

## BUNKI/BUMS 코드를 이용한 원자로격납건물내 중성자스펙트럼 비교 분석

### A Comparative Analysis of Neutron Spectrum in Reactor Containment Building using BUNKI and BUMS Codes

한재문, 김태욱, 김경덕, 윤철환, 허영희  
한수원(주) 원자력환경기술원  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

PWR형 원전인 고리 1호기 격납건물내 4개의 작업층(6 ft, 20 ft, 44 ft, 70 ft)에서 BMS를 이용한 측정값에 대한 중성자스펙트럼을 구하기 위해 2개 또는 몇 개의 Unfolding 방법을 사용하였다. 이때 Unfolding Method는 SPUNIT 코드를, Unfolding Matrix는 SAN4를 이용하였다. 그러나 초기 스펙트럼을 선정할 때 BUNKI 프로그램은 중성자 에너지 분포를 Maxwellian 분포로 선택하였으며, BUMS 프로그램은 PWR에서 측정한 대표적인 스펙트럼을 중성자에너지 분포를 선택하여 중성자스펙트럼을 구하였다. Unfolding한 스펙트럼의 전체 플럭스에는 변화가 없었지만 고에너지 영역에서의 플럭스는 현저한 차이를 보였다.

#### Abstract

Various unfolding methods were used for analyses of neutron spectra measured using BMS at 4 points(6 ft, 20 ft, 44 ft, 70 ft) in Kori unit 1. SPUNIT code and SAN4 matrix were used for each unfolding. The BUNKI code used Maxwellian distribution. But BUMS code used typical neutron energy distribution measured in PWR, when initial spectrum was selected. Total fluxes obtained from the unfolding were not different from each other but their spectra showed remarkable differences in high energy level.

## 1. 서 론

원자력발전소에서 시설의 검사나 보수 등을 목적으로 방사선작업자가 원전 격납건물 내부로 들어가야 할 경우가 발생한다. 이때 방사선작업자가 받게 될 중성자 피폭선량 평가를 위해 중성자선장 분포에 관한 정보가 기본적으로 요구된다. 이를 위해 BMS(Bonner Multisphere Spectrometer)를 이용하여 PWR형 원전인 고리 1호기 격납건물내 수직방향으로 4개 작업층 중 6 ft 와 20 ft에서 각각 4개 지점, 44 ft에서 2개 그리고 70 ft에서 5개 지점을 측정하였다[1]. 이중 각 작업 층별로 측정시간과 불감시간이 양호한 4개 지점에 대해 측정한 값을 이용하여 중성자스펙트럼 얻었다.

Multisphere Spectrometer로 측정된 측정값은 각 측정기별로 중성자스펙트럼에 대한 복합적인 반응도라 할 수 있으므로 실제 스펙트럼을 알기 위해서는 Unfolding 과정을 거쳐야 한다. 현재 중성자 Unfolding 프로그램으로 널리 사용되고 있는 BUNKI-Code 와 BUNKI-Code를 업그레이드 시킨 BUMS-Code를 이용하여 중성자스펙트럼을 비교 분석하였다.

## 2. 분석 방법(Unfolding Algorithm)

BMS로 측정한 자료는  $(n, \mathbf{a})$  반응로부터 발생된 섬광체 발광량을 나타내며, 다중과교 분석기로부터 구한 Peak의 면적값은 해당 측정기의 계수율이다 이 순계수값은 각 측정기 별로 중성자 에너지 스펙트럼에 대한 복합적인 반응도라 할 수 있으므로 실제 에너지 스펙트럼을 알기 위해서는 Unfolding 과정을 거쳐야한다. BMS 검출기의 측정값과 실제 에너지 스펙트럼과의 관계를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$M_i = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} R_i(E) \phi(E) dE \quad (1)$$

여기서  $M_i$ 는 검출기(BMS)의 측정값(counts),  $R_i(E)$ 는 에너지  $E$ 를 갖는 중성자에 대한 검출기  $i$ 의 반응값(counts · cm<sup>2</sup>/neutron),  $\phi(E)$ 는 중성자 선속(neutron/cm<sup>2</sup>)이다.  $\phi(E)$ 를 구하기 위하여 연속함수인  $\phi(E)$ 와  $R_i(E)$ 를 불연속 분할값인  $\phi(g)$ 와  $R_{i,g}$ 로 근사화시킬 수 있다고 가정한다. 즉 검출기 반응값이  $n$ 개의 분할된 에너지 그룹으로 되어 있다고 가정하면, (1) 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_i = \sum_{g=1}^n R_{i,g} \phi_g \Delta E_g \quad (2)$$

여기서  $R_{i,g}$ 는 검출기  $i$ 의 에너지 그룹  $g$ 에 대한 반응값,  $\phi(g)$ 는 에너지 그룹  $g$ 의 에너지 스펙트럼,  $\Delta E_g$ 는 에너지 그룹  $g$ 의 폭 이다.

따라서 8개의 선형방정식을 8개의 검출기에 의해 얻어진 측정값( $M_i$ )과 반응함수 ( $R_{i,g}$ )를 이용하여 풀 수 있다. 이 때 분할된 에너지 그룹이 많으면 많을수록 Unfolding된 스펙트럼의 에너지 분해능을 높일 수 있다. BMS 측정 결과를 Unfolding 하기 위하여 여러

가지 전산 프로그램이 개발되었는데, 대부분 Iterative 기법에 의한 Matrix 변환법을 사용한다. 미국 NRL(Naval Research Laboratory)에서 개발한 BUNKI 프로그램은 BON, SPUNIT 코드 그리고 9개의 반응함수를 가지고 있다[2]. 반면 조지아공대에서 개발한 BUMS 프로그램은 BON, SPUNIT, MAXED, SAND-II 4개의 코드와 14개의 반응함수를 포함하고 있다. BUMS 프로그램에서 가장 중요한 특징은 여러 측정 장소에 알맞은 대표적인 초기 스펙트럼을 사용자가 선택할 수 있다[3].

### 3. Unfolding된 중성자스펙트럼 결과

PWR형 원전인 고리 1호기 격납건물내 4개의 작업층(6 ft, 20 ft, 44 ft, 70 ft)에서 BMS를 이용한 측정값에 대한 중성자스펙트럼을 구하기 위해 Unfolding 방법을 다르게 하였다. Unfolding Method는 SPUNIT 코드를, Unfolding Matrix는 SAN4를 이용하였다. 그러나 초기 스펙트럼을 선정할 때 BUNKI 프로그램은 중성자 에너지 분포를 Maxwellian 분포를 선택하였으며, BUMS 프로그램은 PWR에서 측정된 스펙트럼의 중성자에너지 분포를 선택하여 중성자스펙트럼을 구하였다. 그림 1~4에서 보는바와 같이 전체 플럭스는 변화는 없었지만 각 에너지 구간에서 플럭스의 변화를 볼 수 있다. 특히 1 MeV 이상의 고에너지 영역에서 플럭스 분포가 4개 스펙트럼에서 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 이는 ICRP-60에서 제시하고 있는 중성자선량 평가방법이 중성자 에너지 구간별로 방사선가중치를 다르게 하여 선량을 평가하므로 각 에너지 구간별 플럭스가 중요하다[4].

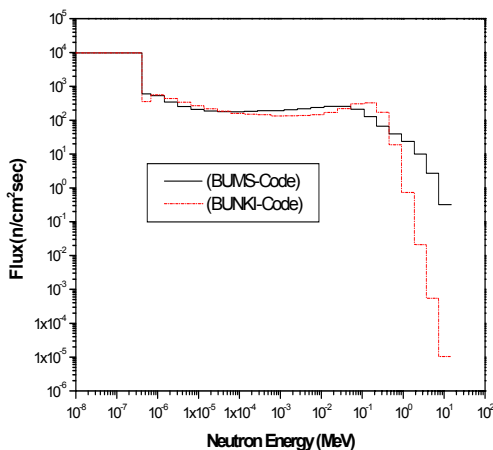


그림 1. 고리1호기 6 ft 지점에서의 중성자스펙트럼

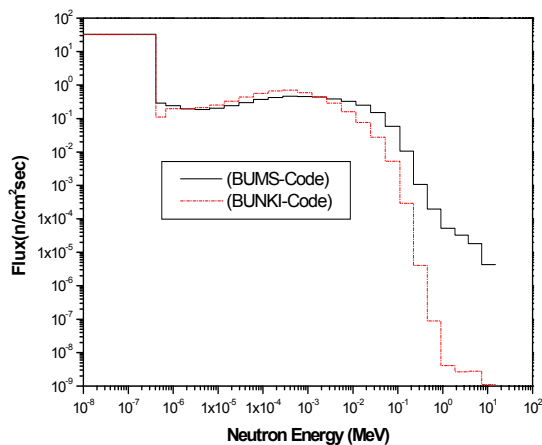


그림 2. 고리1호기 20 ft 지점에서의 중성자스펙트럼

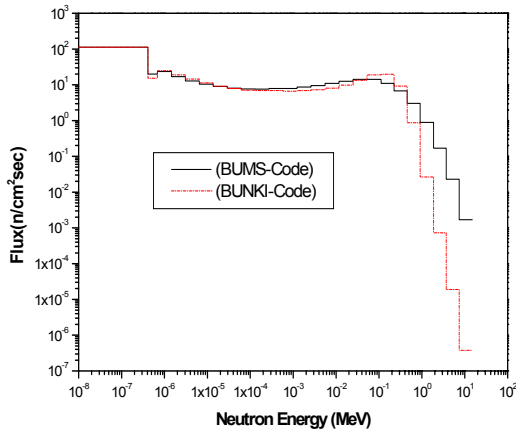


그림 3. 고리1호기 44 ft 지점에서의 중성자스펙트럼

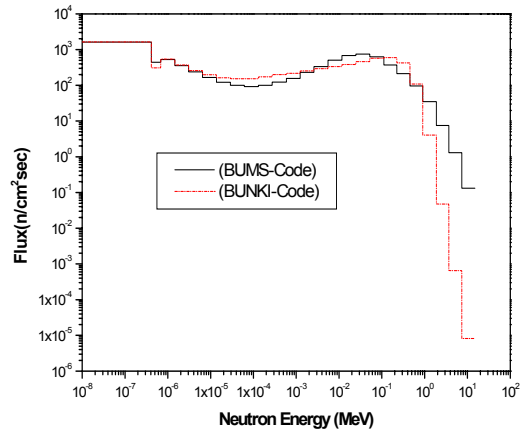


그림 4. 고리1호기 70 ft 지점에서의 중성자스펙트럼

#### 4. 결론 및 향후 계획

다중구(Multisphere)를 이용하여 중성자스펙트럼을 얻기 위해서는 Unfolding 과정을 거쳐야 한다. 중성자를 측정하는 것도 중요하지만, Unfolding 기술에 따라 중성자스펙트럼이 다르게 나타나므로 여러 가지 Unfolding 코드를 이용하여 스펙트럼을 구해서 비교해야 한다. BUNKI 와 BUMS 코드를 비교한 결과 전체 플럭스는 거의 변화가 없지만 에너지에 따른 플럭스는 고에너지 영역에서 큰 차이를 보이고 있다. 이는 ICRP-60에서 제시한 중성자 피폭 선량 평가시 선량 값의 차이를 보일 수 있다. 측정값에 대해 신뢰할 만한 스펙트럼을 얻기 위해서는 측정 지점에 대한 중성자에너지 분포를 예측할 수 있는 초기 스펙트럼을 확보하는 것이 중요하다. 이를 위해 본 연구에서는 PWR(W/H)형 원전인 고리 1호기에서 14개의 중성자스펙트럼을 구하였으며, 앞으로 C/E형 원전인 영광 2호기에서 중성자를 측정할 예정이며, 향후 중성자스펙트럼의 Unfolding을 위한 초기 스펙트럼 자료로 활용할 수 있을 것이다.

#### 참 고 문 헌

1. 한재문, 김태욱, 김경덕, 윤철환, “고리1호기 원자력발전소 격납용기내 중성자스펙트럼 측정“, 한국원자력학회 2003 추계학술발표회논문집, 404~414, 2003.
2. K. A. Lowry and T. J. Jhonson, "Modifications to Iterative Recursion Unfolding

Algorithms and Computer Codes to Find More Appropriate Neutron Spectra", Naval Research Laboratory, U. S. Department. of Navy, 1984.

3. Jeremy Sweezy, "BUMS-Bonner sphere Unfolding Made Simple : an HTML based multisphere neutron spectrometer unfolding package", Nuclear Instruments Methods Physics Research A, vol.476, 263~269, 2002.
4. ICRP, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection Publication 60, 1990.