

ZPPR Assembly-02 노심을 대상으로 ENDF/B-VI 와 JEF-2.2 라이브러리를 이용한 비교계산

A Comparative Neutronic Analysis for ZPPR Assembly-02 by using the ENDF/B-VI and JEF-2.2 Libraries

김학성^a, 홍서기^b, 김영균^b, 김명현^a

^a경희대학교

경기도 용인시 기흥읍 서천리 1

^b한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

CSEWG 고속 검증노심중 ZPPR Assembly-02 노심모델을 대상으로 ENDF/B-VI 와 JEF-2.2 라이브러리를 이용하여 계산하고 그 결과를 비교, 분석해 보았다. DIF3D 코드와 TWODANT 코드를 이용하여 유효증배계수, 축약군에 따른 유효증배계수 변화, 중요 핵종에 대한 각종 노심중앙에서의 반응률비를 계산하여 실험값과 비교하였고, 노심 출력분포, 냉각재 기화반응도에 대하여 두 라이브러리의 차이를 비교하였다. 또, REBUS-3 코드로 연소계산을 수행하여 두 라이브러리에 대하여 시간에 따른 유효증배계수의 변화를 비교하였다. 또한 냉각재를 납으로 교체했을 경우의 영향도 함께 연구하였다. 계산 결과 두 라이브러리 모두 실험값과 근접한 결과를 보였다. 그러나 납냉각재의 경우에 유효증배계수에 상당한 차이가 있었다.

Abstract

A comparative neutronic analysis for ZPPR Assembly-02 core model was performed by using the ENDF/B-VI and JEF-2.2 libraries. By using the DIF3D and TWODANT codes, K_{eff} , relative main reaction rates at the core center for several energy group structures were calculated and compared with experimental data. Additionally, the power

distribution and coolant void reactivity for Pb and Na coolants were estimated and compared. Finally, the eigenvalue changes over time were calculated by using the REBUS-3 code. The results show that the relative reaction rates calculated by using two nuclear data libraries give good agreements with the experimental values. However, in case of Pb coolant, there was significant differences ($\sim 2\%$) in the eigenvalues.

1. 서론

1990년대 후반부터 현재까지 국내 액체금속로 노심설계/해석에는 JEF-2.2를 기초로 한 고속로용 다군 단면적 라이브러리를 생산하여 사용하고 있다. 최근에 ENDF/B-VI 가 도입되어 고속로 노심에 대한 검증계산이 수행되고 있다[1]. 그 연장의 일환으로써 본 연구는 이 두 라이브러리의 신뢰도를 비교, 검증하는데 그 초점을 맞추고 있다. JEF-2.2[2]의 군구조는 중성자 80군 광자 24군이고, ENDF/B-VI는 보다 새로운 기초핵자료나 상세한 군구조의 요구가 있어 중성자의 군구조를 중성자에너지를 150군으로 세분화하고 광자의 에너지를 12군으로 축약한 라이브러리이다[3]. 본 연구에서는 이 두 라이브러리를 대상으로 CSEWG 고속 검증노심으로 벤치마크계산[4]을 수행하여 두 라이브러리의 정확성을 비교해보았다. DIF3D[5] 코드와 TWODANT[6] 코드를 이용하여 유효증배계수, 축약군에 따른 유효증배계수 변화, 중요 핵종에 대한 각종 노심중앙에서의 반응률비를 계산하여 실험값과 비교하였고, 노심 출력분포, 냉각재 기화반응도에 대하여 두 라이브러리의 차이를 비교하였다. 또, REBUS-3[7] 코드로 연소계산을 수행하여 두 라이브러리에 대하여 시간에 따른 유효증배계수의 변화를 비교하였다. 또한 냉각재를 납으로 교체했을 경우의 영향도 함께 연구하였다. 계산 결과 두 라이브러리 모두 실험값과 근접한 결과를 보였다. 그러나 납냉각재의 경우에 유효증배계수에 상당한 차이가 있었다.

2. 연구내용 및 방법

본 연구에서 선정한 CSEWG 고속 임계검증노심의 명칭은 ZPPR Assembly-02 (Loading No. 90, a Demonstration Fast Reactor Benchmark Critical by BNL)[4]로서, 노심의 기하학적 형태와 R-Z 구성내역이 그림 1에 제시되어있다. 이 노심을 대상으로 ENDF/B-VI와 JEF-2.2를 유효증배계수, 축약군에 따른 유효증배계수 변화, 각종 중심 반응률비, 노심 출력분포, 냉각재 기화반응도, 연소에 따른 유효증배계수 변화에 대하여 비교, 분석하였다. 위에 열거된 분석들은 액체금속로 노심설계 종합전산체제인 K-CORE 시스템을 이용하여 계산하였다. ENDF/B-VI의 경우에는 원자력연구소 핵자료랩에서 마련한 MATXS 형태의 150군 미시단면적 라이브러리(KAFAX-E66)[3]를 TRANSX 코드[8]를 이용하여 자기차폐효과가 고려된 유효 미시단면적을 생산하였다. 80군 및 9군 미시단면적을 150군 TWODANT 계산을 통해 얻은 노심영역별 스펙트럼을 이용 TRANSX 코드로 군축약을 통해서 생산하였다. 반면에 JEF2.2의 경우에는 MATXS 형태의 80군 미시단면적 라이브러리(KAFAX-F22)[2]를 이용하여 ENDF/B-VI 와 동일한 과정을 거쳐서 수송 및 확산코드에 사용될 다군핵단면적을 생산하였다. 연소계산을 위해서 핵분열 생성물에 대한 80군 lumped fission products 의 핵단면적을 생산하여 이용하였다. 연소계산시에 노심열출력은 250MWt 로 가정하였고 10년 동안 REBUS-3의 비평형계산모드를 이용하여 연소시켰다. 또한 최근에

납냉각재를 이용한 새로운 개념의 노심[9]들이 개발되고 있어 냉각재의 효과를 보기 위해서 냉각재를 소듐의 경우와 같은 연료대 냉각재 체적비를 가지도록 납의 원자밀도를 구해서 이를 냉각재로 한 경우에 대한 계산을 수행하였다.

3. 연구결과

표 1은 소듐냉각재 및 납냉각재 사용시에 대해 핵자료, 에너지군구조, 전산코드에 대한 유효증배계수를 보여준다. 표 1에서 보는 바와 같이 유효증배계수 계산결과는 에너지군을 축약시킬수록 조금씩 증가하는 경향을 보였고, TWODANT 코드 계산 결과가 DIF3D 코드 계산결과보다 더 크게 계산됨을 볼 수 있었다. 소듐냉각재의 경우에 본 논문에서 고려한 노심은 임계이므로 JEF2.2가 좀 더 정확한 증배계수를 줄을 알 수 있다. 노심에서 또한 냉각재를 납으로 교체했을 경우를 살펴보면 유효증배계수가 증가함을 볼 수 있는데 이는 본 연구에서 냉각재의 체적비를 동일하게 유지하고 소듐에 비해 흡수단면적이 적어 산란특성이 좋은 납으로 교체하였기 때문으로 판단된다. 표 2-1은 소듐냉각재의 경우에 대해 노심중앙에서 U-235의 일군핵분열단면적에 대한 중요 핵종의 일군핵단면적의 비를 보여준다. 이 값은 실질적으로 반응율의 비와 같다. 표 2-1에 나와있는 중심반응률비를 살펴보면 ZPPR Assembly-02 노심의 실험값과 비교하여 두 라이브러리 매우 적은 오차를 보임을 알 수 있다. 표 2-2에서는 납냉각재의 경우에 대하여 ENDF/B-VI 와 JEF2.2를 사용하여 계산한 반응율비를 보여준다. 비교적 잘 일치하지만 Pu-240과 Pu-242의 핵분열의 경우에 다소 큰 차이를 보이고 있다. 표 3-1과 3-2의 냉각재 기화반응도 계산결과를 보면 두 라이브러리간의 차이가 inner core에서의 냉각재기화반응도 차이가 크게 있음을 볼 수 있으나, 두 라이브러리의 경향은 비슷하게 나타난다. 예상할 수 있듯이 납냉각재의 경우가 냉각재기화계수가 더 큰 음의 값을 보였다. 또한 outer core의 경우에는 냉각재기화에 따른 중성자누설효과가 크기 때문에 냉각재기화계수가 음의 값을 줄을 알 수 있다. 그림 2-1과 2-2에 나와있는 출력분포를 살펴보면 두 라이브러리의 오차가 거의 없을 정도로 비슷한 경향을 나타내었다. 또 그림 3-1과 3-2에 나와있는 연소에 따른 유효증배계수의 영향을 보면 ENDF/B-VI가 JEF-2.2보다 큰 값을 가지고 시간에 따라 같은 경향으로 감소함을 볼 수 있다.

4. 결론

위와 같이 ZPPR Assembly-02 고속노심벤치마크문제를 대상으로 한 본 연구의 결과를 종합해 보았을 때, ENDF/B-VI에 JEF-2.2에 비해 K_{eff} 값에 있어 대체로 큰 값을 갖는 경향이 있음으로 나타났지만, 두 라이브러리 모두 노심중앙에서의 반응률의 경우에 실험값에 근접한 오차를 보여, 대체로 정확한 계산 결과를 보임을 확인할 수 있었다. 유효증배계수의 경우에는 JEF2.2의 경우가 실험치를 기준으로 했을 때 더 정확한 값을 주었다. 출력분포의 경우에는 거의 일치하였고 연소계산결과 유효증배계수의 영향을 보면 ENDF/B-VI가 JEF-2.2보다 큰 값을 가지고 시간에 따라 같은 경향으로 감소함을 볼 수 있다.

감사의 글

본 논문은 과학기술부에서 시행하는 원자력중장기사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 송훈, 김영일 “액체금속로용 150군 군정수 라이브러리 벤치마크 계산” KNS-2001 추계 학술발표회논문집, 2001
- [2] 김정도, 길충섭, “KAFAX-F22 : JEF-2.2를 이용한 고속로용 다군 단면적 라이브러리 생산 및 검증,” KAERI/TR-842/97, KAERI (1997).
- [3] 김정도, 길충섭, “KAFAX-E66 : KALMER 우라늄 금속연료 노심설계를 위한 중성자 150군 및 광자 12군 다군 단면적 라이브러리,” Calculation Note No. NDL-23/01, KAERI (2001)
- [4] ENDF-202 Cross Section Evaluation Working Group Benchmark Specifications, National Neutron Cross Section Center, BNL 1974.
- [5] K. L. Derstine, “DIF3D : A Code to Solve One-, Two-, and Three Dimensional Finite-Difference Diffusion Theory Problems,” ANL-82-64, ANL (1984)
- [6] R. E. Alcouffe et al., “User’s Guide for TWODANT : A Code Package Two-Dimensional Diffusion-Accelerated Neutron Transport,” LA-10049-M, LANL (1990)
- [7] B. J. Toppel, “A User’s Guide for the REBUS-3 Fuel Cycle Analysis Capability,” ANL-83-2, ANL (1983)
- [8] R. E. MacFarlane, “TRANSX 2 : A Code for Interfacing MATXS Cross-Section Libraries to Nuclear Transport Codes,” LA-12312-MS, LANL (1990).
- [9] S. G. Hong, E. Greenspan, and Y. I. Kim, “Once-for-Life Core for Encapsulated Nuclear Heat Source(ENHS) Reactor,” to be presented at ANS 2002 Annual Meeting, 2002, June 9, Hollywood, Florida, USA.

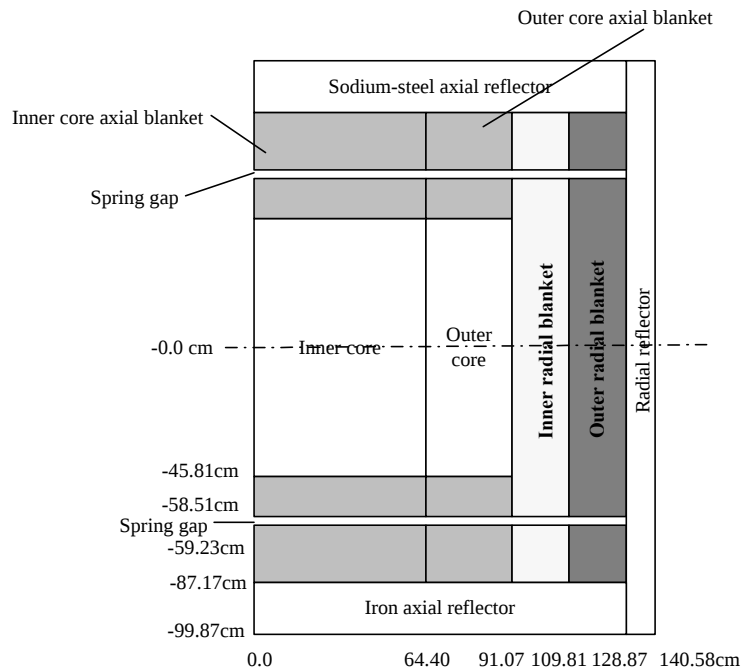


그림 1. ZPPR Assembly-02 노심모델

	Sodium cooled		Lead cooled	
	TWODANT	DIF3D	TWODANT	DIF3D
JEF-2.2(80g)	1.0014662	0.9819507	1.0262418	1.0061570
JEF-2.2(9g)	·	0.9845709	·	1.0075948
ENDF/B-VI(150g)	1.0104988	0.9843143	1.0409861	1.0154811
ENDF/B-VI(80g)	·	0.9905957	·	1.0197424
ENDF/B-VI(9g)	·	0.9915895	·	1.0196391

표 1. 계산코드, 축약군에 따른 유효증배계수 변화

Na cooled	Experimental data	ENDF/B-VI	JEF-2.2
$\sigma_f (U-238) / \sigma_f (U-235)$	0.0201 ± 0.0004	$2.21010E-02$	$2.12963E-02$
$\sigma_f (Pu-239) / \sigma_f (U-235)$	0.9372 ± 0.0142	$9.21739E-01$	$9.18949E-01$
$\sigma_f (Pu-240) / \sigma_f (U-235)$	0.1704 ± 0.0026	$1.94561E-01$	$1.83661E-01$
$\sigma_\gamma (U-238) / \sigma_f (U-235)$	.	$1.38167E-01$	$1.39596E-01$
$\sigma_f (Pu-241) / \sigma_f (U-235)$	.	$1.30963E+00$	$1.31891E+00$
$\sigma_f (Pu-242) / \sigma_f (U-235)$	.	$1.35183E-01$	$1.25785E-01$
$\sigma_f (Pu-238) / \sigma_f (U-235)$	.	$5.72855E-01$	$5.51223E-01$

표 2-1. 중심 반응률비 비교 (C/E)

Pb cooled	ENDF/B-VI	JEF-2.2
$\sigma_f (U-238) / \sigma_f (U-235)$	$1.92384E-02$	$1.77834E-02$
$\sigma_f (Pu-239) / \sigma_f (U-235)$	$9.34126E-01$	$9.38563E-01$
$\sigma_f (Pu-240) / \sigma_f (U-235)$	$1.97610E-01$	$1.83923E-01$
$\sigma_\gamma (U-238) / \sigma_f (U-235)$	$1.43807E-01$	$1.45842E-01$
$\sigma_f (Pu-241) / \sigma_f (U-235)$	$1.31517E+00$	$1.32060E+00$
$\sigma_f (Pu-242) / \sigma_f (U-235)$	$1.35045E-01$	$1.23260E-01$
$\sigma_f (Pu-238) / \sigma_f (U-235)$	$5.90612E-01$	$5.67923E-01$

표 2-2. 중심 반응률비 비교 (C/E)

KAFAX-F22 (80g)			
Sodium Void		Lead Void	
inner & outer core	-45	inner & outer core	-630
inner core	+565	inner core	+819
outer core	-619	outer core	-1519

표 3-1. 냉각재 기화반응도 (pcm)

KAFAX-E66 (150g)			
Sodium Void		Lead Void	
inner & outer core	-288	inner & outer core	-1346
inner core	+374	inner core	+362
outer core	-669	outer core	-1755

표 3-2. 냉각재 기화반응도 (pcm)

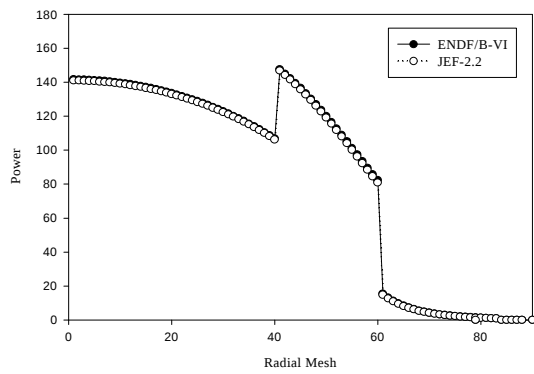


그림 2-1. 노심 중앙에서의 출력분포,
Na-cooled

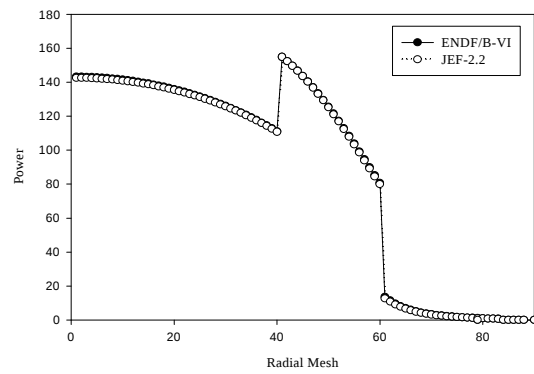


그림 2-2. 노심 중앙에서의 출력분포,
Pb-cooled

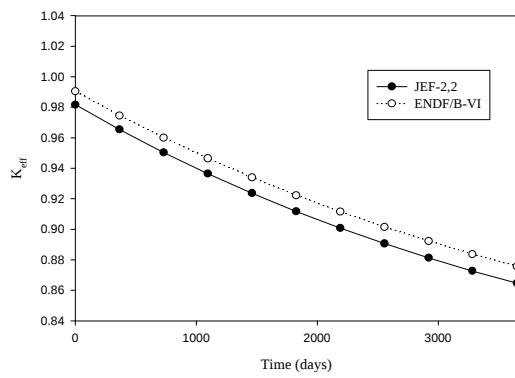


그림 3-1. 연소에 따른 K_{eff} 변화,
Na-cooled

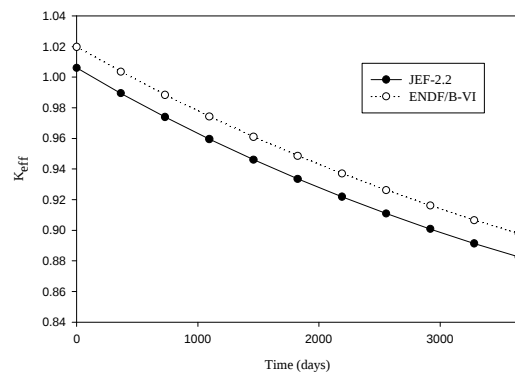


그림 3-2. 연소에 따른 K_{eff} 변화,
Pb-cooled