

한국에너지공학회(2000년도)  
추계 학술발표회 논문집 P139~153

## AMBIDEXTER 시스템 출력제어 모듈 설계에 관한 연구

### The Study on Reactor Power Regulating Modules for the AMBIDEXTER

김태균, 유영진, 김진성, 임현진, 오세기  
아주대학교  
경기도 수원시 팔달구 산 5

#### 1. Introduction

원자력 시스템의 안전성 획득을 위한 제어기기의 설계는 시스템의 동특성 모델에 대한 해석과 정상 운전을 저해할 수 있는 반응도 섭동 평가가 우선되어야 한다. 각 노형에 대한 동특성 모델 해석은 시스템의 고유한 응답특성을 평가할 수 있는 기반을 마련하는 것이며, 정상상태에서의 반응도의 섭동(reactivity perturbation) 평가는 과도 상태에서 시스템의 안전성 및 제어능 평가를 위한 제반 자료를 제공한다.

현재 아주대학교에서 개념설계중인 AMBIDEXTER는 Th-<sup>233</sup>U 핵주기를 이용하는 용융염 핵연료 원자로이며, 내부 배관망을 배제하여 배관망 파손에 의한 사고의 확률을 혁신적으로 감소시킨 일체형 원자로이다. 그림 1에 AMBIDEXTER의 계통도를 도시하였다.

본 연구에서는 용융염 핵연료 AMBIDEXTER의 출력 제어기기 설계를 통한 시스템의 안전성을 평가하고, 예상 가능 반응도 사고 해석을 통한 각 제어기기들의 동작 시나리오를 작성, 확인하고자 한다.

#### 2. Design of Power Control Model

본 연구에서 사용한 시스템 동특성 모델은 선행연구에서 제시하였던 노심 동특성 모델, 붕괴 열출력 모델, 그리고 열/에너지 수송회로의 동특성 해석 모델이다. 노심 동특성 모델은 용융염 핵연료 원자로의 특징을 포함하게 수정된 일점 동특성 방정식으로 구성하였으며, 열출력 모델은 각 핵종의 농도, 붕괴상수, 그리고 평균 감마 에너지를 이용하여 계산하였으며, 열/에너지 수송회로의 동특성 모델은 노심모델과 증기발생기까지의 계통모델을 선택하였다.

##### 2.1 Features of System Reactivity

시간 종속 함수인 반응도는, 일반적으로, 정상상태 보정을 위한 초기 반응도, 궤환효과에 의한 궤환반응도, 제어기기의 동작에 의한 제어기기 반응도, 그리고 외란에 의한 외부 삽입

반응도로 구성이 된다. 하지만 온라인 정화공정에 의해 시스템의 자정·자활성 확보를 설계 목표로 가지는 AMBIDEXTER 원자력 시스템은 반응도 함수에 정화공정기기 처리오차에 의한 반응도 효과분을 추가하여야 한다. 본 연구에서는 위에서 언급한 AMBIDEXTER의 특징적인 반응도 항을 화학적 반응도라 정의하겠다.

### 2.1.1 Reactivity Effects by Treatment Error in Pyrochemical Unit

#### 2.1.1.1 Reactivity Effects by the Partial Error of Isotope Treatment Capabilities

핵종처리를 위한 정화공정기기의 핵종별 반응도 효과는 아래와 같이 평가 할 수 있다.

$$\begin{aligned} d\rho_{chemical}(t) &= \sum \left( -\frac{\partial \rho}{\partial X_i} \right) \left( \frac{\partial X_i}{\partial t} \right) dt, \quad i = \text{정화공정에서 제거되는 핵종} \\ &= \sum \left( -\frac{\partial \rho}{\partial \sum_a} \right) \left( \frac{\partial \sum_a}{\partial X_i} \right) \left( \frac{\partial X_i}{\partial t} \right) dt \\ &= \sum \left( \text{Coff}_{chemical} \right) \left( \sigma_{a,i} \right) \left( \frac{\partial X_i}{\partial t} \right) dt \end{aligned}$$

HELIOS CODE를 통해 평가된 시스템의 화학적 반응도 상수는 표 1과 같으며, 기기별 주요 핵종의 미시 흡수 반응단면적 및 핵종별 처리율은 표 2와 같다. 이중 불활성 가스균은 노심 하단부에서 노내로 유입되는 헬륨 기포에 의해 제거되고, 불활성 및 반불활성 금속은 열교환기의 표면에 흡착되어 제거되며, 희토류 및 할로겐 원소는 정화공정을 통해 처리된다.

#### 2.1.1.2 Reactivity Effects by the Reinsertion Rate Error

자활성 확보를 위한 AMBIDEXTER의 또 다른 방안은 일정량의 핵연료 물질인  $^{233}\text{U}$ 을 재주입하여 핵연료 물질 연소에 의한 반응도의 감소폭을 보상해주는 것이다. 재주입되는  $^{233}\text{U}$ 은 Th의 중성자 포획에 의해  $^{233}\text{Pa}$ 이 자연 붕괴되어 생성되는 것이다. 선행연구 결과로 나타난 AMBIDEXTER의 핵연료 물질  $^{233}\text{U}$ 의 재주입량은 표 2에 나타내었다.

### 2.1.2 Temperature Reactivity Effects

#### 2.1.2.1 Fuel Salt Temperature Reactivity Effects

궤환효과중 핵연료온도변화에 수반되는 반응도의 변화는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$d\rho_{feedback, T_F}(t) = \sum \left( -\frac{\partial \rho}{\partial T_j} \right) \left( \frac{\partial T_j}{\partial t} \right) dt, \quad j = T_F$$

용융염 핵연료의 온도 변화에 따른 반응도 상수는 HELIOS CODE를 이용하여 평가하였

다. 표 3, 그림 2에 그 결과를 모사하였다. 온도 변화율은 앞서 설명한 노심의 열/에너지 균형식을 이용하여 해석할 수 있다. 그림 2를 근사하여, 핵연료 온도변화에 따른 반응도 상수를  $-3.829E-5 d(\rho)/C$ 로 평가하였다.

### 2.1.2.2 Moderator Temperature Reactivity Effects

감속재의 온도계수는 핵연료 온도 반응도 계수 평가와 같은 방법으로 해석할 수 있다.

$$d\rho_{feedback, T_c}(t) = \sum \left( -\frac{\partial \rho}{\partial T_j} \right) \left( -\frac{\partial T_j}{\partial t} \right) dt, \quad j = T_G$$

근사 곡선 및 결과 값은 표 4, 그림 3에 정리하였다. 이를 이용한 감속재 온도변화에 따른 반응도의 상수는  $4.69017E-6 d(\rho)/C$ 로 평가되었다.

본 장에서는 각 반응도 계수에 대한 정량적인 평가를 수행하였다. AMBIDEXTER 시스템은 반응도 평가 결과, 기존의 상용로에 비해 높은 부(-)반응도 효과를 가지는 것으로 확인되었다. 표 5에 본 연구에서 평가된 각 반응도 계수 값을 나타내었다.

## 2.2 Design of Reactivity Control Mechanism

### 2.2.1 Regulator Rod Design

반응도 삽입에 대한 시스템의 정상운전을 위해 고려중인 조절봉의 설계는 두 가지 측면에서 연구되어야 한다. 첫째, 조절봉 삽입 속도에 대한 평가이며, 둘째는 조절봉 삽입 위치에 따른 노내에 미치는 반응도 효과에 대한 평가이다.

현재 AMBIDEXTER에서 고려중인 조절봉은 노심 용기 상부의 원통형 계측기드럼 속에 위치하며, 설정출력과 노심출력의 차이인 유효출력오차 값이 발생하는 경우 동작하는 것으로 가정하였으며, 조절봉의 속도는 상수값으로 설정하였다.

조절봉의 삽입에 따른 반응도 효과는 축방향 중성자속 분포 해석에서 출발하여야 한다. 선행연구의 결과를 바탕으로 AMBIDEXTER 노심의 축방향 중성자속 분포는 Cosine 함수로 가정할 수 있다. 이 경우, 횡방향 중성자속에 대한 영향은 고려하지 않았다. 축방향 중성자속을 Cosine 함수로 가정한 경우, 조절봉의 삽입 위치에 따른 반응도 효과는 아래와 같이 평가할 수 있다.

$$\rho_w(x) = \rho_w(H) \left[ \frac{x}{H} - \frac{1}{2\pi} \sin \left( \frac{2\pi x}{H} \right) \right]$$

여기서,  $\rho_w(x)$  : 조절봉 삽입 위치에 따른 반응도 양,

$\rho_w(H)$  : 조절봉이 최대로 삽입되었을 때의 반응도,

$x$  : 조절봉 첨두의 삽입 위치,

$H$  : 노심 높이.

조절봉의 운전을 위한 경계조건은 아래와 같다.

$$P_{error}(t) = ( P_{Demand} - P_{Total}(t) )$$

여기서,  $P_{error}(t)$  : 출력 에러,

$P_{Demand}$  : 출력 설정값,

$P_{Total}(t)$  : t 시간의 전체 출력.

## 2.2.2 Bypass Valve Design in Intermediate Heat Transport System

중간 열/에너지 수송회로내의 우회류 유량조절 밸브를 통한 반응도 효과는 2차 열/에너지 수송회로의 유량 제어를 통해 얻어진다. 우회류 유량조절 밸브는 시스템의 안전정지출력과 출력의 증가폭을 고려한 함수로 구성되며, 2차측의 열충격을 최소화하기 위해 그 용량을 1% 이하로 고정하였으며, 본 연구에서는 밸브의 개폐 시간에 대한 기계적인 움직임은 고려하지 않았다. 우회류 유량조절 밸브의 해석을 위한 수식은 아래와 같다.

$$C_{valve} = f ( P_{limit}, dP )$$

## 3. Simulation

### 3.1 Control Matrix of AMBIDEXTER

원자력 시스템은 각 구성 기기들의 운전 상태에 따라 동작 모드를 크게 아래와 같이 네 가지로 구분한다. 일체형 용융염 핵연료 AMBIDEXTER 역시 아래와 같이 네 가지의 운전 모드를 가진다.

1) Normal Operation ( Condition I ) : 정지상태 혹은 정상 운전상태를 의미하며, 설계범위 안의 출력 천이를 포함하여, 시스템은 계획된 작업을 수행하고 있는 상태여야 한다.

2) Upset Condition ( Condition II ) : 시스템의 전 운전기간동안 빈번히 발생할 수 있는 계획되지 않은 상태를 의미한다. 이 경우 정상상태 운전을 저해할만한 기계적 고장이나, 지속적인 효과에서도 시스템은 견뎌야 한다. 이 상태에 대한 예는 아래와 같다.

- Uncontrolled Control Rod Withdrawal
- Partial Loss of Molten Salt
- Loss of Load
- Loss of Offsite Power
- Excessive Heat Removal

- Control Rod Drop
- Bypass Valve Failure
- Steam Line Break
- Loss of Coolant Salt Circulation

3) Emergency Condition ( Condition III) : 시스템의 전 운전기간동안 극소수 발생할 수 있는 계획되지 않은 사고 상태를 의미한다. 이러한 사고의 예는 아래와 같다.

- Complete Loss or Interruption of Molten Salt Flow at 100% Power
- Minor Fuel Handling Accident

4) Faulted Condition ( Condition IV) : Loss of Molten Salt Accident (LOMSA), SSE와 LOMSA의 결합사고, 그리고 중요한 핵연료 취급 사고를 의미한다. 다음과 같은 사고는 이 경우에 해당한다.

- SSE
- Loss of Molten Salt Accident
- Locked Reactor Coolant Pump Rotor
- Major Secondary System Pipe Rupture
- Control Rod Ejection
- Major Fuel Handling Accident

AMBIDEXTER 원자로의 운전모드를 결정하기 위한 대응 제어 논리 행렬은 표 6에 표시하였다.

## 3.2 Analysis of Considerable Scenarios

### 3.2.1 System Response Characteristics by External Reactivity Insertion

외부 반응도 삽입에 따른 시스템의 응답특성을 확인하기 위해서 계단 및 선형 외부 반응도 삽입에 대한 시스템의 천이상태를 살펴보았다. 선행연구에서 확인하였던 시스템의 출력 및 온도의 빠른 천이에 대해, 설계상 고려 가능한 반응도 섭동에 대해 다시 해석한 결과를 그림 4-7에 모사하였다.

### 3.2.2 System Response Characteristics by Treatment Errors in Pyrochemical Unit

정화공정 기기내의 핵종처리능 변동에 의한 효과는 처리능 부분상실과 과다처리, 그리고 핵연료 물질인  $^{233}\text{U}$ 의 주입률 변화를 나누어서 고려할 필요가 있다. 화학적 처리 오류로 인한 핵종처리능 부분상실은 노심으로 재유입되는 용융염에 과다한 핵분열후 생성물질이 함유되어 노심의 정상상태를 저하하는 효과로 나타난다. 이에 대한 결과는 그림 8, 9에 도시하였다. 이때 10%의 정화공정 오류에서도 안전정지 출력 (안전정지 상수 : 1.15) 287.5 [MWth]

이 나타나지 않았다. 또한 10초후 출력은 즉시 감발되어 재 정상상태를 이루었고, 온도 역시 3 °C 이내에서 그 변동폭이 한정되었다. 공정기기 내에서의 핵종 과다처리로 인한 화학적 반응도의 증가는 보다 긴 시간 지연을 나타내었다. 출력 및 온도 천이는 각각 25 [MWth], 3 °C 이내에서 나타났다. 이에 대한 결과는 그림 10, 11에 모사하였다.

핵연료물질 재주입에 대한 효과는 핵연료물질 재주입 방식에 대한 고려에서 출발하여야 한다. 재주입 방식으로는, 일정량의 핵연료물질을 지속적으로 노내에 재주입하는 방식과, 일정시간 간격으로 노내에 재주입하는 두 가지의 방식을 고려할 수 있다. 반응도 관점에서 일정량의 용융염을 지속적으로 노내로 재주입하는 방법은 기계적 사고를 줄일 수 있지만, 오류 발생시 큰 반응도의 섭동을 가질 수 있고, 일정 시간 간격으로 핵연료물질을 노내로 재주입하는 방식은 기계적인 사고의 확률은 상대적으로 높지만, 기계적 결함에 의한 반응도의 섭동을 줄일 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 핵연료 물질의 재주입을 연속모드로 가정하고 해석하였다. 10초 동안의 핵연료물질 재주입을 증가 및 감소에 따른 시스템의 과도특성을 그림 12-15에 표시하였다.

### 3.2.3 Sensitivity Analysis of Regulator

먼저 조절봉의 최대 삽입량에 대한 시스템의 민감도 분석을 수행하였다. 조절봉의 최대 반응도 삽입을 10 cent부터 5 dollar까지 변화시키며, 출력비 80%, 50%, 30%에 대한 해석의 결과를 그림 16-23에 도시하였다. 이때 제어봉의 삽입 속도는 14 cm/sec(노심 삽입시간 20초)로 가정하였다. 표 7에는 각 출력 감발에 따른 출력천이 후 재정상상태까지 걸리는 시간을 나타내었다. 예상과는 달리 조절봉 최대 반응도에 따른 급격한 열충격은 나타나지 않았다. 이로 인해, 최대 조절봉의 반응도 량은 고려할 수 있는 최대의 값으로 볼 수 있지만, 기계적인 미미한 진동에도 많은 반응도 효과를 예측할 수 있다. 따라서, 최대 반응도량 3 dollar의 조절봉을 설계 기본으로 택하였다.

3dollar의 조절봉의 동작 속도에 따른 50% 출력감발 경우에 대해 해석한 결과를 그림 13-16에 도시하였다. 조절봉의 동작속도는 노심 최대 삽입 시간을 기준으로 40 sec, 20sec, 10sec, 5sec, 그리고 2.5 sec의 경우에 대해서 비교하였다. 각 시간을 속도로 표시하면, 노심의 높이가 280cm 이므로, 각각 7, 14, 28, 56, 112 cm/sec으로 평가된다. 이때 정상상태 재복귀 시간을 표 8에 나타내었다. 결과에서 보듯이 조절봉의 이동속도가 28 cm/sec 이상을 가질 경우, 시스템의 조절봉에 대한 민감도가 커져 조절봉의 동작이 진동함을 볼 수 있다. 따라서 기계적인 움직임 및 시스템의 조절봉에 대한 민감도를 고려할 때 28 cm/sec 이상의 값은 배제되어야 할 것이다.

### 3.2.4 System Response Characteristics by Bypass Flow Valve Control

AMBIDEXTER에 고려된 제어기기들중 우회류 밸브를 이용하여 시스템의 안정성 확인을 위한 해석을 수행하였다. 먼저 우회류 밸브의 효과를 평가하기 위해 선형 반응도 삽입 및 계단 반응도 삽입에 따른 냉각열의 10% 우회를 가정하고 시스템의 응답특성을 그림 24-27에 도시하였다. 두 가지 반응도 삽입사고 모두 출력의 감발과 수렴을 보였으나, 노심 평균온도의 진동은 노심 구조물에 상당한 열충격을 가할 것으로 보인다.

상기의 데이터를 바탕으로 침니와 정화기에서의 최대 허용 오차를 0.1%, 0.5%로 가정하였을 경우, 시스템의 출력은 설계시 고려된 안전정지출력을 넘지 않는 것으로 평가되었다. 이에 대한 구조재의 열충격을 평가하기 위해, 우회류 밸브의 용량을 변화시키며 과도응답을 평가하였다. 상기의 평가로부터 우회류 밸브용량 0.1%가 최적의 값을 보였다. 이때 밸브작동을 고려하지 않은 경우에 비해 최대 10초 이상의 빠른 응답효과를 가져왔으며, 출력의 변동은 5% 미만을 나타내었다.

#### 4. Conclusion

일체형 용융염 핵연료 원자로 AMBIDEXTER는 일정량의 용융염을 우회처리하여, 설계 개념인 자활·자정 능력을 보유한다. 정상상태에서 가질 수 있는 최대 정화능 오차에 대한 개략적인 평가를 통해, 정상운전중 안정성 확보를 위한 정화기기들의 최대 섭동치를 선정하였으며, 이에 따른 시스템의 과도응답 특성을 해석하였다. 운전중 안정성 확보를 위한 각 기기의 최대 허용 오차를 커버그스 시스템과 정화기기 내를 가가 0.1%, 0.5%로 설정하였다. 시스템의 고유안정성 확보를 위해 제어봉의 사용을 피하였고, 중간열교환 경로내의 우회류 밸브 개념을 도입하여 신속한 감폭응답을 실현하였다. 또한 AMBIDEXTER의 설계 특성을 고려한 조절봉의 민감도 분석을 통해, 최대 삽입 반응도 3 dollar, 최대 이동 속도 28 cm/sec의 기계적 특성을 가지는 조절봉을 설계값으로 설정하였다. 또 다른 반응도 제어기기로 고려된, 우회류 밸브의 동작을 출력에 대한 함수로 수정하여 보다 높은 시스템의 안정성 획득을 기대할 수 있을 것이다.

추후 AMBIDEXTER 모델의 붕괴열 출력에 대한 정량적인 해석과 부하추종운전을 위한 우회류 밸브의 개선을 통해, AMBIDEXTER가 보다 강화된 안전성을 가지기 위한 제어기기의 평가를 수행하여야 할 것이다.

#### 5. Reference

- 1) 오세기, 정근모, 원성희, 임현진, 조재국, “핵적 자정·자활 능력을 갖춘 용융염 원자력 보일러 시스템의 개념 설계에 관한 연구, ’97 원자력 기초연구과제 최종 보고서”, 과학기술부, 1997
- 2) 오세기, 정근모, 원성희, 임현진, 조재국, “AMBIDEXTER 원자력 보일러시스템의 노심 관리 및 반응도 효과 연구”, ’98 원자력 기초연구과제 최종 보고서’, 과학기술부, 1998
- 3) 오세기 외, “다단계 연속후처리를 포함하는 핵주기공정의 핵종농도 동적분포해석 코드개발(I) - 정상 평형상태 해석모델”, 99전력기술기초연구, 전력기술기초연구소, 2000. 9
- 4) 원성희, “SAMS : 가변 재처리 시간상수를 고려한 용융염핵연료 원자로 평형핵종농도분석 코드“, 공학석사 학위논문, 아주대학교, 1999
- 5) 임현진, “AMBIDEXTER 열수송 시스템의 개념설계에 관한 연구”, 공학석사 학위논문, 아주대학교, 1999
- 6) 조재국, “AMBIDEXTER 원자로 노심의 핵적자활성 최적화 설계 연구”, 공학석사 학위논문, 아주대학교, 1999
- 7) 조재국, 원성희, 임현진, 김태규, 오세기, “250MWth AMBIDEXTER 노심의 반응도 특

- 성 및 출력 분포 해석”, 한국 에너지공학회, 추계학술발표회 논문집, 1998
- 8) 김태규, 윤정선, 원성희, 임현진, 조재국, 오세기, “용융염 핵연료 원자로 AMBIDEXTER의 동특성 해석”, 한국 에너지 공학회 춘계학술 발표회 논문집, 1999
- 9) 김태규, 오세기, 김용희, 박원석, “미입계 원자로 HYPER 시스템의 동특성 해석”, 한국 에너지 공학회 춘계학술 발표회 논문집, 2000
- 10) Combustion Engineering, “System 80+ Standard Design”, Combustion Engineering, 1993
- 11) S.K. Oh and K.M. Chung, AMBIDEXTER Nuclear Complex: A Practical Approach for Rekindling Nuclear Energy Application , Proc. of SMiRT-15, Seoul, Korea, August 15-20, 1999
- 12) S.K. Oh and K.M. Chung, Eligibility of the AMBIDEXTER Nuclear Complex for a Generation IV Nuclear Power System , The 15th KAIF/KNS Annual Conference Seoul, Korea, April 19-20, 2000
- 13) Paul R. Kasten, Safety Program For Molten-Salt Breeder Reactors , ORNL-TM-1858, 1967
- 14) J. R. Tallackson, MSRE Design and Operations Report Part 2.A, Nuclear and Process Instrumentation , ORNL-TM-729, ORNL, 1968
- 15) R. C. Steffy, Jr., Theoretical Dynamic Analysis of the MSRE with 233U Fuel ,ORNL-TM-2571, ORNL, 1969
- 16) W. H. Sides, Jr., “Control Studies Of A 1000-Mw(e) MSBR , ORNL-TM-2927, 1970
- 17) W. H. Sides, Jr., MSBR Control Studies: Analog Simulation Program , ORNL-TM-3102, 1971
- 18) E. E. Lewis, “Nuclear Power Reactor Safety”, John Willey & Sons, 1977
- 19) Karl O. Ott, Robert J. Neuhold, “Nuclear Reactor Dynamics”, American Nuclear Society, 1985



[표 1] 핵종처리 및 재주입 반응도 계수

반응도 계수	Thermal	Epi-Thermal	Fast	Total
정화공정 핵종처리	-0.30095	-0.12891	-0.00638	-0.4365
핵연료물질 재주입	0.32346	0.05209	n/a	0.3757

[표 2] 주요 정화처리 및 주입 핵종의 특성표

\* : Microscopic Fission Cross Section [barn]

화학적 반응도 상수	핵종	미시흡수 반응단면적 [ $\text{cm}^2$ ]	처리율 [#/cc]
<b>처리핵종</b>			
-0.4365	Kr-87	4.25E-23	3.54E+10
	Xe-135	8.18E-20	6.48E+09
	Mo-100	6.44E-25	7.83E+10
	Zr-93	1.53E-24	2.67E+04
	Pr-143	1.11E-23	1.82E+04
	Nd-145	1.63E-23	4.90E+00
	Nd-146	1.06E-23	1.17E+05
	Pm-147	7.68E-23	6.66E+02
	Sm-150	1.45E-23	2.91E+02
Sr-90	5.41E-26	8.88E+04	
<b>주입핵종</b>			
0.3757	U-233	4.53E+01*	2.82E+13

표 3. 용융염 핵연료 온도 변화에 따른 유탄중배계수와 반응도 변화

Fuel Salt Temp [F]	$\Delta T_F$	$K_{eff}$	$\rho$
1165	-10	0.991478	-0.0086
1170	-5	0.99129	-0.00879
1173	-2	0.991179	-0.0089
1175	0	0.991102	-0.00898
1177	2	0.991025	-0.00906
1180	5	0.990914	-0.00917
1185	10	0.990726	-0.00936

표 4. 감속재 온도변화에 따른 유탄중배계수와 반응도의 변화

Graphite Temp [F]	$\Delta T_G$	$K_{eff}$	$\rho$
1215	-10	0.99106	-0.00903
1220	-5	0.99108	-0.00900
1223	-2	0.99110	-0.00899
1225	0	0.99110	-0.00898
1227	2	0.99111	-0.00897
1230	5	0.99113	-0.00895
1235	10	0.99115	-0.00893

[표 3.10] AMBIDEXTER 반응도 계수

반응도 계수	계수값
$\rho_{Fuel} [d\rho/dT_{Fuel}]$	-3.82948E-5
$\rho_{Graphite} [d\rho/dT_{Graphite}]$	4.69017E-6
$\rho_{Chemical,i} [d\rho/d\Sigma_a]$	-0.30104 * $\sigma_{ai}$

[표 6] AMBIDEXTER 대응 제어 논리 행렬

\*: Anticipated Occurrence Operation Condition ; In AMBIDEXTER, AOO case is represented by out of order of on-line processing unit.

**Regulating Modes**

A: Regulating Rod Insertion

B: By Pass Loop Valve Control

C: Reactivity Driven Rod Insertion

**Safety Actions**

D: Safety Rod Insertion

E: Fuel Salt Dump Valve Control

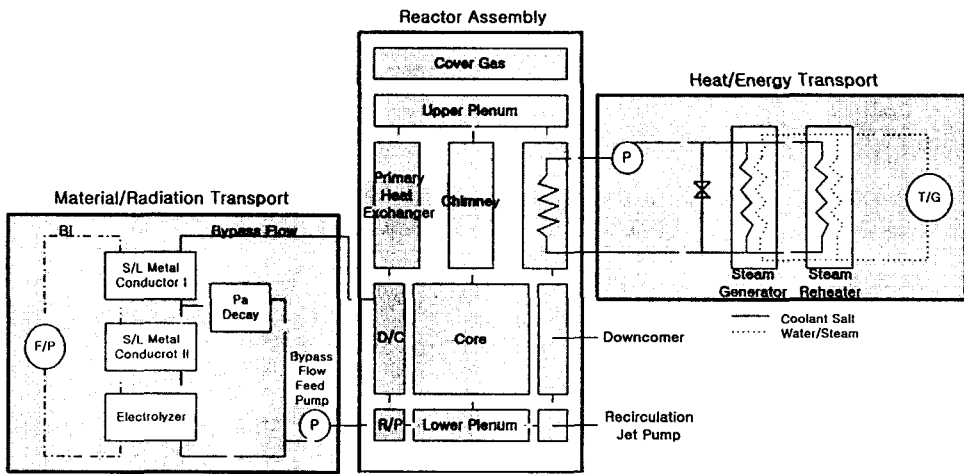
Condition				Normal Condition	*AOOC	ACCIDENT	
						Emergency Condition	Faulted Condition
Process Failure							
Reactivity Accident	Positive	Fuel Handling Accident	Over-treatment Fuel salt	A	A, B		
			Re-injection excess U	B	A, B		
			Re-injection Cold Fuel Salt	B	A, B		
		Cold lag		B	A, B	D	D, E
		Channel Blocking Accident	Partial	B	A, B		
	Entire				D	D, E	
	Negative	Fuel Handling Accident	Pipe/Process Accident		C	D	
			Re-injection Scarce U		C	D	
		Cover Gas System Failure			C		
		Regulating Rod mechanic Failure			C	D	
Loss of Cooling	Loss Of Heat Sink	Partial		B	C		
		Entire				D	D, E
	Loss Of Coolant	Partial		B	C		
		Entire				D	D, E
	Loss Of ShutDown Cooling	Temporary Shutdown Cooling System Failure				D	D, E
		Ordinary Shutdown Cooling System Failure				D	D, E

[표 7] 출력 감발에 따른 각 최대 반응도 삼입치별 정상상태 재복귀 시간

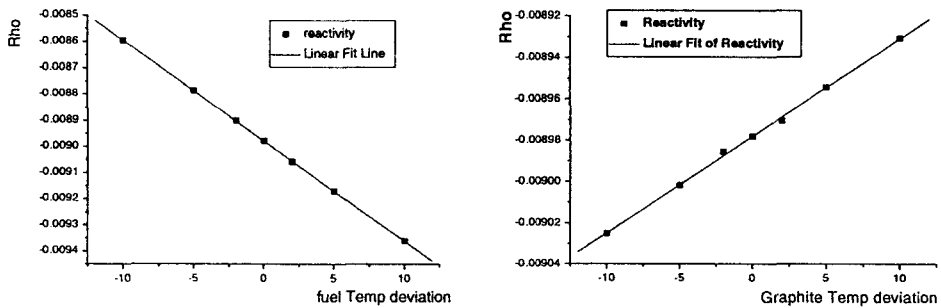
정상상태 재 복귀 시간 [sec]					
반응도 최대 삼입량	10 cent	50 cent	1 dollar	3 dollar	5 dollar
출력 감발율					
20 % Power Degradation	65.13	20.32	13.01	7.79	6.57
50 % Power Degradation	41.02	12.74	11.23	7.12	532
80 % Power Degradation	15.87	7.88	6.11	4.39	3.78

[표 8] 50% 출력 감발 시 조절봉 이동 속도에 따른 정상상태 재복귀 시간

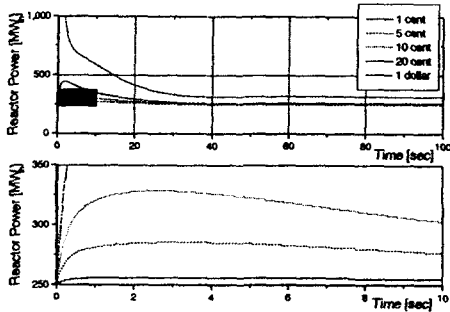
정상상태 재 복귀 시간 [sec]					
조절봉 이동 속도 [cm/sec]	7	14	28	56	112
50 % Power Degradation	1.22	2.09	3.35	6.02	11.4



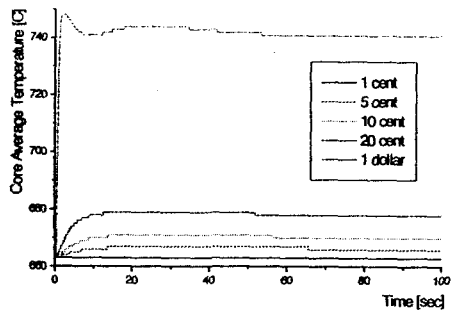
[그림 1] AMBIDEXTER 원자력 복합체 계통도



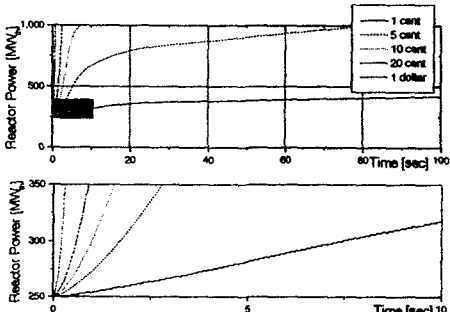
[그림 2] 핵연료 온도 변화에 따른 반응도의 변화 [그림 3] 감속재의 온도변화에 따른 반응도의 변화



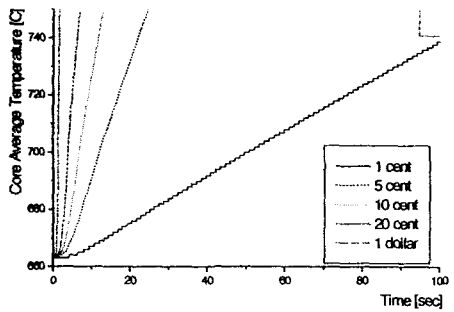
[그림 4] 계단 외부반응도 삽입에 의한 출력 천이



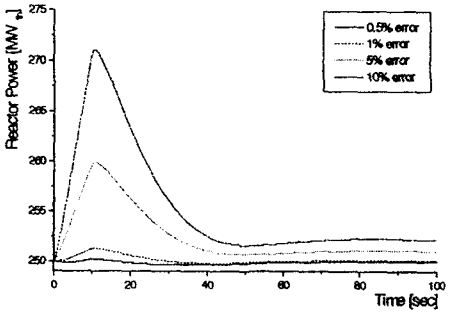
[그림 5] 계단 외부반응도 삽입에 따른 노심 평균 온도 천이



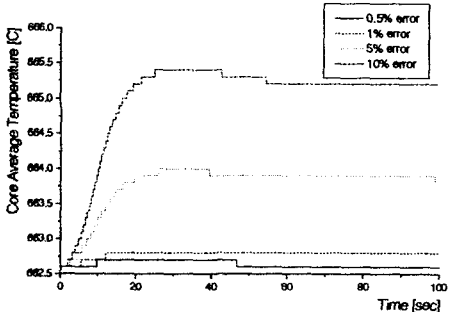
[그림 6] 선형 외부반응도 삽입에 의한 출력 천이



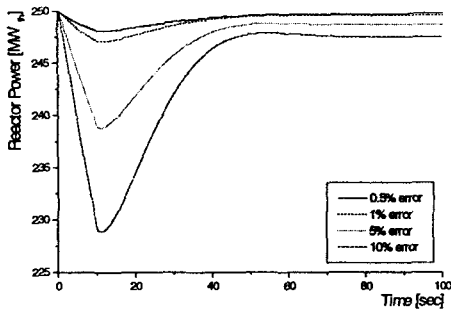
[그림 7] 선형 외부반응도 삽입에 따른 노심 평균 온도 천이



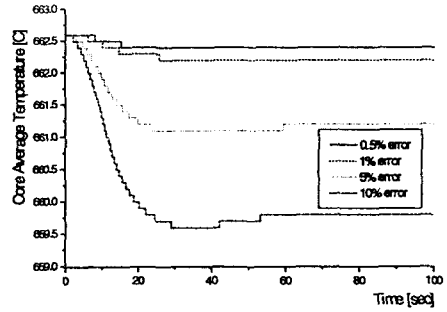
[그림 8] 핵종처리능 부분 상실에 의한 출력천이



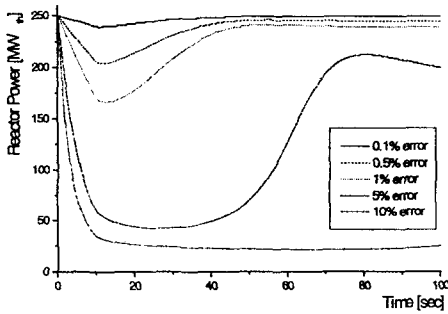
[그림 9] 핵종처리능 부분 상실에 의한 노심 평균 온도천이



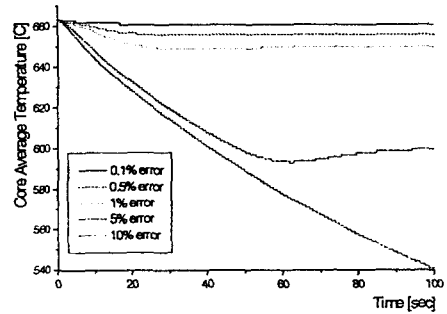
[그림 10] 핵종 과다처리에 의한 출력천이



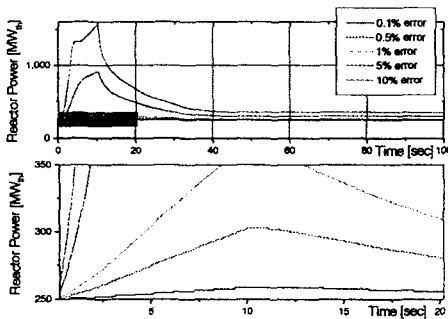
[그림 11] 핵종 과다처리에 의한 노심평균 온도천이



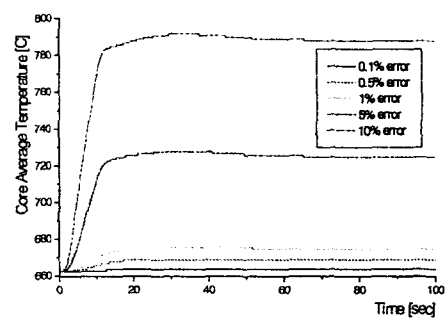
[그림 12] 핵연료물질 재주입 감소에 의한 출력천이



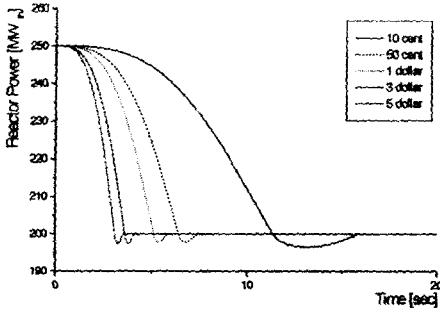
[그림 13] 핵연료물질 재주입 감소에 의한 노심평균 온도천이



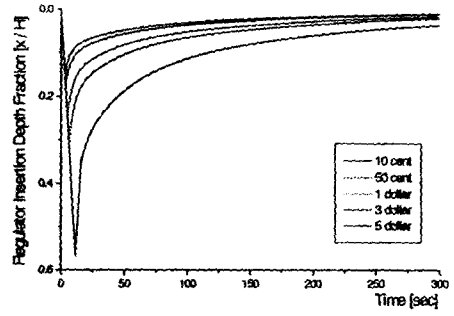
[그림 14] 핵연료물질 재주입 증가에 의한 출력천이



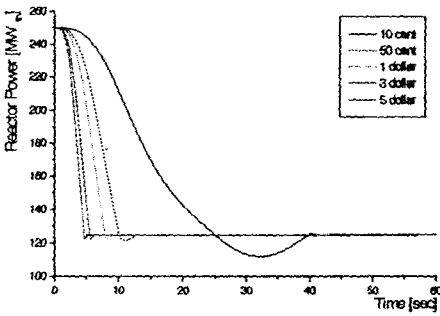
[그림 15] 핵연료물질 재주입 증가에 의한 노심평균 온도천이



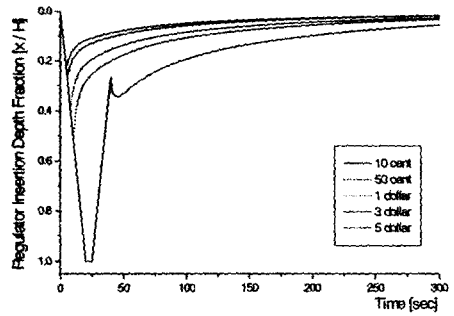
[그림 16] 조절봉 최대 반응도에 따른 20% 출력 감발시 출력 전이



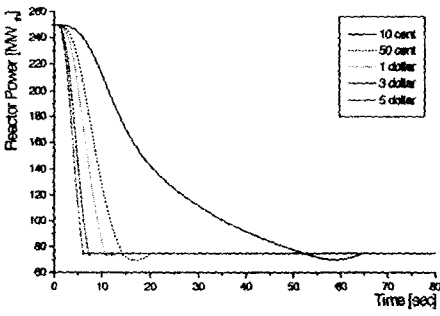
[그림 17] 조절봉 최대 반응도에 따른 20% 출력 감발시 조절봉 삽입양



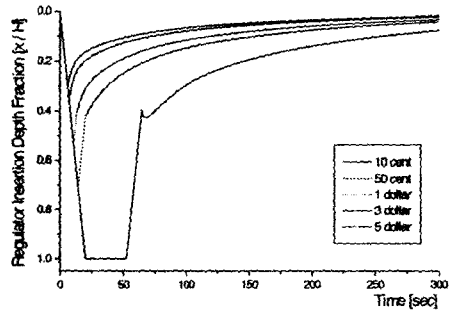
[그림 18] 조절봉 최대 반응도에 따른 50% 출력 감발시 출력 전이



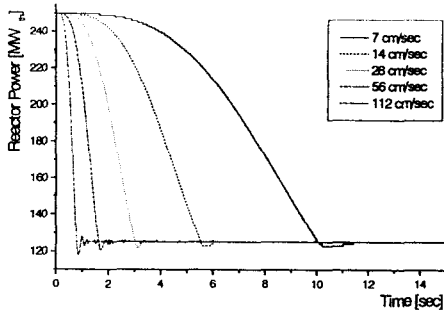
[그림 19] 조절봉 최대 반응도에 따른 50% 출력 감발시 조절봉 삽입양



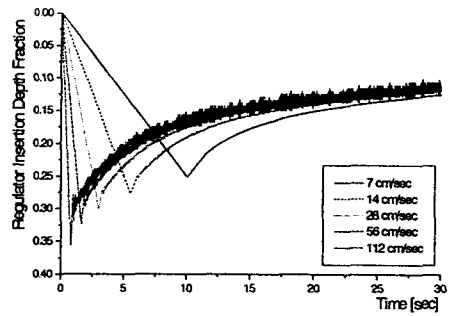
[그림 20] 조절봉 최대 반응도에 따른 70% 출력 감발시 온도 전이



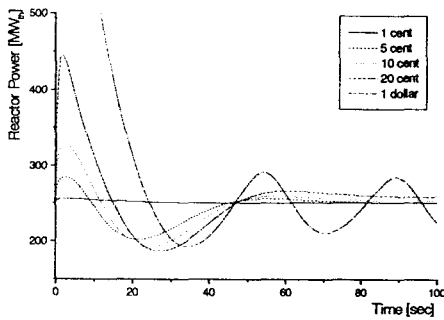
[그림 21] 조절봉 최대 반응도에 따른 70% 출력 감발시 조절봉 삽입양



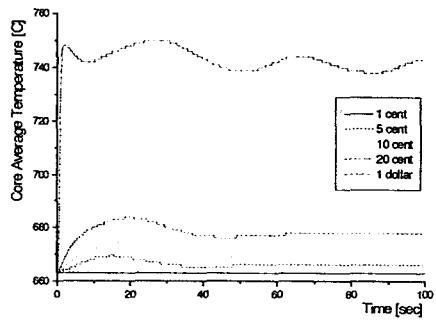
[그림 22] 조절봉 삽입 속도에 따른 50% 출력 감발시 출력 천이



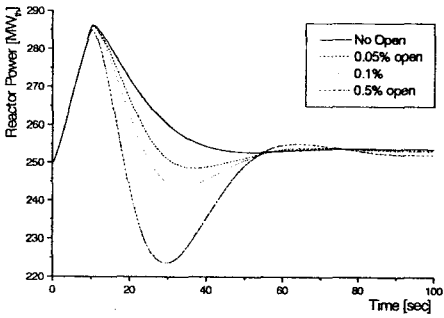
[그림 23] 조절봉 삽입 속도에 따른 50% 출력 감발시 조절봉 삽입량



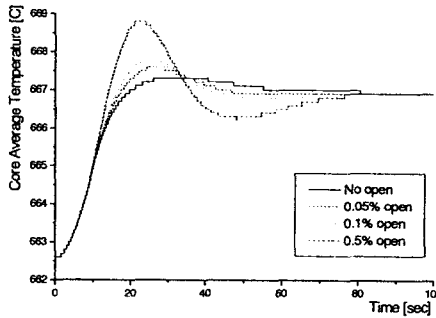
[그림 24] 우회류밸브를 사용한 시스템의 계단반응도 삽입에 따른 출력천이



[그림 25] 우회류밸브를 이용한 시스템의 계단 반응도 삽입에 따른 노심평균 온도천이



[그림 26] 최대허용 핵종처리 반응도 삽입에 대한 우회류밸브 용량에 따른 출력천이



[그림 27] 최대허용 핵종처리 반응도 삽입에 대한 우회류밸브 용량에 따른 노심 평균온도 천이