

BETHSY 부분충수운전 실험 6.9c를 이용한 MELCOR1.8.3 전산코드 평가

An Assessment of MELCOR 1.8.3 using BETHSY Midloop Operation Experiment 6.9c

조용진, 김인구, 이석호, 이종인
한국원자력안전기술원

요약

프랑스 CEA 실험장치인 BETHSY 실험설비에서 수행된 부분충수 운전에 대한 실험인 6.9c 실험에 대한 MELCOR 1.8.3 의 평가를 수행하였다. 이 연구는 OECD/NEA 국제공동연구인 ISP-38 로 수행되었다. 평가결과, MELCOR 1.8.3 은 부분충수운전시 잔열제거계통 상실에 대한 예측능력이 있고 원자로 냉각재 계통압력, 노심수위 등 전반적으로 거동을 잘 모의하고 있다고 판단되었다. 그러나 민감도 분석에서 도출된 결론에 의하여 상간의 운동량 전달 및 Liquid Entrainment 모델에 있어서 개선 필요성이 있는 것으로 평가되었다.

1. 서론

MELCOR 전산코드는 중대사고 분석을 위하여 개발된 전산 코드이나 기존의 사고해석코드와는 달리 비 응축성가스를 기본적으로 고려하고 있기 때문에 부분 충수 운전상태의 원자력 발전소를 모의하는데 계산상에서 큰 문제가 없을 것으로 판단되었다. 그러나 RELAP5와 비교하여 볼 때 상대적으로 계산시간이 짧다는 장점이 있는 반면 상대적으로 단순한 열수력 모델을 가지고 있기 때문에 CCFL (Counter Current Flooding Limit) 등의 복잡한 열수력현상을 모델링 할 수 없을 것이라는 예측을 할 수 있었다. 그러나 이러한 단순한 모델링이 원자력발전소의 전반적인 거동을 쉽게 예측하여 적절한 정확도와 더불어 빠른 계산결과를 줄 수 있다면 이는 심사 계산 등을 포함한 여러 가지 용도에 사용 가능할 것이라 판단되었다. 따라서 OECD/NEA에서 주관하는 ISP 38 (International Standard Problem 38) 에 참여하여 실험과의 비교를 통한 코드의 계산능력을 평가하였다.

2. 기술적 배경

2.1 MELCOR 1.8.3 전산코드 개요

MELCOR 전산코드는 중대사고 전반을 모델링할 수 있게 만들어진 중대사고 해석용 전산코드이며 모듈방식으로 구성되어 있다. 중대사고 분석에서 사용되는 여러 가지 모델을 가지고 있기 때문에 열수력학 모델은 단순하게 구성되어 있다. 이 연구에서는 IBM RISC 6000 기종을 이용하였다.

2.2 실험개요

앞절에서 언급한 바와 같이 ISP 38은 BETHSY 6.9c 실험을 이용하여 부분충수 운전시의 계통거동 및 중력급수의 효율성을 보기 위한 실험이다. 이 실험의 Sequence of Event 는 표 1 과 같다. BETHSY 실험설비는 1982 년에 건설을 시작하여 1985년부터 가동되기 시작한 실험장치로서 CATHARE 전산코드를 개발하고 Symptom Oriented EOP 개발 및 Accident Management 관련된 현상이해를 위한 실험장치이다. 기본모델은 프랑스 원자력발전소 설계회사인 Framatome에서 설계한 3-loop 원자력 발전소이며 높이는 실제 원자력 발전소 대비 1:1 이며 부피는 1:100 축적으로 설계되었다. 그 동안 냉각재 상실사고 및 Non-LOCA 의 여러 가지 사고 전개과정에 대하여 실험이 수행되어 왔으며 최근에는 저출력 정지운전중 파도현상에 대한 실험들이 수행되었다. (Test 6.9c, Test 6.9e, Test 6.9f 등)

3. 입력자료 작성 및 경계/초기 조건

앞절에서 언급한 바와 같이 ISP 38은 BETHSY 6.9c 실험을 이용하여 부분 충수 운전시의 계통거동 및 중력급수의 효율성을 보기 위한 실험이다. 이 실험의 평가를 위하여 BETHSY 실험장치의 Nodalization 을 수행하였다. Nodalization 은 가능한한 단순화 하였으며 그 내용은 그림 1 과 같다.

원자로용기 모델은 이 실험에서 열원으로서의 위치를 차지하고 있게 된다. MELCOR은 증대사고 현상 해석 코드로서 열수력 모델로 단순한 모델을 채택하고 있기 때문에 입력자료도 단순화하는 것이 필요하다. 경험상, 복잡한 Nodalization은 그만큼 정확할 수도 있으나 MELCOR의 경우 불필요한 Error를 발생시켜 계산시간이 많이 필요하게 된다. 따라서 단순한 Nodalization 을 채택하였다. CVH Package 입력 자료로는 Downcorner 1 Control Volume, Lower Plenum 및 Lower Head 1 Control Volume, 원자로심 및 우회유로 각각 1 Control Volume, Upper Plenum, Upper Plenum 및 Upper Head 1 Control Volume 으로 모델링하였다.

원자로 냉각재계통 모델은 원자로용기 내 냉각수 거동에 대한 경계조건을 제공해 주는 만큼 높이차이 (Elevation Change) 를 중요시하여 입력자료를 작성하였다. 여기에도 단순한 Nodalization이 적용되었다. 특이한 사항으로 저온관 Loop Seal을 모의하기 위하여 Intermediate Leg를 2개로 나누어 입력자료를 작성하였다. 또한 Reactor Coolant Pump는 이 실험에서 그 역할이 없기 때문에 Flow Path 의 압력손실항으로만 고려하였다. 증기발생기 이차측 모델은 이 실험의 특성상 증기발생기가 비어있는 상태에서 수행되었기 때문에 이에 대한 모델이 필요 없게 되었다. 따라서 증기발생기 U-Tube 의 이차측은 단일조건으로 고려되었다.

기타 모델로서 Heat Structure 부분은 원자로 일차냉각재계통 내에 존재하는 주요 구조물 및 용기 자체의 열 용량 등이 중요하기 때문에 원자로용기, 파이프, Baffle, 등을 모델 하였으며 Manway는 이 실험에서의 경계조건중의 하나이며 가장 중요한 현상중의 하나인 이상유동 마찰계수 (Two Phase Friction Factor) 에 의한 Liquid Entrainment 에 중요한 입력자료이다. 이것은 실험보고서에 기술되어 있는 것과 같이 Flow Path로 모델링을 하였으며 이는 민감도 분석 항목중의 하나로 추가분석이 수행되었다. 중력급수는 유량 경계조건으로 모델링하였다. BETHSY 실험에서는 Upper Plenum 의 압력에 따라 주입되는 유량에 차이가 발생하나 모델링이 복잡하여 단순히 유량경계조건으로 모델하였다.

상기와 같은 모델을 이용하여 정상상태 모의를 수행하였다. MELCOR은 특성상 정상상태 모의를 위한 특별한 모델이 없기 때문에 실험의 초기조건을 맞추기 위하여 직접 입력자료를 조절하여 초기조건을 맞추었다.

4. 계산 결과 및 민감도 분석

실험과 같이 0 초에서부터 1000초까지는 정상상태를 조성하기 위한 계산을 수행하였고 이후 1000 초부터 히터의 출력을 138 Kw 로 상승시켜 계산을 수행하였다. 결과에서는 정상상태 부분은 제외하고 히터출력 상승시점을 0 초로 하여 결과를 처리하였다.

4.1 기본계산

압력 변화 단계로서 압력변화에 의하여 모든 변수들이 조절되는 단계로서 이 압력은 두 부분의 Manway를 통한 누설에 의하여 큰 영향을 받게 된다. 이러한 압력변화는 최종적으로 사고 전 과정에 영향을 미칠 수 있고 가장 전산코드사이에 차이가 큰 기간이다.

0 초에 히터의 출력이 증가가 시작되고 이미 포화온도에 도달하여 있던 원자로용기 내의 냉각수가 비등이 시작되면서 원자로용기 수위상승에 따라 가압기 및 증기발생기 Manway를 통한 냉각재의 누설이 시작된다. 계속적인 가열에 따라 원자로용기 및 고온관의 냉각재에서 점차로 비등이 발생되면서 이상수위 (Two-Phase Mixture Level) 가 상승하게 된다. 이러한 수위 상승은 압력 방출통로가 형성되어 있는 가압기로 Liquid Entrainment를 유입되게 하며 Entrainment 들이 모여서 Liquid Plug를 형성하게 된다. 이로 인해 외부로 누설되는 기체의 유동이 제한받게 되며 일차 냉각재계통의 압력이 상승하게 된다. 또한 Intermediate Leg의 수위와 노심수위간의 수두차이로 인하여 증기발생기 Manway는 지속적으로 증가된 수위가 유지되게 된다. 또한 증기발생기 U-tube는 상대적으로 온도가 낮기 때문에 이 부분에서 증기 응축에 의한 Liquid가 생성되게 된다. 지속적으로 냉각재 누설이 계속되면서 가압기에 누적되던 냉각수 양은 지속적으로 유입되는 고온의 증기에 의하여 다시 재기화되어 가압기에서 원자로 냉각재계통의 감압을 방해하던 냉각재가 감소하기 시작한다. 또한 증기발생기에 설치되어 있는 Manway높이 이상으로 상승되어 있어서 감압을 방해하였던 냉각재는 계속적인 냉각재 누설 및 가압기의 감압방해요인이 사라짐에 따라 냉각재 수위가 Manway높이 이하로 감소하여 또 하나의 감압유로가 형성되게 된다. (그림 2 참조) 가압 및 감압으로 압력 변화단계인 초기단계에서 실험과 계산결과에 대한 비교를 해보면 계통의 전반적인 압력거동은 적절하게 예측이 되고 있으나 부분적으로 약간씩 그 차이가 발생하고 있다. 최대압력 관점에서 보면 실험에서는 실제로 최대값을 보이고 곧 압력이 감소하는 추세로 반전되는 현상을 나타내고 있으나 MELCOR를 이용한 계산에서는 가압기로 주입되는 증기와 가압기에 잔류하고 있던 액화 냉각재가 평형을 이루어 약 1000초 동안 고압상태가 지속되는 현상을 보여준다. 반면에 그

림 3 에서는 위와 같이 가압기에 액화 냉각재가 잔존하고 있는 시기에는 거의 유량이 빠져나가지 않는 것을 보여주고 있으나 실험에서는 이 시기에도 적으나마 증기는 계속적으로 빠져나가고 있는 것을 보여준다.

두 번째는 누설단계로서 가압기에 잔류하고 있던 액화된 냉각재가 모두 고갈되고 난 후 원자로용기의 냉각재 거동은 지속적인 가열로 인한 증기상태의 누설로 볼 수 있으며 특별한 현상은 없고 일반적으로 노심의 히터에서 발생된 열에 의하여 냉각재가 비등하여 증기가 발생되고 발생된 증기는 바로 가압기 Manway 또는 증기발생기 Manway를 통하여 밖으로 빠져나가는 시기이다.

이 시기에 있어서의 연료봉 피복재 온도는 앞에서 언급하였다시피 하나의 Heat Structure 로 모델링 하였기 때문에 실험 자료와 비교하는 것이 의미가 없다고 볼 수 있으며 보다 중요한 결과는 노심 수위라 할 수 있다. 노심수위는 계통전체의 초기 냉각재 재고량에 큰 영향을 받으며 또한 냉각재 계통 입력자료중 높이 차이의 정확성 직접적인 영향을 받는다. 그림 4 에서 보면 원자로 수위가 감소하는 시기는 실험에서는 4100 초에 감소하기 시작하나 MELCOR 계산에서는 4600초에서 감소하기 시작한다. 이러한 차이는 약 500초 정도로 초기 냉각수 재고량차이에서 비롯되는 것으로 판단된다. 반면 최소로 감소하는 수위는 약 1.9m 로 계산과 실험에서 동일한 결과를 보여주고 있다. 또한 감소하는 기울기 및 증가하는 기울기는 거의 유사하기 때문에 MELCOR 전산코드는 이러한 현상에 대한 예측능력이 있다고 판단된다.

세 번째는 노심 재 충수 단계로서 압력변화가 거의 없으나 중력급수에 의하여 노심의 재 충수가 적절히 이루어지는지에 대한 평가가 중요한 현상이며 이러한 재 충수 과정은 사고 완화를 위하여 중요한 현상이 된다. 앞에서 기술한 것과 같이 중력급수가 시작된 후 실험에서는 즉각적인 반응으로 원자로 노심수위가 상승하나 MELCOR계산에서는 중력급수가 시작된 후에도 약 600 초 정도 더 감소하다가 수위가 상승하게 된다. 이는 Nodalization에서 보는 바와 같이 저온관 제어체적은 Intermediate Leg의 가장 낮은 부분부터 원자로용기 입구까지를 하나의 제어체적으로 모의하였기 때문에 이 부분으로 주입되는 중력급수는 우선 이 제어체적을 모두 채우면서 수위가 원자로용기와 연결된 유로의 높이차이 보다 높아지는 시점부터 그 유로를 통하여 원자로용기로 주입되기 때문으로 판단된다. 이러한 문제는 Lumped Parameter Model 때문에 발생한다고 볼 수 있으며 MELCOR전산코드에서 발생하는 이유는 단순한 Nodalization모형을 사용하였기 때문이다. 따라서 이 부분에 대하여도 민감도분석이 필요할 것으로 판단된다.

4.2 민감도 계산

앞에서 계산한 기본계산은 여러 가지 민감도 계산 중 가장 실제에 근접한 계산결과를 제시한 것이었고 여기서는 가장 중요한 변화를 나타내었던 변수에 대한 민감도 분석 결과에 대하여 기술하였다. 이 계산 시에 가장 큰 변화를 나타내었던 위치별 입력변수의 내용은 표 2와 같다. 이 이외에 민감도 분석도 수행하였으나 다음의 경우를 제외하고는 큰 영향을 주지 않았다.

1) 가압기밀림관 MEL (Momentum Exchange Length) 민감도 분석 (민감도계산 1)

BETHSY 6.9c 실험의 평가에서 압력거동에 가장 영향을 미치는 현상은 초기 비등시기에 가압기내로 유입되는 Liquid Entrainment의 양이다. 이러한 Entrainment의 양은 국부적인 기체와 액체간의 운동량 전달에 의하여 직접적인 영향을 받으므로 MELCOR의 FL Package내 입력자료 중 가압기 부분의 입력자료의 MEL를 Default로 계산을 수행하였다. 기본계산에서는 이 부분의 입력을 0.0으로 계산을 수행하였다. 또한 유로 Option으로서 Normal Vertical Flow Path 를 사용하였다.

기본계산에서 적절히 보여주었던 압력거동은 비등시 액체와 기체간의 운동량 작용길이가 늘어남에 따라 가압기로 Entrainment되는 냉각수 양이 많아지게 되며 이에 따라 전반적인 계통내의 압력거동이 변화하게 된다. 그림 7 에서와 같이 초반 압력증가는 차이가 없으나 증가하는 압력에 의하여 앞서 기본계산에서 언급한 바와 같이 수두차이에 의하여 증기발생기 Manway방향으로 더 많은 냉각재의 유출이 계속되게 된다. 가압기내의 냉각재 질량을 보면 실험 전기간에 걸쳐서 상당히 많은 양의 물이 지속적으로 남아 있는 현상을 볼 수 있고 이 물이 줄어들거나 하는 변화는 나타나지 않았다. 이로 인하여 노심 수위는 실험보다 훨씬 더 많이 감소하였고 노심출구 액체온도는 압력증가로 인한 포화온도 상승효과에 의하여 실험과는 상당히 다른 거동을 보였다. 또한 계통 전체 냉각수 질량측면에서는 누설량이 실험보다 과대 평가되었기 때문에 당연히 더 많은 감소를 보였다. 따라서 이 변수는 관련 계통 거동 변화에 큰 영향을 미치는 것으로 평가되었다.

2) 가압기 밀림관 Flow Path Option민감도 분석 (민감도계산 2)

이 분석에서는 가압기 밀림관의 유로의 모델링시 선택사항으로 되어 있는 Geometry Option에 대하여 민감도 분석을 수행하여 보았다. 이 선택사항은 기본계산에서는 'Normal Vertical Flow Path'를 사용

하였으나 여기서는 'Atmosphere-First Vertical Flow Path'를 사용하였다. 이 선택사항은 상부로 연결되는 Flow Path에 Horizontal Stratification이 발생하는 것으로 간주하고 계산을 수행한 것이다. 여기서는 또한 MEL 를 Default 값으로 입력하였다.

압력거동에서 보면 Normal Vertical Flow Path를 사용한 경우 보다 압력 상승 량이 적고 가압기로 이동되는 Entrainment에 의한 냉각수의 양도 적은 것으로 나타났다. 이는 계산 시에 Atmosphere에 포함되어 이동하는 증기의 양이 많아지기 때문으로 판단된다.

Manway유량측면에서 보면 이들 상부 플레넘 압력거동에 영향을 받는 수두차이때문에 영향을 받게 된다. 가압기의 Manway를 통하여 누출되는 유량은 기본계산과 민감도 분석 1을 통하여 얻은 평가결과인 가압기로 Entrainment되는 양에 따라 많은 영향을 미친다는 것과는 어느 정도는 일치한다. 즉, 그림 13에서 보는 바와 같이 이 유량은 초반에 실험보다 적은 유량이 빠져나가나 약 8000초 경 그 양이 실험치를 초과하였다. 포화증기에 의한 가압기내 유체의 가열은 그 효율이 크지 않기 때문에 상당한 시간이 요구되어 그 동안 많은 양의 냉각재 누설이 발생하게 된다.

3) 증기발생기 U-Tube Flow Path Option 민감도 분석 (민감도 계산 3)

이 민감도 분석에서는 가압기 Manway이외의 또 하나의 압력 경계 조건으로서의 역할을 하고 있는 증기발생기 Manway에 대한 영향 평가로서 기본계산과 같은 가정을 이용하였고 증기발생기 U-Tube Flow Path Option에 Atmosphere-First Vertical Flow Path를 이용하였다. 기본계산에서는 Normal Vertical Flow Path를 이용하였다. 이 계산의 주요 목적은 증기발생기 Manway를 빠져나가는 유체들 중 기체와 액체의 비율이 상부에서 U-Tube를 지나서 빠져나가는 것과 아래 방향의 수두차이에 의하여 빠져나가는 것 중 어느 것의 영향이 큰지를 판단하고 원자로용기 상부 플레넘의 압력거동에 증기발생기 Manway의 영향이 어느 정도인지를 판단하기 위하여 수행되었다.

분석결과 압력거동은 상당부분 차이가 났다. 최고 압력시 유지되는 기간이 20 %정도 줄어들었으며 최고 압력도 약 4000pa정도 감소되었다. 이는 전반적인 거동에서 증기발생기 방향으로 빠져나가는 부분의 역할에 의하여 변화된 것이라 판단된다. 즉, 증기발생기 U-Tube방향으로 빠져나가는 증기 상태의 냉각재의 양이 커짐에 따라 상대적으로 가압기 방향으로 빠져나가는 냉각재의 양이 감소하였고 이에 따라 가압기내로 Entrainment에 의한 냉각수 축적이 줄어들었다는 것을 의미하며 이것은 가압기 내의 축적된 냉각재 량을 보면 확실히 알 수 있다. 노심 수위측면에서 보면 가압기 상부로 유입되는 냉각수의 양이 적고 증기발생기 Manway 로 빠져나가는 냉각재의 양이 줄어든다는 것은 일차계통내의 냉각재의 양의 감소율이 적다는 것을 의미하게 된다. 따라서 원자로심 수위는 그 감소율이 적어져서 감소시점이 늦어지게 되는 것으로 나타났다.

7. 결론 및 향후연구계획

연구결과, MELCOR 전산코드는 부분충수 운전시의 계통거동을 적절히 모의할 수 있는 능력이 있으며, 계산시간이 다른 전산코드와는 달리 계산시간이 약 1/10 정도로 정확한 계산보다는 빠른 시간 내에 전반적인 발전소 거동을 파악하는데 적절한 것으로 나타났다. 그러나 사용자 의존성(User Dependency)이 큰 것으로 나타나 발전소 입력자료 작성시 주의가 필요한 것으로 나타났으며 몇가지 개선되어야 할 부분이 도출되었다. 향후 개선이 필요한 부분은 Nodalization의 기준에 대한 적절성이 재평가되어야 할 필요가 있으며 Momentum Exchange Length 등을 포함한 입력자료 작성시 User Dependency 를 줄이기 위한 노력이 필요하게 되었다. 또한 노심모델로서 Heat Structure대신 중대사고 까지 계산범위 확대를 위하여 COR Package 이용이 필요할 수 있다.

참고문헌

- [1] P.Gully, "BETHSY Data Base : Update of the initial report and its addendum for the period May 88 until May 95," STR/LES/95-238, CEA/Grenoble, 1995.
- [2] MELCOR 1.8.3 Code Manual, Sandia National Laboratory, June, 1994.
- [3] G.Kimber, C.Leveque and G.Lavialle, "ISP-38 1st Workshop Report : Loss of Residual Heat Removal System During Mid-Loop Operation - Pressurizer and Steam Generator 1 Outlet Plenum Manway Open," STR/LES/95-244, CEA/Grenoble, 1995
- [4] G.Kimber, C.Leveque and G.Lavialle, "Comparison Report (Draft Version 1.2)," Volume 1&2, Feb.,1997.

표 1. BETHSY 6.9c 실험의 진행과정

실험시간	운전조건
-1000 ~ 0 초	정상상태 운전 - 히터출력 : 0 Kw - RCS 고온관 온도 : 포화온도 - RCS 저온관 온도 : 92°C - 원자로 용기 상부 플레넘 압력 : 대기압
0 초	히터 출력 상승 시작
15 초	히터 출력 138 Kw 도달 (실험 종료 시까지)
30 초	가압기 Manway를 통한 냉각재 누설 시작
950 초	원자로 용기 상부 플레넘 최대압력 도달
5500 초	충력급수 시작
7300 초	전체 노심 재충수
9000 초	실험종료

표 2. MELCOR 계산시 도출된 주요 입력변수 및 실제 위치

입력변수		Cod Pkg	코드 입력값 (Default)	전체 거동에 미치는 영향
위치	변수이름			
PZR 밀림관	Momentum Exchange Length	FL	FL Path 높이차이	가압기로 유입되는 Entrainment 양 조절
S/G	Momentum Exchange Length	FL	FL Path 높이차이	S/G U-Tube 로 유입되는 Entrainment 양 조절
-	Convergence Criterion	CVH	0.001	계산속도 개선
가압기 밀림관, S/G, 및 U.P.	Flow Path Orientation Option	FL	N/A	0 - Normal Vertical 1 - Atmosphere-First Vertical 2 - Pool-First Vertical 3 - Normal Horizontal 4 - Atmosphere-First Horizontal 5 - Pool-First Horizontal 6 - Pool Velocity = Atm. Velocity, Vertical 7 - Pool Velocity = Atm. Velocity, Horizontal

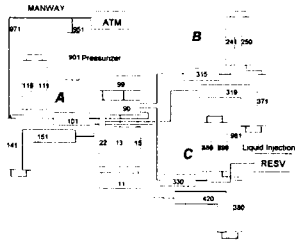


그림 1. MELCOR 1.8.3 Nodalization

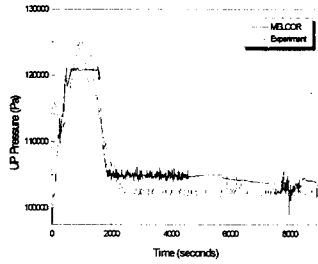


그림 2. 원자로용기 상부 플레넘 압력 (기본계산)

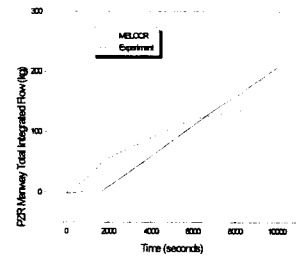


그림 3. 가압기 Manway 누적유량 (기본계산)

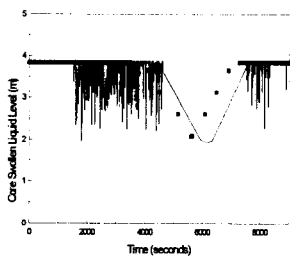


그림 4. 노심 수위 (기본계산)

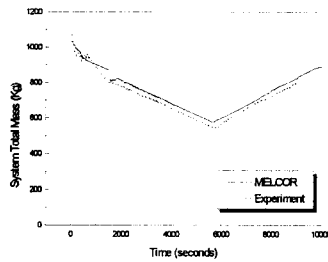


그림 5. 계통 총 냉각재 질량 (기본계산)

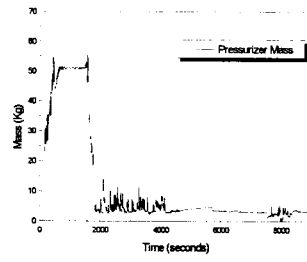


그림 6. 가압기내의 냉각재 질량 (기본계산)

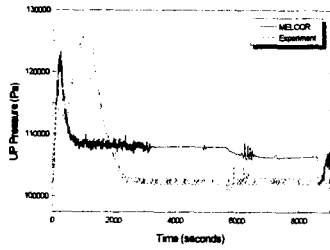


그림 7. 원자로용기 상부플레넘 압력 (민감도 계산 1)

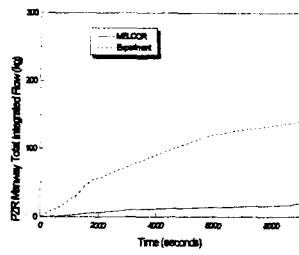


그림 8. 가압기 Manway 누적유량 (민감도 계산 1)

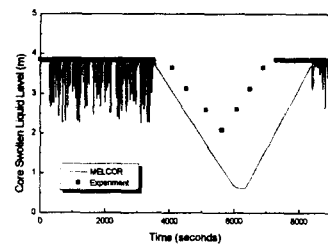


그림 9. 노심 수위 (민감도 계산 1)

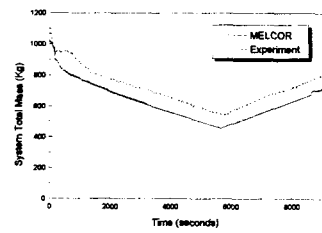


그림 10. 계통 총 냉각재 질량 (민감도 계산 1)

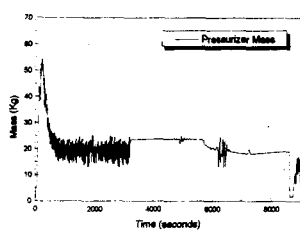


그림 11. 가압기내의 냉각재 질량 (민감도 계산 1)

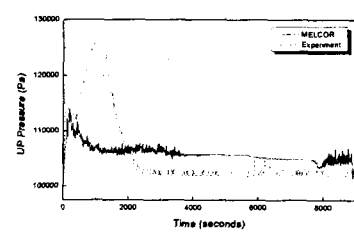


그림 12. 원자로용기 상부플레넘 압력 (민감도 계산 2)

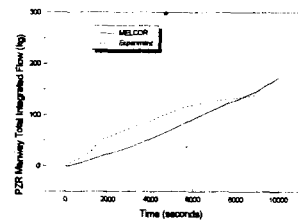


그림 13. 가압기 Manway 누적유량 (민감도 계산 2)

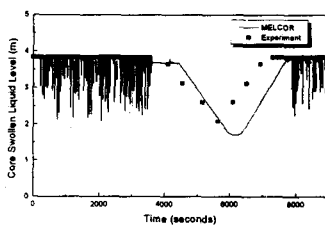


그림 14. 노심 수위 (민감도 계산 2)

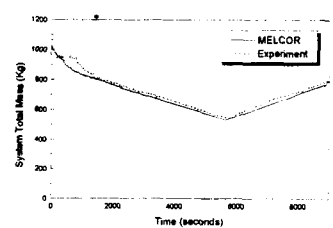


그림 15. 계통 총 냉각재 질량 (민감도 계산 2)

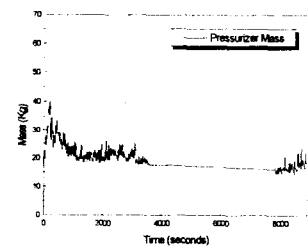


그림 16. 가압기내의 냉각재 질량 (민감도 계산 2)

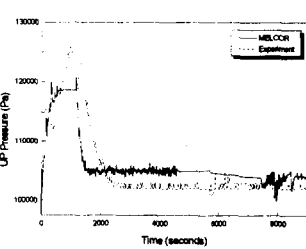


그림 17. 원자로용기 상부플레넘 압력 (민감도 계산 3)

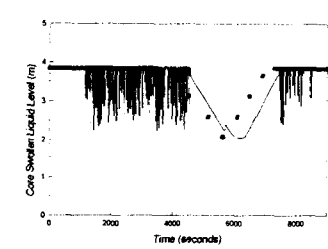


그림 18. 노심 수위 (민감도 계산 3)