

터빈 트립 해석을 통한 최적모델과 보수적 모델의 비교 평가

Comparison of Best-estimate Model and Conservative Model for Turbine Trip

이동혁, 김요한

한전 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

영광 1/2호기 FSAR 15장에 기술된 설계사고중 터빈 트립 사고를 RETRAN 코드를 사용하여 분석하였다. 지금까지 Westinghouse형 원전의 FSAR non-LOCA 안전해석에는 Westinghouse사에서 개발한 LOFTRAN 코드를 사용하였다. 본 연구에서는 EPRI에서 개발한 범용 원전 안전해석 코드인 RETRAN 코드를 사용하여 터빈 트립 사고를 분석하고 그 결과를 LOFTRAN의 결과와 비교하였다. RETRAN 코드를 사용하여 영광 1/2호기 정상상태 모델을 만들었으며, LOFTRAN 안전해석에 적용된 가정 및 모델들을 RETRAN 정상상태 모델에 적용하여 안전분석을 수행했다. 그 결과 같은 가정 및 모델을 선택할 경우 두 코드의 계산 결과가 비슷함을 확인하였다. 또한 RETRAN을 이용한 최적 분석을 수행하여 안전해석 결과와 비교하였다.

Abstract

Turbine trip accident for Yonggwang Unit 1/2, which is included in design basis accidents described in FSAR Chapter 15, was analyzed using RETRAN code. In current FSAR for Westinghouse plants, non-LOCA safety analysis is performed with LOFTRAN, a computer code developed by Westinghouse. In this study, RETRAN code, developed by EPRI were used to perform turbine trip analysis. Assumptions and models used in LOFTRAN were applied to RETRAN code. Results of the analysis were found to be in good agreement. For comparison, best-estimate turbine trip analysis were performed and compared with results of safety analysis.

1. 서 론

원자력발전소는 설계시, 안전성 확인을 위해 여러 가지 가상 사고를 가정하며, 전산코드를 사용하여 안전해석을 수행하고 그 결과를 FSAR 15장에 기술하고 있다. 현재 FSAR 15장 안전해석은 Westinghouse형 발전소의 경우 Westinghouse에서 개발된 전산코드를 사용하며, CE형 발전소의 경우 CE형 전산코드를 사용하고 있다. 본 연구에서는 FSAR 15장 설계사고 중 터빈 트립 사고를

EPR에서 개발된 RETRAN 코드를 사용하여 분석하였다. RETRAN 코드는 체적(volume) 및 junction을 이용하여 사용자가 자유롭게 시스템을 모델링할 수 있는 범용 코드이며, 다양한 제어 시스템의 모델링이 가능하다. 제어 시스템 모델링 기능 때문에 RETRAN 코드는 주로 최적분석에 사용되었다. 본 연구에서는 안전해석에 사용된 가정을 RETRAN에 적용하여 터빈 트립 사고를 해석하고 LOFTRAN 코드의 분석결과와 비교하였다. 또한 RETRAN 코드로 최적분석을 수행하여 안전해석 결과를 비교하였다.

2 터빈 트립 사고 개요

영광 1/2호기 FSAR 15장에는 두가지 측면에서 터빈 트립 사고를 기술하고 있다. 하나는 RCS 최대 압력 측면에 중점을 둔 것으로 RCS 압력이 최대가 되도록 가압기 PORV 및 분무를 모델하지 않았다. 다른 하나는 DNB 측면에 중점을 둔 것으로 가압기 PORV 및 분무를 모델하고 있다. 각 경우에 대해 최대 반응도 피드백 및 최소 반응도 피드백 경우를 분석하여 총 4가지 경우를 분석하였다. 본 연구에서는 압력 측면에 중점을 두고 터빈 트립을 분석하였다.

터빈 트립 사고는 터빈으로 공급되는 증기가 차단되면서 시작된다. 터빈 트립이 발생되면 자동으로 원자로 트립 신호가 발생되나, 안전해석에서는 터빈 트립에 의한 원자로 트립을 무시한다. 또한 터빈 트립이 발생하면 증기 덤프 밸브가 열려 증기발생기에서 열을 제거하게 되나, 안전해석에서는 증기 덤프를 모델하지 않고 있다. 터빈 트립과 동시에 증기 흐름 및 증기발생기에 공급되는 주급수가 차단된다고 가정한다. 원자로가 트립되지 않은 상태에서 증기발생기를 통한 열제거가 원활히 이루어지지 못하므로 1차측 냉각재의 온도 및 압력이 상승한다. 가압기 PORV가 작동되지 않는다고 가정하여 RCS 압력은 PORV 개방 설정치 이상으로 상승하며, 가압기 고압에 의한 원자로 트립이 발생된다. 1차측 압력 상승은 가압기 안전밸브의 작동으로 멈추게 된다. 이때 가압기 안전밸브의 개방 설정치는 보수적으로 높게 가정한다. 원자로 트립으로 열공급이 줄어들고, 증기발생기 2차측의 압력이 안전밸브 개방설정치에 도달하여 열제거가 이루어지면, 1차측 온도 및 압력이 낮아지며 계통이 안정되어 터빈 트립 사고가 종료된다. 터빈 트립 안전해석에 사용된 주요 가정을 정리하면 <표-1>과 같다.

< 표-1 터빈 트립 사고 해석시 주요 가정 >

터빈 트립 관련 주요 계통	가 정	비 고
터빈 트립에 의한 원자로 트립	×	
증기 덤프 계통	×	
주급수 차단	터빈 트립과 동시	
가압기 PORV	×	
가압기 살수 계통	×	
가압기 안전밸브 개방 설정치	보수적으로 높게	
증기발생기 PORV	×	
증기발생기 안전밸브 개방 설정치	보수적으로 높게	

3. RETRAN 모델

가. 정상상태 모델

사고해석에 앞서, 먼저 영광 1/2호기 정상상태 RETRAN 모델을 작성하였다. 정상상태 모델은 67개의 체적과 106개의 junction으로 구성되었다. 영광 1/2호기의 정상상태 RETRAN nodalization은 그림 1과 같다. 3개의 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.

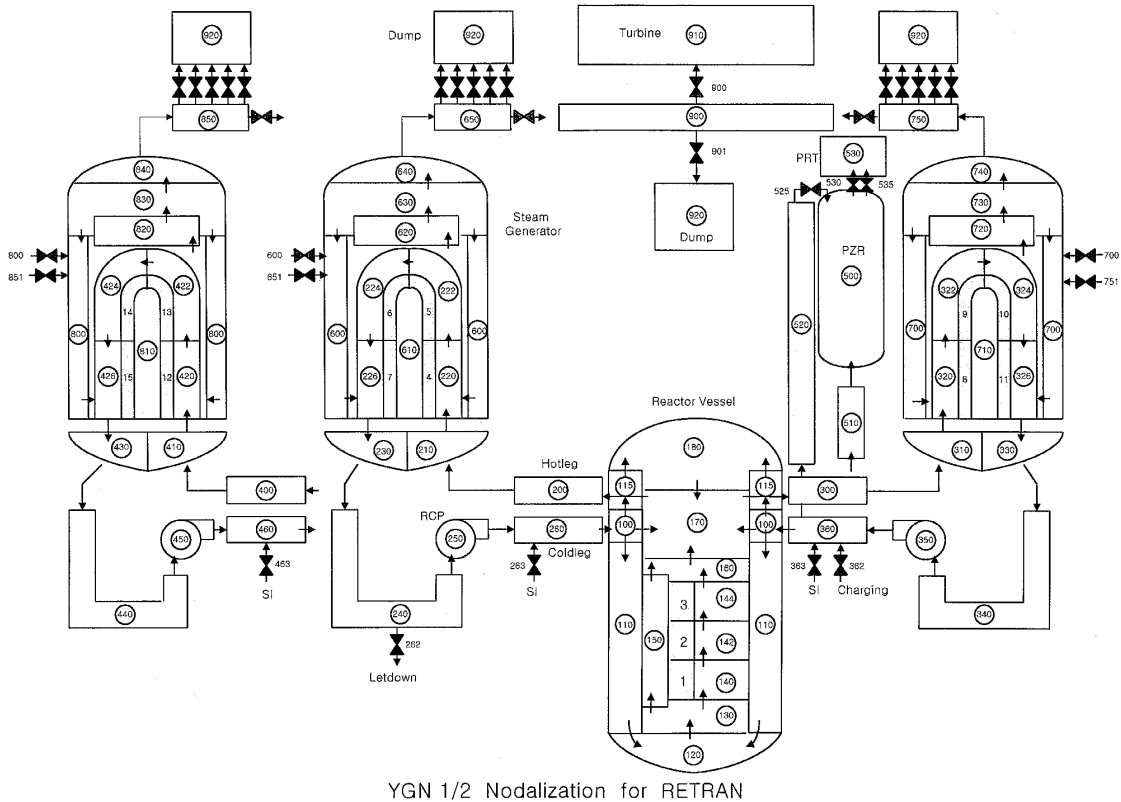


그림 1 영광 1/2호기 정상상태 RETRAN Nodalization

나. 터빈 트립 해석을 위한 RETRAN 모델

FSAR 15장의 안전해석에 사용된 주요 가정을 그대로 사용하였다. 터빈 트립에 의한 원자로 트립, 증기 덤프, 가압기 압력 제어 계통, 증기발생기 PORV 등은 작동되지 않는다고 가정하였다. 가압기 안전밸브 및 증기발생기 안전밸브의 개방 설정치는 LOFTRAN 입력에 사용된 값과 동일하게 설정하였다. MDC, DTC 등 반응도 관련 값들도 LOFTRAN에 입력된 값을 환산하여 RETRAN에 입력하였다. 단, 사고전 초기 조건은 RETRAN의 경우 100% 출력에서 정상상태 값을 사용하였으나, LOFTRAN의 경우 불확실도를 고려한 값을 사용하여 조금 차이가 있으며, 두 코드의 nodalization이 서로 다르다는 점에서 차이가 있다.

4 분석 결과

가. RETRAN과 LOFTRAN의 결과 비교

RETRAN을 사용한 경우와 LOFTRAN을 사용한 경우 모두 비슷한 결과를 보였다. 원자로 트립은 가압기 고압 신호에 의해 발생되었으며, 고압 설정치 도달시간 역시 큰 차이가 없었다. RETRAN 및 LOFTRAN 코드를 이용한 사고해석의 원자로 트립 시간 및 최대 가압기 압력은 < 표-2>와 같다.

< 표-2 원자로 트립 시간 및 최대 압력 >

구 분	항 목	RETRAN	LOFTRAN
Max. feedback	원자로 트립	6.6 초	6.8 초
	트립 신호	가압기 고압	가압기 고압
	가압기 최대 압력	2653.7 psia	2653 psia
Min. feedback	원자로 트립	6.8 초	6.9 초
	트립 신호	가압기 고압	가압기 고압
	가압기 최대 압력	2656.6 psia	2654 psia

Maximum feedback 경우에 대한 시간에 따른 원자로 출력, 가압기 압력, 가압기 수체적, RCS 평균 온도는 그림 2~그림 5와 같다. 원자로 출력은 RETRAN과 LOFTRAN의 결과가 거의 일치하고 있다. 가압기 압력은 사고 초반에 압력이 증가되는 부분 및 최대 압력 부분은 잘 일치하나 압력이 떨어지는 구간에서 차이를 보이고 있다. 그러나 전반적인 경향은 비슷하며, 안전성 평가시 압력상승 및 최대압력이 중요하므로 안전성 평가 측면에서 결과는 동일하다. 가압기 수체적은 LOFTRAN이 surge line 체적을 포함한 수체적을 출력하는 반면, RETRAN은 가압기에 있는 유체 체적만 표시하기 때문에 차이를 보이고 있으나 체적 변화의 경향은 서로 유사하다. RCS 평균 온도는 사고전 초기 조건의 차이 때문에 두 경우가 약간의 차이를 보이고 있으나 그 경향은 유사하다. 그림 6, 그림 7은 minimum feedback 조건에서 시간에 따른 원자로 출력 및 가압기 압력이다. Maximum feedback 경우와 마찬가지로 RETRAN의 해석 결과와 LOFTRAN의 해석 결과가 비슷하게 나타났다. 따라서 LOFTRAN의 분석과 동일한 가정을 사용하여 사고해석을 수행할 경우 RETRAN 코드를 사용해도 동일한 결과를 얻을 수 있다.

나. 최적 분석과 보수적인 분석의 비교

사고 해석에 사용된 가정을 바꾸어 가며 터빈 트립 사고 해석 결과에 미치는 영향을 살펴보았다. 먼저 터빈 트립 사고시 증기 덤프 계통이 작동된다고 가정하였다. 증기 덤프 계통은 터빈 트립이 일어나면 덤프 밸브를 열어 증기발생기 2차측의 증기를 방출한다. 따라서 증기발생기를 통한 열제거가 가능해져 1차측 온도 및 압력 상승을 크게 완화해준다. 그림 9에서 볼 수 있듯이 가압기 압력이 안전 밸브가 열리는 압력까지 상승하지 않는다. 증기 덤프로 인해 RCS 온도와 가압기 수위가 크게 낮아진다. 계산 결과, 증기 덤프 계통이 터빈 트립 사고 발생기 RCS의 압력 상승을 크게 억제하는 능력이 있음을 확인하였다.

두 번째로 안전해석시 가정하는 원자로 트립 지연 시간 2초를 없애고 분석을 수행하였다. 보수

적인 안전해석에서는 가압기 압력이 트립 설정치에 도달한 뒤 2초 후에 원자로 트립신호가 발생된다고 가정하였다. 지연시간을 없앤 결과, 원자로 트립이 빨리 일어나 1차측 열발생량이 줄어들어 사고 결과를 완화시켜주는 효과가 있었다. 지연시간 유무의 효과는 원자로 출력(그림 8)에서 확인할 수 있다. 그러나, 가압기 최대 압력에는 큰 영향을 주지 않는다. 냉각재 평균온도나 가압기 수위에서는 빠른 트립이 과도 현상을 완화시킴을 확인할 수 있다. 그러나, 전체적인 완화 효과는 증기 덤프 계통에 비하면 미미하다.

마지막으로 모든 제어계통 및 보호계통이 작동되는 상태에서 최적분석을 수행하였다. 터빈 트립에 의한 원자로 트립이 발생된다고 가정하여, 터빈 트립과 동시에 원자로 트립이 발생한다. 또한 증기덤프 계통이 작동되어 증기발생기를 통한 열제거가 일어난다. 안전해석에서 가정한 터빈 트립은 2차측 증기 차단으로 인한 열제거원 상실 및 1차측 원자로의 지속적인 운전으로 인한 지속적인 열공급에 의해 1차측 냉각재가 가열되고 압력이 올라가는 과도현상이다. 그러나, 최적분석의 터빈 트립은 증기덤프를 통한 열제거 및 원자로 트립에 의한 열공급 중단으로 인해 1차측 냉각재의 온도 및 압력이 내려가는 경향을 보여, 안전해석과는 반대의 경향을 보이고 있다. 원자로 출력은 사고 시작과 동시에 급격히 감소한다. 가압기 압력은 증기 덤프로 인한 RCS 냉각으로 감소한다. 냉각재 평균 온도 역시 사고 시작과 동시에 감소하며, 가압기 수위 역시 감소한다.

5. 결론

RETRAN 코드를 사용하여 영광 1/2호기 터빈 트립 사고를 분석하고, 그 결과를 LOFTRAN 코드의 분석 결과와 비교하였다. 안전해석에 같은 가정을 사용할 경우 두 코드 모두 유사한 결과를 보여주었다. 따라서 LOFTRAN 코드에서 사용한 것과 동일한 보수적인 가정을 사용할 경우, RETRAN 코드로도 충분히 안전해석을 수행할 수 있음을 확인하였다. 이와는 별도로 터빈 트립 사고의 최적해석을 수행하여 안전해석 결과와 비교하였다. 실제 발전소의 제어 및 보호계통을 그대로 모사한 최적해석의 경우 안전해석의 결과와 전혀 다른 경향을 보여주어 안전해석이 매우 보수적인 가정을 사용하고 있음을 확인할 수 있었다.

6. 참고문헌

1. 영광 1/2호기 FSAR, 한국전력공사
2. 영광 1/2호기 PLS, 한국전력공사
3. EPRI NP-7450, RETRAN-3D - A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flows Systems, EPRI, 1995
4. WCAP-10348, Setpoint Study Korea Electric Company Units 5&6, Westinghouse Electric Corporation, 1983
5. Safety Analysis Standard, Westinghouse Electric Corporation
6. WCAP-7878, LOFTRAN Code Description and User's Manual, Westinghouse Electric Corporation
7. TC.91IJ03.R1998.76, 고리 2호기 RETRAN 정상상태 요약보고서, 한전 전력연구원, 1998

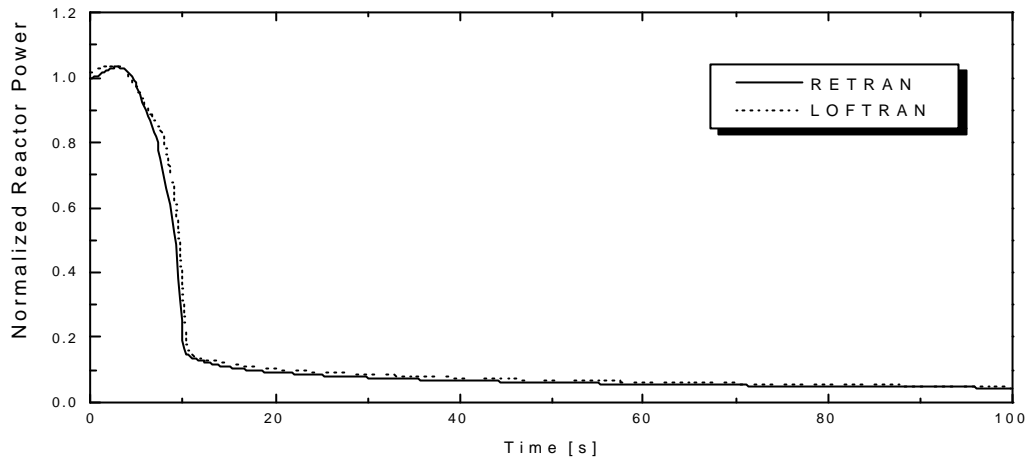


그림 2 터빈 트립 사고시 시간에 따른 원자로 출력(Maximum feedback)

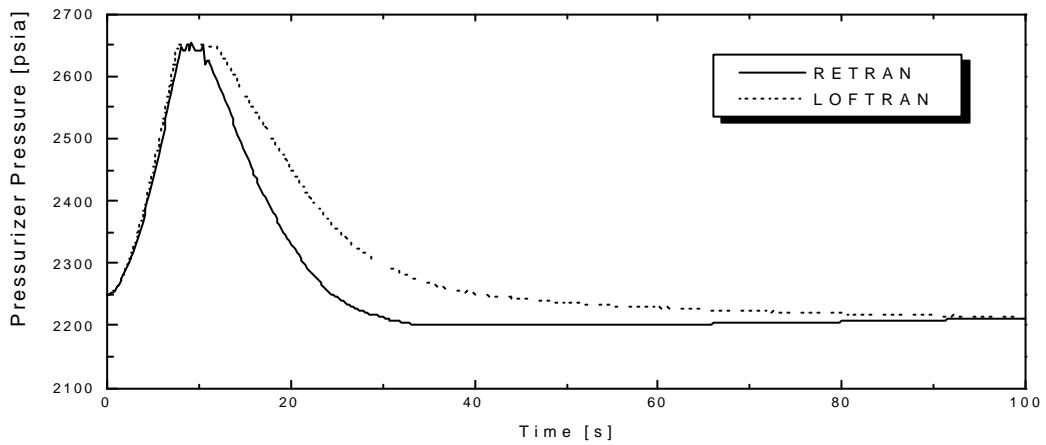


그림 3 터빈 트립 사고시 시간에 따른 가압기 압력(Maximum feedback)

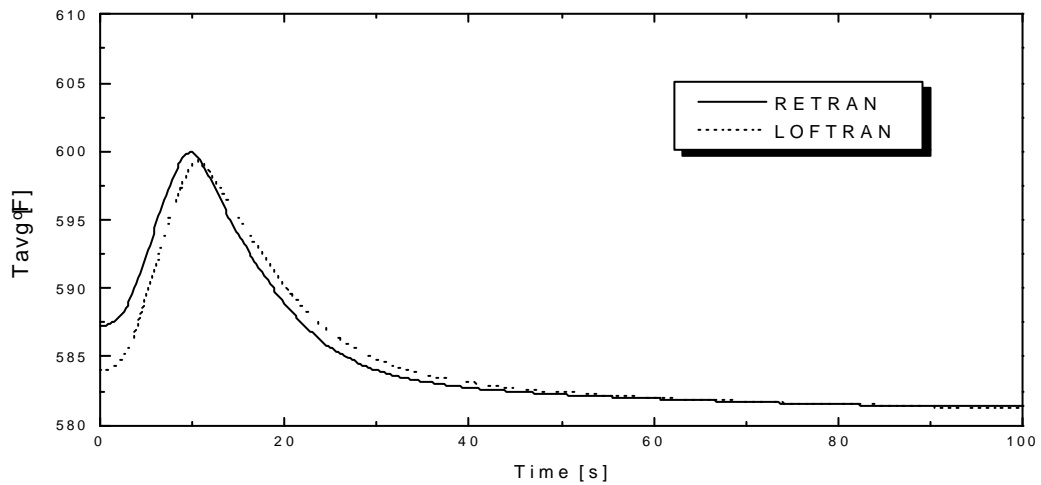


그림 4 터빈 트립 사고시 시간에 따른 냉각재 평균 온도(Maximum feedback)

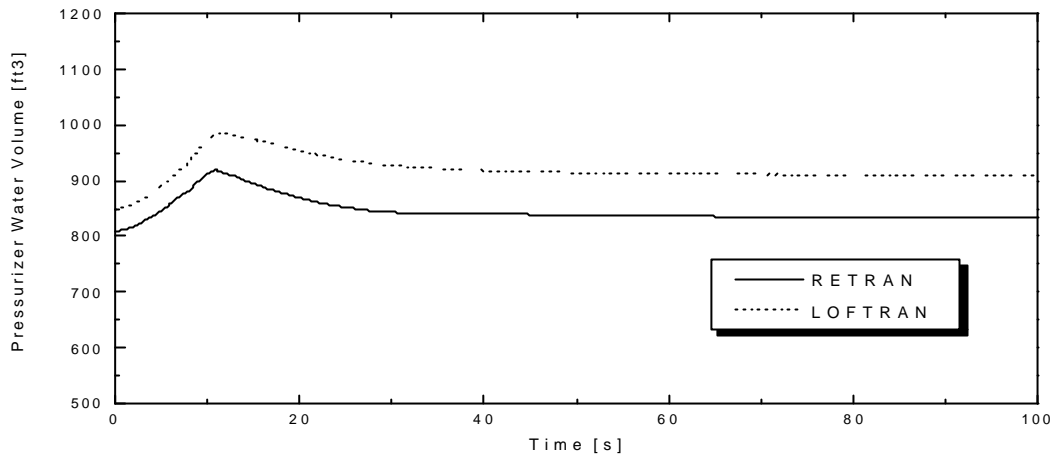


그림 5 터빈 트립 사고시 시간에 따른 가압기 체적(Maximum feedback)

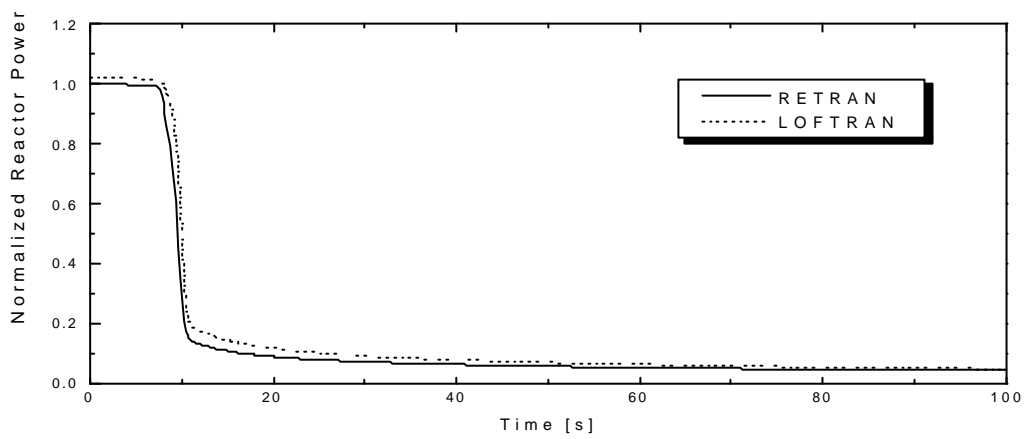


그림 6 터빈 트립 사고시 시간에 따른 원자로 출력(Minimum feedback)

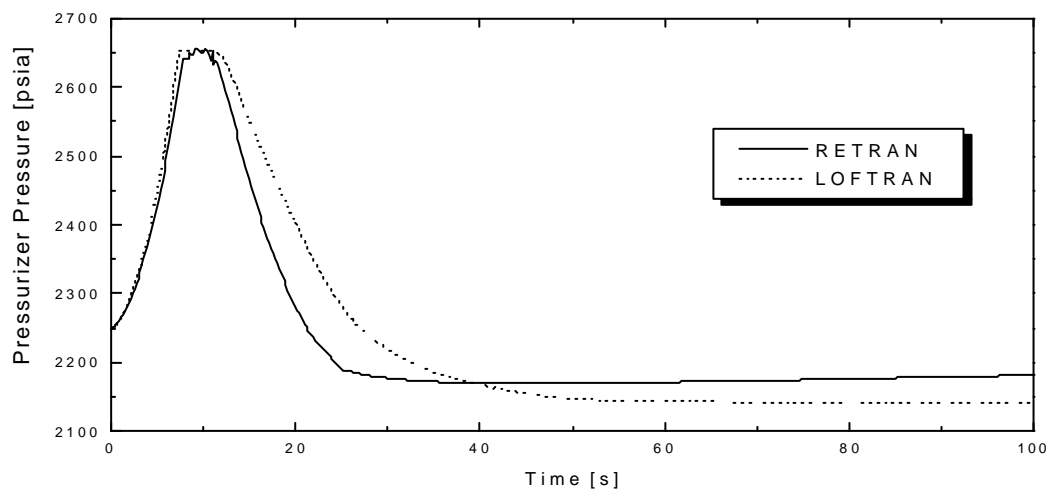


그림 7 터빈 트립 사고시 시간에 따른 가압기 압력(Minimum feedback)

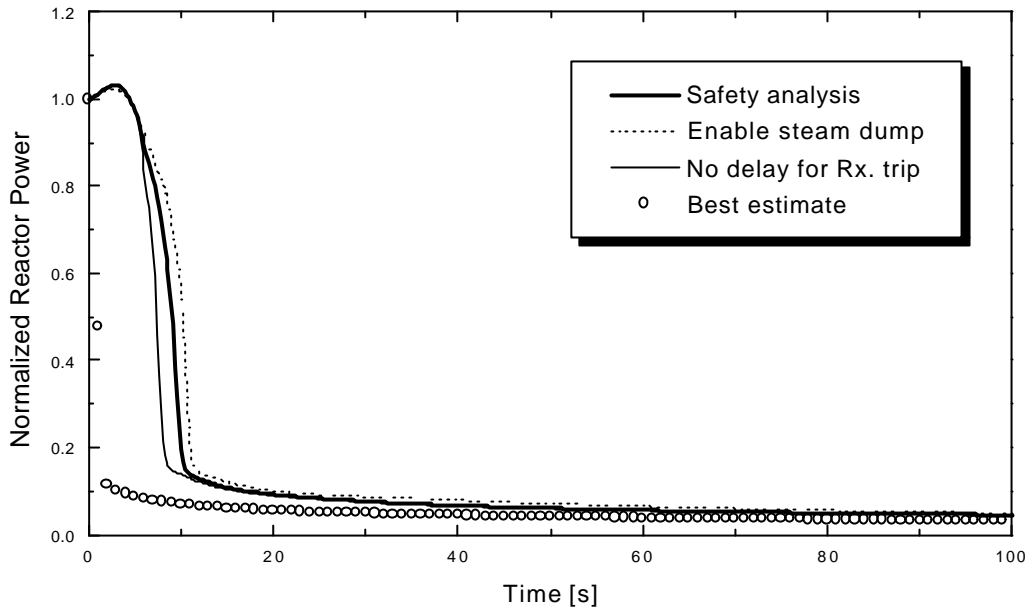


그림 8 다양한 조건에서 터빈 트립 사고시 시간에 따른 원자로 출력

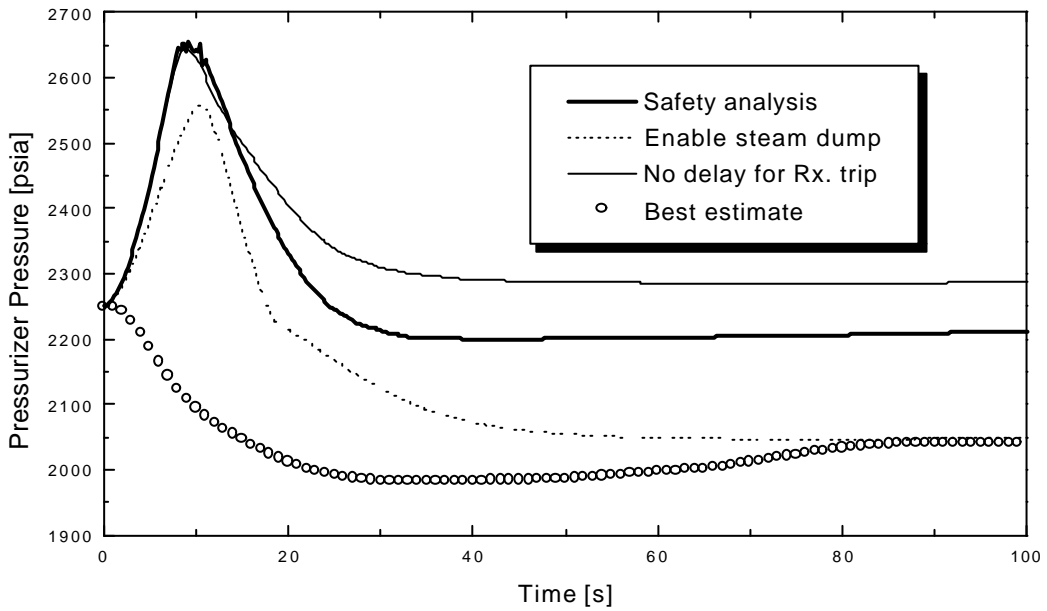


그림 9 다양한 조건에서 터빈 트립 사고시 시간에 따른 가압기 압력

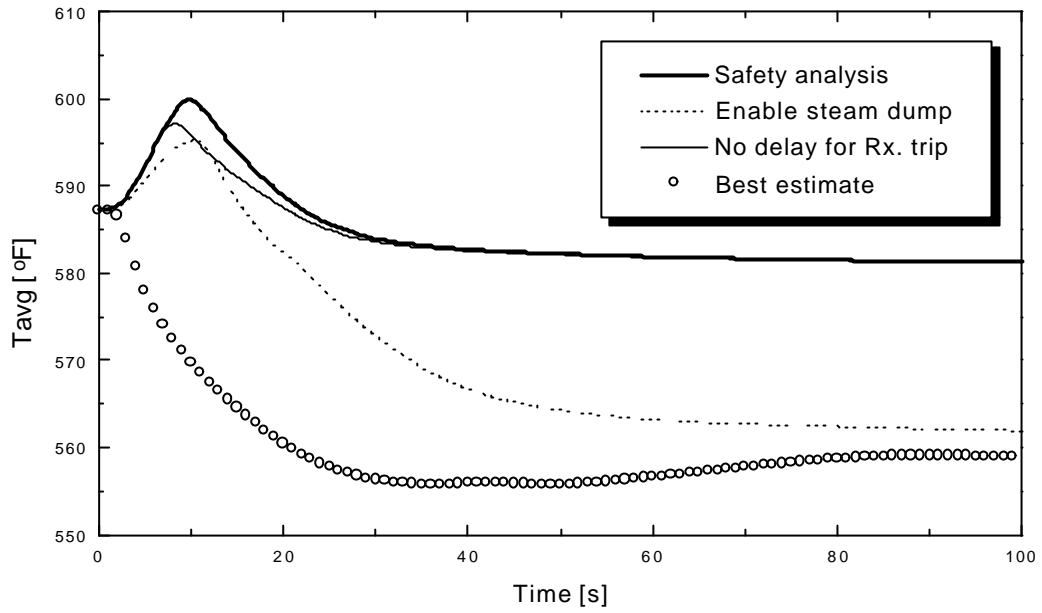


그림 10 다양한 조건에서 터빈 트립 사고시 시간에 따른 냉각재 평균 온도

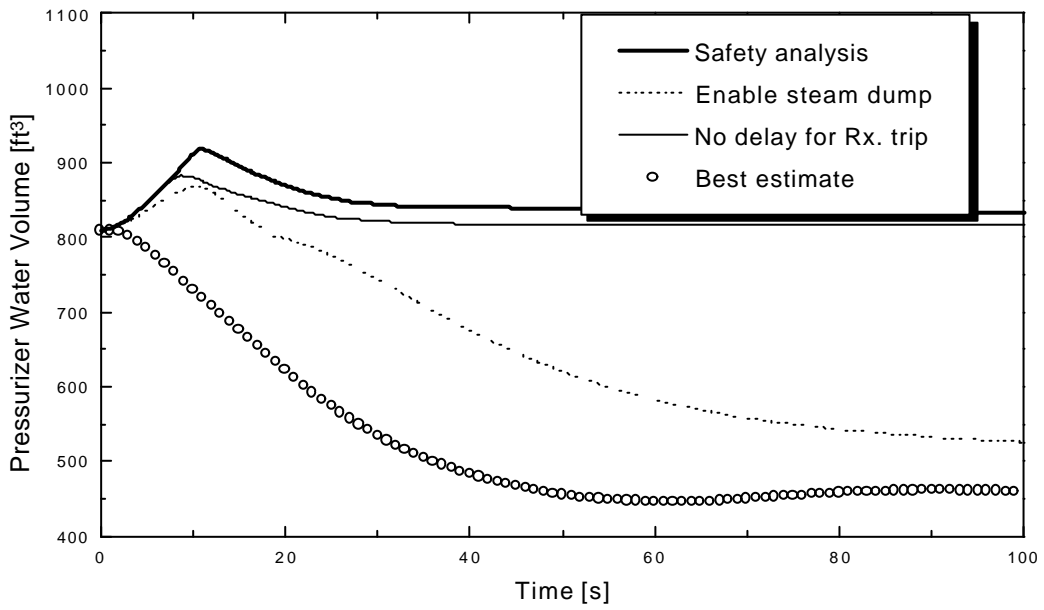


그림 11 다양한 조건에서 터빈 트립 사고시 시간에 따른 가압기 수위