

가압경수로를 위한 토륨핵연료의 핵설계안 종합 비교

Comparison on Nuclear Design Concepts of Thorium Fuel Assembly for PWR

김관희, 김명현

경희대학교
경기도 용인시 기흥읍 서천리

요 약

토륨 핵연료의 성능을 이미 개발된 성능평가 지수를 이용하여 비교하였다. 평가된 핵연료의 성능은 증식성과 핵확산 저항성, 장수명 핵종의 핵변환율, 폐기물의 방사성 독성이다. 또한 토륨을 핵연료로 이용하는 핵연료주기의 경제성을 평가하기 위하여 핵연료주기 비용을 선행 핵연료주기 비용에 한해서 산출하였다. 여러 성능지수는 핵연료의 성능 평가 지표(증식, 핵변환, 핵확산 저항성, 방사성독성)에 대하여 정량적인 판별 기준을 제공하였고 기존 상업로와 비순환 토륨 핵연료에 성능 지수를 적용하여 설계안 별로 결과치를 비교함으로써 설계의 우수성을 비교하였다. 또한 토륨 핵연료를 이용한 RTF, WASB, KTF의 선행 핵연료주기 비용을 원료, 변환, 농축, 성형가공의 단계별로 각각 비교하고 주기별 비용을 비교함으로써 핵연료 경제성을 평가하였다.

Abstract

A variety of performance indices are used to measure the nuclear characteristics in fuel cycle economics, proliferation resistance, radio-toxicity burden and environmental adaptability for thorium-based fuel designs. The comparison between the base uranium fuel cycle and the thorium fuel cycles was shown. Thorium-based fuel designs were evaluated from an economic perspective. Economics evaluation based on the front-end fuel cycle was performed. The front-end fuel cycle cost was divided into four steps: mining, conversion, enrichment and fabrication.

1. 서 론

토륨 핵연료를 이용한 핵연료주기는 핵주기 경제성 향상, 사용후 핵연료의 저장 및 영구처분, 핵확산 문제를 해결하기 위해서 여러 설계안들이 제안되었으며 토륨 핵연료를 가압경수로에 적용하는 핵연료 개념은 핵적 타당성을 보임을 이미 여러 논문에서 입증되었다.

토륨 핵연료를 사용한 대표적인 설계안은 다음과 같다. SBU (Seed-Blanket Unit) 개념을 사용한 RTF (Radkowsky Thorium Fuel)는 가압경수로에 토륨핵연료를 이용하여 비순환 장주기를 달성한 설계안이다. KTF (Kyunghee Thorium Fuel)는 이 설계안을 고유 설계안으로 변형한 설계안이며 WASB (Whole-Assembly Seed and Blanket)의 원형모델이기도 하다.

본 논문에서는 토륨 핵연료의 성능을 이미 개발된 성능평가 지수를 이용하여 비교하였다. 평가할 핵연료의 성능은 증식성과 핵확산 저항성, 장수명 핵종의 핵변환율, 폐기물의 방사성 독성이다. 또한 핵연료주기 경제성을 평가하기 위하여 핵연료주기 비용 중에서 선행 핵연료주기 비용에 한해서만 비교, 평가하였다. 위에서 언급한 3가지 토륨 핵연료 설계안에 대한 이 같은 성능 평가는 계속 수정, 보완하여 개발되고 있는 현 단계에서의 토륨 핵연료 설계안에 대한 중간평가이며 앞으로 개발될 새로운 설계안의 방향을 제시할 수 있다.

2. 토륨 핵연료 설계안

2.1 RTF-Galperin Design

RTF는 SBU 개념에 바탕을 둔 설계로서 SBU의 형태는 그림 1과 같다. 핵연료집합체의 중심부분이 씨드(Seed) 영역으로 20 w/o 우라늄 핵연료가 장전되었고 핵연료집합체의 외곽 영역은 블랭킷(Blanket) 영역으로 약간의 13 w/o 우라늄과 토륨 핵연료가 장전되었다. 씨드에서 중성자를 블랭킷에 공급함으로써 Th-232가 U-233으로 변환된다.

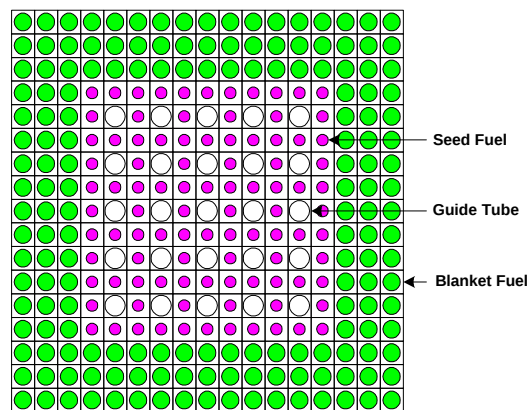


그림 1 Seed-Blanket Unit(SBU)

토륨 핵연료를 사용한 RTF, WASB, KTF 설계안의 설계인자 및 특성은 표 1에서 각각의 항목별로 정리하였다.

2.2 WASB-MIT Design

RTF 개념 중 결점은 핵연료집합체가 두 개의 서로 다른 영역으로 구성되어 있다. 이는 핵연료 재장전 과정을 더욱 복잡하게 만드는 요소이다. WASB(Whole-Assembly Seed and Blanket) 개념은 씨드와 블랭킷을 완전히 분리함으로써 핵연료집합체 제조 및 재장전 과정을 간단하게 하였다. 씨드와 블랭킷은 노내에 그림 2와 같이 1:1로 장전된다.

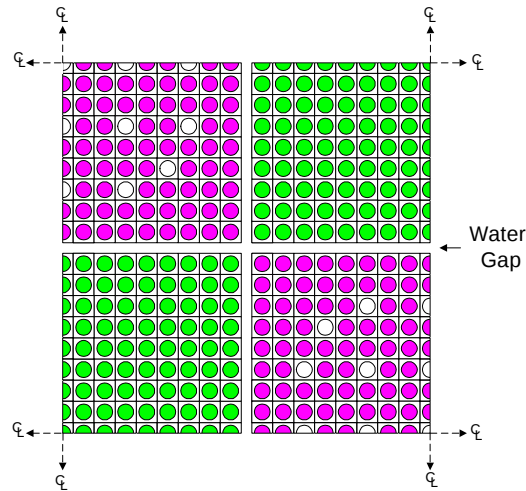


그림 2 WASB의 씨드/블랭킷 모듈

2.3 KTF-KHU Design

WASB 개념의 모태가 된 설계안으로서 씨드와 블랭킷을 분리하여 노내에 비균질하게 장전하였다. KTF는 노내에 그림 3과 같이 잔정된다. RTF, WASB, KTF의 설계 개념은 비순환 토륨 핵연료 주기를 기본으로 하였기 때문에 토륨으로 이루어진 블랭킷을 원자로내에 오래 잔류시켜 U-233의 생성이 충분해지도록 하고자 씨드와 블랭킷을 서로 다른 교체 주기로 재장전한다. 즉, 씨드 핵연료는 원자로의 임계조건을 만족시키고 블랭킷으로 중성자의 공급을 극대화하기 위하여 자주 교체시키나 블랭킷은 씨드 핵연료가 10번 교체되는 동안 노내에 계속 잔류시킨다.

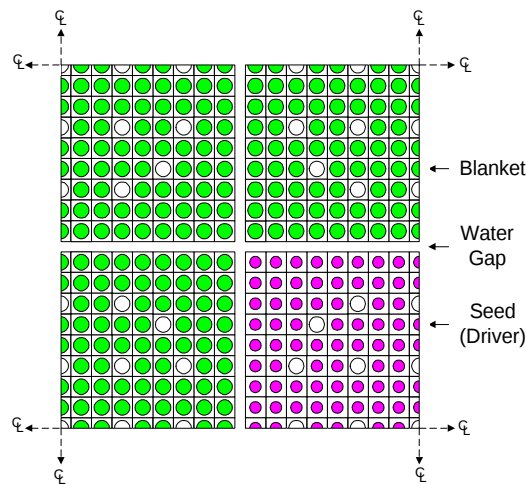


그림 3 KTF의 씨드/블랭킷 모듈

표 1 토륨 핵연료 설계안 제원

Parameter	RTF-Galperin Design		WASB-MIT Design		KTF-KHU Design	
	Seed	Blanket	Seed	Blanket	Seed	Blanket
Fuel Assembly Size, cm	21.4		21.4		21.6	
Dimension, cm	13.83	21.4	21.4	21.4	21.6	21.6
Fuel Material Composition	U/Zr metal alloy U enrichment < 20%	(U+Th)O ₂ U volume fraction ~0.1 U enrichment < 20%	UO ₂ U enrichment ~ 20%	(U+Th)O ₂ U volume fraction ~0.1 U enrichment < 12%	U/Zr metal alloy U enrichment < 6%	(U+Th)O ₂ U volume fraction ~0.2 U enrichment < 10%
Number of Fuel Rods	108	156	264	289	264	264
Fuel Pellet Radius, cm	0.0 - 0.20 (Zr filler) 0.20 - 0.385 (Fuel)	0.4095	0.0 - 0.28 (Er ₂ O ₃) 0.28 - 0.377 (Fuel)	0.4095	0.33	0.4025
Gas Gap, cm	No	0.0085	0.0082	0.0085	No	0.0085
Cladding Thickness, cm	0.03	0.057	0.03	0.057	0.006	0.065
Fuel Rod Radius, cm	0.415	0.475	0.415	0.475	0.336	0.476
Fuel Cell Pitch, cm	1.26	1.26	1.26	1.26	1.27	1.27
Core Volume Fraction	41	59	50	50	25	75

3. 핵설계 성능 평가

핵연료 설계안의 성능을 평가하기 위하여 본 연구에서 사용한 평가 항목은 다음과 같다. 핵연료의 증식성, 핵주기의 핵확산 저항성, 필요 없는 장수명 희귀 액티나이드(Long Lived Minor Actinide, LLMA)가 소멸되는 정도를 판별할 핵변환성, 사용후 핵연료를 영구 처분한다고 가정할 때의 방사성 위해도, 핵연료주기의 경제성으로 나누어 평가하였다. 각 항목의 특성 및 결과는 다음과 같다.

3.1 핵연료 증식성

핵연료의 증식성을 평가하는 측면은 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 핵연료성 물질의 양을 증가시키는 순수 핵연료 증식성이다. 즉, 초기 장전된 핵분열성 물질량보다 연소 후 방출되는 핵분열성 물질량이 많은 것을 뜻한다. 두 번째는 핵연료성 물질을 핵분열성 물질로 전환함으로써 장전된 핵연료 자원의 효율적인 사용 측면에 있다. 핵분열성 물질의 생성이 주된 목적이라면 노내에서의 핵연료의 효율적인 사용은 고려하지 않아도 되지만 그것이 아니라면 생성과 소멸을 잘 조화시켜 주기초부터 생성된 핵분열성 물질이 주기말까지 고르게 연소할 수 있도록 조절하는 것이 필요하다.

이는 순수 핵연료의 증식성 측면에서만 본 것이며 지표들은 다음과 같다.

원자로에서 U-233, Pu-239, Pu-241 등의 핵분열성 물질은 Th-232, U-238, Pu-240 등과 같은 핵연료성 물질이 중성자를 포획함으로써 생성된다. 핵분열성 물질의 생성과 소멸을 나타내는 척도로서 아래와 같은 증식율(Breeding Ratio, BR) 혹은 전환율(Conversion Ratio, CR)을 주로 사용한다. 그러나 BR과 CR은 시간에 따라 변하기 때문에 경우에 따라서는 증식 혹은 전환시키는 원자로의 설계특성을 명확하게 대변할 수 없다. 따라서 일정기간 동안의 핵연료 증식 특성을 한 값으로 보기 위해서는 핵분열성 물질 총량 변화 비율(Overall Fissile Inventory Ratio, FIR)과 핵분열성 물질 이득(Fissile Gain, FG)을 사용하는 것이 타당하다. FIR과 FG은 다음과 같이 정의된다.

$$FIR = \frac{\text{Fissile fuel amount at the end of a refueling period}}{\text{Initial fissile amount}}$$

$$FG = \frac{\text{Discharged fissile amount} - \text{Feed fissile amount}}{\text{Feed fissile amount}}$$

표 2는 PWR, CANDU, RTF와 KTF의 FIR, FG 값을 비교한 것인데, 블랭킷에서는 증식성이 높으나 씨드에서는 높지 않음을 확인할 수 있었다.

표 2 핵연료에 따른 FIR와 FG

	PWR	CANDU	RTF		KTF	
			Seed	Blanket	Seed	Blanket
FIR	0.35	0.72	0.21	1.01	0.27	0.87
FG	-0.65	-0.28	-0.79	0.01	-0.73	-0.13

3.2 핵확산 저항성

핵확산저항성 문제에 있어서 사용후 핵연료의 플루토늄의 총 누적량과 동위원소별 조성비율이 관심의 초점이 된다. 즉 사용후 핵연료에 남아 있는 플루토늄으로 얼마나 효과적으로 또는 효율적으로 핵무기를 만들 수 있는지가 문제이다. 그러므로 아래와 같은 특성에 대한 핵확산 저항성을 정량화한 지표가 사용되어 왔다.

- 핵무기 제조에 필요한 핵분열성 물질의 최소질량을 정량화
- 단위질량당 방출되는 자발 중성자 방출율과 세기를 정량화
- Actinide로부터의 발생하는 열량을 정량화

위의 각 항목에 대한 핵확산 저항성 지표로서 임계질량(Bare Critical Mass, BCM), 자발 핵분열 중성자원(Spontaneous Neutron Source, SNS), 열량방출(Thermal Generation, TG)을 사용하였으며 정의는 아래와 같다.

1. BCM : 사용후 핵연료에서 추출된 플루토늄의 조성비로 무반사체 임계 체적구(Bare Critical Sphere) 제조에 필요한 플루토늄의 최소질량.

2. SNS : 사용후 핵연료에서 추출된 플루토늄의 조성비에서 플루토늄 단위질량당 방출되는 중성자 방출율.

3. TG : 사용후 핵연료에서 추출된 플루토늄의 조성비에서 플루토늄 단위질량당 발생하는 열량.

이 지표들은 사용후 핵연료의 물성으로부터 핵무기 물질로 전용되는 가능성을 비교한 것이다. 표 2는 각기 다른 플루토늄 조성비를 갖는 핵연료 물질들에 대하여 위에서 정한 세 지표로 비교한 것이다. 특히, 토륨 핵연료 주기를 갖는 RTF와 KTF의 블랭킷에서 핵확산 저항성에 있어 BCM, TG, SNS 모든 지표에서 유리한 면을 보였다. 그러나 MOX와의 비교에서는 큰 차이를 보이지 못 했다. 따라서 이 지표들만으로 핵확산 저항성을 표현하는 것은 부족함을 알 수 있다. 토륨 핵연료를 사용하는 RTF와 KTF에서는 생성되는 플루토늄의 총량이 월등히 적으므로 총량과 연계된 새로운 종합적인 지표 개발이 필요함을 확인하였다.

표 3 플루토늄 조성에 따른 BCM, TG, SNS

	PWR	CANDU	MOX	RTF		KTF	
				Seed	Blanket	Seed	Blanket
Burnup (GWD/THM)	33	7	33	30	100	40	100
Pu-238	0.024	0.00095	0.019	0.065	0.120	0.031	0.077
Pu-239	0.584	0.6753	0.404	0.465	0.383	0.481	0.418
Pu-240	0.240	0.2577	0.321	0.225	0.150	0.268	0.178
Pu-241	0.112	0.05326	0.178	0.155	0.147	0.142	0.155
Pu-242	0.039	0.0128	0.078	0.090	0.201	0.079	0.172
BCM(kg)	14.50	12.78	15.69	14.26	15.45	14.07	15.20
TG(W/kg)	12.58	3.76	13.84	41.68	72.66	17.59	45.77
SNS(MBq/kg)	0.416	0.261	0.726	0.527	0.790	0.407	0.656

3.3 핵변환 가능성

장수명 핵분열 물질(LLFP)에 대한 핵변환 지표는 해당 원소들의 물량변화로 쉽게 계량되지만 장수명 희귀 액티나이드(LLMA)의 소멸 지표는 쉽게 판별할 수 없다. 초우라늄(Transuranics, TRU) 원소들의 붕괴사슬에서 알 수 있듯이 많은 딸핵종(Daughter Nuclide)들의 방사성 붕괴와 핵분열이 동반하기 때문에 소멸 지표를 간단히 정리할 수 없다.

LLMA는 원자로 내에서 직접 분열되지 않고 중성자 포획에 의하여 핵분열성 핵종으로 핵변환된 후 핵분열한다. 열중성자 원자로에서 위와 같은 반응을 하는 주된 원인은 Np-237, Am-241, Am-243이 열중성자 영역에서 핵분열 단면적이 작고 포획 단면적이 크기 때문에 중성자 흡수에 의해 생성된 딸핵종 Pu-239, Am-242m, Cm-245가 열중성자 영역에서 핵분열 단면적이 모핵종보다 크기 때문이다.

장수명 핵종의 핵변환에 있어 핵변환 성능을 정량화할 수 있는 지표로 유효핵분열반감기(Effective Fission Half-Life, EFHL)를 핵변환 지표로 사용하였다. 유효핵분열반감기의 정의에 따라 식을 유도하여 보면 다음과 같다.

$$T_{EFHL} = \frac{\ln 2}{\sigma_f^i \Phi + \sum_j f_j \sigma_\gamma^i \frac{\sigma_f^j}{\sigma_t^j} \Phi + \sum_k \lambda_i^{i \rightarrow k} \frac{\sigma_f^k}{\sigma_t^k}}$$

그림 4는 핵연료 주기에 따른 유효핵분열반감기(EFHL)를 보여주고 있다. 핵연료마다 EFHL이 약간의 차이는 보이나 대체로 비슷한 반감기를 갖는다. 이는 열중성자로라는 한정적인 요인 때문이지만 고속로나 가속구동 원자로인 경우에는 EFHL이 LLMA의 핵변환성을 더욱 확실하게 나타낼 수 있을 것이다.

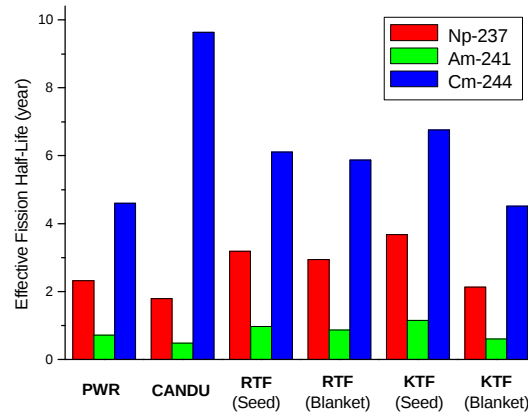


그림 4 핵연료 주기에 따른 EFHL

4. 방사성 독성 평가

많은 원자로와 핵연료가 액티나이드의 핵변환을 위해서 연구되었다. 핵변환을 하는 주된 이유는 장기간 방사성독성을 가지는 액티나이드 핵종을 소멸하여 방사성독성을 줄이는데 있다. 액티나이드의 핵변환을 연구하기 위하여 지금까지 방사능독성을 사용하였다. 이전의 핵변환 연구에서는 방사성독성을 3가지 Reference Dose에 근거하여 분석하였다. : Maximum Permissible Concentration(MPC), Equivalent Cancer Dose, Annual Limit on Intake(ALI) 그러나 방사성독성의 분석은 다소 복잡하고 방사성독성이 시간에 의존하기 때문에 방사성독성의 비교는 쉽지 않았다. 이번 연구에서는, 방사성 독성을 쉽게 평가하고 비교하기 위하여 ALI에 근거한 액티나이드 핵종의 새로운 방사성독성 지수를 사용하였다.

4.1 ALI에 근거한 방사성독성 지수

ICRP에서 권고한 ALI에 근거하여 방사성 독성 지수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R(t) = \frac{A(t)}{ALI} = \frac{\lambda N(t)}{ALI}$$

여기서 $R(t)$ = 시간 t 에서의 방사성독성

$A(t)$ = 시간 t 에서의 방사능

ALI = 연간섭취한도

λ = 붕괴 상수

$N(t)$ = 시간 t 에서의 핵종수

4.2 시간 적분 방사성독성 지수

시간에 대한 적분은 시간 종속적인 변수로부터 시간 독립적인 지수를 유도할 수 있는 한가지 방법이다. 여기서 시간 적분값 또는 시간 평균값을 얻기 위해 무한 시간 간격(0년에서 ∞ 까지) 또는 부분 시간 간격(0년에서 1×10^4 년까지 또는 1×10^4 년에서 1×10^8 년까지)에 대해 $R_j(t)$ 를 적분하였다. 무한 시간 간격에 대한 시간 적분 $R_j(t)$ 값은 모핵종 j 로부터 발생하여 인간에 끼치는 전체 방사성독성과 동일하다. 부분 시간 간격에 대한 시간 적분 $R_j(t)$ 값은 인류의 생존 기간동안에 영향을 줄 수 있는 방사성독성을 표현한 것이다.

무한 시간 간격 0년에서 ∞ 년까지 $R_j(t)$ 의 시간 적분값은 Ultimate Radio-toxicity Index, I_{Uj} 라 한다.

$$I_{Uj} = \int_0^{\infty} R_j(t) dt$$

방사성독성 연구에 있어서 유리화 폐기물의 수명은 중요하다. 몇 천년이 수명으로 제안되지만 시간에 대한 관점을 만년으로 고려하는 것이 적절하다. 그래서 단기간 위험도 평가를 위해서 0년에서 1×10^3 년으로 시간 간격을 정하였다. 이 시간 간격동안 적분된 총 방사성독성 지수를 Short-term Radio-toxicity Index, I_{Sj} 라 한다.

$$I_{Sj} = \int_0^{1 \times 10^3 y} R_j(t) dt$$

I_{Sj} 는 방사성 핵종이 유리화 폐기물에 있는 동안의 총 방사능을 나타낸다. 또 다른, 시간에 대한 관점으로서 $Np-237$ 과 모든 딸핵종이 안정 핵종으로 될 때까지의 시간과 동일한 천만년(1×10^6)을 선정하였다.

1×10^3 년에서 1×10^6 년까지의 장기간동안 적분된 총 방사성독성 지수를 Long-term Radio-toxicity Index, I_{Lj} 라 하고 정의는 다음과 같다.

$$I_{Lj} = \int_{1 \times 10^3 y}^{1 \times 10^6 y} R_j(t) dt$$

I_{Lj} 는 유리화 폐기물이 파괴된 후 인간에게 영향을 미칠 수 있는 총 방사성독성을 나타낸다.

그림 5는 방사성독성 $R(t)$ 를 단 · 장주기로 시간 적분한 지수값 I_S , I_L 를 나타낸 것으로 시간 종속적인 변수로부터 시간 독립적인 지수로 전환함으로써 방사성독성 판별을 쉽게 할 수 있다.

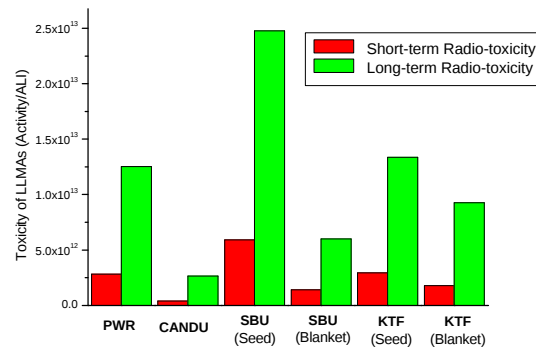


그림 5 시간 적분 방사성독성 I_S , I_L

5. 경제성 평가

토륨 핵연료의 장점 중에서 핵연료주기 경제성 향상을 평가하기 위하여 핵연료주기 비용 중에서 선행 핵연료주기 비용에 한해서만 비교, 평가하였다. 선행 핵연료주기 비용은 전력 1 kWh를 생산하는데 드는 비용, 즉 발전단가를 산출함으로서 정량화할 수 있다. 우라늄 핵연료와 토륨 핵연료를 이용한 RTF, WASB, KTF의 선행 핵연료주기 비용을 원료, 변환, 농축, 성형가공의 단계별로 각각 비교하고 주기별 비용을 비교함으로서 핵연료 경제성을 평가하였다.

핵연료주기는 우라늄광산에서 원자로심에 장전할 핵연료를 성형가공하기 까지의 과정과 사용후 핵연료를 원자로심에서 인출한 연후 이 연료를 저장하거나 또는 재처리 및 재사용하는 등 사용후 연료의 사후처리과정의 두가지로 구분된다. 전자는 선행 핵연료주기(front-end fuel cycle)라 하며 후자는 후행 핵연료주기(back-end fuel cycle)라 한다. 본 논문에서는 선행 핵연료주기에 대해 논의하기로 한다.

5.1 경제성 평가 자료

토륨 핵연료주기의 경제성을 평가하기 위하여 사용한 자료는 다음과 같으며 선행 핵연료주기 비용을 원료, 변환, 농축, 성형가공의 단계별로 각각 비교하고 주기별 비용을 비교함으로서 핵연료 경제성을 평가하였다. 핵연료주기 비용은 단위비용을 발전량으로 나누어 할인율을 적용하여 평준화 비용을 구하였다.

표 4 Fuel cycle data and unit prices

Item	Lead Time	Loss factor	Unit Prices
Fuel purchase	24 months		
- Uranium			\$ 50/kg
- Thorium			\$ 85/kg
- Zirconium			\$ 30/kg
Conversion	18 months	0.5 %	\$ 8/kg U
Enrichment	12 months	0.25 %	\$ 110/SWU
Fabrication	6 months	1.0 %	\$ 275/kg U

RTF, WASB, KTF의 원료, 변환, 농축, 성형가공의 단계별 계산 자료 및 비용을 표 5에서 표 8까지로 정리하였다. 핵연료주기 비용을 계산하기 위해서는 우선 각 부분의 비용규모와 그 발생시점을 확인하여 원자로 특성에 따른 계산에서 얻어지는 각 부분의 연료 필요량은 핵연료주기 여러 단계의 손실률을 감안하여 보정해 주었다. 부문별 비용을 계산하기 위해 단위비용을 곱하였다.

표 5 원료 비용 비교

		Ore				
Fuel		Enrich	kg/assy.	Unit Cost \$/kg	Total Cost \$/assy.	LTI years
All U		0.71	4,287	50	214,356	2
RTF						
Seed	U	0.71	2,422	50	121,125	2
	Zr	1	68	30	2,048	2
Blanket	U	0.71	895	50	44,747	2
	Th	1	229	30	19,492	2
total			3,615		187,412	
WASB						
Seed	U	0.71	2,961	50	148,041	2
	Zr	1	83	30	2,504	2
Blanket	U	0.71	826	50	41,304	2
	Th	1	212	30	17,993	2
total			4,082		209,841	
KTF						
Seed	U	0.71	1,315	50	65,766	2
	Zr	1	32	30	969	2
Blanket	U	0.71	2,028	50	101,376	2
	Th	1	382	30	11,458	2
total			3,757		179,568	

LTI: Lead Time to Irradiation

표 6 핵연료 변환 비용 비교

		Conversion				
Fuel		kg/assy. (feed)	kg/assy. (prod.)	Unit Cost \$/kg	Total Cost \$/assy.	LTI years
All U		4,287	4,266	8	34,126	1.5
RTF						
Seed	U	2422	2,410	8	19,283	1.5
	Zr	68	68	0		1.5
Blanket	U	895	890	8	7,124	1.5
	Th	229	228	0		1.5
total		3,615	3,597		26,407	
WASB						
Seed	U	2,961	2,946	8	23,568	1.5
	Zr	83	83	0		1.5
Blanket	U	826	822	8	6,576	1.5
	Th	212	211	0		1.5
total		4,082	4,062		30,144	
KTF						
Seed	U	1,315	1,309	8	10,470	1.5
	Zr	32	32	0		1.5
Blanket	U	2,028	2,017	8	16,139	1.5
	Th	382	380	0		1.5
total		3,757	3,739		26,610	

표 7 핵연료 농축 비용 비교

		Separative Work				
Fuel		Enrich	SWU/ assy.	Unit Cost \$/SWU	Total Cost \$/assy.	LTI years
All U		4.51	3,181	110	349,962	1
RTF						
Seed	U	20.00	2,339	110	257,308	1
	Zr	1	0			1
Blanket	U	15.00	839	110	92,254	1
	Th	1	0			1
total					349,563	
WASB						
Seed	U	20.00	2,859	110	314,487	1
	Zr	1	0			1
Blanket	U	15.00	774	110	85,156	1
	Th	1	0			1
total					399,643	
KTF						
Seed	U	6.00	1,080	110	118,799	1
	Zr	1				1
Blanket	U	10.00	1,794	110	197,327	1
	Th	1				1
total					316,126	

표 8 핵연료 성형가공 비용 비교

		Fabrication						
Fuel		kg/assy. (feed)	kg/assy. (prod.)	Hardware Cost \$/assy.	Process Cost \$/kg	QA + Total safety Cost \$/assy.	LTI years	
All U		462	457	25,135	192.5	12,568	125,675	0.5
RTF								
Seed	U	56	56		154.0		8,578	0.5
	Zr	68	67	11,576	154.0	5,788	27,722	0.5
	U	28	28		192.5		5,304	0.5
	Th	228	226	16,072	192.5	8,036	67,593	0.5
	total	380	376	27,649		13,824	109,196	
WASB								
Seed	U	69	68		154.0		10,484	0.5
	Zr	83	82	12,568	154.0	6,284	31,511	0.5
	U	26	25		192.0		4,896	0.5
	Th	211	209	12,568	192.0	6,284	58,990	0.5
	total	388	384	25,135		12,568	105,881	
KTF								
Seed	U	97	96		154.0		14,923	0.5
	Zr	32	32	12,568	154.0	6,284	23,826	0.5
	U	95	94		192.0		18,288	0.5
	Th	380	376	12,568	192.0	6,284	91,816	0.5
	total	604	598	25,135		12,568	148,853	

5.2 핵연료주기 비용 계산 방법

모든 선행 핵연료주기 비용은 총 비용지출의 현재 가치에 근거하여 계산된다. 그러므로 원자로 내에서 사용될 시점에서의 총 핵연료비용을 평가하기 위해서는 서비스가 개시되는 시점에서의 비

용을 산출해야한다.

$$FC = C \cdot (1 + r_y)^{t_i}$$

여기서 FC는 원자로내에서 사용될 시점에서의 미래 비용이고 C는 실제 비용, r_y 는 할인율, t_i 는 비용이 지출된 시점과 사용 시점사이의 시간 간격이다. 할인율은 5 %로 가정하였으며 플랜트 효율과 이용율은 각각 33.71 %와 95%로 가정하였다. 핵연료집합체 및 플랜트 자료는 표 9로 정리하였다.

표 9 Plant data

Fuel	Assembly #	Power MWth	Plant efficiency %	Availability %	Refueling Length months	Cycle time years
All U	193	3400	33.71	95	1.5	4.5
RTF	Seed	157	33.71	95	1.5	3
	Blanket	157				10
WASB	Seed	96	33.71	95	1.5	3
	Blanket	97				10
KTF	Seed	39	33.71	95	1.5	3
	Blanket	118				10

핵연료주기에 따른 각 과정마다의 전력생산 비용을 표 10으로 나타내었다. 표 10의 내용 중 초기 3년 동안의 비용은 씨드를 교체하기 전 즉, 3번째 주기까지를 나타낸 것이고 다음 3년 동안의 비용은 씨드를 재장전 했을 때의 선행 핵연료주기 비용을 나타낸 것이다.

표 10 선행 핵연료주기 비용

Component	Cost (mills/kWh)			
	All U	RTF	WASB	KTF
Ore	1.17	1.41	1.65	1.52
Conversion	0.18	0.19	0.23	0.22
Enrichment	1.83	2.50	2.98	2.55
Fabrication	0.64	0.76	0.77	1.17
Total for front-end	3.82	4.86	5.63	5.46

그림 6은 씨드 핵연료 교체전까지의 선행 핵연료주기 비용을 나타낸 것으로 토륨 핵연료가 우라늄 핵연료에 비해 비용이 높게 평가되었다. 이는 씨드와 블랭킷의 농축도가 우라늄 핵연료주기 보다 높아 농축공정 비용이 높고 씨드와 블랭킷의 핵연료집합체를 분리하여 가공하기 때문에 성형가공 비용의 상승을 초래하기 때문이다. 그러나 블랭킷 장전기간 즉, 씨드를 3번 재장전하고 블랭킷은 재장전을 안 했을 때의 기간 9년 동안의 총 선행 핵연료주기 비용을 비교하면 토륨 핵연료의 선행 핵연료주기 비용이 우라늄 핵연료 비용보다 낮게 평가될 것이다.

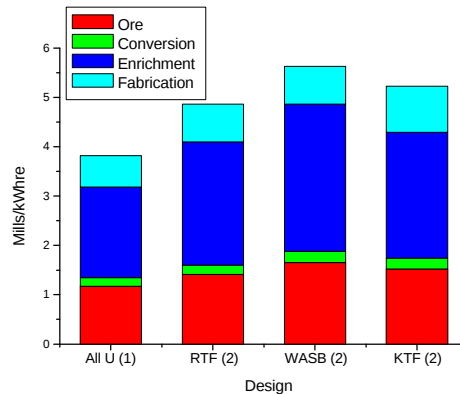


그림 6 초기 3년 동안의 핵연료 비용

6. 결 론

여러 성능지수는 핵연료의 성능 평가 지표(증식, 핵변환, 핵확산 저항성, 방사성독성)에 대하여 정량적인 판별 기준을 제공하였고 기존 상업로와 비순환 토륨 핵연료에 성능 지수를 적용함으로써 설계안 별로 결과치를 비교함으로써 설계의 우수성을 비교할 수 있었다.

핵주기 특성을 핵연료 증식성, 핵확산 저항성, 핵변환 특성, 방사선 위해도에 대하여 평가한 결과 다음과 같은 특징을 얻었다. 첫째, 핵연료 증식성에 있어 토륨 핵연료 주기를 사용하는 블랭킷에서 FIR과 FG가 일반 상업로보다 높은 증식성을 가졌다. 둘째, BCM, TG, SNS는 토륨 핵연료 주기를 갖는 RTF와 KTF에서 핵확산 저항성에 있어 유리한 측면을 보였다. 셋째, 핵변환 평가에서는 핵연료마다 EFHL이 약간의 차이는 보이나 대등한 결과를 얻었다. 마지막으로 방사선 위해도는 RTF와 KTF의 씨드에서 상대적으로 높은 방사성독성을 보였다.

또한 토륨 핵연료를 이용한 RTF, WASB, KTF의 선행 핵연료주기 비용을 원료, 변환, 농축, 성형가공의 단계별로 각각 비교하고 주기별 비용을 비교함으로써 핵연료 경제성을 평가하였다. 핵연료주기 비용 분석 결과로부터 경제적 관점이 핵연료 개발에 있어서의 중요한 요소를 확인할 수 있었다. 씨드 핵연료 교체전까지의 선행 핵연료주기 비용을 비교하면 토륨 핵연료가 우라늄 핵연료에 비해 비용이 높게 평가된다. 이는 씨드와 블랭킷의 농축도가 우라늄 핵연료보다 상당히 높고 씨드와 블랭킷의 핵연료집합체를 분리하여 가공하기 때문에 비용 상승을 초래하기 때문이다.

참고 문헌

1. 김관희, 김명현 “토륨 핵주기를 이용하는 고전환 압력관형 경수로에 대한 핵주기 특성” 2000 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 2000
2. 김 창효 “핵공학 개론” 한국 원자력 학회, 1989
3. 류석진 “미래형 핵연료주기의 경제성 연구”, 석사학위논문, 1998
4. Kim, K.H., Kim, M.H. "Performance Evaluation of High-Conversion Thorium Fuels for PWR Application" Proc. ANS/ENS Int. Mtg. Washington DC, U.S.A, 2000
5. Kim, M.H., Woo, I.T. "Once-Through Thorium Fuel Cycle Options for the Advanced PWR Core", Proc. ANS Int. Top. Mtg. on Advances in Reactor Physics, Pittsburgh, PA, USA, XV.C.3, 1-11, 2000
6. Galperin, A., et al. "A Thorium-Based Seed-Blanket Fuel Assembly Concept to Enhance

PWR Proliferation Resistance", Proc. Int. Conf. on Future Nuclear Systems, Jackson Hole, WY, USA, #532, 1-8, 1999

7. Busse, M., Kazimi, M.S. "Thermal and Economic Analysis of Thorium-Based Seed-Blanket Fuel Cycles for Nuclear Power Plants", MIT-NFC-TR-025, MA, USA, 2000
8. Wang, D., Driscoll, M.J., Kazimi, M.S. "Design and Performance Assessment of a PWR Whole-Assembly seed and Blanket Thorium Based Fuel Cycle", MIT-NFC-TR-026, MA, USA, 2000