

## 다절점 AMBISM/SIMULINK 모델을 이용한 AMBIDEXTER 개측제어 시스템 개념 설계에 관한 연구

유영진, 김진성, 이영준, 오세기  
아주대학교

### A Design Concept study for the AMBIDEXTER Control System through Developing a Multi-node System Model, AMBISM/SIMULINK

Yeongjin Yu, Jinsung Kim, youngjoon Lee, Sekee Oh  
Ajou University

#### 1. 서론

기존 원자력 발전 기술이 안고 있는 문제점들을 해결함과 동시에 장기적으로 기존의 경·중수형 원자로를 대체 또는 보완할 수 있을 것으로 기대되는 새로운 원자력에너지시스템으로서 토륨·우라늄·플루토늄 혼합 핵주기에 기초한 용융염원자로(Molten Salt Reactor)의 일종인 AMBIDEXTER (Advanced Molten-salt Break-even Inherently-safe Dual-missioning EXperimental and TEst Reactor) 원자력에너지 복합시스템의 개념설계 연구가 진행 중이다.

ThF<sub>4</sub>, UF<sub>4</sub>, 그리고 PuF<sub>4</sub> 용융염을 핵연료 물질로 사용하는 AMBIDEXTER 원자력에너지 시스템은 원자로계통 전체가 원자로 압력용기안에 일체형으로 내장되었으며, 이로부터 열·에너지 수송회로와 물질·방사선 수송회로가 각각 독립적으로 구성된 시스템이다. 이러한 폐쇄 핵연료 주기(Closed Fuel Cycle) 개념은 정교한 핵물질 관리 및 운전전략을 필요로 하고 운전 중 탈 설계 조건이 발생할 경우 조속한 원상 회복능력이 중요하다. 그러므로 개념 설계 단계에서 예상할 수 있는 각종의 비정상 초기 조건에 대한 시스템의 대응 천이상태를 분석하여 시스템을 안정적이며 신속하게 회복시킬 수 있는 적절한 제어기 설계가 필요하다.

이에 따라, 본 연구에서는 선행 연구에서 수행된 제어 기기가 없는 상황 하에서 각종의 예상 및 가상 운전시나리오에 대한 시뮬레이션을 수행하여 나온 결과 자료를 확인·분석하여 안정성과 제어성의 확보를 통한 출력 제어 방법론과 제어기기의 설계를 통하여 최적의 제어 방법론을 제시하였다. 탈 설계 사고와 같은 가상 운전 상황에서 제어기와 제어 모델이 원자로 시스템의 안정성 유지와 신속한 자동제어를 수행하는지를 평가하였으며 원자로 노심에는 직접적인 제어 없이도 자동 조절 기능에 의하여 원자로 노심은 안정적인 상태를 유지할 수 있으며 제안된 제어기를 통하여 시스템 전체적으로 안정적 상태를 신속하게 유지할 수 있음을 확인하였다.

## 2. AMBIDEXTER 계측 제어 시스템 모델

### 2.1 밸브 모델

일반적으로 쓰이는 밸브 중에서 AMBIDEXTER 원자력 시스템에 쓰이는 밸브의 종류는 DC 전동기를 이용한 서보 밸브를 사용하였다. DC 전동기를 이용한 서보 밸브는 직류 전기 에너지를 회전 기계 에너지로 변환하며 발생하는 토오르크를 이용하여 밸브의 구동을 제어한다. 광범위한 속도 제어 능력, 속도-회전력의 특성 양호, 여러 제어 방법에 적용가능성이 우수하여 광범위하게 적용되는 밸브 시스템이다.

이러한 DC 전동기를 이용한 서보 밸브를 구동, 제어하는 방식으로 본 연구에서는 전기자 제어 DC 전동기를 이용하였다. 전기자 제어 DC 전동기 구동 밸브의 회로 구성 모델은 [그림1]과 같다. 전기자 제어 DC 전동기는 전기자 회로의 입력 전압  $V_a(t)$ 를 통하여 제어 및 구동되며, 계자권선은 일정한 계자 회로 전압  $V_f$ 가 인가된다. 전기자의 회전축은 회전 운동 기계시스템에 연결되어있으며 이러한 회전 운동 기계시스템이 밸브를 구동한다.

전기자 제어 DC 전동기의 모델링은 다음과 같다. 먼저 전기자 제어 DC 전동기 구동 밸브 회로의 방정식을 살펴보면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$L_a \frac{d i_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + V_b(t) = V_a(t) \quad (1)$$

여기서  $L_a, R_a$ : 전기자 회로의 인덕턴스와 저항

$i_a(t)$ : 전기자회로의 전류

$V_a(t)$ : 전기자회로 인가전압

$V_b(t)$ : 전기자의 역기전력 (back electromotive force)

전기자의 역기전력  $V_b(t)$ 의 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_b(t) = K_1 \Phi \omega(t) = K_1 K_2 I_f \omega(t) = K_m \omega(t) \quad (2)$$

여기서  $K_1, K_2, K_m$ : 각각 비례 상수, 전동기 상수

$\Phi$ : 계자 회로에서 발생한 자속

$I_f$ : 계자 회로의 유도 전류

$\omega(t)$ : 전기장의 회전 각속도

전동기의 발생 토오르크  $T(t)$ 의 방정식

$$T(t) = K_3 \Phi i_a(t) = K_3 K_2 I_f i_a(t) = K_t i_a(t) \quad (3)$$

여기서  $K_3$ : 비례 상수

회전 운동 기계시스템의 방정식

$$J \frac{dw(t)}{dt} + Bw(t) + T_L(t) = T(t) \quad (4)$$

여기서 J : 관성 모멘트  
 B : 회전마찰  
 T<sub>L</sub>(t): 회전 운동 기계시스템 부하의 토크  
 T(t) : 전동기의 전기자에서 발생한 토크

위 전기자 제어 DC 전동기 구동 벨브의 식들을 라플라스 변환을 하여 입력 V<sub>a</sub>(S), 출력 ω(S)에 대하여 정리를 하면 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{W(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{(R_a + L_a s)(Js + B) + K_b K_m} \Rightarrow \frac{\omega_n}{s^2 + 2\xi s + \omega_n^2} \quad (5)$$

위의 식(5)에서, 전기자 제어 DC 전동기 구동 벨브의 모델을 라플라스 변환하여 간략화하면 표준적인 2차 시스템으로 기술할 수 있음을 볼 수 있다. 이러한 주파수 영역에서 표현된 라플라스 변환식을 다시 시간 영역으로 변환하여 시간 변화에 따른 계산을 수행할 수 있게 SimuLink로 표현하였다. 그리고 이러한 2차 시스템의 성능과 안정성에 척도가 될 수 있는 감쇠율(ξ)과 고유주파수(ω<sub>n</sub>)를 선정하기 위하여 임펄스 응답에 대한 출력을 시뮬레이션하였다. 먼저 고유주파수(ω<sub>n</sub>)를 선정하기 위하여 주파수영역에서 안정성의 기준이 되는 감쇠부족(0 < ξ < 1)중에서 전형적인 값인 감쇠율 0.5를 기준으로 단위 계단 입력신호에 대한 시뮬레이션을 수행하였다 [그림2]. 다음으로 감쇠율(ξ)을 선정하기 위하여 고유주파수를 임의의 값으로 정해진 상태에서 단위 계단 입력 신호에 대한 결과값을 구하였다 [그림3]. 감쇠율(ξ) 선정 판단 기준이 되는 응답의 신속성과 안정성은 백분율 오버슈트(P.O), 침두치 시간(T<sub>p</sub>), 정정시간(T<sub>s</sub>)으로써 판단하였다 [표1]. 백분율 오버슈트는 단위 계단 입력에 대하여 다음과 같이 정의되어진다.

$$P.O = \frac{M_p - f_v}{f_v} \times 100\% \quad (M_p \text{는 시간 응답의 침두치, } f_v \text{는 응답의 최종치}) \quad (6)$$

위와 같은 시뮬레이션의 결과 값을 통하여 벨브 시스템 모델의 신속한 응답성과 안정성을 기대할 수 있는 적절한 고유주파수(ω<sub>n</sub>)와 감쇠율(ξ)을 각각 5 Hz와 0.7로 선정하였다.

이와 같이 구성된 전기자 제어 DC 전동기 구동 벨브 모델의 안정성과 제어성을 향상시키기 위하여 피드백 보상기를 추가하였다. 요구되는 벨브 출력값과의 오차에 대하여 선형적으로 비례되는 피드백 보상기를 추가함으로써 상승시간을 감소시키는 효과를 얻을 수 있다. 또한 안전성을 개선시키는 역할을 하는 미분 피드백 보상기를 추가함으로써 벨브 모델의 안정성을 개선하였다. 추가적인 적분 피드백 보상기는 본 벨브 모델에 추가하지 않았다. 적분 피드백 보상기를 추가함은 2차 시스템을 3차 시스템으로 만드는 것으로 시스템을 복잡하게 하는 것이다. 이는 시스템의 불안정 요소를 추가하는 것이며 적분 피드백 보상기의 장점은 정상 상태의 오차를 줄이는 것인데 비례-미분 피드백 보상기로 이미 정상 상태 오차가 없는 모델을 구현할 수 있으므로 추가적인 적분 피드백 보상기를 모델에 포함시키지 않았다. 비례-미분 피드백 보상기를 추가한 벨브 모델은 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{W(s)}{V_a(s)} = \frac{w_n + k_D s}{s^2 + (2\xi + k_D)s + w_n^2 + k_p} \quad (7)$$

비례-미분 피드백 보상기의 상수값은 Ziegler-Nichols의 동조법을 기초로 단위 계단 입력 법에 의하여 반복 작업을 통하여 구하였으며  $k_D$ ,  $k_p$  값은 각각 0.75와 0.9로 선정하였다. 보상기를 추가하기 전 모델과 비례-미분보상기를 추가한 벨브 모델에 대한 비교 그래프는 [그림4]에 나타내었다.

### 2.3 노심 반응도 제어기 모델

AMBIDEXTER 원자력 시스템에 설계된 노심 반응도 제어기는 노심의 시동과 운전 정지시에 원자로 노심의 제어를 수행하게 된다. 현재 모델은 운전 중 탈 설계 조건이 발생할 시에 이러한 노심 반응도 제어가 자동으로 작동, 제어되게 설계하였다. 노심의 현재 출력을 중성자속 계측 감지기가 상시 계측하고 있으며 출력이 과도하게 변동하는 상황이 발생하면 중성자속 계측 감지기의 신호를 받은 노심 상부에 위치한 DC 서보 모터가 작동하여 반응도 제어봉을 구동하게 됨으로써 노심의 출력을 제어하는 시스템이다.

#### 2.3.1 중성자속 계측 감지기 모델

노심의 출력을 계측하는 중성자속 계측 감지기는 대부분 노심 내부에 설치되어 노심 안에서 중성자속을 계측하게 되어있다. 이렇게 노심 내부에 중성자속 계측 감지기를 설치하게 되면 높은 에너지를 가지고 있는 중성자와의 반응으로 쉽게 타버리는 일이 발생하게 된다. 이는 중성자속 계측 감지기의 잦은 오작동과 교체물 요구하게 되고 결국 안전성과 경제적인 문제를 야기하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 모델의 중성자속 계측 감지기는 노심 외부에 위치하며 노심을 순환하여 나온 핵연료 용융염에서 중성자속을 측정하게 되어 있으며 다음과 같이 구성되어있다.

$$\phi_{det}(t) = X\phi_{direct}(t) + \phi_{external}(t-\tau)e^{-\lambda t} \quad (8)$$

$\phi_{det}(t)$  : 중성자속 계측 감지기에 측정된 중성자속

$\phi_{direct}(t)$  : 중성자속 계측 감지기에 직접 측정된 t시간에서의 노심 상부 중성자속

$\phi_{external}(t-\tau)$  : 노심을 순환하고 나온 핵연료 용융염속의 지발 중성자속

X : 노심 상부에서 감지기까지 도달 중성자속 분율

$\tau$  : 노심 순환하고 나온 핵연료 용융염속의 지발 중성자속이 감지기까지 도달 시간

$\lambda$  : 지발 중성자 모핵종 유효 붕괴 상수

#### 2.3.2 반응도 제어봉과 DC서보 모터 모델

본 모델에서 노심 출력 제어봉을 구동시키는 서보 시스템 모델은 서보 시스템에 광범위하게 쓰이는 전기자 제어 DC 전동기로 정하였으며 수학적 모델링은 위에서 언급된 전기자 제어 DC 전동기 구동 벨브 모델과 같다.

노심 출력과 시스템의 안정성, 신속한 제어성을 제어봉 반응도 변화량 선정 기준으로 정하였다. 반응도 변화량이 과도하게 크면 반응시간은 빠르나 노심 출력이 진동하며 안정성에

심각한 문제를 초래하고 반응도 변화량이 과도하게 적으면 노심 출력이 안정상태를 찾는 시간이 상당히 오래 걸린다. 또한 반응도 변화량이 적절하지 못하면 흑연 감속제에 급격한 온도 변화가 생기므로 흑연의 건전성에 문제를 줄 소지가 있다. 이와 같은 기준을 고려하여 반응도 변화량을 선정하였으며 노심 출력 제어봉 이동에 따른 반응도 변화량 선정에 대한 그래프는 [그림5,6]과 같다. 노심 출력 제어봉의 최대 삽입량은  $0.2\%dk/k$ 이며 제어봉 이동에 따른 반응도의 변화량은 정상상태에서 계측된 중성자속과 차이가 1% 마다  $0.05mk/sec \cdot percent-power\ error$ 가 삽입되게 설계하였다.

## 2.4 증기 온도 제어기 모델

증기 유량 감소와 같은 탈 설계 사고가 발생할 시 중간 열전달계통과 증기 터빈 계통의 효율적인 열 수송 능력을 저해시키며 증기발생기 및 증기재열기의 증기 출구 온도가 상승하게 된다. 이와 같이 증기 출구 온도 상승 시 증기터빈의 날개에 영향을 방지하기 위하여 증기 온도가 일정한 수준이상으로 상승하는 것을 방지하기 위한 제어기가 필요하게 된다. 본 모델은 이러한 역할을 하는 제어기를 설계하는 것으로서 증기 발생기 출구에 온도 감지기가 위치해 있으며 증기 온도를 상시 계측하게 된다. 증기 온도 감지기가 일정 온도 이상의 온도를 측정하게 되면 기준 온도와의 편차에 비례하여 자동으로 냉각 용융염 우회류 밸브를 작동하여 증기발생기로 유입되는 냉각 용융염 유량이 감소하게 함으로써 증기가 열 교환할 수 있는 열량을 낮추어 줌으로써 증기의 온도를 일정하게 자동 제어하는 방식이다. 이에 대한 모델은 다음과 같이 구성하였다.

$$\frac{dF_{coolant-salt}}{dt} = -\alpha (T_{steam-out} - 1000^{\circ}F) \quad (9)$$

여기서  $F_{coolant-salt}$  : 냉각 용융염 유량

$\alpha$  : 제어기 이득,  $1^{\circ}F\ error$ 당  $0.1\%/sec$  냉각 용융염 유량변동

증기 발생기 열측 냉각 용융염에 대하여 다음과 같이 표현이 된다.

$$M_{c,i}^{SG} C_{p,i}^c \frac{dT_{c,i}^{SG}}{dt} = (F - F_{contl})_{c,i}^{SG} C_{p,i}^c (T_{c,i-1}^{SG} - T_{c,i}^{SG}) + h_{cw,i}^{SG} A_{cw,i}^{SG} (T_{w,i}^{SG} - T_{c,i}^{SG}) \quad (10)$$

이때, 제어기의 이득 선정에 관련된 그래프는 [그림7,8]에 도시하였으며 선정 기준은 신속한 응답과 안정성에 기준을 두었다. 또한 최대한 보수성을 갖게 하기 위하여 증기 펌프의 절반이 고장을 일으킨 사고인 증기 유량을 50%로 감소시킨 상태에서 이득 선정을 하였다.

증기 온도를 일정하게 하는 또 다른 방법으로는 노심의 출력을 제어하여 생산하는 열량을 인위적으로 미리 낮추는 것이다. 증기 온도 감지기가 냉각용융염 우회류 밸브에 신호를 주는 대신 위에서 언급한 노심 반응도 제어기에 신호를 주어 노심 출력 제어봉을 자동으로 적절히 제어하는 방법이다. 또한 우회류 밸브 제어를 통한 방법과 노심 반응도 제어 방법 두 가지를 병행하여 제어하는 방법도 각각 구성하여 보았다.

## 2.5 증기 유량 제어기 모델

### 2.5.1 핵연료 용융염의 열 수송 능력 저하 경우

제어기가 없는 상태에서 수행된 선행 연구 결과를 살펴보면 핵연료 용융염 순환 펌프의 고장으로 인한 핵연료 용융염 유량 감소와 같은 핵연료 용융염의 열 수송 능력 저하 경우 핵연료 용융염의 원자로 노심 출구 온도는 상승하는 반면 각 계통기기의 열전달 능력은 정상적이므로 노심 입구 온도는 감소하는 현상을 보여주며 원자로의 자동조절 능력에 의하여 노심은 일정한 출력과 온도에 수렴하여 안정화됨을 볼 수 있었다. 문제는 이러한 사고시 열 수송 능력이 감소함으로 인한 증기의 온도가 감소함으로써 증기터빈의 날개에 심각한 문제를 야기시킬 수 있다. 이러한 문제를 방지하기 위하여 본 모델은 노심 입력단과 출력단에 핵연료 용융염의 온도를 상시 계측할 수 있는 온도 감지기를 설치하여 정상 상태이며 특별한 노심 출력제어가 없는 상황에서 핵연료 용융염의 노심 입력단 온도는 감소하고 출력단 온도는 상승하는 상황이 발생시에 온도 감지기가 증기 유량을 조절할 수 있는 Governor 밸브에 신호를 주어 증기 유량을 적절히 감소시켜주는 자동 제어를 수행할 수 있게 모델을 구성하였다.

그런데 위와 같이 설계된 제어기가 자동으로 적절히 작동되어 증기 출구 온도가 목표치에 도달한다 하더라도 노심 출력이 자동 조절 능력에 의하여 정상상태보다 낮은 출력에서 안정화됨으로 노심 출구온도는 기준온도보다 낮은 온도에서 안정화된다. 결국 노심 출구 온도와 기준 온도와의 편차가 계속 존재함으로 제어기는 계속적으로 증기 유량을 감소시키려하게 된다. 이에 따라 증기 유량이 과도하게 감소함으로써 증기 온도는 기준치 온도보다 과도하게 상승하게 되고 이러한 증기 온도 상승은 증기 온도 제어기에 의하여 냉각용융염 우회류 밸브를 개방함으로써 증기 온도를 강하하려하게 된다. 이러한 두개의 상반되는 역할을 하는 제어기의 동시 작동에 의하여 시스템은 oscillation을 할 잠재적인 불안 요소를 가지게 된다. 이러한 문제를 피하기 위하여 증기 발생기의 증기 출력단에 증기 온도를 상시 계측할 수 있는 온도 감지기를 추가로 설치하였다. 증기 유량 제어기가 작동되어 증기 온도가 상승하여 기준온도가 되면 추가 설치된 온도 감지기가 Governor 밸브를 구동하는 모터의 인가전압을 off 시킴으로써 안정적인 제어가 이루어지게 설계하였다. 또한 핵연료 용융염의 온도 변화에 대한 증기의 영향은 각 기기간의 수송 지연 효과에 의하여 약 12.5초가 늦어지는 것을 고려하여 제어기를 설계하였다.

위와 같은 과정에 의해 설계된 핵연료 용융염 유량 감소시 증기 유량 제어기 모델은 다음과 같이 구성하였다.

$$\frac{dF_{steam}}{dt} = -\beta (T_{core-out} - 1300^{\circ}F) \quad (11)$$

여기서  $F_{steam}$  : 증기 유량

$\beta$  : 제어기 이득, 1 °F error당 0.05%/sec 증기 유량 변동

또한, 증기 발생기 튜브 축의 증기에 대해 다음과 같이 표현이 된다.

$$M_{s,i}^{SG} C_{p,i}^{SG} \frac{dT_{s,i}^{SG}}{dt} = (F - F_{const})_{s,i}^{SG} C_{p,i}^{SG} (T_{s,i+1}^{SG} - T_{s,i}^{SG}) + h_{ws,i}^{SG} A_{ws,i}^{SG} (T_{w,i}^{SG} - T_{s,i}^{SG}) \quad (12)$$

이때, 제어기의 이득선정에 관련된 그래프는 [그림9,10]에 도시하였다. 제어기의 이득이 크

면 즉각적인 시스템의 응답은 신속하나 [그림9]에서 보듯이 제어기 이득이 과도하게 크면 증기 유량을 급격히 감소시킴으로써 증기 온도가 급상승하는 현상을 볼 수 있다. 그러므로 증기 온도가 안정화되어갈 때 증기 출구단 온도 감지기에 의해 governor 밸브 구동 모터의 인가전압이 on/off를 반복함으로써 시스템의 안정성이 저해됨을 볼 수 있다. 제어기 이득을 변화시키면서 수행한 시뮬레이션 결과, 핵연료 용융염의 출구단 온도와 기준치 온도와의 1 °F 편차에 대하여 0.05%/sec씩 증기 유량을 감소시켜줄 때 가장 안정적이면서 신속한 시스템 응답을 갖게 됨을 볼 수 있다.

### 2.5.2 냉각 용융염의 열 수송 능력 저하 경우

본 모델은 냉각 용융염 순환펌프의 고장으로 인하여 냉각 용융염의 유량이 감소하여 냉각 기능의 저하를 가져오는 사고가 발생시에 제어기가 없는 상태에서 수행된 선행 연구 결과를 분석하여 적절한 제어기를 구성하는 것이다. 선행 연구 결과를 분석해보면 냉각 용융염 감소는 1차 계통 및 중간 열전달 계통간의 효율적인 열 수송 능력을 저하시키며, 원자로의 자동 조절 능력에 의하여 노심의 출력이 적절한 값에서 수렴하여 안정화됨을 볼 수 있다. 그러므로 노심에는 어떠한 특별한 제어는 불필요하며 단지, 열 수송 능력의 저하로 인해 증기의 온도가 감소함에 따라 적절한 제어가 필요함을 알 수 있다. 이러한 문제를 방지하기 위하여 본 모델은 중간 열교환기 입력단과 출력단에 냉각용융염의 온도를 상시 계속할 수 있는 온도 감지기를 설치하여 특별한 노심 출력제어가 없는 상황에서 냉각 용융염의 중간 열교환기 입력단 온도는 감소하고 출력단 온도는 상승하는 상황이 발생시에 증기 유량을 조절할 수 있는 Governor 밸브에 신호를 주어 증기 유량을 적절히 감소시켜주는 자동 제어를 수행할 수 있게 모델을 구성하였다.

이 모델도 핵연료 용융염의 열 수송 능력 저하 경우시 제어기에서 언급된 바와 같이 증기 온도 제어기와 증기 유량 제어기 두개의 상반되는 역할을 하는 제어기의 동시 작동에 의하여 시스템은 oscillation을 할 잠재적인 불안 요소를 가지게 된다. 이러한 문제를 피하기 위하여 위 핵연료 용융염의 열 수송 능력 저하 경우시 증기 유량 제어기에서와 같이 동일한 방법으로 추가적인 증기 출력단 온도 감지기를 설치하였다. 또한 냉각 용융염의 온도 영향이 증기단에 미치는 수송 지연 효과를 고려하여 설계하였다.

이에 대한 모델은 다음과 같이 구성하였다.

$$\frac{dF_{steam}}{dt} = -\gamma (850^{\circ}F - T_{HX-in}) \quad (13)$$

여기서  $F_{steam}$  : 증기 유량

$\gamma$  : 제어기 이득, 1 °F error당 0.005%/sec 증기 유량 변동

또한, 튜브 측의 증기에 대해 (식12)와 같이 표현이 된다. 제어기의 이득선정에 관련된 그래프는 [그림11]에 도시하였다.

### 3. 시뮬레이션 결과 및 해석

선행 연구를 통하여 도출된 AMBIDEXTER-AMBISM/Simulink 모델의 정상상태 자료와 탈 설계 사고시의 천이상태에서 원자로 시스템의 자동 조절 능력을 분석한 자료를 기반으로 하여 계속 제어기와 제어 모델을 구성하였으며 각종의 예상 및 가상 운전 시나리오에 대한

시뮬레이션 수행을 통하여 구성 모델을 평가하였다. 시뮬레이션 내용으로는 각 기기의 유량 감소에 따른 냉각 기능 상실 사고, 반응도 삽입과 같은 가상 운전 상황에서 제어기와 제어 모델이 원자로 시스템의 안정성 유지와 신속한 자동제어를 수행하는지를 평가하였다. 또한 경제적, 안전한 중요 평가 대상인 원자로 노심의 흑연 감속재의 건전성에 최소한의 영향을 주면서 원자로 시스템의 신속한 자동 제어 응답을 기대할 수 있는 AMBIDEXTER 원자로 시스템의 제어 방법론을 분석하였다.

냉각 기능 상실 사고 중 급수 장치의 고장을 가정한 증기 유량 감소 사고를 가정하였다. 증기 발생기 및 재열기로 유입되는 증기유량을 1%/sec 비율로 감소시키며 총 10%,30%,50%로 감소되는 사고를 가정하였으며 천이상태의 시작은 정상상태에서 50초 후에 일어나는 것으로 정하였다. 앞에서 설계된 증기 온도 제어기 모델 세 종류에 대하여 시뮬레이션을 한 결과가 [그림12,13,14,15]이다. [표2]에서 정리하였듯이 각 제어 모델의 흑연 감속재 온도가 약 20초간 선형적인 기울기를 갖으며 급격히 감소하게 된다. 먼저, 노심 반응도 제어를 통한 모델을 살펴보면 흑연 감속재가 20초간 약 26.7°F가 변했으며 초당 1.34°F씩 변동하였다. 냉각 용융염 우회류 밸브를 구동시켜 냉각 용융염의 유량을 변동을 준 제어기를 보면 20초간 약 7.3°F가 변했으며 초당 0.37°F씩 변동하였다. 두가지 제어 모델을 동시에 작동하여 제어했을 경우엔 11.3°F가 변했으며, 초당 0.55°F가 변했다. 증기의 온도를 살펴보면 노심 반응도 제어의 경우 최고 온도가 1045.9°F까지 상승하며 제어 기준 온도로 안정화되는데 449.35초가 걸린다. 이는 노심의 변동 영향이 증기에까지 영향이 미치는데는 각 용융염의 수송지연에 따른 응답 지연 특성에 의하여 총 제어시간과 제어능에 영향을 준 것이다. 냉각 용융염 우회류 밸브를 구동해서 냉각 용융염의 유량을 제어해준 모델과 두가지 제어기를 동시에 작동시킨 모델은 증기 온도의 최고 온도나 총 제어시간이 큰 차이를 보이지 않았으며 약 1005°F까지 증기 온도가 상승하고 총 제어시간은 각각 200.5초와 200.9초가 걸렸다. 이러한 결과를 살펴보면, 흑연 감속재의 온도를 급격히 변동시키므로써 건전성을 저해하는 영향이 가장 적으면서 신속하며 안정적인 증기 온도 제어를 하기 위해서는 원자로 노심을 제어하기보다는 냉각 용융염 우회류 밸브를 구동시켜 냉각 용융염의 유량 변동을 통한 자동제어가 가장 적절함을 볼 수 있다.

다음으로 핵연료 용융염 유량 감소 사고시 증기 유량 제어기 모델을 살펴보면, 시뮬레이션 범위는 선행연구 결과를 보면 핵연료 용융염의 유량이 50%이상 감소하면 흑연감속재의 안전성 기준이 되는 1350°F를 초과하게 된다. 그러므로 핵연료 용융염의 유량 50%이상의 감소는 원자로 가동 정지의 사고에 해당되므로 제어기 설계 모델의 범위를 벗어난다는 판단 하에 10%,30,40%의 유량 감소를 가정하고 수행하였다. 선행 연구 결과와 [그림17]과 같이 노심은 자동 조절 능력에 의하여 일정한 출력에 안정화됨을 볼 수 있다. 핵연료 용융염 유량이 가장 많이 감소한 40%감소의 경우 증기 유량 제어기의 총 제어시간을 살펴보면 약 76.4초 만에 증기 온도가 다시 기준 온도값으로 회복하여 안정화됨을 볼 수 있다. 증기 유량 제어기가 가동되는 동안 증기 기준 온도와 최고 변동 온도간의 편차를 보면 약 8.5°F로써 증기 터빈 날개에 대한 영향은 무시할 정도로 판단되며 충분히 신속하며 안정적으로 자동제어가 이루어진다고 할 수 있겠다.

냉각 기능 상실 예상 사고로서 다음은 냉각 용융염 펌프 고장으로 인한 유량 감소 사고를 수행하였다. 이때 작동되는 제어기는 냉각 용융염 열 수송 능력 저하 경우시 구동되는 증기 유량 제어기 모델이다. 원자로 노심은 선행 연구 결과와 같이 특별한 노심 제어 없이 원자로 시스템의 자동 조절 기능에 의하여 안정화됨을 볼 수 있다 [그림18]. 증기 유량 제어기의 작동에 의하여 증기발생기 증기 출구 온도가 설계 목표치에 도달할 때까지 증기 유량이 적절히 감소됨을 볼 수 있다 [그림19,20]. 냉각 용융염 유량이 가장 많이 감소한 50%감소의 경우 증기 유량 제어기의 총 제어시간을 살펴보면 약 85.9초 만에 증기 온도가 다시 기준 온도 값으로 회복하여 안정화됨을 볼 수 있으며 충분히 신속하며 안정적으로 자동제어가 이



루어진다고 할 수 있겠다.

다음으로, 핵연료 용융염 정화공정과 재주입 공정을 포함하는 물질·방사선 수송회로에서의 오작동으로 인한 핵연료 물질의 과다 주입을 가정한 반응도 삽입사고 시 제어기와 시스템의 응답을 평가하였다. 반응도 주입 방식은 램프 방식에 의한 주입으로 하였으며 주입량은 0.03mk, 0.15mk, 0.3mk, 0.5mk로 설정하였다. 이러한 사고 시에 시스템 제어 방법으로는 첫째, 원자로 노심의 노심 반응도 제어기를 통하여 급격히 상승된 출력을 정상 상태의 출력으로 신속히 복귀시키는 방법이 있다. 둘째, 노심 반응도 제어기를 사용하지 않고 증기 온도 제어기를 통하여 제어하는 방법이 있다. 반응도 삽입에 의하여 증가된 출력은 원자로 시스템의 자동 조절 기능에 의하여 인위적인 출력 제어 없이 안정화됨을 이전 연구 수행결과를 통하여 판단할 수 있다. 반응도 삽입에 의하여 출력이 급격하게 증가된 출력은 증기발생기 증기 출력단의 증기 온도를 상승시키는 역할을 하게 된다. 이때 증기 온도 제어기를 이용하여 증기의 온도를 고정시키는 것으로 원자로 노심에는 인위적 제어 없이 증기온도를 고정시킴으로써 노심 출력이 자동 조절 능력에 의하여 자동적으로 낮아지면서 안정화시키는 방법이다.

원자로 노심 반응도 변동에 대하여 자동으로 반응도 변동을 상쇄시킬 수 있게 설계된 노심 반응도 제어기가 작동되었을 때와 노심 반응도 제어기를 사용하지 않고 증기 온도 제어기를 통하여 제어시의 출력과 흑연 감속재의 온도변화, 증기 온도변화를 도시하였다.[그림 21,22,23,24,25](그래프 비교를 위하여 각각 0.3mk, 0.5mk만을 도시하였다.) 최대 반응도 삽입량인 0.5mk 주입시 두가지 제어 방법에 대한 결과를 [표3]에 비교 분석하였다. 노심 반응도 제어기를 구동하였을 때 신속한 시스템의 응답을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이에 비하여 노심의 제어기 없이 증기 온도 제어기를 쓰는 경우는 시스템의 응답이 상대적으로 늦지만 흑연의 최대 온도 편차 0.588°F, 증기 최대 온도 편차 9.834°F, 시스템 안정화 시간을 고려해보면 반응도 삽입사고 시에도 노심에 직접적인 제어 없이도 적절히 제어가 이루어질 수 있음을 볼 수 있다.

#### 4. 결론 및 토의

고유 안전성과 원자력 이용에 대한 개념이 획기적으로 개선된 AMBIDEXTER 원자력 시스템의 개념 설계과정에서 각 기기의 유량 감소에 따른 냉각 기능 상실 사고, 반응도 삽입과 같은 가상 운전 상황에서 제어기와 제어 모델이 원자로 시스템의 안정성 유지와 신속한 자동제어를 수행하는지를 평가하였다.

시뮬레이션 결과를 통하여 냉각 기능 상실 사고 시에 원자로 시스템의 자동 조절 기능에 의하여 원자로 노심에는 특별한 직접적 제어 없이도 설계, 제안된 증기 온도 제어기, 증기 유량 제어기를 통하여 신속하며 안정적인 시스템 응답을 얻을 수 있었다. 반응도 삽입에 따른 원자로 과도 상태의 경우, 원자로 노심에 직접적인 반응도 제어를 할 경우 가장 신속한 시스템의 안정성을 가져올 수 있지만 노심에 직접적인 특별한 제어 없이도 증기 온도 제어기와 원자로 자동 조절 기능에 의하여 적절한 제어를 할 수 있음을 확인하였다.

본 연구를 통하여, AMBIDEXTER 원자력 시스템은 탈 설계 사고 시에 원자로 노심에는 직접적인 제어 없이도 자동 조절 기능에 의하여 원자로 노심은 안정적인 상태를 유지할 수 있으며 제안된 제어기를 통하여 시스템 전체적으로 안정적 상태를 신속하게 유지할 수 있음을 확인 할 수 있었다.

향후 수행되어야 할 연구 내용으로는 각각의 기기 유량 감소에 따라 수송 지연 시간의 증가 시 시스템의 응답과 수송 지연 시간의 허용 범위에 대한 연구가 필요할 것이다. 그리고 현 제어기 모델은 제어기 자체의 시간 지연에 대한 고려는 하지 않은 상태이므로 이에 대한 연구가 필요하다. 또한 원자력 시스템의 운용 시에 발생할 수 있는 부하추종, 시동과 운전

정지와 같은 상황에서 적절한 제어 방법과 제어기기의 기본 개념 설계가 이루어져야 한다.

### 5. 참고문헌

- [1] 김진성, “AMBIDEXTER 원자력 복합 에너지 시스템의 출력 자동조절 특성 평가 연구”, 공학석사학위논문, 아주대학교, 2002 .
- [2] 김진성, 이영준, 유영진, 오세기, “AMBIDEXTER 원자력 복합 에너지시스템의 출력 자동조절 특성 평가 연구”, 한국에너지공학회, 춘계학술발표회 논문집, 2002
- [3] 오세기 외, “가변지발중성자 분을 원자로 시스템 AMBIDEXTER의 안전성 및 제어 성 설계용 동적 거동 모사 해석 모델 개발”, ‘2001 원자력 기초연구과제 최종보고서’, 과학기술부, 2001
- [4] 남문현, 이상효, 남부희, “제어 시스템 공학”, 자유아카데미, 1990
- [5] Karl O. Ott, Robert J. Neuhold, “Nuclear Reactor Dynamics”, American Nuclear Society, 1985
- [6] W. H. Sides, Jr., “MSBR Control Study : Analog Simulation Program”, ORNL, 1971
- [7] Dorf C. Bishop, “Modern Control Systems :9th”, Prentice Hall, 2001
- [8] Nise, “Control Systems Engineering”, John Wiley & Sons. Inc 2000

감쇠율	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3
%오버슈트	0.2	1.5	4.6	9.5	16.3	25.4	37.2

표 1 백분율 오버슈트와 감쇠율의 관계

	노심 제어		우회관 펌프 제어		노심-우회관 펌프	
	시간	온도	시간	온도	시간	온도
급변동 시작	110.0	1270.7	120.5	1301.5	90.0	1298.1
급변동 완료	130.0	1243.7	140.1	1294.2	110.5	1286.7
최고 온도	105.0	1045.9	109.9	1005.7	108.0	1005.2
안정화 완료	449.35초		200.52		200.95	

표 2 증기 온도 제어기 성능 비교

	최고 출력 분율	노심 안정화시간 (sec)	속연 감속계 최고온도편차 <sup>F</sup>	증기 최고온도편차 <sup>F</sup>	증기 온도 안정화시간(sec)
노심 반응도 제어	1.287	24.38	0.173	0.288	50.01
증기 온도 제어기	1.570	277.86	0.588	9.834	210.02

표 3 노심 반응도 삽입(0.5mk) 사고시 제어기 성능비교

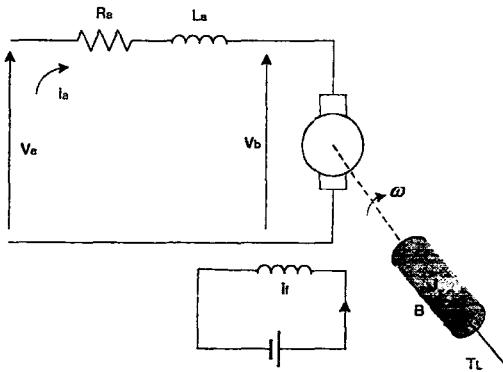


그림 1 전기자 제어 DC 전동기 모델

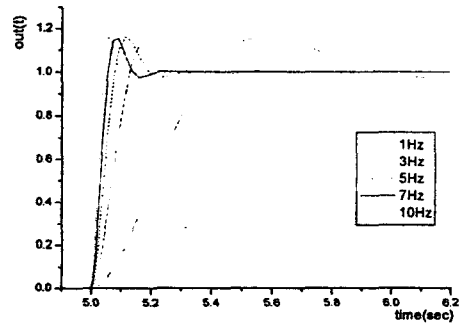


그림2 임펄스입력에 대한 고유주파수선정

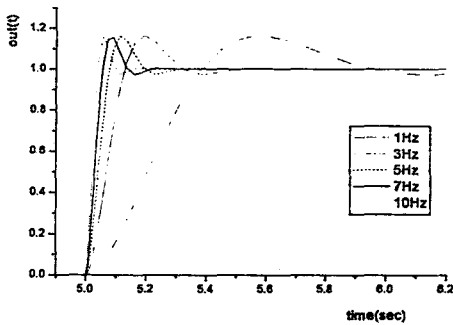


그림 3 임펄스입력에 대한 감쇠율선정

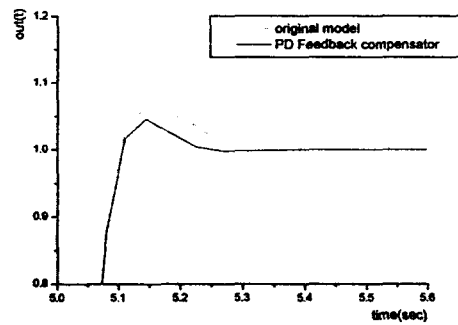


그림 4 PD보상기 추가전,후 응답비교

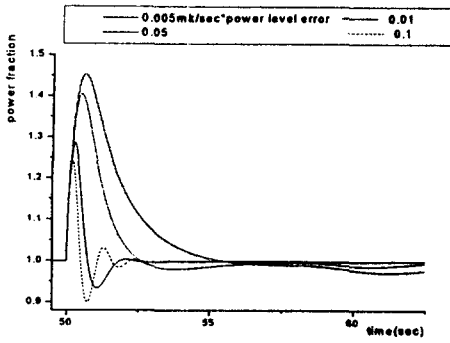


그림 5 노심 반응도 제어기  
반응도 변화량-출력 관계

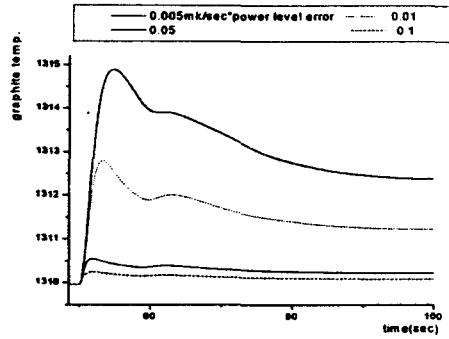


그림 6 노심 반응도 제어기  
반응도 변화량-후연감속재 온도 관계

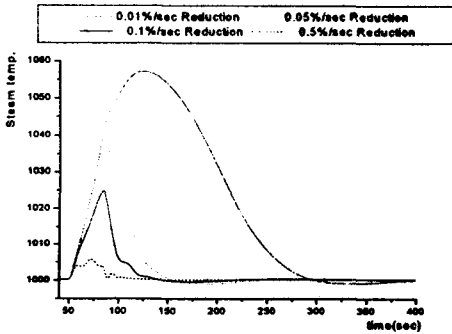


그림 7 증기 온도 제어기 이득-증기온도

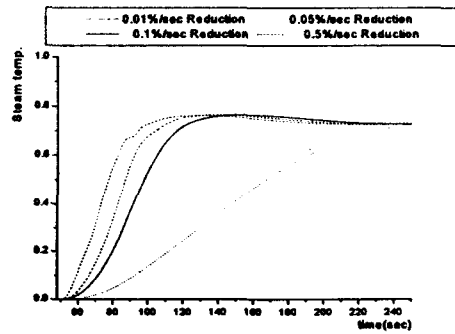


그림 8 증기온도제어기 이득-우회류 유량

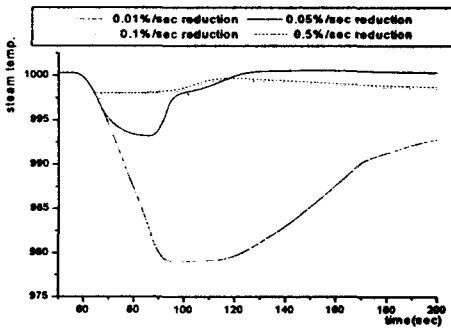


그림9 핵연료 용융염 유량 감소시  
제어기이득-증기온도 관계

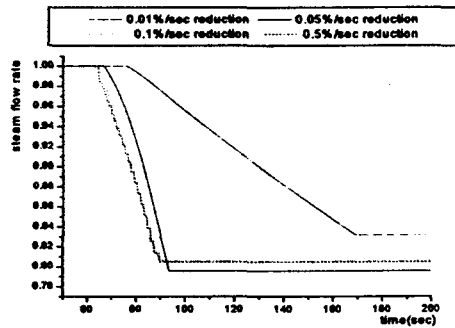


그림10 핵연료 용융염 유량 감소시  
제어기이득-증기유량 관계

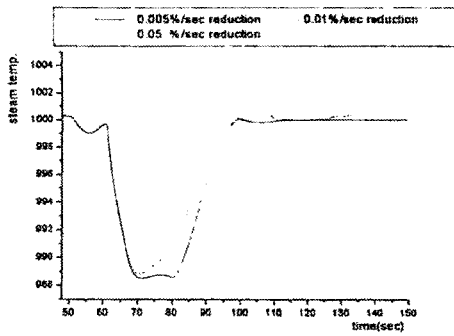


그림 11 냉각 용융염 유량 감소시 제어기이득-증기온도 관계

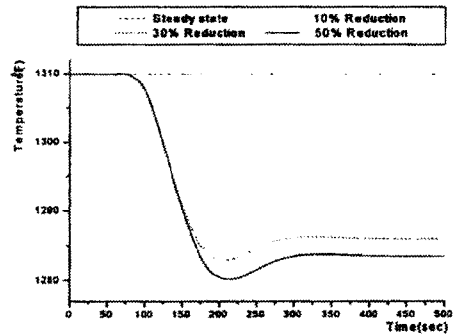


그림 12 냉각용융염우회류밸브로만 제어시 흑연온도

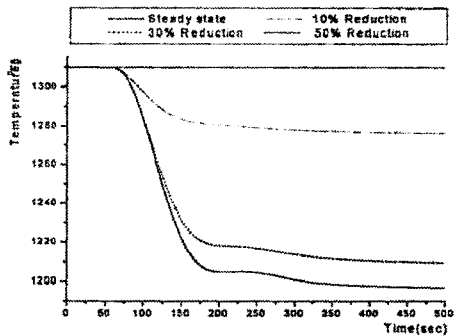


그림 13 증기유량감소시 노심 반응도 제어기만 작동시 흑연온도

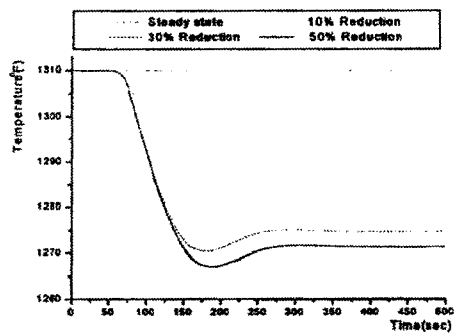


그림 14 증기유량감소시 노심+우회류밸브 제어시 흑연온도

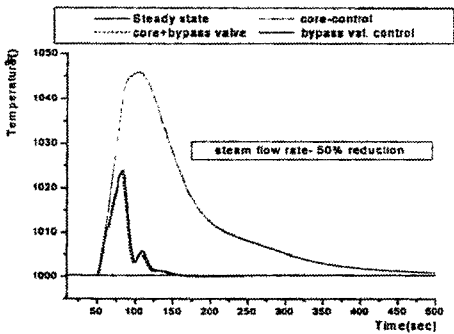


그림 15 증기유량 감소 시 증기온도변화 비교

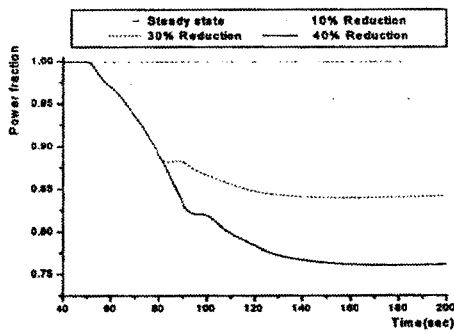


그림 16 핵연료 용융염 유량 감소시 출력 분율

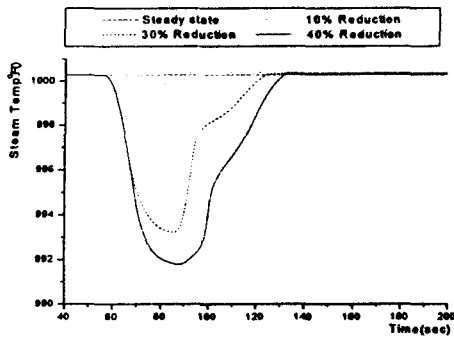


그림 17 핵연료 용융열 유량 감소시 증기온도 변화

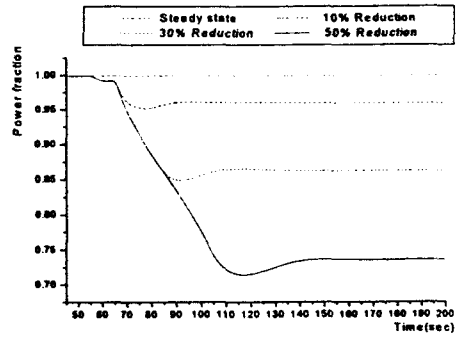


그림 18 냉각 용융열 유량 감소시 출력 분율 변화

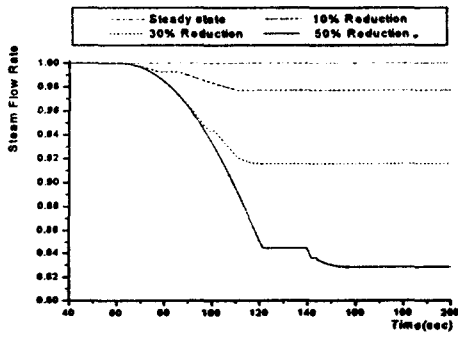


그림 19 냉각 용융열 유량 감소시 증기유량 변화

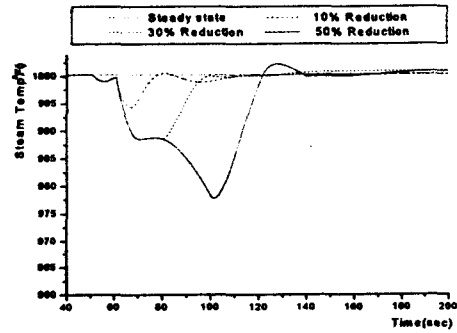


그림 20 냉각 용융열 유량 감소시 증기온도 변화

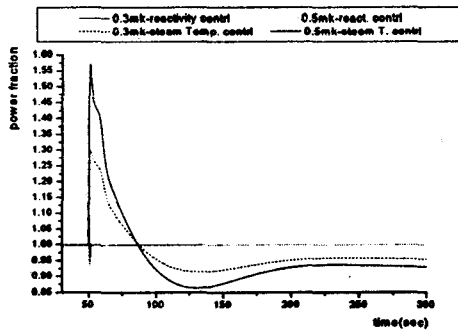


그림 21 노심 반응도 삽입 사고시 두가지 제어방법의 출력 분율 비교

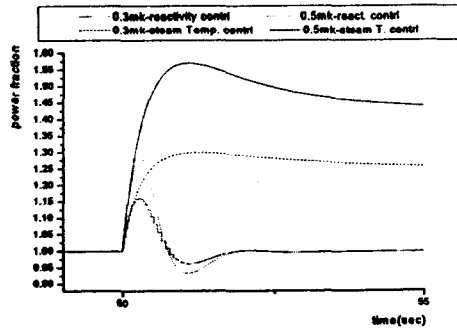


그림 22 노심 반응도 삽입 사고시 두가지 제어방법의 출력 분율 비교(확대)

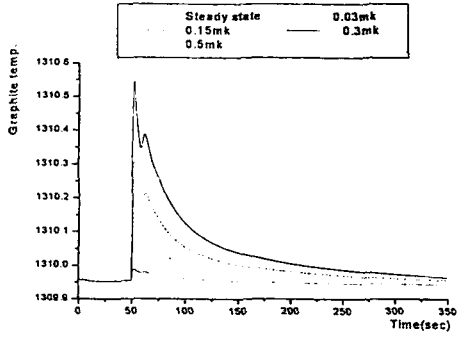


그림 23 노심 반응도 삽입 사고시  
제어봉에 의한 반응도 제어방법시  
흑연 온도 변화

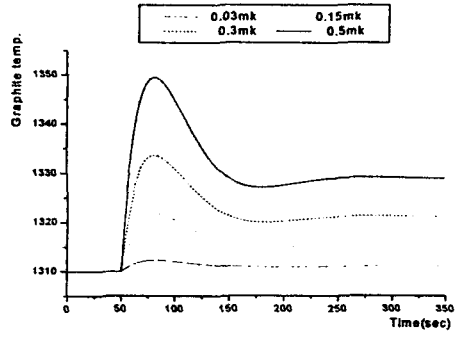


그림 24 노심 반응도 삽입 사고시  
증기 온도 고정제어기 구동시  
흑연 온도 변화

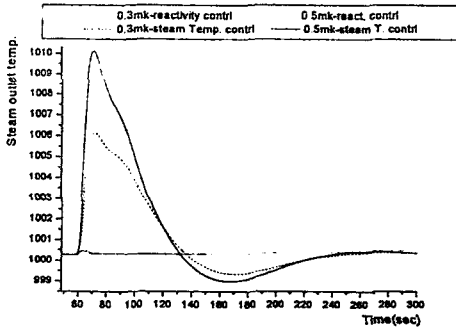


그림 25 노심 반응도 삽입 사고시  
두가지 제어법의 증기온도변화 비교