

SEU, Pu, ADS 옵션별 AMBIDEXTER 초기 노심 관리 특성

이영준, 유극중, 신동훈, 소순규, 김진성, 오세기

Management Characteristics of the AMBIDEXTER Initial Core based on SEU, Pu and ADS Option respectively

Youngjoon Lee, Gukjong You, Donghun Shin, Soonkyu So, Jinsung Kim, Sekee Oh

1. 서론

AMBIDEXTER 원자력 시스템은 기존의 상용로와 다른 두 가지의 특징을 가지고 있다. 핵연료가 용융된 상태로 노심을 통과하면서 핵분열로 인해 발생한 열을 중간 열교환기를 거쳐 노심에어로 유입되고 일부는 우회하여 고온 화학 공정을 거쳐 핵연료 주입과 함께 노심으로 재순환된다. 또한 노심이 특성이 다른 두 개의 격자를 기본으로 구성되어 핵분열 임계성을 유지하고 잠재 핵분열설 물질의 변환으로 인한 핵연료를 생성하여 핵분열물질 양을 일정하게 유지하여 핵적 자활성을 지니고 있다. 본 연구에서는 선행 연구로부터 구성된 평형 노심으로부터의 원자로의 기하학적 구조와 용융염 핵연료의 기저 물질(${}^7\text{LiF} - \text{BeF}_2 - \text{ThF}_4 - \text{NatUF}_4$) 양이 평형상태와 동일하며 설계허용치를 만족하는 SEU, Pu 및 ${}^{233}\text{U}$ 기반의 외부 공급율을 조절하여 임계 노심을 구성하였다.

2. AMBIDEXTER 초기 노심 구성

2-1 코드 체계

본 연구에서는 그림 1과 같은 기존의 코드 체계를 그대로 사용하여 연구의 연속성을 이어나갔다. 각 코드들의 특징을 살펴보면 1점 1군 연소 이론 코드인 ORIGEN2는 핵물질의 연속 주입과 핵분열 물질의 제거 등을 처리하는 정화공정과 노심 내에 생성되는 물질들의 농도를 계산하며 2차원 연소도 해석 코드인 HELIOS는 노심 격자의 구조에 따른 핵적 특성들을 계산하고 마지막으로 2차원 다군 중성자 확산 코드인 SQUID를 사용하여 결정된 노심 구조를 고려하여 유효 증배 계수와 전환율을 계산한다. ORIGEN2의 라이브러리는 선행 연구에서 각 격자별로 스펙트럼 특성을 고려하여 라이브러리를 보정하였으며 ORIGEN2에서 계산된 결과는 HELIOS의 입력으로 사용되어 균정수의 핵적 특성을 계산한다. 이는 다시 SQUID에 입력되어 유효증배계수와 전환율을 계산한다.

2-2 평형 노심 설계 결과

AMBIDEXTER 원자로는 그림 2와 같이 용융염 핵연료가 노심을 통과하면서 핵분열을 통해 열에너지를 얻어 플레넘(plenum) 상단을 지나 대부분은 열교환기에서 열을 전달하고 노심에 직접 유입되며 일부는 정화공정으로 우회하여 핵분열 물질의 제거 및 핵물질 주입

후 노심에 유입되는 순환 개념을 가지고 있다. 이때 핵연료가 용융 상태를 유지하기 위해 $\text{ThF}_4 + \text{UF}_4 \leq 14 \text{ mole\%}$ 의 조건과 변성제인 천연 우라늄을 첨가하여 현실적으로 순수 ^{233}U 만을 분리할 수 없도록 한 핵비확산성 확보를 위해 ^{233}U 의 농도가 전체 U의 농도 중에 12%이하가 되는 상태를 항상 유지하도록 하였다. 순환하는 용융염 핵연료는 핵분열로 인한 출력을 담당하는 씨드 격자 및 핵물질의 생성을 담당하는 블랭킷 격자에서의 특성과 정화 공정에서의 핵분열 물질 제거 및 핵연료 주입량을 고려하여 핵물질의 농도를 계산하였다.

ORIGEN2에서 상이한 특성을 가진 격자를 고려하기 위해 각각의 라이브러리가 보정된 씨드 격자로만 이루어진 노심과 블랭킷 격자로만 이루어진 노심을 설정하였다. 각 노심에서 주요 핵종들의 주입률과 핵분열 물질들의 제거율을 결정한 후 짧은 시간 동안 핵종 변화를 계산하여 변화된 핵종들을 계산하였으며 그 결과를 합한 후 각 노심이 차지하는 부피에 맞게 나누어 다시 입력하여 반복 수행함으로써 핵연료가 노심을 통과하여 혼합된 후 노심에 재주입되는 순환 개념을 구현하였다. 각 핵종들의 농도를 계산하는 과정은 그림 3의 순서도와 같으며 설정 특성과 원리는 다음과 같다. 우선 기저물질인 ^7Li 와 ^9Be 의 양은 중성자와 반응물이 매우 작고 그 절대량이 매우 많으므로 시간에 따른 변화량이 거의 없어 항상 일정한 양을 유지하며 상태 유지를 위해 주입되는 양도 매우 작다. 그 다음으로 핵변환으로 인해 지속적으로 소모되는 ^{232}Th 와 ^{238}U 의 양을 일정하게 유지하기 위해서 유일한 생성원인 외부 주입률을 조절하여 평형 상태를 설정해준다. 핵분열 물질의 경우 주요 핵종들과의 중성자 흡수율이 99.99% 이내에 포함되는 비교적 흡수율이 큰 핵분열 원소들을 정하여 가능한 모든 붕괴 고리를 고려하여 각 노심별로 시간에 따라 누적량이 최대일 때의 양을 평형 상태라 가정하여 농도를 결정하였다. 핵분열 원소들은 중성자 흡수 물질이므로 보수성을 감안하여 그 양이 최대가 될 때를 적용하였다. 잠재 핵분열성 물질인 ^{232}Th 와 ^{238}U 가 중성자와 반응하여 생성된 ^{233}Pa 와 ^{239}Np 의 양은 ^{233}Th 와 ^{239}U 의 β^- 붕괴에 의해 영향을 받으므로 그 양을 고려하여 시간에 따른 양을 추적하여 수렴 값을 구하였다. 이때 ^{233}Pa 와 ^{239}Np 는 시간이 지난 뒤 자연 붕괴하여 핵분열성 물질인 ^{233}U 와 ^{239}Pu 가 되고 3일에 노심 내 ^{233}Pa 와 ^{239}Np 의 양이 모두 제거되도록 설정되었으므로 계산된 ^{233}Pa 와 ^{239}Np 의 양의 33.33%가 ^{233}U 와 ^{239}Pu 의 주입량이 된다. 마지막으로 Pu계열의 평형 상태 농도는 다른 물질들의 농도가 결정된 상태에서 시간에 따라 양의 변화가 없을 때까지 반복 수행하여 계산하였다. 계산 결과는 평형상태에서의 핵종 농도 비는 표 1과 같다.

앞서 계산된 평형 상태에서의 핵종 농도를 사용하여 HELIOS를 통해 각 격자의 각 군에서 핵적 특성들을 계산하였으며 이를 다시 SQUID에 입력하여 핵적 자활성을 이루도록 노심 구조를 결정하였다. 그 결과 노심 한가운데 한 개의 블랭킷 격자를 위치하여 노 중심에서 지나친 출력 상승을 억제하였으며 외각 방향으로 씨드 - 블랭킷 - 씨드 - 블랭킷 영역을 차례로 배치한 후 최외각을 반사체로 둘러싼 그림 4와 같은 노심 구조가 설계되었다. 이때 각 영역은 최대의 효율을 내도록 반복 수행에 의해 계산되어졌고 계산된 영역에서 반사체의 두께를 조절하여 최종 구조를 결정하였다. 최종 계산된 노심의 구조 및 자활성 특성은 표 2에 나타낸 바와 같다.

2-3 초기 노심 시나리오

평형 상태에서는 핵분열을 통해 임계를 이루는 물질은 잠재 핵분열성 물질인 ^{232}Th 과 ^{238}U 이 중성자 흡수에 의해 생성된 핵분열성 물질인 ^{233}U 와 ^{239}Pu 이다. 그러나 자연계에는 ^{233}U 와 ^{239}Pu 가 존재하지 않으므로 운전 초기부터 이 두 물질을 사용할 수 없다. 초기 노심에서 임계를 이루기 위해 기저물질인 $\text{LiF} - \text{BeF}_2$ 와 주성분 잠재 핵분열성 물질인 ThF_4 의 용량을 변화시키지 않고 장전 및 주입할 핵분열성 물질에 따라 그림 5와 같이 SEU(Slightly Enrichment Uranium) 기반, Pu 기반, ADS(Accelerated Driven System) 기

반의 세 가지 시나리오에 따라 시뮬레이션을 하였다. 각 시나리오에 대한 설명은 다음과 같다.

- SEU 기반 : 토륨과 천연우라늄을 기저 핵연료물질로 장전한 초기노심에서의 임계도를 저농축 우라늄의 주입율을 조절하면서 평형노심에 도달하는 노심관리 전략
- Pu 기반 : 토륨과 천연우라늄을 기저 핵연료물질로 장전한 초기노심에서의 임계도를 핵무기 해체로 얻는 Pu의 주입율을 조절하면서 평형노심에 도달하는 노심관리 전략
- ADS 기반 : 토륨과 천연우라늄을 기저 핵연료물질로 장전한 초기노심에서의 임계도를 ADS를 이용하여 토륨의 핵변환으로 생산한 ^{233}U 의 주입율을 조절하면서 평형노심에 도달하는 노심관리 전략

2-4 초기 노심 구성

초기 노심의 기하학적 구조는 평형 노심에서 계산된 구조와 동일하며 핵연료 조성은 각 시나리오에 따라 핵분열성 물질의 주입량과 장전량을 조절하면서 ORIGEN2를 통해 계산하였다. 초기 노심도 평형 노심과 마찬가지로 이종 격자의 특성을 고려하기 위해 각 격자로만 이루어진 두 개의 노심을 구성하여 각 노심 결과 값의 합으로 전체 핵종 농도를 계산하였다.

SEU 기반 시나리오의 경우 우라늄의 농축양에 따라 핵분열성 물질인 ^{235}U 의 양을 조절하였다. 이 때 핵확산성을 고려하여 우라늄 농축량은 20%를 넘지 않도록 하였다. 외부에서 주입되는 농축우라늄은 우선 잠재 핵분열성 물질인 ^{238}U 의 양이 시간에 따라 일정하게 유지되도록 ^{238}U 의 양을 결정한 후 우라늄의 농축도로부터 핵분열성 물질인 ^{235}U 의 양을 계산하였다. 핵분열 물질 및 기타 주요 핵종들은 일정 시간이 지난 후 ^{135}Xe 의 양이 최대 양에 도달하여 수렴할 때의 시점에 생성된 양으로 계산되었다. 이것은 초기 노심이 중성자 흡수 단면적이 매우 큰 ^{135}Xe 이 일정하게 유지됨으로 ^{135}Xe 의 양을 고려하여 임계를 이루는 상태를 계산하기 위해서이다. ORIGEN2를 통해 계산된 핵종 농도는 HELIOS에 입력되어 핵적 특성들을 계산하고 이는 다시 SQUID에 입력되어 임계 여부를 결정한다. 임계에 못 미칠 경우 농축도를 늘리고 임계를 넘을 경우 농축도를 줄여 계산을 재수행하였다.

Pu 기반 시나리오에서는 핵분열성 물질로 핵무기 해체로부터 나온 Pu를 사용한다. 일단 장전량을 전체 핵종의 농도로부터 계산되고 주입량은 노내 장전량이 일정하게 유지하도록 조절하여 계산한다. 핵분열 물질 및 기타 물질량 계산과 임계도 계산 방식은 앞의 SEU 시나리오와 동일하다.

ADS 기반 시나리오에서는 외부에서 입자 가속기를 통해 인공적으로 생성된 ^{233}U 를 초기 노심의 핵분열성 물질로 사용한다. Pu 시나리오와 마찬가지로 핵종 농도로부터 장전량을 계산하고 그 양이 일정하게 유지하도록 주입율을 조절하여 주입율을 계산한 후 임계 여부를 계산한다.

3. 결과 및 결론

동일한 노심 구조에서 기저 물질 및 잠재 핵분열성 물질의 양이 평형 노심과 같고 시나리오 별로 장전되는 핵분열성 물질들 간의 질량 차이가 비슷함으로 전체 장전량과 채널당 장전량은 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 핵연료 주입량 및 노물리적 특성들은 각 시나리오에 따라 장전되는 핵연료의 특성에 의해 영향을 받게 된다. 이때 핵물질 정화율과 열적 특성은 모든 시나리오에 동일하게 적용되었으며 그 결과를 평형 노심과 비교하여 요약하면 표

3과 같다.

각 시나리오에서 임계도는 SEU, Pu, ADS 기반에서 각각 1.00165, 1.000508, 1.000605로 만족하였고 이때 전환율은 0.9513, 0.8269, 1.0205로 계산되었다. 여기서 ADS 기반으로 운전할 경우 증식의 특성을 지니고 있음을 알 수 있다.

온도 반응도 계수는 전반적으로 음(-)의 값을 나타내고 있으나 Pu 기반의 경우에만 양(+)의 값을 갖는 것으로 계산되었다. 이는 핵변환로로 사용될 경우 안전성에 문제를 일으킬 수 있으므로 심도있는 연구가 필요하다.

4. 향후 연구

각 시나리오 별로 초기 노심을 기점으로 최단 시간, 경제적인 핵연료 주입으로 평형 상태 노심에 도달하는 천이 노심을 계산하고자 한다. 각 시나리오에서도 여러 가지 원리에 의해 천이 노심을 구성할 수 있으며 이 때 사용되는 방정식으로부터 최적화를 도모하고자 한다.

참고 문헌

- [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 노심의 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
- [8] 이영준 외, “Th-U-Pu 혼합 용융염핵연료 AMBIDEXTER 노심의 핵적 자활성 설계 방법론 개선”, 공학석사 학위 논문, 아주대학교, 2003

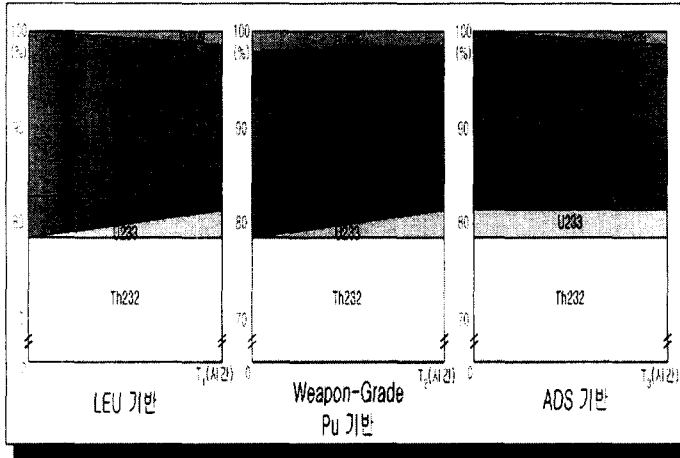


그림 5 옵션별 천연노심 시나리오

표 1. 평형 상태에서의 핵종농도

핵종	농도	핵종	농도
Activation Materials	^9Li 2.321E-02	^{232}Th 1.099E+01	
	^7Li 6.994E+01	^{239}Pa 3.096E-04	
	^9Be 1.599E+01	^{235}U 3.596E-01	
Fission Products	^{149}Nd 2.756E-04	^{238}U 1.888E-02	
	^{145}Nd 2.688E-04	^{239}U 2.619E-03	
	^{147}Pm 6.021E-05	^{239}Np 6.770E-05	
	^{146}Sm 3.442E-05	^{239}Pu 3.166E-02	
	^{151}Sm 1.835E-05	^{240}Pu 7.436E-03	
	^{152}Sm 3.136E-05	^{241}Pu 6.027E-03	
	^{154}Eu 2.994E-07	^{242}Pu 1.051E-03	
	^{168}b 1.359E-04	^{242m}Am 5.808E-09	

표 2 핵연료 최적화 연구 결과 요약

씨드 격자의 핵연료 반경		1.5cm	
노심 구조	모양	원통형	
	크기	반경	165.909cm
		높이	401.19cm
	영역(격자종류)	격자 개수 [개]	반경 [cm]
격자 배치	1영역(블랭킷)	1	5
	2영역(씨드)	217	77.5
	3영역(블랭킷)	110	95
	4영역(씨드)	516	152.5
	5영역(블랭킷)	155	165.9
	6영역(반사체)	-	245.9
반사체의 두께		80 cm	
k_{eff}		1.0001810	
C.R		1.001	
용융염 핵연료 용적량		37455471.4 g	

표 3. 평형 노심 및 초기노심 설계 특성 결과

설계특성 파라미터				
용융염핵연료				
-성분	${}^7\text{Li}-\text{BeF}_2-(\text{Th, U, Pu})\text{F}_4$	${}^7\text{Li}-\text{BeF}_2-(\text{Th, U})\text{F}_4$	${}^7\text{Li}-\text{BeF}_2-(\text{Th, U, Pu})\text{F}_4$	${}^7\text{Li}-\text{BeF}_2-(\text{Th, U})\text{F}_4$
-성분비, m/o	69.9-16.0-(11.0,3.0,0.05)	69.9-16.0-(10.98, 3.09)	69.9-16.0-(10.98,3.09,0.25)	69.9-15.9-(10.98, 3.2)
-노심 총 장전량, kg	37.455	37.455	37.455	37.455
-초냉각 장전량, kg	9.4(S)/115.3(B)	9.4(S)/115.3(B)	9.4(S)/115.3(B)	9.4(S)/115.3(B)
-장전연료의 핵물질비				
-초연 Th/U 비	3.67/1.0	3.55/1.0	4.99/1.0	3.43/1.0
-연속 주입율, kg/day	0.493	0.215	0.526	0.581
노심리 특성				
-유효증배계수, k_{eff}	1.0002	1.00165	1.000508	1.0006046
-평균 전핵율, OP	1.001	0.9513	0.82691	1.0205
-최대 중성자속, $\times 10^{16}$ nvt				
-열중성자(E \leq 1.0eV)	2.838	2.531	2.956	2.392
-속중성자(E \geq 50 keV)	2.672	4.110	3.712	4.039
-음도반증배계수, ρ_{eff}				
-용융염 핵연료	-2.30×10^{-5}	-2.081×10^{-6}	-2.235×10^{-6}	-8.975×10^{-5}
-핵연감속재	3.02×10^{-6}	-3.183×10^{-5}	2.234×10^{-5}	-1.948×10^{-7}
열유체 특성				
-출력밀도, W/cc of fuel salt				
-최대	744.3	517.15	812.4	402.7
-평균	28.1	28.1	28.1	28.1
-최대 산발 유속, cm/sec	129	129	129	129
-핵연료 온도, °F				
-노심입구	1150.0	1150.0	1150.0	1150.0
-노심출구	1300.0	1300.0	1300.0	1300.0