

고성능 연구로 핵설계를 위한 설계변수 특성 연구

A Parametric Study on Characteristics for Nuclear Design of High-performance Research Reactor

조동건, 이충성, 이병철, 서철교, 채희택, 박철
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

한국원자력연구소에서는 하나로를 통해 얻는 연구로 설계 및 운영 경험을 바탕으로 고성능의 연구로를 개념설계 중에 있다. 본 연구에서는 고성능 연구로 설계를 위해 핵연료집합체 형태, 노심 및 핵연료 지지 구조체에 의한 반응도 및 중성자속 변화, 제어봉/정지봉의 수 등의 설계변수에 대한 핵특성 분석을 수행하였다. 핵연료집합체 형태는 관형, 봉형 및 튜브형 핵연료를 고려하였으며, 튜브형 핵연료가 열적 여유도가 많고, 반사체에서도 비교적 높은 열중성자속을 얻을 수 있으므로 고성능 연구용 원자로의 핵연료로 적합한 것으로 나타났다. 노심 및 집합체의 구조체 관점에서는 알루미늄 블록을 노심 지지체로 하는 것이 유동관을 적용하는 것에 비해 유리한 것으로 나타났으며, 핵연료집합체내 지지 구조체에 의한 반사체 내에서의 중성자속 감소는 약 7% 정도로 나타났다. 노심 제어 가능성 측면에서는 제어봉의 두께를 약 4mm로 사용하면 초기노심부터 핵연료를 모두 채우고 운전하는 것이 가능한 것으로 나타났다.

Abstract

A conceptual design of advanced research reactor with high neutron performance has been performed at KAERI based on design and operation experience obtained from HANARO. In this study, nuclear characteristics of design parameters such as various types of fuel assemblies, structural materials of core and fuel assembly, and the number of absorber rods were analyzed. Among rod, plate and tube type fuel assemblies considered, tube type assembly seems to be preferable as a high performance research reactor fuel because of high thermal margin and neutron flux in reflector. Aluminium block as a structural material of core was shown to be superior to flow tube due to higher reactivity and thermal flux in reflector. The stiffener to fix plates in the fuel assembly had the no impact on fast flux in central trap. The reduction of thermal flux in reflector caused by the stiffener was about 7%. If the control absorber rods of 4mm thickness were chosen, it would be possible to operate the reactor with fresh fuel assemblies from the initial core.

1. 서론

연구용 원자로는 방사성 동위원소 생산, 중성자 방사화 분석, 중성자 빔 이용 연구, 핵연료 및 재료 조사 시험, 중성자 도핑, 중성자 포획 암치료, 차폐 연구, 교육 및 훈련 등 다양한 분야에서 광범위하게 이용되고 있다. 현재 전 세계에서 운전되고 있는 연구로 가운데 약 2/3가 운전이력이 30년 이상 되어 연구로의 수명을 40년 정도로 가정하면, 2010년에서 2020년 사이에 연구로의 수는 현재의 1/3로 줄어들 것으로 예상된다. 이에 따라 최근에는 고성능의 연구로를 새로 건설하는 사업이 조금씩 증가하는 추세에 있다.

한편, 우리나라는 1995년에 30MW_{th} 출력의 하나로를 건설, 운영해 오고 있으며, 출력운전이 시작된 이후 이용자 및 원자로 이용이 급격히 증가하여 2010년대에는 연구로 이용 요구가 하나로의 수용능력을 초과할 것으로 추정된다. 또한, 하나로의 건설 사업을 통하여 연구로의 설계·건설·시험·운전·이용 등에 종합적인 경험을 가진 인력을 보유하고 있다. 이에 따라 한국원자력연구소에서는 하나로의 설계·건설·운전·이용 경험과 기 확보 및 향후 개발될 원자력 신기술을 접목하여 상업적, 기술적으로 경쟁력이 있는 해외 진출형 연구로를 설계하고 있다[1].

본 연구에서는 U-Mo 분산 핵연료를 사용하여 20MW 열출력을 갖는 고성능 연구로 설계를 위한 설계변수 특성 분석을 수행하였다. 우선적으로 집합체 형태에 따른 열출력 분포 및 노내 및 반사체의 중성자속 변화 등의 핵적 특성 분석을 수행하였으며, 노심 및 핵연료 지지체에 사용되는 구조체에 의한 반응도 및 중성자속 변화 등을 평가하였다. 또한, 제어봉 수에 따른 노심제어 특성을 분석하였다.

2. 전산체계

연구용 원자로 노심해석 체계로는 WIMS/VENTURE, HELIOS/VENTURE, SRAC, WIMS-ANL/REBUS-PC 및 MCNP 코드 등을 고려할 수 있다. 본 연구에서는 신핵연료 노심분석은 MCNP 코드를 이용하였으며, 연소노심 상태의 노심분석은 MCNP 코드와 SRAC 코드시스템을 병행하여 사용하였다. 즉, SRAC 코드를 이용하여 평형노심의 주기초(Beginning of Cycle, BOC) 및 주기말(End of Cycle, EOC) 노심 평균연소도에서 핵종 수밀도를 산출하고 이를 MCNP 코드의 각 핵연료 영역에 적용하여 노심계산을 수행하였다. 그런데, 평형노심 상태에서의 축방향 핵분열성 핵종(fissile nuclide) 분포를 보면, 노심 중앙은 높은 열중성자속으로 인해 연소가 많이 진행되어 ²³⁵U의 수밀도가 적고 상·하부 쪽으로 갈수록 연소가 적게 진행되어 ²³⁵U의 잔존량이 많다. 이러한 축방향 불균일성을 MCNP에 보정하지 않고 평균값만을 이용하여 축방향으로 단일 값을 적용하면 약 10~20mk 정도 유효증배계수 값이 크게 평가된다. 이를 보정하기 위해 BOC 및 EOC에서 ²³⁵U의 축방향 핵종 분포는 해석하고자 하는 노심 평균연소도에 해당하는 하나로 핵연료집합체의 연소이력 분포를 적용하였다. 핵분열성 생성물은 거시적 흡수반응단면적을 고려하여 20개의 핵종만을 고려하였다[2].

3. 노심 설계변수 특성 분석

3.1 핵연료집합체 및 노심 형태

고성능 연구로 핵설계를 위해서는 우선 핵연료집합체 형태부터 결정하여야 한다. 따라서, 우선적으로 현재 연구용 원자로의 핵연료로 널리 사용되는 튜브(tube)형, 판(plate)형 및 봉(rod)형 핵

연료를 이용하여 노심을 구성한 후, 각 노심에 대해 노심 출력 분포와 중성자속 분포 등의 핵적 특성 분석하였다.

3.1.1 각 노심 모델의 특징 및 제원

각 핵연료를 이용하여 구성된 노심 모델은 다음과 같다. 첫 번째로, 8UT18 노심은 그림 1에서 보듯이, 튜브형의 핵연료를 사용하는 노심으로 프랑스에서 설계중인 RJH 연구로에서 고려하고 있는 핵연료를 기본 개념으로 사용하고 있다. 단, RJH에서는 제어봉이 노심 하부에 위치해 있어 집합체 내부를 통해 삽입 및 인출되나, 8UT18 노심에서는 제어봉이 노심상부에 위치해 있어 핵연료집합체 외부의 안내관을 따라 삽입 및 인출이 이루어진다. 따라서, 집합체는 두 가지 형태, 즉, 제어봉이 위치하는 핵연료집합체는 네 개의 원형 튜브 핵연료로, 제어봉이 위치하지 않는 핵연료집합체는 다섯 개의 원형 튜브 핵연료로 구성하였다. 이 노심은 고밀도 튜브형 핵연료를 사용한 조밀노심(compact core)의 특징을 갖는다.

두 번째로, 8UP24 노심은 그림 2에서 보듯이, 판형 핵연료를 사용하는 노심으로서 전형적인 MTR형 핵연료를 기본으로 하고 있다. 각 집합체당 핵연료 판의 개수는 15개를 사용하였다. 이 노심은 제어봉 구동장치가 노심 하부에 위치할 수밖에 없어 **하나로**의 확증된 기술을 이용하는데 어려움이 많다. 이 노심 또한 고밀도의 판형 핵연료를 사용한 조밀노심의 특징을 갖는다.

나머지 두 노심은 **하나로**와 같은 봉형 핵연료를 사용하는 노심으로 현재까지 **하나로**를 통해 확보한 기술을 그대로 적용할 수 있다는 이점이 있다. 그런데, 봉형 핵연료는 직경을 작게 만드는데 한계가 있어 연료봉 당 우라늄 장전량이 많아 조밀 노심을 구성하면 노심 총 핵연료 유효길이 짧아져 노심 평균 선출력이 높다. 평균 선출력이 높다는 것은 핵연료봉의 중심온도가 높아질 수 있음을 뜻하며, U-Mo 핵연료의 경우 핵연료 온도가 일정수준 이상 높아지면 기지(matrix)로 사용되는 알루미늄과 U-Mo 핵연료 입자의 반응이 가속화되어 열전도도가 급격히 감소하기 때문에 안전성을 저해하는 요인이 된다[1]. 이와 같은 이유로, 53H16C6 노심은 같은 우라늄 장전량 하에서 노심에 장전되는 총 핵연료봉의 유효길이(active fuel length)를 늘임으로써 노심 평균 선출력을 낮추고 핵연료 온도 측면에서 좀 더 유리한 조건을 만들기 위해 핵연료의 밀도를 $5.3\text{gU}/\text{cm}^3$ 로 적용하였으며, 8UH10C6 노심은 핵연료 온도면에서 한계가 있음에도 불구하고 고밀도의 봉형 핵연료를 이용한 노심에 대한 특성 분석을 위해 $8\text{gU}/\text{cm}^3$ 을 적용하였다. 그림 3 및 4는 MCNP로 묘사된 봉형 핵연료 노심을 나타낸다.

모든 노심에 대해 핵연료는 우라늄 실리사이드 핵연료에 비해 재처리가 용이하여 현재 국제적인 검증시험이 진행중인 U-Mo 분산 핵연료를 사용하였으며, 그 중에서도 현재까지 조사 특성이 비교적 우수한 것으로 평가되는 U-7wt%Mo를 사용하였다[3-5]. 핵연료 심재의 길이는 모두 700mm로 하였으며, 냉각재는 H_2O , 반사체는 D_2O 를 가정하였다. 또한 모든 노심은 신핵연료가 장전됨을 가정하였으며, 우라늄의 장전량은 약 60kg 정도로서 거의 같다. 냉각수 채널의 너비는 기존 연구로에서 일반적으로 사용하는 값을 사용하였다. 표 1에는 각 노심에 대한 제원이 상세히 기술되어 있다.

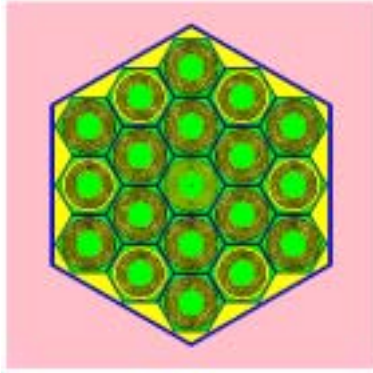


그림 1. 8UT18 노심의 단면도

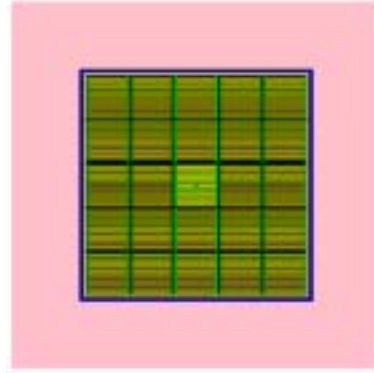


그림 2. 8UP24 노심의 단면도

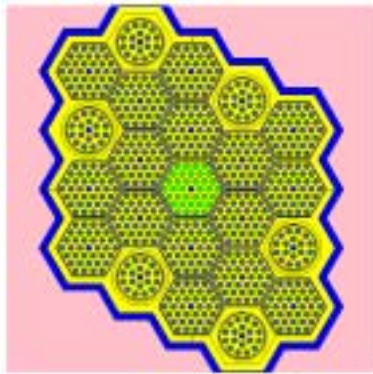


그림 3. 53H16C6 노심의 단면도

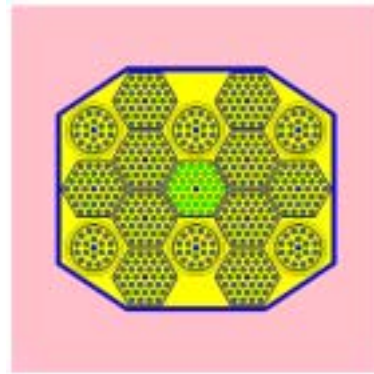


그림 4. 8UH10C6 노심의 단면도

표 1. 각 노심의 제원 비교

Parameter	8UT18	8UP24	53H16C6	8UH10C6
General Data				
Reactor power(MW)	20	20	20	20
Coolant/moderator	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
Reflector	D ₂ O	D ₂ O	D ₂ O	D ₂ O
Control rod drive location	Above core	Below Core	Above Core	Above Core
Core Data				
Equivalent diameter(cm)	19.2	17.3	20.2	16.8
Number of fuel assemblies	18	24	22	16
Number of control plates or rods	6	N/A	6	6
Core Fuel load(kg U)	59.8	59.8	60.1	62.0
Fuel Data				
Fuel type	Tube	Plate	Rod with fin	Rod with fin
Fuel material	U-7%Mo	U-7%Mo	U-7%Mo	U-7%Mo
Fuel enrichment(%- ²³⁵ U)	19.75	19.75	19.75	19.75
Uranium density(gU/cm ³)	8.0	8.0	5.3	8.0
Number of fuel elements	4/5	15	36/18	36/18
Fuel meat thickness(mm)	0.75	0.57	5.49(dia.)	5.49(dia.)
Fuel plate thickness(mm)	1.35	1.37	7.87(dia.) fin=1.02×0.76	7.87(dia.) fin=1.02×0.76
Coolant channel width(mm)	2.2	2.5	2.5	2.5

3.1.2 핵특성 분석 결과

MCNP 코드를 이용하여 전술한 각 노심의 핵특성 분석을 수행한 결과는 다음과 같다.

가. 핵연료 안전성

핵연료 안전성 측면에서 U-Mo 핵연료의 온도는 앞서 언급한 것처럼 매우 중요한 항목이다. 핵연료의 건전성 평가를 위해 8UT18과 8UP24 노심의 최대 표면열속을 계산한 결과, 각각 2.24MW/m² 및 1.75MW/m²로 평가되었다. 이 두 노심에 대해 핵연료의 최대 온도는 U-Mo가 반응하는 온도(약 220℃) 이하로 충분히 유지될 것으로 예상되었으며, 전반적으로 열적 여유도가 높아 설계 변경의 자유도가 큰 것으로 평가되었다. 저밀도의 우라늄을 사용한 53H16C6 노심은 최대 선출력이 93kW/m로 잠정적 제한치인 100kW/m보다 낮아서 비교적 핵연료 온도 제한조건을 만족할 만하였으나, 고밀도 우라늄을 사용한 8UH10C6 노심은 최대 선출력이 136kW/m로 매우 높게 나타나 제어봉이 움직이는 연소노심에서는 선출력 제한치를 초과할 것으로 예상되어 봉형 핵연료를 이용한 고밀도 조밀노심을 구성하는 것은 매우 어려운 것으로 나타났다.

나. 노심 조사공내 중성자속

Central Trap(CT)은 중성자 조사(irradiation)에 의한 재료의 건전성 시험을 위해 주로 사용된다. 그러므로 CT에서는 고속중성자속이 높으면 높을수록 유리하다. 모든 노심에 대해 고속중성자속(>0.1MeV)은 2.0E+14 n/cm²·sec 이상 확보되는 것으로 나타났으며, 튜브형 및 판형 핵연료를 사용한 노심의 고속 중성자속(>1.0MeV) 값이 1.3E+14 n/cm²·sec로 높아 봉형 핵연료를 사용한 노심보다 유리한 것으로 나타났다.

다. 반사체에서의 중성자속

반사체에서는 높은 열중성자속을 넓은 범위에서 얻는 것이 좋다. 열중성자속(<0.625eV)은 축방향으로 노심 중앙으로부터 ±5cm, 즉 10cm의 크기에 대해 평균값을 산출하였다. 각 노심에 대해 열중성자속이 2.0E+14 n/cm²·sec 이상이 되는 영역은 반경방향으로 각각, 58cm, 50cm, 45cm 및 50cm로 튜브형 핵연료 노심이 가장 넓은 영역까지 중성자속이 높은 것으로 나타났다. 또한, 반사체에서의 최대 열중성자속은 8UT18, 8UP24, 53H16C6 및 8UH10C6 각 노심에 대해 4.26E+14, 3.20E+14, 3.04E+14 및 3.74E+14 n/cm²·sec로서 튜브형 핵연료 노심의 열중성자속이 가장 높아서 유리한 것으로 나타났다. 반사체에서의 출력대비 최대 열중성자속은 각각 1.23, 1.60, 1.52 및 1.87×10¹³ [n/cm²·sec]/MW_{th})로서 이는 모든 노심에 대해 반사체에서의 중성자속만을 비교하면 하나로보다 우수한 성능을 나타낸다.

3.1.3 결과 요약

앞의 결과를 바탕으로 볼 때, 판형 핵연료는 제어봉 구동장치를 노심하부에 설치해야 하므로 적용이 불가능 할 것으로 보이며, 봉형 핵연료는 고밀도 조밀노심을 구성하면 최대 선출력이 제한치인 100kW/m를 초과하므로 핵연료의 건전성을 확보할 수 없고, 저밀도출력 노심을 구성하면 반사체에서 성능이 떨어지므로 고성능 연구로의 핵연료로는 불리할 것으로 판단된다. 그런데, 튜브형 핵연료는 열적 여유도가 많고, 반사체에서도 비교적 높은 열중성자속을 얻을 수 있으므로 고성능 연구용 원자로의 핵연료로 채택하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

3.2 노심 구조물

3.2.1 노심 모델

연구용 원자로의 핵연료집합체를 지지하는 구조물로는 유동관과 알루미늄 블록을 고려할 수 있다. 유동관을 적용하면 하나로를 통해 확보한 기술을 그대로 적용할 수 있다는 장점이 있고, 알루미늄 블록을 적용하면 노심구조가 매우 단순해져 유동관을 적용하는 것에 비해 유리하다는 장점이 있다. 따라서, 유동관을 적용한 노심과 알루미늄 블록을 적용한 노심의 핵특성 분석을 수행하였다. 계산은 연소노심 주기말 조건에서 수행되었으며, SRAC 코드를 이용하여 주기말 노심의 평균연소도에서 핵중수밀도를 산출하고 이를 MCNP 코드에 적용하여 핵특성 분석을 수행하였다.

유동관을 적용한 노심(이하 Model A)은 하나로의 실증된 경험을 최대한 이용한다는 전제 하에 하나로와 동일한 제원의 유동관 형태를 가정하였으며, 집합체간 거리는 8.01cm이다. 그림 5는 MCNP로 모델링된 노심 Model A를 나타낸다. 알루미늄 블록을 적용한 노심(이하 Model B)은 블록안에 원형으로 채널을 구성하고 이곳에 핵연료집합체를 장전하는 개념이다. 그림 6은 MCNP로 모델링된 노심 Model B를 나타낸다. 핵연료 채널간의 경계를 짓는 알루미늄 블록의 최단 두께는 3mm를 사용하였으며 알루미늄 블록과 반사체 경계부분의 알루미늄 최단 두께는 5mm를 사용하였다. 두 노심 모두 18개의 핵연료집합체가 장전됨을 가정하였으며, 12개의 채널에는 표준핵연료집합체가 장전되고 6개의 채널에는 제어봉 구동을 위한 감축핵연료집합체가 장전됨을 가정하였다. 각 모델에서 제어봉 및 정지봉의 수는 4개 및 2개를 고려하였다. 노심에 장전된 우라늄 양은 상호간에 48kg으로 동일하다. Model A 및 B에는 동일한 제원을 갖는 핵연료 집합체를 장전하였다. 표준 핵연료집합체의 원형 핵연료 튜브 수는 5개를 사용하였으며, 감축핵연료집합체의 원형 핵연료 튜브 수는 4개를 사용하였다. 집합체 내부의 알루미늄 채움재(Al filler)의 직경은 BR2 핵연료집합체의 알루미늄 채움재 직경이 3.7cm임을 참조하여 3.5cm를 가정하였으며, 핵연료 두께는 핵연료 장전량을 맞추기 위해 0.64mm를 사용하였다. 핵연료 냉각 유로의 너비는 undermoderated region에 위치하면서 35일 주기, 55% 연소도를 만족할 것으로 예상되는 2.7mm를 적용하였다.

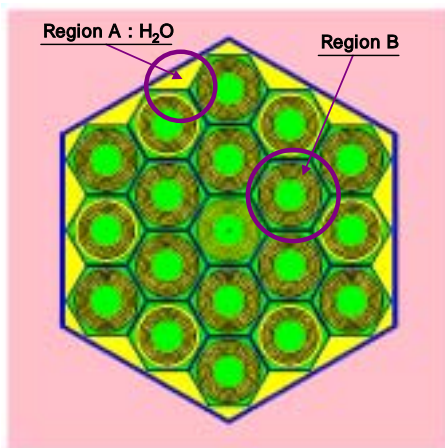


그림 5. 유동관을 적용한 노심 모형 (Model A)

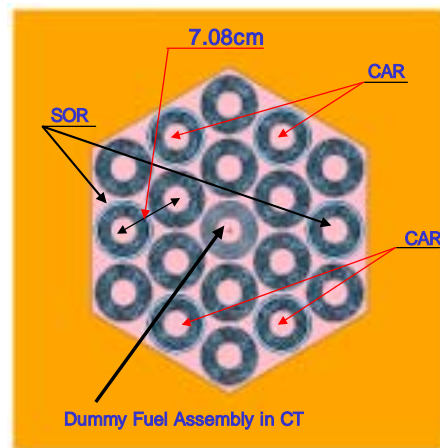


그림 6. 알루미늄블록을 적용한 노심 (Model B)

3.2.2 계산 결과

유동관을 적용한 Model A에 대한 주기말 유효증배계수는 1.03480 ± 0.00266 으로 나타났으며, 알루미늄 블록을 적용한 Model B의 주기말 유효증배계수는 Model A에 비해 약 30mk 정도 높게 나타났다. 이처럼 유동관을 적용한 것에 비해 알루미늄 블록을 적용했을 때 반응도가 증가한 이

유는 다음과 같이 추정된다. Model A에 사용된 핵연료집합체의 냉각재 유로 너비는 핵연료대비 감속재 비(moderator-to-fuel ratio)에 따른 유효증배계수 곡선에서 거의 최대 반응도를 야기시키는 영역에서 설계되었고, 따라서, 반사체와 노심 경계면인 그림 5의 Region A 영역은 국부적으로 과감속 영역이 된 것으로 판단된다. 그런데 알루미늄 블록을 적용함으로써 이 부분에 존재하던 H₂O가 알루미늄으로 교체되었기 때문에 반응도가 약간 증가한 것으로 추정된다. 고성능 연구로 설계에 있어서 핵연료 이용률을 높이기 위해 높은 핵분열성 물질 방출연소도(discharged fissile percent burnup)를 추구하고 있으므로 핵연료집합체는 반응도가 최대가 되는 영역에서 설계될 가능성이 크다. 이 경우 유동관과 inner shell을 하나로와 같이 유선형으로 적용하면 국부적으로 반사체 경계면 근처의 노심 영역은 과감속 영역이 될 가능성이 크다. 알루미늄 블록을 적용하면 앞서 유동관 적용시 나타나는 현상을 줄일 수 있어 유리하다.

다음으로, Model B를 대상으로 Model A와 동일한 우라늄 장전량을 유지하면서, 같은 유효증배계수를 갖는 핵연료 및 냉각재의 두께를 산출하였다. 계산결과, 핵연료 및 냉각재의 두께는 각각 0.068 및 0.20cm로 나타났다. 따라서, 동일한 노심 반응도를 유지하면서 냉각재의 두께가 감소한다는 의미는 노심크기 감소를 의미하므로 이는 반사체에서의 중성자속 증가와 직결된다. 따라서, 유동관을 적용하는 것 보다 알루미늄 블록을 적용하는 것이 핵적으로 유리할 것으로 판단된다.

3.3 핵연료지지 구조체(Stiffener)

3.3.1 노심 모델

튜브형 핵연료집합체는 크게 두 종류로 구분할 수 있다. 첫째, 그림 6과 같이 핵연료를 원형으로 제조하여 집합체(이하 A형 핵연료)를 구성하는 것이며, 둘째, 그림 7과 같이 curved plate를 핵연료지지 구조체(stiffener)에 삽입하여 집합체(이하 B형 핵연료)를 구성하는 것이다. 이는 현재 벨기에의 BR2 원자로에서 사용하는 핵연료이다. 그런데, 그림 7과 같이 핵연료지지 구조체를 집합체 내에 삽입하면, 이 부분에는 핵연료가 장전되지 않으므로 같은 우라늄을 집합체 내에 장전하기 위해서는 집합체가 상대적으로 커지게 된다. 이는 결과적으로 노심이 커지는 효과를 초래하게 되어 반사체에서의 중성자속이 감소하게 되는데, 이의 영향을 분석하였다. A형 핵연료의 제원은 앞서 Model B에 사용된 제원을 그대로 사용하였으며, B형 핵연료집합체의 표준/감속 핵연료 집합체의 튜브 수는 7/5개를 사용하였다. 표 2에는 계산에 이용된 각 핵연료집합체 제원이 상세히 기재되어 있다. 구조체(stiffener)의 영향도 분석을 위해서는 각 노심 모델이 구조체가 있는 경우와 없는 경우를 적절하게 대변하도록 설정하는 것이 중요하다. 본 계산에서 구조체가 있는 핵연료집합체 및 노심 모델은 앞서 기술한 Model B와 핵연료의 양을 동일하게 유지함을 원칙으로 하였으며, 냉각재의 양은 유효증배계수가 상호간에 같도록 조절하였다. 이렇게 하였을 경우 A 및 B형 핵연료의 두께는 각각 0.068cm 및 0.067cm이었으며, 냉각재의 두께는 두 타입 모두 2.0cm로 나타났다.

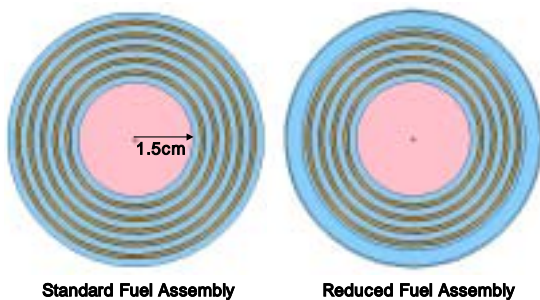


그림 6. A형 핵연료집합체

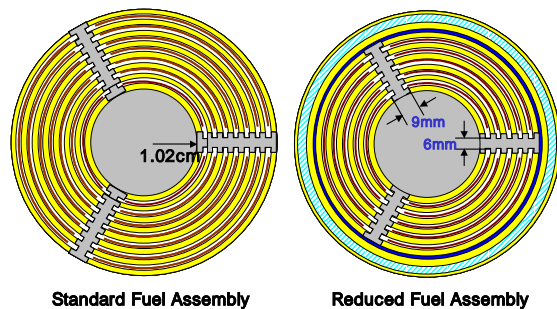


그림 7. B형 핵연료집합체

A형 핵연료가 장전된 노심 모형은 앞서의 Model B와 동일하며, B형 핵연료집합체가 장전된 노심 모형(이하 Model C)은 그림 8에 나타나 있다. 핵연료집합체 수는 상호간에 18개로 동일하며, 노내 조사공은 CT 1개, 정지봉/제어봉의 수는 4/2개로 상호간에 동일하다. 노심 우라늄 장전량 또한 상호간에 거의 같다. 각 노심의 등가반경은 Model B가 16.9cm이고, Model C가 18.3cm로 집합체 내에 구조재(stiffener)가 없는 노심이 1.4cm 정도 작다. 집합체 상호간의 거리(assembly pitch)는 Model B가 7.08cm이고, Model C는 7.67cm이다. 표 2에는 각 집합체 및 노심 제원이 상세히 기재되어 있다.

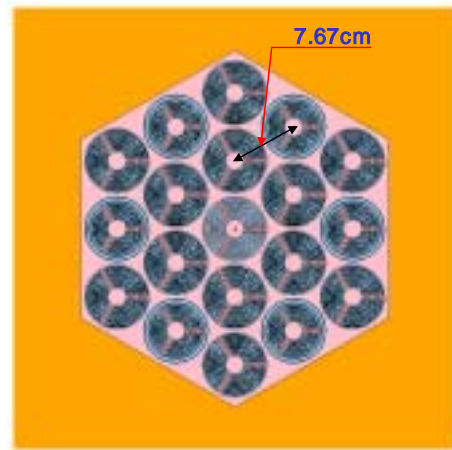


그림 8. Model C 노심의 모형

표 2. 각 핵연료집합체 제원 및 노심 제원

Parameter	MARIA형 핵연료집합체	BR2형 핵연료집합체
Fuel Meat Thickness(cm)	0.068	0.067
Cladding Thickness(cm)	0.03	0.04
Coolant Width(cm)	0.2	0.2
Fuel Length(cm)	70	70
Al Filer Radius(cm)	1.50	1.02
Flow Tube Thickness(cm)	No	0.125
Water Gap for Hf Rod(cm)	0.1	0.1
Hf Thickness(cm)	0.4	0.4
Water Gap for for Hf Rod(cm)	0.05	0.07
Hole Radius(cm)	3.34	3.649
Fuel Assembly Pitch(cm)	7.08	7.698

3.3.2 계산 결과

두 노심에 대한 특성 비교는 주기말에 시점에서 비교되었으며, 핵적 특성을 분석하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

가. 유효증배계수

MCNP 계산결과, Model B 노심의 EOC에서의 유효증배계수는 1.03224 ± 0.00042 로 계산되었으며, Model C 노심의 유효증배계수는 1.03058 ± 0.00034 로 상호간에 거의 같게 나타났다. 이는 앞서도 언급했듯이, 동일한 반응도를 갖는 노심 조건에서 중성자 성능을 평가하는 것이 타당할 것으로 판단되어 유효증배계수 값을 감속재(냉각재) 양을 조절하여 맞추었기 때문이다.

나. CT에서의 중성자속

CT에서의 최대 중성자속은 Model B의 경우 다음과 같다. 노심 내 조사공의 열중성자속 ($<0.625\text{eV}$)은 $2.91\text{E}+14 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 로 계산되었으며, 0.1MeV 이상의 속중성자속은 $3.79\text{E}+14 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 로 계산되었다. 또한, 1.0MeV 이상의 속중성자속은 $1.86\text{E}+14 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 로 평가되었다. 중성자속 평가시 통계오차는 1σ 유의수준에서 1.2%이다. Model C의 경우에는 노심 내 조

사공의 열중성자속($<0.625\text{eV}$)은 $2.88\text{E}+14 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 로 계산되었으며, 0.1MeV 이상의 속중성자속은 $3.81\text{E}+14\text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 로 계산되었다. 또한, 1.0MeV 이상의 속중성자속은 $1.84\text{E}+14\text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 로 평가되었다. 이때 통계오차는 1σ 유의수준에서 1.6% 이다. 따라서, CT에서의 속중성자속은 통계적 오차 내에서 일치하여 노내 조사공 측면에서 핵연료집합체내 지지 구조체의 영향은 무시할 만한 것으로 나타났다.

다. 반사체에서의 중성자속

반사체내에 배치할 조사공의 수, 크기 등에 대해서는 현재 고려중에 있으므로 여기서는 조사공이 없는 상태에서 중성자속 분포를 분석하였다. 중성자속($<0.625\text{eV}$)이 산출된 위치는 그림 9에서 원형으로 표시된 오른쪽 상부의 1/4 부분이며 노심 중앙으로부터 반경 45cm 까지의 반사체 영역이다. 축방향 위치는 노심 중심으로부터 $\pm 5\text{cm}$, 즉 10cm 의 길이에 대해 평균값을 산출하였다. 그림 10은 Model B의 반사체내 열중성자속 분포이며, 그림 11은 Model C의 반사체내 열중성자속 분포를 나타낸다. 지지 구조체가 없는 경우 반사체내의 최대 열중성자속($<0.625\text{eV}$)은 $5.1\text{E}+14 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 로 나타났으며, 지지 구조체가 있는 경우 반사체 내의 최대 열중성자속($<0.625\text{eV}$)은 $4.78\text{E}+14 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 로 나타났다. 이때의 통계적 오차는 1σ 유의수준에서 각각 0.90% 및 0.93% 로 나타났다. 따라서, 집합체 내에 핵연료 지지체가 있는 노심이 없는 노심에 비해 약 7% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 같은 중성자속이 $3.1\text{E}+14\text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 가 되는 위치까지의 반경방향 거리는 Model B의 경우 53.4cm , Model C의 경우 52.1cm 로 나타나 약 1cm 정도의 차이를 나타났다. 따라서, 집합체 내의 지지체에 대한 영향도는 크지 않으므로 핵연료 지지체가 있어 유체유발진동에 매우 강한 B형 핵연료를 사용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

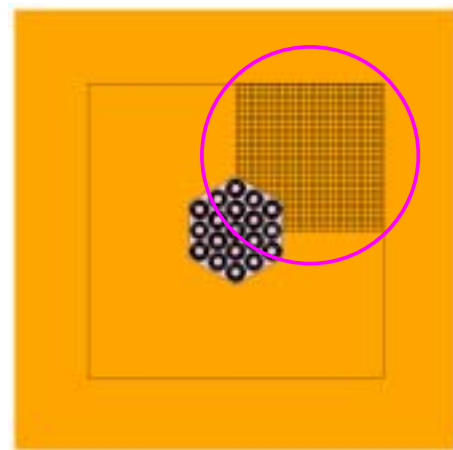


그림 9. 열중성자속 산출 위치

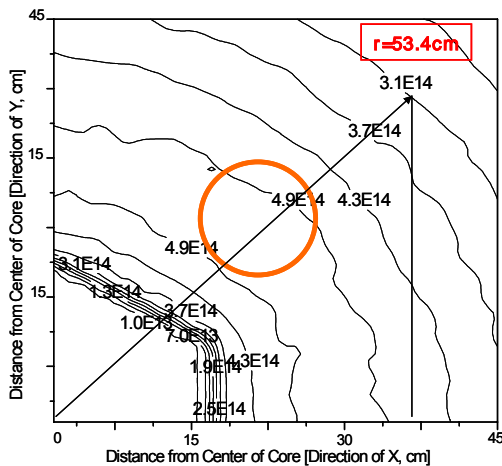


그림 10. Model B의 열중성자속 분포

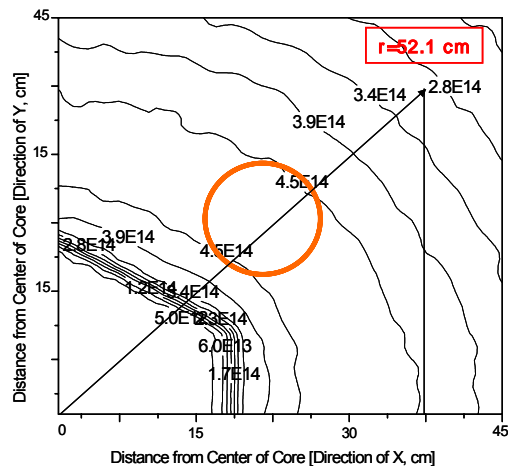


그림 11. Model C의 열중성자속 분포

3.4 제어봉 개수

노심반응도 제어장치 구성을 위해 제어봉 및 정지봉의 수에 따른 반응도가(reactivity worth)를 평가하였다. 계산은 세 가지 경우에 대해 수행되었다. 제어봉/정지봉의 수가 4/2개인 노심과 3/3개인 노심에 대해 제어봉(control absorber rod, CAR) 및 정지봉(Shut Off Rod, SOR) 반응도(reactivity worth)를 각각 계산하였으며, 네 개의 Hf 흡수봉을 제어봉 및 정지봉으로 동시에 사용하는 경우에 대해서도 반응도를 계산하여 노심 제어 가능성을 평가하였다.

3.4.1 노심 모델

노심모형은 그림 12에서 보는 바와 같이 육각형 모양의 알루미늄 블록안에 핵연료 채널을 구성하고, 12개의 채널에는 표준핵연료집합체를 장전하고, 6개의 채널에는 감축핵연료집합체를 장전하였다. 제어봉 및 정지봉 구동을 위한 채널이 6개 있으며, 이는 유동관을 갖는다. 노심 중앙에는 노내 조사를 위한 CT 조사공이 1개 있다. 핵연료 채널간의 알루미늄 블록의 최소두께는 4.8mm이며, D₂O 영역과 노심을 경계짓는 inner shell은 두께 7mm를 갖는 지르코늄으로 설정하였다. 알루미늄 블록의 축방향 길이는 기존 하나로의 유동관 길이가 126cm임을 감안하여 126cm를 적용하였다. 즉, 핵연료집합체의 핵연료(active fuel)의 중앙을 원점으로 보면, 축방향으로 -63cm~63cm에 걸쳐 알루미늄 블록이 위치한다. 기타 반사체의 반경, 하부 inlet plenum 및 상부 영역은 하나로 제원과 동일하게 구성하였다. 그림 13은 노심모델의 수직 단면도를 나타낸다.

노심에 장전되는 표준 핵연료집합체는 3×6개의 curved plate로 구성하였으며, 감축핵연료집합체는 3×4개의 curved plate로 구성하였다. 핵연료 길이는 70cm를 사용하였으며, 알루미늄 피복재의 상부 및 하부 끝단 길이는 하나로 핵연료와 같이 3cm를 적용하였다. 냉각수의 유로너비는 2.5mm, 핵연료 및 피복재의 두께는 각각 0.6mm 및 0.4mm를 가정하였다. 표 1에는 노심 모델의 제원이 상세히 기재되어 있다.

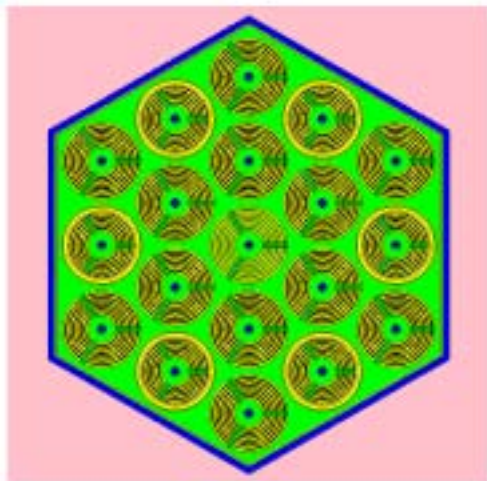


그림 12. 노심 수평 단면도

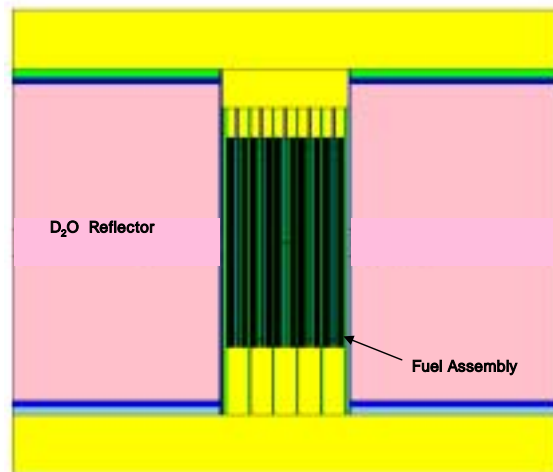


그림 13. 노심 수직 단면도

표 3. 노심 및 핵연료의 기초 제원

Parameter	Value	
Reactor Core		
Reactor power	20 MW _{th}	
Number of fuel sites(standard/reduced/flux trap)	12/6/1	
Lattice pitch	8.8 cm	
Fuel channel inner radius(standard/reduced)	4.04/4.16	
Radius of flow tube for absorber rods(inner/outer)	3.26/3.385	
Number of absorber rods(CAR/SOR)	4/2	
Radius of Hf absorber rods(inner/outer)	3.61/4.01 cm	
Fuel Assembly		
	Standard	Reduced
Radius of central support(material/outer radius)	Zircaloy-4 / 0.4 cm	Zircaloy-4 / 0.4 cm
Radius of Al filler(inner/outer)	0.5/1.45 cm	0.5/1.45 cm
Number of fuel plates	3×6	3×4
Fuel thickness	0.06 cm	0.06 cm
Coolant gap size	0.25 cm	0.25 cm
Cladding thickness	0.04 cm	0.04 cm
Thickness of stiffener	0.6 cm	0.6 cm

2.2 제어봉/정지봉 수에 따른 노심모델

제어봉/정지봉 개수에 따라 노심을 분류하면 다음과 같다. 제어봉이 4개이고 정지봉이 2개인 노심모델(이하 C4S2 노심)은 그림 14와 같으며, 제어봉 및 정지봉의 수가 각각 3개인 노심 모형(이하 C3S3 노심)은 그림 15와 같다. 정지봉 및 제어봉을 공유로 사용하는 노심(이하 C4(S4) 노심)은 그림 16과 같으며, 이는 Hf shroud 4개를 제어봉 및 정지봉으로 함께 사용한다. C4S2 및 C3S3 노심은 제어봉을 위한 유동관이 6개 설치되어 있어 표준핵연료집합체가 12개, 감축핵연료집합체가 6개인 반면, C4(S4) 노심은 노심제어를 위한 유동관이 4개 설치되어 있어 표준핵연료집합체가 14개, 감축핵연료집합체는 4개만이 장전되어 있다. 따라서, C4(S4) 노심의 핵연료 장전량이 약간 많다. 각 흡수봉에 대해 Zr tip은 3cm를 적용하였으며, Hf shroud의 두께는 4mm, 축방향 길이는 70cm를 적용하였다.

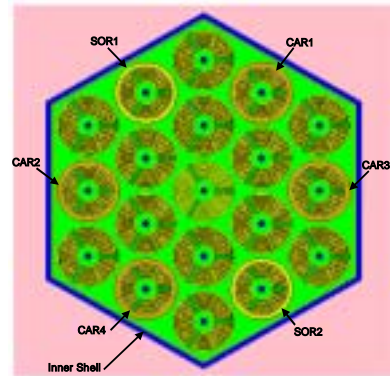


그림 14. 제어봉/정지봉이 4/2개인 노심

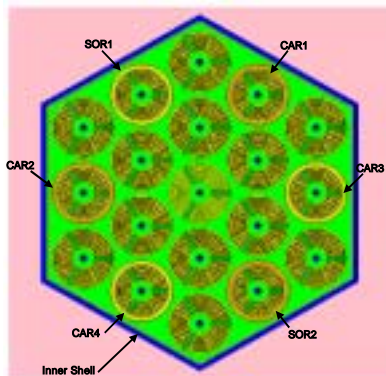


그림 15. 제어봉/제어봉이 3/3개인 노심

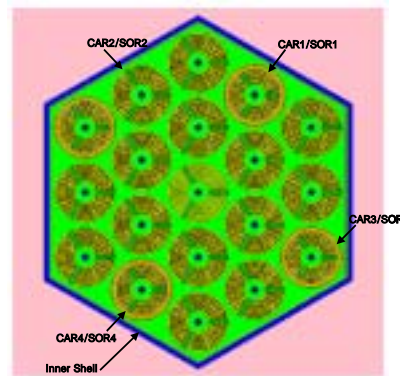


그림 16. 제어봉(정지봉)이 4(4)개인 노심

3.3.2 계산 결과

표 4에는 각 노심에 대해 MCNP를 통해 평가된 반응도 값이 기재되어 있다. 초기노심의 제어 가능성 측면에서 임계위치를 살펴보면, C4S2, C3S3 및 C4(S4) 노심에 대해 각각 핵연료 중심부로부터 -10cm, -16cm 및 -11cm에서 임계를 이루어 초기 노심부터 모든 핵연료를 채우고 운전하더라도 제어가 가능한 것으로 나타났다.

정지 여유도 측면에서는 만일 정지여유도를 하나로와 같이 ‘제어봉이 임계위치에 있고 정지봉 중 반응도가가 가장 큰 정지봉이 삽입되지 않는 조건에서 나머지 정지봉이 모두 삽입되었을 시의 음의 반응도가’라고 정의한다면 모든 노심에 대해 1%Δk 이상의 음의 반응도를 유지하여 충분한 정지 여유도를 확보하는 것으로 나타났다. 그러나, 만일 정지여유도를 ‘정지봉 중 반응도가가 가장 큰 정지봉이 삽입되지 않는 조건에서 나머지 정지봉만이 삽입되었을 시의 음의 반응도가’라고 정의한다면, C4(S4) 노심은 유효증배계수가 0.99586로 정지여유도를 확보할 가능성이 있으나, 나머지 노심에 대해서는 불가능한 것으로 나타났다.

표 2. 신핵연료 노심에서의 제어봉/정지봉 수에 따른 반응도

Spec.	C4S2 노심		C3S3 노심		C4(S4) 노심	
	Keff	δρ(mk)	Keff	δρ(mk)	Keff	δρ(mk)
All Rod Out	1.16646 (0.00079)	-	계산안함 (C4S2와동일)	-	1.17328 (0.00088)	-
All CAR In	0.89785 (0.00075)	268.61	0.98032 (0.00085)	186.14	0.90150 (0.00086)	271.78
CAR1 In	1.10928 (0.00068)	57.18	1.10928 (0.00068)	57.18	1.11407 (0.00079)	59.21
CAR2 In	1.04568 (0.00085)	120.78 ¹⁾	1.04568 (0.00085)	120.78	1.06555 (0.00085)	107.73
CAR3 In	0.98032 (0.00085)	186.14 ¹⁾	0.98032 (0.00085)	186.14	0.99586 (0.00091)	177.42
CAR4 In	0.89785 (0.00075)	268.61 ¹⁾	-	-	0.90150 (0.00086)	271.78
All SOR In	1.03604 (0.00077)	130.42	0.98032 (0.00085)	186.14	0.90150 (0.00086)	271.78
SOR1 In	1.11034 (0.00070)	56.12	1.10928 (0.00068)	57.18	1.11407 (0.00079)	59.21
SOR2 In	1.03604 (0.00077)	130.42	1.04568 (0.00085)	120.78	1.06555 (0.00085)	107.73
SOR3 In	-	-	0.98032 (0.00085)	186.14	0.99586 (0.00091)	177.42
SOR4 In	-	-	-	-	0.90150 (0.00086)	271.78
Critical Position (K_effective)	-10cm (1.00420± 0.00077)	-	-16cm (1.00499± 0.00092)	-	-11cm (1.00062± 0.00077)	-
²⁾ Shutdown Margin	0.94971 (0.00090)	54.49	0.89110 (0.00083)	113.89	0.92468 (0.00080)	75.94

()안의 값은 표준편차임

¹⁾ : δρ의 값은 누적된 값임

²⁾ : Shutdown Margin은 제어봉이 임계위치에 있고 정지봉중 반응도가가 가장 큰 것이 삽입되지 않는 조건에서 나머지 정지봉이 삽입되었을 시의 음의 반응도

4. 결론

고성능 연구로 설계를 위해 핵연료집합체 형태, 노심 및 핵연료지지 구조체, 제어봉/정지봉의 수에 따른 제어 가능성 등의 설계변수에 대한 핵특성 분석을 수행하였다. 판형 핵연료는 제어봉

구동장치를 노심하부에 설치해야 하므로 하나로의 실증기술을 적용할 수 없으며, 봉형 핵연료는 중성자속이 높은 고밀도 조밀노심을 구성하면 열수력적 안전성을 확보하기 어려워 고성능 연구로의 핵연료로는 불리한 것으로 나타났다. 튜브형 핵연료는 열적 여유도가 많고, 반사체에서도 비교적 높은 열중성자속을 얻을 수 있으므로 고성능 연구용 원자로의 핵연료로 적합한 것으로 나타났다. 노심내 구조체 측면에서는 알루미늄 블록을 적용한 노심이 유동관을 적용한 노심에 비해 노심 반응도를 30mk 정도 추가로 확보할 수 있고, 이는 노심 크기 감소와 직결되므로 반사체에서의 중성자속이 상대적으로 높아져 유리한 것으로 나타났다. 집합체내 핵연료 지지 구조체에 의한 CT에서의 중성자속 감소는 무시할 만 하였으며, 반사체에서의 열중성자속($<0.625\text{eV}$)은 약 7% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, 구조체가 존재함으로써 유체유발 진동에 매우 강한 BR2형 핵연료를 사용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 신핵연료 노심에 대해 제어봉/정지봉의 개수에 대한 노심 제어 가능성을 평가한 결과, 제어봉/정지봉 개수를 4/2개, 제어봉의 두께를 약 4mm로 사용하면 초기노심부터 신핵연료를 모두 채우고 운전하는 것이 가능한 것으로 나타났다.

Acknowledgements

본 연구는 한국원자력연구소 기관고유사업으로 수행되었습니다.

REFERENCE

1. 박철 외, "수출전략형 연구로 설계," KAERI/RR-2289/2002, 한국원자력연구소 (2003).
2. 조동건 외, "SRAC/MCNP를 이용한 고성능 연구로 노심 예비 개념설계," 2003 추계학술발표회논문집, 용평, 10월30일-10월31일 (2003).
3. N. A. Hanan, et al, "Fluxes at Experiment Facilities in HEU and LEU Designs for the FRM-II," *Proceedings of 1997 International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors*, Jackson Hole, USA, October 5-10, pp. 401-411 (1997).
4. N. A. Hanan, et al, "Alternative LEU Designs for the FRM-II with Power Levels of 20-22MW," *Proceeding of 1999 International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors*, Budapest, Hungary, October 3-8 (1999).
5. Chang-Kyu Kim, "Advanced Fuel Development for Research Reactors," *Proceedings of IAEA/RCA Regional Workshop/Training Course on Core Management for Improved Utilization of Research Reactors*, Daejeon, Korea, May 13-24, pp. 229-267 (2002).