

## WH형 3-Loop 원전에 대한 분리형 및 일체형 가연성흡수봉 평가

배성만 김양은 이상희

전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

### 요 약

국내 WH형 가압경수로에서 V-5H 연료와 함께 사용되고 있는 분리형 가연성흡수봉인 WABA와 V-5H 연료의 5대 장점중 하나로 국외에서 널리 사용중인 일체형 가연성흡수봉인 IFBA에 대한 비교 평가를 수행하였다. WH형 3-Loop 원전을 대표한 영광 2호기를 대상으로 하여 4.2 w/o 농축도의 신연료 60개 장전을 가정하여 WABA 사용 노심, IFBA 사용 노심, WABA+IFBA 혼합 사용 노심에 대한 최적 평형노심 장전모형을 선정하고 각각에 대한 노심특성 및 경제성을 평가하였다. 장전모형 선정 및 노심특성 분석에는 한전이 보유하고 있는 WH사의 APA (ALPHA/PHOENIX-P/ANC) 7.8.0 코드체계를 사용하였으며 경제성 평가에는 POCO 코드를 사용하였다.

### 1. 서 론

국내 3-Loop 가압경수로로는 1990년부터 국산 연료가 장전되기 시작하면서 일체형 가연성흡수봉인  $Gd_2O_3$ 를 사용하다가, 1994년 WH사의 V-5H 연료가 장전되면서부터 분리형 가연성흡수봉인 WABA를 사용하고 있다. 그러나 V-5 계열의 연료를 사용하고 있는 국외의 전력회사들은 가연성흡수봉으로 일체형인 IFBA를 사용하거나 또는 WABA와 IFBA를 혼합하여 사용하는 경우가 많이 있다. 분리형 가연성흡수봉인 WABA는 PYREX 가연성흡수봉을 개량한 것으로 내부에 형성된 유로가 주기말의 중성자 감속을 좋게 하여 주기길이를 연장시켜주는 역할을 한다. IFBA는 연료봉 소결체 표면에  $ZrB_2$ 를 얇게 도포한 것으로 핵연료에 물리, 화학적 영향을 거의 주지 않으며 주기말 잔존 독작용 효과도 거의 없는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 분리형과 일체형 가연성흡수봉은 서로 상대적인 장단점을 가지고 있으며,  $Gd_2O_3$  가연성흡수봉과 WABA 가연성흡수봉에 대한 평가는 이미 수행된바 있다. [참고 1] 이 연구에서는 [참고 1]에서 다루지 않은 IFBA 가연성흡수봉과 WABA 가연성흡수봉의 비교 평가를 위해서 각각에 대한 최적 평형노심 장전모

형을 선정하고 이들 평형노심에 대한 주기길이, 출력첨두 계수, 감속재 온도계수, 잔존 독작용 효과, 노심연소 거동 등에 대한 평가를 수행하고 그 결과로부터 경제성 평가를 수행하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 설계 해석 전산체계

본 연구에서 사용한 전산체계는 한전이 보유하고 있는 미국 Westinghouse사의 APA(ALPHA/PHOENIX-P/ANC) 7.8.0 전산코드로서 그 기능 및 역할은 다음과 같다.

PHOENIX-P는 2차원 다군수송이론 코드로서 ENDF/B-V file에서 유도된 42 에너지군으로 이루어진 미시단면적을 사용하여 Nodal 코드인 ANC에서 사용하는 2군 단위집합체 반응 단면적을 계산하여 제공한다. 또한 Baffle/Reflector 영역의 반응 단면적과 고온 전출력때의 각 연료봉 출력분포를 계산하여 ANC에 제공한다.

ANC(Advanced Nodal Code)는 Nodal Expansion Method를 사용하여 2차원 또는 3차원 노심 계산을 수행할 수 있는 노심해석 코드이다. ANC는 PHOENIX-P에서 생산한 단위 집합체별 핵 단면적을 사용하여 노심 연소계산 및 주요 핵적상수 계산을 수행한다. 또한 PHOENIX-P에서 제공하는 연료봉 출력분포를 이용하여 집합체내 출력 첨두계수를 계산한다.

ALPHA(Automated Linkage of PHOENIX-P and ANC)는 핵단면적 생산코드인 PHOENIX-P의 모델을 만들어주고, 3-D Nodal 코드인 ANC에서 사용할 수 있도록 PHOENIX-P 코드가 생산한 핵단면적 자료를 효율적으로 편집하여 주는 연결 코드이다.

### 2.2 평가 조건

WABA 와 IFBA 가연성흡수봉에 대한 평가대상 원전으로 영광 2호기를 선정하였다. 노심은 157개의 V-5H 핵연료집합체로 구성되며 핵연료봉의 상·하단 6 inch는 천연 우라늄으로 이루어진 Axial Blanket으로 구성되어 있다. 가연성흡수봉은 축상에서 중앙 120 inch 부분만 적용되며 출력첨두를 줄이기 위해 집합체내에 대칭으로 배치되어 있다. 신연료의 농축도 및 개수는 최근의 핵연료 사용 추세에 따라 4.2 w/o 및 60개를 사용하였다. IFBA에 사용된  $ZrB_2$ 의 양은 2.35 mg/inch이며 집합체내 IFBA의 배치는 WH사의 표준 배치를 사용하였다. 출력첨두 계수를 포함한 각종 안전제한치는 현행 안전제한치를 그대로 적용하였다.

### 2.3 평가 방법

분리형인 WABA는 일체형인 IFBA에 비해 장전위치 선정에 제약이 있어 (제어봉 및 source 위치에 장전 못함) 동일한 장전모형을 사용 할 수 없으므로 WABA 사용 노심, IFBA 사용 노심, WABA+IFBA 혼합 사용 노심 대해 시행착오적인 방법을 사용하여 각각 별도의 최적장전모형을 선정하였다. 이들 최적장전모형의 특징은 신연료 및 한 주기 연소된 연료가 노심 최외각에 전혀 배치되지 않는 이른바 L<sup>4</sup>P (Low Low Leakage Loading Pattern)로서 영광 2호가 9주기부터 시작

하여 과도노심을 거쳐 15주기에서 완전 평형노심에 도달하였다.

## 2.4 평가결과

각각의 가연성흡수봉 사용 노심 대한 주기길이, 가연성흡수봉 개수, 안전제한치들에 대한 계산 결과는 [표 1]과 같다. 먼저 연소에 따른 출력침두치 변화 [그림 4]와 잔존 독작용 효과 [표 2]는 IFBA가 가장 우수한 것으로 나타났다. 주기길이는 IFBA가 WABA에 비해 약간 길게 나타났는데 그 차이는 40 MWD/MTU로 가연성흡수봉 사용에 따른 주기길이는 별 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 상대적으로 주기말 잔존 독작용 효과가 큰 WABA의 장전모형이 IFBA에 비해 좀더 저누출 장전모형이기 때문인데 [그림 1, 2], IFBA를 사용할 경우 주기 중반에 나타나는 2차 침두 출력으로 인하여 1/4 노심의 중앙인 (3,4), (4,3) 위치에 신연료를 배치할 수 없으므로 WABA에 비해 상대적으로 최외곽 연료의 중성자 누설이 커졌기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 주기길이는 주기말의 잔존 독작용과 중성자 누설에 좌우되는데 WABA와 IFBA의 경우 이 두 가지가 서로 상쇄되어 비슷한 주기길이를 갖게 된 것이다 [표 2]. WABA와 IFBA를 혼합사용한 노심의 주기 길이가 가장 길게 나타난 것은 위에서 언급한 (3,4) 위치에 WABA를 배치함으로써 가장 중성자 누설이 작은 장전모형을 얻을 수 있었기 때문이다. 그러나 그 차이는 매우 미미하며 (IFBA에 비하여 20 MWD/MTU의 주기길이 증가) 상대적으로 많은 수의 가연성흡수봉을 사용함으로써 가연성흡수봉 비용을 고려한 총 주기비 측면에서는 오히려 가장 불리하게 나타났다 [표 3]. 핵주기비 측면에서 볼 때 주기길이 차이가 미미하므로 경제성은 가연성흡수봉 가격 자체에 더 영향을 받는 것으로 나타났으며, [참고 1] 및 [참고 2]의 경제성 입력 자료를 사용하여 계산한 주기비 계산결과는 [표 3]과 같다. 이 결과로부터 4.2 w/o, 60개의 V-5H 핵연료를 사용할 경우 가연성흡수봉 사용에 따른 주기비는 IFBA가 가장 유리한 것으로 나타났으나, 가연성흡수봉 가격에 따라 순위가 변할 수 있을 정도로 그 차이는 미미하여 오히려 사용자 편이성 여부가 가연성흡수봉 사용의 판단기준이 되는 것으로 나타났다.

## 3. 결 론

WH형 3-Loop 원전에 대해 4.2 w/o, 60개의 신연료 장전을 가정한 WABA 사용 노심, IFBA 사용 노심, WABA+IFBA 혼합 사용 노심 대한 노심특성 및 경제성을 평가하였다. 평가 결과 주기중 노심의 출력침두치 및 주기말 잔존 독작용 효과 측면에서 IFBA가 유리한 것으로 나타났다. 경제성 평가 결과 역시 IFBA가 WABA에 비해 유리한 것으로 나타났으나 그 차이는 미미하였다. 안전제한치 측면에서는 세 가지 경우 모두 기존 안전제한치에 대해 충분한 여유를 가지고 있는 것으로 나타났으나, WABA의 경우 가연성흡수봉 장전 개수의 제약에 의해 신연료 농축도가 더 높아지거나 신연료 개수가 줄어들 경우 주기초 봉산농도 제한치를 만족하기가 어려워 단독 사용이 불가능할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- (1) 한국전력공사 기술연구원, "가연성독봉 사용방법 최적화 연구" (1993. 9)
- (2) 박상원 외, "W형 3-Loop 발전소에 대한 일체형 가연성흡수봉 경제성 평가", '한국원자력학회 '96 춘계학술발표회 논문집 제1권 (1996. 5)
- (3) G. H. Choi et al., "Nuclear Design Report of the Yonggwang Unit 2 Cycle 9", WCAP-14433 (August 1995)
- (4) T.Q.Nguyen et al., "Qualification of the PHOENIX-P ANC Nuclear Design System for Pressurized Water Reactor Cores", WCAP-11597-NP-A (June 1988)
- (5) Y.S. Liu et al., "ANC-A Westinghouse Advanced Nodal Computer Code", WCAP-10966-NP-A (Dec. 1985)

표 1. 가연성흡수봉 평가결과 비교

	BP 개수		주기길이 (MWD/MTU)	봉산농도 (ppm)		출력침두치 (위치)	MTC (pcm/°F)	SDM (EOL,%)
	WABA	IFBA						
				HFP	HZP			
WABA	848	-	16820	1936	2158	1.495 (3,4)	0.76	3.02
IFBA	-	3232	16860	1962	2167	1.478 (1,4)	1.32	3.30
WABA/IFBA 혼합	192	4032	16880	1722	1944	1.514 (2,5)	-0.84	3.15

표 2. 주기말 중성자누설 및 잔존독작용 비교

	외곽 평균출력	Buckling	잔존독작용(pcm)
WABA	0.4177	0.00046	143
IFBA	0.4427	0.00050	86
WABA/IFBA 혼합	0.4108	0.00046	132

표 3. 가연성흡수봉 별 주기비 비교

	핵연료 주기비 (mills/KWh)	가연성흡수봉 비용 (mills/KWh) *	총 주기비(mills/KWh)
WABA	5.1905	0.1144	5.3049
IFBA	5.1833	0.1147	5.2980
WABA/IFBA 혼합	5.1774	0.1688	5.3462

\* IFBA 예상 가공비 : \$369/연료봉 [참고 2]

WABA 평균 구입가 : \$1,400/봉

그림 1. WABA 평형노심 장전모형

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	A-0 (1,2) 0.864	B-0 (6,4) 1.068	B-20 (6,1) 1.107	B-24 (4,3) 1.090	B-0 (4,6) 1.192	C-20 F 1.319	B-16 (5,4) 0.895	A-0 (1,5) 0.370
2	B-0 (6,4) 1.068	B-20 (2,3) 1.088	C-20 F 1.338	B-20 (2,5) 1.145	C-20 F 1.370	B-0 (7,2) 1.158	C-0 F 0.998	A-16 (3,5) 0.310
3	B-20 (6,1) 1.107	C-20 F 1.336	B-20 (3,2) 1.185	C-24 F 1.388	B-16 (6,3) 1.187	C-16 F 1.228	A-16 (1,7) 0.572	
4	B-24 (4,3) 1.090	B-20 (5,2) 1.144	C-24 F 1.388	B-24 (3,4) 1.156	C-16 F 1.290	C-0 F 1.051	A-20 (1,3) 0.356	
5	B-0 (4,6) 1.192	C-20 F 1.368	B-16 (3,6) 1.187	C-16 F 1.290	B-16 (4,5) 0.879	A-0 (6,2) 0.455		
6	C-20 F 1.319	B-0 (2,7) 1.157	C-16 F 1.228	C-0 F 1.051	A-0 (2,6) 0.455			
7	B-16 (5,4) 0.895	C-0 F 0.990	A-16 (5,5) 0.575	A-20 (1,3) 0.356				
8	A-0 (1,5) 0.370	A-16 (5,3) 0.310						

Reg-# of WABA  
SHUFL  
EOL, Power

그림 2. IFBA 평형노심 장전모형

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	A-64 (2,1) 0.868	B-64 (7,1) 1.058	B-104 (4,1) 1.125	C-104 F 1.357	B-80 (3,2) 1.102	B-80 (5,4) 1.110	C-48 F 1.152	A-48 (4,4) 0.428
2	B-64 (7,1) 1.058	8-80 (4,5) 1.087	C-80 F 1.345	B-0 (6,4) 1.150	B-0 (7,2) 1.139	C-80 F 1.323	C-0 F 1.068	A-80 (2,2) 0.341
3	B-104 (4,1) 1.125	C-80 F 1.344	B-80 (2,3) 1.101	B-80 (3,6) 1.088	B-104 (2,6) 1.101	C-64 F 1.247	A-0 (5,2) 0.584	
4	C-104 F 1.357	B-0 (4,6) 1.150	B-80 (6,3) 1.088	B-48 (5,5) 1.131	C-80 F 1.315	C-0 F 1.072	A-0 (3,4) 0.373	
5	B-80 (3,2) 1.102	B-0 (2,7) 1.139	B-104 (6,2) 1.101	C-80 F 1.315	C-48 F 1.133	A-0 (4,2) 0.482		
6	B-80 (5,4) 1.110	C-80 F 1.322	C-64 F 1.247	C-0 F 1.072	A-0 (2,4) 0.482			
7	C-48 F 1.152	C-0 F 1.067	A-0 (2,5) 0.584	A-80 (4,3) 0.373				
8	A-48 (4,4) 0.428	A-80 (3,3) 0.337						

Reg-# of IFBA  
SHUFL  
EOL, Power

그림 3. WABA+IFBA 평형노심 장전모형

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	A-0 (7,1) 0.978	B-128 (6,1) 1.118	C-128 F 1.349	B-104 (5,4) 1.113	B-128 (3,1) 1.137	C-128 F 1.334	B-0 (7,2) 0.943	A-104 (1,4) 0.366
2	B-128 (6,1) 1.118	C-128 F 1.346	B-128 (2,5) 1.116	B-80 (6,3) 1.154	C-128 F 1.376	B-0 (6,4) 1.143	C-0 F 1.004	A-128 (1,2) 0.308
3	C-128 F 1.349	B-128 (5,2) 1.115	B-0 (2,7) 1.194	C-W24 F 1.366	B-W24 (4,3) 1.153	C-80 F 1.228	A-0 (6,2) 0.565	
4	B-104 (5,4) 1.113	B-80 (3,6) 1.152	C-W24 F 1.365	B-104 (4,5) 1.169	C-104 F 1.295	C-0 F 1.041	A-80 (4,2) 0.354	
5	B-128 (3,1) 1.137	C-128 F 1.375	B-W24 (3,4) 1.152	C-104 F 1.296	B-128 (2,2) 0.861	A-0 (3,3) 0.436		
6	C-128 F 1.334	B-0 (4,6) 1.142	C-80 F 1.229	C-0 F 1.043	A-128 (5,5) 0.444			WABA
7	B-0 (7,2) 0.943	C-0 F 0.999	A-0 (2,6) 0.564	A-80 (2,4) 0.355				
8	A-104 (1,4) 0.366	A-104 (4,4) 0.305						Reg-# of IFBA SHUFL EOL, Power

그림 4. 연소도에 따른 첨두출력 비교

