

탄소피막입자 핵연료를 이용한 가압경수로의 노심핵설계 타당성 평가

배 강목, 김 명현
경희대학교

경기도 용인시 기흥읍 서촌리, mhkim@nms.kyunghee.ac.kr

요 약

MHTGR에서 사용하는 탄소피막입자 핵연료의 장점을 살려 가압경수로의 핵연료로 사용하는 개념을 도입하였다. 울진3/4호기를 모델노심으로 하여 탄소피막입자 핵연료를 가압경수로에 사용하는 것이 가능함을 확인하였다. 그러나 가압경수로 핵연료 제한조건인 $5w/o$ 이내에서 울진3/4호기의 열출력과 주기를 만족하는 노심구성은 어려웠고, 주기길이가 짧아진 노심구성은 가능하였지만 경제성 측면에서 불리할 것으로 여겨져 상업용 가압경수로에 적용하는 것은 타당성이 없다고 판단되었다.

1. 서론

MHTGR에서 사용하는 탄소피막 입자 핵연료는 가압경수로의 핵연료에 비하여 몇가지 장점을 가지고 있다.[1] 핵연료 입자를 열화탄소 피막으로 싸고 탄소충진체에 장입함으로 방사능 누출을 효과적으로 차단하며, 탄소매트릭스가 높은 열전도도와 기계적 강도를 가지므로 열적여유도가 높아진다. 피막핵연료를 그룹1과 같이 가압경수로에 적용하는 핵설계안에 대한 개념설계안을 수립하고 핵연료 설계의 타당성을 확인하였다.[2] 본 연구에서는 핵연료 설계안에 대하여 반응도쾌환 안전성과 운전 온도 등을 평가하였고, 울진 3/4호기 노심을 모델로 하여 가압경수로에 적용시킨 노심을 구성하는 핵설계 타당성을 검토하였다.

2. CASMO-NESTLE 전산체계

탄소피막입자 핵연료를 가압경수로 소결체에 채워넣을 경우 이중의 비균질성을 가지게 되는데 이전연구에서 CASMO-3 를 MCNP-4A 코드와 비교하여 CASMO-3 코드사용의 타당성을 검증하였다.[2] 탄소피막입자 핵연료를 이용하여 구성된 가압경수로심의 노심해석을 위하여 본 논문에서는 CASMO[3]-NESTLE[4]을 연계하여 노심해석을 수행하였다. 이 전산체계의 타당성을 검증하기 위하여 울진3/4호기를 대상으로 노심 해석을 수행하였으며 이 결과를 FSAR의 자료와 비교하였다. 상대출력과 임계보론농도, 축방향 출력분포 등

의 검증결과 CASMO-NESTLE 전산체계는 가압경수로 노심해석을 하는데 있어서 타당하다고 판단되었다. 그림3은 상대출력분포 검증결과이다.

3. 반응도 변환효과 및 핵연료 온도평가

탄소피막입자 핵연료를 가압경수로에 사용할 때 핵연료집합체의 안전성을 평가하기 위하여 이미 타당성 연구가 이루어진 핵연료 개념설계안에 대하여 감속재 온도계수와 핵연료 온도계수를 계산하였다. 핵연료의 농축도가 5.8w/o이고 핵연료 소결체의 반지름이 울진3/4호기와 같은 0.413cm와 0.433, 0.455cm의 소결체에 대하여 계산한 결과 핵연료의 장전량이 늘어날수록 FTC와 MTC는 더 큰 음의 값을 나타내고 있으며 울진3/4호기의 Hot Full Power 운전조건에서 핵연료 온도계수와 감속재 온도계수는 모두 음의 값을 나타내어 안전함을 보였다. 표1과 표2에서 핵연료 온도계수와 감속재 온도계수를 나타내었다. 새로운 개념의 핵연료 설계안은 탄소매트릭스의 사용으로 인하여 핵연료의 온도가 매우 낮아질 것으로 예상된다. 온도감소에 따른 라이브러리 효과도 기대되어 Fort Saint Vrain Reactor에서 사용하는 열전도도 공식을 이용하였고 계산방법은 NESTLE 코드의 온도계산 공식을 이용하였다. 계산결과 핵연료의 평균온도는 약 150°C가 감소하였고 핵연료 내에서 중심과 표면의 온도차이는 50°C정도로 가압경수로의 UO₂ 핵연료보다 크게 낮아졌으며 열적 여유도가 증가함을 볼 수 있다. 핵연료의 온도변화에 의한 라이브러리 효과는 주기초에서 최고 0.09933의 임계도값의 차이를 보였다.

4. 탄소피막입자 핵연료의 가압경수로 노심설계

탄소피막입자 울진3/4호기의 노심을 기본 모델로 하여 탄소피막입자 핵연료의 집합체를 구성하는 경우를 설계하였다. 설계안1은 울진3/4호기의 열출력과 주기길이를 만족하는 조건으로 노심을 구성한 경우로 핵연료 집합체는 4가지 농축도와 가돌리니아 독봉의 사용여부에 따라 구분하여 모두 7가지 핵연료 집합체로 설계하였다. 핵연료 집합체의 설계안에 대한 재원은 표3에 나타내었고 9w/o 농축도의 가돌리니아 일체형 독봉을 8개와 12개로 사용하였다. 독봉의 핵연료 집합체내 위치는 그림5에서 보여주고 있으며 독봉의 axial zoning 방법은 그림4에서 나타내었다. 핵연료 집합체의 enriched zoning은 고려하지 않았으며 울진3/4호기의 핵연료 집합체와 같은 동일한 geometry를 사용하였다. 노심의 장전모형은 울진3/4호기를 기본 모델로 하였으나, 탄소피막입자 핵연료 집합체의 임계도 변화 특성이 약간 틀려 장전모형을 부분적으로 변경시켰다. 설계된 탄소피막입자 핵연료를 가지고 노심을 구성한 결과 울진3/4호기의 주기길이를 만족하고 동일한 열출력을 가지는 노심을 구성할 수 있었다. 그러나, 핵연료 집합체의 설계시 농축도가 최고 5.645w/o를 가짐으로써 가압경수로의 핵연료 농축도 제한조건을 초과하였다.

설계안2는 가압경수로의 핵연료 제한치를 넘지 않는 범위에서 핵연료의 최고 농축도를 4.95w/o로 낮추어 설계하였다. 각 핵연료 집합체의 설계시 설계안1에서 한 방식으로 구성하였으나 울진3/4호기의 임계도 곡선과 비슷한 경향으로 설계하기 위하여 BP의 사용을 4개와 8개로 줄여 사용하였다. 이 경우 주기는 300EFPD로 60EFPD만큼의 감소를 나타내었고, 임계보론농도는 주기초에 울진3/4호기보다 130ppm정도가 크게 설계되어 MTC가 양의 값을 가지게 되었다. 핵연료 집합체별로 보론이 MTC에 미치는 영향을 살펴본

결과 약 500ppm이하에서는 음의 MTC값을 가지게 됨을 확인하였다. 임계보론 농도가 높게 설계된 이유는 BP의 사용이 줄어서 주기초의 임계도값이 울진3/4호기의 핵연료 집합체보다 크게 설계되었기 때문이었다.

설계안3은 설계안2에 대하여 임계보론 농도를 줄여 주기초 MTC를 낮추기 위한 방안으로 BP의 갯수를 8개와 12개로 늘려 사용하였으며, 이때 핵연료의 농축도가 낮아져 주기중간부분에 가돌리니아 독봉에 의한 피크가 발생하였다. 그림6과 그림7은 핵연료집합체의 임계도 곡선과 노심 장전모형을 나타내고 있다. 출력분포의 제어를 위해 장전모형을 변화시켜 출력분포의 안정을 꾀한결과 주기길이가 울진3/4호기보다 짧아진 270 EFPD를 나타내었다. 그림8에서 보듯이임계보론농도는 500ppm 이하로 유지되었으며 상대출력분포도 주기초 최고 1.34(울진3/4, 1.28)의 값을 가지고 주기말은 1.32(울진3/4, 1.26)의 값을 보였다. 정상출력, 평형제논상태에서 주기초의 MTC를 계산한 결과 $-7.5 \text{ pcm}/^\circ\text{F}$ 의 값을 나타내어 안전성을 확보함을 보였다. 설계안3은 탄소피막입자 핵연료를 가압경수로에 적용가능함을 보였으나, 기존의 상업용 가압경수로(울진3/4)와 경제성 측면에서 비교하면 농축도는 높아지고, 주기길이는 짧아지는 단점을 나타내었다.

5. 결론

MHTGR에서 사용하는 탄소피막입자 핵연료의 장점을 가압경수로에 적용시키기 위한 새로운 개념의 핵연료는 가압경수로에 사용할 경우 탄소 매트릭스의 사용은 핵연료의 온도감소 효과를 보였고 충분한 열적여유도를 확보하는 장점을 나타내었다. 울진3/4호기를 모델로 하여 노심구성을 할 경우 주기길이와 열출력을 만족하는 설계가 가능하였지만 핵연료의 농축도가 가압경수로 제한치인 5w/o를 초과하게 되었다. 가압경수로의 농축도 제한조건인 5w/o이내에서 탄소피막입자 핵연료를 이용하여 구성된 노심은 핵연료의 농축도 증가와 제조비용 증가 및 주기길이의 감소로 인하여 기존의 가압경수로(울진3/4호기)보다 탄소피막입자 핵연료는 가압경수로에 사용하는 것은 가능하지만, 경제성 측면에서 불리하여 경쟁력을 가지지 못한다고 판단되었다. 따라서 탄소피막입자 핵연료를 가압경수로에 적용하는 것은 타당성이 없다고 보여진다. 구체적인 경제성 평가 결과는 참고문헌 5에서 언급되었다.

참고 문헌

1. H. C. Yi, "MHTGR and Coated Fuel Particles", Presentation material for the seminar at Kyung Hee University, General Atomics, (1994).
2. M. H. Kim, S. G. Lee, Y. J. Kim, "Nuclear Feasibility of Carbon-coated Particle Fuels in PWRs", *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 75, 362,(1996).
3. M. Edenius, B.H.Forssen, "CASMO-3, A Fuel Assembly Burnup Program User's Manual", STUDSVIK/NFA-89/3, Studsvik of America (1991).
4. P.J.Turinsky et al., "NESTLE: A Few-Group Neutron Diffusion Equation Solver Utilizing the Nodal Expansion Method for Eigenvalue, Adjoint, Fixed-Source Steady-State and Transient Problems," INEL, EGG-NRE-11406 (June 1994).

5. 류 석진, 김 명현, "UCO 핵연료의 가압경수로 적용에 대한 경제성 평가", 한국원자력학회 1998 춘계 학술발표회 논문, 경희대학교 (1998).

표 1. 핵연료 온도 계수 계산결과 [단위 : pcm/°K]
 $\Delta T = 20 \text{ }^\circ\text{K}$

Fuel Temp. [°K]	Pellet Radius	0.413 cm		0.433 cm		0.455 cm	
		BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC
300 °K		-3.25	-2.2	-3.4	-2.35	-3.65	-2.7
900 °K		-3.05	-1.9	-3.2	-2.15	-3.4	-2.25
1500 °K		-2.4	-1.55	-2.55	-1.75	-2.65	-1.8
2100 °K		-1.05	-1.3	-2.2	-1.4	-2.3	-1.55

표 2. 감속재 온도계수 계산결과 [단위 : pcm/°K]
 $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{K}$

MOD Temp. [°K]	Pellet radius	0.413 cm		0.433 cm		0.455 cm	
		BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC
300 °K		0.9	10.9	0.3	9.8	0.2	8.4
400 °K		-1.5	17.8	-2.9	15.3	-4.4	12.2
500 °K		-7.1	18.1	-9.3	13.9	-11.9	9.0
600 °K		-47.6	-20.0	-54.3	-30.3	-62.0	-42.3

표 3. 탄소피막입자 핵연료 집합체별 제원 [설계안1/설계안2/설계안3]

Assembly Type	Number of Fuel Assembly	Fuel Enrichment (w/o)	Number of BP rod per Assembly	BP w/o (Gd ₂ O ₃)
A	45/41/49	3.8/3.25/3.25	12/8/12	9/8/9
B1	20/24/24	4.69/3.95/3.95	8/4/8	9/8/9
B2	24/24/16	4.69/3.95/3.95	12/8/12	9/8/9
C1	16/16/16	5.11/4.45/4.45	8/4/8	9/8/9
C2	28/28/20	5.11/4.45/4.45	12/8/12	9/8/9
D1	20/20/28	5.645/4.95/4.95	8/4/8	9/8/9
D2	24/24/24	5.645/4.95/4.95	12/8/12	9/8/9

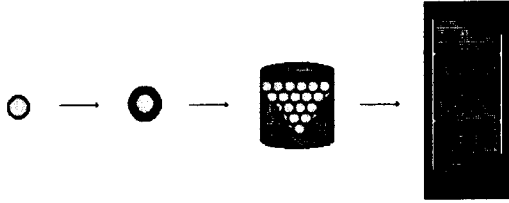


그림 1. 탄소피막입자 핵연료의 가압경수로에 적용방법

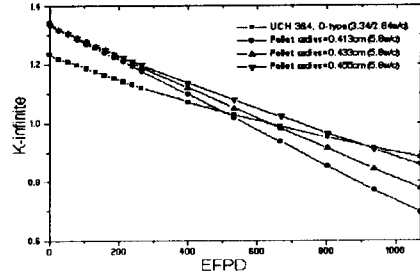


그림 2. 개념 설계안 핵연료 집합체

			0.59	0.89	1.04
			0.5839	0.8710	1.0196
			-1.03	-2.1	-2.30
	0.60	1.05	1.16	1.20	1.24
	0.5937	1.0222	1.1363	1.1758	1.2150
	-1.05	-2.64	-2.04	-2.01	-2.01
0.71	1.13	1.28	0.86	1.22	1.06
0.6959	1.0994	1.2514	0.8585	1.1926	1.0625
-1.98	-2.7	-2.23	-0.17	-2.24	0.23
	1.18	0.83	1.16	0.83	1.18
	1.1568	0.8305	1.1698	0.8529	1.1758
	-1.96	0.06	0.84	2.75	-0.35
		1.12	0.79	1.23	0.82
		1.1380	0.8121	1.2677	0.8538
		1.60	2.79	3.06	4.12
			1.12	0.82	1.15
			1.1633	0.8558	1.1700
			3.86	4.36	1.70
FSAR				1.18	0.98
NESTLE				1.2201	1.0231
Error				4.01	4.39
					0.78
					0.8214
					5.30

그림 3. ARO, HFP, Eq.Xe, 0.0 MWD/MTU 에서의 NESTLE 검증자료

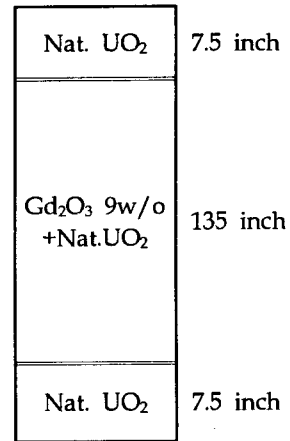


그림 4. BP rod axial zoning

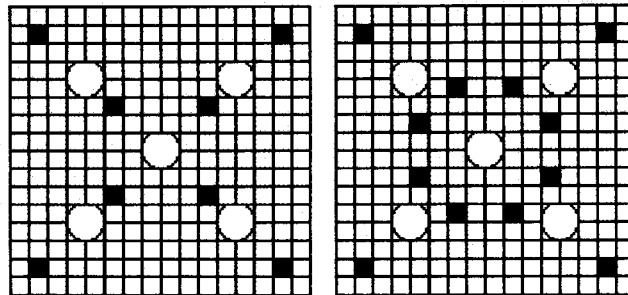


그림 5. 핵연료 집합체내 BP의 위치

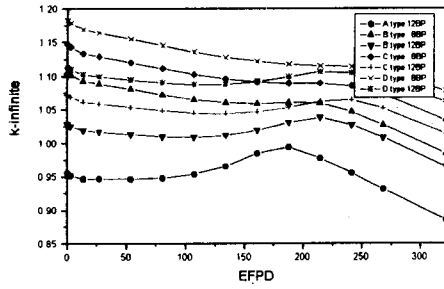


그림 6. 핵연료 집합체 임계도 변화

					B1	C1	D1	
				B1	D1	D2	D1	C2
			C1	D1	D2	A	B2	B1
		B1	D1	C2	A	D2	A	B2
	D1	D2	A	C2	A	C2	A	
B1	D2	A	D2	A	C1	A	B2	
C1	D1	B2	A	C2	A	A	B1	
D1	C2	B1	B2	A	B2	B1	A	

그림 7. 핵연료 집합체 노심장전 모형

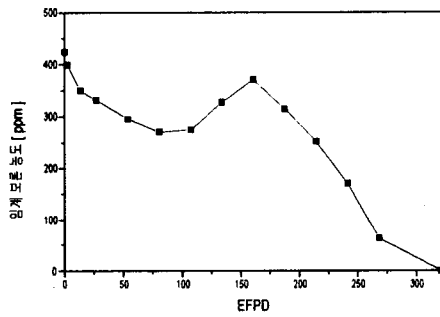


그림 8. 임계 보론 농도

					0.5361	0.8155	0.9278		
					0.5251	0.8665	1.0720	1.3418	1.2845
				0.6430	1.0725	1.1676	0.9777	1.1872	1.3010
					1.1379	0.9712	1.2343	0.9809	1.1101
						1.1580	0.9631	1.1097	0.9081
							1.1882	0.8981	0.9871
								0.8860	1.0504
									0.9047

그림 9. BOC, HFP, Eq. Xe, 0.0 GWD/MTU 에서의 상대출력분포