

'95 추계학술발표회

한국원자력학회

소형 동력로의 무봉산 노심 설계

최 유선, 김 명현

경희대학교

박 군철, 이 은철

서울대학교

요 약

열출력 108MW_t급의 소형 원자로를 설계하였다. 설계 제한 조건으로 2년의 재장전 주기, 무봉산 노심, 저 출력 밀도를 채택하였고, 핵연료 집합체의 설계는 올진 3&4호기의 사양을 그대로 사용하였다. 노심 출력 준위 제어는 제어봉만으로 가능하도록 하였다. CASMO-3와 KINS-3를 통해 설계된 노심의 주기 길이 만족 여부 확인, 침투 계수, 감속재 온도 계수, 출력 계수 등을 계산하였다. 설계 결과, 한국 표준 원전 핵연료집합체 사양으로 저출력 밀도의 소형원자로를 무봉산 운전으로 가정하여 설계 가능함을 알 수 있었으며, 감속재 온도 계수가 음의 안전성을 갖고 있으며, 가연성 독봉의 축방향 Zoning이 필요하며, 기존 상용로의 경우 보다 독봉을 많이 사용되어야 하며, 제어봉이 서양 장기판처럼 배치될 정도로 많이 사용되어야 함을 알았다.

1. 서 론

지금까지 국내에서의 원자력 이용분야는 기술적인 성숙에도 불구하고 상업적인 대형 발전에 편중되어 연구 개발되어 왔다. 그러나, 이제는 여러 면에서 볼 때 그 활용분야의 범위를 확대할 수 있는 시기와 여건이 충분하다고 할 수 있다. 상업적인 전기 생산이외의 활용 분야는 연구/실험용 원자로, 지역 난방을 위한 열 병합 발전, 의학 치료용 방사선원 생산, 비파괴 검사, 소형동력 등으로 다양하다.¹⁾²⁾ 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 부적합할 수 있다. 원자로를 대형 상업 전력 생산 이외의 목적에 이용할 경우 대형로(600MWe이상)보다는 소형로가 대체적으로 더 유리하다. 왜냐하면 경제성이 최우선이 아닌 소형로

의 경우 저출력 노심으로서 대형의 노심보다 안전성을 높일 수 있으며, 운전 및 제어가 쉬어지고, 표준화의 가능성도 높으며 다목적으로 이용할 수 있는 설계 여유도가 높아지기 때문이다. 본 연구에서는 소형로가 이용될 수 있는 분야 가운데 가능한 한 설계 제한 조건이 명확한 분야를 우선적으로 선택하여 노심의 제한 조건과 특성을 파악하고, 핵적 개념 설계를 하고자 하였다. 현재 활용이 되고 있으며 상업적인 가능성이 높으며 제한 조건이 명확한 선박추진용 원자로를 설계 목표로 하였다. 선박용으로 소형로가 쓰일 경우 소형 동력로가 되어야 하며, 노심의 크기 및 중량의 제한이 있다. 또한 선박의 용도와 크기가 정해지면 주기출력이 정해지기 때문에 노심의 출력은 열효율에 따라 고정된 열출력을 필요로 하게 된다.³⁾⁴⁾

최근 신형원자로의 개발이 추진되는 과정에서 부산 사용에 따른 액체 방사성 폐기물의 발생을 줄이고, CVCS를 제거하여 발전시설을 간단히 하기 위해 무부산 운전의 가능성이 검토되었다.⁵⁾ 무부산 노심은 주기초의 잉여 반응도를 가연성 독봉과 제어봉으로만 상쇄하여야 하므로 기존 원자로보다 설계와 운전이 어렵다. 특히 제어봉의 반응도 조절기능이 극대화됨으로 대형원자로에서는 가능성이 매우 적은 것으로 알려 졌다. 본 연구에서는 우선 노심의 반응도 제어 가능성만을 검토하였으며, 운전의 효율성은 검토하지 않았다.

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, 원자력 추진의 경우 고출력, 대용량일때 경제적으로 유리하다.(주기출력이 10만 마력 이상일 때 원자력 추진 기관은 경제성이 있다고 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 국내 제작가능한 최대 마력선으로 VLCC(Very Large Crude Oil Carrier)기종으로 정하였다. 이 유조선은 주기 출력이 30,000마력이고 속력이 15.7노트이고 기관실의 부피는 12008.9 m³이상이다. 이 부피 내에 원자력 추진설비를 넣을 경우 원자로 노심의 한계 부피를 정하기 위하여 일본에서 이미 해상실험을 마친 'MUTSU' 호⁶⁾⁷⁾의 적용하여 노심의 등가 직경과 실효높이를 대략 비슷하다고 보면 직경과 높이는 각각 248.1cm이내의 길이를 만족되도록 설계되어야 VLCC기종의 유조선 내에 원자력에 의한 추진설비 설치가 가능하게 된다.

노심의 핵적 설계 목표는 유조선용 원자로인 동시에 소형동력로로서의 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, 경제적으로는 불리하지만 안전성을 높이기 위하여 선출력 및 출력 밀도를 낮게 하였다. 셋째, 핵연료의 재

장전 주기는 선박용 원자로인 경우 배의 수명까지 재장전 없이 운전될 수 있도록 원자로의 수명에 맞추는 것이 좋으나, 그럴 경우 핵연료가 고농축되어야 하므로 상업적인 한계에 부딪히게 된다. 따라서 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' 호⁵⁾⁶⁾의 설계 조건을 기준으로 하여, 열출력증감 비율만큼 열수력 설계치를 조정하였다. 'MUTSU'호의 열효율과 유조선의 주기출력으로부터 목표 열출력 용량을 108MW로 정하였다.

또한 노심 설계에서 고려되어야 할 사항은 핵연료의 설계인 데, 매우 많은 설계안이 도출될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 한국 표준 발전소인 울진 3&4호기의 핵연료를 길이만을 변화시키고 그대로 사용하는 것을 목표로 삼았다. 평균 선출력을 울진 3&4호기 평균 열출력보다 20%의 여유도를 추가적으로 두어 10.24KW/m이하가 되도록 목표하였다.

3. 핵적 개념 설계 방법

노심의 개념 설계를 위하여 40군의 중성자 Library를 사용하였고, Gadolinium을 포함한 집합체별의 단면적을 생산할 수 있는 코드인 CASMO-3⁸⁾와 3차원 노달 노심 분석 코드인 KINS-3⁹⁾를 사용하였다. CASMO-3에 의한 집합체별 농축도 결정은 그림1에서 처럼 주기 말까지 무한 증배 계수가 1 이상으로 유지되도록 하여 2개 batch를 가정하여 2가지 집합체별 농축도를 결정하였다. 정해진 농축도에 따라 각각의 핵연료 집합체에 가연성 독봉의 위치와 갯수를 조합하여 집합체내 침투 출력을 조절하였다. 집합체 갯수를 결정하기 위하여 설계 선출력 10.24 KW/m와 목표 열출력 108MW로 부터 연료봉의 총길이를 계산하였고, 울진 3&4호기의 운전 출력 밀도인 96.64KW/ℓ을 초과하지 않도록 하였다. 초기 노심의 장전모형은 이미 정해진 집합체 수를 배열하는 것이지만 노심이 2 batch가 되도록 하여 핵연료 농축도가 상용료의 농축도 이상이 되지 않게 하였고, 동일한 농축도의 집합체는 가능한 접하지 않도록 하였다. 또한 여러 경우의 장전 모형이 있을 수 있으나, 침투출력이 가능한 낮게 되며, 출력 분포가 평탄하도록 그림2와 같은 모형에 따라 노심을 구성하였다. 가연성 독봉의 재질은 천연우라늄과 7% 농축도의 Gadolinium을 혼합한 일체형의 형태로 사용하였다. 집합체내의 가연성 독봉의 수는 대칭이 되도록 하고 그림 3과 같이 주기초 잉여반응도가 0에 가깝게 되도록 12개와 16개를 핵연료 집합체별로 각각 사용하였고, 축방향 침투치를 가능한 낮게 하기 위하여 그림 4에서 처럼 축방향으로 Zoning을 하였고, Zoning한 부분의 핵연료 농축도를 주기길이를 만족할 수 있도록 CASMO-3로 재조정하였다. 그림 5에서 처럼 주기길이를 만족하는 새로운 농축도를 선정하였다.

4. 개념 설계결과

설계 제한 조건과 설계 목표에 따라 소형동력로의 노심을 아래의 표1과 같이 구성하였다.

표 1. 개념 설계 결과

핵연료 농축도	1.88, 2.14, 3.3, 3.65
집합체 Pitch(cm)	20.25
실효 높이 (cm)	120
노심 등가 직경 (cm)	139
전출력 환산일 (EFPD)	690
주기 연소도 (MWD/MTU)	14868.6
노심 등가 직경/높이 비율	1.1507

설계된 노심의 주기초 잉여반응도는 6.1%이고, 그림6에서 보면 주기 말까지 0이상의 반응도를 갖으므로 주기길이를 충족시킴을 알 수 있다. 그림7과 그림8에서 반경 방향 침투 출력치는 1.173, 축방향 침투치가 1.0453이며, 집합체내의 붕침투값은 2.10으로 침투 붕출력치는 1.45의 값으로 제한 침투 출력치였던 3.56이하의 조건을 만족시키고 있다. 그림9에서 보는 바와 같이 운전조건 상태에서 감속재 온도 계수는 $-29.6\text{pcm}/^{\circ}\text{C}$ 의 큰 음의 값으로 1차 냉각수의 온도 변화에 따른 노심의 자기제어성이 상업용 노심보다 큰 것을 볼 수 있었다. 그림10은 0%출력에서 100%출력 사이에서의 출력 계수를 보여주고 있다. 농축도 2.14%의 핵연료 집합체 17개와 농축도 3.65%의 핵연료 집합체 20개로 주기 말까지 연소가능함을 알 수 있었다. 본 연구로 부터 한국 표준형인 울진 3&4호기의 핵연료 집합체를 사용한 노심 설계는 핵적으로 타당하며, 유조선 내에 원자로 설비 배치가 가능함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. "Small and Medium Reactors: I. Status and Prospects," NUCLEAR ENERGY AGENCY, OECD, 1991.
2. "Small and Medium Reactors: II. Technical Supplement," NUCLEAR ENERGY AGENCY, OECD, 1991.
3. "조선 해양 공학 개론," 대한 조선 공학회, 1993.
4. 채 원석, "원자력선 개관," 영문 출판사, 1992. 4.
5. ABB-CE, "Elimination of Soluble Boron for a New PWR Design," EPRI Project RP-2614-24, Final Report, 1989. 9.
6. "원자력선 연구 개발의 현황," 일본 원자력 연구소, 1992.
7. T.Hoshi, H.Iida, M.Ochiai, "Recent Development in Nuclear Ship Reactor in Japan," JAERI.
8. "가연성 독봉 사용방법 최적화 연구," KRC-92N-104, 한전기술연구원, 1993. 9.

9. “노심 및 원자로계통의 설계검증코드 체제확립 및 개발에 대한 연구,” KINS/GR-054, 한국원자력 안전기술원, 1993.

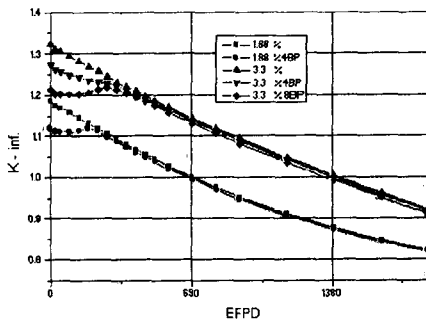
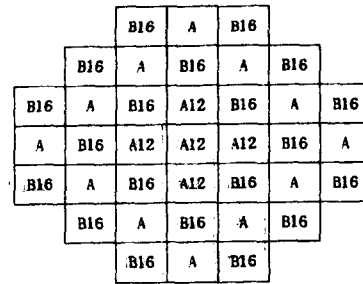


그림 1. CASMO의 집합체별 농축도 결정



A : 농축도 2.14% 집합체
 B : 농축도 3.65% 집합체
 No. : BP 갯수

그림 2. 초기 노심 장전 모형

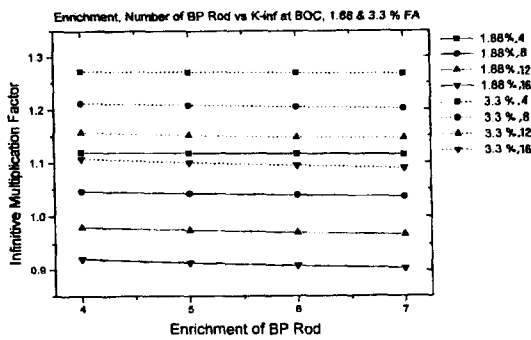


그림 3. 각 집합체별 BP농축도, 갯수에 따른 K-inf. 변화

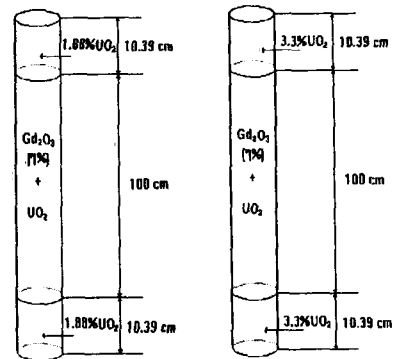


그림 4. 2.14%, 3.65% 핵연료집합체의 가연성독봉의 축방향 구성

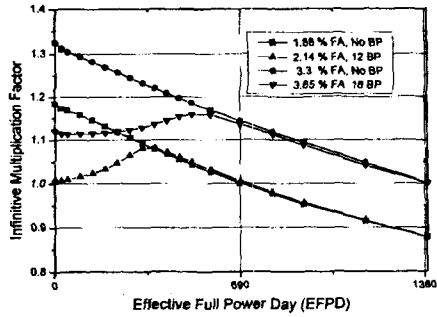


그림 5. CASMO에 의한 농축도 재설정

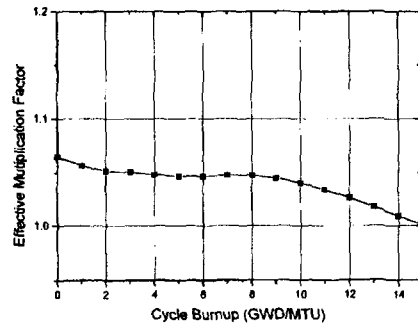


그림 6. 연소도에 따른 유효 증배 계수

0.837	0.894	1.159	0.943
0.953	0.975	1.153	0.833
	1.143	1.051	0.919
	1.173	0.914	1.007
		0.963	
		1.038	
			BOC
			EOC

그림 7. 상대 출력 분포(ARO, Eq. Xe)

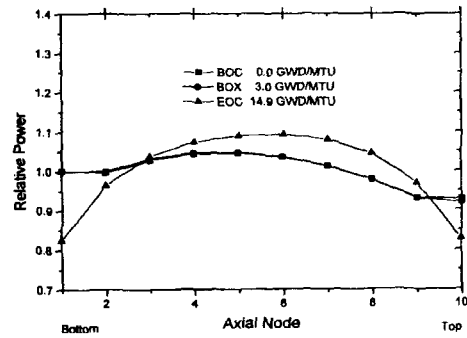


그림 8. 축방향 상대 출력 분포

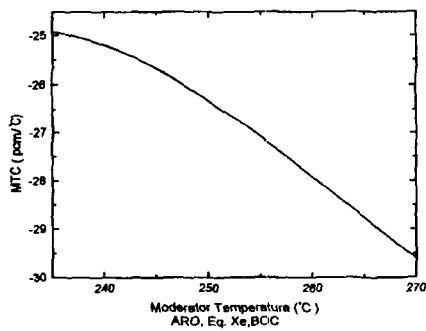


그림 9. 감속제 온도에 따른 MTC

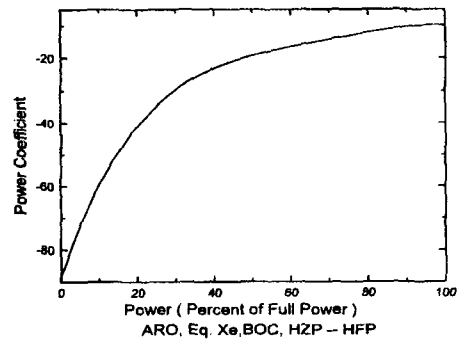


그림 10. 출력 계수