

## AMBIDEXTER 천이노심설계를 위한 노심관리방법

유극중, 신동훈, 소순규, 이영준, 김진성, 오세기  
아주대학교

### Development of a core management method for design of AMBIDEXTER transient Cores

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

#### 1. 서론

개념설계중인 용융염핵연료를 사용하는 AMBIDEXTER 원자로는 핵분열성 물질의 핵분열로 인해 열 출력을 내는데 주로 기여하는 씨드격자와 잠재 핵분열성 물질의 변환을 통해 핵분열성 물질을 생산하는데 주로 기여하고 블랭킷격자로 구성되어있고 핵분열성 물질이 노심을 통과하여 원자로내의 1차 열교환기를 거친 후 물질·방사선수송회로를 통해 정화공정에 유입되어 핵분열 물질의 정화를 한 후 핵연료와 다시 노심에 주입된다. 핵연료로서 Th/U/Pu의 혼합불화물을 LiF-BeF<sub>2</sub>와 혼합하여 사용하며 노심이 break-even 전환율 특성을 만족하도록 설계 되어있다. 연소로 손실되는 핵분열성 물질의 보충을 위해 운전 중 지속적으로 소량의 천연 Th와 U불화물을 주입하므로 별도로 농축된 핵분열성물질을 필요로 하지 않는다. 본 연구는 이러한 평형상태의 핵중수밀도에 도달하기 위해서 실현가능성 있는 초기노심 핵분열 물질로서 SEU, <sup>233</sup>U, Pu의 장전 경우를 옵션노심으로 선정하여 각 초기노심으로부터 평형노심에 이르는 천이 과정에 대한 노심관리 방법을 찾고 이드로부터 최적화 방법을 선택하기 위해 수행되었다.

#### 2. 천이노심관리 방법

##### (1) 초기 노심(SEU-기반, Pu-기반) 구성 및 특성

ORIGEN2/HELIOS/SQUID 체제를 이용하여 선행연구에서 수행한 AMBIDEXTER 원자로심의 기하학적 구조와 용융염핵연료의 기저물질 성분(<sup>7</sup>LiF-BeF<sub>2</sub>-ThF<sub>4</sub>-<sup>Nat</sup>UF<sub>4</sub>), 핵분열 생성물을 선택하여 초기노심 장전연료물질로 선정하고 SEU, Pu의 분율을 조절하여 임계도를 만족하는 범위에서 초기노심을 구성하고 장전량을 결정하였다. 단 <sup>233</sup>U기반 초기 노심은 평형노심과 동일한 성분을 갖게 되므로 별도의 천이노심을 구성할 필요가 없어 연구에 제외하였다.

##### (2) 천이노심모델 개발

###### (ㄱ) 천이노심모델

AMBIDEXTER는 평형상태에 이르면 핵분열성물질을 추가로 공급하지 않고 소량의 천연 Th 및 U만을 공급하므로 지속적으로 운전이 가능하며 동시에 생성되는 핵분열성물질의 양

이 최소가 되는 원자력에너지시스템이다. 따라서 천이노심의 설계핵심은 천연에 존재하지 않지만 Th/U주기에 반드시 필요한  $^{233}\text{U}$ 의 장전량을 최소화하고 짧은 기간에 확보하여 천연 운전기간을 최소화하는 것이라 할 수 있다.

선행연구 평형노심의 핵종수밀도를 목표로 하는 SEU-기반, Pu-기반의 초기노심을 결정하고 3군 다 영역 중성자확산방정식과 연속장전/정확모델을 포함하는 핵종변환방정식을 초기노심에서부터 평형노심에 도달될 때 까리 소 구간의 시간으로 절단하여 반복 계산하는 천이노심모델을 개발하였다.

(L)AMBIBURN 코드

흑연감속재와 원자로용기 재질의 중성자조사에 대한 수명효과를 평가할 수 있도록 속중성자 영역을 1.0ev ~ 50kev와 50kev 이상의 2군으로 분리하는 3군 중성자군 구조를 선택하였으며 상향 산란 및 다 군간 산란을 무시하고 천이노심주기의 중성자평형방정식 및 핵종변환방정식을 3군 K영역 근사모델로 표현하면,

$$\begin{aligned}
 0 &= (-D_1^k \nabla^2 + \Sigma_{a1}^{\text{res},k} + \sum_{j=1}^L \sigma_{a1}^j N_j^k + \Sigma_{s,12}^k - \frac{1}{k_{\text{eff}}} x_1 \sum_{j=1}^L v \sigma_{n1}^j N_j^k) \Phi_1^k - \frac{1}{k_{\text{eff}}} x_1 \sum_i^{2,3} \sum_{j=1}^L v \sigma_{n1}^j N_j^k \Phi_i^k \\
 0 &= (-D_2^k \nabla^2 + \Sigma_{a2}^{\text{res},k} + \sum_{j=1}^L \sigma_{a2}^j N_j^k + \Sigma_{s,23}^k - \frac{1}{k_{\text{eff}}} x_2 \sum_{j=1}^L v \sigma_{n2}^j N_j^k) \Phi_2^k - \frac{1}{k_{\text{eff}}} x_2 \sum_i^{1,3} \sum_{j=1}^L v \sigma_{n2}^j N_j^k \Phi_i^k - \Sigma_{s,12}^k \Phi_1^k \\
 0 &= (-D_3^k \nabla^2 + \Sigma_{a3}^{\text{res},k} + \sum_{j=1}^L \sigma_{a3}^j N_j^k) \Phi_3^k - \Sigma_{s,23}^k \Phi_2^k, \quad k=1,2,\dots, K \dots\dots\dots(1)
 \end{aligned}$$

$$\frac{dN_l}{dt} = \sum_{j=1}^L \eta_{jl} \lambda_j N_j - \left( \sum_{k=1}^K (\sigma_{a1}^l \Phi_1 + \sigma_{a2}^l \Phi_2)_{n,k} v_{n,k} A_k + \lambda_l + R_l \right) N_l + F_l, \quad l=1,2,\dots, L \dots\dots\dots(2)$$

$\Sigma_{a1}^{\text{res}}$  : 중원소를 제외한 원소들의 흡수 거시단면적의 합,  
 $\Sigma_{s,12}$  : 1군에서 2군으로의 하향 거시단면적,  
 $\sigma_{a1}^j$  및  $\sigma_{n1}^j$  : 각각 중원소의 흡수 및 핵분열 미시단면적,  
 $A_k$  : k 노심영역의 체적분율,  
 $v_B$   $v_S$  : blanket 및 seed 격자에서 용융염 체적 분율, ( $v_B + v_S = 1$ )이며,  
 $( )_{n,k}$ 의 n은 격자의 종류를 구별하는 subscript로서 노심영역의 구성격자가 blanket 격자인 경우는 n=B, seed 격자인 경우는 n=S로 표기한다. K는 노심 영역수, L은 중원소, Th, Pa, U, Np, Pu의 동위원소 핵종수이다. 또한  $N_j$ 는 용융염핵연료의 핵종수밀도이며,  $N_j^k$ 는 k 노심영역에서 균질화된 핵종수밀도로서 blanket 및 seed 격자 노심영역에 대해 각각  $v_B N_j$  및  $v_S N_j$ 와 같다. 핵종변환방정식에서  $\lambda_j$ 은 j핵종의 붕괴상수[1/초],  $\eta_{jl}$ 은 j핵종이 l핵종으로의 붕괴분율, 또  $R_l$ 은 온라인 재처리를 위해 원자로계통으로부터 추출되는 l핵종의 추출 분율을 나타낸다. 그러므로 계통내로 공급되는 l핵종의 총 공급율,  $F_l$ 은 변환된 모핵종, m의 재처리손실 및 계통의 추출분율,  $\delta_m$ 와 노외잔류시간,  $t_d$ 를 고려한 재순환 공급율,  $(1-\delta_m)R_m N_m(t-t_d)\exp(-\lambda_m t_d)$ 와 외부공급원으로부터 보충되는 외부 공급율,  $F_l^{\text{ext}}$ 를 합한 량과 같다. 잠재핵분열성물질 핵종, g에 대한 핵종변환방정식은

$$\frac{dN_g}{dt} = - \left\{ \sum_{k=1}^K (\sigma_{a1}^g \Phi_1 + \sigma_{a2}^g \Phi_2)_{n,k} V_{n,k} A_k \right\} N_g + F_g^{ext} \quad \dots\dots\dots(2'a)$$

핵변환 모핵종,  $m$ 에 대한 핵종변환방정식은

$$\frac{dN_m}{dt} = \eta_{gm} \left\{ \sum_{k=1}^K (\sigma_{c1}^g \Phi_1 + \sigma_{c2}^g \Phi_2)_{n,k} V_{n,k} A_k \right\} N_g - \left\{ \sum_{k=1}^K (\sigma_{a1}^m \Phi_1 + \sigma_{a2}^m \Phi_2)_{n,k} V_{n,k} A_k + \lambda_m + R_m \right\} N_m \quad \dots\dots\dots(2'b)$$

핵분열성물질인 핵변환 자핵종,  $d$ 에 대한 핵종변환방정식은

$$\frac{dN_d}{dt} = \eta_{md} \lambda_m N_m(t) + (1 - \delta_m) R_m N_m(t - t_d) - \left\{ \sum_{k=1}^K (\sigma_{a1}^d \Phi_1 + \sigma_{a2}^d \Phi_2)_{n,k} V_{n,k} A_k \right\} N_d + F_d^{ext} \quad \dots\dots\dots(2'c)$$

로 표현되며, 온라인으로 계통 내로 재주입하지 않은  $d$ 핵종의 잔여량,  $N_{d,res}$ 은,

$$\frac{dN_{d,res}}{dt} = R_m N_m - (1 - \delta_m) R_m N_m(t - t_d) \quad \dots\dots\dots(2'd)$$

로 표현된다.

다시 두 방정식군 식(1) 및 (2'a), (2'b), (2'c)를 행렬{ } 및 벡터[ ]로 간략히 하면,

$$0 = \{A\}[\mathbf{N}] - \{\Phi\} \quad \dots\dots\dots(3a)$$

$$\frac{d}{dt}[\mathbf{N}] = \{B\}[\mathbf{N}] + \{F^{ext}\} \quad \dots\dots\dots(3b)$$

그리고 잔여량 벡터,  $[\mathbf{N}_{res}]$ 은

$$\frac{d}{dt}[\mathbf{N}_{res}] = \{C\}[\mathbf{N}] \quad \dots\dots\dots(3c)$$

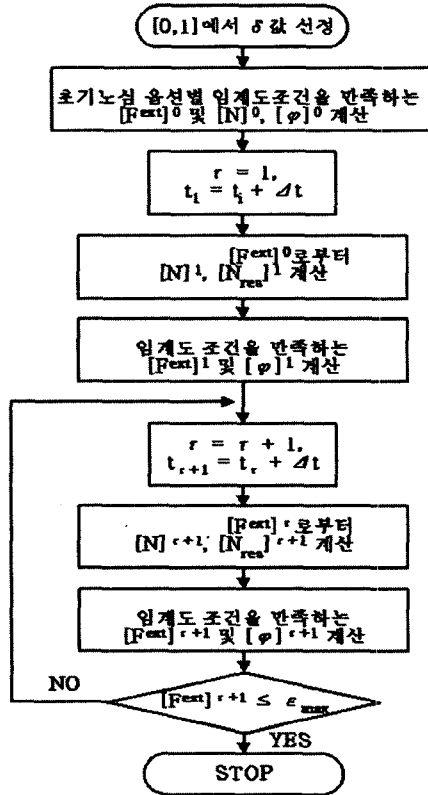
와 같다.

특히 AMBIBURN 코드는 중원소 붕괴고리만을 표현한 핵종변환코드이며 ORIGEN2 코드와 달리 3군 에너지구조를 사용하여 AMBIDEXTER 원자로에서 에너지에 의한 효과를 보다 정확하게 계산할 수 있다.

### (3) 천이노심 최적화

상태방정식인 식(3)을 임계가 유지되는 천이노심기간에서 소 구간으로 세분하고, 각 소 구간에서  $[\mathbf{N}]$  및  $\{\Phi\}$ 의 변화율이 크지 않다고 가정하면 선형방정식으로 간략화 된다. 천이운전기간은 천이운전이 종결되는 시간까지이며 이상적으로 외부공급량 벡터  $\{F^{ext}\}^T = [0]$ 이 되는 시점이다. 시뮬레이션 과정은 임계도 요건을 만족하는 초기노심으로부터의  $[\mathbf{N}]$ 와  $\{\Phi\}$ 를 천이노심의 시작점으로 하고 소 구간에서 AMBIBURN 코드에 의해 핵종수밀도를 계산하고, 이 값으로부터 SQUID코드로 중성자 확산방정식을 만족하는 임계도 조건에 맞는 평가한 후 이와 같은 과정을 반복하여 외부공급율에 의한 소 구간, 구간마다의 핵종수밀도(노내·노외누적량)를 계산한다. 그림1. 은 이 반복계산 과정을 그림으로 나타낸 논리흐름도이며 SEU기반, Pu기반에서의 각 시나리오별로 재순환되는  $^{233}\text{U}$  및 Pu의 양을 바로 주입하는 최소재순환 경우와 평형노심 요구 장전량에 이를 때까지 시설 내 저장하는 최대재순환 경우의 두 상황도 포함하고 있다.

그림 1. 천연노심관리 시뮬레이션 논리흐름도



### 3. 결과

그림 2는 SEU-기반, Pu-기반 별로 초기노심에서 200일까지 천연노심에서 유효중성자증배계수의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 Pu기반에서는 SEU기반 보다 유효중성자증배계수가 조금씩 증가하는 것을 볼 수 있는데 이 것은 Pu의 재주입양을 줄일 필요가 있음을 보여주고 있다. 그림. 3은 각 옵션에 대하여 최대 및 최소 재순환 경우 별로 초기노심에서부터 전 출력운전 200일 동안에 걸쳐 단위 용융염부피당 핵분열성물질( $^{233}\text{U}$  및  $^{239}\text{Pu}$ )의 수밀도 시간변화를 나타낸 것이다. 그림을 보면 초기노심부터 40일이 경과하면서 각 핵종의 수밀도의 변화율은 일정한 기울기를 유지하고 있다. 표1은 각 옵션별로 생성되는  $^{233}\text{U}$ 의 핵종수밀도의 차이가 2-3%정도임을 나타내고 있으며 Pu-기반 및 SEU-기반 경우 모두  $2.81 \sim 2.91 \times 10^{13}$  #/cc/d에 불과하여 평형노심 농도  $1.04 \times 10^{20}$  #/cc에 도달하기 위해 매우 긴 기간이 필요하다. 따라서 현실성이 없다고 생각 된다.

그림 2. 천이노심 옵션별 임계도 시간변화

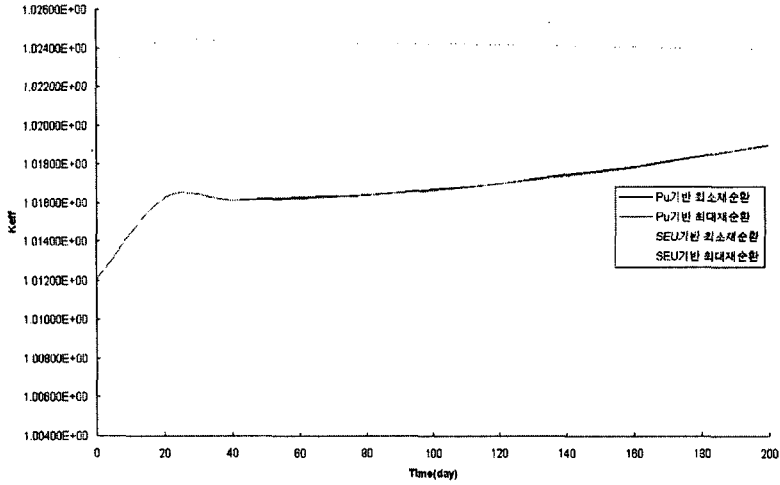


그림 3. 천이노심 옵션별 노내  $^{233}\text{U}$  및  $^{239}\text{Pu}$  농도 시간변화량

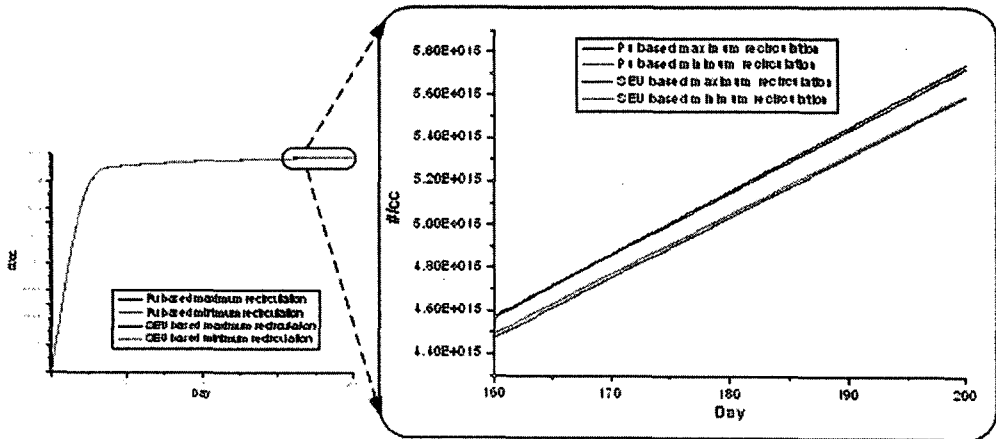


표. 1.1 천연노심 옵션별(Pu기반) Fissile 핵종수밀도의 시간변화를

Pu기반						
Time(d)	U233		U235		Pu239	
	최소재순환	최대재순환	최소재순환	최대재순환	최소재순환	최대재순환
0	0.00000E+00	0.00000E+00	5.77742E+18	5.77742E+18	6.41969E+19	6.41969E+19
20	4.96797E+14	4.95640E+14	5.75210E+18	5.75210E+18	6.55297E+19	6.55297E+19
40	1.07445E+15	1.06913E+15	5.72651E+18	5.72651E+18	6.68456E+19	6.68456E+19
60	1.65396E+15	1.64205E+15	5.70099E+18	5.70088E+18	6.81524E+19	6.81463E+19
80	2.23471E+15	2.21254E+15	5.67553E+18	5.67542E+18	6.94496E+19	6.94436E+19
100	2.81651E+15	2.78091E+15	5.65014E+18	5.65003E+18	7.07373E+19	7.07314E+19
120	3.39934E+15	3.34721E+15	5.62481E+18	5.62470E+18	7.20154E+19	7.20096E+19
140	3.98314E+15	3.91141E+15	5.59954E+18	5.59943E+18	7.32839E+19	7.32781E+19
160	4.56795E+15	4.47345E+15	5.57433E+18	5.57422E+18	7.45426E+19	7.45369E+19
180	5.15372E+15	5.03332E+15	5.54918E+18	5.54907E+18	7.57915E+19	7.57859E+19
200	5.74044E+15	5.59101E+15	5.52408E+18	5.52397E+18	7.70305E+19	7.70250E+19

표. 1.2 천연노심 옵션별(SEU기반) Fissile 핵종수밀도의 시간변화를

SEU기반						
Time(d)	U233		U235		Pu239	
	최소재순환	최대재순환	최소재순환	최대재순환	최소재순환	최대재순환
0	0.00000E+00	0.00000E+00	1.56329E+20	1.56329E+20	0.00000E+00	0.00000E+00
20	5.26478E+14	5.25358E+14	1.56525E+20	1.56525E+20	2.21008E+14	2.21008E+14
40	1.10824E+15	1.10334E+15	1.56746E+20	1.56746E+20	4.51446E+14	4.51446E+14
60	1.68634E+15	1.67501E+15	1.56966E+20	1.56966E+20	6.79923E+14	6.79923E+14
80	2.26410E+15	2.24881E+15	1.57185E+20	1.57180E+20	9.07187E+14	9.09203E+14
100	2.84150E+15	2.81448E+15	1.57403E+20	1.57398E+20	1.13324E+15	1.13524E+15
120	3.41856E+15	3.37720E+15	1.57620E+20	1.57615E+20	1.35811E+15	1.36009E+15
140	3.99527E+15	3.93696E+15	1.57836E+20	1.57831E+20	1.58180E+15	1.58376E+15
160	4.57164E+15	4.49378E+15	1.58051E+20	1.58046E+20	1.80434E+15	1.80627E+15
180	5.14766E+15	5.04769E+15	1.58265E+20	1.58260E+20	2.02572E+15	2.02763E+15
200	5.72332E+15	5.59870E+15	1.58478E+20	1.58473E+20	2.24596E+15	2.24785E+15

그림 4. 각 옵션별 축방향 중성자속 분포

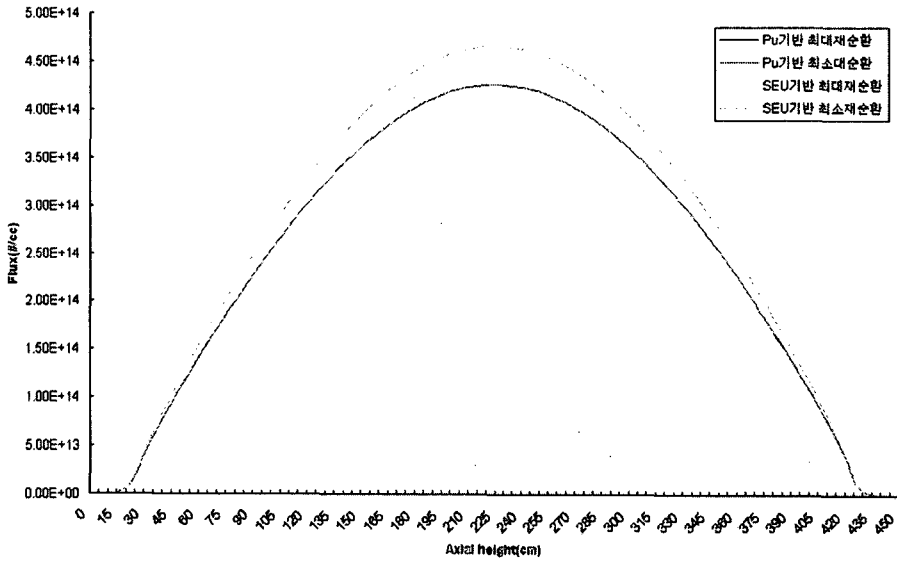


그림 5. 각 옵션별 반경방향 중성자속 분포

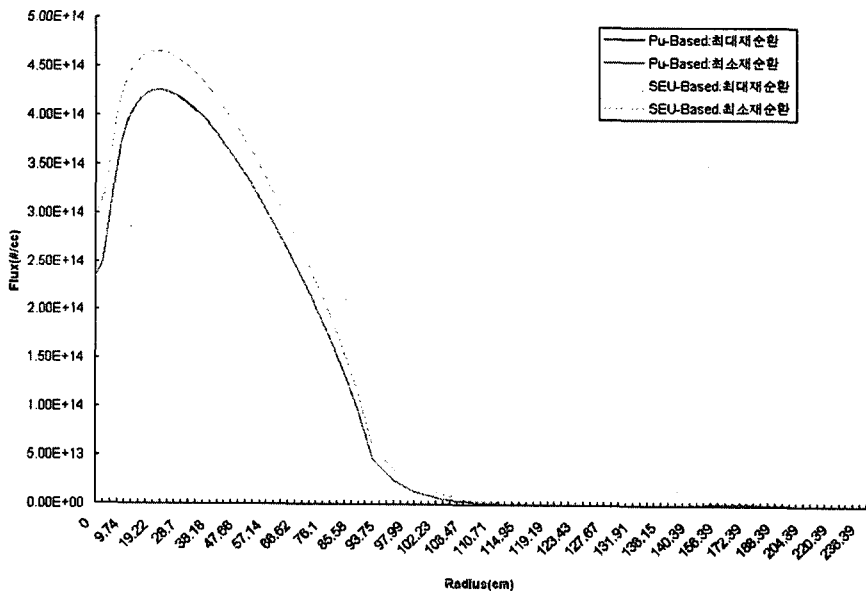


그림 4, 5는 열중성자 영역에서 100일 후에 반경방향, 축방향 중성자속분포를 나타낸 것이다. 표 2는 옵션별 출력을 나타내고 있고 출력 값을 보면 열중성자영역에서 SEU-기반이 10%정도 큰 값을 나타내고 있는데 이것은 주로 출력을 내는 씨드격자의 파괴비가 60%정도로 블랭킷 보다 크며 반응단면적과 핵종수밀도는 각 옵션에서 비슷한 값을 갖기 때문에 중성자속분포가 그림 4, 5처럼 SEU-기반이 10%정도 크게 나타난 것이다. 하지만 표 2에서 열중성자영역을 제외한 다른 영역에서는 Pu-기반에서 출력이 더 높게 나타나고 있는데 이것은 AMBIDEXTER 원자로출력이 250MW<sub>th</sub>이기 때문에 다른 영역에서 나머지 출력을 대신하고 있다고 할 수 있고 Pu-기반은 SEU-기반 보다 Fast Region으로 경화되었다고 볼 수 있다.

표 2. 각 옵션별, 영역별 출력

		SEU-기반	Pu-기반
1군 (Fast Region)	블랭킷영역	7.4419E+04	8.0765E+04
	씨드영역	1.6640E+06	1.4409E+06
	블랭킷영역	1.7377E+06	2.8769E+06
2군 (Resonance Region)	블랭킷영역	3.6602E+05	5.3750E+05
	씨드영역	9.5761E+06	1.5029E+07
	블랭킷영역	1.2108E+07	2.6488E+07
3군 (Thermal Region)	블랭킷영역	3.1711E+06	3.6713E+06
	씨드영역	1.9562E+08	1.6494E+08
	블랭킷영역	2.3463E+07	3.2772E+07

#### 4. 결론 및 향후연구

요컨대 250MW<sub>th</sub> AMBIDEXTER-NEC가 평형노심을 이루기 위해 필요로 하는 <sup>233</sup>U을 생산하는데 설정한 SEU-기반 및 Pu-기반 핵주기 옵션은 소요되는 천연노심주기기간이 전형적인 원자로 수명 3~40년 보다 매우 큰 것으로 나타났다. 따라서 U<sup>233</sup> 장전량 확보를 위한 최적옵션은 초기노심부터 ADS와 같은 외부생산시설로부터 전량을 공급받아 운전하는 것이라는 결론을 얻었다. 또한 앞으로 각 옵션별로 임계도 변화허용범위를 ±0.5mk이하를 만족하도록 핵분열성 물질 주입율을 조절하면서 시뮬레이션을 수행하고 특히 Pu기반의 경우 농축우라늄과 함께 사용하여 사용 후 핵연료를 사용하여도 임계도를 유지 시키고 시뮬레이션을 수행할 수 있는 방법 등 다양한 천연노심관리 방안을 모색하고자 한다.



## 5. 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] 이영준 외, “Th-U-Pu 혼합 용융염핵연료 AMBIDEXTER 노심의 핵적 자활성 설계 방법론 개선”, 공학석사 학위 논문, 아주대학교, 2003
  
- [4] D.Lecarpentier and V. Carpentier, A Neutronic Program for Critical and Nonequilibrium Study of Mobile Fuel Reactors: The Cinsf1D Code, Nuc. Sci. & Eng. Vol.143, pp.33-46(2003)
  
- [5] Samuel Glasstone, Alexander Sesonske, “Nuclear Reactor Engineering”, Chapman & Hall, 1994