

RETRAN 코드를 이용한 CE형 발전소의  
출력운전중 CEA 인출과도현상 해석

RETRAN Analysis of Uncontrolled CEA Withdrawal at Power  
for CE Type Plants

이동혁, 김요한, 양창근, 성장경

한전 전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

현재 국내 CE형 원전의 출력운전중 제어되지 않은 제어봉집합체 인출 과도현상은 대부분 CESEC 코드와 CETOP 코드를 사용하여 해석하였다. CESEC 코드를 사용하여 1차측 시스템 과도현상을 분석하여 노심출력, 유량, 압력 등을 계산하고, CETOP 코드를 사용하여 DNBR 값을 계산하고 있다.

본 연구에서는 EPRI에서 개발된 범용 원전 안전해석 코드인 RETRAN 코드를 사용하여 CE형 원전의 출력운전중 제어봉집합체 인출 과도현상을 모사하였다. 또한 최종안전성분석보고서 작성에 사용된 CESEC 코드를 이용한 결과와 비교하였다. 해석 결과, RETRAN의 결과와 CESEC의 결과가 비슷한 경향을 보이고 있어 RETRAN의 해석 결과가 타당함을 확인하였다.

Abstract

For CE plants, uncontrolled CEA withdrawal at power transients were analyzed using CESEC and CETOP codes. The CESEC code is used for system response calculation to obtain system parameters, such as core heat flux, RCS flowrate, RCS pressure. CETOP code is used to calculate DNBR. In this study, RETRAN code is used to perform transient analysis. RETRAN is system transient analysis code developed by EPRI. It is more flexible than CESEC and can calculate DNBR without separate code such as CETOP. The results from CESEC-CETOP and the results from RETRAN show good agreement. Therefore RETRAN code can be used instead of CESEC code for analysis of uncontrolled CEA withdrawal at power transients.

## 1. 서 론

과거 CE형 원전의 출력운전중 제어되지 않은 제어봉집합체 인출 과도현상은 CESEC 코드와 CETOP 코드를 사용하여 해석하였다. CESEC 코드는 계통열수력분석용 코드로 1차측 시스템 과도현상 분석에 사용한다. CETOP 코드는 핵비등이탈률(DNBR) 계산에 사용된다. DNBR 계산을 위해 CESEC 코드해석 결과에서 노심출력, 유량, 압력 등을 가져와 CETOP 코드를 사용하여 DNBR 값을 계산한다. 기존 해석 방법의 가장 큰 단점은 안전성 판정 기준인 DNBR값 계산을 위해 CESEC 코드와 CETOP 코드를 각각 실행해야 한다는 점이다. 이런 방법은 민감도 분석 수행 등 많은 case를 계산해야 할 때 불편하다.

본 연구에서는 EPRI에서 개발된 범용 원전 안전해석 코드인 RETRAN 코드를 사용하여 출력운전중 제어되지 않은 제어봉집합체 인출 과도현상을 분석하였다. 대상 발전소로는 한국 표준형 원전인 울진 3/4호기를 선정하였다. RETRAN 코드는 자체적으로 DNBR 계산이 가능하므로 민감도 분석 등에 편리하게 사용할 수 있다. 민감도 분석을 통해 가장 제한적인 case를 선정된 뒤 선정된 최종 case에 대해 CETOP이나 VIPRE 등 상세 DNBR 분석코드를 사용한다.

## 2. 출력운전중 제어되지 않은 제어봉집합체 인출 현상 개요

제어되지 않은 제어봉집합체의 인출은 제어봉구동장치 제어계통 또는 원자로제어계통의 고장에 의해 일어날 수 있다. 제어봉집합체가 인출되면 양의 반응도 삽입 효과가 있어서 노심 출력이 증가한다. 1차측 열제거원 역할을 하는 터빈 출력은 증가하지 않으므로 1차측 냉각재에 에너지가 축적되어 냉각재 온도가 올라가며, 온도 상승에 따른 부피 팽창으로 인해 원자로 냉각재 압력이 상승한다. 노심 출력 증가에 따라 DNBR값이 감소한다.

원자로 출력이 계속 증가하면 가변 과출력 트립 설정치에 도달하여 원자로 트립 신호가 발생된다. 원자로 트립신호 발생후 제어봉이 노심에 완전히 삽입되기까지 시간 지연이 있고, 핵분열이 감소해도 연료에 축적된 열에너지가 방출되므로 노심열속은 원자로 트립신호 발생 직후에 최대값에 도달하며 최소 DNBR이 발생한다. 제어봉이 완전 삽입되어 노심 출력이 감소하고 1차측 냉각재의 온도 및 압력이 감소되면 과도현상이 종료된 것으로 본다.

출력운전중 제어되지 않은 제어봉집합체 인출 현상은 ANS Condition II로 분류되는 과도현상이다. 분석시 초기 조건은 현행 FSAR에 기술된 값을 가정하였다.

< 표-1 출력운전중 제어되지 않은 제어봉집합체 인출 과도현상 해석시 초기 조건 >

초기 조건 변수	값	비 고
노심 출력 [MWt]	2871.3	
노심 입구 온도 [°F]	570.0	
노심 유량 [ $10^6$ lbm/hr]	112.0	
가압기 압력 [psia]	2000	
가변 과출력 트립 설정치 [%]	115	
반응도 피드백	최소값	

### 3. RETRAN 모델

#### 가. 정상상태 모델

사고해석에 앞서, 먼저 울진 3/4호기 정상상태 RETRAN 모델을 작성하였다. 정상상태 모델은 103개의 체적과 153개의 junction으로 구성되었다. 2개의 RCS 루프 및 증기발생기, 4개의 원자로 냉각재 펌프를 각각 모델링하였다. 노심 핵연료 부분은 6개의 체적으로 모델하였으며, 증기발생기는 2차측 7개, 1차측 8개의 체적으로 모델하였다. 또한 가압기 안전밸브 및 PORV, 증기발생기 안전밸브, 원자로 트립 계통 등이 모델 되었다. 울진 3/4호기의 분할도는 그림 1과 같다.

#### 나. 노심 반응도 모델

제어되지 않은 제어봉집합체 인출 과도현상은 반응도가 삽입되는 사고이므로 노심 반응도 모델이 가장 중요하다. RETRAN 계산 결과와 CESEC 코드 계산결과를 비교하기 위해 RETRAN 코드와 CESEC 코드에 같은 반응도 값을 입력하였다. 도플러 피드백 반응도 및 감속재 피드백 반응도는 RETRAN의 14300Y 카드 및 14200Y 카드를 사용하여 모델하였다. 반응도 값은 최소 피드백 값을 사용하였다. 원자로 트립 발생시 제어봉 낙하에 따른 반응도는 141XXY 카드로 모델하였다. 본 과도현상의 초기사건인 제어되지 않은 제어봉집합체 인출은 RETRAN 제어계통모델을 사용하여 일정한 속도로 반응도가 삽입되는 것으로 모델하였다. 0초에 반응도 삽입이 시작되며 원자로 트립 신호가 발생되면 반응도 삽입이 중지되는 것으로 모델하였다. 인출된 제어봉집합체에 의한 반응도 삽입량은  $5.45 \times 10^{-5} \Delta k/k / \text{sec}$ 로 가정하였다.

#### 다. 핵비등 이탈률 계산

CE 방법론에 따르면 핵비등 이탈률 계산은 CETOP 코드를 사용하여 수행한다. CETOP 코드의 입력으로 CESEC 코드의 계산 결과가 사용된다. 노심 열속, 노심 유량, 노심 압력, 노심 온도 등이 핵비등 이탈률 계산에 사용되는 중요한 변수이다. 또한 노심의 축방향 및 반경방향 출력분포도 중요하다. 본 연구에서는 CETOP 및 CESEC 두 개의 코드에서 계산하던 것을 RETRAN 한 개의 코드로 처리할 수 있도록하여, DNBR에 대한 민감도 분석을 RETRAN 코드로 하나로 수행할 수 있도록 하였다. RETRAN의 반응도 계산은 point kinetics를 사용하나, 핵비등 이탈률 계산에는 노심의 축방향 출력분포, 반경방향 출력 분포를 고려한다.

### 4. 분석 결과

#### 가. RETRAN 코드를 이용한 출력운전중 제어되지 않은 제어봉집합체 인출 과도 현상

RETRAN 코드를 사용하여 울진 3/4호기 출력운전중 제어되지 않은 제어봉집합체 인출 과도 현상을 분석하였다.  $t=0.0$ 초에 제어봉집합체가 인출되는 것으로 가정하였다. 제어봉 인출에 따른 반응도 삽입으로 노심 출력이 증가하기 시작한다. 1차측 유체의 열제거원 역할을 하는 터빈의 출력이 일정하다고 가정하므로 노심 출력이 상승하면 제거되는 것보다 더 많은 에너지가 1차측 유체에 축적되어 1차측 온도 및 압력이 상승한다. 온도 상승에 따라 감속재 피드백 및 도플러 피드백 효과에 의한 음의 반응도 삽입이 있어 출력 상승을 억제하게 되는데, 이 효과를 최소화하기 위해 최소 반응도 피드백을 가정하였다.

노심 출력 계속 증가하다가 과출력 트립 설정치에 도달하게 되면 원자로 트립 신호가 발생된다. 원자로 트립 신호가 발생되면 인출되던 제어봉집합체의 인출이 중단되며, 원자로 트립을 위한 제어봉 삽입이 시작된다. 그림 2와 그림 3은 시간에 따른 노심 출력과 노심 열속을 각각 나타내었다. 노심 출력은 약 20초까지 증가하다가 원자로 트립으로 인해 감소된다. 노심 열속은 약 21초까지 증가하다가 원자로 트립으로 감소된다. 최소 DNBR은 원자로 트립 직후 나타난다.

원자로 트립이 발생되면 동시에 터빈 트립이 발생한다고 가정하며, 3초 후에 소외전원 상실이 일어난다고 가정한다. 본 과도현상은 최소 DNBR이 원자로 트립 직후에 나타나기 때문에 소외전원 상실에 3초 지연시간을 고려할 경우 최소 DNBR에 도달한 후에 소외전원이 상실되기 때문에 소외전원 상실 가정은 최소 DNBR값에 영향을 주지 않는다.

터빈 트립이 발생하면 터빈으로 흐르던 증기 유로가 차단되어 일시적으로 열제거 유로가 상실되나, 증기발생기 압력이 상승하여 주증기 안전밸브가 열리면서 열제거가 다시 시작된다. 원자로 출력이 줄어든 상태에서 증기발생기 안전밸브를 통해 열이 제거되기 때문에 1차측 온도가 감소되며 압력 역시 감소되어 과도현상이 종료된다.

#### 나. CESEC 결과와 RETRAN 결과의 비교

CESEC의 결과와 RETRAN의 결과가 전반적으로 잘 일치하고 있다. 제어봉 인출에 따른 노심 출력 변화는 거의 동일하다. 원자로 트립은 RETRAN 코드의 경우가 약간 빠르나 큰 차이는 없다(그림 2). 시간에 따른 노심 열속 변화 역시 노심 출력과 비슷한 경향을 보이고 있다. 단지 노심 출력이 줄어도 연료에 축적된 열에너지가 방출되므로 노심 열속의 감소 속도가 노심 출력보다 느리다. 노심 열속 역시 RETRAN 코드의 계산결과가 좀더 일찍 감소한다(그림 3). 가압기 압력의 경우 전체적인 경향은 비슷하나 CESEC의 계산결과가 더 높은 값을 보이고 있다(그림 4). 원자로 냉각재 온도 역시 경향은 비슷하나 값은 조금 차이가 난다(그림 5). 증기발생기 압력은 1차측 출력이 상승함에 따라 천천히 높아지다가 터빈 트립이 일어나 터빈으로 공급되는 유로가 차단되면 압력이 급격히 높아져서 주증기관 안전밸브 개방 압력까지 올라간다. 증기발생기 압력은 RETRAN이 약간 낮지만 큰 차이는 없다(그림 6). 주증기관 안전밸브를 통한 유량은 CESEC와 비슷한 유량이 나오도록 RETRAN 입력을 조절하여 거의 같은 유량을 보이고 있다(그림 7). 핵비등 이탈율은 RETRAN 코드로 계산한 값과 CESEC-CETOP으로 계산한 값이 비슷한 경향을 보이고 있다(그림 8). 보수적인 결과를 위해 RETRAN 코드의 DNBR 값이 CESEC-CETOP 보다 낮은 값이 나오도록 RETRAN 입력을 보수적으로 입력하였다.

< 표-2 시간에 따른 주요 현상 요약 >

내 용	시간 [s]
제어봉집합체 인출 시작	0.0
가변과출력 트립 조건 도달 (115%)	18.6
원자로 트립 발생	19.2
최대 노심 출력 도달 (115.5%)	19.2
최소 DNBR 도달	20.2
최대 노심 평균열속 도달 (113.2%)	20.8
최대 가압기 압력 도달	23.0

## 5. 결론

RETRAN 코드를 사용하여 울진 3/4호기의 출력운전중 제어되지 않은 제어봉집합체 인출 과도 현상을 분석하였다. 분석결과 기존의 CE 안전해석 방법인 CESEC(계통 과도현상 분석) 코드과 CETOP(DNBR 분석) 코드를 사용하여 분석한 결과와 유사한 결과를 얻었다.

기존 CE 해석방법은 CESEC 코드를 사용하여 1차측 시스템 과도현상을 분석하여 노심출력, 유량, 압력 등을 계산하고, CETOP 코드를 사용하여 DNBR 값을 계산하였다. 따라서 2개의 별도의 코드를 사용해야 하는 단점이 있다. RETRAN 코드의 간단한 DNBR 계산 능력이 있어 민감도 분석 등에 좀더 편리하게 사용할 수 있다. 또한, RETRAN 해석 결과가 CESEC-CETOP의 결과와 비슷한 경향을 보이고 있어 RETRAN의 해석 결과가 타당함을 확인할 수 있었다.

## 6. 후 기

본 연구는 산업자원부 지원하에 수행중인 과제인 “고유 안전해석 전산코드 개발”과제의 일환으로 수행되었다.

## 7. 참고문헌

1. 울진 3/4 호기 최종안전성분석보고서, 한국전력공사
2. EPRI NP-7450, RETRAN-3D - A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flows Systems, EPRI, 1995
3. EPRI NP-4498, The Reactor Anaysis Support Package(RASP) Volume 3. PWR Event Guidelines, EPRI, 1986
4. Advanced Power Reactor 1400 Standard Safety Analysis Report, 한국수력원자력(주)
5. Safety Analysis Standard, Westinghouse Electric Corporation
6. TM.00NS20.P2001.114, RETRAN을 이용한 출력운전중 제어봉 고장인출사고 분석, 한국전력공사, 2001

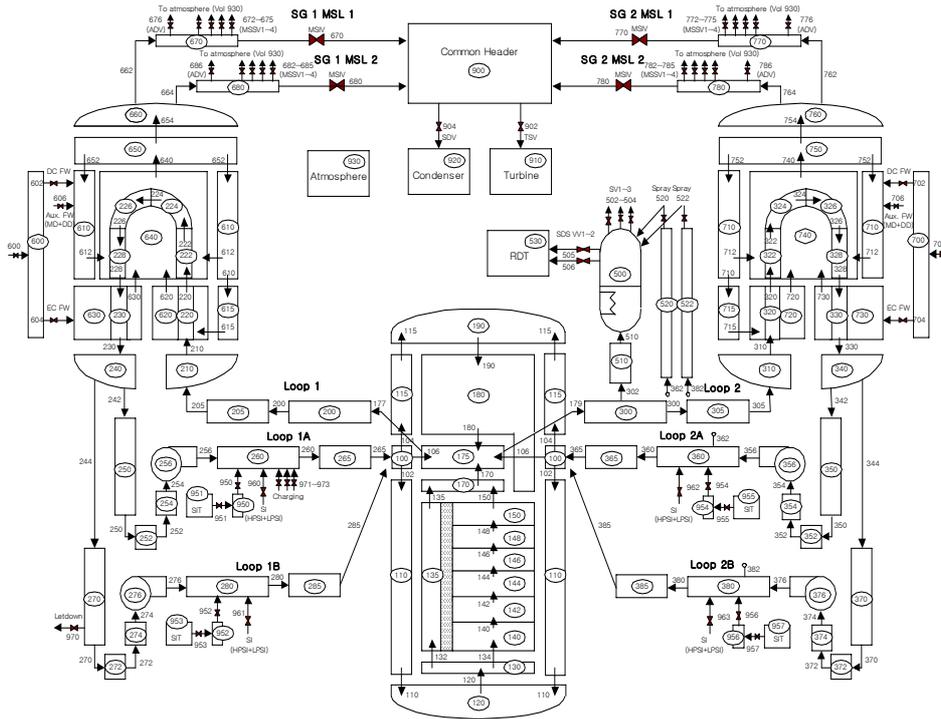


그림 1 울진 3/4호기 RETRAN 분할도

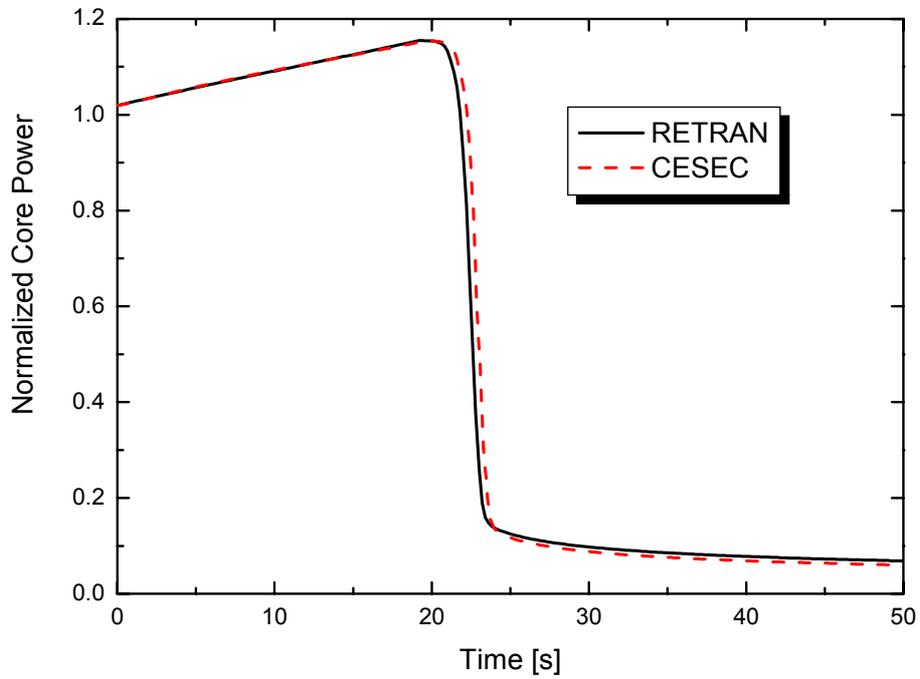


그림 2 시간에 따른 노심 출력

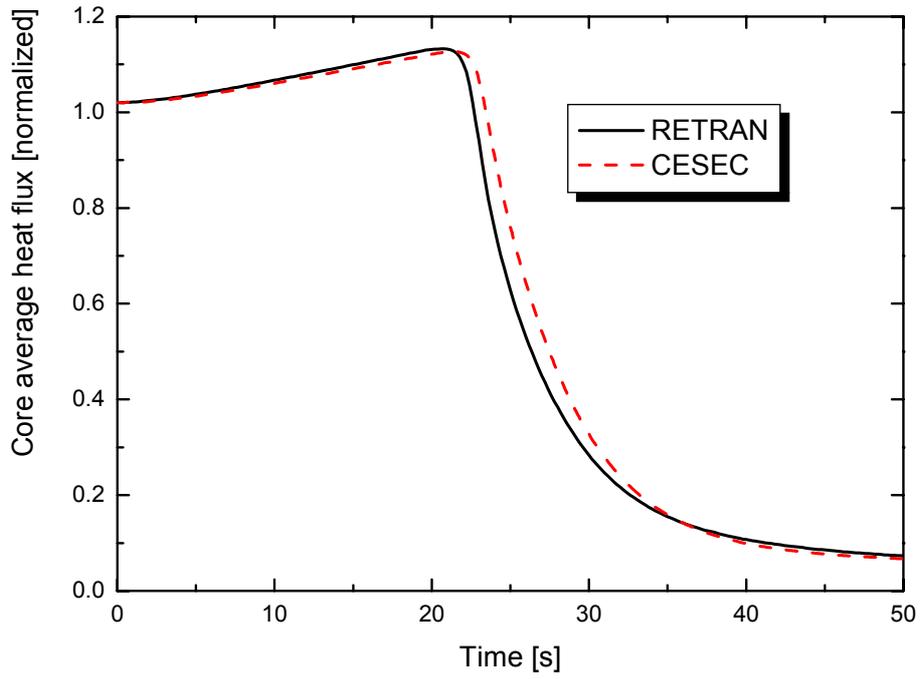


그림 3 시간에 따른 노심 열속

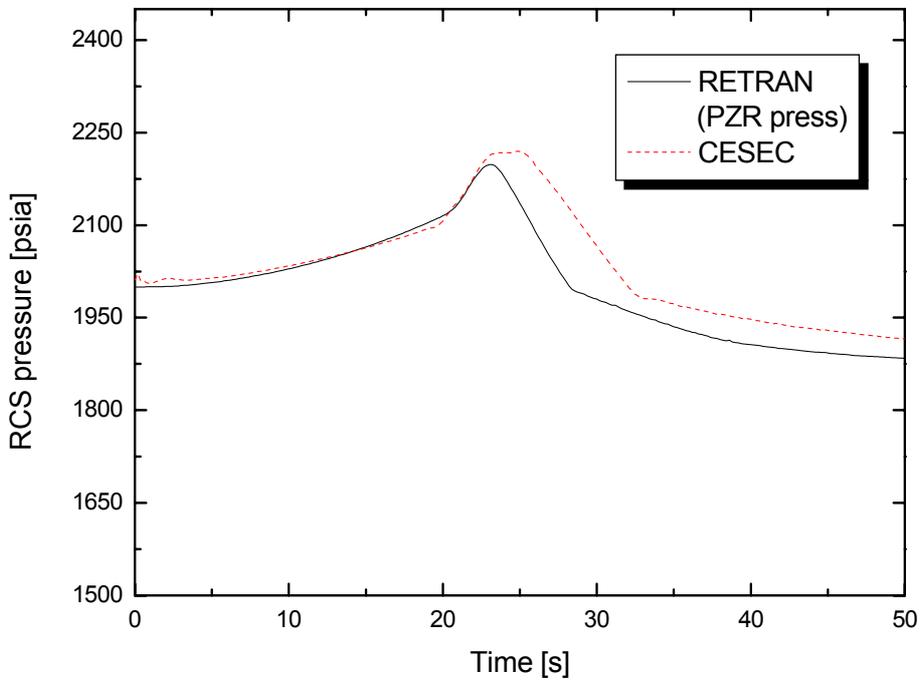


그림 4 시간에 따른 가압기 압력

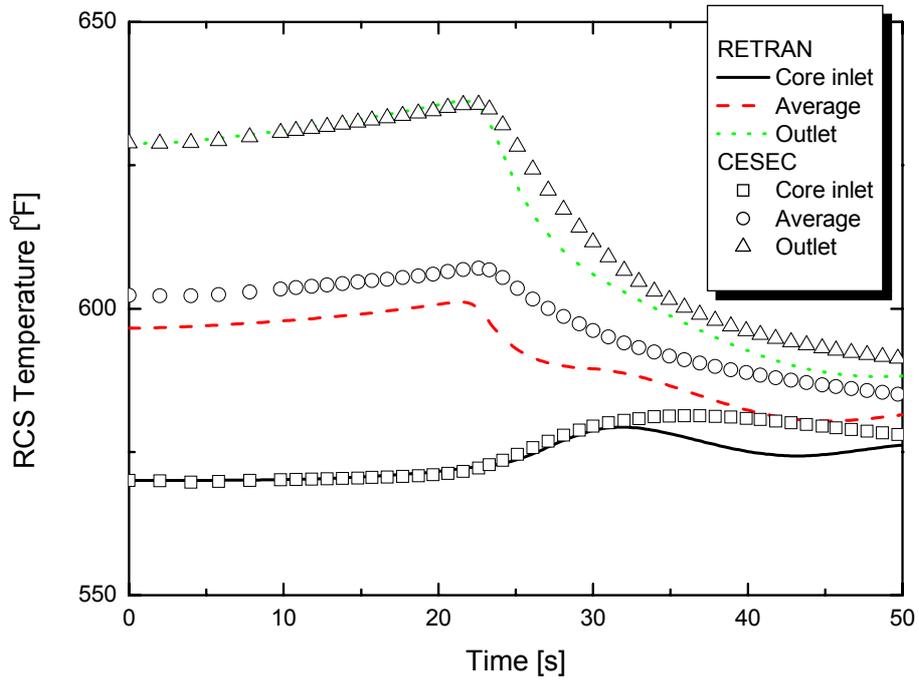


그림 5 시간에 따른 원자로냉각재 온도

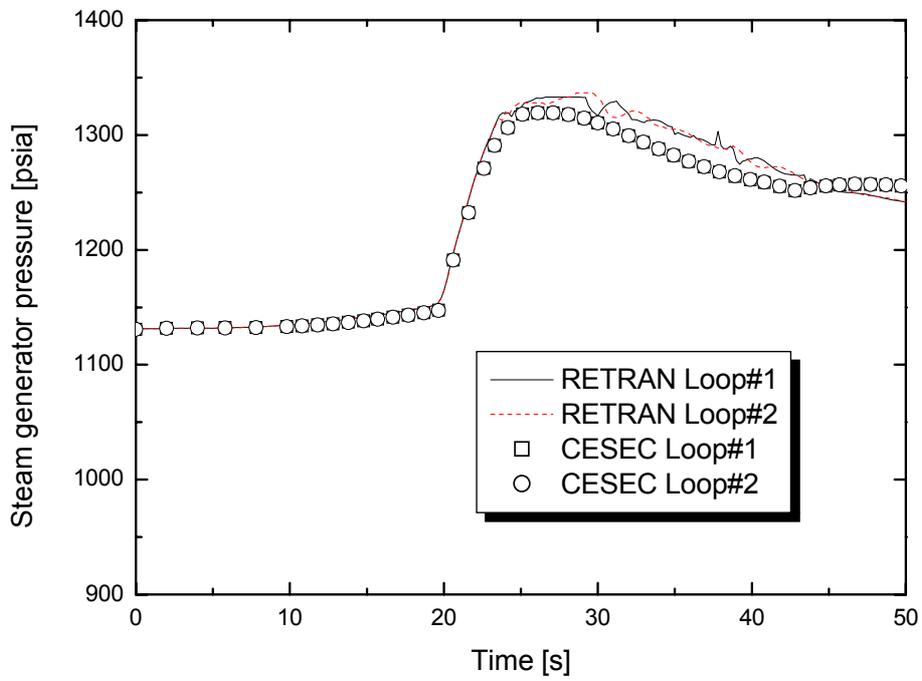


그림 6 시간에 따른 증기압력

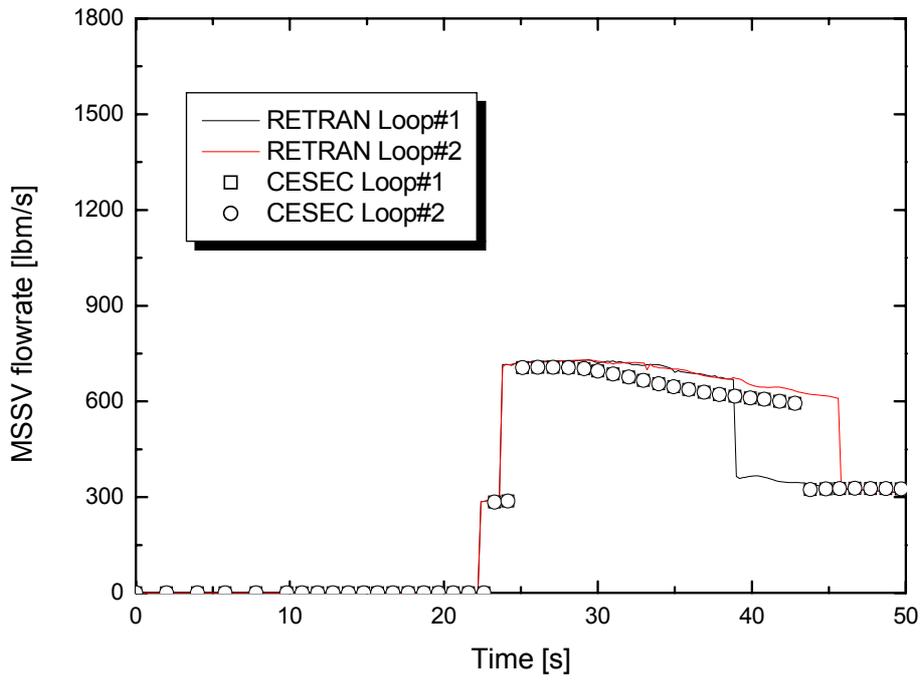


그림 7 시간에 따른 주증기 안전밸브 유량

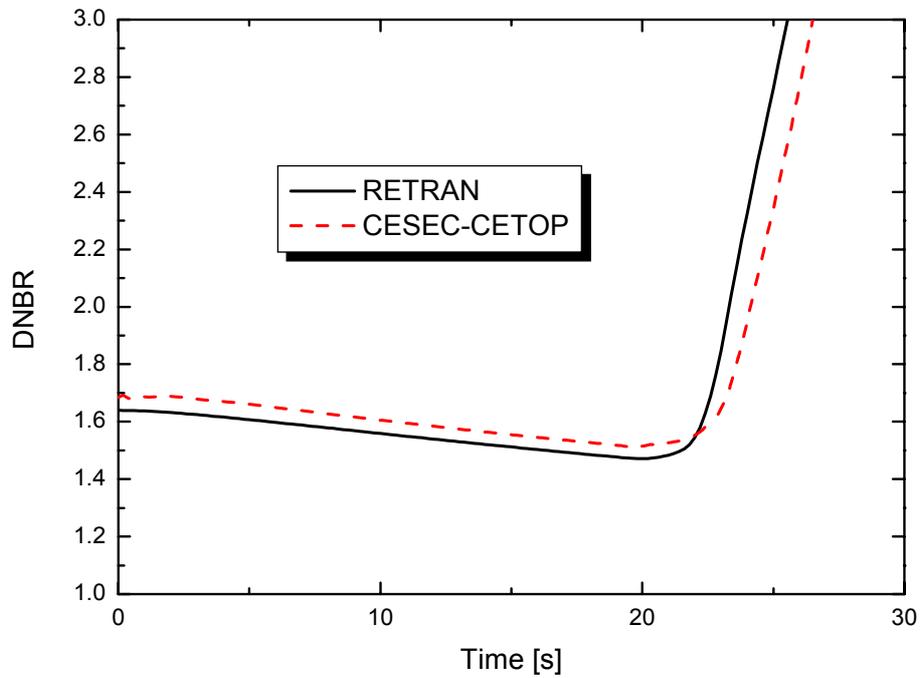


그림 8 시간에 따른 DNBR