

가압경수로의 초장주기 무봉산 노심 핵설계

김종채, 김명현

경희대학교

요 약

CASMO/MASTER 전산체계를 활용하여 600MWe급 가압경수로의 초장주기 무봉산 노심 핵설계 가능성을 검토하였다. 핵연료는 주기길이 1,600EFPD를 만족시키면서 잉여반응도를 평탄하게 유지시키기 위하여 MOX 핵연료를 사용하였으며, 가연성 독봉으로는 WABA와 IFBA를 혼합하여 핵연료집합체를 구성하였다. 그리고 제어봉 설계에서 잉여반응도 제어용 제어봉은 Ag-In-Cd을 사용하였으며, 잉여반응도 제어용과 A.O. 제어용이 독립적으로 작동되도록 설계했다. 또한 shutdown용 제어봉은 B₄C로 설계하였으며, 제어봉가를 증가시키기 위하여 B-10을 90w/o까지 농축했다. 노심분석 결과 A.O. \pm 10%, AP600의 침투출력제한지 2.6의 안전한계를 만족시키면서 제어봉만으로 주기길이 1600 EFPD 동안 반응도 제어가 가능하고 shutdown을 위한 노심 안전성도 확보되는 것을 확인하였다.

1. 서 론

신형원자로의 설계목표인 경제성 향상, 안전성 증진, 환경친화 등의 요소에 적합한 노심 운전 전략의 하나가 무봉산 노심 구성에 장주기 운전 개념 도입이다.

무봉산 운전은 액체폐기물의 발생량을 줄이고, 봉산농도 조절과 관련된 CVCS를 제거하여 발전시설을 간단하게 할 뿐만 아니라 옴의 감속재 온도 계수를 크게 하여 원자로의 고유 안전성을 증진시키는 등의 장점을 가지고 있다.[1] 그러므로 무봉산 운전의 경우 잠수함이나 선박용 원자로등의 소형원자로 등에 오래 전부터 적용되어 왔으며, AP600 노심을 바탕으로 상업용 가압경수로의 무봉산 운전 가능성 연구[2]가 수행되어 타당성이 입증된 바 있다. 장주기 운전 전략은 원자로의 이용율을 높여 경제성을 향상시키므로 타 에너지원과의 경쟁력을 증진시키고, 자원의 이용을 극대화시키는 장점이 있다. 그러므로 주기길이에 따른 상업용 원자로의 경제성 평가가 이미 수행되었으며, 일부 원자로는 장주기 개념을 도입하여 상업운전중이다.

무봉산 운전의 장점과 장주기 운전의 장점을 최대한 활용한 원자로인 담수화 플랜트 노심인 SMART[3]는 100MWe 정도의 소형원자로로서 무봉산 노심, 1500EFPD 이상의 주기길이, 1 Batch 장전 전략 등을 노심 설계의 특징으로 한다. 본 연구의 목표는 소형로에 적용된 초장주기 무봉산 노심 전략을 상업용 원자로에 적용하여 핵적 타당성을 검토하고자 한다. 상업용 원자로는 AP600을 근간으로 하였으며, 재장전을 고려하지 않고 핵연료, 가연성 독봉, 제어봉 등의 설계 변수 변경만으로 초장주기 무봉산 노심 구성이 가능한지를 검토하였다.

2. 설계 변수 연구

2.1 핵연료집합체 설계

무봉산 노심 구성을 가능하게 하는 중요한 척도는 주기말까지 노심 잉여반응도를 평탄하게 유지시키는 것이다. 이는 제어봉의 움직임을 최소화하여 운전원의 운전 조작 부담을 경감시킬 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 주기길이를 1500EFPD 이상으로 설정하고 있는데 UO_2 핵연료만으로는 주기길이를 만족시키기 어렵다. 또한 잉여반응도를 평탄하게 유지시키기 위해서는 conversion ratio가 큰 핵연료를 사용하는 것이 적합하리라 판단된다. 본 연구에서는 핵연료로 MOX(Mixed Oxide) 핵연료를 사용하였다.

MOX 핵연료는 원폭해체에 따른 Pu의 소비와 사용후 핵연료에 포함된 Pu의 활용이라는 관점에서 연구되었으며, 최근에는 유럽과 일본등에서 UO_2 대체 핵연료로 유용하게 쓰이고 있다. 상업발전에는 UO_2 에 비하여 1/3 정도로 제한되어 사용되고 있는데, 이는 두 핵연료가 서로 다른 핵적 특성을 보이기 때문이다. 가장 중요한 원인은 Pu-240의 자기공명 효과에 의한 중성자 스펙트럼 경화가 제어물질의 흡수능력을 떨어뜨려 shutdown margin을 만족시키기 어렵기 때문이다. 그러나 high moderating ratio[4](2.0 대신 2.5 이상)을 갖는 원자로는 중성자 감속능력을 향상시켜 제어봉가와 boron worth를 증진시키므로 노심 전체를 MOX 핵연료로 구성할 수 있는 것으로 연구되었다. HMR(High Moderating Ratio)를 갖는 원자로는 N4, SYSTEM80+, AP600등의 신형원자로로서 노심 전체를 MOX 핵연료로 구성함을 보였다.[4][5] 따라서 본 연구에서도 노심 전체를 MOX 핵연료로 장전하였다.

상업용으로 사용하는 MOX 핵연료내 Pu isotope composition은 SIEMENS 설계안과 COGEMA 설계안으로 크게 나눌 수 있다. 두 설계안에서 Pu isotope composition은 거의 비슷하나, 서로 다른 두드러진 특징은 SIEMENS 설계안에서는 Am241을 취급하지 않으나 COGEMA에서는 Am241을 MOX 핵연료의 구성물로 포함시키고 있다는 것이다. Pu241의 반감기가 13.2yr로 짧아서 핵연료의 수송이나 저장시 Pu241이 Am241로의 변환을 고려해야 하기 때문에 본 연구에서는 COGEMA의 설계안을 선택하였다. COGEMA에서 MOX 핵연료 제조시 사용하는 Pu isotope composition은 Pu238 / Pu239 / Pu240 / Pu241 / Pu242 / Am241의 중량 비율이 1.83 / 57.93 / 22.5 / 11.06 / 5.6 / 1.08 과 같으며, 이때 Uranium은 천연우라늄을 사용하였다.

무봉산 노심은 주기초 잉여반응도 제어를 위하여 다량의 가연성 독봉을 사용해야만 한다. 따라서 가연성 독봉의 핵적 특성을 분석하여 무봉산 노심에 적합한 독봉의 재질/개수/농도등을 결정하는 것은 잉여반응도를 평탄하게 유지하기 위하여 매우 중요할 뿐만 아니라 가장 먼저 수행되어야 할 부분이다.

핵연료로 MOX를 사용할 경우 DOE에서는 “MOX 핵연료와 가연성 독물질을 섞어서 사용할 수 없다”[6]라고 제한하고 있다. 이는 노심 전체를 MOX 핵연료로 구성할 경우 Er_2O_3 나 Gd_2O_3 등의 일체형 독봉은 사용 불가능 하다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 주기초 잉여반응도 제어를 위하여 가연성 독봉으로 WABA(Wet Annular Burnable Absorber)와 IFBA(Integral Fuel Burnable Absorber)를 사용하였다. 표 1에서 본 연구에서 사용한 가연성 독봉의 설계 사항을 나타내고 있는데, 독봉의 개수와 독물질 B-10의 농도 결정은 IFBA나 IFBA+WABA가 삽입된 MOX 핵연료집합체내에서 핵적 특성 분석을 바탕으로 결정되었다. WABA는 제어봉이 삽입되지 않는 핵연료집합체에 24개가 삽입되었다. 그리고 IFBA는 제어봉이 삽입되는 핵연료집합체에 64, 80, 104개가 사용되었으며, Westinghouse사의 17×17 핵연료집합체의 표준 배치를 사용하였다. 또한 IFBA와 WABA는 독물질로서 B를 사용하는데 B-10을 80w/o로 농축하였다.

제어봉은 KOFA 설계 자료를 근거로 RB(Regulating Bank)는 Ag-In-Cd을 사용하였으며, 잉여반응도 제어용 제어봉과 A.O.(Axial Offset) 제어용 제어봉으로 나누어 운용되도록 설계하였다. 그리고 SB(Shutdown Bank)는 B-10을 90w/o 농축한 B_4C 를 사용하여 충분한 shutdown margin을 확보할 수 있도록 설계했다. 표

1에는 제어봉의 설계 제한도 요약되어 있다. 제어봉가를 높이기 위하여 KOFA 설계의 cladding 물질을 SS-304에서 Hafnium[7]으로 설계 변경하였으며, 1%의 제어봉가 증가를 가져왔다. Hafnium은 cladding으로서 좋은 기계적 성질을 나타내며, 특히 각각 2,050과 4,572 barn의 흡수단면적인 2.4와 1.1eV 근처의 공명 영역을 가지고 있어 열중성자 영역에서 좋은 중성자 흡수체로 알려져 있다.

2.2 주기길이 결정을 위한 MOX 와 UO₂ 핵연료의 경제성 비교 평가

MOX 핵연료의 주기길이 결정을 위하여 UO₂ 핵연료와 MOX 핵연료의 경제성을 비교하였다. UO₂ 핵연료는 3 batch, 18개월 주기에 대하여 수행되었으며, MOX 핵연료는 1 batch의 36, 48, 60 개월에 대하여 각각 수행되었다.

경제성 평가는 발전단가 측면에서 수행되었다. 발전단가는 크게 자본비와 운전·유지비로 구성되는 고정비와 핵연료주기비로 나누어 진다. 본 연구에서는 고정비중 운전·유지비에 대한 평가는 수행하지 않았으며, 핵연료주기비는 후행비용이 동일하다고 가정하여 선행핵연료 주기비에 국한하였다. 핵연료주기비 계산은 평준화비용법을 기초로 한 전산 코드인 FUELCOST-IV를 활용하였으며, 입력자료는 표 2에 수록하였다.

초장주기 무봉산 노심의 주기길이 결정을 위한 UO₂ 핵연료와 MOX 핵연료의 발전단가 계산 결과는 표 3에 나타내었다. 표 3에서도 알 수 있듯이 UO₂ 핵연료로 3 batch, 18개월로 운전할 경우, 발전단가 측면에서 이에 상응하는 MOX 핵연료의 주기길이는 60개월(1650 EFPD)로 나타났다. 이는 연소도 42,000MWD/MTU 이상 부터는 MOX 핵연료가 더 경제적이라는 OECD/NEA 평가[9] 결과와 일치하는 것이다.

3. 노심 핵설계

무봉산 노심을 구성하기 위한 핵연료집합체 설계에서 가장 중요한 사항은 주기초에서 주기말까지 잉여반응도가 적은 값으로 일정하게 유지되도록 설계하는 것이다. 핵연료집합체의 무한증배계수는 핵연료농축도, 독봉의 재질/개수/농도 등의 함수이다. 그러므로 이들을 조합하여 무한증배계수의 평균치가 평탄해지도록 핵연료집합체를 설계한다. 그림 1은 핵연료집합체별 무한증배계수를 나타내고 있다. 장전모형의 설계 목표를 평면방향 출력분포를 주기말까지 평탄하게 유지시키는 것으로 하였다. 노심의 출력분포를 평탄하게 함으로써 잉여반응도 제어를 용이하게 할 수 있고, 앞서 선택한 핵연료집합체의 설계안으로 노심의 출력분포를 그대로 유지시켜 나갈 수 있다. 따라서 반응도를 제어하는 제어봉들도 노심내에 끌고루 분포시켜 제어봉의 삽입과 인출시 평면방향 출력분포가 가능한 찌그러지지 않도록 위치시킨다. 그림 2는 장전 모형 및 제어봉 위치를 나타낸 것이다. 노심 전체적으로 MOX 핵연료에서 Pu은 13.64w/o를 차지하고 있으며, 핵분열성 Pu은 9.41w/o를 차지하고 있다.

무봉산 노심은 제어봉만으로 반응도를 제어하기 때문에 빈번한 제어봉의 삽입과 인출을 예상할 수 있다. 따라서 빈번한 제어봉의 삽입과 인출 운전 조건에서도 A.O.를 안전 한계내로 유지할 수 있도록 설계하는 것은 중요하다. 본 연구에서는 A.O. 안전한계를 $\pm 10\%$ 로 설정하였는바 제어봉이 삽입된 상태에서도 A.O.를 유지하기 위하여 Axial Zoning을 수행하였다. Axial Zoning 방법은 그림 3에 나타낸 것 처럼 축방향으로 Pu 농축도를 달리하는 방법을 사용하였다. 본 연구에서는 1 batch로 노심을 구성하고 있어 그림 1에서 알 수 있듯이 가연성 독봉의 개수나 농도에 의한 축방향 zoning 방법을 이용하면 A.O. 주기초에는 안전한계 유지에 효과가 있을 수 있으나, 주기말에는 효과가 미미하여 제어봉이 인출되는 주기말에는 A.O. 제어가 불가능 할 것으로 판단된다. 따라서 주기초부터 주기말까지 무한증배계수 변화를 그대로 유지할 수 있도록 Pu 농축도를 축방향으로 다르게 구성하였다.

4. 결과 및 논의

AP600 원자로를 바탕으로 MOX 핵연료를 이용하여 설계된 초장주기 무봉산 노심 분석은 CASMO/MASTER[10] 전산체계를 활용하였다. 잉여반응도 제어용 제어봉이 삽입되지 않은 상태의 잉여반응도, 임계제어봉 위치, 잉여반응도 제어용 제어봉이 삽입된 상태의 A.O, 침투출력치등은 그림 4에서 그림 7까지 각각 나타내었다. 그리고 분석된 Shutdown Margin은 표 4에 수록하였다. 이들의 결과를 살펴볼 때 무봉산 노심에서 A.O. $\pm 10\%$, AP600의 침투출력제한지 2.6의 안전한계를 만족시키면서 제어봉만으로 주기길이 1600 EFPD 동안 제어가 가능함을 확인하였다. 또한 Shutdown Bank에 사용되는 B₄C의 B-10 농도를 90w/o 까지 농축함으로써 충분한 제어봉가를 가지고 있어 shutdown을 위한 안전성 확보에도 큰 어려움이 없는 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENT

CASMO/MASTER 전산체계 활용에 도움을 주신 한국원자력연구소의 지성균 박사님과 실원 여러분에게 감사드리며, 본 연구는 한국과학기술원 신형원자로연구센터의 지원금에 의한 것입니다.

참고문헌

1. ABB-CE, "Elimination of Soluble Boron for a New PWR Design," EPRI Project RP-2614-24, Final Report, 1989.
2. Jong Chae Kim and Myung Huyn Kim, "Reactor Core Design for the SBPO in Medium-Sized PWR," Proc. Topl. Mtg. on Advances in Nuclear Fuel Management II, Myrtle Beach, S.C., March 23-26, 1997, vol.I, 10-33, American Nuclear Society, 1997.
3. 장문희 외, "중소형 신형 원자로 개발," 원자력증장기 계획, 개별 면담 자료, 1997.
4. Patrick Barbault, "A Plutonium-Fueled High-Moderated PWR for the Next Century," Nucl.Sci. & Eng., 122, 240-246, 1996.
5. Richard D. Ankney, "Transition Cycle Fuel Management using Weapons-Grade Moxed Oxide Fuel," Proc. Topl. Mtg. on Advances in Nuclear Fuel Management II, Myrtle Beach, S.C., March 23-26, 1997, vol.II, 18-17, American Nuclear Society, 1997.
6. M. L. Kantrowit et al., "Core Design for Disposition of Weapons-Grade Plutonium in SYSTEM80 Reactors," Proc. Topl. Mtg. on Advances in Nuclear Fuel Management II, Myrtle Beach, S.C., March 23-26, 1997, vol.II, 18-9, American Nuclear Society, 1997.
7. J. Bergeron et al., "100% Plutonium Recycling Feasibility in a 900 PWR Core," Proc. Topl. Mtg. on Design and Computation, France, April 23-27, American Nuclear Society, 1990.
8. 이상희 et al., "가연성흡수봉 사용방법 최적화 연구(II)," '96전력연-단102, 1996.
9. OECE/NEA, "The Economics of the Nuclear Fuel Cycle," AERI/TS-11/96, 1996.
10. "Master- α User's Manual," KAERI/TR-560/95, 1995.

표 1. 가연성 독봉 및 제어봉의 설계 제원

	제원	제어물질	제어물질 농도(w/o)
WABA	KOFA	Boron	B ₁₀ - 80
IFBA	< 0.001 in 피막	Boron	B ₁₀ - 80
Regulating Bank	KOFA	Ag-In-Cd	85/10/5
Shutdown Bank	KOFA	Boron	B ₁₀ - 90

표 2. 경제성 평가 입력자료

항목	UO ₂ [8]	MOX[9]
원광비(U ₃ O ₈)	25.61 \$/lb	25.61 \$/lb
변환비	4.8 \$/kg	4.8 \$/kg
농축비	109.18 \$/kg	-
성형가공비	272.2 \$/kg	1,100 \$/kg[2]
Fissile Pu 비용	-	8.46 \$/g
이자율	8.0 %/yr	8.0 %/yr

표 3. UO₂ 핵연료와 MOX 핵연료의 발전단가 비교

단위 : mills/kwhe

핵연료	주기길이 (month)	중간 간의 정비계획	연료비	고정비	발전단가	상대비율
UO ₂	18	-	5.457	29.22	34.677	1.0000
MOX	36	15D/yr	8.940	28.37	37.316	1.0760
		15D/2yr	8.927	27.96	36.887	1.0637
	48	15D/yr	7.472	28.11	35.582	1.0261
		15D/2yr	7.452	27.52	34.974	1.0086
	60	15D/yr	7.269	27.99	35.259	1.0168
		15D/2yr	7.249	27.5	34.749	1.0021

표 4. Shutdown Margin

	BOC	EOC
(N-1) RCCA Worth with 10% uncertainty	13.31% 11.98%	16.34% 14.71%
Stuck Rod Worth	2.66%	2.54%
Total Defect (HFP,,E _Q .Xe -> CZP, No Xe)	7.13%	8.29%
Refueling Shutdown Margin	4.85%	6.42%

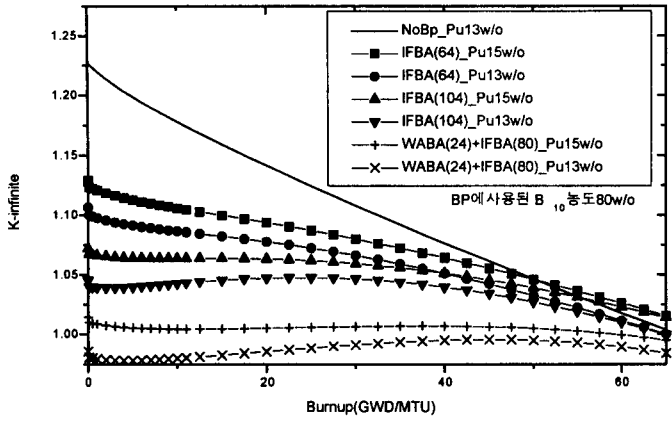


그림 1. 핵연료집합체별 무한증배계수

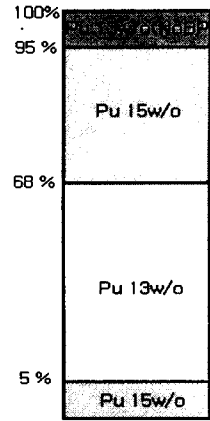


그림 3. Axial Zoning

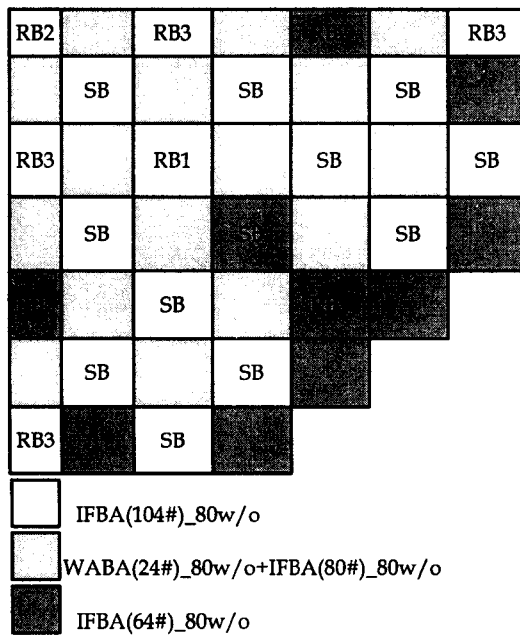


그림 2. 장전모형 및 제어봉 위치

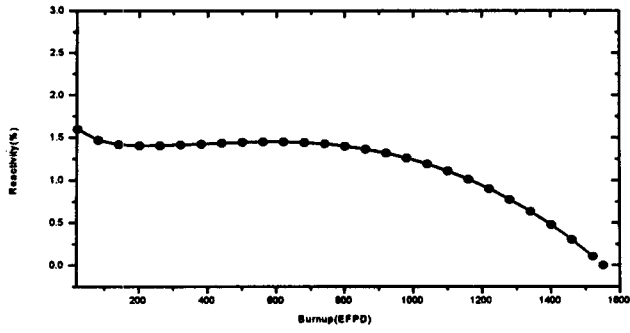


그림 4. Unrodded 상태의 잉여반응도

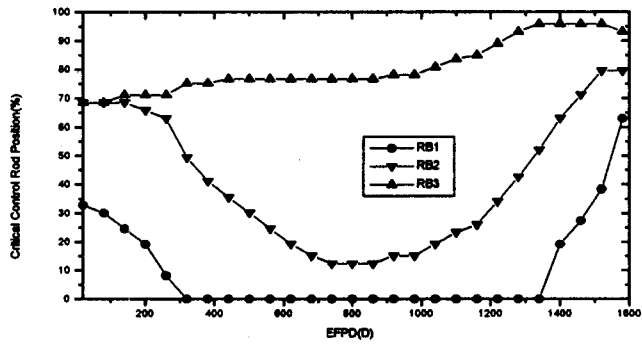


그림 5. 임계 제어봉 위치

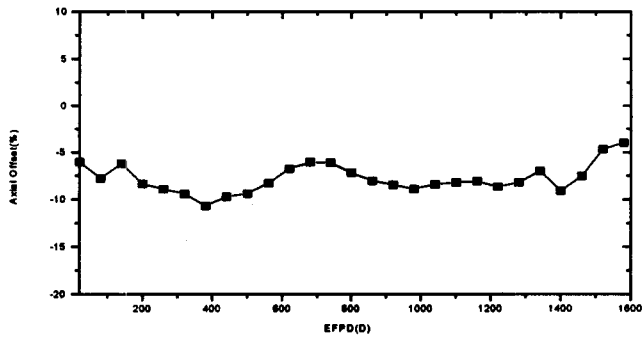


그림 6. Axial Offset

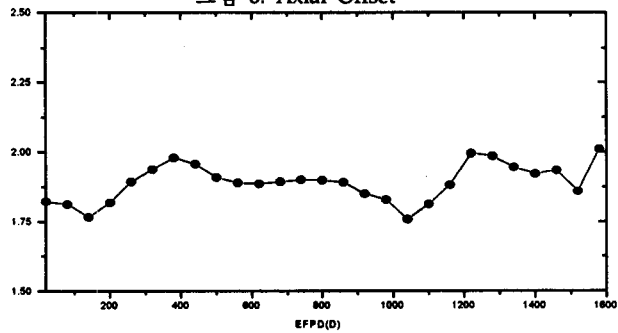


그림 7. 첨두출력인자