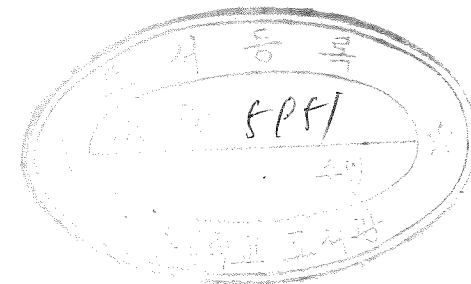


429.624
7 8928

碩士學位論文

閃光檢出器를 利用한 空氣와 水中에서의 伽馬線 分光 分析



濟州大學校 大學院

에너지工學科

金 銀 淑



1995年 12月

閃光檢出器를 利用한 空氣와
水中에서의 伽馬線 分光 分析

指導教授 朴 在 雨

金 銀 淑

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

1995年 12月



金銀淑의 工學碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 이 유근 印

委 員 이 재영 印

委 員 박 재우 印

濟州大學校 大學院

1995年 12月

Analysis of γ -ray Energy Spectrum
Using the NaI(Tl) Detector
in Air and Water

Eun-Suk Kim

(Supervised by professor Jae-Woo Park)



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF
ENGINEERING

DEPARTMENT OF NUCLEAR AND ENERGY
ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

1995. 12.

목 차

Summary	1
I. 서 론	2
II. 이론적 배경	4
1. 감마선과 물질과의 반응	4
1) 광전효과	6
2) 콤프턴산란	7
3) 전자쌍생성	9
2. 이론적 응답함수의 구성	12
1) 전에너지 peak	14
2) 전에너지 peak의 저에너지 꼬리	14
3) Flat Continuum	15
4) 1차 콤프턴산란	15
5) Single Escape Peak	16
6) Double Escape Peak	16
III. 실험장치 및 방법	19
1. NaI(Tl) 검출기	19
2. 선 원	24
3. 실험방법	25

IV. 스펙트럼 획득 및 분석	27
V. 결론	42
VI. 참고문헌	44

Summary

This is a study directed toward analyzing the energy spectrum of the γ -rays emitted from sources in air and water using NaI(Tl) scintillation detector. The main purpose of the study is to apply the theoretical response functions, which have been constructed by simplifying the response functions proposed for high-purity germanium detector, to generating the γ -ray energy spectrum of the scintillation detector. Experiments have been carried out to determine the empirical parameters constituting the response functions as function of γ -ray energy.

For monoenergetic γ -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 γ -ray sources both in air and water are compared and analyzed. The empirical parameters are also plotted as function of γ -ray energy.

It has been found that the response functions constructed predict accurately the energy spectrums of the sources considered in this study in air as well as in water. It is observed that considerable differences exist in some of the empirical parameters depending on whether the sources are in air or water. 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 will be effectively applied to predicting the energy spectrums of various γ -ray sources.

I. 서론

최근 원자력 시설의 운영과 방사성 동위원소의 취급의 늘어남에 따라 핵폐기물 및 방사선 영향에 대한 관심이 높아 가고 있다. 이와 더불어 환경에 대한 각국의 경각심 또한 필요한 실정이다. 지난 1993년 러시아가 동해에 액체 폐기물을 버리다 국제 환경 감시 단체인 그린피스에 의해 저지 당하는 일이 있었다. 이 사건 이후 핵폐기물에 의한 환경오염에 큰 관심을 갖게 되었다고 말할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 방사성 물질에 의한 환경 오염을 감시하기 위하여 널리 이용되는 감마선 스펙트럼 분석 방법을 이용하여 공기와 수중에서의 스펙트럼을 비교·분석함으로써 방사성 핵종 분석을 위한 데이터 베이스를 제공하는데 있다.

본 연구에서의 감마선 스펙트럼 분석은 스펙트럼 획득을 위한 계측과 이론적 응답함수의 결정 및 분석으로 나뉘어진다. 감마선 스펙트럼 계측을 위하여 섬광검출기 종류인 NaI(Tl) 검출기를 이용하였는데 사용이 간편하고 정밀도가 높기 때문에 수중 스펙트럼 측정에 적합하다.

본 연구에서는 NaI(Tl) 검출기를 이용하여 Cr-51, Cs-137, Mn-54, Zn-65, Na-22 표준 감마선원에 대하여 공기와 수중에서의 스펙트럼을 측정하였다. 공기 중에서는 납으로 차폐된 조건에서 측정하였으며, 수중에서는 물깊이 10cm인 아크릴 수조에서 측정하였다.

스펙트럼의 분포를 분석하기 위한 자료로 이론적 응답함수(response function) 식을 구성하여 실험 데이터를 curve fitting 하였는데, 이 함수식은 감마선과 물질과의 반응에서 일어나는 광전효과(photoelectric effect), 콤프턴산란(Compton scattering), 쌍생성(pair production) 등을 고려한 것이다. 사용된 이론적 응답함

수식(Lee 등, 1986)은 전에너지 peak, flat continuum, 1차 콤프턴산란으로 이루어져 있고, 세 개의 선형계수와 세 개의 비선형계수를 포함하고 있다. 이러한 상관계수들은 공기와 수중에서 얻은 데이터를 curve fitting시에 결정하였고 얻어진 상관계수를 비교·분석하기 위하여 에너지에 대하여 그래프화 하였다. 그리고 임의의 감마선 스펙트럼의 예측을 위한 기본 자료로 상관계수를 입사되는 감마선 에너지(E_0)에 대한 실험적 함수식으로 나타내었다.

II. 이론적 배경

1. 감마선과 물질과의 반응

감마선 측정시 감마선과 검출 물질과의 반응은 매우 중요한 현상이며 이러한 반응을 통하여 감마선이 가진 에너지가 검출 물질에 전달되는 과정은 다양하다. 원자핵에서 방출되는 감마선의 에너지는 대개 0.01 ~ 10MeV 사이에 존재하고 있고 이 에너지 범위 내에서 주로 일어나는 반응은 광전효과, 콤프턴산란, 쌍생성 등 세 가지이며 나머지 과정들은 이들 과정에 비하면 확률이 적다. 위와 같은 반응은 입사되는 감마선의 에너지와 물질에 따라 다르게 나타나게 되는데 Fig. 1은 NaI에 대한 반응 확률을 질량감쇠계수(mass attenuation coefficient)로 나타낸 것으로, 이 계수는 선형감쇠계수(linear attenuation coefficient)를 밀도로 나눈 값이다.

감마선이 물질을 통과할 때 갖는 세기는 $I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$ 의 형태로 표시된다. 여기서 I_0 는 감마선의 초기 세기, I 는 물질 내 거리 x 에서의 세기이며, μ 는 선형 감쇠계수이다. 따라서 반응이 일어날 확률 μ 는 광전효과 반응 확률(τ), 콤프턴 산란 반응 확률(σ), 쌍생성효과 반응 확률(χ)의 합으로 나타나게 된다.

감마선은 알파선이나 베타선과 같은 하전 입자와는 달리 원자를 직접 전리시킬 수 없고 주로 광전효과, 콤프턴산란, 쌍생성의 과정을 통하여 물질에 감마선의 에너지를 전달하고 결과적으로 전자를 발생시킨다. 이와 같이 발생된 고속의 전자

는 물질 내의 원자를 전리 또는 여기 시키면서 자신의 에너지를 잃게 된다. 따라서 감마선을 측정하기 위해서는 전리 또는 여기 상태에서 전기적 신호를 얻어야 한다. II장에서는 감마선 계측에 있어서 가장 기본이 되는 감마선과 물질과의 상호작용에 대해서 알아보고 스펙트럼 분석을 위한 이론적 응답함수에 관하여 기술하고자 한다.

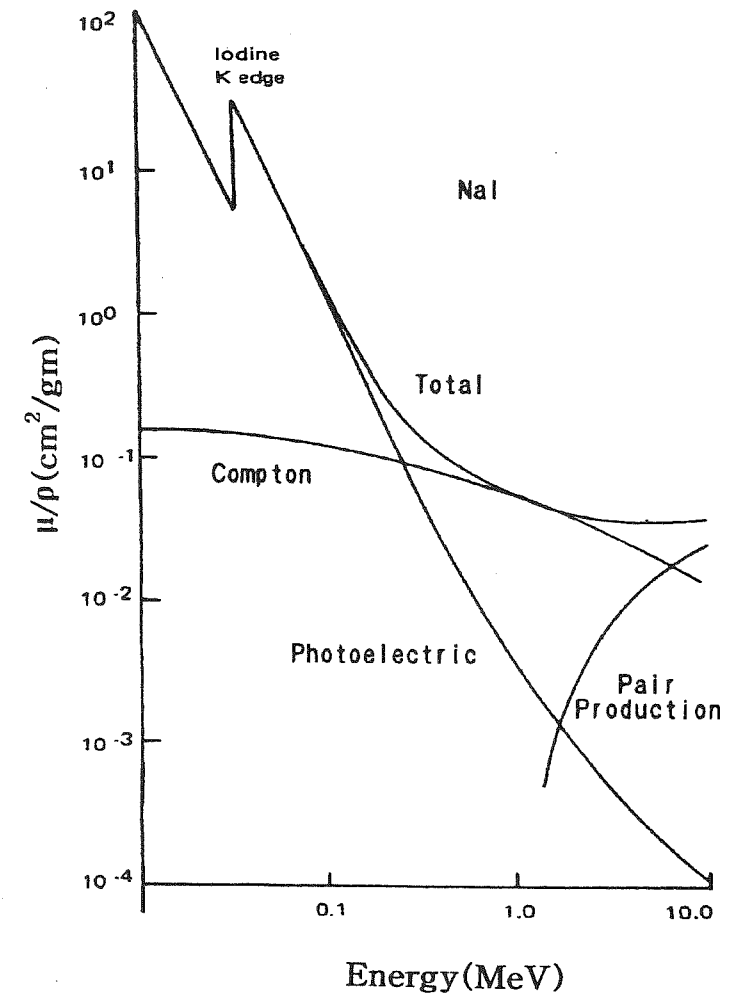


Fig. 1. Mass attenuation coefficients for NaI

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

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

가 되고 여기서, E_γ 는 감마선의 에너지이며 E_b 는 궤도전자의 결합에너지이다. 이와 같은 광전효과의 결과 궤도 내의 빈자리에는 다른 궤도로부터 전자의 보충이 이루어질 때 특성 X선 또는 Auger 전자가 방출된다. 이러한 광전효과가 일어날 확률 τ 는 저에너지에서 크기 때문에 중요한 상호작용이 되고, 근사적으로 감마선의 에너지가 0.51MeV 정도 이하일 때 다음과 같이 나타낼 수 있다(강희동 등, 1993).

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

여기서, Z 는 물질의 원자번호이고, E_γ 는 입사 감마선의 에너지이다. 위의 식에서 알 수 있는 바와 같이 광전효과는 검출기 재료의 원자번호(Z)의 5승에 비례하고 입사 감마선 에너지의 3.5승에 반비례한다.

방사선 검출기의 에너지 응답 특성은 광전효과에 의해서 발생한 광전자 에너지의 모두를 검출기내에서 잃는다고 하면 Fig. 2에 나타난 바와 같이 감마선 에너지 peak가 생긴다. 광전효과는 스펙트럼 상에 감마선 에너지에 해당하는 단일 peak가 생성된다.

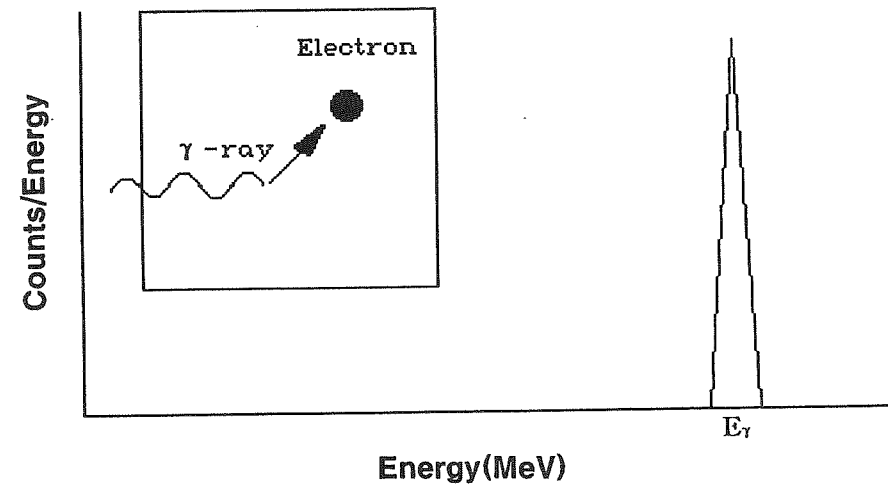


Fig. 2. γ -ray energy spectrum of photoelectric effect

2) 콤프턴산란(Compton Scattering)

콤프턴산란은 궤도전자와 감마선이 상호작용해서 감마선의 에너지 일부를 전자에게 전달하여 궤도전자를 이탈시키고 동시에 감마선이 산란되는 현상이다. 산란 감마선 및 Compton 전자의 에너지는 운동량과 에너지 보존 법칙으로부터 구해진다. 산란 감마선의 에너지(E_{γ}')와 Compton 전자의 에너지(E_c)는 입사 감마선의 에너지(E_{γ}) 및 전자의 산란각(θ)에 대한 함수로서 각각 다음과 같이 된다.

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

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

여기서, $a = E_\gamma / m_0c^2$ 이며 m_0c^2 은 전자의 정지 질량에너지(0.511MeV)이다. 위의 식에서 $\theta = 0^\circ$ 일 때, $E_c = 0$, $E_\gamma = E'_\gamma$ 가 된다. 즉 입사 감마선 에너지는 Compton 전자에는 전달되지 않고, 모두 산란 감마선의 에너지가 되는 경우이다. 또한 $\theta = 180^\circ$ 일 때는 $E_c = 2a \cdot E_\gamma / (1 + 2a)$, $E'_\gamma = E_\gamma / (1 + 2a)$ 가 된다. 이는 Compton 전자에 최대의 에너지가 전달되고 방사선 검출기로 측정할 스펙트럼에서는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 Compton edge의 에너지가 된다.

콤프턴산란의 반응 확률 σ 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 크며, 물질의 원자번호 Z 에 비례한다. 따라서 방사선 검출기에 있어서 콤프턴산란의 에너지 응답은 식 (3), (4)에 보는 바와 같이 산란각에 따라서 변하게 된다. 즉, Compton 전자는 전각도로 산란되므로, 그 에너지 응답은 $\theta = 0^\circ$ 로 부터 $\theta = 180^\circ$ 까지 연속적으로 분포하게 된다. 또한 검출기는 일반적으로 주위를 차폐해서 사용하기 때문에 방사선원으로부터 나온 감마선이 주위의 차폐 물질과 반응하여 콤프턴산란이 일어나 후방산란한 감마선이 검출기내로 입사되어 그 에너지에 해당하는 peak가 나타나게 된다. Fig. 3은 위에서 열거한 과정에 의해 나타나는 감마선 스펙트럼을 나타낸 것이다.

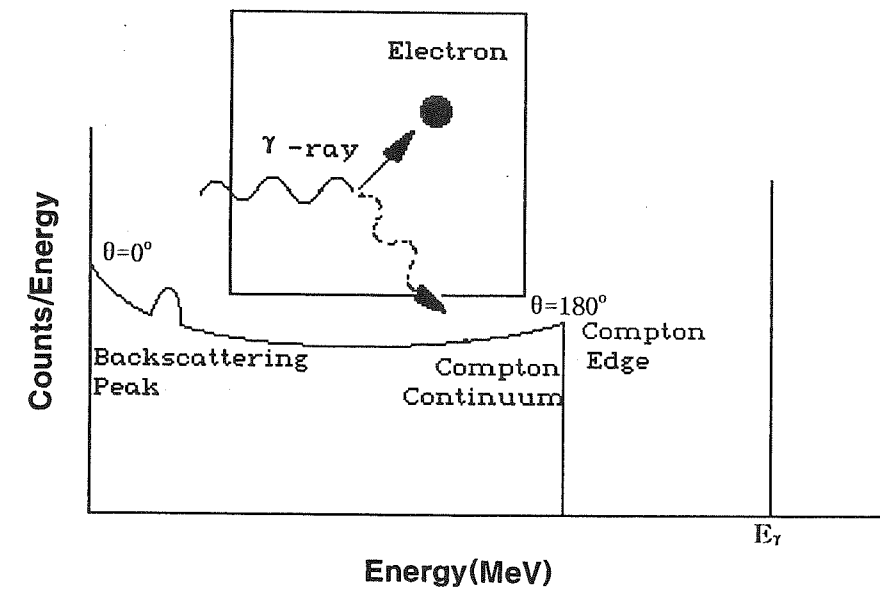


Fig. 3. γ -ray energy spectrum of Compton scattering

3) 전자쌍생성(Pair Production)

전자쌍생성은 입사 감마선이 물질을 이루고 있는 원자핵의 Coulomb 장 내에서 소멸할 때 음전자와 양전자의 쌍이 생성되는 과정이다. 입사 감마선이 음전자와 양전자를 생성하기 위해서는 전자의 정지 질량에너지(m_0c^2)의 2배인 1.02MeV 이상 되어야 한다. 물론 이 경우에 원자핵은 반도 되지만 원자핵의 운동량이 에너지에 비해 매우 크기 때문에 반도에너지는 무시 할 수 있다. 생성된 전자와 양전자의 운동에너지를 각각 E_p^- , E_p^+ 라 하면,

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

가 된다. 이 때 양전자는 검출 물질을 통과하면서 자신의 에너지를 모두 잃게 되면 주위의 자유전자와 결합하여 소멸하고 0.511MeV의 광자 두 개를 발생시킨다.

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

여기서, κ 는 쌍생성의 반응 확률을 나타낸 것이며 $f(E_\gamma, Z)$ 는 감마선의 에너지와 물질의 원자번호에 의존하는 함수로서 감마선의 에너지가 증가함에 따라 증가하는 함수이다(강희동 등, 1993). 따라서 전자쌍생성은 물질의 원자번호의 제곱에 비례하고 감마선의 에너지가 증가함에 따라 증가한다.

방사선 검출기에 있어서 전자쌍생성의 에너지 응답은 양전자의 소멸에 수반된 두 개의 감마선이 검출기내에서 모두 흡수되거나, 한 개가 흡수되는, 또는 둘다 흡수되지 않는 등의 복잡한 과정이 일어나게 된다. 먼저 두 개의 감마선이 모두 검출기 바깥으로 이탈하게 되면 $(E_\gamma - 2m_0c^2)$ 의 위치에 double escape peak가 생

기고, 한 개의 감마선만이 이탈하면 $(E_\gamma - m_0c^2)$ 의 위치에 single escape peak가 생기게 되어 Fig. 4와 같은 감마선 스펙트럼을 얻게 된다.

방사선 검출기에 있어서 실제의 에너지 응답은 위에서 설명한 세 가지의 과정이 복합되어 나타난다. 이것은 검출기내에서 발생한 2차 과정의 감마선이나 전자의 검출기 이탈, 방사선원과 차폐 물질과의 상호작용으로 인한 후방산란, 특성 X선 등이 검출기내로 들어와서 peak가 나타나기 때문이다(Knoll, 1979).

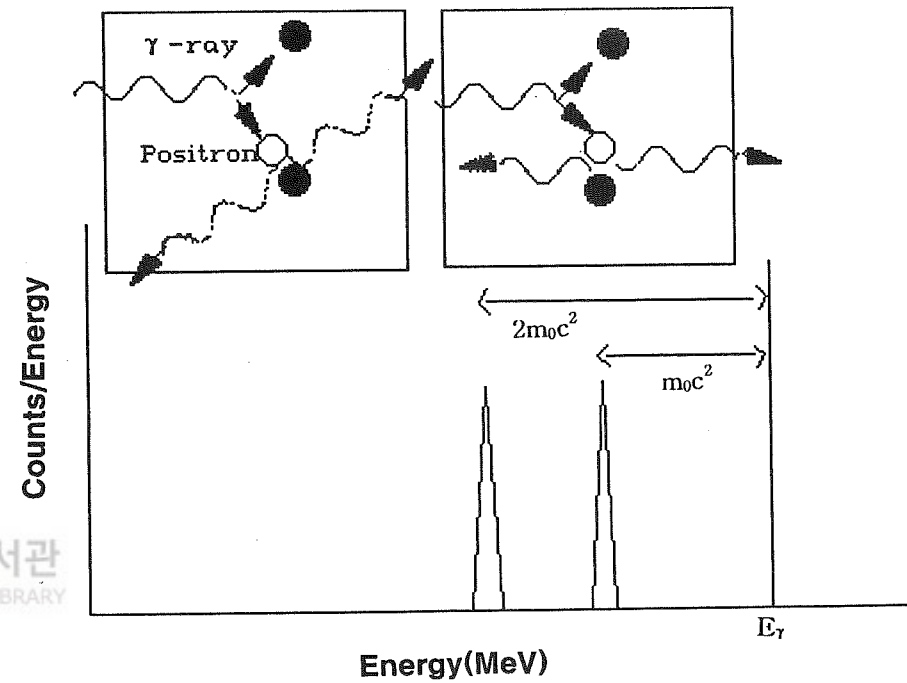


Fig. 4. γ -ray energy spectrum of pair production

앞서 열거한 반응에 의하여 나타나는 이상적인 스펙트럼은 Fig. 5와 같이 나타난다. 그러나 실제 측정된 스펙트럼은 단일에너지 감마선이 입사되더라도 Gaussian 분포로 나타나게 된다. 이러한 스펙트럼 형성에 가장 주된 원인은 계수치 통계 오차로서 방사성 붕괴가 시간적으로 불규칙하게 일어나기 때문이다.

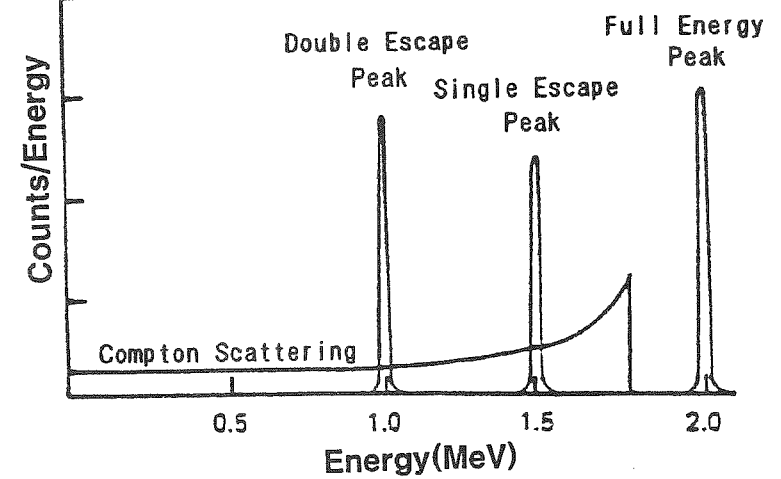


Fig. 5. Idealized γ -ray energy spectrum

2. 이론적 응답함수의 구성

방사선 검출기의 출력 신호는 검출 물질에 흡수된 방사선 에너지가 전기적 신호의 변환 매체인 전하 운반체로 변환됨으로써 형성되며 출력 신호의 크기는 최종적으로 수집되는 전하 운반체의 수에 의해서 결정된다. 같은 에너지의 방사선이 검출 물질에 완전히 흡수되더라도 최종적으로 수집되는 전하 운반체의 수는 매 방사선마다 일정하지 않으며 통계적으로는 평균치에 대해 대칭인 분포를 갖게 된다. NaI(Tl) 검출기인 경우 방사선의 에너지가 일차적으로 섬광으로 변환되고 이 섬광

이 광음극에 흡수되어 광전자가 방출되며 방출된 광전자는 광증폭관에서 그 수가 증배되어 양극에 수집되는 단계를 거친다. 이러한 다단계 과정을 거침에 따라 양극에 수집되는 전자의 수는 통계적인 요동이 커지며 결과적으로 완전한 Gaussian 분포를 갖게 된다. 따라서 검출기의 응답함수는 검출기에 흡수되는 에너지를 Gaussian 분포의 평균값으로 하고 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 (Tsoufanidis, 1976).

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

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 에너지 분포를 구한 후 식 (8)과 같이 folding 하면 얻을 수 있다. 본 연구에서는 앞서 수행된 고순도 게르마늄(HpGe) 검출기의 전체적인 응답함수식에 근거하여 응답함수식을 구성하였다(Lee 등, 1986).

1) 전에너지 peak(Full Energy Peak)

전에너지 peak은 앞서 설명한 감마선과 물질과의 반응에서 주로 광전효과에 의하여 입사 감마선의 전에너지가 검출기에 흡수되는 경우 얻어지는 peak로 Fig. 1에서 보듯이 에너지가 낮은 감마선에서 반응 확률이 크게 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 peak Gaussian 분포의 분산에 해당하는 상관계수(parameter)이고, A_1 은 peak의 높이에 비례하는 상관계수이다.



2) 전에너지 peak의 저에너지 꼬리(Low Energy Tail on the Left Side of the Full Energy Peak)

앞서 기술한 전에너지 peak는 검출기 내부에 생성된 전하 운반체가 전부 수집된 경우로서 peak를 중심으로 좌우 대칭형이 된다. 반면에 검출기의 불순물 및 표면 효과에 의한 영향으로 전하 운반체의 일부가 검출기 외부로 이탈하여 불완전 전하 수집이 생기면 전에너지 peak의 왼쪽(저에너지 영역)에는 상대적으로 계수치가 높게 되어 지수함수 형태의 꼬리가 나타나게 된다. 이러한 현상을 반영한 응답함수는 다음과 같이 된다.

$$f_2(E_0, E) = A_2 \exp\left[\frac{(E-E_0)}{\sqrt{2}B_1B_2}\right] \operatorname{erfc}\left[\frac{(E-E_0)}{\sqrt{2}B_1} + \frac{1}{2B_2}\right] \quad (11)$$

여기서, B_2 는 꼬리 부위의 분산 정도를 나타내는 상관계수이다.

3) Flat Continuum

입사되는 감마선 에너지 E_0 이하에서는 모든 에너지에 걸쳐 일정 크기의 에너지 응답이 나타나게 된다. 이러한 응답함수는 계단함수로 표시되는 흡수에너지 분포를 식 (8)에 대입하여 folding하여 다음과 같이 구해진다.

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

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 입사되는 에너지 중에서 흡수된 에너지에 의해 스펙트럼 상에 연속 분포로 나타나게 된다. 반도체 검출기를 이용하여 앞서 연구한 Lee(1986) 논문에서는 2차, 3차 콤프턴산란 반응항을 고려하였으나 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.

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

$$E \leq E_0$$

$$E' = E_0 - E, \cos \theta = 1 + m_0 c^2 / E_0 - m_0 c^2 / E'$$

여기서, B_3 은 산란 각도가 180° 일 때 Compton edge에 해당하는 에너지이고, B_4 는 Compton edge에서의 분산된 정도를 나타내는 상관계수이다.

5) Single Escape Peak

입사되는 감마선의 에너지가 1.02MeV 이상이 되는 경우에 나타나는 항으로 0.511MeV의 에너지를 갖는 한 개의 소멸 감마선이 검출기를 빠져나가고 나머지는 한 개는 검출기에 흡수된 경우이다. 전에너지 peak로부터 0.511MeV 아래 위치에 single escape peak가 나타나며 응답함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

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



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

6) Double Escape Peak

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

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

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

위와 같이 단일 에너지 감마선이 입사되더라도 감마선과 물질과의 반응 및 계측의 통계학적 요동에 의하여 식 (16)과 같은 함수의 조합으로 스펙트럼이 이루어진다.

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

윗식에서 식 (14), 식 (15)는 입사 감마선 에너지가 1.02MeV 이상인 경우에 적용되는 식으로 single escape peak, double escape peak 항이 추가되어 응답함수식을 구성하게 된다. 본 연구에서 NaI(Tl) 검출기를 사용하여 저에너지 영역에 감마선을 계측하기 때문에 앞서 고순도 게르마늄 검출기를 이용한 연구에서의 응답함수(Lee 등, 1986) 구성과는 다소 차이가 있었다. 즉, NaI(Tl) 검출기는 반도체 검출기보다 생성된 전하 수집 효율이 좋기 때문에 불완전 전하 수집으로 인하여 생기는 전에너지 peak의 저에너지 꼬리 부분에 해당하는 식 (11) 항이 없어도 무관하였다. 따라서 최종적으로 응답함수식으로 사용한 항은 식 (10), (12), (13)으로 구성하였다. 이러한 함수식의 결정은 이론적 해석으로 기본식을 구성한 후 이를 이용한 실험 결과의 분석을 통하여 이루어졌다.

앞서 구성한 응답함수식을 이용하여 실험에서 계측된 자료를 해석하기 위해서는 응답함수에 사용된 상관계수를 결정해야 한다. 상관계수를 결정하기 위하여 사용된 프로그램은 North Carolina 주립 대학교에서 개발된 CURCON(Jin 등, 1986)이다. 이 프로그램에서 선형 상관계수인 \widehat{A}_1 , A_3 , A_4 결정은 χ^2 함수에 바탕을 둔 회귀 방법에 의해 결정되며, 비선형 상관계수인 B_1 , B_3 , B_4 는 χ^2 함수를

gradient법에 의해서 초기치를 변화시키면서 χ^2 함수가 최소가 되는 최적치를 구하는 Marquart 방법에 의하여 결정된다. 이와 같은 알고리즘들은 χ^2 함수를 최소화하는 수치적 방법들이다(Bevington, 1969). χ^2 함수는 다음과 같이 표시된다.

$$\chi^2 = \sum \left\{ \frac{1}{\sigma_i^2} [y_i - y(x_i)]^2 \right\} \quad (17)$$

여기서, y_i 는 실험에서 측정된 데이터이고, σ_i 는 y_i 의 표준편차이며 $y(x_i)$ 는 함수식에서 계산된 값이다. CURCON 프로그램에서는 초기치를 입력하여 반복 계산에 의해 응답함수의 상관계수가 결정된다.



III. 실험 장치 및 방법

Fig. 6은 본 연구에서 사용된 실험 장치를 도식적으로 나타낸 것인데 ① 섬광체, ② 광증배관, ③ 전치증폭기로 구성된 NaI(Tl) 검출기를 나타낸 것이다. ④, ⑤는 고전압 공급 장치와 증폭기로 구성된 NIM(nuclear instrument module) 전자 장비를 나타낸 것이고, ⑥은 다중과고분석기 대신 사용하는 스펙트럼 분석용 소프트웨어가 장착된 컴퓨터이다. Fig. 7에서 (a)는 공기 중에서 납으로 차폐한 경우이고, (b)는 아크릴 수조에 수중에서의 검출기 배치에 대한 모습이다. 1절에서는 NaI(Tl) 검출기에 대하여, 2절에서는 사용된 선원에 대하여 살펴보고 3절에서는 실험 방법에 대해 살펴보고자 한다.

1. NaI(Tl) 검출기



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

NaI(Tl) 섬광검출기는 Fig. 8과 같이 방사선의 에너지를 광으로 변환하는 섬광체와 섬광체의 광을 전기적 신호로 변환하는 광증배관(photomultiplier tube, PMT), 그리고 전치증폭기로 구성되어 있다.

방사선이 섬광체내에 입사하여 에너지를 잃게 되면 섬광체에 흡수된 에너지에 비례하는 양의 광을 방출한다. 방출된 광은 광증배관의 광음극에서 발광량에 비례하는 양의 광전자로 방출되며, 이 때 광전자는 광증배관내의 dynode에 의해 10^5 - 10^6 배로 수가 증배되어 양극에 수집됨으로써 입사 방사선의 잃은 에너지에 비

레하는 출력 신호가 발생한다. 이러한 신호는 전치증폭기를 거치면서 더욱 증폭된다. Fig. 8은 위의 과정을 도식적으로 나타낸 것으로서 출력 신호를 증폭·정형후 파고치를 분석하면 입사 방사선의 에너지에 대한 정보를 얻을 수 있다.

섬광검출기는 알파선, 베타선, 감마선 등의 검출 및 스펙트럼 측정 등에 널리 사용되고 있으며 또한 섬광체의 종류가 많고 크기와 형태를 다양하게 제작할 수 있기 때문에 방사선의 종류 및 에너지에 따라 적합하게 사용 가능한 것이 큰 장점이다(강희동 등, 1993).

특히 입사 방사선이 감마선일 경우 섬광체내에서 콤프턴산란, 광전효과, 쌍생성 등의 상호작용 중 대부분 광전효과에 의해 입사 감마선의 에너지에 해당하는 전에너지 peak가 원자번호의 5승에 비례하여 나타나기 때문에 원자번호가 비교적 큰 NaI(Tl) 섬광검출기가 많이 사용된다.



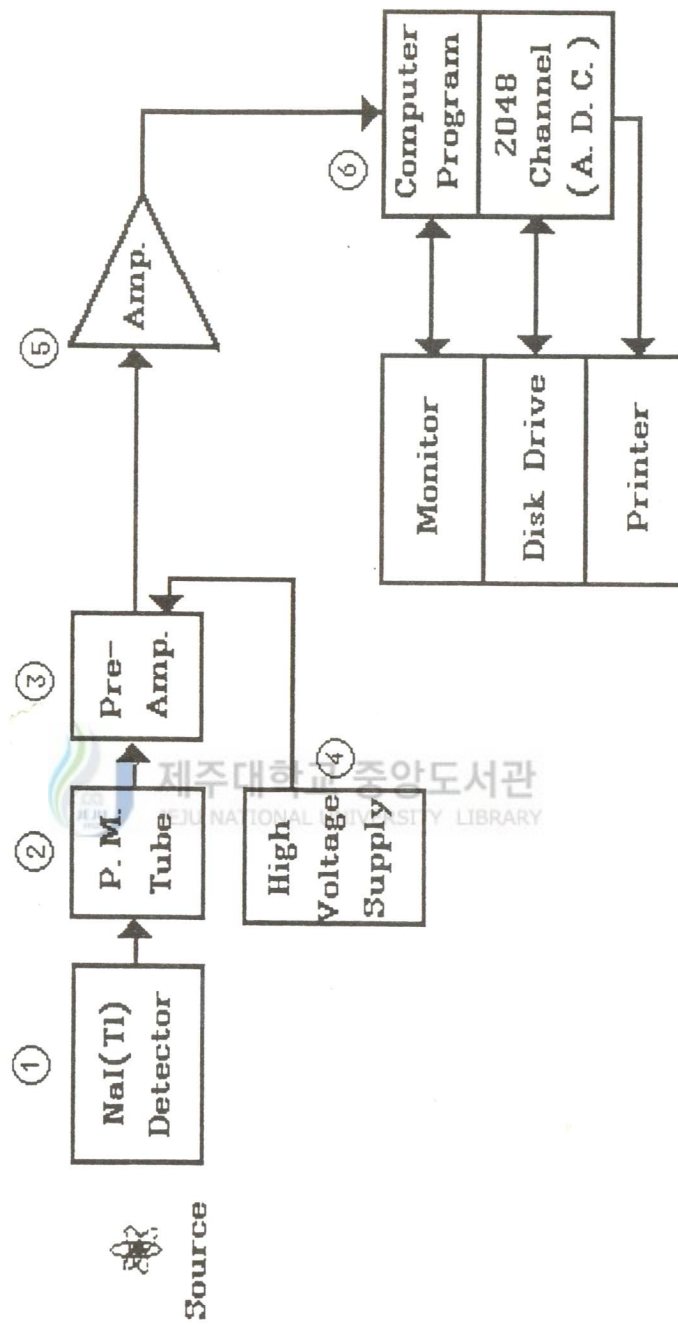


Fig. 6. Schematic block diagram of experimental apparatus

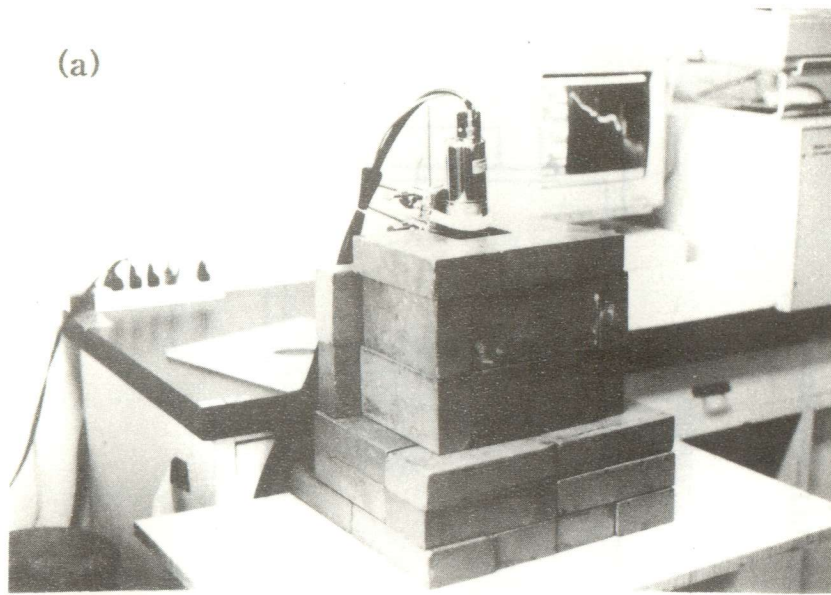


Fig. 7. Experimental apparatus of measuring conditions in air (a) and water (b)

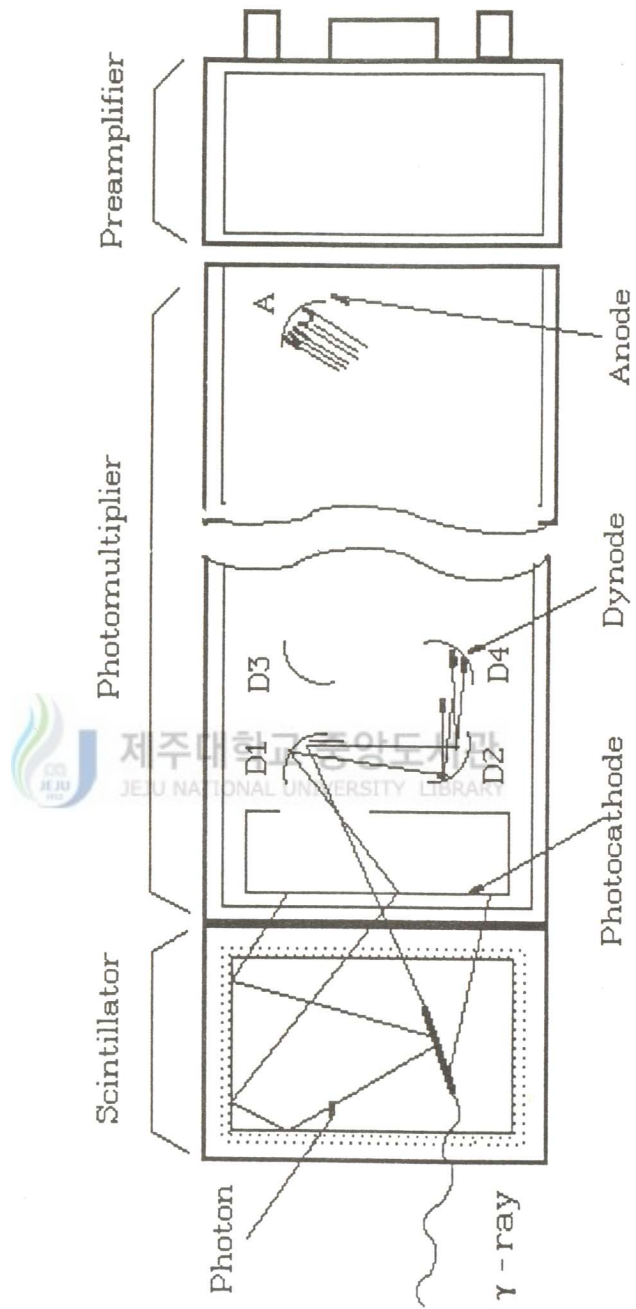


Fig. 8. Schematic diagram of 3in. x 3in. NaI(Tl) detector

실험에서 사용된 섬광검출기의 형태는 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of NaI(Tl) Detector

Specification	Type
Model	(CANBERRA) 7.6cm×7.6cm(3in.×3in.) 802-4
Resolution	7.5% ~ 8.5%(Cs-137 : 0.662MeV)
Window	0.05mm(0.02in.), aluminum ; density : 147.9mg/cm ²
Reflector	Oxide : thickness, 1.6mm(0.625in.) ; density : 88mg/cm ²
Magnetic/Light-Shield	Conetic lined steel
Typical Bias	+800 ~ +1100V dc.

2. 선원(Sources)



이 연구에서 사용된 선원은 단일 에너지를 나타내는 감마선원으로써 저에너지 영역에서 사용되는 표준 감마선원을 사용하였다. Table 2는 사용된 선원의 목록으로 에너지 범위는 0.32008 ~ 1.275MeV에 해당된다. 이 중에서 Zn-65와 Na-22 선원은 전자포획에 의한 0.511MeV의 소멸 감마선을 포함하고 있다. 그리고 스펙트럼 분석에서 curve fitting시 오차를 줄이기 위하여 Y-88 선원을 이용하였는데, 이 선원은 0.89804MeV, 1.83606MeV에 해당하는 두 개의 에너지가 발생되는데 본 연구에서는 1.836MeV의 전에너지 peak를 사용하였다.

Table 2. Monoenergetic γ -ray sources

Nuclide	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
Na-22	1.27454	950.4 day

3. 실험 방법

이 연구의 실험 과정은 크게 세 부분으로 나뉘어 진다.

첫째, 고전압 입력장치에서 1000 Volt를 입력하고 증폭기에서 fine gain과 course gain을 각각 0.3, 10으로 고정하고 스펙트럼 획득을 위한 응용 프로그램 (AccuSpec)을 컴퓨터 상에 구동시킨다.

둘째, 검출기에서 얻어진 출력 신호는 증폭기를 거치면서 더 증폭되고 컴퓨터에 내장된 ADC(Analog to Digital Converter)에 의해서 신호에 비례하는 계수치를 얻게 된다. 얻어진 데이터는 파일로 저장하여 스펙트럼 분석에 이용하였다.

셋째, FORTRAN으로 되어 있는 CURCON 프로그램을 실행시켜서 이론적 상관계수 및 fitting된 데이터를 얻었다.

위와 같은 세 가지 과정에 대하여 공기와 수중에서 실험을 실시하였다. Fig. 7에서 (a)는 공기 중에서 실험 장치로서 검출기를 납으로 차폐시킨 후 배경 방사능

을 10분간 측정하고 각각의 선원에 대하여 스펙트럼을 10분씩 측정하였으며, (b)는 수중에서의 실험으로 가로, 세로, 높이가 28cm×29cm×25cm인 사각 아크릴 수조에 물을 10cm 높이로 채운 후 배경 방사능을 측정하였다. 또한 같은 높이에서 수조 중앙에 선원을 장착하고 수면 바로 위에 검출기를 장착하고 10분씩 측정하였다. 그리고 스펙트럼 분석에 사용된 데이터는 정확도를 높이기 위해 반복된 실험을 통하여 보정된 데이터를 얻었다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

IV. 스펙트럼 획득 및 분석

실험에서 획득한 스펙트럼 데이터는 배경 방사능을 보정하고, 채널을 에너지로 변환하기 위해서 에너지 교정을 하였다. Cs-137과 Na-22 선원에서 각각 0.662MeV, 1.274MeV에 해당하는 전에너지 peak를 이용하여 최소자승법으로 구한 교정식은 다음과 같다.

$$y = 1.4262303593 \cdot x - 0.0081907639 \quad (18)$$

식 (18)에서 y 는 에너지이고, x 는 채널수이다. 획득한 스펙트럼을 응답함수식에 curve fitting하기 위해서 각 채널별 계수치를 전체 계수치로 나누어 정규화(normalization) 하였다. 정규화된 데이터에서 fitting 영역에 해당하는 데이터를 선택하여 CURCON 프로그램에 실행시키면 응답함수에 사용된 상관계수가 결정되며 응답함수에서 이론적 데이터를 얻어 그래프로 그리면 fitting된 스펙트럼이 구해진다.

공기와 수중에서 측정해서 얻어진 데이터와 fitting에서 얻은 스펙트럼을 그래프화 하면 Fig. 9 ~ Fig. 12와 같다. Fig. 9는 Cr-51 감마선원에 해당하는 스펙트럼으로써 0.32008MeV의 전에너지 peak를 포함하고 있다. 공기 중에서 점선으로 표시된 실험 데이터를 보면 0.14208MeV 정도에서 낮은 peak가 나타나 있는데 이는 후방산란에 의한 영향이다. 본 연구의 응답함수에서는 후방산란을 고려하지 않았기 때문에 fitting한 스펙트럼에는 나타나지 않고 있다. 또한 수중에서의 스펙트럼을 살펴보면 에너지가 낮기 때문에 물의 차단 및 산란효과에 의한 영향으로 전에너지 peak가 공기 중에서보다 1/3 정도 낮게 나타나고 있다. 그리고

물에 의해 산란된 감마선의 입사로 저에너지 영역에서 상대적으로 스펙트럼이 높게 나타나 있다. 수중에서의 실험 데이터는 산란 감마선의 영향으로 요동이 심한 것을 볼 수 있다. 그럼에도 불구하고 수중에서도 본 연구의 응답함수가 실험 데이터에 근접하게 fitting함을 알 수 있다. Fig. 10은 Cs-137 감마선원에 해당하는 스펙트럼으로 0.662MeV의 전에너지 peak를 포함하고 있으며 수중에서는 Compton edge가 거의 나타나지 않음을 볼 수 있다. 이 경우 Cr-51과는 달리 수중에서의 데이터는 비교적 요동이 적음을 볼 수 있다. Fig. 11은 Mn-54의 스펙트럼을 나타낸 것으로 0.8348MeV의 전에너지 peak를 포함하고 있으며, Fig. 12는 1.115MeV의 전에너지 peak를 포함한 Zn-65의 스펙트럼을 나타낸 것으로 앞서 설명한 Cr-51 스펙트럼보다 저에너지 영역에서 물의 차단 영향의 적게 나타남을 볼 수 있다. 이러한 결과는 결정된 상관계수에서도 잘 나타나 있다. 여기서 Na-22선원(1.274 MeV)인 경우는 전자포획에 의한 0.511MeV peak 영향이 크기 때문에 스펙트럼을 구성하는데 제외시켰다. Table 3은 curve fitting을 통하여 결정된 상관계수 값을 보여주고 있다. 계수들의 유효숫자는 계수값을 이용하여 응답함수를 나타낼 경우 결과치에 민감한 영향을 미치므로 10자리까지 구하였다.

각각의 응답함수식에 대하여 살펴보면 전에너지 peak에 나타난 상관계수는 \widehat{A}_1 , B_1 이고 flat continuum에 나타나는 상관계수는 A_3 , B_1 이고, 1차 콤프턴 산란에 나타나는 상관계수는 A_4 , B_3 , B_4 이다. 이러한 상관계수를 최소자승법을 이용하여 입사 에너지(E_0)에 대한 함수식으로 구한 것을 그래프로 나타내면 Fig. 13 ~ Fig. 18이 된다. 결과를 분석해 보면 선형계수 \widehat{A}_1 은 전에너지 peak의 높이에 해당하는 계수로써 공기와 수중에서의 함수식은 같은 형태이지만 계수값에서 큰 차이가 나타나고 있다. Table 3에서 보면 0.322MeV에서는 그 차이가 0.02662이고 1.115MeV에서는 0.00491로 저에너지 영역에서 영향이 크게

나타나고 있으며 공기 중 계수값이 높게 나타나 있다. 다음으로 A_3 는 flat continuum에서의 선형계수로 수중에서 큰 계수치를 보이고 있으며 저에너지 영역에서 영향이 크게 나타나고 있다. 1차 콤프턴산란의 선형계수인 A_4 의 fitting 함수를 Fig. 15에서 보면 공기 중에서는 에너지가 높아짐에 따라 점차적으로 감소하는데 비해 수중에서는 급격히 감소함을 볼 수 있다. 선형계수들은 에너지가 높아짐에 따라 감소하고 있고, 수중에서는 A_3 , A_4 의 계수값이 공기 중에 비해 높게 나타나고 있다. 비선형계수인 B_1 은 전에너지 peak의 Gaussian분포 분산 및 flat continuum의 분포에 해당하는 계수로 Table 3에서 보면 계수값의 거의 같게 나타나 fitting 함수도 같음을 볼 수 있다. 즉, 공기와 수중에서의 전에너지 peak의 분포 형태는 같고 그 계수치에만 영향을 미침을 알 수 있다. B_3 , B_4 는 1차 콤프턴산란에서 Compton edge의 에너지 및 분포에 해당하는 계수로써 에너지가 높아짐에 따라 증가하고 있으며 수중에서의 스펙트럼을 볼 때 Compton edge가 완만해짐을 볼 수 있다. 그러나 curve fitting에서 Compton continuum edge의 위치가 정확값을 제시해 주지 않았기 때문에 이 항에 대해서 비교는 하지 않겠다. 상관계수들을 이론적 함수식으로 근사시킬 때 얻은 상수 값들은 Table 4에 나타나 있다.

Table 3. Response function parameters obtain from by curve fitting

Energy(MeV)		0.32008	0.662	0.8348	1.115
\widehat{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 4. Coefficients of fitted parameters



(a) Fitting coefficients of polynomial \widehat{A}_1

a_1	b_1	c_1	d_1
0.41898391×10^3	-0.12580940×10^4	0.12595135×10^4	-0.42041254×10^3
a_2	b_2	c_2	d_2
0.42920395×10^2	-0.12877870×10^3	0.12891470×10^3	-0.43059744×10^2

(b) Fitting coefficients of polynomial A_3

e_1	f_1	g_1	h_1
$0.28906103 \times 10^{-7}$	$-0.21090025 \times 10^{-7}$	$0.52597177 \times 10^{-4}$	$0.24726346 \times 10^{-4}$
e_2	f_2	g_2	h_2
$-0.12616037 \times 10^{-7}$	$0.11772816 \times 10^{-3}$	$0.27413306 \times 10^{-4}$	$-0.72263692 \times 10^{-7}$

(c) Fitting coefficients of polynomial A_4

i_1	j_1	k_1	l_1
$0.83501394 \times 10^{-7}$	$0.44236648 \times 10^{-4}$	$-0.17628511 \times 10^{-3}$	$0.33779271 \times 10^{-3}$
i_2	j_2	k_2	l_2
$0.19665971 \times 10^{-3}$	$-0.65373228 \times 10^{-3}$	$0.11286739 \times 10^{-2}$	$-0.40266708 \times 10^{-3}$

(d) Fitting coefficients of polynomial B_1

m_1	n_1	o_1	p_1	q_1
-0.278133×10^{-2}	0.175417×10^{-1}	-0.384445×10^{-1}	0.471829×10^{-1}	0.329554×10^{-1}
m_2	n_2	o_2	p_2	q_2
-0.461892×10^{-2}	0.237224×10^{-1}	-0.444417×10^{-1}	0.485573×10^{-1}	0.909939×10^{-5}

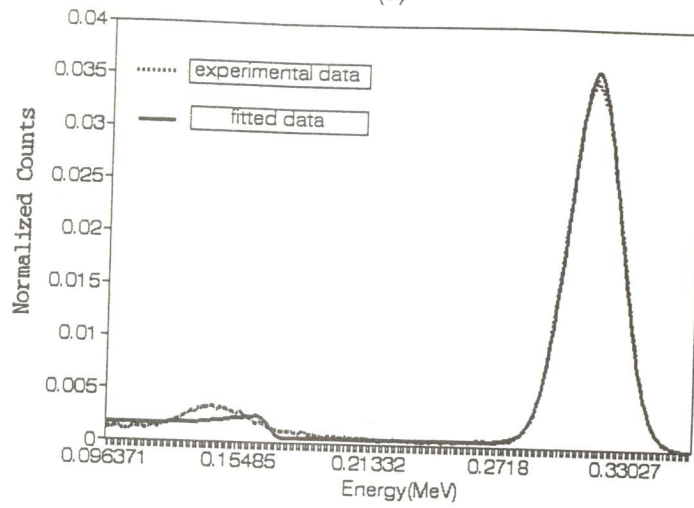
(e) Fitting coefficients of polynomial B_3

r_1	s_1	t_1	u_1	v_1
0.110337×10^0	-0.521860×10^0	0.886925×10^0	1.2892861×10^0	-0.783133×10^{-4}
r_2	s_2	t_2	u_2	v_2
0.116596×10^0	-0.593302×10^0	0.984042×10^0	0.834375×10^{-1}	-0.822142×10^{-3}

(f) Fitting coefficients of polynomial B_4

w_1	x_1	y_1	z_1	β_1
0.796448×10^{-1}	-0.277699×10^0	0.292494×10^0	-0.558095×10^{-1}	-0.246368×10^{-4}
w_2	x_2	y_2	z_2	β_2
-0.216494×10^{-1}	0.147738×10^0	-0.148800×10^0	0.192548×10^0	0.510858×10^{-3}

Cr-51
(a)



(b)

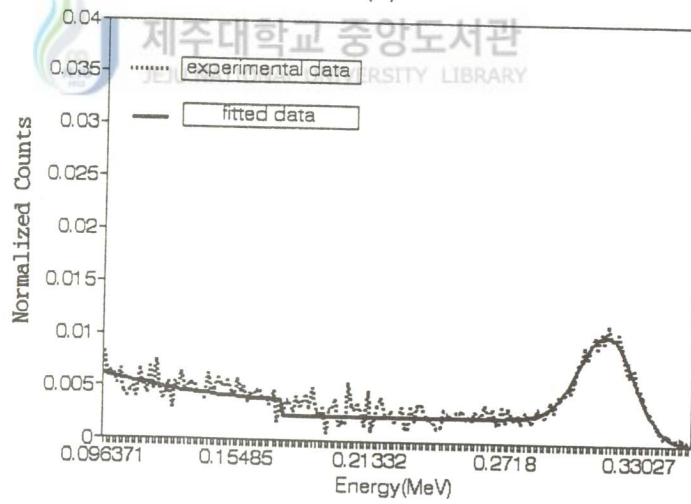


Fig. 9. Cr-51 γ -ray energy spectrums,
in air (a) and in water (b)

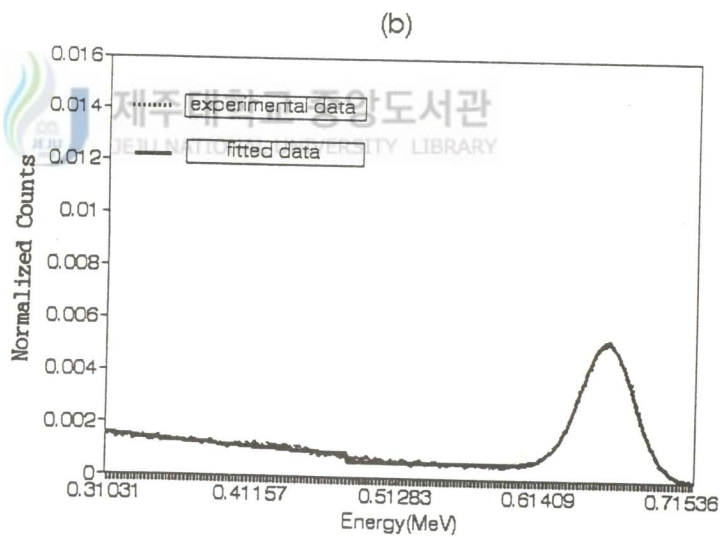
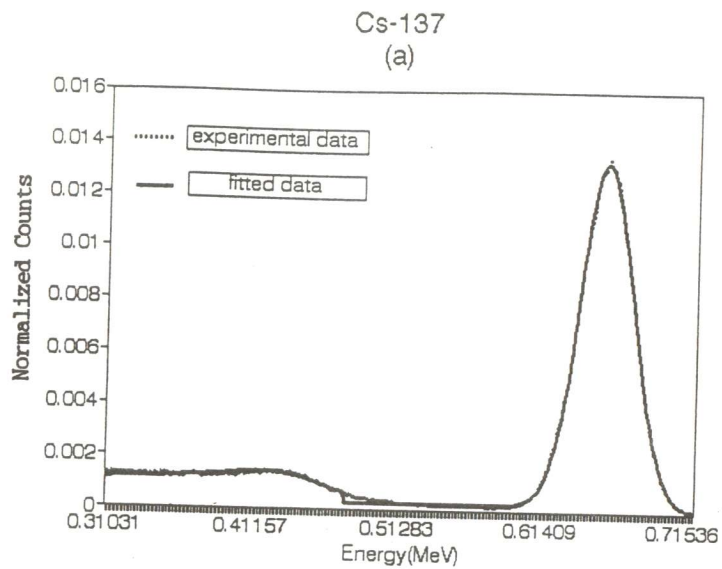
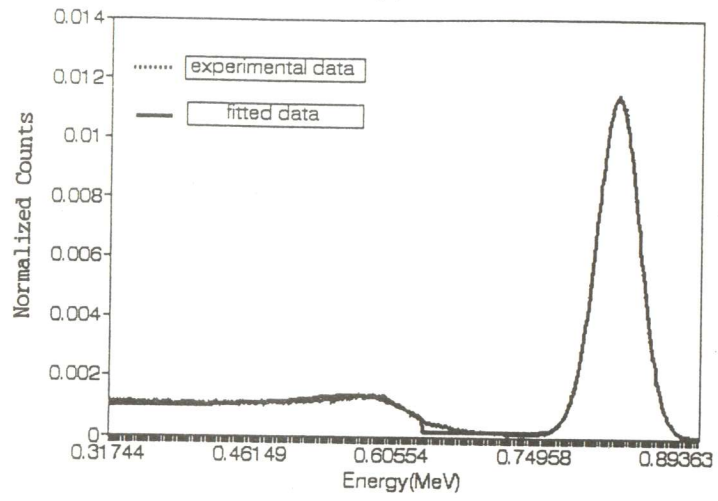


Fig. 10. Cs-137 γ -ray energy spectrums, in air (a) and in water (b)

Mn-54
(a)



(b)

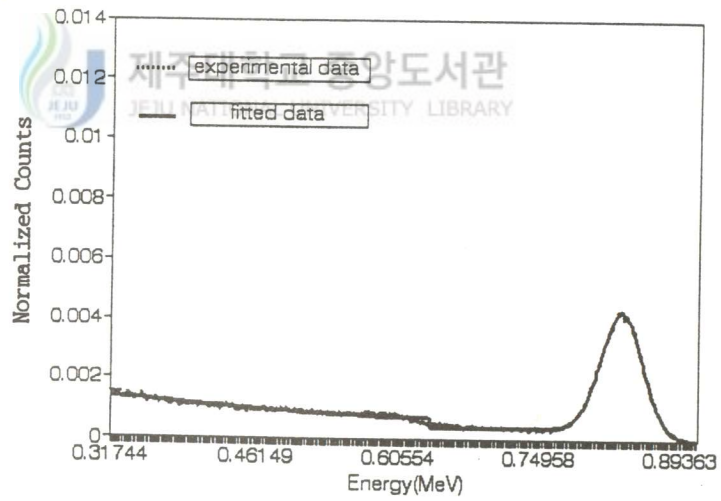
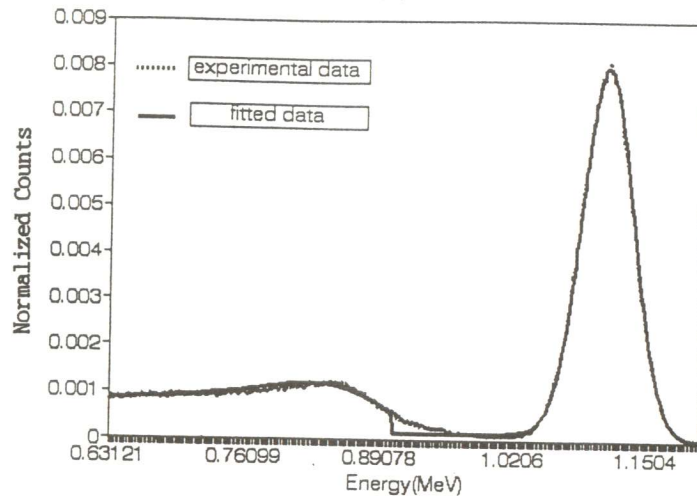


Fig. 11. Mn-54 γ -ray energy spectrums,
in air (a) and in water (b)

Zn-65
(a)



(b)

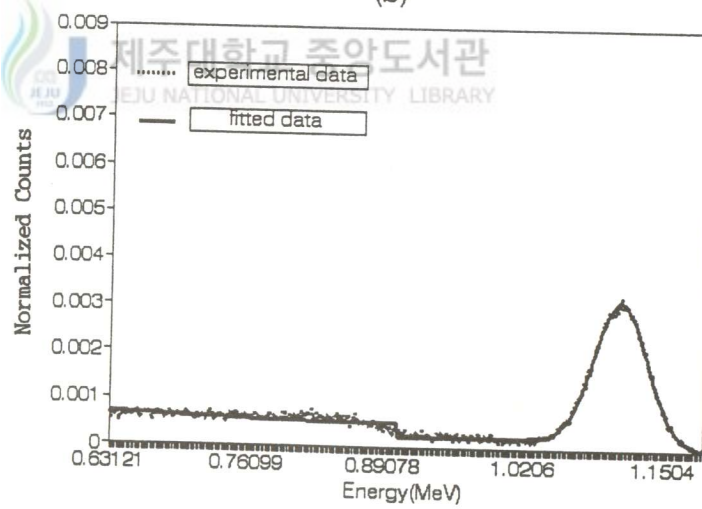


Fig. 12. Zn-65 γ -ray energy spectrums,
in air (a) and in water (b)

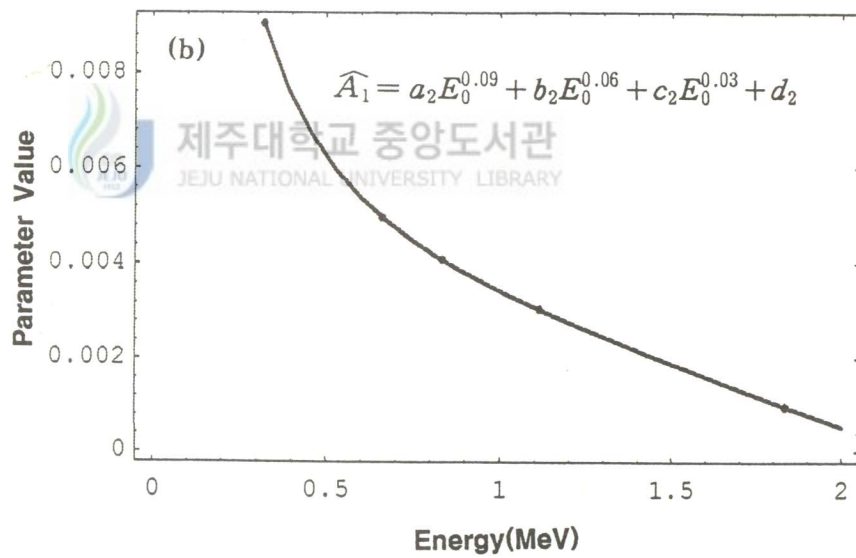
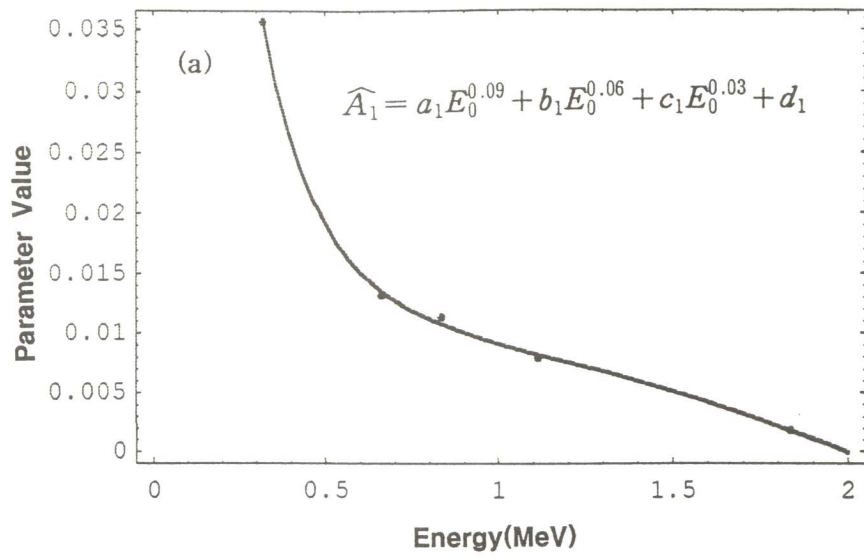


Fig. 13. Polynomial fitting of parameter \widehat{A}_1 as function of incident γ -ray energy E_0 , in air (a) and in water (b)

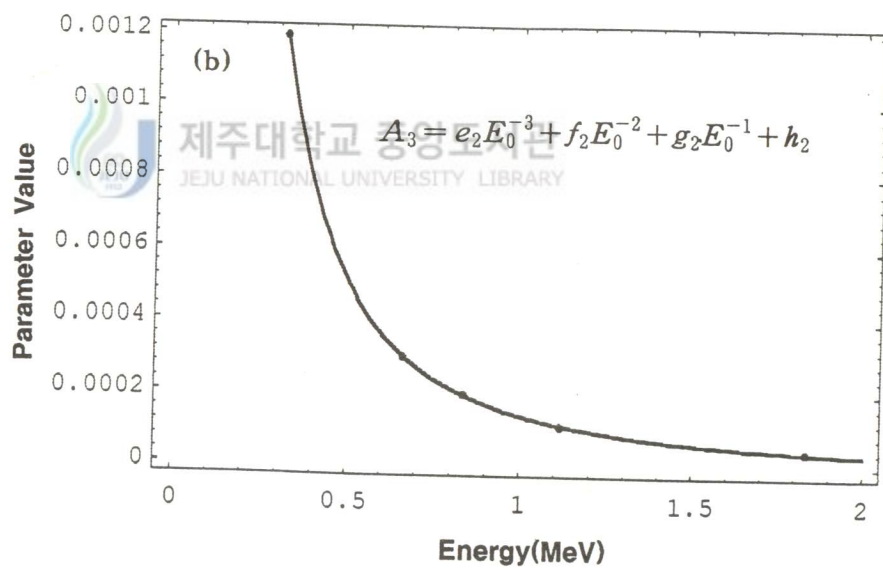
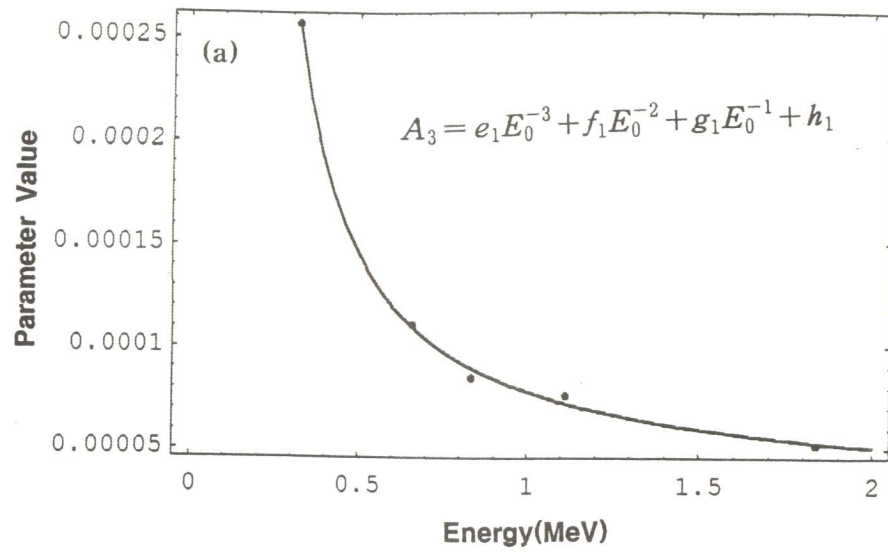


Fig. 14. Polynomial fitting of parameter A_3 as function of incident γ -ray energy E_0 , in air (a) and in water (b)

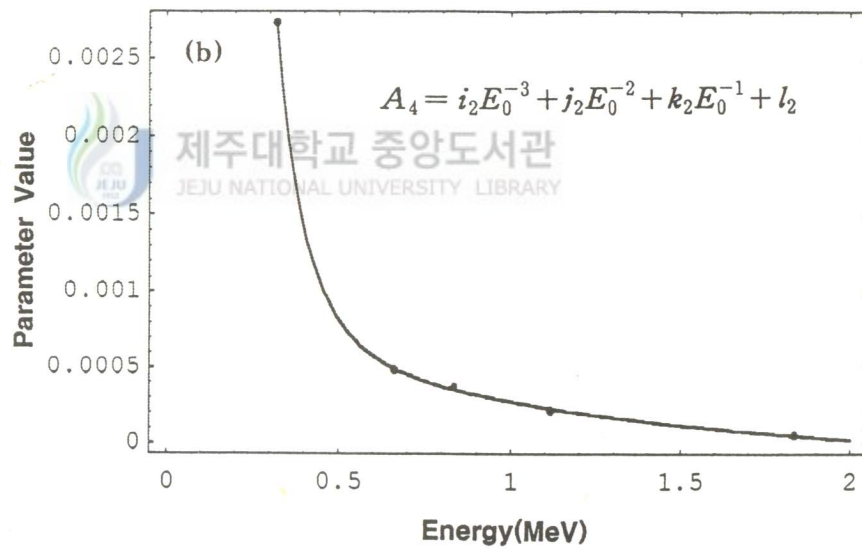
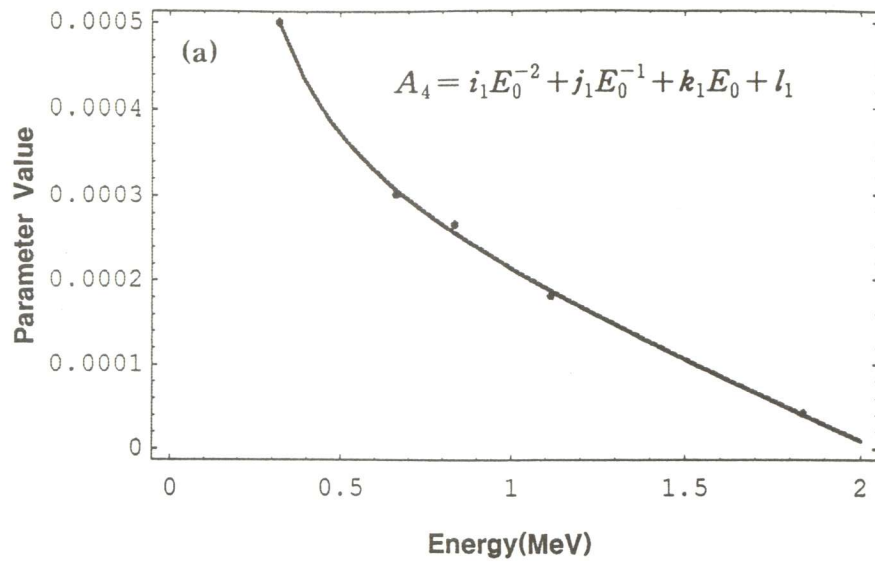


Fig. 15. Polynomial fitting of parameter A_4 as function of incident γ -ray energy E_0 , in air (a) and in water (b)

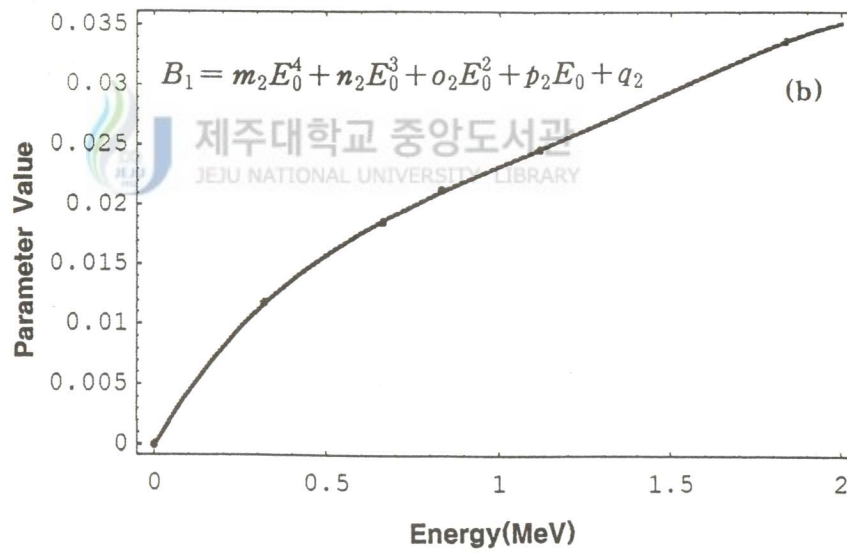
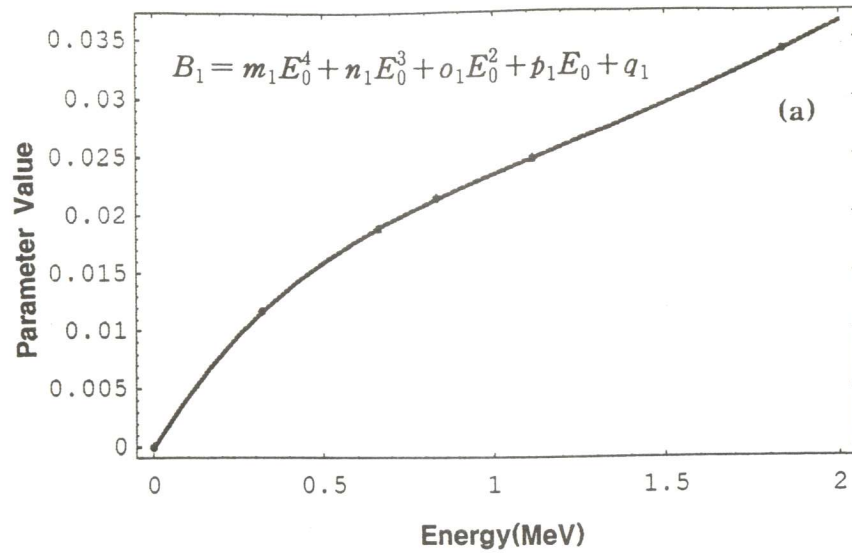


Fig. 16. Polynomial fitting of parameter B_1 as function of incident γ -ray energy E_0 , in air (a) and in water (b)

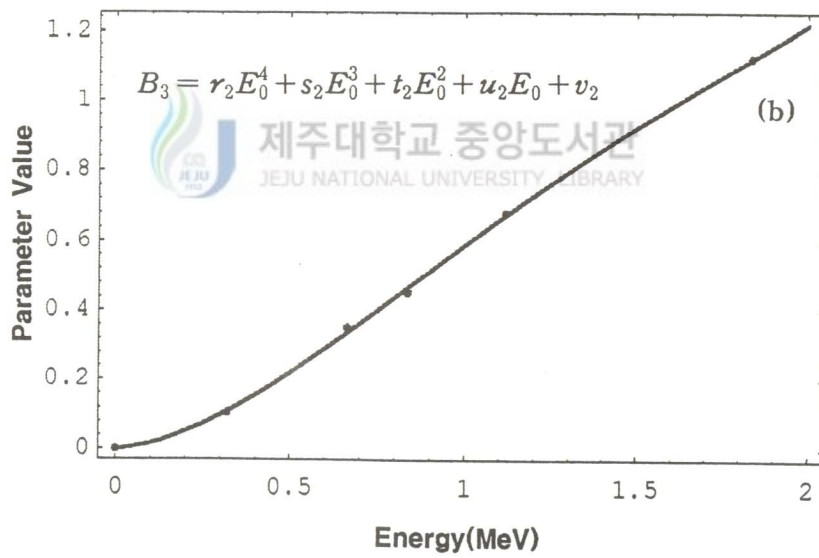
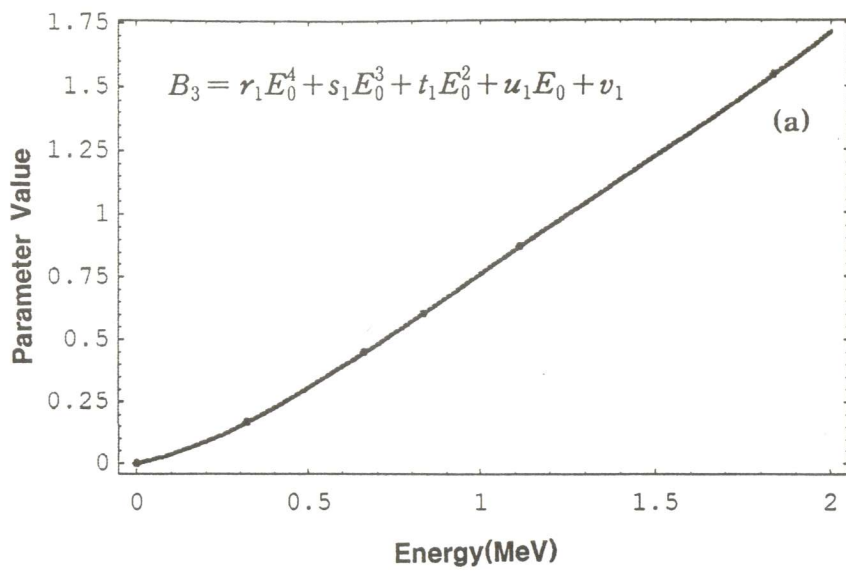


Fig. 17. Polynomial fitting of parameter B_3 as function of incident γ -ray energy E_0 , in air (a) and in water (b)

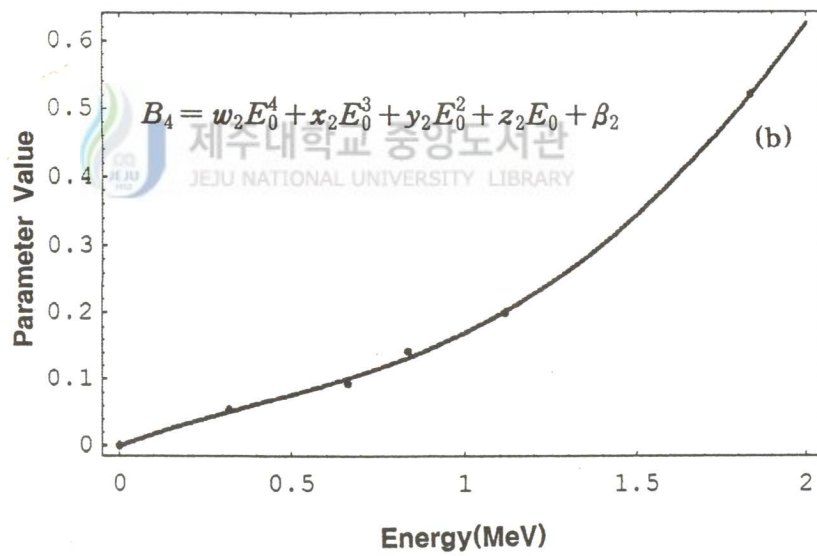
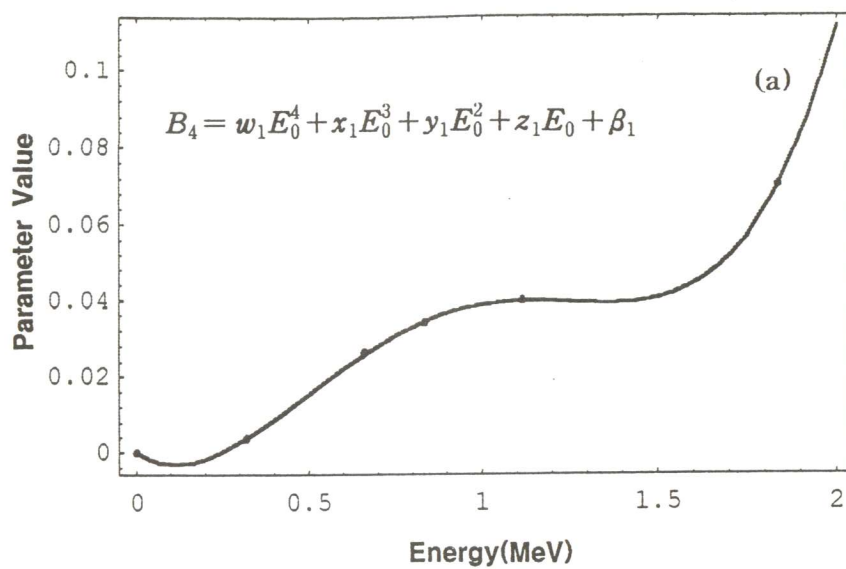


Fig. 18. Polynomial fitting of parameter B_4 as function of incident γ -ray energy E_0 , in air (a) and in water (b)

V. 결 론

본 연구에서는 NaI(Tl) 섬광검출기를 이용하여 주요 환경 방사능 영역에 속하는 저에너지 감마선원인 Cr-51, Cs-137, Mn-54, Zn-65, Na-22에 대하여 공기와 수중에서의 에너지 스펙트럼을 분석하였다. 측정된 스펙트럼을 분석하기 위하여 참고문헌(Lee 등, 1986)에 제시된 함수식에 근거하여 응답함수식을 구성하였다. 응답함수식에 고려된 항은 전에너지 peak, flat continuum, 1차 콤프턴산란으로서 기존의 고순도 게르마늄의 응답함수를 단순화한 형태이다. 본 연구에 사용된 응답함수는 고려된 에너지 영역에서 공기 중 뿐만 아니라 수중에서의 감마선 에너지 스펙트럼을 정확하게 나타낼 수 있음을 확인하였다.

응답함수의 주요 상관계수들은 실험 데이터를 χ^2 -최소자승법을 이용하여 응답함수식에 fitting 시킴으로써 감마선 에너지의 함수로 구하였다. 응답함수의 상관계수들을 주어진 에너지 영역에 대해서 최소자승법으로 근접시킴으로써 임의의 감마선 에너지에 대해서 스펙트럼을 예측할 수 있는 자료를 제시하였다.

수중에서의 스펙트럼은 본론에서 언급했듯이 물의 차단 및 산란효과에 의해서 공기 중에서 얻은 결과와는 다르게 나타났으며, 가장 큰 차이를 보인 상관계수는 전에너지 peak의 높이에 해당하는 \hat{A}_1 값으로 Cr-51에서는 공기 중에 비해 1/3 정도 낮게 나타나 전체적인 스펙트럼에 가장 큰 영향을 미치고 있다. 이외의 선형계수인 A_3 , A_4 는 수중에서 높게 나타나고 있으며 저에너지 영역에서 물에 의한 영향이 크게 나타나고 있다. 비선형계수인 B_1 은 공기와 수중에서 같게 나타나고 있다. 이러한 결과는 스펙트럼의 전에너지 peak의 분포가 같고 전체적인 계수치에만 영향을 미침을 알 수 있었다. 전체적으로 공기와 수중에서의 선형계수

는 입사되는 감마선 에너지(E_0)에 대하여 에너지가 높아짐에 따라 감소하고 있으며 비선형계수는 증가하고 있다.

위의 이론적 응답함수의 구성과 결과로 얻어진 상관계수를 통하여 감마선 에너지 영역을 세분화하여 에너지에 대한 함수식으로 나타낸다면 임의의 감마선 입사시에 나타나는 이론적 응답함수 스펙트럼도 예측될 수 있으리라 본다.

본 연구에서는 물의 깊이를 10cm로 고정하였으나 추후 연구 사항으로 물의 깊이에 따른 스펙트럼에 미치는 영향을 분석 할 수 있으리라 여겨진다. 이 경우 응답함수에 사용된 계수식의 변수는 감마선의 에너지와 물의 깊이가 될 것이다.



VI. 참고 문헌

- Bergner, M. J. and Seltzer S. M., 1972, Response Function for Sodium Iodide Scintillation Detectors, *Nuclear Instruments and Methods*, 104, 317-332.
- Bevington, P. R., 1969, Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences, Mc-Graw Hill, 336 pp.
- Clark, T. C. and Gardner R. P., 1982, A Monte Carlo Model in situ Prompt Gamma-Ray Analysis Probes, *Nuclear Instruments and Methods*, 193, 365-370.
- 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, 416-426.
- 강희동, 김도성, 최희동, 1993, 감마선 분광 및 핵종 분석, 경북대학 센서기술연구소, pp. 30 - 55.
- Knoll, G. F., 1979, Radiation Detection and Measurement, John Wiley & Sons, 816 pp.
- Lee, M. C., Verghese, K. and Gardner, R. P., 1986, Extension of the Semi-Empirical Germanium Detector Response Function to Low Energy Gamma Rays, 16 pp.
- 이영길, 1993, 감마선 미세빔을 사용한 HpGe검출기의 고유 검출 효율에 관한 연구, 충남대학교, pp. 7 - 12.

Nicholas T., 1976, Measurement and Detection of Radiation,
Mc-Graw Hill, 570 pp.

Tsoufanidis, T., Wehring, B. W. and Wyman, M. E., 1969, The
Use of an Analytical Response Function for Unfolding Beta
Spectra, *Nuclear Instruments and Methods*, 73, 98-102.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

감사의 글

대학원 생활을 한 지도 벌써 2년이 되어 갑니다. 지난 학기 동안 저에게 격려와 조언을 주신 분들께 진정 감사의 말씀을 전합니다. 무엇보다도, 논문 주제에서부터 완성하기까지 2년동안 지도해 주시고 격려해 주신 박재우 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 그리고 항상 관심을 갖고 격려를 해주신 이윤준 교수님, 이현주 교수님, 조경호 교수님, 이재영 교수님 그리고 천원기 교수님께도 감사를 드립니다. 또한 연구에 관하여 자료와 많은 조언을 해주신 원자력연구소 이명찬 박사님께 감사드립니다.

본 연구가 이루어지도록 주위에서 물신양면으로 도와주신 동료들과 졸업 선배님들에게도 감사의 말씀을 전합니다. 그리고 힘들어 할 때마다 도움을 주신 김휴찬 선배님, 장도현 선배님, 실험장치를 만드는데 함께 고생한 김수훈 학우에게도 깊은 감사를 드립니다.

끝으로 오늘이 있기까지 헌신적 사랑과 정성으로 보살펴 주신 부모님과 동생은미에게 이 작은 결실의 논문을 바칩니다.