

영광 원자력 1/2호기 시뮬레이터 NSSS 열수력 프로그램 개발: 제 2부. 코드 모의결과

서재순, 정재준*, 김경두*, 김봉건**, 이명수**, 이용관**, 이승욱***
한양대학교, 한국원자력연구소*, 한국전력공사**, (주)엑트***

Development of the NSSS Thermal-Hydraulic Program for YGN Unit 1/2 Simulator: Part II. Simulation Results

J.S. Suh, J.-J. Jeong*, K.D. Kim*, B.K. Kim**, M.S. Lee**, Y.G. Lee**, S.W. Lee***
Hanyang Univ., KAERI*, KEPCO**, ACT Ltd.***

1. 서론

영광 원자력 1/2호기[1] 시뮬레이터의 NSSS(Nuclear Steam Supply System) 열수력 모델을 개선하기 위해, 한전 전력연구원과 한국원자력연구소는 최적 계통분석코드인 RETRAN [2]을 기본으로 시뮬레이터용 NSSS 열수력 프로그램(ARTS 코드라 명명함)을 개발/장착하기 위한 연구개발을 공동으로 수행하고 있다. RETRAN 코드는 원래 "최적 모의"를 위해 개발한 것이므로 시뮬레이터용 NSSS 열수력 프로그램이 되기 위해서는 우선적으로 "실시간 모의" 및 "Robustness" 능력을 보완해야 한다. 이를 위해 기존 RETRAN 코드의 복잡한 물리적 상관식(Correlations)을 단순화하고 유동영역에 따른 불연속성을 제거하여 코드의 Robustness를 보완함과 동시에 실시간 계산이 가능하도록 개선했다[3]. 그런데, 지나친 단순화는 RETRAN 코드 고유의 장점을 훼손시킬 우려가 있으므로 물리현상을 왜곡시키지 않는 범위에서 코드를 수정해야 하며 그 결과가 물리적으로 타당한지를 확인해야 한다. 또한 종합적인 모의 결과가 시뮬레이터의 시험 요건[4]을 만족하는지 확인해야 한다.

이러한 맥락에서 현재 개발중인 ATRS 코드[3,5]의 전반적인 성능을 평가하기 위해 영광 원자력 1/2호기의 다양한 운전 상황을 모의하고 그 결과를 분석하는 작업을 진행하고 있다. 그런데, ARTS코드의 모의결과를 평가하려면 모든 평가대상사고 혹은 운전절차를 동일한 조건에서 여타의 방법(예를 들면 최적코드를 이용한 해석)으로 모의하고 비교/분석하는 작업이 필요하다. 그러나 평가 대상사고가 다양하고, 이들을 다른 코드로 모의하는 일 자체가 방대한 업무이며, ARTS코드가 현재 개발중인 코드임을 감안하여, 여기에서는 단순히 ARTS코드의 모의결과를 소개하고 정성적/정량적인 타당성을 논의하는데 주안점을 두었다.

2. 정상운전 모의 결과

영광 1/2호기의 전출력운전조건은 전출력 정상운전 자료, 최종안전성분석보고서, 영광 1/2호기 PLS[6] 등을 참고하여 설정하였다. ARTS 코드로 1000초간 Null-transient 계산을 수행하여 최종적인 정상상태 운전조건을 얻었으며, 설정 운전조건 및 계산결과와의 비교는 표 1에 나와있다. 모든 주요 원자로 계통 변수들이 1%의 오차범위내에 들고 있음을 알 수 있다.

ARTS의 정상운전(Normal operation)시험은 한국전력공사에서 발행한 "원자력교육원

#1 시뮬레이터 소프트웨어 납품서"에 명시된 SAT(Site Acceptance Test) 항목[7]을 기준하여 실시했다. SAT의 정상운전 상태 항목은 다음 아홉 가지이다.

- 100 % → 75 % 출력운전
- 75 % → 50 % 출력 운전
- 50 % → 2 % 출력 운전
- 2 % → 고온대기 상태 운전
- 고온정지 → 2 % 출력 운전
- 고온대기에서 고온정지까지 운전
- 고온정지에서 저온정지까지 운전
- 저온정지에서 고온정지까지 운전
- 2 % → 100 % 출력 운전

현재 ARTS코드는 원자로출력제어 논리가 포함되지 않으므로 위의 시험 항목 중 출력감발에 의한 운전상태를 제외하고 나머지 시험을 수행했다. 시험 결과, 모든 운전모드에서 SAT 확인항목을 만족시키는 결과를 얻었다[3]. 다만, 부분충수운전모드 시험에서는 원자로계통 배수중 각 루프의 고온관의 수위가 불균형하게 감소하며 계산시간 간격이 단축되는 등 일부 문제가 있는 것으로 나타났다.

표 1. 원자로 계통 초기 조건 비교 (전출력 운전)

원자로 계통 변수	입력 초기 조건	모의된 초기 조건	오차 (%)
노심 열출력 (MWt)	2775.0	2760.5	-0.52
가압기 압력 (psia)	2250.0	2253.2	0.14
가압기 수위 (ft)	22.4	22.5	0.44
냉각재 유량 (lb/sec)	30305.6	30263.1	0.14
고온관 온도 (*F)	619.9	620.4	0.08
저온관 온도 (*F)	557.9	558.7	0.14
냉각재 평균온도 (*F)	588.9	589.6	0.12
주증기관 압력 (psia)	961.0	962.7	0.17
증기발생기 수위 (ft)	41.5	41.6	0.24
주급수 유량 (lb/sec)	1138.05 (×3)	1145.3 (×3)	0.64
증기유량 (lb/sec)	1138.05 (×3)	1145.3 (×3)	0.64

3. 비상운전 모의 결과

ARTS의 Robustness와 정확한 계산능력을 평가하기 위해 고리 2호기용 시뮬레이터의 SAT 보고서에 포함된 사고 중에 각 사고유형별로 제한적인 사고를 다음과 같이 선정하여 과도현상 모의를 수행하였다.

- 주급수 배관 파단
- 주급수 유량 조절 밸브 비정상 열림
- 주증기 배관 파단
- 터빈 Trip
- 부적절한 보조급수 동작 신호 작동
- 원자로 냉각재 펌프 Trip
- 원자로 냉각재 펌프 축 파손
- 원자로 냉각재 펌프 회전자 고착
- 가압기 압력 방출밸브 내부 누설
- 증기발생기 튜브 파단
- 저온관 파단에 의한 냉각재 상실사고

위의 사고에 대한 ARTS 코드의 모의결과 "실시간 계산 능력" 및 "Robustness" 측면에서 아주 만족스러웠다[3]. 상기 사고 모의는 500 MHz Pentium CPU를 장착한 개인용 컴퓨터에서 수행했는데, 대형 냉각재 상실사고를 제외하고 모두 실시간 요건을 만족시켰다.

여기에서는 편의상 주증기배관 파단사고와 증기발생기 튜브 파단의 모의결과만을 보기로 한다. 사고모의시 공통적으로 다음 가정을 채택했다.

- 원자로는 100 % 전출력, 정상운전 (Steady-state operation)에 있다.
- 운전원의 운전행위는 없으며 모든 계통은 자동으로 작동한다.

(1) 주증기 배관 파단

주증기 배관 파단사고는 전출력운전중 주증기 배관 50% 파단을 가정하였다. 표 2는 사고 진행중에 발생한 주요 사건을 시간별로 나타낸 것이다.

표 2. 주증기 배관 파단 사고 시나리오

시 간	주요 사건
1100초	- S/G B 주증기 배관 50% 파단
1160초	- 증기발생기 저-저 수위에 의한 원자로 및 터빈 정지 - 주급수 차단 / 보조급수 작동
1187초	- SI 작동 및 주증기관 차단
2300초	- 가압기압력 상승으로 가압기 PORV 열림
2680초	- 건전 증기발생기 수위 회복 및 보조급수 차단

사고모의 결과는 그림 1 ~ 9에 나와있다. 주증기 배관 파단 사고와 함께 증기발생기의 압력과 수위는 급속도로 감소한다(그림 1과 2 참조). 사고직후에 증기발생기 저-저 수위가 발생하여 그림 3에 나타난 바와 같이 원자로가 정지한다. 주증기관 압력 감소로 주증기관이 차단된 후 건전한 증기발생기의 수위는 유지되고 압력도 일시적으로 증가한다. 주증기관 차단 이후에도 파단 증기관을 통한 과도한 열제거로 인해 일차측 온도는 지속적으로 감소한다(그림 4 참조). 주증기관 차단신호 발생과 동시에 안전주입신호가 발생하여 1차계통으로 비상노심생각수가 지속적으로 주입되는데 이에 따라 가압기 수위는 증가한다. 파단 증기발생기의 냉각재가 고갈됨에 따라 가압기 압력도 증가하여 마침내 가압기 안전밸브 개방설정치에 도달하면 가압기 안전밸브가 열리게 되어 더 이상의 압력증가는 발생하지 않는다(그림 6, 7 참조). 이상의 모의 결과에서 다음 사항을 확인할 수 있다.

- 증기발생기 증기 유량 증가
- 증기발생기 수위 급격히 증가
- 원자로 출력 증가(원자로 정지전)
- 원자로 냉각재 계통 평균 온도 감소
- 가압기 수위 및 압력 감소
- 안전주입신호에 따른 안전주입
- 증기발생기 저-저 수위로 원자로 트립

또한, 모의 결과는 전반적으로 영광 1호기 최종안전성분석보고서의 결과와 유사한 경향을 보였다.

(2) 증기발생기 튜브 파단

증기발생기 튜브파단 사고는 전출력운전 중 증기발생기 튜브 3개가 파단되는 것으로 가정하여 모의하였다. 표 3에는 이 사고의 주요 사상이 시간별로 나타나 있다.

사고모의 결과는 그림 10 ~ 18에 나타나 있다. 증기발생기 일차측 튜브의 파단으로 1차측 냉각재가 2차측으로 누출됨에 따라, 1차측 압력과 가압기 수위가 감소된다(그림 10과 11참조). 또한 파단부위를 통한 누출유량은 파단 증기발생기의 주급수 유량을 감소시킨다(그림 12 참조). 일차측 냉각재 재고량의 감소로 일차측 압력이 감소되고 가압기 저압력 신호에 의해서 원자로가 정지된다(그림 13참조). 원자로 정지 후 1차측 압력은 급격히 감소하고 가압기 저-저 압력에 의해서 안전주입 신호(그림 14참조)가 발생하고 그와 함께 일차측

표 3. 증기발생기 튜브파단 사고 시나리오

시 간	주요 사건
1100초	- Loop B 증기발생기 튜브 파단(3개)
1455초	- 가압기 저압력 신호에 의한 원자로 정지 및 터빈 정지 - 주급수 차단 / 보조급수 작동
1470초	- 가압기 저-저 압력에 의한 SI 작동
2165초	- 증기발생기 수위 회복에 따른 보조급수 차단

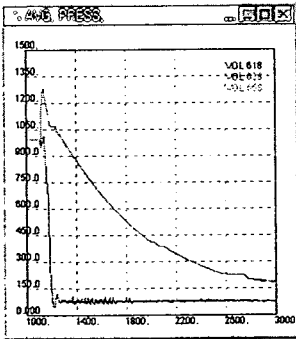


그림 1 증기발생기 압력

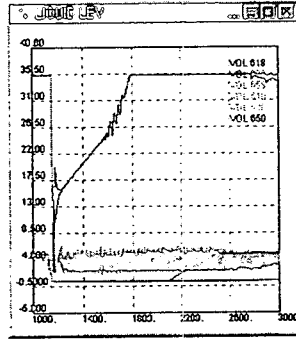


그림 2 증기발생기 수위

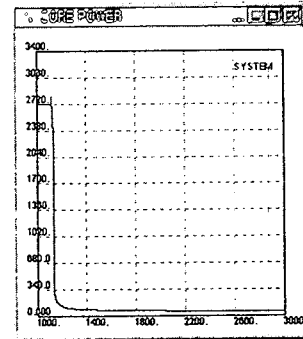


그림 3 원자로 출력

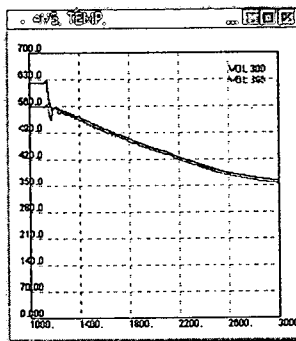


그림 4 RCS 온도

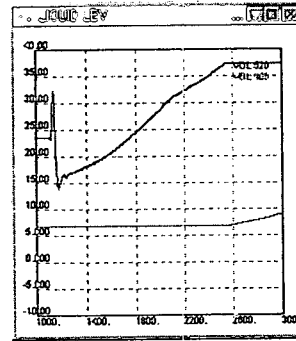


그림 5 가압기 수위

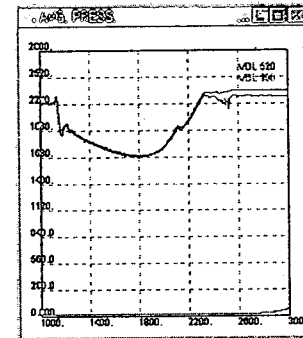


그림 6 가압기 압력

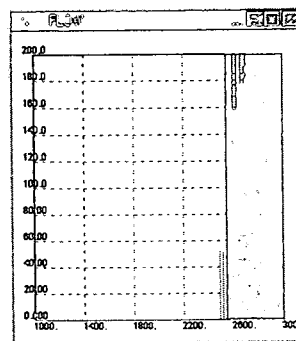


그림 7 가압기 압력방출밸브 유량

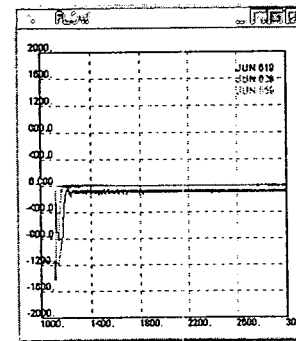


그림 8 증기 방출 유량

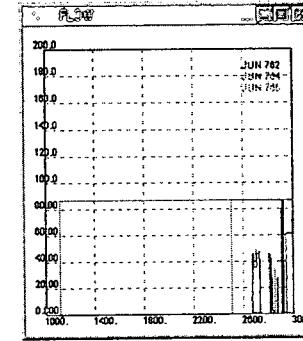


그림 9 보조급수 유량

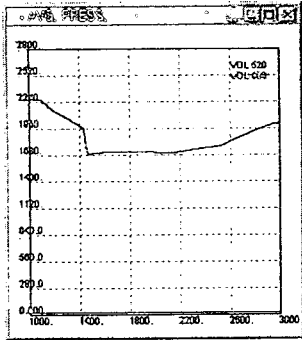


그림 10 가압기 압력

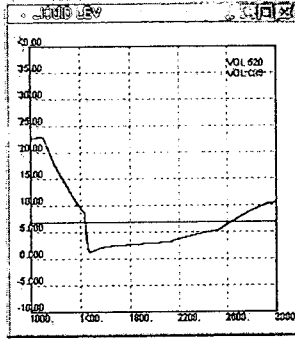


그림 11 가압기 수위

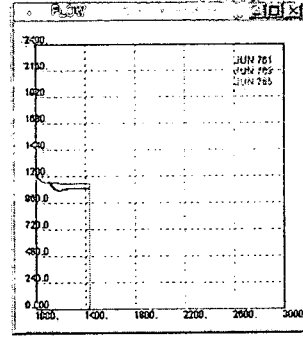


그림 12 주급수 유량

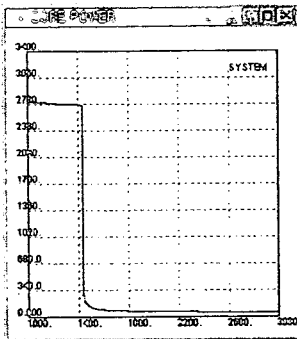


그림 13 원자로 출력

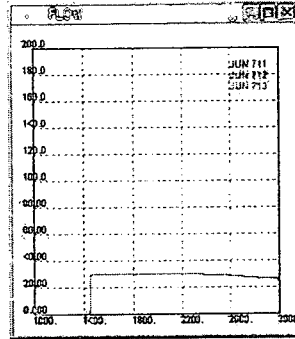


그림 14 안전주입유량

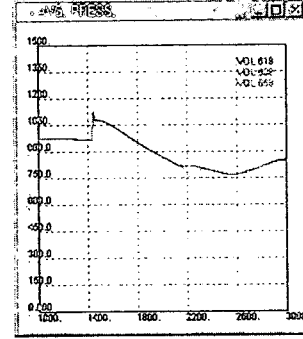


그림 15 증기발생기 증기압력

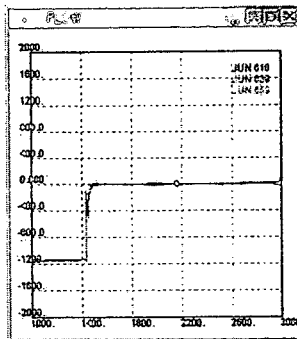


그림 16 증기발생기 유량

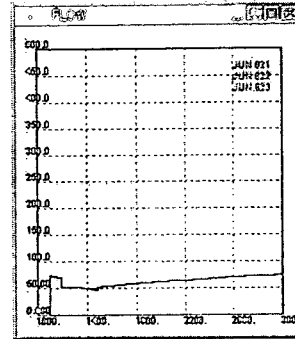


그림 17 SG 튜브 방출 유량

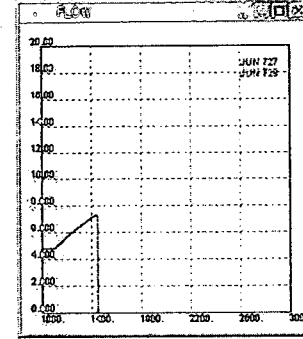


그림 18 충전 유량

충전 펌프는 정지한다. 이에 따라 1차측으로 비상노심냉각수가 지속적으로 주입되어 가압기의 압력과 수위는 점진적으로 복구된다.

이 사고의 모의 결과에서 다음 사항을 확인할 수 있다.

- 가압기 압력/수위 급격히 감소
- 충전 유량 증가
- 파단 증기발생기 주급수 유량 감소
- 가압기 압력감소에 따른 안전주입신호 발생
- 가압기 저압에 의한 원자로 트립

결론적으로, 증기발생기 튜브파단사고 모의결과는 원자력 교육원 #1 시뮬레이터 SAT 결과 및 영광 1호기 최종안전성 분석보고서 결과와 유사한 경향을 보이고 있다.

4. 결론 및 향후 계획

영광 원자력 1/2호기 시뮬레이터의 NSSS 열수력 모델을 개선하기 위해, 최적 계통분석코드인 RETRAN을 기본으로 하여 시뮬레이터용 열수력 프로그램(ARTS 코드)을 개발하고 있다. 이를 위해 RETRAN 코드의 복잡한 물리적 상관식(Correlations)을 단순화하고 또한 유동영역에 따른 불연속성을 제거하여 코드의 Robustness를 보완함과 동시에 실시간 계산이 가능하도록 수정했다.

여기에서는 현재 개발중인 ATRS 코드의 전반적인 성능, 즉, 실시간 모의능력, Robustness, Realistic Simulation 등을 보기 위해, 영광 원자력 1/2호기의 다양한 운전 양태를 모의하고 그 결과를 분석했다. 정상상태(Steady state), 정상운전(Normal operation) 및 각종 사고 등을 모의했는데 모의결과는 정성적/정량적으로 타당했으며 실시간 모의능력 및 Robustness도 충분히 입증되었다. 다만, 부분충수 운전모드 시험에서는 원자로 계통 배수중 각 루프의 고온관의 수위가 불균형하게 감소하며 계산시간 간격이 단축되는 등 일부 문제가 있는 것으로 나타났다. 지금까지 밝혀진 문제점은 앞으로 개선할 예정이며, 코드성능에 대한 체계적인 평가작업도 동시에 수행할 예정이다.

참고문헌

1. 영광 원자력 1호기 최종안전성 분석 보고서(개정본), 한국전력공사, 1995. 1.
2. M. P. Paulsen et al., RETRAN 3D code manual, EPRI NP-7450, Electric Power Research Institute (1998).
3. 김경두 외, "원자력교육원 2호기 시뮬레이터 성능개선," '00-전력연-단165, 한국전력공사 전력연구원, 2000.4.
4. Nuclear Power Plant Simulators for Use in Operator Training and Examination, ANSI/ANS-3.5-1998, American Nuclear Society (1998).
5. 이승욱 외, "영광 원자력 1/2호기 시뮬레이터 NSSS 열수력 프로그램 개발 - 제 1부 ARTS 코드개발", 한국에너지공학회 2000년도 춘계학술발표회, 2000. 5. 26, 성균관대학교.
6. 영광원자력 1, 2호기 운전주의, 제한 및 설정치 (PLS; Precaution, Limitation, and Setpoint), 한국전력공사, 1993. 12.
7. 삼성전자, "원자력교육원 #1 시뮬레이터 소프트웨어 납품서", 한국전력공사(1998).