

연료집합체의 주요정수와 MOX형연료에서 Pu의 동위원소조성을 표 1,2에 주었다.

표 1. 연료집합체의 주요정수[4]

△ 연료봉세포		△ 물봉세포
세포겉음 1.265cm	— 연료심재료	— 재료: 지르칼로이
직경 0.819cm	① UO_2 연료	내경 1.14cm
연료심밀도 10.4g/cm^3	농축도 4.1%	외경 1.22cm
— 외피재료: 지르칼로이	(연소흡수봉의 Gd_2O_3 함량 4%)	
밀도 6.55g/cm^3	② MOX 연료	
외경 0.95cm	Pu부화도 3.9, 5.8, 11.7%	
내경 0.836cm	U농축도 0.2%	
— 열매(랭각재): H_2O		

표 2. MOX연료에서 Pu의 동위원소조성[3]

동위원소	^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu	^{241}Am
함량/%	1.9	57.5	23.3	10.0	5.4	1.9

2. 로물리적특성

먼저 표준 UO_2 연료집합체의 4.1% UO_2 연료봉세포와 MOX연료집합체의 Pu부화도(연료안의 중금속에서 Pu의 무게함량)가 서로 다른 세가지 연료봉세포에서 69군중성자에너지스펙트르에 대한 계산결과를 그림 2에 보여주었다.

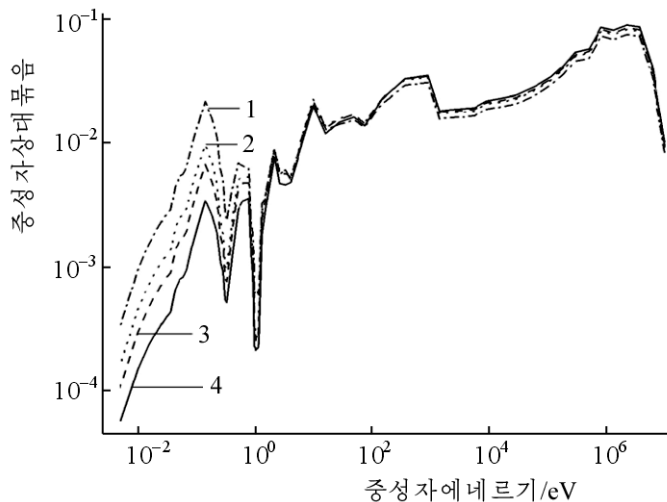


그림 2. UO_2 및 MOX연료세포에서 중성자에너지스펙트르
1-4.1% UO_2 , 2-3.9% MOX, 3-5.8% MOX, 4-11.7% MOX

그림 2에서 보는바와 같이 MOX연료의 경우 UO_2 연료보다 에너지스펙트르가 더 경화되어있다. 또한 같은 MOX연료인 경우에도 Pu부화도가 높을수록 스펙트르가 더 심히 경화된다는것을 알수 있다. 그 원인은 UO_2 및 MOX연료집합체의 평균화된 4군자름면적을 비교하여 설명할수 있다.(표 3과 4)

표 3과 4에서 보는바와 같이 MOX연료집합체의 4군(열중성자군)거시흡수자름면적은 $0.298\text{ }783\text{ cm}^{-1}$ 로서 UO_2 연료집합체의 값 $0.098\text{ }117\text{ cm}^{-1}$ 보다 3배 크며 3군(공명중성자군)에서는 약 6.2배 크다. 즉 MOX연료는 UO_2 연료에 비해 열 및 공명에너지구역에서 중

성자들을 훨씬 더 많이 흡수한다.

또한 무한매질에서 중성자증식을 특징짓는 $\nu\Sigma_f/\Sigma_a$ 값이 열군과 공명군에 관해 각각 1.645와 0.265로서 UO_2 연료의 값 1.693과 1.403에 비해 작다. 반면에 빠른중성자에 속하는 1, 2군의 경우 MOX연료의 $\nu\Sigma_f/\Sigma_a$ 값은 각각 1.876과 0.802로서 UO_2 연료의 값 1.576과 0.508보다 크다.

표 3. UO_2 연료 집합체의 평균화된 4군 자름면적(연소전)

군번호	D	Σ_{tr}	Σ_a	Σ_f	$\nu\Sigma_f$
1	1.548 63	0.215 243	0.002 800	0.001 616	0.004 413
2	0.789 17	0.422 384	0.025 700	0.005 363	0.013 059
3	0.731 03	0.455 976	0.017 881	0.010 280	0.025 084
4	0.335 61	0.993 218	0.098 117	0.068 074	0.166 110

표 4. MOX 연료 집합체의 평균화된 4군 자름면적(연소전)

군번호	D	Σ_{tr}	Σ_a	Σ_f	$\nu\Sigma_f$
1	1.567 06	0.212 713	0.003 387	0.002 167	0.006 355
2	0.776 75	0.429 137	0.034 590	0.009 610	0.027 727
3	0.605 60	0.550 415	0.110 546	0.102 159	0.029 317
4	0.282 17	1.181 32	0.298 783	0.171 743	0.491 552

결국 MOX연료는 UO_2 연료에 비해 빠른중성자의 손실은 상대적으로 적고 공명중성자와 열중성자의 손실이 더 크므로 중성자스펙트럼이 에너지가 높은 쪽으로 쏠리게 된다.

다음으로 MOX연료 집합체와 UO_2 연료 집합체의 연료온도와 감속재온도결수 및 붕소가치를 표 5에 주었다.

표 5. MOX 연료 집합체와 UO_2 연료 집합체의 연료온도와 감속재온도결수 및 붕소가치

연료온도결수/K		감속재온도결수/K		붕소가치/%	
MOX	UO_2	MOX	UO_2	MOX	UO_2
$-2.74 \cdot 10^{-5}$	$-2.34 \cdot 10^{-5}$	$-6.18 \cdot 10^{-4}$	$-4.07 \cdot 10^{-4}$	$-2.71 \cdot 10^{-5}$	$-7.13 \cdot 10^{-5}$

표 5에서 보는바와 같이 MOX연료 집합체와 UO_2 연료 집합체의 연료온도결수(도플러결수)와 감속재온도결수는 다같이 -값을 가지며 따라서 고유안전성이 담보된다. 절대값에 있어서는 MOX연료가 UO_2 연료에 비해 두 온도결수값이 더 크다. 그것은 MOX연료에 포함되어있는 주요공명핵종인 ^{240}Pu 의 공명흡수자름면적이 ^{238}U 보다 훨씬 크기때문이다.

한편 MOX연료의 붕소가치(단위붕소농도변화에 의한 반응도변화)는 UO_2 연료보다 훨씬 작다. 그것은 감속재(랭각재)에 풀려있는 가용성흡수체인 붕소는 주로 열중성자를 세게 흡수하고 상열중성자는 잘 흡수하지 않으며 MOX연료의 중성자스펙트럼이 UO_2 연료에 비해 경화되어있으므로 붕소에서의 열중성자흡수에 의한 반응도감소효과가 상대적으로 작기때문이다.

그림 3과 4에 UO_2 연료 집합체와 MOX형 연료 집합체에서 연소흡수체인 Gd가 없는 경우와 있는 경우 연소도에 따르는 무한매질증식결수의 변화를 보여주었다.

그림 3, 4에서 보는바와 같이 Gd가 없는 경우 연소초기 Xe평형해독에 이를 때까지 증식결수는 급격히 감소하며 그 이후에는 서서히 감소한다. 연소전에 무한증식결수가 UO_2 연료집합체에서 1.398인데 비해 MOX연료집합체에서는 1.208로서 훨씬 작으나 증식결수의 감소속도는 MOX연료집합체가 UO_2 연료집합체에 비하여 현저히 느려서 $40 \text{ GW} \cdot \text{d}/\text{t}_\text{U}$ 의 연소도에 이르러서는 거의 같아진다.

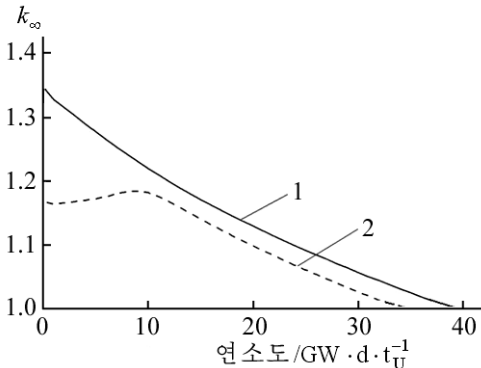


그림 3. UO_2 연료집합체에서 연소도에 따르는 k_∞ 의 변화
1-Gd가 없는 경우, 2-Gd가 있는 경우

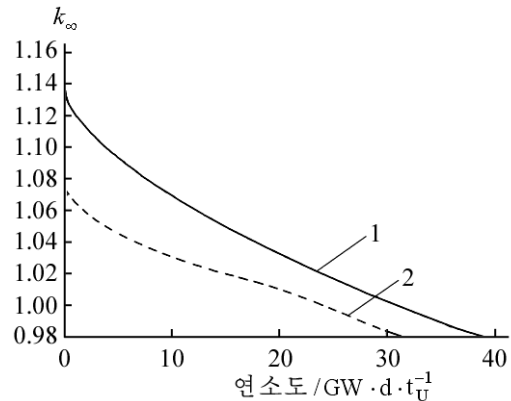


그림 4. MOX형연료집합체에서 연소도에 따르는 k_∞ 변화
1-Gd가 없는 경우, 2-Gd가 있는 경우

다음으로 연료에 Gd가 포함된 경우 MOX연료집합체와 UO_2 연료집합체에서 증식결수의 변화특성이 현저히 차이난다. UO_2 연료집합체인 경우 Xe평형해독이후 Gd가 연료보다 훨씬 빨리 연소되면서 초기에 증식결수가 오히려 증가하다가 $10 \text{ GW} \cdot \text{d}/\text{t}_\text{U}$ 근방에서 극대를 이루며 그 이후에는 연소도가 증가함에 따라 Gd가 없는 경우와 같은 모양으로 감소한다.

그러나 MOX연료집합체에서는 UO_2 연료집합체와 같은 Xe평형해독이후 증식결수의 증가현상이 나타나지 않으며 다만 곡선의 경사도가 어느 정도 완만해질뿐이다.(그림 4)

이 원인도 역시 앞에서 본 MOX연료집합체에서의 스펙트르경화와 관계된다. Gd의 열중성자흡수자름면적은 수만b에 달하지만 상열대역에서는 급격히 작아진다. 때문에 UO_2 연료집합체에 비해 열중성자의 몫이 훨씬 적은 MOX연료집합체에서는 Gd가 상대적으로 느리게 연소되며 따라서 Gd의 연소로 인한 반응도보상효과가 뚜렷이 나타나지 않게 된다.

이상의 계산은 가압경수로의 전형적인 작업온도와 압력조건(연료온도 881K, 감속재온도와 압력은 각각 585K, 15.5MPa)에서 진행하였다.

맺는 말

가압경수로물리계산체계 《부흥》의 집합체계산기능을 리용하여 MOX형경수로연료집합체의 로물리적특성을 평가하고 표준 UO_2 연료집합체와 비교하였다.

참 고 문 헌

- [1] 허일문 등; 원자력, 2, 19, 주체102(2013).
- [2] H. R. Trelluel; Progress in Nuclear Energy, 48, 135, 2006.
- [3] P. Bernard; Progress in Nuclear Energy, 49, 583, 2007.
- [4] A. Yamamoto et al.; Journal of Nuclear Science and Technology, 39, 8, 900, 2002.

주체106(2017)년 12월 5일 원고접수

Reactor Physics Properties of LWR Fuel Assembly Loaded MOX Fuel

Ho Il Mun, So Chol and Chae Jong Suk

In this paper we studied the reactor physics properties including the neutron energy spectrum and reactivity coefficients of fuel assembly of PWR loaded with MOX fuel, boron importance and the change of infinite multiplication coefficients according to the burnup, and compared with those of the UO₂ standard fuel assembly.

Key words: LWR, MOX fuel, fuel assembly