

표준형 원전을 위한 장주기용 개량연료 노심 해석

이 국종, 최 기용, 이 해찬, 정 선교
한국 원전연료(주) 기술연구소

요 약

현재의 원전 운용은 연료주기 비용을 최소화하여 경제성을 향상시키는 것이 세계적인 추세이다. 따라서 영광 3, 4호기 이후의 국내 원전 건설의 대부분이 될 한국 표준형 원전을 대상으로 하여, 현재 개발 중이거나 이미 실용화된 개량 원전 연료의 특성을 적용하여 실제 노심해석을 수행하고, 이에 따른 경제성 분석을 수행하였다. 노심해석은 현재의 영광 3, 4호기에 장전된 CE형 연료 및 장주기용 개량연료를 초기노심 및 평형 노심에 각각 장전하는 경우에 대하여 수행하였다. 가연성 흡수체는 현재 사용중인 Gadolinia 및 Integral Fuel Burnable Absorber(IFBA) 가연성 흡수체를 사용하여 분석하였다. 그 결과 현재의 CE형 연료에서 사용하는 0.382" 연료봉보다 0.374"의 연료봉이 중성자 경제성 측면에서 유리하며, Gadolinia보다 IFBA가 반경방향 침투출력 계수의 제어를 쉽게할 수 있음이 밝혀졌다. 그 외에 열적 여유도 증진을 위한 유량 혼합 날개의 채용과 고연소도를 위한 새로운 피복관 재료의 사용이 요청된다. 이상과 같은 결과는 향후 표준형 원전의 장주기용 개량연료를 위한 개발 방향으로 제시될 수 있다.

I. 연구의 목적

현재 원전운용은 열적 여유도는 최대화하고, 연료 주기비용은 최소화하여 경제성을 향상시키는 것이 세계적인 추세이다. 따라서 본 연구에서는 현재 개발되었거나, 개발중인 개량 원전연료의 여러 핵적 특성을 비교하고, 실제 노심 해석을 통한 경제성 분석을 수행하여 한국표준형 원전을 위한 장주기/고연소 개량 원전연료의 기본 개발 방향을 제시하고자 한다. CE사의 SYSTEM80을 기본으로한 영광 3, 4 호기와 후속호기들이 국내의 기술진에 의하여 설계가 수행되고 건설되고 있으나 현재의 CE형 연료는 국내의 Westinghouse형 발전소의 연료에 비하여 장주기/고연소 연료로써의 경제성 및 열적여유도 측면에서 뒤져 있다. 또한 현재의 노심설계는 중성자의 경제성을 최대화하여 원전연료 주기비용을 최소화시키고 열적여유도를 증가시키므로써 원전의 안전성 및 Operational Flexibility를 증가시키는 추세이다. 따라서 노심내의 중성자 경제성을 향상시키는 노심설계기술을 개발하여야 하며, 궁극적으로는 장주기용 개량연료를 개발하여야 한다. 또한 열적여유도를 증가시키기 위해서는 유량혼합날개의 적용과 같은 원전연료 설계방법을 적용할 수 있으며, 그 결과 열적 여유도를 15 - 20% 이상 증가시킬 수 있다. 따라서 CE형 원전의 장주기(18 개월 이상) 고연소도(50,000 MWD/MTU) 원전연료의 개발은 원전연료 주기비용의 절감과 열적 여유도를 증가시켜 원전의 안전성 증가 및 전력의 안정적 공급을 위해서 절대적으로 필요하다.

II. 개발방향 선정

한국표준형 원전의 장주기용 개량연료 개발에는 열적 여유도를 최대화하고 원전연료 주기비용은 최소화시키기 위하여 중성자 경제성을 최대화시키는 원전연료 직경, 원전연료 가연성 흡수봉의 종류, 피복관 재질, 원전연료 집합체의 축방향 및 반경방향 농축도 분리, 열적 여유도 개선 그리고 압력용기 중성자속 조사 최

소화 등의 사항이 고려되어야한다.

- 원전연료 직경 선정: 지금까지의 원전연료 설계 경험에 의하면 원전연료 소결체의 직경에 따라 집합체의 중성자 경제성이 다르다는 것이 나타나 있다. 따라서 영광 3, 4호기에서 현재 사용하고 있는 CE의 0.382" 원전연료 소결체와 개량연료의 0.374" 원전연료 소결체를 분석 대상으로 선정하였다.

- 가연성 흡수체의 종류: 가연성 흡수봉의 종류에 따라 연료 집합체내에서의 최대출력의 크기와 노심의 임계열속 여유도가 달라진다. 따라서 현재 영광 3, 4호기에서 사용하고 있는 Gadolinia와 Westinghouse사의 Integral Fuel Burnable Absorber(IFBA)를 분석 대상으로 선정하였다.

- 열적 여유도 개선: 발전소의 안전성 및 Operational Flexibility를 향상시키기 위해서는 열적 여유도를 개선하여야 한다. 이를 위해서 현재 국내에서 생산하여 Westinghouse형 원전에 공급되는 VANTAGE5H 연료에서 채용한 유량혼합날개를 사용하면 열적 여유도를 15 - 20% 증가 시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 유량혼합날개를 표준형 원전의 개량 원전연료에 적용할 경우 최소한 10% 이상 열적 여유도를 증가시킬 수 있을 것이다.

- 피복관 및 지지격자 재질: 고연소도 원전연료의 경우 산화막의 두께와 부식 그리고 중성자조사에 의한 피복관의 성장 등이 원전연료의 건전성에 영향을 줄 수 있다. 따라서 고연소도에서 피복관의 건전성을 유지할 수 있는 재료를 선정하여야 한다.

- 축방향 및 반경방향 농축도 분리: 중성자의 경제성을 최대화하고 축방향 및 반경방향의 출력분포를 균일하게 하기위하여 Axial Blanket을 사용하여 축방향의 농축도를 분리하고, Enrichment Zoning을 사용하여 반경방향의 농축도를 분리하는 방법을 적용하였다.

- 저누출 장전모형 선정: 저누출 장전모형은 중성자 경제성을 증대시켜주며, 압력용기의 중성자속 조사를 감소시켜서 압력용기의 건전성을 유지시키며 원자로의 수명을 연장시켜 준다. 압력 용기가 과도하게 중성자에 조사되면 취성 천이온도(NDT)가 감소하여 낮은 압력에서도 파괴될 수 있다. 따라서 중성자의 경제성 뿐만 아니라 압력용기의 건전성과 수명연장을 위하여 최대한 저누출 장전모형의 설계가 필요하다.

이와 같은 사항들을 고려하여 열적 여유도 및 원전연료 주기비용에 민감한 원전연료 직경과 가연성 흡수체의 종류 그리고 초기 및 평형 노심에 따라 다음과 같은 분석대상을 선정하였다.

- 대상 1 : 0.382" Gadolinia 초기노심
- 대상 2 : 0.382" Gadolinia 평형노심
- 대상 3 : 0.374" IFBA 초기노심
- 대상 4 : 0.374" IFBA 평형노심
- 대상 5 : 0.382" IFBA 초기노심
- 대상 6 : 0.382" IFBA 평형노심

대상 1과 2는 Gadolinia 가연성 흡수체를 사용하는 기존의 CE형 연료를 사용한 장전모형으로 FAH 및 경제성 평가의 비교 기준이 된다. 대상 3과 4는 0.374" 연료봉에 유량혼합날개를 가진 개량연료에 IFBA를 사용한 개량 원전연료의 경우이다. 대상 5와 6은 대상 1과 2에서 사용한 연료에다 Gadolinia 가연성 흡수체 대신에 IFBA를 사용한 경우로 IFBA를 사용할 경우에 얻을 수 있는 열적 여유도를 평가하고자 하는 것이다.

III. 해석방법

선정된 6개의 분석대상을 표준형 원전의 노심해석이 가능한 ALPHA/PHOENIX/ANC 코드 체계로 분석을 수행하였다. ALPHA/PHOENIX/ANC 코드 체계는 2차원 다균 수송이론 단위 집합체 핵반응 단면적 생산 코드인 PHOENIX-P, Nodal Expansion Method를 이용한 노심해석 코드인 ANC 그리고 ANC와

PHOENIX-P를 자동으로 연결 시켜 ANC 입력 자료를 생산하는 ALPHA로 구성되어 있다. ALPHA/PHOENIX/ANC 코드 체계를 이용한 노심해석은 다음의 그림 1과 같은 표준 설계절차를 따랐다. 즉, ALPHA/PHOENIX 코드를 이용하여 단위 집합체의 핵반응단면적과 Baffle/Reflector의 반응 단면적을 계산하였다. ALPHA 코드를 이용하여 ANC 입력 Punch Deck을 작성하고 BOL에서 EOL까지의 ANC 모델을 생산하여 연소계산을 수행하였다. 아울러 제어봉 상수를 ALPHA/PHOENIX 코드로 계산하고 이를 이용하여 ANC로 정지여유도 계산을 하였다.

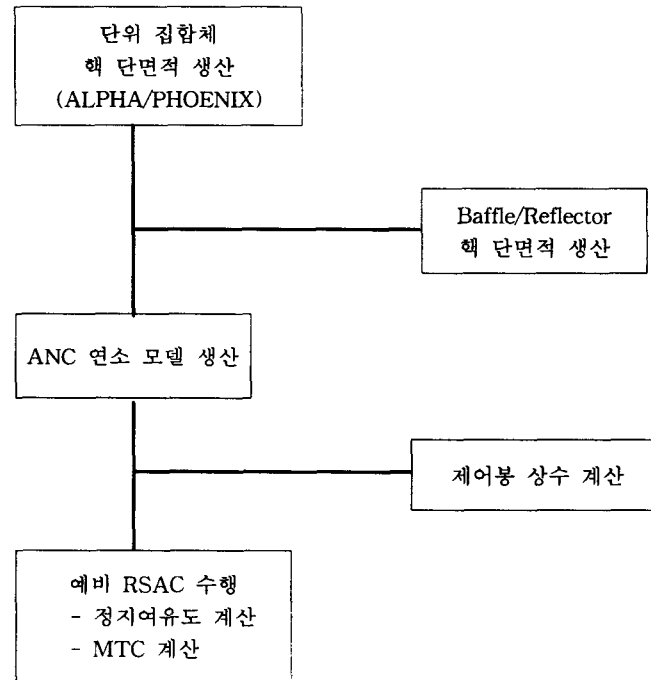


그림 1. ALPHA/PHOENIX/ANC 코드 체계에 의한 노심 해석 절차.

해석 대상인 초기 및 평형 노심의 6가지 경우에 대하여 다음과 같은 기준을 적용하여 모의 설계를 통한 노심해석을 수행하였다.

- 초기 노심
 - 177 개 새 연료 사용
 - 동등 에너지 요구량 (18개월 주기)
 - 최대한의 저누출 장전모형
 - FAH 제한치 (CE 연료 : 1.55, 개량연료 : 1.65)
 - Gadolinia 가연성흡수봉 : 6w/o Gd와 자연산 UO₂ 혼합
 - 2.40 mg/inch ZrB₂ IFBA 사용
 - Enrichment Zoninig을 사용한 반경방향 농축도 분리
 - Axial Blanket을 사용한 축 방향 농축도 분리(개량연료 만)
- 평형 노심
 - 60 개 새 연료 공급
 - 동등 에너지 요구량 (18개월 주기)

- 최대한의 저누출 장전모형
- FΔH 제한치 (CE 연료 : 1.55, 개량연료 : 1.65)
- Self-generating Rule 적용
- 평형주기 : N주기와 N-1주기의 임계농도가 5 ppm 이내
- Gadolinia 가연성흡수봉 : 6w/o Gd와 자연산 UO₂ 혼합
- 2.40 mg/inch ZrB₂ IFBA 사용
- Enrichment Zoning을 사용한 반경방향 농축도 분리
- Axial Blanket을 사용한 축 방향 농축도 분리(개량연료 만)

각 분석대상의 장전모형은 중성자의 노의 누출이 최소화되도록 설계하였으며, FΔH 또한 최소가 되도록 설계하였다. 또한 각 장전모형에 대해서는 규제기관의 허가를 받을 수 있도록 정지 여유도 및 MTC를 확인하는 예비 RSAC을 수행하였다.

한편 경제성분석은 동일 에너지 요구량을 만족시킬 수 있는 장전모형에 대하여 가연성 흡수체와 집합체의 제조비용을 제외한 농축 우라늄의 가격과 주기길이의 차이만을 고려하여 Spread Sheet Program을 이용하여 평가하였다. 실제 원전연료의 가격은 농축 우라늄의 가격이 전체의 70 - 80% 이상을 차지하고 있다.

IV. 결과 및 분석 평가

총 6가지의 초기노심 및 평형노심에 대하여 분석한 결과는 다음의 표 1과 2에 요약되어 있다. 각 분석대상의 장전모형이 각각 그림 2에서 그림 7까지에 나타나 있다. 6가지의 장전모형은 FΔH 제한치를 만족시켜야하고 같은 에너지 요구량(Energy Requirement)을 만족시켜야 한다. FΔH 제한치는 CE형 0.382" 연료봉은 1.550 그리고 유량혼합날개를 가진 0.374" 개량연료는 1.650이나 설계여유도를 고려하여 각각 1.510과 1.600 이내에서 장전모형을 선정하였다. 에너지 요구량은 한 주기의 열출력 총량이 같도록 주기말의 임계보론농도 10 ppm을 기준으로 대략 같은 EFPD가 되도록 장전모형을 선정하고 농축도를 조절하였다.

	H	J	K	L	M	N	P	R
8	H1-08 Feed 0 1946	A-00 Feed 0 1949	H1-08 Feed 0 1947	H1-08 Feed 0 1921	A0-00 Feed 0 1916	A0-00 Feed 0 1901	C3-12 Feed 0 1942	C0-00 Feed 0 1367
9	A-00 Feed 0 1949	H1-08 Feed 0 1947	A0-00 Feed 0 1944	A0-00 Feed 0 1944	H1-08 Feed 0 2076	C3-12 Feed 0 2010	A0-00 Feed 0 1422	C0-00 Feed 0 1376
10	H1-08 Feed 0 1944	A0-00 Feed 0 1564	C3-12 Feed 0 2072	A0-00 Feed 0 1573	C3-12 Feed 0 2129	A0-00 Feed 0 1500	C2-12 Feed 0 1226	H0-00 Feed 0 803
11	H1-08 Feed 0 1921	A0-00 Feed 0 1944	A0-00 Feed 0 1573	H1-08 Feed 0 2028	A0-00 Feed 0 1010	C3-12 Feed 0 1917	H0-00 Feed 0 1345	
12	A0-00 Feed 0 1516	H1-08 Feed 0 2077	C3-12 Feed 0 2129	A0-00 Feed 0 1519	H1-08 Feed 0 1977	C1-08 Feed 0 1706	H0-00 Feed 0 940	
13	A0-00 Feed 0 1420	C3-12 Feed 0 2010	A0-00 Feed 0 1500	C3-12 Feed 0 1971	C1-08 Feed 0 1706	H0-00 Feed 0 1077		
14	C3-12 Feed 0 1942	A0-00 Feed 0 1466	C2-12 Feed 0 1226	H0-00 Feed 0 1315	H0-00 Feed 0 940			
15	C0-00 Feed 0 1367	C0-00 Feed 0 1370	H0-00 Feed 0 804					

Region #1A
Shuffle Rotation
B/C Burnup
E/C Burnup

그림 2. CE 연료 초기노심 장전모형(Gadolinia)

	H	J	K	L	M	N	P	R
8	H-08 Feed 0 1934	A-00 Feed 0 1925	B-56 Feed 0 1964	B-56 Feed 0 1964	A-00 Feed 0 1945	A-00 Feed 0 1940	C2-88 Feed 0 1936	C1-00 Feed 0 1362
9	A-00 Feed 0 1925	B-08 Feed 0 1947	A-00 Feed 0 1534	A-00 Feed 0 1565	B-08 Feed 0 2082	C2-88 Feed 0 2107	A-00 Feed 0 1382	C1-00 Feed 0 1331
10	B-56 Feed 0 1934	A-00 Feed 0 1534	C2-88 Feed 0 2073	A-00 Feed 0 1574	C2-88 Feed 0 2105	A-00 Feed 0 1540	C2-88 Feed 0 1700	H-00 Feed 0 800
11	B-56 Feed 0 1934	A-00 Feed 0 1565	A-00 Feed 0 1573	B-56 Feed 0 2031	A-00 Feed 0 1561	C2-88 Feed 0 2075	H-00 Feed 0 1348	
12	A-00 Feed 0 1925	B-08 Feed 0 2028	C2-88 Feed 0 2105	A-00 Feed 0 1561	B-56 Feed 0 1971	C1-88 Feed 0 1828	H-00 Feed 0 850	
13	A-00 Feed 0 1540	C2-88 Feed 0 2107	A-00 Feed 0 1540	C2-88 Feed 0 2075	C1-88 Feed 0 1828			
14	C2-88 Feed 0 1936	A-00 Feed 0 1942	C2-88 Feed 0 1706	H-00 Feed 0 1348	H-00 Feed 0 800			
15	C1-00 Feed 0 1362	C1-00 Feed 0 1331	B-00 Feed 0 800					

Region #1A
Shuffle Rotation
B/C Burnup
E/C Burnup

그림 3. CE 연료 초기노심 장전모형(IFBA)

8	H-48 Feed 0 16782	A-10 Feed 0 17281	H-48 Feed 0 18010	H-48 Feed 0 17881	A-10 Feed 0 16926	H-48 Feed 0 20224	C-98 Feed 0 19677	H-00 Feed 0 11531
9	A-10 Feed 0 15228	H-48 Feed 0 18657	A-10 Feed 0 15284	A-10 Feed 0 15534	H-48 Feed 0 20220	C-98 Feed 0 21829	A-10 Feed 0 14007	H-00 Feed 0 10986
10	H-48 Feed 0 18010	A-10 Feed 0 15284	C-112 Feed 0 20220	A-10 Feed 0 15476	C-112 Feed 0 21441	A-10 Feed 0 15284	C-98 Feed 0 17121	H-00 Feed 0 8575
11	H-48 Feed 0 17061	A-10 Feed 0 17061	A-10 Feed 0 15476	H-48 Feed 0 18629	A-10 Feed 0 15751	C-98 Feed 0 19005	H-00 Feed 0 13024	
12	A-10 Feed 0 16926	H-48 Feed 0 20220	C-112 Feed 0 21441	A-10 Feed 0 15751	H-36 Feed 0 19167	C-48 Feed 0 17628	H-00 Feed 0 91250	
13	H-48 Feed 0 20224	C-98 Feed 0 21829	A-10 Feed 0 15284	C-98 Feed 0 15905	C-48 Feed 0 17628	H-00 Feed 0 10436		
14	C-98 Feed 0 19677	A-10 Feed 0 14007	C-98 Feed 0 17121	H-00 Feed 0 13024	H-00 Feed 0 91750			
15	H-00 Feed 0 11531	H-00 Feed 0 10986	H-00 Feed 0 8575					Region #1A Shuffle Rotation B/C Burnup B/C Burnup

그림 4. 개량연료 초기노심 장전모형(IFBA)

8	X4-16 (4.4) 0' 4033 5107	X4-16 (6.1) 20' 4220 4725	Z4-16 Feed 0 21383	X1-08 (3.1) 20' 3642 5476	Y1-08 (7.1) 20' 3076 3676	X1-08 (5.2) 20' 3076 3271	Z1-08 Feed 0 3973	Y4-16 (3.1) 50' 3104 3104
9	X4-16 (8.1) 0' 3866 4725	Y1-08 (5.0) 0' 3516 3516	Y4-16 (2.0) 0' 3049 3049	Y0-00 Feed 0 3325	X0-00 Feed 0 3005	Z4-16 Feed 0 21263	Y4-16 Feed 0 3604	Z0-00 Feed 0 1314
10	Z4-16 Feed 0 21383	Y4-16 Feed 0 3049	Z4-16 Feed 0 21356	X2-12 Feed 0 3429	Z4-16 Feed 0 21259	X0-00 Feed 0 3104	Z2-12 Feed 0 3850	Z4-16 Feed 0 21383
11	X1-08 (3.1) 0' 3642 5476	Y0-00 Feed 0 3325	X2-12 Feed 0 3429	Y4-16 (3.0) 0' 3104 3104	Y2-12 Feed 0 3567	Y0-00 Feed 0 3104	Z0-00 Feed 0 15270	
12	Y1-08 (7.1) 0' 3076 3676	X0-00 Feed 0 3005	Z4-16 Feed 0 21383	Y2-12 Feed 0 3429	Y1-08 Feed 0 3567	Z1-08 Feed 0 3973	X4-16 Feed 0 4033	
13	X1-08 (5.2) 0' 3076 3271	Z4-16 Feed 0 21383	X0-00 Feed 0 3104	Y0-00 Feed 0 3104	Z1-08 Feed 0 3973	X1-08 Feed 0 4033		
14	Z1-08 Feed 0 3973	Y4-16 Feed 0 3604	Z2-12 Feed 0 3850	Z0-00 Feed 0 15270	X4-16 Feed 0 4033			
15	Y4-16 (3.1) 0' 3104 3104	Z0-00 Feed 0 15270	X4-16 Feed 0 4033					Region #1A Shuffle Rotation B/C Burnup B/C Burnup

그림 5. CE 연료 평형노심 장전모형(Gadolinia)

	H	J	K	L	M	N	P	R
8	X-98 (4.4) 0' 4034 5323	X-98 (6.1) 0' 3474 4911	Z-98 Feed 0 21815	X-98 (5.1) 20' 3654 5374	Y-98 (7.1) 20' 2782 3664	X-98 (5.0) 20' 3589 5218	Z-98 Feed 0 20963	Y-98 (3.1) 20' 2777 3565
9	X-98 (6.1) 0' 3514 4911	Y-98 (5.0) 0' 3240 4081	Y-98 (2.0) 0' 2190 4081	X-98 (2.0) 0' 1591 3274	Y-00 Feed 0 4201	Z-98 Feed 0 21912	Y-98 (3.0) 0' 2121 3039	Z-00 Feed 0 13279
10	Z-98 Feed 0 21815	Y-98 (6.2) 0' 3182 4826	Z-104 Feed 0 21815	X-98 (4.5) 0' 3239 4514	Z-98 Feed 0 21916	X-00 Feed 0 3040	Z-98 Feed 0 18192	Y-98 (2.0) 0' 3023 4586
11	X-98 (5.1) 0' 3634 5374	Y-00 Feed 0 4201	X-98 (3.0) 0' 2186 3532	Y-104 Feed 0 4019	Y-98 (3.0) 0' 2186 3532	Y-00 Feed 0 4201	Z-00 Feed 0 15105	
12	Y-98 (7.1) 0' 3076 3676	X-00 Feed 0 3040	Z-98 Feed 0 21927	Y-98 (4.5) 0' 3240 4514	Y-48 Feed 0 17173	Z-98 Feed 0 20963	X-98 (2.0) 0' 2064 4733	
13	X-98 (5.5) 0' 3569 5218	Z-98 Feed 0 21927	X-00 Feed 0 3040	Y-00 Feed 0 4201	Z-48 Feed 0 17176	X-48 Feed 0 3536	X-98 (2.0) 0' 2064 4733	
14	Z-98 Feed 0 20963	Y-98 (5.0) 0' 3240 4081	Z-98 Feed 0 21808	Z-00 Feed 0 15107	X-98 (3.0) 0' 2186 4736			
15	Y-98 (3.1) 0' 2777 3565	Z-00 Feed 0 15270	X-98 (2.0) 0' 2064 4733					Region #1A Shuffle Rotation B/C Burnup B/C Burnup

그림 6. CE 연료 평형노심 장전모형(IFBA)

	H	J	K	L	M	N	P	R
8	X-98 (1.5) 0' 4485 5915	Z-98 Feed 0 22389	Y-48 (1.7) 0' 3676 3676	Z-98 Feed 0 22389	Y-98 (1.0) 0' 2954 4602	Y-98 (1.2) 0' 2954 4602	Z-48 Feed 0 19536	X-98 (1.0) 0' 4194 5623
9	Z-98 Feed 0 22389	Y-98 (3.0) 0' 2255 4073	X-48 (1.0) 30' 3604 4080	Y-48 Feed 0 28234	X-00 Feed 0 3104	Z-00 Feed 0 19136	Z-00 Feed 0 19136	X-48 (2.0) 0' 4077 5511
10	Y-48 (7.1) 0' 3076 3676	X-98 (2.2) 0' 4074 5328	Z-98 Feed 0 22389	Y-98 (3.0) 0' 2255 4073	Y-00 Feed 0 3104	Z-98 Feed 0 22389	Y-00 Feed 0 3104	X-98 (3.0) 0' 4077 5511
11	Z-98 Feed 0 22389	Y-48 (5.0) 0' 3240 4081	Y-98 (2.0) 0' 2190 4081	Z-98 Feed 0 22389	Z-98 Feed 0 22389	Y-98 (2.0) 0' 2190 4081	Z-48 Feed 0 19536	X-00 Feed 0 3104
12	Y-98 (4.1) 0' 2854 4402	Z-98 Feed 0 22389	Y-00 Feed 0 3104	Y-98 (2.0) 0' 2190 4081	Y-98 (4.0) 0' 3426 4386	Y-98 (4.1) 0' 2854 4402	Z-00 Feed 0 15270	X-98 (3.0) 0' 4077 5511
13	Y-98 (2.1) 0' 22389 4185	X-00 Feed 0 3104	Z-98 Feed 0 22389	Z-48 Feed 0 19536	Z-48 Feed 0 19536	Z-00 Feed 0 15270	X-98 (5.0) 0' 4573 6062	
14	Z-48 Feed 0 19536	Z-00 Feed 0 15270	Y-00 Feed 0 3104	X-00 Feed 0 3104	X-00 Feed 0 3104	X-98 (4.0) 0' 3426 4386		
15	X-98 (6.1) 0' 4194 5623	X-48 (4.2) 0' 4073 4733	X-88 (5.0) 0' 4386 5833					Region #1A Shuffle Rotation B/C Burnup B/C Burnup

그림 7. 개량연료 평형노심 장전모형(IFBA)

● 노심해석 결과

표 1 초기노심 분석 및 경제성 비교

분석 대상 분류	분석 인자					
	평균농축도 w/o	주기길이 EFPD	방출연소도 MWD/MTU	최대 FΔH	정지여유도 %	우라늄 가격 \$(x1000)
CE(.382") Gd	2.6844	435.7	16338	1.503	7.3	44,035
CE(.382") IFBA	2.6807	438.2	16422	1.472	7.0	438,97
개량연료(.374") IFBA	2.4876	439.7	16198	1.546	7.8	39,972

표 2 평형노심의 분석 및 경제성 비교

분석 인자 분석 대상 분류	평균농축도 w/o	공급집합체 갯수/주기	주기길이 EFPD	방출연소도 MWD/MTU	최대 FAH	정지여유도 %	우라늄 가격 \$(x1000)
CE(.382") Gd	4.3671	60	441.6	48963	1.503	7.1	28,610
CE(.382") IFBA	4.2928	60	442.9	48959	1.428	7.0	27,938
개량연료(.374") IFBA	4.1288	60	450.5	48962	1.582	7.2	27,045

- i) FAH 제한치 : CE - 1.550, 개량연료 - 1.650
- ii) 정지여유도 제한치 : 6.5%
- iii) 원광비 \$ 12.00/ lb-U₃O₈, 변환비 \$ 6.50/kg U_{nat}., 농축비 \$ 125.00/kg-SWU

이상의 초기노심 3가지 경우와 평형노심 3가지 경우의 경제성 분석결과를 보면 초기노심 평형노심 모두 개량연료의 설계사양에 IFBA를 사용할 경우가 우라늄의 가격에서 훨씬 유리한 것으로 나타났으며, 주기길이의 측면에서도 초기노심은 4 EFPD 그리고 평형노심은 9 EFPD가 긴 것으로 나타났다. 또한 CE의 설계사양에 IFBA를 사용할 경우에도 Gadolinia를 사용할 경우보다 우라늄 가격에서 다소 유리하나 이는 IFBA 제작비용으로 상쇄될 것이다. 그러나 이 경우에도 최소한 열적 여유도 측면에서 초기노심의 경우는 FAH가 2% 정도 그리고 평형노심에 대해서는 5% 정도가 개선되었다. 아울러 정지 여유도와 감속재 온도계수 등의 기본적인 안전성 변수들을 모든 평가대상들이 기준치를 만족시켰다. 평형노심의 경우, IFBA를 사용하여 5%의 FAH Margin을 가지고 저누출 장전모형을 찾는다면 이보다 더욱 좋은 경제성을 보일 것이다. 또한 0.382" 연료봉 외경을 갖는 CE형 연료는 낮은 H/U 비율 때문에 undermoderation되어 중성자의 이용률이 좋지 않다. ALPHA/PHOENIX/ANC 계산 결과에 따르면 0.374" 외경의 개량연료는 0.382" 외경의 CE형 연료보다 주기길이가 3.5% 길게 나타났다.

원전연료의 가연성 흡수체로서 Gadolinia와 IFBA를 사용할 경우 집합체내에서의 출력분포의 최대치가 5-10K MWD/MTU에서 Gadolinia의 경우가 IFBA의 경우보다도 최소한 4-5% 정도 높다. 집합체내에서의 최대출력은 결과적으로 주기중 임계열속(CHF)을 증가 시켜 열적 여유도를 감소시키므로 IFBA가 Gadolinia에 비해서 열적여유도 측면에서 장점이 있다. 또한 Gadolinia의 경우 주기말에서도 연소되지 않고 일부가 존재하거나 복잡한 연쇄반응으로 중성자를 계속적으로 흡수하므로써 중성자 경제성에 영향을 주어 주기길이를 감소시킨다

V. 결론

표준형 원전의 장주기용 개량연료로서 CE 원전연료 설계사양에 Gadolinia를 사용할 경우와 개량연료 설계사양(0.374")에 IFBA를 사용할 경우 초기노심에서 우라늄 가격은 4 백만 달러, 주기길이는 4 EFPD 차이가 나고 평형노심에서는 우라늄 가격은 157 만 달러 주기길이는 9 EFPD의 차이가 난다. 따라서 표준형

원전의 장주기/고연소 원전연료서는 개량연료의 설계사양(0.374")에 IFBA를 사용할 경우 원전연료 주기비용을 절감할 수 있으며, 열적 여유도 측면에서도 10% 정도의 증가를 기대할 수 있으므로 원전의 안전성 및 Operational Flexibility를 증가시킬 수 있다.

이 경제성 평가 결과는 Uranium의 현물 시장 가격 \$ 12.00/ lb-U₃O₈ 을 기준한 것으로 만약 현재 한전의 장기 도입 계약 가격인 \$ 25.00/ lb-U₃O₈ 을 기준한다면 개량연료에 의한 주기비 절감은 더욱 커질 것이다. 결론적으로 표준형 원전의 개량연료로서는 다음표와 같은 사양을 갖는 연료가 적합한 것으로 판단된다.

표 3 표준형원전 개량연료 개발사양

연료 직경	0.374 inch
가연성 흡수체 종류	IFBA
열여유도 개선 방안	유량혼합날개
피복관 재질	Improved Zr-4 보다 부식에 강한 재질
방출 연소도	> 50,000 MWD/MTU
축 방향 농축도 분리	상/하 저농축 UO ₂ 사용
반경방향 농축도 분리	GT/IT 주위 및 집합체 가장자리

본 표준형 원전 개량연료 개발방안 연구에서는 그 주안점이 노심설계에 의한 경제성 분석과 열적여유도 분석에만 있었다. 그러나 개량연료의 개발은 사고에 대한 안전성 분석, 연료봉 및 집합체의 기계적 건전성 해석 그리고 열수력적 해석 등이 포함되는 대규모의 과제이다. 따라서 보다 경제적이고 안전성이 높은 표준형 원전의 개량연료의 개발은 반드시 필요하며, 표준형원전 개량연료의 개발시에 본 연구에서 얻은 결과들은 좋은 참고가 될 것이다.

참고문헌

1. "Nuclear Design Report for Yonggwang Unit 3 Cycle 1," Korea Atomic Energy Research Institute and ABB-CE INC, Dec. 1994.
2. "METCOM," Westinghouse Electric Corporation.
3. "ANC-Advance Nodal Code, User's Manual," Westinghouse Electric Corporation.
4. "PHOENIX-P, User's manual," Westinghouse Electric Corporation.
5. "ALPHA, User's manual," Westinghouse Electric Corporation.