

Measurement and Monte Carlo Simulation evaluation of a Compton Continuum Suppression with low level soil Sample

Eun-Sung Jang,¹ Hyo-Yeong Lee^{2,*}

¹Department of Nuclear Physics and Radiation Technology Research Center, Pusan National University

²Department of Radiological Science, Dongeui University

Received: November 20, 2017. Revised: April 15, 2018. Accepted: April 30, 2018

ABSTRACT

This study compared PENELOPE with measured values from low energy peak to high energy peak to reduce peak to compton ratio and continuum background spectrum using ^{60}Co , ^{137}Cs and mixed volume source. In addition, the change in backscattering and compton edge efficiency was compared with that of PENELOPE through changes in the vicinity of low energy. The results from the mixed volume source are applied to the soil samples to determine how much the minimum detection limits of the soil samples are reduced in the suppression and unsuppressed mode. The compton suppression of the low energy region of ^{60}Co (1,173 keV) was considerable, and the Compton edge RF for the ^{137}Cs (661 keV) peak was 2.8. In particular, the ^{60}Co source emits coincidence gamma rays of 1,173.2 keV and 1,332.5 keV, so compton inhibition was reduced by approximately 21%. RF of compton edges of 1,173 keV and 1,332 keV emitted from a ^{60}Co source was 3.2 and 3.4, and the peak to compton edge ratio was improved to 8: 1. And Compared with Penelope, the uncertainty was well within 2%. In compton unsuppressed mode, MDA values of 661 keV, 1,173 keV and 1,332 keV were 0.535, 0.173 and 0.136 Bq/kg, respectively, but decreased in compton suppressed mode to 0.121, 0.00826 and 0.00728 Bq/kg. Thus, Compton suppressed could reduce the background radioactivity and the radioactivity contained in the detector itself.

Keywords: Compton suppression Spectrometer Peak-to Compton, Continuum, Monte Carlo

I. INTRODUCTION

산란 각도가 임의의 방향을 가짐에 따라 산란 후 감마선의 에너지 스펙트럼은 연속적인 분포를 나타내며 이것이 바로 일반적인 감마선 검출기에서 역기능으로 나타나는 컴프턴 배경계수이다. 컴프턴 배경 및 자연 방사선을 억제하기 위하여 컴프턴 억제 분광기는 감마선에 대한 검출효율이 높은 NaI와 같은 섬광체를 HPGe 검출기 주위를 둘러싸게 하여 컴프턴 산란한 감마선이 NaI(Tl) 검출기에 포착되게 하고 이로부터 발생하는 시간 신호를 이용하여 컴프턴 배경계수(compton background)를 최소화한다.

컴프턴 억제 분광기(compton suppression spectrometer,

CSS)를 이용한 감마선 분광학은 1980년대부터 사용되어 졌다. 구조는 HPGe 1개, BGO, BEGe를 사용하였으나^[1-4], 2000년 이후부터 에너지 분해능 및 검출효율이 좋은 NaI(Tl) 검출기가 사용되었다.

신호 검출은 먼저, 광자 산란에 때문에 이탈하는 감마선을 계측하는 NaI(Tl)는 컴프턴 억제로 주 검출기 HPGe 검출기로부터 나오는 감마선의 에너지는 1 KeV에서 3 MeV에 이르며 이 영역에서는 비 억제(Unsuppressed)되도록 선택 모드를 사용하였다. 또한 컴프턴 억제(compton suppression)에 의한 배경을 최대 15배 정도까지 줄일 수 있으며 높은 동시 계수율의 효율을 보장해 준다. 또한 컴프턴 억제 분광기(compton suppression spectrometer)는 컴프턴 기준선

* Corresponding Author: Lee Hyo Yeong

E-mail: lhy250@deu.ac.kr

Tel: +82-51-890-2679

Address: Dong-Eui University of Busan, 176 Eomgwang-ro, Busan-jingu, 614-714, Busan, Republic of Korea

및 전체 에너지 피크를 억제하고 감마 스펙트럼과 환경 샘플을 감시하는데 사용된다.^[5] HPGe 감마 스펙트럼의 콤프턴 연속체 배경은 관심있는 약한 전체 에너지 피크의 식별을 흐리게 하고 뿐만 아니라 식별된 피크의 불확실성을 증가시키는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서 사용된 콤프턴 억제 분광기의 구조는 제조사에서 데이터를 받았고 이를 Monte Carlo Simulation of Penelope에 적용하였다.^[6-8] 점선원인 ⁶⁰Co(1,173,1,332 keV), ¹³⁷Cs(661 keV) 및 혼합부피선원 (50 ml)를 사용하였으며 피크 대 콤프턴 비율 (Peak to Compton ratio), 연속체 배경 스펙트럼을 감소시키고자 저에너지부터 고에너지 peak에서 측정된 측정치(suppressed와 unsuppressed)를 PENELOPE와 비교하였다. 또한 저에너지(100 keV) 전후에서의 변화를 통해 후방산란(backscatter), 콤프턴 단(compton edge)의 효율 변화를 PENELOPE와 비교하였다.

혼합부피선원에서 나온 결과를 토양시료에 적용하여 억제(suppressed)와 비 억제(unsuppressed)모드에서 토양시료의 최소검출한계치(minimum detectable activity, MDA)가 얼마큼 감소하였는지 확인하고자 한다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. Compton-suppression principle

감마선 스펙트럼은 광전효과에 의한 감마선의 full-energy peak, 콤프턴 산란 반응에 의한 연속체 전자쌍에 의한 single 또는 double escape peak 등으로 비교적 복잡한 모양으로 나타난다. 그뿐만 아니라, sum peak이나 background 감마선에 의한 여러 가지 요인들로 인하여 측정하고 감마선 이외에도 다른 에너지의 감마선에 대한 검출이 이루어짐으로써 감마선 스펙트럼은 더욱 복잡하게 나타난다. 콤프턴 억제 (compton suppression)은 스펙트럼에서 콤프턴 연속체(compton continuum)로 존재하는 영역을 억제하는 장치이다.^[9-11] 이는 콤프턴 연속체 영역에 존재할 수 있는 감마핵종에 대한 피크 분석을 더욱 명확히 할 수 있는 장점이 있다. 그뿐만 아니라 주 검출기 주위를 억제(suppression) 검출기로 감싸줌

으로써 감마선 계측 시 수반되는 배후방사능에 대한 차폐효과를 기대할 수 있다.

1.1 Compton-suppression Spectrometer

실험에 사용된 main 검출기는 closed-ended coaxial type의 직경 64 mm, 길이 71 mm의 crystal이 사용된 p-type HPGe 검출기로, 1,332 keV 감마선에 대하여 1.73 keV의 FWHM, 60 %의 상대 효율, Peak-to-Compton Ratio 58:1을 가진다.^[4] 하나의 HPGe와 4개의 NaI(Tl) 검출기로 구성된다. 기본적인 콤프턴 억제(compton suppression)를 이용한 검출기는 Fig. 1과 같은 기본적인 구성을 한다.

1.2 Data Aquisition Electronics

콤프턴 억제 분광기(compton suppression spectrometer)에 사용된 자료 수집 전자 장치의 블록 다이어그램이 Fig. 2에 나와 있다.

고전압 전원 공급 장치는 환형 검출기의 광전자 증배관(photomultiplier tube)과 플러그 검출기의 광전자증배관에 연결된다. HPGe 검출기의 출력 신호는 우선 전치 증폭기로 입력된다. 전치 증폭기로부터의 신호는 증폭기로 공급된다. HPGe detector 및 NaI(Tl) 검출기의 신호는 게이트에서 동시에 수집된다. 게이트는 anti-coincidence 모드로 작동하는데, 일치 모드에서는 검출기에서 생성된 신호가 서로 상쇄되어 비 충돌 신호가 카운트되고 신호는 멀티 채널 분석기로 분석된다. 스펙트럼이 표시되고 개인용 컴퓨터로 자료가 수집된다.^[12-14] 검출 시스템은 일반 모드와 압축 모드 동시에 샘플을 측정할 수 있다.

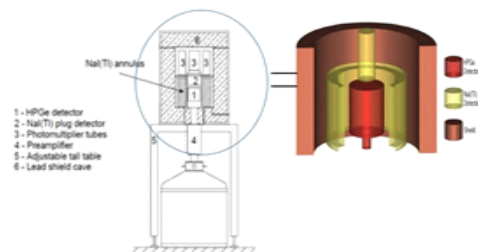


Fig. 1. Schematic drawing of compton suppression spectrometer.

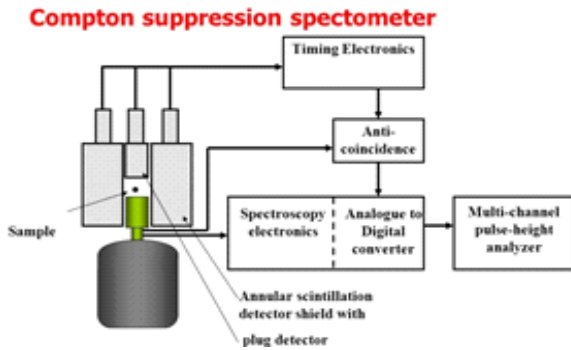
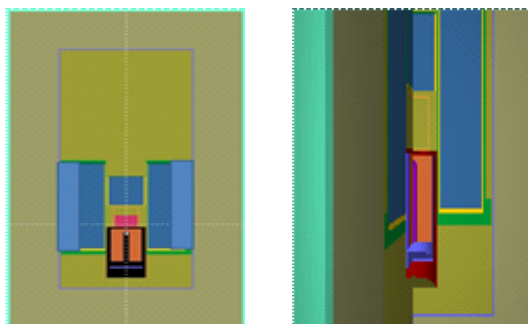


Fig. 2. Block diagram of the Compton Suppression Spectrometer with Standard Timing.

2. PENELOPE of Simulation

PENELOPE란“ PENetration and Energy Loss of positrons and Electrons”에서 파생되었다.

PENELOPE의 알고리즘은 100 eV ~ 1 GeV 사이의 에너지를 가진 전자와 양전자에 적용 가능한 산란 및 충돌 단면적 데이터베이스와 상호작용 모델을 채용하고 있다.^[5] PENELOPE는 측면변위와 경계면 통과과정을 유효 적절히 처리하여 에너지 요동에 일과성이 있다. PENELPE는 몬테카를로(Monte Carlo) 방법^[6]에 따라 검출기의 특성을 전산모사 하도록 구성되어 있는데, Monte Carlo 방법은 시뮬레이션 테크닉의 일종으로 많은 수의 실험을 바탕으로 통계 자료를 얻어 그 자료로부터 역산하여 어떤 특정한 수치나 확률분포를 구하는 방법이다.^[6] 검출기 구조는 크리스탈의 길이, 직경 및 깊이 등 다양한 기하학적 구성요소들은 제조사에서 제공한 데이터 값들을 시뮬레이션^[7]에 적용하였다.



(a) 50 ml standard source (b) 50 ml soil source

Fig. 3. Schematic view of the Compton Suppression System used for the simulation.

3. Peak-to-Total Calibration

peak-to-total은 전체 효율에 대한 피크 효율의 비율로 정의된다. 총 효율은 전체 스펙트럼 아래의 전체 면적이며, 피크 효율은 입사 감마선의 완전 에너지 증착에 해당합니다.^[15] pak-to-total 보정의 정의는 방정식 Eq. 1과 같다.

$$\gamma = \frac{\epsilon_{peak}}{\epsilon_{total}} \tag{1}$$

Genie-2000 소프트웨어는 카이 제곱 최소화 기법을 사용하여 주 피크 에너지에서 피크 대 전체 비율 (p / T)을 자동으로 계산하고 대수 함수에 맞추고 Eq.2 사용하였다.

$$\ln\left(\frac{P}{T}\right) = a + b \ln E_r + c(\ln E)^2 + \frac{d}{E_r^d} \tag{2}$$

여기서 a, b, c 및 d 파라미터는 카이 제곱 최소화에 의해 얻어졌다.

3.1 peak height-to-compton ratio, P/C

특정 photo-peak에 대한 피크 높이 대 컴프턴 비율은 컴프턴 가장자리를 피하는 해당 컴프턴 연속체의 상대적으로 평평한 지역에서 채널 당 평균 카운트에 대한 피크 카운트의 비율로 정의됩니다. 피크 높이 대 컴프턴 비율은 검출기 분해능과 전체 에너지 피크 효율의 요소를 포함하는 스펙트럼의 질을 나타내는 지표로 값이 클수록 핵종 분석에 유리함을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Peak to compton ratio of HPGe detector for different modes of operation

Source (point)	Energy (keV)	Peak to compton ratio	
		Normal mode	Compton suppression mode
¹³⁷ Cs	353-383	176.4	342.8
⁶⁰ Co	1040-1096	71.8	235.7

3.2 Compton suppression factor

컴프턴 억제(compton suppression)의 효과를 정량적으로 나타내기 위한 대표적인 지표로서, 주어진 감마선 에너지에 대해서 억제(suppression)된 경우와 비 억제(unsuppression) 경우에 주 검출기에 deposit 된 에너지의 비를 나타내거나, Eq. 3과 같이 정의된다.^[3]

$$CSF = \frac{\text{(Peak-to-ratio)unsuppressed}}{\text{(Peak-to-ratio)suppressed}} \frac{\text{Compton}}{\text{Compton}} \quad (3)$$

3.3 Energy Calibration & Efficiency

표준 점선원인 저에너지(²⁴¹Am)부터 고에너지(⁶⁰Cs) 사용하여 에너지 및 효율 교정하였고 Table 2에 나타내었다. 채널 번호와 에너지와 간의 상관관계를 이용하여 교정 곡선을 획득하였고 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Efficiency of the system for various energies (of radionuclides) in different modes of operation (geometry:50 ml)

Nuclide and gamma line(keV)	Compton suppression mode	Normal mode(unsuppressed)
²⁴¹ Am(59.54)	13.1	14.2
¹³³ Ba(356.06)	14.0	14.9
¹³⁴ Cs(604.2)	3.19	6.36
¹³⁷ Cs(661)	2.75	5.68
⁶⁰ Co(1173)	0.852	3.13
⁶⁰ Co(1332)	0.682	2.81

4. MDA(Minimum Detectable Activity: MDA)

계산 및 측정

최소검출방사능(Minimum Detectable Activity: MDA)는 시료의 양과 효율 및 측정시간에 의존하는 양이다.^[7] Currei^[8] 논문의 통계적 고찰을 통한 검출한계를 이용하여 유도하였고, 95 %의 신뢰수준에서 Eq. 4를 통해 최소검출방사능을 구했다.

$$MDA = \frac{2.71}{t_s} + 4.65 \frac{\sqrt{BGC}}{t_B} \quad (4)$$

여기서 BGC 백그라운드 계수치, ts는 시료 계측 시간, ts는 백그라운드 계측시간, E는 백그라운드 계수율, Y는 화학수율, S는 보정인자로 시료량과 측정중 반감기를 보정하는 인자이다.

혼합부피선원(50 ml)를 측정하였다, NaI(Tl) 플러그와 Ge 검출기 창 사이의 거리는 6 cm이며 정상 모드와 억제 모드의 스펙트럼은 각각의 측정에 대해 동시 기록하였다. 각각의 비교인자 값들을 구하여 비교하였다. 결과를 이용하여 토양을 정상모드와 억제모드로 최소검출한계치(minimum detectable activity, MDA)를 비교하였다.^[16-18]

III. RESULTS

1. Peak-to-Total Calibration

혼합부피표준선원(50 ml)를 사용하여 측정치와 Penelope를 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 가장 에너지가 큰 쪽 661 keV에 ¹³⁷Cs 광전 피크가 있고, 약 500 keV 부터 저 에너지 영역 쪽으로 넓게 퍼져 있는 컴프턴 영역이 상당히 억제되었다. ⁶⁰Co의 경우 1,173 keV 부터 저 에너지 영역 쪽으로 넓게 퍼져 있는 컴프턴 영역이 상당히 억제되었다.

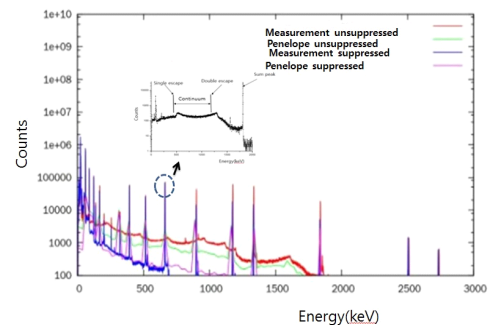
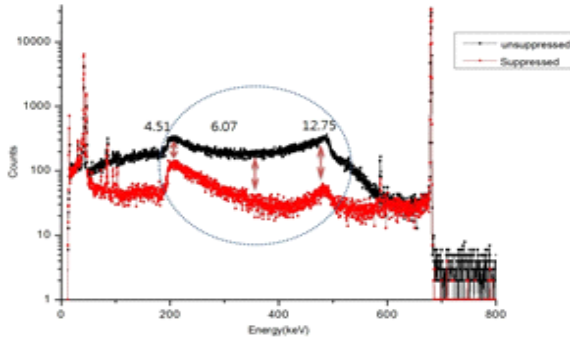


Fig. 4. Comparison measurement of 50 ml source with Penelope

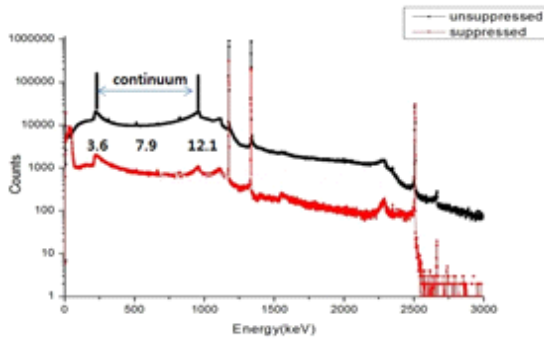
2. Efficiency Calibration

혼합부피 표준선원(50 ml)를 사용하여 저 에너지(59.54 keV)부터 고 에너지(1332.5 keV)까지 억제(suppressed)와 비 억제(unsuppressed)의 SF 비(suppressed factor ratio)를 비교한 결과 저에너지보다는 고에너지로 갈수록 억제비(reduction factor ratio, RF)가 크게 감소함을 확인할 수 있다. 또한

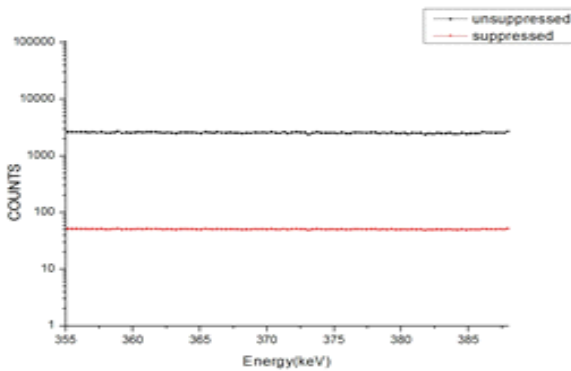
측정치와 Penelope는 2% 이내에서 잘 일치함을 확인하였다.



(a) ¹³⁷Cs



(b) ⁶⁰Co



(c) ¹³⁷Cs(358 - 384 keV continuum region)

Fig. 6. Photon spectrum of the standard source by using the unsuppressed and Compton suppressed spectra for an NaI scintillator exposed to ¹³⁷Cs and ⁶⁰Co.

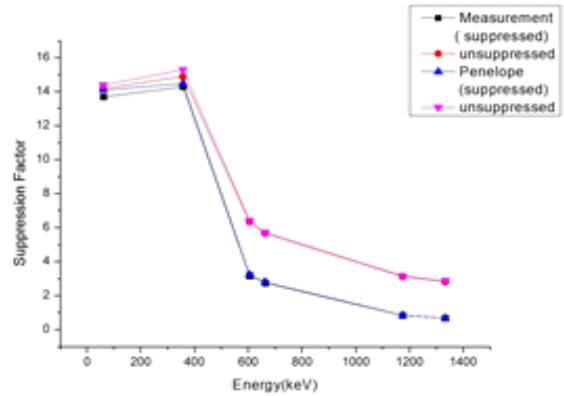


Fig. 5. Comparison 50ml CRM source SF of measurement with Penelope.

3. Comparison factor & Measurement

Fig. 6 (a)에서 컴프턴 억제 스펙트럼에서는 coincidence로 방출되는 감마선에 의해 피크들 또한 감소한다. 이러한 사실은 coincidence 감마선이 관심 핵종 스펙트럼과 간섭할 때 유용하게 사용될 수 있다. 661 keV 피크에 대한 Compton edge의 RF는 2.8이다.

Fig. 5 (b)의 스펙트럼과 같이 ⁶⁰Co은 두 개의 1173.2keV와 1332.5 keV의 coincidence 감마선을 방출하므로 억제효과를 특성화 하는 데 유용하다.

1173.2 keV 피크와 1332.5 keV 피크에 의한 coincidence 피크인 2505.7 keV 피크는 약 21%로 감소했다. 또한 1173.2keV 피크와 연관된 Compton edge의 RF는 3.2, 1332.5 keV 와 연관된 Compton edge의 RF는 3.4 이다.

¹³⁷Cs의 억제 스펙트럼에서의 전 에너지 흡수 피크의 계수 손실은 억제되지 않은 모드에 대하여 약 1.4% 정도인 반면, Compton edge는 약 1/3로 감소했다. 컴프턴 연속체(compton continuum)에서 가장 계수가 낮은 채널에서 후방산란피크 근처에서 RF는 약 2.7이다.

Fig. 6(C)에서 볼 수 있듯이 비 억제(unsuppressed)에 비해 억제(suppressed)에서는 백그라운드가 확실히 감소함을 확인 할 수 있다. 즉, 이것은 자연에서 발생하는 ²³⁸U, ⁴⁰K, ²³²Th 방사능 물질의 자연붕괴 산물과 같은 자연적인 방사능 핵종에 의한 검출기 및 그 주변부의 오염 신호이다. 그러므로 연속체(continuum)

영역이 형성된 것을 확인 할 수 있다. ^{137}Cs 의 피크 대 Compton ratio는 50:1 이고, 억제 계수에서는 311:1로 향상되었다. 이때 컴프턴 억제요인(compton suppression factor, CSF)는 6.2 이다.

Fig. 7에서 피크대 컴프턴(peak-to-compton)은 컴프턴 끝단(compton edge)와 후방 산란 피크 모두에 주어진다. 또한 모든 데이터에서 변환 계수는 0.26 keV/ch이다. 100 keV 이하의 에너지에서는 컴프턴 효과는 아주 미약함을 확인하였다. 두 경우 모두 100 keV 이상에서 에너지가 증가하면 효율은 증가하지만 특정 에너지 이상에서는 떨어지게 된다. 또한 Penelope와 비교한 결과 불확도는 2%이내에서 잘 일치하였다.

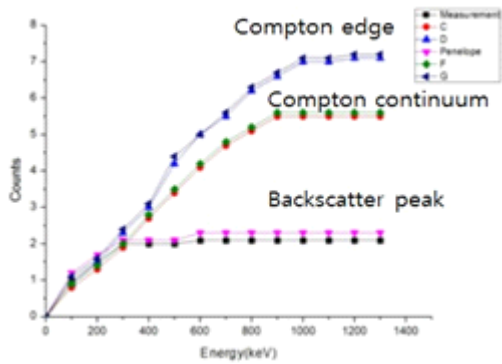
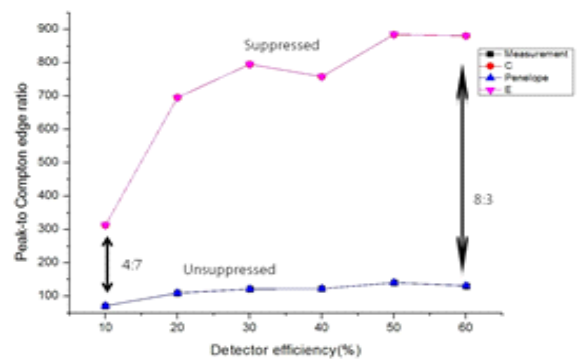


Fig. 7. Comparison Variation in the PTC gain for the Compton-edge, continuum and backscatter peak as a function of the gamma photon energy with Penelope.

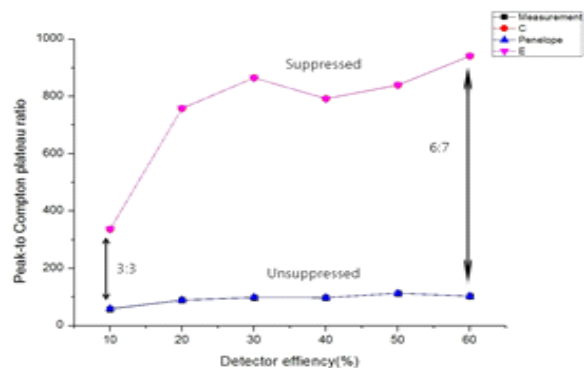
그러므로 컴프턴 억제(compton suppression) 효율은 피크 대 컴프턴 비가 클수록 에너지 분해능과 검출효율이 좋음을 확인하였다. 또한 연속체 감소는 2차 광자 에너지가 감소함에 따라 점차 낮아진다.

Fig. 8 (a),(b)에서 compton continuum와 compton edge는 각각 광전피크의 높이와 컴프턴 바탕선(compton Plateau : compton 영역 358-382 keV 영역의 평균 높이) 높이의 비율, 광전피크의 높이와 컴프턴 끝단 (compton edge)의 높이의 비율, 광전피크의 넓이와 컴프턴 영역 전체 넓이의 비율을 나타낸다.^[4,5] 이 억제인자는 그림에서 보듯이 에너지에 대한 함수이다. 컴프턴 연속체(compton continuum) 높이는 358~ 382 keV에서 억제 대 단순모드에서 3:3에서 6:7로 향상되었다. P/C가 62.3:1에서 193.7:1로

증가하는 것이 관찰되었다. 그러므로 컴프턴 끝단 (compton edge) 요소는 3.1로 증가하였다. 피크 대 컴프턴 연속체 비율은 ^{137}Cs 로 측정했을 때 6:1의 비율로 향상 될 수 있었다. 피크 대 컴프턴 끝단 (compton edge) 비율은 8:1로 향상 되었다. 또한 Penelope와 비교했을 때 전체적으로 불확도는 2%이내에서 잘 일치하였음을 확인하였다. 그러므로 PTC비가 클수록 에너지 분해능 및 검출효율이 높았다.



(a) Peak-to-Compton edge (475-481 keV)



(b) Peak-to-Compton Plateau(358-382 keV)

Fig. 8. Comparison Compton suppression system performance as function of HPGe detector efficiency with Penelope

Fig. 9은 토양을 측정된 감마선 스펙트럼이다. 토양의 컴프턴 억제(compton suppression) 과정을 통해 얻은 스펙트럼을 보여준다. 단순 모드 스펙트럼에서는 단일이탈 피크와 이중 이탈 피크와 함께 전 에너지 흡수 피크가 관찰된다.^[5-8] 컴프턴 억제 스펙트럼에서는 컴프턴 연속체(compton continuum)이 전체적으로 단순 모드의 약 15% 수준으로 억제되

었다.

배후 자연방사선보다 방사성능도가 높은 핵종들은 전 에너지 흡수 피크들과 함께 단일이탈 피크와 이중이탈피크가 보였다.^[13-16]

또한, 관심영역(358–382 keV)을 확대해 보면 억제 연속체(suppressed continuum) 영역이 형성됨으로써 백그라운드 감소함을 확인 할 수 있다. 또한 MDA 값은 억제(unsuppressed) 영역에서 661 keV, 1,173 keV 및 1,332 keV의 MDA 값은 각각 0.535, 0.173 및 0.136 Bq/kg에서 suppressed 모드에서는 0.121, 0.00826 및 0.00728 Bq/kg로 감소하였다.

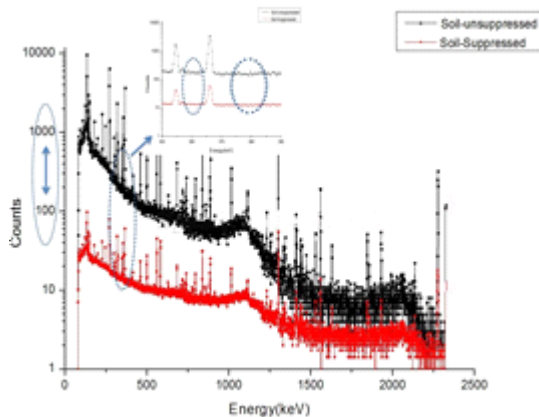


Fig. 9 The suppressed and unsuppressed soil spectra obtained with Compton Suppression Spectrometer. The acquisition times are 80000 sec for both spectra.

IV. DISCUSSION & CONCLUSION

컴프턴 억제 시스템(compton suppression system)은 제조사에서 제공한 데이터를 바탕으로 측치와 Penelope 전산모사^[6-7]를 비교한 결과 민감한 Ge 불감층에서 3% 정도의 오차가 났지만 전반적으로 불확도는 2% 이내에서 일치하였다.

컴프턴 억제는 자연배경, 즉 자연방사선(지각 및 우주선), 검출기 자체에 함유된 방사능, 주위의 방사선원을 감소시킬 뿐만 아니라, 컴프턴 연속체(compton continuum)의 강도를 가장 효율적으로 감소시킨다.^[19] 컴프턴 억제 분광기는 검출 시스템의 피크대 배후계수(Peak-to-background) 성능을 크게 향상할 수 있다. 컴프턴 억제모드에서 전 에너지 흡수 피크의 손실은 억제되지 않은 모드에 비하여 1% 미만이었

으며, 전체적으로 컴프턴 연속체(compton continuum)는 23% 억제되었다. 컴프턴 연속체로 말미암아 억제되지 않은 모드에서는 분별하기 어려웠던 방출 강도가 매우 낮은 감마선보다 명확히 분별할 수 있다. 또한 백그라운드 감마선의 총계수율이 약 12.8% 수준으로 주요 백그라운드 피크가 획기적으로 줄어드는 효과를 확인하였다.

Reference

- [1] K. Fukuda, J. Ohkuma, T. Asano and Y. Satoh, Performance of a Ge-BGO Compton-suppression spectrometer and its application to photon activation analysis, Nuclear Instrument and Method B, Vol. 114, pp. 379, 1996.
- [2] M. Moxzynski, J. H. Bjerregard, B. Herskind, P. Knudsen, Limitation of the Compton suppression in Ge-BGO Compton suppression spectrometers. Nuclear Instrument and Physics Research Section. Vol. 280, pp. 73-82, 1989.
- [3] R. Alba, G. Bellia and A. Del Zoppo, "Performance of a symmetric BGO-NaI anti-compton shield", Nucl. Instrum. And Meth., Vol. A 271, pp. 553-556, 1988.
- [4] Yuhao Mi, Hao Ma, Zhi Zeng, Jianping Cheng, Hui Compton suppression in BEGe detectors by digital pulse shape analysis. 2017.
- [5] Chien Chung, C. J Lee, Environmental monitoring using a HPGe-NaI(Tl) Compton suppression spectrometer. Nucl.Instrum. Methods Phys. A. 273, pp. 436-440. 1988.
- [6] JW. Scates, J. Hartwell, R. Aryaeinejad, M. McIlwain, 2006. Optimization studies of a Compton suppression spectrometer using experimentally validated Monte Carlo simulations, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A: Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip. 556(2), 498-504. 2016
- [7] Y. Choi, K.B Lee, K.J. Kim, J. Han, E.S. Yi, Development of an optimized Compton suppression gamma-ray spectrometric system using Monte Carlo simulation, Applied Radiation and Isotopes, Vol. 109, pp. 558-562. 2016.
- [8] O. Sima, I. Osvath, Calibration of a low-level anti-Compton underground gamma-spectrometer by experiment and Monte Carlo. Appl. Radiat. Isot. 81. pp. 109

-113. 2013.

- [9] A.T. Farsoni, B. Alemayehu, A. Alhawsawi, E. M. Becker, Farsoni et al., Compton suppressed phoswich detector for gamma spectroscopy, 2013.
- [10] Grigorescu EL, De Felice P, Eazdolescu AC, Low-level gamma spectrometry using bata coincidence and Compton suppression Appl Radiat isot. 61, pp. 191-5, 2004.
- [11] W. Sahl, D. Degering, C. Lierse and X. Li, "Enhancement of Compton suppression ratios in anti-Compton techniques: the Garching and Karlsruhe photon spectrometers", Nucl. Instrum. And Meth., Vol. A369, pp. 627-633, 1996.
- [12] Light transport contribution to the timing characteristics of scintillation detectors Radiat. Phys. Chem. 80, pp. 365-368. 2011
- [13] HPGe Detectors for Compton Suppression Counting Systems. Ortec
- [14] G. J Schmid, J. J Blair, J. E Kammeraad, HPGe Compton suppression using pulse shape analysis, Reseachgate, 1999.
- [15] A. McNamara, H. Heijnis, D. Fierro, M. Reinhard, The determination of the efficiency of a Compton suppressed HPGe detector using Monte Carlo simulations. J. Environ. Radioact. 106, 1-7. 2012.
- [16] N. Ghal-Eh, A Compton suppression detection system for use in manganese bath measurements Radiation physics and Chemistry 112 ; 34-39. 2015.
- [17] Yamada T, Ishizu H, Kawada Y, A simple method for activity determination of ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs in foodstuffs using Nai(Tl) scintillation spectrometer. Appl Radiat isot. Nov, 81:353-355. 2013.
- [18] Low-level gamma spectrometry using bata coincidence and Compton suppression Appl Radiat isot. 61. 191-195. 2004.
- [19] Kenichiro Yasuda, Masahito Mori, Yutaka Miyamoto, Masaki Magara Low energy gamma- and X-ray measurements by means of Compton suppression technique for safeguards environmental samples Journal of Nuclear science and Technology, Vol. 39, pp. 576-578, 2002.

저준위 토양시료를 이용한 콤프턴 연속체 억제 측정 및 몬테카를로 시뮬레이션 평가

장은성,¹ 이효영^{2,*}

¹부산대학교 핵물리방사선연구소

²동의대학교 방사선학과

요 약

본 연구는 점 선원인 ^{60}Co , ^{137}Cs 및 혼합부피선원을 이용하여 피크 대 콤프턴 비율, 연속체 배경 스펙트럼을 감소시키기 위해 저 에너지 peak부터 고 에너지 peak에서 측정된 측정치와 PENELOPE와 비교하였다. 또한, 저에너지 부근에서의 변화를 통해 후방산란, 콤프턴 단(compton edge)의 효율 변화를 PENELOPE와 비교하였다. 혼합부피 선원에서 나온 결과를 토양시료에 적용하여 억제와 비 억제(unsuppressed)모드에서 토양시료의 최소검출한계치가 얼마나 감소하였는지 확인하고자 한다. ^{60}Co (1,173 keV)의 저에너지 영역의 콤프턴 억제가 상당히 되었으며, ^{137}Cs (661 keV) 피크에 대한 Compton edge의 RF는 2.8이다. 특히, ^{60}Co 선원은 1,173.2keV와 1,332.5 keV의 coincidence 감마선을 방출하므로 콤프턴 억제는 대략 21% 감소하였다. ^{60}Co 선원에서 방출되는 1,173keV와 1,332keV의 compton edge의 RF는 3.2, 3.4였으며 피크대 콤프턴 edge 비율은 8:1로 향상되었다. 그리고, PENELOPE와 비교했을 때 불확도는 2% 이내로 잘 일치하였다. Compton unsuppressed 모드에서 661 keV, 1,173 keV 및 1,332 keV의 MDA 값은 각각 0.535, 0.173 및 0.136Bq/kg이었으나, Compton suppressed 모드에서는 0.121, 0.00826 및 0.00728B/kg로 감소하였다. 따라서, Compton suppressed는 배후방사능과 검출기 자체에 함유된 방사능을 줄일 수 있었다.

중심단어: 콤프턴 억제분광기, 피크 대 콤프턴, 콤프턴 연속체, 몬테카를로 시뮬레이션