

## 냉각재 펌프 축과손 과도해석을 통한 RCS 유량 편차의 영향 평가

### Study on Effect of RCS Flow Asymmetry on Locked Rotor Transient Analysis

이동혁

한전 전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

#### 요 약

국내외 WH형 원전에서 루프별 RCS 유량이 차이가 나는 유량 편차 현상이 발견되었다. WH는 노형별로 최대 유량 편차를 계산하고 유량 편차의 영향을 받는 사고들을 제시하였다. 본 논문에서는 고리 2호기 냉각재 펌프 축과손 과도해석을 EPRI에서 개발한 범용 원전 안전해석 코드인 RETRAN 코드를 사용하여 수행하고 유량 편차 현상에 따른 영향을 평가하였다. 또한 최종안전성 분석보고서 작성에 사용된 LOFTRAN 코드를 이용한 결과와 비교하였다. 해석 결과, RCS 유량 편차를 고려할 경우 약간 더 보수적인 결과를 보이고 있으나 영향이 크지는 않은 것으로 나타났다.

#### Abstract

A number of WH plants experienced RCS flow asymmetry. Westinghouse calculated maximum RCS flow asymmetry for 2,3,4 loop plants. Based on this information, effect of RCS flow asymmetry on pressure transient for Locked Rotor was studied using RETRAN code. Cases for symmetric and asymmetric RCS flow were analyzed. Results were also compared to LOFTRAN results. Results show that assumption of RCS flow asymmetry does result in slightly higher peak pressure, but the effect is not significant.

#### 1. 서 론

국내외 WH형 원전에서 루프별 RCS 유량에 차이가 나는 유량 편차 현상이 발견되었다. WH는 노형별로 최대 유량 편차를 계산하고 유량 편차의 영향을 받는 사고들을 제시하였다. 본 논문에서는 고리 2호기 냉각재 펌프 축과손 과도해석을 EPRI에서 개발한 범용 원전 안전해석 코드인 RETRAN 코드를 사용하여 수행하고 유량 편차 현상에 따른 영향을 평가하였다. 또한 최종안전성 분석보고서 작성에 사용된 LOFTRAN 코드를 이용한 결과와 비교하였다.

## 2. RCS 유량 편차 현상

원자력발전소의 1차측 유체계통은 각 루프별로 동일한 유량이 흐르도록 설계되었다. 그러나, 기기 제작 오차 등으로 인한 RCP 성능 차이, 증기발생기별 관막음률 차이 등으로 인해 루프별 RCS 유량이 차이가 나는 현상이 발생하였다. 여러 WH형 원전에서 유량 편차 현상이 발견되었으며, WH사는 NSAL-00-008을 통해 유량 편차 현상을 각 발전소에 통보하였다[1]. WH는 노형별로 최대 유량 편차를 계산하였다. 2루프 및 3루프 발전소의 경우, 증기발생기 관막음률 차이를 10%로 가정하여 루프간 최대 유량 편차는 루프 유량의 5%인 것으로 나타났다. WH에 따르면 유량 편차 현상이 원자력발전소의 안전해석 결과에 주는 영향은 크지 않으며, 과도현상 유형에 따라 유량 편차의 영향을 받는 사고도 있고, 받지 않는 사고도 있다. 일반적으로 과도현상이 루프별로 대칭적으로 일어나는 경우 유량 편차의 영향을 받지 않으며, 비대칭적인 과도현상은 유량 편차의 영향을 받는다. 본 논문에서 해석하고자 하는 냉각재 펌프 축파손 과도현상은 한쪽 냉각재 펌프의 축이 고착되는 사고로 비대칭적인 현상이 나타나며, 유량 편차의 영향을 받는다.

## 3. 냉각재 펌프 축파손 안전해석

원자로냉각재 펌프 축파손 과도현상은 ANS Condition IV로 분류되는 과도현상이다. 축파손이 일어나면 원자로냉각재 펌프가 즉시 멈추어 해당 루프의 냉각재 순환이 정지된다. 순환 정지가 즉시 일어난다는 점이 단순한 펌프 트립 현상과 다르다. 단순한 펌프 트립의 경우 펌프 회전체의 관성 및 유체의 관성에 의해 유량이 서서히 감소된다. 원자로 트립은 RCS 저유량에 의해 발생된다. WH의 안전해석에서는 터빈 트립이 발생되면 건전한 RCP가 트립되는 것으로 가정하였다.

원자로냉각재 펌프 1대가 고착되면 RCS 유량이 급격하게 감소하여 노심에 공급되는 냉각재 유량이 줄어들며, 이에 따라 노심 상부 및 고온관의 온도가 급격히 상승한다. 냉각재의 온도 상승에 따른 냉각재 팽창으로 1차측 압력이 급격히 상승한다. 또한 증기발생기를 통한 열제거량 역시 급격히 감소하므로 1차측 가열이 더욱 빨리 일어난다. 실제 발전소에는 1차측에 가압기 PORV, 2차측에 증기 덤프 계통이 있어 1차측 및 2차측의 과압을 방지하며, 2차측을 통한 열제거량을 조절하여 1차측 온도를 적절히 유지시킨다. 그러나, 안전해석 수행시에는 이런 제어 계통은 작동되지 않는다고 가정한다. 1차측 압력이 너무 높아지는 것을 방지하기 위해 가압기 안전밸브가 작동된다고 가정한다. 그러나, 압력 축적 현상을 고려하여 실제 개방 설정치보다 높은 압력에서 개방된다고 가정한다. 안전해석에 사용된 주요 가정을 정리하면 <표-1>과 같다.

< 표-1 RCP 축파손 안전해석시 주요 가정 >

RCP 축파손 안전해석 관련 주요 가정	가 정	비 고
증기 덤프 계통	×	
가압기 PORV	×	
가압기 살수 계통	×	
가압기 안전밸브 개방 설정치	보수적으로 높게	
RCP 트립	원자로/터빈 트립시 RCP도 트립됨	

## 4. RETRAN 모델

### 가. 정상상태 모델

사고해석에 앞서, 먼저 고리 2호기 정상상태 RETRAN 모델을 작성하였다. 정상상태 모델은 50개의 체적과 83개의 junction으로 구성되었다. 고리 2호기의 정상상태 RETRAN nodalization은 그림 1과 같다. 2개의 RCS 루프 및 증기발생기를 각각 모델링하였다. 가압기 안전밸브 및 PORV, 증기발생기 안전밸브, 원자로 트립 계통 등이 모델 되었다. 사고해석에는 사용되지 않았으나, 주급수 유량 제어 계통, 증기 덤프 계통 등도 모델링했다.

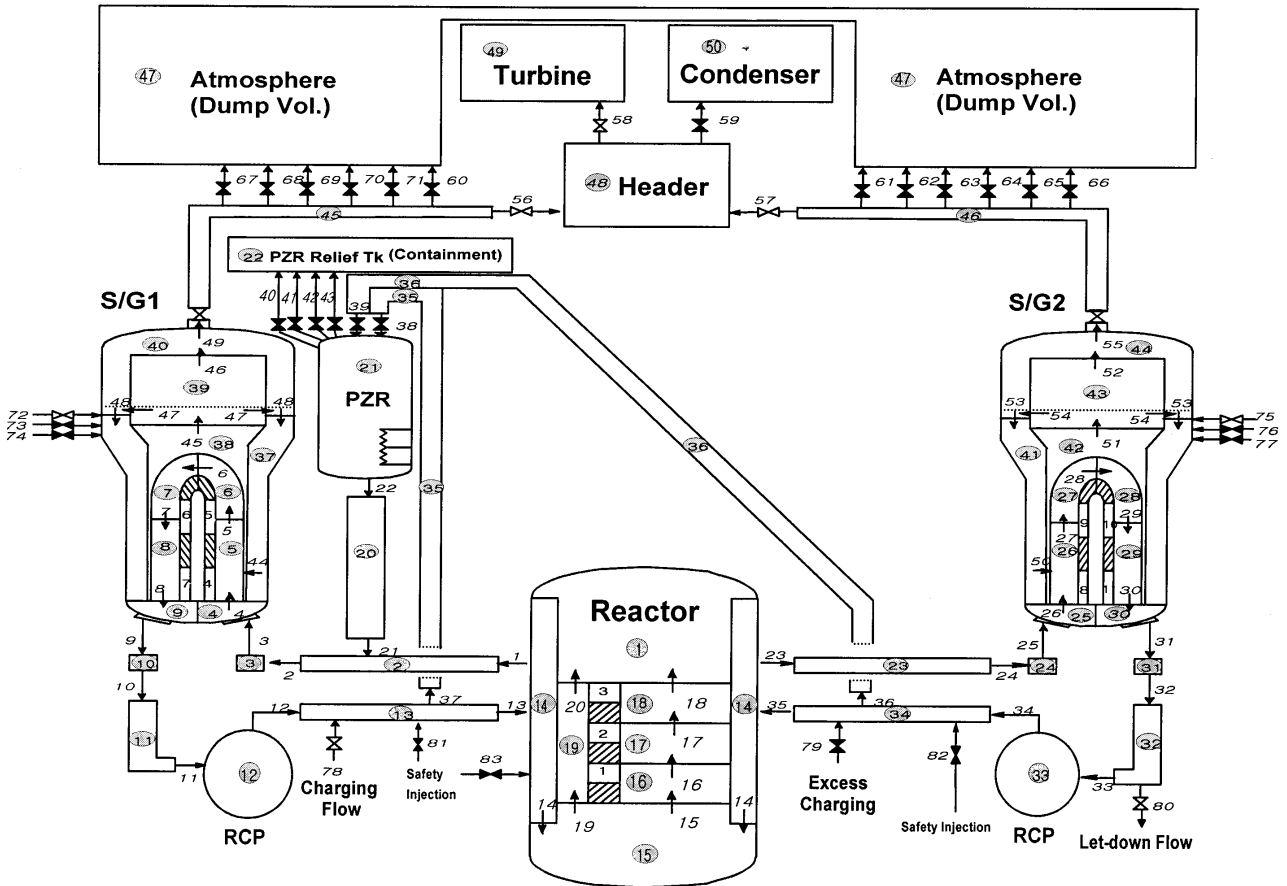


그림 1 고리 2호기 정상상태 RETRAN Nodalization

### 나. RCS 유량 편차 모델링

WH에 따르면 2루프 발전소의 경우 루프간 최대 유량 편차는 5%이다. 이는 증기발생기 관막음률이 10% 만큼 차이 나는 것을 가정했을 때의 값이다. 유량편차가 없을 때 각 루프의 유량을 100%로 보았을 때 최대 유량 편차를 가정하면 한 개의 루프는 97.5%, 다른 하나는 102.5%의 유량이 흐른다. 사고해석시 루프 #1의 RCP가 고착된다고 가정하므로, 루프 #1의 유량이 작은 경우와 큰 경우를 모두 모사해야 한다. 또한 유량이 작은 쪽 루프는 10%의 증기발생기 관막음을 고려하였다. 관막음률에 비례하여 증기발생기 U 튜브의 열전달 면적, 체적 및 단면적을 조절하였다. 증기발생기를 통한 열제거량 및 2차측 증기 유량도 1차측 유량에 비례한다고 가정하였다.

< 표-2 RCS 유량 편차 가정 >

	조건 1		조건 2	
	루프 1	루프 2	루프 1	루프 2
1차측 유량	97.5%	102.5%	102.5%	97.5%
2차측 유량	97.5%	102.5%	102.5%	97.5%
증기발생기 관막음률	10%	0%	0%	10%

**다. 냉각재 펌프 축파손 모델링**

원자로냉각재 펌프 #1의 축파손은 t=0.0001초에 일어나는 것으로 가정하였다. RCS 저유량 신호에 의해 원자로 트립이 발생되며, 저유량 설정치 도달후 원자로 트립 발생까지 1초의 지연시간을 가정하였다. 원자로 트립 발생과 동시에 터빈 트립 및 루프 #2의 원자로냉각재 펌프 트립이 발생하도록 모델하였다. 본 연구에서는 최대 압력에 초점을 맞추었기 때문에 가압기 PORV가 작동되지 않는다고 가정하여 1차측 압력이 최대가 되도록 하였다. 또한 가압기 안전밸브의 개방설정치를 2550 psia로 높게 가정했으며, 여기에 추가로 0.95초의 지연시간을 모델하였다. 또한 가압기 안전밸브의 용량이 FSAR 15장 안전해석에서 사용한 가압기 안전밸브 용량과 비슷하도록 안전밸브의 단면적을 줄여 과압 방지 능력을 극소화했다. 펌프 축파손 과도현상은 매우 짧은 시간에 최대 압력에 도달했다가 다시 압력이 감소하므로 반응도 피드백 효과는 모델하지 않았다.

**5. 분석 결과**

**가. RETRAN 코드를 이용한 냉각재 펌프 축파손 과도 현상**

RETRAN 코드를 사용하여 고리 2호기 냉각재 펌프 축파손 과도 현상을 분석하였다. t=0.0001초에 루프 #1 원자로냉각재 펌프의 축파손이 발생한다. 루프 #1 유량은 약 1.6초에 0에 도달하며, 그 이후에는 역류 현상이 일어난다(그림 3). 루프 #2 유량은 초기에 증가하다가 원자로 트립 발생과 동시에 펌프가 트립되어 유량이 감소된다. 펌프 회전체의 관성 및 유체의 관성에 의해 유량은 천천히 감소한다. RCS 최대 압력은 2793 psia로 약 4.6초에 나타난다. 최대 압력 도달후 RCS 압력은 빠른 속도로 감소되어 사고가 종료된다(그림 2). 참고로 LOFTRAN 계산 결과와 RETRAN 계산결과를 비교하였다. 시간에 따른 원자로 출력을 비교하면 두 코드의 결과가 매우 유사하나, LOFTRAN 코드로 계산한 결과가 약간 높은 값을 보이고 있다. RCS 압력의 경우 LOFTRAN 코드가 RETRAN 코드보다 훨씬 높은 값을 보인다. LOFTRAN으로 계산한 최대 압력은 약 3.8초에 2913 psia이다. LOFTRAN의 결과가 최대 압력이 좀더 일찍 나타나며, 최대 압력도 약 120 psi 정도 높다. 차이가 나는 주요 원인은 두 코드에서 사용한 발전소 초기 조건의 차이인 것으로 판단된다. RETRAN 코드의 경우 초기 출력 및 압력을 nominal 값을 사용한 반면, LOFTRAN 코드에서는 불확실도를 고려하여 초기 출력 및 초기 가압기 압력을 102% 및 2300 psia로 높게 가정하였다. 루프별 RCS 유량은 RETRAN 계산 결과와 LOFTRAN 계산 결과가 유사한 경향을 보이고 있다.

**나. RCS 유량 편차의 영향**

RCS 유량 편차를 고려하여 RETRAN 계산을 수행하였다. 유량 편차의 영향이 나타나는 부분은 원자로 트립 시간이다. RETRAN 모델에서 유량 편차가 없는 경우를 기준으로 계산된 저유량 설정치에서 원자로 트립이 발생하도록 했기 때문에 루프 #1의 유량이 큰 경우(조건 2) 원자로 트립

발생 시간이 약간 지연되는 효과가 있다. 유량 편차를 고려하지 않은 경우 원자로 트립이 1.094초에 발생되며, 유량 편차를 고려한 경우 1.11초에 발생된다. 루프 #1의 유량이 작은 조건 1의 경우 원자로 트립이 더 빨리 발생하므로 최대 압력이 오히려 더 낮게 계산된다. 또한 유량이 많은 쪽의 냉각재 펌프가 손상되면 유량이 적은 루프만 유동이 형성되므로 유량 편차를 고려한 경우에 노심에 공급되는 유량이 약간 감소된다. 그러나 두 경우의 차이는 크지 않으며, 과도현상의 경향은 동일하다(그림 4.5). 조건 2에서 최대압력은 유량 편차를 고려한 경우가 6 psi 더 높게 나타났다. 한편, 참고로 건진한 RCP의 트립 시점을 2초 지연시킨 경우를 계산하였다. 유량 편차의 유무에 관계없이 최대압력이 약 60 psi 정도 감소되었다.

< 표-3 주요 계산 결과 >

조건	원자로 트립 시점	최대 압력
유량 편차 없음	1.094 sec	2793 psia @ 4.6 sec
조건 2(루프 #1 고유량)	1.11 sec	2799 psia @ 4.5 sec
유량 편차 없음, RCP 트립 2초 지연	1.094 sec	2733 psia @ 4.6 sec
조건 2(루프 #1 고유량), RCP 트립 2초 지연	1.11 sec	2739 psia @ 4.4 sec

## 6. 결론

RETRAN 코드를 사용하여 고리 2호기 냉각재 펌프 축과손 과도해석을 수행하고 RCS 유량 편차 현상이 최대 압력에 미치는 영향을 평가하였다. 분석 결과, 유량 편차를 고려할 경우 최대 압력이 더 높아짐을 확인할 수 있었으나, 압력 상승 폭은 약 6 psi로 크지 않았다. 또한 LOFTRAN 코드의 결과와 RETRAN 코드의 결과를 비교하여 서로 비슷한 경향을 보임을 확인할 수 있었다. 또한 손상되지 않은 RCP의 트립 시간을 약간 완화함으로써 최대 압력을 크게 낮출 수 있음을 확인하였다.

## 7. 후 기

본 연구는 과학기술부가 지원하는 원자력 연구개발 중장기 과제중 “원전 운전과도해석 및 신안전해석 기술개발” 과제의 일환으로 수행하였다.

## 8. 참고문헌

1. NSAL-00-008, Reactor Coolant Loop Flow Asymmetry, Westinghouse
2. 고리 2호기 FSAR, 한국전력공사
3. 고리 2호기 PLS, 한국전력공사
4. EPRI NP-7450, RETRAN-3D - A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flows Systems, EPRI, 1995
5. WCAP-9951, Setpoint Study Korea Electric Company KO-RI Unit No.2 , Westinghouse Electric Corporation, 1983
6. Safety Analysis Standard, Westinghouse Electric Corporation
7. WCAP-7878, LOFTRAN Code Description and User's Manual, Westinghouse Electric Corporation
8. TC.91IJ03.R1998.76, 고리 2호기 RETRAN 정상상태 요약보고서, 한전 전력연구원, 1998

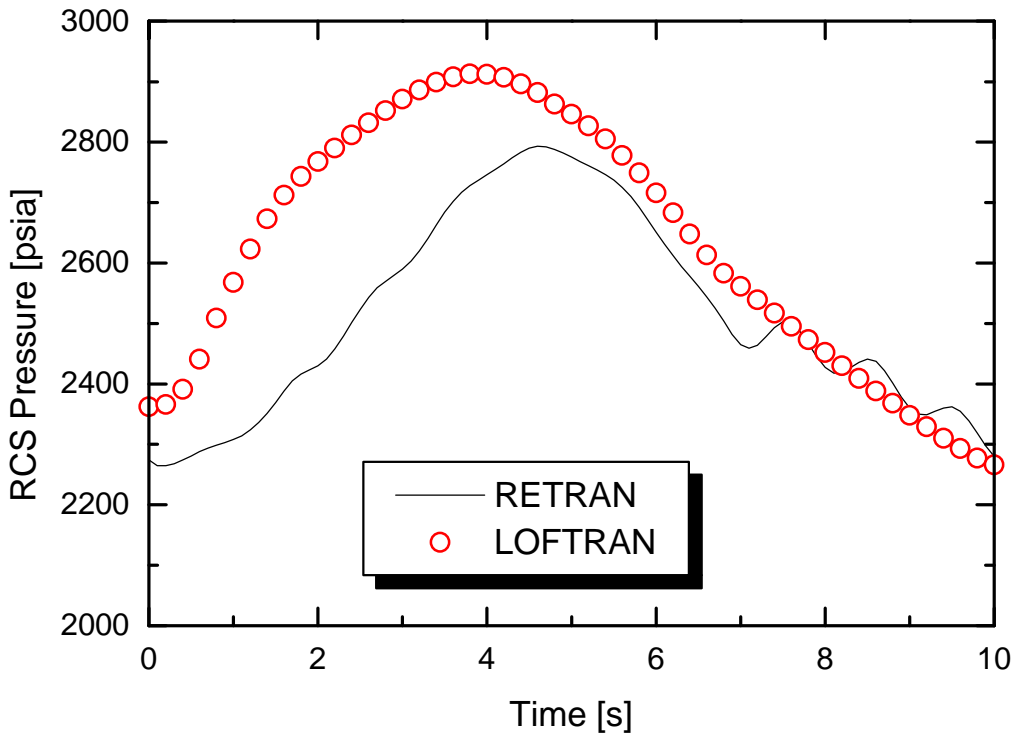
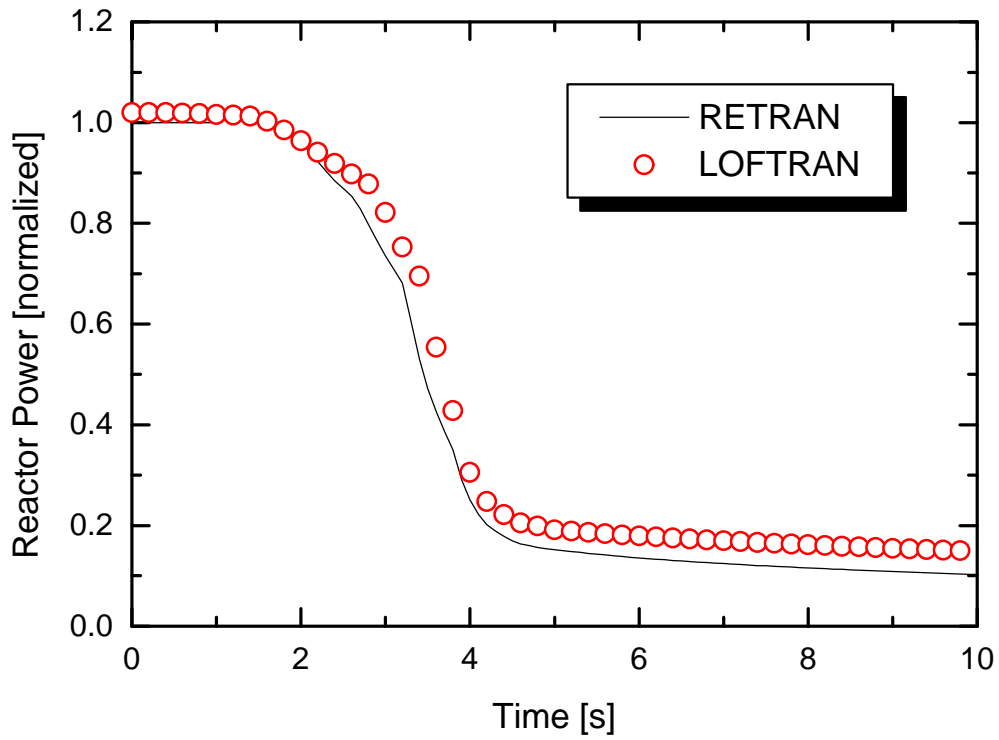


그림 2 시간에 따른 원자로 출력 및 RCS 최대 압력(Symmetric flow)

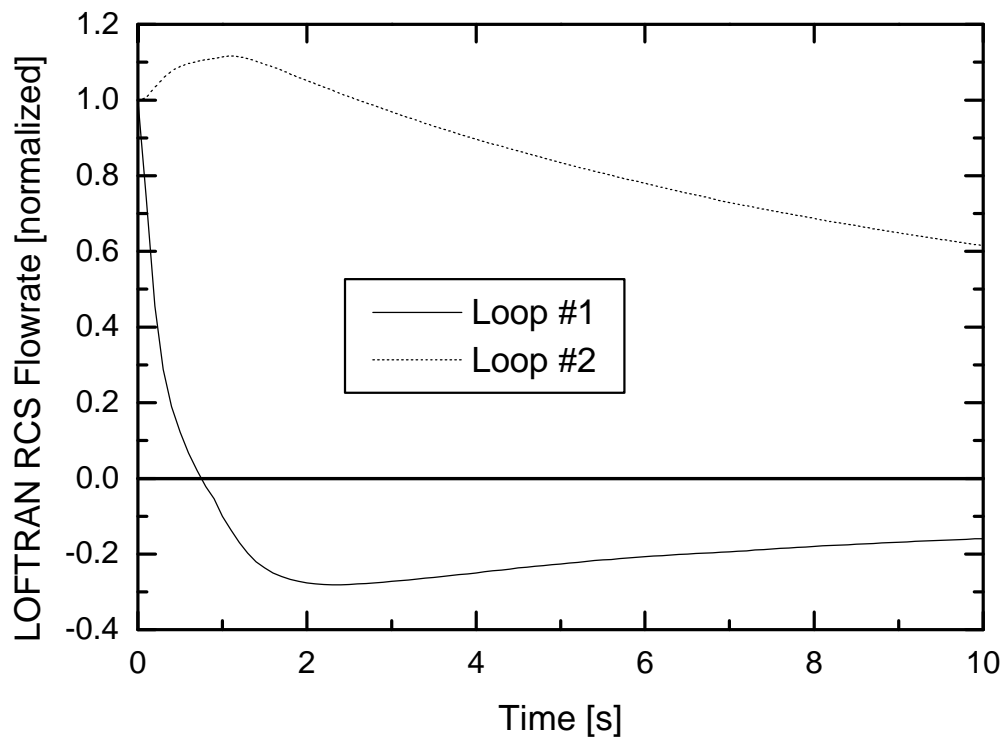
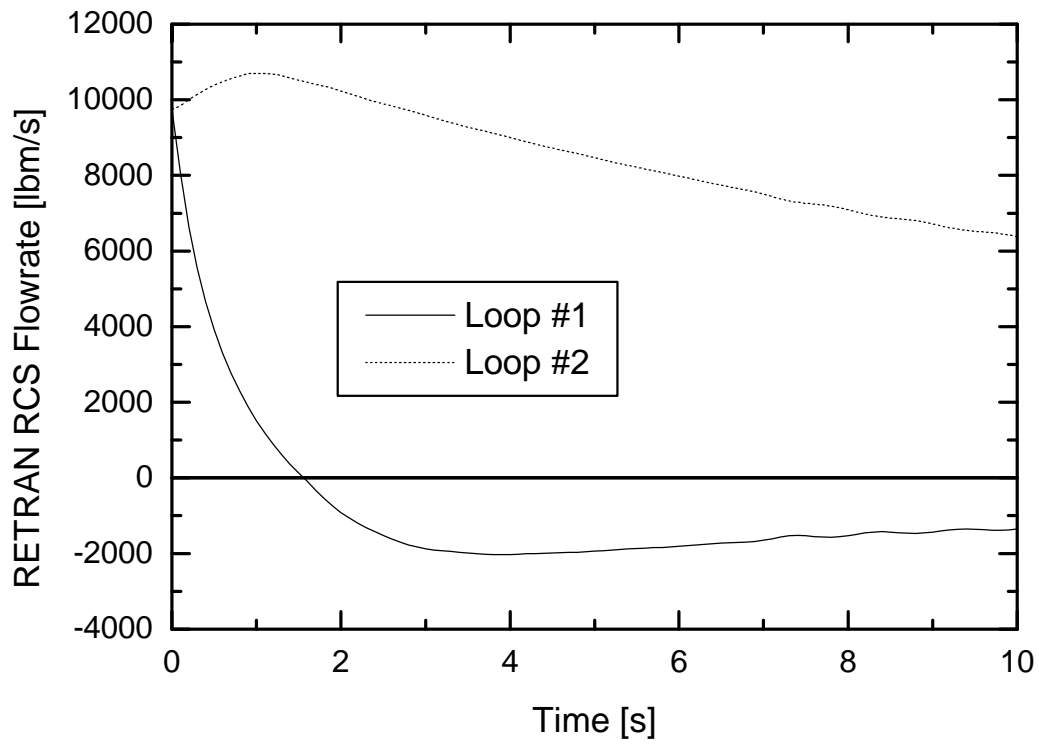


그림 3 시간에 따른 원자로 냉각재 유량(Symmetric flow)

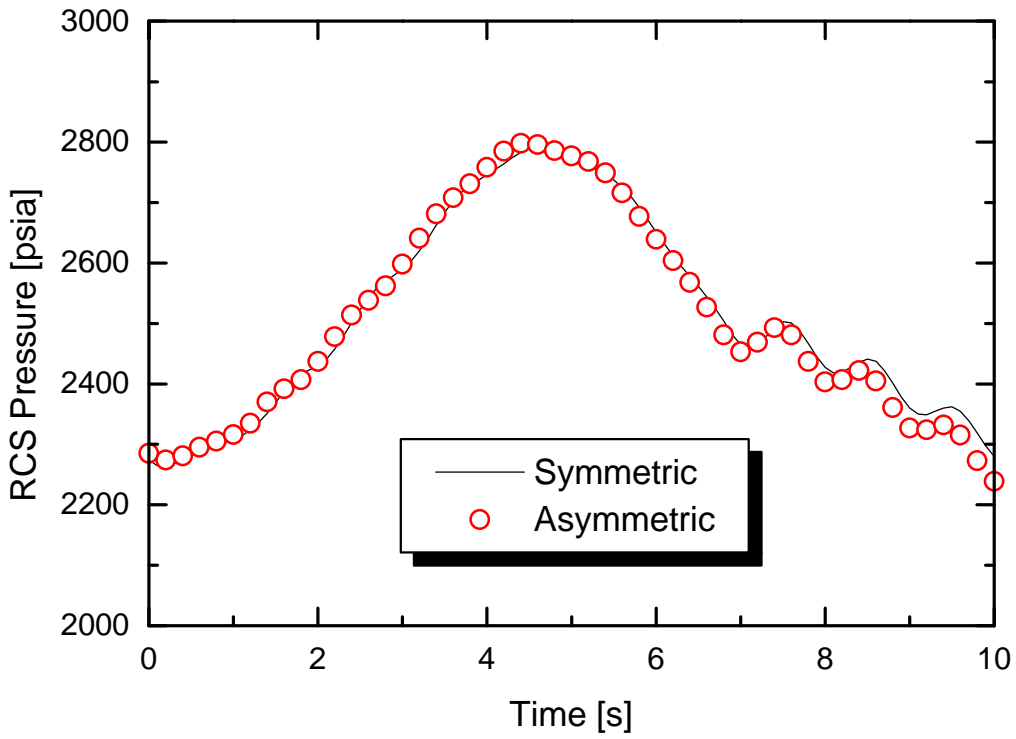
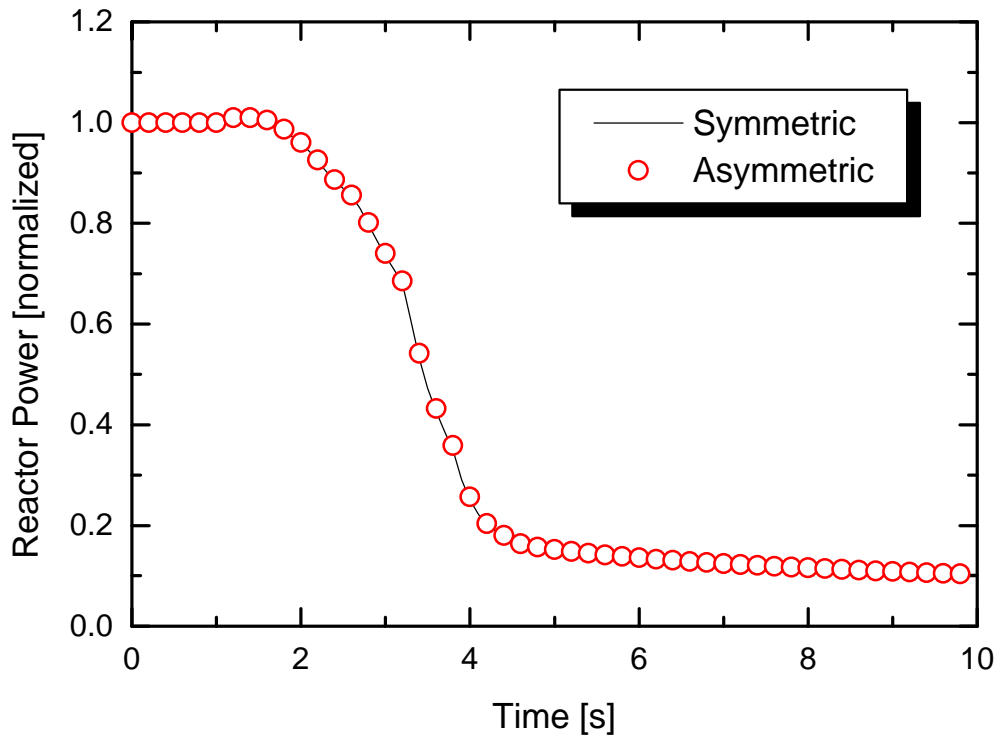


그림 4 시간에 따른 원자로 출력 및 RCS 최대 압력(유량 편차 고려)



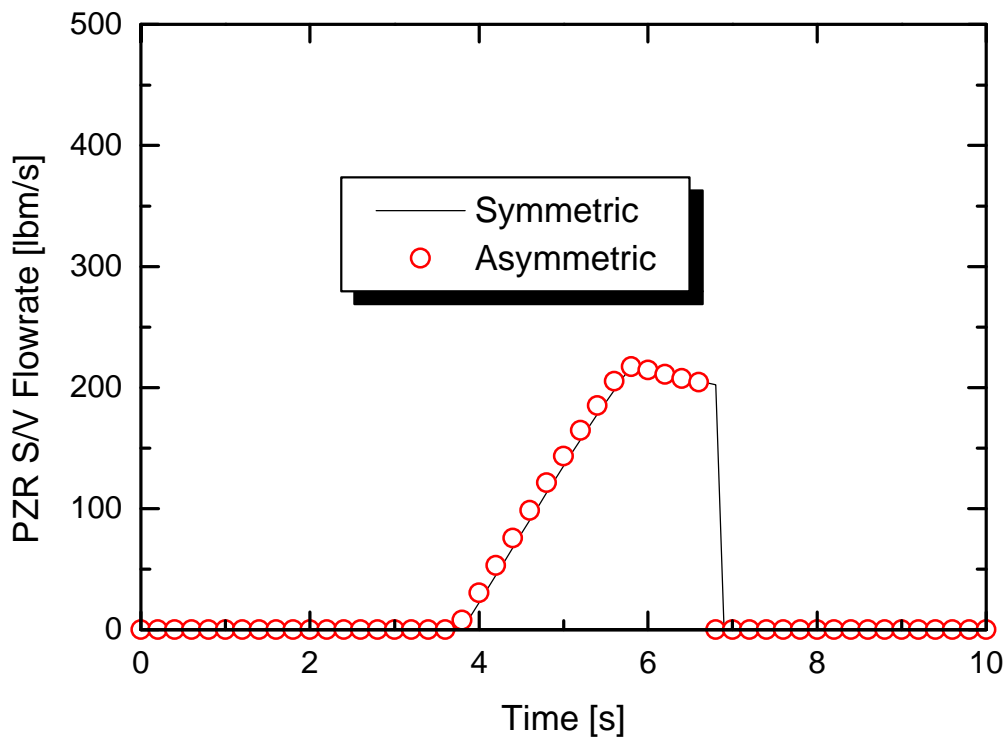
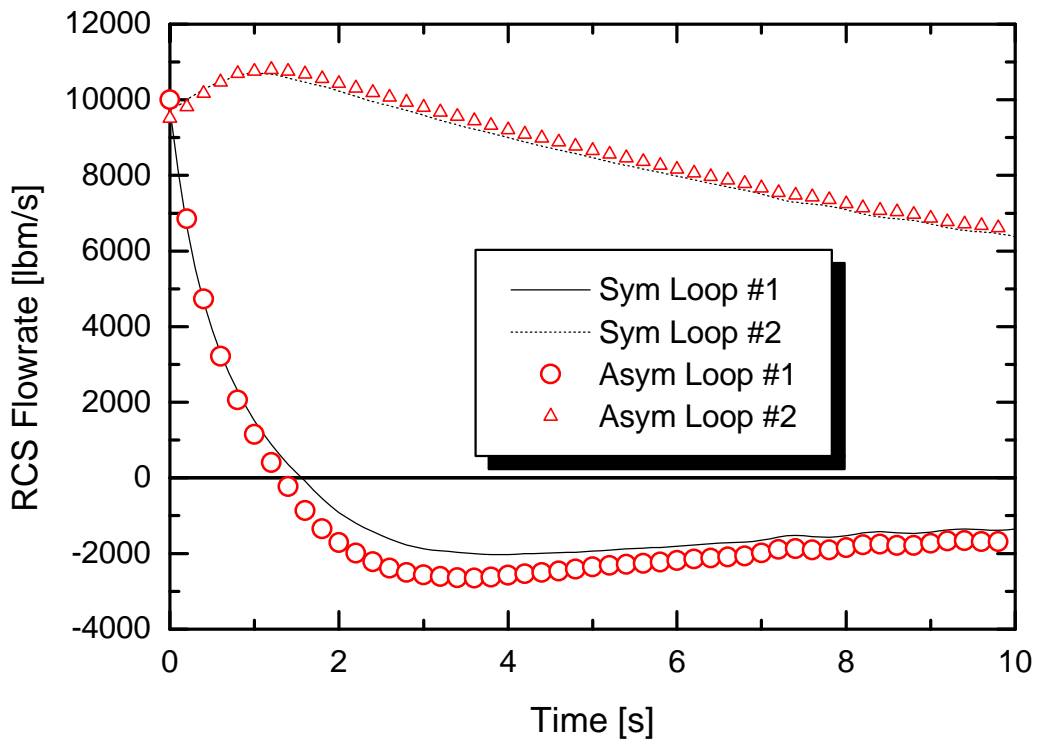


그림 5 시간에 따른 원자로 냉각재 유량 및 가압기 안전밸브 유량(유량 편차 고려)