

Measurement of MDA of Soil Samples Using Unsuppression System and Compton Suppression of Environmental Radioactivity in Processing Technology

Suman Kang*, Inchul Im*, Jaeseung Lee*, Eunsung Jang**, Mihyeon Lee***, Kyungtae Kwon****, Changtae Kim*****

*Department of Radiological Science, Dongeui University**

*Department of Radiation Oncology, Kosin University Gospel Hospital***

*Department of Radiation Safety Managment, Dong-pusan College****

*Department of Radiological Science, Dongnam Health University*****

*Department of Health Care managment, Dongeui University******

환경 방사능 처리기술에서의 Compton suppression 및 Unsuppression system을 이용한 토양시료의 MDA 측정

강수만*, 임인철*, 이재승*, 장은성**, 이미현***, 권경태****, 김창태*****

동의대학교 방사선학과*, 고신대학교 복음병원 방사선종양학과**, 동부산대학교 방사선 안전관리실***,

동남보건대학교 방사선과****, 동의대학교 의료경영학과*****

Abstract

Compton suppression device is a device by using the Compton scattering reaction and suppress the Compton continuum portion of the spectrum, so can be made more clear analysis of gamma ray peak in the Compton continuum region. Measurements above background occurs or, radioactivity counts of radioactivity concentration value of ^{40}K nuclides ^{137}Cs and natural radioactivity artificial radioactivity detected from the surface soil sample, unwanted non-target analysis and interference peak who dotted line you know the calibration of the measurement energy is allowed to apply the (Compton suppression) non-suppressed spectrum inhibition spectrum and (Compton Unsuppression) the background to the measured value of the activity concentration value of the standard-ray source is detected relative to the peak of By measuring according to the different distances cause ^{137}Cs , and comparative analysis of the Monte Carlo simulation, in order to obtain a detection capability for efficient, looking at the Compton inhibitor, as the CSF value increases with increase in the distance, more It was found that the background due to Compton continuum of the measured spectrum suppression mode Compton unrestrained mode can know that the Compton suppression many were made, using a ^{137}Cs is reduced.

Key Words : MDA, Compton Suppression, soil samples, environmental radioactivity, Basal activity

요약

Compton suppression 장치는 Compton 산란 반응을 이용하여, 스펙트럼의 Compton continuum 부분을 억제함으로써 Compton continuum 영역 내에서의 감마선 피크들의 분석을 보다 명확하게 할 수 있게 해주는 장치이다. 표준토양 시료에서 검출된 인공 방사능인 ^{137}Cs 과 자연 방사능인 ^{40}K 핵종의 방사능 농도 값들에 대한 방사능 계수치가 백그라운드를 상회하는 측정값이 발생되거나, 불필요한 방해피크나 비해석 대상 피크에 대하여 검출된 표준선원의 방사능 농도 값들의 실측치에 대한 background를 비억제 스펙트럼(Compton Unsuppression)과 억제 스펙트럼(Compton suppression)을 적용시켜 측정 에너지에 대한 교정을 알고자 점선원인 ^{137}Cs 을 거리별에 따라 측정하여, 몬테칼로 시뮬레이션과 비교 분석함으로써 효율적인 검출 능력을 얻고자 함이며, Compton 억제 인자를 보면 거리가 멀어짐에 따라 CSF 값이 클수록 더 많은 Compton suppression가 이루어졌음을 알 수 있고, ^{137}Cs 을 이용한 컴프턴 비억제 모드와 억제모드로 측정된 스펙트럼에서 컴프턴 연속에 의한 백그라운드가 감소함을 알 수 있었다.

중심단어: MDA, Compton Suppression, 토양시료, 환경 방사능, 기저방사능

I. INTRODUCTION

원전 시설을 운영함에 있어 방사능의 유출 또는 방출에 의한 주변 환경 시료를 대상으로 분석하여, 에너지 준위를 평가함으로써 원자력 시설의 안정성 여부 및 환경 영향 평가를 통한 만약의 사고를 대비하기 위한 판단의 근거가 확보되어야 하며, 특히 토양의 시료 측정분석은 중요한 의미를 갖는다. 국내 원전 주변 환경 방사능 측정은 여러 기관에서 매년 실시되고 있으나 이들 기관의 측정결과 상대 오차율이 커서 신뢰성이 미흡하다. 환경 방사능 측정과 분석에 의한 결과의 신뢰도를 향상시키기 위해서는 각종 시료의 채취방법 및 전처리 기술의 확립과 기저 방사선의 처리기술, 환경 방사선 인증 표준 선원의 제작 보급, 검출기 효율 및 에너지 교정기술, 신뢰도를 높이기 위한 검출기의 효율 향상과 성능 개선 등의 노력이 필요하다고 볼 수 있는 데^[1]. 감마선을 검출하는 검출기는 입사되는 감마선으로부터 생성되는 2차 전자를 완전히 정지시키고 모든 방사선 에너지가 출력신호로 나올 수 있도록 고안되어 있어 기저 방사선의 처리 기술 또한 매우 중요하다. 원자핵에서 방출되는 감마선의 에너지는 보통 0.1~10MeV 정도의 에너지 영역에서 주로 광전효과(Photoelectric effect), 컴프턴 산란(Compton scattering) 및 전자 쌍생성(Electron-pair production)이 주로 일어난다. 에너지가 수백 keV 이상인 감마선의 경우에는 다중상호작용에 의해 산란감마선이 검출기내에서 광전효과를 일으키게 되며 광전 peak를 만드는 역할을 하고 있다. 그러나 검출기의 주위는 차폐재로 차폐시켜 사용하므로 선원으로부터 나온 감마선이 다시 차폐물

질에 의해 컴프턴 산란이 일어나게 된다. 이 산란된 감마선이 다시 검출기로 입사하게 되면 후방산란의 peak가 나타나게 된다^[2]. 감마선 계측에 있어서 Compton 산란에 의한 효과는 스펙트럼에서 넓은 에너지 영역에 걸쳐 Compton continuum 부분을 형성하게 된다. 이는 continuum 상의 작은 피크들의 분석에 영향을 미치게 된다. 저준위 방사능이 함유된 환경시료에서 방사능 계측 시 감마선 스펙트럼의 분석은 계수치가 낮으며, 방사능붕괴와 백그라운드 계수치의 통계학적 요동특성으로 인해 Peak 모양이 찌그러 들고 peak로 인해 분석이 어려워 실제로 방사능이 존재하지 않은 시료의 계수치가 백그라운드를 상회하는 측정값이 발생한다. 붕괴계열을 이루지 않은 자연방사성 핵종은 14개 핵종이 존재하며, 생활 주변에서 검출되기 쉬운 핵종은 ^{40}K , ^{87}Rb 핵종이며 이외에 ^{50}V , ^{115}In , ^{138}La , ^{147}Sm , ^{176}Lu 등이 있다. 자연방사성 핵종인 ^{40}K 핵종의 방사능농도 평균값과 인공 방사성 핵종인 ^{137}Cs (반감기: 30.1년)의 방사능농도 평균값은 $959\pm 158\text{Bq/kg}$ 및 $31.0\pm 8.62\text{Bq/kg}$ 으로 이 값은 우리나라 전국 미경작지 토양시료 중에 함유된 ^{40}K 핵종과 ^{137}Cs 핵종의 방사능 농도 평균값인 670Bq/kg 및 27.2Bq/kg 보다는 각각 높은 값으로 나타났다^[3-4]. 홍천군 북방면 지역에서 채취된 토양시료를 분석한 결과 시료 중에 함유된 방사성 핵종은 인공방사성 핵종인 ^{137}Cs 핵종과 자연방사성 핵종인 ^{40}K 핵종이외에 붕괴계열을 이루는 uranium (4n+2) 계열의 ^{214}Pb (352.0keV), ^{214}Bi (1764.5keV), thorium (4n) 계열의 ^{208}Tl (2614.4keV), ^{212}Bi (727.3keV), ^{228}Ac (911.2keV) 등이 검출되었다^[5]. 한국 원자력안전기술원에서 “전국 환경방사능 조사” 보고서에 의하면 우리나라 표준 토양의 ^{137}Cs 방사능 농도 범위는 2011년

<MDA ~ 12.9 Bq/kg-dry 및 2012년 <MDA ~ 29.7 Bq/kg-dry이며^[6], 2013년 고리본부 원전주변 환경방사능 조사 및 평가 측정지점에서 측정치는 0.398 ~ 4.30 Bq/kg-dry이며, 비교지점(울산)에서의 농도 범위는 4.92 ~ 6.82 Bq/kg-dry로 나타났으며 자연 방사능인 40K 핵종에 대해서는 <MDA로 나타났다^[7]. 방사능 측정분야에서 많이 사용되는 용어인 최소검출 방사능준위 (minimum detectable activity level, MDA) 는 주어진 분석 방법 및 시료종류에 따라 실제로 얻어질 수 있는 방사능 농도준위로 계측과정에 포함되는 많은 특수한 요인과 계측기 특성 및 시료자체의 특성에 따라 값이 변하기 때문에 측정장비를 교환할 경우 분석방법을 개선하거나 MDA값을 다시 산출해야만 한다. MultiFit은 방해피크나 비해석 대상 피크의 존재여부를 확인하기 위하여 수행하는 과정으로 측정된 스펙트럼을 정확히 분석하기 위해서는 우선 Separated Overlaps를 선택하여 MultiFit을 수행하고, 그 다음 Close Overlaps를 선택하여 MultiFit으로 스펙트럼의 피크들을 분리시킨 후 불필요한 방해피크나 비해석 대상 피크를 제거해야 한다^[5]. 본 연구에서는 표층토양 시료에서 검출된 인공 방사능인 ¹³⁷Cs과 자연 방사능인 ⁴⁰K핵종의 방사능 농도 값들에 대한 방사능 계수치가 백그라운드를 상회하는 측정값이 발생되거나 불필요한 방해피크나 비해석 대상 피크에 대하여 검출된 표준부피선원의 방사능 농도 값들의 실측치에 대한 background를 비억제 스펙트럼(Compton Unsuppression)과 억제 스펙트럼(Compton suppression)을 적용시켜 측정 에너지에 대한 교정을 알고자 점선원인 ¹³⁷Cs을 거리별에 따라 측정하여, 몬테칼로 시뮬레이션과 비교하여 최상의 상태에서 비교 분석함으로써 효율적인 검출 능력을 얻고자 함이다.

II. Sample And Measurement Apparatus

1. 시료채취

환경 방사능 분석에 있어서 시료의 채취 및 전 처리 과정은 측정대상의 핵종에 따라 변화될 수 있으며, 토양 시료의 채취는 주변 지역에 대한 측정값에 대한 변동성이 적고 표면이 항상 환경 방사능에 노출되어 있

는 지역을 선택하였으며, 장애물이나 인위적 또는 자연적 붕괴 및 자연 생태계적인 잡초나 환경 오염물질이 전혀 없는 평탄지역을 선정하였다. 토양시료는 원전부지내(정수장, 전시관) 2개 지점, 부지주변 1개지점(사택 2단지) 그리고 원전 시설과 무관한 비교지점인 울산에서 1개 지점을 선정하여 상·하반기 2회 채취하였다. 채취지점은 대표성을 유지하기 위해 반경 5m 내에서 500g 이상을 원통형 지름 50mm, 높이 50mm 토양 채취기로 표면 0~5mm 정도의 깊이에서 토양시료를 채취·혼합하여 그 지점의 시료를 사용하였다. 채취한 토양 시료는 이물질이 전혀 없는 스테인레스 바트에서 2mm 간격의 체(sieve)를 이용하여 이물질을 제거하고 dry oven에 넣고 105℃~110℃에서 24시간 건조시켰으며, 완전히 건조된 토양시료는 상온에서 냉각시킨 후 막 사발을 이용하여 곱게 분쇄하여 일정한 두께로 펼쳐 놓고 시료의 대표성을 확보하기 위하여 격자형으로 사료를 등분한 다음, 일정량의 시료를 택하여 핵종 분석용기 마리넬리 비이커(48 mmφ x 50mm H)에 50mm 높이로 충전한 다음 측정시료의 무게를 재고 측정하였다. 표층토양에서 검출된 ¹³⁷Cs 및 ⁴⁰K 값은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Points around the nuclear power plant in comparison with the radioactivity concentration values for soil samples

지점	시기	¹³⁷ Cs (Bq/kg-dry)	⁴⁰ K (Bq/kg-dry)
A	상반기	1.49±0.25	508±11.00
	하반기	1.60±0.10	601±13.00
B	상반기	0.26±0.80	920±19.00
	하반기	0.37±0.07	917±18.00
C	상반기	3.69±0.15	704±15.00
	하반기	2.25±0.11	705±14.00
D	상반기	0.43±0.23	714±15.00
	하반기	0.44±0.17	608±12.00

2. Compton suppression system

Compton suppression 장치는 Compton 산란 반응을 이용하여, 스펙트럼의 Compton continuum 부분을 억제함으로써 Compton continuum 영역 내에서의 감마선 피크들의 분석을 보다 명확하게 할 수 있게 해주는 장치이며, 환경 방사선 시료에서 측정의 하한치를 높이

기 위해서는 감마선 스펙트럼의 한계를 개선 할 필요가 있다. 시료 측정에는 Canberra System을 사용하였으며, 상대효율은 60%, 분해능은 1.96 keV, peak-to-compton 비는 59/1이다. 핵종분석용 스펙트럼은 MCA (multichannel analyzer)로 감마선 스펙트럼은 8,192 채널로 최대 감마에너지를 3 MeV까지 측정하도록 하였다. 측정이 끝난 스펙트럼은 분석용 프로그램인 Geine 2,000을 이용하여 분석하였다. 계측시간은 모든 시료에 Live time (80,000s), BKG (8,000s)을 이용하여 비억제 스펙트럼(Compton Unsuppression)과 억제 스펙트럼(Compton suppression)의 방사능 농도를 총 계수치 및 초당 계수치 등의 스펙트럼을 비교 분석하였다.

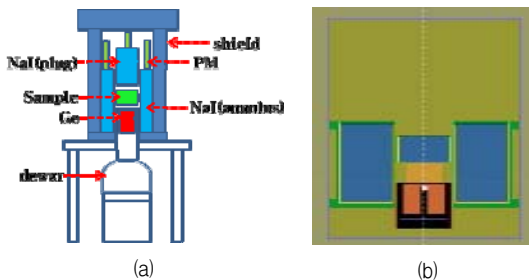


Fig. 1. Anti-Compton device (a) Simulation modeling with PENELOPE (b).

3. 배경 스펙트럼 측정 및 보정

검출기를 납 차폐용기에 넣고 시료 없이 에너지 스펙트럼을 측정한 경우에도 다양한 에너지 피크가 나타난다(Fig. 2).

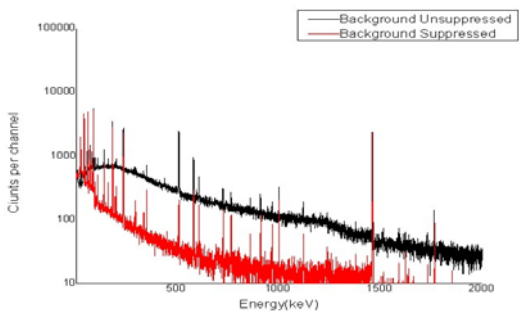


Fig. 2. Comparison of background spectra 80,000 sec.

이러한 배경스펙트럼은 검출기 주변의 자연방사성 핵종, 검출기 또는 차폐체에 들어 있는 방사성 핵종,

계측 계통의 잡음 등에 기인한다. 이러한 배경 스펙트럼은 시료를 측정하는 경우 중첩되어 나타나므로 미리 측정하여서 시료를 측정한 스펙트럼에서 빼주어야 한다. 시료와 배경을 측정하는 시간을 같게 설정하여야 하며, 같은 기하학적 구조 및 특징을 가지는 시료 용기를 시료를 충전 하지 않은 상태에서 계측기에 두고 측정한다.

4. Compton suppression factor

Compton suppression의 효과를 정량적으로 나타내기 위한 지표로서, 주어진 감마선 에너지에 대해서 suppression 된 경우와 되지 않은 경우에 Main 검출기에 deposit 된 에너지 비를 나타내거나^[7], 다음 식과 같이 정의 된다^[8].

$$CSF = \frac{(Peak - t_0 - Compton ratio)_{Unsuppressed}}{(Peak - t_0 - Compton ratio)^{pressed}}$$

Peak-to-Compton ratio는 특정 에너지원의 경우에 있어서 정해진 영역에 대한 피크의 영역비로 정해지며, 각각의 에너지 영역에 대한 full energy peak 영역의 면적비로 정의된다^[7]. 이 계수는 억제된 스펙트럼 내에 존재하는 연속체 높이에 대한 비억제된 스펙트럼내에 존재하는 Compton 연속체의 평균적인 높이의 비율로 정의된다. Peak-to-Compton ratio는 특정에너지원에 대해서, 한정된 영역에 대해서만 에너지 스펙트럼이 suppression 되는 정도를 반영하기 때문에 보다 다양한 에너지의 선원에 대한 전체적인 영역에서의 Compton suppression의 효과를 정량적으로 나타낼 수 있는 지표로서 다음과 같다.

$$ARF = \frac{\sum \{(Count)_{unsuppressed} / (Count)^{pressed}\}}{Total\ number\ of\ channels}$$

위 식은 Compton Suppression이 일어난 경우와 일어나지 않은 경우에 대해 continuum 영역에서 각 채널당 카운터 수의 비를 평균하여 나타낸 것으로, 감마선 에너지 스펙트럼 영역 전반에 대한 Compton Suppression의 효과를 확인할 수 있다. NaI 플러그와 고순도 게르마늄 검출창 사이에 점 선원을 원통형 비이커의 정중앙면에 0.5 cm에 놓고 에너지 범위 15 keV~595 keV 범위에서 ¹³⁷Cs에 의한 CSF를 평가하였으며 Table 2와

같다.

Table 2. Compton Suppression factors for the standard point source ¹³⁷Cs

Energy (KeV)	Measurement		PENLOPE		CSF	
	Unsupp	Supp	Unsupp	Supp	MT	MC
15	120.3	105.0	655.7	176.7	1.2	3.7
55	99.7	48.5	650.8	170.3	2.1	3.8
75	126.7	90.0	645.2	167.2	1.4	3.9
115	156.0	35.7	626.8	163.4	4.4	3.8
175	189.0	52.7	654.4	182.4	3.6	3.6
255	209.0	67.5	591.1	143.5	3.1	2.0
335	193.3	30.0	580.2	122.9	6.5	4.7
375	190.3	27.7	584.5	116.0	6.8	5.0
465	304.5	149.0	546.0	99.4	6.1	5.5
535	81.0	25.5	235.2	84.7	3.2	2.8
595	34.5	32.0	63.2	58.3	1.1	1.1

Note) PENLOPE: PENetration and Energy Loss of Positrons and Electrons

5. Comparison Suppression에 의한 토양시료의 MDA 측정

방사선 계측시스템은 자연방사선 환경 속에서 운용되므로 필연적으로 background의 영향을 받는다. 그런데 시료의 방사능이 극히 미미할 때는 그 신호를 background와 구분하기 어려워지므로 측정할 수 있는 방사능의 한계 문제가 발생한다. 실제로 얻은 계수가 background와 구분될 수 있는 한계를 검출한계치 (Low Limit of Detection: LLD)라 부르고 이로부터 계수효율 등을 반영하여 방사능으로 환산한 값을 최소검출방사능(Minimum detectable Activity: MDA)이라 부른다. 환경 시료에서 발견되는 측정의 하한치를 높이기 위해서는 감마선 스펙트럼의 검출 한계를 개선시킬 필요가 있다. 감마선 스펙트럼 시스템의 방사능 백그라운드는 게르마늄 크리스탈 주변에 매우 근접한 방사능 핵종 양을 감소시킬 수 있다. 원전부지 주변에서 채취한 토양시료를 각각 80,000s 측정하여 비억제 스펙트럼과 억제 스펙트럼의 방사능 농도를 각각 비교하였다(Fig. 3).

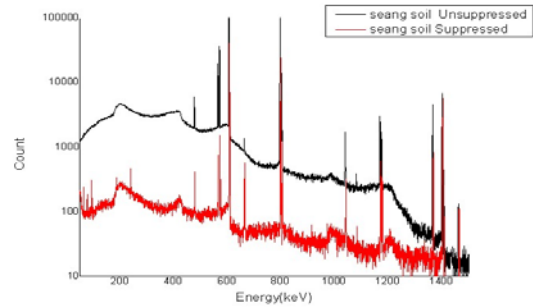


Fig. 3. Gamma ray Spectrum of land soil sample.

III. RESULT

1. ¹³⁷Cs 점선원 거리에 따른 Compton suppression factor

컴프턴 백그라운드는 원래 감마선 에너지에서 기인된 것으로서 55~65 keV에 대한 비억제 모드에서 663,694.3 Counts이고 억제모드에서는 439,173.9 Counts이므로 컴프턴 억제 인자비는 1.51이다. 컴프턴 플래토우 영역 358-382 keV 에너지에서 ¹³⁷Cs는 비억제 모드에서 893,329.0 Counts이고 컴프턴 억제모드에서는 139,773.0 Counts이다. 따라서 컴프턴 억제인자는 6.39임을 계산할 수 있다. 이것은 컴프턴 산란에 의한 백그라운드가 84.4% 감소되었다는 것을 의미한다. 이 영역에서 컴프턴 전산모사에 의한 컴프턴 억제 인자는 6.80이다. 그러므로 컴퓨터 전산모사에 의해 더 많이 컴프턴 억제가 일어났음을 알 수 있다. 컴프턴 에지 461-472 keV 에너지에서 비억제 모드에서 1,441,214 Counts, 억제 모드 219,149 Counts이므로 컴프턴 억제는 6.58이다.

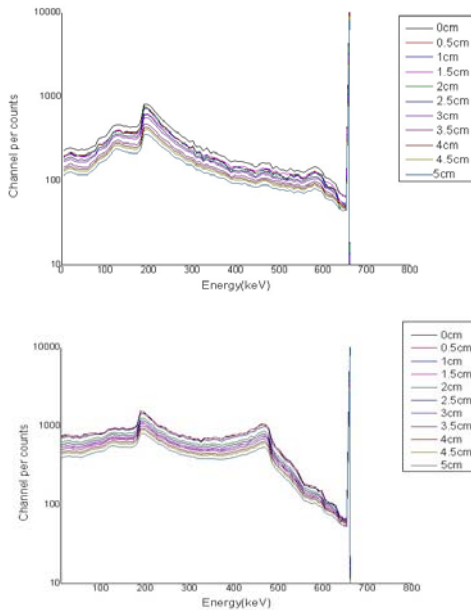


Fig. 4. Typical Gamma ray energy spectrum of the ¹³⁷Cs source using the Compton Suppression measurement.

Compton 억제 인자를 보면 거리가 멀어짐에 따라 CSF 값이 클수록 더 많은 Compton suppression가 이루어졌음을 알 수 있고, ¹³⁷Cs을 이용한 컴프턴 비억제 모드와 억제모드로 측정된 스펙트럼에서 볼 수 있듯이 컴프턴 연속에 의한 백그라운드가 감소함을 알 수 있다.

2. Comparison Suppression에 의한 토양시료의 MDA 측정값

토양시료에서 전반적으로 검출된 ¹³⁷Cs 시료에 대한 시료 채취 지점마다 A지점에서는 비억제 모드에서는 <2.05, 억제 모드에서는 <0.92, CSF는 2.22로 나타났으며, B지점에서는 비억제 모드에서는 3.99±0.46, 억제 모드에서는 1.32±0.36, CSF는 0.923로 나타났고, C지점에서는 비억제 모드에서는 <1.89, 억제 모드에서는 <0.847, CSF는 2.23으로 나타났으며, D지점에서는 비억제 모드에서는 <2.63, 억제 모드에서는 <1.29로 CSF는 2.03으로 나타났으며, 최소 검출가능한 값(MDA)는 억제 모드에서는 <0.847~1.32±0.36으로 나타났으며, 비억제 모드에서는 최소 검출가능한 값(MDA)는 <1.89~

3.99±0.46으로 나타났으며 Table 3과 같다.

Peak-to-Compton ratio를 나타내는 CSF는 B 지점에서 0.923으로 나타나 가장 잘 억제되었음을 확인 할 수 있었다.

Table 3. The land soil of the radioactivity

지점	핵종	MDA		CSF
		unsuppression (Bq/kg-dry)	suppression (Bq/kg-dry)	
A	¹³⁷ Cs	<2.05	<0.920	2.22
	⁴⁰ K	923±36	933±36	0.989
B	¹³⁷ Cs	3.99±0.46	1.32±0.36	0.923
	⁴⁰ K	422±19	422±18	1.00
C	¹³⁷ Cs	<1.89	<0.847	2.23
	⁴⁰ K	642±28	649±27	0.989
D	¹³⁷ Cs	<2.63	<1.29	2.038
	⁴⁰ K	502±29	497±28	1.01

IV. CONCLUSION

Compton Suppression System에 대한 특성에서 알 수 있듯이 ¹³⁷Cs 점선원으로 검교정 한 후 토양시료를 측정결과에서 비억제에 비해 많이 억제되었음을 확인 할 수 있었다. 또한 환경시료에 대한 측정에서 백그라운드, 시료측정시간, 회수율 등의 여러 인자가 MDA값에 영향을 미치는데⁹⁻¹³, 그 중에서 방사능 농도가 2,500 Bq/kg 이상에서 측정시간을 짧게 해 줌으로서 MDA값들을 줄일 수 있었으며, 시료량이 증가할수록 자체 흡수효과에 의한 효율의 감소가 뚜렷이 나타났다. 또한 Compton suppression의 활용은 자연적인 방사능 또는 인공적인 방사능 핵종의 존재¹⁴⁻¹⁵, Compton continuum의 상승을 초래하는 환경시료에 포함된 일부 방사능 핵종의 미소량 측정에 있어 유용함을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 활용된 Compton suppression System은 표준 시료와 보정 후 방사능 농도는 거의 일치함을 알 수 있어 4개 지점에서 성분 비율이 가장 높은 것들을 통해 알 수 있듯이 측정된 결과 불확도가 1.8% 이내로 나타나 Monte Carlo Simulation 결과와 일치하여 향후 토양시료의 측정에서 있어서의 기준점을 제시할 것으로 사료된다.

Reference

- [1] Yonggu Im, "Uclear safety and security commission," Uclear Safety And Security Commission, 1993.
- [2] Nuclear safety and security commission, Environmental radioactivity monitoring work shop, 1996.
- [3] National environmental radioactivity survey, KINS/AR- 409,1997.
- [4] Yangsuk Kim, "A Study on the measurement of Radioactivity in Soil and the Determination of relevand Gamma-ray Exposure Rete ", Major in Natural Science Education(physics), Graduate School of Education Chungnam National University Tacjon, korea, 1998.
- [5] Sang kyu Hwang, "An analysis of gamma radioactive nuclide contained in soils in Bukbang Myeon Hongchon" Department of physis, Graduate School, Kangwon University, 2000.
- [6] uclear Safety And Security Commission, "National environmental radioactivity survey report", 2011, 2012.
- [7] uclear Safety And Security Commission, "National environmental radioactivity survey report", Pukyong National University Research Institute of Radiology, 2013.
- [8] Salvat. F, Fernandez-Varea J.M, Sempau. J, "A code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport." in: Workshop Proceeding, Issy-les Moulinaux, France, Vol. 7, No. 10, 2003.
- [9] Parus J, Kierzek J. Raab W, Donohue D, "A dual purpose Compton suppression spectrometer. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry", Vol. 258, No. 1, pp.123-132, 2003.
- [10] Helms H. A, "Low Level Counting/Compton Suppression" Harshaw Chemie B. V, De Meern, Holland ,1996
- [11] "Compton Suppression. Made Easy", Canberra Application Note, AN-D-8901.
- [12] C.S. Park, G. M. Sun and H.D. Choi, "Performance of a Compton Suppression Spectrometer of the SNU-KAERI PGAA facility", J. Korean Nucl. Soc. Vol. 35, pp. 347, 2003.
- [13] J. KIERZEK, J. PARUS, "Optimization of the Gamma Spectrometry System at SAL with the Use of Large NaI(Tl) Annulus in the Anticoincidence Mode for Compton Scattered Radiation Suppression" Report IAEA/AL/110, Seibersdorf, Austria, September 1997.
- [14] L.L. 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, p. 427, 1993.