

# 1000MW<sub>e</sub>급 동력용가압경수로의 3차원다순환 로심연소계산에 대한 연구

허일문, 서철, 리혜련

동력용원자로들에서는 초기연료장입으로부터 평형순환에 도달할 때까지 여러차례의 과도순환을 거치게 된다. 따라서 초기순환으로부터 평형순환까지의 다순환연소해석을 진행하여야 한다.

우리는 자체로 가압경수로물리계산체계 《부흥》[1-4]을 리용하여 1000MW<sub>e</sub>급 동력용가압경수로의 3차원다순환연소계산을 진행하였다.

## 1. 1000MW<sub>e</sub>급 동력용가압경수로의 로심자료

전기출력이 1 000MW<sub>e</sub>인 동력용가압경수로는 177개의 연료집합체로 구성되어있다.[6] 그림 1과 표 1에 1, 2, 3, 4순환에서 로심의 연료집합체배치(1/4대칭구역)와 개별적연료집합체들의 구성자료를 주었다.

D	C	B					
C1	C1	D2	D	B			
B1	B2	A	D2	D1	C		
B2	A	C1	A	C1	D1	B	
A	D2	A	C1	A	D2	D	
B2	A	C1	A	C1	A	D2	B
B1	B	A	D2	A	B2	C1	C
A	B1	B2	A	B2	B1	C1	D

1순환

B2	E	D1					
E2	B	D2	E	D2			
B1	D2	E3	B2	E1	B		
B2	B	C	D	C1	E1	D2	
E3	C1	C1	B1	D	B2	E	
C1	C1	E3	C1	C	E3	D2	D1
D	C	C1	C1	B	D2	B	E
A	D	C1	E3	B2	B1	E2	B2

2순환

D	F	D2					
F1	D2	F1	F	D1			
C1	E	B	D	F1	C		
E3	C	E1	D	C1	F1	D1	
C1	F2	B	C1	D	D	F	
E3	D2	E3	B	E1	B	F1	D2
E2	E3	D2	F2	C	E	D2	F
C1	E2	E3	C1	E3	C1	F1	D

3순환

E2	G	D2					
G1	E	G1	F	D1			
E3	F1	C	F	G1	C		
F1	D	G2	E	E3	G1	D1	
D	F1	D2	E2	E	F	F	
G2	F1	F2	D2	G2	C	G1	D2
E3	E3	F1	F1	D	F1	E	G
C1	E3	G2	D	F1	E3	G1	E2

4순환

그림 1. 개별적운영순환에서 로심의 연료집합체배치(1/4대칭구역)

표 1. 매 운영순환에서 로심에 배치된 연료집합체의 구성자료

순환	집합체 종류	로심에서 집합체수/개	연료농축도/%	집합체에서 연료봉수/개	집합체에서 흡수봉수/개	가연성 천연UO <sub>2</sub> 에서 Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 의 질량%/%
1	A	45	1.28	236		
	B	20	2.34	236		
	B1	8	2.34/1.28	176/52	8	4
	B2	16	2.34	232	4	4
	C	12	2.84/2.34	184/52		
	C1	32	2.84/2.34	176/52	8	4
	D	12	3.34/2.84	184/52		
	D1	8	3.34/2.84	176/52	8	4
	D2	24	3.34/2.84	128/100	8	4
	E	16	4.6/4.1	184/52		
2	E1	8	4.6/4.1	176/52	8	6
	E2	4	4.1/3.5	176/52	8	6
	E3	16	4.1/3.5	172/52	12	6
	F	16	4.3/3.8	184/52		
3	F1	20	4.3/3.8	176/52	8	6
	F2	8	4.3/3.8	172/52	12	6
	G	8	3.9/3.4	184/52		
4	G1	20	3.9/3.4	176/52	8	6
	G2	12	3.9/3.4	172/52	12	6

## 2. 계 산 결 과

우리는 위에서 소개된 동력용가압경수로의 4개의 운영순환에 대한 3차원연소계산을 진행하였다. 9가지 종류의 연료집합체로 구성된 1순환초기 로심의 각이한 운영상태에서 유효증식결수계산결과를 표 2에 주었다.

표 2. 1순환초기 로심의 각이한 운영상태에서 유효증식결수계산결과

상태	선행연구[5]값	계산값	상대편차/%
랭상태(20℃), 0%	1.215	1.219	0.33
고온령출력(296℃), 0%	1.161	1.165	0.34
고온만출력(312℃), 0%	1.138	1.141	0.26

표 2에서 보는바와 같이 유효증식결수의 계산값과 선행연구[5]값과의 상대편차는 불과 0.26~0.34%이다.

다음으로 고온만출력상태에서의 1순환초기와 1순환마감에서의 집합체별평균출력분포 계산결과를 그림 2와 3에 보여주었다.

그림 2와 3에서 보는바와 같이 두 경우에 출력분포에서 선행연구[5]값과의 최대상대편차는 각각 3.23, 5.45%이다.

순환연소도  $13.75 \text{ GW} \cdot \text{d}/t_U$ 에 해당하는 순환길이(만출력작업일수)는 371일로서 선행연구자료(368일)(순환연소도  $13.65 \text{ GW} \cdot \text{d}/t_U$ 에 해당함)에 비해 불과 3일(~0.8%) 차이난다.

선행연구값 계산값 상대편차/%	1.12 1.13 0.89			0.75 0.76 1.33											
				1.21 1.20 -0.83		1.20 1.21 0.83		0.63 0.64 1.59							
				1.08 1.07 -0.93		0.82 0.80 -2.44		1.33 1.33 0.00		1.12 1.13 0.89					
		1.04 1.03 -0.96		0.73 0.72 -1.37		1.13 1.12 -0.88		0.87 0.86 -1.15		1.22 1.24 1.64		0.62 0.64 3.23			
		1.06 1.05 -0.94		0.74 0.73 -1.35		1.15 1.15 0.00		0.80 0.79 -1.25		1.24 1.25 0.81		1.27 1.26 -0.79		0.95 0.86 1.05	
0.68 0.67 -1.47		0.88 0.87 -1.14		1.04 1.06 1.92		0.76 0.75 -1.32		1.14 1.15 0.88		1.07 1.06 -0.93		1.31 1.29 -1.18		1.12 1.13 0.89	

그림 2. 1순환초기 고온만출력(림계붕소농도 0.105 4%)상태에서의 집합체별평균출력분포

선행연구값 계산값 상대편차/%						0.69 0.72 4.35									
						1.18 1.20 1.69		1.10 1.12 1.82		0.57 0.60 5.26					
						1.20 1.20 0.00		0.96 0.94 -2.08		1.20 1.22 1.67		0.91 0.95 4.40			
		1.20 1.18 -1.67		0.96 0.92 -4.17		1.19 1.20 0.84		0.93 0.92 -1.08		1.08 1.10 1.85		0.55 0.58 5.45			
		1.14 1.11 -2.63		0.96 0.91 -5.21		1.26 1.24 -1.59		0.95 0.92 -3.16		1.12 1.13 0.89		1.11 1.13 1.80		0.76 0.78 2.63	
0.95 0.90 -5.26		1.09 1.05 -3.67		1.14 1.11 -2.63		0.96 0.91 -5.21		1.13 1.13 0.00		1.10 1.09 -0.91		1.14 1.15 0.88		0.84 0.87 3.57	

그림 3. 1순환마감(연소도 13.75GW·d/t<sub>U</sub>, 림계붕소농도 1.19·10<sup>-3</sup>%)에서의 집합체별평균출력분포

그림 1에 보여준 연료교체방안에 따라 2, 3, 4순환의 로심에 대한 연소계산을 진행하였는데 2, 3순환의 마감에 로심에서 집합체별평균출력분포계산결과를 그림 4와 5에 보여주었다.

그림 4와 5에서 보는바와 같이 선행연구자료[5]값에 비한 최대상대편차는 각각 7.84, 7.05%로서 계산이 충분한 정확도를 가진다는것을 보여준다.

각이한 운영순환에서 연소도에 따르는 림계붕소농도의 변화를 그림 6에 보여주었다.

그림 6에서 보는바와 같이 1순환의 경우 크세논평형해독에 도달한 이후에 Gd흡수체의 연소효과로 하여 연소도가 증가함에 따라 림계붕소농도가 초기에 약간 증가하는 경향을 보이다가 서서히 감소하기 시작하며 Gd가 연소됨에 따라 선형에 가까운 감소특성을 가진다. 나머지 운영순환들에서는 크세논평형해독이후에 림계붕소농도가 거의 선형적으로 감소한다.

선행연구값 계산값 상대편차/%	1.01				0.52 0.52 0.00		
	1.02				0.99 0.97 -2.02		1.25 1.20 -4.00
	0.99						0.51 0.53 3.92
			0.90 0.90 0.00		1.12 1.11 -0.89		0.96 0.96 0.00
							1.07 1.10 2.80
			1.40 1.34 -4.29		0.99 1.00 1.01		1.10 1.09 -0.91
							1.43 1.39 -2.80
							0.94 0.96 2.13
							0.51 0.55 7.84
			1.07 1.05 -1.87		0.99 1.01 2.02		1.01 1.02 0.99
							1.05 1.05 0.00
							1.05 1.08 2.86
							1.01 1.00 -0.99
							0.94 0.97 3.55
			0.82 0.78 -4.88		1.09 1.08 -0.92		0.99 0.99 0.00
							1.41 1.35 -4.26
							0.94 0.96 2.13
							0.91 0.92 1.10
							1.34 1.32 -1.49
							0.63 0.65 3.17

그림 4. 2순환마감에서의 집합체별출력분포

선행연구값 계산값 상대편차/%	1.04				0.49 0.48 -2.04		
	1.02				0.90 0.87 -2.14		1.17 1.09 -6.84
	0.92				0.95 0.95 0.00		1.04 1.02 -1.92
	0.88 0.89 1.14		1.30 1.27 -2.31		0.94 0.94 0.00		1.25 1.20 -4.00
	1.11 1.14 2.70		0.93 0.93 0.00		1.31 1.31 0.00		0.91 0.92 1.10
	0.89 0.94 5.62		1.40 1.36 -2.86		0.91 0.93 2.65		1.34 1.29 -3.73
	1.13 1.18 4.42		0.91 0.93 2.20		0.63 0.65 3.17		

그림 5. 3순환마감에서의 집합체별출력분포

원래 매 순환에 새로 장입되는 연료집합체가 한가지 종류로 고정된 경우에는 3 혹은 4순환이후부터 순환과정의 반복되어 평형순환에 도달하게 된다. 그러나 우리의 경우에는 매번 서로 다른 종류의 집합체들을 로심에 장입하였으므로 곡선들이 완전히 일치하지 않는다.

한편 연소도에 따르는 림제붕소농도와 감속재온도결수의 변화특성을 대비하여 보면 유사한 경향성이 나타난다는 것을 알 수 있다. (그림 7) 그것은 감속재온도결수가 감속재(랭각재)에 포함된 붕소의 농도와 밀접히 관계되기 때문이다. 랭각재속의 붕소함량이 높을수록 감속재온도결수의 절대값이 작아지며 지어 어떤 한계농도이상에서는 부호가 +로 되어 고유안정성이 보장되지 않는다. 연소가 심화됨에 따라 여유반응도보상에 필요한 림제붕소농도값이 감소하며 그에 따라 감속재온도결수의 절대값이 증가한다.

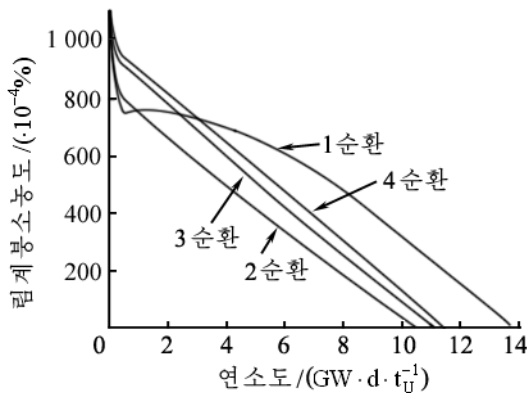


그림 6. 연소도에 따르는 림제봉소  
농도의 변화

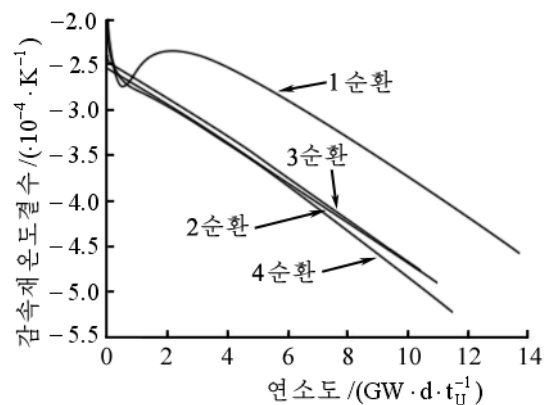


그림 7. 연소도에 따르는 감속재  
온도계수의 변화

연소결음(림제탐색주기)은  $250 \text{ GW} \cdot \text{d} / t_U$  로 하였으며 4개 순환에 대한 전체 계산시간은 동작주파수와 주기억이 각각 3.4GHz , 4GB인 Core i3 컴퓨터를 리용한 경우 3 287s이다.

## 맺 는 말

우리는 3차원연소해석과 열수력학적귀환, 림제탐색기능을 가진 가압경수로물리계산체계 《부흥》을 리용하여  $1000\text{MW}_e$ 급 동력용가압경수로의 1, 2, 3, 4순환에 대한 3차원로심연소계산을 진행하였다. 계산결과는 선행연구결과와 거의 일치한다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 53, 6, 81, 주체96(2007).
- [2] 허일문; 조선민주주의인민공화국 과학원통보, 5, 21, 주체98(2009).
- [3] 허일문 등; 원자력, 1, 22, 주체103(2014).
- [4] W. Wagner et al.; International Steam Tables, Springer, 189~287, 2008.
- [5] System 80+(Trademark) Standard Cessar Design Certification, Amendment 1, 1900, DOE/SF/165 64-T4, Vol.4.
- [6] 谢仲生; 压水堆核电站堆芯燃料管理计算及伏化, 原子能出版社, 86~104, 2001.

주체106(2017)년 7월 5일 원고접수

## 3D Multicycle Core Burn-up Calculation of $1000\text{MW}_e$ Power PWR

Ho Il Mun, So Chol and Ri Hye Ryon

By using the PWR physics calculation system “Puhung” with capabilities of 3D burn-up analysis, thermal hydraulic feedback and criticality search, we performed 3D core burn-up calculation for 1<sup>st</sup>—4<sup>th</sup> cycles of  $1000\text{MW}_e$  power PWR. The calculation results were all in good agreement with those of the reference.

Key words: PWR(pressurized-water reactor), multicycle burn-up calculation