KAERI/TR-2034 /2002

SMART 노심 부수로 해석 코드 체계 개발 및 평가

Development and Assessment of a Subchannel Analysis Code System for SMART Core Design

KAERI

2002. 2.

한국원자력연구소

Korea Atomic Energy Research Institute

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 "일체형 원자로 노심 설계 기술 개발" 과제의 기술보고서로 제출합니다.

2002. 2.

주저자: 황 대 현

공저자: 서 경 원

지 성 균

요 약 문

SMART 노심 열수력장 해석을 위한 부수로 해석 코드 체계를 개발하고 집합체 실험 자료에 대한 예측 성능 및 적용성을 평가하였다. MATRA 코드는 정상상태 및 과도상태에서 집합체 혹은 노심에서의 열수력장 분포를 계산하는 부수로 해석 코드로서, 기존의 COBRA-IV-I 코드로부터 개발되었다. PC 및 workstation 에서 사용할 수 있도록 개발된 MATRA 코드는 구조 단순화 및 계산 기능 보완을 통하여 사용자 환경이 개선되었으며, 교차류에 대한 수치해법 모형 보완, 기포율 및 횡방향 전달 모형 개선 등을 통하여 코드 수렴성 및 정확도가 향상되었다. PWR 및 BWR 조건에 대한 집합체 내의 유동 분포 실험 자료를 평가하여 기포 이동을 고려한 난류혼합 모델을 개발하였으며, 이를 MATRA 코드에 적용하여 2 상 유동장에 대한 해석 정확도를 개선하였다. MATRA 코드를 집합체 CHF 실험 자료 분석에 적용하여 SMART 노심 조건에 적용 가능한 SR-1 국부조건 CHF 상관식을 개발하였으며, SMART 노심의 정상상태 및 과도상태 열적 여유도 평가를 위해 MATRA 코드를 사용한 1/8 노심 열수력장 분석 모형을 개발하였다.

SUMMARY

A subchannel code system is developed for the thermal-hydraulic analysis of SMART core, and the applicability and accuracy of the code is assessed for various experimental data with rod bundles. MATRA is a subchannel analysis code calculating the enthalpy and flow distribution in fuel assemblies and reactor cores for both steady-state and transient conditions. MATRA has been developed to be run on an IBM PC or HP WS based on the existing CDC CYBER mainframe version of COBRA-IV-I. MATRA has been provided with an improved structure and code functions to give more convenient user environment. Improvement of various models enhances the convergence and accuracy of the code: those include the numerical solution scheme for the crossflow, the void fraction model, and the lateral transport model, and so on. A turbulent mixing model considering void drift phenomenon is devised by employing the two-phase mixing test data under PWR and BWR conditions. MATRA/SR-1 CHF correlation system is developed from local conditions of rod bundle CHF data calculated by MATRA. The optimized 1/8 core lumping models are developed for the analysis of the thermal margin of SMART core at steady-state and transient conditions.

목 차

요약문

SUMMARY

표목차

그림목차

I. 서론 ---------- 1

II. MATRA 코드 모델 ---------- 5

II.1 지배방정식 ---------- 5

II.2 코드 주요 모형 ---------- 6

II.2.1 MATRA 코드의 구조 및 기능---------- 6

II.2.2 MATRA 코드의 주요 모형 ---------- 8

II.3 MATRA 코드와 COBRA-3CP 코드 비교 ---------- 9

II.3.1 수력적 해석 모형에 대한 수치 해법 ---------- 9

II.3.2 핵연료 온도 계산 모형에 대한 수치 해법---------- 10

III. MATRA 코드 평가---------- 19

III.1 횡방향 전달 모형 평가 ---------- 19

III.1.1 MATRA 코드의 횡방향 전달 모델---------- 19

III.1.2 동일 체적 교환 모델의 최적화---------- 22

III.2 집합체 CHF 실험 자료 평가---------- 25

III.2.1 MATRA 코드를 사용한 집합체 CHF 실험 자료 분석 ---------- 26

III.2.2 SR-1 상관식 개발 및 검증---------- 27

IV. MATRA 코드의 SMART 노심에 대한 적용 ---------- 63

V. 결론 ---------- 69

VI. 참고문헌---------- 71

표 목차

표 1.1 기존 부수로 해석 코드 특성 비교 ---------- 3
표 1.2 COBRA 계열 부수로 해석 코드 모형 개발 과정 ---------- 4
표 2.1 COBRA-3CP 코드와 MATRA 코드의 비교---------- 11
표 3.1 2상 유동 분포 실험 집합체 특성 자료 및 실험 영역 ---------- 35
표 3.2 MATRA 코드 분석에 사용된 주요 모형 ---------- 36
표 3.3 여러가지 횡방향 전달 모형의 부수로 출구 엔탈피 예측 성능 평가
결과 ---------- 37
표 3.4 SR-1 상관식 개발에 사용된 정방형 집합체 CHF 실험 자료------ 38
표 3.5 여러가지 자료 그룹에 대한 SR-1 상관식의 P/M 통계량--------- 39

그림 목차

그림 2.1 연속 방정식 유도를 위한 제어 체적---------- 12
그림 2.2 에너지 보존 방정식 유도를 위한 제어 체적---------- 13
그림 2.3 축방향 운동량 보존 방정식 유도를 위한 제어 체적---------- 14
그림 2.4 횡방향 윤동량 보존 방정식 유도를 위한 제어 체적---------- 15
그림 2.5 MATRA 코드와 COBRA-IV-I 코드 특징 비교---------- 16
그림 2.6 MATRA 코드의 계산 과정---------- 17
그림 3.1 2 상 유동 분포 실험 집합체 단면 형태---------- 40
그림 3.2 EM 모델을 사용한 corner 수로 출구 건도 계산 결과와 실험치 비교 ---------- 41
그림 3.3 2 상 유동 분포 실험 자료의 유동 패턴 분석 ---------- 42
그림 3.4 Lahey 의 EVVD 모델을 사용한 corner 수로 출구 건도 계산 결과와 실험치 비교 ---------- 43
그림 3.5 THERMIT 코드 모델을 사용한 corner 수로 출구 건도 계산 결과와 실험치 비교 ---------- 44
그림 3.6 기포 이동 계수의 최적화 ---------- 45
그림 3.7 MATRA 코드 모델을 사용한 corner 수로 출구 건도 계산 결과와 실험치 비교 ---------- 46
그림 3.8 GE 9-봉 집합체 corner 수로 유속에 대한 예측 성능 평가 ------ 47
그림 3.9 유속에 대한 집합체 CHF 변화 특성---------- 48
그림 3.10 국부조건 CHF 상관식 체계 개발 절차---------- 49
그림 3.11 SR-1 상관식 체계 개발에 사용된 실험집합체 단면 형태 ------- 50
그림 3.12 기존 KRB-1 상관식으로 평가한 P/M 의 질량 유속에 대한 변화 51
그림 3.13 저유속 및 고유속 경계 조건---------- 52
그림 3.14 기본형태 상관식의 P/M 돗수 분포 특성---------- 53
그림 3.15 저유속 보정 인자의 예측 성능 평가---------- 54
그림 3.16 축방향 비균일 출력 분포 보정 인자 평가 ---------- 55
그림 3.17 상관식 변수들에 대한 실험 자료 돗수 분포---------- 56
그림 3.18 SR-1 CHF 상관식의 압력에 대한 예측 경향 ---------- 57

그림 3.19 SR-1 CHF 상관식의 질량 유속에 대한 예측 경향 ---------- 58
그림 3.20 SR-1 CHF 상관식의 임계 건도에 대한 예측 경향 ---------- 59
그림 3.21 SR-1 CHF 상관식의 수력 직경에 대한 예측 경향 ---------- 60
그림 3.22 여러가지 CHF 예측 모형의 질량 유속에 대한 예측 경향 비교 -- 61
그림 3.23 SR-1 상관식의 한계 DNBR 타당성 평가 ---------- 62
그림 4.1 SMART 노심 열수력 코드 체계---------- 65
그림 4.2 정상상태 해석을 위한 1/8 노심 60-채널 부수로 해석 모델 ----- 66
그림 4.3 과도상태 DNBR 해석을 위한 1/8 노심 21-채널 부수로 해석 모델 67

I. 서론

SMART(System integrated Modular Advanced ReacTor) 노심은 국내의 기존 가압 경수로에서 사용하고 있는 것과 동일한 형태의 정방형 핵연료 집합체로 구성되어 있다. 그러나 노심 유효 길이가 짧고 정상 운전 상태에서의 평균 질량 유속이 가압 경수로에 비하여 약 1/3 정도로 작은 특징이 있다. SMART는 15% 이상의 열적 여유도를 확보하도록 설계 요건에서 명시하고 있다. SMART 노심의 열적 여유도는 DNBR에 의해 제한되는데, DNBR 계산에 영향을 미치는 중요한 설계 변수들에 대하여 국내의 1000 MWe급 기존 발전소(고리 3호기)와 비교한 결과 SMART 노심의 냉각재 입구 온도 감소, 가열 길이 감소, 그리고 평균 열속의 감소 등은 열적여유도를 증가시키는데 비하여 질량 유속의 감소는 열적 여유도를 감소시킨다. 그런데 질량 유속의 감소가 매우 크기 때문에 전체적으로 SMART 노심의 열적 여유도가 기존 가압 경수로에 비하여 월등하지 않은 결과로 나타났다. 충분한 열적 여유도의 확보를 위하여 SMART 노심에 적용될 핵연료 집합체에는 혼합 날개가 부착되어야 하며, 노심 열수력장 해석 체계도 다수로 해석 체계를 도입하여 최적화 해야할 필요가 있는 것으로 나타났다.

가압경수로 노심에 대한 다수로 해석 체계로서 가장 널리 사용되고 있는 부수로 해석 코드(subchannel analysis code)는 원자로 노심 열수력장 해석에 적용되는 핵심적인 코드로서, 현재 국내에서는 웨스팅하우스사의 THINC-IV와 CE사의 TORC 등이 노심 열수력 설계에 사용되고 있다. 표 1.1은 현재 사용 중인 부수로 해석 코드들 중 몇가지 대표적인 코드를 선정하여 기본적인 특징을 서로 비교한 것이다. 현재 경수로심 열수력 설계에 사용되고 있는 부수로 해석 코드들은 대부분 HEM 혹은 SEM 모델을 사용하고 있으며, 수로에 대한 축방향 유속에 비하여 횡방향 유속이 상대적으로 작은 경우에 적용되는 일차원적 접근법을 사용하고 있다. 표 1.2에 정리한 여러가지 부수로 해석 코드들 가운데 이상유동 상태에서 기체와 액체의 온도가 서로 평형을 이룬다고 가정하는 코드들은 대부분이 COBRA 계열 코드로서, 이들은 그 수치 해법(운동량 보존식을 풀때 미지수를 교차류로 두느냐, dP/dx로 두느냐에 따라서 달라짐)이나 횡방향 운동량 방정식에 대한 모형의 차이 등에 따라서 약간의 차이는 있으나 근본적으로 코드 예측 성능은 서로 비슷하다. W사의

THINC 코드는 COBRA 계열 코드와는 달리 3 차원 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 노심내에서의 유량 순환(recirculation)을 예측할 수 있는 능력이 있는 것으로 알려져있다. 이러한 HEM 이나 SEM, 그리고 일차원적 접근 방법이 갖는 여러가지 제약들을 해결하기 위하여 비교적 최근에 개발되는 코드들은 열적인 비평형 혹은 부분적인 비평형(액체에 대해서만 비평형 상태를 고려함)모형을 사용하고 있으며, 액체와 기체의 속도 차이를 고려하기 위하여 drift-flux 혹은 two-fluid 모형을 사용하는 추세에 있다. 이러한 모형을 적용할 경우 표 1.1에서 보듯이 풀어야할 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 여러가지 전달 모형들의 정확도 향상 등이 우선 해결되어야 한다. 이러한 코드들이 아직은 원자로심과 같은 복잡한 구조에 적용하기 어렵다고 말할수 있으나, 국부적인 열수력 조건에 대한 기준으로서의 가치는 충분하다.

이러한 검토를 바탕으로 SMART 노심에 대한 부수로 해석 체계는 우선 열적 평형 상태를 가정한 COBRA 계열 코드에서 출발하였다. 표 1.2 는 COBRA 계열 코드의 주요 모델 변화 과정을 간략하게 나타낸 것이다. COBRA-IV-I 코드는 가장 나중에 개발되었으며 축방향 열전도 효과나 교차류 모델의 확장 등이 고려되어 있다. SMART 노심 해석에 적용한 MATRA 코드는 COBRA-IV-I 코드에 근거하고 있다. 본 보고서의 2 장에서는 MATRA 코드의 모델을 간략히 기술하고 주요 특징을 기존 COBRA 코드와 비교하였으며, 3 장에서는 MATRA 코드에 적용된 횡방향 전달 모형의 정확도 평가 결과와 집합체 CHF 실험 자료 분석에 적용하여 개발한 SR-1 CHF 상관식 체계에 대하여 기술하였고, 마지막으로 4 장에서는 MATRA 코드를 사용한 SMART 노심 고온 부수로 해석 모형에 대하여 기술하였다.

표 1.1 기존 부수로 해석 코드 특성 비교

코드명	개발기관	적용조건	속도 모형	온도 모형	비 고
TORC	CE	Steady	Homogeneous	Equilibrium	2-D, CE-1
THINC-IV	W	Steady	Homogeneous	Equilibrium	3-D, perturbation, WRB-1
COBRA-3C	PNL	Steady/transient	Slip	Equilibrium	2-D
COBRA-3CP	KWU	Steady/transient	Slip	Equilibrium	2-D, dP/dx, ERB-3
VIPRE-01	EPRI	Steady/transient	Slip	Equilibrium	2-D, dP/dx, recirc., EPRI-1
COBRA-IV-I	PNL	Steady/transient	Slip	Equilibrium	2-D, axial conduction
FLICA	CEA	Steady/transient	Slip	Partially non-equil.	3-D
ASSERT-4	AECL	Steady/transient	Drift-flux	Non-equilibrium	2-D
THETA	W	Steady/transient	Drift-flux	Partially non-equil.	3-D, porous medium
THERMIT-2	MIT	Steady/transient	Two-fluid	Non-equilibrium	3-D
FIDAS	PNC	Steady/transient	Two-fluid	Non-equilibrium	3T6V, 3-field, dryout model
COBRA-TF	PNL	Transient	Two-fluid	Non-equilibrium	3-D, 3-field

표 1.2 COBRA 계열 부수로 해석 코드 모형 개발 과정

Code Capability	COBRA-II	COBRA-IIIC	COBRA-IIIC/MIT	COBRA-IV-I
Subchannel Representation				
BWR multiple closed channels	No	No	Yes	No
PWR assembly/subchannel	Yes	Yes	Yes	Yes
Multi-stage calculation	No	No	No	No
Hydrodynamic Capability				
Transient	No	Yes	Yes	Yes
Homogeneous/Non-homogeneous	Homogeneous	Homogeneous	Homogeneous	Homogeneous
2-phase thermal equilibrium/Non-equilibrium	Equilibrium	Equilibrium	Equilibrium	Equilibrium
Lateral pressure difference	$\Delta P = C\|W\|W$	$\Delta P = C\|W\|W + \delta(UW)/\delta x + \delta(W)/\delta t$	$\Delta P = C\|W\|W + \delta(UW)/\delta x + \delta(W)/\delta t$	$\Delta P = C\|W\|W + \delta(UW)/\delta x + \delta(W)/\delta t + \delta(VW)/\delta y$
Flow reversal	No	No	No	Yes
Natural circulation	No	No	No	Yes
Flow blockage	Minor blockage	Substantial blockage	Substantial blockage	Total channel blockage
Fuel/Thermal-Hydraulic Models				
Single/two-phase mixing	input/input	input/input	input/Beus or input	input/input
Coolant void fraction	homo./mod. Armand/slip/Levy	homo./mod. Armand/slip	homo./Levy/mod. Armand/Smith	homo./Levy/mod. Armand
Two-phase friction factor	homo./Armand	homo./Armand	homo./Armand/Baroczy	homo./Armand
Gap conductance	input	input	detailed MATRO package	input
Fuel conductivity	temperature dependent	temperature dependent	temperature dependent	temperature dependent
Critical Heat Flux	No	BAW-2/W-3	BAW2/W3/CISE-4/Hench-Levy	BAW-2/W-3
Axial conduction	No	No	No	both in fuel and coolant
Wall conduction	No	No	No	Yes
Heat transfer correlation	input	input	BEEST package	RELAP-4 package

II. MATRA 코드 모델

II.1 지배방정식

MATRA 코드는 COBRA-IV-I 코드[1]로부터 개발된 것으로서 지배방정식 형태는 COBRA-IV-I 코드와 동일하다. 즉, 2 상 유동장은 혼합물로 취급하여 HEM (Homogeneous Equilibrium Model) 혹은 SEM(Slip Equilibrium Model)을 적용하고 있다. MATRA 코드의 연속 방정식, 에너지 보존 방정식, 축방향 및 횡방향 운동량 보존식은 아래와 같이 표현된다. 지배 방정식이 유도된 제어 체적은 그림 2.1 ~ 그림 2.4 에 제시하였다. 부수로 해석 코드 지배 방정식 유도 과정은 참고 문헌 [2]에 상세히 기술되어 있다.

연속방정식:

$$A_i \frac{\partial \left\langle \left\langle \rho_m \right\rangle \right\rangle_i}{\partial t} + \frac{\partial m_i}{\partial x} + \sum_j \left(w_{ij} + w'_{i \leftrightarrow j} \right) = 0 . \tag{2.1}$$

에너지 보존 방정식:

$$A_i \frac{\partial}{\partial t} \left\langle \left\langle \rho_m \right\rangle \right\rangle_i \left\langle \left\langle h_m \right\rangle \right\rangle_i + \frac{\partial}{\partial x} \left(\dot{m}_i \left\langle \hat{h} \right\rangle_i \right) + \sum_j w_{ij} \left\langle \hat{h}^* \right\rangle_i = Q \tag{2.2}$$

where,

$$Q = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left\langle k \frac{\partial T}{\partial x} \right\rangle_i A_i \right) - \sum_j C_{ij} \left(T_i - T_j \right) - \sum_j w'_{ij} \left(h_i - h_j \right) + \sum_n \xi_n \left\langle q''_n \right\rangle \tag{2.3}$$

축방향 운동량 보존식:

$$\frac{\partial \dot{m}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\left\langle \sum_k \alpha_k \rho_k u_k^2 \right\rangle_i A_i \right) + \sum_j w_{ij} \left\langle u^* \right\rangle_i = -\bar{A} \frac{\partial P}{\partial x} - F_x \tag{2.4}$$

where,

$$F_x = \frac{1}{2}\left\{\frac{f\phi^2}{d_{hy}\rho_m} + \frac{K}{\rho'\Delta x}\right\}_i \frac{\dot{m}_i^2}{A_i} + f_T \sum_j w'_{ij}\left(u_i - u_j\right) + A_i \left\langle\left\langle \rho_m \right\rangle\right\rangle_i g\cos\theta \qquad (2.5)$$

횡방향 운동량 보존식:

$$\frac{\partial w_{ij}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(w_{ij}\left\langle \overline{u}\right\rangle_i\right) + \frac{1}{l}\sum_j w_{ij}\left\langle \overline{v}\right\rangle_i = \frac{s_{ij}}{l}\left(P_i - P_j\right) - F_{ij} \qquad (2.6)$$

where,

$$F_{ij} = \frac{1}{2}K_G \frac{w_{ij}\left|w_{ij}\right|}{\rho^* s_{ij} l} + s_{ij}\left\langle\left\langle \rho_m \right\rangle\right\rangle_i g\sin\theta \qquad (2.7)$$

II.2 코드 주요 모형

MATRA 는 기존의 CDC CYBER mainframe 용 COBRA-IV-I 를 토대로 하여 IBM PC 및 HP Workstation 에서 사용할 수 있도록 개발된 부수로 해석 코드이다. 그림 2.5 는 MATRA 코드의 특징을 기존의 COBRA-IV-I 코드와 비교한 것인데, 본 절에서는 MATRA 코드에서 개선된 주요 코드 기능 및 모델을 기술하였다.

II.2.1 MATRA 코드의 구조 및 기능

코드의 구조면에서는 먼저 CDC CYBER mainframe version 을 IBM PC 및 HP workstation version 으로 변환하였다.[3] 그리고 잘못 입력된 코드 입력 자료의 편집을 위해 사용된 방대한 크기의 불필요한 subroutine 들을 제거하여 코드 구조를 단순화시켰고, 계산에 자주 사용되는 중요한 상수들의 유효 숫자를 증가시키고 모든 실수들을 2 배 정도(double precision)로 그 정밀도를 높여 보다 정확한 계산 결과를 얻을 수 있도록 하였다. 기존의 입·출력 양식을 수정하여 정밀한 정보를 입·출력으로 제공하도록 하였고, 코드 구조를 쉽게 파악할 수 있도록 Fortran 90 을 사용하여 코드 내용을 재구성하였다.

코드 기능면에서 보면, COBRA-IV-I 에서는 코드의 입·출력 단위 체계로 British 단위 하나만을 사용할 수밖에 없으나, MATRA 에서는 SI 와 British 단위를 선택적으로 사용할 수 있도록 입·출력 단위 체계의 전환 기능을 제공하였다. 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 야기했었는데, MATRA 에서는 유체의 물성치 계산 routine 을 코드 내에 이식하여 과냉 상태의 물성치를 직접 계산함으로써 물성치 계산에 따른 오차를 상당량 줄일 수 있도록 하였다. COBRA-IV-I 에서는 계산에 사용되는 축방향 node 를 균일하게 분할할 수밖에 없으나, MATRA 에서는 flow blockage 와 같은 문제 분석 시에 가변적인 축방향 node 생성 기능을 사용하여, 선택적으로 조밀한 node 를 사용함으로써 축방향 node 개수를 최적화할 수 있도록 하였다. 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 축방향 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 하였다. 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 MDNBR 에 대한 열출력, 봉의 반경 방향 첨두치 및 유량의 값을 찾아내는 MDNBR 추적 계산 기능을 제공하였다. 현재 MATRA 는 그림 2.6 에서 보인 바와 같이 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. 이 과정 중에 수행되는 교차류 방정식에 대한 수치 해법으로 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 하였다.

II.2.2 MATRA 코드의 주요 모형

SMART 노심은 기존 경수로에 비하여 유속 및 건도 조건이 다소 확장되었으며, 신형 원자로 노심에 적용 가능성이 있는 비정방형 집합체에 대해서도 MATRA 코드를 적용할 수 있도록 열수력장 해석 모형을 보완하였다. 이를 위하여 집합체 압력 손실 모형과 기포율 계산 모형, CHF 계산 모형, 그리고 횡방향 전달 모형 등이 개선되었다. 비정방형 집합체에 대한 압력 손실 모형으로서 그리드 형태와 와이어랩 형태의 간격 격자에 적용할 수 있는 Rehme[4,5]의 모형을 적용하였다. 기존의 COBRA-IV-I 에서는 이상 유동장에서의 체적(bulk) 기포율을 예측하기 위해 몇 가지 간단한 모형들을 사용하고 있는데, 이들 모형들은 비교적 오래 전에 개발되었고 그 적용 범위가 좁기 때문에 체적 기포율에 대한 새로운 모형이 필요하게 되었다. 따라서 보다 개선되고 적용 범위가 넓은 Chexal-Lellouche[6] 기포율 모형을 MATRA 에 구현하게 되었는데, 이 모형은 매우 방대한 영역의 압력과 유량, 기포율 조건에 적용 가능하며, 증기-물, 공기-물, 산소, hydrocarbon 등 여러 유형의 유체들에 적용할 수 있다. CHF 해석 모형으로서 SMART 노심에 적용할 수 있도록 개발된 SR-1 상관식[7]을 추가하였으며, 일반적인 CHF 성능을 평가할 수 있도록 1995 AECL-IPPE CHF lookup table[8]을 코드에 적용하였다. 난류 혼합에 의한 횡방향 전달 모형은 부수로 해석 코드의 정확도에 큰 영향을 미치는 모형이다. COBRA-IV-I 코드는 인접 수로 간에 난류 혼합으로 인한 질량 교환량이 서로 같다고 가정하는 '동일 질량 교환 모형'이 사용되고 있다. 그런데 건도가 높은 조건에서 수행된 실험 결과에 따르면 이러한 모델이 모서리 수로 등에서 잘 맞지 않는 것으로 나타났으며, 이에 따라 '동일 체적 교환 모형'이나 기포 이동 모형 등이 제시되고 있다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 MATRA 코드에서는 횡방향 전달 모형을 개선하였으며[9], 이에 대한 상세한 평가는 III 장에서 기술하였다.

II.3 MATRA 코드와 COBRA-3CP 코드 비교

COBRA-3CP 와 MATRA 는 모두 COBRA 계열 코드들로서, COBRA 의 개발 과정을 살펴보았을 때 같은 COBRA-IIIC[10] 코드에 그 뿌리를 두고 있다. 즉, COBRA-3CP 는 COBRA-IIIC 를 수정한 COBRA-IIIC/MIT-2[11] 코드로부터 개발된 코드이고, MATRA 는 COBRA-IIIC 를 수정한 COBRA-IV-I 로부터 개발된 코드이다. COBRA-3CP 는 주로 가압 경수로 노심 분석을 목적으로 보완, 개선된 코드인 반면에, MATRA 는, 가압 경수로의 안전 해석과 액체 금속로 노심 분석에 적용하기 위해 관련 모형들이 보완된 COBRA-IV-I 에, 신형 원자로 노심 분석을 위한 기능과 모형들이 추가로 보완된 코드이다. 이와 같이, 비록 같은 뿌리에서 출발한 코드들이지만, 그 개발 목적이 서로 다르기 때문에 표 2.1 에서 보인 바와 같이 두 코드의 기능과 모형에는 다소 차이가 있다. COBRA-3CP 에 비해 MATRA 에서 추가로 제공하는 기능과 모형들은 모두 선택적으로 사용할 수 있기 때문에, 기본적으로 동일한 기능과 모형들을 사용하면 동일한 수력적 해석 결과를 얻을 수 있다. 다만 두 코드의 수력적 해석 모형과 핵연료 온도 계산 모형의 수치 해법이 서로 다르기 때문에, 계산 시간과 열적 해석 결과가 서로 다르게 나타날 수 있다. 따라서 이들 두 코드의 수치 해법상의 차이점에 대하여 다음과 같이 기술하였다.

II.3.1 수력적 해석 모형에 대한 수치 해법

초기에 개발된 대부분의 COBRA 계열 코드들은 유체의 미분 지배 방정식으로부터 교차류 분포에 대한 연립 선형 대수 방정식을 유도하여 그 수치 해를 구하고 있다. 이에 비하여 COBRA-3CP 의 경우에는, 압력 구배 분포에 대한 방정식의 해를 구하는 수치 해법을 사용하고 있다. 이 두 가지 수치 해법은 비록 같은 지배 방정식을 사용하고 있지만, 전자의 경우, 교차류가 인접 부수로 간의 gap 에서 정의되기 때문에, 풀어야 할 선형 대수 방정식의 개수가 gap 의 총 개수와 같은 반면, COBRA-3CP 의 경우, 압력 구배가 각각의 부수로에서 정의되기 때문에, 풀어야 할 방정식의 개수는 부수로의 총 개수와 같다. 일반적으로 부수로의 개수는 gap 의 개수에 비하여 적기 때문에, 압력 구배 방정식에 대한 해를 구하는 COBRA-3CP 는 교차류 방정식의 해를 구하는 다른 COBRA 계열 코드에 비하여, 특히 노심 전체에 대한 해석과 같은 큰 문제를 다루는 경우에 있어서 그 계산 효율이 높은

장점을 가지고 있다. 한편 MATRA 의 경우에는 COBRA-3CP 와는 달리, 아직까지는 교차류 방정식에 대한 해를 구하고 있기 때문에 그 계산 효율이 COBRA-3CP 에 비하여 떨어지고 있다. 따라서 앞으로 MATRA 의 수력적 해석 모형에 대한 수치 해법을 개선할 필요가 있다.

II.3.2 핵연료 온도 계산 모형에 대한 수치 해법

COBRA-3CP 는 핵연료 온도 계산 모형에 대한 수치 해법으로 COBRA-IIIC 와 동일하게 유한 차분법(Finite Difference Method: FDM)을 사용하고 있으며, 각 계산 node 마다 핵연료의 물성치를 다르게 줄 수 있다. 반면에, MATRA 는 COBRA-IV-I 와 동일하게 직교 배치(Orthogonal Collocation)를 이용한 가중 잔류법(Weighted Residual Method: WRM)을 사용하고 있는데, 이 수치 해법은 유한 차분법에 비하여 훨씬 적은 개수의 계산 node 를 사용하여, 유한 차분법과 거의 비슷한 정도의 정확도를 갖는 수치 해를 비슷한 계산 시간으로 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한, 유한 차분법과는 달리, 각 계산 node 에서의 불연속적인 수치 해가 아니라 다항식 형태의 연속적인 수치 해를 얻을 수 있기 때문에, 핵연료의 임의의 지점에서의 온도를 보간법을 사용하지 않고 얻을 수 있다는 장점이 있다.[12] 그러나 핵연료의 물성치를 제한된 몇 개의 collocation 지점에만 다르게 줄 수 있기 때문에, 핵연료의 온도 구배(temperature gradient)가 클 경우에는 핵연료의 온도 분포를 정확히 예측하지 못한다는 단점이 있다. 따라서 앞으로 MATRA 의 핵연료 온도 계산 모형에 대한 수치 해법을 개선할 필요가 있다.

표 2.1 COBRA-3CP 코드와 MATRA 코드의 비교

Capability or Model	COBRA-3CP	MATRA
Flow Solution (Steady State) - Inlet Flow / Exit Pressure Boundary Conditions - Pressure Drop Boundary Conditions (BCs)	O	O O
Flow Solution (Transient) - Fully Implicit - Explicit Arbitrary Flow Field and BCs	O	O O
Diversion Crossflow Model - Lateral Momentum Flux		O
Turbulent Mixing Model - Equal-Mass-Exchange - Equal-Volume-Exchange	O	O O
Void Drift Model		O
Equation of State - Reference Pressure - Local Pressure	O	O O
Heat Conduction (Fluid) - Radial Conduction - Axial Conduction	O	O O
Heat Conduction (Fuel Rods) - Radial Conduction - Axial Conduction	O	O O
Input / Output Unit System - SI - British	O	O O
Axial Noding Scheme - Uniform - Nonuniform	O	O O
Precision of Reals - Single - Double	O	 O
Fluid Energy Solution - Spatially Explicit - Spatially Implicit	O	 O
Numerical Solution of Hydrodynamics - Pressure Gradient Equation - Diversion Crossflow Equation	O	 O
Fuel Rod Model - Finite Difference - Orthogonal Collocation	O	 O

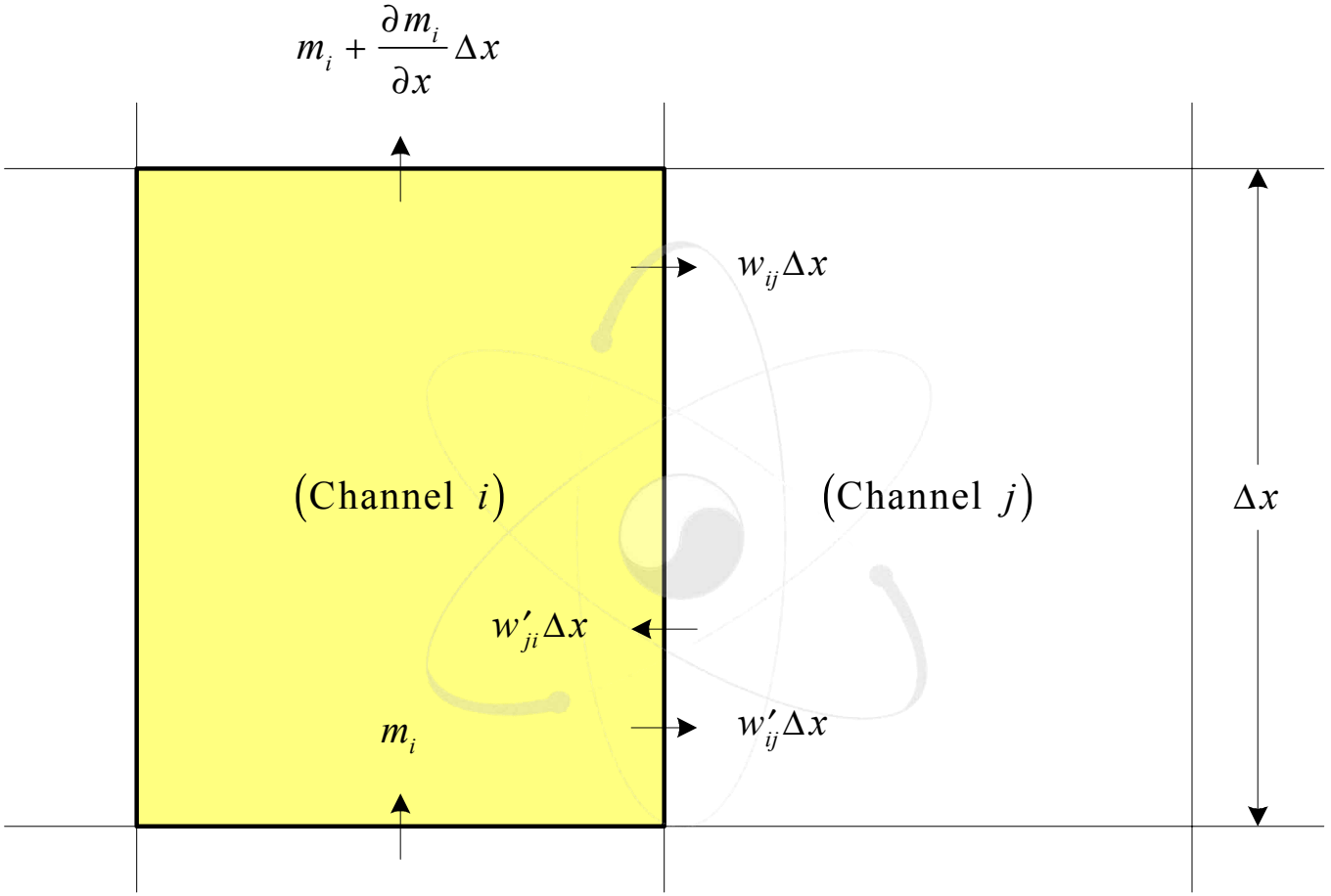


그림 2.1 연속 방정식 유도를 위한 제어 체적표 1

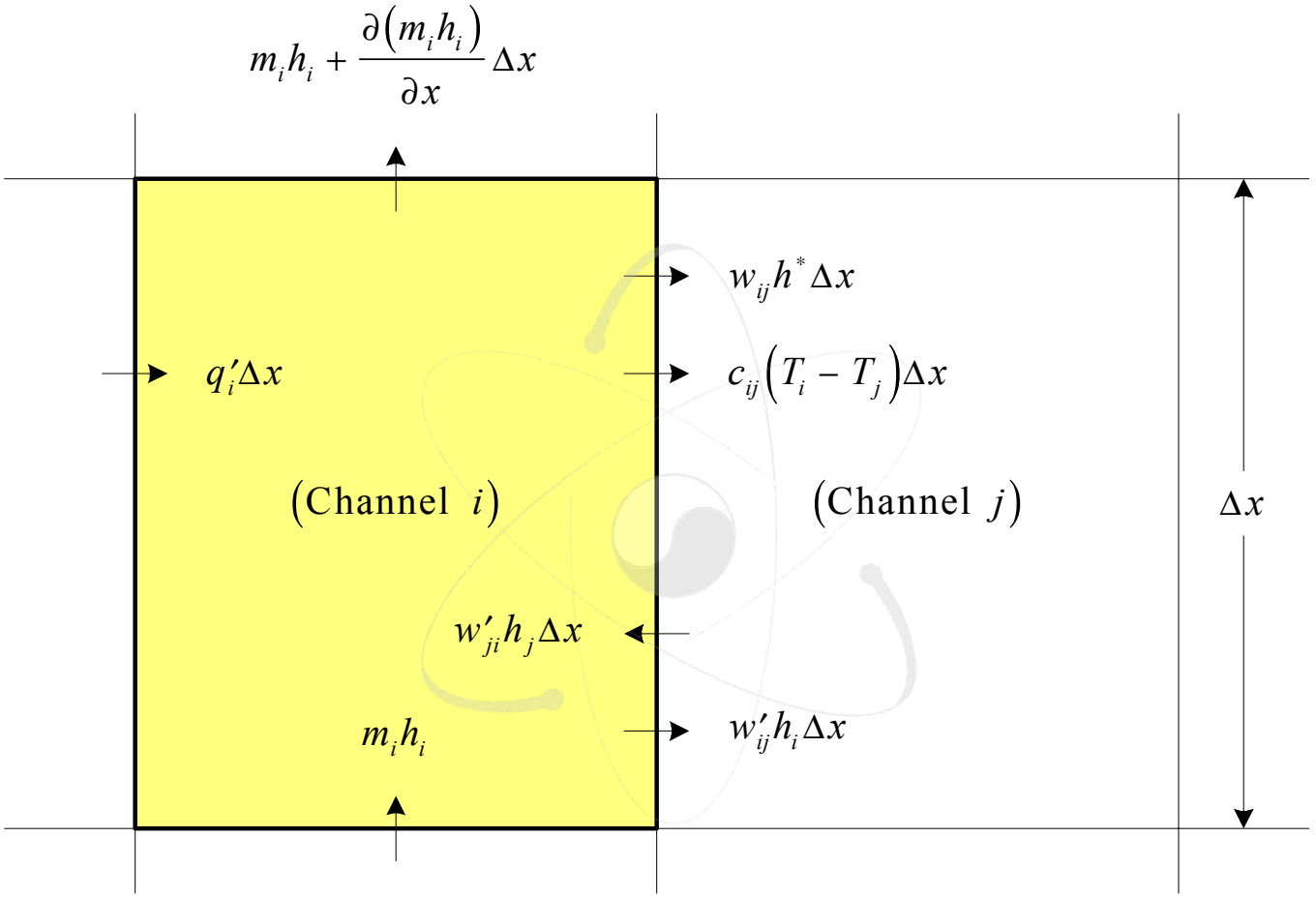


그림 2.2 에너지 보존 방정식 유도를 위한 제어 체적

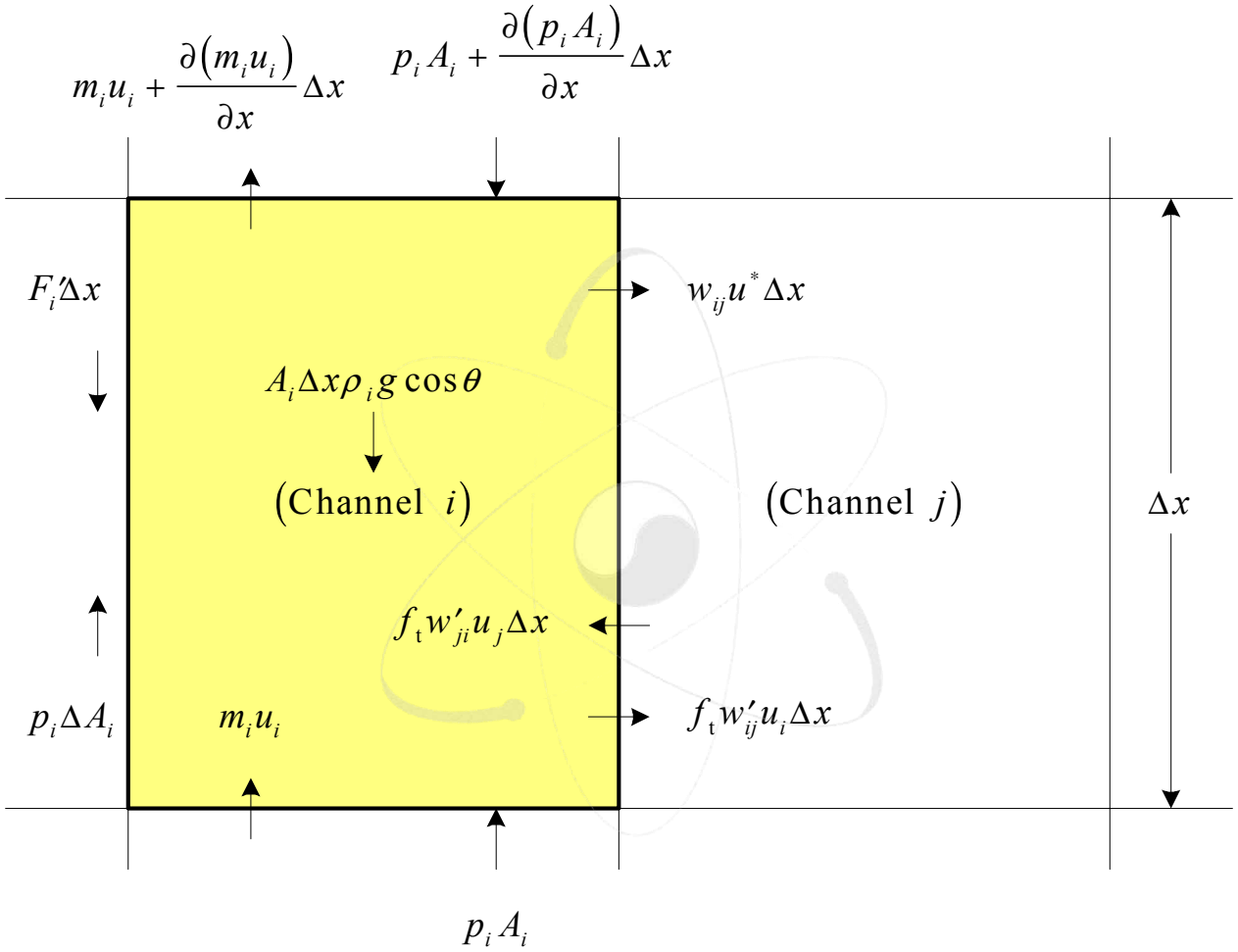


그림 2.3 축방향 운동량 보존 방정식 유도를 위한 제어 체적

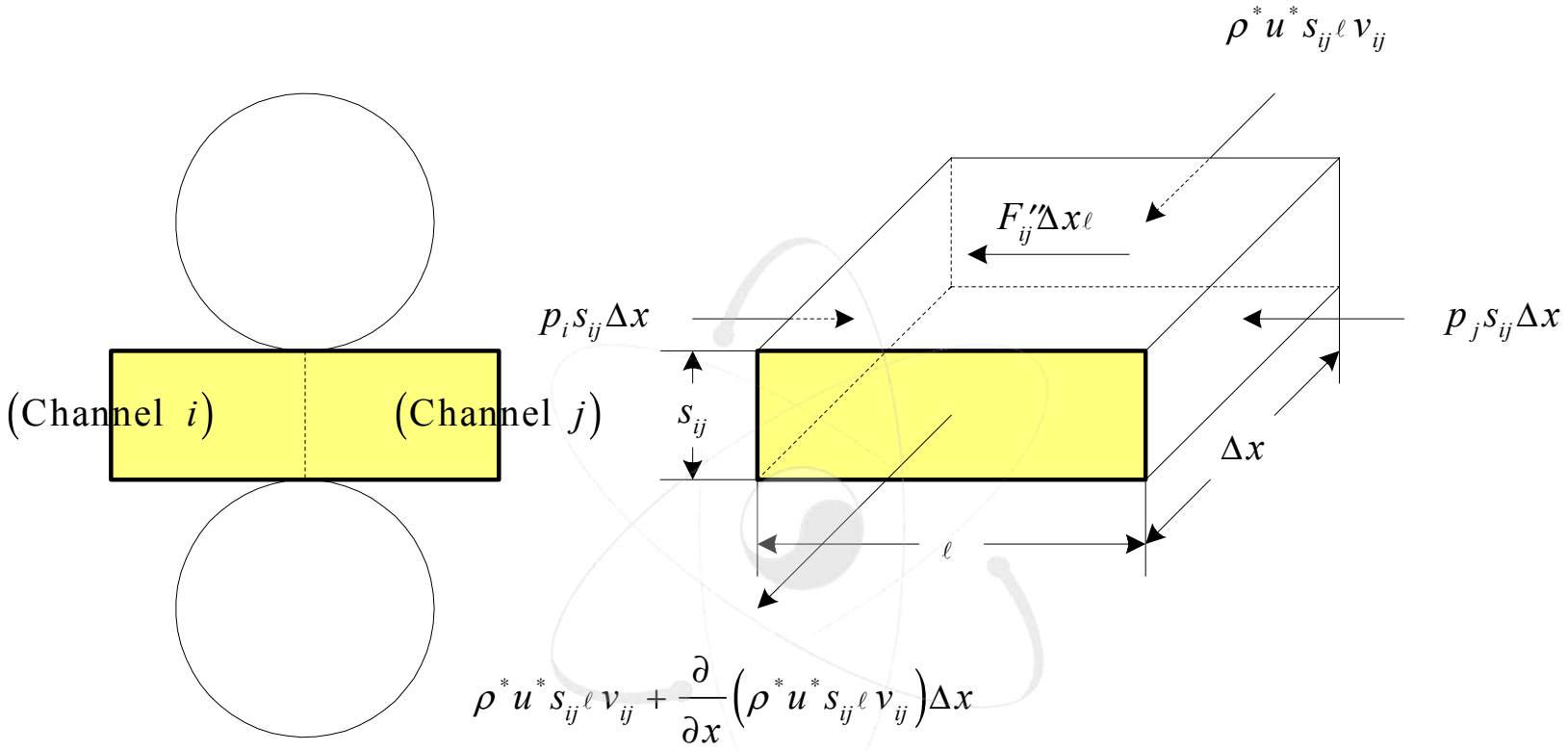


그림 2.4 횡방향 운동량 보존 방정식 유도를 위한 제어 체적

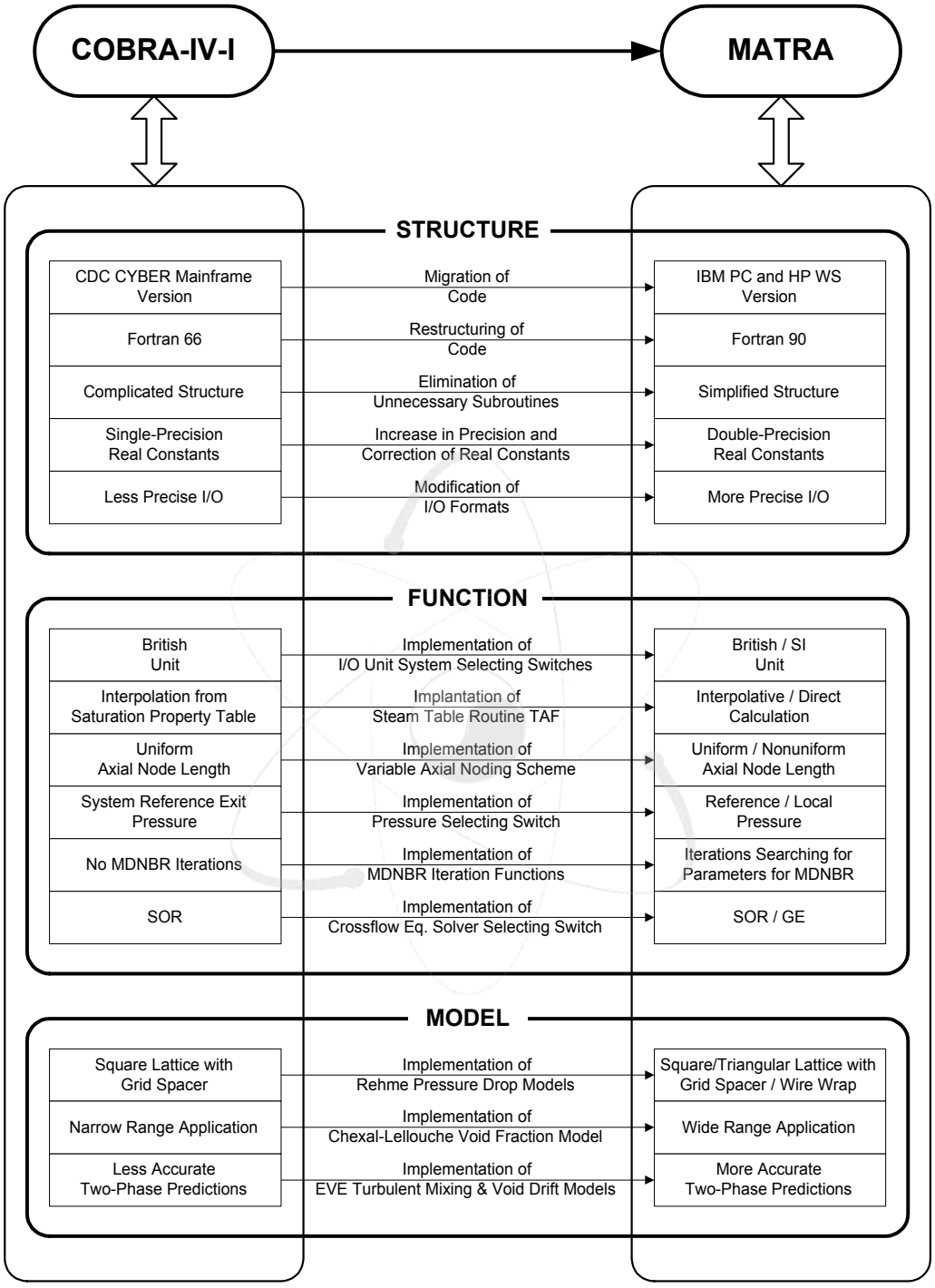


그림 2.5 MATRA 코드와 COBRA-IV-I 코드 특징 비교

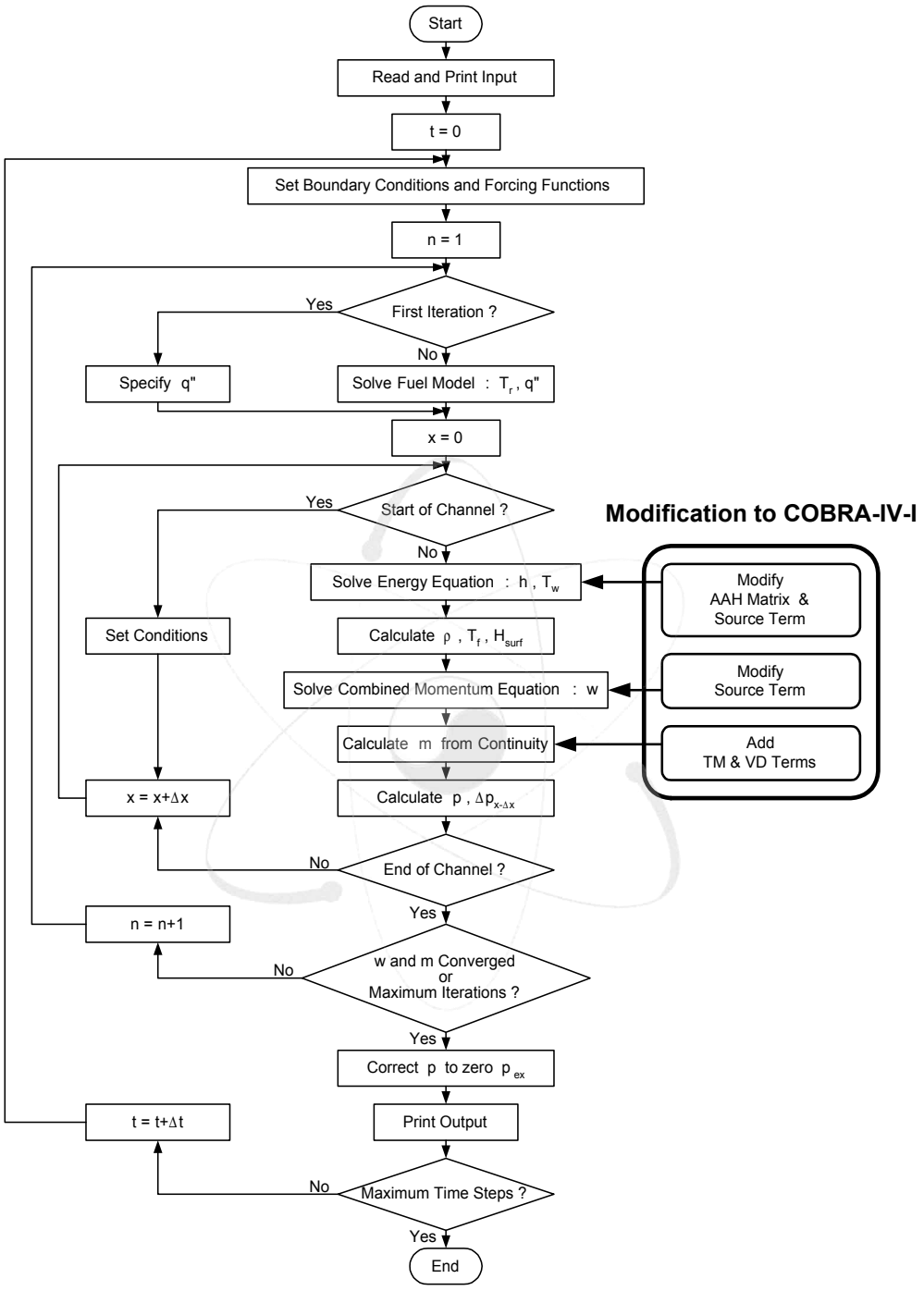


그림 2.6 MATRA 코드의 계산 과정

III. MATRA 코드 평가

III.1 횡방향 전달 모형 평가

III.1.1 MATRA 코드의 횡방향 전달 모델

부수로 해석 모형에서 부수로 간의 횡방향 질량, 에너지 및 운동량 전달 현상은 기본적으로 아래와 같은 네 가지 모형을 통하여 예측하고 있다.

- Diversion crossflow
- Turbulent mixing
- Void drift
- Viscous transfer

이 때, 연료봉 주위의 원주방향 압력 구배가 없다고 가정하면 원주방향의 회전 유동은 없다. 위의 4 가지 모형들 중에서 diversion crossflow 는 인접 부수로 간의 압력 차이로 인해 발생되는 것으로서 횡방향 운동량 보존식을 통하여 평가할 수 있다. Turbulent mixing 과 viscous transfer 항은 난류 에디의 요동에 의한 영향과 분자 단위의 전달(conduction 혹은 viscous momentum transfer)을 모사하는 것이며, void drift 항은 이상 유동 상태에서 기포의 횡방향 분포가 평형 상태를 이루려고 하는 경향을 모사하기 위한 것이다. 실제로 가압 경수로 노심 분석에 사용되고 있는 부수로 해석 코드 모형들을 검토해 보면 일반적으로 운동량에 대한 viscous transfer 는 거의 무시되고 있으며, 에너지에 대한 영향, 즉 부수로 간의 conduction 은 몇 가지 코드에서 사용되고 있다. 그리고 void drift 현상이 모형화된 코드는 거의 없는데 이는 가압 경수로 노심의 정상 운전 조건에서는 2 상 유동 현상이 크게 나타나지 않기 때문이다. 그러나 사고 상태나 CHF 조건에서는 부수로 내에 상당한 양의 기포가 존재하게 되므로 void drift 모형은 코드 예측의 정확성에 큰 영향을 준다. Turbulent mixing 모형도 기존의 COBRA 계열 부수로 해석 코드에서 사용하는 동일 질량 교환 모형은 단상 유동 조건에서는 타당하지만 이상 유동 조건에서는 동일 체적 교환 모형이 더 잘 맞는 것으로 알려져 있다. 본 절에서는 위의 세 가지 현상을 고려한 횡방향 전달 모형을 동일 체적 교환 모형에 근거하여 유도하고 이를 기존 코드에서 사용되고 있는 동일 질량 교환 모형과 비교하였다.

(1) 동일 질량 교환 모델

(2.1), (2.2) 및 (2.4)식에 제시한 부수로 해석 지배 방정식의 좌변 마지막 항은 난류 혼합으로 인하여 i 부수로와 인접한 부수로 간에 교환되는 질량, 에너지 및 축방향 운동량을 나타내고 있다. 부수로 i 와 j 사이에서 단위 축방향 길이 당 갭(s_{ij})을 통해 전달되는 난류 유동의 크기는 아래와 같이 정의된다.

$$w'_{ij} \equiv \rho_i s_{ij} v'_{ij} . \qquad (3.1)$$

'Mixing length' 이론에 의하면 단상 유동 조건에서 부수로 i 와 j 사이의 요동 속도, v'_{ij} 는 eddy diffusivity 에 비례하며, 유효 혼합 길이에 역비례한다. COBRA-IV-I 코드에서 질량에 대한 eddy diffusuvuty 는 에너지에 대한 eddy diffusivity 와 동일하게 취급하며, 횡방향 요동 속도와 축방향 유속 간의 비율로 정의되는 난류 혼합 인자를 도입하여 난류 유동을 아래와 같이 표현하고 있다.

$$w'_{ij} = \beta \cdot s_{ij} \cdot G_{avg} . \qquad (3.2)$$

축방향 운동량에 대한 eddy viscosity 는 에너지에 대한 eddy diffusivity 에 난류 Prandtl 수와 같은 의미를 갖는 난류 운동량 인자, f_T 를 곱하여 평가한다. 난류 혼합 인자는 일반적으로 단상 유동 조건에서 수행되는 열혼합 실험 자료로부터 구하며, COBRA-IV-I 코드에서는 이를 2 상 유동 조건에도 그대로 적용하고 있다. COBRA-IV-I 코드의 난류 혼합 모형은 동일 질량 교환(EM) 개념에 근거하고 있다. 즉, 인접한 두 채널 간의 난류 유동 크기는 서로 동일하다는 가정($\rho_i v'_{ij} = \rho_j v'_{ji}$)으로부터 채널 간의 질량 이동이 발생하지 않는다. ($w'_{i \leftrightarrow j} \equiv w'_{ij} - w'_{ji} = 0$)

(2) 동일 체적 교환 모델

2 상 유동 조건에서 수행된 실험 결과에 따르면 인접한 수로 간에 에너지와 운동량 이동 뿐만 아니라 상당한 양의 질량 이동이 발견된 바 있다[13]. 이 현상을 설명하기 위하여 수로 간에 동일한 체적이 교환되는 개념($v'_{ij} = v'_{ji}$)이 도입되었으며, 이 때 난류 혼합은 비평형 기포율 구배에 비례하는 것으로 가정하였다[14]. 즉,

횡방향 혼합은 두 수로 경계면에서의 난류 요동과 수로 간의 기포 이동에 의해 발생하게 된다. 기포 이동은 기포가 평형 분포 상태를 이루는 방향으로 이동하는 경향에 의해 발생하는데, 실험에 의하면 기포는 유로 면적이 넓고 유속이 빠른 영역으로 이동하는 경향을 보인다. Levy 의 연구에 따르면 기포의 평형 분포는 유속 분포와 관련이 있다[15]. Levy 는 채널 내에서 평형 밀도 분포는 평형 유속 분포와 선형적 비례 관계에 있다고 가정하였다. 그러나 Sadatomi 등의 2 채널에 대한 실험적 연구 결과에서는 이러한 선형적 관계가 발견되지 않았다[16]. 따라서 MATRA 코드에서는 실험 자료 평가를 통하여 기포 이동 계수 K_{VD} 를 실험적으로 결정하였다. 이에 따라 난류 혼합으로 인한 질량 교환은 아래와 같이 표현하였다.

$$w'_{i\leftrightarrow j} = \left(w'_{ij}\right)_{SP} \cdot \theta \cdot \left[\left(\alpha_j - \alpha_i\right) - K_{VD}\frac{\left(G_j - G_i\right)}{G_{avg}}\right], \tag{3.3}$$

여기서,

$$\theta \equiv \left(\beta_{TP}/\beta_{SP}\right)\left(\Delta\rho/\rho_f\right). \tag{3.4}$$

2 상 유동 난류 혼합에 대한 Beus 의 연구[17]에 따르면 위식에 나타나는 보정 인자 θ 는 bubbly-slug 영역에서 아래와 같이 표현된다.

$$\theta = 1 + \left(\theta_M - 1\right)\cdot\frac{\chi}{\chi_C}, \tag{3.5}$$

그리고 annular 영역에서는

$$\theta = 1 + \left(\theta_M - 1\right)\cdot\frac{1 - \chi_0/\chi_C}{\chi/\chi_C - \chi_0/\chi_C}, \tag{3.6}$$

이며, 여기서

$$\chi_0/\chi_C = 0.57\cdot \mathrm{Re}^{0.0417}, \tag{3.7}$$

그리고 $\theta_M = 5$ 이다[18]. Slug-annular 천이 조건에 해당하는 건도는 아래와 같이 평가된다.

$$\chi_C = \frac{0.4\sqrt{gD_{hy}\rho_f \Delta\rho}/G + 0.6}{\sqrt{\rho_f/\rho_g} + 0.6}. \quad (3.8)$$

이와 유사하게 난류 혼합 및 기포 이동에 의한 에너지 전달량은 아래와 같이 표현된다.

$$w'_{ij}\, h_i - w'_{ji}\, h_j = \left(w'_{ij}\right)_{SP} \cdot \theta \cdot \left[\left(\alpha_j - \alpha_i\right) - K_{VD}\frac{\left(G_j - G_i\right)}{G_{avg}}\right] \cdot \left(\frac{\rho_f h_f - \rho_g h_g}{\rho_f - \rho_g}\right). \quad (3.9)$$

III.1.2 동일 체적 교환 모델의 최적화

(1) 집합체 2상 유동 분포 실험 자료 분석

MATRA 코드에 도입된 난류 혼합 모형은 실험 집합체에 대한 2 상 유동 분포 실험 자료 평가를 통하여 최적화 하였다. 실험 집합체 기하 형태는 표 3.1 에 정리하였으며, 실험 집합체 단면 형태는 그림 3.1 에 제시하였다. GE 의 9-봉 집합체 실험[19]에서는 BWR 운전 조건인 69 bar 에서 출구 엔탈피 및 유속 분포를 측정하였다. Ispra 16-봉 집합체 실험은 BWR 및 PWR 운전 조건에서 수행되었으며, 7 개의 대표적인 간격격자가 사용되었다. 실험 집합체에 대한 MATRA 코드 분석에 사용된 주요 모형은 표 3.2 에 제시하였다. GE 의 9-봉 집합체와 ISPRA 16-봉 집합체 중 혼합날개가 부착되지 않은 집합체에 대한 단상 유동 난류 혼합 인자는 0.005 로 결정하였으며, 간격 격자의 수로별 압력 손실 계수는 참고문헌 [20]으로부터 결정하였다. 열수력적 조건의 대칭성을 고려하여 그림 3.1 에 나타낸 바와 같이 1/8 집합체에 대하여 분석하였다.

BWR 조건에서의 실험 결과에 의하면 corner 수로는 power-to-flow 비가 가장 크지만 출구 건도는 집합체 평균 건도보다 낮은 것으로 관찰되었다. EM 모델을 사용하여 계산한 결과는 그림 3.2 에서 보듯이 이러한 경향을 제대로 예측하지 못하는 것으로 나타났다. 그러나 PWR 과 같은 고압력 조건에서는 건도가 높은 조건에서도 이러한 경향이 실험적으로 나타나지 않았다. 이에 대하여 BWR 조건과 같이 상대적으로 압력이 낮으면 기포 밀도가 감소하여 기포의 이동을 촉진시키는

경향이 있기 때문이라는 해석도 있다[20]. 2 상 유동장 형태와 난류 혼합 간에 밀접한 관련이 있다는 연구 결과는 여러 번 제시된 바 있다. 그림 3.3 은 기존의 2 상 유동 패턴을 사용하여 실험 자료를 분석한 결과를 제시한 것인데, 그림에서 굵은 실선은 PWR 과 같은 고압력 조건(160 bar)을, 그리고 가는 실선은 BWR 과 같은 저압력 조건(70 bar)을 나타낸 것이다. 슬러그-처언 유동 경계는 아래와 같이 표현되는 Wallis 모델[21]로부터 평가하였다.

$$j_g^* = 0.4 + 0.6 \cdot j_f^* \qquad (3.10)$$

그림에서 보듯이 대부분의 BWR 조건 실험 자료들은 slug 나 annular 영역에 속하는 것으로 나타났다. 이에 비하여 PWR 조건에서는 McQuillan & Whalley 모델[22]이 제시하는 dispersed bubbly flow 영역에 있는 것을 알 수 있다. Dispersed bubbly flow 영역에서는 아주 작은 기포가 형성되어 액체는 연속적인 상을 유지하고 있으며, 주어진 기포율 조건에서 액체와 기체간의 경계면적이 매우 큰 상태를 이룬다. 따라서 이러한 조건에서는 기포와 액체 간의 마찰력 증가로 인하여 기포 이동이 억제될 수 있다는 해석도 가능하다.

Lahey 가 제시한 동일 체적 교환 모델[14]을 MATRA 코드에 적용하여 실험 자료를 분석한 결과, 그림 3.4 에서 보듯이 EM 모델에 비하여 전반적으로 예측 성능이 향상된 것을 알 수 있다. 그러나 건도가 높은 BWR 조건에서는 corner 수로 출구 건도를 실험치에 비하여 상당히 높게 예측하고 있는 것으로 나타났다. THERMIT 코드에서는 K_{VD} 를 상수 값으로 1.4 를 적용하고 있는데[23], 이 모델을 MATRA 코드에 적용하여 평가한 결과는 그림 3.5 에 제시하였다. 이 모델은 BWR 조건에서 corner 수로의 출구 건도를 약간 더 정확하게 예측하는 경향을 보이지만 고 건도 영역에서는 여전히 높게 예측하는 경향을 보이고 있으며 특히 PWR 조건 실험 자료에 대하여 corner 채널의 엔탈피 상승을 약 11% 정도 낮게 예측하는 결과를 보였다.

(2) 기포 이동 계수의 최적화

실험 자료로부터 최적 기포 이동 계수(K_{VD})를 구하기 위하여 BWR 및 PWR 조건에서 K_{VD} 에 대한 corner 수로 출구 건도(χ_1)의 변화율을 평가하였다. K_{VD} 와

χ_1간에 선형적 비례 관계가 있다고 가정하면 최적 K_{VD}는 아래와 같이 계산된다.

$$K_{VD,OPT} = K_{VD,L} + \frac{\chi_{1,M} - \chi_{1,L}}{S_\chi}, \tag{3.11}$$

여기서 선형 비례 상수는 아래와 같이 정의된다.

$$S_\chi \equiv \frac{\chi_{1,U} - \chi_{1,L}}{K_{VD,U} - K_{VD,L}}. \tag{3.12}$$

실험 자료 평가 결과 K_{VD}가 증가하면 corner 수로 출구 건도는 감소하며, 선형 비례 상수의 절대값은 국부 건도가 증가함에 따라 커지는 것으로 나타났다. Beus 모델을 사용한 동일 체적 교환 모형을 적용하여 평가한 결과 slug-annular 경계 조건 근처에서 S_χ의 최소값이 나타났다. 이는 2 상 유동 혼합이 이 조건에서 최대값을 갖기 때문에 나타난 결과이다. PWR 및 BWR 조건에서 평가된 K_{VD}의 최적치는 그림 3.6 에 제시하였다. 자료의 scattering 이 상당히 크게 나타났으나 건도 및 압력에 대한 K_{VD}의 경향을 구별해 낼 수 있었다. 이러한 분석을 통하여 K_{VD}에 대한 단순 선형 모델을 아래와 같이 도출하였다. 먼저 bubbly-slug flow 영역($\chi < \chi_C$)에서는,

$$K_{VD} = a_1 \cdot \left(\frac{\chi - \chi_{osv}}{\chi_C - \chi_{osv}} \right). \tag{3.13}$$

로 표현되는데, 이는 기포 이동 효과가 건도에 따라 선형적으로 증가함을 나타내고 있다. 임계 압력 조건에서 K_{VD}가 0 이 된다고 가정하여 기울기 a_1을 아래와 같이 구했다.

$$a_1 = 0.72 \cdot \left(\frac{1 - P_r}{P_r} \right)^{1.33}. \tag{3.14}$$

한편 annular flow 영역($\chi \geq \chi_C$)에서는 S_χ 값이 작아서 K_{VD} 값의 scattering 이 상대적으로 크게 나타났으며, 이 영역에서 아래와 같은 선형 모델을 적용하였다.

$$K_{VD} = a_1 + a_2 \cdot \left(\frac{\chi - \chi_{osv}}{\chi_C - \chi_{osv}} - 1 \right), \tag{3.15}$$

실험 자료 평가를 통하여 $a_2 = 10$ 으로 결정하였다.

그림 3.7 은 이와 같이 도출된 MATRA 코드의 EVVD 모델을 사용하여 corner 수로의 출구 건도를 분석한 결과를 보인 것이다. 이 모델은 K_{VD} 를 상수로 취급하는 모델에 비하여 정확도가 상당히 개선되었으며, 압력의 영향도 적절히 고려되고 있는 것으로 나타났다. 실험 집합체 내의 모든 수로에 대한 출구 건도 평가 결과는 표 3.3 에 정리하였다. 중심 수로와 가장자리 수로에서는 난류 혼합 모델 차이로 인한 예측 성능 차이가 크게 나타나지 않았다. 그 이유는 이들 수로가 corner 수로에 비하여 상대적으로 유로 면적 및 유량이 커서 횡방향 전달량의 변화에 대한 민감도가 작기 때문이다. 그림 3.8 은 corner 수로의 질량 유속 예측치와 실험치를 비교한 것인데 건도가 높은 영역에서 MATRA 의 EVVD 모델 예측 성능이 향상되는 것으로 나타났다.

III.2 집합체 CHF 실험 자료 평가

원자로 설계 관점에서 부수로 해석 코드의 가장 중요한 기능은 CHF 해석 체계를 구축하고 그 불확실도를 평가하는 것이다. 집합체 내의 열수력장 해석에 대한 MATRA 코드의 예측 성능은 참고문헌 [24]에서 여러가지 실험 자료와 비교한 바 있다. 본 절에서는 MATRA 코드를 집합체 CHF 실험 자료 분석에 적용하여 SMART 노심에 대한 MATRA/SR-1 국부조건 CHF 상관식 체계를 개발하고 불확실도를 평가하였다. SMART 노심은 기존 국내 경수로 노심에 비하여 출력 밀도가 낮고 핵연료 길이가 짧으며, 특히 열수력적 관점에서 보면 정상 상태 노심 입구 유속이 상당히 낮은 조건에서 운전되는 특징을 갖고 있다. CHF 는 일반적으로 질량 유속과 선형적 비례 관계를 갖으며, 그 기울기는 고유속과 저유속 조건에서 확연히 다르게 나타나는 것으로 알려져 있다[25]. 저유속 조건에서 CHF 는 거의 환상 유동에서의 액막 증발 현상에 의해 발생하며, CHF 와 질량 유속의 관계는 임계 건도가 1 이 되는 에너지 보존식에 의해 표현되는 관계와 거의 유사한 것으로 나타난다. 이에 비하여 고유속 조건에서 CHF 는 주로 핵비등 이탈 현상에 의해 발생하며, 이 경우 질량 유속 변화에 대한 CHF 변화를 나타내는 곡선의 기울기는 저유속 조건에서의 기울기보다 작다. 이러한 특징은 여러 가지 실험을 통하여 관찰된 바 있으며, 기존의 원형관에 대한 상관식 중에서도 유속 조건에 따라 상관식 형태가 달라지는 경우를 찾아볼 수 있다[25,26]. 이러한 현상은 봉 집합체에서도 발견할 수 있는데, 그림 3.9 는 5x5

집합체에 대한 CHF 실험 자료[27]를 유속에 대하여 나타낸 것인데, 저유속 조건에서 CHF 와 질량 유속 간의 선형적 관계가 달라지는 것을 볼 수 있다. 본 연구에서는 부수로 해석 코드 MATRA 를 사용하여 SMART 노심과 같은 저유속 조건에 적용할 수 있는 국부조건 CHF 상관식 체계를 개발하였다. 그림 3.10 은 국부조건 CHF 상관식 체계를 개발하는 과정을 나타낸 것이다. 부수로 해석 코드는 실험 자료 분석을 통해 상관식 개발에 필요한 국부 열수력 조건을 제공하며, 또한 노심 고온 부수로 해석을 통해 DNBR 여유도 평가에 적용된다.

III.2.1 MATRA 코드를 사용한 집합체 CHF 실험 자료 분석

국부 조건 CHF 상관식 개발을 위하여 수집된 정방형 집합체 기하 형태 및 실험 조건은 표 3.4 에 정리하였다. 수집된 실험 자료는 혼합날개 부착 여부에 따라 두 그룹으로 구분하였으며, 분석에 사용된 실험 자료는 모두 2518 개로서, 혼합날개가 부착된 집합체 자료는 1738 개, 혼합날개가 없는 집합체 자료는 780 개이다. 실험 자료의 범위는 압력: 69～171 bar, 질량 유속: 470～4973 kg/m^2/s, 가열 길이: 1.37～4.27 m 로서 SMART 노심 운전 조건을 포함하고 있다. 실험 집합체 단면 형태는 그림 3.11 에 제시하였다.

집합체 CHF 실험 자료는 주로 고압력 PWR 조건에 해당하므로 MATRA 코드 분석에는 기존의 동일 질량 교환 개념의 난류 혼합 모델을 적용하였다. 분석 대상 실험집합체 중 KWU 실험 자료(TS 3～48)에는 열혼합 실험 자료가 일부 포함되어 있으며 이로부터 난류혼합인자를 평가한 바 있다[28]. 그리고 Westinghouse 실험 집합체(TS 156～164)에 대한 난류 혼합 인자는 WCAP 자료[29]에 제시된 값을 적용하였다. 난류혼합인자에 대한 정보가 없는 실험집합체에 대해서는 간격격자 압력 손실 계수의 크기로부터 혼합날개 부착 여부를 판단하여, 이로부터 난류혼합인자의 크기를 적절히 가정하였다. 즉, TS 512～517 은 동일한 봉 직경 및 봉간 거리로 구성된 집합체들인데 지지격자 압력 손실 계수가 0.57 로서 작은 집합체들은 혼합날개가 없는 것으로 가정하였으며, 이 경우의 대표적인 난류혼합인자 값으로서 0.005 를 적용하였다. 압력손실 계수가 1.73～1.91 로서 큰 집합체들은 혼합날개가 부착된 것으로 가정하여 난류혼합인자 값은 0.05 를 적용하였다[30].

CHF 발생 위치에서의 국부 열수력적 조건은 부수로 해석 코드인 MATRA 코드를 사용하여 분석하였으며, 부수로 해석 모형은 그림 3.11 에 제시한 바와 같다. MATRA 코드로 분석한 실험 집합체 내의 부수로 출구 건도 및 질량 유속의 분포는 난류혼합인자(TDC)의 크기에 따라 크게 달라지는 것으로 나타났다. 혼합 날개가 부착된 경우에 해당하는 TDC=0.05 인 경우 부수로 간의 에너지 및 운동량 교환에 의해 출구 건도 및 질량 유속 분포가 상당히 균일해지는 것을 알 수 있다. MATRA 코드로 계산한 CHF 발생 위치에서의 국부 열수력 조건은 국부조건 CHF 상관식 개발에 사용된다.

III.2.2 SR-1 상관식 개발 및 검증

실험 자료는 CHF 에 영향을 주는 주요 변수 특성에 따라 아래와 같이 4 개의 그룹으로 구분하였다.

	Uniform APS		Non-uniform APS
	High velocity ($G>1356$ kg/m^2/s)	Low velocity ($G\leq1356$ kg/m^2/s)	
MV grids	A (1255)	B (382)	D (140)
No MV grids	C (741)		

본 연구에서 저유속과 고유속의 경계(G_{ref})는 1356 kg/m^2/s 로 선정하였다. 이는 그림 3.12 에서 보듯이 기존 경수로 조건에서 개발된 KRB-1 CHF 상관식[31]을 사용하여 집합체 실험 자료를 분석한 결과 P/M 의 분산이 급격하게 증가하기 시작하는 위치를 선정한 것이다. Katto 의 유속 경계 조건 및 매우 낮은 유속에 적용되는 complete evaporation 모델과 비교하면 그림 3.13 과 같다. G_{ref} 를 단순히 상수로서 고려하는 것은 정확한 접근 방법은 아니지만 현재로서는 이에 대한 연구가 부족한 상태이며 앞으로 실험적 및 이론적 연구가 더 수행되어야 할 필요가 있다.

분류된 실험 자료를 사용하여 상관식 개발은 단계적으로 수행하였다. 즉, A-그룹 자료를 사용하여 상관식 기본 형태($q''_{CHF,Base}$)를 개발하고, B-그룹 자료를 사용하여 저유속 보정 인자(F_G)를 개발하며, C-그룹 자료를 사용하여 혼합날개 보정

인자(F_{SG})를 개발하고, 다음으로 D-그룹 자료를 사용하여 비균일 축방향 출력분포 보정 인자(F_{NU})의 성능을 평가하였다. SR-1 상관식 형태는 아래와 같이 표현하였다.

$$q''_{CHF} = q''_{CHF,Base} \times \frac{F_G \cdot F_{SG}}{F_{NU}} \tag{3.16}$$

(1) SR-1상관식 기본 형태 개발

SR-1 상관식의 기본 형태는 혼합 날개가 부착된 지지격자를 사용하는 축방향 균일 출력 분포 실험 자료 중 집합체 평균 질량 유속이 1356 kg/m^2/s 보다 큰 고유속 조건에 해당하는 1255 개 실험 자료(A-그룹 자료)를 사용하여 개발하였다. 상관식의 함수 형태는 KRB-1 상관식과 동일하며, 이는 국부조건 CHF 상관식이 나타내는 두 가지 뚜렷한 경향을 고려하여 결정된 것이다. 첫째는 CHF 와 국부 건도 간의 관계로서 다른 모든 조건이 동일한 경우 CHF 는 국부 건도에 반비례하는 경향을 보인다. 둘째는 CHF 와 질량 유속 간의 관계로서, 동일한 국부 조건에서 질량 유속이 증가하면 국부 건도가 낮은 경우에는 CHF 가 증가하나, 국부 건도가 높은 경우에는 CHF 가 감소하는 경향을 보인다. 이는 CHF 가 서로 다른 물리적 현상에 의해 지배되기 때문인데, 이러한 경향을 고려하기 위하여 상관식의 기본 함수 형태는 아래와 같이 선정되었다.

$$q''_{CHF,Base} = A_1 - A_2 \cdot G \cdot \chi + A_3 \cdot G \tag{3.17}$$

상관식은 3 가지 물성치(P, G, χ)와 5 가지 기하 형태 변수(L, D_{he}, D_{hy}, d_g, g_{sp})를 포함하는 8 개의 독립 변수들로 구성된 비선형 함수 형태이며, 실험 자료로부터 상관식 계수를 최적화하기 위하여 비선형 회귀분석 프로그램인 FITZ 코드[32]를 사용하였다. 비선형 회귀분석 모형은 계수의 초기치 설정에 따라 여러 가지 해를 가질 수 있는데, 본 분석에서는 KRB-1 상관식의 계수들을 초기치로 선정하였으며, 그 결과 SR-1 상관식 기본 형태의 계수들은 참고문헌[33]에 제시한 바와 같이 평가되었다.

A-그룹에 해당하는 1255 개 실험 자료에 대하여 상관식으로 계산된 P/M 의 평균 및 표준 편차는 각각 1.001 및 0.100 으로 평가되었다. 상관식의 타당성을 통계적인

관점에서 검증하기 위하여 잔차(residual) 분석을 수행하였다. 회귀 분석 모형이 타당하게 설정되었다면 잔차의 모평균은 0 이고 잔차 모집단은 정규분포를 하는 것으로 알려져 있다[34]. CHF 상관식의 잔차는 측정된 CHF 와 예측된 CHF 의 차이로 정의된다. 잔차의 모평균에 대한 추정은 t-test 로 수행하였다. 그 결과 유의수준 1%로서 잔차의 모평균이 0 으로 추정될 수 있는 것으로 나타났다. 모집단의 분포가 정규 분포를 하는지에 대한 추정은 D'-test[35]를 사용하여 수행하였다. D'-test 는 모집단이 정규 분포를 한다는 것을 귀무가설로 설정하고, 표본의 D' 값을 계산하여 이를 D'의 한계치와 비교하여 가설 검증을 수행하는 것이다. 분석 결과 SR-1 기본 상관식의 D' 값은 D' 한계치의 최소값보다 약간 작은 것으로 나타났으며, 이는 정규 분포보다 더 중심으로 치우친 분포를 하는 것을 의미한다. 그림 3.14 는 기본 상관식의 P/M 돗수 분포를 정규 분포 함수와 비교한 것인데 중심으로 더욱 치우친 분포 형태를 확인할 수 있다.

일반적으로 상관식 한계 DNBR 계산에 사용되는 Owen's one-sided tolerance factor[36]는 모집단이 정규 분포를 할 경우에 적용되는 것이며, 정규 분포가 아닌 경우에는 distribution free 에 대한 tolerance limit 을 구하는 방법[37]을 적용해야 한다. 이 방법을 SR-1 기본 상관식에 적용한 결과, 95% 확률과 95% 신뢰도로서 P/M 의 tolerance limit 은 1.191 으로 결정되었다.

(2) 저유속 보정 인자 개발

그림 3.9 에서 보듯이 저유속 조건에서 질량 유속 변화에 대한 CHF 변화는 고유속의 경우보다 커지는 것으로 나타났으며, 이를 보정하기 위하여 저유속 조건에 대한 보정 인자 형태를 아래와 같이 가정하였다.

$$F_G = \left(\frac{G}{G_{ref}} \right)^A \tag{3.18}$$

여기서 G_{ref} 는 저유속 영향이 나타나기 시작하는 기준 유량으로서 본 연구에서는 실험 자료에 대한 예측 경향 분석을 통하여 이를 1356 kg/m^2/s 으로 설정하였다. Katto 의 원형관에 대한 연구[26]에 의하면 고유속 상관식과 저유속 상관식의 경계는

아래와 같은 관계식으로 표현되며, Katto 상관식 중 L-regime 과 H-regime 상관식은 이 지점을 기준으로 서로 다른 기울기를 갖는다.

$$\left(\frac{G_{\text{limit}}L}{\sigma\rho_{\text{f}}}\right)^{0.29} < \frac{0.4\left(\rho_{\text{g}}/\rho_{\text{f}}\right)^{0.133}}{D/L+0.0031} \tag{3.19}$$

그림 3.13 에서는 G_{ref} 와 G_{limit} 을 표본 비교한 결과를 보여주고 있는데, (3.18)과 같은 형태의 유속 보정 인자는 질량 유속이 0 일 때 CHF 도 0 이 되며, Katto 상관식의 경우와는 달리 유속 변화에 대한 CHF 변화를 나타내는 기울기가 연속적으로 변하여 질량 유속이 G_{ref} 에 도달하면 고유속 상관식의 기울기와 같아지는 것으로 가정하고 있다. G_{limit} 은 0 과 G_{ref} 사이의 있으며, SMART 노심 정상 운전 조건에서 G_{limit} 을 평가한 결과 G_{ref} 의 약 1/2 정도에 해당하는 것으로 나타났다. B-그룹에 해당하는 382 개의 저유속 실험 자료 분석을 통하여 저유속 보정 인자는 아래와 같이 개발되었다[33].

$$A = 0.81 - 0.38\times10^{3}\cdot\left(\frac{q''}{Gh_{fg}}\right) \tag{3.20}$$

그림 3.15 는 A-그룹과 B-그룹을 더한 실험 자료에 대하여 저유속 보정 인자의 예측 성능을 평가한 결과로서 보정 인자를 적용하지 않은 경우에 비하여 저유속 조건에서 CHF 를 적절히 예측하는 것으로 나타났다. 유속이 아주 낮은 경우에 CHF 는 수로 내의 액체가 완전히 증발하는 조건, 즉 출구 건도가 1.0 인 조건에 수렴하는 경향을 나타낸다. 따라서 저유속 영역에서 CHF 는 상관식으로 계산된 값과 출구 건도가 1 에 해당하는 값 중에서 작은 값으로 결정하였다.

(3) 혼합날개 보정 인자 개발

KWU 실험 자료를 분석한 결과 혼합날개(mixing vane)가 부착된 집합체의 CHF 크기는 동일한 입구 조건에서 혼합 날개가 없는 경우에 비하여 10～20% 정도 높은 것으로 나타났다. 앞 절에서 SR-1 기본 상관식 및 저유속 보정 인자는 혼합날개가

부착된 실험 집합체 자료로부터 개발한 것이다. 그러나 SMART 노심에 혼합날개가 없는 KOFA 연료를 그대로 적용할 경우 이를 분석할 수 있는 국부조건 상관식이 필요하므로, 본 절에서는 국부조건 상관식에 대한 혼합날개 보정 인자를 개발하였다.

혼합날개가 없는 실험집합체에 대한 741 개의 CHF 실험 자료(C-그룹 자료)를 수집하였으며, 이 실험 자료를 SR-1 기본 상관식 및 저유속 보정 인자를 사용하여 분석한 결과 전반적으로 약 10% 정도 CHF 를 크게 예측하는 것으로 나타났다. 따라서 혼합날개가 없는 경우 혼합날개 보정 인자는 0.9 로 평가되었으며, 이를 적용한 결과 SR-1 상관식으로 예측한 P/M 의 평균 및 표준 편차는 각각 1.00 및 0.107 로 나타났다.

(4) 비균일 축방향 출력 분포 보정 인자 평가

축방향 비균일 출력 분포가 CHF 에 미치는 영향은 Tong 의 F-factor 방법론[38]을 사용하여 보정하였다. 즉,

$$F = \frac{C\int_{z_{ONB}}^{z_C} q'' e^{-C(z_C - z)} dz}{q''_{loc}\left\{1 - e^{-C(z_C - z_{ONB})}\right\}} \tag{3.21}$$

이며, 여기서

$$C = 5.906 \times \frac{(1-\chi_C)^{4.31}}{(G/1356)^{0.478}}. \tag{3.22}$$

수집된 축방향 비균일 출력 분포 실험 자료 중 보정 인자의 적용 범위를 고려한 140 개의 D-그룹 자료에 대한 평가 결과는 축방향 출력 분포 형태와 함께 그림 3.16 에 제시하였다. 그림에서 보듯이 혼합날개 부착 여부에 따라 평균 오차는 약 5% 이내, 표준편차는 약 12% 이내로서 적절한 예측 성능을 보이고 있으며, 비록 자료의 범위는 충분하지 않으나 Tong F-factor 가 현재 대부분의 경수로 노심에 널리 적용되고 있는 점을 고려하면 SMART 노심 CHF 해석에서도 적용 가능할 것으로 판단된다.

(5) SR-1 CHF 상관식

MATRA 코드를 사용하여 개발한 SR-1 상관식 체계는 아래와 같다.

$$q''_{CHF} = \min\left\{ q''_{CHF,Base} \times \frac{F_G \cdot F_{SG}}{F_{NU}},\ q''_{Evap} \right\} \tag{3.23}$$

여기서,

$$\begin{aligned} q''_{CHF,Base} = {} & a_{10} + a_1 L + a_2 P_r + a_3 d_{he} + a_4 d_{hy} + a_5 \tanh\left[a_{12}\left(d_g + g_{sp} \right) + a_{13} \right] \\ & - \left(a_6 P_r + a_7 P_r L + a_8 L + a_9 P_r^2 \right) \cdot G \cdot \chi + K_3 \cdot G \end{aligned}, \tag{3.24}$$

$$q''_{Evap} = \left(\frac{d_{he}}{4L} \right) G h_g \left(1 + \frac{\Delta h_{sub}}{h_{fg}} \right), \tag{3.25}$$

$$\begin{aligned} F_G &= \left(G / G_{ref} \right)^{0.81 - 0.38 \cdot B_o} && \text{, for } G < G_{ref} \\ &= 1 && \text{, for } G \geq G_{ref} \end{aligned}, \tag{3.26}$$

$$\begin{aligned} F_{SG} &= 1.0 && \text{for mixing vaned spacer grid,} \\ &= 0.9 && \text{for non-mixing vaned spacer grid} \end{aligned} \tag{3.27}$$

그리고 F_{NU} 는 (3.21) 및 (3.22) 식으로 제시한 Tong F-factor 를 적용하였다. SR-1 상관식 개발에 사용된 2518 개 실험 자료의 범위는 아래와 같다.

Pressure(bar):	68 to 171,
Mass flux(kg/m^2/s):	470 to 4973,
Critical quality:	-0.21 to 0.70,
Heat flux(kW/m^2):	513 to 4380,
Heated length(m):	1.37 to 4.27,
Hydraulic diameter(mm):	9.5 to 13.6,
Heated equivalent diameter(mm):	11.8 to 15.7,
Grid spacing(m):	0.25 to 0.55.

주요 상관식 변수들에 대한 실험 자료의 영역별 돗수 분포는 그림 3.17 에 제시하였다. SR-1 상관식의 압력 및 유속에 대한 적용 범위는 기존 KRB-1 상관식에 비하여 상당히 확장되었다. 주요 열수력 변수들에 대한 SR-1 상관식으로 예측된 P/M 의 분포 경향은 그림 3.18 ~ 그림 3.21 에 제시하였으며, 모든 변수 영역 내에서 비교적 고르게 P/M 자료가 분포하는 것으로 나타났다. SR-1 상관식의 질량 유속에 대한 CHF 예측 경향을 기존의 CHF table 및 경수로 설계용 국부조건 상관식과 비교한 결과는 그림 3.22 에 제시하였다. CE-1 상관식은 적용 범위를 벗어나는 저유속 조건에서 부정확한 경향을 보이고 있으며, WRB-1 상관식은 전 영역에서 선형적인 변화를 나타내고 있다. CHF table 은 모든 건도 조건에서 저유속 영역의 원형관 CHF 변화 특성을 보여주고 있는데, SR-1 상관식에서도 이와 유사한 특성이 나타나는 것을 볼 수 있다.

(6) 상관식 한계 DNBR

실험 자료 분석 결과 나타난 여러 가지 자료 군에 대한 P/M 의 통계량은 표 3.5 에 정리하였다. 표에서 G-그룹 자료는 질량 유속이 1500 kg/m^2/s 이하에 해당하는 실험 자료들을 모은 것인데, P/M 의 불확실도는 저유속 조건에서 크게 나타났다. 따라서 보수적인 설계를 위하여 SMART 노심 설계에 적용할 상관식의 불확실도 크기는 G-그룹 자료 평가 결과로부터 결정하였다.

상관식 한계 DNBR 은 DNB 설계 기준에 근거하여 결정해야 한다. 만일 P/M 의 모집단이 정규 분포를 한다면 상관식 한계 DNBR 은 one-sided tolerance limit 개념을 적용하여 아래와 같이 계산될 수 있다.

$$DNBR_{cor} = \overline{(P/M)} + k_{95/95} \cdot s \qquad (3.28)$$

여기서, $DNBR_{cor}$ 은 상관식 한계 DNBR, $k_{95/95}$ 는 95% 확률과 95% 신뢰도로서 결정되는 one-sided tolerance limit factor[36]이며, s 는 P/M 의 표본 표준 편차이다. 이 관계식에 따르면 표 3.5 의 G-그룹 및 H-그룹에 해당하는 상관식 한계 DNBR 은 각각 1.281 및 1.203 으로 평가된다.

그러나, G-그룹 및 H-그룹의 P/M 에 대하여 D'-test 를 통한 모집단 정규분포 검사를 수행한 결과 유의수준 5%에서 정규 분포하지 않는 것으로 나타났다. 따라서

상관식 한계 DNBR 은 non-parametric tolerance limit 결정 방법론[37]을 적용하여 평가하였다. 그 결과 G-그룹 및 H-그룹의 상관식 한계 DNBR 은 각각 1.331 및 1.228 로 나타났다. 상관식 한계 DNBR 은, DNBR 값이 한계 DNBR 과 같아지는 경우 95% 이상의 신뢰도로서 실제로 CHF 가 발생할 확률이 5% 이하가 되도록 설정되어야 한다. 그림 3.23 에 나타낸 모든 실험 점들은 실제로 CHF 가 발생한 경우들을 표시한 것인데, DNBR 이 상관식 한계 DNBR 보다 큰 경우에도 실제로 CHF 가 발생한 경우는 그림에서 tolerance limit 을 나타내는 점선의 아래 영역에 나타나며, 상관식 한계 DNBR 이 타당하게 설정 되었다면 이들은 DNB 설계 기준에 따라 5%보다 작아야 한다. 그림에서 G-그룹 및 H-그룹의 상관식 한계 DNBR 에 대하여 이들은 각각 3.7% 및 4.4%로 나타났으며, 이로부터 한계 DNBR 이 적절히 설정되었음을 알 수 있다.

표 3.1 2상 유동 분포 실험 집합체 특성 자료 및 실험 영역

	GE 9-rod	Ispra 16-rod		
Name of test bundle	GE	PELCO-S	EUROP-BWR	EUROP-PWR
Rod array	3x3	4x4	4x4	4x4
Heated length, m	1.83	3.66	3.66	3.66
Rod diameter, mm	14.5	15	10.8	10.8
Rod pitch, mm	18.8	19.5	14.3	14.3
Hydraulic diameter, mm				
- inner channel	16.4	17.3	13.5	13.5
- side channel	11.3	11.5	9.4	9.4
- corner channel	7.1	7.1	6.8	6.8
Radial power distribution	uniform	uniform	uniform	uniform
Axial power distribution	uniform	uniform	uniform	uniform
Pressure, bar	69	70	70	160
Mass velocity, $kg/m^2/s$	720 ~ 1460	910 ~ 1930	970 ~ 2060	2180 ~ 3250
Bundle exit quality	0.03 ~ 0.32	0.02 ~ 0.31	-0.17 ~ 0.24	-0.17 ~ 0.20
Number of data points	13	208	49	205

표 3.2 MATRA 코드 분석에 사용된 주요 모형

Parameter	GE 9-rod bundle	Ispra 16-rod bundles	
		PELCO-S	EUROP
Single-phase turbulent friction factor	0.184 $Re^{-0.2}$	0.44 $Re^{-0.25}$	0.41 $Re^{-0.25}$
Spacer grid loss coefficients			
corner channel (1)	1.0	1.311	1.352
side channel (2, 4)	1.0	1.036, 1.031	0.960,0.965
inner channel (3, 5, 6)	1.0	0.709, 0.652, 0.651	0.848, 0.900, 0.987
Subcooled void model	Levy		
Bulk void model	Chexal-Lellouch model		
Two-phase friction multiplier	Armand model		
Diversion crossflow resistance coefficient	0.5		
Transverse momentum parameter	0.5		
Number of axial nodes	60		
Single-phase turbulent mixing parameter	0.005		

표 3.3 여러가지 횡방향 전달 모형의 부수로 출구 엔탈피 예측 성능 평가 결과

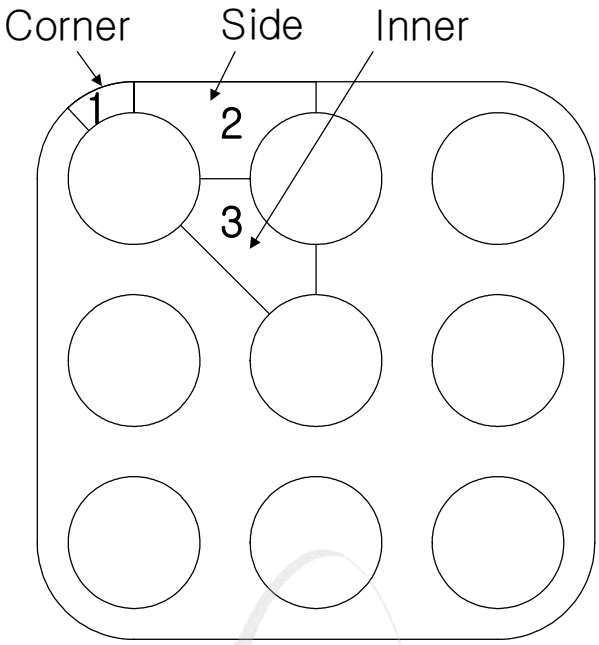
	BWR conditions			PWR conditions		
	Corner	Side	Inner	Corner	Side	Inner
Number of data	270			205		
EM model						
- mean of P/M	1.525	1.021	0.991	0.991	1.007	1.061
- rms error	0.646	0.100	0.052	0.050	0.028	0.074
Lahey's EVVD model						
- mean of P/M	1.276	0.983	1.039	0.972	1.006	1.068
- rms error	0.377	0.085	0.074	0.053	0.029	0.082
Constant K_{VD} model						
- mean of P/M	1.053	0.937	1.090	0.888	1.004	1.095
- rms error	0.209	0.104	0.118	0.135	0.028	0.110
Proposed K_{VD} model						
- mean of P/M	1.052	0.955	1.080	0.983	1.001	1.071
- rms error	0.151	0.088	0.108	0.049	0.025	0.085

표 3.4 SR-1 상관식 개발에 사용된 정방형 집합체 CHF 실험 자료

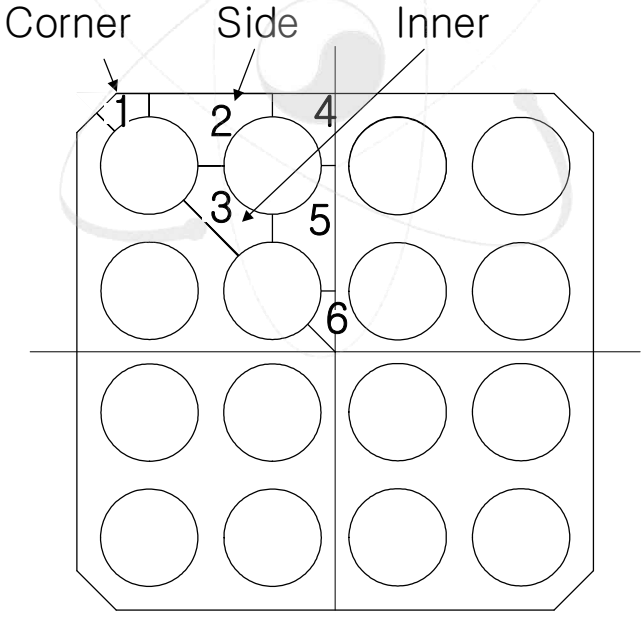
TS	Configu-ration	Axial profile	Grid spacing [mm]	Heated length [m]	Rod dia./pitch [mm]	Mixing vane	Pressure (bar)	Mass flux (kg/m2/s)	# of data
156	TYP-5X5	UNIFORM	660	4.27	9.5/12.6	R	103~167	1343~4928	73
157	TYP-5X5	UNIFORM	660	2.44	9.5/12.6	R	103~167	1372~4893	78
158	THM-5X5	UNIFORM	660	2.44	9.5/12.6	R	103~168	1342~4713	68
160	TYP-5X5	UNIFORM	559	2.44	9.5/12.6	R	103~167	1369~4874	67
161	TYP-5X5	UNIFORM	559	4.27	9.5/12.6	R	103~167	1335~4973	70
162	THM-5X5	COSINE	559	4.27	9.5/12.6	R	103~166	1340~3403	47
164	TYP-5X5	COSINE	559	4.27	9.5/12.6	R	103~167	1380~3578	54
13	THM-5X5	UNIFORM	534	3.0	10.8/14.3	P	70~161	522~3511	88
20	TYP-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	S	70~165	1094~3665	61
29	TYP-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	S	70~165	560~3694	111
30	TYP-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	F1	69~165	573~3693	100
31	TYP-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	70~167	579~3722	97
33	TYP-5X5	UNIFORM	534	3.0	9.5/12.7	F1	70~166	597~3863	102
37	TYP-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	69~167	578~3673	99
38	TYP-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	70~166	609~3836	95
39	TYP-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	F1	69~166	602~3848	104
40	THM-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	100~166	551~3477	77
41	THM-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	100~166	544~3505	79
43	TYP-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	159~165	1240~3829	31
46	TYP-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	160~165	1237~3793	29
47	THM-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	140~165	1152~3497	49
48	THM-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	139~165	1138~3505	49
515	THM-21	UNIFORM	381	1.83	10.7/14.3	unknown	69~157	675~3987	54
516	THM-21	UNIFORM	381	1.83	10.7/14.3	unknown	69~158	661~3975	56
3	THM-5X5	UNIFORM	534	3.0	10.8/14.3	None	70~160	471~3460	90
7	TYP-5X5	UNIFORM	534	3.0	10.8/14.3	None	70~160	512~3191	42
11	TYP-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	None	71~171	511~3361	81
14	THM-5X5	UNIFORM	534	3.0	10.8/14.3	None	70~160	470~3451	65
16	THM-5X5	UNIFORM	534	3.0	10.8/14.3	None	70~160	501~3431	65
19	TYP-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	None	70~167	487~3594	83
21	TYP-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	None	70~165	494~3558	88
22	TYP-6X6	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	None	69~162	513~3376	78
512	TYP-21	UNIFORM	254	1.83	10.7/14.3	unknown	69~158	547~4029	57
513	THM-21	UNIFORM	254	1.83	10.7/14.3	unknown	69~160	545~3910	54
514	THM-21	UNIFORM	254	1.37	10.7/14.3	unknown	69~158	1041~3934	38
517	TYP-21	Non-uni	254	1.83	10.7/14.3	unknown	103~158	786~3727	39

표 3.5 여러가지 자료 그룹에 대한 SR-1 상관식의 P/M 통계량

자료 그룹	자료 내용	자료 수	평균 P/M	표준 편차
A	MV & 고유속 자료 (SR-1 기본 형태 개발 자료)	1255	1.001	0.0999
B	MV & 저유속 자료 (저유속 보정 인자 개발 자료)	382	1.053	0.1519
C	No-MV & Uniform APS 자료 (혼합날개 보정 인자 개발 자료)	741	1.000	0.1073
D	Non-uniform APS 자료 (비균일 APS 보정 인자 평가 자료)	140	1.015	0.1160
E	모든 MV 자료	1738	1.014	0.1158
F	모든 No-MV 자료	780	0.997	0.1083
G	모든 저유속 자료 ($G < 1500\ kg/m^2/s$)	706	1.040	0.1380
H	모든 자료	2518	1.009	0.1138



GE 9-rod test bundle



ISPRA 16-rod test bundle

그림 3.1 2상 유동 분포 실험 집합체 단면 형태

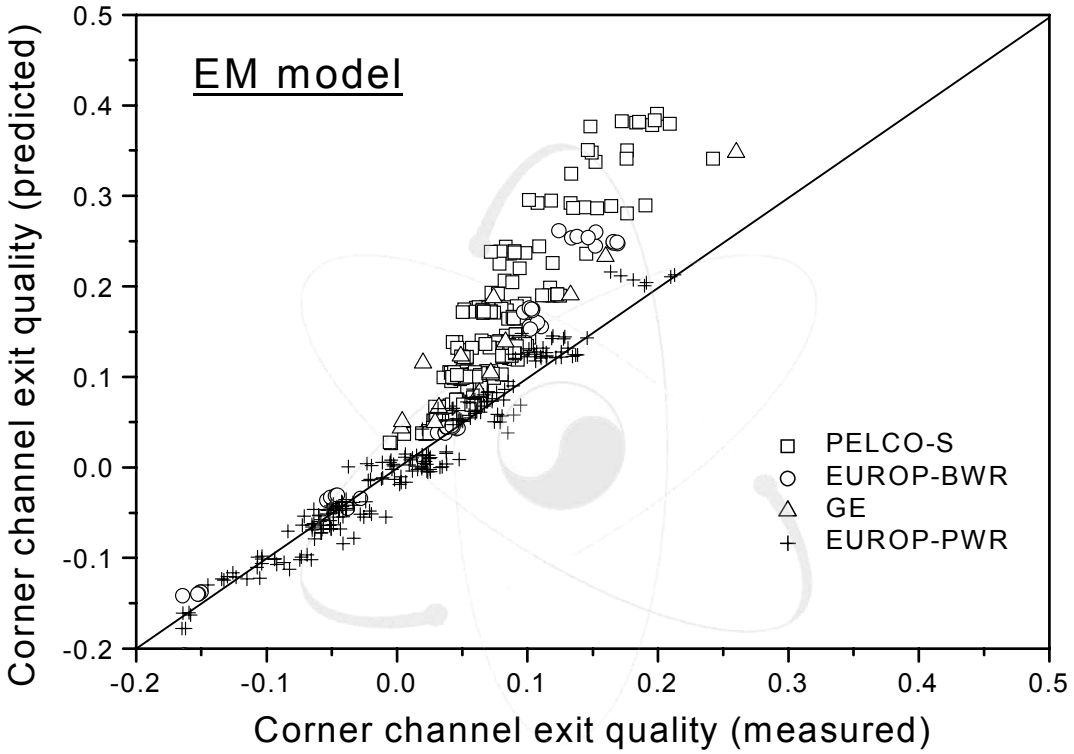


그림 3.2 EM 모델을 사용한 corner 수로 출구 건도 계산 결과와 실험치 비교

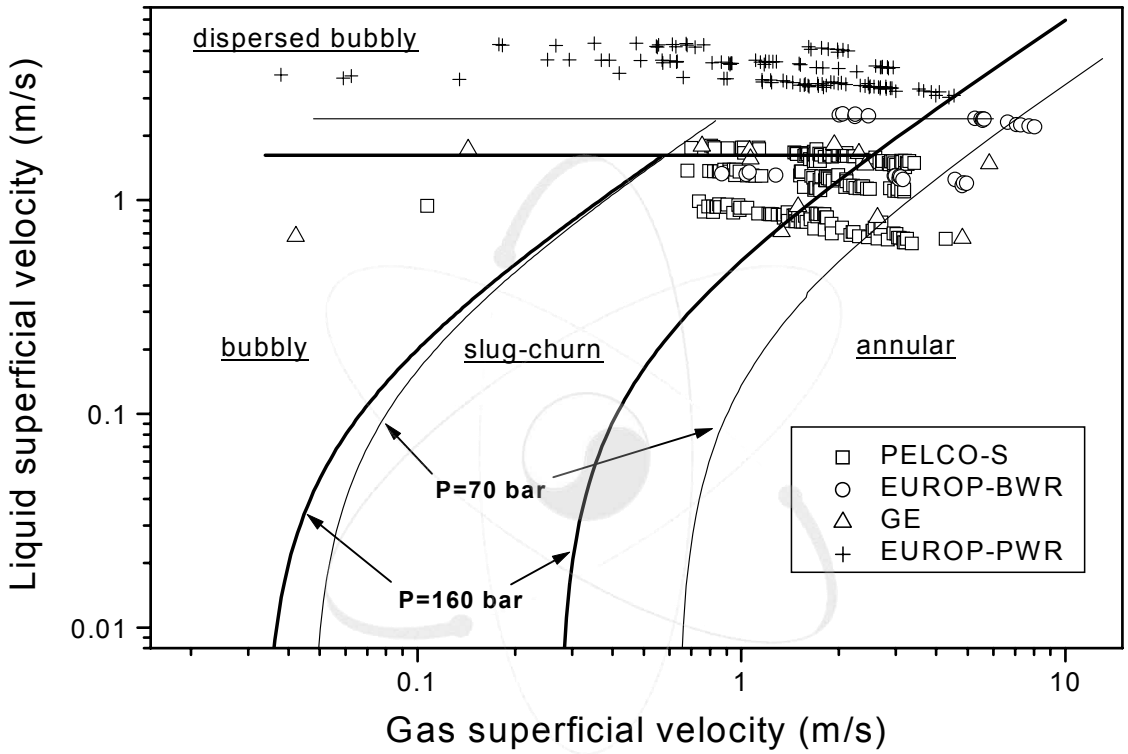


그림 3.3 2상 유동 분포 실험 자료의 유동 패턴 분석

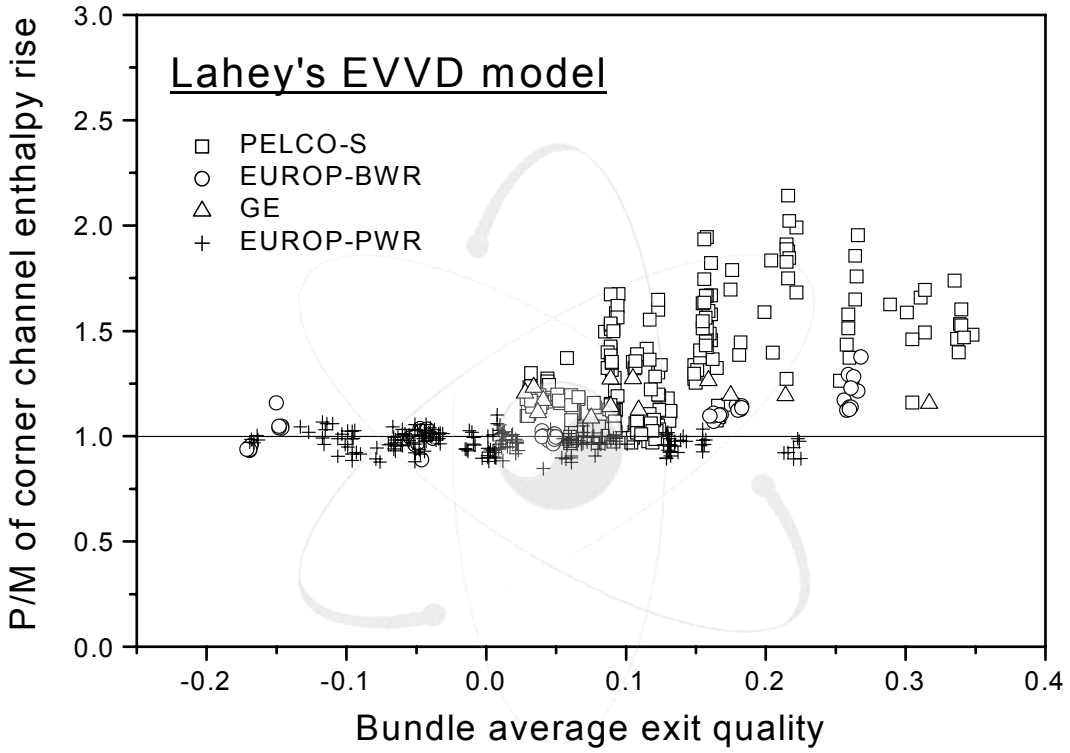


그림 3.4 Lahey의 EVVD 모델을 사용한 corner 수로 출구 건도 계산 결과와 실험치 비교

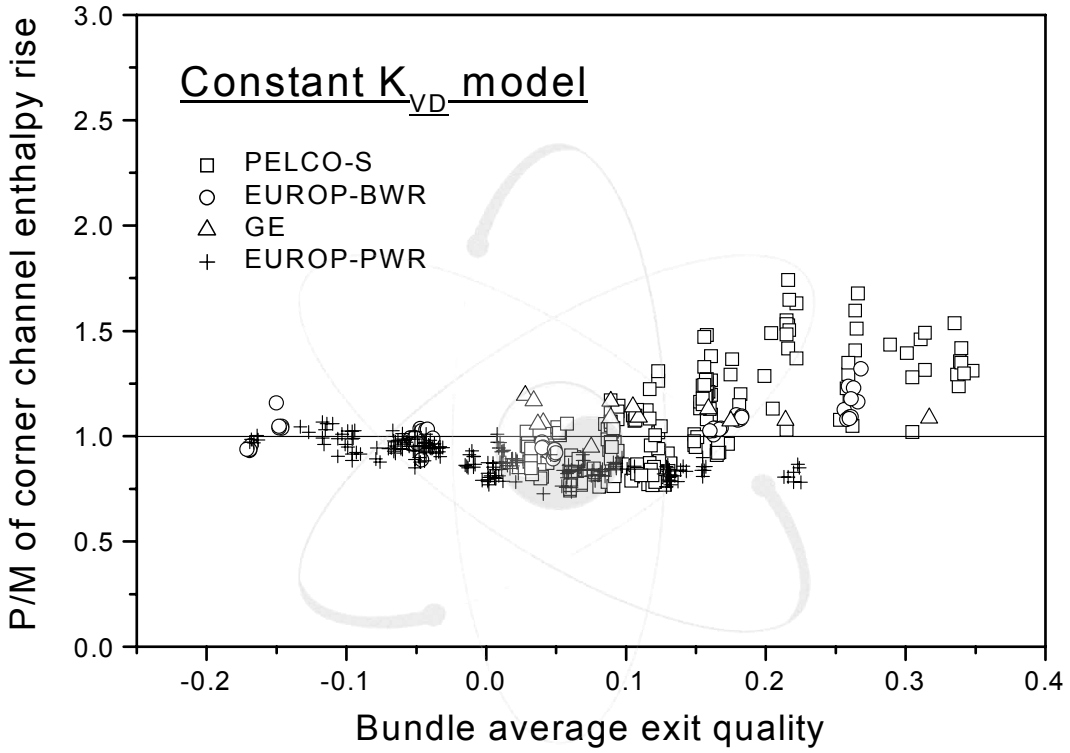


그림 3.5 THERMIT 코드 모델을 사용한 corner 수로 출구 건도 계산 결과와 실험치 비교

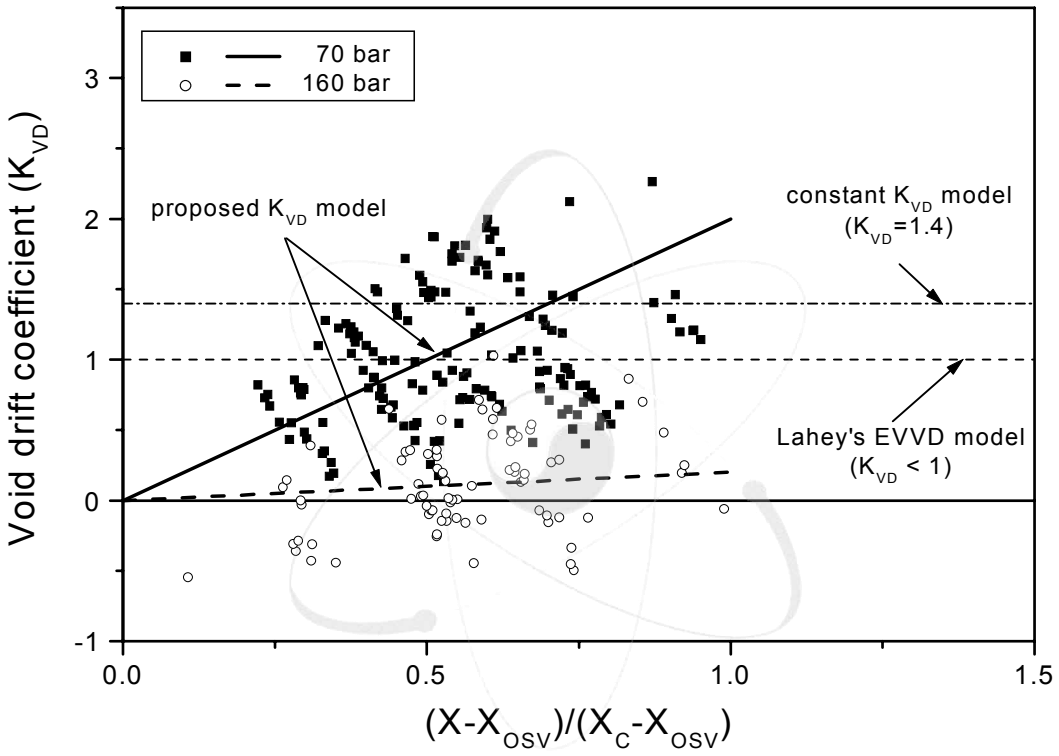


그림 3.6 기포 이동 계수의 최적화

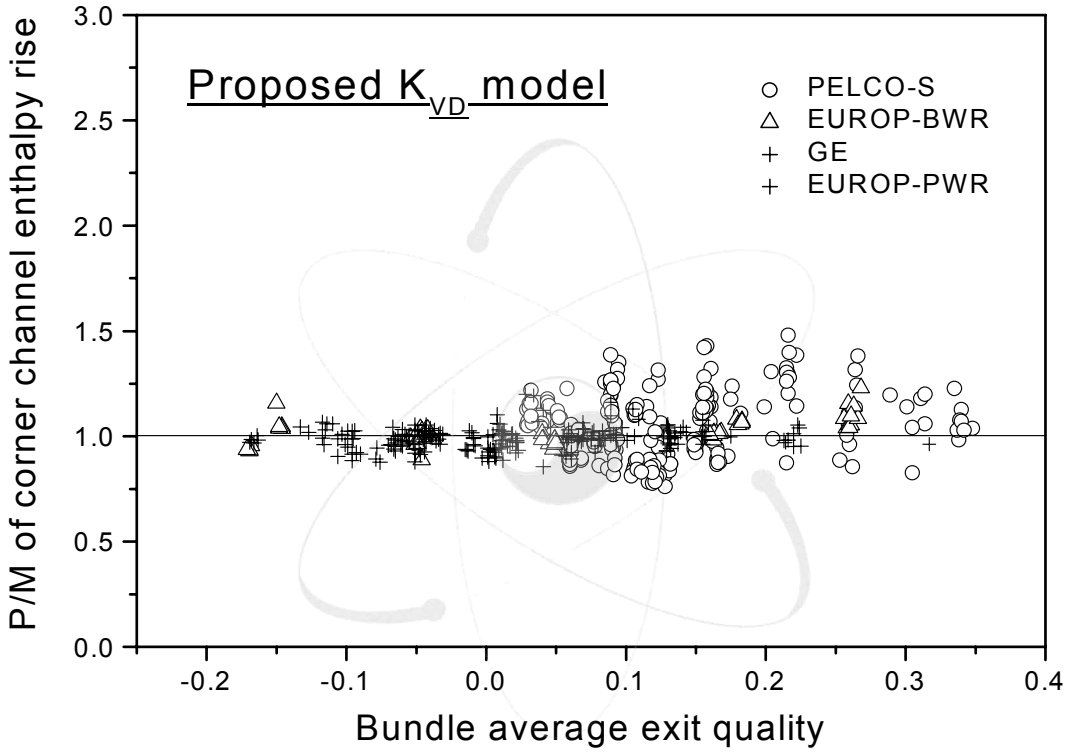


그림 3.7 MATRA 코드 모델을 사용한 corner 수로 출구 건도 계산 결과와 실험치 비교

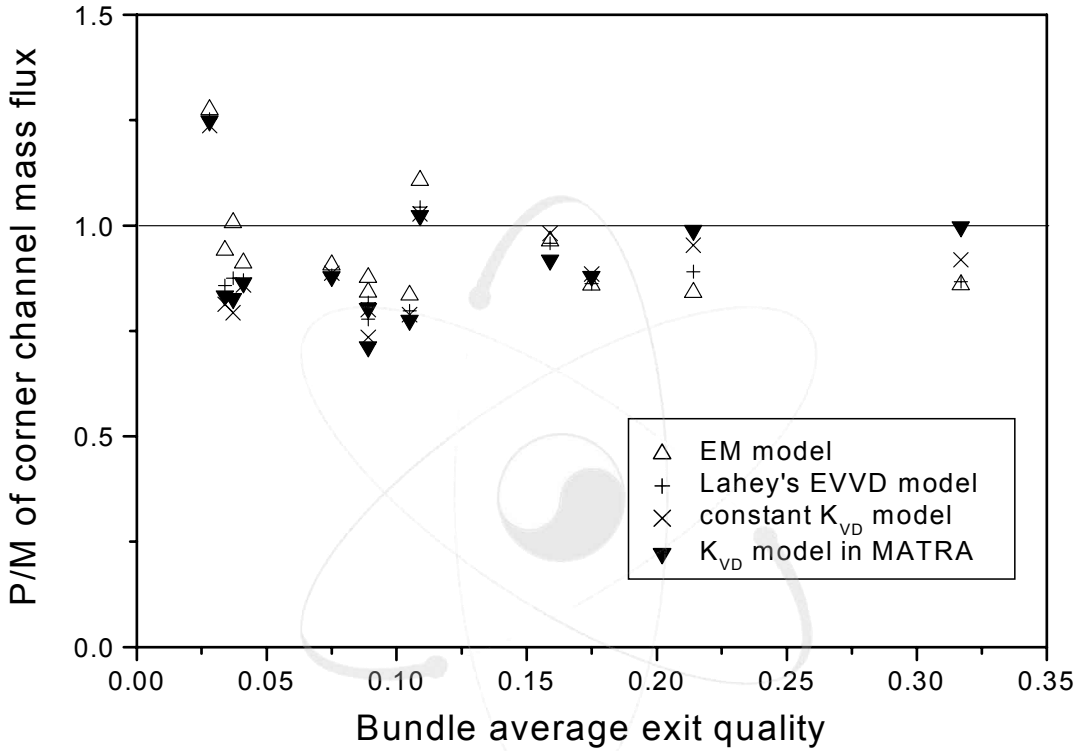


그림 3.8 GE 9-봉 집합체 corner 수로 유속에 대한 예측 성능 평가

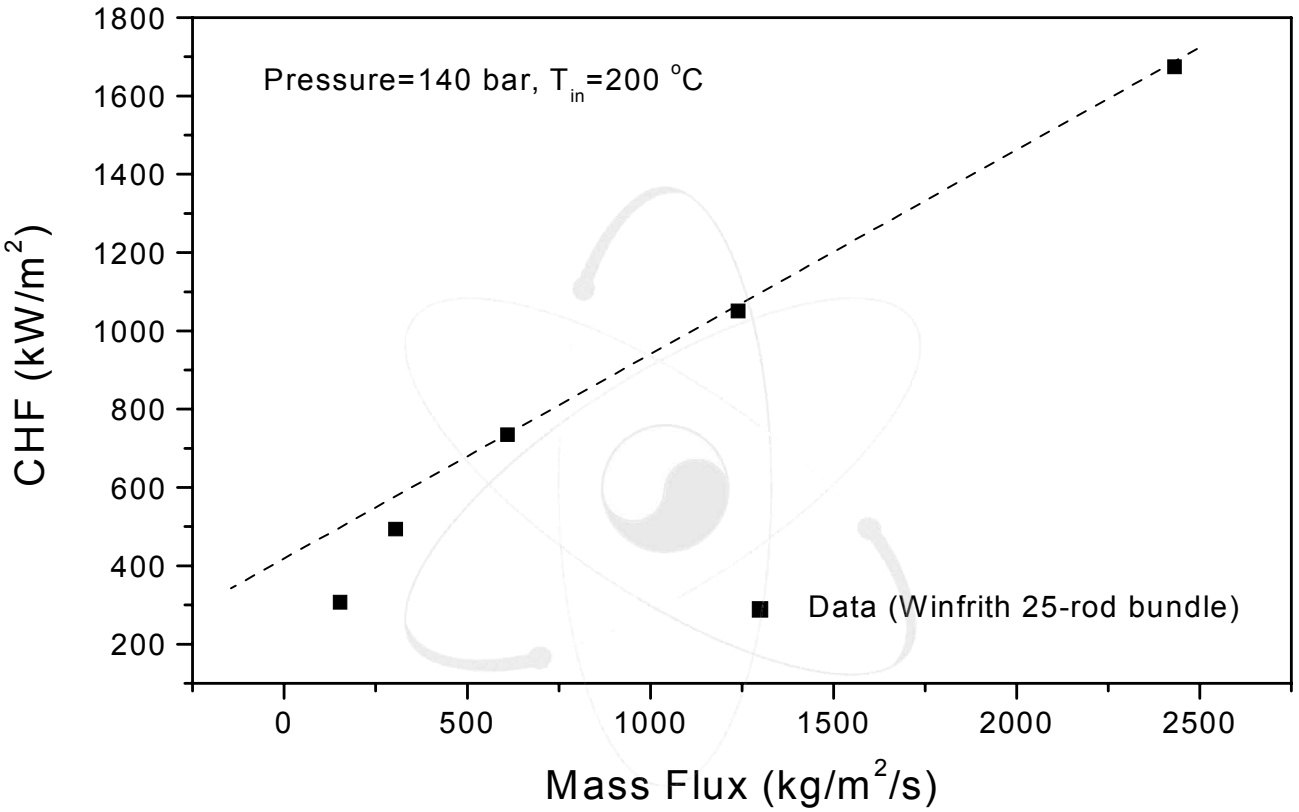


그림 3.9 유속에 대한 집합체 CHF 변화 특성

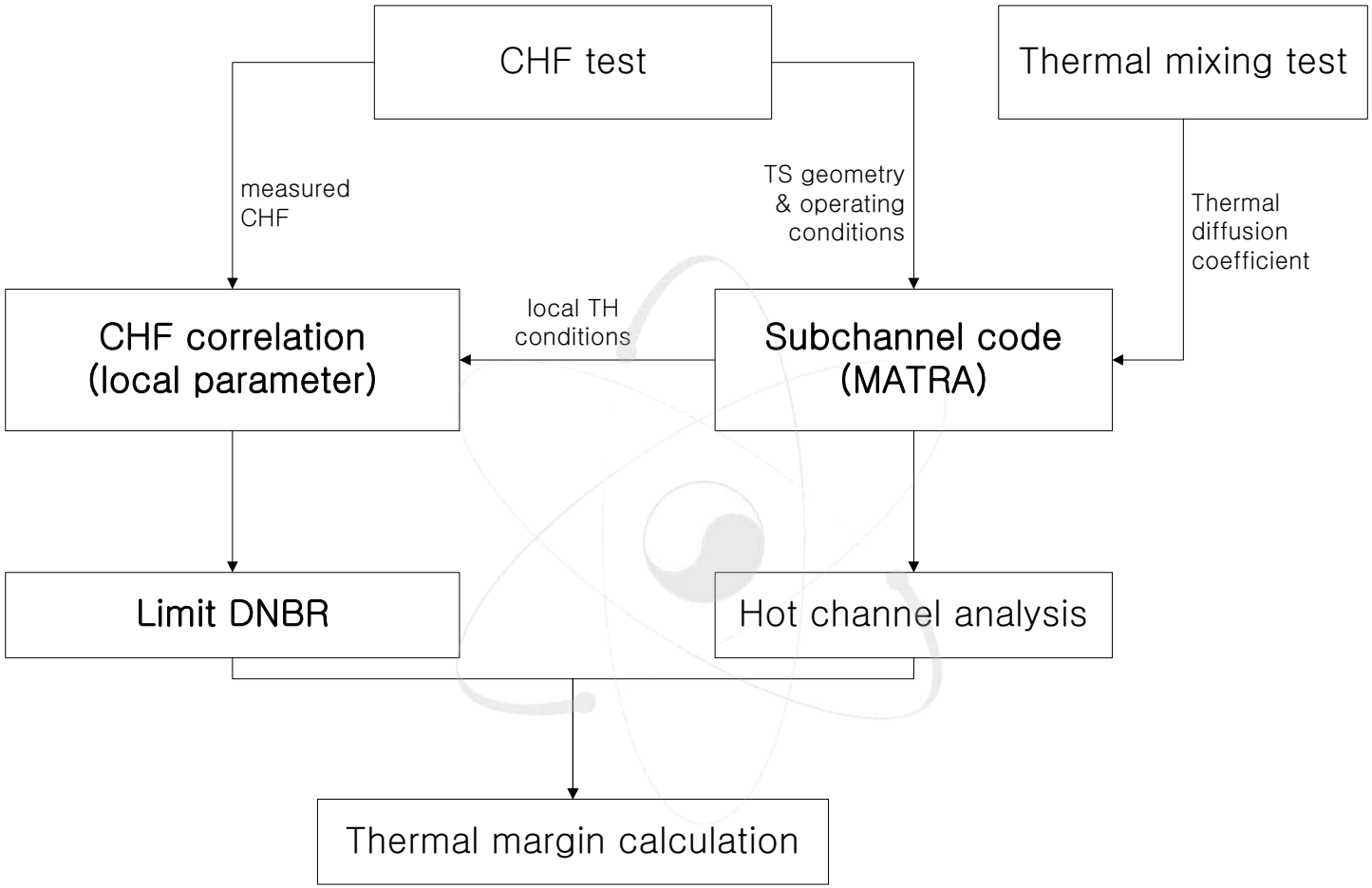


그림 3.10 국부조건 CHF 상관식 체계 개발 절차

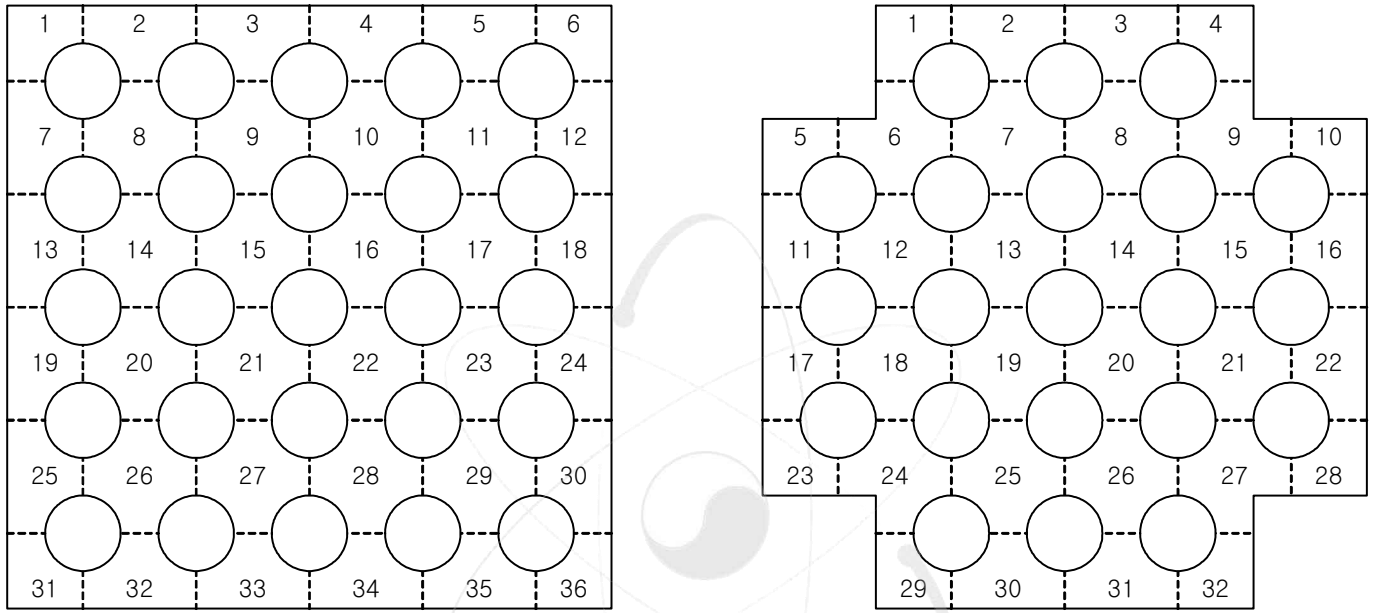


그림 3.11 SR-1 상관식 체계 개발에 사용된 실험집합체 단면 형태

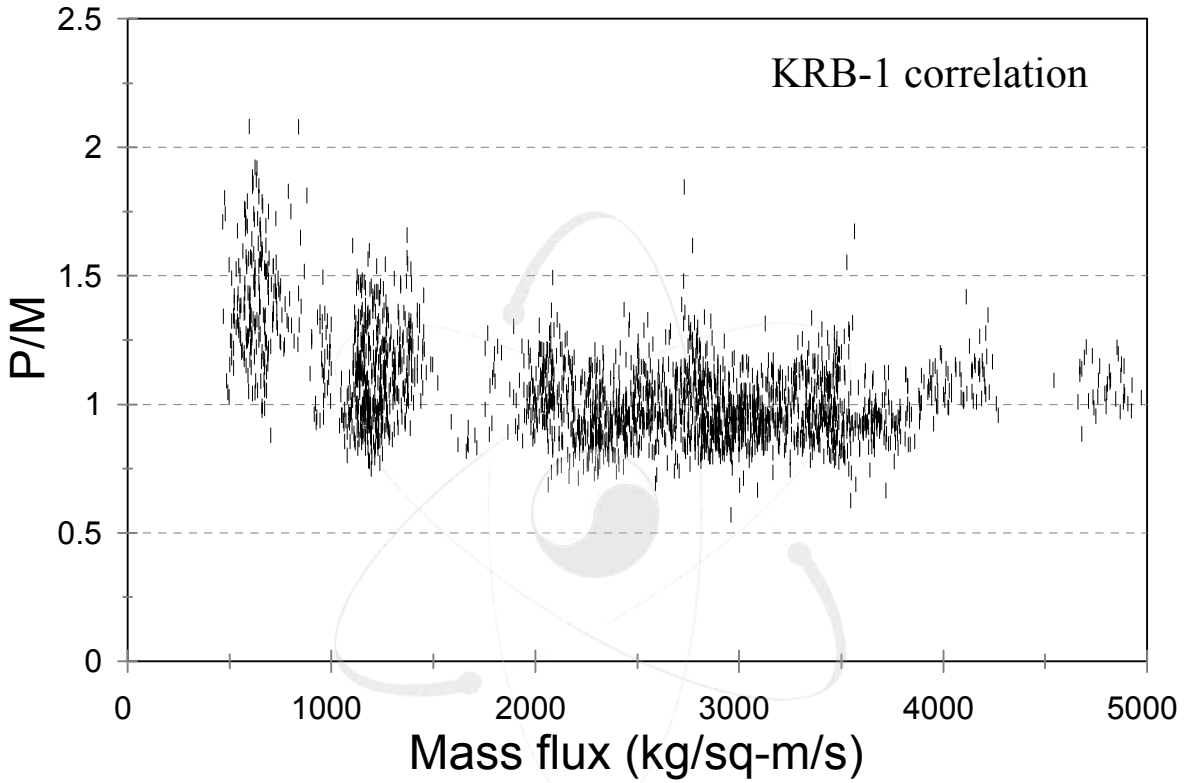


그림 3.12 기존 KRB-1 상관식으로 평가한 P/M의 질량 유속에 대한 변화

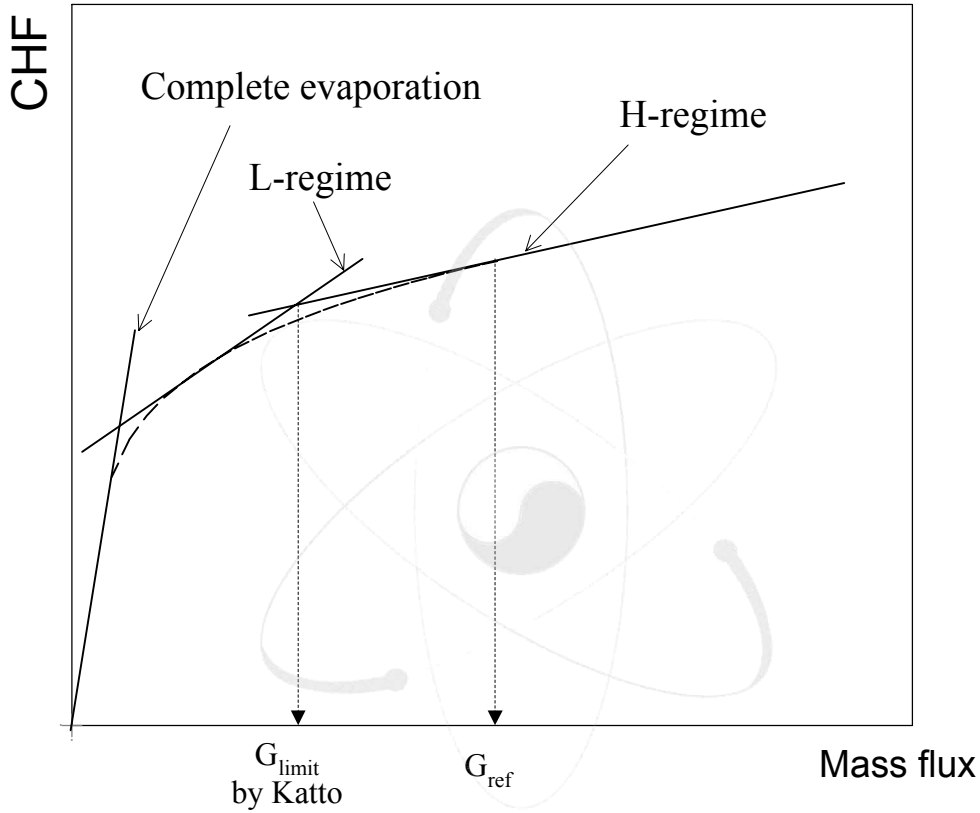


그림 3.13 저유속 및 고유속 경계 조건

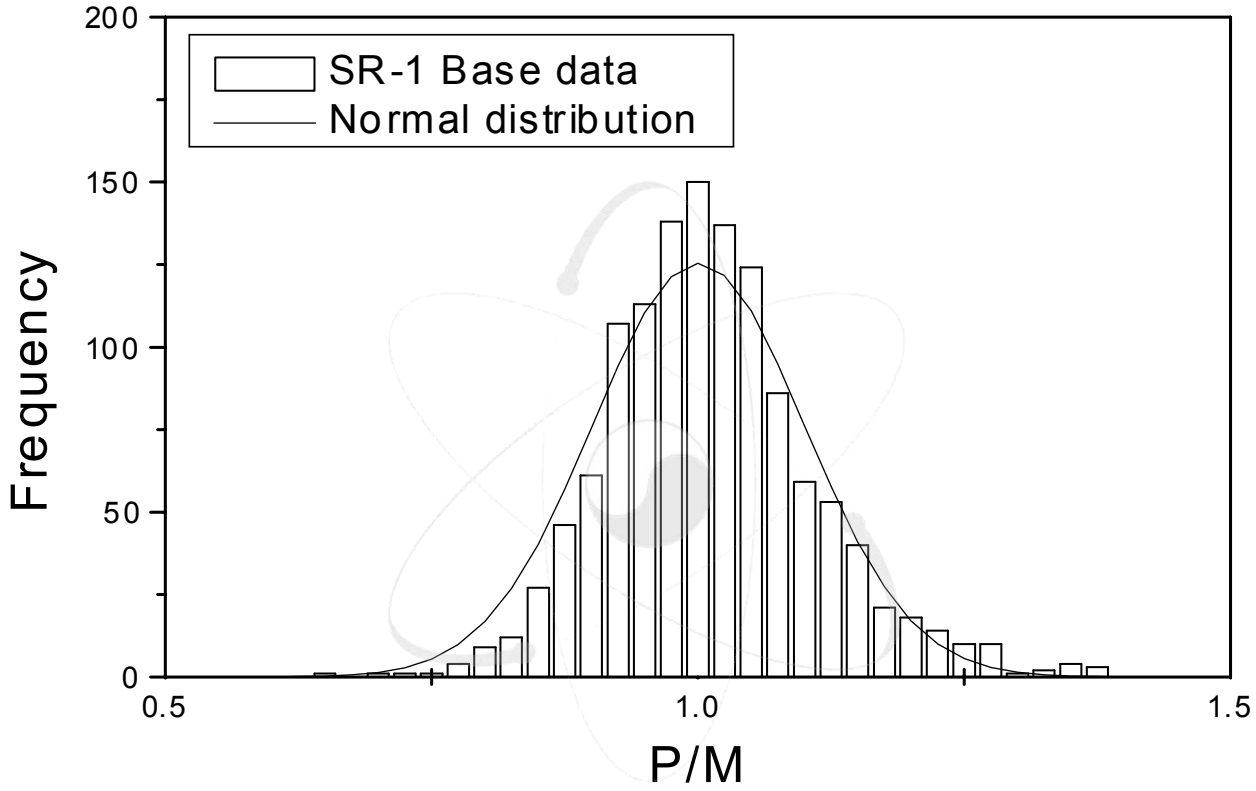


그림 3.14 기본형태 상관식의 P/M 돗수 분포 특성

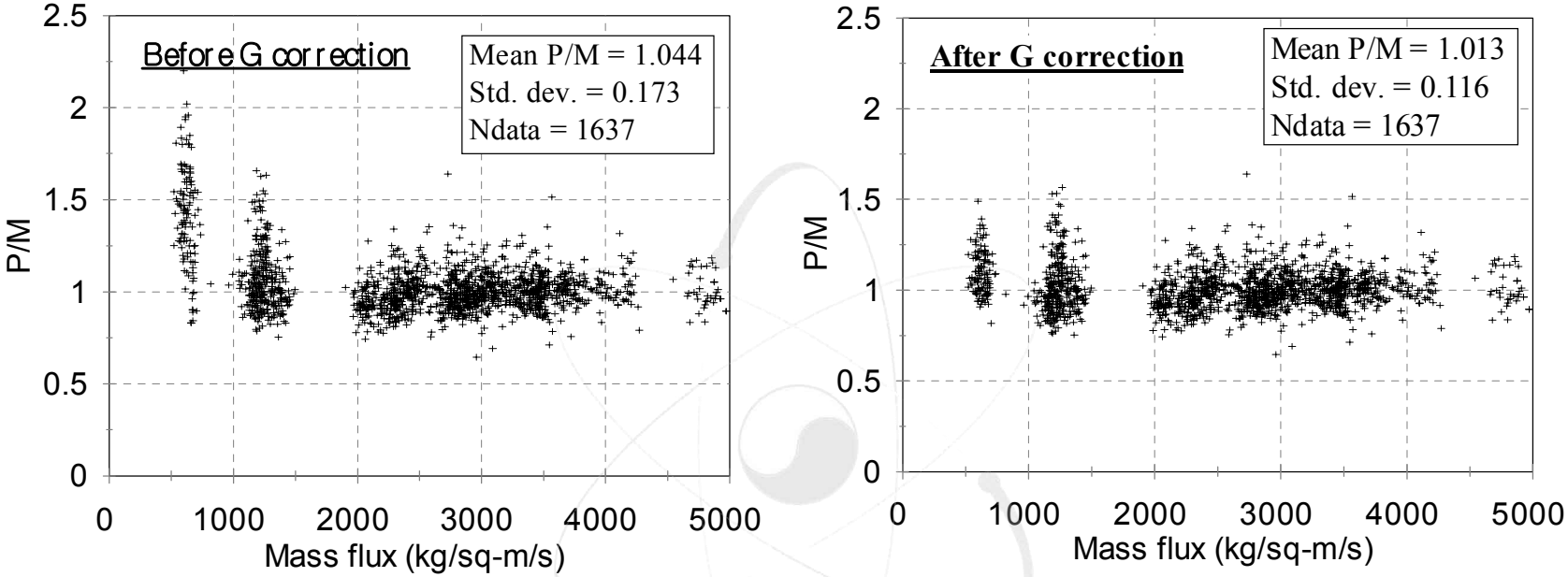


그림 3.15 저유속 보정 인자의 예측 성능 평가

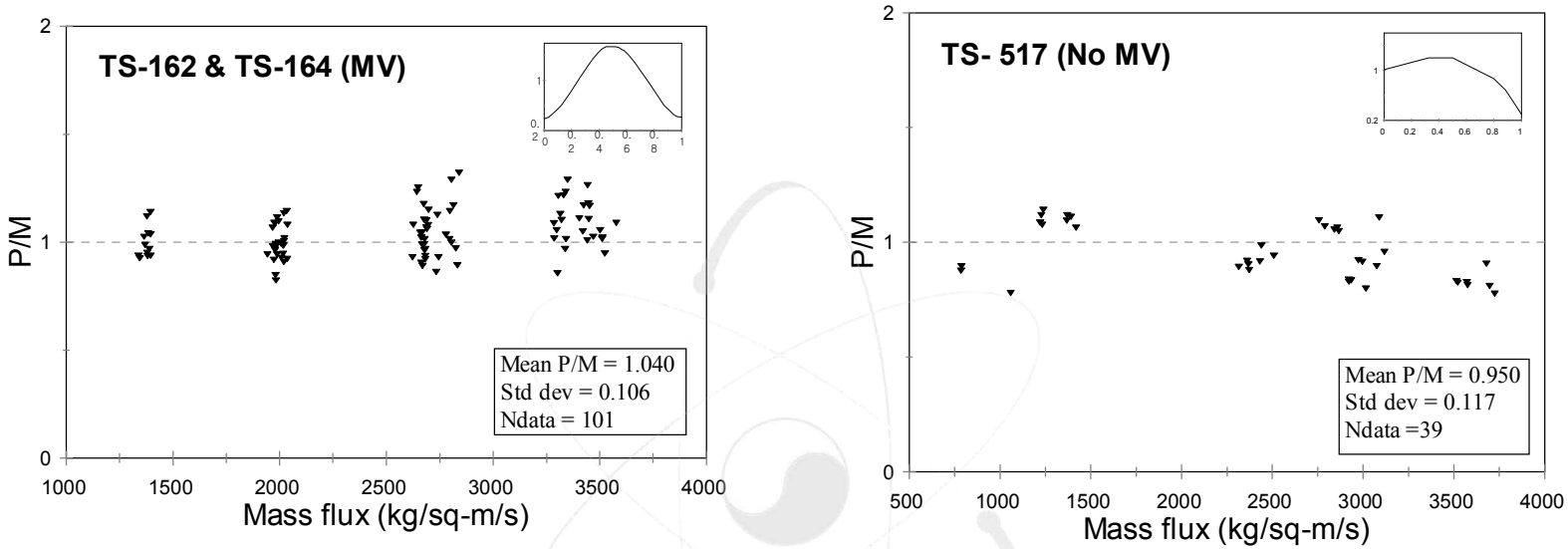


그림 3.16 축방향 비균일 출력 분포 보정 인자 평가

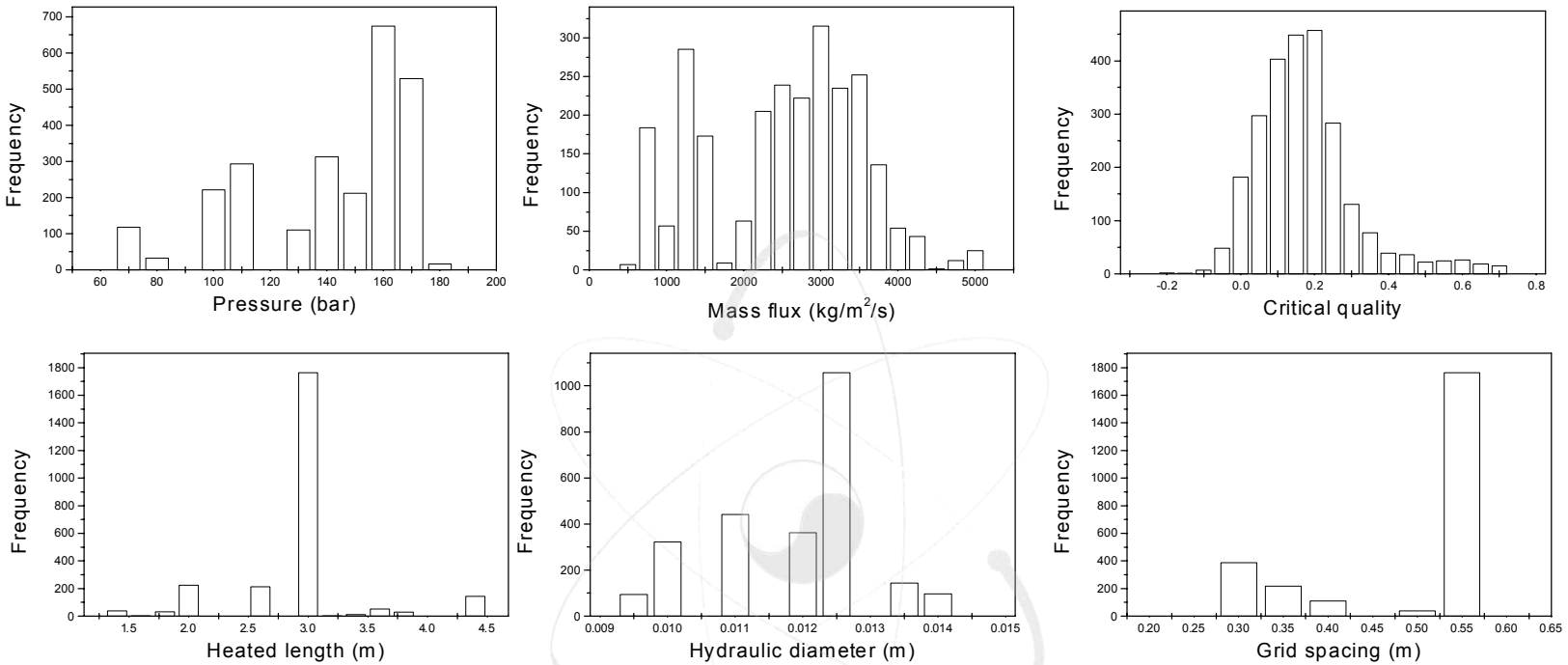


그림 3.17 상관식 변수들에 대한 실험 자료 돗수 분포

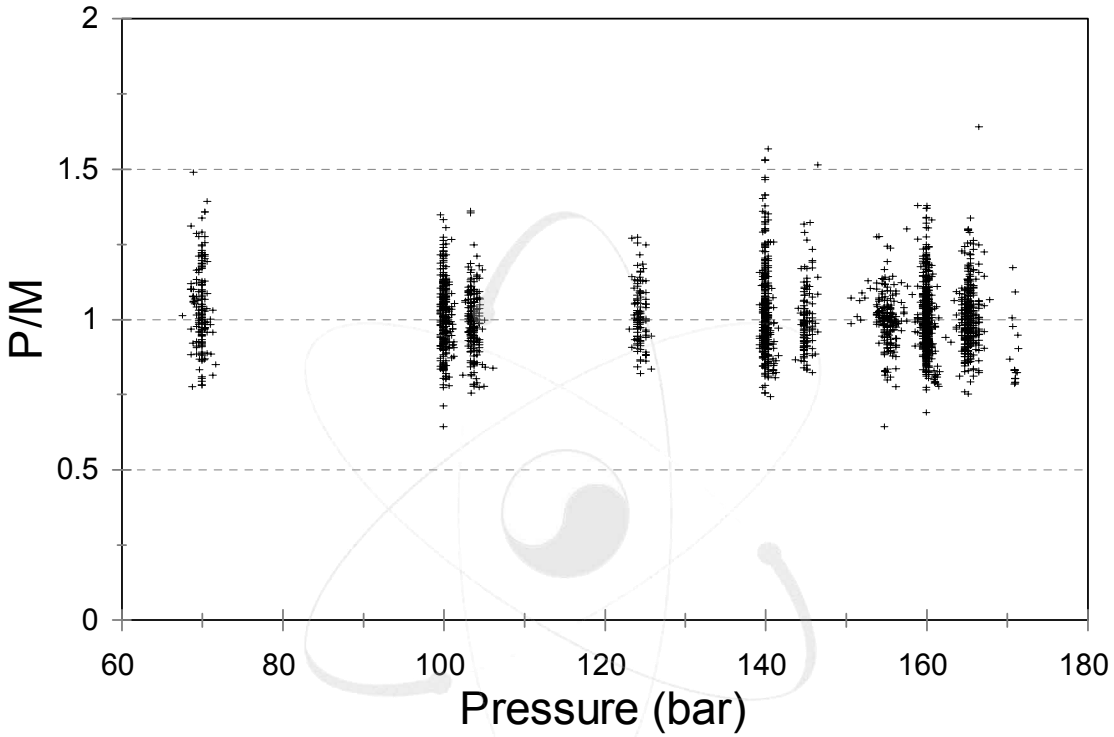


그림 3.18 SR-1 CHF 상관식의 압력에 대한 예측 경향

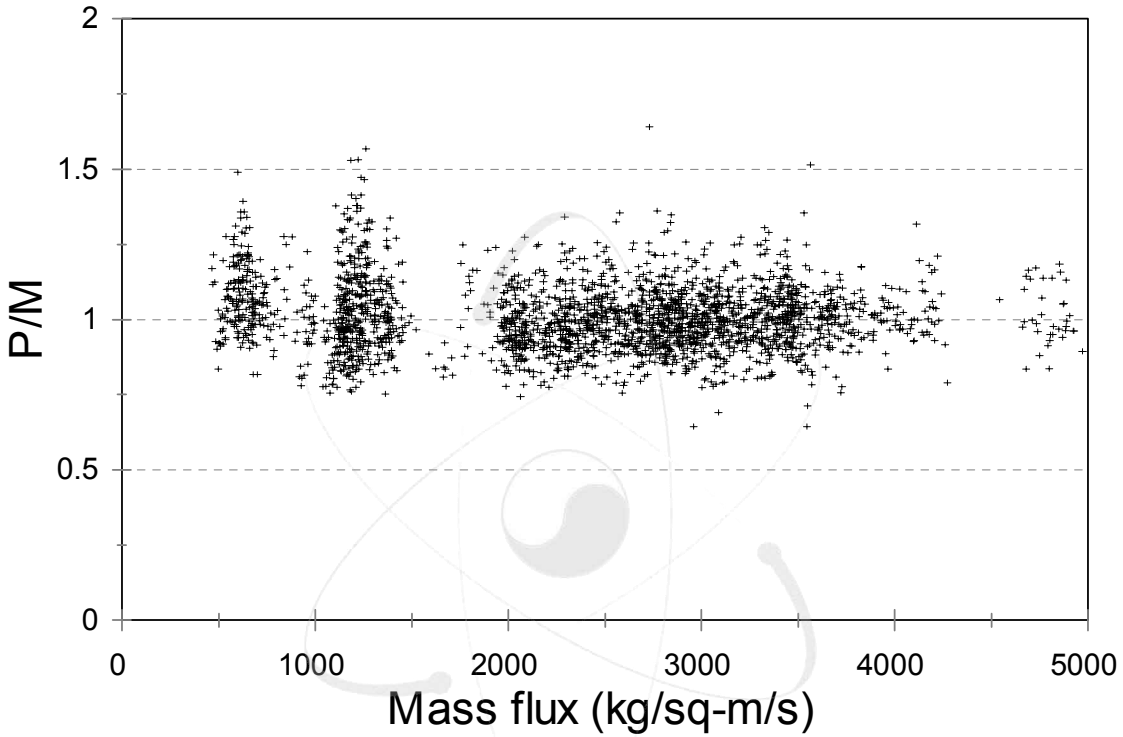


그림 3.19 SR-1 CHF 상관식의 질량 유속에 대한 예측 경향

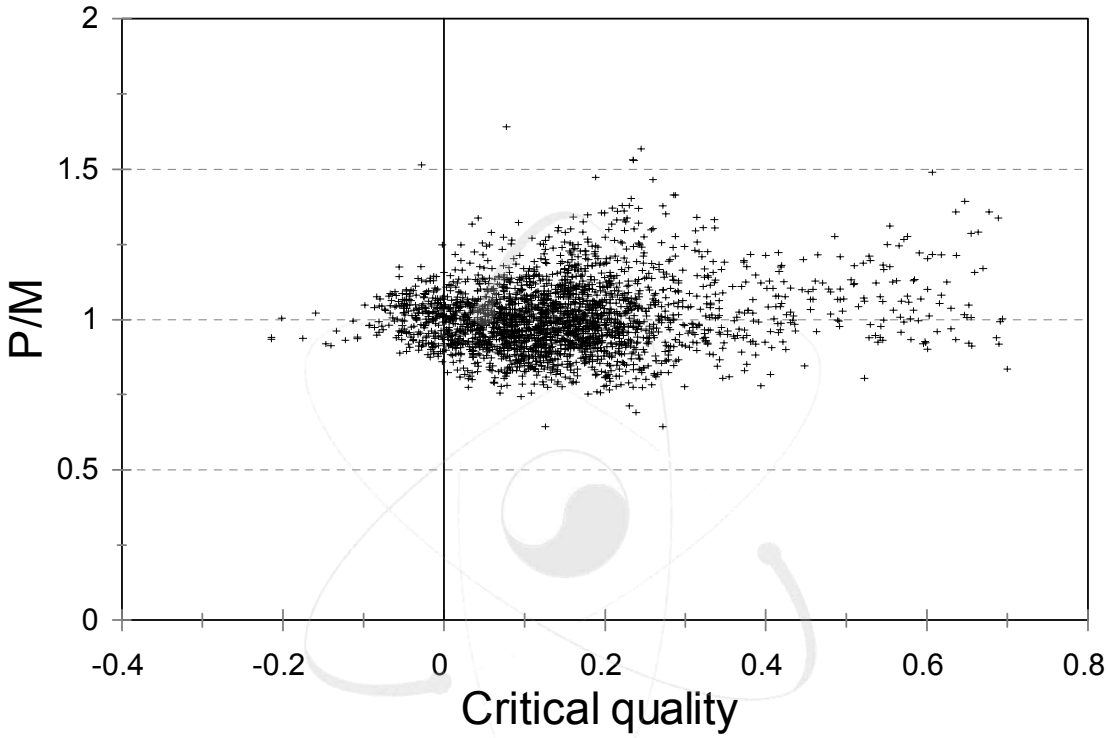


그림 3.20 SR-1 CHF 상관식의 임계 건도에 대한 예측 경향

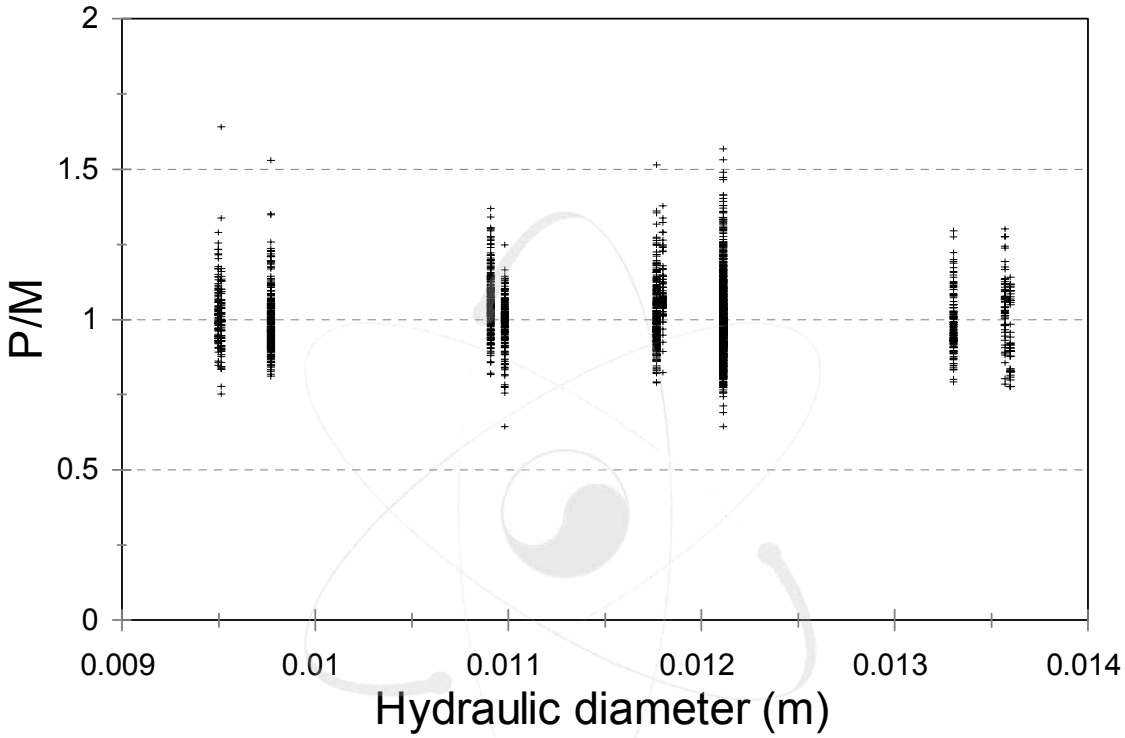


그림 3.21 SR-1 CHF 상관식의 수력 직경에 대한 예측 경향

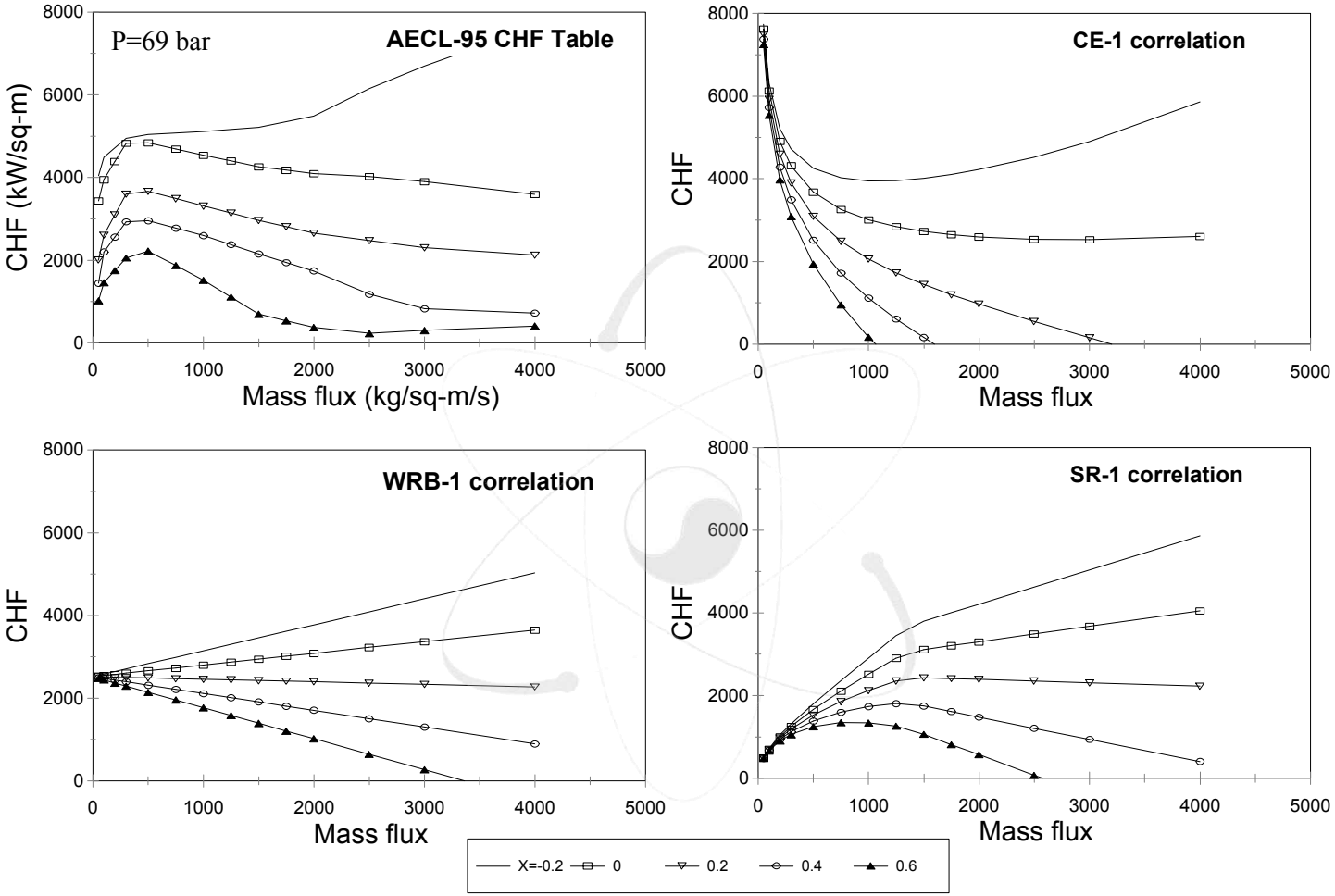


그림 3.22 여러가지 CHF 예측 모형의 질량 유속에 대한 예측 경향 비교

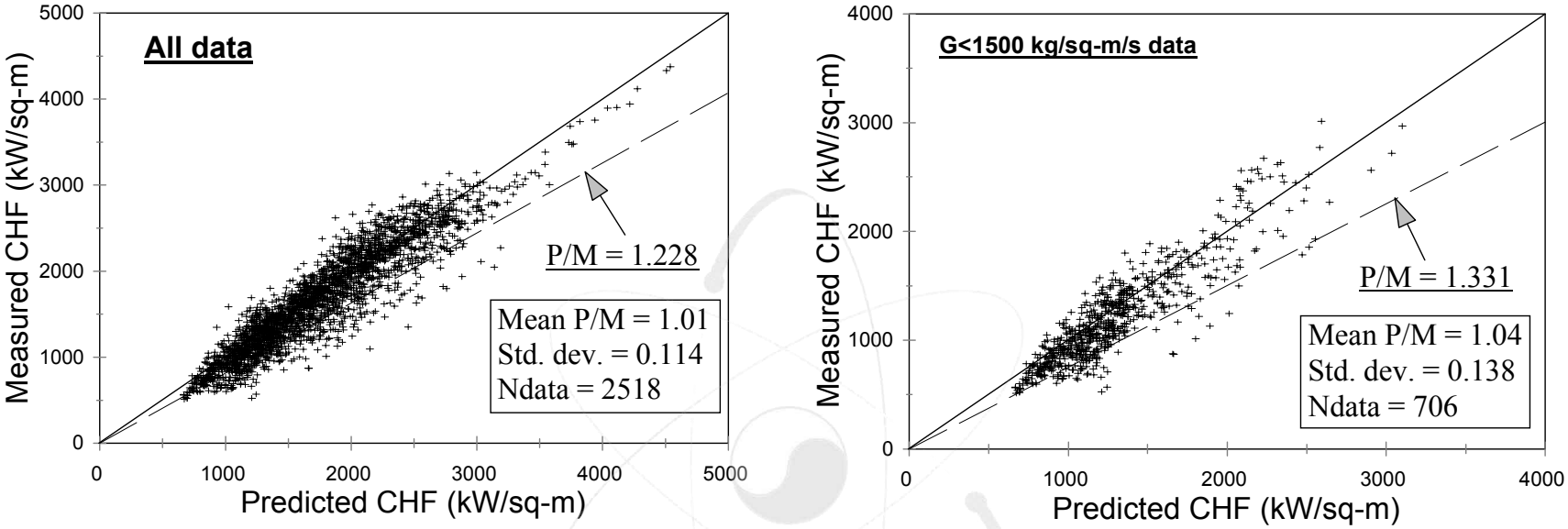


그림 3.23 SR-1 상관식의 한계 DNBR 타당성 평가

IV. MATRA 코드의 SMART 노심에 대한 적용

SMART 기본 설계 노심의 가장 중요한 열수력 설계 변수는 노심 최소 DNBR 이다. SMART 노심에 대한 열수력 설계 요건은 정상상태 및 과도 상태에서 최고온 연료봉의 DNB 발생 확률이 5% 이하가 되도록 요구하고 있으며, 노심의 열적 여유도를 15% 이상 확보하는 것은 중요한 설계 목표의 하나이다. 이러한 설계 요건 만족 여부를 평가하기 위하여 개발된 SMART 노심에 대한 열수력 설계 코드 체계는 그림 4.1 과 같다. 노심 압력 손실 및 집합체 양력 평가를 위한 수력적 해석은 DIWAN 코드로 수행하며, 노심에서의 열수력 조건 및 최소 DNBR 등 열적 해석은 부수로 해석 코드인 MATRA 를 사용하여 수행한다. 그리고 MATRA 코드로부터 DNBR 신속 계산 모듈을 개발하여 사고 해석 및 setpoint 해석에 적용한다.

정상상태 열수력 설계 방법론은 CHF 해석 체계와 부수로 해석 코드 체계를 정비하여 정상상태 노심의 열적 여유도를 평가하는 것으로 요약할 수 있다. CHF 해석 체계는 국부조건 CHF 상관식 및 한계 DNBR 로 구성되며, CHF 해석 체계 개발에 사용된 부수로 해석 코드는 노심 최소 DNBR 해석에 동일하게 적용되어야 한다. SMART 노심에 대하여 앞장에서 기술한 SR-1 상관식 체계를 개발하였다. 부수로 해석 코드 체계는 다양한 노심 조건에 대한 코드 계산 능력 확보 뿐만 아니라, 고온부수로 해석을 위한 lumping 기법이나 설계 출력 분포의 설정 등의 내용을 포함하고 있다. SMART 노심 최소 DNBR 계산을 위하여 부수로 해석 코드 MATRA 를 사용하였다. 전 노심에 대한 부수로 해석은 엄청나게 많은 계산 시간을 소요하므로, lumping 기법을 사용하여 노심 최소 DNBR 해석에 사용할 적절한 모델을 개발하였다. 기존 연구 결과[39]에 따르면 고온 부수로 주변에 2-layer 이상의 부수로를 고려하면 집합체 내의 유동 분포 영향을 모사할 수 있는 것으로 나타났으며, 이에 따라 SMART 노심의 기준 분석 모형은 그림 4.2 와 같은 1/8 노심 60-채널 모델로 선정하였다. 이 모델은 고온 집합체를 모두 부수로 단위로 해석한다. 노심 최소 DNBR 을 계산할 때 출력 분포는 기본적으로 핵설계 계산을 통해 나타나는 분포를 그대로 사용한다. 그러나 보수적인 계산이 필요한 경우나 안전해석 분야에 제공하는 단순화된 DNBR 계산 모델 개발에 사용할 목적으로, 열수력 설계 관점에서 가장 보수적인 설계 출력 분포를 결정하였다. 그림 4.2 에 나타낸 반경방향 출력 분포는 설계 출력 분포를 나타낸 것이며, 설계 출력 분포의

보수성은 참고문헌 [40]에서 평가하였다.

SMART 안전 해석 분야에서 요구하는 DNBR 신속 계산 모형을 제공하기 위하여 MATRA 코드를 사용한 간이 해석 모형을 개발하고 이에 대한 코드 입력 자료를 생산하였다[41]. 안전 해석에 사용될 SMART 노심의 출력 분포와 부수로 해석 모형을 선정하고, MATRA/SR-1 CHF 해석 체제를 사용한 정상 상태 DNBR 분석을 통해 그 보수성을 평가하였다. SMART 안전 해석을 위한 노심 반경 방향 출력 분포로는 고온 집합체가 노심의 중심에 위치하고 고온 부수로를 중심으로 비교적 편평한 출력 분포를 가지는 21-수로 해석 모형을 선정하였으며, 핵 설계 분야에서 제공한 봉 출력 분포들과 비교한 결과 DNB 관점에서 충분히 보수적인 것으로 평가되었다. 그림 4.3 은 SMART 1/8 노심에 대하여 봉 출력 첨두치를 1.0 으로 설정한 21-수로 해석 모형의 반경 방향 출력 분포를 나타낸 것이다. 핵 설계 분야에서 제공한 LCO 조건에서의 핵연료 집합체 축 방향 출력 분포들 중에서 AO 가 +0.40 인 경우가 DNB 관점에서 가장 보수적인 것으로 평가되었으며, 따라서 이 분포를 SMART 안전 해석을 위한 노심 축 방향 출력 분포로 선정하였다. SMART 안전 해석에 사용될 21-수로 해석 모형의 DNB 관점에서의 보수성을 입증하기 위하여, SMART LCO 영역에 있는 운전 조건들의 몇 가지 조합에 대한 DNBR 분석 결과, 모든 조건들에 대하여 21-수로 해석 모형이 기준 상세 모형인 60-수로 해석 모형에 비하여 더 보수적인 것으로 나타났으며, 대략 2% 정도의 보수성을 더 갖는 것으로 평가되었다.

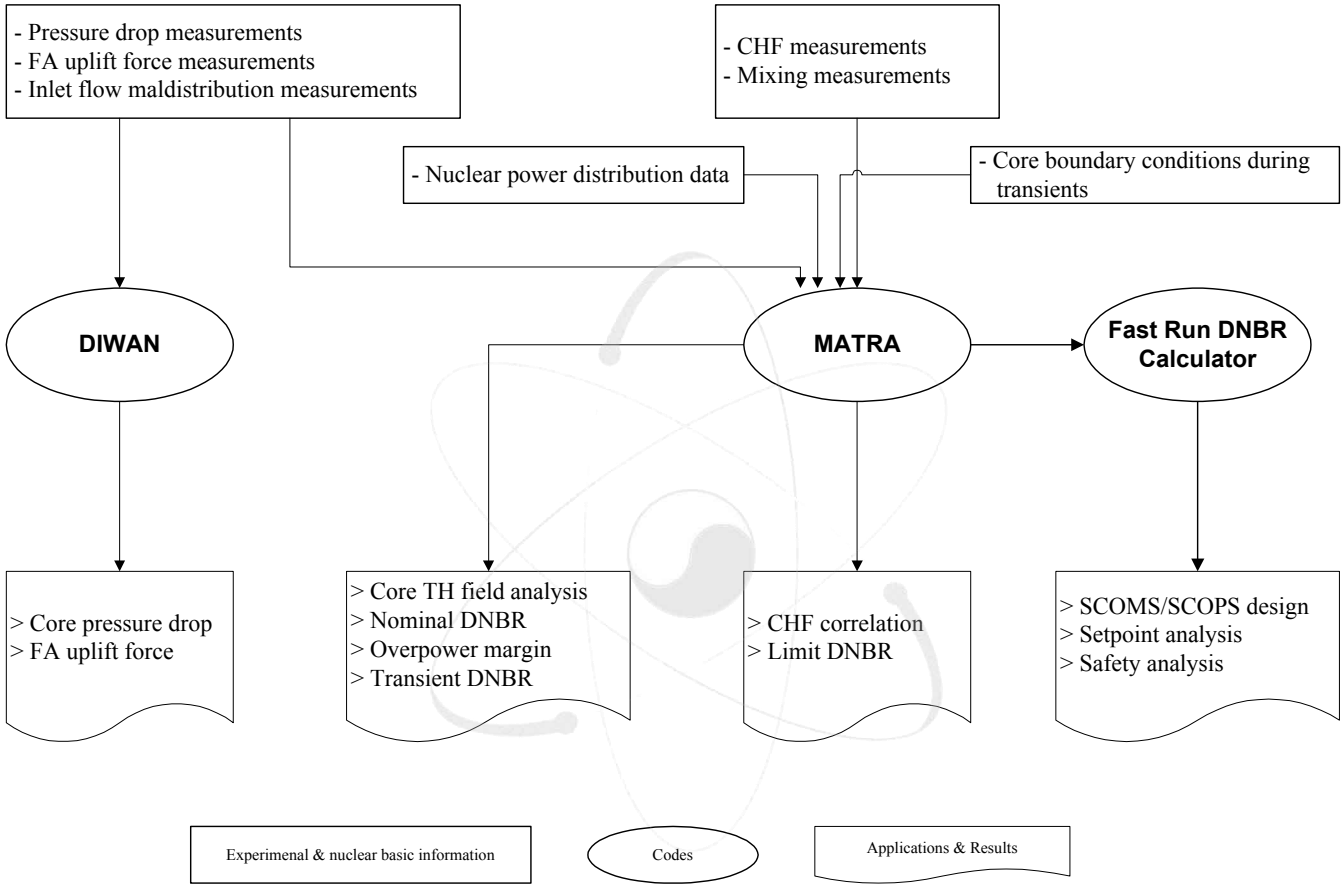


그림 4.1 SMART 노심 열수력 코드 체계

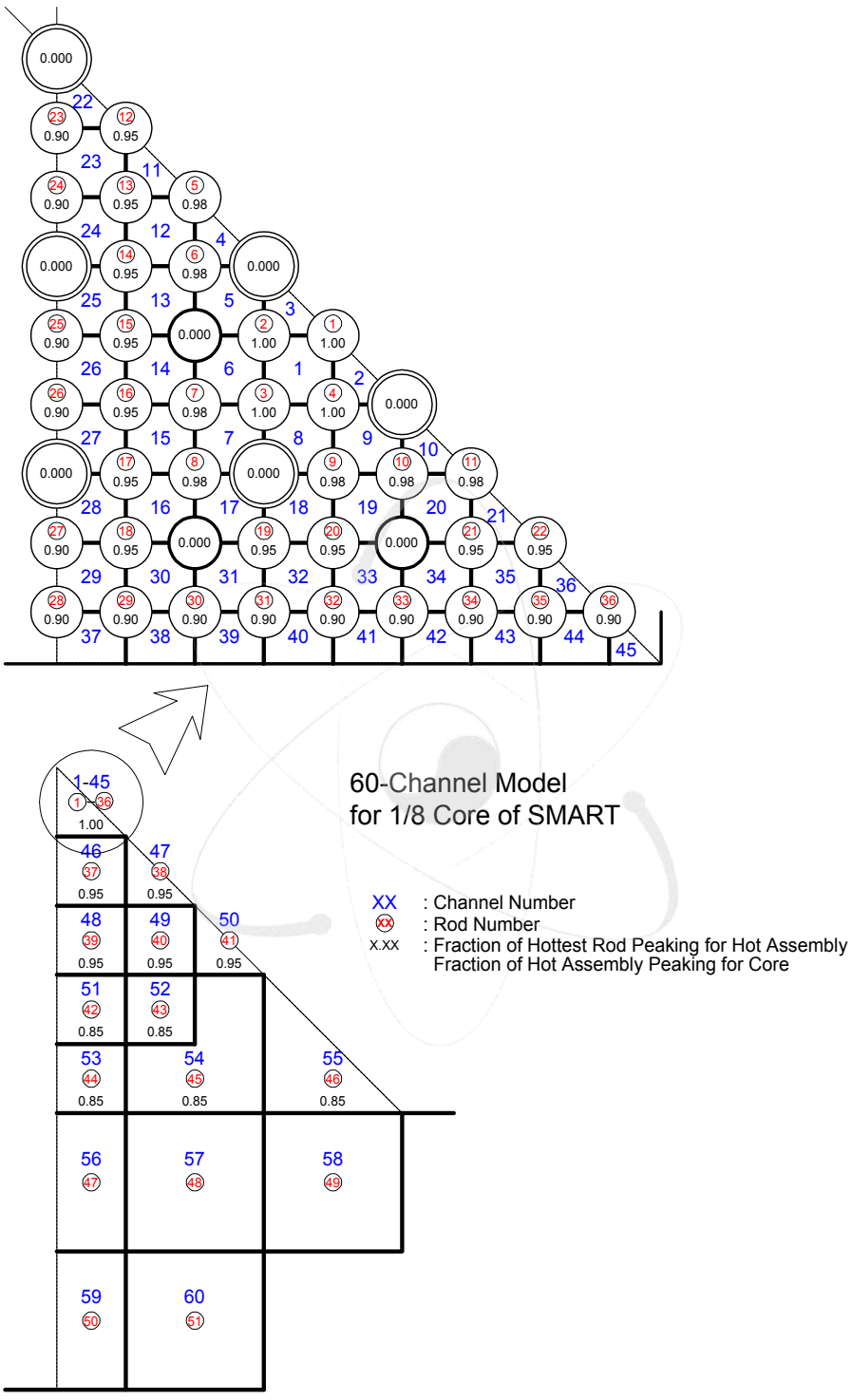


그림 4.2 정상상태 해석을 위한 1/8 노심 60-채널 부수로 해석 모델

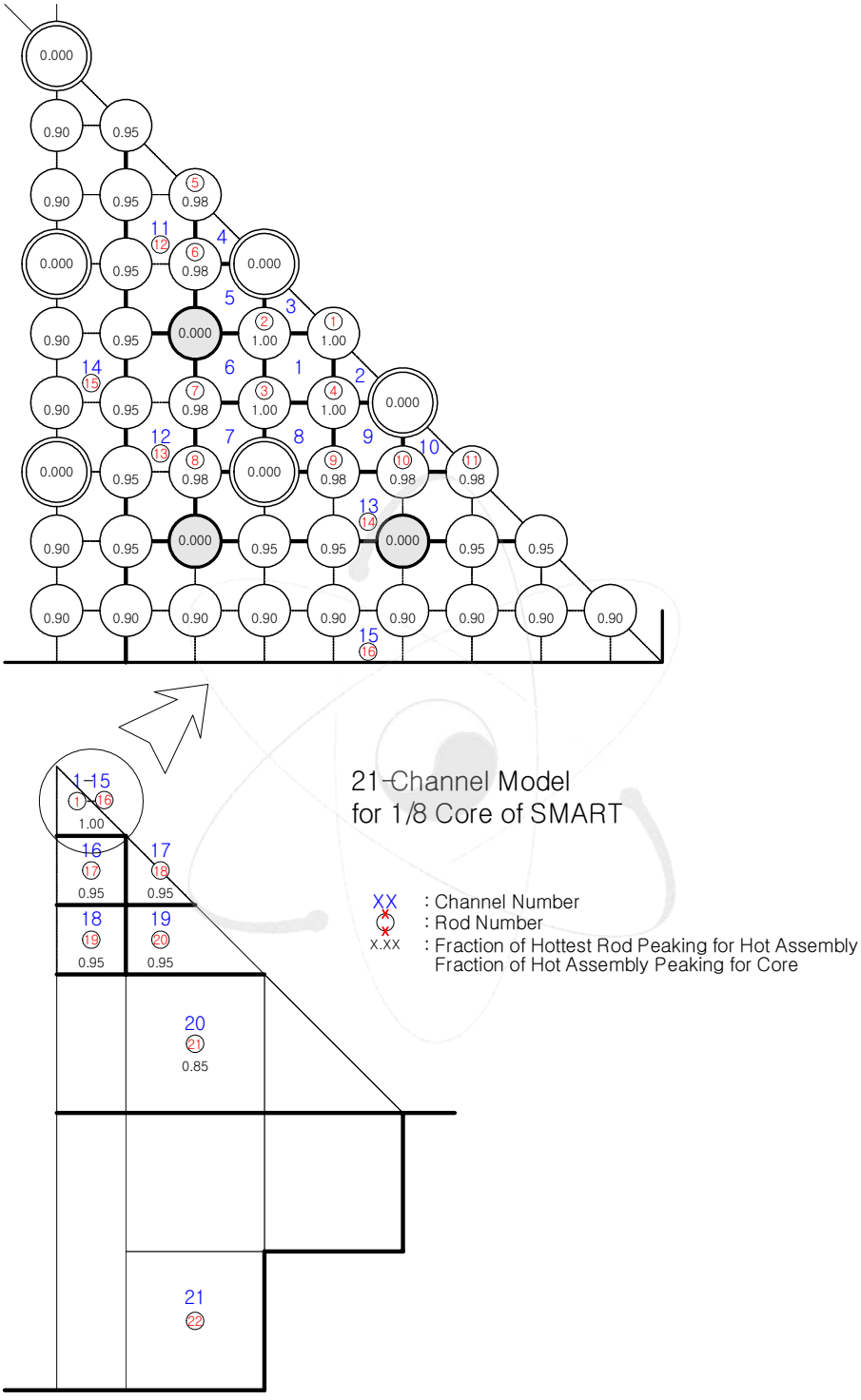


그림 4.3 과도상태 DNBR 해석을 위한 1/8 노심 21-채널 부수로 해석 모델

V. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) SMART 노심 열수력장 해석을 위하여 MATRA 코드를 사용한 부수로 해석 체계를 개발하였다. MATRA 코드는 COBRA-IV-I 코드로부터 개발하였으며, 코드 구조 및 기능 면에서 여러가지 항목이 개선되었고, 저유속 조건에서의 수렴성을 향상시키기 위하여 수치적 해법을 보완하였다. SMART 노심 조건을 고려하여 압력 손실 모형, 기포율 모형, CHF 모형, 그리고 횡방향 전달 모형 등을 보완하였다.

(2) MATRA 코드를 사용하여 개발한 기포 이동을 고려한 난류혼합 모형의 예측 성능을 평가하였다. PWR 및 BWR 조건에서 수행된 3x3 및 4x4 실험집합체 출구의 2 상 유동장 분포 측정 자료를 분석하여 기포 이동 계수를 최적화하였으며, 실험 자료 분석 결과 기존의 COBRA-IV-I 모델이나 2 상 유동 혼합 모형에 비하여 우수한 예측 성능을 보이는 것으로 나타났다.

(3) MATRA 코드를 사용하여 SMART 노심에 적용 가능한 국부조건 CHF 상관식 체계를 개발하고 불확실도를 평가하였다. 그 결과 기존의 가압경수로 설계를 위해 개발된 상관식 체계의 문제점을 보완한 SR-1 상관식 체계를 개발하였으며, SMART 노심 조건을 포함하는 집합체 CHF 실험 자료 분석에 MATRA 코드를 적용할 수 있음을 보였다.

(4) SMART 노심의 정상 상태 및 과도 상태 DNBR 분석을 위하여 MATRA 코드를 사용한 고온 부수로 해석 모형을 개발하였다. 1/8 노심에 대한 60-채널 모델과 이를 단순화 시킨 21-채널 모델을 개발하여 SMART 노심 최소 DNBR 분석 체계를 정비하였다.

VI. 참고문헌

[1] C. L. Wheeler, et. al., COBRA-IV-I: An Interim Version of COBRA for Thermal-Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements and Cores, BNWL-1962 (1976).

[2] 황대현, 단상 및 이상 유동장 부수로 해석 모형에 대한 고찰, KAERI/TR-804/97 (1997).

[3] Y. J. Yoo, K. Y. Nahm, and D. H. Hwang, Conversion of the COBRA-IV-I Code from CDC CYBER to HP 9000/700 Version, KAERI/TR-803/97 (1997).

[4] K. Rehme, Pressure Drop Performance of Rod Bundles in Hexagonal Arrangements, Int. J. .Heat Mass Transfer 15, 2499-2517 (1972).

[5] K. Rehme, Pressure Drop Correlations for Fuel Element Spacers, Nuclear Technology 17, 15-23 (1973).

[6] B. Chexal, et. al., Void Fraction Correlation for Generalized Applications, Progress in Nuclear Energy 27(4), 255-295 (1992).

[7] 황대현, 유연종, 지성균, SMART 노심 조건에 대한 국부조건 CHF 상관식 개발, 2000 춘계학술발표회논문집, 원자력학회 (2000).

[8] D.C. Groeneveld, et. al., The 1995 look-up table for critical heat flux in tubes, Nuclear Engineering Design 163, 1-23 (1996).

[9] D.H. 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).

[10] D. S. Rowe, COBRA IIIC: A Digital Computer Program for Steady State and Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements, BNWL-1695 (1973).

[11] J. W. Jackson and N. E. Todreas, COBRA IIIC/MIT-2: A Digital Computer Program for Steady State and Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements, MIT-EL 81-018 (1981).

[12] R. J. Cena, et. al., Predicting Fuel Rod Temperature Response by Orthogonal Collocation, ANS Transactions 21, 205-206 (1975).

[13] Gonzalez-Santalo, J. M. and P. Griffith, Two-phase flow mixing in rod bundle

subchannels, ASME Paper 72-WA/NE-19 (1972).

[14] Lahey, Jr., R. T. and F. J. Moody, The Thermal Hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor, ANS Monograph, 2nd ed., New York, 168-184 (1993).

[15] Levy, S., Prediction of two-phase pressure drop and density distribution from mixing length theory, J. Heat Transfer 85, 137-152 (1963).

[16] Sadatomi, M., et. al., Flow redistribution due to void drift in two-phase flow in a multiple channel consisting of two subchannels, Nucl. Engrg. Des. 148, 463-474 (1994).

[17] S. G. Beus, Two-Phase Turbulent Mixing Model for Flow in Rod Bundles, WAPD-T-2438 (1971).

[18] Todreas, N. E. and M. S. Kazimi, Nuclear System II: Elements of thermal hydraulic design, Hemisphere, New York, pp.260-273 (1990).

[19] Lahey, Jr., R. T., 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 (1970).

[20] Wolf, L., et. al., Comprehensive assessment of the Ispra BWR and PWR subchannel experiments and code analysis with different two-phase models and solution schemes, Nucl. Engrg. Des. 99, 329-350 (1987).

[21] Wallis, G. B., One-dimensional Two-phase Flow, McGraw-Hill, New York, 345-351 (1969).

[22] McQuillan, K. W. and P. B. Whalley, Flow patterns in vertical two-phase flow, Int. J. Multiphase Flow 11, 161-175 (1985).

[23] Kelly, J. E.,et. al., THERMIT-2: A two-fluid model for light water reactor subchannel transient analysis, MIT-EL 81-014 (1981).

[24] Yoo, Y. J., et. al., Development of a subchannel analysis code MATRA applicable to PWRs and ALWRs, J. Korean Nuclear Society 31, 314-327 (1999).

[25] Macbeth, R.V., The burnout phenomenon in forced-convection boiling, Advances in Chemical Engineering 7, 207-293 (1968).

[26] Katto, Y., A generalized correlation of critical heat flux for the forced convection boiling in vertical uniformly heated round tubes, Int. J. Heat Mass Transfer 21, 1527-1542 (1978).

[27] Bowditch, F.H. & D.J. Mogford, An experimental and analytical study of fluid flow and critical heat flux in PWR fuel elements, AEEW-R2050 (1987).

[28] 황대현, 외, 임계열속 해석 체제 개선 Vol. 1, KAERI/TR-233/91 (1991).

[29] Motley, F.E., et al., Critical heat flux testing of 17x17 fuel assembly geometry with 22-inch grid spacing, WCAP-8536 (1975).

[30] 황대현, 외, 노심 열수력장 및 임계열속 해석 체제 개선, KAERI/RR-980/90 (1990).

[31] Hwang, D.H., et. al., Evaluation of thermal margin in a KOFA-loaded core by a multichannel analysis methodology, J. KNS 27, 518-531 (1995).

[32] Van de Berg, H.R., FITZ(NLINZ) Non-linear least square curve fitting code - IBM PC version, FPE-85-021 (1985).

[33] 황대현, SMART 노심 CHF 해석 체계 개발: I. SR-1 CHF 상관식 개발, SMART-CA- CA120-07 Rev.0, 설계 계산서 (2000).

[34] Draper, N.R. & H. Smith, Applied Regression Analysis, 2nd ed., Chapter 3., John Wiley & Sons Inc. (1981).

[35] ANS, Assessment of the Assumption of Normality (Employing individual observed values), ANSI N15.15 (1974).

[36] Owen D.B., Factors for One-Sided Tolerance Limits and for Variables Sampling Plans, SCR-607 (1963).

[37] Somerville P.N., Tables for Obtaining Non-Parametric Tolerance Limits, Annals of Mathematical Statistics 29, pp.599 (1958).

[38] Tong, L.S., Boiling crisis and critical heat flux, TID-25887 (1972).

[39] 황대현, 외, "다수로 해석 코드에 의한 노심 열수력장 분석 기술 개발", KAERI/TR-461/94 (1994).

[40] 유연종, "SMART 노심 열수력 설계 출력 분포 영향 평가", SMART-CA-CA120-09, 설계계산서 (2000).

[41] 유연종, "SMART 안전 해석을 위한 MATRA 코드 입력 자료 생산", SMART-CA-CA120-11 (2000).

서 지 정 보 양 식			
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/TR-2034/2002			
제목 / 부제	SMART 노심 부수로 해석 코드 체계 개발 및 평가		
주저자 및 부서명	황 대현 (동력로설계기술개발팀)		
연 구 자 및 부 서 명	서경원, 지성균 (동력로설계기술개발팀)		

출 판 지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2001
페 이 지	73 p.	도 표	있음(0), 없음( )	크 기	26 Cm.
참고사항					
비밀여부	공개(0), 대외비( ), __ 급비밀		보고서종류	기술보고서	
연구위탁기관			계약번호		

초록 (15-20줄내외)

SMART 노심 열수력장 해석을 위한 부수로 해석 코드 체계를 개발하고 집합체 실험 자료에 대한 예측 성능 및 적용성을 평가하였다. MATRA 코드는 정상상태 및 과도상태에서 집합체 혹은 노심에서의 열수력장 분포를 계산하는 부수로 해석 코드로서, 기존의 COBRA-IV-I 코드로부터 PC 및 workstation에서 사용할 수 있도록 개발되었다. 코드 구조를 단순화시키고 여러가지 계산 기능을 보완하여 사용자 환경을 개선하였으며, 교차류에 대한 수치해법 모형, 기포율 및 횡방향 전달 모형등의 보완을 통하여 코드 수렴성 및 정확도를 향상시켰다. PWR 및 BWR 조건에 대한 집합체 내의 유동 분포 실험 자료를 평가하여 기포 이동을 고려한 난류혼합 모델을 개발하였으며, 이를 MATRA 코드에 적용하여 2상 유동장 해석 정확도를 개선하였다. MATRA 코드를 집합체 CHF 실험 자료 분석에 적용하여 SMART 노심 조건에 적용 가능한 SR-1 CHF 상관식을 개발하였다. 정상상태 및 과도상태에 대한 SMART 노심 열적 여유도 평가를 위해 MATRA 코드를 사용한 1/8 노심 열수력장 분석 모형을 개발하였다.

주제명키워드 (10단어내외)	SMART, 부수로 해석, MATRA, 난류 혼합, SR-1

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Stamdard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/TR-2034/2002			

Title / Subtitle	Development and Assessment of a Subchannel Analysis Code System for SMART Core Design
Main Author and Department	Dae-Hyun Hwang (Advanced Reactor Development)
Researcher and Department	K.W. Seo, S.Q. Zee (Advanced Reactor Development)

Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI	Publication Date	2001
Page	73 p.	Ill. & Tab.	Yes(0), No ( )	Size	26 cm.
Note					

Classified	Open(0), Restricted( ), ___ Class Document	Report Type	Technical Report
Sponsoring Org.		Contract No.	

Abstract (15-20 Lines)

A subchannel code system is developed for the thermal-hydraulic analysis of SMART core, and the applicability and accuracy of the code is assessed for various experimental data with rod bundles. MATRA is a subchannel analysis code calculating the enthalpy and flow distribution in fuel assemblies and reactor cores for both steady-state and transient conditions. MATRA has been developed to be run on an IBM PC or HP WS based on the existing CDC CYBER mainframe version of COBRA-IV-I. MATRA has been provided with an improved structure and code functions to give more convenient user environment. Improvement of various models enhances the convergence and accuracy of the code: those include the numerical solution scheme for the crossflow, the void fraction model, and the lateral transport model, and so on. A turbulent mixing model considering void drift phenomenon is devised by employing the two-phase mixing test data under PWR and BWR conditions. MATRA/SR-1 CHF correlation system is developed from local conditions of rod bundle CHF data calculated by MATRA. The optimized 1/8 core lumping models are developed for the analysis of the thermal margin of SMART core at steady-state and transient conditions.

Subject Keywords: SMART, Subchannel analysis, MATRA, turbulent mixing, SR-1