

APR-1400 원전을 위한 비균질 토륨핵연료 노심설계 방안연구

배 강목, 김 관희, 김 명현
경희대학교

A study on APR-1400 core design for heterogeneous thorium fuel

Bae Kang-Mok, Kim Kwan-Hee, Kim Myung-Hyun
KyungHee Univ.

요 약

PWR에의 토륨 핵연료 운용방안의 하나로 제안되었던 KTF 설계안을 바탕으로, APR-1400 노심에 맞게 설계변수에 따른 최적화를 수행하였다. 최적화 방향은 핵확산 저항성 증대와 경제성 제고를 목표로 하였으며 최적화의 설계 기준은 핵확산 저항성의 경우 SNS, TG, BCM, Toxicity를 기준으로 하고 경제성은 FEI라는 새로운 지수를 사용하여 두 가지 모두 최대가 되는 방향으로 최적화 하였다. 최적 설계안을 이용하여 APR-1400의 노심을 설계하는 과정을 여러 측면에서 검토하였으며, 비균질 노심에 토륨핵연료집합체를 사용한 설계안이 안전성 및 경제적 타당성을 갖음을 확인하였다.

Abstract

An optimization of KTF thorium fuel assembly design was performed on the basis of the design parameter studies. Optimization goals were to make the core have both proliferation resistance and fuel cycle economics. Four kinds of proliferation resistance indexes were used; SNS, TG, BCM, Toxicity. A new index, FEI was regarded as a limiting index for the maximization of fuel cycle economics. Optimized thorium fuel design was applied for APR-1400 reactor core. Nuclear core design procedures were examined to solve the thorium fuel reactor problems. It was shown that heterogeneous thorium fuel core option is acceptable in safety and economics aspects.

1. 서 론

토륨핵연료 주기의 연구는 경제성 및 핵확산 저항성을 높이는 목적으로 근래에 활발한 연구가 진행중이다. 토륨 핵연료주기의 연구목표는 현재의 PWR 비순환 우라늄 핵연료 주기보다 경제성을 높이기 위하여 장주기 노심으로 설계방향을 모색하고 있으며 토륨핵연료를 사용함으로써 핵확산 저항성을 향상시킨다. 이러한 장점을 이용하려는 연구가 현재 국제적으로 진행되고 있는데 구체적으로 예를 들면 이스라엘 Ben-Gurion 대학의 RTF설계안인 SBU(Seed Blanket Unit)개념이나 MIT의 WASB(Whole-Assembly Seed and Blanket), 그리고 경희대학교의 KTF 설계안 등이 연구되어 왔다. 본 연구에서는 이전에 연구하였던 KTF 설계안을 바탕으로 여러 가지의 설계변수 연구를 통하여 핵확산 저항성과 경제성을 높일 수 있도록 APR-1400 원자로를 대상으로 핵연료집합체 설계안의 최적화를 수행하였다. 이 설계안을 바탕으로 노심을 핵설계하여 토륨 핵연료집합체를 이용하는 노심의 타당성을 평가하였다.

2. 전산체계 및 특성

균정수 생산을 위한 코드로 CASMO-3나 HELIOS 사용을 고려할 수 있는데 CASMO-3는 토륨 라이브러리를 갖고 있지 않다. CASMO-4 버전에는 토륨 라이브러리를 포함하고 있으나 상업용으로 배포되어 국내 일부에서만 제한적으로 사용하므로 본 계산에서는 HELIOS 1.5 버전을 균정수 생산에 사용하였다. HELIOS1.5 버전은 우라늄 노심에 대하여 검증이 확인된 바 있으며, 토륨 라이브러리의 확인을 위하여 MIT에서 수행한 WASB와 SBU 설계안에 대한 CASMO-4와 MOCUP 계산결과를 기준으로 비교하였다. 계산결과 Th-232와 U-233 핵종에 대하여는 HELIOS1.5가 CASMO-3보다 MOCUP 결과에 더 근접함을 보였고, Plutonium 핵종은 HELIOS1.5가 CASMO-3보다 오차가 약간 크게 나타났다. Th-232에서 전환된 U-233 핵종의 경우 HELIOS1.5 버전은 MOCUP에 비하여 49.38 [MWD/kgHM]에서 1.2%, 82.19 [MWD/kgHM]에서 1.5%로 비교적 정확하게 예측하고 있음을 보였다.

본 연구에서 사용하는 토륨핵연료집합체 모델은 씨드와 블랭킷이 1:3의 비율로 장전되고 각각의 핵연료 조성이 서로 큰 차이를 갖는다. 이는 씨드와 블랭킷의 경계면에서 비균질성이 커져 균정수 생산시 이를 고려해야 할 것으로 예상하여 color-set 균질화방법과 단일 핵연료집합체별 균질화방법을 비교하였다. 단일 핵연료집합체 단위로 균질화한 경우 최대오차는 2.23%, color-set으로 균질화한 경우는 1.34%로 나타났으며, 두 방법상의 차이는 크지 않았다. Color-set 균질화를 수행하면 더 정확한 균정수를 얻을 수 있으나 균질화 방법상의 복잡성과 시간의 제한점을 고려하여 핵연료집합체별로 균질화하는 방법을 택하였다. 또한 노심내 씨드와 블랭킷을 장전하므로 PWR 노심과의 중성자 누출률이 다를 것으로 예상하여 다음과 같은 계산을 수행하였다. 신핵연료 장전후 3주기동안 연소계산을 color-set 모듈에 대하여 2-D HELIOS로 계산을 수행하고 HELIOS에서 생성한 균질화된 핵단면적을 이용하여 노심장전후 3-D 계산을 수행하였다. 두 계산결과를 각 배치별 방출시점에서 증배계수값을 비교하여 color-set 모듈 계산과 실제 노심과의 차이를 계산하였다. 배치가 늘어날수록 중성자 누설이 약간씩 증가하며 차이를 보이지만 평균적으로 8%의 중성자 누설이 있음을 보였다. 본 계산에서는 ARP-1400 원자로를 기준으로 하였는데 KTF 설계안을 이용한 노심 설계보다 노심이 1.5배 커졌으므로 중성자 누설률은 감소할 것으로 예상되나 보수적인 측면에서 8%를 적용하기로 하였다.

3. 변수해석에 의한 최적화 설계안 선정

현재의 KTF 설계안은 핵연료 증식성 측면에서 최적화된 설계이다. 그러나 신형 핵연료에 대한 요구 사항은 시대에 따라 변하며 지금은 핵연료의 증식성보다는 환경 친화적이면서 비핵확산에 유리한 핵연료의 개발에 초점을 두고 있다. 이에 KTF 설계안을 환경 친화적이고 비핵확산에 유리한 핵연료 설계안으로 보완, 수정 하고자 하였다. 변수해석에 따른 설계인자 분류 및 변수해석에 필요한 변수의 조합은 다음과 같이 하였다. 씨드 핵연료 종류 변화에 따라 크게 나누고 V_m/V_f 변화(핵연료의 반경 변화), Fissile 함유량 변화(핵연료의 농축도 및 함유량)에 따라 경우의 수를 정하였다. 경우의 수를 정하는 방법은 기존의 변수해석에서 사용한 방법을 선택하였으며 각 변수의 수치는 대표적인 토륨핵연료의 수치를 택하였다. 이번 변수해석에서 고려되지 않는 설계변수는 씨드 및 블랭킷의 Gap, Cladding, Pitch이며 각 크기는 SBU 및 WASB의 수치를 사용하였다.

이번 변수해석에서는 집합체 모듈모형을 계산 모델로 선정하여 계산을 실행하였다. 단위 집합체 모듈모형에 사용된 각 설계 변수는 APRI400의 수치를 사용하였으며 변수해석을 위한 핵연료 종류는 씨드 핵연료 U/Zr과 UO_2 를 블랭킷 핵연료 $(U+Th)O_2$ 를 각각 선정하였다. 그림 1은 변수해석에 사용한 집합체 모듈모형이다.

최적 설계안 선정을 위하여 세 가지 항목 핵확산저항성, 방사성독성, 핵연료의 경제성(효

율성)으로 나누어 각각 평가하고 최적의 경우를 선정하였다.

3.1 핵확산저항성에 유리한 설계 방안 설정

핵확산저항성을 평가하는 지수는 SNS(Spontaneous Neutron Source rate), TG(Thermal heat Generation), BCM(Bare Critical Mass)을 사용하였다. SNS의 경우 씨드 반경, 씨드 농축도, 블랭킷의 우라늄 함유량이 증가할수록 감소한다. 블랭킷 반경, 블랭킷 농축도가 증가할수록 SNS는 증가한다. SNS는 플루토늄 조성 중 Pu-238,240,242의 짝수 원소들이 주도적인 역할을 하고 있으며 씨드의 반경을 증가시켰을 경우 짝수 플루토늄 원소들의 구성비가 약 1~2% 정도 감소함을 볼 수 있다. 블랭킷의 농축도가 증가할 경우는 짝수 플루토늄 원소들의 구성비가 약 3% 증가하였다.

3.2 방사성 독성에 유리한 설계 방안 설정

방사성 독성을 평가하는 지수는 I_s (Short-term Integral Toxicity)와 I_L (Long-term Integral Toxicity)을 사용하였다. I_s 에 대하여 변수해석 결과를 해석하면 다음과 같다. 씨드 반경이 증가할수록 독성(I_s)은 증가한다. 씨드 농축도, 블랭킷 반경, 블랭킷 농축도, 블랭킷 우라늄의 함유량이 증가할수록 독성(I_s)은 감소한다. 방사성 독성을 장·단기로 구분할 경우 단기에 영향을 주는 악티나이드는 Am-241, Am-243 이며 장기적 영향을 주는 악티나이드는 Np-237, Cm-242등이다. 씨드의 반경 증가는 스펙트럼의 경화를 가져와 악티나이드 중 Am의 생성을 감소시키는 영향을 주고 다른 설계 변수의 증가는 악티나이드의 생성을 더 증가시켜주는 것으로 보여진다.

3.3 경제성에 유리한 설계 방안 설정

핵연료의 경제성(효율성)을 평가하는 지수는 FEI(Fissile Economic Index)를 사용하였다. 변수해석의 결과 값으로 본 각 설계변수의 영향은 다음과 같다. 씨드 반경, 씨드 농축도, 블랭킷 반경, 블랭킷 농축도, 블랭킷 우라늄의 함유량 즉, 모든 설계변수의 증가는 FEI를 감소시킨다. 설계 변수의 증가는 장전되는 우라늄 양의 증가를 뜻하고 이는 경제성의 감소를 의미한다. 핵연료의 반경이 증가하면 스펙트럼이 경화되어 핵연료에 포획되는 중성자의 수가 많아져 핵분열성 물질의 생성을 증가시킨다. 그러나 스펙트럼의 영향보다 반경 증가로 인해 장전되는 핵연료의 증가가 핵연료의 경제성에 더 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났다.

3.4 최적설계안의 선정

선정 과정에 있어서 모든 경우가 PWR보다 핵확산 저항성, 방사성독성, 핵연료의 경제성에서 우수하기 때문에 최적 설계안 선정에서 PWR보다 좋아야 한다는 전제 조건을 모두 만족하였다. 종합적으로 핵확산저항성, 방사성독성, 핵연료의 경제성(효율성)에 최적화된 설계안을 선정하면 씨드와 블랭킷의 반경이 가장 작은 경우가 선정되었다. 선정된 최적 설계안은 핵확산 저항성, 방사성독성, 핵연료의 경제성은 PWR보다 모두 우수하였고 현재의 KTF와 SBU보다 우수한 부분이 있다. 그러나 WASB 설계안보다 핵확산 저항성 면에서 좋지 않았다. 그러나 이번 최적 설계안 선정에서는 핵연료의 경제성을 최우선 관점으로 보았기 때문에 핵확산 저항성, 방사성독성은 설계안 선정의 제한치 역할을 하였다. 최적 설계안의 설계 변수를 표 2로 나타내었다.

4. 노심구성의 특징 및 계산결과

설계대상 노심은 APR-1400을 기준으로 하였으며 씨드 핵연료집합체는 3배치로 18개월마다 재장전되고 블랭킷 핵연료집합체는 토륨의 전환특성을 고려하여 9년동안 노심에 잔류시키는 핵주기 전략을 이용하였다.

그림 2는 최적화된 토륨핵연료 집합체설계안의 노심장전 모형이다. 블랭킷 핵연료집합체를 노심중앙에 두고 씨드와 블랭킷을 1:3으로 배열하였으며 반사체와 인접하는 구역은 모두 블랭킷으로 장전하였다. 배치별 농축도 설정은 color-set 모형으로 씨드와 블랭킷을 1:3으로 장전하여 3주기동안을 연소시킨 후 각 주기에서 방출되는 농축도를 갖도록 once burned, twice burned 핵연료집합체의 농축도를 결정하였다. 이렇게 씨드 핵연료집합체의 농축도를 결정하는 경우는 블랭킷의 연소효과가 반영되었다. 즉, 초기 노심에서 블랭킷은 모두 신핵연료이므로 앞의 방법으로 씨드의 배치별 농축도를 계산하여 노심에 장전하면 주기길이가 길어지게 되는데 주기길이의 증가량은 1주기 말에서 중배계수가 약 10% 정도 커졌다. 이 효과를 고려하여 color-set에서 주기계산을 수행시 무한중배계수를 10% 낮게 잡았으며 color-set 모듈에서의 중성자 누설률은 8%로 보수적으로 적용하였다. 두가지 경우를 보수적으로 적용한 이유는 블랭킷 내에서 3주기가 지나면 U-235는 거의 소모되고 Th-232에서 전환된 U-233의 소모만 있게되어 주기길이가 조금씩 짧아지는 경향을 보였다. 그러므로 초기 주기길이는 재장전 노심을 고려할 때 목표 연소도보다 약간 길게 하는 것이 목표 연소도를 유지하는 재장전 노심설계에 유리하기 때문이다. 본 연구의 연소도 목표는 씨드 3배치동안 55,000 [MWd/kgHM]이고 이를 만족하는 초기 농축도값은 신핵연료 5.0 w/o, once burned 핵연료 3.0 w/o, twice burned 핵연료 1.6 w/o로 결정하였다. 씨드 핵연료집합체의 출력분포 비율이 크기 때문에 노심내 출력피크를 조절하기 위하여 가연성 독물질을 사용하였다. 가연성 독물질로는 일체형의 가돌리니아를 고려하였으며 씨드 핵연료집합체내 가연성 독물질은 가돌리니아 4.8w/o 농축도를 핵연료집합체에 따라 4, 8, 12개씩 가이드튜브관 주위에 사용하였다. 노심장전모형을 결정하여 노심계산을 수행한 결과 1 주기에서의 주기길이는 약 23,000 [MWd/kgHM] 정도로 길게 나타났는데 그 이유는 중성자 누설률을 보수적으로 적용하였고 배치별 농축도 결정시 블랭킷이 연소된 효과를 3주기에 대하여 적용하지 않았기 때문이다. 주기초에서 보른농도는 NoXe 상태에서 1945pcm으로 계산되었고, 그림 3에서 반경방향 상대출력 분포를 나타내었다. Fr 제한치를 1.58로 하였으나 주기초 신핵연료 집합체에서 1.72로 약간 높게 계산되었다. 반경방향 피크를 낮추기 위하여 씨드에서의 가연성 독물 사용을 최적화하여 핵연료집합체를 설계하면 충분히 설계 제한치 이내로 유지할 것으로 예상되었다. 핵연료봉의 축방향 출력분포는 그림 4에서와 같이 PWR의 특성과 거의 같고 최대값은 1.5를 넘지 않았다. 재장전 노심을 고려할 때 블랭킷 핵연료집합체는 1주기 연소후 고른 연소도 분포를 가지나 씨드 핵연료집합체는 신핵연료의 연소도가 크고 twice burned fuel의 연소도는 평균에 미치지 못하고 있는데 이 부분은 향후 씨드 핵연료집합체의 배치별 농축도 조절을 수행하면 재장전 노심을 위한 문제점은 없을 것으로 판단된다.

5. 결론

토륨을 사용하는 핵연료주기의 핵확산저항성과 경제성을 높이기 위한 최적화 설계변수들을 선정하여 각 변수들의 중요도를 결정하였다. 핵확산저항성을 증대시키려면 블랭킷내 UO_2 의 농축도를 감소시키거나 핵연료 반경을 감소시키는 경우가 가장 큰 효과를 나타내었다. 경제성을 증가시키기 위해서는 블랭킷이나 씨드의 반경을 감소시키는 경우가 최대로 나타났다. 최적 핵연료집합체 설계안을 APR-1400원자로에 적용하여 노심계산을 수행하였으며 노심 구성시 발생하는 문제점들을 해결하기 위한 방안을 제안하였다. 노심설계 계산결과는 향후 씨드 핵연료집합체의 농축도 조절, 가연성 독물 사용의 최적화를 통하면 재장전 노심설계가 가능함을 보였다.

참고 문헌

1. 김관희, 김명현, "비균질 토륨장전 노심의 핵설계 최적화 방안 연구", 2002 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 2002
2. KH. Kim, K.M. Bae, M.H. Kim "Optimization of Thorium-based Seed & Blanket Fuel Assembly Design for PWR", Proc. ANS Int. Mtg. Florida, USA, 2002
3. K.H. Kim and M.H. Kim "Performance Evaluation of High-Conversion Thorium Fuels for PWR Application" Proc. ANS/ENS Int. Mtg. Washington DC, U.S.A, 2000
4. M.H. Kim and I.T. Woo "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

Table 1. 설계변수 해석을 통해 얻어진 설계 최적화 방향

		Seed Radius	Blanket Radius	Seed Enrichment	Blanket Enrichment	UO2 Contents in Blanket
SNS	증가를 위한 변경 방향	↓	↑	↓	↑	↓
	지수 향상을 위한 설계변수 변경 순위	-3	+2	-1	+1	-2
TG	증가를 위한 변경 방향	↓	↑	↓	↑	↑
	지수 향상을 위한 설계변수 변경 순위	-1	+1	-2	+2	+3
BCM	증가를 위한 변경 방향	↓	↓	↓	↓	↓
	지수 향상을 위한 설계변수 변경 순위	-2	-1	-3	-4	-5
Is	증가를 위한 변경 방향	↓	↑	↑	↑	↑
	지수 향상을 위한 설계변수 변경 순위	-2	+1	-1	+2	+3
Ll	증가를 위한 변경 방향	↑	↓	↑	↑	↓
	지수 향상을 위한 설계변수 변경 순위	+3	-1	+2	+1	-2
FEI	증가를 위한 변경 방향	↓	↓	↓	↓	↓
	지수 향상을 위한 설계변수 변경 순위	-2	-1	-3	-4	-5

- 방향은 영향도가 작은 순위

+ 방향은 영향도가 큰 순위

Table 2. Optimized Fuel Assembly Parameters

Parameter	Optimized KTF Design	
	Seed	Blanket
Fuel Assembly Size [cm]	20.778	
Dimension [cm]	20.778	20.778
Fuel Material Composition	U/Zr metal alloy U enrichment : 5.0 w/o	(U+Th)O ₂ U volume fraction ~0.2 U enrichment < 20 w/o
Fuel Pellet Radius [cm]	0.325	0.3895
Gas Gap Thickness [cm]	No	0.0085
Cladding Thickness [cm]	0.03	0.057
Fuel Rod Radius [cm]	0.355	0.455
Fuel Cell Pitch [cm]	1.285	1.285
Core Volume Fraction	25	75

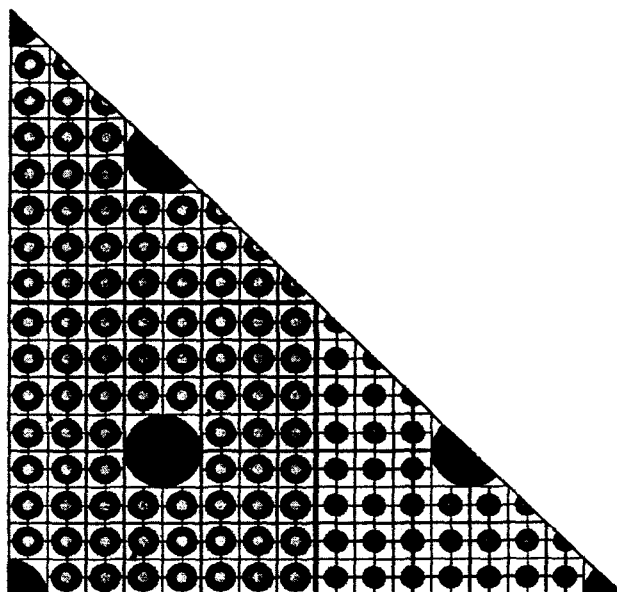


Figure 1. Color-set Module Geometry for parameter studies

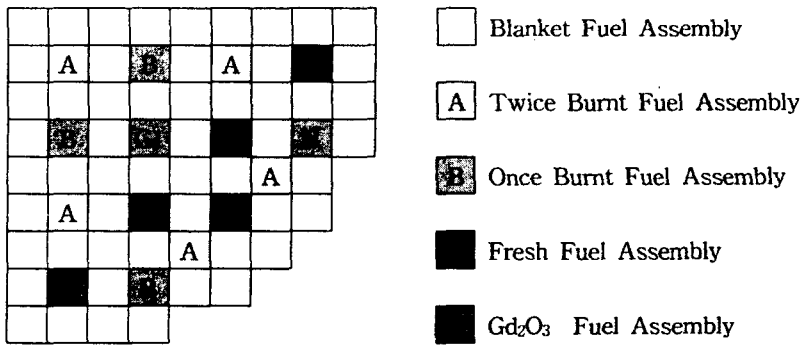


Figure 2. Loading Pattern of Quarter core

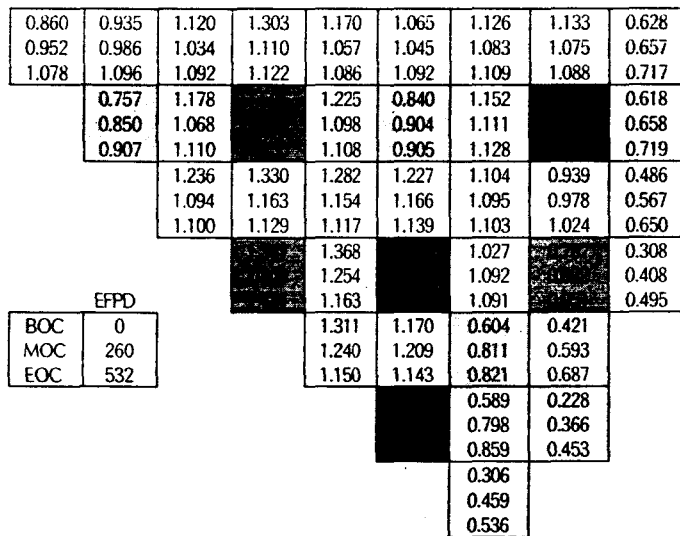


Figure 3. Radial Relative Power Distribution

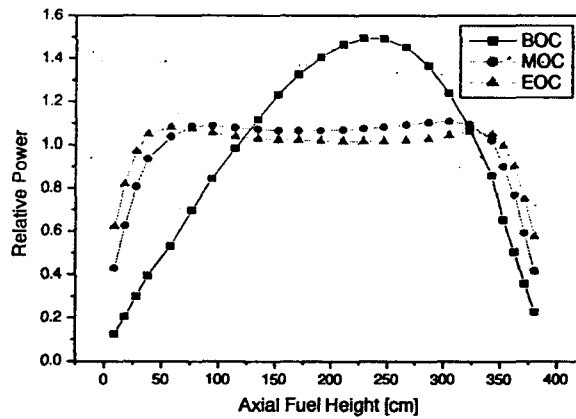


Figure 4. Axial Relative Power Distribution.