'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

SMART 일차계통 가열운전 제어논리 개발

Development of Control Logic for Heatup Operation for SMART

서재광, 윤주현, 김긍구, 이두정, 지성균

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

SMART 일차계통 가열운전에서는 원자로냉각재펌프를 이용하여 가열하는 기존 상용원자로 경우와 달리 핵적 열원을 이용한다. 원자로 제어봉을 사용하는 가열운전모드에서 노심출력 등의 주요 변수들을 안정적인 상태로 유지하면서도 가열 성능을 내기 위해서는 가열운전시에 요구되는 제어논리의 개발이 필수적이다. 본 연구에서는 두 가지 제어논리를 개발하여 각 제어논리의 성능을 분석하였다. 첫 번째 제어논리에서는 요구 가열율과 노심출구온도 측정값으로부터 산정된 가열율과의 차이를 가지고 제어봉이 제어되며, 두 번째 제어논리에서는 가열운전시에 주어진 가열율로 일차냉각재의 온도를 올리는데 필요한 열량을 열평형식으로부터 계산한 요구 노심출력값과 측정된 노심출력값과의 차이를 가지고 제어된다. MMS 코드를 이용하여 각 제어방식의 제어논리를 모의하여 얻은 결과로부터 각 제어논리의 특성을 밝혔으며 두 특성의 비교를 통해 후자의 열평형식을 이용한 노심출력 제어방식이 운전 및 안전 측면에서 바람직한 가열운전 제어논리임을 도출하였다.

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 system. Because of the relatively smaller magnitude of the negative moderator temperature coefficient at low temperature, a stable and safe control logic for the nuclear heating is very important. Two different nuclear heating control logics are evaluated in this study. The first logic is to move the control rods based on the difference between the required heating rate and measured heating rate. The other one moves the control rods based on the difference between the measured core power and the required core power that is calculated to meet the given heating rate. The characteristics of the two different control logics are evaluated by using the Modular Modeling System (MMS) code package and the second control logic is found to be preferable to the first one from the viewpoint of the operation and safety.

1. 서 론

일체형원자로 SMART의 일차계통은 기존 분리형 대용량의 상용원자로 일차계통과는 설계 특성에서 다소 차이가 있으며 이에따라 계통의 운전방법도 다르다. 특히 일차계통을 저온에서 고온으로 가열하는 가열운전모드에서 기존의 상용로에서는 대용량의 원자로냉각재펌프의 펌프 열을 이용하나, SMART에서는 펌프의 용량이 작아 이러한 운전방법이 가능하지 않게 된다. 따라서 SMART 일차계통 가열운전에 노심의 핵에너지를 직접 사용하는 방법의 타당성에 대한 검토가 필요하였다.

SMART에서는 노심 반응도제어에 기존 상용원자로와는 달리 붕산을 쓰지 않기 때문에 반응도에 대한 냉각재온도계수는 큰 음의 값을 갖으며 제어봉구동장치는 미세 제어가 가능하도록 설계되어 있다. 상용로 가열운전에서는 원자로 미임계 상태에서 펌프 열을 사용하여 가열을 하므로 제어봉의 움직임을 제어하는 제어논리가 불필요하나 SMART에서는 가열 열원이 핵에너지 이므로 노심출력을 안정적으로 제어하면서 적절한 가열 성능을 내도록 해주는 제어논리의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 두 가지 가열운전 제어논리를 개발하여 각 제어논리의 성능을 분석하였다. 첫 번째 제어논리에서는 요구 dT/dt 와 노심출구온도 측정값에 근거하여 산출된 dT/dt 와의 차이를 가지고 제어봉이 제어되며 두 번째 제어논리에서는 가열운전시 주어진 가열율로 일차냉각재의 온도를 올리는데 필요한 열량을 열평형식으로부터 계산한 요구 노심출력값과 측정된 노심 출력값과의 차이를 가지고 제어된다. 각 제어방식의 제어논리가 계통의 특성과 맞물려 어떠한 동특성을 보이는지를 해석하기 위하여 MMS (Modular Modeling System) 코드 [1] 를 이용하였으며 모의 결과 및 비교를 통해 각 제어논리의 특성을 도출하였다.

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

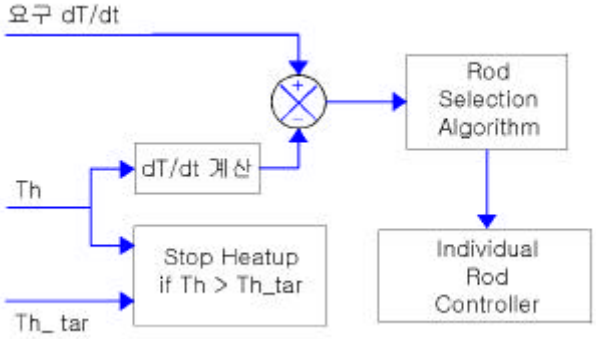


그림 1 dT/dt 제어논리

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
	펌프 유회유량, kg/s	25.0
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 일차제어 (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 Tref 제어방식이 있을 수 있는데, 본 연구에서는 dT/dt 제어방식과 프로그램 Tref 제어방식이 본질적으로 큰 차이가 없다고 보고 dT/dt 제어방식을 모의하였다. dT/dt 제어논리에서는 요구 dT/dt와 측정된 노심출구온도로부터 산정된 계산 dT/dt와의 비교를 통해 제어봉이 움직임으로써 출력제어가 이루어진다. 노심출력을 일차제어변수로 이용하는 열평형 제어논리에서는 요구 노심출력값과 노외계측노심출력값과의 비교를 통해 출력제어가 이루어진다. 열평형 제어논리에서 요구 노심출력값으로 고정값을 쓰는 방식과 계통의 운전 열수력 조건에 따라 달라지는 가변값을 쓰는 방식이 있을 수 있다. 본 연구에서는 후자의 가변 노심출력값을 결정하는 모델을 개발하였다.

각 제어논리는 응답특성은 계통의 여러 설계 및 운전특성과 연관되어있다. 특히 운전SMART 원자로집합체 구조에 의하면 노심을 관통한 냉각재가 노심출구온도계측기가 위치하는 곳까지 도달하는데 걸리는 지연시간 (냉각재 지연시간) 이 수초 대에 이르는 데 이는 dT/dt 제어로직을 사용하는 경우 노심 동특성과 맞물려 출력요동을 야기하게 될 것으로 예상된다. 반면 가열운전시 필요한 열량을 미리 계산하여 노심출력을 제어하는 방식은 열평형 제어방식에서는 온도를 제어변수로 사용하지 않으므로 이러한 지연시간에 의한 영향을 dT/dt 제어논리에 비해 덜 받을 것으로 예상된다. 각 제어논리의 응답특성은 MMS 코드 모의 결과에서 자세히 언급될 것이다.

2.2. dT/dt 제어논리

dT/dt 가열 제어논리에서는, 계산된 (dT/dt) 와 참조 (dT/dt)를 비교하여 차이가 발생하면 제어봉을 구동하여 노심출력을 변동시킴으로써 실제 dT/dt 가 참조 dT/dt 를 따라가도록 한다. 그림 1은 dT/dt 제어논리의 흐름도를 보여준다.

2.3. 열평형 제어논리

열평형 제어논리에서는, 가열운전조건에서 성립하는 열평형식으로부터 계산한 요구 열량값과 노외계측노심출력값을 비교하여 차이가 발생하면 제어봉을 구동하게된다. 일차냉각재를 요구 가열율 (dT/dt)dm 로 가열하는데 필요한 요구 열량은 다음의 열평형식으로 부터 도출될 수 있다.

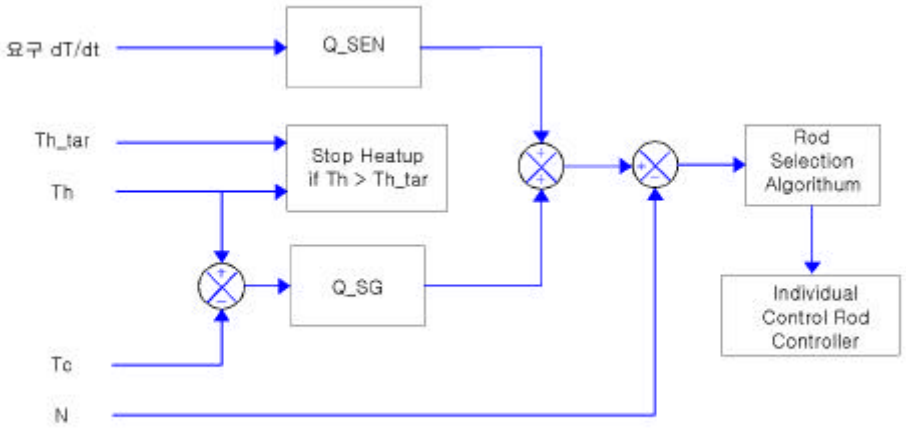
$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{노심}} &= \dot{Q}_{SEN} + \dot{Q}_{SG} \\ &= V \cdot \frac{d(\rho \cdot C_p \cdot T)}{dt} + \dot{Q}_{SG} \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 $\dot{Q}_{\text{노심}}$, $\dot{Q}_{SEN}$, $\dot{Q}_{SG}$는 각 각 노심에서 발생하는 열량, 냉각재 내부에너지 변화량 (sensible heat), 증기발생기에서 제거되는 열량을 의미한다. 우변의 첫 번째 항은 온도변화에 따른 주어진 체적 내에 있는 냉각재의 내부에너지 변화율을 나타내는데, dT/dt가 40 °C/hour (0.011°C/sec) 인 경우 이 값은 정격출력의 약 0.5% 정도에 해당한다. V는 일차계통 체적, ρ는 일차냉각재 밀도, C_p는 비열, T는 온도이다. $\dot{Q}_{SG}$는 노심입구 및 출구온도의 차이로부터 구해진다 :

$$\dot{Q}_{SG} = \dot{m}_{MCP} \cdot (h_{\text{노심출구}} - h_{\text{노심입구}}) \quad (2)$$

여기서 $\dot{m}_{MCP}$ 는 유량, h는 엔탈피를 나타낸다.

$\dot{Q}_{SG}$의 값은 일차 및 이차 측 온도조건에 의해 결정되는데, 일차측 및 이차측이 모두 저온상태인 경우 아주 작은 값이나 가열이 진행되어 양측간의 온도차가 벌어지면서 커지게 된다. 가열운전이 끝나는 시점에서의 $\dot{Q}_{SG}$ 값은 정격출력의 약 6 % 정도에 해당된다. 가열이 진행되어 $\dot{Q}_{SG}$ 가 커지게 됨에 따라 요구 $\dot{Q}_{\text{노심}}$도 커지게 된다. 그림 2는 열평형 제어논리의 흐름도를 보여준다.



3. MMS 코드를 이용한 가열운전 모의

계통성능해석코드인 MMS 코드를 이용하여 dT/dt 제어논리와 열평형 제어논리의 가열운전 특성을 모의하였다. SMART MMS 모델은 이차계통을 포함한 주요 계통으로 구성되며 성능해석을 목적으로 개발되었다 [2]. 그림 3은 SMART 일차계통의 MMS 모델을 보여준다. MMS 코드 모의에서 가열율은 40 °C/h 이고 가열온도 범위는 약 200 °C에서 300 °C 이다.

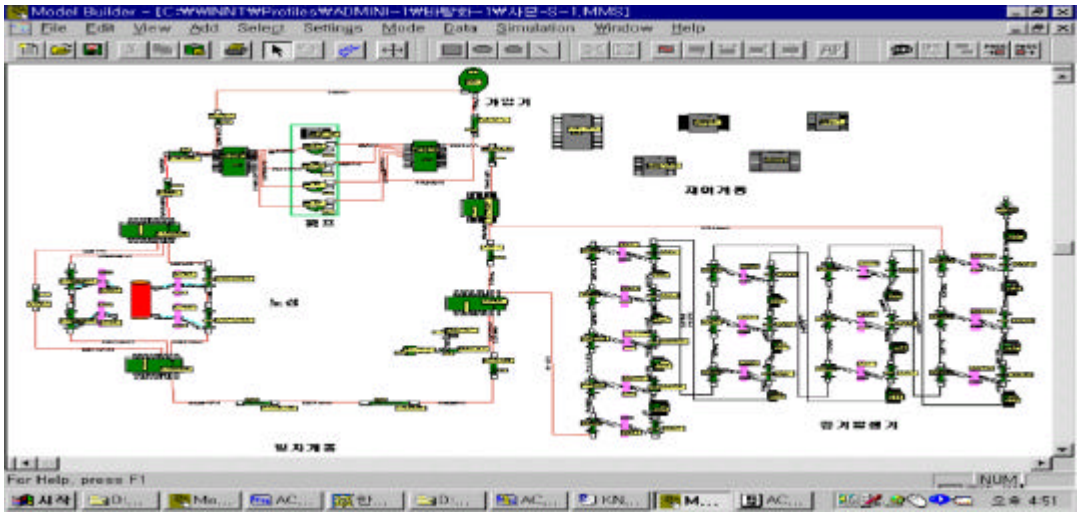


그림 3 SMART 일차계통 MMS 모델

4. 논 의

그림 4 및 5는 각 각 dT/dt 제어논리 및 열평형 제어논리의 결과를 보여준다. 그림 4의 a) 및 5의 a)는 가열운전시의 출력변화를 나타내며 100% 정격 출력값에 대한 분율로 표시되었다. 약 1500초 근방에서 급격한 출력 변화가 일어나는 이유는 이때부터 이차측 증기가 일정값으로 제어되기 때문이다. 서로 다른 두가지 방식의 제어논리를 사용하였음에도 불구하고 시간에 따른 전반적인 출력 변화의 경향은 매우 흡사함을 보여주는데 이는 열평형 제어논리에서 사용하는 열평형 모델이 적합함을 보여주는 것이다. 또 그림은 두 제어 방식 모두에서 노심 출력이 심하게 요동함을 보여준다. 이러한 출력요동은, 노심으로 들어오는 냉각재의 온도가 일정하지 않고 지속적으로 상승함으로 생기는 일종의 연속적인 외부 섭동에 대한 노심의 동특성 반응인 것으로 판단되나 그 정확한 원인 분석을 위해서는 핵적 동특성에 대한 정량적인 평가가 필요할 것으로 보인다. 그림 4의 a) 및 5의 a)를 비교해보면 dT/dt 제어논리의 출력변동 주기가 열평형 제어논리의 그것보다 짧음을 알 수 있는데 이는 dT/dt 제어논리의 잦은 제어봉 움직임과 관련이 있다 (그림 4의 b) 및 5의 b) 참조).

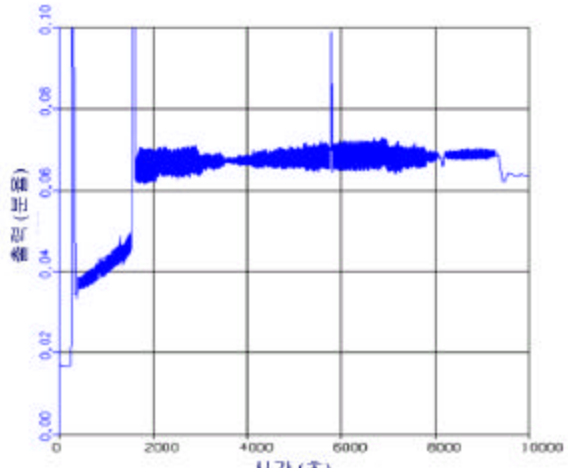
그림 5의 a)에서는 실제 노심출력 (Q_FUEL) 요구 노심열출력 (Q_CORE), 증기발생기로부터 제거되는 열량 (Q_SG), 일차냉각재의 sensible heat (Q_SEN) 이 표시되어있다. 노심출구온도가 상승함에 따라 Q_SG, Q_CORE, Q_FUEL이 같이 상승함을 알 수 있다.

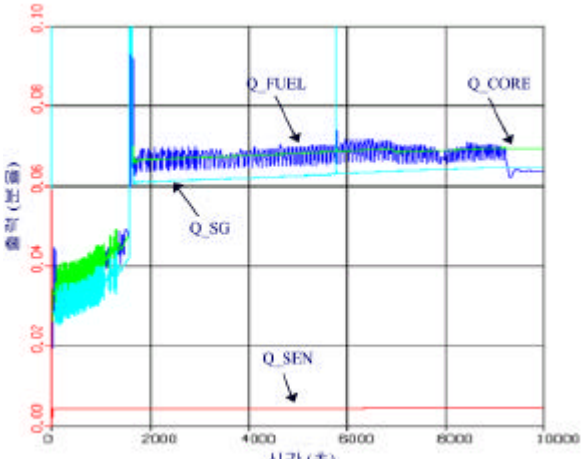
그림 4 및 5의 b)는 제어봉의 위치를 보여준다. 거시 시간으로 보게되면 두 제어모델의 제어봉 움직임 경향은 매우 유사하나 미세 시간으로 보게되면 상당히 다른 양상을 보여준다. 그림 6의 a) 및 b)는 미세 시간으로 살펴 본 각 제어모델의 제어봉 위치를 보여준다. dT/dt 제어논리에서는 잦은 제어봉 움직임이 발생하나 열평형 제어논리에서는 그러한 현상이 일어나지 않는다. dT/dt 제어논리의 잦은 제어봉 움직임은 냉각재 지연시간에 의한 영향과 앞서 언급한 연속적인 외부 섭동에 의한 영향의 복합으로 인하여 파생된 것이라 판단된다. 제어봉의 잦은 움직임은 그 자체로 제어봉의 수명을 단축시킬 뿐만 아니라 빈번한 출력 변동을 야기하므로 원자로안전성 및 운전성에 부정적인 영향을 미치게된다.

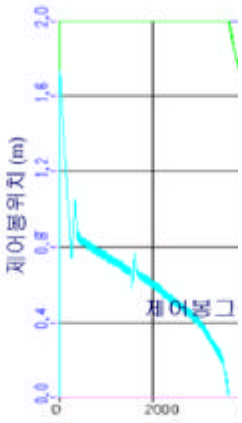
그림 4 및 5의 c)는 dT/dt 제어논리 및 열평형 제어논리의 가열율 계산 결과를 보여준다. 두 경우 모두 주어진 참조 가열율과 실제 가열율이 비슷함을 알 수 있다. 가열운전 종반에 들어 목표 설정 온도와 실제 온도가 약간 차이가 나는 이유는 그 시점에서 제어봉이 모두 인출되었기 때문인데 이는 가열운전 모의라는 본 연구목적으로 이차계통 급수온도를 60 °C 라 가정하였기 때문에 생긴 것으로 판단된다.

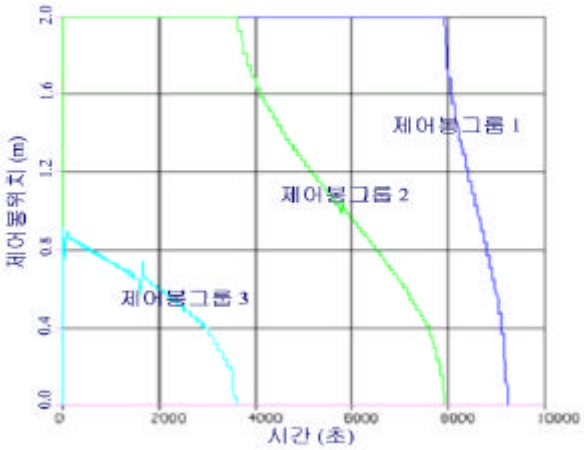
5. 결 론

MMS 코드를 이용하여 dT/dt 제어논리 및 열평형 제어논리를 SMART 일차계통 가열운전에 적용하여 모의한 결과로부터, dT/dt 제어논리에서는 심한 출력 요동 및 제어봉의 잦은 움직임이 발생한 반면 열평형 제어논리에서는 다소간의 출력 요동은 있으나 제어봉 움직임에 있어서 요동과 같은 현상은 일어나지 않았다. 이러한 두 제어논리의 특성 비교를 통하여 핵적 가열운전의 제어방식으로, 측정 노심출력과 요구 노심출력간의 편차에 의해 제어봉이 제어되는 방식인 열평형 제어논리를 채택하는 것이 바람직하다고 판단된다.

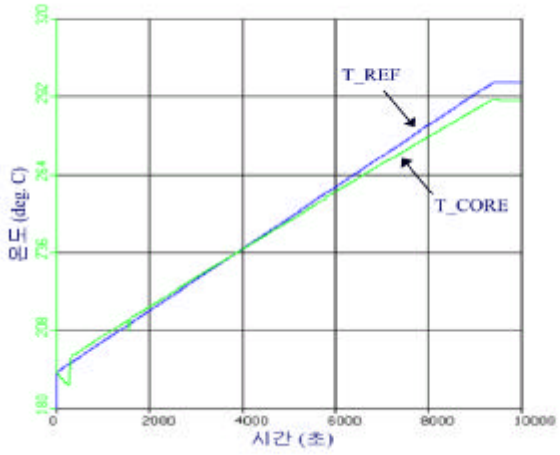


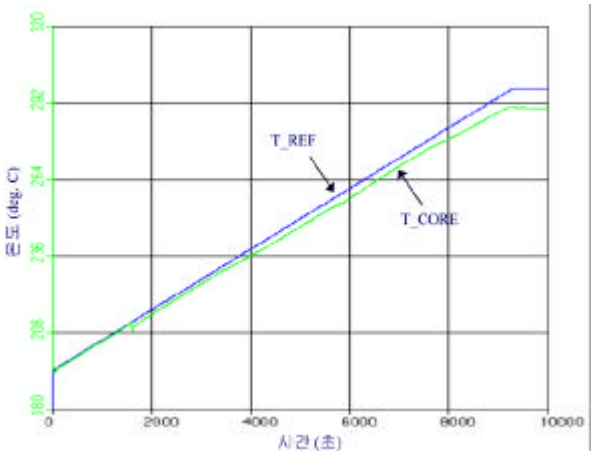






b)



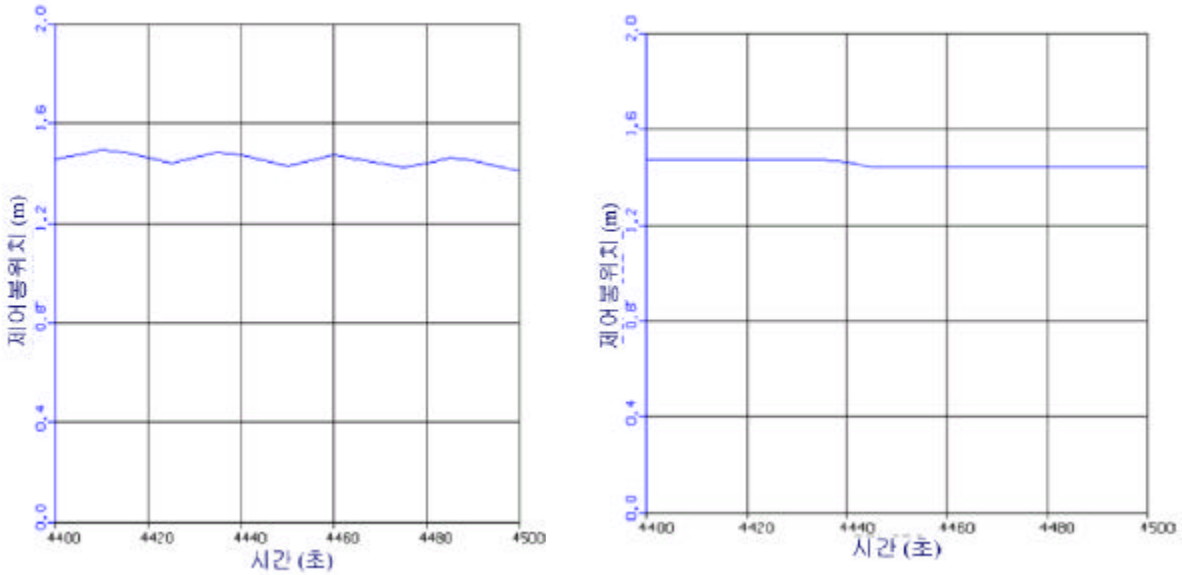


(c)

(c)

그림 4 dT/dt 제어논리 계산결과

그림 5 열평형 제어논리 계산결과



a) dT/dt **제어논리 계산결과**

그림 6 미세 시간에서 본 제어봉 움직임

6. 참고문헌

1. MMS Basic Manual, Framatome Technologies, Inc., 1999.
2. Documentation for the SMART MMS Model, SMART-MMS-006, KAERI-FTI, 2000.