

경수로 압력용기 모의실험 PCA-REPLICA 차폐 벤치마크 해석

길충섭, 김정도  
한국원자력연구소

황원국  
경희대학교

요 약

경수로 압력용기의 취화는 주로 고속 중성자에 기인한다. 경수로 압력용기를 모의한 PCA-REPLICA 실험을 해석하여 원자력 시설의 구조재로 쓰이는 철의 핵자료 검증과 MATXS/TRANSX/DANTSYS 계산체제의 유용성을 확인하고자 하였다. 라이브러리는 JEF-2.2를 이용한 KAFAX-F22가 기본 자료로 이용되었고, 이밖에 ENDF/B-VI.1과 JENDL-3.2의 철 핵자료도 비교 검증하였다. 계산결과는 실험오차 등을 고려하면 측정치와 근접하는 경향을 보였고, 앞으로 개발될 차폐해석용 라이브러리 검증에 유용한 자료가 될 수 있겠다.

1. 개 요

전세계적으로 차폐해석을 위해 주로 사용되어온 핵자료와 해석코드는 ORNL의 AMPX/ANISN 형 라이브러리와 1차원 ANISN과 2차원 DOT(최근에는 DORT) 코드였다. 이들 코드들은 3차원의 TORT와 함께 현재 DOORS 시스템[1]에 포함되어 있다. 한편 LANL에서 개발되어 사용되고 있는 NJOY/MATXS형 라이브러리와 1차원 ONEDANT[2], 2차원 TWODANT는 3차원 THREEDANT를 갖고 있는 DANTSYS 시스템은 현재 노물리 계산은 물론이고 점차 차폐계산에도 사용되고 있다. MATXS와 DANTSYS를 연결한 사용법의 특징은 MATXS/TRANSX/DANTSYS로 연결하여 ENDF-format 라이브러리내의 각종 자료가 있는 MATXS 라이브러리를 이용하는 것이 가능하고 1, 2, 3차원 코드의 입력형식이 동일하며 코드내에  $S_N$  계산을 위한 여러가지 각분할 자료, 핵분열 스펙트럼 등의 자료가 내장되어 있어 필요한 입력 자료의 선택이 가능하며 각종형태(ascii 혹은 binary) 및 format(fixed 혹은 free-field FIDO)의 단면적 라이브러리를 사용할 수 있게 되어 있다. 여기에서는 1차원 ONEDANT 및 2차원  $S_N$ 코드인 TWODANT를 이용하여 3차원 계산을 모의한 3D-Synthesis 방법으로 PCA-REPLICA 벤치마크 실험[3]을 해석하여 MATXS/TRANSX/DANTSYS 계산체제의 적용성을 확인함과 아울러 철의 평가핵자료의 신뢰성을 검토하였다.

2. PCA-REPLICA 실험

모든 NESDIP(H<sub>2</sub>O/Fe)(NESTOR Shielding and Dosimetry Improvement Programme) 실험이 UKAEA-Winfrith에 있는 NESTOR 원자로의 ASPIS 차폐설비에서 수행되었는데 그중 PCA-REPLICA는 NESDIP의 첫 실험이다. 이실험은 미국 ORNL의 PCA(Pool Critical Assembly)에서 LWR-PV-SDIP(LWR Pressure Vessel Surveillance Dosimetry Improvement Program)[4]으로 수행되었던 노심과 열 차폐체, 그리고 열 차폐체와 RPV 사이의 물의 두께를 각각 12와 13cm로 한 소위 12/13 configuration을 그대로 복제한 실험 설비이다. 핵분열판의 중심을 통과하는 수평축(중성자축)을 따라 세가지 문턱에너지 계측기가 10곳에 설치되어 있는데, 이들 계측기는 Rh-103(n,n')

Rh-103m, In-115(n,n')In-115m, S-32(n,p)P-32로서 문턱에너지는 각기 0.04, 0.336 그리고 0.9275 MeV이다. 그림 1은 PCA-REPLICA 실험 해석을 위한 계산모델이다.

### 3. 핵자료 처리 및 다군 단면적

차폐계산에 이용되고 있는 중성자 단면적 자료들은 먼저 평가핵자료로부터 일반적인 중성자 가중합수를 사용하여 200군 내외로 생산되고, 이를 이용하여 주어진 특정한 문제에 대해 1차원 계산을 수행하여 얻어진 영역별 스펙트럼을 가중합수로하여 소수군으로 축약하여 생산된다. 여기에서 이용된 KAFAX-F22[5] 라이브러리는 JEF-2.2로부터 고속로용으로 생산된 중성자 80군 감마선 24군의 MATXS형 자료로서 금번 예비계산에서는 이것을 주 자료로 사용하였으며 여기에 ENDF/B-VI.1과 JENDL-3.2의 철 자료를 첨가하였다. 이밖에 Rh-103(n,n'), In-115(n,n') 및 S-32(n,p)의 단면적 자료는 IRDF-90 Version 2 자료를 NJOY94[6]로 축약하였다. 이들 축약과정에도 적절한 가중합수의 선택이 필요하나 금번 예비계산을 위해서는 이를 생략하고 단순 축약된 한가지 자료만을 생산하였다. 비교 목적으로 BUGLE96 라이브러리도 이용하였다. 이 자료는 ORNL에서 처리된 것으로 ENDF/B-VI로부터 생산된 중성자 199군, 감마선 42군으로 처리된 VITAMIN-E6로부터 LWR의 차폐 및 압력용기 선량 계산을 목표로 축약된 중성자 47군, 감마선 20군 자료이다.

### 4. 방사선 선원(Source)

PCA-REPLICA 실험에서는 NESTOR 원자로를 이용하고 있으나 계산에서는 ex-NESTOR-core 모형을 이용하게 되므로 핵분열판의 U-235의 핵분열 선원을 고정선원으로 주게 된다. 실제로  $3.121 \times 10^{10}$  fission/sec의 1 Watt출력을 고려하여 핵분열 스펙트럼으로부터 규격화한 선원을 사용한다. 이때 U-235의 핵분열당 생성되는 평균 중성자수는 참고문헌 2로부터 2.437을 택하면 체적선원은  $7.606 \times 10^{10}$  neutron/sec이다. 실험결과 핵분열판 출력은  $6.74 \times 10^{-4}$  NESTOR Watt로 추정하고 있다. 40.2cm x 63.5cm x 0.6cm의 체적을 고려하면 단위 체적당 선원값은  $4.96 \times 10^7$  neutron/cm<sup>3</sup>/sec이다.

### 5. 수송계산

중성자 수송계산에는 1차원 ONEDANT와 2차원 TWODANT 코드를 사용하였다. 먼저 80군의 ONEDANT 계산으로부터 PCA-REPLICA 각 영역의 중성자속을 구하고 가중평균한 28군의 영역별 거시단면적을 구하였다. 이때의 28군은 0.1 MeV 이상을 25군으로하고 그 이하는 0.414eV까지 2군, 나머지 1군으로 축약한 것이다. 이때 ONEDANT 계산에는 P<sub>3</sub>, S<sub>16</sub> 및 10<sup>-5</sup>의 수렴한계가 적용되었다. 28군의 영역별 유효단면적을 이용한 PCA-REPLICA 실험 해석에는 1차원 및 2차원 계산을 병행한 3-D-equivalent flux synthesis방법을 적용하였다. 이 방법은 1차원과 2차원 중성자속으로부터 3차원 계산과 유사한 값을 얻기 위한 방법으로 처음에 Combustion Engineering에 의해 제안되어 그후 ORNL에서 자주 사용되어 지금은 보편화되어 있다. 이 방법은 다음 관계식으로 3차원 중성자속을 유도하고 있다. 즉

$$\phi(x,y,z) = \phi(x,z) \times \phi(y,z) / \phi(z).$$

1차원 계산인  $\phi(z)$  계산은 같은 2차원  $\phi(y,z)$ 계산에서 y의 값을 1.0cm로하고 양쪽에 반사경계조건을 설정하여 구함으로써 1혹은 2차원 코드에서 사용하는 서로 다른 S<sub>N</sub> 값등으로부터의 오차를 줄일 수 있는 장점이 있다. 모든 계산에서 P<sub>3</sub>, S<sub>8</sub>, 10<sup>-3</sup> 그리고 mesh간격은 1cm를 넘지 않도록 하였다.

## 6. 결과 및 분석

고정 선원인 핵분열판으로부터 물, 열차폐체, 물 그리고 압력용기 내외의 10곳에 설치된 문턱 에너지 계측기에 의한 반응률 측정값과 계산결과를 비교하여 표 1에 정리하였다. 철의 단면적에 대해서는 ENDF/VI.1과 JENDL-3.2 자료의 검증을 위해 열차폐체와 RPV에서 이들 자료로 대체하여 계산한 결과와 BUGLE-96을 이용한 결과도 참고로 정리하였다. 표에서 살펴보면 Rh-103반응률 계산값은 냉각수 내에서는 모두 실험값에 비해 작게 나타났으나 실험 오차를 고려하면 만족할만한 결과를 보이고 있다. 압력용기 모사체 T/4에서는 계산값이 모두 10%정도 높게 나타났으나, void영역에서는 오히려 10%정도 작았다. In-115 및 S-32반응률도 T/4에서 높게 계산되었으나, void영역에서의 S-32반응률 계산값은 JENDL-3.2 철 자료를 이용한 결과를 제외하면 20%정도 높았다. BUGLE-96 이용결과도 MATXS형의 라이브러리 결과와 큰 차이를 보이지 않고 있음을 알 수 있다. JEF-2.2와 ENDF/B-VI.1 철 핵자료는 거의 비슷한 결과를 보이고 있으나 JENDL-3.2자료는 이들에 비해 다소 낮게 나타났다. 그림 2에는 RPV T/4와 void영역에서 각각의 철 자료를 이용하여 계산된 중성자속을 실험치와 비교하여 나타냈다. RPV T/4에서는 약 2 MeV 아래의 중성자속이 모두 크게 계산되었으나, RPV밖 void영역으로 투과되어 나오는 약 2 MeV 이상의 중성자는 과도하게 계산되고 있음을 보여주고 있다. 이는 표 1의 Rh-103과 In-115 반응률이 RPV를 투과하면서 실험치에 비해 작아지고, 문턱에너지가 0.93 MeV인 S-32 반응률이 void영역에서 크게 계산된 주원인으로 판단된다.

## 7. 결론

차폐해석용 라이브러리 개발 및 검증을 위한 예비단계로서 JEF-2.2를 이용하여 이미 개발된 고속로용 KAFAX-F22 라이브러리와 MATXS/TRANSX/DANTSYS 계산체제를 이용하여 PCA-REPLICA 실험을 해석하였다. 계산된 문턱에너지 계측기 반응률비를 실험값과 비교하였는데 전체적으로 실험치에 근접한 결과를 얻었으며, 철 핵자료는 ENDF/B-VI.1이 상대적으로 가장 안정된 결과를 보였다. 실험오차 이상의 차이를 보이고 있는 계산결과들은 상세군 자료 및 군 축약시 적절한 가중합수를 취한다면 개선될 것으로 판단된다. 이 예비계산을 토대로 앞으로 개발될 차폐해석용 라이브러리의 검증을 위해 다양한 차폐 벤치마크실험 해석이 수행될 것이다.

## 참 고 문 헌

1. RSIC CODE PACKAGE CCC-650, "DOORS3.1 : One, Two- and Three-Dimensional Discrete Ordinates Neutron/Photon Transport Code System," ORNL (1997).
2. 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).
3. J. Butler, M.D. Carter, I.J. Curl, M.R. March et al., The PCA Replica Experiment PART I, Winfrith Measurements and Calculations. AEEW-R 1736 (1984).
4. W.N. McElroy Editor, LWR PRESSURE VESSEL SURVEILLANCE DOSIMETRY IMPROVEMENT PROGRAM: PCA EXPERIMENTS AND BLIND TEST, HEDL-TME 80-87, NUREG/CR-1861 (1981).
5. 김정도, 길충섭, "KAFAX-F22 : JEF-2.2를 이용한 고속로용 다군 단면적 라이브러리 생산 및 검증, - 중성자 80군 및 광자 24군 -, KAERI/TR-842/97 (1997).
6. R. E. MacFarlane, D.W. Muir, "The NJOY Nuclear Data Processing System, Version 91," LA-12740-M (Oct. 1994).

II 1. PCA-REPLICA(H<sub>2</sub>O/Fe) Threshold Detector Reaction rates/NESTOR Watt(dps/atom)

Reference Location	From Fission Plate (cm)	Measured * (Error %)	Calculated (C/E)			
			JEF-2.2 (KAFAX-F22)	ENDF/B-VI.1 Iron Data	JENDL-3.2 Iron Data	BUGLE-96 28-group
<b>Rh-103(n, n')Rh-103m</b>						
	1.91	1.69-20(6.0)	1.44-20(0.87)	1.44-20(0.87)	1.44-20(0.87)	1.41-20(0.85)
12cm	7.41	3.78-21(6.0)	3.59-21(0.97)	3.59-21(0.97)	3.59-21(0.97)	3.51-21(0.95)
Water gap	12.41	1.40-21(6.0)	1.21-21(0.88)	1.21-21(0.88)	1.21-21(0.88)	1.18-21(0.86)
	14.01	1.27-21(6.0)	1.12-21(0.90)	1.12-21(0.90)	1.12-21(0.90)	1.10-21(0.88)
13cm	19.91	4.23-22(6.0)	3.41-22(0.82)	3.41-22(0.82)	3.43-22(0.83)	3.62-22(0.87)
Water gap	25.41	1.15-22(7.0)	1.06-22(0.94)	1.06-22(0.94)	1.05-22(0.93)	1.10-22(0.98)
	30.41	4.73-23(7.0)	4.47-23(0.96)	4.48-23(0.97)	4.43-23(0.96)	4.62-23(1.00)
T/4	39.01	2.07-23(4.0)	2.17-23(1.09)	2.20-23(1.11)	2.15-23(1.08)	2.22-23(1.12)
3T/4	49.61	5.53-24(4.9)	5.41-24(1.02)	5.60-24(1.05)	5.42-24(1.02)	6.07-24(1.14)
Void	58.61	1.80-24(4.6)	1.50-24(0.87)	1.60-24(0.93)	1.53-24(0.89)	1.62-24(0.94)
<b>In-115(n, n')In-115m</b>						
T/4	39.01	3.93-24(2.9)	4.25-24(1.13)	4.28-24(1.13)	4.17-24(1.11)	4.26-24(1.13)
3T/4	49.61	8.23-25(3.4)	7.71-25(0.98)	7.83-25(0.99)	7.51-25(0.95)	8.46-25(1.07)
Void	58.61	2.31-25(3.5)	2.13-25(0.96)	2.18-25(0.98)	2.08-25(0.94)	2.23-25(1.01)
<b>S-32(n, p)P-32</b>						
T/4	39.01	1.08-24(5.5)	1.12-24(1.08)	1.12-24(1.08)	1.07-24(1.03)	1.08-24(1.04)
3T/4	49.61	1.46-25(5.9)	1.47-25(1.05)	1.45-25(1.03)	1.33-25(0.95)	1.54-25(1.10)
Void	58.61	3.73-26(5.3)	4.25-26(1.19)	4.21-26(1.18)	3.79-26(1.06)	4.14-26(1.16)

\* Measured values, in C/E ratios, are reduced by 4 x in RPV and Void box and by 2 x in water because of NESTOR core background.

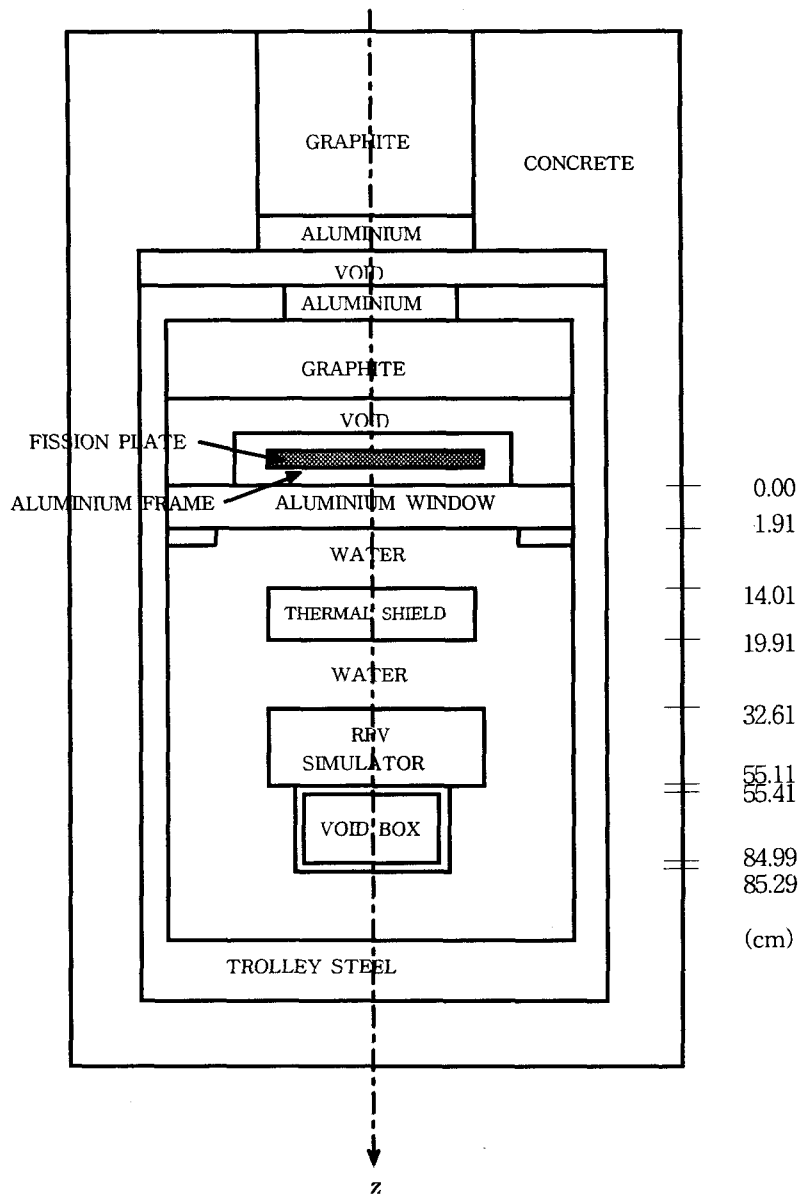


그림 1. PCA-REPLICA Configuration for TWODANT Calculations

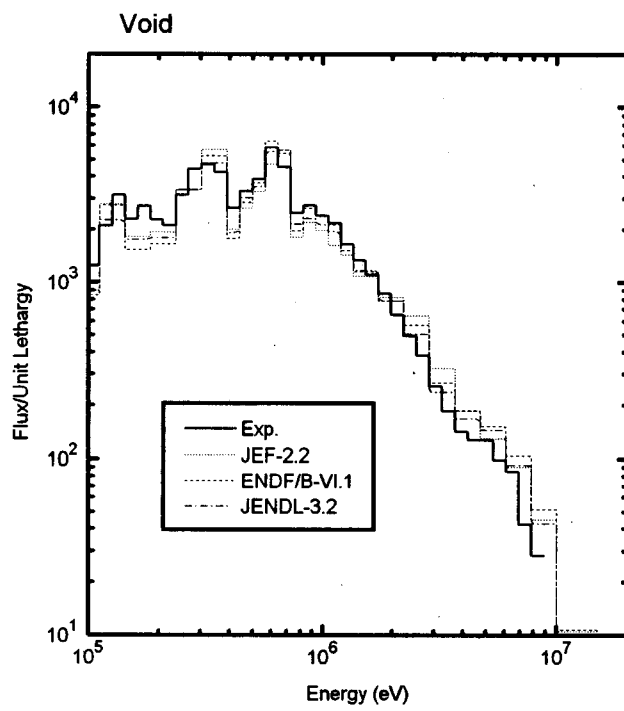
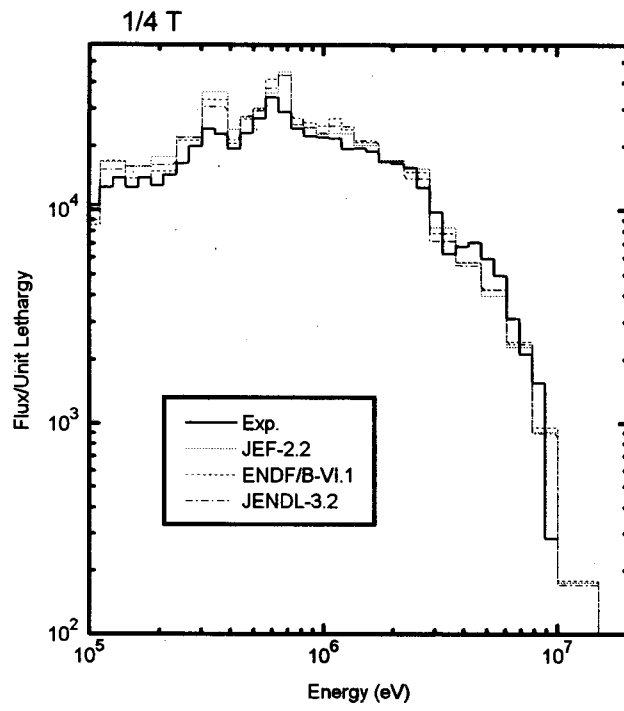


그림 2. 압력용기 모사체에서의 중성자속 비교