

WIMS 라이브러리 생산을 통한 혼합핵연료 격자의 임계계산에 관한 연구

최중수, 황원국
경희대학교

김정도
한국원자력연구소

요 약

본 연구는 가압경수로 핵설계용 WIMS/D 라이브러리를 ENDF/B-VI 평가핵자료를 처리하여 생산하는 목적을 가지고 있다. 이를 위하여 혼합핵연료와 관련된 핵자료 처리 방안을 확립할 필요가 있으며, 생산된 라이브러리를 검증할 필요가 있다. 여기에서 이용된 혼합핵연료 임계실험자료는 Saxton의 6개 실험과 Westinghouse의 11개 실험이었으며, 검증 결과는 생산된 라이브러리를 가압경수로에 적용할 수 있는 것으로 판단되었다.

1. 서론

한국 원자력연구소의 WIMKAL-88⁽¹⁾은 ENDF/B-V등을 이용하여 작성되었으므로 이를 ENDF/B-VI로 개선할 필요가 있다고 보고 있다. 이와 관련된 연구는 지속적으로 수행되어 왔다. 본 연구에서는 플루토늄 등의 Actinide의 핵자료 처리를 주로 취급하였으며, 감속재로 사용되는 경수내 수소 핵종의 경우 열중성자 산란에 대해서는 자유기체 모델과 열중성자 산란법칙 라이브러리가 있으며, 본 연구에서는 이전의 연구결과⁽²⁾를 통하여 검증된 Release-2를 이용하였다. 라이브러리 생성 시 핵분열 스펙트럼을 결정하기 위하여 Saxton 실험에 대하여 순수히 Pu-239에 대한 핵분열 스펙트럼과 U-235, U-238, Pu-239에 대한 핵분열 스펙트럼을 혼합한 것에 대한 벤치마크를 실시하여 최적 혼합 조건을 결정하였으며, 결정된 최적 혼합 조건을 Westinghouse 실험에도 적용하여 벤치마크를 실시하였다.

2. 본론

2.1 Saxton 임계실험⁽³⁾

Saxton 임계실험에서 핵연료⁽¹⁾는 UO_2 - PuO_2 핵연료 직경 0.3374(in), 피복재 외부와 내부 직경을 각각 0.391", 0.3445"이며, 10.19268 g/cm³의 밀도를 가진다. 감속재 밀도는 22°C에서 0.997766g/cm³이며 표-1에서 보여 주는 것과 같이 실험-3의 경우 보론을 337ppm 함유한다. 벤치마크를 수행하기 위해서 주어진 임계실험을 단순화된 모델로 적용시킬 필요가 있다. 즉, 핵연료 지지판이나 다른 핵연료 관련 구조물을 고려하지 않았으며, 감속재 온도는 실제로 15.75°C에서 25.8°C로 변하고 있으나, 모두 22°C로 가정하여 계산하였다.

2.2 Westinghouse 임계실험⁽³⁾⁽⁴⁾

이는 미국의 WREC(Westinghouse Reactor Evaluation Center)에서 수행된 혼합핵연료 임계실험이다. 플루토늄의 조성 측정은 1965년에 측정되었으나 1976년에 원소별 조성이다시 평가된 바 있다. 다시 측정된 자료를 이전의 처음 측정된 자료와 비교하면, 혼합핵연료의 원소별 수밀도⁽³⁾에서 약간의 차이를 보이고 있으며, Pu-241의 붕괴에 의해 생기는 Am-241의 측정 자료가 포함되어 있다. 그러나 본 연구에서는 Am-241의 영향을 고려하지 않았다. 이 실험에서 사용된 혼합핵연료의 플루토늄 함량(PuO_2)은 2w/o이며, Pu-240의 조성비에 따라 8% Pu-240 및 24% Pu-240의 두 가지 핵연료로 구분되어 있으며, 수밀도 및 구성은 표-3, 표-4에서 제시하였다. 여기에서 우라늄은 천연우라늄이다. 이 실험 또한 Saxton 실험과 마찬가지로 단순화된 모델을 적용하여 벤치마크를 실시하였다.

2.3 WIMS/D 라이브러리 생산

WIMS/D 라이브러리 생산에는 NJOY94.10이 이용되었으며, ENDF/B-VI를 기반으로 각 핵종에 대한 69군 군정수를 생산하였다. 주요 핵종에 대한 처리 내용은 다음과 같다. Actinide 계열 핵종의 경우 열중성자 산란은 자유기체 모델을 이용하였으며, 온도는 295 °K이다. 가중함수는 모두 EPRI-CELL LWR을 이용하였다. 포텐셜 산란단면적은 핵종별로 스피인 의존성 실유효반경은 ENDF/B-VI의 값을 이용하였다. Goldstein-Cohen값 등 기타 파라미터는 관련 연구⁽⁵⁾와 일치시켰다. 경수내 수소 핵종의 경우 열중성자 산란은 열중성자 산란법칙 라이브러리 ENDF/B-VI Release-2를 이용하였다.

이미 지정한 바와 같이 혼합핵연료의 핵분열 스펙트럼을 결정하기 위하여는 순수 Pu-239의 핵분열스펙트럼을 이용한 라이브러리와 U-235, U-238, Pu-239 등에 대하여 평균화된 핵분열 스펙트럼을 이용한 라이브러리를 생산하였다. 이들 중 적절한 핵분열 스펙트럼

을 결정하기 위하여 Saxton 실험을 이용하였으며, 그 결과를 Westinghouse 실험의 벤치마크에 적용하였다. 혼합 핵분열 스펙트럼 결정방법은 다음과 같다.

U-235 핵분열율: 6개 임계실험에 대해서 U-235의 핵분열율을 조사하고 이들 핵종들이 차지하는 분율들의 평균은 대략 6%이며, 실제로 각각의 임계실험에서도 차지하는 분율은 거의 6%정도의 값에서 집중되는 현상을 보이고 있다.

U-238 핵분열율: 6개 임계실험에 대해서 U-238의 핵분열율을 조사하고 이들 핵종들이 차지하는 분율들의 평균은 대략 4%이며, 각각의 임계실험에서 U-238이 차지하는 분율은 2%에서 6%까지 다양하게 나타나고 있다.

Pu-239 핵분열율: 6개 임계실험에 대해서 Pu-239의 핵분열율을 조사하고 이들 핵종들이 차지하는 분율들의 평균은 대략 90%이며, 각각의 임계실험에서 Pu-239가 차지하는 분율은 대략 88%에서 91% 범위에 나타나고 있다.

위와 같은 과정의 반복을 통해서 하나의 최적의 혼합 핵분열 스펙트럼 비율을 찾을 수가 있으나, 실제로 상기 과정을 되풀이 하여도 처음 결정된 혼합 핵분열 스펙트럼 비율에서 크게 벗어 나지 않음을 알 수 있었다. 따라서 90% Pu-239, 6% U-235, 4% U-238의 비율로 핵분열 스펙트럼을 혼합하여 최적 조건을 찾아내었다. 하지만 이 최적 조건이라 함은 Saxton 실험에 대해서만 적용될 수 있으며, 일반 가압경수로의 경우에 대해서 최적 조건이라고 할 수는 없다.

2.4 임계실험 계산결과

생산된 WIMS/D 라이브러리를 적용하여 이미 지적한 임계실험을 계산하였다. 계산 결과는 표-5와 표-6에 주어지고 있으며, 모두 만족스러운 결과를 보였다. 또한 핵분열 스펙트럼의 혼합에 따른 결과도 보여주고 있는데, 결과에서 보는 것처럼 단일 핵분열 스펙트럼이나 혼합 핵분열 스펙트럼에 관계없이 생산된 라이브러리에 대한 검증계산은 만족스러운 결과를 보여주고 있으며, 혼합 핵분열 스펙트럼이 다소 개선된 경향을 보이고 있다.

3. 결론

ENDF/B-VI를 이용하여 플루토늄 등의 Actinide 핵종들을 처리하여 WIMS/D 라이브러리를 생산하였으며, Saxton과 Westinghouse 임계실험에 대한 계산결과 만족스러운 결과를 얻었다. Saxton 실험에 대해서는 혼합 핵분열 스펙트럼의 최적 혼합비율을 결정하였으며, 벤치마크 결과 또한 단일 핵분열 스펙트럼을 사용한 것보다 개선되어진 결과를 얻었다. 이를 통하여 혼합 핵연료용 라이브러리 생산시 핵분열 스펙트럼을 단일 핵종에 대한 스펙트럼

을 사용하는 것보다는 핵분열성 동위원소 비율을 적절히 가중하여 혼합핵연료에 대한 스펙트럼을 이용할 필요가 있다고 판단된다.

WIMS 라이브러리 생산에 관한 연구중 경수내 수소, 중수내 중수소에 대한 열중성자 산란법칙 라이브러리의 개선에 관한 연구⁽⁶⁾가 진행 중이므로, 이후 수소에 대한 열중성자 산란법칙의 개선 내용을 이번 연구에서 생산한 라이브러리에 적용할 예정이며, 다른 임계실험 자료를 수집하여 생산된 라이브러리에 관한 벤치마크 검증할 필요가 있다.

Acknowledgement

본 연구에서 사용된 벤치마크 자료는 참고문헌 3으로 공개되기 전에 평가자로부터 입수한 것으로, 쓰도록 허락해주신 주형국 박사께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 김정도 외, "원자로해석을 위한 핵자료평가 및 균정수 생산", KAERI/RR-750/88
- (2) 안호준, "벤치마크 검증을 통한 열중성자 산란법칙 라이브러리에 관한 연구", 석사논문, 경희대 (1996)
- (3) "International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments", NEA/NCD/DOC(97)01/VI
- (4) 김정도 외, "Benchmark Test and Adjustment of an Updated Library from ENDF/B-IV", 『원자력학회지』 별책 제 13권 제 3호 (1981)
- (5) 박병철, "벤치마크 검증을 통한 WIMS/D 라이브러리 생산방안에 관한연구", 석사논문, 경희대 (1994)
- (6) 황원국, 최중수, "노심설계를 위한 균정수 생산 및 평가 연구", CARR/RCA-9701

표-1 SAXTON 임계실험 자료

실험	핵종	수밀도 (#/barn-cm)	격자간격 (cm)	임계버클링 ($\text{cm}^{-2} \times 10^{-3}$)	
				전체	축
실험-1	H O	6.6705×10 ⁻² 3.3353×10 ⁻²	1.3208	10.88	1.07
실험-2			1.4224	12.21	1.14
실험-4			1.8669	15.96	1.61
실험-5			2.0117	15.93	1.34
실험-6			2.6416	12.84	1.25
실험-3			H O B-10 B-11	6.6696×10 ⁻² 3.3376×10 ⁻² 3.3707×10 ⁻⁶ 1.5017×10 ⁻⁵	1.4224

표-2 SAXTON 임계실험 핵연료 구성 및 수밀도

물질	구성핵종	수밀도 (#/barn-cm)
UO ₂ - PuO ₂ 혼합물	Pu-239	1.3526×10 ⁻³
	Pu-240	1.2759×10 ⁻⁴
	Pu-241	1.3185×10 ⁻⁵
	Pu-242	6.0318×10 ⁻⁷
	U-234	1.1675×10 ⁻⁶
	U-235	1.5283×10 ⁻⁴
	U-238	2.1072×10 ⁻²
	O-16	4.5523×10 ⁻²
피복재	Sn	4.6590×10 ⁻⁴
	Fe	1.4148×10 ⁻⁴
	Cr	7.5977×10 ⁻⁵
	Zr	4.2517×10 ⁻²

표-3. Westinghouse 임계실험 자료

실험	핵연료형태	격자간격 (cm)	보론농도 (ppm)	펠릿 직경 (cm)	피복재 외경/두께 (cm)	임계버클링(m ⁻²)		
						반경	축	전체
1	8% Pu-240	1.753	0	1.283	1.443/0.076	61.0	8.56	69.6
3	8% Pu-240	3.505	0	1.283	1.443/0.076	40.75	9.52	50.3
4	8% Pu-240	2.694	0	1.283	1.443/0.076	88.9	9.47	98.4
6	8% Pu-240	2.479	0	1.283	1.443/0.076	99.25	9.47	104
7	8% Pu-240	2.479	261	1.283	1.443/0.076	74.19	9.53	83.7
8	8% Pu-240	2.479	526	1.283	1.443/0.076	53.46	9.64	63.1
9	8% Pu-240	1.753	526	1.283	1.443/0.076	49.39	8.95	58.3
10	8% Pu-240	1.753	261	1.283	1.443/0.076	53.82	8.73	62.6
11	8% Pu-240	1.905	0	1.283	1.443/0.076	81.0	8.97	90.0
12	24% Pu-240	2.479	0	1.283	1.443/0.076	70.0	9.44	79.5
13	8% Pu-240	2.694	0	1.283	1.443/0.076	63.7	9.64	73.3

표-4 Westinghouse 임계실험 핵연료 원소별 수밀도

물질	동위원소	8% Pu-240 혼합핵연료봉		24% Pu-240 혼합핵연료봉	
혼합핵연료 (9.54g/cm ³)	U-234 U-235	1.2458×10 ⁻⁶	1.4886×10 ⁻⁴	1.2458×10 ⁻⁶	1.4886×10 ⁻⁴
	U-236 U-238	2.0936×10 ⁻⁷	2.0611×10 ⁻²	2.0936×10 ⁻⁷	2.0611×10 ⁻²
	Pu-238 Pu-239	3.8836×10 ⁻⁸	3.9462×10 ⁻⁴	-	3.08365×10 ⁻⁴
	Pu-240 Pu-241	3.3206×10 ⁻⁵	2.52216×10 ⁻⁶	1.00572×10 ⁻⁴	1.637794×10 ⁻⁶
	Pu-242 Am-241	1.1882×10 ⁻⁷	5.8134×10 ⁻⁷	2.78386×10 ⁻⁶	2.37198×10 ⁻⁷
	O-16	4.3779×10 ⁻²		4.3779×10 ⁻²	
피복재 (Zr-2)	Zr Fe	4.26212 × 10 ⁻²		9.56417 × 10 ⁻²	
	Cr Sn	7.60928 × 10 ⁻⁵		4.83275 × 10 ⁻⁴	
	Ni	3.03362 × 10 ⁻⁵			
감속재	H O	6.67064 × 10 ⁻²		3.33532 × 10 ⁻²	
	B-10 B-11	2.88672 × 10 ⁻⁶		2.34169 × 10 ⁻⁵ (261ppm)	
	B-10 B-11	1.16194 × 10 ⁻⁵		5.81768 × 10 ⁻⁶ (526ppm)	

표-5 SAXTON 임계실험 계산결과

임계실험	단일 핵분열 스펙트럼*		혼합 핵분열 스펙트럼**	
	증배계수	%오차	증배계수	%오차
실험-1	0.9890	1.1	0.9896	1.04
실험-2	1.0009	0.09	1.0016	0.16
실험-3	1.0058	0.58	1.0065	0.65
실험-4	0.9925	0.75	0.9935	0.65
실험-5	0.9940	0.6	0.9950	0.5
실험-6	0.9958	0.42	0.9967	0.33
평균	0.9963	0.59	0.9972	0.56
표준편차	0.0055	0.31	0.0055	0.2778

표-6 Westinghouse 임계계산 결과

임계실험 번호	단일 핵분열 스펙트럼*		혼합 핵분열 스펙트럼**	
	증배계수	%오차	증배계수	%오차
1	0.9937	0.63	0.9940	0.6
3	0.9982	0.18	0.9986	0.14
4	1.0027	0.27	1.0034	0.34
6	0.9915	0.85	0.9922	0.78
7	0.9956	0.44	0.9962	0.38
8	0.9942	0.58	0.9946	0.54
9	0.9972	0.28	0.9974	0.26
10	1.0000	-	1.0003	0.03
11	0.9905	0.95	0.9909	0.91
12	0.9859	1.41	0.9864	1.36
13	0.9843	1.57	0.9848	1.52
평균	0.9940	0.6509	0.9943	0.6236
표준편차	0.0054	0.43	0.0054	0.4671

*: 100% Pu-239 핵분열 스펙트럼
 **: (90% Pu-239)+(6% U-235)+(4% U-238)