

# 중성자 수반 수송 방정식을 이용한 SMART 노외 계측기 반응함수 평가

이환수 · 김하용 · 송재훈 · 김교운  
한국원자력연구원  
E-mail: hslee@kaeri.re.kr

중심어 (keyword) : DORT, SMART, AWF, SAF, GEOSHIELD, 중성자 수반 수송계산

## 서 론

원자로 노심 내 핵연료집합체의 출력분포를 감시하고 제어하기 위해서 노외계측기가 사용된다. 노외계측기는 그 위치와 크기에 따라 원자로 노심에 대한 계측기의 반응도가 차이가 있어 이를 보정하기 위하여 계측기의 반응함수를 사용한다. 반응함수로는 원자로의 반경방향으로 Assembly Weighting Factor (AWF), 축 방향으로 Shape Annealing Function (SAF)이 사용된다. AWF는 각 핵연료집합체의 노외계측기에 대한 반응 분율이며, SAF은 노심 체적의 각 수평조각에 기인하는 노심 높이의 백분율당 노외계측기의 반응 분율이다. 두 반응함수는 노심 선원에 대한 중성자 Adjoint 수송계산을 이용하여 구한다.

이 논문에서 한국원자력연구원에서 개발 중인 일체형원자로 SMART 노외 계측기의 반응함수 AWF와 SAF을 2차원 결정론적 수송해석 코드인 DORT<sup>[1]</sup>를 이용하여 평가하였다.

## 방법론 및 계산

중성자 수반 수송방정식을 이용하여 노심 임의의  $r_i$  위치에서의 점등방핵분열 선원에 대한 노외 계측기의 반응도는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$R(r_i) = \frac{1}{4\pi} \int dE \chi(E) \Phi^+(r_i, E)$$

여기서  $\Phi^+$  는 수반 선원에 대한 위치  $r_i$  에서의 Adjoint Scalar Flux 이고  $\chi(E)$ 은  $^{235}\text{U}$  Fission Spectrum이다. 노외 계측기가  $^{235}\text{U}$  Fission Chamber 이기 때문에 수반 수송계산에서 선원항은  $^{235}\text{U}(n,f)$  반

응도에 비례한다. 따라서 단면적 라이브러리에 있는  $^{235}\text{U}$ 의 거시단면적  $\sigma_t$ 를 선원항으로 사용한다.

위와 같이 얻어지는 각 격자에 대한 계측기 반응도  $R(r_i)$ 를 이용하여 AWF와 SAF은 다음과 같이 각각 나타낼 수 있다.

$$AWF = \frac{R_n}{\sum_{n=1}^N R_n}$$

$$SAF = \frac{\left[ \frac{\sum_i R_{i,j}^k \pi (r_{i+1}^2 - r_i^2) (z_{i+1} - z_i)}{\sum_{k=1}^m \sum_j \sum_i R_{i,j}^k \pi (r_{i+1}^2 - r_i^2) (z_{i+1} - z_i)} \right]}{\left[ \frac{(z_{i+1} - z_i)}{H} \times 100 \right]}$$

여기서  $R_n$ 은 한 개의 핵연료 집합체에 대한 계측기 반응도,  $N$ 은 계산할 총 집합체 개수이며 SAF 식의  $i, j$ 는 노심 영역에서의 반경방향 및 축 방향 격자,  $m$ 은 축 방향의 노외계측기 개수,  $k$ 는 상단, 중간, 하단의 노외계측기,  $H$ 는 실제 노심 길이이다.

SMART는 출력영역 계측기가 4채널, 선원영역 계측기가 2채널로 각각 축 방향으로 3개와 1개로 구성되어 있으며, 이 논문에서는 원자로의 운전 시 사용되는 출력영역 계측기에 대한 AWF와 SAF를 계산하였다. AWF를 계산하기 위해서 R- $\theta$  좌표로, SAF은 R-Z 좌표로 원자로를 모사하였다. 그림 1과 2는 GEOSHIELD<sup>[2]</sup>를 이용하여 SMART 노심 영역 반경방향(R- $\theta$ ) 및 축 방향(R-Z)을 모델링한 것을 나타낸 것이다.

AWF는 반경반향으로 194 구간, 방위각 방향으로 180 구간을 나누어서 계산하였다. 그리고 노심 만의

영향을 고려하기 위하여 모든 방향에 대하여 Vacuum 경계조건을 사용하였다.

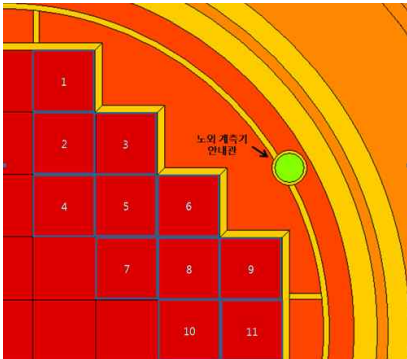


그림 1. SMART 노심 영역 반경 방향(R-θ) 모델링

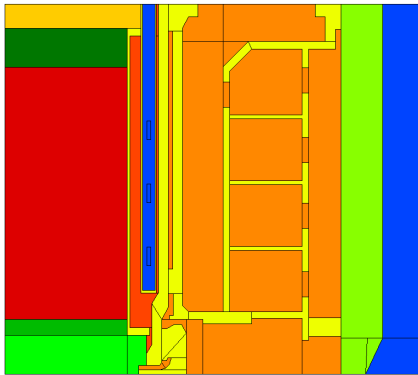


그림 2. SMART 노심 영역 축 방향(R-Z) 모델링

SAF 계산을 위해 R-Z 방향 모델링은 반경반향 및 축 방향에 대해 178 및 195 미세 격자 구간을 나누어 모사하였으며 계측기는 상단, 중단, 하단의 3개의 계측기를 노심에 대칭되도록 하였다. 계측기의 실질적 반응도를 보기 위하여 계측기 Neutron Sensitive Length(15mm) 만을 모사하였다.

중성자 수반 수송계산에 47군의 중성자 및 20군의 감마선의 BUGLE-96<sup>[3]</sup>이 단면적 자료로 이용되었다.

### 결과 및 고찰

각 핵연료집합체에 대응하는 AWF는 그림 3에 나타내었다. 노심보호용 계측기에서 가장 가까운 6번 핵연료집합체에 대한 AWF가 0.312로 가장 크게 나타났고 계측기에서 멀어질수록 그 값이 작아져 1번 핵연료 집합체에 대한 AWF는 0.003로 나타났다. 즉 AWF는 노외 계측기 가까이에서는 크며 멀어질수록 작아지는 것을 알 수 있다. 축 방향에 대한 반응 함수인 SAF을 그림 4에 나타내었다. 상단, 중단, 하단 계측기의 중심 높이인 75.4% 50.0%, 25.0% 높이에서

최대값이 각각 0.010053, 0.010054, 0.010166으로 나타났다. 하단 계측기와 노심과의 사이에 감속재와 안내관 등의 영향으로 중단 및 상단 계측기의 SAF 최대값보다 하단 계측기의 값이 약간 더 크게 나타났다.

	0.003			
	0.010	0.032		
	0.016	0.065	0.312	
		0.044	0.129	0.289
			0.042	0.059

그림 3. SMART 노외계측기 Assembly Weighting Factor

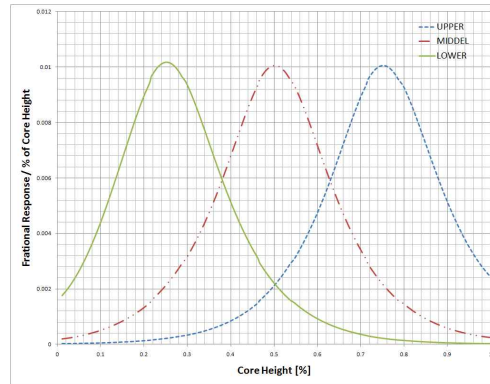


그림 4. SMART 노외계측기 Shape Annealing Function

### 결론

다양한 출력분포에 대한 실제 노심 보호용 노외 계측기에 반응은 노외 계측기 반응함수(AWF, SAF)와 실제 노심의 출력분포를 곱하여 구할 수 있다. 본 결과는 SMART 노심 보호 계통 설계 및 MMIS설계를 위한 방사선 물리자료로 제공된다.

### 참고 문헌

1. RSICC Computer Code Collection-DOORS3.2," CCC-650, ORNL (1998)
2. 김강석 외, "Development of the GEOSHIELD Program for the Automatic Particle Transport Calculation Using DORT," KARP (2006)
3. "RSIC DATA LIBRARY COLLECTION BUGLE-96," DLC-185, ORNL (1996)