

선박용 소형동력로의 노심 핵설계

최유선 · 김종채 · 김명현

경희대학교 원자력공학과

Nuclear Core Design for a Marine Small Power Reactor

Yu Seon Choi, Jong Chae Kim and Myung Hyun Kim

Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University

요 약

열출력 108 MW_{th}급의 소형 원자로심을 설계하였다. 설계 제한 조건으로 2년의 재장전 주기, 무봉산 운전, 저출력 밀도를 채택하였고, 핵연료의 설계는 울진 3 & 4호기의 핵연료집합체 사양을 그대로 채택하였다. 노심 출력준위 제어는 제어봉만으로 가능하도록 하였으며, CASMO-3와 KINS-3를 통해 설계된 초기노심이 주기길이, 첨두계수, 감속재 온도계수, 출력계수 등의 설계 한계치를 만족하는지 확인하였다. 설계 결과, 한국형 표준원전 핵연료집합체를 장전하는 유조선급의 선박용 소형원자로를 무봉산 운전 조건으로 설계 가능함을 알 수 있었다. 단 가연성 독봉을 축방향으로 농축도를 달리하여 장전할 필요가 있으며, 독봉과 제어봉을 설계 한계까지 사용하여야 함을 알았다. 충분한 정지 반응도를 얻기위해 3개의 제어봉군 이외에 추가적인 정지제어봉군이 노심 외곽에 배치되는 안이 제기되었다.

Abstract—A small power reactor core of 108 MW_{th} was designed with some design constraints: 2 year refueling cycle length, soluble boron free operation, low power density, and proven fuel assembly design - Uljin 3&4 design specifications. CASMO-3 and KINS-3 was used to evaluate operational capability for power level control via control rods. Cycle length, power peaking factor, M.T.C., and power coefficients were also checked. Designed core loaded with KOFAs satisfied all design goals. We found that much more burnable poisons are to be loaded with axial enrichment zoning. Control rod assemblies should be located at every other assemblies with more than 3 banks. Additional shutdown banks are proposed for the safe plant cooldown, which could be located at core periphery.

1. 서 론

최근 신형원자로의 개발이 추진되는 과정에서 봉산 사용에 따른 액체 방사성 폐기물의 발생을 줄이고, 화학 체적제어계통(CVCS)을 제거하여 발전시설을 간단히 하기 위해 무봉산 운전의 가능성이 검토되었다¹⁾. 무봉산 노심은 주기초의 잉여 반응도를 가연성 독봉과 제어봉만으로 상쇄시켜야 하므로 기존 원자로보다 설계와 운전이 어렵다. 특히 제어봉의 반응도 조절기능이 극대화됨으로 대형원자로에서는 가능성이 매우 적은 것으로 알려 졌다.

원자로를 상업적 전력 생산 목적 이외에 활용할 경우 대형로(600 MWe 이상)보다는 소형로가 대체적으로 더

유리하다. 왜냐하면 경제성이 최우선 목표가 아닌 소형로의 경우 저출력 노심으로서 대형의 노심보다 안전성을 높일 수 있으며, 운전 및 제어가 쉬어지고, 표준화의 가능성도 높으며 다목적으로 이용할 수 있는 설계 여유도가 높아지기 때문이다. 소형로의 이용 가능한 분야는 연구/실험용원자로, 지역 난방을 위한 열병합 발전로, 의학치료용 방사선원 생산로, 선박 잠수함 우주선 등의 소형동력로 등으로 다양하다^{2,3)}. 그런데 전기 생산이외의 원자로 이용은 그 사용 목적에 따라 설계 제한 조건들이 서로 매우 다르기 때문에 노심 설계 변수들도 달라져야 하며, 따라서 기존 상용로에 사용된 설계 개념은 부적합하다. 본 연구에서는 소형로가 이용될 수 있는 분야 가운데서 비교적 설계 제한 조건이 명확한 소형 동

력로를 우선적으로 선택하여 노심의 제한 조건과 특성을 파악하고, 핵적 개념 설계를 하였다. 따라서 현재 활용이 되고 있으며 향후 상업적인 가능성이 높으며 제한 조건이 명확한 선박추진용 원자로를 설계 목표로 하였다. 선박용으로 소형로가 쓰일 경우 노심의 크기 및 중량의 제한이 있는데 선박의 용도와 크기가 정해지면 주기출력이 정해지기 때문에 노심의 출력은 열효율에 따라 고정된 열출력을 필요로 하게 된다^{4,5)}.

본 연구에서는 무부산 운전의 가능성이 많은 선박용 소형동력로의 노심을 개념설계하여 무부산 운전하에서의 반응도 제어 가능성을 검토하였다.

2. 설계 제한 조건 및 설계 목표

소형동력로의 설계에서 우선적으로 고려해야 하는 설계 항목은 열출력 용량과 운전조건이다. 본 연구에서는 다음의 이유로 유조선의 추진 엔진을 설계 대상으로 삼았다.

첫째, 선박이 고출력, 대용량일때 원자력 추진이 보다 경제적으로 유리하다(디젤 추진엔진에 대한 원자력 추진 기관의 경제성 분기점은 주기출력이 10만 마력 이상이라고 본다). 둘째, 유조선의 출입 항구와 항로는 대부분 고정되어 있어서 방사선에 대한 일반 대중들의 우려가 적다. 셋째, 유조선의 경우 국내 조선 기술 수준이 높으며 건조 경험이 많이 축적되어 있다. 본 연구의 대상이 된 유조선은 국내에서 제작가능한 최대 선박인 VLCC(Very Large Crude Oil Carrier)기종을 정하였다. 이 유조선은 주기 출력이 30,000마력이고 속력이 15.7노트이고 기관실의 부피는 12,008.9 m³ 이상이다. 이 부피 내에 원자력 추진설비를 넣을 경우 원자로 노심의 한계 부피를 정하기 위하여 일본에서 이미 해상실험을 마친 'MUTSU'호⁶⁾의 설계를 적용하여 보면 직경과 높이는 각각 248.1 cm 이내의 길이를 만족되도록 설계되어야 VLCC 기종의 유조선 내에 원자력에 의한 추진설비 설치 가능하게 된다.

노심의 핵적 설계 목표는 유조선용 원자로인 동시에 소형 동력로로서의 특성을 극대화하기 위해 다음의 항목을 채택하였다. 첫째, 무부산 운전이 가능하도록 노심을 설계하였다. 둘째, 급격한 출력 변동이 있는 경우를 가정하여 제어봉만으로 출력이 조절될 수 있도록 하였으며, 셋째 경제적으로는 불리하지만 안전성을 높이기 위하여 선출력 및 출력 밀도를 낮게 하였다. 넷째, 핵연료의 재장전 주기는 선박용 원자로인 경우 배의 수명까지 재장전 없이 운전될 수 있도록 원자로의 수명에 맞추는 것이 좋으나, 그럴 경우 핵연료의 농축도가 매우 높아져야 하므로 상업적인 활용 한계에 부딪히게 된다. 따

라서 유조선의 통상적인 정기 점검 기간인 2년과 같도록 하였다. 본 연구에서는 노심 설계안 도출이 주 관심이기 때문에 노심을 구성하는 물질들의 물리적, 화학적, 재료적인 측면은 고려하지 않았다. 그러나 핵설계와 관련된 1차계통의 조건들은 이미 해상실험까지 마친 일본의 'MUTSU'호⁶⁾의 설계 조건과 같게 하였다. 노심의 냉각수 압력은 11 MPa이며, 노심 냉각수 입구온도와 출구온도는 각각 271°C와 285°C로 하였다. 열출력은 VLCC를 추진할 수 있도록 'MUTSU'호의 열효율(20.8%)과 유조선의 주기출력으로부터 환산하여 108 MWt로 정하였으며, 냉각수 유량은 열출력 증감 비율(30 MWt에서 108 MWt로 증가)만큼 증가시켜 5,400 ton/hr로 하였다.

또한 노심 설계에서 중요한 변수로 작용되는 것은 핵연료봉과 핵연료집합체의 설계인데, 너무 많은 설계안이 도출될 수 있고 비현실적인 설계가 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 한국 표준 발전소인 울진 3 & 4호기의 핵연료를 길이만을 변화시키고 그대로 사용하는 것을 목표로 삼았다. 이렇게 함으로써 핵연료만큼은 실증된 기술을 사용하게 되어 현실적으로 건조 가능한 원자로가 될 수 있다. 또한 평균 선출력을 울진 3 & 4호기 평균 열출력보다 20%의 여유도를 추가적으로 두어 10.24 KW/m 이하가 되도록 목표하였다.

3. 계산 체계의 검증

노심의 개념 설계를 위하여 CASMO-3[®]와 3차원 노달 노심 분석 코드인 KINS-3[®]를 사용하였다. 이 전산체계의 신뢰성을 검증하기 위해 울진원자력 3 & 4호기(UCH 3 & 4)와 AP600을 대상으로 노심 계산을 수행하였으며 정상상태의 노심출력 계산과 제어봉의 제어봉가 계산이 비교되었다.

3-1. 울진원자력 3 & 4 호기의 검증계산

노심전체는 177개의 핵연료 집합체로 구성되었으며, 각 핵연료 집합체는 16×16의 핵연료봉과 5개의 제어봉 안내관으로 되어있다. 핵연료봉은 1.8~3.34 w/o의 UO₂ 펠렛과 Zircaloy-4의 피복재로 구성되어 있으며 가연성 독봉이 없는 경우 단일 농축도의 UO₂ 핵연료만으로, 가연성 독봉이 있는 경우는 낮은 농축도의 핵연료와 높은 농축도의 핵연료가 섞여있는 형태로 구성되어 9개의 서로 다른 핵연료 집합체군으로 되어 있다.

노심계산은 CASMO-3에서 각 핵연료 집합체에 대하여 생산된 데이터를 바탕으로 정상상태의 주기초 및 주기말에서의 평면 출력분포, 주기초와 주기말에서 반응도 및 온도계수의 비교, 축방향출력분포, 임계 보론 농도계산 등을 수행하여 Table 1, 2, 3, Fig. 1, 2에 각각 제

Table 1. Reactivity and Coefficients at BOC.

	PSAR	CASMO-3/KINS-3	ERROR (%)
K-effective			
HFP, No Xe, 0 ppm, 594°F	1.139	1.134	-0.44
HFP, Eq Xe, 0 ppm, 594°F	1.103	1.098	-0.45
Critical Boron Concentration (ppm)			
HFP, No Xe, 594°F	1016	993	-2.26
HFP, Eq Xe, 594°F	749	752	0.40
Boron Worth (ppm/% Δρ)			
HFP, Eq Xe, 594°F	84	84	0.0
M.T.C. (Δρ/F)			
HFP, Eq Xe, 749 ppm, 594°F, 50 MWD/MTU	-0.56×10 ⁻⁴	-0.58×10 ⁻⁴	3.57

Table 2. Reactivity and Coefficients at EOC.

	PSAR	CASMO-3/KINS-3	ERROR (%)
Boron Worth (ppm/%Δρ)			
HFP, Eq Xe, 594°F, 13GWD/MTU	82	85	3.53
M.T.C. (Δρ/F)			
HFP, Eq Xe, 749 ppm, 594°F, 13GWD/MTU	-2.30×10 ⁻⁴	-2.28×10 ⁻⁴	0.87

Table 3. Integral Rod Worth of UCH3 & 4 (%Δρ).

	BOC		EOC	
	PASR	KINS-3	PSAR	KINS-3
PSCEA	-0.22	-0.22	-0.31	-0.29
BANK 5	-0.44	-0.47	-0.46	-0.48
BANK 4	-0.57	-0.56	-0.65	-0.63
BANK 3	-0.73	-0.70	-0.62	-0.62
BANK 2	-0.66	-0.79	-0.56	-0.78
BANK 1	-1.74	-1.82	-1.73	-1.72
Shutdown CEAS	-13.24	-12.59	-15.00	-14.7
TOTAL	-17.38	-16.93	-19.02	-18.94

시하였다. 초기노심의 EOC는 13000 MWD/MTU로 계산되었으며, 이는 UCH3 & 4 PSAR에 나타난 13650 MWD/MTU과는 17일의 EFPD 차이가 난다. 전체적으로 노심분석의 결과는 비교적 수용할 수 있는 범위에 들었다. 즉 주기초와 주기말에서 수행된 반응도 및 온도 계수 계산에서 PSAR과 비교하여 각각 2.04%와 3.7%의 오차가 발생했는데 이는 PSAR과 KINS-3의 주기 길이 차이에서 오는 오차로 예상된다. 또한 제어봉군의 완전 인출상태(ARO)시 평면 출력분포에서 노심 안쪽에서는 정확한 결과를 보여주나 반사체 영역에서는 6-7%의 오차를 보이는데 출력이 낮고 크게 변하는 영역이기 때문

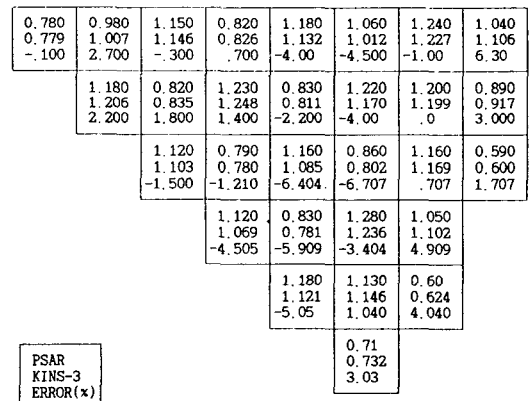


Fig. 1. Radial Power Distribution at BOC(50MWD/MTU), ARO, Eq Xe (UCH3 & 4).

에 생긴 오차이다. 그리고 출력제어용 저가제어봉이 삽입되었을 때의 평면 출력분포에서는 비교적 정확한 결과를 얻었다. 그리고 제어봉가 계산에서는 각 제어봉집합체가 서로 중첩되며 삽입되는 경우를 고려하였으며, 계산 결과 총제어봉가의 경우 주기초에서는 약 2%, 주기말에서는 약 0.5% 이내의 일치도를 보여주고 있으며, 저가 제어봉군의 경우 거의 일치한 것으로 나타났다.

3-2. AP600의 검증계산

AP600의 노심분석에 사용된 입력자료는 Westinghouse

0.950	1.100	1.140	0.960	1.130	1.100	1.140	0.840
0.926	1.103	1.147	0.945	1.130	1.076	1.124	0.883
-2.505	.202	.606	1.505	.0	-2.101	-1.404	5.101
	1.140	0.960	1.260	0.950	1.120	1.110	0.750
	1.158	0.945	1.283	0.928	1.110	1.108	0.782
	1.505	-1.505	1.800	-2.300	-.808	-.101	4.202
		1.200	0.960	1.190	0.930	1.080	0.550
		1.213	0.946	1.187	0.888	1.093	0.586
		1.010	-1.400	-.200	-4.505	1.202	6.505
			1.200	0.960	1.200	0.910	
			1.200	0.917	1.184	0.913	
			.0	-4.400	-1.303	.300	
				1.180	1.090	0.57	
				1.159	1.111	0.611	
				-1.700	1.901	7.101	
					0.680		
					0.696		
					2.300		

PSAR
KINS-3
ERROR(%)

Fig. 2. Radial Power Distribution at EOC, ARO, Eq Xe (UCH 3 & 4).

1.048	0.968	1.112	1.054	1.140	1.016	1.074
1.071	0.954	1.125	1.034	1.140	0.982	1.095
2.195	-1.446	1.124	-1.898	.0	-3.346	2.002
	1.073	1.014	1.287	1.029	1.104	0.957
	1.093	0.997	1.305	0.998	1.103	0.975
	1.864	-1.677	1.418	-3.061	-0.091	1.933
		1.109	1.006	1.081	1.022	0.938
		1.118	0.980	1.080	1.001	0.979
		0.766	-2.560	-0.069	-2.055	4.398
			.1.065	0.934	0.895	0.626
			1.062	0.901	0.890	0.669
			-0.282	-3.506	-0.587	6.869
				1.153	0.712	
				1.159	0.730	
				0.477	2.563	

SSAR
KINS-3
ERROR(%)

Fig. 3. Radial Power Distribution at BOC, ARO, Eq Xe (AP-600).

사가 US DOE에 제출한 AP-600 SSAR(Standard Safety Analysis Report)의 자료를 기초로 하였다. AP-600의 독물 질로서는 WABA를 사용하고 있으며, 제어봉체계는 M0, M1으로 표시되는 저가제어봉(Gray Rod) 집합체와 M2, M3, AO로 대표되는 고가제어봉(Black Rod) 집합체, 그리고 SD1, SD2, SD3의 정지제어봉(Shutdown Rod) 집합체로 구성되어 있다. 부하추증운전을 담당하도록 설계되어 있는 저가제어봉집합체는 기존 가압경수로에 사용되던 24개의 고가제어봉중 20개를 Stainless Steel 봉으로 교체한 설계를 사용하였다.

KINS-3에 의한 노심계산은 울진 3 & 4호기 분석방법과 유사한 방법으로 수행하였으며, 주기전체를 통하여 연소도에 따라 출력분포 및 임계보론 농도, 저가제어봉 군과 고가제어봉군의 적분제어봉가 등을 계산하였다. Fig. 3, 4는 이들의 결과를 보여주고 있다. 출력분포의 경우 AP-600의 SSAR과 비교하여 각각 주기초는 대부분이 1~2%, 주기말에서는 2~3%의 오차가 발생하여 수

0.992	1.083	1.008	1.112	1.016	0.977	0.865
1.041	1.123	1.053	1.145	1.035	0.962	0.855
4.940	3.740	4.415	3.013	1.870	-1.535	-0.925
	0.999	1.101	1.108	1.118	0.986	0.874
	1.047	1.140	1.146	1.128	0.975	0.850
	4.780	3.497	3.430	0.894	-1.090	-2.689
		1.025	1.131	1.044	1.138	0.863
		1.064	1.152	1.053	1.111	0.847
		3.805	1.857	0.862	-2.395	-1.854
			1.050	1.124	0.923	0.692
			1.062	1.099	0.880	0.674
			1.167	-2.269	-4.632	-2.601
				1.099	0.781	
				1.054	0.740	
				-4.117	-5.218	

SSAR
KINS-3
ERROR(%)

Fig. 4. Radial Power Distribution at EOC, ARO, Eq Xe (AP-600).

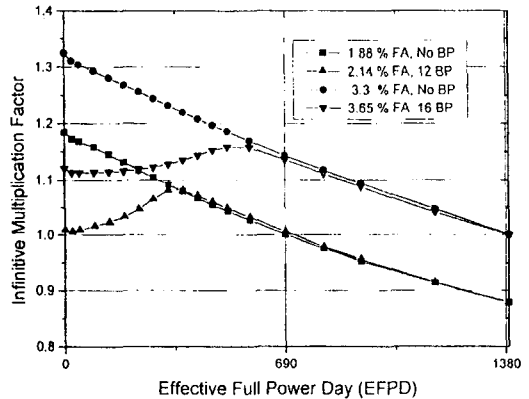
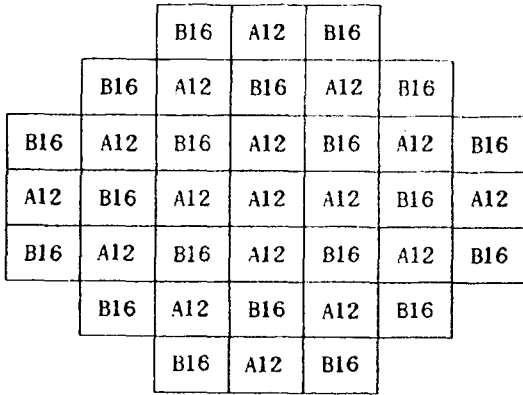


Fig. 5. Fuel Enrichment of 2 batch Fuel Assemblies.

용할 수 있는 범위에 들었다. 임계보론 농도는 검증계산의 방법론 전체를 평가할 수 있는 중요 척도로서 정확성이 요구된다. CASMO-3/KINS-3로 분석된 초기노심의 주기길이는 16200 MWD/MTU으로 표준안전성분석 보고서에 나타난 16650 MWD/MTU보다는 400 MWD/MTU 정도 짧다. 전출력상태에서 각각의 제어봉집합체에 대한 제어봉가계산을 수행하였으나 표준안전성 분석 보고서에는 전체 제어봉집합체에 대한 제어봉가만이 수록되어 있어 각각의 제어봉집합체에 대한 비교는 할 수 없었다. 전체 제어봉집합체의 경우 주기초에는 1%, 주기말에는 -18%의 오차를 나타냈다. 그리고 1차로 출력 조절에 사용되는 저가제어봉 집합체인 M0가 삽입되었을 때의 출력분포 계산도 수행하였다. 그 결과 주기초에서는 M0군의 위치를 비롯하여 전체적으로 2-3%의 오차를 보였다. 그러나 주기말에서는 최고 9%까지 큰 오차를 보였다. 평면출력분포, 적분제어봉가 등이 주기말로 진행될수록 오차가 심화되는 것은 주기 길이의 차이



A#: Enrichment 2.14%, BP #
 B#: Enrichment 3.65%, BP #

Fig. 6. Core Loading Pattern.

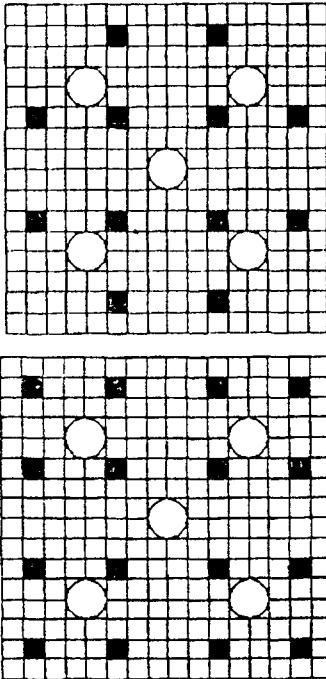


Fig. 7. BP Rod Location in a Fuel Assembly.

에서 발생하는 것으로 생각된다. 그러나 전체적으로 CASMO-3/KINS-3의 계산체계는 본 연구에 필요한(개념설계 연구에 필요한) 신뢰성을 갖음을 알 수 있었다.

4. 핵적 개념 설계 방법

CASMO-3에 의한 집합체별 농축도 결정은 Fig. 5에서처럼 주기 말까지 무한 증배 계수가 1 이상으로 유지

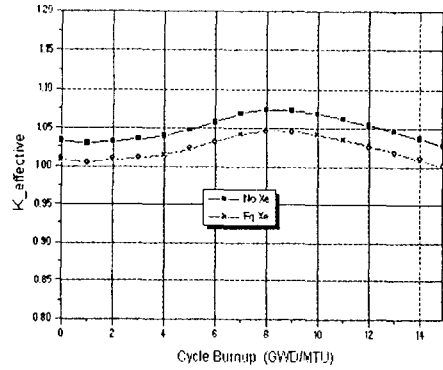


Fig. 8. Core Excess Reactivity vs. Burnup.

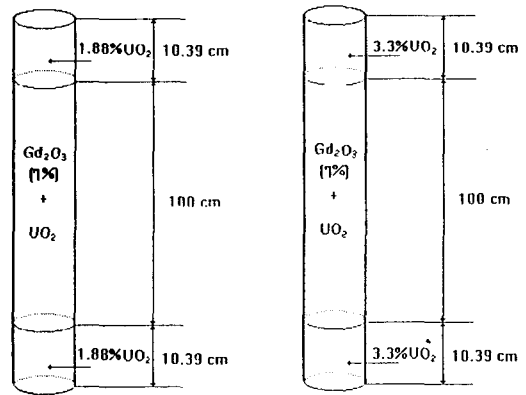


Fig. 9. Axial Poison Enrichment Zoning in BP Rod.

되도록 하여 2개 batch를 가정하여 2가지 집합체별 농축도를 결정하였다. 정해진 농축도에 따라 각각의 핵연료 집합체에 가연성 독봉의 위치와 갯수를 조합하여 집합체내 첨두 출력을 조절하였다. 집합체 갯수를 결정하기 위하여 설계 선출력 10.24 KW/m와 목표 열출력 108 MWt로부터 연료봉의 총길이를 계산하였고, 울진 3 & 4호기의 운전 출력 밀도인 96.64 KW/l을 초과하지 않도록 하였다. 초기 노심의 장전모형은 이미 정해진 집합체 수를 배열하는 것이지만 노심이 2 batch가 되도록 하여 핵연료 농축도가 상용로의 농축도 이상이 되지 않게 하였고, 동일한 농축도의 집합체는 가능한 접하지 않도록 하였다. 또한 여러 경우의 장전 모형이 있을 수 있으나, 첨두출력이 가능한 낮게 되며, 출력 분포가 평탄하도록 Fig. 6과 같은 모형에 따라 노심을 구성하였다.

가연성 독봉은 천연우라늄과 Gadolinium을 혼합한 일체형의 독봉을 사용하였으며, Fig. 8에서처럼 주기초 노심 잉여반응도가 0에 가깝게 되도록 농축도와 갯수를 조정하였다. 설계안은 Fig. 7과 같이 핵연료 집합체별로 12개와 16개를 각각 장전하고, 7% 농축도의 Gd를 사용

Table 4. Core Design Parameters.

Fuel Enrichment	1.88/2.14, 3.3/3.65
Assembly Pitch (cm)	20.25
Effective Height (cm)	120
Equivalent Diameter (cm)	139
Discharge Burnup (EFPD)	690
Cycle Burnup (MWD/MTU)	14868.6
Core Diameter/Height Ratio	1.1507

0.852	0.919	1.200	0.827
0.921	0.948	1.144	0.865
	1.220	0.958	0.963
	1.151	0.933	1.009
		1.031	
		1.030	

BOC
EOC

Fig. 10. Relative Power Density (ARO, Eq Xe).

하도록 하였다. 또한 축방향 침투치를 가능한 한 낮추기 위하여 Fig. 9에서 처럼 축방향으로 Enrichment Zoning을 하였다.

5. 개념 설계 결과

설계 제한 조건과 설계 목표에 따라 소형동력로의 노심을 아래의 Table 4와 같이 구성하였다. 설계된 노심의 주기초 잉여반응도는 0.9%이고, Fig. 8에서 보면 주기말까지 평탄하게 유지되면서 양의 반응도를 갖으므로 주기길이를 충족시킴을 알 수 있다.

Fig. 10, 11에서는 출력분포를 보여주는데 최대 반경 방향 침투 출력치는 1.22, 최대 축방향 침투치가 1.148이며, 집합체내의 최대 봉침투값은 1.181로서 최대 침투 봉 출력치는 1.65의 값을 넘지않아 제한 침투 출력치였던 3.56이하의 조건을 만족시키고 있다. 운전온도 범위에서의 감속재 온도 계수는 Fig. 12에서 보는 바와 같이 -35.0 pcm/°C의 큰 음의 값을 갖어 상업용 노심보다 큰 반응도 제환 안정성을 갖는다. Fig. 13은 0% 출력에서 100% 출력 사이에서의 출력 계수를 보여주고 있다

다음의 Fig. 14는 제어봉군 3개의 배치를 보여주는데 봉산을 쓰지 않기 때문에 주기초에 상당량의 제어봉을 삽입하고 운전을 개시하여야 한다. 주기말로 진행하면서 A,B 뱅크를 중첩하여 빼면 반응도 요구량을 맞추어 줄 수 있다. Fig. 15는 출력 제어에 필요한 제어봉의 삽입 위치를 주기초에 대해 보여 주고 있다.

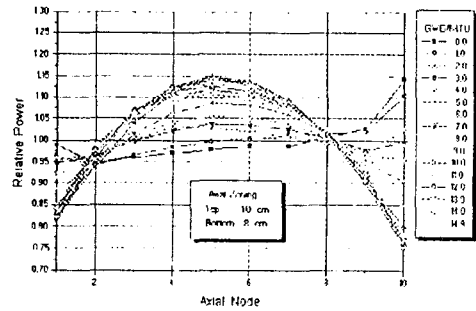


Fig. 11. Axial Power Shape.

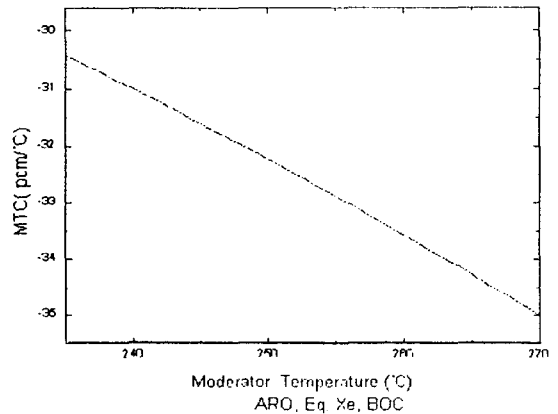


Fig. 12. Moderator Temp. Coeff.

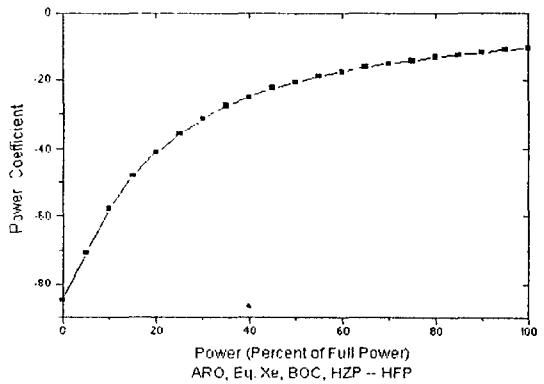
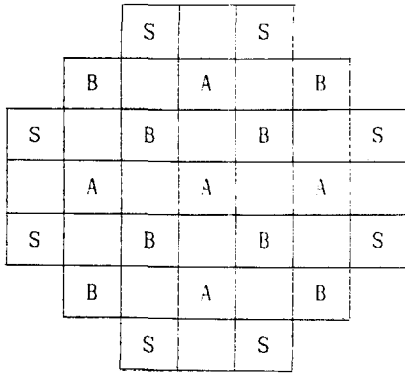


Fig. 13. Power Coefficient.

설계된 노심의 Power Defect는 2.6%Δp이며, Xe의 반응도가는 2.3%Δp의 값을 갖는다. 주기초의 잉여 반응도가 0.9%Δp이고 계산된 적분제어봉가가 13.2%Δp이므로, Shutdown Margin은 7.4%Δp 정도의 노심임을 알 수 있었다. 그러나 노심의 Temperature 반응도 Defect는 18.4%Δp이므로 재장전 정지(shutdown cooldown)에 필요한 총 반응도는 주기초에 24.2%Δp 가량이다. 따라서



A: A Bank, B: B Bank, S: Shutdown Bank

Fig. 14. Control Rod Bank Arrangement.

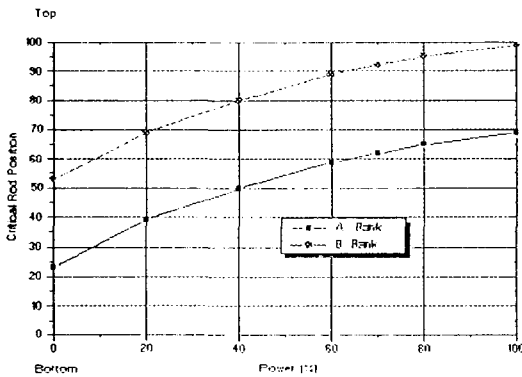


Fig. 15. Rod Position vs. Power Level (BOC).

적분 제어봉가를 상쇄하면 약 11%Δp의 추가적인 정지 반응도가 필요하다. 이를 위해서는 봉산수를 사용하거나 추가 정지제어봉이 필요하다. 이 부분이 선박용 원자로의 노심설계에서 가장 논란이 될 수 있는 문제이다. 실제로는 핵연료의 재장전은 선박을 개보수하는 시기에만 시행되도록 설계되고 있다.

6. 결 언

본 연구로부터 울진 3 & 4호기의 핵연료 집합체 설계

를 그대로 사용하여 대형 유조선에 사용할 소형 동력로가 설계될 수 있음을 보였다. 이 결과는 핵적 설계의 측면만을 고려한 것이므로 핵연료의 기계적 건전성은 추후 검토되어야 한다. 특히 선박의 경우 정지나 출발시 출력이 급히 증/감발되므로 핵연료에서의 PCMI 안전성이 따로 검토되어야 한다. 이 원자로는 MTC가 음의 방향으로 매우 커서 운전의 안전성은 좋으나 원자로 정지에 따른 Shutdown Margin의 확보가 어렵다. 현재 제어봉이 집합체에서 하나 걸러 배치되어 정지여유도는 확보하였다. 그러나 핵연료 재장전시의 cold shutdown을 위한 고농도 봉산을 사용할 수 없어, 재장전이나 cold shutdown을 위한 비상 제어봉이 추가로 설치될 필요가 생겼다. 이 필요성은 노심이 작으므로 노심 외곽에 추가의 제어봉을 판형으로 두름으로써 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. ABB-CE, "Elimination of Soluble Boron for a New PWR Design", EPRI Project RP-2614-24, Final Report, (1989).
2. "Small and Medium Reactors: I. Status and Prospects", Nuclear Energy Agency, OECD, (1991).
3. "Small and Medium Reactors: II. Technical Supplement", Nuclear Energy Agency, OECD, (1991).
4. "조선 해양 공학 개론", 대한조선공학회, (1993).
5. 채원석, "원자력선 개관", 영문출판사, (1992).
6. "원자력선 연구 개발의 현황", 일본원자력연구소, (1992).
7. T. Hoshi, H. Iida and M. Ochiai: "Recent Development in Nuclear Ship Reactor in Japan," JAERI.
8. "가연성 독봉 사용방법 최적화 연구", KRC-92N-I 04, 한전기술연구원, (1993).
9. "노심 및 원자로계통의 설계검증코드 체계확립 및 개발에 대한 연구", KINS/GR-054, 한국원자력안전기술원, (1993).