

압력관형 가압경수로심의 핵적 개념설계안의  
최적화를 위한 변수해석

A Parametric Study for the Optimization of  
Conceptual Nuclear Design of Light Water cooled PHWR

박동환, 김명현

경희대학교  
449-701 경기도 용인시 기흥읍

요 약

중수 냉각/감속원자로(PHWR)의 개량형으로서 제안되어진 압력관을 이용한 가압경수로심에 대하여 네 가지의 설계개념을 제안하였다. 핵연료 다발의 네 가지 설계안은 압력관 외부의 감속재의 종류에 따라 분류되어졌다. 이러한 네 가지의 설계안에 대하여 핵연료의 농축도, 반경, 감속재의 두께를 변수로 설정하여 방출연소도와 반응도 궤환 계수를 중심으로 최적화 설계를 하였다. 변수 연구를 통하여 볼 때 핵연료를 0.6077cm의 반경과 냉각재를 경수로 사용하며 중수를 2.0cm의 두께에만 사용하는 설계안이다. 또한 IFBA를 이용하여 노심의 잉여반응도 제어가 가능하였고, 기존 CANDU의 방출연소도와 비교하여 2.4배 증가하였다.

Abstract

A design concept of pressure-tube type light water cooled reactor was proposed as an innovative Pressurized Heavy Water Moderated Reactor(PHWR). Four kinds of reactor concepts were tested for the selection of moderator outside of the pressure tube. The most feasible design concept has features which is fuel pellet radius is 0.6077cm UO<sub>2</sub> fuel, light water coolant, and thickness of heavy water moderator is 2.0cm. Also Excess reactivity was dropped to the level of that of CANDU module throughout IFBA and Discharged burnup was increased 2.4 times longer than that of CANDU.

I. 서 론

가압중수로의 장점과 가압경수로의 장점을 채택한 압력관형 가압경수로심의 핵설계를 제안하였다. 이 원자로는 CANDU-6를 기본으로 냉각재를 중수대신 경수(H<sub>2</sub>O)로 사용하고, 경수 냉각재 사용으로 인한 반응도 보상을 위해 압력관을 경계로 한 감속재의 영역에 1.6cm의 두께에만 중수(D<sub>2</sub>O)를 반사체 역할로서 두르고, 핵연료의 농축도를 천연우라늄에서 2.4w/o정도의 농축우라늄으로 대체한 개념이다. 이 설계안은 농축우라늄을 사용함으로써 보다 높은 연소도를 가능하게 하였고, 냉각재가 경수이기 때문에 냉각수계통에서의 tritium 생성이 없어진다. 종래의 CANDU에서는 calandria tank의 전 영역을 중수로 채웠으나, 본 연구에서는 중수의 사용을 감속재관 내부로 한정함으로써 감속재관 외부는 void영역으로 남게되고, 그로 인해 중수의 사용을 줄일 뿐 아니라 제어 감시설비장치의 설치를 용이하게 한다. 위에서 제안한 개념 설계안에 대해 안전성을 검토하기 위해 MTC(Moderator Temperature Coefficient), CTC (Coolant Temperature Coefficient), Void

coefficient를 계산하여 모두 음의 값을 보임으로서 노심 설계의 안전성을 확인하였다.<sup>1)</sup> 또한 비상 사고시 void인 calandria tank영역에 water injection을 했을 경우 추가적인 안전성 여부를 확인하기 위하여 노심이 정지가 되는지의 여부와 농축우라늄 우라늄 핵연료 사용을 기본 설계 개념으로 하는 본 설계안에 대하여 BP를 사용함으로써 핵연료 다발의 잉여 반응도제어가 가능한 지를 확인하였다. 이러한 결과로 기존 CANDU의 반응도 제어시스템을 그대로 적용 할 수 있음을 확인하였다. 또한 안전한 노심 설계안을 위해 핵연료봉의 반경을 변경시켜 평탄한 power sharing을 갖는 설계안을 제시하였다.<sup>2)</sup> 앞서 제시된 전 영역의 중수감속재를 사용하여 최소의 설계변경이라는 장점과 가장 큰 감속능력을 갖는 제 1설계안과 부분적인 영역의 중수 감속재 사용으로 삼중수소의 발생원을 최소화 할 수 있으면서, 부분적으로 반응도를 보상할 수 있는 제 2설계안, 그리고 삼중수소의 발생원을 근본적으로 제거할 수 있는 경수 감속재를 사용하는 제 3설계안, 그리고 삼중수소의 발생원을 제거할 수 있는 제 3설계안의 장점과 더불어 경수보다는 높은 감속비를 갖는 흑연 감속재를 사용하는 제 4설계안에 대하여 핵연료의 농축도와 소결체 반경, 그리고, 제 2,3,4 설계안에 대하여 감속재 두께에 따른 변수연구를 통하여 각 설계안의 특성을 정확히 분석하여, 압력관을 이용한 가압경수로심에 대하여 최적화를 위한 계산을 수행하였다.

## II. 노심 설계안의 핵적 특성

본 연구에서는 압력관형 가압경수로심의 개념설계에 있어서 그림 1~4와 같이 전 영역의 중수, 부분적인 영역의 중수, 경수, 흑연 감속재에 대한 감속재종류별로 네 가지의 설계안을 제시하였다. 제 1설계안은 기존 가압중수로의 핵연료 채널형태에 대하여 냉각재를 경수로 사용하여 삼중수소의 발생을 최소화하며 S/G에서의 경수와 중수의 접촉위험성이 없어진다. 또한 경수 냉각재를 사용함으로써 핵연료를 농축 이산화 우라늄을 사용하여, 핵연료의 방출연소도를 증가시켜 사용후 핵연료의 발생량 또한 감소시킬 수 있다. 제 2설계안은 제 1설계안의 형태에 대하여 중수 감속재를 압력관 외부에 부분적인 영역에만 사용함으로써 제 1설계안의 장점과 더불어 감속재의 양을 1설계안에 비하여 최소화 할 수 있다. 제 3설계안은 감속재를 경수로 사용함으로써 삼중수소의 발생원을 제거한다. 제 4설계안은 감속재를 부분적인 영역에 흑연을 사용함으로써 제 3설계안의 경수 감속재보다 높은 감속비를 갖는 감속재를 사용하여 보다 높은 감속효과를 갖도록 하는데 목적이 있다.

## III. 핵설계의 타당성 검증을 위한 변수연구

변수연구를 위한 설계변수의 설정은 핵연료의 농축도, 냉각재 대 핵연료의 비율(핵연료 소결체의 반경), 핵연료 대 감속재의 비율(감속재의 두께)로 설정하였다. 핵설계의 타당성을 검증하기 위한 방법으로서 방출연소도의 길이, 음의 감속재 온도계수, 냉각재 온도계수, 기포반응도 계수를 통하여 타당성 확인을 하였다. 또한 이 계산의 운전조건은 월성 2,3호기의 운전 조건<sup>3)</sup>과 동일하게 계산하였다.

그림 6에서와 같이 제 1설계안은 가장 높은 방출연소도를 보이지만, 그림 10~12에서처럼 모든 변수에 대하여 양의 냉각재 온도계수와 감속재온도계수, 그리고 기포반응도계수를 나타낸다. 결국 제 1설계안은 높은 방출연소도를 가지지만 양의 반응도 궤환효과로 인해 설계에 타당성을 가질 수 없다. 제 2설계안의 경우는 그림 7에서와 같이 방출 연소도는 제 1설계안보다 높지는 않지만 그림 13~18에서 보여지는 바와 같이 핵연료 소결체의 반경이 0.45cm일 때를 제외하고 모두 음의 반응도 궤환효과를 나타낸다. 한편 그림 5에서 보여지는 바와 같이 감속재의 종류별 두께에 대한 무한증배계수의 변화를 볼 때 중수감속재는 두께에 대하여 선형적으로 증가한다. 따라서 핵연료 다발의 간격과 기존 가압중수로의 제어봉인 MCA(Mechanical Control Absorber)의 크기를 고려하여 감속재의 두께를 2.0cm로 결정 할 수 있다. 제 3설계안의 경우 중수의 중성자포획으로 인한 삼중수소의 발생원을 경수감속재로 대체함으로써 제거할 수 있는 장점이 있지만 그림 8에서처럼 방

출연소도가 가장 낮고, 그림 19~24에서처럼 모든 경우의 변수변경에 대하여 양의 냉각재 온도계수와 감속재온도계수, 그리고 기포반응도계수를 나타낸다. 따라서 설계의 타당성을 가질 수 없다. 제 4설계안의 경우 그림 9에서와 같이 방출연소도는 제 2설계안보다는 낮지만 그림 25~30에서와 같이 음의 냉각재 온도계수와 기포반응도 계수를 나타낸다. 반면에 약 0~10pcm사이의 양의 감속재 온도 계수를 갖지만 이는 거의 변화가 없다고 가정할 때 핵적으로 타당성이 있는 설계안이라고 할 수 있다. 그러나 흑연 감속재의 하중이 핵연료 채널에 미치는 영향과 그 하중으로 인한 전체 발전소 용량 증대에 불리한 점을 고려할 때 제 2설계안을 가장 타당성이 있는 설계안이라고 할 수 있다. 이에 대하여 핵연료봉의 반경을 두 가지로 고려하였다. 그림 31에서처럼 냉각재 대 핵연료의 비율을 고려할 때 가장 효율적인 경우로서 핵연료봉의 반경을 0.5cm로 설정할 수 있으며, 반면에 원자로내의 시스템을 기존 CANDU의 입증된 기술을 그대로 적용하는 의미에서 0.6077cm의 핵연료봉의 경우를 고려하였다. 한편 핵연료의 농축도는 각 농축도별 방출 연소도의 증감을 통하여 핵연료 주기비용의 정확한 분석을 통하여 이루어져야 하겠지만 우선적으로 약 2배 이상의 방출 연소도를 갖는 2.8w/o일 때를 기본으로 계산하였다.

#### IV. 노심 반응도 제어의 타당성

앞서 제안된 네 가지의 설계안은 CANDU의 잉여반응도에 비해 노심에서의 잉여반응도가 훨씬 크다. 이에 대하여 핵적으로 타당성이 입증된 제 2설계안에 대하여 노심의 잉여반응도 제어를 위해 BP(Burnable Poison)를 사용하고자 한다. 이에 대하여 가압경수로보다 낮은 방출연소도에 대한 초기 노심의 반응도 제어가 쉬운 IFBA를 사용하였다. IFBA는 두께가 0.00254cm로 coating의 두께에 제한이 있으며 흡수체 역할을 하는 붕소의 농축도를 100%까지 증가시킬 수 있다. 본 연구에서는 핵연료 다발의 power sharing을 고르게 하기 위해 우선 핵연료 다발의 최외각 붕의 배열인 외환경에서부터 차례로 중환경, 내환경의 순으로 고르게 배열하여 보았다. 이에 대하여 표 2에서와 같이 각 경우의 수에 대하여 계산한 결과 외환경에 균일한 간격으로 3개의 붕에 IFBA를 사용하였을 때 power sharing이나 저농축 보론을 고려하여 그림 32와 33에서처럼 핵연료 소결체 반경이 0.5cm와 0.6077cm에 대하여 가장 바람직한 형태를 나타내었으며, 기존 가압중수로의 제어시스템을 그대로 적용할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이에 대한 결과를 토대로 기존 가압중수로의 방출연소도와 비교하였을 때 2.4배 증가하였다.

#### V. 결론 및 향후과제

앞서 제시된 3가지의 설계안과 흑연 감속재를 사용하는 추가 설계안에 대하여 타당성 확인을 위한 연구를 수행하였다. 이를 위해 감속재의 두께, 핵연료 소결체의 반경, 핵연료의 농축도를 변수로 설정하여 핵연료의 방출연소도와 반응도 계환계수를 통하여 계산을 수행한 결과 제 2설계안의 2.0cm두께의 중수 감속재와 0.6077cm의 핵연료소결체 반경을 갖는 설계안이 가장 타당성이 있는 설계안으로 나타났다. 이에 대하여 2.8w/o의 농축도를 갖는 핵연료 다발에 대하여 초기 노심의 잉여반응도를 IFBA를 사용하여 제어하였으며, 따라서 기존 가압중수로의 제어시스템을 그대로 적용할 수 있음을 확인하였다. 뿐만 아니라 핵연료 다발의 방출연소도가 2.4배로 증가함으로써 사용 후 방출 핵연료의 양을 현저히 줄일 수 있을 뿐 아니라 부분적인 중수 감속재를 사용함으로써 액체 폐기물의 양 또한 줄일 수 있었다. 차후 핵연료의 농축도를 변경하여 농축도 변경에 따른 방출 연소도의 증감 여부를 통하여 정확한 핵연료 주기 비용의 분석이 수행되어야 한다.

#### 참 고 문 헌

1. Myung-Hyun Kim and Jin-Kyoo Yoon "Conceptual Design for a Deuterium Moderated Pressurized Light Water Cooled Reactor," Proceedings of the Topical

Meeting on Advances in Nuclear Fuel Management II, Myrtle Beach, South Carolina, U.S.A., March 23-26, 1997.

2. 박동환, 김명현 “압력관형 가압경수로심의 핵적 개념설계”, '97 추계학술발표회 논문집, 경북대학교(1997)
3. 한국 전력 기술주식회사, “월성 2,3,4호기 최종안전성 분석보고서,” 1995

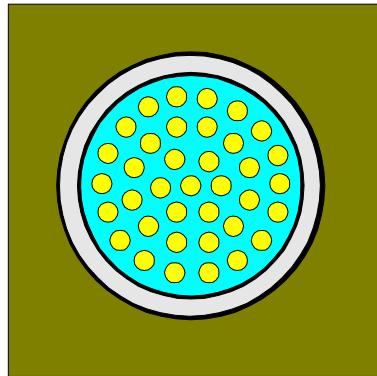


그림 1 제 1설계안

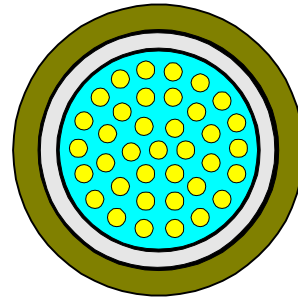


그림 2 제 2설계안

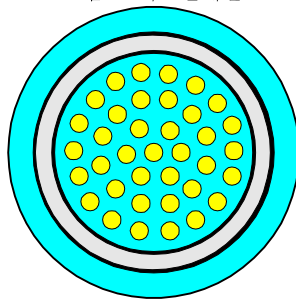


그림 3 제 3설계안

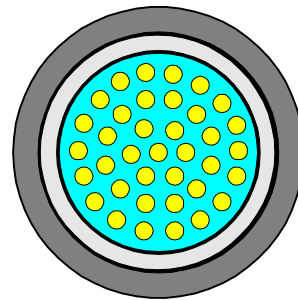


그림 4 제 4설계안

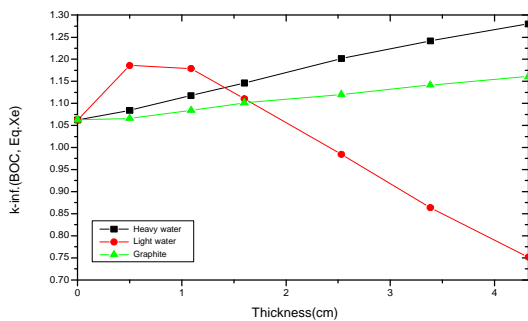
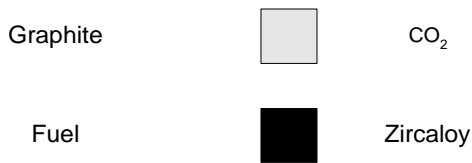
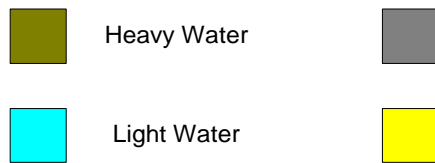


그림 5 감속제의 두께에 따른 무한증배계수의 변화

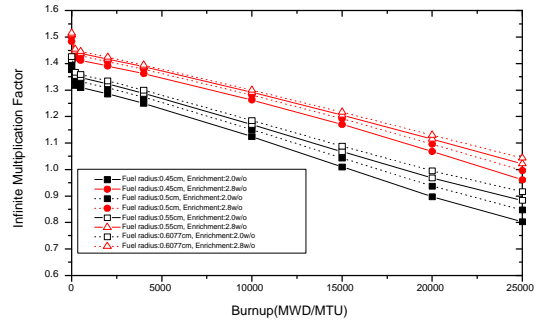


그림 6 제 1설계안의 각 변수별 무한증배계수

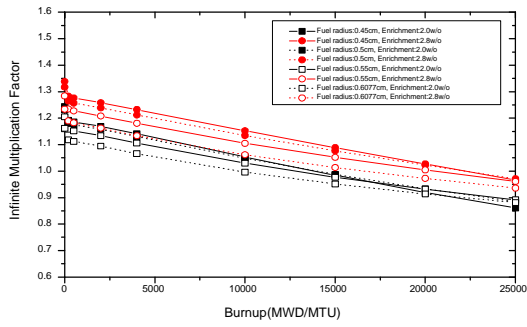


그림 7 제 2설계안의 각 변수별 무한증배계수 (감속재의 두께:2.0cm)

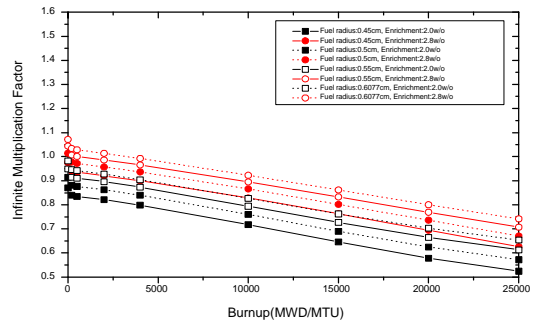


그림 8 제 3설계안의 각 변수별 무한증배계수 (감속재의 두께:2.0cm)

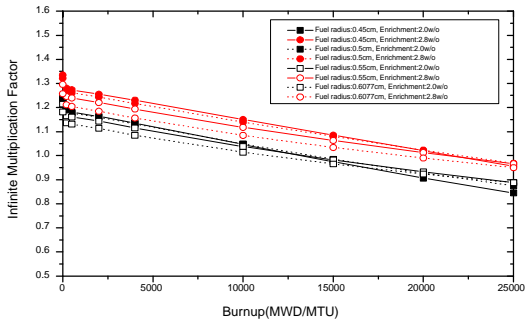


그림 9 제 4설계안의 각 변수별 무한증배계수 (감속재의 두께:2.0cm)

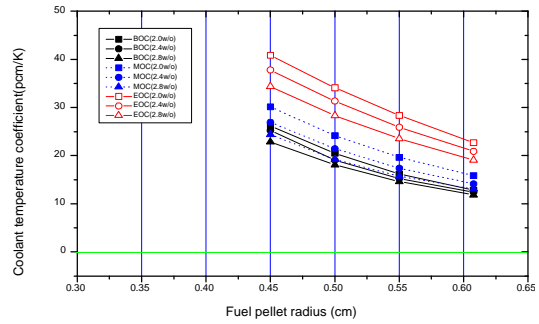


그림 10 제 1설계안의 냉각재 온도계수

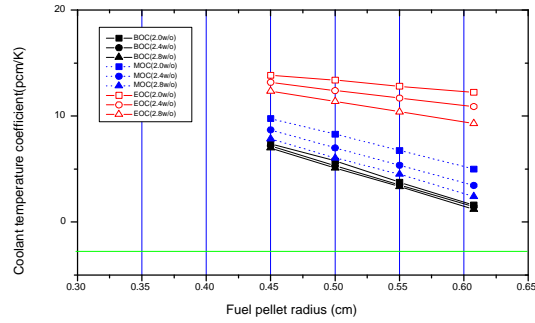


그림 11 제 1설계안의 감속재 온도계수

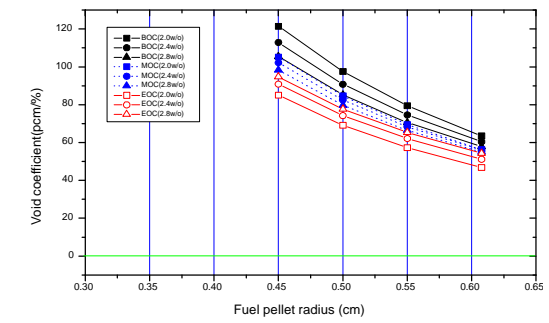


그림 12 제 1설계안의 기포 반응도 계수

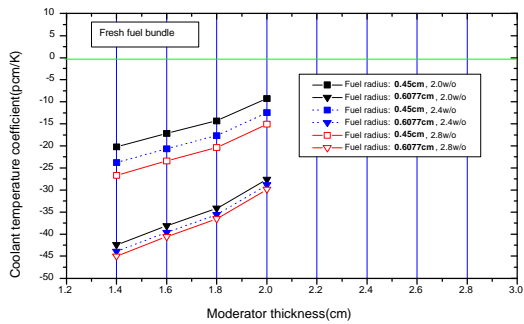


그림 13 제 2설계안의 냉각재 온도계수 (초기 장전시 핵연료 다발)

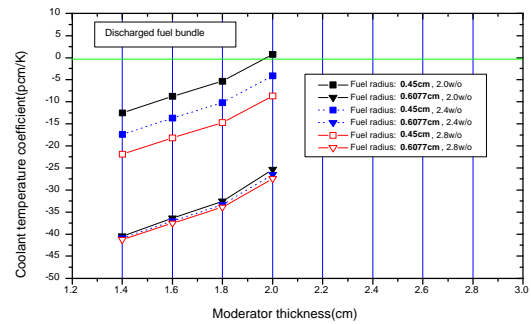


그림 14 제 2설계안의 냉각재 온도계수 (방출 직전의 핵연료 다발)

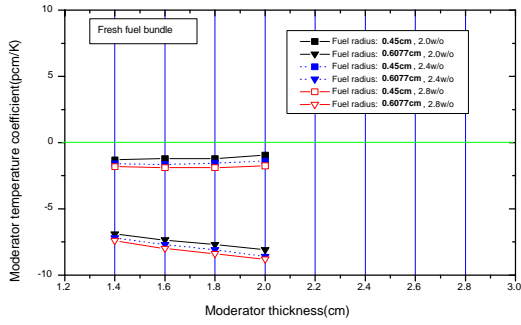


그림 15 제 2설계안의 감속재 온도계수  
(초기 장전시 핵연료 다발)

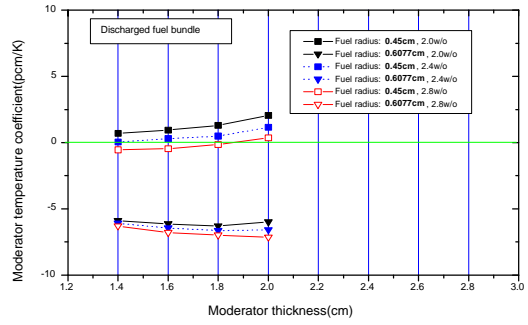


그림 16 제 2설계안의 감속재 온도계수  
(방출직전의 핵연료 다발)

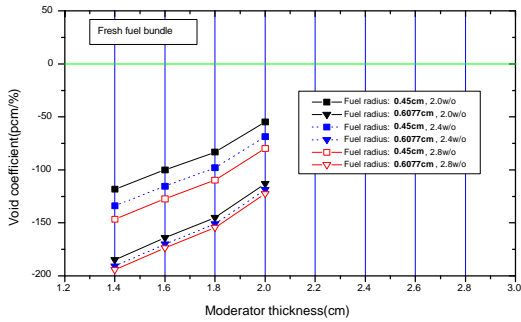


그림 17 제 2설계안의 기포 반응도계수  
(초기 장전시 핵연료 다발)

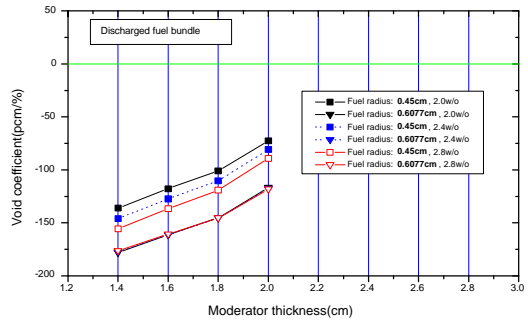


그림 18 제 2설계안의 기포 반응도계수  
(방출직전의 핵연료 다발)

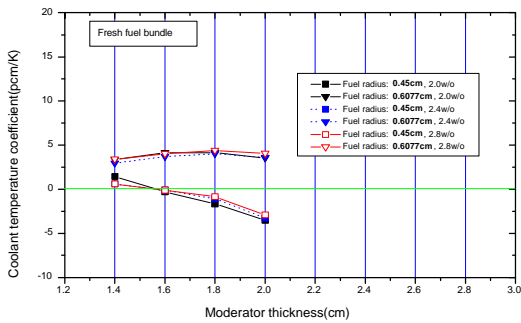


그림 19 제 3설계안의 냉각재 온도계수  
(초기 장전시 핵연료 다발)

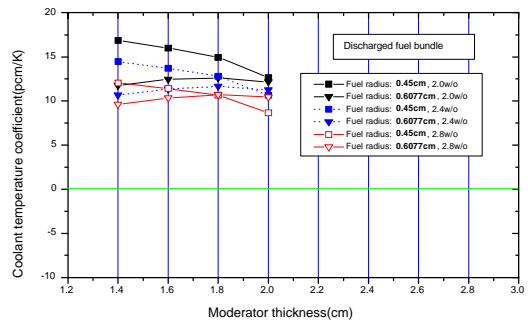


그림 20 제 3설계안의 냉각재 온도계수  
(방출 직전의 핵연료 다발)

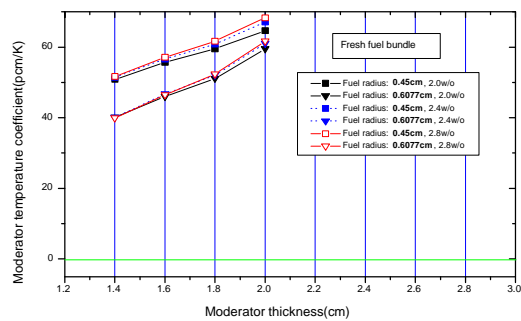


그림 21 제 3설계안의 감속재 온도계수  
(초기 장전시 핵연료 다발)

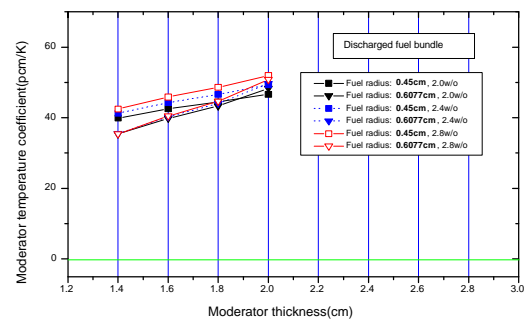


그림 22 제 3설계안의 감속재 온도계수  
(방출직전의 핵연료 다발)

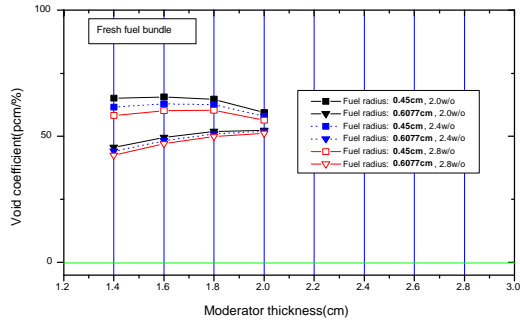


그림 23 제 3설계안의 기포 반응도계수  
(초기 장전시 핵연료 다발)

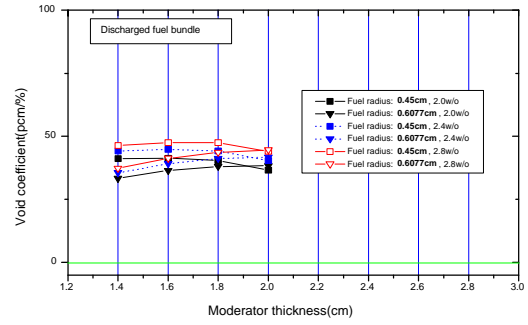


그림 24 제 3설계안의 기포 반응도계수  
(방출직전의 핵연료 다발)

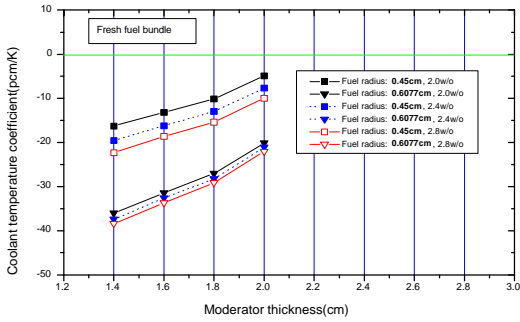


그림 25 제 4설계안의 냉각재 온도계수  
(초기 장전시 핵연료 다발)

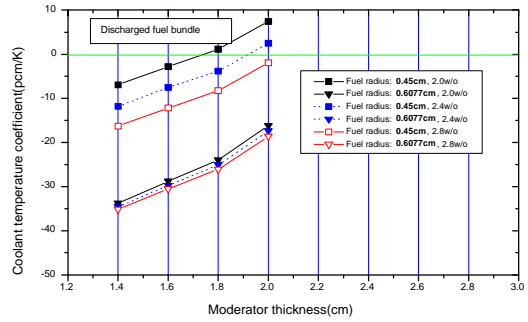


그림 26 제 4설계안의 냉각재 온도계수  
(방출 직전의 핵연료 다발)

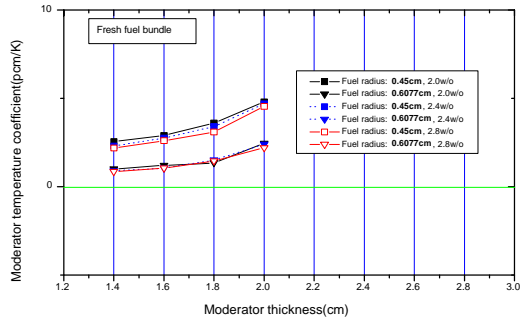


그림 27 제 4설계안의 감속재 온도계수  
(초기 장전시 핵연료 다발)

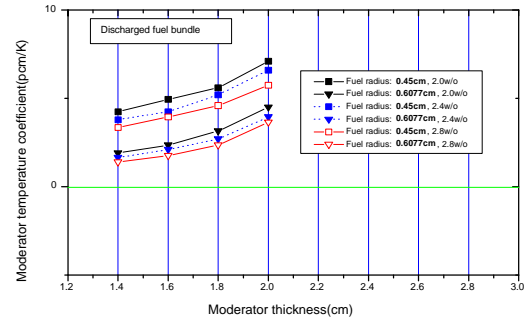


그림 28 제 4설계안의 감속재 온도계수  
(방출직전의 핵연료 다발)

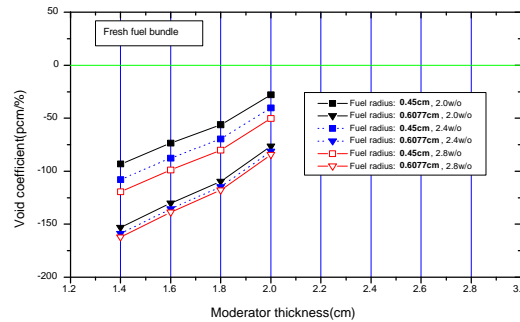


그림 29 제 4설계안의 기포반응도계수  
(초기 장전시 핵연료 다발)

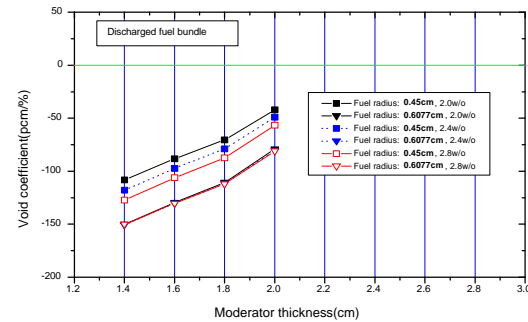


그림 30 제 4설계안의 기포반응도계수  
(방출직전의 핵연료 다발)

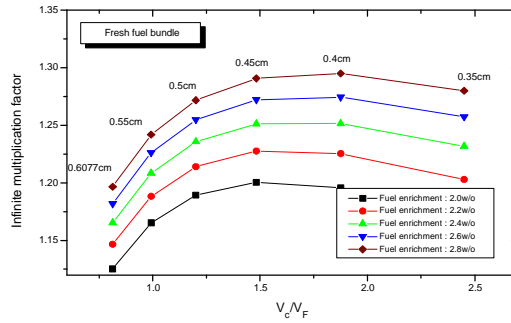


그림 31 제 2설계안에서 농축도별 냉각재 대 핵연료 비

표 1 BP의 위치별 핵연료다발 설계

\*제어 불가능

OPTION I						
CASE		Power sharing (Max./Min.)	Number of B-10 (#)	Enrichment of B-10 (w/o)	Thickness of IFBA (cm)	
외 환경 (18)	3	5CASE1	1.537	7.26E+22	67	0.00254
	6	5CASE2*	1.469	-	-	-
	9	5CASE3*	1.453	-	-	-
	18	5CASE4*	1.156	-	-	-
중 환경 (12)	3	5CASE5	2.338	7.15E+22	64	0.00254
	4	5CASE6	2.02	1.01E+23	45	0.00254
	6	5CASE7	1.833	8.26E+22	37	0.00254
	12	5CASE8*	1.744	-	-	-
내 환경 (6)	6	5CASE9	2.406	7.25E+22	33	0.0025
OPTION II						
CASE		Power sharing (Max./Min.)	Number of B-10 (#)	Enrichment of B-10 (w/o)	Thickness of IFBA (cm)	
외 환경 (18)	3	7CASE1	1.772	2.53E+22	25	0.00254
	6	7CASE2	1.726	2.58E+22	Nat.B	0.00165
	9	7CASE3	1.456	3.29E+22	25	0.0011
	18	7CASE4*	1.784	-	-	-
중 환경 (12)	3	7CASE5	1.873	3.65E+22	36	0.00254
	4	7CASE6	1.878	3.24E+22	24	0.00254
	6	7CASE7	1.873	3.05E+22	Nat.B	0.00195
	12	7CASE8	1.937	7.18E+22	25	1.0018
내 환경 (6)	6	7CASE9	2.368	4.66E+22	23	0.00254

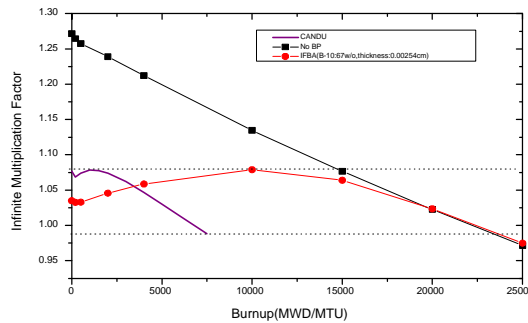


그림 32 IFBA 사용시 반응도 제어효과(5CASE1)

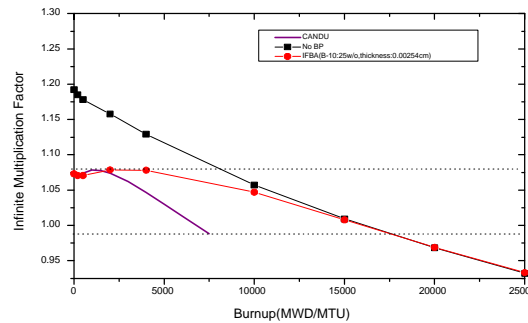


그림 33 IFBA 사용시 반응도 제어효과(7CASE1)