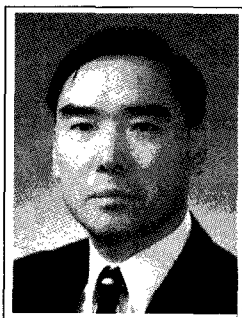


# 노내 중성자속 검출기의 반응도 계산 모형 설계

— 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 —

하 달 규

삼창기업(주) 중앙연구소 소장



되고 있고, 앞으로 건설중인 원전 영광 3·4호기에는 이 노내 고정식 중성자 검출기 집합체가 사용되고 있고, 앞으로 건설중인 원전에서도 사용되리라 예상된다.

본 연구에서는 현재 사용중인 중성자 검출기 집합체의 동작을 몬테카를로 전산 코드로 시뮬레이션 하고자 한다.

이는 보다 정확하게 검출기의 수명과 신호 등을 계산 할 수 있게 할 것이다.

또한 보다 장수명의 검출기 모형도 제시할 것이다.

## 자기 출력형 중성자 검출기의 동작 원리

자기 출력형 중성자 검출기 (SPND)는 크게 3부분으로 되어 있다.

즉 로듐 에미터(Emitter), 알루미늄 절연체(Insulator), 인코넬 시스

(Inconel Sheath)가 동축으로 구성되어 있다.

SPND의 동작은 로듐 에미터의  $(n, \beta)$ 반응에 기인한다. <그림 1>에 나타나있듯이 로듐 에미터에서  $(n, \beta)$ 반응으로 생성된 전자는 에미터 표면으로 이동, 절연체를 지나 인코넬 시스에 도달하여 전기적인 신호를 발생한다.

## 계산 모델링

자기 출력형 중성자 검출기의 신호는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$I = e \times (\text{에미터에서 생성된 전자 수})$$

①

$$\times (\text{전자의 에미터 탈출 확률})$$

②

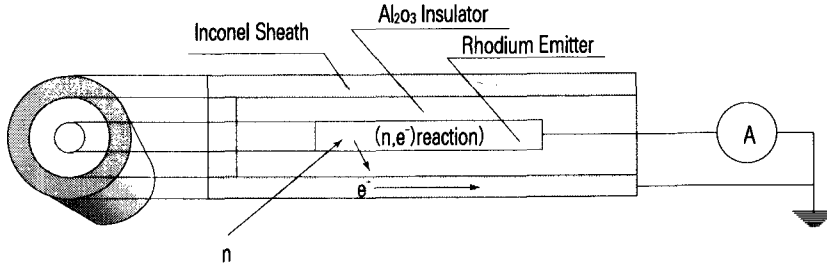
$$\times (\text{전자의 절연체 통과 확률})$$

③

여기서 ①번 항은 에미터 내에서 로듐의 흡수 반응의 갯수와 같고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

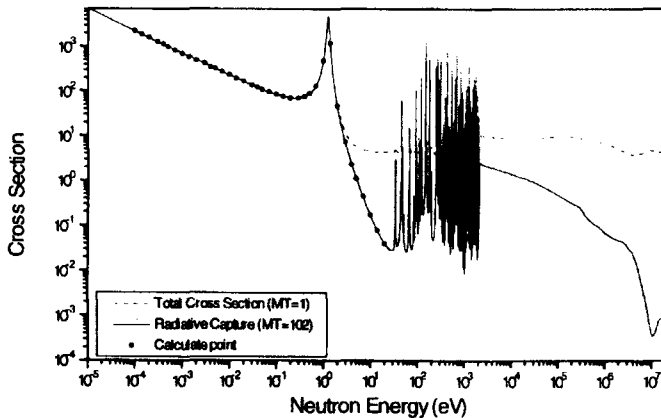
**원** 자로심의 출력을 측정하는데에는 여러 가지 방법이 있지만 그 중 가장 직접적으로 노심의 출력을 측정하는 것 중의 하나가 자기 출력형 중성자 검출기 (SPND : Self-Powered Neutron Detector)를 사용한 노내 고정식 중성자 검출기 집합체(In-core Instrument Assembly)이다.

현재 영광 3·4호기에는 이 노내 고정식 중성자 검출기 집합체가 사용



〈그림 1〉 로듐 자기 출력형 중성자 검출기의 동작 원리

Cross Section of Rhodium-103 from JENDF



〈그림 2〉 로듐의 반응 단면적(JENDF)

$$\textcircled{1} = \iint \Sigma(E,r)\Phi(E,r)f(E,r)dE dV$$

$$= \sum_a^{\text{group}} \times \Phi_{\text{tot}} \times V \times f$$

여기서 f는 Neutron Shielding factor로 중성자가 외부로부터 검출기 내로 이동하여 에미터에 도달할 확률을 나타내며 전산 코드로 구할 수 있다.

에미터에 도착한 중성자는 로듐과 (n, β) 반응을 한다.

이 반응의 1그룹 거시 흡수 단면적 (Σ<sub>a</sub><sup>1group</sup>)은 MCNP4A 전산 코드와

JENDF의 Cross Section Library로 구할 수 있다.

〈그림 2〉에 사용된 JENDF의 흡수 단면적이 나타나 있다.

사용된 중성자 스펙트럼은 JENDF에서 제시한 전형적인 PWR의 중성자 속을 사용하였다.

이렇게 생성된 전자는 에미터 표면으로 이동하여야 신호에 기여할 수 있는데, 이 ②번항 또한 MCNP4A 시뮬레이션으로 구하였다.

에미터 표면의 전자는 다시 절연체

를 지나 시스에 도달하여야만 신호를 발생시킬 수 있는데, 이 절연체에는 공간 전하가 구성되어 작은 에너지의 전자는 지나갈 수가 없다.

③번항은 절연체를 지나가기 위한 최소의 전자 에너지를 구함으로 결정할 수 있고, 이는 다음과 같은 Katz와 Penfold의 식으로 구하였다.

〈그림 3〉에 앞에서 설명한 전체 계산 과정에 대한 개략도를 나타내었다.

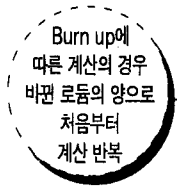
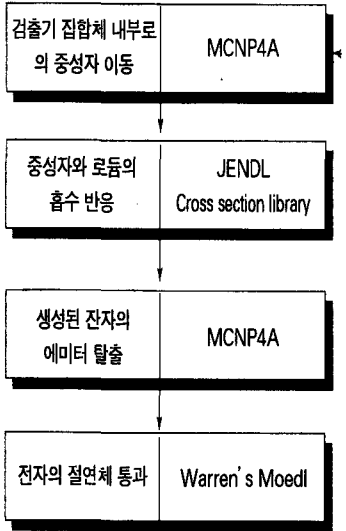
$$E_{\min} = \exp(6.63 - [34.662 - 10.482 \times \ln(\bar{r}p)]^{1/2}) \dots(1)$$

$$\bar{r} = \frac{r_i - r_e}{1 - k} \cdot \left( \left[ \frac{1 - k^2}{2 \ln(1 - k)} \right]^{1/2} \times E \left\{ k \cdot \left[ \frac{2 \ln(1 - k)}{1 - k^2} \right]^{1/2} \right\} - k \right) \dots(2)$$

Where, r<sub>i</sub>-r<sub>e</sub>: Insulator wall thickness, cm

k: r<sub>i</sub>/r<sub>e</sub>

E(arg): complete elliptic integral of the second kind



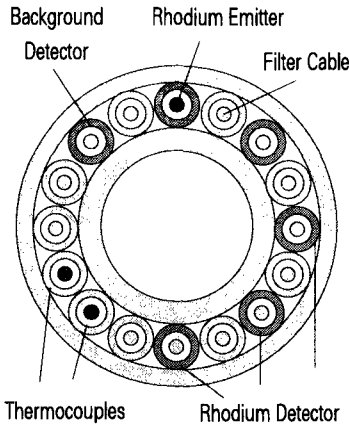
〈그림 3〉 계산 과정

**중성자 검출기 모형**

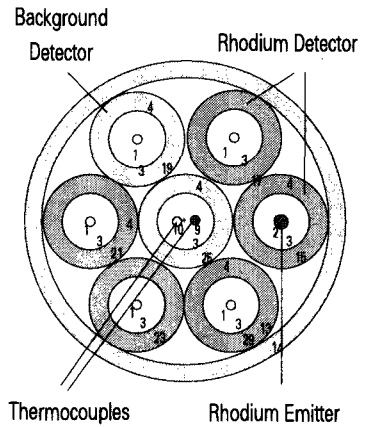
기존의 영광 3·4호기에 사용되는 형태의 중성자 검출기에 대하여 위의 계산을 적용하였고(Model A), 보다 긴 수명을 위하여 로듐 에미터의 부피를 늘린 형태의 중성자 검출기 모형(Model B)에 대하여도 위의 계산 방법으로 그 감도와 수명을 계산하였다.

〈그림 4〉, 〈그림 5〉에 각 경우의 단면을 나타내었다.

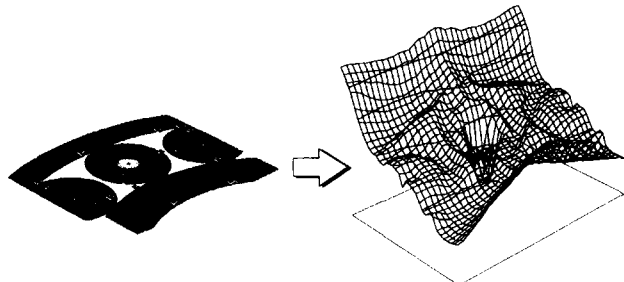
기존의 검출기는 가운데 이동형 검



〈그림 4〉 ICI 집합체 단면



〈그림 5〉 제안된 ICI 집합체 단면



〈그림 6〉 ICI 집합체 내의 중성자속 분포

출기를 위한 공간이 있으나 제안된 형태는 이 공간과 filler cable을 없애고 에미터의 반경을 늘렸다.

**계산 결과**

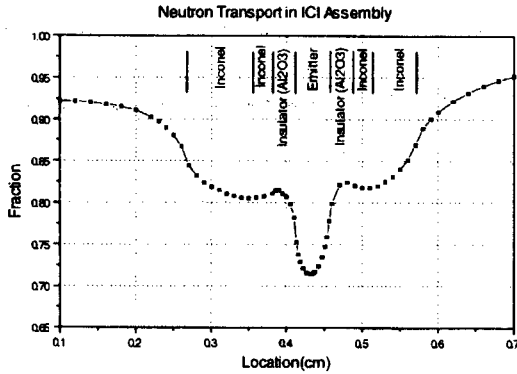
**1. 중성자 검출기 내에서의 중성자의 거동**

〈그림 6〉은 앞에서 설정한 Model A 모형에서의 2차원적인 중성자 분포도이다.

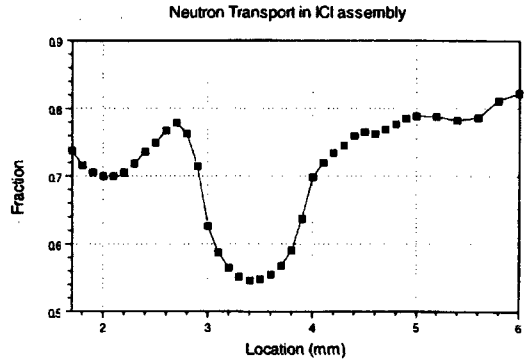
중심의 로듐 에미터에서 로듐의 큰 중성자 흡수 단면적으로 인해 중성자의 감소가 관찰되었다.

또한 중성자 검출기 내의 빈 공간에서 상대적으로 큰 분포가 나타났고, 알루미늄 절연체보다는 인코넬 구조물에서 큰 감소를 보인다.

로듐 에미터 내에서 평균 중성자속과 외부의 중성자속에 대한 그래프가 〈그림 7〉과 〈그림 8〉에 나타나 있고, 전체적으로 약 73%의 중성자가 외부



〈그림 7〉 ICI 집합체 내의 중성자속 분포



〈그림 8〉 제안된 ICI 집합체 내의 중성자속 분포

에서 에미터에 도달한다.

## 2. 로돔의 중성자 흡수 반응

앞에서 설명된 바와 같이 로돔은  $(n, \beta)$  반응에 의해 신호를 발생한다.

JENDF의 Cross-section Data와 MCNP4A 코드로 계산한 로돔 에미터 내의 중성자 평균 스펙트럼으로 로돔 에미터와 중성자와의 반응을 계산하였다. 결과를 보면 전체 반응의 87%는 1eV 이하의 열중성자에 의한 것이고, 나머지 13% 정도는 그 이상의 Epithermal 중성자와의 반응에 의한 것이다.

이는 로돔이 1.25eV 근처에서 공명을 갖고 있기 때문이며 기존의 계산된 값인 15%와 유사하다.

## 3. Beta Escape Probability와 Emin

위의 식 (1)로 각 모형의 경우를 계산한 결과 절연체를 지날 수 있는

〈표 1〉 자기 계산된 출력형 중성자 검출기 출력과 초기 감도

	Initial Current	Sensitivity (A/nv · cm)	1-Goup Cross section	Neutron Transport	Emin	Electron Escape Probabilit
Model A	$2.92 \times 10^{-6} \text{A}$	$4.86 \times 10^{-22}$	113.2b	72.2%	299.5KeV	0.31
Model B (Proposed)	$4.40 \times 10^{-6} \text{A}$	$7.34 \times 10^{-22}$	107.8b	57.4%	497.6KeV	0.13

최소 에너지 Emin은 기존의 Model A의 경우는 300keV이고, 새로이 제안된 Model B의 경우에는 498keV이다.

Model B의 경우 값이 더 큰 이유는 Model B의 경우가 절연체의 두께가 더 두꺼워서이고, 만약 더 감도를 높이고자 한다면 절연체 두께를 줄이면 된다.

MCNP4A로 에미터 표면까지 전자의 탈출 확률을 계산하였다.

Model B의 경우 로돔 에미터의 반경이 Model A의 2배 정도이고, 이로 인하여 전자의 탈출 확률은 1/3 정도로 줄었다.

〈표 1〉에 이에 대한 요약을 나타내었다.

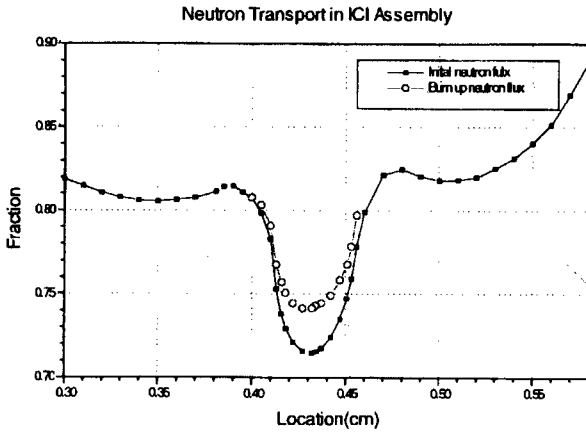
## 4. 초기 감도

앞에서 설명한 계산 과정으로 중성자 검출기의 초기 감도(Initial Sensitivity)를 계산하였다.

Model A의 경우 약  $4.86 \times 10^{-22}$  A/nv · cm이고, Model B의 경우  $7.34 \times 10^{-22}$  A/nv · cm 정도이다.

기존의 계산값들은 열중성자의 경우에만 계산하였는데, 본 연구에서는 전형적인 PWR 중성자속에 대해 계산하였다.

기존의 연구와 비교하기 위하여 열



〈그림 9〉 연소도에 따른 중성자속의 분포

〈표 2〉 연소도에 따른 중성자 검출기의 출력과 감도

		Initial	6 Month	12 Month	18 Month	24 Month
Neutron Transport	Model A	72%	75%	77%	79%	81%
	Model B	57%	60%	63%	66%	69%
Rhodium Depletion	Model A	100%	83%	67%	54%	44%
	Model B	100%	87%	74%	63%	53%
Sensitivity ( $10^{-22}A/nv \cdot cm$ )	Model A	4.86	4.26	3.65	3.08	2.56
	Model B	7.34	6.76	6.13	5.50	4.89

중성자속에서의 감도를 계산하였다. 그 결과 기존에 계산된 값들보다 작게 계산되었고, 이는 기존 계산이 단지 중성자 검출기에 대해서만 계산한 것과 달리, 본 계산에서는 중성자 검출기 집합체 전체를 고려하였기 때문에 구조물에서의 중성자 감쇠의 영향으로 추정된다(표 1).

### 5. 연소도에 따른 감도

중성자 검출기는 원자로 내에서 계속 상주하여 중성자를 검출하는데,

이에 따라 로듐은 연소되어 그 양이 점차 감소한다.

로듐의 양이 줄어들며 따라 다음과 같은 일이 발생한다.

첫째, 강한 중성자 흡수체인 로듐이 줄어들며 따라 로듐 에미터에서의 Self-shielding 효과가 줄어들어 로듐 에미터에서 중성자속이 증가한다.

이를 〈그림 9〉에 나타내었다. 〈그림 9〉는  $1.5 \times 10^{14} \# / cm^2 \cdot sec$ 의 중성자속으로 6개월간 연소하였을 경우의 로듐 에미터 내의 중성자 분포를

초기의 값과 비교한 것이다.

초기에 중성자는 외부 중성자속의 72% 정도이지만 6개월 연소 후에는 75% 정도로 늘어난다.

둘째, 로듐의 수밀도가 적어져서 로듐과 중성자와의 반응이 줄어들고 이는 전체적인 신호를 줄어든다.

위의 효과는 서로 상반되지만 연소가 계속 진행됨에 따라 두 번째의 효과가 더 지배적이다.

다음에 연소도에 따른 중성자 검출기의 감도를 계산하였고 〈표 2〉에 그 결과를 나타내었다.

### 결론

몬테카를로 방법을 이용하여 노내 중성자 검출기 집합체의 계산 모델을 제시하였다.

기존의 노내 중성자 검출기 집합체에 대하여 전형적인 PWR에서의 감도를 계산한 결과 초기 감도는 약  $4.86 \times 10^{-22} A/nv \cdot cm$ 로 계산되었고, 연소됨에 따라 24개월 정도 연소 후에는  $2.56 \times 10^{-22} A/nv \cdot cm$ 로 계산되었다.

또한 보다 장주기에 적합한 중성자 집합체 모형을 제시하였고 이의 감도도 계산하였다.

새로이 제시된 중성자 집합체의 경우 로듐의 반경을 늘려 보다 오래 사용할 수 있으리라 추정되고, 그 출력은 절연체의 두께에 민감한 것을 알 수 있다. ☞