

부수로 해석 코드 MATRA(Version 1.0) 검증 보고서

**Validation of a Subchannel Analysis Code MATRA Version 1.0**

*KAERI*

2008. 10.

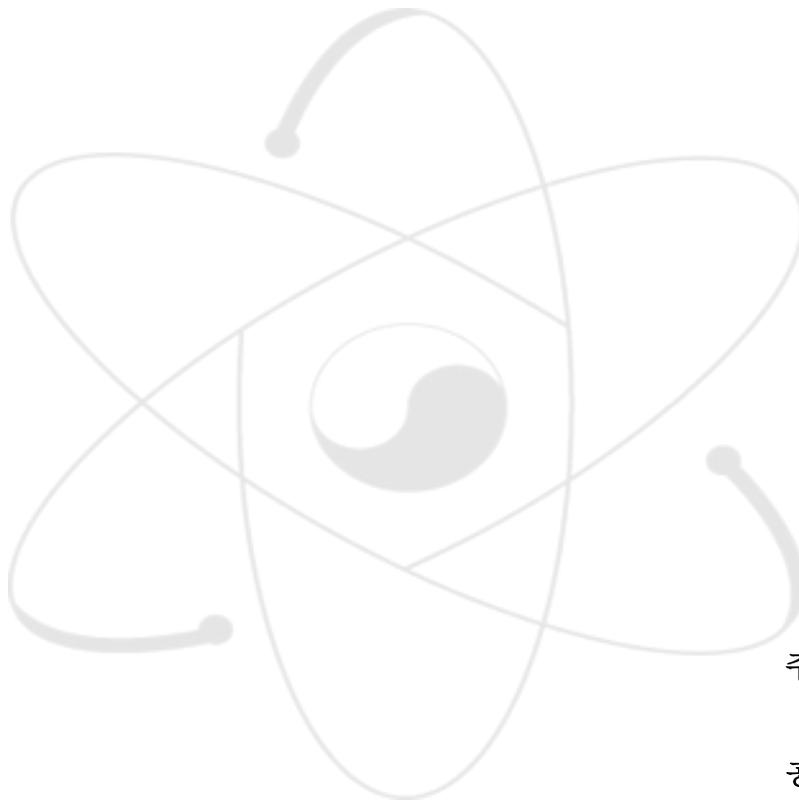
한국원자력연구원

**Korea Atomic Energy Research Institute**

# 제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

본 보고서를 "신형원자로 설계·해석 기술 체계화 연구" 과제의 기술보고서로 제출합니다.



2008. 10.

주저자: 황 대 현

공저자: 서 경 원  
권 혁

## 요 약 문

SMART 노심 열수력장 해석에 적용되는 부수로 해석 코드 MATRA 의 지배 방정식 및 주요 모델을 정비하고, 정상상태 부수로 유동 및 엔탈피 분포 시험 자료에 대한 검증 계산을 수행했다. MATRA 코드의 지배 방정식은 이상 유동 혼합물에 대한 적분식 형태로 표현되며, 미포화 비등 모델 및 슬립 모델을 적용하여 열적 비평형 효과 및 상간의 속도 비균일 효과를 고려할 수 있다. MATRA 코드의 주요 수치 해법과 코드 구조에 대하여 정리했으며, 기존의 COBRA-IV-I 코드와 MATRA 코드의 차이점을 요약했다. MATRA 코드의 정상상태 부수로 열수력장 예측 성능 검증을 위하여 8 종류의 집합체 열수력 시험 자료를 분석했다. 시험자료는 단상유동 부수로 유동 및 온도 분포 자료, 단상유동 집합체 입구유동 비균일 분포 자료, 단상유동 집합체 부분 유로 막힘 자료, 그리고 이상 유동 부수로 엔탈피 및 유동 분포 자료들로 구성 된다. 시험 자료 분석을 통하여 MATRA 코드의 예측 성능 및 적용 한계를 평가했다.

## SUMMARY

A subchannel analysis code MATRA has been developed for the thermal hydraulic analysis of SMART core. The governing equations and important models were established, and validation calculations have been performed for subchannel flow and enthalpy distributions in rod bundles under steady-state conditions. The governing equations of the MATRA were on the basis of integral balance equation of the two-phase mixture. The effects of non-homogeneous and non-equilibrium states were considered by employing the subcooled boiling model and the phasic slip model. Solution scheme and main structure of the MATRA code, as well as the difference of MATRA and COBRA-IV-I codes, were summarized. Eight different test data sets were employed for the validation of the MATRA code. The collected data consisted of single-phase subchannel flow and temperature distribution data, single-phase inlet flow maldistribution data, single-phase partial flow blockage data, and two-phase subchannel flow and enthalpy distribution data. The prediction accuracy as well as the limitation of the MATRA code was evaluated from this analysis.

# 목 차

제 출 문.....	i
요 약 문.....	ii
SUMMARY.....	iii
목 차.....	iv
표 목차.....	vi
그림 목차.....	vii
I. 서론.....	1
II. MATRA 코드 모델 및 구조.....	4
II.1. 지배 방정식.....	4
II.1.1 국부순간 방정식 (Local instantaneous equation).....	4
II.1.2 혼합물에 대한 시간 평균 방정식.....	6
II.1.3 부수로 지배 방정식.....	9
II.2. 알고리즘.....	21
II.2.1 음해법(Implicit Method).....	23
II.2.2 양해법(Explicit Method).....	29
II.3. 코드 구조.....	35
II.3.1 코드 구조.....	35
II.3.2 코드 구조 개선 사항.....	38
II.3.3 주요 Subroutines.....	43
III. MATRA 코드 검증 계산.....	57
III.1. CNEN 4x4 집합체 유동분포 자료.....	57
III.1.1 개요.....	57
III.1.2 실험 장치.....	57
III.1.3 분석 결과.....	57
III.2. CU 4x4 집합체 유동 및 엔탈피 분포 자료.....	62
III.2.1 개요.....	62
III.2.2 실험장치.....	62
III.2.3 분석 결과.....	64
III.3. PNL 2x6 집합체 저유속 유동분포 자료.....	78
III.3.1개요.....	78
III.3.2 시험자료.....	78
III.3.3 분석.....	79
III.3.4 결과 및 논의.....	79
III.4. CE 15x15 집합체 입구 비균일 유동분포 자료.....	104

III.4.1 개요 .....	104
III.4.2 시험자료 .....	104
III.4.3 분석 .....	105
III.4.4 결과 및 논의 .....	106
III.5. PNL 7x7 집합체 유로막힘 유동분포 자료 .....	111
III.5.1 개요 .....	111
III.5.2 시험 자료 .....	111
III.5.3 분석 결과 .....	112
III.6. WH 14x14 집합체 유로막힘 유동분포 자료 .....	119
III.6.1 개요 .....	119
III.6.2 시험 장치 및 시험 자료 .....	119
III.6.3 분석 결과 .....	120
III.7. GE 3x3 집합체 부수로 2상 유동 분포 자료 .....	129
III.7.1 개요 .....	129
III.7.2 시험 장치 및 시험 자료 .....	129
III.7.3 분석 .....	130
III.8. ISPRA 4x4 집합체 부수로 2상 유동 분포 자료 .....	140
III.8.1 개요 .....	140
III.8.2 시험 장치 및 시험 자료 .....	141
III.8.3 분석 .....	141
III.8.4 결과 및 논의 .....	145
IV. 결론 .....	174
참고 문헌 .....	175
부록. MATRA 코드 입력 자료 .....	176

## 표 목차

표 1.1 2상유동장 온도 및 속도 고려 방법에 따른 지배방정식 특성 비교 .....	3
표 2.1 MATRA 알고리즘의 상대비교 .....	30
표 2.2 MATRA에 사용한 변수들의 정의 .....	31
II.3.3 주요 Subroutines .....	43
표 2.3 물 포화 물성치 비교 (MATRA와 NIST STEAM) .....	46
표 2.4 주어진 압력과 온도에서의 물 물성치 비교 (MATRA와 NIST STEAM) .....	47
표 2.5 MATRA 물성치 계산 옵션 및 의미 .....	48
표 3.1 부수로별 주요 치수 .....	68
표 3.2 실험 조건 .....	69
표 3.3 시험핵연료의 부수로 .....	82
표 3.4 실험조건 .....	83
표 3.5 MATRA 입력자료 .....	84
표 3.6 시험핵연료의 측정부위와 부수로채널 .....	107
표 3.7 유속분포 측정 결과 및 MATRA 계산 결과 비교 .....	113
표 3.8 시험부 주요 사양 .....	132
표 3.9 시험 범위 .....	133
표 3.10 GE 3x3 집합체 부수로 유량 및 출구 건도 측정 자료 .....	134
표 3.11 시험부 주요 사양 .....	146
표 3.12 시험 범위 .....	147

## 그림 목차

그림 2.1 채널 유동 방향과 중력 방향의 상대적 관계.....	21
그림 2.2 음해법에 적용된 제어 체적.....	32
그림 2.3 음해법의 계산 수행 순서도.....	33
그림 2.4 양해법(ACE method)의 계산 순서도.....	34
그림 2.5 MATRA 코드 전체 구조.....	49
그림 2.5 MATRA 코드 주요 subroutine 호출 흐름.....	50
그림 2.6 MATRA 입력처리 구조.....	51
그림 2.7 MATRA SCHEME 구조.....	52
그림 2.8 MATRAScheme 구조.....	53
그림 2.9 MATRA 코드와 COBRA-IV-I 코드 특징 비교.....	54
그림 2.10 COBRA-IV-I 코드 배열 크기 설정 방법.....	55
그림 2.11 MATRA 코드의 배열 크기 설정 방법 (점선 부분과 흐린 글자가 삭제된 부분임).....	56
그림 3.1 CNEN-Studsvik 4×4 봉다발 집합체 형상 및 부수로 해석 모형.....	59
그림 3.2 부수로 #1(corner)의 출구 질량유속 비교.....	60
그림 3.3 부수로별 출구 질량유속 분포 해석 결과.....	61
그림 3.4 4×4 봉다발 집합체 횡단면 및 부수로 모형.....	70
그림 3.5 EM 난류 혼합 모형을 사용한 MATRA 코드의 부수로별 엔탈피 분포 해석결과 (실험 조건 2).....	71
그림 3.6 EM 난류 혼합 모형을 사용한 출구 질량유속 분포 (=0.005, 0.01).....	72
그림 3.7 EVVD 난류 혼합 모형을 사용한 출구 질량유속 분포 (=0.0, 0.005, 0.01).....	73
그림 3.8 출구 질량유속 분포 - EM 난류 혼합 모형과 EVVD 난류 혼합 모형 (=0.005).....	74
그림 3.9 EM 난류 혼합 모형을 사용한 출구 엔탈피 분포 (=0.005, 0.01).....	75
그림 3.10 EVVD 난류 혼합 모형을 사용한 출구 엔탈피 분포 (=0.005, 0.01).....	76
그림 3.11 EM모형과 EVVD모형을 사용한 출구 엔탈피 분포 (=0.005).....	77
그림 3.12 시험체적부의 제어체적과 부수로채널.....	85
그림 3.13 Case 3의 3번째 시창에서의 속도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14).....	86
그림 3.14 Case 3의 7번째 시창에서의 속도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14).....	87
그림 3.15 Case 3의 9번째 시창에서의 속도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14).....	88
그림 3.16 Case 1의 3번째 시창에서의 속도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14).....	89
그림 3.17 Case 1의 7번째 시창에서의 속도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14).....	90
그림 3.18 Case 1의 9번째 시창에서의 속도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14).....	91
그림 3.19 Case 2의 3번째 시창에서의 속도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14).....	92
그림 3.20 Case 2의 5번째 시창에서의 속도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14).....	93

그림 3.21 Case 2의 7번째 시창에서의 속도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14).....	94
그림 3.22 Case 3의 3번째 시창에서의 온도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14).....	95
그림 3.23 Case 3의 7번째 시창에서의 온도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14).....	96
그림 3.24 Case 3의 9번째 시창에서의 온도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14).....	97
그림 3.25 Case 1의 3번째 시창에서의 온도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14).....	98
그림 3.26 Case 1의 7번째 시창에서의 온도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14).....	99
그림 3.27 Case 1의 9번째 시창에서의 온도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14).....	100
그림 3.28 Case 2의 3번째 시창에서의 온도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14).....	101
그림 3.29 Case 2의 7번째 시창에서의 온도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14).....	102
그림 3.30 Case 2의 9번째 시창에서의 온도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14).....	103
그림 3.31 시험핵연료의 횡단면과 핵연료집합체 형상 .....	108
그림 3.32 CE 입구분사류 실험에 대한 MATRA 해석결과(노즐 중앙을 가로지르는 방향).....	109
그림 3.33 CE 입구분사류 실험에 대한 MATRA 해석결과(노즐에 접해 있는 방향).....	110
그림 3.34 시험부 단면 개략도 및 1/8 집합체 부수로 모형 .....	114
그림 3.35 MATRA 코드의 집합체 축방향 가변크기 노드 설정 (노드 개수=25) .....	115
그림 3.36 시험 자료와 MATRA 계산 결과 비교 (1번 부수로).....	116
그림 3.37 부수로별 축방향 속도 분포 (MATRA 해석 결과, 지지격자 중간 70% 유로막힘, UB=5.7 ft/sec) .....	117
그림 3.38 부수로별 유량 분포 (MATRA 해석 결과, 지지격자 중간 70% 유로막힘, UB=5.7 ft/sec, 슬리브 중심에서 3De 하류 지점).....	118
그림 3.39 Westinghouse flow blockage 시험부 .....	122
그림 3.40 시험부 횡단면 및 크기 .....	123
그림 3.41 축방향 위치에 따른 집합체별 유량 분포 .....	124
그림 3.42 집합체별 국부 유속 분포 .....	125
그림 3.43 국부 유속 분포 (레벨2).....	126
그림 3.44 국부 유속 분포 (레벨6).....	127
그림 3.45 국부 유속 분포 (레벨7).....	128
그림 3.46 시험 루프 개략도 .....	135
그림 3.47 부수로 해석 모형 및 채널 번호.....	136
그림 3.48 난류모델에 따른 MATRA코드의 center부수로 출구건도 및 유량 예측성능 비교 .137	
그림 3.49 난류모델에 따른 MATRA코드의 side부수로 출구건도 및 유량 예측성능 비교.....138	
그림 3.50 난류모델에 따른 MATRA코드의 corner부수로 출구건도 및 유량 예측성능 비교.139	
그림 3.51 시험부 단면도 및 자료 수집 부수로 위치.....	148
그림 3.52 부수로 해석 모형 및 채널 번호.....	149
그림 3.53 Corner 채널 (#1) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (EUROP-PWR, EM).....	150
그림 3.54 Side 채널 (#2) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (EUROP-PWR, EM).....	151
그림 3.55 Center 채널 (#6) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (EUROP-PWR, EM).....	152

그림 3.56	부수로별 출구 유속 예측 오차 비교 (EUROP-PWR, EM).....	153
그림 3.57	Corner 채널 (#1) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (EUROP-PWR, EVVD).....	154
그림 3.58	Side 채널 (#2) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (EUROP-PWR, EVVD).....	155
그림 3.59	Center 채널 (#6) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (EUROP-PWR, EVVD).....	156
그림 3.60	부수로별 출구 유속 예측 오차 비교 (EUROP-PWR, EVVD).....	157
그림 3.61	Corner 채널 (#1) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (EUROP-BWR, EM).....	158
그림 3.62	Side 채널 (#2) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (EUROP-BWR, EM).....	159
그림 3.63	Center 채널 (#6) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (EUROP-BWR, EM).....	160
그림 3.64	부수로별 출구 유속 예측 오차 비교 (EUROP-BWR, EM).....	161
그림 3.65	Corner 채널 (#1) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (EUROP-BWR, EVVD).....	162
그림 3.66	Side 채널 (#2) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (EUROP-BWR, EVVD).....	163
그림 3.67	Center 채널 (#6) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (EUROP-BWR, EVVD).....	164
그림 3.68	부수로별 출구 유속 예측 오차 비교 (EUROP-BWR, EVVD).....	165
그림 3.69	Corner 채널 (#1) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (PELCO-S, EM).....	166
그림 3.70	Side 채널 (#2) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (PELCO-S, EM).....	167
그림 3.71	Center 채널 (#6) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (PELCO-S, EM).....	168
그림 3.72	부수로별 출구 유속 예측 오차 비교 (PELCO-S, EM).....	169
그림 3.73	Corner 채널 (#1) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (PELCO-S, EVVD).....	170
그림 3.74	Side 채널 (#2) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (PELCO-S, EVVD).....	171
그림 3.75	Center 채널 (#6) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (PELCO-S, EVVD).....	172
그림 3.76	부수로별 출구 유속 예측 오차 비교 (PELCO-S, EVVD).....	173

## I. 서론

부수로 해석 코드는 원자로의 안전성을 평가하는 척도인 안전 여유도 평가에 사용되는 핵심적인 코드로서, 가압경수로 노심 설계 시 연료집합체 내부의 부수로 단위 유동장 특성 및 DNBR 해석에 사용되고 있다. 안전 여유도를 결정하는 여러 인자들 중에서 일반적으로 DNBR 여유도가 가장 작게 나타난다. 따라서 안전 여유도는 흔히 DNBR 여유도로 표현되기도 한다. DNBR에 대한 여유도를 평가하려면 적절한 고온 부수로 해석이 필요하며, 고온 부수로의 국부적인 열수력장을 예측하기 위하여 서로 개방된 집합체 수로 간의 열혼합 효과와 노심 출력 분포 영향, 그리고 노심 압력 분포의 영향 등이 부수로 해석 코드를 통하여 적절히 고려되어야 한다. 또한 DNB 평가에 사용되는 CHF 해석 체계 개발에도 부수로 해석 코드가 필요하다.

부수로 해석 코드에 사용되는 열수력장 지배 방정식과 이에 수반되는 여러 가지 보조 관계식, 열수력 상관식 및 모델 상수 등은 개발에 적용된 여러 가지 가정이나 시험 자료의 한계성 등으로 인하여 어느 정도의 예측 불확실도를 갖는다. 또한 연료 집합체와 같은 복잡한 구조물을 모사하는 시험 장치가 갖는 한계와 실제 노심을 그대로 모사하지 못하는 scaling 제한, 그리고 실제 운전 조건을 완벽히 재현하지 못하는 시험 matrix에 대한 제약 등은 모두 부수로 해석 코드가 불가피하게 갖게 되는 예측 불확실도의 원인으로 작용한다. 이러한 예측 불확실도는 코드 검증을 통하여 정량화 될 수 있다.

SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor) 노심은 기존 가압 경수로 핵연료와 유사한 정방형 집합체로 구성된다. 부수로 해석 코드(subchannel analysis code)는 원자로 노심 열수력장 해석에 적용되는 핵심적인 코드로서, 현재 웨스팅하우스사의 THINC-IV와 CE사의 TORC 등이 국내 가압경수로의 노심 열수력 설계에 사용되고 있다. 이러한 부수로 해석 코드들은 대부분 HEM (homogeneous Equilibrium Model) 혹은 SEM (Slip Equilibrium Model) 을 사용하고 있으며, 수로에 대한 축방향 유속에 비하여 횡방향 유속이 상대적으로 작은 경우를 가정한 일차원적 접근법을 사용하고 있다. 부수로 해석 코드들은 대부분 이상유동 조건에서 열적 평형을 가정하고 있으며, 수치 해법이나 횡방향 운동량 방정식에 대한 모형에 약간의 차이는 있으나 근본적으로 코

드 예측 성능은 서로 비슷하다. 웨스팅하우스사의 THINC 코드는 COBRA 계열 코드와는 달리 3차원 지배 방정식을 풀지만 횡방향에 대해서 섭동 방법론을 적용하여 방정식을 단순화시키므로 기본적으로 COBRA 계열 코드와 성능이 비슷하다고 볼 수 있다. 다만 이 코드는 횡방향 유속에 대하여 보다 정확한 계산 능력이 있고 노심 내에서의 유량 순환(recirculation)을 예측할 수 있는 능력이 있다. 부수로 해석 코드의 열적 평형 및 일차원적 접근 방법이 갖는 여러 가지 제약들을 보완하기 위하여 온도 및 속도의 비평형을 고려한 최적 부수로 해석 코드들도 다수 개발되었다. 이러한 모형을 적용할 경우 표 1.1에서 보듯이 풀어야 할 방정식 수가 늘어나므로 계산 시간이나 필요한 기억 용량이 기하급수적으로 증가하게 되는데, 최근 전산기의 용량 및 계산 속도가 상당히 향상되었기 때문에 이 중 ASSERT-4 코드는 실제로 CANDU 원자로심 설계에 적용 단계에 있다. 이러한 열적 비평형 모형은 보다 정확한 부수로 해석을 위하여 개발해 나가야 할 방향이지만, 이를 위해서는 액체와 기체간의 경계면에 대한 여러 가지 전달 모형들의 정확도 향상 등이 우선 해결되어야 한다. 이러한 코드들이 아직은 원자로심과 같은 복잡한 구조에 적용하기 어렵다고 말할 수 있으나, 국부적인 열수력 조건에 대한 기준으로서의 가치는 충분하다.

본 보고서는 SMART 노심 열수력 설계에 적용하기 위하여 개발되고 있는 부수로 해석 코드 MATRA (Version 1.0)에 대한 검증 계산 결과를 요약한 것이다. 본 보고서에서 사용된 MATRA Version 1.0 코드는 이상 유동장에 대하여 상 간의 슬립을 고려한 혼합물로 고려하며, 미포화 비등 모델을 도입하여 부분적인 열적 비평형 효과를 고려할 수 있다. 본 보고서의 2 장에서는 MATRA 코드의 지배 방정식 유도 과정, 주요 수치 해법, 그리고 코드 구조에 대하여 기술했으며, 3 장에서는 8 종류의 집합체 열수력장 측정 시험 자료에 대한 MATRA 코드 예측 성능 평가 내용을 기술했다.

표 1.1 2상유동장 온도 및 속도 고려 방법에 따른 지배방정식 특성 비교

Model Designation	Restrictions		No. of field eqs.			External constitutive eqs.		Characteristics	Final, verifiable results
Model Designation	No.	Imposed on	Mass	Moment	Energy	No.	Type		
1V1T 1VS1T 1VD1T	3	$V_g=V_l, h_l, h_g$ $V_g/V_l, h_l, h_g$ $V_g-V_l, h_l, h_g$	1	1	1	2 3 3	$t, q$ $t, q, V_g/V_l=slip$ $t, q, V_r$ or $V_{gm}$ or $V_{gj}$	(HEM) Homogeneous, Equilibrium Slip, Equilibrium Drift, Equilibrium	$P, V, \alpha$ $P, V, \alpha$ $P, V, \alpha$
1VTKTsat 1VSTKtsat 1VDTKtsat	2	$V_g=V_l, h_l$ $V_g/V_l$ or $V_g-V_l, h_g$	1 1 2	1 1 1	2 2 1	3 4 4	$t, q, q_g, E$ $t, q, q_g, V_g/V_l, E$ $t, q, G, V_r$ or $V_{gm}$ or $V_{gj}$	Homogeneous, Partial non-equilibrium Slip, Partial non-equilibrium (DF) Drift flux, Partial non-equilibrium	$P, V, \alpha, T_l$ or $T_g$ $P, V, \alpha, T_l$ or $T_g$ $P, V, \alpha, T_l$ or $T_g$
2V1T	2	$h_l, h_g$	1	2	1	4	$t_l, t_g, q, M$	Two-fluid, Equilibrium	$P, V_l, V_g, \alpha$
1V2T 1VD2T 2VTKTsat 2VTKtsat	1	$V_g=V_l$ $V_g-V_l$ $h_l$ or $h_g$ $h_l$ or $h_g$	2 2 2 1	1 1 2 2	2 2 1 2	5 6 5 6	$t, q_l, q_g, G, E$ $t, q_l, q_g, G, E, V_r$ or $V_{gm}$ $t_l, t_g, q, G, M$ $t_l, t_g, q, q_k, M, E$	Homogeneous, Full non-equilibrium Drift, Full non-equilibrium Two-fluid, Partial non-equilibrium	$P, V, \alpha, T_l, T_g$ $P, V, \alpha, T_l, T_g$ $P, V_l, V_g, \alpha, T_l$ or $T_g$
2V2T	0	None	2	2	2	7	$t_l, t_g, q_l, q_g, G, M, E$	(TF) Two-fluid, Full non-equilibrium	$P, V_l, V_g, \alpha, T_l, T_g$

## II. MATRA 코드 모델 및 구조

### II.1. 지배 방정식

#### II.1.1 국부순간 방정식 (Local instantaneous equation)

임의의 전달량  $\Psi$ 의 미소 질량체적에 대한 변화율은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \int_{V_m} (\rho \cdot \Psi) dV = - \int_{A_m} (\vec{n} \cdot \vec{J}) dA + \int_{V_m} (\rho \cdot \Phi) dV \quad (2.1)$$

, 여기서  $J$ 는 질량체적 표면을 통하여 유출되는 전달량속 (flux, 단위 면적당 전달량),  $\Phi$ 는 질량체적 내부의 전달량 생성항(source)를 나타낸다. 위 식에 나타나는 적분에 대한 시간 미분 항을 시간 미분에 대한 적분 항으로 변환하기 위하여 "Reynolds transport theorem"을 적용한다. 이에 따르면,

$$\frac{d}{dt} \int_{V_m} (\rho \cdot \Psi) dV = \int_{V_m} \frac{\partial(\rho \cdot \Psi)}{\partial t} dV + \int_{A_m} (\rho \cdot \Psi \cdot \vec{v} \cdot \vec{n}) dA \quad (2.2)$$

로 표현될 수 있다. 따라서 이를 (1)식에 대입하면

$$\int_{V_m} \frac{\partial(\rho \Psi)}{\partial t} dV + \int_{A_m} (\rho \Psi \vec{v} \cdot \vec{n}) dA = - \int_{A_m} (\vec{n} \cdot \vec{J}) dA + \int_{V_m} (\rho \cdot \Phi) dV \quad (2.3)$$

을 구할 수 있으며, 여기서 면적 적분을 체적 적분으로 전환하기 위하여 "divergence theorem"을 적용하면

$$\int_{V_m} \frac{\partial(\rho \Psi)}{\partial t} dV + \int_{V_m} \nabla \cdot (\rho \Psi \vec{v}) dV = - \int_{V_m} (\nabla \cdot \vec{J}) dV + \int_{V_m} (\rho \cdot \Phi) dV \quad (2.4)$$

을 얻을 수 있다.

전달량이 정의되는 매질이 연속체인 경우 (4)식에 따라서 아래와 같은 관계식이 만족되어야 한다.

$$\frac{\partial(\rho \Psi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \Psi \vec{v}) = - \nabla \cdot \vec{J} + \rho \cdot \Phi \quad (2.5)$$

위 식을 일반적인 국부순간 방정식이라고 한다. 이상 유동의 경우 각 상(phase),  $k$ 에 대한 국

부순간 방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial(\rho_k \Psi_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k \Psi_k \vec{v}_k) = -\nabla \cdot \vec{J}_k + \rho_k \Phi_k \quad (2.6)$$

이상 유동장에서 전달량은 아래와 같이 질량, 운동량, 그리고 내부에너지로 대표된다. 질량체적 표면에서의 전달량속 및 질량체적 내부의 생성항은 각각 아래와 같이 표현된다.

질량 보존식;

$$\Psi_k = 1$$

$$\dot{J}_k = 0$$

$$\Phi_k = 0$$

운동량 보존식;

$$\Psi_k = \dot{v}_k$$

$$\dot{J}_k = P_k \dot{I}_k - \vec{\tau}_k$$

$$\Phi_k = \dot{F}_k$$

에너지 보존식;

$$\Psi_k = u_k + \frac{v_k^2}{2}$$

$$\dot{J}_k = \dot{q}_k + (P_k \dot{I}_k - \vec{\tau}_k) \cdot \dot{v}_k$$

$$\Phi_k = \frac{q_k'''}{\rho} + \dot{F}_k \cdot \dot{v}_k$$

여기서,

$\dot{v}_k$  : velocity of k-phase

$P_k$  : thermodynamic pressure of k-phase

$\vec{\tau}_k$  : shear stress of k-phase

$\vec{F}_k$  : body force of k-phase

$u_k$  : internal energy of k-phase

$\vec{q}_k$  : heat flux out from k-phase

$q_k'''$  : volumetric heat source of k-phase

을 의미한다.

### II.1.2 혼합물에 대한 시간 평균 방정식

전달량은 미소 시간 구간에 대한 평균과 요동항의 합으로 표현될 수 있다. 즉,

$$\Psi = \bar{\Psi} + \Psi^T \quad (2.7)$$

여기서,

$$\bar{\Psi} = \frac{1}{t_0} \int_t^{t+t_0} \Psi dt$$

이다. 일반적으로 실험을 통해 측정되는 변수들은 대부분 시간 평균된 값이다.

국부순간 방정식에 나타나는 전달량을 위와 같이 시간 평균 및 요동항으로 대체하고, 요동의 2차항 이상을 무시하면 아래와 같은 방정식들을 얻을 수 있다. 시간 평균 과정에서 두 상의 불연속적인 경계면에 대한 jump condition도 함께 유도된다. 아래 식에서 index  $i$  는 상 간의 경계 (interface)를 의미한다.

질량 보존식 (시간 평균):

$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \vec{v}_k) = \Gamma_k \quad (2.8)$$

$$\sum_k \Gamma_k = 0$$

운동량 보존식 (시간 평균):

$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k \bar{v}_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \bar{v}_k \bar{v}_k) = -\alpha_k \nabla P + \nabla \cdot [\alpha_k (\bar{\tau}_k + \bar{\tau}_k^T)] + \alpha_k \rho_k \bar{g}_k + \bar{M}_k \quad (2.9)$$

$$\bar{\tau}_k^T = \overline{\rho_k \bar{v}_k^T \bar{v}_k^T}$$

$$\bar{M}_k = \Gamma_k \bar{v}_{ki} + P_{ki} \nabla \alpha_k + \bar{M}_k^d$$

$$\bar{M}_k^d = \bar{M}_{ik}^{Drag} + \bar{M}_{ik}^{Virtual-Mass} + \bar{M}_{ik}^{Basset} + \bar{M}_{ik}^{Lift} + \bar{M}_{ik}^{Collision} - \nabla \alpha_k \cdot \bar{\tau}_i$$

$$\sum_k \bar{M}_k = \vec{0}$$

에너지 보존식 (시간 평균):  $h_k = u_k + P_k / \rho_k$  적용

$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k h_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k h_k \bar{v}_k) = -\nabla \cdot [\alpha_k (\bar{q}_k + \bar{q}_k^T)] + \alpha_k q_k''' + E_k \quad (2.10)$$

$$\bar{q}_k^T = \overline{\rho_k u_k^{0T} \bar{v}_k^T}$$

$$E_k = \Gamma_k \left( h_{ki} + \bar{v}_{ki} \cdot \bar{v}_k - \frac{v_k^2}{2} \right) + \frac{q_{ki}}{L_s} - P_{ki} \frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + \bar{M}_k^d \cdot \bar{v}_{ki} + W_{ki}^T$$

$$\sum_k E_k = 0$$

위 식에 적용된 주요 가정들은 아래와 같다.

(i) 균질한 body force (only gravity)

$$\vec{F}_k = \bar{g}_k$$

(ii) 계면에서의 표면 장력에 의한 운동량 및 에너지 생성 무시

$$\bar{M}_m \approx \vec{0}$$

$$E_m \approx 0$$

(iii) 유체간의 점성에 의한 계면 마찰은 유체와 고체 간의 마찰력에 비하여 무시 가능

$$(\nabla \cdot \bar{\tau}_k)_F \approx 0$$

(iv) 내부에너지에 비하여 운동에너지 및 위치에너지는 상대적으로 매우 작음

$$u^0 \approx u$$

(v) 고체 표면을 통한 열속에 비해 압력에 의한 work 항은 매우 작음

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V PdV \approx 0$$

(iv) 에너지 보존식에서 body force에 의한 work 무시

$$\rho_k \vec{F}_k \cdot \vec{v}_k \approx 0,$$

(vii) 에너지 보존식에서 shear stress 에 의한 work 무시

$$(\nabla \cdot \vec{\tau}_k \cdot \vec{v}_k)_F \approx 0,$$

$$(\nabla \cdot \vec{\tau}_k \cdot \vec{v}_k)_W \approx 0$$

(viii) 유체간의 열전도 무시

$$(\nabla \cdot \vec{q}_k)_F \approx 0$$

(ix) 이상 유동은 열역학적 평형 상태 유지.

MATRA 코드는 이상 유동을 혼합물(mixture) 방정식으로 모사한다. 각 상에 대한 지배방정식으로부터 혼합물에 대한 지배 방정식은 아래와 같이 유도된다.

질량 보존식 (혼합물):

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \sum_k \alpha_k \rho_k \right) + \nabla \cdot \left( \sum_k \alpha_k \rho_k \vec{v}_k \right) = 0 \quad (2.11)$$

운동량 보존식 (혼합물):

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \sum_k \alpha_k \rho_k \vec{v}_k \right) + \nabla \cdot \left( \sum_k \alpha_k \rho_k \vec{v}_k \vec{v}_k \right) = -\nabla P + \nabla \cdot \left[ \sum_k \alpha_k (\vec{\tau}_k + \vec{\tau}_k^T) \right] + \sum_k \alpha_k \rho_k \vec{g}_k \quad (2.12)$$

에너지 보존식 (혼합물):

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \sum_k \alpha_k \rho_k h_k \right) + \nabla \cdot \left( \sum_k \alpha_k \rho_k h_k \vec{v}_k \right) = -\nabla \cdot \left[ \sum_k \alpha_k (\vec{q}_k + \vec{q}_k^T) \right] + \sum_k \alpha_k q_k''' \quad (2.13)$$

### II.1.3 부수로 지배 방정식

부수로 지배방정식은 위의 혼합물 방정식을 부수로 제어체적에 대하여 적분하여 구한다. 체적 적분과 면적 적분을 아래와 같이 정의하여 표시했다.

Volume average:

$$\langle\langle F \rangle\rangle \equiv \frac{1}{V} \int_V F dV \quad (2.14)$$

Surface average:

$$\langle G \rangle_x \equiv \frac{1}{A_x} \int_{A_x} G dA; \text{ 주유동 방향} \quad (2.15)$$

$$\langle G \rangle_{ij} \equiv \frac{1}{A_{ij}} \int_{A_{ij}} G dA; \text{ 횡방향} \quad (2.16)$$

#### (1) 부수로 질량 보존식:

MATRA 코드의 경우 질량 보존식에 대한 부수로 제어체적은 연료봉의 중심을 연결하는 선으로 이루어지는 최소 단위의 유로면적과 주유동 방향의 미소한 노드( $\Delta x$ )로 구성된다. 부수로 제어체적에 대하여 적분한 질량 보존식은 아래와 같다.

$$\int_V \frac{\partial}{\partial t} \left( \sum_k \alpha_k \rho_k \right) dV + \int_V \nabla \cdot \left( \sum_k \alpha_k \rho_k \vec{v}_k \right) dV = 0 \quad (2.17)$$

직교 좌표계에서 "divergence theorem"을 적용하면 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\int_V \nabla \cdot \dot{\Psi} dV = \int_A \dot{\Psi} \cdot \mathbf{r} \cdot \mathbf{n} dA$$

$$= \Psi_x A_x + \Psi_y A_y + \Psi_z A_z$$
(2.18)

여기서  $A_x, A_y, A_z$ 는 각각  $x, y, z$  방향에 대하여 수직인 유로 면적을 의미한다. 그리고  $\Psi_x, \Psi_y, \Psi_z$ 는 각각  $A_x, A_y, A_z$ 를 통해 유출되는 전달량을 나타낸다. 따라서, 위 식의 좌변 둘째 항은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\int_V \nabla \cdot \left( \sum_k \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_k \right) dV = \left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,x} \right\rangle_x A_x + \left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,y} \right\rangle_y A_y + \left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,z} \right\rangle_z A_z$$

$$\cong \left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,x} \right\rangle_x A_x + \left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,ij} \right\rangle_{ij} s_{ij} V_x$$
(2.19)

질량 보존식을 미소한 축방향 노드에 대하여 표현하면

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x} \left\{ \int_V \frac{\partial}{\partial t} \left( \sum_k \alpha_k \rho_k \right) dV + \int_V \nabla \cdot \left( \sum_k \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_k \right) dV \right\} = 0$$
(2.20)

이며, 임의의 부수로와 인접한 모든 채널을 통한 횡방향 순유출량을 고려하면 질량 보존식은 아래와 같이 표현된다.

$$A_x \frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} + \sum_j W_{ij} = 0$$
(2.21)

여기서, 혼합물의 밀도 및 축방향 질량 유량, 그리고 횡방향 교차류는 아래와 같이 정의된다.

$$\rho_m \equiv \left\langle \left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k \right\rangle \right\rangle$$

$$\dot{m} \equiv \left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,x} \right\rangle_x A_x$$

$$W_{ij} \equiv \left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,ij} \right\rangle_{ij} s_{ij}$$

## (2) 부수로 운동량 보존식:

혼합물 운동량 보존식의 적분 형태는 아래와 같다.

$$\int_V \frac{\partial}{\partial t} \left( \sum_k \alpha_k \rho_k \vec{v}_k \right) dV + \int_A \left( \sum_k \alpha_k \rho_k \vec{v}_k \vec{v}_k \right) \cdot \vec{n} dA = - \int_V \nabla P dV + \int_A \left[ \sum_k \alpha_k (\vec{\tau}_k + \vec{\tau}_k^T) \right] \cdot \vec{n} dA + \int_V \left( \sum_k \alpha_k \rho_k \vec{g}_k \right) dV \quad (2.22)$$

표면 적분을 유체-유체 표면(F)과 유체-고체 표면(W)으로 구분하여 대류항 및 전단응력 항을 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\int_A \left( \sum_k \alpha_k \rho_k \vec{v}_k \vec{v}_k \right) \cdot \vec{n} dA = \int_F \left( \sum_k \alpha_k \rho_k \vec{v}_k \vec{v}_k \right) \cdot \vec{n} dA + \int_W \left( \sum_k \alpha_k \rho_k \vec{v}_k \vec{v}_k \right) \cdot \vec{n} dA = \int_F \left( \sum_k \alpha_k \rho_k \vec{v}_k \vec{v}_k \right) \cdot \vec{n} dA \quad (2.23)$$

$$\int_A \left[ \sum_k \alpha_k (\vec{\tau}_k + \vec{\tau}_k^T) \right] \cdot \vec{n} dA = \int_F \left[ \sum_k \alpha_k (\vec{\tau}_k + \vec{\tau}_k^T) \right] \cdot \vec{n} dA + \int_W \left[ \sum_k \alpha_k (\vec{\tau}_k + \vec{\tau}_k^T) \right] \cdot \vec{n} dA \cong \int_W \left[ \sum_k \alpha_k (\vec{\tau}_k + \vec{\tau}_k^T) \right] \cdot \vec{n} dA \quad (2.24)$$

이 경우 유체와 유체 간의 점성에 의한 전단응력 항은 무시되었다. 이로부터 축방향 운동량 보존식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

**(가) 부수로 축방향 운동량 보존식:**

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \left( \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,x} \right) dV + \int_F \left( \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,x} \vec{v}_k \right) \cdot \vec{n} dA = - \int_V \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right) dV - F'_x \quad (2.25)$$

직교 좌표계에서 위 식의 대류항은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\int_F \left( \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,x} \vec{v}_k \right) \cdot \vec{n} dA = \left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,x}^2 \right\rangle_x A_x + \left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,x} v_{k,ij} \right\rangle_{ij} s_{ij} \nabla x \quad (2.26)$$

그리고, 유동의 진행 방향과 중력의 반대방향 간의 각도가  $\theta$ 인 경우 위 식의 생성항은 아래와 같이 표현된다.

$$-F'_x = \int_W \left[ \sum_k \alpha_k (\vec{\tau}_k + \vec{\tau}_k^T) \right] \cdot \vec{n} dA - \int_V \left( \sum_k \alpha_k \rho_k g \cos \theta \right) dV \quad (2.27)$$

따라서, 미소한 축방향 노드에 대한 축방향 운동량 보존식은 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left( \bar{m} \frac{\partial}{\partial x} \left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,x}^2 \right\rangle A_x \right) + \sum_j W_{ij} u^* = -\bar{A}_x \frac{\partial P}{\partial x} \\ + \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta X} \left\{ \int_W \left[ \sum_k \alpha_k (\tau_k^t + \tau_k^r) \right] \cdot r \, ndA \right\} - A_x \rho_m g \cos \theta \end{aligned} \quad (2.28)$$

여기서  $\bar{A}_x$ 는 제어체적 내에서 축방향으로 산술 평균한 유로 면적을 의미한다. 횡방향 유동에 의한 축방향 운동량 전달을 평가하기 위한 축방향 평균 유속은 아래와 같이 정의된다.

$$u^* \equiv \frac{\left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,x} v_{k,ij} \right\rangle_{ij}}{\left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,ij} \right\rangle_{ij}}$$

### (i) 대류항

위 식의 좌변 둘째 항에 표시된 운동량 대류항은 이상 유동장 모델에 따라 여러 가지 형태로 표현될 수 있다. HEM (Homogeneous Equilibrium Model)의 경우 이는 아래와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,x}^2 \right\rangle A_x = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\dot{m}^2}{\rho_m A_x} \right) \quad (2.29)$$

현재 MATRA 코드에 반영되어 있는 SEM (Slip Equilibrium Model)에 의하면 이는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,x}^2 \right\rangle A_x = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\dot{m}^2}{\rho' A_x} \right) \quad (2.30)$$

여기서,  $1/\rho'$ 은 "effective specific volume"으로서 아래와 같이 정의되는 변수이다.

$$\frac{1}{\rho'} \equiv \sum_k \frac{\langle \chi_k \rangle^2}{\rho_k \langle \alpha_k \rangle}$$

이때 flow quality는 다음과 같이 정의된다.

$$\langle \chi_k \rangle \equiv \frac{\langle \alpha_k \rangle \rho_k \langle v_{k,x} \rangle_k}{\sum_k \langle \alpha_k \rangle \rho_k \langle v_{k,x} \rangle_k}$$

위 식에 질량 보존식을 적용하면 대류항은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\dot{m}^2}{\rho' A_x} \right) = \dot{m}^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\rho' A_x} \right) - 2u' \left[ A_x \frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \sum_j W_{ij} \right] \quad (2.31)$$

여기서 "momentum velocity"는 다음과 같이 정의된다.

$$u' \equiv \frac{\dot{m}}{\rho' A_x}$$

### (ii) 벽면 마찰 (wall friction) 항

운동량 보존식의 우변에 나타나는 전단응력 항은 고체 표면과 유체 간의 마찰 압력손실 및 형상 압력손실 형태로 표시하고 실험적으로 압력손실 계수를 결정하여 적용한다. 고체 표면의 마찰 압력손실 및 지지격자 등의 구조물에 의한 형상 압력손실을 고려하면 아래와 같은 표현식을 구할 수 있다.

$$\frac{1}{\Delta x} \int_W \left( \sum_k \alpha_k \tau_k \right)_x \cdot \mathbf{r} \, ndA = -\frac{A_x}{2} \left[ \frac{f}{d_{hy}} + \frac{K}{\Delta x} \right] \left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,x}^2 \right\rangle = -\frac{1}{2} \left[ \frac{f}{d_{hy}} + \frac{K}{\Delta x} \right] \left( \frac{\dot{m}^2}{\rho' A_x} \right) \quad (2.32)$$

### (iii) 난류항

난류 전단응력에 의한 운동량 생성항은 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{1}{\Delta x} \int_W \left( \sum_k \alpha_k \tau_k^T \right)_x \cdot \mathbf{r} \, ndA \cong - \left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k \overline{v_{k,x}^T v_{k,ij}^T} \right\rangle s_{ij} \quad (2.33)$$

주유동 방향의 난류 전단응력 항은 무시했다. 난류 점성 모델을 적용하면 난류에 의한 전단응력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$-\overline{\rho_k v_{k,x}^T v_{k,ij}^T} \cong \rho_k \varepsilon_M \frac{\partial v_{k,x}}{\partial y} \quad (2.34)$$

여기서  $y$ 는 주유동 방향과 수직인 횡방향을 나타내며,  $\varepsilon_M$ 은 와점성계수 (eddy viscosity)를 의미한다. 따라서 생성항은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
-\left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k \overline{v_{k,x} v_{k,ij}} \right\rangle s_{ij} &= \rho_k \varepsilon_M \frac{\partial v_{k,x}}{\partial y} s_{ij} \\
&= \rho_k \varepsilon_M \frac{(v_{k,x})_j - (v_{k,x})_i}{z_{ij}} s_{ij} \\
&= -\rho_k s_{ij} \left( \frac{\varepsilon_M}{z_{ij}} \right) \left[ (v_{k,x})_i - (v_{k,x})_j \right] \\
&= -(w'_{ij})^M \left[ (v_{k,x})_i - (v_{k,x})_j \right]
\end{aligned} \tag{2.35}$$

혼합길이 모형에 의하면 와점성 계수는 요동 속도와 적절한 혼합길이의 곱으로 표현될 수 있다. 따라서 위 식의  $\varepsilon_M/z_{ij}$  항은 횡방향 요동 속도와 유사하다. MATRA 코드에서는 난류에 의한 횡방향 교차류의 정의로부터 위 식에 나타나는 난류 교차류를 다음과 같이 나타낸다. (난류에 의한 횡방향 교차류는 에너지 보존식 유도 과정에서 정의되어 있다.)

$$(w'_{ij})^M = f_T \beta s_{ij} G_{avg} = f_T w'_{ij}$$

여기서  $f_T$  는 난류 Prandtl 수 ( $= \varepsilon_M/\varepsilon_H$ )를 의미한다. 따라서 부수로에 대한 축방향 운동량 보존식은 아래와 같이 유도된다.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t} \bar{m} - A_x 2u' \frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \sum_j W_{ij} (u^* - 2u') &= -\sum_j f_T w'_{ij} \left[ (v_{k,x})_i - (v_{k,x})_j \right] \\
- \bar{A}_x \frac{\partial P}{\partial x} - \left( \frac{\bar{m} g}{A_x} \right) \left\{ \frac{f}{2d_{hy} \rho'} + \frac{K}{2\Delta x \rho'} + A_x \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\rho' A_x} \right) \right\} &- A_x \rho_m g \cos \theta
\end{aligned} \tag{2.36}$$

#### (나) 부수로 횡방향 운동량 보존식:

제어체적에 대하여 적분된 형태의 횡방향 운동량 보존식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \left( \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,ij} \right) dV + \int_F \left( \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,ij} \vec{v}_k \right) \cdot \vec{n} dA = - \int_V \left( \frac{\partial P}{\partial X_{ij}} \right) dV - F'_{ij} \tag{2.37}$$

횡방향 운동량 보존식의 경우 제어체적은 질량이나 축방향 운동량 보존식의 경우와 달리  $s_{ij} l_{ij} \Delta x$  로 정의된다. 여기서  $l_{ij}$  는 인접한 두 채널 ( $i, j$ ) 간의 교차류가 영향을 미치는 유효 거리를 나타낸 것이다. 이러한 제어체적을 적용하면 위 식 좌변 첫째 항에 나타나는 체적 적분은 다음과

같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \int_V \left( \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,ij} \right) dV &= l_{ij} \cdot \int_{A_{ij}} \left( \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,ij} \right) dA \\ &= l_{ij} \cdot \Delta x \cdot s_{ij} \left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,ij} \right\rangle_{ij} = l_{ij} \cdot \Delta x \cdot W_{ij} \end{aligned} \quad (2.38)$$

횡방향 운동량의 대류항은 축방향 유동에 의한 횡방향 운동량 전달 항과 횡방향 유동에 의한 횡방향 운동량 전달 항으로 구분할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} \int_F \left( \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,ij} v_{k,x}^r \right) \cdot \bar{n} dA &= \left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,ij} v_{k,x} \right\rangle_x s_{ij} l_{ij} + \left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,ij}^2 \right\rangle_{ij} s_{ij} V_x \\ &= \left( \bar{u}_{ij} \frac{W_{ij}}{s_{ij}} \right) s_{ij} l_{ij} + \left( \bar{w} \frac{W_{ij}}{s_{ij}} \right) s_{ij} V_x \\ &= \bar{u}_{ij} \cdot W_{ij} \cdot l_{ij} + \bar{w} \cdot W_{ij} \cdot V_x \end{aligned} \quad (1.39)$$

여기서, 축방향 유동에 의한 횡방향 운동량 전달을 평가하기 위한 축방향 평균 유속은 아래와 같이 정의된다.

$$\bar{u}_{ij} \equiv \frac{\left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,ij} v_{k,x} \right\rangle_x}{\left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,ij} \right\rangle_{ij}}$$

그리고, 횡방향 운동량 전달을 평가하기 위한 횡방향 평균 유속은 아래와 같이 정의된다.

$$\bar{w} \equiv \frac{\left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,ij}^2 \right\rangle_{ij}}{\left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,ij} \right\rangle_{ij}}$$

횡방향 압력 구배는 다음과 같이 표현된다.

$$\int_V \left( \frac{\partial P}{\partial X_{ij}} \right) dV = s_{ij} \Delta x \left[ \int_{l_{ij}} \left( \frac{\partial P}{\partial X_{ij}} \right) dl \right] = s_{ij} \Delta x (P_j - P_i) \quad (2.40)$$

그리고, 횡방향 운동량의 생성항은 다음과 같다.

$$-F'_{ij} = \int_V \left[ \sum_k \alpha_k (\vec{\tau}_k + \vec{\tau}_k^T) \right]_{ij} \cdot \bar{n} dA - \int_V \left( \sum_k \alpha_k \rho_k g_{k,ij} \right) dV \quad (2.41)$$

부수로 해석 코드의 특성상 횡방향 유동은 축방향 유동에 비하여 매우 작은 조건을 유지하므로 횡방향 유동에 의한 난류 전단응력 항은 일반적으로 무시할 수 있다. 중력 방향에 대한 채널의 상대적인 기울기가 그림 2.1과 같이 주어졌을 때, 위의 생성 항은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\int_W \left( \sum_k \alpha_k \tau_k \right)_{ij} \cdot \mathbf{r} \, ndA = -\frac{A_{ij}}{2} K_G \rho^* \left( \frac{W_{ij}}{\rho^* s_{ij}} \right) \left| \frac{W_{ij}}{\rho^* s_{ij}} \right| \quad (2.42)$$

$$-\int_V \left( \sum_k \alpha_k \rho_k g_{k,ij} \right) dV = -s_{ij} l_{ij} \Delta x \sum_k (\alpha_k \rho_k g \sin \theta \cos \phi) \quad (2.43)$$

여기서  $A_{ij} = s_{ij} \Delta x$  이다. 따라서 횡방향 운동량 보존식의 적분 형태는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (l_{ij} \cdot \Delta x \cdot W_{ij}) + \bar{u}_{ij} \cdot W_{ij} \cdot l_{ij} + \bar{w} \cdot W_{ij} \cdot V x = s_{ij} \Delta x (P_i - P_j) \\ - \frac{A_{ij}}{2} K_G \rho^* \left( \frac{W_{ij}}{\rho^* s_{ij}} \right) \left| \frac{W_{ij}}{\rho^* s_{ij}} \right| - s_{ij} l_{ij} \Delta x \sum_k (\alpha_k \rho_k g \sin \theta \cos \phi) \end{aligned} \quad (2.44)$$

미소 축방향 노드에 대한 지배방정식을 구하기 위하여  $(l_{ij} \cdot \Delta x)$ 를 나누고 정리하면 다음과 같은 횡방향 운동량 보존식을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial W_{ij}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}_{ij} \cdot W_{ij}) + \frac{\bar{w} \cdot W_{ij}}{l_{ij}} = \frac{s_{ij}}{l_{ij}} (P_i - P_j) - \frac{K_G}{2} \left( \frac{W_{ij} |W_{ij}|}{\rho^* s_{ij} l_{ij}} \right) - s_{ij} \rho_m g \sin \theta \cos \phi \quad (2.45)$$

### (3) 부수로 에너지 보존식:

혼합물에 대한 에너지 (엔탈피) 보존식을 부수로 제어체적에 대하여 적분하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \int_V \frac{\partial}{\partial t} \left( \sum_k \alpha_k \rho_k h_k \right) dV + \int_A \left( \sum_k \alpha_k \rho_k h_k \mathbf{v}_k \right) \cdot \mathbf{r} \, ndA = - \int_A \left( \sum_k \alpha_k \mathbf{q}_k \right) \cdot \mathbf{r} \, ndA \\ + \int_V \left( \sum_k \alpha_k q_k''' \right) dV - \int_A \left( \sum_k \alpha_k \mathbf{q}_k^T \right) \cdot \mathbf{r} \, ndA \end{aligned} \quad (2.46)$$

위 식을 미소한 축방향 노드( $\Delta x$ )로 나누고 각 항을 전개하면 아래와 같은 관계식들을 구할 수 있다.

#### (i) 좌변 첫째 항:

$$\frac{1}{\Delta x} \int_V \frac{\partial}{\partial t} \left( \sum_k \alpha_k \rho_k h_k \right) dV = A_x \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m h_m) \quad (2.47)$$

여기서,

$$h_m \equiv \frac{\left\langle \left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k h_k \right\rangle \right\rangle}{\left\langle \left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k \right\rangle \right\rangle}$$

(ii) 좌변 둘째 항;

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta x} \int_A \left( \sum_k \alpha_k \rho_k h_k \mathbf{v}_k^r \right) \cdot \mathbf{n} dA &= \frac{1}{\Delta x} \left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k h_k v_{k,x} \right\rangle_x A_x + \frac{1}{\Delta x} \left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k h_k v_{k,ij} \right\rangle_{ij} s_{ij} V_x \\ &= \frac{\partial}{\partial x} (G \hat{h}_x) + \sum_j W_{ij} h^* \end{aligned} \quad (2.48)$$

여기서,

$$\hat{h} \equiv \frac{\left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k h_k v_{k,x} \right\rangle_x}{\left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,x} \right\rangle_x}$$

$$h^* \equiv \frac{\left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k h_k v_{k,ij} \right\rangle_{ij}}{\left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k v_{k,ij} \right\rangle_{ij}}$$

(iii) 우변 첫째 항;

표면 열속은 유체 간의 열전도와 가열면을 통한 열속으로 구분된다.

$$-\int_A \left( \sum_k \alpha_k \mathbf{q}_k^r \right) \cdot \mathbf{n} dA = -\int_F \left( \sum_k \alpha_k \mathbf{q}_k^r \right) \cdot \mathbf{n} dA - \int_W \left( \sum_k \alpha_k \mathbf{q}_k^r \right) \cdot \mathbf{n} dA \quad (2.49)$$

그리고, 유체 간의 열전도는 다시 축방향 전도와 횡방향 전도로 구분된다.

$$-\int_F \left( \sum_k \alpha_k \overset{r}{q}_k \right) \cdot \overset{r}{n} dA = -A_x \left\langle -k \frac{\partial T}{\partial x} \right\rangle_x - A_{ij} \left\langle -k \frac{\partial T}{\partial y} \right\rangle_{ij} \quad (2.50)$$

횡방향 전도의 경우, 횡방향 온도 구배를 아래와 같이 단순화하여 적용한다.

$$-A_{ij} \left\langle -k \frac{\partial T}{\partial y} \right\rangle_{ij} = s_{ij} \Delta x \cdot k \left( C \cdot \frac{T_j - T_i}{L_c} \right) \quad (2.51)$$

여기서  $L_c$ 는 채널 중심 간의 거리,  $C$ 는 시험을 통해 결정되는 보정 상수이다. 가열면을 통한 열속은 아래와 같다.

$$-\int_W \left( \sum_k \alpha_k \overset{r}{q}_k \right) \cdot \overset{r}{n} dA = \Delta x \sum_n \xi_n (\bar{q}'' )_n \quad (2.52)$$

여기서  $\xi_n$ 은 부수로와 접한  $n$  번째 가열면의 가열둘레 (heated perimeter)를 의미한다. 따라서 미소한 축방향 노드에 대하여 우변 첫째 항은 아래와 같이 표현된다.

$$-\frac{1}{\Delta x} \int_A \left( \sum_k \alpha_k \overset{r}{q}_k \right) \cdot \overset{r}{n} dA = \frac{\partial}{\partial x} \left[ A_x \left\langle k \frac{\partial T}{\partial x} \right\rangle_x \right] + \sum_j \left( \frac{s_{ij} C k}{L_c} \right) (T_j - T_i) + \sum_n \xi_n (\bar{q}'' )_n \quad (2.53)$$

#### (iv) 우변 둘째 항;

우변 둘째 항은 제어 체적 내부의 열원을 고려한 것으로서 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{1}{\Delta x} \int_V \left( \sum_k \alpha_k \overset{r}{q}_k \right) dV = A_x \cdot \bar{q}''' \quad (2.54)$$

#### (v) 우변 셋째 항;

난류 점성 모델을 적용하면 인접한 부수로 간의 난류 요동으로 인하여 유출되는 열속 항은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\overset{r}{q}_k = \rho_k c_{p,k} \overline{T_k v_{k,x}^T} \cong -\rho_k \varepsilon_H \frac{\partial h_k}{\partial y} \quad (2.55)$$

따라서, 에너지 보존식의 우변 셋째 항은 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
-\frac{1}{\Delta x} \int_A \left( \sum_k \alpha_k \mathbf{r}_k^T \right) \cdot \mathbf{r} dA &= s_{ij} \rho \varepsilon_H \frac{\partial h_k}{\partial y} \cong s_{ij} \rho \varepsilon_H \frac{h_j - h_i}{z_{ij}} \\
&= -\left( w'_{ij} \right)^H (h_i - h_j)
\end{aligned} \tag{2.56}$$

여기서 난류에 의한 횡방향 교차류는 아래와 같이 정의된다.

$$\left( w'_{ij} \right)^H = w'_{ij} \equiv \beta s_{ij} G_{avg}$$

여기서  $G_{avg}$ 는 두 채널의 평균 축방향 유속이다. 위 식으로부터 아래와 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\beta = \left( \frac{\varepsilon_H / z_{ij}}{G_{avg} / \rho_k} \right)$$

$\beta$ 는 난류혼합인자로서 핵연료 집합체의 경우 일반적으로 열혼합 시험을 통해 결정한다.

이로부터 부수로에 대한 에너지 보존식은 아래와 같이 유도된다.

$$\begin{aligned}
A_x \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m h_m) + \frac{\partial}{\partial x} (m \hat{h}) + \sum_j W_{ij} h^* &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ A_x \left\langle k \frac{\partial T}{\partial x} \right\rangle_x \right] \\
+ \sum_j \left( \frac{s_{ij} C k}{L_c} \right) (T_j - T_i) + \sum_n \xi_n (\bar{q}'' )_n &+ A_x \cdot \bar{q}'' - \sum_j w'_{ij} (h_i - h_j)
\end{aligned} \tag{2.57}$$

위 식에는 두 종류의 엔탈피, 즉  $h_m$ 과  $\hat{h}$ 가 나타난다. HEM을 적용할 경우 두 엔탈피는 서로 같다. 그러나, SEM을 적용할 경우에는 두 엔탈피가 서로 다르며, 이 경우에는 아래와 같이 정의되는 "slip parameter"를 도입하여 두 엔탈피 간의 관계를 구한다.

$$\Psi \equiv \frac{\rho_m}{h_g - h_l} (\hat{h} - h_m)$$

각 엔탈피에 대한 정의식으로부터 slip parameter는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\Psi = \langle \alpha_l \rangle \rho_l \langle \chi_g \rangle - \langle \alpha_g \rangle \rho_g \langle \chi_l \rangle$$

여기서,

$$\langle \chi_g \rangle = \frac{\hat{h} - h_f}{h_g - h_f},$$

$$\langle \alpha_g \rangle = \frac{\langle \chi_g \rangle}{\langle 1 - \chi_g \rangle \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right) S + \langle \chi_g \rangle}$$

Slip parameter를 사용하여 에너지 보존식을 다시 정리하면 다음과 같다. 우선 질량 보존식에 유동 엔탈피 (flow enthalpy,  $\hat{h}$ )를 곱하고, 이를 에너지 보존식과 결합하면 아래식을 구할 수 있다.

$$A_x \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m h_m - \rho_m \hat{h}) + A_x \rho_m \frac{\partial \hat{h}}{\partial t} + m \xi \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} + \sum_j W_{ij} (h^* - \hat{h}_i) = Q \quad (2.58)$$

열적 평형 상태를 가정하고 slip parameter는  $\hat{h}$  만의 함수라고 가정하면 위 식의 좌변 첫째 항은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$A_x \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m h_m - \rho_m \hat{h}) = -A_x h_{fg} \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -A_x h_{fg} \left( \frac{\partial \Psi}{\partial \hat{h}} \right) \frac{\partial \hat{h}}{\partial t} \quad (2.59)$$

따라서, SEM을 적용할 경우 에너지 보존식은 아래와 같이 유동엔탈피에 대하여 표현된다.

$$\begin{aligned} A_x \left\{ \rho_m - h_{fg} \left( \frac{\partial \Psi}{\partial \hat{h}} \right) \right\} \frac{\partial \hat{h}}{\partial t} + m \xi \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} + \sum_j W_{ij} (h^* - \hat{h}_i) &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ A_x \left\langle k \frac{\partial T}{\partial x} \right\rangle_x \right] \\ + \sum_j \left( \frac{s_{ij} C k}{L_c} \right) (T_j - T_i) + \sum_n \xi_n (\bar{q}'' )_n + A_x \cdot \bar{q}'' - \sum_j w'_{ij} (h_i - h_j) & \end{aligned} \quad (2.60)$$

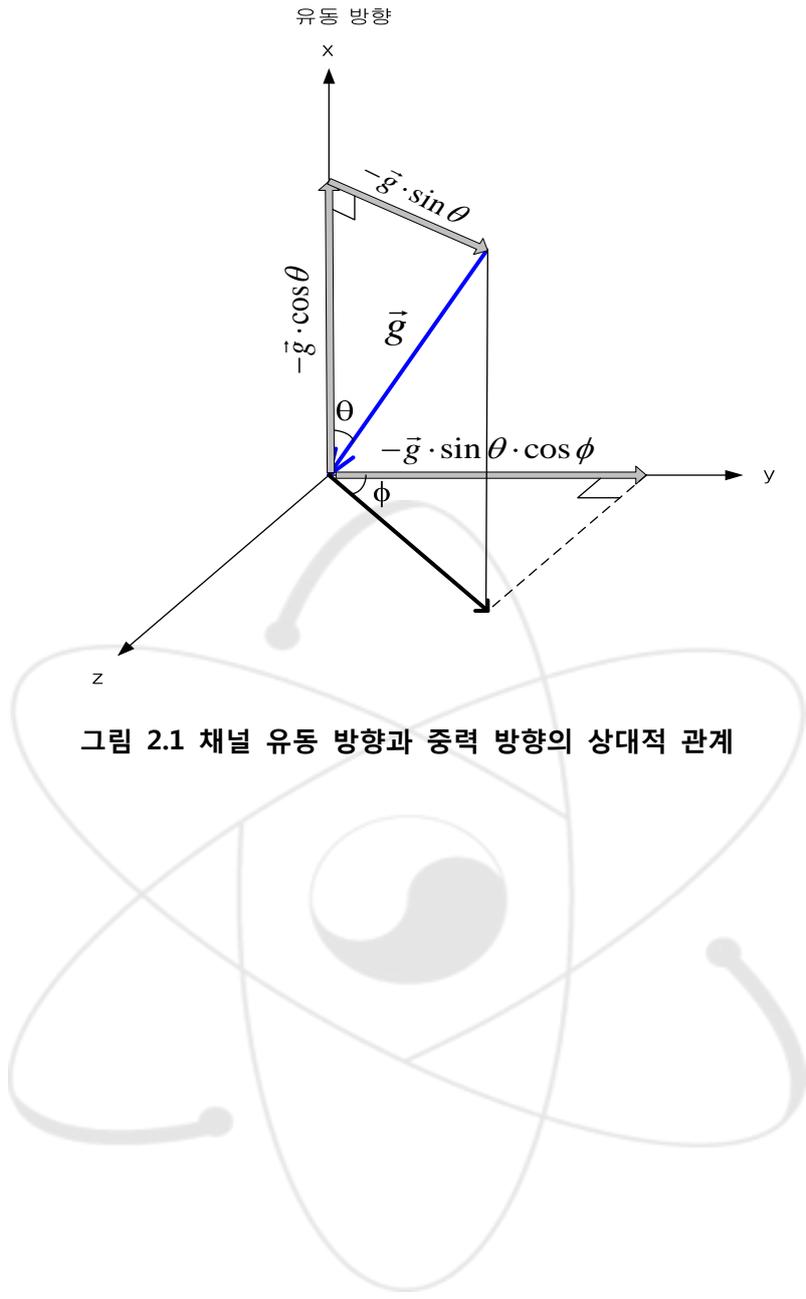


그림 2.1 채널 유동 방향과 중력 방향의 상대적 관계

## II.2. 알고리즘

MATRA에서 2가지 수치해법이 부수로 해석을 위해 사용된다. 첫 번째는 음해법(implicit)으로 대부분의 정상상태(steady-state)의 부수로 해석 시 사용된다. 제한된 과도해석이 가능하고 축방향 유동은 항상 '양'의 값을 가져야 하고 횡방향 유동에 비해 항상 커야 한다는 제한 조건이 있다[1]. 두 번째는 재순환 유동처럼 축방향 유동이 '음'의 부호를 가지는 경우를 해석하기 위한 양해법(explicit)으로 ACE method를 기반으로 한다[2-3]. 이 방법은 CFL(Courant-Friedrich-Levy) 제한조건에 의해 시간 간격의 크기가 제한된다. 음해법을 적용할 수 없는 문제들에 대해서 음해법의 값을 초기 조건으로 하여 양해법을 사용하여 정상상태 해를 얻을 수 있다. 이들 방법들은 COBRA-IV-I 코드에서 사용한 방법을 기초로 하여 개발되었다[1]. 현재 보고서에서는 음해법을 상세히 기술하고 양해법은 개괄적으로 소개했다.

음해법과 양해법의 비교는 표 2.1과 같다. 음해법은 이상유동의 slip 모델이 가능한 알고리즘이다. 반면 양해법은 homogeneous equilibrium model(HEM)만 가능하다. 양해법은 액상-기상의 계면에서 밀도변화를 안정적이고 정확하게 계산하기 위하여 개발되었다. 이런 목적에서 양해법은 HEM이 적용되었다. 향후 slip을 고려할 수 있는 방법론 개발이 필요하다.

두 방법론 모두 동일한 연료모델을 사용하며 orthogonal collocation 방법을 적용한 가중유수(weighted residual)법으로 연료의 온도해를 구한다. 연료모델은 표면 열전달계수값을 통해 열수력장과 온도정보를 교환한다. 현재 MATRA에서 구현하는 열전달계수 모델은 Relap-4 열전달계수 체계를 사용한다[4].

두 방법 모두 압력조건에 대하여 옵션에 따라 기준 압력(reference pressure)이나 국부 압력(local pressure)을 적용한다. 국부 유체 밀도는 국부 엔탈피와 기준 압력의 함수로 계산된다. 따라서 국부 운동효과나 정수력압에 대하여는 유체 물성치 계산을 수행하지 않는다. 이 가정은 계의 압력이 국부적인 압력 변화보다 매우 클 경우에 유용하다. 경수로의 경우 150 bar의 운전조건이므로 이 조건을 충분히 만족한다. 계산 수행에 사용하는 주요 변수들은 표 2.2와 같다.

## II.2.1 음해법(Implicit Method)

MATRA에서 사용하는 기본적인 solution algorithm이 implicit method 이다. 이 방법은 축방향 주유동의 부호가 '+'이고 해석대상의 모든 영역에서 교차류보다 항상 큰 축방향 유량이 보장되어야 한다. 이상유동에 대하여는 열적 평형과 검사체적내의 기포율과 유속이 균일하게 분포되어 있다고 가정한다. 이러한 가정과 함께 이상유동의 상간의 속도차인 slip이 고려된다. 횡방향은 고려되는 제어 체적 내에서 축방향 계산에서 사용된 유체와 동일하게 고려한다. 이러한 가정하에 아래와 같은 수식이 성립한다.

$$\hat{h} = \frac{\langle \rho u h \rangle}{\langle \rho u \rangle} = \frac{\langle \rho v h \rangle}{\langle \rho v \rangle}$$

$$\hat{x} = \frac{\langle \alpha \rho_v u_v \rangle}{\langle \rho u \rangle} = \frac{\langle \alpha \rho_v v_v \rangle}{\langle \rho v \rangle}$$

유동 엔탈피와 건도는 축방향 속도나 횡방향 속도의 어느 값을 기준으로 하여도 동일한 값을 가진다. 위의 관계식들과 가정을 통해 연속방정식, 에너지방정식 그리고 축방향과 횡방향 운동방정식은 아래와 같이 기술된다.

$$A_x \frac{\partial \langle \rho_m \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} + \sum_j W_{ij} + \sum_j (w'_{ij} - w'_{ji}) = 0 \quad (2.61)$$

$$A_x \frac{\partial \langle \rho_m \rangle \langle h_m \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \dot{m} \langle \hat{h} \rangle}{\partial x} + \sum_j W_{ij} \langle \hat{h}^* \rangle + \sum_j (w'_{ij})^H (h_i - h_j) = Q \quad (2.62)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[ \bar{m} A_x 2u' \frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \bar{m} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\rho' A_x} \right) + \sum_j W_{ij} (u^* - 2u') + \sum_j f_T w'_{ij} [(v_{k,x})_i - (v_{k,x})_j] \right] \\ = -\bar{A}_x \frac{\partial P}{\partial x} - F_x \end{aligned} \quad (2.63)$$

$$\frac{\partial W_{ij}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}_{ij} \cdot W_{ij}) + \frac{\bar{w} \cdot W_{ij}}{l_{ij}} = \frac{s_{ij}}{l_{ij}} (P_i - P_j) - F_{ij} \quad (2.64)$$

### (1) 차분 방정식(Difference equations)

부수로에 대한 지배방정식 (2.61)~(2.64)을 부수로에 대하여 이산화하고 부수로 간의 상호연계를 고려하면 이산화된 방정식(2.62.65)~(8)을 얻을 수 있다. 이산화 방정식에 사용된 제어 체적은 그림 2.2에 나타나 있다.

연속방정식

$$\bar{A}_{i,j} \frac{\rho_{i,j}^{n+1} - \rho_{i,j}^n}{\Delta t} + \frac{m_{i,j}^{n+1} - m_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta x_j} + \{D_c^T\} \{w_{k,j}\}^{n+1} = -\{D_c^T\} \{w'_{k,j}\}^{n+1} \quad (2.65)$$

에너지방정식

$$\begin{aligned} \bar{A}_{i,j} \rho_{i,j}^n \frac{\widehat{h}_{i,j}^{n+1} - \widehat{h}_{i,j}^n}{\Delta t} + m_{i,j-1} \frac{\widehat{h}_{i,j}^{n+1} - \widehat{h}_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta x_j} + \{D_c^T\} \{w_{k,j} \widehat{h}_{k,j}\}^{n+1} \\ - \widehat{h}_{i,j}^{n+1} \{D_c^T\} \{w_{k,j}\}^{n+1} - \widehat{h}_{i,j}^{n+1} \{D_c^T\} \{w'_{k,j}\}^{n+1} = Q_j^{n+1} \end{aligned} \quad (2.66)$$

축방향 운동량방정식

$$\begin{aligned} \frac{m_{i,j}^{n+1} - m_{i,j}^n}{\Delta t} - 2\bar{m}_{i,j}^{n+1} \frac{\widehat{v}_{i,j}}{A_{i,j}} \left( \bar{A}_{i,j} \frac{\rho_{m_{i,j}}^{n+1} - \rho_{m_{i,j}}^n}{\Delta t} + \{D_c^T\} \{w_{k,j}\}^{n+1} + f_t \{D_c^T\} \{w'_{k,j}\}^{n+1} \right) \\ + \left( m_{i,j-1}^2 \right)^{n+1} \frac{\widehat{v}_{i,j}^{n+1}/A_{i,j} - \widehat{v}_{i,j-1}^{n+1}/A_{i,j-1}}{\Delta x_j} + \left( m_{i,j-1}^2 \right)^{n+1} \frac{\widehat{v}_{i,j}^{n+1}/A_{i,j} - \widehat{v}_{i,j-1}^{n+1}/A_{i,j-1}}{\Delta x_j} + \{D_c^T\} \{w_{k,j} \widehat{v}_{x,k,j}^*\}^{n+1} \\ = -\bar{A}_{i,j} \frac{p_{i,j}^{n+1} - p_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta x_j} - F_x^{n+1} \end{aligned} \quad (2.67)$$

횡방향 운동량방정식

$$\begin{aligned} \frac{w_{k,j}^{n+1} - w_{k,j}^n}{\Delta t} + \frac{w_{k,j}^{n+1} u_{ij,k,j}^{n+1} - w_{k,j-1}^{n+1} u_{ij,k,j-1}^{n+1}}{\Delta x_j} + \frac{s}{\ell} C_s \{D_c\} \left[ D_c^T \right] \left\{ N \frac{w_{k,j}^2}{\rho_{k,j}^* s_{k,j}^2} \right\}^{n+1} \\ = \frac{s}{\ell} \{D_c\} \{p_{i,j-1}\}^{n+1} - F_{ij}^{n+1} \end{aligned} \quad (2.68)$$

, 여기서 합을 나타내는  $\{D_c^T\}$  와 차를 나타내는  $\{D_c\}$  연산자는 아래와 같이 정의된다.

$$\{D_c^T\} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \{D_c\} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

시간에 대하여는 1차 후향차분법(1<sup>st</sup> order backward difference)을 적용했다. 공간에 대하여서는 대류항에 대해 1차 후향차분을 적용했다. 대류항에 대한 후향차분의 적용을 upwind라고 하며 동의어로 donor cell 이라고도 한다. 물리적으로 축방향 유동이 항상 양의 방향으로만 진행한다고 가정했기 때문에 유량은 항상 상류에 의한 영향을 받으며 하류의 영향은 무시할 수 있다. 따라서 upwind 방법은 이런 물리적 상황을 잘 묘사하는 차분법이다.

모든 주요변수들, 속도, 온도, 질량유량은 횡방향 유동과 연계되어 있기 때문에 행렬을 동시에 풀어야 한다. 반복계산과정은 우선 에너지 방정식을 풀고 여기서 얻어진 엔탈피 값을 이용하여 각 변수들의 물성치를 계산하여 횡방향과 축방향 운동방정식이 묶여진 방정식을 푸는 순서로 반복계산이 진행된다. 아래에서는 각 방정식의 유도과정과 수치해법을 기술했다.

## (2) Energy equations

유체의 에너지는 벽면에서의 열전도 방정식과 동시에 풀려진다. 에너지 방정식은 횡방향 운동량 방정식과 함께 부수로에서의 엔탈피 항으로 표현되며 이를 유동 엔탈피 항과 벽면 온도의 변수만으로 방정식을 다시 쓰면 식(2.66)을 얻을 수 있다. 지배방정식을 유동 엔탈피와 벽면 온도만으로 표현한 식(2.69)을 차분하면 식 (2.66)의 형태를 얻는다.

$$\bar{A} \left( \rho - h_v \frac{\partial \psi}{\partial h} \right) \frac{\partial \hat{h}}{\partial t} + m \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} + \{D_c^T\} \{w\hat{h}\} - \hat{h} \{D_c^T\} \{w\} - \hat{h} \{D_c^T\} \{w'\} = Q \quad (2.69)$$

이렇게 기술된 방정식을 미지수와 계수로 분리하면 간단히 식(2.69)와 같은 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$\left[ \begin{matrix} AAH_{i,j} \\ T_{wc,j} \end{matrix} \right] \left\{ \begin{matrix} \hat{h}_{i,j} \\ T_{wc,j} \end{matrix} \right\} = \{c_{i,j}\} \quad (2.70)$$

식(10)으로 표현된 행렬 AAH에 대하여 Gauss 소거법이나 SOR(Successive Over Relaxation)을

이용하여 냉각재의 엔탈피와 벽면 온도를 동시에 구한다.

### (3) Momentum equations

부수로 해석을 위해서 사용하는 운동량방정식은 축방향 식(2.67)과 횡방향 운동량 식(2.68) 형태를 사용한다. 이 두 식의 유도과정은 아래와 같다.

#### 축방향 운동량방정식

운동방정식의 대류항을 아래와 같은 관계식을 이용하여 비체적항의 항으로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} m \widehat{v}_x &= \frac{\partial}{\partial x} m \frac{m \widehat{v}}{A} \\ &= \frac{\widehat{v}}{A} \frac{\partial}{\partial x} m^2 + m^2 \frac{\partial}{\partial x} \frac{\widehat{v}}{A} \\ &= -2m \frac{\widehat{v}}{A} \left( \bar{A} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \{D_c^T\} \{w\} + \{D_c^T\} \{w'\} \right) + m^2 \frac{\partial}{\partial x} \frac{\widehat{v}}{A} \end{aligned}$$

이를 이용하면 아래와 같은 implicit 형태의 축방향 운동량방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{m^{n+1}_{i,j} - m^n_{i,j}}{\Delta t} - 2\bar{m}^{n+1}_{i,j} \frac{\widehat{v}^{n+1}_{i,j}}{A_{i,j}} \left( -\bar{A}_{i,j} \frac{\rho^{n+1}_{m_{i,j}} - \rho^n_{m_{i,j}}}{\Delta t} + \{D_c^T\} \{w_{k,j}\}^{n+1} + f_t \{D_c^T\} \{w'_{k,j}\}^{n+1} \right) \\ + (m^2_{i,j-1})^{n+1} \frac{\widehat{v}^{n+1}_{i,j}/A_{i,j} - \widehat{v}^{n+1}_{i,j-1}/A_{i,j-1}}{\Delta x_j} + \{D_c^T\} \{w_{k,j} \widehat{v}_{x,k,j}^*\}^{n+1} = -\bar{A}_{i,j} \frac{p^{n+1}_{i,j} - p^{n+1}_{i,j-1}}{\Delta x_j} + F_x^{n+1} \end{aligned} \quad (2.71)$$

, 여기서

$$\bar{m}_{i,j} \equiv \frac{1}{2} (m_{i,j} + m_{i,j-1})$$

$$\widehat{v} = \frac{1}{\bar{\rho}} \equiv \frac{\widehat{\chi}^2}{\alpha \rho_v} + \frac{(1-\widehat{\chi})^2}{(1-\alpha) \rho_l} : \text{momentum specific volume}$$

## 횡방향 운동량방정식

횡방향 운동량방정식은 지배방정식으로부터 자연스럽게 차분을 통하여 얻어진다. 이 때 횡방향 속도, 의 정의를 통해 좌측항의 3번째항은 식(2.72)에서 보여지는 것처럼 횡방향 속도의 제곱 항으로 표현된다.

$$\begin{aligned} & \frac{w_{k,j}^{n+1} - w_{k,j}^n}{\Delta t} + \frac{w_{k,j}^{n+1} \overline{u_{ij,k,j}^{n+1}} - w_{k,j-1}^{n+1} \overline{u_{ij,k,j-1}^{n+1}}}{\Delta x_j} + \frac{s}{\ell} C_s \{D_c\} [D_c^T] \left\{ N \frac{w_{k,j}^2}{\rho_{k,j}^* s_{k,j}^2} \right\}^{n+1} \\ & = \frac{s}{\ell} \{D_c\} \{p_{i,j-1}\}^{n+1} - F_{ij}^{n+1} \end{aligned} \quad (2.72)$$

여기서 세 번째 항의 비선형 항을 선형화하기 위하여 이전 반복계산의 값으로 대체하면 식(2.68)과 같은 형태의 최종 횡방향 운동량방정식을 얻을 수 있다.

## 결합된 운동량방정식(combined momentum equation)

식(2.67)을 압력에 대하여 풀어 쓰면 식(13)과 같이 쓸 수 있다. 이 때 j번째 노드의 값은 한 단계 전의 반복계산값을 사용한다.

$$\begin{aligned} \bar{p}_{i,j}^{n+1} &= p_{i,j-1}^{n+1} + \frac{\Delta x_j}{A_{i,j}} \left( 2\bar{m}_{i,j}^{n+1} \frac{\bar{v}_{i,j}^{n+1}}{A_{i,j}} \left( \bar{A}_{i,j} \frac{\rho_{m_i,j}^{n+1} - \rho_{m_i,j}^n}{\Delta t} + \{D_c^T\} \{w_{k,j}\}^{n+1} + f_t \{D_c^T\} \{w'_{k,j}\}^{n+1} \right) - \frac{m_{i,j}^{n+1} - m_{i,j}^n}{\Delta t} \right) \\ & - \frac{\Delta x_j}{A_{i,j}} \left( (m_{i,j-1}^2)^{n+1} \frac{\bar{v}_{i,j}^{n+1}/A_{i,j} - \bar{v}_{i,j-1}^{n+1}/A_{i,j-1}}{\Delta x_j} + (m_{i,j-1}^2)^{n+1} \frac{\bar{v}_{i,j}^{n+1}/A_{i,j} - \bar{v}_{i,j-1}^{n+1}/A_{i,j-1}}{\Delta x_j} + \{D_c^T\} \{w_{k,j} \hat{v}_{x,k,j}^*\}^{n+1} \right) \\ & - \frac{\Delta x_j}{A_{i,j}} (F_x^{n+1}) \end{aligned} \quad (2.73)$$

이를 행렬 형태로 표현하면 아래와 같이 표현된다. 여기서 위첨자 n+1은 편의상 생략했다.

$$\{p_{i,j-1}\} = \{\tilde{p}_{i,j}\} - [R_{i,j}] \{w_{k,j}\} \Delta x - \{F_{i,j}\} \Delta x \quad (2.74)$$

여기서 R 행렬과 F 행렬은 각각 아래와 같다.

$$[R_{i,j}] = \left( \frac{1}{A_{i,j}} \left( \frac{1}{\Delta t} 2\bar{m}_{i,j} \left( \frac{\hat{v}_{i,j}}{A_{i,j}} \right) \{D_c^T\} - \{D_c^T\} [\hat{v}_{x,k,j}^*] \right) \right) \quad (2.75)$$

$$[F_{i,j}] = \frac{1}{A_{i,j}} \left( 2\bar{m}_{i,j} \frac{\hat{v}_{i,j}}{A_{i,j}} \left( \bar{A}_{i,j} \frac{\rho_{m_{i,j}}^{n+1} - \rho_{m_{i,j}}^n}{\Delta t} + f_t \{D_c^T\} \{w'_{k,j}\}^{n+1} \right) - \frac{m_{i,j}^{n+1} - m_{i,j}^n}{\Delta t} \right) \quad (2.76)$$

$$+ \frac{1}{A_{i,j}} \left( (m_{i,j-1}^2)^{n+1} \frac{\hat{v}_{i,j}^{n+1}/A_{i,j} - \hat{v}_{i,j-1}^{n+1}/A_{i,j-1}}{\Delta x_j} + (m_{i,j-1}^2)^{n+1} \frac{\hat{v}_{i,j}^{n+1}/A_{i,j} - \hat{v}_{i,j-1}^{n+1}/A_{i,j-1}}{\Delta x_j} - F_x^{n+1} \right)$$

횡방향에 대하여도 이와 같이 재정리하면 아래와 같은 행렬식과 각 행렬의 계수에 대한 관계식을 얻을 수 있다.

$$[D_c] \{p_{i,j-1}\} = [RP_{k,j}] \{w_{k,j}\} + \{FP_{k,j}\} \quad (2.77)$$

$$[R] = \left( \frac{1}{s/\ell} \left( \frac{1}{\Delta t} + \frac{\bar{u}_{ij,k,j}}{\Delta x_j} \right) \right) \quad (2.78)$$

$$[F] = \left( \frac{1}{s/\ell} \left( -\frac{w_{k,j}^n}{\Delta t} - \frac{w_{k,j-1} \bar{u}_{ij,k,j-1}}{\Delta x_j} - F_{ij} \right) + C_s \{D_c\} [D_c^T] \left\{ N \frac{\tilde{w}_{k,j}^2}{\rho_{k,j}^* S_{k,j}^2} \right\} \right) \quad (2.79)$$

위의 행렬관계식 (2.74)와 (2.77)을 재정리하면 아래와 같은 행렬식을 얻을 수 있고 이들 각 행렬 계수식은 식 (2.81)와 같이 간략화할 수 있다.

$$([D_c][R_{i,j}]\Delta x + [RP_{k,j}]) \{w_{k,j}\} = ([D_c] (\{ \tilde{p}_{i,j} \} - \{F_{i,j}\} \Delta x) - \{FP_{k,j}\}) \quad (2.80)$$

$$[AAA_{k,j}] \{w_{k,j}\} = \{b_{k,j}\} \quad (2.81)$$

, 여기서 AAA 행렬과 벡터 b는 아래와 같다.

$$[AAA_{k,j}]_{(N_k \times N_k)} \equiv [D_c][R_{i,j}]\Delta x + [RP_{k,j}]$$

$$\{b_{k,j}\}_{(N_k \times 1)} \equiv [D_c] (\{ \tilde{p}_{i,j} \} - \{F_{i,j}\} \Delta x) - \{FP_{k,j}\}$$

#### (4) Solution procedure

전체적인 계산순서는 그림 2.3과 같이 전개된다. 그림의 바깥쪽 경계의 반복계산은 입구 쪽에

서 출구 쪽으로 전개되면서 축방향으로 국부변수들을 순서대로 계산한다. 계산되는 국부변수의 순서는 엔탈피, 밀도, 횡방향 유량, 축방향 유량 그리고 압력 순이다.

여기에는 3개의 내부 반복계산이 포함되어 있다. 첫 번째 연료모델을 통한 핵연료 온도와 열속의 계산이다. 만약 이 값이 경계조건으로 주어질 경우 이 계산은 생략된다. 다른 2개의 내부 반복계산은 항상 수행되며 에너지 방정식과 운동량방정식의 계산수행과정 중에 발생한다. 이들 두 방정식은 음적으로 표현된 대수방정식에 의해 각각 AAH와 AAA 행렬식을 가지며 이들 행렬연산을 위해 반복계산을 수행하게 된다.

## II.2.2 양해법(Explicit Method)

원자로 사고 시 재관수 상황에서 급격한 밀도 변화에 의한 저유속의 이상유동형태가 발생하게 된다. 이러한 상황에서 MATRA의 음해법은 수치적으로 불안정해지며 종국에는 계산에 실패한다. 이와 같이 저유속의 급격한 밀도변화를 수반하는 이상유동의 문제를 해결하기 위한 방법론으로 ACE(Advance Continuous-fluid Eulerian method) 방법론이 제안되었다. ACE 방법은 Relap 등에서 사용하는 ICE 방법의 개선된 방법으로 ICE의 외재적으로 처리된 에너지 항을 내재적으로 처리하고, 풀어야 할 주변수를 엔탈피로 대체함으로써 저유속 조건에서 보다 안정화된 수치해를 얻게 되었다[2-3].

현재 MATRA에 사용하는 양해법은 ACE 방법에 기반을 두고 있으며 각 상간의 열적평형 상태를 가정하여 homogeneous equilibrium 상태를 가정하며 slip은 고려하지 않는다. 따라서 모든 상간의 속도는 동일하며 제어 체적내의 상들의 속도는 균일 분포를 가정한다. 따라서 엔탈피와 건도는 모두 static 상태를 사용하여 ACE 방법을 적용하여 해를 구하도록 구성되어 있다.

양해법의 계산은 그림 2.4의 순서도처럼 초기값으로부터 질량, 운동량, 에너지를 계속해서 explicit하게 업데이트한다. 이 때 실제값과의 오차는 연속방정식을 만족시키지 못함에 따라 발생하는 잔차로써 표현되며 이를 압력의 변화에 따른 에너지 변화량으로 재기술한다. 이 오차를 줄여나가는 방법은 반복계산을 통하여 이루어지며 implicit하게 진행된다.

표 2.1 MATRA 알고리즘의 상대비교

Characteristics	Implicit	Explicit	Remark
Capability	Steady state ( limited transient )	Transient (Approaching steady state )	
Restriction	- Positive axial flow - Axial flow > Lateral flow	Limited time step (CFL #) ( Accept negative axial flow)	FCOUR vs. COUR[1/T]
Definition parameter	Flow quality, slip	Static quality (Not allow slip)	Energy equation vs. Equation of state
Primary variables	5 ( h, W, m, P, $\rho$ )	5 ( h, W, m, P, $\rho$ )	Principle variable : h
Available model	-Slip model (void-quality relation, two-phase multiplier) - Wire spacer model	Only HEM (Not allow slip)	Development underway in explicit method - relative phase motion by use of the drift flux <sup>1</sup>
Local fluid density	f (h(x), P ) ( local enthalpy, reference pressure)	f (h(x), P ) ( local enthalpy, reference pressure)	System Pressure >> spatial pressure variation

표 2.2 MATRA에 사용한 변수들의 정의

Symbol	Description and Units	Definition
$m$	Axial mass flow rate(kg/sec)	$m = \langle \rho u \rangle A$
$w$	Lateral mass flow per unit length(kg/sec-m) (cross flow)	$w = \langle \rho v \rangle s$
$w'$	Turbulent crossflow per unit length(kg/sec-m)	
$\bar{\rho}$	Two phase momentum density(kg/m <sup>3</sup> )	$\bar{\rho} = \frac{\langle \rho u \rangle^2}{\langle \rho u^2 \rangle}$
$\rho$	Mixture density(kg/m <sup>3</sup> )	$\rho = \langle \rho \rangle + (1 - \alpha)\rho_l$
$\hat{v}$	Momentum specific volume(m <sup>3</sup> /kg)	$\hat{v} = \frac{1}{\bar{\rho}}$
$v$	Mixture specific volume(m <sup>3</sup> /kg)	$v = \frac{1}{\rho}$
$h$	Mixture enthalpy(kJ/kg)	$h = \frac{\langle \rho h \rangle}{\langle \rho \rangle}$
$h'$	Enthalpy transported by the turbulent crossflow(kJ/kg)	
$\hat{h}$	Flowing enthalpy(kJ/kg)	$\hat{h} = \frac{\langle \rho u h \rangle}{\langle \rho u \rangle}$
$\hat{x}$	Flowing quality	$\hat{x} = \frac{\langle \alpha \rho u \rangle}{m}$
$x$	Static quality	$x = \frac{\langle \alpha \rho_v \rangle}{\rho}$
$\psi$	Function defining relationship between mixture and flowing enthalpy(kg/m <sup>3</sup> )	$\psi = \rho_l \hat{x}(1 - \alpha) - \rho_v \alpha(1 - \hat{x}) \quad \psi = \frac{(\hat{h} - h)\rho}{(h_v - h_l)}$
$\alpha$	Vapor volume fraction	$\alpha = \frac{(\rho_l - \rho)}{(\rho_v - \rho_l)}$
$u$	Axial velocity(m/s)	$u = \frac{\langle \rho u \rangle}{\rho} = \frac{m}{\rho A}$
$\hat{u}$	Momentum velocity(m/s)	$\hat{u} = \frac{\langle \rho u^2 \rangle}{\langle \rho u \rangle} = \frac{m \hat{v}}{A}$
$u'$	Axial velocity transported by the turbulent crossflow(m/s)	
$P$	Pressure(Pa)	$P = P_v = P_l$
$v$	Lateral velocity(m/s)	$v = \frac{\langle \rho v \rangle}{\rho} = \frac{w}{\rho s}$
$A$	Subchannel flow area(m <sup>2</sup> )	
$s$	Gap width(m)	

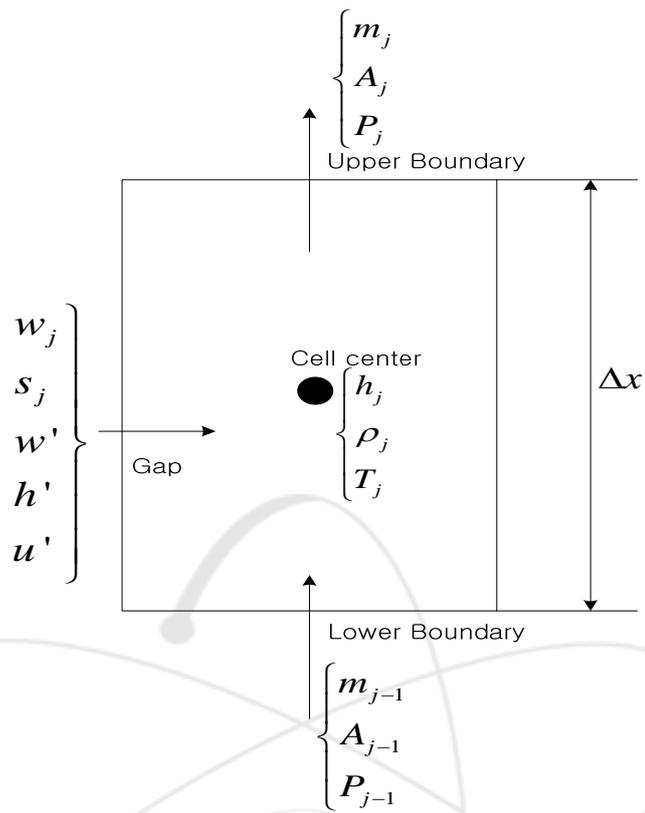


그림 2.2 음해법에 적용된 제어 체적

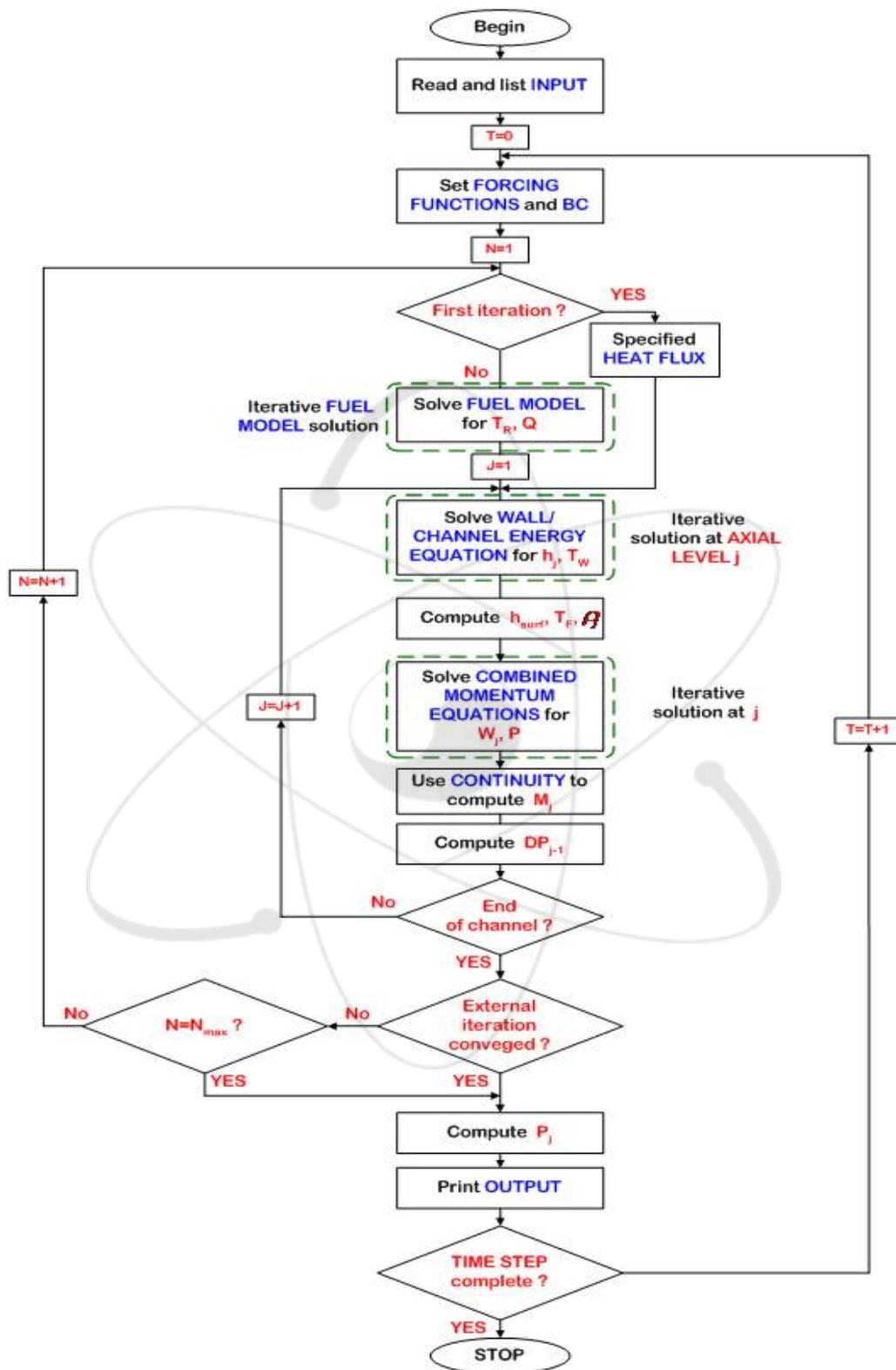


그림 2.3 음해법의 계산 수행 순서도

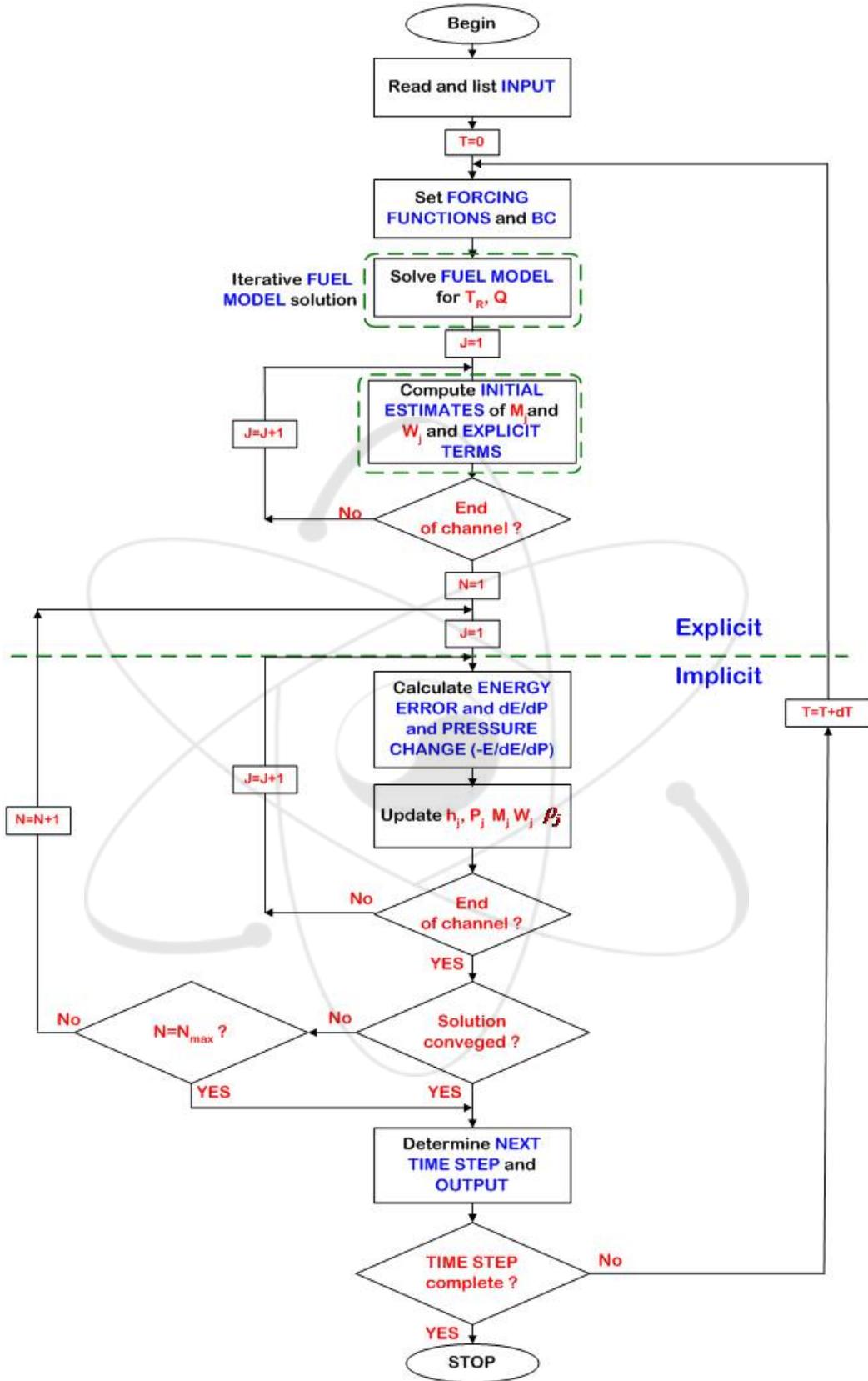


그림 2.4 양해법(ACE method)의 계산 순서도

## II.3. 코드 구조

### II.3.1 코드 구조

현재 MATRA 는 기본적으로 COBRA-IV-I 와 동일한 계산 과정을 사용하고 있다. 즉, 각 축방향 평면에서의 유체의 엔탈피, 밀도, 교차류, 축방향 유량 및 압력을 계산 영역의 입구로부터 출구까지 계산하는 과정을, 교차류와 축방향 유량에 대해 주어진 수렴 조건을 만족할 때까지 반복하게 된다.

#### (1) Program MATRA

그림 2.5에 MATRA 의 개략적인 구조를 나타냈다. 그림 2.6에는 주요한 부프로그램 및 함수들이 호출되는 순서를 모두 나타냈다.

주 프로그램인 MATRA 에서 부프로그램 CLEAR 를 호출하여 각종 common 변수들을 초기화한다. 그리고 부프로그램 SETUP 을 호출하여 입력 파일을 읽고 해당 변수들을 초기화하거나 값을 할당한다. Explicit 해를 구해야 할 경우는 부프로그램 XSCHM 을, implicit 해를 구해야 할 경우에는 부프로그램 SCHEME 을 호출하여 지배방정식의 해를 구한다. 부프로그램 CHF 를 호출하여 CHF 와 관련된 값들을 계산하고 부프로그램 RESULT 를 호출하여 계산된 정보를 바탕으로 출구에서의 요약 정보, 봉다발 평균 정보, 채널 별 상세 정보, 교차류 상세 정보, 연료봉 별 상세 정보, MDNBR 등을 출력한다. 이 과정을 입력 파일에 주어진 시간 동안 반복한다.

#### (2) Subroutine SETUP

그림 2.7에 부프로그램 SETUP 의 구조를 나타냈다. SETUP 은 주 프로그램인 MATRA 에 의해 호출되며 부프로그램 SETRI 를 호출한다. SETRI 는 입력 파일을 읽고, initial 카드와 case control 카드, 그리고 1 ~ 12번 카드에 해당하는 변수나 옵션을 설정, 또는 관련 자료를 처리한다. 이 과정에서 입력 자료의 건정성을 평가하기 위해서 부프로그램 LIMITS 와 LOAD 를 호출한다. 다양한 축방향 노드 크기가 주어진 경우엔 부프로그램 VAN 을 호출하여 노드를 할당한다. 부프로그램

PROP 을 호출하여 주어진 운전 조건에서의 물성치들을 계산한다. 부프로그램 SPLIT 을 호출하여 입구 유량을 분배하는데, 옵션 IG=1 인 경우 첫 노드에서 발생하는 압력 강하를 균등하게 하는 조건으로 입구 유량을 분배한다. 부프로그램 SETPI 를 호출하여 입력 내용을 정리하여 출력하는데, SETPI 를 호출하기 전과 호출한 후에 입출력 단위 옵션에 따라서 부프로그램 CIUNIT 을 호출하여 단위를 변환한다. 부프로그램 SETIV 를 호출하여 행렬 [AAA] 와 [AAH] 설정에 필요한 ILOC 관련 변수들을 초기화한다.

### (3) Subroutine SCHEME

부프로그램 SCHEME 은 주 프로그램인 MATRA 에 의해 호출되며, implicit 해를 구할 때 사용된다. SCHEME 의 구조를 그림 3.4에 나타냈다.

먼저 부프로그램 HEAT(NHT=1) 을 호출한다. 이것을 줄여서 HEAT-1 이라고 표현하면, HEAT-1 은 연료 온도 모형을 사용하지 않을 때는 사용자 입력에 의해 주어진 평균 열속으로부터 각 연료봉의 표면 열속을 계산한다. 연료 온도 모형을 사용할 때는 부프로그램 TEMP 를 호출하여 연료봉 피복관 온도를 계산하고, HEAT-3 에서 계산되는 연료봉 주위 부수로의 평균 온도와 평균 열전달 계수로부터 표면 열속을 재계산한다. 부프로그램 AREA 를 호출하여 입력에 의해 유로 면적이 변하거나 와이어랩을 사용하여 유로 면적이 변하는 것을 처리한다.

그 다음 엔탈피를 구하기 위해서 먼저 부프로그램 HEAT-2 를 호출하여 HEAT-1 에서 계산된 열속으로부터 연료봉에서 주변 부수로로의 선출력을 계산한다. 부프로그램 MIX 를 호출하여 난류 혼합 모형에 따라서 단상유동이나 유상유동의 유동양식 별 난류혼합량을 계산한다. 부프로그램 DIFFER-1 을 호출하면, 부수로에서의 단위 길이당 엔탈피 증가량을 계산한다. 그리고 부프로그램 ENERGY 를 호출하여 [AAH]  $\{h, Tw\} = \{BH\}$  의 해를 구하여 엔탈피와 벽면온도를 계산한다.

물성치들을 업데이트하기 위해서 먼저 부프로그램 PROP-2 를 호출하여 주어진 엔탈피로부터 온도와 물성치들을 계산한다. 또 부프로그램 VOID 를 호출하여 과냉 기포율을 계산하고 체적 기포율, 밀도, 체적, 이상유동마찰계수 증배계수(multiplier) 를 계산한다. HEAT-3을 호출하면 연료봉 주위 부수로들의 평균 냉각재 온도와 평균 열전달 계수를 계산한다.

부프로그램 FORCE 는 부수로 간극에서 와이어랩이 통과할 때 생기는 강제 교차류(forced crossflow) 나 스페이스 그리드에 의해서 인접 채널 간에 일정 비율이 분배되는 우회 교차류(diversion crossflow) 를 계산한다. 또 다시 부프로그램 MIX 를 호출하여 난류혼합 모형에 따라서 단상유동이나 유상유동의 유동양식별 난류혼합량을 계산한다. 부프로그램 DIFFER-3을 호출하여 압력손실계수 DPK를 계산하고 교차류를 고려하지 않은 축방향 압력손실  $dp/dx$ 를 계산한다. 계산 옵션에 따라서 Gaussian Elimination 방법을 사용하는 DIVGE 나 Successive Over Relaxation 방법을 사용하는 DIVSOR 을 호출한다. DIVGE 나 DIVSOR 은 DIFFER-2 를 호출하여 교차류의 저항  $C_{IJ}$ 와 횡방향 운동량 관련항을 계산하고, 행렬  $[AAA]$  와  $\{B\}$  를 구성하고  $[AAW] \{w\} = \{B\}$ 의 해를 구한다.

교차류를 구한 후에는 연속방정식으로부터 축방향 유량을 계산하고, 부프로그램 DIFFER-4 를 호출하여 교차류를 고려한 축방향 압력손실  $dp/dx$ 를 계산한다

부프로그램 AREA 부터 DIFFER-4 를 호출하는 부분까지를 각 축방향 노드 별로 계산하는데 이것을 axial sweep 이라고 하며, 이것을 수렴할 때까지 반복하는 과정을 outer iteration 이라고 한다.

#### (4) Subroutine XSCHEM

부프로그램 XSCHEM 은 주 프로그램인 MATRA 에 의해 호출되며 explicit 해를 구할 때에 사용된다. XSCHEM 의 구조를 그림 2.8에 나타냈다. XSCHEM 이 호출하는 부프로그램들과 SCHEME 에서 호출하는 부프로그램과 동일하므로 부프로그램들의 기능을 설명하지 않는다.

첫 번째 axial sweep 은 HEAT-1 내부에서 이뤄진다. HEAT-1 에서 모든 연료봉과 모든 축방향 노드 별로 열속을 계산한다.

두 번째 axial sweep 에서는 임시로 유량과 교차류를 계산한다.

세 번째 axial sweep 에서는 반복법에 의해서 residual error 를 최소화 하는 압력 변화로부터 압력을 계산하고, 이로부터 유량, 교차류, 밀도, 엔탈피를 업데이트한다.

네 번째 axial sweep 에서는 모든 부수로와 모든 축방향 노드 별로 최대 Courant 수를 구하고 이로부터 다음 time step 을 계산한다.

## II.3.2 코드 구조 개선 사항

### (1) 개요

MATRA 코드는 CDC CYBER mainframe 에서 실행되던 COBRA-IV-I 코드를 토대로 PC 콘솔 환경에서 실행되도록 개발되었다. MATRA 코드에서 개선된 사항들을 그림 2.9에 정리했다. 기존 COBRA-IV-I 코드의 불필요한 부프로그램들을 제거하고 코드 구조를 단순화시켰다. 프로그래밍 언어로는 기존의 Fortran 66 대신 Fortran 90을 사용하여 코드의 유연성과 가독성을 높였다. 계산에 자주 사용되는 중요한 상수들의 유효 숫자를 증가시키고 모든 실수들을 2배 정도(double precision)로 그 정밀도를 높여 보다 정확한 계산 결과를 얻을 수 있도록 했다. 기존의 5자리 숫자를 입력하던 것을 10자리로 늘려서 보다 정밀한 정보를 입력할 수 있도록 했고, 출력 자료의 정밀도도 높였다. 파라미터문을 도입하여 해결할 문제의 크기에 따라서 SPECSET, SPECSPL과 같은 연계 프로그램을 이용하여 변수들의 크기를 재설정해야 하는 문제를 해결했다. COBRA-IV-I 에서는 코드의 입출력 단위 체계로 British 단위를 사용했으나, MATRA 에서는 SI 와 British 단위를 선택적으로 사용할 수 있도록 입출력 단위 체계의 전환 기능을 제공했다. 유체의 물성치에 대한 계산 방법으로 COBRA-IV-I 는 포화(saturated) 상태의 물성치로부터 선형 보간법(linear interpolation)에 의하여 과냉(subcooled) 상태의 물성치를 계산함으로써 상당한 오차를 야기했었다. MATRA 에서는 유체의 물성치 계산 라이브러리로 Siemens 의 TAF 와 NIST 의 Steam database 라이브러리를 이식하여 과냉 상태의 물성치를 직접 계산함으로써 물성치 계산에 따른 오차를 상당량 줄일 수 있도록 했다. 물성치 라이브러리 사용시 과도한 계산 시간을 줄이기 위해 입력자료로부터 적절한 범위의 포화 물성치표를 생산하고 이로부터 선형 보간법을 통해 물성치를 계산할 수 있도록 했다. COBRA-IV-I 에서는 계산에 사용되는 축방향 노드를 균일하게 분할할 수 밖에 없으나, MATRA 에서는 flow blockage 와 같은 문제 분석 시에 가변적인 축방향 노드 생성 기능을 사용하여, 선택적으로 조밀한 노드를 사용함으로써 축방향 노드 개수를 최적화할 수 있도록 했다. COBRA-IV-I 에서는 유체의 모든 물성치들을 기준 압력인 계통 출구 압력에 대해서 계산하고 있다. 가압 경수로의 정상 상태와 같은 고압의 단상 유동(single-phase flow) 영역에서는 축

방향 압력 강하가 유체의 물성치에 미치는 영향이 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에, 계통 압력을 이용한 이러한 계산 방법이 어느 정도 타당성을 갖고 있지만, 보다 낮은 압력, 혹은 이상 유동(two-phase flow) 조건에서는 국부 압력이 유체의 물성치에 미치는 영향이 무시할 수 없을 정도가 되는 경우가 종종 있기 때문에, MATRA 에서는 유체의 물성치를 계산하는데 있어서, 유동 조건에 따라 사용자가 계통 압력 혹은 국부 압력을 선택적으로 사용할 수 있도록 했다. 교차류 방정식의 해를 구하는 과정에서 COBRA-IV-I 는 SOR(Successive Over-Relaxation) 방법을 사용하고 있는데, 저유속 조건과 같은 특정 조건에서 코드의 수렴성을 향상시키기 위하여 가우스 소거법(Gaussian Elimination)을 추가하여 선택적으로 사용할 수 있도록 했다. 일반적으로 가압 경수로의 열출력을 제한하는 가장 중요한 열수력 인자는 최소 핵비등 이탈율(Minimum Departure from Nucleate Boiling Ratio: MDNBR)이다. MDNBR 은 운전 여유도를 결정할 수 있기 때문에, 미리 결정된 한계 DNBR 에 대한 운전 가능 영역을 계산할 수 있는 기능이 필요하다. 따라서 MATRA 에서는 주어진 부프로그램 ITDNBR을 통해서 MDNBR 에 대한 열출력, 봉의 반경 방향 첨두치 및 유량의 값을 찾아내는 MDNBR 추적 계산 기능을 제공했다.

## (2) 파라미터문 도입

MATRA 코드에는 많은 변수들이 배열형태로 사용된다. 이러한 배열들의 크기를 하나의 숫자로 고정시켜서 사용하는 것은 비효율적인 측면이 많다. MATRA 코드 실행시에 계산 문제의 크기에 맞게 동적 메모리 할당 방식으로 배열을 만드는 것이 메모리 크기 측면에서는 효율적이지만 이 방식은 시스템에 부하를 준다. 또한 equivalence 문의 사용으로 동적 메모리 할당 방식을 구현하는데 어려움이 있다. 따라서 MATRA 코드에 파라미터문을 도입하여 배열 크기를 변경할 수 있도록 했다. 기존의 COBRA-IV-I 코드는 배열의 크기를 바꾸려면 specset.exe와 specspl.exe라는 연계 프로그램을 사용했다(그림 2.10). 배열들의 크기를 specdat 이라는 파일에 입력하고, specset.exe를 실행하면 specmir에 담겨있는 배열크기를 specdat을 참조하여 숫자로 치환하여 specfix에 저장한다. 다시 specfix를 입력으로 specspl.exe를 실행하여 specfix에 담겨있던 spec 문

들을 각각의 파일로 분리하여 'spec/spec01'~'spec/spec46'까지로 나누어 저장하여 사용한다. 기존의 이러한 방법은 spec문을 수정하거나 새로운 common 문 등을 추가할 경우에 변경사항을 specmir에 반영해 주어야 했다. 따라서 코드의 원활한 유지 보수를 위해서는 spec문 외에도 specmir를 함께 관리해야 했다. 따라서 연계 프로그램의 필요성을 없애고 편리한 유지 보수와 필요에 따라 변수 크기를 변경할 때의 절차를 간소화하기 위해서 파라미터문을 도입했다(그림 2.11). 'spec/specs' 파일에 배열 크기를 정의하는 변수들(MC, MR 등)을 파라미터로 정의했다. 이 경우에 사용자가 계산하려는 문제에 따라서 배열 크기를 바꾸고 싶으면 'spec/specs' 파일의 파라미터 크기만 바꿔주고 재컴파일해서 MATRA 코드를 사용하면 된다.

### (3) 물성치 라이브러리 추가

기존 COBRA-IV-I 코드는 냉각재 물성치를 계산할 때 입력된 포화 물성치 표를 이용하여 오차가 컸다. 따라서 MATRA 코드에서는 Siemens 에서 개발한 TAF 함수를 추가했다. 함수 TAF는 경수로 운전조건에 해당하는 물의 물성치에 관한 포트란 함수이다. 이 외에 다양한 운전 조건에서 물성치를 계산할 수 있는 NIST/ASME Steam Database 라이브러리를 추가했다. 이러한 라이브러리를 MATRA 코드에 통합/컴파일하여 사용하는 방식은 구현이 쉬우나 MATRA 코드 실행파일에 물성치 데이터베이스가 통째로 들어가므로 실행파일이 커지고 NIST 물성치 라이브러리를 이용하지 않을 때도 메모리에 로딩되어 시스템에 부하를 주게 된다. 따라서 NIST 물성치 라이브러리를 dll 화일로 만들어서 이 라이브러리가 필요할 때만 MATRA 코드가 해당하는 dll 파일을 로딩하여 사용하도록 했다.

NIST/ASME Steam Database 는 IAPWS-951 함수에 의해서 물과 증기의 물성치를 계산하며, 물성치의 적용 한계는 다음과 같다.

- Thermodynamic Property Limits

---

<sup>1</sup> IAPWS-95 : Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use - The International Association for the Properties of Water and Steam

- ✓ 273.15K < T < 1273.15K
- ✓ P < 1,000 MPa
- ✓ Molar Mass = 18.015268 g/mol Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW)
- Transport Property Limits (IAPWS 1985 + IF97)
  - ✓  $\mu$ 
    - 273.15 K < T < 1173.15 K for P < 300 MPa
    - 273.15 K < T < 873.15 K for 300 MPa < P < 350 MPa
    - 273.15 K < T < 423.15 K for 350 MPa < P < 500 MPa
  - ✓ k
    - 273.15 K < T < 1073.15 K for P < 100 MPa
    - 273.15 K < T < 673.15K for 100 MPa < P < 150 MPa
    - 273.15 K < T < 523.15 K for 150 MPa < P < 200 MPa
    - 273.15 K < T < 398.15 K for 200 MPa < P < 400 MPa
- Surface Tension Limits
  - ✓ Surface tension is valid from the triple point to the critical point.

MATRA 코드에 추가한 라이브러리가 제대로 작동하는지 확인하기 위해서 MATRA의 물성치 계산값과 독립적인 윈도우즈 프로그램인 NIST STEAM 의 물성치를 각각 비교했다.

먼저 MATRA의 물성치와 NIST STEAM의 포화 물성치를 0.1~22 MPa 범위에서 비교하여 표 2.3에 정리했다. 각각의 주요 물성치들의 상대오차는  $-4.243e-3 \sim 9.278e-4$  %로 나타났다. 주어진 압력과 온도로부터 여러 물성치를 구할 때, MATRA 코드와 윈도우즈 NIST STEAM 프로그램의 물성치를 0.01~40 MPa 의 압력과 300~1250 K 의 온도 범위에서 비교하여 표 2.4에 정리했다. 그 결과 주요 물성치의 상대오차는  $-4.8e-5 \sim 4.5e-5$  %로 나타났다. MATRA에 NIST STEAM 라이브러리가 성공적으로 이식되어 잘 작동하고 있는 것을 표 2.5로부터 알 수 있다.

#### (4) 물성치 계산 방식 개선

MATRA 코드는 열수력장을 입구부터 출구까지 반복법에 의해 계산하는데, 새로운 물성치 라이브러리는 기존의 TAF 함수보다 계산속도가 훨씬 느리다. 따라서 물성치가 필요할 때마다 라이브러리로부터 물성치를 계산하는 방법은 정밀하지만 계산속도가 매우 늦어진다.

최근에 타분야 코드들간에 연계코드 개발 경향이 나타나고 있는데, 코드 간에 반복 계산이 이뤄지는 경우엔 빠른 계산속도가 요구된다. MATRA 코드에서 새로운 물성치 라이브러리를 사용할 때 계산시간을 단축하기 위해서 기존의 포화 물성치 표에서 보간법으로 물성치를 계산하는 방법을 도입했다. 코드 입력 1번 카드의 J9 옵션값을 0과 1에서 두가지에서 2와 3을 추가 확장하고

J9TF 옵션을 추가했다. 표 2.5에 물성치 계산 옵션을 정리했다.

사용자가 J9TF 옵션을 0으로 선택하면 물성치 라이브러리 함수를 그대로 계산하도록 하고, J9TF 옵션을 1로 선택하면, MATRA 코드 계산 초기에 코드 입력으로부터 필요한 압력 및 온도/엔탈피 범위를 판단하고, 충분히 넓은 범위의 포화 물성치 표를 물성치 라이브러리로부터 생성했다. 그리고 이후의 계산에서는 생성된 포화 물성치 표로부터 물성치를 계산하도록 했다. 옵션 J9TF를 2로 선택하면 과냉 영역뿐 만 아니라 과열 영역에서의 물성치 표도 생성하도록 했다.



### II.3.3 주요 Subroutines

#### PROGRAM MATRA

Caller : 없음

Callee : APROP, AREA, CHF, CLEAR, CPTIME, CURVE, DUMPIT, HEAT, ISWAP, ITDNBR, RESTRT, RESULT, SCHEME, SETUP, SYSDDT, VOID, XSCHM

기능 : 주 프로그램으로 변수를 초기화 하거나 주어진 시간까지의 입력을 처리하여 문제를 계산하고 결과를 처리하고 출력하는 전체 과정을 담당한다.

#### SUBROUTINE SETUP

Caller : MATRA

Callee : CIUNIT, CLEAR, ISWAP, SETIV, SETPI, SETRI, SYSDDT

기능 : 사용자 입력 파일을 읽고 단위를 변환하여 부수로 문제 기하형태, 초기치 또는 경계치를 설정한다. 입력 파일 내용을 출력하고 행렬크기 계산을 위한 변수(ILOC, LOCA)를 설정한다.

#### SUBROUTINE SETRI (ERROR)

Caller : SETUP

Callee : APROP, CIUNIT, CURVE, ISWAP, LIMITS, LOAD, PROP, SPLIT, VAN

Argument : ERROR - 기본값 'NO', 입력 처리 중 에러가 발생하면 'YES'

기능 : 사용자 입력 매뉴얼에 맞게 작성된 입력 파일을 읽고 해당 변수에 대입하거나 옵션을 설정, 또는 관련 자료를 처리 한다.

#### SUBROUTINE PROP (IPART, J, JX)

Caller : MATRA, SETRI, SCHEME, SPLIT, XSCHM

Callee : APROP, CURVE, STEAM, FSPRE, TSA

Argument : IPART - 옵션 플래그 1 또는 2

Argument : J - 축방향 계산 노드 번호

Argument : JX - 축방향 물리적 노드 번호

기능 : 출구 압력에서의 포화 물성치나 과열증기 물성치를 계산하거나(IPART=1) 주어진 압력과 온도에서의 물성치와 레이놀즈수, 프란틀수, 열전달계수, 유동마찰계수 등을 계산한다

(IPART=2)

### **FUNCTION APROP (I1,P1,P2)**

Caller : PROP, RESULT, SETRI, STEAM

Callee : PROPSTM, TAF

Argument : I1 – 어떤 물성치를 계산할지 알려주는 변수

Argument : P1 – 첫번째 파라미터

Argument : P2 – 두번째 파라미터

기능 : 주어진 arguments에 따라서 주어진 압력과 온도에서의 specific volume, specific enthalpy, specific entropy, thermal expansion coeff., specific heat, thermal conductivity, viscosity, surface tension를 구하거나, 주어진 온도와 물성치로부터 압력을 구하거나, 주어진 압력과 물성치로부터 온도를 구한다. 이때 J9 옵션에 따라서 물성치 라이브러리를 TAF(J9=1)나 NIST Steam Database(J9=2)로 선택할 수 있다.

### **SUBROUTINE HEAT (NSS,JB,NHT,JX3)**

Caller : MATRA, SCHEME, XSCHM

Callee : CURVE, HCOOL, ISWAP, ROLLIT, TEMP

Argument : NSS – Caller를 구별하기 위한 플래그 (1~3)

Argument : JB – 축방향 계산 노드 번호

Argument : NHT – 특정 계산을 위한 스위치 플래그 (1~3)

Argument : JX3 – 축방향 물리적 노드 번호

기능 : 연료봉 온도와 표면 열속을 계산하거나(NHT=1), 연료봉 주변으로의 선출력을 계산하거나(NHT=2), 연료봉 주변의 부수로 평균 냉각재 온도와 열전달계수를 계산한다(NHT=3).

### **SUBROUTINE AREA (J,JX)**

Caller : MATRA, SCHEME, SPLIT

Callee : CURVE

Argument : J – 축방향 계산 노드 번호

Argument : JX – 축방향 물리적 노드 번호

기능 : 사용자의 입력(NAFACT>0)이나 와이어랩의 사용(J6=1 또는 3)으로 인해서 부수로 면적이나 부수로간 간극 크기의 변화가 있을 경우에 유로면적과 수력직경 등을 재계산한다.

### **SUBROUTINE MIX (J)**

Caller : SCHEME, SPLIT, XSCHEM

Callee : APROP, CURVE, TSA

Argument : J – 축방향 계산 노드 번호

기능 : 여러가지 난류혼합 모형에 따라서 단상유동이나 유상유동의 유동양식별 난류혼합량을 계산한다.

### **SUBROUTINE DIFFER (IPART,J,JX)**

Caller : DIVGE, DIVSOR, SCHEME, SPLIT, XSCHEM

Callee : APROP, CURVE

Argument : IPART – 특정 계산을 위한 스위치 플래그 (1~4)

Argument : J – 축방향 계산 노드 번호

Argument : JX – 축방향 물리적 노드 번호

기능 : 단위 축방향 길이당 엔탈피 증가량  $dh/dx$ 를 계산한다. SCHEME에서는 축방향 열전도와 연료봉으로부터의 열전달량만을 고려한다. XSCHEM에서는 모든 형태의 에너지 전달량을 포함하는데 사실상 정상상태의  $dh/dx$ 와 같다. 벽면 열전달 모형을 사용할 때에는 냉각재 온도를 엔탈피로 변환하기 위한 벽면-냉각재 열전달 계수인 UWALL도 계산한다(IPART=1). 교차류의 저항 CIJ와 횡방향 운동량 관련항을 계산한다(IPART=2). 압력손실계수 DPK를 계산하고 교차류를 고려하지 않은 축방향 압력손실  $dp/dx$ 를 계산한다(IPART=3). 교차류를 고려한 축방향 압력손실  $dp/dx$ 를 계산한다(IPART=4).

### **SUBROUTINE XSCHEM (IPART)**

Caller : MATRA

Callee : APROP, CURVE, DIFFER, FORCE, HEAT, ISWAP, MIX, PROP, ROLLIT

Argument : IPART – 특정 계산 스위치 플래그 (1~2)

기능 : IPART=2일 때, explicit 과도 해를 찾는다. 첫번째 스위치에서는 임시 유량과 연료 온도를 계산한다. 두번째 스위치에서는 실제 유량과 압력장을 수렴시킨다. 세번째 스위치에서는 최대 Courant number에 해당하는 다음 시간 단계를 찾는다. IPART=1일 때, 최대 Courant number에 해당하는 다음 시간 단계를 찾는다.

**표 2.3 물 포화 물성치 비교 (MATRA와 NIST STEAM)**

Saturated Properties	MATRA PROPSTM(a) vs. NIST STEAM(b)	
	Min.	Max.
Pressure Range [MPa]	0.1	22
% Err(Tsat)	-4.243E-03	9.278E-04
% Err(Vf)	-3.904E-05	3.996E-05
% Err(Vg)	-4.157E-05	4.150E-05
% Err(hf)	-4.254E-05	4.108E-05
% Err(hg)	-2.070E-05	1.998E-05
% Err(Cpf)	-3.982E-05	4.015E-05
% Err(Cpg)	-3.762E-05	4.967E-05
% Err(kf)	-1.114E-05	1.119E-05
% Err(kg)	-3.698E-05	4.526E-05
% Err(μf)	-4.482E-05	4.555E-05
% Err(μg)	-2.929E-05	3.801E-05
% Err(σ)	-3.621E-05	4.386E-05

% Err = (a-b)/a × 100 or (a-c)/a × 100

a : PROPSTM = MATRA function for water and steam properties with NIST Steam Database (IAPWS-95) source code.

b : NIST STEAM = NIST/ASME Steam Database with formulation of IAPWS-95.

**표 2.4 주어진 압력과 온도에서의 물 물성치 비교 (MATRA와 NIST STEAM)**

Properties with given P & T.	MATRA PROPSTM(a) vs. NIST STEAM(b)	
	Min.	Max.
Pressure Range [MPa]	0.01	40
Temperature Range [K]	300	1250
% Err(V)	-4.765E-05	4.448E-05
% Err(H)	-4.185E-05	3.333E-05
% Err(Cp)	-4.116E-05	4.003E-05
% Err(K)	-4.551E-05	4.106E-05
% Err( $\mu$ )	-3.740E-05	4.030E-05

% Err = (a-b)/a × 100 or (a-c)/a × 100

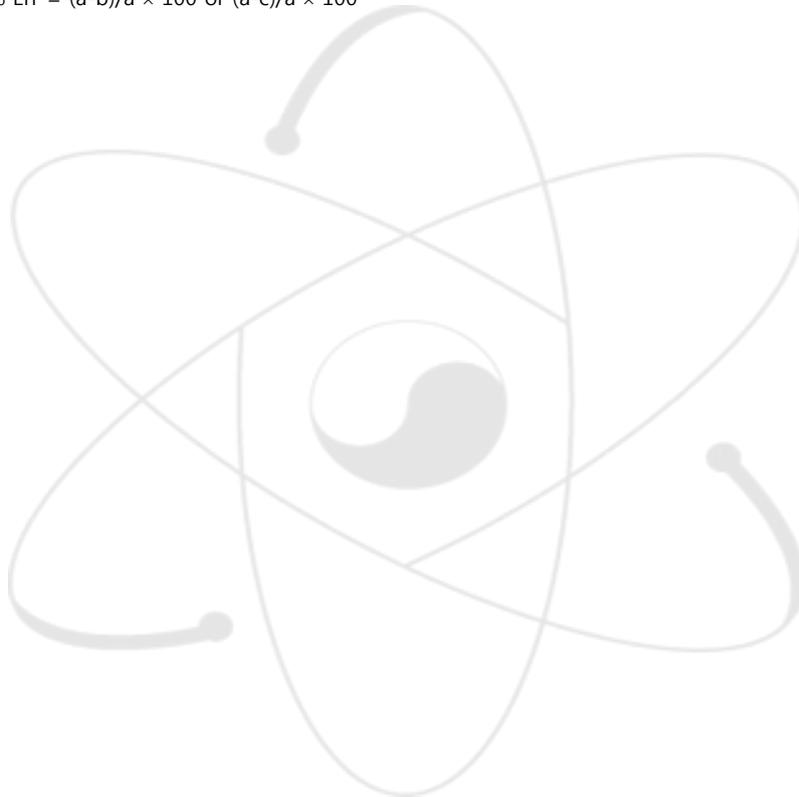
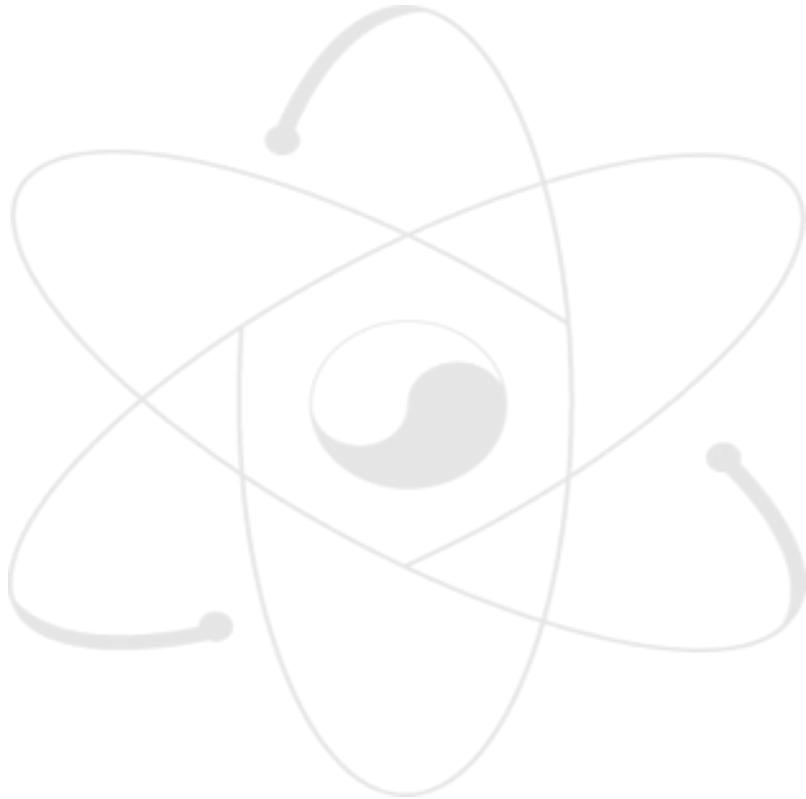


표 2.5 MATRA 물성치 계산 옵션 및 의미

옵션 변수	J9	J9TF+
	0 : 과냉 물성치 입력	-
	1 : TAF 함수	-
	2* : NIST STEAM 라이브러리	0 : 함수 이용 1 : 함수 이용, 과열 물성치 표 생성 2 : 과냉 및 과열 물성치 표 생성

+ MATRA에서 추가된 옵션



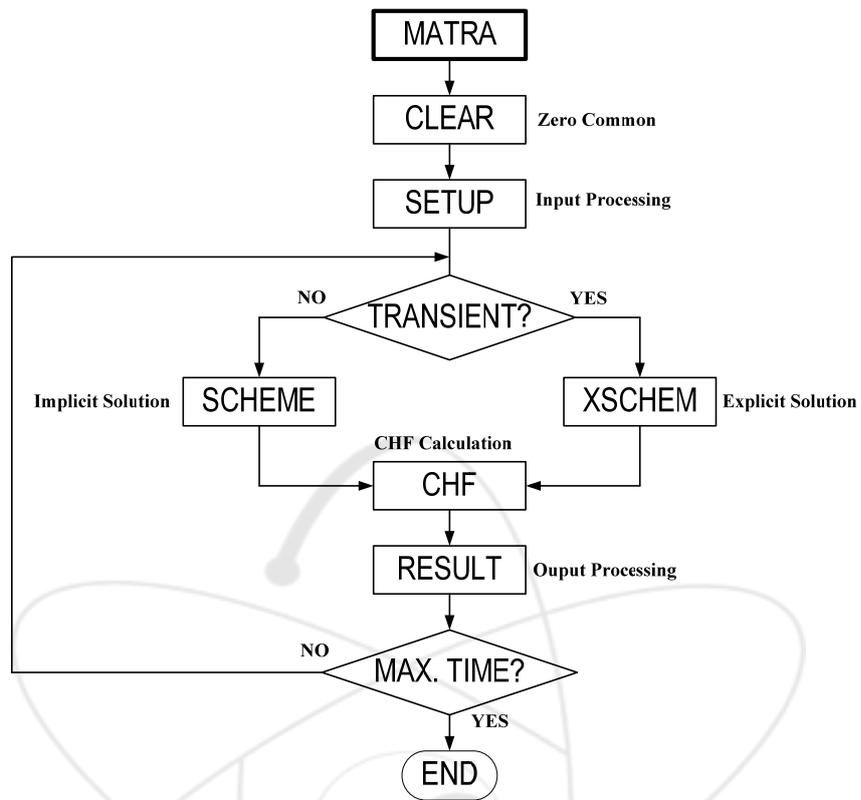


그림 2.5 MATRA 코드 전체 구조

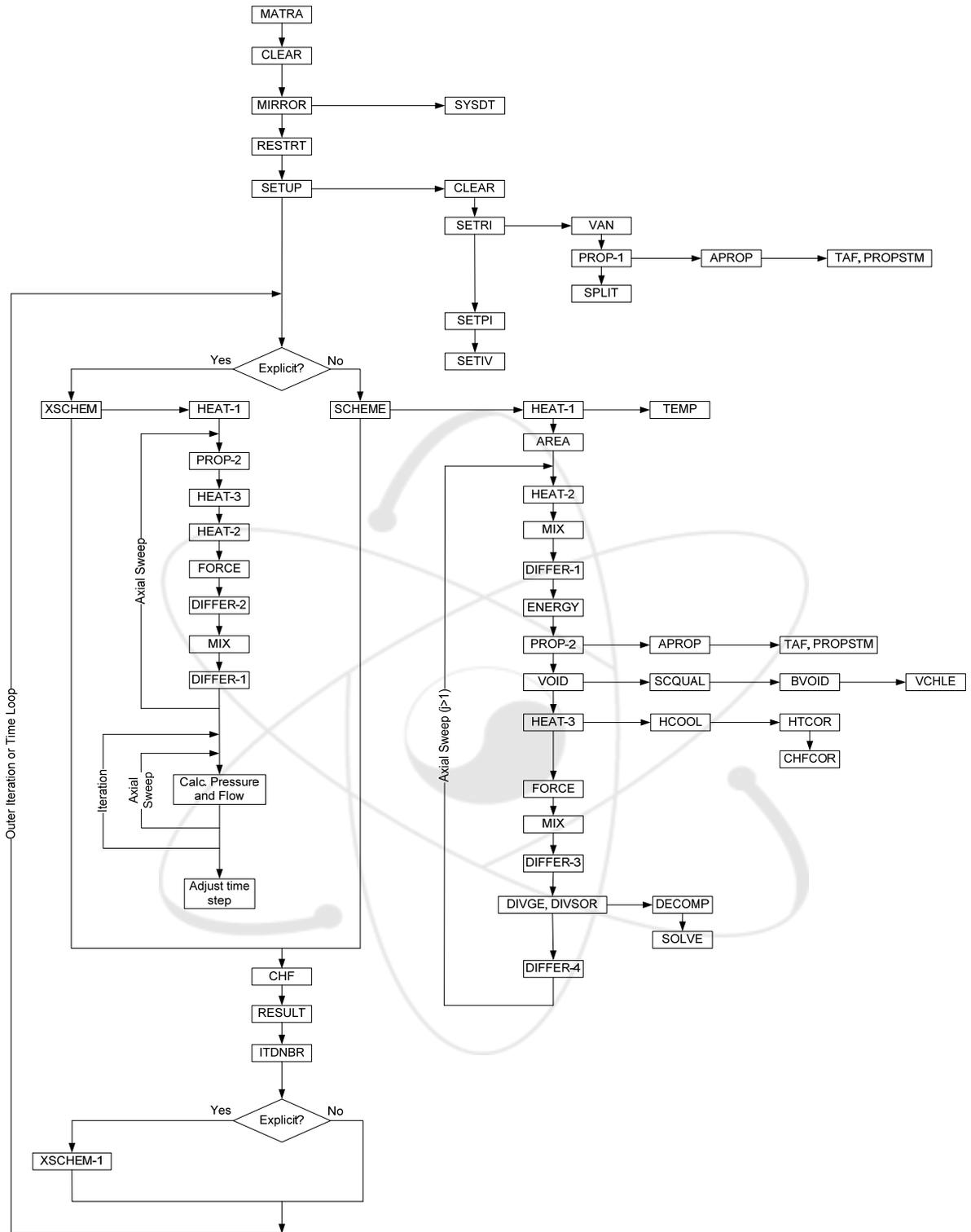


그림 2.5 MATRA 코드 주요 subroutine 호출 흐름

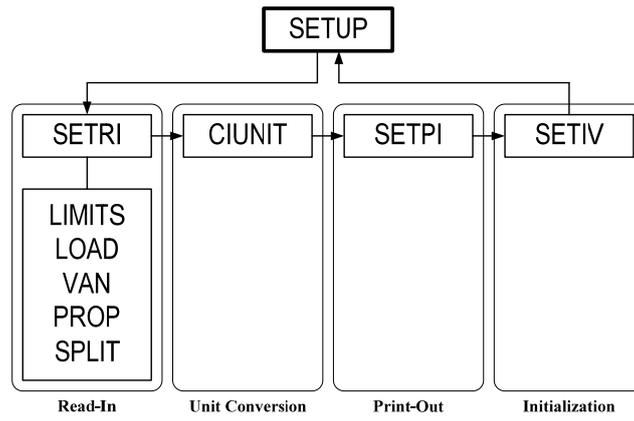


그림 2.6 MATRA 입력처리 구조



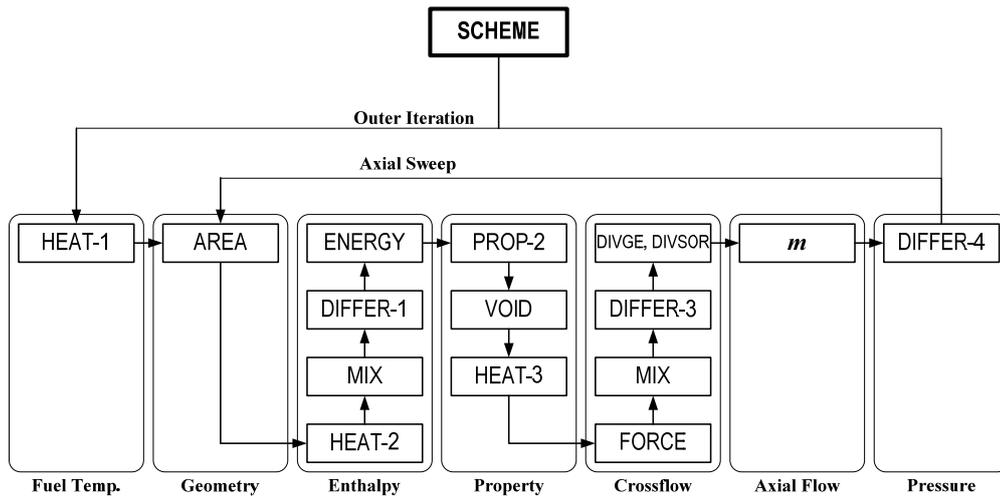
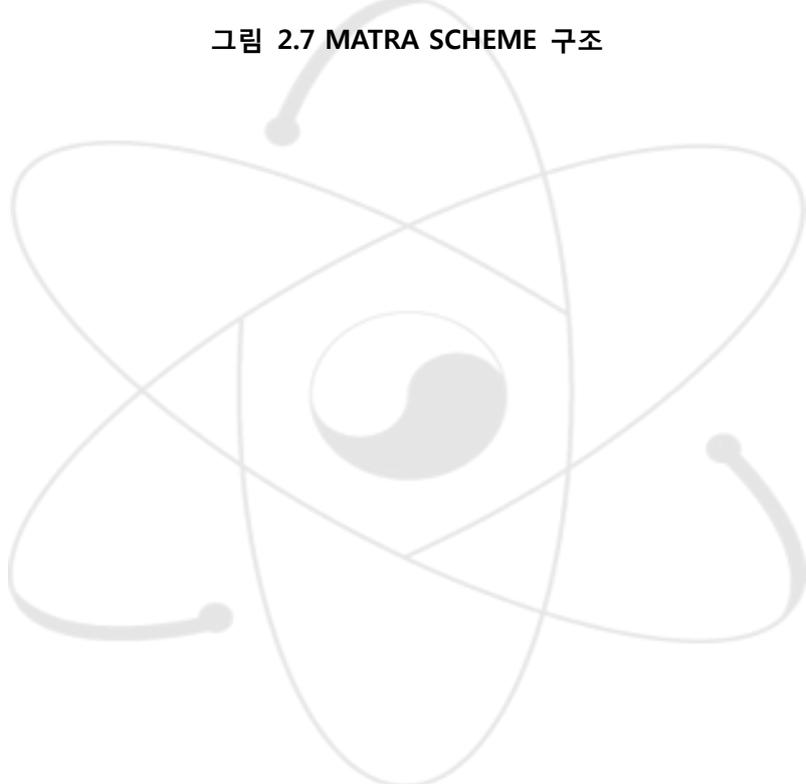


그림 2.7 MATRA SCHEME 구조



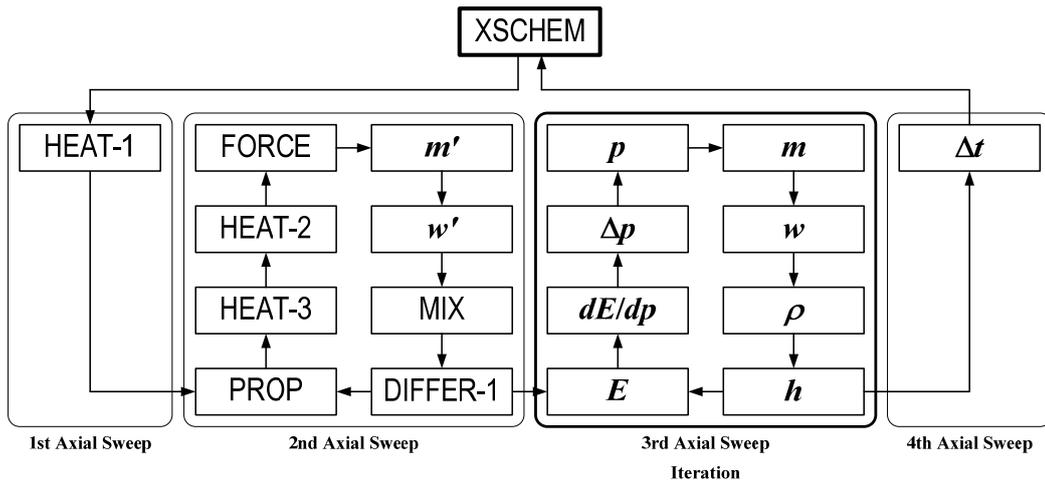


그림 2.8 MATRAScheme 구조

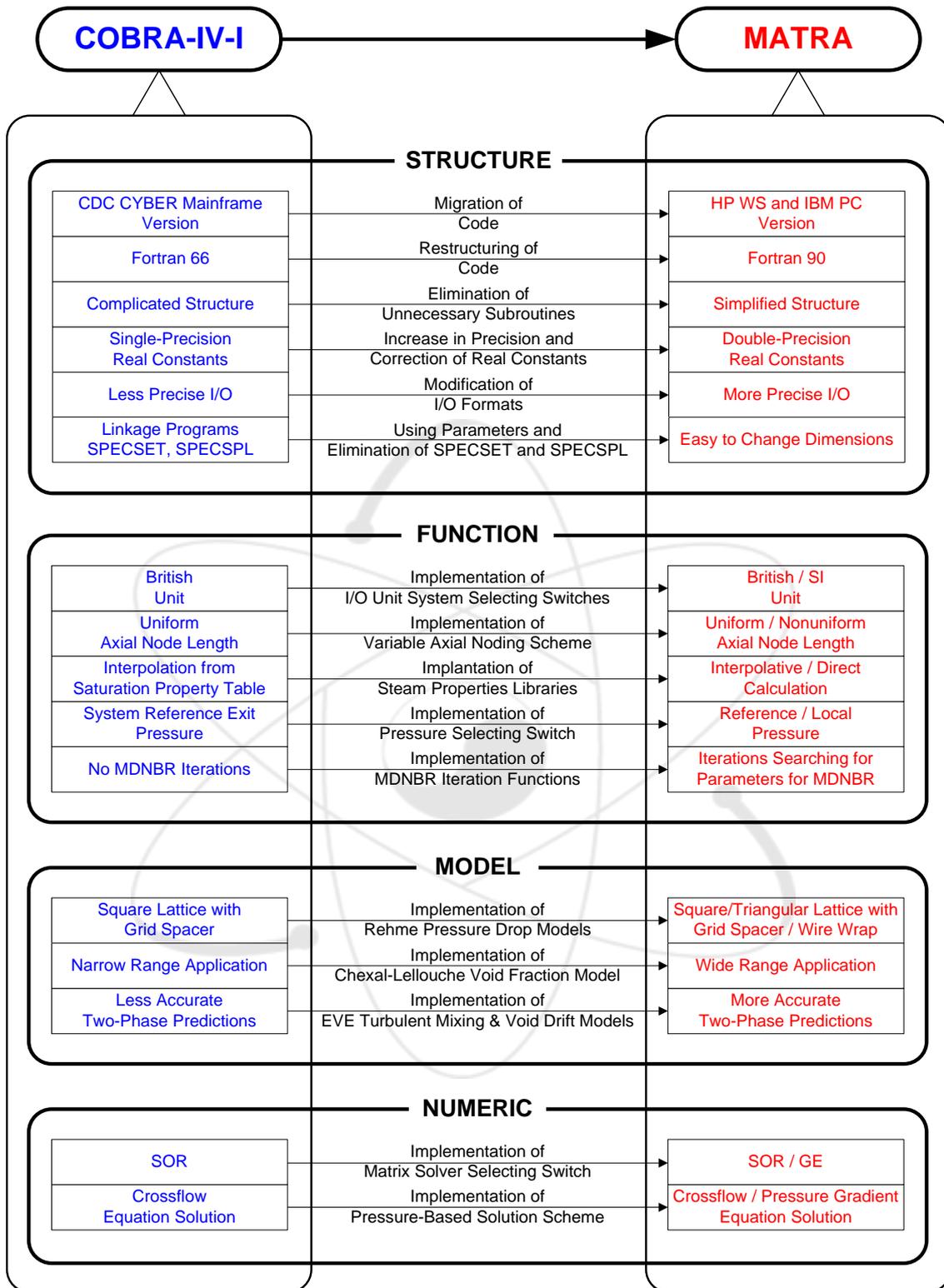


그림 2.9 MATRA 코드와 COBRA-IV-I 코드 특징 비교

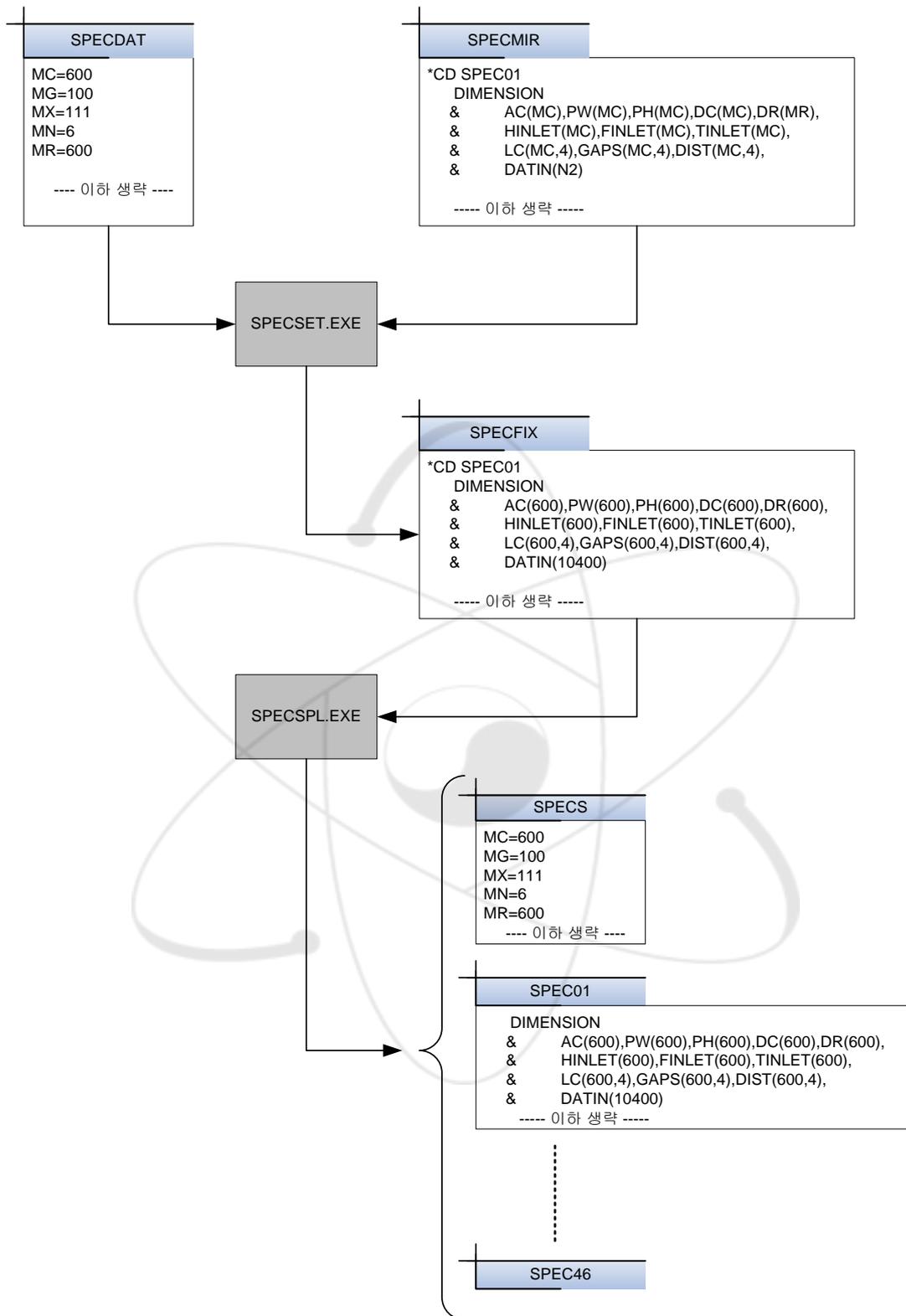


그림 2.10 COBRA-IV-I 코드 배열 크기 설정 방법

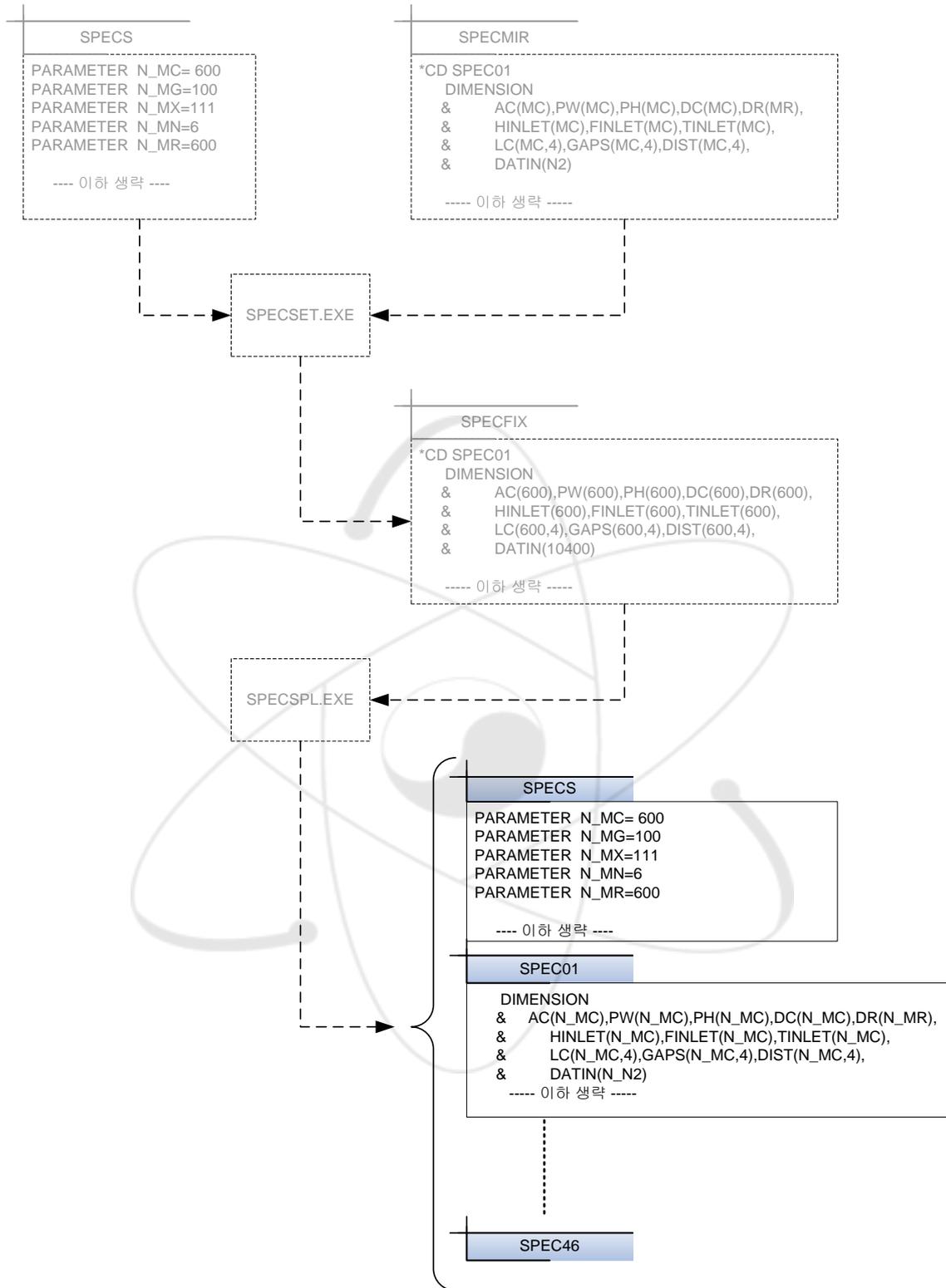


그림 2.11 MATRA 코드의 배열 크기 설정 방법 (점선 부분과 흐린 글자가 삭제된 부분임)

### III. MATRA 코드 검증 계산

#### III.1. CNEN 4x4 집합체 유동분포 자료

##### III.1.1 개요

본 실험 자료는 Studsvik Laboratory에서 수행한 비가열 4x4 봉다발 집합체에서의 부수로별 축방향 속도 분포를 측정한 자료[5]이다.

##### III.1.2. 실험 장치

실험부는 길이가 55.12" 외경이 0.593"의 봉들을 0.760" 간격으로 설치한 4x4 봉다발 집합체이다. 집합체의 횡단면과 MATRA 코드의 부수로 입력 모형을 그림 3.1에 나타냈다.

봉다발 집합체 한면의 길이 = 3.156"

봉 개수 = 16

봉 외경 = 0.593"

봉 길이 = 55.12"

봉과 봉 중심간 거리 = 0.760"

봉과 봉 사이 간극 =  $0.760 - 0.593 = 0.167$ "

봉과 집합체 벽면 사이의 간극 =  $\frac{3.156 - (3 \times 0.760 + 0.593)}{2} = 0.1415$ "

봉다발 등가 직경 =  $\frac{4 \times (3.156^2 - (4 - \pi) \times 0.438^2) - 16 \times \pi / 4 \times 0.593^2}{16 \times \pi \times 0.593 + 4 \times 3.156 - 2 \times (4 - \pi) \times 0.438} = 0.590$ "

지지격자 수 = 1

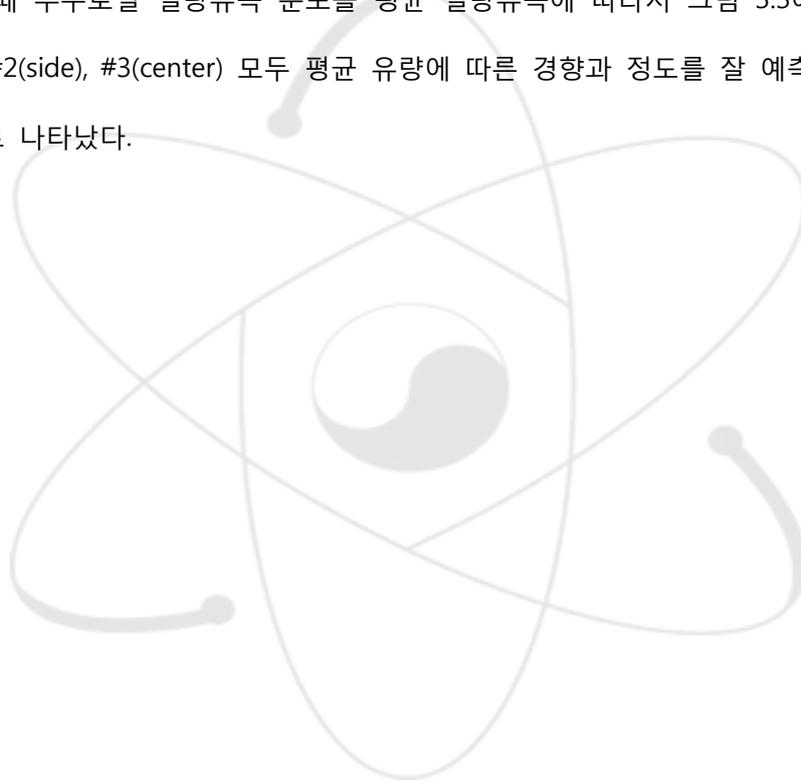
지지격자 상대 위치 = 0.5

지지격자 압력손실계수 = 0.3

##### III.1.3 분석 결과

CNEN-Studsvik 실험자료 중 5가지 유량에 대해서 MATRA 코드 해석을 수행했다. 부록에

TDC 값이 0.02이고 집합체 평균 질량 유속이 1.9 Mlbm/hr-ft<sup>2</sup> 인 경우의 MATRA 코드 입력을 수록했다. TDC 값을 0.005와 0.02로 바꿔가면서 5가지 유량(0.46,0.96,1.9,2.8,3.8Mlbm/hr-ft<sup>2</sup>)의 실험 자료에 대해서 MATRA 코드 해석을 수행하고, corner 에 위치한 부수로 #1의 축방향 질량 유속을 실험 결과, CNEN의 예측 결과, 그리고 THINC-IV 코드 해석 결과와 함께 그림 3.2에 비교했다. TDC 값이 0.005일 때보다 0.02 일 때 MATRA 코드 해석결과와 실험결과와 잘 일치했다. 이것은 난류 혼합 인자가 증가할수록 부수로간의 에너지 및 운동량의 혼합이 많이 발생하여 각 부수로의 열수력적 특성이 균일해지면서 부수로별 유량 변화량이 줄어들기 때문이다. TDC 값을 0.02로 사용할 때 부수로별 질량유속 분포를 평균 질량유속에 따라서 그림 3.3에 나타냈다. 부수로 #1(corner), #2(side), #3(center) 모두 평균 유량에 따른 경향과 정도를 잘 예측하고 실험결과와 일치하는 것으로 나타났다.



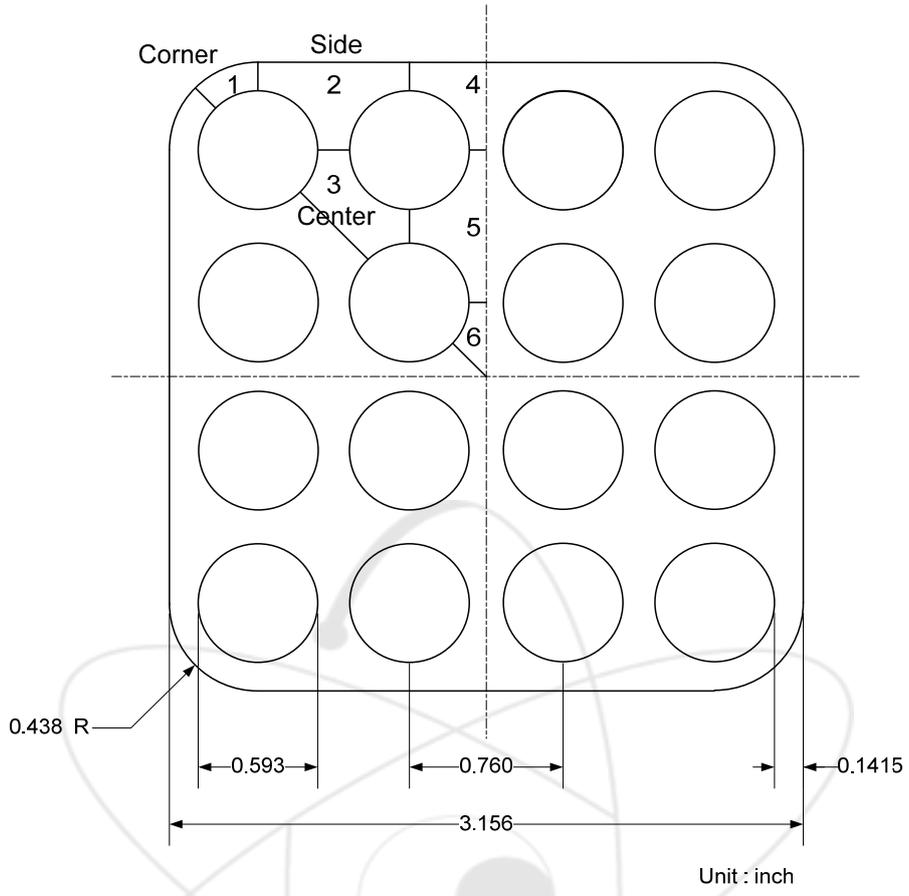


그림 3.1 CNEN-Studsvik 4×4 봉다발 집합체 형상 및 부수로 해석 모형

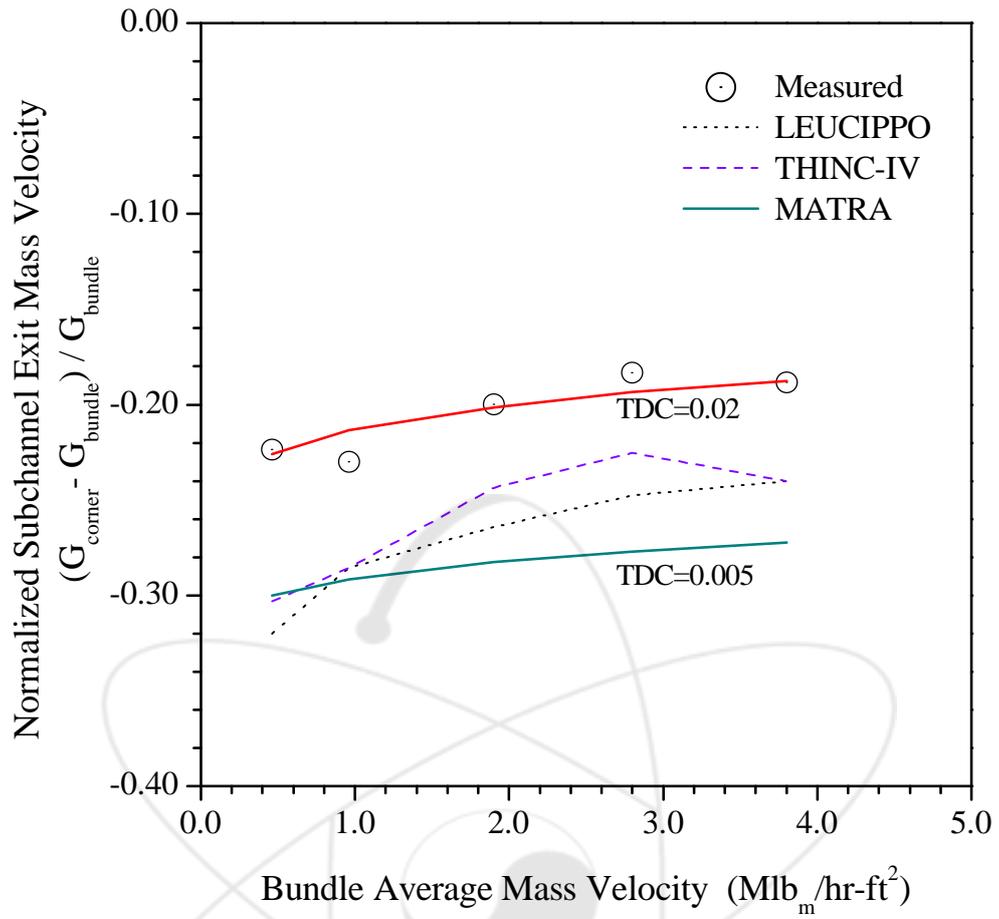


그림 3.2 부수로 #1(corner)의 출구 질량유속 비교

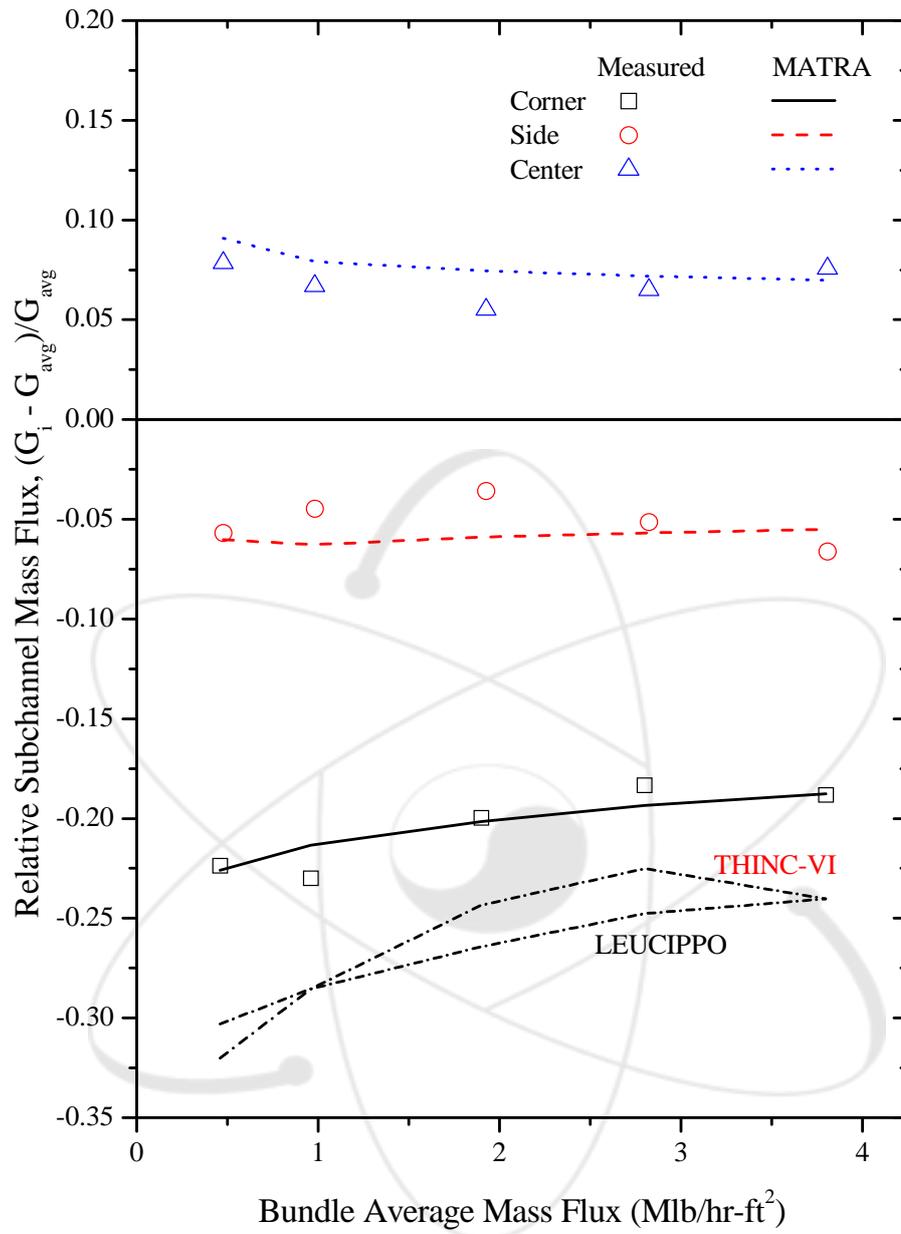


그림 3.3 부수로별 출구 질량유속 분포 해석 결과

## III.2. CU 4x4 집합체 유동 및 엔탈피 분포 자료

### III.2.1 개요

Columbia대학에서 수행된 4x4 봉다발 집합체 부수로 출구에서의 질량유속 및 엔탈피 측정 실험결과[6]를 MATRA 코드를 이용하여 분석했다. MATRA코드의 정확도를 높이기 위해서 MATRA 코드의 계산 결과에 영향을 미치는 인자들의 값을 변화시켜가면서 계산한 결과, 난류 혼합 인자와 난류 혼합 모형이 해석결과에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 부수로 출구 질량유속 변화량에 대한 MATRA 코드의 예측오차는 과냉조건에서 5%, 체적비등조건에서 -25~+5%로 나타났다. 부수로 출구 엔탈피 변화량에 대한 MATRA 코드의 예측 오차는 -20~+5%로 나타났다.

### III.2.2 실험장치

본 계산서에서 MATRA 코드의 해석 대상은 Columbia 대학에서 수행된 4x4 봉다발 집합체의 부수로 출구 질량유속 및 엔탈피 측정 실험결과이다. 이 실험은 전형적인 경수로 집합체와 유사한 기하형태를 가진 4x4 사각형 배열 봉다발 집합체에서 수행된 것으로, 여러 압력, 질량유속, 열유속, 그리고 입구 엔탈피 조건에서 고온 내부 부수로와 저온 내부 부수로의 출구 질량유속 및 엔탈피 분포를 측정된 실험이다. 실험에 관한 제반 사항들은 다음과 같다.

#### (1) 실험부

실험부는 4x4 봉다발 집합체이며, 집합체의 기하형태는 전형적인 경수로 핵연료집합체와 비슷하게 제작되었다. 봉다발 집합체의 횡단면은 2.383"x2.383"의 정사각형이고 16개의 가열봉들이 피치 0.555"의 4x4의 사각형 배열을 이룬다. 가열봉은 직경 0.422"의 스텐레스-347 튜브이다. 그림 3.4와 표 3.1에 봉다발 집합체 횡단면의 모양과 치수를 나타냈다. 봉다발 집합체의 주요한 치수는 다음과 같다:

집합체 내부 한면의 길이 = 2.383"  
봉의 외경 = 0.422"  
봉의 중심간 거리 = 0.555"  
봉과 봉 사이의 간극 = 0.133"  
봉과 집합체 벽면 사이의 간극 = 0.148"  
봉다발의 등가 직경 = 0.448"

집합체의 16개 가열봉 중에서, 왼쪽 8개와 오른쪽 8개 가열봉들의 열유속이 서로 달라서 횡 방향으로 불균일한 열유속분포를 갖는다. 왼쪽 8개 가열봉들의 열유속은 평균 열유속보다 높고 (Hotter/Average=1.08), 오른쪽 8개 가열봉들의 열유속은 평균 열유속보다 낮다 (Colder/Average=0.92). 가열봉의 열유속 차이는 가열봉 튜브 벽면 두께를 다르게 제작하여 조절했다. 가열길이는 60"이며 축방향으로 균일한 열유속을 갖는다.

가열 길이 = 60"  
열유속 분포 Hotter/Average = 1.08  
열유속 분포 Colder/Average = 0.92  
열유속 분포 Colder/Hotter = 0.86

봉과 봉 사이의 간격을 유지하기 위한 지지격자는 축-방향으로 가열길이 끝부분 7" 지점부터 10" 간격으로 6개가 설치되었다. 각 지지격자는 길이가 짧고 속이 빈 원형 튜브들을 용접한 것이며, 각 튜브 내부에 설치된 3개의 핀으로 가열봉을 지지한다. 참고문헌 [6]에서 지지격자의 압력 손실계수는 보고되지 않았다.

## (2) 실험변수 및 실험 조건

실험변수는 그림 3.4의 5번 부수로와 11번 부수로의 출구 질량유속과 출구 엔탈피, 그리고 집합체 출구 압력이다. 출구 엔탈피는 과냉조건에서는 출구 온도로부터 직접 계산되었고, 비등조

건에서는 열평형법에 의해 계산되었다. 부수로 5번과 11번의 출구부분에 부수로를 둘러싼 가열봉들 사이에 0.02" 두께의 날(vane)을 용접하여 인접한 부수로와 격리하고, 각 부수로의 질량유속과 온도를 측정했다. 출구 질량유속은 터빈질량유속계로 측정되었고, 온도는 저항온도계로 측정되었다. 출구 질량유속 변화량 대 평균 질량유속  $(G_i - G_{avg})/G_{avg}$ 의 측정 오차는  $\pm 2\%$ 이다. 출구 엔탈피 변화량 대 평균 출구 엔탈피  $(h_i - h_{avg})/h_{avg}$ 의 측정 오차는 과냉조건에서  $\pm 1\%$ 이고, 비등조건에서  $\pm 3\%$ 로 나타났다. 여러 압력과 열유속 조건에서 입구 엔탈피를 변화시키며 일련의 실험을 수행했다. 실험 조건의 범위를 표 3.2에 나타내었다.

### III.2.3 분석 결과

#### (1) MATRA 코드 입력자료

MATRA 코드를 사용하여 Columbia대학에서 수행한 44 봉다발 집합체의 부수로 출구 질량유속 및 엔탈피 측정 실험결과를 해석했다. MATRA 코드의 해석 모형은, 15개의 부수로들로 구성된 1/2 집합체 봉다발이고, 가열길이 60"를 60개의 축방향 노드들로 균일하게 나누었다. MATRA 코드의 부수로 해석 모형은 그림 3.4에서 집합체 윗부분의 1/2 부분이다. 참고문헌 [2]에서 실험결과를 명확하게 비교 평가할 수 있는 자료가 실험 case 1~4이므로, 본 계산서에서도 실험 조건 1~4에 대해서 MATRA 코드 입력자료를 작성하고 해석했다. 입출력 자료에 사용된 단위는 British 단위이고, Levi의 과냉비등 모형과, Chexal-Lellouche의 기포 모형을 사용했고, 이상유동 마찰손실 배수로는 Armand 모형을 사용했다. EVVD (Equivalent Volume Exchange & Void Drift Model) 난류 혼합 모형의 경우, CVDB와 CVDA는 각각 1.5와 5.0을 사용했고, 난류 혼합 인자의 값은 0.0, 0.005, 그리고 0.01을 사용했다. EM (Equivalent Mass Exchange Model) 난류 혼합 모형의 경우, 난류 혼합 인자의 값은 0.005와 0.01을 사용했다. 지지격자의 압력손실계수는 참고문헌에서 명시되지 않았으므로, 일반적인 경수로 지지격자의 압력손실계수보다 큰 값인 1.0의 값을 사용했고, 난류 유동마찰계수는 McAdams 상관식을 사용했다. 여러 실험식과 경험 상수들을 포함한 계산 변수들의 자세한 입력 자료 작성 근거와 EVVD 난류 혼합 모형과  $\beta=0.005$ 일 때의 MATRA 코드

입력 자료를 부록에 예시했다.

## (2) 분석 결과 및 논의

Columbia 대학의 출구 유동분포 및 엔탈피 분포 실험 중 단상유동 실험자료에 대해서 MATRA 코드 해석을 수행하고 실험결과 중 단상유동 영역의 자료와 비교했다. 실험 조건 1과 4는 높은 질량유속 조건이고 압력은 서로 다르다. 실험 조건 2와 3은 실험 조건 1과 4에 비해 상대적으로 낮은 질량유속 조건이며 압력은 같고 실험 조건 3의 열유속이 실험 조건 2보다 높다. 횡방향으로 비균일한 열유속을 갖는 봉다발 집합체에서 과냉 비등의 영향으로 부수로에 따라 질량유속 및 엔탈피 변화가 크게 나타는 것을 알 수 있었다. 모든 실험 조건에서 저온 내부 부수로인 11번 부수로의 엔탈피는 고온 내부 부수로인 5번 부수로의 엔탈피보다는 작지만, 봉다발 평균 엔탈피보다는 크게 나타났다(그림 3.5). 그림 3.6 ~ 그림 3.8는 출구 질량유속의 변화를 출구 건도에 대해서 나타낸 것이다. 과냉조건에서 고온 내부 부수로인 5번 부수로에서 과냉비등이 먼저 시작되고 부수로 내의 유체 부피와 마찰압력 손실이 증가하면서 질량유속이 감소하게 된다. 11번 부수로의 질량유속은 일시적으로 증가하게 되나, 곧 11번 부수로에서도 과냉 비등이 시작되면서 11번 부수로의 질량유속도 감소하게 된다. 실험 조건 1과 4를 비교하면, 질량유속과 열유속이 같을 때, 압력이 낮은 실험 조건 1에서 질량유속의 변화가 큰 것으로 나타났다. 실험 조건 2와 3에서, 압력과 질량유속이 같을 때, 열유속이 큰 실험 조건 3에서 질량유속 변화가 크게 나타났다. 실험 조건 3과 4에서, 압력과 열유속이 같을 때, 질량유속이 작은 실험 조건 3에서 질량유속 변화가 크게 나타났다. 과냉조건에서 질량유속의 변화는 열유속이 높을수록, 압력이 낮을수록, 질량유속이 작을수록 크게 나타나는데, 이것은 압력이 감소하고 열유속이 증가하고 질량유속이 감소함에 따라 과냉비등이 증가하고 이상유동 마찰압력손실이 증가하기 때문이다. 그림 3.6은 EM 난류 혼합 모형을 사용한 MATRA 코드 해석결과이고, 그림 3.7은 EVVD 난류 혼합 모형을 사용한 MATRA코드 해석결과이다. 그림 3.6과 그림 3.7에서 난류 혼합 모형에 관계없이 난류 혼합 인자가 증가할수록 부수로 유량 변화량이 줄어드는 것으로 나타났다. 이것은 난류 혼합 인자

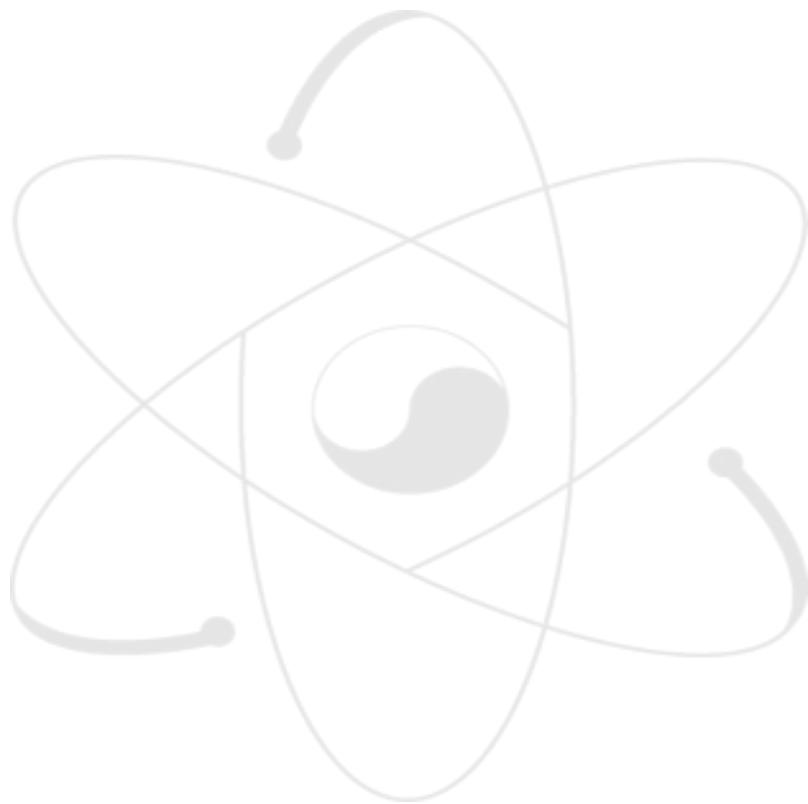
가 질량유속의 변화를 의미하진 않지만, 난류 혼합 인자가 증가할수록 부수로간의 에너지 및 운동량의 혼합이 많이 발생하고 각 부수로의 열수력적 특성이 균일해지면서 질량유속에도 영향을 준 것이다. 출구 질량유속에 대한 난류 혼합 인자의 영향은 EVVD모형보다 EM 난류 혼합 모형을 사용했을 경우에 크게 나타났다(그림 3.6, 4). 난류 혼합 인자가 동일할 경우, 과냉 조건에서 EM 난류 혼합 모형과 EVVD 난류 혼합 모형의 MATRA 코드 해석결과가 거의 차이를 보이지 않았다. 실험조건 1과 4에서 EM 모형의 예측 결과가 EVVD 모형보다 근소하게 실험결과와 일치했다(그림 3.8). 그림 3.9 ~ 3.10은 부수로 출구 엔탈피의 변화량을 출구 건도에 대해서 나타낸 것이다. 모든 경우에 난류 혼합 인자가 증가할수록 출구 엔탈피 변화량을 작게 예측하는 것을 알 수 있다(그림 3.9, 3.10). 또, 난류 혼합 인자가 출구 엔탈피 분포에 미치는 영향이 질량유속 분포에 미치는 영향보다 큰 것으로 나타났다. 이러한 현상은 난류 혼합 인자는 인접 부수로 간에 난류에 의해 동일하게 교환되는 질량의 척도이고, 부수로 내의 질량유속의 변화가 아니라 에너지 및 운동량의 혼합 정도에 관계되기 때문이다. 난류 혼합 인자가 동일할 때, 단상유동 영역에서는 EVVD 모형이 부수로의 밀도에 영향을 미치며 EM 난류 혼합 모형과 EVVD 난류 혼합 모형의 해석 결과에서 약간의 차이가 나타났으나 어느 모형이 더 잘 예측하는지 평가하기는 힘들다(그림 3.11).

Columbia 대학에서 수행한 4×4 봉다발 집합체 출구에서의 유속 및 엔탈피 분포 측정 실험 중 단상영역 실험결과에 대해서 MATRA 코드를 이용하여 해석한 결과는 다음과 같다.

1. 횡방향에 대해서 비균일 열유속 분포를 가지는 4×4사각형 배열 봉다발 집합체에서 MATRA 코드는 출구 건도에 대한 출구 질량유속을 단상유동 조건에서 5% 오차 이내에서 잘 예측했다.
2. 엔탈피 예측에서는 MATRA 코드 해석결과가 실험결과의 경향과 비슷하지만, -20~+5%의 오차를 가지며 대체로 엔탈피 변화량을 실험결과보다 작게 예측했다.
3. MATRA 코드의 정확도를 높이기 위해서 MATRA 코드의 계산 결과에 영향을 미치는 인자들의 값을 변화시켜 가면서 계산한 결과, 난류 혼합 인자와 난류 혼합 모형이 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

이상의 결론으로부터, MATRA 코드를 노심 열수력 해석에 사용할 때, 난류 혼합 인자 및 난류

혼합 모형 등의 해석결과에 영향을 미치는 인자를 찾아내고, 실험 조건에 대한 인자들에 대한 최적의 값을 이용하는 것이 매우 중요하다는 것을 알 수 있었다.



**표 3.1 부수로별 주요 치수**

Subchannel Type		Interior	Edge	Corner	Total
Number	N	9	12	4	25
Flow Area (in <sup>2</sup> )	Af	0.16816	0.12931	0.09391	3.44082
Wetted Perimeter (in)	Pw	1.32575	1.21788	1.04944	30.74403
Heated Perimeter (in)	Ph	1.32575	0.66288	0.33144	21.21203
Equivalent Diameter (in)	De	0.50736	0.42471	0.35796	0.44767

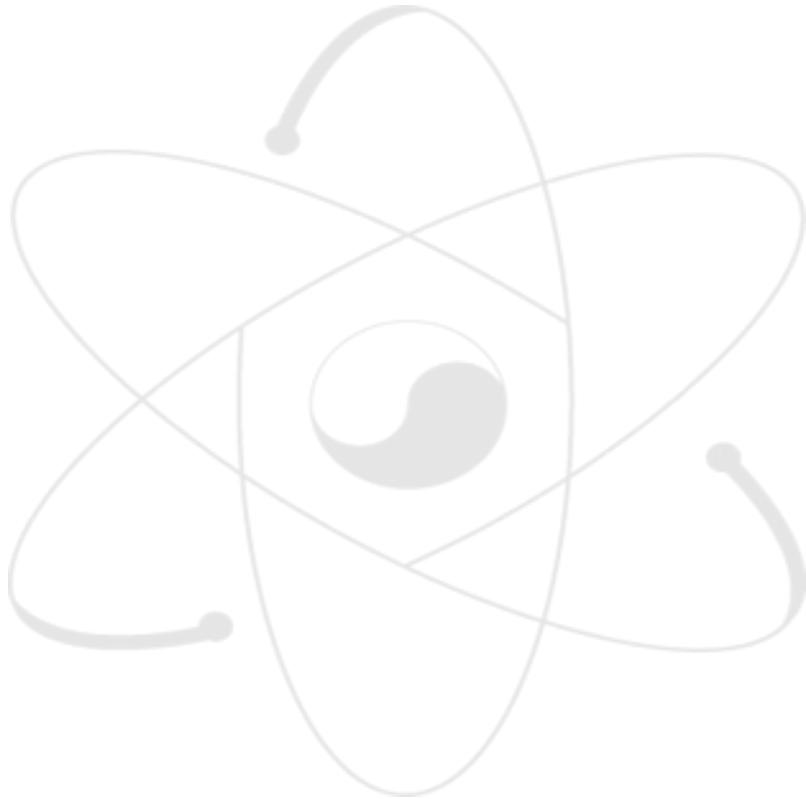
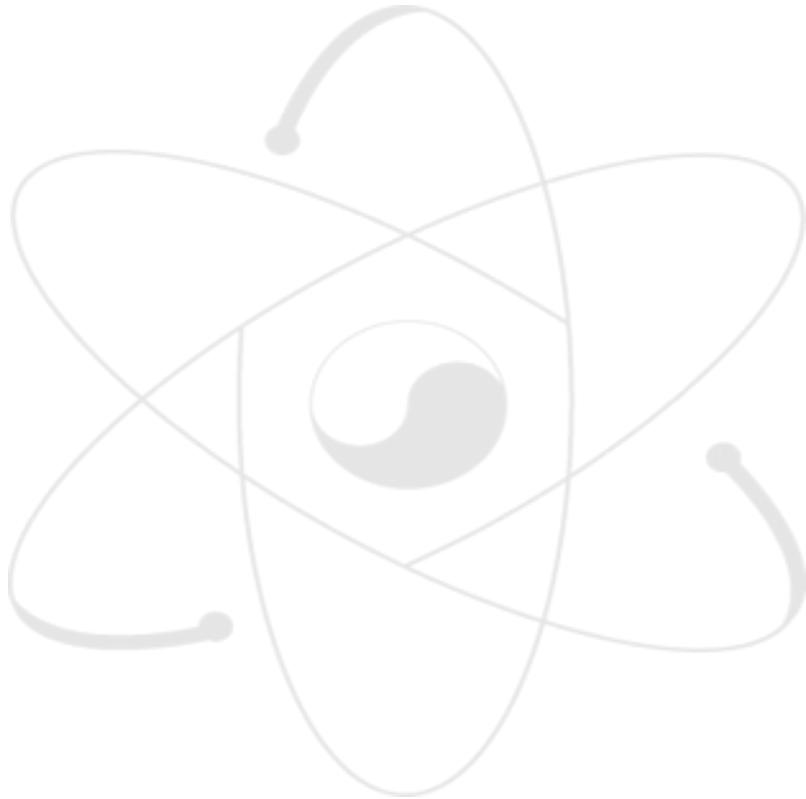


표 3.2 실험 조건

압력	500, 1200 psi
평균 질량유속	1, 2, 3106 lb/hr-ft <sup>2</sup>
입구 온도	172, 484 F
평균 열유속	0.384, 0.580, 0.967 MBtu/hr-ft <sup>2</sup>
횡방향 열유속비	Colder/Hotter = 0.86 Colder/Average = 0.92 Hotter/Average = 1.08



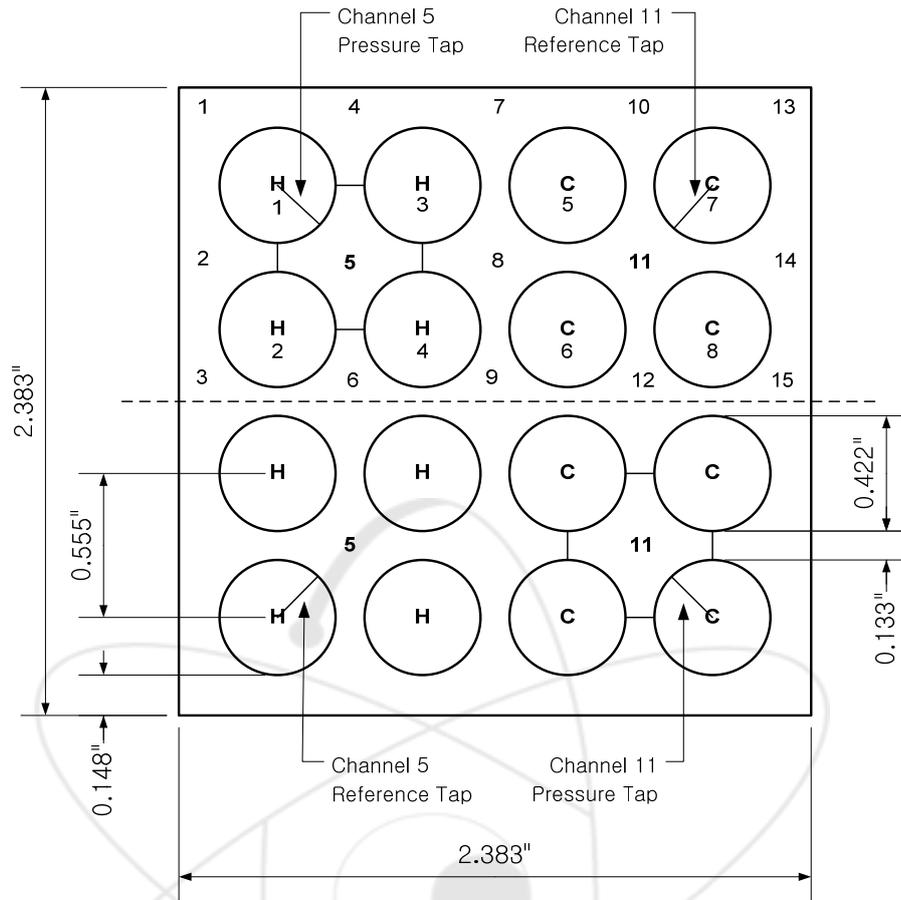


그림 3.4 4×4 봉다발 집합체 횡단면 및 부수로 모형

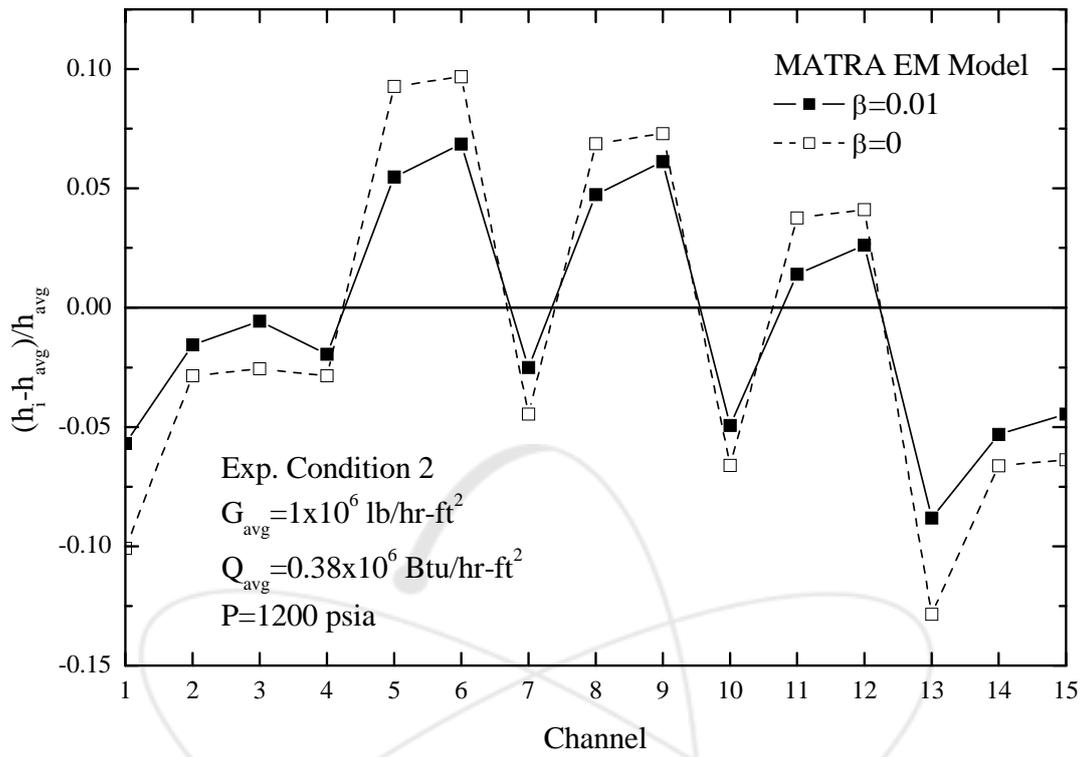
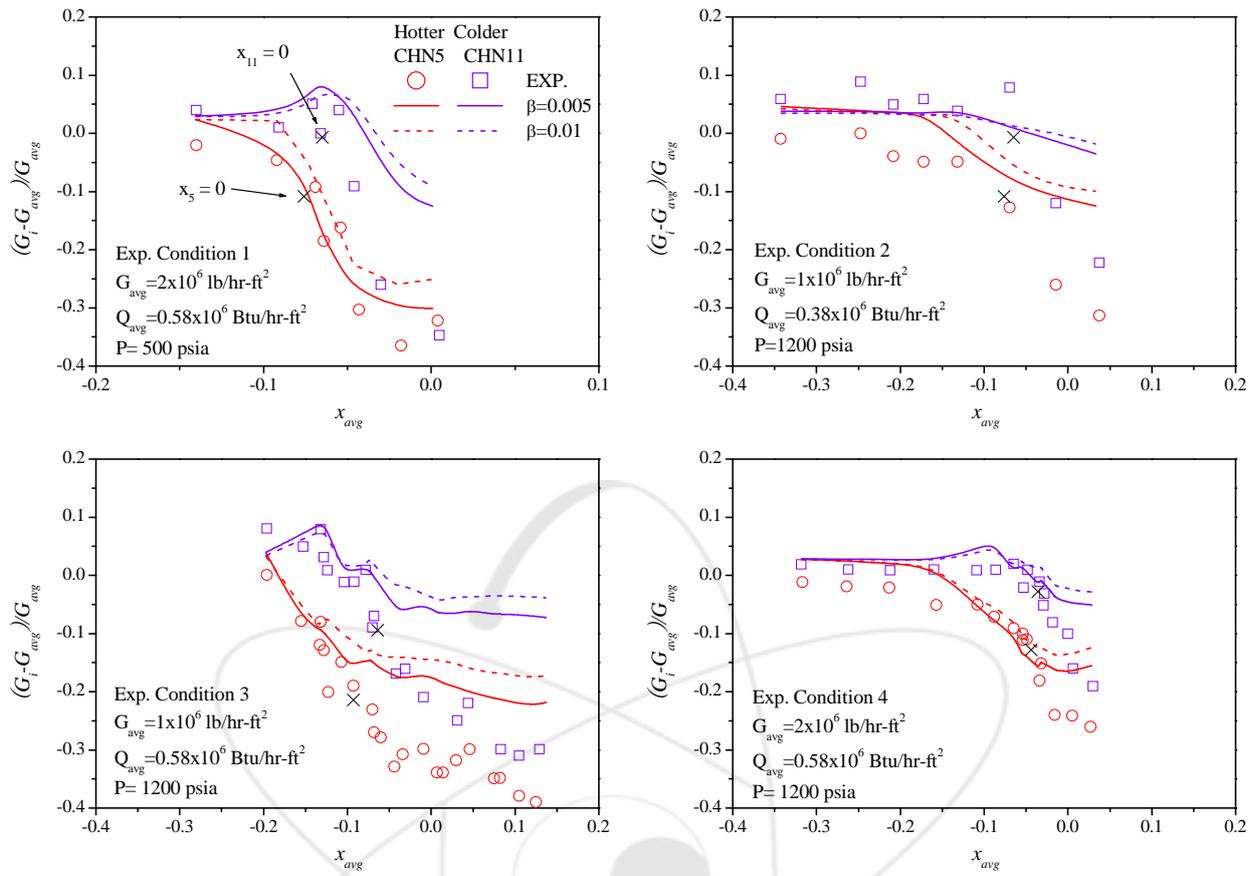
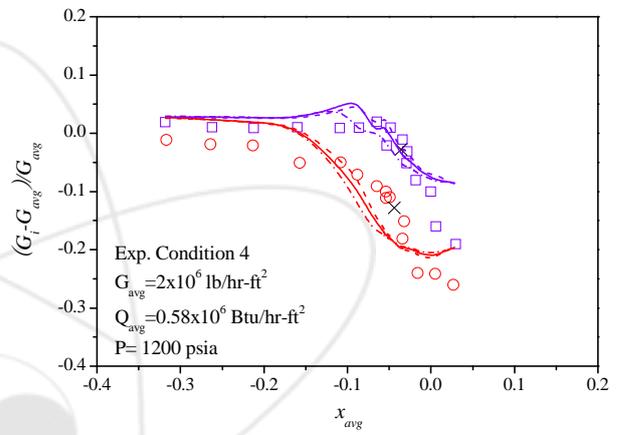
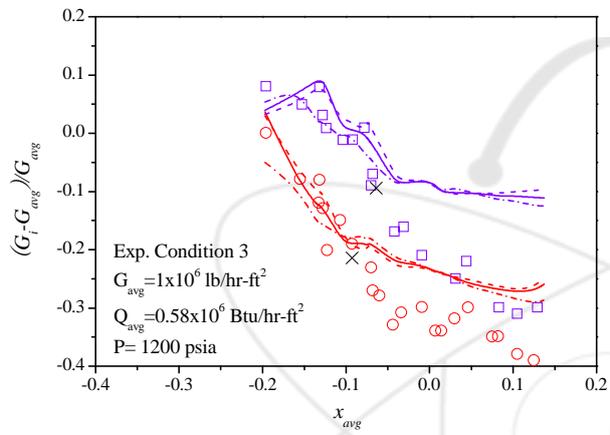
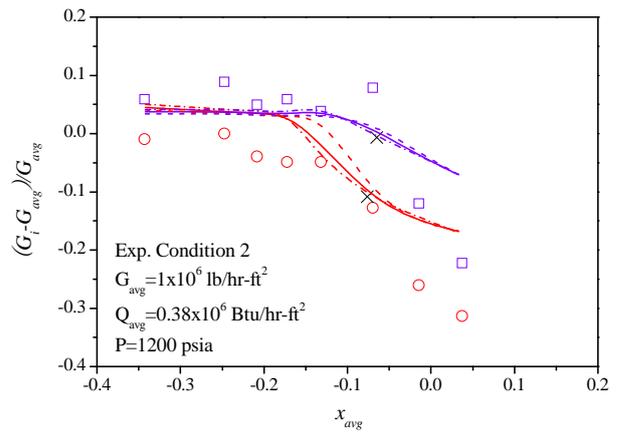
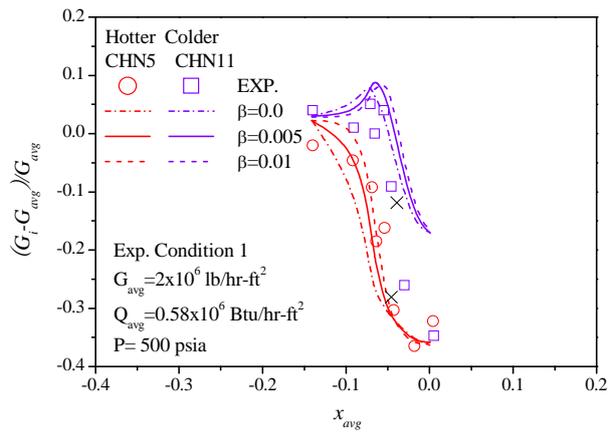


그림 3.5 EM 난류 혼합 모형을 사용한 MATRA 코드의 부수로별 엔탈피 분포 해석결과  
 (실험 조건 2)



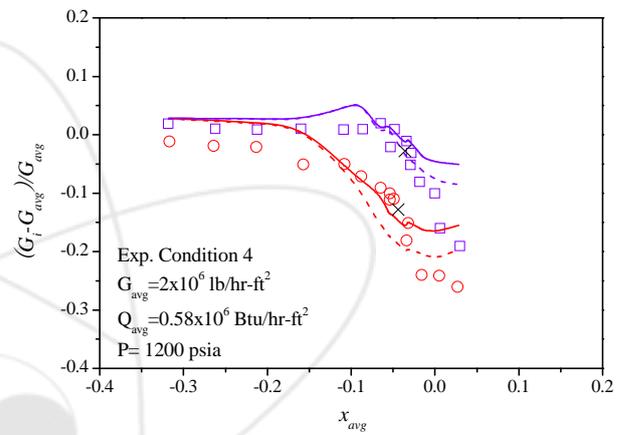
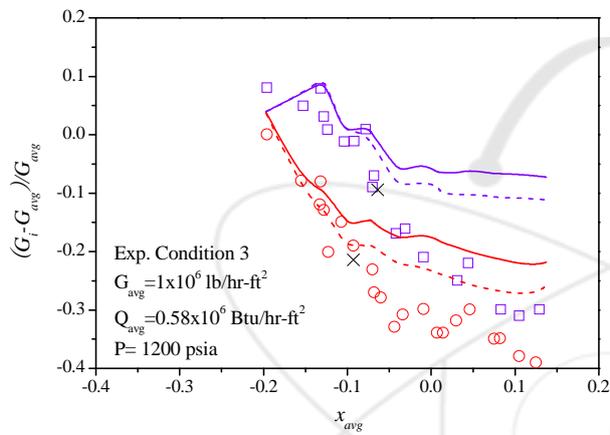
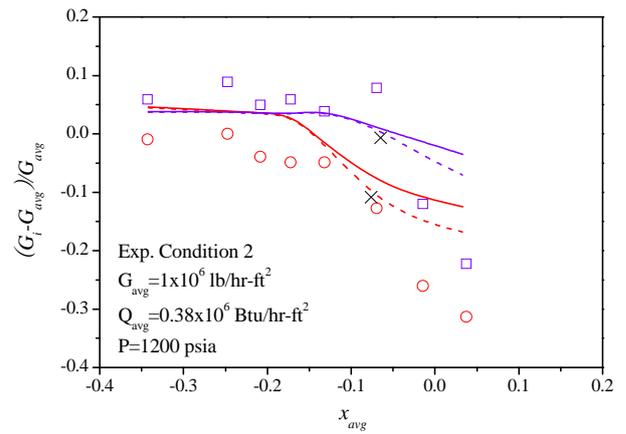
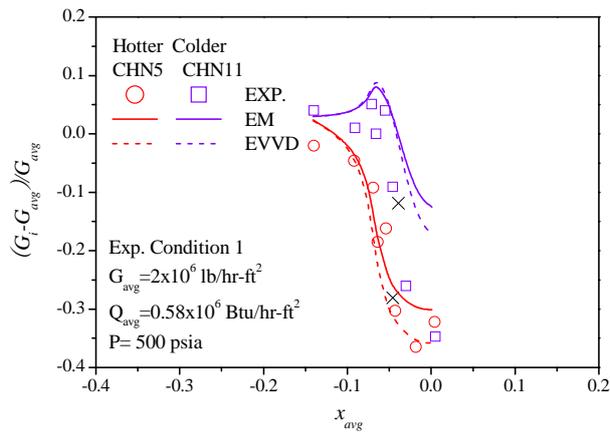
Flow redistribution,  $\beta = \{0.005, 0.01\}$ , EM

그림 3.6 EM 난류 혼합 모형을 사용한 출구 질량유속 분포 ( $\beta = 0.005, 0.01$ )



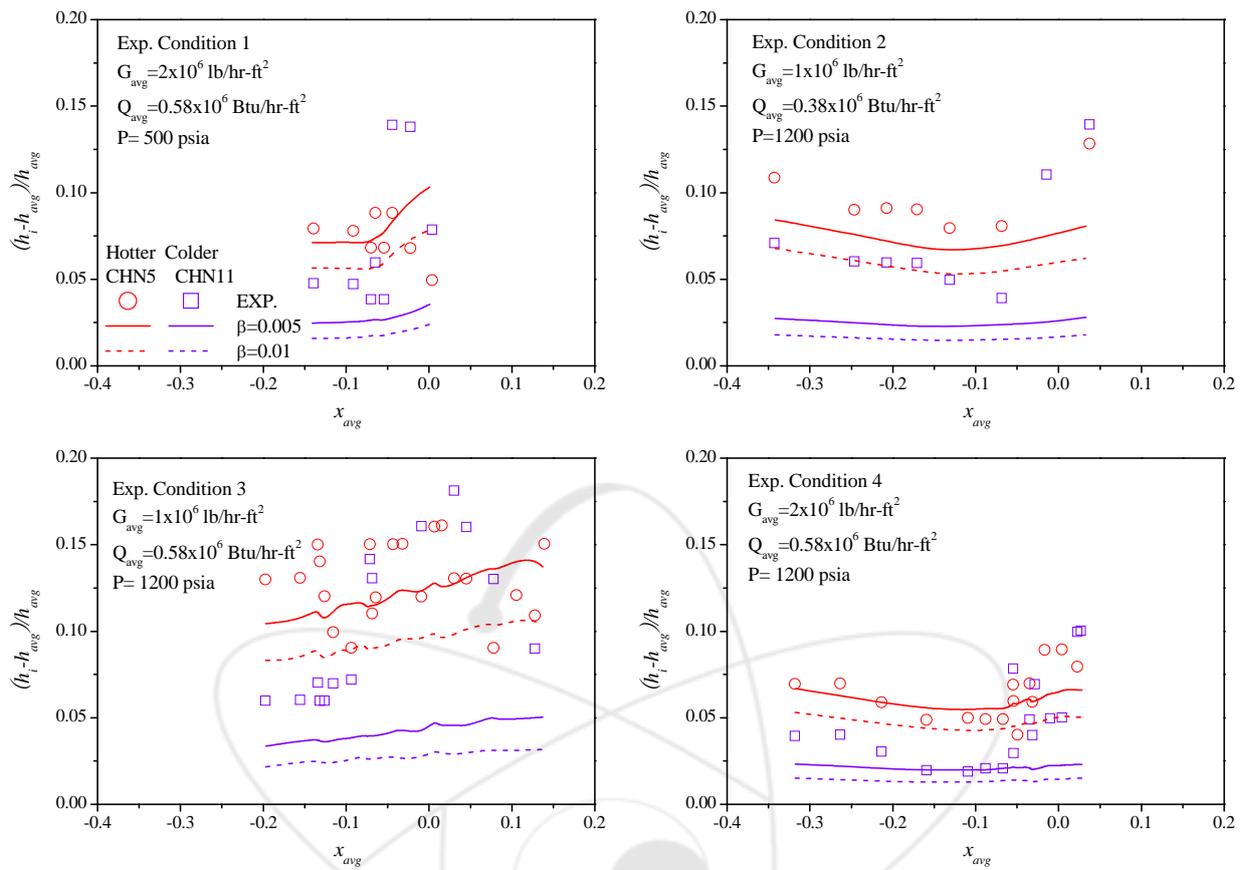
Flow redistribution,  $\beta = \{0, 0.005, 0.1\}$ , EVVD

그림 3.7 EVVD 난류 혼합 모형을 사용한 출구 질량유속 분포 ( $\beta = 0.0, 0.005, 0.01$ )



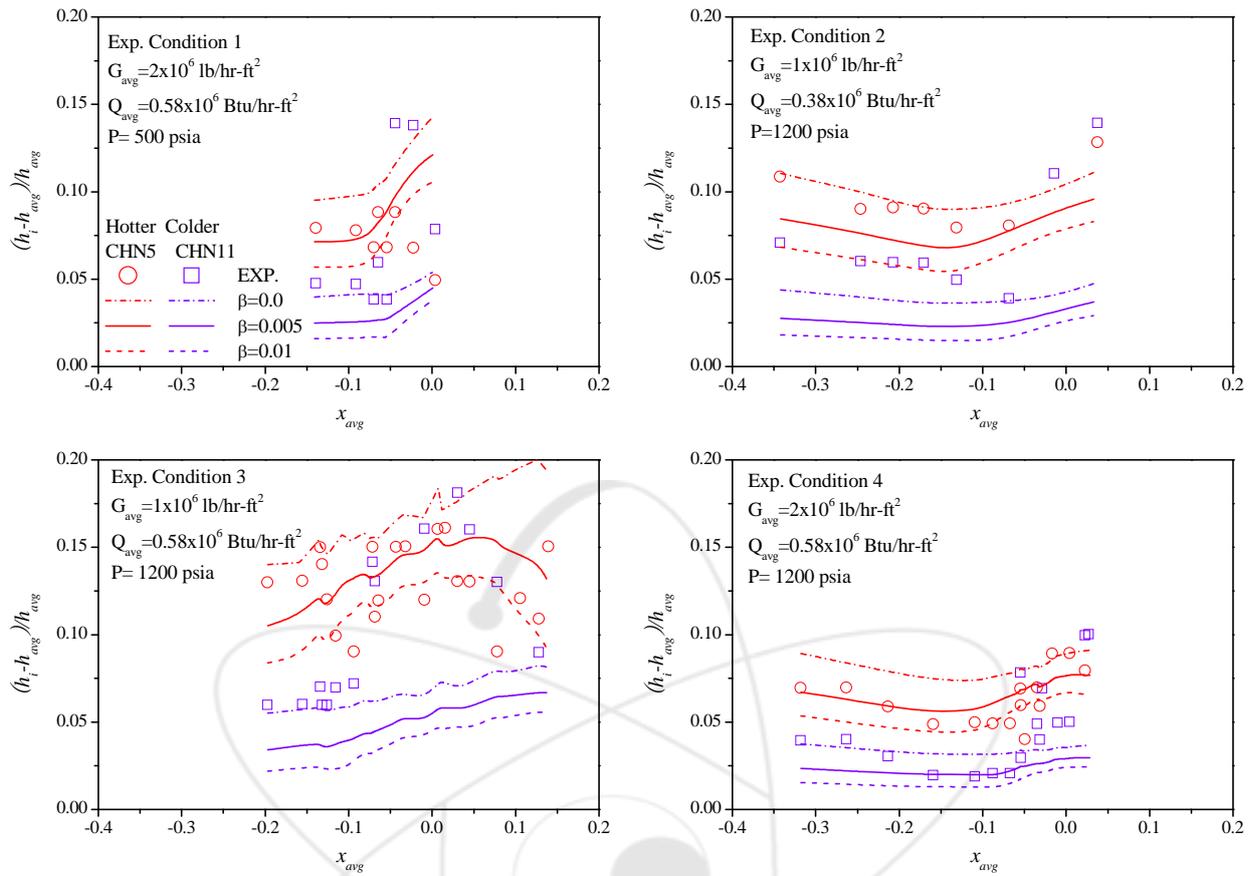
Flow redistribution,  $\beta = 0.005$ , EM & EVVD

그림 3.8 출구 질량유속 분포 - EM 난류 혼합 모형과 EVVD 난류 혼합 모형 (=0.005)



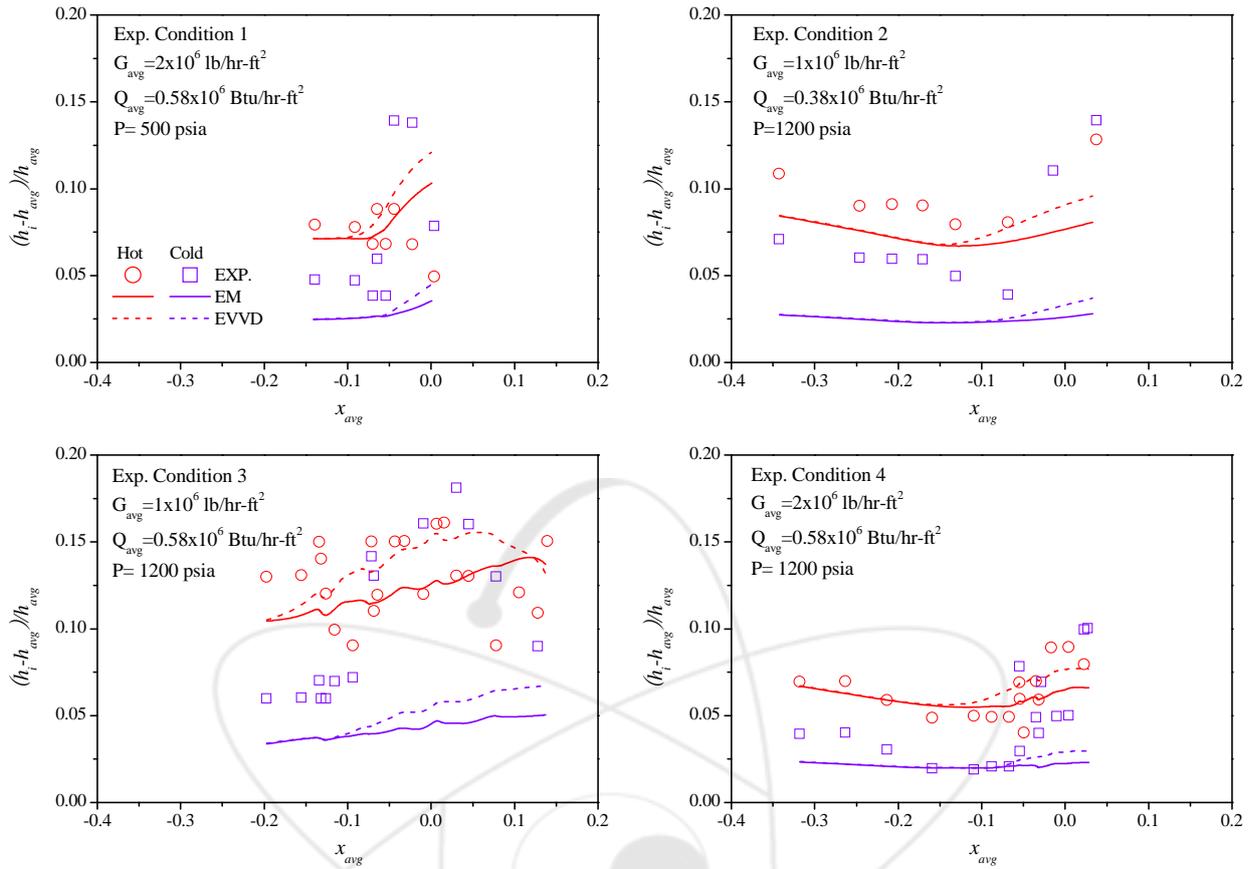
Enthalpy redistribution,  $\beta = \{0.005, 0.01\}$ , EM

그림 3.9 EM 난류 혼합 모형을 사용한 출구 엔탈피 분포 ( $\beta = 0.005, 0.01$ )



Enthalpy redistribution,  $\beta = \{0.0, 0.005, 0.01\}$ , EVVD

그림 3.10 EVVD 난류 혼합 모형을 사용한 출구 엔탈피 분포 ( $\beta = 0.005, 0.01$ )



Enthalpy redistribution,  $\beta = 0.005$ , EM & EVVD

그림 3.11 EM모형과 EVVD모형을 사용한 출구 엔탈피 분포 ( $\beta = 0.005$ )

### III.3. PNL 2x6 집합체 저유속 유동분포 자료

#### III.3.1개요

저압, 저유량 조건에서 부수로 코드들은 잘 수렴하지 못하는 경향이 있다. 이는 부수로 코드의 axial direction dominant 가정을 적용할 수 없는 경우가 이 조건에서 발생하기 때문이다. 저압, 저유량 조건 중에서도 혼합대류 (mixed convection)<sup>2</sup> 조건에서의 부수로 온도분포와 유량분포에 대한 일련의 실험들이 LMFBR의 노심열수력 특성을 평가하기 위하여 수행되었다. 이들 실험 중 하나인 PNL 2X6 시험<sup>[7]</sup>은 혼합대류조건에서의 온도, 유동장의 분포 예측성능을 평가하기 위한 실험이다.

PNL 2X6 실험은 혼합대류조건에서 온도구배가 속도장에 미치는 영향을 평가하기 위하여 수행되었다. 혼합대류조건을 평가하기 위한 무차원수  $Gr/Re^2$  을 도입했고 각 부수로의 엔탈피 증가분이 동일하도록 부수로의 면적을 설계했다. 12개의 가열봉은 6개씩 두 개조로 구성하여 비균일 출력상황을 모사할 수 있다. 속도장은 LDV를 사용하여 유동방향으로 9개의 가시창을 통해 측정된다. 속도장 측정에 사용한 동일한 시창에 7개의 열전대를 장착한 모듈을 사용하여 7개의 부수로 중심의 온도를 동시에 측정한다.

PNL 2X6 실험은 강제대류 지배조건과 혼합대류 지배조건에서 축방향으로 발달하는 부수로채널의 온도장과 속도장을 제공한다. MATRA를 사용하여 두 대류조건에서의 온도장과 속도장을 평가했다.

#### III.3.2 시험자료

저압, 저유속 조건에서의 부수로 코드의 예측성능을 평가하기 위하여 PNL 2X6 실험자료를 활용했다. PNL 2X6 실험은 LMFBR의 열혼합 성능을 평가하기 위하여 시작되었으며 부수로해석 코드

---

<sup>2</sup> 혼합대류조건이란 강제순환과 자연순환이 동시에 발생하는 조건이나 펌프와 같은 강제순환조건에서 발생하는 자연대류조건을 의미한다.

의 예측성능을 평가하기 위한 부수로 측정자료들을 제공한다. 실험은 상온, 상압조건에서 수행했고 부수로 형상은 그림 3.12와 같으며 각 부수로의 엔탈피 상승이 동일하도록 면적을 고려했다. 부수로 형상에 대한 자료는 표 3.3에서 제시했다. 연료집합체의 형상은 그림 3.12에서와 같이 시창이 구성되어 있다. PNL에서 수행한 3가지의 실험은 표 3.4에 요약했다. 참고문헌 [8]에 의하면  $Gr/Re^2$ 의 값이 0.05보다 클 경우 혼합대류가 발생하며 자연대류에 의한 영향을 무시할 수 없다. PNL 실험에서는 case 2 가 이와 같은 영역에 속한다.

유체의 속도는 Laser Doppler Anemometer(LDA)를 사용하여 9개의 시창부위에서 측정했고 온도는 유속측정 후 시창부위에 7개의 열전대로 이루어진 모듈을 삽입하여 부수로별 온도를 측정했다. 측정부위는 중앙의 8번에서 14번까지의 부수로에 한정되었다. 속도와 온도측정에 대한 불확실도는 각각  $\pm 0.005$  ft/sec 와  $\pm 1.414$  °F 이다. 봉다발 형태의 유로에서 LDA를 사용한 속도측정은 이 실험이 최초의 시도이다. 보고서에 의하면 경험 미숙과 실제 계측 시스템의 문제로 계획된 5 set의 실험이 3 set에 대해서만 측정가능했으며 그 중 일부 위치에서는 속도를 계측하는데 실패했다고 기술하고 있다.

그림 3.12와 같은 부수로 형상에서 6개씩 한 조로 구성된 가열봉은 실험에 따라 표 3.4와 같은 출력분포를 가지며 1~6번까지가 가열봉 또는 high heat flux 영역이다.

### III.3.3 분석

층류 조건을 모델링하기 위한 저유량 조건에서의 마찰계수,  $64/Re$ 를 사용했다. 지지격자에 대한 손실계수,  $k$ , 값이 문헌상에 없기 때문에 임의값, '1'을 사용했다. 표 3.5는 CASE 3을 기준 실험으로 선택하여 조정한 MATRA 입력값들을 예시했다.

### III.3.4 결과 및 논의

#### (1) CASE 3 – 고유속, forced convection dominant case

6개의 가열봉에만 가열되는 비균일 열유속 상황에서 균일하게 분포한 속도분포는 가열면에서

더 높은 유속으로 편향되었다. 이는 부력에 의해 속도분포가 영향 받은 결과이다. 이러한 경향은 출구쪽으로 가면서 더욱 커진다. 그림 3.13에서 3.15까지 각 부수로별로 높이에 따라 측정자료와 계산결과를 비교했다. 계산결과는 MATRA와 PNL보고서에 수록된 COBRA IV-I의 계산결과이다. 정확한 입력자료가 없기 때문에 MATRA에서는 모르는 변수에 대하여는 기본 모델과 입력값을 이용했다. 계산된 결과는 실험에서 보여주는 온도 기울기에 의한 속도분포의 왜곡현상을 잘 추정하고 있음을 확인했다. COBRA 결과와의 차이는 열입력값, 지지격자의 손실계수, TDC 값과 같은 인자들의 값이 주어지지 않은 것에 기인하는 것으로 추정된다.

Case 3의 경우는 고유속 조건에서 실험한 경우로써 표 3.4에서처럼 출력비율은 1:0 에 각 가열봉당 1.810kW의 출력이 입력되었고, 체적유량은 2.47gpm이고 평균유속은 0.327 ft/sec 이다. 집합체의 온도차이는 31°F 가 발생하고 가장 심각한 열속 불균형 실험조건이다. 입구쪽 즉 1번째 시창에서의 속도분포는 iso 1과 유사하다. 그러나 열속이 가해짐에 따라 이들 속도분포는 온도장의 영향을 받게 되고 3번째 시창부터 균일유속분포에서 비균일분포로 바뀌게 되며 9번째 시창에서는 iso 1에 비교하여 최대 50%의 차이가 발생한다. 이러한 유동장의 비균일은 부력에 전적으로 기인하며 가열면을 따라 유체가 더 많이 흐르는 형태로 유동분포가 재배열되기 때문이다.

## **(2) CASE 1 – 고유속, forced convection dominant case**

그림 3.16에서 3.18까지 각 부수로별로 높이에 따라 측정자료와 계산결과를 비교했다. 9번째 시창에 대해서는 실험자료가 없기 때문에 계산결과를 생략했다. 계산결과는 MATRA와 PNL보고서에 수록된 COBRA IV-I의 계산결과이다. 계산된 결과는 실험에서 보여주는 온도 기울기에 따른 속도분포의 의존을 잘 보여주고 있다. 그러나 열속이 가해지는 영역에서의 최대 유속을 낮게 예측하는 경향이 있다. 이 경향은 전체 부수로의 유량분배에 영향을 주어 저유량에서 실험값보다 예측치가 더 높게 예측했다. MATRA가 COBRA에 비해 열속에 따른 유량 분배의 기울기가 더 완만했다.

### (3) CASE 2 – 저유속, Mixed convection dominant case

그림 3.19에서 3.21까지 각 부수로별로 높이에 따라 측정자료와 계산결과를 비교했다. 9번째 시창 및 7번째 시창의 일부 자료가 없다. 계산결과는 MATRA와 PNL 보고서[7]에 수록된 COBRA IV-I의 계산결과이다. 저유속의 혼합대류 열전달 영역에서 COBRA-IV-I는 음해법(implicit method)으로 수렴하지 않았기 때문에 null-transient로 양해법의 하나인 ACE 방법으로 수렴했다. 그러나 MATRA는 음해법으로 수렴했다. 이러한 차이는 정의된 변수의 정확도를 배정도를 사용했기 때문으로 추정되며 앞서 계산된 문제의 축방향 길이의 1/3크기를 사용하여야 수렴했다. 계산된 결과는 실험값의 경향성을 잘 추정하는 것으로 평가된다.

### (4) 온도분포

실험 자료값과 COBRA 계산과 MATRA 계산의 입구와 출구온도에서 차이가 존재하기 때문에 입출구 온도를 이용해 무차원화한 온도를 사용하여 비교했다. 예측된 온도값은 부수로 8번에서 14번의 값이고 부수로 중심부의 값이다.

계산된 결과와 실험값의 비교는 그림 3.22에서 3.30번까지이다. 계산된 결과는 COBRA와 MATRA 모두 실험값보다 20 ~ 60% 정도 온도를 높게 평가했다. 이 차이는 측정값의 불확실도 1.5%를 감안하더라도 매우 크다. 이러한 차이는 부수로에 대한 면적 평균값과 국부 예측값에 의한 차이로 유추된다. 특히 유속분포의 차이는 부수로내 온도구배에 영향을 줄 것이다. 온도구배에 의한 부수로내에서의 온도 분포가 측정값과 계산값의 차이를 유발한 것으로 파악된다. 특히 8번 부수로에서의 온도는 비정상적인 것으로 판단되며 이후의 참고문헌 [9]에서 이 부위의 열전대가 벽가까이에 위치하여 벽냉각효과(cold wall effect)가 발생한 것으로 추정했다. 이처럼 열전대의 위치변화는 온도측정에 큰 영향을 주는 것으로 파악되므로 이러한 오차를 감안해야 한다.

표 3.3 시험핵연료의 부수로

TYPE	AREA(in <sup>2</sup> )	Wetted Perimeter(in)	Heated Perimeter(in)
Corner	0.0782	1.073	0.3731
Side	0.1127	1.321	0.7461
Central	0.1534	1.492	1.492

Rod diameter :d=0.475  
Pitch : p=0.575  
Rod-wall spacing : gap=0.350

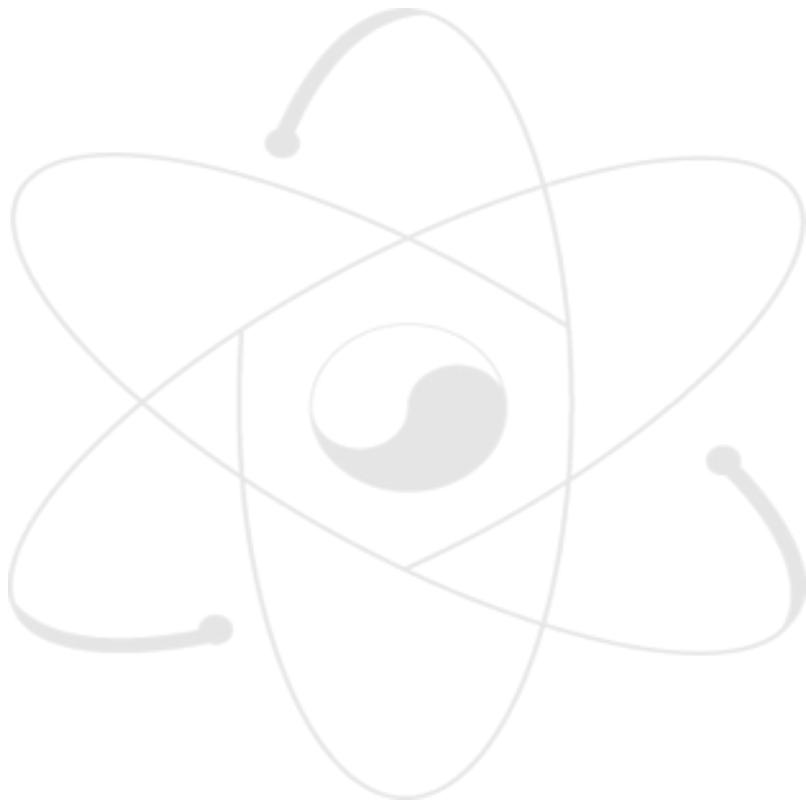


표 3.4 실험조건

Case	Pow. ratio	Re	Gr	Gr/Re <sup>2</sup>	T <sub>B</sub> (F)	T <sub>mean</sub> (F)	W(gpm)	Q <sub>H</sub> (kW/rod)	Q <sub>L</sub> (kW/rod)
1	2:1	960	1.23x10 <sup>4</sup>	0.013	30	75	2.47	1.140	0.570
2	1:0	480	4.05x10 <sup>4</sup>	0.176	33	75	1.25	0.910	0.0
3	1:0	960	3.80x10 <sup>4</sup>	0.041	31	75	2.47	1.810	0.0

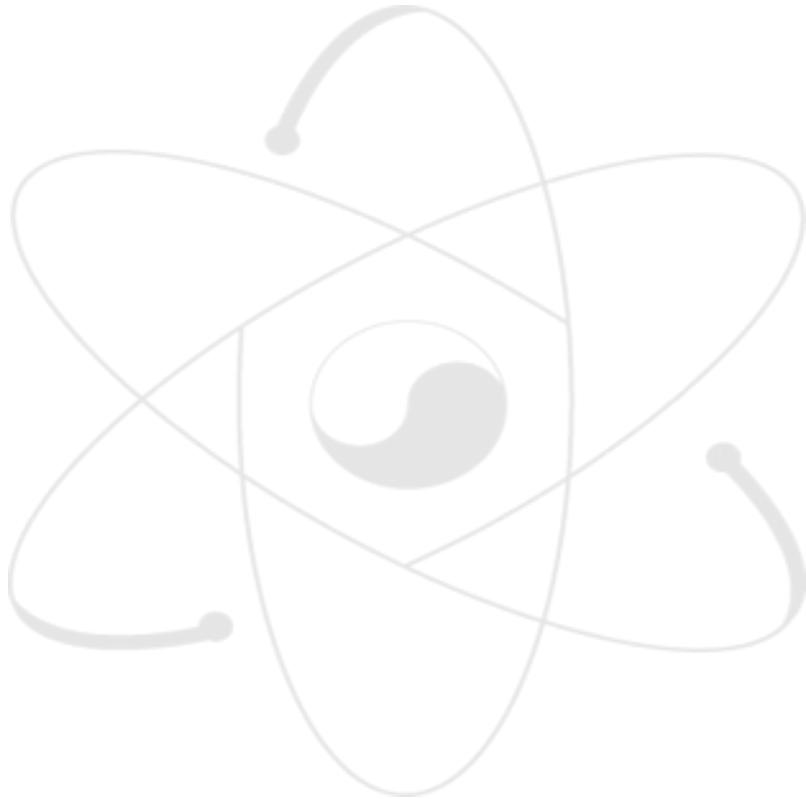
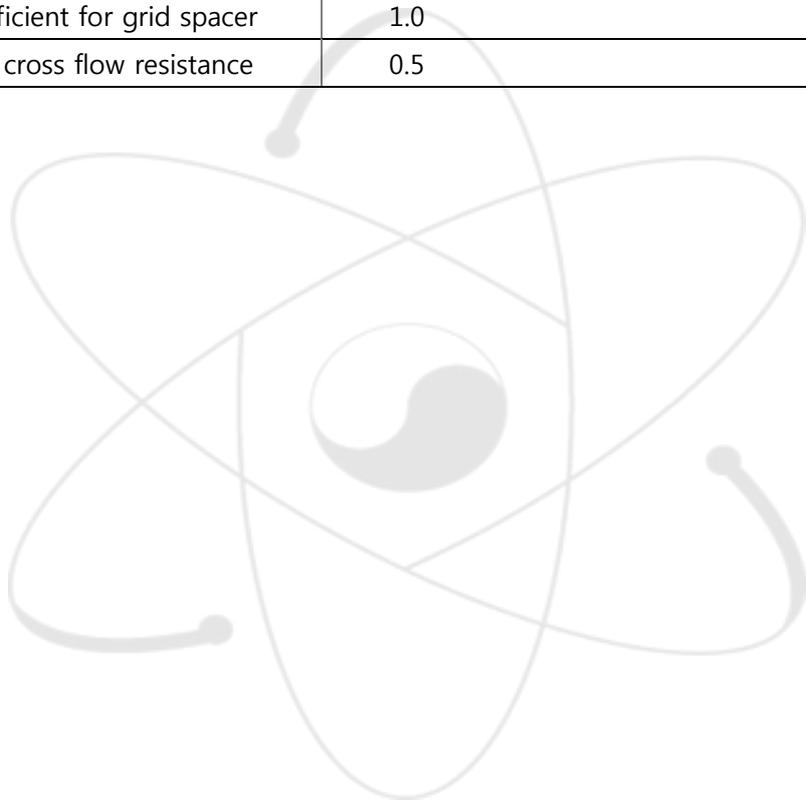


표 3.5 MATRA 입력자료

INPUT PARAMETER	MATRA
Geometry	21 subchannels, 12 rods Bundle length – 72.0 inches Axial node size – 3.0 inches
Power distribution	Average values measured with table 3
Inlet Flow and Temperature	Average value measured with table 2
Input Correlations	Friction factor – maximum of ( $16/Re$ , $0.184Re^{-0.2}$ )
TDC	0.005
Loss coefficient for grid spacer	1.0
Diversion cross flow resistance	0.5



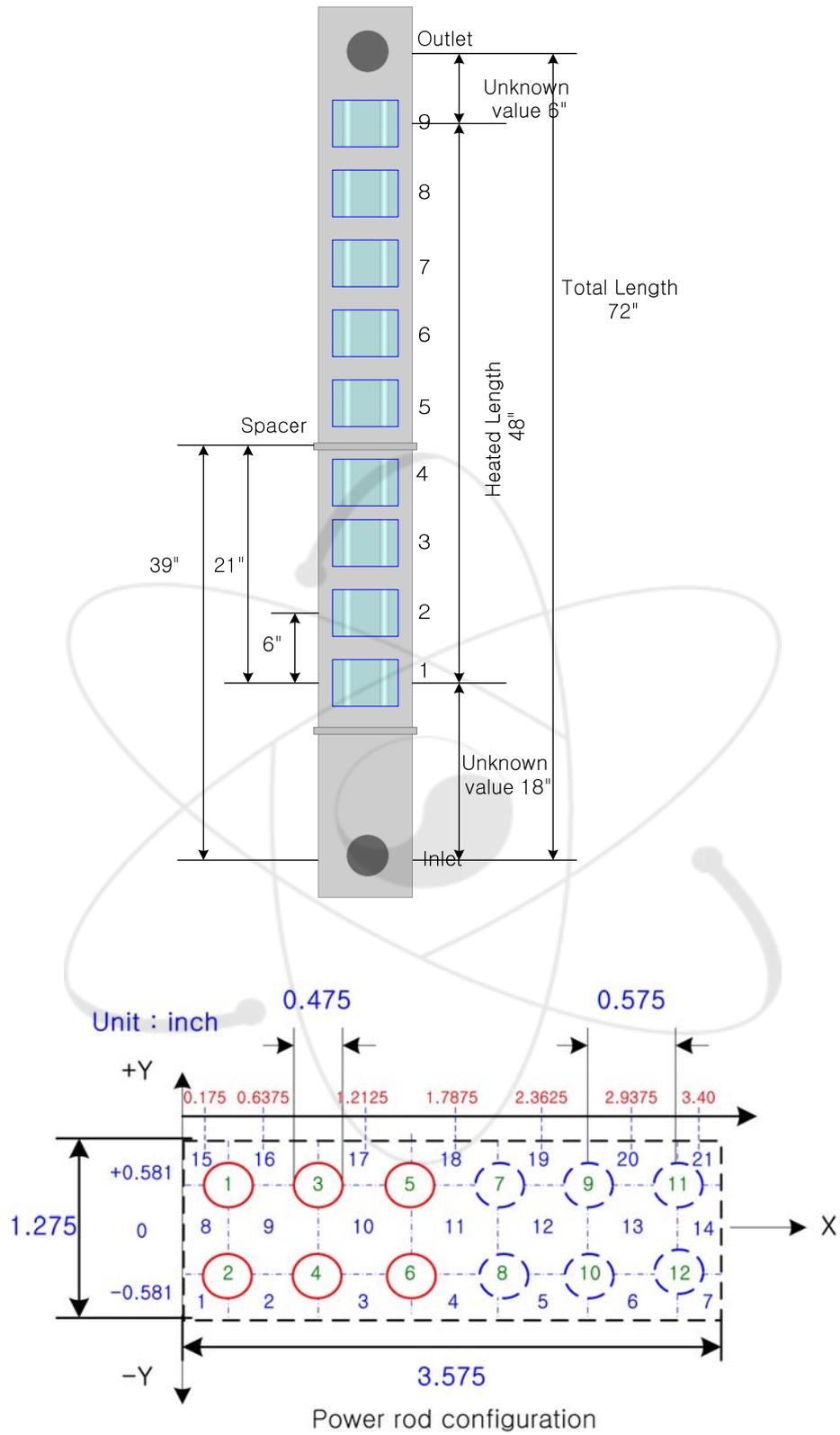


그림 3.12 시험체적부의 제어체적과 부수로

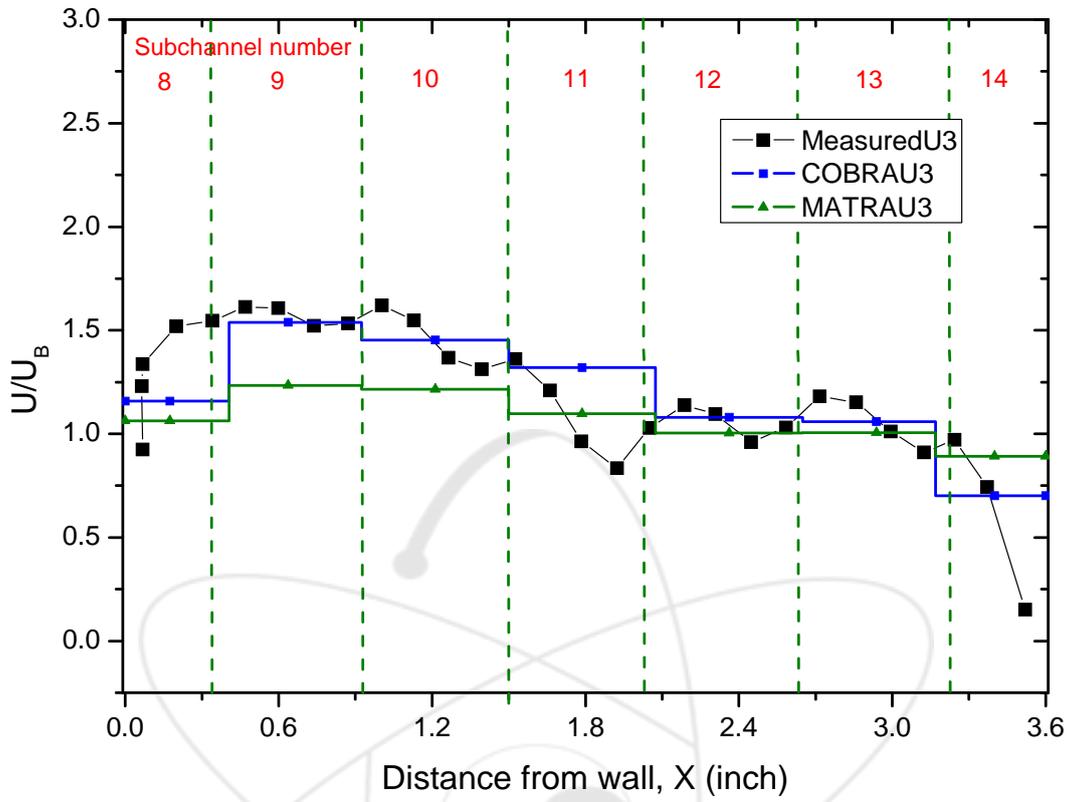


그림 3.13 Case 3의 3번째 시창에서의 속도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14)

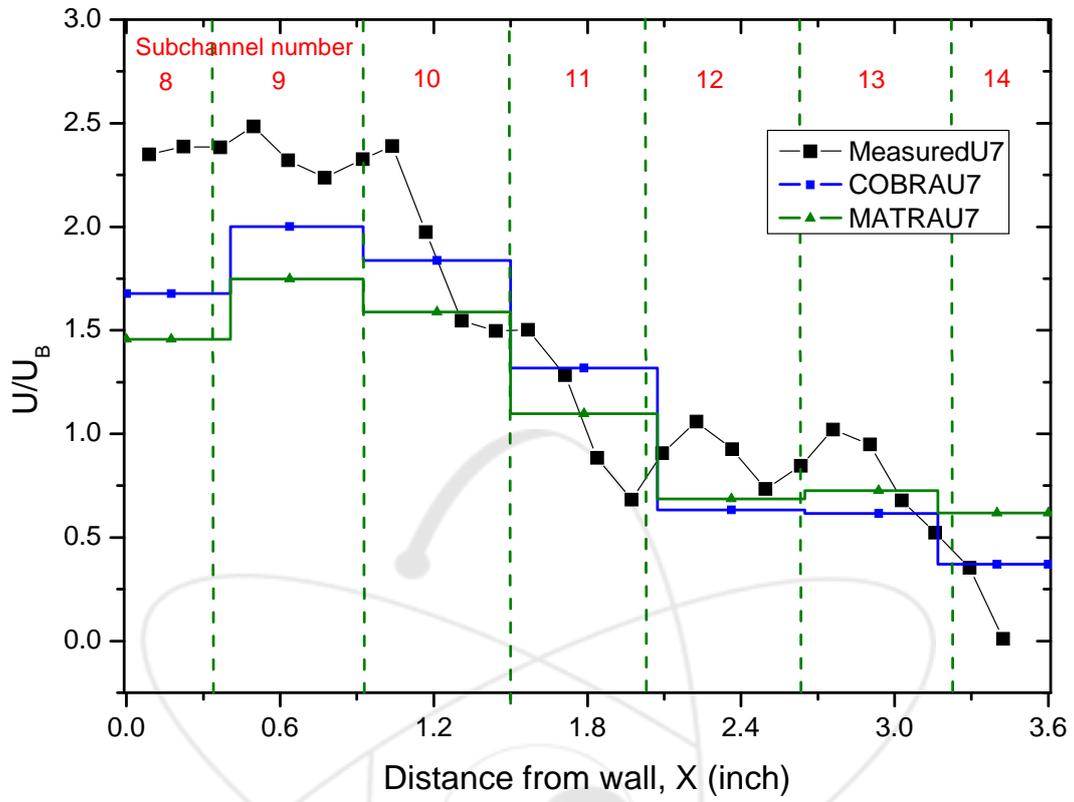


그림 3.14 Case 3의 7번째 시창에서의 속도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14)

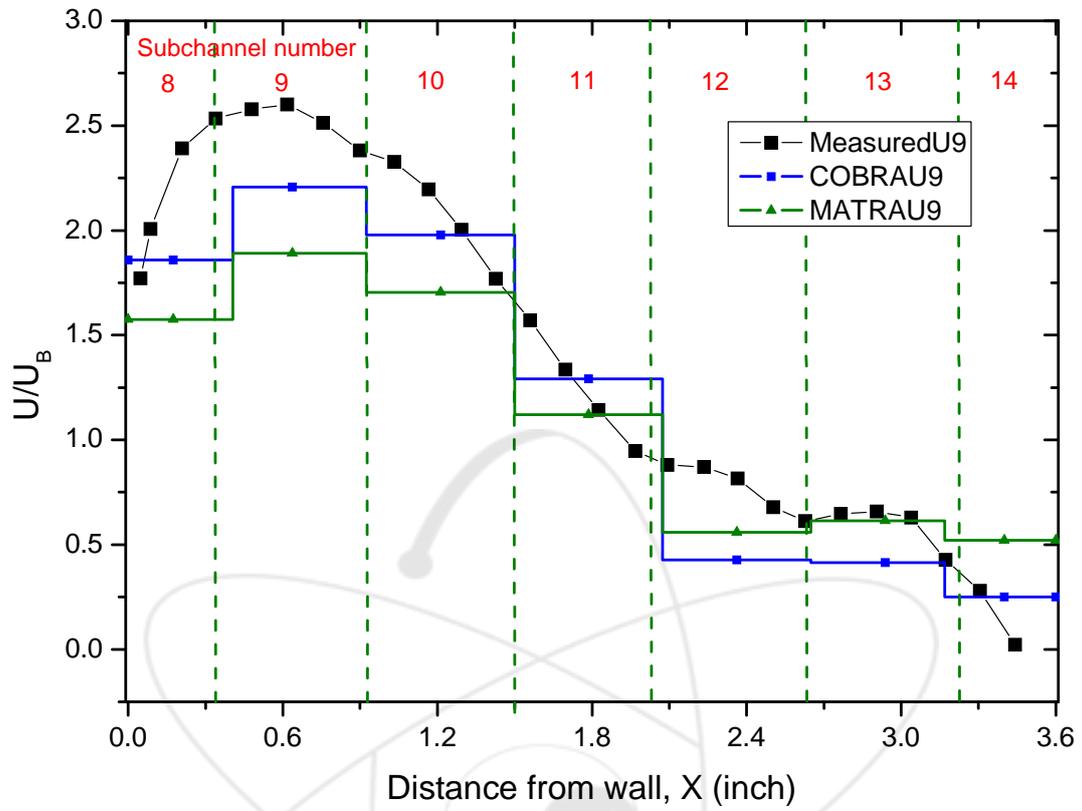


그림 3.15 Case 3의 9번째 시창에서의 속도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14)

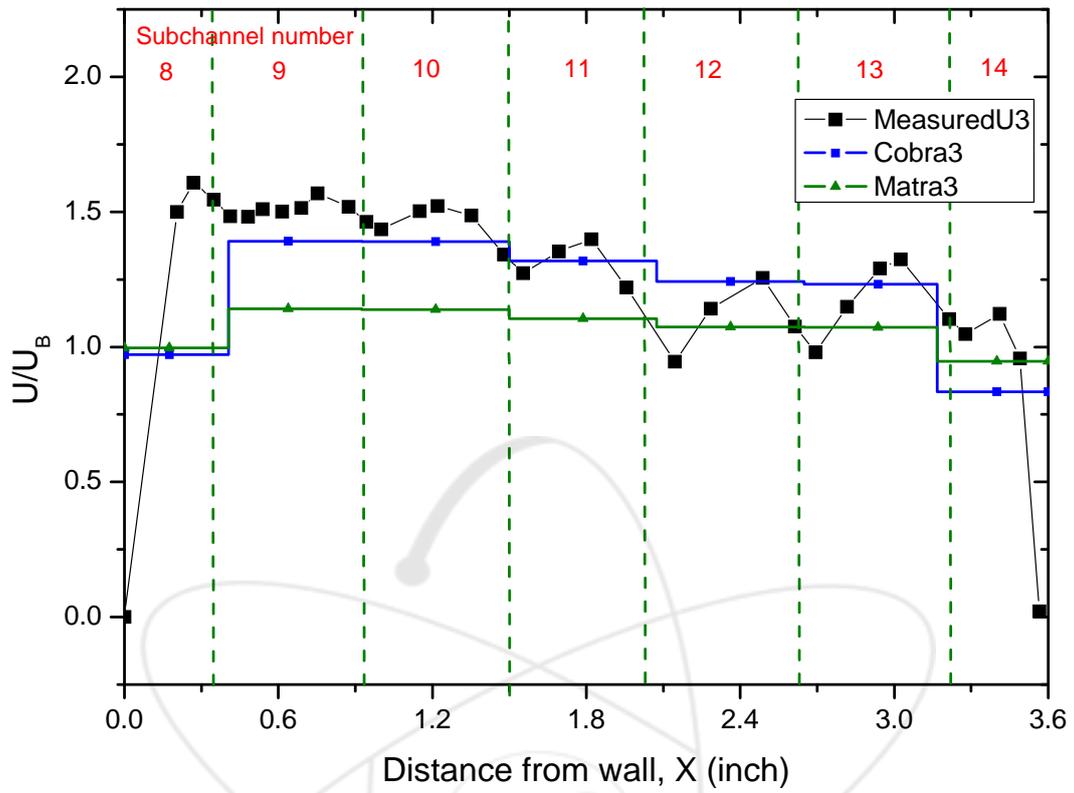


그림 3.16 Case 1의 3번째 시창에서의 속도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14)

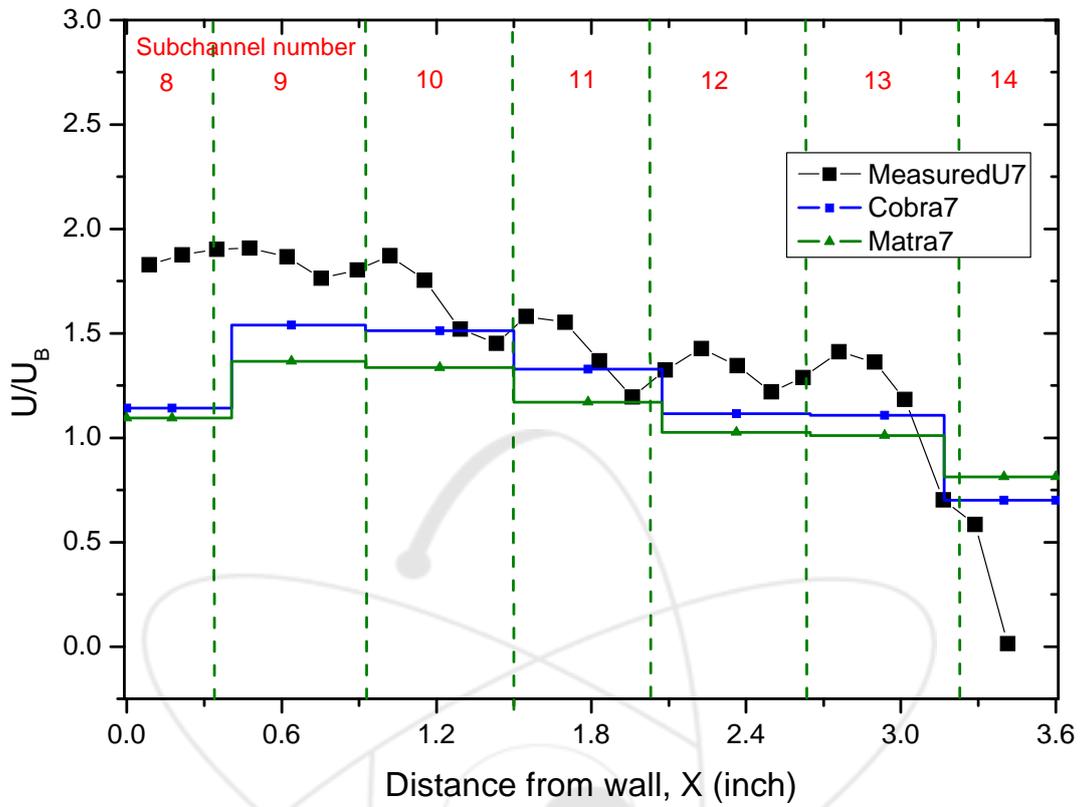


그림 3.17 Case 1의 7번째 시창에서의 속도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14)

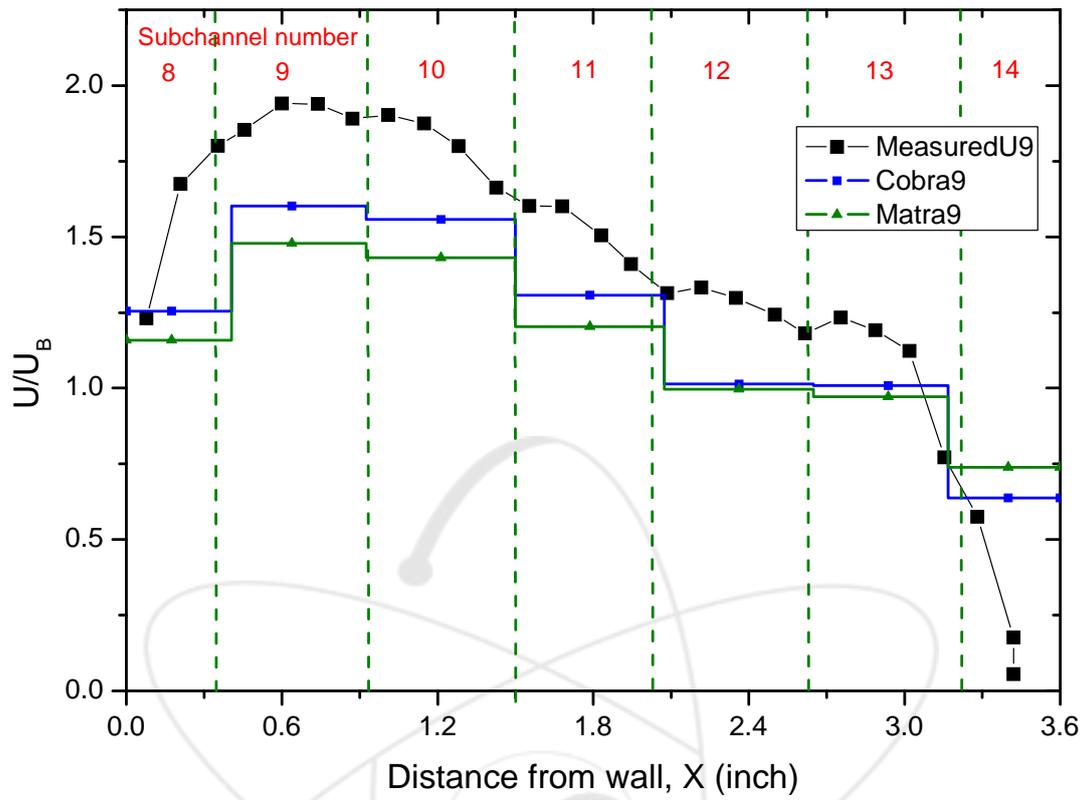


그림 3.18 Case 1의 9번째 시창에서의 속도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14)

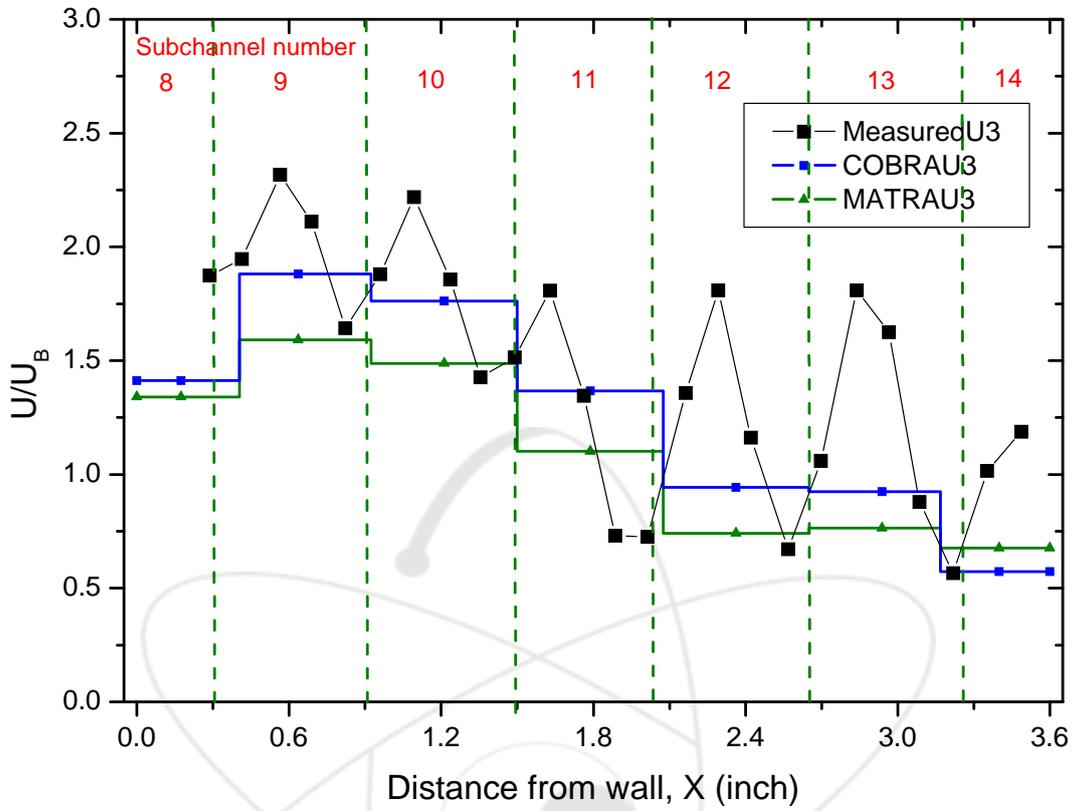


그림 3.19 Case 2의 3번째 시창에서의 속도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14)

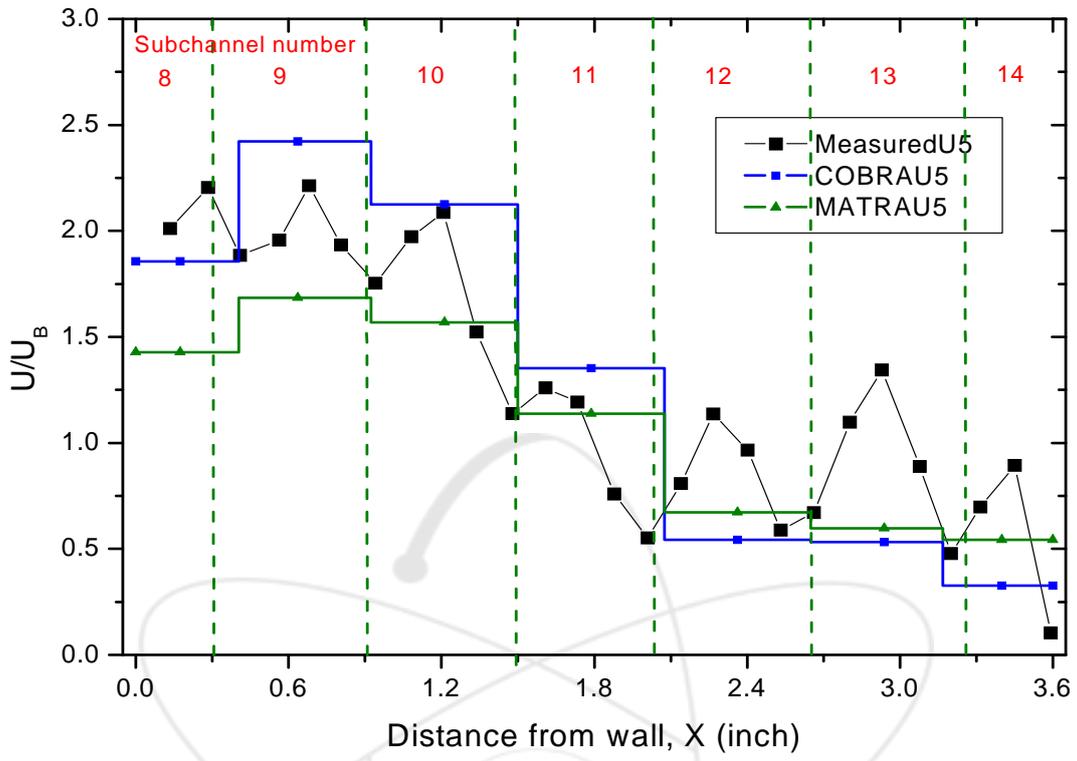


그림 3.20 Case 2의 5번째 시창에서의 속도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14)

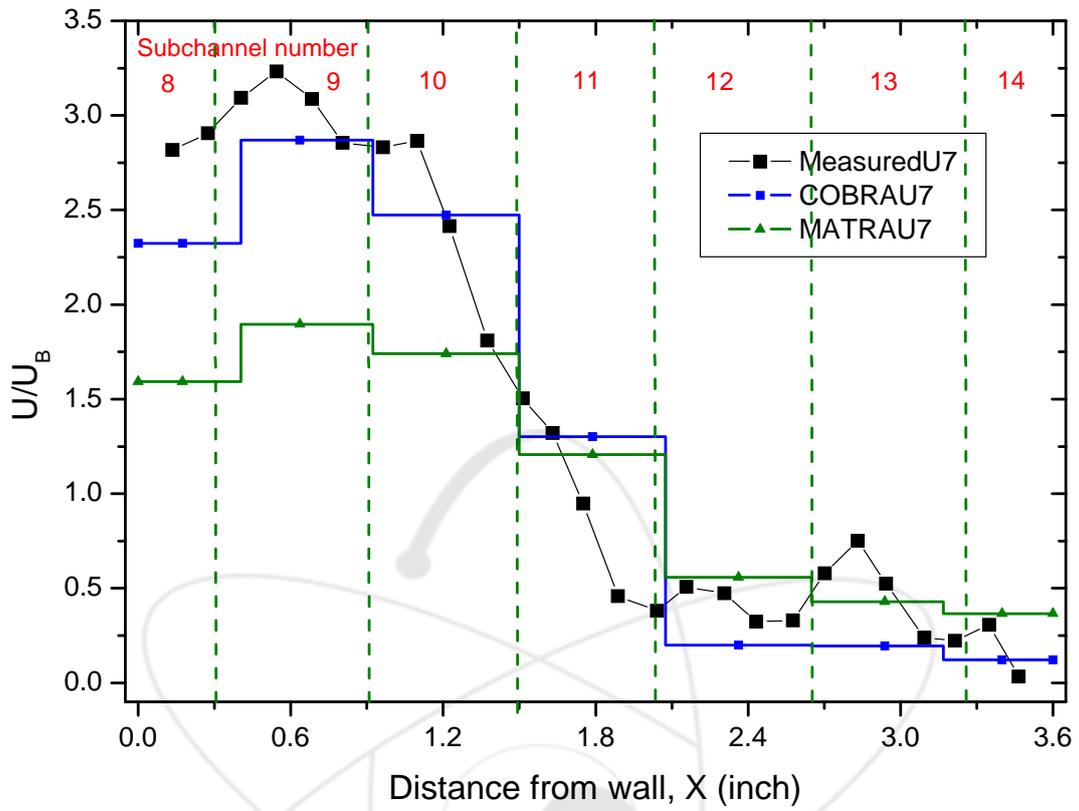


그림 3.21 Case 2의 7번째 시창에서의 속도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14)

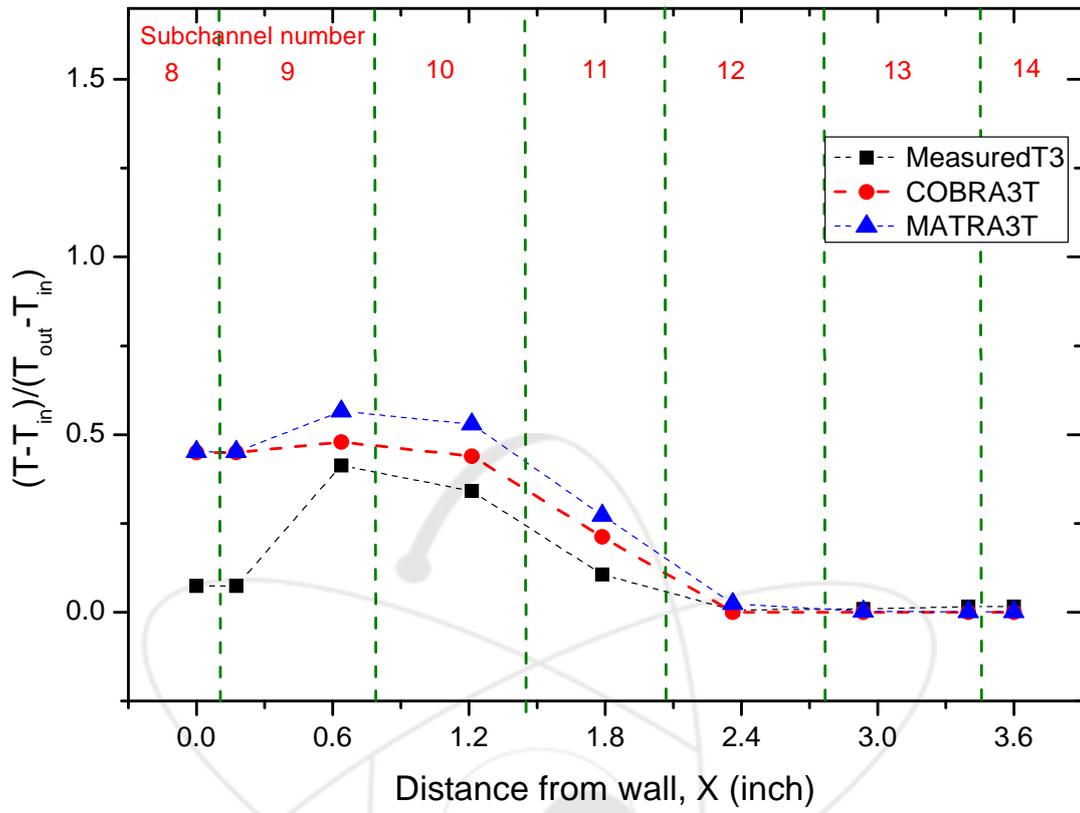


그림 3.22 Case 3의 3번째 시창에서의 온도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14)

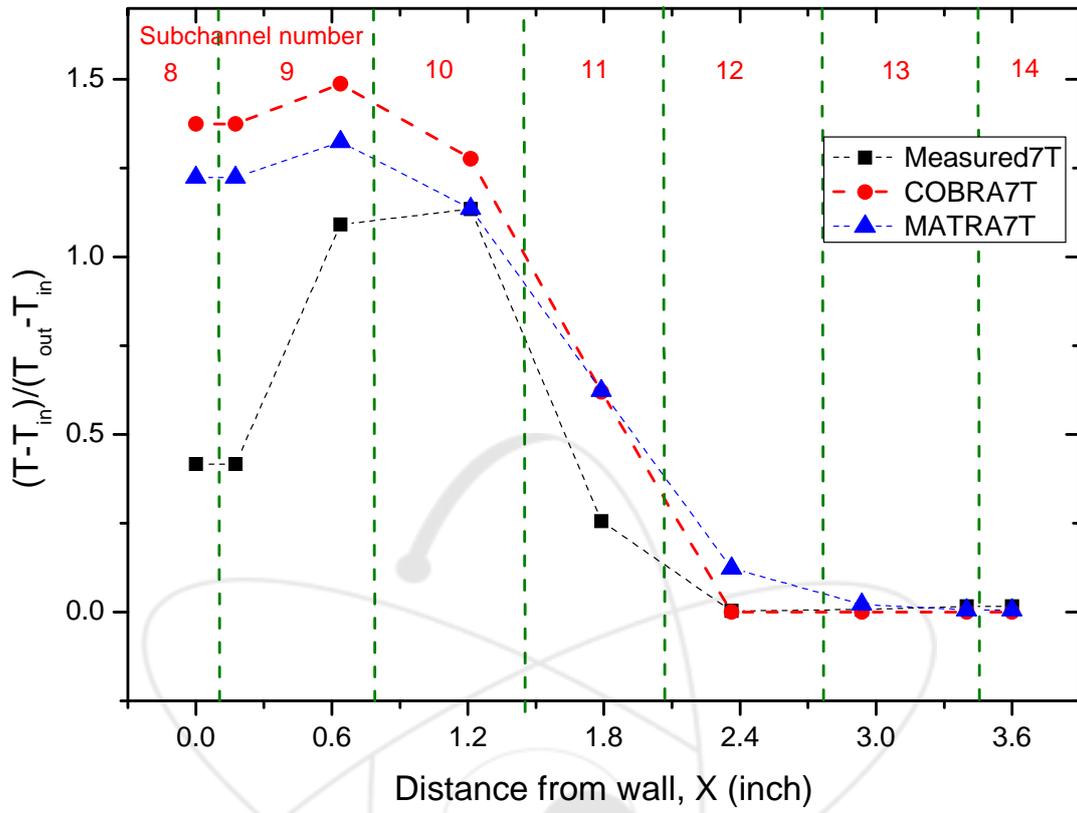


그림 3.23 Case 3의 7번째 시창에서의 온도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14)

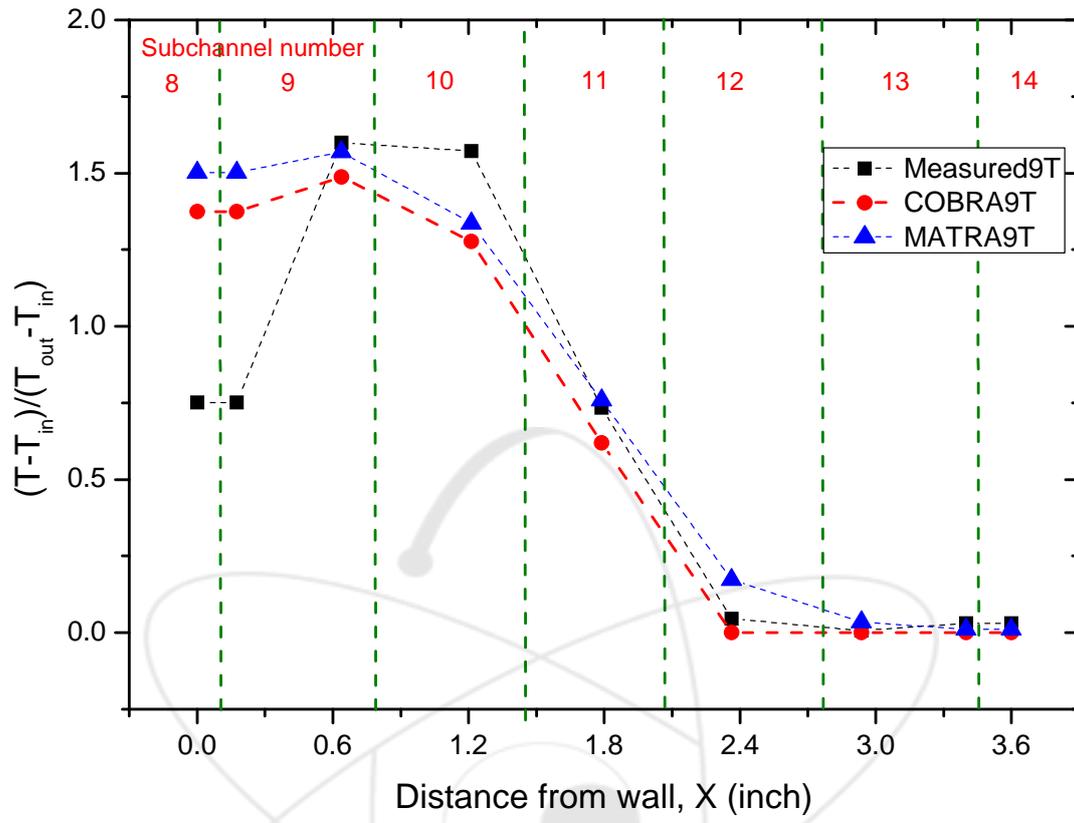


그림 3.24 Case 3의 9번째 시창에서의 온도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14)

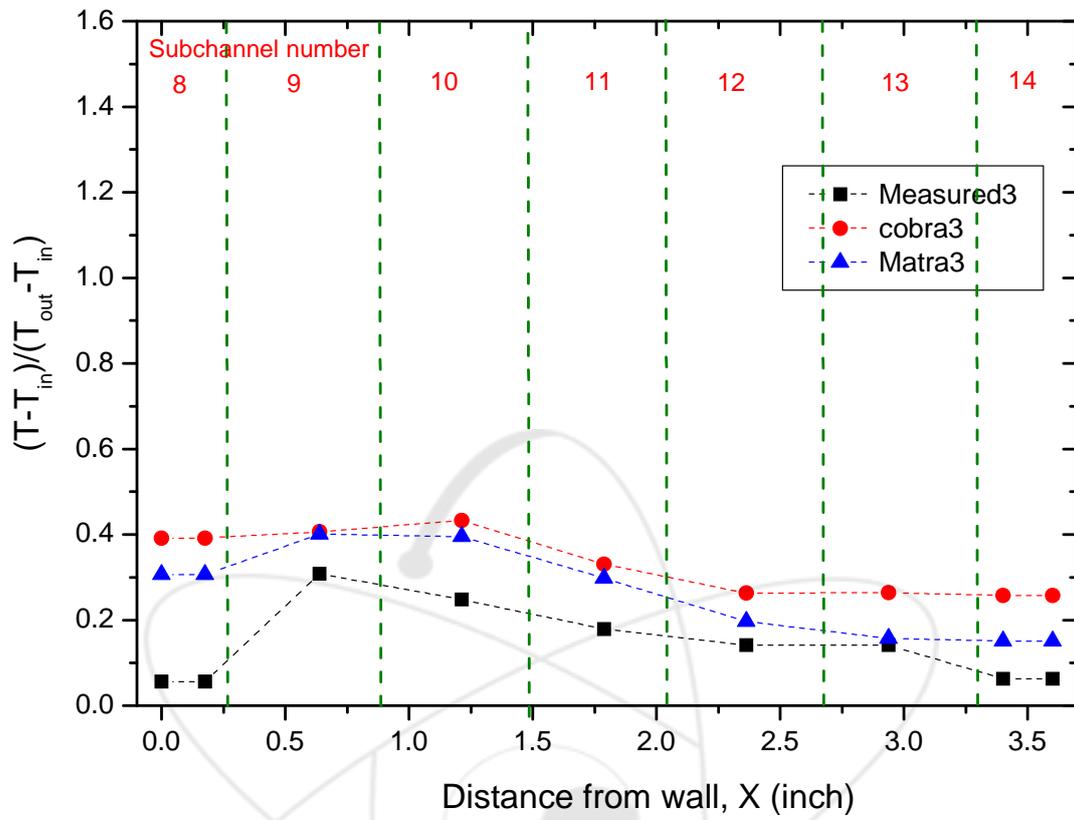


그림 3.25 Case 1의 3번째 시창에서의 온도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14)

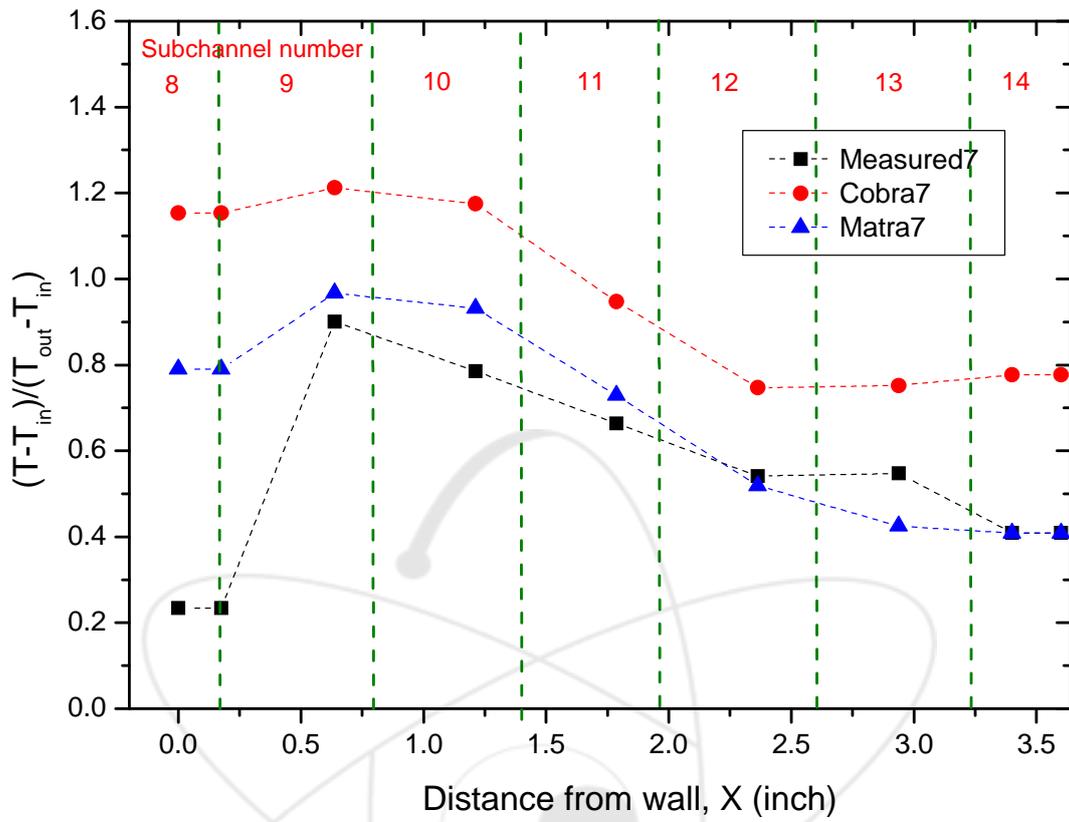


그림 3.26 Case 1의 7번째 시창에서의 온도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14)

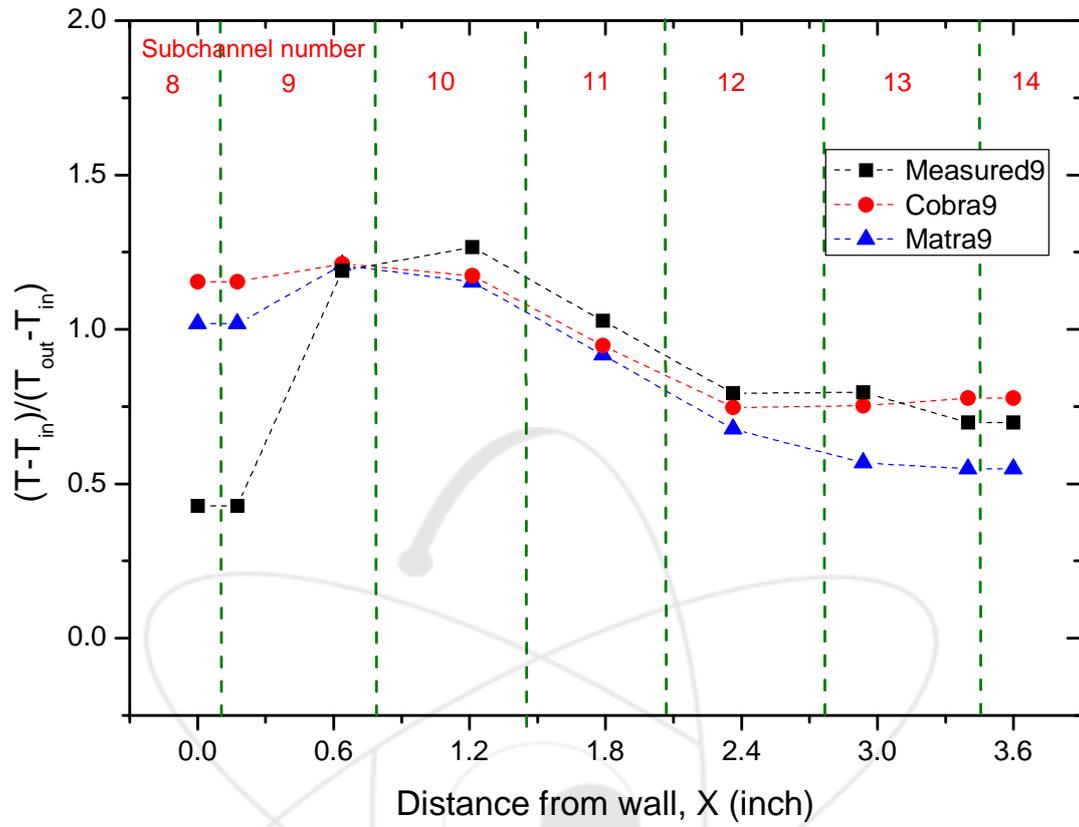


그림 3.27 Case 1의 9번째 시창에서의 온도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14)

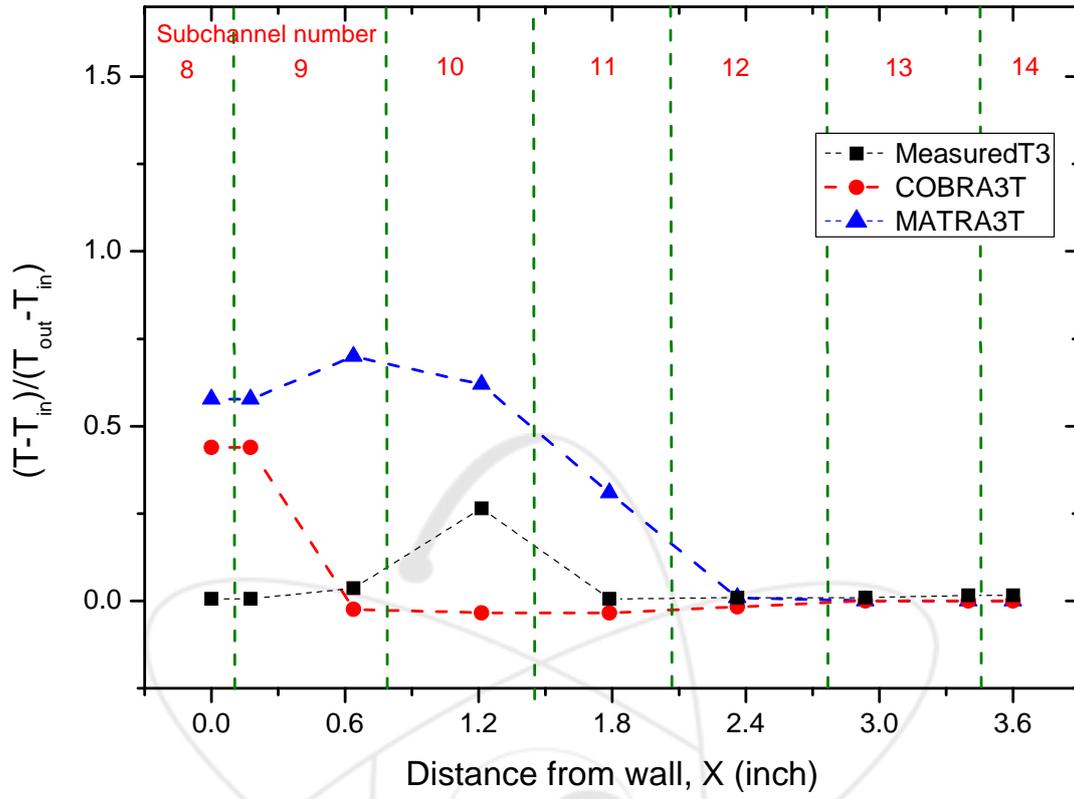


그림 3.28 Case 2의 3번째 시창에서의 온도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14)

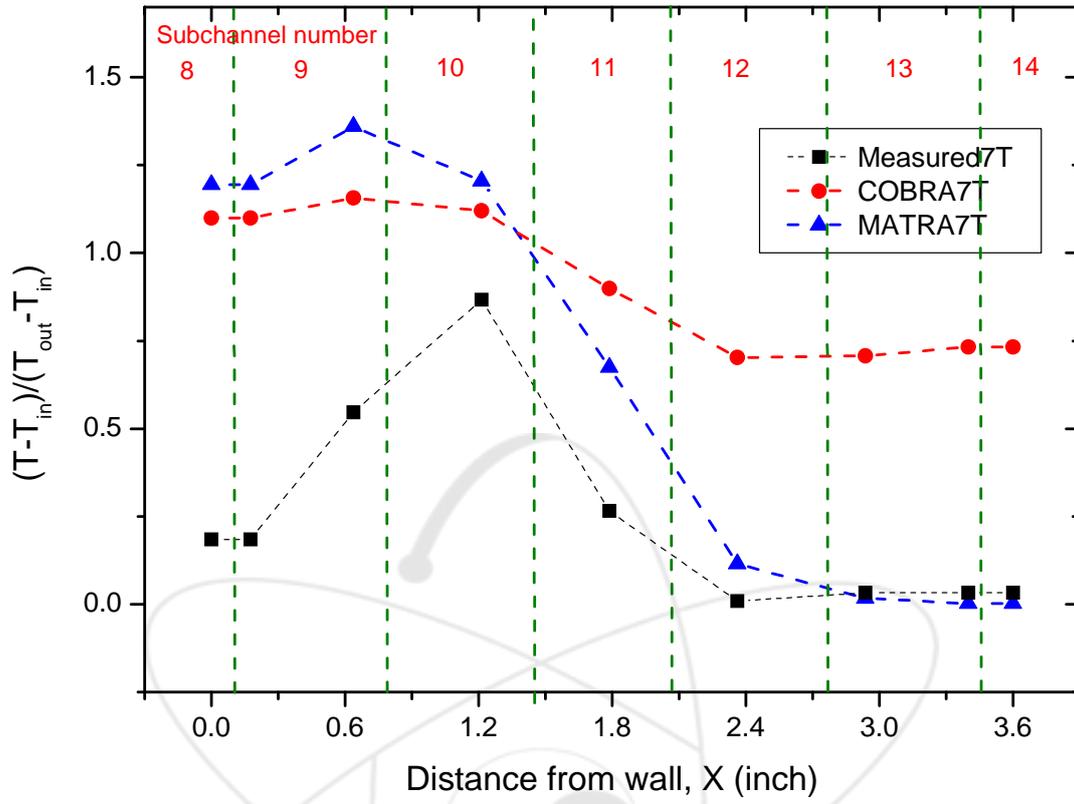


그림 3.29 Case 2의 7번째 시창에서의 온도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14)

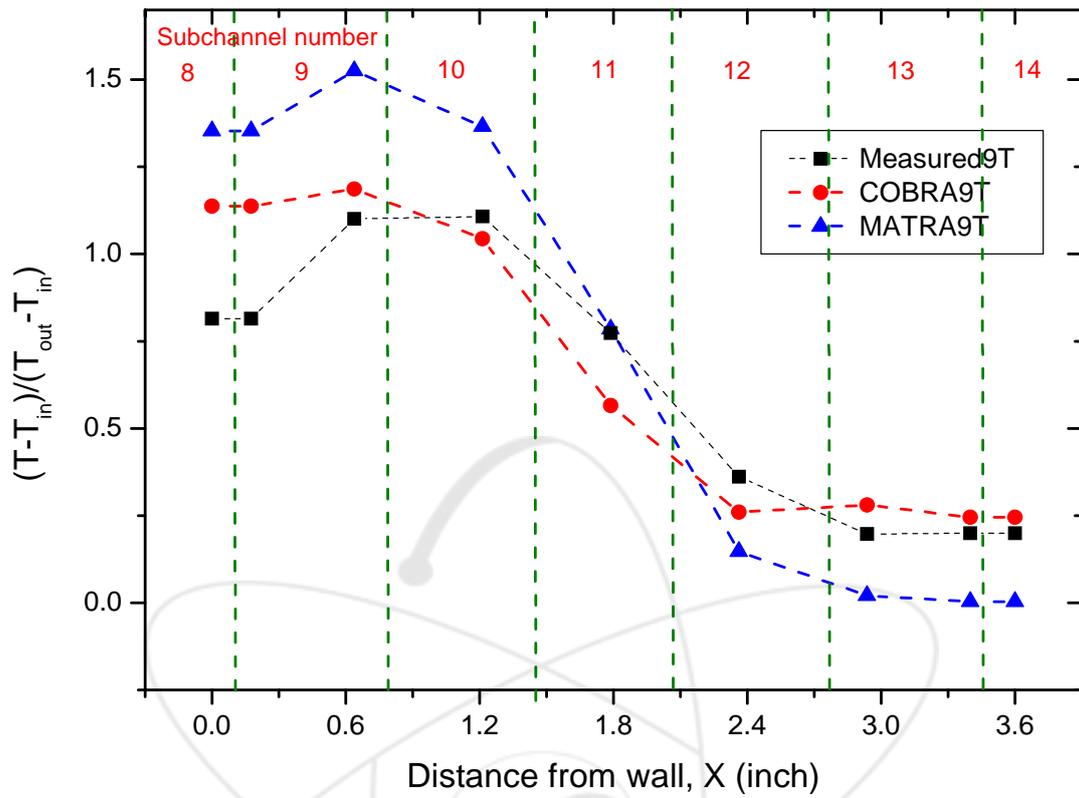


그림 3.30 Case 2의 9번째 시창에서의 온도분포 비교 (subchannel 8 ~ 14)

### III.4. CE 15x15 집합체 입구 비균일 유동분포 자료

#### III.4.1 개요

비균일한 입구유속이 어떻게 분포하고 진행하는지 평가하기 위하여 Combustion Engineering (이하 CE)은 입구제트에 의한 유량분포와 배분에 관한 실험[10]을 수행했다. 15 x 15의 사각형 격자구조를 갖는 핵연료채널에서의 축방향에 따른 부수로에서의 유량분포를 측정했다. 두 개의 피토관을 이용하여 집합체의 수력지름으로 무차원화한 축방향길이( $L/D_e$ )가 0.5, 21, 44인 3지점에 대하여 유속을 측정했다. 횡단면에 대하여는 노즐을 가로지르는 반경방향과 노즐에 인접한 방향에 대하여 측정했다. 유입되는 유량은 평균유량 2000 gpm, 평균유속, 6.7 fps, 평균유량면적에 대한 수력지름에 대한 레이놀즈수는 47,000이다. 유동영역은 관내 유동형태이므로 완전발달한 난류유동이다. 측정결과, 수력지름의 21 이상인 하류에서 반경방향의 정압분포가 균일해지고, 44 이상에서는 유량분포도 균일해진다.

노즐에 의한 초기 유속분포를 알고 있을 때 축방향으로 진행해가는 과정을 MATRA가 모사할 수 있는지를 평가했다. 초기 유속에 대한 부분적인 자료를 이용하여 초기 유속 분포를 가정하고 이를 토대로 유속분포의 진행과정을 축방향에 따라 평가했다. MATRA 코드에 의해 계산된 축방향에 따른 유속분포는 실험결과와 일치하였다.

#### III.4.2 시험자료

CE에서 수행한 입구 제트에 의한 입구유속분포에 관한 시험자료이며, 상온, 상압 조건에서 15 x 15 연료집합체를 1.5 scale-up한 시험부로 시험했다. 연료집합체의 형상은 그림 3.31에서 보여지는 것처럼 입구노즐과 위 아래 각 한 개씩 두 개의 header plate와 축방향에 평행하게 그리드가 부착되어 있다. 이 그리드는 연료봉 한 개에 4개의 반구가 물려있는 형상이다. 횡단면은 그림 3.31에서 보여지는 것처럼 원점에 대하여 대칭으로 구성되어 있으며 총 256개의 부수로를 가지고 있다.

가열봉 직경 = 0.625"  
 봉 피치 = 0.837"  
 가열 길이 = 46"  
 지지격자 간격: Header plate에서 24.1" 위쪽  
 Plate 길이 = 12.83"  
 반경방향 유속 분포 = 비균일 분포

반경방향의 비균일 유속분포는 1/4 대칭 형태이기 때문에 실험결과는 1/4 분포에 대하여만 수행되었다. 유속을 측정한 지점과 부수로 해석에 사용된 부수로 번호를 표 3.6에 나타냈다.

### III.4.3 분석

노즐 직경의 1.3배 내에 위치한 부수로는 평균유속인 6.7 fps보다 항상 큰 유속을 가진다. 제트영역은 노즐직경의 4/5에 해당하는 영역이고 혼합영역은 노즐반경의 2/3이며 외부영역은 이 보다 큰 영역이다.

국부유속으로부터 평균속도는 아래의 실험식에 의해 계산된다

$$\bar{u}_o = C_c \sigma_h \left( \frac{u_m}{V_{jet}} \right) V_{jet} \quad (3.1)$$

여기서  $\bar{u}_o$  는 부수로 평균유속,  $C_c$  는 입구 제트에 대한 수축인자(contraction coefficient),  $\sigma_h$  는 header plate와 부수로 사이의 면적비,  $u_m$  은 부수로에서의 첨두속도,  $V_{jet}$  는 유입 제트의 유속이다. 면적비는 0.784이고 수축인자는 노즐영역에 대하여는 1 나머지에 대하여는 알려지지 않은 값이다[10]. 이 값은 실험에 의해 결정되는 값이나 현재 문헌에서 언급되어 있지 않기 때문에 입구 속도분포를 결정하기 위하여 시행착오법으로 결정했다. 노즐 이외의 영역에서 이 값은 0.7~0.79를 갖는다.

측정된 유속분포는 제트의 중심영역(그림 3.32의 centerline)과 접한 영역(그림 3.32의 tangent line)에 대한 정보를 제공한다. 유속분포를 MATRA의 입력자료로 이용하기 위하여 아래의

수식을 사용한다. 이 때 입구의 질량유속의 속도는 식 (1)의 속도분포 경험식으로부터 유도된다.

$$\sum_{i=1}^{corner} \left( \frac{G_i}{G_{inlet}} \right) \left( \frac{A_i}{A_{tot}} \right) + \sum_{i=1}^{side} \left( \frac{G_i}{G_{inlet}} \right) \left( \frac{A_i}{A_{tot}} \right) + \sum_{i=1}^{inner} \left( \frac{G_i}{G_{inlet}} \right) \left( \frac{A_i}{A_{tot}} \right) = 1 \quad (3.2)$$

여기서  $G_i$ 는  $i$ 번째 부수로의 질량유속,  $G_{tot}$ 는 평균질량유속,  $A_i$ 는  $i$ 번째 부수로의 유로면적,  $A_{tot}$ 는 집합체의 전체유로면적이다. 결정된 입구유속분포를 부록에 MATRA 코드 입력형태로 수록했다.

### III.4.4 결과 및 논의

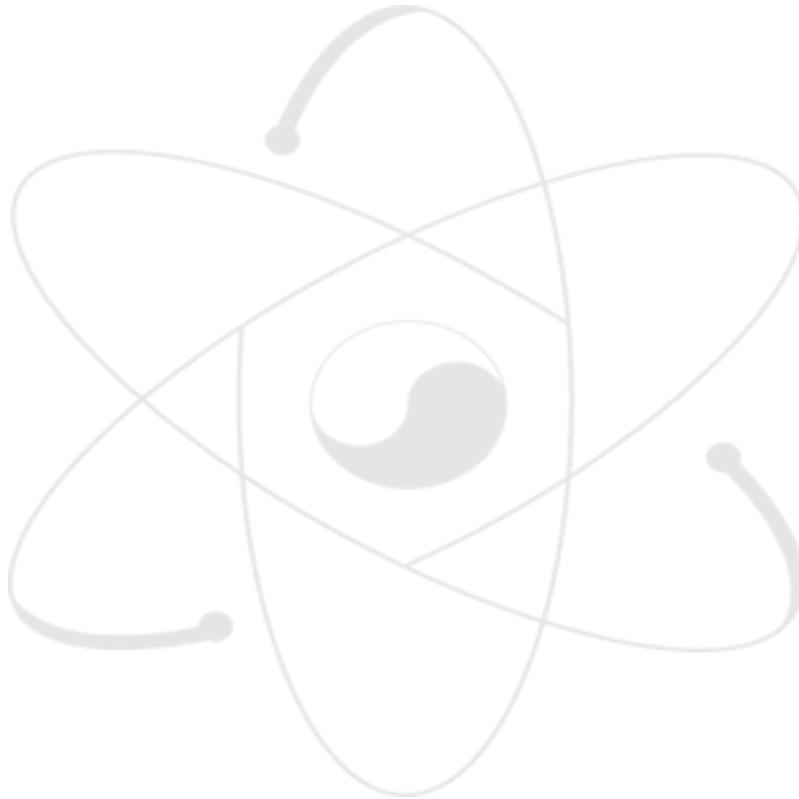
입구에서의 비균일 유량조건을 입력자료로 제공하여 실험자료에 대한 MATRA의 모사능력을 평가했다. 측정된 자료는 제트의 중앙을 가로지르는 자료와 제트 경계면에 접해있는 부수로에 대하여 측정한 2종류이다.

노즐 중앙에 가로지르는 유속에 대하여 반경방향에 대한 측정자료와 계산한 결과는 그림 3.32와 같다.  $L/D_e=0.5$ 인 자료 비교결과에서 보듯이 초기 유속분포를 잘 추정하여 MATRA의 입력 자료에 기입되었음을 확인할 수 있다. 축방향으로 유동이 진행함에 따라 유동분포는 반경방향의 유속분포 기울기가 줄어드는 방향으로 횡방향 유동이 발생하여 점점 균일해진다. 실험에서 측정된 이러한 경향은 MATRA에서 동일하게 모사되었음을 확인했다. 노즐 중앙에서의 부수로 평균 최대 유속은 10.649 fps 였고 계산 결과는 10.659 fps 로 약 0.09% 높게 MATRA가 계산했다. 벽면에 인접한 side와 corner 영역의 부수로에서 측정값과 최대 10.55% 차이를 보였다.

그림 3.33의 노즐에 접해 있는 영역에 대한 계산에서도 노즐 중앙과 유사한 결과를 보여준다. 최대 유속은 노즐 중앙에 바로 접해있는 부수로에서 7.65 fps였다. MATRA에 입력된 자료는 약 7.8346 fps 였으며 약 2.4% 높게 평가했다. 최대 오차는 부수로의 혼합영역 근처의 131번 부수로에서 나타났다. 그러나 축방향으로 진행함에 따라 이러한 오차가 감소했다. 131번 부수로에서 MATRA와 측정값의 비교오차는 14.7% 였다.

표 3.6 시험핵연료의 측정부위와 부수로

L/D <sub>e</sub>	0.5	21	44
Inch	0.3877	16.282	34.115
mm	9.84	413.56	866.51
Tangent line	129~136		
Center line	177~184		



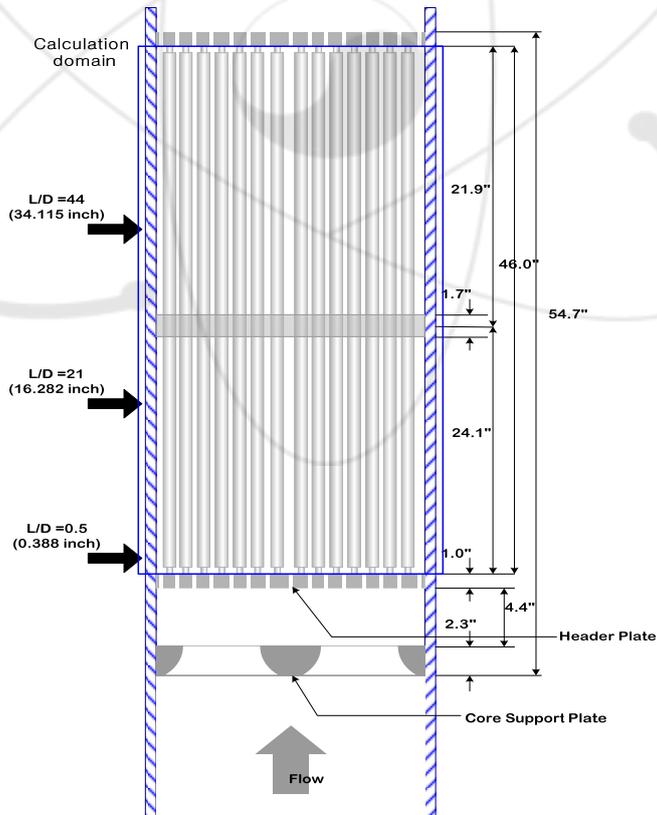
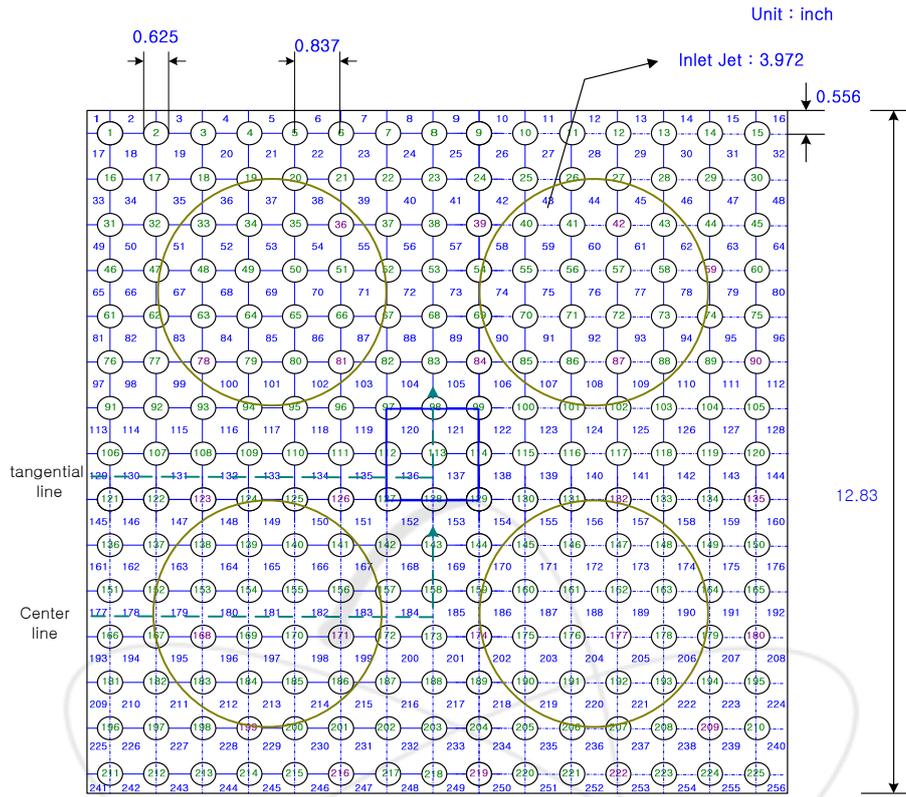


그림 3.31 시험핵연료의 횡단면과 핵연료집합체 형상

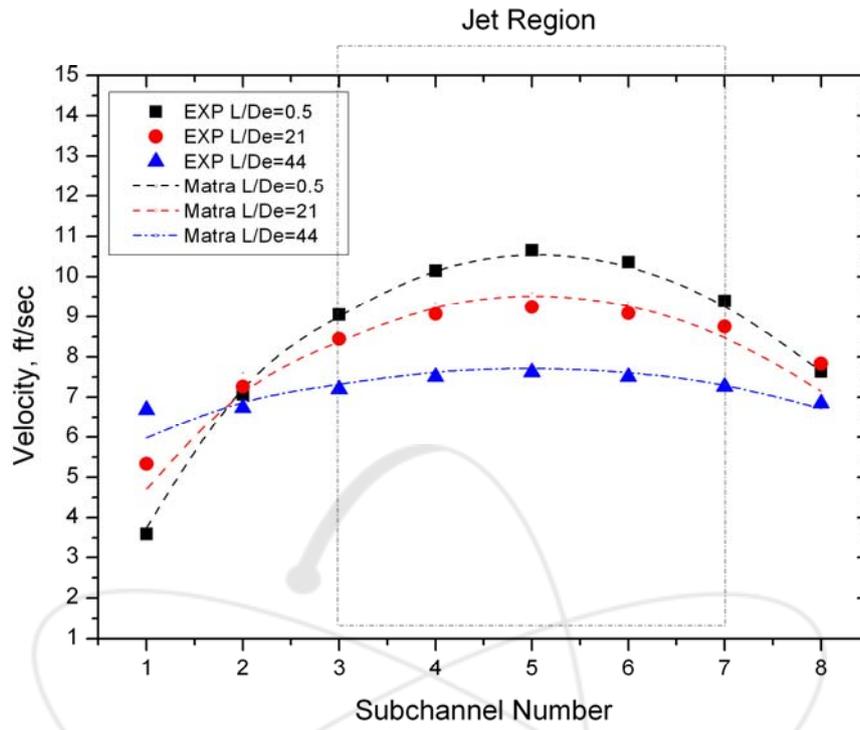


그림 3.32 CE 입구분사류 실험에 대한 MATRA 해석결과(노즐 중앙을 가로지르는 방향)

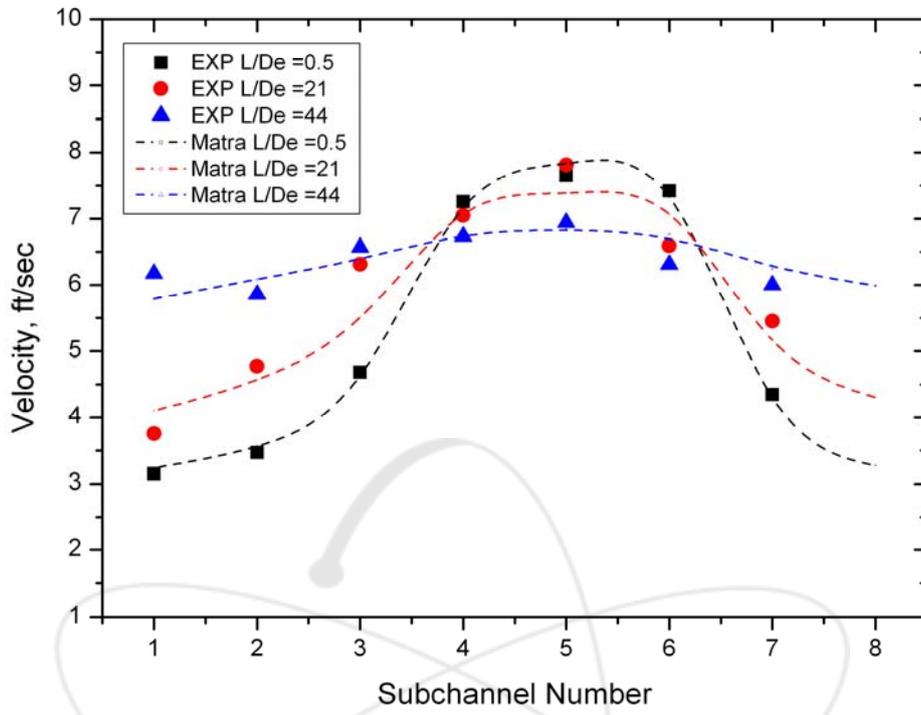


그림 3.33 CE 입구분사류 실험에 대한 MATRA 해석결과(노즐에 접해 있는 방향)

### III.5. PNL 7x7 집합체 유로막힘 유동분포 자료

#### III.5.1 개요

PNL 유로막힘 측정 실험[11]은 봉다발 집합체 모형에서 가상의 슬리브로 유로가 막혔을 때 막힌 유로 근처에서 발생하는 난류 유동 현상을 조사하기 위한 것이다. 슬리브 유로막힘은 가압 경수로에서 냉각재손실사고(LOCA)시에 발생할 수 있는 연료 피복관의 팽윤(swelling) 또는 팽창(ballooning) 현상을 모사하기 위한 것이다. 이 실험은 가상의 유로막힘 근처의 유동현상을 조사하여 냉각재손실사고시 안전해석을 뒷받침하고, 그 결과를 노심해석 코드의 검증에 사용하기 위한 것이다. LDA(Laser Doppler Anemometry)를 이용하여 지지격자 상류와 하류에서 유속을 측정하여 난류강도와 속도분포를 측정했다.

#### III.5.2 시험 자료

실험부는 7x7 봉다발 집합체이고 길이가 57"이고 외경이 0.392"인 봉들을 0.539"의 간격으로 설치했다. 집합체는 상부와 하부의 체결판과 봉 중간에 3개의 단순한 달걀판(egg crate) 형태의 지지격자로 조립되어 있다. 가로 4", 세로 2"의 관측창을 실험부 앞, 뒷면에 6" 간격으로 9개씩 설치하고, LDA로 유속을 측정했다. 유로막힘 비율이 70% 일 때, 상온(85 F)의 물을 레이놀즈수  $2.9 \times 10^4$ , 유속 5.7 ft/sec 조건에서 실험을 수행했다. 실험부의 주요 제원은 다음과 같다(그림 3.34).

봉다발 집합체 한 면의 길이 = 4.065"

봉 개수 = 49

봉 외경 = 0.392"

봉 길이 = 57"

봉과 봉 중심간 거리 = 0.539"

봉과 봉 사이 간극 =  $0.539 - 0.392 = 0.147$ "

봉과 집합체 벽면 사이의 간극 =  $\frac{4.065 - (6 \times 0.539 + 0.392)}{2} = 0.2195$ "

$$\text{봉다발 등가 직경} = \frac{4 \times (4.065^2 - 49 \times \pi / 4 \times 0.392)}{49 \times \pi \times 0.392 + 4 \times 4.065} = 0.554''$$

$$\text{봉다발 유동마찰계수 } f = 0.34 \text{Re}^{-0.25}$$

지지격자 수 = 3

지지격자 압력손실계수 = 1.14

슬리브 위치(횡방향) = 49개 봉 중에서 중앙 9개 봉

슬리브 위치(축방향) = 지지격자 #1과 #2 사이 중간

슬리브 압력손실계수 (부수로 #1) = 0.5

### III.5.3 분석 결과

PNL 유로막힘 실험부에 대해서 1/8 집합체 모형(그림 3.34)을 만들고 MATRA 코드 해석을 수행했다. MATRA 코드에는 축방향 노드의 크기를 구간별로 다르게 설정할 수 있는 가변 노드 크기 기능을 갖고 있는데, 이 기능을 이용한 MATRA 코드 해석 결과와 고정된 노드 크기를 갖는 COBRA-IV-I 코드의 해석 결과를 비교했다. 봉다발 집합체의 길이는 50"이며, 노드의 개수는 양쪽 모두 25개로 고정했다. COBRA-IV-I 코드 해석에서는 2.0" 길이의 노드이고, MATRA 코드 해석에서는 입력에는 50" 길이의 10개 구간으로 나누어 각각 노드의 크기를 그림 3.35와 같이 다르게 설정했다. 그 결과 MATRA 코드의 가변 크기 노드에 의해서 적은 수의 노드를 가지고서 유속 변화가 심한 구간에서도 높은 해상도를 가지고 실험 결과를 더 잘 예측하는 결과를 얻을 수 있었다(표 3.7, 그림 3.36). MATRA 코드 해석에 의한 부수로별 축방향 속도분포를 그림 3.37에 나타냈다. 유로막힘 비에 따라서 유속이 줄었다가 회복되는 정도가 다른 것을 잘 보이고 있다. 또한 슬리브에 의한 제트 현상을 잘 예측하고 있는 것을 알 수 있다. 회전 영역이 끝나는 슬리브 중심선에서 3 De 만큼의 하류 지점에서의 부수로별 질량유속을 그림 3.38에 나타냈다. 유로가 막힌 부수로 1,2,3에서의 유량이 감소하고 나머지 부수로에서의 유량이 증가한 것이 잘 나타났다.

표 3.7 유속분포 측정 결과 및 MATRA 계산 결과 비교

Measured		MATRA	
Z	$U_1/U_b$	Z	$U_1/U_b$
355.6	1	0	1
433.07	0.895	107.95	0.9995
449.58	0.759	209.55	0.9991
457.2	0.661	260.35	0.9992
496.57	0.621	311.15	0.9973
511.81	0.549	361.95	0.9851
525.78	0.538	387.35	0.9638
591.82	0.725	412.75	0.89
660.4	0.778	438.15	0.5952
812.8	0.884	450.85	0.5404
1117.6	0.967	463.55	1.086
		476.25	1.0461
		488.95	1.0123
		501.65	0.5841
		514.35	0.4389
		539.75	0.6049
		565.15	0.6889
		590.55	0.7313
		641.35	0.7907
		692.15	0.8323
		742.95	0.9249
		793.75	0.942
		844.55	0.9498
		946.15	0.9608
		1098.55	0.9716
		1270	0.9887

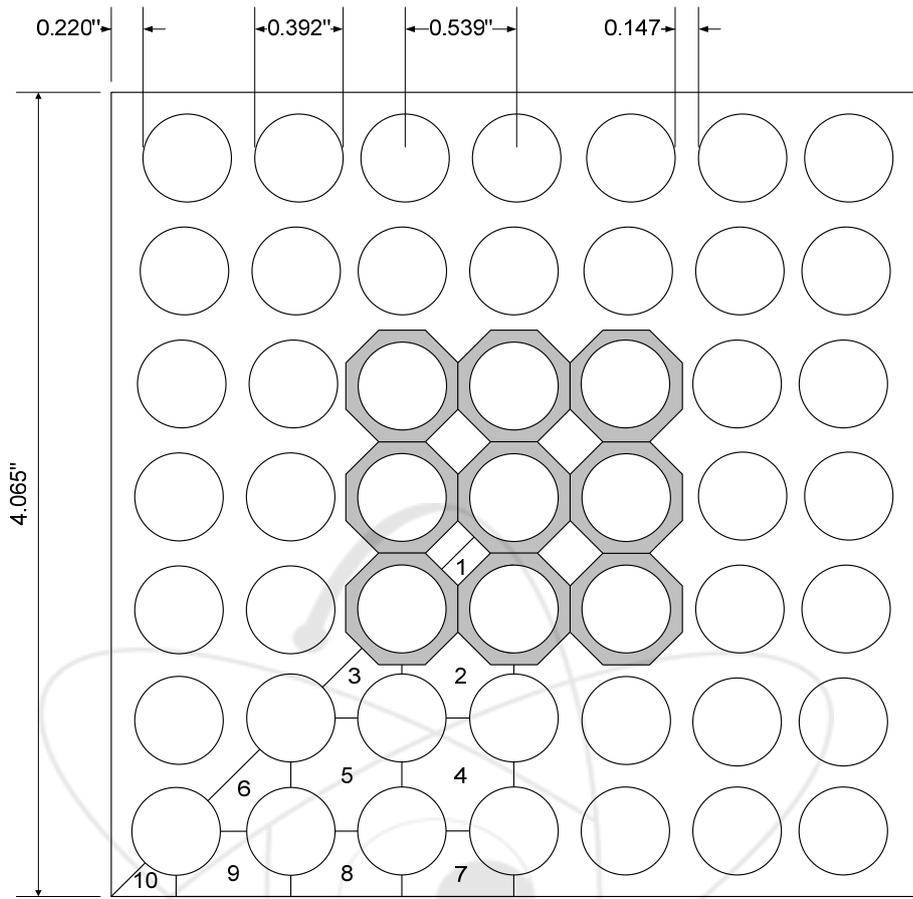


그림 3.34 시험부 단면 개략도 및 1/8 집합체 부수로 모형

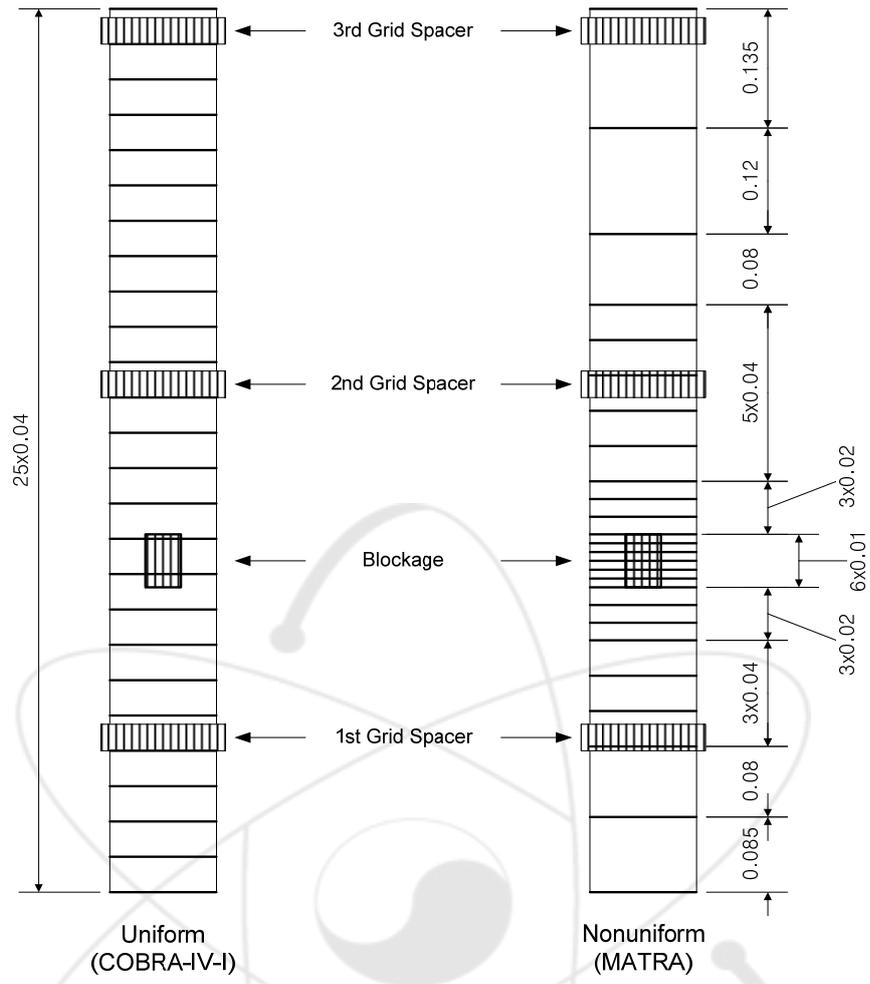


그림 3.35 MATRA 코드의 집합체 축방향 가변크기 노드 설정 (노드 개수=25)

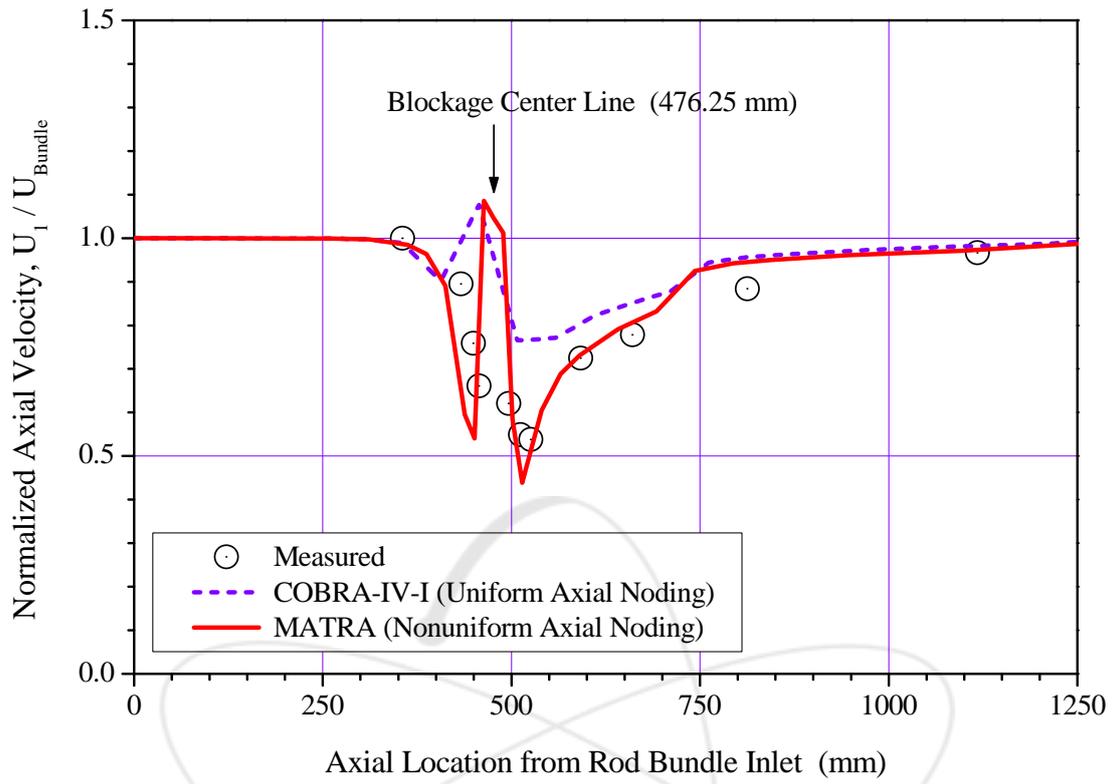


그림 3.36 시험 자료와 MATRA 계산 결과 비교 (1번 부수로)

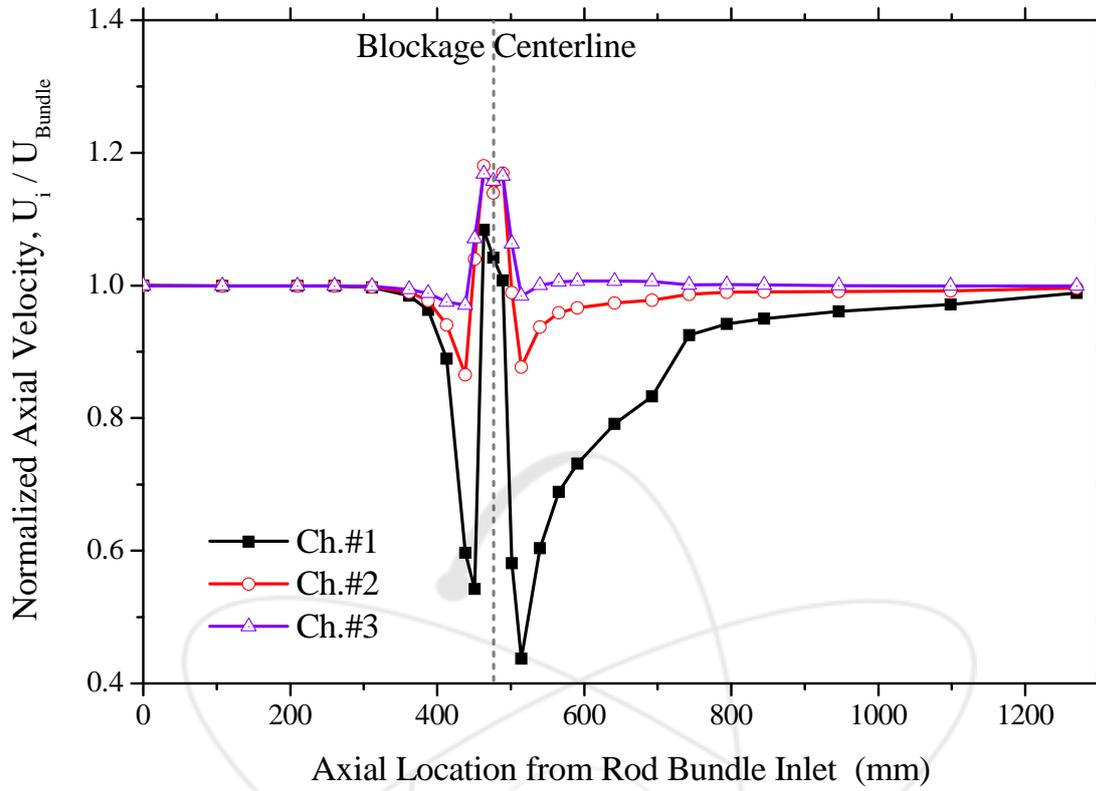


그림 3.37 부수로별 축방향 속도 분포 (MATRA 해석 결과, 지지격자 중간 70% 유로막힘, UB=5.7 ft/sec)

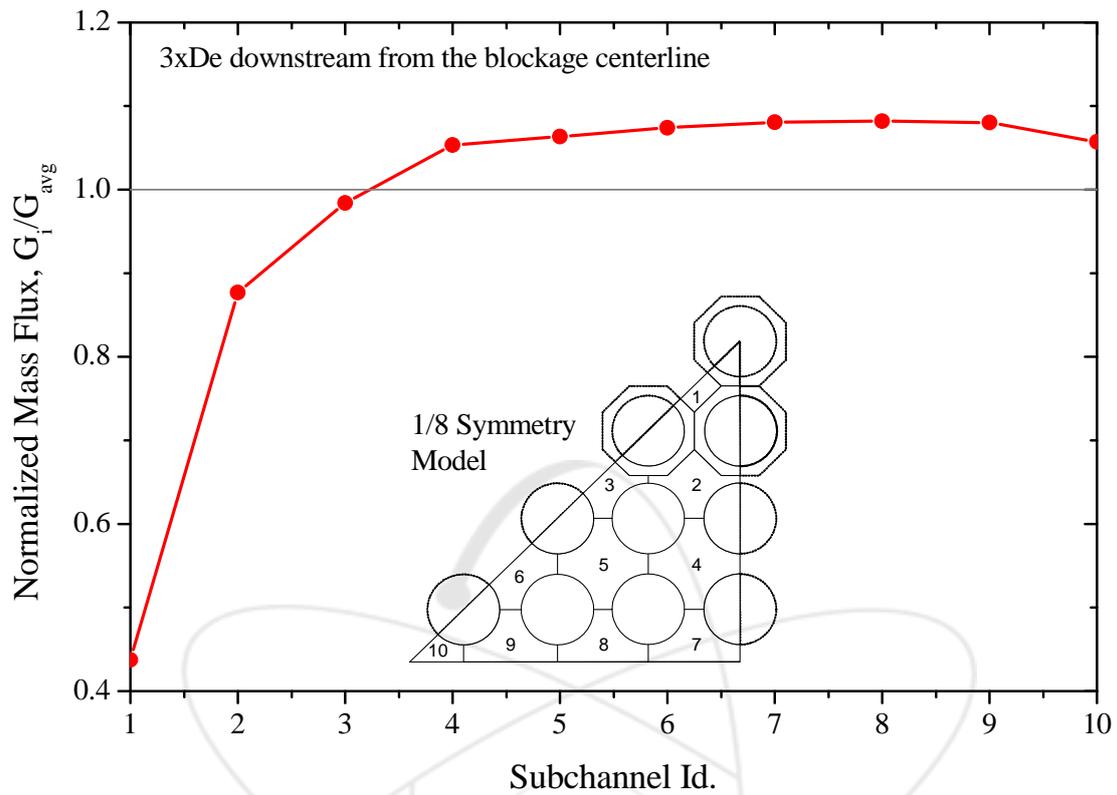


그림 3.38 부수로별 유량 분포 (MATRA 해석 결과, 지지격자 중간 70% 유로막힘,  $UB=5.7$  ft/sec, 슬리브 중심에서 3De 하류 지점)

## III.6. WH 14x14 집합체 유로막힘 유동분포 자료

### III.6.1 개요

이 시험[12]은 인접한 두 봉다발 집합체 중 하나의 봉다발 집합체 입구에 유로막힘이 발생했을 때 두 집합체 사이에서 발생하는 유동 재분배 현상을 조사하기 위한 것이다. 두 집합체의 입구측에 설치된 밸브로 입구 유량을 조절하여 유로막힘 현상을 모사했다. 완전 유로막힘 현상은 각 집합체 입구 유량을 1500/0 gpm으로, 부분 유로막힘 현상은 1100/550 gpm으로 모사했다. 본 분석에서는 부분 유로막힘 현상을 분석했다.

### III.6.2 시험 장치 및 시험 자료

시험부는 두 개의 14×14 봉다발 집합체가 나란히 설치된 형태이다. 봉의 외경은 0.426" 이고, 봉 간 간격 대 외경의 비(P/D)가 1.28, 봉의 길이는 38" 이며 지지격자는 설치되지 않았다(그림 3.39). 그림 1과 같이 5" 간격으로 7개 축방향 위치에서 피토 튜브를 이용하여 횡방향(그림 3.40)의 국부 유속과 정압 분포를 측정했다. 시험부의 주요 제원과 운전조건은 다음과 같다.

시험부 크기(W×H) = 15.33 inch × 7.63 inch

봉 개수 = 392 (2×14×14)

봉 외경 = 0.426 inch

봉 길이 = 38 inch

봉과 봉 중심간 거리 =  $0.426 \times 1.28 = 0.545$  inch

봉과 봉 사이 간극 =  $0.545 - 0.426 = 0.12$  inch

봉표면과 집합체 벽면 사이의 간극 (가로) = 0.5768 inch

봉표면과 집합체 벽면 사이의 간극 (세로) = 0.5836 inch

봉다발 등가 직경 =  $4 \times (15.33 \times 7.63 - 392 \times \pi \times 0.426^2 / 4) / (392 \times \pi \times 0.426) = 0.466$  inch

### 운전 조건

보고서에 명시된 자료가 없으나 수력시험임을 고려하여 상온 대기압 시험으로 가정했다.

- ✓ 압력  
보고서에 명시적으로 압력을 표시하지 않았으나 수력시험임을 고려할 때 대기압으로 가정함,  $P_{exit} = 14.7 \text{ psi}$
- ✓ 온도  
보고서에 명시적으로 온도가 나타나지 않았으나 수력시험임을 고려할 때 상온으로 가정함,  $T_{in} = 80 \text{ F}$
- ✓ 유량  
집합체별 입구 유량, 1100, 550 gpm 이나 SETRI 11.1에 평균질량유속을 입력하고 11.4 에 입구유량분포를 입력함.  
 $1650 \text{ gpm} = 1650 \text{ gal/min} \times 60\text{min/hr} \times 0.13368 \text{ ft}^3/\text{gal} \times 62.21 \text{ lbm/ft}^3 / 62.959 \text{ in}^2 \times 144 \text{ in}^2/\text{ft}^2 = 1.8831 \text{ Mlbm/ft}^2\text{-hr}$
- ✓ 열유속  
비가열 실험이므로 0

#### 부수로별 입구 유량 분포 (SETRI 11.3)

집합체 입구 유량이 1100 gpm과 550 gpm인 실험을 모사하기 위해서 왼쪽 집합체와 오른쪽 집합체의 유량을 2/3 대 1/3로 나누고, 두 집합체 사이에 있는 부수로의 유량은 1로 주었다.

#### III.6.3 분석 결과

두 개의 집합체 중에서 왼쪽과 오른쪽 집합체의 입구유량을 각각 1,100 gpm 과 550 gpm 으로 다르게 설정하여, 오른쪽 집합체 입구의 유로막힘을 모사했다. 축방향에 따른 집합체별 유량과 횡방향 유속분포를 측정했다.

#### 유로막힘 시험 - 집합체별 비교

보고서에서 각각의 집합체를 하나의 채널로 해석한 것과 달리 MATRA 코드에서는 부수로 해석을 하고 부수로별 유량을 합산하여 각 집합체 유량을 계산했다. MATRA 해석 결과를 시험결과와 THINC-IV 코드 해석 결과와 함께 비교했다(그림 3.41). 보고서의 그래프를 스캔한 후 디지털화하면 THINC-IV 코드의 입구 유량이 66.7%와 33.3%가 아닌 약 70%와 30%로 나타났으며 이러

한 차이가 집합체 출구까지 이어졌다. 실험 자료가 그래프 형태로 제시되어 있기 때문에 자료의 신뢰도가 높지는 않으나, 전반적으로 MATRA 해석 결과가 THINC-IV 해석 결과보다 실험결과를 잘 예측하는 것으로 나타났다.

#### **유로막힘 시험 - 부수로별 비교**

계산 노드 크기를 부수로별로 세분하여 MATRA 코드 해석 결과를 측정된 횡방향 국부 유속분포와 축방향에 따라 비교했다(그림 3.42). 횡방향 유속은 그림 3.40의 row 1~3 에 해당하는 부수로의 유속분포를 평균하여 비교했다. 3 가지 축방향 위치 (레벨 2, 6, 7)에 대한 횡방향 유속의 상세한 비교 결과는 각각 그림 3.43 ~ 그림 3.45에 제시했다.

MATRA 코드 해석결과가 축방향에 따른 부수로별 유속분포 경향을 대체적으로 따라가는 것으로 나타났다. 그러나 MATRA 코드의 부수로별 유속분포가 시험 자료 및 THINC-IV 코드 해석 결과보다 전체적인 작게 예측하는 것으로 나타났다. 이것은 비교한 부수로의 위치가 다르거나, 1100/550 gpm으로 보고된 자료가 근사치여서 입구 유량이 정확하지 않기 때문으로 판단된다.

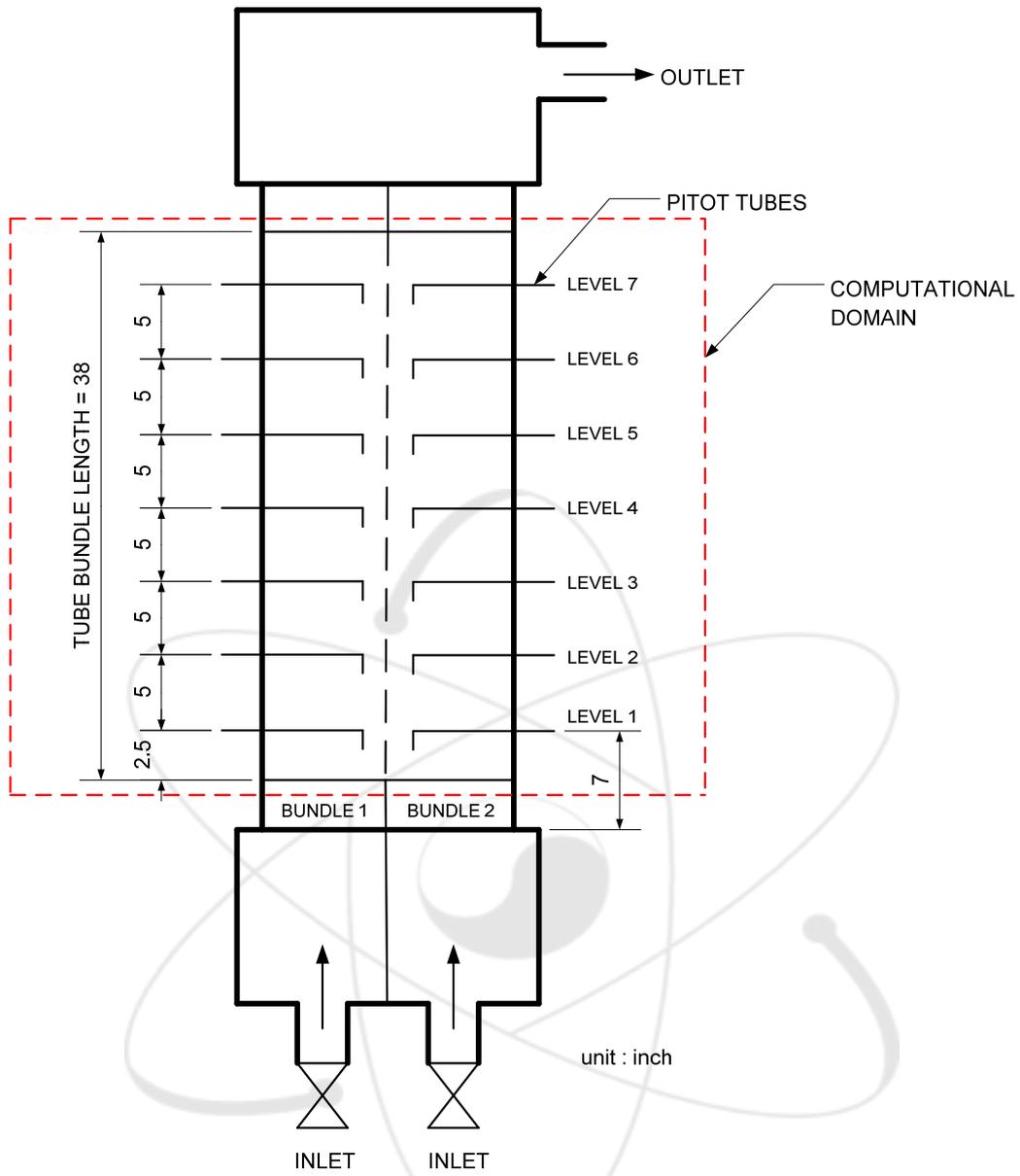


그림 3.39 Westinghouse flow blockage 시험부

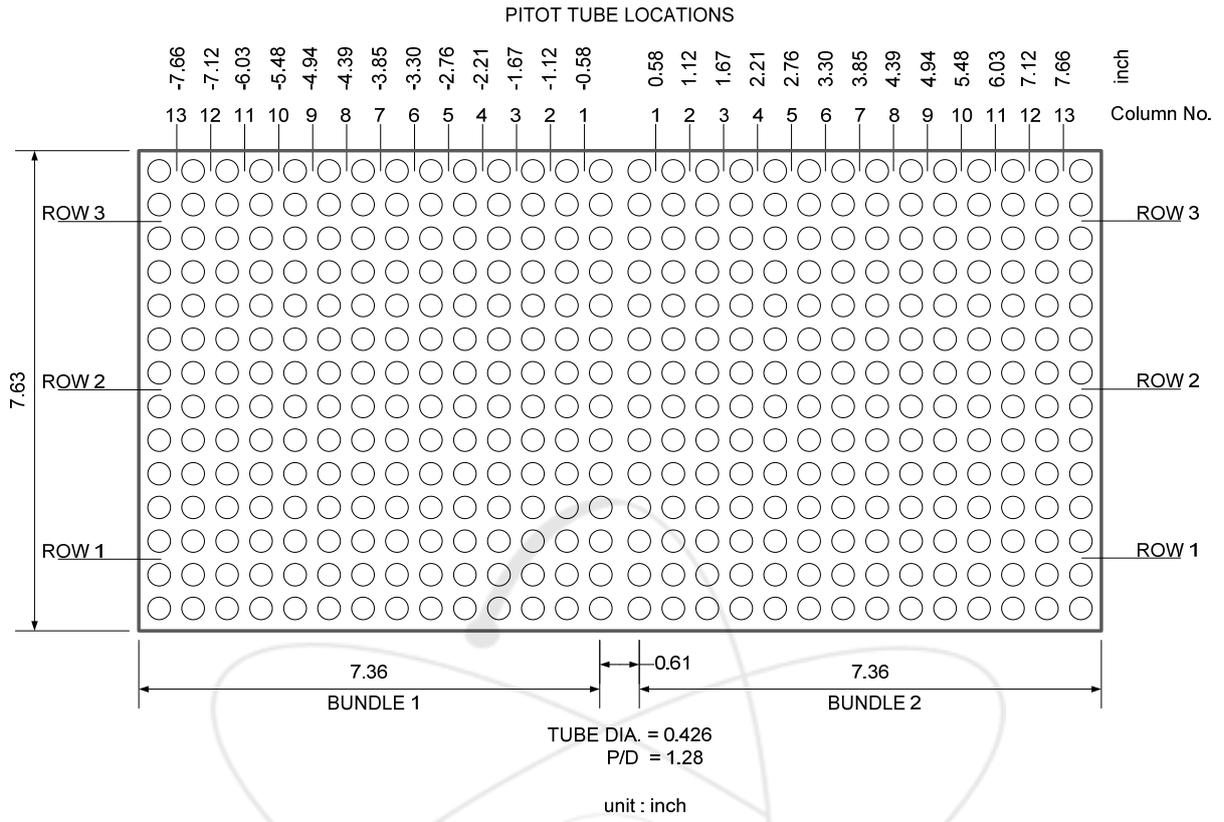


그림 3.40 시험부 횡단면 및 크기

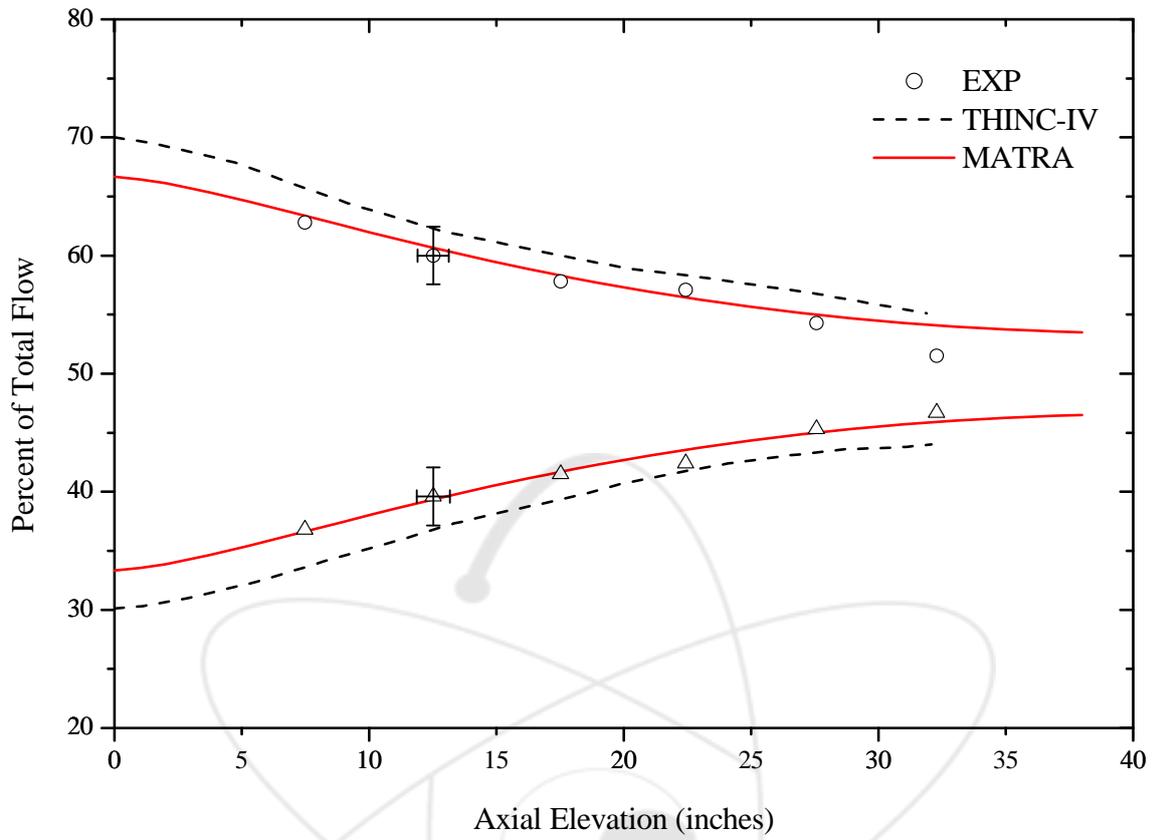


그림 3.41 축방향 위치에 따른 집합체별 유량 분포

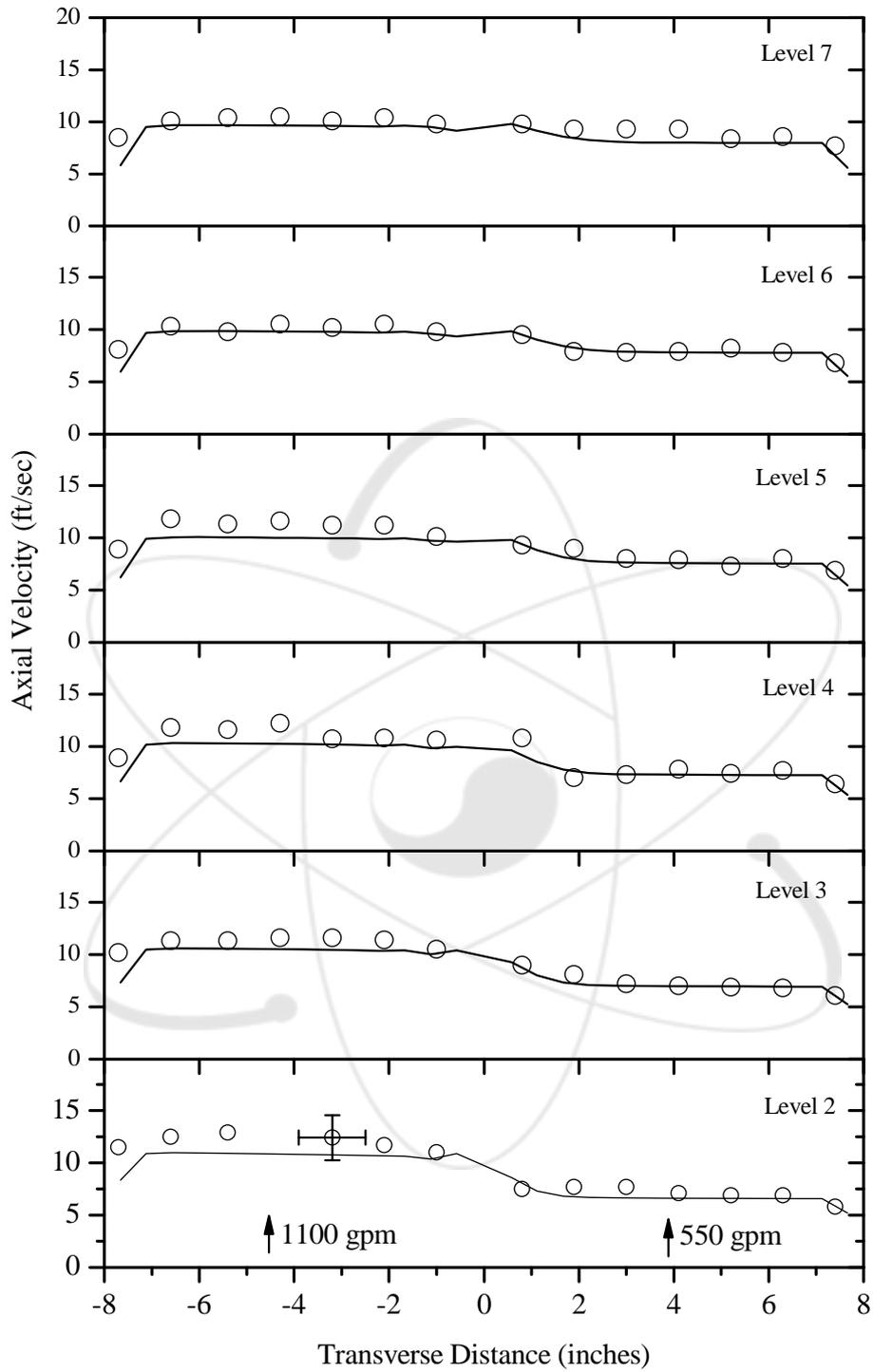


그림 3.42 집합체별 국부 유속 분포

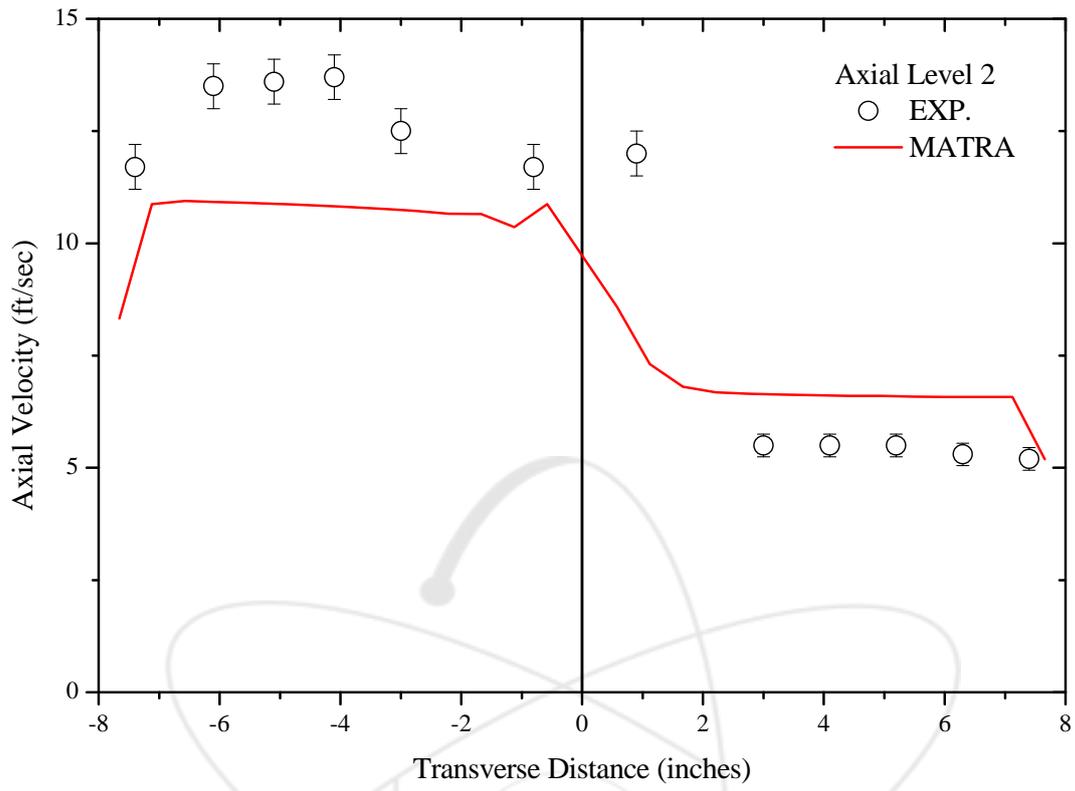


그림 3.43 국부 유속 분포 (레벨2)

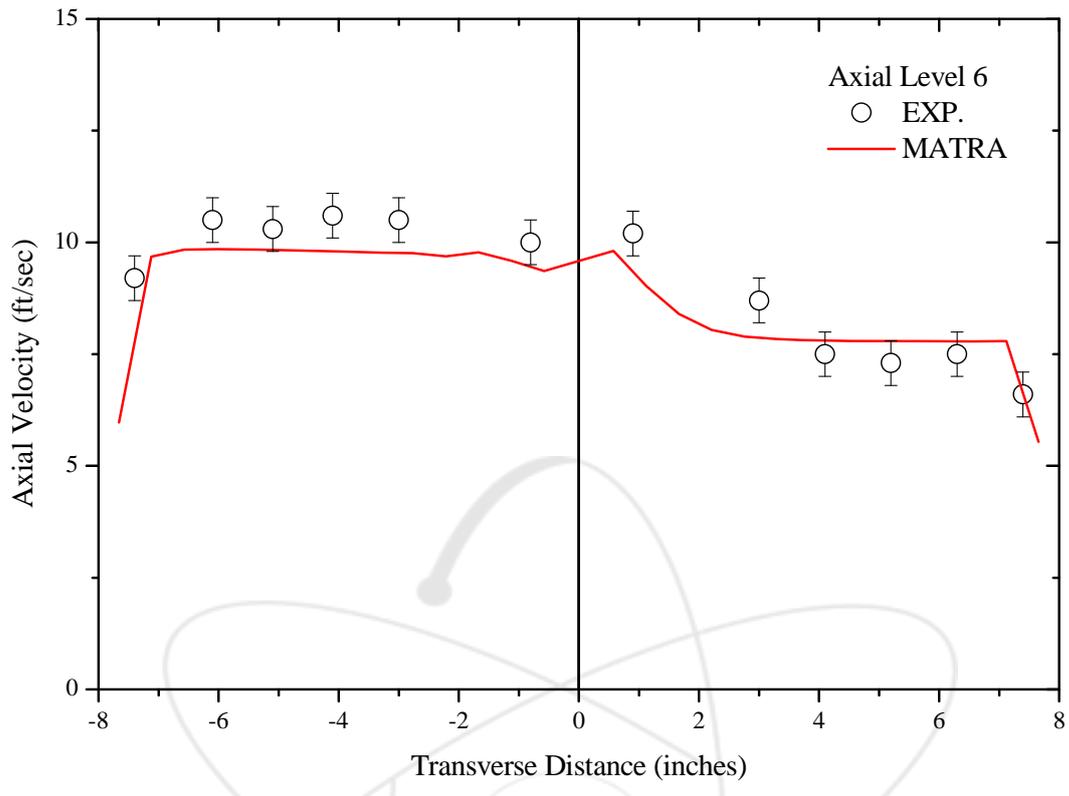


그림 3.44 국부 유속 분포 (레벨6)

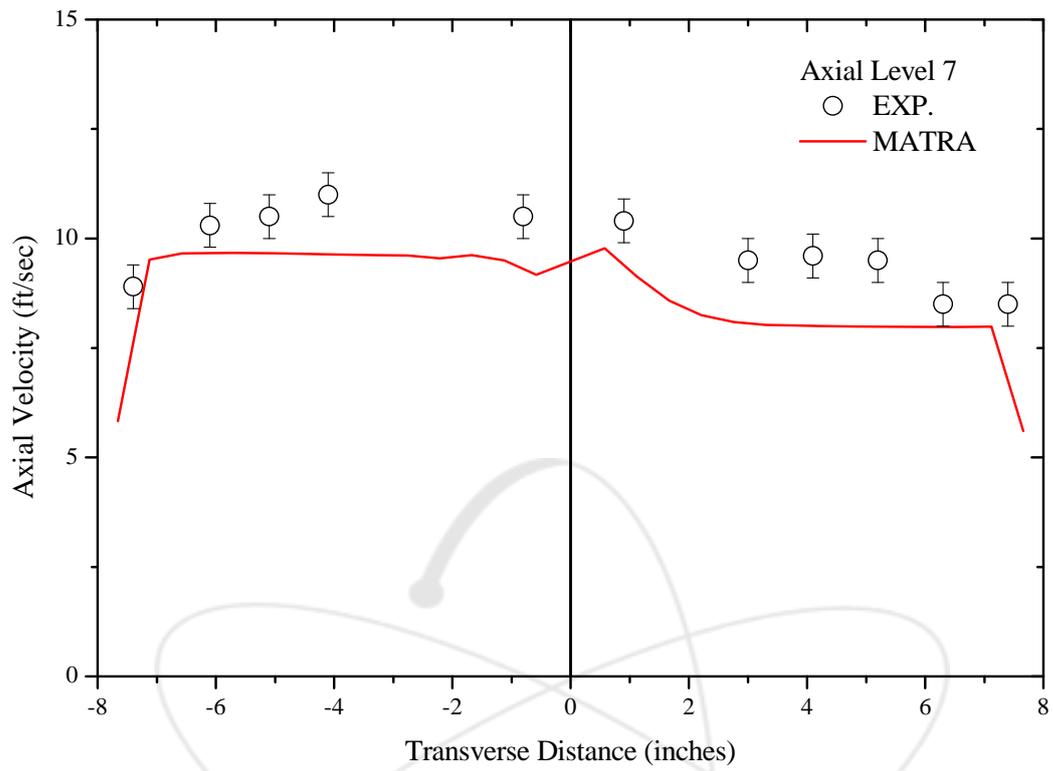


그림 3.45 국부 유속 분포 (레벨7)

### III.7. GE 3x3 집합체 부수로 2상 유동 분포 자료

#### III.7.1 개요

원자로 노심의 열수력적 특성을 향상시키기 위하여 집합체와 같은 복잡한 구조물 내의 유량 및 엔탈피 분포를 정확히 이해하는 것이 필요하다. 이는 CHF와 같은 열수력 성능 변수를 국부적으로 예측할 때 보다 정확한 국부 열수력 조건을 제공하여 신뢰도를 향상시킨다. GE에서 수행한 3x3 정방형 집합체 시험[13]은 가열봉을 사용한 steam-water 2상 유동 조건에서 부수로 출구의 유속 및 엔탈피 분포를 측정하였다. 시험은 전형적인 BWR 운전 조건에서 수행되었으며 부수로에서의 압력 강하 측정 자료도 수집되었다. 시험 자료는 부수로 단위의 국부 열수력장 예측 모델 개발 및 평가에 활용될 수 있다. 시험은 9개의 전기 가열봉을 사용하여 수행되었다. 반경 방향 출력 분포가 부수로 국부 조건에 미치는 영향을 조사하기 위하여 균일 출력 분포와 비균일 분포를 적용한 시험 집합체에 대하여 각각 시험을 수행했다. 시험 자료를 분석한 결과 집합체 내에서 유량 및 온도 분포의 변화가 부수로 형태에 따라 현저하게 다르게 나타났으며, 기존의 COBRA 계열 부수로 해석 코드는 2상 유동 조건에서의 국부 열수력장 거동을 제대로 예측하지 못하는 것으로 나타났다. 그리고 교차류의 엔탈피는 일반적으로 donor 수로의 엔탈피보다 크고 유동장 패턴에 따라 크게 영향을 받는 것으로 관찰되었다. 단상 및 2상 유동 조건에서 측정된 압력 강하 시험 자료를 분석한 결과 단상 유동 마찰압력 손실 계수는 원형관에 대한 마찰계수보다 크게 나타났으며, 2상 유동 마찰 증배계수는 Martinelli-Nelson 모델을 사용하여 적절히 예측할 수 있는 것으로 나타났다.

#### III.7.2 시험 장치 및 시험 자료

시험 루프 개략도 및 시험부 단면 형태는 각각 그림 3.46과 그림 3.47에 제시했다. 가열봉은 니켈 튜브를 사용했으며 봉별 출력 분포를 조절하기 위하여 peaking transformer를 사용했다. 봉간 간격 및 봉-벽면 간격은 3.2 mm S/S 핀을 사용하여 유지했으며, 이러한 핀은 채널을 따라서

축방향으로 여러 위치에 부착했다. 부수로 유량은 isokinetic 방법을 사용하여 측정했다. 이 방법을 적용할 경우 측정 부수로는 나머지 부수로와 격리되어야 하는데, 이를 위하여 약 0.25 mm 두께의 아주 얇은 금속 박막으로 만든 duct (sampling tube)를 사용했으며 한 차례에 한 개 부수에 대한 유량만을 측정할 수 있다. Isokinetic 방법을 적용하기 위하여 측정 대상 채널과 기준 채널 (보통 시험부 외벽에서 측정함)의 동일한 축방향 위치에 압력 탭을 설치하여 두 탭 간의 압력차를 측정했다. Sampling tube가 없는 상태에서의 압력차를 '기준 압력차'라고 하는데 일반적으로 0 근처의 값을 갖는다. Sampling tube가 장착된 이후에는 측정되는 압력차가 '기준 압력차'와 동일한 값을 갖도록 유량 조절 밸브를 조작한다. 이 상태에서 sampling tube로 추출되는 냉각재의 엔탈피는 calorimeter에서의 열평형 조건을 적용하여 평가한다. Calorimeter에서는 외부 냉각수의 유량 및 입구/출구 온도와 냉각된 sample flow의 온도를 측정한다. Calorimeter를 거친 sample flow는 터빈 유량계를 통과하게 되며 이때 유량이 측정된다. 표 3.10은 isokinetic 방법으로 측정된 부수로 유속 및 엔탈피 자료를 정리한 것이다. 3 종류의 부수로, 즉 corner, side, 그리고 center 채널에 대하여 여러 가지 열출력 및 유량 조건에서 측정했으며, 집합체 평균 유속 및 엔탈피는 열평형 관계식 등을 적용하여 평가했다. 시험 범위는 출구 건도 관점에서 보면 단상 유동 조건으로부터 약 36% 까지 분포하며 질량 유속은 대략 1500 kg/m<sup>2</sup>-sec 이하로서 비교적 저유속 조건에서 수행되었다.

### III.7.3 분석

본 분석에는 2상 유동 조건에서 부수로 간의 난류혼합 모형이 중요한 역할을 한다. 단상 유동 조건에서 사용되는 EM (Equal Mass exchange) 모델에 의하면 부수로 간의 난류 유속은 아래와 같다.

$$w'_{ij} = \beta \cdot s_{ij} \cdot G_{avg} \quad (3.3)$$

2상 유동 조건에서는 EVVD (Equal-Volume exchange and Void Drift) 모델을 적용하여 난류혼합 유속을 계산했다. 이에 따르면 난류 혼합에 의해 채널 i 에서 j 로 이동하는 순 유량은 아래와

같이 표현된다.

$$w'_{ij} - w'_{ji} \equiv w'_{i \leftrightarrow j} = (w'_{ij})_{SP} \cdot \theta \cdot \left[ (\alpha_j - \alpha_i) - K_{VD} \frac{(G_j - G_i)}{G_{avg}} \right] \quad (3.4)$$

Where,

$$\theta = 1 + 4 \cdot \frac{\chi}{\chi_c} \quad , \text{ for bubbly-slug flow } (\chi \leq \chi_c),$$

$$\theta = 1 + 4 \cdot \frac{1 - \chi_0/\chi_c}{\chi/\chi_c - \chi_0/\chi_c} \quad , \text{ for annular flow } (\chi > \chi_c),$$

$$\chi_0/\chi_c = 0.57 \cdot \text{Re}^{0.0417} \quad ,$$

$$\chi_c = \frac{0.4 \sqrt{g D_{hy} \rho_f \Delta \rho} / G + 0.6}{\sqrt{\rho_f / \rho_g} + 0.6} \quad ,$$

$$K_{VD} = 1.4 \quad (\text{MIT model})$$

이 모델에서 기포 이동 계수 (KVD)는 여러 가지 모델을 적용할 수 있는데, 본 분석에서는 THERMIT 코드에 적용된 바 있는 KVD=1.4 를 적용했다.

MATRA 입력 자료는 부록에 제시했으며, MATRA 분석 결과와 시험 자료를 비교한 결과는 그림 3.48 ~ 그림 3.50에 제시했다. EVVD 모델을 적용할 경우 2상 유동 조건에 대한 부수로 코드의 예측 정확도는 상당히 향상되는 것으로 나타난다. 그러나 corner 채널의 질량 유속의 경우 난류 모델을 개선한 경우에도 코드 정확도가 크게 나아지지 않는 것으로 나타났다.

표 3.8 시험부 주요 사양

	GE
Rod array	3x3
Heated length, m	1.83
Rod diameter, mm	14.5
Rod pitch, mm	18.8
Rod to wall gap, mm	3.37
Hydraulic diameter, mm	
- inner channel	16.4
- side channel	11.3
- corner channel	7.1
Radial power distribution	uniform
Axial power distribution	uniform
Spacer grid (no MV)	
- Number (active region)	6
- grid spacing, mm	305
- 압력손실계수 (Re=105)	1.0
Rod friction factor	
- a ( $f_B = a \cdot Re_b$ )	0.184
- b ( $f_B = a \cdot Re_b$ )	-0.2
Number of sampling channels	3

표 3.9 시험 범위

	GE 3x3
Pressure, bar	69
Power, MW	0.3 ~ 2.1
Heat flux, kW/m <sup>2</sup>	100 ~ 750
Mass velocity, kg/m <sup>2</sup> /s	720 ~ 1460
Bundle exit quality	3 ~ 32%
Number of test conditions	13



표 3.10 GE 3x3 집합체 부수로 유량 및 출구 건도 측정 자료

	ID	Heat Flux	$H_{in}$	Bundle average		Corner 채널		Side 채널		Center 채널	
				Mass Flux	Exit Quality						
		MBtu/h-f <sup>2</sup>	Btu/lbm	Mlb/h-f <sup>2</sup>	-						
1	1B	0	38.0	0.480	-	0.311	-	0.462	-	0.526	-
2	1C	0	38.0	0.990	-	0.701	-	0.939	-	1.150	-
3	1D	0	38.0	1.510	-	1.095	-	1.441	-	1.690	-
4	1E	0	38.0	1.970	-	1.620	-	1.910	-	2.190	-
5	2B2	0.225	392.7	0.530	0.029	0.372	0.003	0.521	0.014	0.540	0.030
6	2B3	0.225	433.9	0.535	0.090	0.550	0.072	0.530	0.076	0.521	0.104
7	2B4	0.225	489.8	0.535	0.176	0.524	0.133	0.517	0.180	0.560	0.220
8	2C1	0.225	485.4	1.060	0.042	0.965	0.029	1.066	0.018	1.077	0.059
9	2C2	0.225	507.5	1.068	0.075	0.968	0.063	1.028	0.075	1.144	0.100
10	2D1	0.450	283.4	0.540	0.110	0.425	0.083	0.560	0.105	0.556	0.117
11	2D3	0.450	418.2	0.540	0.318	0.490	0.260	0.532	0.330	0.563	0.364
12	2E1	0.450	399.7	1.080	0.035	0.950	0.004	1.102	0.026	1.162	0.051
13	2E2	0.450	445.9	1.080	0.106	1.046	0.049	1.078	0.097	1.180	0.105
14	2E3	0.450	513.5	1.060	0.215	0.965	0.160	1.081	0.185	1.126	0.249
15	2G1	0.675	316.7	1.070	0.038	0.882	0.032	0.968	0.044	1.142	0.043
16	2G2	0.675	352.8	1.080	0.090	1.000	0.020	1.111	0.068	1.130	0.110
17	2G3	0.675	395.9	1.070	0.160	0.865	0.074	1.132	0.127	1.160	0.176

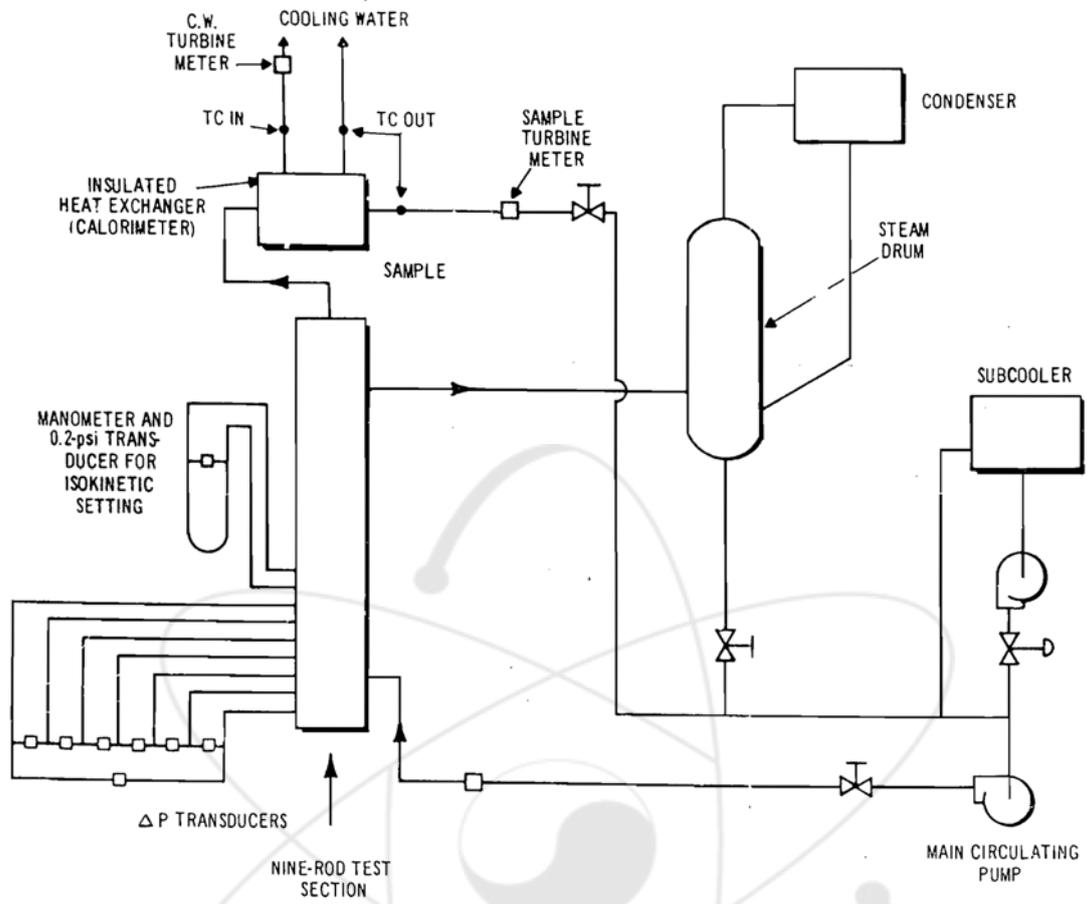


그림 3.46 시험 루프 개략도

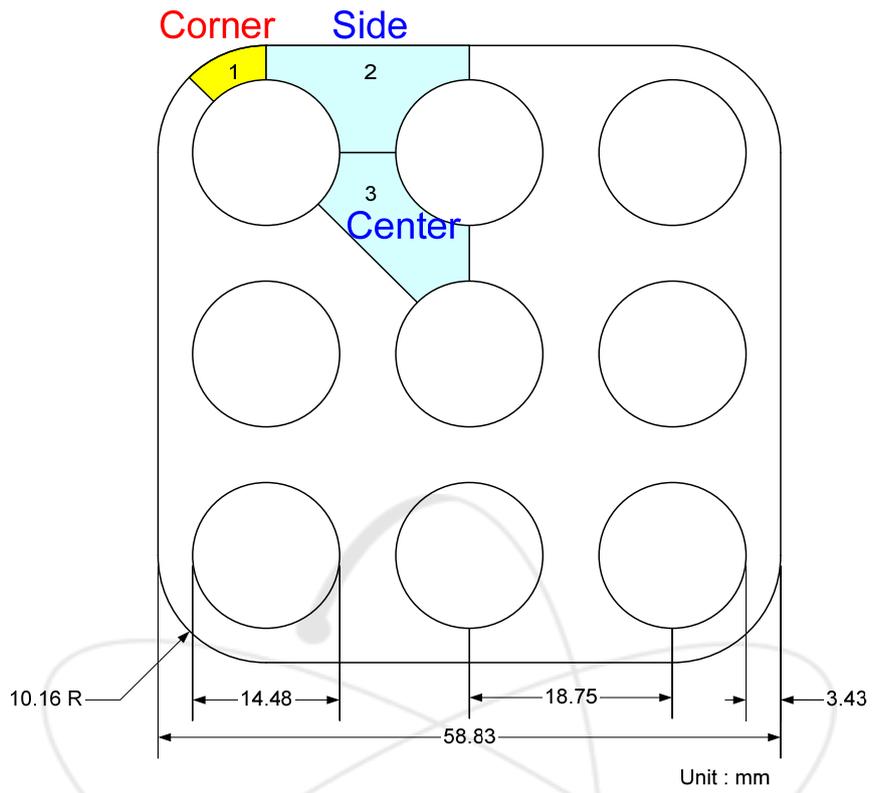


그림 3.47 부수로 해석 모형 및 채널 번호

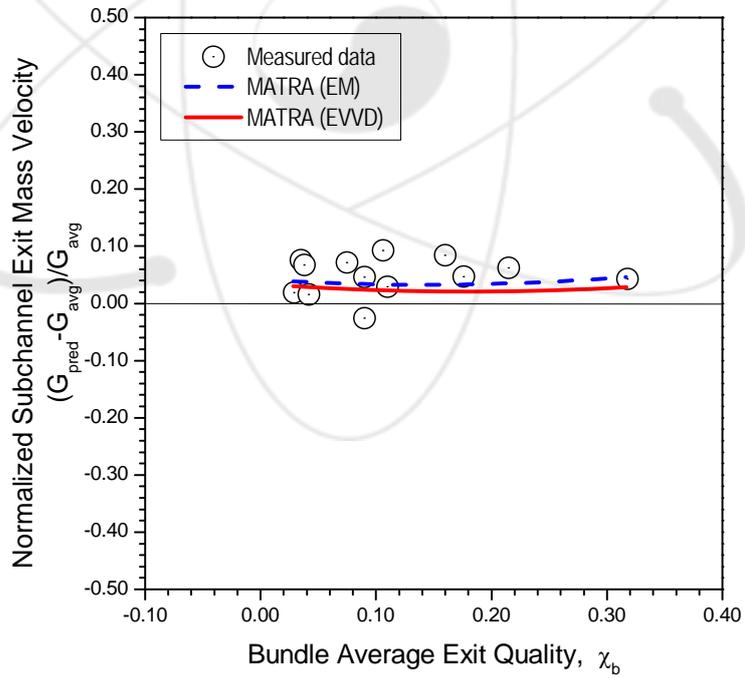
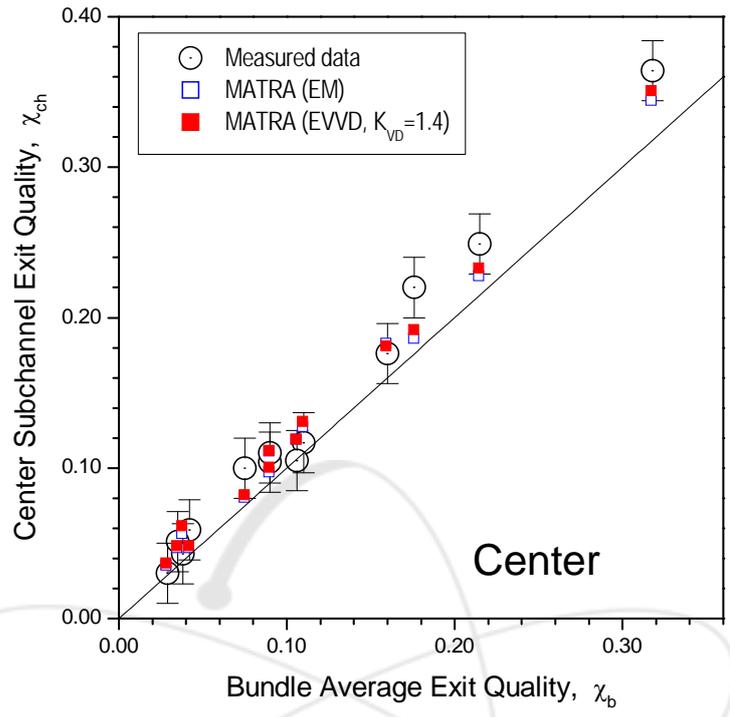


그림 3.48 난류모델에 따른 MATRA 코드의 center 부수로 출구건도 및 유량 예측성능 비교

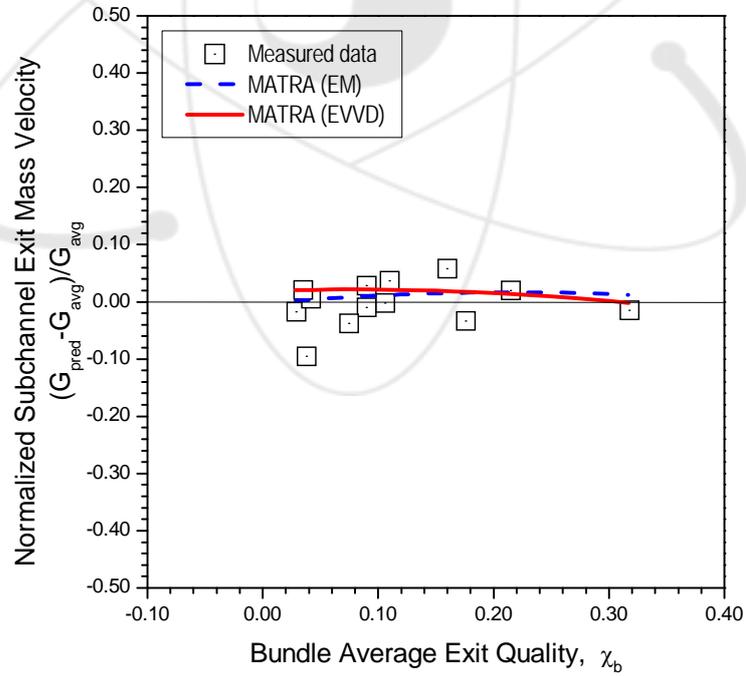
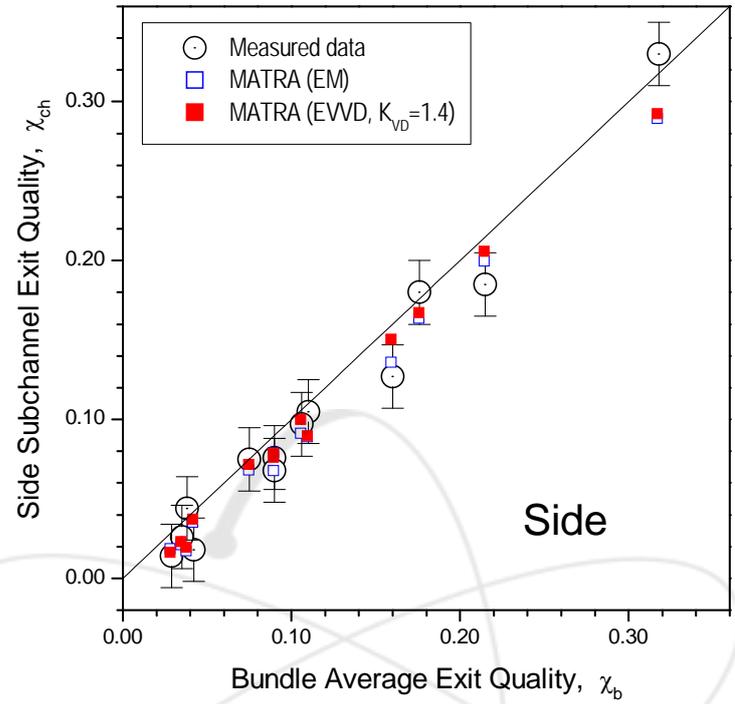


그림 3.49 난류모델에 따른 MATRA 코드의 side 부수로 출구건도 및 유량 예측성능 비교

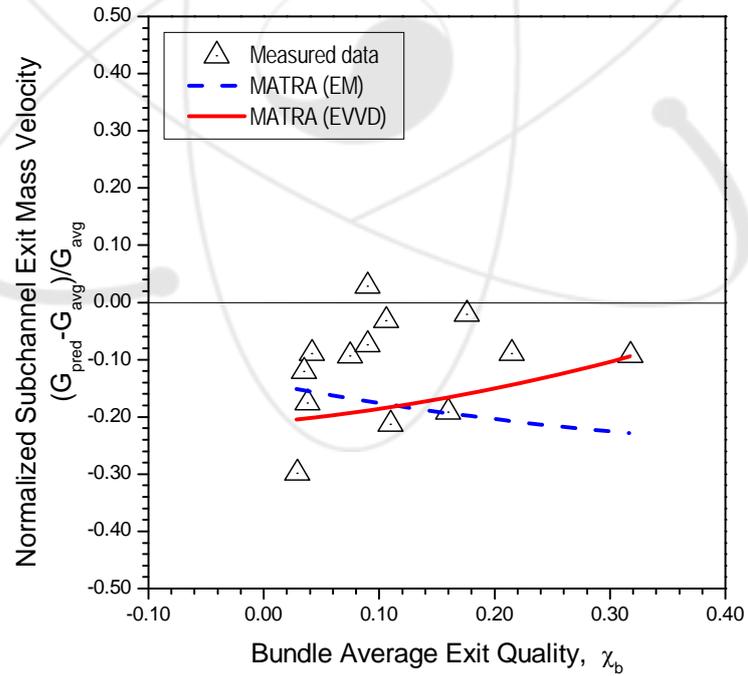
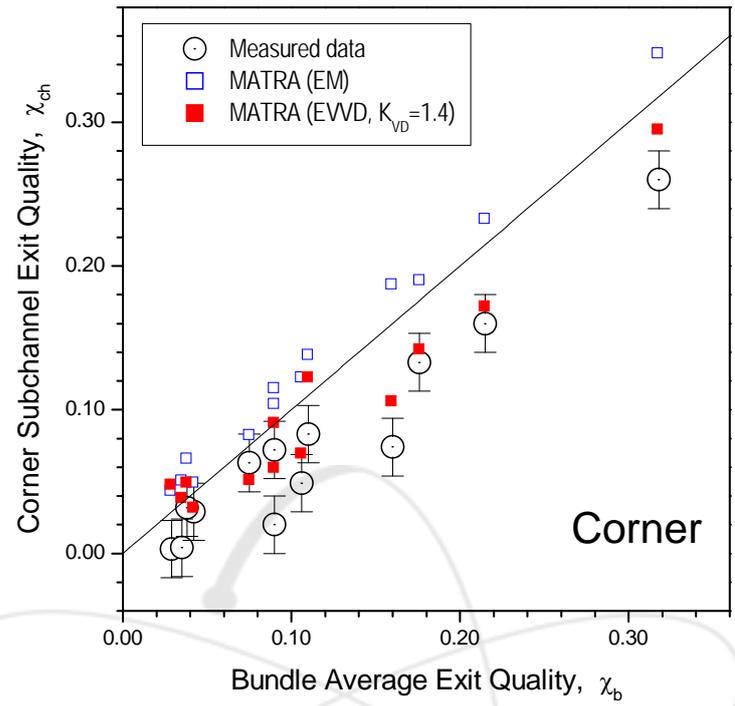


그림 3.50 난류모델에 따른 MATRA 코드의 corner 부수로 출구건도 및 유량 예측성능 비교

## III.8. ISPRA 4x4 집합체 부수로 2상 유동 분포 자료

### III.8.1 개요

부수로 해석 코드의 2상 유동장 해석 능력을 검증하기 위하여, 4x4 배열의 16개 가열봉으로 구성되는 시험집합체에 대한 부수로 출구의 엔탈피 및 질량 유량 분포 측정 자료[14]를 수집했다. 시험집합체는 축방향 및 반경방향으로 균일한 출력 분포를 갖는 16 개의 가열봉으로 구성된다. 부수로 출구의 엔탈피 및 유량을 측정하기 위하여 'iso-kinetic' 방법이 적용되었으며, 5 개의 부수로 출구에 sampling tube를 동시에 적용하여 각 부수로의 엔탈피 및 유량 측정 자료를 획득했다. 시험집합체 형태는 대표적인 PWR 및 BWR 집합체 형태를 모사한 두 종류로서 각각 EUROP 및 PELCO-S로 명명되었으며, 압력 조건도 PWR 및 BWR 운전 조건을 고려하여 160 bar 및 70 bar 조건에서 시험을 수행했다.

시험 결과에 의하면 BWR 압력 조건에서 모서리 수로(corner subchannel)의 물성치가 이상 거동을 나타내었으며, PWR 압력 조건에서는 이러한 거동이 발견되지 않았다. 이러한 이상 거동은 압력 조건에 의존하며 집합체 기하 형태와는 무관한 것으로 나타났다.

부수로 해석 코드를 사용하여 부수로 출구 엔탈피 및 유속을 계산하고 이를 시험 자료와 비교했다. 부수로 간의 난류혼합 모델은 코드 예측 결과에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다[15]. BWR 조건의 경우 기존의 부수로 해석 코드가 주로 사용하고 있는 동일질량교환 모델 대신 동일체적교환에 근거한 void drift 모델을 사용하여 시험 자료를 적절하게 예측할 수 있는 것으로 나타났다. PWR 조건의 경우에는 기존의 동일질량교환 모델의 예측 성능도 적절한 것으로 나타났다.

### III.8.2 시험 장치 및 시험 자료

2상 유동 조건 부수로 출구 엔탈피 및 유속 측정 시험은 유럽 JRC (Joint Research Center)의 Ispra (이탈리아 북부지방) sector에 있는 고온고압 water test loop (BOWAL: Boiling Water Loop)에서 수행되었다. BOWAL의 주요 사양은 다음과 같다.

최대 운전 압력	250 bar
최대 계통 온도	450 °C
시험부 최대 출력	3.6 MW

시험부는 4x4 정방형 격자구조를 갖는 집합체이며, 시험부의 주요 사양은 표 3.11에 정리했다. Iso-kinetic 방법에서는 자료를 수집하고자 하는 채널 (sample channel)에 probe를 설치하여 sampling을 하게 되는데, 이 때 probe 삽입으로 인하여 채널의 압력 손실 특성이 달라지면 유량 분포에 영향을 주게 되므로 이를 보정해 주어야 한다. 그림 3.51은 시험부 단면을 나타내는데, 빗금으로 표시된 자료 수집 부수로의 출구 근처에 압력 탭을 설치하여 압력을 측정하고 ('s'로 표시됨), 이를 보정하기 위한 참조 압력치는 그림의 'r'로 표시된 위치에서 측정한다.

지지격자의 압력 손실 계수는 실험을 통해 직접 측정되기 어렵다. 이는 압력손실 측정 자료로부터 적절한 보정 및 계산을 통하여 평가되는데, 여기서는 Ulrych의 cell-structure 방법을 적용하여 평가했다. Re=100,000 조건에서 평가된 압력손실계수는 3.11에 정리했다.

집합체별 시험 범위는 표 3.12에 정리했다. 부수로 출구 엔탈피 및 유량 분포 자료를 정리하여 부수로 해석 코드 계산 결과와 비교 했다.

### III.8.3 분석

#### (1) 부수로 해석 입력

MATRA 코드 해석에 사용된 주요 입력은 아래와 같다.

Rod friction factor: 표 3.11

축방향 출력 분포: Uniform

부수로 기하 형태 (그림 3.52 참조)

채널 type	채널 번호	PELCO-S			EUROP		
		Flow area mm <sup>2</sup>	Wetted perimeter mm	Heated perimeter mm	Flow area mm <sup>2</sup>	Wetted perimeter mm	Heated perimeter mm
Corner	1	26.4	14.86	5.89	19.2	11.36	4.22
Side	2 (4)	123.6 (61.8)	43.06 (21.53)	23.56 (11.78)	73.3 (36.7)	31.19 (15.59)	16.89 (8.44)
Center	3, 5 (6)	101.8 (25.4)	23.56 (5.89)	23.56 (5.89)	56.9 (14.2)	16.89 (4.22)	16.89 (4.22)

지지격자 축방향 위치 (입구로부터)

번호	PELCO-S		EUROP	
	축방향 상대 위치 (L=3657.6 mm)	지지격자 type	축방향 상대 위치 (L=3657.6 mm)	지지격자 type
1	0.081	1	0.081	1
2	0.218	1	0.218	1
3	0.355	1	0.355	1
4	0.491	1	0.491	1
5	0.628	1	0.628	1
6	0.765	1	0.765	1
7	0.902	1	0.902	1

부수로별 지지격자 압력손실 계수

부수로 번호	PELCO-S		EUROP	
	지지격자 type	압력손실계수	지지격자 type	압력손실계수
1	1	1.311	1	1.352
2	1	1.036	1	0.960
3	1	0.709	1	0.848
4	1	1.031	1	0.965
5	1	0.652	1	0.900
6	1	0.651	1	0.987

가열봉 자료: 표 3.11 및 그림 3.52 참조

### Turbulent mixing model:

- Single-phase turbulent mixing model: EM

$$w'_{ij} = \beta \cdot s_{ij} \cdot G_{avg}$$

- Two-phase mixing & void drift model: EVVD

$$w'_{ij} - w'_{ji} \equiv w'_{i \leftrightarrow j} = (w'_{ij})_{SP} \cdot \theta \cdot \left[ (\alpha_j - \alpha_i) - K_{VD} \frac{(G_j - G_i)}{G_{avg}} \right]$$

where,

$$\theta = 1 + 4 \cdot \frac{\chi}{\chi_c} \quad , \text{ for bubbly-slug flow } (\chi \leq \chi_c),$$

$$\theta = 1 + 4 \cdot \frac{1 - \chi_0/\chi_c}{\chi/\chi_c - \chi_0/\chi_c} \quad , \text{ for annular flow } (\chi > \chi_c),$$

$$\chi_0/\chi_c = 0.57 \cdot \text{Re}^{0.0417} \quad , \quad \chi_c = \frac{0.4 \sqrt{g D_{hy} \rho_f \Delta \rho} / G + 0.6}{\sqrt{\rho_f / \rho_g} + 0.6} \quad ,$$

$$K_{VD} = 1.4 \quad (\text{MIT model})$$

### Pressure drop model:

- Single-phase pressure drop model:

$$\Delta P_f = f \left( \frac{L}{d_{hy}} \right) \frac{G^2}{2\rho} + \sum_{n=1}^N K_{grid,n} \frac{G^2}{2\rho}$$

$$f = 0.184 \times \text{Re}^{-0.2}$$

- Two-phase pressure drop model: Armand model

$$\Delta P_f = \Phi \cdot f \left( \frac{L}{d_{hy}} \right) \frac{G^2}{2\rho}$$

$$\Phi = \frac{(1 - \chi)^2}{(1 - \alpha)^{1.42}} \quad , \text{ for } 0.0 < \chi \leq 0.6$$

$$\Phi = 0.478 \times \frac{(1 - \chi)^2}{(1 - \alpha)^{2.2}} \quad , \text{ for } 0.6 < \chi \leq 0.9$$

$$\Phi = 1.73 \times \frac{(1 - \chi)^2}{(1 - \alpha)^{1.64}} \quad , \text{ for } 0.9 < \chi \leq 1.0$$

## (2) MATRA 분석 결과

### PWR 조건 분석 (EUROP-PWR)

EUROP-PWR은 160 bar 조건에서 PWR 집합체 형태를 갖는 시험집합체를 사용하여 수행한 시험 자료로서, 그림 3.53 ~ 그림 3.55는 각각 corner 채널 (채널 번호 1), side 채널 (채널 번호 2), 그리고 center 채널 (채널 번호 6)에 대한 부수로 출구 국부 건도 (thermodynamic equilibrium quality)와 출구 질량 유속 분석 결과를 나타낸 것이다. 분석에 사용된 난류혼합 모델은 동일질량 교환 모델 (EM)이다. 분석 결과 부수로 출구 건도는 비교적 잘 예측하는데 비하여 부수로 출구 국부 유속은 시험 자료와 비교할 때 특히 corner 부수로에서 상당한 오차를 보이는 것으로 나타났다 (그림 3.56).

동일 체적 교환 모델을 적용하여 분석한 결과는 그림 3.57 ~ 그림 3.60에 제시했다. 이 경우 corner 채널의 예측 성능은 EM 보다 나빠졌으며 center 및 side 채널의 질량 유속 예측 성능은 EM에 비하여 향상되었다.

### BWR 조건 분석 (EUROP-BWR)

EUROP-BWR은 70 bar 조건에서 PWR 집합체 형태를 갖는 시험집합체를 사용하여 수행한 시험 자료로서, 그림 3.61 ~ 그림 3.63는 각각 corner 채널 (채널 번호 1), side 채널 (채널 번호 2), 그리고 center 채널 (채널 번호 6)에 대한 부수로 출구 국부 건도 (thermodynamic equilibrium quality)와 출구 질량 유속 분석 결과를 나타낸 것이다. 분석에 사용된 난류혼합 모델은 동일질량 교환 모델 (EM)이다. 분석 결과 corner 부수로 출구 건도는 고건도 영역에서 크게 예측 되는 것으로 나타났으며, side 및 center 부수로에서는 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다. 부수로 출구 국부 유속은 corner 부수로에서 시험 자료보다 약 20% 정도 낮게 예측하는 것으로 나타났다 (그림 3.64).

동일 체적 교환 모델을 적용하여 분석한 결과는 그림 3.65 ~ 그림 3.68에 제시했다. 이 경우 corner 채널의 예측 성능은 EM 보다 향상되었으며 corner 수로의 질량 유속에 대한 예측성능은 불충분하나 전반적으로 좋은 예측 성능을 보이는 것으로 나타났다.

### **BWR 조건 분석 (PELCO-S)**

PELCO-S는 70 bar 조건에서 BWR 집합체 형태를 갖는 시험집합체를 사용하여 수행한 시험 자료로서, 그림 3.69 ~ 그림 3.71은 각각 corner 채널 (채널 번호 1), side 채널 (채널 번호 2), 그리고 center 채널 (채널 번호 6)에 대한 부수로 출구 국부 건도 (thermodynamic equilibrium quality)와 출구 질량 유속 분석 결과를 나타낸 것이다. 분석에 사용된 난류혼합 모델은 동일질량 교환 모델 (EM)이다. 분석 결과 EM 모델은 corner 부수로의 출구 건도 및 질량 유속에 대하여 상당히 over-prediction 하는 경향을 나타내었다. Side 수로와 center 수로에서는 비교적 잘 예측했으나, 건도가 높은 영역에서는 side 수로의 건도를 높게 예측하는 경향을 나타내었다. 부수로 출구 국부 유속은 corner 부수로에서 약 20~30% 크게 예측하는 것으로 나타났다 (그림 3.72).

동일 체적 교환 모델을 적용하여 분석한 결과는 그림 3.73 ~ 그림 3.76에 제시했다. 이 경우 corner 채널의 건도 예측 성능은 EM에 비하여 현저하게 향상되었으나 질량 유속에 대한 예측 성능은 그만큼 나아지지 않았다.

### **III.8.4 결과 및 논의**

2상 유동 부수로 출구 엔탈피에 대한 MATRA 코드의 예측 성능을 평가한 결과 center 및 side 채널에 대한 예측 성능은 전반적으로 우수하며 corner 수로의 경우 압력이 낮은 BWR 조건에서는 예측 성능이 난류혼합 모델에 따라 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. PWR 조건에서는 기존의 EM 모델이 적절한 예측 성능을 보인데 비하여 BWR 조건에서는 void drift를 고려한 난류혼합 모델의 예측 성능이 우수했다. 부수로 질량 유속의 경우에는 엔탈피에 비하여 MATRA 코드의 예측 오차가 상대적으로 크게 나타났으며, 이는 난류혼합모델의 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났다. 예측 성능을 향상시키기 위하여 2상 유동 조건 부수로 압력손실 모델에 대한 검토가 필요한 것으로 판단된다.

표 3.11 시험부 주요 사양

Name of test bundle	Ispra 16-rod		
	PELCO-S	EUROP-BWR	EUROP-PWR
Rod array	4x4	4x4	4x4
Heated length, m	3.66	3.66	3.66
Rod diameter, mm	15	10.8	10.8
Rod pitch, mm	19.5	14.3	14.3
Rod to wall gap, mm	3.37	2.93	2.93
Hydraulic diameter, mm			
- inner channel	17.3	13.5	13.5
- side channel	11.5	9.4	9.4
- corner channel	7.1	6.8	6.8
Radial power distribution	uniform	uniform	uniform
Axial power distribution	uniform	uniform	uniform
Spacer grid (no MV)			
- Number	7	7	7
- grid spacing, mm	500	500	500
- 압력손실계수 (Re=105)	0.830	0.944	0.944
Rod friction factor			
- a ( $f_B = a \cdot Re_b$ )	0.184	0.184	0.184
- b ( $f_B = a \cdot Re_b$ )	-0.2	-0.2	-0.2
- $f/f_B$	1.392	1.298	1.298
Number of sampling channels	4	5	5

표 3.12 시험 범위

	PELCO-S	EUROP-BWR	EUROP-PWR
Pressure, bar	70	70	160
Power, MW	0.3 ~ 2.1	0.3 ~ 2.1	1.4 ~ 2.1
Heat flux, kW/m <sup>2</sup>	100 ~ 750	150 ~ 1050	700 ~ 1050
Mass velocity, kg/m <sup>2</sup> /s	1000, 1500, 2000	1000, 2000	2500 ~ 3500
Bundle exit quality	0 ~ 30%	-17 ~ 22%	-20 ~ 20%
Number of data points	211	49	205



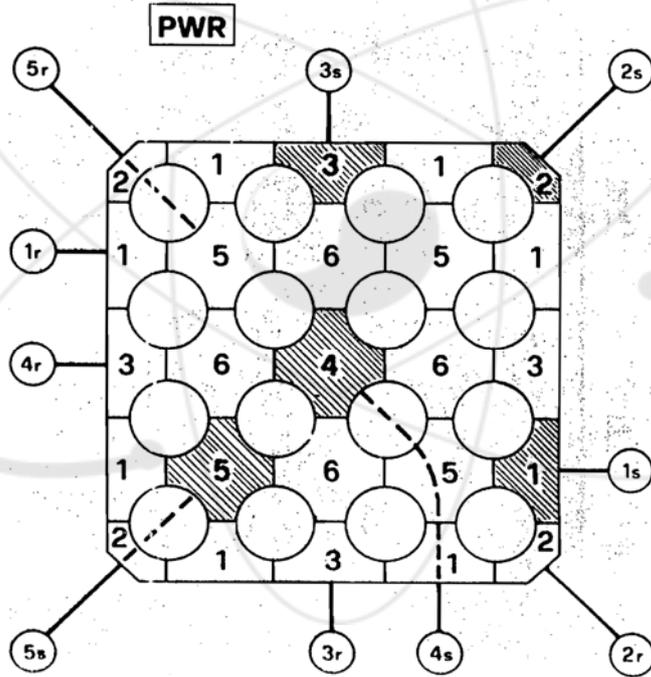
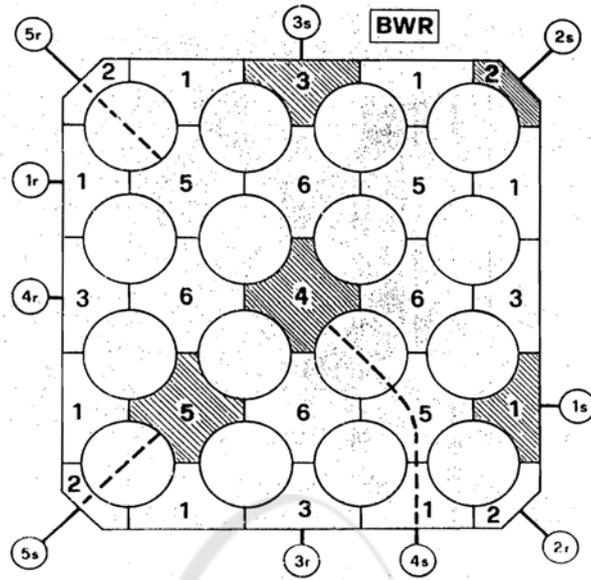


그림 3.51 시험부 단면도 및 자료 수집 부수로 위치

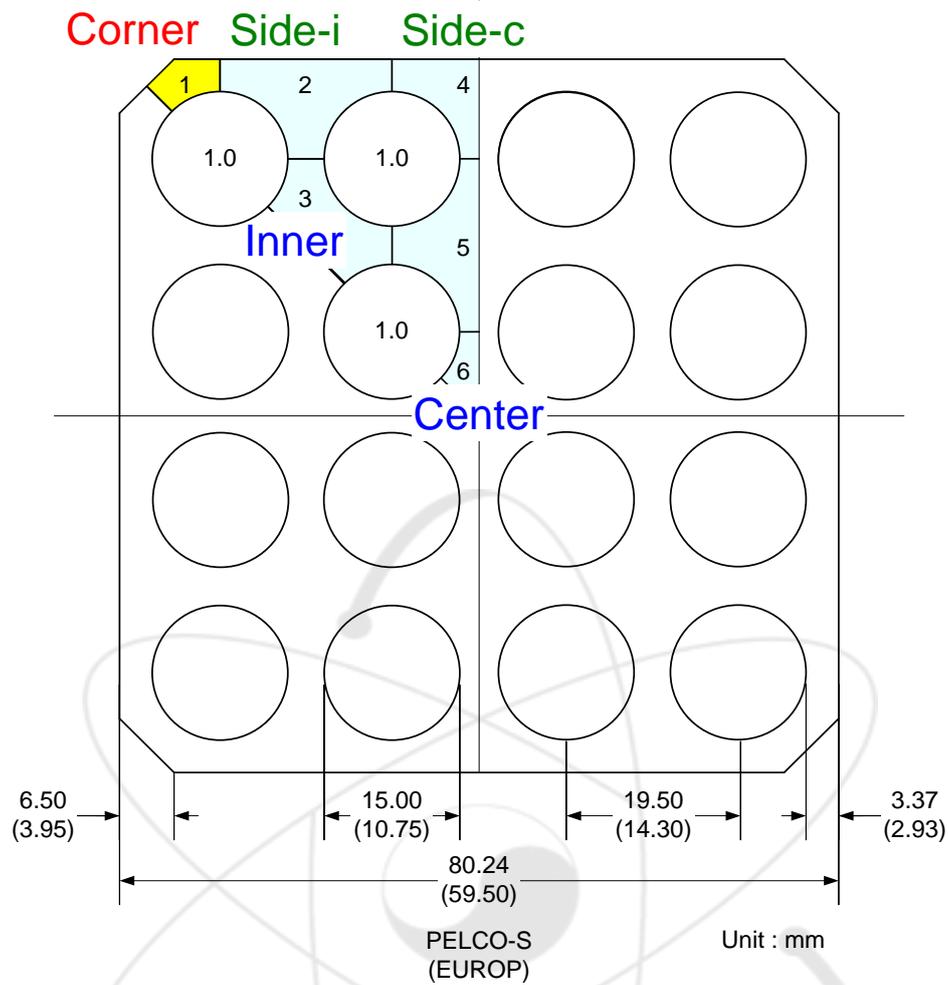


그림 3.52 부수로 해석 모형 및 채널 번호

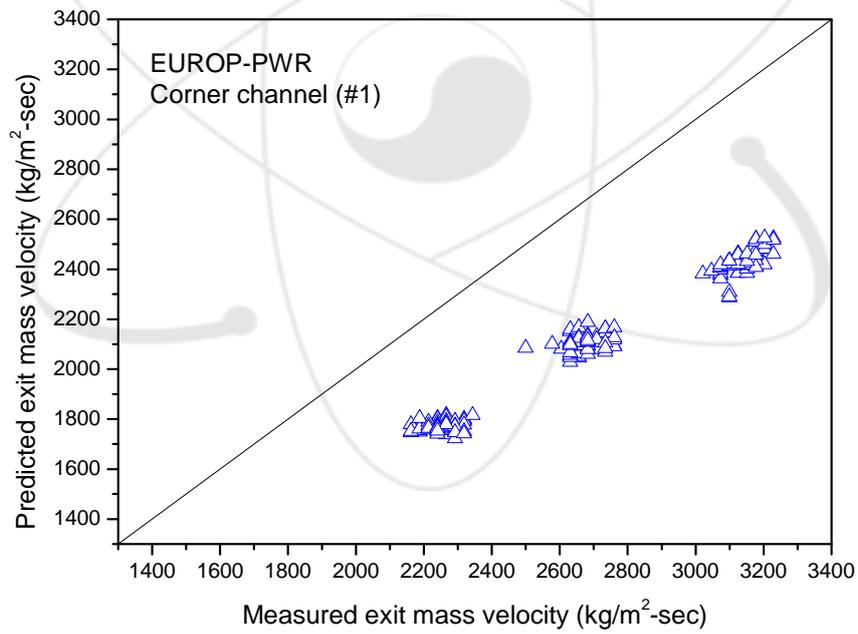
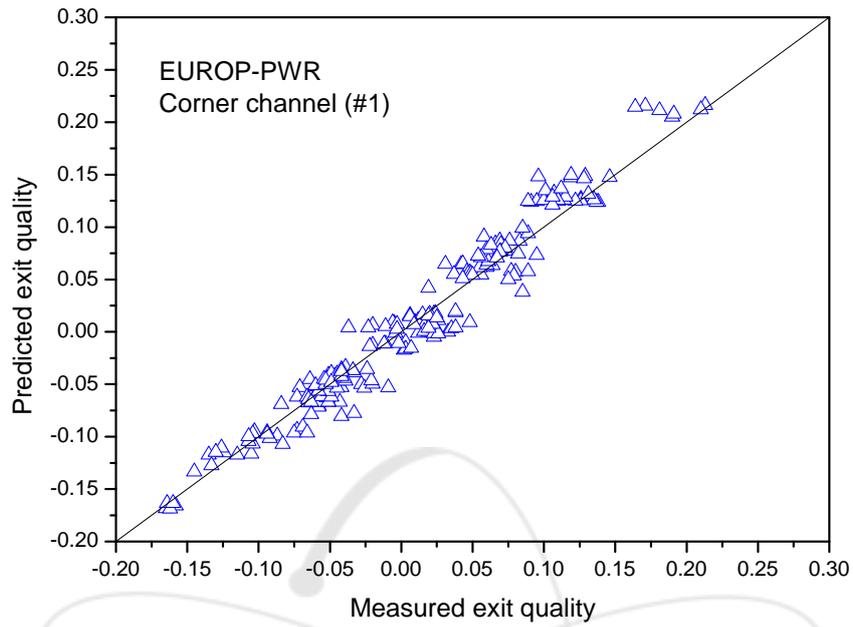


그림 3.53 Corner 채널 (#1) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (EUROP-PWR, EM)

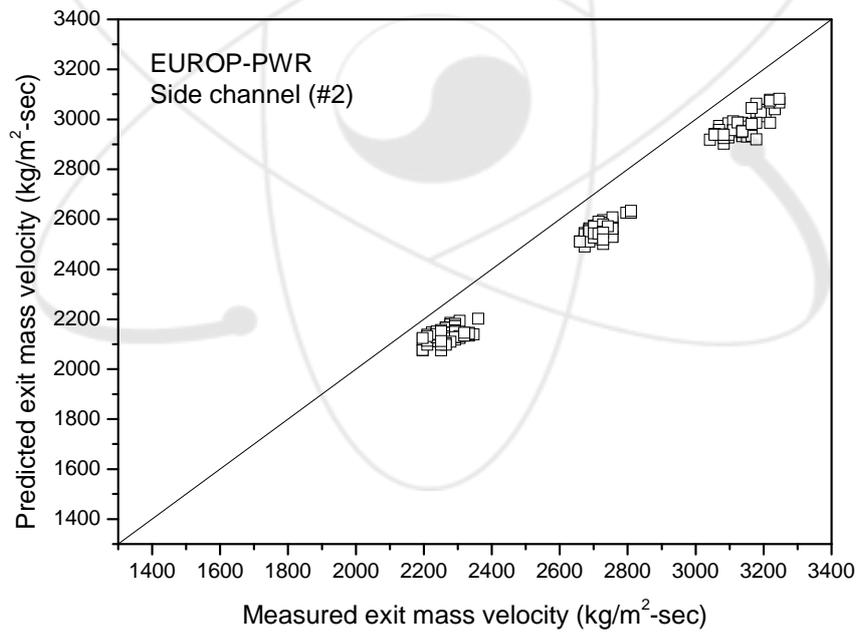
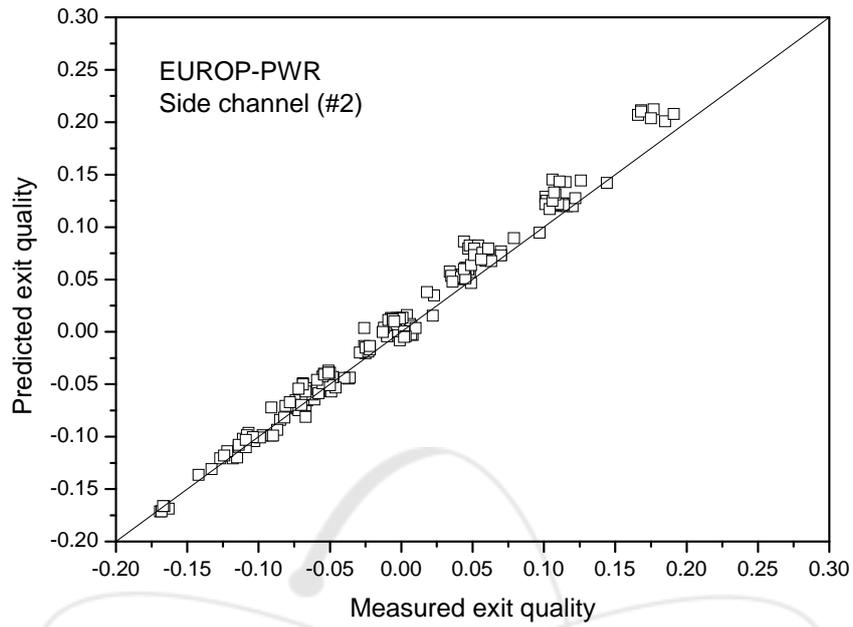


그림 3.54 Side 채널 (#2) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (EUROP-PWR, EM)

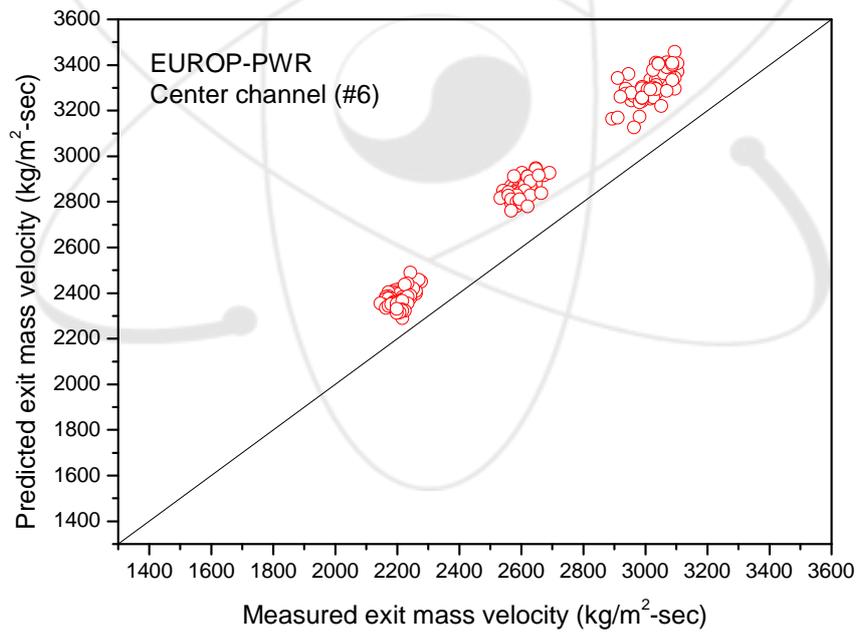
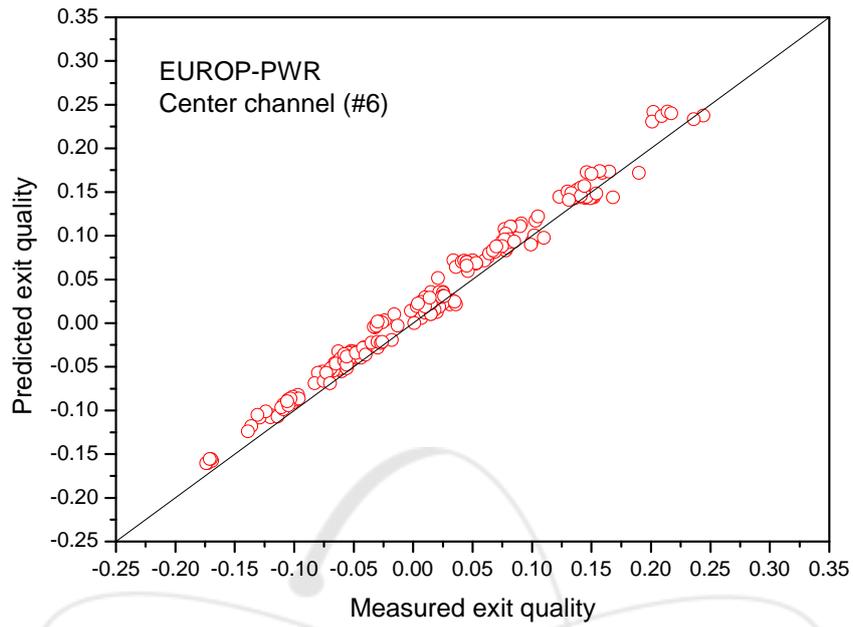


그림 3.55 Center 채널 (#6) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (EUROP-PWR, EM)

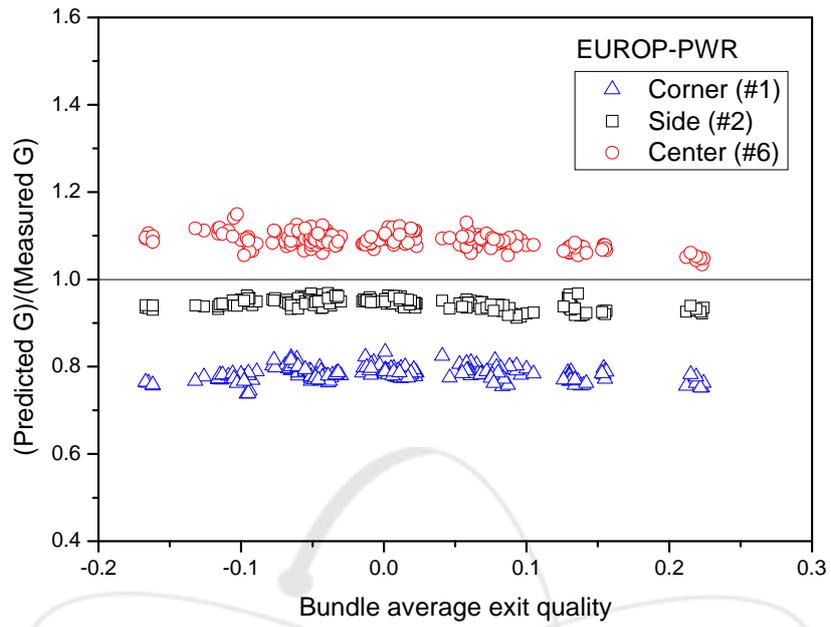


그림 3.56 부수로별 출구 유속 예측 오차 비교 (EUROP-PWR, EM)

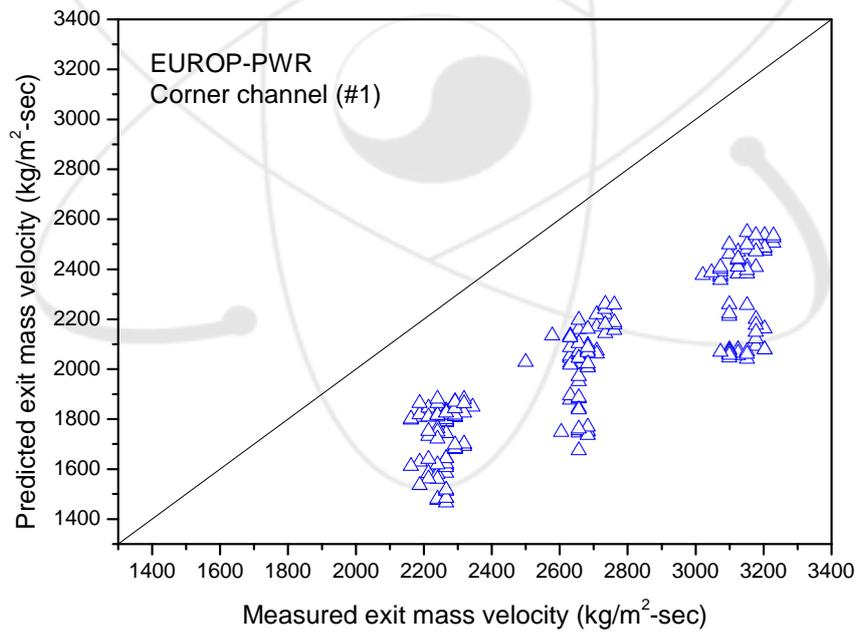
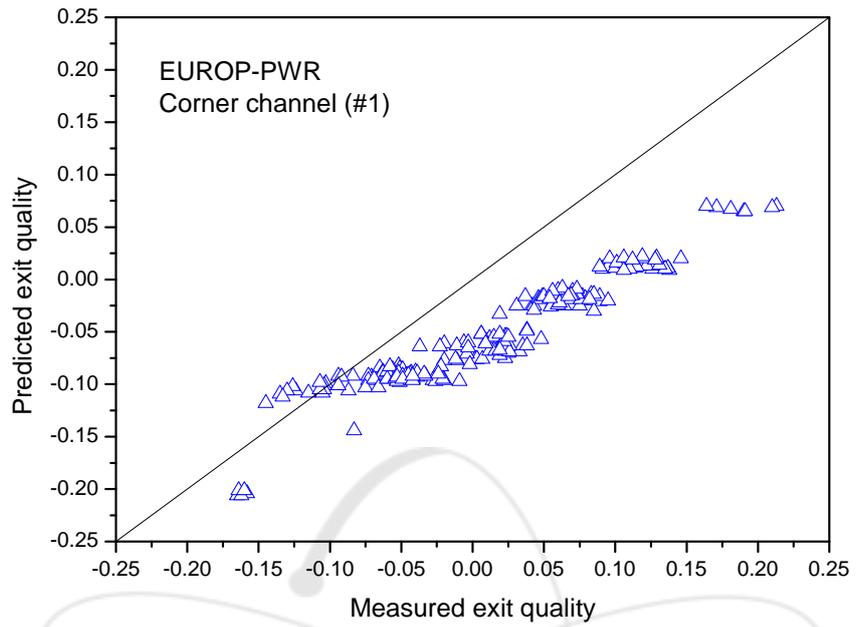


그림 3.57 Corner 채널 (#1) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (EUROP-PWR, EVVD)

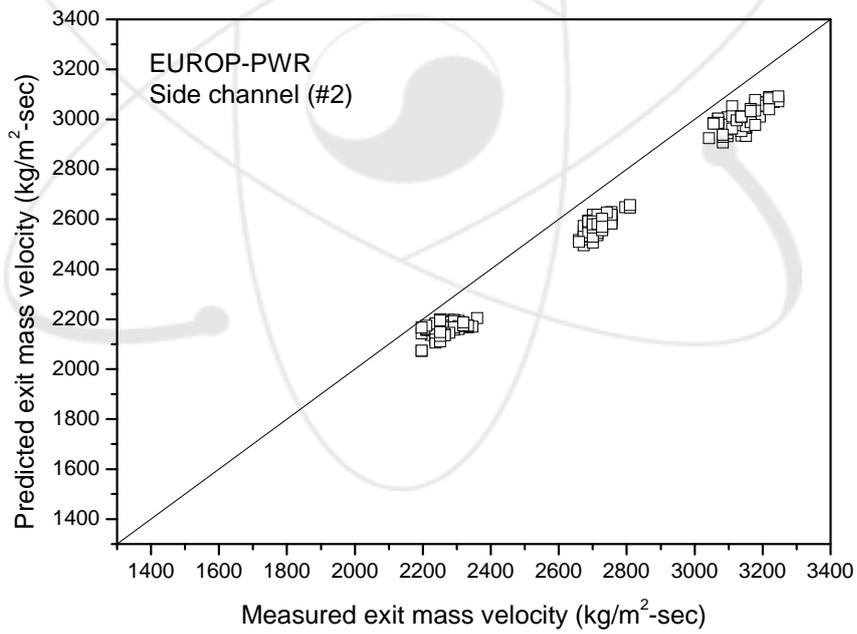
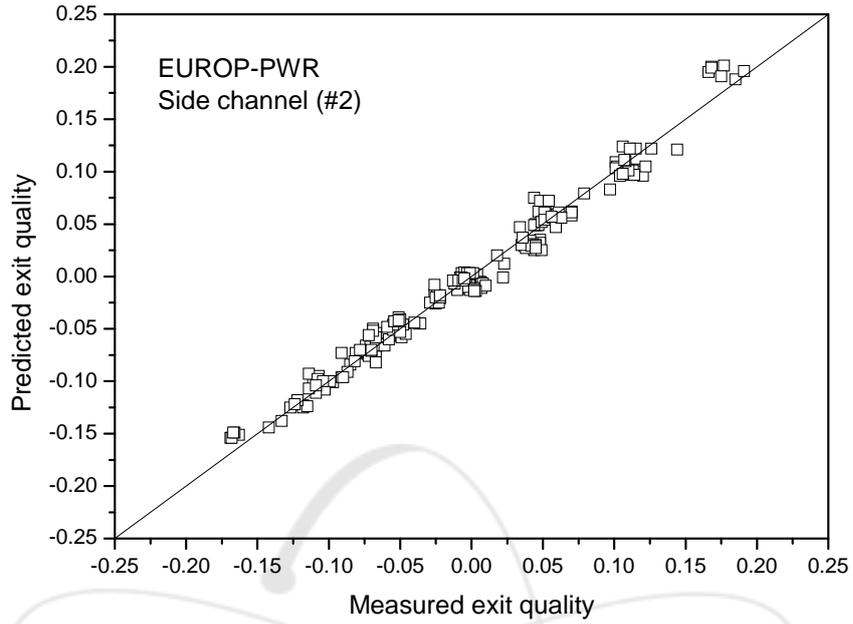


그림 3.58 Side 채널 (#2) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (EUROP-PWR, EVVD)

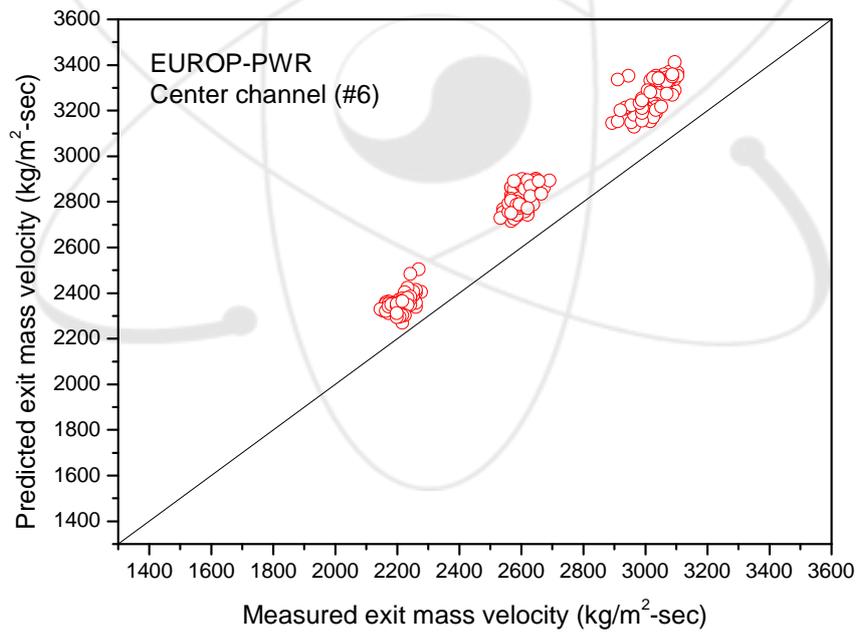
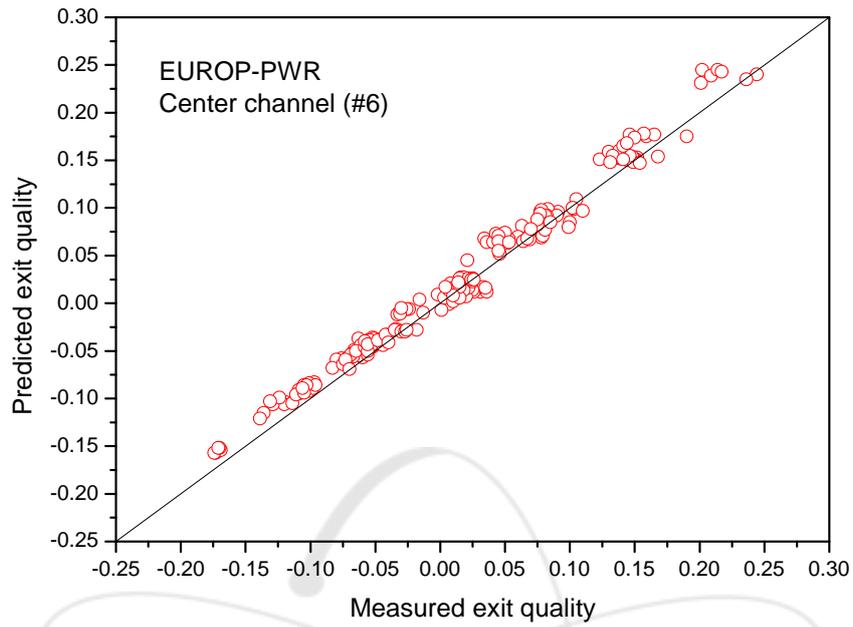


그림 3.59 Center 채널 (#6) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (EUROP-PWR, EVVD)

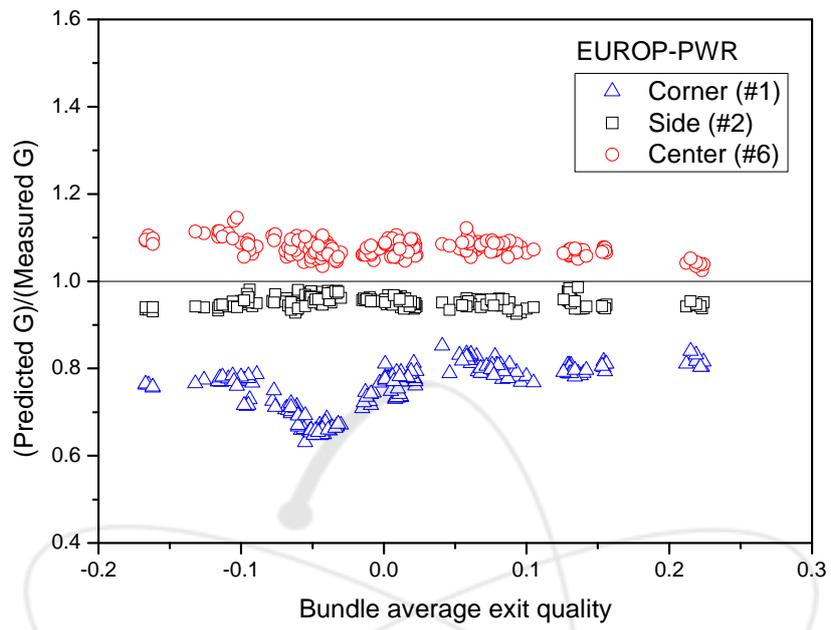


그림 3.60 부수로별 출구 유속 예측 오차 비교 (EUROP-PWR, EVVD)

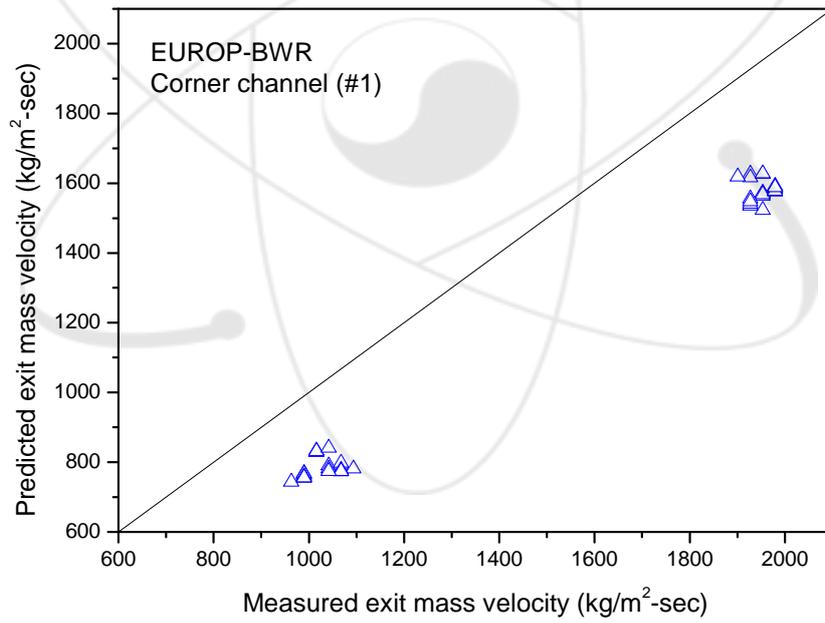
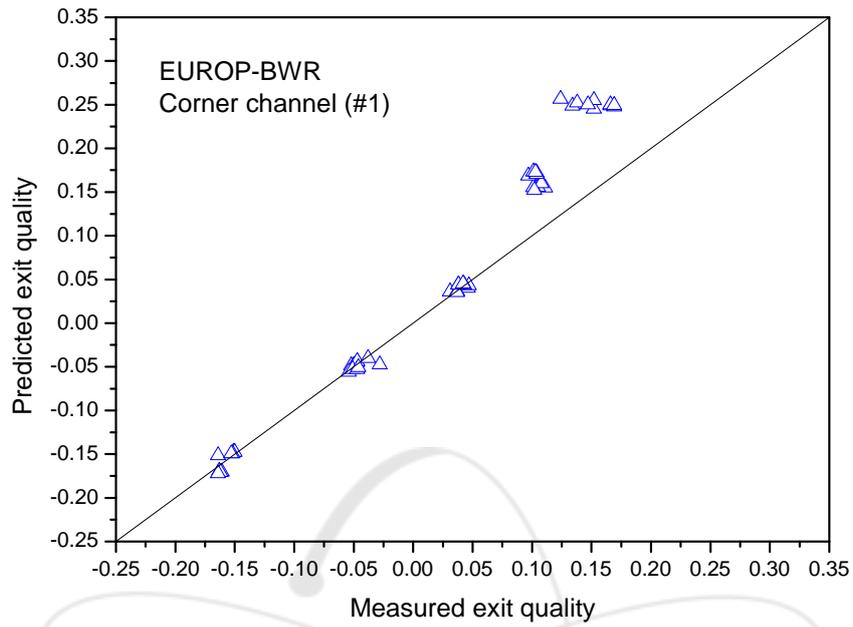


그림 3.61 Corner 채널 (#1) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (EUROP-BWR, EM)

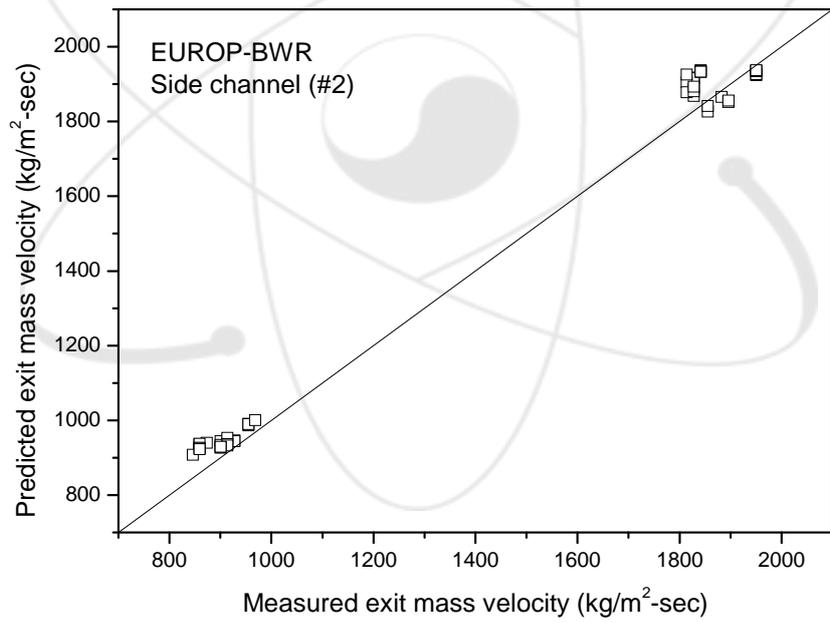
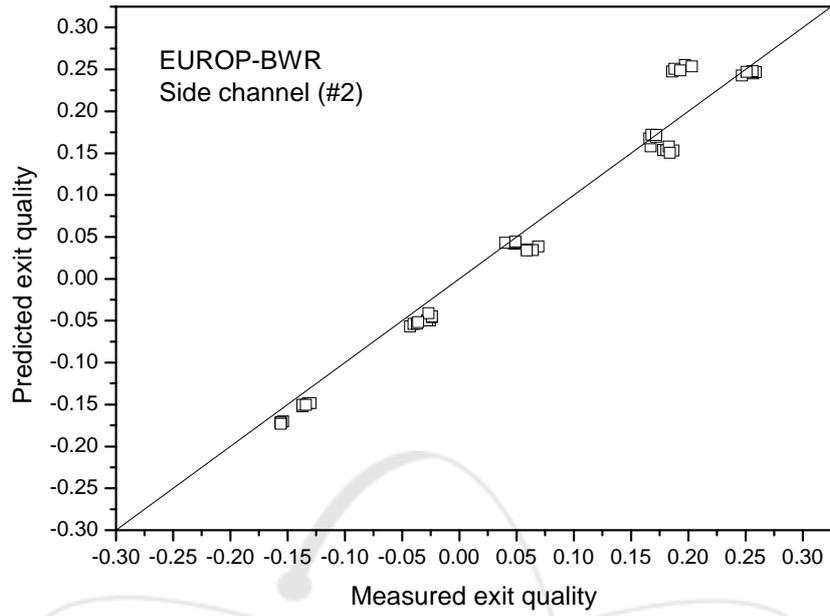


그림 3.62 Side 채널 (#2) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (EUROP-BWR, EM)

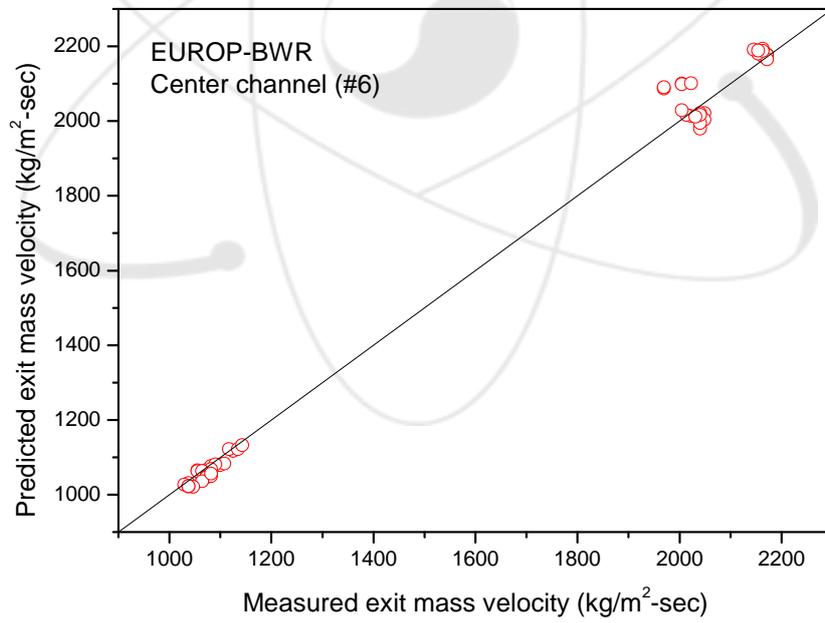
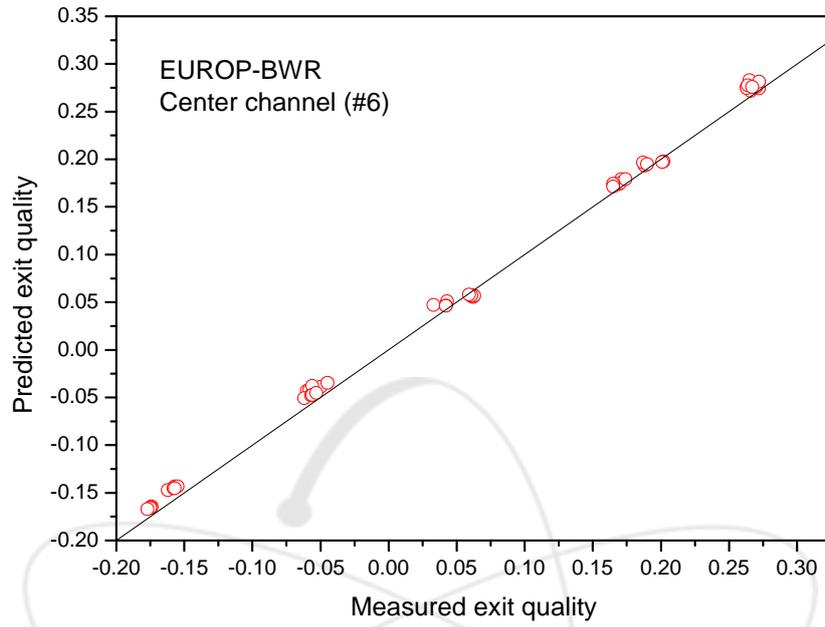


그림 3.63 Center 채널 (#6) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (EUROP-BWR, EM)

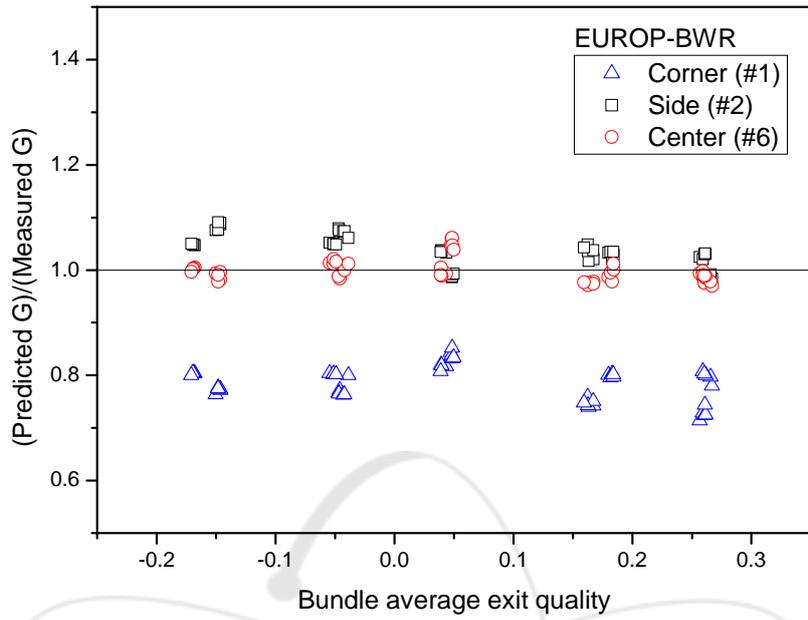


그림 3.64 부수로별 출구 유속 예측 오차 비교 (EUROP-BWR, EM)

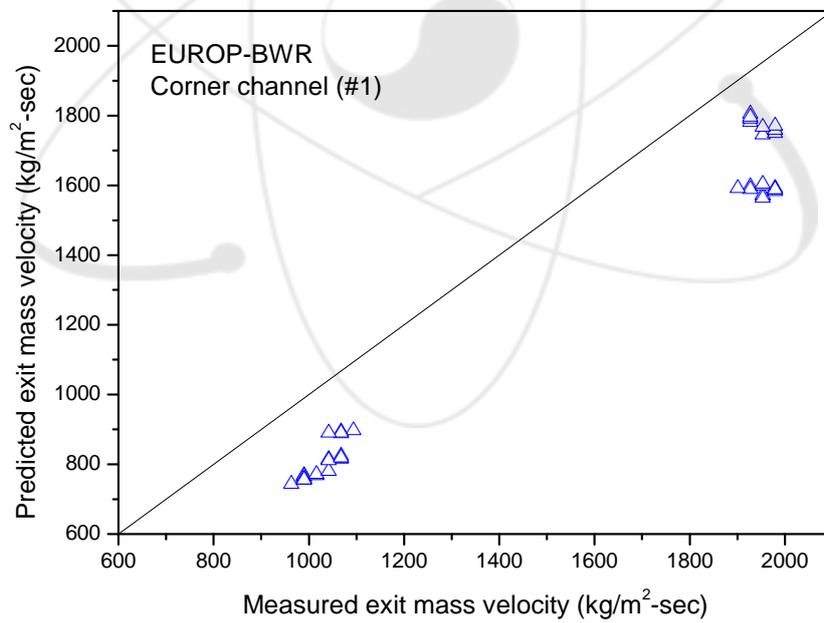
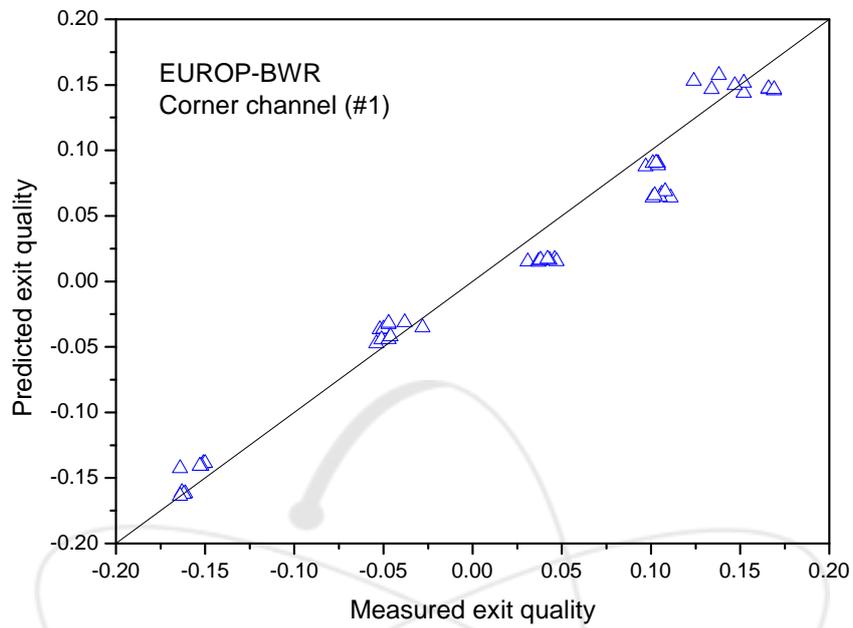


그림 3.65 Corner 채널 (#1) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (EUROP-BWR, EVVD)

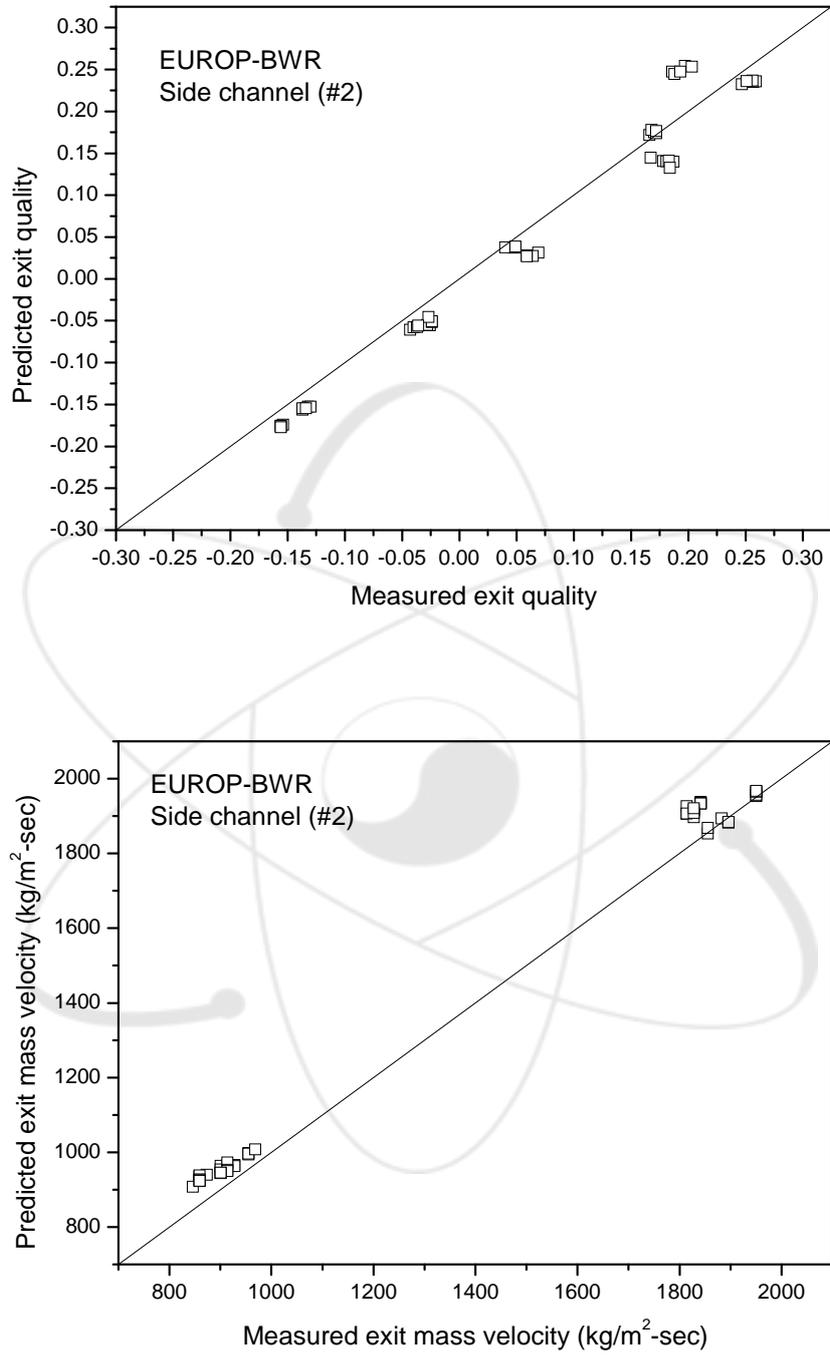


그림 3.66 Side 채널 (#2) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (EUROP-BWR, EVVD)

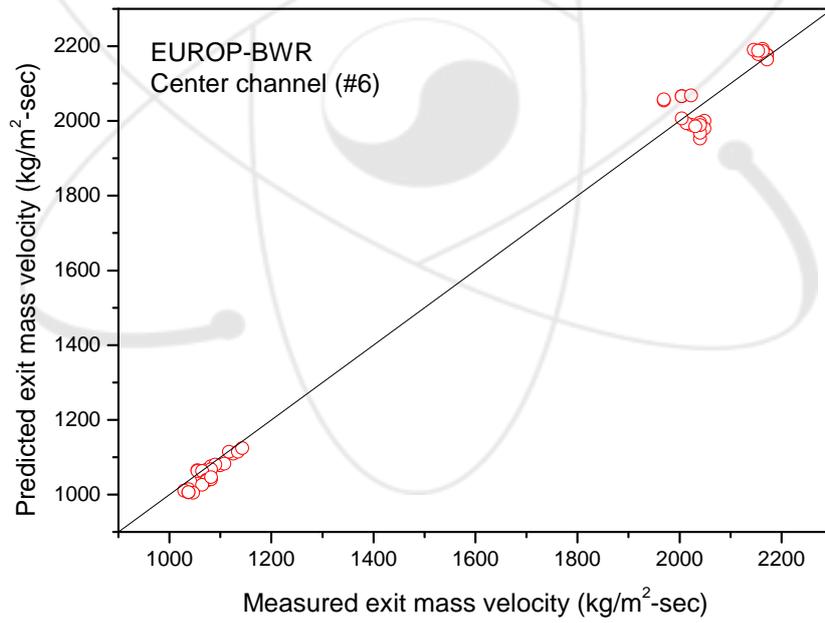
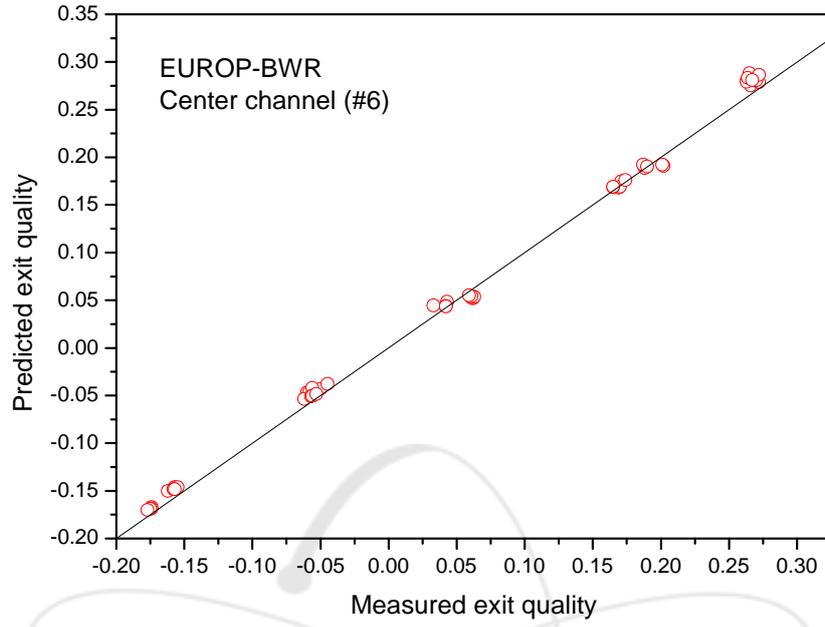


그림 3.67 Center 채널 (#6) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (EUROP-BWR, EVVD)

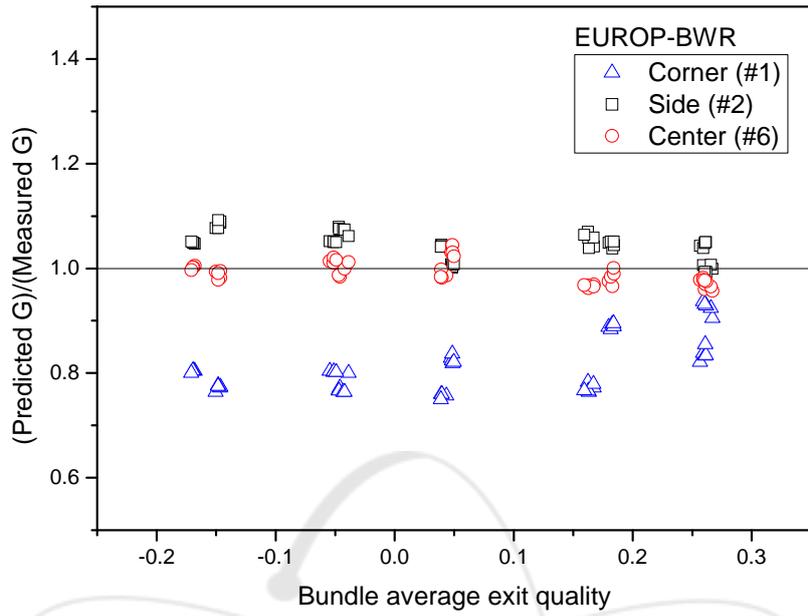


그림 3.68 부수로별 출구 유속 예측 오차 비교 (EUROP-BWR, EVVD)

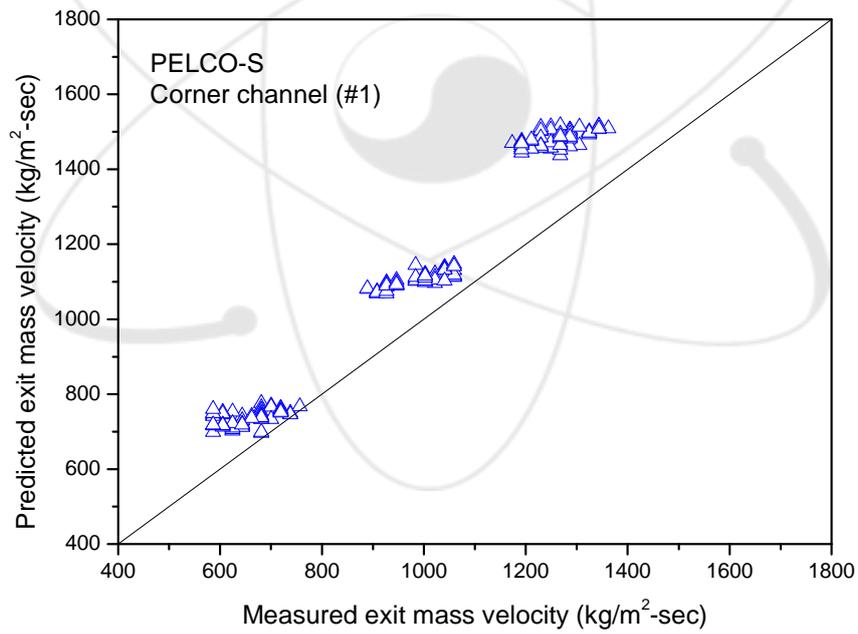
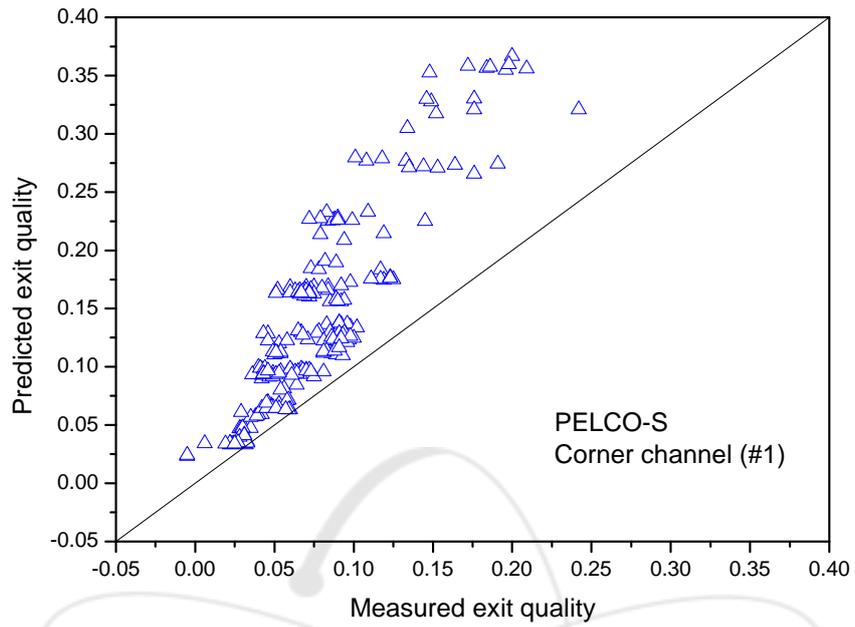


그림 3.69 Corner 채널 (#1) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (PELCO-S, EM)

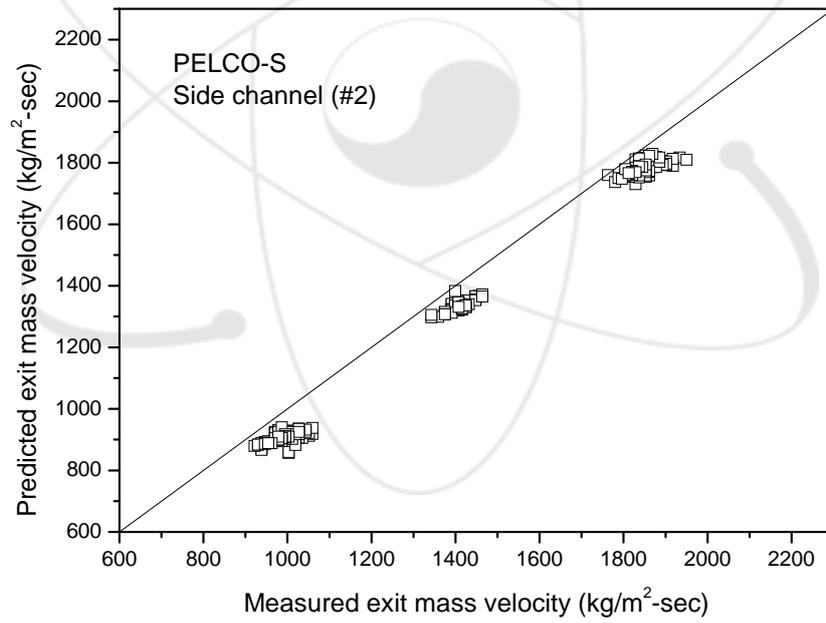
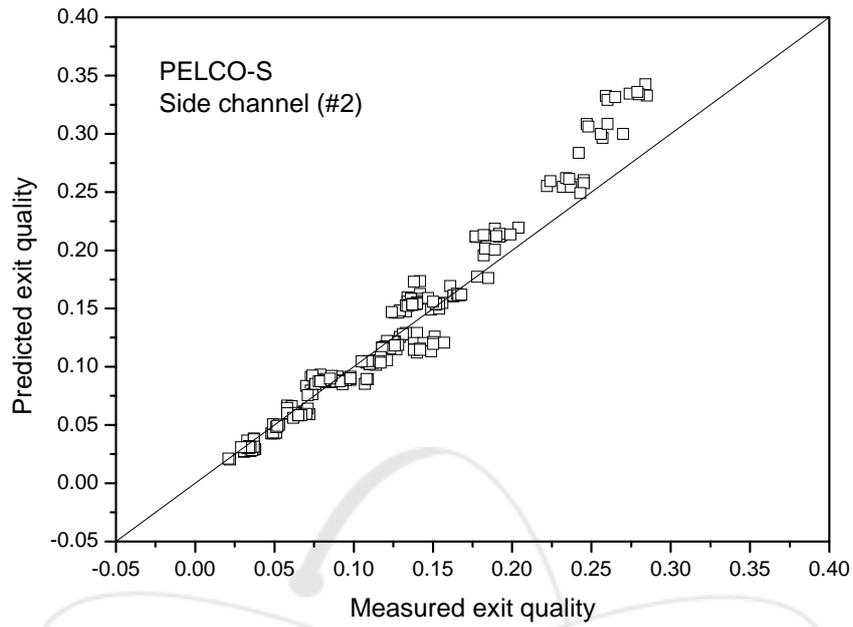


그림 3.70 Side 채널 (#2) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (PELCO-S, EM)

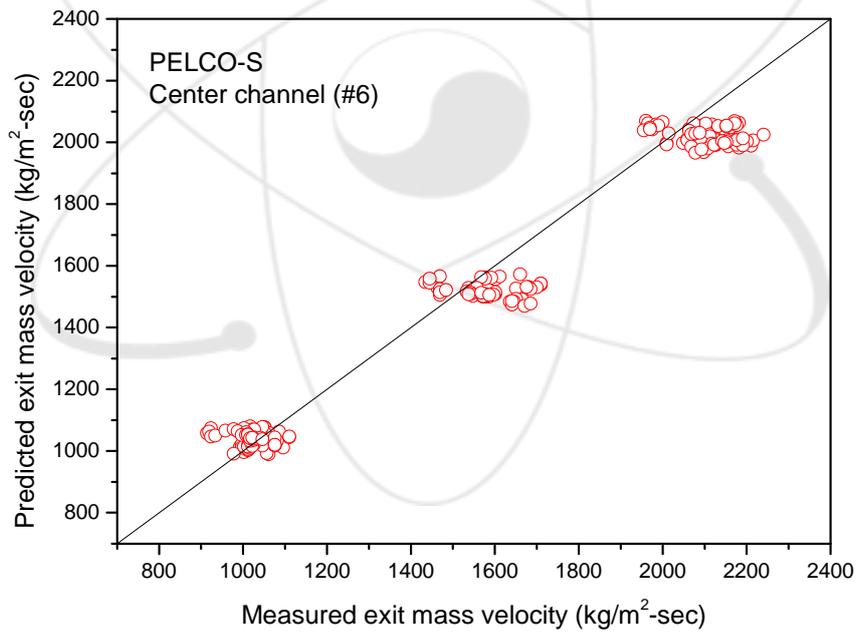
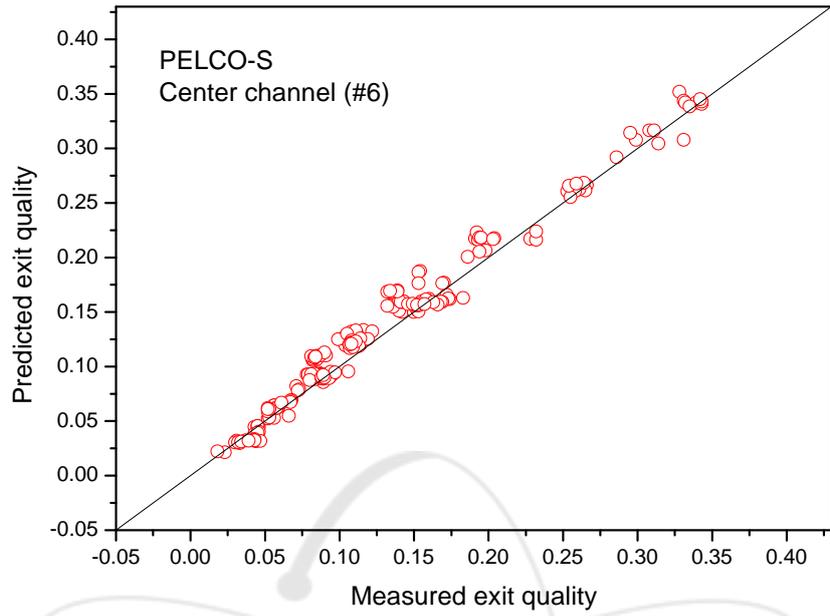


그림 3.71 Center 채널 (#6) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (PELCO-S, EM)

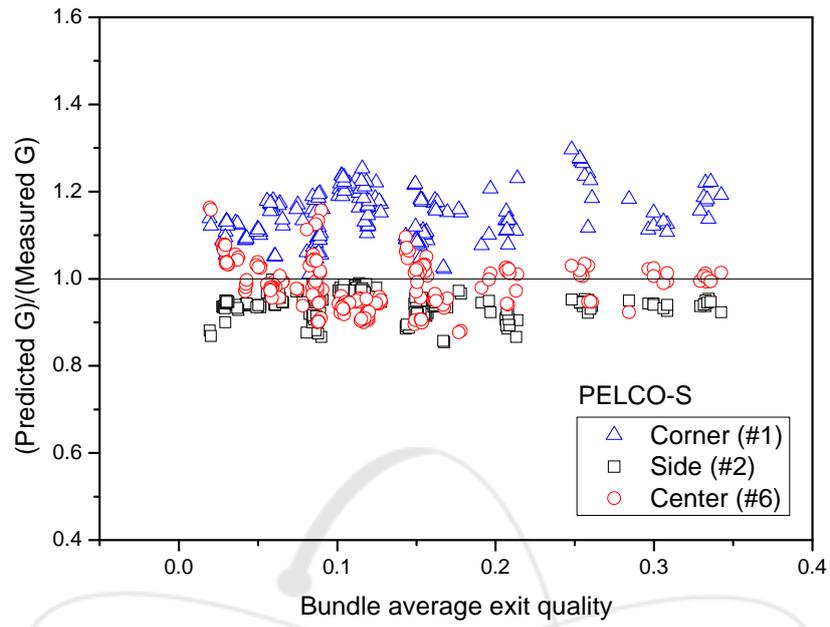


그림 3.72 부수로별 출구 유속 예측 오차 비교 (PELCO-S, EM)

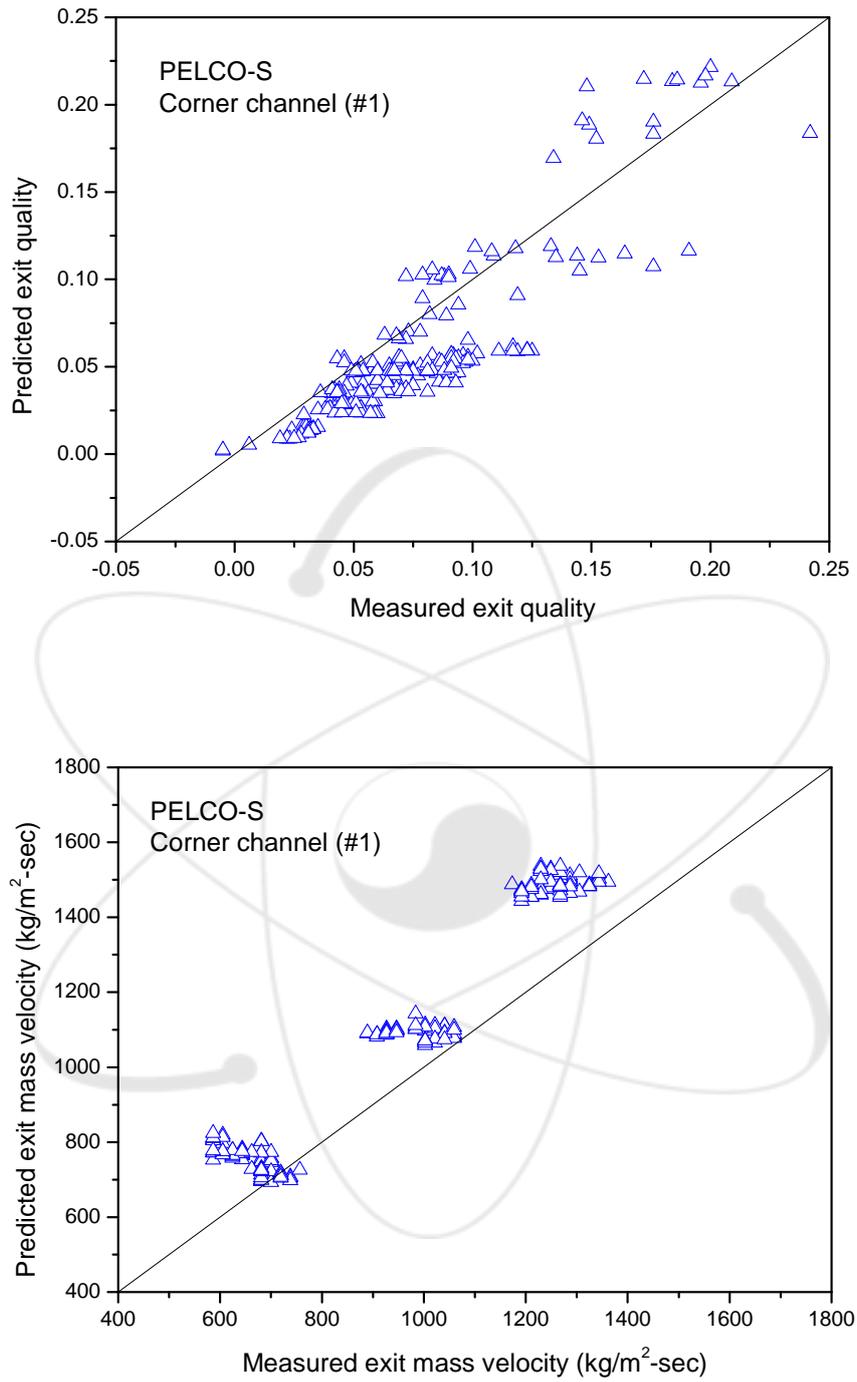


그림 3.73 Corner 채널 (#1) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (PELCO-S, EVVD)

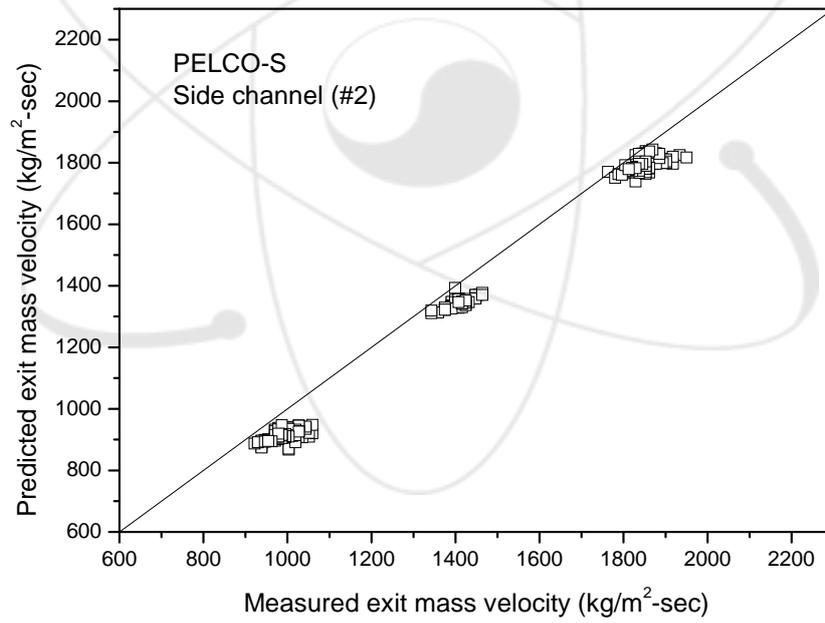
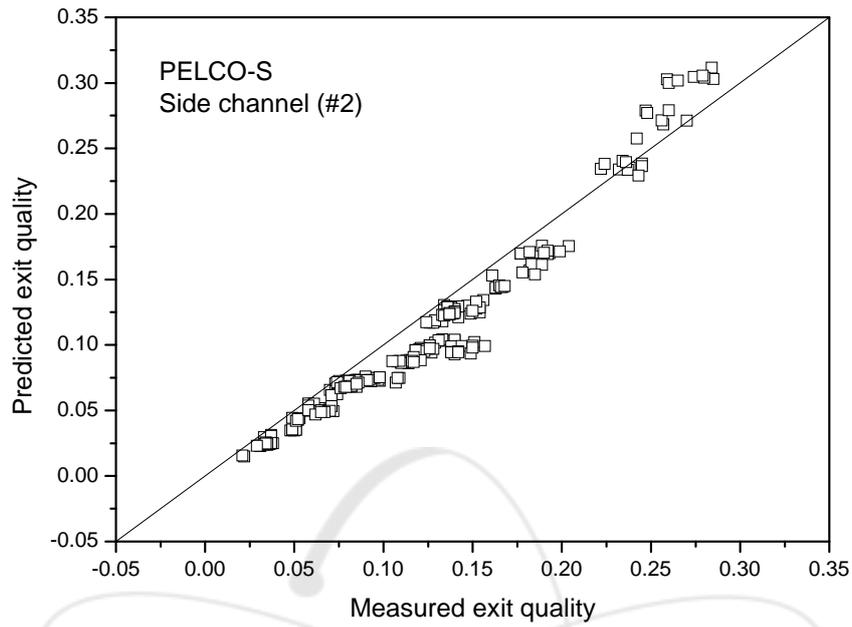


그림 3.74 Side 채널 (#2) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (PELCO-S, EVVD)

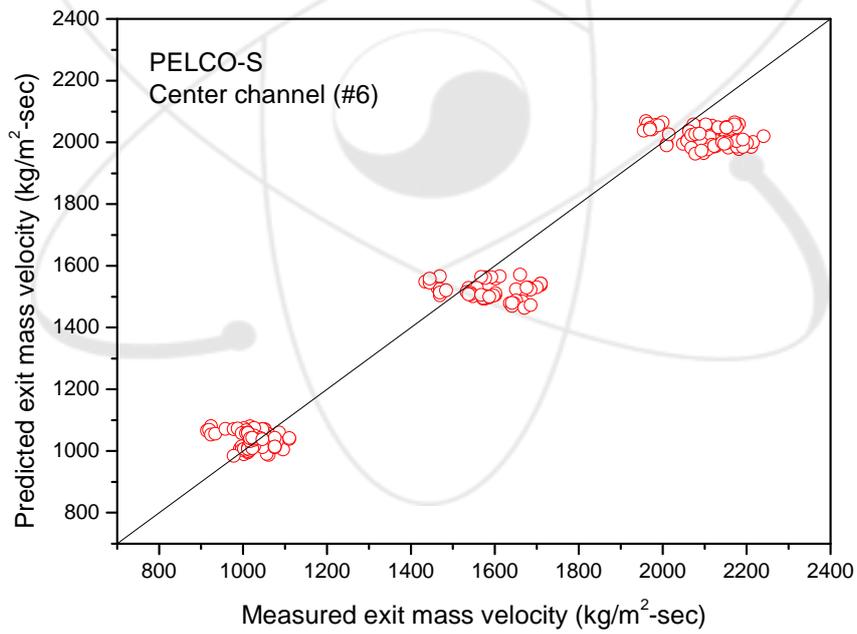
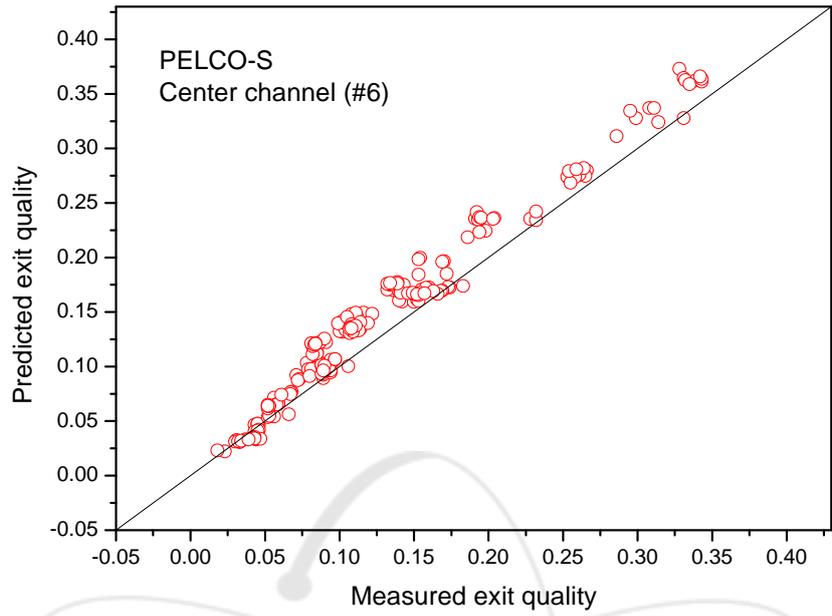


그림 3.75 Center 채널 (#6) 출구 건도 및 질량 유속 비교 (PELCO-S, EVVD)

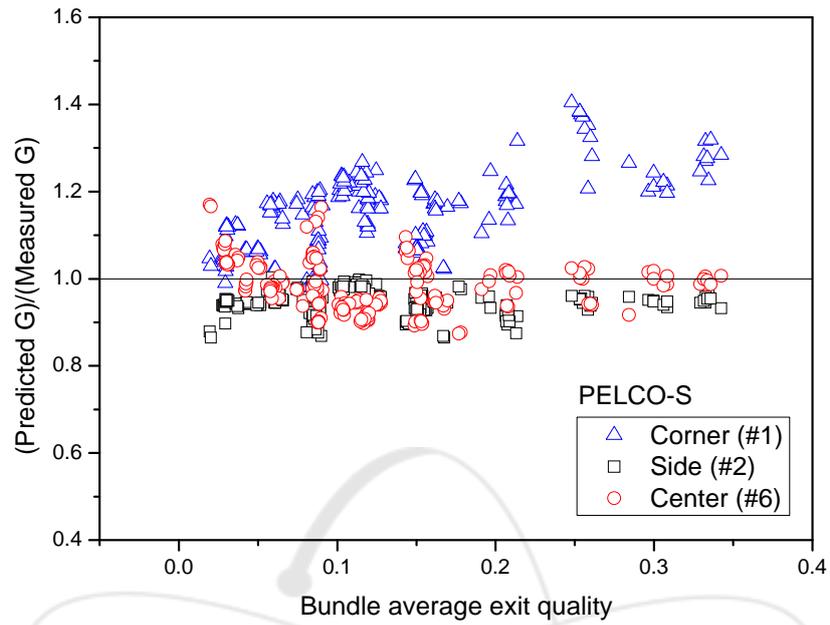


그림 3.76 부수로별 출구 유속 예측 오차 비교 (PELCO-S, EVVD)

## IV. 결론

부수로 해석 코드 MATRA Version 1.0에 대한 지배 방정식 형태 및 수치해법 알고리즘, 그리고 코드 구조에 대하여 정리했다.

단상유동 부수로 유동 및 온도 분포 자료로서 CNEN 4x4 집합체 유동분포 자료, CU 4x4 집합체 유동 및 엔탈피 분포 자료를 분석한 결과 단상 유동 조건에서 부수로 유동 분포는 MATRA 코드가 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다. PNL 2x6 집합체의 저유속 유동분포 자료를 분석한 결과 이 영역은 부수로 해석 코드의 적용 범위를 벗어나므로 MATRA 코드 예측 오차가 비교적 크게 나타났다.

단상유동 집합체 입구유동 비균일 분포 자료로서 CE의 15x15 집합체 입구 비균일 유동분포 자료를 분석했으며, 단상유동 집합체 부분 유로 막힘 자료로서 PNL 7x7 집합체 유로막힘 유동분포 자료와 WH 14x14 집합체 유로막힘 유동분포 자료를 분석하여 MATRA 코드의 예측 성능이 적절함을 확인했다.

이상 유동 부수로 엔탈피 및 유동 분포 자료로서 GE의 3x3 집합체 자료와 ISPRA 4x4 집합체 부수로 2상 유동 분포 자료를 분석했다. MATRA 코드의 2상 유동 난류혼합 모델중 하나인 EVVD 모델을 적용하면 압력이 낮은 조건에서도 부수로 엔탈피 분포를 적절히 예측하는 것으로 나타났다. 2상 유동 유속분포에 대한 예측 성능은 엔탈피 분포에 비해 상대적으로 낮게 나타났다.

## 참고 문헌

- [1] C. W. Stewart et al., COBRA-IV : The model and the Method, BNWL-2214 (1977).
- [2] C. W. Stewart et al., Advanced continuous fluid Eulerian computation scheme for flows with large density gradients, Trans. ANS, vol. 24, pp. 178 (1976).
- [3] C. W. Stewart and T. L. George, A Eulerian computation method for fluid flow with large density gradients at all speeds, NSE, vol. 64, pp. 237-243 (1977).
- [4] K. V. Moore and W. H. Rettig, Relap4-A computer program for transient thermal-hydraulic analysis, ANCR-1127, (1975).
- [5] V. Martinelli et al., Experimental investigation on mass velocity distribution and velocity profiles in an LWR rod bundle, Trans. ANS 15, 413-415, 1972.
- [6] F. S. Castellana and J.E. Casterline, Subchannel flow and enthalpy distributions at the exit of a typical nuclear fuel core geometry, Nuclear Engineering Design 22, 3-18, (1972).
- [7] M. S. Qigley, C. A. McMongale, J. M. Bates, Investigation of Combined Free and Forced Convection in a 2X6 Rod Bundle, BNWL-2216 (1977).
- [8] E. U. Khan, W. M. Rohsenow, A. A. Sonin, and N. E. Todreas, A porous body model for predicting temperature distribution in wire-wrapped rod assemblies operating in combined forced and free convection, Nuc. Eng. And Des., Vol. 35, pp. 199(1975)
- [9] T. Morita, C. A. Olson, Y. X. Sung, J. F. Connelley, Jr. and E. H. Novendstern et al., Subchannel Thermal-hydraulic Analysis at AP600 Low-Flow Steam-Line-Break Conditions, Nuclear Technology, Vol. 112, pp.401 (1995).
- [10] Marshall, R. C. and Letendre, R. P., Influence of inlet geometry on flow in the entrance region of a Nuclear Reactor Rod Bundle, ASME, 68-WA/HT-34, pp. 1-8 (1969).
- [11] J. M. Creer et al., Effects of sleeve blockages on axial velocity and intensity of turbulence in an unheated 7x7 rod bundle, BNWL-1965, (1976).
- [12] H. Chelemer, P. T. Chu, L. E. Hochreiter, THINC-IV – An Improved Program for Thermal Hydraulic Analysis of Rod Bundle Cores, WCAP-7956, Westinghouse Electric Corp.(1973).
- [13] R. T. Lahey et al., Two-phase Flow and Heat Transfer in Multirod Geometries: Subchannel and Pressure Drop Measurements in a Nine-Rod Bundle for Diabatic and Adiabatic Conditions, GEAP-13049, GE (1970).
- [14] H. Herkenrath et al., Experimental investigation of the enthalpy and mass flow distribution in 16-rod clusters with BWR-PWR geometries and conditions, EUR 7575 EN, JRC Ispra (1981).
- [15] Dae-Hyun Hwang et al., Assessment of the interchannel mixing model with a subchannel analysis code for BWR and PWR conditions, Nuclear Engineering Design 199, 257-272 (2000).

# 부록. MATRA 코드 입력 자료

## 1. CNEN 4x4 집합체 유동분포 시험 MATRA 입력 자료

```

99999      0      1      1
1          0 CNEN 16-ROD BUNDLE ISOTHERMAL TEST G=1.90 BRITISH INPUT SI OUTPUT
1          60      1      0      1      0
2          1      3      1      1      0      0      0
.184      -2      0.
3          2
0.         1.      1.      1.
4          6      6      0      0      0      0
1          .0408   .5769   .2329   2      .1415
2          .1948   1.691   .9315   3      .1670           4      .1415
3          .1507   .9315   .9315   5      .1670
4          .0974   .8457   .4657   -5     .1670
5          .1507   .9315   .9315   -6     .1670
6          .0377   .2329   .2329
7          2      0      1      1      0      0
.5         1
1          .3
2          .3
3          .3
4          .3
5          .3
6          .3
8          3      3      0      0      0      0      0      0      0
1          .593   1.      1      .125   2      .250   3      .125
2          .593   1.      2      .250   3      .250   4      .250           5      .250
3          .593   1.      3      .125   5      .250   6      .125
9          0      0      0      0      0      0
55.12     0.      1.E-1   1.E-3   1.E-2   .5      .5      1.           0.8      1.6      1.0
50         200     200
10         0      0      0      0      0      0      0      0
.020
11         1      0      0      0      0      0      0      0
14.696    68.     1.90    0.
12         1      0      0      0      0      0      0      0

```

## 2. CU 4x4 집합체 유동 및 엔탈피 분포 시험 MATRA 입력 자료

```

99999      0      0      0      0
1          0 Columbia University 4x4-Rod Bundle Mixing Test Run 31
1         60         1         0         1         0
2         1         3         1         1         0         0         0
.184      -2         0.
3         2
0.         1.         1.         1.
4         15        15        0         0         0         0
1         .09391    1.04944    .33144    2         .148         4         .148
2         .12931    1.21788    .66288    3         .148         5         .133
3         .06466    .60894    .33144    -6        .133
4         .12931    1.21788    .66288    5         .133         7         .148
5         .16816    1.32575    1.32575    6         .133         8         .133
6         .08408    .66288    .66288    -9        .133
7         .12931    1.21788    .66288    8         .133        10        .148
8         .16816    1.32575    1.32575    9         .133        11        .133
9         .08408    .66288    .66288    -12       .133
10        .12931    1.21788    .66288    11        .133        13        .148
11        .16816    1.32575    1.32575    12        .133        14        .133
12        .08408    .66288    .66288    -15       .133
13        .09391    1.04944    .33144    14        .148
14        .12931    1.21788    .66288    15        .148
15        .06466    .60894    .33144
7         2         0         6         1         0         0
.05000    1         .21667    1         .38333    1         .55000    1         .71667    1
.88333    1
1         1.0
2         1.0
3         1.0
4         1.0
5         1.0
6         1.0
7         1.0
8         1.0
9         1.0
10        1.0
11        1.0
12        1.0
13        1.0

```



### 3. PNL 2x6 집합체 저유속 유동분포 시험 MATRA 입력 자료

```

99999      0      1      0      0
1          0 PNL 2 X 6 Cal. CASE 1 power ration 2:1 flow : 2.47 gpm
1          60      0      0      1      0
2          0      0      0      0      1      0      0
.184      -.20     0.
16.       -1.      0.
3          7
0.         0.      0.25  0.99386  .417  1.0123  0.583  1.0044  0.75  1.0123
0.9167    0.99474  1.    0.
4          21      21      0      0      0      0
1          0.0782  1.073  0.3731  8      0.1125  0      2      0.1125
2          0.1127  1.321  0.7461  9      0.10     0      3      0.1125
3          0.1127  1.321  0.7461  10     0.10     0      4      0.1125
4          0.1127  1.321  0.7461  11     0.10     0      5      0.1125
5          0.1127  1.321  0.7461  12     0.10     0      6      0.1125
6          0.1127  1.321  0.7461  13     0.10     0      7      0.1125
7          0.0782  1.073  0.3731  14     0.1125   0
8          0.1127  1.321  0.7461  9      0.10     0      15     0.1125
9          0.1534  1.492  1.492   10     0.10     0      16     0.10
10         0.1534  1.492  1.492  11     0.10     0      17     0.10
11         0.1534  1.492  1.492  12     0.10     0      18     0.10
12         0.1534  1.492  1.492  13     0.10     0      19     0.10
13         0.1534  1.492  1.492  14     0.10     0      20     0.10
14         0.1127  1.321  0.7461  21     0.1125   0
15         0.0782  1.073  0.3731  16     0.1125   0
16         0.1127  1.321  0.7461  17     0.1125   0
17         0.1127  1.321  0.7461  18     0.1125   0
18         0.1127  1.321  0.7461  19     0.1125   0
19         0.1127  1.321  0.7461  20     0.1125   0
20         0.1127  1.321  0.7461  21     0.1125   0
21         0.0782  1.073  0.3731
7          2          0          1          1          0          0
.5417     1
1          1.0
2          1.0
3          1.0
4          1.0
5          1.0
6          1.0

```



4. CE 15x15 집합체 입구 비균일 유동분포 시험 MATRA 입력 자료

```

99999      0      1      0      0
1          0 inlet influece CE 15 X 15 - uniform inlet condition
1         60      0      0      1      0
2         0      0      0      0      0      0      0
.184     -.20     0.
3         2
0.        0.      1.      0.
4         256     256     0      0      0      0
1 0.232437 1.602870 0.490874 2 0.556 0 17 0.556
2 0.311974 1.818750 0.981748 3 0.556 0 18 0.212
3 0.311974 1.818750 0.981748 4 0.556 0 19 0.212
4 0.311974 1.818750 0.981748 5 0.556 0 20 0.212
5 0.311974 1.818750 0.981748 6 0.556 0 21 0.212
6 0.311974 1.818750 0.981748 7 0.556 0 22 0.212
7 0.311974 1.818750 0.981748 8 0.556 0 23 0.212
8 0.311974 1.818750 0.981748 9 0.556 0 24 0.212
9 0.311974 1.818750 0.981748 10 0.556 0 25 0.212
10 0.311974 1.818750 0.981748 11 0.556 0 26 0.212
11 0.311974 1.818750 0.981748 12 0.556 0 27 0.212
12 0.311974 1.818750 0.981748 13 0.556 0 28 0.212
13 0.311974 1.818750 0.981748 14 0.556 0 29 0.212
14 0.311974 1.818750 0.981748 15 0.556 0 30 0.212
15 0.311974 1.818750 0.981748 16 0.556 0 31 0.212
16 0.232437 1.602870 0.490874 32 0.556 0
17 0.311974 1.818750 0.981748 33 0.556 0 18 0.212
18 0.393773 1.963495 1.963495 34 0.212 0 19 0.212
19 0.393773 1.963495 1.963495 35 0.212 0 20 0.212
20 0.393773 1.963495 1.963495 36 0.212 0 21 0.212
21 0.393773 1.963495 1.963495 37 0.212 0 22 0.212
22 0.393773 1.963495 1.963495 38 0.212 0 23 0.212
23 0.393773 1.963495 1.963495 39 0.212 0 24 0.212
24 0.393773 1.963495 1.963495 40 0.212 0 25 0.212
25 0.393773 1.963495 1.963495 41 0.212 0 26 0.212
26 0.393773 1.963495 1.963495 42 0.212 0 27 0.212
27 0.393773 1.963495 1.963495 43 0.212 0 28 0.212
28 0.393773 1.963495 1.963495 44 0.212 0 29 0.212
29 0.393773 1.963495 1.963495 45 0.212 0 30 0.212
30 0.393773 1.963495 1.963495 46 0.212 0 31 0.212
31 0.393773 1.963495 1.963495 47 0.212 0 32 0.212

```

32	0.311974	1.818750	0.981748	48	0.556	0		
33	0.311974	1.818750	0.981748	49	0.556	0	34	0.212
34	0.393773	1.963495	1.963495	50	0.212	0	35	0.212
35	0.393773	1.963495	1.963495	51	0.212	0	36	0.212
36	0.393773	1.963495	1.963495	52	0.212	0	37	0.212
37	0.393773	1.963495	1.963495	53	0.212	0	38	0.212
38	0.393773	1.963495	1.963495	54	0.212	0	39	0.212
39	0.393773	1.963495	1.963495	55	0.212	0	40	0.212
40	0.393773	1.963495	1.963495	56	0.212	0	41	0.212
41	0.393773	1.963495	1.963495	57	0.212	0	42	0.212
42	0.393773	1.963495	1.963495	58	0.212	0	43	0.212
43	0.393773	1.963495	1.963495	59	0.212	0	44	0.212
44	0.393773	1.963495	1.963495	60	0.212	0	45	0.212
45	0.393773	1.963495	1.963495	61	0.212	0	46	0.212
46	0.393773	1.963495	1.963495	62	0.212	0	47	0.212
47	0.393773	1.963495	1.963495	63	0.212	0	48	0.212
48	0.311974	1.818750	0.981748	64	0.556	0		
49	0.311974	1.818750	0.981748	65	0.556	0	50	0.212
50	0.393773	1.963495	1.963495	66	0.212	0	51	0.212
51	0.393773	1.963495	1.963495	67	0.212	0	52	0.212
52	0.393773	1.963495	1.963495	68	0.212	0	53	0.212
53	0.393773	1.963495	1.963495	69	0.212	0	54	0.212
54	0.393773	1.963495	1.963495	70	0.212	0	55	0.212
55	0.393773	1.963495	1.963495	71	0.212	0	56	0.212
56	0.393773	1.963495	1.963495	72	0.212	0	57	0.212
57	0.393773	1.963495	1.963495	73	0.212	0	58	0.212
58	0.393773	1.963495	1.963495	74	0.212	0	59	0.212
59	0.393773	1.963495	1.963495	75	0.212	0	60	0.212
60	0.393773	1.963495	1.963495	76	0.212	0	61	0.212
61	0.393773	1.963495	1.963495	77	0.212	0	62	0.212
62	0.393773	1.963495	1.963495	78	0.212	0	63	0.212
63	0.393773	1.963495	1.963495	79	0.212	0	64	0.212
64	0.311974	1.818750	0.981748	80	0.556	0		
65	0.311974	1.818750	0.981748	81	0.556	0	66	0.212
66	0.393773	1.963495	1.963495	82	0.212	0	67	0.212
67	0.393773	1.963495	1.963495	83	0.212	0	68	0.212
68	0.393773	1.963495	1.963495	84	0.212	0	69	0.212
69	0.393773	1.963495	1.963495	85	0.212	0	70	0.212
70	0.393773	1.963495	1.963495	86	0.212	0	71	0.212
71	0.393773	1.963495	1.963495	87	0.212	0	72	0.212
72	0.393773	1.963495	1.963495	88	0.212	0	73	0.212
73	0.393773	1.963495	1.963495	89	0.212	0	74	0.212

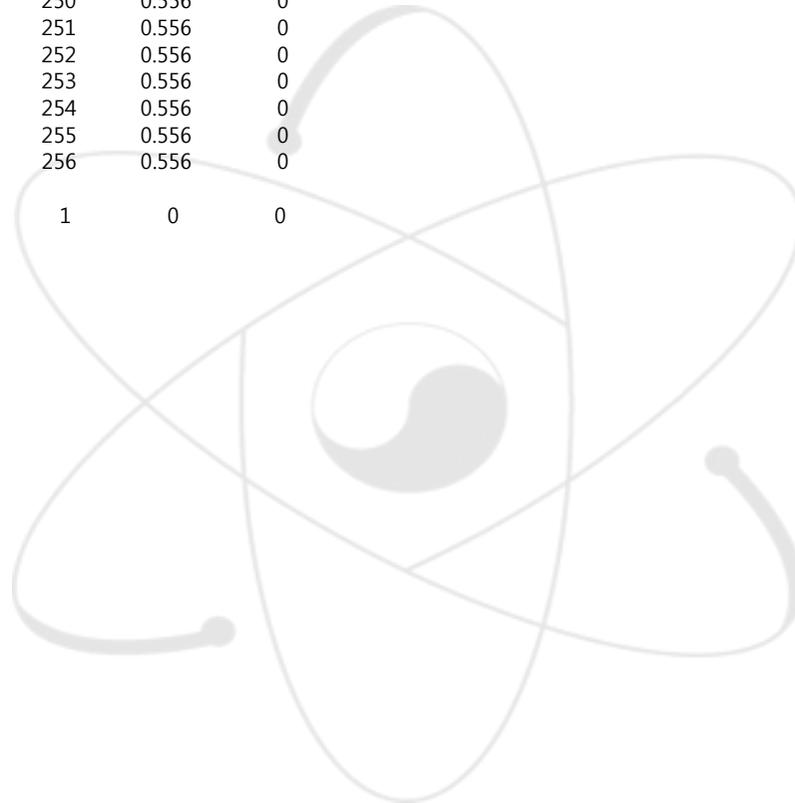
74	0.393773	1.963495	1.963495	90	0.212	0	75	0.212
75	0.393773	1.963495	1.963495	91	0.212	0	76	0.212
76	0.393773	1.963495	1.963495	92	0.212	0	77	0.212
77	0.393773	1.963495	1.963495	93	0.212	0	78	0.212
78	0.393773	1.963495	1.963495	94	0.212	0	79	0.212
79	0.393773	1.963495	1.963495	95	0.212	0	80	0.212
80	0.311974	1.818750	0.981748	96	0.556	0		
81	0.311974	1.818750	0.981748	97	0.556	0	82	0.212
82	0.393773	1.963495	1.963495	98	0.212	0	83	0.212
83	0.393773	1.963495	1.963495	99	0.212	0	84	0.212
84	0.393773	1.963495	1.963495	100	0.212	0	85	0.212
85	0.393773	1.963495	1.963495	101	0.212	0	86	0.212
86	0.393773	1.963495	1.963495	102	0.212	0	87	0.212
87	0.393773	1.963495	1.963495	103	0.212	0	88	0.212
88	0.393773	1.963495	1.963495	104	0.212	0	89	0.212
89	0.393773	1.963495	1.963495	105	0.212	0	90	0.212
90	0.393773	1.963495	1.963495	106	0.212	0	91	0.212
91	0.393773	1.963495	1.963495	107	0.212	0	92	0.212
92	0.393773	1.963495	1.963495	108	0.212	0	93	0.212
93	0.393773	1.963495	1.963495	109	0.212	0	94	0.212
94	0.393773	1.963495	1.963495	110	0.212	0	95	0.212
95	0.393773	1.963495	1.963495	111	0.212	0	96	0.212
96	0.311974	1.818750	0.981748	112	0.556	0		
97	0.311974	1.818750	0.981748	113	0.556	0	98	0.212
98	0.393773	1.963495	1.963495	114	0.212	0	99	0.212
99	0.393773	1.963495	1.963495	115	0.212	0	100	0.212
100	0.393773	1.963495	1.963495	116	0.212	0	101	0.212
101	0.393773	1.963495	1.963495	117	0.212	0	102	0.212
102	0.393773	1.963495	1.963495	118	0.212	0	103	0.212
103	0.393773	1.963495	1.963495	119	0.212	0	104	0.212
104	0.393773	1.963495	1.963495	120	0.212	0	105	0.212
105	0.393773	1.963495	1.963495	121	0.212	0	106	0.212
106	0.393773	1.963495	1.963495	122	0.212	0	107	0.212
107	0.393773	1.963495	1.963495	123	0.212	0	108	0.212
108	0.393773	1.963495	1.963495	124	0.212	0	109	0.212
109	0.393773	1.963495	1.963495	125	0.212	0	110	0.212
110	0.393773	1.963495	1.963495	126	0.212	0	111	0.212
111	0.393773	1.963495	1.963495	127	0.212	0	112	0.212
112	0.311974	1.818750	0.981748	128	0.556	0		
113	0.311974	1.818750	0.981748	129	0.556	0	114	0.212
114	0.393773	1.963495	1.963495	130	0.212	0	115	0.212
115	0.393773	1.963495	1.963495	131	0.212	0	116	0.212

116	0.393773	1.963495	1.963495	132	0.212	0	117	0.212
117	0.393773	1.963495	1.963495	133	0.212	0	118	0.212
118	0.393773	1.963495	1.963495	134	0.212	0	119	0.212
119	0.393773	1.963495	1.963495	135	0.212	0	120	0.212
120	0.393773	1.963495	1.963495	136	0.212	0	121	0.212
121	0.393773	1.963495	1.963495	137	0.212	0	122	0.212
122	0.393773	1.963495	1.963495	138	0.212	0	123	0.212
123	0.393773	1.963495	1.963495	139	0.212	0	124	0.212
124	0.393773	1.963495	1.963495	140	0.212	0	125	0.212
125	0.393773	1.963495	1.963495	141	0.212	0	126	0.212
126	0.393773	1.963495	1.963495	142	0.212	0	127	0.212
127	0.393773	1.963495	1.963495	143	0.212	0	128	0.212
128	0.311974	1.818750	0.981748	144	0.556	0		
129	0.311974	1.818750	0.981748	145	0.556	0	130	0.212
130	0.393773	1.963495	1.963495	146	0.212	0	131	0.212
131	0.393773	1.963495	1.963495	147	0.212	0	132	0.212
132	0.393773	1.963495	1.963495	148	0.212	0	133	0.212
133	0.393773	1.963495	1.963495	149	0.212	0	134	0.212
134	0.393773	1.963495	1.963495	150	0.212	0	135	0.212
135	0.393773	1.963495	1.963495	151	0.212	0	136	0.212
136	0.393773	1.963495	1.963495	152	0.212	0	137	0.212
137	0.393773	1.963495	1.963495	153	0.212	0	138	0.212
138	0.393773	1.963495	1.963495	154	0.212	0	139	0.212
139	0.393773	1.963495	1.963495	155	0.212	0	140	0.212
140	0.393773	1.963495	1.963495	156	0.212	0	141	0.212
141	0.393773	1.963495	1.963495	157	0.212	0	142	0.212
142	0.393773	1.963495	1.963495	158	0.212	0	143	0.212
143	0.393773	1.963495	1.963495	159	0.212	0	144	0.212
144	0.311974	1.818750	0.981748	160	0.556	0		
145	0.311974	1.818750	0.981748	161	0.556	0	146	0.212
146	0.393773	1.963495	1.963495	162	0.212	0	147	0.212
147	0.393773	1.963495	1.963495	163	0.212	0	148	0.212
148	0.393773	1.963495	1.963495	164	0.212	0	149	0.212
149	0.393773	1.963495	1.963495	165	0.212	0	150	0.212
150	0.393773	1.963495	1.963495	166	0.212	0	151	0.212
151	0.393773	1.963495	1.963495	167	0.212	0	152	0.212
152	0.393773	1.963495	1.963495	168	0.212	0	153	0.212
153	0.393773	1.963495	1.963495	169	0.212	0	154	0.212
154	0.393773	1.963495	1.963495	170	0.212	0	155	0.212
155	0.393773	1.963495	1.963495	171	0.212	0	156	0.212
156	0.393773	1.963495	1.963495	172	0.212	0	157	0.212
157	0.393773	1.963495	1.963495	173	0.212	0	158	0.212

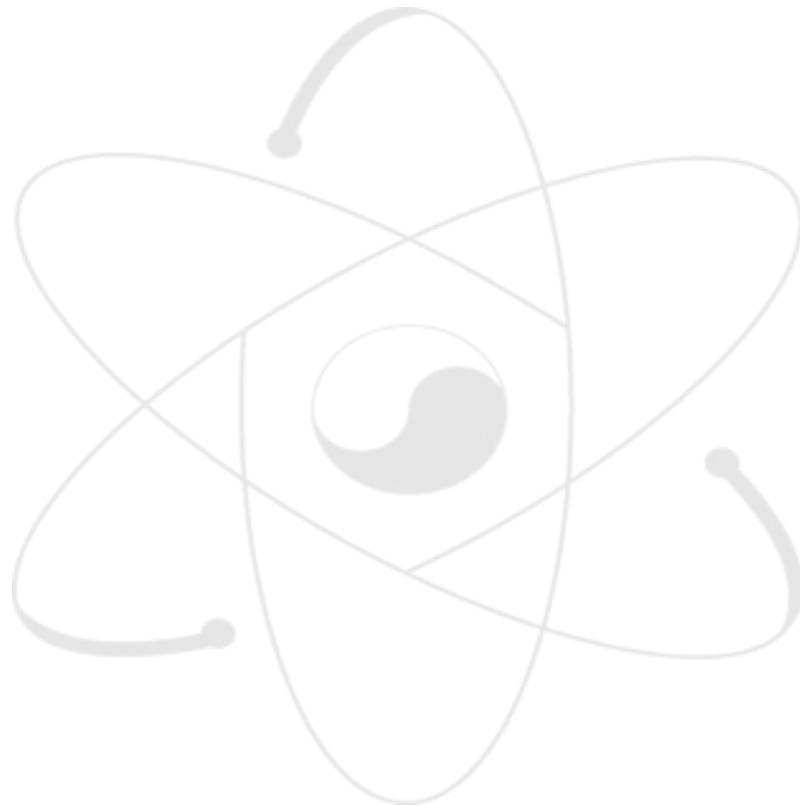
158	0.393773	1.963495	1.963495	174	0.212	0	159	0.212
159	0.393773	1.963495	1.963495	175	0.212	0	160	0.212
160	0.311974	1.818750	0.981748	176	0.556	0		
161	0.311974	1.818750	0.981748	177	0.556	0	162	0.212
162	0.393773	1.963495	1.963495	178	0.212	0	163	0.212
163	0.393773	1.963495	1.963495	179	0.212	0	164	0.212
164	0.393773	1.963495	1.963495	180	0.212	0	165	0.212
165	0.393773	1.963495	1.963495	181	0.212	0	166	0.212
166	0.393773	1.963495	1.963495	182	0.212	0	167	0.212
167	0.393773	1.963495	1.963495	183	0.212	0	168	0.212
168	0.393773	1.963495	1.963495	184	0.212	0	169	0.212
169	0.393773	1.963495	1.963495	185	0.212	0	170	0.212
170	0.393773	1.963495	1.963495	186	0.212	0	171	0.212
171	0.393773	1.963495	1.963495	187	0.212	0	172	0.212
172	0.393773	1.963495	1.963495	188	0.212	0	173	0.212
173	0.393773	1.963495	1.963495	189	0.212	0	174	0.212
174	0.393773	1.963495	1.963495	190	0.212	0	175	0.212
175	0.393773	1.963495	1.963495	191	0.212	0	176	0.212
176	0.311974	1.818750	0.981748	192	0.556	0		
177	0.311974	1.818750	0.981748	193	0.556	0	178	0.212
178	0.393773	1.963495	1.963495	194	0.212	0	179	0.212
179	0.393773	1.963495	1.963495	195	0.212	0	180	0.212
180	0.393773	1.963495	1.963495	196	0.212	0	181	0.212
181	0.393773	1.963495	1.963495	197	0.212	0	182	0.212
182	0.393773	1.963495	1.963495	198	0.212	0	183	0.212
183	0.393773	1.963495	1.963495	199	0.212	0	184	0.212
184	0.393773	1.963495	1.963495	200	0.212	0	185	0.212
185	0.393773	1.963495	1.963495	201	0.212	0	186	0.212
186	0.393773	1.963495	1.963495	202	0.212	0	187	0.212
187	0.393773	1.963495	1.963495	203	0.212	0	188	0.212
188	0.393773	1.963495	1.963495	204	0.212	0	189	0.212
189	0.393773	1.963495	1.963495	205	0.212	0	190	0.212
190	0.393773	1.963495	1.963495	206	0.212	0	191	0.212
191	0.393773	1.963495	1.963495	207	0.212	0	192	0.212
192	0.311974	1.818750	0.981748	208	0.556	0		
193	0.311974	1.818750	0.981748	209	0.556	0	194	0.212
194	0.393773	1.963495	1.963495	210	0.212	0	195	0.212
195	0.393773	1.963495	1.963495	211	0.212	0	196	0.212
196	0.393773	1.963495	1.963495	212	0.212	0	197	0.212
197	0.393773	1.963495	1.963495	213	0.212	0	198	0.212
198	0.393773	1.963495	1.963495	214	0.212	0	199	0.212
199	0.393773	1.963495	1.963495	215	0.212	0	200	0.212

200	0.393773	1.963495	1.963495	216	0.212	0	201	0.212
201	0.393773	1.963495	1.963495	217	0.212	0	202	0.212
202	0.393773	1.963495	1.963495	218	0.212	0	203	0.212
203	0.393773	1.963495	1.963495	219	0.212	0	204	0.212
204	0.393773	1.963495	1.963495	220	0.212	0	205	0.212
205	0.393773	1.963495	1.963495	221	0.212	0	206	0.212
206	0.393773	1.963495	1.963495	222	0.212	0	207	0.212
207	0.393773	1.963495	1.963495	223	0.212	0	208	0.212
208	0.311974	1.818750	0.981748	224	0.556	0		
209	0.311974	1.818750	0.981748	225	0.556	0	210	0.212
210	0.393773	1.963495	1.963495	226	0.212	0	211	0.212
211	0.393773	1.963495	1.963495	227	0.212	0	212	0.212
212	0.393773	1.963495	1.963495	228	0.212	0	213	0.212
213	0.393773	1.963495	1.963495	229	0.212	0	214	0.212
214	0.393773	1.963495	1.963495	230	0.212	0	215	0.212
215	0.393773	1.963495	1.963495	231	0.212	0	216	0.212
216	0.393773	1.963495	1.963495	232	0.212	0	217	0.212
217	0.393773	1.963495	1.963495	233	0.212	0	218	0.212
218	0.393773	1.963495	1.963495	234	0.212	0	219	0.212
219	0.393773	1.963495	1.963495	235	0.212	0	220	0.212
220	0.393773	1.963495	1.963495	236	0.212	0	221	0.212
221	0.393773	1.963495	1.963495	237	0.212	0	222	0.212
222	0.393773	1.963495	1.963495	238	0.212	0	223	0.212
223	0.393773	1.963495	1.963495	239	0.212	0	224	0.212
224	0.311974	1.818750	0.981748	240	0.556	0		
225	0.311974	1.818750	0.981748	241	0.556	0	226	0.212
226	0.393773	1.963495	1.963495	242	0.212	0	227	0.212
227	0.393773	1.963495	1.963495	243	0.212	0	228	0.212
228	0.393773	1.963495	1.963495	244	0.212	0	229	0.212
229	0.393773	1.963495	1.963495	245	0.212	0	230	0.212
230	0.393773	1.963495	1.963495	246	0.212	0	231	0.212
231	0.393773	1.963495	1.963495	247	0.212	0	232	0.212
232	0.393773	1.963495	1.963495	248	0.212	0	233	0.212
233	0.393773	1.963495	1.963495	249	0.212	0	234	0.212
234	0.393773	1.963495	1.963495	250	0.212	0	235	0.212
235	0.393773	1.963495	1.963495	251	0.212	0	236	0.212
236	0.393773	1.963495	1.963495	252	0.212	0	237	0.212
237	0.393773	1.963495	1.963495	253	0.212	0	238	0.212
238	0.393773	1.963495	1.963495	254	0.212	0	239	0.212
239	0.393773	1.963495	1.963495	255	0.212	0	240	0.212
240	0.311974	1.818750	0.981748	256	0.556	0		
241	0.232437	1.602870	0.490874	242	0.556	0		

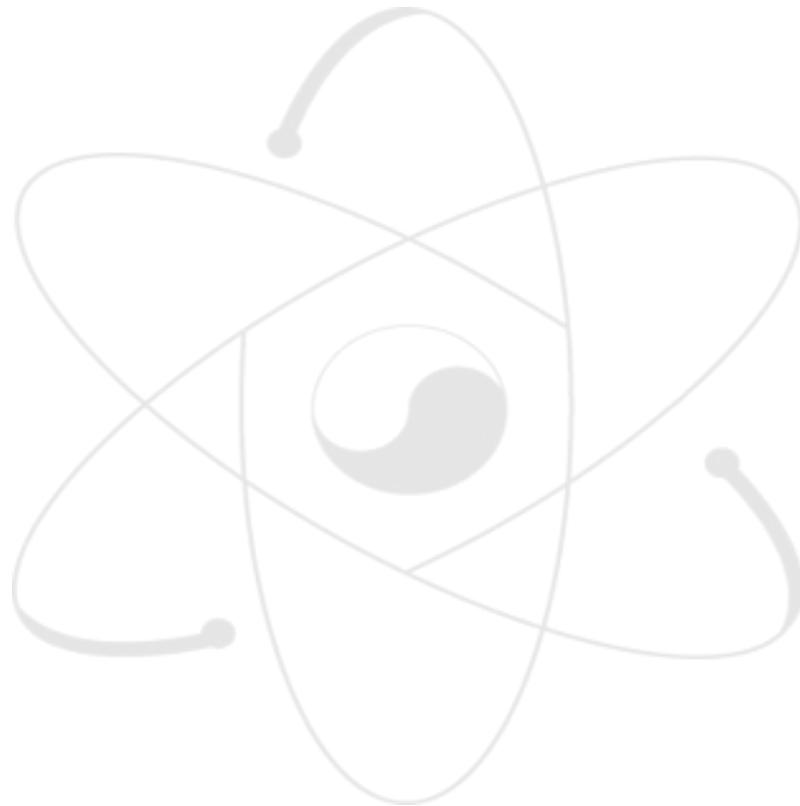
242	0.311974	1.818750	0.981748	243	0.556	0
243	0.311974	1.818750	0.981748	244	0.556	0
244	0.311974	1.818750	0.981748	245	0.556	0
245	0.311974	1.818750	0.981748	246	0.556	0
246	0.311974	1.818750	0.981748	247	0.556	0
247	0.311974	1.818750	0.981748	248	0.556	0
248	0.311974	1.818750	0.981748	249	0.556	0
249	0.311974	1.818750	0.981748	250	0.556	0
250	0.311974	1.818750	0.981748	251	0.556	0
251	0.311974	1.818750	0.981748	252	0.556	0
252	0.311974	1.818750	0.981748	253	0.556	0
253	0.311974	1.818750	0.981748	254	0.556	0
254	0.311974	1.818750	0.981748	255	0.556	0
255	0.311974	1.818750	0.981748	256	0.556	0
256	0.232437	1.602870	0.490874			
7	2	0	1	1	0	0
.5239	1					
1	1.0					
2	1.0					
3	1.0					
4	1.0					
5	1.0					
6	1.0					
7	1.0					
8	1.0					
9	1.0					
10	1.0					
11	1.0					
12	1.0					
13	1.0					
14	1.0					
15	1.0					
16	1.0					
17	1.0					
18	1.0					
19	1.0					
20	1.0					
21	1.0					
22	1.0					
23	1.0					
24	1.0					
25	1.0					



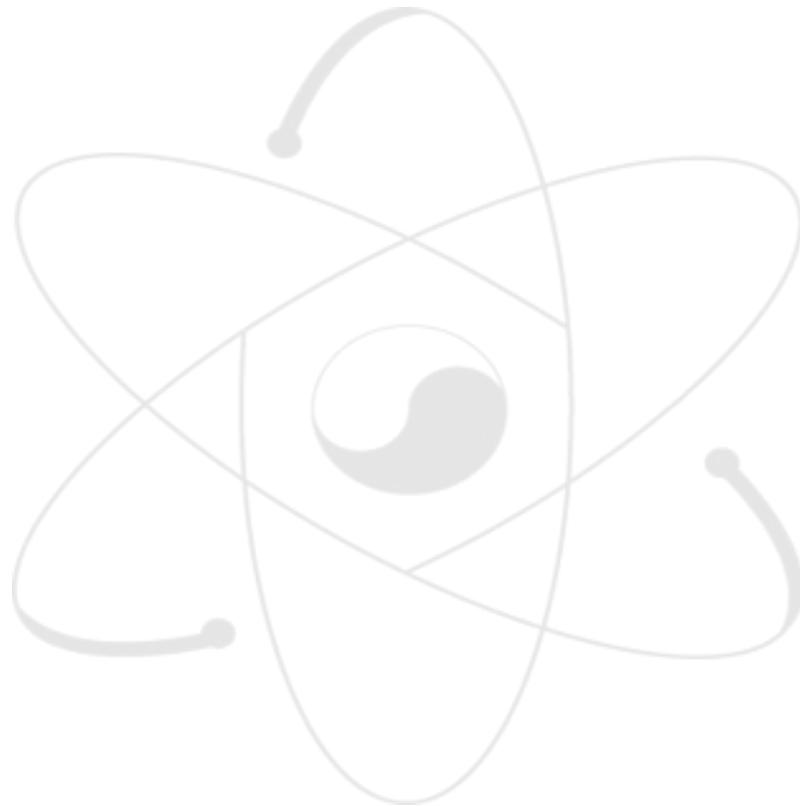
26	1.0
27	1.0
28	1.0
29	1.0
30	1.0
31	1.0
32	1.0
33	1.0
34	1.0
35	1.0
36	1.0
37	1.0
38	1.0
39	1.0
40	1.0
41	1.0
42	1.0
43	1.0
44	1.0
45	1.0
46	1.0
47	1.0
48	1.0
49	1.0
50	1.0
51	1.0
52	1.0
53	1.0
54	1.0
55	1.0
56	1.0
57	1.0
58	1.0
59	1.0
60	1.0
61	1.0
62	1.0
63	1.0
64	1.0
65	1.0
66	1.0
67	1.0



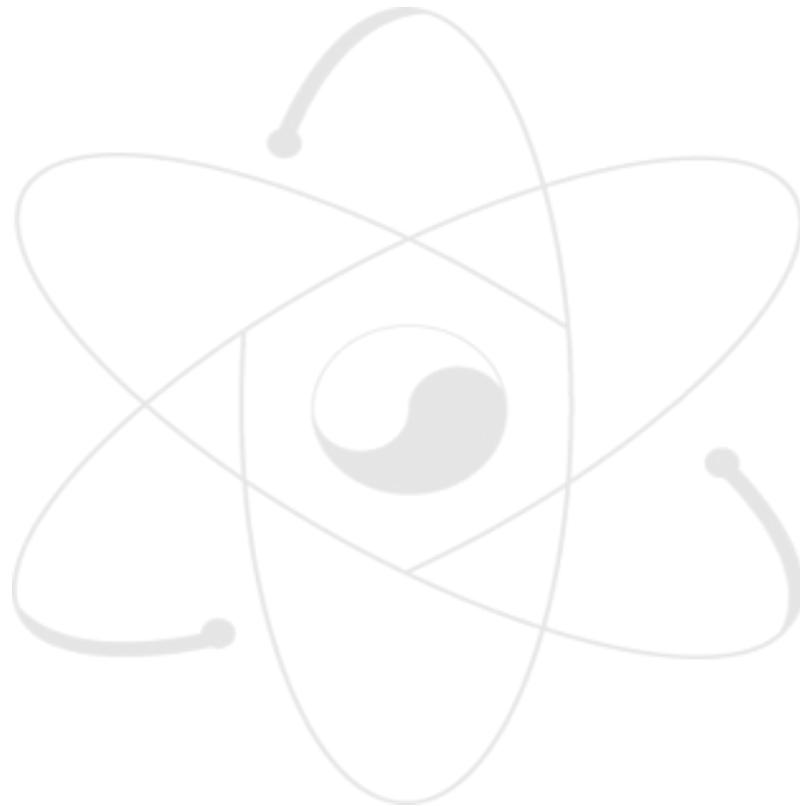
68 1.0  
69 1.0  
70 1.0  
71 1.0  
72 1.0  
73 1.0  
74 1.0  
75 1.0  
76 1.0  
77 1.0  
78 1.0  
79 1.0  
80 1.0  
81 1.0  
82 1.0  
83 1.0  
84 1.0  
85 1.0  
86 1.0  
87 1.0  
88 1.0  
89 1.0  
90 1.0  
91 1.0  
92 1.0  
93 1.0  
94 1.0  
95 1.0  
96 1.0  
97 1.0  
98 1.0  
99 1.0  
100 1.0  
101 1.0  
102 1.0  
103 1.0  
104 1.0  
105 1.0  
106 1.0  
107 1.0  
108 1.0  
109 1.0



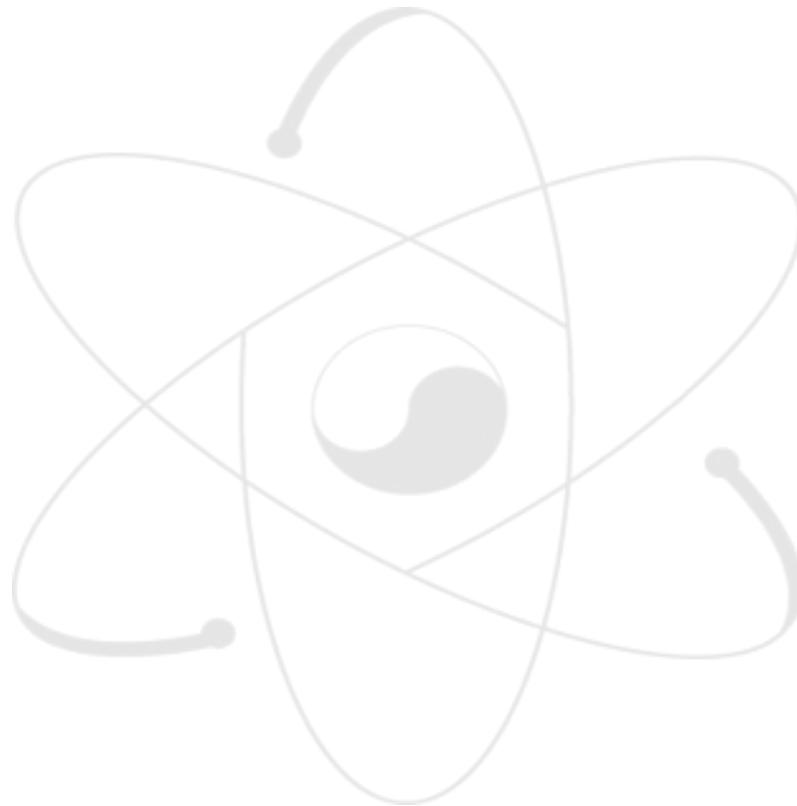
110	1.0
111	1.0
112	1.0
113	1.0
114	1.0
115	1.0
116	1.0
117	1.0
118	1.0
119	1.0
120	1.0
121	1.0
122	1.0
123	1.0
124	1.0
125	1.0
126	1.0
127	1.0
128	1.0
129	1.0
130	1.0
131	1.0
132	1.0
133	1.0
134	1.0
135	1.0
136	1.0
137	1.0
138	1.0
139	1.0
140	1.0
141	1.0
142	1.0
143	1.0
144	1.0
145	1.0
146	1.0
147	1.0
148	1.0
149	1.0
150	1.0
151	1.0



152 1.0  
153 1.0  
154 1.0  
155 1.0  
156 1.0  
157 1.0  
158 1.0  
159 1.0  
160 1.0  
161 1.0  
162 1.0  
163 1.0  
164 1.0  
165 1.0  
166 1.0  
167 1.0  
168 1.0  
169 1.0  
170 1.0  
171 1.0  
172 1.0  
173 1.0  
174 1.0  
175 1.0  
176 1.0  
177 1.0  
178 1.0  
179 1.0  
180 1.0  
181 1.0  
182 1.0  
183 1.0  
184 1.0  
185 1.0  
186 1.0  
187 1.0  
188 1.0  
189 1.0  
190 1.0  
191 1.0  
192 1.0  
193 1.0



194	1.0
195	1.0
196	1.0
197	1.0
198	1.0
199	1.0
200	1.0
201	1.0
202	1.0
203	1.0
204	1.0
205	1.0
206	1.0
207	1.0
208	1.0
209	1.0
210	1.0
211	1.0
212	1.0
213	1.0
214	1.0
215	1.0
216	1.0
217	1.0
218	1.0
219	1.0
220	1.0
221	1.0
222	1.0
223	1.0
224	1.0
225	1.0
226	1.0
227	1.0
228	1.0
229	1.0
230	1.0
231	1.0
232	1.0
233	1.0
234	1.0
235	1.0



236 1.0  
 237 1.0  
 238 1.0  
 239 1.0  
 240 1.0  
 241 1.0  
 242 1.0  
 243 1.0  
 244 1.0  
 245 1.0  
 246 1.0  
 247 1.0  
 248 1.0  
 249 1.0  
 250 1.0  
 251 1.0  
 252 1.0  
 253 1.0  
 254 1.0  
 255 1.0  
 256 1.0

8	225	225	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.625	0.000	1	.25	2	.25	17	.25	18	.25
2	0.625	0.000	2	0.25	3	0.25	18	0.25	19	.25
3	0.625	0.000	3	0.25	4	0.25	19	0.25	20	.25
4	0.625	0.000	4	0.25	5	0.25	20	0.25	21	.25
5	0.625	0.000	5	0.25	6	0.25	21	0.25	22	.25
6	0.625	0.000	6	0.25	7	0.25	22	0.25	23	.25
7	0.625	0.000	7	0.25	8	0.25	23	0.25	24	.25
8	0.625	0.000	8	0.25	9	0.25	24	0.25	25	.25
9	0.625	0.000	9	0.25	10	0.25	25	0.25	26	.25
10	0.625	0.000	10	0.25	11	0.25	26	0.25	27	.25
11	0.625	0.000	11	0.25	12	0.25	27	0.25	28	.25
12	0.625	0.000	12	0.25	13	0.25	28	0.25	29	.25
13	0.625	0.000	13	0.25	14	0.25	29	0.25	30	.25
14	0.625	0.000	14	0.25	15	0.25	30	0.25	31	.25
15	0.625	0.000	15	0.25	16	0.25	31	0.25	32	.25
16	0.625	0.000	17	0.25	18	0.25	33	0.25	34	.25
17	0.625	0.000	18	0.25	19	0.25	34	0.25	35	.25
18	0.625	0.000	19	0.25	20	0.25	35	0.25	36	.25
19	0.625	0.000	20	0.25	21	0.25	36	0.25	37	.25
20	0.625	0.000	21	0.25	22	0.25	37	0.25	38	.25

21	0.625	0.000	22	0.25	23	0.25	38	0.25	39	.25
22	0.625	0.000	23	0.25	24	0.25	39	0.25	40	.25
23	0.625	0.000	24	0.25	25	0.25	40	0.25	41	.25
24	0.625	0.000	25	0.25	26	0.25	41	0.25	42	.25
25	0.625	0.000	26	0.25	27	0.25	42	0.25	43	.25
26	0.625	0.000	27	0.25	28	0.25	43	0.25	44	.25
27	0.625	0.000	28	0.25	29	0.25	44	0.25	45	.25
28	0.625	0.000	29	0.25	30	0.25	45	0.25	46	.25
29	0.625	0.000	30	0.25	31	0.25	46	0.25	47	.25
30	0.625	0.000	31	0.25	32	0.25	47	0.25	48	.25
31	0.625	0.000	33	0.25	34	0.25	49	0.25	50	.25
32	0.625	0.000	34	0.25	35	0.25	50	0.25	51	.25
33	0.625	0.000	35	0.25	36	0.25	51	0.25	52	.25
34	0.625	0.000	36	0.25	37	0.25	52	0.25	53	.25
35	0.625	0.000	37	0.25	38	0.25	53	0.25	54	.25
36	0.625	0.000	38	0.25	39	0.25	54	0.25	55	.25
37	0.625	0.000	39	0.25	40	0.25	55	0.25	56	.25
38	0.625	0.000	40	0.25	41	0.25	56	0.25	57	.25
39	0.625	0.000	41	0.25	42	0.25	57	0.25	58	.25
40	0.625	0.000	42	0.25	43	0.25	58	0.25	59	.25
41	0.625	0.000	43	0.25	44	0.25	59	0.25	60	.25
42	0.625	0.000	44	0.25	45	0.25	60	0.25	61	.25
43	0.625	0.000	45	0.25	46	0.25	61	0.25	62	.25
44	0.625	0.000	46	0.25	47	0.25	62	0.25	63	.25
45	0.625	0.000	47	0.25	48	0.25	63	0.25	64	.25
46	0.625	0.000	49	0.25	50	0.25	65	0.25	66	.25
47	0.625	0.000	50	0.25	51	0.25	66	0.25	67	.25
48	0.625	0.000	51	0.25	52	0.25	67	0.25	68	.25
49	0.625	0.000	52	0.25	53	0.25	68	0.25	69	.25
50	0.625	0.000	53	0.25	54	0.25	69	0.25	70	.25
51	0.625	0.000	54	0.25	55	0.25	70	0.25	71	.25
52	0.625	0.000	55	0.25	56	0.25	71	0.25	72	.25
53	0.625	0.000	56	0.25	57	0.25	72	0.25	73	.25
54	0.625	0.000	57	0.25	58	0.25	73	0.25	74	.25
55	0.625	0.000	58	0.25	59	0.25	74	0.25	75	.25
56	0.625	0.000	59	0.25	60	0.25	75	0.25	76	.25
57	0.625	0.000	60	0.25	61	0.25	76	0.25	77	.25
58	0.625	0.000	61	0.25	62	0.25	77	0.25	78	.25
59	0.625	0.000	62	0.25	63	0.25	78	0.25	79	.25
60	0.625	0.000	63	0.25	64	0.25	79	0.25	80	.25
61	0.625	0.000	64	0.25	66	0.25	81	0.25	82	.25
62	0.625	0.000	65	0.25	67	0.25	82	0.25	83	.25

63	0.625	0.000	66	0.25	68	0.25	83	0.25	84	.25
64	0.625	0.000	67	0.25	69	0.25	84	0.25	85	.25
65	0.625	0.000	68	0.25	70	0.25	85	0.25	86	.25
66	0.625	0.000	69	0.25	71	0.25	86	0.25	87	.25
67	0.625	0.000	70	0.25	72	0.25	87	0.25	88	.25
68	0.625	0.000	71	0.25	73	0.25	88	0.25	89	.25
69	0.625	0.000	73	0.25	74	0.25	89	0.25	90	.25
70	0.625	0.000	74	0.25	75	0.25	90	0.25	91	.25
71	0.625	0.000	71	0.25	76	0.25	91	0.25	92	.25
72	0.625	0.000	72	0.25	77	0.25	92	0.25	93	.25
73	0.625	0.000	73	0.25	78	0.25	93	0.25	94	.25
74	0.625	0.000	74	0.25	79	0.25	94	0.25	95	.25
75	0.625	0.000	75	0.25	80	0.25	95	0.25	96	.25
76	0.625	0.000	76	0.25	77	0.25	94	0.25	95	.25
77	0.625	0.000	77	0.25	78	0.25	95	0.25	96	.25
78	0.625	0.000	78	0.25	79	0.25	96	0.25	97	.25
79	0.625	0.000	79	0.25	80	0.25	97	0.25	98	.25
80	0.625	0.000	80	0.25	81	0.25	98	0.25	99	.25
81	0.625	0.000	81	0.25	82	0.25	99	0.25	100	.25
82	0.625	0.000	82	0.25	83	0.25	100	0.25	101	.25
83	0.625	0.000	83	0.25	84	0.25	101	0.25	102	.25
84	0.625	0.000	84	0.25	85	0.25	102	0.25	103	.25
85	0.625	0.000	85	0.25	86	0.25	103	0.25	104	.25
86	0.625	0.000	91	0.25	92	0.25	109	0.25	110	.25
87	0.625	0.000	92	0.25	93	0.25	110	0.25	111	.25
88	0.625	0.000	93	0.25	94	0.25	111	0.25	112	.25
89	0.625	0.000	94	0.25	95	0.25	112	0.25	113	.25
90	0.625	0.000	95	0.25	96	0.25	113	0.25	114	.25
91	0.625	0.000	81	0.25	82	0.25	97	0.25	98	.25
92	0.625	0.000	82	0.25	83	0.25	98	0.25	99	.25
93	0.625	0.000	83	0.25	84	0.25	99	0.25	100	.25
94	0.625	0.000	84	0.25	85	0.25	100	0.25	101	.25
95	0.625	0.000	85	0.25	86	0.25	101	0.25	102	.25
96	0.625	0.000	86	0.25	87	0.25	102	0.25	103	.25
97	0.625	0.000	87	0.25	88	0.25	103	0.25	104	.25
98	0.625	0.000	88	0.25	89	0.25	104	0.25	105	.25
99	0.625	0.000	89	0.25	90	0.25	105	0.25	106	.25
100	0.625	0.000	90	0.25	91	0.25	106	0.25	107	.25
101	0.625	0.000	91	0.25	92	0.25	107	0.25	108	.25
102	0.625	0.000	92	0.25	93	0.25	108	0.25	109	.25
103	0.625	0.000	93	0.25	94	0.25	109	0.25	110	.25
104	0.625	0.000	94	0.25	95	0.25	110	0.25	111	.25

105	0.625	0.000	95	0.25	96	0.25	111	0.25	112	.25
106	0.625	0.000	97	0.25	98	0.25	113	0.25	114	.25
107	0.625	0.000	98	0.25	99	0.25	114	0.25	115	.25
108	0.625	0.000	99	0.25	100	0.25	115	0.25	116	.25
109	0.625	0.000	100	0.25	101	0.25	116	0.25	117	.25
110	0.625	0.000	101	0.25	102	0.25	117	0.25	118	.25
111	0.625	0.000	102	0.25	103	0.25	118	0.25	119	.25
112	0.625	0.000	103	0.25	104	0.25	119	0.25	120	.25
113	0.625	0.000	104	0.25	105	0.25	120	0.25	121	.25
114	0.625	0.000	105	0.25	106	0.25	121	0.25	122	.25
115	0.625	0.000	106	0.25	107	0.25	122	0.25	123	.25
116	0.625	0.000	107	0.25	108	0.25	123	0.25	124	.25
117	0.625	0.000	108	0.25	109	0.25	124	0.25	125	.25
118	0.625	0.000	109	0.25	110	0.25	125	0.25	126	.25
119	0.625	0.000	110	0.25	111	0.25	126	0.25	127	.25
120	0.625	0.000	111	0.25	112	0.25	127	0.25	128	.25
121	0.625	0.000	113	0.25	114	0.25	129	0.25	130	.25
122	0.625	0.000	114	0.25	115	0.25	130	0.25	131	.25
123	0.625	0.000	115	0.25	116	0.25	131	0.25	132	.25
124	0.625	0.000	116	0.25	117	0.25	132	0.25	133	.25
125	0.625	0.000	117	0.25	118	0.25	133	0.25	134	.25
126	0.625	0.000	118	0.25	119	0.25	134	0.25	135	.25
127	0.625	0.000	119	0.25	120	0.25	135	0.25	136	.25
128	0.625	0.000	120	0.25	121	0.25	136	0.25	137	.25
129	0.625	0.000	121	0.25	122	0.25	137	0.25	138	.25
130	0.625	0.000	122	0.25	123	0.25	138	0.25	139	.25
131	0.625	0.000	123	0.25	124	0.25	139	0.25	140	.25
132	0.625	0.000	124	0.25	125	0.25	140	0.25	141	.25
133	0.625	0.000	125	0.25	126	0.25	141	0.25	142	.25
134	0.625	0.000	126	0.25	127	0.25	142	0.25	143	.25
135	0.625	0.000	127	0.25	128	0.25	143	0.25	144	.25
136	0.625	0.000	129	0.25	130	0.25	145	0.25	146	.25
137	0.625	0.000	130	0.25	131	0.25	146	0.25	147	.25
138	0.625	0.000	131	0.25	132	0.25	147	0.25	148	.25
139	0.625	0.000	132	0.25	133	0.25	148	0.25	149	.25
140	0.625	0.000	133	0.25	134	0.25	149	0.25	150	.25
141	0.625	0.000	134	0.25	135	0.25	150	0.25	151	.25
142	0.625	0.000	135	0.25	136	0.25	151	0.25	152	.25
143	0.625	0.000	136	0.25	137	0.25	152	0.25	153	.25
144	0.625	0.000	137	0.25	138	0.25	153	0.25	154	.25
145	0.625	0.000	138	0.25	139	0.25	154	0.25	155	.25
146	0.625	0.000	139	0.25	140	0.25	155	0.25	156	.25

147	0.625	0.000	140	0.25	141	0.25	156	0.25	157	.25
148	0.625	0.000	141	0.25	142	0.25	157	0.25	158	.25
149	0.625	0.000	142	0.25	143	0.25	158	0.25	159	.25
150	0.625	0.000	143	0.25	144	0.25	159	0.25	160	.25
151	0.625	0.000	161	0.25	162	0.25	177	0.25	178	.25
152	0.625	0.000	162	0.25	163	0.25	178	0.25	179	.25
153	0.625	0.000	163	0.25	164	0.25	179	0.25	180	.25
154	0.625	0.000	164	0.25	165	0.25	180	0.25	181	.25
155	0.625	0.000	165	0.25	166	0.25	181	0.25	182	.25
156	0.625	0.000	166	0.25	167	0.25	182	0.25	183	.25
157	0.625	0.000	167	0.25	168	0.25	183	0.25	184	.25
158	0.625	0.000	168	0.25	169	0.25	184	0.25	185	.25
159	0.625	0.000	169	0.25	170	0.25	185	0.25	186	.25
160	0.625	0.000	170	0.25	171	0.25	186	0.25	187	.25
161	0.625	0.000	171	0.25	172	0.25	187	0.25	188	.25
162	0.625	0.000	172	0.25	173	0.25	188	0.25	189	.25
163	0.625	0.000	173	0.25	174	0.25	189	0.25	190	.25
164	0.625	0.000	174	0.25	175	0.25	190	0.25	191	.25
165	0.625	0.000	175	0.25	176	0.25	191	0.25	192	.25
166	0.625	0.000	177	0.25	178	0.25	193	0.25	194	.25
167	0.625	0.000	178	0.25	179	0.25	194	0.25	195	.25
168	0.625	0.000	179	0.25	180	0.25	195	0.25	196	.25
169	0.625	0.000	180	0.25	181	0.25	196	0.25	197	.25
170	0.625	0.000	181	0.25	182	0.25	197	0.25	198	.25
171	0.625	0.000	182	0.25	183	0.25	198	0.25	199	.25
172	0.625	0.000	183	0.25	184	0.25	199	0.25	200	.25
173	0.625	0.000	184	0.25	185	0.25	200	0.25	201	.25
174	0.625	0.000	185	0.25	186	0.25	201	0.25	202	.25
175	0.625	0.000	186	0.25	187	0.25	202	0.25	203	.25
176	0.625	0.000	187	0.25	188	0.25	203	0.25	204	.25
177	0.625	0.000	188	0.25	189	0.25	204	0.25	205	.25
178	0.625	0.000	189	0.25	190	0.25	205	0.25	206	.25
179	0.625	0.000	190	0.25	191	0.25	206	0.25	207	.25
180	0.625	0.000	191	0.25	192	0.25	207	0.25	208	.25
181	0.625	0.000	193	0.25	194	0.25	209	0.25	210	.25
182	0.625	0.000	194	0.25	195	0.25	210	0.25	211	.25
183	0.625	0.000	195	0.25	196	0.25	211	0.25	212	.25
184	0.625	0.000	196	0.25	197	0.25	212	0.25	213	.25
185	0.625	0.000	197	0.25	198	0.25	213	0.25	214	.25
186	0.625	0.000	198	0.25	199	0.25	214	0.25	215	.25
187	0.625	0.000	199	0.25	200	0.25	215	0.25	216	.25
188	0.625	0.000	200	0.25	201	0.25	216	0.25	217	.25

189	0.625	0.000	201	0.25	202	0.25	217	0.25	218	.25			
190	0.625	0.000	202	0.25	203	0.25	218	0.25	219	.25			
191	0.625	0.000	203	0.25	204	0.25	219	0.25	220	.25			
192	0.625	0.000	204	0.25	205	0.25	220	0.25	221	.25			
193	0.625	0.000	205	0.25	206	0.25	221	0.25	222	.25			
194	0.625	0.000	206	0.25	207	0.25	222	0.25	223	.25			
195	0.625	0.000	207	0.25	208	0.25	223	0.25	224	.25			
196	0.625	0.000	209	0.25	210	0.25	225	0.25	226	.25			
197	0.625	0.000	210	0.25	211	0.25	226	0.25	227	.25			
198	0.625	0.000	211	0.25	212	0.25	227	0.25	228	.25			
199	0.625	0.000	212	0.25	213	0.25	228	0.25	229	.25			
200	0.625	0.000	213	0.25	214	0.25	229	0.25	230	.25			
201	0.625	0.000	214	0.25	215	0.25	230	0.25	231	.25			
202	0.625	0.000	215	0.25	216	0.25	231	0.25	232	.25			
203	0.625	0.000	216	0.25	217	0.25	232	0.25	233	.25			
204	0.625	0.000	217	0.25	218	0.25	233	0.25	234	.25			
205	0.625	0.000	218	0.25	219	0.25	234	0.25	235	.25			
206	0.625	0.000	219	0.25	220	0.25	235	0.25	236	.25			
207	0.625	0.000	220	0.25	221	0.25	236	0.25	237	.25			
208	0.625	0.000	221	0.25	222	0.25	237	0.25	238	.25			
209	0.625	0.000	222	0.25	223	0.25	238	0.25	249	.25			
210	0.625	0.000	223	0.25	224	0.25	239	0.25	240	.25			
211	0.625	0.000	225	0.25	226	0.25	241	0.25	242	.25			
212	0.625	0.000	226	0.25	227	0.25	242	0.25	243	.25			
213	0.625	0.000	227	0.25	228	0.25	243	0.25	244	.25			
214	0.625	0.000	228	0.25	229	0.25	244	0.25	245	.25			
215	0.625	0.000	229	0.25	230	0.25	245	0.25	246	.25			
216	0.625	0.000	230	0.25	231	0.25	246	0.25	247	.25			
217	0.625	0.000	231	0.25	232	0.25	247	0.25	248	.25			
218	0.625	0.000	232	0.25	233	0.25	248	0.25	249	.25			
219	0.625	0.000	233	0.25	234	0.25	249	0.25	250	.25			
220	0.625	0.000	234	0.25	235	0.25	250	0.25	251	.25			
221	0.625	0.000	235	0.25	236	0.25	251	0.25	252	.25			
222	0.625	0.000	236	0.25	237	0.25	252	0.25	253	.25			
223	0.625	0.000	237	0.25	238	0.25	253	0.25	254	.25			
224	0.625	0.000	238	0.25	239	0.25	254	0.25	255	.25			
225	0.625	0.000	239	0.25	240	0.25	255	0.25	256	.25			
9	0	0	0	0	0	9	1	0	0	0			
46.0	0.	1.E+2	1.E+3	1.E-2	.5	.5	0.	0.	0.	0.8	1.6	0.7	0.0
32		200	200										
1	.008427	6	0.01087	6	.021739	3	0.043478	1	0.019441				
8	0.043478	1	0.039839	5	0.043478	1	0.040989						

10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
.05											
11	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14.7	77.0	1.50491	0.0								
0.35864	0.50000	0.58000	0.58000	0.65000	0.58000	0.58000	0.57000	0.57000	0.58000		
0.58000	0.65000	0.58000	0.58000	0.50000	0.35864	0.50000	0.65000	0.73000	0.75000		
0.80000	0.78000	0.72000	0.70000	0.70000	0.72000	0.78000	0.80000	0.75000	0.73000		
0.65000	0.50000	0.53500	0.82000	1.15000	1.18000	1.25000	1.20000	1.13000	0.85000		
0.85000	1.13000	1.20000	1.25000	1.18000	1.15000	0.82000	0.53500	0.54000	1.10000		
1.20000	1.29283	1.35296	1.30191	1.19272	1.33000	1.33000	1.19272	1.30191	1.35296		
1.29283	1.20000	1.10000	0.54000	0.55636	1.13242	1.34716	1.53044	1.58728	1.19272		
1.39696	1.45000	1.45000	1.39696	1.19272	1.58728	1.53044	1.34716	1.13242	0.55636		
0.54500	0.93136	1.40000	1.55000	1.57000	1.55000	1.45000	0.92028	0.92028	1.45000		
1.55000	1.57000	1.55000	1.40000	0.93136	0.54500	0.51000	0.80000	1.20000	1.40000		
1.55000	1.45000	1.23000	0.63930	0.63930	1.23000	1.45000	1.55000	1.40000	1.20000		
0.80000	0.51000	0.48128	0.52924	0.68887	1.06664	1.16704	1.09057	0.63930	0.48512		
0.48512	0.63930	1.09057	1.16704	1.06664	0.68887	0.52924	0.48128	0.48128	0.52924		
0.68887	1.06664	1.16704	1.09057	0.63930	0.48512	0.48512	0.63930	1.09057	1.16704		
1.06664	0.68887	0.52924	0.48128	0.51000	0.80000	1.20000	1.40000	1.55000	1.45000		
1.23000	0.63930	0.63930	1.23000	1.45000	1.55000	1.40000	1.20000	0.80000	0.51000		
0.54500	0.93136	1.40000	1.55000	1.57000	1.55000	1.45000	0.92028	0.92028	1.45000		
1.55000	1.57000	1.55000	1.40000	0.93136	0.54500	0.55636	1.13242	1.34716	1.53044		
1.58728	1.54255	1.39696	1.13786	1.16704	1.39696	1.19272	1.58728	1.53044	1.34716		
1.13242	0.55636	0.54000	1.10000	1.20000	1.29283	1.35296	1.30191	1.19272	1.33000		
1.33000	1.19272	1.30191	1.35296	1.29283	1.20000	1.10000	0.54000	0.53500	0.82000		
1.15000	1.18000	1.25000	1.20000	1.13000	0.85000	0.85000	1.13000	1.20000	1.25000		
1.18000	1.15000	0.82000	0.53500	0.50000	0.65000	0.73000	0.75000	0.80000	0.78000		
0.72000	0.70000	0.70000	0.72000	0.78000	0.80000	0.75000	0.73000	0.65000	0.50000		
0.35864	0.50000	0.58000	0.58000	0.65000	0.58000	0.58000	0.57000	0.57000	0.58000		
0.58000	0.65000	0.58000	0.58000	0.50000	0.35864						
12	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0
177	178	179	180	181	182	183	184	129	130		
131	132	133	134	135	136						

5. PNL 7x7 집합체 유로막힘 유동분포 시험 MATRA 입력 자료

```

99999      0      0      0
1          0 PNL 49-ROD BUNDLE FLOW BLOCKAGE TEST 70% NONUNIFORM AXIAL NODING
1         60         1         0         1         0
2         1         3         1         1         0         0         0
.34      -.25      0.
3         2
0.        1.        1.        1.
4         10        10         0         0         0         0
1         .0849      .6158      .6158      2         .1470
2         .1698      1.232     1.232     3         .1470         4         .1470
3         .0849      .6158      .6158      5         .1470
4         .1698      1.232     1.232     5         .1470         7         .1470
5         .1698      1.232     1.232     6         .1470         8         .1470
6         .0849      .6158      .6158      9         .1470
7         .1639      1.155     .6158      8         .2200
8         .1639      1.155     .6158      9         .2200
9         .1639      1.155     .6158     10        .2200
10        .0714      .5699     .1539
5         3         6         0
.0000     .3450     .3650     .3850     .4050     1.000
1
1.000     1.000     .3000     .3000     1.000     1.000
2
1.000     1.000     .6455     .6455     1.000     1.000
3
1.000     1.000     .8210     .8210     1.000     1.000
6         2         6
.0000     .3450     .3650     .3850     .4050     1.000
1
1.000     1.000     2.E-2     2.E-2     1.000     1.000
2
1.000     1.000     .4429     .4429     1.000     1.000
7         2         0         4         2         0         0
.1750     1         .3750     2         .5750     1         .9750     1
1         1.14
2         1.14
3         1.14
4         1.14
5         1.14

```

6	1.14										
7	1.14										
8	1.14										
9	1.14										
10	1.14										
1	.50										
2	.00										
3	.00										
4	.00										
5	.00										
6	.00										
7	.00										
8	.00										
9	.00										
10	.00										
8	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	.392	1.	1	.125	2	.250					
2	.392	1.	1	.250	2	.250	3	.125			
3	.392	1.	1	.125	2	.250	3	.125			
4	.392	1.	2	.250	4	.250					
5	.392	1.	2	.250	3	.250	4	.250	5	.250	
6	.392	1.	3	.125	5	.250	6	.125			
7	.392	1.	4	.250	7	.250					
8	.392	1.	4	.250	5	.250	7	.250	8	.250	
9	.392	1.	5	.250	6	.250	8	.250	9	.250	
10	.392	1.	6	.125	9	.250	10	.125			
9	0	0	0	0	0	10					
50.	0.	1.E-1	1.E-3	1.E-2	.5	.273	1.		0.8	1.6	0.5
25		200	200								
1	.085	1	.080	3	.040	3	.020	6	.010		
3	.020	5	.040	1	.080	1	.120	1	.135		
10	0	0	0	0	0	0	0	0			
.020											
11	1	0	0	0	0	0	0	0			
17.	85.	1.2757	0.								
12	1	0	0	0	0	0	0	0			

6. WH 14x14 집합체 유로막힘 유동분포 시험 MATRA 입력 자료

99999	0	0	0	0				
1	0 WH 14x14 blockage, 1100/550 gpm							
1	60	0	0	1	0			
2	0	0	0	0	1	0	0	
.316	-.25	0.						
64.	-1.	0.						
4	435	435	0	0	0			
01	0.03782	0.87662	0.33458	2	0.0584	30	0.0577	
02	0.07670	1.21444	0.66916	3	0.0584	31	0.1193	
03	0.07670	1.21444	0.66916	4	0.0584	32	0.1193	
04	0.07670	1.21444	0.66916	5	0.0584	33	0.1193	
05	0.07670	1.21444	0.66916	6	0.0584	34	0.1193	
06	0.07670	1.21444	0.66916	7	0.0584	35	0.1193	
07	0.07670	1.21444	0.66916	8	0.0584	36	0.1193	
08	0.07670	1.21444	0.66916	9	0.0584	37	0.1193	
09	0.07670	1.21444	0.66916	10	0.0584	38	0.1193	
10	0.07670	1.21444	0.66916	11	0.0584	39	0.1193	
11	0.07670	1.21444	0.66916	12	0.0584	40	0.1193	
12	0.07670	1.21444	0.66916	13	0.0584	41	0.1193	
13	0.07670	1.21444	0.66916	14	0.0584	42	0.1193	
14	0.07670	1.21444	0.66916	15	0.0584	43	0.1193	
15	0.09426	1.27916	0.66916	16	0.0584	44	0.1840	
16	0.07670	1.21444	0.66916	17	0.0584	45	0.1193	
17	0.07670	1.21444	0.66916	18	0.0584	46	0.1193	
18	0.07670	1.21444	0.66916	19	0.0584	47	0.1193	
19	0.07670	1.21444	0.66916	20	0.0584	48	0.1193	
20	0.07670	1.21444	0.66916	21	0.0584	49	0.1193	
21	0.07670	1.21444	0.66916	22	0.0584	50	0.1193	
22	0.07670	1.21444	0.66916	23	0.0584	51	0.1193	
23	0.07670	1.21444	0.66916	24	0.0584	52	0.1193	
24	0.07670	1.21444	0.66916	25	0.0584	53	0.1193	
25	0.07670	1.21444	0.66916	26	0.0584	54	0.1193	
26	0.07670	1.21444	0.66916	27	0.0584	55	0.1193	
27	0.07670	1.21444	0.66916	28	0.0584	56	0.1193	
28	0.07670	1.21444	0.66916	29	0.0584	57	0.1193	
29	0.03782	0.87662	0.33458	58	0.0577			
30	0.07633	1.21444	0.66916	31	0.1193	59	0.0577	
31	0.15480	1.33832	1.33832	32	0.1193	60	0.1193	
32	0.15480	1.33832	1.33832	33	0.1193	61	0.1193	
33	0.15480	1.33832	1.33832	34	0.1193	62	0.1193	

34	0.15480	1.33832	1.33832	35	0.1193	63	0.1193
35	0.15480	1.33832	1.33832	36	0.1193	64	0.1193
36	0.15480	1.33832	1.33832	37	0.1193	65	0.1193
37	0.15480	1.33832	1.33832	38	0.1193	66	0.1193
38	0.15480	1.33832	1.33832	39	0.1193	67	0.1193
39	0.15480	1.33832	1.33832	40	0.1193	68	0.1193
40	0.15480	1.33832	1.33832	41	0.1193	69	0.1193
41	0.15480	1.33832	1.33832	42	0.1193	70	0.1193
42	0.15480	1.33832	1.33832	43	0.1193	71	0.1193
43	0.15480	1.33832	1.33832	44	0.1193	72	0.1193
44	0.19009	1.33832	1.33832	45	0.1193	73	0.1840
45	0.15480	1.33832	1.33832	46	0.1193	74	0.1193
46	0.15480	1.33832	1.33832	47	0.1193	75	0.1193
47	0.15480	1.33832	1.33832	48	0.1193	76	0.1193
48	0.15480	1.33832	1.33832	49	0.1193	77	0.1193
49	0.15480	1.33832	1.33832	50	0.1193	78	0.1193
50	0.15480	1.33832	1.33832	51	0.1193	79	0.1193
51	0.15480	1.33832	1.33832	52	0.1193	80	0.1193
52	0.15480	1.33832	1.33832	53	0.1193	81	0.1193
53	0.15480	1.33832	1.33832	54	0.1193	82	0.1193
54	0.15480	1.33832	1.33832	55	0.1193	83	0.1193
55	0.15480	1.33832	1.33832	56	0.1193	84	0.1193
56	0.15480	1.33832	1.33832	57	0.1193	85	0.1193
57	0.15480	1.33832	1.33832	58	0.1193	86	0.1193
58	0.07633	1.21444	0.66916	87	0.0577		
59	0.07633	1.21444	0.66916	60	0.1193	88	0.0577
60	0.15480	1.33832	1.33832	61	0.1193	89	0.1193
61	0.15480	1.33832	1.33832	62	0.1193	90	0.1193
62	0.15480	1.33832	1.33832	63	0.1193	91	0.1193
63	0.15480	1.33832	1.33832	64	0.1193	92	0.1193
64	0.15480	1.33832	1.33832	65	0.1193	93	0.1193
65	0.15480	1.33832	1.33832	66	0.1193	94	0.1193
66	0.15480	1.33832	1.33832	67	0.1193	95	0.1193
67	0.15480	1.33832	1.33832	68	0.1193	96	0.1193
68	0.15480	1.33832	1.33832	69	0.1193	97	0.1193
69	0.15480	1.33832	1.33832	70	0.1193	98	0.1193
70	0.15480	1.33832	1.33832	71	0.1193	99	0.1193
71	0.15480	1.33832	1.33832	72	0.1193	100	0.1193
72	0.15480	1.33832	1.33832	73	0.1193	101	0.1193
73	0.19009	1.33832	1.33832	74	0.1193	102	0.1840
74	0.15480	1.33832	1.33832	75	0.1193	103	0.1193
75	0.15480	1.33832	1.33832	76	0.1193	104	0.1193

76	0.15480	1.33832	1.33832	77	0.1193	105	0.1193
77	0.15480	1.33832	1.33832	78	0.1193	106	0.1193
78	0.15480	1.33832	1.33832	79	0.1193	107	0.1193
79	0.15480	1.33832	1.33832	80	0.1193	108	0.1193
80	0.15480	1.33832	1.33832	81	0.1193	109	0.1193
81	0.15480	1.33832	1.33832	82	0.1193	110	0.1193
82	0.15480	1.33832	1.33832	83	0.1193	111	0.1193
83	0.15480	1.33832	1.33832	84	0.1193	112	0.1193
84	0.15480	1.33832	1.33832	85	0.1193	113	0.1193
85	0.15480	1.33832	1.33832	86	0.1193	114	0.1193
86	0.15480	1.33832	1.33832	87	0.1193	115	0.1193
87	0.07633	1.21444	0.66916	116	0.0577		
88	0.07633	1.21444	0.66916	89	0.1193	117	0.0577
89	0.15480	1.33832	1.33832	90	0.1193	118	0.1193
90	0.15480	1.33832	1.33832	91	0.1193	119	0.1193
91	0.15480	1.33832	1.33832	92	0.1193	120	0.1193
92	0.15480	1.33832	1.33832	93	0.1193	121	0.1193
93	0.15480	1.33832	1.33832	94	0.1193	122	0.1193
94	0.15480	1.33832	1.33832	95	0.1193	123	0.1193
95	0.15480	1.33832	1.33832	96	0.1193	124	0.1193
96	0.15480	1.33832	1.33832	97	0.1193	125	0.1193
97	0.15480	1.33832	1.33832	98	0.1193	126	0.1193
98	0.15480	1.33832	1.33832	99	0.1193	127	0.1193
99	0.15480	1.33832	1.33832	100	0.1193	128	0.1193
100	0.15480	1.33832	1.33832	101	0.1193	129	0.1193
101	0.15480	1.33832	1.33832	102	0.1193	130	0.1193
102	0.19009	1.33832	1.33832	103	0.1193	131	0.1840
103	0.15480	1.33832	1.33832	104	0.1193	132	0.1193
104	0.15480	1.33832	1.33832	105	0.1193	133	0.1193
105	0.15480	1.33832	1.33832	106	0.1193	134	0.1193
106	0.15480	1.33832	1.33832	107	0.1193	135	0.1193
107	0.15480	1.33832	1.33832	108	0.1193	136	0.1193
108	0.15480	1.33832	1.33832	109	0.1193	137	0.1193
109	0.15480	1.33832	1.33832	110	0.1193	138	0.1193
110	0.15480	1.33832	1.33832	111	0.1193	139	0.1193
111	0.15480	1.33832	1.33832	112	0.1193	140	0.1193
112	0.15480	1.33832	1.33832	113	0.1193	141	0.1193
113	0.15480	1.33832	1.33832	114	0.1193	142	0.1193
114	0.15480	1.33832	1.33832	115	0.1193	143	0.1193
115	0.15480	1.33832	1.33832	116	0.1193	144	0.1193
116	0.07633	1.21444	0.66916	145	0.0577		
117	0.07633	1.21444	0.66916	118	0.1193	146	0.0577

118	0.15480	1.33832	1.33832	119	0.1193	147	0.1193
119	0.15480	1.33832	1.33832	120	0.1193	148	0.1193
120	0.15480	1.33832	1.33832	121	0.1193	149	0.1193
121	0.15480	1.33832	1.33832	122	0.1193	150	0.1193
122	0.15480	1.33832	1.33832	123	0.1193	151	0.1193
123	0.15480	1.33832	1.33832	124	0.1193	152	0.1193
124	0.15480	1.33832	1.33832	125	0.1193	153	0.1193
125	0.15480	1.33832	1.33832	126	0.1193	154	0.1193
126	0.15480	1.33832	1.33832	127	0.1193	155	0.1193
127	0.15480	1.33832	1.33832	128	0.1193	156	0.1193
128	0.15480	1.33832	1.33832	129	0.1193	157	0.1193
129	0.15480	1.33832	1.33832	130	0.1193	158	0.1193
130	0.15480	1.33832	1.33832	131	0.1193	159	0.1193
131	0.19009	1.33832	1.33832	132	0.1193	160	0.1840
132	0.15480	1.33832	1.33832	133	0.1193	161	0.1193
133	0.15480	1.33832	1.33832	134	0.1193	162	0.1193
134	0.15480	1.33832	1.33832	135	0.1193	163	0.1193
135	0.15480	1.33832	1.33832	136	0.1193	164	0.1193
136	0.15480	1.33832	1.33832	137	0.1193	165	0.1193
137	0.15480	1.33832	1.33832	138	0.1193	166	0.1193
138	0.15480	1.33832	1.33832	139	0.1193	167	0.1193
139	0.15480	1.33832	1.33832	140	0.1193	168	0.1193
140	0.15480	1.33832	1.33832	141	0.1193	169	0.1193
141	0.15480	1.33832	1.33832	142	0.1193	170	0.1193
142	0.15480	1.33832	1.33832	143	0.1193	171	0.1193
143	0.15480	1.33832	1.33832	144	0.1193	172	0.1193
144	0.15480	1.33832	1.33832	145	0.1193	173	0.1193
145	0.07633	1.21444	0.66916	174	0.0577		
146	0.07633	1.21444	0.66916	147	0.1193	175	0.0577
147	0.15480	1.33832	1.33832	148	0.1193	176	0.1193
148	0.15480	1.33832	1.33832	149	0.1193	177	0.1193
149	0.15480	1.33832	1.33832	150	0.1193	178	0.1193
150	0.15480	1.33832	1.33832	151	0.1193	179	0.1193
151	0.15480	1.33832	1.33832	152	0.1193	180	0.1193
152	0.15480	1.33832	1.33832	153	0.1193	181	0.1193
153	0.15480	1.33832	1.33832	154	0.1193	182	0.1193
154	0.15480	1.33832	1.33832	155	0.1193	183	0.1193
155	0.15480	1.33832	1.33832	156	0.1193	184	0.1193
156	0.15480	1.33832	1.33832	157	0.1193	185	0.1193
157	0.15480	1.33832	1.33832	158	0.1193	186	0.1193
158	0.15480	1.33832	1.33832	159	0.1193	187	0.1193
159	0.15480	1.33832	1.33832	160	0.1193	188	0.1193

160	0.19009	1.33832	1.33832	161	0.1193	189	0.1840
161	0.15480	1.33832	1.33832	162	0.1193	190	0.1193
162	0.15480	1.33832	1.33832	163	0.1193	191	0.1193
163	0.15480	1.33832	1.33832	164	0.1193	192	0.1193
164	0.15480	1.33832	1.33832	165	0.1193	193	0.1193
165	0.15480	1.33832	1.33832	166	0.1193	194	0.1193
166	0.15480	1.33832	1.33832	167	0.1193	195	0.1193
167	0.15480	1.33832	1.33832	168	0.1193	196	0.1193
168	0.15480	1.33832	1.33832	169	0.1193	197	0.1193
169	0.15480	1.33832	1.33832	170	0.1193	198	0.1193
170	0.15480	1.33832	1.33832	171	0.1193	199	0.1193
171	0.15480	1.33832	1.33832	172	0.1193	200	0.1193
172	0.15480	1.33832	1.33832	173	0.1193	201	0.1193
173	0.15480	1.33832	1.33832	174	0.1193	202	0.1193
174	0.07633	1.21444	0.66916	203	0.0577		
175	0.07633	1.21444	0.66916	176	0.1193	204	0.0577
176	0.15480	1.33832	1.33832	177	0.1193	205	0.1193
177	0.15480	1.33832	1.33832	178	0.1193	206	0.1193
178	0.15480	1.33832	1.33832	179	0.1193	207	0.1193
179	0.15480	1.33832	1.33832	180	0.1193	208	0.1193
180	0.15480	1.33832	1.33832	181	0.1193	209	0.1193
181	0.15480	1.33832	1.33832	182	0.1193	210	0.1193
182	0.15480	1.33832	1.33832	183	0.1193	211	0.1193
183	0.15480	1.33832	1.33832	184	0.1193	212	0.1193
184	0.15480	1.33832	1.33832	185	0.1193	213	0.1193
185	0.15480	1.33832	1.33832	186	0.1193	214	0.1193
186	0.15480	1.33832	1.33832	187	0.1193	215	0.1193
187	0.15480	1.33832	1.33832	188	0.1193	216	0.1193
188	0.15480	1.33832	1.33832	189	0.1193	217	0.1193
189	0.19009	1.33832	1.33832	190	0.1193	218	0.1840
190	0.15480	1.33832	1.33832	191	0.1193	219	0.1193
191	0.15480	1.33832	1.33832	192	0.1193	220	0.1193
192	0.15480	1.33832	1.33832	193	0.1193	221	0.1193
193	0.15480	1.33832	1.33832	194	0.1193	222	0.1193
194	0.15480	1.33832	1.33832	195	0.1193	223	0.1193
195	0.15480	1.33832	1.33832	196	0.1193	224	0.1193
196	0.15480	1.33832	1.33832	197	0.1193	225	0.1193
197	0.15480	1.33832	1.33832	198	0.1193	226	0.1193
198	0.15480	1.33832	1.33832	199	0.1193	227	0.1193
199	0.15480	1.33832	1.33832	200	0.1193	228	0.1193
200	0.15480	1.33832	1.33832	201	0.1193	229	0.1193
201	0.15480	1.33832	1.33832	202	0.1193	230	0.1193

202	0.15480	1.33832	1.33832	203	0.1193	231	0.1193
203	0.07633	1.21444	0.66916	232	0.0577		
204	0.07633	1.21444	0.66916	205	0.1193	233	0.0577
205	0.15480	1.33832	1.33832	206	0.1193	234	0.1193
206	0.15480	1.33832	1.33832	207	0.1193	235	0.1193
207	0.15480	1.33832	1.33832	208	0.1193	236	0.1193
208	0.15480	1.33832	1.33832	209	0.1193	237	0.1193
209	0.15480	1.33832	1.33832	210	0.1193	238	0.1193
210	0.15480	1.33832	1.33832	211	0.1193	239	0.1193
211	0.15480	1.33832	1.33832	212	0.1193	240	0.1193
212	0.15480	1.33832	1.33832	213	0.1193	241	0.1193
213	0.15480	1.33832	1.33832	214	0.1193	242	0.1193
214	0.15480	1.33832	1.33832	215	0.1193	243	0.1193
215	0.15480	1.33832	1.33832	216	0.1193	244	0.1193
216	0.15480	1.33832	1.33832	217	0.1193	245	0.1193
217	0.15480	1.33832	1.33832	218	0.1193	246	0.1193
218	0.19009	1.33832	1.33832	219	0.1193	247	0.1840
219	0.15480	1.33832	1.33832	220	0.1193	248	0.1193
220	0.15480	1.33832	1.33832	221	0.1193	249	0.1193
221	0.15480	1.33832	1.33832	222	0.1193	250	0.1193
222	0.15480	1.33832	1.33832	223	0.1193	251	0.1193
223	0.15480	1.33832	1.33832	224	0.1193	252	0.1193
224	0.15480	1.33832	1.33832	225	0.1193	253	0.1193
225	0.15480	1.33832	1.33832	226	0.1193	254	0.1193
226	0.15480	1.33832	1.33832	227	0.1193	255	0.1193
227	0.15480	1.33832	1.33832	228	0.1193	256	0.1193
228	0.15480	1.33832	1.33832	229	0.1193	257	0.1193
229	0.15480	1.33832	1.33832	230	0.1193	258	0.1193
230	0.15480	1.33832	1.33832	231	0.1193	259	0.1193
231	0.15480	1.33832	1.33832	232	0.1193	260	0.1193
232	0.07633	1.21444	0.66916	261	0.0577		
233	0.07633	1.21444	0.66916	234	0.1193	262	0.0577
234	0.15480	1.33832	1.33832	235	0.1193	263	0.1193
235	0.15480	1.33832	1.33832	236	0.1193	264	0.1193
236	0.15480	1.33832	1.33832	237	0.1193	265	0.1193
237	0.15480	1.33832	1.33832	238	0.1193	266	0.1193
238	0.15480	1.33832	1.33832	239	0.1193	267	0.1193
239	0.15480	1.33832	1.33832	240	0.1193	268	0.1193
240	0.15480	1.33832	1.33832	241	0.1193	269	0.1193
241	0.15480	1.33832	1.33832	242	0.1193	270	0.1193
242	0.15480	1.33832	1.33832	243	0.1193	271	0.1193
243	0.15480	1.33832	1.33832	244	0.1193	272	0.1193

244	0.15480	1.33832	1.33832	245	0.1193	273	0.1193
245	0.15480	1.33832	1.33832	246	0.1193	274	0.1193
246	0.15480	1.33832	1.33832	247	0.1193	275	0.1193
247	0.19009	1.33832	1.33832	248	0.1193	276	0.1840
248	0.15480	1.33832	1.33832	249	0.1193	277	0.1193
249	0.15480	1.33832	1.33832	250	0.1193	278	0.1193
250	0.15480	1.33832	1.33832	251	0.1193	279	0.1193
251	0.15480	1.33832	1.33832	252	0.1193	280	0.1193
252	0.15480	1.33832	1.33832	253	0.1193	281	0.1193
253	0.15480	1.33832	1.33832	254	0.1193	282	0.1193
254	0.15480	1.33832	1.33832	255	0.1193	283	0.1193
255	0.15480	1.33832	1.33832	256	0.1193	284	0.1193
256	0.15480	1.33832	1.33832	257	0.1193	285	0.1193
257	0.15480	1.33832	1.33832	258	0.1193	286	0.1193
258	0.15480	1.33832	1.33832	259	0.1193	287	0.1193
259	0.15480	1.33832	1.33832	260	0.1193	288	0.1193
260	0.15480	1.33832	1.33832	261	0.1193	289	0.1193
261	0.07633	1.21444	0.66916	290	0.0577		
262	0.07633	1.21444	0.66916	263	0.1193	291	0.0577
263	0.15480	1.33832	1.33832	264	0.1193	292	0.1193
264	0.15480	1.33832	1.33832	265	0.1193	293	0.1193
265	0.15480	1.33832	1.33832	266	0.1193	294	0.1193
266	0.15480	1.33832	1.33832	267	0.1193	295	0.1193
267	0.15480	1.33832	1.33832	268	0.1193	296	0.1193
268	0.15480	1.33832	1.33832	269	0.1193	297	0.1193
269	0.15480	1.33832	1.33832	270	0.1193	298	0.1193
270	0.15480	1.33832	1.33832	271	0.1193	299	0.1193
271	0.15480	1.33832	1.33832	272	0.1193	300	0.1193
272	0.15480	1.33832	1.33832	273	0.1193	301	0.1193
273	0.15480	1.33832	1.33832	274	0.1193	302	0.1193
274	0.15480	1.33832	1.33832	275	0.1193	303	0.1193
275	0.15480	1.33832	1.33832	276	0.1193	304	0.1193
276	0.19009	1.33832	1.33832	277	0.1193	305	0.1840
277	0.15480	1.33832	1.33832	278	0.1193	306	0.1193
278	0.15480	1.33832	1.33832	279	0.1193	307	0.1193
279	0.15480	1.33832	1.33832	280	0.1193	308	0.1193
280	0.15480	1.33832	1.33832	281	0.1193	309	0.1193
281	0.15480	1.33832	1.33832	282	0.1193	310	0.1193
282	0.15480	1.33832	1.33832	283	0.1193	311	0.1193
283	0.15480	1.33832	1.33832	284	0.1193	312	0.1193
284	0.15480	1.33832	1.33832	285	0.1193	313	0.1193
285	0.15480	1.33832	1.33832	286	0.1193	314	0.1193

286	0.15480	1.33832	1.33832	287	0.1193	315	0.1193
287	0.15480	1.33832	1.33832	288	0.1193	316	0.1193
288	0.15480	1.33832	1.33832	289	0.1193	317	0.1193
289	0.15480	1.33832	1.33832	290	0.1193	318	0.1193
290	0.07633	1.21444	0.66916	319	0.0577		
291	0.07633	1.21444	0.66916	292	0.1193	320	0.0577
292	0.15480	1.33832	1.33832	293	0.1193	321	0.1193
293	0.15480	1.33832	1.33832	294	0.1193	322	0.1193
294	0.15480	1.33832	1.33832	295	0.1193	323	0.1193
295	0.15480	1.33832	1.33832	296	0.1193	324	0.1193
296	0.15480	1.33832	1.33832	297	0.1193	325	0.1193
297	0.15480	1.33832	1.33832	298	0.1193	326	0.1193
298	0.15480	1.33832	1.33832	299	0.1193	327	0.1193
299	0.15480	1.33832	1.33832	300	0.1193	328	0.1193
300	0.15480	1.33832	1.33832	301	0.1193	329	0.1193
301	0.15480	1.33832	1.33832	302	0.1193	330	0.1193
302	0.15480	1.33832	1.33832	303	0.1193	331	0.1193
303	0.15480	1.33832	1.33832	304	0.1193	332	0.1193
304	0.15480	1.33832	1.33832	305	0.1193	333	0.1193
305	0.19009	1.33832	1.33832	306	0.1193	334	0.1840
306	0.15480	1.33832	1.33832	307	0.1193	335	0.1193
307	0.15480	1.33832	1.33832	308	0.1193	336	0.1193
308	0.15480	1.33832	1.33832	309	0.1193	337	0.1193
309	0.15480	1.33832	1.33832	310	0.1193	338	0.1193
310	0.15480	1.33832	1.33832	311	0.1193	339	0.1193
311	0.15480	1.33832	1.33832	312	0.1193	340	0.1193
312	0.15480	1.33832	1.33832	313	0.1193	341	0.1193
313	0.15480	1.33832	1.33832	314	0.1193	342	0.1193
314	0.15480	1.33832	1.33832	315	0.1193	343	0.1193
315	0.15480	1.33832	1.33832	316	0.1193	344	0.1193
316	0.15480	1.33832	1.33832	317	0.1193	345	0.1193
317	0.15480	1.33832	1.33832	318	0.1193	346	0.1193
318	0.15480	1.33832	1.33832	319	0.1193	347	0.1193
319	0.07633	1.21444	0.66916	348	0.0577		
320	0.07633	1.21444	0.66916	321	0.1193	349	0.0577
321	0.15480	1.33832	1.33832	322	0.1193	350	0.1193
322	0.15480	1.33832	1.33832	323	0.1193	351	0.1193
323	0.15480	1.33832	1.33832	324	0.1193	352	0.1193
324	0.15480	1.33832	1.33832	325	0.1193	353	0.1193
325	0.15480	1.33832	1.33832	326	0.1193	354	0.1193
326	0.15480	1.33832	1.33832	327	0.1193	355	0.1193
327	0.15480	1.33832	1.33832	328	0.1193	356	0.1193

328	0.15480	1.33832	1.33832	329	0.1193	357	0.1193
329	0.15480	1.33832	1.33832	330	0.1193	358	0.1193
330	0.15480	1.33832	1.33832	331	0.1193	359	0.1193
331	0.15480	1.33832	1.33832	332	0.1193	360	0.1193
332	0.15480	1.33832	1.33832	333	0.1193	361	0.1193
333	0.15480	1.33832	1.33832	334	0.1193	362	0.1193
334	0.19009	1.33832	1.33832	335	0.1193	363	0.1840
335	0.15480	1.33832	1.33832	336	0.1193	364	0.1193
336	0.15480	1.33832	1.33832	337	0.1193	365	0.1193
337	0.15480	1.33832	1.33832	338	0.1193	366	0.1193
338	0.15480	1.33832	1.33832	339	0.1193	367	0.1193
339	0.15480	1.33832	1.33832	340	0.1193	368	0.1193
340	0.15480	1.33832	1.33832	341	0.1193	369	0.1193
341	0.15480	1.33832	1.33832	342	0.1193	370	0.1193
342	0.15480	1.33832	1.33832	343	0.1193	371	0.1193
343	0.15480	1.33832	1.33832	344	0.1193	372	0.1193
344	0.15480	1.33832	1.33832	345	0.1193	373	0.1193
345	0.15480	1.33832	1.33832	346	0.1193	374	0.1193
346	0.15480	1.33832	1.33832	347	0.1193	375	0.1193
347	0.15480	1.33832	1.33832	348	0.1193	376	0.1193
348	0.07633	1.21444	0.66916	377	0.0577		
349	0.07633	1.21444	0.66916	350	0.1193	378	0.0577
350	0.15480	1.33832	1.33832	351	0.1193	379	0.1193
351	0.15480	1.33832	1.33832	352	0.1193	380	0.1193
352	0.15480	1.33832	1.33832	353	0.1193	381	0.1193
353	0.15480	1.33832	1.33832	354	0.1193	382	0.1193
354	0.15480	1.33832	1.33832	355	0.1193	383	0.1193
355	0.15480	1.33832	1.33832	356	0.1193	384	0.1193
356	0.15480	1.33832	1.33832	357	0.1193	385	0.1193
357	0.15480	1.33832	1.33832	358	0.1193	386	0.1193
358	0.15480	1.33832	1.33832	359	0.1193	387	0.1193
359	0.15480	1.33832	1.33832	360	0.1193	388	0.1193
360	0.15480	1.33832	1.33832	361	0.1193	389	0.1193
361	0.15480	1.33832	1.33832	362	0.1193	390	0.1193
362	0.15480	1.33832	1.33832	363	0.1193	391	0.1193
363	0.19009	1.33832	1.33832	364	0.1193	392	0.1840
364	0.15480	1.33832	1.33832	365	0.1193	393	0.1193
365	0.15480	1.33832	1.33832	366	0.1193	394	0.1193
366	0.15480	1.33832	1.33832	367	0.1193	395	0.1193
367	0.15480	1.33832	1.33832	368	0.1193	396	0.1193
368	0.15480	1.33832	1.33832	369	0.1193	397	0.1193
369	0.15480	1.33832	1.33832	370	0.1193	398	0.1193

370	0.15480	1.33832	1.33832	371	0.1193	399	0.1193
371	0.15480	1.33832	1.33832	372	0.1193	400	0.1193
372	0.15480	1.33832	1.33832	373	0.1193	401	0.1193
373	0.15480	1.33832	1.33832	374	0.1193	402	0.1193
374	0.15480	1.33832	1.33832	375	0.1193	403	0.1193
375	0.15480	1.33832	1.33832	376	0.1193	404	0.1193
376	0.15480	1.33832	1.33832	377	0.1193	405	0.1193
377	0.07633	1.21444	0.66916	406	0.0577		
378	0.07633	1.21444	0.66916	379	0.1193	407	0.0577
379	0.15480	1.33832	1.33832	380	0.1193	408	0.1193
380	0.15480	1.33832	1.33832	381	0.1193	409	0.1193
381	0.15480	1.33832	1.33832	382	0.1193	410	0.1193
382	0.15480	1.33832	1.33832	383	0.1193	411	0.1193
383	0.15480	1.33832	1.33832	384	0.1193	412	0.1193
384	0.15480	1.33832	1.33832	385	0.1193	413	0.1193
385	0.15480	1.33832	1.33832	386	0.1193	414	0.1193
386	0.15480	1.33832	1.33832	387	0.1193	415	0.1193
387	0.15480	1.33832	1.33832	388	0.1193	416	0.1193
388	0.15480	1.33832	1.33832	389	0.1193	417	0.1193
389	0.15480	1.33832	1.33832	390	0.1193	418	0.1193
390	0.15480	1.33832	1.33832	391	0.1193	419	0.1193
391	0.15480	1.33832	1.33832	392	0.1193	420	0.1193
392	0.19009	1.33832	1.33832	393	0.1193	421	0.1840
393	0.15480	1.33832	1.33832	394	0.1193	422	0.1193
394	0.15480	1.33832	1.33832	395	0.1193	423	0.1193
395	0.15480	1.33832	1.33832	396	0.1193	424	0.1193
396	0.15480	1.33832	1.33832	397	0.1193	425	0.1193
397	0.15480	1.33832	1.33832	398	0.1193	426	0.1193
398	0.15480	1.33832	1.33832	399	0.1193	427	0.1193
399	0.15480	1.33832	1.33832	400	0.1193	428	0.1193
400	0.15480	1.33832	1.33832	401	0.1193	429	0.1193
401	0.15480	1.33832	1.33832	402	0.1193	430	0.1193
402	0.15480	1.33832	1.33832	403	0.1193	431	0.1193
403	0.15480	1.33832	1.33832	404	0.1193	432	0.1193
404	0.15480	1.33832	1.33832	405	0.1193	433	0.1193
405	0.15480	1.33832	1.33832	406	0.1193	434	0.1193
406	0.07633	1.21444	0.66916	435	0.0577		
407	0.03782	0.87662	0.33458	408	0.0584		
408	0.07670	1.21444	0.66916	409	0.0584		
409	0.07670	1.21444	0.66916	410	0.0584		
410	0.07670	1.21444	0.66916	411	0.0584		
411	0.07670	1.21444	0.66916	412	0.0584		





7. GE 3x3 집합체 부수로 2 상 유동 분포 시험 MATRA 입력 자료

```

99999      0      1      1
1          0 GE 9-ROD BUNDLE TWO-PHASE TEST 2B2 EV & VD CVDK=1.00
1         60      1      0      1
2          1      3      1      1      0      0      0
.184     -.20     0.
3          4
0.        0. .3999999  0.      .4      1.      1.      1.
4          3      3      0      0      0      0
1         .0391349 .5579977 .2238385  2      .135
2         .1823721 1.6333539 .8953539  3      .168
3         .1447341 .8953539 .8953539
7          2      0      8      1      0      0
.2166667  1      .3166667  1      .4166667  1      .5166667  1      .6166667  1
.7166667  1      .8166667  1      .9166667  1
1          1.
2          1.
3          1.
8          3      3      0      0      0      0      0      0      0
1         .570     1.      1      .125     2      .250     3      .125
2         .570     1.      2      .250     3      .250
3         .570     1.      3      .125
9          0      0      0      0      0      0
120.      0.      1.E-1  1.E-3  1.E-2  .5      .5      .5
60         200     200
10         0      0      0      0      1      1      2      1      0
.005
14
11         0      0      0      0      0      0      0      0
1000.     392.69 .530     .225
12         1      0      0      0      0      0      0      0

```

8. ISPRA 4x4 집합체 부수로 2상 유동 분포 시험 MATRA 입력 자료

```

99999      1      1      1
1          0 CISE 16-ROD BUNDLE EUROP-P 160 BAR RUN 205.1 EV & VD CVDK=1.00
1         60      1      0      1
2         1      1      1      0      0      0      0
.238832   -.20    0.
3         2
0.        1.      1.      1.
4         6      6      0      0      0      0
1 19.19905 11.36459 4.22152 2 2.925
2 73.30871 31.18606 16.88606 3 3.550      4 2.925
3 56.86371 16.88606 16.88606 5 3.550
4 36.65436 15.59303 8.44303 -5 3.550
5 56.86371 16.88606 16.88606 -6 3.550
6 14.21593 4.22152 4.22152
7         2      0      7      1      0      0
.081365   1      .218066 1 .354768 1 .491470 1 .628171 1
.764873   1      .901575 1
1         1.352
2         .960
3         .848
4         .965
5         .900
6         .987
8         3      3      0      0      0      0      0      0      0
1 10.75    1.      1      .125 2 .250 3 .125
2 10.75    1.      2      .250 3 .250 4 .250 5 .250
3 10.75    1.      3      .125 5 .250 6 .125
9         0      0      0      0      0      0      1      0      0
3657.6    0.      1.E+3 5.E-3 5.E-3 .5 .5 .0 0.8 1.6 0.7 3657.6
60        200 200
10        0      0      0      0      0      0      0      0      0
0.010
11        0      0      0      0      0      0      0      0
16.000 1292.9 2271.4413 718.1244
12        1      0      0      0      0      0      0      0

```

서 지 정 보 양 식

<b>수행기관보고서번호</b>		위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드	
KAERI/TR-3639/2008					
<b>제목 / 부제</b>		부수로 해석코드 MATRA(Version 1.0) 검증 보고서			
<b>연구책임자 및 부서명 (AR,TR 등의 경우 주저자)</b>		황대현 (중소형원자로기술개발부)			
<b>연구자 및 부서명</b>		서정원, 권혁(중소형원자로기술개발부)			
<b>출판지</b>	대전	<b>발행기관</b>	한국원자력연구원	<b>발행년</b>	2008. 10.
<b>페이지</b>	214 p.	<b>도표</b>	있음( O ), 없음( )	<b>크기</b>	21.0x29.7Cm.
<b>참고사항</b>					
<b>공개여부</b>	공개( O ), 비공개( )		<b>보고서종류</b>	기술보고서	
<b>비밀여부</b>	대외비( ), ___ 급비밀				
<b>연구위탁기관</b>				<b>계약번호</b>	
<b>초록 (15-20 줄내외)</b>		<p>SMART 노심 열수력장 해석에 적용되는 부수로 해석 코드 MATRA 의 지배 방정식 및 주요 모델을 정비하고, 정상상태 부수로 유동 및 엔탈피 분포 시험 자료에 대한 검증 계산을 수행했다. MATRA 코드의 지배 방정식은 이상 유동 혼합물에 대한 적분식 형태로 표현되며, 미포화 비등 모델 및 슬립 모델을 적용하여 열적 비평형 효과 및 상 간의 속도 비균일 효과를 고려할 수 있다. MATRA 코드의 주요 수치 해법과 코드 구조에 대하여 정리했으며, 기존의 COBRA-IV-I 코드와 MATRA 코드의 차이점을 요약했다. MATRA 코드의 정상상태 부수로 열수력장 예측 성능 검증을 위하여 8 종류의 집합체 열수력 시험 자료를 분석했다. 시험자료는 단상유동 부수로 유동 및 온도 분포 자료, 단상유동 집합체 입구유동 비균일 분포 자료, 단상유동 집합체 부분 유로 막힘 자료, 그리고 이상 유동 부수로 엔탈피 및 유동 분포 자료들로 구성 된다. 시험 자료 분석을 통하여 MATRA 코드의 예측 성능 및 적용 한계를 평가했다.</p>			
<b>주제명키워드 (10 단어내외)</b>		부수로 해석 코드, MATRA, 코드 검증			

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code	
KAERI/TR-3639/2008							
Title / Subtitle		Validation of a subchannel Analysis Code MATRA Version 1.0					
Project Manager and Department (or Main Author)		Dae-Hyun Hwang (Small and Medium Reactor Technology Development Division)					
Researcher and Department		Kyung-Won Seo, Hyouk Kwon (Small and Medium Reactor Technology Development Division)					
Publication Place	Daejon	Publisher	KAERI	Publication Date	2008. 10.		
Page	214 p.	Ill. & Tab.	Yes(O),No ( )	Size	21.0x29.7 Cm.		
Note							
Open	Open( O ), Closed( )		Report Type	Technical Report			
Classified	Restricted( ), ___Class Document						
Sponsoring Org.				Contract No.			
Abstract (15-20 Lines)		<p>A subchannel analysis code MATRA has been developed for the thermal hydraulic analysis of SMART core. The governing equations and important models were established, and validation calculations have been performed for subchannel flow and enthalpy distributions in rod bundles under steady-state conditions. The governing equations of the MATRA were on the basis of integral balance equation of the two-phase mixture. The effects of non-homogeneous and non-equilibrium states were considered by employing the subcooled boiling model and the phasic slip model. Solution scheme and main structure of the MATRA code, as well as the difference of MATRA and COBRA-IV-I codes, were summarized. Eight different test data sets were employed for the validation of the MATRA code. The collected data consisted of single-phase subchannel flow and temperature distribution data, single-phase inlet flow maldistribution data, single-phase partial flow blockage data, and two-phase subchannel flow and enthalpy distribution data. The prediction accuracy as well as the limitation of the MATRA code was evaluated from this analysis.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		Subchannel Analysis code, MATRA, Code validation					