

## 고리 1호기 Fuel Management를 통한 Vessel Fluence 최소화 방안 연구

권태제, 이교섭, 양승근, 정선교  
한국원전연료(주)

이상희, 박현택, 전휘수, 김용배  
한국전력공사

### 요 약

원자로 vessel 수명에 영향을 미치는 fluence를 감소시키는 방안을 고리 1호기에 대하여 검토하였다. 적용 방법은 하드웨어 변경과 향상된 설계 방법론 적용등으로 확보한 열적여유도를 정량화하고, 이를 설계상의  $F_{SH}$  제한치 상향조정에 활용하여 상대적으로 저누출 장전모형을 선정하므로써 vessel fluence를 줄이도록 하였다. 분석 결과, 적절한 열적여유도를 보유하고도  $F_{SH}$  제한치를 7% 정도 높일 수 있는 것으로 밝혀졌으며, 이렇게 상향 조정된 제한치를 사용할 경우 핵연료 이용을 향상과 함께 vessel fluence의 감소 효과를 얻어 vessel의 수명 연장에 도움을 줄 수 있는 것으로 밝혀졌다.

### 1. 서 론

고리 1호기는 2-loop, 웨스팅하우스 가압경수로로서 1978년 최초로 14x14 STD 연료가 장전된 이래 8주기부터 OFA 연료가 사용되었으며, 11주기 부터는 KOFA 연료가 장전되는등 다양한 연료의 연소 경험을 가지고 현재 15주기가 운전중에 있다. 1997년 부터 가동될 16주기 부터는 3.8w/o의 농축도를 갖는 OFA 연료 33%가 재장전되어 약 346 EFPD의 평형 주기길이로 운전될 예정이다. 가연성독봉으로는 WABA가 사용되며, 16/17주기 계획 예방정지 기간에는 증기발생기가 교체될 예정으로 있다.

고리 1호기는 국내에서 가장 오래되어 타 발전소에 비하여 그림 1에서 보듯이 상대적으로 반응도가 높은 신연료가 노심의 최외각에 배치되어 연료 이용율이 떨어질 뿐만 아니라 이에따라 vessel에 조사되는 fluence가 많아 수명에도 악영향을 미치고 있다. 이와 같이 연료를 장전할 수 밖에 없는 이유는 표1에 나타낸 바와 같이 낮은 설계제한치가 어느정도 개량화된 연료 장전과 설계방법론의 발달에도 불구하고 지금까지 계속 적용되고 있기 때문이다.

국제적으로는 고성능 연료의 장전과 향상된 설계방법론 적용 및 최적노심관리를 통해 vessel fluence를 적정선 이하로 줄여 수명을 연장시키기 위한 연구가 많이 수행되고 있다[1,2,3]. 본 연구에서는 고리 1호기에 OFA 연료 장전과 증기발생기 교체에 즈음하여 향상된 설계 방법론 적용으로  $F_{SH}$  제한치 상향 조정 가능성을 알아보고, 이를 이용한 최적노심관리를 통해 vessel fluence를 최소화하여 vessel의 수명 연장에 기여할 수 있는 방안을 알아보도록 한다.

### 2. 본 론

운전중 발생할 수 있는 Pressurized Thermal Shock (PTS) event 조건에서 vessel 손상의 주요인은 속중성자 조사로 인한 용접부위나 흠이 있는 곳의 embrittlement이다. 따라서, 중성자 조사로 인한 Reactor Pressure Vessel (RPV)의 embrittlement가 수명에 영향을 미치는 가장 중요한 인자이므로 embrittlement 현상을 줄여 vessel 수명을 연장시키기 위해서는 반경 방향의 중성자 누출을 줄여 vessel fluence를 최소화 하는 것이 가장 효과적이다. 이를 위한 최선의 방법은 장전모형 선정시 가능한 저누출 모형을 선정하는 것이다.

## Motivations

- 열적 여유도 증가 : 혼합유동날개가 부착된 OFA 연료의 장전과 노후 열교환기 교체로 인한 관막음을 감소로 냉각수의 유동율증가 및 발달된 열수력적 설계 방법론(RTDP : Revised Thermal Design Procedure)을 적용할 경우 16% 이상의 열적 여유도를 확보하게 된다. 따라서, 적절한 여유도를 보유하고 나머지를  $F_{JH}$  제한치를 높이는데 이용할 경우 제한치를 약 7% 정도 상향조정할 수 있다.
- $F_Q$  여유도 확보 : 16주기부터 OFA 연료 장전 계획으로 수행된 LOCA 해석 결과[4]  $F_Q$  제한치가 상향 조정되었을 뿐만 아니라 가연성 흡수봉 길이의 최적화[5]를 통해 현재 약 15% 이상의 여유도를 확보하고 있는 상태이다. 따라서,  $F_{JH}$  제한치를 7% 정도 올릴 경우  $F_Q$ 에 대한 여유도가 여전히 5% 이상될 것으로 예상된다.

이렇게 획득한 열적 여유도 및  $F_Q$ 를 운전여유도 증대를 위해 RAOC (Relaxed Axial Offset Control)을 도입하는등의 방안이 있을 수 있으나, 여기서는 수명연장 관점에서 vessel fluence를 감소시키기 위한 저누출 장전모형 선정에 이용하는 방안을 검토하기로 한다.

## 연료주기 분석 (Fuel Cycle Analysis)

고리 1호기는 vessel 구조상 용접 부위가 360°에 걸쳐 있기 때문에 fluence를 줄이기 위해서는 노심외곽에 배치된 연료다발의 출력(즉, 중성자 누출)을 고루 줄이는 것이 중요하다. 이를 위해 다음과 같은 경우에 대해 평형노심 장전모형을 선정하여 그 효과를 알아보았다. 그림 2에는 각 Case에 대한 노심외곽 부분의 연료장전 모형을 보여주고 있다.

- 현행연료 inventory (3.8 w/o 40 OFA 재장전) 및 현행설계제한치 유지
  1. Case 1 : 전통적인 장전모형
- 현행연료 inventory (3.8 w/o 40 OFA 재장전) 및 상향조정된 설계제한치 이용
  2. Case 2 : Ultra-Low-Low-Leakage Loading Pattern (UL4P)
  3. Case 3 : Low-Low-Leakage Loading Pattern (L4P)-(3,6) 및 (6,3)에 Once burnt 연료배치
  4. Case 4 : L4P + Hf - (3,6) 및 (6,3) 위치의 Once burnt 연료에 Hf (8 rods/FA) 사용
  5. Case 5 : L4P + Pyrex - (3,6) 및 (6,3)의 Once burnt 연료에 Pyrex (16 rods/FA) 사용
  6. Case 6 : L4P + Hf - (3,6) 및 (6,3) 위치에 신연료를 배치하고 Hf 사용
- 최적 연료 inventory 및 상향조정된 설계제한치 이용
  7. Case 7 : UL4P - 4.0 w/o 36 OFA (with WABA) 사용

## 8. Case 8 : UL4P - 4.0 w/o 36 OFA (with IFBA) 사용

### 분석방법

각 형태의 노심은 PHOENIX-P[6]와 ANC[7] 코드를 이용하여 평형노심의 3D Quarter Core 모델을 생산하였다. Vessel fluence 계산은 DOT[8] 코드를 이용하였다.

### 계산결과

각 분석 Case의 중요 결과는 표 2에 정리하였으며 상세 계산결과는 다음과 같다. Cases 2,6,7은 아래 기술한 이유로 계산결과를 상술하지 않았다.

Case 1 : 현행 설계 제한치를 그대로 적용했을 경우의 평형노심으로 주기 길이는 약 346 EFPD이다. 노심이 상대적으로 작고 선형출력밀도가 높아 반경방향 출력분포를 낮은 설계 제한치 이내로 유지시키기 위해서는 그림 2에서와 같이 일부 신연료를 최외각에 배치하지 않을 수 없는 상황이다. 현재까지 이와 유사한 장전모형의 사용으로 인해 많은 중성자의 조사를 받아왔던 vessel 특정부분의 fluence를 수명연장 관점에서 감소시켜줄 필요가 있다.

Case 2 : 이 경우부터는 모두 새로 설정한 설계제한치( $F_{JH}$ )를 적용하였다. Case 2는 최외각에 모두 2번이상 연소된 연료를 배치한 초저누출 장전모형(UL4P)인데 상향 조정된  $F_{JH}$  제한치보다 더 높은 제한치를 필요로한다. 이는 반응도가 높은 신연료가 노심내부에 장전되는 반면에 반응도가 낮은 연료가 대부분 노심외곽에 배치되어 노심내부와 외곽쪽의 심한 출력편차 조절이 용이하지 않기 때문으로 판단된다. 또한 제어봉 위치에 가연성 흡수봉을 사용할 수 없는 점도 반경방향 출력제어에 큰 제약이 되고 있다.

Case 3 : Case 2의 (3,6), (6,3) 위치에 twice burnt 연료대신 once burnt 연료를 배치시킨 경우로써 (그림2), 이때 전통적인 장전모형 (Case 1)에 비해 외곽연료 평균출력이 24.4 % 만큼 감소하였으며, 주기길이는 약 353 EFPD로써 7 EFPD를 더 연소시킬 수 있는 것으로 나타났다 (표 2).

Case 4 : Case 3은 (3,6), (6,3) 위치에 once burnt 연료가 사용되어 이 위치의 출력이 만족스러울 만큼 감소되지는 않은 상태이다. 따라서 이 위치의 중성자 누출을 최소화하기 위한 방안으로 Hf 봉을 사용하였다(그림2). Hf은 Ag-In-Cd와 반응도 제어능이 유사하지만 swelling 관점에서 Ag-In-Cd 보다는 우수한 것으로 알려져 있다. 노심 전체의 반경방향 출력제어가 가능한 범위내에서 한 연료다발당 8개의 Hf 봉이 사용되었다. 계산결과 Case 1과 주기길이는 거의 같지만 외곽 연료의 평균 출력은 30% 정도 감소되었음을 알 수 있다 (표 2).

Case 5 : Case 4의 Hf 대신 Pyrex를 사용한 경우이다(그림2). Pyrex는 가연성 흡수봉으로도 쓰이는 물질로 반응도가 Hf 보다는 작지만 노심이 연소됨에 따라 같이 연소되는 특성을 가지고 있다. 따라서 표 2에서 보는 바와 같이 외곽 연료의 평균 출력 (즉 vessel fluence) 감소측면에서는 Hf을 사용하는 경우가 다소 우수하지만 (외곽 연료의 평균출력 28.5% 감소) 첨두출력 제어와 주기비 측면에서는 Pyrex를 사용한 경우가 유리한 것으로 나타났다.

Case 6 : (3,6), (6,3) 위치에 Hf을 장착한 신연료를 배치한 경우로써 Once burnt 연료를 배치한

경우(Cases 4, 5) 보다 주기비 관점에서 비 경제적이다.

Case 7 : 지금까지는 현행 연료 Spec(40 feed @3.8 w/o)을 적용하였으나 Hf이나 Pyrex 붕을 사용하지 않고도 노심의 중성자 누출을 현저하게 줄이고 연료이용율을 극대화 시키기 위한 연료 Spec을 정하였다. 현행 주기 길이를 유지하면서 이 목적에 부합하는 최적 Spec은 신연료수를 36 개로 하면서 4.0w/o 정도의 농축도를 사용하는 것이다. 가연성 흡수봉으로 WABA봉을 사용할 경우 제어봉 위치에 가연성 흡수봉을 포함하는 신연료 배치상의 제약 때문에 초저누출 장전모형(UL4P) 선정은 더 높은 설계제한치를 필요로 한다.

Case 8 : 제어봉 위치에 제약을 받지 않는 일체형 가연성 흡수봉 (이 경우 IFBA)을 사용하여 UL4P를 달성하였다(그림 2). 외곽 출력 감소율은 28.6%로 Pyrex 붕을 사용한 Case 5와 같은 정도로 fluence를 충분히 감소시킬 수 있고, 이와 더불어 방출연소도를 약 46,400 MWD/MTU 까지 증가시킬 수 있어 경제성 측면의 극대화를 꾀할 수 있다.

L4P 및 UL4P의 중성자 누출이 가장 높은 위치인 (3,6), (6,3)의 연소도에 따른 평균출력을 그림 3에 표시했다. 이 그림은  $F_{JH}$  상향조정으로 중성자 누출이 많이 감소할 것임을 보여주고 있다. 속중성자의 fluence 계산결과 (3,6) 위치에 해당하는 22.5° 부근의 vessel 내벽 fluence가 Cases 3, 4의 경우 Case 1에 비해 각각 14.9% 및 20.2% 만큼 감소하였다(표 2). Diagonal 및 노심전체에서도 fluence의 현저한 감소를 볼 수 있다.

### 3. 결 론

확보된 열적 여유도를 이용하여 상향조정 가능한  $F_{JH}$  제한치를 설정하고, 이를 이용하여 저누출 장전모형을 사용하는 것만으로 vessel fluence를 많이 줄일 수 있으며, 부수적으로 경제적인 이득을 얻을 수 있는 것으로 밝혀졌다. 이때 Hf이나 Pyrex붕을 사용하는 경우 독물질 삽입으로 인한 반응도 손실과 제작 또는 구매로 인한 비용 및 일정소요를 감수해야 하기 때문에 수명과 관련하여 vessel fluence를 적정선 이하로 줄여야만 된다는 연구결과가 없는 한 이 독물질 사용이 경제성이 있는가 여부를 판단하기는 쉽지 않을 것으로 사료된다. 이러한 독물질을 사용하지 않고 Case 8과 같이 batch 크기를 줄이면 노심 외곽에 모두 반응도가 작은 연료를 배치할 수 있어 (UL4P) 핵연료 이용율을 크게 높일 수 있을 뿐만 아니라 이것만으로 vessel fluence 감소 측면에서 큰 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

### Design Impacts 및 Future works

지금까지 살펴본 모든 장전모형은 노심 반응도가 기존노심에 비해 큰 차이가 없기 때문에 (주기길이가 유사) 특별히 설계에 미치는 영향은 없지만  $F_{JH}$  상향 조정으로 인해 실제 설계에 적용하기 위해서는 다음과 같은 사항의 고려가 필요하다. 새로운  $F_{JH}$  제한치를 사용한 경우 LOCA  $F_Q$  제한치와 충분히 여유가 있지만 (약 10% 정도) LOCA 해석에 입력 자료중 연료 다발별 평균 출력중 최대값 ( $\bar{P}_{max}$  : maximum assembly average power)으로 기존의  $F_{JH}$ 에 상응하는 낮은 값이 사용되었으므로 상향 조정될  $F_{JH}$ 에 부합하는  $\bar{P}_{max}$ 를 사용하여 LOCA의 재해석이 필요하다. 또한 가능성에 대한 타당성 조사는 이미 수행되었지만 DNB 분석과 경우에 따라서는 Core DNB limit 및 AO(Axial Offset) limit의 변경과 그에 따른 setpoint 개정이 필요할 수도 있다. 더구나 Case 8의 경우 핵연료 이용율과 열적여유도를 최적화하는 axial blanket 사용 여부와 그의

농축도를 결정할 필요가 있고 특히, 농축도 증가로 인해 사용후연료 저장조의 임계도 분석이 요구된다.

<Fluence 계산에 도움을 주신 한양대 원자력과 박사과정 김종오군에게 감사드립니다.>

#### 4. 참고문헌

1. D.K. Lee, "Economic Evaluation of Fuel Management Flux Reduction Options for Zion," Trans. Am. Nucl. Soc., **63**, 410 (1991)
2. G.A. Rowan et al., "Life Extension of the St. Lucie Unit 1 Reactor Vessel," Trans. Am. Nucl. Soc., **63**, 434 (1991)
3. S. Yang, R.J. Chin, "The Role of Fuel Management in Reactor Vessel Life Extension," Trans. Am. Nucl. Soc., **70**, 380 (1994)
4. Reload Transition Safety Report for Kori Unit 1, KNFC/Westinghouse, May 1995
5. 고리 1호기에 대한 가연성 독봉봉의 최적길이 결정, KNFC, June 1995
6. Ngyeny, T.Q. et.al., "Qualification of the PHOENIX-P/ANC Nuclear Design System for Pressurized Water Reactor Cores," WACP-11596-P-A, June 1988
7. Liu, Y. S. et.al., "ANC-A Westinghouse Advanced Nodal Computer Code," WCAP-10965-P-A, December 1985
8. W.A. Rhades et al., "The DOT-IV Two Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Space-Dependent Mesh and Quadrature," ORNL/TM-6529 (Jan 1979)

표 1. 주요 발전소의 특성 비교

항목	2-loop (14x14 연료)		3-loop (17x17 연료)
	고리 1호기	Point Beach	고리 4호기
노심열출력 (MWt)	1723.5	1518.5	2775
선형출력밀도(kw/ft)	6.46	5.69	5.43
$F_{DH}$ 제한치	1.435	1.574	1.528
$F_Q$ 제한치	2.35	2.50	2.60
사용 연료	OFA	OFA	V5H
가연성독봉질	WABA	IFBA	WABA

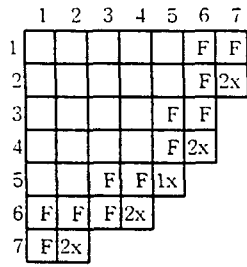
표 2. 각 Case 별 분석 결과 요약

Case	주기길이 MWD/MTU (EFPD)	# of BA	Max $F_{DH}$ <sup>N</sup> Thru Depletion *	Average Power		Vessel Fluence Reduction (%)			Discharge BU (MWD/MTU)	Discharge BU Gain
				주기평균 <sup>a</sup>	감소율(%)	22.5°	45°	전체		
1	13820 (346.4)	208 WABA	1.435	0.5675	-	-	-	-	41813	-
3	14080 (352.9)	192WABA	1.514	0.4288	24.4	14.9	27.0	13.2	42558	745
4	13810 (346.1)	192 WABA (64 Hf)	1.542	0.3973	30.0	20.2	29.8	15.7	41771	-42
5	13930 (349.1)	192 WABA (128 Pyrex)	1.537	0.4055	28.5	19.2 <sup>κ</sup>	-	15.1 <sup>κ</sup>	42150	337
8	13820 (346.4)	832 IFBA	1.535	0.4054	28.6	-	-	-	46429	4616

\* 제어봉 삽입한계 고려

# 누출면수를 고려한 노심 최외각 연료들의 cycle averaged power & 추정치

고리 1호기 15주기



고리 4호기 10주기

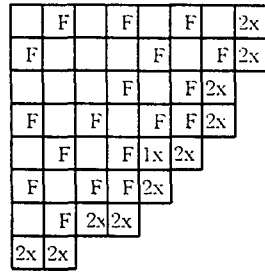
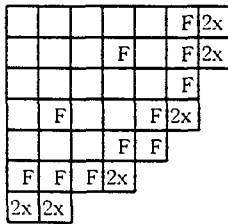
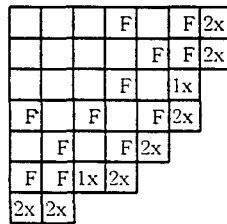


그림 1. 국내 2-loop와 3-loop의 현행 장전모형 비교

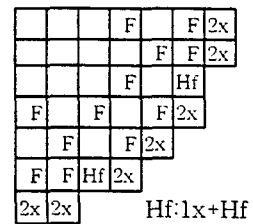
Case 1. 현행 LP



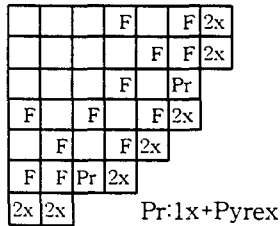
Case 3. L4P



Case 4. L4P + Hf



Case 5. L4P + Pyrex



Case 8. UL4P

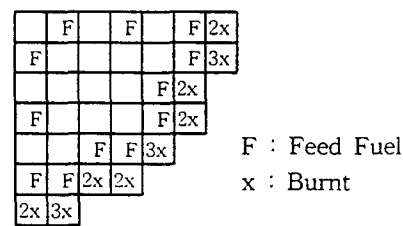


그림 2. 각 분석 Case 별 장전모형

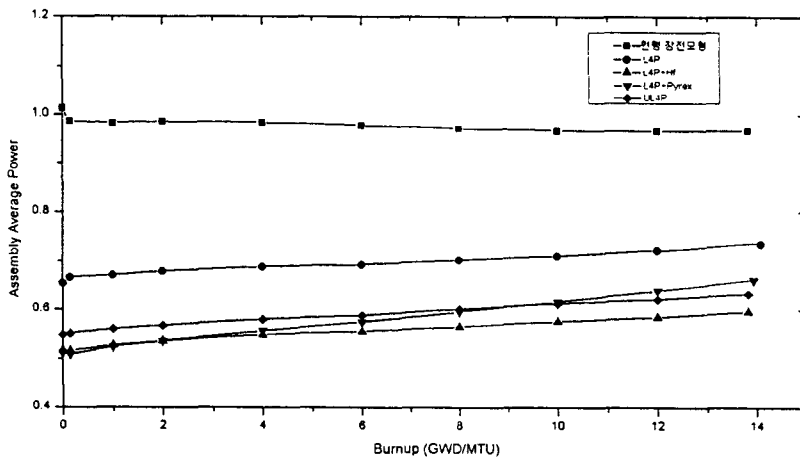


그림 3. Assembly Average Power with Burnup (location 3,6)