

Monte Carlo 방법을 이용한 바나듐 자발 중성자계측기 초기 민감도 계산

차균호¹ · 박영우^{2,+}

Calculation of Initial Sensitivity for Vanadium Self-Powered Neutron Detector (SPND) using Monte Carlo Method

Kyoon Ho, CHA¹ and Young Woo, PARK^{2,+}

Abstract

Self-powered neutron detector (SPND) is being widely used to monitor the reactor core of the nuclear power plants. The SPND contains a neutron-sensitive metallic emitter surrounded by a ceramic insulator. Currently, the vanadium (V) SPND has been being developed to be used in OPR1000 nuclear power plants. Some Monte Carlo simulations were accomplished to calculate the initial sensitivity of vanadium emitter material and alumina insulator with a cylindrical geometry. An MCNP code was used to simulate some factors (neutron self-shielding factor and beta escape probability from the emitter) and space charge effect of an insulator necessary to calculate the sensitivity of vanadium detector. The simulation results were compared with some theoretical and experimental values. The method presented here can be used to analyze the optimum design of the vanadium SPND and contribute to the development of TMI (Top-mount In-core Instrumentation) which might be used in the SMART and SMR.

Keywords: SPND, neutron sensitivity, self-shielding effect, beta escape probability, space charge effect, MCNP

1. 서 론

원자력발전소의 안전계통과 중성자속 감시를 위한 자기출력형 중성자 계측기 (Self-Powered Neutron Detector, SPND)는 즉발 및 지연반응의 두 가지 방사성 포획반응 방법을 이용하여 개발되어 사용되고 있다[1]. 즉발반응 SPND는 즉발 감마 방사선과 계측기 물질인 에미터와의 상호작용을 이용하여 출력발생 당시의 중성자속을 측정하며, 지연반응 SPND에서는 방사화된 핵종의 베타붕괴 과정에서 나오는 전자들이 계측대상이 된다. 일반적으로 SPND에서는 두 메커니즘이 함께 발생되므로 두 성분 중의 하나가 특히 우세하도록 계측기 재질을 선정한다. 대표적인 지연 SPND의 예로는 로듐이나 바나듐 계측기가 있으며 백

금, 하프늄, 코발트 등은 즉발 SPND로 사용된다.

SPND의 민감도를 예측하기 위한 이론적인 모델이 0.025 eV (2,200 m/sec) 에너지의 중성자와 반응하는 지연반응 계측기의 경우 Warren에 의해 개발되었다[2]. 이 모델은 Warren과 Shah 및 Jaschik과 Seifritz에 의해 즉발반응 계측기에도 적용할 수 있도록 개선되었다[3,4]. Warren과 Shah는 넓은 영역 에너지의 중성자 스펙트럼(0~14.9 MeV)을 민감도 계산에 고려한 반면에 Jaschik과 Seifritz는 외부 감마선속으로 인한 전류발생을 모델링하였다. 이들에 의해 개발된 모델이 특히 중요한 것은 계측기로부터 나오는 총 출력전류에 기여할 수 있는 여러 가지 효과들을 고려하여 다양하게 모델을 확장시킬 수 있는 토대가 제시되었다는 사실이다. 다시 말해 이들의 모델을 이용하면 계측기의 재질이나 사양 등 여러 가지 인자들을 변화시키면서 계측기 출력 특성을 평가할 수 있다.

본 논문은 자기출력형 바나듐 중성자계측기의 초기민감도를 Monte Carlo 방법을 이용하여 평가한 것이다. 민감도 계산을 위한 자기차폐인자(self-shielding factor)와 베타전자 이탈확률(beta escape probability) 계산 및 절연체 내에서의 공간하전효과 모사는 Monte Carlo 방법 기반의 MCNP 코드를 이용하여 수행하였으며, 계산된 결과와 Warren의 자료를 비교해 봄으로써 초기민감도 평가과정을 검증하였다.

일반적으로 SPND의 수명은 중성자의 반응으로 인한 에미터의 연소에 따라 결정되며, SPND의 수명예측은 원자력발전소의

¹ 한수원 중앙연구원 (KHNP Central Research Institute)
70, 1312-gil, Yuseong-daero, Yuseong-gu, Daejeon, 34101, Korea

² 충남대학교 메카트로닉스공학과 (Department of Mechatronics Engineering, IMAL, Chung Nam National University)
99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34134, Korea

⁺Corresponding author: ywpark@cnu.ac.kr

(Received : May. 26, 2016, Accepted: May. 31, 2016)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

경제적 운영에 중요한 역할을 한다. 또한, SPND의 수명 예측을 위해서는 SPND 민감도 연소모델이 필요하며, 연소모델은 초기 민감도 모델의 검증에 따라 정확한 모델링과 수명예측이 가능하다. 따라서 SPND의 초기 민감도 계산을 위한 모델 정립은 향후 개발되는 SPND 연소모델의 기반이 된다고 할 수 있다.

2. SPND 민감도 계산모델

중성자 민감도(Sensitivity, S)는 모든 에너지 영역에 걸친 총 중성자속(Φ)에 대한 에미터(emitter) 단위 길이당 총 검출기 출력 전류(I)의 비로 정의된다. 이때 중성자 포획 후에 베타붕괴를 통해 음전자를 방출하는 에미터만을 고려하였으며 다음과 같이 표현된다.

$$S = I/\Phi \tag{1}$$

중성자 선속에 노출된 후 신호를 생성하기까지의 지연시간은 (n, β) 반응에 의해 결정된다. 입사 중성자 선속이 변화되었을 경우 계측기의 출력 전류가 안정화되기까지 4~5번 반감기의 시간이 필요하다. 여기서는 출력 전류가 입사 중성자 선속과 평형상태에 있다고 가정하여 출력 전류를 계산하였다. 또한 계측기 수명 초기, 즉 전혀 연소가 일어나지 않은 상태를 가정하였다.

단위 길이당 SPND의 전류 신호는 에미터의 부피와 중성자 포획속도 및 베타전자 이탈확률에 비례하며, 계측기의 길이에 반비례한다. 전류 민감도에 대한 기본적인 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_\beta = e \frac{V}{L} \epsilon C_p \tag{2}$$

여기서,

I_β : 단위 에미터 길이당 단위 계측기 전류

e : 전자 전하량 (1.602×10^{-19} Ampere-sec/electron)

V : 에미터의 부피 (cm^3)

L : 에미터의 길이 (cm)

ϵ : 베타전자 이탈확률

C_p : 중성자 포획속도 ($\text{electron}/\text{cm}^3$)

단위 부피당 중성자 포획속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_p = \int_0^{E_{max}} \Sigma(E_n) \Phi(E_n) f(E_n) F(E_n) dE_n \tag{3}$$

여기서,

$\Sigma(E_n)$: 에너지 E_n 인 중성자에 대한 에미터 원자의 거시적 중성자 포획 단면적 (cm^{-1})

$\Phi(E_n)$: 에너지 E_n 에서의 미분 중성자속 ($\text{n}/\text{cm}^2 \text{ sec}$)

$f(E_n)$: 에너지 E_n 인 중성자에 대한 에미터의 자기차폐인자로

서 원통형 에미터의 경우 ≤ 1

$F(E_n)$: 에너지가 E_n 인 중성자에 대한 에미터의 중성자속 depression factor (≤ 1)

E_{max} : 최대 중성자 에너지 (20 MeV)

2.1 자기차폐인자

SPND 에미터는 중성자 흡수체이기 때문에 에미터 내부의 중성자 선속이 위치에 따라 다르며, 이로 인해 에미터 내부에서 발생하는 베타전자의 수가 위치에 따라 다르게 된다. 이와 같이 에미터의 직경에 의존하여 중성자속이 변화되는 효과를 자기차폐효과 (self-shielding effect)라 부른다[5].

2.2 중성자속 depression

SPND를 원자로의 노심 속에 삽입하게 되면, 에미터 외부에서의 중성자 흡수로 인한 계측기 내부의 중성자속 감소 및 에미터 내부에서의 중성자 흡수로 인한 계측기 인접부분의 중성자속 감소현상으로 인하여 계측기 위치에서 중성자속의 교란현상(perturbation)이 발생된다. 즉, SPND를 통과하는 동안에 흡수된 중성자들이 계측기 외부로 확산되어 나오지 못하게 되어 중성자속을 증가시킬 수 없기 때문에 중성자속 하강(depression) 현상이 일어난다.

2.3 베타전자 이탈확률

에미터로부터 베타전자가 이탈하여 집전자까지 도달하게 될 확률(ϵ)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \int_{E_\beta} B(E_\beta) \epsilon(E_\beta, r) dE_\beta \tag{4}$$

여기서, $B(E_\beta)$: 베타전자 에너지 스펙트럼

$\epsilon(E_\beta, r)$: 베타전자가 r 위치에서 이탈할 확률

2.4 공간하전효과

에미터에서 방출된 저에너지 전자들은 SPND가 평형상태에서 작동할 경우 절연체 내부의 공간하전 전기장에 의해 에미터 방향으로 반탄되기 때문에 계측기의 출력 전류에 기여하지 못하게 된다. 이들 전자들은 절연체를 통과하는 동안 초기에는 절연체 내부의 결정 결함이나 불순물 위치에 포획된다.

이와 같이 절연체 내부의 트랩이 채워지는 동안의 초기 과도기가 지나게 되면 공간하전 전기장의 영향에 의해 에미터로부터 절연체로 들어오는 전자들의 수만큼 전자들이 절연체를 빠져나가는 평형상태에 도달하게 된다. 따라서 전자들의 공간하전하가 절연체 내부에 균일하게 분포하고 있다고 가정하면 절연체 내의 퍼텐셜 분포는 다음과 같이 포와송 방정식의 해가 된다.

$$V(r) = A \left[-\left(\frac{r}{r_i}\right)^2 + \frac{\ln\left(\frac{r}{r_e}\right) + k^2 \ln\left(\frac{r_i}{r}\right)}{\ln\left(\frac{1}{k}\right)} \right] \quad (5)$$

여기서,
 A : 절연체의 종류의 방사선의 강도에 관련된 비례상수
 r : 에미터의 중심으로부터 절연체 내부의 어떤 지점까지의 반경 거리
 r_e : 에미터의 반경
 r_i : 절연체의 외부 반경
 k = r_e/r_i

식(5)는 SPND의 정상적인 운전조건에서 V(r_e) = V(r_i) = 0 이라는 경계조건을 적용하여 구하였다. 한편 절연체 내부의 전기장 분포는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E(r) = \frac{2A}{r_i} \left\{ \frac{r}{r_i} - \left[\frac{1-k^2}{2\ln(1/k)} \right] \frac{r_i}{r} \right\} \quad (6)$$

3. Monte Carlo Simulation

3.1 바나듐 SPND 초기 중성자 민감도 계산 모델

바나듐(Vanadium, V) SPND의 중성자 민감도는 중성자 방사화 생성물인 V-51로부터 방출되는 베타 입자들과 중성자를 흡수한 직후 형성되는 V-52로부터 방출되는 베타전자로 인한 영향을 모두 포함하여야 한다. 바나듐의 핵반응에 의해 발생하는 신호의 99%는 3.76 분의 반감기를 가지는 지연반응으로 나타나며, 1%의 신호만이 즉발반응에 의한 신호를 발생한다. 따라서, 바나듐의 주요 신호분석을 위하여 본 논문에서는 V-51로부터의 지연반응 과정에서 발생하는 전류만을 고려하였으며, V-52로부터의 베타전자 및 감마선의 즉발반응에 의한 전류 영향은 포함시키지 않았다.

또한 바나듐 SPND의 재료 및 기계적 구성(직경, 길이 등)을 결정하기 위해, 계측기의 민감도 함수를 이용하여 신호 대 잡음비(S/N; Signal to noise ratio)를 만족하는 바나듐 계측기의 최소 필요 전류수준(>200 nA(=S/N>2))을 평가하였으며[6], 이에 따른 계측기의 길이 및 직경을 Table 1과 같이 결정하였다.

Table 1. Specifications of vanadium SPND

Part of SPND	Material	Density (g/cm ³)	Length (cm)	Radius (cm)
Emitter	V-51	6.1	40	0.0565
Insulator	Al ₂ O ₃	1.9	40	0.1015
Sheath	Inconel-600	8.44	40	0.1295

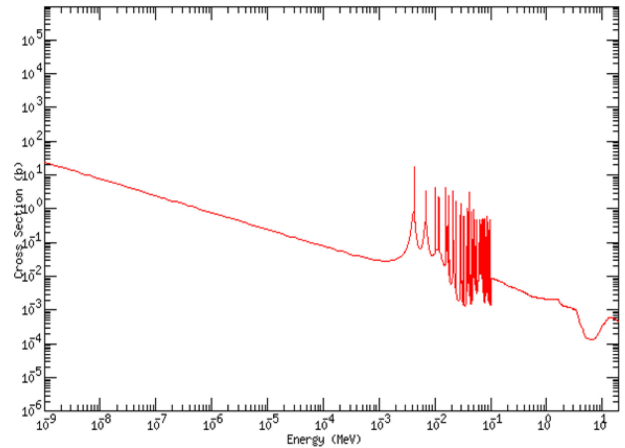


Fig. 1. Neutron cross section of vanadium-51.

민감도 계산을 위해서는 식(1) 및 (2)를 수치해석으로 계산해야 한다. 즉, 민감도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S = 2\pi e \sigma \sum_{i=1}^M r_i \Delta r_i N_V(r_i) f_n(r_i) \int_{E_\beta} B(E_\beta) \epsilon(E_\beta, r) dE_\beta \quad (7)$$

여기서, f_n(r_i) : 자기차폐인자

∫_{E_β} B(E_β) ε(E_β, r) dE_β : 베타전자 이탈확률

따라서 에미터 반경방향에 대한 자기차폐인자 및 베타전자 이탈확률을 구하면 식(7)을 이용하여 민감도를 계산할 수 있다.

3.2 V-51의 중성자 포획단면적

자연상태의 바나듐은 V-50이 0.25 %, V-51이 99.75 %의 비율로 존재한다. V-50은 중성자를 포획한 다음 V-51이 되며 V-50의 비율이 매우 낮기 때문에 일반적으로 V-50의 핵반응은 무시한다.

Fig. 1은 V-51의 중성자 포획단면적을 나타낸 그림이다. V-51은 열에너지 영역(~1 eV)과 열외에너지 영역(1 eV ~ 10 keV)에서 공명현상이 거의 없으므로 SPND의 신호분석측면에서 유리한 면이 있다. 또한, 바나듐의 열중성자에 대한 반응 단면적은 4.9barns으로서 로듐 SPND에 비해 상대적으로 작은 반응단면적으로 인하여 계측기 수명이 길다는 장점이 있다.

3.3 자기차폐인자 계산

Weinberg 및 Wigner에 따르면 열중성자에 대한 바나듐의 자기차폐인자는 다음의 식으로 주어진다[7].

$$f(2,200m/sec) = 1 - \frac{4}{3} \sum (2,200m/sec) r_e \quad (8)$$

여기서, r_e : 원통형 에미터의 반경 (cm)

∑(2,200m/sec) : 열중성자에 대한 거시적 중성자 포획단면적 (cm⁻¹)

또한, 식(3)에서 $\Phi(E_n)$, $f(E_n)$ 및 $F(E_n)$ 는 MCNP 계산으로 구할 수 있다. 실제 계산에서는 $f(E_n)$ 와 $F(E_n)$ 를 서로 분리하지 않고 자기차폐인자라는 하나의 항으로 평가하였으며, 결과비교를 위하여 열중성자 영역(2,200 m/sec)에서만 수행되었다.

3.4 베타전자 이탈확률(ϵ) 계산

베타전자 이탈확률 계산을 위해서는 우선 바나듐 에미터 내부에서 발생하는 베타 에너지 스펙트럼을 알고 있어야 하며, 베타 에너지 스펙트럼을 구한 후에는 MCNP 코드를 이용하여 베타전자 이탈확률(비적길이)을 계산한다. 한편 절연체 내부에 존재하는 공간 하전 전기장으로 인해 전자들이 에미터로부터 방출되어 절연체 속으로 들어왔다고 하더라도 에너지가 너무 낮을 경우에는 집전자까지 도달하지 못하고 다시 에미터 쪽으로 반탄되기 때문에 비적길이를 계산하기에 앞서 퍼텐셜 $V(r)$ 이 최대가 되고 전기장 $E(r)$ 이 0이 되는 반경 방향의 위치를 결정하여야 한다. 베타 에너지 스펙트럼과 전기장이 제로가 되는 반경 방향의 위치 및 베타전자 이탈확률은 다음과 같이 구할 수 있다. 베타붕괴시 선원으로부터 방출되는 베타전자들의 정규화된 에너지 스펙트럼은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B(E') = \frac{105}{16} \frac{1}{(E_{\beta_{max}} - E')^{7/2}} (E_{\beta} - E')^2 \sqrt{E'} \quad (9)$$

여기서 $E_{\beta_{max}}$ 는 바나듐 에미터의 경우 2.47 MeV가 된다. 식(9)의 베타 에너지 스펙트럼 계산식이 MCNP 전자 수송계산의 입력 파일에서 선원 확률인자로 사용되었다. MCNP 계산에서는 선원 확률인자로 어떤 데이터가 입력되든지 상관없이 항상 자동적으로 1로 정규화 시킨다. 따라서 MCNP 코드에서의 선원인자 입력결과는 다른 코드에서 사용되는 입력과 달라질 수도 있다.

3.5 공간하전 영향 평가 모델

MCNP 전자 수송계산에서는 절연체 내부에 존재하는 공간하전 전기장(space-charge electric field) 때문에 기하학적 모델링을 할 때 바나듐 SPND의 실제적인 전류 수집을 고려할 필요가 있다. 식(5) 및 (6)을 통해서 퍼텐셜은 절연체내 어떤 위치에서 최대값을 나타내며, 이 때 전기장은 0이 되고 이 지점을 경계로 반경 방향 양쪽의 전기장 방향이 바뀌게 된다.

식(6)으로부터 $E(r)$ 이 0이 되는 반경을 임계거리(Critical Distance)라 하며, 다음과 같이 구할 수 있다. 또한 도식적으로 표현하면 Fig. 2와 같다.

$$r_0 = r_i \left[\frac{1-k^2}{2\ln(1/k)} \right]^{1/2} \quad (10)$$

여기서 r_0 는 에미터의 중심축으로부터 측정된 반경 거리이며, k 는 절연체의 외부 반경(r_e)에 대한 에미터 반경(r_i)의 비인

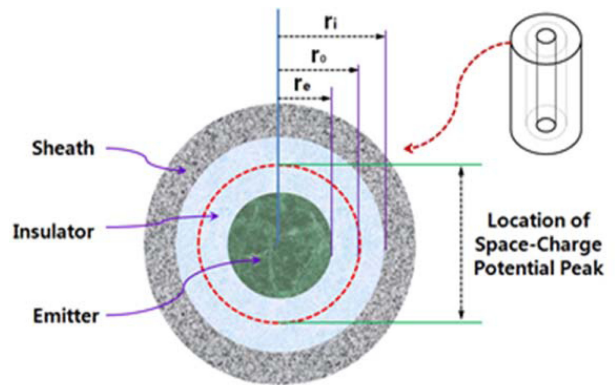


Fig. 2. Schematic diagram of critical distance.

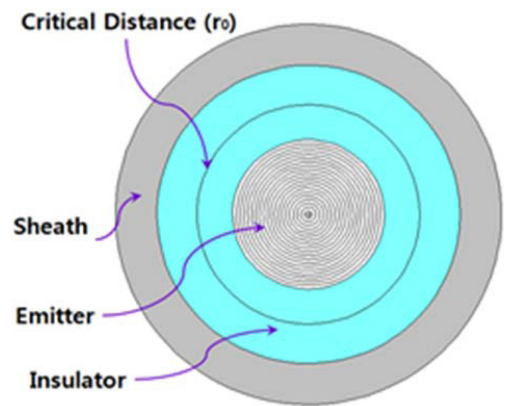


Fig. 3. MCNP modeling of vanadium SPND.

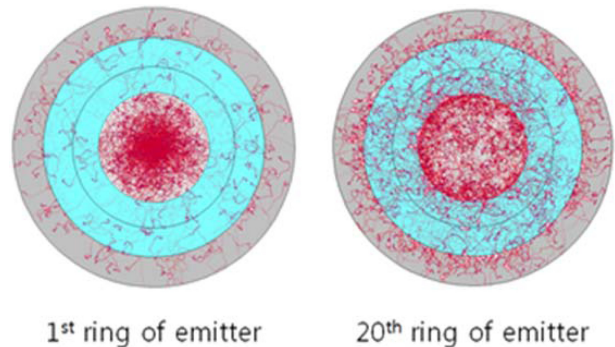


Fig. 4. Space charge effect of beta electrons.

$k = r_e/r_i$ 이다. 에미터로부터 방출된 전자들이 r_0 에 도달하기 전에 운동 에너지를 모두 잃게 되면 전기장에 의해 에미터 방향으로 반탄되며, 반탄된 지점의 전기장 부호가 바뀌게 된다. 에미터에서 방출된 전자들이 r_0 이상의 거리까지 도달하게 되면 반대로 전기장에 의해 수집 전극인 sheath 방향으로 반탄된다. 에미터로부터 방출된 전자는 반구 방향의 어느 각도로나 방출될 수 있기 때문에 에미터 표면의 어떤 지점으로부터 r_0 까지의 거리는 모든 가능한 이동 각도를 고려하여 평균값으로 구하여야 한다. 에미터에서의 자기차폐인자 및 절연체에서의 공간하전 영향

을 평가하기 위하여 Fig. 3과 같이 에미터 및 절연체를 반경방향으로 각각 20 및 2개의 ring으로 모델링 하였다.

평형상태에서는 에미터로부터 방출된 전자들 가운데 r_0 에 도달하기 전에 가지고 있던 운동 에너지를 모두 상실하게 된 전자들이 전기장에 의해 에미터 방향으로 반탄된다. 그러나 Fig. 4에서 보듯이 에미터에서 방출된 전자들이 r_0 을 넘어서게 되면 역방향의 전기장에 의해 집전자인 sheath 방향으로 전자가 밀려 가게 된다. 본 논문에서 고려한 바나듐 SPND의 경우 전기장이 0이 되는 반경방향 위치인 r_0 는 0.0779 cm이며, 이때의 $k = r_e/r_i$ 값은 0.55665이다.

3.6 MCNP Simulation 결과

MCNP 코드를 이용하여 바나듐 에미터 내부의 중성자속 분포를 계산하였다. 즉, 식(3)에서 $\Phi(E_n)F(E_n)$ 항에 해당되는 값을 구하기 위하여 MCNP 코드를 이용하였다. 중성자속을 계산하기 위하여 원통형 중성자 부피 선원의 중심축에 위치한 속이 빈 원통 내부의 중심부에 바나듐 SPND가 위치하고 있다고 가정하였다. 중성자장의 균일성을 보증하기 위하여 원통의 높이는 계측기의 실제 높이보다 훨씬 긴 80 cm로 가정하였다. 계측기는 축 방향을 따라 세 영역으로 나누어 모델링 하였다. 제1영역과 제3영역은 상부와 하부로부터 각각 20 cm로서 이 영역에서의 중성자속은 계측기 신호에 영향을 주지 않으므로 이 부분에서의 민감도 평가는 수행되지 않았다. 실제로 바나듐 에미터가 위치한 영역을 모델링한 제2영역은 상부 20 cm로부터 하부 20 cm까지의 40 cm 길이로서 절연체와 에미터 영역을 반경 방향을 따라 각각 20개의 cell로 나누어 중성자 수송계산을 수행하였다.

바나듐 SPND 내부의 중성자속 분포 tally는 MCNP 코드에서 어떤 한 셀 내부의 중성자속 평균을 주게 되는 “F4:n” tally 옵션으로 수행하였다. 만족할 만한 계산 정확도를 얻기 위하여 기하학적 모델링 과정에서 중성자 선원의 균일성을 가정하였으며 오차 감소기법중의 하나인 Russian roulette 기법을 이용하여 기하학적 구조를 쪼갬으로써 오차를 감소시켰고, 총 120,000,000 회의 history를 수행하여 중성자속을 구하였다. 그 결과 일부 속 중성자 구간을 제외하고는 대부분의 에너지 구간에서 중성자속 계산결과와 상대 오차가 0.1 이하로 나타났으며, Table 2에서 보듯이 자기차폐인자 계산결과를 식(8) 및 Warren Model과 비교를 통해 볼 때 계산모델의 타당성을 확인 하였다.

또한, MCNP 코드를 이용하여 바나듐 SPND의 베타전자 이탈확률을 계산하였다. 이를 위하여 국내원전 OPR1000에서 사용되는 로듐 SPND와 유사하게 바나듐 SPND의 기하학적 형태를 MCNP 입력 양식에 따라 에미터와 절연체 및 sheath의 반경은 각각 Table 1과 같이 모델링 하였으며, 계측기의 높이는 40 cm로 하였다. 에미터와 절연체 부위는 반경 방향을 따라 각각 20개 segment로 나누었다. 바나듐 SPND의 베타전자 이탈확률 tally로는 MCNP 코드에서 어떤 표면적에 대한 평균 중성자속

Table 2. Calculation result of self-shielding factor

This work	Weinberg & Wigner	Warren
0.97439	0.9724	0.9733

Table 3. Calculation result of beta escape probability

This work	Warren
0.52778	0.56828

을 출력하는 “F2:e” tally 옵션을 사용하였다.

MCNP 전자 수송계산은 총 1,000,000회 수행하였는데, 이 정도만으로도 각각의 에너지 구간에서 상대 표준편차를 충분히 0.1 이하로 낮출 수 있었으며, Table 3에서 보듯이 베타전자 이탈확률 계산결과를 Warren Model과 비교를 통해 볼 때 계산모델의 타당성을 확인 하였다.

4. 결 론

본 논문은 MCNP 코드를 이용하여 바나듐 자기 출력형 중성자계측기(SPND)의 초기 열중성자 민감도 평가를 위한 자기차폐인자 및 베타전자 이탈확률 계산모델을 개발하였다. 현재로서는 공명 중성자에 대한 자기차폐인자 계산결과가 거의 발표되어 있지 않고 전체 중성자 스펙트럼에 대한 MCNP 계산결과도 전혀 발표되어 있지 않다. 또 다른 문헌에 발표된 계측기의 사양도 OPR1000 원전에 사용중인 로듐 SPND의 사양과는 차이가 난다.

그러나 열중성자 자기차폐인자와 베타전자 이탈확률 및 열중성자(2,200 m/sec)에 대한 바나듐 에미터의 초기 민감도 평가결과가 에미터의 크기에 따라 문헌 2에 발표되어 있다. 연구 결과들의 상호 비교를 위하여 문헌 2에 나와 있는 자료들을 토대로 바나듐 SPND의 초기 민감도를 구하였다.

자기 출력형 중성자 계측기의 중성자 민감도는 단일 에너지의 열중성자 기여분 뿐만 아니라 다른 에너지 영역에 속한 열중성자와 열중성자보다 오히려 반응 단면적이 큰 공명 중성자로부터의 기여분을 포함하게 된다. 실제로 현재 국내 원전에서 사용되고 있는 로듐 SPND를 교정할 때에는 실험적으로 구한 열중성자 민감도에 카드뮴 분율을 곱하여 공명 중성자의 기여분을 결정한다. 또한 교정과정에서 실험적으로 구한 열중성자 민감도는 0 eV에서 0.414 eV까지의 에너지 영역에 걸친 중성자 민감도의 적분값이 된다. 따라서 실험적으로 구한 값과 2,200 m/sec의 열중성자에 대해 이론적으로 구한 민감도를 직접적으로 비교하는 것은 합리적이지 못하므로 향후 상용원전 노심의 중성자 스펙트럼을 고려하여 전 에너지 영역에 대한 중성자 민감도 평가가 필요할 것이다.

개발된 모델 및 해석방법은 바나듐 SPND의 최적설계에 사용될 수 있으며, 특히 SMART 및 SMR 원자로에 적용이 예상되

는 상부탑재 노내계측기(Top-mount In-core Instrumentation)에 대한 최적의 기하학적 구조를 가지는 SPND 개발에 기여할 것이다.

REFERENCES

- [1] John W. Hilborn, "Self-Powered Neutron Detectors for Reactor Flux Monitoring", *Nucleonics*, Vol. 22, No. 2 - February, 1964.
- [2] H. D. Warren, "Calculational model for self-powered neutron detector," *Nucl. Sci. Eng.*, Vol. 48, p. 331, 1972.
- [3] W. Jaschik and W. Seifritz, "Model for calculating prompt-response self-powered neutron detectors," *Nucl. Sci. Eng.*, Vol. 53, p. 61, 1974.
- [4] H. D. Warren and N. H. Shah, "Neutron and gamma-ray effects on self-powered in-core radiation detectors," *Nucl. Sci. Eng.*, Vol. 54, p. 395, 1974.
- [5] L. L. Carter, "Self-Shielding factors for FFTF flux measurements," *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Vol. 43, p. 710, 1982.
- [6] International Standards, "Nuclear power plants - In-core instrumentation - Characteristics and test methods of self-powered neutron detectors," *CEI/IEC 61468*, 1st edition, 2000-03.
- [7] A. M. Weinberg and E. P. Wigner, "The Physical Theory of Neutron Chain Reactors", p707, *The University of Chicago Press, Chicago*, 1958.