

## 250MW<sub>th</sub> AMBIDEXTER 노심의 반응도 특성 및 출력 분포 해석

조재국, 원성희, 임현진, 김태규, 오세기

아주대학교

### Some Analyses of Reactivity Characteristics and Power Distribution of the 250MW<sub>th</sub> AMBIDEXTER Core

Jae Kook Cho, Sung Hee Won, Hyun Jin Lim, Tae Kyu Kim, Se Kee Oh  
Ajou University

#### 1. 서론

농축 우라늄 고체 핵연료를 사용하는 기존의 원자력 발전로 개념에서는 근본적으로 핵연료인  $^{235}\text{U}$  농축과 노내에서 Pu 누적에 따른 핵확산 우려, 고준위 방사성 폐기물로 취급되는 사용후 핵연료 처리·처분에 관한 정책적·기술적 장기전망의 불확실성, 그리고 핵안전성 문제 등을 완전하게 해결할 수 없다. 본 연구는  $\text{Th}/^{233}\text{U}$  핵연료주기를 이용하는 용융염 핵연료 AMBIDEXTER(Advanced Molten-salt Break-even Inherently-safe Dual-mission EXperimental and TEst Reactor) 원자로 시스템의 개발을 통해 이와 같은 원자력 발전기술이 안고 있는 고유한 문제를 해결할 수 있는 방안을 찾기 위해 수행되고 있다.<sup>1)</sup>

AMBIDEXTER 원자로 시스템은 일체형 구조로서 1차 열전달계통의 배관과 벨브를 혁신적으로 배제하여 용융염 핵연료가 원자로용기 하부 중앙에 위치한 노심을 통과하면서 자체 핵분열로 가열되어 원자로용기 상부주변에 내장된 열교환기를 거쳐 냉각된 후 바로 다시 로심으로 유입되며, 이때 핵연료 용융염 일부는 우회회로를 통하여 정화공정에서 정화·재생 처리되어 이중 핵연료물질인  $^{233}\text{U}$ 은 로심으로 재유입된다. 결국 핵분열로 생성된 열에너지와 방사성물질은 각각 다른 경로를 통해 원자로에서부터 변환·이용설비계통으로 수송되므로 원자력의 평화적 이용에 대한 다원화 효과를 얻을 수 있다. 그림 1은 AMBIDEXTER 원자로 시스템의 개념도로서 원자로집합체, 방사선/물질 수송회로 및 열/에너지 수송회로를 함께 도시하였다.

본 연구는 AMBIDEXTER 원자로의  $\text{Th}/^{233}\text{U}$  핵연료에서 전환율이 수지균형점을 유지하는 핵적자활성 설계조건과 전출력운전 영역에서의 최소 임계반응도를 유지하는 임계도 조건을 동시에 만족하는 로심격자 핵설계<sup>2)</sup> 해석을 수행하여 250MW<sub>th</sub> 표준원형로에 대한 최적 격자 상수를 구하였다. 또한 핵설계에 중요한 특성자료이며, 안전성 해석의 입력자료로 사용하기 위하여 노심을 구성하고 있는

물질의 온도변화 및 용융염 핵연료 농도 변화에 대한 반응도 효과를 분석하였다. 계산에 이용한 코드는 2차원 로심격자 설계용 중성자/감마선 수송이론 코드 HELIOS<sup>3)</sup>와 온라인 정화공정의 특성 및 용량을 고려한 용융염 핵연료의 성분비 계산을 위한 ORIGEN2 코드를 결합하여 격자상수 및 반응단면적을 계산하였다. 그리고, R-Z 2차원 다분 중성자 확산 이론 코드인 SQUID<sup>5)</sup>를 이용하여 AMBIDEXTER 로심의 반응도 특성, 출력 및 중성자속 분포 특성을 모사하였다.

## 2. AMBIDEXTER 노심격자 및 로심 모델

AMBIDEXTER 노심을 구성하는 표준격자는 흑연감속재의 육각주 중앙에 원주형의 관통구가 있는 구조로서 노심격자간격은 16cm, 연료 채널은 10.24cm, 높이는 250cm이며 핵적 자활성을 만족하는 용융염의 표준성분비는 <sup>7</sup>LiF 71.625 mole %, BeF<sub>2</sub> 16.0 mole %, ThF<sub>4</sub> 12.0 mole %, <sup>233</sup>UF<sub>4</sub> 0.375 mole %인 단일염으로 균일화하였다. 이밖에 HELIOS 모델에 사용된 입력자료는 표 1에 나타내었다.

핵연료 용융염 밀도는 핵연료 평균온도인 1200 °F에 대응하는 3.3267g/cc, 흑연감속재의 밀도는 이론치의 86.4%인 1.9g/cc를 사용하였다.

출력밀도는 MSRE나 MSBR의 설계 및 운전자료<sup>6),7)</sup>에 근거하여 열출력과 노심체적에 따라 용융염 단위체적 당 출력으로 표현하여 50W/cc로 결정하였다.

AMBIDEXTER 노심 설계해석을 위한 SQUID 모델은 노심을 반경 원통형으로 단순화하여 노심의 유효반경을 130.5cm, 반사체 외부 반경을 157.5cm, 노심의 높이 249.8cm인 이원 구조로 모델링 하였다. 그림 2의 SQUID 코드 입력 모델에서 mesh의 크기는 원통 반경방향으로  $\Delta r=4.5\text{cm}$ , 그리고 원통 축방향으로  $\Delta z=3.47\text{cm}$ 로 균일하게 분할하였으며, 외부에너지 중성자속분포 경계조건은  $\alpha \phi + \beta D \frac{d\phi}{dx} = 0$ 에서  $\alpha = \beta = 1$ 로 하는 외압경계 조건을 가정하였다. 이외 영역별 균정수를 비롯한 SQUID 입력자료는 HELIOS를 이용하여 계산하였으며 표 2에 수록하였다.

## 3. 반응도 및 노심 출력 분포 해석

AMBIDEXTER 원자로 운전상태의 변화에 대한 반응도 효과를 분석하기 위해 용융염-흑연 등은 반응도 계수, 용융염 핵연료의 온도 계수, 용융염 밀도 계수 및 <sup>233</sup>U mole % 변화 당 미분 반응도 양을 계산하였다.

반응도 함수 구성요소 중, 온도는 핵연료 성분비의 대부분을 차지하고 있는 <sup>7</sup>LiF(72.625 mole%)의 용융점(1121 °F)을 감안하여 평가하기 위해 1140 °F~1300 °F(기준온도:1200 °F)범위에서, 감속재인 흑연의 온도는 1210 °F~1350 °F(기준온도:1250 °F)범위에서 용융염-흑연 등가온도 변화에 대하여, 그리고 감속

재의 온도는 기준온도(1250 °F)에 두고 용융염 핵연료 온도를 1140 °F~1300 °F범위에서 변화시켜 핵연료 온도 변화에 대한 반응도를 평가하였다. 또 다른 구성요소인 핵분열물질  $^{233}\text{U}$ 의 mole %( $^{233}\text{U}$  기준 분율; 0.375 mole %)는 mole % 당 -10%~10%범위에서, 용융염 밀도(기준밀도; 3.3267 g/cm<sup>3</sup>)는 밀도당 -10%~10%범위에서 각각의 유효증배계수를 HELIOS 코드로 평가, 반응도를 온도와 성분비에 대한 함수로 표현하였다.

그림 3에 도시한 노심 온도 및 용융염 핵연료의 온도 변화에 대한 반응도 변화율로부터 정상운전 조건에서 노심의 반응도 계수와 핵연료 반응도 계수를 각각  $-2.570 \times 10^{-5} \Delta k/k \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $-3.110 \times 10^{-5} \Delta k/k \text{ } ^\circ\text{C}$ 로 평가하였다. 특히 AMBIDEXTER 원자로의 핵연료 온도계수는 PWR의  $\sim -1.5 \times 10^{-5} \Delta k/k \text{ } ^\circ\text{C}$ 에 비교하여 약 2배의 부(-)값을 가지므로 상대적으로 높은 고유안전성을 보유하고 있음을 알 수 있다. 이는 온도상승에 대한 액체 핵연료의 부피팽창이  $\text{UO}_2$  고체핵연료에 비해 크고, 높은 핵연료 온도에서 Th의 공명 흡수 단면적의 Doppler broadening 효과가 큰 영향을 미치기 때문이다.

그림 4에는 용융점의 밀도와  $^{233}\text{U}$  mole %의 변화에 대한 반응도 효과를 도시하였다. 용융점 밀도의 반응도 계수는 정상운전온도 값 부근에서  $-5.17 \times 10^{-4} \Delta k/k \text{ } \%$ 로 나타났으며, 표준  $^{233}\text{U}$  mole %에 대해 %변화는  $2.91 \times 10^{-3} \Delta k/k \text{ } \%$ 로서 이는 용융염내 핵분열성물질의 농도 조절이 안전성에 매우 중요한 요소가 됨을 의미한다.

AMBIDEXTER 원자로를 용융염 표준노심격자로 된 노심과 외부에 흑연반사체가 있는 원주형(그림 2)으로 단순화하여 R-Z 2차원 중성자 확산 코드 SQUID를 이용하여 계산하였다. 그림 5-1은 노심의 중앙에서 축방향(Z)과 반경방향(R)으로 원자로 출력분포를 계산한 결과를 도시하였는데, 축방향 출력은 cosine형으로 최대 47.30W/cc 및 평균 29.95W/cc를 나타내며 출력침두인자가 1.58, 반경방향으로는 각각 47.30W/cc, 35.12W/cc로서 출력침두인자가 1.35로 되어 노심출력 침두인자는 2.13으로 평가된다. 그림 5-2는 같은 위치에서의 열중성자속 분포를 도시한 것인데, 최대치와 평균치는 각각 축방향으로는  $1.05 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ ,  $6.66 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ , 반경방향으로는  $1.05 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ ,  $7.34 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ 로 나타났다. PWR의 경우는 영역별로 농축도 또는 연소도를 서로 다르게 설계하므로 최대출력 제한치를 만족하는 출력평탄화를 이루나, AMBIDEXTER는 용융염 핵연료를 사용하므로 기존 고체핵연료사용 원자로처럼 연료봉 용융방지를 위해 허용 핵연료 온도를 넘지 않기 위한 국부출력 제한을 고려할 필요가 없다.

#### 4. 결론

2차원 노심핵설계 코드 HELIOS를 이용,  $^7\text{LiF}-\text{BeF}_2-\text{ThF}_4-^{233}\text{UF}_4$  용융염 핵연료를 사용하는 열출력 250MW<sub>th</sub> AMBIDEXTER 원자로의 육각주형 노심격자가 핵적자활성 설계조건과 임계도 조건을 만족하는 표준노심격자를 구성, 용융염 핵연

료 및 감속재 온도 변화에 대한 반응도와 용융염 핵연료의 밀도 및  $^{233}\text{U}$ 의 Mole % 변화에 대한 반응도를 계산하고, 온도와 용융염 농도 변화에 대한 반응도 효과 분석을 수행하였다. R-Z 2차원 중성자 확산 이론 코드 SQUID를 이용, 표준 노심격자로 구성된 노심과 외부에 흑연 반사체로 구성된 원통형 AMBIDEXTER 원자로의 출력 및 중성자속 분포를 계산하였다.

AMBIDEXTER 노심은 PWR에 비해 보다 큰 부(-)의 온도계수 값을 갖는 반응도 특성에 의해 상대적으로 더 높은 고유 안전성을 보유하고 있고, 또한 용융염내 핵분열성물질의 농도 조절이 원자로 안전성에 매우 중요한 요소임을 알았다.

노심의 출력 및 중성자속 분포를 통해 노심의 출력첨두인자를 2.13으로 평가하였다. AMBIDEXTER 원자로는 용융염을 핵연료로 사용하므로 큰 출력첨두인자를 가져도 기존 고체 핵연료 사용 원자로의 연료봉 용융의 문제가 없기 때문에 고체핵연료봉 용융방지를 위한 핵연료 허용 온도 제한을 위한 국부출력 제한을 고려할 필요가 없다.

결국, AMBIDEXTER 원자로는 기존 원자력 발전 시스템 보다 더 높은 고유 안전성을 유지하며, 고 출력을 내는 설계가 가능하다.

## Reference

- 1] 오세기, 정근모, AMBIDEXTER 원자력 복합체-신뢰성 있는 미래 원자력에너지 이용 방안, 한국 에너지공학회 춘계학술발표 논문집, 1998
- 2] 조재국, 원성희, 임현진, 오세기, 김택겸, 등가연소도 근사법을 이용한 AMBIDEXTER 노심격자의 핵적자활성에 관한 연구, 한국 에너지공학회 춘계학술발표 논문집, 1998
- 3] USER MANUAL HELIOS, SCANDPOWER, 1995
- 4] 원성희, 임현진, 조재국, 오세기, 등가연소도 최적화를 위한 AMBIDEXTER 핵연료 재생공정의 시간 상수특성화 연구, 한국 원자력학회 춘계학술발표회 논문집, 1998
- 5] A. Daneri, B. Gabutti, E. Salina, SQUID-360, Research Contract Euratom-Fiat-Ars, 1967
- 6] L. G. Alexander, Molten Salt Converter Reactor Design Study and Power Cost Estimates from a 1000MW<sub>e</sub> Station, ORNL-TM-1060 Oak Ridge National Laboratory, 1965
- 7] J. R. McWherter, Molten Salt Breeder Experiment Design Bases, ORNL-TM-3177 Oak Ridge National Laboratory, 1970

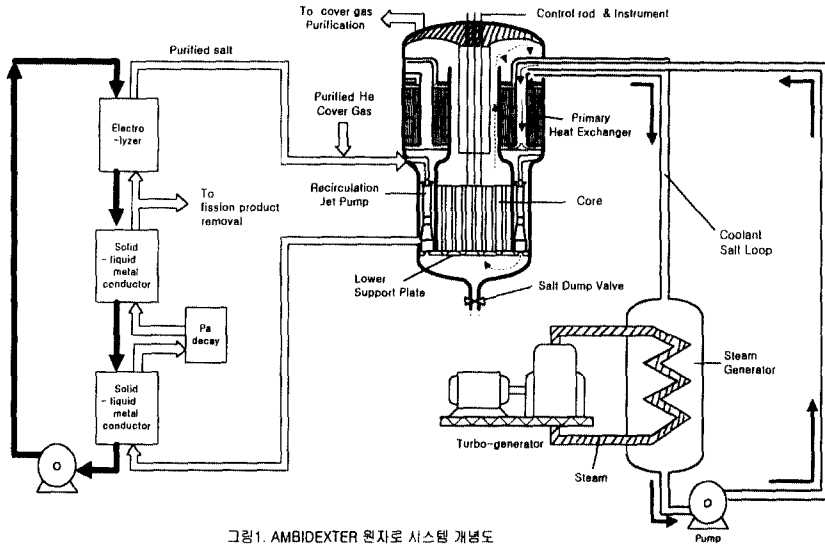


그림1. AMBIDEXTER 원자로 시스템 개념도

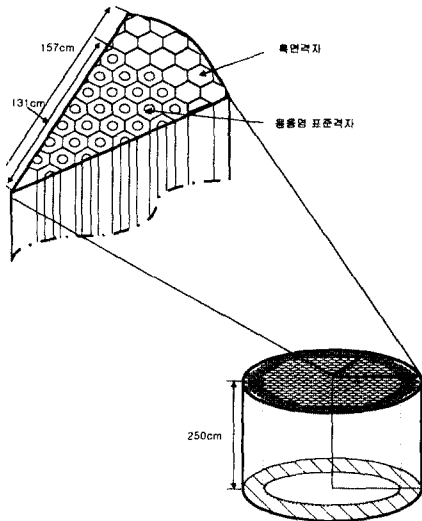


그림 AMBIDEXTER 로심 구조  
- SQUID 코드 입력 모델

${}^7\text{LiF}-\text{BeF}_2-{}^{232}\text{ThF}_4-{}^{233}\text{UF}_4$ 용융염 mole % (mole percentage)	${}^7\text{LiF}$	71.625
	$\text{BeF}_2$	16
	$\text{ThF}_4$	12
	${}^{233}\text{UF}_4$	0.375
Reactor Cylinder Radius [cm]	135	
Reactor Cylinder Height [cm]	245	
Average Temperature[K <sup>m</sup> ]	Moderator	950
	Fuel Salt	922
Power Density [w/cc]	50	
Graphite Density [g/cc] (이론치 : 2.2)	1.9	
Fuel Salt Density[g/cc] ( ${}^{233}\text{UF}_4$ 의 mole%=0.375 일때)	3.3267	

표 1. HELIOS 표준격자 입력 자료

		격자 종류	
		로심표준격자	반사체격자
$\Sigma_a$	1	3.0386e-03	7.2398e-06
	2	1.1549e-02	1.5587e-04
$\Sigma_{Rem}$	1	1.7533e-03	3.6104e-03
$\Sigma_f$	1	1.0963e-03	0
	2	7.0598e-03	0
$\nu\Sigma_f$	1	2.7358e-03	0
	2	1.7612e-02	0
D	1	1.0272	0.978
	2	0.83	0.74532

표 2. 노심격자 영역별 균정수

