

AMBIEXTER 열수송 시스템의 동적 거동 모사해석 모듈 개발

임현진, 김태규, 김진성, 오세기
아주대학교

Development of Dynamic Simulation Modules for the AMBIDEXTER's Heat Transport System

Hyunjin Lim, TaeKyu Kim, JinSung Kim and SeeKee Oh
Ajou University

1. 서론

AMBIDEXTER 원자력 에너지 시스템은 Th^{233}/U 핵주기를 이용한 용융염 핵연료가 내장형 열교환기를 포함하는 일체형 원자로 시스템을 순환하면서 1차 냉각 계통을 이루고, 독립된 온라인 정화계통에 의해 액상 용융염 핵연료 일부를 연속 추출, 처리, 재주입 함으로 노심의 핵적 자활상태를 유지한다. 이와 같은 시스템 개념은 배관망 파손에 의한 중대사고 방지, 열수송 회로와 방사성 물질 회로의 독립적 구성을 통한 효과적인 원자력 에너지 이용과 고유 안전성을 확보하는 장점을 통해 현안 원자력 문제의 근본적인 해결 방안을 제시하고 있다.

이러한 고유 안전성과 원자력 이용에 대한 개념이 획기적으로 개선된 AMBIDEXTER의 안전성 및 제어성의 개념설계 과정에서 요구되는 시스템 해석코드 AMBISM은 현재 선행 연구를 통해 수행된 노심 핵설계 및 열수송 기기의 규격 설계 자료를 중심으로 개발, 보완하는 단계에 있다.

본 연구는 AMBIDEXTER 원자력 에너지 시스템의 개념설계 단계에서 요구되는 AMBISM 코드의 열수송 시스템 모듈 개발로서 정상상태의 정격 출력을 기준으로 선행 연구에서 규격 설계, 구성된 열수송 시스템에 대한 동적 모델링 및 시뮬레이션을 통해 시스템 해석을 수행하고, 이에 따른 열수송, 제어 및 안전 계통 설계를 위한 시스템의 동적 특성 자료를 제공하는데 있다.

2. AMBIDEXTER 원자력 에너지 시스템 개요

2.1 AMBIDEXTER 열수송 시스템 개요

AMBIDEXTER 열수송 시스템은 [그림 1]과 같이 일차 냉각 계통을 포함하는 일체형 원자로와 이러한 1차 계통과 터빈 계통간의 중간 열수송 계통인 냉각 용융염 순환 시스템으로 구성되어있다.

일체형 원자로의 핵연료 용융염은 노심과 내장형 열교환기를 중심으로 침니 및 다운컴머로 구성되는 계통을 일정 유량을 유지하면서 순환한다. 중간 열수송 계통은 냉각 용융염을 고온 유체로 하는 초임계 증기발생기와 증기 재열기로 구성된다.

터빈 계통의 증기사이클에 적용한 초임계 증기는 약 3200(psi) 이상의 압력을 유지하면서

고압터빈을 구동시킨다. 이러한 사이클은 동일 온도범위에 대해, 잔열(Residual Heat)구간에서 물/증기의 혼합 상태(iwo phase)로 존재하게 되는 미임계(sub-critical) 증기 사이클에 비해 열원(heat source)온도에 가깝게 접근하므로 보다 높은 효율의 발전계통 구현이 가능하다. 따라서, 증기발생기의 구조는 유출시의 증기상태가 터빈계통까지 초임계로 가압된 상태를 유지하며 전달되도록 하기 위해, 일반 증기 사이클의 드럼타입이 아닌 튜브 타입으로 구성되므로 유체의 밀도는 점진적인 변화를 갖게되며, 복수기(Condenser)등의 기기가 요구되지 않는 단순한 계통의 구성이 가능하다.

그러나, 이러한 초임계 사이클의 단점은 1차 고압터빈을 거친 후 유출되는 증기의 습분 함유량(Steam quality)이 급격히 증가하는 현상으로, 이는 중압터빈의 운전 환경에 적절치 못한 상태가 된다. 따라서, 중압 터빈 계통의 환경에 대해 적절한 규모의 증기 재열기 도입이 요구된다.

AMBIDEXTER 열수송 시스템에 도입한 증기발생기 및 재열기는 모두 Shell & Tube 형태의 Counter Current Flow 열교환기이며, 정격 출력에 대한 규격 설계는 ORNL의 MSBR 플랜트 개념설계에서 개발한 PRIMEX-RETEX-SUPEX 코드 체계를 보완, 적용하였다.

증기터빈계통의 운전 조건은 MSBR 플랜트의 개념설계 자료를 참조하였으며, 구성 기기의 규격설계에서 고려한 기기의 열용량 분배는 노심 열출력의 90%는 2기의 증기발생기, 10%는 2기의 재열기가 담당하는 것으로 가정하였다. 선행 연구를 통해 250 MW_{th} 정격 출력을 기준으로 개념설계가 이루어진 AMBIDEXTER의 열수송 시스템 구성 기기의 설계특성자료는 <표 1>과 같다.

2.2 AMBISM 코드

AMBISM 코드가 포함하는 AMBIDEXTER의 주요 계통 기기에 대한 공정흐름도는 [그림 2]와 같다. 시스템 모델은 노심의 일점 동특성 모델과 이에 대응하여 흑연감속재 구조체, 일차냉각계통 및 중간 열수송계통에 대한 열전달 모델로 구성하였으며, 열전달 계수에 관계하는 용융염의 물성치는 ORNL 선행연구의 결과인 상관식을 이용, 정상운전의 평균온도를 기준으로 한 일정 상수로 취급하였다.

핵연료 용융염의 계통순환 특성을 고려한 노심의 일점 동특성 모델은 시스템의 열전달 모델과 연계하여 노심의 외부 반응도 삽입에 대한 전체 시스템의 동적 거동을 해석할 수 있도록 하였으며, 시스템의 열전달 모델에서는 각 계통 기기의 정상상태 설계를 기준으로 각 계통별 열전달 매체의 입/출 온도 변화추이를 예측할 수 있도록 하였다.

이와 같은 시스템의 동적 거동 해석을 위해 각 기기에 대해 Lumped 파라미터 모델을 적용하였으며, Explicit Method를 적용하여 주어진 열수송 시스템 연립방정식의 해를 구하도록 하였다.

3. 열수송 시스템의 동적 거동 모델

[그림 2]와 같이 구성된 Lumped 시스템의 시간 종속 열전달 모델은 열수송 매체의 열전달 경계가 되는 기기를 중심으로 구성하였다. 각 기기의 유입온도에 관계한 모델에는 전단계 기기에서의 유출부터 현 단계의 기기까지 도달되기까지 소요되는 시간 상수의 개념을 도입하였다. 이는 차후 연구에 대한 시스템의 배관계통에 대한 설계 요건을 제공할 수 있다.

<표 2>에는 250 MW_{th} AMBIDEXTER의 주요 계통기기의 정상상태 파라미터를 정리하였

다. AMBISM 코드의 초기조건은 이 값들과 양립성을 고려하여 수용할 수 있는 오차 범위 안에서 대표값을 갖도록 보정하므로 천이상태의 시뮬레이션 결과가 물리적 의미를 유지하는데 유의하였다.

구성된 시스템의 각 Lump에 대한 시간 종속 열전달 방정식은 질량, 비열, 열전달 상수, 전열면적 및 열수송 매체의 유량으로 표현할 수 있으며, 일체형 원자로의 노심을 구성하는 Graphite 및 핵연료 Lump에 대해서는 핵연료 용융염에 의해 발생하는 γ -heating을 고려하였다. 각 기기의 튜브 Lump의 열전달 현상은 튜브면을 경계로 하여 고온 유체와 저온 유체 간의 대류와(Convection) 전도(Conduction)로 열전달 계수를 표현하였으며, 정상상태의 유량, 주어진 튜브 다발의 전열면적을 연립방정식의 상수로 취급하였다.

3.1 노심 일점 동특성 모델

용융염 핵연료 순환특성을 갖는 노심 일점 동특성 및 붕괴 열출력 모델은 선행 연구를 통해 다음과 같이 구성되었다.⁽⁶⁾

$$\frac{dP_r(t)}{dt} = \left(\frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} \right) P_r(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad (1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} P_r(t) - \lambda_i C_i(t) - \frac{C_i(t)}{\tau_C} + \delta \frac{C_i(t - \tau_L)}{\tau_C} e^{-\lambda_i \tau_L} \quad (2)$$

$$\frac{dD_i(t)}{dt} = \sum \varepsilon_i \lambda_i D_i(t) \quad (3)$$

3.2 흑연 감속재 및 핵연료 용융염의 열전달 모델

노심의 핵연료 용융염 및 흑연 감속재에 대한 열유동 특성은 분산열원비를 95대5로 가정하였다. 중성자 동특성 모델과 대응되도록 구성한 노심 열전달 모델을 핵연료 채널과 흑연 감속재 격자구조 간의 열전달과 핵연료의 유동에 의한 열수송 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

흑연 감속재 구조체에 대해,

$$m_g^{Rx} C_p^g \frac{dT_g}{dt} = h_{fg} A_{fg} (T_f^{Rx} - T_g^{Rx}) + K_g P_r \quad (4)$$

핵연료 용융염에 대해,

$$\frac{dT_{i,f}^{Rx}}{dt} = \frac{1}{\tau_{hxRx}} [T_{o,f}^{Rx} - T_{i,f}^{Rx}] \quad (5)$$

$$m_f^{Rx} C_p^f \frac{dT_f^{Rx}}{dt} = F_f^{Rx} C_p^f (T_{i,f}^{Rx} - T_f^{Rx}) + h_{fg} A_{fg} (T_g^{Rx} - T_f^{Rx}) + K_r P_r \quad (6)$$

3.3 열교환기 및 증기발생기의 열전달 모델

AMBIDEXTER 열수송 시스템의 주요 계통 기기는 모두 Shell & Tube 형태를 취함에 따라 각 기기의 Lumped 모델은 고온부(hot side)유체, 튜브측, 저온부(cold side)유체로 열전달 모델을 구성하였다.

열수송 시스템의 내장형 열교환기는 핵연료 및 냉각 용융염의 열유체역학적 물성이 운전 조건에 대해 일정상수의 단상(single phase)을 유지하는 것으로 가정하여 열전달 방정식을 도출하였으며, 중간 열전달계통의 초임계 증기발생기 모델은 주어진 정적 운전 범위에서의 온도, 압력에 대한 엔탈피의 비선형적인 변화를 고려하여 개략적으로 4개의 Lump로 구성되도록 하였다. 이에 대한 기본적인 열전달 모델은 다음과 같다.

각 기기의 고온부 유체에 대해,

$$\frac{dT_{i,f}^{Hx}}{dt} = \frac{1}{\tau_{RxHx}} [T_{o,f}^{Rx} - T_{i,f}^{Hx}] \quad (7)$$

$$m_f^{Hx} C_p^f \frac{dT_f^{Hx}}{dt} = F_f^{Hx} C_p^f (T_{i,f}^{Hx} - T_f^{Hx}) + h_{ft} A_{ft} (T_t^{Hx} - T_f^{Hx}) \quad (8)$$

튜브 벽의 평균온도에 대해,

$$m_t^{Hx} C_p^t \frac{dT_t^{Hx}}{dt} = h_{ft} A_{ft} (T_f^{Hx} - T_t^{Hx}) + h_{tc} A_{tc} (T_c^{Hx} - T_t^{Hx}) \quad (9)$$

또한, 튜브 외부의 저온부 유체에 대해서는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dT_{i,c}^{Hx}}{dt} = \frac{1}{\tau_{SCHx}} [T_{o,c}^{SG} - T_{i,c}^{Hx}] \quad (10)$$

$$m_c^{Hx} C_p^c \frac{dT_c^{Hx}}{dt} = F_c^{Hx} C_p^c (T_{i,c}^{Hx} - T_c^{Hx}) + h_{tc} A_{tc} (T_t^{Hx} - T_c^{Hx}) \quad (11)$$

상기 수식에 기술된 파라미터는 다음과 같다.

- m_X^Y : Total mass of material X in equipment Y, [g]
- C_p^X : Specific heat of material X, [W · sec/g · °C]
- $T_{i,X}^Y$: Inlet Temp. of material X in equipment Y, [°C]
- T_X^Y : Average Temp. of material X in equipment Y, [°C]
- F_X^Y : Mass flow rate of material X in equipment Y, [g/sec]
- h_{XX} : Heat transfer Coeff., material X to X', [W/cm² · °C]
- A_{XX} : Heat transfer area, material X to X', [cm²]
- τ_{YY} : Transition time, equipment Y to Y', [sec]
- K_X : Fraction of fission power generated in material X
- P_r : Total fission Power in reactor, [W_{th}]
- g : Graphite, f : Fuel salt, t : Tube (or Tube wall)
- c : Coolant salt (or Steam), RX : Reactor core, Hx : Heat Exchangers (or Steam Generator)

4. 시뮬레이션 해석

구성한 열수송 시스템 모듈에 대한 시뮬레이션은 연계된 노심 모듈에 대한 외부 반응도 삽입을 변수로 하여 수행하였다. [그림 3-1,2]는 0.1(mK)의 Ramp와 Step 반응도 삽입에 대한 노심 출력 변화와 노심에서의 핵연료 용융염 평균 온도변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 5초의 시간에서 각 외부 입력 특성에 대한 노심 출력과 핵연료 용융염 온도변화의 유사한 추이를 확인 할 수 있다.

[그림 4-1,2,3]은 0.001(mK)의 Ramp 반응도 삽입에 대한 원자로 출력, 핵연료 용융염 온도 변화, 열교환기에서의 평균 온도 변화를 나타낸 것이며, [그림 5-1,2]는 0.001(mK)의 Step 반응도 삽입에 노심 출력 변화 및 열수송 시스템의 온도 변화 추이를 나타낸 것이다.

시뮬레이션 결과, 본 연구에 의해 구성된 AMBIDEXTER 열수송 시스템의 동적 거동 모델은 일정 시간 지연을 유지하며 노심 출력 변화에 대해 적절한 온도 변화 추이를 보이는 것을 확인하였다.

5. 결론 및 토의

미래의 안정적인 원자력 이용 대안으로서 AMBIDEXTER 원자력 에너지 시스템이 현재 개념 설계단계에 있다. 본 연구의 결과를 통해 현재 개발중인 AMBIDEXTER 해석 코드 AMBISM에 대한 열수송 시스템의 동적 거동 모사해석 모듈이 개발되었다.

선행 연구의 결과인 핵연료 용융염의 순환특성을 고려한 노심 일점 동특성 모델과 연계하여 Graphite 노심, 내장형 열교환기, 증기발생기에 대한 모듈을 Lumped 파라미터 모델로 구현하였으며, 외부 반응도삽입을 입력변수로 하여 시스템의 동적 거동 모사가 가능하도록 하였고, 이를 통해 열수송, 제어 및 안전 계통 설계를 위한 시스템의 동적 특성 자료를 제공하는 전산 체제의 기본 형태가 구축되었다.

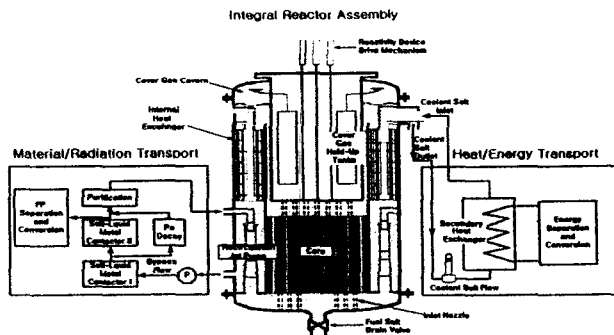
차후 연구를 통해 개선하게 될 AMBISM 코드의 내용으로는 출력조절, 부하추종 등에 대한 제어 특성 범위의 평가 및 이에 대한 제어모듈의 구현이 요구되며, 온라인 정화공정 모듈의 개발과 GUI(Graphic User Interface) 환경의 시뮬레이션 코드개발을 통해 AMBIDEXTER 시스템 통합 시뮬레이터로서의 개발로 진행되어야 할 것이다.

감사문

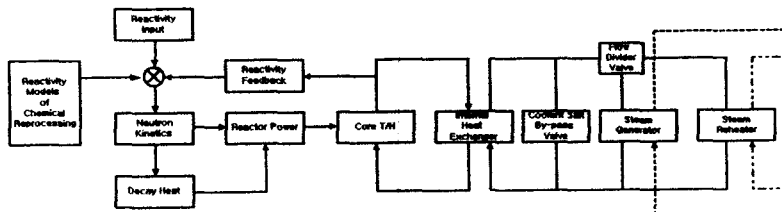
본 논문은 과학기술부에서 시행하는 “원자력 기초연구사업”의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 오세기, 정근모, 원성희, 임현진, 조재국, "핵적 자활, 자정 능력을 갖춘 용융염 원자력 보일러 시스템의 개념설계에 관한 연구", '97 원자력 기초연구과제 최종 보고서', 과학기술부, 1998
- [3] 임현진, "AMBIDEXTER 열수송 시스템의 개념설계에 관한 연구", 공학석사학위논문, 아주대학교, 1999
- [3] 김태규, 윤정선, 오세기, "용융염 핵연료 원자로 AMBIDEXTER의 동특성 해석" 한국 에너지공학회, 춘계학술발표회 논문집, 1999
- [4] 조재국, 원성희, 임현진, 오세기, "등가연소도 근사법을 이용한 AMBIDEXTER 노심 격자의 핵적 자활성에 관한 연구", 한국 에너지공학회, 춘계학술발표회 논문집, 1998
- [5] 조재국, 원성희, 임현진, 김태규, 오세기, "250 MW_{th} AMBIDEXTER 노심의 반응도 특성 및 출력 분포 해석, 한국 에너지공학회, 추계학술발표회 논문집, 1998
- [6] Roy C. Roberson 외, "Conceptual Design Study of A Single-fluid Molten-Salt Breeder Reactor", ORNL, 1971
- [7] C. H. Bettis 외, "Design Study of A Heat-Exchange System for One MSBR Concept", ORNL, 1967
- [8] C. H. Bettis 외, "Computer Programs for MSBR Heat Exchangers", ORNL, 1971
- [9] W. H. Sides, Jr. , "Control Studies of a 1000-Mw(e) MSBR", ORNL-TM-2927, 1970
- [10] "1967 ASME Steam Tables", The ASME Research Committee on Properties of Steam, 1967



[그림 1] AMBIDEXTER 원자력 에너지 시스템 개념도



[그림 2] AMBISM Code의 Block Diagram

<표 1> 내장형 열교환기, 증기발생기 및 재열기의 설계 파라미터

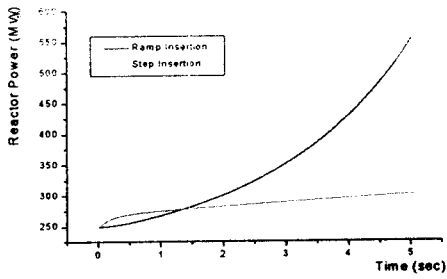
	IHX	S/G	Reheater
Length, [m]	2.30	23.30	12.34
Tube ID, [cm]	0.83	1.08	1.81
Tube OD, [cm]	0.91	1.27	1.90
Wall thickness, [cm]	0.09	0.195	0.09
Heat transfer coefficient [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]			
Tube-side to Tube-wall	7915	6050~12710	1815
Shell-side to Tube-wall	7015	8530~18730	3867

<표 2> AMBIDEXTER 계통설계 특성 자료 및 정상상태 파라미터

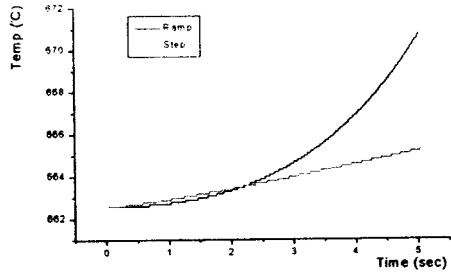
Reactor Core	
Gross Reactor Power [MW_{th}]	250.0
Fuel Salt Processing Rate [Core/Day]	0.1
Max Reactivity Insertion Limit [mk]	5.0
Fuel Temperature Coefficients [$\Delta k/k \ ^\circ C$]	- 3.83E-5
Coolant Temperature Coefficients [$\Delta k/k \ ^\circ C$]	4.69E-6
Prompt Neutron Generation Time [sec]	2.4E-4
Trip Set Point	1.15
Fuel salt flow rate, [kg/sec]	2247.8
Core volume, [m^3]	27020.18
Fuel salt volume, [m^3]	8416.81
Fuel salt mass, [kg]	27921.93
Graphite mass, [kg]	48442.32
Heat transfer area, [m^2]	4133.94
Average fuel salt velocity, [m/sec]	1.235
Core transit time of fuel salt, [sec]	1.984

Internal Heat Exchanger		
Coolant salt flow rate, [kg/sec]	372.75	
Number of tubes	1755	
Heat transfer area, [m^2]	115.85	
Tube metal mass, [kg]	812.37	
	Fuel salt (Tube)	Coolant salt (Shell)
Volume, [m^3]	0.1716	1.134
Mass, [kg]	567.8	2464.18
Velocity, [m/sec]	1.462	0.5144
Transit time, [sec]	1.57	5.5

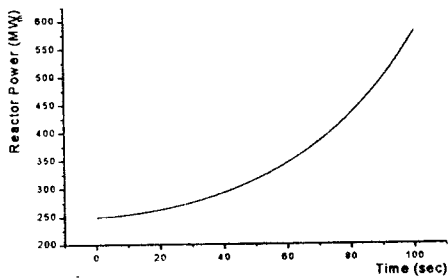
Steam Generator		
Steam flow rate, [kg/sec]	75.20	
Number of tubes	393	
Heat transfer area, [m^2]	365	
Tube metal mass, [kg]	5535.24	
	Steam (Tube)	Coolant salt(shell)
Volume, [m^3]	0.57	2.89
Mass, [kg]	399.1	6372
Velocity, [m/sec]	1.15	9.62
Transit time, [sec]	4.39	36.75



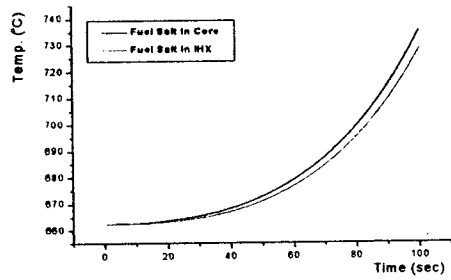
[그림 3-1] Resctivity Insertion = 0.1(mk),
원자로 출력비교



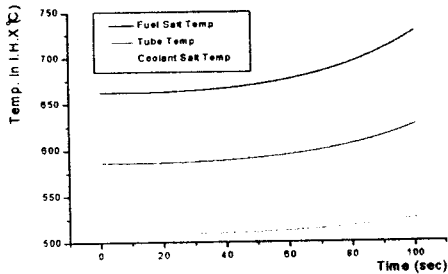
[그림 3-2] Resctivity Insertion = 0.1(mk),
노심 핵연료 평균 온도



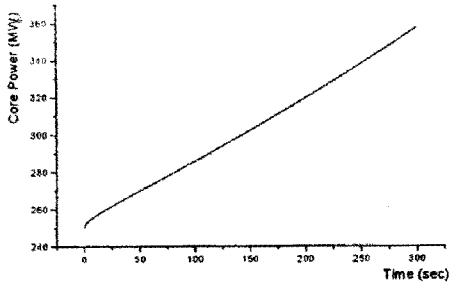
[그림 4-1] Ramp Insertion = 0.001(mk),
원자로 출력



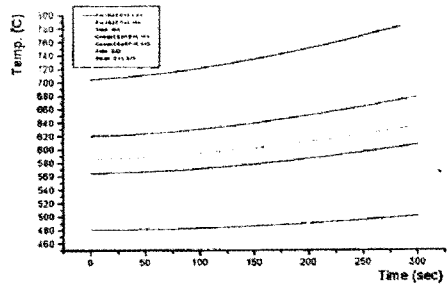
[그림 4-2] Ramp Insertion = 0.001(mk),
핵연료 온도



[그림 4-3] Ramp Insertion = 0.001(mk),
열교환기 온도



[그림 5-1] Step Insertion = 0.001(mK),
원자로 출력



[그림 5-2] Step Insertion = 0.001(mK),
열수송 시스템 온도 변화