'2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

SMART 정상운전 출력제어논리 개발

Development of Normal Power Control Logics for the SMART

유승엽, 강한옥, 윤주현, 이두정

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

SMART 정상운전 출력제어논리를 개발하고, MMS(Modular Modeling System) 코드를 이용한 수치모의를 통하여 서로 다른 제어논리의 특성을 비교평가 하였다. SMART의 정상출력운전 영역인 정격출력의 20~100% 범위 내에서는 주냉각재 펌프가 고속회전하고, 노심출력은 주급수유량의 변화와 SMART의 자기제어능력 (MTC, Doppler effect)에 의해 조절된다. 노심출구온도는 중성자속 신호(N-Control)와 노심출구에서의 일차측 냉각재온도신호 (T-Control)를 받아 제어봉을 움직여 조절할 수 있다. SMART 정상운전 출력제어논리로 중성자속 신호와 노심출구온도 신호를 모두 이용하는 T+N Control과 온도신호 만을 이용하는 T-Control 두 가지를 개발하였고, 두 제어논리의 장단점을 비교평가 하였다.

ABSTRACT

SMART power maneuvering control logics are developed. A Modular Modeling System (MMS) computer code is used for the evaluation of the developed control logics. In the SMART normal operating mode, the reactor power can be maneuvered in the range of 20~100% of the rated power by varying the feedwater flow rate and the SMART self-regulation features (MTC, Doppler effect). In this operating mode the Main Coolant Pumps (MCP's) are operating in a high speed. For matching the core exit temperature with a programmed temperature profile as a function of a reactor power, control rods are moved by utilizing the neutron flux (N-control) and core outlet temperature (T-control) signals. Two different control logics are developed and evaluated as SMART power control logics, e.g., a T+N control logic using both neutron flux and core exit temperature signals and a T-control logic using only the core exit temperature signal. Those control logics are compared and evaluated by simulating fast power variation transients.

1. 서 론

일체형 원자로 SMART의 일차계통은 기존의 상용 원자로와 출력, 설계특성, 운전특성 등에서 많은 차이가 있다[표 1]. 상용로의 경우 정상운전 출력제어계통은 냉각재의 평균온도(T_{avg})와 출력편차를 제어신호로 사용한다. 하지만 SMART는 출력편차와 증기발생기 입구 온도를 주제어신호로 사용한다. 정상출력운전시 핵연료의 에너지 방출과 일차 냉각재 사이의 열평형이 맞아야 하고 핵적, 열수력적 변수의 편차가 허용하는 한계에 들어야 한다. 노심 정상출력운전을 위한 경계조건은 노심의 특성과 에너지 평형구조를 통한 변수의 크기에 의해 결정되야 한다. 이러한 조건들은 주요기기의 고장, 제어 수단, 운전원의 실수에 의해 어긋날 수 있다. 이러한 변수들 사이의 관계가 결과적으로 어긋날 수 있기 때문에 어떤 변수가 설정된 제한치에서 벗어났을 때 노심출력은 적절한 제어방식에 의해 조절돼야 한다. 모든 종류의 노심출력제어(중성자속 제어, 냉각재 출구온도 제어 등등)는 CEDM(Control Element Drive Mechanism)으로 할 수 있다. 열중성자속 제어나 냉각재 노심출구온도 제어 모두 결과적으로 노심출력의 변화를 일으키는 동일한 효과를 가져온다. 중성자속제어(N-Control)는 일차측 냉각재 온도제어(T-Control)보다 본질적으로 시간지연이 적고 다른 교란(MCP Start-up/trip, 이차계통에 변수와 관계된 교란)에 적절한 제어를 할 수 있다. 하지만 중성자속제어는 일차 냉각재 온도제어 오차에 비해 상대적인 오차가 큰 것이 일반적인 경향이다. 따라서 에러의 영향을 제거하기 위해서 실제의 NSSS 증기량에 따라 계측된 중성자속의 값을 보정해야 한다. 일차 냉각재 온도제어(T-Control)는 제어논리가 간단하고 중성자속제어보다 상대적인 오차가 작다는 이점이 있지만 계측기의 시간지연과 온도를 노심출구가 아닌 증기발생기 입구에서 잴 경우 출력변화 인식을 위한 루프 시간지연이 커지는 단점이 있다.

본 연구에서는 MMS 코드를 이용하여 SMART 정상운전 출력제어논리를 모의하였고, 중성자속 신호와 일차 냉각재온도 신호를 모두 이용하는 T+N Control과 일차냉각재 온도신호만을 이용하는 T-Control을 적용하여 비교하여 보았다.

표 1 SMART 운전변수[1]

원자로 정격출력, MWt	330.0
정상 운전압력, MPa	15.0
노심출구/ 입구 냉각재 온도, oC	310.0 / 270.0
노심관통 유량, kg/sec	1556.0
증기량, kg/sec	152.7
증기압력, Mpa	3.3
정상출력운전시의 급수온도, oC	180.0

2. 정상운전 출력제어논리

SMART 정상운전 출력 변화시 노심출력을 제어할 수 있는 제어방식은 위에서 설명한 바와 같이 T-Control과 T+N Control로 분류할 수 있다. 그림. 1은 T+N control의 Block Diagram으로 온도와 노심출력의 허용 변화폭은 각각 $\pm 3^0 C$, $\pm 2\%$ 이다. 이 값은 현재 예측되는 온도 계측기와 주급수 유량 계측기 오차를 고려하여 설정하였다. 그림. 1에서 U1을 매개변수로 고려하여

CEDM 을 움직이는 경우가 T-Control이고 U(=U1+U2)를 고려한 경우는 T+N Control이 된다.

$$U1=0.333*(T1-T_{ref})$$
$$U2=0.5*(N-P_{ref}) \quad (1)$$
$$U=U1+U2$$

SMART에서 일차계통의 제어 변수로 이용할 수 있는 것은 증기발생기 입구 온도와 노심 출력이다. T-Control은 증기발생기 입구온도가 미리 설정된 온도 프로파일에서 $\pm 3^0 C$가 차이가 나면 매개변수 U1값이 1보다 커지거나 –1보다 작게 돼 CEDM이 움직이게 된다. T+N Control은 온도 편차와 노심 출력 편차의 합이 1보다 커지거나 –1보다 작으면 CEDM이 움직이게 된다. 하지만 U1값이 음이고 U2값이 양이면, 또는 반대의 경우 두 값의 합이 상쇄되어 노심출력이나 증기발생기 입구 온도가 이미 프로그램된 설정치와 상당한 차이가 발생해도 CEDM이 적절하게 움직이지 않는 경우가 발생할 수 있다. 이는 주급수 온도 변화시 이러한 현상이 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해서 T+N Control에 다음과 같은 보정 인자를 도입하였다.

$$CF1=\frac{T_{sat,steam}-T_{FW,measured}}{T_{sat,steam}-T_{FW,ref}}, T_{FW}=180^o C, T_{sat,steam}=243^o C$$
$$C.F=\frac{\Delta h_{superheat}+\Delta h_{phasechange}+\Delta h_{subcooling}*CF1}{\Delta h_{total}(=\Delta h_{superheat}+\Delta h_{phasechange}+\Delta h_{subcooling})} \quad (2)$$

여기서 Δh : 엔탈피 변화량

위 보정 인자에서 측정해야 할 변수는 급수온도만 있으면 되므로 추가적인 측정인자는 생기지 않는다.

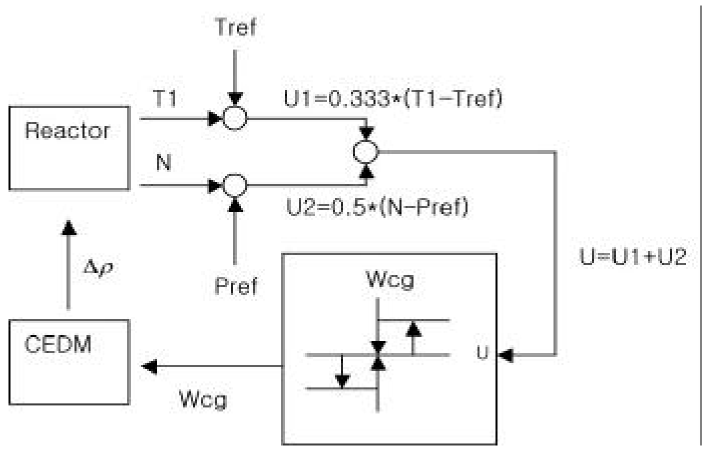


그림. 1 T+N control 의 Block Diagram

2.1 정상출력운전 모의를 위한 MMS SMART 모델

MMS(Modular Modeling System)코드[2]를 이용하여 정상운전 출력 변화시 제어논리에 따른 특성을 모의하였다. SMART MMS 모델은 수치적인 데이터로 상호작용을 하는 여러 개의 모듈로 구성되어 있으며 각각의 모듈은 SMART 플랜트의 구성기기와 제어논리를 포함하고 있다[3]. 냉각재 상실사고를 제외한 여러 과도운전과 정상운전을 모의하기 위하여 SMART MMS 모델은 다음과 같은 계통을 가지고 있다. : RCS(Reactor Coolant System), MSFS(Main Steam and Feed-water System), RHRS(Residual Heat Removal System), CCS & MU(Component Cooling System/Makeup System), Plant Control/Protection System. 개발된 모델은 가열운전/정지운전, 정상출력운전, 비상 정지운전 등 넓은 범위의 플랜트 운전모드를 모의할 수 있다. 그림. 2는 SMART의 전체 플랜트 모델이다. 이 SMART 모델에 T-Control과 T+N Control(보정 인자가 있을 때와 없을 때)을 적용하여 주급수 유량을 100%에서 20%로 변화시키고 다시 20%에서 100%로 변화시켰다. 이때 변화율은 5%/min이다. 그리고 정상출력 운전시의 CEDM 속도는 4mm/sec를 적용하였다. SMART CEDM은 8개의 제어그룹을 가지며 이중 3개는 조절제어 그룹으로, 나머지 5개는 정지제어 그룹으로 사용된다.

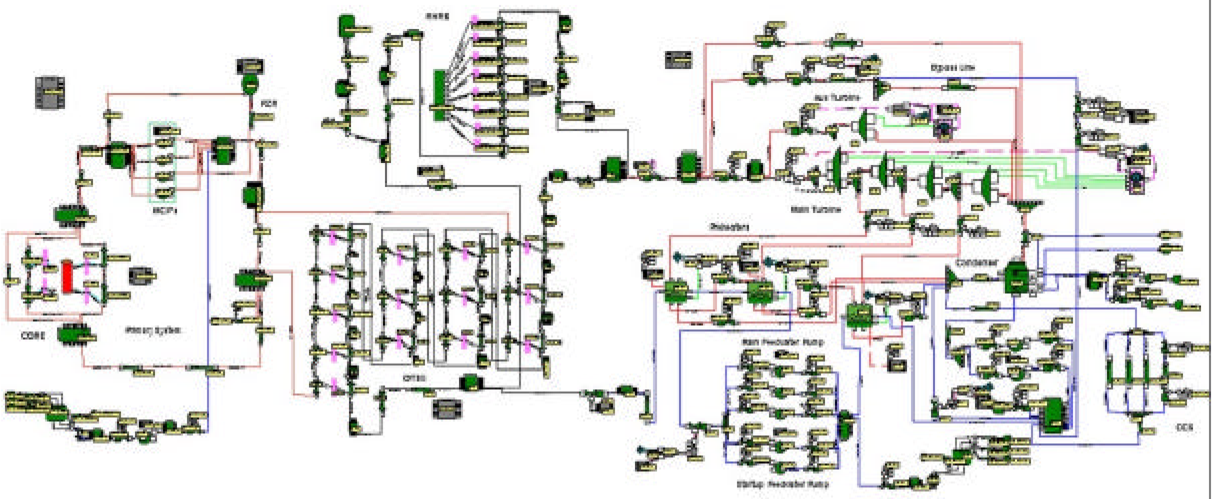


그림. 2 SMART MMS 모델

3. 결과

앞으로의 모든 결과는 주급수 유량을 100%에서 20%로 줄이고 다시 20%에서 100%로 올린 경우를 계산한 것이다. 여기서 예열기는 주급수 유량 50% 근처에서 멈추고 작동시켰으며 주로 예열기의 작동여부가 급수온도에 영향을 미친다. SMART의 증기발생기 열용량은 급수온도 180 ^{o}C를 기준으로 크기를 산정했기 때문에 급수 온도가 이보다 낮을 경우 증기발생기로부터의 과도한 열전달에 의해 일차계통의 냉각재 온도가 감소하며, 이 경우 음의 냉각재 반응도 계수(Moderator Temperature Coefficient)로 인해 노심출력이 올라가는 현상이 발생한다. 그림. 3은 T-control을 적용하여 계산한 결과로서 (a)는 예열기를 급수유량을 줄일 때 멈추고 급수유량을 다시 증가시킬 때 작동시킨 경우이고 (b)는 예열기를 멈춘 상태로 급수유량을 증가시킨 경우이다. 예열기를 멈추고 작동시킨 경우는 적절하게 노심 출력이 제어되고 있음을 볼 수 있다[그림. 3 (a)]. 20% 급수유량에서 미리 설정된 노심출력보다 약간 크게 나오는 이유는 100%출력으로 설정된 응축기 용량으로 인해 급수온도가 더 낮아지기 때문이다. 하지만 예열기를 멈춘 경우는 노심출력이 120%까지 올라가고 있음을 볼 수 있는데 이는 예열기를 멈출 경우 급수온도가 60 ^{o}C 까지 낮아지기 때문이다.

그림. 4의 (a) 와 (b)는 증기발생기 입구, 출구의 온도로서 전체적으로 미리 프로그램된 온도 프로파일을 잘 따라가고 있음을 볼 수 있다. (a)의 경우 급수유량을 증가시킬 때를 제외하고는 온도의 편차가 허용된 변화폭인 $\pm 3^{0}C$ 안에 들기 때문에 위 그림. 3의 (a) 처럼 CEDM이 움직이지 않는 것을 볼 수 있다. 그림. 4의 (b)의 경우는 전 영역에 걸쳐서 변화폭 안에 들기 때문에 CEDM이 전혀 움직이지 않는다.

그림. 5는 T+N control을 적용한 결과로서 보정 인자를 사용하지 않은 경우이다. 예열기를 멈춘 경우에는 위의 그림. 3의 결과와 마찬가지로 노심출력이 118%까지 올라가고 있음을 볼 수 있다. 또한 CEDM의 움직임 또한 T-control에 비해 많은 것을 볼 수 있다. 그림. 6은 증기발생기 입구, 출구 온도로서 역시 상당한 차이가 발생하고 있다. 그림. 5의 (b)에서 6000초 이후에도 노심출력이나 증기발생기 온도가 상당한 편차가 발생했는데도 CEDM이 움직이지 않는 것을 볼 수 있는데 이는 앞에서 설명한대로 매개변수 U1은 양이 되고 매개변수 U2는 음이 되어 상쇄되기 때문이다. 이 같은 현상을 제거하기 위해 보정 인자를 도입하였고 성공적인 결과를 가져왔다[그림. 7, 그림. 8]. 그림. 7은 보정 인자와 T+N control을 적용한 경우로서 노심출력이 미리 프로그램된 프로파일을 잘 따라가고 있음을 볼 수 있고 CEDM 의 움직임 또한 적음을 볼 수 있다. 하지만 역시 예열기를 멈춘 상태, 즉 급수온도가 낮을 경우에는 출력이 120% 까지 올라감을 볼 수 있다. 그림. 9는 예열기를 멈추었을 때와 작동시켰을 때의 급수온도의 변화를 나타내는 것으로 180 ^{o}C에서 40^{o} C 까지 내려가고 있음을 볼 수 있다.

위의 결과에서 T-control 과 보정 인자를 적용한 T+N control 이 SMART 정상운전 출력 변화시 만족할 만한 제어 성능을 나타내는 것을 볼 수 있었다. 그리고 주급수 온도를 적절한 온도로 유지하기 위한 별도의 노력이 필요함을 알 수 있었다. 또한 계측기의 지연시간 효과와 계측기 자체의 측정 오차가 두 가지 제어논리에 영향을 미칠 수 있다. 특히 T+N control을 적용할 때 노외 계측기로 읽는 노심출력이 정확한 값을 얻기 위해서는 실제의 NSSS 증기량에 따라 보정을 해주어야 할 필요가 있다.

4. 결론

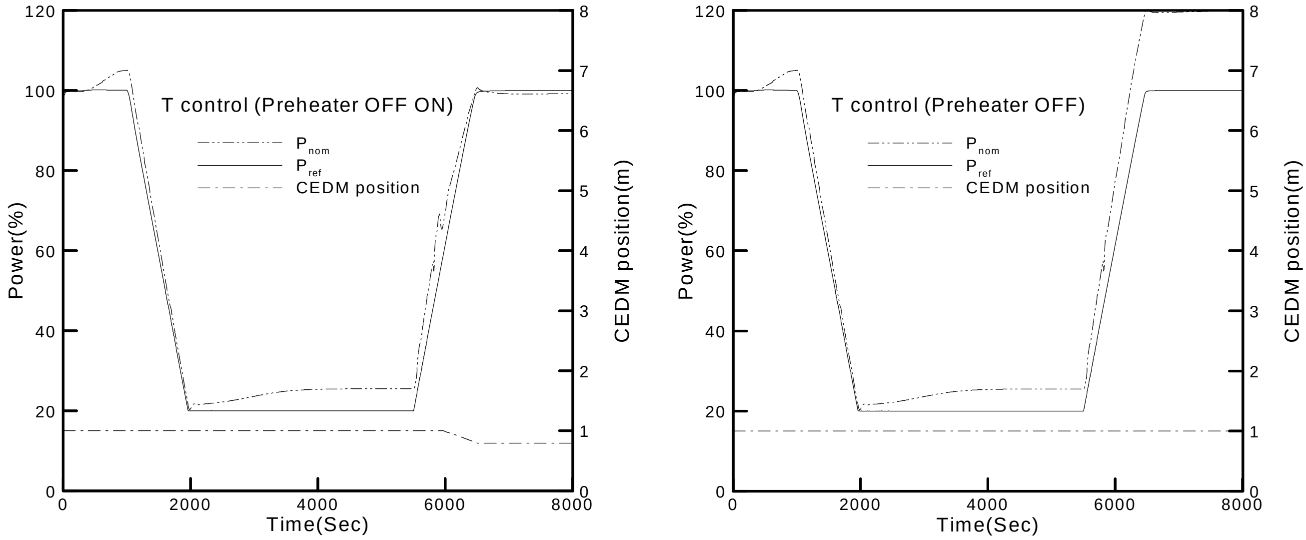
MMS 코드를 이용하여 T-control, T+N control 두 가지 제어논리를 SMART 정상운전 출력 변화시에 적용하여 모의한 결과, T-control과 보정 인자를 도입한 T+N control 이 정상운전 출력 변화시 미리 설정된 노심출력과 온도 프로파일을 잘 따라가고 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 주급수 온도를 적절한 온도로 유지하기 위한 노력이 필요함을 알 수 있었고, 계측기의 시간지연 효과와 계측기 자체의 측정 오차가 정상운전 출력제어논리에 영향을 미칠 것이라고 판단된다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

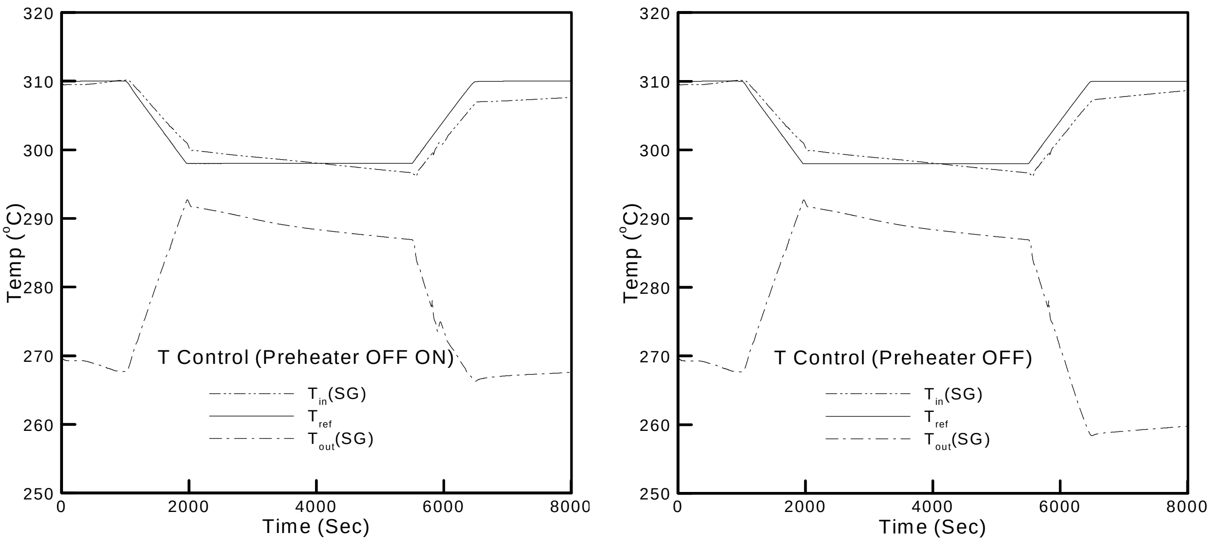
참 고 문 헌

1. 장문희 외, "신형원자로 계통개념 연구," KAERI/RR-1438/94, 한국원자력연구소, 1995.7.
2. MMS Basic Manual, Framatome Technologies, Inc., 1999.
3. Han-Ok Kang et al., "Development of the SMART Plant Analyzer using the Modular Modeling System(MMS)", NTHAS2, Fukuoka, Japan, October, 2000.



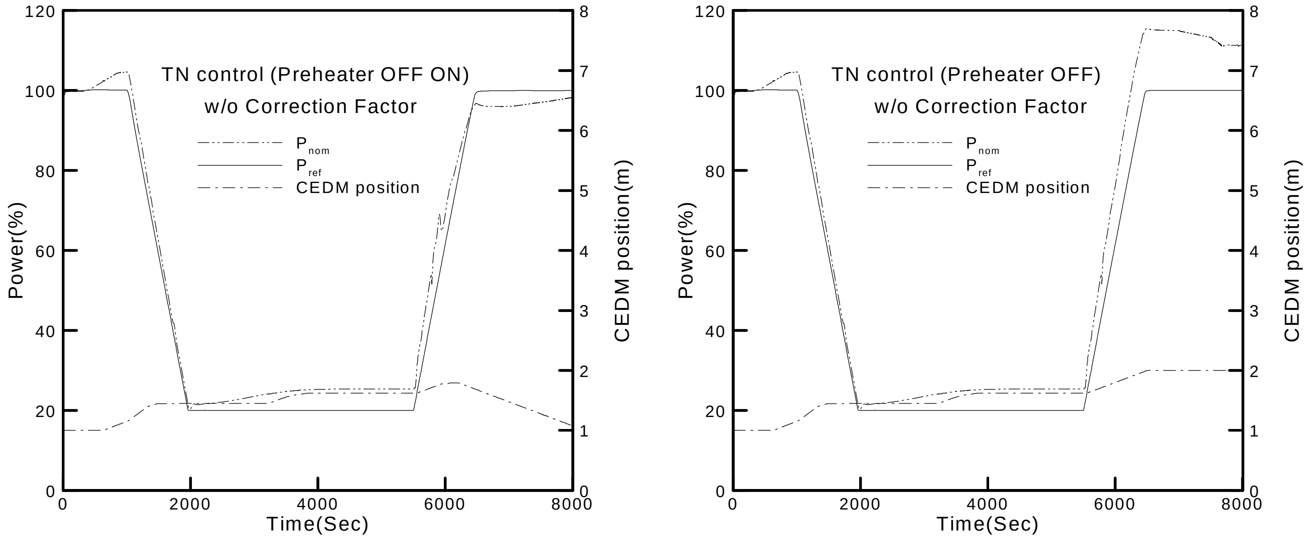
(a) (b)

그림. 3 노심 출력 변화 : T-Control



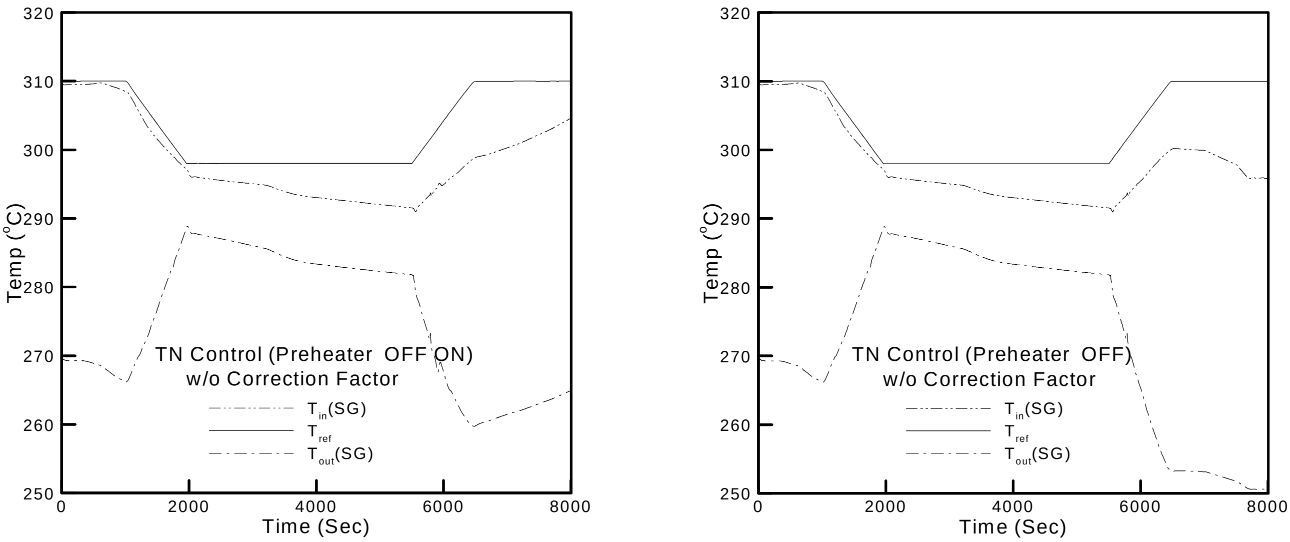
(a) (b)

그림. 4 증기발생기 입구, 출구 온도 변화 : T-Control



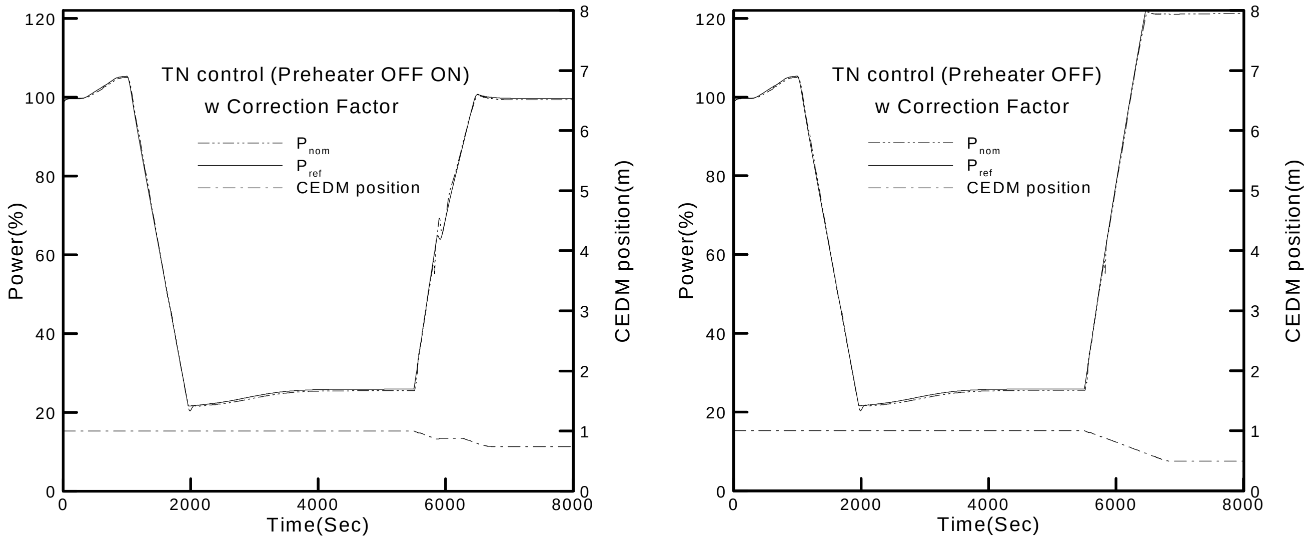
(a) (b)

그림. 5 노심 출력 변화 : T+N Control (보정 인자가 없을 때)



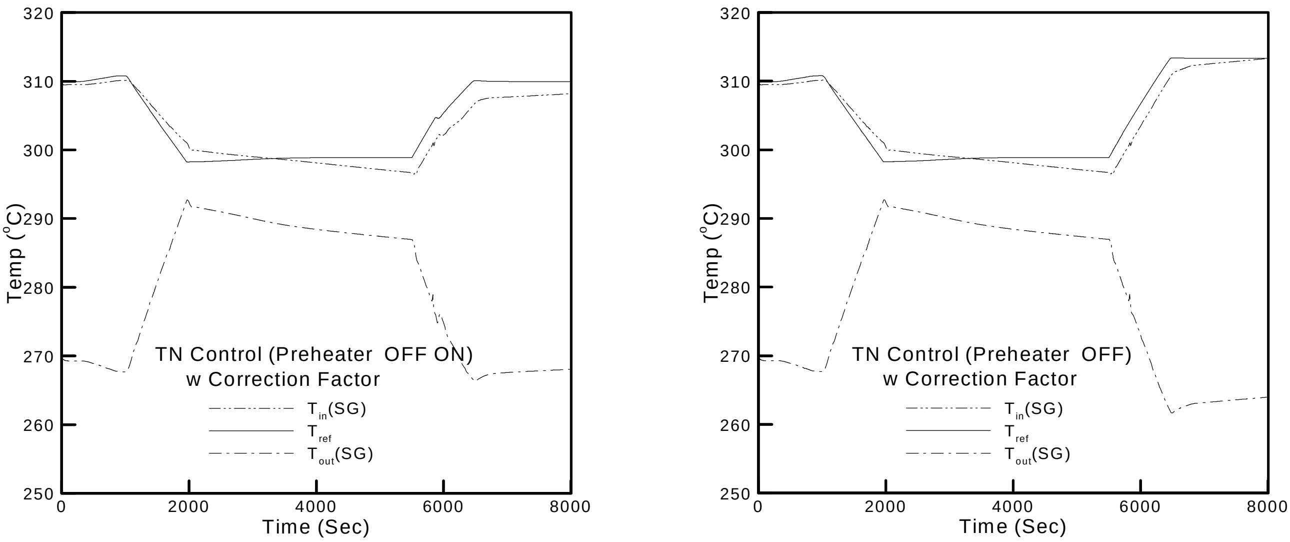
(a) (b)

그림. 6 증기발생기 입구, 출구 온도 변화 : T+N Control (보정 인자가 없을 때)



(a) (b)

그림. 7 노심 출력 변화 : T+N Control (보정 인자가 있을 때)



(a) (b)

그림. 8 증기발생기 입구, 출구 온도 변화 : T+N Control (보정 인자가 있을 때)

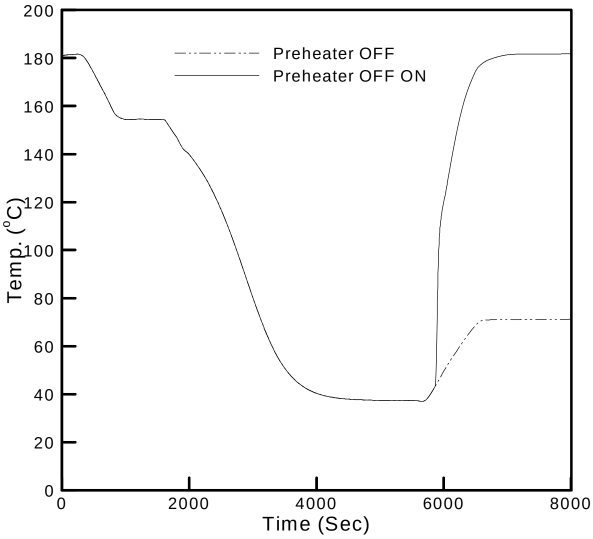

Preheater OFF
Preheater OFF ON
Temp. (°C)
Time (Sec)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
0
2000
4000
6000
8000

그림. 9 급수온도 변화