

육각형 핵연료집합체로 구성된 신형원자로심 개념연구

김궁구, 황대현, 유연중, 김영진, 장문희
한국원자력연구소

요 약

피동 및 고유안전 개념을 중점적으로 적용하고 운전유연성을 극대화하는 설계특성을 갖는 신형 원자로 노심개념 설정연구를 수행하였다. 노심의 출력은 피동안전개념 등과 같은 신기술의 적용이 용이하도록 600MWe급의 중·소형으로 설정하였다. 신형원자로는 무봉산 저출력밀도 노심개념을 채택하여 원자로 계통의 단순화와 낮은 선출력밀도로 원자로의 안전여유도가 제고될 수 있는 것으로 판단된다. 또한 모든 운전영역에서 음의 감속계 반응도계수가 보장되고 사각형격자에 비해서 더 큰 값을 나타내므로 원자로의 고유안전성과 향상된 운전성능을 보장할 수 있다. 육각형 집합체내의 핵연료봉 직경 및 봉간거리에 대해 열수력적 관점에서 최적화 계산을 수행한 결과, 참조 모형으로 선정한 핵연료 집합체는 와이어랩 지지격자를 사용할 경우 열수력적으로 최적설계에 가까운 것으로 분석되었다.

1. 서론

최근 선진국들은 원전의 안전성을 기존 원전에 비해 획기적으로 제고하면서도 경제성을 개선할 수 있는 신형원자로 개발에 주력하고 있다. 이와 같은 추세에 발맞추기 위해서 국내에서도 두가지 방향의 연구개발이 이루어지고 있다. 첫번째는 차세대원자로 개발로서 정부의 주관하에 한국전력공사, 한국원자력연구소, 신형원자로연구센터등의 유관기관들이 협력하여 피동형 원자로에 대한 개발전 타당성 조사, AP600의 용량 격상 가능성 검토, SYSTEM 80*에 피동형 개념 적용 타당성 검토를 완료하였고, 현재는 차세대 원자로로서 개량형 대용량 원자로가 채택되어 개발되고 있다 [1]. 두번째는 원자력연구소와 학계 공동으로 수행 중인 신형원자로 기술개발 과제이다. 신형원자로의 주요개념으로서 피동 및 고유안전 개념을 중점적으로 적용함으로써 원전의 사고시 동력등 외부지원 및 운전원의 조치 없이도 사고에 대처할 수 기능과 운전 유연성을 극대화하는 설계를 채택하고 있다. 본 논문에서는 중소형 신형원자로의 노심설계 방향, 핵연료집합체 및 노심에 대한 예비설계, 열수력 관점에서의 최적 연료봉 직경 및 봉간거리 대해 기술하고 있다.

2. 노심설계 목표 및 설계요건

2.1 설계목표

신형원자로 노심은 피동 및 고유 안전성을 갖도록 하기위해 충분한 열출력 여유도가 보장되도록 저출력밀도로 설계하고, 붕산수를 사용하지 않고 원자로의 출력과 출력분포제어가 가능하도록 600 MWe급의 무붕산 노심으로 설계하는 것을 목표로 한다. 또한 운전유연성을 더해주는 핵적 변환효과의 향상과 핵연료 경제성을 도모하기 위해 핵연료 전환률을 제고시키는 노심개념을 채택하고 있으며, 압력용기에 대한 고속중성자 조사량을 최소화할 수 있도록 노심의각 및 주변지역을 설계한다.

2.2 설계요건

앞에서 기술한 설계목표를 달성하기 위하여 무붕산 노심설계, 저출력밀도 노심설계추구 및 준조밀격자 핵연료집합체를 장전하는 노심개념을 주요 요소기술로 채택하였으며 다음과 같은 기본 설계요건을 설정하였다.

- 저출력밀도 노심설계: 저출력밀도는 열출력 여유도를 높여 노심의 안전성을 제고하는데 가장 기본이 된다. 노심의 크기는 AP600 원자로와 같도록 정하며, 육각형 준조밀 핵연료집합체를 장전함으로써 선출력밀도를 더욱 낮추어 노심의 안전성을 제고한다.
- 준조밀격자 노심설계: 핵연료 집합체를 준조밀격자로 설계함에 따라서 노심의 핵연료 이용률을 향상시키고 주기초 노심의 잉여 반응도를 줄여 무붕산 원자로 설계를 용이하게 할 수 있다.
- 핵연료의 방출연소도 향상: 핵연료의 방출연소도를 향상시킴으로서 경제성을 도모한다.
- 장주기 운전: 18개월 또는 24개월 장주기 운전모드를 채택한다.
- 무붕산노심 설계: 무붕산 노심설계를 채택함으로써 계통이 단순화되어 운전 및 유지 보수가 용이해질 수 있으며, 붕산수 사용으로 인한 액체 폐기물양을 현저하게 줄일 수 있다. 또한 원자로심의 냉각재 부반응도계수를 항상 음으로 유지시킬 수 있기 때문에 원자로의 고유 안전성이 향상되고 운전이 용이해질 수 있다. 이밖에 붕산수의 산성으로 인한 일차냉각계통 구조재들의 부식을 근원적으로 방지할 수 있다.
- 발전소 수명 연장: 60년 발전수명을 확보하기 위해 원자로 압력용기에 대한 고에너지 중성자 조사량을 최소화한다.

3. 핵연료 집합체 및 노심설계

3.1 핵연료 집합체 및 노심 구조

핵연료집합체는 KOFA 핵연료봉을 배열한 육각형으로 변화시켜 육각형 핵연료 집합체로 구성하였다. 그림1은 육각형 격자구조를 갖는 핵연료 집합체의 단면을 보여주고 있다. 이 그림에서 보

인 육각형 격자의 핵연료 봉간거리는 1.14 cm이고 봉사이 겹은 0.23 cm로 핵연료 집합체의 지지 격자로서 그리드 형태나 와이어를 핵연료봉 주위에 감아 사용하는 와이어랩 형태를 사용할 수 있다. 핵연료집합체의 전체 봉수는 397개로 KOFA 핵연료 집합체와 비교하여 108개가 더 많다. 제어봉이나 가연성 독봉 삽입을 위한 가이드튜브 36개, 계측장비를 위한 가이드튜브 1개를 제외하면 핵연료봉은 360개를 장전할 수 있다. 핵연료는 UO_2 이며 핵연료 농축도는 18개월 운전을 상정하여 약 3.5 w/o이다.

원자로심의 크기는 AP600 원자로의 노심 크기와 같도록 정했으며, 노심에는 AP600 원자로의 핵연료 집합체수보다 많은 151개의 육각형 핵연료 집합체가 장전된다. 제어봉 집합체 장전모형은 보다 자세한 분석을 거친 후에 충분한 운전 및 정지 여유도를 가질 수 있도록 결정될 것이다.

3.2 핵연료 집합체 및 노심 특성분석

현재 육각형 격자구조의 핵연료 집합체 특성을 분석하는 전산코드의 미비로 본 연구에서는 WIMS[2,3]를 사용하여 단일 격자모형에 대해 설계변수 변화에 따른 핵적특성변수 변화를 해석하였다. 그림2는 WIMS로 해석한 냉각재 온도계수를 냉각재 온도의 함수로 보여주고 있다. 이 그림에서와 같이 감속재온도계수는 KOFA 핵연료 집합체와 비교하여 육각형 준조밀 핵연료집합체에서 보다 옴의 값을 나타낸다. 따라서 육각형 준조밀 핵연료 집합체를 장전한 노심은 고유안전성 및 운전 용이성이 증대될 수 있다. 그러나 이로 인하여 원자로 운전상태 변화(저온 영출력에서 고온 전출력)로 인한 반응도가 변화는 육각형격자에서 10.7 % Δk 로 KOFA핵연료 격자의 6.3 % Δk 보다 크기 때문에 제어봉의 반응도가도 이에 상응하여 커져야 한다는 것을 알 수 있다.

원자로심에 장전되는 전체 핵연료봉수는 54,360개로 AP600노심의 38,280개보다 약 42% 증가한다. 따라서 평균 선출력밀도도 9.7 kW/m로 낮아지게 되어 원자로의 열적여유도를 향상시킬 수 있다. 핵연료 장전량은 약 99 ton이며 specific power density는 19.5 kg/ UO_2 이다. 18개월 주기운전시 평균 주기연소도는 약 10,000 MWD/MTU이다.

4. 노심 열수력 특성분석

4.1. 노심 열수력 분석방법

본 연구에서는 단일수로 개념의 열수력적 특성 평가 프로그램을 개발하여, 육각형 준조밀격자 집합체를 사용하는 신형원자로 노심의 열적여유도와 집합체 구조에 대한 열수력적 최적화 분석을 수행하였다. 열적여유도 분석에 사용된 육각형 집합체에 대한 임계열속 상관식으로서 system parameter 개념으로 개발된 KFK 상관식[4]을 선정하였으며, 삼각격자 부수로에서의 압력손실은 "equivalent annular zone" 모형[5]을 사용하여 계산하였다. 그리고 와이어랩 지지격자의 압력손실 분석에는 Rheme의 모형[6]을 적용하였다. 삼각격자 부수로의 단상 유동 열전달은 Weisman에 의

해 수정된 Dittus-Boelter 상관식 형태[7]를 사용하였으며, 피복관 및 핵연료봉 중심온도는 소결체와 피복관 내에서 열전도도가 온도와 무관하게 일정하고 축방향의 열전달을 무시한다는 가정하에서 계산하였다.

4.2. 신형원자로 노심과 AP600 노심의 열적 여유도 비교

AP600 노심의 핵연료 집합체는 IFM이 부착된 정방향이며, 신형원자로 노심의 핵연료는 grid 형태 지지격자가 부착된 그림1의 참조 육각형 집합체이다. 두 노심의 열적여유도 비교를 위하여 운전조건은 서로 동일한 것으로 가정하였으며, 정상출력 상태에서의 주요 열수력 설계 변수는 표1에 제시하였다. System parameter 개념의 CHF 상관식을 두 노심에 적용하고 사고에 대한 required margin이 서로 동일하다면, 두 노심의 정상상태 DNBR 비교는 열적여유도의 비교와 동일한 의미를 갖는다. 따라서 AP600 노심을 기준으로 신형원자로 핵연료 및 노심조건 변화에 따른 열적여유도 변화량을 α 라고 정의하면 두 노심 간의 열적여유도 차이에 기여하는 변수들은 노심 평균열속, 부수로 형태, 노심 입구유속, 수력직경 및 IFM 부착유무 등이다. 이 중 노심 평균열속(q'')의 차이는 열적여유도에 직접적인 영향을 주는 변수이며, 나머지 변수들이 임계열속에 미치는 영향은 WSC-2 혹은 KfK 상관식을 사용하여 평가하였다. 부수로형태의 영향은 동일한 국부 열수력조건에서 사각격자 수로와 삼각격자 수로간의 임계열속 차이를 WSC-2 상관식으로 평가하였으며, 노심 입구 유속(G) 및 수력직경(D_{hy})이 임계열속에 미치는 영향은 KfK 상관식의 각 변수에 대한 parametric trend로부터 평가하였다. 한편 IFM의 영향은 기존의 사각형 집합체에 대한 실험 결과를 참고하여 평가하였으며, 평가 결과 표2에서 보듯이 신형원자로 노심은 IFM이 없는 상태에서도 AP600 노심과 유사한 열적여유도를 확보할 수 있는 것으로 판단된다. 그러나 신형원자로심의 압력 손실은 표1에서 보듯이 약 2배 정도 증가하므로 노심 선정시 이를 고려해야 한다.

4.3. 육각형 집합체 구조에 대한 열수력적 최적화

육각형 집합체내의 핵연료봉 직경 및 봉간거리에 대해 열수력적 관점에서 최적화계산을 수행하였다. 즉, 노심 및 집합체 크기를 일정하게 유지한 상태에서 노심 최소 DNBR, 노심 압력 손실, 피복관 표면온도 및 연료봉 중심온도에 대한 최적 기하형태를 조사하였는데, 이는 V_M/V_F (water-to-fuel rod volume ratio)를 매개 변수로 하여 아래와 같은 두 가지 관점에서 수행하였다.

- 1) V_M/V_F 가 일정하게 주어진 조건에서는 집합체내의 최적 연료봉수(봉직경 및 봉간격)를 결정
- 2) V_M/V_F 를 변화시키는 조건에서는 봉간격을 고정시키고 봉직경의 최적치를 결정

V_M/V_F 가 일정한 경우 그림3, 4에서 보듯이 봉간거리(RP)가 줄어들수록 노심 최소 DNBR은 커진다. 그리고 V_M/V_F 가 증가하면 질량유속, 노심 평균열속 및 수력직경의 영향이 복합적으로 나타나 DNBR은 증가 후 감소하는 경향을 보인다. 한편 V_M/V_F 가 증가하면 핵연료봉 중심온도 및 피복관 표면온도는 증가하며 노심 압력손실은 감소한다. 따라서 설계 요구조건에 따라 이들 변수 간의

최적화가 이루어져야 한다. DNBR 관점에서 본 397 연료봉 집합체의 봉 직경 및 봉 간격 최적치는 지지격자가 grid 형태인 경우 그림3에서 보듯이 각각 8.5 및 11.4 mm($V_M/V_F=1.12$)이며, 와이어랩 형태인 경우에는 그림4에서 보듯이 각각 10.0 및 11.4 mm($V_M/V_F=0.50$)로 평가되었다. 따라서 본 연구에서 참조 모형으로 선정한 그림1과 같은 핵연료 집합체는 봉직경 및 봉간격이 각각 9.5 및 11.4 mm($V_M/V_F=0.677$)로서 와이어랩 지지격자를 사용할 경우 열수력적 최적치와 유사하다.

5. 결론

고유안전성과 핵연료 이용률을 향상시키기 위한 신형원자로 노심개념으로 육각형 준조밀격자가 장전된 저출력밀도 노심개념을 설정하였다. 노심의 출력은 피동안전개념 등과 같은 신기술의 적용이 용이하도록 600MWe급의 중·소형으로 설정하였다. 준조밀 육각형 격자구조로 구성된 노심의 선형출력 밀도는 같은 크기의 사각형 격자구조 노심에서 보다 약 28%정도 낮기 때문에 원자로의 안전여유도를 증가시킬 수 있다. 신형원자로는 무봉산노심 개념을 채택하여 원자로 계통의 단순화와 낮은 선출력밀도로 원자로의 안전여유도가 제고될 수 있는 것으로 판단된다. 또한 전 운전 영역에서 음의 감속재 반응도계수가 보장되고 사각형격자에 비해서 더 큰 값을 나타내므로 원자로의 고유안전성과 향상된 운전성능을 보장할 수 있다. 육각형 집합체내의 핵연료봉 직경 및 봉간 거리에 대해 열수력적 관점에서 최적화계산을 수행한 결과, 참조 모형으로 선정한 핵연료 집합체는 봉직경 및 봉간격이 각각 9.5 및 11.4 mm($V_M/V_F=0.677$)로서 와이어랩 지지격자를 사용할 경우 열수력적으로 최적치에 가까운 것으로 분석되었다.

참고문헌

- [1] 차세대 원자로 기술개발(I), 해외개발노형비교, 한전기술연구원, KRC-92N-J11, 1994. 12
- [2] J.R. Askew, F.J. Fayers, P.B. Kemshell, "A General Description of the Lattice Code WIMS", Journal of the British Nuclear Energy Society, Oct,1966, Vol. 4, No. 4
- [3] H.R. Kim, WIMS-KAERI for the Extended KMRR Physics Calculations, KAERI, 1987
- [4] Donne M.D., Hame W., "Critical Heat Flux Correlation for Triangular Arrays of Rod Bundles with Tight Lattices including the Spiral Spacer Effect", Nuc. Technology 71, pp.111 (1985)
- [5] Rehme K., "Pressure Drop Performance of Rod Bundles in Hexagonal Arrangements", Int. J. Heat Mass Transfer 15, pp.2499 (1972)
- [6] Rehme K., "Pressure Drop Correlations for Fuel Element Spacers", Nuc. Technology 17, pp.15 (1973)
- [7] Weisman J., "Heat Transfer to Water Flowing Parallel to Tube Bundles", Nuc. Sci. Eng. 6, pp.79 (1959)

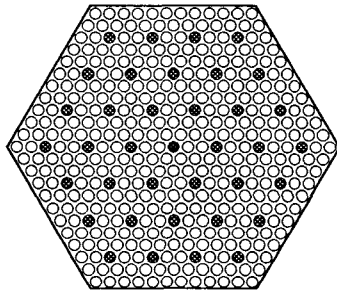
표 1. AP600 및 신형 원자로심의 정상상태 열수력 특성 자료 비교

Parameter	AP600	신형 원자로	Parameter	AP600	신형 원자로
Core thermal power, MW	1933	1933	V_M/V_F	1.296	0.677
Average power density, W/cc	78.82	77.07	Rod diameter, mm	9.5	9.5
Average heat flux, kW/m ²	451.1	325.8	Rod pitch, mm	12.6	11.42
Average LHGR, kW/m	13.48	9.72	Hydraulic diameter (typical), mm	11.78	5.64
Vessel mass flow, kg/s	9235.6	9235.6	Clad thickness, mm	0.57	0.65
Core inlet mass velocity ¹⁾ , kg/m ² /s	2346.3	3130.2	Max. fuel centerline temp., °C	-	1357.5
Core inlet temperature, °C	276.9	276.9	Max. clad surface temp., °C	-	360.2
Core outlet temperature, °C	319.0	319.0	Assembly pressure drop ²⁾ , bar	0.72	1.58
Core outlet pressure, bar	157.2	157.2			

¹⁾ 9% core bypass flow 고려, ²⁾ BEP & TEP 제외

표 2. AP600 및 신형 원자로심 열적 여유도 비교

변수	변수의 차이		열적 여유도 차이 (α)
	AP600	신형원자로	
q''	451.1	325.8	+ 38.5%
격자구조	square	triangle	+ 20 %
G	2346.3	3130.2	+ 25.0%
D_{hy}	11.78	5.64	- 44.8%
IFM	Yes	No	- 30 %
Sum			+ 8.7%



격자 피치: 22.9cm
 핵연료 봉간거리: 1.142cm
 No of Rods: 397
 No of GT: 36
 No of GT for Instrument: 1
 No of Fuel Rod: 360
 V_M/V_F : 1.134

그림 1 육각형 핵연료 집합체 단면도

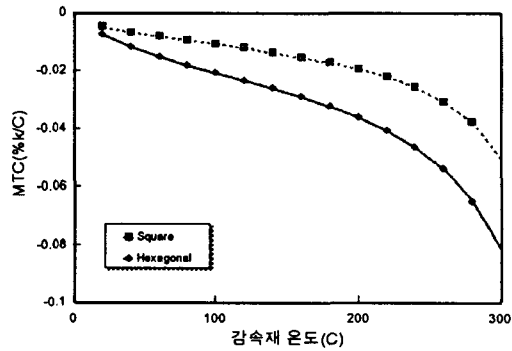


그림 2 감속재 온도 변화에 따른 감속재 온도계수

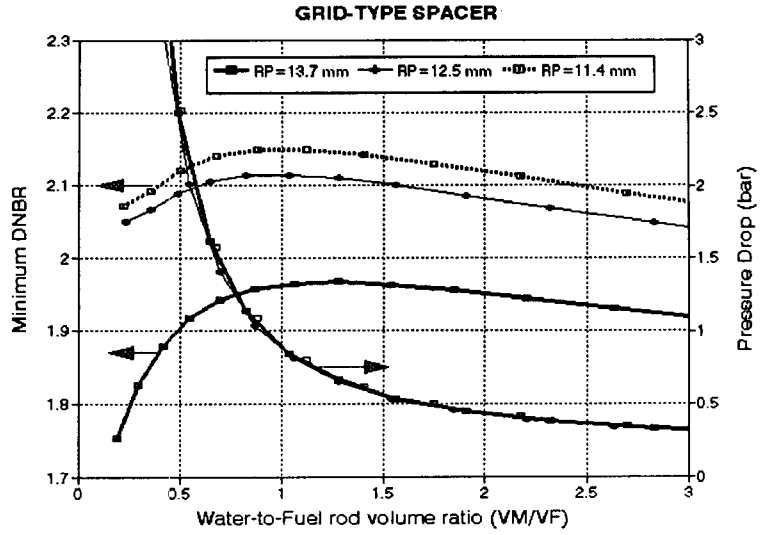


그림 3. V_M/V_F 변화에 따른 노심 최소 DNBR 및 압력 손실 변화(그리드 형태)

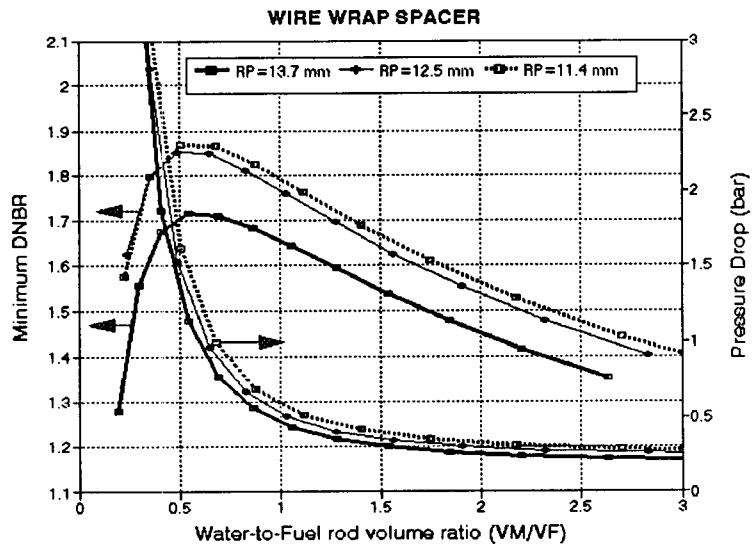


그림 4. V_M/V_F 변화에 따른 노심 최소 DNBR 및 압력 손실 변화(와이어랩 형태)