

## 육방형핵연료 장전 무봉산운전 노심 개념의

### 핵설계 평가

송재승, 김궁구, 지성균, 장문희  
한국원자력연구소

#### 요 약

봉산수를 사용하는 기존 가압경수로에 적용하는 설계요건을 검토하여 무봉산운전 가압경수로 노심핵설계에 적용할 설계요건을 도출하였다. 무봉산운전 노심에서 운전중 반응도 제어는 제어봉만으로 이루어지기 때문에 제어봉의 삽입 및 인출에 제한을 두지 않아야 한다. 따라서 운전중 제어봉의 삽입 및 인출로 인하여 침투출력인자가 높아지게 되므로 노심 선출력밀도를 낮게 설계해야 한다. 또한 제어봉만을 사용하여 상온영출력 상태에서 미임계요건을 만족해야 하기 때문에 고온선출력 상태에서의 노심 잉여반응도를 최소화하여 제어봉 부하를 줄여야 하고, 이를 위해서는 연소에 따른 반응도 변화를 최소화하는 핵연료집합체 설계가 필요하다. 이와 같이 도출된 설계요건을 적용하여 600 MWe 급 원자로심을 육방형핵연료로 구성하고 무봉산운전 24개월 주기에 대한 주요 핵설계변수를 분석하여 노심의 핵설계를 평가하였다. 이 연구에서 제시된 노심은 무봉산운전 노심의 제반 설계요건을 만족하고 있으며 기존 가압경수로에 상응하는 경제성을 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

#### 1. 개요

가압경수로에서의 무봉산운전 방식은 1차계통 부식의 주 원인인 봉산수를 사용하지 않음으로써 계통의 건전성을 제고하고 액체 폐기물의 양을 현저하게 줄일 수 있으며, 냉각재 내의 봉산함량을 조절하는 계통을 제거하여 계통설비를 단순하게 할 뿐만 아니라 봉산농도 조절 및 측정이 불필요해지므로 제어 및 감시계통이 간단해지는 장점이 있다. 또한, 노심의 감속재온도계수를 항상 음의 값으로 유지할 수 있기 때문에 원자로의 고유안전성이 향상된다. 그러나, 노심의 반응도를 제어하는 수단이 제어봉에만 한정되므로 노심설계의 기본적 개념에 있어서 기존의 가압경수로와는 다른 특성을 필요로 하게 된다.

이 연구에서는 무봉산운전 방식을 채택한 가압경수로의 노심핵설계에서 기존의 설계요건과 달

라져야 하는 무봉산노심 설계요건을 도출하고, 이 개념을 적용하여 전기출력 600 MW 급 가압경수로를 육방형핵연료로 노심을 구성하여 핵설계를 수행하였다. 제안된 노심은 가동율(capacity factor) 90%의 24 개월 주기계획을 기본으로 하였으며 평형주기에 이르기까지 노심의 반응도 제어가능성과 노심안전성을 검토하였다. 이 노심의 핵연료봉은 자료의 취득과 분석의 편의를 위하여 국내 기술로 생산되어 상용으로 사용되었던 KOFA<sup>[11]</sup>를 육방형집합체 구조로 변환하여 설계에 적용하였다. 핵연료집합체 균정수 생산에는 육방형 기하구조의 취급이 가능한 HELIOS<sup>[2]</sup> 코드를, 노심의 해석에는 AFEN 육방형 3차원 해석기법을 사용하는 MASTER 2.0<sup>[3]</sup>을 각각 사용하였다.

## 2. 무봉산운전을 위한 핵설계 요건

### 가. 핵연료 연소에 따른 잉여반응도 최소화

원자로의 출력운전을 위해서는 적당량의 잉여반응도를 필요로 한다. 이 잉여반응도는 상온에서 고온출력상태로 전환할 때 필요한 반응도결손, 핵분열생성물에 의한 음의 반응도 및 핵연료의 연소에 따른 반응도 감소를 상쇄하기 위한 것이다. 기존의 가압경수로에서는 이 잉여반응도의 대부분을 봉산으로 제어하게 되므로 가연성흡수체의 사용은 주기초 감속계온도계수가 음의 값을 유지할 정도면 충분하다. 따라서 핵연료집합체와 노심의 반응도는 연소에 따라 선형적으로 감소하는 특성을 갖는다. 그러나, 무봉산운전 노심에서는 제어봉에 부과되는 잉여반응도 제어 부하를 가능한 한 줄이기 위하여 핵연료 연소에 따른 반응도 감소를 보상해야 하는 잉여반응도의 대부분을 가연성흡수체가 제어하도록 설계가 이루어져야 한다. 따라서, 무봉산운전 노심에서 핵연료집합체와 노심의 반응도는 연소에 따른 변화를 최소화하는 방향으로 설계되어야 한다.

### 나. 자유로운 제어봉 이동을 위한 국부첨두출력 설계목표값의 상향조정

기존의 가압경수로에서 대부분의 운전은 제어봉이 거의 삽입되지 않은 상태에서 이루어진다. 제어봉의 노심 내 삽입은 운전조건에 따라 엄격히 제한되며 노심의 운전은 특정한 축방향 출력편차 범위 내에서 제한된다. 그러나 무봉산운전 노심에서는 수시로 발생하는 반응도의 변화를 제어봉만으로 제어해야 하므로 제어봉의 삽입과 인출을 제한할 수 없으며, 운전원이 축방향 출력편차를 제어할 수단이 없으므로 발생가능한 모든 축방향 출력편차를 수용할 수 있는 설계가 수행되어야 한다. 결국, 무봉산운전 노심의 첨두출력인자는 봉산을 사용하는 노심보다 높게 설정될 수 밖에 없는데 기존의 연구에 의하면 제어봉만으로 노심의 잉여반응도를 제어하는 운전의 경우 3차원 첨두출력계수는 핵연료나 가연성흡수물질의 축방향 농축도변화 유무에 따라 3.0에서 3.5까지의 값을 갖게 된다.<sup>[5,6]</sup> 따라서, 무봉산운전 노심에서의 국부첨두출력은 3.5 정도가 적절한 설계목표값으로 제시될 수 있다.

### 다. 제어봉만을 사용한 노심의 미임계상태 유지

무봉산운전 노심에서는 제어봉만으로 상온 영출력 상태에서 노심의 미임계를 유지할 수 있어야 한다. 따라서, 일반적인 노심설계기준인 핵연료장전시 노심유효증배계수 0.95 이하와 반응도가가

가장 큰 제어봉 고착시 미임계 유지 등의 조건을 만족하기 위해서는 상온 영출력시 모든 제어봉이 삽입된 상태에서 노심의 유효증배계수가 0.95 이하가 되어야 하며 반응도가가 가장 큰 제어봉 하나를 제외한 모든 제어봉이 삽입된 상태에서 노심의 유효증배계수가 1.0 미만이 되어야 한다.

### 3. 600 MWe 육방형핵연료 장전 노심의 핵설계

상기의 설계요건을 적용하여 전기출력 600 MW의 무봉산운전 육방형핵연료 장전 노심의 핵설계 타당성을 검토하였다. 자료의 취득과 분석의 편의를 위하여 핵연료는 국내기술로 개발되어 상용으로 사용되었던 KOFA 핵연료봉을 그대로 사용하였다. 노심의 열출력, 핵연료집합체 배열 및 개수, 기타 계통변수들은 참고문헌<sup>16)</sup>을 참조하였으며 핵설계와 관련된 주요제원을 표 1에 요약하였다.

핵연료의 연소에 따른 반응도 변화를 최소화하기 위하여 가연성 흡수물질로는  $B_4C-Al_2O_3$  혼합체를 사용하였다. 제어봉과의 양립성을 확보하기 위하여 가연성흡수봉은 핵연료집합체 내의 핵연료를 대체하여 장전되므로 노심내 가연성흡수봉의 수에 따라 노심평균 선출력밀도는 약간씩 달라지나 평형노심의 경우 108 W/cm로 기존 가압경수로 180 W/cm의 60% 정도의 값을 갖게 되며 2절에서 설정된 첨두출력 설계목표값 3.5를 적용하면 최대 국부 선출력밀도는 첨두출력 설계값이 2.3 정도인 기존 가압경수로 419 W/cm의 90% 정도에 해당하는 값을 유지하게 된다. 제어봉은 출력 및 반응도제어를 위한 조절제어봉과 원자로정지를 위한 정지제어봉 및 반경방향 출력분포제어를 위하여 노심내에 항상 삽입되어 운전되는 중앙제어봉의 3가지 군으로 분류하였다. 제어봉 내 중성자흡수 물질로는  $B_4C$ 와  $Ag-In-Cd$ 가 사용되는데  $B_4C$ 는 제어봉가를 높일 수 있는 반면 중성자흡수반응의 부산물로 생성되는 He 기체가 제어봉의 부풀림 현상을 유발하여 제어봉고착의 원인을 제공할 수 있으므로 정지제어봉에만의 사용으로 국한하였고, 원자로운전 중 수시로 노심 내에 삽입되는 중앙 및 조절제어봉에는  $Ag-In-Cd$  혼합체를 사용하였다.

이 연구에서 제시된 평형주기 노심장전모형 및 제어봉배치를 그림 1 과 2에 나타내었다. 정지제어봉은 3개의 핵연료집합체에 삽입되는 제어봉을 하나의 제어봉 구동장치에 연결하여 제어봉설치에 따른 비용절감을 꾀하였으며 노심 전체적으로는 1/3 회전대칭을 유지하도록 하였다. 이 노심의 주기계획은 24개월 2.8배치로 정확한 3배치를 구성하지 못하는 이유는 신연료를 6의 배수로 장전해야 하기 때문이다. 핵연료집합체 설계는 연소에 따른 반응도변화를 최소화하기 위하여 가연성흡수봉을 배치하였으며 초기노심부터 평형주기까지 사용된 두가지 핵연료집합체의 연소에 따른 무한증배계수 변화를 그림 3에 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 무한증배계수가 연소기간 동안 거의 일정하게 유지되기 때문에 노심의 연소에 따른 반응도변화는 1개의 중앙제어봉이 완전 삽입된 상태에서 6개의 CEDM으로 구성된 조절제어 1군 만으로 충분히 제어될 수 있는 것으로 나타났다. 각 주기별 임계 제어봉 위치와 노심의 3차원 첨두출력인자 변화는 그림 4와 5에 나타내었는데 첨두출력인자가 설계목표값 3.5 이하를 충분히 만족하고 있다. 중앙 및 조절제어봉의 반응도가는 각 주기 및 연소도 별로 달라지나 표 2에 기술된 범위 내에서 비교적 안정되어 있다. 노심의 안전성 확보 관건인 상온 영출력 상태의 미임계도는 표 3에 나타난 바와 같이

10%의 제어봉 반응도가 불확실도를 고려하더라도 2 절에서 논의된 일반적인 노심설계기준을 충분히 만족하고 있다.

이 노심의 평형주기에서 방출되는 핵연료의 연소도를 표 4에 요약하였는데 최대 핵연료봉 연소도 56000 MWD/MTU은 기존 KOFA의 연소도한계를 초과하나 핵연료개발의 추세가 최대 핵연료봉 연소도 60000 MWD/MTU을 추구하거나 이미 상용화되는 과정에 있으므로 KOFA 사용시 성능이 향상된 핵연료에 이를 적용하면 최대방출연소도 설계요건을 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 방출되는 핵연료집합체의 평균연소도는 약 44000 MWD/MTU로 12개월 4배치 노심의 평균연소도와 유사한 값을 가지므로 핵연료의 경제성면에서도 기존의 가압경수로와 큰 차이는 없을 것으로 예상된다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 무봉산운전 노심의 핵설계에서 고려되어야 할 설계요건을 도출하였다. 또한 도출된 설계요건을 적용하여 육방형 핵연료집합체를 사용하는 노심을 구성하였다. 구성된 노심은 제어봉만을 사용하는 노심의 제어에서 발생할 수 있는 침투출력의 증가에 대비하여 노심평균 선출력을 기존 가압경수로의 60% 정도로 유지하면서도 핵연료집합체의 방출연소도를 고려하면 기존의 가압경수로에 상응하는 경제성을 유지할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 이 노심은 상온 영출력 상태에서 제어봉의 삽입만으로도 미임계 상태를 유지할 수 있고 연소에 따른 노심의 반응도 변화를 6개로 구성된 단 1개의 조절 제어봉군으로 제어할 수 있음이 확인되었다. 이 연구에서는 가연성흡수봉으로 핵연료집합체 내의 핵연료를 대체하여 장전되는  $B_2C-Al_2O_3$  봉의 사용만을 고려하였으나 핵연료와 혼합하여 핵연료경제성을 향상시킬 수 있는 일체형 가연성흡수체의 사용이 향후 연구로 추천된다.

#### 참고문헌

1. D. S. Sohn, et al., "Fuel Design Report for 17x17 Assembly," KAERI, 1987.
2. "HELIOS Program Description," Scandpower, 1994.
3. B. O. Cho, et al., "Partial Current Based AFEN Formulation for Hexagonal-z Neutronics Solver in MASTER," Submitted to *International Conference on the Physics of Nuclear Science and Technology*, October 5-8, 1998, Long Island, New York.
4. 이창호 외, "MASTER 2.0 사용자 지침서," KAERI/UM-3/98, 한국원자력연구소, 1998.
5. 장문희 외, "중소형 일체형원자로 개발, 중소형 일체형원자로 노심 설계개발," KAERI/RR-1712/96, 한국원자력연구소, 1997.
6. 김영진 외, "신형원자로 기술개발, 신형원자로 노심 개념 연구," KAERI/RR-1715/96, 1997.

표 1. 600 MWe 육방형 노심 제원

노심제원	노심 열출력 (MW)	1933	
	핵연료집합체 수	151	
	핵연료집합체 pitch (cm)	25.3	
	유효노심높이 (cm)	365.76	
	주기길이 (전출력일)	660	
핵연료집합체 제원		Type 1	Type 2
	핵연료봉 pitch (cm)	1.246	1.246
	핵연료봉 수	324	360
	안내관 수	37	37
	가연성흡수봉 수	36	18
	핵연료 농축도 (wt%)	4.76 (4.95, 4.00 혼용)	
가연성 독봉 제원	가연성흡수체 종류	$B_4C-Al_2O_3$	$B_4C-Al_2O_3$
	중성자흡수체 직경 (cm)	0.7098	0.6698
	$B^{10}$ 장전량 (g/cm)	0.0152	0.0081
핵연료봉 제원	KOFA 와 동일		
제어봉 제원		정지제어봉	중양/조절제어봉
	중성자흡수체 종류	$B_4C$	Ag-In-Cd
	중성자흡수체 직경 (cm)	0.8229	0.8662

표 2. 중양 및 조절제어봉가

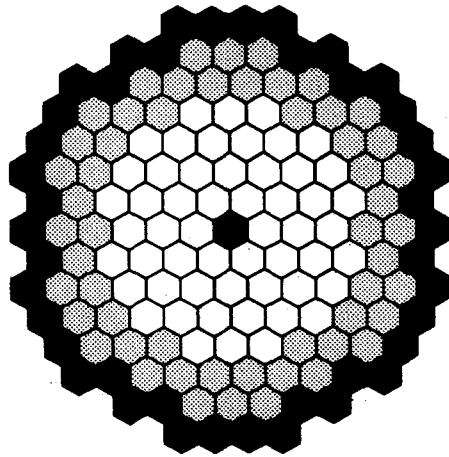
삽입제어군	제어봉가 범위 (pcm)
중양제어군	230 < 제어봉가 < 330
중양제어군 + 조절제어군 1	1500 < 제어봉가 < 2000
중양제어군 + 조절제어군	7500 < 제어봉가 < 9000

표 3. 상온 영출력 상태의 최대 미입계도

제어봉 삽입상태	노심 유효증배계수
전제어봉 삽입 (ARI)	< 0.890
최대반응도가 제어봉 고착 (N-1)	< 0.983

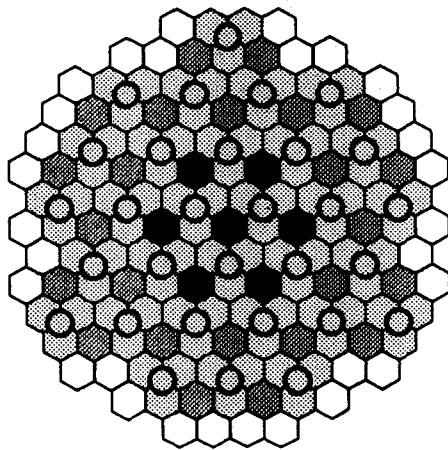
표 4. 평형주기 핵연료 방출연소도

구분	방출연소도 (MWD/MTU)
핵연료 평균 방출연소도	43934
최대 핵연료집합체 방출연소도	47185
최대 핵연료봉 방출연소도	55994



 신핵연료집합체    
  1 회연소 핵연료집합체    
  2 회연소 핵연료집합체

그림 1. 평형주기 노심장전 모형







 중앙제어봉    
  조절제어군 1    
  조절제어군    
  정지제어군

그림 2. 제어봉 배치

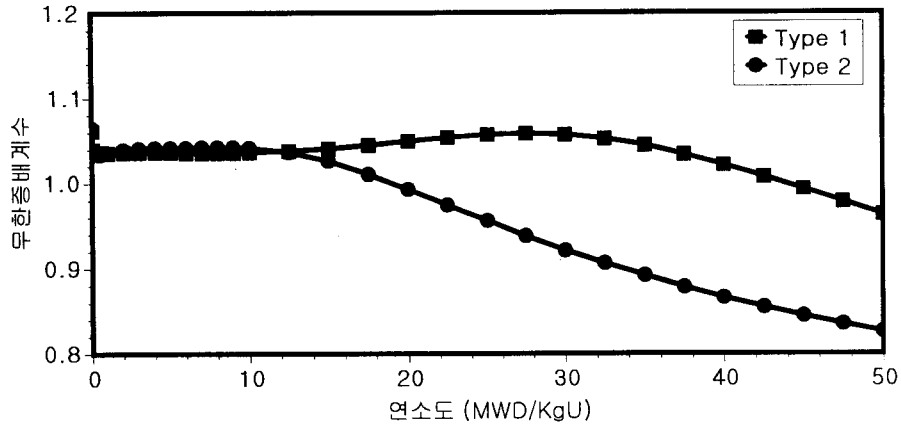


그림 3. 핵연료집합체 무한증배계수 변화

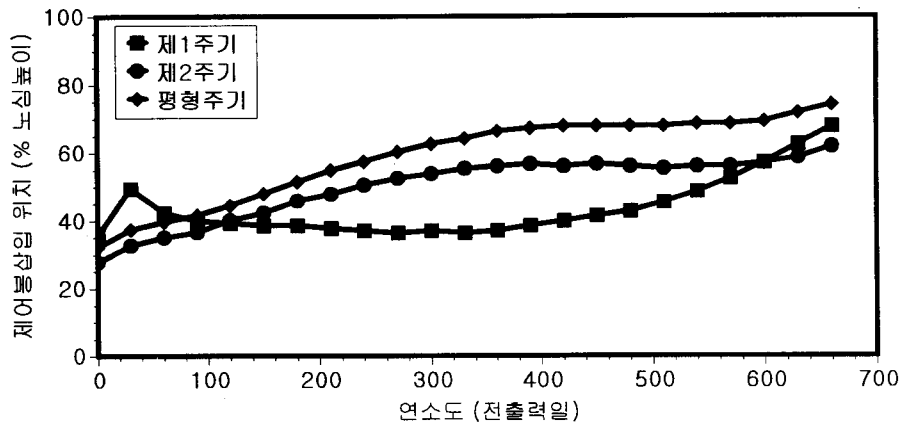


그림 4. 노심입계를 위한 조절제어1군 삽입위치

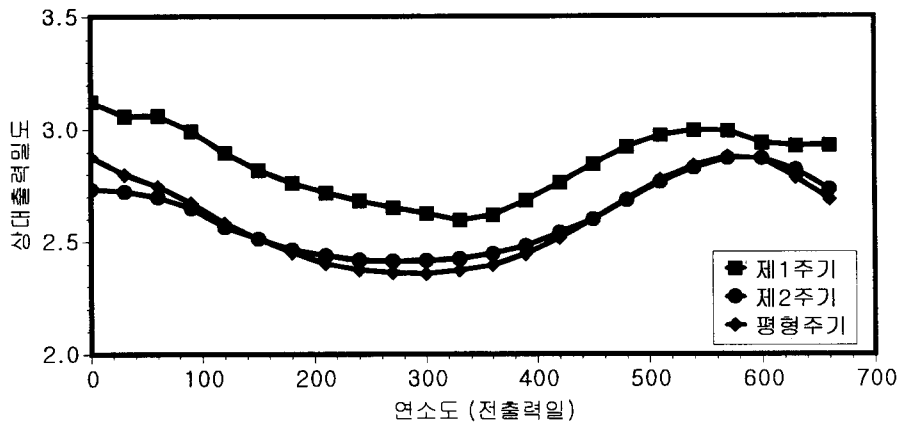


그림 5. 전출력 노심연소에 따른 첨두출력인자 변화