

소형 동력로의 핵적 개념 설계

최 유선*, 김 명현
경희대학교

요 약

원자력의 이용 분야 확대를 위하여 선박용 소형 동력로를 설계하였다. 본 연구에서는 다음의 제한 조건 및 설계 조건을 설정하여 핵적 개념 설계를 수행하였다. 노심의 부피는 국내 제작가능한 VLCC기종 유조선 기관실내에 배치 가능하도록 제한하였고, 선박의 정기 점검 기간에 맞춘 핵연료 재장전 주기 길이, 무봉산 노심 운전, 상용 가압경수로 보다 낮은 선출력과 출력 밀도, MUTSU호와 같은 1차 계통 열수력 조건, 등의 설계 조건을 설정하였다. 울진 3&4의 핵연료 집합체의 길이만을 짧게 하여 사용하는 것에 대한 타당성 모색을 핵적 개념 설계 목표로 삼았다. 핵연료 집합체의 설계 및 반응단면적 생산은 CASMO-3 코드를, 노심 전체의 분석은 3차원 노달 코드인 KINS-3코드를 사용하였다. 개념 설계 결과, 노심 주기길이 690일을 달성할 수 있는 핵연료 집합체의 농축도와 갯수는 1.88%의 17개, 3.3%의 20개로 결정하였고, F_0 는 2.833이었고, 운전 상태에서의 감속재 온도 계수는 $-24.8 \text{ pcm}/^\circ\text{C}$ 로 나타나서 한국형 원자로용 핵연료 집합체를 그대로 선박용 원자로에 사용 가능함을 볼 수 있었다.

1. 서 론

지금까지 국내에서의 원자력 이용분야는 기술적인 충분함에도 불구하고 상업적인 대형 발전에 편중되어 연구 개발되어왔으나, 이제는 기술적인 축적으로 볼 때 그 활용분야의 범위를 확대할 수 있는 시기와 여건이 충분하다고 할 수 있다. 상업적인 전기 생산이외에 이용할 수 있는 분야로는 연구/실험용원자로, 지역 난방을 위한 열 병합 발전, 의학 치료용 방사선원 생산, 비파괴 검사, 소형동력용 등으로 다양하다.¹⁾²⁾ 원자로를 이용한 전기 생산이외의 활용은 그 사용 목적에 따라 설계시의 제한 조건들이 다르기 때문에 설계 변수들도 달라져야 한다. 따라서 기존 상용로에 사용된 설계 개념은 부적합할 수 있기 때문에 새로운 설계 개념의 도입이 필수적으로 요구된다. 원자로를 이용한 타분야로의 활용은 대형로 보다는 소형로가 더 유리할 것으로 여겨진다. 왜냐하면 소형로의 경우 저출력 노심이며 제어가 비교적 용이하여 대형크기의 노심보다 향상된 안정성을 기대할 수 있고 표준화의 가능성도 있으며 다목적으로 이용할 수 있는 장점이 예상되기 때문이다. 본 연구에서는 소형로가 이용될 수 있는 분야 가운데 가능한 한 설계 제한 조건이 명확한 분야를 선택하여 노심의 제한 조건과 특성을 파악하고, 핵적 개념 설계를 하는 것이 목적이다.

선박용으로 소형로가 쓰일 경우 소형 동력로가 되어야 하며, 노심의 크기 및 중량의 제한이 있다. 왜냐하면 기존의 기관실 공간 안에 원자로 압력 용기와 기타 안전, 차폐설비를 넣을 수 있어야 하고, 배에서는 부피보다 중량이 더 중요한 인자이기 때문에 원자력 추진 설비의 중량이 기존의 기관실의 중량을 초과해서는 안된다는 제한 조건이 있다. 선박의 용도와 크기가 정해지면 주기출력이 정해지기 때문에 노심의 출력은 열효율에 따라 고정된 열출력을 필요로 하게 된다.³⁾⁴⁾ 본 연구에서는 제한 조건이 비교적 명확한 선박용의

소형동력로를 선택 분야로 하였다.

2. 설계 제한 조건

선박의 제한 조건은 어떤 용도의 선박 내에 원자력 추진 기관을 넣을 것인가의 문제이다. 선박에는 화물선, 여객선, 유조선, 잠수선 등으로 분류할 수 있다. 이 가운데 유조선을 선택하였는데 그 이유는 다음과 같다. 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 부피는 곡선형태의 선박 기관실에 내접할 수 있는 정육면체의 부피이다. 이 부피 내에 원자력 추진설비를 넣을 경우 원자로 노심의 한계 부피를 정하기 위하여 일본에서 이미 해상실험을 마친 MUTSU호의 원자로실 및 기관실의 합한 부피와 원자로 노심의 부피비를 적용하기로 하였다. MUTSU호의 원자로 노심 부피는 원자력 추진설비 부피의 0.1 %에 해당한다.⁵⁾ 노심의 등가 직경과 실효높이를 대략 비슷하다고 보면 직경과 높이는 각각 248.1cm이내의 길이를 만족되도록 설계되어야 VLCC기종의 유조선 내에 원자력에 의한 추진설비 설치가 가능하게 된다.

본 연구에서는 노심의 핵적 설계만을 목표로 하였는데, 선박용 원자로는 다음의 경우에 의해 그 특성이 달라지므로 종래의 발전용 상업로와는 다른 설계가 되어야 한다. 해상에서의 선박은 충돌이나 좌초 시에 1차 냉각재의 누출에 의한 재임계의 위험성을 설계 단계에서부터 배제하기 위하여 일반적인 육상로에서 사용하고 있는 붕산수를 사용하지 않아야 한다. 무붕산 운전이 가능하도록 노심이 설계되어야 함으로 주기초에 잉여 반응도 보상을 위한 가연성 독봉과 제어봉의 많은 사용이 요구된다. 급격한 출력 변동이 있으며, 제어봉만으로 출력이 조절되어야 하므로 경제적으로는 불리하지만 안전성을 고려하여 선출력 및 출력 밀도가 낮아야 한다. 핵연료의 재장전 주기는 연료 교체시의 선박의 구조물들의 일부 해체하는 번거로움을 없애기 위해 배의 수명까지 재장전 없이 원자로의 수명을 맞추는 것이 좋으나, 그럴경우 핵연료를 고농축해야 하므로 농축비가 고가로 되어 상업적인 한계에 부딪히게 될 것으로 예상되므로 배의 정기 점검 기간인 2년과 같도록 한다. 본 연구에서는 노심 설계만이 개념 설계에 주 관심이기 때문에 노심을 구성하는 물질들의 물리적, 화학적, 재료적인 측면은 고려하지 않았다. 그러나 핵설계와 관련된 1차계통의 조건들은 국내에 선박용 원자로가 없기 때문에 이미 해상실험을 마친 일본의 'MUTSU'호⁵⁾⁶⁾의 조건을 인용하였고, 열출력증감 비율만큼 1차 냉각재의 유량을 대응시켰다.

3. 핵적 개념 설계 목표

원자로의 형식은 이미 개발될 때 선박용으로 개발되었으며 배에서의 경험이 충분한 가압경수로로 하고, 국내 상업로의 설계 기술이 이용될 수 있도록 하여 핵적 개념 설계의 목표를 아래와 같이 설정하였다. 첨두 출력값은 MUTSU의 첨두 출력이하로 제한하였다.

- 핵연료집합체는 한국표준형인 울진 3&4의 것을 길이만을 변화시켜 사용한다. 본 설계

과정에서는 열중성자를 이용하는 노심으로 구성하고, 무엇보다도 기 확립된 핵연료 설계 및 제작 기술을 활용하기 위하여 한국형 핵연료 집합체를 그대로 선박용 원자로에 사용할 수 있는가를 모색하였다.

- 평균 선출력을 10.24 KW/m가 되도록 한다. 울진 3&4의 최대제한 선출력인 45.6KW/m에 $F_0(3.56)$ 를 고려하여 평균 열출력을 계산하면 12.8KW/m가 된다. 선박용 원자로는 보통 최대 출력의 90%정도의 상태에서 운전되는 데, 120%의 과출력상태를 고려하여 20%의 초과량을 고려하면 목표 선출력인 10.24KW/m가 된다. 따라서 20%정도의 안정성을 향상시킨 것이라 할 수 있다.

- 무부산 운전이 가능한 노심이 되도록 한다

4. 핵적 개념 설계 방법

본 개념 설계과정에서는 40군의 중성자 Library를 사용하며 Gadalinium을 포함한 집합체별의 단면적을 생산할 수 있는 코드인 CASMO-3⁷⁾⁸⁾에 의해 각 핵연료 집합체 별 단면적들을 생산하였고, 자동화된 연결코드인 LINS에 의해 처리되어 KINS-3의 입력자료로 사용되었다. 노심 분석 코드인 KINS-3는 제어봉 삽입, 감속재의 밀도 변화, 핵연료 온도, 연소도, Xenon농도 분포 등을 고려할 수 있는 3차원 노달코드이다. KINS-3로 열수력학적 제한 및 핵연료 온도제한 등의 효과를 고려한 상태로 노심 분석을 수행하였다. KINS-3는 울진3&4의 PSAR과의 검증에서 수용할 만한 검증결과를 나타냈으며, 노심 출력 분포의 적절한 검증을 위하여 핵연료 집합체를 2×2개의 노드로 구성할 것을 추천하고 있다.⁸⁾ KINS-3의 단점은 노심의 외부 경계 조건을 묘사하는데 일괄적으로 Albedo값을 사용하고 있어 참조 자료가 없는 새로운 원자로에는 노심의 경계부분에서의 계산은 Albedo에 따라 정확도가 떨어질 수 있다는 것이다.

CASMO-3에 의한 집합체별 농축도 결정을 위한 계산에 앞서 개략적인 계산으로 노심 평균 농축도를 예상하였다. 개략적인 노심 평균 농축도는 노심 내에 장전되어 있는 금속 U-235의 양과 핵연료(UO₂)의 총량에 의해 추정되었다. 금속 U-235의 양은 주어진 출력과 주기에 의한 소모율로부터 구하고 핵연료 장전량은 집합체 갯수와 노심의 실효 높이에 의해 구해진다. 개략적으로 추정된 노심 평균 농축도는 실제의 정확한 값이 아니기 때문에 그 수치는 큰 의미가 없지만 비교적 근사한 값이므로 CASMO-3에 의해 정확한 계산을 할 때에 계산 시간을 절약할 수 있게 한다. 실제로도 근사한 값을 나타냈다. CASMO-3에 의한 집합체별 농축도 결정은 Fig.1의 노심을 구성하기 위하여 Fig.3에서 처럼 2종류의 집합체 농축도를 결정할 때, 2주기를 노심 내에 있어야할 집합체는 무한 증배 계수가 2 주기 말까지 1 이상으로 유지하는 상태에서의 농축도를 찾고, 1 주기 장전되는 집합체는 1주기 말까지 무한 증배 계수가 1 이상으로 유지하는 상태에서의 농축도를 찾아서 집합체별 농축도를 결정하였다. 정해진 농축도에 따라 각각의 핵연료 집합체에 가연성 독봉의 위치와 갯수를 조합하여 계산하였다.

집합체 갯수를 결정하기 위하여 설계 선출력 10.24 KW/m와 목표 열출력 108MW로 부터 연료봉의 총길이를 계산하고, 울진 3&4의 운전 출력 밀도인 96.64KW/ℓ을 초과하지 않게 하여 집합체의 과출력에 대한 안정성 측면의 우려를 배제하였다. 선박에 설치되는 원자로이므로 선체의 진동과 요동을 고려하여 노심 지름/높이 비를 구형에 가깝게 하였다. 구형에 가까운 노심은 누출율이 가장 적은 형태가 된다. 물론 반사체가 있을 경우는 저누출을

의 노심 모양은 중요하지는 않을 수 있다.

초기 노심의 장전모형은 이미 정해진 집합체 수를 배열하는 것이지만 노심이 2배치가 되도록 하며 동일한 농축도의 집합체는 가능한 접하지 않도록 하였다. 또한 여러 경우의 장전 모형이 있을 수 있으나, 침투출력이 가능한 낮게 되며, 출력 분포가 평탄하도록 Fig.1와 같은 모형에 따라 노심을 구성하였다. 가연성 독봉의 재질은 Gadolinium을 사용하였는데, 흡수 단면적이 기타의 독봉의 재료들 보다 월등히 크고, 가연성 독봉의 영향이 주기 말에는 없는 재료이다. 본 연구에서는 여러 형태로 독봉을 구성할 수 있으나 올진 3&4의 경우처럼 천연우라늄과 4% 농축도의 Gadolinium을 혼합한 일체형의 형태로 하였다. 집합체내의 가연성 독봉의 수는 대칭성을 유지하도록 하여 4개와 8개를 사용한 경우에 대해서 올진 3&4와 같은 곳에 위치시킨 형태로 배열하였다.

5. 결과 및 논의

설계 제한 조건과 설계 목표에 따라 소형동력의 노심을 Table 1과 같이 구성하였고, 연소도에 따라 노심의 유한 증배 계수의 변화(Fig.4)와 주기초, 말의 출력분포(Fig.2, Fig.5), 출력 계수(Fig.7)를 나타내었다. 반경방향 침투깊이 1.227, 축방향 침투깊이 1.0996, 집합체 내의 붕침투깊이 2.10으로 침투 붕출력(F_0)이 2.833을 나타내어 제한 침투 붕출력이하의 값을 만족하였다. Fig.6에서 처럼 주기초에서 주기말까지 음의 감속재 온도 계수 조건을 만족시키고 있으며, 운전조건 상태에서 감속재 온도 계수는 $-24.8\text{pcm}/^\circ\text{C}$ 의 큰 음의 값으로 1차 냉각수의 온도 변화에 따른 노심의 자기제어성이 상업용 노심보다 크며, 또한 주기말로 연소됨에 따라 더욱 큰 음의 값이 뵈을 볼 수 있었다.(Fig.8) 농축도 1.88%의 핵연료 집합체 17개와 농축도 3.3%의 핵연료 집합체 20개로 주기 말까지 연소 가능함을 알 수 있었다.

6. 결 론

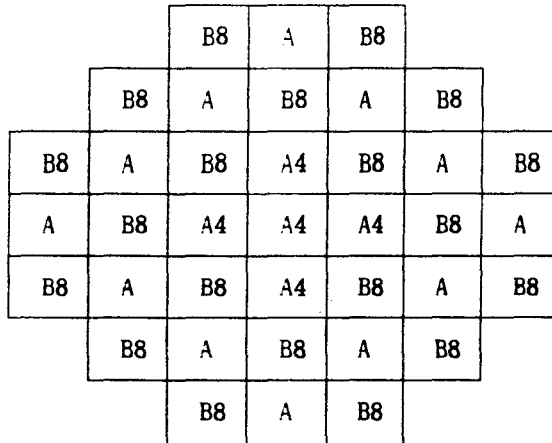
본 연구에 의해 한국 표준형인 올진 3&4 핵연료 집합체를 사용한 노심 설계는 핵적으로 타당하며, VLCC기종의 유조선 내에 원자로 설비 배치가 가능함을 알 수 있었다. 상용 핵연료 집합체를 그대로 사용하였기 때문에 경제적으로 타당성이 있으며, 열수력적인 조건이 현존하는 MUTSU호의 1차 계통 조건과 같도록 인용되었기 때문에 열수력적인 면에서도 안전성이 보장된다고 할 수 있다. 현 단계에서는 개념적인 설계이므로 성능 개선과 최적화의 연구가 계속적으로 이루어 져야 할 것이다.

집합체 Pitch(cm)	20.25
실효 높이 (cm)	120
노심 등가 직경 (cm)	139
전출력 환산일 (EFPD)	690
주기 연소도 (MWD/MTU)	14868.6
F_0	2.833
노심 등가 직경/높이 비율	1.1507

Table 1. 개념 설계 결과

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) "원자력선 연구 개발의 현황", 일본 원자력 연구소, 1992.
- 6) T. Hoshi, H. Iida, M. Ochiai, "Recent Development in Nuclear Ship Reactor in Japan", JAERI.
- 7) "가연성 독봉 사용방법 최적화 연구", KRC-92N-104, 한전기술연구원, 1993. 9.
- 8) "노심 및 원자로계통의 설계검증코드 체계확립 및 개발에 대한 연구", KINS/GR-054, 한국원자력안전기술원, 1993.



A : 농축도 1.88 % 의 집합체
 B : 농축도 3.3 % 의 집합체
 No. : BP 갯수

Fig.1 초기 노심 장전 모형

0.998	1.021	1.178	0.847
0.931	0.957	1.149	0.852
	1.227	0.989	0.895
	1.164	0.932	1.001
BOC		0.935	
EOC		1.029	

Fig.2 BOC, EOC의 상대 출력 분포(ARO, Eq. Xe.)

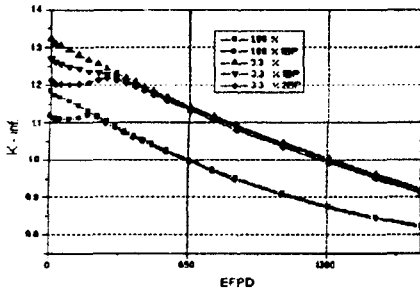


Fig. 3 CASMO의 집합체별 농축도 결정

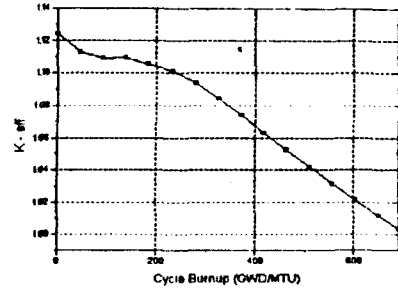


Fig. 4 연소도에 따른 유효 증배 계수

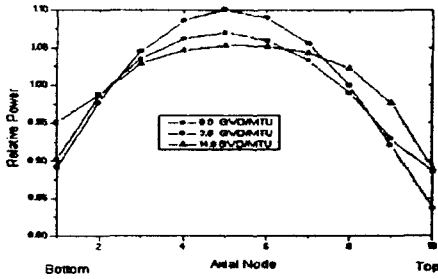


Fig. 5 축방향 상대 출력 분포

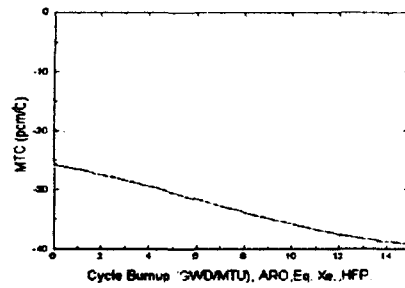


Fig. 6 연소도에 따른 MTC

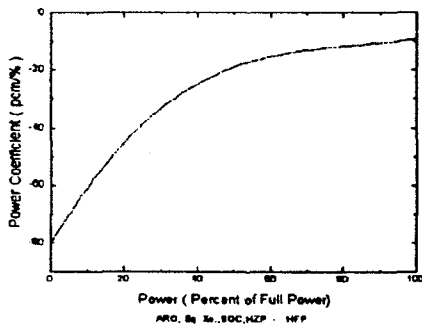


Fig. 7 출력 계수

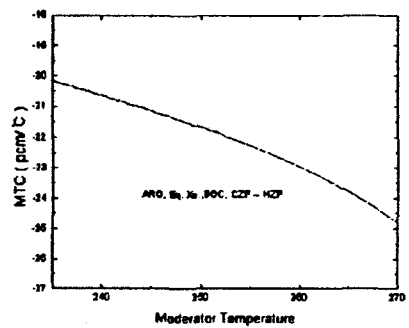


Fig. 8 감속재 온도에 따른 MTC