

Dependence Evaluation of the Self-Absorption Correction Factor for p-type High Purity Germanium Detector Characteristics

p-type HPGe 검출기 특성에 따른 밀도 보정인자 의존도 평가

Mee Jang*, Young-Yong Ji, Chang-Jong Kim, Wannoo Lee, and Mun Ja Kang

Korea Atomic Energy Research Institute, 111 Daedeok-daero 989 beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

장미*, 지영용, 김창중, 이완로, 강문자

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received July 31, 2015 / Revised September 15, 2015 / Approved October 1, 2015)

The precise determination of the activity for each radionuclide in environmental samples requires the self-absorption correction factor. In this research, we derived the self-absorption correction factor for three p-type high purity germanium detectors using the Monte Carlo code MCNPX. These detectors have different characteristics such as crystal diameter, height and size of the core. We compared the calculated full-energy peak efficiency with the experimental value using a standard sample with 1 g/cm³ density and verified the modeling. We simulated the dependency of the full-energy peak efficiency on the 0.3, 0.6, 0.9, 1.0, 1.2 and 1.5 g/cm³ samples and obtained the corresponding self-absorption correction factor. The self-absorption correction factors calculated for the three detectors differ by less than 1% over most of the energy range and sample densities considered. This indicates that the self-absorption correction factors are independent of the crystal characteristics of HPGe detector.

Keywords: Self-absorption correction factor, High purity germanium detector, Monte Carlo

*Corresponding Author.

Mee Jang, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: mjang@kaeri.re.kr, Tel: +82-42-868-8007

ORCID

Mee Jang <http://orcid.org/0000-0002-0115-3178>

Chang-Jong Kim <http://orcid.org/0000-0002-8399-9053>

Mun Ja Kang <http://orcid.org/0000-0002-2380-7654>

Young-Yong Ji <http://orcid.org/0000-0002-9076-6645>

Wannoo Lee <http://orcid.org/0000-0002-0408-7006>

HPGe 검출기를 이용하여 밀도가 다양한 환경시료에 대한 정밀 분석시 정확한 분석을 위해서는 밀도보정인자가 필요하다. 밀도에 대한 보정인자를 구하기 위해서 본 연구에서는 몬테카를로 코드인 MCNPX 코드를 사용하여 크리스털의 높이, 지름 및 코어의 크기와 같은 특성이 다른 세 대의 p-type HPGe 검출기를 모사하고 밀도 1 g/cm³의 교정용 표준시료를 이용하여 모델링을 검증하였다. 검증을 통하여 모델링을 확정된 후 0.3, 0.6, 0.9, 1.0, 1.2, 1.5 g/cm³ 밀도를 가진 샘플에 대한 효율을 시뮬레이션하고 밀도보정인자를 도출하였다. 도출된 각 검출기에 대한 밀도보정인자를 비교하였을 때 전 에너지 범위에서 그 차이가 거의 없음을 확인하였으며 이는 검출기의 크리스털과 같은 주요 특성에 대해 밀도보정인자가 독립적임을 의미한다.

중심단어: 밀도보정인자, HPGe 검출기, 몬테카를로

1. 서론

감마 스펙트로메트리는 환경시료 중 천연방사능핵종 혹은 인공핵종을 분석하기 위하여 자주 이용되며 그 중 정밀분석을 위해 가장 많이 사용되는 장비는 HPGe 검출기 (High Purity Germanium Detector, 고순도 게르마늄 검출기)이다. 환경시료에 대한 정확한 방사능 농도 분석을 위해서는 우선 기준물질을 이용하여 주어진 기하학적 구조를 바탕으로 효율 교정이 이루어진다. 각 시료에 대한 정확한 분석을 위해서는 교정용 표준시료와 실제시료가 물리적 및 화학적으로 동일해야 하나 이는 현실적으로 어려우며 따라서 이에 대한 보정이 필요하다. 즉 환경시료는 밀도 및 화학적 구성 등 다양한 특성을 가지며 이는 분석결과에 영향을 미치게 된다. 특히 교정용 표준시료의 밀도는 한 가지 값으로 고정되어 있으나 0.3 g/cm³에서 1.5 g/cm³까지 다양한 범위의 밀도를 가진 환경시료에 적용하기 위해서는 밀도에 대한 보정이 필요하다. 저에너지 감마선의 경우 밀도 차이에 의한 self-attenuation에 의해 분석 결과가 크게 달라질 수 있으므로 밀도 보정은 환경시료를 정확하게 분석하는데 있어 중요한 역할을 하게 된다[1]. 밀도에 의한 효율 보정은 실험적 혹은 이론적으로 접근 가능하지만 실험적으로 각 밀도에 대한 보정인자를 구하기 위해서는 다양한 밀도를 가지는 시료들을 준비해야 하는 번거로움이 있다. 이를 대체할 수 있는 방법으로는 주로 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 코드 사용이 가능하며 이에 대한 연구는 계속해서 진행되어 왔다[2-4]. 그러나 코드를 사용한 밀도보정인자 도출의 경우 각 실험실이 가지고 있는 검출기의 구조 및 구성 물질에 대한 정확한 모사가 필요하며 이에 대한 검증 또한 필요하다. 즉 계측 효율에 가장 크게 영향

Table 1. Characteristics of the High Purity Germanium detectors

| Characteristics | Detectors | | |
|----------------------------------|-----------|------|------|
| | I | II | III |
| Type | p | p | p |
| Crystal Diameter (mm) | 55.9 | 57.7 | 64 |
| Crystal Length (mm) | 71.1 | 74.8 | 44 |
| Entrance Window | Al | Al | Al |
| Entrance Window Thickness (mm) | 0.03 | 0.03 | 0.03 |
| Ge dead layer thickness (mm) | 0.7 | 0.7 | 0.7 |
| Distance crystal to end cap (mm) | 3 | 3 | 4 |
| Core Diameter (mm) | 10.5 | 10.5 | 8.9 |
| Core height (mm) | 57.4 | 61.1 | 30 |
| Radius of Edges (mm) | 8 | 8 | 8 |
| Relative Efficiency (%) | 30 | 30 | 30 |

을 미칠 수 있는 크리스털의 지름과 높이를 포함한 형태 특성 및 크기에 대한 고려가 필요하므로 검출기가 달라질 경우에는 새로운 모사가 필요할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 몬테카를로 코드인 MCNPX 코드를 사용하여 크리스털과 같은 주요 특성이 다른 세 대의 HPGe 검출기를 모사하고 실제 실험을 통하여 모델링을 검증한 이후 밀도보정인자 F (self-absorption correction factor)를 도출함으로써 검출기의 특성에 따른 밀도보정인자의 의존도를 평가하였다.

2. 모델링 및 검증

본 연구에서는 Table 1과 같이 세 가지 p-type 검출기에

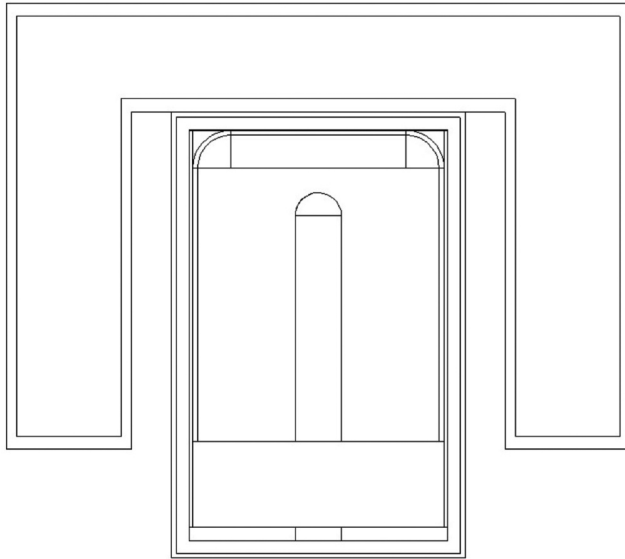


Fig. 1. Geometry of the Detector I and Marinelli beaker.

대한 모델링 및 시뮬레이션을 통하여 효율을 구하였다. 세 검출기 모두 효율은 30%으로 동일하나 크리스털과 코어 등 주요 특성이 모두 다르다. 따라서 이를 시뮬레이션하기 위해서는 우선 제작사에서 제공된 자료를 바탕으로 모델링을 하였으며 이후 실험값과 비교하여 검증하였다.

각 검출기를 모델링 후 MCNPX 코드를 이용하여 계산한 효율 값과 밀도 1 g/cm³의 마리넬리 1리터 교정용 표준시료를 이용하여 측정한 효율 값을 비교하였으며 Detector I의 구조를 모델링한 결과는 Fig. 1과 같다. MCNPX 코드를 이용하여 계측기의 효율을 비교하기 위해서 F8 tally를 사용하였으며 history number는 10⁸개로 설정하였다. 또한 시뮬레이션 결과 statistical error는 5% 이하임을 확인하였다. 교정용 표준시료에는 Am-241 (59.54 keV), Cd-109 (88.03 keV), Co-57 (122.06, 136.47 keV), Ce-139 (165.86 keV), Sn-113 (391.70 keV), Cs-137 (661.66 keV), Y-88 (898.04, 1836.04 keV), Co-60 (1173.23, 1332.49 keV)등의 핵종이 포함되어 있으며 이에 해당하는 에너지에 대해 MCNPX를 이용하여 계산한 효율과 실제 측정한 효율의 비 $E_{\text{simulation}}/E_{\text{experiment}}$ 를 구하였다.

Fig. 2에서 보듯이 높은 에너지 영역에서는 그 비가 1로 수렴하며 계산값과 측정값이 유사함을 확인하였으나 저에너지 영역에서는 그 차이가 커짐을 확인할 수 있다. 계측 효율은 게르마늄 크리스털을 둘러싸고 있는 dead layer 영역의 두께에 영향을 많이 받게 된다. 이는 게르마늄에서 광자의

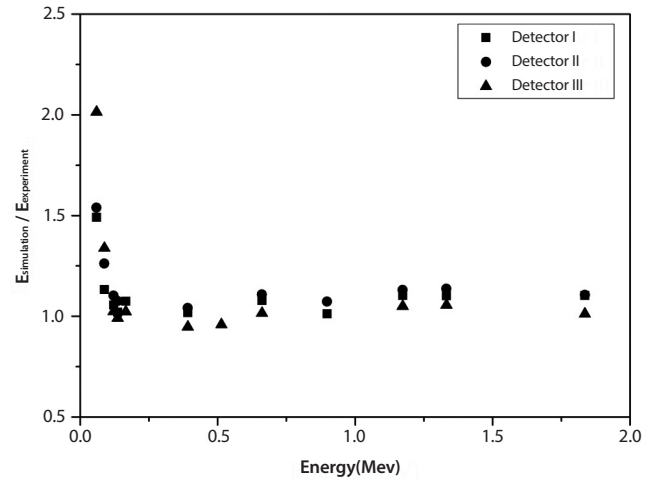


Fig. 2. Comparison of the $E_{\text{simulation}}$ and $E_{\text{experiment}}$ before the dead layer correction.

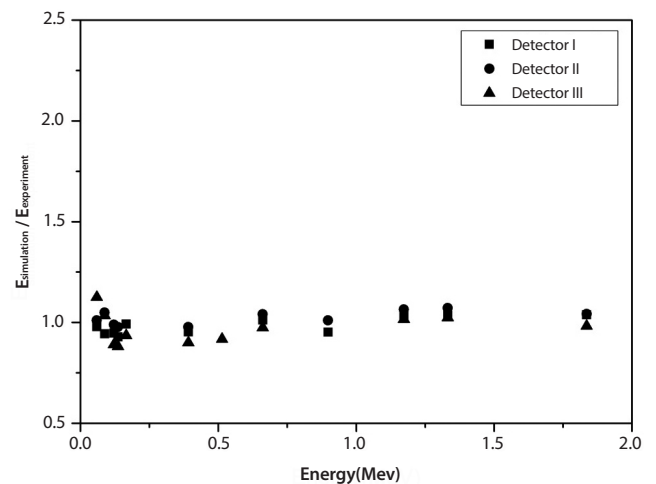


Fig. 3. Comparison of the $E_{\text{simulation}}$ and $E_{\text{experiment}}$ after the dead layer correction.

감쇄계수가 크기 때문이며 따라서 낮은 에너지에서는 dead layer의 두께에 매우 민감하게 반응하므로 이에 대한 조정이 필요하다[5]. 이에 대한 보정이 없을 경우 저에너지 영역에서의 불확도는 커질 수 있으며 이는 밀도에 대한 시뮬레이션 결과값에 대한 신뢰도 확보가 어려울 수 있으므로 계측값과 비교하여 dead layer의 두께를 조정함으로써 가장 유사한 값을 보이는 두께를 구할 필요가 있다. 따라서 dead layer의 두께를 0.1 mm씩 증가시키며 비교 과정을 통해 계측기 I, II의 경우 dead layer를 0.7 mm에서 1.1 mm로 조정하였으며, 가장 차이를 많이 보였던 계측기 III의 경우에는 1.4 mm로

Table 2. Full-energy peak efficiency evaluation for the Detector I according to the density variation

| Energy (MeV) | Density (g/cm ³) | | | | | |
|--------------|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0.3 | 0.6 | 0.9 | 1.0 | 1.2 | 1.5 |
| 0.05954 | 1.95E-02 | 1.82E-02 | 1.71E-02 | 1.67E-02 | 1.60E-02 | 1.50E-02 |
| 0.08803 | 4.20E-02 | 3.94E-02 | 3.71E-02 | 3.64E-02 | 3.50E-02 | 3.31E-02 |
| 0.12203 | 4.53E-02 | 4.27E-02 | 4.03E-02 | 3.96E-02 | 3.81E-02 | 3.61E-02 |
| 0.13648 | 4.54E-02 | 4.27E-02 | 4.04E-02 | 3.96E-02 | 3.82E-02 | 3.61E-02 |
| 0.16586 | 4.69E-02 | 4.43E-02 | 4.20E-02 | 4.12E-02 | 3.98E-02 | 3.78E-02 |
| 0.3917 | 2.56E-02 | 2.45E-02 | 2.35E-02 | 2.32E-02 | 2.26E-02 | 2.17E-02 |
| 0.51401 | 2.07E-02 | 1.99E-02 | 1.92E-02 | 1.89E-02 | 1.85E-02 | 1.78E-02 |
| 0.66166 | 1.71E-02 | 1.65E-02 | 1.60E-02 | 1.58E-02 | 1.55E-02 | 1.50E-02 |
| 0.89804 | 1.26E-02 | 1.23E-02 | 1.19E-02 | 1.18E-02 | 1.16E-02 | 1.13E-02 |
| 1.17324 | 1.05E-02 | 1.02E-02 | 9.95E-03 | 9.87E-03 | 9.71E-03 | 9.47E-03 |
| 1.3325 | 9.54E-03 | 9.30E-03 | 9.08E-03 | 9.01E-03 | 8.87E-03 | 8.66E-03 |
| 1.83606 | 7.55E-03 | 7.39E-03 | 7.24E-03 | 7.19E-03 | 7.09E-03 | 6.95E-03 |

Table 3. Self-absorption correction factor for Detector I

| Energy (MeV) | Density (g/cm ³) | | | | |
|--------------|------------------------------|------|------|------|------|
| | 0.3 | 0.6 | 0.9 | 1.2 | 1.5 |
| 0.05954 | 1.17 | 1.09 | 1.02 | 0.96 | 0.90 |
| 0.08803 | 1.15 | 1.08 | 1.02 | 0.96 | 0.91 |
| 0.12203 | 1.15 | 1.08 | 1.02 | 0.96 | 0.91 |
| 0.13648 | 1.14 | 1.08 | 1.02 | 0.96 | 0.91 |
| 0.16586 | 1.14 | 1.08 | 1.02 | 0.97 | 0.92 |
| 0.3917 | 1.10 | 1.06 | 1.01 | 0.97 | 0.93 |
| 0.51401 | 1.09 | 1.05 | 1.01 | 0.98 | 0.94 |
| 0.66166 | 1.08 | 1.05 | 1.01 | 0.98 | 0.95 |
| 0.89804 | 1.07 | 1.04 | 1.01 | 0.98 | 0.95 |
| 1.17324 | 1.06 | 1.03 | 1.01 | 0.98 | 0.96 |
| 1.3325 | 1.06 | 1.03 | 1.01 | 0.98 | 0.96 |
| 1.83606 | 1.05 | 1.03 | 1.01 | 0.99 | 0.97 |

Table 4. Full-energy peak efficiency evaluation for the Detector II and III according to the density variation

| Detector II | | | | | | |
|--------------|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Energy (MeV) | Density (g/cm ³) | | | | | |
| | 0.3 | 0.6 | 0.9 | 1.0 | 1.2 | 1.5 |
| 0.05954 | 2.22E-02 | 2.07E-02 | 1.94E-02 | 1.89E-02 | 1.81E-02 | 1.71E-02 |
| 0.08803 | 4.69E-02 | 4.40E-02 | 4.14E-02 | 4.06E-02 | 3.90E-02 | 3.68E-02 |
| 0.12203 | 5.06E-02 | 4.76E-02 | 4.49E-02 | 4.41E-02 | 4.24E-02 | 4.02E-02 |
| 0.13648 | 5.05E-02 | 4.75E-02 | 4.49E-02 | 4.41E-02 | 4.24E-02 | 4.02E-02 |
| 0.16586 | 5.24E-02 | 4.95E-02 | 4.68E-02 | 4.60E-02 | 4.44E-02 | 4.21E-02 |
| 0.3917 | 2.91E-02 | 2.79E-02 | 2.68E-02 | 2.64E-02 | 2.57E-02 | 2.47E-02 |
| 0.51401 | 2.37E-02 | 2.28E-02 | 2.20E-02 | 2.17E-02 | 2.12E-02 | 2.04E-02 |
| 0.66166 | 1.96E-02 | 1.89E-02 | 1.83E-02 | 1.81E-02 | 1.77E-02 | 1.71E-02 |
| 0.89804 | 1.46E-02 | 1.42E-02 | 1.37E-02 | 1.36E-02 | 1.34E-02 | 1.30E-02 |
| 1.17324 | 1.21E-02 | 1.18E-02 | 1.15E-02 | 1.14E-02 | 1.12E-02 | 1.09E-02 |
| 1.3325 | 1.11E-02 | 1.08E-02 | 1.05E-02 | 1.04E-02 | 1.03E-02 | 1.00E-02 |
| 1.83606 | 8.65E-03 | 8.47E-03 | 8.30E-03 | 8.25E-03 | 8.14E-03 | 7.97E-03 |

| Detector III | | | | | | |
|--------------|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Energy (MeV) | Density (g/cm ³) | | | | | |
| | 0.3 | 0.6 | 0.9 | 1.0 | 1.2 | 1.5 |
| 0.05954 | 1.55E-02 | 1.45E-02 | 1.36E-02 | 1.34E-02 | 1.28E-02 | 1.21E-02 |
| 0.08803 | 3.53E-02 | 3.32E-02 | 3.12E-02 | 3.07E-02 | 2.95E-02 | 2.79E-02 |
| 0.12203 | 3.94E-02 | 3.71E-02 | 3.50E-02 | 3.43E-02 | 3.31E-02 | 3.13E-02 |
| 0.13648 | 3.95E-02 | 3.72E-02 | 3.52E-02 | 3.45E-02 | 3.33E-02 | 3.15E-02 |
| 0.16586 | 4.12E-02 | 3.89E-02 | 3.68E-02 | 3.62E-02 | 3.49E-02 | 3.31E-02 |
| 0.3917 | 2.25E-02 | 2.16E-02 | 2.07E-02 | 2.04E-02 | 1.99E-02 | 1.91E-02 |
| 0.51401 | 1.81E-02 | 1.75E-02 | 1.68E-02 | 1.66E-02 | 1.62E-02 | 1.56E-02 |
| 0.66166 | 1.51E-02 | 1.45E-02 | 1.41E-02 | 1.39E-02 | 1.36E-02 | 1.32E-02 |
| 0.89804 | 1.11E-02 | 1.08E-02 | 1.05E-02 | 1.04E-02 | 1.02E-02 | 9.93E-03 |
| 1.17324 | 9.24E-03 | 9.01E-03 | 8.78E-03 | 8.69E-03 | 8.56E-03 | 8.34E-03 |
| 1.3325 | 8.44E-03 | 8.23E-03 | 8.05E-03 | 7.98E-03 | 7.85E-03 | 7.66E-03 |
| 1.83606 | 6.62E-03 | 6.48E-03 | 6.35E-03 | 6.29E-03 | 6.22E-03 | 6.09E-03 |

Table 5. Self-absorption correction factor for Detector II and III

| Detector II | | | | | |
|--------------|------------------------------|------|------|------|------|
| Energy (MeV) | Density (g/cm ³) | | | | |
| | 0.3 | 0.6 | 0.9 | 1.2 | 1.5 |
| 0.05954 | 1.17 | 1.09 | 1.02 | 0.96 | 0.90 |
| 0.08803 | 1.15 | 1.08 | 1.02 | 0.96 | 0.91 |
| 0.12203 | 1.15 | 1.08 | 1.02 | 0.96 | 0.91 |
| 0.13648 | 1.15 | 1.08 | 1.02 | 0.96 | 0.91 |
| 0.16586 | 1.14 | 1.08 | 1.02 | 0.97 | 0.92 |
| 0.3917 | 1.10 | 1.06 | 1.01 | 0.97 | 0.93 |
| 0.51401 | 1.09 | 1.05 | 1.01 | 0.98 | 0.94 |
| 0.66166 | 1.08 | 1.05 | 1.01 | 0.98 | 0.95 |
| 0.89804 | 1.07 | 1.04 | 1.01 | 0.98 | 0.95 |
| 1.17324 | 1.06 | 1.04 | 1.01 | 0.98 | 0.96 |
| 1.3325 | 1.06 | 1.03 | 1.01 | 0.98 | 0.96 |
| 1.83606 | 1.05 | 1.03 | 1.01 | 0.99 | 0.97 |

| Detector III | | | | | |
|--------------|------------------------------|------|------|------|------|
| Energy (MeV) | Density (g/cm ³) | | | | |
| | 0.3 | 0.6 | 0.9 | 1.2 | 1.5 |
| 0.05954 | 1.16 | 1.09 | 1.02 | 0.96 | 0.91 |
| 0.08803 | 1.15 | 1.08 | 1.02 | 0.96 | 0.91 |
| 0.12203 | 1.15 | 1.08 | 1.02 | 0.96 | 0.91 |
| 0.13648 | 1.14 | 1.08 | 1.02 | 0.96 | 0.91 |
| 0.16586 | 1.14 | 1.08 | 1.02 | 0.97 | 0.92 |
| 0.3917 | 1.10 | 1.06 | 1.01 | 0.97 | 0.94 |
| 0.51401 | 1.09 | 1.05 | 1.01 | 0.98 | 0.94 |
| 0.66166 | 1.08 | 1.05 | 1.01 | 0.98 | 0.95 |
| 0.89804 | 1.07 | 1.04 | 1.01 | 0.98 | 0.95 |
| 1.17324 | 1.06 | 1.04 | 1.01 | 0.98 | 0.96 |
| 1.3325 | 1.06 | 1.03 | 1.01 | 0.98 | 0.96 |
| 1.83606 | 1.05 | 1.03 | 1.01 | 0.99 | 0.97 |

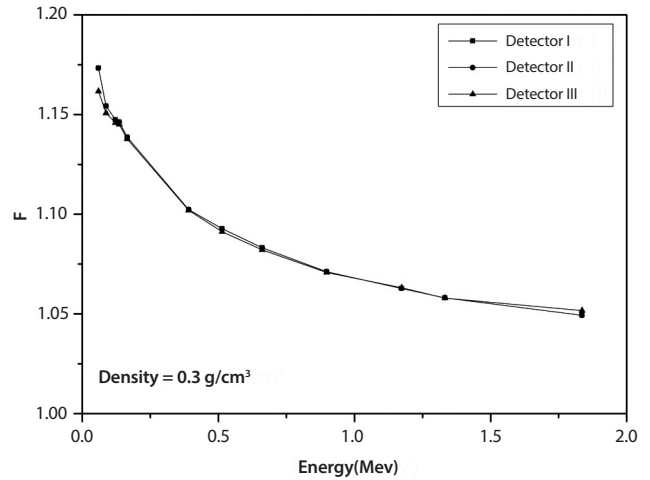


Fig. 4. Comparison of the self-absorption correction factor for the three detectors (Density: 0.3 g/cm³).

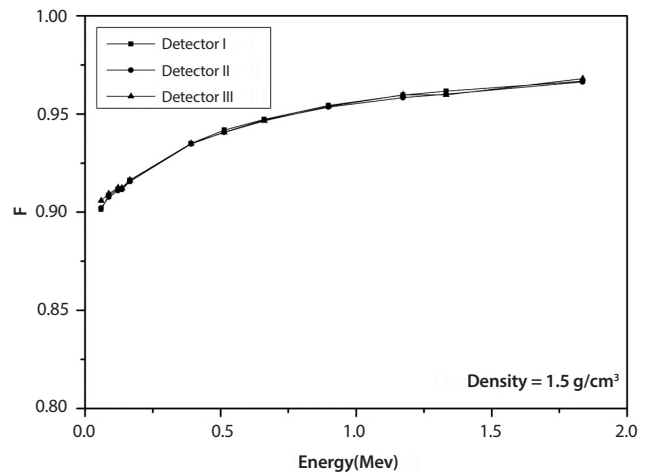


Fig. 5. Comparison of the self-absorption correction factor for the three detectors (Density: 1.5 g/cm³).

조정하였다. Dead layer의 두께를 조정된 후, 시뮬레이션 값과 실험값의 비는 Fig. 3과 같이 에너지 전 영역에서 1에 가까운 분포를 보임을 확인하였다. 따라서 이러한 검증을 토대로 각 검출기에 대한 모델링을 확정하였으며, 이를 이용하여 여러 밀도 값에 대한 효율을 계산하였다.

3. 결과

검증된 모델을 바탕으로 마리넬리 1리터 비이커에 담긴

샘플의 밀도 변화에 따른 효율을 MCNPX 코드를 이용하여 구하였으며 검출기 I에 대한 결과는 Table 2와 같다. 즉 교정용 표준시료의 밀도인 1 g/cm^3 와 비교하였을 때 낮은 밀도에서는 저에너지 영역에서 효율의 차이가 있음을 확인할 수 있다. 이를 이용하여 밀도보정인자 F는 밀도 1 g/cm^3 에 대한 효율에 대한 비로 나타낼 수 있으며 그 결과는 Table 3과 같이 0.9 - 1.17 값을 가진다. 즉 밀도가 0.3 g/cm^3 인 샘플에 대해서 Am-241 (59.54 keV)에 대한 밀도보정인자는 1.17이 되는 것이다. 이와 같은 방법으로 검출기 II, III에 대해서도 밀도 변화에 따른 에너지별 효율과 밀도보정인자 F를 구한 결과는 Table 4, 5와 같다. 밀도보정인자를 비교하였을 때 검출기를 I를 기준으로 각 밀도에 대해 전 에너지 범위에서 그 차이가 1%이하임을 확인할 수 있다. 즉 그 값이 거의 유사함을 확인할 수 있으며, Fig. 4, 5에 밀도 0.3 과 1.5 g/cm^3 에 대한 밀도보정인자 F를 비교하였다.

4. 결론

본 연구에서는 크리스털 및 코어와 같은 효율 측정에 중요한 영향을 미치는 주요 특성이 다른 p-type 고순도 게르마늄 검출기에 대해 모델링하고 실제 표준시료를 이용하여 실험값과 시뮬레이션 값을 비교함으로써 모델링을 검증하였다. 이는 dead layer에 의해 저에너지 영역에서 생길 수 있는 실험값과 계산값의 차이를 줄이기 위함이며 이를 통해 모델링을 확정하였다. 이 결과를 바탕으로 전 에너지에 걸쳐 $0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5 \text{ g/cm}^3$ 밀도에 대한 밀도보정인자를 도출하였으며, 그 결과 그 차이가 크지 않아 밀도보정인자가 크리스털과 같은 검출기의 주요 특성에 독립적임을 확인하였다. 다만 본 연구에서는 일부 p-type의 HPGe 검출기만 다루었기 때문에 다른 다양한 p-type 및 n-type HPGe 검출기에 대한 추가 검증 및 연구가 필요하다고 판단된다.

REFERENCES

[1] W.N. Lee, H.P. Lee, K.H. Chung, Y.H. Cho, G.S. Choi, C.W. Lee, H.W. Chung, E.J. Lee, Y.S. Sho, and J.O. Lee, "A Practical and Simple Method of Self-absorption Cor-

rection for Environmental Samples", J. Korea Asso. Radiat. Prot., 31(1), 47-52 (2006).

- [2] T. Boshkova and L. Minev, "Corrections for self-attenuation in gamma-ray spectrometry of bulk samples", Appl. Radiat. Isot., 54(5), 777-783 (2001).
- [3] M. Jurado Vargas, A. Fernandez Timon, N. Cornejo Diaz, and D. Perez Sanchez, "Monte Carlo Simulation of the self-absorption corrections for natural samples in gamma-ray spectrometry", Appl. Radiat. Isot., 57(6), 893-898 (2002).
- [4] J.D. Nikolic, D. Jokovic, D. Todorovic and M. Rajacic, "Application of GEANT4 simulation on calibration of HPGe detectors for cylindrical environmental samples", J. Radiol. Prot., 34(2), N47-N55 (2014).
- [5] E. Stancu, C. Costache, and O. Sima, "Monte Carlo Simulation of P-type HPGe Detectors-The dead layer problem", Romanian Reports in Physics, 67(2), 465-473 (2015).