한국에너지공학회 (2002년도)
춘계 학술발표회 논문집 P9-20

AMBIDEXTER 원자력 복합 에너지시스템의 출력 자동조절 특성 평가 연구

김진성, 이영준, 유영진, 오세기
아주대학교

Evaluation of Some Self-Regulation Characteristics of the AMBIDEXTER Nuclear Energy Complex

JinSung Kim, YoungJoon Lee, YeongJin Yu and SeKee Oh
Ajou University

1. 서론

기존의 원자력 발전기술이 안고 있는 대부분의 고유한 문제점인 핵안전성, 핵확산방지 및 핵폐기물 관리 문제는 물론 더 나아가 국내의 핵원료자원의 공급안정과 원자력에 대한 국민적 신뢰성 회복을 비롯하여 원자력의 평화적 이용확대를 위해 필수적으로 고려해야할 사항들을 반영한 새로운 개념의 250 MW_{th} 실증로급 AMBIDEXTER(Advanced Molten-salt Break-even Inherently-safe Dual-missioning EXperimetal and TEst Reactor) 원자력 에너지 시스템을 현재 개념 설계 중에 있다.

(Th, U, Pu)F_4 용융염을 핵연료 물질로 사용하는 AMBIDEXTER 원자력 시스템은 원자로계통 전체가 원자로 압력용기안에 일체형으로 내장되었으며 이로부터 열·에너지 수송회로와 물질·방사선 수송회로가 각각 분리, 혼합된 복합 원자력에너지시스템으로서 설계목표인 핵적 자활·자정능의 확보를 위해 핵분열 생성물질의 처리 및 핵연료 물질의 재주입을 담당하는 온라인 정화공정 기기로 노내 용융염의 일정량을 우회 처리한다. 이러한 폐쇄 핵연료 주기(Closed-Fuel-Cycle) 개념은 정교한 핵물질관리 및 운전전략을 필요로하고 운전중 탈설계조건이 발생할 경우 조속한 원상 회복능력이 중요하다. 그러므로 개념설계 단계에서 예상할 수 있는 각종의 비정상 초기 조건에 대한 시스템의 대응 천이 상태를 시뮬레이션하여 탈설계조건 범위를 분석하고 빠른 회복에 필요한 출력 조절 방법을 개발해야한다.

이에 따라, 본 연구에서는 출력 및 지발중성자 출력분율 변화에 대한 다영역 노심 일점동특성 방정식, 노심과 우회류 밸브를 포함하는 내장형 열교환기로 구성된 1차 계통의 열전달 방정식, 그리고 증기발생기와 증기재열기로 구성된 중간 열전달 계통의 열전달 방정식을 적용하여 Matlab의 Simulink를 이용한 시뮬레이션 모델을 구성하고 제어기기가 없는 상황하에서 부하변동, 원자로계통 천이, 중간열전달계통 천이, 반응도 삽입과 같은 각종의 예상 및 가상 운전시나리오에 대한 시뮬레이션을 수행하여 나온 결과 자료를 확인·분석하여, 그에 따른 안전성 확보와 최적의 부하추종 운전방법론에 대한 기본 개념을 제시하였다.

2. AMBIDEXTER 원자로 시스템 모델링

2-1. AMBIDEXTER 열수송시스템 개요

AMBIDEXTER 일수송시스템은 1차 열전달계통으로서 일체형 원자로시스템, 중간 열전달계통으로서 냉각용융염 순환회로, 그리고 2차 열전달계통으로서 증기터빈을 구동하기 위한 증기발생기를 경계로 물/증기 순환회로로서 3단의 폐회로계통으로 [그림 1]과 같이 구성되어있다.

일체형 원자로의 핵연료용융염은 노심과 내장형 열교환기를 중심으로 침니 및 다운컴머로 구성되는 계통을 일정 유량을 유지하면서 순환하며, 중간열수송계통은 냉각용융염을 고온유체로 하는 초임계 증기발생기와 증기재열기로 구성된다. AMBIDEXTER 원자력 시스템 개념도를 [그림 2]에 나타내었다.

이와 같이 구성되어있는 AMBIDEXTER 열수송시스템은 MSBR 열교환기 규격설계코드를 이용한 선행 연구를 통하여 구성이 되어있는 상태이며, 선행 연구자료 및 MSBR 모델을 기반으로 하여 각 기기에 대한 Simulink 모델을 이번 연구를 통하여 구성하였다. 일체형 원자로 모델은 핵연료용융염의 계통순환 특성을 고려한 노심 일점동특성 방정식 및 핵연료용융염과 흑연감속재간의 열전달방정식, 중간 열전달계통 모델은 핵연료용융염과 냉각용융염간의 열전달방정식, 그리고 2차 열전달계통은 냉각용융염과 증기간의 열전달방정식을 이용하여 Simulink 모델을 구성하였으며, 각 기기에 대한 모델링은 아래와 같다.

2-2. AMBIDEXTER 시뮬링크 모델링

가. 노심 일점 동특성 모델 및 노심 열전달 모델

노심은 육각형의 흑연 구조체의 중심을 핵연료가 지나가는 격자를 기본으로 구성된 원통형 구조이다. AMBIDEXTER는 주로 열출력을 담당하는 씨드 격자와 핵연료 전환을 담당하는 블랑킷 격자의 이종 격자로 구성되어있다. 본 연구에서는 열전달 현상 및 물리적 특징들을 효과적으로 구현하기 위하여 [그림 3]과 같이 가로 방향으로는 격자와 출력 분포를 고려하여 4개의 영역으로 나누었고 세로 방향으로는 출력 분포를 고려하여 영역별로 펌프수를 다르게 구성하였다. 핵연료용융염은 노심 중앙으로부터 블랑킷격자 영역(1영역)과 씨드격자 영역(2영역)은 온도 변화 폭이 클 것으로 예상되어 각 영역을 6개의 펌프로 나누었으며 노심 바깥쪽의 씨드격자 영역(3영역)은 4개의 펌프, 가장 바깥의 블랑킷격자 영역(4영역)은 온도 변화가 가장 작을 것으로 예상되어 2개의 펌프로 나누었다. 흑연 감속재의 구성은 각 영역의 핵연료용융염 구성의 펌프 수의 반으로 구성하였다. 이 때 각 영역에서 핵연료와 흑연의 비열, 밀도, 그리고 질량은 일정하다고 가정하였다. 또한 흑연감속재와 핵연료용융염 사이에 적용된 열전달 계수는 ORNL-4541의 자료를 기반으로 하여 축방향으로 중심영역과 외곽영역에 각기 다른 열전달계수를 적용하였다.

노심에 적용된 지발 중성자는 6군의 그룹으로 가정하여 사용하였으며 노심 영역별 핵연료용융염 유량은 정상상태의 출구 온도가 일정한 값을 유지하도록 챤넬 하단에 오리피스(Orifice)를 설치하였다고 가정하여 계산하였다. 이러한 다영역 원자로 계통에서 노심 거주시간과 계통 순환시간을 별도로 고려하였다. 핵연료의 순환에 따라 지발 중성자의 시간에 따른 농도 변화 핵분열에 의한 생성분과 붕괴에 의한 분열 뿐 아니라 정화공정으로 우회되는 계통 유량을 고려하여 계통 내 재순환하는 유량을 재조정하였다. 주요 핵분열 물질인 ^{233}U, ^{235}U, ^{239}Pu의 지발 중성자의 붕괴 상수는 대부분 그룹별로 오차 안에 있으므로 가장 주된 핵분열 물질인 ^{233}U의 붕괴 상수를 사용하였다. 지발 중성자 생성 분율은 주요 핵분열

물질의 핵분열 분율을 가중하여 구하였으며 그 값은 0.003016209이다.

핵연료용융염과 흑연 감속재의 온도 반응도 계수는 단위 온도당(°F) $-2.48869 \times 10^{-5}\delta$ k/k와 $3.02179 \times 10^{-6}\delta$ k/k이다. 각 럼프별 온도 반응도 계수는 온도 변화에 따른 밀도 변화가 반응도 변화에 주된 영향을 미친다고 판단하여 럼프의 부피 비에 비례하도록 계산하였다.

일체형 원자로에 대한 열전달 모델은 [그림 4]와 같으며 핵연료용융염 순환특성을 갖는 노심 일점 동특성 방정식 및 반응도 계산식, 그리고 이와 연계와 각 럼프들간의 열전달방정식은 아래와 같다.

- 노심 일점 동특성 방정식

$$\frac{dP(t)}{dt} = \left(\frac{\rho(t)-\beta}{l}\right)P(t) + \sum_{i=1}^{6}\lambda_i C_i(t)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{l}P(t) - \lambda_i C_i(t) - \frac{C_i(t)}{\tau_C} + \delta\frac{C_i(t-\tau_L)}{\tau_C}e^{-\lambda_i \tau_L}$$

P(t) : t 시간에서의 출력 [MW_{th}]
$C_i(t)$: t 시간에서의 지발중성자 모핵종의 수 밀도 [MW_{th}]
$\rho(t)$: t 시간에서의 총반응도 [Δk/k],
β : 지발중성자 생성비율의 총합, $\beta = \sum_{i=1}^{6}\beta_i$
l : 즉발중성자 생성 시간 [sec]
λ_i : i 군 지발중성자 모핵종 유효붕괴 상수 [sec^{-1}]
τ_C : 핵연료용융염의 노심잔류 시간 [sec]
τ_L : 핵연료용융염의 원자로계통 순환주기 [sec]
δ : 핵연료용융염의 우회유량 분율

- 반응도 계산식

$$\rho = \rho_0 + \sum_{j=1}^{6}\sum_{i=1}^{2}\alpha_{fi}\Delta T_{ij}^{f} + \sum_{j=1}^{4}\alpha_{f3}\Delta T_{3j}^{f} + \sum_{j=1}^{2}\alpha_{f4}\Delta T_{4j}^{f} + \sum_{j=1}^{3}\sum_{i=1}^{2}\alpha_{gi}\Delta T_{ij}^{g} + \sum_{j=1}^{2}\alpha_{g3}\Delta T_{3j}^{g} + \alpha_{g4}\Delta T_{41}^{g} + \rho_c$$

ρ : 반응도
ρ_0 : 정상상태에서의 기준 반응도
α_{fi} : 영역별 럼프의 핵연료용융염 온도 반응도 상수
α_{gi} : 영역별 럼프의 흑연 감속재 온도 반응도 상수
ρ_c : 제어봉 반응도

- 핵연료용융염 및 흑연 감속재의 열전달 방정식

노심의 핵연료용융염에 대해,

$$M^{Rx}_{f,i} C^{f}_{p,i} \frac{dT^{Rx}_{f,i}}{dt} = F^{Rx}_{f,i} C^{f}_{p,i} (T^{Rx}_{f,i-1} - T^{Rx}_{f,i}) + h^{Rx}_{fg,i} A^{Rx}_{fg,i} (T^{Rx}_{g,i} - T^{Rx}_{f,i}) + K^{Rx}_{f,i} P^{Rx}_{i}$$

노심의 흑연 감속재에 대해,

$$M^{Rx}_{g,i} C^{g}_{p,i} \frac{dT^{Rx}_{g,i}}{dt} = h^{Rx}_{fg,i} A^{Rx}_{fg,i} (T^{Rx}_{f,i} - T^{Rx}_{g,i}) + K^{Rx}_{g,i} P^{Rx}_{i}$$

나. 내장형 열교환기 열전달모델

내장형 열교환기 모델에서 핵연료용융염과 냉각용융염은 3개의 동일한 럼프로 구성된 튜브벽을 경계로 축방향으로 6개의 동일한 럼프로 나누어 구성하였다. 내장형 열교환기 내의 핵연료용융염과 냉각용융염의 밀도, 질량, 그리고 비열은 각 럼프에 대해서 동일하다고 가정하였으며, 이 설계점 값들은 정상상태와 각종 천이상태동안 일정하게 유지된다고 가정하였다. 열전달계수는 선행연구결과 자료를 기반으로하여 6개의 럼프를 3개의 영역으로 나누어 유동특성과 열균형(Heat Balance)을 고려한 열전달 계수를 적용하였으며 천이상태에서 열전달계수 변화는 유량의 함수라고 가정하였다. 또한 핵연료 용융염과 냉각용융염의 재고량 및 저속 유체에 대한 수송지연에 따른 응답지연 특성을 고려하기 위하여 일체형 원자로와 내장형 열교환기 사이, 그리고 내장형 열교환기와 증기발생기 및 증기재열기 사이에서 핵연료용융염 루프와 냉각용융염 루프의 고온구간과 저온구간에 유량에 따라 반비례하는 수송지연 효과를 고려하였다.

내장형 열교환기에 대한 열전달 모델은 [그림 5]와 같으며 각 럼프들간의 열전달방정식은 아래와 같다.

튜브측의 핵연료용융염에 대해,

$$M^{Hx}_{f,i} C^{f}_{p,i} \frac{dT^{Hx}_{f,i}}{dt} = F^{Hx}_{f,i} C^{f}_{p,i} (T^{Hx}_{f,i-1} - T^{Hx}_{f,i}) + h^{Hx}_{fw,i} A^{Hx}_{fw,i} (T^{Hx}_{w,i} - T^{Hx}_{f,i})$$

튜브벽에 대해,

$$M^{Hx}_{w,i} C^{w}_{p,i} \frac{dT^{Hx}_{w,i}}{dt} = h^{Hx}_{fw,i} A^{Hw}_{fw,i} (T^{Hx}_{f,i} - T^{Hx}_{w,i}) + h^{Hx}_{wc,i} A^{Hx}_{wc,i} (T^{Hx}_{c,i} - T^{Hx}_{w,i})$$

또한, 쉘측의 냉각용융염에 대해,

$$M^{Hx}_{c,i} C^{c}_{p,i} \frac{dT^{Hx}_{c,i}}{dt} = F^{Hx}_{c,i} C^{c}_{p,i} (T^{Hx}_{c,i+1} - T^{Hx}_{c,i}) + h^{Hx}_{wc,i} A^{Hx}_{wc,i} (T^{Hx}_{w,i} - T^{Hx}_{c,i})$$

다. 증기발생기와 증기재열기의 열전달 모델

증기발생기와 증기재열기 모델은 내장형 열교환기 모델과 동일하게 3개의 동일한 럼프로 구성된 튜브벽을 경계로 냉각용융염과 증기를 축방향으로 6개의 동일한 럼프로 나누어 구성하였다.

증기발생기의 경우 쉘측의 냉각용융염의 물성은 내장형 열교환기에서의 가정과 동일하지만 튜브측의 증기의 경우 온도와 압력에 따라서 물성이 선형적으로 변화하지 않을 뿐만 아니라 초임계 상태에서는 온도와 압력에 따라서 매우 변화가 크기 때문에 각 튜브측 럼프의

평균온도와 평균압력을 기준으로 증기의 물성을 구하였다. 각 럼프의 질량과 관계된 밀도의 경우 각 럼프의 평균온도와 평균압력을 기준으로한 비체적 값의 역수를 취하여 구하였으며 비열의 경우 각 럼프의 엔탈피와 온도 분포를 고려하여 계산하였다. 그러나 이 설계점 값들은 정상상태와 각종 천이상태동안 일정하게 유지된다고 가정하였다. 열전달계수는 내장형 열교환기 모델과 동일한 방법을 적용하였다. 또한 증기터빈을 구동시키고 증기발생기로 유입는 증기의 입구온도는 정상상태 및 부하에 따른 각종 천이상태에서 700°F로 제어된다고 가정하고 입구온도를 고정시켰다.

증기재열기의 경우 내장형 열교환기로부터 유입되는 냉각용융염의 열량중 90%의 열을 전달받는 증기발생기에 비해 10%만을 전달받기 때문에 이 모델에 미치는 영향이 작다고 가정하고 내장형 열교환기 모델의 모델링 방법을 적용하였으며 증기재열기로 유입되는 증기의 입구온도는 증기발생기와 동일한 가정을 적용하여 650°F로 고정시켰다.

증기발생기와 증기재열기에 대한 열전달 모델은 [그림 5]와 같으며 각 럼프들간의 열전달 방정식은 아래와 같다.

쉘측의 냉각용융염에 대해,

$$M^{SG}_{c,i} C^{c}_{p,i} \frac{dT^{SG}_{c,i}}{dt} = F^{SG}_{c,i} C^{c}_{p,i} (T^{SG}_{c,i-1} - T^{SG}_{c,i}) + h^{SG}_{cw,i} A^{SG}_{cw,i} (T^{SG}_{w,i} - T^{SG}_{c,i})$$

튜브벽에 대해,

$$M^{SG}_{w,i} C^{w}_{p,i} \frac{dT^{SG}_{w,i}}{dt} = h^{SG}_{cw,i} A^{SG}_{cw,i} (T^{SG}_{c,i} - T^{SG}_{w,i}) + h^{SG}_{ws,i} A^{SG}_{ws,i} (T^{SG}_{s,i} - T^{SG}_{w,i})$$

또한, 튜브측의 증기에 대해,

$$M^{SG}_{s,i} C^{s}_{p,i} \frac{dT^{SG}_{s,i}}{dt} = F^{SG}_{s,i} C^{s}_{p,i} (T^{SG}_{s,i+1} - T^{SG}_{s,i}) + h^{SG}_{ws,i} A^{SG}_{ws,i} (T^{SG}_{w,i} - T^{SG}_{s,i})$$

상기 수식에 사용된 변수는 다음과 같다.

$M^{Y}_{X,Z}$: Material X mass of node Z in equipment Y

$F^{Y}_{X,Z}$: Material X mass flow rate of node Z in equipment Y

$C^{X}_{p,Z}$: Material X specific heat of node Z

$T^{Y}_{X,Z}$: Material X temperature of node Z in equipment Y

$h^{Y}_{XX',Z}$: Material X to X' heat transfer coefficient node Z in equipment Y

$A^{Y}_{XX',Z}$: Material X to X' heat transfer area of node Z in equipment Y

$K^{Rx}_{X,Y}$: Fraction of node Y fission power generated in material X

P^{Rx}_{X} : Node X fission power in reactor

g : Graphite, ***f*** : Fuel salt, ***c*** : Coolant salt, ***s*** : Steam, ***w*** : Tube wall

Rx : Reactor core, ***Hx*** : Internal heat exchanger ***SG*** : Steam Generator

3. 시뮬레이션 및 해석 (without controller)

선행연구를 통하여 도출된 결과 자료 및 MSBR 모델을 기반으로 하여 핵연료용융염의 계통순환을 고려한 다영역 원자로 모델에 대한 노심 일점동특성 방정식과 열수송시스템의 각 기기에 대한 열전달방정식을 적용한 AMBIDEXTER Simulink 모델을 구성하여 제어기기가 없는 상황하에서 각종의 예상 및 가상 운전시나리오에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션의 내용으로는 각 기기의 유량 감소에 따른 천이상태와 반응도 삽입을 통한 과도상태에서 인위적인 제어없이 원자로의 Self-Regulation이 잘 이루어지는 섭동 범위를 확인하였으며, 또한 냉각용융염의 우회류 및 증기유량조절을 통한 원자로 출력 조절의 가능성에 대해 분석하였다.

AMBIDEXTER 중간열전달계통을 순환하는 냉각($LiF-BeF_2$)용융염의 유량이 감소되는 냉각용융염 유량 상실사고(loss of coolant salt flow)를 가정하였다. 100% 정상출력운전 상태에서 냉각용융염의 유량이 수 초내에 감소(80%, 60%, 40%, 20%)를 일으킨다고 가정하였으며, 이중 40% 감소 경우에 대한 원자로 출력 및 노심 입·출구 온도변화를 [그림 6]과 [그림 7]에 도시하였다. 이 사고로 발생되는 중간열전달계통의 열수송 능력 감소는 곧바로 핵연료용융염의 원자로 입구온도 상승을 일으키므로 노심 온도 상승과 더불어 부(-)의 핵연료 온도계수로 인해 출력이 감소된다. 이로 인한 출력 감소는 열전달 계통의 온도와 핵연료용융염의 원자로 입구온도 강하의 원인이 되어 다시 일정한 수준의 출력 상승으로 이어진다.

그림에 의하면 냉각용융염 유량 상실로 원자로 출력이 약 75% 수준으로 감소한 후에 다시 상승하여 82%에서 평형을 유지하며 이때 노심 핵연료의 입·출구 온도는 1166.681°F와 1289.865°F로 유지되므로 별도의 출력조절을 고려하지 않더라도 원자로는 안정상태에 도달됨을 보여준다. 냉각용융염과 증기의 입·출구 온도변화는 [그림 8], [그림 9]에 나타내었다.

다음으로 반응도 삽입을 통한 과도상태를 살펴보면 반응도를 Ramp와 Step으로 일정량(0.03mk, 0.15mk, 0.3mk)을 주입했을 경우 급격한 반응도 증가에 의하여 출력이 증가하였으며 최대출력에 도달한후 부(-)의 핵연료 온도계수에 의하여 정상상태보다 약간 높은 수준의 출력으로 수렴하였고 Ramp 반응도 삽입보다는 Step 반응도 삽입의 반응도 변화가 더 큼을 확인하였다. 유량감소에 따른 원자로의 천이상태와는 달리 반응도 삽입량에 따라서 최대출력이 원자로의 안전범위를 초과할 수 있기 때문에 원자로의 Self-Regulation에 한계가 있었으며, 이는 곧 제어봉과 같은 인위적인 출력제어가 필요함을 확인할 수 있었다. 0.3mk의 Ramp와 Step 반응도 삽입에 대한 원자로 출력, 반응도 변화, 그리고 노심 입·출구 온도에 대한 그래프를 [그림 10], [그림 11], [그림 12], [그림 13], [그림 14], [그림 15]에 각각 나타내었다.

마지막으로 냉각용융염의 우회류 및 증기유량조절을 통한 원자로 출력조절을 살펴보면 증기발생기로 유입되는 증기유량을 감소시켰을 경우(20%, 40%, 60%, 80%) 내장형 열교환기의 냉각용융염 입·출구온도가 증가한다. 이로인하여 원자로 입구온도가 증가하여 부(-)의 핵연료 온도계수로 인해 출력이 감소하게되며 원자로 출력범위는 정상상태 원자로 출력 250 MW_{th}에서 130.187 MW_{th}까지 감소하였다. 증기발생기로 유입되는 냉각용융염 유량을 우회류밸브를 통하여 감소시켰을 경우(20%, 40%, 60%, 80%)도 앞의 경우와 동일한 원리에 의하여 원자로 출력은 감소하게되며 원자로 출력범위는 정상상태 원자로 출력 250 MW_{th}에서 109.515 MW_{th}까지 감소하였다. 또한 증기발생기로 유입되는 두 열전달 유체를 동시에 감소시켰을 경우(냉각용융염 우회류 : 20%, 40%, 60%, 80% 증기유량 감소 : 20% 고정)에는 출력이 108.051 MW_{th}까지 감소하였다. 단순히 원자로 출력감소의 측면으로 보았을때는 증기발생기로 유입되는 두 열전달 유체를 동시에 감소시켰을 경우가 원자로 출력 제어 범위가 가장 넓었다. 그러나 이 시뮬레이션의 경우는 부하추종운전에 관한것이기 때문에 실제적으로 증기터빈에 전달되는 에너지양과 각 제어방법에 대한 경제성 평가등 다양한 분석이 필요할 것이다. 유량조절에 따른 원자로 출력에 대한 그래프를 [그림 16], [그림 17], [그림 18]에 각각 나타내었다.

시뮬레이션 결과, 냉각용융염 유량감소에 따른 원자로 천이상태에서는 Self-Regulation에 의한 안전성을 확인할 수 있었고, 반응도 삽입에 따른 원자로 과도상태에서는 원자로 설계 안전성의 범위에 따라 인위적인 제어가 필요함을 알 수 있었으며, 원자로 출력제어에 있어서는 출력 감소측면만을 가지고 평가할 경우 증기유량 감소 및 우회류를 통한 출력제어가 가능함을 확인할 수 있었다.

4. 결론 및 토의

고유 안전성과 원자력 이용에 대한 개념이 획기적으로 개선된 AMBIDEXTER의 개념설계 과정에서 요구되는 안전성 및 제어성의 기본자료를 도출하기 위하여 열전달 유체의 유량감소를 통한 원자로의 천이상태 및 출력제어와 반응도 삽입을 통한 과도상태 해석을 위한 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션을 통하여 냉각용융염 유량감소에 따른 원자로 천이상태에서 Self-Regulation이 원활하게 작용함을 확인하였으며, 반응도 삽입에 따른 원자로 과도상태의 경우는 설계 안전 기준치 설정에 따라 인위적인 제어가 필요함을 알 수 있었으며, 증기발생기로 유입되는 두 열전달 유체의 유량 조절을 통한 원자로 출력감소의 가능성을 확인할 수 있었다.

따라서 반응도 삽입에 대한 원자로의 과도상태 제어를 통한 안전성을 확보하기 위하여 AMBIDEXTER 원자력 시스템 모델에 적합한 제어봉 설계가 요구되며 부하추종 운전에 따른 원자로의 출력조절을 위하여 각 기기의 열전달 유체의 적절한 유량 및 온도 조절을 통한 원자로 출력 제어기기 설계가 필요하다.

본 연구를 통해 도출된 자료 및 결과는 향후 AMBIDEXTER 원자력 시스템의 제어기기 설계를 위한 기초자료로써 이용될 수 있을것이며, AMBIDEXTER Simulink 모델에 사용된 각종 설계자료와 유동특성 및 조건에 따른 물성에 대하여 수정·보완한다면 더 정확한 전체 시스템의 동적 거동 모사에 대한 동특성 자료를 제공할 수 있을 것이다.

향후 수행되어야 할 연구내용으로는 각 기기의 열전달 유체에 대한 유동특성 및 조건에 따른 물성 적용 방법론과 보다 상세한 시뮬레이션 자료를 기반으로한 과도상태 및 부하추종 운전에 따른 원자로 출력조절에 대한 제어 범위의 설정 및 제어기기의 기본 설계라고 할 수 있다.

참고문헌

[1] W. H. Sides, Jr., "Control Studies of a 1000-MW(e) MSBR", ORNL, 1970

[2] W. H. Sides, Jr., "MSBR Control Study : Analog Simulation Program", ORNL, 1971

[3] C. H. Bettis 외, "Computer Programs for MSBR Heat Exchangers", ORNL, 1971

[4] "1967 ASME Steam Tables", The ASME Research Committee on Properties of Steam, 1967

[5] 김진성, 김태규, 임현진, 오세기, "AMBIDEXTER-NEC 계통 모사 해석용 다절점 AMBISM 정상상태 모델의 타당성 연구", 한국에너지공학회, 춘계학술발표회 논문집, 2001

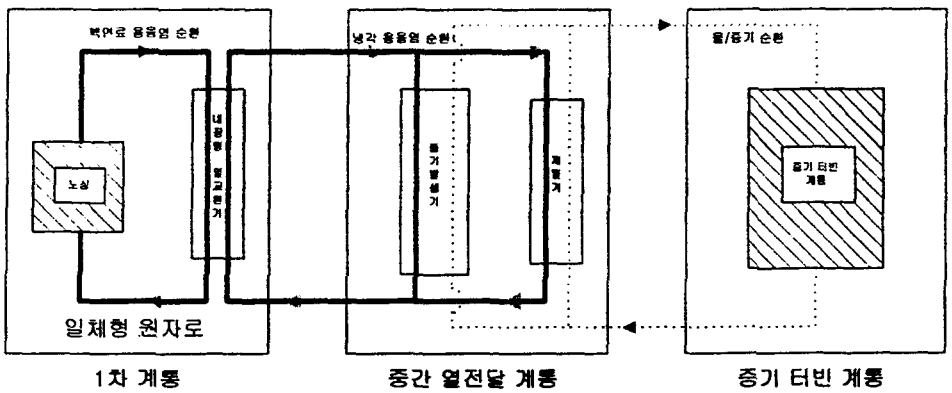
[6] 김태규, "AMBIDEXTER 시스템 출력 제어 모듈 설계에 관한 연구", 공학석사학위논문, 아주대학교, 2001

[7] 오세기 외, "가변지발중성자 분율 원자로 시스템 AMBIDEXTER의 안전성 및 제어성

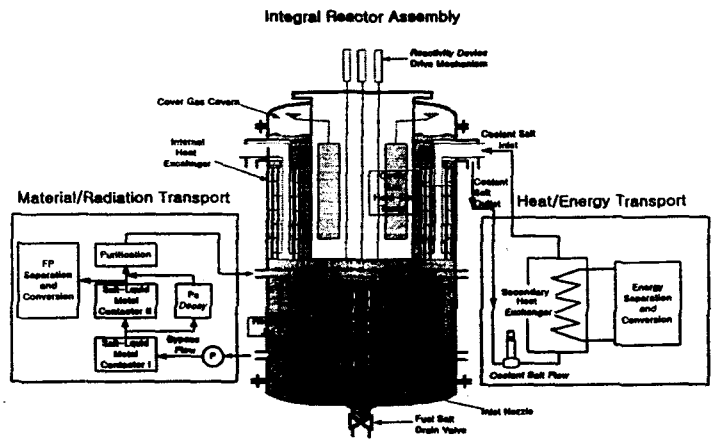
설계용 동적 거동 모사 해석 모델 개발", '2001 원자력 기초연구과제 최종보고서', 과학기술부, 2001

[8] 오세기, 정근모, 원성희, 임현진, 조재국, "핵적 자활, 자정 능력을 갖춘 용융염 원자력 보일러 시스템의 개념설계에 관한 연구", '97 원자력 기초연구과제 최종보고서', 과학기술부, 1998

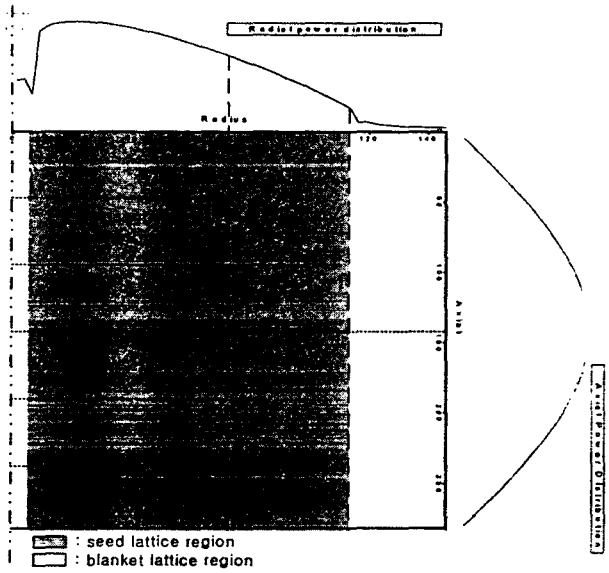
[9] 임현진, "AMBIDEXTER 열수송 시스템의 개념설계에 관한 연구", 공학석사학위논문, 아주대학교, 1999



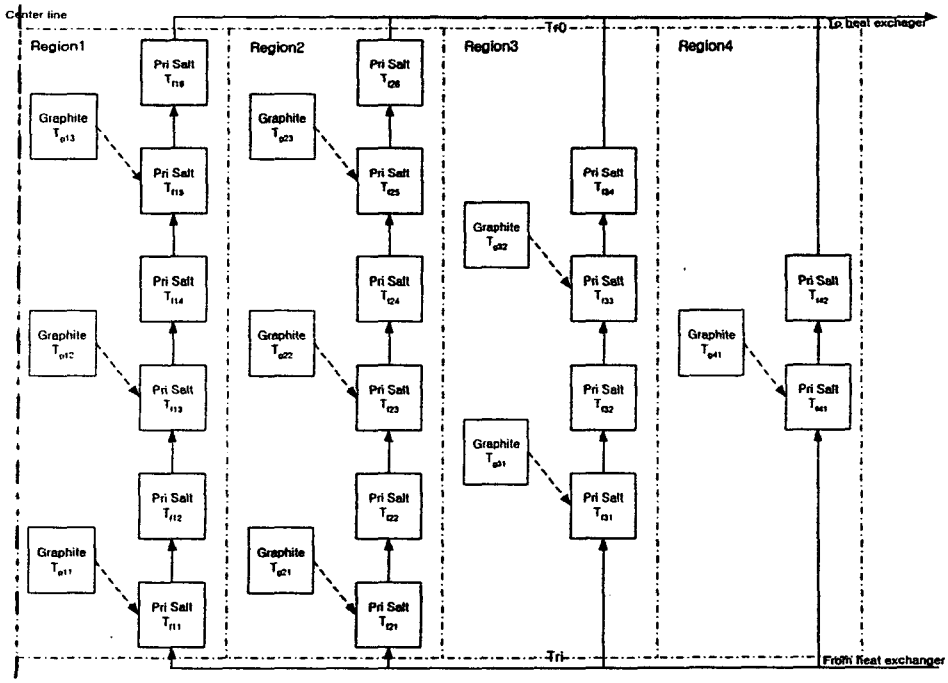
[그림 1] AMBIDEXTER 열수송시스템 회로 개념도



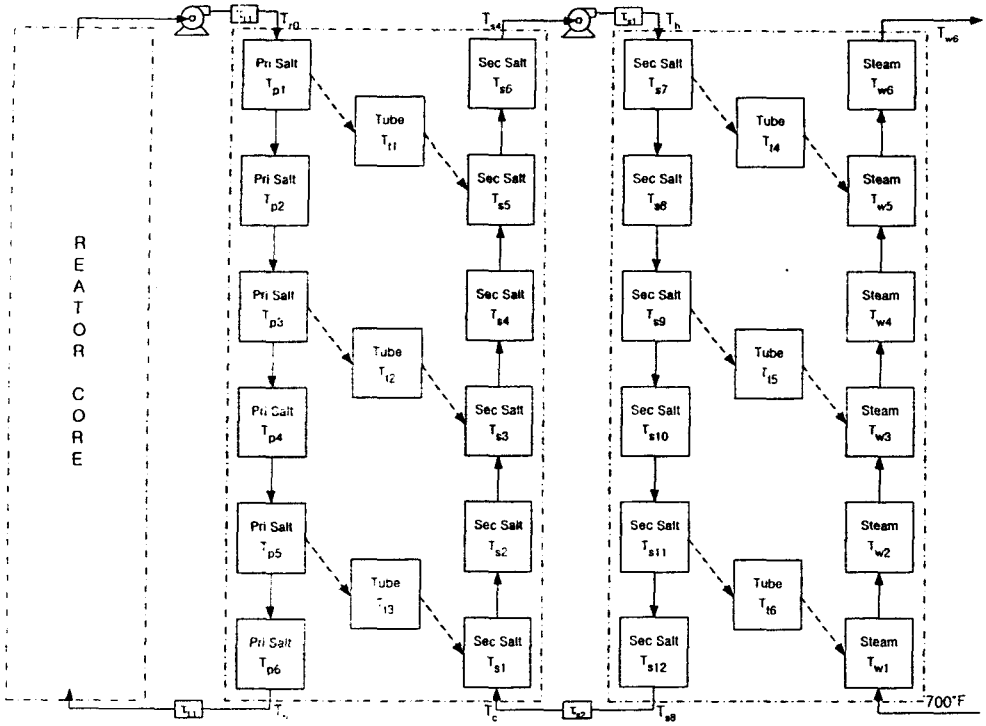
[그림 2] AMBIDEXTER 원자력 시스템 개념도



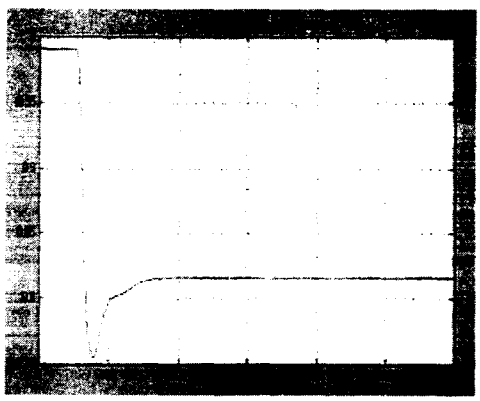
[그림 3] AMBIDEXTER 노심구조



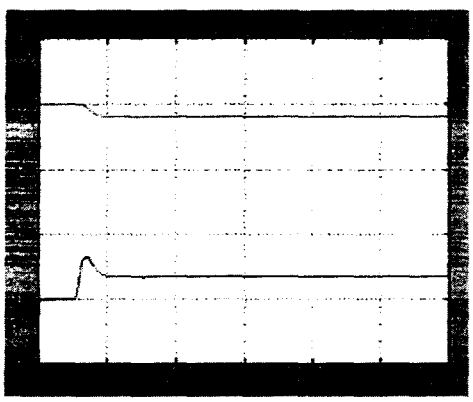
[그림 4] AMBIDEXTER Simulink 모델 노심 구조



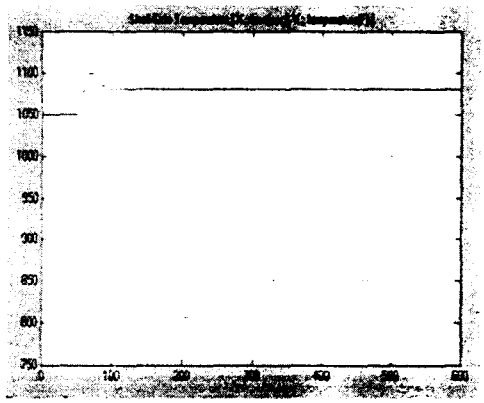
[그림 5] AMBIDEXTER Simulink 모델 열교환기 구조



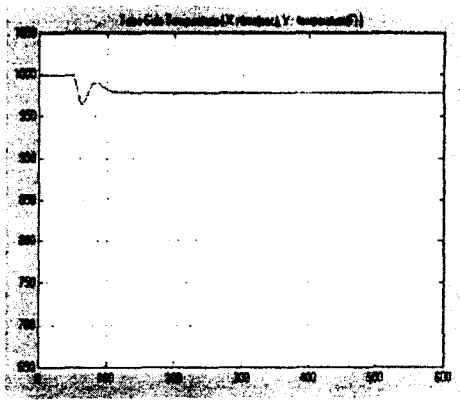
[그림 6] 냉각용융염 유량감소(40%)에 따른 원자로 출력



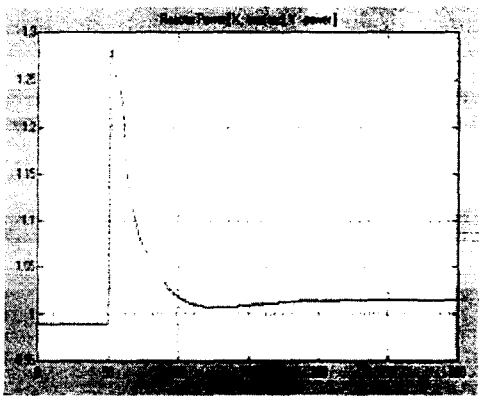
[그림 7] 냉각용융염 유량감소(40%)에 따른 노심 입·출구 온도



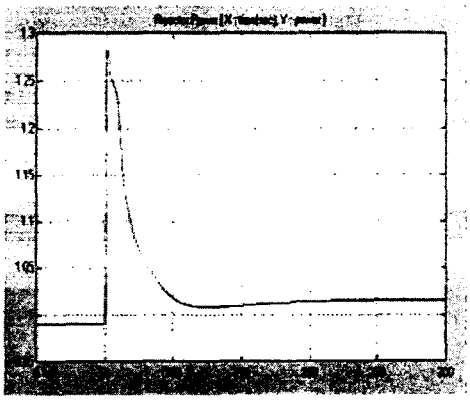
[그림 8] 냉각용융염 유량감소(40%)에 따른 냉각융융염 입·출구 온도



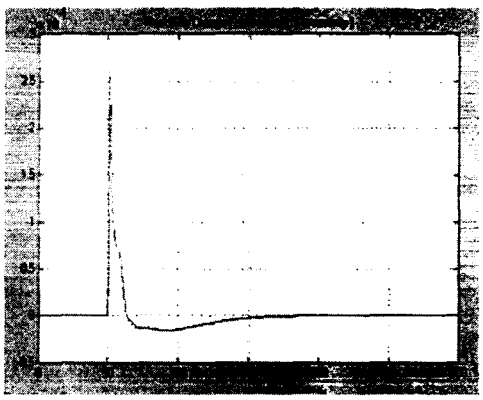
[그림 9] 냉각용융염 유량감소(40%)에 따른 증기 입·출구 온도



[그림 10] Ramp 반응도 삽입(0.3mk)에 따른 원자로 출력

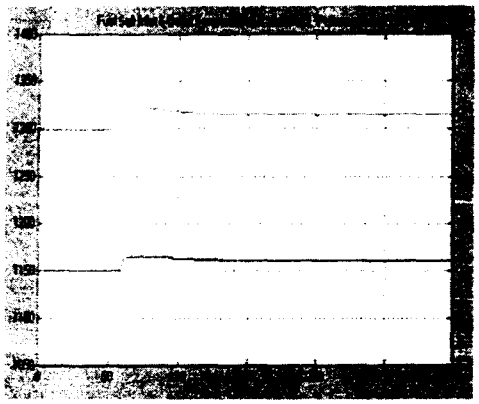


[그림 11] Step 반응도 삽입(0.3mk)에 따른 원자로 출력

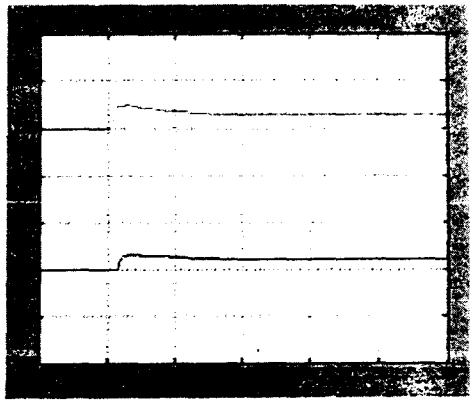


[그림 12] Ramp 반응도 삽입(0.3mk)에 따른 노심 반응도 변화

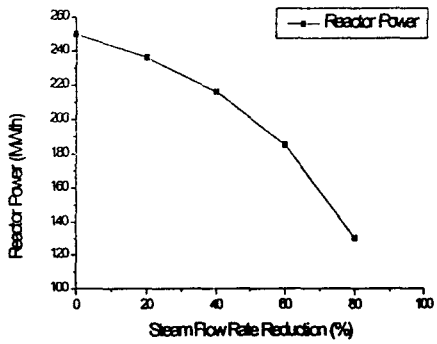
[그림 13] Step 반응도 삽입(0.3mk)에 따른 노심 반응도 변화



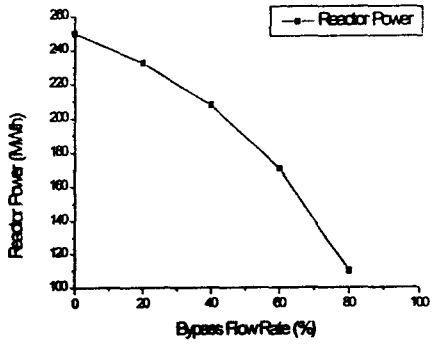
[그림 14] Ramp 반응도 삽입(0.3mk)에 따른 노심 입·출구 온도



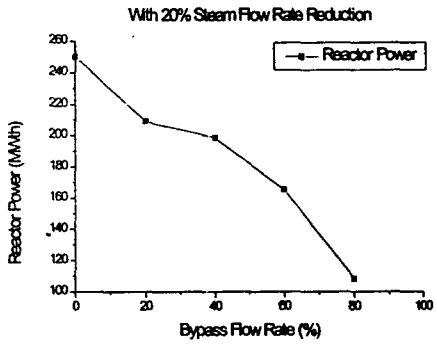
[그림 15] Step 반응도 삽입(0.3mk)에 따른 노심 입·출구 온도



[그림 16] 증기유량 감소에 따른 원자로 출력변화



[그림 17] 냉각용융염 우회류 유량에 따른 원자로 출력변화



[그림 18] 냉각용융염 우회류 유량에 따른 원자로 출력변화 (증기유량 20% 고정)