

다중 노드 증기발생기 모델을 이용한 WH형 발전소의 주급수관 파단 과도 해석

Analysis of Feedline Break Transient for WH Type Plants Using Multi-node Steam Generator Model

이동혁, 이창섭, 김요한, 박영찬

한전 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

과거 WH의 주급수관 파단 과도현상 해석은 간단한 증기발생기 모델을 사용한 시스템 코드해석과 증기발생기 한 개를 떼어내 다른 코드로 상세하게 모델하여 해석하는 두 부분으로 구성되어 있다. 정확한 계산을 위해서는 두 계산을 번갈아 수행하여 수렴된 값을 얻어야 하나, 시간을 많이 걸리는 관계로 상세한 증기발생기 모델은 증기발생기 유형별로 한번만 계산하고, 이 계산 결과에 여러 가지 보수적인 가정을 도입하여 시스템 코드해석에 사용한다.

본 연구에서는 EPRI에서 개발된 범용 원전 안전해석 코드인 RETRAN 코드를 사용하여 시스템 해석에 다중 노드 증기발생기 모델을 포함시켜 고리 1호기를 대상으로 주급수관 파단 과도해석을 수행하였다. 또한 최종안전성분석보고서 작성에 사용된 LOFTRAN 코드를 이용한 결과와 비교하였다. 해석 결과, 다중 노드 증기발생기 모델을 사용한 RETRAN 코드의 결과가 단일 노드 증기발생기 모델을 사용한 LOFTRAN의 결과보다 완화된 결과를 보여주고 있음을 확인하였다.

Abstract

In the past, analysis of feedline break transient of WH type plants required a system transient run and a separate detailed steam generator model analysis. An accurate analysis of the transient requires iteration between system and detailed steam generator analysis results. However, to save time, only a representative case of detailed steam generator analysis was performed for each steam generator model. Conservative assumptions were used to account for lack of iteration process. In this study, a multi-node steam generator is modeled within the system analysis using RETRAN. Analysis were performed for Kori Unit 1. The results of RETRAN analysis are compared with results from LOFTRAN.

1. 서 론

과거 WH의 주급수관 파단 과도현상 해석은 간단한 증기발생기 모델을 사용한 시스템 코드해석과 증기발생기 한 개를 분리하여 다른 코드로 상세하게 모델하여 해석하는 두 부분으로 구성되어 있다. 정확한 계산을 위해서는 두 계산을 번갈아 수행하여 수렴된 값을 얻어야 하나, 시간을 많이 걸리는 관계로 상세한 증기발생기 모델은 증기발생기 유형별로 한번만 계산하고, 이 계산 결과에 여러 가지 보수적인 가정을 도입하여 시스템 코드해석에 사용한다.

본 연구에서는 EPRI에서 개발된 범용 원전 안전해석 코드인 RETRAN 코드를 사용하여 시스템 해석에 다중 노드 증기발생기 모델을 포함시켜 고리 1호기를 대상으로 주급수관 파단 과도해석을 수행하였다. 또한 최종안전성분석보고서 작성에 사용된 LOFTRAN 코드를 이용한 결과와 비교하였다.

2. 주급수관 파단 과도 현상 개요

주급수관 파단 과도현상이란 증기발생기 2차측에 주급수를 공급해주는 배관이 파단되는 것을 가정한 과도현상이다. 주급수관이 파단되면 모든 주급수가 파단면으로 방출되어 증기발생기에 급수가 중단된다. 또한 고압 상태인 증기발생기 2차측 유체가 파단면을 통해 역류하여 방출된다. 주급수 공급이 차단된 상태에서 증기가 계속 터빈에 공급되고, 파단면을 통해 유체가 방출되므로 증기발생기 수위가 낮아진다. 증기발생기 저-저 신호에 의해 원자로 트립이 발생되며, 보조급수가 공급되기 시작한다. 이때 손상된 증기발생기에는 보조급수 역시 상실되는 것으로 가정하여 건전한 증기발생기에만 보조급수가 공급된다고 가정한다. 원자로 트립으로 인한 터빈 트립 발생으로 터빈을 통한 증기 유동은 차단되지만 주급수 파단면을 통해 증기가 계속 방출된다. 건전한 증기발생기의 증기도 주증기 공통관을 통해 손상된 증기발생기로 흘러 파단면으로 방출된다. 안전주입 신호 발생으로 주증기관 차단밸브가 닫힐때까지 건전한 증기발생기 측의 증기 방출이 계속된다. 주증기관 차단 후에는 건전한 증기발생기의 증기방출유로가 차단되어 증기발생기 압력이 안전밸브 개방 압력에 도달할 때까지 증기방출이 중지된다. 장기적인 열제거는 건전한 증기발생기의 안전밸브 및 보조급수에 의존한다.

1차측 온도는 과도현상 초기에 다량의 유체 및 에너지 방출로 급격히 감소했다가 주증기관 차단 후 열제거원 상실로 천천히 상승한다. 1차측 온도는 노심의 붕괴열 생성률 및 건전한 증기발생기를 통한 열저거울에 의해 결정된다. 시간이 지나 노심 붕괴열이 작아지고, 건전한 증기발생기의 2차측 유체 재고량이 어느 정도 회복되면 1차측 온도가 다시 감소하기 시작하는데, 이때 과도현상이 종료된 것으로 판정한다.

주급수관 파단 과도현상은 ANS Condition IV로 분류되는 과도현상이다. 분석시 파단 면적은 현 FSAR에 기술된 것과 같이 $0.4ft^2$ 을 가정하였다.

< 표-1 주급수관 파단 과도현상 해석시 주요 가정 >

주급수관 파단 과도현상 해석시 주요 가정	가 정	비 고
주급수 유량	파단과 동시에 완전 상실	
보조급수 유량	건전한 증기발생기에 공급 모터 구동 펌프 1대 용량	
파단 면적	0.4ft ²	
소외 전원	공급	
원자로 트립	증기발생기 저-저 수위	

3. RETRAN 모델

가. 정상상태 모델

사고해석에 앞서, 먼저 고리 1호기 정상상태 RETRAN 모델을 작성하였다. 정상상태 모델은 68개의 체적과 105개의 junction으로 구성되었다. 2개의 RCS 루프 및 증기발생기를 각각 모델링하였다. 증기발생기의 가열부는 2차측 4개, 1차측 8개의 체적으로 모델하였다. 또한 가압기 안전밸브 및 PORV, 증기발생기 안전밸브, 원자로 트립 계통 등이 모델 되었다. 사고해석에는 사용되지 않았으나, 주급수 유량 제어 계통, 증기 덤프 계통 등도 모델링했다.

나. 다중 노드 증기발생기 모델

WH사가 안전해석에 사용하는 LOFTRAN 코드의 경우 증기발생기 2차측을 1개의 체적으로 모델한다. 이 경우 2차측 유체의 재순환 현상을 모사할 수 없으므로 2차측 유체가 정체되어 있는 것으로 가정하게 열전달율을 계산하게 된다. 이는 실제 증기발생기에서 재순환 현상에 의해 유체 흐름이 있을때의 열전달율과는 차이가 있게 된다. 따라서 단일 노드 증기발생기로는 증기발생기 2차측의 물리적인 현상을 제대로 모사하기 어렵다.

RETRAN으로 만든 다중 노드 증기발생기 모델은 증기발생기 가열부, 습분분리기, 하강관 등을 모사하여 재순환 유로를 모델하였으며, 가열부의 열전달 모델을 좀더 정확하게 하기위해 증기발생기 2차측을 수직 방향으로 4개의 체적으로 분할하여 모델하였다. 1차측 U관은 상향유로에 4개, 하향유로에 4개, 총 8개의 체적으로 분할하여 모델하였다. 재순환비는 WH의 설계자료를 참고하여 모델하였다.

다. 주급수관 파단 모사

t=10초에 주급수관이 파단되는 것으로 가정하였다. 파단 면적은 FSAR에 기술된 것과 동일한 0.4ft²으로 가정하였다. 임계 유량 모델은 등엔탈피 팽창 모델(isoenthalpic expansion model)을 사용하였다. 주급수 공급유로는 주급수 펌프 → 주급수관 → 증기발생기 내 피드링(feedring) → 하강관으로 연결된다. 피드링은 주급수를 증기발생기에 고르게 공급하기 위해 설치된 배관으로 정상 운전시 물에 잠겨있다. 주급수 파단이 발생되면 물에 잠겨있던 피드링이 노출되기 전까지는 파단면으로 물이 방출된다. 수위가 낮아져 피드링이 노출되면 파단면으로 증기가 방출된다. 증기 방출은 증기발생기 수위 감소 속도를 낮추어 원자로 트립 시점을 지연시키는 효과가 있으며, 열제거량

증가로 1차측이 냉각되어 피드백 효과로 노심 출력이 증가되는 효과가 있다. 원자로 트립 후에는 보수적으로 낮은 건도 값을 사용하여 손상된 증기발생기를 통한 에너지 제거를 감소시켰다.

4. 분석 결과

가. RETRAN 코드를 이용한 주급수관 파단 과도 현상

RETRAN 코드를 사용하여 고리 1호기 주급수관 파단 과도 현상을 분석하였다. t=10초에 루프 #1 증기발생기의 주급수관이 파단되는 것으로 가정하였다. 주급수 파단으로 인해 양쪽 증기발생기의 주급수 공급이 중단되며, 파단 직후에는 파단면으로 액체 상태의 주급수가 방출된다. 이 기간 동안 증기발생기 수위가 감소하나 1차 및 2차측 출력에는 큰 변화가 없다. 증기발생기 수위가 낮아져 물에 잠겼던 주급수 피드링이 노출되면 파단면을 통해 증기가 방출되기 시작한다. 증기 방출로 인해 2차측의 열제거량이 증가되며 증기압력 및 온도가 감소된다. 2차측 온도 감소는 1차측 온도 감소로 이어지며, 피드백 효과로 인해 노심 반응도가 증가되어 1차측 출력이 상승한다. 증기발생기 수위가 계속 감소하여 약 35초에 저-저 수위에 의한 트립 설정치에 도달한다. 원자로 트립 및 터빈 트립이 발생되면 1차측 출력이 급격하게 줄어들며, 2차측도 터빈을 통한 열제거 유로가 차단된다. 터빈 차단으로 일시적으로 증기 압력 및 온도가 상승한다. 그러나 1차측 출력의 지속적인 감소와 파단면을 통한 지속적인 에너지 방출로 결국 증기 압력 및 온도가 낮아진다. 이 기간 동안 건전한 증기발생기에서 발생된 증기는 주증기 공통관을 통해 손상된 증기발생기의 주증기관을 역류하여 파단면으로 방출된다. 1/2차측 온도 압력이 낮아져 안전주입 설정치에 도달하면 안전주입이 시작되며, 주증기관 차단 조건이 만족될 경우 주증기관이 차단된다. 주증기관 차단으로 건전한 증기발생기의 증기 방출이 중단된다. 손상된 증기발생기는 2차측 유체가 모두 증발하여 열제거 능력을 상실한다. 건전한 증기발생기의 증기 압력/온도가 증가되어 증기발생기 안전밸브 개방설정치에 도달하기 전까지는 1차측 열제거율이 상실된다. 건전한 증기발생기 축도 파단면으로 많은 양의 유체가 방출된 상태이기 때문에 열전관의 상당부분이 노출된 상태이다. 보조급수 공급으로 어느 정도 수위가 회복되어 열전달 면적이 늘어나 열제거율이 늘어나고 노심의 붕괴열 생성율과 균형을 이루기 전까지는 1차측 온도가 상승한다. 열제거율이 붕괴열 생성율보다 높아지면 1차측 온도가 감소되며 과도 현상이 종료된다.

나. LOFTRAN 결과와 RETRAN 결과의 비교

LOFTRAN의 결과가 초기 과도현상이 RETRAN 보다 크게 나타난다. 이는 임계 유량 모델이 LOFTRAN은 Moody식을 사용하였고 RETRAN에서는 등엔탈피 팽창 모델을 사용했기 때문이다. 따라서 LOFTRAN의 결과가 1차측 출력 상승이 더 빨리 나타나며, 최대 출력도 좀더 높게 나타난다(그림1). 원자로 트립 및 주증기관 차단도 LOFTRAN의 경우가 조금씩 빠르다. 그러나 전체적으로 두 코드의 계산 결과는 비슷한 경향을 보이고 있다. RETRAN에서 Moody 식을 사용하였을 경우 최대 파단 유량은 LOFTRAN의 결과와 동일하다(그림4). 그러나 주증기 차단 시점이 등엔탈피 팽창 모델보다 빨라 냉각재 최대 온도는 더 낮게 계산되었다.

주증기관 차단후 장기적인 온도 상승은 LOFTRAN의 경우가 훨씬 높게 나타난다. 이는 LOFTRAN이 열전달 면적을 보수적으로 작게 계산하기 때문인 것으로 보인다. RETRAN 코드를 사용할 경우 온도 상승이 훨씬 작게 나타나 1차측 포화온도까지 많은 여유가 있음을 확인할 수 있다.

< 표-2 시간에 따른 주요 현상 요약 >

내 용	시간 [s]
주급수관 파단	10.0
증기발생기 저-저 수위 설정치 도달	37.1
원자로 트립 발생	39.1
보조급수 공급 시작	97
주증기관 저압력 안전주입 설정치 도달	146
주증기관 차단	153
Tavg 극대값 도달	2586

5. 결 론

RETRAN 코드를 사용하여 증기발생기를 다중 노드로 모사하고 고리 1호기 주급수관 파단 과도해석을 수행하였다. 과거 LOFTRAN 코드를 사용하여 해석할 경우 파단면적에서 건도를 입력으로 지정해야 했으나 RETRAN 코드를 사용하여 별도의 건도 입력 없이 주급수관 파단 과도해석 수행이 가능하였다. 시간에 따른 과도 현상 경향은 LOFTRAN 코드를 사용했을 경우와 비슷하게 나타났으나 주요 관심사인 1차측 냉각재 최대 온도는 RETRAN으로 계산한 값이 낮게 나와 다중 노드 증기발생기 모델을 사용한 RETRAN 모델을 사용하는 것이 발전소 여유도 확보에 유리한 것으로 판단된다.

6. 후 기

본 연구는 과학기술부 지원하에 수행중인 원자력 중장기 과제인 “원전 운전과도해석 및 신안전 해석 기술 개발”과제의 일환으로 수행되었다.

7. 참고문헌

1. TR.96NS06.97.45, 고리 1호기 주급수관 파단 사고 해석, 한국전력공사, 1997
2. 고리 1호기 FSAR, 한국전력공사
3. EPRI NP-7450, RETRAN-3D - A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flows Systems, EPRI, 1995
4. Safety Analysis Standard, Westinghouse Electric Corporation
5. WCAP-7878, LOFTRAN Code Description and User's Manual, Westinghouse Electric Corporation

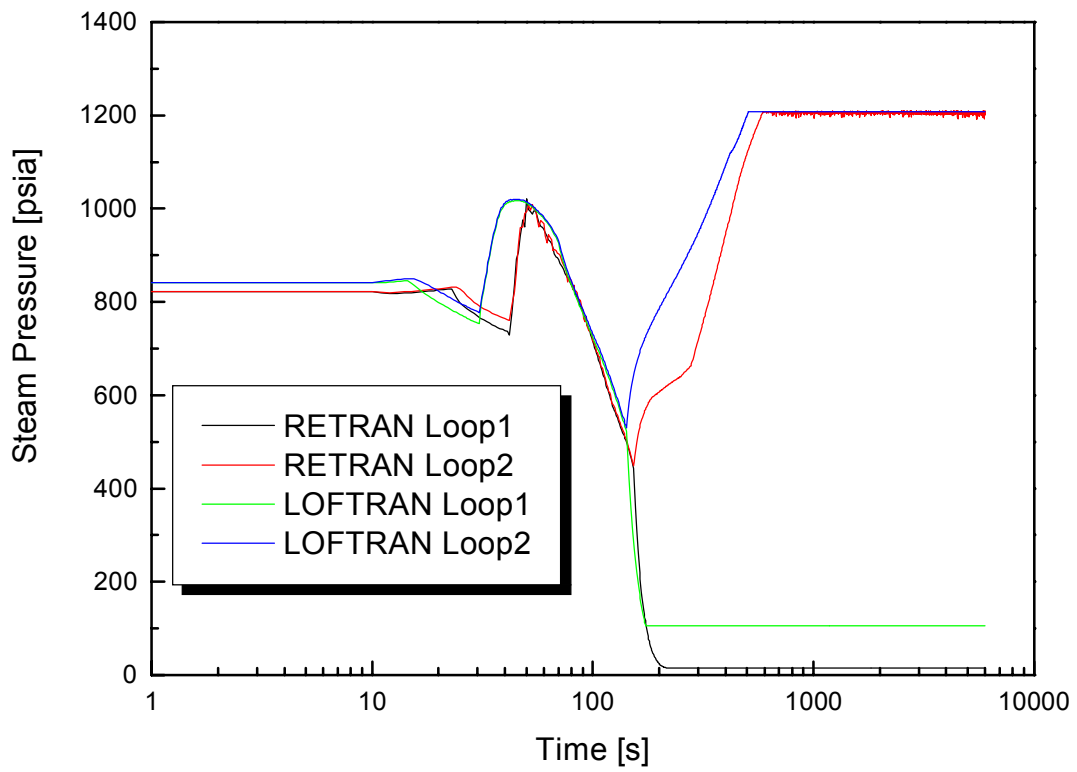
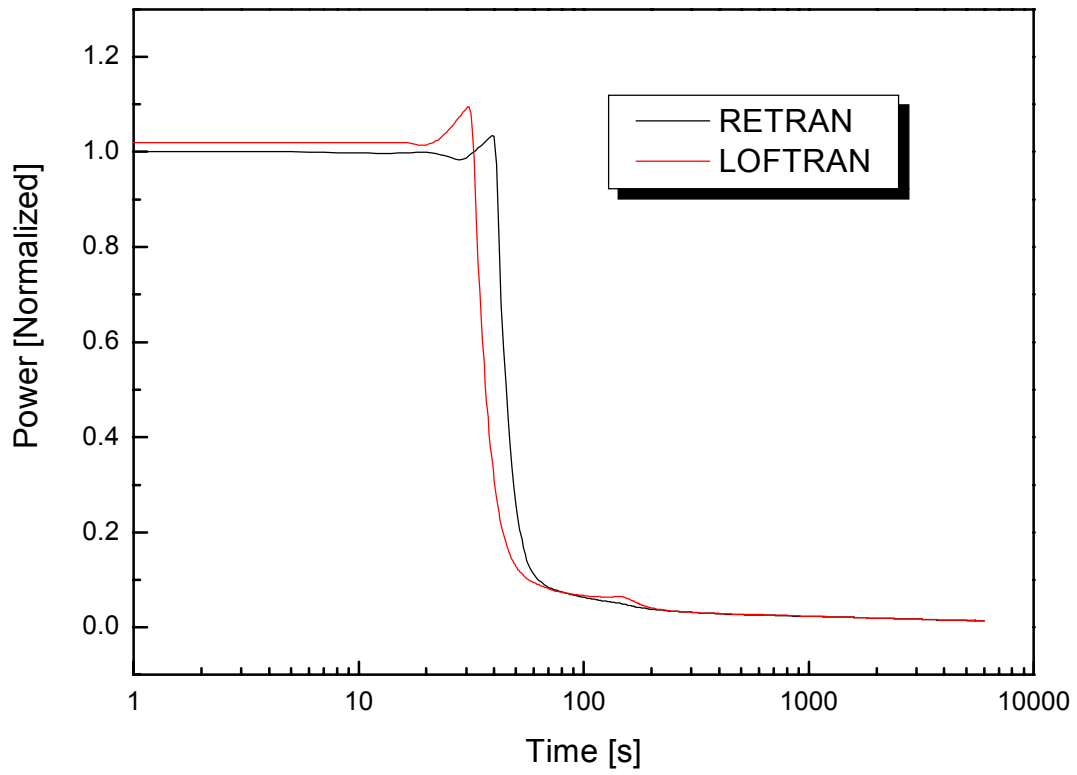


그림 1 시간에 따른 원자로 출력 및 증기 압력

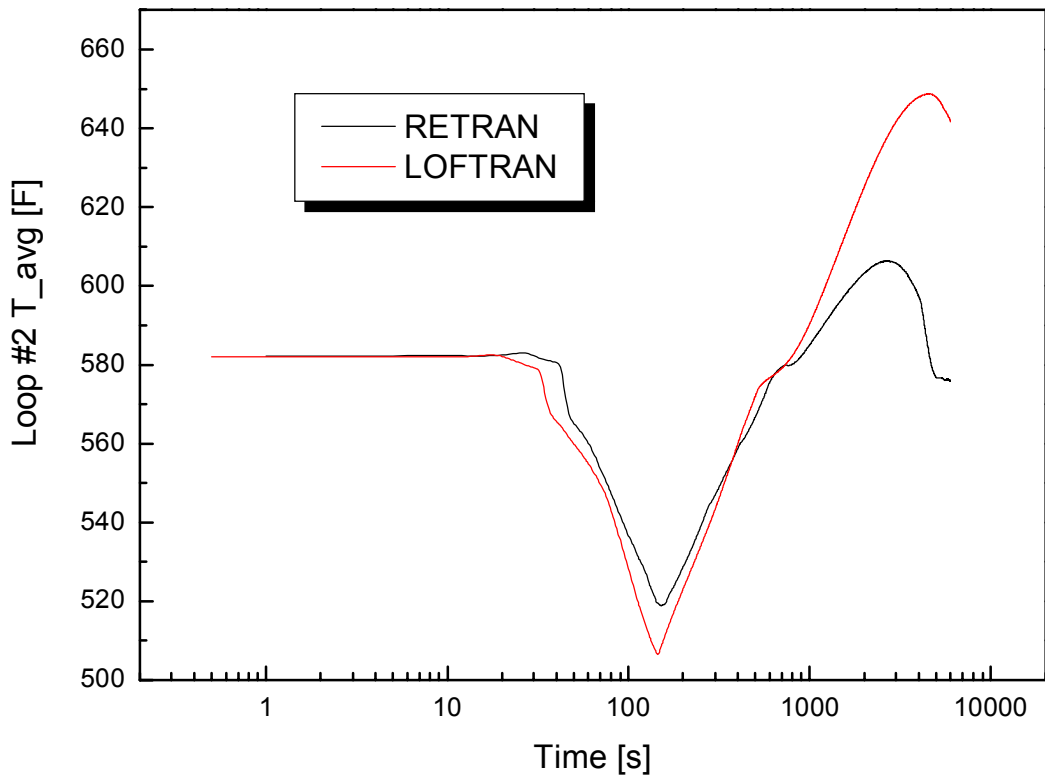
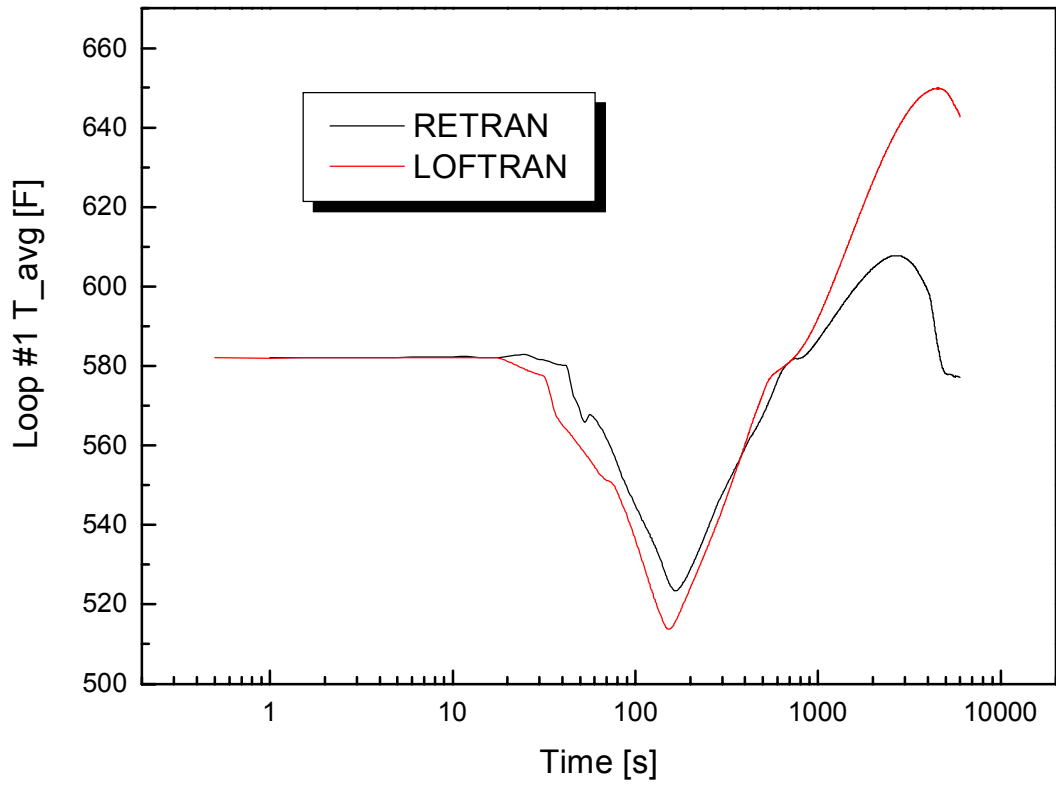


그림 2 시간에 따른 냉각재 평균 온도

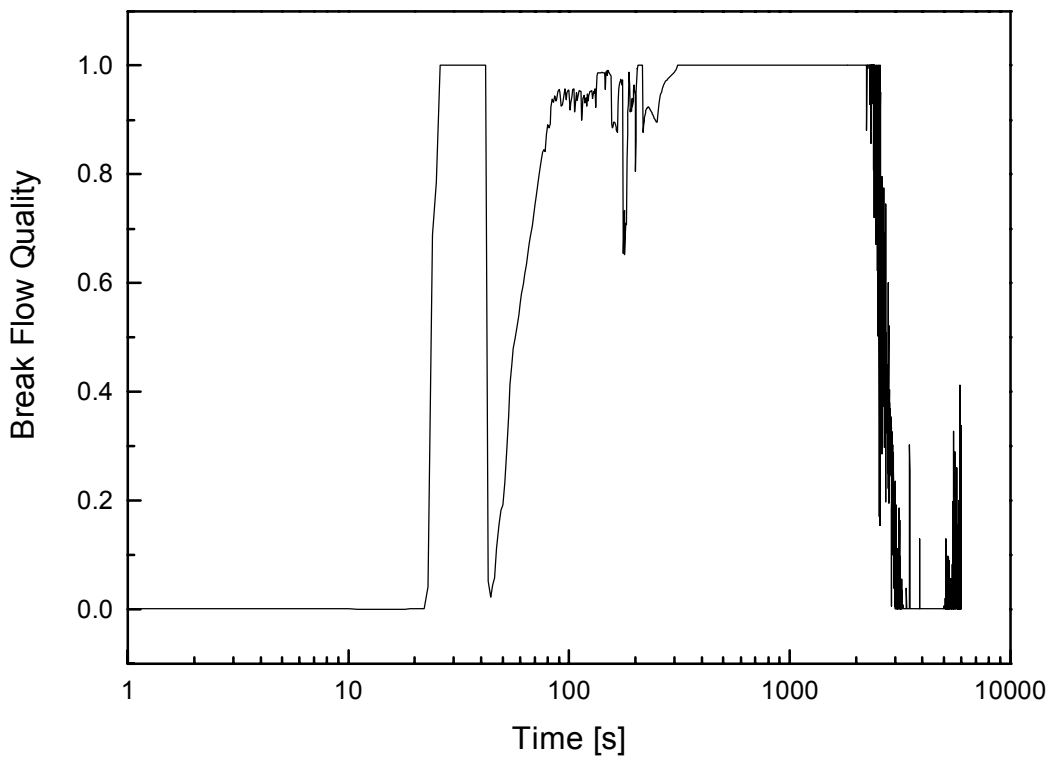
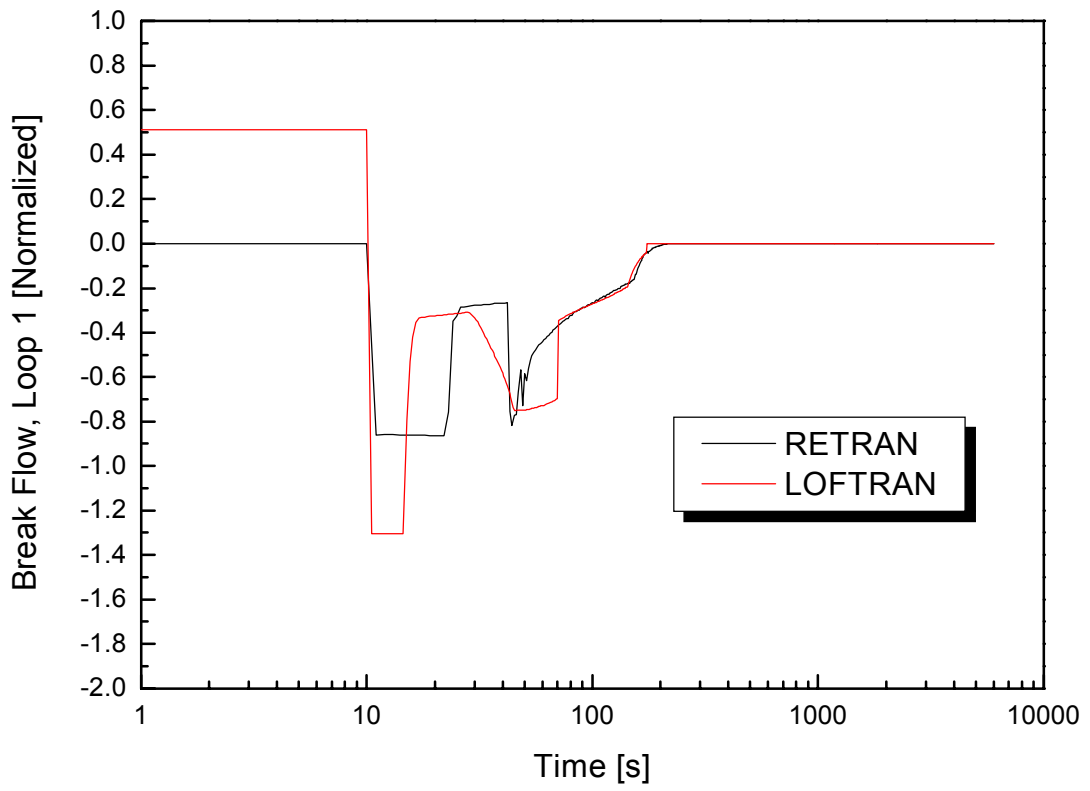


그림 3 시간에 따른 파단 유량 및 건도

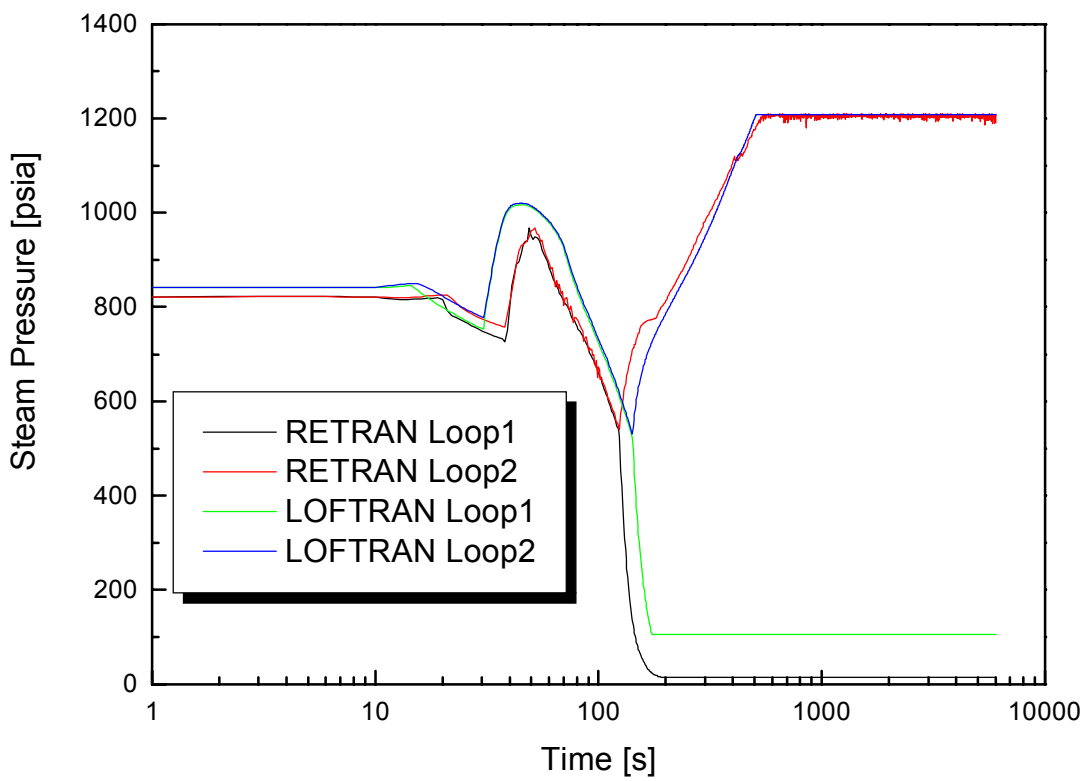
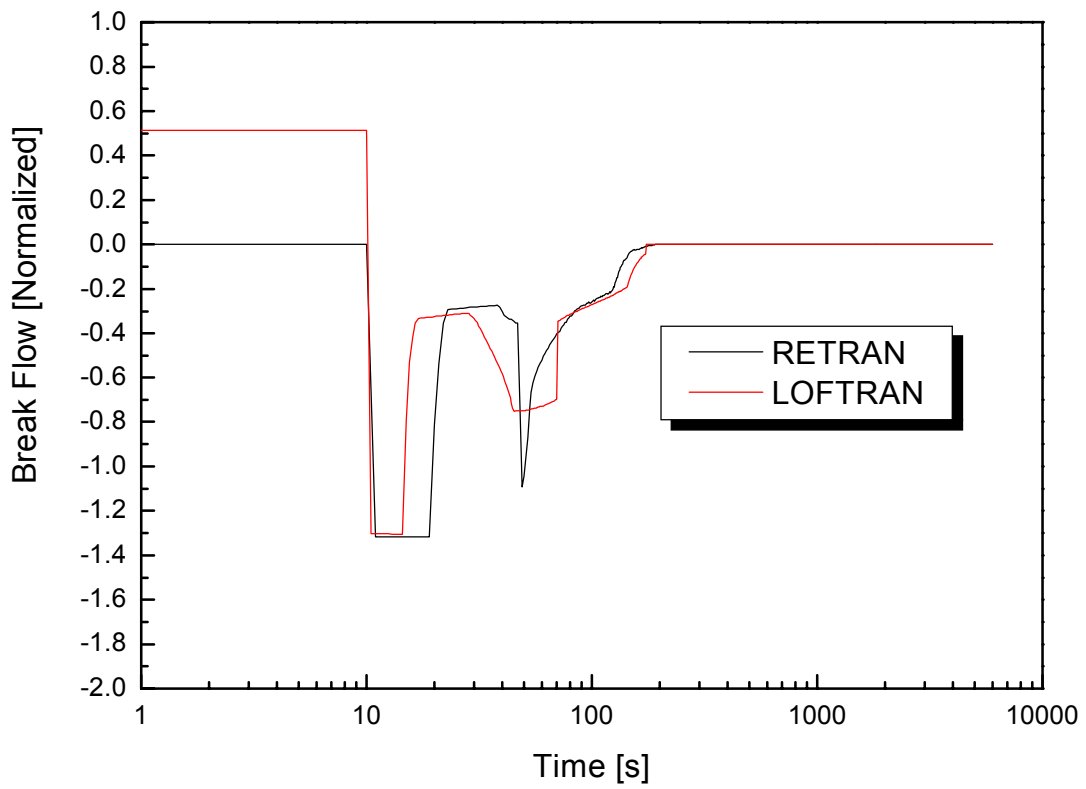


그림 4 Moody 임계유량 관계식 사용시 시간에 따른 파단 유량 및 증기 압력