

영광 3호기 가연성흡수봉 종류에 따른 노심특성 분석

최기용, 이국종, 이해찬, 정선교
한국 원전연료(주) 기술 연구소

요 약

노심설계에서 현재 사용되는 일체형 가연성 흡수봉인 Gd, ZrB₂ 그리고 Er의 한국표준형 원전 노심 설계에의 타당성을 노심 F/H 제어, 저누출 장전모형 설계, 농축도/주기길이 그리고 주기말의 잔존 페널티 등의 측면에서 분석하였다. 초기노심의 경우는 영광 3호기 1주기 장전모형에 동일 연료집합체를 사용한 Gd/ZrB₂/Er의 경우와 ZrB₂/Er 최적장전모형에 동일 연료집합체를 사용한 경우에 대하여 분석하였다. 평형노심은 Gd/ZrB₂/Er 모두 동일한 장전모형을 사용한 18개월 주기길이의 노심에 대하여 동일한 농축도에서의 주기길이차이와 동등 주기길이를 내는데 필요한 농축도 요구량에 대하여 분석하였다. 초기노심 평형노심 모두 F/H 제어에는 ZrB₂/Er가 Gd보다 유리하였으며, 저누출 장전모형의 설계에도 ZrB₂와 Er가 Gd보다 유리하였다. 평형노심에서 동일한 주기길이를 내는데 요구되는 농축도는 ZrB₂에 비하여 Er는 0.182 w/o Gd는 0.063 w/o 높게 나타났으며 동일 농축도를 사용할 경우 주기길이는 ZrB₂에 비하여 Gd는 165 MWD/MTU 그리고 Er은 575 MWD/MTU가 짧게 나타났다. 따라서, F/H 제어와 저누출 장전모형의 설계에는 ZrB₂와 Er가 Gd보다 유리하였으나 Er의 경우 주기말에서의 잔존 페널티가 매우 크다는 단점이 있다.

1. 서 론

현재 노심설계에 사용되는 가연성 흡수봉은 분리형인 과거의 WABA나 PYREX에서 일체형인 ZrB₂, Gd 그리고 Er등으로 전환해가는 추세이다. 이들 세가지 일체형 가연성 흡수봉들은 각자 나름대로의 장단점을 지니고 있다. 한국내의 가압경수형 원전은 크게 웨스팅하우스형과 한국표준형으로 나눌 수 있다. 또한 앞으로 계속 추가 건설되는 한국 표준형 원전이 늘어남에 따라 한국 표준형 원전의 장주기 운전에 적합한 가연성 흡수봉의 선정은 연료 주기비용의 감소와 열적 여유도 확보 및 운전성 향상의 측면에서 매우 중요하다. 또한 현재의 노심설계는 경제성 증대와 원전의 수명연장을 위하여 중성자 저누출 장전모형의 재장전 설계를 요구하고 있다.

최초의 한국 표준형 원전인 영광 3호기 1주기의 노심설계는 Gd 가연성 흡수봉을 사용하여 설계되었다. Gd를 사용할 경우 Gd의 매우 큰 열 중성자 흡수 단면적과 적은수의 Gd봉을 사용하여 야만하는 까닭에 집합체내에서의 침투출력 제어에 어려움이 있으며 노심의 F/H 제어와 중성자 저누출 장전모형 설계에 어려움이 있다.

18개월 장주기로 운전시에는 연료의 농축도 증가로 인한 초기 잉여반응도 제어를 위하여 다량의 가연성 흡수봉이 필요하다. 그러나 이는 주기말 가연성 흡수체의 잔존으로 인한 페널티로 주기비의 증가가 초래된다. 또한 한국 표준형 원전에서 사용되는 연료는 집합체내에 4개의 연료봉에 해당하는 크기의 Water hole이 존재하여 적절한 농축도 분리와 가연성 흡수봉의 배치를 필요로 한다.

본 연구에서는 영광 3호기의 초기노심(실설계에 근거)과 가상 18개월 평형주기에서의 Gd, ZrB₂ 그리고 Er 가연성 흡수봉에 따른 노심의 F/H제어, 주기길이 그리고 주기말의 페널티 등의

측면에서 비교 평가하였다. 분석에 사용된 코드시스템은 KNFC가 노심설계에 사용하고 있는 APA(ALPHA/PHOENIX/ANC) 코드시스템을 사용하였다.

2. APA 분석코드 시스템 및 해석방법

2.1 APA 분석코드 시스템

APA 노심설계 코드시스템은 단위집합체 핵 단면적 생산코드인 PHOENIX-P, Nodal Expansion Method를 사용한 노심계산 코드인 ANC 그리고 PHOENIX-P와 ANC 를 연결하여 ANC 입력자료를 생산하는 ALPHA를 중심으로 1차원 노심해석 코드인 APOLLO 등의 여러 보조 코드들로 이루어져 있다. 본 타당성 연구에서는 ALPHA, PHOENIX 그리고 ANC 코드가 사용되었다.

PHOENIX-P: PHOENIX-P는 2차원 다군 수송이론 코드로서 ENDF/B-V에 기초한 42에너지군 단면적 Library로 ANC 에서 필요한 2군 단위 집합체 반응단면적을 계산하여 제공한다. PHOENIX-P는 또한 Baffle/Reflector 영역의 핵반응 상수도 계산하여 ANC의 입력자료로 제공한다.

ANC(Advanced Nodal Code): ANC는 2차원 또는 3차원 노심계산을 수행할 수 있는 Nodal Expansion Method를 사용한 노심해석 코드이다. ANC는 PHOENIX-P에서 생산된 집합체 단면적을 입력으로하여 노심계산을 수행하며 연소계산 및 노심의 주요 핵적상수 계산을 수행한다.

ALPHA(Automated Linkage of PHOENIX-P and ANC): ALPHA는 PHOENIX-P의 입력을 자동으로 작성하여 PHOENIX-P 작업을 수행하여 핵반응 단면적을 계산하고 그 결과를 ANC의 입력으로 작성해 주는 자동화 프로그램이다.

2.2 해석방법

일체형 가연성 흡수봉의 노심 특성을 분석하기 위하여 Gd, ZrB₂ 그리고 Er에 대하여 초기노심과 18개월 주기 평형 노심에 대하여 수행하였다. 초기노심은 실제 영광 3호기 1주기의 실제 Gd 설계 장전 모형을 사용하였으며 ZrB₂와 Er의 경우는 Gd의 장전모형을 그대로 사용한 경우 그리고 동일 연료 집합체를 사용한 최적 저누출 장전모형의 경우에 대하여 분석하였다. 즉 다음과 같은 5가지의 초기 노심에 대하여 고려하였다.

- Gd 초기노심(영광 3호기 실설계 장전모형)
- ZrB₂ 초기노심(영광 3호기 실설계 장전모형)
- Er 초기노심(영광 3호기 실설계 장전모형)
- ZrB₂ 초기노심(최적 저누출 장전모형)
- Er 초기노심(최적 저누출 장전모형)

초기노심에 사용된 연료집합체의 상세한 자료가 표 1에 나타나 있다. 또한 초기노심의 실설계에 사용된 장전모형과 최적화된 저누출 장전모형이 그림 1과 그림 2에 나타나 있다.

평형노심은 동일 저누출 장전모형을 사용하여 Gd, ZrB₂ 그리고 Er의 농축도와 갯수를 조절하여 각각의 최적 장전모형을 선정하였다. 평형노심은 가연성 흡수체의 주기말 페널티를 알아보기 위하여 두가지 방법을 사용하였다. 첫 번째는 동일 농축도의 연료를 사용하여 주기말의 주기길이 차이를 비교하였다. 두 번째는 동일주기길이를 만족시키는 우라늄의 농축도를 비교하였다. 초기 및 평형노심에서 사용한 F/H 제한치는 1.500과 1.600을 각각 사용하였으나 Gd 평형노심에서는 이 값

을 만족하지 못하여 1.659를 사용하였다. 평형노심에 사용된 입력자료는 표 2와 그리고 장전모형은 그림 3과 같다.

3. 계산결과 및 분석

초기노심의 Gd, ZrB₂ 그리고 Er 가연성 흡수봉의 계산결과는 표 3과 같다. 초기노심 영광 3호기 1주기 Gd와 동일한 장전모형을 사용한 ZrB₂의 경우가 Gd의 경우보다 F/H는 1.500에서 1.399로 6.73% 향상되었으며 이 효과로 저누출 최적장전모형 설계가 가능할 것이다. 주기길이는 378 MWD/MTU가 증가하였는데 이는 Gd가 사용되는 천연 우라늄 (0.74 w/o) 봉에 농축된 우라늄이 대체되어서 나타나는 효과와 Gd의 주기말 페널티에 의한 영향이다. Er의 경우에도 F/H는 1.401로 6.6% 향상되었으나 주기길이는 -598MWD/MTU가 감소되었는데 이는 Gd의 경우보다 오히려 우라늄 장전량이 감소되어서 나타나는 효과와 Er의 주기말 잔존 페널티의 효과이다.

ZrB₂와 Er를 사용하여 최적 장전모형을 찾아낸 초기노심 경우 ZrB₂ 장전모형의 F/H는 1.486 그리고 주기길이는 동일한 실설계 장전모형을 사용한 ZrB₂ 경우보다도 365 MWD/MTU 증가하였는데 이는 순수히 저 중성자 누출 장전모형에 의한 효과이다. Er의 경우 F/H는 1.478 그리고 주기길이는 ZrB₂ 경우보다 835 MWD/MTU가 감소하였다. 이는 Er의 커다란 주기말 잔존 페널티에 의한 영향이다.

평형노심의 계산결과는 표 4와 같다. 동일한 연료농축도를 사용한 경우 주기길이는 ZrB₂의 경우 Gd에 비하여 165 MWD/MTU가 길어졌다. Er의 경우 ZrB₂ 보다는 575 MWD/MTU 그리고 Gd 보다는 410 MWD/MTU가 적게 나타났다. 또한 동등한 주기길이를 내는데 필요한 농축도를 비교한 경우 ZrB₂에 비하여 Gd는 0.063 w/o 그리고 Er는 0.182 w/o가 높게 요구됨이 나타났다.

4. 결론

일체형 가연성 흡수봉인 Gd/ZrB₂/Er의 한국표준형 원전 노심설계 적합성 여부를 F/H제어, 저누출 장전모형, 주기길이 그리고 주기말의 잔존 페널티 측면에서 살펴본 결과는 다음과 같다.

- 주기중 노심의 F/H제어 - ZrB₂와 Er가 Gd보다 유리
- 저누출 장전모형 설계 - ZrB₂와 Er가 Gd보다 유리
- 동일 주기길이에 요구되는 우라늄 농축도 - ZrB₂에 비해 Er는 0.182 w/o
Gd는 0.063 w/o가 높게 요구됨
- 주기말 잔존 페널티 - ZrB₂에 비해서는 Gd가 Gd에 비해서는 Er가 큼

따라서 F/H제어와 저누출 장전모형의 설계에는 ZrB₂와 Er가 Gd보다 유리하나 Er의 경우 주기말에서의 잔존페널티가 매우 크고 동등한 주기길이를 내는데 필요한 농축도가 높다는 단점이 있다.

참고문헌

1. METCOM, Westinghouse Electric Corporation
2. ANC-Advanced Nodal Code, User's Manual WEC
3. PHOENIX-P, User's Manual WEC
4. ALPHA, User's Manual WEC

표 1 초기노심 연료집합체 입력자료

1) 실제설계 Gd/ZrB₂/Er 장전모형

FA Type	No of FAs	U ₂₃₅ w/o	No of Rods	No of BAs (ZrB ₂ /Er)	BA w/o (ZrB ₂ [*] /Er [#])
A000	45	1.30	236	0/0	-
B000	16	2.37	236	0/0	-
B036	4			36/36	2.4/2.0
B136	4	2.36/1.30	184/52	36/36	2.4/2.0
B144	4	2.36/1.30	184/52	44/44	2.4/2.0
B228	4	2.37	236	28/28	2.4/2.0
B236	12	2.37	236	36/36	2.4/2.0
C000	12	2.87/2.35	184/52	0/0	-
C144	8	2.87/2.36	184/52	44/44	2.4/2.0
C152	8			52/52	2.4/2.0
C168	16			68/68	2.4/2.0
D000	8	3.35/2.87	184/52	0/0	-
D044	4			44/44	2.4/2.0
D144	8	3.36/2.85	184/52	44/44	2.4/2.0
D268	24	3.35/2.87	136/100	68/68	2.4/2.0

*:B₁₀ mg/inch, #:w/o

2) 최적 ZrB₂/Er 장전모형

FA Type	No of FAs	U ₂₃₅ w/o	No of Rods	No of BAs (ZrB ₂ /Er)	BA w/o (ZrB ₂ [*] /Er [#])
A000	45	1.30	236	0/0	-
B000	16	2.37	236	0/0	-
B044	4			44/44	2.4/2.0
B100	8	2.36/1.30	184/52	0/0	-
B200	16	2.37	236	0/0	-
C044	4	2.87/2.35	184/52	44/44	2.4/2.0
C052	8			52/52	2.4/2.0
C136	4			36/36	2.4/2.0
C144	12	2.87/2.36	184/52	44/44	2.4/2.0
C152	16			52/52	2.4/2.0
D052	8	3.35/2.87	184/52	52/52	2.4/2.0
D068	4			68/68	2.4/2.0
D144	8	3.36/2.85	184/52	44/44	2.4/2.0
D236	8	3.35/2.87	136/100	36/36	2.4/2.0
D244	16			44/44	2.4/2.0

*:B₁₀ mg/inch, #:w/o

표 2 평형노심 연료집합체 입력자료

1) 동일 농축도 주기길이 비교

FA Type	No. of FAs	No. of Rods (고농축도/저농축도)	No. of BAs (Gd/ZrB ₂ /ER)	BA w/o (Gd [*] /ZrB ₂ [#] /ER [*])	U ₂₃₅ 농축도
F00	16	184/52	0/0/0	0.0/0.0/0.0	4.4/3.8
F05	12	184/52	4/48/48	8.0/2.4/2.0	4.4/3.8
F06	12	184/52	8/68/68	8.0/2.4/2.0	4.4/3.8
F07	20	184/52	16/88/88	8.0/2.4/2.0	4.4/3.8

* : w/o, # : mg/inch

2) 동일 주기길이 농축도 비교

FA Type	No. of FAs	No. of Rods (고농축도/저농축도)	No. of BAs (Gd/ZrB ₂ /ER)	BA w/o (Gd*/ZrB ₂ */ER*)	U235 농축도 (Gd/ZrB ₂ /ER)
F00	16	184/52	0/0/0	0.0/0.0/0.0	4.331/4.268/4.450
F05	12	184/52	4/48/48	8.0/2.4/2.5	4.331/4.268/4.450
F06	12	184/52	8/68/68	8.0/2.4/2.5	4.331/4.268/4.450
F07	20	184/52	16/88/88	8.0/2.4/2.5	4.331/4.268/4.450

* : w/o, # : mg/inch

표 3 초기노심 계산결과

구분	우라늄 장전량(mg/cc)	주기중 최대 F/H	주기길이 (MWD/MTU)	주기길이차*
Gd 실제설계	2562	1.500	13650	-
ZrB ₂ 실제설계	2564	1.399	14028	378
Er 실제설계	2556	1.401	13052	-598
ZrB ₂ 최적설계	2564	1.486	14393	743
Er 최적설계	2558	1.478	13558	-92

*:Gd 실제설계와 ANC 계산결과와의 차이

표 4 평형노심 분석결과

1) 동일 농축도 주기길이 비교

구분	U-loading (mg/cc)	평균농축도	주기중 최대 F/H	주기길이	주기길이차 (MWD/MTU)
Gd	2557	4.268	1.659	16060	-165
ZrB ₂	2564	4.268	1.563	16225	0
Er	2558	4.268	1.505	15650	-575

2) 동등 주기길이 농축도 비교

구분	U-loading (mg/cc)	평균농축도	주기중 최대 F/H	주기길이
Gd	2557	4.331(0.063)	1.665	16225
ZrB ₂	2564	4.268	1.563	16225
Er	2558	4.450(0.182)	1.540	16225

A000	B136	B236	A000	B228	B144	C152	D044
A000	B136	B236	A000	B228	B144	C152	D044
A000	B108	B204	A000	B204	B108	C108	D000
	B036	A000	D268	A000	B236	C144	C000
	B036	A000	D268	A000	B236	C144	C000
	B000	A000	D20	A000	B204	C108	C000
		C168	A000	C168	A000	D268	B000
		C168	A000	C168	A000	D268	B000
		C108	A000	C108	A000	D208	B000
			C152	A000	D268	D000	
			C152	A000	D268	D000	
			C108	A000	D208	D000	
				C168	D144	B000	--ZrB ₂ FA XXNN--XX:Fuel ID
				C168	D144	B000	--Er FA NN:No. of BAs
				C108	D108	B000	--Gd FA F:fresh
					C000		G:once-burnt
					C000		H:twice-burnt
					C000		

그림 1 영광 3호기 초기노심 실제설계 장전모형

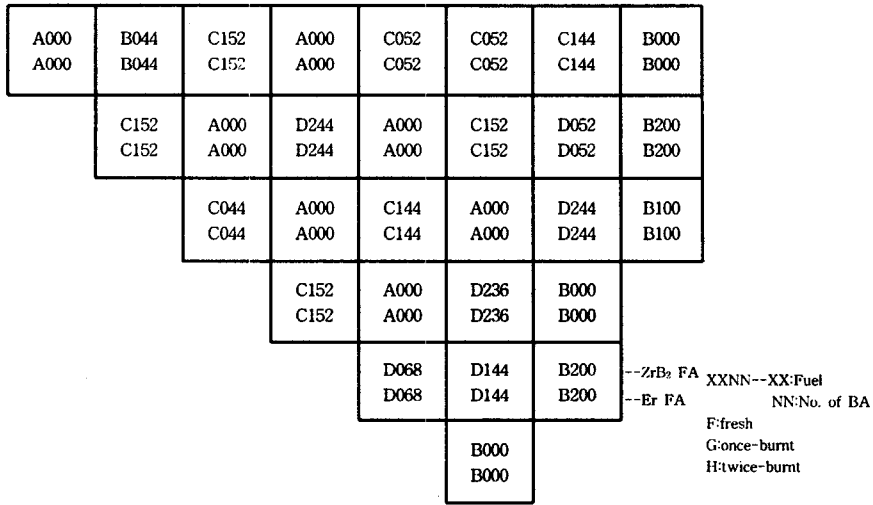


그림 2 초기노심 최적설계 장전모형

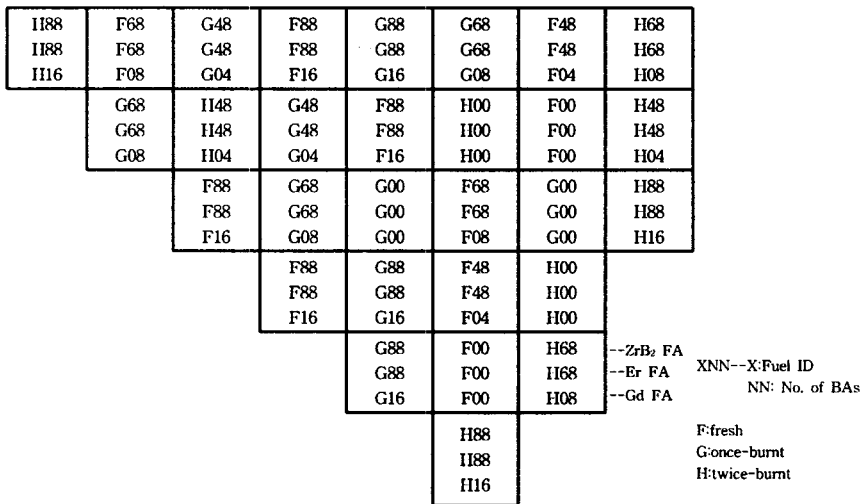


그림 3 평형노심 장전모형