

등가연소도 근사법을 이용한 AMBIDEXTER 로심격자의 핵적 자활성에 관한 연구

조재국, 원성희, 임현진, 오세기, 김택겸*
아주대학교, 한국 원자력 연구소*

Study on the Self-Sustainability of AMBIDEXTER Lattice Using Equivalent Burnup Approximation

Jae Kook Cho, Sung Hee Won, Hun Jin Lim, Se Kee Oh, Taek Kyum Kim*
Ajou University, Korea Atomic Energy Research Institute*

요약

2차원 노심핵설계 코드 HELIOS를 이용하여 ${}^7\text{LiF}-\text{BeF}_2-\text{ThF}_4-{}^{233}\text{UF}_4$ 용융염 핵연료와 흑연(Graphite) 감속재로 구성된 AMBIDEXTER(Advanced Molten-salt Break-even Inherently-safe Dual-mission EXperimental and TEST Reactor) 원자로의 육각주형 로심격자에 대해 핵적 자활성 요건의 설계해석을 수행하였다. AMBIDEXTER 원자로는 액체 핵연료의 유동성을 이용한 온라인 핵연료 정화·처리·재생의 연속공정을 도입하여 노내의 잔류 핵분열 생성물질의 포화율을 최소로 유지시키고 중성자 경제성을 극대화하므로 높은 전환율을 얻는 설계이다.

핵연료 내에 잔류하는 핵분열생성물질의 포화농도에 대응하는 연소도를 등가연소도로 정의할 때, 열출력 250MW_{th} AMBIDEXTER 원자로의 등가연소도 374MWD/TeH.E.의 평형 로심 모델에 대해 핵적 자활성을 지배하는 주요 핵설계인자로서 용융염 핵연료의 ${}^{233}\text{U}$ Mole 분율, 흑연-대-용융염의 체적비, 노심격자간격 및 출력 밀도의 변화에 따른 임계도 및 전환율을 평가하였다.

그 결과, ${}^{233}\text{U}$ Mole 분율과 흑연-대-용융염 체적비를 좌표축으로 하는 2차원상공간에서 핵적 자활성 요건 상태함수는 각 노심격자간격에 대해 완만한 선형 함수로 표현할 수 있음을 확인하였다.

1. 서론

농축 우라늄 고체 핵연료를 사용하는 기존의 원자력 발전로 개념에서는 근본적으로 핵물질 SEU(Slightly Enriched Uranium)를 생산키 위한 ${}^{235}\text{U}$ 농축과 노내에서 ${}^{238}\text{U}$ 의 중성자포획으로 전환·생성되는 Pu 누적에 따른 핵확산 우려, 고준위 방사성 폐기물로 취급되는 사용후 핵연료 처리·처분에 관한 정책적·기술적 장기 전망의 불확실성, 그리고 설계기준사고인 LOCA로부터 중대사고로 이어지는 안전성 문제 등을 완전하게 해결할 수 없다. 본 연구는 Th/ ${}^{233}\text{U}$ 핵연료주기를 이용하는 용융염 핵연료 AMBIDEXTER 원자로 시스템¹⁾의 개발을 통해 이와 같은 원자력 발전기술이 안고 있는 고유한 문제를 해결할 수 있는 방안을 찾기

위해 수행하고 있다.

AMBIDEXTER는 노내에 장전된 용융염 핵연료의 일부를 By-pass회로로 순환시켜 일련의 용융염처리 화학공정을 거치면서 분리·정화·재생되므로 노내 잔류 핵분열생성물질의 양을 최소화할 뿐만 아니라 지속적으로 핵연료물질의 성분비를 일정하게 유지하는 설계이다. 이는 노물리 관점에서 중성자의 기생포획(Parasitic Capture)유실을 줄이므로 잉여중성자를 잠재핵분열성물질 Th의 전환에 유효하게 이용하는 고전환율 노심을 구현하는데 매우 효과적이다. AMBIDEXTER의 핵적 자활성 요건은 이러한 특성을 이용하여 열중성자로에서 Th/²³³U 핵주기 전환율을 정상적으로 1.0에 유지시키는 설계요건과 대응한다.

또 원자로 시스템은 일체형 구조로서 일차 열전달계통의 배관과 벨브를 혁신적으로 배제시키고 원자로용기 하부 중앙에 위치한 노심을 통과하면서 자체 핵분열로 가열된 용융염 핵연료는 원자로용기 상부주변에 내장된 열교환기를 거쳐 냉각된 후 바로 다시 로심으로 유입된다. 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 노심격자 핵설계해석을 통해 AMBIDEXTER 원자로의 핵적 자활성 요건을 만족하는 노심 구조와 특성을 시뮬레이션하고 주요 핵설계 파라미터에 대해 민감도분석을 수행하므로 설계개념의 타당성을 검증하는 목적으로 수행하였다. 계산에 이용한 코드는 스웨덴의 Scandpower가 개발하여 세계적으로 널리 사용하고 있는 2차원 노심격자 연소도 계산용 중성자/감마선 수송이론 코드 HELIOS²⁾로서 열중성자군의 에너지 상한선을 1.0 eV로 정하여 임계도 해석을 하였으며, 연소에 따른 AMBIDEXTER 핵연료의 성분비 특성을 모델링 할 수 있도록 ORIGEN2 시뮬레이션으로부터 등가연소도³⁾를 평가하고 이에 대응하는 HELIOS 연소계산을 수행하였다.

2. AMBIDEXTER 로심격자 모델

AMBIDEXTER 로심을 구성하는 표준격자는 그림 2에 단순화하여 도시한 바와 같이 후연감속재의 육각주 중앙에 원주형의 관통구가 있는 구조로서 열출력 250 MW_{th} 원자로 경우, 관통구를 통해 621℃의 ⁷LiF-BeF₂-ThF₄-²³³UF₄ 혼합 용융염 핵연료가 노심의 하부로부터 유입되어 상부출구로 이동하는 동안 자체 함유된 ²³³U의 핵분열반응에 의해 704℃로 가열된다. 원자로 입구에서 핵연료은도는 용융염의 응고점, ~500℃를 고려하여 충분한 여유를 갖도록 결정하였다.

이 때 용융염의 밀도는 혼합 용융염의 구성성분비와 온도분포의 함수로서 특히 중원소인 토륨과 우라늄의 함유량에 민감하나 본 연구에서는 표준성분비를 갖는 용융염물질에 대해 핵연료의 노내 평균온도에 대응하는 3.3093 g/cm³을 사용하였다. 여기서 표준성분비는 Mole 분율로 나타낼 때, ⁷LiF 71.7%, BeF₂ 16.0%,

ThF₄ 12.0% 그리고 ²³³UF₄ 0.3%로 정의하였다. 또한 흑연감속재는 중성자 흡수 단면적이 매우 큰 불활성기체 핵분열생성물질 ¹³⁵Xe의 기공 내 흡착산류하는 양을 최소화하기 위해 기공성이 낮은 것을 사용하지만 100% 순도의 흑연으로 가정하고 밀도 1.9 g/cm³(이론값 2.2 g/cm³)을 입력자료로 사용하였다.

출력밀도는 MSRE나 MSBR의 설계 및 운전자료^{4),5)}에 근거하였으며 노심격자의 기하학적 구조에 따라 결정되는 감속비율(Moderating Ratio)의 변화에 무관하도록 파라미터를 선택하여 용융염의 단위체적 당 출력으로 환산하였으며 최소 30 W/cm³에서 최대 137 W/cm³의 범위에 걸쳐 민감도 분석을 수행하였다. 잠재 핵분열성물질 Th의 전환율은 핵연료의 연소도와 변환 중간핵종 ²³³Pa농도에 대한 종속함수이기 때문에 AMBIDEXTER의 핵적 자활성 요건을 합리적으로 해석하기 위해서는 온라인 정화개념을 HELIOS 연소도 모델에 적합한 형태로 입력하는 것이 중요하다. ORIGEN2 코드를 이용하여 등가연소도 개념을 개발하였으며 374 MWD/TeH.E.의 등가연소도가 개략적으로 정화계통의 정화주기를 만족하는 평형노심의 평균연소도에 대응함을 확인하였다.

표 1은 HELIOS 입력자료로 사용된 AMBIDEXTER 원자료의 주요 특성파라미터이다.

3. 핵적 자활성 요건 해석

핵적 자활성 요건 평가를 위한 시뮬레이션은 격자 핵특성 인자 ²³³U Mole 분율, 흑연-대-용융염 체적비, 노심격자간격, 그리고 출력밀도를 변화시키면서 연소도 374 MWD/TeH.E.에서 유효증배계수와 전환율의 영향을 분석하였다. 이 때 ²³³U Mole 분율의 범위는 0.275~0.375, 흑연-대-용융염 체적비로서 용융염 체적분율을 0.10~0.40, 노심격자간격은 8~16cm의 범위를 선택하여 계산을 수행하였다.

AMBIDEXTER 원자료는 유효반경이 135cm, 높이가 250cm인 원주형으로써 $\phi = 0$ 경계조건은 반사체를 고려하지 않은 외삽경계면이며, 모든 격자 구성물질은 불순물을 포함하지 않는 것으로 단순화 하였다. 용융염의 평균 출력밀도가 137 W/cm³일 때에 대한 시뮬레이션 결과로서, 유효증배계수와 전환율의 변화를 도시하였는데, 그림 3-1은 ²³³U Mole 분율이 0.325일 경우, 흑연-대-용융염 체적비와 노심격자간격에 따라, 그림 3-2는 노심격자간격이 12cm일 경우, 흑연-대-용융염 체적비와 ²³³U Mole 분율에 따라, 그리고 그림 3-3은 흑연-대-용융염 체적비가 0.30일 경우, ²³³U Mole 분율과 노심격자간격에 따라 각각 도시하고 있다. 그림에 의하면 AMBIDEXTER 노심격자의 임계도는 격자간 거리가 증가할수록 감소하며, 전환율은 반대로 증가하는 것으로 나타난다.

그림 4는 앞에 논의한 격자핵특성 인자를 변수로하는 핵적자활성 요건 상태함수를 ²³³U Mole 분율과 흑연-대-용융염 체적비를 좌표축으로하는 2차원 상공간에 각 노심격자간격에 따라 도시하였다. 핵적 자활성을 유지하기 위한 임계도와 전환율 조건을 동시에 만족하는 점으로써 그림 3-1에서는 노심격자간격이 12cm와 14cm일 때 각각 흑연-대-용융염 체적비가 0.29와 0.30, 그림 3-2에서는 ²³³U

Mole 분율이 0.3일 때 흑연-대-용융염 체적비가 0.26, 그림 3-3에서는 ^{233}U Mole 분율이 0.325일 때, 노심격자간격이 14cm이며, 이 밖에 격자 핵특성 인자의 시뮬레이션 범위 밖에도 핵적 자활성 요건을 만족하는 영역이 존재함을 예측할 수 있다.

그림 4에 나타난 노물리적 특징은 첫째, 핵적 자활성 요건 상태함수는 상공간의 원점으로 접근할수록 ^{233}U Mole 분율에 비해 흑연-대-용융염 체적비에 보다 더 민감함을 보여준다. 따라서 흑연-대-용융염의 체적비는 설계 고정상수이므로 운전중 고려되는 상태변화에 무관하게 핵적 자활성을 만족하기 위해서는 운전변수로서 ^{233}U Mole 분율을 변화시키는 제어기능이 요구되며 제어의 안정성을 향상시키기 위해서는 핵연료 내의 ^{233}U Mole 분율을 높이는 설계가 바람직하다. 그러나 ^{233}U Mole 분율의 증가에서 오는 경제적 불이익을 고려하여야 한다. 둘째, 노심격자간격이 증가할수록 핵적 자활성요건 상태함수는 상공간의 원점에서 멀어지고 있다. 즉 moderating ratio가 증가할수록 핵적 자활성 요건을 만족하기 위해서는 보다 많은 용융염 핵연료와 ^{233}U 의 양이 필요하다. 이는 그림 3-1, 3-2, 3-3에서 나타난대로 격자 핵특성 인자는 임계도보다 전환율 변화와 더 큰 상관관계를 갖기 때문이다. 셋째, AMBIDEXTER 노심격자는 주요한 격자핵특성인자에 대해 핵적 자활성 요건이 완만한 연속함수 형태로 존재하므로 설계 및 운전특성 변화에 민감하지 않은 신뢰성이 높은 설계선택이 가능함이 입증되었다. 결론적으로 AMBIDEXTER 노심격자설계는 흑연의 침투온도 제한치, 용융염 핵연료의 유속 한계 등 설계제약조건의 허용범위와 경제성을 고려하여 본 연구에서 확인된 상공간 안에서 최적화 설계가 가능하다.

4. 결론

AMBIDEXTER 원자로는 액체 핵연료의 유동성을 이용한 온라인 정화·처리·재생의 연속공정을 도입하여 노내의 잔류 핵분열 생성물질의 포화양을 최소로 유지시키고 중성자 경제성을 극대화하여 높은 전환율을 얻으므로 Th/ ^{233}U 핵주기의 핵적 자활성을 만족하는 새로운 개념을 갖는 원자로이다.

2차원 노심 핵설계 코드 HELIOS를 이용하여 $^7\text{LiF}-\text{BeF}_2-\text{ThF}_4-^{233}\text{UF}_4$ 용융염 핵연료와 흑연감속재로 구성된 노심 격자의 핵설계해석을 통하여 AMBIDEXTER 원자로의 핵적 자활성 요건을 만족하는 노심 구조와 특성을 시뮬레이션하고, ^{233}U Mole 분율, 흑연-대-용융염-체적비, 노심격자간격, 출력밀도 등의 격자 핵설계 인자에 대해 민감도 분석을 수행, 설계개념의 타당성을 입증하였다.

열출력 250 MW_{th} AMBIDEXTER 노심을 HELIOS 코드로 모델링하기 위해서 ORIGEN2의 연소도에 따른 핵종분포 동특성해석을 통해 등가연소도를 정의하였다. 정화공정의 시간특성을 고려하였을 때 노내 평형 핵분열생성물질 농도에 근사적으로 대응하는 등가연소도를 374MWD/TeHE로 평가하였다. 시뮬레이션 결과, 핵적 자활성 요건을 만족하는 노심격자간격/ ^{233}U Mole 분율/흑연-대-용융염 체적비 값의 쌍들은(예, 12cm/0.30/0.26, 12cm/0.325/0.29, 14cm/0.325/0.30 등)

2차원 상공간에서 분포점 간의 상관관계를 나타내는 상태함수로 표현할 수 있었다.

결국 AMBIDEXTER 로심격자는 주요한 핵설계특성을 나타내는 각종 인자들에 대해 완만한 연속함수 형태로서 핵적 자활성 요건을 만족하는 설계가능 범위가 존재하므로 앞으로 설계가 진행되면서 설계제약조건의 허용범위와 경제성을 고려하여 이 범위안에서 설계값이 최적화 될 것이다.

Reference

- 1] 오세기, 정근모, AMBIDEXTER 원자력 복합체-신뢰성 있는 미래 원자력에너지 이용 방안, 한국 에너지공학회 춘계학술발표 논문집, 1998
- 2] USER MANUAL HELIOS, SCANDPOWER, 1995
- 3] 원성희, 임현진, 조재국, 오세기, 등가연소도 최적화를 위한 AMBIDEXTER 핵연료 재생공정의 시간 상수특성화 연구, 한국 원자력학회 춘계학술발표회 논문집, 1998
- 4] J. R. McWherter, Molten Salt Breeder Experiment Design Bases, ORNL-TM-3177 Oak Ridge National Laboratory, 1970
- 5] L. G. Alexander, Molten Salt Converter Reactor Design Study and Power Cost Estimates from a 1000MW_e Station, ORNL-TM-1060 Oak Ridge National Laboratory, 1965

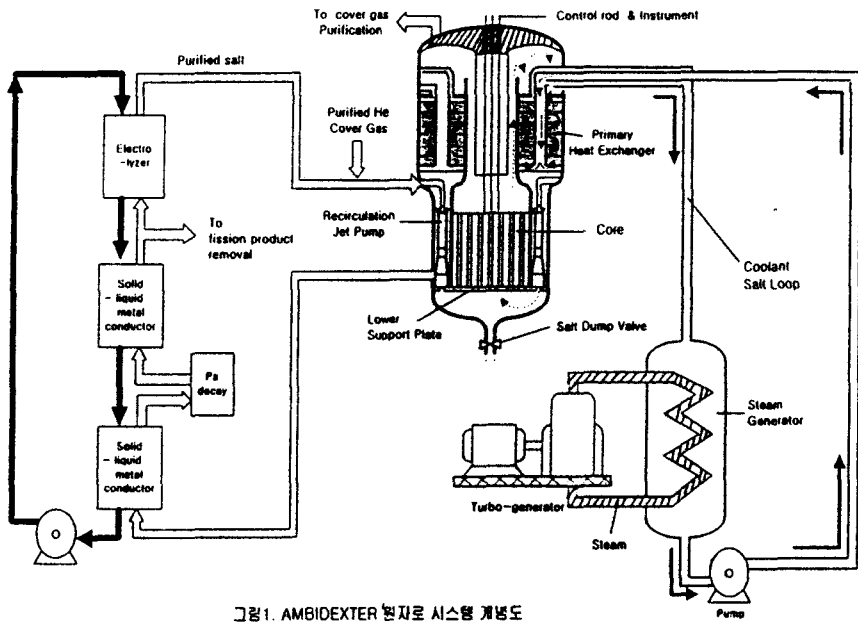
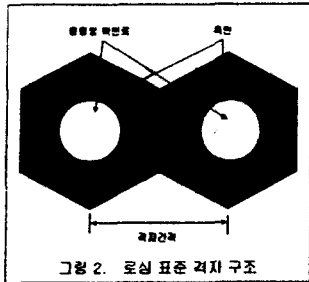


그림 1. AMBIDEXTER 원자로 시스템 개념도



${}^7\text{LiF}-\text{BeF}_2-{}^{232}\text{ThF}_4-{}^{233}\text{UF}_4$ 용융염 물분율 (mole percentage) [%]	${}^7\text{LiF}$	71.70 ± 0.05
	BeF_2	16
	ThF_4	12
	${}^{233}\text{UF}_4$	0.30 ± 0.05
Thermal Capability [MW]	250	
Core Shape	Cylindrical	
Reactor Cylinder Radius [cm]	135	
Reactor Cylinder Height [cm]	250	
Average Temperature[K ^o]	Moderator	544.261
	Fuel Salt	935.93
Power Density [w/cc]	137	
Graphite Density [g/cc] (이론치 : 2.2)	1.9	
Fuel Salt Density[g/cc] (${}^{233}\text{UF}_4$ 의 물분율=0.3 일때)	3.3093	

표 1. HELIOS 입력 자료

그림 3-1. ^{235}U Mole 분율 = 0.325일때, 폭연-대-용융염 체적비에 따른 변화

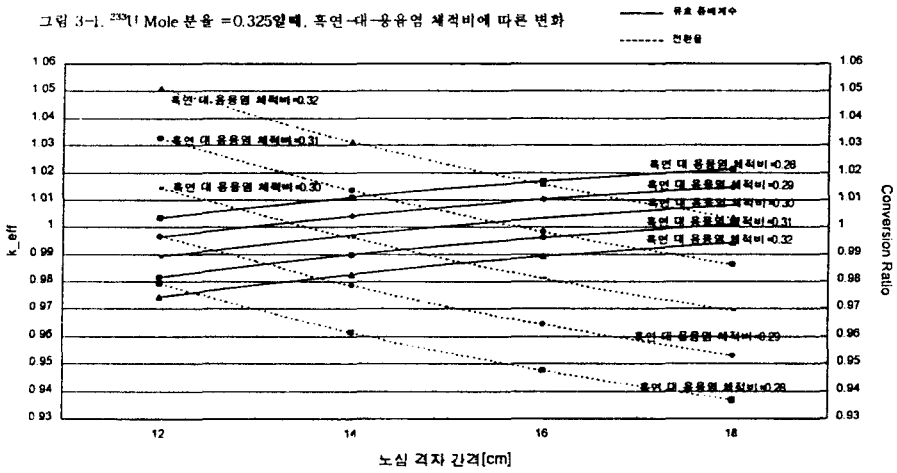
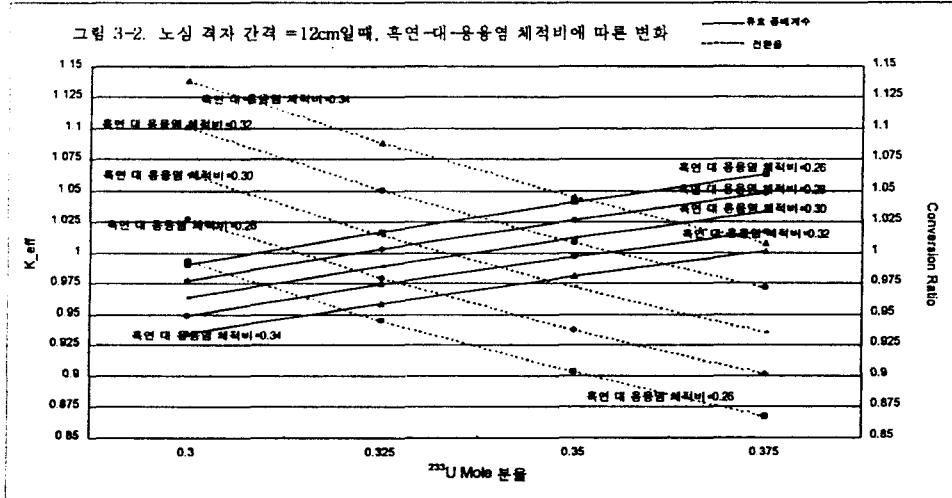


그림 3-2. 노심 격자 간격 = 12cm일때, 폭연-대-용융염 체적비에 따른 변화



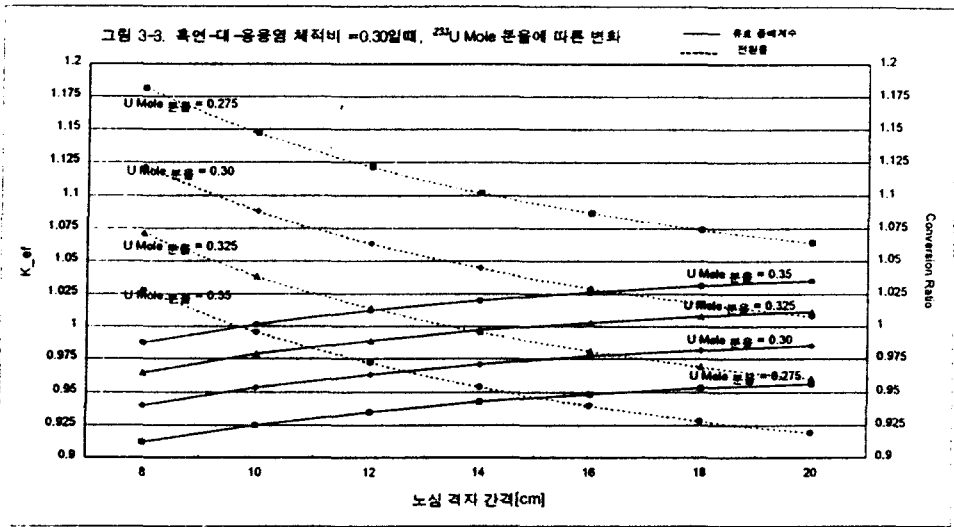


그림 4. ^{233}U Mole 분율 v.s. 흑연-대-용융염 체적비

