

'96 춘계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

고리원자력 4호기 감시시편 X에 대한 선량분석

문복자, 김형현, 김용일  
한국원자력연구소

요 약

최근 고리원자력 4호기 압력용기에 대한 제 3차 감시시험<sup>(1)</sup>이 수행되었고 그 과정 중 측정된 시편에서의 반응률을 근거로 선량분석을 수행하였다. ENDF/B-VI를 근거로 만들어진 BUGLE93<sup>(2)</sup> 라이브러리를 사용하여 각분할코드인 DORT version 2.7.3<sup>(3)</sup>를 이용한 forward 및 adjoint 수송 계산 결과와 측정된 반응률을 결합하여 고리 4호기 원자로의 감시시편 X를 대상으로 1 MeV이상의 중성자속, 0.1 MeV 이상의 중성자속 및 dpa(displacement per atom)를 계산하여 측정치와 계산치를 비교하였다.

1. 서 론

압력용기 건전성 평가에 필요한 측정자료를 제공하기 위하여 발전소 건설시 압력용기와 같은 재질의 시편을 여러개 제작하여 압력용기 내벽 가까이 설치해 두었다가 감시시험시 이 시편을 인출하여 여러가지 시험을 거쳐 수명기간동안의 압력용기 건전성을 평가하게 된다. 고리원자력 4호기에 설치된 감시시편함은 모두 6개로 중성자패드(neutron pad) 바깥면에 붙어 있고 방위각방향으로는 107°, 110°, 287°, 290°, 340°, 343° 에 위치하는데 1/8 노심에서 볼 때 17°, 20° 위치에 있다(그림 1). 6개의 시편중 1, 2차 감시시험시 343°, 107° 에 위치한 시편 U와 V가 인출되었고 3차 감시시험시에는 287° 에 위치한 시편 X가 인출되었다. 이 보고서에서는 forward 및 adjoint 수송계산과 측정방사능의 분석을 통한 시편 X의 선량분석을 수행함으로써 시편 X에 대한 8차 핵주기동안 조사된 1 MeV 이상 중성자집적량을 계산하여 측정치와 비교하였고 0.1 MeV 이상 중성자속과 dpa도 계산하였다. 수송계산 및 시료의 반응률을 계산하기위해 ENDF/B-VI 핵자료에 근거한 BUGLE93 라이브러리를 사용하였다.

2. 본 론

2.1 중성자수송계산

수송계산에 사용한 핵단면적은 ENDF/B-VI로부터 LWR 차폐계산을 목적으로 생산된 BUGLE93 라이브러리로 중성자 47군, 감마선 20군으로 이루어져 있고 ENDF/B-VI로부터 계산된 여러 형태의 시편에 대한 핵반응 단면적을 포함하고 있다. 핵단면적자료의 미시핵단면적과 수

밀도를 입력으로 GIP 코드를 사용하여 거시핵단면적을 계산하여 2차원 각분할 수송 코드인 DORT를 사용하여 수송계산을 수행하였다. 산란단면적은 P3 전개, angular quadrature는 S<sub>8</sub>을 사용하였다. 원자로는 R- $\theta$  좌표계를 사용하여 1/8 대칭을 가정하여 묘사하였으며 반경방향과 방위각방향으로 각각 99개와 89개의 mesh를 이용해 묘사되었다.

고리원자력 4호기 선량분석을 위해 forward 및 adjoint의 두가지 형태의 수송계산이 수행되었다. Forward 계산은 압력용기 내 각 영역에서의 중성자속 분포와 시편 및 압력용기에서의  $\phi(E > 1.0 \text{ MeV})$ 에 대한  $\phi(E > 0.1 \text{ MeV})$ 와 dpa의 비를 계산하기 위한 것이다. Forward 수송계산에 사용된 선원분포는 일반적인 Westinghouse형 3-loop 형태 원자로의 통계자료 분석을 통한 출력분포가 사용되었다. Forward 계산에 의한 시편 중심에서의  $\phi(E > 0.1 \text{ MeV}) / \phi(E > 1.0 \text{ MeV})$  및  $dpa / \phi(E > 1.0 \text{ MeV})$  비는 다음과 같다.

$$\phi(E > 0.1 \text{ MeV}) / \phi(E > 1.0 \text{ MeV}) = 4.747$$

$$dpa / \phi(E > 1.0 \text{ MeV}) = 1.990 \text{E-}21$$

시편이나 압력용기에서의 1 MeV 이상 중성자속을 선원으로 이용한 adjoint 계산은 고속중성자에 대한 노심의 가중함수를 제공하는데 이 가중함수  $I(r, \theta, E)$ 와 노심의 선원분포  $S(r, \theta, E)$ 를 사용하여  $(r, \theta)$  위치에서의 response  $R(r, \theta)$ 을 다음식을 이용하여 계산하게 된다.

$$R(r, \theta) = \int_r \int_\theta \int_E I(r, \theta, E) S(r, \theta, E) r dr d\theta dE$$

Adjoint 계산에 의해 구해진 시편에서의 1 MeV 이상 중성자속 및 중성자 집적량 계산치를 표 1에 나타내었다. 0.1 MeV 이상 중성자속과 dpa는 표 1의 1 MeV 이상 고속중성자속 계산치와 forward 계산으로 구해진  $\phi(E > 0.1 \text{ MeV}) / \phi(E > 1.0 \text{ MeV})$  및  $dpa / \phi(E > 1.0 \text{ MeV})$  비를 사용하여 계산되는데 계산결과는 표 4에 있는 바와 같다.

## 2.2 측정 반응률 계산

각 시료의 반응률(reaction rate) R 은 측정방사능 A와 연소이력에 따라 결정되는 포화율(saturation factor) SF로 부터 다음식으로 계산된다.

$$R = \frac{A}{N_0 F Y SF}$$

여기서  $N_0$  는 g당 중성자 측정시료의 원자수이며 F는 해당 동위원소의 질량비, Y는 해당 핵반응으로 생겨나는 생성물이다. 표 2에 감시시험시 측정된 방사능과 반응률을 나타내었다. 이 반응률로부터 에너지  $E_t$  이상의 측정 중성자속은 다음 식에 의해 계산된다.

$$\phi(E > E_t) = R / \bar{\sigma}$$

여기서  $\bar{\sigma}$  는 평균핵반응단면적으로 1 MeV 이상의 고속중성자속 계산의 경우 BUGLE93 라이브러리의 군구조를 근거로하면 다음과 같이 계산된다.

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{g=1}^{47} \sigma_g \phi_g}{\sum_{g=1}^{18} \phi_g}$$

여기서  $\sigma_g$  는 해당시료의  $g$  군 핵반응단면적이고  $\phi_g$  는  $g$  군의 중성자속으로 이 중성자 스펙트럼을 구하기 위해 다음 식을 이용하여 최소자승법에 의한 fitting을 수행한다.

$$R_i = \sum_g \sigma_{ig} \phi_g$$

이 식에서 측정시료  $i$  의 반응률  $R_i$ 와 BUGLE93 라이브러리에 포함된 핵반응단면적  $\sigma_{ig}$  그리고 forward 수송계산으로 얻어진 스펙트럼  $\phi_g$ 를 입력으로 fitting을 수행하여 adjusted spectrum을 계산한다. 본 계산에서는 SAND/FERRET/INTVAL<sup>(4)</sup> 코드체계를 이용하여 fitting을 수행하였고 표 3에 측정반응률과 SAND/FERRET/INTVAL 계산에 의한 반응률을 비교하였다. Fitting에 의해 구해진 스펙트럼을 이용한 평균핵반응단면적과 표 2의 반응률로부터 중성자속 측정치가 계산된다. 표 4에 고속중성자 집적량 및 dpa 측정치를 수송계산으로 계산된 값과 비교하였다. 측정반응률과 관련된 불확실도는 수송계산에 의한 중성자 에너지 스펙트럼과 시료의 핵반응단면적, 측정된 방사능 등에 의한 불확실도를 포함하며 1 MeV 이상의 고속중성자속에 대한 불확실도는 13%로 평가되었다.

### 3. 결론

고리원자력 4호기 감시시편 X에 대한 선량분석을 수행하여 시편에서의 1 MeV이상 고속중성자속과 0.1 MeV 이상 중성자속 그리고 dpa 계산값을 측정값과 비교하였다. 표 4에 보이는 바와 같이 중성자속과 dpa 측정치와 계산치의 비는 0.83 ~ 0.85로 계산되었고 여기서 측정치는 측정 방사능과의 최소자승법에 의한 fitting을 통해 계산된 중성자 스펙트럼을 이용하여 조절된 값이며 이 과정에서 1 MeV 이상 고속중성자속 측정치에 대한 불확실도는 13%로 평가되었다.

### 4. 참고 문헌

- 1) 김병철, "고리원자력 4호기 원자로 압력용기재료 제 3차 감시시험 (감시용기 X)," KAERI/CR-047/95, Dec. 1995.
- 2) D. T. Ingersoll, et al., "Production and Testing of the VITAMIN-B6 Fine-Group and the BUGLE-93 Broad-Group Neutron/Photon Cross Section Libraries Derived from ENDF/B-VI Nuclear Data," Draft, ORNL, Apr. 1994.
- 3) RSIC Computer Code Collection CCC-543, "TORT-DORT Two- and Three-Dimensional Discrete Ordinates Transport, Version 2.7.3," Jan. 1994.
- 4) "SAND/FERRET/INTVAL Configuration Control Release Letters," SE/REA-049/94, SE/REA/050/94, SE/REA-051/94, May 1994.

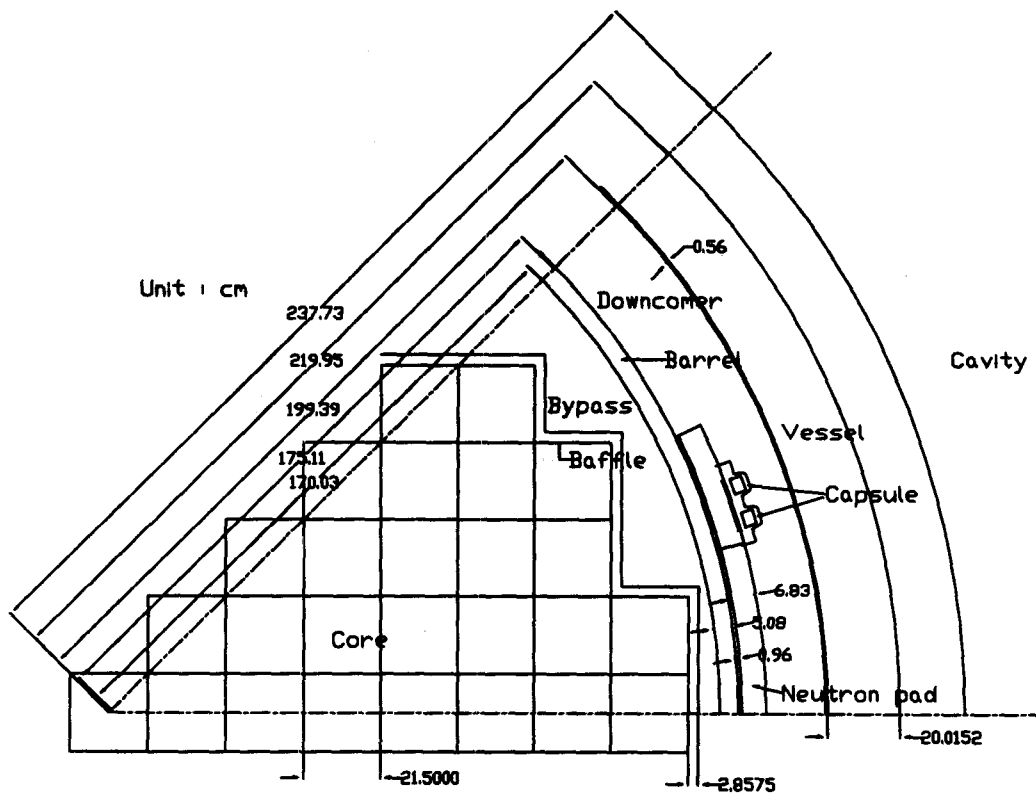


그림 1. DORT 계산에 사용된 고리원자력 4호기 원자로의 구조 및 감시시편 위치

표 1. 수송 계산 결과

Cycle	Irradiation Time (EFPS)	Flux( $E > 1.0$ MeV) ( $n/cm^2$ -sec)	Cumulative Fluence ( $n/cm^2$ )
1	2.572E+07	1.984E+11	5.102E+18
2	2.784E+07	1.757E+11	9.993E+18
3	2.474E+07	1.486E+11	1.367E+19
4	2.278E+07	1.637E+11	1.740E+19
5	2.121E+07	1.789E+11	2.119E+19
6	2.675E+07	1.630E+11	2.555E+19
7	3.094E+07	1.877E+11	3.136E+19
8	3.866E+07	1.767E+11	3.819E+19
average	-	1.741E+11	-

표 2. 측정 방사능 및 반응률

Dosimeter Materials	Axial Location	Measured Activity		Reaction Rate	
		$\mu$ Ci	dps/gm	dps/gm	dps/nucleus
Cu-63(n, $\alpha$ )Co-60	Top	1.430E-2	7.561E+5	-	-
	Middle	1.246E-2	3.547E+5	7.110E+5	1.085E-16
	Bottom	2.077E-2	2.847E+5	5.707E+5	8.706E-17
	Average	-	4.652E+5	6.408E+5	9.776E-17
Fe-54(n,p)Mn-54	Top	1.682E-1	3.275E+6	5.993E+6	9.582E-15
	Middle	1.854E-1	3.119E+6	5.707E+6	9.125E-15
	Bottom	1.025E-1	2.916E+6	5.336E+6	8.532E-15
	Average	-	3.103E+6	5.679E+6	9.080E-15
Ni-58(n,p)Co-58	Top	5.831E-1	9.381E+6	8.346E+7	1.192E-14
	Middle	5.548E-1	8.925E+6	7.940E+7	1.134E-14
	Bottom	6.742E-1	8.909E+6	7.926E+7	1.132E-14
	Average	-	9.072E+6	8.071E+7	1.152E-14
Co-59(n, $\gamma$ )Co-60	Top	8.909E-1	4.781E+7	9.584E+7	6.252E-12
	Middle	8.798E-1	5.425E+7	1.087E+8	7.095E-12
	Bottom	6.524E-1	3.448E+7	6.912E+7	4.509E-12
	Average	-	4.551E+7	9.123E+7	5.952E-12
Co-59(n, $\gamma$ )Co-60 (Cd)	Top	6.456E-1	1.592E+7	-	-
	Middle	3.530E-1	2.612E+7	5.236E+7	3.416E-12
	Bottom	4.027E-1	2.980E+7	5.973E+7	3.897E-12
	Average	-	2.395E+7	5.605E+7	3.657E-12

표 3. 측정치와 FERRET 계산치의 비교

Reaction	Reaction Rate(rps/nucleus)			Ratio(Meas/Calc)	
	measurement	priori calculation	adjusted calculation	priori calculation	adjusted calculation
Cu-63(n, $\alpha$ )Co-60	9.776E-17	7.550E-17	9.479E-17	1.29	1.03
Fe-54(n,p)Mn-54	9.080E-15	9.310E-15	9.043E-15	0.98	1.00
Ni-58(n,p)Co-58	1.152E-14	1.320E-14	1.194E-14	0.87	0.97
Co-59(n, $\gamma$ )Co-60	5.952E-12	5.930E-12	5.927E-12	1.00	1.00
Co-59(n, $\gamma$ )Co-60 (Cd)	3.657E-12	4.310E-12	3.674E-12	0.85	1.00

표 4. 선량 분석 결과 요약

Quantity	Measured Value	Calculated Value	Ratio (Meas/Calc)
Flux, E>1.0 MeV (n/cm <sup>2</sup> -sec)	1.439E+11 ± 13%	1.741E+11	0.83
Flux, E>0.1 MeV (n/cm <sup>2</sup> -sec)	6.977E+11 ± 24%	8.264E+11	0.84
dpa/sec	2.947E-10 ± 18%	3.464E-10	0.85