

**MULTISAMS-HELIOS-SQUID 코드 체계를 이용한  
AMBIDEXTER 노심의 물리적 모델링**

**Physics Modeling of the AMBIDEXTER Core  
Using MULTISAMS-HELIOS-SQUID Code System**

유영진, 이영준, 김태규, 오세기

아주대학교

경기도 수원시 팔달구 산 5

### 1. 서론

과거 몇몇 중대 원자력 발전사고와 핵무기의 사용은 원자력 산업에서 안전성과 핵확산의 문제를 부각시키는 계기가 되었다. 또한, 제 2세대 원자로로 대표되는 HWR, LWR 등의 상용 원자로가 가지는 안전성과 핵확산 방지에 대한 고유문제점은 원자력 산업이 해결해야할 대표적인 과제로 인식되고 있다.

현재 아주대학교에서 개념설계중인 일체형 용융염 핵연료 원자로 AMBIDEXTER는 주요 기기를 부수의 배관망 없이 하나의 용기 안에 위치시켜 시스템의 높은 신뢰도를 획득하였고, 용융염 핵연료 사용에 따른 큰 온도 부(-)반응도 효과에 의한 높은 고유안전성, 그리고 Th-<sup>233</sup>U 핵주기에 의한 높은 핵확산 방지성을 가지도록 설계되었다. 이는 기존의 원자력산업에서 고려되던 설계 개념에 비해 진일보한 원자력 시스템의 설계 개념으로 인식되고있다. 또 다른 AMBIDEXTER의 이점들은, 노내의 잉여중성자를 이용하여 잠재핵분열성 물질인 Th를 핵분열가능물질인 <sup>233</sup>U으로 전환하여, 시스템의 전환율을 1.0으로 유지하는 높은 중성자 경제성과 이를 이용한 핵연료 연소에 따른 추가적인 핵연료 물질의 주입없이 전 운전기간에서 임계를 유지하는 자활성을 들 수 있다.

노심격자와 블랭킷격자를 이용한 선행 연구의 이중격자 구조는 앞에서 언급한 전환율과 임계도를 만족시켰다. 하지만 선행설계는 시스템의 안전성 및 노심 구조제의 건전성을 저해하는 과다 속중성자속 분율과 높은 출력첨두인자값을 동시에 보유하고 있었다.

본 연구에서는 선행연구의 문제점을 보완하기 위해 핵적자활성 및 안전성을 보유한 단일 격자구조 노심을 설계하였고, 이에 대한 물리적인 모델링 해석을 수행하였다. 평가에 이용된 코드는 2차원의 노심 격자 연소도 해석 코드인 HELIOS와 R-Z축 2차원 다군 중성자 확산 이론 코드인 SQUID, 그리고 AMBIDEXTER 설계 특징인 온라인 정화공정기기 모델을 포함한 핵중농도분포 해석코드인 MULTISAMS를 이용하였다.

### 2. 해석 모델링

#### 2.1 선행 연구 결과 검토 및 문제점

AMBIDEXTER 원자로 노심 격자는 원통형 용융염 채널이 육각주 흑연 감속재 중앙에 위치하는 구조이다. 선행 연구의 용융염 채널은 시스템의 유효증배계수 획득을 위한 핵연료

분율 12.5 v/o인 노심격자와 전환율 보정을 위한 핵연료 분율 80 v/o인 블랭킷격자로 구분하였으며, [그림 1]에 이중격자 구조를 도시하였다. 이중 격자를 이용하여 설계목표인 임계도와 전환율을 획득하기 위해, AMBIDEXTER는 노심 중앙에 노심격자를 위치시키고 그 둘레를 블랭킷격자가 둘러싸는 이질 노심의 형태를 취하였다. 또한 블랭킷격자 구역에서 열중성자속이 급격히 떨어지는 것을 방지하기 위해 한층의 노심격자를 블랭킷격자내에 포함시켰다. 선행연구를 통해 평가된 노심의 R-Z축에서 50KeV 이상의 속중성자속 분포와 출력밀도를 [표 1]과 [그림 2, 3]에 모사하였다.

선행연구의 문제점으로 평가된 과도 속중성자분포로 인해, 흑연감속재의 건전성 보유범위를  $2 \times 10^{22} [n / cm^2]$ 으로 제한하였을 때, 노심 흑연감속재의 건전성 유지기간은 약 1.34년에 불과하였고, 이 결과는 [그림 4]에 도시하였다. 이 결과는 시스템의 안정성 확보를 위해 잦은 흑연감속재 교체를 필요로 하였다. 또한 잦은 운전정지로 인한 시스템의 경제성 손실은 선행연구 설계의 수정을 요하는 요소가 되었다.

선행연구 설계에서 수정되어야 할 또 하나의 맹점은 바로 등가연소도 개념을 이용한 노심의 구성이다. 용융염 핵연료를 사용하는 AMBIDEXTER는 운전 시작 일정 시간후 정화공정 기기에서의 핵종 처리와 핵연료물질 재주입에 의해 노내의 각 핵종농도가 균형상태에 이른다. HELIOS 코드는 온라인 정화공정을 통한 핵종처리 및 핵연료의 재주입에 대한 영향을 평가할 수 없기 때문에, ORIGEN에서 평가된 평형농도 상태에서의 핵연료 연소도를 그대로 HELIOS에도 적용하였다. 이렇게 구성된 노심은 정화공정에서의 핵종처리를 고려할 수 없게 되어, 설계에서 제안한 양보다 많은 핵분열 후 생성물질을 함유한 노심으로 해석이 되었다. 따라서 선행연구를 통한 설계는 보수적인 관점에서도 시스템이 자정·자활성을 유지할 수 있다는 평가의 잣대로 활용할 수 있다.

## 2.2 AMBIDEXTER 원자로 핵적 자활성 노심 모델

본 연구의 목적은 선행연구가 가지는 문제점을 해결할 수 있는 노심 격자를 평가하고, 평가된 격자를 이용하여 설계목표인 임계도와 전환율을 만족시키는 노심을 구성하는 것이다. 앞에서 언급한 등가연소도에 의한 문제점은 HELIOS 코드속에 중성자 거동에 중요한 영향을 미치는 핵종의 평형상태 농도를 삽입하여 수정하였다. 각 핵종의 평형상태 농도의 평가를 위해 AMBIDEXTER 구성기기 핵종농도분포 해석코드인 MULTISAMS를 이용하였다.

노심 격자 특성을 평가하기 위한 온도, 밀도, 그리고 용적량은 [표 2]와 같이 설정하였다. 해석에 이용된 중성자는 고속, 열외, 그리고 열중성자 그룹으로 나누었으며, 각각 그룹의 에너지 영역은 50KeV 이상, 50KeV - 1eV이상, 그리고 1eV이하로 설정하였다. 계산에 이용된 코드 체계는 [그림 5]와 같다.

## 3. 해석

설계 목표인 시스템의 임계도와 전환율을 동시에 만족시키는 노심 격자의 선택을 위하여 HELIOS와 SQUID코드를 이용하여 [표 2]의 설계 값을 바탕으로 최적의 단일격자 구조에 대한 해석을 수행하였다. [표 3]과 [그림 6]에 핵연료 용융염 채널의 반경에 따른 유효증배계수와 전환율을 도시하였다. 평가 결과, 핵연료 용융염 채널 반경이 3.25 cm의 단일격자 노심이 설계목표에 가장 근접한 격자구조인 것으로 평가되었으며, 선택된 격자구조를 [그림 7]에 도시하였다. 또 R-Z축 방향의 출력밀도와 속중성자속 분포를 [그림 8, 9]에 도시하였다. 출력밀도, 속중성자속 침투인자 및 용융염 총 용적량은 [표 1]에 선행연구와 함께 비교

하였다. 출력밀도 침투인자가 3.21, 속중성자속 침투인자가 3.87인, 선행설계 이중격자 노심 구조에 비해, 본 연구에서 채택된 단일격자 노심구조는 출력밀도 침투인자 값이 31% 낮아진 2.22, 속중성자속 침투인자는 36% 낮아진 2.47로 평가되었다. [그림 10, 11]에 이 결과를 도시하였다. 3.25cm 단일격자 노심에서 흑연의 건전성 유지기간은 최대 속중성자속에 위치하는 노심 중심부가 3.35년 동안 건전성을 유지하는 것으로 평가되어, 선행연구에 비해 250% 향상을 도모하였다. 노심 위치에 따른 흑연 검속재 건전성은 [그림 12]에 평가하였다.

#### 4. 결론 및 토의

현재 개념 설계중인 AMBIDEXTER 원자력 시스템의 선행연구를 통해 설계된 노심 모델을 재평가하고 제시된 문제점을 제시하였다. 시스템의 안전성과 신뢰성을 평가하기 위해 노심격자와 블랑킷격자의 이중격자로 구성된 선행연구 노심모델을 재평가하여 보았고, 높은 출력밀도와 속중성자속 침투인자에 의해 단일격자로 구성된 노심구조를 모색하게 되었다. 이 결과 핵연료 용융염 채널 반경을 3.25cm로 하는 노심구조 설계 시에 유효증배계수 0.999와 전환율 1.002로써 설계 목표 요건을 만족시켰다. 이때의 출력밀도 침투인자는 2.22, 속중성자속 침투인자는 2.47로 평가되었다. 이는 선행연구 노심구조에 비해 31%, 36% 감소한 수치이다. 노심 중심부의 흑연 검속재 건전성 평가를 통해서 기존의 연구에 비해 250% 향상된 값을 획득하였다.

본 연구를 통해 AMBIDEXTER 원자력 시스템의 설계 목표 요건인 임계도와 핵적자활성을 동시에 만족하며, 보다 높은 안전성을 보유한 단일격자구조 노심설계 모델에 대한 타당성을 입증하였다.

본 연구 해석에 사용되었던 코드들은 AMBIDEXTER 원자로 특성 평가에 고유한 한계를 지니고 있다. 따라서 코드들의 지속적인 개발과 수정이 필요할 것이다. 이와 더불어 각 핵종의 반응단면적은 현재 설계중인 AMBIDEXTER 원자로의 값이 아닌 Th 핵연료를 이용하는 PWR 원자로 스펙트럼으로 평가된 라이브러리를 기본으로 하고있다. 따라서 보다 경화된 중성자 스펙트럼을 가질 것으로 예상되는 AMBIDEXTER 라이브러리의 수정이 필요할 것이며, 또한 보정된 라이브러리를 통한 MUTISAMS에서의 핵종평형농도 분석을 통한 시스템의 재확인 평가가 수행되어야 할 것이다.

#### 5. 감사문

본 연구는 2000년도 과학기술부 주관 원자력 기초 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

본 연구를 수행하는데 지도를 아끼지 않으신 아주대학교 오세기 교수님, 나상신 교수님께 감사드립니다.

#### 6.Reference

- 1) 오세기, 정근모 외, "핵적 자정,자활 능력을 갖춘 용융염 원자력 보일러 시스템의 개념 설계에 관한 연구", 97원자력 기초 연구 과제, 과학 기술부, 1998
- 2) 오세기, 정근모 외, "AMBIDEXTER 원자력 보일러 시스템의 노심관리 및 반응도 효과 연구", 98 원자력 기초 연구 과제, 과학기술부, 1999
- 3) 오세기, 임현진, 김태규, 윤정선, 장남복, 신영균, 조성경, "ORIGEN-2 코드를 이용한 노형별 핵연료 주기 특성 분석 연구", 아주대학교 에너지 학과, 2000

- 4) 조재국, "AMBIDEXTER 원자로 노심의 핵적자활성 최적화 설계 연구", 공학석사 학위 논문, 아주대학교, 1999
- 5) 조재국, "등가연소도 근사법을 이용한 AMBIDEXTER 로심격자의 핵적 자활성에 관한 연구", 한국 에너지 공학회 춘계 학술 발표 논문집, 1998
- 6) 오세기, 정근모, "AMBIDEXTER 원자력 에너지시스템 설계개념", 한국 에너지 공학회지, 1999
- 7) 조재국, 원성희, 임현진, 김태규, 윤정선, 오세기, "250 AMBIDEXTER 원자로의 정특성 최적 설계", 한국 에너지 공학회 춘계 학술 발표 논문집, 1999
- 8) "User Manual HELIOS", Scandpower, 1995
- 9) A. Daneri et al, "SQUID-360", Sezione Energia Nucleare, 1967
- 10) "RSIC COMPUTER CODE COLLECTION-ORIGEN2", ORNL, 1983
- 11) Se Kee Oh, Kun Mo Chung, "AMBIDEXTER Nuclear Complex: A Practicable Approach for Rekindling Nuclear Energy Application", SMiRT-15, Seoul Korea, 1999

[표 1] 출력밀도 침투인자와 속중성자속 침투인자 비교

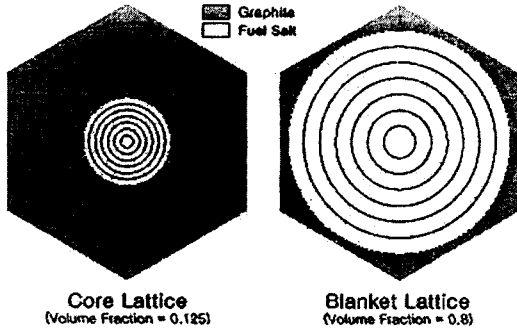
	내용	단일격자 노심			
		출력밀도	침투인자	속중성자속	침투인자
출력밀도	최대 출력밀도	88.8	n/a	37.5	n/a
	Z축 평균 출력밀도	55.9	1.59	23.9	1.57
	R축 평균 출력밀도	44.0	2.02	27.2	1.38
	전체 평균 출력밀도	27.7	3.21	17.1	2.22
중성자속	내용	속중성자속	침투인자	속중성자속	침투인자
		$[10^{14} \times \#/cm^2 \cdot sec]$		$[10^{14} \times \#/cm^2 \cdot sec]$	
	최대 속중성자속	4.72	n/a	1.89	n/a
	Z축 평균 속중성자속	2.97	1.59	1.19	1.59
R축 평균 속중성자속	1.95	2.42	1.21	1.56	
전체 평균 속중성자속	1.23	3.87	7.64	2.47	
용적량	용융염 용적량	8700.84 ℓ		6691.38 ℓ	

[표 2] HELIOS, SQUID 입력 자료

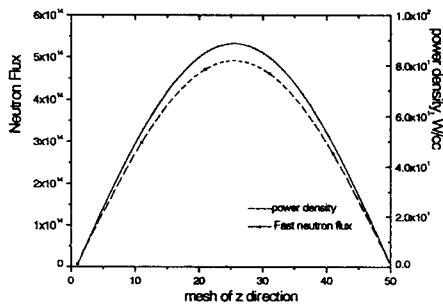
용융염 핵연료 농도 [mole%]	<sup>7</sup> LiF	71.625
	BeF <sub>2</sub>	16
	<sup>232</sup> Th F <sub>4</sub>	12
	<sup>233</sup> UF <sub>4</sub>	0.375
노심 온도 T	흑연 평균	1225
	흑연 low	1100
	흑연 high	1350
	용융염 평균	1173
	용융염 low	1050
	용융염 high	1300
노심구조	반경	165.909
	높이	280
평균 mesh크기[cm]	Z축방향 Δz	4.047
	R축방향 Δr	5

[표 3] 용융염 반경당 Keff & 전환율

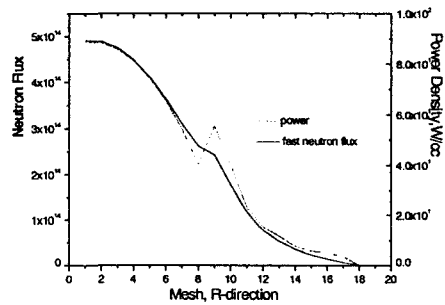
용융염 반경[cm]	유효증배계수	전환율
2.63	1.1061	0.7824
3.22	1.0049	0.9897
3.23	1.0027	0.9939
3.25	0.9990	1.0020
3.26	0.9971	1.0070



[그림 1] 이중 노심 격자 구조



[그림 2] 축방향출력 및 속중성자속 분포



[그림 3] 반경방향출력 및 속중성자속 분포

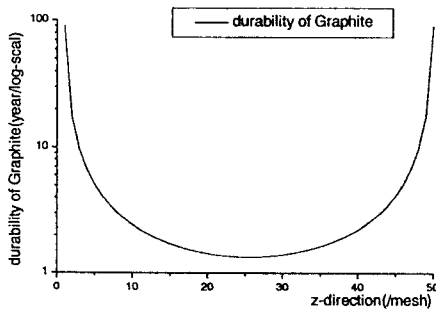


그림 4. 축방향 속중성자 흑연건전성

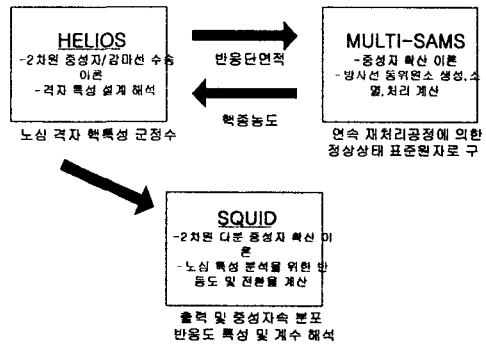


그림 5 노심 모델링 코드체계

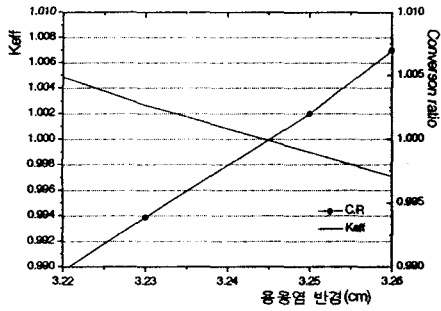
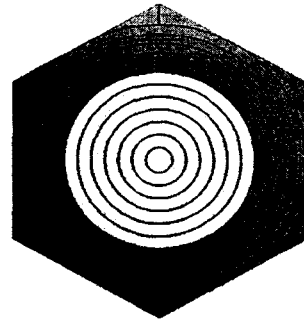


그림 6 용융염 반경당 Keff & 전환율



Radius=3.25 [cm]

[그림 7] AMBIDEXTER 단일 격자 구조

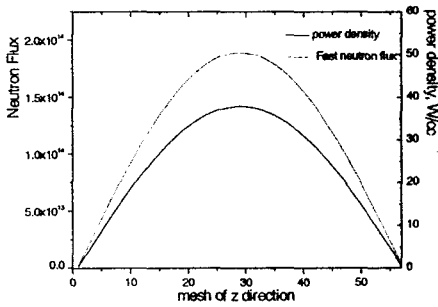


그림 8 축방향 출력 및 속중성자속 분포

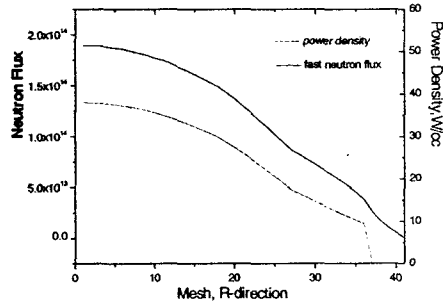


그림 9 반경방향 출력 및 속중성자속 분포

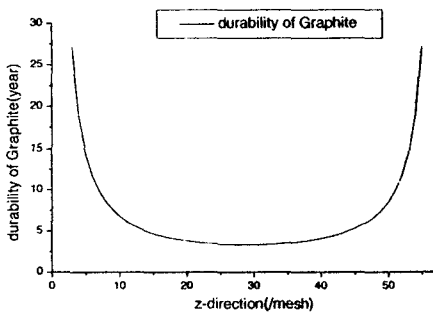


그림 10 축방향 속중성자 흑연건전성

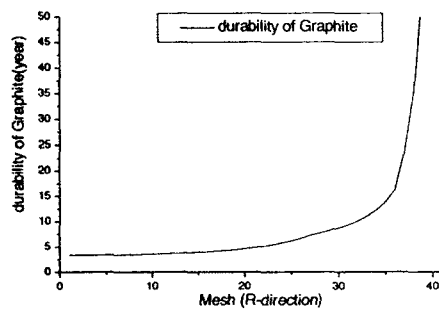


그림 11 반경방향 속중성자 흑연건전성

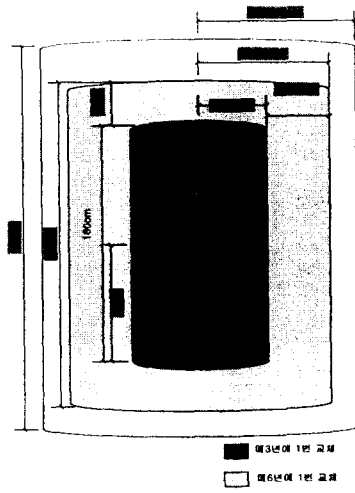


그림 11 속중성자 조사영향고려  
 흑연 교체시기