

## SMART 자연순환운전 해석 Analysis of SMART Natural Circulation Operation

이규형, 이성욱, 김희철

한국원자력연구소  
대전시 유성구 덕진동 150

### 요 약

SMART 일체형원자로 (330 MWt) 의 성능관련 설계기준사건중 하나인 20% ~ 25% 출력에서 자연대류 운전에 대하여 SMART 설계자료를 사용하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 계통의 조건은 10% 증기발생기 관막음을 고려한 최적 상태의 주기초, 주기중, 주기말 노심이며, 사용된 전산코드는 계통 열수력해석 코드인 TASS/SMR 코드이다. 본 운전과도에 대한 허용기준은 원자로 경보신호가 발생하지 않으며 증기 과열도가 천이기간 중 10 °C 이상을 유지하는 것이다. 해석 결과, 본 운전 모드에서는 일차측 증기발생기 입구 온도에 대한 기준 온도의 변경이 필요한 것으로 분석되었다. 기준 온도를 증가시킨 제어 논리를 사용하면 모든 노심 조건에서 자연대류 운전모드로의 전환이 허용기준을 만족하면서 운전이 가능하며, 또한 운전 종료시 원자로 출력은 목표 출력에서 유지되는 것으로 나타났다.

### Abstract

Natural circulation operation in a power range of 20 ~ 25 % for SMART, which is PRDBE (Performance Related Design Basis Events), has been performed. The system initial conditions are best estimate BOC, MOC, EOC conditions in consideration of 10% SG plugging. TASS-SMR code was used for the analysis. The acceptance criteria for this operation is no pre-scrum signal and steam super heat maintains above 10 °C during transient period. The analysis show the need of the change of reference temperature for the primary S/G inlet temperature in order to compensate the decreased core flow. Using the increased reference temperature satisfies the desired criteria for all core conditions.

## 1. 서론

본 해석에서는 SMART 일체형원자로 (330 MWt)의 성능관련 설계기준사건 [1]중 하나인 자연대류 운전모드를 살펴보았다. 자연대류 운전은 SMART 일체형원자로가 가지는 특성인 일차측 냉각재 유로의 저항이 작고, 정적 수두가 큰 장점 등을 이용한 운전 방식이다.

본 해석에서는 주기초, 주기중, 주기말 노심 (BOC, MOC, EOC)에 대하여 각각 20% 출력 강제대류 운전모드에서 자연대류 운전모드로 운전모드 전환을 해석하였다. 해석에 사용된 코드는 계통 열수력해석 코드인 TASS/SMR 코드 [2]이다. TASS/SMR 코드는 SMART 원자로의 성능 및 안전성을 분석하기 위하여 개발된 해석 코드 [1]이다. TASS/SMR 코드에는 SMART 원자로의 주요한 거동인 나선형 증기발생기에서의 열전달 모델, 가압기의 중앙공동과 잔열제거계통의 보상탱크에 존재하는 비응축성가스인 질소의 거동, 초기 정상상태를 자동으로 초기화시켜 주는 루틴, 잔열제거계통의 튜브에서의 열전달 모델 등이 있다. 해석은 4000 초까지 수행하였다.

SMART에서 주냉각재펌프는 glandless canned motor 형태로서 축방향으로 유체가 흐른다. 고속과 저속 두 가지 운전모드를 가지며 고속/저속운전에서 회전속도는 각각 3600 rpm과 900 rpm이다. SMART 정상 출력운전 모드에서 출력범위는 100%에서 20%까지이다. 정상 출력운전 범위에서 네 대의 주냉각재펌프는 모두 고속운전상태로 운전된다 [3]. 자연대류 운전은 주냉각재펌프를 모두 정지시키는 단계와 급수유량을 증가시켜 원하는 출력을 얻는 단계로 나뉜다. 주냉각재펌프를 정지시키는 단계에서 운전은 다음과 같이 이루어진다고 가정하였다. 20% 출력 운전 상태에서 주냉각재펌프는 운전원에 의해 순차적으로 고속에서 저속으로 천이 되며, 네 대가 모두 저속운전 상태에 도달한 후 다시 순차적으로 운전원에 의해 정지된다. 모든 주냉각재펌프가 정지된 후 급수유량을 5%/분의 비율로 25%까지 증가시킨다. 이때 급수유량 변동에 따라 발생하는 노심 출력과 급수유량 편차는 SMART 제어논리 [4]에 의해 조절된다.

## 2. 해석 방법론

자연대류 운전으로 전환시 초기 출력 조건은 20% 출력을 사용하였다. 20% 출력에서 계통 초기조건은 100% 출력 운전으로부터 20% 출력으로의 출력 감발 계산을 수행하여 얻은 20% 출력에서의 정상상태 조건을 이용하였다.

자연대류로 운전모드 변동시 출력 변화율은 5%/분이며 허용 기준은 표 1에 표시되어 있는 원자로 경보신호가 발생하지 않으며, 증기 과열도가 전체 천이기간 중 10 °C 이상을 유지하는 것이다.

20% 출력운전에서 자연대류 운전으로의 전환 과정은 운전원에 의해 수동적으로 이루어진다고 가정하였다. 자연대류로의 운전은 다음 과정을 통하여 이루어진다. 운전원은 고속운전중인 네대의 주냉각재펌프를 순차적으로 저속모드로 전환시키고 다시 순차적으로 정지시킨다. 본 해석에서 사용한 네대의 주냉각재펌프 운전 전환 시점은 표 2에 표시된 시점을 선택했다. 해석은 주기초, 주기중, 주기말 노심 상태에 대하여 수행하였으며, 각각의 노심에 대하여 계산된 계통 주요 변수 값은 표 3 ~ 5에 표시되어 있다.

SMART 기본설계 단계에서 제시된 제어 개념은 계통변수인 일차측 증기발생기 입구 온도와 노심 출력을 기 설정된 제어값에 맞도록 조절하는 것이다. 일차측 증기발생기 입구 온도에 대한 기준 온도는 100% 출력 일 때 310 °C, 20% 출력 일 때 298 °C로 선형적으로 변화하도록 되어 있다. 노심 출력은 급수 유량 분율을 따라 변화하도록 프로그램되어 있다. 상기 두 가지 증기발생기 입구 온도와 노심 출력 편차를 일정한 밴드로 유지하도록 제어봉이 작동하여 전체 계통이 안정된 거동을 보이도록 제어 논리가 구성되어 있다.

강제대류에서 자연대류로의 운전전환 과정에서, 일차계통 유량 감소에 따라 이차계통으로 열 전달 평형을 맞추기 위하여 일차계통 냉각재 노심 입구온도는 감소하게 된다. 이에 따른 냉각재 밀도 감소로 인하여 일차계통 압력이 감소하게 되는데 이 때 일차측의 과도한 압력 강하를 방지하기 위하여 주냉각재펌프의 속도가 변경되는 중 적절한 시점에서 일차측 증기발생기 입구 온도에 대한 기준온도를 100% 출력일 때의 값으로 변경한다 (298 °C → 310 °C). 본 해석에서는 적절한 일차측 기준온도 변경 시점을 선택하기 위하여 민감도 분석을 수행하였다.

또한 주냉각재펌프의 속도 변경 시점과 급수 유량을 변경하는 시점은 다음을 고려하여 선택하였다. 제어 변수로 사용되는 온도 편차와 출력 편차가 원하는 밴드 내로 유지되어서 제어봉의 이동이 없는 시점을 선택하였다.

### 3. 자연대류운전 해석

자연대류 운전으로 전환과정에서 발생하는 주요 계통의 변화는 다음과 같다. 첫 째로 네대의 주냉각재펌프가 고속 운전에서 정지상태로 천이될 때, 두 가지 변수 (노심 출력, 일차측 증기발생기 입구 온도)의 기준 값(reference value)인 급수 유량의 변화가 없는 상태에서 일차 냉각재 유량의 급격한 감소이다. 두 번째는 주냉각재펌프가 모두 정지한 20% 출력에서 자연대류 정상 상태에 도달

한 후 급수유량을 25%로 증가시켜 원자로 출력을 25%로 증가시키는 것이다.

냉각재 유량 변화에 의한 제어 변수 변화는 온도 편차와 출력 편차를 원하는 밴드내로 유지하도록 제어봉을 이동시킨다. 제어봉 삽입/인출에 의한 반응도 제어에 의하여 노심 출력은 급수 유량을 따라서 변화하며, 일차측 증기발생기 입구 온도 역시 기준 온도에 따라 변화하게 된다.

주냉각재펌프의 속도 변경은 고속에서 저속까지 18.56 초, 저속에서 정지까지 21.44 초가 걸리는 coastdown curve를 사용하였다 (그림 2). 해석 방법론에서 제시한 대로 주냉각재펌프 정지로 인한 과도한 일차계통의 압력 저하를 방지하기 위하여 증기발생기 기준 온도를 변경시키는 시점을 두 가지 경우에 대하여 계통 거동을 살펴보았다. 첫 번째 변경 시점은 주냉각재펌프의 속도가 저속에서 이탈하는 순간이고 (case-1), 두 번째는 주냉각재 펌프의 속도가 고속에서 이탈하는 순간이다 (case-2). 각각 case-1 과 case-2에 대한 주기초 노심에 대한 민감도 분석 결과를 그림 3와 4에서 나타내었다. 그림 4에서 보여지는 것과 같이 주냉각재펌프의 속도가 고속에서 이탈하는 순간에 기준 온도를 변경할 경우 급격한 (-) 온도 편차로 제어봉이 인출되면서 펌프 정지에 따른 노심 입구온도의 저하보다 노심 출구부분 (증기발생기 입구)의 온도가 상대적으로 과도하게 상승하여 일차계통의 압력이 경보 설정치인 16 MPa 이상 증가하게 된다. 반면에 주냉각재펌프의 속도가 저속 이하로 떨어질 때 기준 온도를 변경한 경우는 계통 압력을 원하는 범위 (13 MPa ~ 16 MPa)에서 제어할 수 있었다.

강제대류에서 자연대류로의 운전 모드 변화 과정에서 운전원이 계통 변수를 조절하여 원하는 상태로 다다르게 하는 시점은 다음과 같다. 네 대의 주냉각재펌프의 속도를 고속에서 저속으로, 저속에서 정지상태로 변화시킨 후 급수 유량을 20%에서 25%로, 다시 네 대의 주냉각재펌프의 속도를 정지 상태에서 저속으로, 저속에서 고속으로 변화시킨 후 급수 유량을 25%에서 20%로 변경하는 시점으로 구성된다. 급수 유량을 변화시키는 시점은 그림 5에서 보여지는 것과 같이 운전 개시 후 1200 초와 2000 초를 선택하였다. 그리고 주냉각재펌프의 고속에서 저속으로, 저속에서 정지상태로, 정지상태에서 저속으로, 저속에서 고속운전 상태로의 전환 시점은 운전 개시 후 각각 0 초, 600 초, 2800 초, 3400 초로 설정하였다 (그림 6). 그림에서 보이는 바와 같이 운전원의 조작 시점에서 제어봉의 이동이 없는 상태로 주요 계통 변수는 안정되어 있다. 과도기간 중 반응도의 변화는 그림 7에 나와 있다. 온도 편차와 출력 편차의 거동은 각각의 편차를 3 °C와 2% 범위 내로 유지하도록 신호를 발생시켜서 제어봉의 이동은 온도 편차와 출력 편차로 구성된 제어변수 변화에 따라서 이동하게 된다 (그림 8).

주기초 노심 상태에서 자연대류로의 운전 전환을 살펴보면 다음과 같다. 운전원에 의해서 네 대의 주냉각재펌프가 차례로 고속 모드에서 저속 모드로 전환되면서 노심 입구 유량은 감소하게 된다 (그림 9). 그리고 노심 출력은 주냉각재펌프의 상태에 따른 노심 입구 유량의 변화 및 급수 유량의 변화에 따라 진동하게 되나 20% 자연대류 도달한 상태와 25% 자연대류 도달한 상태 (1200 초, 2000 초) 에서 원하는 출력에 대비해서 2% 밴드 안에서 유지되는 것으로 나타났다 (그림 10). 주냉

각재펌프가 각각 고속에서 저속으로, 저속에서 정지상태로 변경되면서 냉각재 유량이 급격하게 감소할 때 노심에서의 열출력을 이차계통으로의 열전달과 평형을 맞추기 위하여 일차측 증기발생기 출구(노심 입구) 온도가 상대적으로 운전 초기에 하락하게 된다. 그러나 주냉각재펌프의 속도가 저속에서 정지로 천이 되면서 기준 온도의 증가로 일차측 증기발생기 출구(노심 입구) 온도의 과도한 하락이 어느 정도 제어된다(그림 11). 일차계통의 압력은 과도기간 중 경보 신호를 발생시키지 않는 범위(13 MPa ~ 16 MPa) 내에서 냉각재 온도 변화에 따른 전체 냉각재 밀도 변화에 따라서 변화하게 된다(그림 12). 과도기간 중 증기과열도는 10 °C 이상을 유지한다(그림 13).

#### 4. 해석 결과

해석 결과 SMART 주기초, 주기중, 주기말 노심에 대하여 20% 출력운전 중 강제대류에서 자연대류로 운전모드 변경하고 출력을 25%로 올린 후 다시 출력을 20%로 변경하고 자연대류에서 강제대류로 전환하는 운전은 일차측 증기발생기 입구 온도에 대한 기준 온도를 변경하는 것이 필요한 것으로 분석되었으며, 증기발생기 입구 온도에 대한 기준 온도를 변경하여 자연대류 운전을 수행하는 경우 원자로 경보신호가 발생하지 않으며 증기 과열도가 전체 과도기간 중 10 °C 이상을 유지하는 것으로 나타났다.

#### 5. 참고문헌

- [1] 임홍식, “SMART 성능해석 방법론”, KAERI/TR-1798/2001, 한국원자력연구소, 2001.
- [2] 윤한영, “TASS/SMR 열수력 모델 기술서”, KAERI/TR-1835/2001, 한국원자력연구소, 2001.
- [3] 김환열, “SMART 계통 설명서”, SMART-FS-SD210, revision 00, 한국원자력연구소, 1998.
- [4] 임홍식, “SMART 출력제어 개념개발을 위한 출력감발 해석”, KAERI/TR-1073/98, 한국원자력연구소, 1998.

표 1. 원자로 경보신호

	설정치
노심출력 (%)	108 ↑
일차측 증기발생기 입구온도 (°C)	325 ↑
일차계통 압력 (MPa)	16 ↑
	13 ↓

표 2 자연순환운전 전개과정

	시간, 초	과도 전개
MCP 고속 -> 저속	0	60 초 간격으로 4 대의 MCP 차례로 저속으로 전환
	180	4 대의 MCP 저속 도달
	180 ~ 600	4 대의 MCP 저속 운전
MCP 저속 -> 정지	600	60 초 간격으로 4 대의 MCP 차례로 정지 상태로 전환
	780	4 대의 MCP 정지 상태
	780 ~ 1200	4 대의 MCP 정지 운전
급수유량 증가	1200 ~ 1260	급수유량 20% → 25% 증가
	1260 ~ 2000	급수유량 25% 자연순환운전
급수유량 감소	2000 ~ 2060	급수유량 25% → 20% 감소
	2060 ~ 2800	급수유량 20% 자연순환운전
MCP 정지 -> 저속	2800	60 초 간격으로 4 대의 MCP 차례로 저속으로 전환
	2980	4 대의 MCP 저속 도달
	2980 ~ 3400	4 대의 MCP 저속 운전
MCP 저속 -> 고속	3400	60 초 간격으로 4 대의 MCP 차례로 고속으로 전환
	3580	4 대의 MCP 고속 도달
	3580 ~ 4000	4 대의 MCP 고속 운전



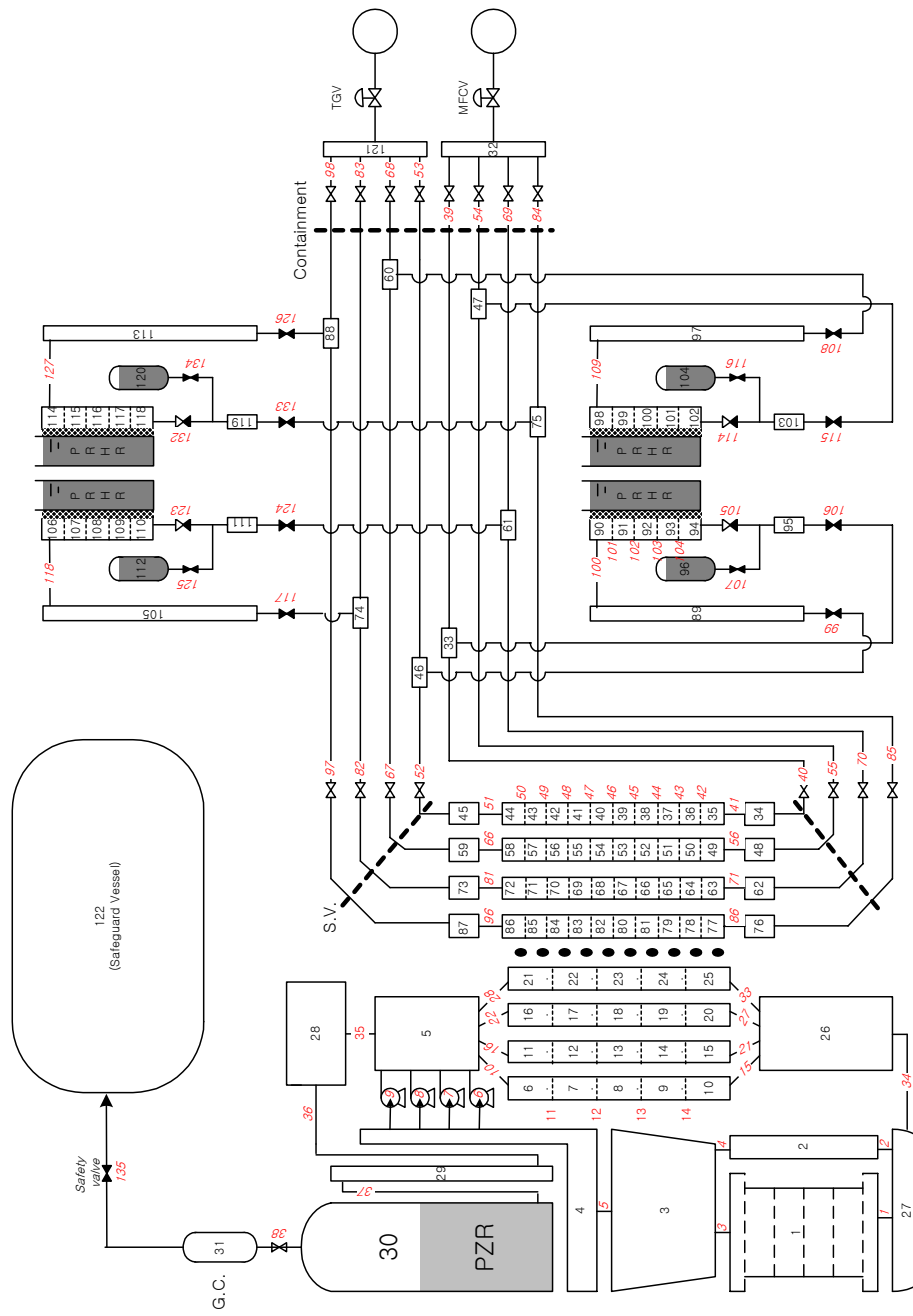


그림 1 SMART 성능/안전해석을 위한 TASS/SMR nodalization



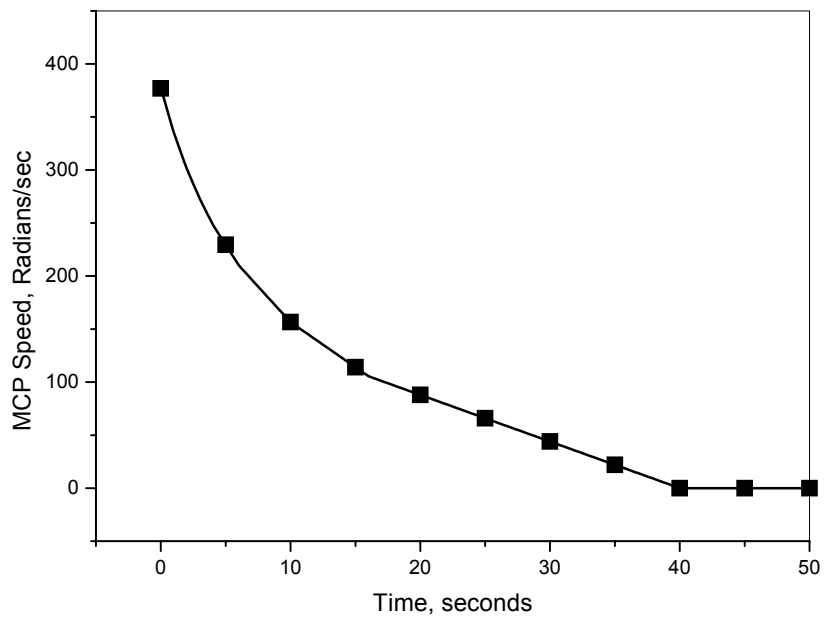


그림 2 주냉각재펌프 coastdown curve

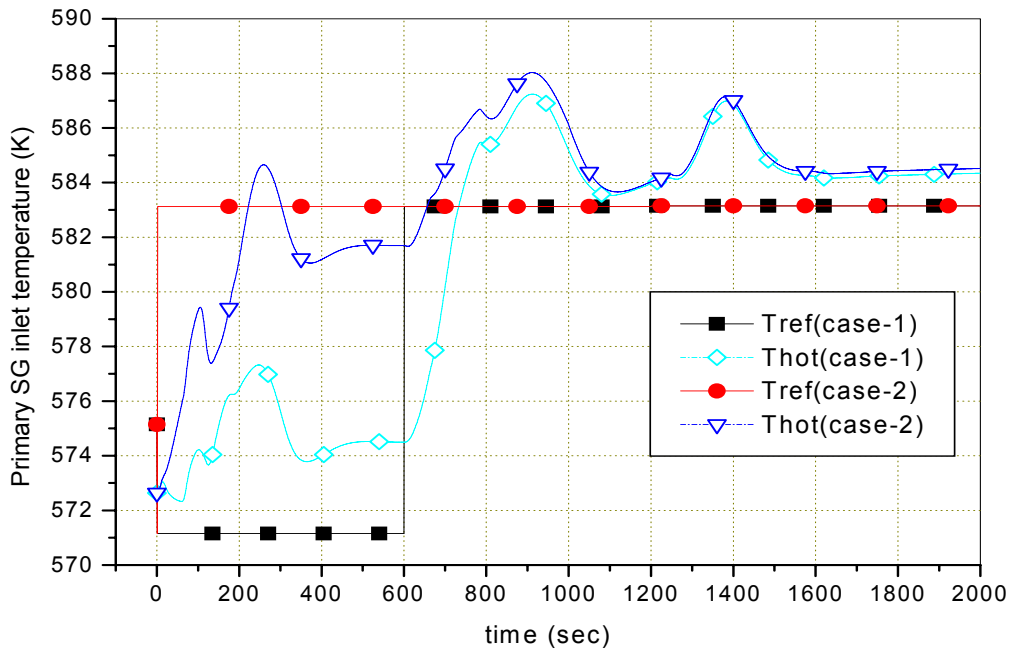


그림 3 일차측 증기발생기 입구온도 변화 (기준온도 민감도)

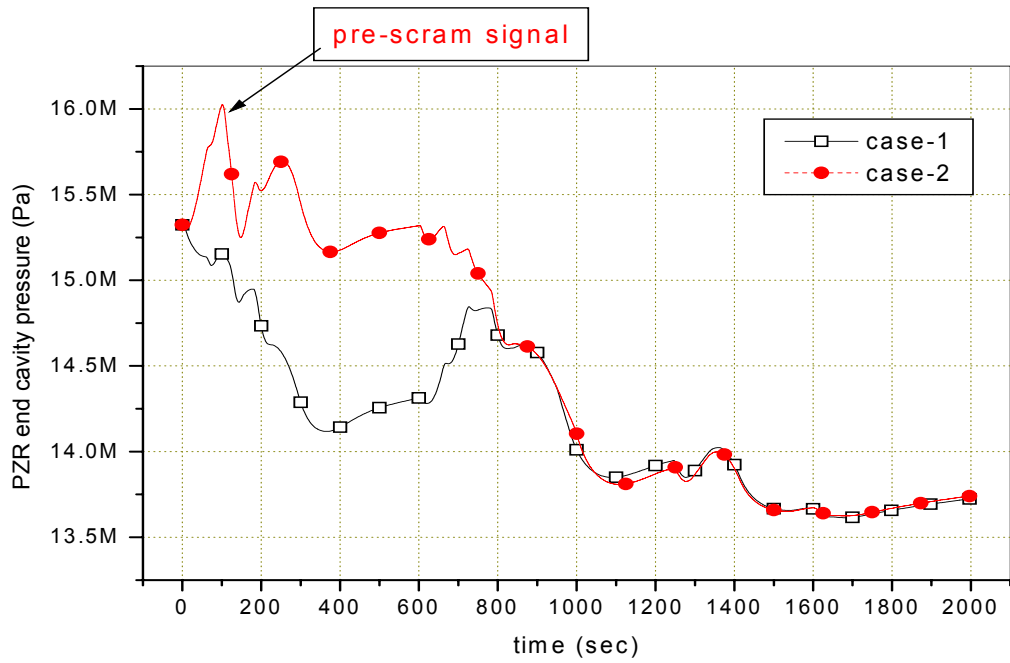


그림 4 가압기 압력 변화 (기준온도 민감도)

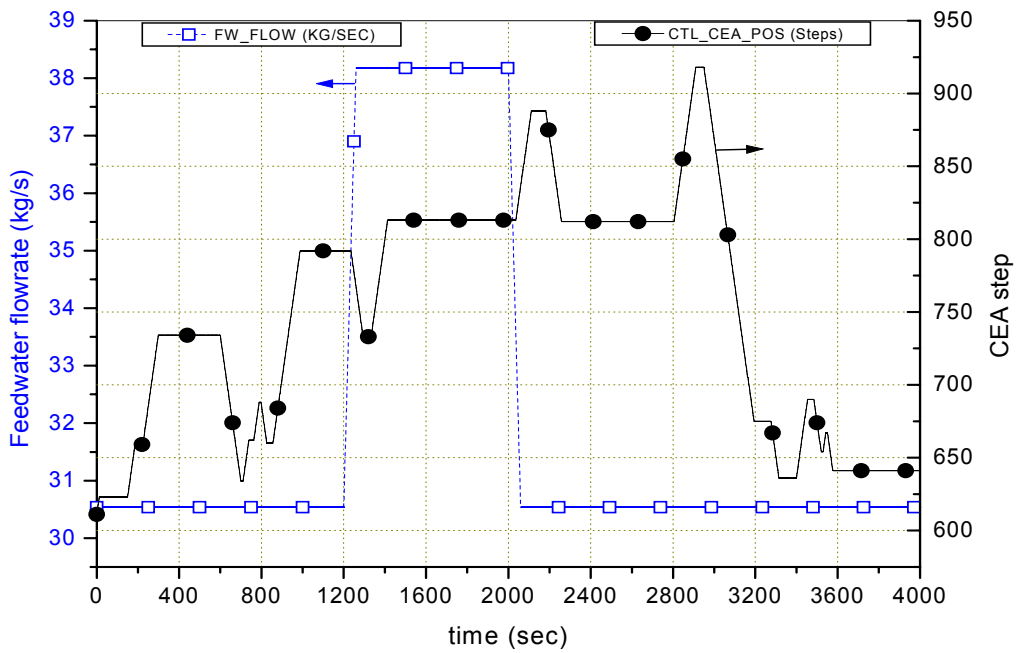


그림 5 급수유량과 제어봉 이동 상관관계 (20→25→20 자연대류, 주기초)

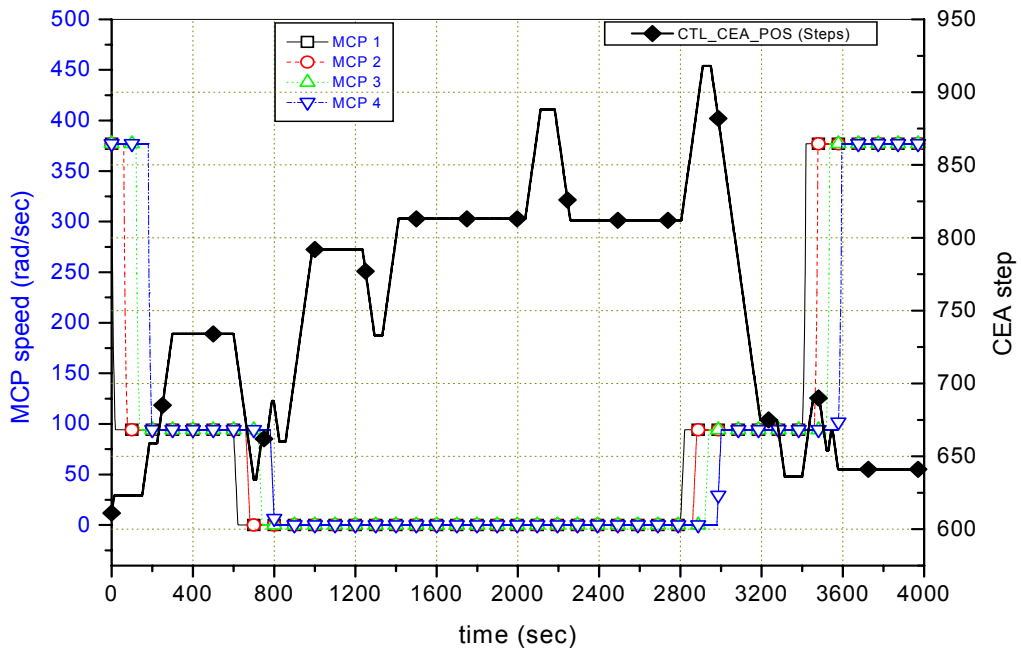


그림 6 주냉각재펌프 속도와 제어봉 이동 상관관계 (20→25→20 자연대류, 주기초)

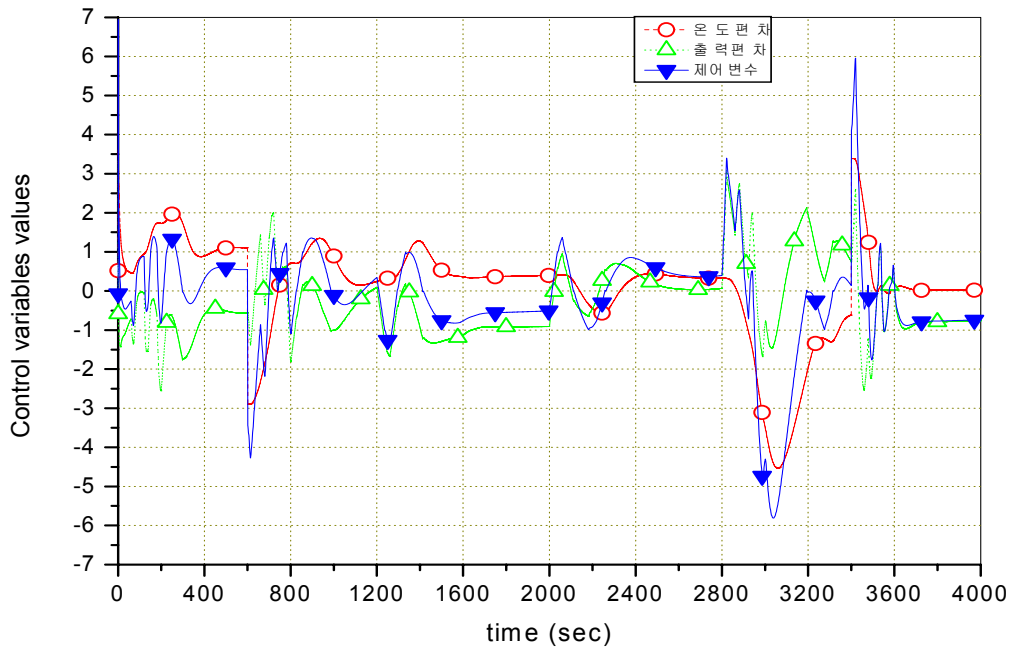


그림 7 제어변수 변화 (20→25→20 자연대류, 주기초)

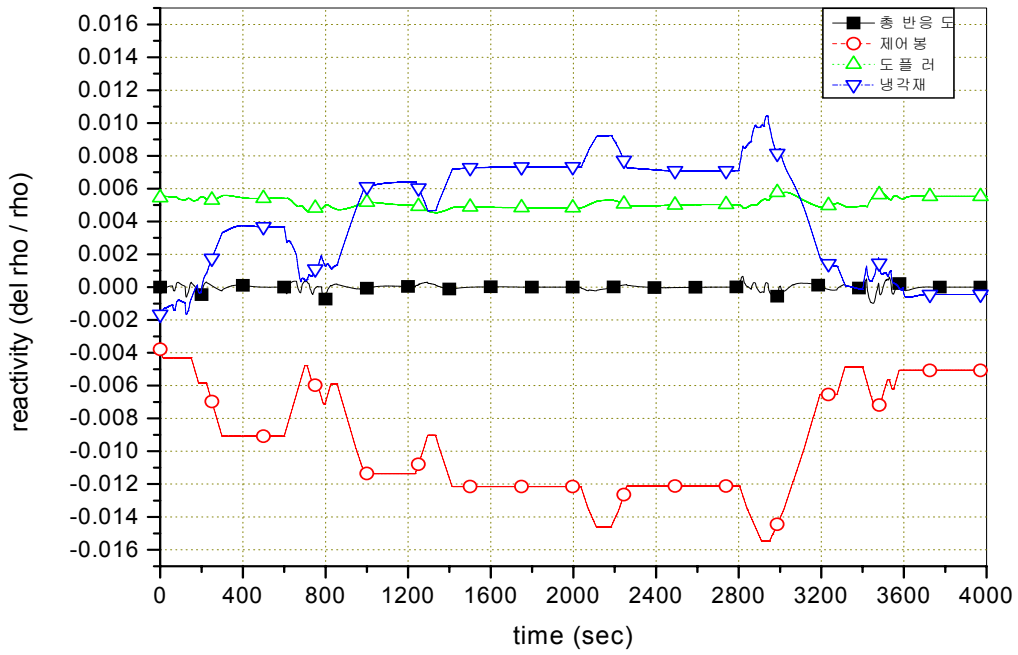


그림 8 반응도 변화 (20→25→20 자연대류, 주기초)

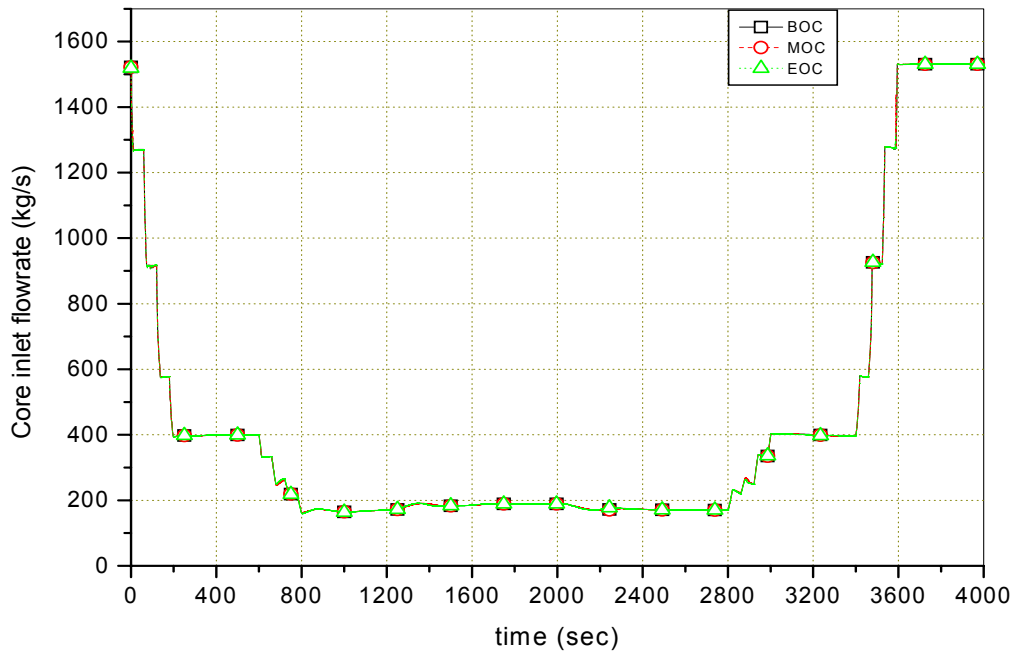


그림 9 노심 입구유량 변화 (20→25→20 자연대류, 주기초,주기중,주기말)

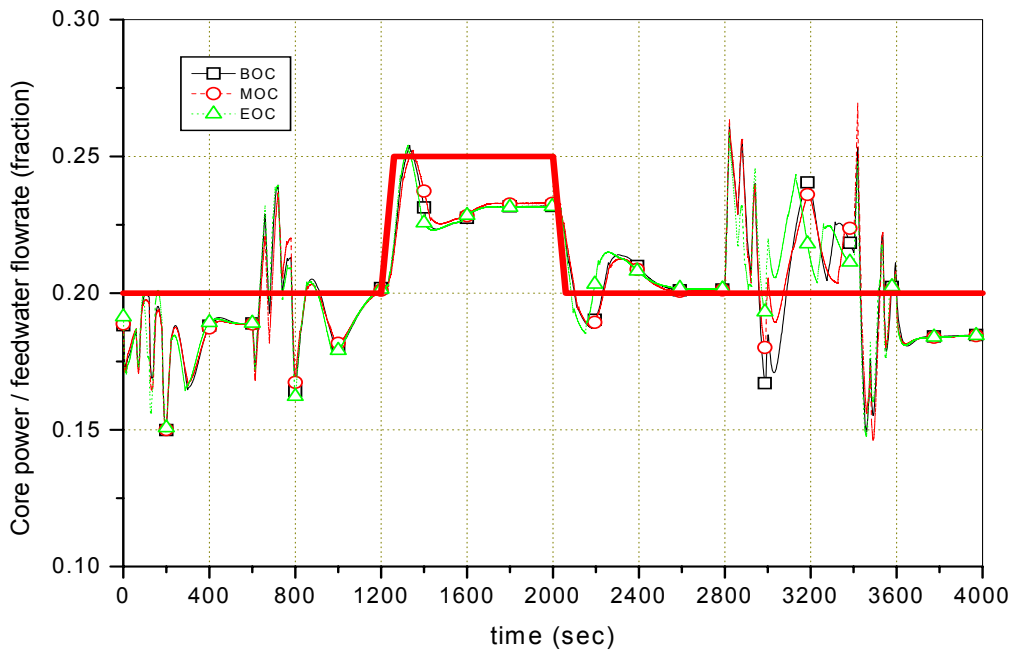


그림 10 노심출력/급수유량 변화 (20→25→20 자연대류, 주기초,주기중,주기말)

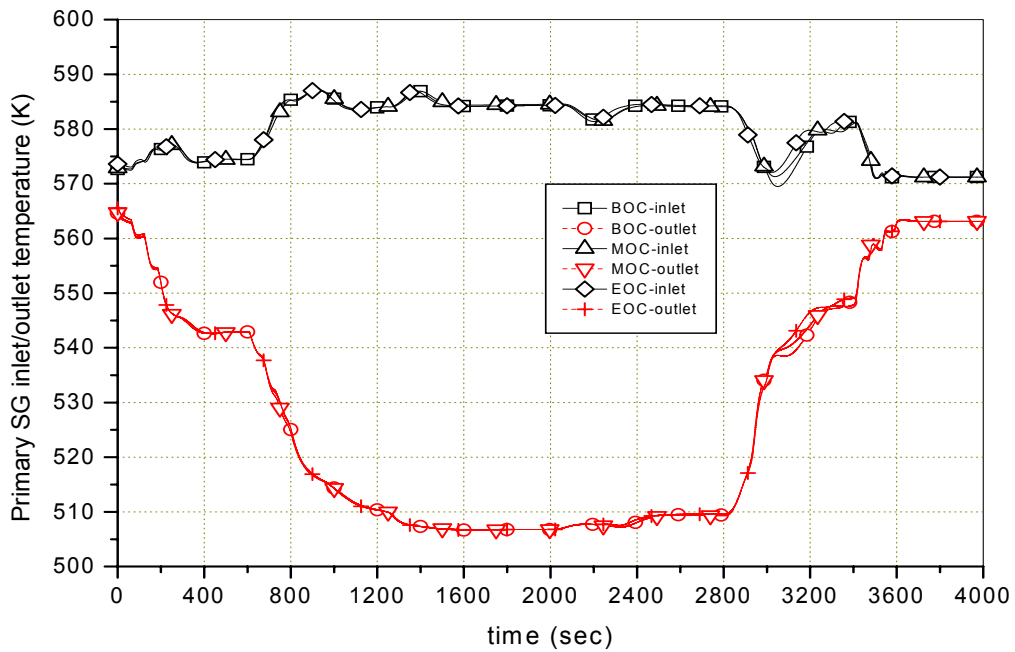


그림 11 일차측 증기발생기 입구/출구온도 변화  
(20→25→20 자연대류, 주기초,주기중,주기말)

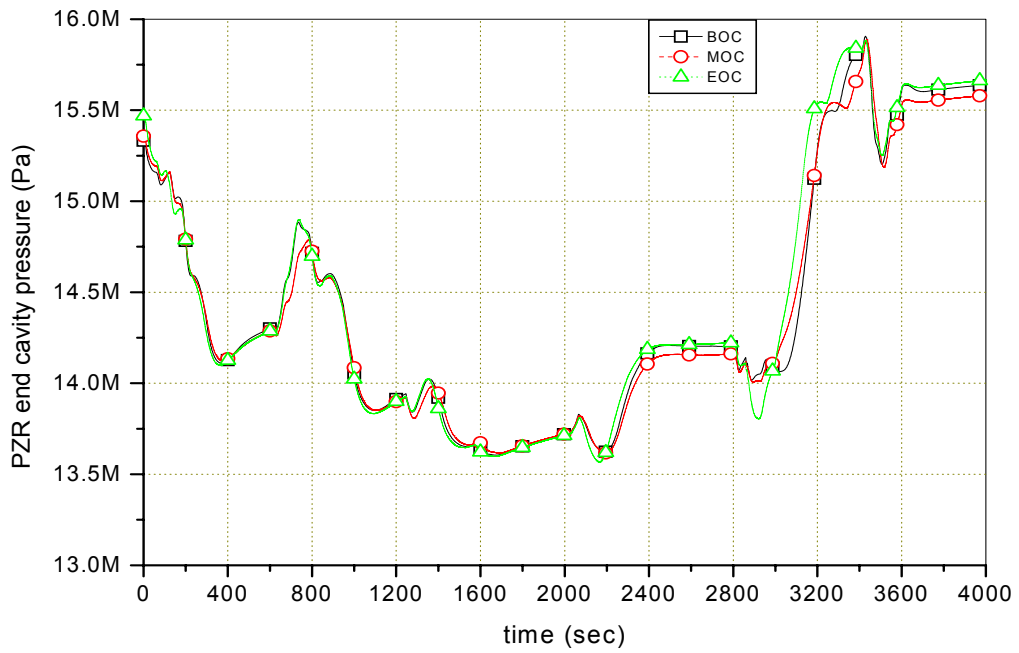


그림 12 가압기 압력 변화 (20→25→20 자연대류, 주기초,주기중,주기말)

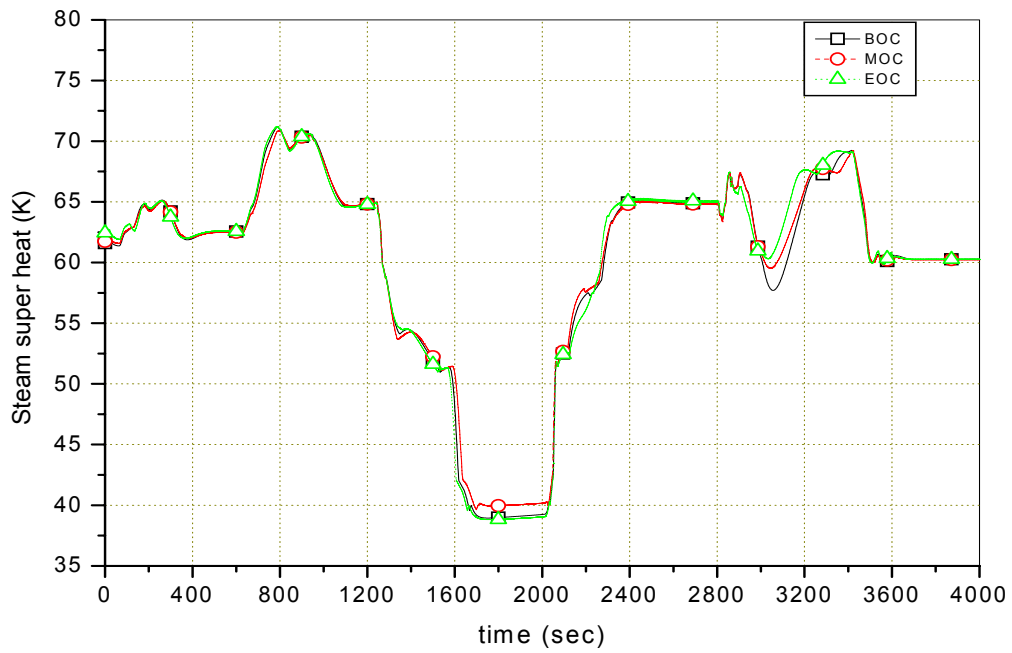


그림 13 증기과열도 변화  
(20→25→20 자연대류, 주기초,주기중,주기말)