'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Seed/Blanket 개념이 적용된 토륨장전 원자로심 핵설계

Design of Thorium Fueled Core with Seed/Blanket Concept

우일탁, 김명현

경희대학교
경기도 용인시 기흥읍 서천리

요 약

비순환 토륨 핵연료 주기를 이용하여 신형 가압경수로심 핵설계를 하였다. 토륨 핵연료는 핵연료 자원 이용의 극대화, 장수명 액티나이드 핵종 발생량 감소, 핵확산 잠재력 감소와 같은 장점이 있다. 노심 설계시 RTF(Radkowsky Thorium Fuel)[1] 설계개념인 씨드(Seed)/블랭킷(Blanket) 개념을 도입하였다. RTF 설계안을 포함한 보다 폭 넓은 변수해석 연구는 토륨의 전환을 극대화 하기 위해 이루어졌다. 본 연구에서는 전환특성에 크게 영향을 미치는 중성자 스펙트럼을 여러 설계변수를 변화시켜 조절하였다. 씨드 핵연료는 UO_2와 U/Zr 금속 핵연료를, 블랭킷 핵연료는 (ThO_2 + UO_2) 혼합 핵연료를 고려하였다. 변수해석은 핵연료 봉 크기, 농축도, 씨드와 블랭킷 노심 구성비등과 같은 설계변수에 대하여 수행하고 설계변수에 따른 전환특성을 고려하여 전환률과 핵확산 저항성이 높도록 하였다.

최적 설계안은 몇몇 변수를 제외하고는 RTF와 유사하였다. 씨드와 블랭킷의 크기를 현재 가압경수로에 사용되는 핵연료 집합체 크기로 맞추어 RTF보다 재장전이 용이하도록 하였다. 최적 설계안은 핵연료 경제성의 이득을 위해 우라늄 농축도를 씨드 6w/o, 블랭킷은 10w/o로 하였다. 본 연구에서는 전체 노심의 재장전을 모사하는 대신 노심 Module를 설정하여 계산하였다. 최적 설계안의 전환률은 RTF와 유사한 값을 보였다. 최적 설계안은 가압경수로에 토륨 핵연료를 적용함으로써 사용후 핵연료 취급에 있어 큰 장점을 가지고 있다. 일반적인 가압경수로에 비해 사용후 핵연료 발생량이 55 %까지 줄어들었으며 장수명 핵종 발생량도 크게 줄었다. 또한 핵확산 저항성 측면에서 사용후 핵연료내 플루토늄 량이나 플루토늄내 핵분열성 물질량이 감소하여 일반적인 가압경수로보다 핵확산 저항성이 우수하다. 그러나 씨드와 블랭킷 핵연료 집합체간의 열적 불균형은 RTF와 같이 매우 컸다.

Abstract

The use of once-through thorium fuel cycle was investigated for the maximization of PWR core performance such as fuel utilization, proliferation resistance, and radio-toxicity reduction of spent fuels. In this paper, nuclear core design was done mainly for the nuclear conversion. The concept of core was based on the seed-blanket unit concept of Radkowsky Thorium Fuel (RTF or RTR)[1]. An extensive parametric study including RTF design has been done for the maximization of conversion ratio. The choice of fuel materials were UO_2 ceramic and U-Zr alloy for seed, and $(Th,U)O_2$ MOX for blanket. Parameters in search were fuel contents, enrichment, fuel radius, and seed/blanket configuration.

The optimized design was found to be almost same with RTF except in a few parameters. The size of seed/blanket unit are modified to the conventional PWR assembly unit for the easiness of reloading. For the benefits in fuel cycle economics, enrichment of uranium was reduced to 6 w/o in seed and 10 w/o in blanket, and U/Zr alloy composition was also modified. Calculation was done for a unit reactor module instead of full core reloading simulation. The conversion ratio of optimized design showed similar value from RTF. Potential benefits from this core are considerable in spent fuel treatment aspects. The total amount of spent fuel could be reduced up to 55% to the conventional PWR once-through cycle. The amount of Pu and fissile contents in Pu could be reduced a lot. These findings conclude that this core gives the better standing in proliferation resistance than a conventional PWR. The thermal power unbalance between seed assemblies and blanket assemblies were high like as in RTF.

1. 서 론

환경친화적 핵연료 주기로써 토륨은 미래의 폭넓게 사용될 핵연료이다. 토륨은 다음과 같은 이점이 있다. 첫째, 열중성자 영역에서 증식이 가능하다. 차세대 원자로의 중요 설계관점인 장주기 로심을 이루는데 토륨을 사용할 수 있다. 둘째, 핵확산 저항성이 높다. 토륨 핵연료 주기에서 방출되는 사용후 핵연료내 플루토늄 조성과 붕괴열, 방사능 준위는 핵확산 저항성을 높인다. 셋째, 사용후 핵연료내 장수명 액티나이드 핵종 발생량이 다른 핵연료 주기보다 작다. 이와 같은 장점으로 인해 많은 나라에서 토륨 핵연료에 관심을 두고 연구가 진행되고 있다. 과거의 토륨 연구가 자원 활용의 극대화에 목적은 둔 반면, 최근의 연구방향은 토륨 핵연료를 사용하는 경우 핵확산 저항성이 증대되고, 핵사찰이 용이하며, 장수명 핵폐기물량이 감소하는 점이 강조되기 때문이다.[2] 토륨 핵연료 주기는 우라늄-플루토늄 핵연료 주기에 비해 핵확산 저항성이 높아 우리나라와 같이 핵문제가 사회, 정치적으로 민감한 나라에서는 장주기 노심 구성 방식으로 생각할 수 있는 좋은 대안이다.

현재 진행중인 토륨 핵연료와 관련된 연구방향은 세가지로 분류된다. 첫번째 연구 방향은 외부 중성자 선원과 토륨 블랭킷을 사용한 미임계 가속기 원자로이다. 두번째 연구 방향은 Thermal Breeder Reactor이다. 이 원자로경우, U-233의 전환을 높이기 위해 핵분열 생성물 제거를 위한 On-line 핵연료 재처리 시설이 필수적이다. 위의 두 가지 방법은 모두 새로운 형태의 원자로이며 많은 기술적 어려움이 따른다. 마지막으로 세번째 연구 방향은 현존하는 가압경수로에 토륨 핵연료를 적용하는 방법이다. 대표적인 예로서 Radkowsky Thorium Reactor(RTR, RTF)이 있다. 이 원자로는 비순환 핵연료 주기의 가압경수로 적용 내에서 토륨의 장점을 강조하고 있다.

본 연구에서는 RTF의 Seed/Blanket Unit 개념을 도입하여 비순환 토륨 핵연료 주기를 적용한 가압경수로심을 설계하였다. 기존의 가압경수로심에 장전되는 핵연료를 토륨으로 바꾸면서 전환률과 핵확산 저항성이 우수하도록 일부 설계변수를 변경하여 핵연료 집합체를 설계하였다. 핵설계 변수중 fissile 농축도, fissile/fertile 비율, 핵연료봉 반경과 같은 몇몇 설계 변수를 제외하고 현재 가압경수로 핵연료 집합체의 기계적, 열수력학적 설계는 같도록 하였다. 모든 계산은 9개의 핵연료 집합체를 하나의 module로 설정하여 2차원 평면 계산하였으며 HELIOS[3] 전산체계를 이용하였다. 핵연료의 재장전은 Unit module에 대해 씨드 핵연료만 평형주기로 가정하면서 교체시키고 블랭킷은 가능한 오랫동안 노심에 장전하였다. 전환률, 핵확산 저항성, 사용후 핵연료 장수명 액티나이드 발생량과 같은 노심 핵적 특성을 기존 가압경수로와 비교하였다.

2. 토륨 장전 원자로 설계 개념

본 연구에서는 핵연료 경제성 및 핵확산 저항성이 향상된 가압경수로에 적용되는 비순환 핵연료 설계를 연구하였다. 기본적인 연구 접근은 현재 가압경수로에 사용되는 핵연료집합체를 최소한으로 설계 변경으로 하였다. 설계된 노심의 열출력은 2,775MWth이며 핵연료 집합체가 157개 장전되는 전형적인 가압경수로심이다. 설계된 노심의 특징은 다음과 같다.

첫째, 핵연료 집합체를 RFT 설계개념인 Seed/Blanket을 적용하여 씨드와 블랭킷으로 구분하여 비균질 노심으로 구성하였다. RTF 노심은 그림 1과 같이 Seed Blanket Unit(SBU)를 균일하게 장전되어있는 형태이다. SBU는 중성자 감속이 많이 이루어지도록 하기 위해 씨드 핵연료는 SBU의 안쪽부분에 장전되면서 블랭킷 핵연료봉보다 얇고, 블랭킷은 외곽부분에 장전되는 형태이다. 이와 같은 형태는 핵연료 재장전이 기술적으로 어렵고 복잡하다. 이에 반해서 본 연구에서는 그림 2와 같이 씨드와 블랭킷을 집합체별로 구분하여 노심에 장전함으로써 재장전과 핵연료 집합체 가공이 쉽도록 하였다. 각각의 핵연료 집합체는 핵연료 조성을 제외하고 같은 기하학적 구조를 가지고 있다. 따라서 재장전 기술개발 없이도 현재 재장전 기술을 적용하여 핵연료를 재장전 할

수 있다.

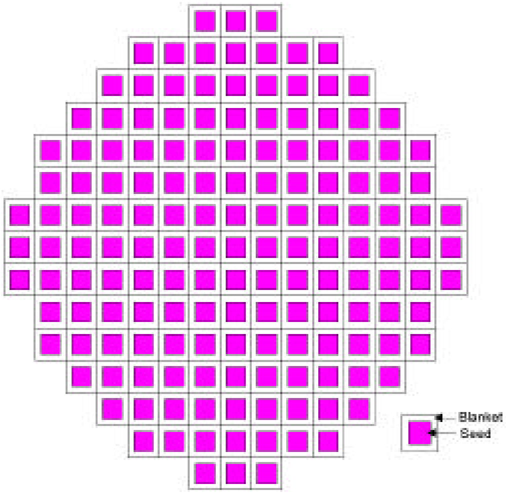


그림 1. RTF Core

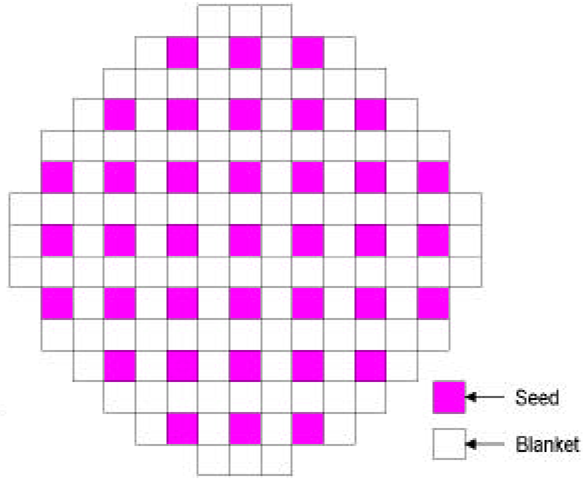


그림 2. Desegined Reactor Core

둘째, 씨드와 블랭킷을 서로 다른 교체 주기로 재장전한다. 이것은 RTF의 설계개념과 같다. U-238과 비교해서 Th-232 전환으로 생성되는 U-233은 포화되는데 걸리는 시간 약 5년 이상의 시간이 걸린다. 따라서 비순환 토륨 핵연료주기를 채택한 본 연구에서는 블랭킷을 씨드 핵연료가 5 7번 재장전동안 노심에 잔류시키면서 장전 위치만 옮겨가도록 하였다. 그러나 씨드 핵연료는 원자로의 임계 조건을 만족시키고 블랭킷으로의 중성자의 공급을 극대화하기 위하여 자주 교체시키도록 하였다. 씨드는 3 batch로 매년 교체되고 블랭킷은 토륨의 전환 특성을 고려하여 약 100 GWD/MT 까지 노내에 계속 잔류토록 하는 핵주기 전략을 채택하였다.[4]

셋째, 블랭킷 핵연료는 토륨을 기저물질로 사용하는 $(Th+U)O_2$ 혼합물이며 씨드로부터 중성자를 공급받아 핵변환되는 핵연료이고, 씨드 핵연료는 블랭킷으로 가능한 많은 중성자를 공급해주고 임계유지를 위해 U/Zr 금속 핵연료와 UO_2를 고려하였다.

3. 변수 해석 연구

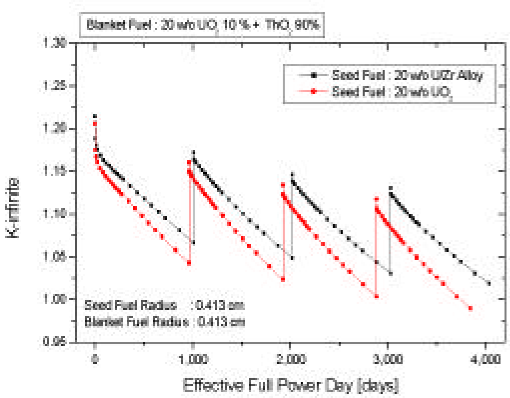
본 연구에서는 변수해석 연구를 통해 가압경수로 환경에서 토륨핵연료 전환특성을 분석하고 그 결과를 바탕으로 새로운 가압경수로심 핵설계를 하였다. 변수해석 연구에 사용된 설계변수는 핵연료 집합체 설계에 필요한 대부분의 설계인자를 고려하였다. 앞선 연구[5]에서는 씨드 핵연료로써 UO_2만을 고려하여 설계하였다. 본 연구에서는 씨드 핵연료로 UO_2와 U/Zr 금속 핵연료를 고려하여 보다 고전환에 유리한 씨드 핵연료 물질을 알아보았다. 또한 U/Zr 금속핵연료의 U 함유량에 따른 전환특성을 변수해석연구를 통해 살펴보았다.

먼저, 씨드 핵연료를 UO_2와 U/Zr 금속 핵연료를 사용하여 각각의 전환특성을 알아보았다. 표 1은 씨드 핵연료 종류에 따른 전환특성 변수해석 연구에 사용된 설계변수이다.

표 1. 씨드 핵연료 종류에 따른 변수해석연구에 사용된 설계변수

씨드			블랭킷			Pin Pitch
종류	농축도	핵연료 반경	UO_2 농축도	UO_2 함유량	핵연료 반경	
UO_2	20 w/o	0.413 cm	20 w/o	10 %	0.413 cm	1.285 cm
U/Zr alloy						

변수해석 결과, 그림 3에서 보는 것처럼 금속핵연료를 사용할 경우 금속 핵연료가 세라믹 핵연료보다 밀도가 높기 때문에 단위 부피당 장전되는 핵분열성 물질과 핵원료성 물질이 많아 주기초 잉여반응도 값이 크며 전 주기동안 반응도 변화 완만하다. 그림 4는 연소에 따른 블랭킷내 U-233 량이다. 세라믹 핵연료와 금속핵연료간의 차이는 없고 블랭킷에서 FIR값도 차이는 없다. 그러나 전체적인 FIR값은 금속핵연료가 세라믹 핵연료보다 큰 값을 가졌다. 그 이유는 블랭킷에서 생성되는 U-233 량에는 차이가 없지만 금속핵연료가 가진 큰 밀도로 인하여 같은 부피내에 핵연료가 더 많이 장전되어 플루토늄 생성량이 증가하였기 때문이다. 따라서 금속핵연료가 세라믹 핵연료보다 전환률이 더 높다. 또한 금속핵연료는 열전도도가 세라믹 핵연료보다 우수하여 높은 열출력에서도 열적 안전성을 가질 수 있다. 본 연구에서처럼 씨드에서 높은 열출력이 예상될 때 씨드 핵연료로써 금속핵연료를 사용하는 것이 전환률 측면이나 열적 안전성 확보측면에서 더 유리하다.



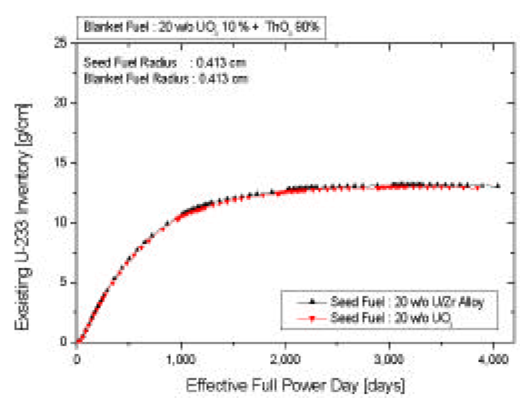


그림 3. 씨드 핵연료 종류에 따른 무한증배계수　그림 4. 씨드 핵연료 종류에 따른 U-233 량

표 2. 씨드 핵연료 종류에 따른 FIR값

Seed Material	Blanket					Module				
	Seed Refueling #				Average FIR	Seed Refueling #				Average FIR
	1	2	3	4		1	2	3	4	
UO_2	0.901	0.962	1.003	1.002	0.96	0.737	0.743	0.743	0.741	0.74
U/Zr	0.908	0.967	1.000	1.001	0.96	0.782	0.787	0.786	0.783	0.78

RTF에서 사용된 Seed 핵연료는 우라늄이 부피비로 20　30% 함유된 U/Zr 금속 핵연료이며 일정기간 원자로 임계유지를 위해 우라늄을 20 w/o까지 농축하여 사용하였다. 아래의 표는 RTF와

PWR에서 10주기동안 사용되는 우라늄량과 핵연료를 만들기 위해 필요한 천연우라늄량, SWU를 보여주고 있다.

표 3. RTF와 PWR에서 필요로하는 우라늄량과 SWU

	U Weight (Ton H.M)	Enrichment U-235 w/o	Natural U (Ton)	Separative work (kg SWU)	Loaded total number of fuel rods
RTF*	36.8	20	1,337	1,570,591	92,316
PWR*	256.6	3.3	1,516	1,215,243	165,792

* 2,775 Mwth, 157 Assembly or SBU

표 3에서 보는 것처럼 RTF에서는 PWR에 비해 매우 작은 량의 우라늄이 장전된다. 그러나 핵연료 제조시 필요한 천연우라늄은 RTF와 PWR에 장전되는 우라늄량 차이에 비해 큰 차이를 보이지 않고 있으며 오히려 RTF의 높은 농축도로 인하여 RTF가 PWR보다 보다 큰 SWU를 보여 핵연료 주기 경제성 측면에서 이득이 없음을 보여준다. RTF의 이런 문제점을 보완하기 위해 본 연구에서는 씨드 핵연료에 장전되는 U/Zr 금속 핵연료의 농축도를 낮추는 방법으로 U/Zr 금속 핵연료내 U 함유량을 높히는 것에 관심을 가지게 되었다. 그리하여 U/Zr 금속핵연료내 U 함유량에 대한 변수해석 연구를 통하여 핵적 특성을 비교하고 보다 경제적이면서 우라늄 자원 절약 측면에서 유리한 핵연료 조성을 알아보았다. 변수 해석 연구에서 비교 조건 맞추기 위해 단위 부피당 장전되는 U-235량을 동일하게 하였다. 표 4는 U/Zr 금속 핵연료의 U 함유량 변수해석 연구에 사용된 U/Zr 핵연료 조성이다.

표 4. U/Zr 금속 핵연료내 U 함유량 변화에 따른 핵연료 조성

U to Zr volume ratio	Avg. Density [g/cm^3]	Converted Weight Percent (w/o)		
		U-235 (Fissile w/o)	U-238	Zr
10 : 90	7.70	14.81 (60)	9.28	75.31
30 : 70	10.21	11.17 (20)	44.67	44.16
50 : 50	12.72	8.96 (12)	65.72	25.32
70 : 30	15.23	7.48 (8.57)	79.84	12.68
90 : 10	17.74	6.43 (6.67)	89.85	3.62

우라늄 함유량에 따른 무한증배계수를 살펴보면, 우라늄 함유량이 적을수록 장전되는 U-238량이 작아서 주기초에 중성자의 U-238 흡수가 작고 U-235 흡수는 많아 핵분열이 많이 일어난다. 그리하여 주기초 잉여반응도는 그림 5와 같이 우라늄 함유량이 작을수록 높다. 그러나 연소가 진행되면서 우라늄 함유량이 작으면 주기초에서 부터 U-235 소모는 많고 U-238의 중성자 포획으로 생성되는 플루토늄 생성량이 작아서 무한증배계수는 급격히 감소하여 전 주기에 걸쳐 반응도 변화가 크다. U/Zr 금속 핵연료의 경우 전환률을 보다 크게 하려면 U 함유량을 높이는 것이 유리하다. 그러나 U 함유량이 높을수록 보다 많은 플루토늄 fissile이 생성되어 핵확산 저항성 측면에서는 불리하다.

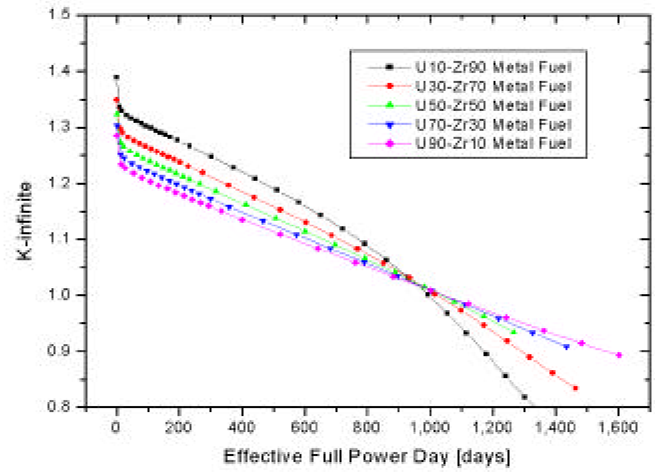


그림 5. U/Zr 금속핵연료내 U 함유량에 따른 무한증배계수

표 5는 같은 량의 U-235가 장전되는 핵연료를 만들기 위해 필요한 천연 우라늄량과 SWU이다. 표에서 보는 것처럼 우라늄 함유량이 높을수록 농축비용의 절감과 천연 우라늄 자원의 절약을 얻을 수 있다.

표 5. U/Zr 금속 핵연료내 U 함유량 변화에 따라 요구되는 천연우라늄량과 SWU

Volume ratio	Loaded U-235 (kg)	Loaded U-238 (kg)	Loaded U (kg)	Required Nat. U (kg)	SWU (kg)
U10-Zr90	15.4	10.3	25.7	3,015	3,820
U30-Zr70		61.8	77.2	2,995	3,536
U50-Zr50		113.4	128.8	2,975	3,322
U70-Zr30		164.9	180.3	2,954	3,134
U90-Zr10		216.4	231.8	2,949	2,984

4. 최적 설계안 평가

앞선 연구와 본 연구에서 수행된 변수 해석연구를 통해 가압경수로 환경에서의 비순환 토륨 핵연료 전환특성을 살펴보았다. 변수 해석 연구 결과를 바탕으로 비순환 토륨 핵연료를 가압경수로에 활용할 때 최적 설계안을 마련하였다. 최적 설계안은 높은 전환율과 핵확산 저항성이 높은 설계안이다. 표 6은 최적 설계안의 설계 변수이다. 씨드 핵연료는 우라늄 함유량이 75 %이고 농축도가 6.0 w/o인 U/Zr 금속핵연료를 사용하고 핵연료 반경은 0.33 cm이며 핵연료 집합체 크기는 현재 가압경수로 핵연료 집합체와 동일하다. 블랭킷 핵연료는 농축도 10 w/o인 UO_2를 20 %, ThO_2를 80% 혼합한 혼합 핵연료이고 핵연료 반경은 0.4025 cm이다. 노심은 씨드와 블랭킷 핵연료 집합체 구성비를 1:3으로 하여 Checkerboard 형태이다. 잉여반응도 조절을 위해 씨드 핵연료 집합체에 가연성 독봉을 적용할 수 있으며 블랭킷 핵연료 집합체에는 적용하지 않았다.

표 6. 최적 설계안의 설계변수

Parameter	Seed	Blanket
Fuel Assembly Size, cm	21.61	
Fuel Material Composition	U/Zr Metal Fuel U content : 75 % U enrichment : 6.0 w/o	$(Th+U)O_2$ UO_2 content : 20 % U enrichment : 10 w/o
Initial Fuel Weight (kg H.M)	U - 460	Th - 337 U- 92
Fuel Radius, cm	0.33	0.4025
Number of Guide Tubes	24 + 1 (Central)	
Reactivity Control	Control Rod + Burnable Poisons	None

최적 설계안 분석은 노심 분석의 기술적 어려움으로 인하여 노심을 구성하는 씨드와 블랭킷 핵연료 집합체 일부를 그림 6과 같이 Module로 선정하여 계산하였다.

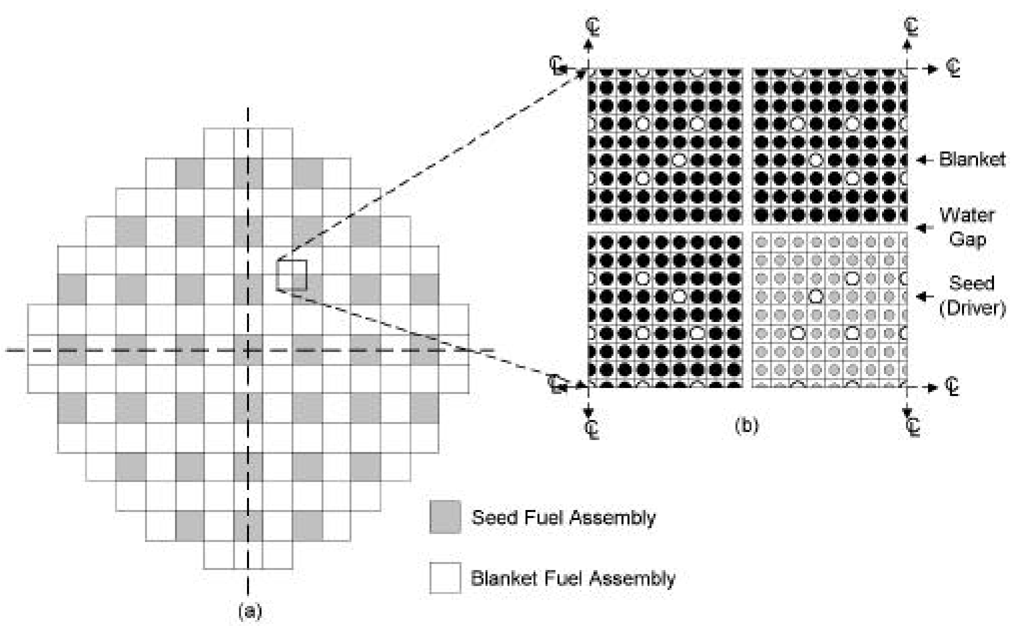


그림 6. 최적 설계안 노심 구성 형태(a)와 노심 계산 Module(b)

4.1 노심 잉여 반응도 제어

그림 7은 최적 설계안 무한증배계수이다. 3배치의 재장전 전략을 가지는 PWR에 사용되는 핵연료 집합체중 가장 농축도가 높은 핵연료 집합체 무한증배계수와 비교해 볼 때 최적 설계안은 주기초 잉여 반응도와 주기말까기의 반응도 변화가 작다. 이것은 최적 설계안이 기존 가압경수로보다 높은 전환율을 가짐을 의미한다. 또한 가압경수로에 장전되는 핵연료 집합체가 교체될 때 그 핵연료 집합체의 무한증배계수값은 0.9 정도인데 이를 기준으로 최적설계안과 가압경수로에 장전되는 핵연료 집합체 방출연소도를 비교해보면 최적 설계안이 가압경수로에 장전되는 핵연료집합체보다 Effective Full Power Day로 약 200일 정도 더 긴 것을 알 수 있다.

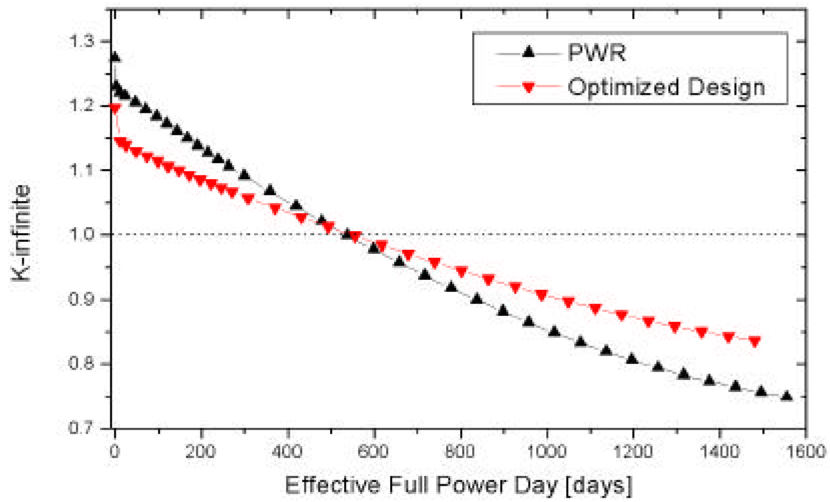


그림 7. 최적 설계안 무한증배계수

표 7은 기본적인 군정수를 요약하였다. RTF, PWR과 최적 설계안 모두 비슷한 결과를 보여주고 있다. 그러나 고속중성자 대 열중성자 비율은 최적 설계안이 RTF와 PWR보다 작아서 최적 설계안이 열중성자로 감속이 더 많음을 의미한다. 그림 8은 최적설계안 Module내 고속중성자와 열중성자 분포를 나타낸다. 주기초 씨드 부분에서 고속중성자 분포가 높으며 주기말로 갈수록 고속중성자 분포는 블랭킷과 비슷한 분포를 가진다. 반면 열중성자 분포는 주기초에 블랭킷에서 씨드보다 약간 더 높지만 주기말로 갈수록 씨드에서 높아진다. 이것은 주기초 씨드에서 블랭킷보다 핵분열이 많이 일어나면서 씨드에서 고속중성자 분포가 높은 반면 주기말로 갈수록 블랭킷에서 핵분열이 점점 많아지면서 결국은 씨드와 블랭킷간 고속중성자 분포는 비슷해졌다. 또한 주기초에 블랭킷에서 열중성자 분포가 높은 것은 씨드에서 생성된 고속중성자가 감속되면서 블랭킷으로 공급되고 있기 때문이다.

표 7. 최적 설계안 2-Group Cross Section 자료

	RTF		PWR		Optimized Design	
	Fast	Thermal	Fast	Thermal	Fast	Thermal
D [cm]	1.48304	0.43009	1.43546	0.44825	1.44199	0.43273
Σ_a [1/cm]	7.2057E-03	7.5368E-02	8.1270E-03	7.0883E-02	8.7687E-03	7.0847E-02
$\upsilon\Sigma_f$ [1/cm]	4.6324E-03	1.1863E-01	5.5295E-03	1.1143E-01	4.7862E-03	1.0428E-01
Σ_r [1/cm]	2.0049E-02	-	1.8186E-02	-	1.9003E-02	-
ψ [1/cm^{2}sec]	2.0516E+14	5.2953E+13	2.2458E+14	5.5910E+13	2.4115E+14	6.3484E+13
ψ_1/ψ_2	3.8743		4.0168		3.7986	
Resonance escape Probability	7.3562E-01		6.9114E-01		6.8426E-01	

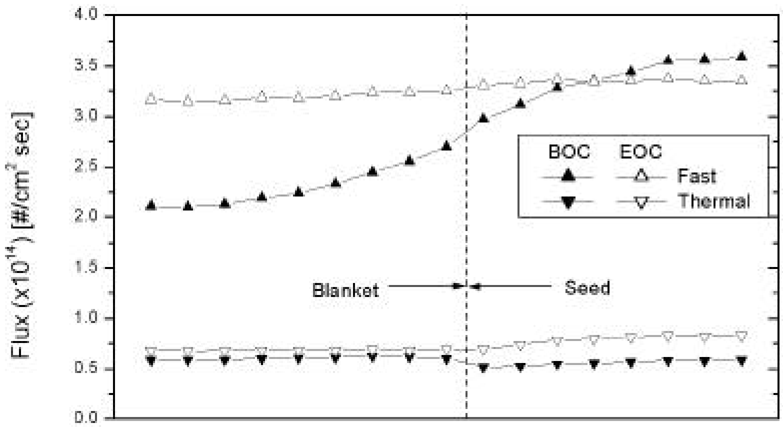


그림 8. 최적설계안 Module내 중성자속 분포

4.2 핵전환성 평가

FIR 값으로 노심의 전환특성을 살펴보았다. 표 8에서 처럼 FIR값은 현재 가압경수로보다 큰 값을 가졌다. 표 9는 8,325 GWD 열생산에 필요한 핵연료량을 PWR과 비교한 것이다. 최적 설계안에서 사용되는 우라늄량은 약 83.17톤으로 PWR에서 사용되는 량, 약 364.33톤의 불과 31%에 해당하여 많은 우라늄 자원 절약을 보인다. 3,000 EFPD후 방출되는 핵연료량은 최적설계안이 111.5톤이고 PWR에서는 254.9톤임으로 약 44%의 사용후 핵연료 발생량을 줄일 수 있다. 전환률 관점에서 3,000 EFPD 동안 소비된 heavy metal(Th, U)량은 최적 설계안이 11.32톤(U-235:4.2톤)이고 PWR은 9.46톤(U-235:5.56톤)임으로 최적설계안이 PWR보다 약 120% 더 소비되었다. 이것은 Th-232 전환으로 생성된 U-233 소모된 량을 포함한다. U-233으로 전환량을 고려한다면 최적설계안 전환률은 약 1.09가 되며 이 노심은 증식이 됨을 알 수 있다.

표 8. 최적 설계안의 FIR 값

	Seed Refueling Cycle #				Average FIR
	1	2	3	4	
Optimized Design	0.55	0.60	0.60	0.60	0.58
PWR	0.42				

표 9. 8,325GWD 열생산동안 핵연료량 변화 비교

	Optimized Design	PWR
Effective Operation Day	3,000	3,000
Requirement of Th-232 (Ton)	39.64	0
Requirement of U-238 (Ton)	77.74	256.62
Requirement of U-235 (Ton)	5.43	7.71
Th-232 Mass in Spent Fuel (Ton)	35.70	0
U-238 Mass in Spent Fuel (Ton)	74.57	252.72
U-235 Mass in Spent Fuel (Ton)	1.23	2.15
Pu-239 Mass in Spent Fuel (Ton)	0.42	1.11
Pu-241 Mass in Spent Fuel (Ton)	0.12	0.24
Actual Consumption of Th-232 (Ton)	3.95	0
Actual Consumption of U-238 (Ton)	3.17	3.90
Actual Consumption of U-235 (Ton)	4.20	5.56

4.3 핵확산 저항성 평가

최적 설계안의 핵확산 저항성 측면을 살펴보았다. 최적 설계안은 씨드와 블랭킷 핵연료 집합체로 구분되어 있어 씨드와 블랭킷 사용후 핵연료내 플루토늄 동위원소 조성을 가압경수로에서 발생되는 사용후 핵연료와 비교하여 핵확산 저항성을 살펴보았다. 최적 설계안에서 발생되는 플로토늄은 씨드에서 0.72톤, 블랭킷에서 0.24톤으로 총 0.96톤이다. 이 량은 PWR에서 발생되는 플루토늄량(약 1.88톤)의 51%에 불과하다. 최적 설계안에서 발생되는 사용후 핵연료내 플루토늄량은 PWR에 비해 작다. 표 10은 최적 설계안과 가압경수로의 사용후 핵연료내 플루토늄 동위원소 조성이다. 최적 설계안에서 발생되는 사용후 핵연료는 가압경수로에서 나오는 사용후 핵연료보다 Pu-238, Pu-242 함유량은 높아진 반면, Pu-239 함유량은 낮아졌다. 이는 플루토늄 순도가 떨어져 핵무기를 만들려고 하면 보다 많은 사용후 핵연료량이 필요로 하게 됨으로 최적 설계안은 핵확산 저항성이 높아졌음을 의미한다. 또한 Pu-238량이 많을수록 붕괴열로 인하여 사용후 핵연료 재처리를 더욱 어렵게 한다.

표 10. 사용후 핵연료내 Pu 조성

	Seed	Blanket	Seed + Blanket	PWR
Pu-238	0.03	0.09	0.07	0.01
Pu-239	0.46	0.39	0.41	0.59
Pu-240	0.28	0.17	0.21	0.21
Pu-241	0.14	0.15	0.15	0.14
Pu-242	0.09	0.20	0.16	0.05

4.4 장수명 액티나이드 핵종 발생량 평가

다음으로 최적 설계안의 장수명 액티나이드 핵종 발생량을 살펴보았다. 표 11은 최적 설계안과 가압경수로에서 장수명 액티나이드 핵종 발생량이다. 표는 매년 방출되는 사용후 핵연료내 장수명 핵종별 발생량이다. 씨드와 가압경수의 값은 매년 방출되는 핵연료에서 계산되었고 블랭킷은 10년간 노심내 장전되었다가 한꺼번에 방출됨으로 씨드와 가압경수로와 쉽게 비교하기 위해 한꺼

번에 방출된 블랭킷 핵연료를 10으로 나누어 계산하였다. 표에서 보는 것과 같이 최적 설계안이 가압경수로에서보다 매년 발생되는 사용후 핵연료내 장수명 액티나이드 핵종량이 작아 사용후 핵연료 취급에 있어 가압경수로보다 환경 친화적이라 할 수 있다.

표 11. 장수명 액티나이드 핵종 발생량 [kg/yr]

	Seed	Blanket	Seed+Blanket	PWR
Np-239	3.9	2.9	6.8	13.1
Am-241	0.2	0.1	0.3	0.8
Am-243	1.1	2.2	3.3	6.2
Cm-242	0.1	0.1	0.2	0.5
Cm-244	0.4	2.4	2.8	2.9
Total	5.7	7.7	13.4	23.5

4.5 핵적 안전성 평가

최적 설계안 핵적 안전성을 살펴보기 위해 감속재 온도계수(Moderator Temperature Coefficient)와 핵연료 온도 계수(Fuel Temperature Coefficient)를 살펴보았다. 그림 9에서처럼 최적 설계안의 감속재 온도계수와 핵연료 온도계수는 모든 전 주기에 걸쳐 음의 값을 유지하였으므로 노심 설계에서 요구되는 내재적인 안전성을 확보함을 알 수 있었다

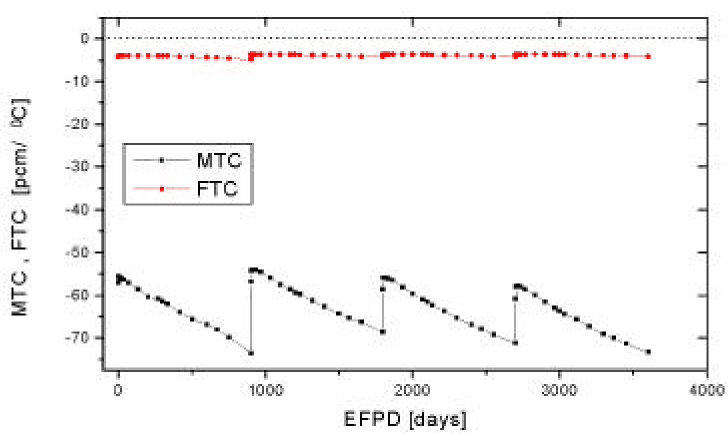


그림 9. 최적 설계안의 MTC와 FTC 변화

씨드와 블랭킷 사이의 열출력 차이를 살펴보았다. 최적 설계안에서 씨드와 블랭킷 역활이 다른 만큼 씨드와 블랭킷간의 열출력 밀도 차이는 매우 클이 예상된다. 열출력 밀도의 불균형을 완화하기 위해 블랭킷에 농축된 UO_2을 혼합하여 사용하였다. 그림 10은 최적 설계안의 씨드와 블랭킷간의 열출력 밀도를 보여주고 있다. 씨드는 700 1,100 w/cm^3이고 블랭킷은 200 300 w/cm^3로 블랭킷에 고농축의 UO_2를 혼합하였음에도 불구하고 매우 큰 차이를 보여주고 있다. 표 12는 주기초와 주기말에서 Peaking Factor를 보여주고 있다 주기초에 매우 높았던 Peaking Factor는 연소가 진행되면서 블랭킷에서 U-233이 생성되고 붕괴되면서 열출력이 높아져 주기말로 갈수록 Peaking Factor는 주기초보다는 많이 작아지지만 그러나 PWR보다 여전히 높은 값을 보인다. 이런 열출력 밀도차이를 극복하는 것은 아직 숙제로 남아있다.

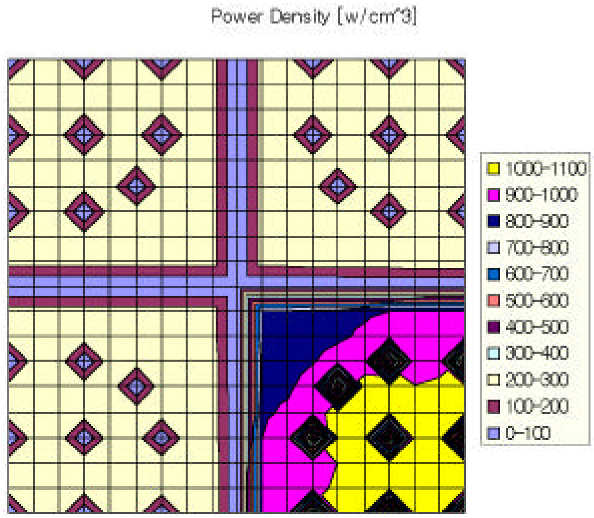


그림 10. **최적 설계안 열출력 밀도**

표 12. **최적 설계안** Peaking factor

	Seed	Blanket	Seed + Blanket	PWR
BOC	1.1228	1.1025	2.4575	1.0775
EOC	1.0148	1.0564	1.5375	1.0184

5. 결 론

본 연구에서는 토륨 핵연료를 가압경수로심에 비순환 주기로 적용할 때 전환률이 높은 노심을 설계하는 방법론을 연구하고 토륨 핵연료 주기를 활용하는 가압경수로심을 설계하였다. 노심은 RTF**의 설계개념을 도입하여 씨드와 블랭킷으로 구분되는 비균질 로심으로 구성하였으며** RTF**의** SBU**와 달리 씨드와 블랭킷의 독립된 핵연료 집합체로 설계하여 현재의 재장전 기술을 그대로 적용할 수 있는 장점이 있다. 가압경수로 환경에서 토륨 핵연료의 전환특성을 변수 해석 연구를 통하여 살펴보았으며 그 결과로 전환률과 핵확산 저항성이 높은 최적 설계안을 마련하였다. 최적 설계안** U-233**을 재처리하지 않는 비순환 토륨 핵연료 주기를 사용하였기 때문에 높은 전환률을 얻을 수는 없었지만 기존의 상업용 원자로보다는 큰 전환률을 가졌고 사용후 핵연료 발생량을 크게 줄일 수 있었으며 플루토늄 발생량및 플루토늄내 핵분열성 물질 함유량이 작아 핵확산 저항성이 증가하였다. 장수명 액티나이드 핵종 생성량도 일반 가압경수로보다 작아 환경 친화적이였다. 또한 최적 설계안은 안전성 측면에서는 음의 냉각재 온도계수와 핵연료 온도계수를 가짐으로써 내재적인 안전성을 확보할 수 있었다. 반면에, 최적 설계안에 대한 열수력학적 조건이 아직 고려하지 않았다. 씨드와 블랭킷사이의 심한 열출력의 불균형을 극복할 수 있는 방안이 모색되어야 할 것이다.**

REFERENCE

1. A. Galperin, P. Reichert, and A.Radkowsky, "Thorium Fuel Cycle for Light Water Reactor-Reducing Proliferation Potential of Nuclear Power Fuel Cycle," Science & Global

Security, Volume 6, pp265-290, 1997.

2. V. Arkhipov, H. J. Rutten, and A. Galperin, "Progress Summary of the IAEA Coordinated Research Program on the Potential of Thorium-based Fuel Cycles to Constrain Pu and to Reduce Long-lived Waste Toxicity," ICENES'98, The 9th International Conference of Emerging Nuclear Energy System, Tel-Aviv, Israel, June 28 - July 2, 1998.

3. R.J.J. Stamm'ler, J.J. Casal and E.A. Villarino, HELIOS Method, HELIOS Documentation Rev. No. 2, Scandpower A/S, 1993.

4. Myung-Hyun Kim, Jae-Yong Lim, "Nuclear Core Design of a High- Converting LWR with Thorium Fuel," Proceedings of International Conference on Mathematics and Computation, Reactor Physics and Environmental Analysis, Madrid, Spain, Sept. 27-30, 1999.

5. Myung-Hyun Kim, Il-Tak Woo and Hyung-Kook Joo, "Advanced PWR Core Concept with Once-Through Thorium Fuel Cycle," Proceedings of International Conference on Future Nuclear System, Global'99, Jackson Hole, WY, U.S.A., Aug. 30 - Sep. 2, 1999.