

'99 춘계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

**MCNP를 이용한 자기 출력형 로듐  
중성자 검출기 내부의 중성자속 분포 계산**

**Calculation of Neutron Flux Distribution Inside  
a Self-Powered Rhodium Neutron Detector Using a MCNP 4A Code**

신상운, 손중권

한국전력공사 원자력환경기술원  
대전광역시 유성구 덕진동 150

金花, 박문규

한국전력공사 전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

**요 약**

MCNP 4A 코드를 이용하여 영광 3&4호기에서 사용되는 로듐 자기 출력형 중성자 검출기 내부의 중성자속 분포를 계산하였다. 영광 3호기 원자로 barrel의 외부표면에서 구한 스펙트럼을 표준 중성자 스펙트럼으로 이용하였으며, 중성자속 분포 계산결과로부터 열중성자와 공명 중성자의 자체 차폐인자를 평가하였다. 여기에서 평가한 결과를 문헌에 발표된 자료와 비교한 결과 열중성자 차폐인자의 경우에는 문헌에 발표된 결과와 잘 일치하였지만 공명 중성자 차폐인자의 경우에는 상당한 차이를 나타내었다. 이 분야에 대해서는 추가적인 연구가 뒤따라야 할 것으로 판단된다.

**Abstract**

Neutron flux distribution inside a rhodium self-powered neutron detector(SPND) used at Younggwang NPP 3&4 was calculated using a MCNP 4A code. Neutron spectrum calculated at the outer surface of reactor barrel of Younggwang NPP #3 was used as a standard neutron spectrum. From the calculated neutron spectrum, self-shielding factors for thermal neutrons and resonance neutrons were evaluated, then compared with the published results. Thermal self-shielding factor showed a good agreement with the published results, while resonance self-shielding factor showed a considerable discrepancy. Further study will be followed for the interaction of resonance neutrons inside the SPND.

## 1. 서론

자기 출력형 로듐 중성자 검출기는 emitter와 절연체, collector 등 세 부분으로 이루어져 있으며, 동축 실린더형의 배열을 하고 있다. Emitter는 중성자를 민감하게 흡수하는 로듐으로서 직경이 0.046 cm이고 길이가 40 cm인 원통형 철사 조각이다. 절연체는 산화 알루미늄( $Al_2O_3$ )을 이론 밀도의 70%까지 충진시켜 만든 것으로서 고강도의 방사선장에 연속적으로 노출시켰을 경우에도 높은 전기 저항을 유지할 수 있다. 전자를 수집하는 집전체인 collector는 직경이 0.16 cm인 Inconel 600으로 된 신호선 외피이다. 표 1은 영광 3&4호기에 사용되는 로듐을 베이스로 한 SPND의 사양 및 재질을 요약하여 보여준다.<sup>3)</sup>

자기 출력형 중성자 검출기(SPND)는 고강도의 방사선 검출장비이다. 검출기에 입사하는 중성자들은 collector와 절연체를 쉽게 통과한 후 emitter에서 우선적으로 흡수되며, 중성자를 흡수한 emitter 원자는 방사성 물질로 바뀌어 고에너지의 전자를 방출하게 된다. 이 전자들 중 대부분이 emitter를 빠져나와 절연체를 뚫고 마침내는 검출기 외피층을 형성하고 있는 collector에 도달하기에 충분할 정도의 에너지를 지니고 있다.

Emitter로부터 전자들이 빠져나가 emitter 내부에 전자들이 부족하게 되면 동축 케이블의 중심축이 되는 전도체(conductor)에 양의 전하가 걸리게 된다. 이와 같은 양전하 생성속도를 전류 측정장비를 이용하여 연속적으로 측정하게 되면 측정된 전류 신호는 emitter에서의 중성자 흡수속도에 비례하게 될 것이다. 이때 검출기 외피층인 shield와 shield를 둘러싸고 있는 주변 매질이 항상 기저 포텐셜 상태에 있기 때문에 외부의 shield로부터 전자들이 이탈한다고 하더라도 측정된 전류에는 전혀 영향을 미치지 않는다.

본 기고 논문에서는 이러한 로듐 SPND 내부의 중성자속 분포를 계산하고, SPND의 감도를 결정하는 중요한 인자가 되는 자체 차폐인자를 MCNP 4A 코드를 이용하여 평가함으로써 로듐 SPND 설계작업에 활용할 수 있도록 하였다.

표 1. 로듐을 베이스로 한 SPND의 사양 및 재질

부 위	재 질	밀 도 ( $g/cm^3$ )	길 이 (cm)	반 경 (cm)
Emitter	$^{103}Rh$	12,216	40	0,023
절연체	$Al_2O_3$	1,9	40	0,0536
Collector	Inconel-600	8,44	40	0,076

## 2. 로듐 SPND의 전류-감도 방정식

로듐 검출기의 전류 신호는 emitter의 부피와 중성자 포획속도, 베타 이탈확률에 비례한다. 기본적인 전류-감도 방정식은 다음과 같다.<sup>4)</sup>

$$I = e V \epsilon C_p \quad \text{----- (1)}$$

여기서  $I$  : 로듐 검출기의 emitter로부터 나오는 전류 (A)

$e$  : 전자 하전량 ( $1.602 \times 10^{-19}$  A-sec/electron)

$V$  : emitter의 부피( $\text{cm}^3$ )

$\varepsilon$  : 전자 이탈확률

$C_p$  : 중성자 포획속도( $\text{cm}^{-3}$ )

단위 부피당 중성자 포획속도  $C_p$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_p = \int_{0.0}^{E_{max}} \Sigma(E_n) \phi(E_n) f(E_n) F(E_n) dE_n \quad \text{----- (2)}$$

여기서  $\Sigma(E_n)$  : 에너지가  $E_n$ 인 중성자에 대한 emitter 재질의 거시적 중성자 포획 단면적 ( $\text{cm}^{-1}$ )

$\phi(E_n)$  : 에너지가  $E_n$ 인 중성자의 미분 중성자속 ( $\text{n/cm}^2\text{-s}$ )

$f(E_n)$  : 원통형 emitter에서 에너지가  $E_n$ 인 중성자의 자체 차폐인자 ( $\leq 1$ )

$F(E_n)$  : 에너지가  $E_n$ 인 중성자에 대한 emitter의 중성자속 depression factor ( $\leq 1$ )

$E_{max}$  : 최대 중성자 에너지 (20 MeV)

Emitter로부터 베타 입자가 이탈하여 collector까지 도달하게 될 확률,  $\varepsilon$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon = \int_{E_{min}}^{E_\beta} \left( -\frac{dE}{dx} \right)_E^{-1} dE \int_{E_{min}}^{E_\beta} N[R(E') - R(E)] B(E') dE' \quad \text{----- (3)}$$

여기서  $\left( -\frac{dE}{dx} \right)_E^{-1}$  : 절연체 매질 내에서 에너지가  $E$ 인 전자의 비에너지 상실(specific energy loss)의 역수 ( $\text{cm/MeV}$ )

$N[R(E') - R(E)]$  : 전자의 비적길이 확률함수

$B(E')$  : 중성자를 흡수한 후  $^{104}\text{Rh}$ 의  $\beta$  붕괴에 의해 에너지가  $E'$ 인 전자가 생성될 확률

$E'$  :  $\beta$  붕괴과정에서 생성되는 전자의 에너지 (keV)

$E$  : emitter의 표면에 전자가 도달하였을 때 전자의 잔류 에너지 (keV)

$E_\beta$  :  $\beta$  붕괴과정에서 생성되는 전자의 최대 에너지 (keV)

$E_{min}$  : 수집 전극(collector)에 도달하기 위해서 절연체 영역의 공간 하전 전기장을 극복하는데 필요한 전자의 최소 에너지 (keV)

$E_n$  : 입사 중성자의 에너지 (eV)

### 3. MCNP 모델링

여기서는 MCNP 4A 코드를 이용하여 로듐 emitter 내부의 중성자속 분포를 계산하는데 그 목적이 있다. 다시 말해 (2)식에서  $\phi(E_n)F(E_n)$ 항에 해당되는 값을 구하기 위하여 MCNP 4A 코드를 이용하였다. 중성자속을 계산하기 위하여 원통형 중성자 부피 선원의 중심축에 위치한 속이 빈 원통 내부의 중심부에 자기 출력형 로듐 중성자 검출기가 위치하고 있다고 가정하였다. 중성자장의 균일성을 보증하기 위하여 원통의 높이는 검출기의 실제 높이보다 훨씬 긴 80 cm로 가정하였다. 검출기는 축 방향을 따라 세 영역으로 나누었는데, 제1영역과 제2영역은 상부와 하부로부터 각각 20 cm로서 이 영역에서의 중성자속을 평가하지는 않았다. 실제로 로듐 emitter가 위치한 영역을 모델링한 제2영역은 상부 20 cm로부터 하부 20 cm까지의 40 cm 길이로서 절연체와

emitter 영역을 반경 방향을 따라 각각 10개의 cell로 나누어 중성자 수송계산을 수행하였다. 그림 1은 몬테칼로 중성자 수송계산에 사용된 중성자 선원과 자기 출력형 중성자 검출기의 모의 모델을 보여준다.

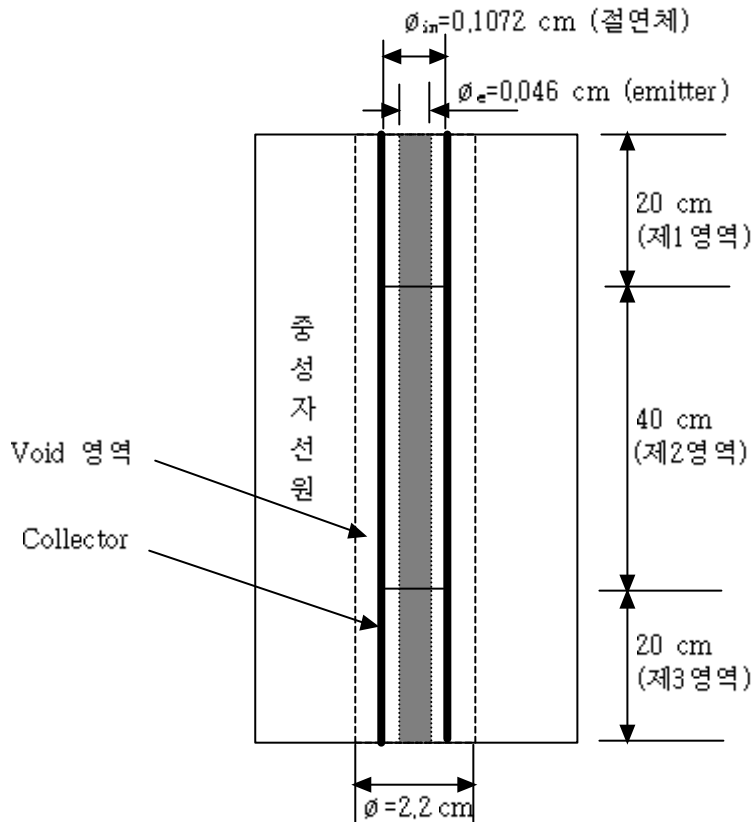


그림 1. MCNP 중성자 수송계산에 사용된 검출기와 중성자 선원의 모의 모델

MCNP 4A 코드를 이용하여 로듐 검출기 내부의 중성자속 분포를 계산하기 위하여 입력자료 작성 양식에 따라 그림 1에 나와 있는 로듐 검출기와 중성자 선원의 기하학적 배열을 입력자료로 작성하였다.

#### 4 결과 및 고찰

자기 출력형 로듐 중성자 검출기 내부의 중성자속 분포 tally는 MCNP 4A 코드에서 어떤 한 셀 내부의 중성자속 평균을 주게 되는 "F4:n" tally 옵션으로 수행하였다. 만족할만한 계산 정확도를 얻기 위하여 기하학적 모델링 과정에서 중성자 선원의 균일성을 가정하였으며 오차 감소기법중의 하나인 Russian roulette 기법을 이용하여 기하학적 구조를 조깅으로써 오차를 감소시켰고, 총 120,000,000회의 history를 수행하여 중성자속을 구하였다. 그 결과 일부 속중성자 구간을 제외하고는 대부분의 에너지 구간에서 중성자속 계산결과의 상대 오차가 0.1 이하로 나타났다. 1번

cell과 2번 cell의 경우 중성자 에너지가 2.232 MeV를 초과하게 되면 상대오차를 0.1 이하로 낮출 수 없었으며, 중성자 에너지가 6.07 MeV를 초과하게 되면 모든 cell에서 상대오차가 0.1 이상으로 증가되었다. 그러나 2.232 MeV를 초과하는 중성자속 분율과 6.07 MeV를 초과하는 중성자속 분율이 각각 7.73%와 1.82%에 불과하고, 이 에너지 영역에서 중성자 반응 단면적은  $2.38 \times 10^{-4} \sim 0.039$  barn에 불과하여 로돔과의 반응을 무시할 수 있기 때문에 속중성자속 분포계산과정에서 상대오차가 다소 높다고 하더라도 로돔 중성자 검출기 설계에는 크게 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

### 가. 로돔 emitter 영역

그림 2는 emitter 내부의 각 cell별로 정규화시킨 중성자 스펙트럼을 보여준다. 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 저에너지 영역에서는 열중성자와 공명 중성자의 자체 차폐효과가 상당히 분명하게 나타나고 있다. 로돔 emitter 재질의 중성자 포획 단면적 값이 열중성자와 공명 중성자 영역에서 매우 높기 때문에 이와 같은 자체 차폐효과가 나타난다. 특히 중성자 에너지가 1.106 eV일 경우 로돔의 공명 단면적이 1,410 b에 달하기 때문에 공명 중성자의 자체 차폐효과가 매우 뚜렷하게 나타났다. 그러나 공명 피크가 나타나는 실제 중성자 에너지는 1.25 eV이다. 여기서는 계산에 사용된 중성자 스펙트럼에서 1.25 eV와 가장 가까운 에너지가 1.106 eV였기 때문에 1.106 eV를 공명 중성자 에너지로 가정하였다.

그림 3과 4는 MCNP 4A 코드를 이용하여 계산한 열중성자와 공명 중성자에 대한 자체 차폐인자와 fitting 결과를 로돔의 각 cell별로 보여준다. 그림 3과 4로부터 열중성자와 공명 중성자에 대한 자체 차폐인자는 다음과 같은 fitting 관계식으로 근사화시킬 수 있었다.

$$F_i = A \exp(B R_i^C) \quad \text{----- (4)}$$

여기서  $F_i$ 는 로돔 emitter 내부의 어떤 반경 위치에서의 중성자 자체 차폐인자이며,  $R_i$ 는 emitter 내부의  $i$ 번째 cell의 중간 반경을 의미하고,  $A$ 와  $B$ ,  $C$ 는 fitting 상수이다.

표 2는 비선형 최소 자승법으로 구한 fitting 상수들의 값과 상관 계수( $r$ )의 제곱을 열중성자와 공명 중성자에 대해 보여주고 있다. 에너지가 0.0258 eV인 열중성자의 경우 MCNP 계산결과와 fitting 결과가  $\pm 2\%$  이내로 일치하였으며, 에너지가 1.106 eV 인 공명 중성자의 경우에는  $\pm 5\%$ 의 차이를 보였다. 로돔 emitter 중심부( $r=0$ )와 emitter 표면( $r=0.023$  cm)에서의 중성자속은 fitting 방법을 이용하여 구하였다. Emitter에서의 자체 차폐인자는 emitter 중심부와 표면의 중성자속 비로 나타낼 수 있으며, fitting하여 구한  $r=0$ 과  $r=0.023$  cm에서의 중성자속으로부터 자체 차폐인자를 구하였다.

한국과학기술원에서 구한 자체 차폐인자와 영광 3&4호기에서 사용되고 있는 검출기에 대해 ABB사가 제시한 값 및 본 연구에서 구한 결과가 표 3에 나와 있다. 표 3에서 알 수 있는 바와 같이 열중성자 자체 차폐인자의 경우 ABB 사의 결과와 본 연구결과가 단지 1.21%의 차이밖에 나지 않으며 KAIST 계산결과보다는 약 4.17% 높게 나타났다. 공명 중성자에 대한 자체 차폐인자는 ABB의 결과보다 약 2배 가량 낮게 나타났다. 현재로서는 ABB의 결과와 본 연구결과를 정성적으로 비교할만한 기준을 확보하지 못하고 있기 때문에 이 분야에 대해서는 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

표 2. 자체 차폐인자의 fitting 상수 및 상관계수

중성자 성분	A	B	C	$r^2$
열중성자	$8.073 \times 10^{-6}$	124.1	1.657	0.977
공명 중성자	$6.150 \times 10^{-7}$	3,436	1.986	0.998

표 3. 자체 차폐인자 평가결과 비교

Emitter 반경 (cm)	열중성자의 경우			공명 중성자의 경우	
	KAIST	ABB	This Work	ABB	This Work
0,023	0,7542	0,7775	0,787	0,302(1,25 eV)	0,147(1,106 eV)

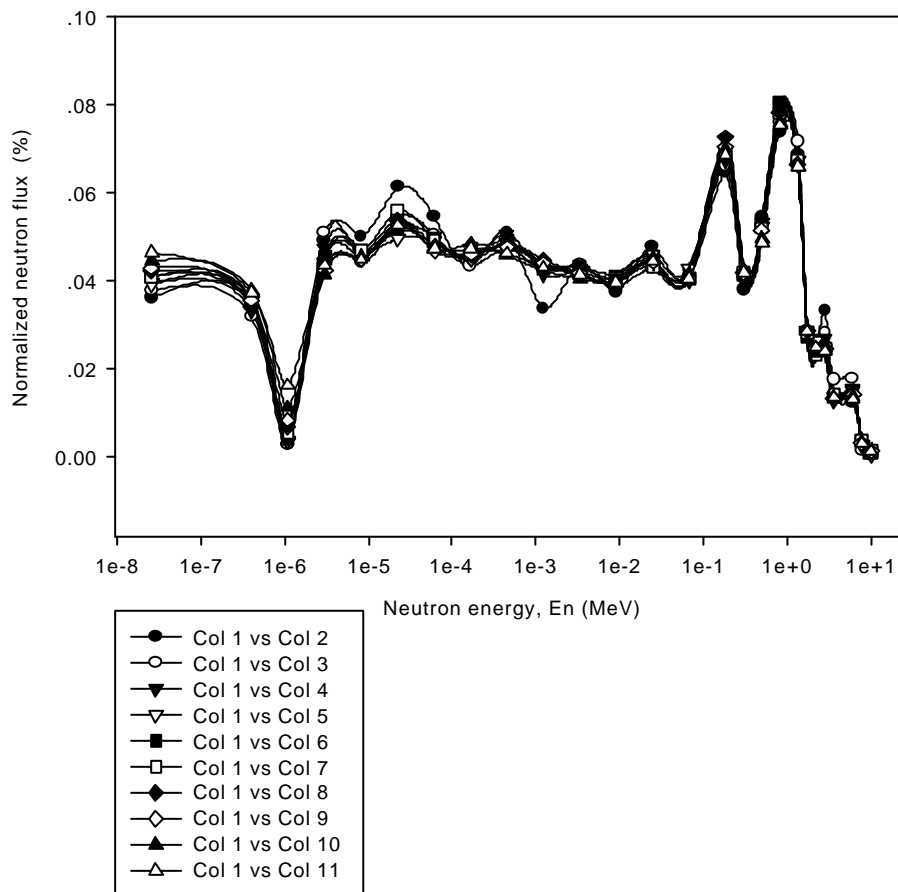
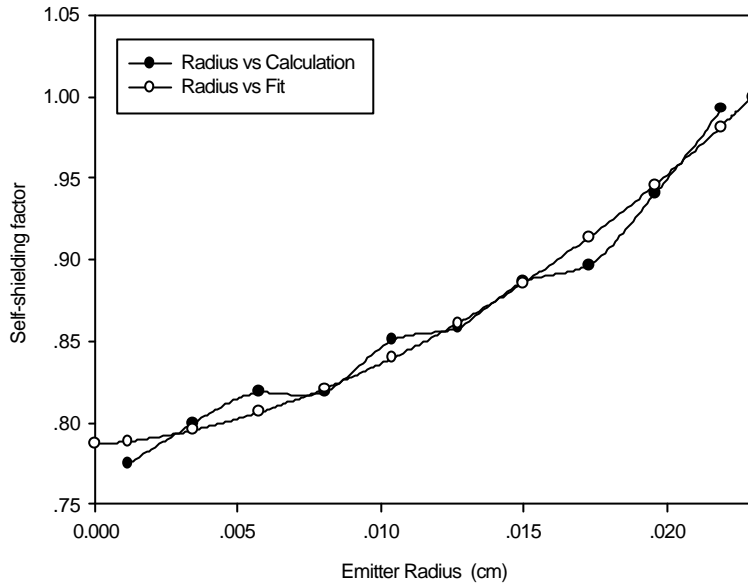
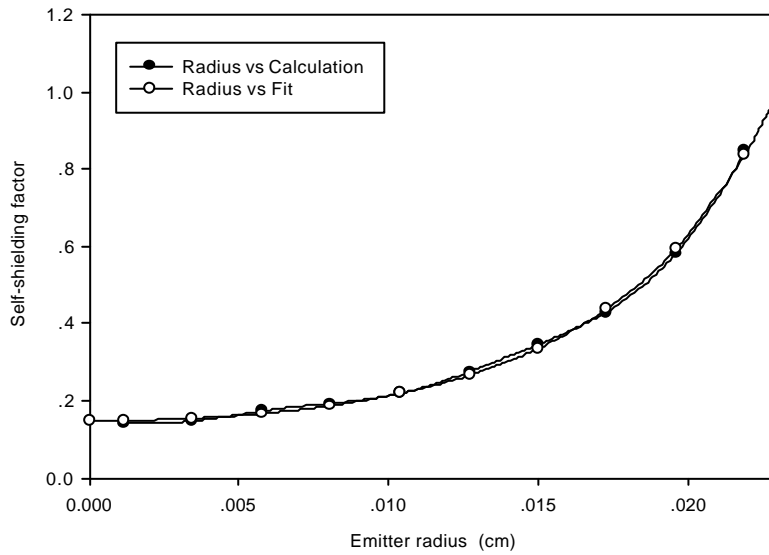


Fig. 2. Neutron flux distributions normalized inside Rhodium emitter



**Fig. 3. Self-shielding factors of the 0.025 eV thermal neutrons in Rhodium**



**Fig. 4. Self-shielding factors of the 1.106 eV resonance neutron in Rhodium**

## 나. 절연체 영역

그림 5는 절연체 내부의 각 cell별로 구한 균등화된 중성자 스펙트럼을 보여주는데, 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 열중성자와 공명 중성자의 경우 cell 위치에 따라 중성자속이 상당한 차이를 보여준다. 표 4는 절연체 외부 cell에서의 중성자속을 1이라고 하였을 경우 각 cell에 대해 구한 정규화된 중성자속을 보여준다. 표 4를 보면 1번 cell과 2번 cell에서 중성자속이 실질적으로 감소하였음을 알 수 있는데, 이는 로듐 emitter 반대편에서 입사하는 중성자들이 emitter를 통과할 때 열중성자와 공명 중성자들이 흡수되어 열중성자속과 공명 중성자속이 감소되었기 때문으로 생각된다. 이러한 현상은 그림 6을 보면 보다 더 확실하게 알 수 있다. 그림 6에서 알 수 있는 바와 같이 절연체 내부의 공명 중성자속은 emitter인 로듐 가까이 가면서 마치 로듐 emitter 내부에서와 같이 급격하게 감소되는데, emitter 근처에서 로듐 emitter로 인해 공명 중성자속이 차폐되어 이러한 효과가 발생된 것으로 추정된다. 다시 말해 절연체 재질로 인한 중성자속의 perturbation은 무시할 수 있으며, 절연체 내부에서 나타나는 중성자속의 변화는 중성자의 강한 흡수체인 로듐 붕이 절연체 중심부에 위치하고 있기 때문에 발생된 것이다.

그러나 이러한 현상은 로듐 검출기의 출력 전류로부터 중성자속을 평가하는데 상당한 영향을 미치게 된다. 즉 (2)식에서 중성자속 depression factor인  $F(E_n)$ 가 바로 이러한 현상을 설명하는 인자인데, 본 연구에서 MCNP 4A 코드를 이용하여 평가한 결과 열중성자의 경우  $F(E_n)$ 가 5%에 이르렀고 공명 중성자의 경우에는 30%에 이르는 것을 알 수 있었다. 앞으로 이러한 결과들을 다른 연구 문헌에서 발표된 자료들과 비교하여 검출기 설계 및 검출기 출력의 해석에 활용할 수 있다.

표4. 절연체 내부의 균등화된 중성자 스펙트럼 (0.023-0.0536 cm)

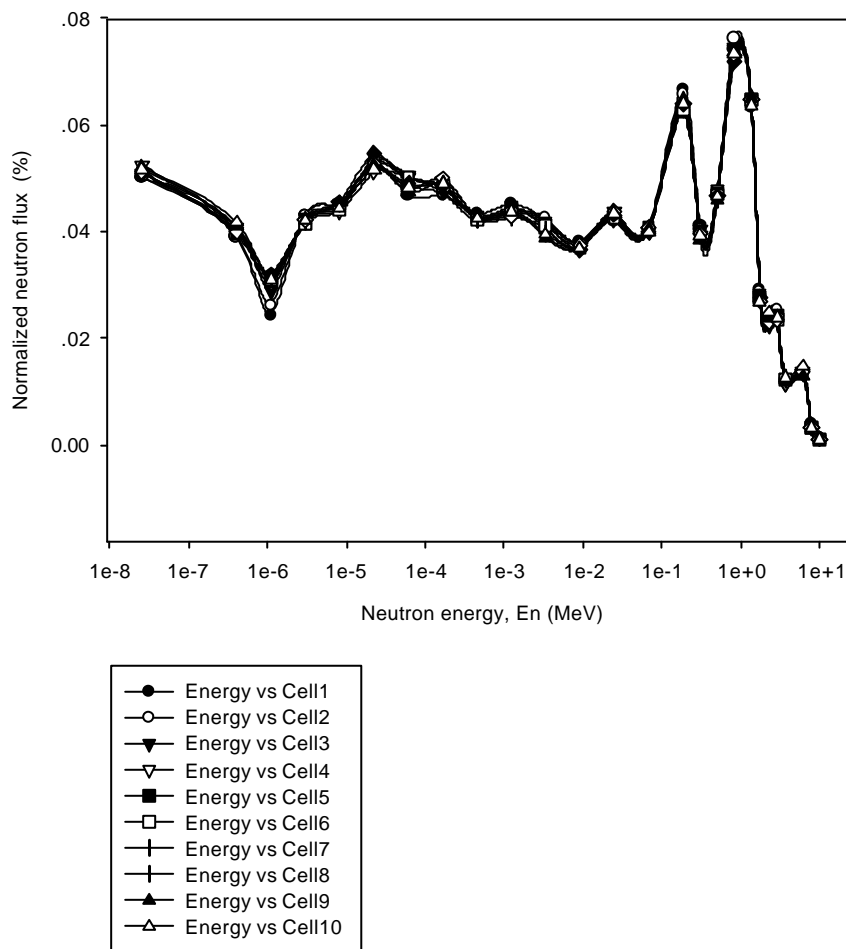
Cell 번호	균등화 중성자 스펙트럼 (%)
1	0.957
2	0.964
3	0.981
4	1.104
5	0.985
6	0.980
7	0.989
8	0.989
9	1.008
10	1.000
평균	0.987
표준편차	$\pm 0.2088$

## 4 결론

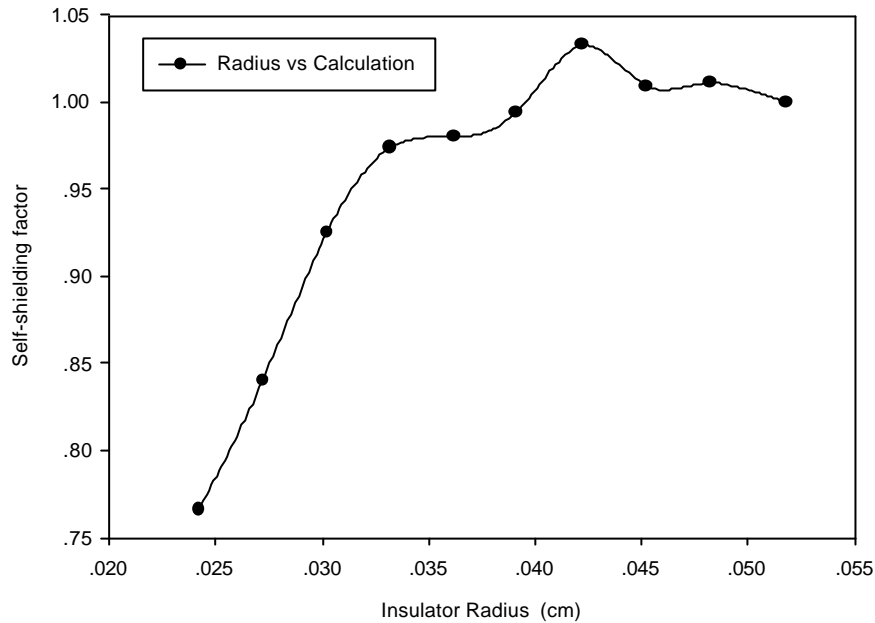
본 연구는 로듐 emitter와 절연체 내부의 중성자속 분포를 MCNP 4A 코드를 이용하여 평가해 본 하나의 예로서 사용된 중성자 선원이 영광 3&4호기의 노심내 상황을 대표하지 못하고 있기 때문에 여기에 나와 있는 결과를 바로 로듐 검출기 설계에 적용할 수는 없을 것이다. 그러나 본 연구를 통해 emitter 내부에서 일어나는 자체 차폐효과와 로듐 emitter로 인해 emitter 주변에서 발



생되는 중성자속의 depression 현상을 확인할 수 있었다. 특히 로듐 emitter 내부에서 일어나는 열중성자 자체 차폐효과는 영광 3&4호기에서 사용되는 로듐 검출기를 대상으로 ABB사에서 계산한 결과와 근소한 차이밖에 보이지 않아 본 연구에서 채택한 방법이 이론적으로 합리적임을 확신할 수 있었다. 그러나 공명 중성자의 경우에는 ABB사의 결과와 큰 차이를 나타내었는데, MCNP 계산방법상에 근본적인 문제점이 있었는지는 확인할 방법이 없었다. 앞으로 공명 중성자의 자체 차폐현상에 관한 다른 연구자들의 연구결과가 수집되는 대로 이 분야의 상세한 비교검토작업을 수행할 예정이다. 절연체 내부에서 나타나는 중성자속의 depression 현상도 현재로서는 비교할만한 다른 연구결과가 나와 있지 않아 앞으로 보다 많은 검토가 뒤따라야 할 것으로 판단된다.



**Fig. 5. Neutron flux distributions normalized inside the insulator**



**Fig. 6. Self-shielding factors of the 1.106 eV resonance neutrons in the insulator**

### 참고문헌

1. J. F. Briesmeister, "MCNP-4A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4A", Los Alamos National Laboratory, New Mexico, 1994
2. Wannoo Lee, "A Study on the Sensitivity of Self-Powered Neutron Detectors(SPNDs)", As Master Report, Department of Nuclear Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 1996, 12
3. "Instruction Manual of In-Core Instrument Assembly for Yonggwang Nuclear Power Plant (Unit 3 and 4), IST Canada INC., Cambridge, Ontario, Canada, 1993
4. John W. Hilborn, "Self-Powered Neutron Detectors for Reactor Flux Monitoring", Nucleonics, Vol. 22, No. 2, 1964