

농축질화연료장전 납-합금냉각 노심 예비설계
A Feasibility Study of 900MWt, Lead-Alloy Cooled Core Design with
The Enriched Nitride Fuel

홍서기, 김상지, 김영일, 한도희

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

99%N-15 농축질화연료를 사용하는 900MWt 급 납-합금 냉각 노심의 타당성 연구를 수행하였다. 이 노심에서는 블랭킷의 배제와 단일농축도를 가진 연료 사용이 추구되었고, 출력분포를 보론카바이드 봉과 Vacancy 봉을 적절히 조합, 사용하여 평탄하게 설계하였다. 노심의 증식특성은 증식비가 1.0을 약간 초과하는 정도로 핵분열성 물질의 외부공급이 필요없는 Fuel-Self-Sufficient 특성을 가진다. 또한 노심높이는 이전의 설계에 비해서 증가시켜 120cm로 설정하였다. 실제로 내부노심영역에는 보론흡수봉과 Vacancy 봉을 둘 다 사용하였고 중앙노심영역에서는 Vacancy 봉만을 사용하였다. 농축질소의 사용 및 노심높이의 증가로 증식비가 증가하여 핵연료봉 외경을 감소시킴으로써 냉각재의 체적비를 증가시킬 수 있고, 주기길이도 450일로 늘릴 수 있었다. 또한 선출력밀도의 감소 및 냉각재부피비의 증가로 피복재외벽의 온도를 감소시킬 수 있었다.

Abstract

In this work, a feasibility study of 900MWt, lead-alloy cooled core design with the enriched nitride fuel is performed. The core is designed so that its conversion ratio without blanket assemblies is slightly larger than unity to minimize the amount of the excess fissile materials and thus, there is no need to feed externally the fissile materials. Furthermore, the core is designed to consist of the single enriched fuel rods. In order to flatten the power distribution under the single enrichment of fuel, combinatorial use of B_4C tie rods and vacancy tie rods are considered here. In comparison with the previous design with the natural nitrogen fuel, the core height is increased to 120cm while the fuel rod diameter is decreased to increase the coolant volume fraction. The use of enriched nitrogen fuel and the increased core height make it possible for the conversion ratio to be increased in spite of the increase of the coolant volume fraction. Due to the increase of the conversion ratio, the cycle length is extended to 465 effective full power days.

1. 서론

본 연구의 목적은 블랭킷의 사용없이 노심평균전환비가 1.0을 약간만 초과하도록 하여 핵분열성 물질의 공급이 불필요한 납합금 냉각재를 사용하는 고속로를 설계하는 것이다. 실제로 이러한 핵분열성 물질의 공급이 불필요한 원자로는 Breakeven

또는 Fuel Self Sufficient 노심으로 불리운다 [1,2,3]. 이러한 노심에서는 잉여 핵분열성 물질의 생산을 최소로 할 뿐만 아니라 연료의 조성이 크게 변화하지 않는다. 또한 블랑켓 집합체의 사용을 배제함으로써 핵무기급의 고순도 플루토늄의 생산이 불가능하다. 본 연구에서는 납합금냉각로에 대해 열출력을 900MWt 로 설정하였고 가능한 냉각재의 체적을 증가시키기 위해 덕트가 없는 집합체 (open lattice)를 선택하였다. 또한 연료의 제조성을 편리하게 하기위해 농축도분리가 아닌 단일 농축도의 연료봉을 사용하고 출력평탄화를 위해서는 B_4C 봉과 vacancy 봉을 혼합하여 사용하였다 [4]. 실제로 내부노심영역의 경우에만 B_4C 봉과 vacancy 봉을 동시에 사용하였고 중앙노심에는 vacancy 봉만을 사용하였다. 왜냐하면 B_4C 봉만을 사용한 경우와 vacancy 봉만을 사용하여 출력분포를 평탄화한 노심에 관한 비교연구에 의하면 전자의 경우 냉각재 기화계수 및 온도반응도계수에 있어서 후자에 비하여 좋지 않은 특성을 가지는 것으로 나타났고 반면에 후자의 경우에는 반응도계수 측면에서 전자에 비해서는 우수하나 연료봉 수의 감소로 인하여 선출력밀도가 증가하는 단점이 있는 것으로 나타났기 때문이다. 그러나 결과적으로 노심높이의 증가로 인하여 냉각재기화 및 준위감소에 따른 반응도가가 악화되는 것으로 드러났다. 또한 이전의 연구와 마찬가지로 반사체로 납합금냉각재를 사용하고 주기동안 연소반응도가를 1\$ 이내로 제한함으로써 USS를 제외한 모든 제어봉이 유효노심밖의 영역에 배치가능하도록 설계하였다. 농축질소의 사용 및 노심높이의 증가로 인해 핵연료반경의 감소에도 불구하고 증식비가 증가하여 주기길이를 450일로 늘릴 수 있었고 또한 냉각재의 체적비를 증가시킬 수 있었다. 따라서 피복재외벽의 온도를 감소시킬 수 있었다. 연료는 이전과 같이 질화연료를 사용하였으나 천연질소 대신에 N-15가 99%농축된 질소를 사용하였다. 왜냐하면 천연질소의 경우 $^{14}N(n,p)^{14}C$ 반응에서 중성자흡수로 인해 중성자의 손실과 환경적으로 유해한 ^{14}C 이 생성되기 때문이다 [3].

2. 설계제원, 노심모형 및 계산방법

천연질소연료 장전노심[5,6]에서와 같이 단일농축도를 추구하였고 출력평탄화를 위해서 내부노심에서는 보론흡수봉과 vacancy 봉을 같이 사용하였고 중앙노심에서는 흡수봉은 사용하지 않고 vacancy 봉을 사용하였다. 천연질소연료 장전노심에서 보았듯이 vacancy 봉만을 사용하는 경우에는 반응도계수 측면에서는 좋으나 내부노심에 선출력밀도가 증가하여 피복재온도가 높은 단점이 있고 보론흡수봉을 사용하는 경우에는 반응도계수측면에서 다소 좋지 않은 것으로 나타났기 때문에 이 두가지 개념을 혼합하고자 하였다. 단 농축질소연료를 사용한 경우에는 금속연료를 사용한 경우와의 비교를 위해서 노심높이를 120cm로 증가시켰다. 집합체는 천연질소연료장전노심의 경우와 같이 217개의 봉이 있고 내부노심의 경우 이중에서 37개가 지지봉인데 이 지지봉중에 6개는 보론흡수봉이고 나머지 31개는 vacancy 봉이다. 그리고 보론흡수봉의 보론은 43%B-10으로 농축된 것을 사용하였다. 중앙노심의 집합체의 경우에는 흡수봉은 없고 31개의 vacancy 봉이 있다. 그리고 외부노심의 경우에는 13개의 지지봉이 있다. 핵연료봉의 외경은 0.85cm 로 천연질소연료장전노심의 경우보다 감소시켰으나 피복재두께는 약간 감소한 0.057cm 로 설정하였다. 지지봉의 경우는 이전의 경우와 마찬가지로 연료봉의 외경에 비해 더 두껍도록 외경을 증가시켜 0.92cm 로 하였다. 또한 농축질소의 사용, 노심높이의 증가, smear density의 증가로 인해 노심의 증식비가 증가하여 냉각재의 체적비를 상당히 증가시킬 수 있었다. $P/D=1.46$ 으로 각 노심영역에서 냉각재의 체적비는 각각 0.566, 0.568, 0.574이다. 표 1은 이 노심에 대한 설계인자들을 보여준다. 가스플래넴의 높이는 유효노심의 높이와 동일하다. 노심의 핵연료집합체 갯수는 앞의 경우와 같이 198개로 평균출력밀도는 상온상태에서 130W/cc 정도이다. 노심영역은 내부, 중앙,

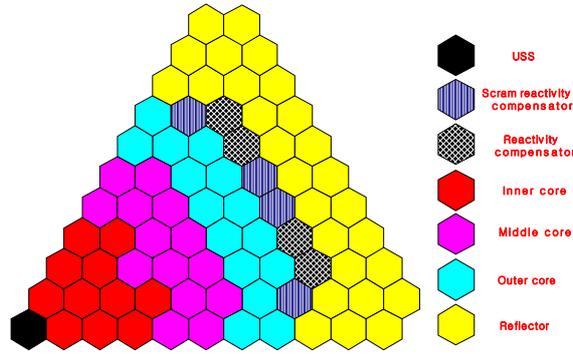
외부 3개의 영역으로 나뉘고 내부, 중앙, 외부노심에 집합체의 수가 각각 48, 72, 78 개이다. 제어봉의 경우에 천연질화연료장전노심의 경우와 같이 노심정지용 제어집합체 (USS) 1개를 노심중앙에 위치시키고, USS의 보조용인 Scram Compensator (SC) 24개와 연소에 의한 반응도와 cold-to-hot 반응도를 보상하기 위한 24개의 Reactivity Compensator (RC) 집합체는 모두 유효노심밖의 반사체영역에 배치하였다.

표 1. 주요 노심설계인자

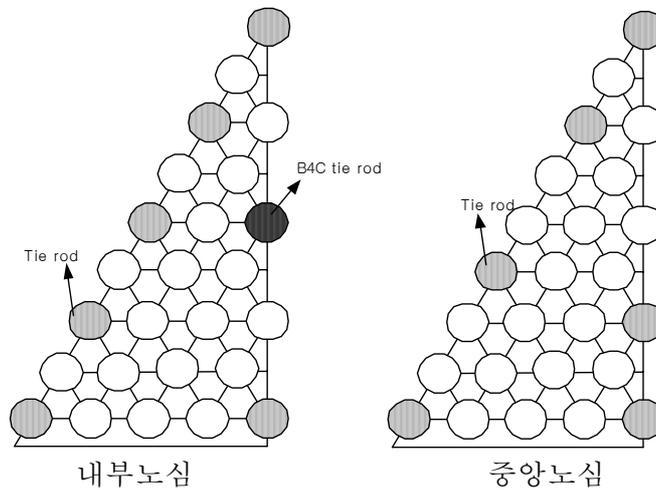
설계인자	설계치
열출력 (MWt)	900
유효노심높이 (cm, cold)	120
가스플래넘길이 (cm, cold)	120
연료봉 외경 (cm)	0.85
연료봉 피복재두께 (cm)	0.057
Tie 봉 외경 (cm)	0.92
Tie 봉 피복재 두께 (cm)	0.057
격자 P/D 비	1.46
집합체당 총 봉수	217
집합체간 간격 (cm)	0.32
집합체 피치(cm, cold)	18.365
연료/냉각재/구조재 부피비	
내부노심 (IC)	0.227/0.566/0.105
중앙노심 (MC)	0.235/0.568/0.105
외부노심 (OC)	0.258/0.574/0.104
집합체수 (IC/MC/OC)	48/72/78
집합체당 tie 봉수 (흡수봉포함) (IC/MC/OC)	37/31/13
집합체당 연료봉수 (IC/MC/OC)	180/186/204
집합체당 흡수봉수 (IC/MC/OC)	6/0/0
노심평균 출력밀도 (W/cc, hot/cold)	120.5/130
노심평균 선출력밀도 (W/cm, hot/cold)	185.9/197.6
주기길이 (EFPDs)	450
TRU 무게비 (BOEC, wt%)	16.5
배치수 (IC/MC/OC)	5/5/5
B-10 농축도 (wt%, IC/MC/OC)	43/-/-
노심구조재	HT-9
제어봉집합체수 (USS/SC/RC)	1/24/24
제어봉의 체적비(%, B4C/냉각재/구조재)	
USS	85/5/10
SC	50/10/20
RC	0/0/20

RC의 경우에는 보론과 같은 흡수물질을 전혀 사용하지 않고 단지 냉각재와 동일한 납합금냉각재의 높이로 반응도를 조절하도록 설계하였다. USS와 SC 제어봉에는 모두 92%의 B-10을 사용하였고 USS의 경우 흡수체, 냉각재, 구조재의 체적비가 각각 85%, 5%, 10%이고 SC의 경우에는 50%, 10%, 20%를 사용하였다. RC의 경우에는 20%의 구조재를 가정하였다. 모든 구조재는 HT-9을 사용하였다. 주기길이는 두 노심 모두 450EFPD 이고 노심영역별 핵연료관리 배치수는 내부, 중앙, 외부노심에 모두에 대해 5배치를 사용하였다. 그림 1은 노심장전모형 및 집합체구조

를 보여준다. 핵주기모델에서 연소된 연료는 재처리하여 99.9%의 TRU를 회수하고 핵분열생성물의 경우 회수율은 5%가 회수되며 나머지 핵분열생성물은 폐기되는 것으로 가정하였다. 그리고 연소된 U-238은 감손우라늄을 외부에서 공급함으로써 보충된다.



(a) 노심장전모형



(b) 집합체구조

그림 1 노심장전모형 및 집합체구조

노심계산을 위한 기본 핵자료는 원자력연구소 핵자료 평가랩에서 ENDF/B-VI에 기초하여 생산한 150군 라이브러리를 사용하였다 [7]. 이 라이브러리는 MATXS 형태로 통상적인 수송/확산이론 코드들이 사용할 수 있는 형태가 아니다. 이 핵자료는 TRANSX 코드 [8]를 이용하여 수송/확산이론 코드들이 사용가능한 형태인 ISOTXS 형태로 변환된다. 이때 자기차폐효과 (self-shielding effect)가 고려된다. 핵단면적 균축약을 위해 TWODANT R-Z [9]모델을 이용하여 150군 노심 스펙트럼이 계산되고 이를 이용하여 다시 9군 균축약된 핵단면적이 TRANSX 코드를 이용하여 생산된다. 이 핵단면적 및 REBUS-3/DIF3D-HEX-Z [10]을 이용하여 노심 연소계산이 수행된다. 노심의 반응도분석은 80군 핵단면적을 이용하여 DIF3D/HEX-Z 모델을 이용하여 수행하였다.

3. 노심해석결과

농축질소의 사용 및 노심높이의 증가로 인하여 증식비가 증가하여 핵연료외경을 감소시킴으로써 냉각재의 체적비를 증가시킬 수 있었다. 따라서 피복재외벽의 온도가 감소하였다. 증식비의 주기평균치를 1.0 정도로 하기 위해서 냉각재의 부피를 증가시키는 동시에 주기길이를 450일로 늘릴 수 있었다. 표 2는 노심핵특성분석 결과를 보여준다. 증식비의 경우 노심전체평균치가 주기초에는 1.017 이고 주기평균치는 1.0으로 나타났다. 또한 주기길이 450일 동안 연소반응도가는 192pcm 으로 나타났다. 출력밀도는 천연질화연료장전노심에 비해 다소 감소하였음에도 불구하고 방출연소도가 증가한 것은 주기길이가 360일에서 450일로 증가했기 때문이다. 노심평균방출연소도는 90MWD/kg 정도로 나타났고 내부, 중앙노심의 경우는 102, 104MWD/kg, 외부노심은 72MWD/kg 으로 나타났다. 첨두방출연소도는 134MWD/kg으로 나타났다. 표 2에서 보듯이 주기길이 450일 만족하는 데 있어서 증식비는 큰 문제가 없었으나 고속중성자플루언스의 경우에는 거의 제한치 근처에 있어서 어려움이 있었다. 그러나 미래의 피복재의 재질향상을 고려한다면 $4.0E+23$ n/cm² 은 그리 문제될 것으로는 보이지 않는다. Heavy metal (HM) 내 TRU 무게비의 경우는 천연질화연료장전노심에 비해서 다소 증가하여 주기초에는 16.5wt%, 주기말에는 16.8wt%로 나타났다. 플루토늄무게비 및 핵분열성 핵종량의 비도 천연질화연료장전노심에 비해서 약간 큰 정도였다. 예상한 바와 같이 선출력밀도의 경우에 노심높이의 증가로 인해 상당히 감소한 것을 알 수 있다. 특히 내부노심의 경우에는 설계안-2의 경우에 비해서 80W/cm 정도가 감소하였다. 반면에 노심높이의 증가에도 불구하고 노심평균선출력밀도가 아주 큰 차이를 보이지 않는 것은 천연질화연료장전노심의 경우는 외부노심의 집합체수가 월등히 많았던 반면에 현재 설계노심의 경우에는 중앙노심보다 6개만 증가하여 전체노심에 대한 연료봉의 수가 감소했기 때문이다. 표 2에서 보듯이 노심영역별 출력분율을 보면 외부노심보다는 중앙노심이 큼을 알 수 있다. 중앙노심의 집합체수가 천연질화연료장전노심 보다 증가한 것은 출력분포를 평탄화 하는 데 도움을 주어 3D 첨두출력인자가 주기초, 주기말에 1.44 정도로 나타났다. 노심영역별 첨두출력이 발생하는 집합체위치는 주기 동안 변하지 않는다. 현 설계안에서 중앙노심의 집합체수를 감소시켜 외부노심의 출력분율을 증가시킨다면 첨두출력인자가 다소 증가할 것이다. 그러나 노심평균선출력밀도 및 내부, 중앙노심에서 첨두출력밀도 또한 감소할 것이므로 피복재벽 첨두온도를 감소시키는 효과를 얻을 수는 있다. 또 하나의 방법은 중앙노심집합체의 vacancy 봉의 수를 증가시키고 중앙노심의 집합체수를 감소시키는 것이다.

표 3은 반응도계수, 유효노심(가스플래넘 제외)에서 냉각재 기화계수, 제어봉반응도가를 보여준다. 표 3에서 보듯이 도플러계수의 경우에 천연질소를 사용한 노심에 비하여 감소했음을 보여준다. 이는 N-15의 사용으로 인한 스펙트럼 경화에 의한 것으로 보인다. 노심지지물의 반경방향팽창에 의한 반응도는 천연질화연료장전노심들의 사이값으로 큰 차이는 없다. 축방향 팽창계수의 경우는 노심높이의 증가로 인해서 증가한 것으로 보인다. 유효노심의 냉각재 기화계수는 가스플래넘을 제외한 유효노심영역에서 냉각재가 100% 기화했다고 가정하고 계산한 값이다. 냉각재기화계수는 천연질화연료장전노심에 비해서 상당히 증가한 것을 알 수 있는 데 이는 우선 노심높이가 증가했기 때문이고 또 하나의 원인은 중앙노심의 집합체수의 증가로 인해 외부영역에서의 출력분율이 감소했기 때문이다. 또한 중성자스펙트럼경화도 주요 원인 중의 하나로 판단된다. 그러나 실제로 납합금 냉각 원자로의 경우에 기화에 의해서 노심영역에 기포가 생기는 것은 냉각재의 기화온도가 연료의 용융온도에 비해서 월등히 높기 때문에 거의 불가능하다. 제어봉 반응도가의 경우에 천연질화연료장전노심에 비해 USS를 제외한 모든 반응도가가 증가한다. 제어봉 반응도가의 증가는 노심높이 증가에 의한 것으로 보이며 USS 반응도가가 감소한 것은 내부노심에 B₄C 봉의 길이도 증가했기 때문으로 판단된다. 그림 2(a)는 내부노심영역,

전체노심영역, 원자로전체영역에서 냉각재의 준위감소에 따른 반응도가를 보여준다. 그림2(a)에서 보듯이 내부노심에서 냉각재준위감소에 따른 반응도가는 계속감소하다가 플래넘 밑부분을 거쳐 유효노심영역으로 점차 떨어지게 되면서 반응도가가 증가하기 시작해서 유효노심의 바닥에서 최대 +0.46% 까지 증가했다가 다시 감소하기 시작한다. 그러나 천연질화연료장전노심에서와 다른 것은 전체노심영역에서 냉각재준위가 감소하는 경우 유효노심의 바닥에서 +0.46% 반응도까지 증가하는 것이 특이하다. 물론 다른 준위에서는 모두 음의 반응도가를 보여준다. 전체적으로 천연질화연료장전노심에 비해서 반응도가가 증가했음을 알 수 있는데 이는 중앙노심의 집합체수가 상대적으로 증가하고 외부노심의 집합체수가 감소했기 때문으로 판단된다. 또한 노심높이의 증가도 어느 정도 작용했으리라 생각된다. 또한 N-14에 비해서 N-15의 중성자 감속능이 떨어져서 중성자 스펙트럼이 경해진 것도 원인이 될 것이다.

표 2 노심핵특성 분석 결과

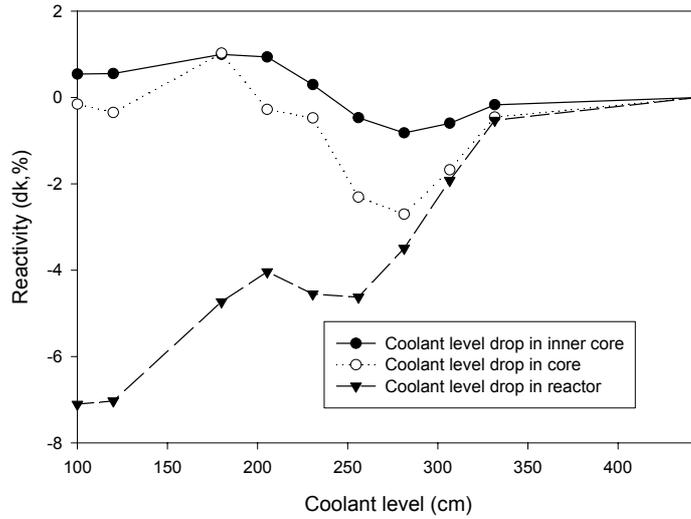
노심핵특성인자	노심핵특성
노심전환비	
전체/내부/중앙/외부노심(주기초)	1.0174/0.9980/1.0119/1.0376
전체/내부/중앙/외부노심(주기평균)	1.0004/0.9858/0.9930/1.0199
연소반응도가 (pcm)	+192
평균방출연소도 (MWD/kg)	
전체/내부/중앙/외부노심	90.2/102.1/103.8/72.3
첨두방출연소도 (MWD/kg)	
내부/중앙/외부노심	131.9/134.0/118.5
TRU 무게비(wt%)	
전체/내부/중앙/외부노심(주기초)	16.45/16.53/16.57/16.31
전체/내부/중앙/외부노심(주기말)	16.79/16.86/16.94/16.64
PU 무게비 (wt%)	
전체/내부/중앙/외부노심(주기초)	15.82/15.89/15.94/15.68
전체/내부/중앙/외부노심(주기말)	16.16/16.22/16.31/16.00
Fissile 핵종무게비 (wt%)	
전체/내부/중앙/외부노심(주기초)	10.36/10.42/10.44/10.26
전체/내부/중앙/외부노심(주기말)	10.58/10.63/10.68/10.46
Fissile PU 량 (kg)	
전체/내부/중앙/외부노심(주기초)	2170/493/767/911
전체/내부/중앙/외부노심(주기말)	2173/492/767/915
외부공급된 핵종량 (kg)	
U-235	0.828
U-238	418.6
평균선출력밀도 (W/cm)	
전체/내부/중앙/외부노심(주기초)	185.9/206.9/214.2/150.6
전체/내부/중앙/외부노심(주기말)	185.9/213.8/212.8/148.1
평균출력밀도 (W/cc)	
전체/내부/중앙/외부노심(주기초)	120.5/126.0/134.8/103.9
전체/내부/중앙/외부노심(주기말)	120.5/130.2/133.8/102.2
3차원 첨두인자 (BOEC/EOEC)	1.438/1.436
첨두고속중성자 플루언스 (n/cm ²)	3.99E+23

표 2 노심핵특성 분석 결과 (계속)

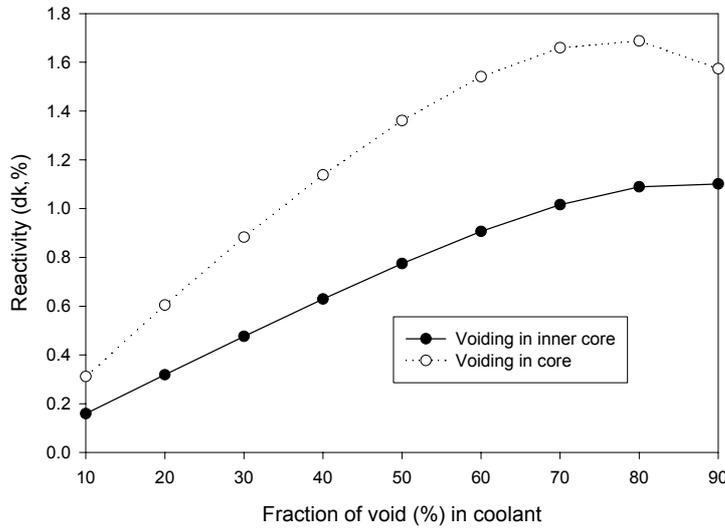
노심핵특성인자	설계안-1
최대선출력밀도 (W/cm)	
내부/중앙/외부노심 (주기초)	271.9/275.4/246.6
내부/중앙/외부노심 (주기말)	271.3/275.1/241.9
최대중성자속 (10E+15n/cm ² sec)	
내부/중앙/외부노심 (주기초)	3.266/3.306/2.928
내부/중앙/외부노심 (주기말)	3.294/3.330/2.886
출력분율	
내부/중앙/외부노심 (주기초)	0.251/0.404/0.337
내부/중앙/외부노심 (주기말)	0.260/0.401/0.332
최대출력밀도 집합체 평균선출력밀도	
내부/중앙/외부노심 (주기초)	263.3/271.0/219.0
내부/중앙/외부노심 (주기말)	265.5/268.6/214.3
최대출력밀도 집합체의 stage factor	
내부/중앙/외부노심 (주기초)	1.0139/1.0098/1.0052
내부/중앙/외부노심 (주기말)	1.0235/1.0181/1.0097

표 3 반응도계수, 냉각재기화반응도가, 제어봉집합체 반응도가

핵특성인자	주기초	주기말
도플러계수 (연료, dp/dT)	-4.47968E-06	-4.36304E-06
반경방향팽창계수 (dk/k)(R/dR)(pcm/%)	-358	-356
연료봉축방향팽창계수 (dk/k)(H/dH)(pcm/%)		
연료	-169.4	-167.4
연료+구조물	-124.5	-122.3
냉각재기화계수 (\$) (유효노심 100%기화)		
IC	+6.31	+6.42
MC	+6.43	+6.33
OC	-0.48	-0.48
TC	+12.67	+12.59
β_{eff}	0.00341	0.00339
제어봉집합체반응도가 (\$)		
USS	2.81	3.12
SC	9.51	9.08
RC	1.62	1.56
USS+SC	14.09	14.09



(a) 냉각재 준위감소에 따른 반응도가



(b) 냉각재 밀도변화에 따른 반응도가

그림 2 냉각재 준위변화 및 밀도변화에 따른 반응도가

그림 2(b)는 내부노심과 전체노심영역에서 냉각재의 밀도변화에 따른 반응도가 를 보여준다. 내부노심의 경우에 밀도변화가 60% 까지는 거의 선형적으로 반응도가 증가하다가 80% 정도 부터는 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. 전체노심의 경우 거의 90% 정도까지 반응도가 증가하는 것을 보여준다.

다음은 주기초, 주기말에서 그리고 장전 및 방출연료의 핵종량 및 핵연료 조성을 분석한 것이다. 전체적으로 천연질화연료장전노심들과 거의 비슷한 경향을 가짐을 알 수 있다. 전체노심에 대해서 전체 플루토늄량은 3.43kg (0.1%) 증가하는 반면에 우라늄의 경우에는 419.5kg (2.4%) 감소한다. 이 감소량은 주로 U-238 의 핵변환된량이다. 따라서 이 만큼 U-238이 외부에서 공급되어야한다. 플루토늄 핵종을 구체적으로 살펴보면 Pu-238 만이 0.32kg (0.8%) 감소하고 Pu-239, 240, 241, 242는

각각 0.06%, 0.04%, 1.6%, 0.06% 증가한다. Minor actinide (MA) 핵종의 경우 전체 노심에서 전체량은 1.15kg (0.87%) 감소한다. 그림 3, 4는 각각 주기초와 주기말에 연료내에 TRU 핵종의 상대무게비(%)를 나타낸다. 그림에서 보듯이 각 노심영역에서 TRU핵종의 무게비는 동일하다. 또한 Pu-239와 Pu-240이 60%, 30% 정도로 전체의 90% 정도를 차지하고 MA는 0.4% 미만이다.

표 3 주기초에서 중요핵종질량 (kg)

핵종	전체노심	내부노심	중앙노심	외부노심
U-234	6.536E+00	1.469E+00	2.264E+00	2.804E+00
U-235	6.425E+00	1.380E+00	2.163E+00	2.881E+00
U-236	5.932E+00	1.348E+00	2.092E+00	2.492E+00
U-238	1.754E+04	3.954E+03	6.137E+03	7.448E+03
Total U	1.756E+04	3.958E+03	6.144E+03	7.456E+03
PU238	3.912E+01	8.817E+00	1.371E+01	1.659E+01
PU239	2.045E+03	4.641E+02	7.219E+02	8.593E+02
PU240	1.022E+03	2.312E+02	3.604E+02	4.304E+02
PU241	1.249E+02	2.840E+01	4.464E+01	5.183E+01
PU242	9.346E+01	2.127E+01	3.301E+01	3.918E+01
Total Pu	3.325E+03	7.538E+02	1.174E+03	1.397E+03
Fissile Pu	2.170E+03	4.925E+02	7.665E+02	9.111E+02
NP237	1.031E+01	2.362E+00	3.656E+00	4.294E+00
AM241	6.417E+01	1.431E+01	2.194E+01	2.792E+01
AM242M	4.669E+00	1.054E+00	1.630E+00	1.985E+00
AM243	2.503E+01	5.690E+00	8.838E+00	1.051E+01
CM242	2.108E+00	5.122E-01	8.188E-01	7.772E-01
CM243	2.082E-01	4.738E-02	7.653E-02	8.427E-02
CM244	1.730E+01	3.959E+00	6.191E+00	7.152E+00
CM245	5.307E+00	1.209E+00	1.879E+00	2.220E+00
CM246	3.217E+00	7.332E-01	1.136E+00	1.347E+00
Total MA	1.323E+02	2.987E+01	4.617E+01	5.629E+01
Total TRU	3.457E+03	7.837E+02	1.220E+03	1.454E+03
Total Fissile	2.177E+03	4.939E+02	7.687E+02	9.140E+02
Total HM	2.102E+04	4.742E+03	7.364E+03	8.910E+03
Fissile wf	1.036E-01	1.042E-01	1.044E-01	1.026E-01
TRU wf	1.645E-01	1.653E-01	1.657E-01	1.631E-01
FPU	8.411E+01	2.172E+01	3.439E+01	2.800E+01
FPPU	5.985E+02	1.541E+02	2.432E+02	2.012E+02
FPMA	8.650E+00	2.217E+00	3.505E+00	2.927E+00
REU	2.389E+01	6.089E+00	9.618E+00	8.187E+00
REPU	1.433E+02	3.641E+01	5.734E+01	4.953E+01
REMA	2.218E+00	5.615E-01	8.856E-01	7.708E-01
DUMP	1.085E-01	2.635E-02	4.346E-02	3.865E-02
Total FP	8.608E+02	2.212E+02	3.490E+02	2.907E+02

표 4 중요핵종질량변화율 (% , EOEC-BOEC)

핵종	전체노심	내부노심	중앙노심	외부노심
U-234	-1.551E+00	-2.341E+00	-2.534E+00	-3.426E-01
U-235	-1.289E+01	-1.427E+01	-1.467E+01	-1.090E+01
U-236	-2.023E-04	-2.692E-01	-2.217E-01	3.311E-01
U-238	-2.386E+00	-2.645E+00	-2.740E+00	-1.958E+00
Total U	-2.389E+00	-2.648E+00	-2.744E+00	-1.960E+00
PU238	-8.286E-01	-1.445E+00	-1.250E+00	-1.529E-01
PU239	6.219E-02	-2.636E-01	-9.642E-02	3.715E-01
PU240	4.168E-02	-4.155E-01	-6.425E-02	3.763E-01
PU241	1.597E+00	1.330E+00	1.967E+00	1.423E+00
PU242	6.291E-02	-1.165E-01	4.653E-02	1.740E-01
Total Pu	1.031E-01	-2.598E-01	-1.750E-02	4.002E-01
Fissile Pu	1.505E-01	-1.717E-01	2.377E-02	4.313E-01
NP237	6.167E-02	1.405E-01	1.254E-01	-3.507E-02
AM241	-2.921E+00	-4.061E+00	-4.389E+00	-1.183E+00
AM242M	6.155E-02	-6.702E-01	-8.003E-01	1.157E+00
AM243	6.279E-02	-1.587E-01	1.086E-02	2.267E-01
CM242	2.184E+01	2.149E+01	2.139E+01	2.256E+01
CM243	8.926E-01	6.968E-01	2.325E+00	-2.983E-01
CM244	1.330E+00	1.388E+00	1.828E+00	8.666E-01
CM245	6.331E-02	-1.837E-02	2.478E-01	-4.811E-02
CM246	6.417E-02	-1.882E-02	5.175E-02	1.194E-01
Total MA	-8.702E-01	-1.435E+00	-1.463E+00	-8.436E-02
Total TRU	6.580E-02	-3.046E-01	-7.220E-02	3.814E-01
Total Fissile	1.120E-01	-2.111E-01	-1.757E-02	3.956E-01
Total HM	-1.985E+00	-2.261E+00	-2.301E+00	-1.578E+00

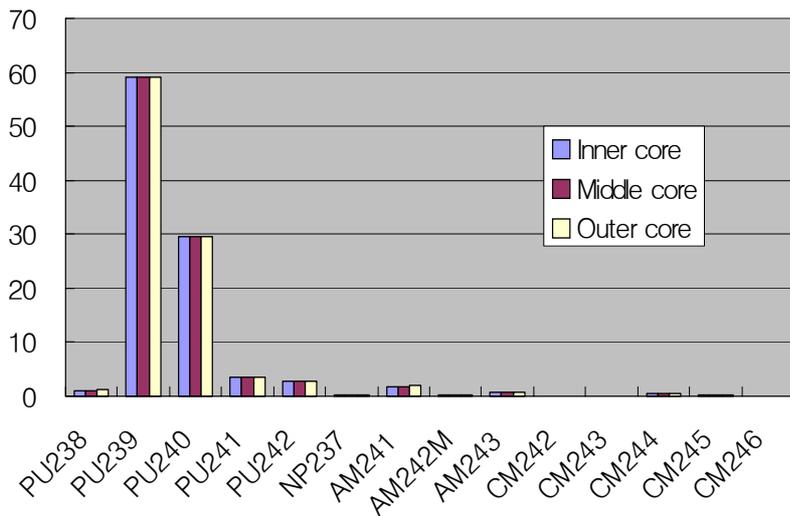


그림 3 주기초에서 TRU 핵종의 질량구성비 (%)

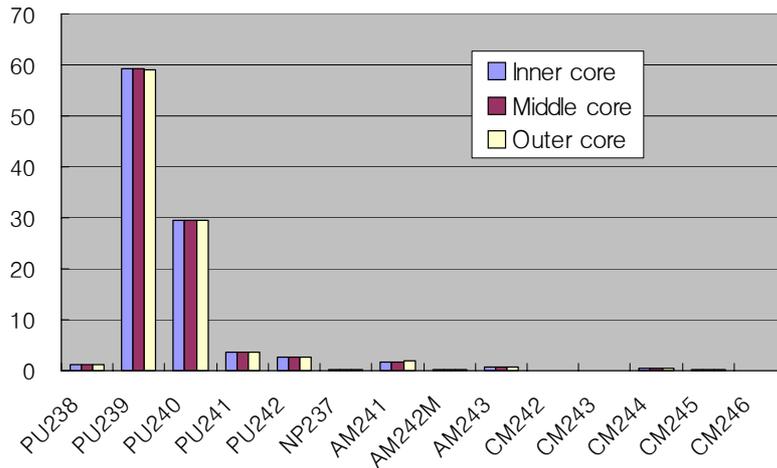


그림 4 주기말에서 TRU 핵종의 질량구성비 (%)

4. 결론

이 논문에서는 99%N-15 농축질화연료를 사용하는 900MWt 급 납-합금 냉각 노심설계의 타당성 연구가 수행되었다. 이 노심에서는 블랭킷의 배제와 단일농축도를 가진 연료사용이 추구되었고 이를 위해 출력분포는 보론카바이드 봉과 Vacancy 봉을 적절히 조합, 사용하여 평탄하게 하였다. 노심의 증식특성은 증식비가 1.0을 약간 초과하는 정도로 Fissile 물질의 외부공급이 필요없는 Fuel-Self-Sufficient 특성을 가진다. 또한 노심높이는 이전의 설계에 비해서 증가시켜 120cm로 설정하였다. 실제로 내부노심영역에는 보론흡수봉과 Vacancy 봉을 둘 다 사용하였고 중앙노심영역에서는 Vacancy 봉만을 사용하였다. 농축질소의 사용 및 노심높이의 증가로 인하여 증식비가 증가하여 핵연료봉 외경을 감소시킴으로써 냉각재의 체적비를 증가시키고 주기길이도 450일로 늘릴 수 있었다. 따라서 피복재외벽의 온도를 감소시킬 수 있었다. 그러나 냉각재기화반응도를 포함한 반응도계수들은 천연질소를 사용하는 경우에 비해서 악화되는 것으로 나타났다. 이는 노심높이증가에 따른 반경방향 중성자 누출의 감소와 N-15가 N-14에 비해 중성자의 감속능이 떨어져 중성자스펙트럼이 경(hard)하기 때문으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 홍서기, E. Greenspan 외, "Once for Life Core Design for the Encapsulated Nuclear Heat Source (ENHS) Reactor," *International Conference on the New Frontiers of Nuclear Technology : Reactor Physics, Safety and High-Performance Computing (PHYSOR2002)*, Seoul, Korea 2002.
- [2] 홍서기, E. Greenspan 외, "Alternative Design Options for the ENHS Reactor Core," *International Congress on Advanced Nuclear Power Plants (ICAPP03)*, Cordoba, Spain, 2003.
- [3] V. V. Orlov 외, Naturally Safe Lead-Cooled Fast Reactor for Large-Scale Nuclear Power.

- [4] Y. Kim et al., "Self-Sustaining Lead-Cooled Reactor with Single Fuel Enrichment," to be published in the *Transactions of the American Nuclear Society* (ANS Winter Meeting, 2003).
- [5] S. G. Hong et al., "질화연료를 사용한 900MWt 급, 납합금 냉각 Breakeven 노심의 예비 핵설계," 2003 춘계원자력학회 학술발표 논문집, 경주, 2003.
- [6] S. G. Hong et al., "900MWt Lead-Alloy Cooled Fuel-Self-Sufficient Cores with Single Enriched Nitride Fuel," to be presented at GLOBAL2003.
- [7] 김정도, "KAFAX-E66 : KALIMER 우라늄 금속연료 노심설계를 위한 중성자 150군 및 광자 12군 다군 단면적 라이브러리," Calculation Note No. NDL-23/01, 2001, 한국원자력연구소.
- [8] R. E. MacFarlane, "TRANSX 2 : A Code for Interfacing MATXS Cross Section Libraries to Nuclear Transport Codes," LA-12312-MS, LANL (Dec. 1993).
- [9] R. E. Alcouffe et al., "User's Guide for TWODANT : A Code Package for Two-Dimensional Diffusion-Accelerated, Neutral-Particle Transport," LANL Report, LA-10049-M (1984).
- [10] B. J. Toppel, "User's Guide for the REBUS-3 Fuel Cycle Analysis Capability," ANL-83-2 (Mar. 1983).