

SMART-P MCP 천이운전전략 개발

Development of MCP Transient Operation Strategy for the SMART-P

유승엽, 최병선, 강한옥, 윤주현, 지성균

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

SMART-P 주냉각재펌프(MCP) 천이운전전략을 개발하고, MMS(Modular Modeling System) 코드를 이용한 수치모의를 통하여 여러 다른 운전전략의 특성을 비교평가 하였다. SMART-P의 정상출력운전모드는 MCP가 고속회전(3600 rpm)하는 고속운전모드, MCP가 저속회전하는 저속운전모드로 구분되고, 또한 정상출력운전모드 천이운전의 한 경우로 자연순환운전이 성능시험운전으로 정의되어 있다. MCP 천이운전은 각 운전 모드에서 다른 운전모드로 전환될 경우 발생하며 이때 계통변수(노심출력, 계통압력, 온도)에 과도현상이 발생한다. 위와 같은 과도현상은 그 정도에 따라 계통의 성능에 나쁜 영향을 미칠 수 있고 운전범위를 제한하므로 최대한 완화시켜야 한다. 이를 위해 SMART-P MCP 운전전략을 개발하여 적용하였으며 만족할 만한 결과를 얻었다.

Abstract

SMART-P MCP(Main Coolant Pump) transient operation strategies are developed. A Modular Modeling System (MMS) computer code is used for the evaluation of the developed operation strategies. In the SMART-P, normal operating modes are classified into MCP high speed(3600 rpm) mode and MCP low speed mode. Also, natural circulation mode is defined as a performance test case. MCP operation transients occur when changing modes from one to another, and system parameters(core power, system pressure, temperature) are having transients. These

transients affect on system performance and, in some cases, limit system operation. In this study, MCP operation strategies are developed and obtained acceptable results.

1. 서 론

원자로냉각재펌프는 정상운전동안 원자로 노심으로부터 발생하는 열을 적절하게 제거하기 위하여 원자로냉각재계통에 충분한 강제순환유량을 제공한다. 노심에서 가열된 원자로냉각재는 원자로냉각재펌프에 의해 증기발생기로 강제 순환된 후 이차냉각재와 열교환으로 증기를 발생시키고 온도가 낮아진다. 온도가 낮아진 원자로 냉각재는 다시 원자로 내부로 순환되어 가열된 후 처음과 같이 원자로냉각재펌프에 의해 증기발생기로 보내어진다. 일체형 원자로 SMART-P의 MCP, 즉 주냉각재펌프는 기존의 상용 원자로와 설계 특성, 운전 등에서 많은 차이가 있다. SMART-P의 MCP는 축류형, 수직직립형 캔드모터 펌프로서 원자로 상부에 2대가 설치되며 주파수 변환방식으로 속도를 제어하므로 저속과 고속의 변속운전이 가능하다. 현 SMART-P의 정상출력운전모드는 MCP 고속운전모드(3600 rpm), MCP 저속운전모드(1300 rpm)로 구분되어 있으며 정상출력운전모드의 한 경우로 자연순환운전(0 rpm)이 성능시험운전으로 정의되어 있다. MCP 고속운전모드의 원자로 출력범위는 20 ~ 100%, 저속운전모드인 경우는 20 ~ 36%이다. 하지만 MCP 저속운전모드로 운전될 경우 증기량의 감소에 따른 터빈효율의 감소로 운전이 어려움이 생겨 출력 격상의 필요성이 대두되었다. 출력을 높이면 MCP 저속회전 속도도 올라가게 되므로 각 운전모드간의 MCP 회전속도 편차가 커지게 된다. MCP 회전속도는 노심통과유량과 비례하므로 각 운전모드간의 천이운전시 원자로 출력, 계통압력, 계통온도에 심한 과도현상이 발생한다. 이러한 과도현상은 계통의 성능이나 운전이 나쁜 영향을 미치므로 최대한 완화시켜야 한다.

본 연구에서는 MMS 코드[1]를 이용하여 SMART-P MCP 천이운전모드를 모의하였고, 위의 과도현상을 완화시킬수 있는 MCP 운전전략을 개발하였다. 해석 결과 과도현상을 완화하기 위해서는 현재의 2 스텝 운전모드(MCP 고속, 저속)를 3 스텝 운전모드(MCP 고속, 중속, 저속)로 바꾸는 것이 좋다고 판단된다.

2. 정상운전 출력제어논리

SMART-P 정상운전 출력 변화시 노심출력을 제어할 수 있는 제어방식은 T-Control과 T+N Control로 분류할 수 있다[2]. 그림 1은 T+N control의 Block Diagram으로 온도와 노심출력의 허용 변화폭은 각각 $\pm 3^{\circ}C$, $\pm 2\%$ 이다. 이 값은 현재 예측되는 온도 계측기와 주급수 유량 계측기 오차를 고려하여 설정하였다. 그림 1에서 U_1 을 매개변수로 고려하여 CEDM을 움직이는 경우가 T-Control이고 $U(=U_1+U_2)$ 를 고려한 경우는 T+N Control이 된다.

$$\begin{aligned} U_1 &= 0.333 \cdot (T_1 - T_{ref}) \\ U_2 &= 0.5 \cdot (N - Pref) \\ U &= U_1 + U_2 \end{aligned} \quad (1)$$

SMART-P에서 원자로냉각재계의 제어 변수로 이용할 수 있는 것은 증기발생기 입구 온도와 노심 출력이다. T-Control은 증기발생기 입구온도가 미리 설정된 온도 프로파일에서 $\pm 3^{\circ}C$ 가 차이가 나면 매개변수 U_1 값이 1보다 커지거나 1보다 작게 돼 CEDM이 움직이게 된다. T+N Control은 온도 편차와 노심 출력 편차의 합이 1보다 커지거나 1보다 작으면 CEDM이 움직이게 된다.

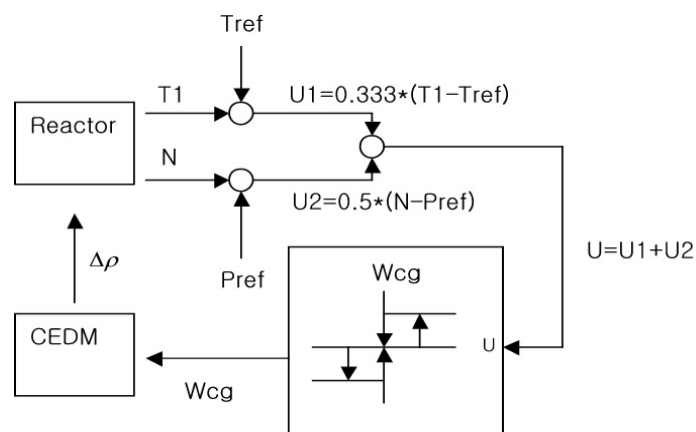


그림 1 T+N control 의 Block Diagram

3. 정상출력운전 모의를 위한 MMS SMART-P 모델

SMART-P MMS 모델은 수치적인 데이터로 상호작용을 하는 여러 개의 모듈로 구성되어 있으며 각각의 모듈은 SMART-P 플랜트의 구성기기와 제어논리를 포함하고 있다 [3]. 냉각재 상실사고를 제외한 여러 과도운전과 정상운전을 모의하기 위하여 SMART-P MMS 모델은 다음과 같은 계통을 가지고 있다. : RCS(Reactor Coolant System), MSFS(Main Steam and Feed-water System), PRHRS(Passive Residual Heat Removal System), CCS(Component Cooling System), Plant Control/Protection System. 개발된 모델은 가열운전/정지운전, 정상출력운전, 비상 정지운전 등 넓은 범위의 플랜트 운전모드를 모의할 수 있다. 그림 2는 SMART-P의 전체 플랜트 모델이다. 이 SMART-P 모델에 MCP 고속운전모드는 T-Control, MCP 저속운전모드는 T+N Control을 적용하였고, MCP 천이운전시 1대의 MCP 회전속도가 80 %이하로 떨어지면 T-Control에서 T+N Control로 자동 전환된다.

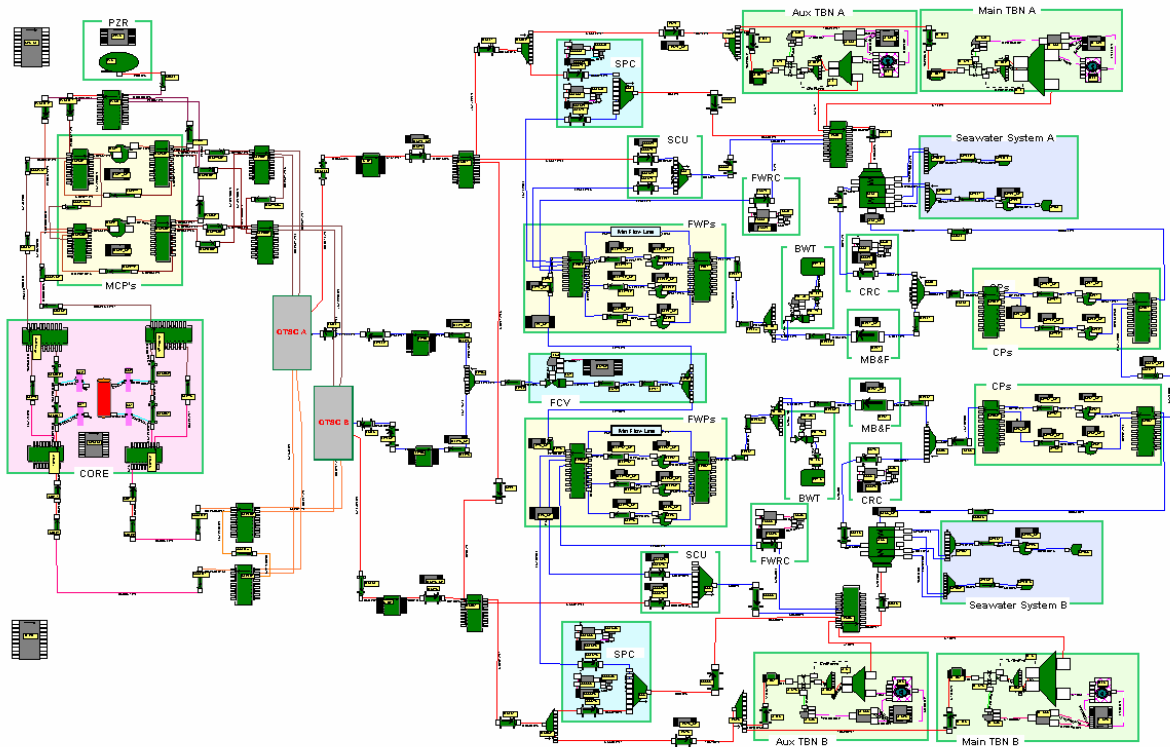


그림 2 SMART-P MMS 모델

4. 결과

MCP 천이운전은 각 운전모드에서 다른 운전모드로 전환될 경우 발생한다. MCP 회전속도는 유량에 비례하므로 회전속도의 변화량은 노심통과유량의 변화량과 비례관계에 있다고 볼 수 있다. 노심통과유량의 변화량은 곧 노심출력의 변화량에 영향을 미치므로 가급적이면 급격하게 변화시키지 않는 것이 과도운전에 유리하다. SMART-P의 MCP는 주파수 변환방식으로 연속적인 속도변화가 가능하므로 상용로의 코스트다운(Coast-down) 곡선이 아닌 선형으로 MCP 속도를 증가, 감소시킬 수 있다. MCP 2대를 동시에 속도전환하는 것보다는 순차적으로 전환하는 것이 과도운전에 유리하므로 순차적으로 100초의 시간지연을 가지고 각 MCP를 속도전환하는 것을 원칙으로 한다. 그림 3은 50 % 출력에서 MCP 고속에서 MCP 저속(800 sec), 저속에서 고속으로(1500 sec)으로 전환한 것을 모의한 결과이다. 이 때의 MCP 저속회전수는 1800 rpm 이다. 회전속도 변화율은 30, 60 rpm/sec로 선형으로 변화시켰으며, 60 rpm/sec가 5 %, 30 rpm/sec가 1 % 정도 최대 피크출력이 올라가는 것을 볼 수 있다. 회전속도를 빨리 변화시킬수록 최대 피크출력이 더 올라가는 것을 확인할 수 있다. 그림 4는 25 % 출력에서 MCP 저속에서 자연순환으로(1500 sec), 자연순환에서 MCP 저속으로(2400 sec) 전환한 결과이다. 그림 3과 달리 출력의 변동량이 더 심한 것을 볼 수 있는데, 이는 노심통과유량이 갑자기 감소하여 ΔT 의 변화량의 정도가 MCP 고속에서 저속으로 바꾼 경우보다 더 크기 때문이다. 가장 느린 15 rpm/sec의 변화속도로도 5 % 이상의 출력피크가 생겼다. 위의 결과에서 보듯이 MCP 고속과 저속, 즉 2 스텝으로 할 경우 회전수의 변동량이 (최대 1800 rpm) 커지므로 이에 따른 계통변수의 변동량도 커지게 된다. 이의 문제점을 해결하기 위해서 MCP 고속(3600 rpm), MCP 중속(1800 rpm), MCP 저속(900 rpm), 즉 3 스텝의 운전을 고려해 보았다. MCP 고속에서 저속의 속도변환은 50 % 출력에서, MCP 중속에서 저속, 저속에서 자연순환의 속도변환은 25 % 출력에서 한다. 그림 5는 25 % 출력에서 MCP 중속에서 저속(1500 sec), 저속에서 중속(2200 sec)으로 바꾼 경우이다. 그림에서 보면 출력의 최대 피크가 두 속도 모두 5 % 이내로 들어오는 것을 볼 수 있다. 그림 4에서 가장 느린 속도, 15 rpm/sec인 경우의 결과보다도 더 좋아진 것을 볼 수 있다. 그림 6은 25 % 출력에서 MCP 저속에서 자연순환(1500 sec), 자연순환에서 저속(2200 sec)으로 바꾼 경우이다. 그림에서 보면 MCP 저속에서 자연순환으로 바꾼 경우에는 두 속도(30, 60 rpm/sec) 모두 출력의 변화량이 5 % 이내로 들어온다. 하지만 자연순환에서 저속, 60 rpm/sec의 속도로 바꾸면 5 % 이상의 출력변동이 생기지만 30 rpm/sec 인 경우에는 출력변동량이 5 % 이내로 들어오는 것을 볼 수 있다. 전자보다 후자가 출력변동량이 더 커지는 이유는 다음과 같다. 같은 출력에서 저속에서 자연순환으로 운전되면 유량이 줄어들게 되며, 출력을 유지하기 위해서 ΔT 가 커져야 한다. 현재 SMART-P에서는 냉각재 고온도를 제어하기 때문에 냉각재 저온도는 더 차가워지게 된다. 자연순환에서 저속으로, 즉 MCP를 기동하게

되면 차가운 냉각재가 노심으로 들어가게 된다. 그러므로 음의 냉각재 반응도 계수 (Moderator Temperature Coefficient)로 인해 노심출력이 더 올라가는 현상이 발생하게 된다. 그림 7 (a),(b) 는 2 스텝인 경우(그림 4) 가압기 압력, 증기발생기 입구온도의 결과를 나타낸 것이고, 그림 8 (a), (b)는 3 스텝인 경우(그림 6)를 나타낸 것이다. 여기서도 계통압력이나 계통온도의 과도현상이 2 스텝보다 3 스텝인 경우 더 완화되는 것을 볼 수 있다.

SMART-P의 MCP는 주파수 변환방식에 의한 연속적인 회전수변화가 가능함으로써 MCP 천이운전에 유리할 뿐만 아니라 여러 스텝의 MCP 운전도 가능하다. 하지만 출력격상에 따른 MCP 저속회전수의 증가는 현재의 2 스텝 MCP 천이운전을 불리하게 한다. 하지만 위의 결과에서 보듯이 2 스텝의 MCP 운전을 3 스텝의 MCP 운전으로 바꾸면 천이 운전시 계통변수의 과도현상을 완화시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 SMART-P는 MCP 저속회전수로 기동운전을 하게 되는데 MCP 기동 운전시 전력소요량을 줄일수 있는 장점이 있다. MCP 전력소요량은 회전수의 3승에 비례하므로, 저속 회전수를 1800 rpm에서 900 rpm으로 줄이면 MCP 전력소요량이 훨씬 줄어들게 된다.

5. 결론

MMS 코드를 이용하여 SMART-P MCP 천이운전을 모의한 결과, 2 스텝 MCP 운전 전략보다는 3 스텝 MCP 운전전략이 계통의 천이특성에 있어서 유리하다는 것을 알 수 있었다. SMART-P MCP는 주파수 변환방식에 의한 연속적인 회전수변화가 가능하기 때문에 현재의 2 스텝운전과 새로 제안된 3 스텝운전의 차이로 인한 MCP 기기설계의 영향은 크지 않으리라 예상된다. 반면에 이러한 설계변경을 수용할 경우 MCP 천이운전시 천이폭을 줄일수 있고, 기동운전시 MCP의 전력소요량을 정격전력소비량의 1/64로 줄일 수 있는 장점이 있다.

후기

본 연구는 과학기술부의 일체형 원자로 연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. MMS Basic Manual, Framatome Technologies, Inc., 1999.
2. 유승엽, 강한옥, 윤주현, 이두정, "Development of Normal Power Control Logics for the SMART," "2001 춘계원자력학술대회, 2001.
3. Han-Ok Kang et al., "Development of the SMART Plant Analyzer using the Modular Modeling System(MMS)", NTHAS2, Fukuoka, Japan, October, 2000.

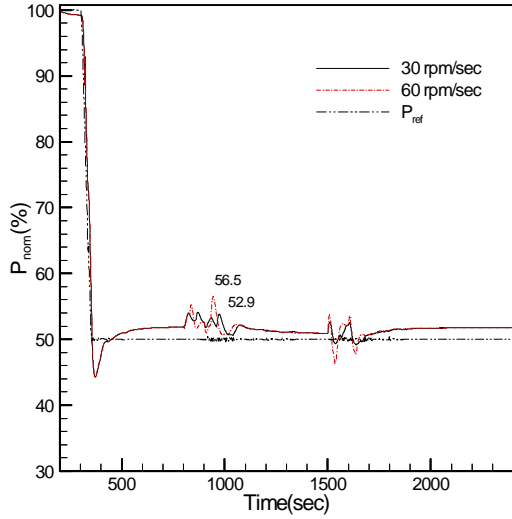


그림 3 출력변화 ; MCP 고속(3600 rpm)
→저속(1800 rpm), 저속→고속
@ 50%출력

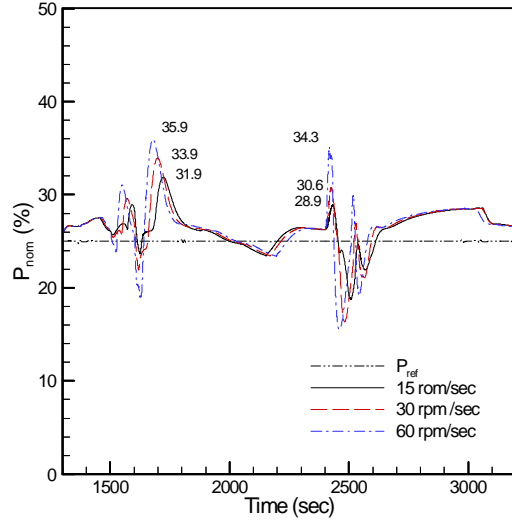


그림 4 출력변화 ; MCP 저속(1800 rpm)
→자연순환, 자연순환→저속
@ 25%출력

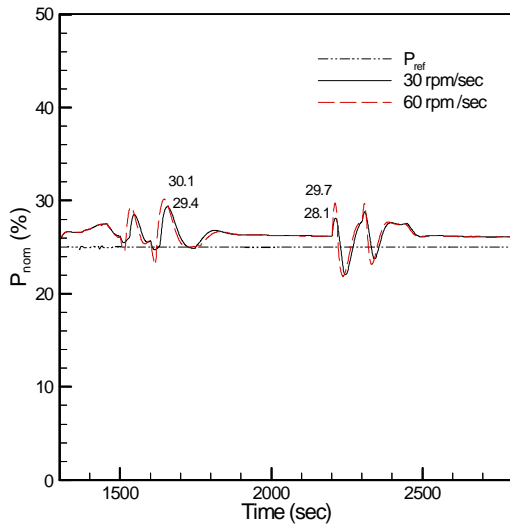


그림 5 출력변화 ; MCP 중속(1800 rpm)
→저속(900 rpm), 저속→중속
@ 25%출력

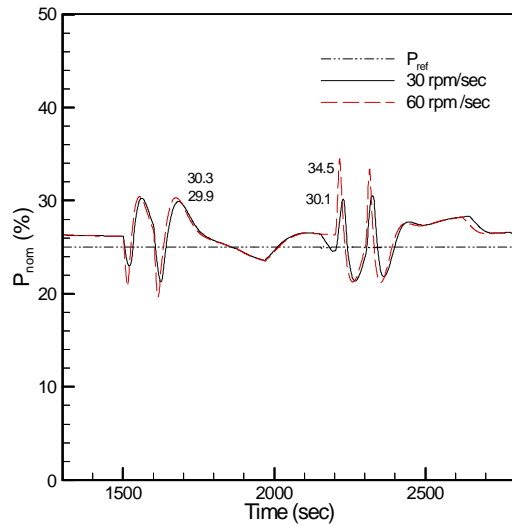
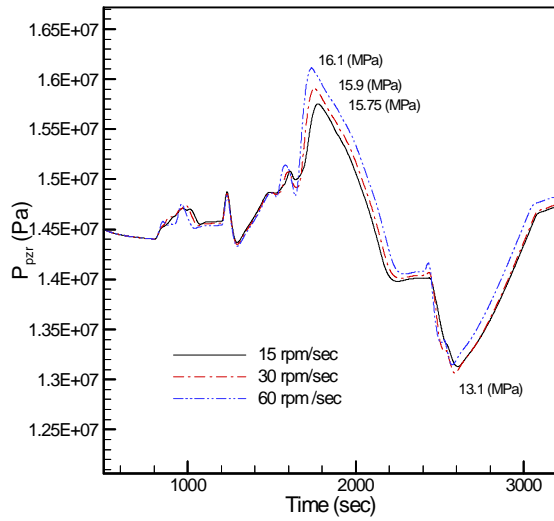
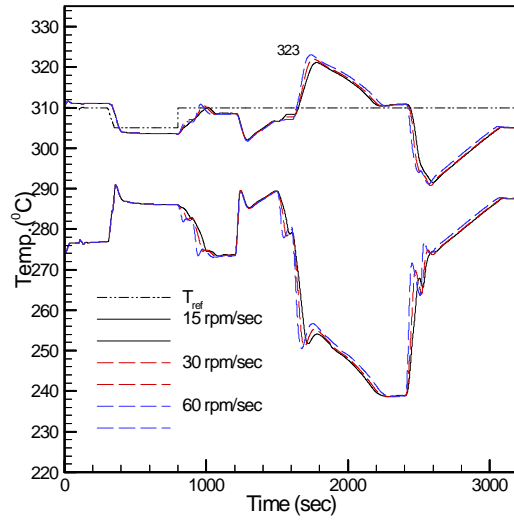


그림 6 출력변화 ; MCP 저속(900 rpm)
→자연순환, 자연순환→저속
@ 25%출력



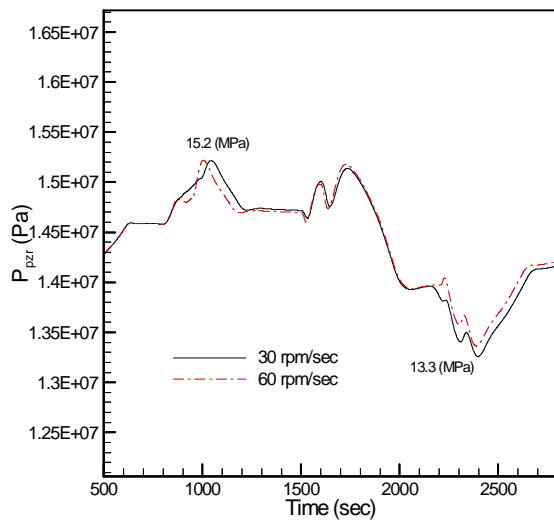
(a)



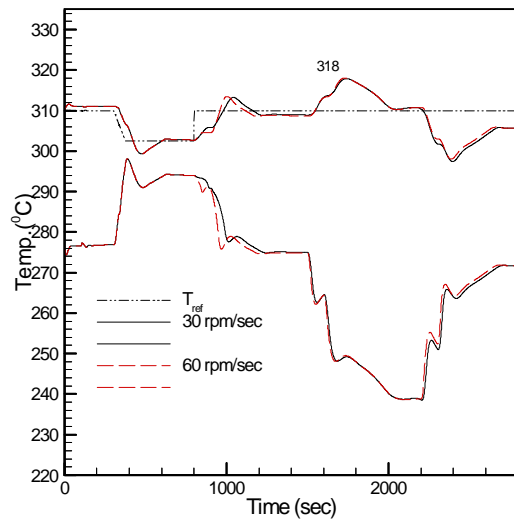
(b)

그림 7 (a) 가압기 압력변화; (b) 증기발생기 입구온도변화;

MCP 저속(1800 rpm)→자연순환, 자연순환→저속 @ 25%출력



(a)



(b)

그림 8 (a) 가압기 압력변화; (b) 증기발생기 입구온도변화;

MCP 저속(900 rpm)→자연순환, 자연순환→저속 @ 25%출력