

## Th-U-Pu 혼합 용융염 핵연료 AMBIDEXTER 원자로 시스템의 온라인 핵연료 용량 최적화 설계에 관한 연구

이영준, 김진성, 유영진, 오세기

A Study an Optimal Design of the On-line Chemical Process System  
for the AMBIDEXTER Operating with the molten Th-U-Pu salt mixture Fuel

Youngjoon Lee, Jinsung Kim, Yeongjin Yu, Sekee Oh

### 1. 서론

원자로계통 전체가 원자로 용기안에 일체형으로 내장되었으며 열·에너지 수송회로와 물질·방사선 수송회로가 각각 분리, 혼합된 복합 원자력에너지시스템인 250MW<sub>th</sub> 실증로급 AMBIDEXTER (Advanced Molten-salt Break-even Inherently-safe Dual-missioning EXperimental and TEst Reactor)는 부의 핵연료 반응도로 인한 고유안전성과 핵확산 방지, 폐기물 감축, 핵연료 경제성 및 자원 이용의 효율성을 갖춘 원자로로서 현재 아주대학교에서 개념 설계중이다.

AMBIDEXTER 원자력 시스템은 (Th, U, Pu)F<sub>4</sub> 용융염 핵연료 물질이 원자로 계통 및 물질·방사선 회로를 순환하며 서로 특성이 다른 씨드 격자와 블랭킷 격자로 노심이 구성되었던 특징을 가지고 있다. 본 연구에서는 AMBIDEXTER의 특징을 고려하여 이중 격자로 구성된 노심에서 순환하는 핵연료 용융염의 평형 상태에서의 핵종 농도를 계산하였고 각 격자의 핵적 특성을 고려하여 자활·자정능을 만족하는 노심 구조를 설계하였다.

### 2. AMBIDEXTER 원자로 모델링

#### 2-1 코드 체계

본 연구에서는 핵물질의 연속 주입과 핵분열 물질의 제거 등을 처리하는 정화공정과 노심 내에 생성되는 물질들의 농도를 계산하는 1점 1군 연소 이론 코드인 ORIGEN2와 노심 격자의 구조에 따른 핵적 특성들을 계산하는 2차원 연소도 해석 코드인 HELIOS, 노심 구조를 결정하여 유효 증배 계수와 전환율을 계산하는 2차원 다군 중성자 확산 코드인 SQUID의 세 개 코드를 상호 연계하여 수행하였다. ORIGEN2에서 계산된 결과는 HELIOS의 입력으로 사용되어 격자 구조에 따른 중성자 스펙트럼이 결정되며 이 결과는 다시 ORIGEN2의 라이브러리 보정에 사용되어 격자 특성을 고려한다. 보정된 라이브러리를 사용하여 평형상태의 핵종 농도가 계산되면 다시 HELIOS를 통해 균정수의 핵적 특성을 계산하여 SQUID의 입력으로 사용되어 격자의 배치, 반사체의 두께 조절 및 노심의 크기를 결정하여 유효증배 계수와 전환율을 계산하여 자활성을 판단한다. 코드 체계의 연계는 [그림 1]에 도시하였다.

## 2-2 평형 상태에서의 핵종 농도 계산

AMBIDEXTER 원자로는 용융염 핵연료가 노심을 통과하면서 핵분열을 통해 열에너지를 얻어 플레넘 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 용융 상태의 핵연료를 유지하기 위해  $\text{ThF}_4 + \text{UF}_4 \leq 14$  mole%의 조건을 만족하고 현실적으로 순수  $^{233}\text{U}$ 만을 분리할 수 없도록 하기 위해  $^{233}\text{U}$ 의 농도가 전체 U의 농도 중에 12%이하가 되도록 변성제인 천연 우라늄을 첨가하여 핵비확산성을 확보하는 기본 전제로 순환하는 용융염 핵연료의 정화 공정 및 핵연료 주입의 특성과 핵물질과의 반응과 출력을 담당하는 씨드 격자와 핵물질의 생성을 담당하는 블랭킷 격자에서의 특성을 고려하여 핵물질의 농도를 계산하였다.

ORIGEN2에서 이를 구현하기 위해 각각의 라이브러리가 보정된 씨드 격자로만 이루어진 노심과 블랭킷 격자로만 이루어진 노심 두 개를 설정하여 각 격자의 특성을 살렸으며 주요 핵종들의 주입률과 핵분열 물질들의 제거율을 결정한 후 각 노심에서의 짧은 시간 동안 핵종 변화를 계산하여 그 결과를 합한 후 각 노심이 차지하는 부피에 맞게 나누어 다시 입력하여 반복 수행함으로써 순환 개념을 구현하였다. 노심의 초기 장착 양은 위의 [표 1]에서 보여지는 것과 같은 기본 요건을 만족하는 범위와 기존의 계산된 노심에서 씨드 격자와 블랭킷 격자의 부피비를 사용하였다. 이를 시작점으로 하여 [그림 2]의 순서도와 같이 우선 기본 물질인  $^7\text{Li}$ 와  $^9\text{Be}$ 의 양은 중성자와 반응률이 매우 작고 그 절대량이 매우 많으므로 항상 거의 일정하고  $^{232}\text{Th}$ 와  $^{238}\text{U}$ 의 양은 주입률을 조절하여 초기량이 평형 상태가 되도록 설정하였다. 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. 잠재 핵분열성 물질인  $^{232}\text{Th}$ 와  $^{238}\text{U}$ 가 중성자와 반응하여 생성된  $^{233}\text{Pa}$ 와  $^{239}\text{Np}$ 의 양은 붕괴 고리에 의해  $^{233}\text{Th}$ 와  $^{239}\text{U}$ 의 양을 고려하여 시간에 따른 양을 계산하여 수렴 값을 구하였다. 이때  $^{233}\text{Pa}$ 와  $^{239}\text{Np}$ 는 시간이 지난 뒤 자연 붕괴하여 핵분열성 물질인  $^{233}\text{U}$ 와  $^{239}\text{Pu}$ 가 되고 3일에 노심 내  $^{233}\text{Pa}$ 와  $^{239}\text{Np}$ 의 양이 모두 제거되도록 설정되었으므로 계산된  $^{233}\text{Pa}$ 와  $^{239}\text{Np}$ 의 양의 33.33%가  $^{233}\text{U}$ 와  $^{239}\text{Pu}$ 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 2]과 같다.

## 2-3 중성자 스펙트럼과 균정수 계산

[그림 3]과 같이 씨드 격자는 육각주의 흑연 감속재 사이에 1.5cm의 반경으로 용융염 핵연료가 지나가고 블랭킷 격자는 격자 전체가 핵연료로 가득 차있다. 씨드 격자는 핵연료를 둘러싸고 있는 흑연 감속재에 의한 중성자 에너지 손실로 인해 핵분열성 물질과 반응할 확률을 높여 핵분열을 일으켜 에너지 생산과 중성자 생성으로 인한 유효중배계수에 영향을 미치며 블랭킷 격자는 중성자 에너지를 감속시켜주는 감속재가 없으므로 씨드 격자에 비해 중성자의 에너지가 경화되어있고 이로 인해 핵분열보다는 잠재 핵분열성 물질과의 포획반응으로 핵분열성 물질로의 전환을 일으켜 전환율에 영향을 미친다. [그림 4]는 씨드 격자와 블랭킷 격자의 중성자 스펙트럼을 나타내며 이는 ORIGEN2의 라이브러리 보정에 이용되었다.

ORIGEN2에서 계산된 핵종 농도를 통해 3개의 에너지 군에서의 핵물질들의 흡수, 포획, 핵분열 단면적 및 베타 붕괴 등 핵적 특성들을 계산하여 SQUID의 입력 자료로 사용되었으며 이는 [표 3]에 정리하였다.

## 2-4 SQUID를 이용한 노심 구조 설계

2차원 다군 중성자 확산 이론 코드인 SQUID를 통해 노심 크기를 결정하고 적절하게 격자들을 배치함으로써 핵적 자활성 지표인 유효증배계수( $k_{eff}$ )와 전환율(Conversion Ratio)를 계산하였다.

$$k_{eff} = \frac{\iint \sum_i v^i \Sigma_f^i(E) \Phi(r, E) dE dr}{\sum_j \iint \Sigma_a^j(E) \phi(r, E) dE dr + l}$$

$$C. R. = \frac{\int (\Sigma_c^{232Th} + \Sigma_c^{238U} + \Sigma_c^{240Pu}) \Phi(E) dE}{\int (\Sigma_a^{238U} + \Sigma_a^{235U} + \Sigma_a^{239Pu} + \Sigma_a^{241Pu}) \Phi(E) dE}$$

이론적으로 유효증배계수는 핵분열성 물질의 거시 핵분열 반응율에 반응당 중성자 생성수의 곱으로 표시된 중성자 생성량을 분자에 나타내며 모든 핵종들의 흡수율과 노외로 빠져나가는 누설율의 합으로 계산된 중성자 소멸량을 분모에 나타냈다. 전환율은 잠재 핵분열성 물질인  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ 의 포획반응율과 핵분열성 물질인  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ 의 흡수반응율의 비로 나타내진다.

핵적 자활성에 영향을 미치는 주요 변수로는 씨드 격자의 핵연료 반경, 노심의 크기, 격자의 배치, 반사체의 두께를 들 수 있다. 씨드 격자의 핵연료 반경을 바꿔감으로서 씨드 격자에서의 중성자 에너지 스펙트럼을 변화시키고 이는 곧 핵분열 단면적에 영향을 미쳐 주로 유효증배계수에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 격자의 제조 공정을 고려하여 0.5cm 단위로 핵연료 반경을 변동시켰을 때 최대의 증배계수 값을 갖는 최적화된 크기인 1.5cm의 핵연료 반경을 사용하였다. 노심의 크기가 커질수록 중성자 누설율이 작아지고 그로 인해 중성자의 이용성이 좋아지나 장착되는 핵연료의 양이 많아지고 그로 인해 경제성이 떨어지는 단점이 있다. 핵적 자활성을 만족하는 요건에서 노심의 크기를 최소화하기 위해서는 격자들을 적절히 배치하여 블랭킷 격자영역에서 최대의 속중성자 속과 씨드 격자 영역에서 최대의 열중성자 속을 갖도록 분포를 최적화해야 한다. 본 연구에서는 급격한 침투출력을 방지하기 위해 노심 한가운데에 하나의 블랭킷 격자를 배치하고 그 부분을 제외한 노심 중심부분에 핵분열로 인한 출력과 잉여 중성자를 생산하는 씨드 격자들을 배치하였다. 씨드 격자 외부에 블랭킷 격자로 둘러싸야 핵물질로의 전환율을 담당했으나 블랭킷 영역 중간에 씨드 격자를 다시 배치하여 블랭킷 영역에서의 중성자분포도를 높혀 중성자 이용을 극대화하였다.

노심 중심 부분에서는 중성자밀도 급한 변화로 인해 격자 영역 범위의 미세한 변화에도 자활성 지표인 유효증배계수와 전환율에 민감하게 변화하고 반대로 중심에서 멀어질수록 변화율이 작아진다. 이를 이용하여 본 연구에서는 가장 영향이 큰 영역인 노 중심의 씨드 영역의 범위를 기본 단위별로 변화시켜 유효증배계수와 전환율의 합이 2에 가까운 위치를 선정 한 후 차츰 외부에 위치한 영역의 반경을 변화시킴으로서 위치를 최적화 하였다. [그림 5]는 최적화된 노심을 기준으로 각 영역을 변화시켰을 때 유효증배계수와 전환율의 합의 변화를 도시한 것이다. 노심 중앙에 위치한 씨드 격자 영역과 블랭킷 격자의 영역의 사이인 두 번째 경계가 변화율은 다른 위치에 비해 급격함을 알 수 있다.

반사체의 두께가 두꺼워짐에 따라 노심 최외각에서의 중성자 이용율이 좋아져 전환율이

향상되며 중성자 분포가 평탄해져 유효증배계수에도 영향을 미친다. [그림 6]를 보면 반사체의 두께에 따라 전환율은 선형적으로 증가하나 유효증배계수는 일정 두께이상 증가하지 않음을 알 수 있다.

최적화된 반사체의 두께를 가지고 블랭킷-씨드-블랭킷-씨드-블랭킷의 5개의 영역을 적절히 배치해도 자활성을 만족하지 않는 경우 반경 방향으로 노심의 크기를 키우고 그에 맞게 다시 영역을 최적화한다. 노심 크기 확장 및 영역 배치를 반복 수행하여 전환율은 조건을 만족하나 유효증배계수가 미입계일 경우 축방향으로 노심을 확장하여 유효증배계수를 보완한다.

### 3. 결과 및 결론

약 170 g/day과 약 64 g/day의  $^{232}\text{Th}$ 와  $^{238}\text{U}$ 의 주입량에서  $^{232}\text{Th}$ 와  $^{238}\text{U}$ 은 평형상태에 도달하며 이 때의  $^{233}\text{U}$ 과  $^{239}\text{Pu}$  주입량은 각각 약 154.8 g/day, 35 g/day로 계산되었다.

노심의 크기는 반사체를 제외하고 반경 165.9cm, 높이 401.2cm이며 노심 한가운데 블랭킷 격자가 위치하고 [표 3]과 같이 영역을 설정하였다. 이 노심의 단면도와 그때의 출력분포는 [그림 7]과 같으며 씨드영역에서 주로 출력이 발생함을 알 수 있다. [그림 8]과 같이 반경 방향 중성자속 분포를 보면 속중성자속은 블랭킷 영역에서, 열중성자속은 씨드 영역에서 높게 나타나며 블랭킷 영역 중간에 삽입된 씨드 격자로 인해 외각에서 중성자밀도가 높아져 자활성에 효과적인 영향을 미침을 알 수 있다.

그 결과, 이종격자의 특성과 핵연료 순환을 고려하여 ORIGEN2 코드를 통해 평형상태에서의 핵종 농도를 계산하였으며 씨드 격자에서의 핵연료 반경이 1.5cm일 때 적절한 격자 배치와 노심 크기 및 반사체 두께를 조절하여 자활성 요건인 유효증배계수와 전환율을 계산한 결과 유효증배계수가 1.0002, 전환율이 1.001로 핵적 자활성을 만족하는 최적의 노심을 구성하였다.

### 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

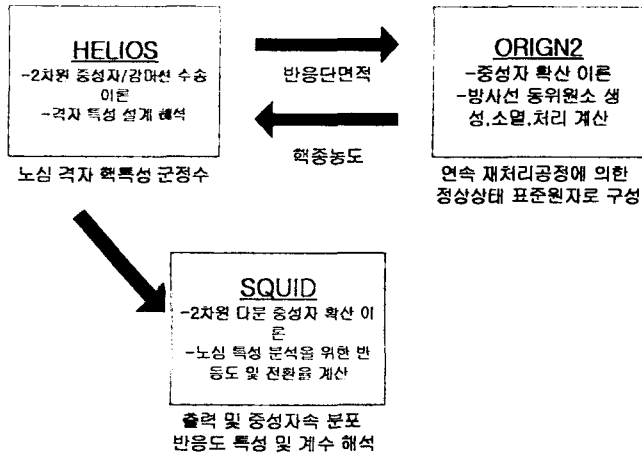


그림 1 코드 체계

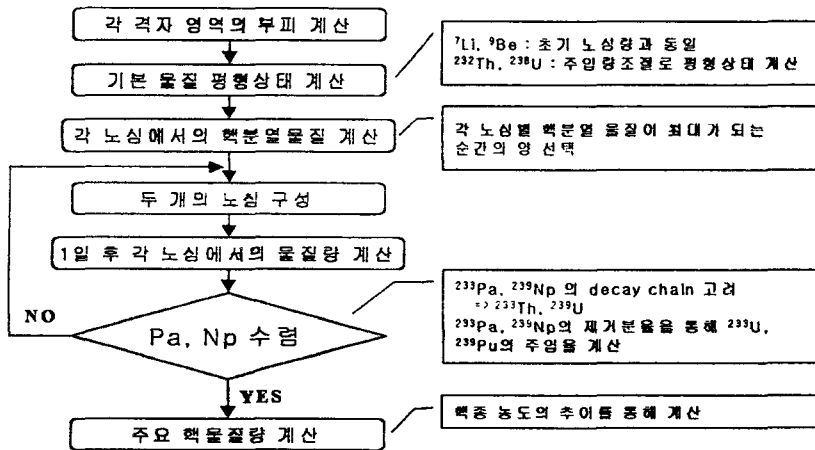


그림 2 평형상태에서의 핵종농도 도출 순서도

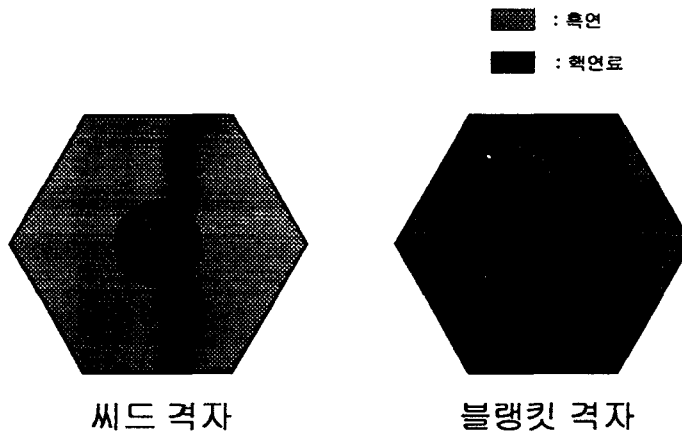


그림 3 이중 격자 구조

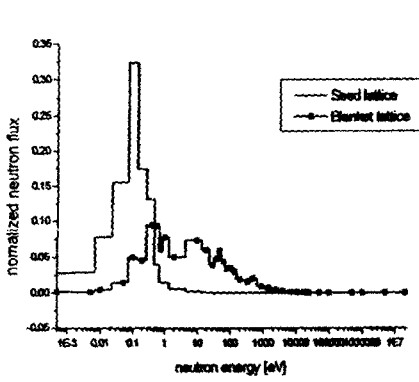


그림 4 격자간 중성자 스펙트럼

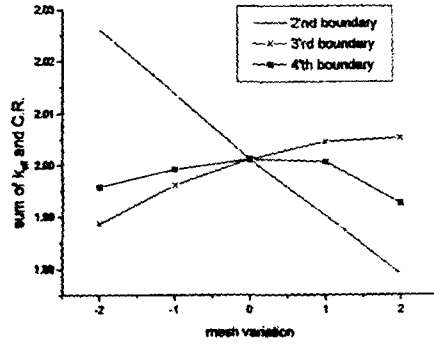


그림 5 영역 변화 당 유효증배계수와 전환율 합이 변화

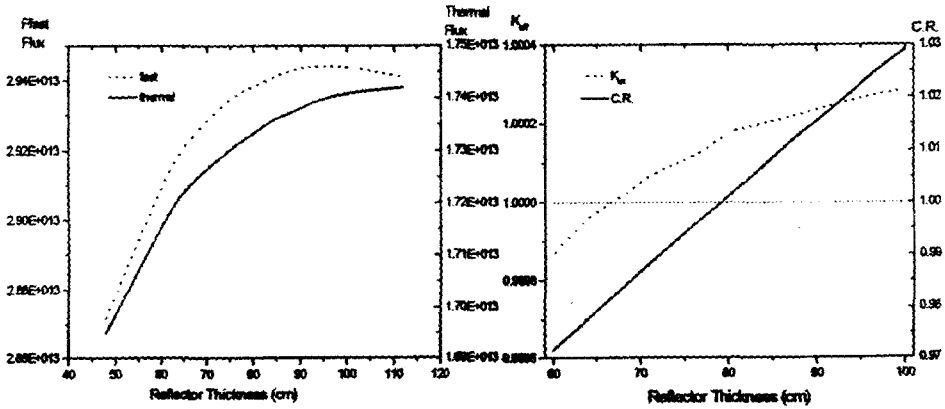


그림 6 반사체 두께 변화에 따른 특성 변화

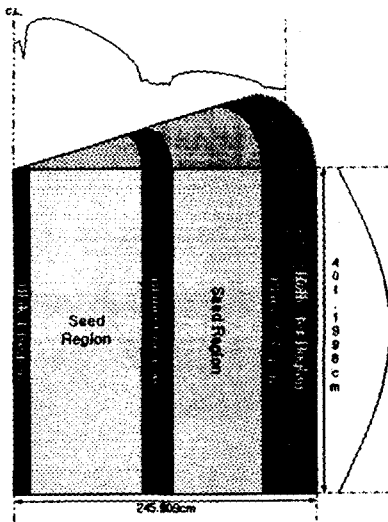


그림 7 노심 단면도와 출력분포

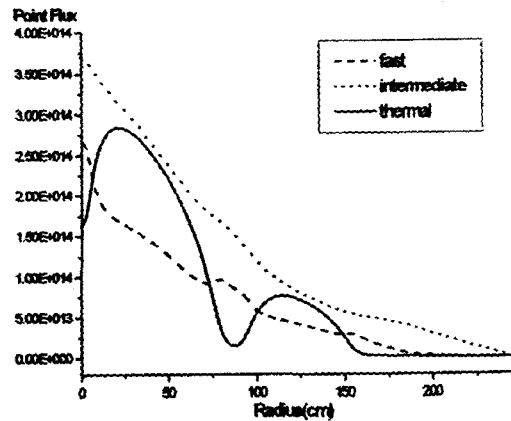


그림 8 반경 방향 중성자 분포

표 1 초기상태에서의 핵종 농도

핵종	몰 분율 [mole %]
<sup>7</sup> LiF	70
<sup>9</sup> BeF <sub>2</sub>	16
<sup>232</sup> ThF <sub>4</sub>	11
<sup>233</sup> UF <sub>4</sub>	0.36
<sup>235</sup> UF <sub>4</sub>	0.0189014
<sup>238</sup> UF <sub>4</sub>	2.6210976

표 2 평형 상태에서의 핵종농도

	핵종	핵종 농도		핵종	핵종 농도
Activation Materials	<sup>6</sup> Li	2.321E-02	Activation Materials	<sup>232</sup> Th	1.099E+01
	<sup>7</sup> Li	6.994E+01		<sup>233</sup> Pa	3.095E-04
	<sup>9</sup> Be	1.599E+01		<sup>233</sup> U	3.596E-01
Fission Products	<sup>143</sup> Nd	2.756E-04		<sup>235</sup> U	1.888E-02
	<sup>145</sup> Nd	2.668E-04		<sup>238</sup> U	2.619E-00
	<sup>147</sup> Pm	6.021E-05		<sup>239</sup> Np	6.770E-05
	<sup>149</sup> Sm	3.442E-05		<sup>239</sup> Pu	3.165E-02
	<sup>151</sup> Sm	1.835E-05		<sup>240</sup> Pu	7.435E-03
	<sup>152</sup> Sm	3.136E-05		<sup>241</sup> Pu	6.027E-03
	<sup>155</sup> Eu	2.994E-07		<sup>242</sup> Pu	1.051E-03
	<sup>165</sup> Ho	1.359E-04	<sup>242m</sup> Am	5.808E-09	

표 3 노심 구조 및 결과 데이터

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