

몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 자기출력형 중성자검출기의
계산 모델링과 설계

Calculational Modeling and Designing of Self-Powered
Neutron Detector with MCNP4A

김윤구, 한경훈, 박봉찬, 노우영, 김창구, 하달규

(주)삼창기업 부설 연구소
경기도 안양시 동안구 관양동 889-3

요 약

원자력 발전소에서 사용되는 자기출력형 중성자 검출기의 동작과 중성자 감도계산에 대하여 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 계산 모델이 제시되었다. 초기의 중성자 감도와 연소도에 따른 중성자 감도를 계산하였고, 보다 장주기에 적합한 형태에 대한 제안과 시뮬레이션도 하였다. 중성자 거동과 전자의 거동에 대하여 MCNP4A¹⁾ 전산코드가 사용되었고, 로듐의 중성자 흡수반응을 위해 JENDL²⁾의 Cross section library가 사용되었으며, 전자의 공간전하 영향에 대한 영향도 계산되었다. 계산된 결과 초기 감도는 기존의 중성자 수송이론으로 계산 모델링을 세운 경우³⁾와 비교되었고, 연소도에 따른 감도는 $1.5 \times 10^{14} \#/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ 의 중성자속으로 6개월간 연소하였을때 계산되었다.

Abstract

A Calculational model with Monte Carlo method is presented for the self-powered neutron detector of the type used in nuclear reactor core. Initial sensitivity and sensitivity with burnup are calculated and new model for long nuclear fuel cycle is suggested. MCNP4A¹⁾ computer code is used for Monte carlo method and JENDL²⁾ cross section library is used for rhodium burnup calculation. The result are compared others neutron transport theory model and burnup sensitivity is calculated at $1.5 \times 10^{14} \#/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ neutron flux after 6 month.

1 서론

원자로심의 출력을 측정하는데에는 여러 가지 방법이 있지만 그중 가장 직접적으로 로심의 출력을 측정하는 것 중의 하나가 자기출력형 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 사용되고 있고, 앞으로 건설중인 원전에서도 사용되리라 예상된다. 본 연구에서는 현재 사용중인 중성자 검출기 집합체의 동작을 몬테카를로 전산코드로 시뮬레이션 하고자 한다. 이는 보다 정확하게 검출기의 수명과 신호등을 계산할 수 있게 할 것이다. 또한 보다 장수명의 검출기 모형도 제시할 것이다.

2 자기출력형 중성자 검출기(SPND)의 동작원리

SPND는 크게 3부분으로 되어있다. 즉, 로듐 에미터(Emitter) , 알루미나 절연체(Insulator), 인코넬 시스(Inconel Sheath)가 동축으로 구성되어있다. SPND의 동작은 로듐 에미터의 (n, β) 반응에 기인한다. 그림 1에 나타나있듯이 로듐 에미터에서 (n, β) 반응으로 생성된 전자는 에미터 표면으로 이동 , 절연체를 지나 인코넬 시스에 도달하여 전기적인 신호를 발생한다.

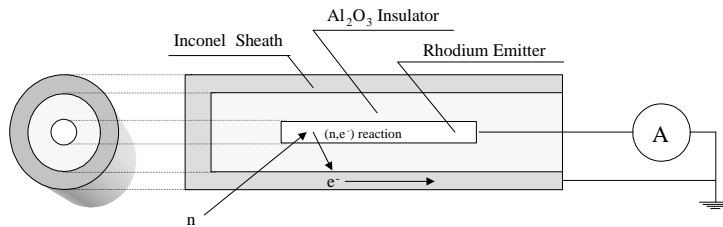


그림 1 로듐 자기출력형 중성자검출기의 동작원리

3 계산 모델링

자기 출력형 중성자 검출기의 신호는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$I = e \times \underbrace{\left(\begin{array}{c} \text{에미터에서} \\ \text{생성된 전자수} \end{array} \right)}_{\textcircled{1}} \times \underbrace{\left(\begin{array}{c} \text{전자의 에미터} \\ \text{탈출확률} \end{array} \right)}_{\textcircled{2}} \times \underbrace{\left(\begin{array}{c} \text{전자의 절연체} \\ \text{통과확률} \end{array} \right)}_{\textcircled{3}}$$

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

$$\textcircled{1} = \int \int \Sigma(E, r) \Phi(E, r) f(E, r) dE dV = \Sigma_a^{1group} \times \Phi_{tot} \times f$$

여기서 f는 Neutron Shielding factor로 중성자가 외부로부터 검출기내로 이동하여 에미터에 도달할 확률을 나타내며 전산코드로 구할 수 있다. 에미터에 도착한 중성자는 로듐과 (n, β) 반응을 한다. 이 반응의 1그룹 거시 흡수 단면적(Σ_a^{1group})은 MCNP4A 전산코드와 JENDF의 Cross Section Library로 구할 수 있다. 그림2에 사용된 JENDF의 흡수 단면적이 나타나있다. 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 절연체를 지나 시스에 도달하여야만 신호를 발생할수 있는데 이 절연체에는 공간전하가 구성되어 작은 에너지의 전자는 지나갈 수가 없다. ③번

항은 절연체를 지나가기 위한 최소의 전자 에너지를 구함으로 결정할 수 있고 이는 다음과 같은 Katz 와 Penfold의 식⁴⁾으로 구하였다. 그림3 에 앞에서 설명한 전체 계산 과정에 대한 개략도를 나타내었다.

$$E_{\min} = \exp(6.63 - [34.662 - 10.482 \times \ln(\bar{r}\rho)] \quad \text{-----} \quad (1)$$

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

where, $r_i - r_e$: Insulator wall thickness, cm
 k : r_i / r_e
 $E(\arg)$: complete elliptic integral of the second kind

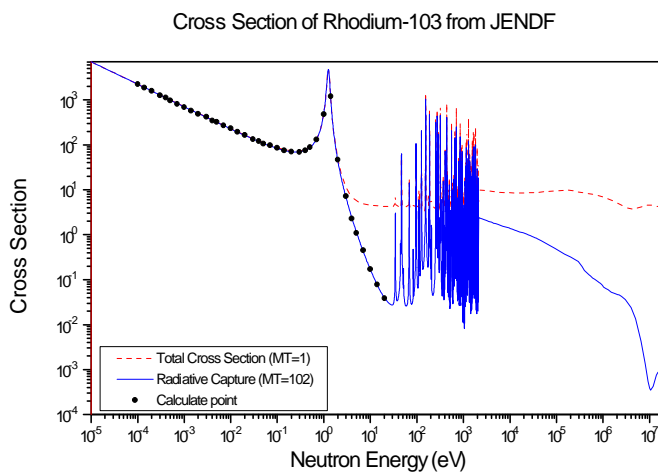


그림 2 로듐의 반응 단면적 (JENDF)

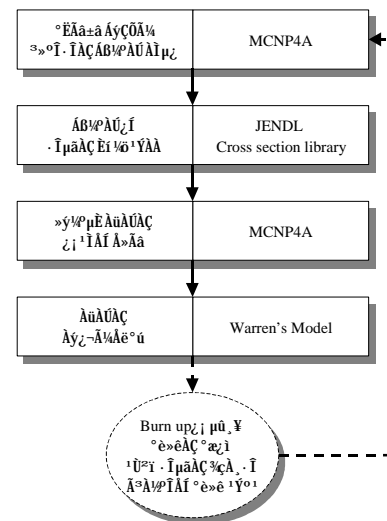


그림 3 계산과정

4. 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 계산방법으로 그 감도와 수명을 계산하였다.

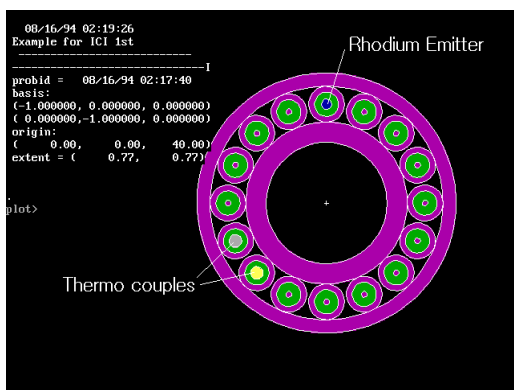


그림 4 ICI 집합체 단면

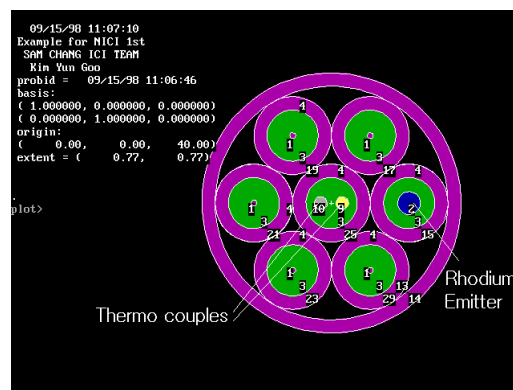


그림 5 제안된 ICI 집합체 단면

그림 4, 그림 5에 각 경우의 단면을 나타내었다. 기존의 검출기는 가운데 이동형 검출기를 위한 공간이 있으나 제안된 형태는 이 공간과 filler cable을 없애고 에미터의 반경을 늘렸다.

5. 계산 결과

5.1 중성자 검출기내에서의 중성자의 거동

그림6은 앞에서 설정한 Model A 모형에서의 2차원적인 중성자 분포도이다. 중심의 로듐 에미터에서 로듐의 큰 중성자 흡수 단면적으로 인해 중성자의 감소가 관찰되었다.

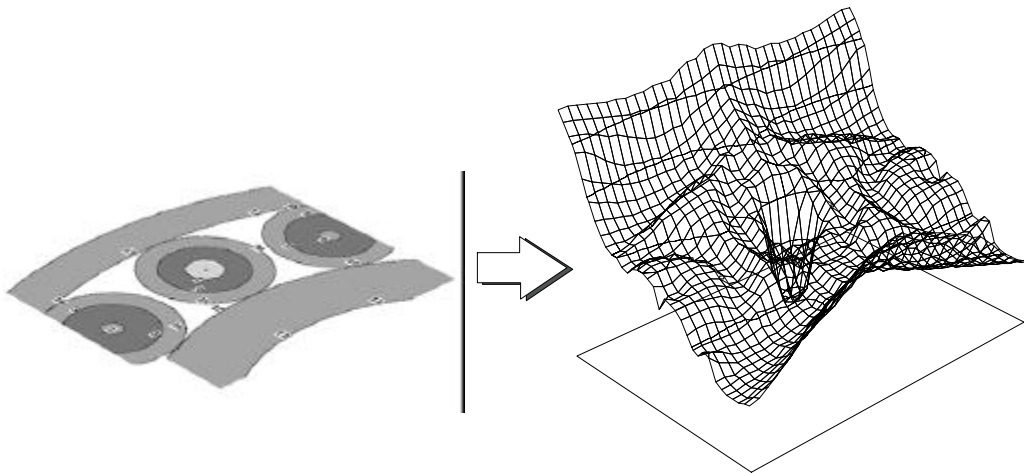


그림 6 ICI 집합체 내의 중성자속 분포

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 그림7과 그림8에 나타나있고 전체적으로 약 73%의 중성자가 외부에서 에미터에 도달한다.

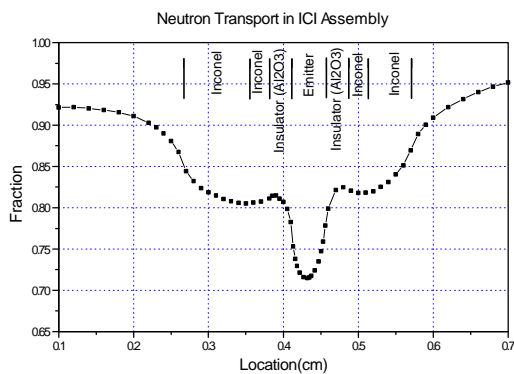


그림 7 ICI 집합체 내의 중성자속 분포

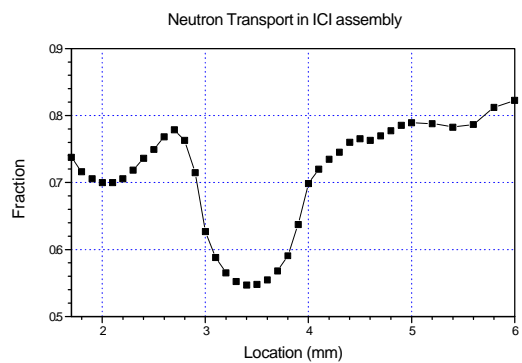


그림 8 제안된 ICI 집합체내의 중성자속 분포

5.2 로듐의 중성자 흡수 반응

앞에서 설명된 바와 같이 로듐은 (n, β) 반응에 의해 신호를 발생한다. JENDF의 Cross-section Data와 MCNP4A 코드로 계산한 로듐 에미터내의 중성자 평균 스펙트럼으로 로듐 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 로듐이 1.25eV 근처에서 공명을 갖고 있기 때문이며 기존의 계산된 값⁵⁾인 15%와 유사하다.

5.3 Beta Escape Probability와 Emin

위의 식 (1)로 각 모형의 경우를 계산한 결과 절연체를 지날 수 있는 최소 에너지 Emin은 기존의 Model A의 경우는 377keV이고 새로이 제안된 Model B의 경우에는 645keV이다. Model B의 경우 값이 더 큰 이유는 Model B의 경우가 절연체의 두께가 더 두꺼워서이고 만약 더 감도를 높이고자한다면 절연체 두께를 줄이면 된다. MCNP4A로 에미터 표면까지 전자의 탈출 확률을 계산하였다. Model B의 경우 로듐 에미터의 반경이 Model A보다 2배정도 이고, 이로 인하여 전자의 탈출확률은 1/3 정도로 줄었다. 표.1에 이에 대한 요약을 나타내었다.

표.1 전자 탈출확률과 Emin

경우	E_{min}	전자탈출 확률	전자탈출확률 (E_{min} 이상)	Insulator 두께
Model A	377 keV	0.39411	0.26536	0.3498 mm
Model B	645 keV	0.135	0.0579	0.6281 mm

5.4 초기 감도

앞에서 설명한 계산 과정으로 중성자 검출기의 초기 감도(Initial Sensitivity)를 계산하였다. Model A의 경우 약 $3.0789 \times 10^{-22} \text{A/nv} \cdot \text{cm}$ 이고 Model B의 경우 $2.789 \times 10^{-22} \text{A/nv} \cdot \text{cm}$ 정도이다. 기존의 계산값들은 열 중성자의 경우에만 계산하였는데 본 연구에서는 전형적인 PWR 중성자속에 대해 계산하였다. 기존의 연구와 비교하기 위하여 열중성자속에서의 감도를 계산하였다. 그 결과 기존에 계산된 값들³⁾보다 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. 이를 표.2에 나타내었다.

표.2 자기 계산된 출력형 중성자 검출기 출력과 초기 감도

		I (current)	S (Initial Sensitivity)
Model A	PWR neutron spectrum	$1.8474 \times 10^{-6} \text{A}$	$3.0789 \times 10^{-22} \text{A/nv} \cdot \text{cm}$
	thermal neutron	$2.239 \times 10^{-6} \text{A}$	$3.731 \times 10^{-22} \text{A/nv} \cdot \text{cm}$
Model B		$1.6734 \times 10^{-6} \text{A}$	$2.789 \times 10^{-22} \text{A/nv} \cdot \text{cm}$

5.5 연소도에 따른 감도

중성자 검출기는 원자로내에서 계속 상주하여 중성자를 검출하는데 이에 따라 로듐은 연소되어 그 양이 점차 감소한다. 로듐의 양이 줄어들에 따라 다음과 같은 일이 발생한다. 첫째 강한 중성자 흡수체인 로듐이 줄어들에 따라 로듐 에미터에서의 Self-shielding 효과가 줄어들어 로듐 에미터에서 중성자속이 증가한다. 이를 그림 9에 나타내었다 그림은 $1.5 \times 10^{14} \text{ #/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 의 중성자속으로 6개월간 연소하였을 경우의 로듐 에미터내의 중성자 분포를 초기의 값과 비교한 것이다. 초기에 중성자는 외부 중성자속의 71%정도이지만 6개월 연소후에는 74%정도로 늘어난다. 둘째, 로듐의 수밀도가 적어져서 로듐과 중성자와의 반응이 줄어들고 이는 전체적인 신호를 줄어든게 한다. 위의 효과는 서로 상반되지만 연소가 계속 진행됨에 따라 두 번째의 효과가 더 지배적이다. 다음에 연소도에 따른 중성자 검출기의 감도를 계산하였고 표.3에 그 결과를 나타내었다.

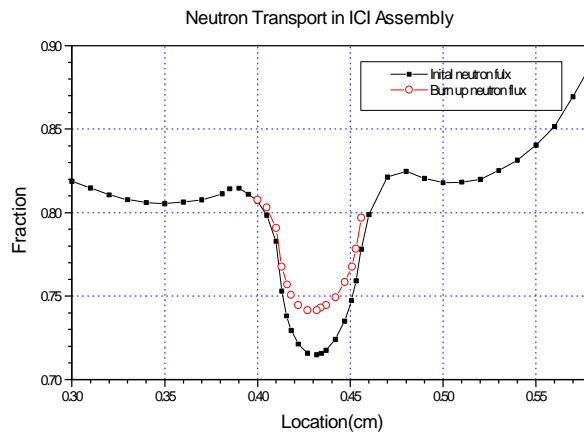


그림 9 연소도에 따른 중성자 속의 분포

표.3 연소도에 따른 중성자 검출기의 출력과 감도

	Rhodium Number Density	I (current)	S (Sensitivity)
초기	$7.26 \times 10^{22} \text{ #/cm}^3$	$1.8474 \times 10^{-6} \text{ A}$	$3.0789 \times 10^{-22} \text{ A/nv} \cdot \text{cm}$
6개월 연소	$6.27 \times 10^{22} \text{ #/cm}^3$	$1.7831 \times 10^{-6} \text{ A}$	$2.9719 \times 10^{-22} \text{ A/nv} \cdot \text{cm}$

6. 결론

몬테칼로 방법을 이용하여 노내 중성자 검출기 집합체의 계산모델을 제시하였다. 기존의 노내 중성자 검출기 집합체에 대하여 전형적인 PWR에서의 감도를 계산한결과 초기 감도는 약 $3.0789 \times 10^{-22} \text{ A/nv} \cdot \text{cm}$ 로 계산되었고 연소됨에 따라 6개월정도 연소후에는 $2.9719 \times 10^{-22} \text{ A/nv} \cdot \text{cm}$ 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.

참고문헌

- 1) J. Briesmeister, Ed., "A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4A", LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory, Nov. 1993
- 2) Tokio FUKAHORI, et al., "CD-ROM Storing JENDL-3.2 Plots and Data", JAERI-Data/Code 97-044
- 3) H. D. Warren, "Calculational Model for Self-Powered Neutron Detector", Nucl. Sci. and Eng. Vol 48, P331-342, 1972
- 4) L.Katz and A. S. Penfold, Rev. Mod. Phys., Vol 24, 28 1952
- 5) R. M. Versluis, "C-E In-core Instrumentation - Functions and Performance", IEEE Trans. on Nucl. Sci. Vol. NS-31, No. 1, Feb. 1984