

SMART 개념설계의 소형냉각재상실사고에 대한 안전계통 성능 분석
Performance Evaluation for the Safety System of the SMART Conceptual Design
during a Small Break Loss of Coolant Accident

배규환, 이규형, 정영종, 심석구, 장문희

한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor) 개념설계의 안전계통에 대한 성능을 평가하기 위하여 주요 제한 사고인 소형냉각재상실사고를 최적 열수력 계통분석 코드인 MARS/SMR 및 격납용기 분석코드인 CONTEMPT4/MOD5/PCCS 코드를 이용하여 해석을 수행하였다. 보수적인 초기/경계 조건 및 가정을 바탕으로 해석을 수행한 결과, 소형 냉각재상실사고 시 원자로의 냉각재 수위는 노심 상부보다 충분히 높게 유지되었으며 노심의 잔열은 충분히 제거되었다. 또한, 핵연료 피복재의 온도와 NSSS의 압력 및 온도도 지속적으로 감소하게 되므로 원자로의 안전성은 확보되고 있음을 알 수 있었다. 그러나, 사고후 장기간 동안 보다 효과적인 노심 냉각을 위해서는 원자로 용기 내에서 지속적인 자연대류 유로의 확보가 필요하며, 이를 위하여 안전 등급의 충수계통 설계를 포함한 ECCS의 주입성능 개선 등이 요구된다.

Abstract

To assess the performance of the safety system of the SMART conceptual design, the most limiting accident of small break loss of coolant accident was analyzed using the developmental version of MARS/SMR and CONTEMPT4/MOD5/PCCS codes. The analysis results using the conservative initial and boundary conditions show that the decay heat is sufficiently removed and the reactor coolant inventory is maintained well above the top of the core. The fuel cladding surface temperature, system pressure and temperature decrease continuously during the accident ensuring the safety of the SMART conceptual design. However, for more effective core cooling, continuous natural circulation path in the reactor vessel needs to be secured for long period of time by enhancing the reliability and performance of the ECCS injection as well as upgrading the design of the makeup system to a safety class.

1. 서론

최대 열출력 330 MW의 일체형 원자로인 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)는 노심, 가압기, 증기발생기, 주냉각재펌프 등의 주 기기를 단일 원자로 압력용기 내에 배치하여 기존의 상용 원자로에서 발생할 수 있는 주 기기들 사이의 배관 파단으로 인한 대형냉각재상실사고의 가능성을 근본적으로 제거한 설계개념을 채택하고 있다 [1]. 또한, 원자로정지계통, 비상노심냉각계통, 피동잔열제거계통, 원자로보호용기, 원자로 및 격납용기 과압보호계통 등의 안전계통에 피동형 설계 개념을 도입하여 안전성을 더욱 증진시키고 있다. 그림 1은 SMART의 개략적인 계통도이다. SMART의 주요 계통으로는 노심에서 발생한 열을 증기발생기의 세관을 통하여 이차측으로 전달하는 역할을 하는 원자로 용기내의 주요 기기로 구성된 일차계통, 터빈 발전기를 중심으로 한 이차계통, 일차측 냉각재상실사고시 원자로에 물을 공급하는 충수계통 및 비상노심냉각계통, NSSS의 비상정지 시 피동적으로 노심을 냉각시키는 피동잔열제거계통 그리고 NSSS의 주요 기기를 냉각시키는 기기냉각계통 등이 있다.

이와 같이 SMART는 기존의 상용 원자로와는 다른 설계개념을 채택하고 있기 때문에 원자로의 설계 시 체계적인 안전성 분석을 통하여 신뢰성 및 안전성의 확보가 요구된다. 이를 달성하기 위해서는 기존 가압 경수로에서의 안전해석 경험을 기초로 SMART에 특이하게 나타나는 안전 현안들에 대한 분석을 통하여 안전규제요건들이 개발되고, 이와 관련된 체계적인 안전해석 방법론과 코드개발이 요구된다. SMART의 안전해석을 위한 코드는 기존 상용 원자로의 안전해석을 위한 열수력 모델뿐 아니라 피동형 기기들 및 SMART 고유 부품에 대한 모델들이 필요하다. 이와 관련하여 본 연구에서는 SMART 개념설계의 대표적 설계기준사고중 하나인 소형냉각재상실사고에 대하여 최적열수력 계통분석코드인 MARS/SMR [2] 및 격납건물 성능해석 코드인 CONTEMPT4/MOD5/PCCS [3]로 보수적인 초기조건 및 경계조건을 사용하여 안전계통의 성능과 원자로의 안전성을 평가하였다.

소형냉각재상실사고는 일차측 냉각재의 압력경계를 이루고 있는 NSSS의 모든 구성품 및 배관 등의 가상적인 파단으로 인하여 일차측 냉각재가 원자로보호용기나 격납건물 등으로 누설되어 계통의 압력과 냉각재 재고량이 감소하는 사고이다. SMART는 설계 특성상 대형 냉각재상실사고를 근원적으로 배제시킴으로써 소형냉각재상실사고만 고려된다. 예상되는 파단 위치로는 원자로의 중앙 덩개로 연결되는 가압기 안전밸브 배관, 가압기 가스실린더 배관, 제어봉구동장치의 분배관, 가압기 열교환기로 연결되는 분배관, 수위계 분배관, 온도계 분배관 등과 환형 덩개로 연결되는 충수계통 배관, 원자로 배수관, 원자로 수위계 분배관, 온도계 분배관, 증기 및 급수 배관 등이 있다. 본 연구에서는 이러한 파단들 중 냉각재 재고량 손실 및 원자로보호용기 최대압력 거동에서 가장 제한적이라고 판단되는 원자로 중앙 덩개로 연결된 20 mm의 가압기 안전밸브 파단사고에 대한 해석 결과를 기술하였다.

2. 해석모델 및 초기/경계조건

SMART의 소형냉각재상실사고 안전해석에 적용할 수 있는 인허가용 전산코드 및 해석 방법론은 현재 개발 중에 있으므로, 현 시점에서는 최대한 보수적인 초기/경계조건 및 가정을 바탕으로 해석을 수행하였다. 사고시 원자로 계통의 열수력 과도 상태 거동 계산에 사용된 MARS/SMR [2]은 이상유동에 대하여 6개의 지배방정식을 이용하는 최적 열수력 계통 분석 코드이다. 이 코드는 피동형 부품들의 물리적 특성과 관련된 모델들이 반영된 RELAP5/MOD3.2 [4]를 바탕으로 하여 원자로용기의 다차원 해석 기능 등 여러 가지 모델들이 보완 개선된 MARS 코드 [5]를 기초로 SMART의 안전해석을 위하여 SMART 고유의 설계특성을 고려한 모델들을 추가하여 한국원자력연구소에서 개발하고 있는 코드이다.

소형냉각재 상실사고시 파단유량 거동은 원자로보호용기의 압력 및 온도에 영향을 받는다. 현재 개발된 MARS/SMR [2] 코드로는 원자로보호용기 및 격납건물의 과도상태 거동을 적절히 묘사할 수 없기 때문에 본 해석에서는 피동 격납건물 냉각계통 모델 및 열전달 모델이 개선된 CONTEMPT4/MOD5/PCCS 코드 [3]를 사용하여 원자로보호용기의 상태 거동을 상세히 계산하였다. 이렇게 얻어진 원자로보호용기의 압력 및 온도 조건을 입력으로 MARS/SMR 분석을 재 수행하였다.

MARS/SMR의 Nodalization (그림 2)은 SMART의 소형냉각재상실사고 발생 시 예측되는 물리적 현상을 타당하게 예측하기 위하여 총 324 개의 Volume과 346 개의 Junction으로 모델하였다. 표 1은 소형냉각재상실사고 해석에 가장 보수적인 결과를 유발할 수 있도록 조정된 주요 변수들의 초기조건 및 가정을 요약한 것이다. 노심 출력은 측정계기의 오차를 고려하여 정격출력의 103 %로 하고 유량과 온도 등은 출력 증가에 해당하는 정도만큼 변화된 값을 사용하였다. 그리고 급수유량은 원자로 출력 증가량만큼 증가된 유량을 사용하였고, 잔열곡선은 ANS73 곡선에 계수 1.2를 곱한 보수적인 값을 사용하였다. 노심에서 발생하는 잔열 제거 능력 관점에서 피동잔열제거계통 한 트레인이 단일고장에 의해 작동되지 않는 것으로 가정하였다. 해석에 사용된 임계유량 모델은 MARS/SMR에 내장되어 있는 수정된 Henry-Fauske 모델로 냉각재와 함께 흐르는 비응축성 개스 질량 분율을 고려하여 stagnation quality 조건에 따라 단상의 과냉액체, 이상혼합체 및 증기의 임계유량 관계식이 사용된다. 파단 유로는 형상손실계수를 0.6으로 한 smooth area change 옵션과 균질평형 옵션을 사용하고 방출계수는 단상액체, 이상혼합체, 단상증기에 대하여 모두 1.0을 사용하였다.

3. 해석결과

표 2는 가압기안전밸브 배관 파단사고의 사고진행상황을 요약한 것이고, 그림 3에서 14까

지는 MARS/SMR로 계산한 주요 변수들의 사고 거동을 나타낸 것이다.

103 % 정격 출력 운전모드에서 가압기의 중앙공동 상부 덮개에 연결된 내부 직경 20 mm의 가압기안전밸브 배관 하나가 순간적으로 완전 파단되면 가압기의 중앙공동 상부에 존재하는 질소 기체가 원자로보호용기로 방출되기 시작하고 최대 방출 유량은 10 kg/s에 달한다(그림 3). 이로 인하여 일차계통의 압력은 급격히 감소하여 사고 후 15.1 초에 가압기 저압 비상보호 신호 설정치인 12 MPa에 도달하게 된다(그림 5). 비상보호 설정치 도달 후 감지기 응답 및 신호지연이 고려된 총 1.15 초의 시간 지연 후인 16.25 초에 원자로 비상정지 신호가 발생한다. 트립 차단기 열림 및 제어봉구동계통의 코일 감쇠 시간으로 가정된 0.5 초의 시간 지연 후인 16.75 초에 제어봉이 낙하하기 시작하여 총 8 초 동안 노심으로 삽입되면 부의 반응도가가 주입됨으로써 노심 출력은 줄어들게 된다(그림 6). 원자로 정지신호 발생과 동시에 터빈트립, 소외전원상실, 주냉각재펌프 정지, 복수기 작동 불능 및 급수유량 상실 등도 발생한다. 또한, 증기발생기는 터빈과 격리되고 피동간열제거계통에 연결된다. 터빈 정지밸브가 닫히고 주급수유량이 완전히 상실되면 이차계통의 압력과 온도가 증가하고 이에 따라 일차계통에서 이차계통으로의 열전달은 감소한다. 이와 더불어 주냉각재펌프 정지로 인한 일차측 냉각재 유량의 감소로 일차측 냉각재의 온도와 압력은 상승하게 된다(그림 5, 7). 제어봉이 1000 mm 정도 삽입된 약 21 초경부터는 노심 출력 및 열속이 급격히 줄어들고, 이에 따라 일차계통의 압력과 냉각재 온도 및 핵연료 온도도 급격히 감소하게 된다(그림 5, 7). 그 후, 피동간열제거계통이 노심에서 발생하는 잔열을 자연순환에 의하여 제거하게 된다. 증기발생기 하단으로 유입되는 일차측 냉각재는 나선형 세관을 따라 올라 가면서 쉘측으로 흐르는 일차측 냉각재의 열을 흡수하여 과냉각상태에서 포화상태를 거쳐 과열 증기가 되고, 이는 피동간열제거계통의 열교환기로 유입되어 응축된 후 다시 증기발생기로 되돌아오는 자연순환 유로를 형성하게 된다. 그러나 작동 초기단계에서는 피동간열제거계통 내 배관 및 열교환기에 채워져 있던 물의 영향으로 원활한 유로가 형성되지 않는다. 이로 인하여 이차계통의 압력은 계속 상승하여 47 초경에 최대치인 8.53 MPa에 도달한다(그림 5). 압력 상승으로 인한 열전달 감소로 증기발생기 출구에서의 일차측 냉각재 온도도 상승하게 된다(그림 7). 그 후 이차계통 내에서 자연순환 유량이 충분히 형성되면 이차측의 압력은 다시 감소하게 되고(그림 5) 증기발생기 출구에서의 일차측 냉각재 온도도 감소하게 된다(그림 7).

압력 감소로 인한 Flashing으로 사고 후 24 초경부터는 질소기체/증기 혼합체가 파단부로 방출된다. 이와 함께 일차측 냉각재는 가압기로 유입되고 가압기의 수위가 파단 부위까지 도달하는 88 초경부터는 과냉액체 혹은 저 건도의 이상혼합체가 질소기체와 함께 방출됨으로 해서(그림 4) 방출 유량은 급격히 증가하고 135 초경에 최대 유량이 약 41 kg/s에 달한다(그림 3). 이로 인하여 일차측 냉각재 재고량은 급격히 감소하게 된다. 사고 후 280 초경부터는 고 건도의 이상혼합체/질소기체가 방출됨으로써(그림 4) 방출유량은 급격히 줄어들게 된다(그림 3). 사고 후 320 초경에 가압기내의 질소기체가 다 방출되고 그 이후부터는 순수 이상 혼합체 혹은 증기가 파단부로 방출된다(그림 4).

일차계통의 압력이 비상노심냉각탱크의 초기 가스 압력(10 MPa)보다 낮아지게 되는 80 초경에 비상노심냉각탱크의 차가운 냉각수가 가압기 외곽공동으로 주입되나(그림 8), 주입되는 대부분의 유량이 파단부인 가압기 중앙공동 쪽으로 유입되는 것으로 나타났다. 이로 인하여 과냉의 안전주입수가 파단부로 상당량 우회 방출됨으로써 계통의 재고량 회복 및 노심 냉각에 효과적으로 이용되지 못하고 있으며, 사고 후 2640 초경에 비상노심냉각탱크 내의 물이 고갈되면 일차측 냉각재 재고량은 다시 지속적으로 감소하게 된다(그림 8, 11).

계속적인 압력 감소로 인한 Flashing과 노심 잔열 및 원자로내 열 구조물들의 잠열로 인한 비등으로 계통의 기포율은 증가하게 되고, 파단부를 통한 지속적인 증기 혹은 이상 혼합체의 방출로 원자로의 냉각재 재고량은 감소하여 사고 후 4530 초경에는 가압기의 외곽 공동이 고갈된다(그림 9). 사고 후 6380 초경에 펌프 영역은 기포로 꽉 차게 되어 이상혼합체에 의한 자연대류 유로가 깨어진다(그림 9). 이로 인하여 증기발생기를 통한 열제거량이 점점 줄어들게 된다. 이 동안에 파단 부위를 통하여 방출되는 에너지가 노심에서 생성되는 잔열보다 작기 때문에 그 나머지의 에너지는 피동잔열제거계를 통하여 제거된다. 즉, 일차측의 냉각수 온도가 이차측 냉각수 온도보다 조금 높게 유지되면서 일차측의 열을 이차측으로 전달시키게 된다. 압력은 냉각수 온도에 의하여 결정되므로 일차측의 압력은 이차측 압력보다 조금 높게 유지되면서 서서히 감소하게 된다(그림 10).

파단부를 통한 지속적인 질량 및 에너지의 방출로 원자로보호용기의 압력 및 온도는 상승한다. 계통의 압력은 9300 여 초에 원자로보호용기의 압력과 평형을 이루게 되고(그림 10) 파단 유량이 형성되지 않음으로 해서 파단부를 통한 계통의 냉각재 재고량 손실은 거의 일어나지 않게 된다(그림 11). 그 후 원자로용기와 원자로보호용기 사이에 간헐적인 파단 유량 생성으로 인하여 사고 후 15800여 초에 원자로용기의 압축수위는 최소치에 도달하나(그림 11), 노심 상단보다 90 cm 높은 위치이므로 사고 계산 기간동안 노심 냉각에는 충분한 냉각재 재고량이 확보되고 있음을 알 수 있다. 그러나 보다 효과적인 노심 냉각을 위해서는 원자로용기 내에서 지속적인 자연대류 유로의 확보가 필요하며, 이를 위하여 비상노심냉각계통에서 주입되는 냉각수가 파단부로 우회하여 방출되지 않도록 냉각수 주입방식을 개선하고 충수계통을 안전등급으로 설계할 필요성이 있다.

4. 결 론

SMART 개념설계의 소형냉각재상실사고에 대하여 MARS/SMR 및 CONTEMPT4/MOD5/PCCS 코드를 이용하여 보수적인 초기조건 및 가정을 바탕으로 해석을 수행하였다.

해석 결과, 소형냉각재상실사고 시 계통의 냉각재 재고량은 노심 상부보다 충분히 높게 유지되고, 단일고장을 고려하여 4 트레인의 피동잔열제거계통 중 3 트레인만이 작동하더라

도 노심의 잔열은 충분히 제거되었다. 또한, 핵연료 피복재의 온도는 초기치 (626 K)보다 높아지지 않고 NSSS의 압력 및 온도는 지속적으로 감소하게 되므로 원자로의 안전성은 확보되고 있음을 알 수 있다. 그러나, 사고후 장기간 동안 보다 효과적인 노심 냉각을 위해서는 원자로 용기 내에서 지속적인 자연대류 유로의 확보가 필요하며, 이를 위하여 안전 등급의 충수계통을 포함한 ECCS의 주입성능 개선 등이 요구된다.

이러한 개념설계 해석 결과를 바탕으로 향후 이루어질 기본설계 단계에서의 해석은 안전 등급의 충수계통을 포함한 ECCS의 주입성능 개선 등의 설계 최적화를 통하여 얻어진 보다 상세하고 신뢰성 있는 설계 자료들을 사용하여 수행되어야 할 것이다. 또한, 안전규제요건 설정에 따른 관련 코드 및 모델들을 개선하고 해석 방법론 및 가정들을 명확히 설정한 후 SMART의 안전성 확보를 입증해야 할 것이다

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행된 것이다.

5. 참고문헌

- [1] 한국원자력연구소, "일체형원자로 계통설계기술개발", KAERI/RR-1883/98, 1999.
- [2] 정법동, "MARS/SMR 1.4 fixed version", E-mail from Chung Bub-Dong, 1999. 1. 5.
- [3] Y. D. Hwang, "피동형 원자로 격납용기 과도현상 해석 코드 개발", KAERI/TR-1058/98, KAERI, 1998.
- [4] RELAP5 development team, "RELAP5/MOD3 code manual", NUREG/CR-5535, INEL-95/0174, INEL, 1995.
- [5] 이원재, "Development of a multi-dimensional realistic thermal-hydraulic system analysis code, MARS 1.3 and its verification", KAERI/TR-1108/98, KAERI, 1998.

표 1 해석 초기조건 및 가정

변수	값
노심 출력 (정격치의 103%), MWt	339.9
급수 유량 (정격치의 103%), kg/s	157,075
일차측 냉각재 유량, kg/s	1544
가압기 압력, MPa	15.0
일차측 냉각재 SG 입출구 온도, K	583.0/543.0
급수/증기 온도, K	430.0/552.1
SG 증기 압력, MPa	3.0
SG 관막음, %	10
원자로정지 지연시간, 초	1.15
CEDM 지지코일 감쇠 시간, 초	0.5
감속재 밀도/도플러 반응도가	least/most negative
최대 축방향/반경방향 첨두계수	1.563/1.807
제어봉반응도가 (최대 반응도 제어봉고착), % $\Delta \rho$	- 8.9
제어봉 낙하 시간, 초	8.0
가압기 가스 실린더	폐쇄
단일 고장	PRHRS 1트레인 고장
터빈 제어 밸브 닫힘 시간, 초	0.3
MPIV/MSIV 닫힘 시간, 초	2.0/3.0
PRHRS 급수/증기 차단 밸브 개방 시간, 초	2.0/3.0

표 2 소형냉각재상실사고 사고진행 상황

시간, 초	과도전개 사항	설정치 및 값
0.0	가압기안전밸브 배관 (20 mm I.D) 파단 발생	
15.1	가압기 저 압력 비상보호설정치 도달	가압기 압력 \leq 12 MPa
16.25	원자로 비상정지 신호 발생 터빈 트립, 소외전원상실 주냉각재펌프 4대 정지, 주급수 상실 증기, 급수 격리밸브 잠김 피동잔열제거계통 증기,급수차단밸브 열림	비상보호설정치 도달후 1.15 초
16.75	제어봉 삽입 시작	원 자 로 비 상 정 지 신 호 발생후 0.5 초
47.0	증기발생기 증기관 압력 최대치 도달	8.53 MPa
80.0	비상노심냉각탱크 작동	가압기 압력 \leq 10 MPa
2640	비상노심냉각탱크 고갈	
4530	가압기 외곽공동 고갈	
9300	계통압력/원자로보호용기 압력 평형 상태 도달	
15800	원자로 압축수위 최소치 도달	노심 상단 90 cm 위
16200	사고계산 종료	

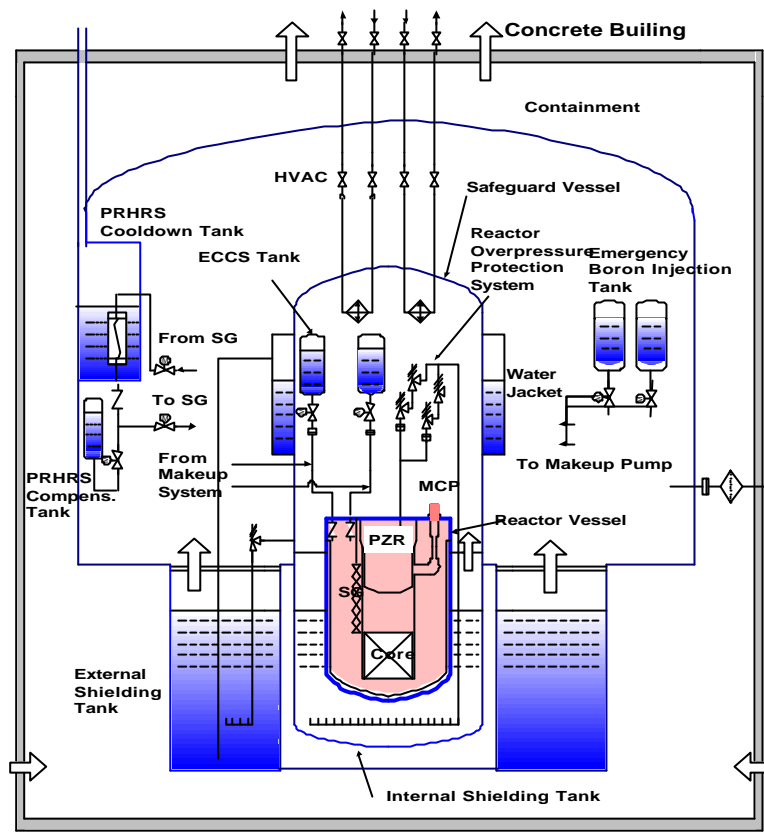


그림 1. SMART 계통 개략도

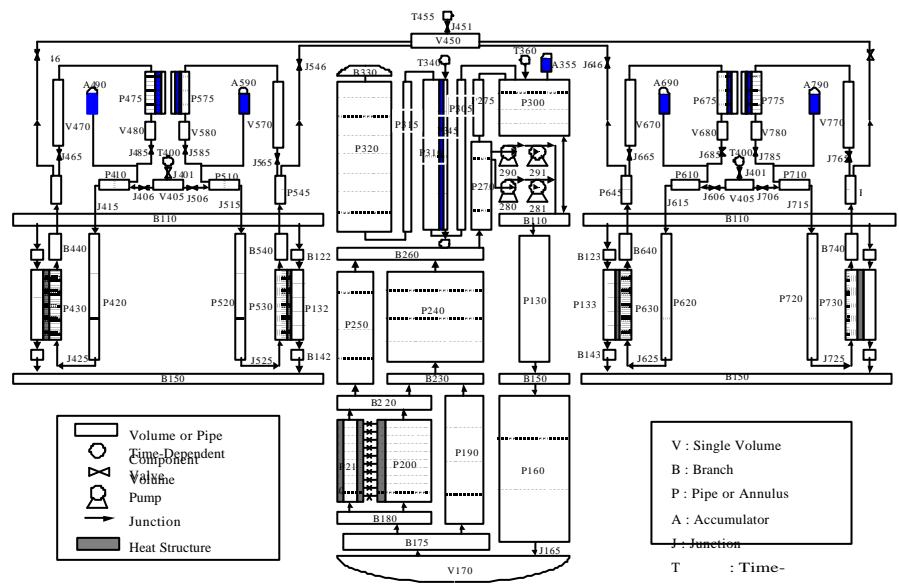


그림 2 MARS/SMR Nodalization

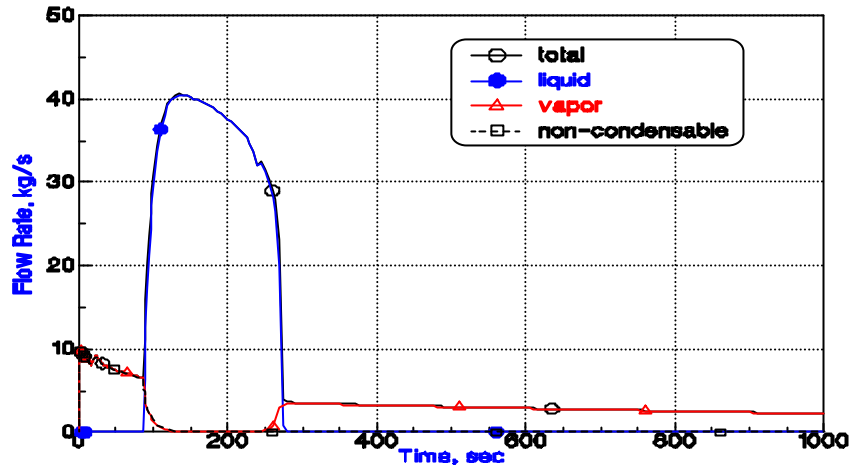


그림 3 파단유량 단기 거동

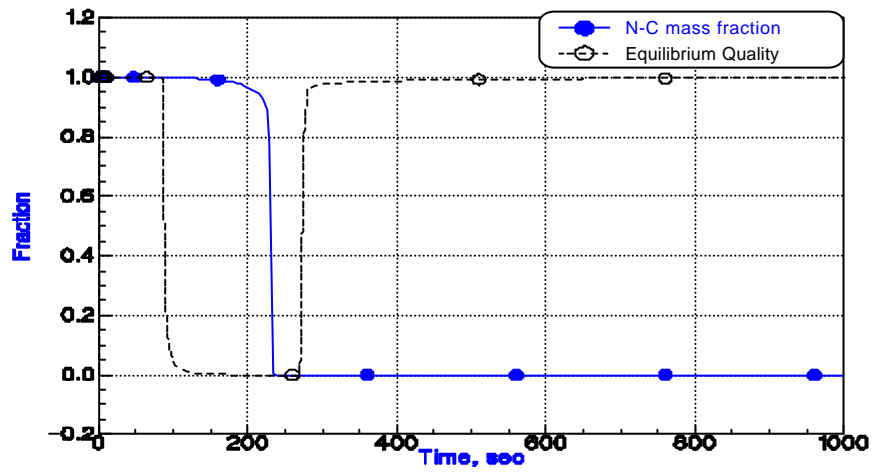


그림 4 파단유로 질소기체 질량분율 및 건도 단기 거동

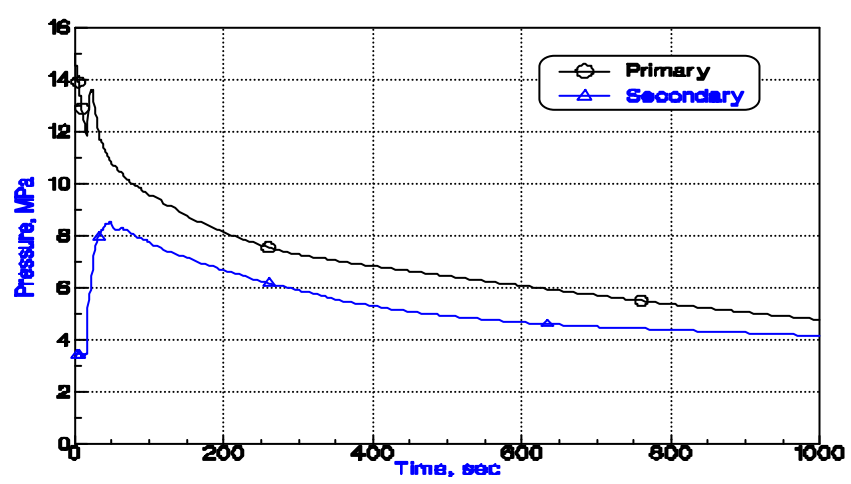


그림 5 계통 압력 단기 거동

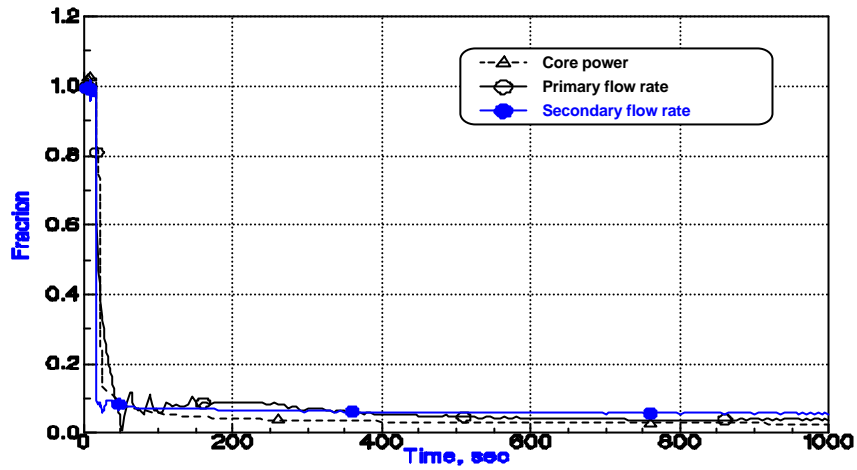


그림 6 노심 출력 및 계통 유량 단기 거동

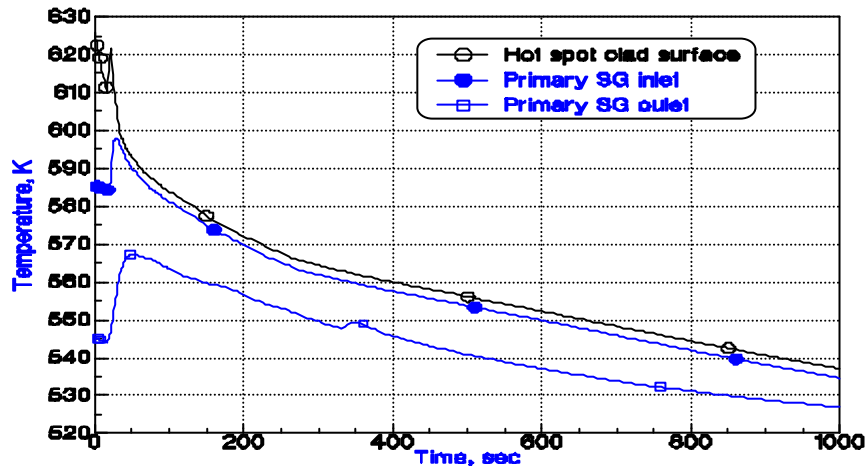


그림 7 일차측 냉각재 온도 및 고온점 핵연료 피복관 표면온도 단기 거동

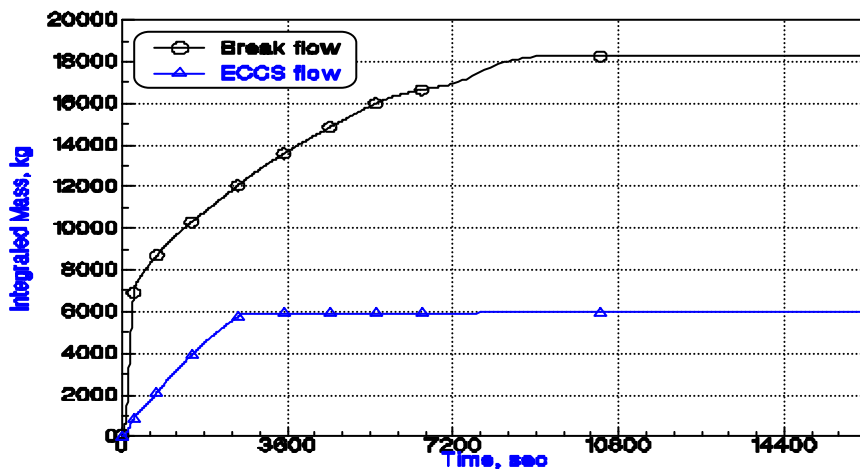


그림 8 적분된 파단유량 및 비상노심냉각수 주입 유량 장기 거동

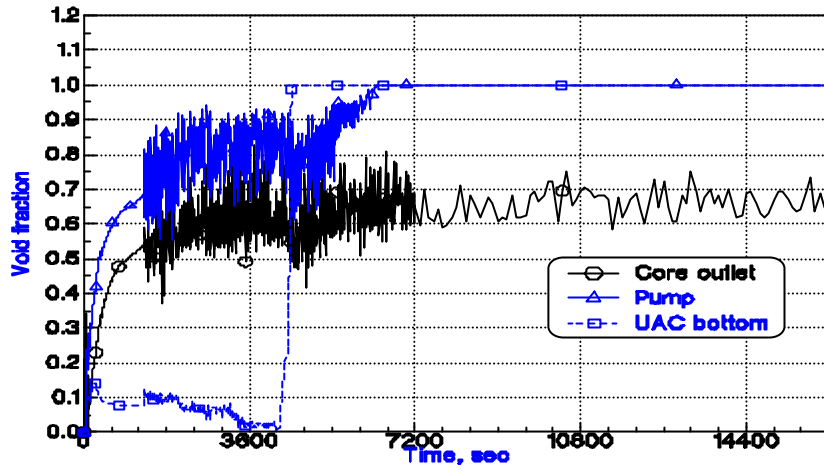


그림 9 일차계통 기포율 장기 거동

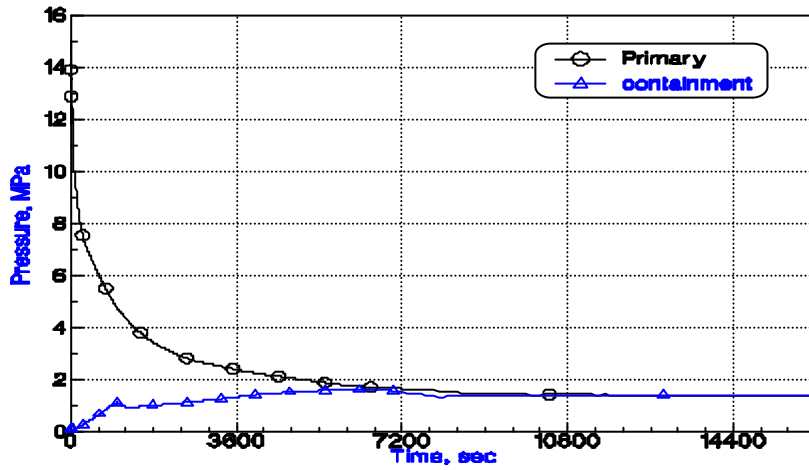


그림 10 계통 및 원자로보호용기 압력 장기 거동

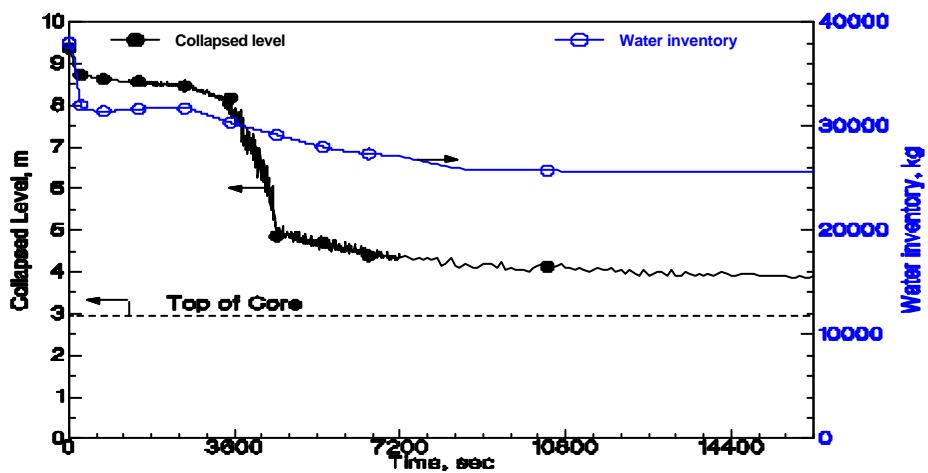


그림 11 일차계통 냉각재 재고량 및 원자로 압축수위 장기 거동