

MARS 코드 품질개선 및 연계해석체계 개발
Quality Improvement of MARS Code
and Establishment of Code Coupling

국내 열수력 실험 데이터 평가 및 MARS 코드 개선
Assessment of Thermal-hydraulic Experiment Database and
Improvement of MARS Code

연구기관
서울대학교

한 국 원 자 력 연 구 원

제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

본 보고서를 “MARS 코드 품질개선 및 연계해석체계 개발”과제 (세부과제: 국내 열수력 실험 데이터 평가 및 MARS 코드 개선)의 최종보고서로 제출합니다.

2010. 3.

KAERI

연구기관명:	서울대학교
과제책임자:	박 군 철
참 여 자:	김 무 환
	전 지 한
	김 성 진
	이 거 형
	방 영 석
	전 성 수
	최 치 응

요 약 문

I. 제 목

국내 열수력 실험 데이터 평가 및 MARS 코드 개선

II. 연구개발의 목적

- 국내 열수력 실험 데이터뱅크 구축
 - 국내 대학에서 수행된 열수력 실험 데이터 수집 및 데이터뱅크 구축
 - 데이터뱅크 내 데이터의 MARS 코드 검증용 실험으로의 적합성 평가
- 데이터뱅크를 사용한 MARS 코드 평가 및 개선
 - 구축된 데이터뱅크를 사용하여 MARS 코드 해석능력 평가 및 문제점 도출
 - 도출된 문제점 개선

III. 연구개발의 내용

- 국내 대학 열수력 실험 자료 수집 및 데이터뱅크 구축
 - 국내 대학에서 수행된 실험 자료 수집
 - 수집된 자료 중 MARS 코드 평가 등 이후 활용 가능성을 고려 자료정리
 - 중복되는 내용의 실험 등에 대한 자료정리
 - 데이터뱅크 개념 정립
 - 데이터뱅크 구축
- MARS 코드 평가를 위한 자료 선정
 - MARS 코드 검증용 자료 선정을 위한 평가지침서 개발
 - 구축된 데이터뱅크의 평가지침서를 통한 자료에 대한 자체 평가
 - 실험자 면담을 통한 평가지침서 확정
 - MARS 코드 평가를 위한 실험 확정
- 선정된 실험을 활용한 MARS 코드 평가 및 개선
 - 선정된 IET, SET 실험을 사용한 MARS 코드 해석 능력 평가

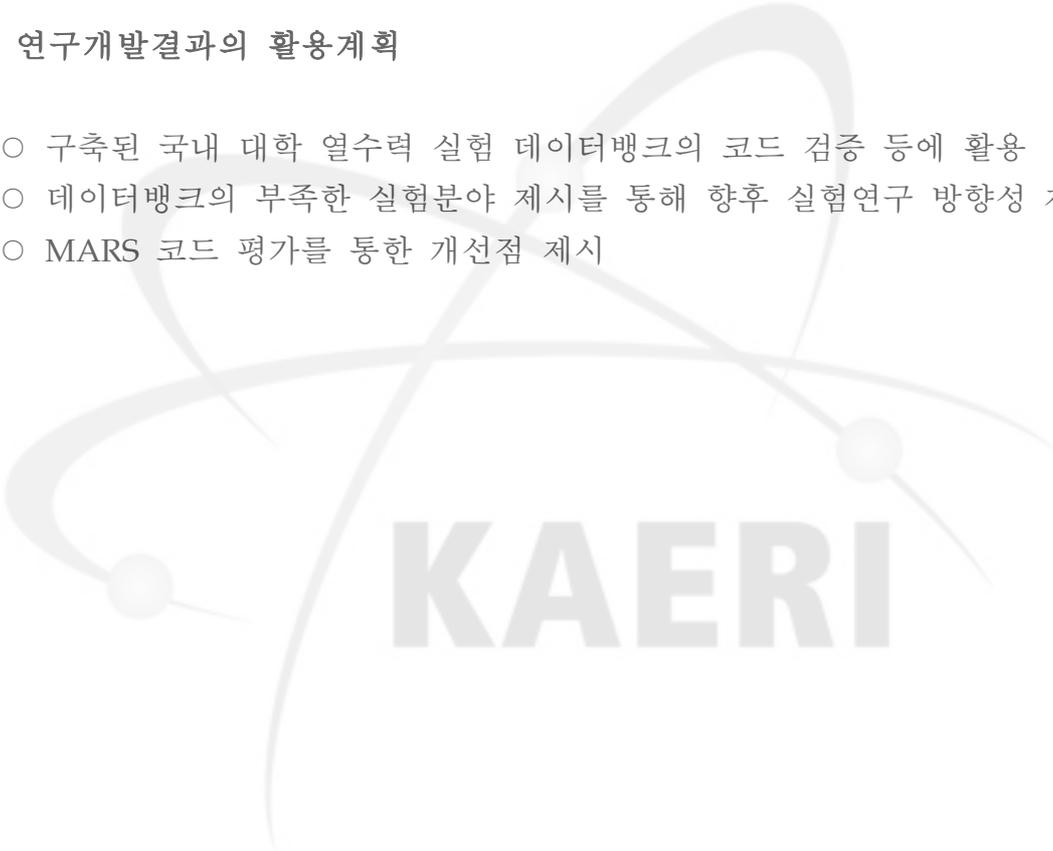
- 평가를 통한 MARS 코드 내 문제점 도출
- MARS 코드 내 모델 개선을 통한 MARS 코드 해석 능력 제고

IV. 연구개발결과

- MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서 개발
- 국내 대학 열수력 실험 데이터뱅크 구축
- 데이터뱅크를 사용한 MARS 코드 평가 및 개선

V. 연구개발결과의 활용계획

- 구축된 국내 대학 열수력 실험 데이터뱅크의 코드 검증 등에 활용
- 데이터뱅크의 부족한 실험분야 제시를 통해 향후 실험연구 방향성 제시
- MARS 코드 평가를 통한 개선점 제시



KAERI

Summary

I. Title of the Project

Assessment of Thermal-hydraulic Experiment Database and Improvement of MARS Code

II. Purpose of the Project

- Development of Domestic Thermal-Hydraulic Experiment Databank
 - Collection of thermal-hydraulic experiments performed at universities in Korea and development of Databank(DB)
 - Evaluation of the appropriateness of experiments in DB for assessment of the capability of MARS code
- Assessment and Improvement of the MARS code
 - Assessment of the capability of MARS code through comparison of the DB data with MARS predictions and identification of the problems
 - Resolvment of the problems and improvement of MARS code

III. Contents of the Project

- Collection of National Thermal-Hydraulic Experimental Data and Development of Databank(DB)
 - Collection of thermal-hydraulic experimental data performed at universities in Korea
 - Assessment of the collected data to evaluate the capability of MARS code
 - Establishment of conceptual design and development of the DB
- Selection of the Data for the Evaluation of Capability of MARS code
 - Development of the assessment guidelines for selection of the data for evaluation of MARS code
 - Evaluation of the data in DB by using guidelines
 - Interview conduction with experiment performers and confirmation of

the assessment

- Determination of the experiments to be used for evaluation of MARS code
- Evaluation of the Capability of MARS code and Improvement of the MARS code
 - Evaluation of the analyzing capability of MARS code with selected experiments
 - Identification of the problems in MARS code
 - Improvement of the MARS code by modifying models in MARS code

IV. Results of the Project

- Development of the Assessment Guidelines for Selection of the Data for Evaluation of MARS code
- Development of Domestic Thermal-Hydraulic Experiment Databank
- Assessment and Improvement of the MARS code

V. Application Plan of the Research Results

- Utilization of the Thermal-Hydraulic Experiment DB for Development and Verification of the Safety Analysis Code
- Identification of the Experimental Research to Make up for Lacks in Data
- Suggestion of Improvements of MARS Code

Contents

Summary	iv
Contents	vi
List of Tables	xii
List of Figures	xiii
Chapter 1 Introduction	1
Chapter 2 Development of the Assessment Guidelines for Selection of the Data for Evaluation of MARS Code	2
Section 1 Background of Development of the Assessment Guidelines	2
Section 2 Development of the Assessment Guidelines for Selection of the Data for Evaluation of MARS Code	3
1. Literature Review	3
A. Domestic Research	3
B. Overseas Research	4
2. Development of the Assessment Guidelines	5
A. Determination of the Contents	5
B. Development of the User Manual	5
C. Improvement of the Assessment Guidelines & User Manual	6
Chapter 3 Development of Domestic Thermal-Hydraulic Experiment Databank	10
Section 1 Collection of Thermal-Hydraulic Experimental Data performed at Universities in Korea	10
Section 2 Evaluation of the experimental data by using Guidelines	12
1. Evaluation of the Suitability for MARS Code	12
A. First Evaluation by the Project-Man	12
B. Second Evaluation by the Experiment-Performer	13
C. Final Evaluation	14

2. Evaluation Results	15
Section 3 Development of the Databank	17
1. Composition of the Databank	17
2. Detail of the Databank	17
Chapter 4 Assessment and Improvement of the MARS code	26
Section 1 Assessment of the Condensation Heat Transfer	26
1. Outline	26
2. Condensation Heat Transfer Model of MARS Code	27
3. Condensation Experiment	30
4. MARS Code Modeling and Results	34
5. Improvements of the Capability of MARS Code	38
Section 2 Assessment of the CCFL in the Nearly Horizontal Pipe	44
1. Outline	44
2. CCFL Experiment	45
3. MARS Code Modeling and Results	47
A. MARS Code Modeling	47
B. Determination of the Onset of CCFL	47
C. Results	48
4. Improvements of the Capability of MARS Code	55
Section 3 Assessment of Loss of RHR in the Mid-Loop Operation	59
1. Outline	59
2. Description of Facility and Experiment	60
A. PKL Integrated Test Facility	60
B. Overview of PKL III G1.1 Test	60
C. Experiment Procedures	61
3. MARS Code Modeling for PKL Facility	64
A. MARS Code Modeling	64
B. Measurement List	65
C. Initial and Boundary Conditions	67
4. Results	69

A. Comparison of RPV Upper Plenum and S/G Pressure	69
B. Comparison of Core Exit Temperature	71
Section 4 Assessment of the DVI Line Break LOCA	73
1. Outline	73
2. SNUF Facility and Experimental Conditions	74
A. SNUF Facility	74
B. Experimental Conditions	74
3. MARS Code Modeling and Results	83
A. MARS Code Modeling	83
B. Results	83
Chapter 5 Conclusions	94
Chapter 6 References	95
APPENDIX	97
A.1 Assessment Guidelines for Selection of the Data for Evaluation of MARS Code	97
A.2 User Manual of the Assessment Guidelines	100
B.1 Questionnaire for the Domestic T/H Experimental Data	115
B.2 1 st , 2 nd Experiment Evaluation Sheet (Sample)	118
B.3 Questionnaire for the MARS Code Data (Sample)	128
B.4 Final Experiment Evaluation Sheet (Sample)	129

목 차

요 약 문	ii
Summary	iv
Contents	vi
목 차	ix
표 목 차	xii
그 립 목 차	xiii
제 1 장 서 론	1
제 2 장 MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서 개발	2
제 1 절 MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서 개발 배경	2
제 2 절 MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서 수립	3
1. 국내외 열수력 실험 평가 참고 자료 조사 및 검토	3
가. 국내 사례	3
나. 국외 사례	4
2. MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서 개발	5
가. MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서 항목 설정	5
나. MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서 사용 설명서 작성	5
다. MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서와 사용 설명서의 개선	6
제 3 장 국내 대학 열수력 실험 데이터뱅크 구축	10
제 1 절 국내 대학 열수력 실험 데이터 수집	10
제 2 절 MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서를 통한 평가	12
1. 실험의 MARS 코드 검증에 대한 적합성 평가	12
가. 과제 담당자의 1차 평가	12
나. 실험 담당자의 2차 평가	13
다. 최종 평가	14
2. 실험 평가 결과	15

제 3 절 데이터뱅크 구축	17
1. 데이터뱅크 구성	17
2. 데이터뱅크 세부 항목	17
제 4 장 MARS 코드 평가 및 개선	26
제 1 절 비응축성기체 존재시 응축 열전달 현상 평가	26
1. 개요	26
2. MARS 코드의 수직관내에서의 응축열전달 모델	27
3. 수직응축관 실험	30
4. MARS 코드 모델링 및 분석결과	34
5. MARS 코드 응축 열전달 모델 개선	38
제 2 절 수평관 내 역류유동제한 현상 평가	44
1. 개요	44
2. CCFL 실험	45
3. MARS 코드 모델링 및 분석 결과	47
가. MARS 코드 모델링	47
나. CCFL 발생 시점 결정	47
다. MARS 코드 해석 결과	48
4. 개선 사항	55
제 3 절 충수운전중 RHR상실사고 평가	59
1. 개요	59
2. PKL 종합 실험 장치 및 실험 절차	60
가. PKL 종합 실험 장치	60
나. PKL III G1.1 실험 개요와 초기 및 경계 조건	60
다. 실험 순서	61
3. MARS 코드를 이용한 실험 해석	64
가. MARS 코드 모델링	64
나. 계측 변수 설정	65
다. 실험 모의 순서 및 경계 조건 설정	67
4. MARS 코드 해석 결과	69
가. 노심 출구 온도 및 계통 압력 비교	69
나. 붕소 농도 비교	71

제 4 절 DVI관 파단 사고 평가	73
1. 개요	73
2. SNUF 실험 장치 및 실험 조건	74
가. 실험장치	74
나. 실험조건	74
3. MARS 코드 해석 결과	83
가. MARS 코드 모델링	83
나. 해석결과	83
제 5 장 결 론	94
제 6 장 참 고 문 헌	95
부 록	97
A.1 MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서	97
A.2 MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서 사용 설명서	100
B.1 국내 대학 열수력 실험 데이터 설문지 (샘플)	115
B.2 1, 2차 실험 평가서 (샘플)	118
B.3 2차 평가 설문지 (샘플)	128
B.4 최종 평가서 (샘플)	129

표 목 차

표 3.1.1 서울대학교 열수력 연구실 (10개)	10
표 3.1.2 서울대학교 원자로 설계 공학실 (1개)	10
표 3.1.3 포항공대 이상 유동 연구실 (8개)	11
표 3.1.4 KAIST 원자력 및 에너지 시스템 설계 안전 연구실 (4개)	11
표 3.1.5 KAIST 원자력 / 수소 시스템 연구실 (5개)	11
표 3.1.6 한동대학교 전자 열유체 실험실 (2개)	11
표 3.1.7 경희대학교 원자력 열유체 실험실 (2개)	11
표 3.3.1 데이터뱅크의 구성 및 형식	18
표 4.1.1 Test Section 주요 설계치	31
표 4.1.2 Test Section 주요 설계치	39
표 4.2.1 수평관 CCFL 상관식	55
표 4.3.1 Condition phase에서 정상상태의 PKL 실험 장치의 주요 변수	62
표 4.3.2 Test phase 시작 후 1차측 냉각재 재고량의 변화	62
표 4.3.3 MARS 코드 변수와 실험 계측기 대응표	65
표 4.3.4 Conditioning phase 계산 결과	67
표 4.4.1 APR1400과 SNUF의 설계 변수	77
표 4.4.2 Base case 실험 초기 조건	78
표 4.4.3 민감도 실험 Case	79
표 4.4.4 수위고갈 시점 비교	86

그 립 목 차

그림 2.2.1 실험 평가 지침서 항목 설정 방법론	7
그림 2.2.2 코드 평가를 위한 실험 설명 예시 (한국원자력안전기술원)	7
그림 2.2.3 Facility and Test Qualification Matrix (CSNI)	8
그림 2.2.4 평가서 작성 방식 설명서 (CSNI)	9
그림 3.2.1 1차 실험평가서	12
그림 3.2.2 2차 실험평가서	13
그림 3.2.3 설문지	13
그림 3.2.4 최종 평가서	14
그림 3.2.5 수집된 국내 열수력 실험 분류	16
그림 3.3.1 국내 열수력 데이터뱅크 구조	19
그림 3.3.2 데이터뱅크 초기 화면 (1)	20
그림 3.3.3 데이터뱅크 초기 화면 (2)	20
그림 3.3.4 국내 열수력 데이터뱅크 구동 화면 (1)	21
그림 3.3.5 국내 열수력 데이터뱅크 구동 화면 (2)	21
그림 3.3.6 국내 열수력 데이터뱅크 구동 화면 (3)	22
그림 3.3.7 국내 열수력 데이터뱅크 구동 화면 (4)	22
그림 3.3.8 국내 열수력 데이터뱅크 구동 화면 (5)	23
그림 3.3.9 국내 열수력 데이터뱅크 구동 화면 (6)	23
그림 3.3.10 국내 열수력 데이터뱅크 구동 화면 (7)	24
그림 3.3.11 국내 열수력 데이터뱅크 구동 화면 (8)	24
그림 3.3.12 국내 열수력 데이터뱅크 구동 화면 (9)	25
그림 3.3.13 국내 열수력 데이터뱅크 구동 화면 (10)	25
그림 4.1.1 SMART PRHRS 개략도	32
그림 4.1.2 실험장비 개략도	33
그림 4.1.3 냉각재킷 및 응축관 단면도	33
그림 4.1.4 응축관실험 MARS 코드 노드화	35
그림 4.1.5 주입유량에 따른 열전달계수 MARS 코드 계산결과	36
그림 4.1.6 비응축성기체 분율에 따른 열전달계수 MARS 코드 계산결과	36
그림 4.1.7 M42 Case 분석결과	37

그림 4.1.8 M82 Case 분석결과	37
그림 4.1.9 수직관내의 응축열전달계수 계산	40
그림 4.1.10 M42 Case 계산결과 비교	41
그림 4.1.11 M82 Case 계산결과 비교	41
그림 4.1.12 Goodykoontz 계산결과 - Run 1 Case	42
그림 4.1.13 Siddique 계산결과 - Run 20 Case	42
그림 4.1.14 Kuhn 계산결과 - Run 2.1-8 Case	43
그림 4.1.15 Park 계산결과 - E13B Case	43
그림 4.2.1 CCFL 실험 장치	46
그림 4.2.2 실험 장치 개념도	49
그림 4.2.3 CCFL 실험 MARS 코드 노드화	49
그림 4.2.4 CCFL 발생 시 유량 변화	50
그림 4.2.5 CCFL 발생시 j_f 와 j_g 의 변화	50
그림 4.2.6 CCFL 발생 시 압력 변화	51
그림 4.2.7 CCFL 발생 시 물의 체적 비율 변화	51
그림 4.2.8 CCFL 발생 시 각 탱크 내 수위 변화	52
그림 4.2.9 CCFL 결과 비교 ($D=70\text{mm}$, $\theta=0.23^\circ$)	53
그림 4.2.10 CCFL 결과 비교 ($D=60\text{mm}$, $\theta=0.23^\circ$)	53
그림 4.2.11 CCFL 결과 비교 ($D=70\text{mm}$, $\theta=0.92^\circ$)	54
그림 4.2.12 MARS 코드 내 CCFL Subroutine의 구성	56
그림 4.2.13 CCFL 결과 비교 ($D=70\text{mm}$, $\theta=0.23^\circ$)	57
그림 4.2.14 CCFL 결과 비교 ($D=60\text{mm}$, $\theta=0.23^\circ$)	57
그림 4.2.15 CCFL 결과 비교 ($D=70\text{mm}$, $\theta=0.92^\circ$)	58
그림 4.3.1 PKL III 실험장치 전체 배치도	63
그림 4.3.2 PKL III G1.1 실험 모의를 위한 MARS 코드 노드화	64
그림 4.3.3 PKL 붕소 농도 및 RPV 수위 계측기	66
그림 4.3.4 PKL 압력 및 온도 계측기	66
그림 4.3.5 Test phase의 냉각재 재고량 비교	68
그림 4.3.6 원자로 상부 및 2차측 증기발생기 압력 비교	70
그림 4.3.7 노심 출구 온도 비교	70
그림 4.3.8 증기발생기 출구부의 붕소 농도 변화 비교	72
그림 4.3.9 펌프 입구부의 붕소 농도 변화 비교	72

그림 4.4.1 SNUF 조감도	80
그림 4.4.2 SNUF 원자로 용기 평면도	80
그림 4.4.3 SNUF 원자로 용기 단면도	81
그림 4.4.4 SNUF 노심 전열봉 구성	81
그림 4.4.5 강수부 가시창 사진	82
그림 4.4.6 SNUF 계측 시스템	82
그림 4.4.7 SNUF에 대한 MARS 코드 노드화	87
그림 4.4.8 SNUF 실험 장치의 파단부	88
그림 4.4.9 MARS 코드 해석에서 모사한 파단부	88
그림 4.4.10 기본 CASE의 일차측 압력	89
그림 4.4.11 기본 CASE의 강수부 수위	89
그림 4.4.12 기본 CASE의 노심 수위	90
그림 4.4.13 SNUF 분석의 기포율	90
그림 4.4.14 B1 CASE의 일차계통 압력	91
그림 4.4.15 B1 CASE의 노심 수위	91
그림 4.4.16 B1 CASE의 강수부 수위	92
그림 4.4.17 S2 CASE의 일차계통 압력	92
그림 4.4.18 S2 CASE의 강수부 수위	93
그림 4.4.19 S2 CASE의 노심 수위	93

KAERI

제 1 장 서 론

원자력 발전소의 안전 해석을 위해 한국원자력연구원에서는 다년간 MARS 코드를 개발해 왔다. MARS 코드는 1998년에 MARS 1.3이 발표된 이후 지속적인 개선이 이루어졌으며, 현재 MARS-KS 2.0β가 발표되었다. 이는 규제검증용 코드로써 국내 가동 중인 가압경수로형 원전의 안전해석뿐만 아니라 개발 중인 SMART에도 적용할 수 있도록 연구가 진행되고 있다. 계산결과의 신뢰도를 향상시키고 활용도를 높이기 위해서는 더 많은 검증과 끊임없는 개선이 이루어져야 한다. 이를 위해 국내 실험을 통한 코드 평가, 국내 실험을 통한 상관식 개발은 반드시 수행되어야 하는 과정이다.

국내 대학들에서는 이미 원자력 발전소에서 발생할 수 있는 수많은 열수력 현상들을 규명하고자 많은 실험들을 수행해왔다. 하지만 그 데이터들이 산재되어 있고 체계적으로 정리되지 못해서 상관식을 개발하고 코드를 검증함에 효과적으로 사용되지 못하고 있는 것이 지금의 현실이다. 이를 위해서는 현재까지 원자력 관련 열수력 실험들의 종류를 파악하고 데이터를 수집함과 동시에 이 실험들이 올바른 절차를 거쳐서 수행되었는가에 대한 평가도 동시에 수행되어야 한다.

이러한 문제를 해결하고자 본 과제에서는 국내 원자력 관련 열수력 실험 데이터들을 수집하고, 이를 체계적으로 데이터뱅크화하고자 한다. 그리고 이들 데이터들을 평가할 수 있는 적절한 평가방법론을 개발하고, 이 후 이들 데이터를 사용하여 MARS 코드를 검증하여 취약점이 발견되었을 시 이를 개선하고자 한다. 목표 달성을 위하여 세부적으로는 다음과 같은 항목들이 본 과제를 통하여 수행되었다.

- 1) MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서 개발
 - 국내외 열수력 실험평가 참고자료 조사 및 검토
 - MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서 및 사용 설명서 개발
- 2) 국내 열수력 실험 데이터뱅크 구축 (총 32개 실험)
 - 국내 대학의 열수력 실험 데이터 수집
 - MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서를 통한 실험 평가
 - 평가된 실험에 대한 데이터뱅크 구축
- 3) MARS 코드 평가 및 개선 (총 4개 실험)
 - SET 실험 1: 비응축성기체 존재시 응축 열전달 현상 평가
 - SET 실험 2: 수평관 내 역류유동제한 현상 평가
 - IET 실험 1: PKL 실험 장치를 이용한 충수운전중 RHR상실사고 평가
 - IET 실험 2: SNUF 실험 장치를 이용한 DVI 파단 사고 평가

제 2 장 MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서 개발

제 1 절 MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서 개발 배경

본 연구는 국내의 열수력 실험 데이터를 활용하여 MARS 코드를 평가하고 개선하는데 목적을 두고 있다. 해석 코드의 평가 및 개선은 궁극적으로는 안전해석에 반영되어 안전성 평가에 직접적인 영향을 미치기 때문에, MARS 코드 해석을 위해 수집된 열수력 실험 데이터의 품질 보증을 필수적인 요소이다. 그간 국내 각 대학과 기관에서 많은 열수력 실험이 수행되었으나, 실험의 과정 및 결과에 대한 체계적인 품질 보증이 수행된 연구는 많지 않다. 품질 보증이 수행된 연구라도 각 기관의 상황에 맞게 개별적으로 수행된 것이기 때문에 일관성과 보편성 측면에서 부족한 부분이 있다. 그러므로 수집된 열수력 실험을 MARS 코드로 해석하기 이전에 수집된 실험의 품질을 보편적이고 일관성 있는 기준으로 재평가할 필요가 있다. 또한 모든 국내 열수력 실험이 MARS 코드 검증에 적합한 것은 아니므로 이에 대한 객관적이고 구체적인 선별 작업도 필요하다.

국내 열수력 실험 데이터의 품질을 평가하기 위한 지침을 마련하기 위해, 기존에 국내외 대학 및 기관에서 활용하고 있던 품질 보증 절차 문서를 조사하였다. 국내의 경우 소프트웨어에 대한 품질 보증 절차 문서는 다수 존재하지만, 실험 연구에 대한 규정된 품질 보증 절차 문서는 거의 존재하지 않았다. 일부 기관의 연구팀 내부에서 자체적으로 수행하고 있는 개별적인 품질 보증 절차서는 존재하지만, 모든 열수력 실험에 적용할 수 있는 보편적인 절차서는 아니다. 또한 대부분의 기관 및 대학에서 제시하는 품질 보증 절차서는 실험 전반에 대한 일반적인 요건만을 추상적으로 제시하고 있어, 이를 이용하여 개별 실험을 구체적으로 평가하기에는 어려움이 있다. 외국의 경우에는 개별 열수력 실험에 대한 품질 보증 절차 등은 있으나, 이 절차서 역시 보편적으로 적용하기에는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 실험 수행의 정확성, 신뢰성, 타당성 및 MARS 코드 검증에 대한 적합성 등을 모두 고려하면서, 일관된 원칙하에 보편적으로 적용할 수 있는 실험 평가 지침서를 개발하였다.

제 2 절 MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서 수립

본 연구에서는 그림 2.2.1에서와 같은 단계적 접근을 통해 열수력 실험에 대한 평가 지침서를 개발하는 전략을 수립하였다. 우선 국내 각 기관에서 활용하고 있는 실험 설명 방법론 및 열수력 실증실험장치의 설계와 절차, 데이터 측정 방법론 등을 면밀히 조사하여 열수력 실험에 대한 필수 확인 항목을 도출한 후, 보편적인 규제지침 초안을 개발하였다. 실험평가지침 초안을 외국의 각 대학과 각 기관들의 품질 보증에 대한 경험을 조사·검토하여 개발된 초안의 적용성을 평가하였다. 그리고 예시 실험을 통하여 평가지침서를 직접 작성해 봄으로써 평가지침서의 수정 및 보완작업을 수행하였다. 수정 및 보완된 실험 평가 지침서의 적용성에 대해서는 재평가 작업을 반복적으로 수행함으로써, 실험 평가 지침서의 완성도를 높였다. 또한 실험 평가 지침서에 포함될 항목의 도출뿐만 아니라 각 항목의 내용에 대한 구체적인 설명을 통해 실험 데이터의 정확한 평가가 수행될 수 있도록 하였다. 이와 같은 작업을 통해 완성된 실험 평가 지침서는 국내외 전문가 의견을 수렴하여 그 완성도를 높였다. 그리고 실험에 대한 평가와 더불어 MARS 코드 평가에 적절한 실험인지를 결정하기 위해 실험 담당자의 견해를 기술하는 항목을 만들어 최종적으로 MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서 (이하 실험 평가 지침서)를 확립하였다.

1. 국내외 열수력 실험 평가 참고 자료 조사 및 검토

가. 국내 사례

MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서의 평가 항목을 도출하기 위해 국내 참고 자료로서 한국원자력안전기술원의 실험 설명 방법론과 한국원자력연구원의 열수력 실증실험의 품질 보증 항목을 활용하였다[한국원자력안전기술원, 2004; 한국원자력연구원, 2006].

한국원자력안전기술원의 실험 설명 방법론은 코드의 예측 능력을 검증하기 위해 사용되는 열수력 실험 결과를 평가하는 일반적인 사항을 제시하고 있다. 또한 코드평가표의 적절한 작성 여부 및 각각의 현상에 대한 항목의 나열이 합당한지에 대한 평가 방법을 제시하고 있다. 그리고 코드 평가에 사용되는 실험에 대해서 그림 2.2.2와 같이 그 실험을 선정한 이유, 실험의 목적, 실험장치 설명, 실험결과 및 실험오차, 실험에 대한 논의 등이 포함되어 있는 평가표를 제시하였다. 본 과제에서 개발한 실험 평가 지침서의 상위 분류는 한국원자력안전기술원의 실험 설명 방법론을 기초로 하여 작성되었다.

한국원자력연구원의 열수력 실증실험의 품질 보증 항목에서는 실험 평가의 범위 및 품질 보증 항목을 구체적으로 제시하고 있다. 또한 각종 절차서, 기록지 등의 품질 보증 문서화 방안의 필요성 및 정밀도(Accuracy), 민감도(Sensitivity), 반복도(Repeatability) 등의 계기 검교정 평가 방법론을 제시하고 있다. 또한 실험 시나리오, 조건 결정, 실험 절차, 측정자료 획득 방법 등의 실험 자체의 품질에 대한 평가도 수행되어야 함을 제시하고 있다. 그리고 실험의 재현성 및 실험 결과의 물리적 해석 등의 실험 결과 검증 방법론의 필

요성을 제시하였다. 한국원자력연구원의 열수력 실증실험의 품질 보증 항목은 본 과제에서 개발된 실험 평가 지침서의 중위 분류 항목을 설정하는데 참고자료로 사용되었다.

나. 국외 사례

실험 평가 지침서의 항목 도출 및 적용성을 평가하기 위해 국외 각 대학 및 기관의 품질 보증 관련 문서를 참고하였다. 참고한 품질 보증 관련 문서에는 열수력 실험에 대한 것뿐만 아니라 코드평가 관련 지침서 등도 포함되어 있다.

미국 Purdue 대학의 품질 보증 문서는 ASME NQA-1을 기준으로 개발되었다[Purdue, 1996]. PUMA 실험을 진행하면서, 신뢰도 있는 실험 수행을 위한 인력, 설비, 설계 문서 등의 관리를 하기 위한 방법을 제시하고 있다. Purdue 대학의 품질 보증 문서에서 제시하고 있는 사항들 중에 특이점은 다음과 같다. 주요 변수의 경우 측정치의 타당성을 서로 다른 3개의 방법으로 확인하고 있다. 또한 서로 영향을 줄 수 있는 사항에 대해서는 분리하여 품질 보증 절차를 진행함으로써 신뢰도가 높은 평가 결과를 도출하고 있다. 예를 들면 IET 실험에 대한 검증자와 SET 실험에 대한 검증자를 분리하고, 코드 작업에 대한 검증과 실험에 대한 검증을 분리하여 품질 보증 절차를 수행하였다. 그리고 실험 설비의 검증을 위해 검증된 코드를 통해 예비계산을 선행하였는지 여부를 조사하여, 실험의 품질을 높일 수 있도록 하고 있다. Purdue 대학의 품질 보증 문서는 그 밖에도 실험의 품질을 평가할 수 있는 다양한 방법론과 문서를 제시하고 있다. 이를 통해 본 과제에서 개발하는 실험 평가 지침서의 타당성 및 적용성을 가늠해 볼 수 있었다.

LANL (Los Alamos National Laboratory)에서는 TRAC 코드 평가를 위한 지침서를 개발하였다[Brent, 2000]. 이 지침서는 실험 자체를 평가하는 내용을 담고 있지는 않지만, 코드 평가를 위해 어떠한 실험을 선택하여야 하는지에 대한 방법론을 제시하고 있다. 또한 코드 개선 과정에 대해 일괄적인 설명과 코드 평가와 관련된 PIRT의 작성 방법을 제시하고 있기 때문에, 본 연구의 향후 진행 방향을 설정하는데 도움을 주었다.

DOE (Department of Energy)의 품질 보증 문서는 10 CFR 50 Appendix B에 근거하여 품질 보증에 대한 개별 항목을 제시하고 있다[DOE, 2006]. 이 문서에서는 원자력 전반에 걸친 평가 항목을 제시하고 있는데, 열수력 실험 평가에 활용될 수 있는 항목도 포함되어 있다. 특히 실험 수행 내용에 대한 평가를 위한 질문지를 제공하고 있어, 본 과제의 실험평가항목의 도출뿐만 아니라, 평가항목을 작성하기 위한 설명서 작성에 활용되었다.

IAEA (International Atomic Energy Agency)의 코드평가 문서는 코드의 유지, 검증, 개발 등에 대한 과정을 명시하는 자료이다[IAEA, 2006]. 본 문서에는 실험을 이용한 코드 평가에 대한 일부 내용과 실험 자체를 평가하는 방법에 대해서 간략하게 소개하고 있다. 그리고 불확실도를 평가하는 방법 등 향후 실험 데이터를 코드에 적용할 경우 유용하게 활용될 수 있는 다양한 정보를 제시하고 있다.

CSNI (Committee on the Safety of Nuclear Installations)의 품질 보증 문서는 본 과제에서 개발하려고 하는 실험 평가 지침서 및 사용설명서와 상당히 유사한 내용을 제시하

고 있다[NEA, 2001]. 코드 평가를 위한 실험 데이터의 수집 방법 및 그 결과에 대해 설명하고 있고, 그림 2.2.3과 같은 실험 장치 및 실험 내용을 기록하고 평가할 수 있는 지침서를 제시하고 있다. 또한 지침서를 작성하기 위한 각 항목에 대한 설명을 그림 2.2.4와 같이 제시하고 있다. 본 과제의 목적과 CSNI에서 평가하려고 하는 내용과는 상이한 부분이 있어, CSNI의 품질 보증 문서의 내용을 그대로 채용하지는 않았지만, 지침서 및 설명서를 작성하는 형식과 일부 내용을 활용하였다.

2. MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서 개발

가. MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서 항목 설정

국내의 품질 보증 관련 문서를 통해 조사한 내용과 전문가의 자문을 바탕으로 MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서의 항목을 부록 A.1과 같이 설정하였다. '실험 제목', '실험 개요', '실험 설명', '실험 결과', '실험 평가', '참고 문헌', '수행자', '견해 및 의견'을 기본으로 실험 평가 지침서의 상위 분류를 설정하였다. 그리고 상위 분류, 중위 분류, 하위 분류, 세부 분류로 구성된 4단계의 항목 분류를 이용하여 65개의 실험 평가 세부 기준을 설정하였다. 또한 실험 조건 및 주요 변수와 같이 실험의 내용에 따라 항목 및 중요도가 다른 세부 기준에 대해서는 실험자 및 작성자가 직접 항목 및 중요도를 기입할 수 있도록 함으로써, 실험 평가 지침서의 보편적인 적용성을 높였다. 그리고 세부 항목을 평가하는 기준으로는 Fully Satisfied (+), Partially Satisfied (0), Not Satisfied (-), Not Applicable (/), Number (#) 등의 내용으로 평가하도록 하였다.

'실험 제목'과 '실험 개요'의 평가 항목을 통해 평가 대상이 되는 실험이 연구 목적에 합당하게 설계 및 계획되었는지를 평가한다. 그리고 '실험 설명'의 평가 항목은 실험 조건 및 변수의 설정 과정에서부터 실험의 진행 과정이 합당하게 이루어졌는지를 평가한다. '실험 결과'의 평가 항목은 평가 대상이 되는 실험을 통해 얻어진 데이터의 신뢰성 및 코드 개선을 위한 적합성을 평가하는데 활용된다. 그리고 '실험 평가'의 항목을 통해 평가 대상이 되는 실험 연구의 중요성과 활용도를 평가한다. 또한 코드 해석을 위해 참고할 수 있는 자료의 적절성과 다양성을 '참고 문헌' 항목을 통해 평가한다. 그리고 '수행자' 항목에서는 실험 수행자와 평가자 모두 평가 대상이 되는 실험에 대해 평가해 봄으로써, 평가 결과의 공정성 및 정확성을 확인한다. 마지막으로 실험 평가 지침서를 작성한 최종 평가자가 실험에 대한 '견해 및 의견'을 작성함으로써 실험의 정확성, 신뢰성, 타당성 등에 대한 총평뿐만 아니라 실험 평가 지침서를 통해 평가하기 힘든 중요한 항목과 향후 MARS 코드 해석 시 고려해야 하는 사항들을 기록할 수 있도록 하였다.

나. MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서 사용 설명서 작성

MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서의 세부 기준 항목은 한 문장의 질문으로만 구성

되어 있기 때문에, 평가자가 각 항목의 의미를 정확하게 파악하여 실험을 평가하는데 어려움이 있다. 실험 평가 지침서의 올바른 활용을 위하여 CSNI의 실험 평가 방식 설명서인 그림 2.2.4의 예시와 같이 설명서를 작성하였다. 본 연구에서 작성된 실험 평가 지침서 사용설명서는 부록 A.2 에 제시되어 있다. 평가되는 실험의 정확한 활용을 위해서는 평가자가 설명서를 정확하게 숙지하고 작업하는 것이 필요하다.

사용설명서에서는 지침서의 상위, 중위, 하위 분류에 포함되어 있는 세부 항목이 어떠한 목적으로 평가되는지를 기술하고, 세부 항목의 전반적인 내용과 각 항목의 평가 방식에 대해서 설명하고 있다. 그리고 각 세부 기준에서 제시하는 평가 내용에 대해 구체적으로 설명하여, 실험 평가자가 지침서의 의도에 맞게 평가할 수 있도록 하였다. 그리고 설명서에서는 IET와 SET 실험, 정상상태와 과도상태 실험 등의 분류에 따라서 세부 기준 항목에서 제시하는 질문의 의도가 조금씩 달라질 수 있으므로, 이에 대한 오해를 줄이기 위해 다양한 경우에 대한 예시를 제시하고 있다. 또한 Fully Satisfied (+), Partially Satisfied (0), Not Satisfied (-) 등의 채점이 평가자에 의해 일관성 있게 수행될 수 있도록 각 세부 항목 별로 이에 대한 설명을 하고 있다.

다. MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서와 사용 설명서의 개선

본 연구에서 개발된 MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서와 사용 설명서는 다양한 검증 작업을 통해 수차례의 수정 및 보완을 통해 완성도를 높였다.

첫 번째로는 예시 실험을 선택하여 실험 평가 지침서를 작성하는 작업을 수행하였다. 국내에서 수행된 열수력 실험의 다양성을 고려하여, IET와 SET 실험 및 정상상태와 과도상태 실험을 각각 선택하여 실험 평가 지침서를 작성하였다. 실험 평가 지침서를 직접 작성하는 과정을 통해, 중복되거나 중요도가 낮은 평가 항목을 제거하고, 필요한 신규 항목을 추가하였다. 그리고 사용설명서의 내용이 명확하지 않아, 세부 항목의 평가가 난해한 부분들을 수정하는 작업을 수행하였다.

두 번째로는 본 실험 평가 지침서와 사용설명서의 작성을 위해 참고하였던 국내외 조사 자료를 이용하여 적용성을 평가하였다. 국내외 조사 자료에는 실험 평가 지침서를 개발하기 위한 내용뿐만 아니라 기존에 수행된 다양한 실험을 평가한 자료를 포함하고 있다. 이를 이용하여 본 연구에서 개발된 MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서가 다양한 실험에 대해서 보편적으로 적용할 수 있는지를 평가하고, 조사 자료에서 평가되어진 결과와의 비교 분석을 통해 완성도를 높였다.

세 번째로는 개발된 실험 평가 지침서와 사용설명서에 대해서 국내외 전문가의 의견을 설문 작업을 통하여 수렴하여 열수력 실험을 평가하는데 각 항목의 분류 및 기준이 적합한지 여부를 검토하였다.

실험 평가 지침서와 사용설명서의 완성도를 높이기 위한 위의 세가지 개선 작업은 수차례의 반복을 통해 상호보완적인 역할을 하면서 수행되었다. 위 과정을 통해 최종적인 MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서와 사용설명서를 확정하였다.



그림 2.2.1 실험 평가 지침서 항목 설정 방법론

<p>1. 실험제목</p>
<p>2. 실험의 개요</p> <ul style="list-style-type: none"> • 실험의 목적 • 실험 시설에 대한 설명 (실험 시설 설계 시 사용된 가정 과 방법, 측정 원칙, 계측 설비, 시설 특이성 등)
<p>3. 실험</p> <ul style="list-style-type: none"> • 실험 조건 • 주요 변수의 선정 • 실험 과정 • 주요 측정 변수가 가질 수 있는 실험 오차
<p>4. 실험 결과 논의</p> <p style="padding-left: 20px;">주요 변수에 대한 실험 결과들과 이에 대한 물리적 설명</p>
<p>참 고 문 헌</p>

그림 2.2.2 코드 평가를 위한 실험 설명 예시 (한국원자력안전기술원)

MAIN FIELDS OF QUALIFICATION	TERMS OF THE MATRIX				Qualification of	
					Facility	Test
REPRESENTATIVITY (Facility and Test)	Quality of Facility	* F	x 1	Design (including scaling) Construction Operation Use in International Framework Personnel Qualification		
	Scaling	T	4	Test Design Including Consistency with Plant Phenomenon Parameter Range Counterpart Test or Similar Test in ITF Availability of SETF Test		
	Boundary Conditions •	T	5	Pump Characteristics Heat Losses Pressure Distribution Valve Operations Fuel Pin Simulation		
QUALITY OF DATA (Data Base)	Description	T/F	2	Facility Instrumentation Data Acquisition System Boundary Condition		
	Data processing	T	2	Time Trends Archiving		
	Documentation	T	3	Evaluation of Data Quantification of Errors		
CHALLENGE (Bridge to Code)	Modelling	T/F	6	Representation of Physical Phenomena Numerics Nodalisation Other (e.g. sensitivity to user effects)		

+ Fully Satisfied - Not Satisfied * T: Relates to Test x Numbers refer to criteria from mandate
o Partially Satisfied / Not Applicable F: Relates to Facility • Examples only

그림 2.2.3 Facility and Test Qualification Matrix (CSNI)

4.1.2.4 Quality of Data: The Database

Description of Facility:

All of the components of the facility must be described. Detailed drawings of all the components including dimensions should be provided; preferably such drawings are made to scale. Materials utilized for each component should be identified. Information on how each component was manufactured or assembled, should be included. Quantities of obvious interest to code validation such as volumes, flow areas, pressure drops, pump performance, etc. should be determined and provided. Information and drawings describing in detail how and where instrumentation is mounted, must be provided. The procedure followed in preparing for and carrying out the test must be described in detail. The sequence and chronology of test operations and control should be included for both the desired and actually achieved actions.

Description of Instrumentation:

A list of all instrumentation should be provided that includes the assigned sensor designation, type of physical variable measured, type of sensor, range or limit of measurement, general location in the facility, and precise location coordinates. The measurement errors must be quantified for each sensor. For each sensor, information should be provided identifying the manufacturer, design or configuration and working principle of the instrument if it is not a common type of sensor, as well as a detailed description and drawings of how it is installed or mounted in the facility.

Description of Data Acquisition System:

The description should include data acquisition hardware and the sampling rate for the various sets of channels. A list of all data channels should be provided identifying the assigned data channel as well as the input sensor/signal or calculated quantity derived from two or more sensor measurements. Errors associated with the data acquisition system should be quantified.

Description of Boundary Conditions:

All of the desired boundary conditions and the approaches followed in attempting to achieve or approximate them must be described. For some types of boundary conditions such as heat sources, this includes detailed information about the design/configuration of the relevant portion of the facility (e.g., fuel rod simulators) that might bear upon the conditions actually attained during the test. The degree to which the desired boundary conditions were achieved or not achieved should be discussed.

Data Processing: Time Trends:

The procedure used to convert raw data into the presented test results must be described. Information on how sensor output voltages were converted into physical variables must be provided. Any data filtering, smoothing, fitting, etc. carried out must be discussed in detail. The procedures employed should not introduce significant uncertainties into the results or cause the results to be misleading.

Data Processing: Archiving:

Raw data should be permanently maintained such a way that they remain available for a possible future reprocessing. Object of consideration is whether the archival medium or format is likely to become obsolete the way that data will cease to be accessible in a practical sense.

그림 2.2.4 평가서 작성 방식 설명서 (CSNI)

제 3 장 국내 대학 열수력 실험 데이터뱅크 구축

제 1 절 국내 대학 열수력 실험 데이터 수집

국내 대학의 열수력 실험 데이터를 확보하기 위하여, 원자력 관련 학과들의 열수력 관련 실험데이터들을 보고서와 학술지 발표 논문들을 중심으로 사전 조사하였다. 이를 토대로 파악된 실험실과 직접 접촉을 통해서 대상 실험들을 구체화 하였다. 최종적으로 서울대학교, 포항공대, KAIST, 경희대학교, 한동대학교, 이상 5개의 국내 대학이 선정되었고, 이 중 열수력 실험이 이루어지고 있는 7개 연구실로부터 실험 정보를 수집하였다. 실험에 대해서 필요한 정보 (실험 제목, 실험 담당자 소개, 실측데이터 유무 및 데이터 소재)를 확보하기 위해, 각 연구실에 설문지(부록 B.1)를 배포하였으며, 이로부터 국내 열수력 실험 데이터뱅크의 구축에 사용될 실험들의 실측데이터 및 관련 정보를 확보하였다. 최종적으로 32개의 열수력 실험이 선정되었고, 수집된 실험 정보를 이용하여 데이터뱅크 구축 및 MARS 코드 평가가 본 과제에서 수행되었다. 표 3.1.1-3.1.7에 각 연구실로부터 최종 선정된 실험 목록을 제시하였다.

표 3.1.1 서울대학교 열수력 연구실 (10개)

번호	실험 제목
1	영광3호기 Mid-Loop
2	SNUF를 이용한 LBLOCA
3	미포화 비등영역에서의 이상유동
4	수직 환형관에서의 미포화 비등
5	강제대류 열전달 계수 측정
6	U 튜브의 자연순환
7	SNUF를 이용한 고온관 파단 사고
8	과냉각비등유동에서의 계면열전달
9	SNUF를 이용한 DVI Line Break LOCA
10	응축열전달

표 3.1.2 서울대학교 원자로 설계 공학실 (1개)

번호	실험 제목
1	안전주입수 우회율 저감 방안

표 3.1.3 포항공대 이상 유동 연구실 (8개)

번호	실험 제목
1	관대 응축 열전달 특성에 관한 실험 및 모델링
2	LiBr 수용액을 이용한 수평관 유하액막의 열전달 특성
3	IRWST에서 직접접촉응축 현상에 대한 실험
4	IRWST에서 증기의 직접접촉 응축과 공기기포 진동현상 실험
5	미세 채널내에서의 흐름응축 열전달 실험
6	수평 사각 마이크로채널 내에서의 유동비등 열전달에 대한 연구
7	나노유체의 풀비등 임계열유속 증가에 대한 실험적 연구
8	비응축성 가스 존재 시 응축 열전달 실험

표 3.1.4 KAIST 원자력 및 에너지 시스템 설계 안전 연구실 (4개)

번호	실험 제목
1	혼합날개 실험 (CHF)
2	비틀린 테이프 삽입 실험 (CHF)
3	라이플 튜브 실험 (CHF)
4	포스트 드라이 아웃 실험 (CHF)

표 3.1.5 KAIST 원자력 / 수소 시스템 연구실 (5개)

번호	실험 제목
1	수평관에서의 역류 유동 제한 현상에 관한 실험적 연구
2	수평관에서의 직접 접촉 응축 열전달에 관한 실험적 연구
3	원자로용기 직접주입에 관한 물과 공기 혼합 실험
4	수평 가열면에서 기포 관찰과 수조비등 CHF 모델 개발
5	LBLOCA 시 재관수 동안 강수부 내 열수력 현상 실험 (DVI)

표 3.1.6 한동대학교 전자 열유체 실험실 (2개)

번호	실험 제목
1	입의 각도 off-take 에서의 기포 침윤과 액적 비산
2	나노유체 열전달 실험

표 3.1.7 경희대학교 원자력 열유체 실험실 (2개)

번호	실험 제목
1	증기발생기 입구 노즐 내 열성층에 대한 실험
2	단일 수로내의 상반류 유동한계 실험

제 2 절 MARS 코드 검증용 실험선정지침서를 통한 평가

수집된 32개의 실험이 실험의 계획 단계부터 장치 제작, 데이터 수집 과정에 이르기까지 적절한 절차를 거쳐서 수행되었으며, 이에 대한 내용이 보고서에 수록되었는지 여부와 MARS 코드 검증의 적합성을 확인하기 위하여 본 과제에서 개발된 MARS 코드 검증용 실험 선정지침서를 이용하여 평가를 수행하였다. 평가는 총 3번에 걸쳐 이루어졌다.

1. 실험의 MARS 코드 검증에 대한 적합성 평가

가. 과제 담당자의 1차 평가

1차 평가에서는 과제 담당자가 실험 보고서나 학위 논문을 바탕으로 실험에 대한 평가서를 작성하였다. 각 실험은 총 65개 문항 (실험 목적의 명확성, 계측의 정확성, MARS 코드 모사 가능성 등)으로 평가하였고, 평가에 대한 근거를 제시함으로써 평가의 신뢰를 높일 수 있도록 하였다. 자료만으로는 평가할 수 없는 항목은 별도 표시함으로써 차후 보완토록 하였다. 그림 3.2.1은 1차 평가서의 일부분을 보여준다. 각 문항에 대한 평가의 근거가 제시되어 있고, 굵은 글씨로 보완이 이루어져야 하는 부분이 표시되어 있음을 알 수 있다.

<p>공학박사학위논문</p> <p>An Experimental Study of CHF and Post-CHF Phenomena on Flow Boiling of R-134a with Grid Effects in Annular Geometry</p> <p>환상관에서 지지격자의 영향을 고려한 R-134a의 유동 비등에서 임계 및 초과 임계 열유속 현상에 관한 실험적 연구</p> <p>이**</p>
<p>A1. 실험제목이 실험내용과 잘 부합하는지의 여부</p> <p>- 각 실험의 제목은 실험내용 및 경과물을 예상하기에 부족함이 없으므로, 본 평가기준 A1은 Fully Satisfied (+)로 평가한다.</p>
<p>B1. 실험에 대한 목적의 명확한 제시 여부</p> <p>- <본 실험에서는 물로 확인하기 힘든 고온 조건의 현상을 규명하기 위해 낮은 임계 압력과 기화열을 가지면서도 물의 비등현상을 적절하게 모의할 수 있는 R-134a를 냉매 물질로 사용하여 가열통과 외곽 채널로 구성된 환상관에서 실험을 수행하였다. 또한 지지격자가 임계 열유속에 미치는 영향에 대한 실험이 수행되었다.> 실험 목적이 명확히 제시되었기 때문에 본 평가 기준 B1은 Fully Satisfied (+)로 평가한다.</p>
<p>B2. 설계 시 사용된 모든 가정이 제시되고 이에 대한 근거 및 검증 과정 제시 여부</p> <p>- IET 실험이 아닌 입구 조건과 지지격자에 따른 heat flux 측정 실험이다. 특별한 가정을 하여 실험을 단순화하거나 조작한 내용은 없는 것으로 판단된다. 따라서 본 평가기준 B2는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.</p>
<p>B3. 최종 실험 장치와 설계와의 차이가 있는 경우 그에 대한 설명이 있는지의 여부</p> <p>- 실험수행자 면담 필요</p>

그림 3.2.1 1차 실험평가서

나. 실험 담당자의 2차 평가

2차 평가는 과제 담당자에 의해 우선적으로 작성되었던 1차 평가서를 실험 담당자가 검토하는 방식으로 이루어졌다. 1차 평가의 전체적인 내용뿐만 아니라 과제 담당자가 자료만으로는 판단하기 어려운 문항에 대해 실험 담당자가 직접 검토함으로써 평가의 정확성을 높일 수 있었다. 그림 3.2.2는 2차 평가서(부록 B.2 참고)의 일부분을 보여준다. 1차 평가에서 평가하기 어려웠던 부분(굵은 글씨)에 대해 실험 담당자가 보완(밑줄 표시)하였음을 알 수 있다.

또한 2차 평가에서는 실험 담당자에게 설문지를 작성토록 하여 실측데이터 및 MARS 코드 입력 파일 보유 여부를 확인하였고, MARS 코드로 모사 가능 여부에 대해서도 실험 담당자의 견해를 구하였다. 그림 3.2.3은 설문지(부록 B.3 참고)의 일부분을 보여준다.

<p>B2. 설계 시 사용된 모든 가정이 제시되고 이에 대한 근거 및 검증 과정 제시 여부</p> <p>- IET 실험이 아닌 입구 조건과 지지격자에 따른 heat flux 측정 실험이다. 특별한 가정을 하여 실험을 단순화하거나 조작한 내용은 없는 것으로 판단된다. 따라서 본 평가기준 B2는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.</p>
<p>B3. 최종 실험 장치와 설계와의 차이가 있는 경우 그에 대한 설명이 있는지의 여부</p> <p>- 실험수행자 면담 필요</p> <p>- 실험을 수행한 최종 실험 장치는 구체적인 설계 도면을 기초로 제작되었으며, 지지격자의 위치나 실험 장치의 압력과 유체 온도 측정 위치 등은 정확히 요구된 위치에서 측정되었다. 수행된 실험 장치의 구성과 도면을 제시하고 있으므로 장치와 설계에서의 차이는 없는 것으로 판단된다. 따라서 본 평가기준 B3는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.</p>

그림 3.2.2 2차 실험평가서

자료 보유 여부	예	아니오
1. 박사님의 실험이 MARS 성능 평가에 적절한 실험입니까?		V
<p>미유 : 본 실험에서 수행된 데이터들은 작동 유체로 R-134a를 사용하여 지지격자의 영향에 대한 실험을 수행하였기 때문에, MARS 코드로 지지격자의 영향을 해석할 경우 그 결과에 대한 신뢰도가 다소 떨어질 것으로 예상된다. 실험 결과들이 물의 실험 결과들과 상사성을 보이긴 하였으나 지지격자의 영향을 모사하기 위해서는 추가적인 데이터가 필요하고 R-134a 실험에 대해 검증된 상관식들의 검증이 있어야 할 것이다. 따라서 MARS 코드를 사용하여 본 실험을 모의하는 것은 어려울 것으로 판단된다.</p>		
2. MARS로 모사하기 위한 Input File을 가지고 계십니까?		V
3. 실험 결과에 대한 Raw data를 아직 보유하고 계십니까?	파일	보고서

그림 3.2.3 설문지

다. 최종 평가

최종 평가는 1, 2차 평가 내용을 종합 정리함으로써 이루어졌다. 실험 평가자들 (서울대, 포항공대의 과제 담당자) 간에 평가의 일관성 유지를 위해 각 항목을 객관식화 하였고, 답변이 겹치는 항목에 대해서는 문항수를 줄여 알아보기 쉽도록 하였다. 이를 통해 MARS 코드 검증에 적합한 실험을 선정하였다. 그림 3.2.4는 최종 평가서(부록 B.4 참고)의 일부분을 보여준다.

<MARS 과제 실험 평가>		환상관(지지격자포함)에서 R-134a의 임계열유속 현상에 관한 실험	이** (KAIST)
1	실험 제목은 실험 내용과 잘 부합하는가?		+
	+ 실험의 제목이 실험 내용 및 결과물을 예상하기 부족함이 없을 경우 (+)로 평가한다.		
	0 실험 제목만으로 내용 및 결과를 예상하기 부족할 경우 (0)로 평가한다.		
2	실험 목적은 명확히 제시되었는가? (해당 항목에 체크할 것!!)		+
	실험 성격	1) 검증 실험 2) 상관식 도출을 위한 실험 3) 현상 파악을 위한 실험 4) 기존에 없던 실험 데이터 영역 확보 실험	
	실험 대상	1) IET 2) SET 노심 핵 연료봉 모사	
	실험 내용	환상관에서 R-134a 임계열유속 실험 데이터 확보. 임계열유속 조건에서 지지 격자가 열전달 증진에 미치는 영향 파악. 액체막의 건조가 임계열유속의 발생에 미치는 영향 및 기포 거동 확인. 초과 임계 열유속 실험 상관식을 개발함.	
3	실험 장치 설계 및 실험 수행에 사용된 가정 및 근거, 영향이 제시되었는가?		0
	+ 충분히 제시되어 있을 경우 (+)로 평가한다.		
	0 사용된 가정이 미치는 영향이 작기 때문에, 제시되지 않은 경우 (0)로 평가한다.		
	- 사용된 가정이 미치는 영향이 큰데, 제시되지 않은 경우 (-)로 평가한다.		
4	MARS 코드 해석을 위한 충분한 설계 정보가 제시되었는가?		/
	+ MARS 코드로 모사하기에 적합한 실험으로써, 입력코드(Input Deck)를 만들기에 충분한 정보가 주어져 있을 경우 (+)로 평가한다.		
	0 MARS 코드로 모사하기에 적합한 실험이지만, 충분한 설계 정보가 제시되지 않은 경우 (0)로 평가한다.		
	/ MARS 코드로 모사하기에 적합하지 않은 실험의 경우 (/)로 평가한다. (이유 : 지지격자의 영향을 MARS로 모사하는 것은 어렵다)		
5	MARS나 RELAP으로 코드 해석이 수행되었는가?		/
	+ MARS나 RELAP으로 실험에 대한 코드 해석이 수행되었으면 (+)로 평가한다.		
	0 CFD나 다른 코드로 해석이 수행되었으면 (0)로 평가한다.		
	/ 코드 해석이 수행되지 않았으면 (/)로 평가한다.		

그림 3.2.4 최종 평가서

2. 실험 평가 결과

평가 결과 32개의 실험이 모두 적절하게 수행되었음을 알 수 있었다. 이를 바탕으로 MARS 코드 평가에 적합한 실험을 선정하였다. MARS 코드 검증을 위한 실험 선정을 위해 그림 3.2.5에서 보여지는 것과 같이 32개 실험을 관련 있는 주제 별로 정리하였다. 크게 IET 실험 4개와 SET 실험 28개로 분류할 수 있었고, 각 주제 별로 세부 분류를 하였다. 최종적으로 서울대학교의 SNUF를 이용한 IET 실험, 비등 및 응축, CHF, CCFL, DVI, 나노 유체 등 관련 SET 실험으로 분류하였다. 이 실험들 중 MARS 코드로 모사 가능한 실험을 다음의 기준으로 선별하였다 (그림 3.2.5 참고).

- 열수력 변수 측정 없이 현상 관찰 위주의 실험 제외 (1개, 실험번호: 25)
- 나노 유체/수용액/R-134a 의 냉각재 실험 제외
(8개, 실험번호: 18, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 28)
- 실험의 분석 대상 스케일이 너무 작거나 다차원 현상 실험 제외
(10개, 실험번호: 5, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 17, 30, 32)

검토 결과 최종 13개의 실험(실험번호: 1, 2, 3, 4, 8, 9, 14, 15, 16, 19, 20, 29, 31)이 MARS 코드로 모사 가능한 실험으로 분류되었고, 본 과제에서는 이 중 3개의 실험과 추가로 국외 실험 1개를 이용하여 아래 총 4개 실험에 대한 MARS 코드 검증 및 개선을 수행하였다.

- SET 실험 1: 비응축성기체 존재시 응축 열전달 현상 평가
- SET 실험 2: 수평관 내 역류유동제한 현상 평가
- IET 실험 1: PKL 실험 장치를 이용한 충수운전중 RHR상실사고 평가
- IET 실험 2: SNUF 실험 장치를 이용한 DVI 파단 사고 평가

각 실험에 대한 평가의 구체적인 내용은 4장에 기술하였다.

IET 실험		SET 실험						
SNUF	DVI	CCFL	비등 실험	응축 실험	임계 열유속	나노 유체 / 수용액	기타	
1) 자연순환 (김강훈, SNU)	5) water jet impingement sweep out direct bypass (윤상철, SNU)	8) 수평관 (최기용, KAIST)	10) 수직 채널내 미프와 비등 유동 (윤병조, SNU)	14) 수직관 응축 열전달 (이권영, POSTECH)	21) 혼합날개 (신병수, KAIST)	26) 나노유체 (김형대, POSTECH)	29) 임계각도 Off-take (HDU)	
2) 고온관 파단 (홍승준, SNU)	6) 액막퍼짐, sweep out, 주입수우회 (이동원, KAIST)	9) 수직관 (경희대)	11) 수직 및 경사 혼합관내 미프와 비등 유동 (이태호, SNU)	15) 가압기 내 응축열전달 (이연건, SNU)	22) 비틀림테일 (박재환, KAIST)	27) TiO ₂ 나노유체 (신유, HDU)	30) 적남용기기화 열전달 (장연문, SNU)	
3) 저온관 파단 (김용수, SNU)	7) 액막 두께, 액체건인, 수직벽면 증발 주입수 분리 (황도현, KAIST)		12) 단일 기포 응축 (김성진, SNU)	16) 수평관 직접접촉응축열전달 (김상재, KAIST)	23) 라이플관 (김창호, KAIST)	28) Li-Br수용액 (김동관, POSTECH)	31) Mid-Loop (서재광, SNU)	
4) DVI관 파단 (이거형, SNU)			13) 수평사각미크로채널 (허철, POSTECH)	17) 마이크로채널 (신정섭, POSTECH)	24) 환상관 (이귀림, KAIST)		32) S/G 급수 일부부 열성능 평가 (KHU)	
				18) 관 내 응축 열전달 (권정태, POSTECH)	25) 가열면 관찰 (정홍준, KAIST)			
				19) IRWST : 직접 접촉 응축 (윤덕현, POSTECH)				
				20) IRWST : 직접 접촉 응축 (이영연, POSTECH)				
4개	3개	2개	4개	7개	5개	3개	4개	

그림 3.2.5 수집된 국내 열수력 실험 분류

제 3 절 데이터뱅크 구축

평가가 이루어진 32개 실험의 데이터를 이용하여 사용자가 효율적으로 사용할 수 있는 국내 열수력 실험 데이터뱅크를 구축하였다. 가능한 실험데이터를 이용하는 사용자의 편의를 돕고자 하였으며 MARS 코드 등 코드를 사용하는 사용자들이 입력을 작성함에 있어서 필요한 정보를 충분히 얻을 수 있도록 구축하였다. 데이터뱅크의 구성은 한국원자력 연구원의 T/H 데이터뱅크에 맞추어 구성을 하였고, 국내 열수력 실험 데이터뱅크의 특성에 맞게 새롭게 수정, 보완되었다.

1. 데이터뱅크 구성

데이터뱅크 구성은 그림 3.3.1과 같은 트리구조(Tree-Structure)로 구성하였다. 각 대학을 서브항목으로 결정하였고, 각 연구실에서 확보된 실험 들을 순차적으로 분류하였다. 기본 틀은 원자력연구원의 Thermal Hydraulic 데이터뱅크에 기준을 두었으며 (그림 3.3.2 참고), 국내 열수력 실험 데이터뱅크를 추가하는 즉, 기존 원자력연구원의 TH 데이터뱅크의 확장된 형태로 구성 하였다 (그림 3.3.3 참고). 현재 원자력연구원의 TH 데이터뱅크는 Web기반의 데이터뱅크로 구축이 되어있기 때문에 본 데이터뱅크도 html을 사용한 Web 기반의 file로 구성이 되었으며, 실험데이터는 원자력연구원에서 제공해 준 ENCOUNTER Format을 이용하여, Web 기반 내에서 그래프의 가시화가 가능하도록 구성하였다.

2. 데이터뱅크 세부 항목

그림 3.3.4는 국내 열수력 데이터뱅크의 초기 구동 화면을 보여준다. 우선, 국내 대학의 각 연구실이 나오고, 한 연구실에 대하여 선택하면 그림 3.3.5와 같이 연도별로 수행된 실험 목록이 나온다. 각 실험에 대한 데이터뱅크의 세부 항목은 표 3.3.1과 같이 구성하였다. 각 항목에 대한 구체적인 내용은 다음과 같다.

■ Abstract

- 실험 내용에 대한 개괄적 소개를 한다 (그림 3.3.6 참고).

■ Experiment Apparatus / Condition

- 실험 장치의 개념도 및 관련 사진을 Image 파일로 보여주고, 실험 조건을 표로 보여준다 (그림 3.3.7 참고).

■ Test Section

- 시험부에 대한 간략한 설명과 Image 파일을 보여준다 (그림 3.3.8 참고).

■ Test Matrix

Test Matrix는 다음의 두 가지 옵션으로 구성되어 있다 (그림 3.3.9 참고).

- Download: 실험 조건 별로 실측데이터를 text 또는 엑셀 파일형태로 "download" 가능하게 하여 사용자가 원하는 데이터 셋을 내려 받을 수 있다 (그림 3.3.10 참고).
- View: Web상에서 그래프를 바로 볼 수 있도록 링크를 걸어, 필요 시 간단한 데이터 경향을 볼 수 있다 (그림 3.3.11 참고).

■ Report

- 본 실험과 관련된 논문이나 보고서를 내려 받을 수 있도록 하였다 (그림 3.3.12, 3.3.13 참고). 저널 논문과 같이 저작권으로 인해 원문을 올리지 못한 경우에 대해서는 실험에 대한 관련 자료를 얻을 수 있는 인터넷주소를 기재하였다.

전체적으로 데이터뱅크는 Web 상에 구축하는 것이기 때문에 최대한 간결하게 구성을 하였다. 그러나 MARS 코드의 검증에 위해 필요한 보다 자세한 실험 정보들은 Report를 통해서 충분히 확보 가능할 것으로 판단한다.

표 3.3.1 데이터뱅크의 구성 및 형식

Contents	내 용	형 식
Abstract	실험 내용 개괄적 소개	Text
Experiment Apparatus /Condition	실험 장비 개념도 / 관련 사진 / 실험 조건	Image
Test Section	실험 부 형상 사진 및 도면	Image
Test Matrix	원본데이터	Download(text file) Plot (T-H Data Bank Format)
Report	실험 원본 자료	Download (pdf file 등)

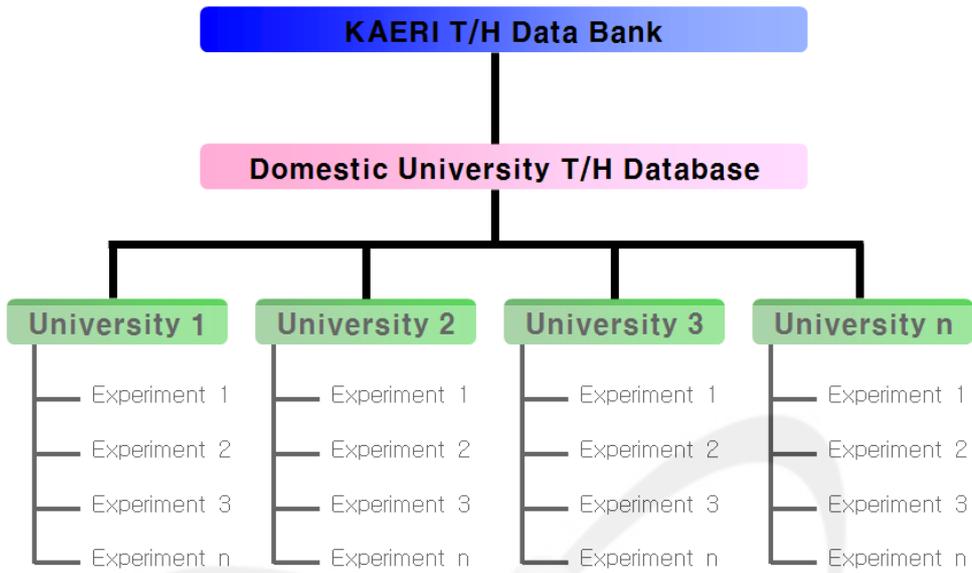


그림 3.3.1 국내 열수력 데이터뱅크 구조

KAERI

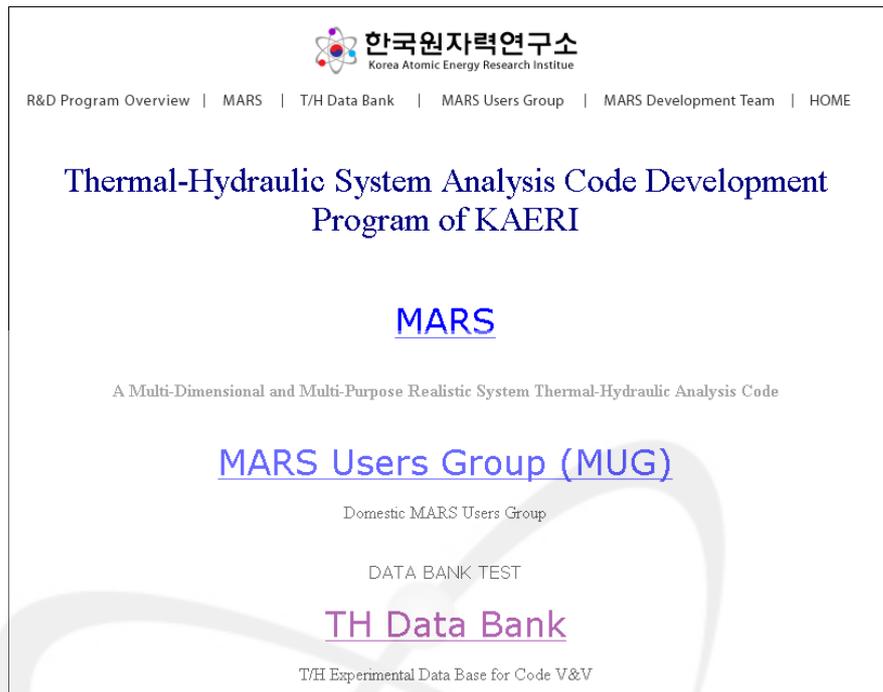


그림 3.3.2 데이터뱅크 초기 화면 (1)

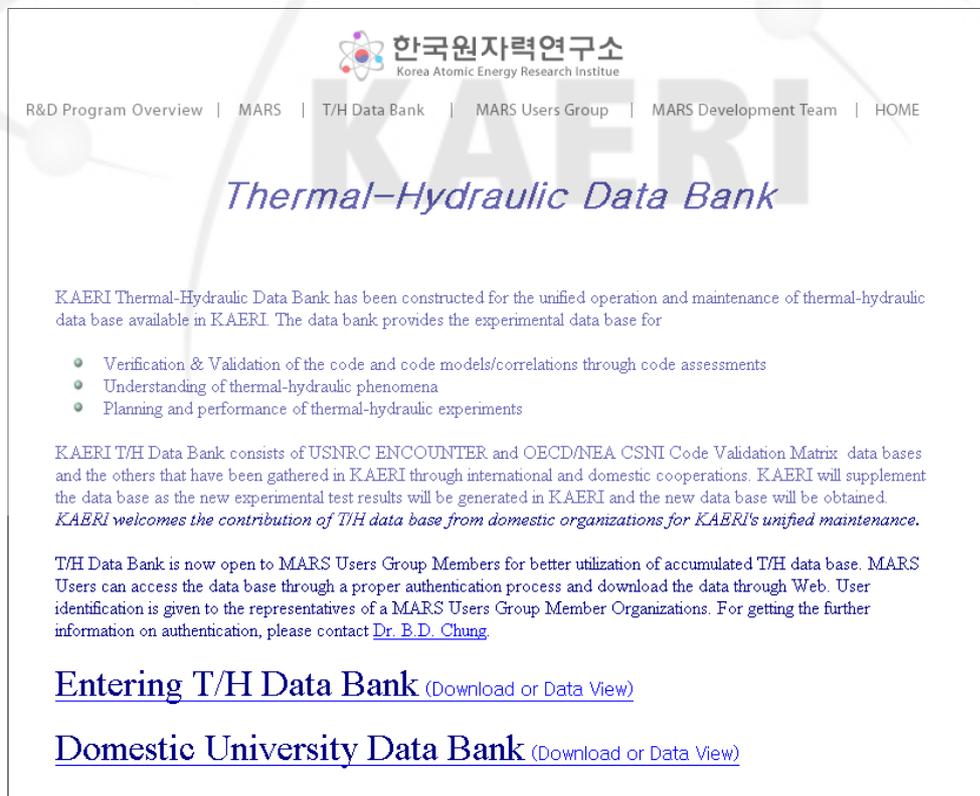


그림 3.3.3 데이터뱅크 초기 화면 (2)


한국원자력연구소
 Korea Atomic Energy Research Institute

[Back to Data Bank Home](#)

Search and Download KAERI T/H Data Bank

DOMESTIC Thermal / Hydraulic Experimental DATABANK

University	Databank
SNU	Professor : Goon-Cherl Park
	Professor : Kune-Yull Suh
POSTECH	Professor : Moo-Hwan Kim
KAIST	Professor : Soon-Heung Chang
	Professor : Hee-Cheon No
KHU	Professor : Sang-Nyung Kim
HDU	Professor : Jae-Young Lee

[Back](#)

그림 3.3.4 국내 열수력 데이터뱅크 구동 화면 (1)


한국원자력연구소
 Korea Atomic Energy Research Institute

[Back to Data Bank Home](#) [Back to Top List](#)

Search and Download KAERI T/H Data Bank

Nuclear Thermal Hydraulic Engineering Laboratory in SNU (Seoul National University)
Professor: Goon-Cherl Park

Experiment	Title	Year
Experiment 1	An Experimental Study on Natural Circulation in a UTSG PWR	1994
Experiment 2	Return Momentum Effect on Water Level Distribution during Mid-loop Operations	1995
Experiment 3	An Experimental Study on the Mass Release for a Hot Leg Break LBLOCA in Post Blowdown	1996
Experiment 4	Measurement of Two-Phase Flow Parameters in the Subcooled Boiling	1996
Experiment 5	A Study on the Evaporative Heat Transfer Coefficient in PCCS	1997
Experiment 6	A Study on Local Flow Structure of Subcooled Boiling in Vertical and Inclined Annuli	2000
Experiment 7	Experimental Study for Improvement of Thermal Hydraulic System Code to Predict Core Coolant Inventory during Commencement of Severe Accidents	2004
Experiment 8	Condensation Heat Transfer in the Presence of Noncondensable Gas at High Pressure	2007
Experiment 9	Experimental Study on Interfacial Heat Transfer of Bubble Condensation in Subcooled Boiling Flow	2007
Experiment 10	An Experiment and Analytical Study for a DVI Line Break LOCA in the Advanced Power Reactor 1400MWe	2008

[Back](#)

그림 3.3.5 국내 열수력 데이터뱅크 구동 화면 (2)

An Experimental and Analytical Study for a DVI Line Break LOCA in the Advanced Power Reactor 1400 MWe

The transient thermal-hydraulic phenomena of a DVI (Direct Vessel Injection) line break LOCA (Loss-of-Coolant Accident) in pressurized water reactor, APR1400 (Advanced Power Reactor 1400 MWe), were investigated. In order to understand the phenomena during the LOCA transient, a reduced-height and reduced-pressure integral loop test facility, the SNUF (Seoul National University Facility), was constructed with scaling down the prototype.

The experimental results showed that the phenomenon of the downcomer seal clearing played a dominant role in the reduction of the system pressure and the recovery of the coolant level in the core. That phenomenon occurred when the steam incoming from cold legs penetrated the coolant in the upper downcomer toward the broken DVI line. The test conditions such as the thermal power, the SI (Safety Injection) flow rate, the SI temperature, and the break area can affect the major thermal hydraulic phenomenon significantly in the accident. Accordingly, additional 7 test cases under varied test were carried out for estimating the influence of the each parameter. From the experimental results, the primary system pressure, the coolant temperature, and the occurrence time of the downcomer seal clearing were affected significantly by the thermal power in the core and the SI flow rate. The break area played a dominant role in the vent of the steam.

[EXPERIMENT APPARATUS / CONDITION](#)

[TEST SECTION](#)

[TEST MATRIX](#)

[REPORT](#)

[Back](#)

그림 3.3.6 국내 열수력 데이터뱅크 구동 화면 (3)

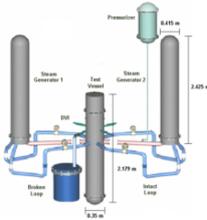
DATABANK/SNU																																		
EXPERIMENT APPARATUS / CONDITIONS																																		
 <p>Fig. 1 Photograph of SNUF</p>	<p style="text-align: center;">Experiment Conditions</p> <p style="text-align: center;">Table 1. Test Conditions of Base Case</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Parameters</th> <th>Values</th> <th>Descriptions</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Test time [s]</td> <td>Starting at 30 s after break</td> <td>To apply lower thermal power</td> </tr> <tr> <td>Initial primary system pressure [MPa]</td> <td>0.6</td> <td>1/13 (Pressure ratio)</td> </tr> <tr> <td>Initial coolant temperature [°C]</td> <td>1.58</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Initial secondary temperature [°C]</td> <td>1.58</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Thermal power [kW]</td> <td>110 (0 - 60 s) 70 (60 - 300 s) 60 (300 - 500 s)</td> <td>Applying an integrated value (3 steps)</td> </tr> <tr> <td>HPSI flow rate [kg/s]</td> <td>0.13</td> <td>Applying an integrated value</td> </tr> <tr> <td>SIT flow rate [kg/s]</td> <td>0.11</td> <td></td> </tr> <tr> <td>SI temperature [°C]</td> <td>27.5</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Broken DVI area [m²]</td> <td>0.000177</td> <td>Henry-Fauske critical flow model Considering the streamline contraction</td> </tr> <tr> <td>Discharge coefficient</td> <td>0.62</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Parameters	Values	Descriptions	Test time [s]	Starting at 30 s after break	To apply lower thermal power	Initial primary system pressure [MPa]	0.6	1/13 (Pressure ratio)	Initial coolant temperature [°C]	1.58		Initial secondary temperature [°C]	1.58		Thermal power [kW]	110 (0 - 60 s) 70 (60 - 300 s) 60 (300 - 500 s)	Applying an integrated value (3 steps)	HPSI flow rate [kg/s]	0.13	Applying an integrated value	SIT flow rate [kg/s]	0.11		SI temperature [°C]	27.5		Broken DVI area [m ²]	0.000177	Henry-Fauske critical flow model Considering the streamline contraction	Discharge coefficient	0.62	
Parameters	Values	Descriptions																																
Test time [s]	Starting at 30 s after break	To apply lower thermal power																																
Initial primary system pressure [MPa]	0.6	1/13 (Pressure ratio)																																
Initial coolant temperature [°C]	1.58																																	
Initial secondary temperature [°C]	1.58																																	
Thermal power [kW]	110 (0 - 60 s) 70 (60 - 300 s) 60 (300 - 500 s)	Applying an integrated value (3 steps)																																
HPSI flow rate [kg/s]	0.13	Applying an integrated value																																
SIT flow rate [kg/s]	0.11																																	
SI temperature [°C]	27.5																																	
Broken DVI area [m ²]	0.000177	Henry-Fauske critical flow model Considering the streamline contraction																																
Discharge coefficient	0.62																																	
 <p>Fig. 2 Schematics of SNUF</p>	<p style="text-align: center;">Table 2. Variation of Test Condition of each Sensitivity Case</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Case number</th> <th>Case name</th> <th>Varied Parameters</th> <th>Values</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P1</td> <td>The integrated power</td> <td>Power</td> <td>70 kW (0 - 500 s) 30 kW (0 - 60 s)</td> </tr> <tr> <td>P2</td> <td>The reduced power</td> <td>Power</td> <td>40 kW (60 - 300 s) 30 kW (300 - 500 s)</td> </tr> <tr> <td>B1</td> <td>The reduced break area</td> <td>Broken DVI area</td> <td>0.000078 m²</td> </tr> <tr> <td>B2</td> <td>The extended break position</td> <td>L/D of DVI line</td> <td>17.7</td> </tr> <tr> <td>S1</td> <td>The reduced SI flow rate</td> <td>HPSI flow rate SIT flow rate</td> <td>0.07 kg/s 0.08 kg/s</td> </tr> <tr> <td>S2</td> <td>The increased SI flow rate</td> <td>SIT flow rate SIT flow rate</td> <td>0.32 kg/s 0.18 kg/s</td> </tr> <tr> <td>S3</td> <td>The high temperature of the SI water</td> <td>SI Temperature</td> <td>54.6 °C</td> </tr> </tbody> </table>	Case number	Case name	Varied Parameters	Values	P1	The integrated power	Power	70 kW (0 - 500 s) 30 kW (0 - 60 s)	P2	The reduced power	Power	40 kW (60 - 300 s) 30 kW (300 - 500 s)	B1	The reduced break area	Broken DVI area	0.000078 m ²	B2	The extended break position	L/D of DVI line	17.7	S1	The reduced SI flow rate	HPSI flow rate SIT flow rate	0.07 kg/s 0.08 kg/s	S2	The increased SI flow rate	SIT flow rate SIT flow rate	0.32 kg/s 0.18 kg/s	S3	The high temperature of the SI water	SI Temperature	54.6 °C	
Case number	Case name	Varied Parameters	Values																															
P1	The integrated power	Power	70 kW (0 - 500 s) 30 kW (0 - 60 s)																															
P2	The reduced power	Power	40 kW (60 - 300 s) 30 kW (300 - 500 s)																															
B1	The reduced break area	Broken DVI area	0.000078 m ²																															
B2	The extended break position	L/D of DVI line	17.7																															
S1	The reduced SI flow rate	HPSI flow rate SIT flow rate	0.07 kg/s 0.08 kg/s																															
S2	The increased SI flow rate	SIT flow rate SIT flow rate	0.32 kg/s 0.18 kg/s																															
S3	The high temperature of the SI water	SI Temperature	54.6 °C																															

그림 3.3.7 국내 열수력 데이터뱅크 구동 화면 (4)


한국원자력연구소
 Korea Atomic Energy Research Institute

[Back to Data Bank Home](#) [Back to Top List](#)

Search and Download KAERI T/H Data Bank

DATABANK/SNU
TEST SECTION

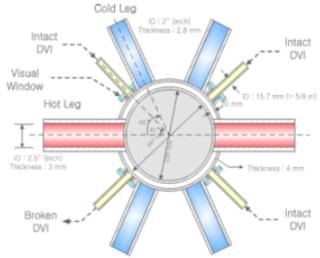


Fig. 1. Plan View of SNUF

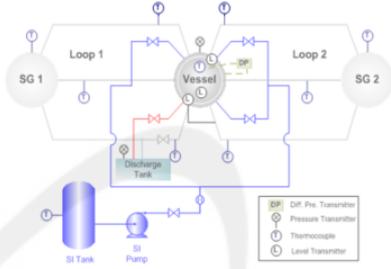


Fig. 2. Instrumentation system of SNUF

[Back](#)

그림 3.3.8 국내 열수력 데이터뱅크 구동 화면 (5)


한국원자력연구소
 Korea Atomic Energy Research Institute

[Back to Data Bank Home](#) [Back to Top List](#)

Search and Download KAERI T/H Data Bank

DATABANK/SNU
TEST MATRIX / RAW DATA

Base
Download View
P1
Download View
P2
Download View
B1
Download View
B2
Download View
S1
Download View
S2
Download View
S3
Download View

[Back](#)

그림 3.3.9 국내 열수력 데이터뱅크 구동 화면 (6)

Time	CoreTemp1	CoreTemp2	CoreTemp3	CoreTemp4	CoreTemp5	OtherTemp1	OtherTemp2	OtherTemp3	OtherTemp4	OtherTemp5
0	155.58282151	18649154.63449157	50893157.9088	159.481	157.60493157	60493159.3757	158.1373	157.66466156	39739149.21872149	35087149.44179
0.5	156.4946	151.48993157	26631158.42152158	51705160.69851157	90914157	90914159.07129159	95024157	96984157	00563149.21872149	04772149.74497
2.163	156.17303151	16891157.24869158	09966158	19528160.68087157	89152157	89152159.05366159	03261157	95121156	69387149.50434149	3333149.72739
2.5	156.52984151	82657157	30156158	15255158	5523161.03825157	94439158	24664158	80218159	0895158	00409157
3	156.4946	151.7934	157.57043159	11729159	51705161.00296158	21339159	21339159	07129159	35461157	96984156
3.5	156.78098151	47234157	85696158	09966159	10778160	98532159	50003158	80433159	86249159	03261157
5.212	156.78098151	47234157	85696158	40389158	80358160	98532158	80433158	50003159	66249158	72826158
5.5	156.7986	151.48993157	87458158	42152159	12541161.30744159	12629158	82196159	68013159	35461158	27305157
6	157.10262151	7934	157.87458158	72577159	12541161.30744159	82196159	12629159	98459159	96344158	57729157
6.5	157.40688151	7934	158.17876159	03006159	7339	161.61194159	12629159	43065160	8598149	65901159
8.166	157.78906151	50751159	5006	195.352	159.44728161	62959159	44829159	44829160	91578159	57665159
8.5	157.78906151	77581158	46535159	01242159	71626161	89882159	10866160	02182161	18506159	9458
9.5	157.69314151	47234158	76959159	62107159	71626161	89882159	10866159	41302160	88049159	64138159
9.5	159.31903153	00764158	78722160	24748160	9512	162.22103160	03946160	03946161	50731160	57239159
11.165	158.01488152	70402158	78722160	24748160	3425	162.22103160	34391160	03946161	81193160	57239159
11.5	158.01488153	00764158	78722160	85636160	64684162	52561160	03946160	03946161	81193160	57239160
12	159.35429153	34648158	82248160	89185160	98549162	98552160	68366160	68366161	84723160	91218160
12.5	158.82742154	22244159	70012161	46535161	58002163	43951160	95288161	25741162	42126161	48601161
14.182	158.9079154	20484159	96894161	44771161	54238163	43951161	63074161	23977162	40361161	46836160
14.5	159.2316514	22244160	00447161	16084161	58002163	13485161	25741161	25741162	42126161	48601160
15	159.53592154	52623160	00447161	46535161	86447163	43951161	25741161	56197162	42126161	79061160
15.5	160.1269	185.11629160	29122162	0568	162.4568	163.72653161	54432161	54432163	31779162	38222160
17.262	159.84021155	1339	160.30896162	07445162	47345163	74419161	25741161	86655163	0307	162.09523161
17.5	159.87549155	16912160	54895162	10575162	53975163	7795	161.53726161	53726163	37076162	13052161
18	160.14454155	1339	160.61327161	76989162	47345163	74419161	56197161	56197163	33545162	39987161
18.5	159.84021155	43779159	39579161	46535161	86447163	74419160	95288161	56197163	33545162	70455160
20.219	159.84021155	74171159	70012161	46535162	16895163	74419160	95288161	56197163	33545162	70455160
20.499	159.84021155	74171159	09149161	46535162	16895163	13485160	95288161	56197163	0307	162.39987160
21	159.84021155	43779159	09149161	46535162	16895163	74419161	25741161	25741163	0307	162.70455160
21.499	159.87549155	84765159	41342161	17849161	57767163	1525	160.66602160	97052162	13423160	29554160
23.227	159.55355155	15151159	41342161	17849161	57767163	1525	160.66602160	97052162	13423160	29554160
23.5	159.57119155	16912159	73539161	19613161	59531163	17016160	68366160	98817162	45656160	30318160
24	159.53592155	1339	159.39579160	85636161	58002163	13485160	64838160	64838162	42126160	96344160
24.5	159.21402154	81244159	96884160	22984160	93356162	81257160	02182160	32627162	40361161	46836160
26.235	159.24929154	54363159	71775160	26512160	96985162	84787160	0571	160.36154162	74362161	80625159
26.5	159.82742154	83005160	00447160	24748160	9512	162.22103160	03946160	03946162	42126161	48601159
27	159.82742154	52623160	00447160	24748160	64684162	52561160	03946160	03946162	42126161	48601159
27.5	158.82321154	52623158	48298159	94308160	64684162	22103159	43065159	73504161	50731161	79061159
29.359	158.62321154	52623158	48298159	94308160	64684162	22103159	12629159	73504161	50731160	8769
29.5	158.31903154	22244158	48298159	63871160	64684161	91647159	43065159	73504161	81193160	8769
30	159.37191154	57904158	53986159	638161160	39541162	27397159	43355159	78795161	58024161	23437159
30.5	159.01488154	33005159	39579159	33437159	7339	161.61194159	82196159	12629161	20271161	18144159
32.331	158.03251154	54363159	71775159	04769159	75153161	62959159	14392159	14392161	22035160	59003158
32.5	158.03251154	54363159	41342159	04769159	75153161	62959159	83959159	14392161	22035160	59003158
33	158.01488154	52623159	70012159	03006159	7339	161.61194158	82196159	12629161	20271160	8769
35.259	157.71077154	22244159	09149158	42152159	42964161	00296158	21339158	21339160	59359160	57239158
35.5	157.72699153	39629159	41342159	7434	159.44728161	02061159	53529158	53529160	61123160	59003158

그림 3.310 국내 열수력 데이터뱅크 구동 화면 (7)

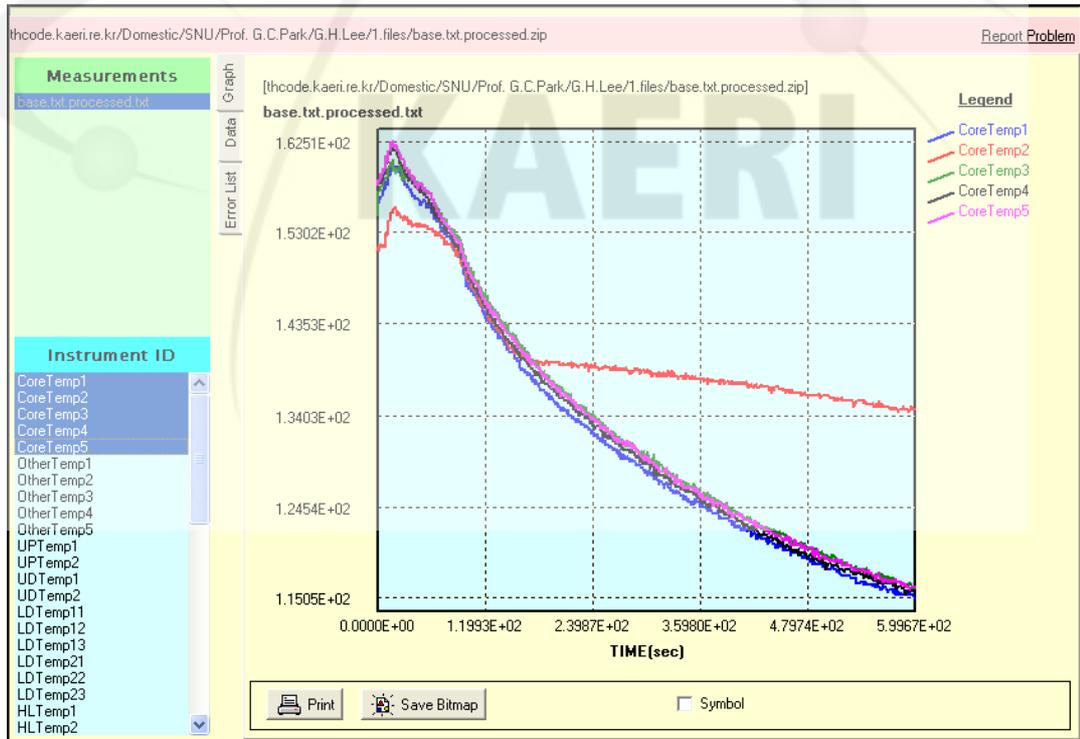


그림 3.311 국내 열수력 데이터뱅크 구동 화면 (8)

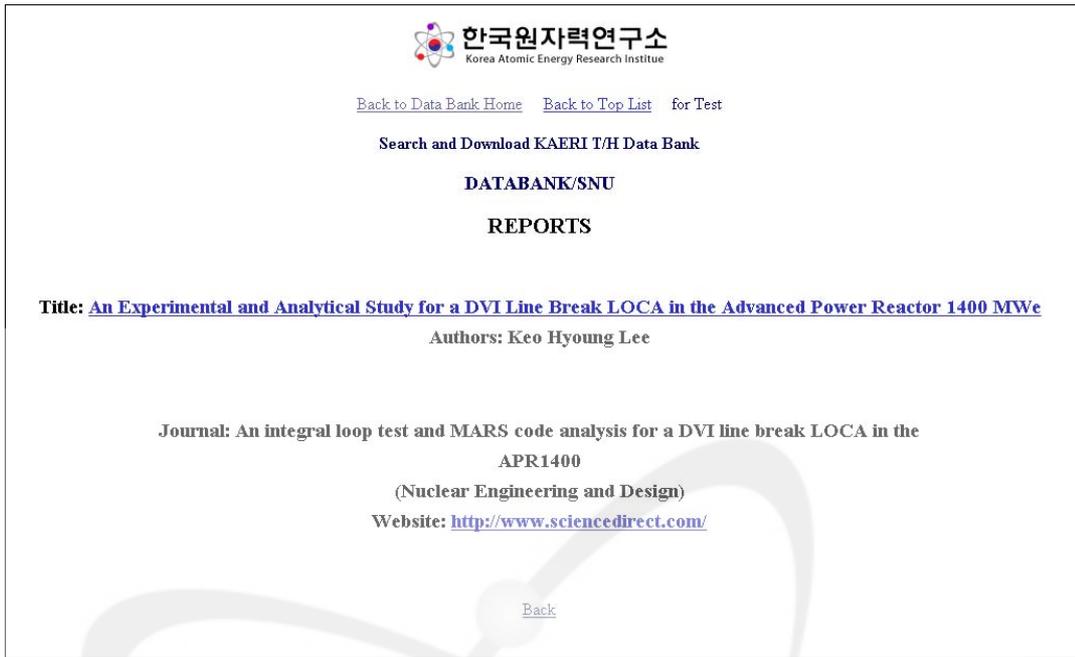


그림 3.3.12 국내 열수력 데이터뱅크 구동 화면 (9)

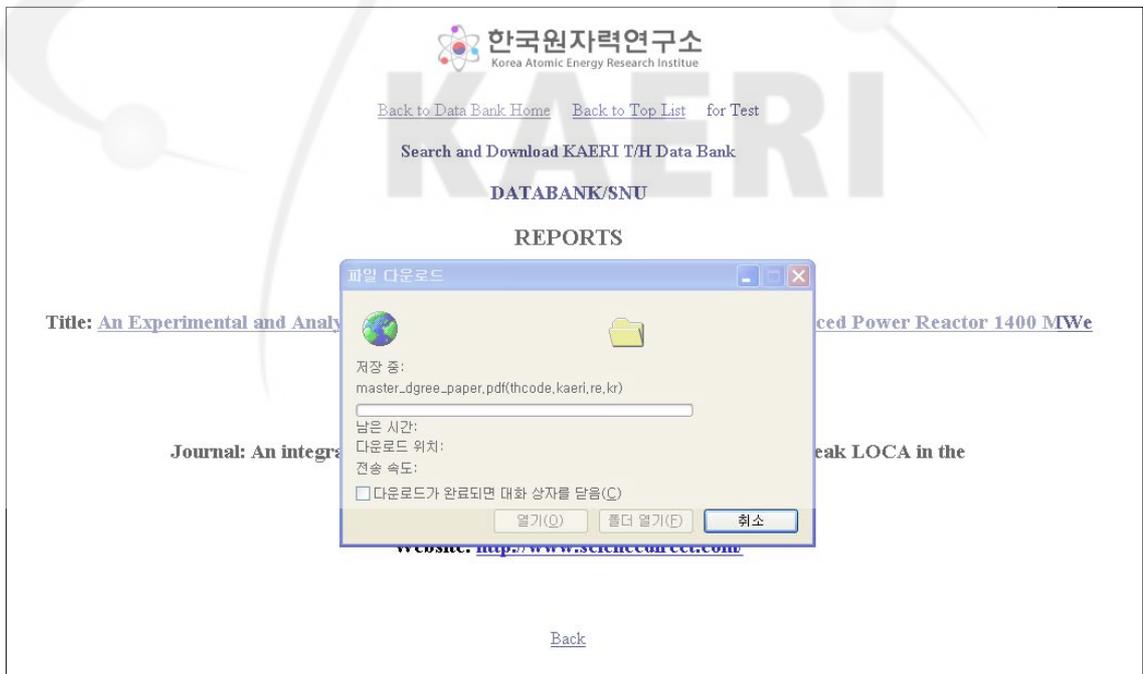


그림 3.3.13 국내 열수력 데이터뱅크 구동 화면 (10)

제 4 장 MARS 코드 평가 및 개선

본 과제에서는 수집된 국내 대학의 실험을 바탕으로 MARS 코드 검증을 수행하였다. 아래의 국내 대학 실험 3개와 국외 실험 1개가 본 과제에서 이용되었다.

- SET 실험 1: 비응축성기체 존재시 응축 열전달 현상 평가 (포항공대)
- SET 실험 2: 수평관 내 역류유동제한 현상 평가 (카이스트)
- IET 실험 1: PKL 실험 장치를 이용한 증수운전중 RHR상실사고 평가 (국외)
- IET 실험 2: SNUF 실험 장치를 이용한 DVI 파단 사고 평가 (서울대학교)

제 1 절 비응축성기체 존재시 응축 열전달 현상 평가

1. 개요

최근 국내외적으로 개발 중인 신형원전에는 내재적인 안전성을 향상시키기 위한 방안으로 피동냉각방법을 널리 채용하고 있다. 국내에서 개발 중인 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)도 역시 피동냉각방법을 사용하여 사고 시의 노심붕괴열을 제거하도록 하고 있다. 피동냉각계통의 열전달은 응축에 의하여 이루어지는데, 비응축성기체 존재 시 응축열전달은 냉각계통의 성능에 영향을 미치기 때문에 원전안전성에 직접적인 영향이 있다. 비응축성기체 존재시의 응축열전달에 대한 연구는 국내외적으로 많은 실험을 통하여 수행되었다.

본 절에서는 불확실성이 크다고 알려져 있는 비응축성기체 존재시의 응축열전달 모델에 대한 MARS 코드의 분석능력을 검증하고 개선점을 제시하고자 한다. 최근에 포항공대에서 수행된 실험[이권영, 2008]을 MARS 코드로 해석하고 개선점을 도출하였다. 또한, 유사실험[Goodykoontz, 1966; Siddique, 1992; Kuhn, 1995; Park, 1999]을 분석 및 비교하였다.

2. MARS 코드의 수직관내에서의 응축열전달 모델

MARS 코드에서 벽면을 통한 열전달율은 열전달계수와 벽면온도 및 증기분압에 따른 포화온도를 통해 계산한다[KAERI, 2007].

$$q''_t = h_c(T_w - T_{sppb}) \quad (4.1.1)$$

q''_t : total heat flux

h_c : predicted condensation heat transfer coefficient

T_w : wall temperature

T_{sppb} : saturation temperature based on partial pressure in the bulk

$$q''_f = h_c(T_w - T_f) \quad (4.1.2)$$

T_f : bulk fluid temperature

응축열전달계수는 상관식을 통하여 구하는데, 비응축성기체가 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우에 따라 구하는 방식에 차이가 있다. 비응축성기체가 존재하지 않는 경우의 응축열전달계수는 층류유동의 경우 Nusselt 상관식을 이용하여 구하고 난류유동인 경우는 Shah 상관식을 이용한다. Nusselt 상관식과 Shah 상관식에 의한 열전달계수는 각각 다음과 같다.

■ Nusselt 상관식

$$h_{nusselt} = \frac{k_f}{\delta} \quad (4.1.3)$$

$$\delta = \left(\frac{3\mu_f \Gamma}{g\rho_f \Delta\rho} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{3\mu_f^2 Re_f}{4g\rho_f \Delta\rho} \right)^{\frac{1}{3}} = 0.9086 \left(\frac{\mu_f^2 Re_f}{g\rho_f \Delta\rho} \right)^{\frac{1}{3}} : \text{film thickness}$$

가정 :

1. 유체특성은 동일하다
2. 기체는 액체표면에 영향을 주지 못한다(drag force)
3. 액체 과냉도는 무시한다.
4. 층류 환상 액막 유동에서의 운동량 변화는 무시한다.
5. 열전달은 층류 환상 액막 유동을 통한 전도에 의해 이루어진다.

■ Shah 상관식 :

$$h_{Shah} = h_{sf} \left(1 + \frac{3.8}{Z^{0.95}} \right) \quad (4.1.4)$$

$$Z = \left(\frac{1}{X} - 1 \right)^{0.8} P_{red}^{0.4}$$

X : equilibrium quality

P_{red} : reduced bulk pressure, $\frac{P}{P_{critical}}$

$h_{sf} = h_l(1 - X)^{0.8}$: superficial heat transfer coefficient

$$h_l = 0.023 \left(\frac{k_l}{D_h} \right) Re_l^{0.8} Pr_l^{0.4}$$

:Dittus-Boelter coefficient assuming all fluid is liquid

$$Re_l = G_{total} \frac{D_h}{\mu_f}$$

비응축성기체가 존재하는 경우의 응축열전달은 Colburn-Hougen Diffusion Method를 통하여 계산한다. 이는 벽면의 액체막과 증기부분 사이에 비응축성기체막을 고려하는 것으로서 비응축성기체막을 통한 확산에 의해 응축되는 기체에서 액체-기체 경계를 통해 전달되는 열의 양이 응축을 통해 전달되는 열의 양과 같다고 가정하여 열전달량을 계산한다. 본 방법에서는 계산 초기에 임의의 경계온도를 가정하고 액체-기체막으로의 응축기체 질량유동에 의한 열전달량을 계산한 후 액체막에서 벽면으로 전달되는 열량을 계산하여 비교한 후 초기에 가정한 경계온도를 보정하고, 열전달량 계산 및 경계온도 보정을 반복하여 경계온도를 결정하고 열전달량을 계산한다. 본 방법론의 가정은 다음과 같다.

1. 경계에서의 확산층을 통한 현열전달은 무시한다.
2. 증기기체에서의 부력에 의한 비응축성기체의 성층화는 무시한다.
3. 질량전달계수는 열과 질량전달의 유사성을 이용하여 구한다.
4. 기체는 응축에서 용해에 의해 기체영역에서 제거되지 않는다.

구체적인 계산 방법은 다음과 같다.

STEP 1) 벽면온도를 통한 포화압력을 경계면의 압력으로 가정하고 이에 해당하는 포화온도를 경계면의 온도로 가정

STEP 2) 액체-기체 막으로의 응축기체질량유동에 의한 열속 계산

$$q''_v = j_v \cdot h_{fgb} \quad (4.1.5)$$

h_{fgb} : $h_{fgsat}(P_{vb})$ steam minus liquid saturation enthalpy in the bulk

P_{vb} : steam partial pressure in the bulk

$$j_v = h_m \rho_{vb} \ln \left(\frac{1 - \frac{P_{vi}}{P}}{1 - \frac{P_{vb}}{P}} \right)$$

P : total pressure

P_{vi} : partial pressure of steam at liquid-gas-vapor interface

h_m : mass transfer coefficient

ρ_{vb} : saturation vapor density at P_{vb} , $\rho_{vb} = (1 - X)\rho_{mb}$

ρ_{mb} : combined vapor and gas density in the bulk at the bulk gas temperature

$$\therefore q''_v = h_m h_{fgb} \rho_{vb} \ln \left(\frac{1 - \frac{P_{vi}}{P}}{1 - \frac{P_{vb}}{P}} \right) \quad (4.1.6)$$

STEP 3) 액체 막에서 벽면으로 전달되는 열속 계산

$$q''_l = h_c (T_{vi} - T_w) \quad (4.1.7)$$

T_{vi} : $T_{sat}(P_{vi})$ saturation temperature corresponding to the interface vapor pressure

: 열전달계수 h_c 는 비응축성기체가 존재하지 않는 경우의 상관식(Nusselt 상관식, Shah 상관식)으로 계산

STEP 4) 가정한 경계압력(P_{vi}) 및 경계온도(T_{vi}) 확인 및 보정을 통한 반복계산(STEP 2)

$$q''_l = q''_v \text{ or}$$

$$h_c (T_{vi} - T_w) = h_m h_{fgb} \rho_{vb} \ln \left(\frac{1 - \frac{P_{vi}}{P}}{1 - \frac{P_{vb}}{P}} \right) \quad (4.1.8)$$

3. 수직응축관 실험

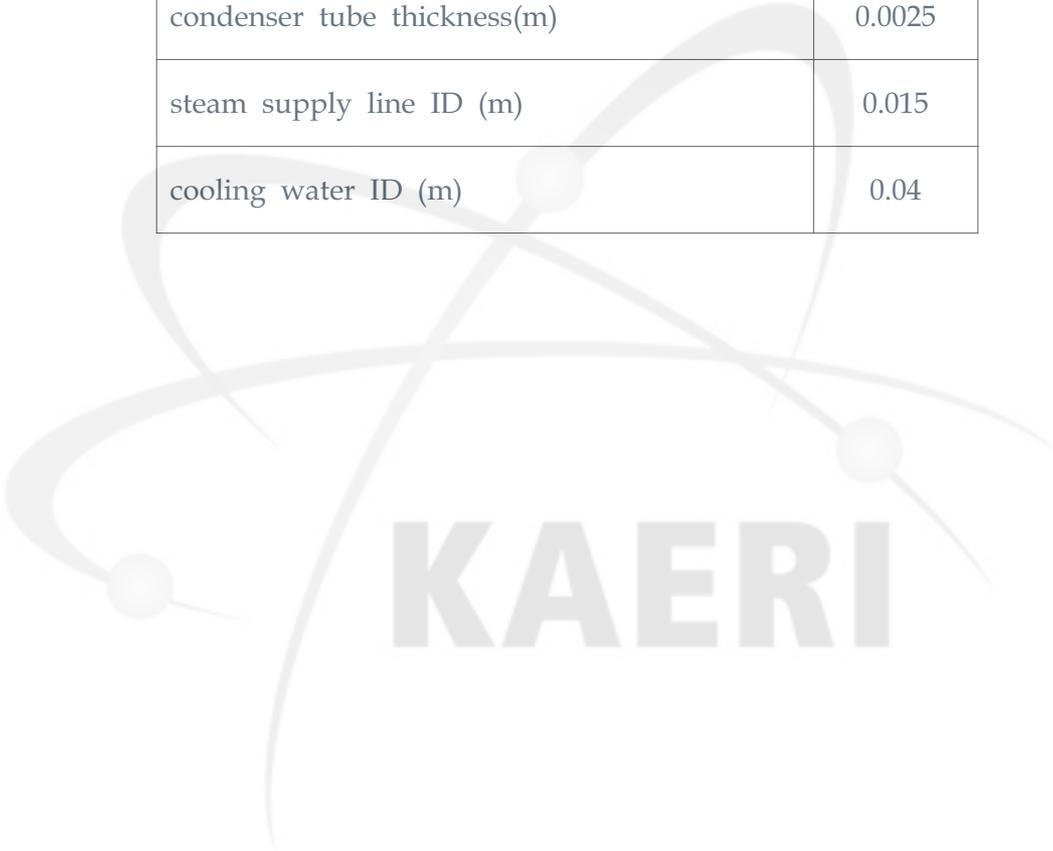
포항공대에서는 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor) 연구로의 피동 잔열제거계통(PRHRS, Passive Residual Heat Removal System)에 있는 응축열교환기의 열전달특성을 파악하고 성능을 평가하고자 실험을 수행하였다[이권영, 2008]. 그림 4.1.1에서 보이는 바와 같이 정상운전 중에는 공급된 급수가 증기발생기에서 기화되어 터빈으로 향하는 유로가 형성되지만, 사고 시에는 증기발생기에서 기화된 증기가 재장전수탱크에 잠겨진 응축관을 흐르며 냉각되어 다시 증기발생기로 유입되는 폐쇄회로가 형성되어 증기발생기를 통한 노심열제거를 한다. PRHRS의 압력을 유지하기 위하여 Compensation tank가 사용되며 질소가스로 가압된다. 정상운전 중에 급수에 질소가스가 녹아있을 수 있으므로 PRHRS 운전시에 증기발생기에서의 증발에 의하여 질소가스가 생성될 수 있으며 이는 응축관내에서 비응축성기체로 작용할 수 있다.

실험장비는 그림 4.1.2에 제시한 바와 같이 증기발생기, 증기유량조절계통, 증기/질소혼합계통, 시험부, 그리고 DAS로 구성되어 있다. 가솔린 보일러를 통해 나온 증기는 습분분리기를 통과하여 증기/질소혼합계통으로 유입된다. 이 사이 증기유량에 따른 압력변동을 상쇄하기 위하여 Surge tank가 설치되어 있다. 증기/질소혼합계통은 질소유량조절기, 가열기, 챔버 및 밸브들로 구성되어 있다. 시험부는 안쪽의 응축관과 바깥쪽의 냉각재킷으로 구성되어 있으며, 표 4.1.1에 주요 형상치들을 제시하였다. 응축관은 304 스테인리스스틸 재질이며, 길이는 3m, 유효길이는 2.8m, 내경은 13mm이다. 그림 4.1.3에는 시험부의 단면을 제시하였다. 시험부의 외벽에는 축방향으로 위치를 달리하여 13군데에 열전대를 설치하였다. 냉각재킷은 아크릴벽체로 구성되었으며 응축관 외벽과 아크릴벽체사이로 냉각수가 흐르도록 하였다. 냉각재킷의 내경은 40mm이며, 축방향 위치를 달리하여 11군데에 열전대를 설치하였다.

실험을 통하여 측정된 유량 및 압력, 온도 자료를 토대로 열전달량 및 열전달계수를 계산하였으며, 주입증기유량이 높아질수록 열전달계수는 커지고 비응축성기체분율이 커질수록 열전달계수는 작아짐을 확인하였으며, 또한 계면응력을 고려한 degradation factor 상관식을 개발하였다.

표 4.1.1 Test Section 주요 설계치

condenser tube ID (m)	0.013
condenser tube length (m)	3
condenser tube effective length (m)	2.8
total condenser tube length (m)	3.0
condenser tube thickness(m)	0.0025
steam supply line ID (m)	0.015
cooling water ID (m)	0.04



KAERI

Normal operating conditions



Emergency conditions

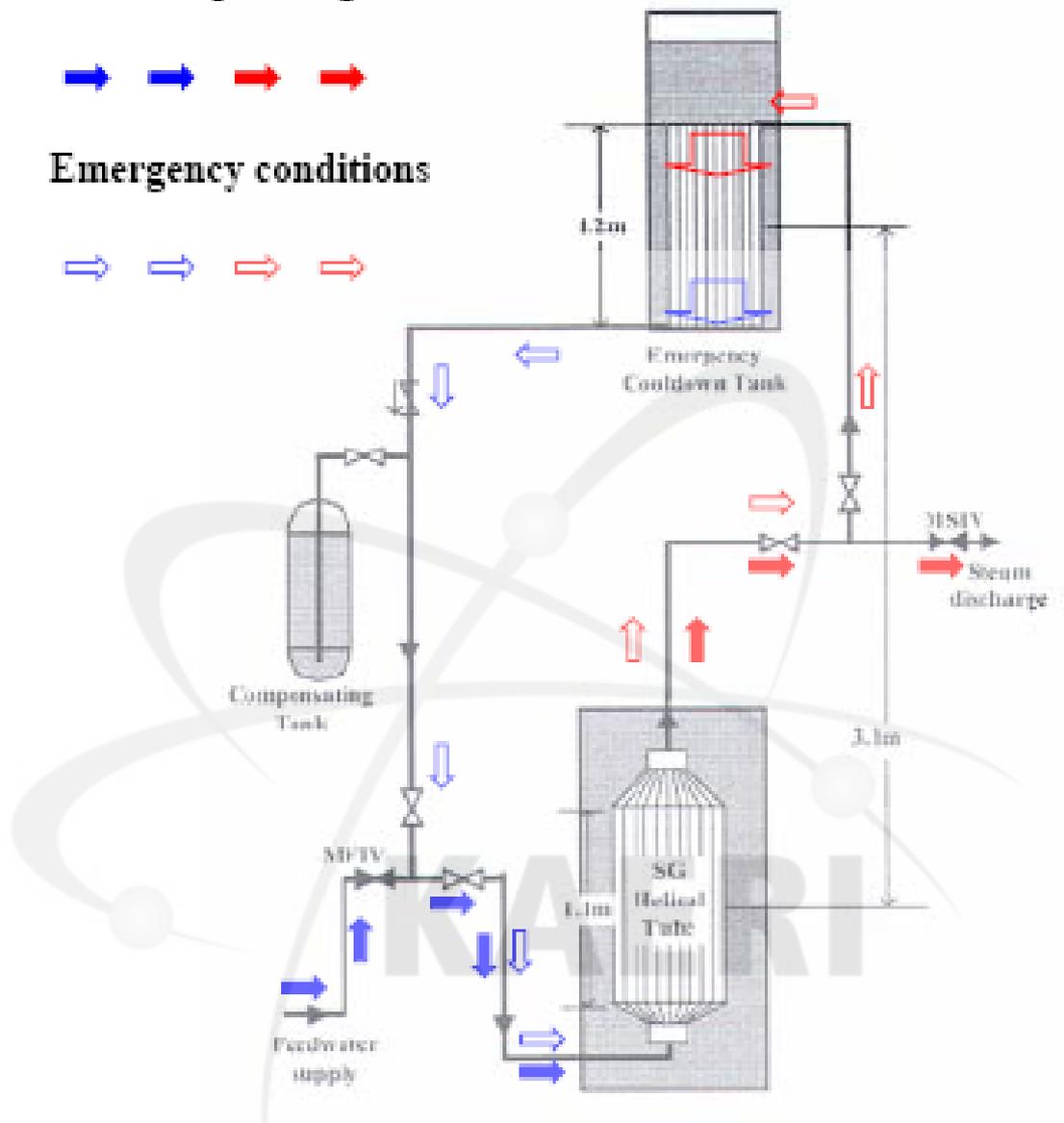


그림 4.1.1 SMART PRHRS 개략도

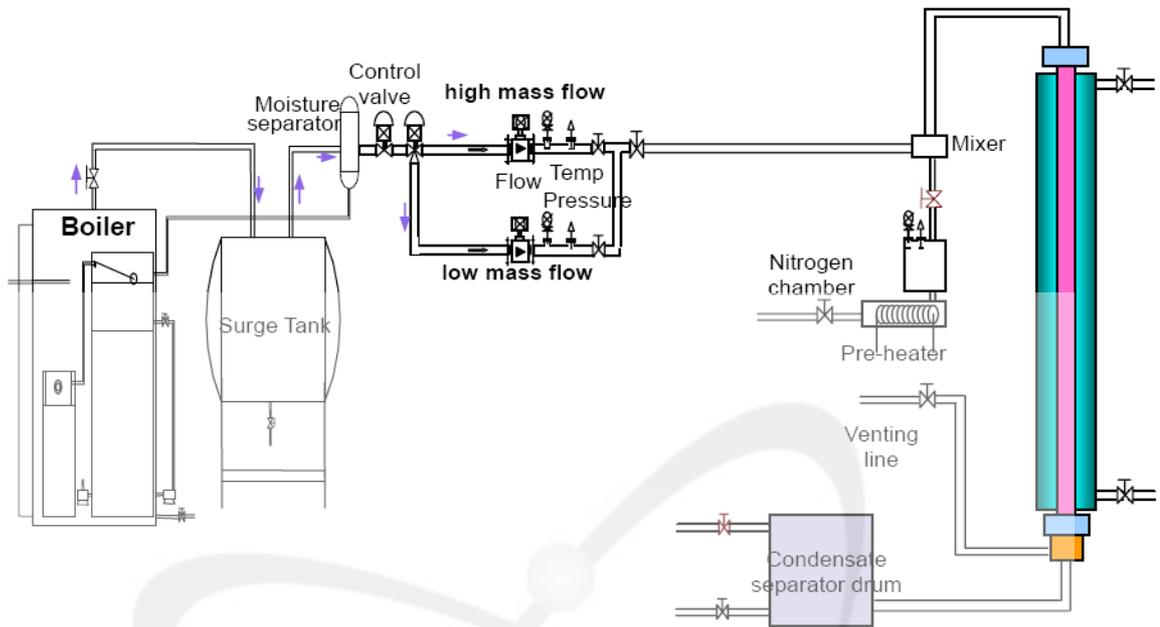


그림 4.1.2 실험장비 개략도

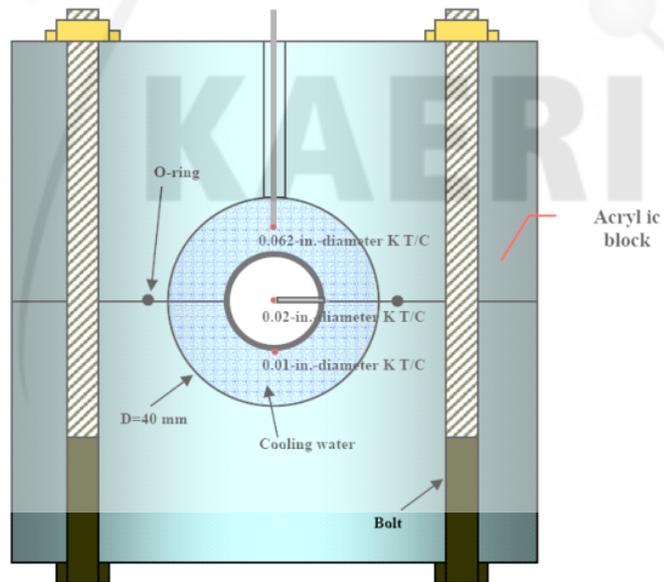


그림 4.1.3 냉각재킷 및 응축관 단면도

4. MARS 코드 모델링 및 분석결과

MARS 코드를 사용하여 실험의 시험부를 모델링하고 분석하였다. 응축관내부 증기, 응축관 벽면, 냉각재킷으로 이루어지는 열전달과정에서 응축관내부의 열저항이 상대적으로 매우 작기 때문에 MARS 코드의 응축모델을 검증하기 위해서는 응축관 내부 이외의 다른 부위의 모사가 정확하여야 한다. 따라서, 본 분석에서는 냉각재킷은 모델링하지 않고 측정된 응축관 외벽온도를 직접 대입함으로써 불필요한 영향을 방지하였다.

그림 4.1.4에는 본 분석에서 사용한 MARS 코드 입력의 노드화 개략도를 제시하였다. 응축관은 MARS 코드의 PIPE component를 사용하여 모사하였다. 주입하는 혼합기체의 상태는 Time-dependent volume을 통하여 모사하였으며, 실험측정치(inlet bulk temperature, inlet pressure)를 대입하였다. 여기서 증기를 포화상태로 가정하면, inlet bulk temperature에 해당하는 포화압력이 증기의 압력분율이 되며, inlet pressure와 증기의 압력분율과의 차이가 비응성기체의 압력분율이 된다. 한편, 주입유량은 Time-dependent junction을 통하여 조절하였으며, 실험측정치로 주어진 증기 및 비응축성기체의 유량을 더한 총 유량을 대입하였다.

그림 4.1.5와 그림 4.1.6은 MARS 코드 분석결과를 보여준다. 주입유량 및 비응축성기체의 영향은 실험결과와 유사하게 나타났다. 하지만 그림 4.1.7과 그림 4.1.8의 실험결과치와 MARS 코드 분석결과치를 비교해 보면, 다음과 같은 두 가지 차이점을 발견할 수 있다.

도출된 문제점 1 : 위치에 따른 열전달계수 그래프 형태가 다름.

도출된 문제점 2 : MARS 코드 계산결과가 실험치보다 크게 예측함.

다음 장에서 도출된 문제점에 대하여 자세히 설명하고 개선안을 제시하였다.

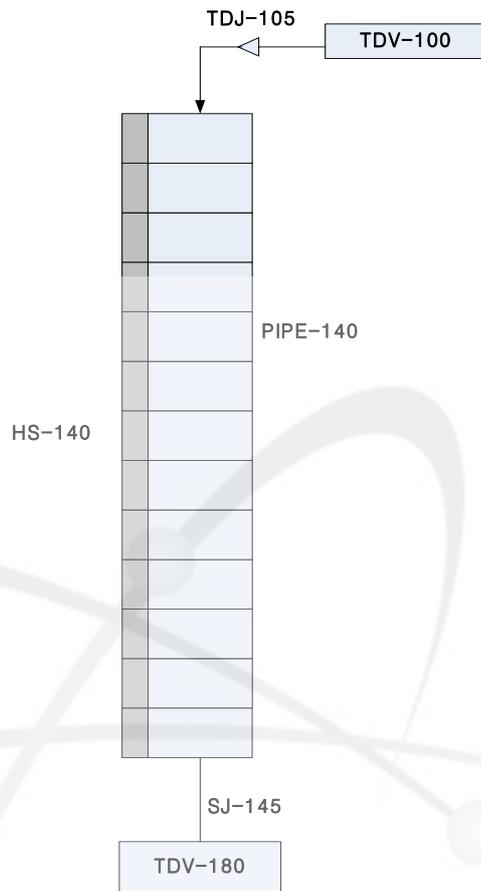


그림 4.1.4 응축관실험 MARS 코드 노드화

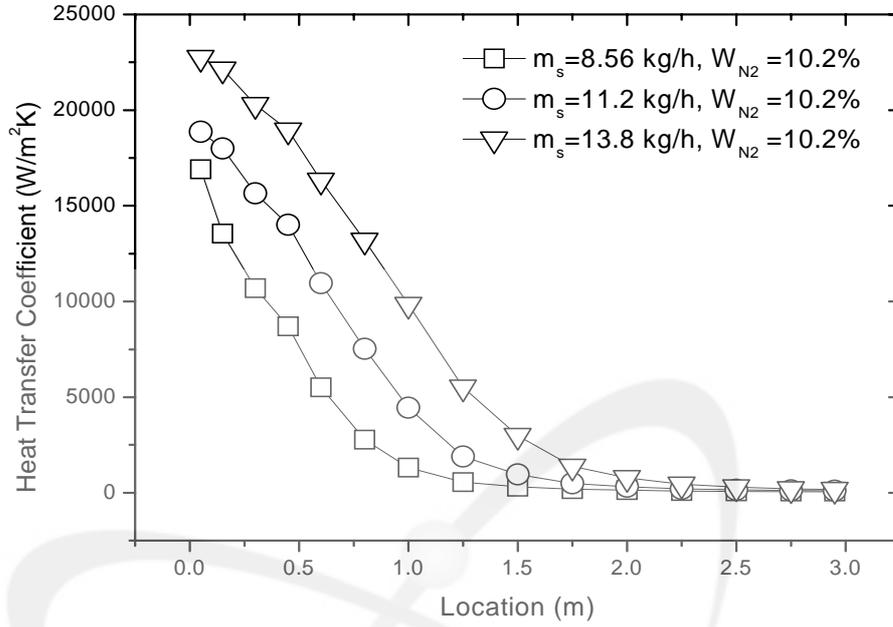


그림 4.1.5 주입유량에 따른 열전달계수 MARS 코드 계산결과

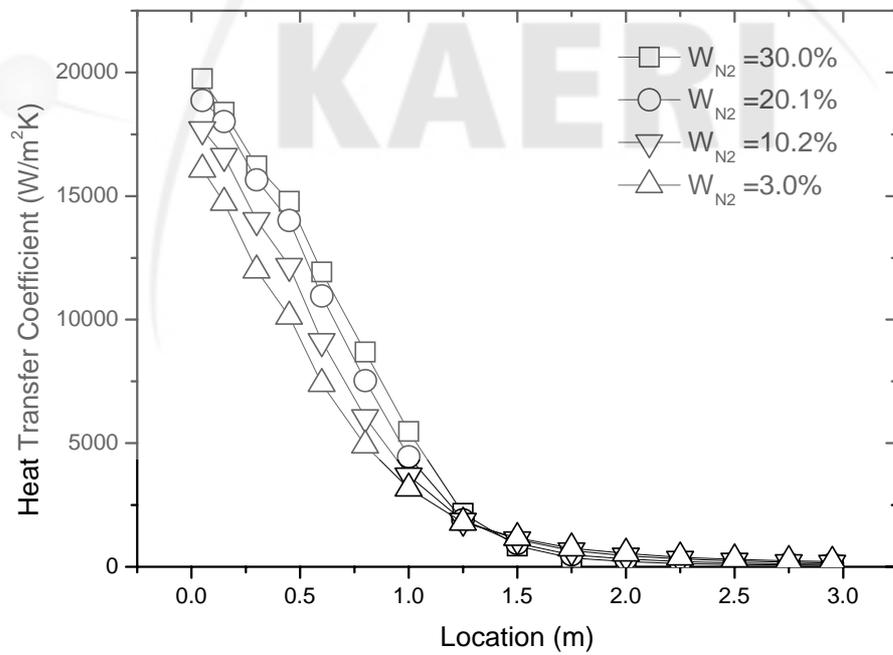


그림 4.1.6 비응축성기체 분율에 따른 열전달계수 MARS 코드 계산결과

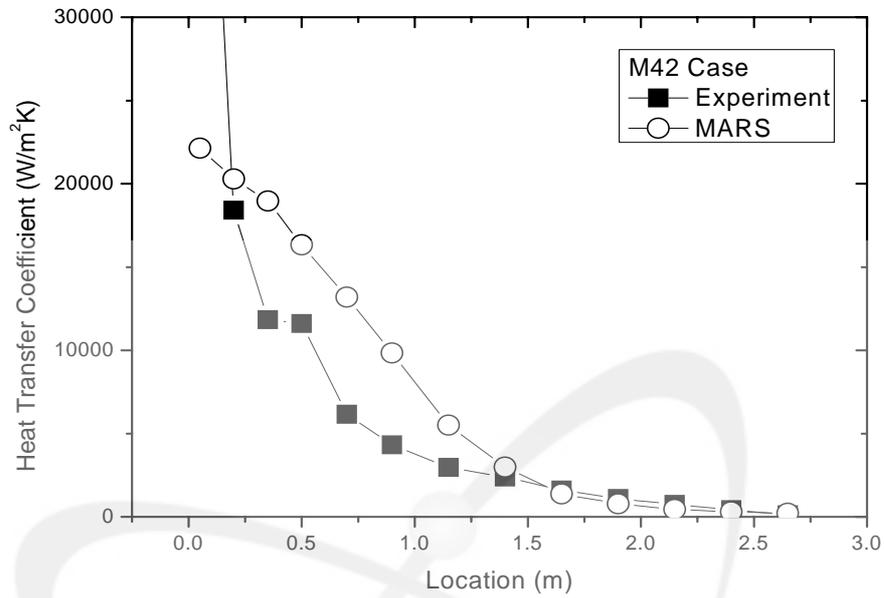


그림 4.1.7 M42 Case 분석결과

(inlet pressure 105.48 kPa, inlet temperature 98.93°C, inlet steam/non-condensable gas mixture flow rate 15.3 kg/hr)

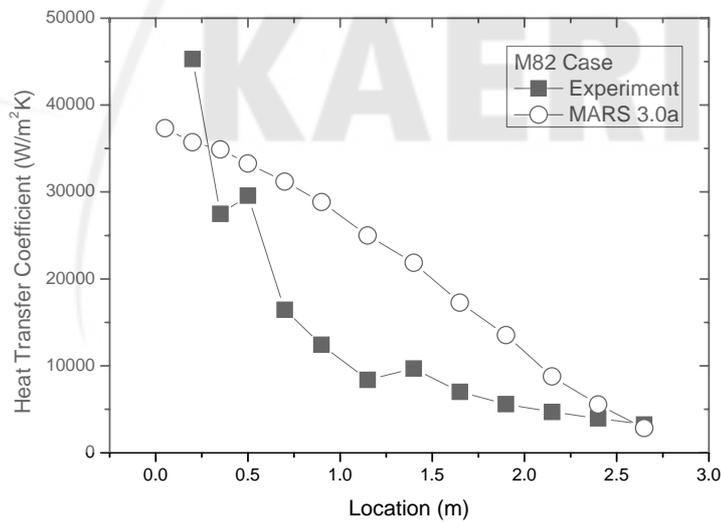


그림 4.1.8 M82 Case 분석결과

(inlet pressure 131.17 kPa, inlet temperature 105.1°C, inlet steam/non-condensable gas mixture flow rate 30.1 kg/hr)

5. MARS 코드 응축 열전달 모델 개선

○ 도출사항 1 : 응축열전달계수 상관식 관련

실험조건은 증류유동임에도 불구하고 열전달계수 계산에 Shah 상관식(난류유동)이 사용되고 있음을 확인하였다. 그림 4.1.9처럼 기존 MARS 코드는 Nusselt 상관식과 Shah 상관식을 사용하여 구한 열전달계수 중 큰 값을 사용하는 논리를 사용하고 있다. Shah 상관식은 관지름이 작을수록 열전달계수를 크게 계산한다(식 Shah 상참고). 즉, 같은 유동조건이라 하더라도 관지름이 작게 되면 Shah 상관식에 의한 열전달계수가 커져서 현재의 MARS 코드에서 사용하는 논리에 따라 Shah 상관식으로 구한 열전달계수가 사용되게 된다. 한편, 현재 MARS 코드에서는 건도로 아래 식 Shah9와 같은 식을 사용하고 있는데, 이 경우 주입유체의 과열도가 클수록 Shah 상관식은 작아지게 된다. 이는 또한 난류유동조건임에도 불구하고 주입유체가 과열증기인 경우 Nusselt 상관식이 잘못 사용되는 경우가 발생할 수도 있게 된다.

$$X_e = \frac{[X_{flow}h_g + (1 - X_{flow})h_f] - h_f^s}{h_g^s - h_f^s} \quad (4.1.9)$$

결론적으로 현재의 MARS 코드가 사용하고 있는 상관식 선택논리로는 관지름이 작은 경우나 과열증기를 사용하는 경우 유동조건에 맞지 않는 상관식을 사용하게 될 수도 있다. 따라서, 상관식 적용논리는 MARS 코드에서 채택하고 있는 상관식들의 본래 적용의도에 따라 유동조건으로 결정하도록 수정되어야 한다. 본 연구에서는 개선안으로 Nusselt 상관식의 상한치인 Film Reynolds 1,800을 기준으로 증류와 난류를 구별하여 상관식을 사용하도록 한다.

○ 도출사항 2: 상관식 개선관련

MARS 코드에서 증류유동에 적용하도록 사용하고 있는 Nusselt 상관식은 비현실적인 엄격한 가정에 기초하여 유도된 상관식이다. 많은 연구를 통하여 Nusselt 상관식의 개선점이 제시되었으며 활용이 가능하다. 한 예로, Nusselt 상관식에서는 계면 응력을 무시하고 있으나, 전단응력으로 인해 액체막의 두께가 얇아지며, 열전달이 강화될 수 있다. 이를 고려하기 위하여 Degradation factor를 사용한 상관식[이권영, 2008]이 제시되어 있다. 상관식은 다음과 같다.

$$\text{Degradation Factor} : f_{pure} = h_{exp,pure} / h_{Nu} = 0.8247\tau_{mix}^{*0.3124} \quad (4.1.10)$$

$$\text{Dimensionless shear stress} : \tau_{mix}^* = \frac{\tau_{mix}}{g\rho_f L} = \frac{1/2\rho_{mix}u_{mix}^2 \cdot f}{g\rho_f L}$$

$$u_{mix} = Re_{mix} \mu_{mix} / \rho_{mix} d_i, \quad L = (v_f^2 / g)^{1/3},$$

$$f = 0.079 Re_{mix}^{-1/4} \text{ for } Re_{mix} > 2,300 \text{ or } f = 16 / Re \text{ for } Re_{mix} < 2,300$$

○ MARS 코드 수정 및 계산결과

상관식 선정기준과 층류유동에서의 열전달계수 상관식 개선안을 반영하여 MARS 코드를 수정 및 계산하였다. 그림 4.1.10 및 그림 4.1.11에서 보여지는 바와 같이 기존 MARS 코드 계산결과에 비하여 실험에 더 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 그림 4.1.12-4.1.15에서 보여지는 바와 같이 타 대학의 유사 실험(표 4.1.2 참고)을 분석한 결과 또한 기존 MARS 코드 계산결과보다 나은 결과를 얻을 수 있었다.

표 4.1.2 Test Section 주요 설계치

	Goodykoontz (1966)	Siddique (1992)	Kuhn (1995)	Park (1999)	Lee (2008)
	NASA	MIT	UCB	KAIST	POSTECH
Tube length (m)	2.15	2.54	2.4	2.4	2.8
Tube ID (mm)	15.875	46	47.5	47.5	13
Tube Thickness (mm)	1.58	2.4	1.65	1.65	2.5
Secondary jacket ID (mm)	50.8	62.7	76.2	100	40
noncondens able gas	-	air, helium	air, helium	air	nitrogen
secondary cooling	forced convection	forced convection	forced convection	forced convection	forced convection
steam flow (g/s)	4.2-14.7	2.4-8.9	8.2-17	2-11	1.8-7.8
inlet air mass fraction (%)	-	10-35	0-40	10-70	0-40
Pressure (MPa)	0.1	0.1-0.5	0.1-0.5	0.17-0.5	0.1-0.13
HTC (W/m ² K)	4485-11867	100-2500 0	500-13000	100-7000	300-27900

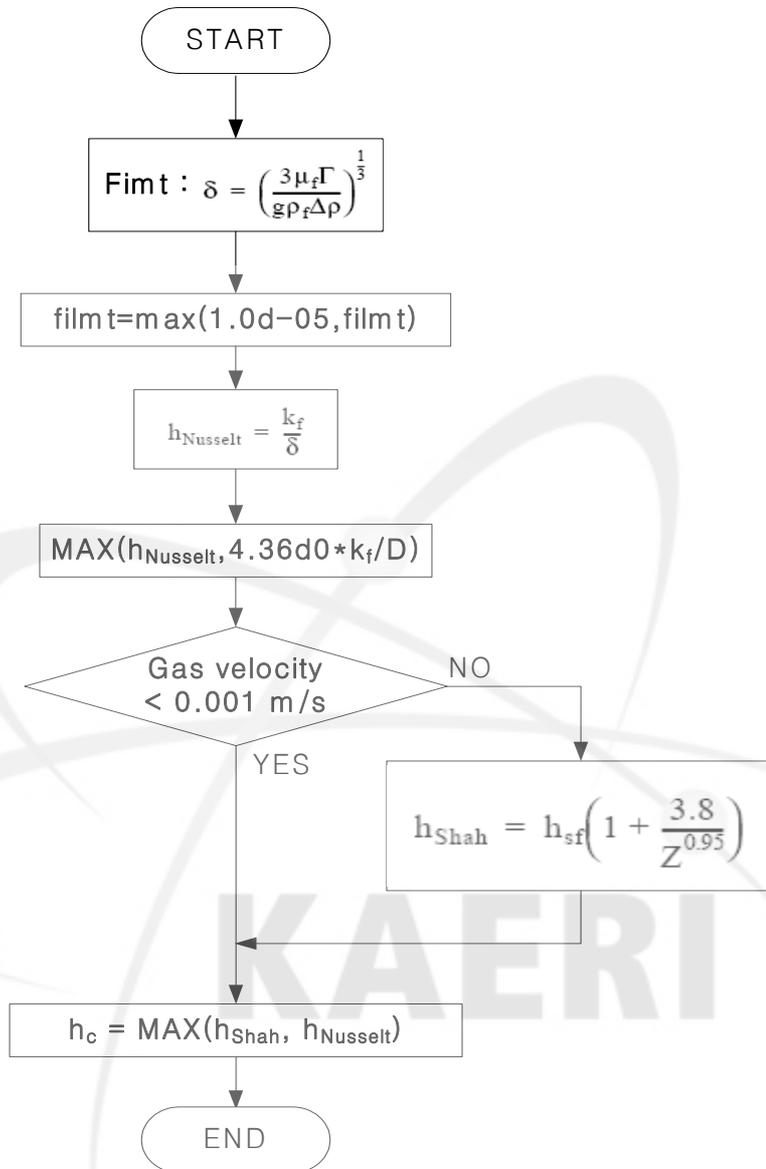


그림 4.1.9 수직관내의 응축열전달계수 계산

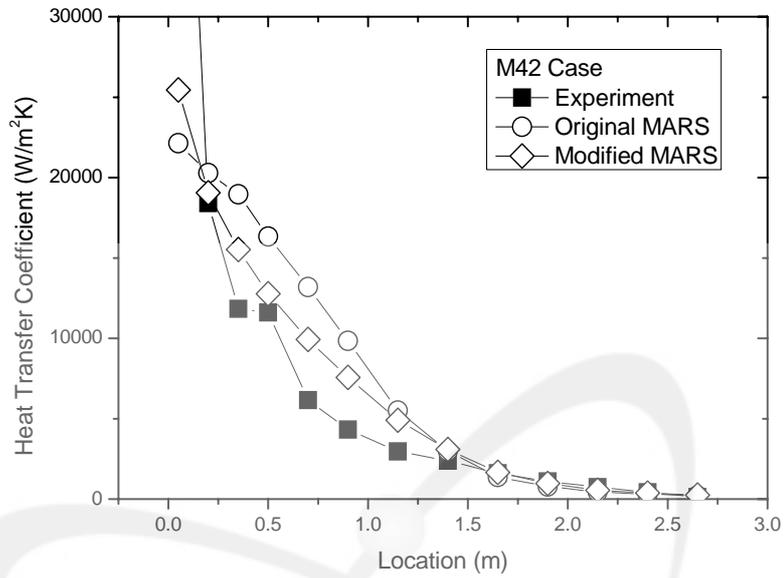


그림 4.1.10 M42 Case 계산결과 비교

(inlet pressure 105.48 kPa, inlet temperature 98.93°C, inlet steam/non-condensable gas mixture flow rate 15.3 kg/hr)

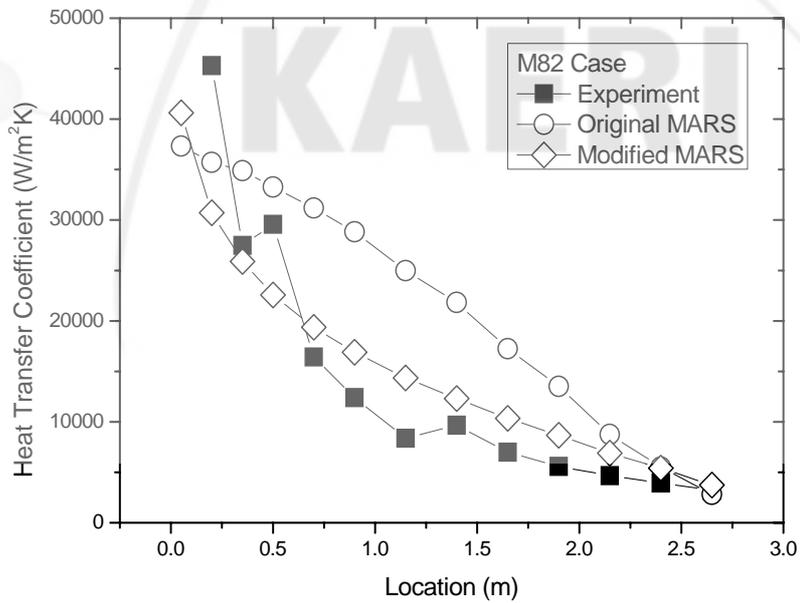


그림 4.1.11 M82 Case 계산결과 비교

(inlet pressure 131.17 kPa, inlet temperature 105.1°C, inlet steam/non-condensable gas mixture flow rate 30.1 kg/hr)

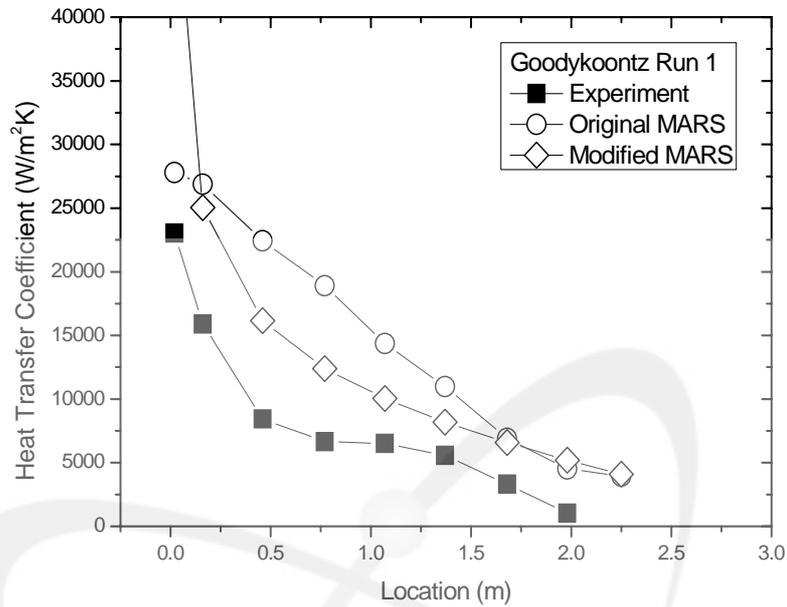


그림 4.1.12 Goodykoontz 계산결과 - Run 1 Case
(inlet pressure 101.3 kPa, inlet temperature 112.2°C, inlet steam flow rate 31.3 kg/hr)

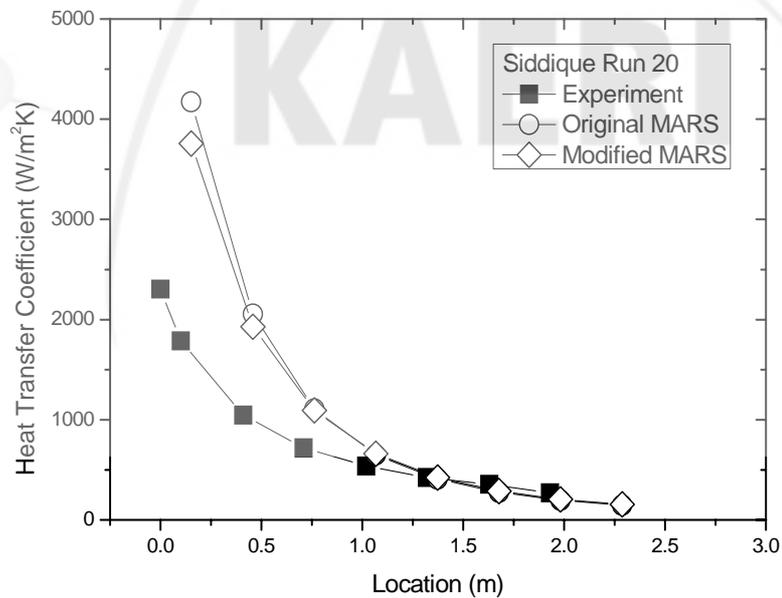


그림 4.1.13 Siddique 계산결과 - Run 20 Case
(inlet pressure 119.0 kPa, inlet temperature 100.3°C, inlet steam-noncondensable gas mixture flow rate 25.0 kg/hr)

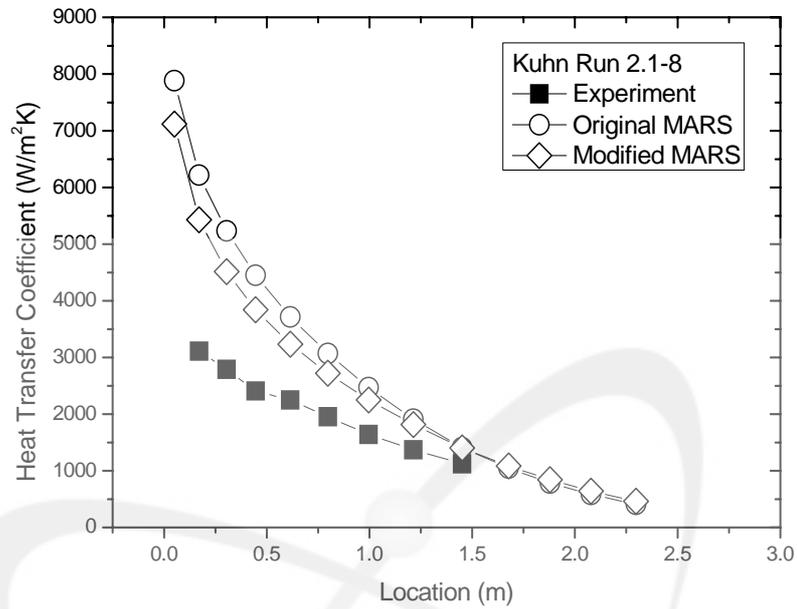


그림 4.1.14 Kuhn 계산결과 - Run 2.1-8 Case
 (inlet pressure 418.1 kPa, inlet temperature 140.7°C, inlet steam-noncondensable gas mixture flow rate 58.4 kg/hr)

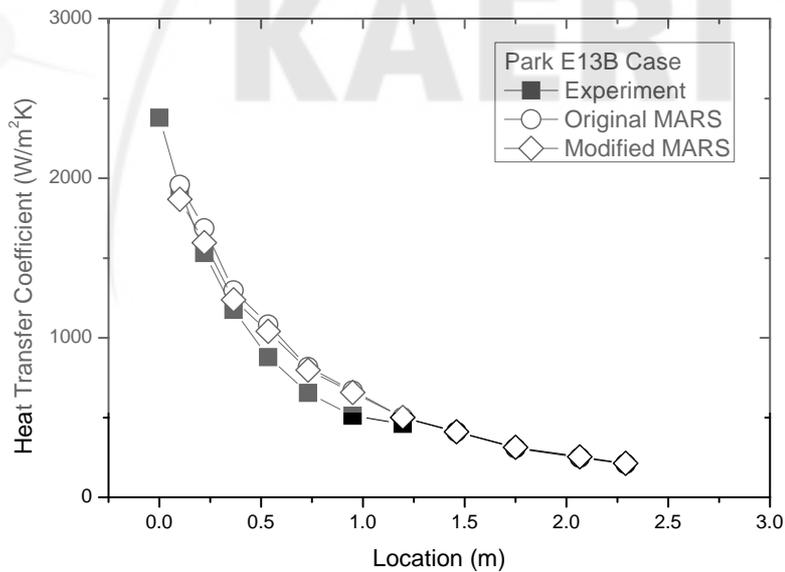


그림 4.1.15 Park 계산결과 - E13B Case
 (inlet pressure 185.4 kPa, inlet temperature 110.5°C, inlet steam-noncondensable gas mixture flow rate 27.0 kg/hr)

제 2 절 수평관 내 역류유동제한 현상 평가

1. 개요

일반적으로 이상유동 시스템에서는 기체의 유속이 액체의 유속보다 빠르는데, 이러한 서로 다른 상 간의 상대속도로 인하여 액체와 기체의 경계면에는 전단응력이 작용하게 된다. 상 간의 상대속도가 증가하면 전단응력도 증가하고 이러한 전단응력의 증가로 인해 액체면에 파동(wave)이 형성되고, 유동에 여러 가지 복잡한 현상을 유발하게 된다. 특히 액체와 기체의 역류 유동(counter-current) 시스템의 경우 이런 두 상의 속도가 어떤 상대 속도에 도달하면 경계면에 파동이 형성되고 압력 강하 또한 증가하여 액체 또는 기체 유량이 더 이상 증가하지 못하는 현상이 발생한다. 이렇게 되면 더 이상 역류 유동이 될 수 없게 되는데, 이렇게 되는 현상을 CCFL (Counter-Current Flow Limit) 혹은 Flooding이라고 한다. 이러한 Flooding 현상은 여러 가지 에너지 사업 분야에서 많이 사용되고 있는데 특히 원자력 발전소의 안전성 평가에 있어 중요하게 다루어지는 문제 중 하나이다. 이러한 현상은 원자력 발전소 사고 발생 시 노심에서 생성된 증기가 안전을 위해 주입되는 물의 흐름을 방해할 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 거의 수평관(nearly horizontal pipe)에서의 역류유동 제한 현상에 대한 MARS 코드의 해석능력을 검증하고 개선점을 제시하고자 한다. 이를 위해 KAIST에서 수행된 실험[최기용, 1993]을 MARS 코드로 모사하여 실험결과와 비교하여 개선점을 도출하였다.

KAERI

2. CCFL 실험

KAIST에서는 수평관에서의 역류유동 제한 현상을 규명하기 위한 실험 연구를 수행하였다[최기용, 1993]. 실험장비는 그림 4.2.1에 제시한 바와 같이 2개의 동일한 vessel과 두 vessel을 잇는 수평관, water pump와 blower, 그리고 수위 계측기 등으로 구성되어 있다. 시험부인 수평관의 길이는 2160mm이고, 내경 (40, 60, 70mm)과 경사도 (0.23, 0.69, 0.92°)를 변경하며 실험을 수행하였다. 이 때 수평관의 경사도는 water vessel 하부에 있는 jacking screw로 조절된다. 이 실험 장치에서 공기는 blower를 통해 air vessel의 상부로 주입되어 수평관을 지나 water vessel의 상부로 빠져나가게 되고, 물은 water pump를 통해 water vessel의 하부로 주입되어 수평관을 지나 air vessel의 하부에 있는 water surge tank에 모이게 된다. 두 유체는 수평관에서 역류 유동을 형성하게 되는데, 실험은 물의 유량은 고정시킨 상태에서 공기 유량을 조금씩 증가시켜 가면서 CCFL이 발생하는 지점을 관측하였다.

실험을 통하여 측정된 공기 및 물의 유량 자료를 토대로 아래 식 4.2.1, 4.2.2와 같은 각 상의 무차원 superficial velocity를 계산하였으며, 주어진 물의 유량에 대해 CCFL의 발생하는데 필요한 공기 유량을 측정하였다.

$$j_f^* = j_f \left(\frac{\rho_f}{gD(\rho_f - \rho_g)} \right)^{1/2} \quad (4.2.1)$$

$$j_g^* = j_g \left(\frac{\rho_g}{gD(\rho_f - \rho_g)} \right)^{1/2} \quad (4.2.2)$$

j_f : the liquid superficial velocity (= $\alpha_f v_f$)

j_g : the gas superficial velocity (= $\alpha_g v_g$)

g : the gravity acceleration

D : the hydraulic diameter of a flow path

ρ : density

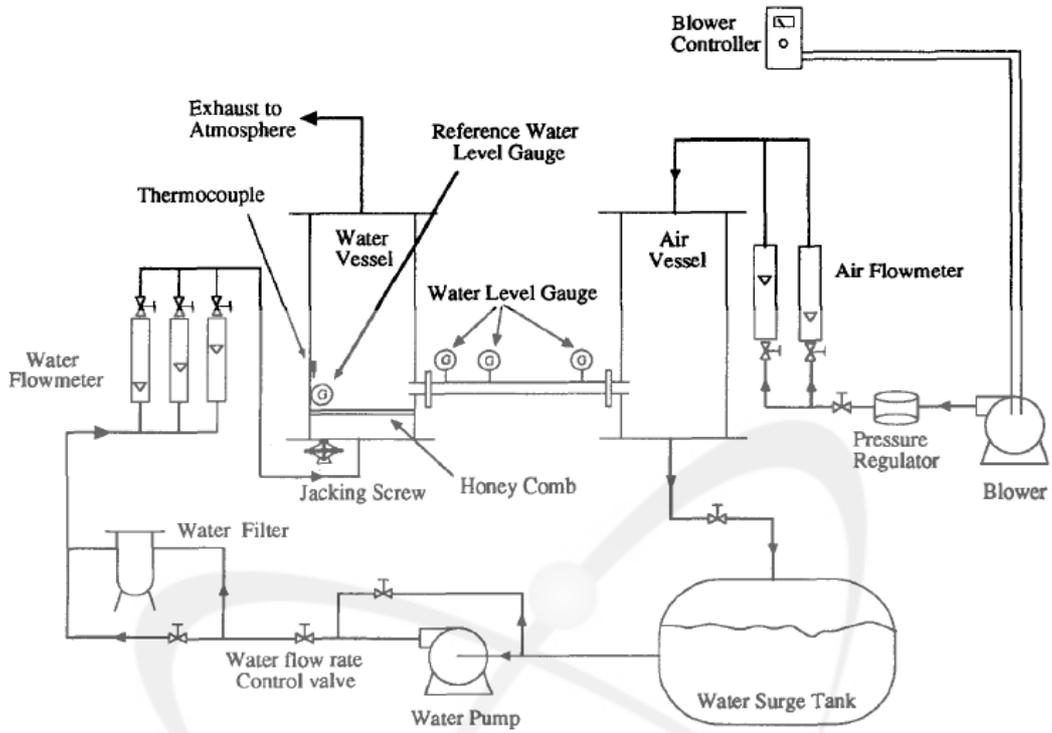


그림 4.2.1 CCFL 실험 장치

KAERI

3. MARS 코드 모델링 및 분석 결과

가. MARS 코드 모델링

MARS 코드로 실험의 시험부를 모델링하고 분석하였다. 모델링에 앞서 그림 4.2.2와 같이 앞서 소개한 그림 4.2.1의 실험 장치를 단순화시켰다. 화살표를 통해 각 유체의 흐름을 표현하였다. 그림 4.2.3은 그림 4.2.2의 실험 장치 개념도를 바탕으로 본 분석에서 사용한 MARS 코드 입력의 노드화 개략도를 제시하였다. 시험부인 수평관은 MARS 코드의 PIPE component를 사용하여 모사하였다. 각 상의 주입 유량은 Time-dependent junction을 통하여 조절하였으며, 각 vessel은 PIPE component를 이용하여 모델링하였다. 공기를 방출시키기 위한 압력 경계 조건으로써 Time-dependent volume을 이용하였다.

이 모델링에서 각 유체는 다음과 같이 흐르게 된다. 물은 TDV310으로부터 TDJ315를 통해 조절되어 P370의 하부를 지나 P100으로 흐르게 되고, 최종적으로 P270에 쌓이게 된다. 공기는 TDV210으로부터 TDJ215를 통해 조절되어 P270의 상부를 지나 P100으로 흐르게 되고 최종적으로 P370을 지나 TDV390을 통해 방출된다.

나. CCFL 발생 시점 결정

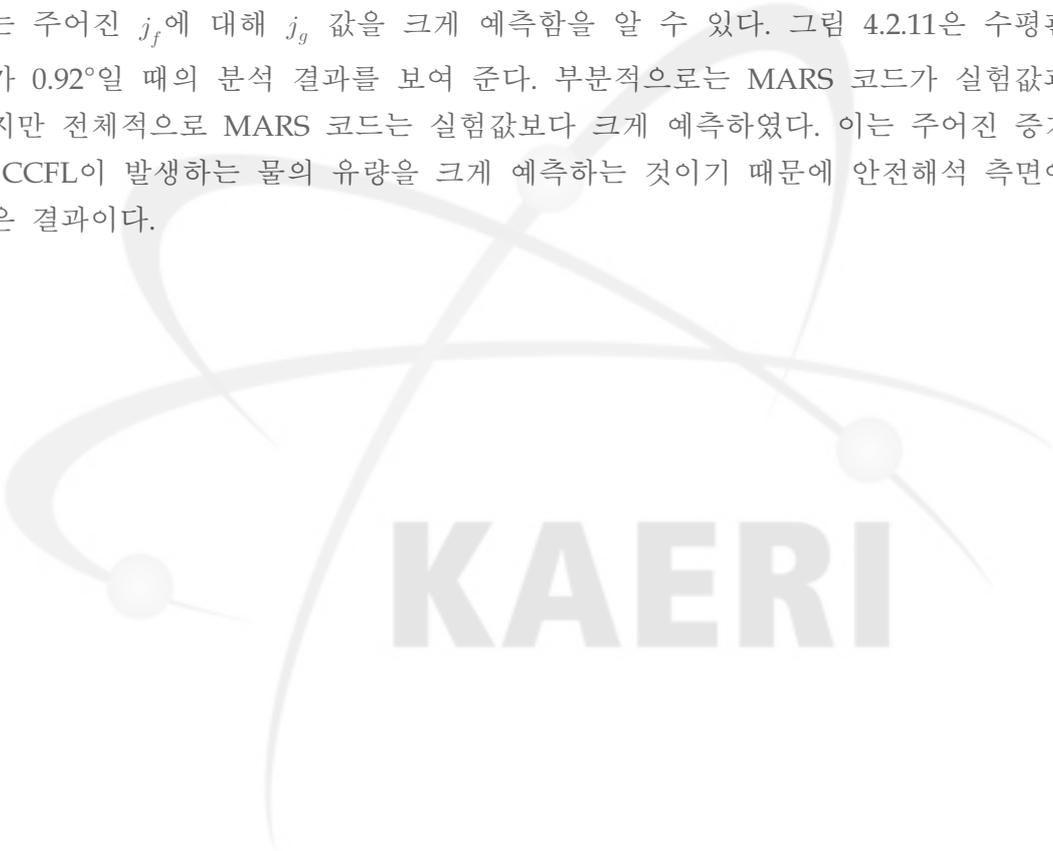
MARS 코드를 이용한 CCFL 분석은 다음과 같은 절차를 통해 수행되었다 (그림 4.2.4-4.2.8 참조). 실험에서 얻어진 j_f 에 상응하는 물의 유량을 고정값으로 주입하고, 동시에 공기는 물의 흐름을 방해하지 않을 정도로 일정하게 주입한다. 두 유체가 역류하는 상황에서 정상 상태를 잡기 위해 200초까지는 공기 유량을 일정하게 유지시킨다. 정상상태가 잡힌 200초 이후에는 CCFL이 발생할 때까지 공기 유량을 서서히 증가시킨다. 그림 4.2.4에서 보면 물의 유량이 570초 정도에서 급격히 감소하게 되는데, 이 시점을 CCFL의 시작점으로 결정하였다. 그림 4.2.5는 각 상의 유량에 대응하는 j_f 와 j_g 로 CCFL의 발생 지점을 표현하였다.

또한, CCFL이 발생하면 물 유량의 급격한 감소 뿐만 아니라 공기 탱크 내 물 수위의 증가, 수평관 내 압력 및 기포율의 증가와 같은 다양한 현상 변화가 나타나게 된다. 그림 4.2.6은 수평관 중심부에서의 압력 변화를 보여준다. 공기 유량이 증가함에 따라 압력이 초반에는 서서히 증가하지만 CCFL이 발생하는 시점부터 압력이 급격히 증가함을 알 수 있다. 그림 4.2.7은 수평관 내 물의 부피 비율을 보여준다. 공기 유량의 증가에 따라 초반에는 물의 부피 비율이 증가하지만 CCFL이 발생하는 시점부터 물의 흐름이 막혀 부피 비율은 감소하게 된다. 즉, 물의 흐름이 제한되어 유량이 감소됨을 알 수 있다. 그림 4.2.8은 각 탱크 내 물의 수위 변화를 보여 준다. 초반에는 물이 공기 유량의 방해 없이 원활히 흘러 물 탱크(P270)에 선형으로 축적되지만 CCFL의 발생하면서 수위 증가율이 감소함을 알 수 있다. 공기 탱크(P370)는 초반에 물이 들어오면서 약간의 수위 증가가 있지만 물의 흐름이 원활하기 때문에 거의 초반에 증가된 수위를 유지한다. 그러나 CCFL이 발생

하면서 물이 수평관으로 흐르는게 제한되면서 공기 탱크 내 물의 수위가 증가함을 알 수 있다. 이와 같이 CCFL이 발생하면 여러 가지 다양한 현상이 나타나게 되는데 주요 변수의 급격한 변화를 종합적으로 분석하여 CCFL의 발생 시점을 결정하였다.

다. MARS 코드 해석 결과

MARS 코드 해석 결과 주어진 j_f 에 대한 j_g 는 그림 4.2.9-4.2.11과 같이 나타났다. 그림 4.2.9와 4.2.10은 수평관의 기울기가 0.23° 일 때의 결과를 보여 주는데, MARS 코드가 수평관에서의 CCFL 발생 시점을 제대로 예측하지 못함을 알 수 있다. 전체적으로 MARS 코드는 주어진 j_f 에 대해 j_g 값을 크게 예측함을 알 수 있다. 그림 4.2.11은 수평관의 기울기가 0.92° 일 때의 분석 결과를 보여 준다. 부분적으로는 MARS 코드가 실험값과 일치하였지만 전체적으로 MARS 코드는 실험값보다 크게 예측하였다. 이는 주어진 증기량에 대해 CCFL이 발생하는 물의 유량을 크게 예측하는 것이기 때문에 안전해석 측면에서 좋지 않은 결과이다.

The logo for KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) is centered on the page. It features a stylized atomic symbol with three orbiting spheres and the word "KAERI" in a bold, sans-serif font below it.

KAERI

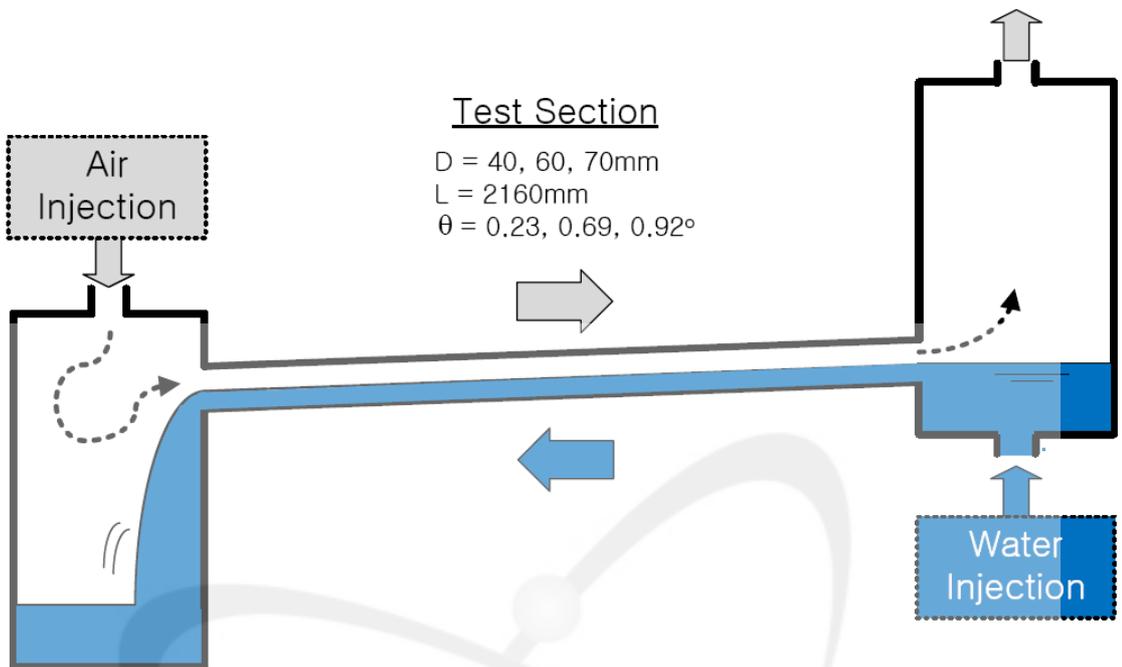


그림 4.2.2 실험 장치 개념도

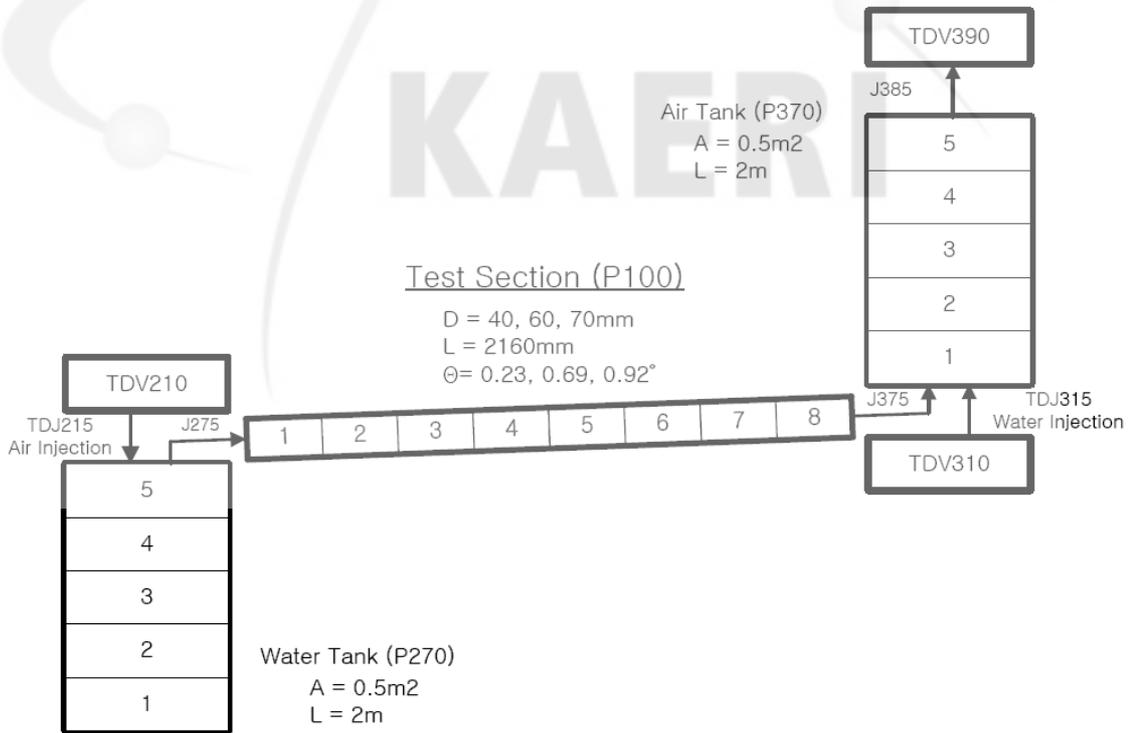


그림 4.2.3 CCFL 실험 MARS 코드 노드화

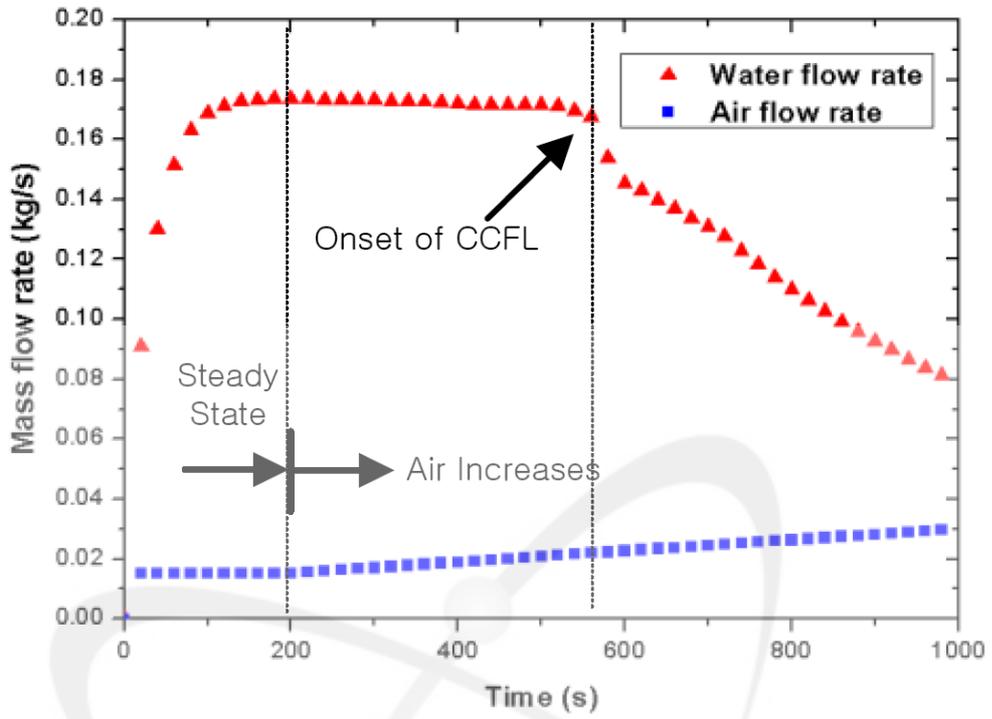


그림 4.2.4 CCFL 발생 시 유량 변화

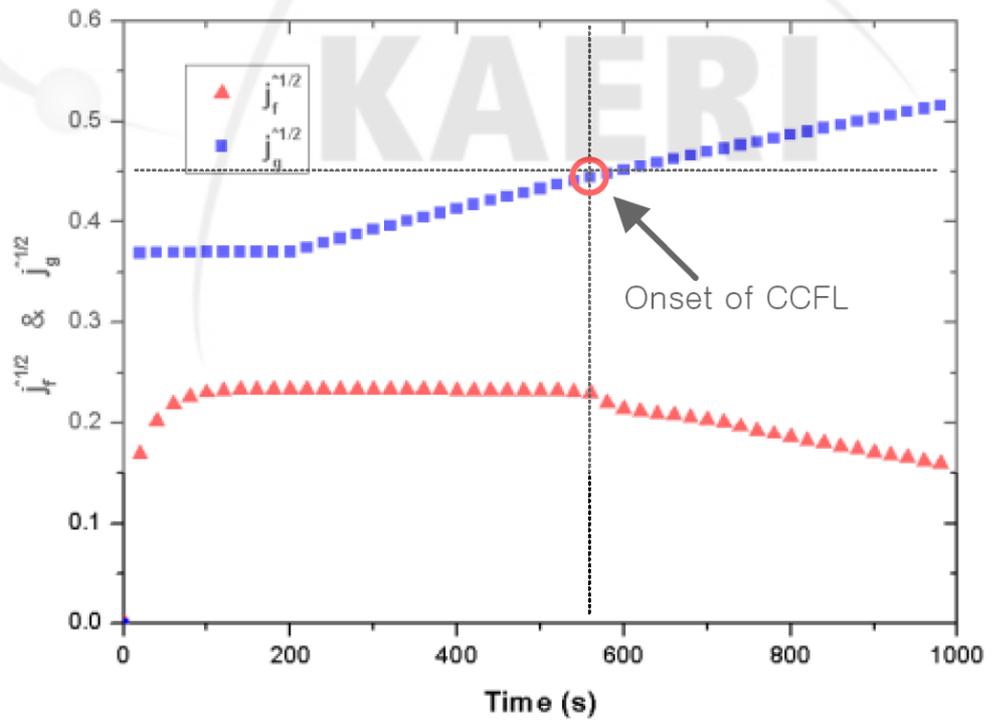


그림 4.2.5 CCFL 발생시 j_f 와 j_g 의 변화

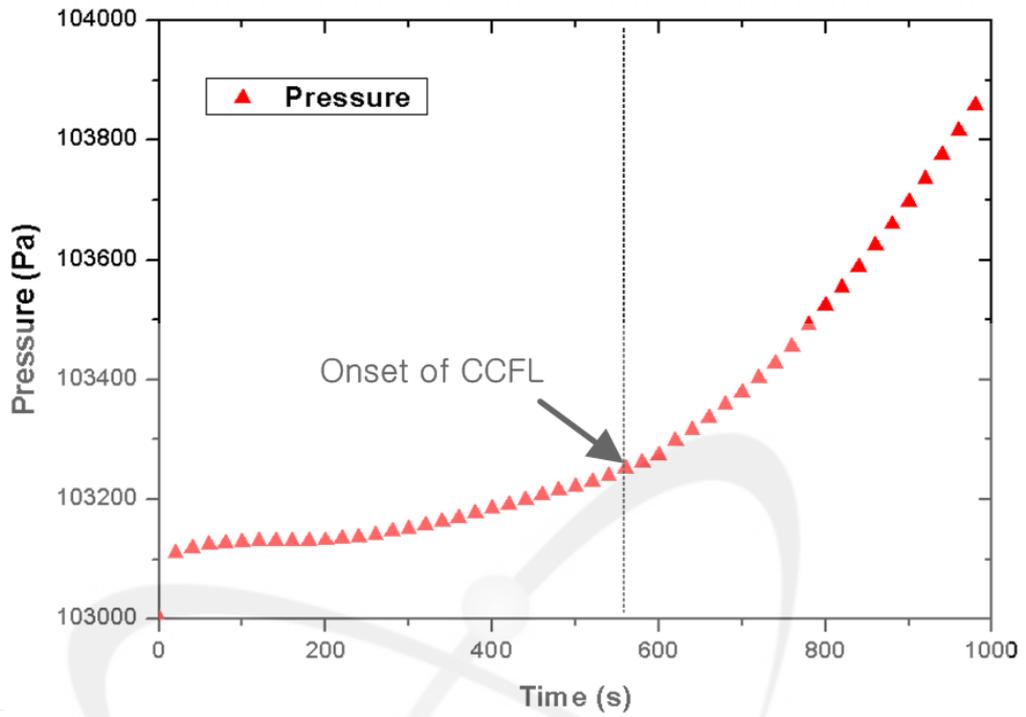


그림 4.2.6 CCFL 발생 시 압력 변화

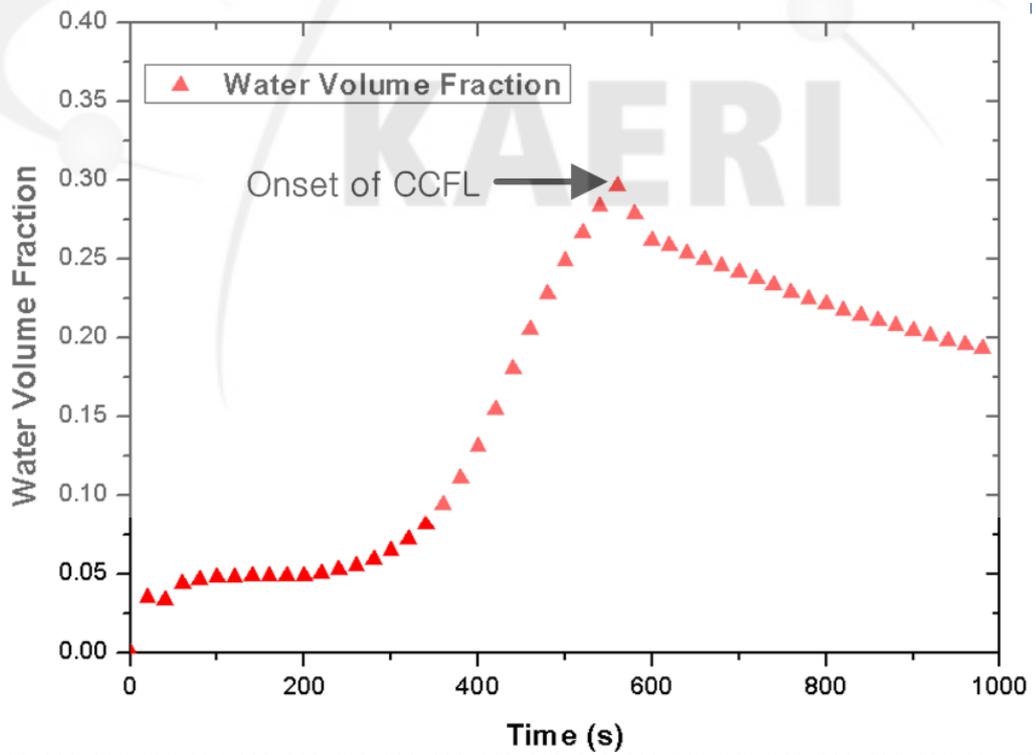


그림 4.2.7 CCFL 발생 시 물의 체적 비율 변화

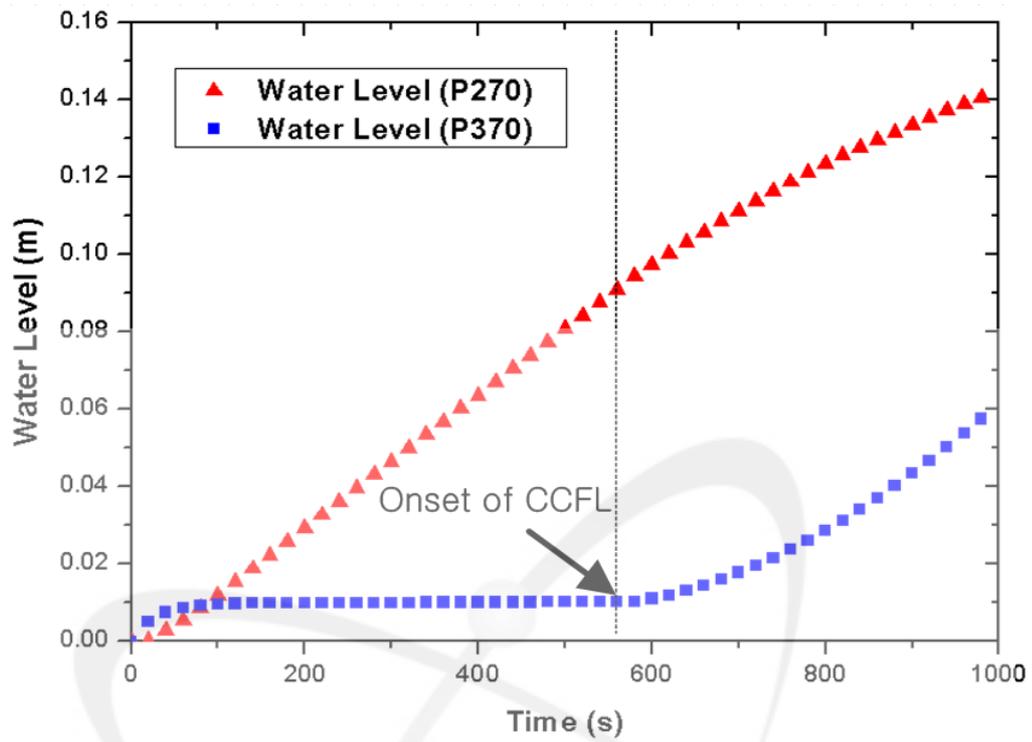


그림 4.2.8 CCFL 발생 시 각 탱크 내 수위 변화

KAERI

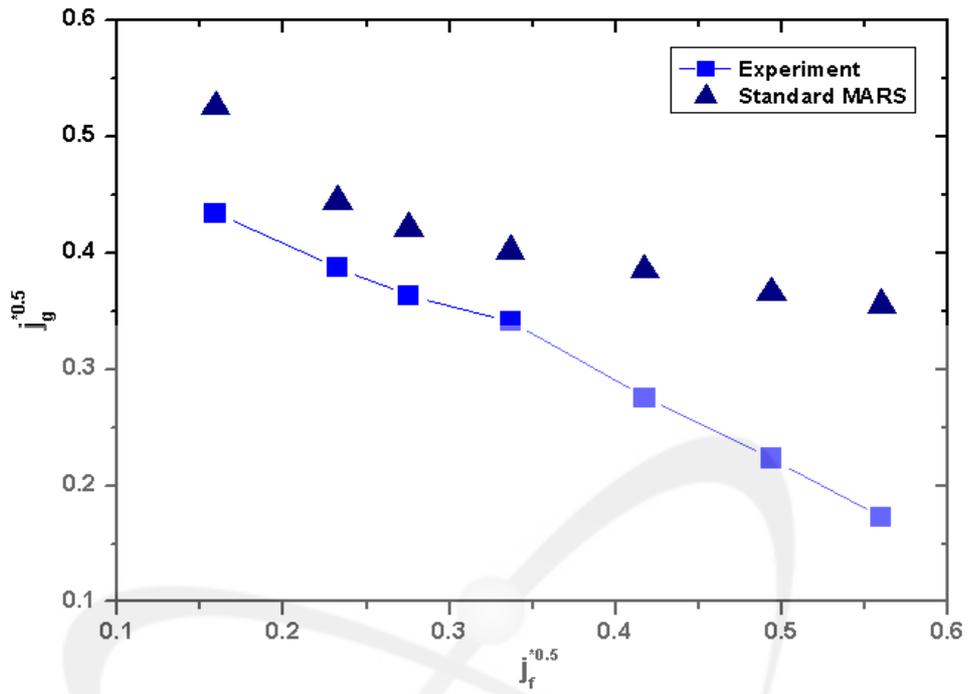


그림 4.2.9 CCFL 결과 비교 ($D=70\text{mm}$, $\theta=0.23^\circ$)

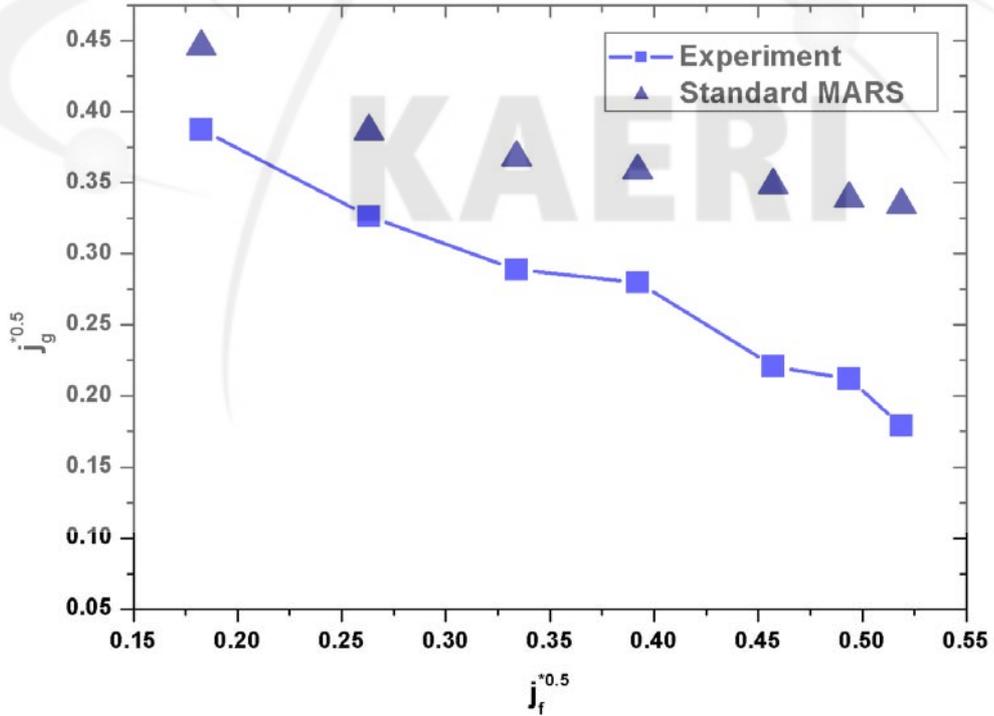


그림 4.2.10 CCFL 결과 비교 ($D=60\text{mm}$, $\theta=0.23^\circ$)

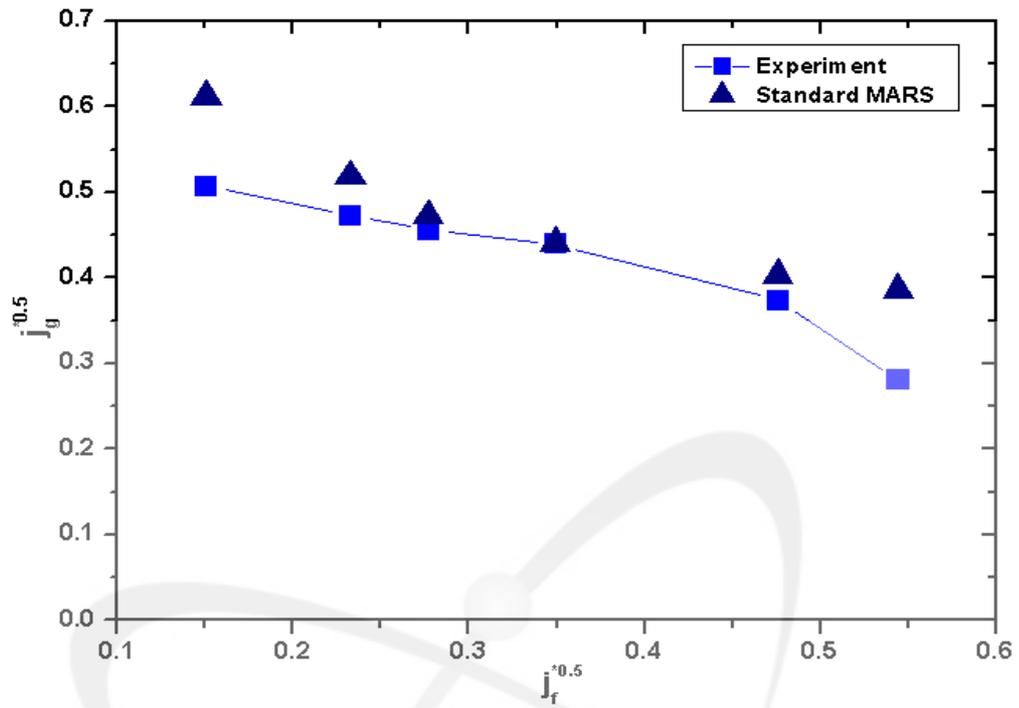


그림 4.2.11 CCFL 결과 비교 ($D=70\text{mm}$, $\theta=0.92^\circ$)

KAERI

4. 개선 사항

MARS 코드 내에서 CCFL 계산방법은 그림 4.2.12와 같다[KAERI, 2007]. 사용자에게 의해 CCFL 모델이 호출되면 MARS 코드는 우선 주어진 상황이 역류 유동인지를 확인한다. 다음으로 현재의 체적이 수직인지 수평 체적인지를 확인하고 이상 유동인지 여부를 체크한다. 그리고 주어진 기체 유량에 대해 허용되는 최대 액체 속도를 현재의 액체 속도가 초과하는지를 체크한다. 이 모든 항목에 있어 참이라면, MARS 코드 내 difference momentum equation은 flooding limit equation으로 교체되어 속도를 계산하게 된다. 그러나 이 모델은 수직관에만 적용되도록 설정되어 있다. 세 번째 조건 항목에서 수직 여부를 판단하여 수평관일 경우에는 적용되지 않도록 설정되어 있기 때문이다. 수평관의 경우, MARS 코드는 역류 유동 현상을 유동 형태에 따른 경계면 마찰력만으로 모사하기 때문에 그림 4.2.9-4.2.11에 나타난 결과처럼 불만족스러운 결과를 나타내게 된다.

이에 기존의 수직 체적에 대한 CCFL 모델을 수평 체적 및 경사진 체적에도 적용 가능하도록 모델의 적용 범위를 확장하였다. 이를 위해 MARS 원시 코드 내에서 그림 4.2.12의 vertical volume에 대한 조건문을 삭제하였고, 수평관 실험에서 개발된 CCFL 상관식을 적용하였다.

표 4.2.1은 수평관에서 개발된 다양한 CCFL 상관식을 보여준다. 이 상관식들을 적용하여 수평관에서의 CCFL 해석에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 그림 4.2.13-4.2.15는 각각 앞서 그림 4.2.9-4.2.11에서 분석된 Case에 대해 개선된 MARS 코드를 이용하여 분석한 결과를 보여준다. 분석 결과 기존 MARS 코드 계산 결과에 비하여 실험에 더 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 기존의 MARS 코드보다 주어진 기체 유량에 대해 CCFL이 발생하는 액체 유량을 낮게 예측함으로써 안전 해석 측면에서 보수적인 결과를 얻을 수 있었다.

표 4.2.1 수평관 CCFL 상관식

CCFL Correlations		
1	Kim	$j_g^{*0.5} + 0.614j_f^{*0.5} = 0.635 - 0.00254 \left(\frac{L}{D}\right)$
2	Richer	$j_g^{*0.5} + j_f^{*0.5} = 0.7$
3	Krolewski	$j_g^{*0.5} + 0.78j_f^{*0.5} = 0.53$

CCFL Subroutine in MARS Code

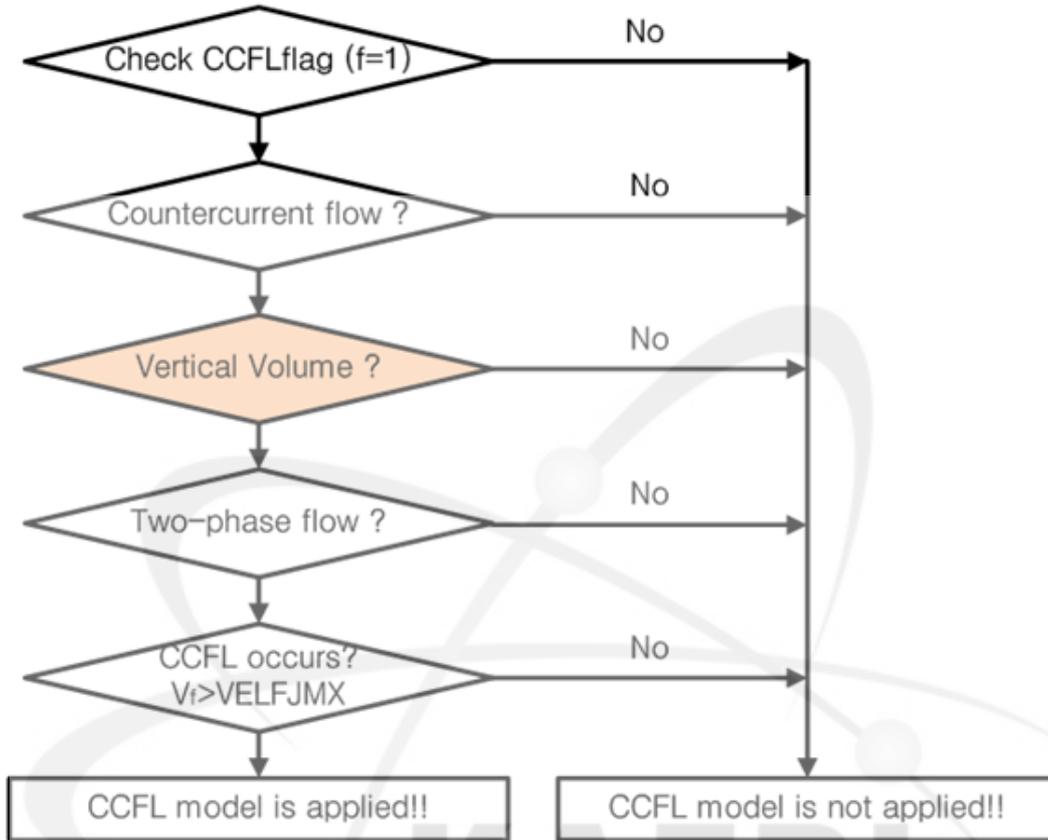


그림 4.2.12 MARS 코드 내 CCFL Subroutine의 구성

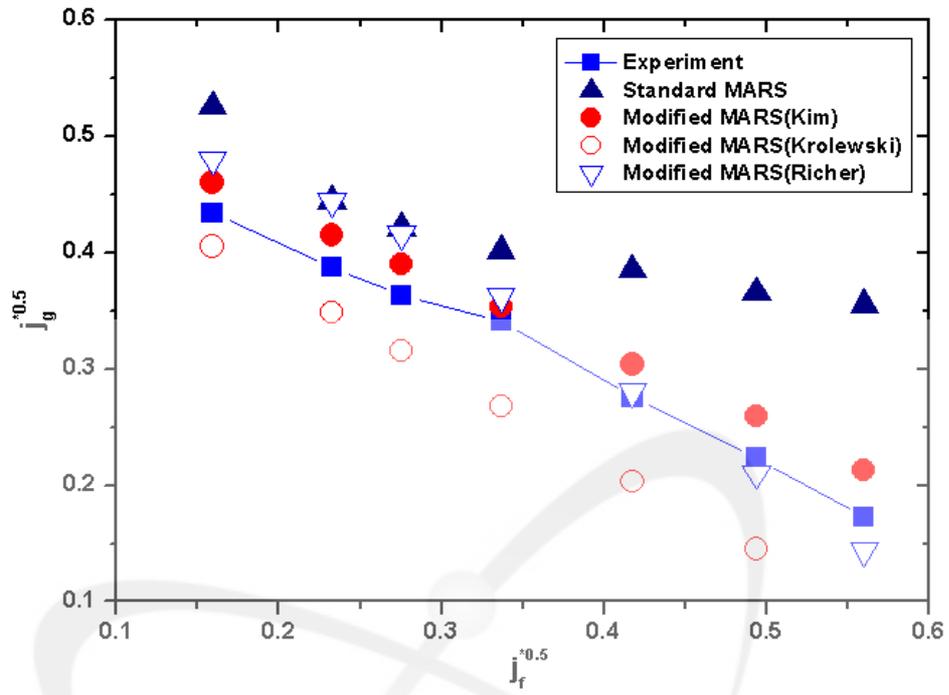


그림 4.2.13 CCFL 결과 비교 ($D=70\text{mm}$, $\theta=0.23^\circ$)

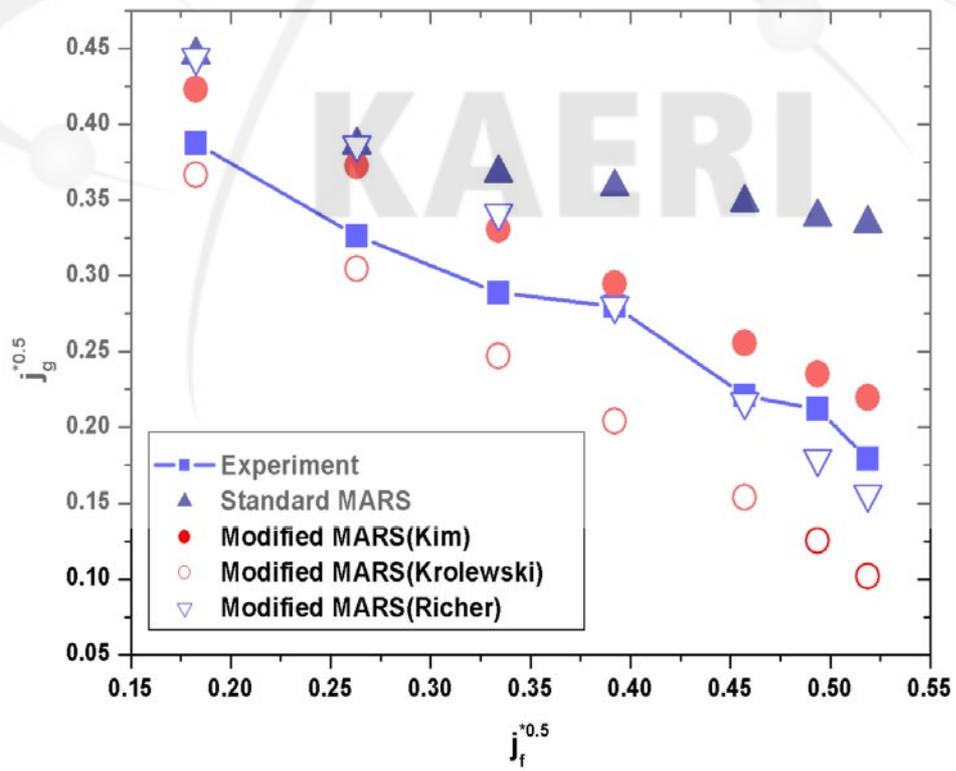


그림 4.2.14 CCFL 결과 비교 ($D=60\text{mm}$, $\theta=0.23^\circ$)

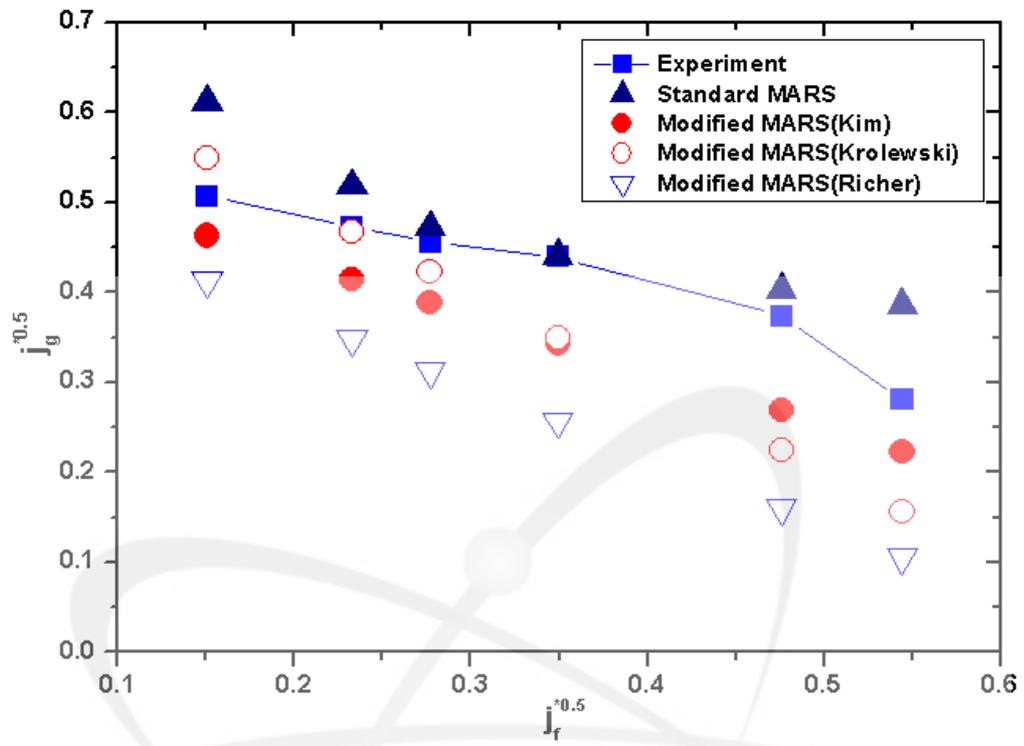


그림 4.2.15 CCFL 결과 비교 (D=70mm, $\theta=0.92^\circ$)

KAERI

제 3 절 충수운전중 RHR상실사고 평가

1. 개요

PKL 실험장치[Areva, 2006]는 독일의 Framatome-ANP (현 Areva) 사가 운영하는 종합 실험장치(Integral Test Facility)로써 독일 KWU 설계의 1300 MWe 급 상용 가압경수로 (참조원전 : Philippsburg 2)에 대해 설계기준초과사고를 포함한 다양한 사고 전개를 모사하도록 제작되었다. PKL 장치의 높이는 실제 발전소와 동일한 높이이며, 체적, 열출력 및 냉각재 유량 등은 1:145의 축소 비율을 갖도록 설계되었고 비록 체적 및 열량 등은 축소 설계되었으나 높이는 그대로 유지함으로써 중력 효과를 효과적으로 모의할 수 있다. 이와 같이 PKL 실험 장치는 실제 발전소에서 발생할 수 있는 냉각재 상실사고를 포함하여 다양한 종합적인 열수력 현상을 잘 모사할 수 있도록 축척 설계되어 있다.

PKL 실험장치의 운영기관인 독일의 Framatome-ANP사는 2008년부터 2011년까지 OECD-PKL2 과제를 통해 계획된 G1 실험들 중 G1.1, G1.2를 완료 하였으며, 실험결과를 현재 CD-ROM 형태로 회원국에 제공 중에 있다. 본 보고서에서는 OECD-PKL2 과제를 통해 수행하였던 실험 중에서 원자로냉각정지 시 잔열제거계통 실패 이후 증기 응축에 의한 붕소희석사고를 모의한 PKL III G1.1의 실험 자료[Areva, 2008]를 이용하여 MARS 코드 평가를 수행하였다.

KAERI

2. PKL 종합 실험 장치 및 실험 절차

가. PKL 종합 실험 장치

PKL 실험장치의 전체 배치는 그림 4.3.1과 같이 모두 4개의 loop로 구성되어 있다. PKL 실험장치의 높이와 길이는 실제 발전소와 1:1 축척인 반면 면적 및 체적은 1:145로 축소되어 전체적으로 그림과 같이 높고 얇은 형태를 하고 있다. PKL 실험장치는 1차 계통인 원자로냉각재계통과 증기발생기 2차측 계통 그리고 1차 계통과 2차 계통 간의 연결 계통으로 구성되어 있다. 실험장치의 축척설계에서 중요하게 고려한 사항은 다음과 같다:

- Full-scale 수력학적 수두 보존 (즉, 1:1 높이 축척)
- 열출력, 체적 및 단면적 축척비 1:145 (최대 열출력: 2.5 MWt)
- 단상 유동의 경우 1:1 축척의 마찰 압력 손실
- 4개 loop 및 RCP 모델 (격리밸브를 이용하여 2~3 loop 발전소 모의도 가능)
- 노심의 경우 1:1 축척의 연료봉(전열봉)을 사용하였으며 연료봉의 개수는 314개
- 증기발생기의 경우 1:1 축척의 U-tube 사용 (증기발생기당 30개의 U-tube)
- 원자로 압력용기의 강수부의 경우 상부는 환형 형태로 모사하였고 하부는 상부 환형과 lower plenum을 연결하는 2개의 원통관으로 연결
- 2차 증기 계통의 필수적인 장치 포함 (터빈, 발전기 제외)

나. PKL III G1.1 실험 개요와 초기 및 경계 조건

원자로냉각정지 시 잔열제거계통이 실패하면 노심에 대한 냉각 능력 상실로 인해 증기가 발생하게 된다. 이런 상황에서 펌프나 다른 계통 또한 작동을 하지 않는다면, 잔열제거계통이 다시 작동하기까지의 노심 냉각은 증기의 자연 순환에 의한 2차측에서의 열전달에 의존하게 된다. 즉, 증기발생기 내에서 증기의 응축으로 생성된 물이 다시 노심으로 들어와 노심을 냉각시키게 된다. 하지만 증기발생기를 이용한 냉각 시 수증기에는 붕소가 용해되어 있지 않으므로 응축에 의해 loop seal에 축적된 냉각재는 순수(pure water)이며 결과적으로 loop seal의 붕소 농도는 응축이 진행될수록 감소한다. 그리고 붕소 함유량이 적은 loop seal의 냉각재가 일시에 노심으로 유입된다면 붕소희석사고에 의한 원자로 재임계가 발생할 가능성이 존재한다.

위와 같이 가압경수로의 원자로냉각정지시 잔열제거계통실패 이후 발생할 수 있는 붕소희석사고를 모의하고 중요 열수력 현상을 파악하는 것이 PKL III G1.1 실험 목적이며 이러한 목적을 만족시키기 위해 설정된 실험 경계조건 설정은 다음과 같다.

- 1 loop 만을 사용 (02, 03, 04 loop는 원자로용기에서 격리 밸브를 통해 막음)
- 잔열제거계통 / 펌프 / 가압기 작동 안함
- 강수부 tube의 하단부를 통한 주입 및 방출을 통한 1차측 냉각재 재고량 조절

위 실험에서의 주요 관심 사항은 다음과 같다.

- 비응축성기체 존재시의 일차계통 냉각수재고량에 따른 1, 2차측 온도 및 압력
- 잔열제거계통 실패 후 냉각재재고량에 따른 냉각재 붕소 농도 변화

다. 실험 순서

PKL III G1.1 실험은 크게 2 단계로 구분되어 진행되었다. 첫 번째 단계는 사고 초기 조건을 설정하기 위한 Conditioning phase이며 두 번째 단계는 잔열제거계통 실패 후 냉각재 재고량 변화에 따른 붕소희석사고를 모의하기 위한 Test phase 이다.

(1) Conditioning phase

Conditioning phase에서는 1-loop의 1차 계통 전체를 붕소 농도 2,000 ppm의 아냉 냉각수로 채우고 압력은 1 bar로 유지한다. 천천히 1차측 냉각수를 방출하여 냉각재 재고량이 3/4-loop가 되도록 하고, 동시에 가압기 밸브를 개방하여 1차측 내 냉각수 방출에 의한 빈 공간을 질소 기체로 채운다. 이 때 최종적으로 남게 되는 냉각재 재고량은 약 1,060kg이며, 주입되는 질소 기체량은 약 표준상태 0.6m³이다. 이 때 1차측은 고립되어 있고 펌프는 작동되지 않아 물은 흐르지 않는다.

냉각재 재고량을 감소시킨 후, 노심 붕괴열 모의를 위해 잔열봉의 총 열량은 200kW로 설정한다. 총 열량은 Conditioning phase 전 기간 동안 일정하게 유지하도록 한다. Test phase를 시작하기 전까지, 노심에서 발생된 열은 잔열제거계통에 의해 제거된다. 표 4.3.1은 Conditioning phase 정상상태에서의 PKL 실험 장치의 주요 변수를 보여준다.

(2) Test phase

Test phase는 Conditioning phase에서 열 제거가 정상상태에 도달하면, 잔열제거계통을 정지시킴으로써 시작된다. 노심 냉각 기능이 상실됨에 따라 노심의 냉각재는 가열되고 잔열제거계통 정지로부터 약 10분 후 노심에서는 증기가 발생하기 시작한다.

Test phase는 노심 내 원자로 하부를 통해 냉각재를 급격히 방출시켰다가 정상 상태에 도달 하면 다시 서서히 증가시키는 과정을 통해 이루어진다. Test phase 기간 동안의 총 실험 시간은 50,990초이고, 이 중 초반 440초부터 2,220초까지는 약 0.22kg/s로 냉각재 방출이 이루어지고, 정상상태 도달 후인 15,850초부터는 점진적인 주입이 시작된다. 최종적으로 실험 종료시엔 냉각재 재고량이 1,020 kg이 되도록 한다.

2차측은 1차측으로부터의 열전달에 의해 온도와 압력이 상승하기 때문에 MSR와 feed water injection을 통해 2bar 및 12.2m로 유지한다. 표 4.3.2에서는 Test phase 시작 후 1차측 냉각재 재고량의 변화를 보여준다.

표 4.3.1 Condition phase에서 정상상태의 PKL 실험 장치의 주요 변수

Test phase 시작 시점에서의 초기 조건 (t=0)	
1차측	
냉각재 재고량	1060 kg (가압기 제외함)
불소 농도	2000 ppm
전열봉 열출력	200kW
압력	약 1bar
노심 출구 온도	약 60 °C
과냉각도	40 K
2차측	
압력	약 1bar (대기압)
온도	약 25°C (298.15K)
수위	12.2m (물 위의 빈 공간은 공기로 채워짐)

표 4.3.2 Test phase 시작 후 1차측 냉각재 재고량의 변화

Time after SOT [s]	사건 경위	1차측 냉각재 재고량 [kg] (+/-는 1060에 대한 상대 값)
0	실험 시작	1060 kg
440	냉각수 방출 시작	1060
2220	냉각수 방출 종료	-390
15850	냉각수 주입 시작 (0.4 kg/s)	-390
17560	냉각재 주입 종료	-280
19160	냉각수 주입 시작 (0.4 kg/s)	-280
20710	냉각재 주입 종료	-185
27060	냉각수 주입 시작 (0.4 kg/s)	-185
27930	냉각재 주입 종료	-130
37720	냉각수 주입 시작 (0.4 kg/s)	-130
38510	냉각재 주입 종료	-80
41320	냉각수 주입 시작 (0.4 kg/s)	-80
42990	냉각재 주입 종료	+30
45500	냉각수 주입 시작 (0.4 kg/s)	+30
45800	주입률 증가 (0.8 kg/s)	~+50
47110	냉각재 주입 종료	+220
49250	냉각수 방출 시작	+220
49620	냉각수 방출 종료	-40
50990	실험 종료	-40

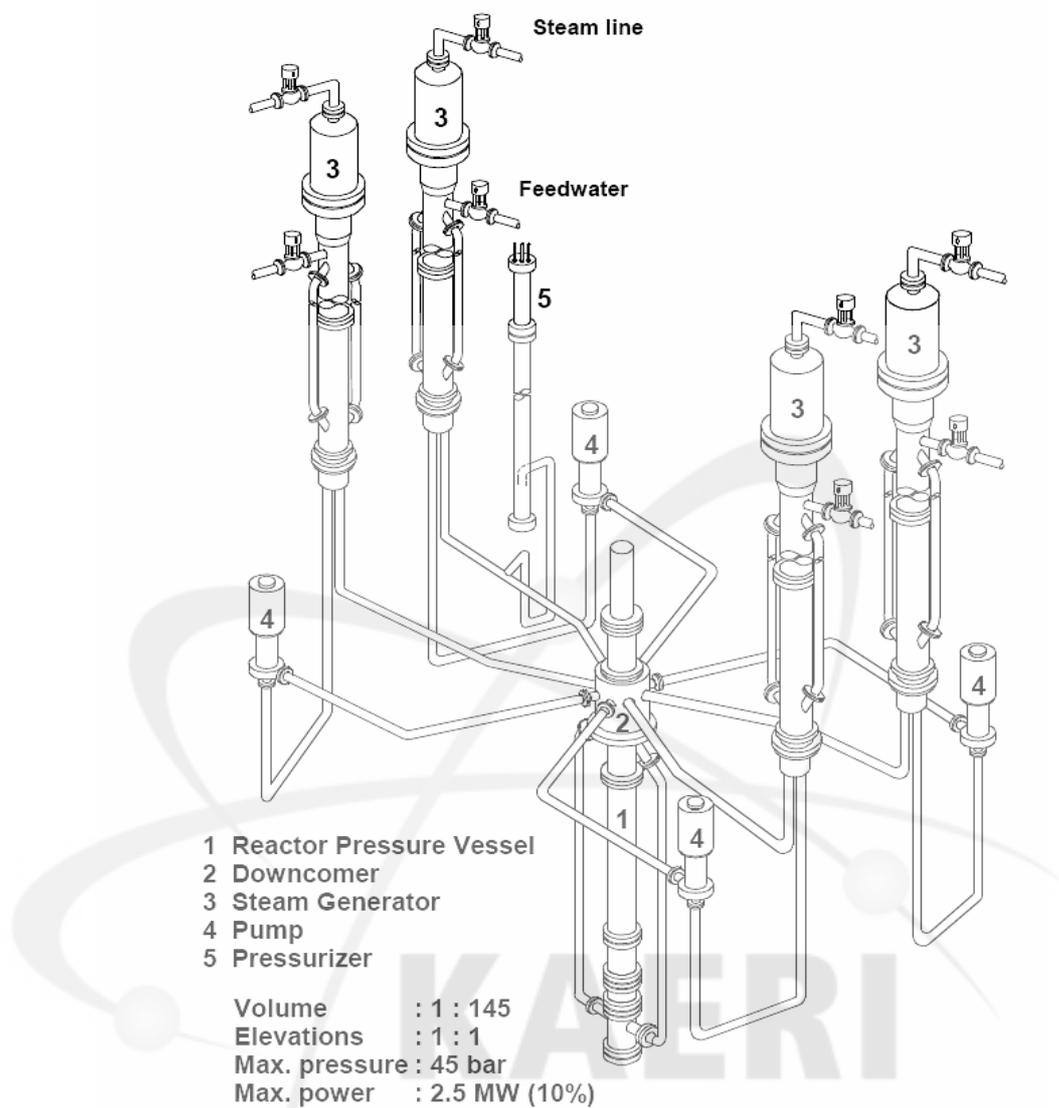


그림 4.3.1 PKL III 실험장치 전체 배치도

나. 계측 변수 설정

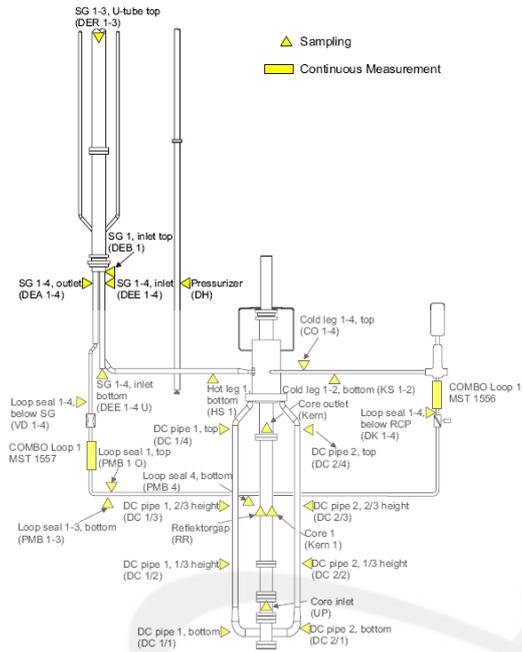
PKL III 실험 장치에는 약 2,000 여개의 다양한 계측기를 설치하여 보다 많은 실험 정보를 취득할 수 있도록 설계하였다. 다양한 계측기가 설치되었으므로 계측기 구분도 쉽지 않기 때문에 PKL 측에서는 계측 장비에 대한 리스트와 함께 개략적인 계측기 위치 정보를 제공하고 있다. 그림 4.3.3과 4.3.4는 본 검증 해석에서 비교할 계측기의 위치를 나타내고 있다.

그림 4.3.3(a)는 붕소 농도 측정기를 보여주고 있는데 이중에서 Continuous Measurement of Boron Concentration(COMBO) 계측기는 붕소 농도를 연속적으로 측정할 수 있는 장비이며 기타 삼각형으로 표시된 계측기는 샘플링으로 붕소 농도를 측정하는 장치이다. COMBO는 증기발생기 출구부와 RCP 입구부에 설치되어 있다. 그림 4.3.3(b)는 원자로압력용기에 설치된 수위 계측기를 보여주고 있다. 그림 4.3.4(a)는 1, 2차 계통의 압력 계측기이며 그림 4.3.4(b)는 원자로압력용기의 온도 계측기를 나타내고 있다.

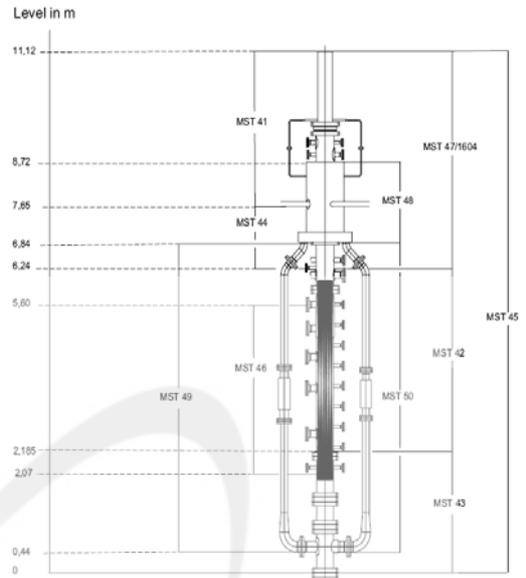
MARS 코드에서는 여러 가지 제어 변수 또는 volume 및 junction 물성치값을 출력할 수 있는데 위에서 본 계측장치와 적절히 1:1 대응을 시켜야 하며 본 계산에서 중요하게 고려된 변수와 계측 장치와의 대응표를 표 4.3.3에 나타내었다. 추후 결과 그림에서 보여지는 범례를 파악하기 위해서는 본 표를 참고하면 된다.

표 4.3.3 MARS 코드 변수와 실험 계측기 대응표

계측기 I.D (MST-#)	MARS 변수 (변수명 / 번호)	설 명
1556	brnppm 330-01	Cold Leg Boron concentration (RCP 1)
1557	brnppm 324-01	Cold Leg Boron concentration (S/G 1)
42	cntrlvar 3	core water level (lower plenum / core)
50	cntrlvar 4	core water level (upper plenum / upper head)
1604	cntrlvar 5	core water level (downcomer)
281	p 354-01	S/G 1 steam dome pressure
241	p 210-04	RPV upper head pressure
670	tempf(g) 102-01	core exit temperature

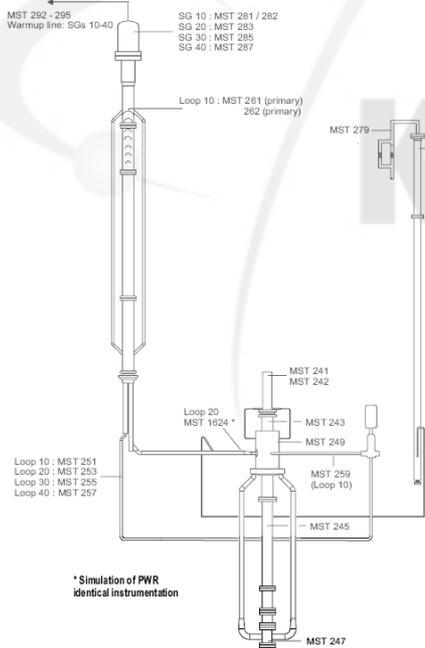


(a) 봉소 농도 계측기

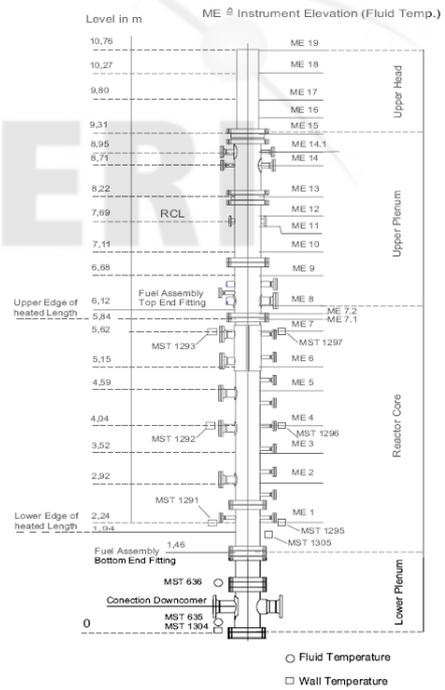


(b) 원자로압력용기 수위 계측기

그림 4.3.3 PKL 봉소 농도 및 RPV 수위 계측기



(a) 압력 계측기



(b) 원자로압력용기 온도 계측기

그림 4.3.4 PKL 압력 및 온도 계측기

다. 실험 모의 순서 및 경계 조건 설정

(1) 초기 조건 모의 (Conditioning phase)

PKL III G1.1 실험 모의는 초기상태 조성을 위한 conditioning 단계부터 시작하였다. Test phase의 초기 조건을 만들어내기 위해서 실험 과정과 동일한 순서로 해석이 진행되었고, MARS 코드의 transnt 옵션을 사용하여 실험값과 유사해지면 정상상태에 도달한 것으로 판단하였다. 표 4.3.4에 Conditioning phase 종료 시점에서의 주요 변수를 나타내었는데 표에서 보듯이 계산값이 목표값에 상당히 근접하는 것을 알 수 있다.

표 4.3.4 Conditioning phase 계산 결과

Parameter	Desired	Calculated	Difference
1차측			
냉각재 재고량 (kg)	1060	1059.5	-0.05%
붕소 농도 (ppm)	2000	1999.8	-0.01%
전열봉 열출력 (kW)	200	200.03	+0.015%
압력 (bar)	~1	1.127	+12.7%
노심 출구 온도 (K)	~333.15K	336.84	+1.1%
과냉각도 (K)	~40	39.31 (376.15-336.84)	-1.73%
2차측			
압력 (bar)	~1	1.00008	+0.008%
온도 (K)	298.15K	297.30	-0.285%
수위 (m)	12.2	12.225	+0.2%

(2) Test Phase 모의

Conditioning phase에서 얻은 결과를 이용하여 Test phase 실험을 모의하였다. Test phase 실험을 모의하기 위해 RHRS를 정지시키고, 하단부 drain line valve를 폐쇄, 증기관 폐쇄, 가압기 밀림관을 폐쇄하였다. Test phase에서 가장 중요한 것은 시간에 따른 냉각재 재고량을 맞추는 것인데 앞서 보인 표 4.3.2의 순서로 냉각재를 방출시켰다. 그림 4.3.5는 냉각재 재고량 변화에 대한 MARS 코드해석 결과를 보여준다. 실험과 동일하게 냉각재 재고량이 변하는 것을 확인할 수 있다.

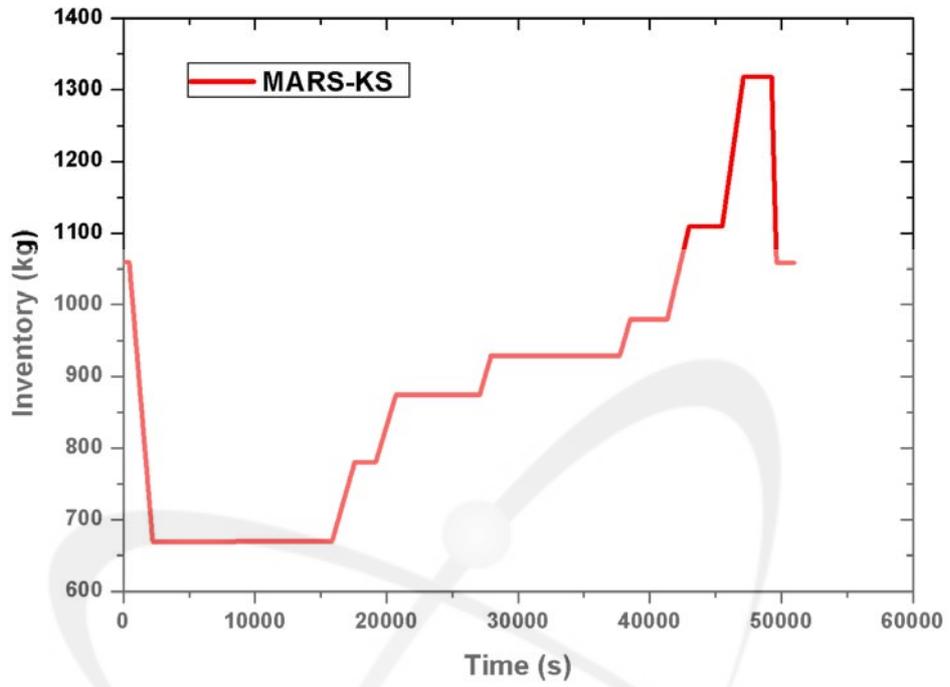


그림 4.3.5 Test phase의 냉각재 재고량 비교

KAERI

4. MARS 코드 해석 결과

가. 노심 출구 온도 및 계통 압력 비교

붕소 농도 비교에 앞서, 전체적인 계통 거동에 대한 계산 결과의 정확성을 파악하기 위해 대표적인 주요 변수인 노심 출구 온도와 계통 압력을 실험값과 비교하였다.

그림 4.3.6은 원자로와 2차측 증기발생기 상부 압력을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 2차측 증기발생기의 압력 변화는 2bar 정도로 실험값과 거의 일치한다. 이는 MSRV를 통해 증기가 방출되기 때문이다. 하지만 1차측의 압력은 냉각수가 주입됨에 따라 실험에 비해 급격하게 증가하게 된다. 실험에서는 초기 압력 0.1MPa에서 최대 1.8MPa까지 증가하는 반면, 해석에서는 초기 0.1MPa에서 7.3MPa까지 압력이 급격하게 증가하게 된다. 1차측이 고립되어 있고, 열생성은 노심에서, 열제거는 증기의 2차측으로의 열전달에 의해 이루어지는데, 이러한 해석 상의 급격한 압력 증가는 2차측으로의 열제거가 실험에 비해 잘 이루어지지 못하기 때문으로 예측된다. 시간이 지나면서 증기가 누적되어 결과적으로 증기압이 급격히 증가하게 된다.

그림 4.3.7은 노심 출구 온도를 비교한 것이다. 초기 출구 온도의 증가는 잔열제거계통 실패로 인한 냉각수의 가열로 인해 나타나는 현상인데, 실험에서는 온도가 급격히 증가했다 떨어지는 현상이 발생한다. 이는 실험에서는 물이 가열됨에 따라 노심 내에서의 자연대류로 비등이 안 일어나지만, 1차원 코드인 MARS 코드는 노심 내 자연대류를 모사할 수 없으므로 비등이 발생하기 때문으로 예상된다. 즉, 비등이 발생하면 물의 수위가 증가하게 되는데, 이로 인해 냉각재 방출 시 전열봉이 노출되지 않는다. 그러나 실험에서는 자연대류로 인해 비등이 없어 코드보다 수위가 낮은 상태에서 냉각재가 방출되므로, 전열봉의 일부분이 물 밖으로 노출되기 때문에 출구 온도가 급격히 상승하게 된다. 이후의 노심 출구 온도는 실험과 해석이 거의 동일하다. 하지만 약 17,000초 이후에 해석에서는 출구 온도가 냉각재가 주입됨에 따라 급격하게 증가하게 된다. 실험에서는 최대 460K까지 증가하지만 코드에서는 570K까지 증가한다. 이는 2차측에서 열제거가 빠르게 이루어지지 못하고 압력이 급격히 증가함에 따라 유체의 포화 온도가 상승하기 때문으로 보인다.

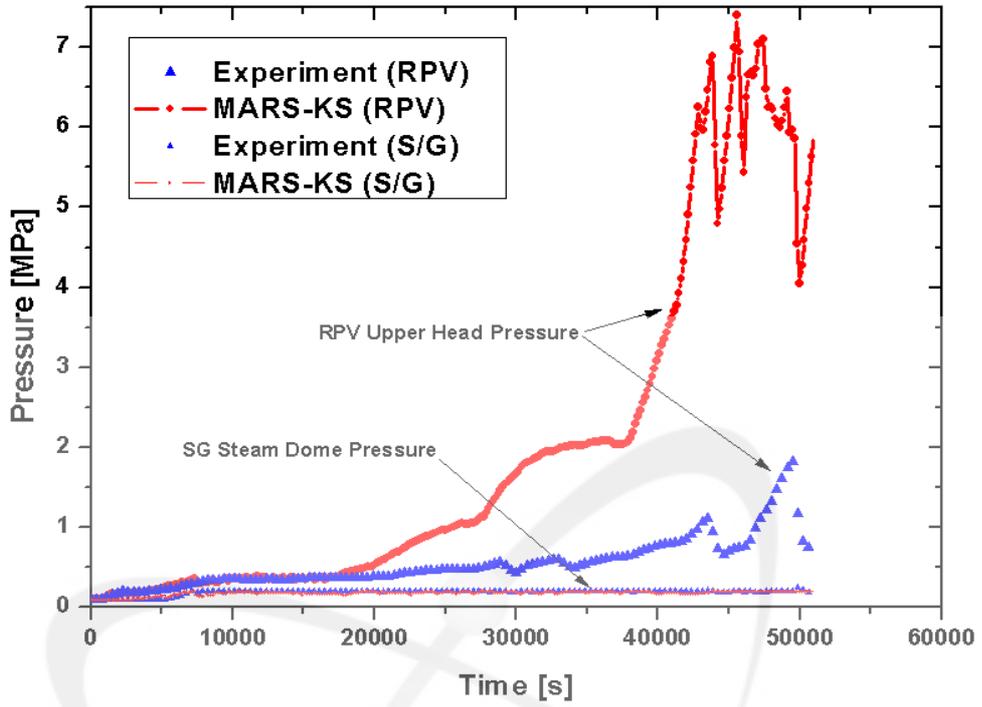


그림 4.3.6 원자로 상부 및 2차측 증기발생기 압력 비교

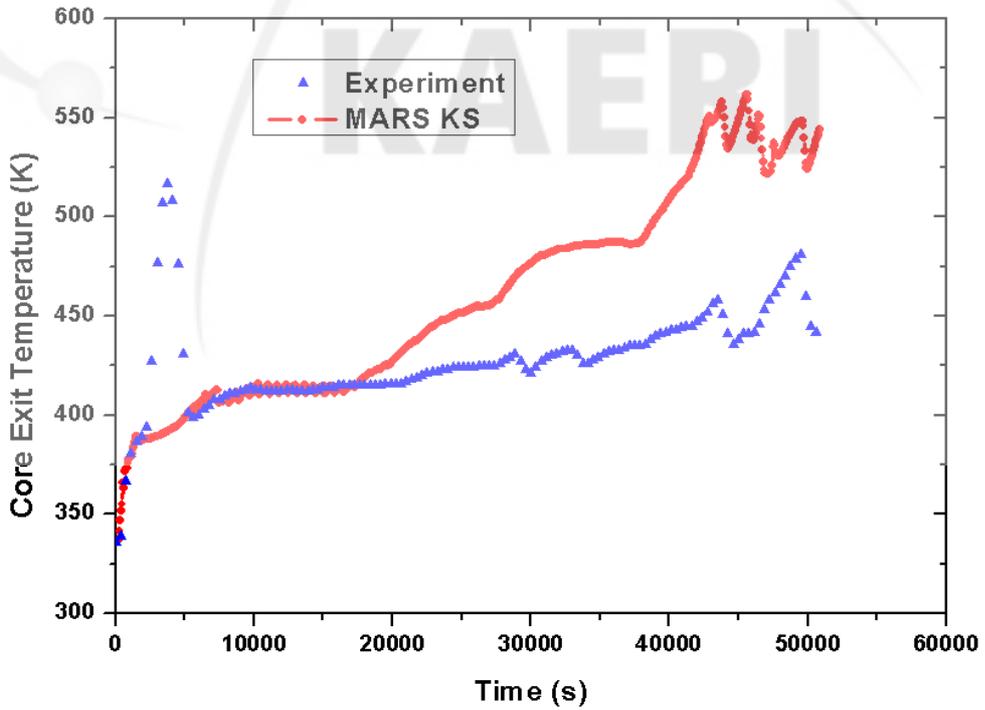


그림 4.3.7 노심 출구 온도 비교

나. 붕소 농도 비교

본 실험에서 보고자 하는 주요 변수중 하나인 붕소 농도의 변화를 그림 4.3.8에 나타내었다. 코드 계산에서 S/G 출구의 붕소 농도는 초기에 거의 2000 ppm에 근접한 값을 보이며 이는 냉각재 재고량이 증가하기 전까지 거의 변화가 없다. 이는 실험에서도 마찬가지인데, 초기 1차측 냉각재의 붕소 농도를 2000 ppm으로 균일하게 설정하였기 때문이다. 그러나 냉각재가 주입되면서 붕소 농도는 점차 감소하게 된다. 이는 냉각수 주입으로 인해 loop seal에 축적된 응축수가 증기발생기 출구 쪽으로 유입되었기 때문이다. 한편, S/G 출구의 붕소 농도는 약 45000초 경부터 다시 급격히 증가하게 되는데, 이는 1차측의 냉각재가 자연순환 유량을 거의 회복함으로써 높이가 낮은 증기발생기 세관을 통해 증기발생기 출구 쪽으로 직접 이동하였기 때문이다. 코드에서는 실험에 비해 붕소 농도가 급격히 감소하는 경향을 보이는데 이는 증기발생기 입구 쪽에 증기가 상대적으로 많이 쌓여 있기 때문에 보다 많은 양의 응축수를 증기발생기 출구로 밀어낸 것으로 보인다.

그림 4.3.9은 RCP 입구부에서의 붕소 농도 변화를 보여준다. 그림에서 보듯이 실험 결과에서 초기 붕소 농도는 2000 ppm을 유지하다가 1차측에 냉각재가 주입되면서 급격히 감소한다. 이는 노심 상부에 있던 증기가 냉각재의 유입으로 인해 밀려서 pump seal로 이동하게 되고, pump seal에서 증기는 응축으로 순수가 되어 펌프 입구로 내려오게 되기 때문이다. 한편, 약 45000초 경부터 펌프 입구부의 붕소 농도는 다시 빠르게 증가하게 되는데, 이는 1차측 냉각재의 증가로 인해 자연순환이 이루어지게 되어 1차측의 냉각재가 직접 펌프 입구로 들어오기 때문이다. 전체적인 붕소 농도 변화에 대해 MARS 코드는 실험 결과를 잘 예측하였다.

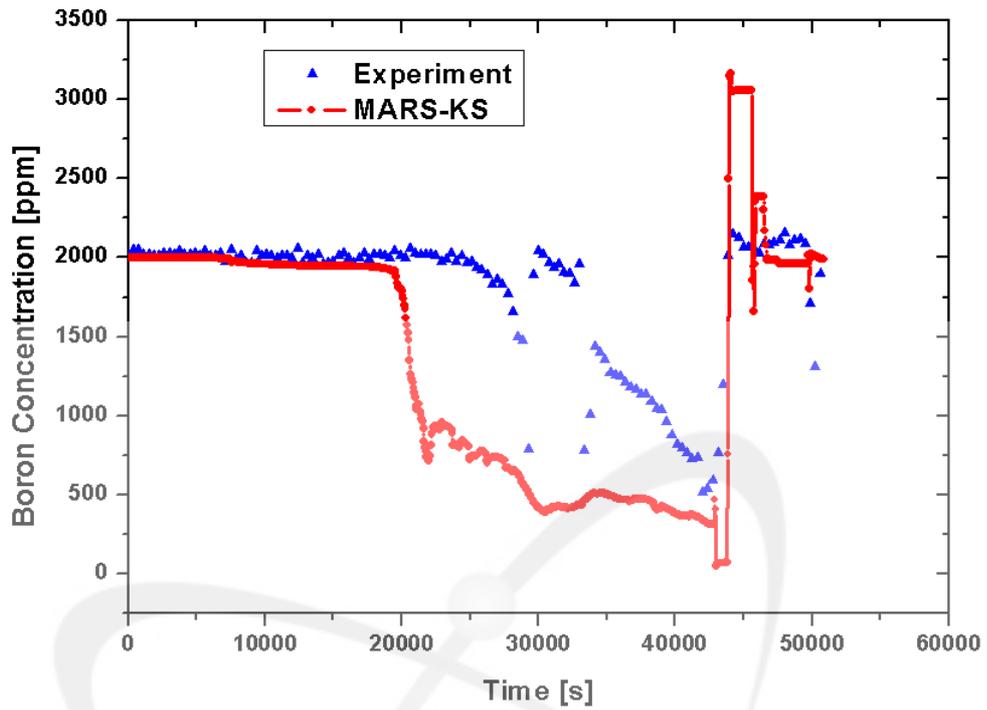


그림 4.3.8 증기발생기 출구부의 붕소 농도 변화 비교

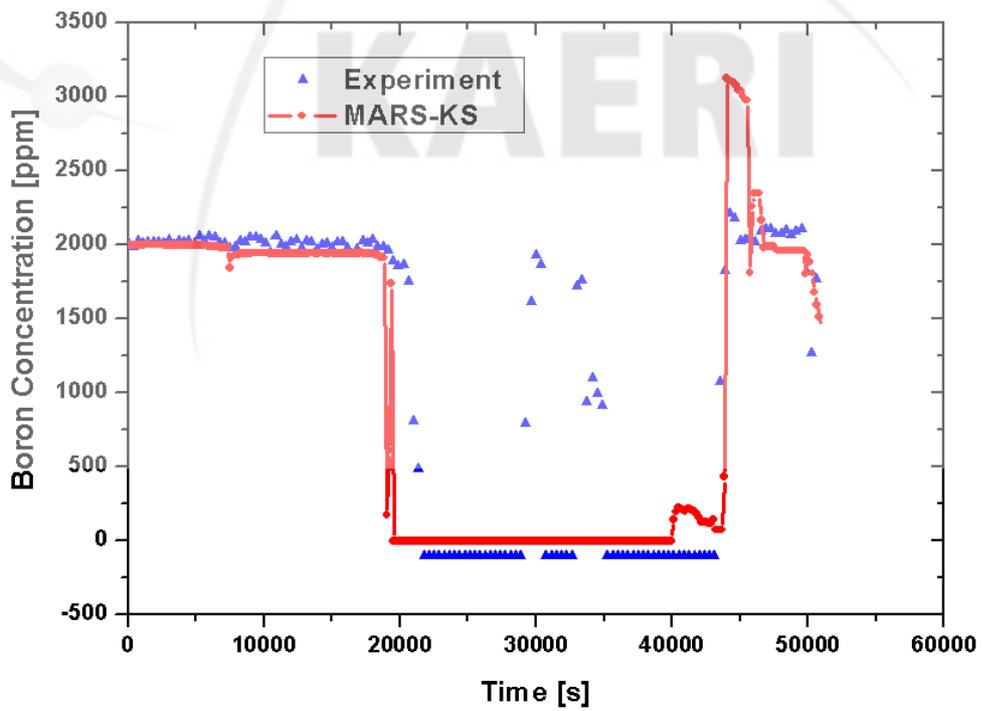


그림 4.3.9 펌프 입구부의 붕소 농도 변화 비교

제 4 절 DVI관 파단 사고 평가

1. 개요

본 연구에서는 APR1400을 모의하는 소형 열수력 종합효과 실험장치인 SNUF (Seoul National University Facility)를 MARS 코드를 이용하여 모델링하고 DVI 파단사고실험 및 종합적인 열수력 거동을 비교 분석하였다[이거형, 2008]. 한국의 차세대 원전인 APR1400(Advanced Power Reactor 1400MWe)에서는 비상노심 냉각 계통(ECCS, Emergency Core Cooling System)으로서 기존의 저온관 주입방식(CLI, Cold Leg Injection)이 아닌 원자로용기 직접주입(DVI, Direct Vessel Injection) 방식을 채택하였는데, 이는 원자로용기의 상부강수부에 위치하고 있으므로 DVI 배관 파단 냉각재 상실사고(LOCA, Loss-of-coolant accident) 시 기존의 CLI 방식의 원자로와는 다른 열수력 거동을 보인다. 특히 노심에서 생성된 증기의 힘이 상부강수부 내의 냉각재를 파단 DVI 배관으로 밀어내고 강수부가 증기로만 채워지게 되는 강수부 seal clearing 현상은 노심과 강수부 간의 차압을 감소시켜 노심의 냉각재 수위를 결정하는 데 중요한 현상이라 할 수 있다. SNUF 실험에서는 DVI 파단 시 노심 및 강수부 냉각재 수위 감소 및 압력 거동 등을 계측하고 분석하였으며, 상부강수부를 가시화하여 강수부 seal clearing 현상을 관찰하였으며, 강수부 seal clearing 현상에 영향을 주는 인자들에 대한 실험조건을 변경시키면서 민감도 해석을 수행하였다. 이러한 실험결과에 대한 MARS 코드 해석을 수행하여 코드의 현상 예측 능력을 검증하였다.

KAERI

2. SNUF 실험 장치 및 실험 조건

가. 실험장치

SNUF는 APR1400의 1차계통을 모의하기 위한 소형 열수력 종합효과 실험장치로서 그 구성은 그림 4.4.1과 같다. 원형에 대한 길이비와 면적비는 각각 1:6.4와 1:178로 설계되었으며, 그림 4.4.2에서 보는 바와 같이 원형과 동일하게 고온관 2개와 저온관 4개를 가지는 동일한 배관 구성을 가지고 있다. 원자로 용기는 그림 4.4.3과 같이 구성되어 있으며, 그림 4.4.4에 나타나 있듯이 260개의 전열봉이 최대 270kW까지 노심의 열출력을 모의할 수 있도록 되어 있다. 각 루프에 있는 증기발생기에는 16개의 U-tube가 있으며, 상부강수부에는 3개의 건전 DVI와 1개의 파단 DVI가 있다. 건전 DVI를 통해서 안전주입수(SI, Safety Injection)가 공급되고, 파단 DVI는 격납용기를 모의한 방출탱크와 연결되어 있다. 주요한 설계 변수 및 원형과의 비교 결과가 표 4.4.1에 요약되어 있다.

본 실험에서 상부강수부 내에서 발생하는 강수부 seal clearing 현상을 직접 관찰하기 위해 DVI 배관과 저온관 사이의 공간에 가시창을 그림 4.4.5와 같이 설계하였다. 그리고 각각의 가시창 앞에 CCD 카메라를 설치하여 강수부 seal clearing 현상을 동영상 파일로 컴퓨터에 저장하는 장치를 구축하였다. 또한 노심의 증기가 루프를 통과하는 시점을 측정하기 위해 고온관과 Loop seal의 일부 관을 가시화하여 디지털 카메라를 이용하여 실시간으로 동영상 촬영을 수행하였다. 실험의 계측시스템은 그림 4.4.6에 나타내었다. Rosemount Co.의 차압계를 이용하여 노심 및 강수부의 수위(Collapsed Water Level), 노심 상부공동과 상부강수부 간 차압을 측정하였다. 상부공동 및 방출탱크의 압력은 VPRNP-A3 모델의 압력계를 사용하였으며, 각 건전저온관에 설치된 오리피스 유량계로부터 증기 유량을 측정하였다. 증기 및 물의 온도는 상부공동, 강수부, 저온관, 고온관, 증기발생기 출구 및 증기발생기 2차계통에 설치된 K-type 열전대를 통해 취득하였다.

나. 실험조건

실험에서 사용한 에너지 척도해석 방법론과 실험장치의 왜곡도를 고려하여 실제 SNUF 실험에서 적용될 실험조건을 결정하였다. APR1400에서의 DVI관 파단 사고를 SNUF 실험 치에서 적절하게 모사하기 위한 최종 실험조건은 표 4.4.2를 통해 확인할 수 있다. 한편, 이 실험에서는 원형에서의 사고를 모사하는 최적의 조건에 대한 실험 수행뿐만 아니라, 다양한 조건에서의 실험을 수행하여 각각의 조건들이 사고에 미치는 영향을 파악할 수 있도록 하였다. 이 실험에서는 표 4.4.3과 같이 원형의 사고를 모사하기 위한 Base case를 포함하여 9가지 Case의 실험을 수행하였다.

(1) Case 1 & 2 : Base case

APR1400에서의 DVI관 파단 사고를 모사하는 기준이 되는 Case의 실험을 수행하였다. 본 Case를 통하여 원형에서의 DVI관 파단 사고를 에너지 척도해석 방법론에 따라 수행된 SNUF에서의 실험을 통해 적절하게 모사되었는지 여부를 분석한다. 소외원형원이 상실되지 않아 HPSI와 SIT에 의한 안전주입수가 지 않아 HPSI와관 모두에서 주입되는 No failure 상황해석 사하였으며, 실험 수행 과정하석신뢰도를 높이기 Case 2를 동일한 조건으로 수행하였다.

(2) Case 3 & 4 : 출력 변경

Base case의 조건에서 출력 조건만을 변경하여 실험을 수행하였다. Case 3의 경우는 출력의 민감도를 해석하기 위하여 Base case의 출력 조건보다 30 kW를 적게 인가하여 실험을 수행하였다. Case 4의 경우는 과도 상태 동안 Base case에 인가된 출력을 적분 평균한 출력인 70 kW로 출력을 고정하여 인가함으로써, 원형에서 인가되는 붕괴열 곡선을 3단계로 적분 평균하여 인가하는 방법의 타당성에 대한 실험적 검증을 수행하였다.

(3) Case 5 & 6 : 파단관 면적 및 형태 변경

Case 5의 경우는 Base case의 조건에서 파단관 면적을 축소시켜 실험을 수행함으로써 파단관 면적에 따른 DVI관 파단 사고의 민감도를 해석하였다. 그리고 Case 6은 파단관의 L/D를 10으로 수행한 Base case와 달리 30으로 수행한 경우이다. 이는 DVI관의 파단되는 지점에 따른 민감도 해석 자료로 사용될 수 있다.

(4) Case 7 & 8 : 안전주입수 유량 변경

Base case의 조건 중에서 안전주입수의 유량 조건만을 변경하여 실험을 수행하였다. Case 7은 소외 전원 상실에 의해 HPSI에 의한 안전 주입수가 1개의 DVI관을 통해서만 주입되는 Single failure 상황을 모사하기 위해, 안전주입수의 유량을 Base case에 비해 적게 주입되도록 한 경우이다. Case 8은 안전주입수를 Base case의 약 2배 정도 주입하여 안전주입수 유량에 의한 DVI관 파단 사고의 민감도를 해석하기 위한 경우이다.

(5) Case 9 : 안전주입수 온도 변경

본 연구에서는 에너지 척도해석 방법론으로 안전주입수의 온도를 결정하였다. 하지만 기존의 연구에는 안전주입수의 온도를 상부 강수부에서의 응축량을 보존하기

위해 Subcooling 비율을 이용하여 결정한 경우가 있다. 이 방법에 의한 Subcooling 비율 결정 방법은 아래와 같다.

$$\left(\frac{C_p \Delta T}{h_{fg}} \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{1/2} \right)_R = 1, \quad \Delta T_R = \frac{\rho_{gR}^{1/2} h_{fgR}}{\rho_{fR}^{1/2} C_{pR}} \quad (4.4.1)$$

위 식을 면 Base case에서 적용한 27.4°C보다 높은 온도인 약 54.6°C 로 안전주입수의 온도를 결정해야 한다. 그러므로 Case 9에서는 안전주입수 온도를 54.6°C 로 설정하여 안전주입수 온도가 DVI관 파단 사고에 미치는 영향을 평가하고, 에너지 척도해석 방법에 따른 안전주입수 온도 결정 방법의 타당성을 검증한다.



표 4.4.1 APR1400과 SNUF의 설계 변수

Parameters		APR1400	SNUF	Ratio
원자로 용기	높이	13.9 m	2.18 m	1:6.4
	면적	16.8 m ²	0.094 m ²	1:179
고온관	길이	4.32 m	1.02 m	1:4.24
	면적	0.89 m ²	0.0032 m ²	1:278
저온관	길이	7.25 m	0.97 m	1:7.47
	면적	0.46 m ²	0.00202 m ²	1:228
강수부 Gap Size		0.255 m	0.02 m	1:12.8
연료봉 직경		9.7 mm	10.0 mm	1:1
과단 면적		0.0366 m ²	1.77×10 ⁻⁴ m ²	1:190



KAERI

표 4.4.2 Base case 실험 초기 조건

변수	실험 조건
실험 시간	과단 후 30 ~ 530 초
초기 1차측 압력	0.6 MPa
초기 2차측 온도	155 oC
초기 냉각재 온도	150 ~ 160 oC
노심 출력	110 kW (0 ~ 60 s) 70 kW (60 ~ 300 s) 60 kW (300 ~ 500 s)
HPSI 유량	0.13 kg/s
SIT 유량	0.11 kg/s
SI 온도	27.5 oC
과단관 면적	0.000177 m ²
HPSI 주입 DVI관 개수	3 개
과단 배관 L/D	10
사고 상황	No failure

KAERI

표 4.4.3 민감도 실험 Case

Case	변경 조건	변경 내용
Case 1	Base case 실험 1	
Case 2	Base case 실험 2	
Case 3	출력 변경	80 kW (0 ~ 60 s) 40 kW (60 ~ 300 s) 30 kW (300 ~ 500 s)
Case 4	출력 변경	70 kW (0 ~ 500 s)
Case 5	과단 면적 변경	0.000078 m ²
Case 6	과단 배관 L/D 변경	30
Case 7	안전주입수 유량 변경 (Single failure 상황 모사)	0.07 kg/s (HPSI) 0.08 kg/s (SIT)
Case 8	안전주입수 유량 변경	0.32 kg/s (HPSI) 0.18 kg/s (SIT)
Case 9	안전주입수 온도 변경	54.6 oC

KAERI

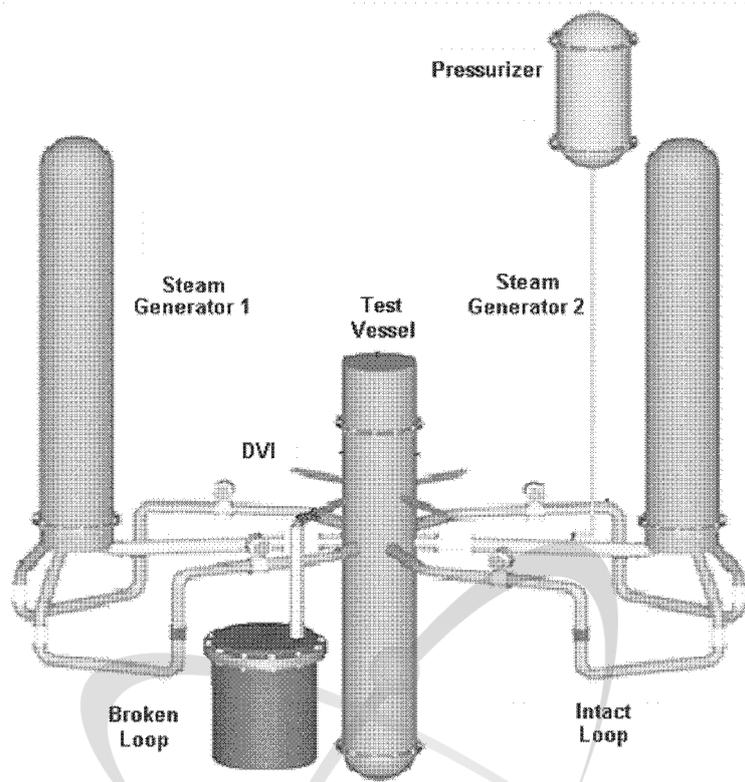


그림 4.4.1 SNUF 조감도

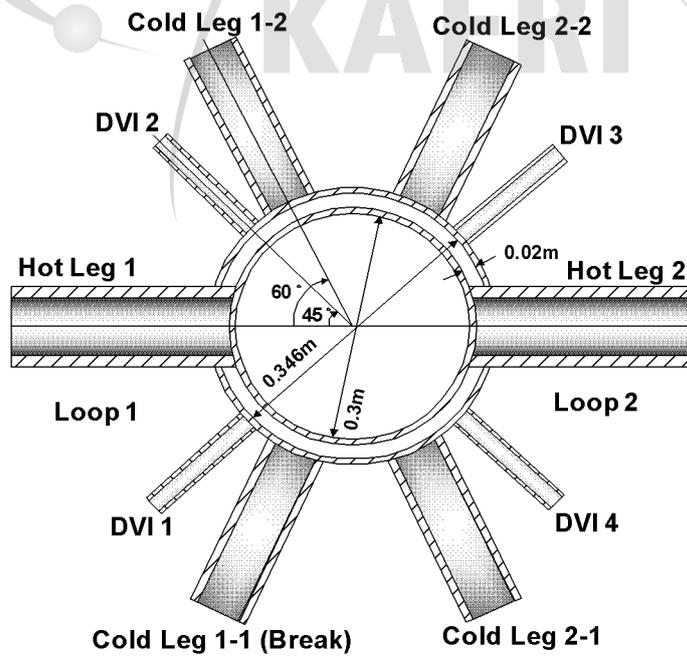


그림 4.4.2 SNUF 원자로 용기 평면도



(a) 외부 모습



(b) 내부 모습

그림 4.4.5 강수부 가시창 사진

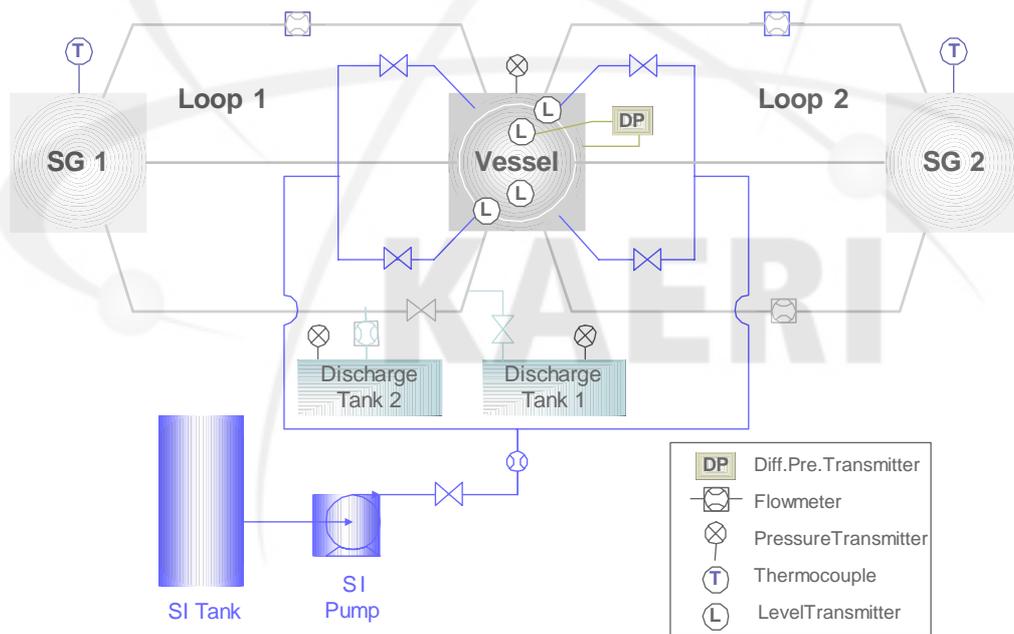


그림 4.4.6 SNUF 계측 시스템

3. MARS 코드 해석 결과

가. MARS 코드 해석 모형

SNUF 실험장비의 MARS 코드 해석을 위한 노드화 개략도가 그림 4.4.7에 제시되어 있다. SNUF 모델은 시험용기, 고온관, 증기발생기 및 저온관으로 구성되어 있다. 시험용기는 하부플레넘(C160 및 C180), 노심(C190), 상부플레넘(C210, C220), 강수부 상부(C115~C120), 강수부 하부(C145~C150)으로 구성하였다.

강수부에서의 다차원 현상을 모사하기 위하여 강수부 상부 및 하부를 원주방향을 따라 6개의 부분으로 나누었다. 수직방향으로는 7개의 노드로 구성하였으며, 단면은 인접 노드와 연결하였다. 원형사고에서는 원자로냉각재펌프의 정지는 상부플레넘 및 강수부 사이의 차압을 증가시키는 저항으로써 작용한다. 이러한 저항을 모사하기 위하여 원자로냉각재펌프(C370, C390, C470, C490)를 통한 압력강하를 고려하기 위하여 압력강하계수를 입력으로 사용하였다. 유동경계로는 건전한 DVI 라인(J911, J912, K914)가 안전주입수를 공급하기 위하여 강수부 상부에 연결되었다. break valve(V913)을 통하여 DVI 라인 파손을 모사하였다. 손상된 배관 및 방출탱크를 모사하기 위하여 5개의 배관(C586, C590, C592, C596, C598)과 time-dependent volume(C954)가 사용되었다. 노심배열은 노심에서 강수부로의 열전달을 모사하기 위하여 열침원으로 모사하였다. 시험용기 및 배관은 주위로의 열손실을 모사하기 위하여 열침원으로 모사하였다. 증기발생기의 일차측 기기들은 입구플레넘(C340, C440), 전열관 부분(C350, C450), 출구플레넘(C360, C460)이 포함된다. 이차측은 강수부(C602, C702), riser(C610, C710), separator(C620, C720) 및 돔 부분(C630, C730)으로 구성된다.

나. 해석결과

MARS 코드를 평가하고 검증하기 위하여 수행된 실험 중 세가지를 MARS 코드를 사용하여 분석하였다. 원형사고를 모사하기 위한 기본 CASE를 분석하였으며, 이외에 기본CASE와 큰 차이를 보인 파단면적감소CASE(B1 CASE)와 안전주입수유량 증가 CASE(S2 CASE)를 분석하였다.

(1) 기본CASE 분석 결과

그림 4.4.10에 보이는 바와 같이 일차계통압력의 MARS 코드 해석 결과는 실험결과와 잘 일치한다. 하지만, 250초를 경과하면서 실험결과와 해석결과에는 차이가 발견된다. SNUF에서는 그림 4.4.8과 같이 DVI라인 파손을 배관과 탱크를 이용하여 모사한데 반하여 MARS 해석에서는 그림 4.4.9과 같이 보수적인 관점에서 DVI 관

외벽 바로 앞단에서 파단된 것으로 모사하였다. 파단부를 배관으로 모사하게 되면 강수부에서 배관으로의 sudden contraction에 의해 유체의 streamline이 수축하게 되는 유동단면적 축소현상(streamline contraction)이 발생한다. 축소되는 정도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{A_c}{A_2} = 0.62 + 0.38 \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^3 \quad (4.4.2)$$

강수부의 면적이 파단 DVI관의 면적에 비해 매우 크다는 점을 고려하였을 때, $(A_2/A_1)^3$ 는 매우 작은 값이므로 MARS 모델에서는 A_c/A_2 를 0.62로 설정하였다. 이는 물과 같은 비응축성기체에 대하여는 적절하지만 DVI 관을 통해 증기가 (되는 경우는 적절하지 못하다. 강수부 밀봉제거(downcomer seal clearing) 이후에는 저온관으로부터 유입된 다량의 증기가 (된다. 결과적으로 유동단면적 축소 비율은 갈수록 커진다. 그러므로 사고의 후반부에는 0.62보다 큰 계수지만 DV어야 한다. 그러나 정확한 (계수를 알수 없기 때문에 본 MARS 코드 해석에서는 전 사고과정에 대하여 0.62를 동일하게 사용하였으며 이 때문에 DVI관을 통하여 (되는 증기의 양이 실험치보다 작게 나타나는 것으로 판단된다. 결과적으로 사고발생 후 250초 이후부터는 일차계통의 압력이 실험에서보다 높게 유지된다.

그림 4.4.11에는 강수부의 수위를 나타내었으며 MARS 코드 계산결과는 실험치와 유사한 것을 알수 있다. 70초에서의 강수부 수위 감소는 강수부 밀봉제거가 발생하였음을 의미한다. 그러므로 MARS 코드에 의하여 강수부 밀봉제거현상이 적절하게 모사되는 것으로 판단할 수 있다. 그림 4.4.12에 보이는 바와 같이 노심수위와 그 수위 도달시점도 MARS 코드를 통해 적절하게 계산됨을 확인할 수 있다.

그림 4.4.13은 고온관, 루프밀봉(loop seal) 및 강수부 상부의 기포율 MARS 계산 결과를 나타낸다. 실험에서 각 부분의 수위고갈시점은 비디오 카메라 촬영을 통하여 측정하였으며, MARS 계산결과와 더불어 표 4.4.4에 제시하였다. 제시된 바와 같이 실험결과와 분석결과는 매우 유사함을 알 수 있다. 먼저, 고온관의 수위가 고갈되며 이후 루프밀봉수위가 빠르게 감소한다. 밀봉수위가 감소하자마자 강수부 상부의 수위가 감소하기 시작하며, 모든 부위의 수위가 고갈되면 노심에서 생성된 증기가 파손된 DVI 관을 통하여 방출된다.

상기의 결과에 따라, 기본CASE는 MARS 코드를 통해 잘 모사된다고 판단된다. 그러나 방출계수에 대하여는 사고시의 모든 과정에서 유동면적 수축을 모사할 수 있는 모델이 필요하다.

(2) 파단면적감소CASE(B1 CASE)의 분석결과

파단면적감소CASE(이하 “B1 CASE”로 칭함)의 실험결과에서는, 일차계통 압력이

기본 CASE에 비하여 천천히 감소하며 노심수위 및 강수부의 수위는 높게 유지되는 것으로 관찰되었다. 또한, 강수부 밀봉제거가 발생하기 않기 때문에 기본 CASE와 같이 70초쯤에 강수부의 수위가 급격히 감소하지 않는다. 그림 4.4.14 및 4.4.15를 비교해보면, 일차계통압력과 노심수위의 MARS 계산결과는 실험치와 비슷한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 250초 이후의 일차계통압력의 차이는 앞절에서 설명한 방출계수에 의한다. 그림 4.4.16에 보이는 바와 같이 강수부 수위의 MARS 계산결과는 70초에서 150초 사이에 천천히 감소한다. 그러나, 100초에서 250초 사이에는 MARS 해석 결과가 실험치에 비하여 작게 나타나고 있다. 최저 강수부 수위는 기본 CASE와 같이 약 1.2m로 계산되었다. MARS 분석결과와 실험측정치의 차이는 안전주입수 우회유동의 모사에 대한 MARS의 분석능에 관련된다. DVI 배관파단사고에서 주입된 안전주입수의 일부가 강수부 상부를 통하여 파손된 DVI 배관으로 바로 방출된다. 규제감시코드를 통한 연구결과에 따르면 건전한 저온관으로부터 유입되는 증기의 유량이 작은 경우, 안전주입수의 우회유량은 RELAP5코드에서 과도하게 계산된다. 이는 donor cell upwind scheme을 사용함에 따른 수치적 확산(numerical diffusion)과 상대적으로 큰 노드를 사용하기 때문에 발생된다. B1 CASE에서 강수부 밀봉제거는 작은 파단면적으로 인해 발생하지 않으며 발생된 증기는 강수부 상부를 통과하지 못한다. 그러므로 B1 CASE에서 강수부 상부의 증기유량은 작다. MARS코드가 RELAP5와 같은 일차원 모듈을 사용하였다는 점과 B1 CASE에서 증기유량이 작은 점을 고려할 때, 안전주입수의 우회유량은 실제 실험에 비하여 과도하게 계산될 것으로 예상된다. 그러므로, 강수부 수위는 안전주입수의 우회로 인해 MARS 계산에서 낮게 유지된다. 반면에 저온관의 증기유량은 B1 CASE에 비하여 기본 CASE에서 높게 나타난다. 그러므로 안전주입수의 우회유량은 기본 CASE에서 잘 예측되며 강수부 수위도 기본 CASE에서 실험측정치와 잘 맞는다고 할 수 있다.

(3) 안전주입수유량증가CASE(S2 CASE)의 분석결과

안전주입수유량을 증가시킨 CASE(이하 S2 CASE로 칭함)에서는 일차계통의 압력이 급격하게 감소한다. 기본 CASE에 비하여 강수부의 수위와 노심의 수위는 높게 유지된다. 그림 4.4.17, 4.4.18 및 4.4.19에 보이는 바와 같이 일차계통압력이나 노심 및 강수부의 수위와 같은 MARS 코드 해석 결과는 실험측정치와 상대적으로 비슷한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉, MARS 코드는 안전주입수 유량의 변화를 준 경우에도 잘 예측할 수 있다고 판단된다.

S2 CASE의 분석에서 방출계수의 오차에 따른 압력차이는 발견되지 않았다. 이는 높은 안전주입수 유량으로 인해 강수부 수위가 상대적으로 높게 유지되기 때문이다. 동 이유로 증기가 아닌 물이 주로 방출되므로 유로단면적축소현상은 유동특성의 변화 없이 발생하며 따라서 방출계수가 적절히 반영될 수 있었다.

표 4.4.4 수위고갈 시점 비교

Clearing parts	SNUF 실험	MARS 코드 해석
고온관	15 ~ 48 s	16 ~ 39 s
Loop seal	55 ~ 62 s	52 ~ 59 s
상부 강수부	70 ~ 100 s	54 ~ 100 s



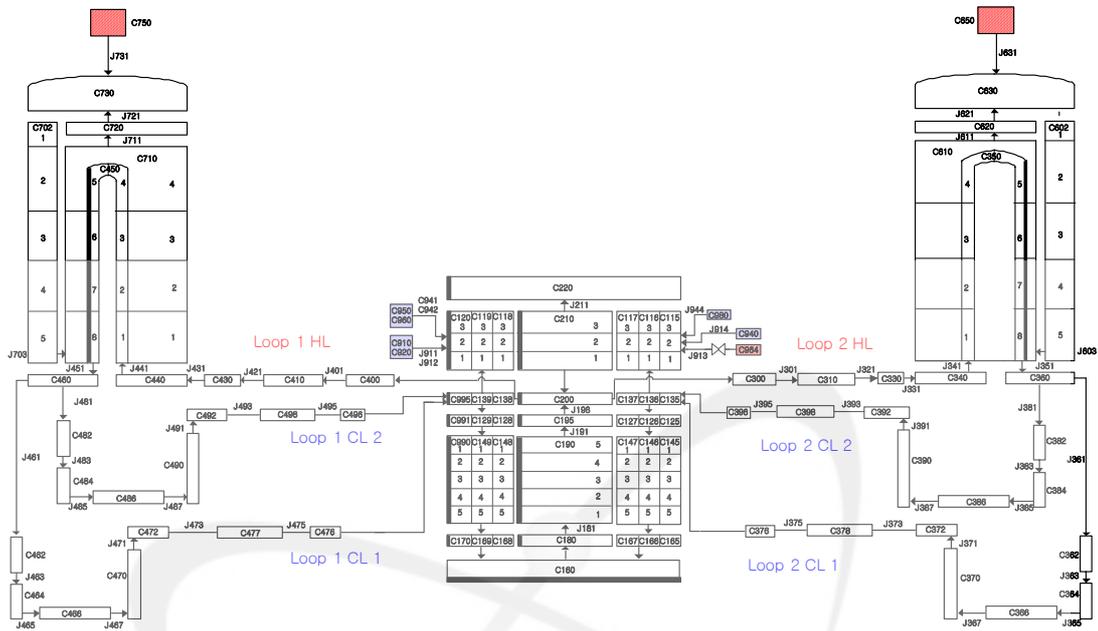
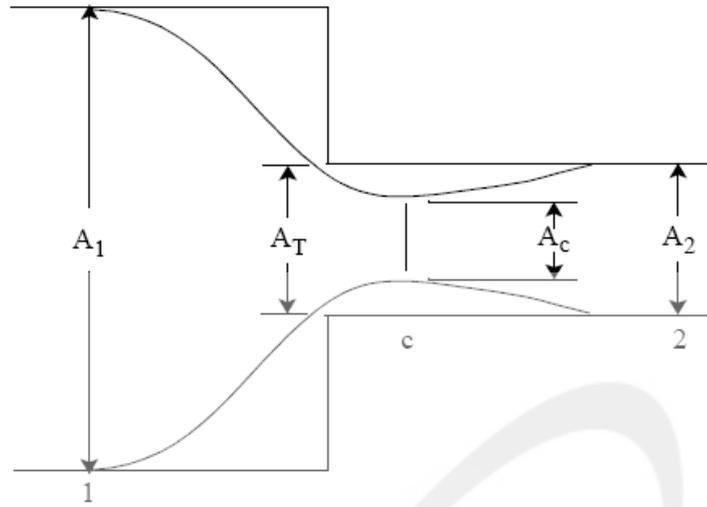


그림 4.4.7 SNUF에 대한 MARS 코드 노드화

KAERI



- A_1 : 강수부의 면적
- A_T : 실제 파단부 면적
- A_c : Stream line의 수축 면적
- A_2 : 실제 유로 면적

그림 4.4.8 SNUF 실험 장치의 파단부

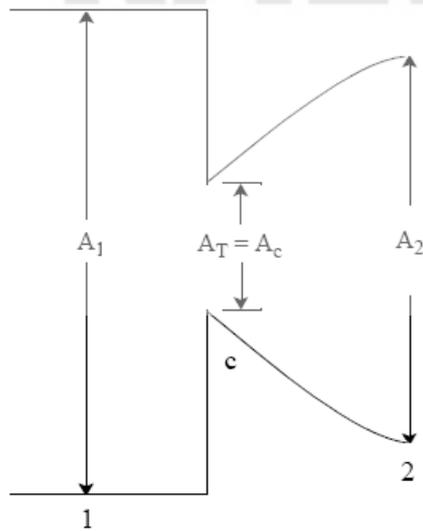


그림 4.4.9 MARS 코드 해석에서 모사한 파단부

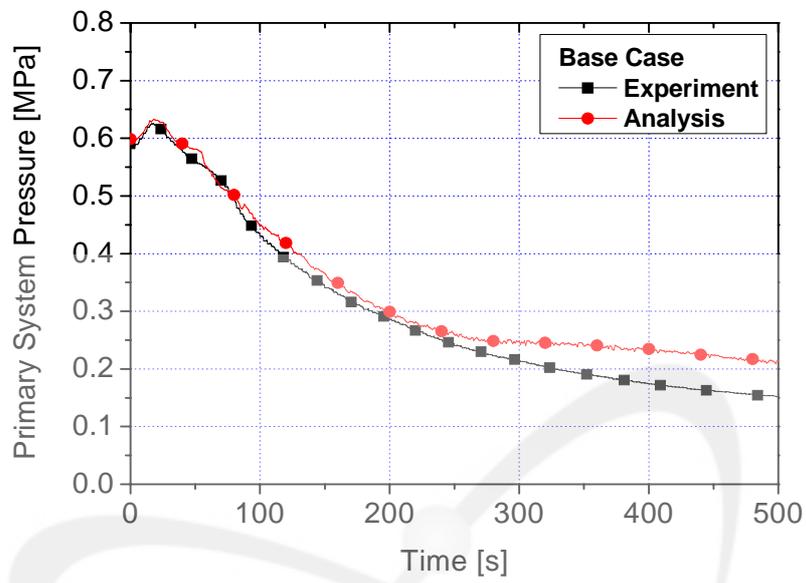


그림 4.4.10 기본 CASE의 일차측 압력

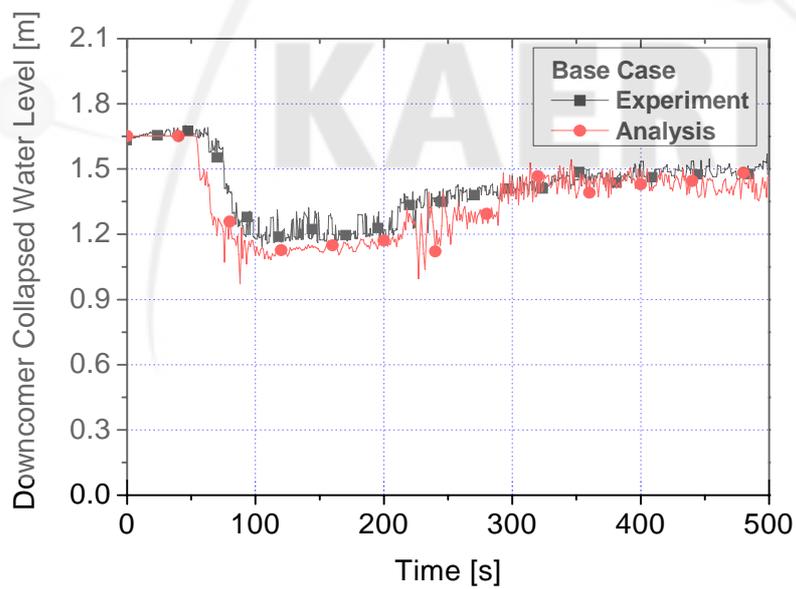


그림 4.4.11 기본 CASE의 강수부 수위

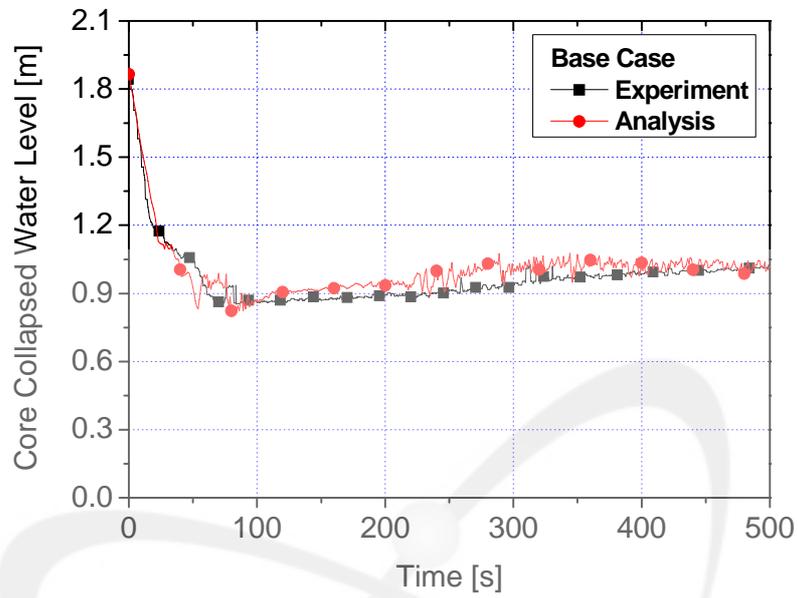


그림 4.4.12 기본 CASE의 노심 수위

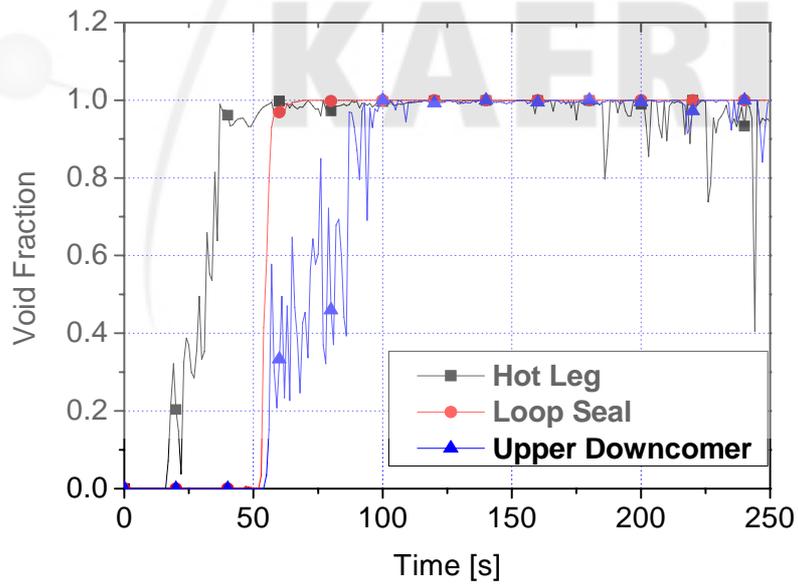


그림 4.4.13 SNUF 분석의 기포율

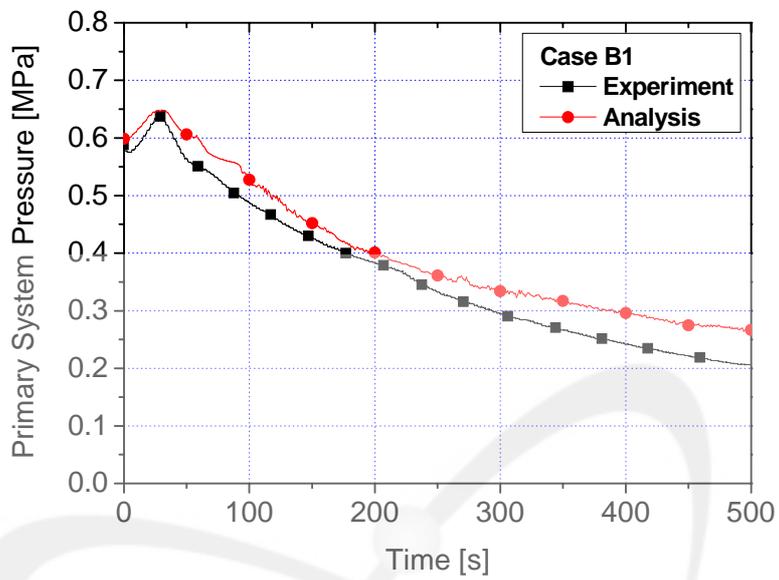


그림 4.4.14 B1 CASE의 일차계통 압력

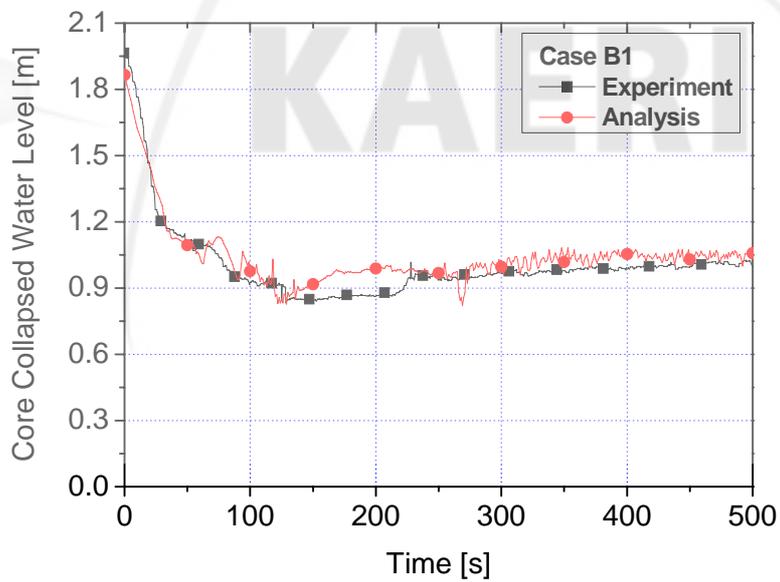


그림 4.4.15 B1 CASE의 노심 수위

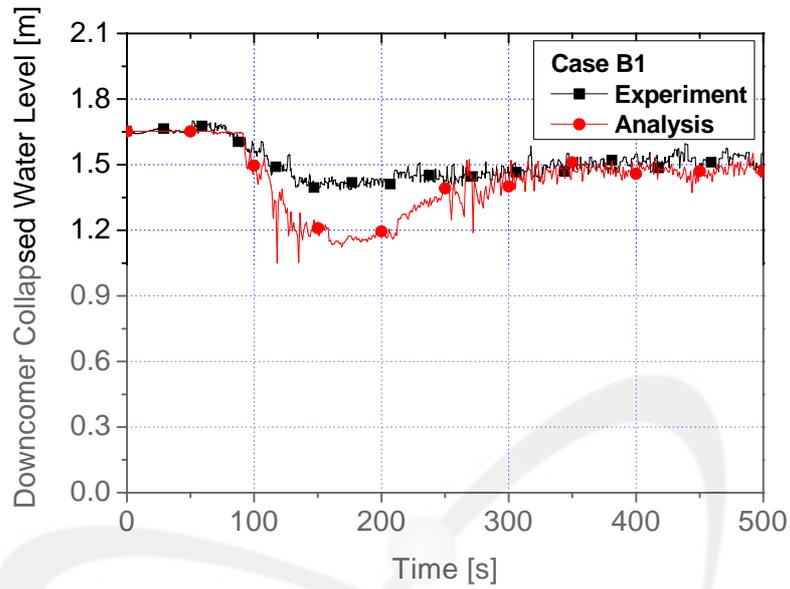


그림 4.4.16 B1 CASE의 강수부 수위

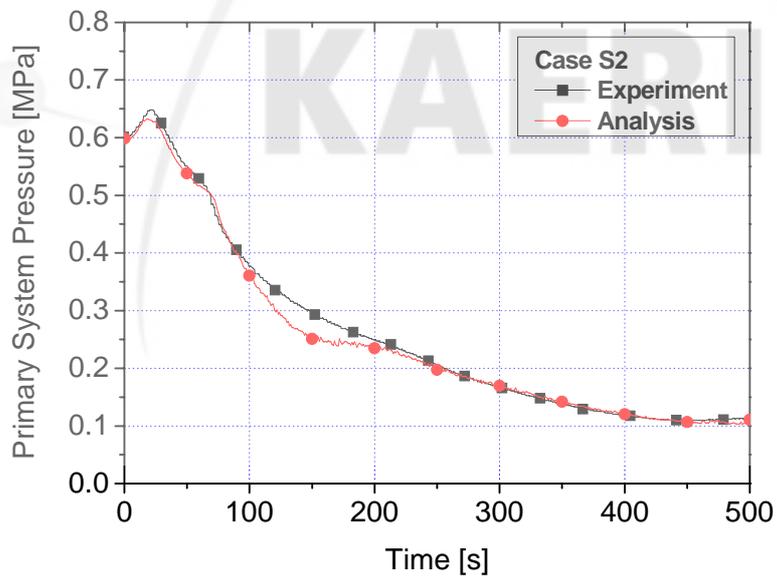


그림 4.4.17 S2 CASE의 일차계통 압력

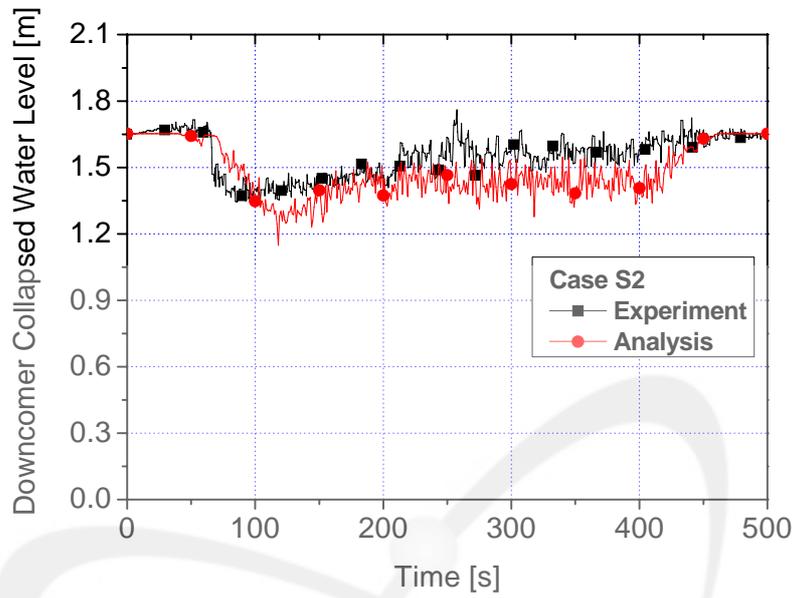


그림 4.4.18 S2 CASE의 강수부 수위

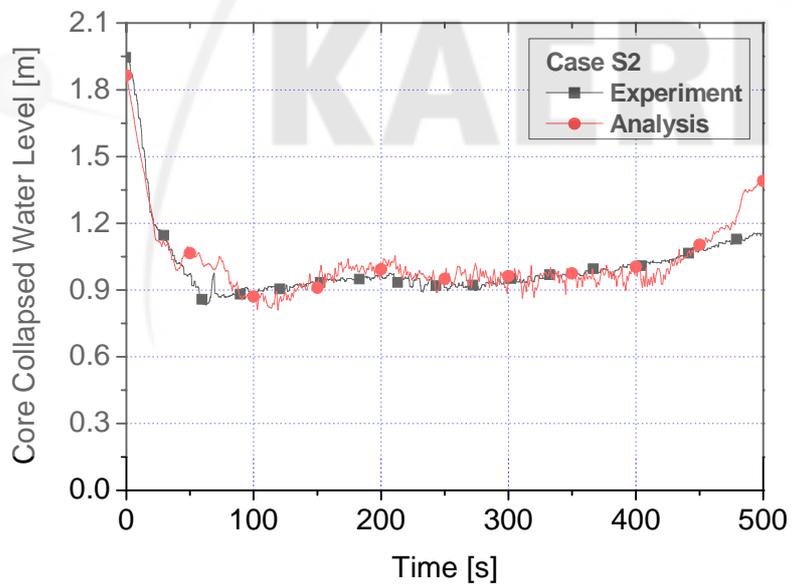


그림 4.4.19 S2 CASE의 노심 수위

제 5 장 결 론

본 과제에서는 국내 대학의 열수력 실험 데이터를 이용하여 MARS 코드 검증을 수행하였다. 이를 위해 산재되어 있는 국내 대학의 열수력 실험 데이터를 수집하였고, 본 과제에서 개발된 <MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서>를 이용하여 실험이 적절하게 잘 이루어졌는지, MARS 코드 검증용으로써 적합한지를 평가하였다. 그리고 수집된 열수력 실험 데이터를 체계적으로 정리하기 위해 한국원자력연구원의 T/H 데이터뱅크에 맞추어 Web 기반의 <국내 대학 열수력 실험 데이터뱅크>를 구축하였다. 최종적으로 수집된 실험 중 MARS 코드 검증용으로 적합하다고 판단되어진 실험들을 이용하여 MARS 코드 평가 및 개선이 본 과제에서 이루어졌다. 주요 결과물은 다음과 같다.

- MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서 및 사용 설명서 개발
- MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서를 통한 실험 평가서 생산
 - 총 32개 실험에 대한 평가 (1·2차 및 최종 평가서)
- 국내 대학 열수력 실험 데이터뱅크 구축
 - 총 32개 실험에 대한 데이터뱅크 구축
- MARS 코드 평가 및 개선 (총 4개 실험)
 - SET 실험 1: 비응축성기체 존재시 응축 열전달 현상 평가
 - 개선 사항 1: 층류 및 난류 유동에 따른 열전달계수 상관식 선정기준 개선
 - 개선 사항 2: Shear Stress를 고려한 상관식 개선
 - SET 실험 2: 수평관 내 역류유동제한 현상 평가
 - 개선 사항: 기존의 CCFL 모델을 수평 및 경사 체적을 위한 모델로 확장
 - IET 실험 1: PKL 실험 장치를 이용한 충수운전중 RHR상실사고 평가
 - IET 실험 2: SNUF 실험 장치를 이용한 DVI 파단 사고 평가

기존의 산재되어 있던 국내 대학의 열수력 실험들을 체계적 정리함으로써 구축된 국내 대학의 열수력 실험 데이터뱅크는 향후 다양한 코드에 검증 등으로 활용될 수 있을 것이다. 또한 데이터뱅크는 부족한 실험분야를 제시함으로써 향후 실험 연구의 방향성을 제시해 줄 수 있을 것이다. 그리고 본 과제에서 제안된 MARS 코드 개선안은 MARS 코드의 성능을 향상시킬 것으로 기대된다.

본 과제의 주요 결과물인 국내 대학 열수력 실험 데이터뱅크는 기존에 수행된 32개 실험의 데이터를 이용하였다. 데이터뱅크의 발전을 위해서는 향후 수행되는 열수력 실험에 대한 체계적이고 지속적인 관리가 필요하다.

제 6 장 참 고 문 헌

이거형, “APR1400의 DVI관 파단 냉각재상실사고에 대한 실험 및 해석 연구”, 석사학위논문, 서울대학교, 2008.

이권영, “피동잔열제거계통의 수직 응축관 내부에서의 증기응축에 대한 비응축성가스의 영향 연구”, 포항공대, 2008.

최기용, “수평관에서의 역류 유동 제한 현상에 관한 실험적 연구”, 석사학위논문, KAIST, 1993.

한국원자력안전기술원, 원자로실설의 사고해석 전산코드 및 방법론 심사지침서, KINS/GE-N005, 대전, 2004.

한국원자력연구원, ATLAS 핵심 시나리오에 대한 시험전후 분석, KAERI/CM-942/2006, 대전, 2006.

AREVA (2006), Draft Final Report of the OECD-PKL Project, Draft (Rev. A).

AREVA (2008), PKL III G1.1: Quick Look Report.

Brent E. Boyack, Validation Test Matrix for the Consolidated TRAC(TRAC-M) Code, LA-UR-00, Los Alamos National Laboratory, USA, 2000.

Department of Energy (DOE), Quality Assurance, DOE O 414.1 B, Washington, D.C., USA, 2006.

Goodykoontz, Jack H. and Dorsch, Robert G., Local heat transfer coefficients for condensation of steam in vertical downflow within a 5/8-inch-diameter tube, NASA TN D-3326, National Aeronautics and Space Administration, 1966.

International Atomic Energy Agency (IAEA), Verification and Validation of Computational Tools for Accident Analysis, DS 395, USA, 2006.

Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), MARS code manual: volume I: Code Structures, System Models, and Solution Methods”, KAERI/TR-2812/2004,

2007.

Kuhn, S.Z., Investigation of heat transfer from condensing steam-gas mixtures and turbulent films flowing downward inside a vertical tube, Ph.D. dissertation, University of California, Berkeley, 1995.

NEA Committee on the Safety of Nuclear Installations, Validation Matrix for the Assessment of Thermal-hydraulic codes for VVER LOCA and Transients, NEA/CSNI/R(2001)4, 2001.

Park, H.S., Steam condensation heat transfer in the presence of noncondensables in a vertical tube of passive containment cooling system, Ph.D. dissertation, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea, 1999.

Purdue University School of Nuclear Engineering, Quality Assurance Procedures for the Purdue University Multi-Dimensional Integral Test Assembly (PUMA) Project, PU NE-96/01, USA, 1996.

Siddique, M.S., The effects of noncondensable gases on steam condensation under forced convection conditions, Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 1992.

KAERI

부 록

A.1 MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서

국내 열수력 실험 데이터 평가 및 MARS 코드 개선

Rev.4

MARS 코드 평가를 위한 실험 선정 지침서

☐ 국내 열수력 실험 데이터 평가 및 MARS 코드 개선

KAERI

NuTHEL

NuTHEL - MARS 코드팀

151-742 서울시 관악구 산 56-1 서울대학교 원자핵공학과 열수력 실험실

Tel: 02)880-7588 Fax: 02)889-2688

상위 기준	중위 기준	하위 기준	세부 기준	비 고
1. 실험 제목			A1. 실험 제목이 실험내용과 잘 부합하는지의 여부	
2. 실험 개요	2-1. 실험 목적		B1. 실험에 대한 목적의 명확한 제시 여부	
	2-2. 실험 장치	2-2-1. 실험 장치 설계	B2. 설계 시 사용된 모든 가정이 제시되고 이에 대한 근거 및 검증 과정 제시 여부 B3. 최종 실험 장치와 설계와의 차이가 있는 경우 그에 대한 설명이 있는지의 여부 B4. 사용된 가정이 실험 결과에 미칠 영향 평가 여부 B5. 코드 해석을 위한 충분한 설계 정보 제시 여부 B6. 실험 장치 설계 이전에 예비 코드해석이 있었는지와 결과의 제시 여부	
		2-2-2. Scaling	B7. 실험 대상의 원형에 대한 설명 여부 B8. 적용한 scaling 방법과 그 적절성 제시 여부 B9. 새로운 scaling의 적용인 경우 본 scaling 방법론에 대한 설명 및 적절성 제시 여부 B10. 사용한 scaling에 대해 발생한 왜곡 가능성 제시 여부 B11. 왜곡이 발생하였다면, 그 왜곡이 있는 구체적 파라미터의 제시 여부 B12. 왜곡된 파라미터가 전체 실험에 미치는 영향 및 해결 방법 제시 여부	
		2-2-3. 계측 장비	B13 실험에 사용된 모든 계측장비의 목록 제시(혹은 자세한 설명)의 완성도 여부 B14. 실험에 필요한 모든 변수 계측 여부 B15. 계측장비의 충분한 분해능을 가졌는지에 대한 여부 B16. 계측장비의 적절한 위치 선정 및 설치시 주의할 사항에 대한 여부 B17. 사용한 계측장비의 오차 제시 여부 B18. Calibration이 요구되는 계측장비 목록의 제시 및 수행 여부 B19. 계측 장비가 실험 결과에 미칠 수 있는 영향성 제시 및 평가 여부	
		2-2-4. 계측 변수	B20. 계측 변수의 적절한 선정 여부 B21. 주요 계측 변수와 부수적 계측 변수의 구분 및 이유 제시 여부	
		2-2-5. 기타 특이성	B22. 실험 장비 및 기타 계측 장비 배치 등에 대한 충분한 설명이 있는지에 대한 여부 B23. 설계, 제작 및 조립상 생길 수 있는 오차의 제시 및 영향성 평가 여부 B24. 해석 시 중요하게 작용할 수 있는 모든 구조물들에 대한 설명 및 자료 제시 여부	
3. 실험	3-1. 실험 조건 및 주요 변수 선정	중요도		
		3-1-1. 시간	C1. 실험 조건에 따른 적절한 시간이 선정되었는지에 대한 평가 여부 C2. 해석 시 요구 될 수 있는 모든 시간 정보의 제시 여부 C3. 정상상태 실험의 경우 총 수행한 실험 시간에 대한 적절성 여부 C4. 과도상태 실험의 경우 측정 변수의 시간 간격에 대한 적절성 여부	
		3-1-2. 온도	C5. 실험 조건에 따른 적절한 온도가 선정되었는지에 대한 평가 여부 C6. 실험 수행 시 주위 환경의 온도에 대한 영향 평가 제시 여부	
		3-1-3. 압력	C7. 실험 조건에 따른 적절한 압력이 선정되었는지에 대한 평가 여부 C8. 실험 설계에 따른 압력 유지 및 변화에 대한 적절한 반영이 될 수 있는지 평가	
		3-1-4. 열속	C9. 실험 조건에 따른 적절한 열속이 선정되었는지에 대한 평가 여부 C10. 실험 설계에 따른 열속 유지 및 변화에 대한 적절한 반영이 될 수 있는지 평가 C11. 열손실에 대한 평가 및 열손실이 실험에 미치는 영향성 평가 여부	

		3-1-5. 유량	C12. 실험 조건에 따른 적절한 유량이 선정되었는지에 대한 평가 여부 C13. 실험 설계에 따른 유량 유지 및 변화에 대한 적절한 반영이 될 수 있는지 평가 C14. 유량과 관련하여 해석을 위한 펌프의 성능 곡선 제시 여부	
		3-1-6. 기타	① C15. 실험 조건에 따른 적절한 ① 변수가 선정되었는지에 대한 평가 여부 ② C15. 실험 조건에 따른 적절한 ② 변수가 선정되었는지에 대한 평가 여부 ③ C15. 실험 조건에 따른 적절한 ③ 변수가 선정되었는지에 대한 평가 여부	
	3-2. 실험 과정	3-2-1. Steady	C16. steady state 판단에 대한 적절한 제시 여부	
		3-2-2. Transient	C17. Scaling과 더불어 적절히 모사 되었는지에 대한 여부 C18. 초기 실험 조건(정상상태 등)에 대한 제시 여부	
	3-3. 실험 변수의 오차	3-3-1. 절대 오차	C19. 절대 오차로 나타낼 수 있는 변수의 오차 제시 여부	
		3-3-2. 상대 오차	C20. 상대 오차로 나타낼 수 있는 변수의 오차 제시 여부	
		3-3-3. Random 오차	C21. 랜덤 오차로 나타낼 수 있는 변수의 오차 제시 여부	
		3-3-4. 전체 오차 분석	C22. 각 변수 오차를 바탕으로 실험 결과에 대한 통계적 오차 분석 제시 여부	
4. 실험 결과	4-1. 데이터	D1. 모든 데이터 처리 유무 제시 여부 D2. 최초 데이터 수집 단계에서 수집 장비의 Sampling rate, filter사용 여부, filter 종류 등에 대한 제시 여부 D3. 데이터의 후처리 방법 제시 여부 D4. 정상상태 실험인 경우 실험 종료 후 초기 조건과 동일한지 여부를 나타낼 수 있는 데이터 제시 여부 D5. 과도상태 실험인 경우 실험 시작 이전 준비 단계(정상상태 등)의 각 변수들에 대한 데이터 제시 여부 D6. 정상상태 실험 및 과도상태 실험 모두 동일한 조건에서의 재실험에 대한 평가 및 이에 대한 데이터 제시 여부 D7. Raw 데이터 제시 여부		
	4-2. 실험 상관식	D8. 상관식 도출 과정의 적절성 여부 D9. 도출한 상관식의 검증 여부 D10. 도출한 상관식의 활용도 제시 여부 D11. 도출한 상관식의 활용범위 및 제한조건 제시 여부		
	4-3. 실험 결과 분석	D12. 실험 결과에 대한 적절한 분석 여부		
5. 실험 평가	5-1. 실험의 중요도	E1. 실험의 중요도 평가		
	5-2. 신뢰도 평가	E2. 신뢰도 평가		
	5-3. 실험 활용도	E3. 활용도 평가		
	5-4. 실험 인용도	E4. 논문 등재 여부 및 편수		
6. 참고 문헌	F1. 참고 문헌이 적절하게 제시 되었는가에 대한 여부			
7. 견해 및 의견	G1.			

[+ Fully Satisfied] [0 Partially Satisfied] [- Not Satisfied] [/ Not Applicable] [# Numbers]

A.2 MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서 사용 설명서

1 실험 제목

- 제시된 실험의 제목을 통해 대략적인 실험의 내용과 결과물들을 예상할 수 있는지 여부를 평가한다. (A1)

2 실험 개요

- 본 항목에서는 실험과 관련된 일반적인 내용이 포함되어 있는지의 여부를 확인하는 단계로서 크게 실험의 목적과 실험 장치에 대한 구체적 설명 여부를 평가한다.

2-1 실험 목적 (B1)

본 실험의 목적이 명확하게 제시되었는지 여부를 아래 사항을 참고하여 평가한다.

- 기술하는 실험이 기존 실험 결과에 대한 검증 실험 혹은 재실험인 경우 기존의 실험 결과 및 관련 자료 제시 그리고 검증 혹은 재실험이 필요했던 이유 등이 본 실험의 목적과 함께 제시되어야 한다.
- 기존 실험 결과 검증 및 비교 등을 목적으로 하지 않은 실험 중 기존의 상관식 혹은 모델 평가를 위해 추가적으로 수행된 실험인 경우 기존의 상관식 및 모델 평가가 실험을 통해 왜 이루어져야 하는지의 이유가 제시되어야 한다. 또한, 기존 상관식 및 모델의 문제점 등의 제시가 본 실험의 목적과 함께 제시되어야 한다.
- 새로운 실험 수행인 경우 본 실험을 하는 이유 및 목적이 제시되어야 한다. 예를 들어, 기존에 없던 실험 데이터 영역 확보, 새로운 상관식의 개발, 새로운 현상에 대한 실험적 분석 자료 확보 등과 같이 본 실험이 어느 영역에 해당하는 실험인지 목적과 함께 제시되어야 한다.

- 또한, 새로운 실험의 목적을 제시할 때, 최근(예를 들어 5년 전부터 현재까지의 연구 현황) 연구 동향을 함께 제시하여 본 연구의 필요성이 목적과 함께 제시되는 것을 지향한다. (예를 들어, Down comer boiling의 경우 근래에 들어 이슈화되고 있는 실험 영역 중의 하나이므로 이러한 배경을 함께 기술함으로 해서 목적이 보다 뚜렷해 질 수 있도록 권장한다.)
- IET 실험의 경우 실험이 특정 원자로를 대상으로 하는 지, 일반적인 원자로를 대상으로 하는 것인지의 여부가 목적과 함께 제시되어야 한다.

평가자는 본 실험의 성격, 대상, 그리고 간단한 실험의 내용을 요약한다.

- 실험성격 : 검증실험, 상관식 도출을 위한 실험, 현상파악을 위한 실험 등.
- 실험대상 : 특정원자로(가상원자로 포함), 일반원자로 등.
- 실험내용 : 임계열유속, 소형냉각재상실사고, 자연대류 등.

2-2 실험 장치

- 본 실험에 사용된 실험 장치에 대한 정보를 상세하게 포함하고 있어야 하며, 잘 설계된 실험 장치일 라도 제작 혹은 조립상에 결점을 지니고 있을 수 있으므로 설계상의 내용과 실제 장치와 어긋난 점 등을 언급하고 실험 결과에 대한 영향 평가가 포함되었는지 여부를 평가한다.
- 초기 실험에 사용된 실험 장치를 새로 제작하지 않은 경우, 다시 말해 기존의 실험 장치를 활용해 실험을 수행한 경우 기존의 실험 장치에 대한 상세한 정보가 제공되어야 한다. 일반적으로 실험 장치의 제작 이후 실험을 수행하고 관련 결과를 도출해 내는 경우(예를 들어 논문 및 보고서) 참고 문헌 혹은 참고 자료 형태로 간략하게 실험 장치를 언급하거나 문헌 번호 및 보고서 번호를 제시할 수도 있으나, 참고자료 혹은 참고 문헌의 정보 없이 실험 장치에 대한 정보를 얻을 수 있는 것을 권장한다.

- 또한, 구조물 변경, 재가공, 부착 및 교체 등으로 인한 실험 결과의 영향 등이 평가 및 제시되었는지 여부를 평가한다.

2-2-1 실험 장치 설계

- 일반적으로 실험 장치를 설계할 때 여러 가지 가정이 포함되게 된다. IET 실험 장치의 경우 실험 대상에 해당하는 원형과 동일하게 제작하기가 매우 어려우므로 축소, 생략 및 간략화 등의 가정이 사용된다. 실험 장치의 설계에 사용된 모든 가정이 제시되고 이에 대한 근거 및 검증 과정 등이 제시되었는지 여부를 평가한다. **(B2)**
- 예를 들어 원자로의 핵연료봉을 모사하기 위해 일반적으로 봉히터를 사용하게 되나 원자로 내부의 구조물을 그대로 모사할 수 없으므로 그리드 등과 같은 실제 구조물을 생략하거나 연료봉 개수를 줄여 간략하게 하는 등 실험 장치와 원형과 차이가 생기게 된다. 이에 대한 구체적인 차이점이 제시되었는지 여부를 평가한다. **(B2)**
- 실험 설계 시 사용된 가정(압력, 구조, 유량, 초기상태 등)이 적절한지를 평가한다. 예를 들어 실제의 연료봉의 개수를 실험에서 줄였거나 유동을 완전발달로 가정했을 시 그 적절성 여부가 제시되었는지를 평가한다. **(B2)**
- 실험 설계 자료와 실제 실험에 사용된 실험 장치와의 차이점이 생길 수 있다. 이는 실험을 수행하며 필요한 경우 재가공 혹은 새로운 계측장비의 설치를 위한 구조물 변경, 기존 장치 일부분을 같은 모델 혹은 같은 구조물의 새 장치로 교체 하는 경우가 발생할 수 있는데 이러한 과정이 실험 수행 중 이루어졌다면 이에 대한 제시를 권장한다. **(B3)**
- 또한, 사용된 가정이 실험 결과에 얼마만큼의 영향을 줄 수 있는지에 대한 평가가 이루어지는 것을 권장하며, 그에 대한 근거 또한 제시되어야 한다. 만약 근거가 제시되어있지 않다면 평가자는 주위 깊게 근거의 제시가 불필요한 실험지의 여부를 살펴 평가한다. **(B4)**
- 실험 도면과 같은 자료가 시스템 코드를 해석하는 사람의 입장에서

본 실험을 해석하기 위한 입력을 작성하는데 부족함이 없을 정도의 자료가 제시되어야 한다. (B5)

- 본 지침서는 MARS 코드 평가를 위한 실험 선정 지침서이므로 MARS 코드 입력에 필요한 정보를 논문이나 보고서에서 충분히 획득가능한지의 여부를 살펴 평가한다. 만약 실험 수행자와의 접촉이 가능한 경우 담당자와의 면담을 통해 획득 가능한지 여부도 함께 기록한다.(B5)
- 압력이 중요하게 작용하는 실험인 경우 압력 강하에 대한 평가가 이루어져야 한다. 즉, 실험 원형을 동일한 크기 및 형태로 실험 장치를 설계 및 제작 한 경우라도 사용한 재료, 계측기, 배관 형태 등의 요인으로 인하여 압력 강하가 다르게 일어나게 되고 추후 해석 시 필요하므로 압력 강하가 함께 평가되어야 한다. (B5)
- 만약 실험 장치 설계 이전에 코드를 사용한 예비 해석이 있었다면, 그 해석 방법과 결과를 제시할 것을 권장한다. (B6)

2-2-2 Scaling

- 실험 대상의 원형과 동일한 크기 및 동일한 상태의 실험인 경우 그 원형에 대한 설명이 기술되었는지의 여부를 평가한다. (B7)
- 실험 대상의 원형과 동일하지 않은 실험 장치의 경우 모든 변수(길이, 면적, 부피, 시간, 열속, 유량 등)에 대한 Scaling 비 및 방법론이 제시되어야 하며, 이 때 원형에 대한 변수 또한 함께 제시되었는지의 여부를 살펴본다. (B8)
- 일반적인 Scaling이 아닌 본 실험 장치에 대한 특정 Scaling이 사용되었다면 사용된 Scaling이 어떠한 것인지에 대해 명확히 기술해야 하며, 이 척도를 사용한 이유 및 장점과 단점 등이 함께 제시되었는지를 평가한다. (B9)
- 기존의 Scaling을 사용한 경우 그 사용 요건을 위배하지 않는다면 특별히 그 적합성을 제시하지 않아도 무방하나 새로운 Scaling을 제시 및 사용한 경우, 모두 본 실험에 사용된 Scaling이 적합함이

제시되었는지를 검토한다. (B8,B9)

- Scaling을 통한 실험 장치의 설계와 더불어 Scaling을 수행함으로써 나타날 수 있는 왜곡에 대한 언급이 필수적으로 요구된다. 왜곡이 발생하는 파라미터가 구체적으로 제시되어야 하며 그 영향이 전체 실험에 미치는 영향과 그 왜곡의 해결 방법이 제시되었는지를 검토하되 왜곡에 관하여서는 1차 평가 후 실제 실험담당자와 면담하여 최종 평가한다. (B10,B11,B12)

2-2-3 계측 장비

- 계측 장비에는 측정 센서, 컨트롤을 위한 모든 장비, 데이터 수집을 위한 모든 장비 등 실험에 사용된 모든 장비를 포함하며 이러한 목록이 모두 제시되어야 하며 실험에 필요한 모든 계측이 이루어졌는지에 대해 평가 한다. (B13,B14)
- 주요 변수를 측정하는 계측 장비와 부수적인 변수를 측정하기 위한 계측 장비를 구별하여 제시하는 것을 권장하며, 부수적인 계측 장비일 경우라도 구체적 설명이 제시되었는지 여부를 평가한다. (B14)
- 실험을 수행하기 위해 요구되는 계측 장비가 적절하게 선정되고 사용, 위치 되었는지가 제시되어야 한다. 예를 들어, 실험의 주요 변수를 측정하기 위한 장비가 부수적인 계측 변수를 측정하기 위한 장비의 분해능 등이 낮아서는 안 된다. 또한 계측 장비 설치시 주의해야 할 사항이나 특별한 고려사항이 있다면 제시할 것을 권장한다. 만약 이미 그 성능이 검증된 잘 알려진 계측 장비를 사용하였다면 분해능을 제시할 필요가 없으나 직접 제작한 장비라면 반드시 제시되어야 하며 평가자는 이를 확인한다. (B15,B16)
- 계측 장비의 경우 통상적으로 장비의 회사, 모델명, 계측 범위, 계측 변수 그리고 계측 오차 등이 모두 제시되어야 한다. 직접 제작하여 사용하는 계측 장비의 경우 기존의 검증된 장비라면 검증 자료 등을 제시하여야 하며 기존에 검증되지 않은 장비라면 자체 검증 자료를 함께 포함하여 제시하여야 함을 권장한다. (B17,B18)
- 사용되는 계측 장비가 보정이 필요한 장비라면 일반적으로 제시 보

정 기간(예를 들어, 3달에 1회)이 제시 되어야 하며 실험 수행기간에 보정 기간이 지난 장비가 사용되어서는 안 된다. Calibration이 요구되는 장비의 목록이 제시되어야 하며, 그 방법론 및 타당성의 근거가 제시되어야 함을 권장한다. (B17,B18)

- 선정된 계측 장비가 실험에 영향을 줄 수 있는 경우, 예를 들어 유동장 내에서의 온도측정을 위한 열전대의 삽입 혹은 기포의 계면면적밀도를 측정하기 위한 5-센서 프루브 등의 삽입은 유동장을 방해할 수 있고 실험 결과에 영향을 줄 수 있으므로 이와 같은 경우 사용한 계측 장비가 실험 결과에 미치는 영향 또한 기술 및 평가하는 것을 권장한다. 계측장비가 실험에 영향을 미치는 지의 여부는 평가자가 신중히 검토해야 하며 실험 담당자가 당연히 영향을 미치지 않는다고 판단했거나 그 영향이 미비하다고 판단하여 기술하지 않는 경우도 있으니 판단에 신중을 기해야 한다. (B19)

2-2-4 계측 변수

- 실험에 중요한 계측 변수들과 위치가 적절하게 선정되었는지 부족함은 없는지에 대한 설명이 요구된다. 예를 들어 수직 방향에 대한 온도 분포를 도출해 내기 위한 실험에서 1 개의 온도 센서를 가지고 측정했다면 분명 부적절한 실험 수행이라 말할 수 있다. 반면, 10 개의 온도 센서를 통해 측정했다면, 왜 10 개의 온도 센서가 사용되었는지에 대한 적절한 설명이 요구된다. 예를 들어 평균값을 측정하였을 경우 무조건 중심에서의 값을 측정해서는 안된다. 측정 목적과 변수에 적절하도록 그 위치가 선정되었는지 검토 후 평가한다. (B20)
- 주요 계측 변수와 부수적 계측 변수가 대체적으로 잘 분류되기를 권장하며, 주요 계측 변수를 선정 및 측정하는 이유에 대한 구체적인 설명이 제시되었는지를 평가한다. 하지만 불필요하다고 판단되면 만족한 것으로 평가한다. (B21)

2-2-5 기타 특이성

- 실험 장비 및 계측 장비의 배치 등이 실험결과에 영향을 줄 수 있

는지 여부 제시를 권장한다. (B22)

- 수직관 혹은 수평관을 포함하고 있는 실험장치의 경우 설계 내용과 같이 정확히 수직 및 수평이 되는지에 대해 언급하는 것을 권장하며, 설계상과 다른 경우(제작 혹은 조립상의 오차)에는 어느 정도 차이가 나며 이로써 실험 결과에 미치는 영향이 어느 정도 인지를 제시하는 것을 권장한다. (B23)
- 해석 시 중요하게 작용할 수 있는 모든 구조물 등에 대한 정보를 제시하고 제공해야 한다. 예를 들어 밸브를 포함하고 중요한 요소로 작용되는 실험인 경우 밸브에 대한 정보를 제공해야 하며 함께 밸브 전후 양단의 압력 강하에 대한 정보 또한 평가하여야 한다. 이는 MARS 코드 모델링에 필요한 정보가 충분히 제시되고 있는지에 관하여 평가한다. (B24)

3 실험 내용

- 본 실험의 실제적인 내용이 상세히 파악 될 수 있어야 한다. 즉, 실험의 초기 조건 및 종료조건 등이 명확히 기술되어야 하며 그와 같은 초기 및 종료 조건을 가지게 된 이유 등 또한 파악 할 수 있어야 한다.
- 실험의 준비 단계(예를 들면 Degassing) 에서부터 시작 및 진행 그리고 종료까지의 실험 과정을 상세히 파악 할 수 있어야 하며, 전체적인 실험 과정에서의 변수 측정 등이 이루어져야 한다.
- 실험의 진행단계에서 강제적으로 실험 조건이 변경되는 경우(예를 들어 Steam Break 등)에는 조건 변경이 이루어지는 시기 및 이유 그리고 원형 사건에 대한 왜곡 등이 함께 제시되었는지를 평가한다.

3-1 실험 조건 및 주요 변수 선정

- 실험 수행을 위한 초기 조건 및 진행 조건 그리고 종료 조건 등 이 유와 함께 상세히 파악할 수 있는지를 평가한다.

3-1-1 시간

- 전체적인 실험 수행 시간에 대한 언급이 요구된다. 시간이 중요하게 작용하는 실험인 경우 실험 진행 시간 등에 대한 명확한 설명이 요구된다.(C1)
- 실험 조건에 적절한 실험 수행 시간, 준비 시간 등 변수 시간 측면에서 적절한 실험 조건을 생성하였는지에 대한 여부가 제시되었는지를 평가한다. (C1,C2)
- 실험 준비 단계에서 Degassing 혹은 예열 및 필터링 등이 요구된다면 이 단계에 소요되는 시간이 제시되는 것을 권장하며, 그러한 시간 간격을 사용하게 된 이유를 덧붙이는 것을 권장한다. 또한 실험 총 소요 시간 등 해석 시 요구되는 시간에 대한 정보가 모두 제시되었는지를 평가한다. (C2)
- Steady State 실험의 경우 총 수행한 실험 시간에 대한 적절성 여부가 제시되어야 한다. 실험 전 steady state까지 수행된 시간이 명시되었는지의 여부를 확인한다. (C3)
- Transient 실험의 경우 측정하는 변수들의 시간 간격이 적절한지에 대한 여부가 제시되었는지를 평가한다. (C4)

3-1-2 온도

- 사건에 따른 적절한 온도 범위가 선택되었는지에 대한 여부가 제시되었는지를 평가한다. (C5)
- 선정된 실험 조건 하에서 적절한 온도 측정 범위 및 센서 등이 선정되었음이 표명되어야 하며, 실험 결과에 미치는 온도의 영향 등이 제시되는 것을 권장한다. (C5)
- 실험 시작 및 종료에 대한 기준이 되는 변수가 온도일 경우 그러한 온도를 사용하게 된 이유가 제시되어야 하며, 온도 변화에 대해 민

감하게 작용하는 실험인 경우 실험 시작 및 종료 시 주변의 온도 변화가 실험 결과에 줄 수 있는 영향에 대한 평가가 제시될 것을 권장한다. (C6)

- 주의 환경 온도의 영향을 받지 않는 실험의 경우 특별한 명시 없더라도 만족하는 것으로 평가한다.

3-1-3 압력

- 실험 시작 및 종료에 대한 기준이 되는 변수가 압력일 경우 이와 같은 압력을 사용하게 된 이유를 평가 하여야 한다. (C7)
- 선정된 실험 조건 하에서 적절한 압력 측정 범위 및 센서 등이 선정되었음이 표명되어야 하며, 실험 결과에 미치는 압력의 영향 등이 제시되는 것을 권장한다. (C7)
- 실험 설계에 따른 압력 유지 및 변화 등이 적절하게 반영될 수 있는지 평가되어야 한다. (C8)

3-1-4 열속

- 실험 시작 및 종료에 대한 기준이 되는 변수가 열속일 경우 이와 같은 열속을 사용하게 된 이유를 제시하여야 한다. (C9)
- 선정된 실험 조건 하에서 적절한 열속 범위가 선정되었음이 표명되어야 하며, 실험 결과에 미치는 열속의 영향 등이 제시되는 것을 권장한다. (C9)
- 실험 설계에 따른 열속이 적절하게 생성 및 유지되는 지에 대한 설명이 요구된다.(C10)
- 열손실의 경우 시공간에 대한 왜곡을 크게 줄 수 있는 요인이기 때문에 열손실에 대한 측정 및 평가가 이루어져야 한다. (C11)
- 열손실에 대한 측정 과정이 포함되어야 하며 열손실이 미치는 실험

결과에 대 영향이 평가되어야 한다. (C11)

3-1-5 유량

- 실험 시작 및 종료에 대한 기준이 되는 변수가 유량일 경우 이와 같은 유량을 사용하게 된 이유를 제시하였는지를 평가한다. (C12)
- 선정된 실험 조건 하에서 적절한 유량 측정 범위를 가지고 있음이 제시되어야 하며 실험 결과에 미치는 유량 변화의 영향 등이 제시 되는 것을 권장한다. (C13)
- 유량과 관련하여 펌프의 성능 곡선이 함께 제시되어야 추후 펌프를 이용한 코드 해석 시 적절히 사용될 수 있다. (C14)

3-1-6 기타 변수

- 이상 3-1-1에서 3-1-5 이외의 측정 변수가 있다(예를 들어, 기포율, 봉산의 농도 등) 이를 제시하고 이 변수에 대한 적절한 선정이 되었음을 평가하여야 한다.(C15)
- 중요도에는 본 실험에 측정에서 중요하다고 생각되는 변수에 대해 나름의 순위를 제시함으로써 실험의 내용 및 목적 파악에 도움이 될 수 있도록 한다. (C15)

3-2 실험 과정

- 실험의 준비 단계에서부터 시작, 진행 및 종료 단계에 이르기까지의 모든 실험 과정이 상세히 기술되었는지를 평가한다.

3-2-1 Steady

- 실험 과정의 평형 조건을 판단할 근거를 모호하지 않게 구체적으로 제시하여야 한다. 예를 들어 “입구 온도가 일정하게 유지시켰다”와 같은 제시 방법 보다 “입구온도를 몇 도에서 \pm 도 범위 내에서 몇 분 동안 유지 시킨 후 실험을 시작하였다”와 같은 방법으로 상세히

기술할 것을 권장한다. (C16)

- 평형 상태를 보는 기준은 따로 규정된 바가 없으므로 본 실험을 수행한 당시의 상황(온도, 압력, 유량 등의 변화)에 대해 통계적 오차 방법 등을 활용해 구체적으로 제시되었는지를 살펴본다. (C16)

3-2-2 Transient

- 과도 실험의 경우 실험을 시작하는 시간을 필요한 경우 Scaling 과정과 일치시켜야 하며 이에 대한 근거 및 자료 등을 함께 제시할 것을 권장한다. (C17)
- 또한, 과도 실험의 경우 초기 실험 조건(정상상태 등)에 대한 언급이 매우 중요하므로 이에 대한 제시가 무엇보다 자세히 이루어져야 한다. (C18)

3-3 실험 변수의 오차

- IET의 경우 절대오차나 상대오차는 중요하지 않으므로 제시되어 있지 않다하더라도 만족하는 것으로 평가한다. 하지만 상관식을 제시하는 실험의 경우는 반드시 제시되어야 한다.
- 선정된 모든 실험 변수에 대한 오차가 제시되었는지를 평가한다.
- 측정된 변수가 가지는 오차가 상대 오차인지 절대 오차인지에 대해 구별해 주는 것을 권장한다.

3-3-1 절대 오차

- 절대 오차로 구분된 측정된 변수의 경우 절대 오차로써 제시해야 하며 보정된 계측기의 경우 보정 결과에 따른 오차를 함께 제시해야 한다. (C19)

3-3-2 상대 오차

- 상대 오차로 구분된 측정된 변수의 경우 상대 오차로써 제시해야 하며 보정된 계측기의 경우 보정 결과에 따른 오차를 함께 제시해야 한다. (C20)

3-3-3 Random 오차

- 실험 과정에서 측정 대상 선택에서 올 수 있는 오차를 랜덤 오차로써 함께 제시하여야 한다. (C21)

3-3-4 전체 오차 분석

- 각 변수의 오차를 바탕으로 실험 결과에 대한 통계적 오차 분석 결과가 제시되어야 한다. (C22)

4 실험 결과

4-1 실험 데이터

- 수행한 실험의 모든 데이터 처리에 대한 구체적인 명시가 있어야 한다. 예를 들어 온도와 압력의 데이터 처리 방법이 다른 경우 이에 대한 명확한 구분을 지어주어야 한다. (D1)
- 최초 데이터가 수집되는 과정에서 수집 장비의 sampling rate과 필터 사용 여부, 필터를 사용한 경우 어떠한 종류의 필터를 사용했는지 등이 함께 제시되어야 한다. 수집된 문서 상으로 확인이 어려울 경우 실제 실험 담당자와 면담을 수행하여 평가한다. (D2)
- 데이터를 처리하는 과정에서 일련의 후처리 과정이 있었는지에 대해 제시하여야 한다. 즉, 데이터 수집 장비로부터의 자료를 그대로 사용했는지 수집된 데이터를 평균을 냈는지, 평균을 냈다면 시간 평균인지 공간 평균인지, 시간평균인 경우 시간 간격은 어떻게 되는지 등에 대해 자세히 제시되어야 한다. (D3)

- 정상상태 실험인 경우 데이터를 수집한 이후, 즉 실험이 종료된 이후에 초기 조건과 동일한지의 여부를 보여주어야 하며, 차이가 있는 경우 실험에 미치는 영향이 적은지에 대한 여부를 판단 및 제시하여야 한다. **(D4)**
- 과도상태 실험인 경우 실험 시작 이전 준비 단계에 대한 각 변수 데이터가 함께 제시되어야 한다. 만약 정상상태의 도달여부에 대한 평가가 제시되어있다면 만족한 것으로 평가한다. 단, 주의 환경의 영향 여부가 고려되어야 하는 경우는 이를 고려하여 평가한다. **(D5)**
- 모든 실험의 경우 모두 동일한 조건에서의 재실험을 수행하여야 하며 이에 대한 평가 제시 및 데이터가 제시되는 것을 권장한다. 이는 문서에 제시되어 있지 않은 경우 실험 담당자와의 면담을 통해 평가한다. **(D6)**
- 최초의 실측 데이터가 함께 제시되는 것을 권장하며 후처리 과정을 거친 데이터의 경우에도 그래프나 상관식과 같은 형태로의 제시와 더불어 테이블화된 데이터의 제시가 반드시 요구된다. IET의 경우에는 해당사항 없으므로 만족한 것으로 평가한다. **(D7)**

4-2 실험 상관식

- 실험 결과로서 상관식이 도출되는 경우 상관식 도출 과정이 적절함을 보여야 하며 도출된 상관식이 검증되었는지의 여부 또한 제시되어야 한다. IET의 경우에는 해당사항 없으므로 만족한 것으로 평가한다. **(D8,D9)**
- 오차분석이 포함된 상관식이 제시 되어야 하며 도출한 상관식의 활용 분야에 대해 상세히 기술함을 권장한다. IET의 경우에는 해당사항 없으므로 만족한 것으로 평가한다. **(D10)**
- 실험 결과로서 도출된 상관식을 다른 연구자가 유용하게 사용하기 위해서 상관식의 활용범위(압력,레이놀즈 수 등)나 제한 조건이 정확하게 제시되어야 한다. IET의 경우에는 해당사항 없으므로 만족한 것으로 평가한다. **(D11)**

4-3 실험 결과 분석

- 실험 결과에 대한 분석이 적절하게 이루어져야 한다. 새로이 발견된 현상이나 사실이 있으면 이에 대한 명확하고 구체적인 설명이 있어야 한다. MARS 코드 모델링을 하는 입장에서 평가자가 면밀히 분석 평가되어야 한다. **(D12)**

5 실험 평가

5-1 실험의 중요도

- MARS 평가를 위한 실험으로 그 중요도를 평가한다. **(E1)**

5-2 신뢰도 평가

- MARS 평가를 위한 실험으로 선정함에 있어서 실험 과정에서 제시된 오차 분석과 함께 실험의 신뢰도를 평가한다. **(E2)**

5-3 실험 활용도

- MARS 평가를 위한 실험으로 활용 가능 여부를 평가한다. **(E3)**

5-4 실험 결과 인용도

- 기 수행된 실험에 대한 평가의 경우 실험 결과에 대한 인용도(논문, 보고서)를 제시함으로써 간접적인 실험의 신뢰도를 평가할 수 있게 한다. 이는 반드시 실험 담당자와의 면담을 통해서 논문 제출 현황을 파악하여 평가하고 구체적으로 기록한다. **(E4)**

6 참고 문헌

- 실험에 관련된 모든 참고 문헌이 올바르게 제시되었는지를 평가한다. **(F1)**

7 견해 및 의견

- 기타 관련된 의견 및 견해를 작성하여 본 평가서를 활용하는 개인 혹은 기관에 도움을 줄 수 있게 한다. **(G1)**



B.1 국내 대학 열수력 실험 데이터 설문지 (샘플)

국내 열수력 실험 데이터 평가 및 MARS 코드 개선

설문지

▣ 국내 열수력 실험 데이터 평가 및 MARS 코드 개선

NuTHEL

NuTHEL MARS 코드팀

151-742 서울시 관악구 산56-1 서울대학교 원자핵공학과 열수력 실험실

Tel: 02)880-7588 Fax: 02)889-2688

설 문 지

본 설문지는 국내 대학 열수력 실험 데이터 수집을 위해 제작되었습니다. 본 설문에 협조해 주셔서 진심으로 감사드립니다.

실험제목 : *ROOT CAUSE OF INSTABILITY IN LIQUID ZONE CONTROL SYSTEM OF CANDU REACTOR*

연구책임자(이름/소속) : 김상녕/경희대학교

실험이 기술된 보고서(또는 논문)명 : *NUCLEAR TECHNOLOGY*

다음 질문 문항 중 보고서에 이미 기술된 부분은 페이지만 기록해 주시고 없는 부분은 간략히 기술해 주십시오. 있더라도 간략히 요약해 주시면 더욱 감사하겠습니다.

1. 실험의 목적

본 연구의 목적은 CANDU형 원자로의 액체영역제어계통(LZCS : Liquid Zone Control System)에서 발생하는 불안정 현상의 근본 원인을 규명하고 이를 근거로 하여 불안정 현상 발생 방지를 위한 구체적인 개선책을 제시하며, 차후 LZCS 개선시 인허가에 필요한 정보 및 자료를 생산하는데 있다.

2. 실험장치

2-1 실험장치 설계 시 사용된 가정

모든 격실에서 경수와 헬륨의 흐름에 이상현상이 발생한다고 가정.
그리고 격실내의 경수와 헬륨이 정상적으로 유동한다고 가정.
또한 He의 온도는 거의 일정하게 유지된다고 가정하였다.

2-2 scaling 방법(예 부피 축소, 길이축소, 압력 감소 등)

격실내에서 발생하는 현상을 직접 확인하고 모사하기 위해 실제 격실과 거의 동일한 구조의 실험장치를 1:1 Scale로 제작하였다.

2-3 scaling시 왜곡된 변수 및 그 타당성 혹은 문제점

3. 실험 주요 변수 선정.

3-1 정상상태 실험이라면, 정상상태로 도달시킨 시간 (2분)

3-2 과도상태 실험이라면, 측정 시간 간격 (x)

3-3 열손실에 대한 평가 및 열손실이 실험에 미치는 영향이 평가되었습니까? ()

3-4 주로 관심을 두고 측정한 변수는 무엇입니까? (압력)

4. 실험결과

4-1 실험 데이터를 지금도 보유하고 계십니까? (O)

4-2 상관식은 도출하였다면 도출된 상관식의 적용범위와제한조건이 제시되었습니까? (O)

4-3 실험데이터에 관한 오차분석은 타당성있게 수행되었습니까? (O)

5. 본 실험의 중요도 및 활용도를 간략히 기술해 주십시오.

CANDU형 원자로의 LZCS 불안정 원인 파악 및 관련 현상을 이해할 수 있고, CANDU원전 운전시 운전원의 불안 해소 및 원전의 안전성 경제성 향상에 기여할 수 있으며, CANDU 개선 사업 및 이의 인허가에 활용할수 있다. 또한 관련 학문 분야에 기여할 수 있고, 인력 양성 및 원자력 기술 국위선양에도 이바지 할 수 있다.

6. 본 실험을 활용한 후속 연구 (⑤)

- ① 없다
- ② 있다 (보고서 번호)
- ③ 있다면 연속된 실험 연구
- ④ 있다면 해석 연구
- ⑤ 있다면 기존코드에 활용하여 개선 혹은 검증

B.2 1, 2차 실험 평가서 (샘플)

공학박사학위논문

An Experimental Study of CHF and Post-CHF Phenomena on Flow Boiling of R-134a with Grid Effects in Annular Geometry

환상관에서 지지격자의 영향을 고려한 R-134a의 유동 비등에서
임계 및 초과 임계 열유속 현상에 관한 실험적 연구

이**

A1. 실험제목이 실험내용과 잘 부합하는지의 여부

- 각 실험의 제목은 실험내용 및 경과물을 예상하기에 부족함이 없으므로, 본 평가기준 A1은 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

B1. 실험에 대한 목적의 명확한 제시 여부

- <본 실험에서는 물로 확인하기 힘든 고온 조건의 현상을 규명하기 위해 낮은 임계 압력과 기화열을 가지면서도 물의 비등현상을 적절하게 모의할 수 있는 R-134a를 냉매 물질로 사용하여 가열봉과 외곽 채널로 구성된 환상관에서 실험을 수행하였다. 또한 지지격자가 임계 열유속에 미치는 영향에 대한 실험이 수행되었다.> 실험 목적이 명확히 제시되었기 때문에 본 평가 기준 B1은 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

B2. 설계 시 사용된 모든 가정이 제시되고 이에 대한 근거 및 검증 과정 제시 여부

- IET 실험이 아닌 입구 조건과 지지격자에 따른 heat flux 측정 실험이다. 특별한 가정을 하여 실험을 단순화하거나 조작한 내용은 없는 것으로 판단된다. 따라서 본 평가기준 B2는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

B3. 최종 실험 장치와 설계와의 차이가 있는 경우 그에 대한 설명이 있는지의 여부

- 실험수행자 면담 필요

- 실험을 수행한 최종 실험 장치는 구체적인 설계 도면을 기초로 제작되었으며, 지지격자의 위치나 실험 장치의 압력과 유체 온도 측정 위치 등은 정확히 요구된 위치에서 측정되었다. 수행된 실험 장치의 구성과 도면을 제시하고 있으므로 장치와 설계에서의 차이는 없는 것으로 판단된다. 따라서 본 평가기준 B3는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

B4. 사용된 가정이 실험 결과에 미칠 영향 평가 여부

- 특별한 가정이 없는 것으로 판단되므로 본 평가기준 B4는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

B5. 코드 해석을 위한 충분한 설계 정보 제시 여부

- 실험수행자 면담 필요

- 본 실험에서 수행된 데이터들은 작동 유체로 R-134a를 사용하여 지지격자의 영향에 대한 실험을 수행하였기 때문에, MARS 코드를 사용하여 본 실험을 모의하는 것은 어려울 것으로 판단된다. 즉, MARS 코드 해석을 위한 충분한 정보가 논문에 제시되어 있다고 보기 힘들다. 따라서 본 평가기준 B5는 Partially satisfied (0)로 평가한다.

B6. 실험 장치 설계 이전에 예비 코드해석이 있었는지와 결과의 제시 여부

- 실험 장치 설계 이전에 임계열유속이 발생할 수 있는 실험조건을 설정하기 위해 MARS 코드 사용하여 실험 조건을 예측하는 연구를 수행하였다. 동 실험 장치에서 임계열유속이 발생 가능한 유량을 예측한 결과 실제 실험 조건과 유사한 결과를 얻었다. 그러나 지지격자의 영향을 목표로 하는 실험의 경우에는 코드 해석이 수행되지 않았기 때문에 본 평가기준 B6는 Partially Satisfied (0)로 평가한다.

B7. 실험 대상의 원형에 대한 설명 여부

- 본 실험에서는 경제성과 안전성을 고려하여 물 대신 R-134a를 작동 유체로 이용하였다. 스케일링에 따른 원형 (물)에 대한 설명이 제시되어 있기 때문에 본 평가 기준 B7은 Fully Satisfied(+) 로 평가한다.

B8. 적용한 scaling 방법과 그 적절성 제시 여부

- 본 실험에서는 scaling 방법과 그 적절성 여부에 대해 논문에 제시하였기 때문에 본 평가 기준 B8은 Fully Satisfied(+) 로 평가한다.

B9. 새로운 scaling의 적용인 경우 본 scaling 방법론에 대한 설명 및 적절성 제시 여부

- 본 실험은 새로운 scaling을 적용한 것이 아니다. 따라서 본 평가 기준 B9는 해당되지 않는 사항이므로 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

B10. 사용한 scaling에 대해 발생한 왜곡 가능성 제시 여부

B11. 왜곡이 발생하였다면, 그 왜곡이 있는 구체적 파라미터의 제시 여부

B12. 왜곡된 파라미터가 전체 실험에 미치는 영향 및 해결 방법 제시 여부

- 본 실험에서 scaling에 따른 왜곡에 대한 언급은 제시되어 있지 않다. 하지만 본 실험은 실험 장치의 scaling이 아니고, 평가 기준 B10 ,11, 12이 꼭 제시되어야만 하는 사항으로 판단되지 않기 때문에 본 평가 기준 B10, 11, 12는 전부 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

B13. 실험에 사용된 모든 계측장비의 목록 제시(혹은 자세한 설명)의 완성도 여부

- 실험에 사용된 모든 계측 장비가 제시되어 있다. 따라서 본 평가기준 B13은 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

B14. 실험에 필요한 모든 변수 계측 여부

- 본 실험은 지지격자와 입구 조건에 따른 heat flux 측정 실험이다. 각종 변수를 측정하기 위한 계측장비가 구체적으로 제시되어 있다. 따라서 본 평가 기준 B14는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

B15. 계측장비의 충분한 분해능을 가졌는지에 대한 여부

- 실험 수행자 면담 필요

- 본 실험에 사용된 계측 장비는 성능과 오차가 검증된 장비로 논문에 구체적인 설명을 하지는 않았다. 계측장비 전문가에게 의뢰하여 설치된 장비(유명 회사 제품)로 충분한 분해능을 가지고 있는 것으로 판단된다. 따라서 본 평가 기준 B15는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

B16. 계측장비의 적절한 위치 선정 및 설치시 주의할 사항에 대한 여부

- 예시 답변) 본 실험에 대해 논문에서는 열전대의 위치가 구체적인 수치로 충분히 제시되었다. 따라서 본 평가 기준 B16은 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

B17. 사용한 계측장비의 오차 제시 여부

- 본 실험에 대한 계측 장비의 오차가 제시되어 있기 때문에 본 평가 기준 B17은 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

B18. Calibration이 요구되는 계측장비 목록의 제시 및 수행 여부

- 본 실험에서 수행된 실험 장치의 경우, 실험 장치 세팅 이후, 실험이 가능한 전 범위에 대해 각 구성 장비에 대한 전체 Calibration 결과를 포함한 보고서를 따로 가지고 있어 논문에서는 각각의 값들을 제시하지 않았다. 따라서 본 평가기준 B18은 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

B19. 계측 장비가 실험 결과에 미칠 수 있는 영향성 제시 및 평가 여부

- 본 실험은 전체 실험에서 봤을 때 계측기의 영향이 유동에 미치는 효과는 중요하지 않기 때문에 크게 다루지 않았다. 따라서 본 평가기준 B19는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

B20. 계측 변수의 적절한 선정 여부

- 본 실험에서는 임계 열유속을 측정하기 위해 입구 유동 조건과 관 내 온도에 대한 측정을 수행하였다. 선정된 계측 변수를 측정하기 위한 계측기의 위치가 실험 목적에 맞게 적절하였다고 판단된다. 따라서 본 평가기준 B20은 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

B21. 주요 계측 변수와 부수적 계측 변수의 구분 및 이유 제시 여부

- 본 실험은 필요한 변수에 대해 전부 제시하였다. 따라서 본 평가기준 B21은 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

B22. 실험 장비 및 기타 계측 장비 배치 등에 대한 충분한 설명이 있는지에

대한 여부

- 실험의 주요 목적에 맞게 계측 장비의 위치가 선정되었음을 확인할 수 있으며, 실험 장비 및 계측 장비에 대한 특이성이 예상되지 않으므로 본 평가기준 B22는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

B23. 설계, 제작 및 조립상 생길 수 있는 오차의 제시 및 영향성 평가 여부

- 실험 수행자 면담 필요

- 설계시 오차의 영향이 생길 수 있는 부분에 대해 추가적인 계측 장비를 설치하여 데이터를 측정하였기 때문에 설계나 제작, 조립상의 오차에 의한 영향은 무시할 수 있는 수준으로 생각되며 특별히 오차 값을 제시하지는 않았다. 따라서 본 실험에서 설계상의 오차에 대해 언급된 부분은 없지만 fully satisfied로 보아도 무방하다.

B24. 해석 시 중요하게 작용할 수 있는 모든 구조물 등에 대한 설명 및 자료 제시 여부

- 본 실험은 채널 및 기타 구조물에 대한 설명 및 자료가 충분히 제시되어 있으므로 본 평가기준 B24는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

C1. 실험 조건에 따른 적절한 시간이 선정되었는지에 대한 평가 여부

C2. 해석 시 요구 될 수 있는 모든 시간 정보의 제시 여부

C3. 정상상태 실험의 경우 총 수행한 실험 시간에 대한 적절성 여부

- 본 실험은 정상 상태 실험으로써 실험 수행 시간이 중요하게 작용하는 실험은 아니다. 실험에서 충분한 시간만큼의 자료를 취득하였다고 판단되므로 본 평가기준 C1, C2, C3는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

C4. 과도상태 실험의 경우 측정 변수의 시간 간격에 대한 적절성 여부

- 본 실험은 과도 상태 실험이 아니기 때문에 해당 사항이 없다. 따라서 본 평가기준 C4는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

C5. 실험 조건에 따른 적절한 온도가 선정되었는지에 대한 평가 여부

- 본 실험에서 온도는 측정 변수이다. 따라서 본 평가기준 C5는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

C6. 실험 수행 시 주위 환경의 온도에 대한 영향 평가 제시 여부

- 본 실험은 주위 환경이 온도 측정에 큰 영향을 끼치지 않을 것으로 판단되므로, 본 평가기준 C6는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

C7. 실험 조건에 따른 적절한 압력이 선정되었는지에 대한 평가 여부

- 본 실험에서는 다양한 압력에서의 측정이 이루어졌다. 실험 목적에 따라 고압에서 실험이 이루어졌기 때문에, 본 평가기준 C7은 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

C8. 실험 설계에 따른 압력 유지 및 변화에 대한 적절한 반영이 될 수 있는지 평가

- 본 실험은 압력의 변화에 따른 열속의 변화를 측정하였다. 따라서 본 평가기준 C8은 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

C9. 실험 조건에 따른 적절한 열속이 선정되었는지에 대한 평가 여부

C10. 실험 설계에 따른 열속 유지 및 변화에 대한 적절한 반영이 될 수 있는지 평가

- 본 실험에서는 지지격자가 임계 열유속에 미치는 영향을 파악하기 위해 다양한 조건에서 열속을 측정하였다. 따라서 본 평가기준 C9, C10은 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

C11. 열손실에 대한 평가 및 열손실이 실험에 미치는 영향성 평가 여부

- insulation에 대한 평가는 나와 있지만, 열 손실이 실험 결과에 거의 영향을 미치지 않는다고 볼 수 있으므로 본 평가기준 C11은 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

C12. 실험 조건에 따른 적절한 유량이 선정되었는지에 대한 평가 여부

C13. 실험 설계에 따른 유량 유지 및 변화에 대한 적절한 반영이 될 수 있는지 평가

- 본 실험은 실험 목적에 따라 유량에 변화를 주었고, 그에 따른 임계 열유속을 측정하였다. 따라서 본 평가기준 C12는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

C14. 유량과 관련하여 해석을 위한 펌프의 성능 곡선 제시 여부

- 본 실험에서는 유량에 따른 임계 열유속의 변화를 살펴 볼 수 있으면 될 뿐, 펌프의 성능 곡선까지 제시할 필요가 없다고 판단된다. 따라서 본 평가기준 C14는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

C15. 실험 조건에 따른 적절한 변수가 선정되었는지에 대한 평가 여부

- 실험 목적에 부합하는 해석을 위한 변수가 적절히 선정되었으므로 본 평가기준 C15는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

C16. steady state 판단에 대한 적절한 제시 여부

- 본 실험에서 계측은 충분히 steady state에 도달한 후 이루어졌을 것으로 판단할 수 있다. 따라서 본 평가기준 C16은 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

C17. Scaling과 더불어 적절히 모사 되었는지에 대한 여부

- 본 실험은 실험 장치에 대한 scaling이 아닌 작동 유체(물 -> R-134a)에 대한 Scaling 실험인데 R-134a로 실제 물에서 발생하는 현상을 잘 모사할 수 있기 때문에 본 평가기준 C17은 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

C18. 초기 실험 조건(정상상태 등)에 대한 제시 여부

- 본 실험은 과도 실험이 아니지만 정상상태에 대하여 언급이 잘 이루어져 있기 때문에 본 평가기준 C18은 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

C19. 절대 오차로 나타낼 수 있는 변수의 오차 제시 여부

C20. 상대 오차로 나타낼 수 있는 변수의 오차 제시 여부

C21. 랜덤 오차로 나타낼 수 있는 변수의 오차 제시 여부

C22. 각 변수 오차를 바탕으로 실험 결과에 대한 통계적 오차 분석 제시 여부

- 실험 수행자 면담 필요

- 오차 분석에 관련된 자료를 가지고 있고, 실험 결과에 대한 오차 분석이 정밀하게 이루어져 있기 때문에, 본 평가 기준 C19, 20, 21, 22는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

D1. 모든 데이터 처리 유무 제시 여부

- 본 실험에서는 데이터의 처리 방법에 대해 제시하진 않았지만, 본 평가 기준 D1은 Fully Satisfied (+)로 평가할 수 있다.

D2. 최초 데이터 수집 단계에서 수집 장비의 Sampling rate, filter사용 여부, filter 종류 등에 대한 제시 여부

- 본 실험에서 사용한 계측 장비에는 특별한 filter가 사용되지 않은 것으로 판단된다. 즉, 계측기를 통하여 수집한 자료를 직접 분석하고 있으므로 본 평가기준 D2는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

D3. 데이터의 후처리 방법 제시 여부

- 본 실험에서는 계측기를 통해 수집한 데이터를 처리하는 과정이 제시되어 있지 않지만 적절하게 처리하였을 것으로 판단할 수 있기 때문에 본 평가기준 D3는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

D4. 정상상태 실험인 경우 실험 종료 후 초기 조건과 동일한지 여부를 나타낼 수 있는 데이터 제시 여부

- 본 실험은 정상 상태 실험으로써 각 주요 변수에 대한 측정이 이루어졌다. 실험 종료 후에도 초기 조건과 동일한지에 대해서 제시되진 않았지만 거의 변화가 없다고 판단할 수 있기 때문에, 본 평가기준 D4는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

D5. 과도상태 실험인 경우 실험 시작 이전 준비 단계(정상상태 등)의 각 변수들에 대한 데이터 제시 여부

- 본 실험은 과도 상태 실험이 아니기 때문에 해당사항이 없다. 따라서 본 평가기준 D5는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

D6. 정상상태 실험 및 과도상태 실험 모두 동일한 조건에서의 재실험에 대한 평가 및 이에 대한 데이터 제시 여부

- 본 실험에서 동일한 조건에서의 재실험 수행 결과에 대한 내용은 제시되어 있지 않지만, steady 상태의 측정을 위해 충분한 시간에 걸쳐 이루어졌다고 판단할 수 있기 때문에 본 평가기준 D6는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

D7. Raw 데이터 제시 여부

- 본 실험에서 실험 결과는 논문에 그래프로 제시되어 있다. 따라서 본 평가기준 D7은 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

D8. 상관식 도출 과정의 적절성 여부

D9. 도출한 상관식의 검증 여부

D10. 도출한 상관식의 활용도 제시 여부

D11. 도출한 상관식의 활용범위 및 제한조건 제시 여부

- 본 실험에서 만들어진 상관식과 관련하여 평가기준 D8, 9, 10, 11에 대한 설명이 논문에 제시되어 있다. 따라서 본 평가기준 D8, D9, D10, D11은 Fully satisfied (+)로 평가한다.

D12. 실험 결과에 대한 적절한 분석 여부

- 논문에는 실험 결과에 대한 상세한 분석이 제시되어 있다. 실험 결과들은 기존의 상관식들과 비교하여 주요 요인에 의한 결과들의 변화를 상세히 분석하는 과정이 이루어졌기 때문에 본 평가 기준 D12는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

E1. 실험의 중요도 평가

- 실험 수행자 면담 필요

- MARS 코드로 본 실험의 결과를 이용하여 지지격자의 영향을 모사하기는 어려울 것으로 판단된다. MARS 평가를 위한 실험으로 선정하기는 어려울 것으로 판단된다. 따라서 본 평가 기준 E1은 Partially Satisfied (0)로 평가한다.

E2. 신뢰도 평가

- 본 실험은 과정과 결과에 있어서 잘 이루어진 실험이다. 따라서 본 평가 기준 E2는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

E3. 활용도 평가

- 실험 수행자 면담 필요

- 본 실험의 결과들은 R-134a 냉매를 이용하여 임계열유속 및 초과 임계열유속 조건에서의 지지격자의 영향을 살펴본 것으로 MARS 코드 해석으로 모사하기에는 적절하지 않은 것으로 판단된다. 따라서 본 평가 기준 E3는 Partially Satisfied (0)로 평가한다.

E4. 논문 등재 여부 및 편수

- 실험 수행자 면담 필요

- 현재까지 실험 관련 논문은 1편이 게재되었으며, 추가적으로 1편이 더 작성될 예정이다. 그러나 MARS 코드 해석과 관련된 논문은 없다. 따라서 본 평가 기준 E4는 Fully Satisfied (+)로 평가한다.

F1. 참고 문헌이 적절하게 제시 되었는가에 대한 여부

- 논문에서 참고문헌을 구체적으로 제시하고 있다. 따라서 본 평가 기준 E3는 Fully Satisfied (+)로 평가한다

G1. 견해

- 실험 수행자 면담 필요

- 본 실험에서 수행된 데이터들은 작동 유체로 R-134a를 사용하여 지지격자의 영향에 대한 실험을 수행하였기 때문에, MARS 코드로 지지격자의 영향을 해석할 경우 그 결과에 대한 신뢰도가 다소 떨어질 것으로 예상된다. 실험 결과들이 물의 실험 결과들과 상사성을 보이긴 하였으나 지지격자의 영향을 모사하기 위해서는 추가적인 데이터가 필요하고 R-134a 실험에 대해 검증된 상관식들의 검증이 있어야 할 것이다. 따라서 MARS 코드를 사용하여 본 실험을 모의하는 것은 어려울 것으로 판단된다.

B.3 2차 평가 설문지 (샘플)

< 국내 열수력 실험 데이터 평가 및 MARS 코드 개선 >

과제의 취지는 다음과 같습니다.

국내 대학들에서는 이미 원자력 발전소에서 발생할 수 있는 수많은 열수력 상황들을 규명하고자 많은 실험들을 수행해왔다. 하지만 그 데이터들이 산재되어 있고 체계적으로 정리되지 못해서 상관식을 개발하고 코드를 검증함에 효과적으로 사용되지 못하고 있는 것이 지금의 현실이다. 이를 위해서는 현재까지 원자력 관련 열수력 실험들의 종류를 파악하고 데이터를 수집함과 동시에 이 실험들이 올바른 절차를 거쳐서 수행되었는가에 대한 평가도 동시에 수행되어야 한다. 이러한 문제를 해결하고자 본 과제에서는 국내 원자력 관련 열수력 실험 데이터들을 체계적으로 Database화하고, 이 들 데이터를 평가할 수 있는 적절한 평가방법론을 개발하며, 이 후 이들 데이터를 사용하여 MARS 코드를 평가하고 취약점이 발견되었을 시 이를 개선하고자 한다.

그래서 위의 취지에 따라 박사님의 실험을 과제에 이용하고자 합니다. 과제에서 하는 일은 다음과 같습니다.

1. **실험 평가 지침서 작성** (이는 실험이 잘 되었는지를 평가하는 것이 아니라, MARS로 모사하기에 적절한 실험인지를 판단하기 위한 것입니다.)
2. **데이터베이스 작성** (이는 MARS로 모사하기에 적절하지 않은 실험이라도, 향후 다양한 분야에 데이터를 활용하기 위한 작업입니다. 논문에 데이터가 있다 하더라도 무수히 많은 양의 데이터를 컴퓨터로 작업하기에는 어려울 것 같아서, 아래와 같이 도움을 부탁드립니다.)

이를 위해 표에 대한 작성을 부탁드립니다.

자료 보유 여부	예	아니오
1. 박사님의 실험이 MARS 성능 평가에 적절한 실험입니까? 이유 : 본 실험에서 수행된 데이터들은 작동 유체로 R-134a를 사용하여 지지격자의 영향에 대한 실험을 수행하였기 때문에, MARS 코드로 지지격자의 영향을 해석할 경우 그 결과에 대한 신뢰도가 다소 떨어질 것으로 예상된다. 실험 결과들이 물의 실험 결과들과 상사성을 보이긴 하였으나 지지격자의 영향을 모사하기 위해서는 추가적인 데이터가 필요하고 R-134a 실험에 대해 확증된 상관식들의 검증이 있어야 할 것이다. 따라서 MARS 코드를 사용하여 본 실험을 모의하는 것은 어려울 것으로 판단된다.		V
2. MARS로 모사하기 위한 Input File을 가지고 계십니까?		V
3. 실험 결과에 대한 Raw data를 아직 보유하고 계십니까?	파일	보고서

답변해 주셔서 감사합니다. 면담 때 부탁드립니다.

B.4 최종 평가서 (샘플)

최종 평가서		환상관(지지격자포함)에서 R-134a의 임계열유속 현상에 관한 실험	이** (KAIST)
1	실험 제목은 실험 내용과 잘 부합하는가?		+
	+ 실험의 제목이 실험 내용 및 결과물을 예상하기 부족함이 없을 경우 (+)로 평가한다.		
	0 실험 제목만으로 내용 및 결과를 예상하기 부족할 경우 (0)로 평가한다.		
2	실험 목적은 명확히 제시되었는가? (해당 항목에 체크할 것!!)		+
	실험 성격	1) 검증 실험 2) 상관식 도출을 위한 실험 3) 현상 파악을 위한 실험 4) 기존에 없던 실험 데이터 영역 확보 실험	
	실험 대상	1) IET 2) SET 노심 핵 연료봉 모사	
	실험 내용	환상관에서 R-134a 임계열유속 실험 데이터 확보. 임계열유속 조건에서 지지 격자가 열전달 증진에 미치는 영향 파악. 액체막의 건조가 임계열유속의 발생에 미치는 영향 및 기포 거동 확인. 초과 임계 열유속 실험 상관식을 개발함.	
3	실험 장치 설계 및 실험 수행에 사용된 가정 및 근거, 영향이 제시되었는가?		0
	+ 충분히 제시되어 있을 경우 (+)로 평가한다.		
	0 사용된 가정이 미치는 영향이 작기 때문에, 제시되지 않은 경우 (0)로 평가한다.		
	- 사용된 가정이 미치는 영향이 큰데, 제시되지 않은 경우 (-)로 평가한다.		
4	MARS 코드 해석을 위한 충분한 설계 정보가 제시되었는가?		/
	+	MARS 코드로 모사하기에 적합한 실험으로써, 입력코드(Input Deck)를 만들기에 충분한 정보가 주어져 있을 경우 (+)로 평가한다.	
	0	MARS 코드로 모사하기에 적합한 실험이지만, 충분한 설계 정보가 제시되지 않은 경우 (0)로 평가한다.	
	/	MARS 코드로 모사하기에 적합하지 않은 실험의 경우 (/)로 평가한다. (이유 : 지지격자의 영향을 MARS로 모사하는 것은 어렵다)	

5	MARS나 RELAP으로 코드 해석이 수행되었는가?	/
	+ MARS나 RELAP으로 실험에 대한 코드 해석이 수행되었으면 (+)로 평가한다.	
	0 CFD나 다른 코드로 해석이 수행되었으면 (0)로 평가한다.	
	/ 코드 해석이 수행되지 않았으면 (/)로 평가한다.	
6	실험 대상의 원형에 대한 설명이 제시되었는가?	/
	+ Scaling된 실험 장치의 경우, 원형에 대한 설명이 제시되어 있으면 (+)로 평가한다.	
	0 Scaling된 실험인데, 원형이 널리 알려진 장치로써 구체적인 설명이 필요 없어서 제시가 안된 경우 (0)로 평가한다.	
	- Scaling된 실험으로서, 원형에 대한 설명이 요구되는데 제시되지 않은 경우 (-)로 평가한다.	
	/ Scaling된 실험이 아닌 경우, (/)로써 평가한다.	
7	Scaling된 실험인 경우 scaling 비 및 방법론이 제시되었는가?	/
	+ Scaling된 실험으로서, scaling 비 및 방법론이 충분히 제시되어 있으면 (+)로 평가한다.	
	0 Scaling된 실험으로서, scaling 비 및 방법론에 대한 설명이 불충분할 경우 (0)로 평가한다.	
	- Scaling된 실험으로서, scaling 비 및 방법론에 대한 설명이 제시되지 않았을 경우 (-)로 평가한다.	
	/ Scaling된 실험이 아닌 경우, (/)로써 평가한다.	
8	Scaling을 사용함으로써 발생할 수 있는 왜곡 현상이 관련 변수나 전체 실험에 미치는 영향이 제시되었는가?	/
	+ Scaling된 실험으로서, Scaling으로 인한 왜곡 현상이 충분히 제시되었으면 (+)로 평가한다.	
	0 Scaling된 실험으로서, Scaling으로 인한 왜곡 현상의 영향을 무시할 수 있기 때문에 제시가 안된 경우 (0)로 평가한다.	
	- Scaling된 실험으로서, Scaling으로 인한 왜곡 현상의 영향을 무시할 수 없는데, 제시가 안된 경우 (-)로 평가한다.	
	/ Scaling된 실험이 아닌 경우, (/)로써 평가한다.	
9	실험에 사용된 모든 계측장비가 제시되었는가?	+
	+ 실험에 사용된 모든 계측 장비가 제시되었을 경우, (+)로 평가한다.	
	0 실험에 사용된 계측 장비가 충분히 제시되지 않았을 경우, (0)로 평가한다.	
	- 실험에 사용된 계측 장비가 전혀 제시되지 않은 경우, (-)로 평가한다.	
10	실험에 필요한 모든 변수를 계측하였는가?	+
	+ 실험에서 요구되는 모든 변수가 계측되었을 경우, (+)로 평가한다.	

	0	계측에 대한 설명이 충분하지 않을 경우, (0)로 평가한다.	
	-	계측에 대한 설명 없이, 결과만을 제시한 경우, (-)로 평가한다.	
11	계측 장비는 실험에 적합한가?		+
	+	성능이 검증된 잘 알려진 계측 장비(유명 회사 제품)를 사용하였다면, 구체적인 설명이 없어도 (+)로 평가한다.	
	-	직접 제작한 장비에 대해서 구체적인 설명이나 분해능이 제시되지 않았다면 (-)로 평가한다.	
12	계측 장비는 적절한 위치에 설치되었는가?		+
	+	계측 장비의 설치 위치에 대한 정보가 구체적인 수치로써 충분히 제시되었을 경우 (+)로 평가한다.	
	-	계측 장비의 설치 위치에 대한 정보가 충분치 않은 경우 (-)로 평가한다.	
13	사용한 계측 장비의 오차가 제시되었는가?		+
	+	사용한 모든 계측 장비에 대해서 오차가 제시되었을 경우, (+)로 평가한다.	
	0	일부 계측 장비에 대해서만 오차가 제시되었다면, (0)로 평가한다.	
	-	사용한 계측 장비에 대한 오차가 전혀 제시되지 않았다면, (-)로 평가한다.	
14	계측 장비가 실험 결과에 미칠 수 있는 영향이 제시되었는가?		0
	+	계측 장비가 실험 결과에 미치는 영향이 제시되었으면, (+)로 평가한다.	
	0	계측 장비의 영향을 무시할 수 있기 때문에 제시하지 않은 경우 (0)로 평가한다.	
	-	계측 장비의 영향을 무시할 수 없는데, 제시되지 않은 경우 (-)로 평가한다.	
15	실험 조건에 따른 적절한 변수가 설정되었는가?		+
	+	시간, 온도, 압력, 유량 등의 조건 변수 설정에 대한 구체적인 설명 (사용 이유, 범위 등)이 있을 경우 (+)로 평가한다.	
	0	조건 변수 설정에 대한 설명이 충분치 않은 경우 (0)로 평가한다.	
	-	조건 변수 설정에 대한 설명 없이, 결과만을 제시한 경우 (-)로 평가한다.	
16	실험 수행 시 주위 환경의 영향에 대한 평가가 제시되었는가? (열손실, 주위 환경의 온도)		0
	+	실험 수행 시 주위 환경의 영향에 대한 평가가 제시되었으면 (+)로 평가한다.	
	0	실험 수행 시 주위 환경의 영향을 무시할 수 있기 때문에 제시되지 않은 경우 (0)로 평가한다.	
	-	실험 수행 시 주위 환경의 영향을 무시할 수 없는데 제시되지 않은 경우 (-)로 평가한다.	
17	정상상태 판단을 위한 구체적 근거가 제시되었는가?		0
	+	“입구온도를 몇 도에서 ± 도 범위 내에서 몇 분 동안 유지 시킨 후 실험을 시작하였다” 와 같이 정상 상태	

		판단을 위한 구체적인 근거가 제시된 경우 (+)로 평가한다.	
	0	정상상태 판단에 대한 구체적인 설명이 제시되지 않은 경우 (0)로 평가한다.	
18	과도 상태 실험의 경우, 실험 조건의 변경이 이루어지는 시기 및 이유가 제시되었는가?		/
	+	사고 발생을 위하여 실험 장치에 인위적으로 조건(밸브 개방 등)을 변경시킨 경우, 이에 대한 설명이 충분하면 (+)로 평가한다.	
	0	실험 조건의 변경에 대한 설명이 불충분할 경우 (0)로 평가한다.	
	-	실험 조건의 변경에 대한 어떠한 언급도 제시되지 않은 경우 (-)로 평가한다.	
	/	과도 상태 실험이 아닌 경우 (/)로 평가한다.	
19	실험 결과에 대한 오차 분석이 제시되었는가?		+
	+	실험 결과에 대한 오차 분석이 제시되었으면 (+)로 평가한다.	
	-	실험 결과의 오차에 대한 설명이 없을 경우 (-)로 평가한다.	
20	모든 데이터 처리에 대한 구체적인 명시가 있는가?		+
	+	논문에 실험 데이터를 처리한 방법에 대하여 구체적인 설명이 있을 경우, (+)로 평가한다.	
	0	실험 데이터를 처리한 방법에 대한 설명이 충분치 않을 경우, (0)로 평가한다.	
21	Raw 데이터가 제시되어 있는가?		+
	+	논문에 실측데이터가 제시되었거나, 이미 File로 실측데이터를 확보한 경우 되어 있으면 (+)로 한다.	
	0	논문에 그래프 상으로만 Data가 존재할 경우, (0)로 평가한다.	
	-	구체적인 데이터를 알 수 없는 경우 (-)로 평가한다.	
22	상관식 도출 과정은 적절히 제시되었는가?		+
	+	상관식 도출 과정이 충분히 제시되었으면 (+)로 평가한다.	
	0	상관식 도출 과정에 대한 설명이 불충분할 경우 (0)로 평가한다.	
	/	상관식을 도출한 실험이 아닌 경우 (/)로 평가한다.	
23	도출한 상관식의 활용도 및 제한 조건이 제시되어 있는가?		+
	+	상관식의 활용도 및 제한 조건이 충분히 제시되었을 경우, (+)로 평가한다.	
	0	상관식의 활용도 및 제한 조건에 대한 설명이 불충분할 경우, (0)로 평가한다.	
	/	상관식을 도출한 실험이 아닌 경우 (/)로 평가한다.	
24	본 실험은 MARS 코드 평가에 적합한 실험인가? (구체적으로 기술 요망)		
		본 실험은 R-134a를 이용하여 다양한 유동 조건과 지지 격자의 영향에 따른 임계 열유속 데이터를 측정하였다. 개	

	발된 상관식을 MARS 코드에 적용할 수는 있겠지만, 지지격자의 영향을 MARS로 모사하기 어려우므로, MARS 코드 평가에 적합하지 않은 실험이다.	
25	기타 특이사항	
	실험 수행자의 견해 - 본 실험에서 수행된 데이터들은 작동 유체로 R-134a를 사용하여 지지격자의 영향에 대한 실험을 수행하였기 때문에, MARS 코드로 지지격자의 영향을 해석할 경우 그 결과에 대한 신뢰도가 다소 떨어질 것으로 예상된다. 실험 결과들이 물의 실험 결과들과 상사성을 보이긴 하였으나 지지격자의 영향을 모사하기 위해서는 추가적인 데이터가 필요하고 R-134a 실험에 대해 검증된 상관식들의 검증이 있어야 할 것이다. 따라서 MARS 코드를 사용하여 본 실험을 모의하는 것은 어려울 것으로 판단된다.	
(+): fully satisfied, (0): partially satisfied, (-): not satisfied, (/): not applicable		

KAERI

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
	KAERI/CM-1235/2009		
제목 / 부제	국내 열수력 실험 데이터 평가 및 MARS 코드 개선		
연구책임자 및 부서명	박군철 (서울대학교)		
연구자 및 부서명	김무환, 전지한, 김성진, 이거형, 방영석, 전성수, 최치웅		
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구원
페이지	p. 133	도표	있음(○), 없음()
참고사항			
공개여부	공개(○), 비공개()	보고서종류	
비밀여부	대외비(), _ 급비밀		
연구수행기관	서울대학교 열수력연구실	계약번호	
초록 (15-20줄내외)	<p>본 과제에서는 국내 열수력 실험 데이터를 이용한 MARS 코드 검증이 수행되었다. 이를 위해 우선, 국내 대학의 열수력 실험 데이터를 수집하였고, 본 과제에서 개발된 <MARS 코드 검증용 실험 선정 지침서>를 이용하여 MARS 코드 검증용으로 적합한 실험인지를 평가하였다. 그리고 수집된 실험 데이터를 이용하여 <국내 열수력 실험 데이터뱅크>를 구축하였다. 최종적으로 이들 실험 데이터를 이용하여 MARS 코드 검증이 수행되었다. 비응축성 기체 존재 시의 응축 열전달 현상, 수평관 내의 역류유동제한 현상, 충수운전 중 RHR 상실사고, DVI관 파단 사고의 총 4가지 실험이 MARS 코드 평가 및 개선에 이용되었다. 본 과제에서 개발된 <국내 열수력 실험 데이터뱅크>는 향후 다양한 열수력 코드의 검증 등에 활용될 수 있을 것이고, MARS 코드 평가로부터 제안된 사항은 향후 MARS 코드 개선에 반영되어 MARS 코드의 성능을 향상시킬 것으로 기대된다.</p>		
주제명키워드 (10단어내외)	MARS코드, 데이터뱅크, 실험평가지침서, 코드개선, 응축열전달, 역류유동제한, PKL실험, 원자로용기직접주입		

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code
		KAERI/CM-1235/2009			
Title / Subtitle		Assessment of Thermal-hydraulic Experiment Database and Improvement of MARS Code			
Project Manager and Department		G.C. Park (Seoul National University)			
Researcher and Department		M.H. Kim, J.H. Chun, S.J. Kim, G.H. Lee, Y.S. Bang, S.S. Jeon, C.W. Choi			
Publication Place	Daejeon	Publisher	KAERI	Publication Date	2010. 3
Page	p. 133	Ill. & Tab.	Yes(○), No ()	Size	A4
Note					
Open	Open(○), Closed ()		Report Type		
Classified	Restricted(), ___Class Document				
Performing Org.	Seoul National University		Contract No.		
Abstract (15-20 Lines)		<p>In this project, the assessment and improvement of MARS code was performed by using the domestic thermal hydraulic experimental data. Firstly, thermal-hydraulic experimental data performed at universities in Korea were collected. Secondly, the data were evaluated by using the <Assessment Guidelines for Selection of the Data for Evaluation of MARS code> developed in this project. Thirdly, the <Domestic Thermal-Hydraulic Experiment databank> was developed by using the collected experimental data. Finally, the capability of MARS code was evaluated by using the experimental data (Condensation heat transfer experiment, CCFL experiment, PKL experiment and DVI line break experiment). It will be expected that the databank will be useful to the various T/H code assessment and the suggestions will improve the capability of MARS code.</p>			
Subject Keywords (About 10 words)		MARS Code, Databank, Assessment Guideline, Code-Improvement, Condensation, CCFL, PKL, DVI			