

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

Eun-Sug Kim and Jae-Woo Park

Department of Nuclear and Energy Engineering, Cheju National University

NaI(Tl) 섬광검출기를 이용한 공기 및 수중에서의 감마선 에너지스펙트럼 분석

김은숙 · 박재우

제주대학교 에너지공학과

Abstract - The energy spectra in the air and water of several γ -ray sources such as Cr-51, Cs-137, Mn-54, Zn-65 have been investigated using the NaI(Tl) scintillation detector. General response functions, which can curve fit the measured spectra, have been constructed. We have found that the constructed response functions can successfully represent the measured spectra in the water as well as in the air. It is possible, by comparing the relevant parameters of the response functions, to quantitatively characterize the changing features of the measured spectra as obtained with varying the water depth. Of the response function parameters, those which affect the shape of the full-energy peak have most notably changed. Besides, those parameters which affect the shapes of the flat continuum, the Compton continuum and edge have also shown slight changes with varying the water depth.

Key words : NaI(Tl) scintillation detector, γ -ray spectra, response functions

요약 - NaI(Tl) 섬광검출기를 이용하여 감마선원인 Cr-51, Cs-137, Mn-54, Zn-65에 대하여 공기와 깊이가 다른 수중에서 에너지스펙트럼을 조사하였다. 측정된 스펙트럼의 차이와 변화를 정량적으로 비교분석하기 위해서 측정 스펙트럼을 곡선근사할 수 있는 응답함수를 구성하였다. 본 연구에서 밝혀진 바에 의하면 구성된 응답함수는 공기중 뿐만 아니라 수중에서 측정된 스펙트럼을 거의 완전하게 나타낼 수 있었다. 또한 응답함수에 사용된 계수들을 비교함으로써 공기와 수중에서-물의 깊이에 따른-스펙트럼의 특성 변화를 정량적으로 규정할 수 있었다. 응답함수의 계수 가운데 전에너지 봉우리의 높이 및 비율이 물의 깊이에 가장 민감하게 영향을 받았으며, 그 외에도 전에너지 봉우리의 퍼진 정도, flat continuum의 높이, 1차 콤프턴산란 연속선의 높이, Compton edge의 모양을 나타내는 응답함수계수 등에서 미약하나마 물의 깊이에 따라 변화를 보였다.

중심단어 : NaI(Tl) 섬광검출기, 감마선 에너지스펙트럼, 응답함수

서론

검출기의 응답함수

근래 원자력 시설의 운영과 방사성 동위원소의 사용이 빈번해짐에 따라 방사성폐기물 및 방사성 물질의 환경오염에 대한 관심이 높아 졌다. 방사성 물질의 환경 오염을 감시하기 위하여 널리 이용되는 방법중의 하나가 감마선 에너지스펙트럼 분석을 통한 방사성 핵종의 확인과 방사능의 측정이다. 감마선 에너지스펙트럼은 시료가 놓인 환경에 따라 형태의 차이가 날 수 있으며, 이러한 차이는 환경시료의 분석에 영향을 주는 한 요소이다. 특히 방사성 시료가 수중에 있을 경우 에너지스펙트럼은 공기중에서와 다른 형태를 갖게 된다. 에너지스펙트럼의 차이를 간단히 구별하는 방법은 육안으로 비교하는 것이다. 스펙트럼의 차이를 보다 구체적이고 정량적으로 확인하는 방법은 스펙트럼을 함수형태로 나타내어 비교하는 것이며, 특정한 감마선 측정계통에서 발생하는 에너지스펙트럼은 그 계통의 응답함수로 나타낼 수 있다.[1] 본 연구는 응답함수를 통하여 감마선 방출 핵종인 Cr-51, Cs-137, Mn-54, Zn-65 선원의 공기와 수중에서의 에너지스펙트럼을 비교·분석하는 방법을 제시하고 그 결과를 분석하는 데 목적을 두었다.

본 연구에 사용된 방법은 NaI(Tl) 섬광검출기와 다중과도분석장치(Multi-channel Pulse Analyzer)를 이용하여 앞서 열거한 감마선원의 공기와 수중에서의 에너지 스펙트럼을 측정하고, 획득한 스펙트럼 자료를 문헌[2,3]에 제시된 응답함수(response function)에 적용하여 응답함수식의 계수를 결정하고, 결정된 계수의 특성을 분석하는 단계로 이루어 진다.

일반적으로 감마선 검출기의 응답함수식은 감마선과 물질의 기본반응인 광전효과, 콤프턴산란, 쌍생성 반응에 근거하여 구성된다. 본연구에서는 비교적 낮은 에너지의 감마선원을 사용하였기 때문에 쌍생성반응을 무시하여 응답함수식을 전 에너지 봉우리(full energy peak), flat continuum, 1차 콤프턴산란, 2차콤프턴산란을 고려하여 구성하였다. 측정된 스펙트럼 자료에 근거하여 응답함수식의 계수를 결정하기 위해서 χ^2 -곡선근사(curve fitting) 방법[4]을 사용하였다.

검출기에서 감마선의 에너지가 측정되기 위해서는 일차적으로 검출기에 입사된 감마선과 검출물질과의 반응을 통하여 감마선의 에너지가 검출물질에 전달되어야 한다. 감마선은 검출물질과의 반응을 통하여 1차적으로 전자를 발생시키고 이 전자가 대량의 2차전리 또는 여기를 시키면서 검출기에 에너지를 전달하게 된다. 따라서 검출기의 출력신호는 검출물질과의 반응을 통하여 생성된 전자에 전달된 감마선의 에너지에 비례해서 나타나게 되며 검출기의 출력신호를 다중과도 분석장치를 통하여 분광하면 특정한 반응을 일으킨 감마선의 수에 비례하는 계수치의 봉우리가 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[5].

광전효과 발생시 일차전자에 전달되는 에너지는 감마선의 전에너지가 된다. 콤프턴산란 반응시 일차전자에 전달되는 에너지는 산란각에 따라 연속분포를 갖는다. 일차 산란반응을 일으킨 감마선은 2차, 3차의 산란반응을 일으킬 수 있으며 궁극적으로 검출기에 전달되는 에너지는 입사된 감마선의 에너지에서 검출기를 이탈하는 산란 감마선의 에너지를 뺀 값과 같다. 전자쌍생성 반응을 일으키는 경우 검출기에 전달되는 에너지는 양전자 소멸로 생성된 두 개의 감마선이 검출기에서 둘 다 흡수되거나, 한 개만 흡수되거나, 둘 다 흡수되지 않는 경우에 따라서 달라진다.

감마선 검출기의 출력 신호는 검출기에 흡수된 감마선 에너지가 전기적 신호의 변환 매체인 전하 운반체로 변환됨으로써 형성되며 출력 신호의 크기는 최종적으로 수집되는 전하 운반체의 수에 의해서 결정된다. NaI(Tl) 검출기인 경우 감마선의 에너지가 섬광으로 변환되고, 이 섬광이 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

생기며 결과적으로 동일한 에너지의 감마선이 검출기에 흡수되더라도 최종적으로 수집되는 전하 운반체의 수는 통계적으로는 평균치에 대하여 Gaussian 분포를 갖게 된다. 따라서 검출기의 응답함수는 검출기에 흡수되는 에너지를 평균값으로 하여 Gaussian 분포함수로 변환(convolution)함으로써 구할 수 있다[6,7]. 본 연구에서는 문헌[2,3]에 보고된 고순도 게르마늄(HpGe) 검출기의 응답함수에 근거하되 쌍생성반응을 무시한 응답함수식을 구성하였다.

전에너지 봉우리(Full Energy Peak)

전에너지 봉우리는 주로 광전효과에 의하여 입사 감마선의 에너지가 검출기에 전부 흡수되는 경우 발생하는 봉우리로서 에너지가 낮은 감마선에서 반응 확률이 높다. 이 경우 검출기에 흡수되는 에너지는 일정하므로 응답함수식은 다음과 같다.

$$f_1(E_0, E) = \hat{A}_1 \exp\left[-\frac{(E-E_0)^2}{2B_1^2}\right] \quad (1)$$

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

여기서 E_0 는 입사되는 감마선 에너지이며, B_1 은 전에너지 봉우리에 해당하는 Gaussian 분포의 분산을 나타내는 계수이고, A_1 은 봉우리의 높이에 비례하는 계수이다.

전에너지 봉우리의 저에너지 부위에 생기는 꼬리

전에너지 봉우리는 검출기 내부에 생성된 전하 운반체가 전부 수집된 경우는 봉우리를 중심으로 좌우 대칭형이 된다. 그러나 실제에 있어서는 검출기의 불순물 및 표면 효과에 의한 영향 등으로 전하 운반체의 일부가 수집되지 않게 된다. 이 경우 전에너지 봉우리의 저에너지 부위(봉우리의 왼쪽)는 오른쪽보다 상대적으로 계수치가 높게 되어 꼬리가 나타나게 된다. 이러한 현상을 반영한 응답함수는 다음과 같이 된다.

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

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

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

Flat Continuum

검출기의 출력신호를 분광하면 입사되는 감마선 에너지보다 낮은 영역에서는 모든 에너지에 걸쳐 일정한 계수치가 나타나게 된다. 이러한 현상을 반영하는 응답함수는 다음과 같다.

$$f_3(E_0, E) = A_3 \operatorname{erfc}\left[\frac{(E-E_0)}{\sqrt{2}B_1}\right] \quad (3)$$

여기서 A_3 는 flat continuum의 높이를 나타내는 계수이다.

1차 콤프턴산란 연속(Single-Scatter Compton Continuum)

입사된 감마선이 검출기에서 1회만 콤프턴산란 반응을 한 경우로서 산란반응을 통하여 전자에 전달된 에너지가 연속분포를 가지므로 스펙트럼도 연속 분포로 나타나게 된다. 콤프턴산란 반응으로 검출기에 흡수된 에너지 분포를 이용하여 구한 응답함수는 다음과 같다.

$$f_4(E_0, E) = A_4 \left[\frac{E_0}{E'} + \frac{E'}{E_0} - 1 + \cos^2\theta \right] \times \operatorname{erfc}\left[\frac{(E-B_3)}{\sqrt{2}B_4}\right], E \leq E_0 \quad (4)$$

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

$$E_c = \frac{E_0}{1 + 0.5m_e c^2}$$

여기서, B_3 은 산란 각도가 180° 일 때 전자에 전달된 에너지이며(Compton edge), B_4 는 Compton edge에서의 퍼짐을 나타내는 계수이다. A_4 는 Compton edge에서 높이를 나타내는 계수이다. $m_e c^2$ 는 전자의 정지질량에너지이며 θ 는 산란각이다.

2차 산란 콤프턴연속(Double-Scatter Compton Continuum)

검출기에서 1차 산란된 감마선이 2차 산란 반

응을 일으키는 경우 검출기에 전달되는 에너지는 1차산란 전자에 전달된 에너지와 2차산란 전자에 전달되는 에너지의 합과 같다. 이 반응은 에너지 스펙트럼상에서 Compton edge와 전에너지 봉우리 사이의 영역에 영향을 미친다. 이 경우의 응답함수식 $f_5(E_0, E)$ 은 상당히 복잡한 형태를 취하게 되는데 문헌 [2,3]에 자세히 주어져 있기 때문에 여기서 생략한다.

위에서 본 바와 같이 단일 에너지 감마선이 입사하여도 감마선과 검출기의 반응에 따라 검출기의 출력신호의 분포는 다양한 형태를 갖게 되며 검출기의 궁극적 응답함수식은 위에서 열거한 개별적인 응답함수식의 선형적 조합으로 표시된다.

$$R(E_0, E) = \sum_{i=1}^5 f_i(E_0, E) \quad (5)$$

본 연구에서는 부피가 큰 NaI(Tl) 검출기를 사용하였으며 저에너지 영역의 감마선원을 사용하였기 때문에 문헌[2,3]의 고순도 게르마늄 검출기에 대한 응답함수를 단순화하여 사용하였다.

실험에서 획득한 에너지스펙트럼을 식 (1)~(5)의 응답함수식으로 나타내기 위해서는 응답함수에 사용된 계수 A_1-A_4 와 B_1-B_4 를 결정해야 한다. 측정된 스펙트럼에 최적으로 근접하는 응답함수의 계수를 결정하기 위하여 본연구에서는 χ^2 함수에 근거한 선형근사법과 Marquardt 알고리즘[4]에 근거한 최소자승법을 이용한 프로그램[8]을 사용하였다. 이 프로그램은 각 계수의 추측된 초기치를 입력하면, A_1-A_4 은 선형근사법으로, B_1-B_4 은 Marquardt 알고리즘으로 반복계산을 통하여 측정데이터에 가장 근접하는 응답함수의 계수를 출력한다.

실험방법 및 스펙트럼 측정

감마선 에너지스펙트럼의 자료를 획득하기 위하여 본 연구에 사용된 장치의 구성은 그림 1과 같다. 검출기는 6"×6" NaI(Tl) 섬광검출기이며 다중과도분석장치는 2048 채널수를 가진 개인용 컴퓨터에 장착된 형태이다. 사용된 감마선원은 Cr-51, Cs-137, Mn-54, Zn-65이며, 각각 단일한 에너

지의 감마선을 방출한다. 표 1은 각 선원에서 방출되는 감마선의 에너지와 반감기를 보여주고 있다. Zn-65는 전자포획으로 인한 0.511MeV의 소멸감마선을 일부 방출한다.

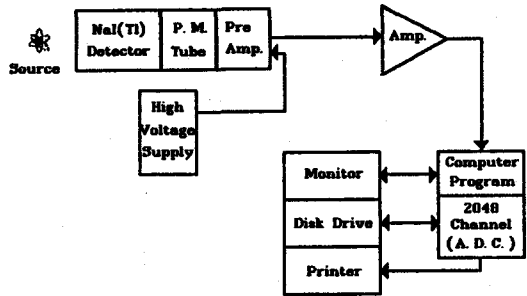


Fig. 1. Arrangement of the Data Acquisition System for Gamma-ray Energy Spectrum.

Table 1. Used γ -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

본 연구는 먼저 실험을 통하여 공기와 수중에서의 모든 스펙트럼 자료를 획득하고 다음 획득한 자료를 근거로 프로그램을 실행시켜서 응답함수의 계수를 구하는 순서를 따랐다. 공기중에서의 스펙트럼 측정은 K-40 등과 같은 배경방사능의 영향을 최소화 하기 위하여 검출기를 납으로 차폐시킨 후 실시하였다. 그림 2는 공기중에서의 측정을 위하여 검출기를 납으로 차폐한 상태를 보여주는 사진이다. 먼저 배경방사능에 대한 스펙트럼을 10분간 측정하고, 각 선원에 대하여 스펙트럼을 10분간씩 측정하였다. 물속에서의 스펙트럼 측정은 가로, 세로, 높이가 각각 28cm×29cm×25cm인 사각 아크릴 수조(그림 3)에 물을 3cm, 6cm, 9cm, 12cm 깊이로 채워 가면서 각 깊이에 대하여 배경 방사능을 10분간 측정하고, 같은 깊이에서 수조 중앙바닥에 각 선원을 고정하고 10분간씩 측정하는 방법을 따랐다. 각 측정에 있어 검출기와 선원의 거리는 일정하게 고정하였으며 측정된 스펙트럼은 채널별 계수치로 컴퓨터

터에 수록되었다.

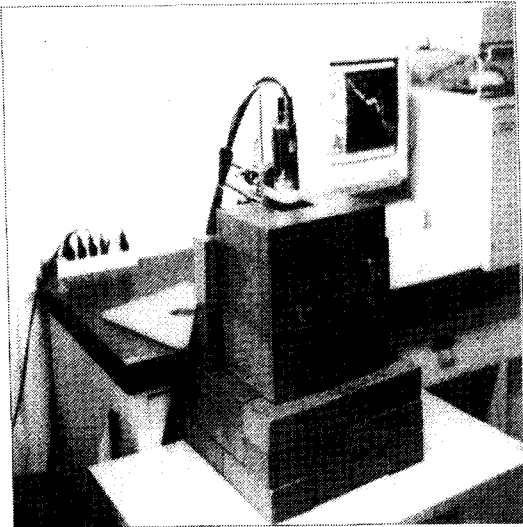


Fig. 2. Detector Arrangement Shielded with Lead Bricks for Measurement in the Air.

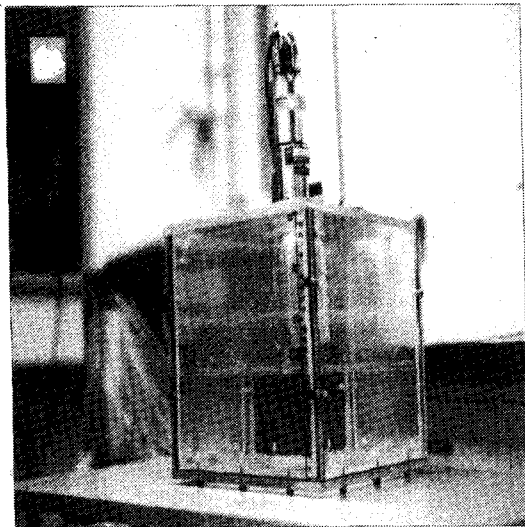


Fig. 3. Detector Arrangement with Arcryl Water Tank for Measurement in the Water.

실험에서 획득한 스펙트럼 자료는 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 있다. 에너지교정 결과 얻어진 채널수와 감마선의 에너지 관계식은 다음과 같다.

$$y = 1.4262303593 \cdot x - 0.0081907639 \quad (6)$$

(6)여기서 y 는 감마선의 에너지이며 x 는 MCA에 나타난 채널수이다.

각 감마선원에 대해서 획득한 스펙트럼을 응답함수식으로 곡선근사하기 위해서 먼저 각 채널의 계수치를 전체 계수치로 나누어 정규화(normalization)하였다. 다음, 정규화된 채널별 계수치는 앞서 언급한 곡선근사 프로그램을 실행시켜 각 응답함수에 사용된 계수를 결정하였다. 마지막으로, 이 실험계수를 응답함수식에 대입하여 각 감마선원에 해당하는 응답함수를 구하였다.

그림 4-7는 각각 Cr-51, Cs-137, Mn-54, Zn-65에서 방출되는 감마선에 대한 공기중에서의 에너지스펙트럼과 수중에서 깊이에 따른 스펙트럼의 변화를 보이고 있다. 각 그림에서 점으로 표시된 것은 측정된 스펙트럼을 나타내며 실선은 응답함수로 근사한 스펙트럼을 나타낸다. 본 연구에서 구성한 응답함수는 전 핵종에 대해서 공기중 뿐만 아니라 수중에서의 스펙트럼을 거의 완전하게 근사하고 있음을 볼 수 있다. Compton Edge부근에서 응답함수로 근사한 스펙트럼이 각이진 모양을 보인 것은 본 연구에 사용한 응답함수가 3차 이상의 Compton 산란을 무시하였기 때문이다. 측정된 스펙트럼을 보면 공통적으로 물의 깊이가 깊어짐에 따라 전에너지 봉우리는 낮아지고 콤프톤 연속의 경계는 불분명해 지고 있다.

Cr-51의 경우(그림 4) 0.32 MeV에서 전에너지 봉우리가 나타나고 있으며 공기중에서 약 0.17 MeV 이하에서는 Compton산란에 의한 연속 영역이 나타나고 있다. 수중 스펙트럼은 검출기의 부에서의 산란의 영향으로 물의 깊이가 깊어짐에 따라 산란 감마선의 영향이 증가하여 물의 깊이가 9cm, 12cm에서는 Compton Edge를 확인하기가 어렵다. Cs-137의 경우(그림 5) 0.66 MeV에서 전에너지 봉우리가 보이며 물의 깊이가 9cm, 12cm에서는 콤프톤 연속을 구별할 수 없다. Mn-54의 경우(그림 6) 0.83 MeV근처에서 전에너지 봉우리가 나타나고 있으며 물의 깊이가 3cm에서는 콤프톤 연속이 뚜렷이 보이거나 그 이상의 물깊이에서는 분명하지가 않다. Zn-65의 경우(그림 7) 1.12 MeV근처에서 전에너지 봉우리가 보이며 물의

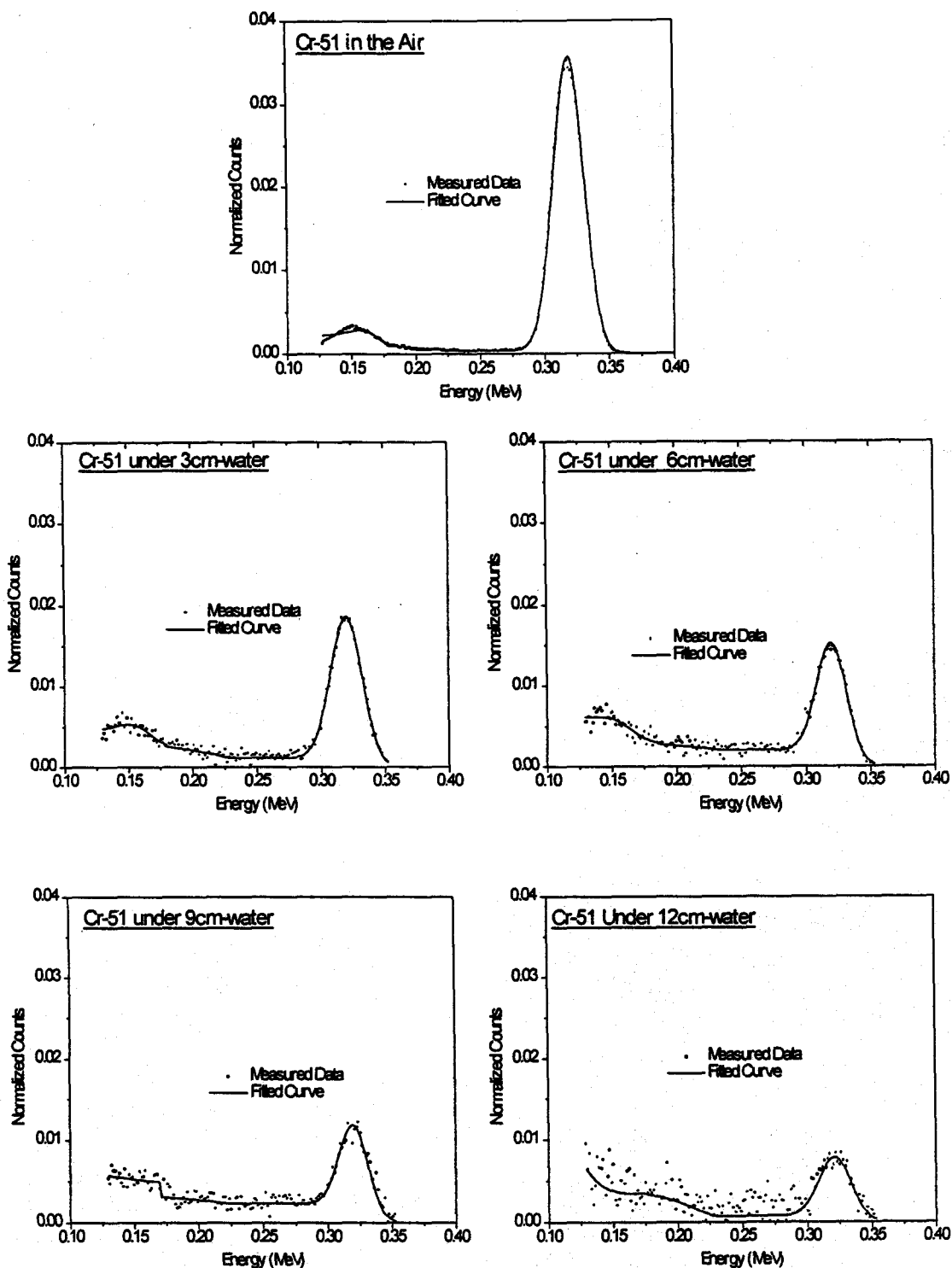


Fig. 4. Curve Fitting of Gamma ray Energy Spectrum for Cr-51 (0.32 MeV).

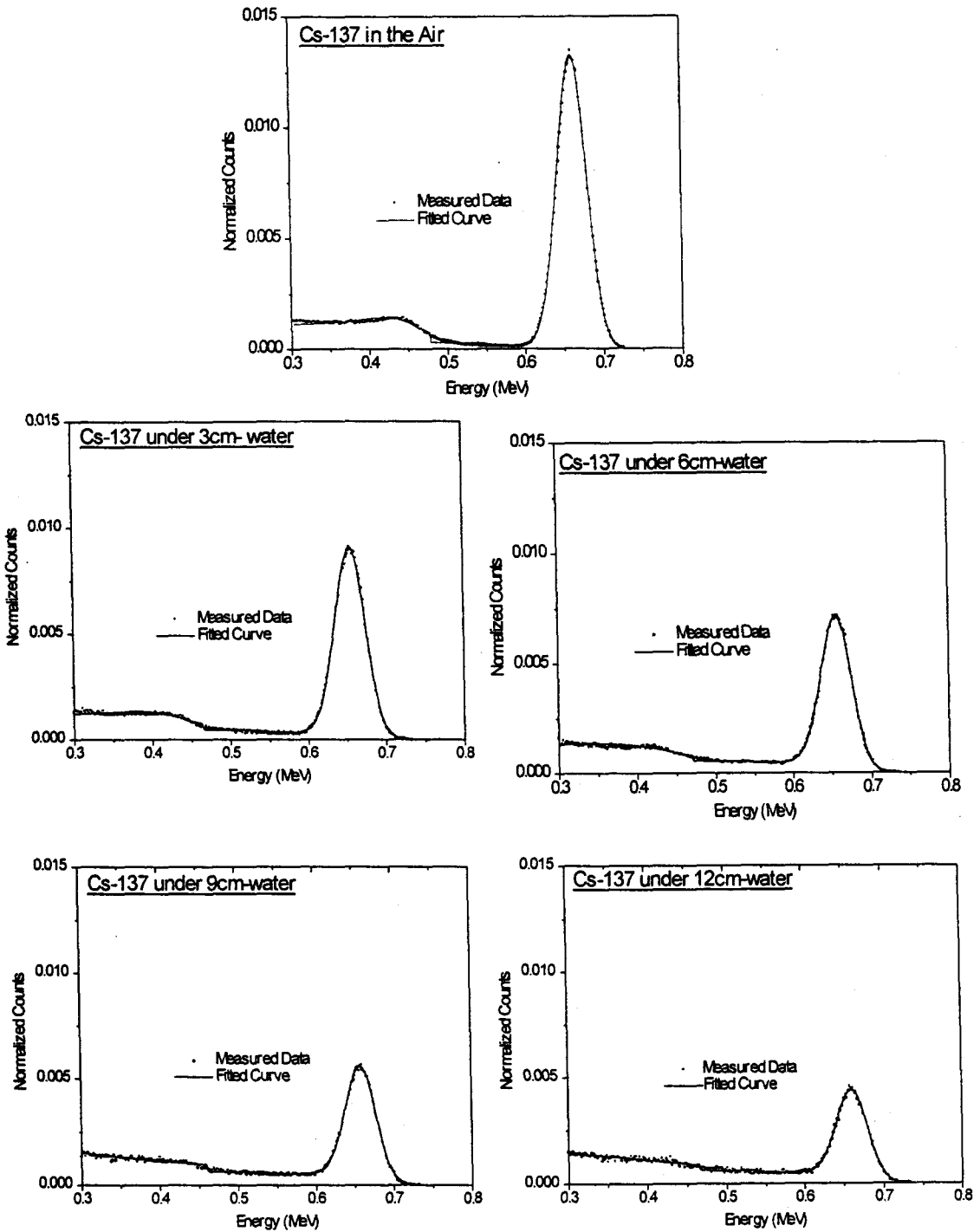


Fig. 5. Curve Fitting of Gamma ray Energy Spectrum for Cs-137 (0.662 Mev).

깊이가 3cm, 6cm에서는 콤프톤 연속이 명확히 구별되나 9cm와 12cm에서는 불분명하다. 이 경우

측정된 스펙트럼 자료의 분산도는 Cs-137과 Mn-54보다 크게 나타났다.

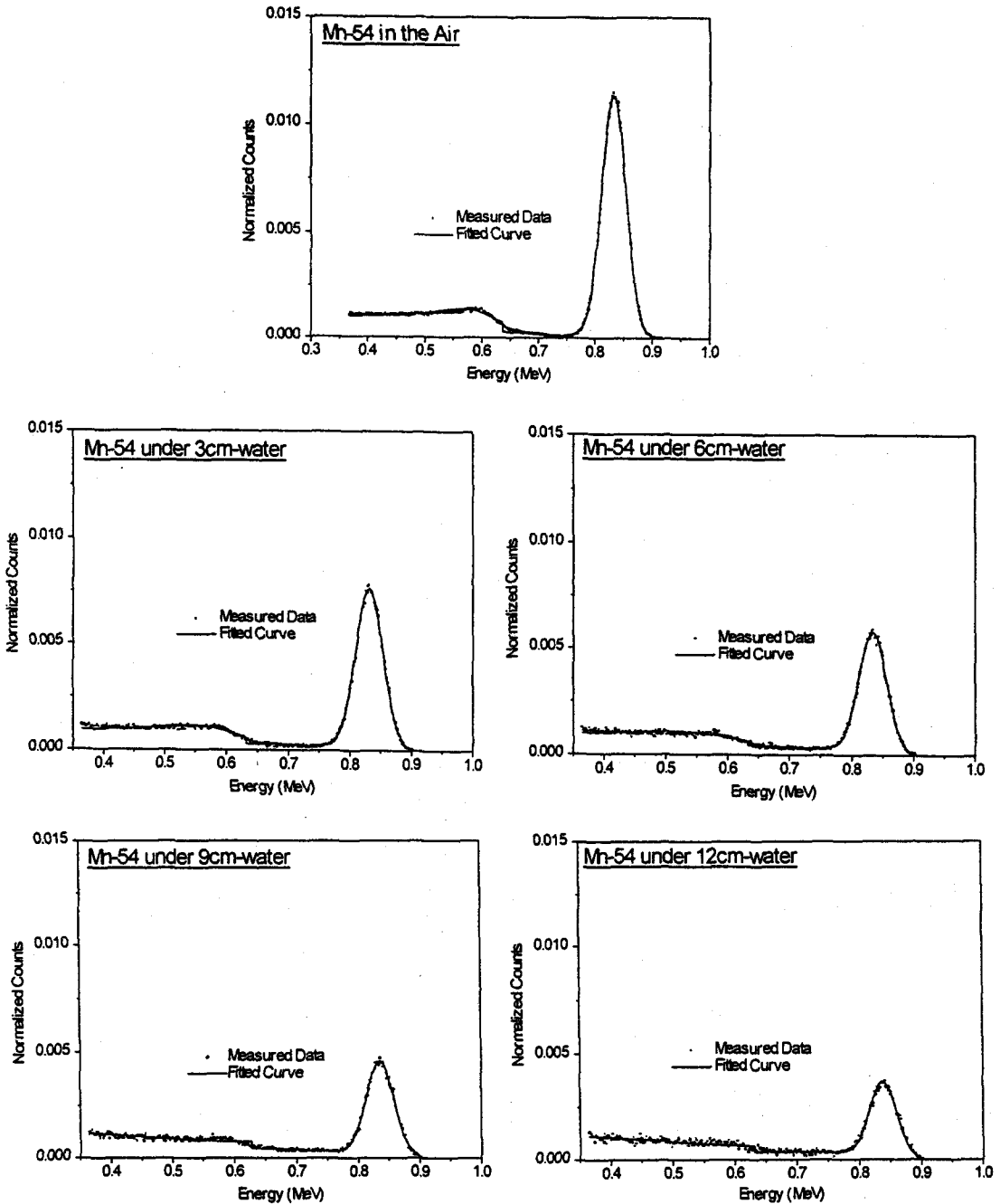


Fig. 6. Curve Fitting of Gamma ray Energy Spectrum for Mn-54 (0.835 Mev).

결과 및 분석

공기와 수중에서 측정된 감마선 에너지스펙트럼의 형태와 변화를 정량적으로 비교·분석하기 위하여 먼저 측정된 스펙트럼을 응답함수로 곡

선근사하였다. 응답함수로 나타낸 스펙트럼의 특징은 응답함수에 사용된 계수에 의해서 규정되므로 측정된 스펙트럼의 비교분석은 이 계수들을 비교분석함으로써 가능하다. 본 연구에 사용된 응답함수의 계수 가운데 스펙트럼의 형태에 민

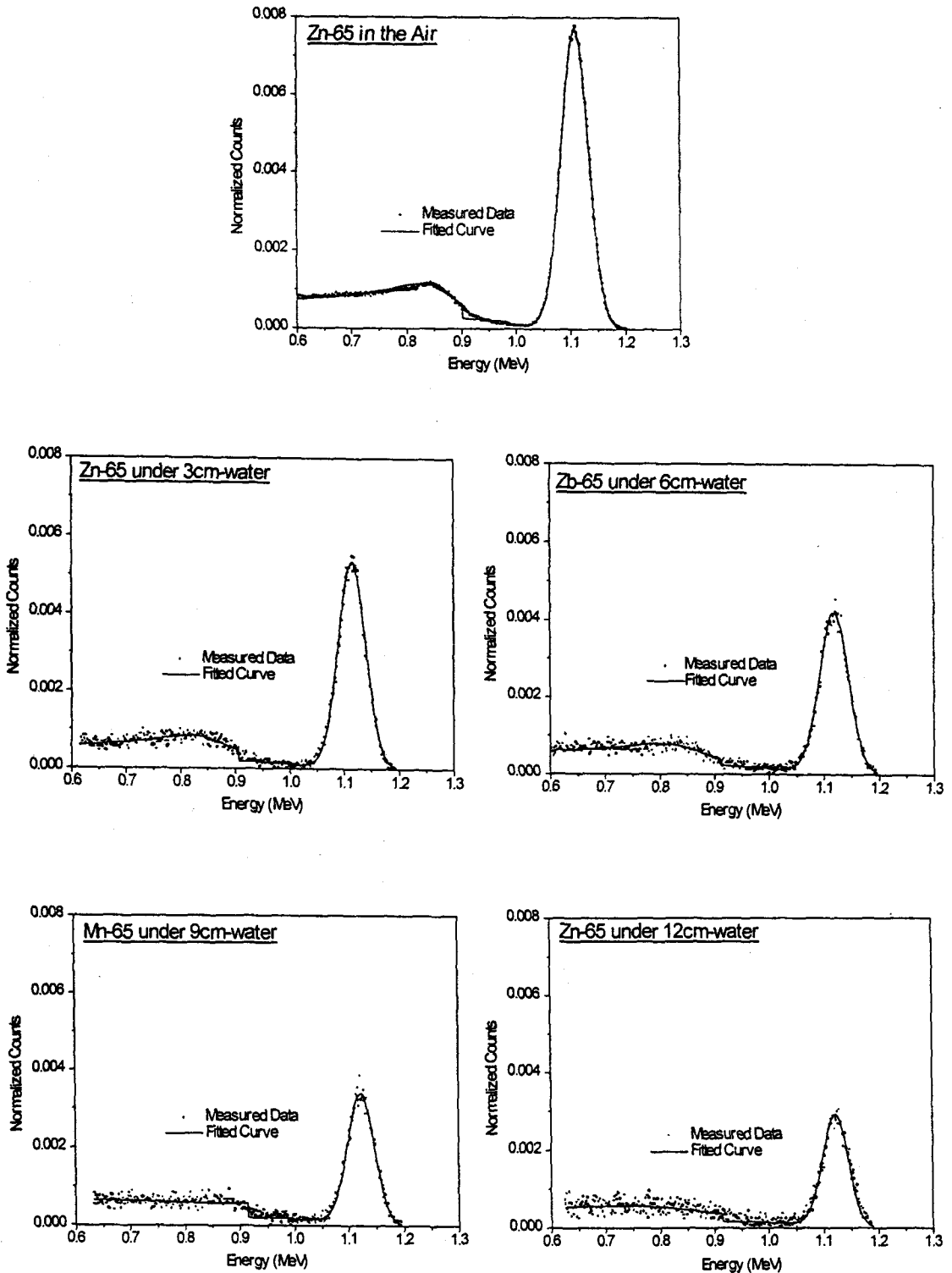


Fig. 7. Curve Fitting of Gamma ray Energy Spectrum for Zn-65 (1.116 Mev).

감하게 영향을 미치는 계수는 $\hat{A}_1, A_3, A_4, B_1, B_3, B_4$ 이다. \hat{A}_1 은 전에너지 봉우리의 높이를 나타내는 계수이며 B_1 은 봉우리의 상대적인 퍼진 정도를 나타낸다. B_1 이 클수록 봉우리의 퍼진 정도가 증가한다. A_3 은 flat continuum의 높이를 나타내는 변수이다. flat continuum은 전 에너지에 걸쳐서 일정한 값으로 계수되는 현상을 나타내는데 콤프톤 연속과 전에너지 봉우리 부위에서는 외형적으로 보이지 않으나 콤프톤 연속의 끝과 전에너지 봉우리 사이의 낮은 부위의 높이를 나타낸다. A_4 는 콤프톤 연속의 높이를 나타내는 계수이며, B_3 는 콤프톤 연속의 끝 에너지에 해당하며, B_4 는 콤프톤 연속의 끝부분에서 모양을 나타낸다. B_4 가 클수록 끝부분의 모양이 완만한 경사를 이루게 된다. 나머지 계수인 A_2, B_2 는 스펙트럼의 외형에 미치는 영향이 미미하기 때문에 분석에서 제외하였다.

그림 8는 각 선원에 대해서 공기와 수중에서의 \hat{A}_1 의 크기를 비교한 것이다. 각 선원에 대해서 물의 깊이가 깊을수록 \hat{A}_1 의 크기가 점점 감소하며 에너지가 낮은 감마선일수록 감소의 정도가 심해짐을 볼 수 있다. 그림 9은 전에너지 봉우리의 퍼진 정도를 나타내는 B_1 의 변화를 보이고 있다. B_1 은 에너지가 큰 감마선에서 증가하며 물의 깊이에 대해서는 그다지 큰 변화가 없음을 볼 수 있다. 그림 10은 전체 계수치에서 전에너지 봉우리의 계수치가 차지하는 비율을 나타낸 그림이다. 모든 선원에 대해서 물 깊이의 증가에 따라 이

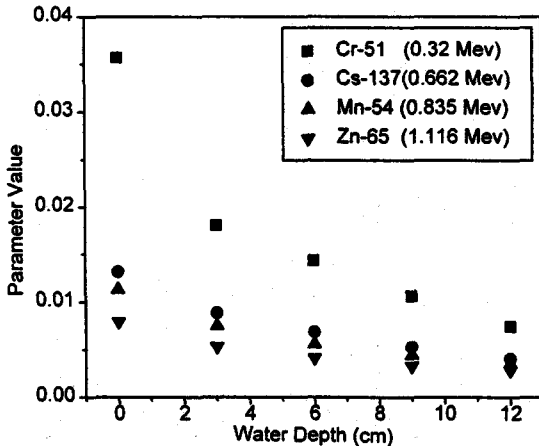


Fig. 8. The Effect of Water Depth on Full Energy Peak Height Parameter \hat{A}_1 .

비율이 감소하며 에너지가 낮을수록 더 빠르게 감소함을 알 수 있다. 그래프에 나타난 바에 의하면 물 깊이의 증가에 따라 이 비율은 대략 지수형으로 감소한다.

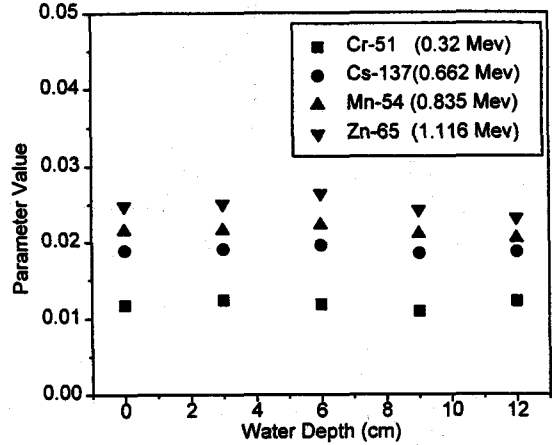


Fig. 9. The Effect of Water Depth on Full Energy Peak Width Parameter B_1 .

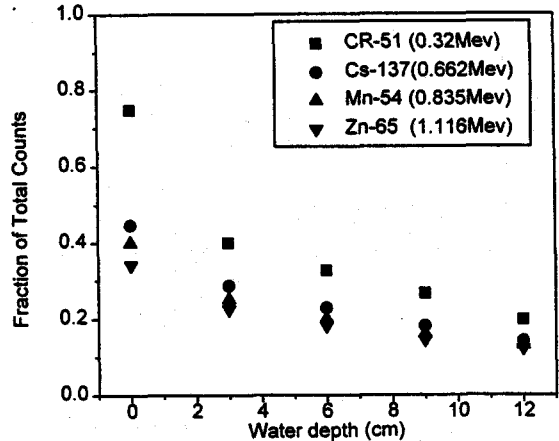


Fig. 10. The Effect of Water Depth on the Ratio of Full Energy Peak Counts to Total Counts.

그림 11은 flat continuum의 높이 변화를 나타낸 그래프이다. Cr-51을 제외한 모든 선원이 물 깊이의 증가에 따라 미소한 증가를 보이고 있다. Cr-51의 경우 9cm까지는 물의 깊이에 비례하여 증가하나 12cm에서는 오히려 감소하였다. 이것은 그림 4에서 볼 수 있듯이 물의 깊이가 12cm에서는 flat continuum부분에서 측정 자료의 분산이 심하여 응답함수로 근사한 스펙트럼이 정확하지 못하기 때문으로 여겨진다. 그림 12는 1차 콤프톤 산란에 의한 연속 영역의 높이를 나타내는 계수의

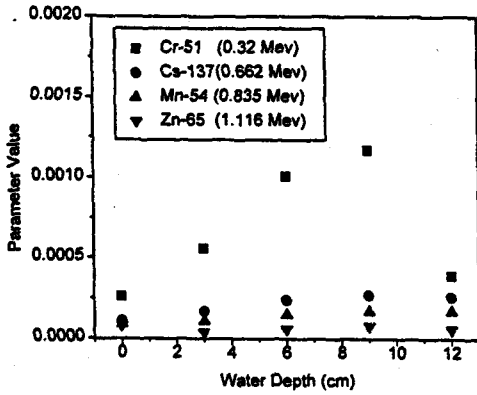


Fig. 11. The Effect of Water Depth on Flat Continuum Height Parameter A₃.

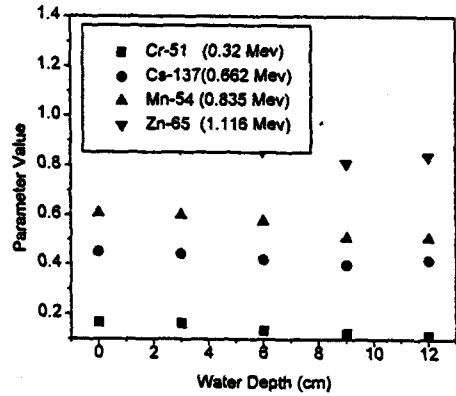


Fig. 13. The Effect of Water Depth on Compton Edge Energy Parameter B₃.

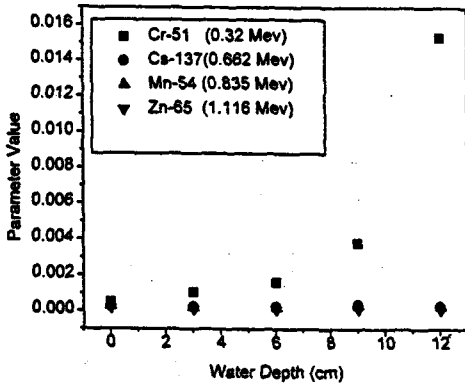


Fig. 12. The Effect of Water Depth on Single-Scatter Compton Continuum Parameter A₄.

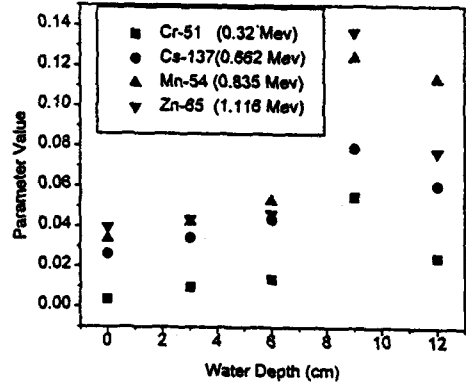


Fig. 14. The Effect of Water Depth on Compton Edge Shape Parameter B₄.

변화를 나타낸 그림이다. Cr-51을 제외한 모든 선원은 물의 깊이에 대해서 이 계수의 변화가 거의 무시할 정도이나 Cr-51의 경우 물의 깊이가 증가함에 따라 이 계수가 증가하는 것이 뚜렷이 나타나고 있다. 그림 13은 응답함수로 근사한 스펙트럼의 Compton edge 에너지를 보이고 있다. Compton edge 에너지는 입사되는 감마선의 에너지가 증가할수록 증가하며 모든 선원에 대해서 물의 깊이가 12cm인 경우를 제외하면 물 깊이의 증가에 따라 조금씩 감소함을 볼 수 있다. 12cm 깊이에서는 전반적으로 Compton edge의 형태가 불분명하기 때문에 응답함수로 근사한 값의 정확성이 결여됨을 알 수 있다. 이론적으로 계산한 Compton edge 에너지는 Cr-51의 경우 0.178 Mev, Cs-137은 0.477 Mev, Mn-54는 0.639 Mev, Zn-65는 0.908 Mev이며 공기중에서 응답함수로 근사한

값은 각각 0.167 Mev, 0.451 Mev, 0.608 Mev, 0.872 Mev로서 이론적 계산치보다 약간 낮게 나타났다. 그림 14은 물 깊이에 따른 Compton Edge의 모양의 변화를 보이고 있다. 물의 깊이가 12cm인 경우를 제외하면 모든 선원이 물 깊이가 증가함에 따라 이 계수가 증가함을 보여 주고 있다. 이것은 선원이 깊이 잠겨 있을수록 Compton edge에서 경사가 완만해져 콤프톤 연속과 flat continuum의 경계의 명확성이 둔화됨을 의미한다.

결론

본 연구에서는 NaI(Tl) 섬광검출기를 이용하여 저에너지 감마선원인 Cr-51, Cs-137, Mn-54, Zn-65에 대하여 공기와 깊이가 다른 수중에서 에너지 스펙트럼을 측정하였다. 측정된 스펙트럼의 차이

와 변화를 정량적으로 비교·분석하기 위해서 측정 스펙트럼을 곡선근사할 수 있는 응답함수를 구성하였다. 본 연구에서 밝혀진 바에 의하면 구성된 응답함수는 공기중 뿐만 아니라 수중에서 측정된 스펙트럼을 거의 완전하게 나타낼 수 있었다. 또한 응답함수에 사용된 계수들을 비교함으로써 공기와 수중에서-물의 깊이에 따른-스펙트럼의 특성 변화를 정량적으로 규정할 수 있는 방법을 제시하였다. 응답함수의 계수 가운데 전 에너지 봉우리의 높이 및 비율이 물의 깊이에 가장 민감하게 영향을 받았으며, 그 외에도 전 에너지 봉우리의 퍼진 정도, flat continuum의 높이, 1차 콤프턴산란 연속의 높이, Compton edge의 모양을 나타내는 응답함수계수 등에서 미약하나마 물의 깊이에 따라 변화를 보였다.

본 연구에서는 이러한 계수들의 변화를 물의 깊이 및 감마선의 에너지의 함수형태로 상관식화하는 작업은 수행하지 못 하였으나 본 연구에서 사용된 방법을 보다 발전시키고 체계화 하면 가능할 것이며 또한 고순도 Ge검출기와 같은 보다 정교한 검출기를 이용한다면 본 연구에서 제시된 방법은 다양한 조건에서의 환경 방사능 분석을 위해 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

감사의 말

이 논문은 1995년도 한국학술진흥재단의 공모 과제 연구비에 의하여 연구되었습니다. 또한 이 연구를 위하여 관련 프로그램의 제공 및 기타 도움을 준 한국전력공사 전력연구원의 이명찬박사께 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Clark, T.C. and Gardner R. P., "A Monte Carlo Model in-situ Prompt Gamma-Ray Analysis Probes", *Nuclear Instruments and Methods*, **193**, 365-370(1982).
2. JIN, Y. and Gardner R.P., "A Semi-Empirical Model for the Gamma-Ray Response Function of Germanium Detectors Based on Fundamental Interaction Mechanisms", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **A242**, 416-426(1986).
3. Lee, M.C., Verghese, K. and Gardner, R.P., 1986, "Extension of the Semi-Empirical Germanium Detector Response Function to Low Energy Gamma Rays", *Trans. of American Nucl. Soc.*, **55**, 555-557(1987).
4. Bevington, P.R., *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*, Mc-Graw Hill (1969).
5. Knoll, G.F., *Radiation Detection and Measurement*, John Wiley & Sons (1979).
6. Tsoufanidis, T., Wehring, B.W. and Wyman, M.E., "The Use of an Analytical Response Function for Unfolding Beta spectra", *Nuclear Instruments and Methods*, **73**, 98-102(1969).
7. 강희동, 김도성, 최희동, "감마선 分光 및 核種 分析", 경북대학 센서기술연구소, pp. 30-55 (1993).
8. 이명찬, 개인접촉으로 취득, 한국전력공사 전력연구원 원자로연구실.