

AMBIDEXTER-NEC 계통 모사 해석용
다절점 AMBISM 정상상태 모델의 타당성 연구

김진성, 김태규, 임현진, 오세기
아주대학교

A Multi-Node System Simulation Method
for the AMBIDEXTER-NEC : The Steady-State AMBISM Case

JinSung Kim, TaeKyu Kim, HyunJin Lim and SeKee Oh
Ajou University

1. 서론

Th, ²³⁵U 용융염 핵연료 주기를 사용하는 AMBIDEXTER 원자력 시스템은 원자로 용기의 중앙에 후연감속재가 위치하고 그 상부 외벽에 열교환기가 장착되어 있는 일체형 구조이다. 원자로 용기내를 순환하는 용융염 핵연료는 용기의 중앙에 위치하는 후연 감속재를 통과하며 핵분열을 일으켜 에너지를 얻고, 용기 상부에 장착된 내장형 열교환기를 지나며 2차측 열·에너지수송회로로 에너지를 전달한다. 이러한 중심 구조체의 일체형 배치는 원자로 용기 내부의 배관망을 최소화하므로 기존 원자력 발전 설비가 안고 있던 배관망 파손에 의한 대형사고 가능성을 혁신적으로 감소시켰다. 또한 열·에너지 수송회로와는 독립적으로 동작하는 물질·방사선 수송회로의 사용은 시스템의 설계목표인 핵적 자정·자환능의 확보뿐 아니라, 부가가치가 높은 동위원소들의 추출·이용을 통한 부차적인 경제적인 이익을 창출할 수 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 주요 계통·기기·구조의 모델링을 집중 파라미터(Lumped Parameter)로 구현한 기존의 AMBISM 코드를 공간 종속성을 보완하기 위하여 다절점으로 구성하여 시뮬레이션을 수행한 결과와 비교평가기준 대상인 MSBR 열교환기 규격설계코드인 PRIMEX, SUPEX, RETEX의 선행연구에서의 시뮬레이션 결과와 비교·분석을 하고, 이를 통하여 AMBIDEXTER 원자력 에너지 시스템 계통 모사 해석용 다절점 AMBISM 정상상태 모델의 타당성을 검증하여 열수송회로, 제어 및 안전 계통 설계를 위한 보다 더 정확한 시스템의 동특성 기반 자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

2. AMBIDEXTER 원자로 시스템 해석 모델

AMBIDEXTER 열수송 시스템은 1차 냉각 계통인 내장형 열교환기를 포함하는 일체형

원자로와 1차 계통과 터빈 계통간의 중간 열수송 계통인 냉각 용융염 순환 시스템으로 구성되어있다. 일체형 원자로의 핵연료 용융염은 노심과 내장형 열교환기를 중심으로 집니 및 다운컴버로 구성되는 계통을 일정 유량을 유지하면서 순환한다. 중간 열수송 계통은 터빈 구동을 위한 초임계 증기발생기와 증기재열기로 구성된다. AMBIDEXTER 원자력 에너지 시스템의 개념도와 열수송 시스템 계통도를 [그림 1]과 [그림 2]에 각각 나타내었다.

2.1 AMBISM 코드

AMBIDEXTER-NEC 시뮬레이터로 개발중인 AMBISM 코드는 정상상태의 자료를 기반으로 하여 시스템의 동적 거동을 모사하는 전산코드이다. AMBISM 코드가 포함하는 시스템 모델은 노심의 일점 동특성 모델과 이에 연계하여 흑연감속재 구조체, 일차냉각계통 및 중간 열수송계통에 대한 열전달 모델로 구성하였으며, 열전달 계수에 관계된 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 계통 기기에 대해 집중 파라미터(Lumped Parameter) 모델을 적용하였으며, 이 시스템에서 사용되고 있는 용융염의 유속이 일반 발전 계통의 작업유체에 비해 매우 느린 특성을 정확하게 반영할 수 있는 공간 종속성의 개념을 적용하기 위하여 각 계통 기기를 7개의 다절점으로 더 세분화된 구성을 통하여 보다 더 신뢰성 있는 자료를 얻을 수 있으며, 각 절점의 위치에 따른 시스템의 거동 예측이 가능하도록 하였다. AMBIDEXTER 열수송 시스템 다절점 구성도를 [그림 3]에 나타내었다.

2.2 노심 일점 동특성 모델

용융염 핵연료 순환특성을 갖는 노심 일점 동특성 및 붕괴 열출력 모델은 선행 연구를 통해 다음과 같이 구성되었다.^[14]

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

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

여기서 $P(t)$: t 시간에서의 출력 [MW_{th}]

$C_i(t)$: t 시간에서의 지발중성자 모핵종의 수 밀도 [MW_{th}]

$\rho(t)$: t 시간에서의 총반응도 [$\Delta k/k$]

β : 지발중성자 생성비율의 총합, $\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i$

Λ : 즉발중성자 생성 시간 [sec]

λ_i : i 군 지발중성자 모핵종 유효붕괴 상수 [sec⁻¹]

τ_c : 용융염핵연료의 노심잔류 시간 [sec]

τ_L : 용융염핵연료의 원자로계통 순환주기 [sec]

2.3 다질점 AMBISM 정상상태 열전달 모델

2.3.1 핵연료 용융염 및 흑연 감속재의 열전달 모델

정상상태에서 핵연료 용융염과 흑연 감속재에 대해서 γ -heating을 고려한 열전달 방정식은 나타내면 다음과 같다. 흑연 감속재에 의한 출력의 기여분은 전체 출력의 5%로 가정하였고, 고온부를 절점의 증가 방향으로 설정하였다.

노심의 핵연료 용융염에 대해,

$$W_f^{Rx,i} C_p^f (T_{f,j}^{Rx,i} - T_{f,j-1}^{Rx,i}) + h_{fg}^{Rx,i} A_{fg}^{Rx,i} (T_{f,j}^{Rx,i} - T_{g,j}^{Rx,i}) = K_f^{Rx,i} P_j^{Rx,i} \quad (3)$$

노심의 흑연 감속재에 대해,

$$h_{fg}^{Rx,i} A_{fg,j}^{Rx,i} (T_{g,j}^{Rx,i} - T_{f,j}^{Rx,i}) = K_g^{Rx,i} P_j^{Rx,i} \quad (4)$$

와 같이 나타낼 수 있다.

2.3.2 내장형 중간 열교환기와 증기발생기의 열전달 모델

셸(Shell)과 튜브(Tube)의 Counter-Flow 형태인 내장형 중간 열교환기와 증기발생기에 대해서 정상상태의 열전달 방정식을 나타내면 다음과 같다. 고온부를 절점의 증가 방향으로 설정하였다.

- 내장형 중간 열교환기 열전달 모델

튜브-측의 핵연료 용융염에 대해,

$$W_{f,j}^{Hx} C_p^f (T_{f,j-1}^{Hx} - T_{f,j}^{Hx}) + h_{fw,j}^{Hx} A_{fw,j}^{Hx} (T_{w,j}^{Hx} - T_{f,j}^{Hx}) = 0 \quad (5)$$

튜브 벽에 대해,

$$h_{fw,j}^{Hx} A_{fw,j}^{Hx} (T_{f,j}^{Hx} - T_{w,j}^{Hx}) + h_{wc,j}^{Hx} A_{wc,j}^{Hx} (T_{c,j}^{Hx} - T_{w,j}^{Hx}) = 0 \quad (6)$$

또한, 셸-측의 냉각 용융염에 대해,

$$W_{c,j}^{Hx} C_p^c (T_{c,j}^{Hx} - T_{c,j+1}^{Hx}) + h_{wc,j}^{Hx} A_{wc,j}^{Hx} (T_{c,j}^{Hx} - T_{w,j}^{Hx}) = 0 \quad (7)$$

와 같이 나타낼 수 있다.

- 증기발생기 열전달 모델

셸-측의 냉각 용융염에 대해,

$$W_{c,j}^{SG} C_p^c (T_{c,j-1}^{SG} - T_{c,j}^{SG}) + h_{cw,j}^{SG} A_{cw,j}^{SG} (T_{w,j}^{SG} - T_{c,j}^{SG}) = 0 \quad (8)$$

튜브 벽에 대해,

$$h_{cw,j}^{SG} A_{cw,j}^{SG} (T_{c,j}^{SG} - T_{w,j}^{SG}) + h_{us,j}^{SG} A_{us,j}^{SG} (T_{s,j}^{SG} - T_{w,j}^{SG}) = 0 \quad (9)$$

또한, 튜브 축의 증기에 대해,

$$W_{s,j}^{SG} C_p^s (T_{s,j}^{SG} - T_{s,j+1}^{SG}) + h_{us,j}^{SG} A_{us,j}^{SG} (T_{w,j}^{SG} - T_{s,j}^{SG}) = 0 \quad (10)$$

$$W_{s,j}^{SG} C_p^s (T_{s,j}^{SG} - T_{s,j+1}^{SG}) = W_{s,j}^{SG} \Delta H_s$$

와 같이 나타낼 수 있으며, 증기재열기 모델에서도 위와 동일한 열전달 방정식으로 나타낼 수 있다.

상기 수식에 기술된 변수는 다음과 같다.

$W_{X,Z}^Y$: Node Z mass flow rate of material X in equipment Y

C_p^X : Specific heat of material X

$T_{X,Z}^Y$: Node Z temperature of material X in equipment Y

$h_{XX',Z}^Y$: Node Z heat transfer coefficient, material X to X' in equipment Y

$A_{XX'}^Y$: Heat transfer area, material X to X' in equipment Y

K_X^{Rx} : Fraction of fission power generated in material X

P_X^{Rx} : Node X fission power in reactor

ΔH_s : Entalpy change of steam

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

AMBIDEXTER 시뮬레이터로 개발중인 AMBISM 코드를 기존의 집중 파라미터(Lumped Prameter)모델에서 7개의 다절점 모델로 구성하여 정상상태에서 시뮬레이션을 수행하였다.

정상상태에서 다절점 AMBISM 코드의 타당성을 평가하기 위하여 각 계통기기의 온도, 압력, 열전달계수 계산 결과를 MSBR 열교환기 규격설계코드의 계산 결과와 비교·분석하였다.

먼저, 각 기기의 온도변화에 대한 결과를 살펴보면 규격설계코드의 경우와 다절점 AMBISM의 경우에 있어서 유사한 추이를 보이는 것을 확인 할 수 있다. 다만 증기발생기와 증기 재열기의 튜브측 출구온도에 있어서 약간의 큰 차이를 보이고 있다. 증기 출구온도에 있어서 이런 차이를 보이는 이유는 크게 세가지로 볼 수 있는데, 첫 번째로 열교환기나 파이프라인 설계시 중요한 고려대상인 열용량과 같은 요소들에 대한 정확한 geometry가 고려되지 않았기 때문이다. 두 번째로 규격설계코드에서 증기재열기 설계시 열용량에 맞는 열교환기 크기를 결정하는데 있어서 과열증기의 엔탈피값을 사용하지 않고 평균 비열값을 사용했기 때문이다. 세 번째로 조임계 증기에 대한 계산시 정확한 엔탈피값을 사용하지 않았기 때문이다. 각 기기에 대한 온도변화의 그래프는 그림 [4-1,2], [5-1,2], [6-1,2]에 각각 도

시하였다.

다음으로 각 기기의 압력변화에 대해서 살펴보면, 규격설계코드의 경우와 다절점 AMBISM의 경우에 있어서 매우 유사한 추이를 보이는 것을 확인 할 수 있다. 각 기기의 입·출구 압력값과 압력강하값이 두가지 경우의 비교에서 거의 동일하게 나타났다. 각 기기에 대한 압력변화의 그래프는 그림 [7-1,2], [8-1,2], [9-1,2]에 각각 도시하였다.

마지막으로 각 기기의 열전달계수의 변화에 대해서 살펴보면 규격설계코드의 경우와 다절점 AMBISM의 경우에 있어서 상당한 차이를 보이는 것을 확인 할 수 있다. 증기재열기의 경우에는 매우 유사한 추이를 보이고 있지만 내장형 열교환기와 증기발생기에서는 열전달 계수가 상당한 차이를 보이고 있다. 내장형 열교환기에서 쉘측은 유사한 추이를 보이지만 튜브측은 상당한 값차이가 났다. 각 기기에 대한 열전달계수의 변화 그래프는 그림 [10-1,2], [11-1,2], [12-1,2]에 각각 도시하였다.

시뮬레이션 결과, 본 연구에 의해 구성된 다절점 AMBISM 정상상태 모델은 온도와 압력은 MSBR 열교환기 규격설계코드의 시뮬레이션 결과값과 유사한 추이를 보이지만 열전달계수는 상당한 차이가 있음을 확인하였다. 용융염의 물성은 온도와 압력에 따라서 민감하게 변화하지 않지만 증기의 경우 온도와 압력에 따라서 물성이 선형적으로 변화하지 않을 뿐만 아니라 초임계 상태에서는 온도와 압력에 따라서 매우 변화가 크기 때문에 공간 종속성을 올바르게 적용하기 위해서는 보다 정확한 열역학 모델링이 중요하다.

결과적으로 AMBIDEXTER-NEC 계통 모사 해석용 다절점 AMBISM 정상상태 모델이 어느정도 타당성이 있지만 각각의 값에 대해서 발생한 오차에 대한 문제점들을 수정·보완해야함을 확인할 수 있었다.

4. 결론 및 토의

미래의 안정적인 원자력 이용 대안으로서 고유 안전성과 원자력 이용에 대한 개념이 획기적으로 개선된 AMBIDEXTER 원자력 에너지 시스템이 현재 개념 설계단계에 있다. 선행연구에서 용융염 핵연료의 순환을 고려한 일점 동특성 모델과 연계하여 흑연 감속재 노심, 내장형 열교환기, 증기발생기, 증기 재열기 모델을 집중 파라미터(Lumped Parameter) 모델로 구현하였으며, 외부 반응도 삽입에 대한 전체 시스템의 동적 거동을 해석할 수 있도록 하였으며, 이 해석을 통하여 열수송, 제어 및 안전 계통 설계를 위한 시스템의 동적 특성 자료를 제공하였다.

본 연구에서는 집중 파라미터(Lumped Parameter) 모델로 구성한 기존의 AMBISM 모델을 각각의 계통 기기에 대해서 7개의 다절점 모델로 더 세분화하여 정상상태에서 시뮬레이션을 수행하였고 개념설계의 기본이 되는 각 기기별 온도, 압력, 열전달계수 값을 MSBR 열교환기 규격설계코드의 시뮬레이션 결과값과 비교·분석하였다. 이를 통하여 온도, 압력에 대해서는 결과값의 유효성을 확인하였고, 열전달계수는 상당한 값차이가 남을 확인하였다.

비교·분석을 통하여 확인된 각각의 값에 대해서 발생한 오차에 대한 문제점들을 수정·보완한다면 선행연구에서 구축된 AMBISM 모델보다 더 정확한 전체 시스템의 동적 거동 모사에 대한 동특성 자료를 제공할 수 있을 것이다.

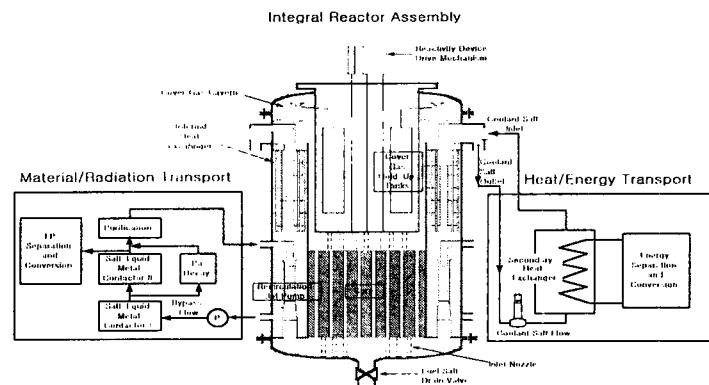
AMBIDEXTER의 더 정확한 동적 거동 해석을 위하여 향후 개선해야 할 내용으로는 첫째로 MSBR 열교환기 규격설계코드인 RETEX 프로그램에 있어서 과열증기에 대한 엔탈피값의 사용을 위한 프로그램 수정, 두 번째로 다절점 AMBISM 모델에 있어서 각 계통 기기의 구조와 크기 및 작업유체의 성질에 따른 절점수의 차별화, 세 번째로 정확한 geometry 구조와 물성치 적용을 위한 프로그램 수정으로 요약될 수 있다.

감사문

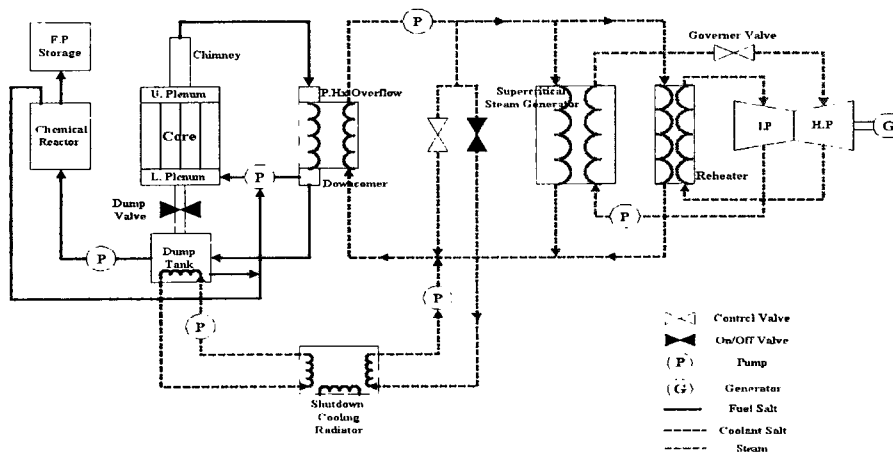
본 논문은 과학기술부에서 시행하는 “원자력 기초연구사업”의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

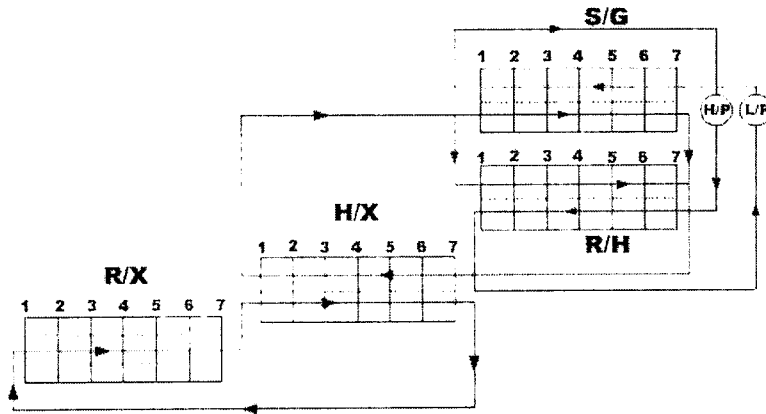
- [1] 오세기, 성근모, 원성희, 임현진, 조재국, “핵적 자활, 자정 능력을 갖춘 용융염 원자력 보일러 시스템의 개념설계에 관한 연구”, ‘97 원자력 기초연구과제 최종 보고서’, 과학기술부, 1998
- [2] 임현진, “AMBIDEXTER 열수송 시스템의 개념설계에 관한 연구”, 공학석사학위논문, 아주대학교, 1999
- [3] 임현진, 김태규, 김진성, 오세기, “AMBIDEXTER 열수송 시스템의 동적 거동 모사해석 모듈 개발”, 한국 에너지공학회, 추계학술발표회 논문집, 2000
- [4] 김태규, “AMBIDEXTER 시스템 출력 제어 모듈 설계에 관한 연구”, 공학석사학위논문, 아주대학교, 2001
- [5] C. H. Bettis 외, “Computer Programs for MSBR Heat Exchangers”, ORNL, 1971
- [6] “1967 ASME Steam Tables”, The ASME Research Committee on Properties of Steam, 1967



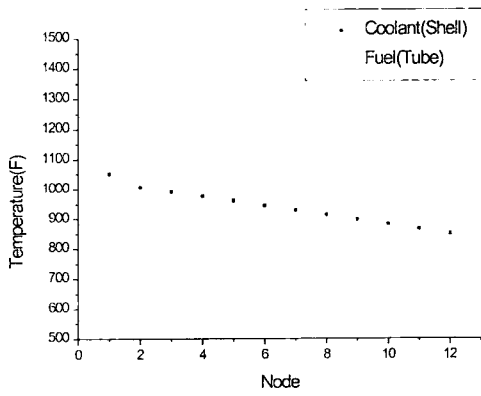
[그림 1] AMBIDEXTER 원자력 에너지 시스템 개념도



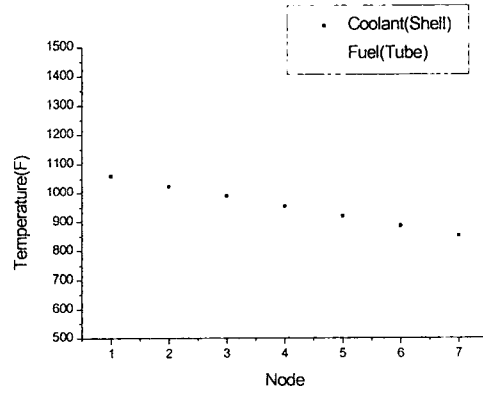
[그림 2] AMBIDEXTER 열수송 시스템 계통도



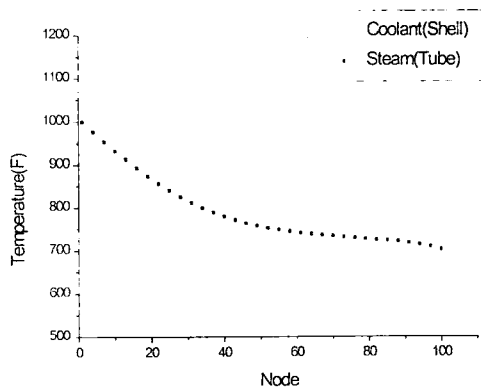
[그림 3] AMBIDEXTER 열수송 시스템 다절점 구성도



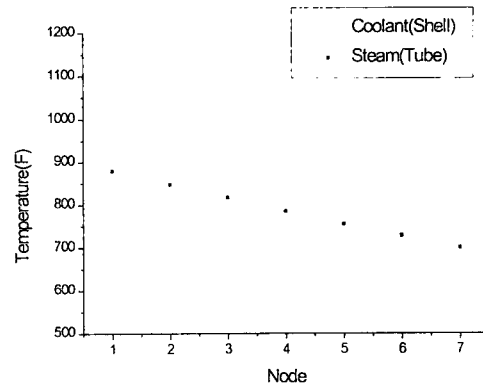
[그림 4-1] 내장형 열교환기 온도변화 (Reference Case)



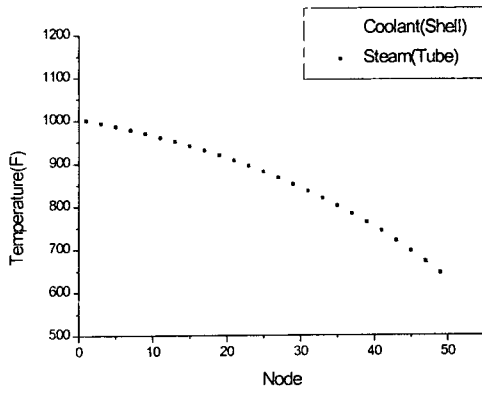
[그림 4-2] 내장형 열교환기 온도변화 (Multi-Node Case)



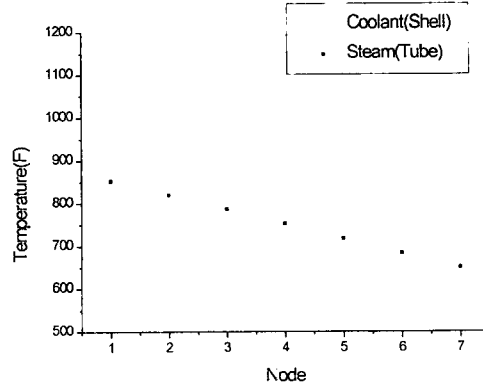
[그림 5-1] 증기발생기 온도변화 (Reference Case)



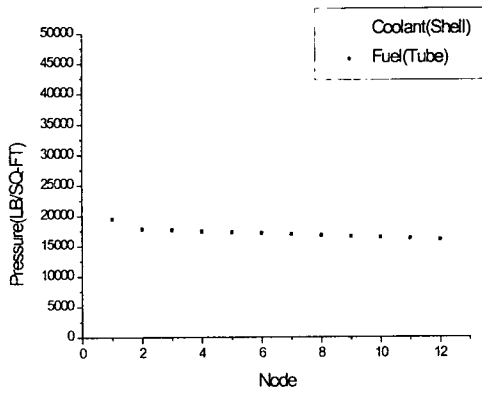
[그림 5-2] 증기발생기 온도변화 (Multi-Node Case)



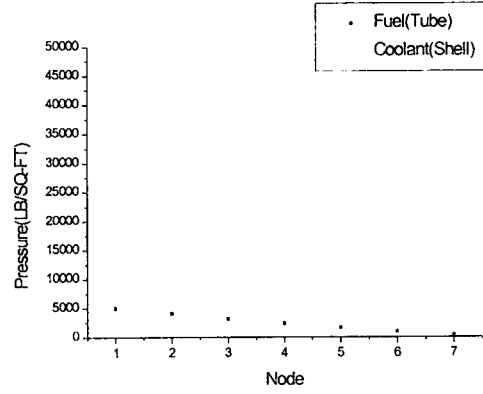
[그림 6-1] 증기재열기 온도변화
(Reference Case)



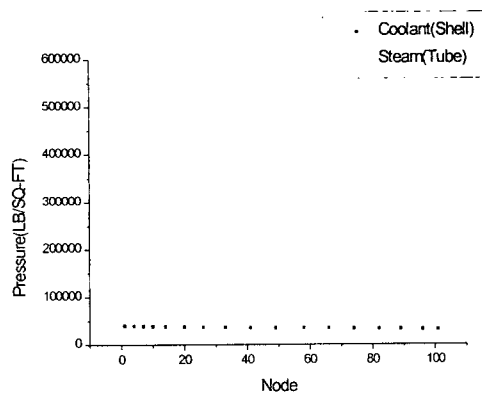
[그림 6-2] 증기재열기 온도변화
(Multi-Node Case)



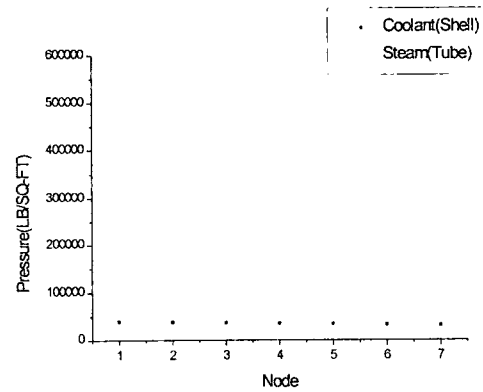
[그림 7-1] 내장형 열교환기 압력변화
(Reference Case)



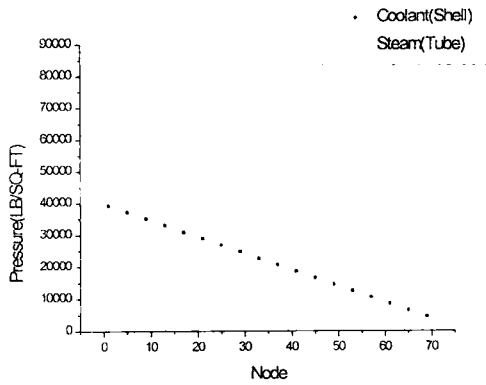
[그림 7-2] 내장형 열교환기 압력변화
(Multi-Node Case)



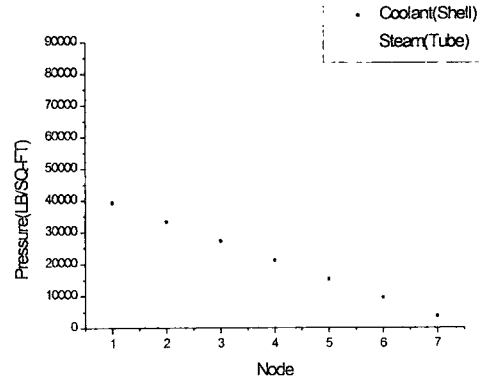
[그림 8-1] 증기발생기 압력변화
(Reference Case)



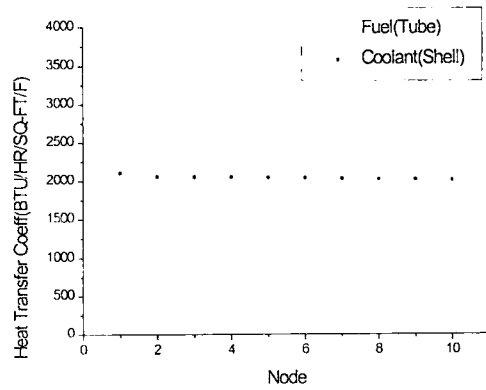
[그림 8-2] 증기발생기 압력변화
(Multi-Node Case)



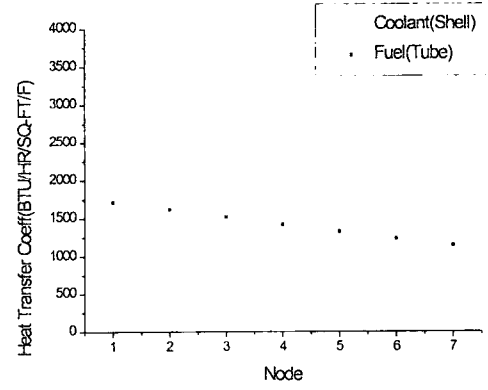
[그림 9-1] 증기재열기 압력변화
(Reference Case)



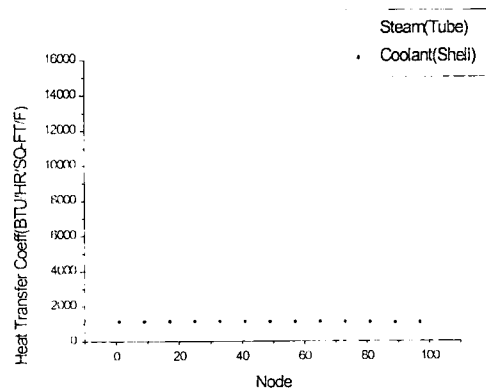
[그림 9-2] 증기재열기 압력변화
(Multi-Node Case)



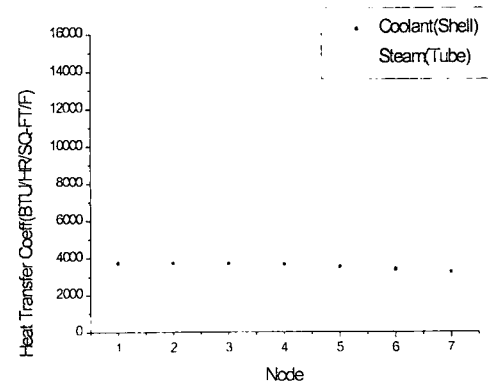
[그림 10-1] 내장형 열교환기 열전달계수
변화 (Reference Case)



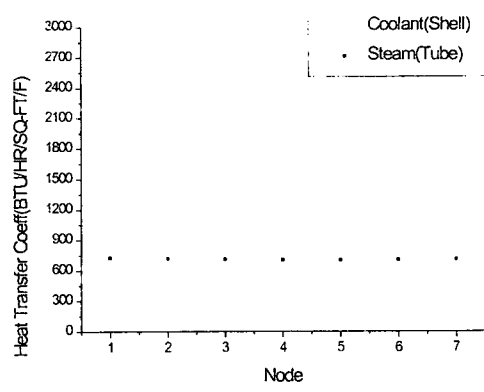
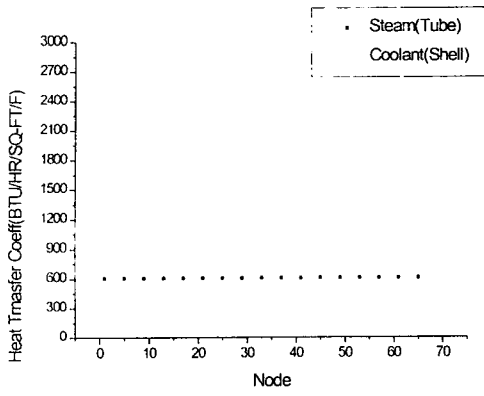
[그림 10-2] 내장형 열교환기 열전달계수
변화 (Multi-Node Case)



[그림 11-1] 증기발생기 열전달계수 변화
(Reference Case)



[그림 11-2] 증기발생기 열전달계수 변화
(Multi-Node Case)



[그림 12-1] 증기재열기 열전달계수 변화 (Reference Case) [그림 12-2] 증기재열기 열전달계수 변화 (Multi-Node Case)