'2000 춘계학술대회 논문집
한국원자력학회

원자력교육원 제 2 시뮬레이터 검증용 파단사고 모델링

Break Accident Modeling for the V&V of KNPEC #2 Simulator

김요한, 전황용

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

한국전력공사 전력연구원에서 개선 연구가 수행중인 원자력교육원 제 2 시뮬레이터 검증용 데이터를 생산하기 위해 최적 평가용 전산 코드인 RETRAN과 MARS를 이용해 영광 1, 2 호기의 증기관 파단사고, 소형 및 대형 냉각재 상실사고를 모의하였다. 모의를 위해 발전소 운전 자료와 설계자료를 활용하였으며, 부족한 자료는 기존 입력 자료를 활용하였다. 모의용 입력과 결과의 유효성을 확인하기 위해 소형 냉각재 상실사고에 있어선 RETRAN과 MARS의 결과를 상호 비교하였다.

Abstract

The simulations of some break accidents, such as steam line break, small and large break loss of coolant accident(LOCA), for Yonggwang Unit 1 & 2 are carried out using RETRAN and MARS to generate the data for the validation and verification of KNPEC#2 simulator which has been upgrading by KEPRI of KEPCO. For the simulations the operation and design data of the plants are used, and to compensate the lacks of the data the existing input data are applied. And in the case of small break LOCA the results of RETRAN and MARS have been compared each other to verify the effectiveness of the inputs and results.

1. 개요

본 논문은 한국전력공사 전력연구원에서 개선 연구가 수행중인 원자력교육원 제 2 시뮬레이터(KNPEC#2)의 검증용 데이터를 생산하기 위해 증기관 파단사고(SLB), 소형(SBLOCA) 및 대형

냉각재 상실사고(LBLOCA)를 최적 평가용 전산 코드인 RETRAN과 MARS로 모의한 결과를 기술하고 있다. 또한 결과의 유효성을 확인하기 위해 SBLOCA에 있어 RETRAN과 MARS의 결과를 상호 비교하고 있다.

전력연구원에서는 개선중인 시뮬레이터의 성능을 평가, 검증하기 위해 많은 사건 시나리오를 선정하여 이에 대한 데이터를 생산하고 있다. 검증용 데이터로는 실제 발전소의 정상 또는 과도상태에서의 운전 데이터나 실증실험에서 취득한 자료를 사용해야 하지만, 발전소 데이터는 그 사건의 종류와 양이 적고, 실증 실험을 수행하기에는 현실적으로 어려움이 많기 때문에 전력연구원에서는 널리 사용되고 있는 최적 평가용 전산 코드를 이용하여 필요한 데이터를 생산하고 있다. 전산 코드로는 미국 전력연구소(EPRI)에서 개발한 RETRAN-3D/MOD002와 한국원자력연구소(한원연)에서 개발중인 MARS 1.4를 사용하였다. 대부분의 사고는 RETRAN을 사용하여 모의하고 있으며, LOCA사고에 있어선 RETRAN 해석 범위의 제한성 때문에 MARS를 선택하여 데이터를 생산하였다.

본 연구에서는 계산을 용이하게 수행하기 위해 주로 전력연구원과 한원연에서 개발한 각 코드의 PC 버전을 사용하여 해석과 모델링을 수행하였다. 기본 입력자료는 해당 발전소인 영광 1, 2호기 운전 및 설계 자료를 주로 활용하였으며, 관련 자료 부족시 기존 입력 자료와 고리 3,4호기의 자료를 사용하였다.

2. 영광 1, 2호기 계통 모델링

가. RETRAN 모델링

영광 1,2호기를 모의하기 위해 발전소 주요 계통을 67개의 볼륨과 110개의 정션으로 모델링하였으며(그림 1), 각종 설정치 제어를 위해 77개의 트립카드와 174개의 제어카드를 사용하였다. 주냉각재 펌프 3개는 펌프 특성 곡선을 반영하여 구성하였으며, 트립카드에 의해 기동 정지가 되도록 하였다. 증기발생기 역시 3개를 각각 모델링하였으며, U자형 전열관을 수직부가 뚜렷하게 구분된다고 보아서 2×2, 4개의 수직 열전도체로 분할하였고, 2차 측은 정상 및 과도 상태에서의 정확한 거동 모사를 할 수 있도록 각각 5개의 볼륨으로 나눴다. 노심은 Point reactor kinetics로 가정하여 해당 계산 스텝에서 출력을 반응도의 합에 의해 계산토록 하였으며, 핵연료 집합체는 축방향 3개의 열전도체로 모델링하였다. 또한 영광 1,2호기 12주기의 노심 특성을 반영하여 제어봉 Scram, 도플러 효과, 감속재 온도 영향 등도 모델링하였으며, 지발중성자군은 연료 설계 보고서에 나온 6개 군의 자료를 사용하였다. 잔열 관계식은 '79 ANS 모델을 사용하였다.

나. MARS 모델링

LOCA분석에 사용된 MARS 입력은 고리 3/4 및 영광 1/2호기 비상운전절차서의 안전해석 체

계 구축시[5] 개발된 것을 사용하였으며, 필요시 일부분을 수정하였다.

영광 1,2호기를 모의하기 위해 발전소 주요 계통을 307개의 볼륨과 345개의 정션으로 모델링하였으며(그림 2), LOCA 모의에 사용되는 각종 설정치 제어를 위해 69개의 트립카드와 각종 제어카드를 사용하였다. 원자로 계통은 2상 유동장에 적절히 대처할 수 있도록 상세 분할 방법을 적용하였으며, 특히 과도 상태시 계통 거동에 영향이 큰 가압기와 증기발생기에 있어서는 더욱 상세한 분할을 통해 보다 정확한 모의가 가능토록 하였다. 또한 비대칭적인 거동 해석이 가능하도록 3개 루프를 각각 모델링하였다. 주냉각재 펌프는 코드에 내장되어 있는 WH형 펌프 모델을 사용하였다. 기타 열수력학적 모델링은 MARS 및 RELAP 코드 사용자 지침서[8,9]의 권고 사항을 반영하여 LOCA시 각 부분에서 발생하는 주요 열수력 특성을 잘 반영할 수 있도록 하였다. 노심의 출력분포는 냉각재 상실사고 해석의 보수성을 고려하여 top-skewed 형태로 가정하였으며, 연료봉을 축방향으로 8개, 반경방향으로 9개로 분할하여 모델링하였다.

3. 주요 파단 사고 모의

가. 증기관 파단 사고

SLB 사고 모의를 위해 본 연구에서는 A루프 주증기관에서 100%의 파열이 발생하여 증기가 격납용기로 방출되는 경우를 다루었으며, RETRAN을 사용하였다. 사고 모의와 관련된 각종 제어 장치를 모델링하였으며, PORV, SV, 덤프 등의 각종 밸브는 용량을 고려하여 크기를 조절하였다. 2상 유동 거동 해석을 위한 선택사항으로는 Dynamic Slip 모델을 사용하였다. 또한 본 연구의 목적이 안전성 분석이 아니라 시뮬레이터 검증용 데이터 생산이므로 사고 초기 환경은 실제 운전 상황, 즉 정상 운전 상태라 가정하여 모든 기기 및 제어계측 계통이 대부분 정상 작동하는 것으로 가정하였다.

사고 시작 이후 시간에 따른 주요 사건은 다음 표와 같으며, 주요 변수의 동향은 그림 3 8에 나타나 있다.

표 1. 시간별 주요 사건 진행 상황

시간 (초)	사 건
00.39	주증기관 저압(600 psia) 신호 발생 및 이에 따른 SI
00.41	SI에 의한 원자로 정지
06.40	주증기관 저압 신호에 따른 주증기관 차단
11.14	저 T_{avg} 신호 발생
60.40	증기발생기 저저수위에 따른 보조급수 주입

그림 8에 나타나 있는 바와 같이 주증기관 파단에 따라 파단 증기관을 통해 순간적으로 상당량의 재고량이 방출되고 이에 따라 압력도 급감한다.(그림 5) 주증기관 저압으로 SI신호가 발생, 주입되며 원자로가 정지된다. 한편 주증기관 저압으로 주증기관이 차단되고 이후 보조급수가 공

급되어 파단되지 않은 B, C루프의 증기발생기의 재고량은 지속적으로 상승(그림 6, 7)하여 상실된 파단 루프의 열제거를 분담하게 된다. 1차 계통은 파단과 동시에 압력과 온도가 급감하지만 SI이후 꾸준히 회복하여 운전원 조치가 없다면 그림 3과 같이 가압기 수위가 만수까지 이르게 된다. 이후 A루프의 재고량이 소진되고 여타 루프에 일정량의 재고량이 차게 되면 1, 2차 계통은 일정한 상태를 유지하게 된다.

나. 소형 냉각재 상실 사고

SBLOCA 사고 모의를 위해 본 연구에서는 가압기가 연결된 A루프 저온관에 0.02 ft^2의 파열이 발생하여 냉각재가 상실되는 경우를 다루었으며, RETRAN과 MARS를 병행, 사용하여 상호 비교하였다. 이 사고 역시 사고 초기 환경은 정상 운전 상태라 가정하여 모든 기기 및 제어계측 계통이 대부분 정상 작동하도록 설정하였다. 단, 비상운전 절차에 따른 주냉각재펌프(RCP) 정지 상황을 설정하기 위해 1차 계통이 일정 압력 이하로 내려가면 RCP정지신호가 발생하고, 약 5분 후 운전자 조치에 따라 정지하는 것으로 설정하였다.

사고 시작 이후 시간에 따른 주요 사건은 다음 표와 같으며, 주요 변수의 동향은 그림 9 14에 나타나 있다.

표 2. 시간별 주요 사건 진행 비교

시간 (초)		사 건
RETRAN	MARS	
34.60	30.94	저압(1960 psia)에 의한 원자로 정지
34.80	31.14	원자로정지에 따른 터빈 정지
48.90	47.10	저압(1678.36 psia)에 의한 주냉각재펌프 정지 신호 발생
53.49	47.87	원자로 정지 및 저 T_{avg}(564 °F)에 의한 급수계통 격리
54.61	52.87	저압(1815 psia)에 의한 안전주입
69.15	55.37	증기발생기 저수위(17 %NR)에 따른 보조급수 주입
348.90	347.10	주냉각재펌프 정지

파단사고와 동시에 1차 계통은 급격한 감압으로 원자로가 정지되고 터빈 정지를 유발한다. 뒤이어 계속된 감압으로 RCP가 정지신호가 발생하며, 5분 후 정지된다. RCP가 정지하면 1차 계통에서는 유동이 거의 없어져 강제대류에서 자연대류로 전환된다.(그림 12) 물론 파열 부위를 통한 냉각재 상실과 안전 주입(SI)으로 대류에 있어 다소의 구동력을 제공하기는 하지만 대체적으로 이 때의 유동장은 정체된다. 압력은 급격히 낮아진 후 SI에 의한 지속적인 냉각재 주입으로 그 정도가 완만해지기는 했지만 역시 감소세를 계속 유지하고 있어 결국 Accumulator 주입에 이를 것이다.

한편 RETRAN과 MARS의 결과를 비교하면, 표 2에서 나타난 바와 같이 초기 사고 진행 추이는 RETRAN이 다소 느린 것으로 나타났으며, 상실 유량(그림 13, 14)과 압력 변화(그림 10)에 있어서도 다소 차이점을 보이고 있다. 이를 검토해 보면 차이점을 유발하는 첫 번째 원인으로 정

상 상태 설정시 사용된 1, 2차 계통 유량의 차이를 들 수 있다. RETRAN의 경우 1, 2차 계통 유량이 각각 9805와 1138.9 lbm/s이고, MARS의 경우 10600와 1131.6 lbm/s로 서로 다르다. 두 번째로 들 수 있는 것이 그림 13과 14에서 볼 수 있듯이 상실 유량의 차이이다. 대체로 MARS의 상실 유량이 RETRAN에 비해 다소 크며 그 경향에 있어서도 차이가 있다. 이는 파단 부위를 통한 상실을 계산하는 상관식에 있어 두 코드가 차이를 가졌기 때문인 것으로 보인다. 앞으로 이 차이점에 대한 보다 면밀한 검토를 통해 이를 보완할 수 있는 방법을 개발해야 할 것이다. 이상의 차이에도 불구하고 결과 비교를 통해 전반적인 경향은 유사함을 볼 수 있었다.

다. 대형 냉각재 상실사고

LBLOCA 사고 모의를 위해 본 연구에서는 가압기가 연결된 A루프 저온관에 100%의 파단이 발생하여 냉각재가 상실되는 경우를 다루었으며, MARS를 사용하였다. 사고시 계통의 최적 거동을 모의하기 위해 고압, 저압 안전 주입 및 Accumulator를 모델링하였으며, 이 때 재장전수조내 냉각수의 온도는 100°F로 가정하였다.

사고 시작 이후 시간에 따른 주요 사건은 다음 표와 같으며, 주요 변수의 동향은 그림 15 19에 나타나 있다.

표 3. 시간별 주요 사건 진행 상황

시간 (초)	사 건
00.87	가압기 저압(1960 psia)에 의한 원자로 정지 신호 발생
02.89	가압기 저압에 의한 원자로 정지
03.08	원자로 정지에 의한 터빈 정지
03.45	가압기 저압(1815 psia)에 의한 안전주입 신호 발생
04.61	저압(1678 psia)에 의한 RCP 정지 경보 발생
05.47	안전주입 시작
07.89	주급수 완전 차단
08.86	전동기구동 보조급수 공급
10.86	터빈구동 보조급수 공급
15.90	저압(631.6 psia)에 의한 Accumulator 공급

LBLOCA의 경우 사고의 진행 경향은 SBLOCA와 유사하다. 그러나, 그 진행 속도가 더욱 빠르고, 그 크기도 크다. 사고 시작과 거의 동시에 저압에 의해 원자로 정지 신호가 발생하여 원자로와 터빈이 정지한다. 잇달아 안전주입과 Accumulator가 공급되지만(그림 18) 압력은 더욱 떨어져 격납용기와 같아지게 된다.(그림 15) 또한 원자로용기 강수관의 수위 역시 감압에 따라 급격히 감소한 후 안전주입과 Accumulator 주입에 따라 다소 회복되지만 낮아진 압력에 따라 일정 수준이상 회복되지 않고 있음을 볼 수 있다. 그러나, 사건 시간이 길어지면 Accumulator의 계속적인 주입과 RCS의 온도 감소에 따라 점차 수위를 회복하게 될 것이다.

4. 결론 및 향후 연구 계획

한국전력공사 전력연구원에서 개선 연구중인 원자력교육원 제 2 시뮬레이터의 검증용 자료를 생산하기 위해 최적 평가용 전산 코드인 RETRAN과 MARS로 증기관 파단사고, 소형 및 대형 냉각재 상실사고를 모의하였다. 모의를 통해 검증에 필요한 각종 변수를 생산할 수 있었으며, 기존 정상 상태 입력의 각종 기기 모델을 개선할 수 있었다. 또한 소형 냉각재 상실사고에 있어서는 두 코드로 동일 상황을 모의함으로써 그 입력과 결과의 상호 유효성을 확인할 수 있었으며, 양 코드간 차이점도 인식할 수 있었다.

지금까지 시뮬레이터 검증을 위해 상기 3개 사고를 비롯해 출력 연속 최대 변화, 가압기 PORV 개방 고착, 모든 AC 전원 상실, 증기발생기 3개 전열과 파열, 급수상실을 동반한 ATWS, TMI-2 사고 등 9개 사건 또는 사고에 대한 시나리오를 정립하여 모의를 수행하였으며, 본 연구를 통해 생산된 데이터를 이용하여 개선중인 시뮬레이터를 검증하는 한편 발전소 성능해석 지원 업무에 활용할 계획이다.

참고자료

1. 영광 1, 2호기 FSAR 제 4, 5, 7, 10, 15장, 한국전력공사
2. 영광 1, 2호기 PLS, 한국전력공사, 1988
3. KNPEC#2 시뮬레이터 검증용 정상상태 RETRAN 모델링, TM.98NJ09.P1999.600, 전력연구원, 1999
4. 최적 ECCS 유량 계산 방법론 개발 및 사고해석 초기조건, TM.99NS06.P1999.438, 전력연구원, 1999
5. 고리3/4, 영광1/2호기 최적 성능해석 결과 보고서, TM.98NS10.P2000.38, 전력연구원, 2000
6. EPRI NP-1850 (Rev.6), RETRAN-02 - A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flows Systems, EPRI, 1995
7. EPRI NP-7450 (Rev.3), RETRAN-3D - A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flows Systems, EPRI, 1998
8. 다차원 최적 열수력 계통분석 코드 MARS 1.3 개발 및 검증, TR-1108/98, 한국원자력연구소, 1998
9. RELAP5/MOD3 Code Manual, NUREG/CR-5535, US NRC, 1995
10. WCAP-10348, Setpoint Study Korea Electric Company Units 5&6, Westinghouse Electric Corporation, 1983

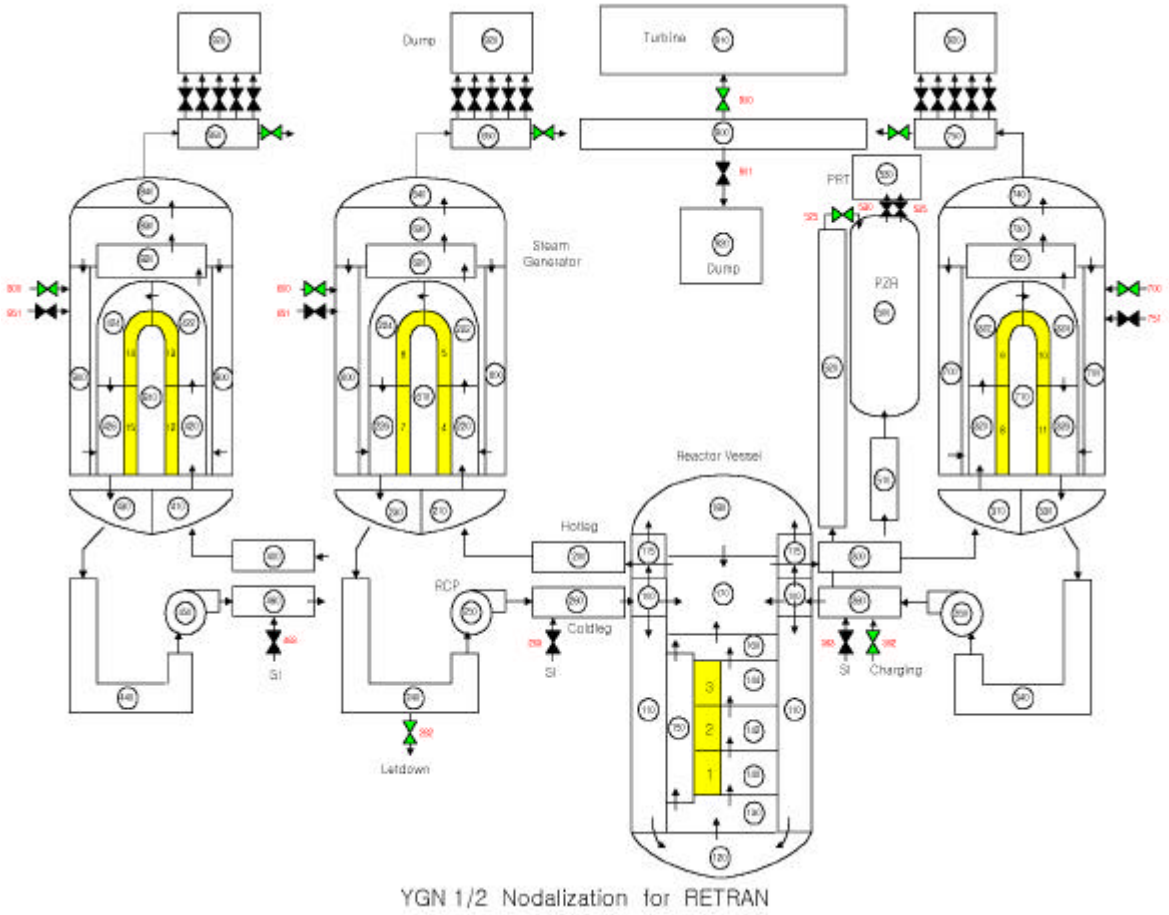

그림 1. RETRAN-3D용 영광 1,2호기 분할도

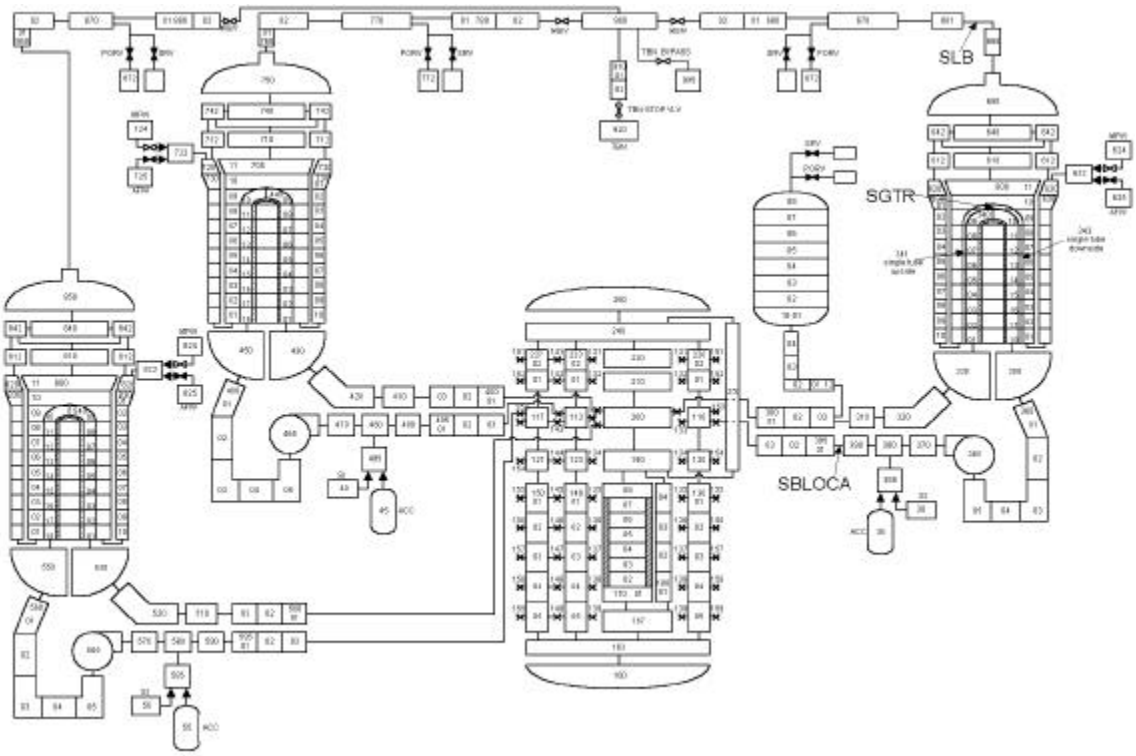

그림 2. MARS용 영광 1,2호기 분할도

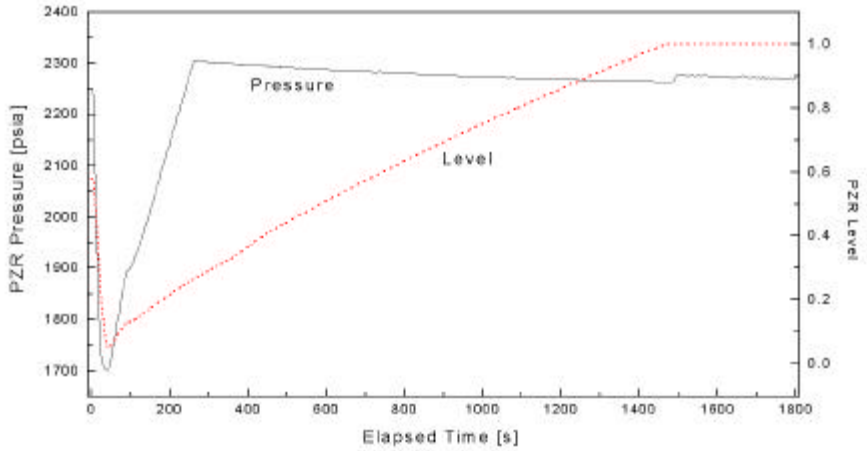

그림 3. 시간에 따른 가압기 압력 및 수위 (SLB)

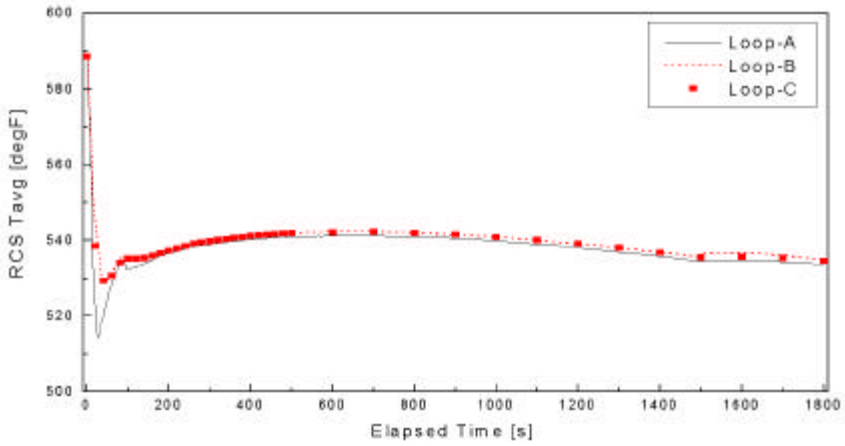

그림 4. 시간에 따른 노심냉각재계통 평균온도 (SLB)

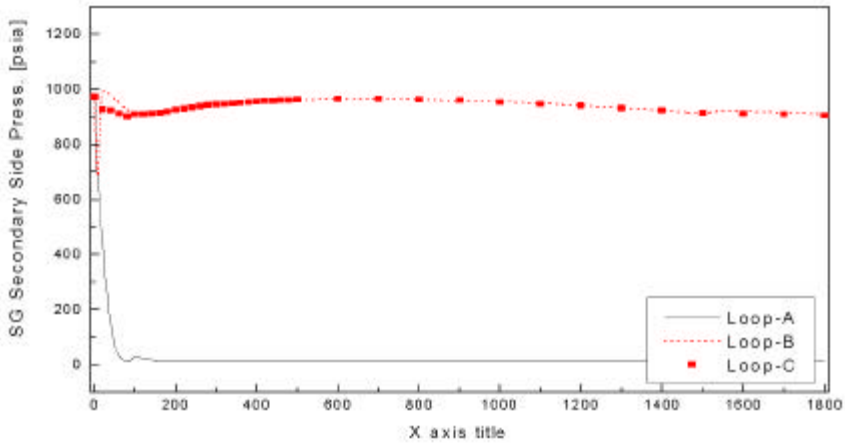

그림 5. 시간에 따른 증기발생기 2차측 압력 (SLB)

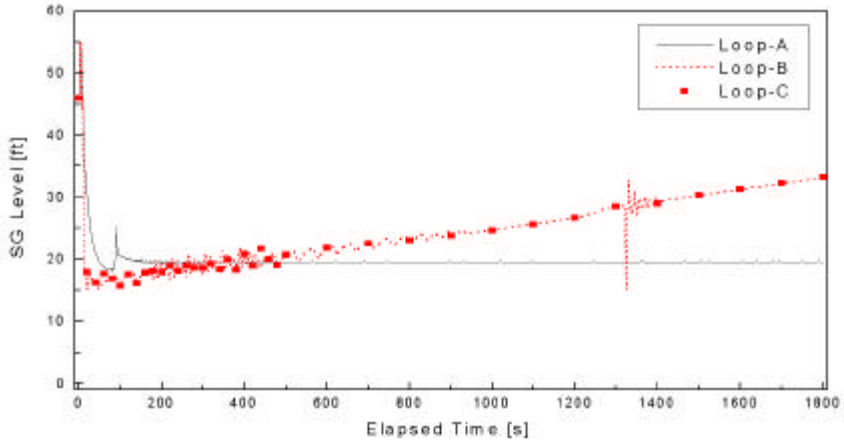

그림 6. 시간에 따른 증기발생기 수위 (SLB)

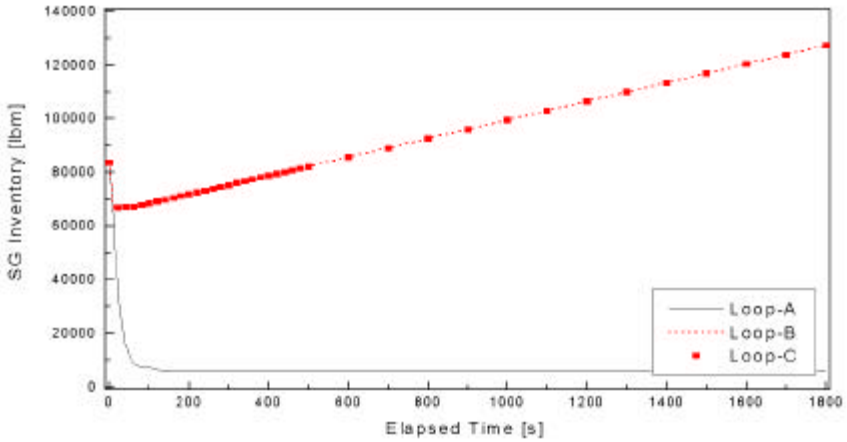

그림 7. 시간에 따른 증기발생기 재고량 (SLB)

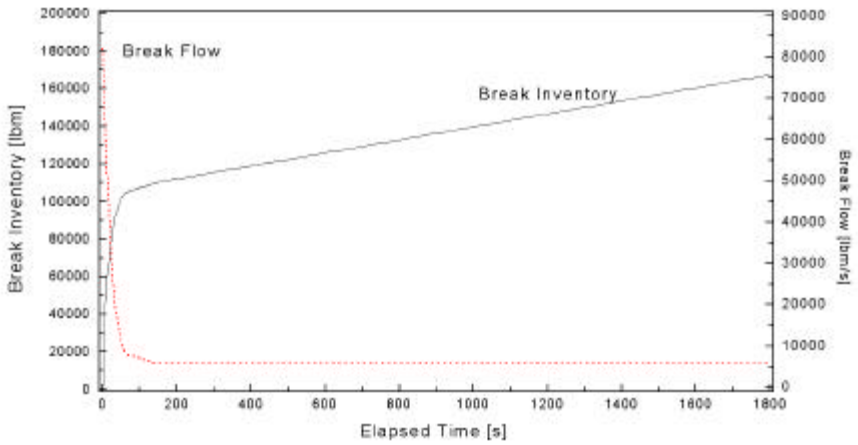

그림 8. 시간에 따른 파단 질량 누적 및 유량 (SLB)

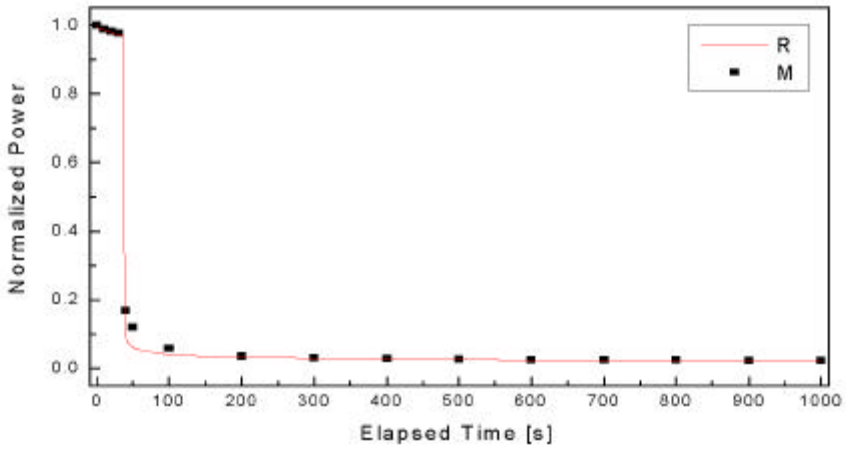

그림 9. 시간에 따른 출력 변화 (SBLOCA)

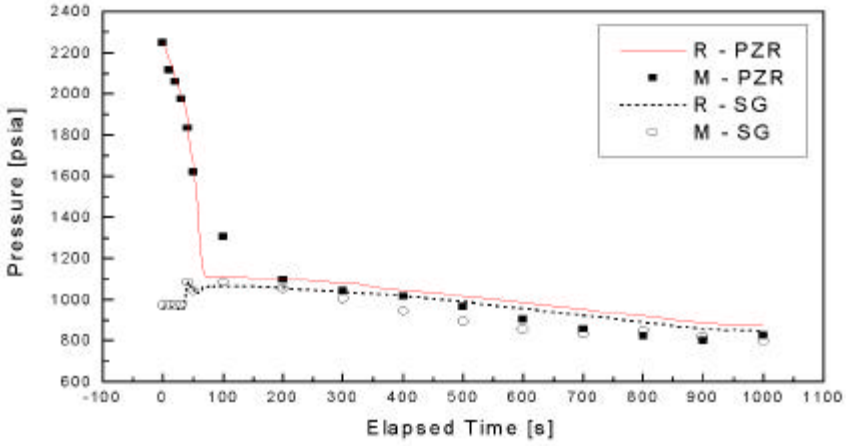

그림 10. 시간에 따른 가압기와 증기발생기의 압력 변화 (SBLOCA)

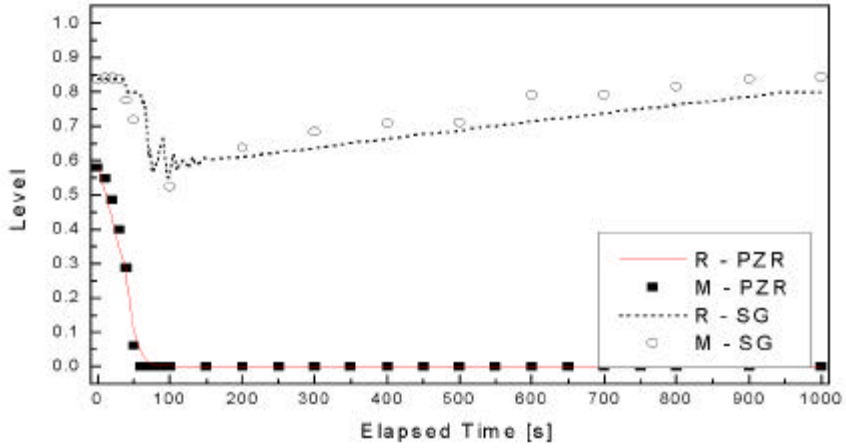

그림 11. 시간에 따른 가압기와 증기발생기의 수위 변화 (SBLOCA)

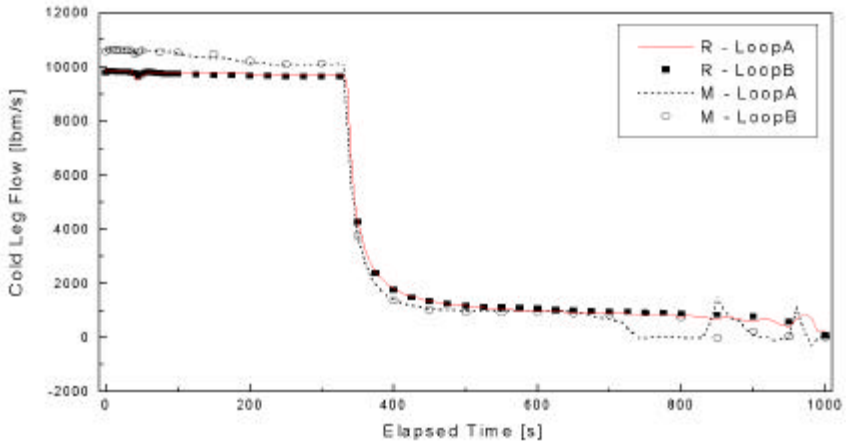

그림 12. 시간에 따른 저온관의 유량 변화 (SBLOCA)

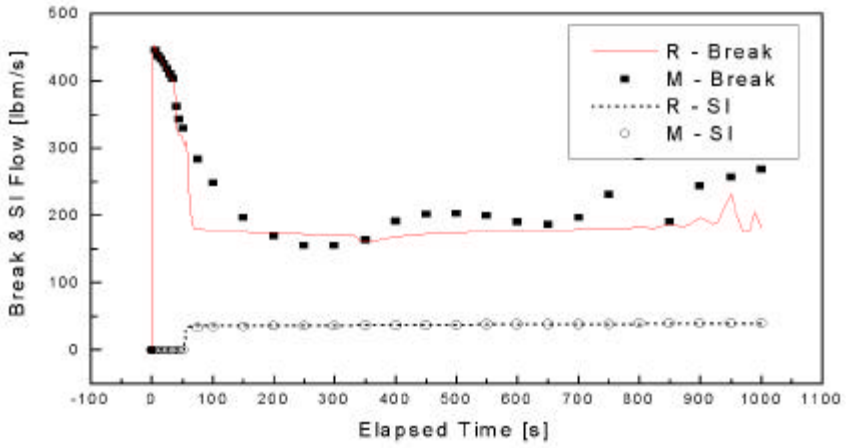

그림 13. 시간에 따른 상실 및 안전주입 유량 (SBLOCA)

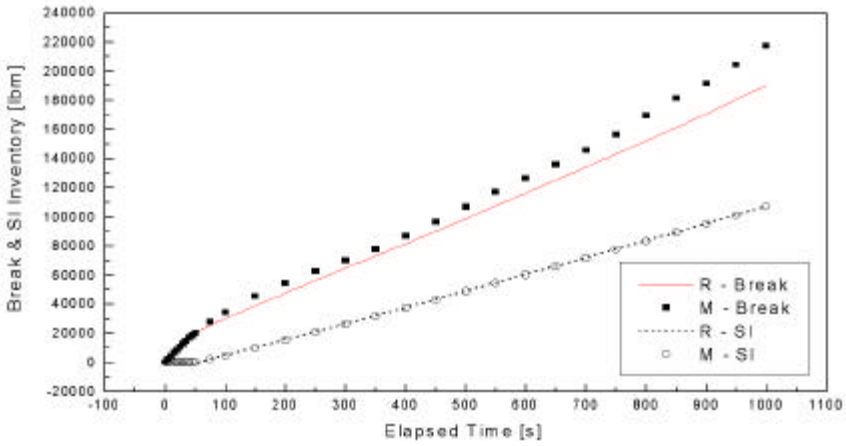

그림 14. 시간에 따른 상실 및 안전주입의 누적 질량 (SBLOCA)

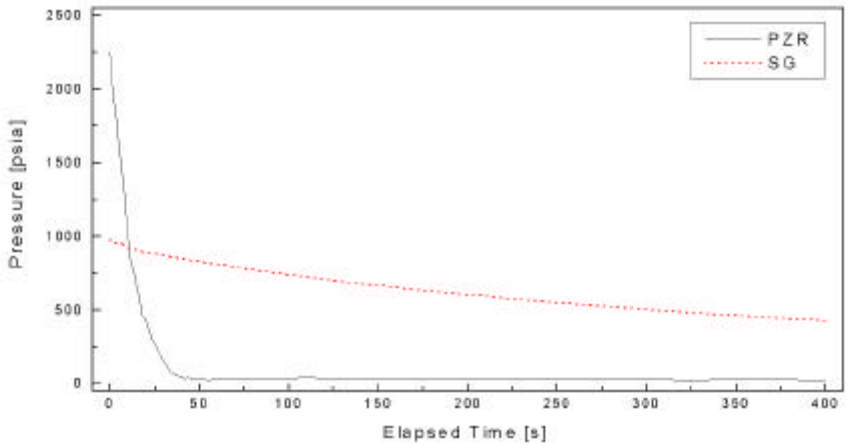

그림 15. **시간에 따른 가압기 및 증기발생기 압력** (LBLOCA)

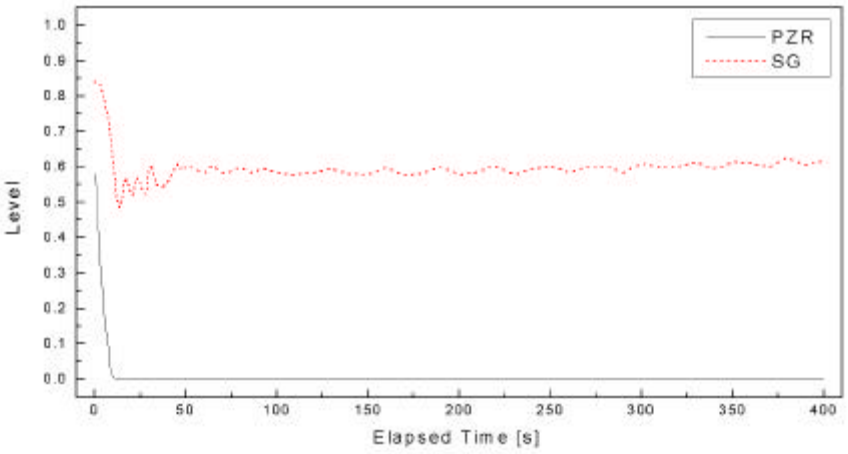

그림 16. **시간에 따른 가압기 및 증기발생기 수위** (LBLOCA)

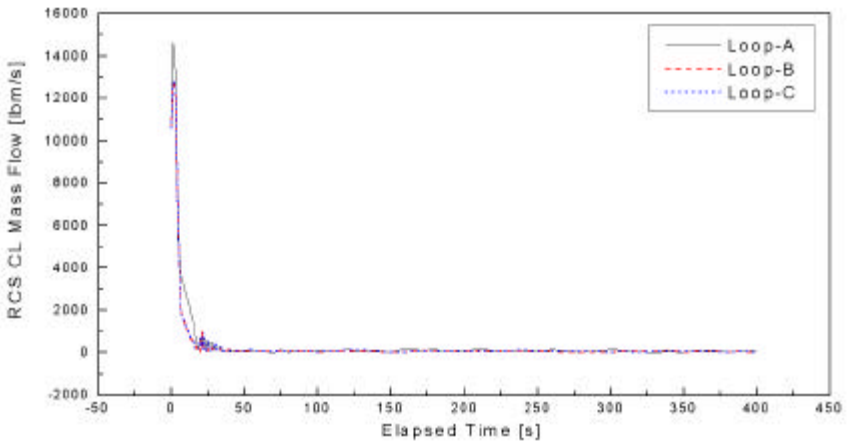

그림 17. **시간에 따른 노심냉각계통 저온관 유량** (LBLOCA)

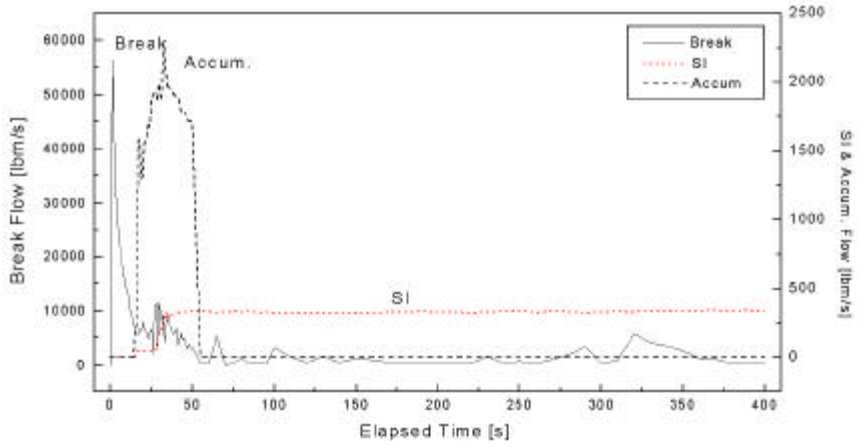

그림 18. **시간에 따른 상실, 안전주입 및 축압기 주입 유량** (LBLOCA)

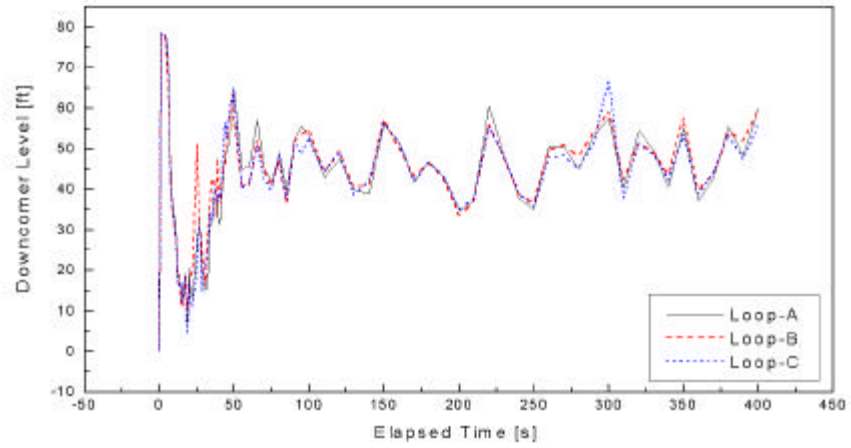

그림 19. **시간에 따른 강수관 수위** (LBLOCA)