

# Study on Development of Embedded Source Depth Assessment Method Using Gamma Spectrum Ratio

## 감마선 스펙트럼 비율을 이용한 매립 선원의 깊이 평가 방법론 개발 연구

Jun-Ha Kim<sup>1,2</sup>, Jea-Hak Cheong<sup>1</sup>, Sang-Bum Hong<sup>2,\*</sup>, Bum-Kyung Seo<sup>2</sup>, and Byung Chae Lee<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Kyunghee University, 1732, Deogyong-daero, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea*

<sup>2</sup>*Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989 beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea*

<sup>3</sup>*Chungbuk National University, Chungdae-ro 1, Seowon-Gu, Cheongju-si, Chungbuk, Republic of Korea*

김준하<sup>1,2</sup>, 정재학<sup>1</sup>, 홍상범<sup>2,\*</sup>, 서범경<sup>2</sup>, 이병채<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*경희대학교, 경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732*

<sup>2</sup>*한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로989번길 111*

<sup>3</sup>*충북대학교, 충북 청주시 서원구 충대로 1*

(Received October 9, 2019 / Revised December 23, 2019 / Approved February 27, 2020)

This study was conducted to develop a method for depth assessment of embedded sources using gamma-spectrum ratio and for the evaluation of field applicability. To this end, Peak to Compton and Peak to valley ratio changes were evaluated according to <sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co, <sup>152</sup>Eu point source depth using HPGe detector and MCNP simulation. The effects of measurement distance of PTV and PTC methods were evaluated. Using the results, the source depth assessment equation using the PTC and PTV methods was derived based on the detection distance of 50 cm. In addition, the sensitivity of detection distance changes was assessed when using PTV and PTC methods, and error increased by 3 to 4 cm when detection distance decreased by 20 cm based on 50 cm. However, it was confirmed that if the detection distance was increased to 100 cm, the effects of detection distance were small. And PTV and PTC methods were compared with the two distance measurement method which evaluates the depth of source by the change of net peak counting rate according to the detection distance. As a result of source depth assessment, the PTV and PTC showed a maximum error of 1.87 cm and the two distance measurement method showed maximum error of 2.69 cm. The results of the experiment confirmed that the accuracy of the PTV and PTC methods was higher than two distance measurement. In addition, Sensitivity evaluation by horizontal position error of source has maximum error of less than 25.59 cm for the two distance measurement method. On the other hand, PTV and PTC method showed high accuracy with maximum error of less than 8.04 cm. In addition, the PTC method has lowest standard deviation for the same time measurement, which is expected to enable rapid measurement.

Keywords: HPGe detector, In-situ measurement, Hotspot, Source depth, Peak to Compton, Peak to Valley

\*Corresponding Author.

Sang-Bum Hong, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: [sbhong@kaeri.re.kr](mailto:sbhong@kaeri.re.kr), Tel: +82-42-868-2745

### ORCID

Jun-Ha Kim

<http://orcid.org/0000-0002-6866-1185>

Jea-Hak Cheong

<http://orcid.org/0000-0001-6666-6698>

Sang-Bum Hong

<http://orcid.org/0000-0002-4424-7457>

Bum-Kyung Seo

<http://orcid.org/0000-0002-1981-7841>

Byung Chae Lee

<http://orcid.org/0000-0001-9709-168X>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

본 연구는 감마스펙트럼 비율을 이용한 매립된 선원의 깊이 평가방법 개발 및 적용성 확인을 위해 진행되었다. 이를 위해 현장측정 HPGe 계측기 및 MCNP 전산모사를 이용하여  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  선원의 매질 내 깊이와 계측거리에 따른 Peak to Compton, Peak to Valley 비율(Q)의 변화를 평가하였다. 해당 결과를 이용해 계측거리 50 cm를 기준으로 PTV 및 PTC 비율(Q)과 매립 선원의 깊이 간의 상관 식을 도출하였다. 그리고 PTC 및 PTV 방법 이용 시 계측거리 변화에 따른 민감도를 평가한 결과, 50 cm 기준으로 계측거리가 20 cm로 감소할 경우 오차가 3 ~ 4 cm까지 증가하였다. 하지만 100 cm로 증가할 경우 계측거리에 의한 영향이 미미함을 확인하였다. 그리고 PTV 및 PTC 방법과 피크 영역의 계수율 변화를 통해 선원의 깊이를 평가하는 Two distance measurement 방법을 상호 비교하였다. 평가 결과 PTV 및 PTC 방법은 최대 1.87 cm의 오차, Two distance measurement 방법은 최대 2.69 cm의 오차를 나타내어 PTV, PTC 방법의 정확도가 비교적 높음을 확인하였다. 선원의 수평 방향 위치 변화 민감도 평가 결과 Two distance measurement 방법은 선원이 off-center 방향으로 30 cm 이동하였을 경우 최대 오차가 25.59 cm로 나타났다. 반면 PTV 및 PTC 방법은 최대 오차 8.04 cm로 현장 적용 시 높은 정확도를 나타낼 것으로 예상된다. 그리고 PTC 방법은 동일 시간 측정 시 다른 방법과 비교하여 낮은 표준편차를 나타내 신속한 평가가 가능할 것으로 기대된다.

중심단어: HPGe detector, 현장측정, 국부 오염, 선원 깊이, Peak to Compton, Peak to Valley

## 1. Introduction

원자력 발전소 및 이용시설의 경우 지하 배관의 누설, 방사화 등의 원인으로 매립된 형태의 국부 오염이 존재할 가능성이 있다[1]. 해당 형태의 방사성 오염은 토양 및 구조물에 부분적으로 높은 방사성 핵종 농도를 부여한다. 따라서 국부 오염은 부지 및 구조물의 개방 기준(Release criteria) 만족을 위해 제거 되어야 하며, 폐기물 절감 및 작업자의 방사선 방호와 효과적인 제염 작업을 위해 정확한 위치 정보가 요구된다. 이때 오염 분포 및 농도에 대한 평가는 원자력 시설 해체 단계 중 특성평가 단계에서 수행되며[2], 오염의 정확한 위치를 파악하기 위해서 수평 방향 위치와 수직방향 위치 평가가 수행된다. 수평 방향 오염 분포 평가는 scan survey 방법을 이용해 수행되며 NaI(Tl), GM 계수관 등 survey meter를 이용해 단일 선원에 대해 최대 30 cm 오차 내에서 평가 가능하다 [3]. 수직방향 오염 분포 평가는 현장측정 방법을 이용해 평가해야 하며, 평가방법에는 계측 위치에 따른 계수율 변화를 이용한 방법[4], 차폐체 유무에 따른 계수율 변화를 이용하는 방법, Peak 영역과 Compton 영역의 비율 특성을 이용한 방법이 존재한다.

일반적으로 수직방향 분포 평가는 계측 거리에 따른 계수율 변화를 이용한 방법(Two distance measurement)[4]을

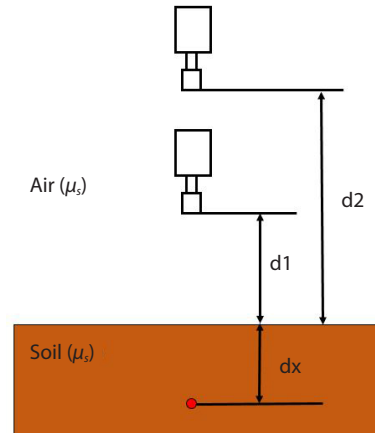


Fig. 1. Concept of two distance measurement.

이용하며, 계측 거리 변화에 따른 피크 영역의 계수율 변화를 이용하여 선원의 깊이를 평가한다. 하지만 해당 방법의 경우 선원의 깊이를 평가하기 위해 최소 2회 측정이 필요하여 측정 신속성 향상에 한계가 있다. 또한 사용되는 수식을 도출하기 위해 공기 층에 의한 감마선 차폐를 무시하기 때문에 오차가 발생한다. 이와 같은 한계점을 극복하기 위해 스펙트럼의 산란 비율을 이용한 깊이 평가 방법이 고안되었다[5].

본 연구는 기존 방사능 깊이 분포 평가에 이용되는 Peak

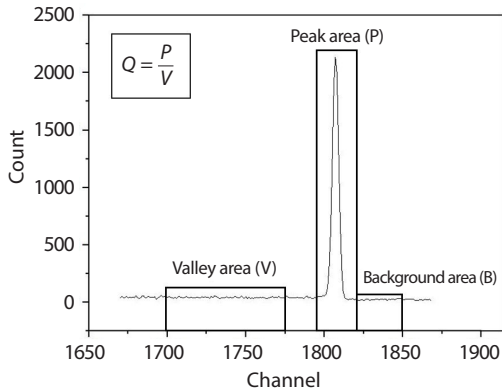


Fig. 2. Spectrum area using Peak to Valley method.

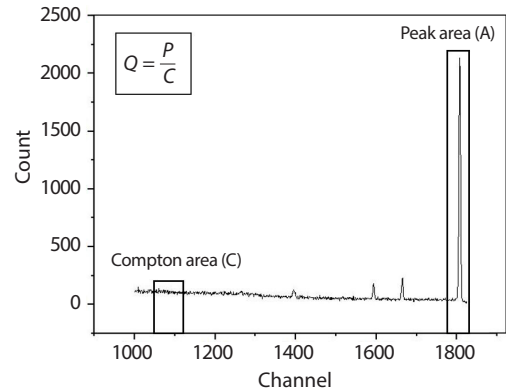


Fig. 3. Spectrum area using Peak to Compton method.

to Valley (PTV) 방법[6]을 이용해 매질에 매립된 형태의 선원의 수직위치 평가 방법을 정의하였다. 또한 Peak to Compton (PTC) 비율을 이용한 수직위치 평가 방법을 제안하였다. 그리고 Two distance measurement 방법과 PTV, PTC 방법을 이용해 실제 매립된 선원을 대상으로 현장측정을 실시하고, 각 방법 별 깊이 평가 정확도를 비교하였다. 또한 선원의 수평 방향 위치 변화가 선원의 수직 방향 위치 평가에 미치는 영향을 각 방법론 별로 평가하고 비교하였다. 해당 실험 결과를 통해 Two distance measurement, PTV, PTC 방법에 따른 매립된 선원의 수직 위치 평가의 신속성 및 정확도를 평가하여 특성평가 단계에서 현장 적용성이 높은 방법론 선정에 도움을 줄 것으로 기대된다.

## 2. Materials and Method

### 2.1 Source depth assessment using two distance measurement method

Two distance measurement 방법은 계측거리 변화에 따른 순 피크 계수율 변화를 통해 오염의 수직방향 분포를 평가하는 방법이다. 순 피크 계수율의 측정 방법은 계측기와 깊이 dx에 존재하는 선원이 일직선상에 위치하게 한 뒤, 매질 표면과 계측기의 거리를  $d_1$ 과  $d_2$ 로 달리하여 실시한다 (Fig. 1). 이때 서로 다른 높이  $d_1, d_2$ 에서 측정된 계수율을 각각  $N_1, N_2$ 라고 하면 식 (1)을 통해 선원의 깊이( $d_x$ )를 도출할 수 있다[4].

$$d_x = \frac{d_2 - \sqrt{\frac{N_1}{N_2}} \cdot d_1}{\sqrt{\frac{N_1}{N_2}} - 1} \quad (1)$$

### 2.2 Source depth assessment using spectrum ratio

Peak to valley 및 Peak to Compton 방법은 현장측정을 통해 얻은 스펙트럼 비율인 Q값과 선원 수직방향 위치와 상관관계를 통해 그 분포를 평가하는 방법이다. 해당 방법은 선원과 계측기 사이의 차폐체 두께 증가에 따른 피크 영역과 Valley 또는 Compton 영역의 변화를 이용한다. 실제 매립된 선원의 깊이가 증가할 경우 감마선이 차폐되어 피크영역의 순 계수율과 산란 영역의 계수율이 동시에 감소한다. 하지만 깊이 증가에 따른 계수율 변화는 감마선 에너지 영역에 따라 다르게 나타나는데, 이는 한번 산란된 감마선과 산란되지 않은 감마선은 에너지 영역이 달라 매질을 투과할 확률이 다르기 때문이다. 따라서 피크 영역과 산란 영역의 비율은 선원의 깊이에 따라 일정한 분포를 나타내게 된다. 이와 같은 현상을 이용해 피크 영역과 산란 영역인 Compton 영역 또는 Valley 영역의 비율 Q 값으로 깊이를 평가하는 방법이 PTC, PTV 방법이다.

PTV 방법에서 기준이 되는 감마선의 피크 영역 에너지는 기저 방사능(background)의 기여는 저 에너지 영역일수록 높기 때문에 핵종 별로 방출 확률이 비교적 높고 고 에너지인 감마선 에너지로 설정하였다. 그리고 피크영역 면적의 channel 수는 HPGe 계측기의 반치폭(FWHM)을

Table 1. Point source property used in experiment

Isotope	<sup>137</sup> Cs	<sup>60</sup> Co	<sup>152</sup> Eu
Reference date		2017-06-01	
activity	10.22 μCi (±3%)	10.27 μCi (±3%)	10.41 μCi (±3%)

Table 2. Spectrum area information for PTV and PTC method

Isotope	<sup>137</sup> Cs	<sup>60</sup> Co	<sup>152</sup> Eu
Scope Energy	662 keV	1332 keV	1407 keV
Branch Ratio	0.8499	0.9998	0.2085
Peak Area	658.3 ~ 667.09 keV (ch.1797 ~ 1821)	1327.1 ~ 1336.8 keV (ch.3625 ~ 3649)	1403.3 ~ 1412.1 keV (ch.3832 ~ 3856)
Background Area	667.2 ~ 676.0 keV (ch.1822 ~ 1846)	3857 ~ 3881 keV (ch.3650 ~ 3674)	1412.5 ~ 1421.3 keV (ch.3857 ~ 3881)
Valley Area	620.3 ~ 650.0 keV (ch.1696 ~ 1775)	1288.7 ~ 1318.4 keV (ch.3522 ~ 3600)	1366.7 ~ 1396.4 keV (ch.3734 ~ 3813)
Compton Area		381.2 ~ 410.1 keV (ch.1041 ~ 1120)	

고려하여 설정하였다. Valley영역은 피크영역 바로 앞쪽의 자연핵종이 존재하지 않는 영역으로 설정하였다 (Fig. 2). 또한 피크영역 및 Valley영역의 순계수율을 구하기 위해 기저 방사능(Background) 영역에서 채널당 count rate를 도출하여 각 영역에서 제거하였다. 이를 통해 피크영역과 Valley 영역의 비율인 Q값을 도출하였다. PTC 방법에 사용되는 Q값은 PTV 방법과 동일하게 계산되며 수식에 사용된 Peak 영역과 Compton 영역의 예시는 아래 그림과 같다(Fig. 3).

### 2.3 Point source experiment using HPGe detector

Peak to Compton 및 Peak to Valley 방법을 위한 Q-depth 상관식 도출을 위해 점선원 실험을 실시하였다. 실험에 사용한 계측기는 현장측정용 HPGe 계측기인 ISOCS (In-Situ Object Counting System, GC4019, Canberra, U.S.A)를 이용하였고, 계측기에서 발생한 신호를 분석하기 위해 MCA는 Lynx (Canberra, U.S.A)를 이용하였다. MCA는 8192 channel을 이용하여 3 MeV의 감마선 에너지까지 분석하도록 설정하였으며 교정선원으로 channel 교정을 실시하였다.

그리고 점 선원이 매질에 매립되어 있는 상황을 모사하기 위해 밀도 1.18 g/cm<sup>3</sup>의 아크릴 차폐체를 이용하였다. 아크릴 차폐체는 1 cm 두께로 제작하였으며 16개의 아크릴차폐체를 제작하여 최대 16 cm 깊이에 선원이 매립된 상황을 모사할 수 있도록 하였다. 실험에 사용된 선원은 다양한 감마선 에너지 영역에 대해 평가하기 위해 <sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co, <sup>152</sup>Eu 3가지 종류의 점 선원(Eckert & Ziegler, Germany)을 이용하였다(Table 1).

계측된 스펙트럼에서 PTC, PTV 비율의 Q값을 계산하기 위해 핵종별 Peak, Compton, Valley 영역을 설정하였다. Peak 영역은 감마선 방출률(Branch ratio)이 높으며 비교적 고 에너지 감마선 영역으로 설정하였다. 이를 통해 계측 불확도를 낮추고 저 에너지 영역에서 증가하는 기저 방사능(Background)의 영향을 최소화하였다. 따라서 <sup>137</sup>Cs의 경우 662 keV, <sup>60</sup>Co은 방출되는 감마선 에너지 중 비교적 고 에너지인 1332 keV, <sup>152</sup>Eu은 비교적 방출 확률(Branch ratio)이 높으며 고 에너지 감마선인 1407 keV로 설정하였다. Valley 영역은 Compton edge 보다 높고 Peak 에너지 보다 낮은 감마선 영역 중 단 반감기 핵종을 제외한 다른 감마 방출 핵종의 Peak 영역이 존재하지 않는 영역으로 설정하였다.

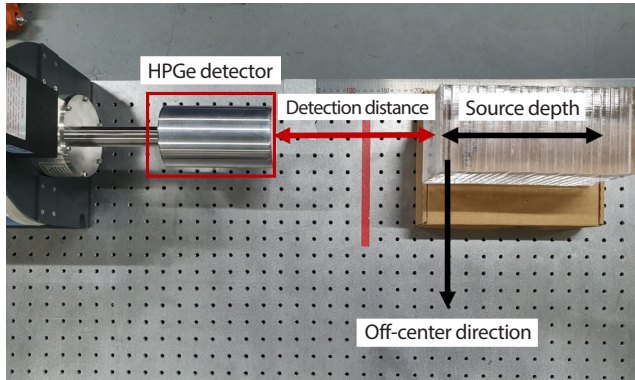


Fig. 4. Point source experiment procedure using HPGe detector.

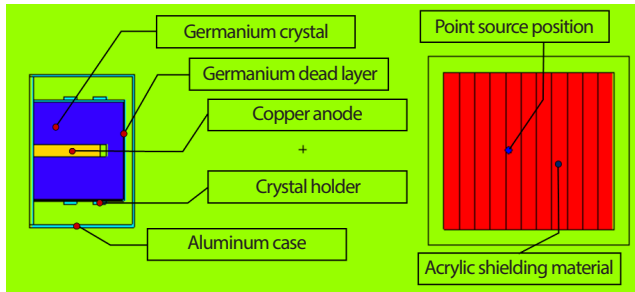


Fig. 5. Geometry modeling of MCNP code simulation.

Compton 영역은 3가지 핵종에 대해 동일 영역으로 설정하였으며 이는 3가지 감마선 에너지의 Compton edge 보다 낮은 스펙트럼 영역 중 다른 감마 방출 핵종에 의한 피크가 존재하지 않는 평탄한 영역으로 설정하였다(Table 2).

Q-depth 상관식을 도출하기 위한 점 선원 실험은 계측기와 아크릴 차폐체 표면의 거리인 계측거리(Detection distance)를 50 cm 기준으로 실시하였다. 그리고 모든 실험은 조건 별 3600 sec 씩 3회 반복 측정하였으며, 선원의 위치는 아크릴 차폐체 표면을 기준으로 0 ~ 16 cm까지 2 cm 간격으로 점 선원의 깊이를 변화하여 계측을 진행하였다. 또한 PTV 및 PTC 측정거리에 의한 깊이 평가 오차를 평가하기 위해 계측거리(Detection distance)를 20 cm 및 100 cm로 변경하여 측정거리 변화에 따른 점 선원 깊이 평가 편차를 확인하였다.

방법론 별 선원 깊이 평가 정확도를 비교하기 위한 점 선원 실험은 깊이를 표면 0~10 cm까지 2 cm 단위로 깊이를 증가시키며, 측정실험 조건을 1번 ~ 6번까지 모사한 뒤 3가지 깊이 평가 방법론 PTC, PTV, two distance measurement을

각각 적용하여 선원 위치를 평가하였다. 그리고 수평 방향 위치 변화 민감도를 평가하기 위해 선원을 off-center 방향으로 10 ~ 30 cm까지 10 cm 간격으로 이동하여 선원 깊이가 평가를 진행하였다(Fig. 4). 이때 점 선원의 깊이를 평가하는 실험은 독립적으로 3회 실시하였으며 two distance measurement 방법의 경우 1200 sec씩 다른 높이에서 2회 측정, PTV 및 PTC 방법은 2400 sec, 1회 측정하여 아크릴 차폐체에 매립된 선원의 깊이를 평가하였다.

## 2.4 Monte Carlo simulation for verification experiment result

몬테카를로 전산모사는 확률에 기반하여 실제 입자의 거동 및 반응을 모사하는 방법이다. 그 중 MCNP (Monte Carlo N-Particle) 코드는 방사선 방호, 노심 임계 등 다양한 원자력 분야에 사용되는 전산모사 코드이다. 해당 코드는 Surface로 구성되는 Cell을 이용하여 다양한 Geometry를 설정할 수 있으며 이를 활용하여 차폐체 및 계측기 구조와 방사선원을 구현할 수 있다. 본 실험에서 MCNP 코드는 실제 계측실험 결과를 검증하고 Q-depth 상관식을 도출하기 위해 이용하였다.

실제 계측실험과 동일한 MCNP 전산모사 실험을 위해 아크릴 차폐체 및 ISOCS 계측기의 검출부와 주변 구조물을 구현하였다. MCNP 전산모사에서 ISOCS 검출기를 구성하는 주요 요소인 Germanium crystal, Dead layer, Crystal holder, Copper anode, Aluminum case를 실제 계측기의 형상 및 설계 도면을 참고하여 구현하였다. 이때 Dead layer의 경우 계측기의 노후화에 따라 그 두께가 변화하기 때문에 점 선원에 대해 MCNP 전산모사와 실제 계측기의 효율이 동일하게 나타나도록 두께를 설정하였다. 그리고 아크릴 차폐체의 경우 실제 제작한 아크릴 차폐체와 동일 형상으로 구현하였다(Fig. 5).

선원의 위치는 실제 실험과 동일하게 0 ~ 16 cm까지 2 cm 단위로 점 선원을 배치하였다. 그리고 선원에서 방출되는 감마선 에너지는 단일 관심 에너지만 방출하도록 설정하였다. 또한 Gaussian Energy Broadening (GEB) Card를 이용하여 각 에너지 별 Full Width Half Media (FWHM)을 MCNP 전산모사에 반영했다. GEB card의 입력 인자는 아래 수식의 a, b, c 3가지 값을 입력한다[7].

$$FWHM = a + b\sqrt{E} + cE^2$$

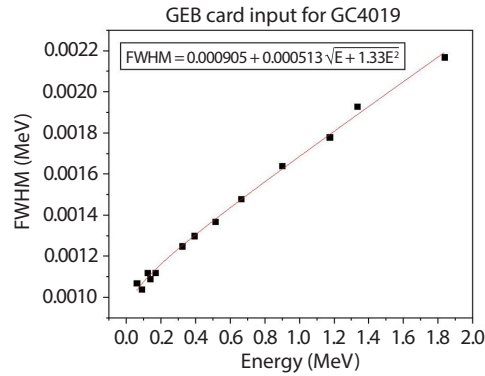


Fig. 6. GEB card input assessment using certificate source.

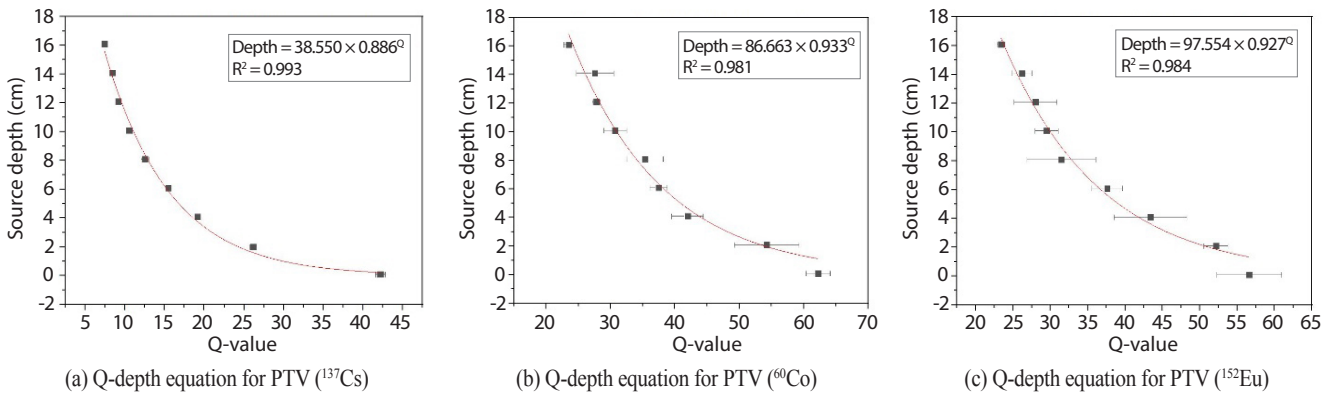


Fig. 7. Q-depth equation for PTV method (a) <sup>137</sup>Cs, (b) <sup>60</sup>Co, (c) <sup>152</sup>Eu.

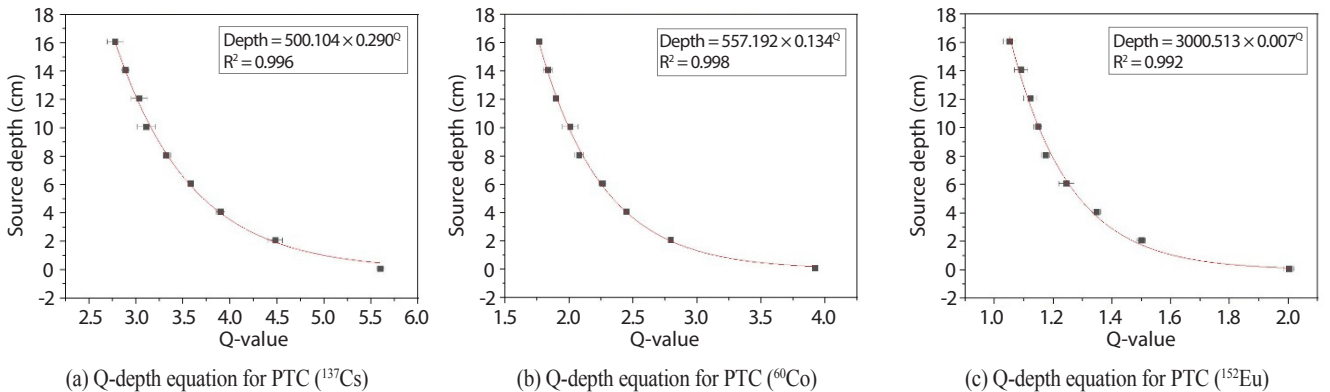
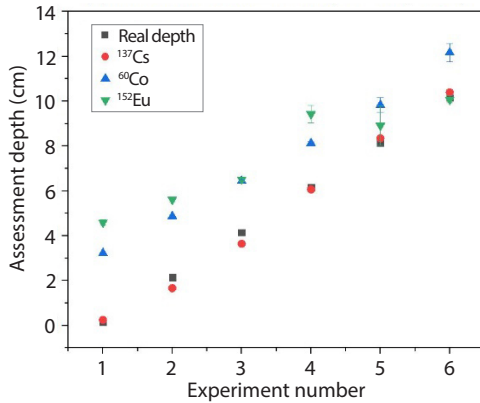


Fig. 8. Q-depth equation for PTC method (a) <sup>137</sup>Cs, (b) <sup>60</sup>Co, (c) <sup>152</sup>Eu.

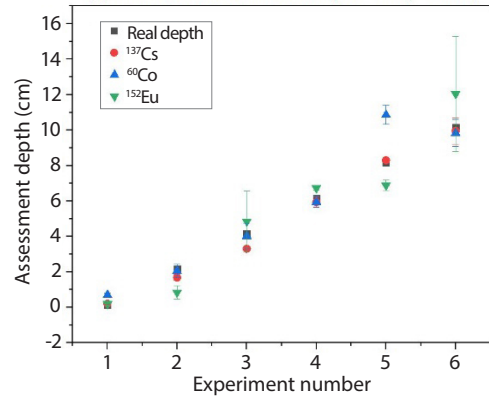
MCNP 전산모사에서 실제 계측기의 FWHM 값을 반영하기 위해 교정선원을 측정하여 얻은 스펙트럼을 바탕으로 HPGe 계측기의 에너지 별 FWHM을 평가하였고 최소자승법

(Least square method)을 이용하여 근사한 뒤 a, b, c 값을 도출하였다[8] (Fig. 6).

해당 값을 이용해 GEB card를 MCNP code에 적용한



(a) Detection distance sensitivity of PTV (20 cm)



(b) Detection distance sensitivity of PTV (100 cm)

Fig. 9. Detection distance sensitivity assessment of PTV method (a) 20 cm distance, (b) 100 cm distance.

결과 실제 계측 결과와 동일한 FWHM이 구현됨을 확인하였다. 그리고 <sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co, <sup>152</sup>Eu 선원은 모두 다양한 감마선 에너지를 방출하며 방출된 감마선은 매질과 산란을 일으켜 Compton 영역에 기여하게 된다. 따라서 실제 선원 측정 시 나타나는 Compton 영역을 구현하기 위해 방출확률이 1% 이상이며 해당 영역에 영향을 줄 수 있는 410.1 keV 이상의 감마선 에너지를 전산모사에 반영하였다. 해당 조건에서 tally8 (Energy distribution of pulses created in a detector by radiation)을 이용하여 검출부(Germanium Crystal)에서 감마선에 의해 발생하는 에너지의 스펙트럼을 수집하였다. 그리고 MCNP 전산모사를 통해 도출된 스펙트럼을 이용해 깊이에 따른 Q값의 변화를 평가하였다.

### 3. Results and Discussion

#### 3.1 Drive Q-depth formula for PTC, PTV method

PTV, PTC 방법을 이용한 점 선원 평가 수식을 정의하기 위해 MCNP 전산모사 및 실제 측정 스펙트럼을 바탕으로 선원 깊이 증가에 따른 Q값의 변화 양상을 평가하였다. 이때 기준이 되는 계측거리는 차폐체 표면과 계측기 표면을 기준으로 50 cm로 설정하였다. 깊이 평가 수식은 선원이 표면에 존재할 때 Q값을 HPGe 계측기를 이용한 점 선원 실험을 통해 구한 뒤, MCNP 및 점 선원 실험을 통해 선원 깊이에

따른 Q값의 변화율을 구하여 도출하였다. 이를 통해 PTV 및 PTC 방법론의 Q-depth 상관식을 핵종에 따라 도출하였다. 상관식의 형태는 Q값과 선원의 깊이의 상관도(R<sup>2</sup>)가 가장 높은 형태로 선정하였다(Fig. 7, 8).

PTC 방법과 PTV 방법의 경우 선원의 깊이가 증가할 때 스펙트럼 비율을 구하기 위해 사용하는 Peak 영역과 Compton 또는 Valley 영역 모두 계수율이 감소하게 된다. 이때 Valley 영역과 Compton 영역으로 기여하는 감마선의 경우 매질과 산란한 뒤 에너지가 감소하였기 때문에 Peak 영역에 기여하는 산란되지 않은 감마선에 비해 투과도가 낮아져 해당 영역의 계수율이 더 많이 감소하게 된다[9]. 따라서 선원의 깊이가 증가할수록 Q값은 위와 같이 일정한 경향성을 가지고 감소하게 된다.

#### 3.2 Sensitivity assessment by detection distance

PTV 및 PTC 방법은 측정거리 50 cm 기준으로 매립된 선원의 깊이를 평가하도록 수식을 도출하였다. 하지만 측정거리가 달라질 경우 감마선이 매질과 산란하여 검출기에 입사하는 Valley 영역과 Compton 영역의 계수율이 달라지게 된다. 그리고 현장측정 시 현장특성에 따라 계측거리가 정확히 50 cm를 유지할 수 없는 경우가 존재한다. 따라서 PTC 및 PTV 방법을 사용할 경우 계측거리 50 cm에서 변화할 경우에 대한 민감도를 평가하였다. 해당 실험에서 계측거리는

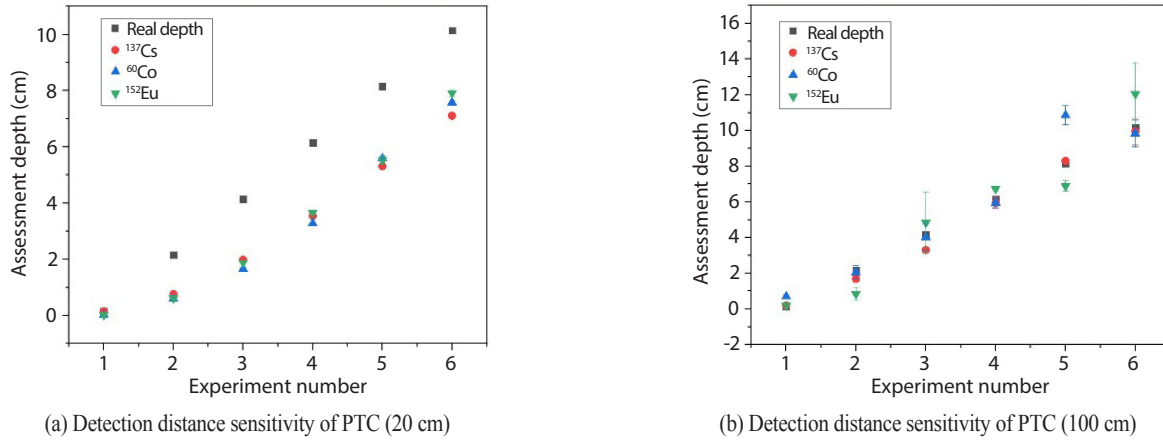


Fig. 10. Detection distance sensitivity assessment of PTC method (a) 20 cm distance, (b) 100 cm distance.

Table 3. Source depth assessment by using two distance measurement

Real depth (cm)	<sup>137</sup> Cs		<sup>60</sup> Co		<sup>152</sup> Eu	
	depth (cm)	Error (cm)	depth (cm)	Error (cm)	depth (cm)	Error (cm)
0.1	1.94	1.84	2.79	2.69	1.63	1.53
2.1	2.88	0.78	3.31	1.21	4.08	1.98
4.1	5.47	1.37	5.26	1.16	3.89	-0.21
6.1	7.27	1.17	7.36	1.26	7.89	1.79
8.1	8.24	0.14	9.39	1.29	9.53	1.43
10.1	10.52	0.42	10.28	0.18	10.31	0.21

20 cm 및 100 cm에서 실시하였으며 경우에 따른 선원 깊이 평가 오차를 평가하였다(Fig. 9, 10).

계측 거리에 따른 선원 깊이 오차를 평가 결과 PTV 방법은 계측거리가 20 cm로 감소할 경우 선원의 깊이를 최대 4.5 cm까지 높게 평가하는 결과가 나타났다. PTC 방법은 계측거리가 감소할 경우 선원의 깊이를 최대 3 cm까지 낮게 평가하였다. 반면 계측거리가 100 cm로 증가한 경우 PTV 방법의 경우 2.8 cm 미만의 오차가 발생하였고 PTC 방법은 2.1 cm 미만의 오차가 발생하였다. 이때 100 cm 거리에서 나타난 오차는 50 cm 거리에서 측정 시 나타나는 오차와 비슷한 수준으로 계측거리가 50 cm 이상일 경우 계측거리에 의한 영향은 미미함을 확인하였다.

### 3.3 Source depth assessment by using PTV, PTC, Two distance measurement method

Two distance measurement 및 PTC, PTV 방법을 이용하여 특정 깊이에 선원이 존재할 때 그 깊이를 평가하는 실험을 진행하였다. 본 실험에서 점 선원은 차폐체 표면에서 10 cm 깊이까지 이동하며, 실제 점 선원의 깊이는 선원 전면 1 mm 두께의 아크릴 케이스를 고려하여 산정하였다(Table. 3, 4, 5).

실험 결과 Two distance measurement 방법의 경우 선원이 표면에 존재할 경우 최대 오차가 2.69 cm로 나타났다. 또한 선원의 깊이가 증가함에 따라 오차가 감소하는



Table 4. Source depth assessment by using Peak to Valley method

Real depth (cm)	<sup>137</sup> Cs		<sup>60</sup> Co		<sup>152</sup> Eu	
	depth (cm)	Error (cm)	depth (cm)	Error (cm)	depth (cm)	Error (cm)
0.1	1.25	1.15	1.97	1.87	0.16	0.06
2.1	2.54	0.44	2.50	0.4	1.60	-0.5
4.1	4.05	-0.05	4.55	0.45	2.93	-1.17
6.1	5.54	-0.56	7.05	0.95	6.90	0.8
8.1	7.59	-0.51	6.78	-1.32	8.97	0.87
10.1	9.81	-0.29	9.36	-0.74	10.88	0.78

Table 5. Source depth assessment by using Peak to Compton method

Real depth (cm)	<sup>137</sup> Cs		<sup>60</sup> Co		<sup>152</sup> Eu	
	depth (cm)	Error (cm)	depth (cm)	Error (cm)	depth (cm)	Error (cm)
0.1	0.91	0.81	0.57	0.47	1.48	1.38
2.1	2.28	0.18	2.36	0.26	1.89	-0.21
4.1	4.05	-0.05	4.14	0.04	3.90	-0.2
6.1	5.75	-0.35	5.71	-0.39	4.40	-1.7
8.1	7.82	-0.28	8.19	0.09	9.24	1.14
10.1	10.26	0.16	9.44	-0.66	11.71	1.61

경향이 나타났으며 최대 1.79 cm의 오차가 발생하였다. Two distance measurement 방법의 결과가 표면에서 높은 오차가 발생하는 이유는 사용한 수식에서 공기 층에 의한 차폐를 고려하지 않았기 때문으로 사료된다. 공기층에 의한 차폐를 고려하지 않을 경우 공기 층의 두께만큼 계수율이 감소하여 선원의 깊이 평가 결과 실제 선원 위치 보다 깊은 위치에 존재한다고 평가된다. PTV 및 PTC 방법의 경우 두 방법론 모두 선원이 표면에 존재할 경우 최대 1.87 cm의 오차가 발생하였다. 그리고 10 cm 깊이에서 오차는 최대 1.61 cm로 나타났다. 그 결과 두 방법 모두 선원이 표면에 존재할 경우와 특정 깊이에 존재하는 경우 모두 높은 정확도를 나타내었다. 이를 통해 Two distance measurement 방법과 비교하여 PTV 및 PTC 방법을 사용할 경우 비교적 높은 정확도를 확보할 수 있었다.

### 3.4 Sensitivity assessment according to source horizontal position of source

점선원이 계측기와 일직선상에 존재하는 조건에서 Two distance measurement 방법과 PTC, PTV 방법을 비교하였다. 비교 결과 Two distance measurement 방법의 최대 오차가 2.69 cm, PTC 및 PTV 방법이 1.87 cm로 약 0.82 cm의 근소한 차이를 보였다. 하지만 해당 결과는 계측기와 선원이 일직선상에 존재하는 이상적인 상황에서 실시된 실험 결과이며, 실제 현장에서는 점 선원의 정확한 수평 방향 위치 정보 확보에 어려움이 있다. 따라서 NUREG-1507 보고서의 Outdoor survey 결과를 참고하여 선원이 off-center 방향으로 10 ~ 30 cm까지 이동하였을 때 방법론에 따른 수평 방향 위치 변화 민감도 평가를 진행하였다(Fig. 11, 12, 13).

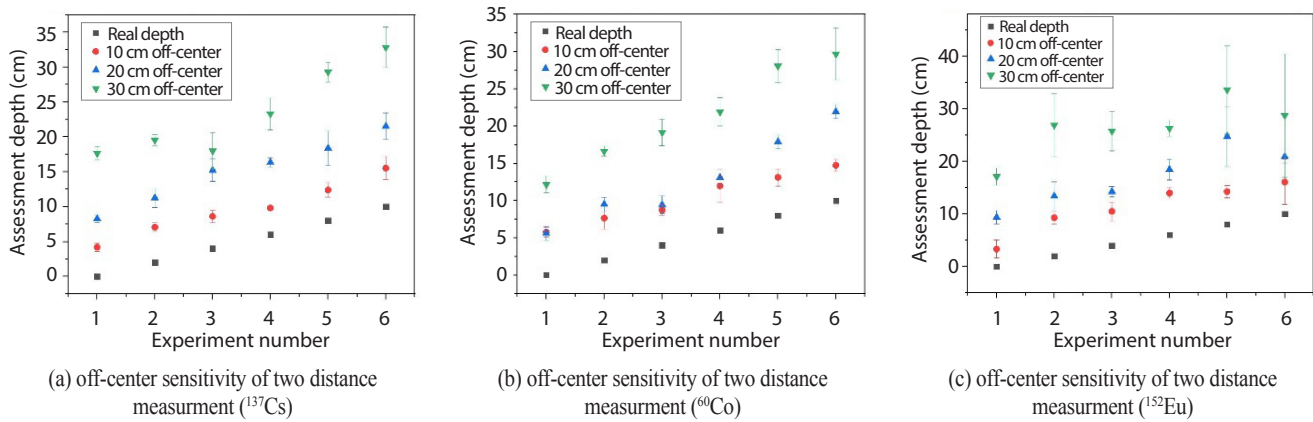


Fig. 11. Off-center sensitivity assessment of two distance measurement (a)  $^{137}\text{Cs}$ , (b)  $^{60}\text{Co}$ , (c)  $^{152}\text{Eu}$ .

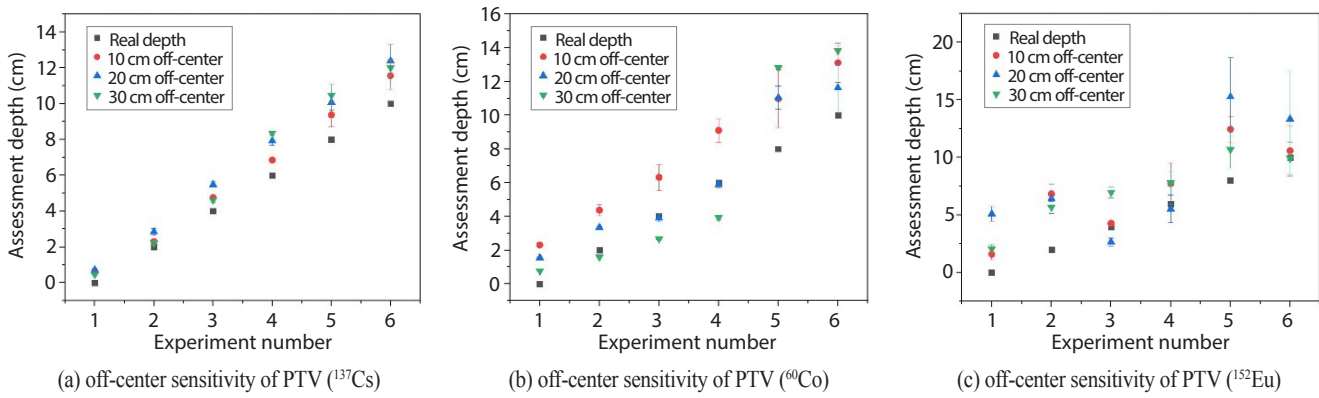


Fig. 12. Off-center sensitivity assessment of PTV method (a)  $^{137}\text{Cs}$ , (b)  $^{60}\text{Co}$ , (c)  $^{152}\text{Eu}$ .

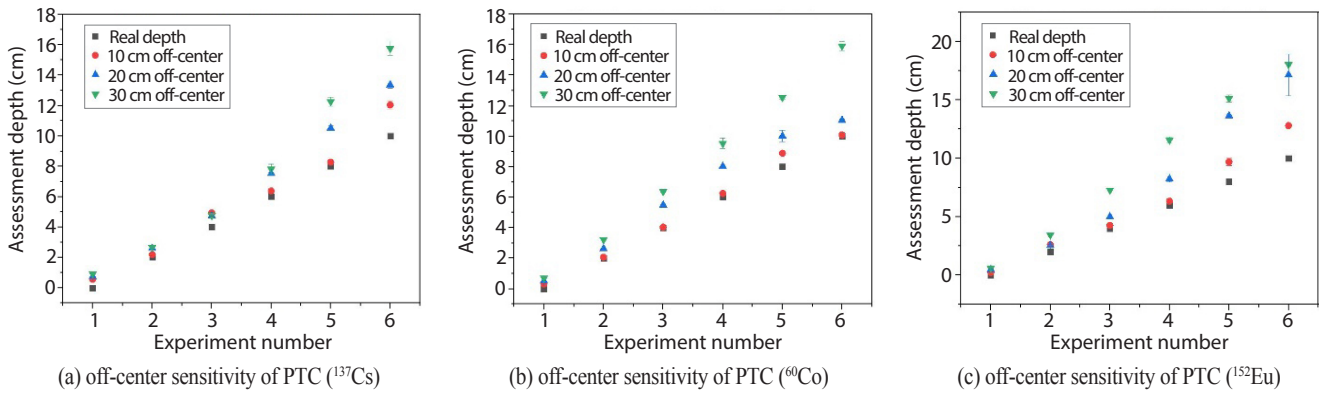


Fig. 13. Off-center sensitivity assessment of PTC method (a)  $^{137}\text{Cs}$ , (b)  $^{60}\text{Co}$ , (c)  $^{152}\text{Eu}$ .

실험 결과 선원이 off-center 방향으로 이동함에 따라 Two distance measurement 방법을 이용한 선원 깊이 평가 시 최대 25.59 cm의 오차가 발생함을 확인하였다. 그리고 PTV

및 PTC 방법을 이용할 경우 최대 8.04 cm의 오차가 발생하여 Two distance measurement 방법과 비교하여 동일 시간 측정 시 높은 정확도를 나타내었다. 이 차이는 선원이

off-center 방향으로 이동할 때 감마선이 계측기에 도달하기 위해 투과하는 매질의 거리에 있다. 피크 영역의 순 계수율의 경우 선원이 off-center 방향으로 이동하였을 때 감마선이 투과하는 공기 층 및 차폐체의 두께가 증가하여 지수함수를 따라 감소한다. 따라서 Two distance measurement 방법의 경우 두 높이에서 측정된 peak 영역의 계수율 차이를 통해 깊이를 평가하기 때문에 높은 오차가 발생한다. 반면 PTC 방법과 PTV 방법의 경우 선원의 깊이가 증가할 때 스펙트럼 비율을 구하기 위해 사용하는 Peak 영역과 Compton 또는 Valley 영역 모두 계수율이 감소하게 된다. 이때 선원이 off-center 방향으로 이동할 경우 감마선이 검출기로 입사하기 위해 투과하는 차폐체의 길이가 길어질 경우 Peak 영역에 비해 Compton 및 Valley 영역이 더 많이 감소하여 Q값이 낮아져 실제보다 깊은 위치에 있다고 평가하게 된다. 하지만 선원이 off-center 방향으로 이동할 때 Q값의 감소율은 Peak 영역 계수율의 감소를 보다 낮기 때문에 PTC 및 PTV 방법을 이용했을 때 two distance measurement 방법보다 비교적 높은 정확도를 얻을 수 있었다.

선원의 깊이 평가 시 표준편차는 동일 시간 측정 시 PTV 방법을 이용할 경우 선원이 off-center 방향으로 이동함에 따라 Valley 영역의 계수율이 감소하여 최대 표준편차가 평균값의 30% 수준 까지 증가함을 확인하였다. 반면 PTC 방법의 경우 Compton 영역이 비교적 높은 계수율이 확보되어 선원이 off-center 되어도 최대 표준편차가 평균값의 15% 수준으로 나타났다. 이를 통해 PTC 방법이 동일 시간 측정 시 비교적 낮은 표준편차를 나타내어 현장 적용 시 신속한 측정 및 평가가 가능할 것으로 기대된다.

#### 4. Conclusion

점 선원 및 아크릴 차폐체, 현장측정용 HPGe 검출기를 이용하여 매질 내 점 선원의 깊이가 증가함에 따른 PTC, PTV 비율 변화를 평가하였으며, 해당 결과를 이용하여 매립된 선원의 깊이 평가 방법을 설정하였다. 그리고 PTV, PTC 비율을 이용한 선원의 깊이 평가 방법과 Two distance measurement 방법의 정확도를 비교하였다. 그 결과 선원이 계측기의 정 방향에 위치할 경우 Two distance measurement 방법은 선원이 표면에 위치할 때 오차가 2.69 cm로 높게

나타났지만 깊이가 증가함에 따라 오차가 감소함을 보였다. 이는 공기에 의한 차폐를 고려하지 않는 가정에 의한 것으로 사료된다. 반면 PTV 및 PTC 방법은 동일 조건에서 최대 1.62 cm의 오차가 나타났으며 모든 조건에서 비슷한 수준의 오차가 발생하였다. 이를 통해 선원이 계측기의 정 방향에 위치할 경우 PTV 및 PTC 방법 모두 유사한 수준의 오차가 발생함을 확인하였다.

점 선원이 off-center 되었을 때 민감도를 평가한 결과 Two distance measurement 방법은 3회 측정 시 높은 표준 편차 및 최대 25.59 cm 수준의 오차가 발생하였다. 반면 PTV 방법은 최대 8.04 cm의 오차가 발생하여 Two distance measurement과 비교하여 높은 정확도를 나타내었다. 하지만 Valley 영역의 낮은 계수율로 인해 최대 평균값 30% 수준의 표준편차가 발생했다. 반면 PTC 방법은 동시간 측정 시 최대 표준편차가 평균값의 15% 수준으로 나타났다. 이를 통해 Two distance measurement 방법과 비교하여 PTV, PTC 방법을 이용하였을 경우 비교적 높은 정확도를 확보할 수 있었다. 또한 PTC 방법의 경우 Compton 영역의 높은 계수율로 동시간 측정 시 낮은 표준편차가 발생하였다. 따라서 PTV 및 PTC 방법이 Two distance measurement 방법과 비교해 동일 조건에서 측정 시 높은 정확도를 확보할 수 있었다. 특히 PTC 방법의 경우 동 시간 측정에서 낮은 표준편차가 발생해 신속하고 정확한 측정이 가능할 것으로 기대된다. 본 연구를 통해 매립 선원 평가 방법에 따른 평가 정확도 및 현장 적용성을 확인하였으며, 이는 현장측정을 이용한 국부오염의 분포 평가 시 도움을 줄 것으로 예상된다.

#### Acknowledgement

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 “해체 전주기 방사선학적 특성평가 기술 개발” 과제의 일환으로 수행된 연구입니다(원자력연구개발사업, No. 2017M2A8A5015143).

#### REFERENCES

[1] International Atomic Energy Agency, “Characterization

- of radioactively contaminated sites for remediation purposes”, IAEA-TECDOC-1017, 1998. 5632 (1995).
- [2] C. Andrieu, T. Boisserie, Y. Desnoyers, C.O. Dehaye, and F. Tardy et al, Radiological Characterisation for Decommissioning of Nuclear Installations, Final Report of the Task Group on Radiological Characterization and Decommissioning (RCD) of the Working Party on Decommissioning and Dismantling (WPDD), NEA/OECD, NEA/RWM/WPDD(2013)2, 2013.
- [3] E.W. Abelquist, W.S. Brown, G.E. Powers, and A.M. Huffert, “Minimum Detectable Concentrations With Typical Radiation Survey Instruments for Various Contaminants and Field Conditions”, Nuclear Regulatory Commission (NRC), NUREG-1507 (1998).
- [4] A. Al-Ghamdi and X.G. Xu, “Estimating the depth of embedded contaminants from in-situ spectroscopic measurement”, *Health Phys.*, 84(5), 632-636 (2003).
- [5] R.B. Oberer, C.A. Gunn, and L.G. Chiang, “Small-angle Compton scattering used to determine the depth of a radioactive source in material and to estimate gamma-ray attenuation”, *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res.*, 722, 65-70 (2013).
- [6] A.N. Tyler, D.C.W. Sandersor, and E.M. Scott, “Estimating and Accounting for  $^{137}\text{Cs}$  Source Burial through In-Situ Gamma Spectrometry in Salt Marsh Environments”, *J. Env. Radioactivity*, 33(3), 195-212 (1996).
- [7] C.J. Werner, J. Armstrong, F.B. Brown, J.S. Bull, and L. Casswell et al, “MCNP user’s manual code version 6.2”, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-17-29981 (2017).
- [8] W.H. Ha, J.R. Yoo, S.W. Yoon, M.J. Park, and J.K. Kim, “Simulation of Counting Efficiencies of Portable NaI Detector for Rapid Screening of Internal Exposure in Radiation Emergencies”, *J. Radiat. Prot. Res.*, 40(4), 211-215 (2015).
- [9] J.H. Hubbell and S.M. Seltzer, “Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements  $Z = 1$  to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest”, National Institute of Standards and Technology, NISTIR