

핵비확산성이 개선된 AMBIDEXTER 변성노심의 핵적 자활성 평가 연구

이영준, 유영진, 오세기
아주대학교

A study on Self-sustainability of the Denatured AMBIDEXTER Core for Enhancing its Non-Proliferation Characteristics

Young Joon Lee, Yeong Jin Yu and Se Kee Oh
Ajou University

1. 서론

기존의 상용 원전이 가지고 있는 고유의 안전성과 핵확산 문제점들에 대한 해결방안으로 연구 진행중인 AMBIDEXTER 원자로는 $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$ 핵주기의 용융염 핵연료를 사용한다. AMBIDEXTER는 주요 기기를 부수의 배관망 없이 하나의 용기 안에 위치시켜 시스템이 높은 신뢰도를 갖춘 원자로이며 용융염 핵연료 사용에 따른 부(-)반응도 효과에 의한 뛰어난 고유 안전성과 $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$ 핵주기에 의한 잉여핵물질 생산불가로 근본적인 핵확산 방지성을 가지도록 설계되어 있다. 본 연구에서는 중성자 증배계수와 핵분열성물질 전환비를 수치 균형점에 맞추는 핵적 자활성 요건을 만족하면서 핵저항성을 한층 강화하기 위해서 기존의 $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$ 핵주기인 용융염 핵연료에 천연 우라늄을 추가하여 최적화된 노심을 구성하였다. 이로써 핵물질인 ^{233}U 의 추출을 더욱 어렵게 될 뿐만 아니라 구조적인 변화없이 핵연료에 천연 우라늄만을 추가하여 선행 연구에서 증명된 모든 장점을 그대로 갖추게 되었고 농축 기술이 불필요함에 따라 추가적인 경제적 부담 또한 덜게 되었다.

본 연구를 수행하기 위해서 사용된 프로그램으로는 ORIGEN2와 HELIOS, 그리고 SQUID의 코드이다. ORIGEN2는 온라인 정화공정을 통한 핵종처리 및 핵연료의 재주입에 대한 영향을 고려하여 평형상태에서의 주요 핵종들의 농도를 구하기 위하여 사용하였으며, 이로부터 구한 핵종들을 HELIOS의 입력자료로 하여 2차원적 노심과 각 핵종들의 반응단면적을 구하였다. 그리고 이 반응단면적을 SQUID에 입력하여 핵적 자활성을 만족하는 적절한 노심의 크기와 격자의 배치 등을 결정하였다.

2. 선행 연구과제의 특징

선행 연구에서는 핵적 자활성을 만족하면서 폐기물, 핵확산 저항성 및 경제성 등을 최상으로 만족하는 노심을 구성하였다. 연구 결과 [그림 1]과 같은 단일 격자로만 노심을 구성하였으며 이때 핵연료 채널의 반경은 3.25cm이었다.

핵연료의 구성은 ${}^7\text{LiF}-\text{BeF}_2-{}^{232}\text{ThF}_4-{}^{233}\text{UF}_4$ 를 사용하였으며 그 구성비는 [표 2]와 같다. 이 핵연료를 이용하여 구성된 격자의 특성을 표현하기 위하여 중성자 그룹을 50 KeV 이상, 50 KeV - 1 eV 이상, 그리고 1 eV 이하인 세 개로 구성하였다.

그 결과 노심의 중성자 증배계수는 0.999이고 전환율 1.002으로서 핵적 자활성을 만족하는 단일 격자로 구성된 노심이 설계되었다. 이 노심의 출력밀도와 속중성자속 값과 각각의 침투깊이 [표 2]에 나타내었고 각 분포를 축 방향과 반경 방향으로 나누어 [그림 2]와 [그림 3]에 도시하였다. 선행 연구 노심은 단일 격자로 구성되었기에 출력과 속중성자속의 평탄한 분포를 띄고 비교적 낮은 속중성자속의 값과 작은 침투 인자를 가진다. 그로 인해 노심 중심부에서 흑연 감속재의 수명이 3.35년으로 뛰어난 건전성과 노심의 열적 특성에 대한 안정성의 장점을 지니고 있다.

3. 변성 AMBIDEXTER의 개념 설계

선행 연구 결과 구성된 노심은 근본적인 설계요건인 핵적자활성의 개념은 갖추고 있으나 ${}^{232}\text{Th}/{}^{233}\text{U}$ 핵주기만을 사용하기 때문에 원자로의 운전을 영구적으로 정지할 경우 다량의 ${}^{233}\text{U}$ 의 처분 문제로 인한 핵확산 저항성 측면에서 취약점을 지니고 있었다. 이러한 문제점의 해결을 위해 변성제(denaturant)로서 적정량의 천연우라늄을 기존의 토륨 핵연료에 첨가하여 운전 중 연속 주입하는 핵연료 장전방법을 택하였다.

이와 같은 변성 핵연료 주기를 적용하여 ${}^{232}\text{Th}/{}^{233}\text{U} - {}^{238}\text{U}/{}^{239}\text{Pu}$ 의 핵주기를 가지는 노심을 구성하였다. 천연 우라늄의 첨가로 인한 전환율 저하를 보강하기 위해 단일 격자로만 이루어진 선행 노심을 잉여 중성자를 생산하는 씨드 격자와 잠재 핵분열 물질로부터 핵분열 물질로 변환을 일으키는 블랭킷 격자로 조합된 노심으로 변경 설계하였다. 이때 각 격자의 모양은 [그림 4]와 같다.

3.1 핵연료 물질 구성

우선 기존의 노심에서 사용된 ${}^{232}\text{Th}/{}^{233}\text{U}$ 핵주기의 핵연료로 씨드격자와 블랭킷 격자를 구성하고 이를 조합하여 자활성 측면에서 최적의 조건을 만족하는 씨드격자를 구성하였다. 그 결과 중심으로부터 반경 2.1cm의 핵연료 채널을 가지는 씨드격자를 기본 씨드격자로 선택하였다.

핵연료의 구성은 ORIGEN2를 이용하여 주요 핵종이 평형상태가 이루어지는 시점을 기준으로 선택되었다. 핵종 선택 방법과 조건을 살펴보면 다음과 같다. 우선 잠재 핵분열성 물질인 ${}^{232}\text{Th}$ 와 ${}^{238}\text{U}$ 의 평형상태를 이루었을 때에 잠재 핵분열성 물질이 중성자를 흡수하여 생성된 물질인 ${}^{233}\text{Pa}$ 와 ${}^{239}\text{Np}$ 의 양을 계산하였다. AMBIDEXTER는 ${}^{233}\text{Pa}$ 와 ${}^{239}\text{Np}$ 를 노심에서 제거하여 정화공정을 통해 반감기를 거쳐 생성된 ${}^{233}\text{U}$ 와 ${}^{239}\text{Pu}$ 를 재주입한다. 그러므로 ${}^{233}\text{Pa}$ 와 ${}^{239}\text{Np}$ 제거량 만큼을 핵분열성 물질인 ${}^{233}\text{U}$ 와 ${}^{239}\text{Pu}$ 으로 주입하였다. 이때 핵연료의 용융상태를 이루기 위해서 ${}^{232}\text{ThF}_4 + \text{UF}_4 \leq 14 \text{ mole\%}$ 의 조건을 만족하고, 핵확산 저항성을 위하여 U동위원소 중 ${}^{233}\text{U}$ 의 농도가 12%이하가 되게 구성하였다.

위의 조건을 수행하여 산출된 핵종들 중 중성자 흡수가 큰 물질들을 선별하여 각 핵종들의 흡수 단면적을 HELIOS를 통해 구하였으며 이 결과는 다시 ORIGEN2의 반응 단면적 라이브러리를 수정하는데 사용함으로써 AMBIDEXTER의 핵종 특성에 더욱 가깝게 보완하였다.

핵연료를 구성하기 위하여 위와 같이 구하여진 핵종들은 중성자 흡수 분율 기준으로 볼 때 [표 3]과 같다.

3.2 노심 설계 과정

앞에서 구한 핵종들로 이루어진 핵연료를 HELIOS의 입력자료로 하여 씨드격자와 블랭킷 격자의 반응 단면적 및 특성을 계산하였으며, 이와 같은 각 격자의 반응 단면적 및 특성을 SQUID 모델에 적용하여 씨드격자와 블랭킷격자의 배열을 변경하는 과정을 통해 최적화된 노심의 구조를 선정하였다.

블랭킷격자-씨드격자 단순배열

중성자 분포의 평탄화를 위하여 블랭킷 격자를 노심의 중앙에 위치하고 씨드격자를 외각에 위치하도록 구성하였다. [그림 5-1]은 주어진 여건 하에서 최적상태 하에서 구성된 노심 중심의 블랭킷 격자의 부피가 작은 구조이다. 이 배열로는 핵적자활성 요건에 가장 근접한 결과가 중성자 증배율의 경우 0.989이고 전환율은 0.9021에 불과하였다. 이를 개선하기 위하여 블랭킷격자와 씨드격자를 분할 배치하였다. 분할 배치 방식은 씨드격자를 다시 블랭킷격자와 씨드격자로 나누는 구조로서 [그림 5-2]와 같다. 이 방법을 통해 증배율이 0.934이로 전환율이 0.994로서 다소 개선되었으나 설계 요건인 핵적자활성을 만족하지는 못하였다.

씨드격자-블랭킷격자의 분할 배치

AMIBIDEXTER 설계의 기본 요건인 핵적자활성을 만족하기 위하여 씨드격자를 노심의 중앙에 위치하도록 노심을 구성하였다. 앞선 연구의 연결과정에서 분할 배치 방식을 사용하였다. 그 결과 각 격자의 크기가 95-2.5-25-22.5 [cm]일 때 증배율이 1.003935, 전환율이 1.004로서 핵적자활성을 만족하였다. 이 노심의 개략적 구조는 [그림 6]과 같다.

씨드격자-블랭킷격자 단순배열

중간에 삽입된 블랭킷격자가 차지하는 비율이 극히 작음을 고려하여 이 부분의 블랭킷 격자를 제거함으로써 씨드격자-블랭킷격자의 단순배열을 이루면서 핵적자활성을 만족하도록 시도하였다. 그 결과 씨드격자의 크기가 노심 중심으로부터 112.5~115cm까지 존재하고 그 외부는 블랭킷격자로 둘러쌓여있을 때 중성자 증배계수는 1.007229~1.002998이고 전환율은 1.012~1.001로 핵적 자활성을 충분히 만족시킴을 알 수 있었다. 또한 단순 배열로 인해 분할 배치로 인한 노심 구조의 복잡성을 해결하게되었다. 이 노심의 개략적 구조는 [그림 7]과 같다.

4. 설계해석

위에서 구성한 씨드격자-블랭킷격자의 순서로 단순배열한 원자로의 씨드격자의 크기에 따른 증배율과 전환율의 변화는 [그림 8]과 같다. 이 결과에 의하면 전환율이 1.0에 매우 근접함으로써 초과 핵분열물질이 생성되지 않음을 알 수 있다. 이는 핵확산저항성 관점에서 우수한 특성을 보유한 것으로 평가할 수 있다.

원자로 중심을 수평으로 가른 [그림 9]에서 속중성자속 분포를 분석하면 속중성자속은 주로 삼재 핵분열성 물질이 핵분열성 물질로 전환하는 블랭킷격자에서 씨드격자보다 높고, 열중성자속 분포를 보면 핵분열을 일으키는 열중성자가 원자로 중심에 위치한 씨드격자에 많이 분포함에 의해 주로 중성자를 생성하고 있음을 관찰할 수 있다. 또한 원자로 중심을 수직으로 잘라 본 [그림 10]의 중성자속 분포를 보아도 씨드격자 부분에서는 열중성자가 속중성자보다 높음을 알 수 있다. 씨드격자와 블랭킷격자의 중성자의 하드닝(hardening) 정도를 확실히 알아보기 위해서 [그림 11]에 각 격자에서의 중성자 분포를 제시하였다. 그림을 분석

해 본 바 씨드격자의 중성자 스펙트럼은 일반 상용로 같은 열중성자로와 매우 유사하나 블랭킷 격자는 1eV~1keV의 열외 중성자영역에 중성자가 주로 분포하는 열외 중성자로의 특징을 가진다. 따라서 AMBIDEXTER는 씨드격자에서의 핵분열 반응에 의한 에너지 및 중성자 생산과 블랭킷 격자에서의 핵분열성물질 증식을 분담하는 하이브리드 원자로의 특징을 갖는다.

[그림 12]과 [그림 13]의 출력 분포를 보면 씨드격자에서 핵분열에 의한 대부분의 출력을 조달하고 있음을 볼 수 있다. 수직축으로 보면 노심 중심에서 가장 높은 출력을 내며 정상적인 출력을 조달하고 있다.

5. 결론 및 토의

본 연구는 선행 AMBIDEXTER 연구의 핵주기를 적용할 경우, 영구 운전 정지 후의 발생할 수 있는 핵확산 저항성에 대한 취약점을 해결하기 위하여 변성 핵연료 주기를 적용하였다. 그 결과 노심의 중앙부는 2.1cm의 핵연료 채널을 가지는 씨드격자가 반경 112.5~115cm 까지 차지하고 그 외각을 핵연료 채널로만 이루어진 블랭킷격자가 차지하는 구조의 노심이 구성되었다. 이로써 AMBIDEXTER의 기본 요건인 핵적자활성을 만족시키면서 운전중 뿐만 아니라 영구 운전 정지에서도 핵확산 저항성을 갖춘 진보된 노심을 설계케 되었다. 또한 농축기술을 사용하지 않은 천연 우라늄을 변성제로 사용함으로써 핵연료 사용의 경제성 측면에서도 향상되었다.

본 연구 수행 중 ORIGEN2 라이브러리 수정시에 주로 핵분열을 일으키는 씨드격자의 특성만을 고려하였다. 그러므로 향후 연구로는 블랭킷격자의 경화된 중성자분포 특성까지 고려한 라이브러리의 보정이 요구된다. 또한 ORIGEN2를 통해 계산된 Pa와 Np의 제거 분율이 0.5/day로 설정하였는데 이러한 용량 규모는 재처리 시설의 기술적 및 경제적 타당성 연구가 필요하다.

감사문

본 논문은 과학기술부 주관 원자력기초연구과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [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 노심 관리 및 반응도 효과 연구", 98 원자력 기초 연구 과제, 과학기술부, 1999
- [3] 조재국 외, "등가연소도 근사법을 이용한 AMBIDEXTER 노심격자의 핵적 자활성에 관한 연구", 한국 에너지 공학회, 춘계 학술 발표 논문집, 1998
- [4] 조재국 외, "AMBIDEXTER 원자로 노심의 핵적자활성 최적화 설계 연구", 공학석사 학위 논문, 아주대학교, 1999
- [5] 유영진 외, "MULTISAMS-HELIOS-SQUID 코드 체계를 이용한 AMBIDEXTER 노심

- 의 물리적 모델링”, 한국 에너지 공학회 추계 학술 발표 논문집, 2000
- [6] User Manual HELIOS, Scandpower, 1995
- [7] A. Daneri et al, SQUID-360, Sezione Energia Nuclear, 1967

[표 1] 선행연구에서의 핵연료 구성

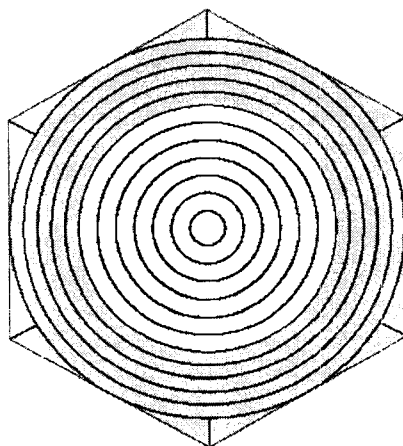
용융염 핵연료 농도 [mole%]	${}^7\text{LiF}$	71.625
	BeF_2	16
	${}^{232}\text{ThF}_4$	12
	${}^{235}\text{UF}_4$	0.375

[표 2] 출력밀도 침투인자와 속중성자속 침투인자 비교

	내용	단일격자 노심	
		측정값 [W/cc]	침투인자
출력밀도	최대 출력밀도	84.375	n/a
	Z축 평균 출력밀도	53.775	1.57
	R축 평균 출력밀도	61.2	1.38
	전체 평균 출력밀도	38.475	2.22
	내용	측정값 [10^{14} #/cm ² · sec]	침투인자
중성자속	최대 속중성자속	1.89	n/a
	Z축 평균 속중성자속	1.19	1.59
	R축 평균 속중성자속	1.21	1.56
	전체 평균 속중성자속	7.64	2.47
용적량	용융염 용적량	6691.38 ℓ	

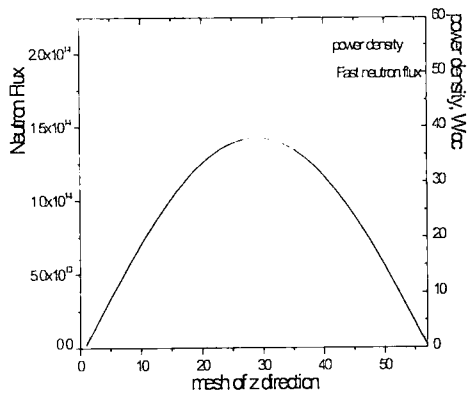
[표 3] 핵종 구성

nuclide	absorption rate	absorption accumulate	concentration	mole%
U233	43.920%	43.920%	6.506E+04	0.240852
TH232	27.195%	71.115%	3.191E+06	11.86401
U238	10.593%	81.708%	5.124E+05	1.857055
PU239	5.238%	86.947%	3.634E+03	0.013115
BE9	4.014%	90.961%	1.669E+05	15.99582
F19	3.213%	94.173%	3.480E+06	0
U235	1.663%	95.836%	2.767E+03	0.010156
LI7	1.586%	97.422%	5.680E+05	69.99112
PU240	0.626%	98.048%	5.687E+02	0.002044
LI6	0.521%	98.569%	1.655E+01	0.002379
U234	0.337%	98.905%	2.842E+03	0.010476
SM149	0.311%	99.216%	2.259E+00	1.31E-05
PU241	0.174%	99.391%	2.497E+02	0.000894
PA233	0.096%	99.486%	4.736E+02	0.001753
PM147	0.076%	99.562%	6.487E+01	0.000381
SM151	0.070%	99.632%	7.532E+00	4.3E-05
ND143	0.055%	99.687%	2.140E+02	0.001291
SM152	0.035%	99.722%	2.893E+01	0.000164
ND145	0.033%	99.755%	2.276E+02	0.001354
HO165	0.032%	99.787%	1.424E+02	0.000744
NP239	0.023%	99.810%	8.093E+01	0.000292
PR143	0.018%	99.828%	1.230E+02	0.000742
PM148M	0.018%	99.846%	3.148E-01	1.83E-06
ND147	0.018%	99.864%	3.502E+01	0.000205
ZR93	0.018%	99.882%	5.483E+02	0.005085
PM148	0.017%	99.899%	1.309E+00	7.63E-06
EU155	0.013%	99.912%	4.996E-01	2.78E-06

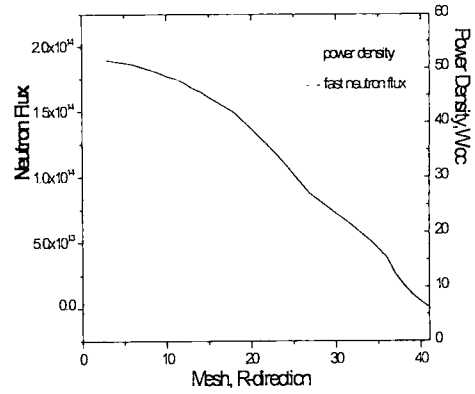


Radius=3.25 [cm]

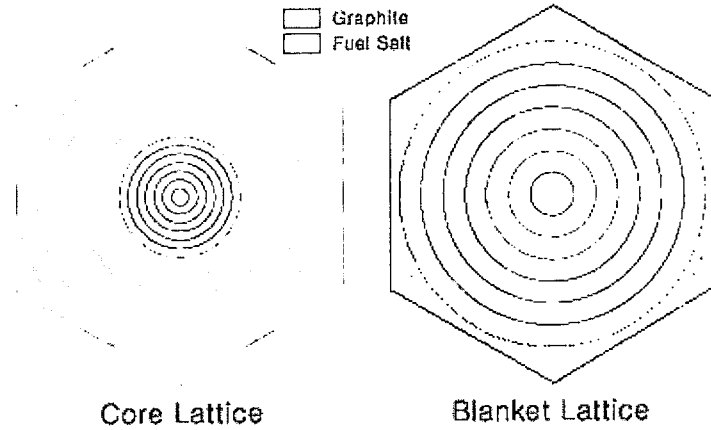
[그림 1] AMBIDEXTER 단일
적자 구조



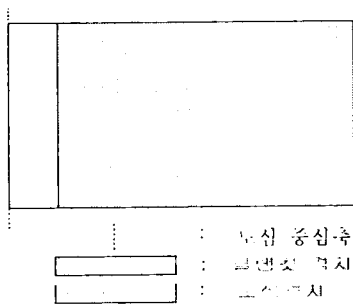
[그림 2] 축방향 출력 및 속중성자속 분포



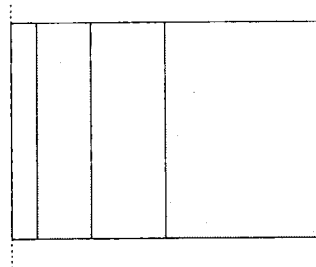
[그림 3] 반경방향출력 및 속중성자속 분포



[그림 5] 노심격자와 블랭킷격자 구조



[그림 6 -1] 단순 블랭킷격자-노심격자 노심의 개략적 구조



[그림 5-2] 블랭킷격자-노심격자 분할배치구조 노심의 개략적구조