

W형 3-Loop 발전소에 대한 일체형 가연성 흡수봉 경제성 평가

박상원, 장도익, 정선교
한국원전연료(주)

요 약

가압 경수로의 노심설계에 있어서 제한된 우라늄 자원의 효율적인 이용을 위한 다양한 방안으로 장주기 운전, 고 방출연소도 및 저누출 장전모형 등을 강구하고 있는 추세이다. 이러한 노심들은 원자로 운전주기 전반에 걸친 공간적 출력 분포 제어와 잉여반응도 제어를 위해 가연성 흡수봉을 사용하고 있으며 이와 관련 하여 가연성 흡수봉에 대한 전략들이 다 각도로 검토되고 있으며 다양한 노심에 대한 최적의 가연성 흡수봉 혹은 그 전략에 대해 많은 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 웨스팅하우스형 3-Loop 발전소에 대해, 장주기 (18 개월-480 EFPD), 저누출 장전 모형 전략을 채용하여, Er_2O_3 , Gd_2O_3 , ZrB_2 의 일체형 가연성 흡수봉에 대한 노심특성 및 경제성을 평형노심개념을 적용, KNFC가 노심설계에 사용하고 있는 APA(ALPHA/PHOENIX-P/ANC) 8.0.0 코드 체계를 이용하여 평가하였다. 노심특성에 대해서는 감속재 온도계수, 첨두출력인자, 잔존흡수봉효과 및 노심 연소거동에 대한 평가가 수행되었고, 동일한 주기길이(480 EFPD) 에 대한 우라늄 적재량에 대해 원광비, 변환비, 농축비, 가공비 그리고 이자율 등을 고려하여 핵주기 경제성 평가 코드인 POCO 코드를 이용하여 경제성을 평가하였다.

1. 서 론

국내의 3-Loop 가압 경수로는 1990년도부터 국산 핵연료가 장전되기 시작하면서 첨두출력을 제어하고 감속재 온도계수를 제한치 이하로 유지시키기 위하여 일체형 BP인 Gd_2O_3 가연성 흡수봉을 사용해 오다가 Westinghouse의 V5H 연료를 장전하게 되면서 분리형 가연성 흡수봉인 WABA를 사용하게 되었다.

그러나 Gd_2O_3 뿐만 아니라, ABB-CE에서 개발한 가연성 흡수봉으로서, 화학적 물리적 성질에 있어서는 Gd_2O_3 와 비슷하며, 유효중성자 단면적(effective neutron cross section)은 붕소와 비슷하다고 알려진 Er_2O_3 와 Westinghouse의 가연성 흡수봉으로 연료봉 소결체 표면에 ZrB_2 를 얇게 피막으로 입힌 것으로 잔존 흡수봉 효과가 거의 없는 것으로 알려져 있는 IFBA등, 일체형 가연성 흡수봉에 대한 관심이 증대되면서, 이들을 이용한 노심설계에서 감속재 온도계수 제어 및 첨두출력 억제 등의 수단으로서, 경제성 및 여러 가지 노심특성에 대한 연구가 진행되어 오고 있다.

이 연구에서는 위에서 제시한 세가지 유형의 일체형 가연성 흡수봉을 국내 W형의 3-Loop 발전소에 대해 평형노심 개념을 이용 동일한 장전모형으로, 동일한 주기길이를 내기위해 적용하는 경우에 대해, 노심 거동 및 경제성을 평가하였다. 노심연소 특성을 평가하기 위해서는 APA 8.0.0 코드 체계가 이용되었으며, 경제성 평가를 위해서는 POCO 코드가 이용되었다.

2. 본 론

2.1 평가조건

Gd_2O_3 , Er_2O_3 , ZrB_2 의 일체형 가연성 흡수봉에 대한 평가를 위한 기준 대상 발전소는 국내의 W형 3-Loop 발전소로서, 대표적인 계통 변수들이 표 1에 나타나 있다. 대상원자로는

157개의 VANTAGE-5H 핵연료로 구성되어 있으며, 상단과 하단 15.24 cm는 천연 우라늄으로 이루어진 Axial Blanket으로 되어 있다. 가연성 흡수봉은 집합체내에서 출력침두현상을 최소화하기 위해 대칭적으로 위치 되었다.

Gd₂O₃, Er₂O₃, ZrB₂ 모두, 가연성 흡수봉의 축상에서 중앙 304.8 cm에 가연성 흡수물질이 혼합되어 있거나 피막으로 입혀져 있다. 안전 제한치는 Table 2와 같이 주어졌으며, 주기초 (0 MWD/MTU 연소도) HFP 에서의 임계 수용성 붕소농도는 설계 경험상 붕소농도와 관련된 사고해석(예; Post-LOCA Long-term Cooling)을 고려하여 약 2050 ppm 정도로 제한하였다.

주기길이는 480 EFPD (18210~18300 MWD/MTU)의 장주기를 목표로 정하였으며, 신연료의 농축도는 단일 농축도를 사용하였다. 최대 연료봉 연소도 제한치가 60000 MWD/MTU 이므로 대략 48000 MWD/MTU 정도의 영역별 방출연소도를 갖도록 신연료 집합체의 수를 60개로 고정하였다.

Gd₂O₃ 봉의 Gd 농축도는 9 w/o를 사용하였으며 UO₂에 비해 낮은 열전도도와 낮은 용융점으로 인하여 Gd₂O₃ 봉의 우라늄 농축도는 [UO₂ 농축도×(1-0.05×9w/o)]가 되도록 하였다^[1]. Er₂O₃의 Erbia 농축도는 2.1 w/o를 사용하였고 일반적으로 2 w/o 내외에서는 열전도도에 미치는 영향이 없는 것으로 알려져 있어^[4] Er₂O₃가 없는 연료봉의 농축도와 같은 값을 사용하였다. 또한, ZrB₂는 2.35 mg/in(1.5X)의 IFBA를 사용하였다. ZrB₂와 Er₂O₃의 집합체내 배치는 동일한 배치를 이용하였고, Gd₂O₃는 Ref. 1에서 단일집합체 배치 모형을 참고하여 침두출력에 유리한 배치형태를 선별하여 사용하였다.

2. 2 평가방법

이 분석을 위해서는 평형노심 개념을 사용하였으며^[4] 평형노심을 생산하기 위해서는 아래와 같은 코드 체계가 이용되었다. Cross-Section은 이차원 중성자 수송코드인 PHOENIX-P^[2]에 의해 생산되었고, PHOENIX-P에 의해 사용된 Cross-Section Library는 ENDF-B/V에 근거하였으며, 이와 연계하여 노심거동 분석을 위해서는 주기길이 ±5 EFPD, 출력분포 ±1.5% 이내의 정확도를 갖고 있는 3D Nodal Code인 ANC^[3]가 사용되었다.

3D ANC를 이용하여, 표 2에서 제시된 안전 제한치를 만족하는 평형주기 장전모형을 우선 Gd₂O₃에 대해 찾아 최적화 시킨 후, ZrB₂와 Er₂O₃에 대해서는 동일한 장전모형을 이용하여 노심상의 가연성 흡수봉 위치와 수를 결정하였다. 여기서, 장전모형에 따른 불확실도를 배제하기 위해 신연료 배치 형태와 재장전시의 연료위치를 같도록 하였다. 각 장전모형은 그림 1 ~ 3에 나타난 바와 같고 각각 1/4 노심, cyclic-symmetry, 자체 반복적인 연료배치로 되어 있다. 이 평가에서 유일한 독립변수는 신연료의 농축도로서, 이 농축도는 평형주기에서 안전제한치를 만족하면서 같은 주기길이[EFPD]를 생산하도록 조정되었다. 3D-ANC 계산에서 얻어진 주기길이, 농축도 및 우라늄 적재량등의 정보를 이용하여 핵주기 경제성 평가 코드인 POCO 코드에 의해 경제성 평가가 수행되었다. 여기서, 원광비, 변환비, 농축비, 가공비, 이자율 등 필요한 값들은 Ref. 1에 근거하였다. 한편, 상기에서 결정된 장전모형을 이용하여 ZrB₂와 같은 연소도(18210 MWD/MTU)를 내는데 필요한 Gd₂O₃ 및 Er₂O₃에 대한 각각의 농축도를 계산하여 상대적으로 작은 우라늄 적재량으로 인한 농축도 증가 효과를 배제시켜 잔존 가연성 흡수봉 Penalty만으로 인해 부가적으로 필요한 우라늄 농축도를 평가하였다.

2. 3 계산결과

분석결과, 반경방향 침두출력인자는 그림 5에 나타난 바와 같이 Er₂O₃가 가장 낮고 Gd₂O₃가 가장 높은 경향을 보인다. 이는 Gd의 경우 흡수봉 수가 상대적으로 작고 단일 집합체 내에서의 Gd 흡수봉 내의 낮은 우라늄 농축도 사용으로 인한 출력침두 현상이 두드러져 집합체 내에서의 침두출력 제어에 어려움이 있기 때문이다. 또한, 각 흡수봉 유형별로 노심연소에 따른 임계붕소농도를 그림 4에 나타내었다. 그림에서 보는 바와같이 임계붕소농도 곡선이 서로 차이를 보이고 있는 것은 각 흡수봉 유형별 연소도에 따른 잔존 흡수봉 효과에 기인하는 것으로

평가된다. 따라서, IFBA는 주기 초에 상대적으로 빠른 연소 속도로 인해 약 6000 BU에서 출력 침두가 일어나고, Gd의 경우 MOL 이후 연소 속도가 가속화 되어 약 12000 BU에서 출력 침두가 일어난다.

표 3에는 각 흡수봉에 따른 핵특성을 비교 제시하였다. 이 중 감속재 온도계수(MTC)는 BOC(0 BU), HZP, ARO, No Xe 임계봉소농도에서 계산되었으며 모두 제한치에 대한 충분한 여유를 가지고 있다. Erbia의 경우 IFBA에 비해 상대적으로 신연료내 흡수봉 개수가 많은 것은 표 2의 HFP, BOL 임계봉소농도 조건을 만족시키기 위해서이다. 동일 연소도(18210 MWD/MTU)에서의 농축도 요구량 차이는 잔존 가연성 흡수봉 Penalty로 인한 것이며 IFBA에 비해 Gd는 0.0532, Erbia는 0.2085 w/o가 더 요구되는 것으로 나타났다.

POCO 코드를 이용하여 계산된 주기비가 표 5에 나타나 있다. 이 계산을 위한 입력자료는 Ref. 1에 근거하였으며 표 4에 나타내었다. 표 5에 주어진 주기비 결과는 흡수봉 가공비용을 고려하지 않은 것으로 전술한 잔존 흡수봉 Penalty 차이에 의해 추가적으로 요구된 높은 농축 우라늄에 의한 것으로 Erbia가 가장 높게 나타났다. 또한, 표 6에 주어진 총주기비 손실은 각 흡수봉별 예상 가공비를 고려한 경우의 Gad 대비 총주기비 손실을 의미하며 역시 Erbia가 가장 크게 나타났다. 한편, 본 계산의 주기비 결과가 Ref. 1보다 낮게 나타난 것은 신연료 집합체 수를 줄이고, 농축도를 높여 영역별 방출연소도가 증가 되었고, 그리고 상대적으로 본 계산의 장전모형이 저누출 장전모형이며, Axial blanket을 사용한 데 그 이유가 있다고 평가된다.

3. 결 론

웨스팅하우스형 3-Loop 발전소에 대해, 장주기 (18 개월-480 EFPD), 저누출 장전모형 전략을 채용하여, Er_2O_3 , Gd_2O_3 , ZrB_2 의 일체형 가연성 흡수봉에 대한 노심특성 및 경제성을 평가하였다. 주기중 노심의 F_{JH} 제어 측면에서는 Erbia의 경우가 가장 유리하고 Gd는 가장 불리한 것으로 나타났다. 주기말 잔존 페널티는 IFBA가 가장 적은 것으로 나타났으며 Erbia가 가장 크게 나타났다. BOL MTC는 모두 제한치에 대해 충분한 여유를 가지고 있으므로 MTC 보다는 오히려 사고해석 관련하여 제한된 초기 봉소농도가 보다 제한적으로 작용하는 것으로 평가된다. 한편, Erbia의 F_{JH} 제어가 가장 용이하므로 저누출 장전모형 선정시 유리하며 이는 경제성에 긍정적인 영향을 줄 수 있다. 주기비 계산 결과는 흡수봉 가공비용을 고려하지 않은 것으로 IFBA가 가장 낮고, Erbia가 가장 높은 것으로 나타났다. 한편, 예상 가공비를 고려한 경우는 Gad와 IFBA가 거의 비슷한 주기비를 보여주었으나, 예상 가공비의 산출에 따라 그 결과는 바뀔 수 있다.

또한, F_{JH} 여유도가 경제성에 영향을 줄 수 있으므로 이에대한 정량적인 평가가 필요할 것으로 판단된다. 따라서 이에 대한 차후의 연구가 필요할 것으로 기대된다.

4. 참고문헌

- [1] "가연성 독봉 사용방법 최적화 연구," 한국전력기술 연구원 (1993.9)
- [2] T.Q. NGUYEN et al., "Qualification of the PHOENIX-P ANC Nuclear Design Systems for Pressurized Water Reactor Cores," WCAP-11597-NP-A (June 1988)
- [3] Y.S. Liu et al., "ANC - A Westinghouse Advanced Nodal Computer Code," WCAP-10966-NP-A (Dec. 1985)
- [4] D.L. STUCKER et al., "Benchmark Solution of Contemporary PWR Integral Burnable Absorbers," Trans. Am. Nucl. Soc., 69(1993)
- [5] M.J. Hone et al., "Benchmark Comparison of ZrB_2 and Erbia PWR Integral Fuel Burnable Absorbers," Trans. Am. Nucl. Soc., 73(1995)

표 1. 계통 변수

노심열출력	2775 MW
T-in	291.5 °C
노심냉각재 유량	286800 gpm
노심 압력	158 kg/cm ²

표 2. 안전 제한 변수

$F_{DH} < 1.528$
$MTC < 9.0 \text{ pcm/ } ^\circ\text{C}$
HFP, BOL(0 BU) 임계붕소농도 $\approx 2050 \text{ ppm}$
최대 연료봉 연소도 $< 60,000$

표3. 일체형 가연성 흡수봉에 따른 핵특성 비교

흡수봉 유형	Gd ₂ O ₃	Er ₂ O ₃	ZrB ₂	비고
• 신연료 농축도 [w/o]	4.625 (4.7170/2.5944)	4.7780	4.5450	Axial Blanket 제외
• 신연료 집합체수	60	60	60	
• 흡수물질 농축도	9 w/o	2.1 w/o	2.35 mg/in	
• 신연료내 흡수봉 갯수	752/feed	4608/feed	4096/feed	
• 노심 우라늄 적재량 [kgU]	72886	72786	73140	
• 주기길이 [EFPD]	480	480	480	
• 주기길이 [MWD/MTU]	18275	18300	18210	
• 붕소 농도 [ppm]				
- BOC,HFP,ARO,No Xe	2076	2042	2062	
- BOC,HZP,ARO,No Xe	2304	2273	2287	
• MTC [pcm/ °C]	-1.30	-1.59	-0.58	제한치 : 9.0
• 주기중 최대 F _{DH} (ARO)	1.514	1.456	1.494	
• 최대연료봉 연소도 [MWD/MTU]	58958	58491	57783	제한치: 60000
• 동일 연소도 (18210 MWD/MTU)에서의 농축도 요구량	4.606 (4.6978/2.5840)	4.7535	4.5450	

표 4. 일체형 가연성 흡수봉 경제성 평가시 사용된 주요 입력 자료

항목	입력 자료
원광(U ₃ O ₈ 비)	25.61 \$/lb
변환비	4.80 \$/kgU
농축비	109.18 \$/SWU
가공비	272.20 \$/kgU
이자율	8.0 %/yr

표 5. 일체형 가연성 흡수봉 유형에 따른 주기비 비교

가연성 흡수봉 유형	주기비 [mills/kwh]	주기비 (A)	IFBA 대비 주기비 손실
Gd ₂ O ₃	5.18	58427300 \$/주기	668800 \$/주기
Er ₂ O ₃	5.32	59972500 \$/주기	2214000 \$/주기
ZrB ₂	5.12	57758500 \$/주기	-

※ Ref. 1으로 부터 Gd₂O₃ 가연성 흡수봉의 주기비 : 5.62 [mills/kwh]

표 6. 가연성 흡수봉 가공비를 고려한 총주기비 손실

BA 유형	BA 예상가공비 (B)	연료봉 가공비 차액(C)	총주기비(A+B-C)	Gad 대비 총주기비 손실
Gd ₂ O ₃	976\$*752 = 733952\$	300\$* 752= 225600\$	58935652 \$/주기	-
Er ₂ O ₃	404\$*4608=1861632\$	300\$*4608=1382400\$	60451732 \$/주기	1516080 \$/주기
ZrB ₂	669\$*4096=2740224\$	300\$*4096=1228800\$	59269924 \$/주기	334272 \$/주기

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	A- 16 (1,2) 41909 56027	B- 16 (4,5) 23936 41909	B- 20 (1,4) 24403 44755	C- 20 Feed 0 24403	B- 8 (5,5) 20333 42277	B- 8 (1,7) 21257 43238	C- 8 Feed 0 21257	A- 8 (1,5) 42277 49430
2	B- 16 (4,5) 23936 41909	B- 16 (5,4) 23944 43222	C- 16 Feed 0 23975	B- 16 (2,3) 23975 44816	B- 8 (2,7) 19306 41321	C- 16 Feed 0 24659	C- 8 Feed 0 19308	A- 12 (3,5) 44105 49728
3	B- 20 (1,4) 24403 44755	C- 16 Feed 0 23967	B- 16 (2,6) 24659 45000	B- 8 (4,6) 19129 40286	B- 12 (3,6) 22884 44104	C- 12 Feed 0 22884	A- 8 (3,4) 40286 50417	
4	C- 20 Feed 0 24403	B- 16 (3,2) 23967 44775	B- 8 (6,4) 19172 40308	B- 16 (6,2) 24621 45254	C- 16 Feed 0 23935	C- 8 Feed 0 19129	A- 16 (2,2) 43223 49264	
5	B- 8 (5,5) 20333 42277	B- 8 (7,2) 19318 41253	B- 12 (6,3) 22891 44096	C- 16 Feed 0 23943	C- 8 Feed 0 20333	A- 8 (2,5) 41321 49496		
6	B- 8 (1,7) 21257 43238	C-16 Feed 0 24621	C- 12 Feed 0 22891	C- 8 Feed 0 19172	A- 8 (5,2) 41253 49448			
7	C- 8 Feed 0 21257	C- 8 Feed 0 19318	A- 8 (4,3) 40308 50453	A- 8 (1,6) 43238 49348				
8	A- 8 (1,5) 42277 49430	A- 12 (5,3) 44096 49742						#-BA shuffle BOL BU EOL BU

그림 1. Gd₂O₃의 평형노심 장전모형

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	A-104 (1,2) 42008 55986	B-104 (4,5) 24304 42008	B-128 (1,4) 24308 44501	C-128 Feed 0 24308	B- 48 (5,5) 20662 42250	B- 48 (1,7) 21415 43084	C- 48 Feed 0 21415	A- 48 (1,5) 42250 49518
2	B-104 (4,5) 24304 42008	B-104 (5,4) 24312 43303	C-104 Feed 0 23865	B-104 (2,3) 23865 44571	B- 32 (2,7) 19645 41315	C-128 Feed 0 24379	C- 32 Feed 0 19646	A- 80 (3,5) 44097 49858
3	B-128 (1,4) 24308 44501	C-104 Feed 0 23857	B-128 (2,6) 24379 44616	B- 16 (4,6) 19971 40800	B- 80 (3,6) 22944 44097	C- 80 Feed 0 22944	A- 16 (3,4) 40800 51015	
4	C-128 Feed 0 24308	B-104 (3,2) 23857 44533	B- 16 (6,4) 20017 40825	B-128 (6,2) 24344 45017	C-104 Feed 0 24304	C- 16 Feed 0 19971	A-104 (2,2) 43303 49575	
5	B- 48 (5,5) 20662 42250	B- 32 (7,2) 19657 41253	B- 80 (6,3) 22951 44089	C-104 Feed 0 24312	C- 48 Feed 0 20662	A- 32 (2,5) 41315 49739		
6	B- 48 (1,7) 21415 43084	C-128 Feed 0 24344	C- 80 Feed 0 22951	C- 16 Feed 0 20017	A- 32 (5,2) 41253 49697			
7	C- 48 Feed 0 21415	C- 32 Feed 0 19657	A- 16 (4,3) 40826 51057	A- 48 (1,6) 43084 49403				
8	A- 48 (1,5) 42250 49518	A- 80 (5,3) 44089 49873						#-BA shuffle BOL BU EOL BU

그림 2. Er₂O₃의 평형노심 장전모형

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	A-104 (1,2) 42009 55860	B-104 (4,5) 24291 42009	B-128 (1,4) 24664 45019	C-128 Feed 0 24664	B- 48 (5,5) 20493 41811	B- 48 (1,7) 21220 42749	C- 48 Feed 0 21220	A- 48 (1,5) 41811 48860
2	B-104 (4,5) 24291 42009	B-104 (5,4) 24295 43426	C- 80 Feed 0 24430	B-80 (2,3) 24430 44857	B- 32 (2,7) 19508 40874	C-104 Feed 0 24856	C- 32 Feed 0 19508	A- 64 (3,5) 43934 49503
3	B-128 (1,4) 24664 45019	C- 80 Feed 0 24422	B-104 (2,6) 24856 44876	B- 16 (4,6) 19657 40050	B- 64 (3,6) 23156 43934	C- 64 Feed 0 23156	A- 16 (3,4) 40050 50133	
4	C-128 Feed 0 24664	B-80 (3,2) 24422 44819	B- 16 (6,4) 19683 40060	B-104 (6,2) 24818 45054	C-104 Feed 0 24291	C- 16 Feed 0 19657	A-104 (2,2) 43426 49497	
5	B- 48 (5,5) 20493 41811	B- 32 (7,2) 19515 40806	B- 64 (6,3) 23152 43916	C-104 Feed 0 24295	C- 48 Feed 0 20493	A- 32 (2,5) 40874 49056		
6	B- 48 (1,7) 21220 42749	C-104 Feed 0 24818	C- 64 Feed 0 23152	C- 16 Feed 0 19683	A- 32 (5,2) 40806 49003			
7	C- 48 Feed 0 21220	C- 32 Feed 0 19515	A- 16 (4,3) 40060 50149	A- 48 (1,6) 42749 48864				
8	A- 48 (1,5) 41811 48860	A- 64 (5,3) 43916 49506						

#-BA
shuffle
BOL BU
EOL BU

그림 3. ZrB₂의 평형노심 장전모형

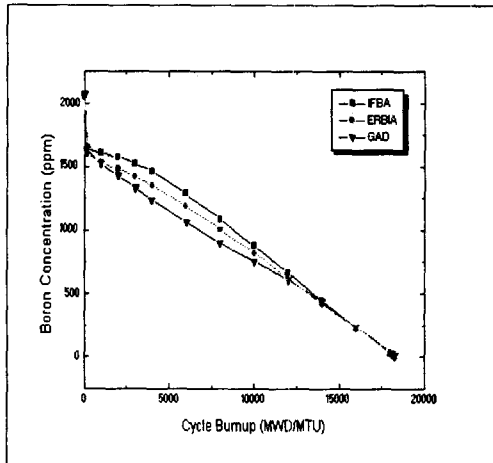


그림 4. 연소도에 따른 흡수봉 유형별 임계 붕소농도

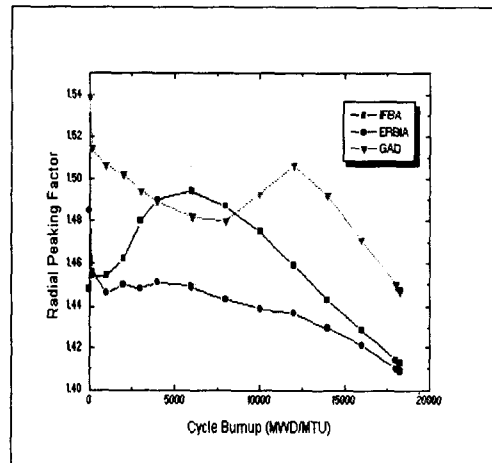


그림 5. 연소도에 따른 흡수봉 유형별 반경방향 침투출력 인자