

단계 출력 설정을 적용한 SMART 일차계통 핵적 가열운전 제어논리 개발

Development of Step Power Setting Control Logic for Nuclear Heatup Operation for SMART

서재광, 박천태, 강한옥, 윤주현, 김궁구, 이두정, 장문희

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

SMART 일차계통 가열운전에서는 원자로냉각재펌프를 이용하여 가열하는 기존 상용원자로 경우와 달리 핵적 열원을 이용한다. 원자로 제어봉을 사용하는 가열운전모드에서 노심출력 등의 주요 변수들을 안정적인 상태로 유지하면서도 충분한 가열 성능을 내기 위한 제어논리의 개발이 필수적이다. 본 연구에서는 기존에 제안된 dT/dt 제어논리 및 가변 노심출력 설정 제어논리보다 논리가 단순하고 운전이 용이한 단계 출력설정 제어논리를 개발하였다. 단계 출력설정 제어논리에서는 노심출력 제어를 위한 참조출력이 계단형으로 주어지게 된다. 참조출력과 실제출력간의 차이로부터 제어봉이 구동된다. 노심출력이 계단형으로 급증하더라도 냉각재 온도는 냉각재의 열적 관성 때문에 완만히 상승하게 된다. 냉각재 가열율의 정도는 참조 출력 값의 크기에 의해 결정된다. 제어봉은 음의 냉각재반응도계수 때문에 지속적으로 인출된다. 본 연구에서는 요구 노심출구 온도 가열율을 얻기 위해 필요한 단계 출력설정 값이 도출되었으며, MMS 코드를 이용하여 단계 출력설정 제어방식을 모의하였다. 모의 결과로부터, 단계 출력설정 가열방식이 가열 논리의 단순함에도 불구하고 충분한 가열 성능을 나타냈음을 확인하였다.

Abstract

A nuclear heating concept is adopted in the SMART compared with the commercial nuclear power plant using the primary coolant pumps for heating the primary system. In order to maintain main parameters such as reactor power in a stable and safe condition during heatup operation, development of control logic for nuclear heatup operation is needed. In this study, step power setting control logic for nuclear heatup operation is proposed and compared to the previous dT/dt and variable power setting control logics. In step power setting control logic, target powers are given in a step-wise change. The core exit temperature rises in a ramp due to thermal inertia of reactor coolant. The rate of temperature increase depends on the given target power level. Control rod is continuously withdrawn due to negative moderator temperature coefficient. In this study, step power levels are derived and step power setting control logic is simulated by using the Modular Modeling System (MMS) code package. From the simulation results, step power setting control logics for nuclear heating is well performed.

1. 서 론

일체형원자로 SMART의 일차계통은 기존 분리형 대용량의 상용원자로 일차계통과는 출력용량, 설계특성, 운전특성 등에서 많은 차이가 있다. 특히 일차계통을 저온에서 고온으로 가열하는 가열 운전모드의 경우, 기존의 상용원자로에서는 대용량의 원자로냉각재펌프의 펌프 열을 이용하나, SMART에서는 펌프의 용량이 작아 이러한 운전방법이 가능하지 않게 된다. 따라서 SMART 일차계통 가열운전에 노심 핵에너지를 직접 사용하는 방법의 타당성에 대한 검토가 필요하였다. 상용로 가열운전에서는 원자로 미입계 상태에서 펌프 열로 가열을 하므로 제어봉의 움직임을 제어하는 제어논리가 불필요하나 SMART에서는 가열 열원이 핵에너지이므로 노심출력을 안정적으로 제어하면서 적절한 가열 성능을 내도록 해주는 제어논리의 개발이 필요하다. 즉, 기존 연구에서는 두 가지 가열운전 제어논리를 개발하여 각 제어논리의 성능을 분석한 바 있다 [1]. 그중 하나는 요구 dT/dt 와 노심출구온도 측정값에 근거하여 산출된 dT/dt 와의 차이를 가지고 제어봉이 제어되는 방식이고 (dT/dt 제어논리) 다른 하나는 가열운전시 주어진 가열율로 일차냉각재의 온도를 올리는데 필요한 열량을 열평형식으로부터 계산한 요구 노심출력값과 측정된 노심 출력값과의 차이를 가지고 제어되는 방식이다 (가변 노심출력 설정 제어논리). 기존의 dT/dt 가열운전 제어논리에서는 유동지연에 의한 요동 및 그에 따른 잦은 제어봉 움직임이 단점으로 지적되었고, 가변 노심출력 설정 제어논리에서는 제어논리가 다소 복잡하고 일차측 및 이차측 저 유량 조건에서 증기발생기 입출구 온도 측정 값에 오차가 커 실제 운전 적용 가능한지가 의문이다. 본 연구에서는 제어논리가 단순하면서도 실제 운전 측면에서 사용이 용이한 것으로 판단되는 2단계 출력 설정 제어방식의 성능을 MMS 코드 [2] 를 이용하여 성능을 모의하였다. 표 1 및 2는 MMS SMART 모델에서 참조한 SMART의 주요 운전변수 및 일차계통 주요 설계자료를 보여준다.

표 1 SMART 주요 운전변수

원자로 정격출력, MWt	330.0
정상 운전압력, MPa	15.0
노심출구/입구 냉각재온도, °C	310.0/270.0
노심관통 유량, kg/s	1556.0
증기량, kg/s	152.7
증기압력, MPa	3.3
가열운전시의 급수온도, °C	60.0

표 2 SMART 일차계통 주요 기기 설계자료

	원자로용기 높이, m	10.0
	원자로 내경, m	3.6
	일차계통 물용량, kg	46000.0
가압기	체적, m ³	21.0
	습식단열재 두께, m	0.02
	습식단열재 층 갯수	20
증기발생기	튜브 외경/내경, mm	12.0/9.0
	튜브 길이, m	14.4
	카세트 갯수	12
	카세트당 튜브 갯수	330
	튜브 수평/수직 피치, m	0.0165/.0135
	튜브 재질	티타늄 합금
노심	노심 높이, m	2
	연료봉 직경, m	0.00836
	연료봉 갯수	30096
	냉각재온도계수, 1/°C	-0.000407
	도플러계수, 1/°C	-1.97e-005
	제어봉그룹 갯수	8

2. 가열운전 제어논리

2.1. 개요

노심에서 생성되는 에너지를 이용하여 일차냉각재를 가열하는 가열운전의 제어로직에는 일차 제어 (대상) 변수의 종류에 따라 크게 두가지로 분류될 수 있다. 하나는 온도계측기로부터 읽는 노심출구온도를 일차제어변수로 사용하는 논리이고 다른 하나는 노외계측기로부터 읽는 노심출력을 일차제어변수로 사용하는 논리이다. 전자의 온도계측을 이용하는 논리에서 온도의 미분치를 이용하는 dT/dt 제어방식과 시간에 따라 요구 온도가 프로그램된 T_{ref} 제어방식이 있을 수 있는데, dT/dt 제어논리의 특성에 대해서는 이미 밝혀진 바 있다 [1]. dT/dt 제어논리에서는 요구 dT/dt 와 측정된 노심출구온도로부터 산정된 계산 dT/dt 와의 비교를 통해 제어봉이 움직임으로써 출력제어가 이루어진다. 노심출력을 일차제어변수로 이용하는 열평형 제어논리에서는 요구 노심출력과 노외계측 노심출력과의 비교를 통해 출력제어가 이루어진다. 열평형 제어논리에서 요구 노심출력 수준으로 고정 값을 쓰는 방식과 계통의 열수력 조건에 따라 달라지는 가변 값을 쓰는 방식이 있을 수 있다. 가변 노심출력을 쓰는 방식의 가열운전 특성에 대해서는 이미 연구된바 있다 [1]. 본 연구에서는 여러 단계의 고정 노심출력을 이용하여 일차냉각재를 가열하는 제어 모델을 개발하여 MMS 코드를 이용하여 그 성능을 평가하였다. 고정 노심출력 설정 제어방식은 가변 노심출력 설정 제어방식의 단순화된 형태로 그 이론적 토대는 크게 다르지 않다.

열평형 제어논리에서 일차냉각재를 요구 (목표) 가열율 $(dT/dt)_{dm}$ 로 가열하는데 필요한 요구 (목표) 노심출력은 다음의 열평형식으로 부터 도출될 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{노심}} &= \dot{Q}_{SEN} + \dot{Q}_{SG} \\ &= V \cdot \frac{d(\rho \cdot C_p \cdot T)}{dt} + \dot{Q}_{SG}\end{aligned}\quad (1)$$

여기서 $\dot{Q}_{\text{노심}}$, \dot{Q}_{SEN} , \dot{Q}_{SG} 는 각 각 노심 출력, 냉각재 내부에너지 변화량 (sensible heat), 증기발생기에서 제거되는 열량을 의미한다. V 는 일차계통 체적, ρ 는 일차냉각재 밀도, C_p 는 비열, T 는 냉각재 온도이다.

증기발생기 튜브 바깥 (일차측) 으로부터 튜브 길이를 따라 튜브안쪽 (이차측) 으로 전달되는 열량에 대한 열평형식은 다음과 같다:

$$\frac{d \dot{Q}_{SG}}{dz} = \dot{m}_1 \frac{di_1}{dz} \quad (2)$$

$$\frac{d \dot{Q}_{SG}}{dz} = \dot{m}_2 \frac{di_2}{dz} \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{SG} = U A \Delta T_{LMTD} \quad (4)$$

여기서 \dot{m} , i , U 는 각 각 유량, 엔탈피, 및 평균열전달계수이다. ΔT_{LMTD} 는 일차측 및 이차측의 Log Mean Temperature Difference이다. A 는 전열관의 열전달 면적이다.

\dot{Q}_{SG} 의 값은 일차 및 이차 측 열수력 조건에 의해 결정되는데, 일차측 및 이차측이 모두 저온상태인 경우 아주 작은 값이나 가열이 진행되어 양측간의 온도차가 벌어지면서 커지게 된다. 가열

운전이 완료되는 시점에서의 \dot{Q}_{SG} 값은 정격출력의 약 6 - 8 % 정도에 해당된다. 가열이 진행되어 \dot{Q}_{SG} 가 커지게 됨에 따라 요구 $\dot{Q}_{노심}$ 도 커지게 된다. \dot{Q}_{SG} 값을 매 시간마다 계산하여 $\dot{Q}_{노심}$ 를 구하도록 하는 가변 노심출력 설정 제어방식의 성능은 기존 연구에서 모의한 바 있다 [1]. 그림 1은 기존의 가변 노심출력 설정 제어논리를 보여준다. 그림 1에서 보듯이 가변 노심출력 설정 제어방식에서는 \dot{Q}_{SG} 를 계산하기 위해서는 증기발생기 입출구 온도 측정 값의 차이가 사용되는데, 가열운전 조건에서는 증기발생기 입출구 온도차가 계기 오차 범위 내에 있어 실제 구현 가능성이 의문시되고 있다. 게다가 예비해석 결과 증기발생기 일차측 입출구 온도차를 이용하여 \dot{Q}_{SG} 를 계산하는 데에는 유동 지연 및 계기 반응 시간 지연으로 인한 오차가 상당히 큰 것으로 밝혀졌다. 따라서 이러한 단점을 보완하고자 새로운 제어논리의 개발이 필요하였고 본 연구에서는 (1)식의 열평형식을 적용함에 있어 단계 노심출력 설정 제어논리를 사용하였다.

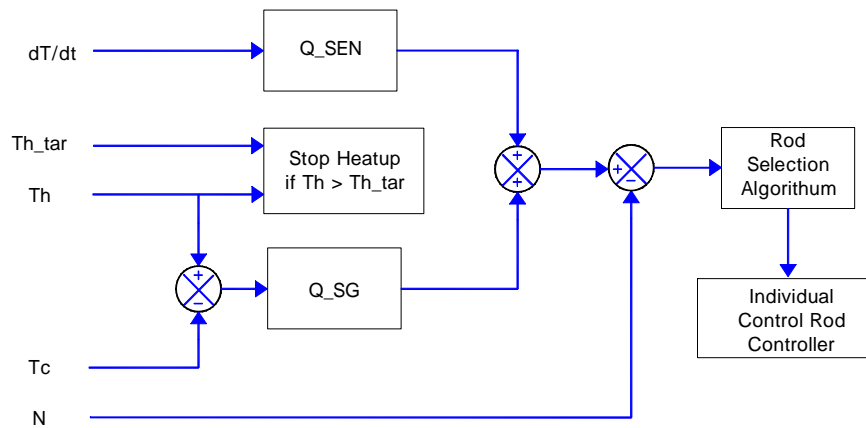


그림 1 가변 노심출력 설정 제어논리 (참고문서 1에서 인용)

2.2. 단계 노심출력 설정 제어논리

단계 노심출력 설정 제어방식에서는 가변 노심출력 설정 제어방식과는 달리 노심 출력을 기 설정된 일정 값으로 제어한다. 즉, $\dot{Q}_{노심}$ 이 일정 값이 되도록 제어봉이 제어된다. (1)식을 단계 노심출력 설정 제어방식에 맞게 재배치하면 다음과 같다 :

$$\dot{Q}_{SEN} = V \cdot \frac{d(\rho \cdot C_p \cdot T)}{dt} = \dot{Q}_{노심} - \dot{Q}_{SG} \quad (5)$$

(5)식에서 $\dot{Q}_{노심}$ 과 \dot{Q}_{SG} 의 차가 주어진다 보면 가열을 dT/dt 가 계산될 수 있다. 밀도 및 비열의 미분치를 무시한다면 가열을 dT/dt 는 다음과 같이 근사적으로 표시될 수 있다 :

$$\frac{dT}{dt} \approx \frac{\dot{Q}_{노심} - \dot{Q}_{SG}(T)}{V \cdot \rho(T) \cdot C_p(T)} \quad (6)$$

(6)식을 이용한 근사 가열율은 MMS 코드를 이용하여 얻은 단계 노심출력 설정 제어논리 성능

해석 결과에 대한 논의 부분에서 코드 모의 가열율과 비교 될 것이다. 단계 노심출력 설정 제어 논리의 흐름도는 그림 2에, 제어논리도는 그림 3에 나타나있다 (본 연구에서는 2 단계 노심출력 설정이 사용되었다). 2 단계 출력 설정은 증기발생기에서의 열수력 조건에 부합되도록 증기발생기 이차측 압력 제어가 시작되는 시점에서 작동하도록 하였다. 각 단계 출력 설정 값은 기존 변형 노심출력 설정 제어논리의 성능 해석 결과로부터 유추되었다.

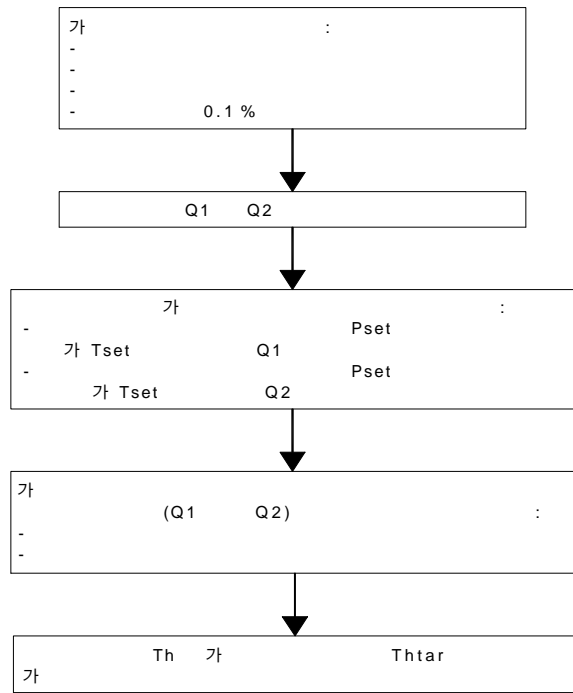


그림 2 단계 노심출력 설정 제어논리의 흐름도

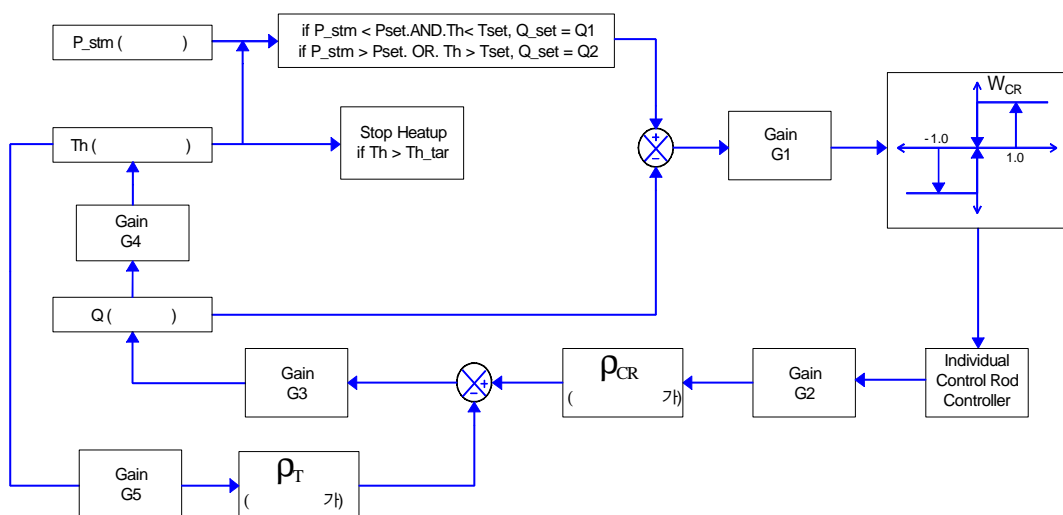


그림 3 단계 노심출력 설정 제어논리

3. MMS 코드를 이용한 가열운전 모의

계통성능해석코드인 MMS 코드를 이용하여 단계 노심출력 설정 제어논리의 가열운전 특성을 모의하였다. SMART MMS 모델은 이차계통을 포함한 주요 계통으로 구성되며 성능해석을 목적으로 개발되었다 [3]. 그림 4는 SMART 일차계통의 MMS 모델을 보여준다. MMS 코드 모의에서 가열율은 100 °C/h 이고 가열온도 범위는 약 200 °C에서 300 °C 이다.

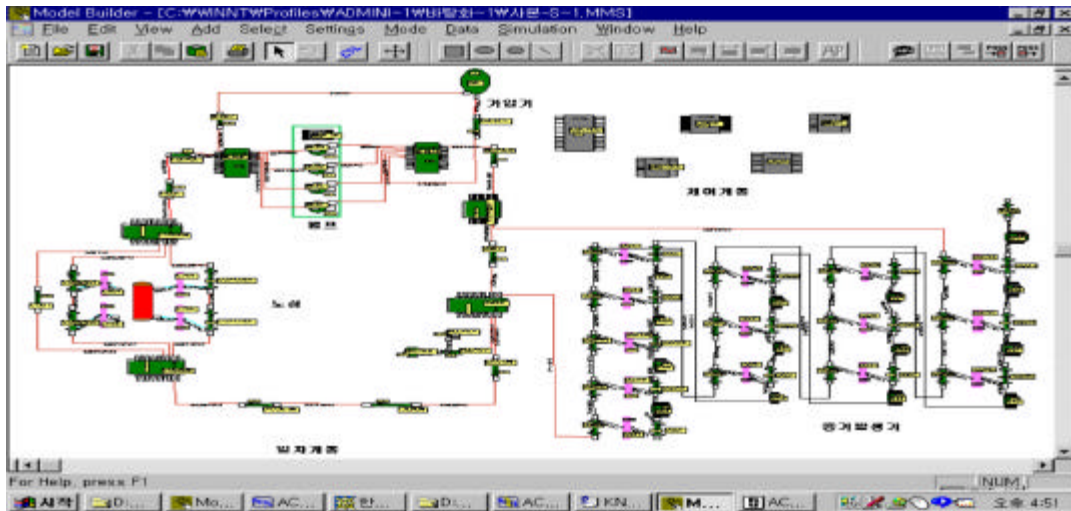


그림 4 SMART 일차계통 MMS 모델

4. 논 의

그림 5 및 6는 가열운전시의 단계 노심출력 설정 제어논리의 결과를 보여준다. 그림 5는 노심 출구온도 (TTCORE), 참조온도 (T1REF2), 노심출력 (정격 출력값에 대한 비율로 표시) (NNFUEL), 요구 (목표) 출력 (NNCORE), 제어봉위치 (ZCP_FUEL), 증기압력 (PPSTM) 이 표시되었다. 약 400초 근방에서 급격한 출력 변화가 일어나는 이유는 이때부터 이차측 증기가 일정값으로 제어되기 때문이다. 단계 노심출력 설정 제어논리의 성능 결과는 기존의 다른 제어논리 성능 모의에서 나타난 전반적인 출력 변화의 경향과 매우 흡사함을 보여주는데 이는 단계 노심출력 설정 제어논리가 가변 노심출력 설정 제어논리와 본질적으로 같기 때문이다. 단계 노심출력 설정 제어방식에서 노심 출력이 심하게 요동함을 보여준다. 이러한 출력요동은, 노심으로 들어오는 냉각재 온도의 지속적 상승에 의한 노심의 동특성의 음의 냉각재반응도계수 반응 때문이다. 그림 5에서 제어봉의 위치는 기존 가변 노심출력 설정 제어논리와 마찬가지로 요동이 심하지 않았으며, 실제 가열율은 참조 가열율에 비교적 잘 일치하였음을 알 수 있다. 가열운전 중반에 들어 목표 설정 온도와 실제 온도가 약간 차이가 나는 이유는 그 시점에서 제어봉이 모두 인출되었기 때문인데 이는 가열운전 모의라는 본 연구목적으로 이차계통 급수온도를 60 °C 라 가정하였기 때문에 생긴 것으로 판단된다.

그림 6에서는 실제 노심출력 (NNFUEL) 요구 노심열출력 (NNCORE), 증기발생기로부터 제거되는 열량 (NNSGP), 일차냉각재의 sensible heat (NNSEN), 식 (6)의 근사 가열율에 근거한 참조 온도 (T1REF3), 냉각재 열용량 (MICP) 등이 표시되어있다. 노심출구온도가 상승함에 따라

NNSGP가 조금씩 커지고 있음을 볼 수 있다. 반면 노심출력은 일정 값으로 제어됨을 알 수 있다. 실제 모의 가열율은 근사가열율과 비교적 잘 맞음을 볼 수 있는데, 이는 단계 노심출력 설정 제어논리가 이론적으로 설명됨을 보여주는 것이다. 다만 노심출구온도가 260 oC 이상되는 영역에서 근사가열율과 실제가열율에 다소 차이가 나는 이유는 식 (5)에서 밀도 및 비열 미분치의 무시 및 식 (6)에서 사용된 평균온도 산정의 단순화에 기인한 것으로 보인다.

5. 결 론

MMS 코드를 이용하여 단계 노심출력 설정 제어논리를 SMART 일차계통 가열운전에 적용하여 모의한 결과로부터, 단계 노심출력 설정 제어논리에서는 기존의 가변 노심출력 설정 제어논리와 마찬가지로 실제 가열율이 요구 가열율에 잘 일치하였으며 다소간의 출력 요동은 있으나 제어봉 움직임에 있어서 심한 요동은 일어나지 않았다. 즉, 단계 노심출력 설정 제어논리는 제어논리가 단순함에도 불구하고 기존에 개발된 제어논리와 유사한 성능을 보여주었다. 따라서 단계 노심출력 설정 제어논리를 실제 운전에 활용할 경우 보다 용이하고 신뢰성있는 핵적 가열운전이 가능할 것으로 판단된다.

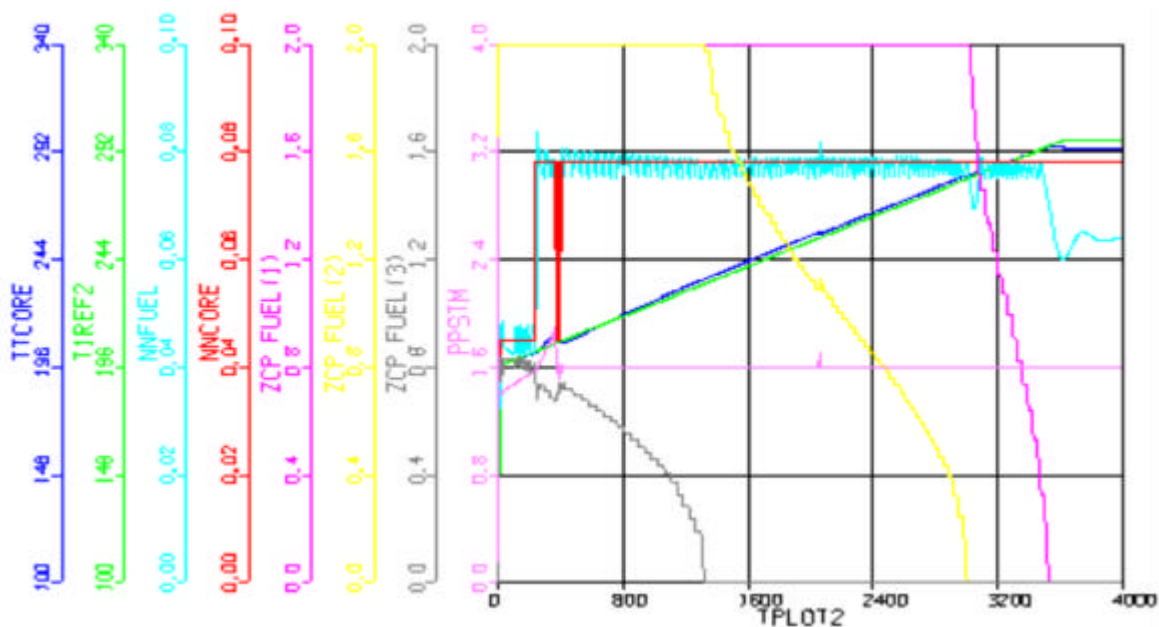


그림 5 단계 노심출력 설정 제어논리의 가열운전 특성

그림 범례 :

Tplot2 : 가열운전 시간 (SEC)

TTCORE : 노심출구온도, °C

T1REF2 : 참조 가열 온도 (100 °C/hour 직선)

MNFUEL : 노심출력 (분율)

MNCORE : 목표 노심출력 (분율)

ZCP_FUEL : 제어봉위치 (m)

PPSTM : 증기압력 (MPa)

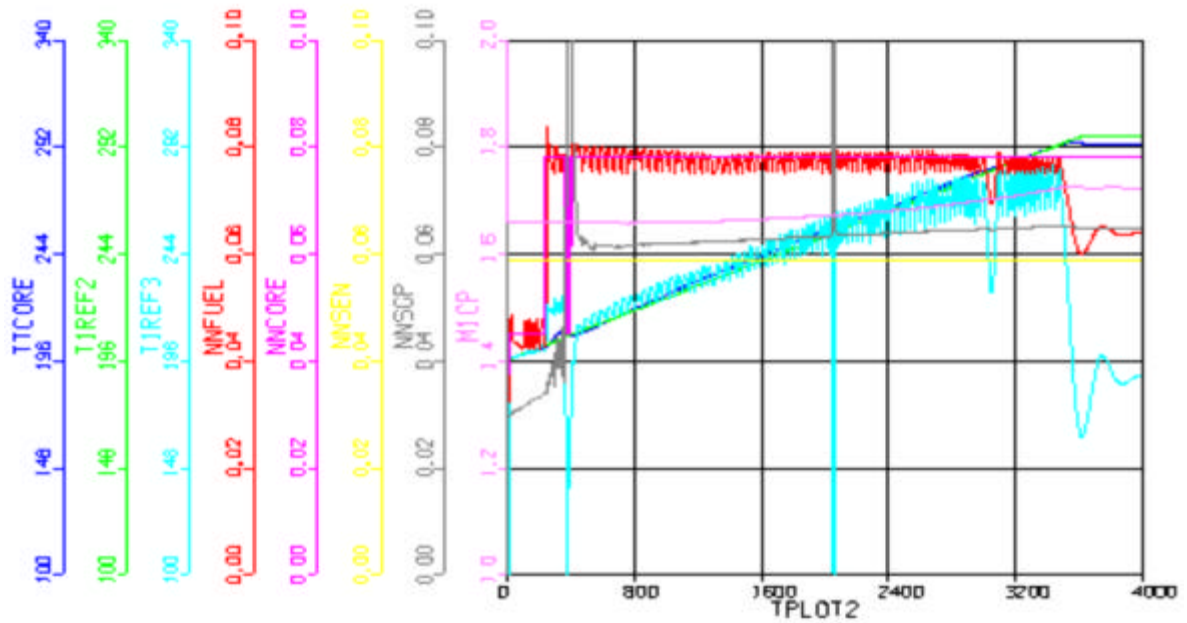


그림 범례 :

TIREF3 : 식 (6)의 근사가열율에 근거한 가열율 곡선

NNSEN : Sensible heat (분율)

NNSGP : 증기발생기를 통한 열 제거율 (분율)

M1CP : 냉각재 열 용량 ($\times 10^8 \text{ J/}^\circ\text{C}$)

6. 참고문헌

1. 서재광 외, SMART 일차계통 가열운전 제어논리 개발, 2000 KNS 춘계학술발표회, 2000, 5.
2. MMS Basic Manual, Framatome Technologies, Inc., 1999.
3. Documentation for the SMART MMS Model, SMART-MMS-006, KAERI-FTI, 2000.