

한국에너지공학회(1998년도)

추계 학술발표회 논문집 p21-28

## **AMBIDEXTER 일체형 원자로의 내장형 열교환기 개념설계** *Conceptual Design Study on the Internal Heat Exchanger of AMBIDEXTER Integral Reactor*

임현진, 원성희, 조재국, 오세기  
아주대학교

### 1. 서론

AMBIDEXTER 원자력 에너지 시스템은 Th/<sup>233</sup>U 핵주기를 이용한 용융염 핵연료가 내장형 열교환기를 포함하는 무배관 형태의 일체형 원자로 시스템을 순환하면서 1차 냉각 계통을 이루고, 독립된 온라인 정화계통을 통한 핵연료 일부의 연속적인 추출, 재주입에 의해 액상의 핵연료가 연속 순환함으로 노심의 임계를 유지한다. 이와 같은 시스템 개념은 핵연료 물질의 수급 안정성 및 경제성 제고, 배관망 파손에 의한 대형사고(LOCA)의 방지, 열수송 회로와 방사성 물질회로의 독립을 통한 효과적인 원자력 에너지 이용과 고유 안전성을 확보하는 장점을 통해 원자력 현안 문제의 근본적 해결 방안을 제시하고 있다.

이러한 배경으로 현재 그림1.에 도시한 데로 개념 설계가 이루어지고 있는 AMBIDEXTER (Advanced Molten-salt Break-even Inherently-safe Dual-mission Experimental and Test Reactor) 원자력 에너지 시스템이 250 MW<sub>th</sub>급 열출력 목표로 연구가 진행 중에 있다.

AMBIDEXTER 일체형 원자로는 고온, 저압의 핵연료를 냉각시키기 위한 1차 열수송 계통의 원자로 용기 내 내장을 통해 방사성 물질의 외부누출 방지, 대형 배관망의 배제, 최단거리내의 열교환 효과를 통해 핵연료 운영의 안전성과 열에너지의 효율성을 원천적으로 구현할 수 있도록 하는 개념이다.

본 연구에서는 AMBIDEXTER 일체형 원자로 열수송 시스템의 핵연료 재순환 개념으로부터 요구되는 내장형 열교환기의 열유동 성능요건을 정의하고 이에 따른 개념설계를 통해 그 타당성을 확인하였다.

열교환기의 설계는 주어진 원자로 노심 정격출력의 100% 용량을 만족하는 설계 중에, 기하학적 규모의 로내 내장 가능성, 용융염 유동에 따른 튜브측 압력 손실과 이를 통한 원자로내 용융염 재순환 가능성을 중심으로, 열교환기의 규모와 열유동 성능에 관계된 인자들의 변화에 따른 열교환기의 설계 범위를 도출하였으며, Simulation은 MSBR Plant의 열교환기 개념설계에서 사용한 PRIMEX를 이용하였다.

### 2. AMBIDEXTER 일체형 원자로 열수송 시스템의 개념

일체형 원자로는 용융염의 화학적 활성에 대해 부식저항성이 강한 니켈합금, Hastelloy 계열 재료의 원통형 압력용기 내에 1차 열교환기 4기를 포함하는 일

체형, 무배관 형태로 구성되어 있다. 노심은 용기 하단 중앙부분에 육각주형 혹은 연 감속재 격자구조의 집합체로서 상하 노심 지지 구조물에 의해 고정되며, 용기의 상단부분 원주 방향으로 동심원 상에 4기의 1차 열교환기를 배치하고, 중단부분 원자로 집합체 외벽과 노심 슈라우드 사이의 환형공간에 일정 간격으로 재순환 펌프군이 배치되어 있다.

이러한 일체형 원자로의 개념은 열전달 계통의 회로망 설계에 중요 사항인 기기간 배관길이와 밸브 수량을 가능한 최소화하는 것으로, 무배관 형태의 기기 배치 개념에 따라 설계기준사고의 원인이 되는 배관 파단 및 유량상실의 확률을 획기적으로 낮출 수 있으며, 계통내 유통하는 용융염 핵연료의 재고량을 최소화하여 경제성을 향상시킨다.

용융염 핵연료는 노심 하부로 621 °C로 유입되어 핵반응을 통해 704 °C로 상승된 후, 침니를 거쳐 내장형 열교환기의 상부 튜브측으로 유입된다. 열교환기 용융염은 튜브측을 하향하면서 Shell측의 상향 냉각염과의 열교환에 의해 노심 유입온도인 621 °C로 하강된 후, 다운캅어를 통해 하향하여 재순환 펌프에 의해 노심으로 유입되는 재순환을 이룬다. 이와 같이, 내장형 열교환기를 포함한 일체형 원자로의 핵연료 및 열수송의 다중 매체역할을 재순환 용융염을 통해 구현할 수 있다.

열교환기 shell측의 냉각염을 통한 1, 2차 계통간의 대한 중간 열전달 회로 개념은 일체형 원자로의 고온 용융염에 대해 직접 증기발생기를 도입하는 경우 발생 가능한 문제들로 첫째, 운전 중 발생 가능한 열교환기 튜브의 소수 경미한 파손으로 증기터빈을 통한 방사성 물질의 대기 유출, 둘째, 포화증기와 온도차에 의해 부분적으로 발생할 수 있는 용융염 핵연료의 응고가능성, 셋째, 경계면 파손시 고온고압수의 원자로내 유입에 의한 급격한 충격 및 부식과 이에 따른 핵연료의 균질성 및 정화공정의 효율성 하락 등의 대비를 위함이며, 냉각염 유량 조절에 의한 원자로 출력을 조절하는 제어계통에 대한 다양성 부여를 위해 도입되었다. 2차측에 대한 중간 열전달 회로의 매체가 되는 냉각염 및 핵연료 용융염의 물성은 표1.과 같다.

이러한 개념에 의한 일체형 원자로의 열출력 규모로 주어지는 내장형 열교환기의 성능요건은 첫째, 일체형 원자로 용기 내 입면배치가 가능한 기하학적 규모, 둘째, 이러한 규모범위 내에서 주어진 노심의 정격출력을 만족하는 열용량 관계인자인 용융염 및 냉각염 유량의 수용능력, 셋째, 열수송 시스템의 용융염 순환에 제약을 주지 않는 적절한 튜브측 압력손실 등이 요구된다.

### 3. 내장형 열교환기 모델

그림2.는 본 연구의 참조모델인 내장형 열교환기의 개략적 단면도이다. 열교환기는 Shell & Tube Type이며, 모든 구성요소는 Hastelloy 계열 재질을 사용한다.

고온, 저압의 용융염 핵연료는 튜브측을 수직 하강하여 다운캅어로 유출되고,

냉각염은 중앙의 다운컴어를 통해 하강한 후 Shell측의 베플 사이를 통해 튜브 외벽과 접촉하여 상승하는 Counter current flow 형태의 열교환을 이룬다.

용융염 유입을 위한 튜브들은 일정간격의 다발형태로 환형평판에 배치되어 있으며, 외부 표면은 나선형 홈으로 열전달 표면적을 증가시키는 구조를 갖추고 있다. 일정간격으로 배치되어 있는 베플들은 냉각염에 대해 Cross-flow를 유도하여 용융염 간의 열전달 효과를 향상시키며, 열교환기의 튜브들을 고정시키는 역할을 한다.

베플이 도입되지 않은 튜브 상단은 고온 용융염의 초기 유입에 의해 발생하는 열응력 완화에 집중하도록 정현파 형태를 이루고 있다.

Simulation에 사용한 PRIMEX 코드는 개략적인 원자로 출력 규모로부터 주어지는 일정 범위의 열교환기를 총 열전달량, 열전달 매체인 용융염, 냉각염의 열교환기 입출 온도, 중앙 Shell측 내경, 열교환기 직경, 튜브의 두께 및 직경, 허용 압력 등을 기본 파라미터로 계산을 수행한다.

Shell측 열전달계수는 베플의 형상에 밀접한 관계가 있는 혼합효과를 고려하여 두 베플 간의 간격과 튜브의 유효수직길이가 열적 평형조건을 만족하도록 계산을 수행하며, 온도에 관련되는 독립연산자들은 선행된 연구를 통해 도출된 실험식을 사용한다.

PRIMEX 코드에서 도입한 나선형 홈 튜브 표면의 열전달 향상효과는 선행 연구의 실험식을 통해 도출되었으며, Reynold 수에 대해 다음과 같이 표현된다.

$EF_i$  및  $EF_o$ 는 각각 튜브 내측 및 외측의 열전달 향상 인자로서,  
 $Re \geq 10,000$  인 경우,  $EF_i = 2.0$ ,  $EF_o = 1.3$  이고,  
 $Re \leq 1,000$ , 이면  $EF_i = 1.0$ ,  $EF_o = 1.0$  으로 향상되지 않으며,  
 $1,000 < Re < 10,000$  의 범위에서는

$$EF_i = 1.0 + \left( \frac{Re - 1000}{9000} \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$EF_o = 1.0 + 0.3 \left( \frac{Re - 1000}{9000} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ 로 각각 계산된다.}$$

또한, Baffle간의 간격에 대한 냉각염의 Cross-flow 구간을 정의함에 따라 도입되는 Berglin 보정계수, BCF(Bergelin's Correction Factor)는

$$BCF = 0.77 \left( \frac{X}{Y} \right)^{-0.138} \text{ 로 정의되었다. (X:Baffle 간격, Y:Cross-flow구간)}$$

이러한 향상인자 및 유실인자는 튜브측의 압력 및 Shell측의 열전달 인자의 계산에 대해 다음과 같이 적용된다.

튜브측 압력손실, 
$$\Delta P_i = \frac{4fl}{d_i} \left( \frac{G_i^2}{2\rho_i G_c} \right) (EF_i)$$

그리고 Shell측 열전달계수를 계산하기 위해 도입한 열전달 인자,  $J$

$$J = \frac{h_B}{C_p G_m} \left( \frac{C_p \mu_b}{k} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{\mu_s}{\mu_b} \right)^{0.14} (EF_o)(BCF)(LF)$$

유실인자인 LF(Leakage Factor)는 상수 값으로서 입력자료에 포함되며 상기 각 수식에 기술된 파라미터들은 다음과 같다.

- $k$  = 열전도도, Btu/hr · ft · °F
- $d_o$  = 튜브외경, ft
- $d_i$  = 튜브내경, ft
- $t$  = 튜브벽 두께, ft
- $f$  = 마찰계수
- $l$  = 튜브길이, ft
- $G_i$  = 튜브 내측의 유체 평균 속도, lb/hr · ft<sup>2</sup>
- $\rho_i$  = 튜브 내측 유체 밀도, lb/ft<sup>3</sup>
- $h_B$  = Baffle 영역 열전달 상수, Btu/hr · ft<sup>2</sup> · °F
- $C_p$  = 비열, Btu/lb · °F
- $G_m$  = 유체 평균 속도 lb/hr · ft<sup>2</sup>
- $\mu_s$  = 벽면 온도에서의 유체 점도, lb/hr · ft
- $\mu_b$  = Bulk fluid 온도에서의 유체 점도, lb/hr · ft

이와 같이 주어진 열유동 성능요건에 따른 내장형 열교환기의 계산에는 원자로 용기에 입면배치가 가능한 전장 및 직경의 기하학적 규모에 대해서, 튜브측의 압력 손실, 튜브의 개수 및 이에 따른 열수용 능력을 중심으로 수행하였다.

#### 4. 시뮬레이션 및 해석

열교환기의 설계용량은 250 MW<sub>Th</sub> 노심 출력에 대해 총 4기로 동일하게 배분됨에 따라 기 당 62.5 MW<sub>Th</sub>를 담당토록 하였다. 용융염의 출구 및 입구온도는 노심의 열수력 설계에 대응하여 각각 621 °C 및 704 °C로 하였으며, 계통 내에서의 열손실은 무시하였다. 2차 계통의 냉각염 온도는 454 °C 및 565 °C로 가정하였다.

직경은 주어진 노심 규모를 기준으로 입면배치에 대한 기하학적 가능 규모인 4 ft 이내로 하였으며, Tube 직경은 선행된 MSBR의 설계를 참조하여 0.03 및

0.04 ft의 두 경우로 하였다. 튜브측 압력손실 한계는 재순환 펌프를 고려하여 20~50 psi의 범위로 Simulation을 수행하였다.

주어진 입력 변화에 따른 열교환기의 튜브측 압력손실, 튜브 개수, 전장, 직경에 대한 변화는 그림 3과 같다.

Simulation 결과, 열유동 성능에 요구되는 내장형 열교환기의 설계는 이론적으로 노심 출력에 대해 99.9%이상의 열수용 능력을 갖는 직경 3ft 이하의 열교환기는 주어진 튜브측 압력 손실이 15~50 psi인 범위에서, 0.01 ft의 튜브직경 차이에 따라, 열교환기의 튜브 길이와 개수의 민감한 차이를 볼 수 있었으며, 튜브직경 0.03 ft의 경우와 0.04 ft인 경우 그 전장이 각각 6.8~8.2 ft 및 10~12ft의 범위에서 구현 가능한 것으로 확인되었다.

표3.에는 개념설계 재원의 한 예로 튜브직경 0.03 ft에서 약 24psi의 튜브측 압력 손실을 갖는 내장형 열교환기 재원을 기재하였다.

## 5. 결론 및 토의

1차 열전달 계통을 내장형 열교환기를 통해 구현하는 무배관 형태의 *AMBIDEXTER* 일체형 원자로 개념으로부터 방사성 물질의 외부 누출 위험성 및 배관망 파단사고를 원천적으로 해결할 수 있다. 본 연구의 내장형 열교환기 개념설계에 의해 개략적인 규모범위에 따른 열수용 능력 및 용융염 핵연료의 재순환 등의 열유동 성능요건이 만족되는 범위가 도출됨에 따라 일체형 원자로의 내장형 열교환기 개념이 타당함이 입증되었다. 원자로 용기내 총 4기로 구성되는 동일 열용량의 내장형 열교환기에 대해, 250 MWth 의 25%인 62.5 MWth의 기당 열수용 능력을 갖는 열교환기는 3ft이하의 직경 및 15~50 psi의 튜브측 압력 손실을 갖는 범위에서, 0.03 ft, 0.04 ft의 튜브 직경에 대해 각각 6.8~8.2 ft 및 10~12 ft의 전장으로 내장가능범위를 구할 수 있었다.

이와 같은 내장형 열교환기에 대해, 일체형 원자로는 노심의 규모와 입, 출구 플레넘과 침니 및 다운컴머를 고려하여, 길이와 상부 최장 직경이 대략 580cm 및 400cm의 범위를 갖으며, 계통의 저압운전 특성에 의해 최대 압력은 열교환기의 튜브측 압력 손실과 유사한 범위에서 설계가 이루어질 것이다.

## 참고문헌

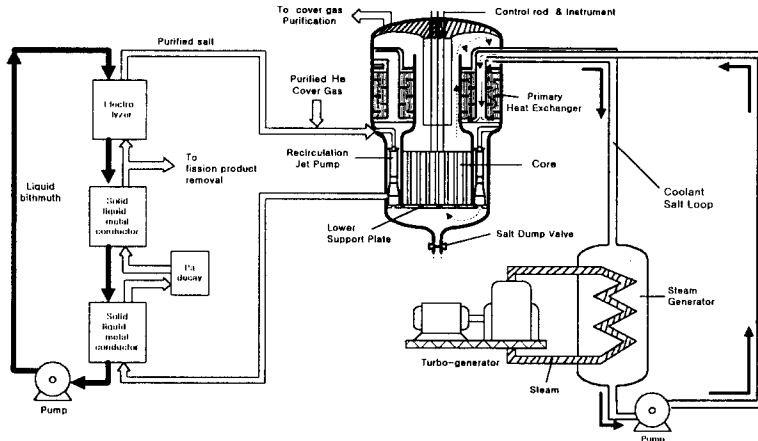
- [1] 오세기, 정근모, "AMBIDEXTER 원자력 복합체-신뢰성 있는 미래 원자력에너지 이용방안", 한국 에너지공학회, 춘계학술발표회 논문집, 1998.
- [2] 오세기, 정근모, 원성희, 임현진, 조재국, "핵적 자활, 자정 능력을 갖춘 용융염 원자력 보일러 시스템의 개념설계에 관한 연구", '97원자력 기초연구과제 최종 보고서", 과학기술부, 1998.
- [3] 원성희, 임현진, 조재국, 오세기, "등가연소도 최적화를 위한 AMBIDEXTER 핵연료 재생공정의 시간상수 특성화 연구", 한국원자력학회, 춘계학술발표회 논문집, 1998
- [4] 조재국, 원성희, 임현진, 오세기, "등가연소도 근사법을 이용한 AMBIDEXTER 노심직자의 핵적 자활성에 관한 연구", 한국 에너지공학회, 춘계학술발표회 논문집, 1998
- [5] Roy C. Roberson 외, "Conceptual Design Study of A Single-fluid Molten-Salt Breeder

Reactor", ORNL, 1971.

[6] C. H. Bettis 외, "Design Study of A Heat-Exchange System for One MSBR Concept", ORNL, 1967.

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

[8] S. Cantor 외, "Physical Properties of Molten-Salt Fuel, Coolant, and Flush Salt", ORNL, 1968.



AMBIDEXTER NUCLEAR COMPLEX

그림 1. AMBIDEXTER 원자력 복합체 개념도

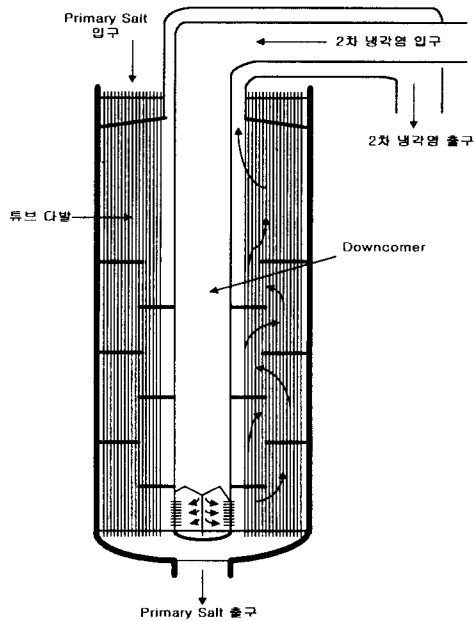


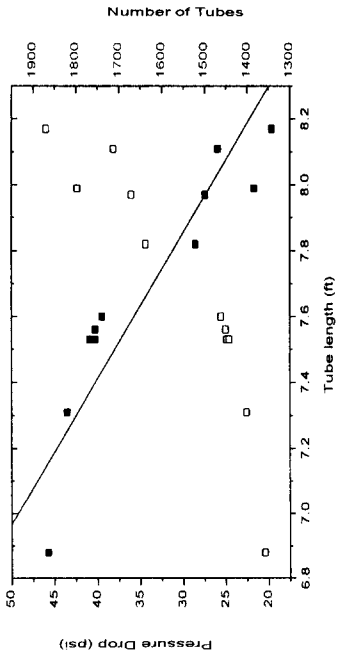
그림 2. 내장형 열교환기 단면도

	Fuel Salt	Coolant Salt
Components	LiF-BeF <sub>2</sub> -ThF <sub>4</sub> -UF <sub>4</sub>	NaBF <sub>4</sub> -NaF
Composition, (mole %)	71.7-16-12-0.3	92-8
Approx. molecular weight	64	104
Approx. melting point, °F	930	725
Vapor pressure at 1150 °F (mmHg)	< 0.1	252
Density, (g/Cm)	3.752-(6.68×0-4)T °C	2.252-(7.11×10-4)T °C
Viscosity, (Centipoise)	0.109(exp(4090/T °K))	0.0877(exp(2240/T °K))
Heat Capacity, (Btu/lb °F ± 2 %)	0.324	0.360

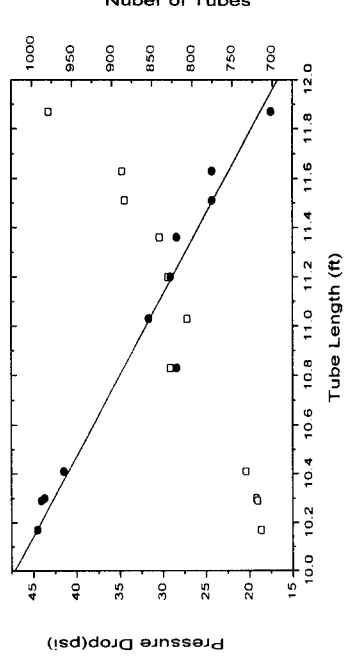
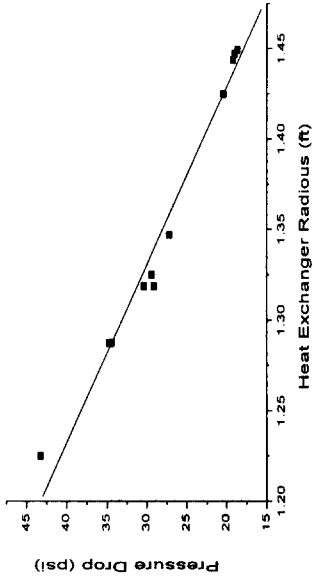
표 1. 핵연료 용융염 및 냉각염 물성

파라미터	재원
총 열전달량, (Btu/hr)	213456900
냉각염 mass flow rate, (lb/hr)	2958333
용융염 mass flow rate, (lb/hr)	438276
튜브 측 압력강하, (lb/in <sup>2</sup> )	23.86
열교환기 직경, (ft)	2.9126
베플 간 간격, (ft)	0.4317
튜브다발 내 유체 체적, (ft <sup>3</sup> )	6.12
총 열전달 면적(튜브 외벽 기준), (ft <sup>2</sup> )	1259.24
튜브 개수	1787
튜브 길이, (ft)	7.47
열교환기 전장, (ft)	6.72
tube 수직측 길이, (ft)	4.69
튜브벽 평균온도, (°F)	1157.4
Shell측 평균온도, (°F)	970.83

표 2. AMBIDEXTER 내장형 열교환기 재원



(a) 튜브직경 = 0.03 ft



(b) 튜브직경 = 0.04 ft

그림 3. 튜브 직경에 따른 열교환기의 튜브측 압력 및 규모 변화