

## 섬광검출기를 이용한 공기 및 수중에서의 감마선 에너지 분광 분석

김 은 숙\* · 박 재 우\*\*

### An Analysis of $\gamma$ -ray Energy Spectrum Using the NaI(Tl) Detector in the Air and Water

Eun-Sug Kim\* and Jae-Woo Park\*\*

#### ABSTRACT

This is a study carried out for analyzing the energy spectrum of the  $\gamma$ -rays emitted from the sources in the air and water using NaI(Tl) scintillation detector. The main purpose of the study is to apply the theoretical response functions, that are constructed by simplifying the response functions proposed for high-purity germanium detector, to generating the  $\gamma$ -ray energy spectrum of the scintillation detector. Experiments have been carried out to determine the empirical parameters constituting the response functions as function of  $\gamma$ -ray energy. For the  $\gamma$ -ray sources, Cr-51, Cs-137, Mn-54, Zn-65, and Na-22 are used in this experiment. The empirical parameters of the response functions determined for the  $\gamma$ -ray sources both in the air and water are compared and analyzed. It is concluded that the functional form of the parameters of the response functions and the method used in this study to determine the empirical parameters can be effectively applied to predicting the energy spectrums of various  $\gamma$ -ray sources.

**Key words** ; NaI(Tl) scintillation detector,  $\gamma$ -ray spectrum, response functions

#### 1. 서 론

최근 원자력 시설의 운영과 방사성 동위원소의 취급이 빈번해짐에 따라 방사성폐기물 및 방

사성 물질의 환경오염에 대한 관심이 높아 가고 있다. 지난 1993년에는 러시아가 동해에 방사성 폐기물을 투기하다 국제 환경 감시 단체인 그린 피스에 의해 저지 당하는 일이 있었으며 이 사건 이후 방사성 물질에 대한 대중의 관심이 한층 고조 되었다.

방사성 물질의 환경 오염을 감시하기 위하여 널리 이용되는 방법중의 하나가 감마선 스펙트

\* 제주대학교 대학원

Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

\*\* 제주대학교 에너지공학과

Dept. of Nuclear and Energy Eng., Cheju Nat'l Univ.

럼 분석을 통한 방사성 핵종의 확인이다. 본 연구의 목적은 공기와 수중에서의 감마선 스펙트럼을 비교·분석함으로써 보다 정확한 방사성 핵종 분석을 위한 데이터 베이스를 제공하는 데 있다.

본 연구의 주요 내용은 1) NaI(Tl) 검출기를 이용하여 Cr-51, Cs-137, Mn-54, Zn-65 감마선 원에 대하여 공기와 수중에서의 에너지 스펙트럼을 측정하고, 2) 측정된 스펙트럼 자료를 감마선과 물질과의 반응이론에 근거하여 구성된 응답함수(response function)에 적용하여 응답함수식의 실험계수를 결정하고, 3) 결정된 실험계수의 특성을 분석하는 과정으로 이루어진다.

일반적으로 감마선 검출기의 응답함수식은 광전효과(photoelectric effect), 콤프턴산란(Compton scattering), 쌍생성(pair production) 반응에 근거하여 구성할 수 있다<sup>(2)</sup>. 본연구에서는 응답함수식을 full energy peak, flat continuum, 1차 콤프턴산란을 고려하여 구성하였으며 각 반응에 대한 함수식은 선형 실험계수와 비선형 실험계수를 포함하고 있다. 측정된 스펙트럼 자료를 이용하여 응답함수식의 실험계수를 결정하기 위해서 CURCON 프로그램을 사용하였다.

## II. 이론

### 2.1 감마선과 물질과의 반응

감마선의 에너지가 측정되기 위해서는 일차적으로 검출기에 입사된 감마선과 검출 물질과의 반응을 통하여 감마선의 에너지가 검출 물질에 전달되어야 한다. 감마선은 알파선이나 베타선과 같은 하전입자와 달리 원자를 직접 전리시키기 보다는 검출물질과의 반응을 통하여 일차적으로 전자를 발생시키고 이 전자가 대부분의 전리 또는 여기를 시키면서 에너지를 전달하게 된다. 따라서 검출기의 출력신호는 검출물질과의 반응을 통하여 생성된 전자에 전달된 감마선의 에너지에 비례해서 나타나게 된다. 만일 검출기의 출력신호를 다중과고 분석장치(Multi-channel Pulse Analyzer)를 통하여 분광하면 특정한 반

응을 일으킨 감마선의 수에 비례하는 봉우리(peak)가 형성된다.

방사성 핵종에서 방출되는 감마선의 에너지는 대개 0.1 ~ 5 MeV 사이에 존재하며 이 에너지 범위에서 일어나는 반응은 광전효과, 콤프턴산란, 쌍생성 반응이 대부분이고 기타의 반응들은 이들 반응에 비하면 거의 무시할 정도이다<sup>(5)</sup>. 이들 반응을 통하여 전자에 전달되는 에너지는 다음에 기술하는 바와 같다.

#### 2.1.1 광전효과(Photoelectric Effect)

광전효과는 감마선과 원자의 궤도전자 사이의 상호작용이다. 이 상호작용의 결과로 감마선은 소멸되고 궤도전자가 자유전자 형태로 방출된다. 이 때 방출되는 광전자의 에너지( $E_p$ )는

$$E_p = E_\gamma - E_b \quad (1)$$

이며, 여기서  $E_\gamma$ 는 감마선의 에너지이며  $E_b$ 는 궤도전자의 결합에너지이다. 궤도전자의 결합에너지는 감마선의 에너지가 매우 작은 경우를 제외하고는 대개 무시할 정도이므로 광전반응을 일으키는 경우는 감마선의 에너지가 전부 검출 물질에 전달되는 경우이다. 이와 같은 광전효과의 결과 궤도 내의 빈자리에는 다른 궤도로부터 전자의 전이가 이루어질 때 특성 X-선 또는 Auger 전자가 방출된다. 이러한 광전효과가 일어날 단면적  $\tau$ 는 근사적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>(5)</sup>.

$$\tau \propto Z^5(E_\gamma)^{-3.5} \quad (2)$$

여기서  $Z$ 는 물질의 원자번호이다. 위의 식에서 알 수 있는 바와 같이 광전효과는 검출물질의 원자번호( $Z$ )의 5승에 비례하고 입사 감마선 에너지의 3.5승에 반비례한다.

#### 2.1.2 콤프턴산란(Compton Scattering)

콤프턴산란은 궤도전자와 감마선이 반응해서 감마선의 에너지 일부를 전자에게 전달하여 궤도전자를 이탈시키고 동시에 감마선은 산란되는 현상이다. 산란 감마선 및 Compton 전자의 에

너지는 운동량과 에너지 보존 법칙으로부터 구해진다. 산란 감마선의 에너지( $E_\gamma'$ )와 Compton 전자의 에너지( $E_c$ )는 입사 감마선의 에너지 및 산란각도( $\theta$ )의 함수로서 각각 다음과 같이 주어진다.

$$E_\gamma' = \frac{E_\gamma}{1 + a(1 - \cos \theta)} \quad (3)$$

$$E_c = E_\gamma - E_\gamma' = E_\gamma \frac{a(1 - \cos \theta)}{1 + a(1 - \cos \theta)} \quad (4)$$

여기서,  $a = E_\gamma/m_0c^2$ 이며  $m_0c^2$ 은 전자의 정지질량 에너지(0.511MeV)이다. 콤프턴산란의 반응 단면적  $\sigma$ 는

$$\sigma \propto Z \cdot f(E_\gamma) \quad (5)$$

로 주어지며  $f(E_\gamma)$ 는 감마선의 에너지에 의존하는 함수이다. 콤프턴산란은 입사 감마선의 에너지가 높아짐에 따라 전방산란 확률이 커지며 물질에 전달되는 에너지는 작아진다.

식 (3), (4)에서 보는 바와 같이 입사된 감마선이 Compton산란 반응을 일으키는 경우 검출기에 전달되는 에너지는 산란각에 따라서 변하게 된다. 즉, Compton 전자는 전각도로 산란되므로, 그 에너지 응답은  $\theta=0^\circ$ 로 부터  $\theta=180^\circ$ 까지 연속적으로 분포하게 된다. 특히  $\theta=0^\circ$  일 때  $E_\gamma' = E_\gamma$ ,  $E_c = 0$ ,가 되어 전자에 전달된 에너지가 0이 되어 반응을 하지 않은 경우와 같으며,  $\theta=180^\circ$ 일 때는  $E_\gamma' = E_\gamma/(1+2a)$ ,  $E_c = 2a \cdot E_\gamma/(1+2a)$ 가 되어 전자에 전달되는 에너지가 최대가 되는 경우이다. 또한 검출기는 일반적으로 주위를 차폐해서 사용하기 때문에 방사선원으로 부터 나온 감마선이 주위의 차폐 물질과 반응하여 콤프턴산란이 일어나 후방산란한 감마선이 검출기내로 입사되는 경우도 있다. 이 경우 입사되는 감마선의 에너지는  $E_\gamma' = E_\gamma/(1+2a)$ 와 같다.

### 2.1.3 전자쌍생성(Pair Production)

전자쌍생성은 입사 감마선이 원자핵의 Coulomb

장내에서 소멸하고 음전자와 양전자의 쌍이 생성되는 과정이다. 입사 감마선이 음전자와 양전자를 생성하기 위해서는 감마선의 에너지가 최소한도 전자의 정지 질량에너지( $m_0c^2$ )의 2배인 1.02MeV 이상 되어야 한다. 생성된 음전자와 양전자의 운동에너지를 각각  $E_p^-$ ,  $E_p^+$ 라 하면,

$$E_p^- + E_p^+ = E_\gamma - 2m_0c^2 \quad (6)$$

가 된다. 양전자는 검출 물질을 통과하면서 에너지를 모두 잃게 되면 주위의 자유전자와 결합하여 소멸하고 0.511MeV의 감마선 두 개를 발생시킨다. 쌍생성 반응의 단면적( $\chi$ )은 다음과 같이 표시된다.

$$\chi \propto Z^2 \cdot f(E_\gamma, Z) \quad (7)$$

여기서  $f(E_\gamma, Z)$ 는 감마선의 에너지와 물질의 원자번호에 의존하는 함수로서 감마선의 에너지가 증가함에 따라 증가하는 함수이다<sup>(5,6)</sup>. 따라서 쌍생성 반응의 확률은 물질의 원자번호의 제곱에 비례하고 감마선의 에너지가 증가함에 따라 증가한다.

전자쌍생성 반응을 일으키는 경우 방사선 검출기에 있어서 에너지 응답은 양전자의 소멸로 생성된 두 개의 감마선이 검출기내에서 모두 흡수되거나, 한 개만 흡수되거나, 또는 둘다 흡수되지 않는 경우에 따라서 달라진다. 먼저 두 개의 감마선이 모두 검출기에 흡수되지 않게 되면 ( $E_\gamma - 2m_0c^2$ )에 해당하는 소위 double escape란 peak가 형성되며, 한 개의 감마선만이 흡수되면 ( $E_\gamma - m_0c^2$ )의 위치에 single escape란 peak가 형성된다. 두 개의 감마선이 모두 흡수되는 경우는 입사된 감마선의 에너지에 해당하는 peak가 형성된다.

### 2.2 검출기의 응답함수

앞서 언급한 바와 같이 방사선 검출기의 출력 신호는 검출 물질에 흡수된 방사선 에너지가 전기적 신호의 변환 매체인 전하 운반체로 변환됨으로써 형성되며 출력 신호의 크기는 최종적으로

로 수집되는 전하 운반체의 수에 의해서 결정된다. 같은 에너지의 방사선이 검출 물질에 완전히 흡수되더라도 최종적으로 수집되는 전하 운반체의 수는 방사선마다 일정하지 않으며 통계적으로는 평균치에 대하여 대칭인 분포를 갖게 된다. NaI(Tl) 검출기인 경우 방사선의 에너지가 섬광으로 변환되고, 이 섬광이 광음극에 흡수되어 광전자가 방출되며, 방출된 광전자는 광증폭관(Photo-multiplification Tube)에서 그 수가 증배되어 양극에 수집되는 단계를 거친다. 이러한 다단계 과정을 거침에 따라 양극에 수집되는 전자의 수는 통계적인 요동이 커지며 결과적으로 Gaussian 분포를 갖게 된다. 따라서 검출기의 응답함수는 검출기에 흡수되는 에너지를 Gaussian 분포의 평균값으로 하여 folding 함으로써 구할 수 있다.

$S(E')$ 의 에너지 분포를 갖는 방사선이 검출기에 완전히 흡수되는 경우 검출기의 출력 신호의 분포를 나타내는 응답함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>(9)</sup>.

$$f(E) = \int_0^\infty R(E, E')S(E')dE' \quad (8)$$

여기서  $R(E, E')$ 는 검출기에 흡수된 에너지가  $E'$ 일 경우 출력되는 에너지  $E$ 의 분포를 나타내는 folding 함수로서 다음과 같은 Gaussian 분포 함수로 표시된다.

$$R(E, E') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}B} \exp\left[-\frac{(E-E')^2}{2B^2}\right] \quad (9)$$

여기서  $B$ 는 Gaussian 분포의 편차를 나타내는 변수이다.

에너지가  $E_0$ 인 감마선이 검출기에 입사되는 경우 검출기에 실제 흡수되는 에너지는 앞서 기술한 감마선과 물질과의 반응에 의해서 결정된다. 따라서 입사되는 감마선의 에너지에 대한 검출기의 응답함수는 각 반응에 따라 검출기가 흡수하는 에너지를 구한 후 식 (8)을 이용하여 folding 하면 얻을 수 있다. 본 연구에서는 문헌

[2]에 보고된 고순도 게르마늄(HpGe) 검출기의 응답함수에 근거하여 응답함수식을 구성하였다.

### 2.2.1 전에너지 봉우리(Full Energy Peak)

전에너지 봉우리는 주로 광전효과에 의하여 입사 감마선의 에너지가 검출기에 전부 흡수되는 경우 얻어지는 peak로서 에너지가 낮은 감마선에서 반응 확률이 높게 나타난다. 이 경우 검출기에 흡수되는 에너지의 분포는 delta 함수로서  $S(E') = \delta(E' - E_0)$ 로 표시되며 이것을 식 (8)에 대입하여 구한 응답함수는 다음과 같다.

$$f_1(E_0, E) = \widehat{A}_1 \exp\left[-\frac{(E-E_0)^2}{2B_1^2}\right] \quad (10)$$

$$\widehat{A}_1 = \frac{A_1}{\sqrt{2\pi}B_1}$$

여기서  $E_0$ 는 입사되는 감마선 에너지이며,  $B_1^2$ 은 전에너지 봉우리에 해당하는 Gaussian 분포의 분산에 해당하는 계수이고,  $A_1$ 은 봉우리의 높이에 비례하는 계수이다.

### 2.2.2 전에너지 봉우리의 저에너지 꼬리(Low Energy Tail on the Left Side of the Full Energy Peak)

전에너지 봉우리는 검출기 내부에 생성된 전하 운반체가 전부 수집된 경우는 봉우리를 중심으로 좌우 대칭형이 된다. 그러나 실제에 있어서는 검출기의 불순물 및 표면 효과에 의한 영향으로 전하 운반체의 일부가 검출기 외부로 이탈하게 되어 불완전한 전하 수집이 일어난다. 이 경우 전에너지 봉우리의 왼쪽(저에너지 영역)에는 상대적으로 계수치가 높게 되어 지수함수 형태의 꼬리가 나타나게 된다. 이러한 현상을 반영한 응답함수는 다음과 같이 된다.

$$f_2(E_0, E) = A_2 \exp\left[\frac{(E-E_0)}{\sqrt{2}B_1B_2}\right] \times \quad (11)$$

$$\operatorname{erfc}\left[\frac{(E-E_0)}{\sqrt{2}B_1} + \frac{1}{2B_2}\right]$$

여기서  $A_2$ 와  $B_2$ 는 각각 저에너지 꼬리부위의 높이와 분산을 나타내는 계수이다.

### 2.2.3 Flat Continuum

일반적으로 검출기의 출력신호를 분광하면 입사되는 감마선 에너지  $E_0$  이하에서는 모든 에너지에 걸쳐 균일한 에너지 응답이 나타나게 된다. 이러한 현상을 반영하는 응답함수는 계단함수로 표시되는 흡수에너지 분포를 식 (8)에 대입하여 folding함으로써 구할 수 있다.

$$f_3(E_0, E) = A_3 \operatorname{erfc} \left[ \frac{(E - E_0)}{\sqrt{2}B_1} \right] \quad (12)$$

여기서  $A_3$ 는 flat continuum의 높이를 나타내는 계수이다.

### 2.2.4 1차 콤프턴산란 (Single Scatter Compton Continuum)

콤프턴산란에 의하여 산란된 감마선은 곧바로 검출기를 이탈하거나 2차 또는 3차의 콤프턴산란 반응을 거친 후에 검출기를 빠져나가거나 흡수된다. 이 경우는 1차 콤프턴산란 반응을 한 것으로 산란반응을 통하여 전자에 전달된 에너지에 의해 스펙트럼상에 연속 분포로 나타나게 된다. 반도체 검출기인 경우 앞서 인용한 논문 [1,2]에서는 2차, 3차 콤프턴산란 반응항을 고려하고 있으나 저에너지인 경우는 거의 나타나지 않으므로 제외하였다. 콤프턴산란 반응으로 검출기에 흡수된 에너지 분포는 식 (4)와 같이 표시되며 이것을 식 (8)에 대입하여 구한 응답함수는 다음과 같다.

$$f_4(E_0, E) = A_4 \left[ \frac{E_0}{E'} + \frac{E'}{E_0} - 1 + \cos^2 \theta \right] \times \operatorname{erfc} \left[ \frac{(E - B_3)}{\sqrt{2}B_4} \right], \quad (13)$$

$$E \leq E_0$$

$$E' = E_0 - E, \cos \theta$$

$$= 1 + m_0 c^2 / E_0 - m_0 c^2 / E'$$

여기서,  $B_3$ 은 산란 각도가  $180^\circ$  일 때 전자에 전달된 에너지이며(Compton edge),  $B_4$ 는 Compton edge에서의 분산을 나타내는 계수이다.  $A_4$ 는 Compton edge에서 봉우리의 높이를 나타내는 계수이다.

### 2.2.5 Single Escape 봉우리

입사되는 감마선의 에너지가 1.02MeV 보다 훨씬 큰 경우에 필요한 항으로 0.511MeV의 에너지를 갖는 한 개의 소멸 감마선이 검출기를 빠져나가고 나머지 한 개는 검출기에 흡수된 경우이다. 이 경우 전에너지 봉우리로부터 0.511 MeV 아래 위치에 single escape 봉우리가 나타나므로 응답함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$f_5(E_0, E) = \widehat{A}_5 \exp \left\{ - \frac{[E - (E_0 - 0.511)]^2}{2B_1^2} \right\} \quad (14)$$

$$\widehat{A}_5 = \frac{A_5}{\sqrt{2\pi}B_1}$$

여기서  $A_5$ 는 single escape 봉우리의 높이를 나타내는 계수이다.

### 2.2.6 Double Escape 봉우리

쌍생성반응 결과 생성된 두개의 소멸 감마선이 모두 검출기를 빠져나가 검출기에는  $E_0 - 1.022$  MeV의 에너지가 흡수되는 경우를 나타낸 것으로 스펙트럼에는 전에너지 봉우리로부터 1.02 MeV 아래 위치에 double escape 봉우리가 나타난다. 이 경우 응답함수는 다음과 같다.

$$f_6(E_0, E) = \widehat{A}_6 \exp \left\{ - \frac{[E - (E_0 - 1.022)]^2}{2B_1^2} \right\} \quad (15)$$

$$\widehat{A}_6 = \frac{A_6}{\sqrt{2\pi}B_1}$$

여기서  $A_6$ 는 double escape 봉우리의 높이를 나타

타내는 계수이다.

### 2.3 응답함수식의 구성

위와 같이 단일 에너지 감마선이 입사되더라도 감마선과 물질과의 반응과 계측의 통계적 요동에 의하여 검출기의 출력신호는 다양한 크기를 갖게된다. 따라서 검출기의 궁극적 응답함수식은 다음과 같은 식 (10)~(15)의 선형적 조합으로 표시될 수 있다.

$$R(E_o, E) = \sum_{i=1}^6 f_i(E_o, E) \quad (16)$$

윗식에서 식  $f_5$ 와  $f_6$ 은 입사 감마선 에너지가 1.02MeV 이상인 경우에만 적용되는 항이다. 본 연구에서는 비교적 부피가 큰 6"×6" NaI(Tl) 검출기를 사용하였으며 저에너지 영역의 감마선원을 사용하였기 때문에 앞서 문헌[2]에 보고된 고순도 게르마늄 검출기를 이용한 연구에서의 응답함수를 단순화하여 사용하였다. NaI(Tl) 검출기는 반도체 검출기보다 생성된 전하 수집 효율이 좋기 때문에 불완전 전하 수집으로 인하여 생기는 전에너지 봉우리의 저에너지 꼬리 부위에 해당하는 식 (11)항을 무시하였다. 따라서 최종적인 응답함수식은 식 (10), (12), (13)으로 구성하였다.

앞서 구성한 응답함수식을 이용하여 실험에서 측정된 자료를 해석하기 위해서는 응답함수에 사용된 각 계수를 결정해야 한다. 실험계수를 결정하기 위하여 사용된 프로그램은 CURCON<sup>(1,2)</sup>이다. CURCON 프로그램에서는 초기치를 입력하면 반복계산에 의해 응답함수의 상관계수가 결정된다.

### III. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험 장치의 배열을 나타낸 것이다. ①은 NaI(Tl) 검출기를 나타낸 것이며, ②와 ③은 각각 NIM(nuclear instrument module) 형태의 주증폭기 및 고전압 공급 장치이다. 주증폭기에서 출력되는 신호는

analog pulse 형태로서 pulse의 높이는 검출기에 흡수된 감마선의 에너지에 비례한다. ④는 개인용 컴퓨터에 장착된 다중과교분석기(Multichannel Pulse Analyzer)로서 analog pulse 신호를 내장된 Analog-to-Digital Converter(ADC)를 통하여 수치화 한 후 감마선 에너지별 계수치를 모니터상에 나타낸다. Fig. 2의 (a)는 공기중에서 스펙트럼을 측정하기 위하여 검출기를 납으로 차폐한 상태를 보여주고 있으며, (b)는 수중에서 스펙트럼을 측정하기 위하여 물로 채운 아크릴 수조에 검출기를 담근 상태를 보여주고 있다.

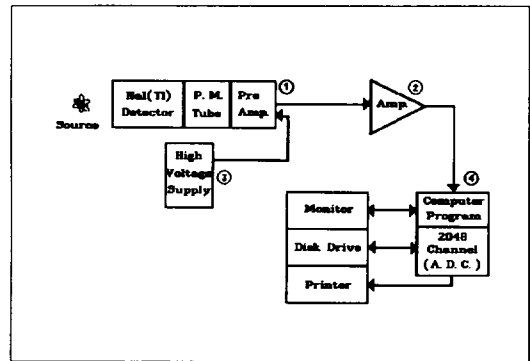


Fig. 1 Experimental arrangement of the MCA system

#### 3.1 NaI(Tl) 검출기

NaI(Tl) 섬광검출기는 감마선 에너지를 광으로 변환하는 섬광체와 섬광체의 광을 전기적 신호로 변환하는 광증배관(photomultiplier tube, PMT), 그리고 전치증폭기로 구성되어 있다.

감마선이 섬광체내에 입사하여 에너지를 잃게 되면 섬광체에 흡수된 에너지에 비례하는 양의 광을 방출한다. 방출된 광은 광증배관의 광음극에서 흡수되어 광량에 비례하는 수의 광전자로 변환된다. 방출된 광전자는 광증배관내의 dynode에 의해  $10^5$ - $10^6$ 배로 수가 증배되어 양극에 수집됨으로써 검출기에 흡수된 감마선의 에너지에 비례하는 전기적 출력신호가 발생한다. 출력신호는 전치증폭기를 통하여 일부 증폭됨으로써 주증폭기에 이르는 과정에서 발생하는 전기적

소음신호를 억제하는 효과를 가져 온다.

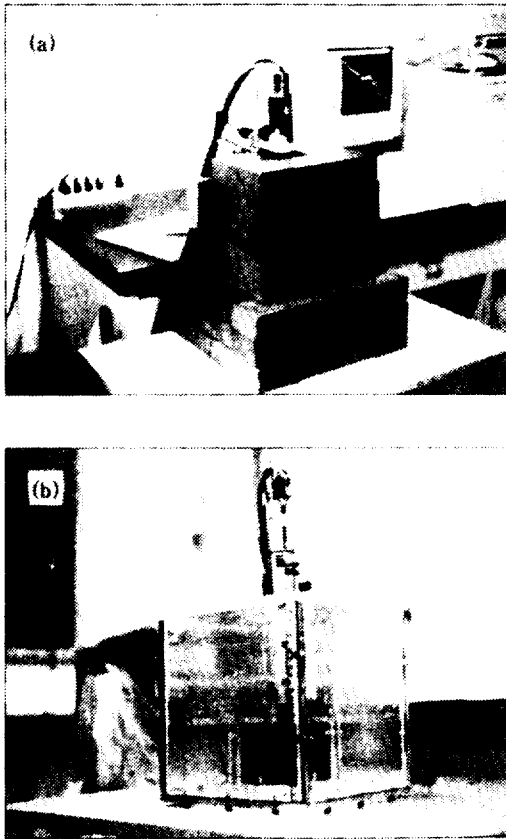


Fig. 2 Experimental setup of measuring conditions in air (a) and water (b)

Table 1 Monoenergetic  $\gamma$ -ray sources

Sources	Energy of Photons(MeV)	Half-Life
Cr-51	0.32008	27.71 day
Cs-137	0.66166	30.17 year
Mn-54	0.83484	312.5 day
Zn-65	1.11555	243.9 day

### 3.2 선원(Sources)

본 연구에 사용된 감마선원은 단일한 에너지를 방출하는 감마선원으로써 저에너지 영역의 감마선을 방출하는 선원을 사용하였다. Table 1

은 사용된 선원의 감마선 에너지와 반감기를 보여주고 있다. 감마선의 에너지 범위는 0.32008 ~ 1.115MeV에 해당된다. 이 중에서 Zn-65 선원은 전자포획에 의한 0.511MeV의 소멸 감마선을 일부 방출한다.

### 3.3 실험 방법

이 연구의 첫단계는 과정은 실험을 통하여 스펙트럼 데이터를 획득하는 과정이며 두번째 단계는 획득한 실험 데이터를 근거로 CURCON 프로그램을 실행시켜서 응답함수의 실험계수를 구하는 과정이다.

첫 단계로 공기와 수중에서 실험을 실시하였다. 공기 중에서의 실험에는 K-40 등과 같은 배경방사능의 영향을 최소화 하기 위하여 검출기를 납으로 차폐시킨 후 실시하였으며 배경 방사능을 10분간 측정하고 각각의 선원에 대하여 스펙트럼을 10분씩 측정하였다. 수중에서의 실험에는 가로, 세로, 높이가 각각 28cm×29cm×25cm인 사각 아크릴 수조에 물을 10cm 높이로 채우고 수면에 검출기의 창이 닿게 한 후 배경 방사능을 10분간 측정하였다. 또한 같은 위치에서 수조 중앙바닥에 각 선원을 고정하고 10분씩 측정하였다. 스펙트럼 분석에 사용된 데이터는 신뢰도를 높이기 위해 동일한 조건에서 반복실험을 통하여 평균치를 구하였다.

## IV. 스펙트럼 획득 및 데이터 분석

실험에서 획득한 스펙트럼 데이터는 배경 방사능을 보정한 후 채널수를 에너지로 변환하기 위하여 에너지 교정을 실시하였다. 에너지 교정에 사용된 선원은 Cs-137과 Na-22 선원이며 각각 0.662 MeV, 1.274 MeV에 해당하는 전에너지 봉우리가 나타난다. 에너지교정 결과 얻어진 채널수와 감마선의 에너지 관계식은 다음과 같다.

$$y = 1.4262303593 \cdot x - 0.0081907639 \quad (17)$$

여기서  $y$ 는 감마선의 에너지이며  $x$ 는 MCA에 나타난 채널수이다.

각 감마선원에 대해서 획득한 스펙트럼을 응답 함수식에 curve fitting하기 위해서 채널별 계수치를 전체 계수치로 나누어 정규화(normalization)하였다. 정규화된 데이터에서 fitting 영역에 해당하는 데이터를 선택하여 CURCON 프로그램을 실행시켜 응답함수에 사용된 실험계수를 결정하였다. 이 실험계수를 응답함수식에 대입하여 해당되는 감마선원의 에너지에 해당하는 응답함수를 구하였다.

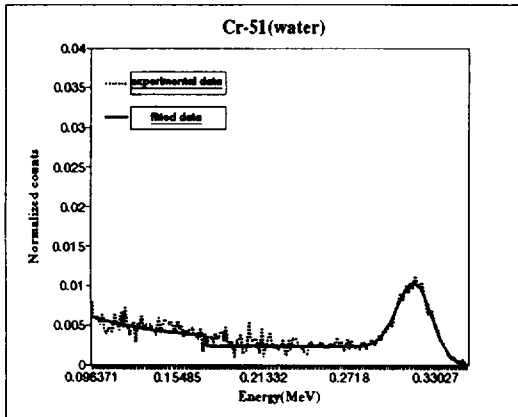
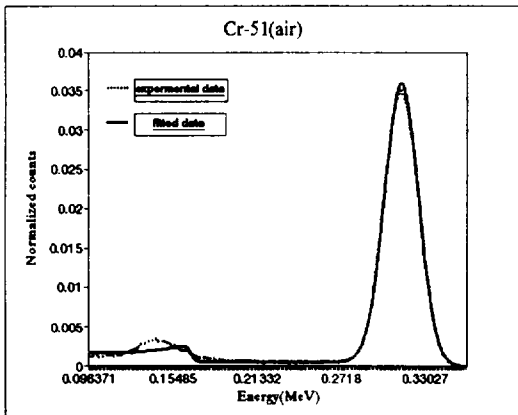


Fig. 3 Cr-51  $\gamma$ -ray energy spectrums, in air (a) and in water (b)

Fig. 3은 0.32008 MeV의 감마선을 방출하는 Cr-51에 대한 공기와 수중에서의 스펙트럼으로써

0.32 MeV에서 전에너지 봉우리가 나타나고 있으며 약 0.18 MeV 이하에서는 Compton continuum 영역이 보이고 있다. Compton continuum의 끝(Compton edge)과 전에너지 봉우리 사이의 낮은 영역은 flat continuum 영역을 나타낸다. 공기중 Compton edge 부위의 경사는 완만한 반면 수중에서는 급격한 경사를 보이고 있다. 공기중에서 측정된 스펙트럼에는 0.14 MeV 부근에서 후방산란에 의한 낮은 봉우리가 보이고 있으나 응답함수로 구한 스펙트럼에는 나타나지 않고 있는데 이것은 본 연구에 사용한 응답함수는 후방산란을 고려하지 않았기 때문이다.

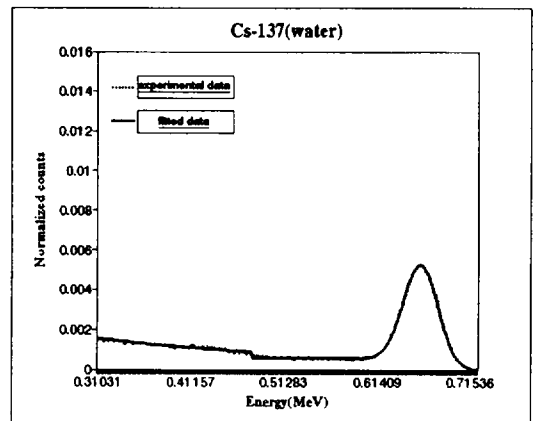
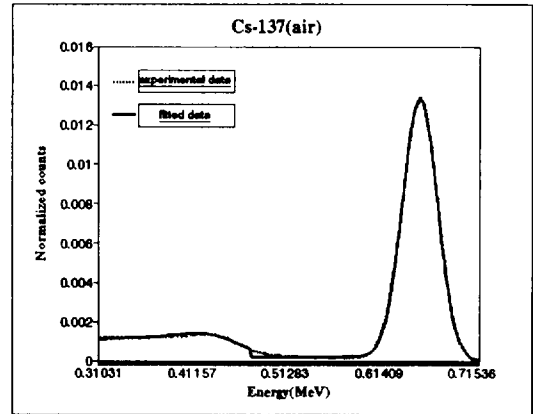


Fig. 4 Cs-137  $\gamma$ -ray energy spectrums, in air (a) and in water (b)

수중에서의 스펙트럼에는 전에너지 봉우리의 높



이는 공기중보다 낮게 나타나고 있으나 Compton continuum과 flat continuum의 높이는 높게 나타나고 있는데 이것은 물에 의해 산란된 감마선이 검출기에 입사되어 저에너지 영역에서 상대적으로 계수치가 높게 나타나기 때문이다. 또한 공기중의 Compton continuum 영역은 대체로 계수치가 고르게 분포한 반면 수중에서는 에너지가 낮아질수록 계수치가 증가함을 볼 수 있다.

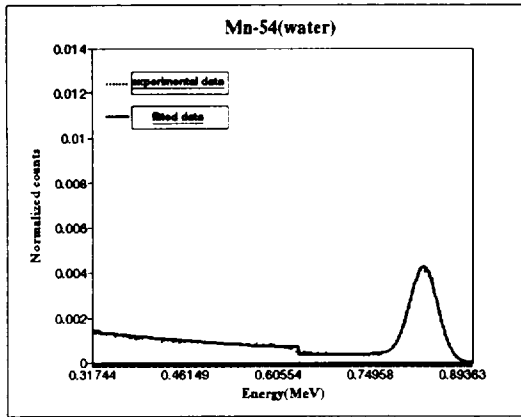
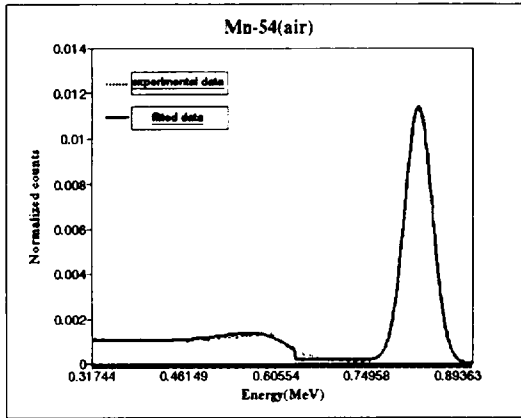


Fig. 5 Mn-54  $\gamma$ -ray energy spectrums, in air (a) and in water (b)

Fig. 4는 0.662 MeV의 감마선을 방출하는 Cs-137에 대한 스펙트럼으로 전에너지 봉우리와 Compton continuum 및 flat continuum을 보여 주고 있다. 이 경우 역시 Cr-51의 스펙트럼과 같이 수중에서 전에너지 봉우리는 낮아진 반

면 Compton continuum 및 flat continuum 영역의 계수치는 상대적으로 증가하고 있다. 그러나 에너지가 증가할수록 Compton continuum의 계수치는 공기중과 거의 같으며 Compton edge는 아주 약하게 나타나고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 5는 0.8348 MeV의 감마선을 방출하는 Mn-54의 공기중 및 수중 스펙트럼을 나타낸 것으로 스펙트럼의 특징은 앞의 경우와 유사하다. 이 경우 수중 스펙트럼의 Compton continuum은 공기중에서와 거의 같으나 에너지가 낮아질수록 계수치가 증가하고 있는 양상은 앞의 경우와 동일하다.

Fig. 6은 1.115 MeV의 감마선을 방출하는 Zn-65의 스펙트럼을 나타낸 것이다. 공기중 스펙트럼의 특징은 다른 감마선원과 유사하나 Compton continuum 영역의 계수치가 상대적으로 상당히 증가하였음을 볼 수 있다. 공기중과 수중에서의 스펙트럼을 비교하면 물에 산란된 감마선의 영향이 그다지 크지 않음을 볼 수 있다.

Table 2 Response function parameters determined by CURCON program

Energy(MeV)		0.32008	0.662	0.8348	1.115
$\hat{A}_1$	Air	0.0356597126	0.0131875384	0.0113058532	0.0079393874
	Water	0.0090413175	0.0049527319	0.0040682294	0.0030264966
$A_3$	Air	0.0002565835	0.0001111663	0.0000850358	0.0000760785
	Water	0.0011890749	0.0002976384	0.0001944788	0.0001094271
$A_4$	Air	0.0005012590	0.0003016827	0.0002661872	0.0001811489
	Water	0.0027398411	0.0004814026	0.0003670841	0.0002112323
$B_1$	Air	0.0117305356	0.0188878979	0.0215115875	0.0248196963
	Water	0.0117762038	0.0185145278	0.0212895740	0.0246037440
$B_3$	Air	0.1670104215	0.4512730528	0.6081337360	0.8726120779
	Water	0.1040830185	0.3502420200	0.4517729524	0.6770463518
$B_4$	Air	0.0036763659	0.0263733224	0.0339185182	0.0396480993
	Water	0.0542394818	0.0925771211	0.1418679651	0.1992617295

Table 2는 실험에 사용된 감마선의 에너지에 대해서 CURCON 프로그램을 이용하여 결정한 응답함수의 계수값을 보여주고 있다.  $\hat{A}_1$ 는 전에

너지 봉우리의 높이를 나타내는 계수이며,  $B_1$ 은 봉우리의 퍼진 정도를 나타내는 계수이다.  $A_3$  과  $A_4$ 는 각각 flat continuum과 Compton continuum의 높이에 비례하는 계수이다.  $B_3$ 는 Compton edge에 해당하는 에너지를 나타내며  $B_4$ 는 Compton edge 부분의 경사도를 나타내는 계수로서 값이 클수록 경사가 급하게 된다.

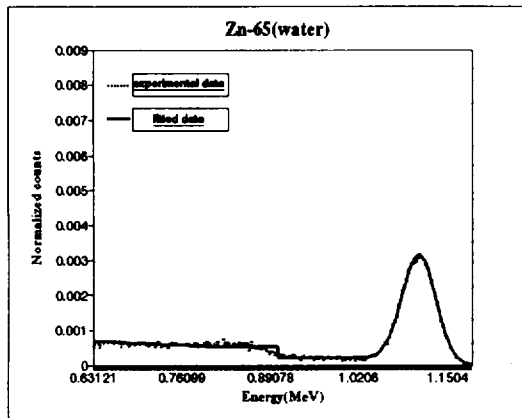
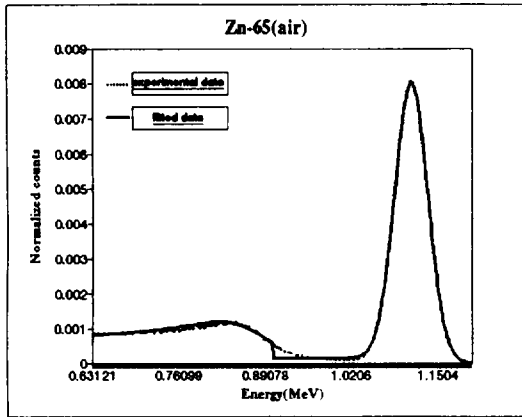


Fig. 6 Zn-65  $\gamma$ -ray energy spectrums, in air (a) and in water (b)

Fig. 7은 공기와 수중에서의 응답함수계수  $\hat{A}_1$ 을 감마선의 에너지에 대해서 나타낸 그래프이다. 그림에 보인 바와 같이 감마선의 에너지가 낮을수록 수중 스펙트럼의 전에너지 봉우리는 공기중 스펙트럼보다 낮게 나타나며 에너지가 증가함에 따라 점점 차이가 줄어들는다. 즉, 0.32

MeV일 때 수중 스펙트럼의  $\hat{A}_1$ 값은 공기중 값의 약 1/4이나 1.115 MeV에서는 약 1/2.5로 차이가 줄어들는다. 수중에서의  $\hat{A}_1$ 의 감소는 전에너지 감마선의 계수치 감소를 나타내는 것으로서 수중 측정시 고려되어야 할 인자이다.

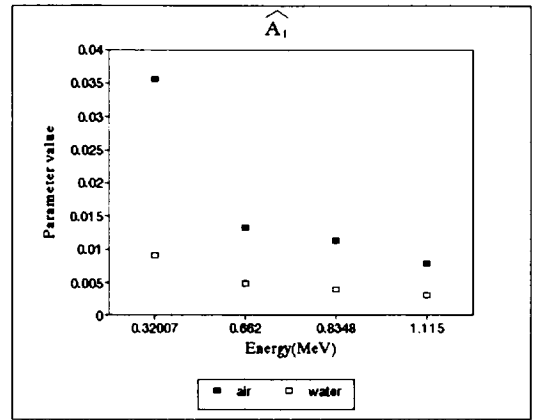


Fig. 7 Variation of response function parameter  $\hat{A}_1$  as a function of gamma energy

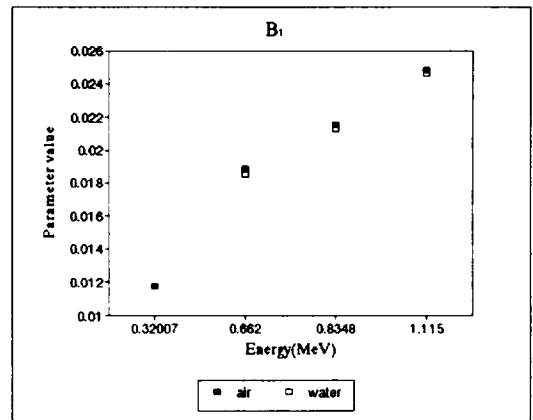


Fig. 8 Variation of response function parameter  $B_1$  as a function of gamma energy

Fig. 8은 공기와 수중에서의 전에너지 봉우리의 퍼진 정도를 나타내는 계수  $B_1$ 을 나타낸 그래프이다. 그림에 보인 바와 같이  $B_1$ 은 감마선 에너지에 따라 증가하며 공기중 및 수중간의 차

이는 거의 무시할 정도이다.  $B_1$ 은 감마선 검출기의 에너지 분해능과 전에너지 봉우리의 총계수치에 영향을 미치는 인자로서 전에너지 봉우리의 높이가 같은 경우  $B_1$ 이 클수록 에너지 분해능은 나빠지며 총계수치는 증가한다. 수중 스펙트럼의 경우  $B_1$ 값은 공기중과 같으나 전에너지 봉우리의 높이가 공기중보다 낮아지므로 수중에서는 에너지 분해능이 나빠진다고 볼 수 있다.

의 변화를 보여주고 있다. 그림에 보인 바와 같이 감마선 에너지가 낮을수록 이 계수들의 값이 증가하며 수중에서의 값이 공기중보다 높게 나타남을 알 수 있다. 특히 수중에서는 두 계수 모두 에너지 증가에 따라 급격하게 감소하고 있다. 이 계수들은 수중에서 산란된 감마선이 상대적으로 전체 계수치에 미치는 영향을 나타내는 인자이다.

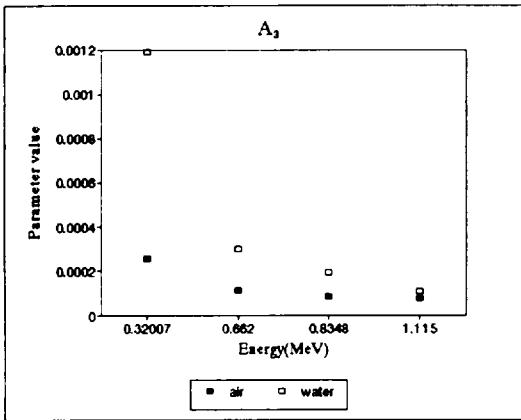


Fig. 9 Variation of response function parameter  $A_3$  as a function of gamma energy

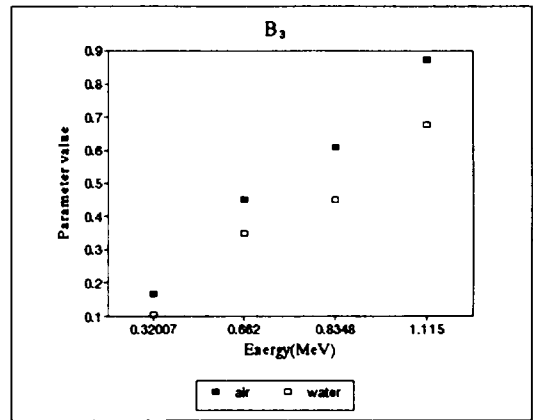


Fig. 11 Variation of response function parameter  $B_3$  as a function of gamma energy

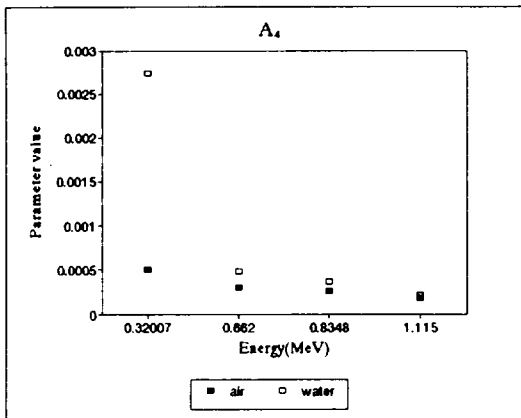


Fig. 10 Variation of response function parameter  $A_4$  as a function of gamma energy

Fig. 11은 공기중 및 수중 스펙트럼의 Compton continuum이 시작되는 edge의 에너지를 나타내는 계수( $B_3$ )의 변화를 나타낸 것이다. Compton edge 에너지는 입사되는 감마선의 에너지가 증가할수록 증가하며, 공기중의 값이 수중의 값보다 더 높게 나타나고 있으며, 감마선의 에너지가 증가할수록 편차도 증가함을 볼 수 있다. 주목할 사항은 응답함수의 Compton edge 에너지 값이 이론적으로 계산한 값과 차이를 보인다는 점이다. 이론적으로 계산한 Compton edge의 에너지는 0.32 MeV인 경우 0.178 MeV, 0.662 MeV인 경우 0.48 MeV, 0.8348 MeV인 경우 0.639 MeV, 1.115 MeV인 경우 0.91 MeV인 반면, 응답함수의 계수값은 전반적으로 이보다 낮은 값을 보이고 있다.

Fig. 9와 10은 공기중 및 수중에서의  $A_3$ 과  $A_4$

Fig. 12는 공기와 수중 스펙트럼에서의  $B_3$ 를

나타내고 있다. 전반적으로 수중의 값이 공기중의 값보다 크게 나타났는데 이것은 수중 스펙트럼에서는 Compton edge 부위의 경사가 공기중보다 더 급함을 의미한다. 에너지에 따른  $B_4$ 의 변화를 보면 수중에서는 에너지 증가에 따라 가파르게 증가하나 공기중에서는 완만한 증가를 보이고 있다. 이것은 수중 스펙트럼인 경우 감마선의 에너지가 증가함에 따라 Compton edge의 형태가 둔화됨을 의미한다.

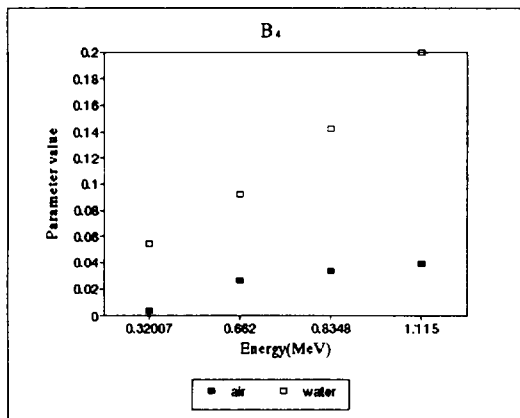


Fig. 12 Variation of response function parameter  $B_4$  as a function of gamma energy

## V. 결 론

본 연구에서는 NaI(Tl) 섬광검출기를 이용하여 주요 환경 방사능 영역에 속하는 저에너지 감마선원인 Cr-51, Cs-137, Mn-54, Zn-65에 대하여 공기와 수중에서의 에너지 스펙트럼을 측정하였으며 측정된 스펙트럼 자료를 이용하여 응답함수의 계수를 결정하였다. 응답함수식은 문헌에 보고된 고순도 Ge 반도체 검출기의 응답함수에 근거하여 구성하였다. 응답함수식에 고려된 항은 전에너지 peak, flat continuum, 1차 콤프턴산란으로서 기존의 고순도 게르마늄의 응답함수를 단순화한 형태이다. 본 연구에 사용된 응답함수식은 고려된 에너지 영역에서 공기중 뿐만 아니라 수중에서의 감마선 에너지 스펙

트럼을 용이하게 나타낼 수 있었다.

응답함수의 계수들은 실험 데이터를 CURCON 프로그램을 이용하여 주어진 응답함수식에 fitting 시킴으로써 감마선 에너지의 함수로 구하였다.

수중과 공기중의 스펙트럼의 차이를 분석하기 위하여 응답함수 계수들을 비교하였다. 가장 두드러진 차이는 전에너지 봉우리의 높이를 나타내는 계수( $\hat{A}_1$ )에서 나타났으며 에너지가 낮을수록 수중 스펙트럼의  $\hat{A}_1$  값이 공기중보다 낮게 나타났다. 반면 flat continuum과 Compton continuum의 높이를 나타내는 계수인  $A_3, A_4$ 는 수중 스펙트럼의 값이 더 크며 에너지가 증가할수록 편차가 감소하였다. 전에너지 봉우리의 퍼진 정도를 나타내는 계수인  $B_1$ 은 수중과 공기중 스펙트럼간의 차이가 거의 무시할 정도였으나 수중에서는 전에너지 봉우리가 낮아진 점을 감안하면 검출기의 분해능이 수중에서는 상당히 떨어짐을 알 수 있다.

Compton edge의 에너지를 나타내는 계수( $B_3$ )에 있어서도 공기중과 수중 스펙트럼간에 상당한 차이가 발견되었으며 전반적으로 수중에서 낮게 나타났다. 또한 이론적으로 계산한 값과도 큰 편차를 보였다. Compton edge의 형태를 나타내는 반응함수 계수( $B_4$ )에 있어서도 공기중과 수중 스펙트럼간에는 큰 편차를 보였는데 에너지가 증가할수록 수중의 값이 공기중보다 크게 나타났다.

본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다. NaI(Tl) 검출기로부터 출력되는 감마선 에너지 스펙트럼을 나타낼 수 있는 비교적 간단한 응답함수를 제시하였으며, 이 응답함수의 계수들을 정량적으로 비교·분석함으로써 공기 및 수중에서의 에너지 스펙트럼의 특징을 정량화 할 수 있음을 제시하였다.

## 참 고 문 헌

1. JIN, Y. and Gardner R.P., 1986, A Semi - Empirical Model for the Gamma-Ray Response

- Function of Germanium Detectors Based on Fundamental Interaction Mechanisms, *Nuclear Instruments and Methods*, A242, pp. 416-426.
2. Lee, M.C., Verghese, K. and Gardner, R.P., 1986, Extension of the Semi - Empirical Germanium Detector Response Function to Low Energy Gamma Rays, pp. 16
  3. Bevington, P. R., 1969, Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences, Mc - Graw Hill, pp. 336
  4. Clark, T.C. and Gardner R.P., 1982, A Monte Carlo Model in situ Prompt Gamma -Ray Analysis Probes, *Nuclear Instruments and Methods*, pp. 193, 365-370.
  5. 강희동, 김도성, 최희동, 1993, 감마線 分光 및 核種 分析, 경북대학 센서기술연구소, pp. 30-55.
  6. Knoll, G.F., 1979, Radiation Detection and Measurement, John Wiley & Sons, pp. 816
  7. 이영길, 1993, 감마선 미세빔을 사용한 HpGe 검출기의 고유 검출 효율에 관한 연구, 충남대학교, pp. 7-12.
  8. Nicholas T., 1976, Measurement and Detection of Radiation, Mc-Graw Hill, pp. 570
  9. Tsoulfanidis, T., Wehring, B.W. and Wyman, M.E., 1969, The Use of an Analytical Response Function for Unfolding Beta spectra, *Nuclear Instruments and Methods*, pp. 73, 98-102.