

고속로 벤치마크 임계실험의 2차원 상세해석

길충섭, 김정도
한국원자력연구소

요 약

고속로 검증실험의 2차원 상세해석을 MATXS형 라이브러리와 TWODANT를 이용하여 수행하였다. 80군자료를 2차원 coarse mesh 계산으로 생산된 중성자속을 가중함수로하여 25군으로 축약하고, P_3S_8 , 2차원 R-Z모델로 임계도 및 중심반응률비를 계산하여 실험값과 비교하였다. 이 과정에서 ENDF/B-VI.3, JEF-2.2 그리고 JENDL-3.2 라이브러리를 상호 비교, 검토하였다.

1. 배 경

고속로용 벤치마크문제를 1차원과 2차원의 2가지 계산모델을 추천하고 있다. 지금까지는 대부분 고속로 임계실험을 해석하기 위해 1차원 확산계산을 수행하고, R.W. Hardie 등이 1차원에서 2차원, 확산계산에서 수송계산으로의 보정을 위해 생산한 수정인자[1]를 이용하여 보정하고 이를 실험치와 비교, 분석하고 있다. 그러나 이 보정인자는 1970년대에 생산된 것으로 지금의 data/method 관점에서 보면 신뢰도가 의문시 된다. 현재의 전산기 조건에서는 2차원, discrete ordinates 상세계산을 직접 수행하는 것이 가능하다. 본 연구에서는 이를 위해 새로이 공개된 ENDF/B-VI.3, JEF-2.2 그리고 JENDL-3.2에 기초한 고속로용 MATXS형 다군 단면적 자료를 생산하고, 벤치마크 해석을 수행하여 각종 라이브러리의 적용성을 검토하였다.

2. 라이브러리 생산

현재 ENDF-6 format 평가핵자료를 완전히 처리할 수 있는 코드는 NJOY[2]뿐이다. 전세계 거의 모든 연구진들이 이를 이용해 열, 고속, 핵융합 및 차폐에 이르는 모든 영역의 핵자료를 처리하고 있다. 여기서는 NJOY94를 이용하여 ENDF/B-VI.3, JEF-2.2 그리고 JENDL-3.2로 각각의 MATXS형 중성자 80군과 광자 24군의 결합형 라이브러리를 생산하였다.

군 구조는 미국 LANL의 80군을 선택하였는데, 이 군구조는 고속로 및 핵융합로 해석에 적합하도록 되어 있다. 공명영역에서의 군구조는 주로 1/8 lethargy로써 U-238 포획단면적의 상세취급이 가능토록 하였으며, 3keV 근처에서 중요한 Sodium 공명과 27keV 근처의 철 공명 등이 고려될 수 있도록 하였다. 핵분열 스펙트럼 영역에서는 여러 종류의 원자로 설계와 GODIVA나 JEZEBEL과 같은 고속 임계노심 등의 차이에서 오는 문제들이 해소될 수 있고, 산소의 공명현상이나 "window" 현상을 상세히 취급할 수 있도록 세분화되어 있다. 10MeV 이상에서는 핵융합로 blanket에서의 Tritium 생산과 방사선 손상 계산에 적합한 군구조이다. 몇몇의 낮은 에너지군은 원자로의 바깥쪽 blanket이나 차폐영역의 연화된 중성자속에 적합하도록 되어 있다.

NJOY 수행과정에서 사용된 각종 tolerance는 0.1%로 하였고 Legendre order 5까지의 자료를 생산하였다. 상세 점자료(point data)로부터 다군화 하기위한 가중함수로서는 GROUPT routine 입력 중에서 IWT=8을 선택하였다. 이것은 고속 증식로 설계를 위한 핵자료의 다군화를 위한 것으로서, 고 에너지에서 fusion peak를 갖고 fission spectrum으로 이어져 있으며 고속로에 적합한 slowing-

down spectrum과 thermal tail을 갖고 있다[2].

MATXS형 라이브러리는 LANL에서 ISOTXS를 보완하여 개발해 현재 미국내는 물론이고 세계 여러나라에서 열, 고속영역은 물론이고 핵융합 영역에 까지 사용되고 있다. 이 형식은 중성자뿐만 아니라 광자, 하전입자 등의 자료를 같이 취급할 수 있고 핵반응 단면적 뿐만 아니라 발열계산을 위한 KERMA, 방사선 손상의 DPA 등의 각종 자료를 수록하여 적절히 사용할 수 있는 장점을 갖고 있다.

3. 검증 계산

3.1. 벤치마크 문제

생산된 MATXS format 라이브러리들의 중성자 자료를 검증하기 위해 R.W. Hardie 등이 선정하여 ENDF/B-IV자료를 검증한 바 있고 현재 국내는 물론 외국에서도 자주 선정되고 있는 18가지 고속 임계노심 문제를 조사하였다. 18가지 노심중에는 미국의 CSEWG의 고속로 벤치마크 문제[3]이 외에 ZPR-3-49, -50, -53 그리고 -54가 추가되어 있다. 이들 노심에 대해선 k_{eff} 값, 각종 중심반응률비, 반응도계수 등의 실험치가 주어져 있는데 금번 계산에서는 k_{eff} 값과 중심반응률비를 선정하여 비교하였다. 제시된 실험치에는 없으나 추정 가능한 값 즉 Pu-239 핵분열률에 대한 U-238 포획률의 비 등의 값도 비교하였다. 노심에 대한 기하학적 모형은 2차원 R-Z모형을 이용하였다(단 ZPPR-2는 CSEWG의 full core 모델 채택).

3.2. 임계계산

2차원 모델 계산에 discrete ordinates 코드인 TWODANT[4]를 사용하였다. 먼저 MATXS format 자료는 각 노심의 특성자료와 함께 TRANSX 코드[5]로 받아드려 영역별 거시적 단면적과 영역별 중성자속이 고려된 핵분열 스펙트럼을 마련한다. TWODANT는 TRANSX의 출력을 직접 받아드려 임계계산을 수행한다. Mesh 간격은 1cm 이하가 되도록 선택하였으며, 수렴조건으로 10^{-5} 가 적용되었다. 본계산에 앞서 몇가지 파라메타에 대한 예비 검토계산을 수행하였다. 즉 비등방성 고려를 위한 Legendre order, 각분할을 위한 angular quadrature order 그리고 균축약에 따른 효과를 검토하였다. VERA-11A 및 ZPR-6-7의 두가지 노심에 대한 P_1 의 l 값 0부터 5까지의 임계계산을 수행하여 l 값이 3이상이면 차이가 거의 없는 것을 확인하였고, ZPR-3-48과 ZEBRA-2노심에 대해 S_N 의 N 값을 2부터 48까지 변화시키면서 k_{eff} 값의 추이를 분석하였다. 한편 80군 자료를 lethargy 폭을 1/2로한 35군, 1.0으로한 20군 그리고 35군을 효율적으로 조절한 25군과 현재까지 고속로의 3차원 핵계산에서 자주 사용되고 있는 6군으로 축약한 소수군에 대한 효과를 조사하기 위해 1차원 ZPR-3-48과 ZEBRA-2, 그리고 2차원 ZPR-3-48에 대한 계산을 수행하였다. 위와 같은 과정을 거쳐 검증노심의 해석에 적절하다고 판단된 25군의 P_3S_8 을 선택하였다[6]. 2차원의 같은 모델로 처음에 coarse mesh에 의한 계산으로 각 영역별 중성자속을 구하고 이를 가중함수로한 축약과정을 통해 25군 단면적을 생산하고 최종적으로 fine-mesh, 25군 계산을 수행하였다. 임계도에 있어서 CSEWG에서 추천한 2차원 벤치마크 문제일지라도 노심이나 반사체 각 영역에서 균질화된 혼합물 자료를 제시하고 있는데 비균질성이 고려되지 않은 문제에는 수정인자가 필요하게 된다. 여기서는 CSEWG에서 제시한 자료와 그밖의 R.W. Hardie의 보고서 자료를 적용하였다.

4. 결과 및 분석

4.1 임계도

표 1, 2, 3에 각각의 라이브러리를 이용하여 계산된 결과를 실험치와 비교하여 정리하였다. MOX 노심과 우라늄 노심으로 구분하여 살펴보면, MOX 노심에서 ENDF/B-VI.3 결과는 대부분이

실험값보다 크게 나타나, 평균적으로 0.4% 정도 높게 나타났다. JEF-2.2와 JENDL-3.2 결과는 평균 0.3%와 0.4% 실험값에 비해 낮았다. 실험값과 계산치와의 평균 편차는 JEF-2.2 결과가 0.7%로 가장 작았다. 우라늄 노심에서는 JEF-2.2 및 ENDF/B-VI.3 결과는 JEF-2.2의 VERA-1B노심을 제외하면 모두 실험치에 비해 다소 크게 나타났으나, JENDL-3.2 결과는 대부분 다소 낮게 나타났다. 임계도는 전체적으로 만족스러운 결과를 얻었으나, JEF-2.2를 이용한 결과가 좀더 실험치에 근접했다.

4.2 반응률비

● F28/F25 : VERA-11A노심 및 CSEWG 비추천 노심에서를 제외하면 세가지 라이브러리를 이용한 계산결과 모두는 대부분 실험 오차 범위내로 만족한 결과이다. 그러나 ZPPR-2 노심의 ENDF/B-VI.3 및 JENDL-3.2의 결과는 실험치와 10% 이상의 차이를 보이고 있다.

● F49/F25 : 세가지 라이브러리 모두 대부분의 노심에서 계산결과는 실험치와 약 2%의 차이로 실험 오차 범위내에서 일치하고 있다. 그러나 CSEWG 비추천 노심에서는 여전히 다른 노심에 비해 실험치와 차이를 보이고 있다.

● F40/F25 : CSEWG 비추천 노심에서는 세가지 라이브러리 모두 실험치와 큰 차이를 보였다. 또한 ZPR-3-56B 노심에서도 약 15%의 차이를 나타냈다. 그러나 ZPR-3-11 노심에서는 JEF-2.2와 JENDL-3.2 계산결과는 실험 오차 범위에서 일치하지만 ENDF/B-VI.3 결과는 약 10%의 차이를 보이고 있다.

● C28/F25 : VERA-11A 노심에서 큰 차이를 보이고 있는 데, 이는 다른 문헌들에서도 같은 결과를 보이고 있다[7, 8]. 이 노심의 추천 실험자료에 문제가 있는 것으로 판단된다.

● C28/F49 : 이 값은 벤치마크 문제에 실험값이 주어지지 않지만 다른 값들에서 추정할 수 있다. 전체적으로 실험값과의 평균 편차가 약 5% 정도이다.

중심반응률비에서는 전반적으로 1~5%인 실험오차를 고려하면 세가지 라이브러리를 이용한 결과 모두 비슷한 경향을 보이면서 만족한 결과를 보이고 있다. 그러나 몇가지 노심 특히 CSEWG 비추천 노심인 ZPR-3-49, -50, -53, -54와 VERA-11A, VERA-1B 및 ZPR-6-7, ZPR-6-6A노심의 일부 자료에서 큰 차이를 보이고 있는 데, 이는 전번 JEF-1을 이용한 벤치마크 계산[7]이나 H. Takano[8] 등이 수행한 바 있는 계산에서도 같은 결과를 보이고 있다.

참 고 문 헌

1. R.W. Hardie, R.E. Schenter, and R.E. Wilson, "An Analysis of Selected Fast Critical Assemblies Using ENDF/B-IV Neutron Cross Sections," *Nucl. Sci. & Eng.*, 57, 222 (1975).
2. R. E. MacFarlane, D.W. Muir, "The NJOY Nuclear Data Processing System, Version 91," LA-12740-M (Oct. 1994).
3. ENDF-202, Cross Section Evaluation Working Group Benchmark Specifications, BNL-19302 (1974) (Revised 11-1981).
4. R.D. O'Dell, F.W. Brinkley, Jr. and D.R. Marr, "User's Manual for ONEDANT: A Code Package for Two-Dimensional Diffusion Accelerated, Neutron-Particle Transport," Los Alamos National Laboratory report LA-9184-M (February 1982).
5. R. E. MacFarlane, "TRANSX 2: A Code for Interfacing MATXS Cross-Section Libraries to Nuclear Transport Codes," Los Alamos National Laboratory report LA-12312-MS (Dec.1993).
6. 김정도, 김충섭, "KAFAX-F22 : JEF-2.2를 이용한 고속로용 다군 단면적 라이브러리 생산 및 검증, - 중성자 80군 및 광자 24군 -, " KAERI/TR-842/97 (1997).

7. Jung-Do Kim et al., "An Analysis of Fast Critical Experiments Using JEF-1-Based 50-Group Constant Set," *J. of Korea Nucl. Soc. Vol. 25, No. 3*, September (1993).
8. JAERI-Research 96-010, P. ZHAO and H. TAKANO, "Sensitivity Analysis of JENDL-3.2 Based on Benchmark Calculations for Fast Reactors," (March 1996).

표 1. JEF-2.2를 이용한 25군, 2차원 R-Z모델 계산결과 (C/E)

Assembly	k_{eff}	Correct	F28/F25	F49/F25	F40/F25	C28/F25	C28/F49
VERA-11A	0.98004	0.98004	0.87258	0.99495	1.09899	0.74933	
ZEBRA-3	0.98579	0.98579	0.98169	0.98834	0.99618		
SNEAK-7A	1.00441	0.99991	0.93304	0.96826		0.97082	1.00586
ZPR-3-54	0.96772	0.99072	1.15462	0.94027	1.19927		
ZPR-3-53	0.97817	1.00117	1.14242	0.93829	1.18557		
SNEAK-7B	1.00063	0.99853	0.98269	0.99085		1.01447	1.02738
ZPR-3-50	0.97840	1.00040	1.13844	0.99220	1.32919		
ZPR-3-48	0.98467	1.00297	1.01692	0.99299	1.03553	0.96339	0.97289
ZPR-3-49	0.98832	1.00412	1.06188	1.01165			
ZPR-3-56B	0.98865	0.99885	0.97046	0.95093	0.84129		
ZPPR-2	0.98786	1.00536	1.07087	0.98342	1.09052		
ZPR-6-7	0.98414	1.00074	0.98892	0.97763		1.05471	1.07926
Average		0.99738	1.02621	0.97748	1.09707	0.95054	1.02135
S. D. *		0.00744	0.08495	0.02231	0.13766	0.10583	0.03866
VERA-1B	0.99852	0.99852	0.90377	0.95317	1.19631	0.92846	0.89822
ZPR-3-6F	1.00870	1.00870	0.97872	1.01584	0.98512	0.95844	0.94623
ZPR-3-12	1.00530	1.00530	1.04426	0.99187		0.96869	0.97505
ZPR-3-11	1.00571	1.00571	1.04299	0.98167	1.02500	0.95082	0.96978
ZEBRA-2	1.00335	1.00335	1.01888	0.99999	1.05034	0.95009	0.94867
ZPR-6-6A	1.00342	1.01072	0.97317			1.01787	
Average		1.00538	0.99363	0.98851	1.06419	0.96388	0.94759
S. D.		0.00389	0.04891	0.02091	0.07974	0.02713	0.02715
Total Ave.		1.00005	1.01535	0.98072	1.08611	0.95701	0.98037
S. D.		0.00750	0.07645	0.02248	0.12244	0.07444	0.04916

* Average $|C/E - 1|$

표 2. ENDF/B-VI.3을 이용한 25군, 2차원 R-Z모델 계산결과 (C/E)

Assembly	k_{eff}	Correct	F28/F25	F49/F25	F40/F25	C28/F25	C28/F49
VERA-11A	0.98903	0.98903	0.89840	0.98889	1.12867	0.74588	
ZEBRA-3	1.00633	1.00633	1.03446	0.99988	1.08792		
SNEAK-7A	1.01093	1.00643	0.96754	0.96391		0.96289	1.00214
ZPR-3-54	0.96013	0.98313	1.20937	0.94181	1.22800		
ZPR-3-53	0.98328	1.00628	1.18112	0.93769	1.20078		
SNEAK-7B	1.00986	1.00776	1.01991	0.98726		1.00316	1.01962
ZPR-3-50	0.98483	1.00683	1.18275	0.99094	1.37480		
ZPR-3-48	0.99123	1.00953	1.06376	0.99267	1.09775	0.95611	0.96585
ZPR-3-49	0.99607	1.01187	1.10584	1.00915			
ZPR-3-56B	0.99197	1.00217	1.01971	0.95029	0.89788		
ZPPR-2	0.99421	1.01171	1.11577	0.98122	1.15480		
ZPR-6-7	0.99179	1.00839	1.02943	0.97529		1.04942	1.07642
Average		1.00412	1.06901	0.97658	1.14633	0.94349	1.01601
S. D. *		0.00853	0.08934	0.02223	0.12734	0.10428	0.03991
VERA-1B	1.00254	1.00254	0.89866	0.94097	1.19158	0.92777	0.90920
ZPR-3-6F	1.00658	1.00658	0.98365	1.02195	1.01736	0.94477	0.92715
ZPR-3-12	1.00788	1.00788	1.06226	0.99249		0.95592	0.96159
ZPR-3-11	1.01315	1.01315	1.06989	0.99162	1.10291	0.93794	0.94704
ZEBRA-2	1.00374	1.00374	1.03736	0.99672	1.09579	0.94323	0.94490
ZPR-6-6A	1.00072	1.00802	0.98610			1.01274	
Average		1.00699	1.00632	0.98875	1.10191	0.95373	0.93798
S. D.		0.00342	0.05866	0.02635	0.06170	0.02769	0.01807
Total Ave.		1.00508	1.04811	0.98016	1.13152	0.95180	0.97266
S. D.		0.00736	0.08568	0.02416	0.11188	0.07311	0.04892

* Average $|C/E - 1|$

표 3. JENDL-3.2를 이용한 25군, 2차원 R-Z모델 계산결과 (C/E)

Assembly	k_{eff}	Correct	F28/F25	F49/F25	F40/F25	C28/F25	C28/F49
VERA-11A	0.97736	0.97736	0.92689	0.99663	1.13687	0.72620	
ZEBRA-3	0.98397	0.98397	0.98582	0.98304	0.99181		
SNEAK-7A	1.00284	0.99834	0.97639	0.97162		0.96444	0.99580
ZPR-3-54	0.96157	0.98457	1.23401	0.95436	1.23247		
ZPR-3-53	0.97511	0.99811	1.21576	0.95123	1.21214		
SNEAK-7B	0.99989	0.99779	1.00808	0.99005		1.01367	1.02739
ZPR-3-50	0.97783	0.99983	1.18996	1.00046	1.34659		
ZPR-3-48	0.98317	1.00147	1.05922	0.99514	1.05269	0.95834	0.96571
ZPR-3-49	0.98599	1.00179	1.10707	1.01397			
ZPR-3-56B	0.99280	1.00300	1.00770	0.95040	0.85127		
ZPPR-2	0.98888	1.00638	1.11291	0.98447	1.10009		
ZPR-6-7	0.98566	1.00226	1.02696	0.97857		1.05399	1.07748
Average		0.99624	1.07090	0.98083	1.11549	0.94333	1.01660
S. D. *		0.00870	0.09650	0.01965	0.14413	0.11403	0.04137
VERA-1B	0.99291	0.99291	0.91365	0.94880	1.20077	0.91617	0.89042
ZPR-3-6F	1.00056	1.00056	0.98674	1.01212	0.99034	0.94174	0.93315
ZPR-3-12	0.99663	0.99663	1.03598	0.98699		0.96414	0.97526
ZPR-3-11	0.99649	0.99649	1.02240	0.97697	1.01450	0.95435	0.97807
ZEBRA-2	0.99482	0.99482	1.00169	0.99908	1.03174	0.95010	0.94954
ZPR-6-6A	0.99825	1.00555	0.96672			1.01620	
Average		0.99783	0.98786	0.98479	1.05934	0.95712	0.94529
S. D.		0.00415	0.04011	0.02151	0.08297	0.03030	0.03290
Total Ave.		0.99677	1.04322	0.98199	1.09677	0.95085	0.97698
S. D.		0.00754	0.09098	0.02029	0.12978	0.08036	0.05087

* Average $|C/E - 1|$