

KINS/RR-281

**원자로용기직접주입 열수력 해석을 위한
TRACE 코드 평가**

**TRACE Code Assessment for Thermal Hydraulic
Analysis in Direct Vessel Injection**

2004. 12



한국원자력안전기술원

제 출 문

한국원자력안전기술원장 귀하

본 보고서를 “원자력 안전규제 기술개발”대과제의 세부과제 “열수력 및 노심 안전해석 규제기술 개발”의 일부로서 수행한 “원자로용기직접주입 열수력 해석을 위한 TRACE 코드 평가”의 기술보고서로 제출합니다.

2004년 12월

총괄연구책임자 : 김 효 정

세부연구책임자 : 김 인 구

연 구 원 : 신 안 동

요 약 문

I. 제 목

원자로용기직접주입 열수력 해석을 위한 TRACE 코드 평가

II. 연구 개발의 목적 및 중요성

국내 차세대원자로 APR-1400의 비상노심냉각계통(ECCS)은 원자로용기 직접 주입(DVI: Direct Vessel Injection) 방식을 채택하고 있다. 기존의 보수적인 해석방법론을 사용한 APR-1400 비상노심냉각계통 성능 평가에서는 최고 핵연료피복재 온도와 같은 주요 안전변수에 대한 허용기준은 만족하는 것으로 나타났으나, 대형 냉각재상실사고 해석에서 기존의 보수적인 평가방법만으로는 DVI 안전주입계통에서 발생하는 주요 현상들을 적절히 평가하지 못하는 것을 발견하였다. 특히 재관수 중 안전주입수 우회, 강수관 비등에 따른 후기가열, 안전주입탱크 유량제어설비 성능 등의 불확실성으로 인한 비상노심냉각계통 성능 평가 결과의 불확실성이 제기되었다. 그 결과 안전위원회에서는 “원자로용기 직접주입방식(DVI)의 안전주입계통 설계와 관련하여 대형 냉각재상실사고(LBLOCA) 후 강수부에서 나타나는 후기가열(Late Heating) 현상 등에 관한 불확실성 분석 예비보고서를 제출할 것”을 APR-1400 표준설계인가 후속조치사항으로 결정하였다.

대형냉각재상실사고 시 강수부에서는 복잡한 3차원 유동이 발생하므로, 강수부에서의 열수력 현상을 현실적으로 예측하기 위해서 다차원 해석코드의 사용이 필요하다. 본 연구에서는 DVI와 관련된 UPTF 실험결과를 사용하여 현재 미국 핵규제위원회의 검증코드로 개발 중이며 다차원 해석 능력을 보유한 TRACE 코드의 열수력학적 예측 능력을 평가하는데 일차적인 목적이 있다. 아울러 본 연구에서는 TRACE 코드를 이용한 검증계산을 수행하기 위해, APR-1400 대형냉각재상실사고 해석에 필요한 TRACE 코드 입력자료(Input Deck)를 개발하고자 한다.

III. 연구의 내용 및 범위

본 연구의 목적을 달성하기 위해 다음의 연구가 수행되었다.

- 1) 코드평가를 위한 UPTF 대상실험의 선정
- 2) 대상실험의 입력자료(Input Deck) 개발
- 3) TRACE 코드 계산 결과 분석 및 개선 사항 도출
- 4) APR-1400 대형냉각재상실사고 해석에 필요한 TRACE 코드 입력자료 개발

IV. 연구개발 결과

본 연구에서는 UPTF 실험 중 Test 6, 7, 21 에 대한 입력자료를 개발하여 TRACE 코드 평가를 수행하였다. 하부플레넘에서의 냉각재 관입율을 실험결과와 비교한 결과 TRACE 코드는 대체로 실험결과와 유사한 관입율을 예측하는 것을 알 수 있었다. 그러나 UPTF Test 21(Run 272) 및 UPTF Test 5(Run 062)와 같이 과냉각도가 높은 냉각수가 주입되는 실험에서는 TRACE 계산결과와 실험결과는 많은 차이를 보여 주었다. 이러한 문제는 TRAC 코드의 증기응축 모델이 강수관 상부에서의 증기응축을 지나치게 높게 예측하기 때문이며, 따라서 TRACE 코드의 증기응축 모델에 대한 개선이 필요함을 알 수 있었다.

APR-1400 원전에 대한 TRACE 코드 입력자료를 개발하여 대형냉각재상실사고 예비해석을 수행하였다. 그 결과 입력자료의 정확성이 침투 핵연료피복재 온도에 미치는 영향이 매우 큰 것을 확인할 수 있었다. 이는 TRACE 코드와 같은 최적해석코드의 사용에 입력자료의 품질 보증이 중요함을 보여 준다.

V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구에서 수행된 TRACE 코드평가를 통해 TRACE 코드를 사용한 검증계산에서 고려해야 할 코드 특성이 파악되었고 이는 검증계산 시 기초자료로 활용될 것이다. 또한 본 연구에서 개발된 TRACE 코드의 APR-1400 원전 입력자료는 추후 APR-1400 원전의 검증계산과 안전성 평가에 활용될 것이다.

SUMMARY

I. Title

TRACE Code Assessment for Thermal Hydraulic Analysis in Direct Vessel Injection

II. Objectives and Importance of the Research

APR-1400, a Korean advanced reactor, has emergency core cooling system (ECCS) with direct vessel injection. The conservative evaluation of ECCS performance showed that important safety parameters like a peak cladding temperature were within the related safety criteria. However, this evaluation method was found not to be proper to predict important phenomena/process associated with direct injection of coolant to reactor vessel during large break LOCAs. In particular, coolant bypass during refill phase, core reheating due to downcomer boiling, uncertainties in the performance of a fluidic resulted in large uncertainties in evaluating overall performance of ECCS. As a result, Nuclear Safety Commission(NSC) decided as a condition of approval of standard design certification that a preliminary uncertainty evaluation report, which address the important phenomena such as late reheating happened during large break LOCAs, shall be submitted.

Multidimensional thermal-hydraulic code calculations are necessary to predict complex thermal-hydraulic phenomena within the downcomer during LBLOCA calculation. The main objective of present study is to evaluate the TRACE code capability with DVI related Upper Plenum Test Facility Data, which is on the developing by US-NRC. Another objective is to develop the APR-1400 plant standard input deck preparing the LBLOCA calculation using TRACE code.

III. Scope and Contents of the Research

To achieve the objectives, followings were carried out.

- 1) Identification of target tests during UPTF tests to assess the code.
- 2) Development of input decks of target tests
- 3) Code calculation analysis and identification of code enhancements
- 4) Input deck development for APR-1400 LBLOCA calculation

IV. Research Results

TRACE input decks for UPTF Test 6,7,21 was developed and TRACE code was evaluated with these input decks. The result of comparison on lower plenum penetration rate with data showed that TRACE code predict reasonable lower plenum penetration rate. On the calculation of Test 21(Run 272) and Test 5(Run 062), high subcooled water is injected, TRACE code overpredicted the bypass rate. Analysis showed that the condensation model in TRACE code overpredict the condensation of steam within upper downcomer region. It is identified that the condensation model in TRACE code needs improvement.

TRACE code input deck for APR-1400 was developed and preliminary LBLOCA case was calculated. The result was very sensitive to its input deck change in terms of peak cladding temperature. It showed that the quality assurance during input deck development is crucial especially in the best estimate thermal-hydraulic calculation.

V. Application Plan of the Results

In present study, the code characteristics to be considered during audit calculation was identified by TRACE code assessment with UPTF test data. These will be used as basic considerations for audit calculation. and the base input deck for APR-1400 plant can be utilized to the stability and audit calculation directly

CONTENTS

| | |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| Summary (in Korean) | i |
| Summary (in English) | iii |
| Content (in English) | v |
| Content (in Korean) | vii |
| List of Figures (in Korean) | ix |
| List of Tables (in Korean) | ix |
| | |
| I. Research Need and Objectives | 1 |
| 1. Background | 1 |
| 2. Objectives | 1 |
| | |
| II. TRACE code assessment | 2 |
| 1. Identification of target tests for TRACE code assessment | 4 |
| 2. Development of input decks for target tests | 10 |
| 3. Comparison of TRACE code calculation with data | 23 |
| 4. Assessment of the condensation model in TRACE | 52 |
| | |
| III. Development of APR-1400 input deck for TRACE | 57 |
| 1. Base input deck development | 57 |
| 2. Preliminary LBLOCA calculation | 59 |
| | |
| IV. Conclusion | 61 |

V. References 62

Appendix : Modification of AVscript for Multi-Graph(Figure) on a Page

목 차

| | |
|-------------------------------------------|-----------|
| 요 약 문 | i |
| Summary | iii |
| Content | v |
| 목 차 | vii |
| 표 목차 | ix |
| 그림목차 | ix |
| | |
| I. 연구의 배경 및 목적 | 1 |
| 1. 연구 배경 | 1 |
| 2. 연구 목적 | 1 |
| | |
| II. TRACE 코드평가 | 2 |
| 1. 코드평가를 위한 대상 실험 선정 | 4 |
| 2. 대상 실험의 TRACE 코드 입력자료 개발 | 10 |
| 3. 실험자료와 TRACE 코드 계산 결과 비교 | 23 |
| 4. TRACE 코드의 증기응축 모델 평가 | 52 |
| | |
| III. APR-1400 원전의 TRACE 코드 입력자료 개발 | 57 |
| 1. 입력자료 개발 | 57 |
| 2. 대형냉각재상실사고 예비해석 | 59 |
| | |
| IV. 결 론 | 61 |

V. 참고문헌 62

부 록 : Avscript 기능 개선 및 사용자 설명서

표 목 차

| | |
|---------------------------------------------|----|
| 표 1 UPTF 실험 계산에 사용된 자료 목록 | 4 |
| 표 2 UPTF Test 6 초기조건 및 경계조건 | 6 |
| 표 3 UPTF Test 7 초기조건 및 경계조건 | 7 |
| 표 4 UPTF Test 21 초기조건 및 경계조건 | 8 |
| 표 5 UPTF Test 6, 7, 21의 관입을 | 9 |
| 표 6 UPTF Test 6, 7, 21의 계통 초기 압력 | 13 |
| 표 7 UPTF Test 6, 7, 21 의 유체 및 벽면 온도조건 | 13 |
| 표 8 UPTF Test 6의 증기주입량에 따른 관입을 | 25 |
| 표 9 UPTF Test 7의 증기주입량에 따른 관입을 | 36 |
| 표 10 UPTF Test 21의 증기주입량에 따른 관입을 | 45 |
| 표 11 APR 1400 원전의 정상상태 조건 | 58 |

그림 목 차

| | |
|-----------------------------------------------------|----|
| 그림 1 UPTF 실험장치 유체흐름도 | 3 |
| 그림 2 CLI 용 원자로용기 모델링 | 11 |
| 그림 3 DVI용 원자로 용기 모델링 | 11 |
| 그림 4 UPTF 실험장치 모델링 개략도 | 12 |
| 그림 5 UPTF Test 6 증기 주입을 | 16 |
| 그림 6 UPTF Test 6 냉각수 주입을 | 17 |
| 그림 7 UPTF Test 6 배압 경계조건 | 18 |
| 그림 8 UPTF Test 7 증기 주입을 | 19 |
| 그림 9 UPTF Test 7 냉각수 주입을 | 20 |
| 그림 10 UPTF Test 7 배압 조건 | 21 |
| 그림 11 UPTF Test 21 경계조건 | 22 |
| 그림 12 UPTF Test 6 run 131 계산결과(압력, 파단유량, 재고량) | 26 |
| 그림 13 UPTF Test 6 run 131 계산결과(온도) | 27 |
| 그림 14 UPTF Test 6 run 132 계산결과(압력, 파단유량, 재고량) | 28 |

| | |
|-----------------------------------------------------------|----|
| 그림 15 UPTF Test 6 run 132 계산결과(온도) | 29 |
| 그림 16 UPTF Test 6 run 133 계산결과(압력, 파단유량, 재고량) | 30 |
| 그림 17 UPTF Test 6 run 133 계산결과(온도) | 31 |
| 그림 18 UPTF Test 6 run 135 계산결과(압력, 파단유량, 재고량) | 32 |
| 그림 19 UPTF Test 6 run 135 계산결과(온도) | 33 |
| 그림 20 UPTF Test 6 run 136 계산결과(압력, 파단유량, 재고량) | 34 |
| 그림 21 UPTF Test 6 run 136 계산결과(온도) | 35 |
| 그림 22 UPTF Test 7 run 200 계산결과(압력, 파단유량, 용기배출량, 재고량) ... | 37 |
| 그림 23 UPTF Test 7 run 200 계산결과(온도) | 38 |
| 그림 24 UPTF Test 7 run 201 계산결과(압력, 파단유량, 재고량) | 39 |
| 그림 25 UPTF Test 7 run 201 계산결과(온도) | 40 |
| 그림 26 UPTF Test 7 run 202 계산결과(압력, 파단유량, 재고량) | 41 |
| 그림 27 UPTF Test 7 run 202 계산결과(온도) | 42 |
| 그림 28 UPTF Test 7 run 203 계산결과(압력, 파단유량, 재고량) | 43 |
| 그림 29 UPTF Test 7 run 203 계산결과(온도) | 44 |
| 그림 30 UPTF Test 21A run 272 계산결과 | 46 |
| 그림 31 UPTF Test 21B run 274 계산결과 | 47 |
| 그림 32 증기주입에 따른 냉각수 하부 플레넘 관입율 (냉각수 주입 위치가 다른 경우) | 48 |
| 그림 33 증기주입에 따른 냉각수 하부 플레넘 관입율(냉각수가 모두 주입된 Test) | 49 |
| 그림 34 모든 냉각수 노즐을 통해 주입된 경우 관입율 예측치 대비 실측치 | 51 |
| 그림 35 UPTF Test 6,7에 대한 냉각수 관입율 예측치 대비 실측치 | 51 |
| 그림 36 TRAC 코드의 증기와 물 경계면에서의 질량수송방정식 상관도 | 52 |
| 그림 37 저온관과 연결된 강수관쪽 셀의 Void Fraction | 53 |
| 그림 38 대상 셀에서의 증기 및 물의 밀도 | 54 |
| 그림 39 임계 속도 및 셀의 횡방향 및 종방향 증기속도 | 54 |
| 그림 40 증기 속도에 따른 Reynold 수 및 Weber 수 | 56 |
| 그림 41 신형경수로 1400에 대한 TRACE 모델링 개략도 | 57 |
| 그림 42 신형경수로 1400에 대한 기존입력자료 및 개선 입력자료 계산결과 | 60 |

I. 연구 배경 및 목적

1. 연구 배경

신형경수로 1400 원전의 비상노심냉각계통으로 강수관 직적주입 방식(DVI)의 설계가 채택되어 대형냉각재상실사고 해석시 3차원 열수력 해석의 필요성이 대두되었다. 원자로에 대한 3차원 해석이 가능한 TRACE 코드를 사용한 사고해석이 수행되고 이에 대한 해석 및 평가가 수행되고 있다. 이와함께 사용되는 코드의 예측능력 및 타당성 평가가 수행되어야 해석코드를 이용한 해석결과에 대한 신뢰를 높일 수 있다.

미국 핵규제위원회(USNRC)도 사고해석용 코드인 TRAC을 사용하여 Sytem 80+, AP600의 규제 검증해석을 수행한 바 있으며 AP1000 원전에 대한 해석을 수행 중이다. 현재 USNRC/RES 주관으로 기존에 사용해왔던 RELAP5와 TRAC 코드를 통합하여 TRACE 코드가 개발되고 있으며 이에 대한 코드의 검증계획을 수립하여 이행하고 있다.

2. 연구 목적

대형냉각재상실사고 시 강수부에서는 복잡한 3차원 유동이 발생하므로, 강수부에서의 열수력 현상을 현실적으로 예측하기 위해서 다차원 해석코드의 사용이 필요하다. 본 연구에서는 DVI와 관련된 UPTF 실험결과를 사용하여 현재 미국 핵규제위원회의 검증코드로 개발 중이며 다차원 해석 능력을 보유한 TRACE 코드의 열수력학적 예측 능력을 평가하는데 일차적인 목적이 있다. 아울러 본 연구에서는 TRACE 코드를 이용한 검증계산을 수행하기 위해, APR-1400 대형냉각재상실사고 해석에 필요한 TRACE 코드 입력자료(Input Deck)를 개발하고자 한다.

II. TRACE 코드 평가

TRACE 코드의 평가를 위해 사용된 개별효과실험으로는 UPTF(Upper Plenum Test Facility), CCTF, SCTF 등의 실험이 기 완료되어 사용되고 있다. 이러한 개별 효과들 시험중에서 DVI 상황에서의 코드평가를 위해 일차적으로 UPTF 실험이 평가대상 실험으로 선정하였다. 선정에서는 DVI 상황이 고려되었는가, 현재 실험결과가 가용한가 등이 고려되었다. UPTF 실험에서는 기존에 일반적으로 사용된 저온관 주입방식(CLI) 비상노심냉각계통에 대한 실험 뿐 아니라 원자로용기 직접주입방식(DVI) 비상노심냉각계통에 대한 실험도 포함되어 있어 지금까지 많은 경험을 갖고 있는 CLI 방식에 대한 검증계산을 토대로 신형경수로 1400에서 채택된 DVI 방식에 대한 검증계산을 대상 시설에 대하여 일관적으로 수행할 수 있는 장점이 있다. 한편 CCTF 및 SCTF 실험은 가열된 핵연료 효과를 모사 할 수 있으나 실험크기가 제한적이고 현재 자료가 가용하지 않기 때문에 UPTF 실험 평가 후 고려하기로 하였다.

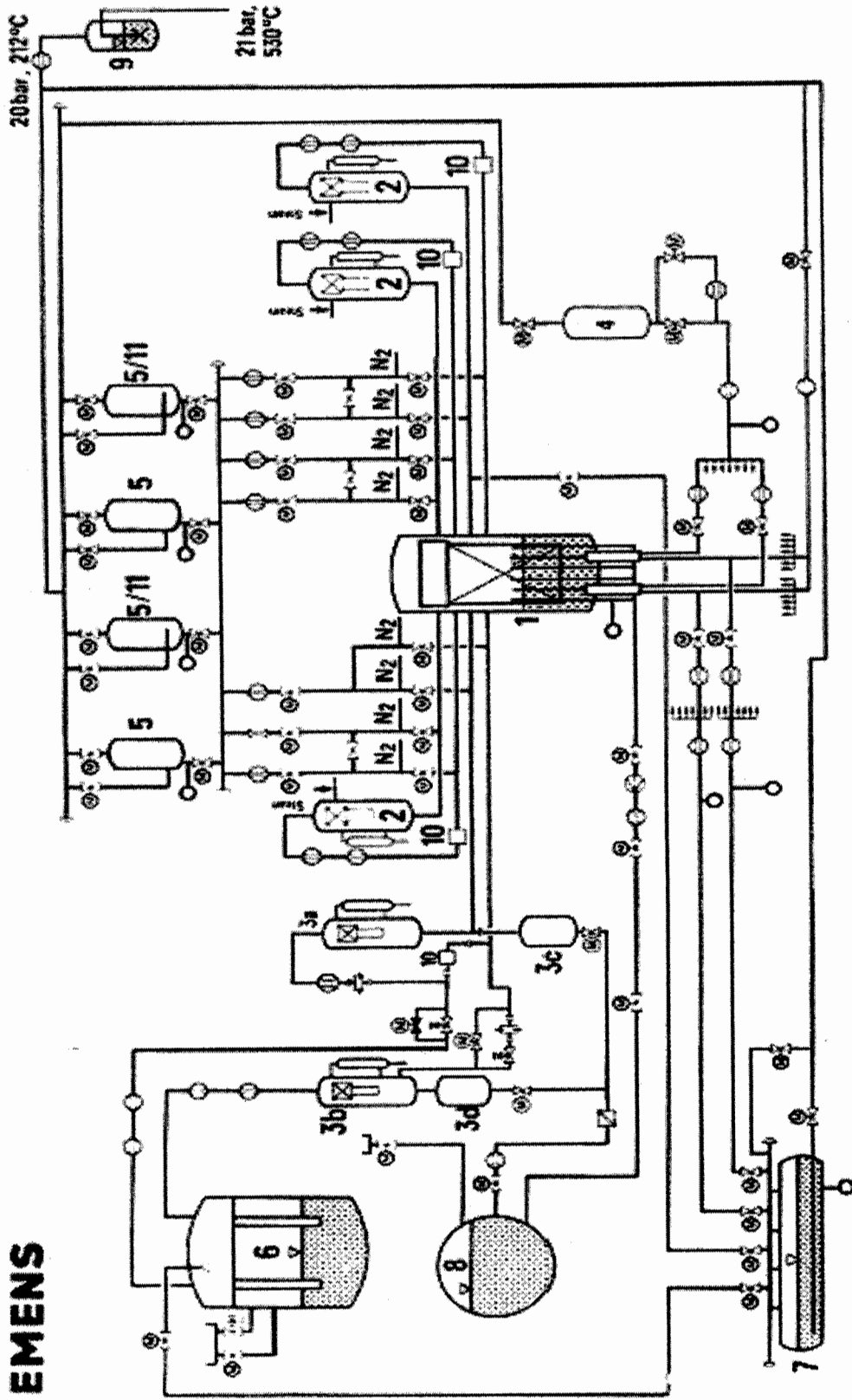
UPTF는 4루프형 1300MWe급 가압형 경수로를 실물크기로 모사한 실험장치이다. 이 장치는 원자로 용기, 강수관(DC), 하부플레넘(LP), 노심모사기, 상부 플레넘 및 증기발생기 모사기를 갖춘 루프(Loop)으로 구성되어 있다. 또한 격납건물 모사기는 격납건물의 수력학적 패환(Feedback)을 모사 한다.

실험 원자로 용기, 원자로 배럴 및 원자로내부구조물은 가압경수로의 크기와 동일하며, 저온관 및 저온관을 모사하여 3개의 건전한 루프와 1개의 파단루프를 모사할 수 있다. [1]

실제 건전 루프의 증기발생기로부터의 발생되는 증기효과는 증기 발생기로의 증기 직접 주입을 통하여 모사된다. 냉각재 펌프는 사고시 냉각재펌프를 통해 흐르는 냉각재 흐름의 모사를 위해 밸브로 모사된다.

UPTF 실험장치의 개략적인 유체흐름도는 그림1과 같다.

SIEMENS



- 1 Test Vessel
- 2 Steam Generator Simulator (Intact Loop)
- 3a Steam Generator Simulator/ Water Separator (Broken Loop Hot Leg)
- 3b Water Separator (Broken Loop Cold Leg)
- 3c Drainage Vessel for Hot Leg
- 3d Drainage Vessel for Cold Leg
- 4 Hot Water Storage Tank Accumulator
- 5 Accumulator
- 6 Containment Simulator
- 7 Steam Storage Tank
- 8 Water Collecting Tank
- 9 Steam Cooler
- 10 Pump Simulator
- 11 N2-Tank
- Sample

그림 1 UPTF 실험장치 유체흐름도

1. 코드평가를 위한 대상 실험 선정

UPTF Test 6 및 7 은 CLI 대상실험으로 대형과단사고시 재관수(Refill)기간중 강수관에서의 냉각수 관입을 측정 실험들이다. 또한 Test 21은 DVI 실험으로 재관수 및 재충수(Reflood) 기간중 냉각수 관입을 측정 실험으로 신형경수로 1400에 직접 관계된 실험군이다. 또한 Test 5 는 CLI 대상 실험으로 재충수 기간중 실험이나 위의 Test 6 및 7과는 경계조건이 실제 원전과 유사하여 추가로 선정되었고, Test 25은 CLI 대상 실험으로 재충수(Reflood) 시간중 실험으로 검증계산에 추가되었다. 본 보고서에서는 Test 6, 7, 21에 집중적으로 기술한다.

상위의 입력자료 생산에 검토된 실험자료 관련 보고서는 다음과 같다.

- UPTF Test No. 5 test data report : R515/87/16[2]
- UPTF Test No. 6 test data report : U9/316/88/18[3]
- UPTF Test No. 7 test summary and dada report : U9/316/89/14[4]
- UPTF Test No. 21 test summary and data report[5]
- UPTF Test No. 25 test summary report[6]
- UPTF Test result related papers.(NUREG/IA-0127, MPR-1163, etc)[7][13][14][15]

검증계산에 사용된 UPTF 실험 및 실험자료는 다음의 표1과 같다.

표 1 UPTF 실험 계산에 사용된 자료 목록

| Test | Run | ECCS Type | Refill/Reflood | NRC Data(.bin) | Input Deck(.inp) |
|------|-----|-----------|----------------|----------------|------------------|
| 6 | 131 | CLI | Refill | Test06-Run131 | uptf6_131_CC |
| | 132 | | | Test06-Run132 | uptf6_132_CC |
| | 133 | | | Test06-Run133 | uptf6_133_CC |
| | 135 | | | Test06-Run135 | uptf6_135_CC |
| | 136 | | | Test06-Run136 | uptf6_136_CC_1 |
| 7 | 200 | CLI | Refill | Test07-Run200 | uptf7_200_CC |
| | 201 | | | Test07-Run201 | uptf7_201_CC |
| | 202 | | | Test07-Run202 | uptf7_202_CC |
| | 203 | | | Test07-Run203 | uptf7_203_CC |

| | | | | | |
|----|-----|-----|---------|----------------|---------------------|
| 21 | 272 | DVI | Refill | Test21A-Run272 | uptf21_272_n10_3 |
| | 274 | | | Test21B-Run274 | uptf21_274_n10_CC_1 |
| | 271 | | Reflood | Test21D-Run271 | uptf21_271_n10 |
| 25 | 242 | CLI | Reflood | Test25A-Run242 | uptf25_242_CC_1 |
| | 241 | | | Test25B-Run241 | uptf25_241_CC |
| 5 | 062 | CLI | Refill | Test05B-Run062 | uptf5_062_CC |

1.1 대상실험의 목적

- UPTF Test 6,7

Test 6 및 7번은 CLI 관련실험으로서 대형냉각재 상실사고시 재관수 기간중 PWR 원전의 하부 플레넘 및 강수관에서의 증기/물 유동 현상을 고찰하기 위한 실험이다.

파단후 재관수 기간까지 유체 유동은 하부 플레넘에서 강수관 상부로 형성되어 파단 저온관을 통해 격납건물로 흐른다. 하부 플레넘에서의 Flashing 및 Entrainment 현상으로 강수관 상부로 흐르는 유동에는 냉각수가 포함될 수 있다. 강수관 상부로 흐르는 이러한 유동은 초기에는 강수관 하부로 관입되는 냉각수의 유동을 방해하는 경향이 있다. 강수관 상부로 형성된 유동이 저온관으로 주입된 냉각수의 일부 또는 전부를 배출 시키는 현상을 “냉각수 우회”라 한다. 파단후 증기량이 감소됨에 따라 냉각수 우회 또한 감소하여 결국 냉각수가 충분히 관입되게 된다.

특정 증기유량에서 파단후 냉각수가 원자로로 관입되는 시점이 존재한다. 이는 강수관내부의 교차류제한(CCFL) 현상과 관계된다. 이러한 현상이 UPTF 실험의 주요 대상이다.

Test 6 에서는 강수관 상부로 흐르는 증기 유량에(102kg/s ~ 440kg/s) 따른 강수관 및 하부 플레넘으로 관입되는 냉각수량을 결정하기 위해 거의 포화상태의 냉각수가 주입된다.

Test 7의 경우 낮은 증기 유량에서의(~102kg/s) 관입율을 구하기 위해 수행된 quasi-steady state 실험이다. 실험에서는 강수관 상부로 흐르는 증기유량에 따른 하부 플레넘으로의 냉각수 관입률을 측정하기 위해 거의 포화상태의 냉각수가 주입

된다.

- UPTF Test 21 A and B

Test 21번 또한 Test 7번과 유사한 Quasi-steady state experiment로서 강수관 상부의 Vent Valve가 닫힌 상태로 수행되었으며 증기 주입량에 따른 냉각수 관입률을 측정하기 위한 실험이다. 단 냉각수는 저온관이 아닌 강수관으로 직접주입된다.

1.2 실험별 계통 구성

Test 6 번은 Run 131, 132, 133, 135, 136의 총 5번의 세부실험으로 구성된다. 고온관 파단 밸브, 펌프 모사기, Vent Valve는 잠겨있으며 파단저온관 밸브는 완전 개방된 상태로 수행된다. 노심 모사기에서 증기가 주입되며 Run 136번을 제외한 세부실험에서는 증기발생기 모사기의 증기도 주입된다. 냉각수 주입제어 계통은 500kg/s의 냉각수 주입을 위해 밸브 스트로크를 30%까지 개방 한다. 위 실험에서는 냉각수에 녹아든 질소를 모사하기위해 질소가 주입된다. Test 6에서의 유동은 증기발생기로부터 주입된 증기가 고온관을 통해 노심으로 흐르며 노심에서 주입된 증기가 추가로 주입되어 하부 플레넘으로 흐른다. 하부플레넘에서 다시 강수관 상부로 흘러 파단저온관을 통해 격납건물 모사기로 빠져나간다.

Test 6의 세부실험에서 사용된 초기 및 경계조건은 아래 표2와 같다.

표 2 UPTF Test 6 초기조건 및 경계조건

| RUN | Ini. Sys. P. (kPa) | C/S steam injected(kg/s) | SG/S steam injected(kg/s) | ECC water injected(kg/s) | Comment (total steam) |
|-----|-----------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 131 | 250 | 309 | 30X3 | 486 X 3 | 399kg/s |
| 132 | 250 | 205 | 30X3 | 486 X 3 | 295kg/s |
| 133 | 250 | 110 | 30X3 | 486 X 3 | 200kg/s |
| 135 | 345 | 349 | 30X3 | 486 X 3 | 440kg/s |
| 136 | 250 | 102 | - | 486 X 3 | 102kg/s No SG steam |

위와 같은 초기조건에서 실험은 시작되고 30초후 노심 및 증기발생기로부터 실험에 필요한 증기량이 주입된다. 38초에서 질소가 주입된다. 증기 유동이 형성된 상태인 45초부터 냉각수가 주입된다.

Test 7 에서는 증기발생기에서 증기가 주입되지 않으며 질소도 주입되지 않고 실험 중간 특정 시험에서 하부 플레넘 하단에 연결된 배수관을 통해 일정량의 냉각수가 배수된다는 점을 제외하면 Test 6과 동일하다. 즉 노심에서 증기가 주입되며 펌프도 모두 닫힌 상태로 실험이 수행되었다.

Test 7은 Run 200, 201, 202, 203의 세부 실험으로 구성되며 각세부실험은 증기 및 냉각수 주입량이 변화되는 2~4개의 Phase로 실험조건이 변경되어 수행되었다.

세부 실험별 및 Phase 별 초기 및 경계조건은 다음 표3과 같다.

표 3 UPTF Test 7 초기조건 및 경계조건

| RUN/Phase | Ini. Sys. P. (kPa) | C/S steam injected (kg/s) | ECC water injected(kg/s) | | | Comment |
|-----------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------------|-----|-----|-----------------------|
| | | | CL1 | CL2 | CL3 | |
| 200/I | 225 | 104 | 494 | - | - | |
| 200/II | - | 54 | 736 | 30 | - | leak at CL2 injection |
| 200/III | - | 102 | 735 | - | - | |
| 201/I | 240 | 102 | - | 487 | 490 | |
| 201/III | | 102 | 493 | 487 | 489 | |
| 202/II | 247 | 128 | - | 486 | 491 | |
| 203/I | 222 | 69 | 735 | - | - | |
| 203/II | | 30 | 737 | - | - | |
| 203/III | | 71 | 737 | - | 733 | |
| 203/IV | | 51 | 493 | 485 | 487 | |

Test 21 A 및 B 실험 또한 위의 저온관 실험과 계통구성이 유사하다. 단 냉각수는 저온관 사이에 설치된 DVI 노즐을 통해 주입된다. 노즐 0번은 파단저온관과 저온관 1번 사이에 위치하며 노즐 1번은 저온관 2번 및 3번 사이에 위치한다.

모든 펌프는 닫혀 있으며 파단저온관은 완전 개방상태로 실험이 수행되었다.

계통 및 격납건물 모사기는 3bar로 초기와 되고 하부 플레넘은 하단에 연결된 배출관을 채우기 위해 0.6 m의 수위로 물이 채워진 상태로 초기화 되었다. Test 21 B(Run 272) 에서는 기타 실험에서와 같이 거의 포화상태의 냉각수가 대신 관 입술에 대한 과냉 냉각수 효과를 고찰하기 위해 117K 정도 과냉된 냉각수가 주입 된다. 실험에서 사용된 증기유량 및 냉각수 주입률 및 온도는 아래 표4와 같다.

표 4 UPTF Test 21 초기조건 및 경계조건

| RUN/phases | Evauation Time period (s) | ECC Injection [kg/s] | | Steam Injection CS +SG | ECC Temperature | |
|------------|---------------------------|----------------------|----------|------------------------|-----------------|---------------------|
| | | Nozzle 0 | Nozzle 1 | | Temp.[C] | $\Delta T_{sub}[K]$ |
| (A)272 | 57-81 | 912 | 910 | 225+89 | 34 | 117 |
| (B)274/I | 59-108 | 845 | 856 | 208+90 | 125 | 56 |
| (B)274/II | 280-324 | 885 | 0 | 103+0 | 125 | 31 |
| (B)274/III | 337.5-344.5 | 885 | 835 | 102+0 | 125 | 26 |

1.3 냉각수의 하부플레넘 관입률 평가

실험의 각 세부실험에서는 보다 나은 관입률을 계산하기 위해 비지속적이고 불균질한 강수관내 유동 현상 및 냉각수의 간헐적인 하부 플레넘으로의 수송현상을 고려하여 “평가 구간”이 결정되어 관입률을 평가하였다. 이러한 “평가 구간”설정을 위해 실험시 사용된 기준[5]은 다음과 같다.

1. 증기 유입량 및 냉각수 주입량 미변동
2. 강수관내 압력변화가 크지 않을 것
3. 하부 플레넘의 냉각수 재고량이 계산되는 두 시점 사이에서 건전 저온관 및 강수관의 냉각수 재고량에 크게 변화가 없을 것
4. 원자로 용기 배출관이 물로 채워져 있는지 확인하기 위하여 또 하부 플레넘 바닥에 설치된 차압계측 센서의 동적 압력 영향이 배제 되도록 하부 플레넘의 수위는 0.6m 이상일 것
5. 하부플레넘의 수위는 임계수위 이하일 것. 임계 수위 이상인 경우에는 노심

에서 강수관으로 흐르는 증기에 의해 냉각수 관입을 방해하게 됨.

6. 파간저온관 하단에 설치된 물/증기 분리기의 수위는 정확한 방출 유량 측정을 위해 제한수위 이하일 것.

실험결과로 제시되는 냉각수의 하부 플레넘으로의 관입율은 Test 6의 경우 평가 구간에서의 하부 플레넘 재고량 변화로 측정되며 Test 7의 경우는 평가 구간사이에서 하부플레넘으로부터 배출된 물의 양과 하부 플레넘의 냉각수 재고량 변화의 합으로 계산되어 시간당 관입율로 측정된다.

위와 같은 방법으로 UPTF Test 6, 7, 21에서 측정된 관입율은 표5와 같다.

표 5 UPTF Test 6, 7, 21의 관입율

| Test | RUN | Steam Injection /kg/s/ | ECC Injection rate Cold Legs /kg/s/ | | | Subcooling of ECC at DC Entrance /K/ | Absolute Press. In DC /kPa/ | Water Delivery into LP /kg/s/ |
|--------|---------|------------------------|--------------------------------------|-----|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | | | 1 | 2 | 3 | | | |
| 6 | 135 | 436 | 480 | 480 | 481 | 56 | 1130 | 543 |
| | 131 | 396 | 478 | 485 | 488 | 59 | 978 | 570 |
| | 132 | 295 | 494 | 489 | 489 | 52 | 727 | 898 |
| | 133 | 202 | 499 | 486 | 496 | 36 | 543 | 975 |
| | 135 | 102 | 494 | 488 | 489 | 26 | 360 | 875 |
| 7 | 200/I | 104 | 494 | | | 20 | 451 | 5 |
| | 200/II | 54 | 736 | 487 | 490 | 7 | 330 | 351 |
| | 200/III | 102 | 735 | 487 | 489 | 22 | 498 | 6 |
| | 201/I | 102 | | 486 | 491 | 10 | 330 | 861 |
| | 201/III | 102 | 493 | | | 12 | 414 | 941 |
| | 202/II | 128 | | | | 11 | 416 | 714 |
| | 203/I | 69 | 735 | | | 13 | 401 | 95 |
| | 203/II | 30 | 737 | | | 0 | 286 | 519 |
| | 203/III | 71 | 737 | | | 9 | 398 | 823 |
| 203/IV | 51 | 493 | 485 | 487 | 2 | 337 | 1031 | |
| Test | RUN | Steam Injection /kg/s/ | ECC Injection rate DVI nozzle /kg/s/ | | Subcooling of ECC at DC Entrance /K/ | Absolute Press. In DC /kPa/ | Water Delivery into LP /kg/s/ | |
| | | | 0 | 1 | | | | |
| 21 | 272 | 314 | 912 | 910 | 117 | 488 | 385 | |
| | 274/I | 298 | 845 | 856 | 56 | 1020 | 86 | |
| | 274/II | 103 | 885 | 0 | 31 | 550 | 35 | |
| | 274/III | 102 | 885 | 835 | 26 | 494 | 556 | |

2. 대상 실험의 TRACE 코드 입력자료 개발

UPTF 실험장치에 대한 TRACE 입력자료는 NRC databank에 수록된 Test 6 133용 입력자료를 기초로 하였다. 보다 정확한 계통 모사를 위해 UPTF 실험장치 보고서를[8][9] 바탕으로 강수관 겹 크기, 강수관내 고온관 관통부 등을 수정하였다. 실험에서의 주요 고찰된 주요 현상은 원자로 용기 특히 하부 플레넘, 강수관, 건전저온관 및 파단저온관에서 발생되므로 이러한 부위의 모델링에 대한 보다 자세한 검토가 수행되었으며 이에 따라 UPTF 실험장치용 TRAC 코드 기초 입력자료를 생산하였다. UPTF Test 6, 7, 21 실험들은 각 실험의 초기 및 경계 조건을 입력자료에 반영하여 대상 실험용 입력자료를 각각 생산하였다.

원자로 용기에 대하여는 TRAC 코드에서 3차원 모델링이 가능한 "VESSEL"로 모델링하였다. Test 6,7의 경우 Vessel component는 아래와 같이 3개의 링, 3개의 sector, 13개의 축방향 레벨로 그림 2와 같이 모델링되어 있다. 강수관은 3번째 링의 축방향 3~12레벨에 해당되며 하부 플레넘은 축방향 1~2 레벨로 모사된다. 노심 증기 모사기는 증기를 주입하는 FILL과 노즐을 모사하는 TEE로 모사되어 원자로용기 축방향 6번 레벨에 연결된다. 고온과 및 저온관은 축방향 11번 레벨에 연결된다.

Test 21의 경우 강수관 상부에 냉각수 주입 노즐을 연결하기 위해 그림 3과 같이 원주방향으로 10개의 sector로 재 모델링하였다. VESSEL component의 재 모델링은 원자로 용기에 연결된 기타 component의 연결위치, 원자로 용기의 Heat structure에 영향을 주게 되므로 이러한 부분들도 수정되었다.

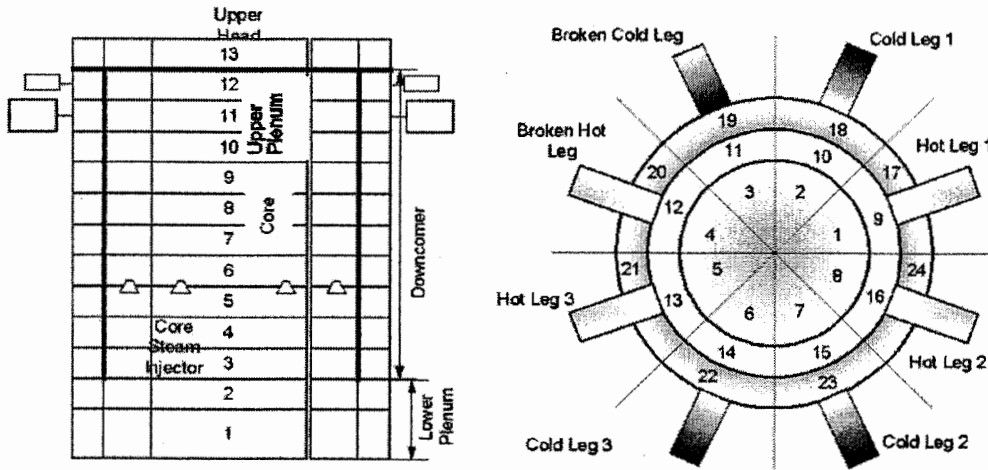


그림 2 CLI 용 원자로용기 모델링

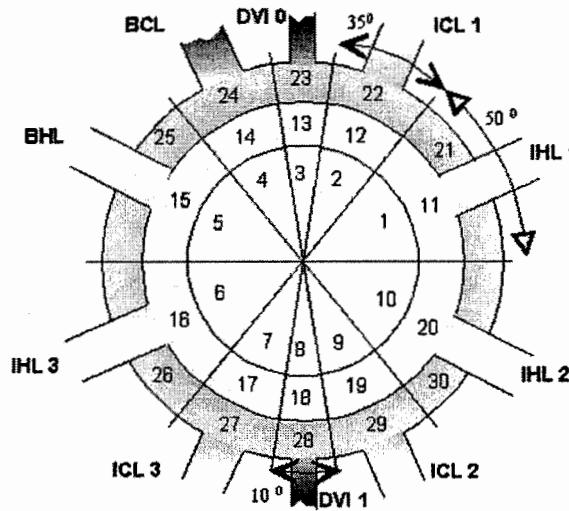


그림 3 DVI용 원자로 용기 모델링

원자로 용기 배출 배관은 원자로 용기 바닥에 연결된다. 배출율은 하부 플레넘의 수위에 따라 조절된다. Test 6에서는 원자로용기 배출은 활성화 되지 않았다.

건전 루프는 비상노심냉각수 주입노즐이 연결된 고온관, 증기발생기 모사기, 펌프 모사기와 CLI 노즐이 연결된 저온관으로 구성된다. 펌프 모사기의 열림/닫힘은 VALVE component로 모사하지 않고 PIPE의 유로면적을 조정하여 모사하였다.

파단 루프는 고온관측과 저온관으로 구성되며 파단저온관은 VALVE로, 격납 건물 모사기는 BREAK로 모사되었다. 실제 실험시설에서는 파단저온관, 물 분리기, 배출용기, 격납건물 모사기로 구성되어 있다. 원자로 용기로부터 배출된 물/증기는 파단 저온관을 따라 물 분리기로 모여 증기는 격납건물 모사기로 흐르며 물은 아래의 배출용기로 흐르게 된다. 이러한 복잡한 파단 저온관 형태를 저온관과 BREAK로 모사되는 격납건물 모사기로 단순화 하였다. BREAK component에서는 격납건물 모사기의 압력이 아닌 물 분리기의 배압이 입력으로 주어졌다.

개략적인 UPTF 실험시설의 노딩 개략도는 그림 4와 같다.

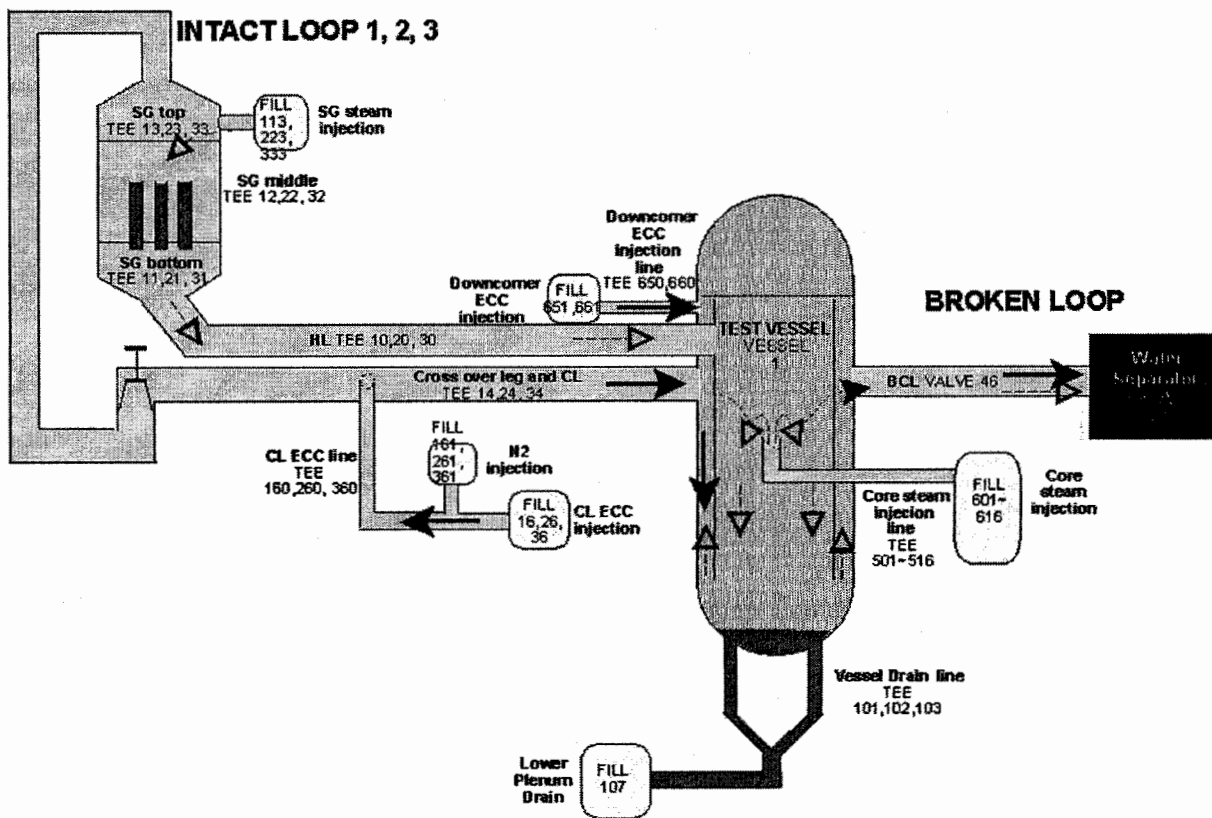


그림 4 UPTF 실험장치 모델링 개략도

2.1 UPTF 실험 모델링

2.1.1 초기 조건

각 실험의 초기조건은 자료 측정지점마다 다르다. 단순화된 계산수행을 위해 초기 조건은 DC(Downcomer), LP(lower Plenum), Core, UP(Upper Plenum), HL 지역

으로 구분되어 측정자료에서 취득되었다.

Test 6,7,21에서 사용된 지역별 초기 압력, 온도는 표6과 같다.

표 6 UPTF Test 6, 7, 21의 계통 초기 압력

(kPa)

| Component | Run 131 | Run 132 | Run 133 | Run 135 | Run 136 | DB variable |
|-----------------|---------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Vessel,loop | 260 | 260 | 260 | 350 | 260 | JAA01CP001H |
| Water separator | 260 | 260 | 260 | 350 | 260 | JEA05CP001 |
| Component | Run 200 | Run 201 | Run 202 | Run 203 | DB variable | |
| Vessel,loop | 255 | 240 | 247 | 222 | JAA01CP001H | |
| Water separator | 255 | 240 | 247 | 222 | JEA05CP001 | |
| Component | Run 272 | Run 274 | Run 271 | DB variable | | |
| Vessel,loop | 287 | 301.29 | 244 | JAA01CP001H | | |
| Water separator | 286.5 | 299.18 | 242 | JEA05CP001 | | |
| Component | Run 242 | Run 241 | DB variable | | | |
| Vessel,loop | 237 | 230 | JAA01CP001H | | | |
| Water separator | 236.5 | 229 | JEA05CP001 | | | |

표 7 UPTF Test 6, 7, 21 의 유체 및 벽면 온도조건

(K)

| Component | Run 131 | Run 132 | Run 133 | Run 135 | Run 136 | DB variable |
|-----------------------------|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------------|
| DC wall | 462.5~475 (470) | 403~472 (421) | 471~473 (473) | 475~478 (477) | 405~464 (433) | 1A07TW073~1A 27TW073 |
| DC fluid | 430~466 (457) | 444~473 (452) | 458~478 (468) | 465~473 (469) | 440~467 (452) | 1A01TF075~ 1A28TF075 |
| LP wall | 411~448 (412) | 418~446 (424) | 426~448 (437) | 450~463 (460) | 425~450 (428) | 2A09TWO12~2 A24TWK08 |
| LP fluid | 404~454 (430) | 421~442 (435) | 428~448 (437) | 450~465 (456) | 433~448 (442) | 2A10TFK08~2A 24TFM14 |
| core wall | 475 | 431~455 (440) | 478 | 479 | 458 | 1A08TW077~1A 21TW077 |
| UP fluid | 464~470 (467) | 460~463 (461) | 468 | 466~469 (468) | 457~461 (459) | 3A24TFP08 |
| UP wall | 469 | 465 | 468 | 471 | 461 | 3A22TWB10 |
| CL wall/fluid | 422~460 (440) | 400~428 (425) | 433~463 (448) | 444~468 (456) | 425~457 (440) | JEC01CT006/7 |
| HL wall/fluid Core fluid | 449~458 (454) | 444~455 (450) | 448~458 (453) | 454~460 (457) | 440~445 (443) | JEC01CT008/9 |

| Component | Run 200 | Run 201 | Run 202 | Run 203 | DB variable |
|-----------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|
| DC wall | 400~428 (411) | 400~425 (402) | 401~426 (409) | 420~422 (421) | 1A07TW073~1A27TW073 |
| DC fluid | 402~430 (412) | 410~426 (415) | 410~425 (415) | 416~421 (418) | 1A01TF075~1A28TF075 |
| LP wall | 367~410 (390) | 369~411 (390) | 369~422 (395) | 371~419 (400) | 2A09TWO12~2A24TWK08 |
| LP fluid | 380~410 (400) | 384~426 (405) | 373~429 (400) | 380~411 (396) | 2A10TFK08~2A24TFM14 |
| core wall | 422~427 (425) | 422~425 (423) | 418~424 (421) | 425 | 1A08TW077~1A21TW077 |
| UP fluid | 430 | 429 | 433 | 425 | 3A24TFP08 |
| UP wall | 429 | 429 | 426 | 420 | 3A22TWB10 |
| CL wall/fluid | 397~403 (400) | 398~402 (400) | 400~402 (401) | 400~402 (401) | JEC01CT006/7 |
| HL wall/fluid Core fluid | 416~430 (423) | 415~425 (420) | 416~430 (423) | 415~422 (419) | JEC01CT008/9 |

| Component | Run 272 | Run 274 | Run 271 | DB variable |
|-----------------------------|------------------|------------------|----------------------|---------------------|
| DC wall | 458~463 (460) | 458~466 (460) | 399.1~400.8 (400) | 1A07TW073~1A27TW073 |
| DC fluid | 408~465 (440) | 408~465 (440) | 400~402 (401) | 1A01TF075~1A28TF075 |
| LP wall | 403~405 (404) | 362~422 (390) | 385~387 (386) | 2A09TWO12~2A24TWK08 |
| LP fluid | 404~415 (410) | 372~420 (400) | 391~399.5 (396) | 2A10TFK08~2A24TFM14 |
| core wall | 467~468 (467) | 464~468 (465) | 400~404 (402) | 1A08TW077~1A21TW077 |
| UP fluid | 450 | 450 | 401.9 | 3A24TFP08 |
| UP wall | 457 | 462 | 400.5 | 3A22TWB10 |
| CL wall/fluid | 435~455 (445) | 460~440 (450) | 400~400.3 (400) | JEC01CT006/7 |
| HL wall/fluid Core fluid | 444~447 (446) | 448~448 (448) | 400.3~400.5 (400) | JEC01CT008/9 |

| Component | Run 242 | Run 241 | DB variable |
|-----------|----------------|----------------|---------------------|
| DC wall | 400~479 () | 398~422 () | 1A07TW073~1A27TW073 |
| DC fluid | 400~479 () | 400~426 () | 1A01TF075~1A28TF075 |
| LP wall | 401 (401) | 400 (400) | 2A09TWO12~2A24TWK08 |

| | | | |
|-----------------------------|------------------|------------------|---------------------|
| LP fluid | 400 (400) | 400 (400) | 2A10TFK08~2A24TFM14 |
| core wall | 400~478 () | 400~416 () | 1A08TW077~1A21TW077 |
| UP fluid | 464 | 414 | 3A24TFP08 |
| UP wall | 469 | 415 | 3A22TWB10 |
| CL wall/fluid | 445 (445) | 399 (399) | JEC01CT006/7 |
| HL wall/fluid Core fluid | 430~470 (450) | 407~413 (410) | JEC01CT008/9 |

2.1.2 경계 조건

UPTF Test 6의 경계조건으로 노심 및 증기발생기 증기 주입율(그림5), 냉각수 주입율(그림6), 질소주입율 및 물 분리기 배압(그림7)이 실험 자료로부터 추출되었다. 증기 주입은 노심모사기와 증기 발생기 모사기로부터 주입된다.(Run 136 : 노심모사기에서만 주입) 증기는 약 30초에서 102kg/s ~ 440kg/s 으로 주입된다. Test 6에서는 질소가 냉각수 주입 배관 중간에서 주입된다. 이때 주입율은 1kg/s, 온도는 36도 정도이다. 냉각수는 건전 저온관을 통해 주입된다. 약 487kg/s의 냉각수가 각각 주입된다. 냉각수의 온도는 run 131, 132, 133, 136 세부실험에서는 115도 이고 run 135에서는 124~135도 정도이다.

Test 7 계산의 경계조건도 Test 6과 마찬가지로 실험 자료로부터 추출되었다. 노심 모사기로부터 주입된 증기주입은 그림8과 같이 30초부터 주입되고 주입량은 102kg/s ~ 440kg/s 이다. 냉각수는 500 ~ 700 kg/s이 각각의 건전 루프로부터 그림9와 같이 주입된다. 이때 냉각수 온도는 거의 포화상태의 온도인 0 ~ 22K의 과냉도를 갖는다. 계산에 사용된 배압은 아래 그림 10과 같다.

Test 21의 경계조건은 증기는 102kg/s ~ 314kg/s의 주입률로 30초 이후 주입된다. 냉각수는 강수관 상부 2개의 DVI 노즐을 통해 주입되는데 Test 21A(272), 21B(274)/Phase I, II은 2개의 노즐을 통해 주입되고 Test 21B(274)/Phase III 에서는 노즐 0번에서만 주입된다. 주입량은 각 노즐에서 835~ 912kg/s 정도 주입되고 냉각수의 온도는 21A 에서는 34도 21B 실험에서는 125도이다. 계산에 사용된 증기, 냉각수 주입율 및 배압조건은 그림 11과 같다.

Steam Injection Rate for UPTF Test 6

Steam Mass Flow (kg/s)

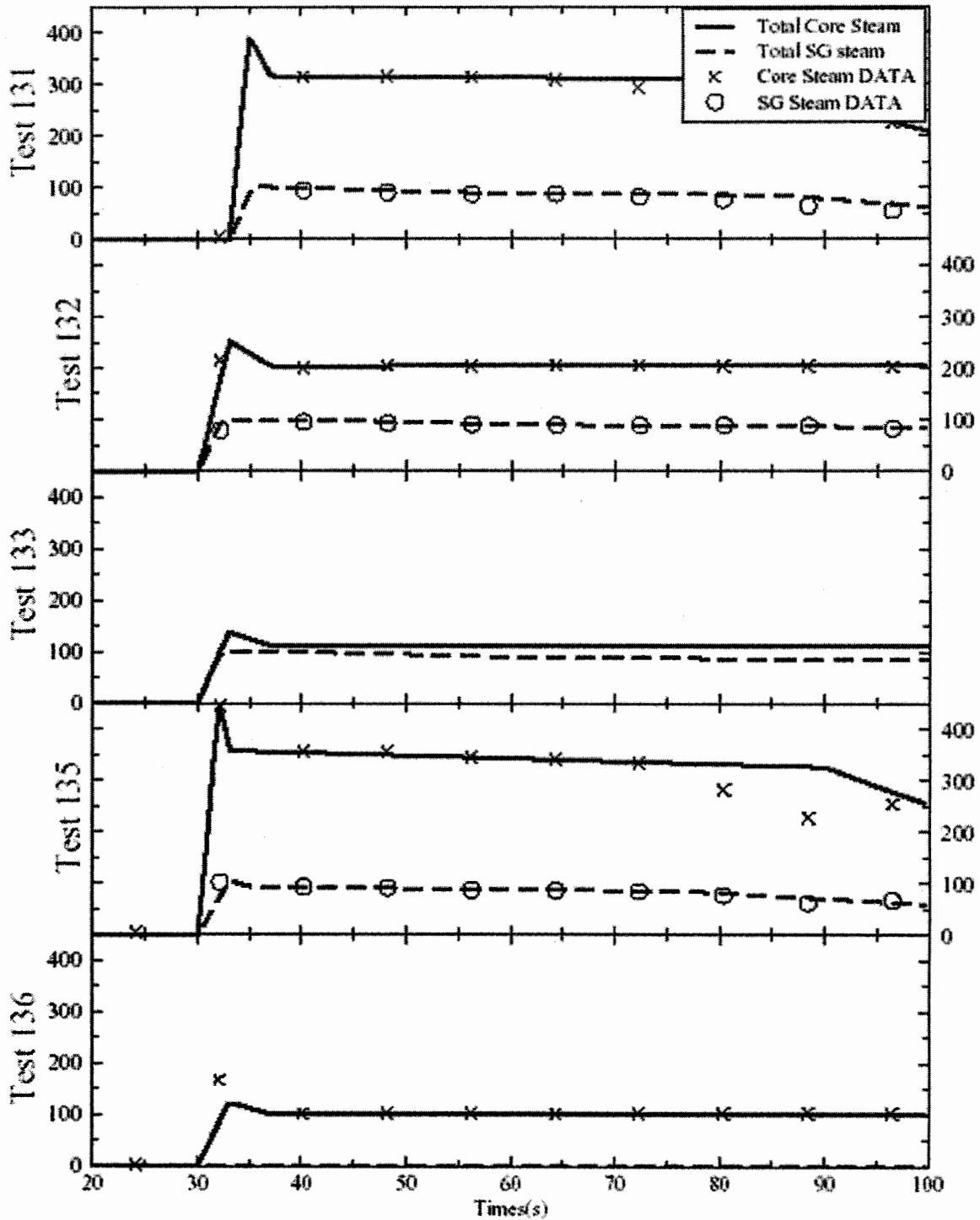


그림 5 UPTF Test 6 증기 주입율

ECC Injection Rate for UPTF Test 6

ECC Injection Rate (kg/s)

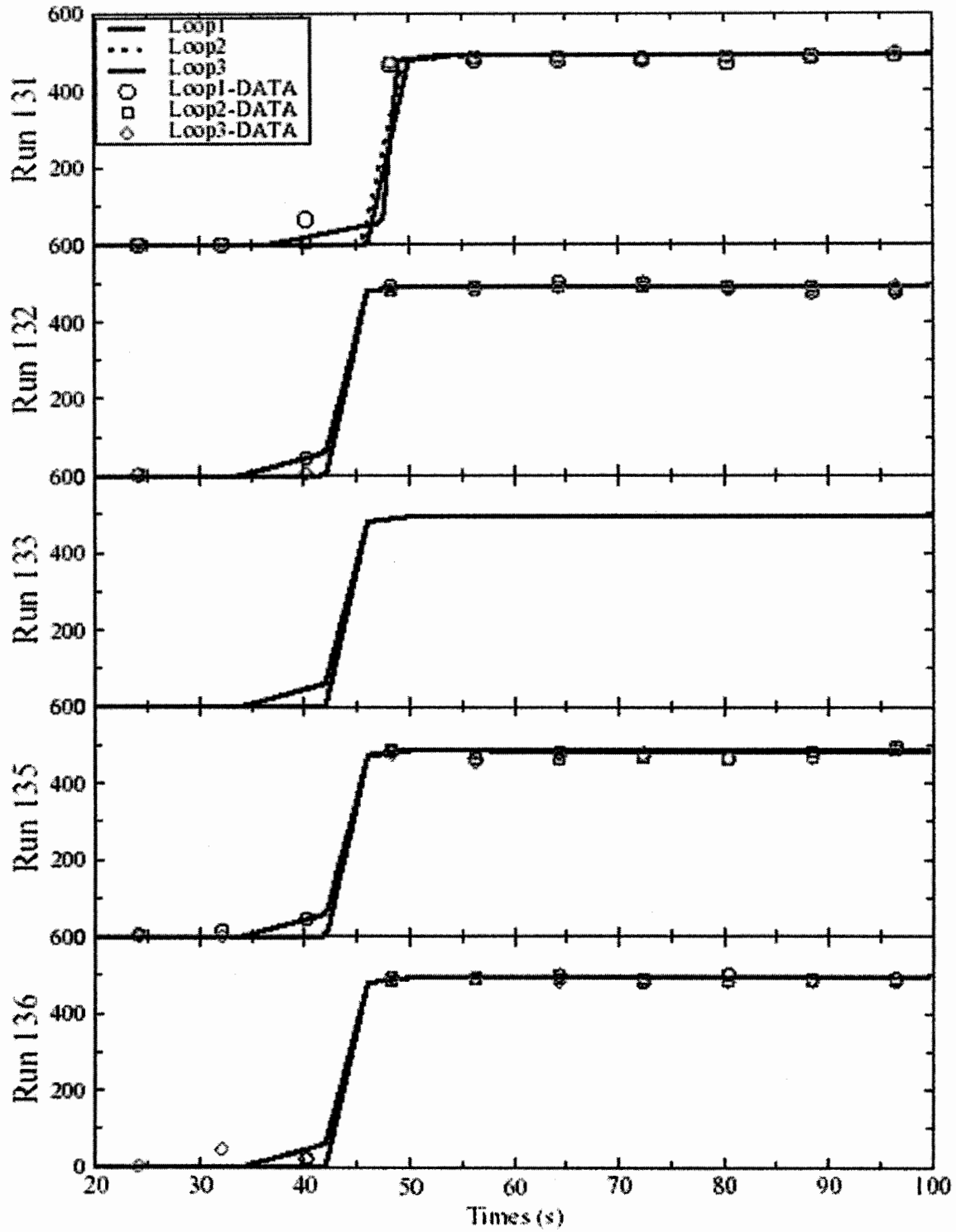


그림 6 UPTF Test 6 냉각수 주입율

Downstream Pressure for UPTF Test 6

Absolute Pressure (kPa)

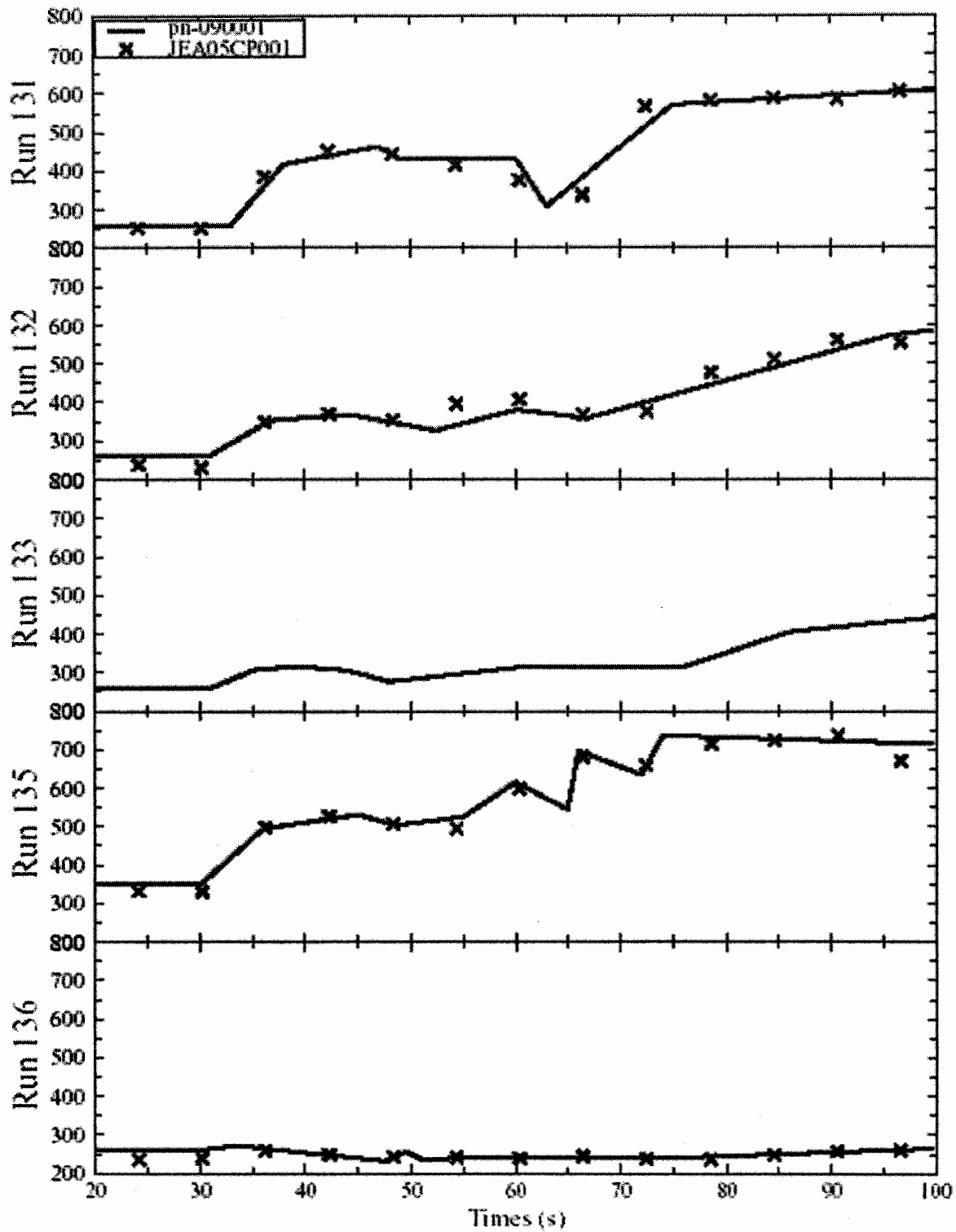


그림 7 UPTF Test 6 배압 경계조건

Steam Injection Rate for UPTF Test 7

Steam Mass Flow (kg/s)

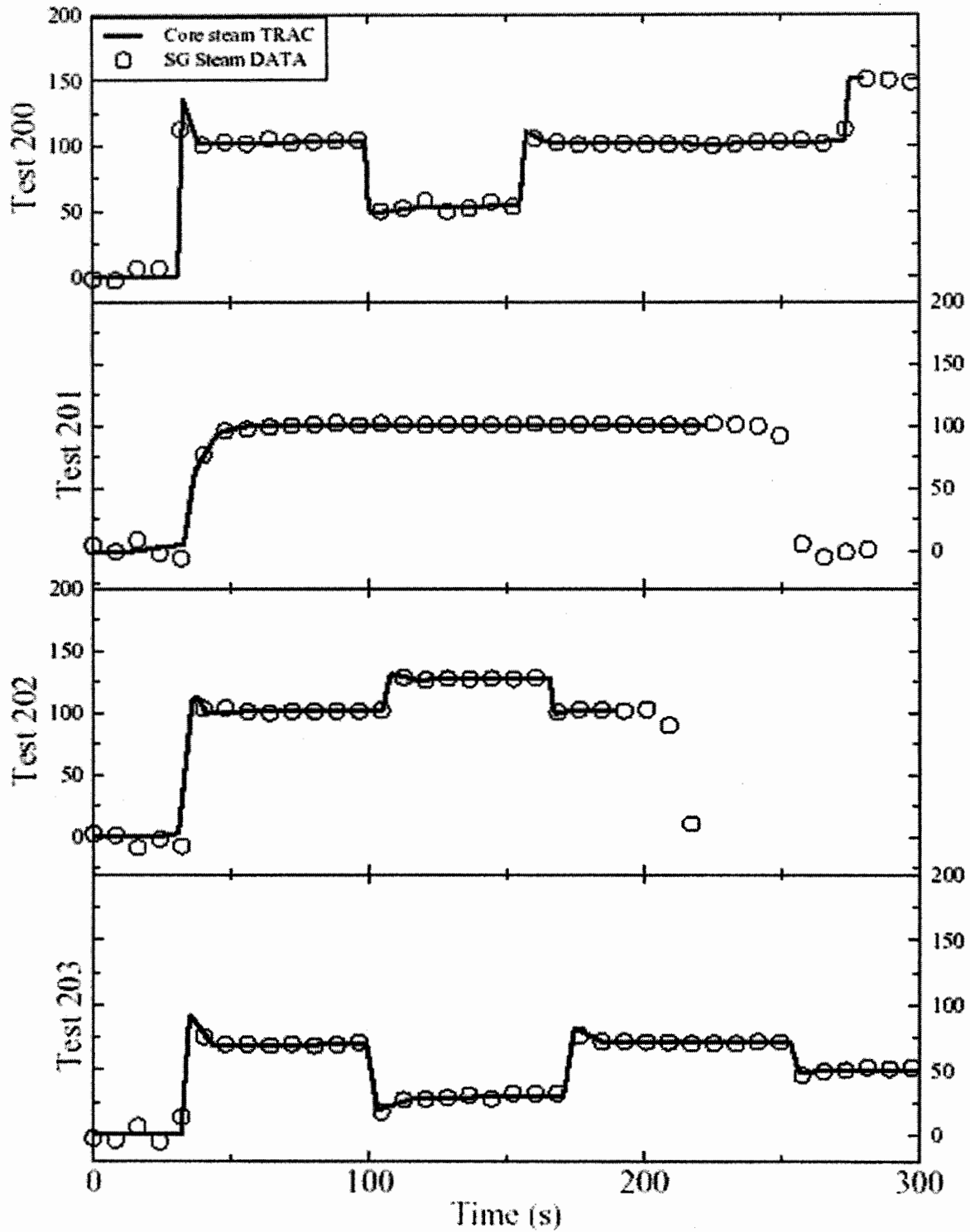


그림 8 UPTF Test 7 증기 주입율

ECC injection rate for UPTF Test 7

ECC injection rate (kg/s)

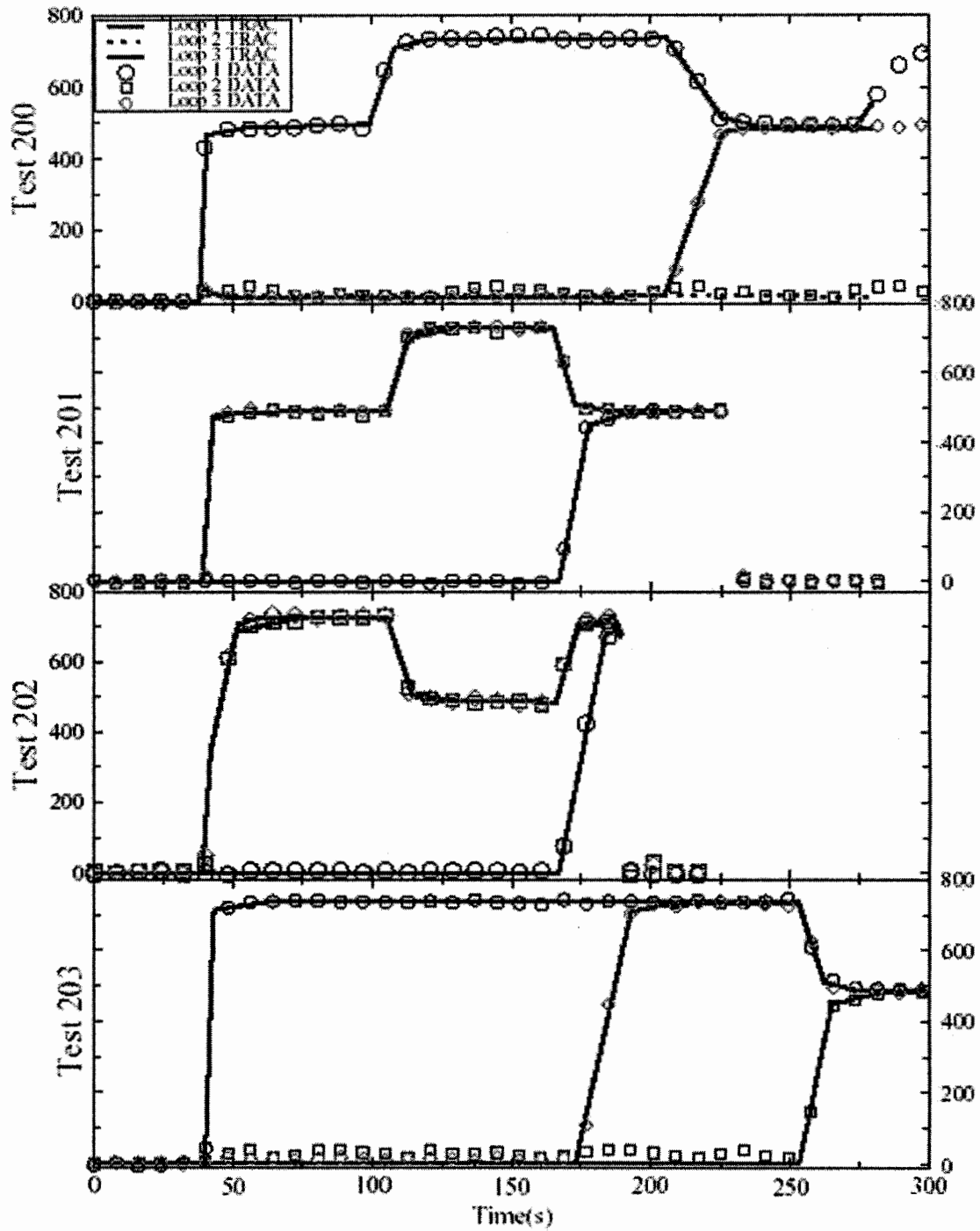


그림 9 UPTF Test 7 냉각수 주입율

Downstream Pressure for UPTF Test 7

Absolute Pressure (kPa)

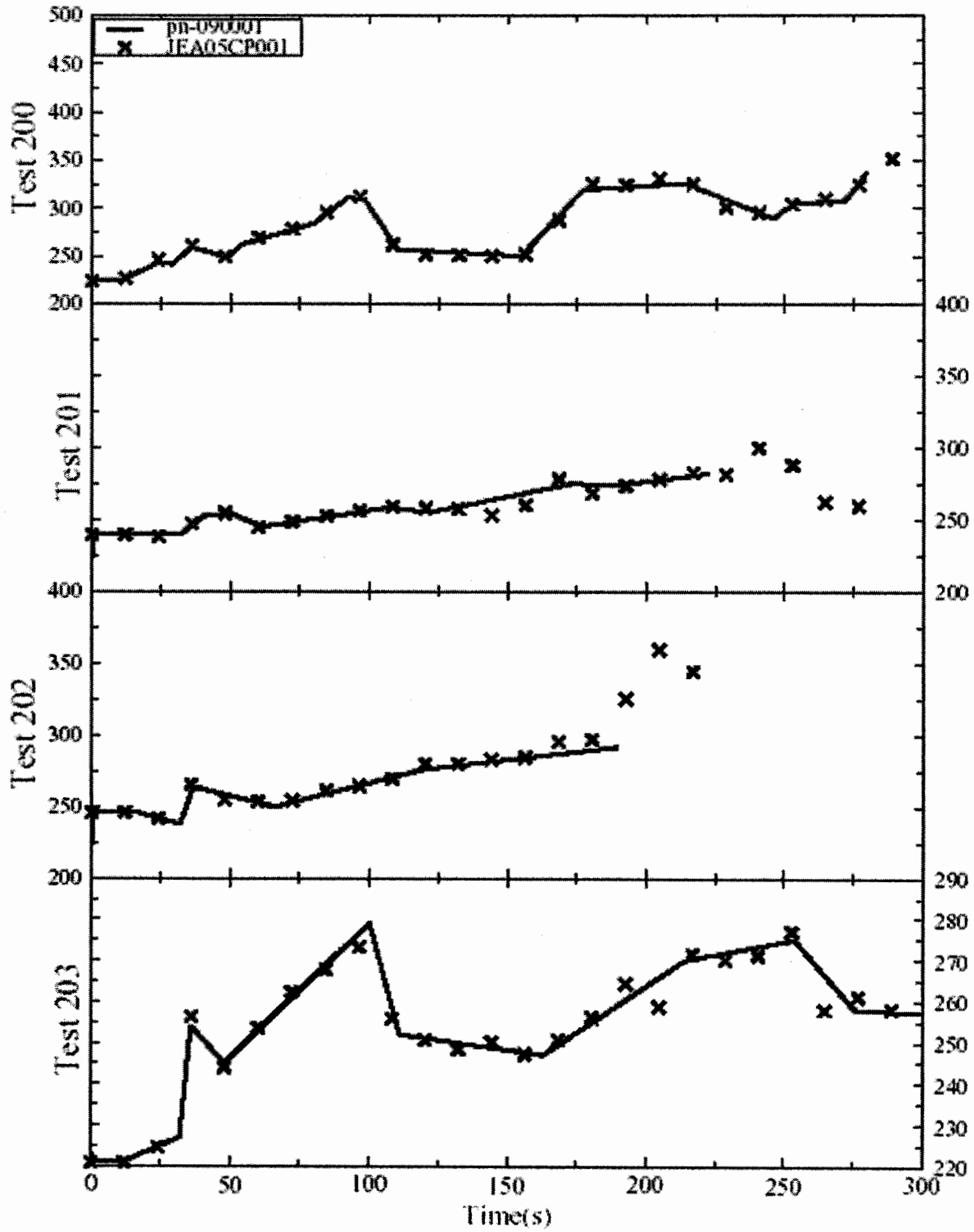


그림 10 UPTF Test 7 배압 조건

Boundary Conditions

UPTF Test 21 A(272) and 21B(274)

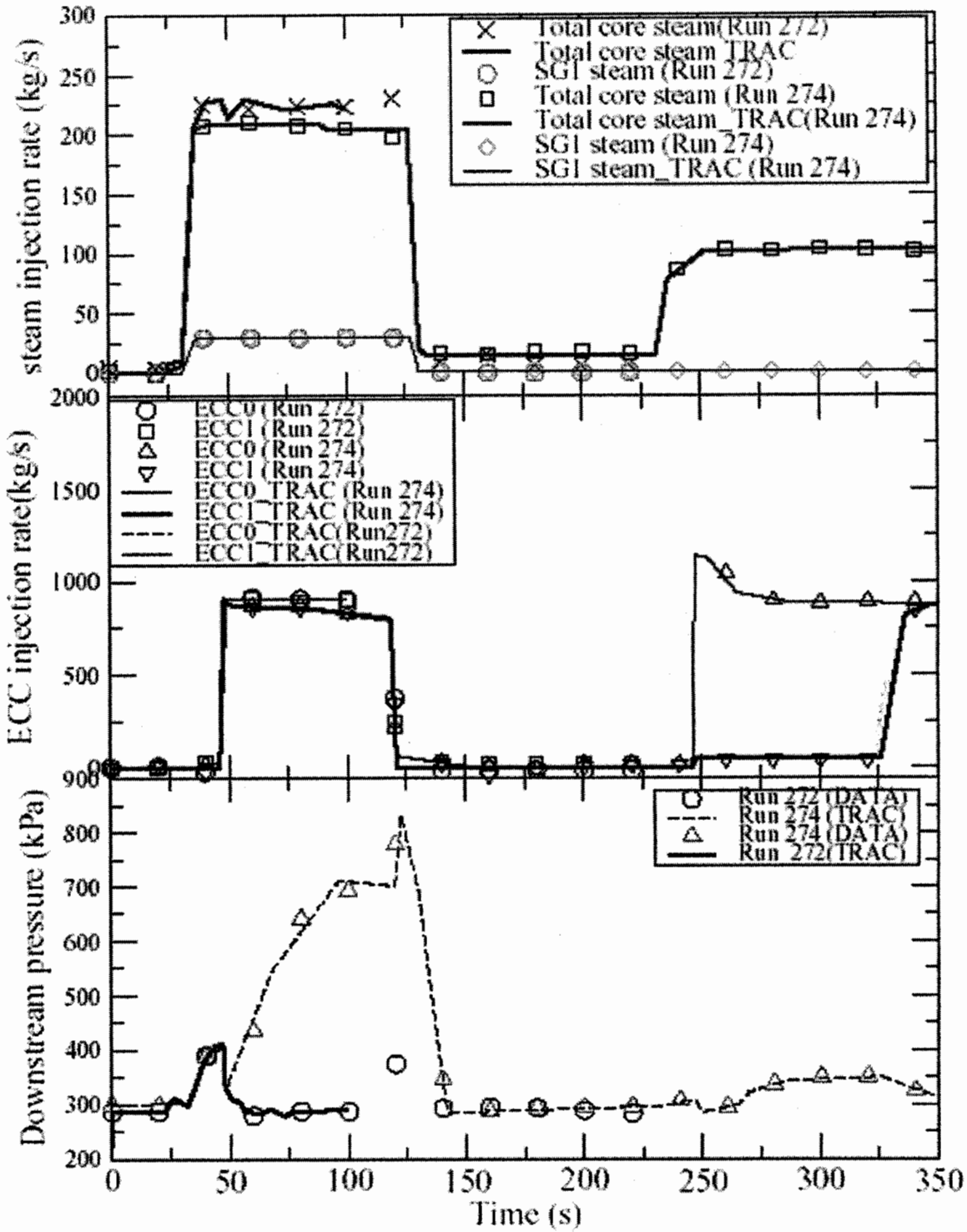


그림 11 UPTF Test 21 경계조건

3. 실험자료와 TRACE 코드 계산결과 비교

계산에 사용된 TRAC 코드의 버전은 TRAC-M V.31140, TRACE V.4, TRACE V.4036i, V.4036i2 등이 사용되었다. 연구 수행 중 NRC 코드 개발팀에서는 TRACE 개발과정중에서 재관수모델(Reflood model)에 대한 개선 및 RELAP 코드와의 통합 및 SNAP 프로그램과의 적합성을 중심으로 개발을 진행되고 있었다. 따라서 사용된 TRAC 버전에 대한 UPTF 실험에 대한 큰 차이는 없는 것으로 확인되었다.

Acgrace는 TRAC계산 결과파일(.xtv)로부터 분석을 위해 필요한 변수의 추출 및 그래프를 생산 할 수 있으며 이를 PDF 파일등으로 변환 시킬 수 있는 일종의 후처리기(Postprocessor) 이다. 본 연구에서와 같이 많은 실험을 계산하여 유사한 변수를 추출하여 검토하거나, 동일한 입력자료를 가지고 민감도 분석을 수행할 경우 계산수행의 숫자 만큼 동일한 작업을 반복하지 않으면 안 된다. TRAC 코드의 실행 및 Acgrace를 통한 그래프 작성 등의 반복적인 작업을 자동화 시켜 분석 시간을 절약하고 분석을 정형화 및 효율화 시킬 수 있는 "Script"가 바로 "Avscript"이다.

현재까지 배포된 Avscript는 하나의 페이지에 하나의 그래프(여러개의 계열)만을 작성할 수 있도록 개발되어 있었다. 본 연구에서는 하나의 페이지에서 여러개의 그래프(예, 질량, 수위, 압력 등등)을 작성할 수 있는 기능 즉 시간에 따른 계통의 압력, 온도, 질량, 재고량 변화를 종합적으로 확인할 수 있는 기능이 필요하게 되었다.

Avscript Ver. 1.0 대한 다중그래프 기능이 가능하도록 Perl Language로 작성된 Avscript를 분석 후 기능을 개선하였으며 기존 사용자 매뉴얼과 차이점을 부록 "개선 Avscrit 사용자 설명서"와 같이 정리하였다.

3.1 Test 6 계산결과

Test 6에 대한 TRACE 코드 계산결과를 각 세부 실험별로 그림에서 압력 거동, 파단유량 및 하부 플레넘 물 재고량에 대하여 실험자료와 비교되었다.(그림 12 ~22)

실험에서는 약 30초에 증기가 주입되고 냉각수는 45초에 주입된다. 증기만 주입되는 30초에서 45초 사이에서는 실험과 동일한 압력거동을 보였다. 냉각수가 주입된 후 초반에서는 코드는 약간 높은 압력 거동을 보이고 있으며 냉각수 주입 후반에서는 실험보다 낮은 압력 거동을 보여 냉각수가 주입되는 기간에서는 실험보다 낮게 예측하였다. 또한 하부 플레넘 수위가 제한 수위를 넘었을때 UP와 DC 사이의 차압을 높게 예측한 것은 코드가 많은 양이 냉각수가 강수관내에 축적 되는 것으로 예측하였기 때문이었다. 주입된 냉각수는 강수관으로 흘러 가나 일부는 건전 저온관에 축적된다. 파단저온관에 근접한 저온관에서는 주입된 냉각수가 우회되고 나머지 저온관에서는 냉각수가 하부 플레넘으로 관입되었다. 그림에서와 같이 저온관내 냉각수 재고량은 세부 실험마다 경향이 다양하다. 파단 저온관 근처의 저온관에 축적되는 속도가 다른 저온관 보다 빠르게 나타났으며 증기유량이 클수록 건전 저온관에 축적되는 냉각수 량도 많았다.

주입된 냉각수는 저온관에서의 증기 응축으로 인하여 온도가 증가 되고 1번 저온관으로 주입된 냉각수는 모두 우회 되고 기타 저온관으로 주입된 냉각수는 하부 플레넘 충수에 기여하는 것으로 나타났다. 강수관쪽에 가까운 저온관내부의 냉각수온도는 다음 그림과 같다. 실험자료와 비교해 볼때 저온관이 채워지는 동안 즉 주입 초반의 저온관내 냉각수 온도를 낮게 예측하였다. 냉각수 주입 초반에서는 저온관1번에서 다른 저온관에서 보다 많은 증기가 응축되어 1번 저온관 내부에 축적되어 저온관 2번과 3번에서 주입된 냉각수가 모두 우회된다. 1번 저온관이 채워진 후부터는 1번 저온관으로 주입된 냉각수는 모두 우회되고 그때의 냉각수 온도 또한 비교적 낮았다. 하부 플레넘의 냉각수 온도는 하부 플레넘으로 관입되는 동안 증기 응축 정도를 타나내는 척도이기도 하다. 코드 예측에서는 실험에서 보다 높은 포화온도에 가까운 온도를 예측하였다.

실험과 마찬가지로 코드 계산 결과에 대하여도 하부 플레넘으로의 관입율을

계산하기 위해 “평가 구간”이 기준에 따라 설정되었다. 코드 계산 결과 냉각수 주입 후 5 ~ 10초 지연되어 관입 시작 시점을 예측하였다. 각 세부 실험에서의 증기 주입량에 따른 관입율은 표8과 같이 실험자료와 비교되었다.

표 8 UPTF Test 6의 증기주입량에 따른 관입율

| Test | Run | Steam inj. rate kg/s | ECC injection into CL | | | | Absolute Press. in DC kPa | DC analysis period | | water delivery into LPkg/s | | Absolute Press. in DCKPa |
|------|-----|-------------------------|-----------------------|-----|-----|------|------------------------------|--------------------|-----------|----------------------------|-------|--------------------------|
| | | | CL1 | CL2 | CL3 | kg/s | | test | trace | test | trace | |
| 6 | 135 | 436 | 480 | 480 | 480 | 1440 | 1130 | 50.0-70.0 | 65.0-72.0 | 548 | 538 | 1092 |
| | 131 | 396 | 480 | 480 | 480 | 1440 | 978 | 50.0-70.0 | 65.0-76.0 | 570 | 621.8 | 868.82 |
| | 132 | 295 | 480 | 480 | 480 | 1440 | 727 | 50.0-67.0 | 55.0-67.0 | 898 | 760 | 675.295 |
| | 133 | 202 | 480 | 480 | 480 | 1440 | 543 | 57.0-80.0 | 55.0-63.0 | 975 | 969.2 | 498.009 |
| | 136 | 102 | 480 | 480 | 480 | 1440 | 360 | 58.0-64.0 | 51.0-61.0 | 875 | 933 | 320.455 |

UPTF Test 6 run 131

TRAC-M vs. DATA.

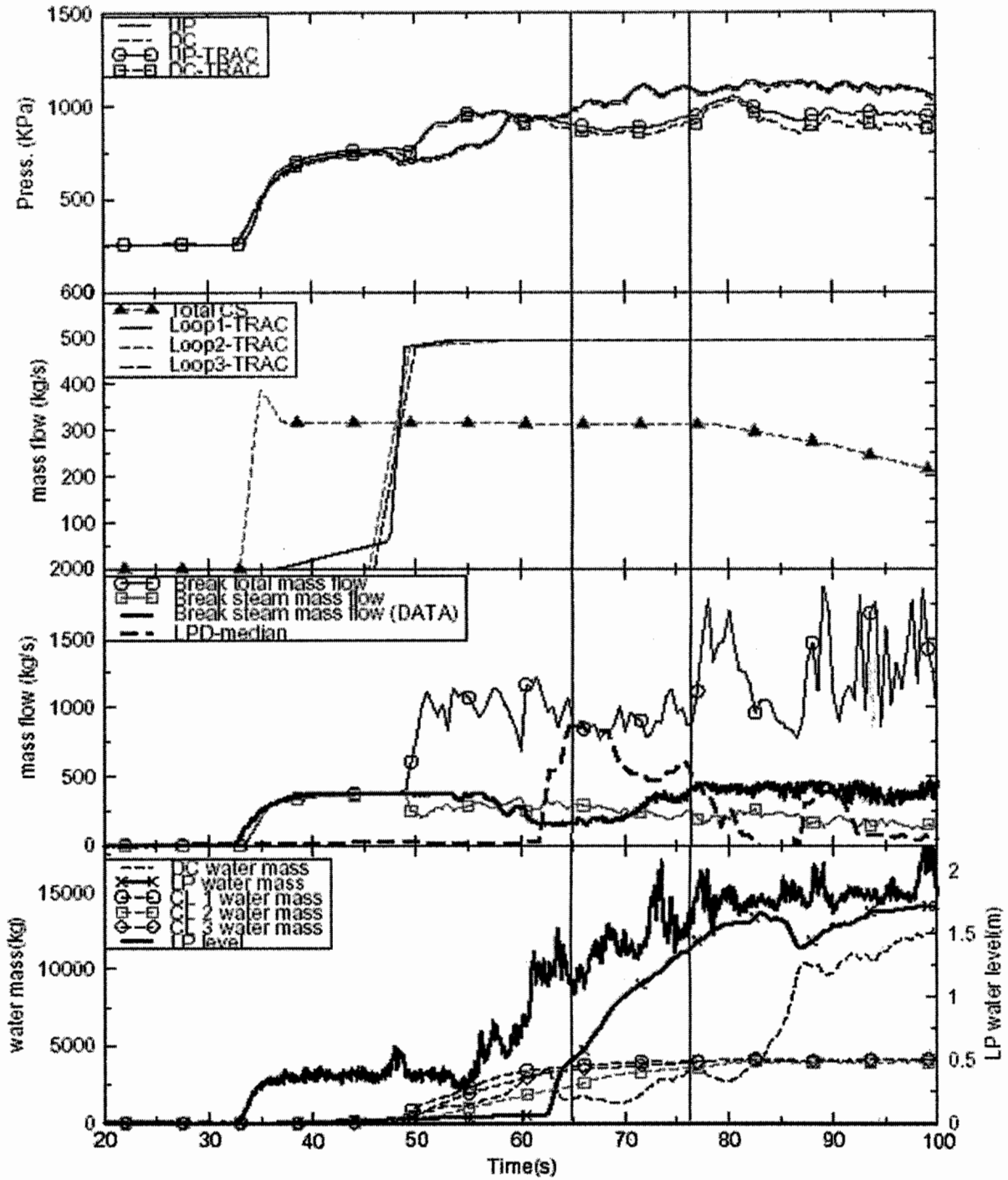


그림 12 UPTF Test 6 run 131 계산결과(압력, 파단유량, 재고량)

UPTF Test 6 run 131

TRAC-M vs. DATA.

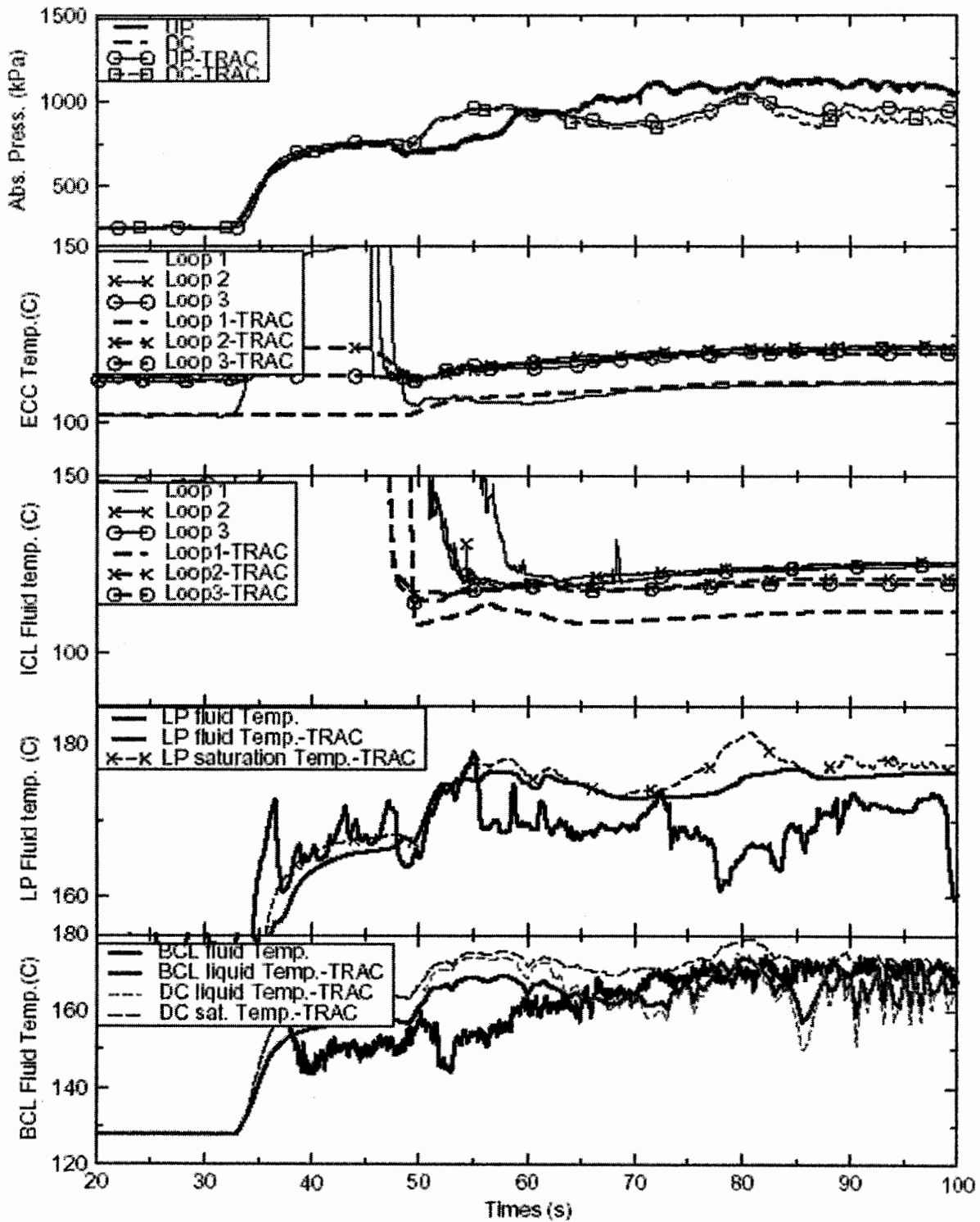


그림 13 UPTF Test 6 run 131 계산결과(온도)

UPTF Test 6 run 132

TRAC-M vs. DATA.

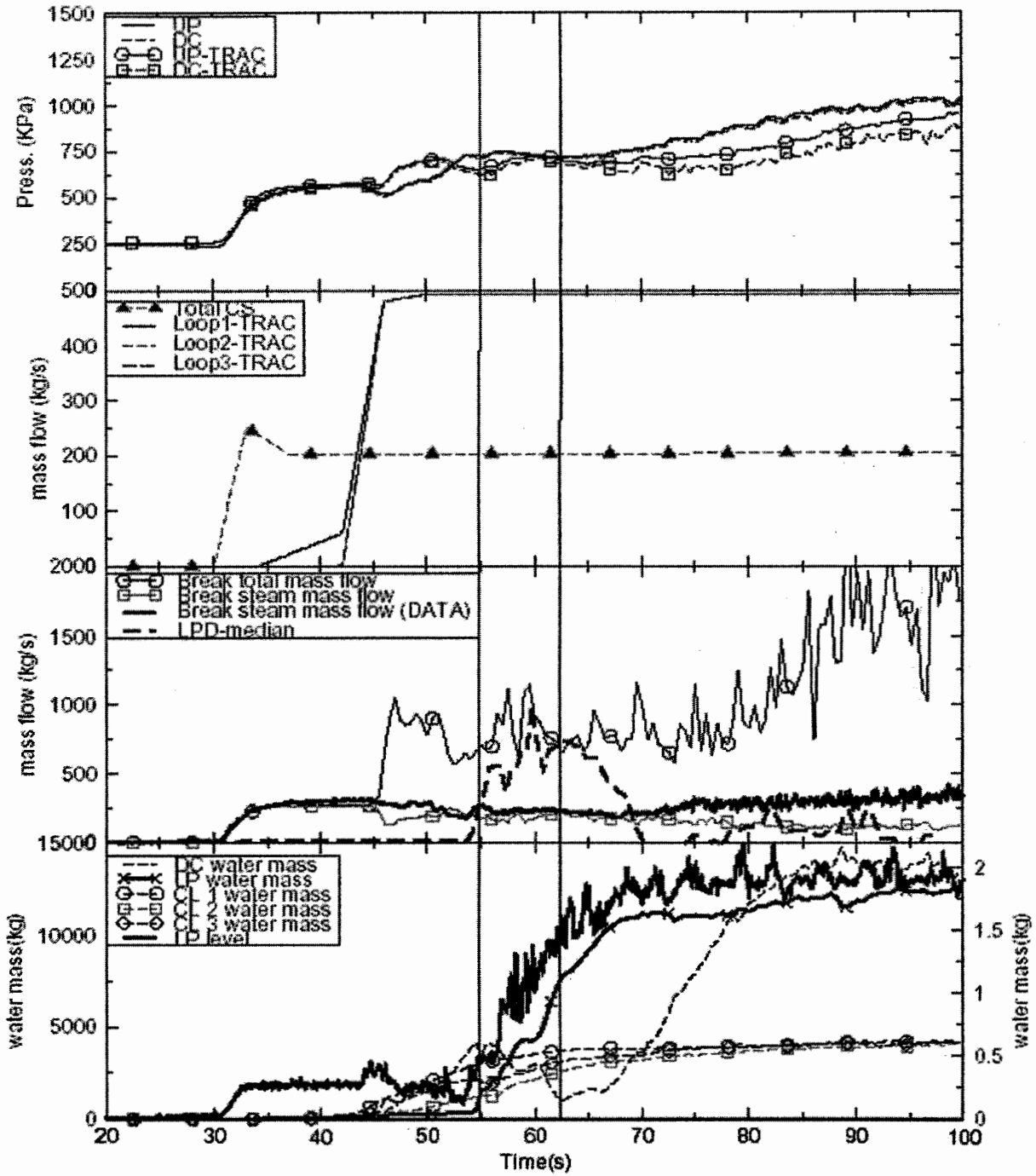


그림 14 UPTF Test 6 run 132 계산결과(압력, 파단유량, 재고량)

UPTF Test 6 run 132

TRAC-M vs. DATA.

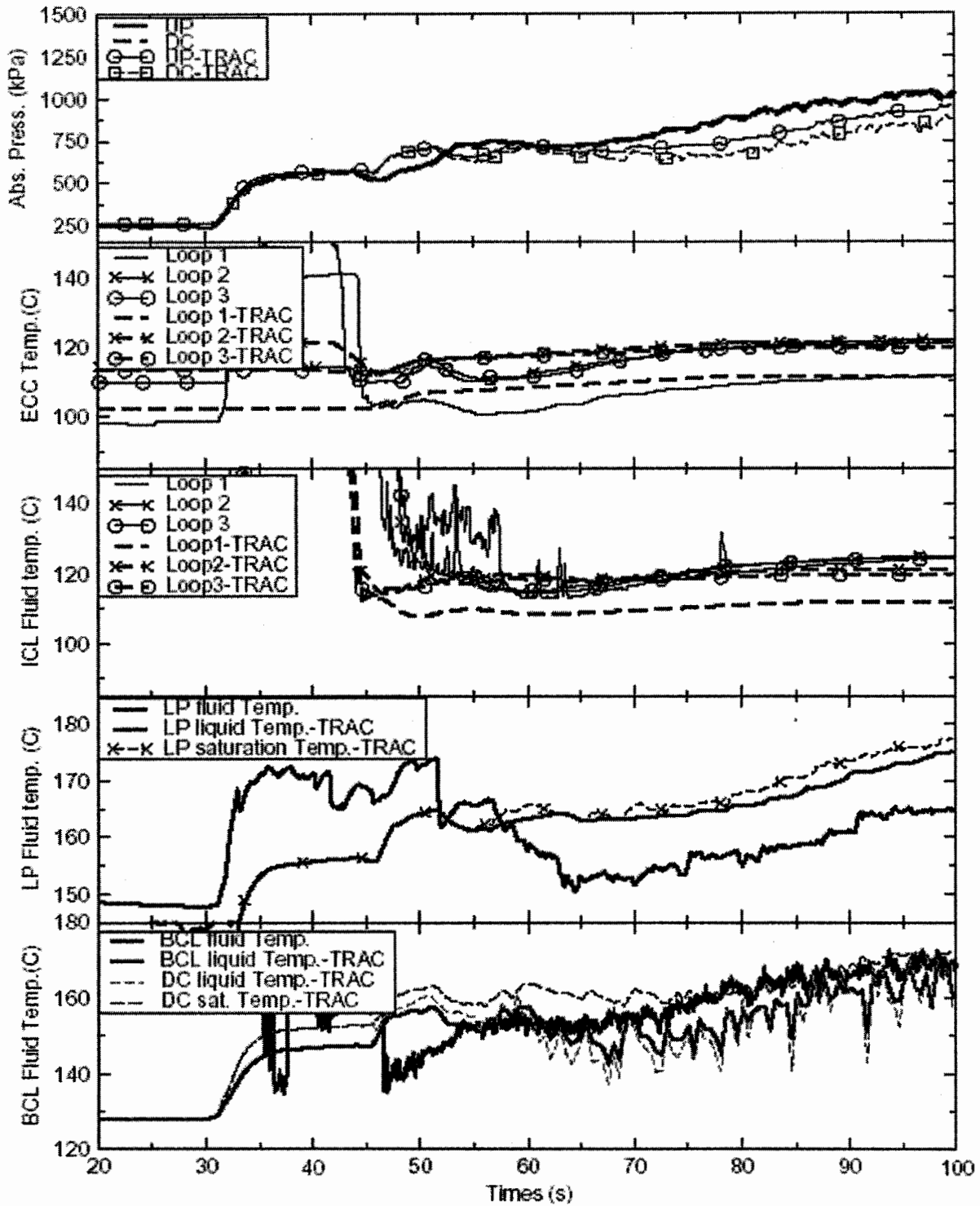


그림 15 UPTF Test 6 run 132 계산결과(온도)

UPTF Test 6 run 133

TRAC-M vs. DATA.

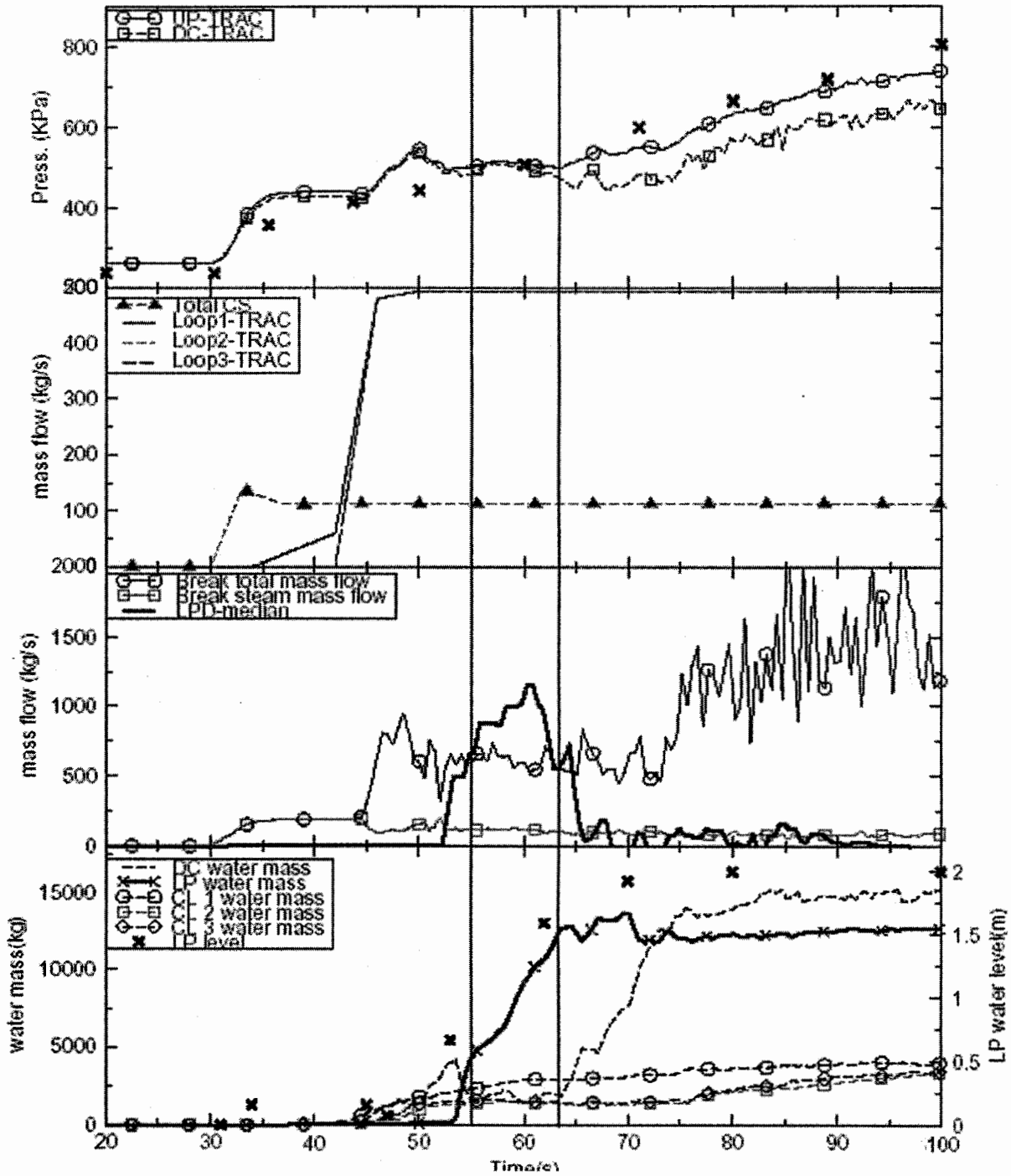


그림 16 UPTF Test 6 run 133 계산결과(압력, 파단유량, 재고량)

UPTF Test 6 run 133

TRAC-M vs. DATA.

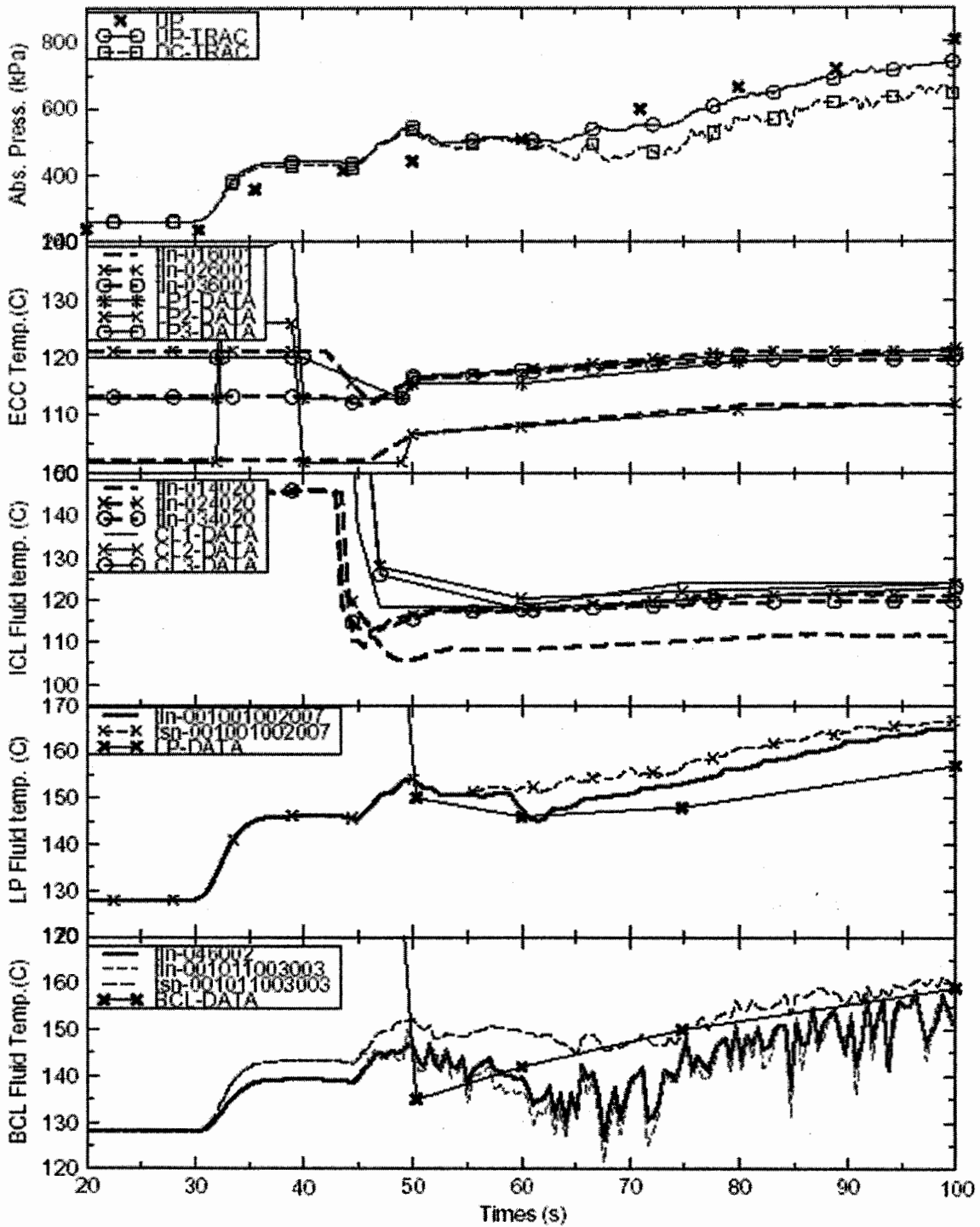


그림 17 UPTF Test 6 run 133 계산결과(온도)

UPTF Test 6 run 135

TRAC-M vs. DATA.

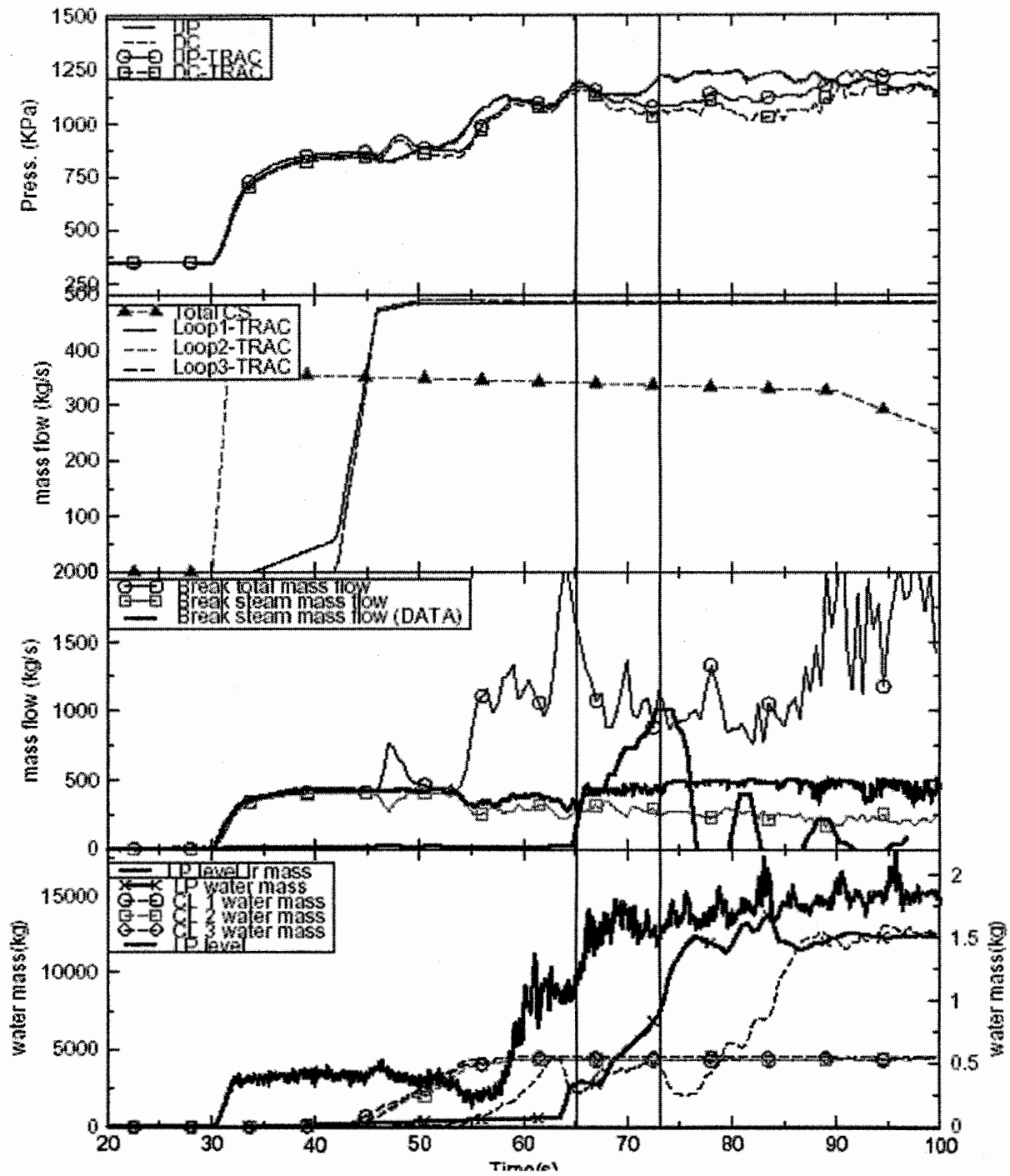


그림 18 UPTF Test 6 run 135 계산결과(압력, 파단유량, 재고량)

UPTF Test 6 run 135

TRAC-M vs. DATA.

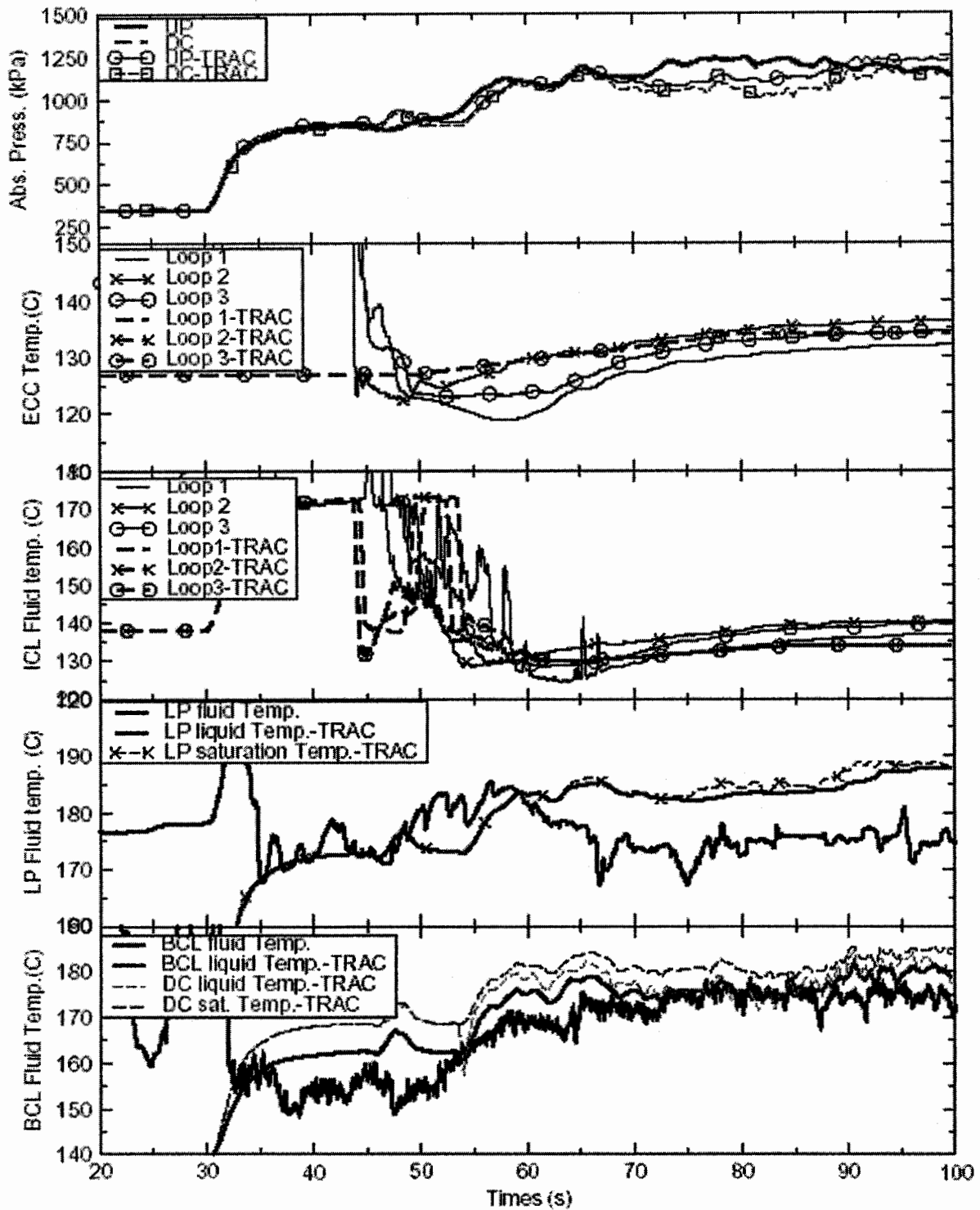


그림 19 UPTF Test 6 run 135 계산결과(온도)

UPTF Test 6 run 136

TRAC-M vs. DATA.

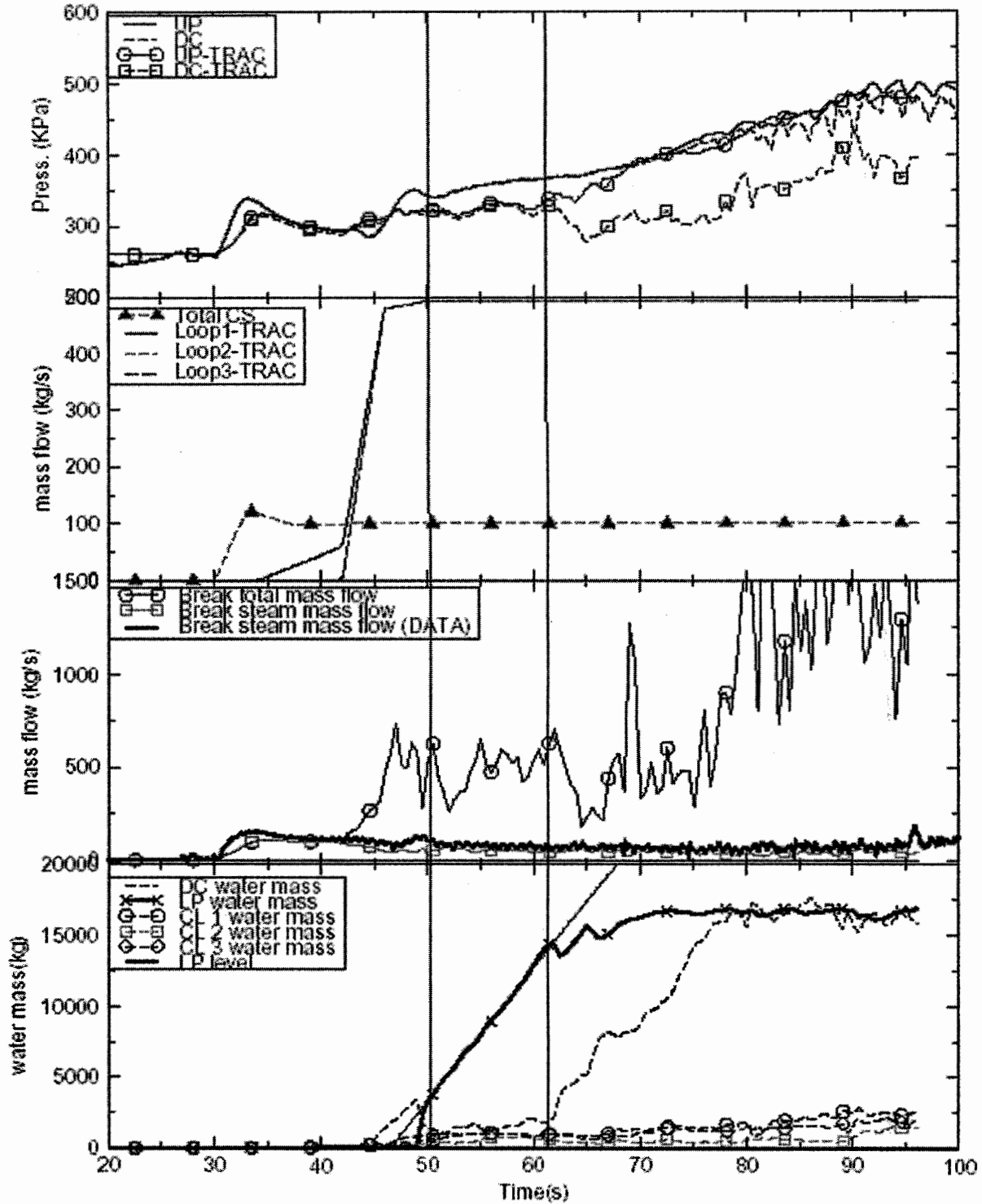


그림 20 UPTF Test 6 run 136 계산결과(압력, 파단유량, 재고량)

UPTF Test 6 run 136

TRAC-M vs. DATA.

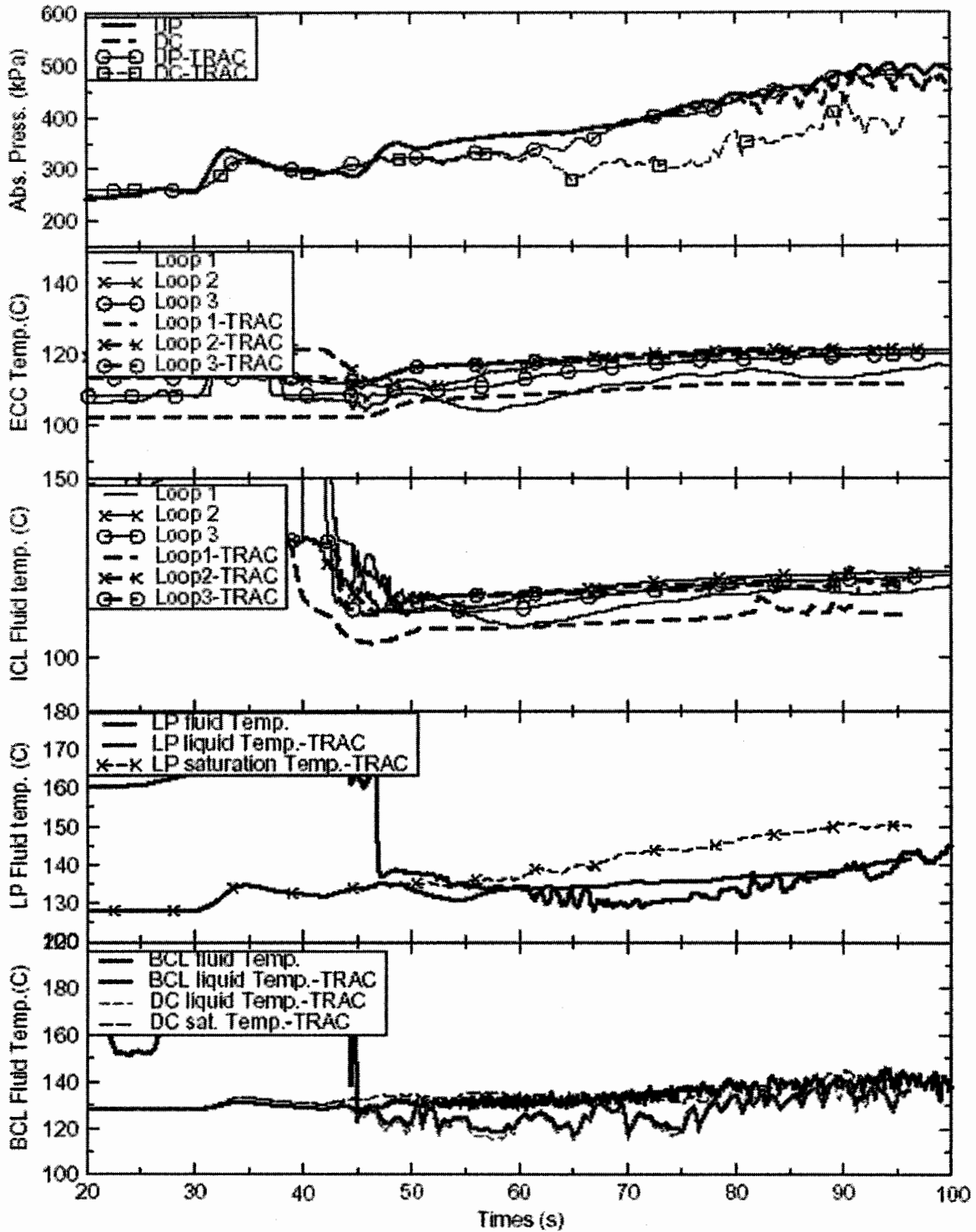


그림 21 UPTF Test 6 run 136 계산결과(온도)

3.2 Test 7 계산결과

Test 7의 세부 실험 대한 코드 계산결과가 압력, 파단 유량, 하부 플레넘 냉각수 재고량 및 용기 배출량에 대하여 실험자료와 비교되어 그림22~29까지에 표시하였다.

노심 증기는 30초부터 주입되고 냉각수는 45초 이후 주입된다. 코드는 냉각수 주입후 상부 플레넘 및 강수관내 압력을 실험자료보다 낮게 예측하여 test 6번과 마찬가지로 냉각수와 하부 플레넘으로 관입되는 동안의 계통 압력이 낮게 예측되었다. 원자로 용기 배출 영향으로 Test 6에서와 같은 강수관과 상부 플레넘 사이의 높은 차압은 나타나지 않았다.

저온관으로 주입된 냉각수의 일부는 저온관에 축적되고 일부는 강수관으로 흘러들어간다. 저온관에서의 냉각수 축적 경향은 Test 6과 유사하였다.

파단저온관으로 배출되는 냉각수 온도는 거의 포화온도에 가까웠다. 코드로 계산되어 결정된 “평가 구간”에서의 관입율은 다음표와 같다.

표 9 UPTF Test 7의 증기주입량에 따른 관입율

| Test | Run | Steam inj. rate kg/s | ECC injection into CL kg/s | | | | Absolute Press. in DC kPa | DC analysis period (s) | | water delivery into LPkg/s | | Absolute Press. in DC kPa |
|------|---------|----------------------|----------------------------|------|-------|-------|---------------------------|------------------------|-----------|----------------------------|---------|---------------------------|
| | | | CL1 | CL2 | CL3 | Tot. | | test | trace | test | trace | |
| 7 | 200/I | 104 | 494 | - | - | 494 | 451 | 75-97 | | 5 | | |
| | cal. | | 492 | 14.8 | 9 | 515.8 | | | 60.0-85.0 | 16.23 | 396.806 | |
| | 200/II | 54 | 736 | 30 | - | 766 | 330 | 125-155 | | 351 | | |
| | cal. | | 732.5 | 13.8 | 10.1 | 756.4 | | | 126-155 | 129.05 | 291.731 | |
| | 200/III | 102 | 735 | - | - | 735 | 498 | 175-205 | | 6 | | |
| | cal. | | 735 | 13 | 12.5 | 760.5 | | | 170-205 | 52.46 | 454.949 | |
| | 201/I | 102 | - | 487 | 490 | 977 | 330 | 85-105 | | 861 | | |
| | cal. | | - | 489 | 489 | 978 | | | 85-105 | 928.74 | 336 | |
| | 201/III | 102 | 493 | 487 | 489 | 1469 | 414 | 192-225 | | 942 | | |
| | cal. | | 488 | 489 | 489 | 1466 | | | 193-219 | 1044 | 371.602 | |
| | 202/II | 128 | - | 486 | 491 | 977 | 416 | 125-155 | | 714 | | |
| | cal. | | - | 489 | 489 | 978 | | | 120-145 | 868 | 362.874 | |
| | 203/I | 69 | 735 | - | - | 735 | 401 | 68-98 | | 95 | | |
| | cal. | | 736 | 22.4 | 13 | 771.4 | | | 75-95 | 14.06 | 378.36 | |
| | 203/II | 30 | 737 | - | - | 737 | 286 | 132-171 | | 519 | | |
| | cal. | | 736 | 23 | 13 | 772 | | | 120-170 | 323 | 278.731 | |
| | 203/III | 71 | 737 | - | 733 | 1470 | 398 | 220-250 | | 823 | | |
| | cal. | | 736 | 23 | 731 | 1490 | | | 227-246 | 835 | 367.007 | |
| | 203/IV | 51 | 493 | 485 | 487 | 1465 | 337 | 290-330 | | 1031 | | |
| | cal. | | 485.5 | 484 | 485.5 | 1455 | | | 290-330 | 1170 | 289.201 | |

UPTF Test 7 run 200

UP/DC pressure.

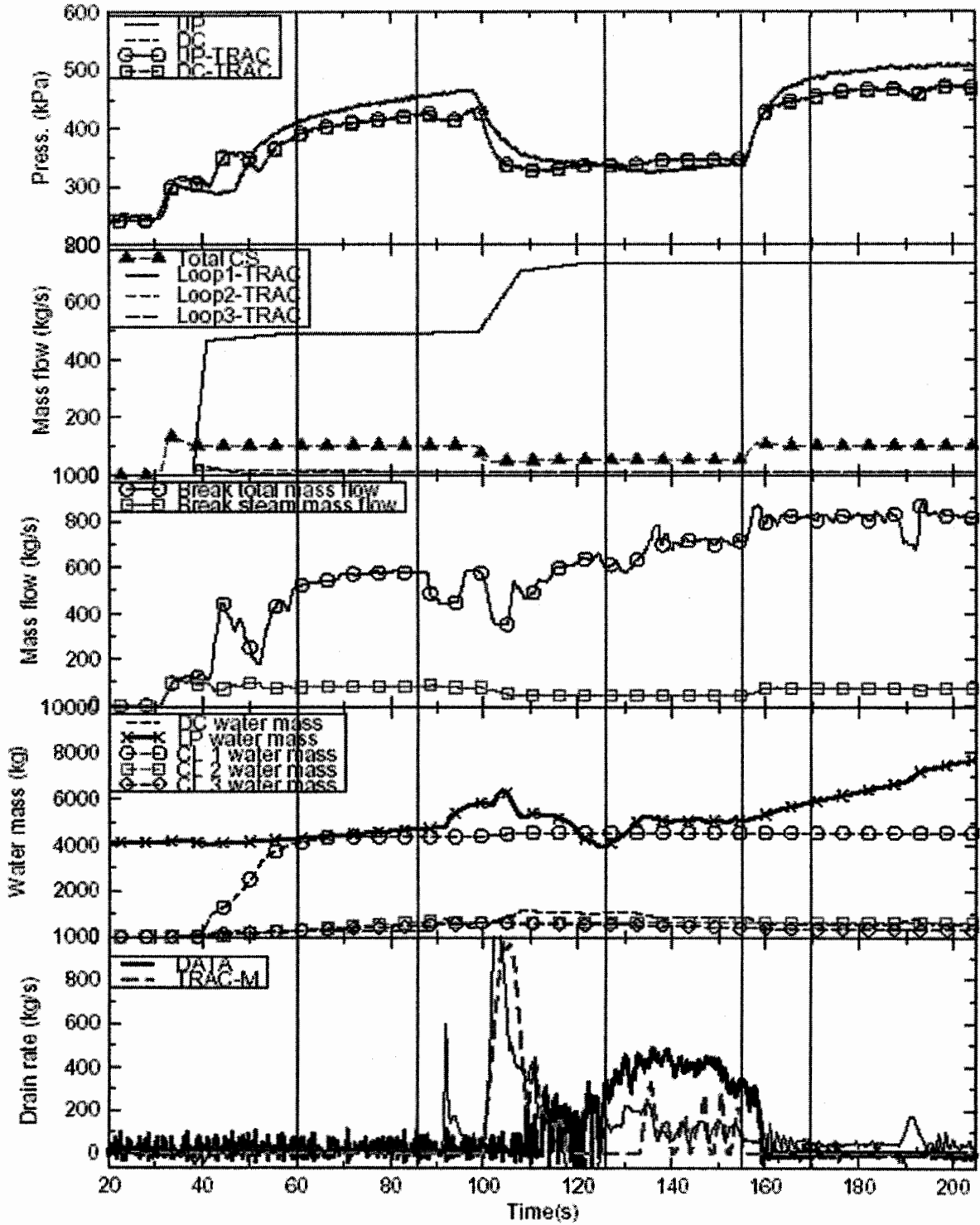


그림 22 UPTF Test 7 run 200 계산결과(압력, 파단유량, 용기배출량, 재고량)

UPTF Test 7 run 200

TRAC-M vs. DATA.

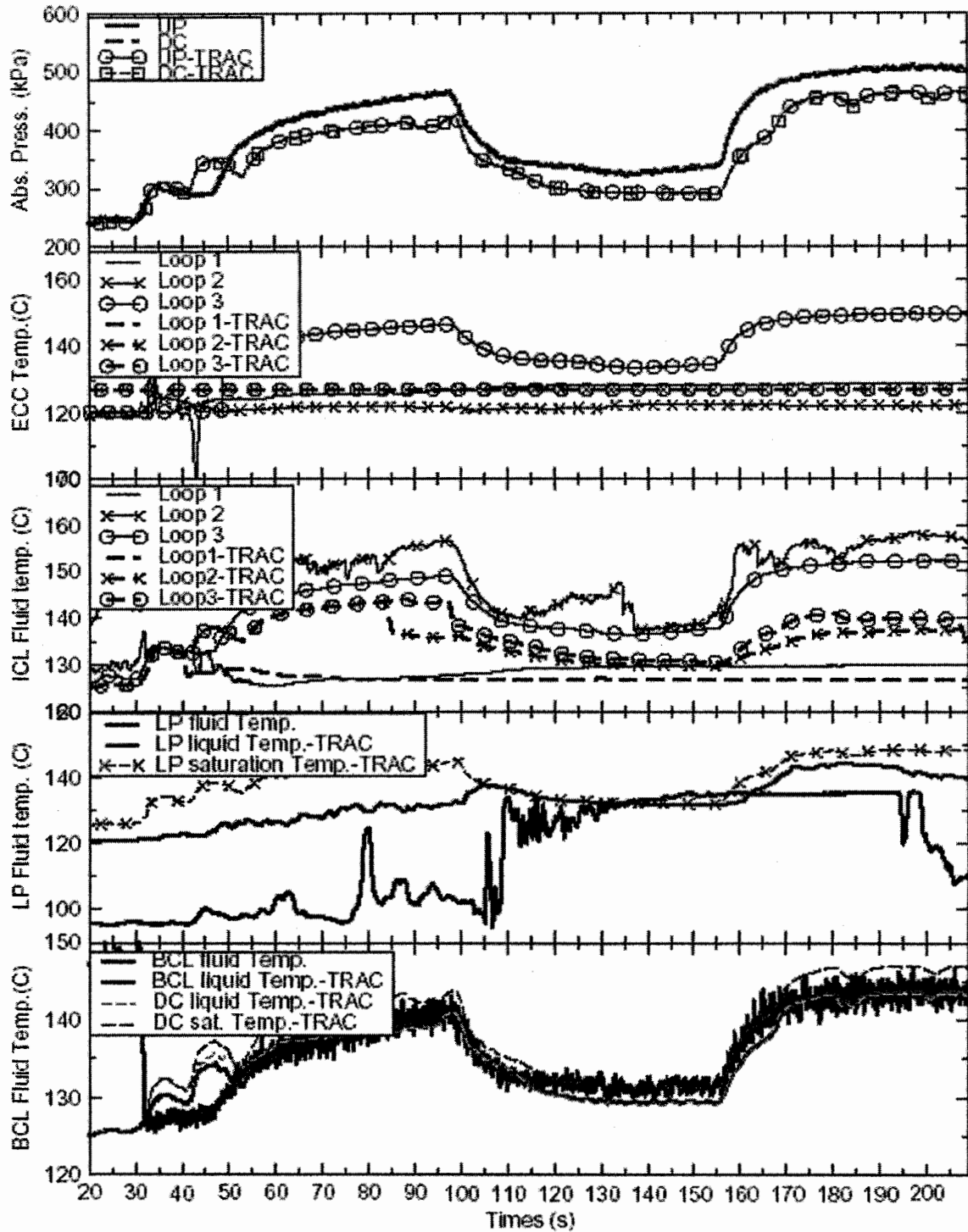


그림 23 UPTF Test 7 run 200 계산결과(온도)

UPTF Test 7 run 201

UP/DC pressure.

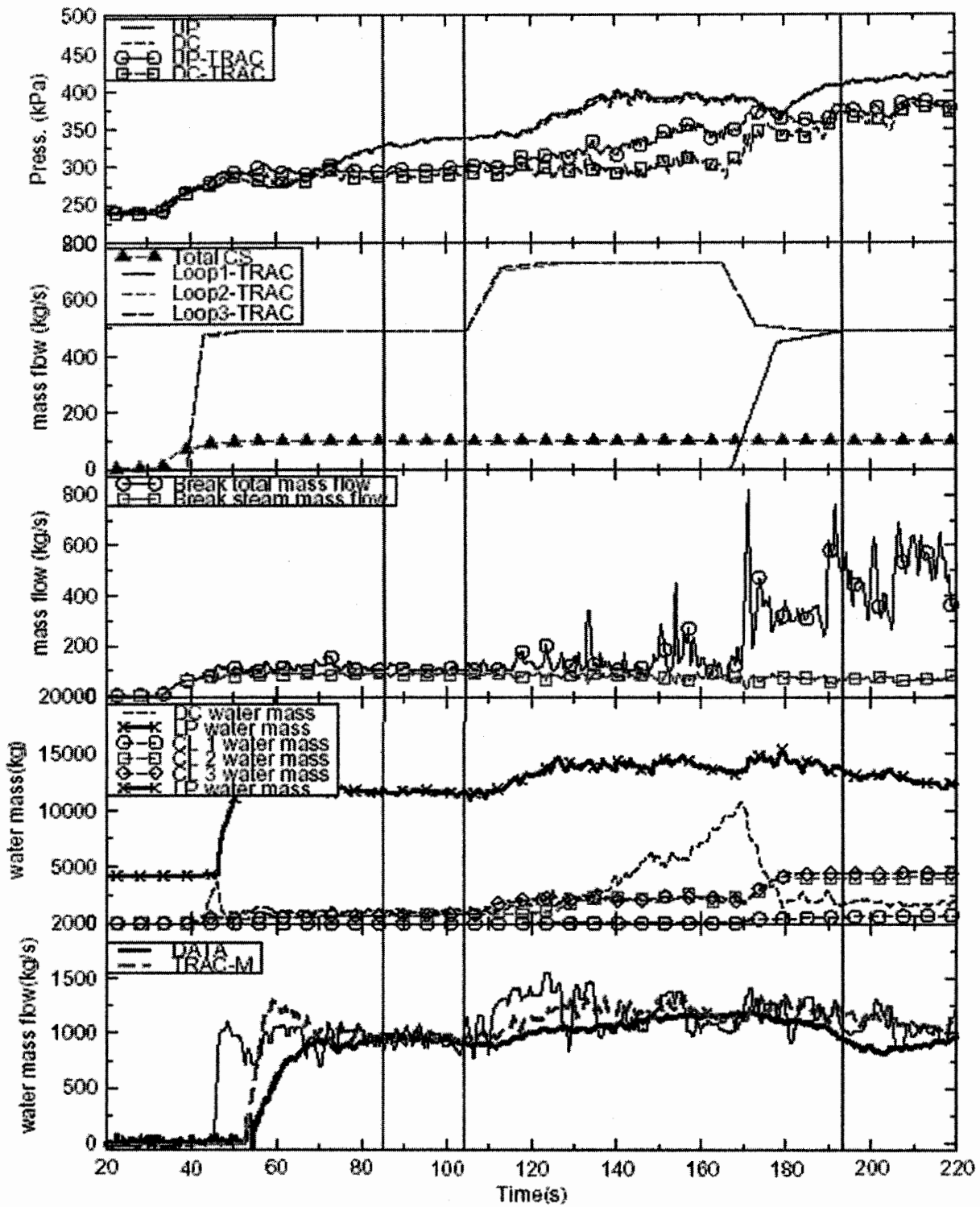


그림 24 UPTF Test 7 run 201 계산결과(압력, 파단유량, 재고량)

UPTF Test 7 run 201

TRAC-M vs. DATA.

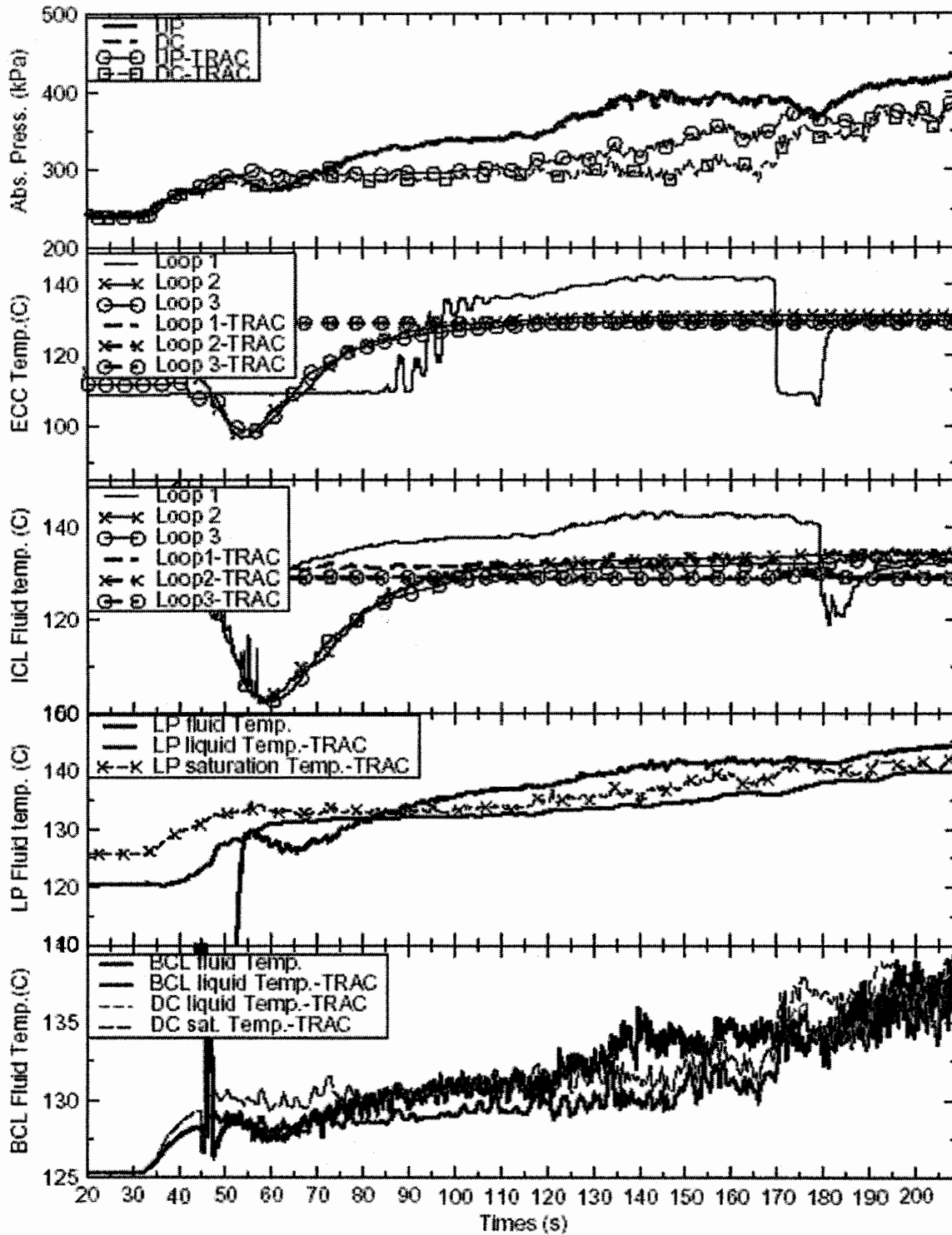


그림 25 UPTF Test 7 run 201 계산결과(온도)

UPTF Test 7 run 202

UP/DC pressure.

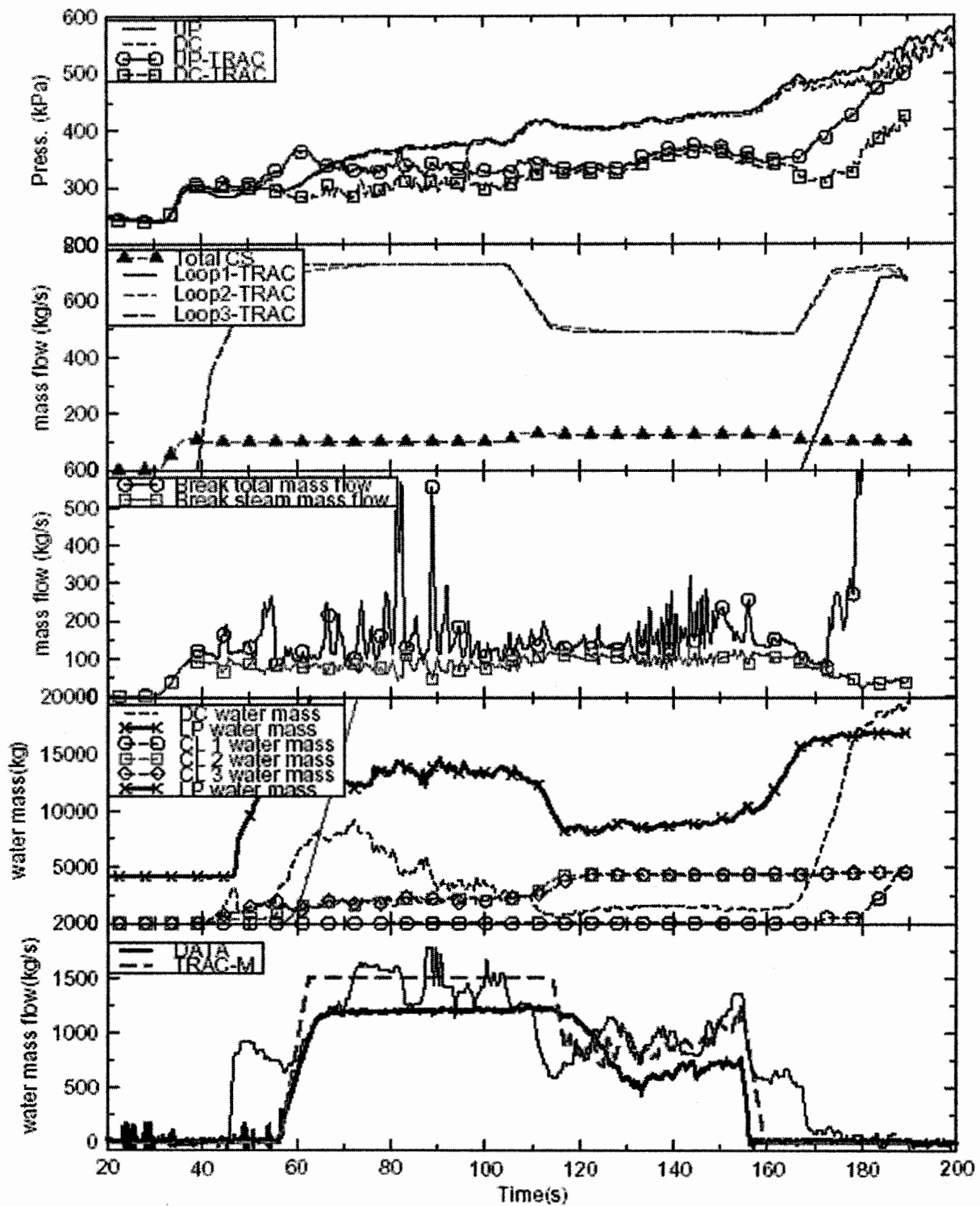


그림 26 UPTF Test 7 run 202 계산결과(압력, 파단유량, 재고량)

UPTF Test 7 run 202

TRAC-M vs. DATA.

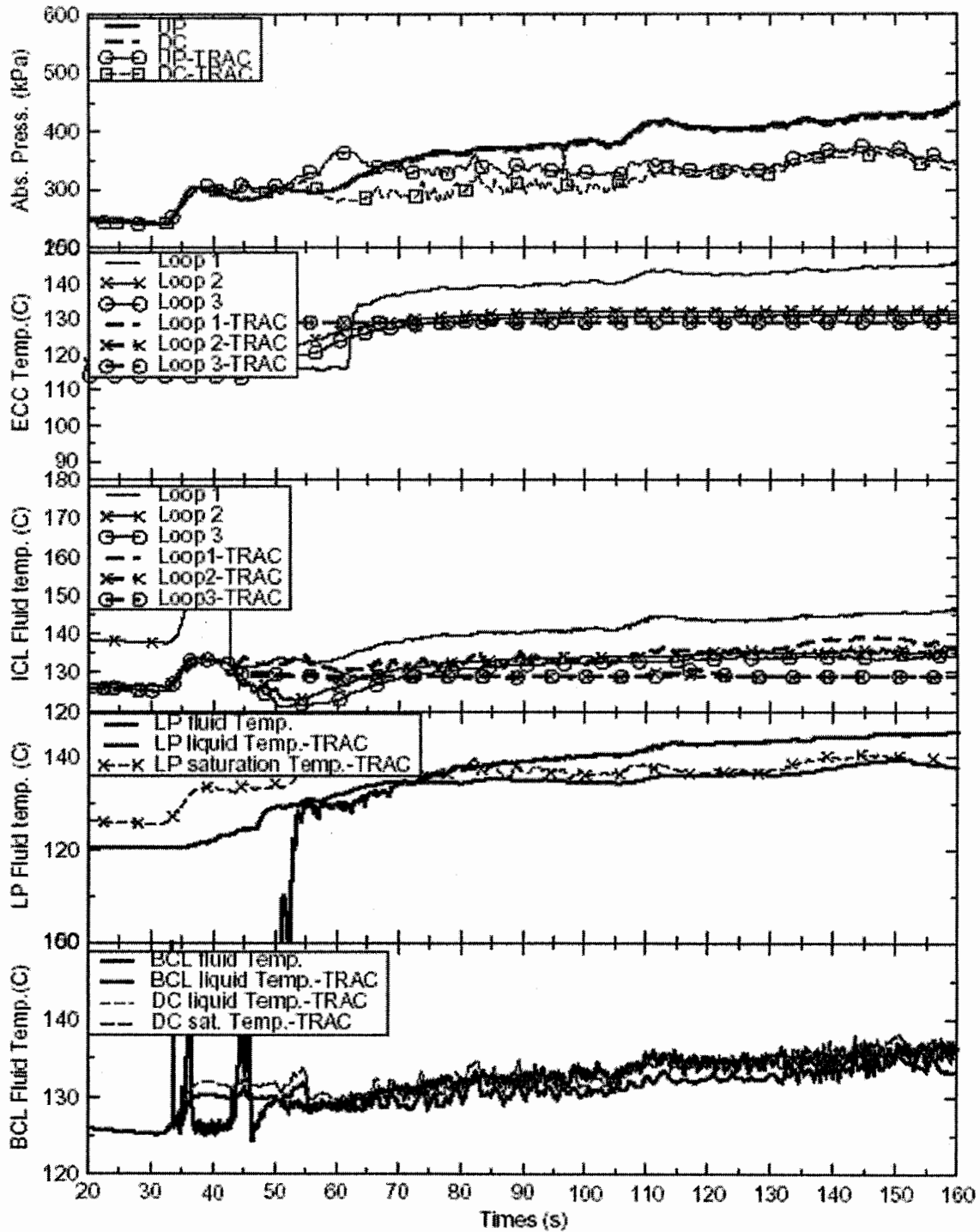


그림 27 UPTF Test 7 run 202 계산결과(온도)

UPTF Test 7 run 203

UP/DC pressure.

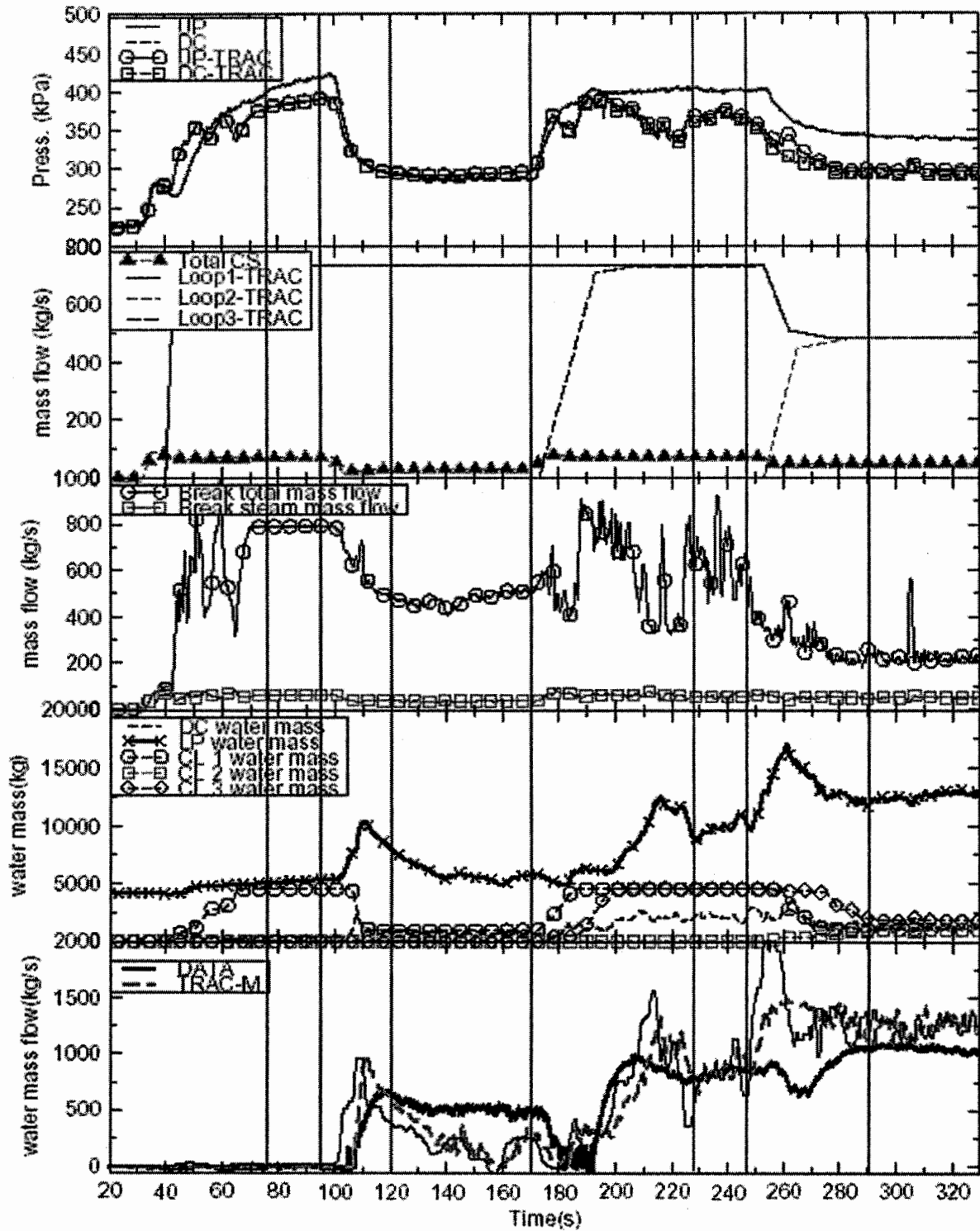


그림 28 UPTF Test 7 run 203 계산결과(압력, 파단유량, 재고량)

UPTF Test 7 run 203

TRAC-M vs. DATA.

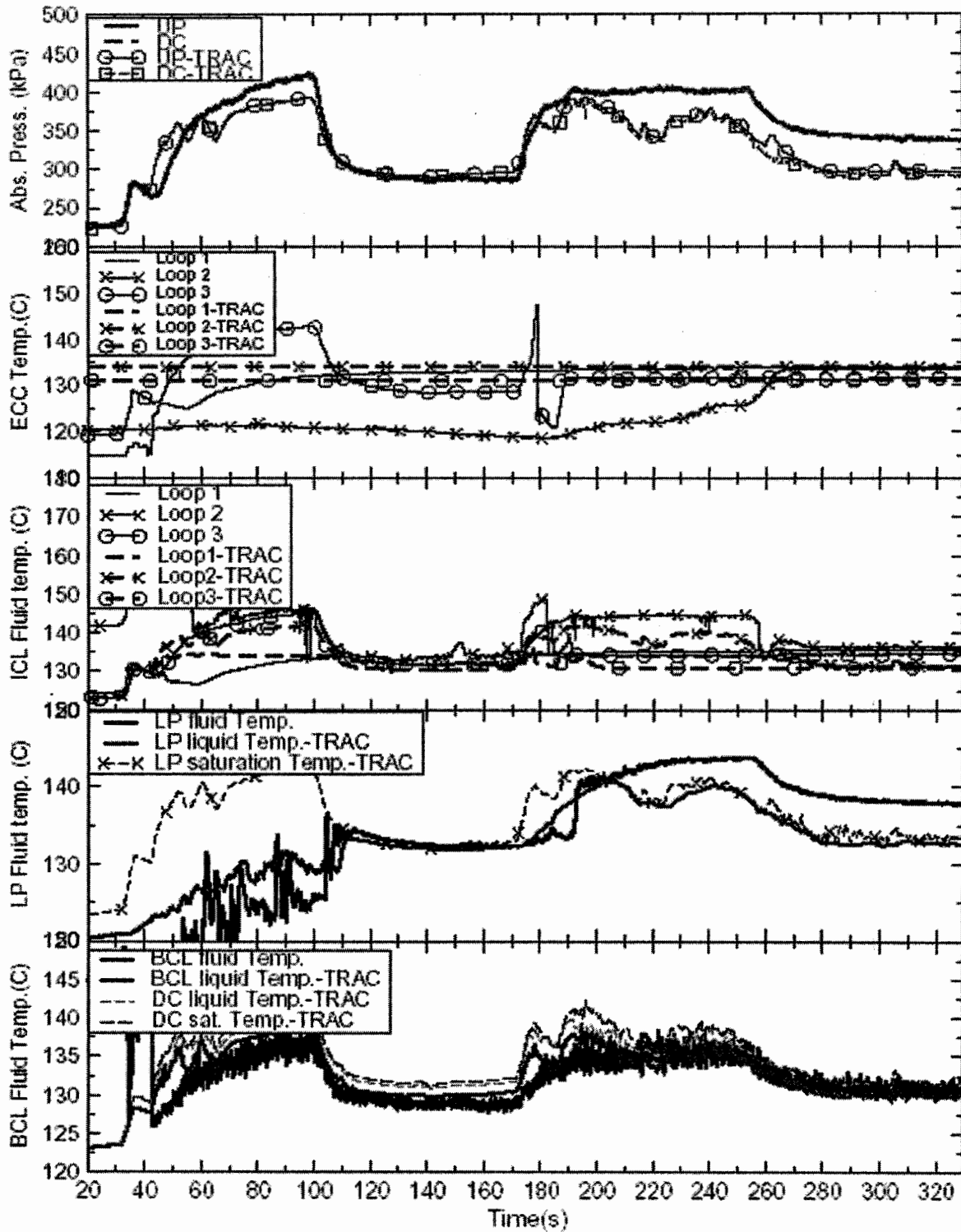


그림 29 UPTF Test 7 run 203 계산결과(온도)

3.3 Test 21 계산결과

Test 21A, B에 대한 코드 계산결과가 압력, 파단 유량, 하부 플레넘 냉각수 재고량 및 용기 배출량이 실험자료와 비교되어 그림30, 31에 표시하였다.

노심 증기는 30초이후 주입되고 냉각수는 45초부터 주입이 시작된다. run 272에서는 높은 냉각도(115K)의 냉각수의 주입이 시작되면서 증기 응축으로 인하여 계통 압력이 빠르게 감소한다. 코드 계산에서는 하부 플레넘으로의 관입을 예측하지 못하였음에도 즉 주입된 냉각수 모두 우회되었음에도 불구하고 계통압력 거동은 자료보다 낮게 계산하였다. run 274 경우에서도 비교적 낮은 계통 압력이 지속됨을 예측하였다.

높은 과냉도의 냉각수가 주입된 run 272 계산에는 저온관 2, 3번이 충수됨에도 하부 플레넘으로의 냉각수 유입을 계산하지 못하였다. run 274 Phase I에서는 상당량의 냉각수가 관입되었다. 이에 따라 Phase III에 하부 플레넘의 수위가 임계수위를 넘어 관입율을 적절히 예측할 수 없음이 밝혀져 원자로 용기 배출을 모사하였다. 약 900kg/s로 주입된 냉각수는 하부 플레넘으로 관입되는 것으로 계산되었다. 이때의 증기 주입량은 각각 298kg/s 와 102kg/s 이었다. DVI 노즐 0번에서만 냉각수가 주입된 Phase II에서는 관입이 없었다.

표 10 UPTF Test 21의 증기주입량에 따른 관입율

| Test | Run /Phase | Steam inj. rate kg/s | Injection rate into DVI nozzle | | | Absolute Press. in DC kPa | DC analysis period | | water delivery into LP kg/s | | Absolute Press. in DC kPa |
|------|------------|----------------------|--------------------------------|-----|------|---------------------------|--------------------|-------------|-----------------------------|--------|---------------------------|
| | | | 0 | 180 | tot. | | test | trace | test | trace | |
| 21 | 272 | 314 | 912 | 910 | 1822 | 488 | 51-81 | 61-91 | 385 | 17.4 | 357.57 |
| | 274/I | 298 | 845 | 856 | 1701 | 1020 | 59-108 | 59-108 | 86 | 894.9 | 760.13 |
| | 274/II | 103 | 885 | 0 | 885 | 550 | 280-324 | 280-324 | 35 | 5.99 | 472.37 |
| | 274/III | 102 | 885 | 835 | 1720 | 494 | 337.5-344.5 | 337.5-344.5 | 556 | 861.92 | 437.59 |

UPTF Test 21A run 272

UP/DC pressure.

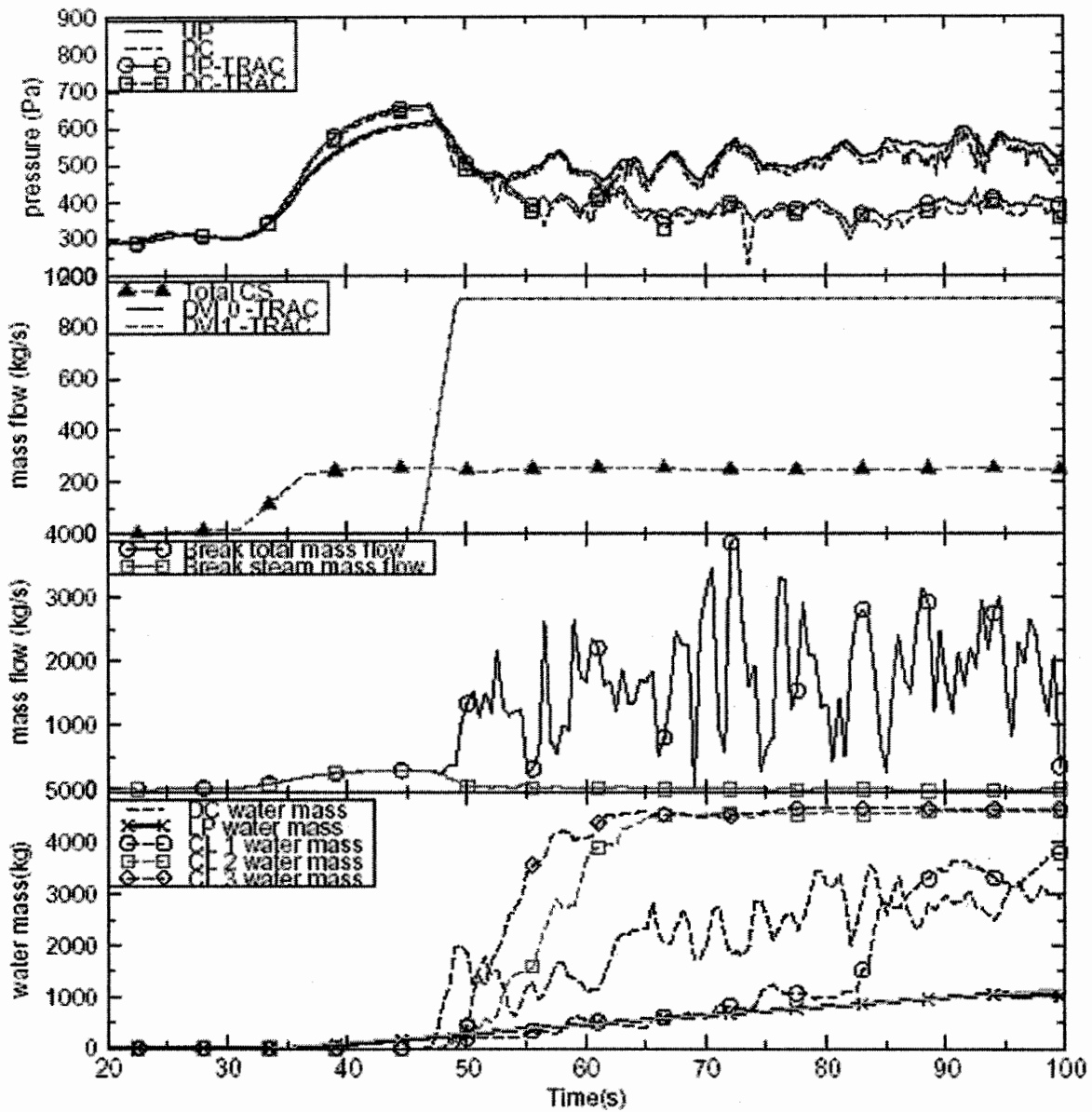


그림 30 UPTF Test 21A run 272 계산결과

UPTF Test 21B run 274

UP/DC pressure.

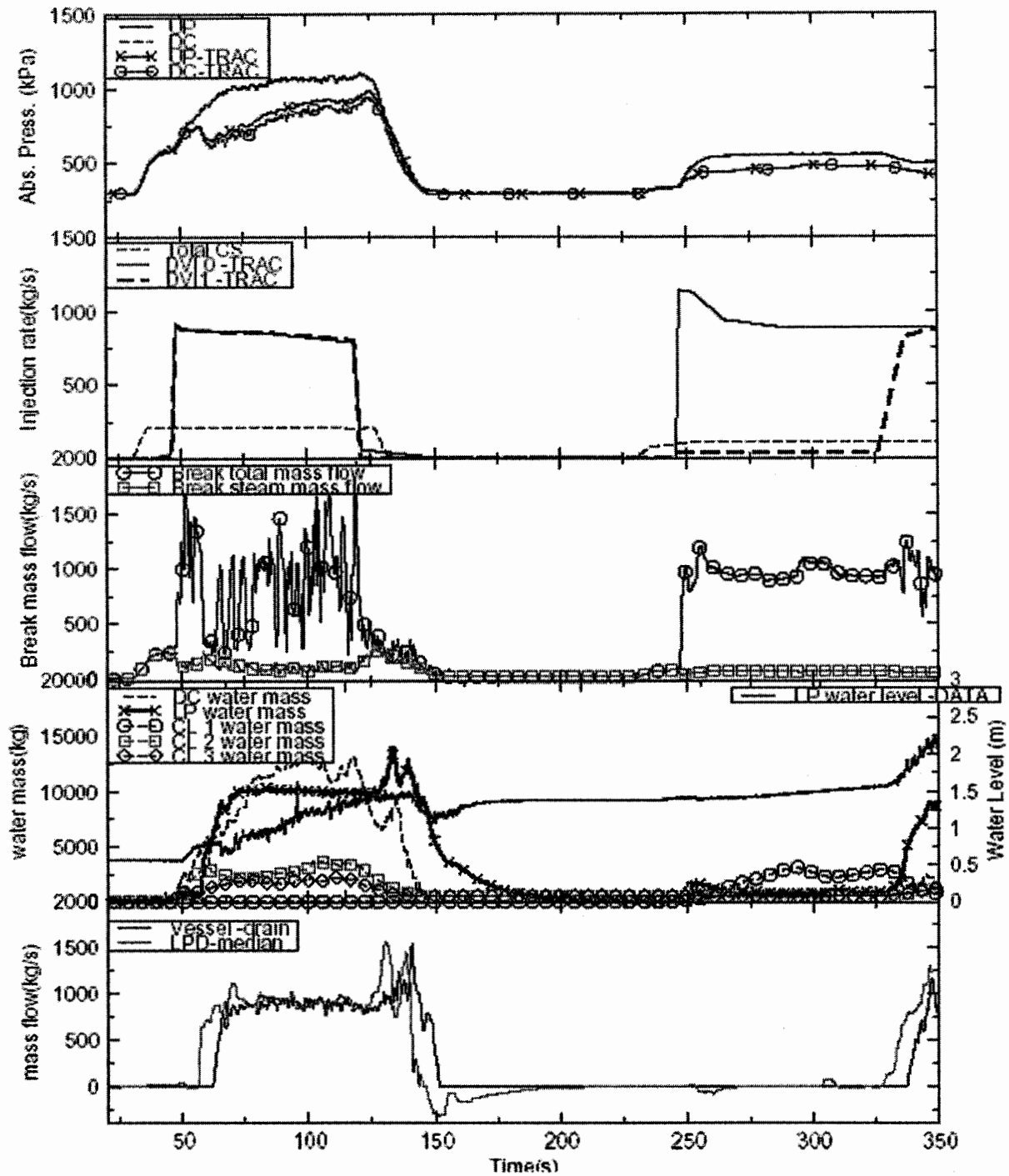


그림 31 UPTF Test 21B run 274 계산결과

3.4 증수 곡선 평가

실험중 재증수 관련 실험들인 UPTF Test 6,7,21의 TRACE 계산결과와 각 실험에서의 실험결과[7](하부플레넘 관입율: LP Penetration rate)을 그림 32, 33에서와 같이 증기 주입량에 따른 하부 플레넘 관입율을 비교하였다. Test 6,7 run 201/III, 203/IV 과 같이 건전 저온관에서 주입되는 실험의 경우 TRACE 코드는 관입율 예측이 비교적 정확하였다. 저온관 1번에서만 냉각수가 주입되는 경우는 자료보다 작게 예측되었으며 저온관 2번 및 3번에서 주입되는 경우 코드는 높은 관입율을 예측하였다.

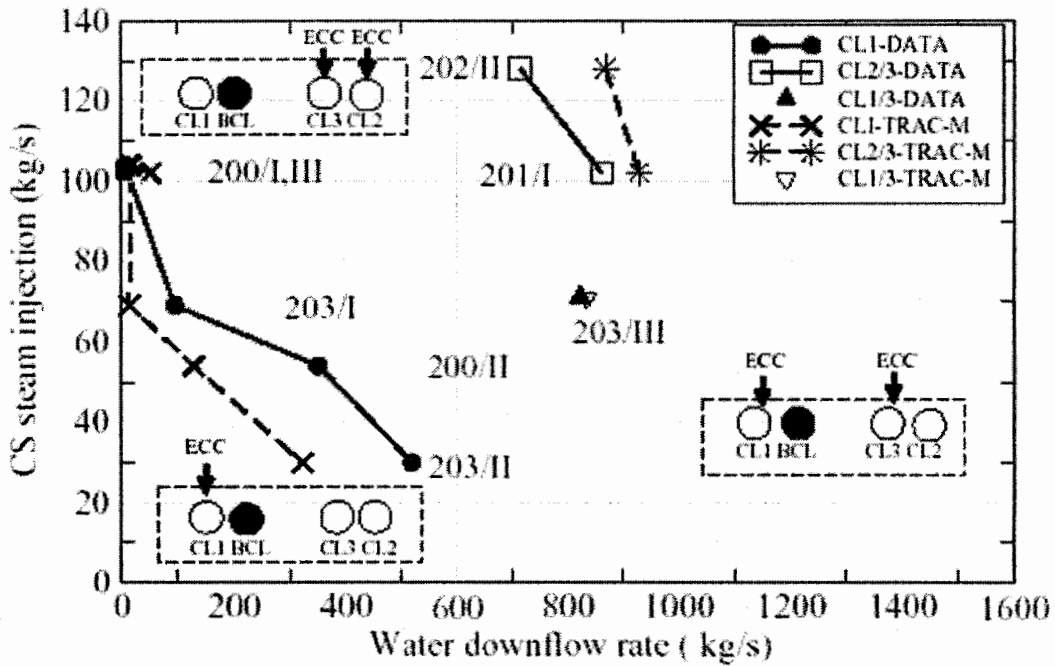


그림 32 증기주입에 따른 냉각수 하부 플레넘 관입율
(냉각수 주입 위치가 다른 경우)

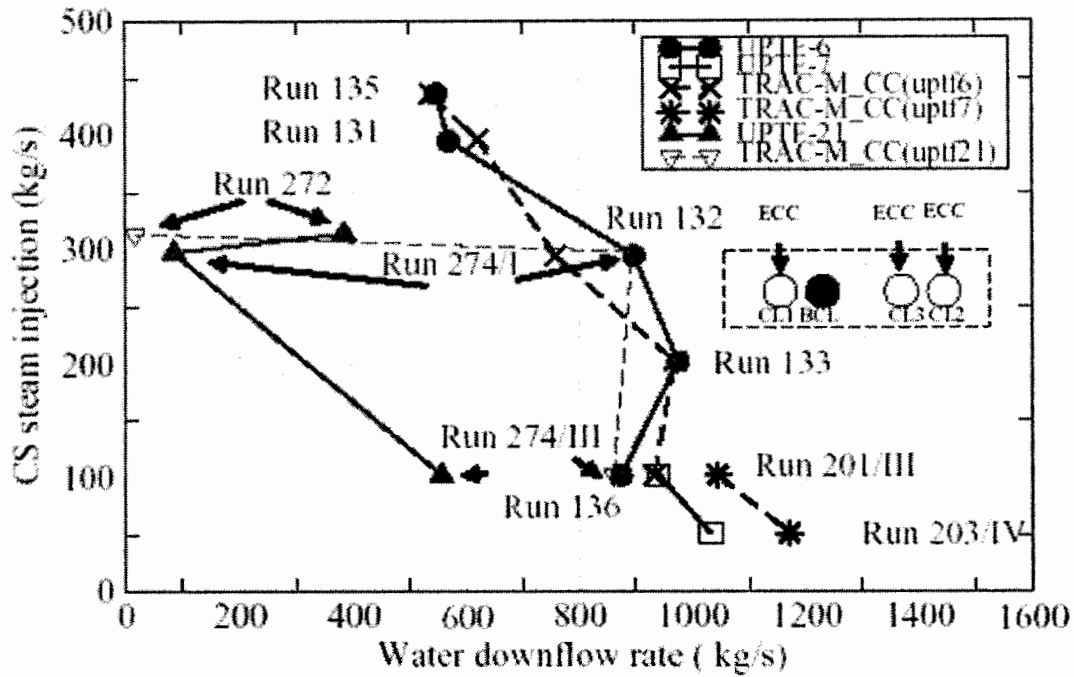


그림 33 증기주입에 따른 냉각수 하부 플레넘 관입율
(냉각수가 모두 주입된 Test)

그림 32에서는 모든 저온관에서 냉각수가 주입되는 경우를 비교하였다. Test 6, 7의 경우 계산결과에서 실험과 거의 유사한 하부플레넘 주입율이 예측되었으나 Test 21의(Run 272, 274) 경우에는 실험결과와 많은 차이를 보였다.

냉각수가 주입되는 위치에 따른 실험의 하부플레넘 관입율과 TRAC-M 코드 예측치에서는 파단저온관 부근의 저온관에서 냉각수가 주입될 경우 그림 6에서와 같이 관입율이 실측치보다 낮아 많은 냉각수가 우회되는 것으로 예측하고 있다. 파단 저온관과 반대쪽 저온관에서 주입되는 경우는 실측치보다 많은 관입율을 보였다. 두 경우 모두 증기주입량이 많을수록 관입량이 줄어드는 경향은 비교적 잘 묘사되고 있음을 확인할 수 있었다.

재충수 관련 실험결과에 대한 실측치 및 예측치는 그림 34, 35과 같이 나타났다. 대체로 Test 7 실험군에서는 실측치와 예측치가 근소한 차이로 유사한 경향을 예측하였다. Test 8에서는 위치에 따른 예측치의 근소한 차이를 보였으나 증기주입량에 따른 관입량 변화경향은 적절히 예측 되었다. 그러나 Test 21에서는 실측치와 관입량에서도 많은 차이를 보였으며 경향에서도 실험과 큰 차이를 보였다.

이러한 결과는 Test 7, 21에서 안전주입탱크의 가압에 사용된 질소가 냉각수에 용해되는 영향을 고려하기 위해 주입된 1kg/s 정도의 질소주입 영향이 계산에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 또한 과도한 냉각수 과냉각도(Subcooling)로 인한 실험시 계측 불안정성을 줄이기 위해 포화온도에 가까운 따뜻한 물을 냉각수로 사용한 Test 6, 7과 실제 상황과 비슷한 온도의 냉각수를 사용한 Test 21(Run 272)과의 냉각수 과냉각도 차이로부터 기인한 것으로 판단된다. 과냉각도가 높은 차가운 물이 주입되는 CLI 주입방식의 계산인 Test 5의 경우에서도 Test21(Run 272) 계산과 동일하게 실측치와는 달리 냉각수의 관입이 전혀 예측되지 못하였다. 또한 Test21(Run 272)에 대하여 TRAC-P 버전으로 LANL(Los Alamos National Laboratory)에서 계산된 문헌[10][11][12]에서도 동일한 현상이 있었던 것으로 문헌 조사 결과 밝혀졌다.

이러한 질소의 주입여부 및 과냉각도의 차이는 모두 증기응축현상에 영향이 큰 변수들이다. 따라서 검증계산 결과에서 보인 차이는 TRAC 코드의 증기응축 모델에서 계산된 증기응축과 실제 일어나는 응축되는 증기량과의 차이인 것으로 판단하였다.

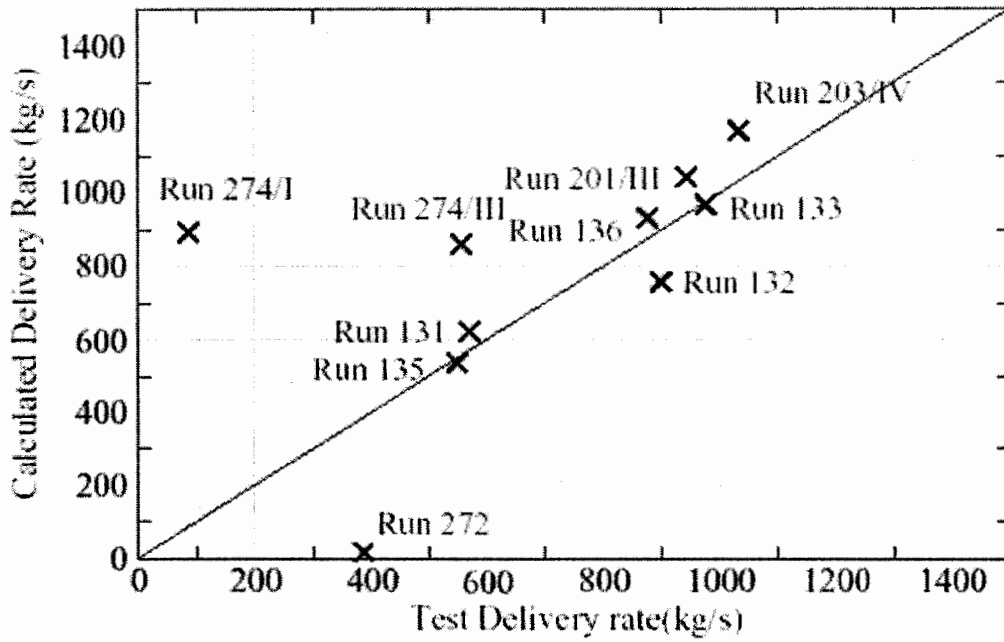


그림 34 모든 냉각수 노즐을 통해 주입된 경우 관입을 예측치 대비 실측치

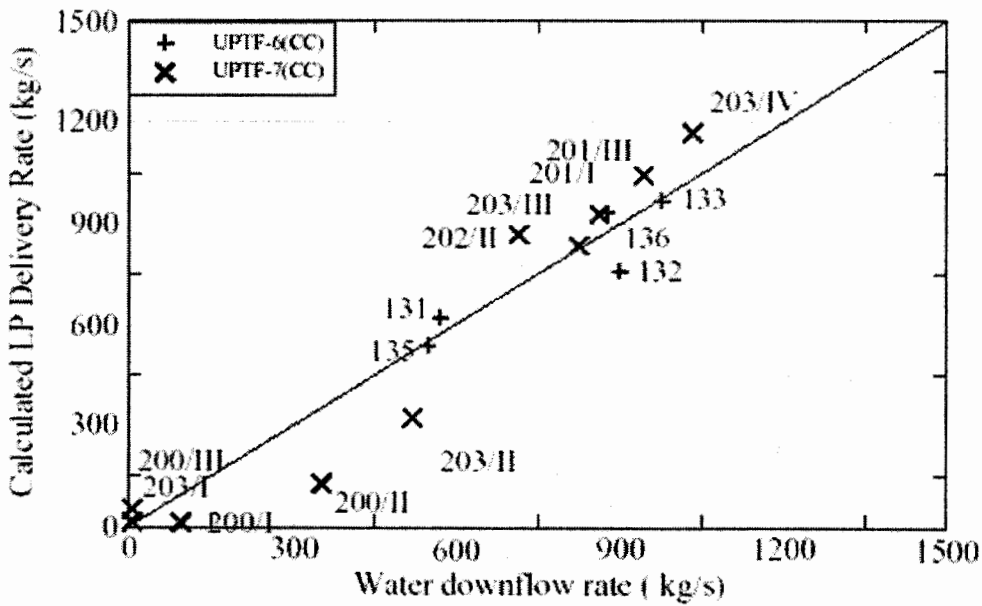


그림 35 UPTF Test 6,7에 대한 냉각수 관입을 예측치 대비 실측치

4. TRACE 코드의 증기응축 모델 평가

TRAC 코드는 증기와 물의 경계면에서 다음의 질량수송방정식을 사용하고 있다.(그림36) UPTF 실험 모사시 증기 온도는 거의 포화온도이므로 물과 증기의 경계로 부터의 질량수송은 경계에서 물로의 열전달을 통해 계산된다. 따라서 경계에서 물로의 열전달은 경계면적(interfacial area)에 따른 영향이 매우 크게 된다. TRAC 코드에서의 경계면적 계산은 유동패턴(Flow pattern)에 따라 다르게 계산되며 유동패턴은 계산의 대상이 되는 셀에서의 Void fraction에 따라 결정된다. 그림 10에서와 같이 계산에서의 관입률이 계산되는 시점에서의 void fraction은 0.75이상이므로 나타났으며 TRAC 코드의 Flow regime map 에 따른 유동패턴 분류로는 Annular-mist 영역에 해당한다.

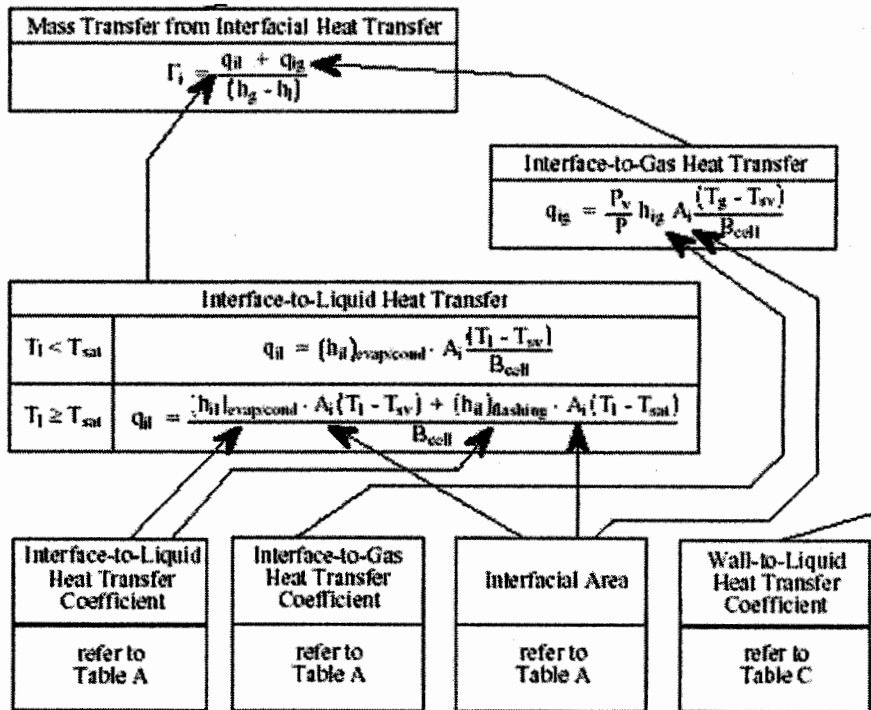


그림 36 TRAC 코드의 증기와 물 경계면에서의 질량수송방정식 상관도

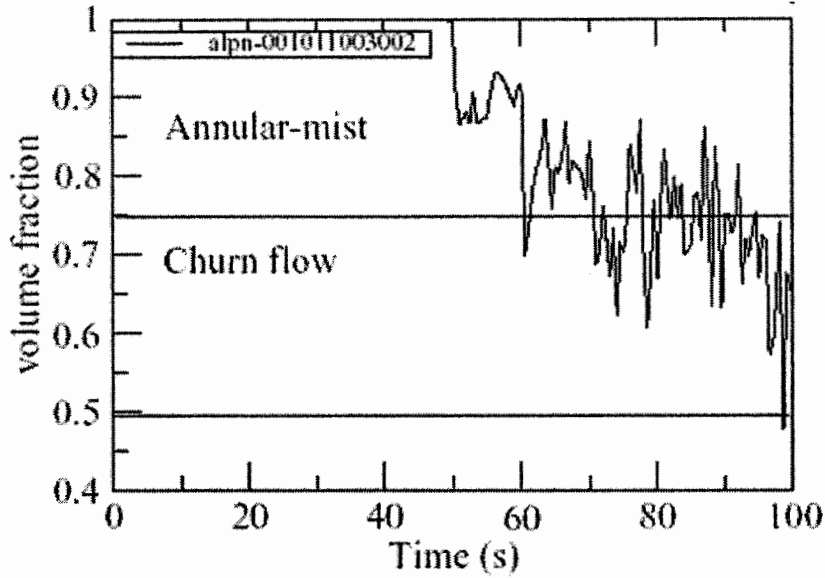


그림 37 저온관과 연결된 강수관쪽 셀의 Void Fraction

Annular-mist 유동영역에서의 경계면적 계산은 film 영역과 droplet 영역을 중첩하여 아래식과 같이 계산된다.

$$A_i = A_{i,am} = (1 - W_f) \cdot (A_{i,drop} + A_{i,film}) + W_f \cdot A_{i,drop,max}$$

where

$$W_f = \begin{cases} 0 & \max(V_l, V_g) < 10V_c \\ 0.5(\max(V_l, V_g) / V_c) - 5 & 10V_c < \max(V_l, V_g) < 12V_c \\ 1 & \max(V_l, V_g) > 12V_c \end{cases}$$

for the critical velocity

$$V_c = \left[\frac{g\sigma(\rho_l - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{1/4}$$

위식에서는 다음의 ASME steam Table에서 권고된 표면장력 상관식이 사용된다.

$$\text{At } 273.14 \text{ K} \leq T_{sat} \leq 582.435 \text{ K}$$

$$\sigma = 0.2358 \left(1 - 0.625 \frac{647.15 - T_{sat}}{647.15} \right) \left(\frac{647.15 - T_{sat}}{647.15} \right)^{1.256}$$

또한 계산시 대상 셀에서의 증기 및 물의 밀도는 그림 38과 같이 계산되므로 임계속도(Critical velocity)는 그림 39와 같이 나타난다. 건전 저온관 1번 부근에서의 횡방향 및 종방향 증기속도는 40m/s 이상으로 경계면적계산식에서 사용되는 droplet 가중치는 1이 되고 따라서 아래의 식을 통해 최대 droplet 경계면적이 계산된다.

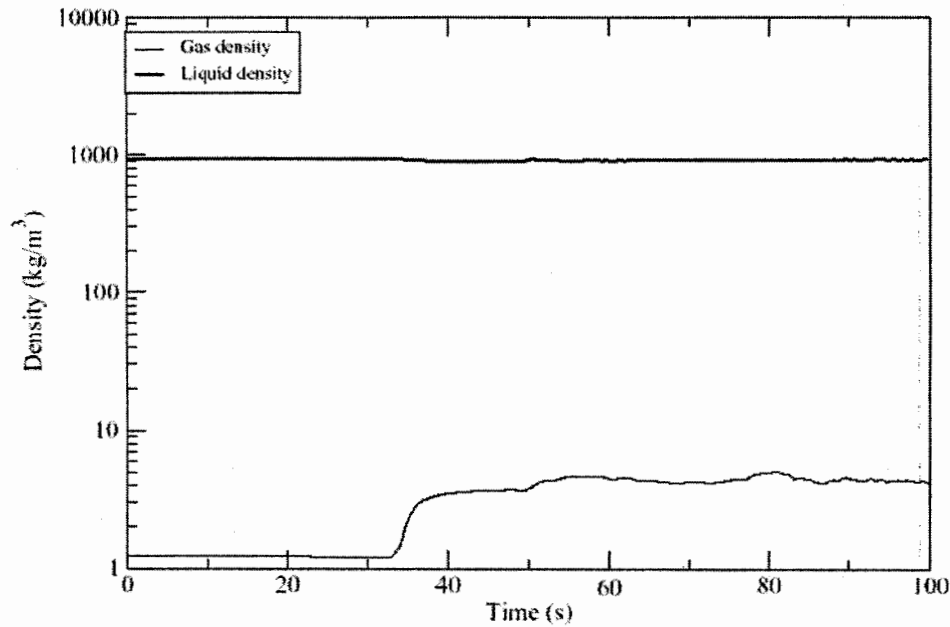


그림 38 대상 셀에서의 증기 및 물의 밀도

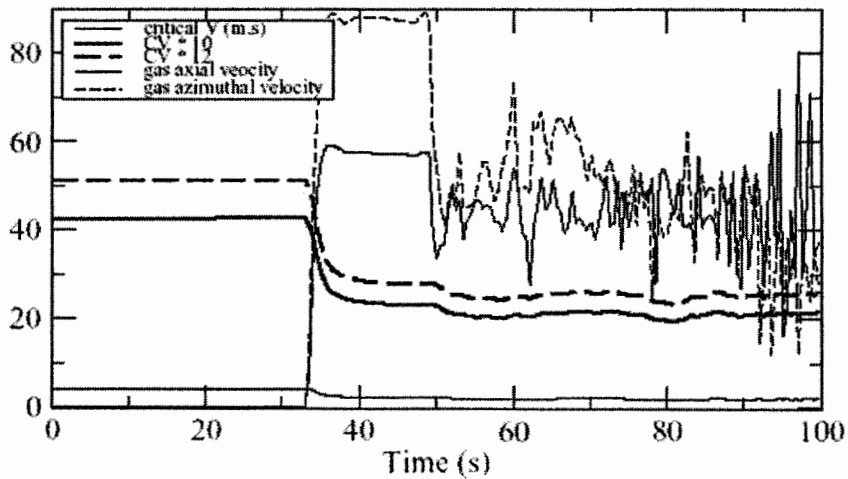


그림 39 임계 속도 및 셀의 횡방향 및 종방향 증기속도

$$A_{i,droplet,max} = B_{cell} \cdot \frac{6(1-\alpha)}{D_d}$$

where

B_{cell} = cell volume

α = cell void fraction

D_d = the Sauter mean droplet diameter

TRACE 코드에서는 2 종류의 droplet diameter 상관식 중 작은 것을 취하여 droplet diameter로 사용한다. 하나는 Kataoka의 상관식(Dd1)이며[16] 다른 하나는 Kitscha and Kocamustafagullari의 상관식(Dd2)을[17] 사용한다.

$$D_{d1} = (796e-3) \cdot \frac{\sigma}{\rho_g (\alpha V_g)^2} \text{Re}_g^{2/3} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{-1/3} \left(\frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{2/3}$$

$$D_{d2} = 0.254 L_0 \left[-0.13 \text{We}_m + \sqrt{16 + (0.13 \text{We}_m)^2} \right]$$

where the Reynolds number and Weber number are given by

$$\text{Re}_g = \frac{\rho_g \alpha V_g D_h}{\mu_g}$$

$$\text{We}_m = \frac{\rho_g (\alpha V_g)^2 L_0}{\sigma}$$

where Laplace coefficient L_0 defined as,

$$L_0 = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)}}$$

계산시 셀에서의 증기속도는 그림 40과 같이 대략 50m/s에서 70m/s의 범위를 갖는다. 이때의 Reynolds 수는 4.5e+6 to 6.4e+6 정도로 계산되며 Weber 수는 280에서 540의 영역을 갖게 된다. 두 상관식을 사용한 droplet diameter는 두 번째 상관식에서의 droplet diameter가 작게 계산되며 따라서 두 번째 droplet diameter 상관식이 Sauter mean diameter 로 사용되게 된다.

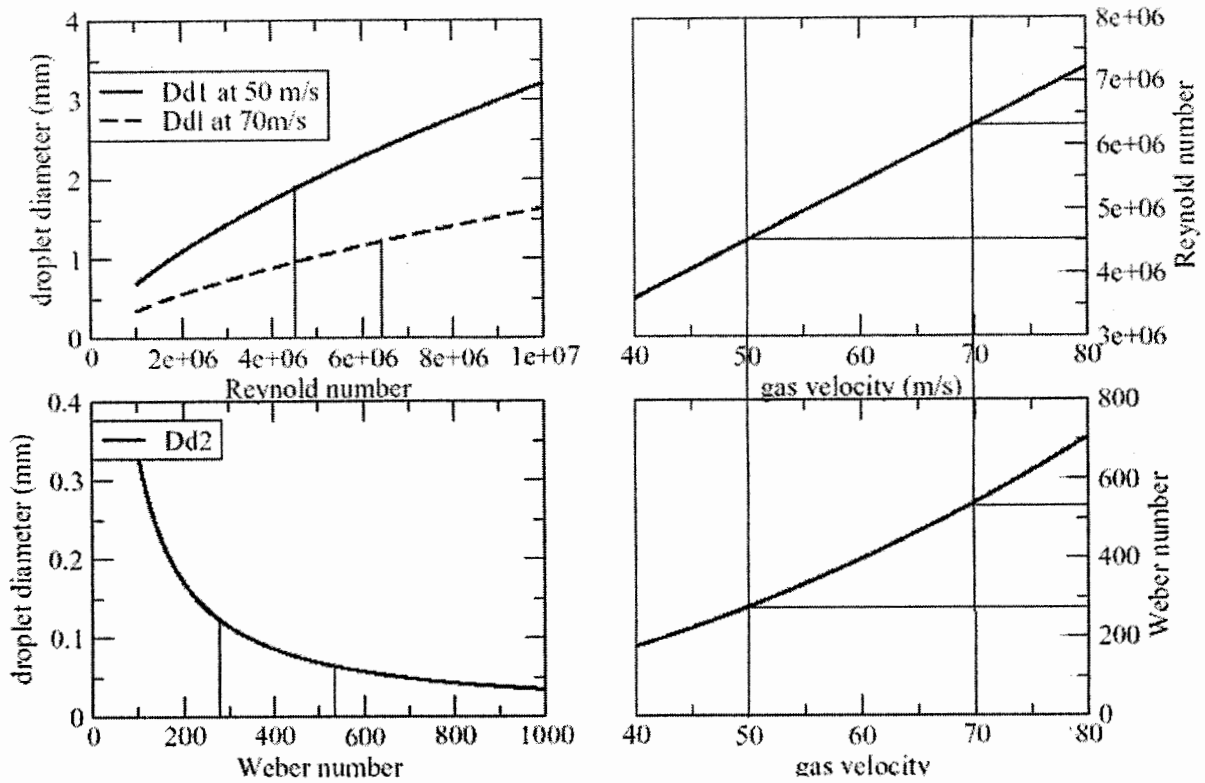


그림 40 증기 속도에 따른 Reynold 수 및 Weber 수

실험결과를 살펴보면 강수관으로 들어오는 냉각수는 상부 강수관에서 slug를 형성하고 이러한 slug가 하부 플레넘으로 관입되는 것을 확인할 수 있다. 그러나

TRAC 코드는 강수관 상부의 유동패턴을 Annular-mist로 예측하게 된다. 게다가 전술된 경계면적에 따른 경계에서의 질량전달과정에서 살펴본 바와 같이 저온관을 통해 강수관으로 주입되는 냉각수는 film 형성 없이 모두 작은 물방울 (droplet)으로 가정된다. 결과적으로 물방울로 계산된 상태에서는 경계면적이 실제 Slug에서의 경계면적보다 크게 예측되며 이는 과도한 증기응축으로 계산되는 것을 확인할 수 있었다.

III. APR-1400 원전의 TRACE 코드 입력자료 개발

1. 입력자료 개발

기존 신형경수로 1400 원전에 대한 TRACE 코드 입력자료에 대한 적절성을 검토하고 대형냉각재상실 사고해석을 위한 신뢰성 있는 입력자료로 개선하기위하여 기존 입력자료를 분석 검토하였다.

현재 사용되고 있는 신형경수로 1400 TRACE 입력자료는 3차원 원자로용기, 1차 및 2차측이 포함된 2기의 증기발생기, 주급수배관, 이코노마이저, 2개의 고온관 및 4개의 저온관 및 4개의 안전주입탱크 및 안전주입펌프를 포함한 4 Train 의 안전주입배관으로 구성된다. 개략적인 TRACE 코드의 신형경수로 1400 원전의 모델링은 그림 41과 같다.

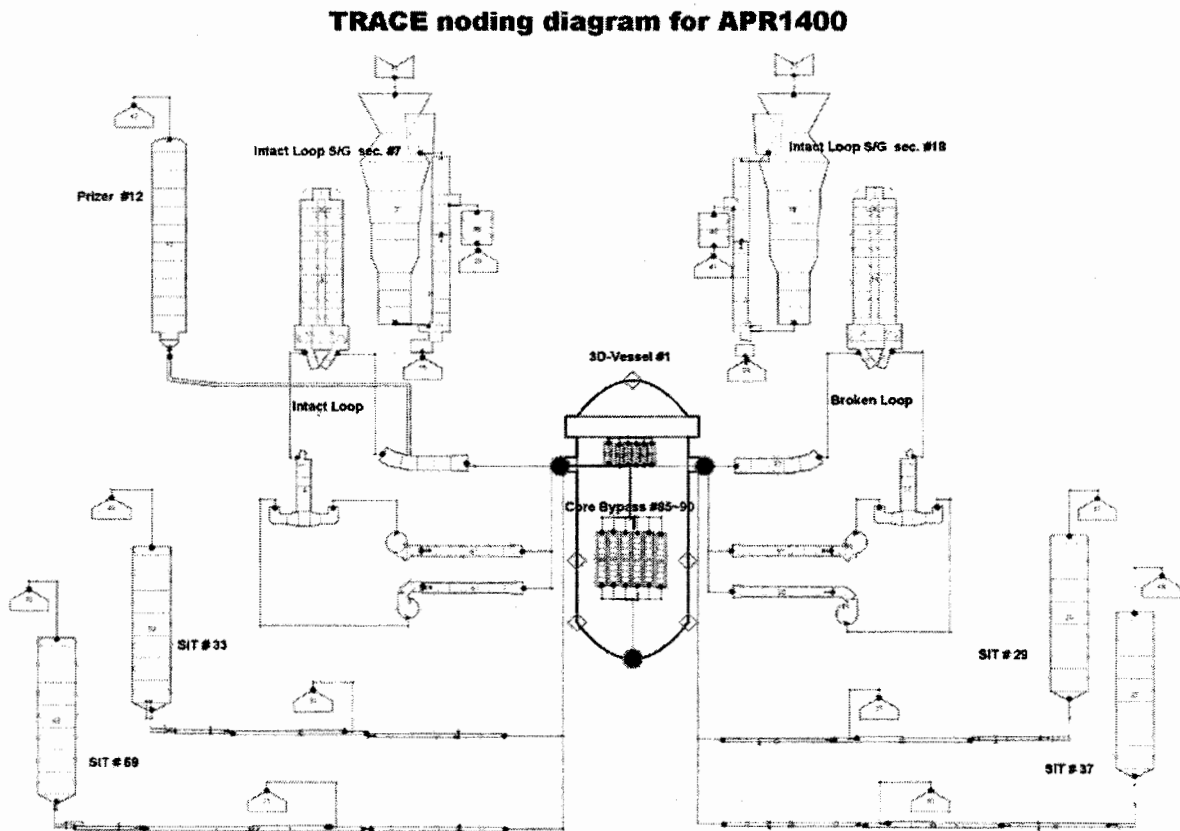


그림 41 신형경수로 1400에 대한 TRACE 모델링 개략도

3차원 원자로용기는 4개의 반경방향 링, 24개의 축방향 레벨(level), 6개의 원주방향 섹터(sector)로 구성된다. 고온관과 저온관은 모두 18번째 축방향 레벨에 연결되며 4개의 DVI 노즐은 20번째 축방향 레벨에 연결된다.

정상상태 입력자료에서는 신형경수로 1400 원전이 102% 출력으로 운전되는 상황을 모사한다. 과도상태 입력자료에서는 4개의 저온관중 하나가 완전 파손되고 가압기의 압력이 10.72Mpa 이하로 떨어져 4개의 안전주입탱크(SIT)로부터 냉각수가 주입된다. SIT 기동 40초 후 2 Train의 안전주입펌프가 작동된다. 이러한 시나리오에 따라 신형경수로 1400에서의 대형냉각재상실사고에 대한 해석이 수행되었다.

기존 신형경수로 1400 원전에 대한 TRACE 정상상태 계산결과를 APR1400 SSAR Sec 6.3 및 RELAP5 gamma 코드 계산결과와[18] 비교 검토하였다. 비교 결과 표 11과 같은 대부분의 정상상태 조건은 동일 또는 유사하였으나 증기발생기 2차측 물 재고량 및 주급수 수온에서 차이를 보였다.

표 11 APR 1400 원전의 정상상태 조건

| Parameters | SSAR | R5-gamma | Current input |
|-----------------------------------|---------|------------|---------------|
| Power (MW thermal) | 4062.66 | 4062.66 | 4062.7 |
| Primary system P.(MPa) | 15.51 | 15.5137 | 16.1 |
| Hot-leg Temp. (K) | 597.05 | 597.82 | 598.82 |
| Cold-leg Temp. (K) | 563.75 | 564.19 | 564.94 |
| RCS loop flow rate (kg/s) | 21000 | 20992 | 21004 |
| Core flow rate (kg/s) | 20361 | 20359 | 21316 |
| Core bypass flow rate(kg/s) | 242.8 | 242.8 | 429.4 |
| Reactor Vessel mass inventory(kg) | | 9.3216E+04 | 1.10603E+05 |
| | | | |
| Secondary system P(MPa) | 6.89 | 6.89591 | 6.8076 |
| Secondary water Temp. (K) | | 558.4 | 557.65 |
| Feedwater Temp.(K) | 505.35 | 505.37 | 556 |
| Main steam flow rate [kg/s] | 2278.8 | 2303.6 | 2292 |
| SG-A mass inventory (kg) | 98,000 | 105,370 | 53,190 |

신형경수로 1400의 원자로는 TRACE 코드에서 3차원 "Vessel" Component로 모델되었다. TRACE 코드의 사용자 매뉴얼에 따르면 "Vessel" Component 모델링 시 적절한 강수관, 하부플레넘, 노심, 상부 플레넘 영역을 결정지어 한다고 되어있다. 이러한 영역의 설정은 "Blasius interfacial drag" 모델과 같이 강수관 및 하부 플레넘 영역에서만 적용되는 모델이 있기 때문에 영역의 부적절한 설정은 모델의 사용여부와 직결된다고 할 수 있다. 확인결과 기존 입력자료에서는 이러한 원자로 용기내 강수관의 영역설정이 잘못되어 Blasius 모델이 적용이 안된 상태로 계산되고 있음을 확인할 수 있었다.

입력자료 확인결과 점검되어야 될 특이사항은 다음과 같다. 노심 우회관이 노심의 최외각에 배치되고 노심 하부에서 노심영역 위의 셀로 연결되어 있으며 이러한 노심 우회관의 유로면적 및 압력강하의 적절한 모델이 점검되어야 한다. 하부 플레넘으로 모사된 최하단 최외각 링은 유체가 흐르지 않도록 모사되어 있다. 강수관 상부의 고온과 관통 부분이 모사되지 않았다. 안전주입탱크를 모사하는 "PIPE" component 에서는 "IACC" 옵션값을 2를 사용하여 탱크의 물이 모두 빠져나간 후 질소 주입은 이루어지지 않도록 하였다.

2. 대형냉각재상실사고 예비해석

원자로용기내 강수관 영역설정 오류, 증기발생기 이차측 물 재고량 차이 및 안전주입탱크 모델링을 수정하지 않은 기존 입력자료에 대한 계산을 시도 하였다. 파단후 500초 LBLOCA 계산중 일부 계산상의 불안정한 부분이 있었다. 계산결과 첫 번째 PCT 침두는 1045K 로 계산되었으며 두 번째 침두는 1160K에서 발생되며 480초 부근에서 노심냉각이 이루어지는 것으로 계산되었다.

기존 입력자료에서 강수관 영역을 바르게 설정하고, 증기발생기 이차측의 모델을 개선하여 이차측 물 재고량을 기준 RELAP 계산에서의 유사하게 증가시켰으며 안전주입탱크를 질소가 주입될 수 있도록 입력자료를 개선하였다. 또한 정상상태 계산시 TRACE 코드의 정상상태 안정화 모듈을 사용하여 정상상태 조건을 조정하도록 하였다. 그림 42에서는 기존 입력자료와 개선된 입력자료를 이용한 계산 결과를 계산시간, 안전주입탱크 수위, 강수관, 하부 플레넘 노심 영역에서의 냉각수 체적비, 침두피복재 온도에 대하여 비교하였다.

계산결과 개선된 입력자료로 계산된 결과에서는 안전주입탱크에서 냉각수 주입이 끝나기 전까지는 질소주입이 시작되기 전까지는 강수관 및 노심의 수위가 증기응축진동으로 인하여 심한 진동을 보였다. 질소 주입이 시작된 이후 PCT는 증가를 멈추고 감소되기 시작한다. 계산 시간 면에서는 기존 입력 자료로 계산에서 발생되었던 안전주입탱크 주입이 종료시 계산시간지연 현상이 없어지면서 계산 시간 면에서는 35% 정도 개선되었다. PCT 측면에서는 개선된 입력 자료로 계산된 결과가 약 400K 정도 높았으며 노심냉각시간도 지연됨을 확인할 수 있었다. 두가지 입력 자료의 계산에서 주요한 영향을 끼치는 변화는 강수관 및 하부 플레넘에서 사용되는 "interfacial drag" 모델의 사용여부 인 것으로 판단된다.

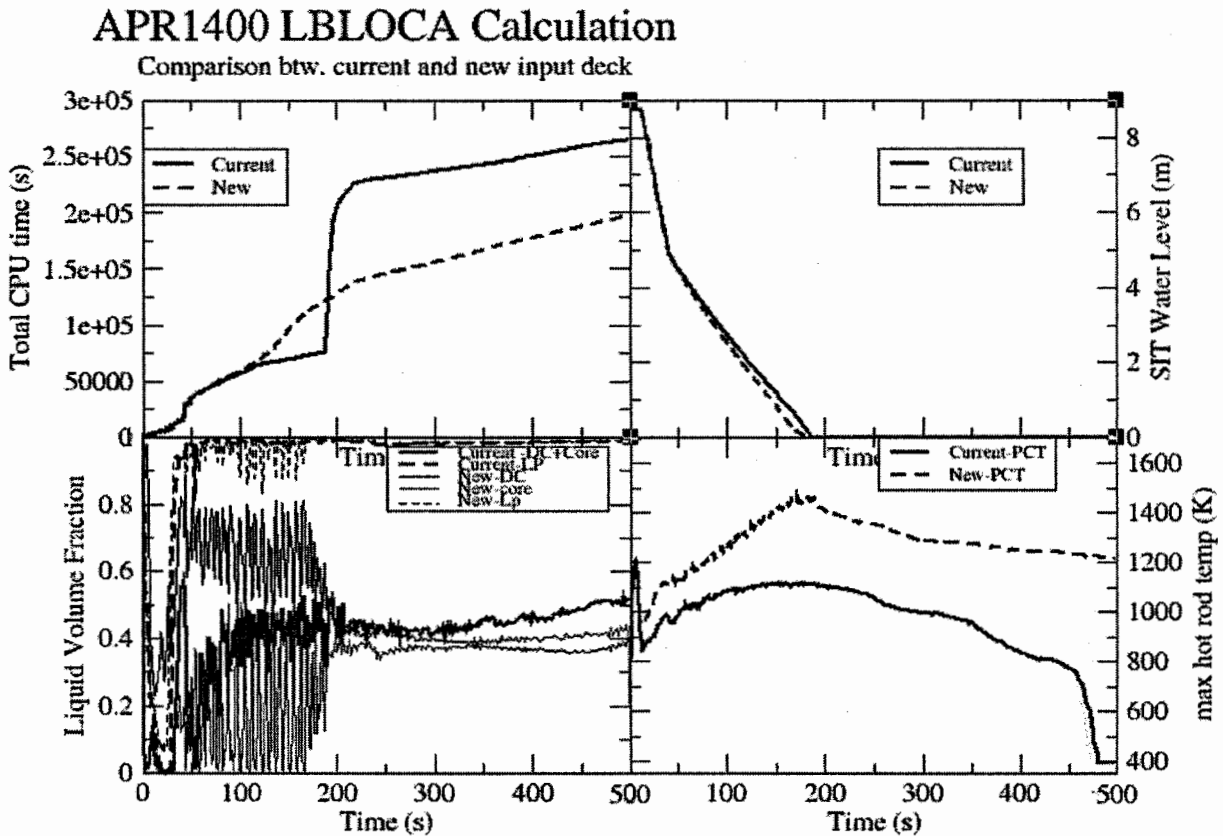


그림 42 신형경수로 1400에대한 기존입력자료 및 개선 입력자료 계산결과

IV. 결 론

TRACE 코드의 UPTF 실험에 대한 검증평가 계산이 수행되었다. UPTF Test 6,7,21에 대한 입력자료의 개발 및 계산이 수행되었다. 하부플레넘 냉각재 관입율을 실험결과와 비교한 결과 TRACE 코드는 대체로 실험결과와 유사한 관입율을 예측하였으나 UPTF Test 21(Run 272) 및 UPTF Test 5(Run 062)와 같이 과냉각도가 높은 냉각수가 주입되는 실험에서는 실험과 많은 차이를 계산하였다. TRACE 코드의 증기응축 모델에 대한 검토 및 계산결과와의 비교를 통해 TRACE 코드의 증기응축 모델에서는 강수관 상부에서의 증기응축이 과하게 예측되는 것을 확인할 수 있었다.

또한 신형경수로 1400 원전에 대한 TRACE 코드 입력자료에 대한 검토로 일부 오류 및 개선사항이 도출되었다. 이를 바탕으로 APR-1400 원전의 TRACE 코드 입력자료를 개선하였으며 기존 입력자료와 개선된 입력자료를 이용한 LBLOCA 해석을 수행하였다. 해석결과 입력자료의 정확성이 첨두피복재 온도에 미치는 영향이 매우 큰 것을 확인할 수 있었다. 본 연구를 통해 개선된 신형경수로 1400 원전의 입력자료는 이후 원전 안전성 검토를 위한 기본 입력자료로 활용될 수 있을 것이다.

수행된 TRACE 코드 평가는 신형경수로 1400(APR1400) 원자로에 대한 안전 해석에서 사용될 코드의 검증의 일환으로 수행되었다. 다차원 코드인 TRACE의 개별실험에 대한 예측능력의 평가 결과로 APR1400 안전해석에서의 고려되어야 할 코드의 특성이 파악되었다. 위 결과들은 APR1400 사고해석분야 검증해석의 기준 자료로 활용될 것이다.

개별실험에 대한 예측능력 평가와 병행된 신형경수로 1400의 TRACE 코드 입력자료의 검토 및 개선을 통하여 독립 규제검증용 기준 입력자료가 생산되었으며 추후 신형경수로 1400 원전에 대한 안전성 확인 자료로 사용될 것이다.

V. 참고 문헌

- [1] NRC, Reactor Safety Issues Resolved by the 2D/3D Program, MUREG/IA-0127, 1993. 7
- [2] GRS, UPTF Test No. 5 test data report : R515/87/16
- [3] GRS, UPTF Test No. 6 Test data report, U9/316/88/18, 1988
- [4] GRS, UPTF Test No. 7 Test summary and data report, E314/90/003, U9/316/89/14, 1989
- [5] GRS, UPTF Test No. 21 Test summary and data report, E314/90/16, 1990
- [6] GRS, UPTF Test No. 25 Test summary and data report, E314/90/13, 1990
- [7] MPR Associates, INC., Summary of Results from the UPTF Downcomer Separate Effects Tests, Comparison to Previous Scaled Tests, and Application to U.S. Pressurized Water Reactors, MPR-1163, 1990. 7
- [8] KWU, UPTF Test Instrumentation/Measurement System Identification/ Engineering Units and Computed Parameters, R515/85/23, 1985. 9
- [9] KWU, UPTF : program and System Description, U9/414/88/023, 1988. 10
- [10] LANL, Summary of Cold-leg Flow Phenomena Observed in UPTF and CCTF Tests and TRAC Posttest Analysis, LA-CP-91-332, 1991. 9
- [11] Mullen, E.B., Stumpf, H.J., and Siebe, D.A., Summary of Downcomer Injection Phenomena for UPTF and TRAC Post-test Analysis, Los Alamos National Laboratory, LA-CP-92-188, 1992. 5
- [12] Siebe, D.A., and Stumpf, H.J., Posttest Analysis of the Upper Plenum Test Facility Downcomer Separate Effects Tests with TRAC-PF1/MOD1 and MOD2, Los Alamos National Laboratory, LA-CP-90-299, 1990. 7
- [13] H. Glaeser and H. Karwat, The contribution of UPTF experiments to resolve some scale-up uncertainties in countercurrent two phase flow, Nuclear Engineering and Design 145(1993)63-84, 1993

- [14] J. Liebert and R. Emmerling, UPTF experiment Flow phenomena during full-scale loop seal clearing of a PWR, Nuclear Engineering and Design 179(1998)51-64, 1998
- [15] Horst Glaeser, Downcomer and tie plate countercurrent flow in the Upper Plenum Test Facility (UPTF), Nuclear Engineering and Design 133(1992)259-283, 1992
- [16] I. Kataoka, M. Ishii, and K. Mishima, Generation and Size Distribution of Droplet in Annular Two-Phase Flow, Trans. ASME, J. Fluid Engineering, 105, 230-238(1983)
- [17] J. Kitscha and G. Kocamustafaogullari, Breakup Criteria for Fluid Particles, Int. J. Multiphase Flow, 15, 573-588, 1989
- [18] 설광원, 차세대원자로 관련 미국 INEEL 공동연구사업 참여 귀국보고서, KINS/DR-765, 2000, 12

부 록 Avscript 기능 개선 및 사용자 설명서

TRAC 코드에서 계산된 결과를 효과적으로 확인할 수 있는 프로그램으로 Acgrace가 사용된다. Acgrace는 TRAC계산 결과파일(.xtv)로부터 분석을 위해 필요한 변수의 추출 및 그래프를 생산 할 수 있으며 이를 PDF 파일등으로 변환 시킬 수 있는 일종의 후처리기(Postprocessor) 이다. 하나의 계산 수행을 위해서라면 TRAC 계산후 Acgrace를 사용하여 수작업 분석을 수행하는 것이 큰 문제가 되지 않는다. 그러나 본 연구나 기타 분석연구의 경우와 같이 많은 실험을 계산하여 유사한 변수를 추출하여 검토하거나, 동일한 입력자료를 가지고 민감도 분석을 수행할 경우 계산수행의 숫자 만큼 동일한 작업을 반복하지 않으면 안 된다. TRAC 코드의 실행 및 Acgrace를 통한 그래프 작성 등의 반복적인 작업을 자동화 시켜 분석시간을 절약하고 분석을 정형화 및 효율화 시킬 수 있는 "Script"가 바로 "Avscript"이다.

현재까지 배포된 Avscript는 하나의 페이지에 하나의 그래프(여러개의 계열)만을 작성할 수 있도록 개발되어 있었다. 본 연구에서는 하나의 페이지에서 여러개의 그래프(예, 질량, 수위, 압력 등등)을 작성할 수 있는 기능 즉 시간에 따른 계통의 압력, 온도, 질량, 재고량 변화를 종합적으로 확인할 수 있는 기능이 필요하게 되었다.

Avscript Ver. 1.0 대한 다중그래프 기능이 가능하도록 Perl Language로 작성된 Avscript를 분석 후 기능을 개선하였으며 기존 사용자 매뉴얼과 차이점을 "개선 Avscript 사용자 설명서"와 같이 정리하였다.

또한 개선된 Avscript를 사용하여 본 연구에서 사용된 UPTF 실험 계산을 일괄계산 할 수 있도록 정리되었다. 개선된 Avscript를 사용하면 UPTF Test 5,6,7,21,25 계산을 우선 수행하게 되고 계산된 결과에서 미리 결정된 실험별 변수를 추출하여 다중 그래프를 생성하여 그 결과를 PDF 파일로 저장하게 된다.

다음은 개선 Avscript에 대한 해당 부분 사용자 설명서 개정 부분이다.

[개선 Avscript 사용자 설명서]

Modification of AVscript for Multi-Graph(Figure) on a Page

Jan. 2004

1. Purpose

AVscript ver 1.0 was developed to draw a figure on a page composing the Acgrace batch file. In many assessment and analysis works, multi-graph(figure) comparison is need to review several system parameters at the same time, such as system pressure, temperature and inventory etc.

Main goal of this Version is to add multi-graph function on the present version of Avscript (Ver. 1.0 May 2002) without modification of input structure for User input, which give compatibility with old versions input.

2. Basic modification concept

AVcript version 1.0 input is composed with Figure definition, Path Definition and Case definition files.

Path definition file contains path for executables (TRAC, RELAP, etc.) , top , output and figures including different kind of version of executables. And Case definition file contains information on data sets which be placed on the certain figure. For the Figure definition file, it has Page information such as title, subtitle, page orientation, and figure=s viewport locations as well as figure information including x,y axis title, size and legend location and so on.

Basic concept for modification is to using Acgrace command ARRANGE for making several figures on a page and FOCUS for activate graph where actual cases(data set) will be placed. If that the page information need to compose multigraph can be collected to page definition file, named avpgdefs.txt. As long as user prepare the page definition file at top directory Avscript change it's mode to multi-graph. Otherwise, input is same as old version.

3. Page Definition

Following parameters will be used for the page definition.

PageID

This field denotes a name for a page the user wishes to generate. It must be equivalent to a onpageID used in the figure definitions input file. This parameter should not be repeated in this file.

Row num

This field represent how many figures will be stacked at vertical direction, With following parameter col num , Row num multiplied by Col num figures will be placed on this page.

Col num

This field represent how many figures will be stacked horizontally.

Margin

Left, right, top and bottom offset from the page edge.

Cgap size

the relative gap spacing between columns

gap size

the relative gap spacing between rows

Orientation

The final column is the orientation field. This determines whether the page is to be printed in Portrait or Landscape mode. Values of P or L are the only allowable values . Note: During multi-graph mode orientation field at Figure definition file is not used.

4. Figure Definition

On multi-graph mode, two more parameters should be added at the each end of column.

onpageID

Page ID where this figure will be placed. It must be equivalent to a pageID used in the page definitions input file.

graph_num

location of figure on the page. This parameter should not be repeated in this file. ex.) 0, 1, 2, 3

Note: these two additional parameters will not needed on normal mode.

5. Path definition and case definition

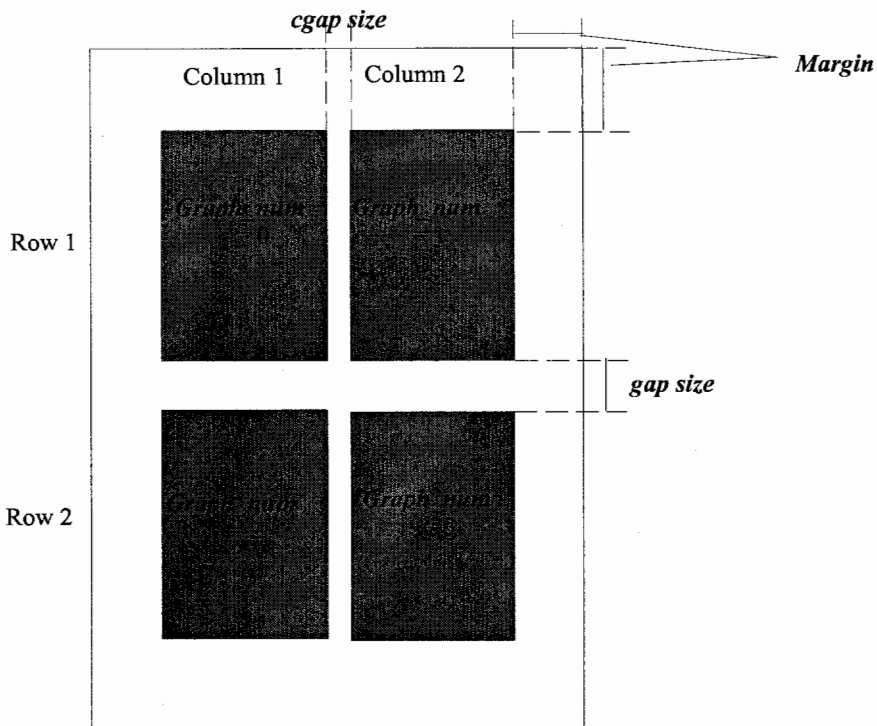
No modification.

6. Graphical definition of page parameters.

For the case

row num = 2,

col num = 2



7. Application example.

A. column array.(When row num = 1)

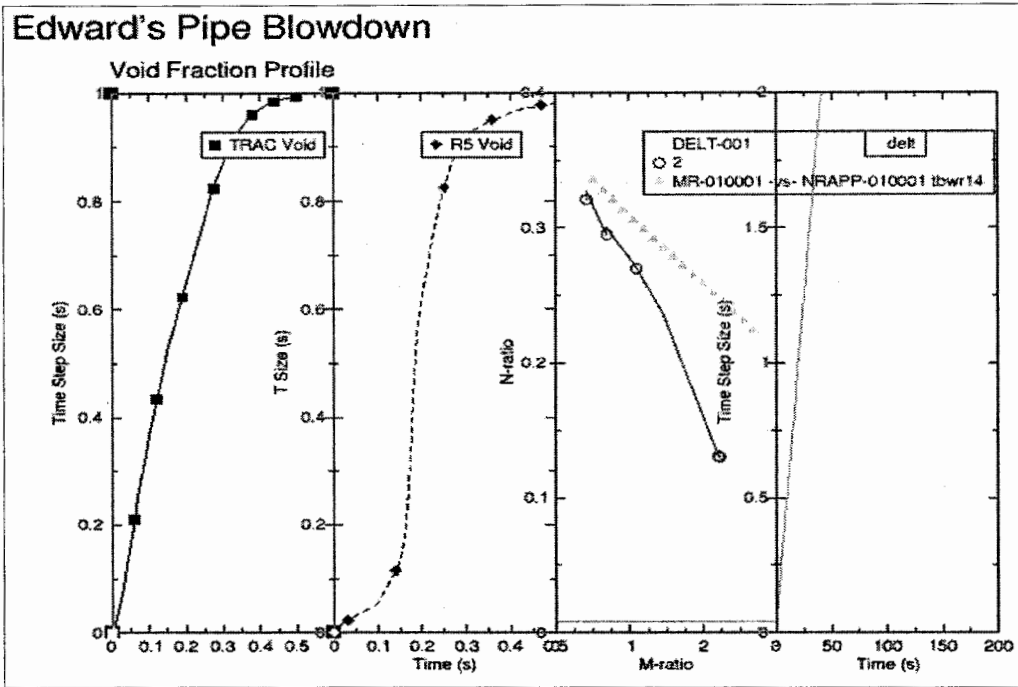
- avpgdefs.txt

| <i>PagelD</i> | <i>row num</i> | <i>col num</i> | <i>margin</i> | <i>cgap size</i> | <i>gap size</i> | <i>orientation</i> |
|---------------|----------------|----------------|---------------|------------------|-----------------|--------------------|
| <i>Pg1</i> | <i>1</i> | <i>4</i> | <i>0.15</i> | <i>0.0</i> | <i>0.0</i> | <i>L</i> |
| <i>end</i> | | | | | | |

- avfigdefs.txt

| <i>FigID...</i> | <i>Viewx</i> | <i>viewxm</i> | <i>viewy</i> | <i>viewym</i> | <i>xlegend</i> | <i>ylegend..</i> | <i>onpagelD</i> | <i>graph_num</i> |
|-----------------|--------------|---------------|--------------|---------------|----------------|------------------|-----------------|------------------|
| | <i>min</i> | <i>ax</i> | <i>min</i> | <i>ax...</i> | | | | |
| <i>Fig1</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>0.25</i> | <i>0.8</i> | <i>Pg1</i> | <i>0</i> |
| <i>Fig2</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>Pg1</i> | <i>1</i> |
| <i>Fig3</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>Pg1</i> | <i>2</i> |
| <i>Fig4</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>Pg1</i> | <i>3</i> |
| <i>end</i> | | | | | | | | |

- output



note: if user input the value of viewxmin, viewxmax, viewymin, viewymax as >0' not >0.0', then location of graphs will set automatically,

and if x, y location of legend set >0' then each location will set automatically using first graph=s legend location.

B. Row array.(When col num = 1)

- avpgdefs.txt

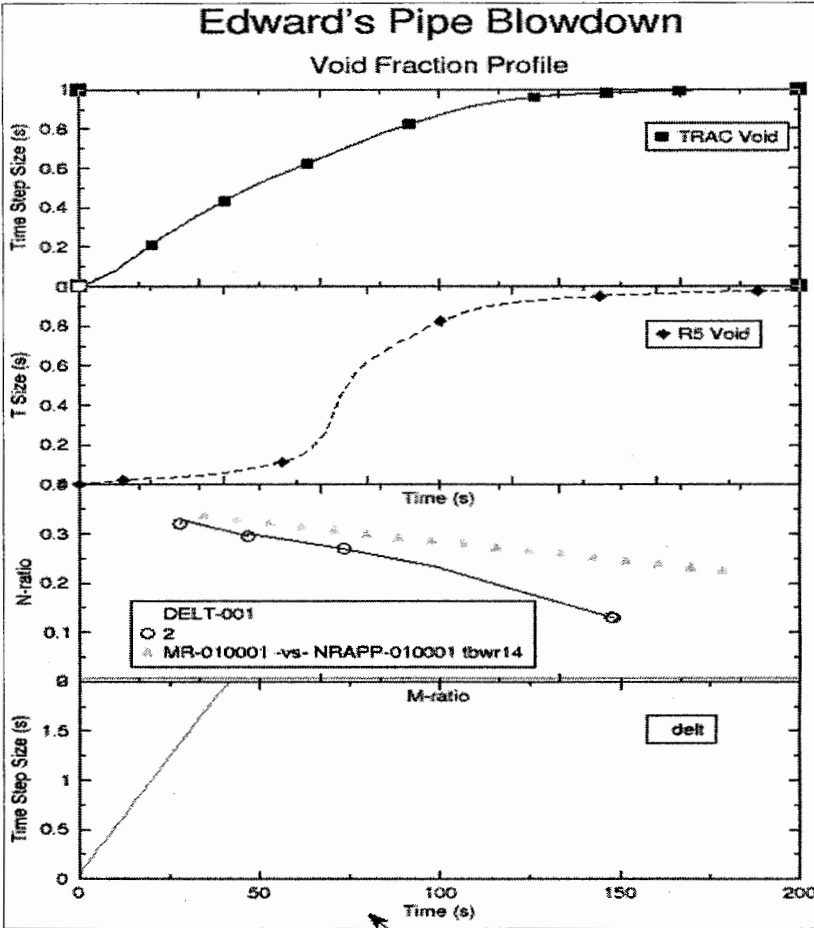
| PageID | row num | col num | margin | cgap size | gap size | orientation |
|--------|---------|---------|--------|-----------|----------|-------------|
| Pg1 | 4 | 1 | 0.15 | 0.0 | 0.0 | P |
| end | | | | | | |

- avfigdefs.txt

| FigID... | Viewx min | viewxm ax | viewy min | viewym ax... | xlegend | ylegend.. | onpageID | graph_num |
|----------|-----------|-----------|-----------|--------------|---------|-----------|----------|-----------|
| | | | | | | | | |

| | | | | | | | | |
|------|---|---|---|---|-----|-----|-----|---|
| Fig1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.7 | 1.1 | Pg1 | 0 |
| Fig2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | Pg1 | 1 |
| Fig3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.2 | 0.5 | Pg1 | 2 |
| Fig4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | Pg1 | 3 |
| end | | | | | | | | |

- output



note: By assign xlegend, ylegend with specific value, user may locate the legend location as desired.

C. General array.

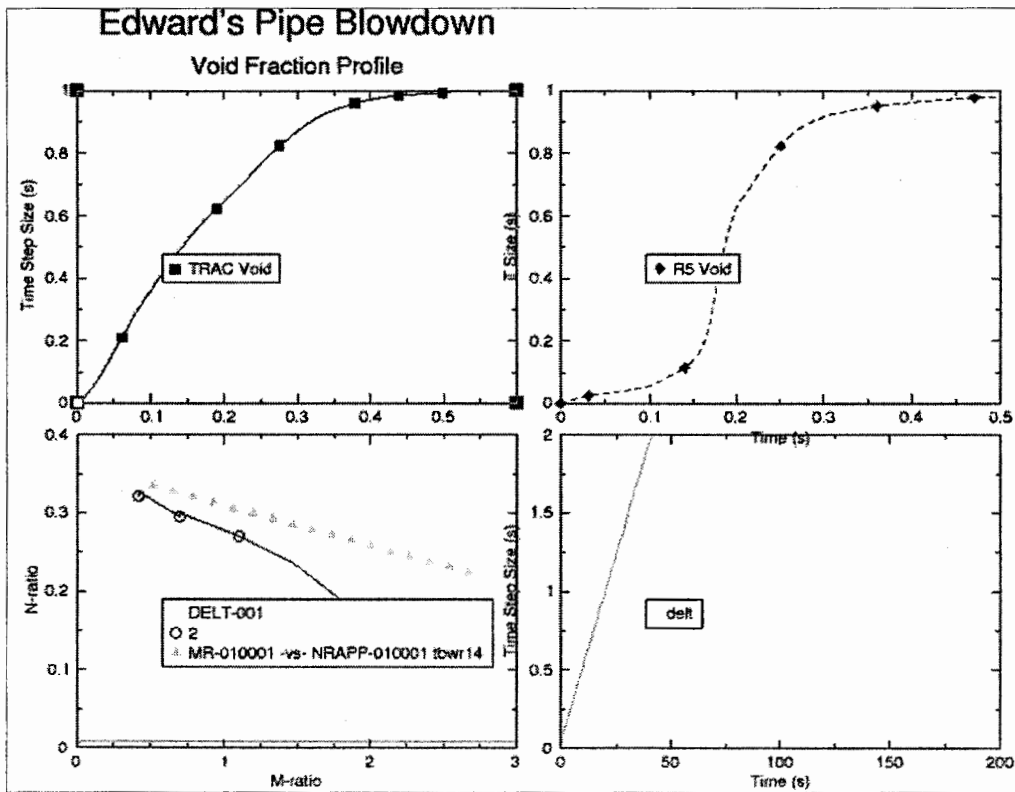
- avpgdefs.txt

| PageID | row num | col num | margin | cgap size | gap size | orientation |
|--------|---------|---------|--------|-----------|----------|-------------|
| Pg1 | 2 | 2 | 0.15 | 0.1 | 0.1 | L |
| end | | | | | | |

- avfigdefs.txt

| FigID... | Viewx min | viewxm ax | viewy min | viewym ax... | xlegend | ylegend.. | onpageID | graph_num |
|----------|--------------|--------------|--------------|-----------------|---------|-----------|----------|-----------|
| Fig1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.2 | 0.7 | Pg1 | 0 |
| Fig2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | Pg1 | 1 |
| Fig3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | Pg1 | 2 |
| Fig4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | Pg1 | 3 |
| end | | | | | | | | |

- output



서 지 정 보 양 식

| | | | |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------------------|
| 수행기관보고서번호 | 위탁기관보고서번호 | | |
| KINS/RR-281 | | | |
| 제목/부제 | 원자로용기직접주입 열수력 해석을 위한 TRACE 코드 평가 | | |
| 연구책임자 및 부서명 | 대과제 김효정 (규제기술연구부), 세부과제 김인구 (원자력안전연구실) | | |
| 연구자 및 부서명 | 신안동(원자로안전해석실) | | |
| 발행지 | 대전 | 발행기관 | 한국원자력안전기술원 |
| 발행일 | 2004. 12. | | |
| 페이지 | 86 p. | 도표 | 유 (O), 무 () |
| 크기 | 29.7 cm | | |
| 참고사항 | '04년도 원자력증장기연구사업 | | |
| 비밀여부 | 공개(O), 비공개() | 보고서 종류 | 연구보고서 |
| 연구위탁기관 | 과학기술부 | 계약 번호 | |
| 초록 | <p>대형냉각재상실사고 시 강수부에서는 복잡한 3차원 유동이 발생하므로, 강수부에서의 열수력 현상을 현실적으로 예측하기 위해서 다차원 해석코드의 사용이 필요하다. 본 연구에서는 DVI와 관련된 UPTF 실험결과를 사용하여 현재 미국 핵규제위원회의 검증코드로 개발 중이며 다차원 해석 능력을 보유한 TRACE 코드의 열수력학적 예측 능력을 평가하는데 일차적인 목적이 있다. 아울러 본 연구에서는 TRACE 코드를 이용한 검증계산을 수행하기 위해, APR-1400 대형냉각재상실사고 해석에 필요한 TRACE 코드 입력자료(Input Deck)를 개발하고자 한다.</p> <p>본 연구에서는 UPTF 실험 중 Test 6, 7, 21 에 대한 입력자료를 개발하여 TRACE 코드 평가를 수행하였다. 하부플레넘에서의 냉각재 관입율을 실험결과와 비교한 결과 TRACE 코드는 대체로 실험결과와 유사한 관입율을 예측하는 것을 알 수 있었다. 그러나 UPTF Test 21(Run 272) 및 UPTF Test 5(Run 062)와 같이 과냉각도가 높은 냉각수가 주입되는 실험에서는 TRACE 계산결과와 실험결과는 많은 차이를 보여 주었다. 이러한 문제는 TRAC 코드의 증기응축 모델이 강수관 상부에서의 증기응축을 지나치게 높게 예측하기 때문이며, 따라서 TRACE 코드의 증기응축 모델에 대한 개선이 필요함을 알 수 있었다.</p> <p>APR-1400 원전에 대한 TRACE 코드 입력자료를 개발하여 대형냉각재상실사고 예비해석을 수행하였다. 그 결과 입력자료의 정확성이 침투 핵연료피복재 온도에 미치는 영향이 매우 큰 것을 확인할 수 있었다. 이는 TRACE 코드와 같은 최적해석코드의 사용에 입력자료의 품질 보증이 중요함을 보여 준다.</p> | | |
| 주제명키워드 | APR-1400, DVI, UPTF, TRACE | | |