

'96 춘계 학술발표회 논문집

한국원자력학회

가압경수로 노심관리를 가연성독물질 성능비교

조진영, 장창선, 정구영, 이정훈, 김창효

서울대학교

요 약

이 논문에서는 Gadolinia, Erbia, IFBA를 비교평가 대상 독물질로 선정하여, 영광 3/4호기 노심을 대상으로 주기길이별 독봉장전노심을 구성하여 노심핵특성인자들을 비교평가하였다. 주기길이측면에서 Gd 장전노심과 IFBA 장전노심이 비슷하게 예측되었으며 Erbia 장전노심이 약 10~13일 정도 작게 예측되었다. 냉각재 온도계수 측면에서는 Erbia 장전노심의 타 독물질 장전노심에 비해 우수하게 평가되었다. 최대 Fr 인자 측면에서는 Erbia 장전노심과 IFBA 장전노심이 거의 비슷한 수준에서 우수하게 평가되었으며 Gd 장전노심은 이 측면에서 취약한 것으로 평가되었다.

1. 서론

현행 가압경수로의 노심관리방향은 장주기 저누출모형으로 우라늄활용도를 극대화시키는 방향으로 나아가고 있다. 이러한 노심설계 경향은 노심내부에서의 높은 출력과 주기초에서의 높은 잉여반응도에 따른 높은 임계붕산농도가 예상되며 이에 따라 이를 적절히 제어할 수 있는 독물질의 보다 합리적인 사용이 요구된다. 독물질은 노심내에서 출력을 평탄화시키고 노심의 초기잉여반응도를 적절히 제어하여 노심의 MTC를 낮출 뿐만 아니라 집합체내에서는 집합체내 붕출력을 적절히 조절하여 침투 붕출력인자를 낮추는 역할을 한다.

이 논문에서는 최근 활발하게 연구되고 있는 독물질인 Gadolinia, Erbia, IFBA를 영광 3/4호기 노심에 적용하여 주기길이별 독봉장전노심의 노심핵특성인자를 도출하

고 이로부터 독물질의 최적사용 가능성을 연구하였다. Gadolinia¹² 는 KOFA 핵연료 집합체 및 영광 3/4호기 초기노심에 장전되어 사용되고 있으며 Erbia³는 ABB-CE사가 연구중에 있는 독물질로서 ABB-CE사의 차세대원자로에 장전이 예상되는 독물질이며, IFBA⁴는 W사가 연구중에 있는 독물질로서 W사 차세대 노심에 장전이 예상되는 독물질이다.

2. 독봉집합체에서의 각 독물질의 독특성 비교평가

독봉집합체에서의 독특성은 대체로 노심에서의 독물질의 독특성 분석의 근간이 된다. 이 장에서는 Erbia 및 IFBA 독봉집합체를 설계하고 각 독물질별 독특성을 무한증배계수, 첨두봉출력인자, 잔여반응도억제가, 냉각재온도계수 측면에서 분석한다.

독봉집합체 설계

Gadolinia 독봉집합체는 현 영광 3/4호기에 장전된 독봉집합체를 사용하였다. 그리고 Erbia 및 IFBA 독봉집합체는 Gadolinia 독봉집합체를 기준으로 하여 연소초기 잉여반응도억제가가 같아지도록 등가 독봉집합체를 설계하였다. 이를 위하여 먼저 Gadolinia 독봉집합체의 주기초 잉여반응도 억제가를 조사하였고 Erbia 및 IFBA의 잉여반응도억제가를 장전되는 독물질량에 따른 함수로 표시하여 이로부터 등가핵연료집합체의 필요 독물질량을 계산하였다. 그리고 이로부터 집합체내의 첨두봉출력인자가 최소가 되는 Erbia와 IFBA 독봉집합체를 설계하였다.

무한증배계수

그림 1의 (a)는 8 Gd 독봉집합체와 이의 등가 독봉집합체들의 무한증배계수를 연소도에 따라 비교한 것이다. Erbia 독봉집합체의 무한증배계수는 연소초기에는 거의 일정하게 유지되다가 감소하며, IFBA 독봉집합체는 연소초기에 봉우리모양의 증가모양을 나타내다가 감소한다. Gadolinia 독봉집합체의 무한증배계수는 봉우리모양이 IFBA에 비해 다소 늦게 나타난다.

첨두봉출력인자

그림 1의 (b)는 8 Gd 독봉집합체와 이의 등가 독봉집합체들의 첨두봉출력인자를 연소도에 따라 비교한 것이다. IFBA나 Erbia 독봉집합체의 첨두봉출력인자는 Gadolinia 독봉집합체에 비교 주기초에는 작음을, 연소가 진행됨에 따라 점점 유사해짐을 알 수 있다. 이는 IFBA나 Erbia는 열중성자흡수단면적이 Gadolinia에 비해 작아 독봉 내에서의 중성자차폐효과가 작으며 또한 다량으로 사용되므로 독봉집합체내의 출력분포조절이 용이하기 때문이다.

잔여반응도억제가

그림 1의 (c)는 8Gd 독봉집합체와 이의 등가 독봉집합체의 잔여반응도억제를 연소도에 따라 비교한 것이다. IFBA의 반응도 억제기는 연소초기 급격히 감소하며 연소도가 20 MWD/kgU을 넘으면 거의 소멸한다. 반면 Erbia의 반응도 억제기는 매우 느리게 감소하며 연소도가 30 MWD/kgU을 넘어도 일정량이 계속 존재한다. Gadolinia의 반응도 억제기는 연소초기에 빠른 속도로 감소하여 연소도 8 MWD/kgU 근처에서 거의 소멸하나 미미한 양이 계속 남는다.

냉각재온도계수

그림 1의 (d)는 각 독물질별 독봉집합체의 냉각재온도계수를 주기초 잉여반응도억제기에 따라 비교한 것이다. Erbia 독봉집합체의 냉각재온도계수는 Erbia 양에 거의 선형적으로 감소할 뿐만 아니라 매우 민감하게 반응하나 IFBA는 독물질량에 거의 선형적으로 감소는 하나 독물질량에 거의 영향을 받지 않는다. Gadolinia는 소량으로 장전되면 증가하나 다량으로 장전되면 감소한다. 냉각재온도계수는 Erbia가 타 독물질에 비해 매우 낮으며 Gadolinia는 소량으로 장전되면 IFBA보다 높으나 다량으로 장전되면 IFBA보다 작다.

3. 독봉사용노심에서의 노심핵특성인자 비교평가

주기길이별 독봉사용노심의 노심핵특성인자의 비교평가를 위해 먼저 Gadolinia를 장전한 12개월 3 batch 및 4 batch, 18개월 3 batch 및 4 batch 노심을 구성하였다. 12개월 4 batch노심과 18개월 3 batch 노심은 원자력연구소에서 설계한 것을 입수하여 사용하였으며, 12개월 3 batch노심과 18개월 4batch노심은 독물질의 비교평가를 위해 설계하였다. IFBA 및 Erbia 장전노심은 Gadolinia 장전노심에서 Gd 독봉집합체를 IFBA 와 Erbia 등가 독봉집합체로 대체함으로써 구성하였다. 그리고 이들의 비교 평가를 위해 대체하는 독봉집합체의 우라늄 농축도는 Gd 독봉집합체와 같도록 하였다. 각 주기 계산을 위해 반경방향으로는 1개의 집합체에 대해 4개의 노드로 축방향으로는 22개의 노드로 나누었으며 계산은 현재 서울대에서 보유하고 있는 CASMO/NEMSNAP 체계를 사용하여 평형주기까지 수행하였다.

표 1은 각 독봉장전 평형노심들의 노심핵특성인자들을 사용된 독물질별로 정리한 것이다. 12개월 단주기에서는 주기길이측면에서 Gd 장전노심과 IFBA 장전노심이 비슷하게 나타났으며 Erbia 장전노심이 약 10일 정도 적게 예측되었다. 이는 표에서 알 수 있듯이 Erbia의 주기말 잔존반응도 억제기가 타 독물질에 비해 높고 독물질 장전

에 따른 핵연료장전량의 감소 때문으로 풀이된다. 18개월 장주기에서도 역시 주기길이에서 Erbia 장전노심이 약 13일 정도 적게 예측되었는데 같은 이유로 풀이된다. 장주기에서는 IFBA 장전노심이 Gd 장전노심에 비해 주기길이 측면에서 약 1~2일 정도 길게 예측되었다. 냉각재 온도계수 측면에서는 독봉집합체의 독특성분석에서 예측되었듯이 Erbia 장전노심이 타 독물질 장전노심에 비해 우수하게 예측되었다. 최대 Fr 인자 측면에서는 Erbia 장전노심과 IFBA 장전노심이 거의 비슷한 수준에서 우수하게 나타났으며 Gd 장전노심은 이 점에서 취약한 것으로 판단된다.

4. 결론 및 향후과제

이 논문에서는 Gadolinia, Erbia, IFBA 독물질에 대해 영광 3/4호기 노심을 대상으로 독봉집합체 및 독봉장전노심의 핵특성인자들을 비교하였다. IFBA와 Erbia는 열중성자 흡수단면적이 작아 다량으로 사용되며 이 때문에 집합체내 출력평탄화 및 노심내 최대 Fr 측면에서 Gd에 비해 유리하게 나타났으며 Erbia는 MTC 측면에서 타 독물질에 비해 우수하게 나타났다. 주기길이 측면에서는 Gd와 IFBA가 주기말에 잔존반응도억제가가 거의 소멸하여 Erbia에 비해 유리하게 나타났다.

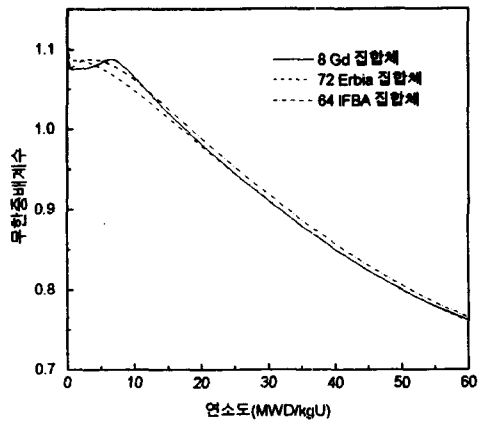
이 연구에서는 Gd 장전노심을 먼저 설계하고 타 독봉장전노심은 Gd독봉집합체의 등가독봉집합체를 대체 장전함으로서 수행되었다. 따라서 각 독물질별 장점들이 최대한 반영되지 않았다. 보다 정확한 비교 판단을 위해서는 제한조건 충족범위내에서 각 독물질별 최적장전노심을 구성하여야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

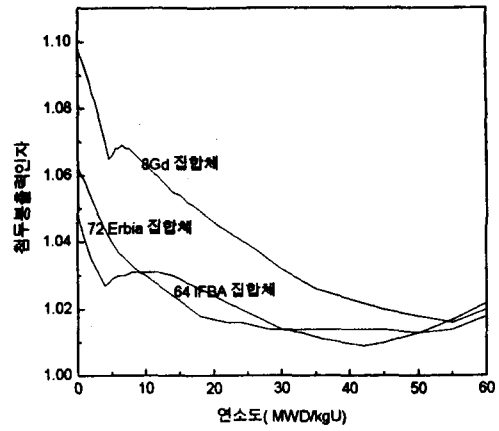
1. Final Safety Analysis Report for YGN 3 & 4, KEPCO
2. W. Böhm, et. al. "Gd₂O₃ up to 9 Weight Percent, an Established Burnable Poison for Advanced Fuel Management in Pressured Water Reactors," Kerntechnik, 50, 234-240, 1987
3. A. Jonsson, John E. Gunn, "Application of Erbium Burnable Absorbers in the Design and Operation of 18- and 24-month Fuel Cycles," ANS Winter Meeting, Oct. 30, 1995.
4. D.L.Stucker, M.J.Hone, "Benchmark Comparison of ZrB₂ and Erbia PWR Integral Fuel Burnable Absorbers," ANS Winter Meeting, Oct. 30, 1995.

표 1. 각 독물질별 장·단주기 평형노심에서의 핵특성인자 비교

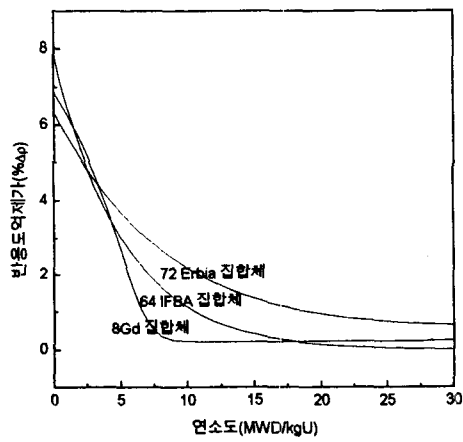
	12 개월 3-batch 노심			12개월 4-batch 노심		
	Gd	Erbia	IFBA	Gd	Erbia	IFBA
<u>공급핵연료집합체</u>						
개수	60	60	60	44	44	44
평균농축도	3.21	3.21	3.21	3.90	3.90	3.90
독물질농도(w/o,cm)	6	1	0.00127	6	1	0.00127
<u>주기길의</u>						
MWD/kgU	11.531	11.216	11.572	11.359	10.909	11.329
EFPD	313	304	314	308	296	307
<u>주기초임계붕산농도(ppm)</u>	959	934	927	930	896	906
<u>최대 Fr</u>	1.463	1.414	1.420	1.465	1.446	1.428
<u>MTC(pcm/F)</u>						
BOC, HFP, Eq.Xe	-11	-15	-13	-19	-21	-18
EOC, HFP, Eq.Xe	-32	-34	-33	-38	-37	-37
<u>반응도억제가(%Δρ)</u>						
BOC	1.98	2.60	2.32	1.81	2.81	2.12
EOC	0.09	0.74	0.10	0.16	1.01	0.12
<u>Fuel Displacement(w/o)</u>	0.10	0.15	0	0.13	0.19	0
	18 개월 3-batch 노심			18개월 4-batch 노심		
	Gd	Erbia	IFBA	Gd	Erbia	IFBA
<u>공급핵연료집합체</u>						
개수	68	68	68	48	48	48
평균농축도	4.05	4.05	4.05	5.16	5.16	5.16
독물질농도(w/o,cm)	6	1	0.00127	6	1	0.00127
<u>주기길의</u>						
MWD/kgU	16.565	16.045	16.590	16.276	15.794	16.328
EFPD	449	435	450	441	428	443
<u>주기초임계붕산농도(ppm)</u>	1402	1342	1345	1384	1318	1316
<u>최대 Fr</u>	1.488	1.412	1.412	1.536	1.479	1.492
<u>MTC(pcm/F)</u>						
BOC, HFP, Eq.Xe	-10	-13	-10	-14	-18	-15
EOC, HFP, Eq.Xe	-37	-37	-36	-36	-39	-39
<u>반응도억제가(%Δρ)</u>						
BOC	2.96	3.94	3.47	2.73	3.85	3.18
EOC	0.15	0.92	0.07	0.27	1.24	0.21
<u>Fuel Displacement(w/o)</u>	0.17	0.27	0	0.23	0.39	0



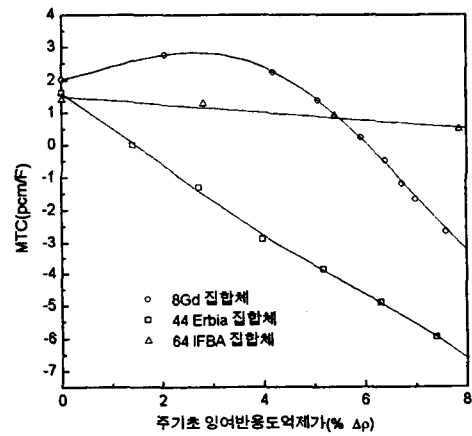
(a) 특물질별 연소도에 따른 무한증배계수



(b) 특물질별 연소도에 따른 원무승률역인자



(c) 특물질별 연소도에 따른 반응도억제가



(d) 주기초 잉여반응도 억제가에 따른 냉각재온도계수

그림 1. 특봉핵연료 집합체에서의 특물질별 특성