

'96 춘계 학술발표회 논문집  
한국원자력학회

LSTF 주증기배관 파단사고 평가

이규복, 손상배  
한국전력기술(주)

요 약

LSTF의 주증기배관 파단사고 실험(RUN SB-SL-01)에 대한 RELAP5/MOD2 해석결과를 제시하고, LSTF의 RUN SB-SL-01 실험결과 중에서 일차측과 이차측 사이의 열전달률에 초점을 맞추어 증기발생기 이차측 및 일차계의 압력, 온도 등과 같은 주요변수를 조사하여 RELAP5/MOD2코드의 성능을 평가하였다. 10% 주증기배관파단사고에 관한 최적 평가에서 주요 매개변수의 전체적 추세가 비교적 잘 예측되었다. 원자로압력용기 상층부에서 기포가 발생하는 기간 동안에는 계통 압력에서 작은 차이가 발생함을 알 수 있었는데, 압력차 발생은 가압기가 비어 있거나 원자로압력용기 상층부에서 기포가 발생하기 때문으로 판단된다.

1. 개 요

대형비정상 시험장치(Large Scale Test Facility;LSTF)는 가압경수로형 원전의 대표적인 현상과 열수력학적 거동을 평가하기 위한 기본적인 자료를 획득할 수 있도록 설계되었으며, 특히 LSTF의 주증기배관 파단 실험 RUN SB-SL-01은 주증기배관 파단시 발생할 수 있는 열수력학적 현상 및 일,이차 계통의 거동과 관련한 유용한 정보를 제공하였다. 본 논문에서는 LSTF의 주증기배관 파단 실험, RUN SB-SL-01에 대한 RELAP5/MOD2 해석결과를 제시하고, LSTF의 RUN SB-SL-01 실험결과 중에서 일차측과 이차

측 사이의 열전달률에 초점을 맞추어 증기발생기 이차측 및 일차계통의 압력, 온도 등과 같은 주요변수를 조사하여 RELAP5/MOD2 코드의 성능을 평가하고자 한다.

## 2. RUN SB-SL-01 실험

두 개의 증기발생기 중 하나인 SG-B의 주증기배관에서 파단이 발생하며, 파단직경은 31.9mm로서 냉각재 저온관 유동단면적의 10%에 해당된다. 본 실험은 100% 출력에서 수행되었으며, 주증기배관파단과 동시에 수동조작에 의해 원자로 정지가 인위적으로 이루어졌다. 주증기배관 파단 초기에 취해지는 자동 방호조치는 주증기격리밸브(MSIV)의 닫힘, 증기발생기 보조급수의 주입, 안전주입 등이 있는데, 주증기격리밸브의 닫힘 또한 2차측 압력이 4.24MPa이 되었을 때 자동으로 발생하는 것으로 하지 않고 파단 시점에서 인위적으로 작동시켰다. 소외전원상실로 인해 주입이 28초 지연되는 것을 가정하여 보조급수는 파단후 28초 시점에서 증기발생기 이차측의 건전 루프에 주입되었다. 고압주입계통(HPIS)은 실험 중에 주입 위치를 변화시킬 수 있도록 설계되어 있으며, 고압주입펌프(PH)와 충전펌프(PJ) 2개로 구성되어 있다. 안전주입 계통은 자동보다 수동조작에 의해 1156초에 주입되었으며, 파단 루프에 대해서는 약 1640초에 고압주입펌프가 충전펌프로 변경되어 냉각수가 주입되었다.

실제로 이러한 차이가 어느정도 실제 현상과는 다른 결과를 발생시킬 것으로 예상할 수도 있으나 약 1시간에 걸쳐 이루어진 본 실험에서는 미미할 것으로 판단되며, 특히 본 실험에 충실하고자 모든 작동은 운전지침서를 따라 수행되었다.(참고문헌 5)

## 3. RELAP5/MOD2 해석

### 가. RELAP5/MOD2 모델

LSTF의 RELAP5/MOD2 모델은 그림 1과 같이 189개의 Volumes, 200개의 Junctions, 180개의 Heat slab으로 구성되어 있으며, 초기조건이 실험에 맞추어 초기화되었다.

10% 주증기배관 파단은 밸브 개방으로 모사되었다. 파단직경은 31.9 mm이고 파단유량

을 일치시키기 위해 민감도분석 결과에 따라 방출계수를 최종적으로 0.85로 조정하였다. 증기발생기 건전 루프의 다중-Volume 모델은 열전달 현상을 정확히 모사하는데 상당히 중요하며, 가압기의 가열기, 살수기, 동력구동방출밸브(PORV), 안전방출밸브들로 구성된 압력제어 계통을 일차계통 압력계산의 중요성때문에 모델에 포함시켰다.

#### 나. 주요 인자

주증기배관 파단사고시에 발생가능한 다양한 열수력 현상을 평가하기 위해 파단유량, 원자로냉각재펌프의 자연순환, 증기발생기 습분분리기의 영향, 증기발생기 이차측의 내부 재순환 유량, 증기발생기 세관을 통한 순방향 및 역방향 열전달, 냉각올과 원자로냉각재 계통의 열적 불균형, 증기발생기 세관의 압력차, PORV 개폐를 포함한 가압기의 거동, 원자로압력용기 상부의 기포형성(Voiding) 등의 인자를 선정하여 결과를 검토하였다.

#### 다. 결 과

##### 1) 파단부위의 방출유량

파단 부위를 통한 방출유량은 방출계수 0.85를 사용할 경우에 그림 2와 같이 모든 사고 기간동안 적절하게 예측되고, 총 파단 유량도 실험치와 좋은 일치를 나타내었다.

##### 2) 압력용기 상부의 기포형성

주증기배관파단사고와 같은 심각한 냉각 사고를 분석할 경우에는 원자로압력용기 상부에서 발생가능한 어떠한 기포형성도 관찰할 수 있도록 주의하여 모델링하여야 한다. 기존의 분석 결과에 의하면 원자로압력용기 상부의 모델링에 따라 기포형성 효과에 의해 계통전체의 압력에 현저한 영향을 줄 수 있다 (참고문헌 1,2,3).

초기의 급격한 감압에 의해 압력용기 상부가 포화상태에 도달하여 증발 과정이 서서히 진행되었으며, 그림 3과 같이 압력용기 상부에서 기포가 형성되었다.

##### 3) 계통 압력

그림 4와 같이 증기발생기 이차측 파단 루프의 감압율이 실험치와 좋은 일치를 나타내었다. 파단 루프의 증기발생기 이차측 압력은 파단 부위를 통한 증기의 방출에 의해서 연

속적으로 감소하였으며, 파단루프의 증기발생기를 통해 열 제거가 급격하게 증가하여 일차측의 과도한 냉각 및 감압이 야기되었다.

일차측 압력의 침투와 약간의 감압현상등 계통압력은 그림 5와 같이 초기 800초 동안 잘 예측되었으나 2000초 이후에는 실험치보다 약 10% 높은 1MPa 정도가 과도하게 예측되었다. 이것은 가압기가 비고 상부헤드에서 기포가 형성되는 효과에 의해서 발생한 현상인 것으로 판단된다.

주증기격리밸브의 닫힘에 의해 건전루프의 증기발생기 이차측은 에너지의 첨가에 의해 재가압되었다. 초기 700초까지는 실험치와 상당히 잘 일치되었으나 700초 이후부터 2000초까지의 건전루프의 증기발생기 이차측 압력은 그림 6에서와 같이 실험결과보다 10% 낮은 1MPa 정도가 과소평가되었다. 이러한 불일치는 이 기간동안 증기발생기 세관을 통한 열제거의 감소와 일차측의 압력과 하향유로(Downcomer)유량의 상승에 따른 것으로 판단된다.

#### 4) 계통 온도

주증기 배관 파단 후에 파단부를 제외한 모든 이차계통으로부터의 취출(Blowdown)을 방지하기 위해 주증기격리밸브가 닫히고, 단지 파단루프의 증기발생기 이차측의 파단부위를 통해 연속적으로 증기/물 이상유체가 방출되었다. 파단루프의 증기발생기 세관을 통한 열제거가 급격이 증가되어 일차계통이 빠르게 냉각되었으며, 그림 7에서 알 수 있듯이 일차계통의 열적 불균형이 나타났다.

그림 7에 나타난 바와 같이 상대적으로 낮은 온도의 고압안전주입에 의해 건전 루프의 고압안전주입 지점의 온도가 떨어지며, 반면에 건전 루프의 증기발생기 이차측은 주증기격리밸브가 닫혀 완전히 격리되므로써 압력감소가 중지되었다. 건전 루프의 증기발생기 이차측이 격리되어 초기에 원자로냉각계통으로부터의 열제거가 감소하므로 그림 7과 같이 건전루프의 저온관 냉각재 온도가 서서히 증가하였다. 그러나, 파단 루프의 증기발생기 이차측 파단부위를 통해 방출이 지속적으로 이루어지므로 파단루프의 저온관 냉각재 온도는 계속해서 감소하였다. 건전루프의 저온관 냉각재의 온도 상승은 그림 8과 같이 초기 84초까지 고온관 냉각재의 온도 상승을 초래하나, 84초 이후는 파단루프의 저온관 냉각재와의 혼합에 의해 건전루프의 저온관 냉각재의 온도 상승이 고온관 냉각재의 온도를 상승시키지 못했다.

대체적으로 계통 온도는 그림 9 및 10과 같이 증기발생기 증기돔(steam dome)을 제외하고는 잘 예측되었다. 건전 루프와 파단 루프의 증기발생기 증기돔(steam dome)의 온도 결과치는 실험치에 비해 각각 10%와 4%정도 작은 50°K와 20°K를 과소예측하였다. 실험에서는 과포화 증기가 발생하는 것으로 측정되었으나, RELAP5/MOD2에서는 포화증기가 발생하는 것으로 예측되었다.

#### 5) 수위

가압기와 증기발생기 이차측의 수위는 그림 11에서 알 수 있듯이 비교적 잘 예측되었다. 그러나 고압안전주입 이후에는 가압기에서 약간의 차이가 발생했다.

#### 6) 계통 유량

원자로냉각재펌프가 관성서행(coast down)된 후 루프의 유량이 급격히 감소하고, 냉각재는 자연순환에 의해 일차계통을 순환하였다. 그림 12 및 13에 나타난 바와 같이 루프의 유량은 건전루프와 파단루프의 열적 불균형으로 인해 혼합이 잘 이루어지지 못했다.

#### 7) 열전달

증기발생기 세관을 통한 열전달에 영향을 주는 주요 인자는 파단부의 방출 유량과 이차측에 잔존해 있는 냉각수의 분포이며, 건전루프의 증기발생기 세관을 통해서 역방향 열전달이 계속적으로 발생하였다.

### 4. 결 론

LSTF의 주증기배관 파단사고 실험, RUN SB-SL-01에 대한 RELAP5/MOD2 최적 평가에서 증기발생기 이차측 및 일차계통의 압력, 온도, 유량 등과 같은 주요변수를 조사한 결과, 증기발생기 이차측의 온도를 제외한 주요 매개변수의 전체적 추세가 비교적 잘 예측되었다. 원자로압력용기 상층부에서 기포가 발생하는 기간 동안에는 계통 압력에서 작은 차이가 발생함을 알 수 있었는데, 압력차 발생은 가압기가 비거나 원자로압력용기 상층부에서 기포가 발생하기 때문으로 판단된다.

## 참고문헌

1. Liang, Kuo-Shing, Wang, Song-Feng, 1986, "Systematic Evaluation of the Main Steam Line Break Accident for a Typical Westinghouse Three Loop Plant Using RELAP5/MOD2 Code", Proceedings of Second International Nuclear Power Plant Thermal Hydraulics And Operations, pp 15-17.
2. Rogers, J. M., 1989 a, "An Analysis of MB-2 100 % Steam Line Break Test T-2013 Using RELAP5/MOD2", AEEW-R2476, UKAEA Atomic Energy Establishment, WINFRITH Reactor Systems Analysis Division.
3. Rogers, J. M., 1989 b, "An Analysis of Semiscale Mod-2C S-FS-1 Steam Line Break Test Using RELAP5/MOD2", UKAEA Atomic Energy Establishment, WINFRITH Reactor Systems Analysis Division.
4. The ROSA-IV Group, 1989, "Supplemental Description of ROSA-IV LSTF with No. 1 Simulated Fuel Rod Assembly", JAERI-M 89-113, Japan Atomic Energy Research Institute.
5. The ROSA-IV Group, 1990 a, "Quick Look Report for LSTF Test SB-SL-01", Japan Atomic Energy Research Institute.
6. The ROSA-IV Group, 1990 b, "ROSA-IV Large Scale Test Facility (LSTF) System Descriptions, JAERI-M 90-176, Japan Atomic Energy Research Institute.

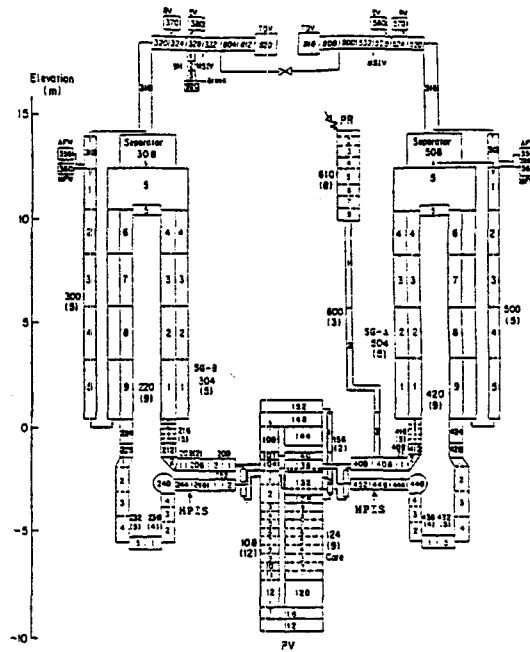


그림 1 LSTF의 RELAP5/MOD2 모델

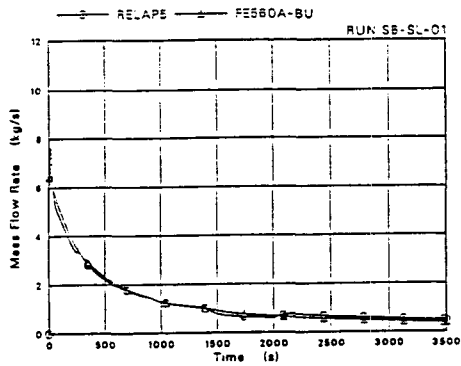


그림 2 파단부위 방출 유량

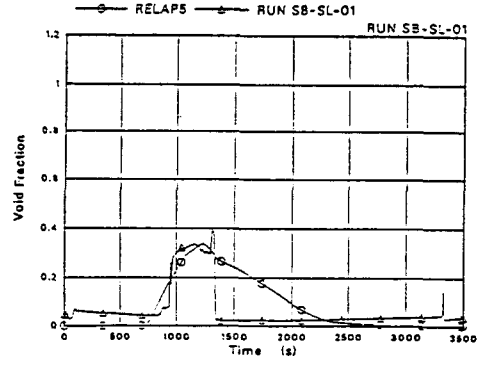


그림 3 원자로압력용기 상부 3개 노드의 체적평균 기포 분율

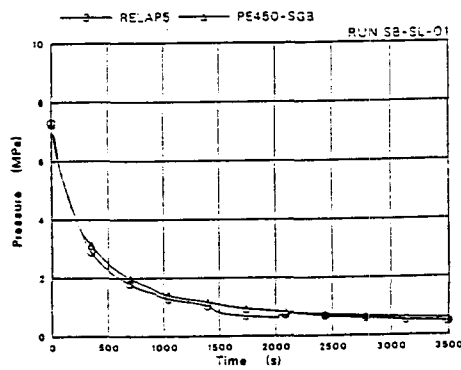


그림 4 파단부위의 이차측 압력

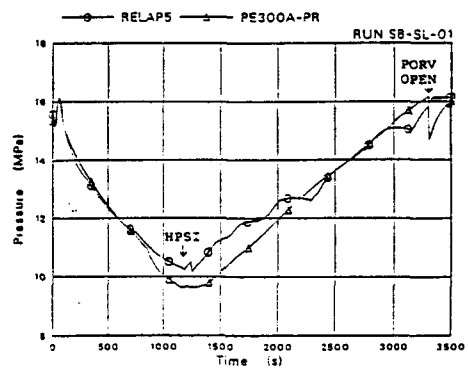


그림 5 가압기 압력

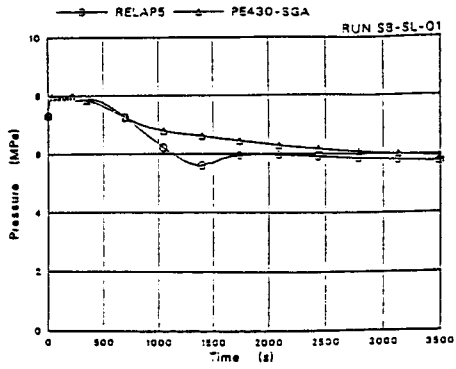


그림 6 건전루프의 이차측 압력

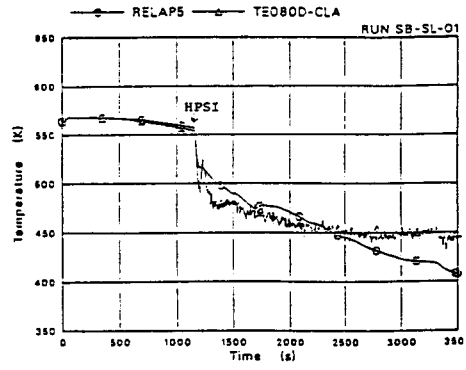


그림 7 건전루프의 저온관 온도

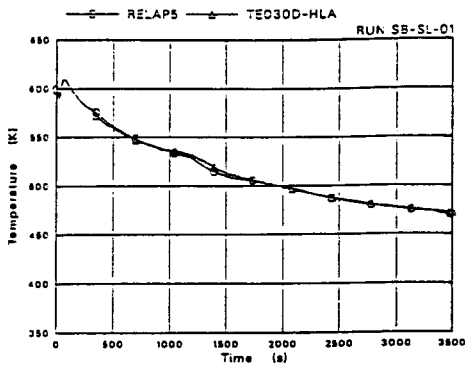


그림 8 건전루프의 고온관 온도

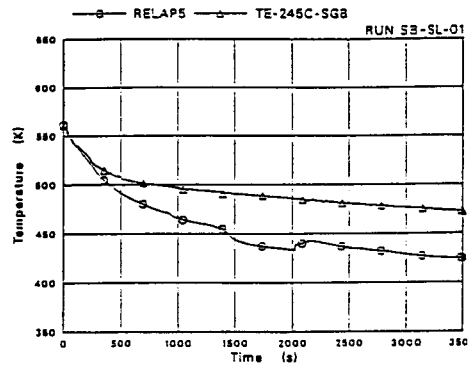


그림 9 파단루프의 증기발생기 둘 온도

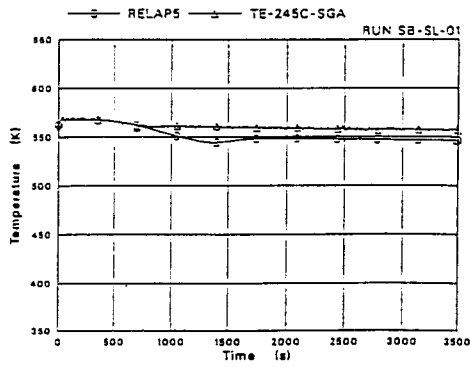


그림 10 건전루프의 증기발생기 둘 온도

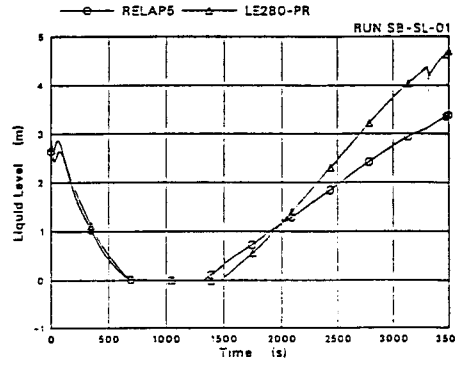


그림 11 가압기 Collapsed 수위

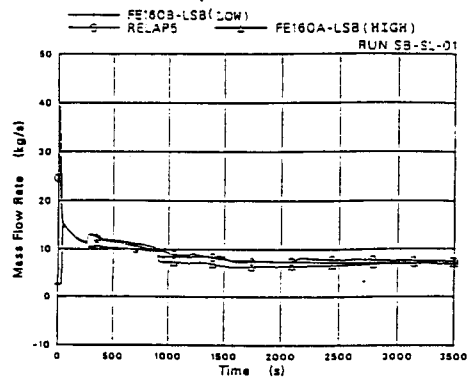


그림 12 파단루프의 펌프 흡입구 유량

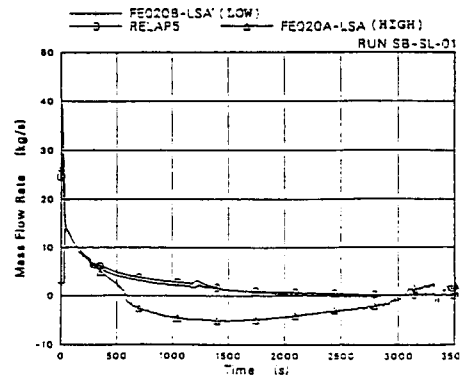


그림 13 건전루프의 펌프 흡입구 유량