

Monte Carlo 방법을 이용한 백금 노내계측기의 감마 민감도 평가

Assessment of Gamma Sensitivity of Platinum SPGD using Monte Carlo Method

구본승, 박문규, 차균호, 최유선, 이택윤, 남일식, 이창섭  
한전전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요약

Monte Carlo 방법을 이용하여 백금 노내계측기의 에너지그룹별 감마 민감도를 계산하였다. MCNP 코드로 영광4호기 5주기 H1-type 핵연료집합체를 모사하여 Instrumentation Thimble 영역의 감마 스펙트럼을 계산하였으며 계산된 감마 스펙트럼을 백금계측기의 민감도 생산을 위한 MCNP 코드의 Gamma Source로 사용하였다. 또한 Insulator 영역에서의 Electron Charge Effect를 고려하기 위하여 f-factor를 정의하여 민감도 계산에 적용하였다. 계산결과 단위 길이당 감마 민감도는 약  $10^{-23} \text{A}/(\text{v}/\text{cm}^2)$  정도의 값을 보였으며 에너지 감소에 따라 민감도도 함께 감소하다가 약 1 MeV 정도의 에너지부터 다시 증가함을 보였다. 일반적으로 민감도에 가장 큰 영향을 미치는 것은 계측기 주변의 스펙트럼이다. 그러므로 정확한 민감도 계산을 위해서는 정확한 스펙트럼 계산과 민감도에 영향을 주는 변수 (Emitter, Insulator, Collector의 밀도, Insulator 내의 Charge 분포)들을 최적화하면서 이러한 변수들의 불확실도를 최소화할 필요가 있다.

Abstract

Gamma sensitivities depending on energy groups of Platinum incore detectors are calculated using the Monte Carlo transport calculation. H1-type fuel assembly loaded in Yonggwang Unit 4 cycle 5 is modelled by MCNP4B code to get gamma spectrum in instrumentation thimble region and then calculated gamma spectrum is used as a source term for gamma sensitivity of Pt detector. In addition, f-factor was defined to consider the effect of electron charge in insulator region. Resulting energy dependent gamma sensitivity was about  $10^{-23} \text{A}/(\text{v}/\text{cm}^2)$  per unit length. Generally, sensitivity is primarily dependent on gamma or neutron spectrum in sensitivity calculation, thus the accurate spectrum around detector assembly and optimizing the variables affected sensitivity like as density and size of emitter, insulator and collector, charge distribution in the insulator, and minimizing the uncertainties of these variables are required for the exact sensitivity calculation.

## 1. 서론

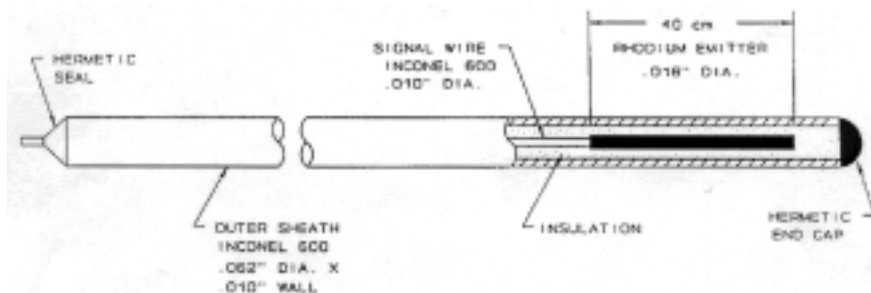
노내 중성자계측기 내에서 일어나는 (n,e), (g,e), (n,g,e) 반응은 복잡한 물리현상을 동반하기 때문에 Platinum 계측기의 정확한 신호해석에는 많은 어려움이 따른다. 1970년대 이후부터 꾸준히 이론 및 해석적 방법론이 개발되면서 계측기 해석에 관한 연구가 진행되어왔다. 비록 최근에 와서 약간씩의 오류가 발견되기는 하지만 큰 수정 없이 아직까지도 사용되고 있다. 그러나 최근의 Monte Carlo Transport Code (MCNP 또는 MONK) 및 새로운 해석방법론의 비약적인 발전으로 감마와 중성자속 Field에서의 정확한 계측기 반응 과정을 예측할 수 있게 되었다. 이에 대한 연구가 많은 사람들에 의해서 수행되었으며 특히 Dominic G. Napolitano와 Donald R. Harris는 Seabrook 원전을 대상으로 Monte Carlo 방법론을 이용하여 감마 민감도 계산을 수행, 적용하였고 벨기에의 SCK·CEN, Nuclear Research Center에서도 Rh, Co, Hf 등에 대해서 민감도 해석을 수행한바 있다.

계측기 민감도는 측정된 단위 중성자 또는 감마속 당 전류를 의미하며 계측기 설계에 있어서 가장 중요한 기본 자료이다. 그리고 민감도는 계측기의 Emitter 재질과 Emitter로 입사되는 선원(중성자 또는 감마)의 에너지별 분포 즉, 스펙트럼에 가장 큰 영향을 받는다. 그러므로 즉발반응 원리를 주로 이용하는 Platinum 계측기의 민감도를 계산하기 위해서는 계측기로 입사되는 감마 스펙트럼을 미리 알아야 한다. 그래서 LANL (Los Alamos National Laboratory)에서 개발한 MCNP4B 코드를 이용, H1-type 단일 핵연료집합체를 모델링하여 계측기집합체가 위치하는 Instrumentation Thimble 영역의 감마 스펙트럼을 미리 계산하였으며 이를 감마 민감도 계산에 이용하였다.

## 2. 본론

### 가. 노내계측기의 일반적 특성

SPND (Self-Powered Neutron Detectors) 는 중성자와 원자핵과의 반응을 통해 중성자속에 비례하는 전류를 생산하며, 다른 노내계측기와 비교해 볼 때 외부로부터의 출력 공급이 필요 없으며, 간단하고 견고한 구조, 노심내 설치 가능한 비교적 작은 크기, 고온/고압 조건에서의 안정성, 선형 특성을 가진 신호 생산, Emitter 재질에 따라 다르나 비교적 낮은 연소율 등의 장점을 가진다. 그러나 비교적 낮은 중성자 민감도로 인해 운전영역이 제한적이며, Emitter는 Background Noise의 보정이 필요할 뿐만 아니라 일부 Emitter는 응답신호가 지연된다는 단점을 가진다.



<그림 2-1> 전형적인 Integral SPND (Rhodium 형)

<그림 2-1>은 전형적인 Integral 형태의 SPND로 Emitter와 이를 둘러싸고 있는 Insulator 그리고 Collector (또는 Sheath)로 구성된 Co-axial Cable로 구성된다. SPND의 Emitter로 주로 사용되는 물질로는 로듐(Rh), 바나듐(V), 코발트(Co), 하프늄(Hf), 백금(Pt) 및 은(Ag) 등이 있으며, 이들 물질은 비교적 높은 용점온도와 열중성자 단면적을 가지고 있다. <표 2-1>는 원전에서 사용되는 계측기의 Emitter 재료별 핵적 특성을 보여준다.

<표 2-1> 계측기 재료별 핵적 특성

Element	Z	장 점	단 점
V	23	· Low depletion	· Very small signal · Signal interpretation difficult · Prompt response has opposite sign
Co	27	· Large prompt response	· Very small signal · Signal interpretation difficult · Average depletion
Rh	45	· Very large signal (small uncertainty) · Signal interpretation easy	· Small prompt response · Average depletion
Ag	47	· Large signal · Signal interpretation easy · Low depletion	· Small prompt response
Gd	64	· Large signal · Large prompt response · Signal interpretation easy	· Rapid depletion
Er	68	· Large prompt response	· Rapid depletion · Signal interpretation difficult · Small signal
Yb	70	· Large prompt response · Low depletion	· Signal interpretation difficult · Small signal
Hf	72	· Large prompt response	· Signal interpretation difficult · Small signal · Average depletion
Pt	78	· Large prompt response · No depletion	· Signal interpretation difficult · Small signal

계측기에서 전류가 발생하는 물리현상은 다음과 같이 간단히 기술할 수 있다. Emitter에서 발생한 전자가 Insulator를 지나 Collector에 도달하면 전류가 흐르게 되고 이것은 신호 모집장치에 감지된다. 역으로 Collector에서 생성된 전자가 Insulator를 지나 Emitter에 도달할 경우에는 반대부호의 전류가 생성된다. 마찬가지로 Insulator에서도 위와 동일한 반응을 예측할 수 있다. 그러므로 순 전류는 이들 두성분의 합으로 양(+) 또는 음(-)이 될 수 있으며 이러한 현상은 반응 형태에 따라 (n,e), (n,g,e), (g,e) 등으로 구분되며 전류 생성 원리는 모두 동일하다.

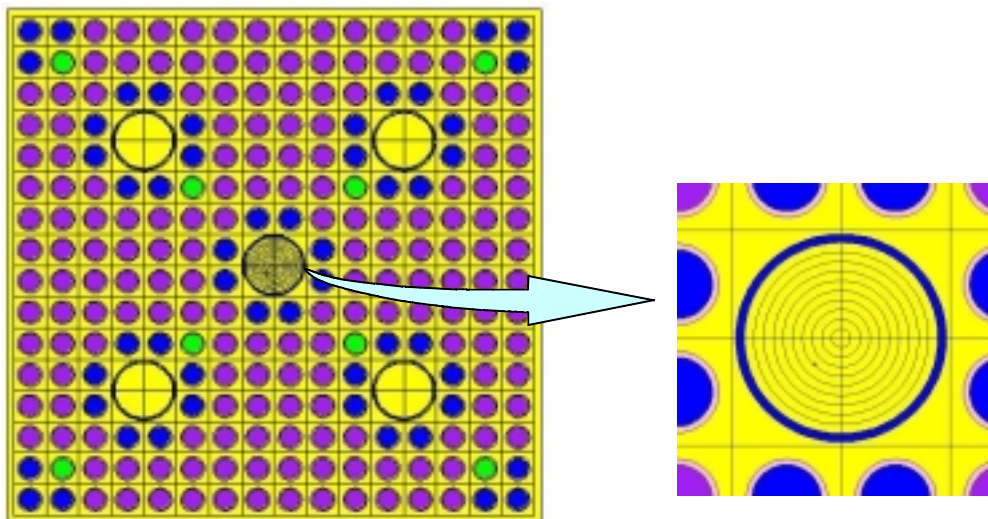
기존의 (n,e) 반응을 이용하는 SPND는 Emitter의 특성상 응답신호가 지연되는 등 여러 단점을 가진다. 이를 대체하기 위한 방법으로 (n,g,e), (g,e) 반응을 이용하는 SPGD (Self-Powered Gamma

Detector)를 생각할 수 있다. SPGD의 바람직한 특성으로는 중성자속 변화에 즉각적으로 반응해야 하며 Signal-to-Noise Ratio가 커야한다. (즉, Background 신호에 비해 큰 신호를 내야한다.) 또한 크기가 작고 교체 없이 수 년 동안 사용 가능하며 정확한 신호해석이 연소가 진행되는 동안에도 가능해야 한다.

### 나. Gamma Spectrum Around the Detector Assembly

일반적으로 노심내 위치별 감마속은 핵연료집합체의 장전 위치, 우라늄 농축도, 가연성 독봉과 제어봉의 존재 유무, 연소도, 구조재 등 다양한 변수의 함수이기 때문에 위치에 따른 감마속을 정확하게 계산하기란 쉽지 않다. 결국 노심전체를 모델링하여 노심평균 감마속( $\bar{\phi}_\gamma$ ) 또는 각 위치별 감마속( $\phi_\gamma(\vec{r})$ )을 계산해야하는데 이 방법은 많은 계산시간을 요하며 또한 연소도와 같은 시간의 변화가 고려되지 않았기 때문에 이 또한 정확한 방법이라고 할 수 없다. 본 논문에서는 단일 핵연료집합체를 모델링하여 노내계측기가 삽입되는 Instrumentation Thimble 영역의 그룹별 감마속만을 계산하였는데 그 이유는 다음과 같다. 감마선은 중성자에 비해서 노심내의 위치에 따른 밀도 변화가 크지 않으며 계측기에 가장 큰 영향을 미치는 것은 계측기집합체와 인접한 몇몇 핵연료봉의 상태라고 할 수 있다. 따라서 계측기가 삽입되는 집합체의 감마 스펙트럼만으로도 감마계측기의 민감도 계산에 충분한 정확도를 줄 수 있으리라 예상된다.

모델링에 사용된 H1-type 핵연료집합체는 영광4호기 5주기에 사용중인 집합체로 다음의 <그림 2-2>, <표 2-2>와 같다.



<그림 2-2> Yonggwang Unit 4 Cycle 5 H1-type FA & 2x2 Instrumentation Thimble

MCNP 모델링 시 가능하면 실제 노심조건과 같게 하기 위하여 냉각재 및 감속재는 고온상태의 밀도 (0.699g/cc)와 반사경계조건 (Reflective Boundary Condition)을 사용하여 단일 핵연료집합체가 무한배열을 이루도록 하였다. 그리고 <표 2-3>의 에너지 그룹에 맞도록 Energy (En) 카드와 Cell Flux Tally (F4:n,p) 카드를 이용하여 Instrumentation Thimble 영역에서의 중성자와 감마의 그룹별

Flux를 계산하였다.

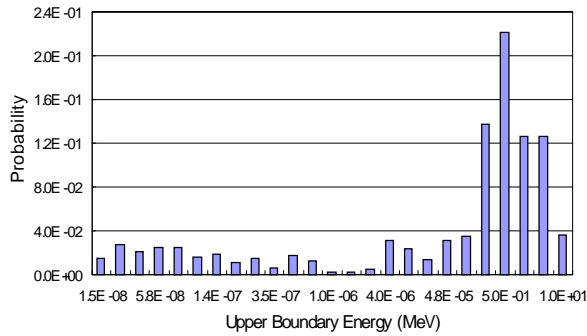
<표 2-2> H-type Assembly Description of Yonggwang Unit 4

Assembly Type	Fuel Enrichment (wt.% U <sup>235</sup> )	No. of Fuel Rods per Assembly	No. of Gd Poison Rods Per Assembly	Poison Enrichment (wt.% Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
H0	4.50/4.01	184/52	-	-
H1	4.51/4.01	176/52	8	6.0
H2	4.50/4.01	172/52	12	6.0

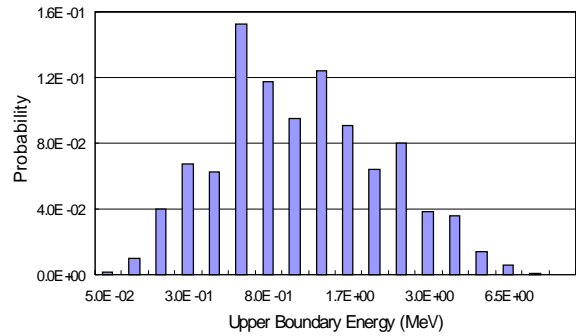
<표 2-3> Neutron & Gamma Energy Boundary

Group Number	Upper Energy Group Boundary (eV)		
	Neutron		Gamma
	25-G	10-G	18-G
1	10.00E+6	1.000E+7	1.000E+7
2	3.679E+6	4.000E+6	8.000E+6
3	1.353E+6	2.000E+6	6.500E+6
4	0.500E+6	1.000E+6	5.000E+6
5	9118.0	8.000E+5	4.000E+6
6	148.728	6.000E+5	3.000E+6
7	48.052	4.000E+5	2.500E+6
8	15.968	3.000E+5	2.000E+6
9	9.877	2.000E+5	1.660E+6
10	4.000	1.000E+5	1.330E+6
11	1.300		1.000E+6
12	1.097		8.000E+5
13	1.020		6.000E+5
14	0.950		4.000E+5
15	0.625		3.000E+5
16	0.350		2.000E+5
17	0.280		1.000E+5
18	0.180		5.000E+4
19	0.140		
20	0.100		
21	0.080		
22	0.058		
23	0.042		
24	0.030		
25	0.015		

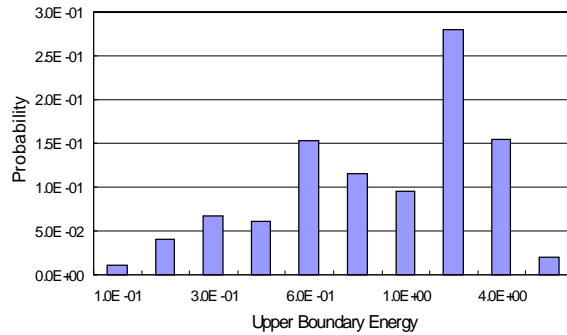
MCNP 계산값 (Particle Flux)은 하나의 입자에 대한 결과이므로 그룹별 입자속을 총합으로 나누면 중성자와 감마의 에너지별 분포, 스펙트럼으로 나타낼 수 있다. <그림 2-3> ~ <그림 2-5>는 각각 Instrumentation Thimble 내의 중성자와 감마의 스펙트럼을 나타낸다.



<그림 2-3> Instrumentation Thimble 내의 중성자 스펙트럼 (25-Group)



<그림 2-4> Instrumentation Thimble 내의 감마 스펙트럼 (18-Group)



<그림 2-5> Instrumentation Thimble 내의 감마 스펙트럼 (10-Group)

#### 다. Charge Distribution in the Insulator

전술한 바와 같이 발생된 전자의 흐름에 따라서 전류의 부호는 양(+) 또는 음(-)이 될 수 있다. 그리고 Emitter 또는 Collector에서 생성된 전류의 흐름에 의해서 Insulator 내에 공간전하장 (Space Charge Field)을 형성하여 계측기 민감도에 영향을 준다. 그러므로 정확한 민감도 계산을 위해서는 Insulator 내의 Charge 분포를 고려해야만 한다. 일반적으로 두 개의 전자를 방출하는 전극이 절연체에 의해서 분리되어 있을 때 절연체는 전자의 저장고 역할을 한다. 즉 절연체 내에는 Space Charge가 형성되고 전기장이 형성된다. 금속전극으로 방출된 전자들의 일부는 절연체 내에서 열평형 상태에 도달하게 된다. 전하의 Trap과 절연체의 Energy Band Structure 때문에 전자는 전극으로 벗어나기 전에 절연체 내에서 일정시간을 보내게 되어 Space Charge를 형성되게 된다. Space Charge에 의한 전기장이 충분히 커지게 되면 절연체로부터 전자의 방출은 전자의 유입과 평형을

이루게 되고 Quasi-Static Charge가 존재하게 된다. 이 전기장은 한 개의 Zero Point를 가지며 전극으로부터 방출된 전자들이 이 지점에 도달하기 전에 운동에너지를 모두 잃게 되면 전기장에 의해 원래의 위치로 향하는 척력을 받게 된다. 따라서 이 지점을 통과하는 전자들만이 전류에 기여하게 된다.

계측기는 Concentric Ring 구조이므로 Emitter의 중심을 기준으로 대칭이다. Insulator 내의 전하가 평형상태에 도달했다고 가정하면 전기장 E (Electric Field)를 다음과 같이 Poisson 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{dE}{dr} + \frac{E}{r} = \frac{\rho(r)}{\epsilon} \quad (\text{식 1})$$

Insulator 내의 Potential Difference가 영(zero)라는 경계조건을 적용하면, 위식의 해는 다음과 같이 표현된다.

$$E(r) = \frac{1}{r\epsilon} \left[ \int_{r_i}^r r' \rho(r') dr' - \frac{1}{\ln(r_o/r_i)} \int_{r_i}^{r_o} dr'' \frac{1}{r''} \int_{r_i}^{r''} r' \rho(r') dr' \right] \quad (\text{식 2})$$

여기서  $r_i$ ,  $r_o$ 는 각각 Insulator의 내경과 외경을 나타내며 전기장은 선형적으로 변하는 함수로  $r_i \sim r_o$  사이의 임의의 임계반경 (Critical Radius)에서 부호가 바뀌게 된다. 임계반경보다 Emitter에 가까운 위치에 정지한 Charge들이 모두 Emitter 방향으로 이동한다고 가정하면 이에 해당하는 분율, f-fraction은 다음과 같이 기술된다.

$$f = \frac{\ln(r_o)}{\ln(r_o/r_i)} - \frac{1}{\ln(r_o/r_i)} \frac{\sum_{j=1}^n \bar{r}_j \ln(\bar{r}_j) \rho_j \Delta r_j}{\sum_{j=1}^n \bar{r}_j \rho_j \Delta r_j} \quad (\text{식 3})$$

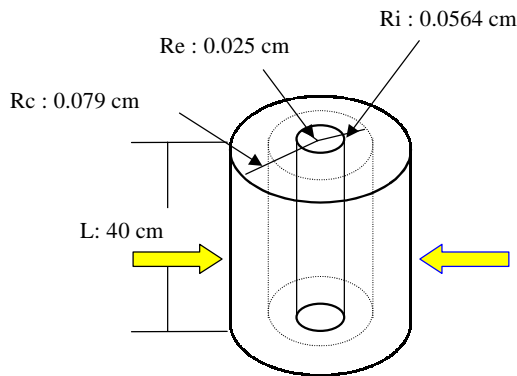
f-fraction을 얻기 위해서 Insulator 영역을 20등분 (typically  $n=20$  or  $30$ )으로 나누어 각 등분된  $r_j$  (Concentric Ring)에서의 Charge ( $\rho$ ) 값을 MCNP 계산을 통하여 구하고 각각의 변수 ( $\bar{r}_j$ ,  $\rho_j$ ,  $\Delta r_j$ )들을 이용하면 f-fraction을 얻을 수 있다.

<표 2-4> Platinum 계측기의 재질 및 크기

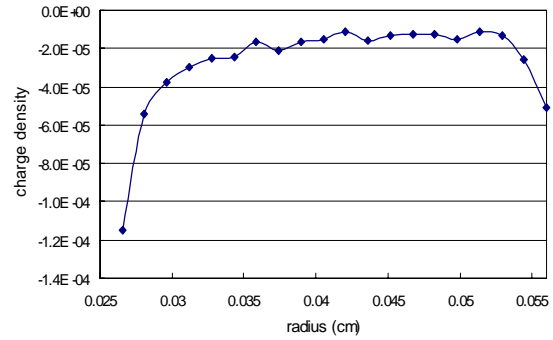
	Emitter	Insulator	Collector
Material	Platinum	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Inconel
Density(g/cc)	21.45	1.96	8.42
Length(cm)		40	

<그림 2-6>과 <표 2-4>는 MCNP 코드로 모델링된 Platinum 계측기의 기하학적 모형 및 사양을 나타내고 있다. Emitter의 재질은 Platinum으로 21.45g/cc의 밀도이며 Insulator는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 1.9g/cc의 밀도를 가진다. Collector는 Inconel로 구성되었고 밀도는 8.42g/cc이다. 각각은 Concentric Ring 형태

로 구성되며 반경은 0.025cm-0.056cm-0.079cm로 전형적인 SPND와 유사하다. <그림 2-7>은 MCNP로 계산된 Insulator 영역에서의 Charge Density,  $\rho_j$ 를 보여준다. (식 3)에 각 변수들을 적용하여 계산하면 f-fraction은 0.47이 되는데 이는 <그림 2-5>의 스펙트럼을 가지며 <그림 2-6>, <표 2-4>와 같이 구성된 계측기의 경우 f=0.47임을 의미한다. 만일 감마 스펙트럼과 계측기의 재질 및 크기가 변하면 이 수치도 함께 변한다.



<그림 2-6> Platinum 계측기의 기하학적 모형



<그림 2-7> Insulator 영역에서의 Charge Density Profile

Emitter-Insulator 경계면에서의 Net Current를  $J_{ei}$ , Insulator-Collector 경계면에서의 Net Current를  $J_{ic}$ 라 하면 Emitter에서 Collector로 향하는 Net Current,  $J_{ec}$ 는 다음과 같이 된다. 여기서  $J_{ei}$ ,  $J_{ic}$ 는 MCNP의 Current Tally를 이용하여 구할 수 있다. MCNP 계산시 Electron Current  $J_{ei}$ ,  $J_{ic}$ 는 Incoming ( $\cos(\theta)<0$ )과 outgoing ( $\cos(\theta)>0$ )으로 각각 구분되며 이 둘의 차이가 경계면에서의 Net Current가 된다. 그리고 전자의 Upper Limit Energy를 정하는 PHYS:E 카드를 사용하면 계산시간 단축을 통한 효율적인 계산을 수행할 수 있다.

$$J_{ec} = J_{ei} - f * (J_{ei} - J_{ic}) = (1 - f) * J_{ei} + f * J_{ic} \quad (\text{식 4})$$

일반적으로 계측기에서 발생하는 Current ( $I$ )는 계측기가 위치한 곳에서의 중성자 혹은 감마속의 크기에 비례한다. (n,e) 반응을 이용하는 Rhodium의 경우 신호의 대부분이 중성자속에 의한 것이며 신호의 크기 또한 감마반응을 이용하는 계측기에 비해서 훨씬 크다. 그러나 Platinum과 같이 감마에 민감한 계측기는 신호의 대부분이 즉발반응으로 발생하며 신호의 크기가 작아 신호해석을 위해서는 계측기 위치에서의 감마와 중성자속의 면밀한 해석이 필요하다.

#### 라. Energy Dependent Gamma Sensitivities of Pt Detector

미리 계산된 Instrumentation Thimble 영역에서의 감마 스펙트럼을 MCNP 입력문의 SDEF 카드를 이용하여 선원향으로 정의하여 Gamma Source가 Collector 표면으로부터  $\cos(\theta)$  방향으로 입사되도록 모델링하였다. 그리고 각 경계면에서의 정확한 Net Current를 계산하기 위하여 Fn:e, Cn, Ftn etc 카드를 함께 이용하였으며 계측기의 크기가 매우 작음을 고려, 입자수를 20000000으로 하였다.

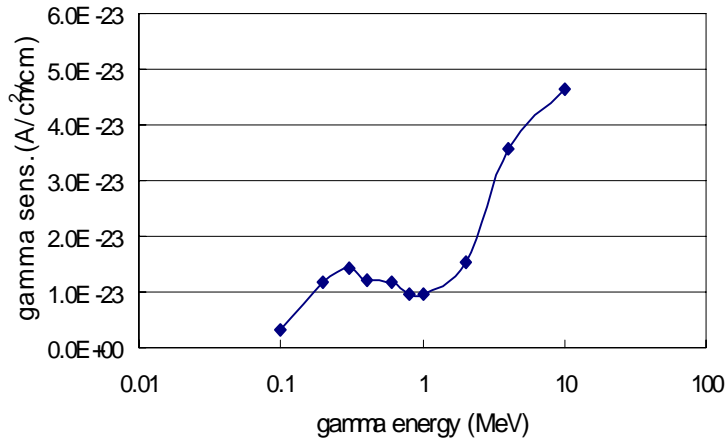
계측기 민감도는 특정 에너지의 감마속 ( $\phi_{\gamma}$ )에 대해서 발생하는 Current ( $I$ )의 양으로 정의되며



다음과 같이 쓸 수 있다.

$$S_{\gamma_g} = \frac{I}{\phi_{\gamma_g}} \quad (\text{식 5})$$

여기서 감마속 ( $\phi$ )은 MCNP를 통해 직접 계산하거나 또는 다음과 같은 간접적인 방법을 통하여 얻을 수 있다. Gamma Source는 Collector의 표면으로부터  $\cos(\theta)$  방향으로 입사하기 때문에  $\phi = 4/(\pi \cdot d \cdot h)$ 가 된다. 여기서  $d, h$ 는 계측기의 직경과 축방향 길이를 의미하며 단위 길이당 민감도를 계산했기 때문에 각각 0.158cm, 1cm가 된다. 위의 (식 3)을 통해서 얻은 f-fraction과 (식 4)에서 구한 에너지별 Net Current를 (식 5)에 대입하면 백금계측기에 대한 에너지별 감마 민감도를 계산할 수 있으며 그 결과를 <그림 2-8>에 나타내었다. 그림과 같이 단위 길이당 에너지별 감마 민감도는 약  $10^{-23} \text{A}/(\text{v}/\text{cm}^2)$  정도의 값을 보였다. 감마 민감도는 높은 에너지 영역에서 제일 높았다가 에너지 감소에 따라 민감도도 함께 감소하다가 약 1 MeV 정도의 에너지부터 다시 증가함을 볼 수 있다. 이 값은 (n,e) 반응을 이용하는 SPND의 민감도 ( $10^{-21} \sim 10^{-22} \text{A}/(\text{v}/\text{cm}^2)$ )에 비해 매우 작은 값을 보이는데 그 이유는 매우 작은 분율의 감마만이 Photoelectric, Compton Scattering, Pair Production과 같은 (g,e) 반응을 일으키고 대부분의 감마는 반응 없이 계측기를 벗어나기 때문이다. 일반적으로 High-Z 물질을 계측기의 Emitter로 사용하는 경우 Low-Z 물질에 비해 상대적으로 높은 감마 민감도를 얻을 수 있으며 계측기 주변물질 (Surrounding Materials)에도 덜 영향을 받는 것으로 알려져 있다.



<그림 2-8> Energy Dependent Gamma Sensitivities of Pt SPGD

### 3. 결론

Monte Carlo Transport 계산을 통하여 Platinum 계측기의 그룹별 감마 민감도를 계산하였다. MCNP4B 코드로 영광4호기 5주기 H1-type 핵연료집합체를 모사하여 Instrumentation Thimble 영역의 감마 스펙트럼을 계산하였으며 계산된 감마 스펙트럼을 Platinum 계측기의 민감도 생산을 위한 MCNP 코드 입력문의 선원항으로 사용하였다. 그리고 Insulator 영역에서의 Charge 분포가 민감도에 미치는 영향을 고려하기위해서 f-factor를 정의하였으며 이를 민감도 계산에 이용하였다. 계산결

과 단위 길이당 민감도는 약  $10^{23} \text{A}(\text{v}/\text{cm}^2)$  정도의 값을 보여 SPND 민감도에 비해서 매우 작은 값을 보였는데 그 이유는 매우 작은 분율의 감마만이 (g,e) 반응을 일으키고 대부분의 감마는 반응 없이 계측기를 벗어하기 때문이다.

민감도계산에 있어서 민감도에 가장 큰 영향을 주는 것은 스펙트럼의 변화다. 그 이유는 스펙트럼의 변화에 따라 Emitter-Insulator-Collector 경계면에서의 Current 및 f-fraction 등도 함께 변하기 때문이다. 또한 Insulator의 재질 및 밀도도 민감도에 영향을 끼친다. 그리고 모든 물리현상이 계측기 내에서만 이루어진다는 가정 하에 계측기만을 모델링 (Unperturbed Condition)할 때의 민감도와 물(냉각수 혹은 속재)을 포함한 계측기 주변 구조물의 영향까지 함께 고려 (Perturbed Condition)될 때의 민감도도 서로 다르다. 그러므로 정확한 민감도 계산을 위해서는 정확한 스펙트럼의 예측 및 민감도에 영향을 주는 변수들을 최적화하는 동시에 가능한 한 변수들의 불확실도를 최소화할 필요가 있다.

#### 4. 참고문헌

1. H. D. Warren "Calculational Model for Self-Powered Neutron Detector," Nuclear Science and Engineering, 48, p. 331-342, 1972.
2. H. D. Warren and N. H. Shah, "Neutron and Gamma-Ray Effects on Self-Powered In-Core Radiation Detectors," Nuclear Science and Engineering, 54, pp. 395-415, 1974.
3. H. D. Warren and M. F. Sulcoski, "Performance of Prompt- and Delayed-Responding Self-Powered In-Core Neutron Detectors in a Pressurized Water Reactor," Nuclear Science and Engineering, 86, pp. 1-9, 1984.
4. D. G. Napolitano and D. R. Harris, "Sensitivity of Seabrook Station's Incore Platinum Detectors," Advances in Mathematics, Computations, and Reactor Physics, Topical Meeting, Pittsburgh, PA. April 25-May 2, 1991.
5. J. P. Gorski and a. G. Merrill, "Incore Power Monitoring Using Platinum Incore Detectors at Seabrook Station," Advances in Mathematics, Computations, and Reactor Physics, Topical Meeting, Pittsburgh, PA, April 28-May 2, 1991.
6. J. P. Gorski and R. J. Cacciapouti, "Experience with Fixed Incore Detectors at Seabrook Station," International Conference on the Physics of Nuclear Science and Technology, Long Island, NY, October 5-8, 1998.
7. R. J. Cacciapouti and J. P. Gorski, "Experience with Fixed Platinum Incore Detectors," Core Monitoring for Commercial Reactors: Improvements in Systems and Methods, Stockholm, Sweden, October 4-5, 1999.
8. S. Levy et al., "Integral Transport Computation of Gamma Detector Response With the CPM2 Code," EPRI NP-6527, Project 2352-3, Final Report, December 1989.
9. J. F. Briesmeister, "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, version 4B", LA-1265-M, 1997.
10. 영광4호기 5주기 핵설계보고서.