

# Calculation of the Correction Factors related to the Diameter and Density of the Concrete Core Samples using a Monte Carlo Simulation

Kyu-Young Lee, Bo Sun Kang\*

Department of Medical Science, Konyang University

Received: September 30, 2020. Revised: October 23, 2020. Accepted: October 31, 2020

## ABSTRACT

Concrete is one of the most widely used materials as the shielding structures of a nuclear facilities. It is also the most generated radioactive waste in quantity while dismantling facilities. Since the concrete captures neutrons and generates various radionuclides, radiation measurement and analysis of the sample was fulfilled prior to dismantle facilities. An HPGe detector is used in general for the radiation measurement, and effective correction factors such as geometrical correction factor, self-absorption correction, and absolute detector efficiency have to be applied to the measured data to decide exact radioactivity of the sample. Correction factors are obtained by measuring data using a standard source with the same geometry and chemical states as the sample under the same measurement conditions. However, it is very difficult to prepare standard concrete sources because concrete is limited in pretreatment due to various constituent materials and high density. In addition, the concrete sample obtained by core drill is a volumetric source, which requires geometric correction for sample diameter and self absorption correction for sample density. Therefore in recent years, many researchers are working on the calculation of effective correction factors using Monte carlo simulation instead of measuring them using a standard source. In this study we calculated, using Geant4, one of the Monte carlo codes, the correction factors for the various diameter and density of the concrete core sample at the gamma ray energy emitted from the nuclides <sup>152</sup>Eu and <sup>60</sup>Co, which are the most generated in radioactive concrete.

Keywords: Monte Carlo Simulation; Geant4; HPGe detector; Geometrical correction; Self-absorption correction

## I. INTRODUCTION

콘크리트는 방사선 이용시설의 건설에 있어서 시공의 편리성으로 인해 차폐용 구조물로 광범위하게 사용되고 있는 재료중의 하나이다. 뿐만 아니라, 콘크리트는 방사화에 의해 원자력 시설의 해체 시 가장 많이 발생하는 방사성 폐기물 중 하나이기도 하다 원자력 시설에서 차폐를 위해 사용된 콘크리트는 중성자를 포획하여 <sup>152</sup>Eu, <sup>60</sup>Co, <sup>134</sup>Cs, <sup>54</sup>Mn 등과 같이 포함하고 있는 불순물에 따라서 감마선을 방출하는 다양한 방사성 핵종을 생성하게 된다.<sup>[1-3]</sup> 이로 인해 시설의 해체 시 방사화가 의심되는 범위의 콘크리트 시료를 채취하여 개별적으

로 방사능을 측정 후 평가하여 처분해야 한다.

차폐용 구조재로 널리 사용되고 있는 콘크리트는 그 구성물질의 비율과 밀도에 따라 차폐성능이 크게 달라지기도 하지만, 방사화에 의해 생성되는 핵종의 방사능 농도도 크게 변하게 되며 방사화된 콘크리트의 방사능 측정 시에 측정값에 영향을 미치는 자가흡수(self absorption)도 변한다.

일반적으로 핵종별 방사능 측정을 위한 감마선 분광분석(gamma spectroscopy)을 위한 시료의 방사능 측정은 에너지 분해능이 높은 HPGe 검출기를 이용한다. 또한, 방사성 핵종의 정확한 방사능 측정을 위해서는 교정선원을 이용한 효율교정과 측정 시료의 기하학적 형태와 밀도의 영향을 고려한 방

\* Corresponding Author: Bo Sun Kang

E-mail: bskang@konyang.ac.kr

Tel: +82-42-600-8441

가능 측정치에 대한 보정이 필요하다.

환경시료의 경우 분쇄하여 표준시료와 같은 규격의 Marinelli beaker나 원통형 용기를 이용하여 기하학적 영향을 보정하지만, 콘크리트는 전처리가 어렵고 채취한 시료와 같은 기하학적 조건과 밀도의 표준시료를 매년 제작하는 것은 매우 소모적이다. 일반적으로, 콘크리트의 경우 “core drill”이라는 장비를 이용하여 시료를 채취하므로 사용하는 core drill의 직경과 길이에 따라 다양한 직경과 높이를 갖는 원판/원통형의 기하학적 구조를 갖는 시료를 얻게 된다. 따라서 콘크리트 시료의 정확한 방사능 측정을 위해서 원판/원통형 체적시료에 대한 기하학적 보정이 필요하다.<sup>[4]</sup>

뿐만 아니라, 콘크리트는 대부분의 밀도가 낮은 환경시료와는 달리 밀도가 높아(2.1 g/cm<sup>3</sup>에서 3.3 g/cm<sup>3</sup>이상) 시료 자체에서 발생하는 방사선의 산란과 흡수로 인해 방사능 측정치에 큰 오차를 일으킬 수 있기 때문에 정확한 측정을 위해서 자체흡수에 대한 보정 또한 필수적이다.<sup>[5-6]</sup>

보정인자 도출을 위해서는 측정하고자 하는 시료와 같은 물질로서 다양한 형태와 밀도를 갖는 표준시료를 이용하여 측정치를 비교해서 도출하는 “직접측정법”과, Monte Carlo simulation을 이용하는 “전산해석법”이 고려될 수 있다. 시료를 직접 측정하는 직접측정법의 경우 표준시료 제작에 비용과 시간이 많이 필요하며 정밀한 측정을 위한 장비와 실험 환경이 필요하다. 반면, Monte Carlo simulation을 이용하는 전산해석법의 경우 검출기와 시료에 대한 정확한 정보만 있다면 별도의 표준시료의 제작이나 장비, 실험환경 없이 검출기와 시료를 모델링하여 전산해석적 방법으로 방사능 측정치를 계산하여 보정인자를 도출할 수 있다. 때문에 많은 연구자들이 Monte Carlo simulation을 이용한 검출기의 효율과 보정인자 계산을 위한 연구를 진행하였다.<sup>[7-9]</sup>

본 연구에서는 Monte Carlo simulation toolkit인 Geant4를 이용하여 HPGe 검출기에 대한 방사화 콘크리트 시료의 밀도에 따른 자가흡수 보정인자 및 직경에 따른 기하학적 보정인자 계산을 위한 시뮬레이션을 수행하였다.

## II. MATERIAL AND METHODS

Geant4 (Geometry And Tracking)는 입자가 물질을 통과할 때 발생하는 물리적 상호작용의 전사모사가 가능한 C++ 기반의 Monte Carlo 전산해석을 위한 tool-kit이다. 모델링한 검출기는 ORTEC사의 GEM10P4-70 모델이며 제원은 Table 1과 같다.

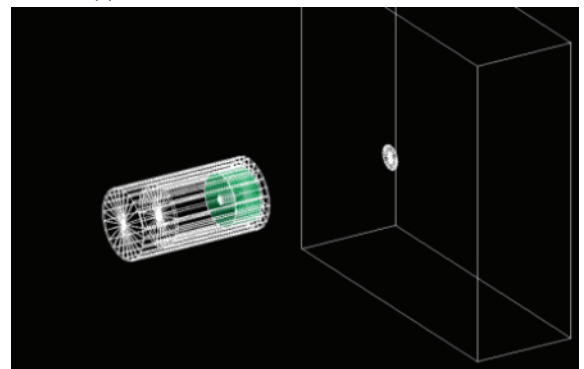
Table 1. The specification of the simulated HPGe detector

	Size(mm)	Material
End cap diameter	70	Aluminum
Crystal diameter	52.9	Germanium
Crystal length	26.9	Germanium
Crystal hole diameter	9.3	Vacuum
Crystal hole length	13.8	Vacuum
Relative Efficiency	10 %	-

검출기의 기하학적 구조에 따라 측정결과에 영향을 미치기 때문에 제조사에서 제공한 규격에 따른 정확한 모델링이 필요하다.<sup>[10]</sup> Fig. 1은 실제 검출기와 제조사에서 제공한 자료를 바탕으로 Geant4에 모델링한 HPGe 검출기를 시각화 한 것이다.



(a) ORTEC-GEM10P4-70 HPGe detector



(b) Modeling HPGe detector using Geant4

Fig. 1. Real model and simulated HPGe detector.

중, 저 에너지의 물리적인 상호작용을 위한 "QGSP\_BERT" 물리모델을 사용하였으며 모델링한 검출기를 이용한 전산해석결과에 대한 신뢰도를 확보하기 위하여 전산해석 결과와 교정선원(대표적 감마선 방출 핵종인  $^{60}\text{Co}$ 과  $^{137}\text{Cs}$ )에 대한 측정치를 비교검토 하였다. 교정선원 측정 시에는 전산해석에서 모델링한 바와 동일하게 Disc source의 중심과 검출기 입사면의 중심을 직선상에 배치한 후 15 cm 거리에서 각각 24시간씩 측정하였다. 측정에 사용된  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  교정선원의 방사능은 1  $\mu\text{Ci}$ 와 5  $\mu\text{Ci}$  이며 각각 12년 4월과 3월에 제조된 것으로 방사성붕괴에 의해 감소된 현재 방사능을 구하여 보정인자를 계산에 사용하였다.

모델링한 검출기의 신뢰도를 검증한 뒤 방사화된 콘크리트 시료에서 주로 생성되는 방사성 핵종에 대한 검출기 고유효율  $\epsilon_{int}$  을 전산해석을 통해 계산하였다. 콘크리트 시료는 시료채취에 사용하는 core drill에 따라 다양한 직경의 원판/원통형으로 채취된다.

점선원의 경우 선원과 검출기입사면 사이의 거리가  $d$ , 검출기 입사면의 반지름이  $r$ 이고, 검출기 입사면의 중심과 선원이 직선상에 정렬되어 있는 경우 계수에 영향을 미치는 기하학적 효율  $\Omega$ 는 Eq. (1)과 같다.

$$\Omega = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + r^2}} \right) \quad (1)$$

교정선원의 경우 점선원으로 가정해도 측정오차가 크지 않지만, 반지름이  $s$ 인 원판 선원인 경우의 기하학적 효율  $\Omega$ 는 Eq. (2)와 같다.<sup>[11]</sup> Eq. (2)는 적분이 불가능해서 정확한 해를 구할 수 없으므로 면적 선원의 기하학적 효율은 전산해석을 통해서만 구할 수 있다.

$$\Omega = \frac{4\pi a}{s} \int_0^\infty \frac{\exp(-dk) J_1(sk) J_1(ak)}{k} dk \quad (2)$$

- $a$  : 검출기 입사면의 반지름
- $d$  : 선원과 검출기 입사면의 거리
- $s$  : 선원의 반지름
- $J_1$  : Bessel 함수

실제 검출기를 사용해서 시료를 측정할 때 측정되는 순계수는 아래 Eq. (3)와 같다.

$$N_{meas} = E_{source} \times \Omega \times \epsilon_{int} \times C_s \quad (3)$$

- $N_{meas}$  : 순계수
- $E_{source}$  : 선원에서 방출된 방사선 개수
- $\Omega$  : 기하학적 보정인자
- $\epsilon_{int}$  : 계측기 고유효율
- $C_s$  : 자가흡수 보정인자

HPGe detector의 계측기 고유효율,  $\epsilon_{int}$ 은 아래와 같이 검출기 자체의 방사선 민감도에 의한 검출기 고유효율,  $\epsilon_{int,m}$ 과 검출기 후단의 전기신호 처리부의 전기회로 고유효율,  $\epsilon_{int,elec}$ 의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{int} = \epsilon_{int,m} \times \epsilon_{int,elec} \quad (4)$$

하지만, 실제 측정과 달리 전산해석으로는 검출기의 전자회로 특성에 의해 발생하는 전기회로 고유효율  $\epsilon_{int,elec}$ 은 모사할 수 없기 때문에 고유효율은 검출기 고유효율인  $\epsilon_{int,m}$ 만 반영되므로, 측정값  $N_{sim}$ 은 Eq. (5)와 같이 표현될 수 있다.

$$N_{sim} = E_{event} \times \Omega \times \epsilon_{int,m} \quad (5)$$

- $E_{event}$  : Event 수
- $\epsilon_{int,m}$  : 검출기 고유효율

따라서, 교정선원을 점선원이라 가정하면 측정된 전에너지 피크 순계수와 점선원에 대해 전산모사한 전에너지 피크 순계수의 비를 통해 Eq. (6)과 같이 전기회로 고유효율을 계산할 수 있다.

$$\epsilon_{int,elec} = \frac{\epsilon_{int}}{\epsilon_{int,m}} \quad (6)$$

- $\epsilon_{int,elec}$  : 전기회로 고유효율
- $\epsilon_{int}$  : 고유효율
- $\epsilon_{int,m}$  : 검출기 고유효율

전산해석법을 이용하여 기하학적 보정계수 및

자가흡수 보정계수를 계산하기위해 진공선원을 모델링하였다. 진공선원이란 시료와 동일한 기하학적 형상을 가지면서 진공으로 정의되고 방사성 동위원소가 균일하게 분포하는 공간을 말한다.

시료 직경에 따른 순수한 기하학적 보정계수를 전산모사하기 위해 점선원과 진공선원의 전에너지 피크의 순계수를 비교하였다. 선원의 직경을 제외한 모든 조건은 동일하게 설정하고 선원의 직경을 변화시키면서 전산모사하였다.

자가흡수는 선원 구성 물질의 밀도와 선원의 크기 등에 따라 달라지므로 진공선원과 콘크리트 시료에서 측정된 각각의 전에너지 피크 순계수의 비를 이용하여 자가흡수 보정계수를 구할 수 있다. 모든 조건은 동일하게 하고 콘크리트 시료의 밀도만 변화시키면서 전산모사 하였다.

본 연구에서는 방사화 콘크리트에서 많이 생성되는 핵종인  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{60}\text{Co}$ 에서 방출되는 감마선 에너지에 대해 선원의 크기를 직경 30, 40, 50 mm의 10 mm 간격으로 변화시키면서 선원크기의 변화에 따른 기하학적 보정인자를 계산하였고, 콘크리트 시료의 밀도를  $2.1 \text{ g/cm}^3$ 부터  $3.3 \text{ g/cm}^3$  까지  $0.4 \text{ g/cm}^3$  간격으로 변화시키면서 각각의 시료 밀도에 대한 자가흡수 보정인자를 계산하였다. 콘크리트 시료 모델링에 사용된 구성 물질은 NIST (National Institute of Standards and Technology) database를 참고하였으며,  $^{121}$  event 수는 통계적 오차를 줄이기 위해 가능한 많은 계산을 하는 것이 좋으나 컴퓨터의 계산시간을 고려하여  $10^9$ 으로 설정하였다.

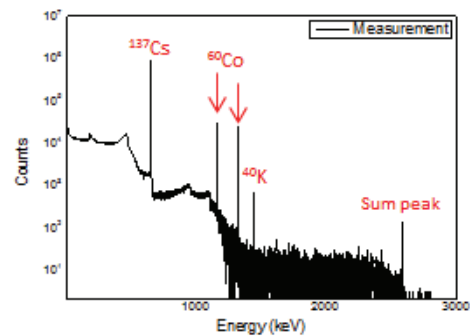
### III. RESULT

#### 1. Verification of simulation reliability

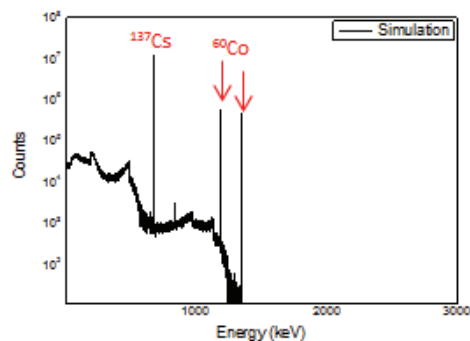
우선, HPGe 검출기를 이용하여 실제 측정된 교정선원의 에너지 스펙트럼 측정결과와 Geant4에 의한 전산모사를 통해 획득한 교정선원의 에너지 스펙트럼을 Fig. 2에 나타내었다.

비교를 위해 실제 교정선원에서 방출된 방사선과 동일한 수의 입자를 시뮬레이션 하였으며 시뮬레이션의 스펙트럼에는 전자회로의 효율이 적용되지 않았기 때문에 피크가 더 높게 나타났다.

두 스펙트럼은 자연에 존재하는  $^{40}\text{K}$ 의 전에너지 피크와  $^{60}\text{Co}$ 의 합성피크를 제외하면 매우 정밀하게 일치함을 알 수 있다. 전산모사의 경우 백그라운드 영향을 완전히 배제할 수 있기 때문에  $^{40}\text{K}$ 의 피크가 전혀 나타나지 않은 것이 당연하다. 그리고  $^{60}\text{Co}$ 의 합성피크가 나타나지 않은 이유는 2개의 에너지를 독립적인 과정으로 모사하였으므로 당연히 발생하지 않게 되었다. 따라서 전산모사의 신뢰성은 확보되었다고 판단된다.



(a) Measurement Spectrum of Cs-137 and Co-60



(b) Simulation Spectrum of Cs-137 and Co-60

Fig. 2. Energy spectra of Cs-137 and Co-60.

측정된 교정선원의 에너지 스펙트럼과 Geant4 전산모사를 통해 획득한 에너지 스펙트럼의 전에너지 피크 순계수에 대한 고유효율( $\epsilon_{int}$ )을 계산하여 Table 2에 나타내었다. 실험에 사용된 선원을 점선원으로 가정하여 Eq. (1)에 의해 기하학적 효율( $\Omega$ )을 계산하였으며, 점선원이 경우 자가흡수가 발생하지 않으므로 자가흡수 보정인자  $C_s$ 는 1을 사용하였다.

Geant4를 이용하여 점선원에 대해 실제 측정과 동일한 조건으로 전산모사한 결과를 Table 3에 나

타내었다. 전산해석의 경우 계측기의 전자회로의 영향에 의한 전자회로 고유효율  $\epsilon_{int,elec}$ 은 측정되지 않으므로 Eq. (4)~(6)을 이용하여  $\epsilon_{int,elec}$ 을 계산하여 Table 3에 나타내었다.

Table 2. Counts by experimental measurements

Energy (keV)	Emission (No. of $\gamma$ )	Counts	$\Omega$	$\epsilon_{int}$
661.7 (Cs-137)	1.32E+10	6.94E+06	7.60.E-03	6.93.E-02
1173.2 (Co-60)	1.06E+09	2.77E+05	7.60.E-03	3.43.E-02
1332.5 (Co-60)	1.06E+09	2.43E+05	7.60.E-03	3.01.E-02

Table 3. Counts by Geant4 simulation

Energy (keV)	No. of Event	Counts	$\Omega$	$\epsilon_{int,m}$	$\epsilon_{int,elec}$
661.7 (Cs-137)	1.32E+10	1.31E+07	7.60.E-03	1.30.E-01	5.32E-01
1173.2 (Co-60)	1.06E+09	5.79E+05	7.60.E-03	7.17.E-02	4.78E-01
1332.5 (Co-60)	1.06E+09	5.10E+05	7.60.E-03	6.31.E-02	4.77E-01

### 2. Geometrical correction factors

계산된 기하학적 보정인자를 Table 4에 나타내었다. 원판 선원의 효율은 점선원에 비해 약 5 % 내외로 감소하였다. 이는 선원의 체적 증가로 인해 기하학적 효율의 감소로 인한 것으로 보인다. 하지만, 직경의 변화에 대해 기하학적 효율의 변화가 크게 나타나지 않는 이유는 실험에 사용된 선원과 검출기의 거리 15 cm가 선원의 직경변화 30 mm ~ 50 mm에 비해 매우 약 10배 정도 큰 값이어서 선원분포의 영향이 미미하게 나타난 것으로 판단된다.

Table 4. Geometrical correction factors( $\Omega$ )

Energy (keV)	Diameter of sample [mm]		
	30	40	50
122 (Eu-152)	0.9487	0.9435	0.9387
344 (Eu-152)	0.9530	0.9449	0.9405
779 (Eu-152)	0.9459	0.9514	0.9420
964 (Eu-152)	0.9483	0.9397	0.9381
1086 (Eu-152)	0.9508	0.9441	0.9321
1112 (Eu-152)	0.9549	0.9467	0.9495
1173 (Co-60)	0.9454	0.9408	0.9464
1332 (Co-60)	0.9474	0.9447	0.9488
1408 (Eu-152)	0.9503	0.9468	0.9463

### 3. Self-absorption correction factors

각각 다른 시료 밀도에 대해 진공선원과 전이저지 피크 순계수를 비교하여 시료 밀도에 따른 자가흡수 보정인자를 계산하여 Table 5에서 Table 7에 나타내었다. 밀도가 증가할수록 저에너지 영역에서 자가흡수가 많이 일어났으며 고에너지일수록 영향을 적게 받았다. 또한 직경이 증가함에 따라라도 자가흡수가 증가하였다. 콘크리트 시료에서 에너지에 따라 직경 30 mm 콘크리트에서 최소 9 %에서 최대 30 %의 자가흡수가 발생되었다. 50 mm 콘크리트에서는 최소 10 %에서 최대 35 %의 자가흡수가 발생하는 것으로 나타났다.

Table 5. Self-Absorption correction factors. ( $C_s$ )

- Diameter 30 mm concrete

Energy (keV)	Density [ $g/cm^3$ ]			
	2.1	2.5	2.9	3.3
122	0.7905	0.7586	0.7289	0.7010
344	0.8505	0.8262	0.8029	0.7807
779	0.8894	0.8706	0.8524	0.8348
964	0.8991	0.8818	0.8650	0.8486
1086	0.9048	0.8884	0.8724	0.8569
1112	0.9060	0.8897	0.8738	0.8584
1173	0.9083	0.8924	0.8769	0.8619
1332	0.9135	0.8984	0.8837	0.8693
1408	0.9157	0.9009	0.8866	0.8725

Table 6. Self-Absorption correction factors. ( $C_s$ )

- Diameter 40 mm concrete

Energy (keV)	Density [ $g/cm^3$ ]			
	2.1	2.5	2.9	3.3
122	0.7677	0.7338	0.7024	0.6733
344	0.8326	0.8061	0.7810	0.7572
779	0.8753	0.8546	0.8347	0.8155
964	0.8861	0.8669	0.8484	0.8306
1086	0.8925	0.8742	0.8566	0.8395
1112	0.8937	0.8756	0.8582	0.8412
1173	0.8963	0.8786	0.8615	0.8450
1332	0.9021	0.8853	0.8690	0.8533
1408	0.9045	0.8881	0.8722	0.8567



Table 7. Self-Absorption correction factors. (C<sub>s</sub>)  
- Diameter 50 mm concrete

Energy (keV)	Density [g/cm <sup>3</sup> ]			
	2.1	2.5	2.9	3.3
122	0.7512	0.7161	0.6839	0.6542
344	0.8193	0.7914	0.7651	0.7404
779	0.8646	0.8425	0.8214	0.8012
964	0.8761	0.8556	0.8359	0.8171
1086	0.8830	0.8634	0.8446	0.8266
1112	0.8843	0.8649	0.8463	0.8284
1173	0.8871	0.8681	0.8499	0.8323
1332	0.8933	0.8753	0.8579	0.8411
1408	0.8959	0.8783	0.8612	0.8448

#### IV. DISCUSSION

전산모사를 활용하여 검출기와 측정시료, 측정환경 등을 최대한 실제와 가깝게 모델링 한다면 매우 경제적으로 실제 결과와 근접한 계산결과를 얻을 수 있으며, 현실에서는 불가능한 개별 조건에 대한 영향을 독립적으로 분석할 수 있다. 전산모사에 의한 결과가 신뢰도를 확보하기 위해서는 전산모사에 의한 결과값과 실제 측정값에 대한 비교검증이 매우 중요하다.

Table 5에서 Table 7에 제시된 보정인자에 따르면 환경시료에 비해 콘크리트는 밀도가 매우 높기 때문에 체적에 따라 최소 9 %에서 최대 35 %의 자가흡수가 발생된다. 따라서 콘크리트 시료의 방사능을 측정할 때 자가흡수에 대한 영향을 보정하지 않으면 측정치와 실제 방사능 사이에는 큰 오차가 발생할 수 있다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 <sup>60</sup>Co와 <sup>137</sup>Cs만을 이용하여 전산모사 결과를 검증하였지만 실제의 경우 더 다양한 방사성 핵종이 존재하며, 자가흡수 보정계수는 저에너지 방사성 핵종에서 더 민감하므로 보다 더 넓은 범위의 에너지에 대한 계산이 필요하다.

향후 시료의 두께가 자가흡수 보정인자에 미치는 영향 및 선원과 검출기 사이의 거리와 선원 크기의 상보적 영향이 자가흡수 보정인자에 미치는

영향에 대해 추가적인 연구를 보완한다면, 본 연구에서 Geant4를 이용하여 계산된 콘크리트 시료의 밀도별 크기별 자가흡수 보정인자는 HPGe 검출기로 콘크리트 시료의 방사능을 측정할 때 정확한 방사능 계산을 위해 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

#### V. CONCLUSION

방사화 콘크리트 코어시료의 방사능 측정을 위해 HPGe 검출기는 측정시료와 동일한 조건을 가진 표준선원을 이용한 효율교정이 이루어져야 한다. 콘크리트 시료는 밀도가 높기 때문에 표준선원과 동일한 조건으로 전처리하는 것은 매우 어려워 측정마다 콘크리트 코어시료와 동일한 표준선원을 매번 제작하는 것 또한 매우 비경제적이다.

Monte Carlo simulation을 이용하여 시료의 가공이나 표준선원을 제작하지 않아도 콘크리트 코어시료의 HPGe detector에 대한 계수효율과 보정인자를 계산할 수 있었다. 방사화 콘크리트에서 주로 방출되는 <sup>60</sup>Co, <sup>152</sup>Eu에서 방출되는 감마선 에너지에 대해 콘크리트 코어 시료의 직경과 밀도에 따른 기하학적 보정인자 및 자가흡수 보정인자를 각각 계산하였다.

#### Reference

- [1] K. Masumoto, A. Toyoda, K. Eda, Y. Izumi, T. Shibata, "Evaluation of radioactivity induced in the accelerator building and its application to decontamination work", Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 255, No.3, pp. 465-469, 2003. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1022511811356>
- [2] Q. B. Wang, K. Masumoto, K. Bessho, H. Matsumura, T. Miura, T. Shibata, "Evaluation of the radioactivity in concrete from acclerator facilities", Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 273, No. 1, pp. 55-58, 2007. <http://dx.doi.org/10.1007/s10967-007-0710-3>
- [3] S. B. Hong, B. K. Seo, D. K. Cho, G. H. Jeong, J. K. Moon, "A Study on the Inventory Estimation for the Activated Bioshield Concrete of KRR-2", Journal of Radiation Protection and Research, Vol. 37, No. 4, pp. 202-207, 2012. <https://doi.org/10.14407/jrp.2012.37.4.202>

- [4] Sharshar T., Elnimr T., El-Husseiny F. A, El-Abd A., "Efficiency Calibration of HPGe Detectors for Volume-source Geometries", *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 48, No. 5, pp. 695-697, 1997.  
[http://dx.doi.org/10.1016/S0969-8043\(97\)00004-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0969-8043(97)00004-3)
- [5] M. Mostajaboddavati, S. Hassanzadeh, H. Faghihian, M. R. Abdi, M. Kamali, "Efficiency calibration and measurement of self-absorption correction for environmental gamma-spectroscopy of soil samples using Marinelli beaker", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 268, No. 3, pp. 539-544, 2006.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s10967-006-0202-x>
- [6] E. ROBU, C. GIOVANI, "Gamma-ray self-attenuation corrections in environmental samples", *Romanian Reports in Physics*, Vol. 61, No. 2, pp. 295-300, 2009.
- [7] Octavian Sima, Dirk Arnold, "On the Monte carlo simulation of HPGe gamma-spectrometry systems", *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 67, No. 5, pp. 701-705, 2009.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.01.014>
- [8] R. Britton, J. Burnett, A. Davies, P. H. Regan, "Determining the efficiency of a broad-energy HPGe detector using Monte Carlo simulations", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 295, No. 3, pp. 2035-2041, 2013.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s10967-012-2203-2>
- [9] J. D. Nikolic, D. Jokovic, D. Todorovic, M. Rajacic, "Application of GEANT4 simulation on calibration of HPGe detectors for cylindrical environmental samples", *Journal of Radiological Protection*, Vol. 34, No. 2, pp. 47-55, 2014.  
<http://dx.doi.org/10.1088/0952-4746/34/2/N47>
- [10] M. J. Vargas, A. F. Timon, N. C. Diaz, D. P. Sanchez, "Influence of the geometrical characteristics of an HpGe detector on its efficiency", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 253, No. 3, pp. 439-443, 2002.  
<http://dx.doi.org/10.1023/A:1020425704745>
- [11] Gleun F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 4th Ed., Hamilton Printing Company, United States of America, pp. 121, 2010.
- [12] <https://physics.nist.gov/>

## 몬테카를로 전산해석을 이용한 콘크리트 코어시료의 직경과 밀도에 따른 보정인자 계산

이규영, 강보선\*

건양대학교 의과학과

### 요 약

콘크리트는 원자력 시설의 차폐용 구조물로 광범위하게 사용되고 있는 재료이다. 하지만, 시설의 해체 시 양적으로 가장 많이 발생하는 방사성 폐기물이기도하다. 콘크리트는 중성자를 포획하여 다양한 방사성 핵종을 생성하기 때문에 해체 전에 시료를 채취하여 방사능 측정 및 평가를 수행해야 한다. 측정은 주로 HPGe 검출기를 이용하는데 시료의 정확한 방사능 판정을 위해서는 기하학적 보정인자, 자가흡수 보정인자, 계측기의 절대효율 등 효과적인 보정인자를 측정치에 반영해야 한다. 보정인자는 기하학적 및 화학적 상태가 실제 시료와 동일한 표준시료를 이용해서 동일한 측정조건 하에서 획득한다. 하지만, 콘크리트는 다양한 구성물질과 높은 밀도로 전처리가 제한적이므로 콘크리트 표준시료를 제작하는 것은 매우 어렵다. 또한 코어드릴(core drill)을 사용하여 채취되는 콘크리트 시료는 체적선원이므로 직경에 대한 기하학적 보정과 밀도에 대한 자가흡수에 대한 보정이 필수적이다. 따라서, 최근에는 많은 연구자들이 표준선원을 제작 후 측정하는 대신 몬테카를로 전산모사(Monte Carlo simulation)을 이용하여 효과적인 보정인자들을 계산하는 연구를 수행하고 있다. 본 연구에서는 Monte Carlo code 중 하나인 Geant4를 이용하여 방사화 콘크리트에서 가장 많이 생성되는 핵종인  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{60}\text{Co}$ 에서 방출되는 감마선 에너지에 대한 콘크리트 코어시료의 직경과 밀도에 따른 보정인자를 산출하였다.

중심단어: 몬테카를로 전산모사; Geant4; HPGe 검출기; 기하학적 보정인자; 자가흡수 보정인자

### 연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	이규영	건양대학교 의과학과	대학원생
(교신저자)	강보선	건양대학교 의과학과	교수