

열중성자 산란법칙 라이브러리 ENDF/B-VI Release-2의 검증

안호준, 황원국
경희대학교
김정도
한국원자력연구소

요약

최근 열중성자 산란법칙 라이브러리 ENDF/B-VI Release-2가 제공된 바 있다. 여기에는 경수내 수소와 흑연내 탄소에 대한 산란법칙이 포함되어 있어, 이를 경수격자인 TRX와 BAPL로 WIMS 계산을 통하여 검증하였다. 온도에 따른 변화를 검증하기 위해 가압경수로와 흑연감속 기체냉각로의 단위격자에 대한 WIMS계산을 수행하였다.

WIMS 라이브러리 생산에 Release-1, Release-2 및 자유기체모델을 이용하여 상대적 차이를 검증한 결과 Release-2는 대체적으로 Release-1보다 개선되었으나, 그 개선의 정도는 현저하지 않음을 보여 주고 있다.

1. 서론

열중성자 산란법칙 ENDF/B-VI Release-2¹⁾가 제공되기 전에는 대부분의 핵설계용 라이브러리 생산에 원자력개발 초기의 미국 General Atomic사에서 계산된 열중성자 산란법칙 라이브러리²⁾가 이용되어 왔다. 이를 Release-2와 구별하기 위하여 편의상 Release-1이라 분류한다. Release-1은 열영역이 1 eV까지로 제한되어 있어, WIMS라이브러리에서 열중성자 영역으로 분류되는 4 eV 사이는 자유기체모델을 적용하여 왔다.

Release-2는 이와 같은 점을 개선하기 위하여 열중성자 절단 에너지를 4 eV로 올렸다. 나아가 Release-1 계산 시 전산능력의 제한으로 단순화된 계산을 하였으나, Release-2를 위한 계산은 보다 상세히 하여 열중성자 산란법칙 라이브러리에 현저히 많은 결맞음 산

란효과를 포함하고 있다.

본 연구에서는 새로 제공된 열중성자 산란법칙 라이브러리 Release-2를 이용한 경수격자 벤치마크 계산을 포함하여, 발전로 해석용 라이브러리에 이용될 때의 문제점을 검토하기 위해 PWR과 Magnox의 단위격자 계산을 수행하였다.

2. WIMS 라이브러리 생산

열중성자 산란법칙 라이브러리 Release-2에는 중수의 중수소에 대한 산란법칙이 없다. 따라서 Release-1과 비교하기 위하여는 경수내 수소와 흑연내 탄소로 제한된다.

WIMS용 라이브러리 생산에는 NJOY91.118³⁾이 이용되었으며, 핵종은 ENDF/B-VI에 있는 ²³⁵U, ²³⁸U, C, Al, Mg, O, Zr 및 H로 제한하였다. 각 핵종의 처리 자료는 이전의 관련연구에서 최적화된 수치⁴⁾을 이용하였다. 발전로 적용 시 경수내 수소와 흑연내 탄소에 열중성자 산란법칙의 상대적 차이를 검토하기 위해 자유기체모델도 포함시켰다. 따라서 WIMS 라이브러리는 열영역 취급과 관련된 3개의 서로 다른 셀이 된다.

3. 열중성자 산란법칙 라이브러리 검증

3.1 경수격자 벤치마크 문제

경수 감속격자 벤치마크 검증문제는 CSEWG⁵⁾에서 추천하는 TRX와 BAPL-UO₂ 시리즈이다. 미국 Westinghouse사의 실험인 TRX노심은 상온에서 실험된 경수감속 격자로 1.3 w/o 농축의 알루미늄 피복의 금속우라늄 연료를 사용하고 있다. 한편 BAPL-UO₂ 격자는 1.311 w/o 농축된 고밀도 산화 우라늄 연료를 사용하며 역시 알루미늄 피복으로 되어 있다. 이 노심은 모두 삼각격자구조를 가지고 있으며, 이들을 검증 계산에 적용하기 위해 단위셀로 등가 변환하였다. 기타 자료는 표-1에 주어져 있다.

이상의 벤치마크 실험에서 측정된 파라미터는 (1) 유효증배인자, (2) ²³⁸U 열외 포획반응율과 열영역 핵분열율의 비, (3) ²³⁵U 열외 핵분열율과 열영역 핵분열율의 비, (4) ²³⁸U 핵분열율과 ²³⁵U 핵분열율의 비 및 (5) ²³⁸U 포획 반응율과 ²³⁵U 핵분열율의 비 등이다.

3.2 발전로 문제

열중성자 산란법칙 라이브러리 평가에 산란법칙의 온도 종속성을 검토하기 위하여 선정된 발전로는 표준 PWR과 Magnox이다. Magnox는 영국 CEGB의 원자로로 피복재는

Mg(Al 0.8%)합금을 사용하고 사각형의 격자 배열이며, 피복재 주변으로 냉각 핀들이 감싸, 핵연료와 감속재 사이를 CO₂ 가스가 흘러 냉각시키도록 설계된 발전로이다. 본 연구에서 이용한 각 발전로의 제원은 표-2에서 보여 주고 있다.

4. 검증계산 결과

4.1 경수격자 벤치마크

표 3에는 경수격자 벤치마크 계산결과가 주어졌 있다. 경수감속 격자 벤치마크 문제에서 k_{eff} 값의 경우, BAPL-1의 계산결과만 Release-2가 Release-1보다 오차가 약간 큰 것을 제외하고 모든 경수감속 격자의 k_{eff} 값은 Release-2가 오차가 작음을 알 수 있다. 나아가 다른 적분 격자 파라미터도 δ^{25} 을 제외하고 전반적으로 Release-2가 Release-1보다 오차의 감소를 볼 수 있다. 그러나 자유기체 모델을 적용한 경우에는 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

4.2 발전로 격자

PWR 격자계산 결과 유효중배인자는 열중성자 산란법칙 라이브러리 Release-1보다는 Release-2가 약간 큼을 알 수 있다[표-4]. 그러나 냉각재 온도를 높일수록 모든 계산 결과는 유효중배인자가 약간씩 감소함을 보이고 있다. 이러한 경향은 Magnox 격자계산 결과도 동일하다[표-5]. 그러나 Magnox의 경우 유효중배인자는 Release-1이 Release-2보다 크다.

5. 결론

계산결과에서 검토된 바와 같이 열중성자 산란법칙 라이브러리 Release-2는 Release-1에 비교하여 비교적 개선되었음을 알 수 있다. 그러나 그 차이는 균정수 생산을 위한 자료에서의 민감도에 비교하여 크지 않아 반드시 Release-2를 이용해야 한다는 타당성은 찾기 어렵다. Release-2는 초저온수에 대한 산란법칙의 생산에 중점이 주어져 있는 것으로 판단되어 향후 상세한 검증계산이 필요할 것이다. 단지 벤치마크 실험은 상온에서 이루어져 발전로의 환경에 대하여는 추가 연구가 필요할 것이다. 나아가 중수내의 중수소에 대하여는 Release-2에 수록되지 않아 이에 대한 검토도 아울러 이루어져야 할 것이다.

본 연구에서는 발전로 계산에서 열중성자 산란법칙 라이브러리 개선에 대한 민감도를 검토하기 위하여 자유기체 모델과 비교하였다. 그러나 발전로 계산을 검증할 수 있는 적절한 방법을 강구하여 상세한 분석을 필요로 할 것으로 보인다.

참고문헌

1. R.E. MacFarlane, New Thermal Neutron Scattering Files for ENDF/B-VI Release 2, LA-12639-MS (January 1994)
2. J.U. Koppel & D.H. Houston, ENDF/B-6 Thermal Neutron Scattering Sublibrary Release 1, IAEA-NDS-97 Rev.1 (September 1990)
3. R.E. MacFarlane & D.W. Muir The NJOY Nuclear Data Processing System, Version 91, LA-12740-M (October 1994)
4. 박병철, 벤치마크 검증을 통한 WIMS/D 라이브러리 생산방안에 관한 연구, 석사논문, 경희대, 1994
5. Cross Section Evaluation Working Group Benchmark Specification, BNL-19302 (November 1974)

표-1. 경수감속격자 특성

격자	바깥 반지름(cm)				감속재/핵연료 체적비	버클링(cm ²)
	핵연료	공동	피복재	격자 간격		
TRX-1	0.49150	0.50420	0.5753	1.8060	2.35	0.005174 0.000526
TRX-2	0.49150	0.50420	0.5753	2.1740	4.02	0.004943 0.000526
BAPL-1	0.48640	0.50420	0.5753	1.5578	1.43	0.002743 0.000525
BAPL-2	0.48640	0.50420	0.5753	1.6523	1.78	0.003018 0.000529
BAPL-3	0.48640	0.50420	0.5753	1.8057	2.40	0.002829 0.000530

표-2. 각 원자로의 특성

원자로 종류	PWR	Magnox
핵연료	2.9% 농축 산화 우라늄	천연 금속 우라늄
피복재	Zr-4	Magnox(Al 0.8%)
냉각재	경수	CO ₂ 가스
감속재	경수	흑연(C)
핵연료 집합체	16×16 배열	채널당 8 개의 핵연료
원자로 직경×높이(m)	5.63×5.9	17×9
핵연봉 직경(cm)	0.9703	3.0
UO ₂ 펠렛 직경(cm)	0.8255	2.8
피치(cm)	1.2802	19.7 ¹⁾
버클링(cm ²)	0.000067991	0.0000121847

주) ¹⁾ : 격자간 간격

표-3. 경수감속적자 벤치마크 결과

(a) TRX-1 계산결과

	실험치	열중성자 산란법칙 라이브러리						자유기체모델		
		Release-1			Release-2					
		계산치	계산/실험	오차(%)	계산치	계산/실험	오차(%)	계산치	계산/실험	오차(%)
k_{eff}	1.0000 ± 0.0026	0.99180	0.9918	-0.820	0.99193	0.9919	-0.807	0.98972	0.990	-1.028
ρ^{28}	1.320 ± 0.021	1.36125	1.031	+3.125	1.36067	1.031	+3.081	1.36597	1.035	+3.482
δ^{25}	0.0987 ± 0.0010	0.09842	0.997	-0.282	0.09827	0.996	-0.434	0.09652	0.978	-2.207
δ^{28}	0.0948 ± 0.0410	0.09915	1.048	+4.809	0.09913	1.048	+4.792	0.09936	1.050	+5.037
C^*	0.797 ± 0.008	0.79711	1.000	+0.014	0.79700	1.000	0.0	0.79502	0.998	-0.248

(b) TRX-2 계산결과

	실험치	열중성자 산란법칙 라이브러리						자유기체모델		
		Release-1			Release-2					
		계산치	계산/실험	오차(%)	계산치	계산/실험	오차(%)	계산치	계산/실험	오차(%)
k_{eff}	1.0000 ± 0.0009	0.99285	0.9929	-0.715	0.99296	0.9930	-0.704	0.99247	0.9925	-0.753
ρ^{28}	0.837 ± 0.018	0.85265	1.019	+1.870	0.85235	1.018	+1.834	0.85321	1.019	1.936
δ^{25}	0.0814 ± 0.0001	0.06049	0.985	-1.478	0.06040	0.984	-1.627	0.05918	0.964	-3.608
δ^{28}	0.0893 ± 0.0035	0.07017	1.013	+1.258	0.07016	1.012	+1.246	0.07019	1.013	+1.281
C^*	0.847 ± 0.008	0.64283	0.994	-0.644	0.64277	0.993	-0.654	0.64057	0.990	-0.994

(c) BAPL-1 계산결과

	실험치	열중성자 산란법칙 라이브러리						자유기체모델		
		Release-1			Release-2					
		계산치	계산/실험	오차(%)	계산치	계산/실험	오차(%)	계산치	계산/실험	오차(%)
k_{eff}	1.0000 ± 0.0008	1.00024	1.0002	+0.024	1.00036	1.0004	+0.036	0.99757	0.9976	-0.243
ρ^{28}	1.39 ± 0.01	1.39547	1.004	+0.394	1.39501	1.004	+0.360	1.40171	1.008	+0.842
δ^{25}	0.084 ± 0.002	0.08275	0.985	-1.486	0.08263	0.984	-1.627	0.08128	0.968	-3.234
δ^{28}	0.078 ± 0.004	0.07606	0.975	-2.485	0.07605	0.975	-2.498	0.07628	0.978	-2.200
C^*		0.80274			0.80265			0.80140		

(d) BAPL-2 계산결과

	실험치	열중성자 산란법칙 라이브러리						자유기체모델		
		Release-1			Release-2					
		계산치	계산/실험	오차(%)	계산치	계산/실험	오차(%)	계산치	계산/실험	오차(%)
k_{eff}	1.0000 ± 0.0008	0.99937	0.9994	-0.063	0.99948	0.9995	-0.052	0.99599	0.9960	-0.401
ρ^{28}	1.120 ± 0.01	1.16183	1.037	+3.735	1.16154	1.037	+3.709	1.16742	1.042	+4.234
δ^{25}	0.068 ± 0.001	0.06754	0.993	-0.678	0.06745	0.992	-0.816	0.06638	0.976	-2.390
δ^{28}	0.070 ± 0.004	0.06538	0.934	-6.598	0.06537	0.934	-6.610	0.06562	0.937	-6.256
C^*		0.73222			0.73217			0.73128		

(e) BAPL-3 계산결과

	실험치	열중성자 산란법칙 라이브러리						자유기체모델		
		Release-1			Release-2					
		계산치	계산/실험	오차(%)	계산치	계산/실험	오차(%)	계산치	계산/실험	오차(%)
k_{eff}	1.0000 ± 0.0001	0.99918	0.9992	-0.082	0.99928	0.9993	-0.072	0.9961	0.9961	-0.390
ρ^{28}	0.908 ± 0.01	0.91353	1.008	+0.831	0.91327	1.008	+0.802	0.91709	1.012	1.224
δ^{25}	0.052 ± 0.001	0.05194	0.999	-0.108	0.05187	0.997	-0.251	0.05101	0.981	-1.898
δ^{28}	0.057 ± 0.0030	0.05356	0.940	-6.028	0.05356	0.940	-6.036	0.05374	0.943	-5.721
C^*		0.65527			0.65522			0.65428		

표-4. PWR 계산결과

감속계 온도 (°K)	Release-1	Release-2	자유기체모델
480	1.187890	1.187888	1.189299
530	1.187367	1.187371	1.188668
585 ¹⁾	1.186823	1.186826	1.188011
630	1.186385	1.186393	1.187504
680	1.185914	1.185931	1.186973
730	1.185465	1.185490	1.186464
800	1.184879	1.184916	1.185783

주) ¹⁾ : 운전 온도

표-5. Magnox 계산결과

감속계 온도 (°K)	Release-1	Release-2	자유기체모델
300	1.094594	1.091963	1.094783
345 ¹⁾	1.093195	1.090574	1.093179
400	1.091695	1.089079	1.091241
450	1.090258	1.087674	1.089624
500	1.086159	1.086488	1.088157
550	1.087949	1.085359	1.086868
600	1.086989	1.084400	1.085716

주) ¹⁾ : 운전 온도