

소형로에서 연소에 따른 반응도 변화 완화를 위한 노심 핵설계 특성 연구

이경훈, 김명현

경희대학교 원자력공학과

Nuclear Design Characteristics of Small Reactor Core for the Reduction of Burnup-Dependent Reactivity Swing

Kyung Hoon Lee, Myung Hyun Kim

Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University

1. 서론

소형원자로는 크기가 작아서 경제성이 떨어지는 단점이 있지만 안전성이 높아 수출용 원자로로서 가능성이 높다. 소형원자로의 이용 범위는 지역난방용 원자로, 담수화플랜트, 선박 및 잠수함의 추진용 원자로 그리고 우주 탐사용 원자로 등으로 확대되었으며 다양한 형태로 개발되었다. 소형원자로 개발에 있어서 주기길이 연장은 핵연료주기 경제성에 매우 큰 영향을 미친다. 원하는 주기길이를 얻기 위해서는 초기에 장전되는 핵연료의 농축도가 높아질 수밖에 없기 때문에 잉여반응도 제어 설계가 힘들뿐만 아니라 높은 핵연료 농축비용으로 인해 중성자 경제성이 떨어진다. 또한, 노심의 크기가 작기 때문에 노심 외곽에서 중성자의 비효율적인 누출이 크다. 이런 이유로 고속중성자로에서는 경제성을 향상을 위해 고속중성자의 누출이 매우 큰 노심 외곽에 blanket 핵연료집합체를 배치하고 있다.

주기초 핵연료의 농축도를 낮추면서 원하는 주기길이를 얻기 위해서는 주기초에서 주기말까지 연소에 따른 노심의 반응도 변화 폭을 최대한 줄여야 한다. 연소에 따라 노심의 반응도가 거의 변화하지 않고 평탄하다면 가장 이상적일 것이다. 그러기 위해서는 높은 전환율을 갖는 새로운 핵연료집합체를 사용하거나 중성자의 비효율적인 누출을 효율적으로 차단할 수 있도록 노심을 구성해야 하며, 이런 설계 변경은 노심의 성능을 크게 변화시킬 수 있다.

본 연구에서는 노심의 연소에 따른 반응도 변화를 완화시키기 위한 여러 가지 방법을 검토하였다. 첫째, 핵연료의 전환 특성을 이용해서 반응도 변화 폭을 줄이기 위해서 여러 가지 핵연료에 대해서 물성 및 핵특성을 평가하였고, 핵연료집합체의 민감도 분석을 통해서 핵전환 특성을 비교하였다. 둘째, 중성자 경제성을 향상시키기 위해 노심 외곽에 반사체를 설치하여 고속중성자를 효과적으로 반사시키는 방법과 노심 외곽에 blanket 핵연료집합체를 적절하게 배치하는 방법을 검토하였다.

2. 핵연료의 핵전환 특성 분석

UO_2 , $(U+Pu)O_2$, U-10Zr, U-Pu-10Zr, $(Th+U)O_2$, $(Th+Pu)O_2$ 의 핵연료를 사용해서 핵연료의 전환 특성을 비교하였다. 플루토늄 혼합핵연료는 reactor grade와 weapon grade로 구분해서 사용하였다. 플루토늄 혼합핵연료에 사용한 플루토늄의 조성은 표 1과 같다.

모두 9가지 종류의 핵연료를 사용하였으며, 각 핵연료의 조성은 감속재 온도계수와 핵연료 온도계수가 모두 큰 음의 값을 갖는 범위에서 결정하였다. 연소에 따른 반응도 변화는 무한증배계수의 기울기를 사용해서 정량적으로 평가하였다. 일반적인 가압경수로에서 방출되는 핵연료집합체의 무한증배계수가 약 0.9이기 때문에, 기울기는 0 GWD/MT에서의 무한증배계수와 무한증배계수가 0.9일때 방출연소도를 사용해서 계산하였다.

그림 1과 표 2는 9가지 종류의 핵연료에 대한 무한증배계수와 그 기울기를 나타내고 있다. reactor grade U-Pu-10Zr 핵연료의 기울기가 가장 작아서 연소에 따른 반응도 변화가 가장 작음을 알 수 있었고, UO₂ 핵연료의 경우 기울기가 가장 컸다. reactor grade의 조성을 갖는 플루토늄 핵연료가 weapon grade 플루토늄 핵연료에 비해 반응도 변화 완화 측면에서 약 15~20% 효과적이었으며, 우라늄 핵연료에 비해서는 반응도 변화가 약 60% 정도 작았다.

초장주기의 원자료를 구성하는 경우에는 우라늄 핵연료보다는 플루토늄 핵연료를 사용하는 것이 유리함을 알 수 있었고, 많은 fissile 물질을 포함하는 것보다는 적당히 fertile 물질을 포함하는 핵연료가 반응도 변화 완화 측면에서 효과적임을 알 수 있었다.

3. 핵연료집합체의 민감도 분석

6가지 핵연료와 일반적으로 상업용 가압경수로에서 사용되는 17×17 핵연료집합체를 사용해서 핵연료집합체의 반응도 변화에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 농축도, 조성, 함유량, 핵연료 반경, pitch, 출력을 20% 변화시켰을 경우에 대해 연소에 따른 무한증배계수 변화와 기울기를 비교하였다. 그림 2에서 그림 7까지 각 핵연료에 대한 무한증배계수 변화를 나타냈고, 표 3은 무한증배계수의 기울기를 나타낸다.

UO₂ 핵연료의 경우 pitch를 20% 줄인 경우에 무한증배계수의 기울기가 6.906로 반응도 변화가 가장 작았고, 기준 UO₂에 비해 기울기가 18.84% 감소했다. 출력을 20% 줄인 경우에는 0.42% 감소했고, 핵연료의 반경을 20% 줄인 경우에는 16.06% 감소했다. 농축도를 20% 줄인 경우에는 기준 핵연료보다 기울기가 12.03% 증가했다. UO₂ 핵연료의 경우 pitch를 줄이거나 핵연료의 반경을 늘이는 것이 반응도 변화를 완화시키는데 효과적임을 알 수 있었다.

(U+Pu)O₂ 핵연료의 경우 플루토늄 조성을 20% 줄인 경우에 무한증배계수의 기울기가 2.494로 반응도 변화가 가장 작았고, 기준 (U+Pu)O₂에 비해 기울기가 28.33% 감소했다. pitch를 20% 줄인 경우에는 27.18% 감소했고, 핵연료의 반경을 20% 줄인 경우에는 18.1% 감소했다. 플루토늄 함유량을 20% 줄인 경우에는 기준 핵연료보다 기울기가 13.13% 증가했고, 출력을 20% 줄인 경우에는 1.87% 증가했다. (U+Pu)O₂ 핵연료의 경우 플루토늄 조성을 줄이거나 pitch를 줄이고, 핵연료의 반경을 늘이는 것이 반응도 변화를 완화시키는데 효과적임을 알 수 있었다.

U-10Zr 핵연료의 경우 pitch를 20% 줄인 경우에 무한증배계수의 기울기가 5.605로 반응도 변화가 가장 작았고, 기준 U-10Zr에 비해 기울기가 27.41% 감소했다. 출력을 20% 줄인 경우에는 0.76% 감소했고, 핵연료의 반경을 20% 줄인 경우에는 16.94% 감소했다. 우라늄 함유량을 20% 줄인 경우에는 기준 핵연료보다 기울기가 5.23% 증가했고, 농축도를 20% 줄인 경우에는 9.79% 증가했다. U-10Zr 핵연료의 경우 pitch를 줄이거나 핵연료의 반경을 늘이는 것이 반응도 변화를 완화시키는데 효과적임을 알 수 있었다.

U-Pu-10Zr 핵연료의 경우 pitch를 20% 줄인 경우에 무한증배계수의 기울기가 2.420로 반응도 변화가 가장 작았고, 기준 U-Pu-10Zr에 비해 기울기가 26.87% 감소했다. 플루토늄 조성을 20% 줄인 경우에는 25.08% 감소했고, 핵연료의 반경을 20% 줄인 경우에는 15.93% 감소했다. 플루토늄 함유량을 20% 줄인 경우에는 기준 핵연료보다 기울기가 7.65% 증가했고, 출력을 20% 줄인 경우에는 1.63% 증가했다. U-Pu-10Zr 핵연료의 경우 pitch를 줄이거나 플루토늄 조성을 줄이고, 핵연료 반경을 늘이는 것이 반응도 변화를 완화시키는데 효과적임을 알 수 있었다.

(Th+U)O₂ 핵연료의 경우 pitch를 20% 줄인 경우에 무한증배계수의 기울기가 3.479로 반응도 변화가 가장 작았고, 기준 (Th+U)O₂에 비해 기울기가 34.81% 감소했다. 출력을 20% 줄인 경우에는 1.78% 감소했고, 핵연료의 반경을 20% 줄인 경우에는 25.76% 감소했다. 우라

늄의 함유량을 20% 줄인 경우에는 기준 핵연료보다 기율기가 4.44% 증가했고, 농축도를 20% 줄인 경우에는 6.02% 증가했다. (Th+U)O₂ 핵연료의 경우 pitch를 줄이거나 핵연료 반경을 늘이는 것이 반응도 변화를 완화시키는데 효과적임을 알 수 있었다.

(Th+Pu)O₂ 핵연료의 경우 pitch를 20% 줄인 경우에 무한증배계수의 기율기가 1.886으로 반응도 변화가 가장 작았고, 기준 (Th+Pu)O₂에 비해 기율기가 47.89% 감소했다. 플루토늄 조성을 20% 줄인 경우에는 32.83% 감소했고, 핵연료 반경을 20% 줄인 경우에는 32.74% 감소했다. 플루토늄 함유량을 20% 줄인 경우에는 기준 핵연료보다 기율기가 15.5% 증가했고, 출력을 20% 줄인 경우에는 0.66% 증가했다. (U+Pu)O₂ 핵연료의 경우 pitch를 줄이거나 플루토늄 조성을 줄이고, 핵연료의 반경을 늘이는 것이 반응도 변화를 완화시키는데 효과적임을 알 수 있었다.

모든 경우를 종합해 볼 때 (Th+Pu)O₂ 핵연료의 pitch를 20% 바꾼 경우에 기율기가 1.886으로 가장 작아서 반응도 변화 완화 측면에서는 가장 우수함을 알 수 있었다.

4. 노심 외곽 반사체/Blanket 설계에 따른 반응도 변화 분석

소형원자로는 노심 외곽에서의 중성자 누설량이 중·대형 원자로에 비해서 상대적으로 커서 중성자 경제성이 떨어지기 때문에 노심 외곽으로 새어 나가는 고속중성자를 반사시켜 중성자 누출을 줄이기 위한 방법으로 반경방향 금속 반사체와 blanket 핵연료집합체를 도입하였다. 이 반사체를 노심 구성을 그대로 유지하면서 16×16 핵연료집합체가 177개 장전되는 대형원자로(2815 MW_{th})와 17×17핵연료집합체가 57개 장전되는 소형원자로(330 MW_{th})의 두 가지 노심에 적용하여 반응도 변화에 미치는 영향을 비교하였다. 그림 8과 그림 9는 두 가지 노심의 장전 모형을 나타낸다. 반경방향 반사체의 균질화 균정수는 모두 HELIOS-1.5 코드를 사용해서 계산하였고, 반경방향 반사체와 blanket 핵연료집합체를 적용한 노심은 MASTER-2.1 코드를 사용해서 계산하였다.

금속 반사체는 물로 구성되어 있는 노심 외부구조물(Baffle)과 용기(Barrel) 사이 영역에 스테인리스 스틸과 탄탈륨을 각각 봉과 판 형태로 설치하였다. 기존의 연구결과 봉형의 경우 봉의 반경이 클수록 속중성자 반사효과가 크기 때문에 봉의 반경은 0.6241 cm로 결정하였고, 물과 금속의 부피비가 같도록 하기 위해 판형 반사체의 두께는 16.7466 cm로 결정하였다.

반경방향 blanket 핵연료집합체는 천연우라늄 UO₂ 핵연료와 5wt%, 20% (Th+U)O₂ 핵연료를 사용하였다. 형태는 각각의 노심에 장전된 핵연료집합체의 형태와 같으며, 노심의 가장 바깥쪽 핵연료집합체 대신 장전하였으며, 반사체는 물로 구성하였다.

대형원자로에 금속 반사체를 적용한 경우 그림 10에서 볼 수 있듯이 반사체의 형태와 종류에 관계없이 노심의 반응도는 큰 변화가 없었고, 주기 길이는 약 2.8% 증가하긴 했지만 전체적인 반응도의 기율기는 물 반사체의 경우와 차이가 없음을 알 수 있었다. blanket 핵연료집합체를 설치한 경우 기존의 노심에 비해 핵연료 장전량이 줄어들기 때문에 핵연료 주기 길이에 손실이 커서 주기 길이가 22%에서 55%까지 줄어들었으며, 반응도의 기율기는 증가하였다. 표 4는 반사체 설계 변경에 따른 노심 반응도의 기율기를 나타낸다.

소형원자로에 금속 반사체를 적용한 경우 그림 11에서 볼 수 있듯이 판 형태의 스테인리스 스틸 반사체를 사용했을 때 주기 길이가 약 13% 증가했고, 다른 형태와 종류의 금속 반사체는 노심의 반응도에 약간의 영향만을 미쳤다. 전체적인 반응도의 기율기는 물 반사체의 경우와 차이가 없음을 알 수 있다. blanket 핵연료집합체를 설치할 경우 18개의 blanket 핵연료집합체가 장전되기 때문에 기존 노심의 핵연료 장전량의 약 1/3이 줄어들기 때문에 핵연료 주기 길이에 매우 손실 클 것으로 예상해서 계산에서 제외하였다.

노심 외곽에 반사체를 설치하는 경우 노심 반응도의 기율기에는 큰 변화가 없었고, 주기 길이만 조금 증가하였고, 대형원자로 보다 소형원자로에서 주기 길이의 증가 효과는 커서

핵연료의 농축도 또는 가연성독봉의 농도를 낮추어 경제적으로는 이득이 있음을 볼 수 있다. blanket 핵연료집합체를 설치하는 경우에는 반응도의 기울기는 기존의 원자로에 비해 커졌고, 주기 길이도 짧아졌다. 효과적인 blanket 핵연료집합체의 사용을 위해서는 노심의 유효직경을 늘려서 노심 외곽에 있는 기존의 핵연료집합체 바깥에 설치해야 할 것이다.

5. 결론 및 향후계획

초장주기의 원자료를 구성하는 경우에 핵연료는 적당한 양의 fertile 물질을 포함하는 플루토늄 핵연료를 사용하는 것이 반응도 변화 완화 측면에서 가장 효과적임을 알 수 있었다.

핵연료집합체의 전환 특성 분석을 위해서 민감도 계산을 수행하였고, 그 결과 (Th+Pu)O₂ 핵연료의 pitch를 20% 바꾼 경우에 기울기가 1.886으로 가장 작아서 반응도 변화 완화 측면에서는 가장 우수해서 초장주기 원자로 설계에 사용하는 것이 타당하다고 생각되었다. 또한, 감속재 온도계수 및 핵연료 온도계수도 큰 음의 값을 가져서 안전성에도 문제가 없었다.

노심 외곽에 반사체 및 blanket 핵연료집합체를 설치하는 경우 노심 반응도의 기울기에는 큰 변화가 없었고, 대형원자로 보다 소형원자로에서 주기 길이의 증가 효과가 커서 경제적으로는 이득이 있음을 볼 수 있다.

앞으로 노심내 driver와 blanket assembly들의 배열에 의한 기하학적 특성과 스펙트럼 효과를 분석하고 초장주기 운전에서의 중성자 경제성 향상을 위한 성능 지표를 도출 해야할 것이다.

6. 참고문헌

1. 김동규, 김명현, "압력용기에서의 중성자 조사량 평가 및 감소방안 연구," '97 한국원자력학회 추계학술발표회, 1997.
2. 구본승, 김명현, "소형동력로의 초장주기 무봉산 노심 핵설계," '98 한국원자력학회 추계학술발표회, 1998.
3. M. Edenius and B. Forssen, "CASMO-3 : User's Manual," STUDSVIK/NFA-89/3, January, 1991.
4. Release Notes for HELIOS System 1.5, TN36/41.16.15, Scandpower, October 31, 1998.
5. J. S. Song et al., "PROLOG-1.1 User's Manual," KAERI/UM-4/99, September, 1999.
6. C. H. Lee et al., "MASTER-2.0 User's Manual," KAERI/UM-3/98, August, 1999.
7. KAERI and ABB-CE, "Nuclear Design Report for YoungGwang Unit3 Cycle 1," KAERI/TR-/94, December, 1994.
8. C. C. Lee et al., "Nuclear Design Characteristics of SMART," Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Suwon, Korea, 19, May, 1998.
9. C. H. Lee et al., "Nuclear Design Manual for Generation of Cross Section and Heterogeneous Formfunction for CASMO-3/MASTER," KAERI/TR-782/96, December, 1996.
10. J. S. Song et al., "Verification and Uncertainty Evaluation of HELIOS/MASTER Nuclear Analysis System," KAERI/TR-1320/99, April, 1999.

표 1. Plutonium 혼합핵연료에 적용한 Plutonium의 조성비.

Pu Isotopes	Reactor Grade (wt%)		Weapon Grade (wt%)
	SIMENS	COGEMA	
Pu-238	1.80	1.83	0.00
Pu-239	59.00	57.93	93.40
Pu-240	23.00	22.50	6.00
Pu-241	12.20	11.06	0.60
Pu-242	4.00	5.60	0.00
Am-242	0.00	1.08	0.00

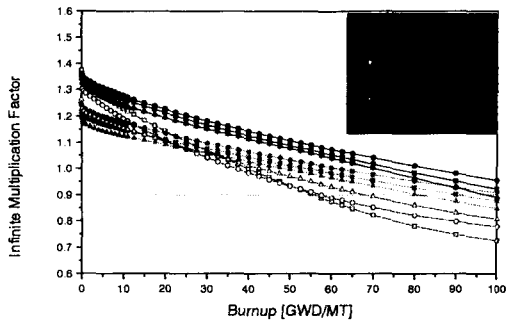


그림 1. 9가지 핵연료의 무한증배계수 변화.

표 2. 9가지 핵연료에 대한 무한 증배계수의 기울기($\times 10^{-3}$).

UO ₂	(U+Pu)O ₂	
	RG	WG
-8.512	-3.480	-4.272
U-10Zr	U-Pu-10Zr	
	RG	WG
-7.722	-3.309	-3.816
(Th+U)O ₂	(Th+Pu) ₂	
	RG	WG
-5.337	-3.619	-4.515

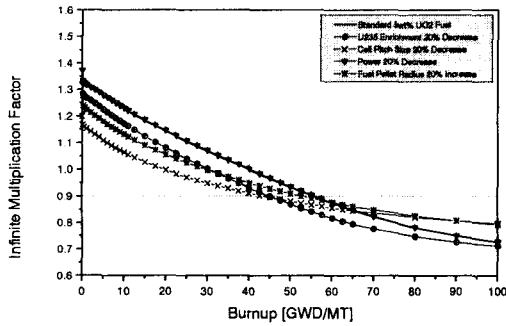


그림 2. UO₂ 핵연료의 무한증배계수 변화.

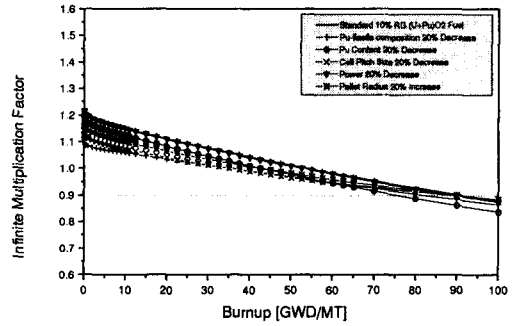


그림 3. (U+Pu)O₂ 핵연료의 무한증배계수 변화.

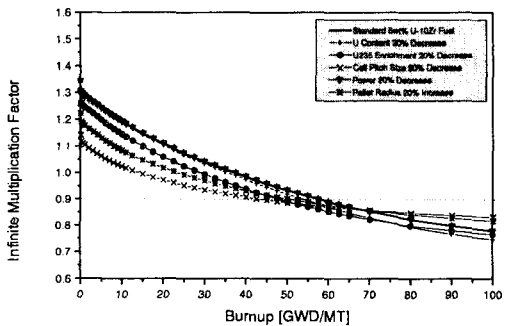


그림 4. U-10Zr 핵연료의 무한증배계수 변화.

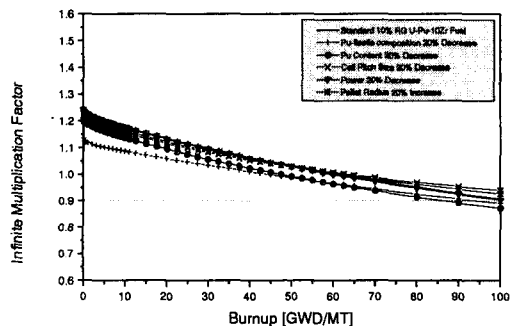


그림 5. U-Pu-10Zr 핵연료의 무한증배계수 변화.

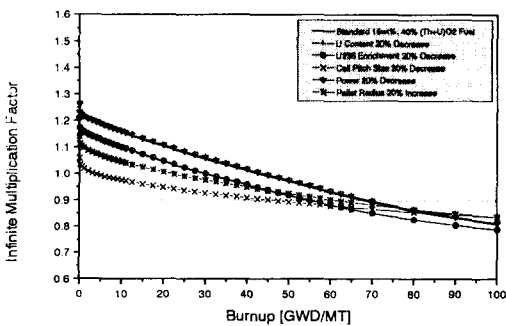


그림 6. (Th+U)O₂ 핵연료의 무한증배계수 변화.

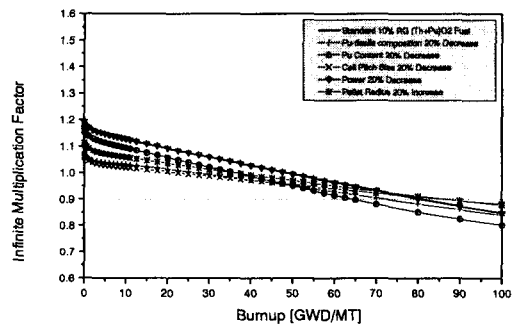


그림 7. (Th+Pu)O₂ 핵연료의 무한증배계수 변화.

표 3. 핵연료집합체 무한증배계수의 기울기($\times 10^{-3}$).

	UO ₂	(U+Pu)O ₂	U-10Zr	U-Pu-10Zr	(Th+U)O ₂	(Th+Pu)O ₂
Reference	-8.512	-3.480	-7.722	-3.309	-5.337	-3.619
Composition	.	-2.494	.	-2.479	.	-2.431
Content	.	-3.937	-8.126	-3.562	-5.574	-4.180
Enrichment	-9.536	.	-8.478	.	-5.658	.
Pitch	-6.908	-2.534	-5.605	-2.420	-3.479	-1.886
Power	-8.477	-3.545	-7.663	-3.363	-5.242	-3.643
Radius	-7.145	-2.850	-6.414	-2.782	-3.962	-2.434

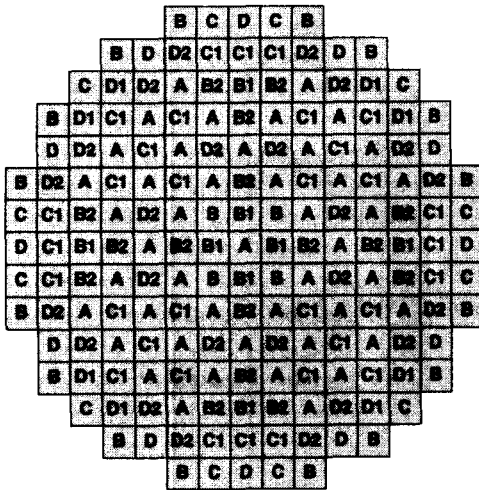


그림 8. 대형원자로의 노심 장전 모형.

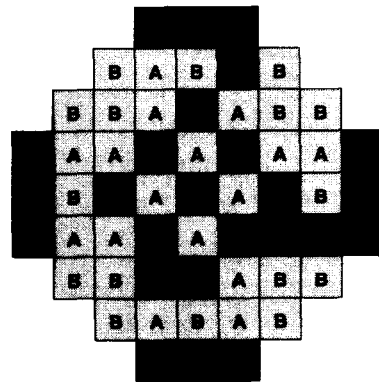


그림 9. 소형원자로의 노심 장전 모형.

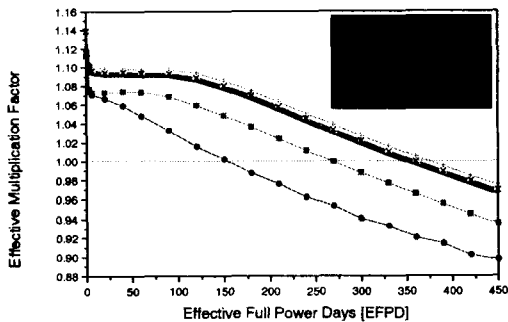


그림 10. 반사체에 따른 대형 노심의 반응도 변화.

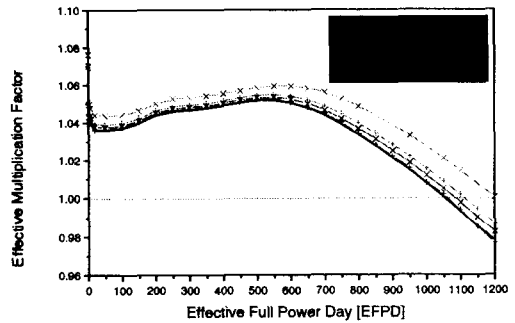


그림 11. 반사체에 따른 소형 노심의 반응도 변화.

표 4. 반사체 설계 변경에 따른 노심 반응도의 기울기($\times 10^{-3}$).

	Reflector					Blanket	
	Water	SUS Plate	SUS Rod	Ta Plate	Ta Rod	UO ₂	(Th+U)O ₂
Large-Sized Core	10.575	10.928	10.496	10.532	10.514	11.664	19.639
Small-Sized Core	2.462	2.390	2.439	2.449	2.430	.	.