

논문 95-4-4-01

구형 BGO 섬광 검출기에 대한 감마선 에너지 스펙트럼 계산

도시홍*, 김종일**, 박홍기**, 추민철**, 정중현*, 김기동^o, 이대원^o

Calculation of Gamma-ray Energy Spectrum for Spherical BGO Scintillation Detector

Sih-Hong Doh*, Hung-Ki Park**, Jong-Il Kim**, Min-Cheal Chu**,
Jung-Hyun Jeong*, Gi-Dong Kim^o, Dae-Won Lee^o

요 약

반지름이 1.25 cm인 구형 BGO 섬광 검출기의 감마선 검출 특성을 결정하기 위하여 감마선 에너지 deposition 스펙트럼을 Monte Carlo 방법으로 계산하였다. 이때 계산에 이용된 감마선 에너지 deposition 스펙트럼 계산 code는 personal computer 에서 사용할 수 있도록 qbasic을 이용하여 작성하였다. 또한 직접 제작된 구형 BGO 섬광 검출기를 이용하여 방사성 선원 ^{22}Na , ^{137}Cs 및 ^{207}Bi 의 감마선 에너지 스펙트럼도 측정하였다. 이 측정 감마선 에너지 스펙트럼의 광전 peak을 Gauss함수로 fitting하여, 광전 peak의 표준편차를 구하고, 이를 Nardi의 경험식을 이용하여 χ^2 fitting하므로써 2000 keV이하의 감마선 에너지에서 구형 BGO 섬광 검출기의 분해능에 대한 에너지 의존성도 조사하였다. 이를 이용하여 에너지 deposition 계산 스펙트럼을 펼치므로써 ^{22}Na 및 ^{137}Cs 의 측정 에너지 스펙트럼과 비교하였다. 또한 감마선 에너지 deposition 스펙트럼 계산 code를 이용하여 반지름이 1.25 cm인 구형 BGO 검출기에 대한 절대효율과 고유 peak 효율도 계산하였다.

Abstract

The γ -ray deposition spectra were calculated by Monte Carlo method to obtain the scintillation characteristics of the γ -ray for BGO scintillation detector with the spherical shape of 1.25 cm radius. The code used in calculating the γ -ray deposition spectra was made for personal computer with qbasic language.

Also the γ -ray energy spectra of ^{22}Na , ^{137}Cs and ^{207}Bi were measured with the detector. The energy dependent resolution below 2000 keV for the detector was determined by estimating the standard deviation of the photopeak fitted with gaussian function, and χ^2 fitting using Nardi's empirical formula. The measured spectra of ^{22}Na and ^{137}Cs were compared with the broadened spectra which were obtained by broadening the calculated γ -ray deposition spectra with the energy dependent resolution. The absolute efficiency and the intrinsic peak efficiency of the detector were obtained by calculating the γ -ray deposition spectrum with the code.

* 正會員 : 부산수산대학교 물리학과
(Dept. of Physics, Nat'l Fisheries Univ.)

** 부산수산대학교 물리학과
(Dept. of Physics, Nat'l Fisheries Univ.)

o 부산대학교 물리학과
(Dept. of Physics, Pusan Nat'l Univ.)

<접수일자 : 1995년 >

* 본 논문은 1994년 농원 재단의 지원에 의한 것임

1. 서론

Bismuth germanate ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) 단결정(일명 : BGO)은 Bi^{3+} 를 활성제로 하는 섬광체로서 Bi의 높은 원자 번호에 기인하는 좋은 저지능(stopping power)을

가지므로 감마선 광전 peak 검출 효율이 다른 감마선 검출기에 비해 좋을 뿐 아니라, 물리적으로 단단하고, 화학적으로 활성도 없고, 조해성도 가지지 않으므로 검출기의 크기를 제한 받는 장소에서는 감마선 검출기로써 많이 이용되는 것으로 알려져 있다^[1].

BGO 검출기에 대한 특성 연구중 Monte Carlo 법을 이용한 특성 연구^[2]는 simulation을 통하여 검출기의 감마선 에너지 deposition 스펙트럼 계산할 수 있어 많은 각광을 받고 있다. 그러나 이런 simulation을 위해서는 대형 계산기가 필요하고, 또한 많은 시간이 소요되는 불편이 있다. 본 연구에서는 personal computer에서 사용할 수 있는 간단한 에너지 deposition 계산 code를 만들고, 방사성 선원의 위치에 따라 계수율에 영향을 받지 않는 구형의 BGO 섬광 검출기를 제작하여 이에 적용시켜 보았다. 또한 작성한 에너지 deposition 계산 code를 이용하여 제작된 구형 BGO 검출기의 특성인 절대 검출 효율 및 고유 peak효율을 계산한 후, 그 값을 실험 값과도 비교하였다.

BGO 섬광 검출기에 대한 감마선 에너지 deposition 스펙트럼을 계산할 때에는 검출기의 크기, 구성물질, 감마선과 물질과의 상호작용인 콤프톤 산란 단면적, 광전 단면적, 쌍생성 단면적 및 전자와 양전자의 저지능 등을 고려하였다.

또한 측정 감마선 스펙트럼의 광전 peak로부터 얻어진 분해능을 이용하여 계산된 감마선 에너지 deposition 스펙트럼을 펄치로서 측정 감마선 스펙트럼과도 비교하였다.

2. 이론

1) 에너지 deposition 스펙트럼 계산

방사선의 선속과 에너지는 검출기와 전자회로에 의해서 측정된다. 즉 방사선의 측정스펙트럼 $M(h)$ 는 선원스펙트럼 $S(E')$ 와 검출기의 응답함수 $R(E',h)$ 에 의해서 결정되는데, 다음과 같다^[3].

$$M(h) = \int_0^{\infty} R(E',h) \cdot S(E') dE' \quad (1)$$

여기서 $M(h)dh$ 는 h 와 $h+dh$ 사이의 파고로 측정될 입자수를, $R(E',h)dh$ 는 에너지 E' 인 감마선이 검출기에 입사했을 때 h 와 $h+dh$ 사이의 파고를 생기게 할 확률

을 나타낸다. 그리고 $S(E')dE'$ 는 E' 와 $E'+dE'$ 사이의 에너지로서 선원에서 방출되는 입자수를 뜻한다. 응답함수 $R(E',h)$ 는 에너지 deposition 스펙트럼 $D(E',E)$ 와 분해능함수 $G(E,h)$ 로 부터 결정되며, 다음과 같다^[4].

$$R(E',h) = \int_0^{\infty} D(E',E) \cdot G(E,h) dE \quad (2)$$

여기서 $D(E',E)dE$ 는 에너지 E' 의 감마선이 E 와 $E+dE$ 사이의 에너지를 검출기에 부여할 확률이고, $G(E,h)dh$ 는 검출기에 부여된 에너지 E 에 의하여 h 와 $h+dh$ 사이의 파고를 생기게 할 확률인데, 분해능 함수 $G(E,h)$ 는 다음과 같은 Gauss 함수로 나타낸다^[5].

$$G(E,h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(E-h)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

여기서 σ 는 표준 편차를 나타낸다.

에너지 스펙트럼 계산할 경우에는 감마선 에너지 deposition 스펙트럼 $D(E',E)$ 를 Monte Carlo법으로 계산하고, 분해능함수 $G(E,h)$ 는 잘 알려진 몇 개의 방사성 선원에 대한 측정 감마선 에너지 스펙트럼의 광전 peak에 대해 Gauss 함수로 fitting을 하므로써, 몇 개의 에너지에 대한 표준 편차^[5]를 구한다. 그리고 이를 Nardi의 경험식^[6]을 이용하여 χ^2 -fitting하므로써 전 에너지에 대한 표준 편차를 구한 후, (식3)을 이용하여 분해능을 구한다.

2) 감마선과 물질과의 상호작용

일반적으로 감마선과 물질과의 상호 작용에는 3가지 상호작용이 있다. 광전효과는 감마선이 원자에 속박되어 있는 전자와 상호작용하여 감마선의 전 에너지는 소멸되고, 원자내의 속박전자가 방출되는 현상을 말하는데, 이 때 감마선 에너지가 전자의 정지질량보다 큰 경우, 상대론적 효과를 고려하여 Born 근사를 사용하면, 광전자 방출에 대한 확률인 광전 산란 단면적 σ_{ph} 는 다음과 같다.^[7,8,9]

$$\sigma_{ph} = \sigma_0 \frac{3}{2} \frac{Z^5}{137^4} \alpha^{-5} (\gamma^2 - 1)^{\frac{3}{2}} \left[\frac{4}{3} + \frac{\gamma(\gamma - 2)}{(\gamma + 1)} \right]$$

$$\cdot \left(1 - \frac{1}{(2\gamma\sqrt{\gamma^2-1})} \cdot \ln \frac{\gamma + \sqrt{\gamma^2-1}}{\gamma + \sqrt{\gamma^2+1}}\right) \quad (4)$$

여기서, σ_0 는 Thomson 산란 단면적^[9], Z 는 감마선과 상호작용하는 물질의 원자번호를, α 는 $\frac{h\nu}{mc^2}$ 을 나타내며, $h\nu$ 는 입사 감마선 에너지를, mc^2 는 전자의 정지질량 에너지를 나타낸다. 그리고 $\gamma = \frac{mc^2 + h\nu}{mc^2}$ 를 나타낸다. 따라서 광전효과는 감마선과 상호 작용하는 물질의 원자번호가 크고, 에너지가 작을수록 더 큰 효과가 일어남을 알 수 있다.

Compton 효과란 감마선과 정지해 있는 전자 사이의 비탄성 충돌 후 전자에게 일부분의 감마선 에너지만 전달해주는 현상을 말하는데, 감마선이 물질과 Compton 산란을 일으킬 확률인 Compton 산란 단면적 σ_c 는 다음과 같다.^[10]

$$\sigma_c = \frac{3}{4} \sigma_0 \left\{ \frac{1+\alpha}{\alpha^2} \left[\frac{2(1+\alpha)}{1+2\alpha} - \frac{1}{\alpha} \ln(1+2\alpha) \right] + \frac{1}{2\alpha} \ln(1+2\alpha) - \frac{1+3\alpha}{(1+2\alpha)^2} \right\} \quad (5)$$

이것은 매우 큰 에너지를 가진 감마선의 경우에는 산란되는 감마선이 일어날 확률이 점점 줄어들을 의미한다. 또한 Compton 산란 단면적 σ_c 는 전자에 의해 흡수된 에너지에 대한 흡수 단면적 $\sigma_{a,c}$ 와 산란 광자의 에너지에 대한 산란 단면적 $\sigma_{s,c}$ 의 합으로 나타낸다.

$$\sigma_c = \sigma_{a,c} + \sigma_{s,c} \quad (6)$$

여기서 산란 광자의 단면적 $\sigma_{s,c}$ 는 다음과 같다.^[9]

$$\sigma_{s,c} = \frac{3}{8} \sigma_0 \left[\frac{\ln(1+2\alpha)}{\alpha^3} + \frac{2(1+\alpha)(2\alpha^2 - \alpha - 1)}{\alpha^3(1+2\alpha)^2} + \frac{8\alpha^3}{3(1+2\alpha)^3} \right] \quad (7)$$

쌍생성이란 감마선과 원자핵 사이의 상호 작용으로써 감마선은 소멸되고 전자와 양전자의 쌍이 발생하

는 현상을 말하는데, 쌍생성 단면적 σ_{pp} 는 다음과 같다.^[11,12]

$$\sigma_{pp} = \frac{3\sigma_0}{8\pi} \frac{Z^2}{137} [0.7854\varphi_0](\alpha < 4.2) \quad (8)$$

$$\sigma_{pp} = \frac{3\sigma_0}{8\pi} \frac{Z^2}{137} [0.7760\varphi_0 + 0.0180\varphi_0^2](\alpha \geq 4.2) \quad (9)$$

여기서 φ_0 와 L , β 는 다음과 같이 표현된다.

$$\varphi_0 = \left(1 - \frac{2}{\alpha}\right) \left\{ \frac{4}{3} \left(1 - \frac{1}{\alpha^2}\right) (L-1) - \frac{4}{\alpha^2} \beta(\beta-1) - \frac{16}{\alpha^4} \beta(L-\beta) \right\} \quad (10)$$

$$L = \frac{2\alpha^2}{\alpha^2 - 4} \ln \frac{\alpha}{2} \quad (11)$$

$$\beta = \frac{1}{\left(1 - \frac{4}{\alpha^2}\right)^{1/2}} \cdot \ln \left\{ \frac{\alpha}{2} + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 - 1} \right\} \quad (12)$$

따라서 쌍생성은 원자번호가 큰 물질일수록, 입사 감마선 에너지가 클수록 큰 효과를 나타남을 알 수 있다.

각 단면적의 경우 근사적으로 계산된 값이지만, 실제 측정된 산란 단면적과는 감마선 에너지가 5 MeV 이하의 전 에너지 구간에서는 0.5% 오차를 나타내었다.^[13,14]

감마선과 물질과의 상호 작용으로 상호 작용 물질 속의 전자에게 감마선이 에너지를 잃어버리는 현상은 산란 광자에 영향을 받지 않기 때문에 전 선형 감쇠 계수 (total linear attenuation coefficient) μ 는 다음과 같이 표현된다

$$\mu = n_0 \sigma_p + Z n_0 \sigma_{a,c} + n_0 \sigma_{pp} \quad (13)$$

이 때 n_0 은 감마선과 상호 작용하는 물질의 단위 체 적당 원자의 수를 나타낸다.

따라서 감마선의 평균 자유 행로 λ 는

$$\lambda = \frac{1}{\mu} \quad (14)$$

에 의해 얻어진다.^[9]

3. 실험 방법

1) 감마선 파고스펙트럼 측정

반지름이 1.25 cm 인 구형 BGO 섬광검출기로 방사성 표준선원 ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{207}Bi 의 감마선 에너지 스펙트럼을 측정하였다. 표1은 방사성 측정에 사용된 선원의 특성을 나타내는데, 감마선 방출 에너지 및 방출 감마선 수를 나타내었다. 측정시 각선원의 방사능은 ^{22}Na 은 0.445 kBq 이고, ^{137}Cs 은 0.506 kBq이며, ^{207}Bi 은 27.430 kBq 이다. 그림 1은 구형 BGO 섬광 검출기에 대한 감마선 에너지 스펙트럼을 계산 및 측정을 통하여 얻기 위한 기하학적 구조를 나타내는데, 방사성 선원은 반지름이 1.5 cm 원판의 중심에 0.1 cm 크기로 밀봉된 선원이며, BGO 검출기 정면 1.5 cm에 이 선원을 두고 에너지 스펙트럼을 계산 및 측정 하였다. 이 때 측정에 사용한 BGO 섬광 검출기의 BGO 섬광체는 Czochralski 법으로 순도 99.999% 의 Bi_2O_3 와 GeO_2 를 mol 비 2 : 3 으로 혼합하여 11시간 동안 1,2차 소결과정을 거쳐 제작되었다. 제작된 BGO와 정방형으로 상용화된 BGO의 재원은 표2와 같은데, 비교적 일치하였다.

제작된 BGO 섬광체를 반지름 1.25 cm의 구형으로 깎아 광전자 증배관에 부착하였는데, 이 때 사용한 광전자 증배관은 R1858로 Hamamatsu 제품이고, 반지름은 2.54 cm이다. BGO 섬광체를 광전자 증배관에 부착할 때에는 구형 BGO 섬광체를 광전자 증배관에 맞게 반지름이 0.45 mm인 원형 평면으로 자른 다음 광전자 증배관에 부착하였다. 이 때 광전자 증배관이 BGO 섬광체보다 크기가 크므로, 부착 후 남은 여분의 지점으로 다른 광이 들어가지 못하도록 차폐하였다. 또한 BGO의 높은 굴절률($n=2.15$)로 인한 광전자 증배관으로의 빛투과 효과를 최대한으로 높여 주기 위하여 광전자 증배관과 BGO 결정사이에 실리콘 광학 그리스로 중간 어울림 층을 형성시켜주었다. 그리고 BGO 섬광체를 빠져나가는 섬광을 줄이기 위해 반사체로는 BaSO_4 를 사용하였다. 이 때 High voltage 공급장치에서 광전자 증배관에 가해진 인가전압도 -1700 ~ -1900V까지 50 V간격으로 변화시켜면서 그 분해능의 변화를 조사하였다.

방사선에 의해 BGO 검출기에 발생한 측정신호는 광전자 증배관을 통해, 전치 증폭기에서 1차 증폭된 다음, 주 증폭기에서 2차 증폭되어 다중과도분석기에서 각각 3600초 동안 기록되었다. 또한 background의 감

마선 에너지 스펙트럼도 같은 시간 동안 측정하여 실제 방사성 선원으로부터 얻어진 에너지 스펙트럼에 대하여 background 효과를 제거해 주었다.

표 1. 측정에 사용한 방사성 동위원소의 특성

Table 1. The property of the measured radioactivities

선원	반감기(년)	방출 감마선 에너지	방출 감마선수(%)
^{137}Cs	30.17	662 keV	85.5
		511 keV	180.8
^{22}Na	2.60	1275 keV	100.0
		570 keV	87.9
^{207}Bi	38.40	1064 keV	61.4
		1770 keV	6.9

표 2. BGO 섬광체의 특성

Table 2. the property of BGO scintillator

	^{137}Cs resolution	Decay constant (n sec)	Wave length (n m)	Density (g/cm^3)
Sheperical (본실험)	22%	290	480	7.12
Cubic	15%	300	480	7.13

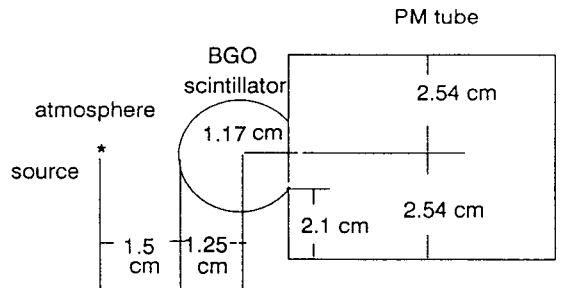


그림 1. 에너지 deposition 스펙트럼 계산 및 측정에 이용된 기하학적 구조

Fig. 1. the geometry of the model used for calculating and measuring energy deposition spectrum

2) 감마선 에너지 스펙트럼 계산

본 연구의 계산에 이용된 입사 감마선의 에너지는 511 keV, 570 keV, 662 keV, 1064 keV, 1275 keV, 그리고 1770 keV 였으며, 감마선 입사는 검출기의 정면 앞 방향 1.5 cm에서 검출기에 입사하는 것으로 가정하여, 난수 발생 법으로 계산하였는데, 입사 감마선수는 10^7 이었다.

감마선의 추적은 실제로 물리적 과정을 재현하는 방법으로 행하여진다. 감마선이 물질(공기 및 BGO 검출기)에 입사되면, 광전, 쌍생성, Compton반응이 일어난다. 그 각 단면적은 물질마다 모두 다르게 나타난다. 본 연구에서 측정에 이용된 감마선 선원의 에너지는 2000 keV 이하영역이므로, 계산의 경우도 2000 keV 이내만 고려하였다. 따라서 감마선 계산 스펙트럼에서는 광전효과와 Compton효과만 대체로 나타남을 알 수 있다. 감마선의 추적은 먼저 입사 감마선 에너지에 대한 상호작용 물질(공기와 BGO)의 광전단면적, 쌍생성단면적, Compton단면적 및 전단면적을 계산하고, 이를 이용하여 전 선형 감쇠 계수를 계산한 후, 감마선 평균자유행로를 계산하는 것으로 시작하였다. 이렇게 계산된 전단면적과 감마선 평균자유행로에 난수를 발생시켜, 감마선과 BGO와의 반응종 일어날 수 있는 반응과 최초의 반응지점을 결정하였다. 이 때 계산에 고려한 매질의 차원은 3차원이다. 물질과 입사 감마선과 일어나는 반응이 Compton 반응일 경우에는 Compton 최대 에너지를 계산한 후, 그 에너지에 대한 난수를 발생시켜 검출기에 검출 가능한 에너지를 결정한다. 이 때 각각의 에너지에 대한 weight는 미분 산란 단면적을 고려하여 계산하였다. 또한 검출기에 검출 가능한 에너지로부터 정확하게 검출될 에너지를 결정하기 위해서 감마선으로부터 에너지를 부여받은 전자의 추적을 계속한다. 전자는 Tabata의 실험식¹⁵⁾을 이용하여 저지능을 계산한 후, 실제로 전자가 BGO 섬광체 속에서 움직일 수 있는 거리를 계산하여, 검출기 내부에서 에너지를 모두 잃어버리는지를 결정한다. 만약 검출기 내부에서 모든 에너지를 잃어버리지 않을 경우에는 검출기 내부에서 잃어버리는 에너지를 BGO내에서의 전저지능을 고려하여 검출기에 검출될 정확한 에너지를 계산하고, 검출기의 memory에 그 정보를 기억시킨다.

일어나는 반응이 광전반응이라면 입사 감마선 전 에너지를 부여받아 발생한 전자에 관한 정보를 위와 같은 방법으로 memory에 기억시키고, 반응이 쌍생성이라면 입사 감마선에 의해 발생하는 전자와 양전자에 관한 에너지 정보를 같은 방법으로 memory에 기억시킨다. 양전자의 추적은 양전자의 저지능¹⁴⁾을 이용하여 계산하였다. 그림 2는 BGO 섬광체에 대한 광전, 쌍생성, Compton 효과에 의한 전선형 감쇠 계수를 나타낸다. 감마선 에너지가 2000 keV이하의 경우에는 평균 자유 행로가 검출기의 크기에 비해서 작아서 한번 반

응 후 다시 반응할 확률이 존재함을 알 수 있는데, 한번 반응후 검출되고 남은 감마선 에너지가 존재하는 경우 다시 이 남은 감마선 에너지를 입력하여 이 과정을 반복적으로 시행한다.

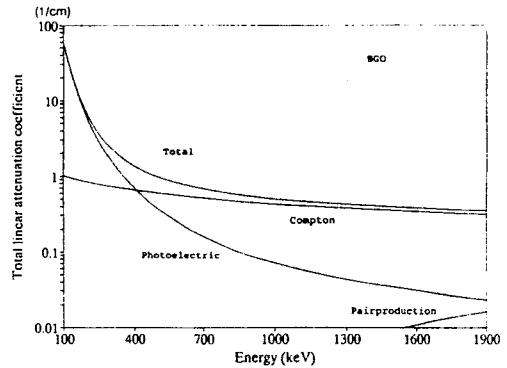


그림 2. BGO 섬광체의 감마선에 대한 전 선형 감쇠 계수

Fig. 2. The total linear attenuation coefficient of the γ -ray for BGO scintillator

4. 결과 및 논의

그림 3은 입사감마선 에너지가 511, 1275 keV 인 경우에 대하여 계산된 deposition스펙트럼을 나타내는데, Compton 산란 효과 및 광전peak 를 볼 수 있으며, 에너지가 증가할수록 Compton 산란 단면적과 광전 단면적은 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 입사 감마선과 물질과의 반응중 광전 반응이 일어날 경우 감마선과 물질과의 첫번째 상호작용 지점이 검출기의 가장 자리에 위치해서 입사감마선 에너지를 모두 흡수한 전자가 검출기 밖까지 나가는 현상이 발생해서, 전자의 전 에너지가 검출기에 모두 흡수되지 못하고 그 일부분만 흡수됨을 볼 수 있다.

에너지 deposition 스펙트럼으로부터 검출기에 측정된 에너지스펙트럼을 재현하기 위하여서는 검출기의 에너지 의존적 분해능 및 에너지 교정 곡선을 고려하여야 하는데, 에너지 의존적 분해능은 ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{207}Bi 방사성 선원의 광전peak에 대한 FWHM(full width half maximum)을 구하고, $\sigma = \frac{\text{FWHM}}{2.35}$ 를 이용하여, 이에 대한 표준편차 σ 를 구한 후, 최소사승법 fitting을

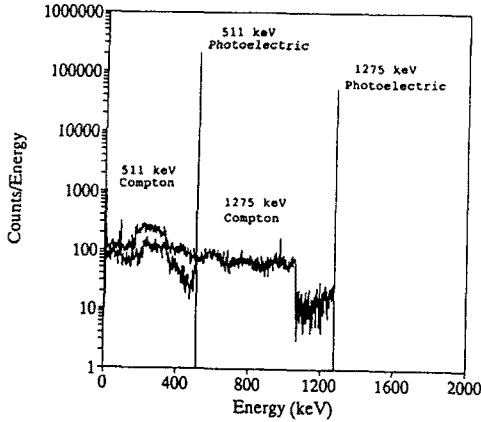


그림 3. 구형 BGO 섬광 검출기에 대한 감마선 deposition 스펙트럼

(입사감마선이 511 keV, 1275 keV 인 경우)

Fig. 3. The γ -ray deposition spectrum of the spherical BGO detector

(the incident γ -ray energy : 511 keV and 1275 keV)

하므로써 전 에너지 구간에 대한 분해능을 구하였다. 이 때 최소자승법에 이용된 식은 Nardi의 경험식^[5]을 이용하였는데 다음과 같다.

$$\sigma = \sqrt{qE^2 + pE} \quad (11)$$

여기서 최소자승법에 의해 얻어진 $p=4.5071 \pm 0.0005$, $q=0.0032 \pm 0.0005$ 이었다. 그림 4는 구형 BGO 검출기의 에너지 의존적 분해능을 나타내는데,

$$R = \frac{2.35\sigma}{E}$$

을 이용하여 계산하였다^[5]. 그림 4의 \blacktriangle 는 ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{207}Bi 방사성 선원에 대한 측정값을 나타내며, 실선은 측정값을 χ^2 fitting 하여 얻은 값이다. 입사 감마선에너지가 500 keV에서 2000 keV일 경우 반지름 1.25 cm 인 구형 BGO 섬광 검출기의 분해능은 약 20 %였다. 그림 5는 계산에 이용된 측정 스펙트럼으로 High voltage 가 -1800V 일 때 얻어진 스펙트럼인데, -1800 V 일 때 통계 오차를 잘 만족하였다. 그림5의 괄호 안의 숫자는 분해능에 대한 통계오차를 나타낸다.

광분률 (photofraction)은 측정 스펙트럼에서 광전 peak 아래면적과 전체반응면적의 비율로 입사된 감마

선이 검출기내에서 상호작용을 통해 전 에너지를 잃어 버릴 확률에 대한 직접적인 측정을 나타낸다. 제작된 구형 BGO 검출기의 100 keV이상의 감마선에 대한 측정 광분률값은, ^{22}Na 의 511 keV, 1275 keV 감마선의 경우에는 $74.6 \pm 3.5 \%$, $58.2 \pm 2.5 \%$ 이고, ^{137}Cs 의 662 keV 측정 감마선의 경우에는 $64.2 \pm 3.3 \%$ 이었다. 감마선 에너지 deposition 스펙트럼 계산 code를 이용하여 얻은 광분률은 입사감마선 에너지가 511 keV일 경우 $78.2 \pm 2.1 \%$ 이며, 1275 keV 일 경우에는 $59.5 \pm 2.5 \%$ 이다. 또한 입사 감마선 에너지가 662 keV 일 경우에는 $65.3 \pm 2.3 \%$ 이었다. 이 때 측정 및 계산에 있어서 오차는 통계 오차를 나타내며, 오차 한계 이내에서 비교적 계산값은 측정값과 잘 일치하였다. 또한 측정에너지 스펙트럼과의 계산 에너지 스펙트럼을 비교할 경우에는 에너지 교정 곡선이 대단히 중요한 요인인데 그림 6과 같다. 그림 6의 + 는 ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{207}Bi 방사성 선원의 측정 스펙트럼의 광전 peak 를 Gauss 함수로 fitting 하여 얻은 에너지 대표점을 나타내고, 실선은 $E = a \times \text{CH\#} + b$ (E : 감마선 에너지, CH\# : channel number, a, b 는 상수)식으로 χ^2 fitting한 값을 나타내는데, $a=2.0330 \pm 0.0005$, $b=47.8770 \pm 0.0005$ 를 얻었다. 그림 6의 에너지 스펙트럼은 ^{22}Na 선원의 감마선 에너지 스펙트럼을 나타내는데, 광전peak에 대한 대표점 에너지가 잘 대응됨을 볼 수 있다. 구형 BGO 섬광 검출기의 에너지 분해능을 고려하여 deposition 계산 스펙트럼을 펼쳐서 ^{22}Na 및 ^{137}Cs 에 대한 측정 감마선 에너지 스펙트럼과 비교한 것이 그림 7-a, 그림 7-b 이다. 굵은실선은 실제 측정된 에너지스펙트럼을 나타내고, 가는실선은 Monte Carlo 법을 이용하여 계산된 에너지스펙트럼을 나타내는데 비교적 일치함을 볼 수 있다. 스펙트럼의 아래쪽 부분은 Bremsstrahlung X선에 의한 효과를 계산에 고려하지 않아 얻어진 결과로 예상되며, Compton edge 부분의 차이는 다중산란에 의한 효과를 고려하지 않아서 얻어진 결과인 것 같다. 본 연구에서는 감마선 deposition 스펙트럼 계산 code 를 이용하여 검출기의 절대 효율 및 고유 peak 효율을 측정하였다. 절대 효율은 방사성 선원이 붕괴하여 방출하는 방사선 수에 대한 검출기가 측정할 수 있는 계수의 비율을 말하며, 고유 peak 효율은 방사선이 검출기 내부에 들어온 수에 대한 검출기가 기록한 광전 peak의 계수에 대한 비율을 말한다. 표3에서는 표1 속의 방사성 선원의 각에너지에 대해 계산된 절대 효

율과 측정으로부터 얻어진 절대효율을 비교하였는데, ^{137}Cs 으로 부터 방출하는 662 keV의 경우 100 keV 이상의 에너지에 대해 측정된 절대 효율은, 계산의 경우 $1.90 \pm 0.08 \%$ 이고, 측정의 경우는 $2.10 \pm 0.30 \%$ 이었다. 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 이 때 오차는 통계오차를 나타낸다. 또한 고유 peak 효율은 계산의 경우에는 $38.50 \pm 1.62 \%$ 이고, 측정의 경우에는 $40.50 \pm 1.50 \%$ 이었다. 고유 peak 효율을 계산할 때에는 검출기의 입체각을 고려하였다.

표 3. 구형 BGO 섬광 검출기에 대한 계산 및 측정으로부터 얻어진 절대효율 및 고유 peak 효율의 비교

Table 3. Comparison the calculated absolute efficiency and intrinsic peak efficiency to the measured absolute efficiency and intrinsic peak efficiency for spherical BGO scintillation detector

감마선 방출 에너지(keV)	절대효율		고유 peak 효율	
	계산값 (%)	측정값(%)	계산값(%)	측정값(%)
511	2.70 ± 0.10	2.52 ± 0.26	65.80 ± 1.84	70.55 ± 2.30
570	2.32 ± 0.09	2.25 ± 0.28	51.35 ± 1.75	45.64 ± 1.85
662	1.90 ± 0.08	2.10 ± 0.30	38.50 ± 1.62	40.50 ± 1.50
1,064	1.65 ± 0.06	1.25 ± 0.25	28.65 ± 1.42	32.30 ± 1.45
1,275	1.34 ± 0.05	1.25 ± 0.32	22.56 ± 1.25	23.50 ± 1.35
1,770	0.95 ± 0.04	0.70 ± 0.32	18.25 ± 1.15	15.35 ± 1.14

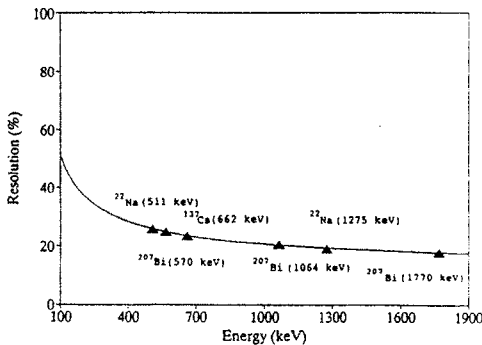


그림 4. 구형 BGO 섬광 검출기에 대한 에너지 의존적 분해능
Fig. 4. The energy dependence resolution of the spherical BGO detector

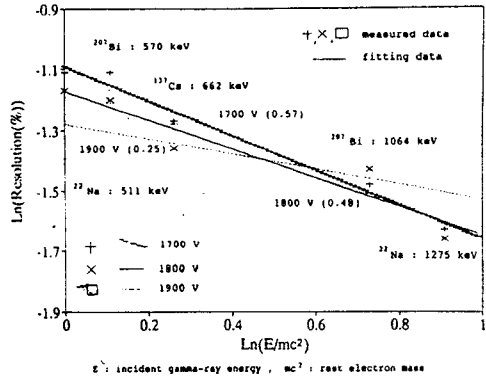


그림 5. High voltage 변화에 따른 에너지 분해능 변화
Fig. 5. The variation of energy resolution to high voltage

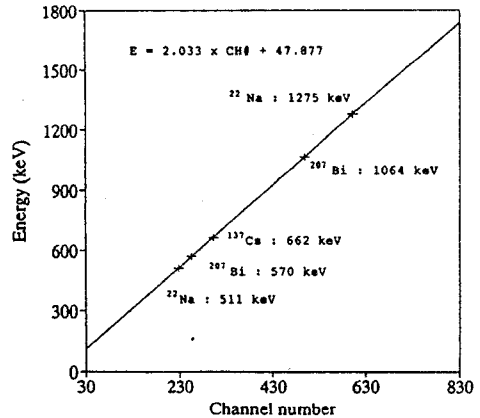


그림 6. 구형 BGO 섬광 검출기의 에너지 교정 곡선
Fig. 6. The energy calibration curve of the spherical BGO detector

V. 결론

반지름이 1.25 cm인 구형 BGO 검출기를 이용하여 방사성 선원 ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{207}Bi 의 감마선 에너지스펙트럼을 측정하였다. 감마선과 물질과의 상호 작용인 Compton산란, 쌍생성, 광전효과를 이용하여 Monte Carlo법으로 감마선 에너지스펙트럼을 계산하기 위하여 personal computer code를 작성하였다. 작성된 code를

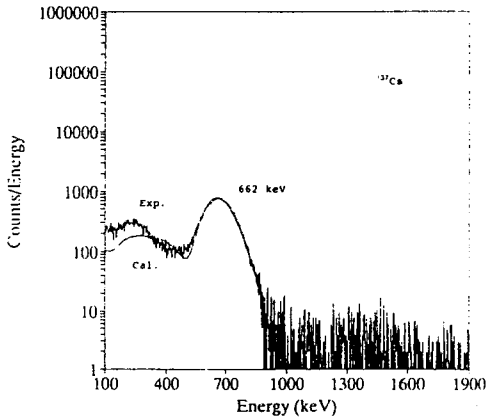
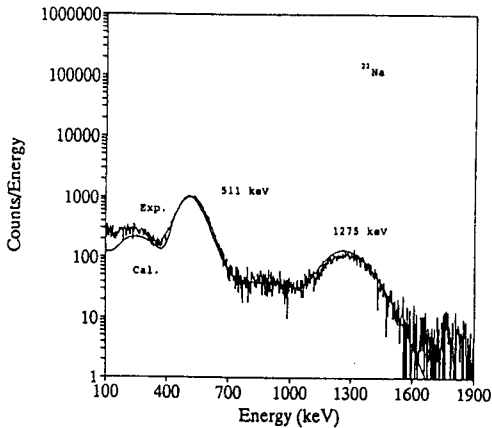


그림 7. a) ²²Na 및 b) ¹³⁷Cs의 측정 파고스펙트럼과 계산 파고스펙트럼의 비교

Fig. 7. The comparison of the measured pulse height spectra to the calculation pulse height spectra of a) ²²Na and b) ¹³⁷Cs

이용하여 ²²Na, ¹³⁷Cs, ²⁰⁷Bi 방사성 선원에 대한 에너지스펙트럼을 계산하였다. 또한 측정된 에너지스펙트럼의 광전 peak들로부터 에너지 의존적 분해능을 결정하였다. 이 에너지 의존적 분해능을 이용하여 계산 스펙트럼을 펼쳤다. 펼친 계산 에너지스펙트럼과 측정 에너지스펙트럼을 비교하여 비교적 잘 일치하였다. 또한 이를 이용하여 검출기에 대해 ¹³⁷Cs 으로부터 방출되는 100 keV 이상의 감마선에 대해 감마선 절대 효율과 고유 peak 효율을 측정 및 계산하였는데, 측정의 경우는 $2.10 \pm 0.30 \%$, $38.50 \pm 1.62 \%$ 이었고, 계산의 경우는 $1.90 \pm 0.08 \%$, $38.50 \pm 1.55 \%$ 이었으며, 그 이외의 에너

지에 대해서도 측정 및 계산이 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 앞으로는 본 연구에서 제작된 감마선 deposition 스펙트럼 계산 code를 모양 및 크기가 다른 섬광검출기에 적용하므로써 보다 많은 검출 특성을 simulation법을 통하여 조사해 보고자한다.

참고 문헌

- [1] 권수일, 임종수, 심규리, 응용물리 4, 24 (1991).
- [2] H. H. Hsu, E. J. Dowdy, G. P. Estes, M. C. Lucas, J. M. Mark, and C. E. Moss and M. E. Hamm, IEEE Transactions on Nuclear Science NS-31, 1, 390 (1984)
- [3] Y. Holler, J. Koch, and A. Naini, Nucl.Instr. and Meth. 204, 485 (1983).
- [4] K. Shin, Y. Hayshida, S. Shiroya, and T. Hyodo, J. Nucl. Sci. and Technol., 16, 390 (1979).
- [5] G. F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement", N. Y. : J. Wiley & Sons, Ch9., 1989.
- [6] E. Nardi, Nucl. Instr. and Meth., 95, 229 (1971).
- [7] K. Siegbahn " Alpha-, Beta- and Gamma-ray Spectroscopy", North-Holland, p.42-54, 1966.
- [8] M. Gavrilu, Phys. Rev. 113. 5 (1959).
- [9] 정운혁, 신편 핵물리학, 제5장 (1988).
- [10] O. Klein and Y. Nishina, Z. Physik 52, 853 (1929).
- [11] H. A. Bethe and W. Heigtle, Proc. Roy. Soc.(London)A146, 83, (1934).
- [12] P.V.C. Hough, Phys. Rev. 73, 266 (1948).
- [13] 양승준, "교육학 석사 학위 논문", 부산대학교 (1994).
- [14] T. Osaki, "Simulation of Gamma-ray and Electron especially for NaI(Tl) scintillation Detector Ver.1.6 ", Tokyo Institute of Technology (1994).
- [15] Tabata,T., Iot. R., and Okabe, S., Nucl. Instr. Meth., 103,85 (1972)
- [16] ICRU Report 37 "Stopping power for electron and positron" (1984)

著 者 紹 介

도 시 흥

『센서학회지 제3권 제2호』 논문 95-4-3-02 참조.
현재 부산 수산대학교 교수.

정 중 현

『센서학회지 제3권 제2호』 논문 95-4-3-02 참조.
현재 부산 수산대학교 교수.

김 중 일

『센서학회지 제3권 제2호』 논문 95-4-3-02 참조.
현재 부산 수산대학교 물리학과 박사 과정.

김 기 동

『센서학회지 제3권 제2호』 논문 95-4-3-02 참조.
현재 부산대학교 기초과학 연구소 전임 연구원.



박 홍 기

1984년 경희대학교 전자공학과 졸업. 1986년 경희대학교 대학원 전자공학과 석사과정 졸업. 현재 부산 수산대학교 물리학과 박사 과정. 김천 전문대학 물리치료학과 부교수. 주관심 분야 : 방사선 물리

이 대 원

『센서학회지 제3권 제2호』 논문 95-4-3-02 참조.
현재 부산대학교 물리학과 교수.



주 민 철

1988년 부산수산대학교 물리학과 졸업. 1990년 부산수산대학교 대학원 물리학과 석사과정 졸업. 1995년 요코하마국립대학 대학원 박사 과정 졸업. 현재 부산 수산대학교 물리학과 조교. 주관심 분야 : 물질공학