

## SNU Experience with ENDF Processing by NJOY

이정훈, 김창효  
서울대학교

### 요 약

최근 선진 원자력 개발국들이 새로운 평가 핵자료집들을 계속하여 공개하고 있다. 이 핵자료들을 노심 해석에 적용하기 위한 연구의 일환으로 최근에 발표된 ENDF/B-VI.2 평가 핵자료집을 이용하여 CASMO-3의 단면적 Data Library를 만들어 검증해 보았다. 평가 핵자료집의 개선 정도와 계산상으로 만들어진 Library와 실제 사용되는 Library의 차이를 알아보기 위하여 ENDF/B-IV도 같이 처리하여 검증하였다. 유효중배계수와 integral parameter들을 비교한 결과 ENDF/B-VI의 유용성과 일관성이 입증되었고, 단면적 Library의 수정 작업에 관한 연구의 필요성도 제기되었다.

### 1. 서론

최근 미국, 유럽, 일본, 중국, 러시아 등 선진 원자력 개발국들이 개발해 오던 평가 핵자료들이 경쟁적으로 공개되고 있다. 미국의 ENDF/B-VI.2, OECD/NEA Data Bank의 JEF-2.2, 일본의 JENDL-3.2, 중국의 CENDL-2, 러시아의 BROND-2.2 등이 최근 공개된 평가 핵자료집이다. 그리고 이 자료들도 새로 계속 개정되어 벤치마크 검증이 끝나는 대로 바로 공개되고 있다. 이에 따라 각국의 연구소에서도 기존의 핵설계용 코드들의 다군정수 Library들을 새로운 평가 핵자료들을 이용해 새로이 생산, 검증하고 있다. 국내에서는 현재 노심 계산용 코드의 개발에 관한 연구는 활발하지만, 실제로 계산에 사용될 다군정수 Library의 개발은 아직 미흡한 단계이다. 실제로 지금까지는 공개된 평가 핵자료가 있다 하더라도 이를 처리하여 원하는 단면적 Library를 생산하는 일은 방대한 양의 메모리를 가지고 있는 대형 전산기를 이용해야만 했고 여러 복잡한 절차를 거쳐 많은 검증은 시도해야 하기 때문에 사실상 여러 곳에서 할 수 있는 일이 아니었다. 그러나 최근의 전산기의 발달로 인해 Workstation이나 PC에서도 평가 핵자료집을 처리하여 다군정수 Library를 생산할 수 있게 되었다.

이 논문에서는 CASMO-3 단면적 자료 Library를 새 평가 핵자료들을 이용하여 개정할 목적으로, NJOY에 의한 ENDF/B-VI.2 자료의 군상수 처리 결과와 동 군상수 자료에 의한 열중성자 벤치마크 실험 결과의 검증 경험에 대해 논의하기로 한다.

## 2. CASMO-3 단면적 Data Library<sup>23)</sup>

CASMO-3은 Studsvik에서 개발한 격자 코드로서 국내에는 원자력 연구소, 한전 및 일부 대학에서 제한적으로 사용이 가능한 코드이다. 이 코드는 사각형 모양의 핵연료 집합체를 가지는 PWR과 BWR의 거시적 단면적과 기타 집합체의 상수들을 생산하기 위해 개발되어 이 두 가지 형태의 원자로에 사용되는 핵연료 집합체에 대하여는 그 정확도가 이미 공인되었다.

CASMO-3의 단면적 Data Library는 70군으로 이루어져 있고, 94개의 핵종들에 대하여 기술되어 있는데, 20여 개의 주요 핵종에 대해서만 자세한 정보가 있다. 대부분의 핵종이 ENDF/B-IV로부터 계산되었고, 일부 핵종은 ENDF/B-V와 JENDL-2, UKNDL, ENDF/B-III로부터 계산되었다.

## 3. 평가 핵자료집 처리

평가 핵자료집의 처리를 위하여 사용된 코드는 Los Alamos National Lab에서 개발된 NJOY 코드이다. 이번 처리과정에서는 Version 91.91<sup>4)</sup>을 사용하여 ENDF/B-IV와 ENDF/B-VI 중에서 벤치마크에 사용되는 핵종만을 처리하였다.

## 4. 벤치마크 문제

임계 실험을 통하여 측정되는 integral parameter의 비교를 위하여 선정된 문제는 BNC-19302 (ENDF-202)으로 분류되어 있는 CSEWG Benchmark Specification에서 제시된 총 35개의 실험<sup>5)</sup>들 중에서 금속 우라늄 연료에 대한 임계 실험인 TRX-1, 2와 산화 우라늄 연료에 대한 BAPL-1, 2, 3과 천연 우라늄 봉의 중수 감속 격자로 구성되어 있는 MIT-1, 2, 3, 4, 5, 6이다. 이들 문제에 대한 사양은 표 1과 같다.

이들 임계 실험에서 측정되는 integral parameter들은 다음과 같다.

$\rho^{28}$  :  $U^{238}$ 의 epithermal 핵포획율/ $U^{238}$ 의 thermal 핵포획율

$\delta^{25}$  :  $U^{235}$ 의 epithermal 핵분열율/ $U^{235}$ 의 thermal 핵분열율

$\delta^{28}$  :  $U^{238}$ 의 핵분열율/ $U^{235}$ 의 핵분열율

$C^*$  :  $U^{238}$ 에서의 중성자 포획율/ $U^{235}$ 에서의 핵분열율

여러 가지 사양의 핵연료봉에 대한 유효증배계수( $k_{eff}$ )의 정확성을 알아보기 위하여 61개의 금속 우라늄 연료에 대한 실험 결과<sup>6)</sup>가 사용되었다. 이 문제들은 1960년대에 Westinghouse에서 만든 코드의 벤치마크 용으로 쓰여졌었다. 금속 우라늄의 농축도는 1.04w/o에서 3.101w/o까지, 핵연료 직경은 0.4445cm에서 2.3495cm까지, 격자간 거리는 0.9525cm에서 4.953cm까지 변화되는 다양한 실험들에서 얻어진 결과와 CASMO-3로 계산된 유효증배계수를 비교하였다.

## 5. 벤치마크 결과

이전에 사용되던 CASMO-3의 단면적 Data Library와 달라진 점을 발견하기 위하여 CASMO-3와 같이 들어온 E4LIB.JA Library에 대해서도 모든 계산을 수행하였다. 그리고 이전 평가 핵자료 집과의 차이점을 알아보기 위하여 ENDF/B-IV를 처리한 단면적 Library도 계산에 사용되었다.

경수를 사용하는 TRX와 BAPL의 경우 ENDF/B-VI로 계산한 Library의 유효증배계수가 E4LIB.JA와 ENDF/B-IV로 계산한 Library의 것보다 약간 높게 나타나고 있다. 그리고 E4LIB.JA의 경우에는 대부분의 parameter들이 고르게 잘 맞는 것을 볼 수 있지만, ENDF/B-IV로 계산한 Library와 ENDF/B-VI로 계산한 Library의 경우에는  $\delta^{25}$ 와  $\delta^{28}$  결과들이 실험 오차에 비해 많이 벗어나 있는 것들을 발견할 수 있다. 이 결과들은 지난 춘계 발표회 때 원자력연구소의 결과와 다른 양상을 보이고 있다.  $\rho^{28}$ 은 더 잘 맞고 있으나, production parameter인  $\delta^{25}$ 은 더 큰 오차를 보이고 있다.

중수를 사용하는 MIT의 경우에는 ENDF/B-VI로 계산한 Library가 E4LIB.JA와 비슷한 결과들을 나타내는 것을 알 수 있다. 이 실험들은 결과들에서 보듯이 그렇게 좋은 결과들을 보여주지는 않는데, 특히  $\delta^{25}$ 와  $\delta^{28}$  값들이 그리 좋지 않은 것으로 보아 중성자 spectrum의 계산 결과가 좋지 않음을 알 수 있다. 유효증배계수의 경우에는 좋은 결과를 보이고 있는데, 경수를 사용한 실험보다 중수를 사용한 실험에서 ENDF/B-VI로 계산한 Library가 더 잘 맞는 것으로 미루어  $H^1$ 의 계산 결과를 다시 확인해 볼 필요성을 느끼게 한다.

61개의 금속 우라늄 봉에 대한 실험들의 결과는 유효증배계수들의 평균들과 표준편차를 계산하여 아래 표에 정리하였다.

	E4LIB.JA	ENDF/B-IV	ENDF/B-VI
$k_{eff}$ 평균값	$1.005313 \pm 0.00017^*$	$1.008348 \pm 0.00029$	$1.014629 \pm 0.000272$

\* 61개 결과에 대한 표준편차.

결과에서 보듯이 ENDF/B-VI로 계산한 Library가 편차도 더 크고, 유효증배계수의 값도 더 큰 것을 알 수 있다. 각각의 결과들도 모두 ENDF/B-VI로 계산한 Library의 유효증배계수가 E4LIB.JA보다 약간씩 크게 나타나고 있다. 참고로 Muft와 Sofocate를 사용한 Westinghouse의 결과는  $0.9960 \pm 0.0072$ 이다.

## 6. 결론

ENDF/B-IV와 ENDF/B-VI.2를 NJOY91.91로 처리하여 원자로심 격자코드인 CASMO-3의 단면적 Data Library를 만들어 그 유용성을 검증하기 위해 벤치마크 테스트를 하였다. 유효증배계수와 각 integral parameter들을 비교하여 본 결과 integral parameter들은 아직 만족할 만한 결과를 보이지 않는 것으로 나타났다.

대부분이 ENDF/B-IV로 이루어졌다는 E4LIBJA는 ENDF/B-IV로 계산한 Library와 많이 다른 결과를 보여주고 있는데, 실제 사용될 수 있는 다군정수 Library를 만들기 위해서는 계산 결과에 많은 인위적인 수정 작업이 필요하고, 이를 위한 많은 경험과 방법론이 개발되어야 하겠다.

ENDF/B-VI로 계산한 Library가 ENDF/B-IV로 계산한 Library에 비하여 integral parameter들과 유효중배계수가 약간 더 안정적인 것으로 나타나 ENDF/B-VI 자료의 유용성과 일관성이 확인되었다. 앞으로도 계속 나오게 될 새 평가 핵자료집을 이용하여 더 나은 단면적 Library를 만들어 내려는 연구의 필요성이 입증되었다.

#### 참고 문헌

1. M. Edenius et al., STUDDSVIK/NEA-89/3 (1989).
2. M. Edenius et al., STUDDSVIK/NEA-89/13 (1989).
3. "CASMO-3 Training", KAERI, April, 1992.
4. R. E. MacFarlane and D. M. Muir, "The NJOY Nuclear Data Processing System, Version 91," LANL report(1994).
5. 김창효 외, "원자로심 설계용 핵자료 체계 구축을 위한 전략 연구", 한국원자력연구소(1994).
6. L. E. Strawbridge and R. F. Barry, "Criticality Calculations for Uniform Water-Moderated Lattices," *Nucl. Sci. Eng.*, **23**, 58(1965)

표 1. CSEWG Benchmark Specification에서 선정된 문제들

	핵연료	피복재	냉각재
TRX-1, 2	U Metal (1.3 w/o) 외경 : 0.983 cm	Al <sup>27</sup> 외경 : 1.151 cm	H <sub>2</sub> O 외경 : 1.8060(TRX-1) (cm) 2.1740(TRX-2)
BAPL-1, 2, 3	UO <sub>2</sub> (1.311 w/o) 외경 : 0.9728 cm	Al <sup>27</sup> 외경 : 1.151 cm	H <sub>2</sub> O 외경 : 1.5578(BAPL-1) (cm) 1.6523(BAPL-2) 1.8057(BAPL-3)
MIT-1, 2, 3	U Metal (0.711 w/o) 외경 : 2.565 cm	Al <sup>27</sup> 외경 : 2.708 cm	D <sub>2</sub> O 외경 : 11.43(MIT-1) (cm) 12.70(MIT-2) 14.605(MIT-3)
MIT-4, 5, 6	U Metal (0.947 w/o) 외경 : 0.983 cm	Al <sup>27</sup> 외경 : 1.141 cm	D <sub>2</sub> O 외경 : 3.81(MIT-4) (cm) 5.715(MIT-5) 7.62(MIT-6)

표 2. 경수 감속 격자의 유효증배계수 및 각 integral parameter 비교

	Reference	E4LIB.JA	ENDF-IV	ENDF-VI	
TRX-1	$k^{eff}$	1.0000	0.9945(-0.55)**	0.9972(-0.28)	1.0035(0.35)
	$\rho^{28}$	1.32(1.59)*	1.326(0.425)	1.3471(2.051)	1.3302(0.773)
	$\delta^{25}$	0.0987(1.01)	0.09976(1.076)	0.09661(-2.118)	0.09476(-3.992)
	$\delta^{28}$	0.0946(4.33)	0.09899(4.644)	0.09467(0.069)	0.09503(0.458)
	$C^+$	0.797(1.00)	0.7833(-1.716)	0.7891(-0.993)	0.7850(-1.500)
TRX-2	$k^{eff}$	1.0000	0.9983(-0.17)	1.0011(0.11)	1.0063(0.63)
	$\rho^{28}$	0.837(1.91)	0.8302(-0.807)	0.8398(0.331)	0.8292(-0.938)
	$\delta^{25}$	0.0614(1.3)	0.06110(-0.484)	0.05929(-3.440)	0.05821(-5.195)
	$\delta^{28}$	0.0693(5.05)	0.07050(1.724)	0.06724(-2.973)	0.06740(-2.737)
	$C^+$	0.647(0.93)	0.6337(-2.049)	0.6359(-1.720)	0.6333(-2.112)
BAPL-1	$k^{eff}$	1.0000	0.9997(-0.03)	0.9964(-0.36)	1.0030(0.30)
	$\rho^{28}$	1.39(0.72)	1.3772(-0.924)	1.4146(1.770)	1.3916(0.117)
	$\delta^{25}$	0.084(2.38)	0.08391(-0.102)	0.08203(-2.336)	0.08053(-4.129)
	$\delta^{28}$	0.078(5.13)	0.07738(-0.790)	0.07346(-5.818)	0.07358(-5.664)
BAPL-2	$k^{eff}$	1.0000	0.9984(-0.16)	0.9958(-0.42)	1.0020(0.20)
	$\rho^{28}$	1.12(0.89)	1.1513(2.795)	1.1830(5.624)	1.1626(3.802)
	$\delta^{25}$	0.068(1.47)	0.06860(0.872)	0.06727(-1.076)	0.06604(-2.874)
	$\delta^{28}$	0.07(5.71)	0.06680(-4.563)	0.06336(-9.484)	0.06343(-9.383)
BAPL-3	$k^{eff}$	1.0000	0.9989(-0.11)	0.9965(-0.35)	1.0022(0.22)
	$\rho^{28}$	0.906(1.1)	0.9043(-0.187)	0.9299(2.636)	0.9130(0.775)
	$\delta^{25}$	0.052(1.92)	0.05264(1.221)	0.05166(-0.656)	0.05075(-2.408)
	$\delta^{28}$	0.057(5.26)	0.05484(-3.788)	0.05198(-8.802)	0.05201(-8.751)

\* 실험 오차(%)

\*\* 실험 값에 대한 계산 오차(%)

표 3. 중수 감속 격자의 유효증배계수 및 각 integral parameter 비교

		Reference	E4LIB.JA	ENDF-IV	ENDF-VI
MIT-1	$k_{\text{eff}}$	1.0000	0.9903(-0.97)	0.9810(-1.90)	0.9926(-0.74)
	$\rho^{28}$	0.498(1.606)	0.5221(4.846)	0.5343(7.283)	0.5191(4.241)
	$\delta^{25}$	0.0447(4.251)	0.04772(6.763)	0.04585(2.575)	0.04415(-1.242)
	$\delta^{28}$	0.0597(3.35)	0.06097(2.132)	0.06012(0.700)	0.05931(-0.653)
	$C^+$	1.017(2.262)	0.9748(-4.152)	0.9826(-3.386)	0.9748(-4.153)
MIT-2	$k_{\text{eff}}$	1.0000	0.9924(-0.76)	0.97968(-2.032)	0.9913(-0.87)
	$\rho^{28}$	0.394(0.508)	0.4262(8.179)	0.4366(10.82)	0.4242(7.662)
	$\delta^{25}$	0.031(9.677)	0.03890(25.49)	0.03754(21.10)	0.03615(16.60)
	$\delta^{28}$	0.0596(2.852)	0.05868(-1.550)	0.05812(-2.490)	0.05743(-3.636)
	$C^+$	0.948(2.11)	0.9188(-3.079)	0.9255(-2.369)	0.9192(-3.038)
MIT-3	$k_{\text{eff}}$	1.0000	0.9978(-0.22)	0.9805(-1.95)	0.9918(-0.82)
	$\rho^{28}$	0.305(1.311)	0.3278(7.490)	0.3360(10.16)	0.3264(7.017)
	$\delta^{25}$	0.0248(4.032)	0.02984(20.34)	0.02896(16.77)	0.02789(12.44)
	$\delta^{28}$	0.0583(2.058)	0.05636(-3.324)	0.05615(-3.696)	0.05560(-4.640)
	$C^+$	0.859(1.863)	0.8607(0.193)	0.8661(0.821)	0.8613(0.262)
MIT-4	$k_{\text{eff}}$	1.0000	1.0112(1.12)	1.0086(0.86)	1.0218(2.18)
	$\rho^{28}$	1.155(0.087)	1.0825(-6.274)	1.1087(-4.011)	1.0773(-6.731)
	$\delta^{25}$	0.0865(1.85)	0.08281(-4.261)	0.08016(-7.333)	0.07734(-10.60)
	$\delta^{28}$	0.0459(2.832)	0.03962(-13.67)	0.03833(-16.50)	0.03717(-19.01)
	$C^+$	1.007(0.794)	0.9737(-3.309)	0.9829(-2.393)	0.9710(-3.573)
MIT-5	$k_{\text{eff}}$	1.0000	1.0079(0.79)	0.9939(-0.61)	1.0074(0.74)
	$\rho^{28}$	0.525(0.381)	0.4909(-6.499)	0.5078(-3.281)	0.4924(-6.201)
	$\delta^{25}$	0.0371(3.235)	0.03655(-1.488)	0.03617(-2.520)	0.03488(-5.973)
	$\delta^{28}$	0.0326(0.307)	0.02800(-14.12)	0.02753(-15.56)	0.02693(-17.40)
	$C^+$	0.7400(0.946)	0.7190(-2.836)	0.7250(-2.031)	0.7192(-2.810)
MIT-6	$k_{\text{eff}}$	1.0000	1.0087(0.87)	0.9823(-1.77)	0.9951(-0.49)
	$\rho^{28}$	0.317(0.631)	0.2877(-9.256)	0.3001(-5.344)	0.2908(-8.275)
	$\delta^{25}$	0.0222(10.811)	0.02130(-4.041)	0.02139(-3.671)	0.02062(-7.099)
	$\delta^{28}$	0.0291(6.186)	0.02450(-15.82)	0.02444(-16.02)	0.02404(-17.39)
	$C^+$	0.647(0.309)	0.6273(-3.052)	0.6317(-2.372)	0.6284(-2.872)