

Study of 4π Compton Suppression Spectrometer by Monte Carlo Simulation

Eun-Sung Jang,¹ Hyo-Yeong Lee^{2,*}

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

²Department of Radiological Science, Dong Eui University

Received: April 17, 2017. Revised: June 12, 2017. Accepted: June 30, 2017

ABSTRACT

Compton suppression apparatus using the Compton scattering response, by inhibiting part of the spectrum Compton continuum in the area of the peak analysis of the gamma rays that enables a clearer device. In order to find out the geometry structure of high-purity germanium detector(HPGe) -NaI(Tl) and to optimize the effect of movement, Monte Carlo simulation was used to grasp the behavioral characteristics of Compton suppression and compare several layout structures. And applied to the cylinder beaker used for the environmental measurement by using the efficiency according to the distance. For the low-energy source such as 81 keV, the Compton continuum is scarcely developed and the suppression effect is also insignificant because the scattering cross-section of the Compton effect is relatively low. In the spectrum for the remaining energy, it can be seen that the Compton continuum part is suppressed in a certain energy range. Compton suppression effect was not significantly different from positional shift. average reduction factor(ARF) value was about 1.08 for 81 keV and about 1.23 for 1332.4keV energy at the highest value .It can be seen that suppression over the Compton continuum region of the energy spectrum is a more appropriate arrangement. Therefore, it can be applied to various environmental sample measurement through optimized structure.

Key Words: Compton suppression Spectrometer, PENELOPE, Comparison factor.

I . INTRODUCTION

감마선 스펙트럼은 광전효과에 의한 감마선의 Full-energy peak, Compton 산란 반응에 의한 Continuum, 전자 쌍생에 의한 Single 또는 Double escape peak 등으로 비교적 복잡한 모양으로 나타난다. 그뿐만 아니라, Sum energy peak나 백그라운드 감마선에 의한 여러 가지 요인들로 인하여 측정하고자 하는 감마선 이외에도 다른 에너지의 감마선에 대한 검출이 이루어짐으로써 감마선 스펙트럼은 더욱 복잡하게 나타난다.^[1,2]

Compton suppression system은 스펙트럼에서 Compton continuum으로 존재하는 영역을 억제하는 장치이다.^[3] 이는 Compton continuum 영역에 존재할 할 수 있는 감마선에 대한 피크 분석을 더욱 명확히 할 수 있는 장점이 있다. 뿐만 아니라, main 검출기 주위를 Sup

pression 검출기로 감싸줌으로써 감마선 측정 시 수반되는 Background radiation에 대한 차폐 효과 역시 기대할 수 있다.^[4]

본 연구에서는 Compton suppression spectrometer기 하학적인 구조 파악 및 이동에 따른 이 때 그 효과를 최적화 할 수 있는 배치구조, 몬테카를로(Monte Carlo) simulation을 통해 Compton suppression의 형태적 특성을 파악하고 비교를 해보았다. 또한 거리의 변화에 따른 4π 효율을 이용하여 환경 측정에 사용되는 실린더 비커에 적용해 보았다.

II . MATERIAL AND METHODS

1. PENELOPE of Monte Carlo Simulation

PENELOPE란“ PENetration and Energy Loss of po

* Corresponding Author: Hyo-Yeong Lee

E-mail: lhy250@deu.ac.kr

Tel: +82-51-890-2679

sitrons and Electrons"에서 발생되었다. 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 에너지요동에 일과성이 있다. PENELPE는 몬테카를로(Monte Carlo) 방법^[6]에 따라 검출기의 특성을 전산모사 하도록 구성되어 있는데, 몬테카를로 방법이란 시뮬레이션 테크닉의 일종으로 많은 수의 실험을 바탕으로 통계 자료를 얻어 그 자료로부터 역산하여 어떤 특정한 수치나 확률분포를 구하는 방법이다.^[6] 통계자료가 많을수록, 입력 값의 분포가 고를수록 결과의 정밀성이 보장되는 특성이 있다. 검출기 구조는 크리스털의 길이, 직경 및 깊이 등 다양한 기하학적 구성요소들은 제조사에서 제공한 데이터 값들을 시뮬레이션^[7]에 적용하였다.

2. Simulation of spectrometer geometry

Simulation에 사용된 main 검출기는 closed-ended coaxial type의 직경 64 mm, 길이 71 mm의 crystal이 사용된 p-type HPGe 검출기로, 1332 keV 감마선에 대하여 1.73 keV의 FWHM, 60 %의 상대 효율, Peak-to-Compton Ratio 58:1을 가진다. 보조 검출기 3"×3" NaI 검출기 5개[Canberra.co]를 Fig. 1과 같이 나타내었고, 검출기의 geometry file을 coding하여 시뮬레이션을 수행하였다.

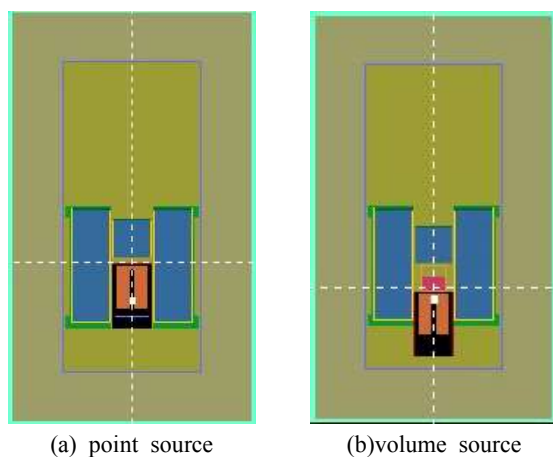


Fig. 1. Schematic view of the Compton Suppression System used for the simulation.

표준 점 선원으로 널리 사용되는 ^{137}Cs 의 661.6 keV, ^{60}Co 의 1173.3 keV, 1332.4 keV의 감마선에 대한 simulation을 진행하였다. 또한 최적화된 배치구조법을 이용하여 환경시료에 적용하였다.

Compton suppression 효과는 Ge crystal에서 흡수되는 에너지를 일차적으로 기록하고, NaI(Tl) crystal에서 흡수되는 에너지가 동시에 기록된 경우에 대해 기록하지 않는 방법으로 suppression 된 스펙트럼을 구하였다. 데이터 분석은 Genie-2000과 Origin 8.0을 사용하였다.

3. Disposition of the detector by Monte Carlo of PENELOPE

Compton suppression 효율의 특성을 파악하기 위해서 점 선원 ^{133}Ba (81,356 keV), ^{137}Cs (661.6 keV), ^{60}Co (1173.3, 1332.4 keV)을 window cap 0.5 cm 기준점으로 하여 -5 cm에서 +15 cm 까지 이동시켜 가면서 X 축과 Z 축 간의 거리변화에 따라 Compton suppression 이 이루어지는 모사 정도를 Fig. 2에 나타내었다.

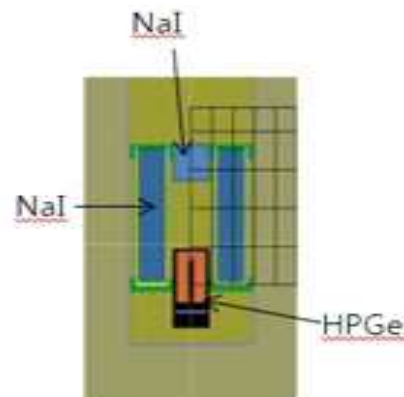


Fig. 2. Detected source at different positions.

4. The direction of the NaI (Tl) detector to window - cap the HPGe detector

Fig. 2와 같이 HPGe 검출기 주위에 NaI(Tl) 검출기들을 HPGe 검출기를 향하는 방향으로 배치한 경우이다. 시뮬레이션에서 도출된 5 ~10 cm 영역을 cover 할 수 있는 위치 중에서 가장 효과가 좋은 위치를 찾기 위해서 HPGe 검출기의 중심 축 연장선상을 따라 NaI 검출기 5개의 위치를 전체적으로 이동시켜가며 시뮬레이션을 진행하였고 이는 Fig. 2에 나타내었다.

5. NaI (Tl) detectors are oriented in the opposite direction to the HPGe detector

Fig. 3과 같이 NaI(Tl) 검출기를 HPGe 검출기 주위에 배치하되, suppression 검출기가 놓인 방향을 main 검출기와 평행하도록 한 경우이다. 앞의 경우와 마찬가지로 중심축을 따라서 NaI 검출기 5개의 위치를 전체적으로 평행이동 시켜가면서 각 위치에 대한 Compton suppression 효과를 시뮬레이션을 Fig. 3과 같이 나타내었다.

Fig. 3과 같이 NaI(Tl) 검출기를 main 검출기 주위에 배치하되, suppression 검출기가 놓인 방향을 HPGe 검출기와 평행하도록 한 경우이다. 앞의 경우와 마찬가지로 중심축을 따라서 NaI(Tl) 검출기 5개의 위치를 전체적으로 평행이동 시켜가면서 각 위치에 대한 Compton suppression 효과를 시뮬레이션 하였다.

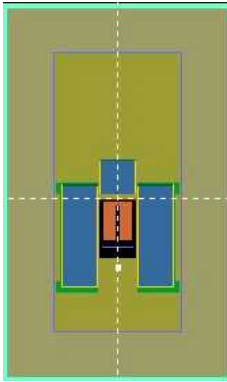


Fig. 3. Schematic view of geometry for arrangement.

6. Comparison factor

Compton suppression의 효과를 정량적으로 나타내기 위한 대표적인 지표로서, 주어진 감마선 에너지에 대해서 suppression 된 경우와 되지 않은 경우에 main 검출기에 deposit 된 에너지의 비를 나타내거나, 다음 Eq. 1과 같이 정의된다.^[8]

$$CSF = \frac{(\text{Peak-to-Compton ratio})_{\text{unsuppressed}}}{(\text{Peak-to-Compton ratio})_{\text{suppressed}}} \quad (1)$$

여기서 Peak-to-Compton ratio는 특정 에너지원의 경우에 있어서 정해진 영역에 대한 피크의 영역비로 정해지는데, 661.6 keV 선원의 경우 55 ~ 65 keV, 358

~ 382 keV (Compton plateau), 461 ~ 472 keV (Compton edge), ⁶⁰Co 선원의 경우 1332.4 keV의 경우 1040 ~ 1096 keV 영역에 대한 감마선 full-energy peak 영역의 면적비로 정의된다.^[9] 감마선을 방출하는 핵종들의 경우에는 감소 계수(RF)가 사용된다. 이 계수는 suppressed 스펙트럼 내에 존재하는 연속체 높이에 대한 unsuppressed 스펙트럼 내에 존재하는 Compton 연속체의 평균적인 높이 비율로 정의된다.^[9] Peak-to-Compton ratio는 특정 에너지원에 대해서, 한정된 영역에 대해서만 에너지 스펙트럼이 suppression 되는 정도를 반영하기 때문에, 더욱 다양한 에너지의 선원에 대한 전체적인 영역에서의 Compton suppression의 효과^[10]를 정량적으로 나타낼 수 있는 Eq. 2 지표로서 다음과 같다.

$$ARF = \frac{\sum \{ (\text{Count})_{\text{unsuppressed}} / (\text{Count})_{\text{suppressed}} \}}{\text{Total number of channels}} \quad (2)$$

III. RESULTS AND DISCUSSION

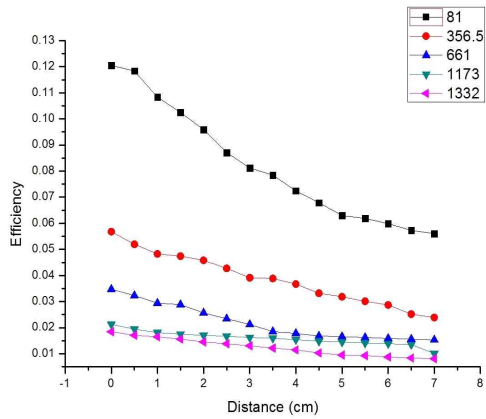
1. 효율 및 에너지스펙트럼

NaI(Tl) 검출기를 다른 위치에서 suppressed 된 검출 시스템으로 포함시키는 경우의 광 피크 효율의 변화^[11]를 Fig. 4에 나타내었다. 다양한 감마선 에너지에 대해 동일하지만 1000 keV 고 에너지보다 에너지가 100 keV 이하일수록 더 두드러진다.

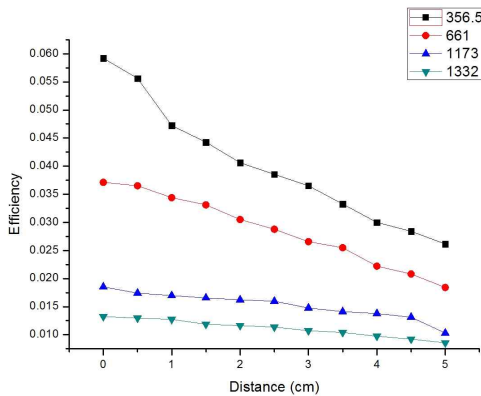
Fig. 5에서와 같이 기준 위치에 배치한 경우의 에너지별 스펙트럼이다. 검은 선으로 표시된 부분이 Compton suppression이 이루어지지 않은 경우의 스펙트럼이고, 붉은 선으로 나타난 부분이 suppression이 이루어진 스펙트럼이다.

81 keV와 같은 저에너지 선원에 대해서는 Compton 효과의 산란 단면적이 상대적으로 낮으므로 Compton continuum이 거의 발생하지 않으며, suppression 효과가 아주 미미함을 확인할 수 있다. 나머지 에너지에 대한 스펙트럼에서는 일정한 에너지 영역에서 Compton continuum 부분이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 8 cm로 이하로 한정된 crystal의 길이로 인하여, 산란하여 crystal 내로 입사하지 않는 다른 에너지 영역의 감마선에 대해 검출을 하지 못하기 때문이다. 661.6 keV의 에너지 스펙트럼보다 1173.3 keV 스펙트럼에서는

상대적으로 약간 높은 에너지 영역에서 suppression이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 고 에너지에 대하여 전방 산란의 영향 때문이다.

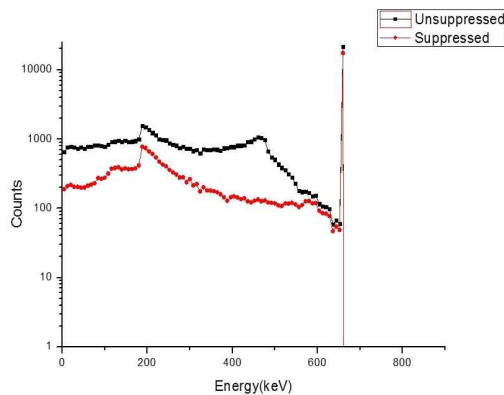


(a) Radial Distance (cm)

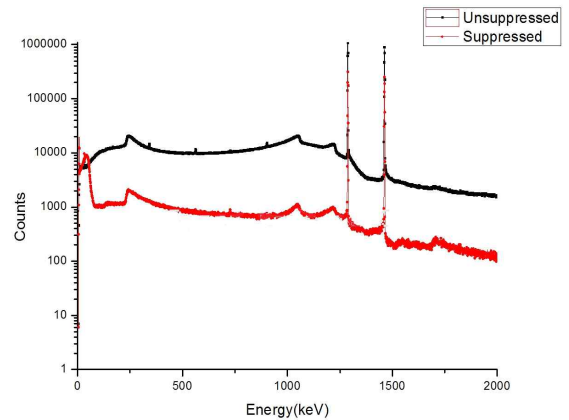


(b) Radial Distance (cm)

Fig. 4. Simulated full-peak efficiency for a point source from 0 cm to 5cm distance for Compton suppression spectrometer.



(a) ^{137}Cs



(b) ^{60}Co

Fig. 5. Simulated spectra of (a) ^{137}Cs , (b) ^{60}Co for NaI(Tl) crystal at location

2. NaI(Tl) detector and annulus toward the HPGe detector

suppression 검출기를 HPGe 검출기 주위에 배치시킴으로써 suppression 되는 깊이를 늘려 배치구조에 대한 시뮬레이션을 진행하였다.

위치 이동에 따른 Compton suppression 효과는 거리가 5이상 지날수록 변화가 줄어들음을 확인할 수 있으며, ARF 값은 가장 높은 값을 나타내는 위치에서 81.1 keV의 경우 약 1.08, 1332.4keV의 경우 약 1.23 정도를 나타남을 Fig. 6에서 확인할 수 있다.

깊이는 2 cm 이상일수록, suppression이 일어나는 범위가 커짐을 Fig. 7의 에너지 스펙트럼 결과에서 알 수 있다.

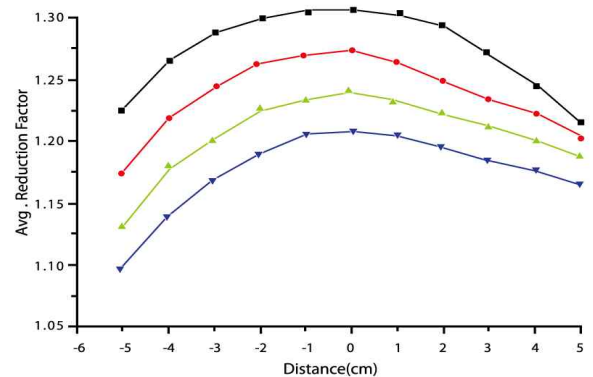
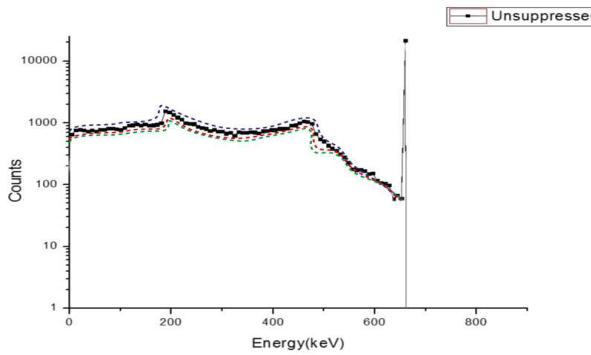
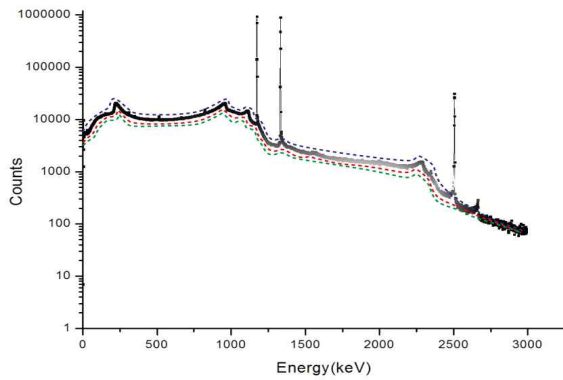


Fig. 6. Average reduction factor location variation.



(a) ¹³⁷Cs



(b) ⁶⁰Co

Fig. 7. Energy spectrum for arrangement at different location.

3. NaI(Tl) detector and annulus parallel to the HPGe detector

NaI(Tl) 검출기 5개를 HPGe 검출기 주위에 배치하되, suppression 검출기가 놓인 방향을 HPGe 검출기와 평행하도록 한 경우이다. 중심축을 따라서 NaI(Tl) 5개의 위치를 전체적으로 평행이동 시켜가면서 각 위치에 대한 Compton suppression 효과를 시뮬레이션 하였다.

Fig. 8은 비교적 높은 ARF 값을 81.1 keV의 경우 약 1.65, 1332.4 keV 에너지의 경우 약 1.9 정도로 나타내는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9는 NaI(Tl) 검출기들의 위치 이동에 따라 특정한 영역에서 suppression이 일어나는 확인할 수 있다. 감마선의 에너지는 최대 ARF 값을 나타내는 거리별 차이가 남을 알 수 있다.

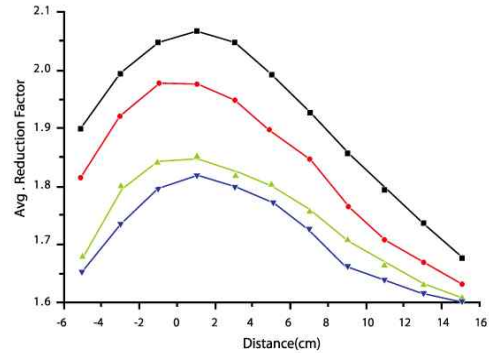


Fig. 8. Average reduction factors for location variation.

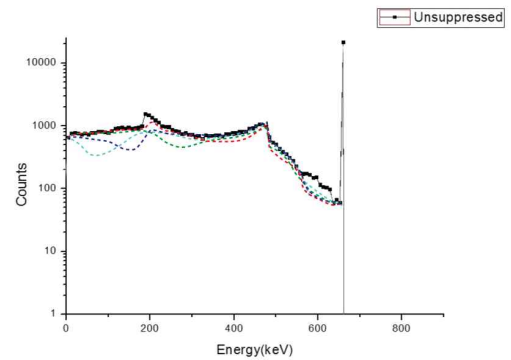


Fig. 9. Simulated spectra for arrangement at different.

4. Optimization

최적화된 배치구조를 통해서 환경시료인 토양을 고리원전부지 주변에서 채취하였으며 전 처리하여 80,000sec로 측정^[12]한 결과 각각의 효율에 대한 불확도는 4% 이내이며 에너지는 1 keV 이하로 매우 잘 일치함을 Fig. 10에서 확인할 수 있다.

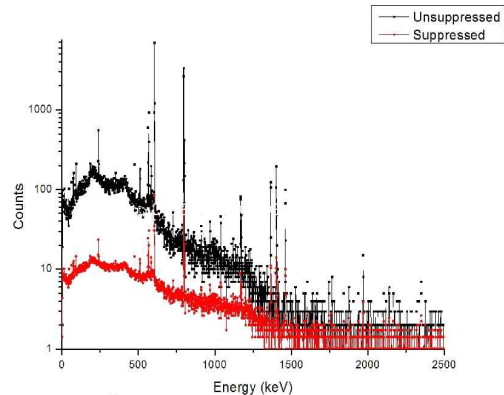


Fig. 10. Comparison between the unsuppressed and suppressed x-ray energy spectra for the soil sample.

Compton suppression의 특성을 파악하기 위한 시뮬레이션의 결과 산란한 감마선은 내경 3 cm의 NaI(Tl) crystal에서 5 ~ 15 cm 영역에 주로 분포함을 알아낼 수 있었고, NaI(Tl) 검출기 5개를 이용해 최적의 배치 구조를 찾기 위한 시뮬레이션에서는 측정하는 에너지에 따라 Compton suppression의 효과는 위치에 따라 변화하는 확인할 수 있었다. 또한, Compton suppression system 구성의 목적에 비추어 볼 때, 결과 에너지 스펙트럼의 Compton continuum 영역 전반에 걸쳐 suppression이 이루어지는 것이 더욱 적절한 배치구조가 됨을 알 수 있다. 따라서 최적화된 구조를 통해 다양한 환경 시료 측정^[12,13]에 적용할 수 있음을 확인하였다.

IV. CONCLUSION

Compton Suppression spectrometer의 배치에 따른 최적화 구조를 파악해서 4π 에 대한 효율을 이용하여 환경 측정에 사용되는 실린더 비커에 적용하면 비 억제에 비해 억제했을 때 백그라운드(자연방사선, 주위의 방사선원) 제거 및 방사능 농도가 낮아짐을 확인 하였다.

Reference

- [1] G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, John Wiley & Sons, Inc, 3rd ed, New York, pp. 428, 2000.
- [2] Lowe Lilly Kiang et al. "A Study on T-shape Compton Suppression Spectrometer by Monte Carlo Simulation", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol. 327, pp. 427, 1993.
- [3] Ceta. Michael et al, "Monte Carlo Simulation of Complex Germanium Detector Systems and Compton Suppression Spectrometers", Nuclear Instruments and Method in Physics Research A, Vol. 251, pp. 119, 1986.
- [4] "Compton Suppression. Made Easy", Canberra Application Note, AN-D-8901.
- [5] Fiat. Slivan. Jack. Mill, Fernandez-Varea, J. Sempau, PENELOPE. A code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport. in: Workshop Proceeding, Issy-les Moulineaux, France, pp. 7-10 July, 2003.
- [6] Bar'ó Juie., J. Sempau, Ja .Mack. Fern'andez-Varea and F. Salvat , "PENELOPE: an algorithm for Monte Carlo simulation of the penetration and energy loss of electrons and positrons in matter", Nuclear. Instrument. Meth. B 100, pp. 31-46. 1995.
- [7] E. S. Jang, B. S. Chang, "A Germanium Detector Structure PENELOPE Characteristic Analysis by Computer Simulation", Journal of Korea Society of Radiology, Vol. 2, pp. 73-77, 2015.
- [8] Debertin, Kelsa., Helmer, Rui. Guo., γ - and X-ray spectrometer with semiconductor detectors, North Holland, Amsterdam, 1988.
- [9] Koren. M, Martincic, Radiation. Measurements.
- [10] Measurement of total-peak-peak ratio of a semiconductor gamma-ray detector. Nuclear. 1996.
- [11] G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, John Wiley & Sons, Inc., 3rd ed., New York, pp. 51, 2000.
- [12] Mc. Namara A.L, Heijnis H., Fierro D, Reinhard M I. The determination of the efficiency of a Compton suppressed HPGe detector using Monte Carlo simulations. J. Environment. Radioactivity. No. 106, pp. 1-7, 2012..
- [13] M. Tsutsumi, T. Oishi, N. Kinouchi, R. Sakamoto and M. Yoshida, "Design of an anti-Compton Spectrometer for Low-level Radioactive Wastes using Monte Carlo Techniques", J. Nucl. Sci. & Tech. Vol. 39, No. 9, pp. 957-963. 2002.

몬테카를로 시뮬레이션을 통한 4π 컴프턴 억제 분광기 연구

장은성,¹ 이효영^{2,*}

¹부산대학교 핵물리방사선기술연구소

²동의대학교 방사선학과

요약

Compton suppression system은 스펙트럼에서 Compton continuum으로 존재하는 영역을 억제하는 장치이다. 본 연구에서는 HPGe-NaI(Tl)의 기하학적인 구조 파악 및 이동에 따른 이 때 그 효과를 최적화 할 수 있는 배치구조를 찾기 위하여, Monte Carlo simulation을 통해 Compton suppression의 행태적 특성을 파악하고, 몇 가지 배치구조에 대한 비교를 해보았다. 또한 거리에 따른 효율을 이용하여 환경 측정에 사용되는 실린더 비커에 적용해 보았다. ARF 값은 81.1 keV의 경우 약 1.65, 1332.4 에너지의 경우 약 1.9 정도로 나타내는 것을 확인할 수 있다. NaI(Tl) 검출기들의 위치 이동에 따라 특정한 영역에서 suppression이 일어나는 확인할 수 있다. Compton suppression system 구성의 목적에 비추어 볼 때, 결과 에너지 스펙트럼의 Compton continuum 영역 전반에 걸쳐 suppression이 이루어지는 것이 더욱 적절한 배치구조가 됨을 알 수 있다. 따라서 최적화된 구조를 통해 다양한 환경시료 측정에 적용할 수 있음을 확인 하였다.

중심단어: 컴프턴 억제분광기, PENELOPE, 비교인자