

2002 추계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

토륨핵연료를 이용한 비균질 노심 재장전설계 방안연구 A Study on Reload Core Design for Heterogeneous Thorium Fuel Core

배강목, 김관희, 김명현
경희대학교
경기도 용인시 기흥읍 서천리 1
주형국
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

토륨을 blanket으로 사용하는 seed blanket개념의 KTF 설계안에 대하여 APR-1400을 대상으로 최적화를 수행하였다. 최적화 목표는 상용로인 PWR보다 핵확산 저항성이 높고 경제성이 높게 설계하는 것이며 핵확산 저항성 지수와 경제성 평가 지수들을 이용하여 최적화를 수행하였다. 최적 설계안을 이용하여 APR-1400 노심을 대상으로 비균질한 노심설계를 수행하였다. Seed는 3 batch로 재장전되며 blanket은 1 batch로 seed 6주기(9년)동안 노심에 장전되는 주기전략을 택하였다. 초기노심에 대하여 장전모형과 BP등을 설계후 1:3의 비율로 노심에 장전한 결과 주기길이, Fq, 및 MTC 등을 계산한 결과 PWR과 유사한 노심설계가 가능함을 확인하였다. 6주기의 재장전 노심을 설계하였으며 blanket의 reactivity swing이 작을수록 재장전 노심설계가 유리하였다.

Abstract

A design optimization of heterogeneous seed and thorium blanket fuel assemblies was performed for APR-1400 core. Optimization goals are the maximization of both proliferation resistance and utilization of thorium fertile. KTF design was optimized based on sensitivity analysis on design parameters such as proliferation resistance and economic indices. Reload core design was tested for the application to advanced PWR, APR-1400. A three batch strategy was applied for seed 18 month cycle length and single batch was applied for blanket, which should be stayed in the core for up to 6 seed cycles(9 years). Feasibility of initial core design with thorium blanket was examined to check the safety concerns related to pin peaking and MTC. Reload core calculations were performed during 6 seed cycles. With flattened reactivity swing in blanket, design of reload core becomes more flexible.

1. 서론

핵비확산성은 근래의 원자력계에서 이슈가 되고 있으며, 제 4세대 원자로 설계개념에 중요한 요건으로 적용되고 있다. 핵비확산성을 증대시키기 위한 기술적 방안의 한가지로서 토륨핵연료 사용이 연구되고 있으며 토륨 핵연료를 PWR에 이용하는 연구는 외국의 경우 이스라엘 Ben-Gurion 대학의 RTF^[1] 설계와 MIT에서 제안한 WASB^[2](Whole Assembly Seed and Blanket) 설계안이 있고 국내에서는 본 연구팀이 수행중인 KTF^[3-4] 설계안이 있다. MIT에서는 WASB 설계안을 이용하여 18개월 주기길이의 PWR에 적용하는 연구^[5]가 수행중이고, 경희대학교에서도 KTF를 이용한 PWR 비균질 노심설계가 수행^[6]되고 있으며 두 연구는 각각의 특성을 가진 상호 보완적인 연구형태로 진행중이다. KTF 설계안을 바탕으로 여러 가지의 설계변수 연구를 통하여 핵확산 저항성과 경제성을 높일 수 있도록 APR-1400 원자로를 대상으로 핵연료집합체 설계안의 최적화를 수행하였다^[7]. 본 연구에서는 앞서 최적화된 KTF 설계안을 이용하여 APR-1400 노심설계를 수행하기 위한 설계방법을 탐색하고 재장전 노심설계를 수행하였다.

2. 핵연료집합체 최적화

2.1. 최적화 목표 및 최적화 방법

기존의 KTF는 핵연료 증식성(FIR)에 대해서만 최적화된 설계이다. 그러나 신형 핵연료는 핵연료의 증식성보다는 환경 친화적이면서 핵확산 저항성에 유리한 핵연료에 관심을 보이고 있다.

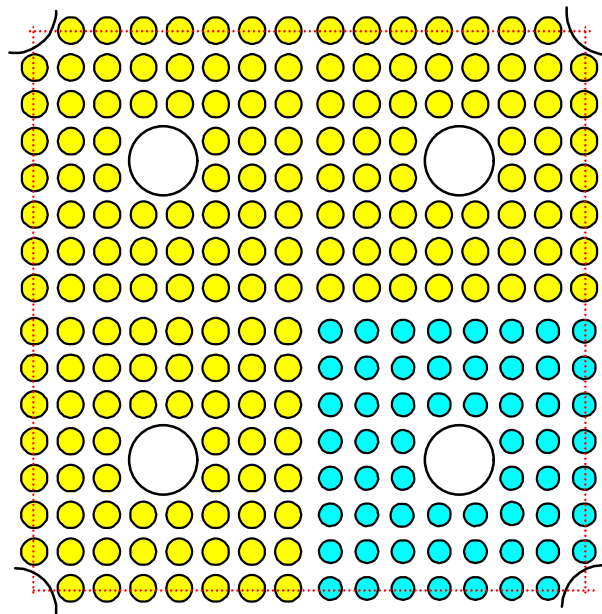


그림 1 Optimized KTF design for APR-1400

이에 기존의 KTF 설계안을 환경 친화적이고 핵확산 저항성을 갖는 핵연료 설계로 보완, 수정하고자 하였다. 그림 1은 변수해석을 위한 APR-1400의 핵연료집합체 모형이다. 기존 변수해석 결과를 바탕으로 새롭게 고려될 사항과 평가항목을 추가하여 최적화 설계를 위한 변수해석을 다시 수행하였다. 성능 평가 항목별로 최적화된 설계안을 선정하면 아래와 같다. Case 1과 Case 4는 핵확산 저항성, 방사성독성, 핵연료의 경제성은 PWR보다 모두 우수하였고 현재의 KTF와 SBU보다 우수한 부분이 있다. 그러나 WASB 설계안보다 핵확산 저항성면에서 좋지 않다. 이번 최적 Case 선정에서는 핵연료의 경제성을 최우선 관점으로 보았기 때문에 Case 1를 최적화된 설계안으로 하였다. 선정 과정에 있어서 모든 Case가 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 Case가 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 저항성과 방사성독성에 대해서는 설계기준 제한치를 만족하면 되고 경제성을 최적설계안의 설계 변수로 놓아 표 1로 정리하였다.

표 1 KTF 최적 설계안

Parameter	Seed	Blanket
Fuel Assembly Size [cm]	20.778	
Dimensions [cm]	20.778	20.778
Fuel Material Composition	U/Zr Metal alloy U enrichment 5 w/o	(U+Th)O ₂ U volume content ~20 v/o U enrichment < 20 w/o
Number of Fuel Rods	236	236
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
Moderator/Fuel Volume Ratio	3.78	2.10
Seed/Blanket Volume Fractions	25	75

2.2. 설계 목표를 만족시키기 위한 설계안 변경

변수해석을 통해 최적화한 토륨핵연료의 핵연료 집합체 설계안을 가지고 노심을 구성하였을 때 집합체 설계안에서 예상하지 않은 문제가 발생할 수 있다. 노심 설계에서 발생하는 문제를 해결하기 위한 방법으로 핵연료 집합체의 변경이 필요할 때 최적 설계안을 어떻게 변경할 것인가를 제시하였다. 만약, 핵확산 저항성에 유리한 설계로 변경을 원한다면 씨드 핵연료 반경과 블랭킷 핵연료 반경을 먼저 변경하는 것이 가장 좋다. 사용후 핵연료의 방사성독성에 유리한 설계로 변경을 원한다면 블랭킷 농축도를 먼저 변경하는 것이 가장 좋다. 씨드 핵연료 반경, 블랭킷 핵연료 반경, 씨드 농축도의 영향력은 비슷하다. 핵연료의 경제성에 유리한 설계로 변경을 하려면 블랭킷 핵연료 반경과 씨드 핵연료 반경을 먼저 변경하는 것이 가장 좋다.

3. APR-1400 노심설계방법

최적화된 설계안을 적용할 PWR로 APR-1400 노심을 선정하였다. APR-1400 노심은 18개월 주기길이를 갖는 차세대 원전으로 3983 MWth의 열출력을 갖는다. 표 2는 APR-1400원전의 노심 제원이다. Seed와 blanket으로 구성된 최적 KTF 설계안을 이용하여 APR-1400과 동급의 원자로 설계를 목표로 하였으며 초기노심과 재장전노심의 계산을 통하여 seed와 blanket을 노심설계에 적용하는 방법을 탐색하였다. 장전모형은 중성자 누설을 최소화하고 노심내 침투 붕출력을 최소로 유지하도록 설정하였으며 주기 운용은 seed의 경우 3 batch로 구성하고 blanket의 경우는 1 batch로 seed 6 주기(9년)동안 노심에 잔류하는 방법을 적용하였다. Blanket은 장전기간이 길어 노심에 미치는 반응도의 지속여부가 설계의 주요 요소로 나타났다.

표 2 APR 1400 노심 제원

Parameter	Value
Thermal Power [MWth]	3983
Number of Fuel Assembly	241 개
Active Core Height [cm]	381
Core Pressure [psi]	2250
Fq Limit	2.58
Avg. Mod. Temp. [K]	582
Linear Power Density [W/g]	44.7
Burnup [MWd/kgHM]	60.0

3.1 초기노심 설계

최적설계안의 제원은 표 1에 나타내었듯이 seed와 blanket의 농축도가 비슷하다. 그러나 seed와 blanket이 1:3의 비율로 구성되기 때문에 color-set을 통한 seed의 batch별 농축도 결정시 명확하게 구분되지 않는다. 선형반응도 모델에서 계산된 방출연소도를 이용하여 HELIOS에서 계산된 연소도별 seed의 농축도 자료를 바탕으로 3 batch seed의 농축도를 결정하였다. 그림 2는 seed 3 batch와 blanket의 k-inf. 그래프를 나타낸 것이다.

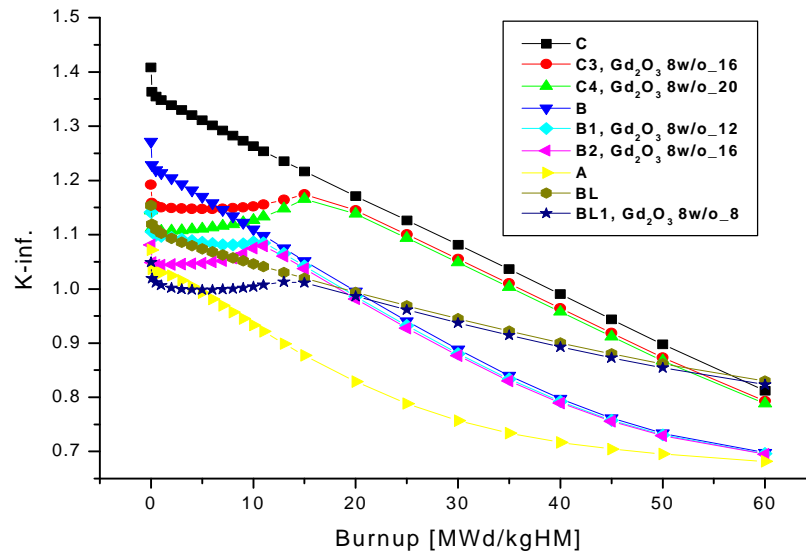


그림 2. Batch별 seed와 blanket의 k-inf.

표 3 3 batch 핵연료집합체 제원

CX_ID	Enrichment	Gd ₂ O ₃	Number
A	1.6	-	20
B1	3.0/2.5	8 w/o_12개	8
B2	3.0/2.5	8 w/o_16개	12
C3	5.0/4.5	8 w/o_16 개	8
C4	5.0/4.5	8 w/o_20 개	12
BL	20 w/o, 20 v/o	-	64
BL1	20 w/o, 20 v/o	8 w/o_8 개	117

18개월 주기를 목표로 설계하였기 때문에 주기초의 잉여반응도가 높아 가연성 독물질을 사용하였다. 가이드 튜브의 크기가 커서 분리형 독봉을 사용하는 것보다는 일체형 독봉의 사용이 가능할 것으로 판단되었고 독물질로는 Gd_2O_3 , IFBA, Er_2O_3 등을 고려할 수 있으나 Gd_2O_3 를 선정하였다. IFBA의 경우는 seed가 금속핵연료를 사용하므로 IFBA 코팅이 불가능 하며 Er_2O_3 를 쓰는 경우 독작용이 작아 사용갯수의 증가 및 농축이 필요하게 된다. 본 연구에서 사용한 가돌리니아는 최대 20개, 농축도 8w/o로 사용하였다. APR-1400을 대상으로 seed와 blanket을 장전한 노심모형은 그림 3과 같다.

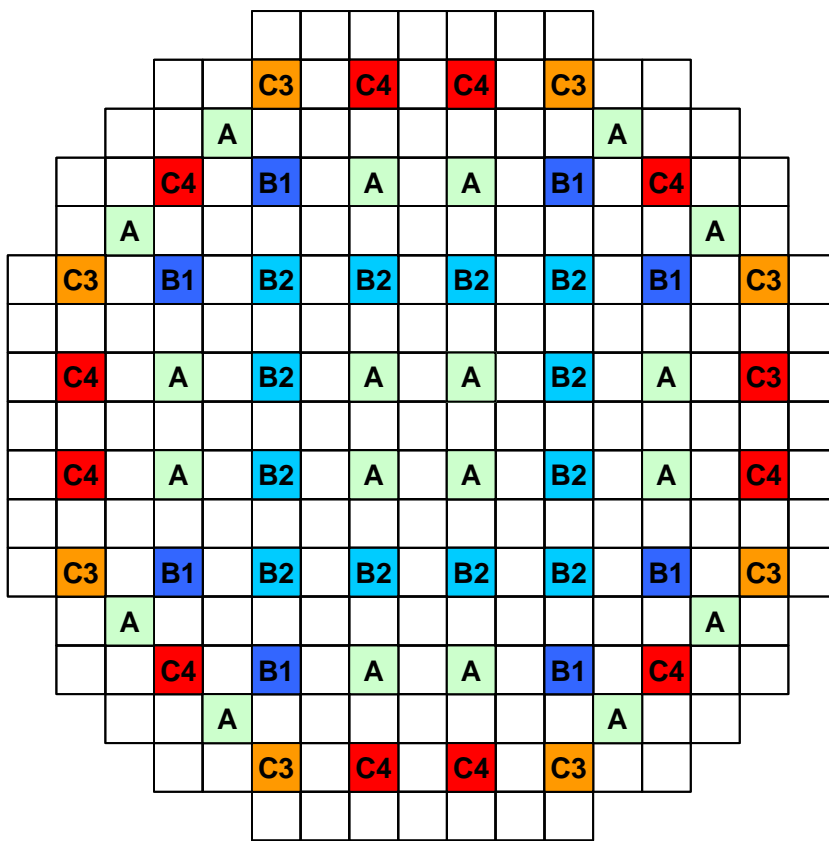


그림 3. 노심 장전모형

Seed와 blanket 핵연료집합체가 각각 60, 181개로 1:3의 비율로 장전되고 노심 외곽에 위치하는 seed는 노심안쪽으로 장전하고 노심외곽은 모두 blanket으로 장전되도록 하였다. 노심 중앙부의 blanket에는 잉여반응도 감소를 위하여 가돌리니아 독봉을 8 w/o로 8개씩을 사용하였다. Blanket에 가돌리니아를 사용한 이유는 현재의 최적설계안의 감속재 대 핵연료비가 거의 정점에 근접하여 위치하기 때문에 보론의 농도가 높아지면 MTC가 positive로 되는 현상이 발생하므로 이를 방지하기 위하여 보론 농도를 일정수준으로 제어할 필요가 있었다. 노심계산결과 주기초 보론농도는

988 ppm으로 계산되었고 주기길이도 목표치를 만족하는 467 EFPD를 유지하였다. BOC, No Xe. 상태에서 MTC는 -4.55 [pcm/C]으로 계산되어 안전성을 갖음을 보였다. 반경방향 상대출력분포는 그림 4에 나타내었는데 MOC에서 최대 1.448로 PWR과 거의 유사한 출력분포를 보여주었다. 봉침두 출력은 그림 5에 나타내었듯이 주기초에서 주기말까지 안전한계치 이내로 분포하였고 최대 값은 2.2를 가졌으며 그림 6에 도시한 축방향 출력분포도 PWR과 유사하였다. 이상의 결과를 바탕으로 seed와 blanket을 1:3의 비율로 APR-1400 노심을 구성시 충분히 설계가 가능함을 보였다. 이를 바탕으로 blanket이 방출되는 시점인 6주기동안에 대한 재장전 설계를 수행하였다.

0.988	1.049	1.034	1.089	1.063	1.110	1.074	1.052	0.740
0.966	1.010	1.063	1.144	1.088	1.081	1.115	1.116	0.715
1.014	1.036	1.055	1.099	1.065	1.074	1.118	1.122	0.745
	0.966	1.081	1.185	1.114	1.022	1.119	1.321	0.745
	0.908	1.099	1.263	1.120	0.958	1.142	1.448	0.721
	0.887	1.074	1.126	1.083	0.915	1.138	1.404	0.754
		1.070	1.122	1.109	1.151	1.080	1.004	0.677
		1.117	1.172	1.125	1.118	1.094	1.033	0.644
		1.075	1.106	1.080	1.092	1.107	1.077	0.698
BOC			1.236	1.166	1.329	1.099	1.219	0.512
MOC			1.295	1.170	1.242	1.065	1.195	0.488
EOC			1.132	1.111	1.127	1.086	1.250	0.550
				1.117	1.108	0.873	0.721	
				1.128	1.097	0.810	0.647	
				1.105	1.108	0.843	0.728	
					1.199	0.729	0.401	
					1.291	0.724	0.376	
					1.355	0.863	0.465	
						0.431		
						0.431		
						0.545		

그림 4. 1주기에서의 반경방향 상대출력분포

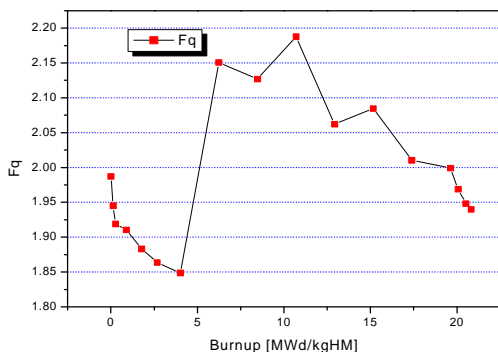


그림 5. 1주기에서의 Pin Peaking

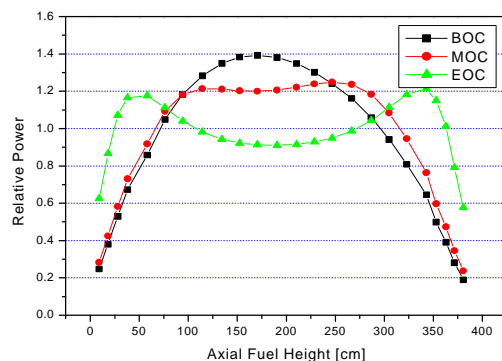


그림 6. 1주기에서의 축방향 상대출력분포

3.2 재장전 노심 설계

Seed와 blanket이 노심에 장전되는 주기전략은 seed 핵연료집합체는 3 batch로 매 주기마다 재장전되고 blanket 핵연료집합체는 1 batch로 seed 6주기(9년) 동안 노심에 잔류하고 있다. 이 경우 blanket은 9년간 노심에 잔류하는 동안 Th-232 핵종이 U-233으로 핵변환되어 노심의 출력을 담당하게 된다. U-233의 생성은 3주기가 지나서야 평형상태에 도달하므로 3주기 이전의 blanket 핵연료집합체의 반응도는 연소도에 따라 계속 감소한다. 또한 blanket은 9년간 노심에 잔류하므로 blanket에서 반응도 손실만큼을 seed에서 보상해 주어야 한다. 앞서 수행한 1주기 설계를 바탕으로 재장전 노심을 설계한 결과 2주기에서의 주기길이가 확연히 줄어드는 경향을 보였다. 이는 blanket 핵연료집합체에서는 2주기에서부터 반응도 감소가 나타나기 때문이며 seed와 blanket의 비율이 1:3이므로 이 현상은 더 가속화된다. 이 경우 재장전 seed의 반응도를 보상시켜 농축도가 높은 seed를 장전하였으나 목표주기를 만족하기는 어려웠다. 이러한 여러 가지 사항들을 고려한 결과 아래의 집합체 설계방안을 선정하였다. Blanket 핵연료집합체는 9년간 연소도에 따른 reactivity swing을 최대한 작게 설계하고 3 batch의 seed를 통하여 재장전을 수행한다. Blanket 핵연료집합체에서 reactivity swing이 가장 작은 경우는 농축도 10 w/o에 부피분율 15 v/o인 경우로 선정되었고, 목표주기를 만족하는 seed 핵연료집합체는 농축도 20 w/o로 나타났다. 이 경우 seed와 blanket의 출력분포 불균형이 크게 나타날 것으로 예상되나 BP설계를 통하여 제어하는 방법을 사용하였다. Seed 핵연료집합체에 대한 3 batch 라이브러리를 생성하기 위하여 노심에 seed 신핵연료를 장전하여 연소시키기를 반복한 결과 6주기 후 seed가 평형상태를 유지하였다. 이때의 seed 라이브러리를 재장전노심의 seed 3 batch 라이브러리로 이용하여 seed와 blanket을 장전한 노심에 대한 6주기의 재장전을 수행하였다. 그림 7은 6주기 재장전 노심의 임계 보론농도이다. 재장전 1주기의 주기길이가 1.5배 길어지는 증상을 보이고 있는데 이는 재장전 초기 blanket의 반응도가 증가하는 방향을 갖기 때문인 것으로 해석된다. 재장전 3주기에서 blanket 핵연료집합체를 shuffle 하였다. 노심외곽의 blanket 핵연료집합체를 모두 내부의 연소도가 높은 blanket 핵연료집합체와 자리 바꿈한 결과 shuffle시의 주기길이 증가량이 크게 나타났다. MTC는 모두 negative값을 가졌으며 Fq값이 약간 높게 나타났으나 이를 해결하기 위한 세부적인 BP 설계가 필요하였다.

4. 결론

핵확산 저항성이 현재의 PWR보다 높고 경제성이 크도록 KTF 설계안을 최적화하여 APR-1400 노심설계를 수행하였다. Blanket의 농축도를 seed와 비슷하게 설계하는 경우 seed와 blanket을 이용한 비균질 노심에서의 문제인 출력분포 제어가 용이하여 PWR과 비슷한 노심이 구성되었다. 그러나 blanket은 seed 6주기동안 노심에 장전되는데 이 때의 반응도 감소가 초기에 나타나 재장전 노심의 주기길이 확보가 어려운 단점이 있었다. Blanket의 reactivity swing이 작을수록 재장전 노심설계가 용이하여 6주기를 설계하였으며 비교적 안정한 주기를 갖는 노심이 설계되었으나 출력분포의 불균형으로 인한 높은 침투 붕출력을 가졌다. 향후 Fq값을 감소시키는 연구가

필요하며 지속적으로 연구되어질 것이다.

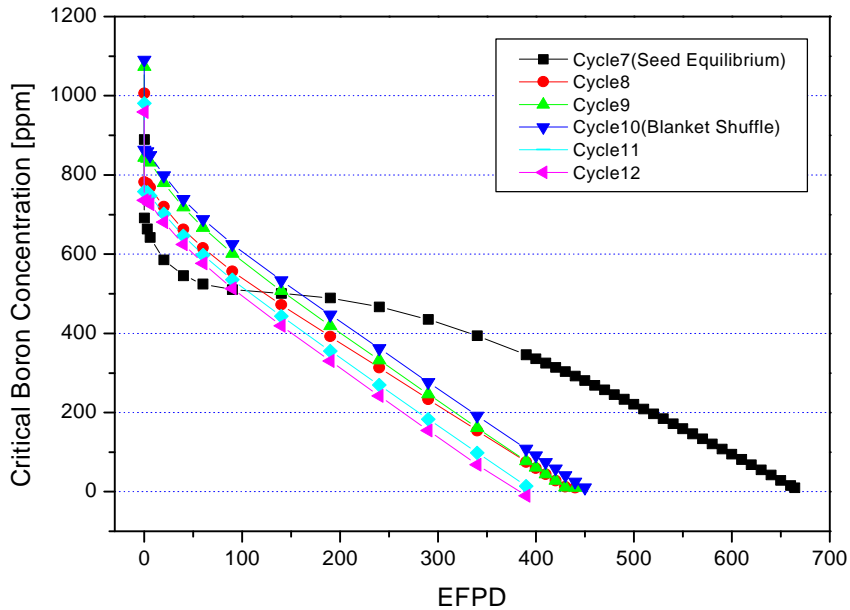


그림 7. 6주기 재장전노심의 임계보론농도

참고문헌

1. 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
2. D. Wang, M. J. Driscoll, M. S. Kazimi "Design and Performance Assessment of a PWR Whole-Assembly Seed and Blanket Thorium Based Fuel Cycle," MIT-NFC-TR-026, MIT Nuclear Engineering Department, September 2000
3. 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
4. 김관희, 김명현 "비균질 토륨장전 노심의 핵설계 최적화 방안 연구", 2002 춘계학술발표회 논문

집, 한국원자력학회, 2002

5. Dean Wang, M J. Driscoll, M.S. Kazimi and E. E. Pilat "A Heterogeneous Th/U Core for Improved PWR Core and Spent Fuel Characteristics", Proc. Int. Cong. on Advanced Nuclear Power Plant, Florida, USA, #1131, 1-8, 2002
6. 배강목, 김관희, 김명현 "APR-1400 원전을 위한 비균질 토륨핵연료 노심설계 방안연구", 2002 춘계학술발표회 논문집, 한국에너지공학회, 2002
7. K.H. Kim, K.M. Bae, M.H. Kim "Optimization of Thorium-based Seed & Blanket Fuel Assembly Design for PWR", Trans. Am. Nucl. Soc., Vol 86, pp. 302-303, Florida, USA, 2002