

## Comparison of the Correction Methods for Gamma Ray Attenuation in the Radioactive Waste Drum Assay

### 방사성폐기물드럼 핵종분석에서 감마선 감쇠보정 방법들의 비교 평가

Young-Yong Ji, Young-Gerl Ryu, Kyoung-Kil Kwak, Duck-Won Kang\* and Ki-Hong Kim

Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Duckjin-dong, Yuseong-gu, Daejeon

\*Korea Electric Power Research Institute, 103-16 Munji-dong, Yuseong-gu, Daejeon

[yjji@kaeri.re.kr](mailto:yjji@kaeri.re.kr)

지영용, 유영걸, 꺾경길, 강덕원\*, 김기홍

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

\*한국전력공사 전력연구원, 대전광역시 유성구 문지동 103-16

(Received March 17, 2006 / Approved June 14, 2006)

#### Abstract

In the measurement of gamma rays emitted from the nuclide in the radioactive waste drum, to analyze the nuclide concentration accurately, it is necessary to use the proper calibration standards and to correct for the attenuation of the gamma rays. Two drums having a different density were used to analyze the nuclide concentration inside the drum in this study. After carrying out the system calibration, we measured the gamma rays emitted from the standard source inside the model drum with changing the distance between the drum and the detector. The measured values were corrected with the three kinds of gamma attenuation correction methods, as a result, the error was less than 10 % in the low density drum and less than 25 % in the high density drum. The measured activity in the short distance was more accurate than in the long distance. The transmission correction for the mass attenuation showed good results (very low error) compared to the mean density and the differential peak correction method.

**Key words:** NDA, Model drum, Gamma-ray, Attenuation correction, Mass attenuation coefficient, Transmission Source

#### 요약

실제 드럼 내에 존재하는 핵종으로부터 방출되는 감마선을 외부에서 측정하여 그로부터 드

럼 내 핵종의 양을 정확하게 분석하기 위해서는 먼저 적절한 교정표준의 선택과 드럼 내 매질의 밀도와 핵종의 분포에 대한 감마선 감쇠보정이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 드럼 내 핵종의 분석을 위하여 밀도가 다른 두 개의 모델드럼을 이용하였으며 전송선원으로서는  $^{152}\text{Eu}$  (10 mCi), 표준선원으로는 혼합선원( $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ )을 이용하였다. 그리고 드럼과 검출기 사이의 거리를 달리하면서 모델드럼 내의 표준선원으로부터 나오는 감마선을 계측하여, 감쇠보정이 되지 않은 이 측정값에 3 종류의 감마선 감쇠보정을 각각 수행하였다. 그 결과 밀도가 낮은 드럼에서의 오차는 10 % 이하이었고, 밀도가 높은 드럼에서의 오차는 25 % 이하이었다. 또한 드럼과 검출기 사이의 거리가 근거리(70 cm, 드럼구획: 10 segments)일 때, 오차는 원거리(90 cm, 드럼구획: 8 segments)에서의 오차보다는 낮았는데 이는 상대적으로 1 segment에 대한 부피차이에 기인한 밀도 측정오차가 낮고 감마선의 산란이 낮았기 때문이다.

**중심단어:** 비파괴분석, 모델드럼, 감마선, 감쇠보정, 질량감쇠계수, 전송선원

## I. 서론

방사성폐기물 드럼의 처분을 위해서는 중·저준위 방사성 폐기물 인도규정에 따라 방사성폐기물 드럼의 구조적 건전성뿐만 아니라 폐기물에 포함되어 있는 전체 방사성핵종의 95% 이상을 규명하여야 하며 13 개의 핵종과 전알파에 대해서는 처분 농도제한치를 설정하여 이에 대한 핵종별 농도 미만이여야 한다[1]. 그리고 방사선 계측 등에 의한 직접 측정방법으로 드럼 내 핵종을 분석하는 경우, 처분 농도제한치가 설정된 핵종에 대하여는 그 처분 농도제한치의 1% 수준을 평가할 수 있는 능력을 요구하고 있다.

실제 드럼 내에 존재하는 핵종으로부터 방출되는 감마선을 외부에서 측정하여 그로부터 드럼 내 핵종의 양을 정확하게 분석하기 위해서는 먼저 적절한 교정표준(calibration standards)의 선택과 드럼의 구성물질(고화매질과 폐기물의 종류)의 밀도와 핵종의 분포에 대한 감마선 감쇠보정이 반드시 필요하다 [2,3]. 따라서 적절한 교정표준의 사용과 드럼 내에서 방출되는 감마선에 대한 감쇠보정은 감마선 비파괴 분석에서 중요한 뿐만 아니라 아주 밀접한 관계에 있다. 일반적으로 핵종분석 시스템을 교정하는데 영향을 미치는 인자들에는 검출기 효율과 측정선원에 대한 감마선 방출율, 계측위치에서의 기하학적 효율 그리고 측정 샘플의 크기 및 형태 등으로 나눌 수 있

다. 실제 낮은 밀도를 가지는 소량의 샘플에 대한 감마선 측정에 있어서는 측정하고자하는 샘플과 유사한 크기 및 형태의 표준선원을 제작하여, 이 표준선원의 계측으로부터 측정 장비의 교정이 이루어지며, 이를 토대로 측정하고자하는 샘플을 교정지점에 위치시켜 방출되는 감마선을 측정한다. 그러나 측정하고자하는 샘플의 크기가 커지게 되면 샘플로부터 방출된 감마선의 측정값은 실제 샘플에 존재하는 핵종의 양에 비례하지 않는다. 이는 거대해진 샘플에 의한 감마선 감쇠가 주원인이며 따라서 정확한 분석을 위해서는 감마선 감쇠에 대한 보정이 반드시 이루어져야 한다.

실제 방사성 폐기물 드럼 내의 핵종을 분석하기 위해서는 동일 규격의 빈 드럼 중앙에 표준선원을 위치시켜, 이 표준선원의 계측으로부터 측정 시스템을 교정하게 된다. 그 후 실제 드럼을 교정된 지점에 위치시켜 감마선 계측을 하게 되며 그 측정값에 대해 감마선 감쇠 보정을 수행하여 최종적으로 드럼 내 핵종의 양을 결정하게 된다.

폐기물 드럼 분석 시스템에서 널리 이용되는 감마선 감쇠보정 방법에는 평균밀도 보정방법(average density correction), 전송선원 보정방법(transmission source correction) 그리고 미분 피크 보정방법(differential peak correction) 등의 3 종류가 있다 [4,5,6]. 평균밀도 보정방법은 일정 부피의 드럼 내 매

질의 무게를 측정하여 이로부터 매질의 평균밀도를 구하는 간단한 방법이다. 그리고 전송선원 보정방법은 드럼 외부에 전송선원을 장착하여 전송선원의 세기가 드럼 매질에 의해 얼마나 감소되는가를 측정함으로써 드럼 내 매질의 밀도를 구하며 이것으로부터 감쇠보정인자를 결정하는 방법이다. 이때 빈 드럼에 대한 전송선원의 감쇠정도를 먼저 측정하여 전송선원의 초기 세기(I<sub>0</sub>)를 결정해 놓아야 한다. 마지막으로 두 개 이상의 감마선 피크를 가지는 핵종이 드럼 내에 존재하는 경우, 이 감마선 피크들의 상대적인 감쇠정도를 이용하여 드럼 내 매질의 밀도를 얻을 수 있으며, 이를 이용하는 방법이 미분 피크 보정방법이다. 이 또한 감쇠되지 않은 감마선 피크들의 초기 세기를 알고 있어야 하며, 이는 측정 시스템 교정과 같은 조건에서 빈 드럼 내 존재하는 표준선원 중, <sup>60</sup>Co 핵종의 두 감마선 피크 계수율을 측정하여 이를 각 피크의 초기 세기(I<sub>0</sub>)로 사용한다.

본 연구에서는 드럼 내 핵종의 분석을 위하여 밀도가 다른 두 개의 모델드럼을 이용하였으며, 드럼의 중앙에 표준선원을 위치시킨 후, 측정 시스템의 교정 지점에 측정하고자 하는 드럼을 장착하였다. 먼저 드럼으로부터 나오는 감마선을 계측하였으며, 감쇠보정이 되지 않은 이 측정값에 3 종류의 감마선 감쇠보정을 각각 실행하였다. 그로부터 그 결과를 빈 드럼에서 측정된 감쇠가 되지 않은 값과 비교하여 3 종류의 감쇠보정에 대한 정확성을 평가해 보았다. 그리고 3 종류의 보정방법과 드럼 매질의 종류에 따른 적절한 질량감쇠계수에 의해 보정된 최종 드럼 내 핵종 분석 값들을 실제 선원의 방사능 값과 비교하여 측정의 정확성을 비교 평가하였다.

## II. 감마선 감쇠보정 방법

앞서 기술한 3 종류의 보정방법으로부터 얻게 되는 감쇠보정 인자는 매질로부터 방출되는 각 감마선 피크들의 에너지에 대해서 계산되어지며, 그로부터 보정된 피크 효율은 감마선 감쇠를 동반하여 측정된 각 피크들의 효율과 그에 해당하는 감쇠보정 인자들의 곱으로 나타내어진다.

$$\epsilon_c = CF_i \times \epsilon_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

여기서,

CF<sub>i</sub> : 에너지 E<sub>i</sub>에서의 감쇠보정 인자

ε<sub>i</sub> : 에너지 E<sub>i</sub>에서 감쇠보정이 되지 않은 피크 효율

ε<sub>c</sub> : 에너지 E<sub>i</sub>에서 감쇠보정이 된 피크 효율

그리고 각 감마선 에너지 피크에서의 감쇠보정 인자, CF<sub>i</sub>는 식 (2)가 된다.

$$CF_i = e^{-\left(\frac{\mu_{at}}{\rho}\right)_i(\rho t)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서,

$\left(\frac{\mu_{at}}{\rho}\right)_i$  : 에너지 E<sub>i</sub>에서 매질 내의 질량감쇠계수, cm<sup>2</sup>/g

ρt : 매질의 면밀도, g/cm<sup>2</sup>

식 (2)에서 보듯이 감마선 감쇠보정 인자는 매질의 밀도에 의존하므로, 보다 정확한 핵종 분석치를 얻기 위해서는 드럼 내 매질의 밀도를 정확하게 평가하는 것이 무엇보다도 중요하다.

### 가. 평균밀도 보정방법

드럼 내 매질의 구성 물질 및 그의 밀도분포가 비교적 일정할 경우 단지 매질의 순 무게를 측정하여 그 값을 전체 드럼의 부피로 나눔으로써 드럼 내 매질의 평균밀도를 구할 수 있으며, 이 평균밀도를 식 (2)의 밀도 항에 대입하여 감쇠보정 인자를 구하는 간단한 방법이다. 평균밀도 보정방법을 사용하기에 앞서 드럼 내 매질의 종류에 따라 적절한 질량감쇠계수를 알고 있어야 하며, 분석하고자 하는 핵종의 감마선 에너지에 대해 가능한 정확한 값을 대입하는 것이 감쇠보정 인자의 오차를 줄일 수 있다.

### 나. 전송선원 보정방법

부피가 큰 드럼에 대한 감마선 감쇠보정을 위해 LANL(Los Alamos National Laboratory)에서는 전송선원 보정방법을 처음 제안했으며[7], 이는 드럼을 통

과하여 검출기 방향으로 잘 조준된 외부 전송선원의 감마선 투과율을 측정함으로써 감마선 감쇠보정 인자를 결정하는 방법이다. 이때 사전에 빈 드럼에 대한 전송선원의 감쇠정도를 먼저 측정하여 전송선원의 초기 세기( $I_0$ )를 결정해 놓아야 하며, 분석해야할 핵종과 유사한 에너지를 가지는 전송선원을 선택하는 것이 감쇠보정 인자를 결정하는데 최적의 조건이 된다. 그리고 전송선원 보정방법을 적용하기 위한 기본 가정으로 매질의 구성과 밀도 분포가 일정해야하며, 매질 내에 존재하는 핵종 또한 일정하게 분포되어 있어야 함을 요구하고 있다.

전송선원을 이용하여 감마선 감쇠보정 인자를 구하는 방법은 먼저 외부 전송선원이 드럼 매질에 의해 감쇠되는 정도를 계측하여 식 (3)으로부터 에너지  $E_T$ 에서의 투과율을 구한다.

$$T_T = \frac{I_T}{I_{T,0}} = e^{-\left(\frac{\mu_{at}}{\rho}\right)_i(\rho t)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

여기서,

- $I_T$  : 감쇠물질이 있는 드럼에서의 계수율
- $I_{T,0}$  : 감쇠물질이 없는 빈 드럼에서의 계수율
- $\left(\frac{\mu_{at}}{\rho}\right)_T$  : 에너지  $E_T$ 에서 매질의 질량감쇠계수 [cm<sup>2</sup>/g]

그리고 분석해야할 핵종의 에너지  $E_i$ 에 해당하는 감마선에 대한 투과율은 전송선원으로부터 얻은 투과율( $T_T$ )을 이용하여 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_i = (T_T)^\alpha \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서,

$$\alpha = \left(\frac{\mu_{at}}{\rho}\right)_i / \left(\frac{\mu_{at}}{\rho}\right)_T \equiv \left(\frac{\mu_{at}}{\rho}\right)_T^i$$

식 (4)에서와 같이 분석하고자 하는 핵종의 에너지에서 매질에 대한 투과율이 계산되어 졌을 때, 드럼 내 매질에 대한 감마선 감쇠보정인자는 측정 대상 매질의 기하학적 형태에 따른 수학적 모델과 그에 해

당하는 수치적분을 사용하여 식 (5)와 같은 근사식으로 나타낼 수 있다.

$$CF_i = \frac{\int_v \tau I dV}{\int_v \tau I \times e^{-\left(\frac{\mu_{at}}{\rho}\right)_i(\rho t)} dV} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\approx \frac{\left[\left(\frac{\mu_{at}}{\rho}\right)_i(\rho t)\right]^\kappa}{1 - \left[e^{-\left(\frac{\mu_{at}}{\rho}\right)_i(\rho t)}\right]^\kappa} = \frac{-\ln(T)^\kappa}{1 - T^\kappa}$$

여기서,

- $\kappa$ : 매질의 기하학적 형태에 관계되는 상수
- $\kappa = 1$ : 평판 형태의 매질
- $\kappa = 0.825$ : 실린더 형태의 매질
- $\tau$ : 분석해야할 핵종의 매질 내 공간적인 분포밀도 (spatial density), g/cm<sup>3</sup>
- $I$ : 분석핵종의 감마선 방출율,  $\gamma/g \cdot s$
- $T$ : 투과율

식 (5)에서 구한 감마선 감쇠보정 인자를 식 (1)에 대입하여 감쇠보정이 된 피크 효율을 얻을 수 있으며, 또한 이를 식 (2)에 대입하여 매질의 면밀도를 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$(\rho t) = -\left(\frac{\mu_{at}}{\rho}\right)_i^{-1} \ln(CF_i) \quad \dots\dots\dots (6)$$

**다. 미분피크 보정방법**

두 개 이상의 감마선 피크를 가지는 핵종이 드럼 내에 존재하는 경우, 매질에 의한 이들 피크의 상대적인 감쇠정도를 측정함으로써 드럼 내 매질의 밀도를 얻을 수 있으며, 이를 이용하는 방법이 미분 피크 보정방법이다. 이 방법을 사용하기 위해서는 먼저 감쇠되지 않은 두 피크의 초기 세기를 알고 있어야 하며, 이는 측정 시스템 교정과 같은 조건에서 빈 드럼 내 존재하는 표준선원 중, <sup>60</sup>Co 핵종의 두 감마선 피크 계수율을 측정하여 이를 각 피크의 초기 세기( $I_0$ )로 사용한다.

미분피크 보정방법을 이용하여 감마선 감쇠보정

인자를 구하는 방법은 드럼에 의해 감소되어 외부로 나오는 여러 개의 감마선 피크를 가지는 핵종을 측정하여 각 에너지 별로 계수율을 식 (7), (8)과 같이 구한다.

$$I_1 = I_{1,0} \times e^{-\left(\frac{\mu_{at}}{\rho}\right)_1(\rho t)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$I_2 = I_{2,0} \times e^{-\left(\frac{\mu_{at}}{\rho}\right)_2(\rho t)} \quad \dots\dots\dots (8)$$

여기서,

$I_1, I_2$  : 매질에 의해 감소된 에너지  $E_1, E_2$ 의 계수율  
 $I_{1,0}, I_{2,0}$  : 빈 드럼에서 측정된 감소되지 않은 에너지  $E_1, E_2$ 의 계수율

그리고 위 두 식의 비로부터 매질의 밀도를 식 (9)와 같이 구할 수 있으며, 그 결과를 식 (2)에 대입하여 감마선 에너지  $E_1$ 에서의 감소보정 인자,  $CF_1$ 를 구한다.

$$(\rho t) = \frac{1}{\Delta\mu} \left[ \ln\left(\frac{I_{1,0}}{I_{2,0}}\right) - \ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \right] \quad \dots\dots\dots (9)$$

여기서,

$$\Delta\mu = \left(\frac{\mu_{at}}{\rho}\right)_1 - \left(\frac{\mu_{at}}{\rho}\right)_2$$

미분피크 보정방법은 앞의 두 보정방법과는 다르게 일정한 매질 구성과 일정한 핵종분포라는 가정을 필요로 하지 않는다는 이점이 있지만, 밀도를 계산하기 위해 사용되어지는 감마선 피크들에 대한 충분한 계수율이 필요하므로 매질 내 기준 핵종의 양이 적은 경우 많은 계측시간이 필요하게 된다.

### III. 실험방법

실제 방사성 폐기물 드럼 내의 핵종을 분석하기 위해서는 동일 규격의 빈 드럼 중앙에 표준선원을 위치시켜, 이 표준선원의 계측으로부터 측정 시스템을 교정하게 된다. 그 후 실제 드럼을 교정된 지점에 위치

시켜 감마선 계측을 하게 되며 그 측정값에 대해 감마선 감소 보정을 수행하여 최종적으로 드럼 내 핵종의 양을 결정하게 된다.

그리고 감마선 감소 보정 중, 전송선원 보정방법을 이용하는 경우에 필요한 전송선원의 초기 세기( $I_0$ )를 결정하기 위하여 넓은 에너지 영역에서 많은 감마선 피크를 가지는  $^{152}\text{Eu}$ (10 mCi)를 전송선원으로 선정하였다. 이것을 이용하여 빈 드럼에 대한 전송선원의 감소정도를 측정하였으며, 이를 전송선원의 초기 세기로 결정하였다. 또한 미분피크 보정방법을 이용하기 위해서는 시스템의 교정과정에서 빈 드럼의 중앙에 위치한 표준선원으로부터 나오는  $^{60}\text{Co}$  핵종의 두 감마선 피크 계수율을 측정하여 이를 각 피크의 초기 세기( $I_0$ )로 설정하였다.

드럼 내 핵종의 분석을 위하여 본 실험에서는 DOT-17H 규격(200 L)의 빈 드럼 내에 콜크와 모래를 각각 충전하여 밀도가 다른 두 개의 모델드럼(콜크드럼, 모래드럼)을 제작하였으며, 표준선원을 드럼 내에 위치시키고자 빈 관들을 설치하였다. 본 실험에서는 드럼의 중앙에 위치한 관에  $^{133}\text{Ba}$ (84.142  $\mu\text{Ci}$ ),  $^{137}\text{Cs}$ (101.028  $\mu\text{Ci}$ ) 그리고  $^{60}\text{Co}$ (47,534  $\mu\text{Ci}$ ) 등의 핵종이 혼합되어 있는 표준선원(실린더 형태, 직경 6 mm, 높이 12 mm)을 위치시킨 후, 측정 시스템의 교정지점에 측정하고자하는 모델드럼을 장착하였다(그림 1, 2).

그리고 드럼으로부터 방출되는 감마선을 검출하기 위한 검출시스템은 동축형의 HPGe 검출기(30%)를 사용하였으며, 외부 방사선의 영향을 차단하고 드럼의 일정 분할면만 입사하도록 검출기 콜리메이터

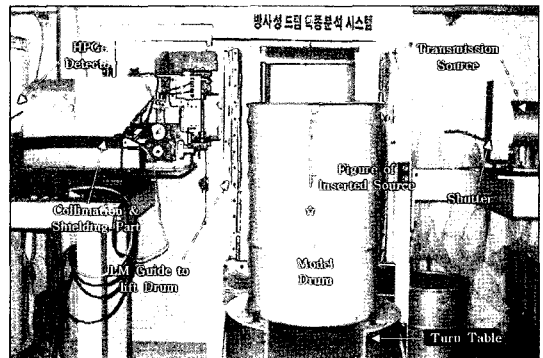


Fig. 1. Radioactive waste assay system.

와 차폐체를 설치하였다. 따라서 검출기는 콜리메이터에 의해 약 5.1 cm(2 inches) 높이의 입사면을 가지며, 약 10 cm의 납 차폐체로 둘러싸여 있다. 또한 납에 의한 특성 x-선의 영향을 줄이고자 차폐체 내부는 1.6 mm 두께의 구리를 입혔다.

폐기물 드럼 분석 시스템은 적절한 측정시간의 배분과 낮은 불감시간을 유지하기 위해 드럼 내 핵종의 양에 따라 검출기의 위치를 변화시킬 수 있도록 수정되었으며, 본 실험에서는 드럼 표면으로부터 검출기까지의 거리를 70, 90 cm로 각각 설정하였다. 그리고 드럼 반경방향으로의 비균질성을 보완하기 위해 드럼을 회전시키면서 감마선을 계속하였으며, 이때 그림 3에서와 같이 검출기까지의 위치 변화에 따라 정해지는 기하학적 배열에 의해 드럼의 높이를

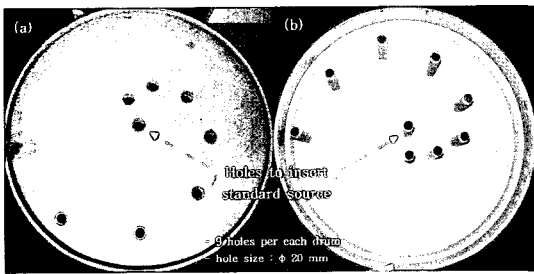


Fig. 2. Model drum (a) cork drum (b) sand drum.

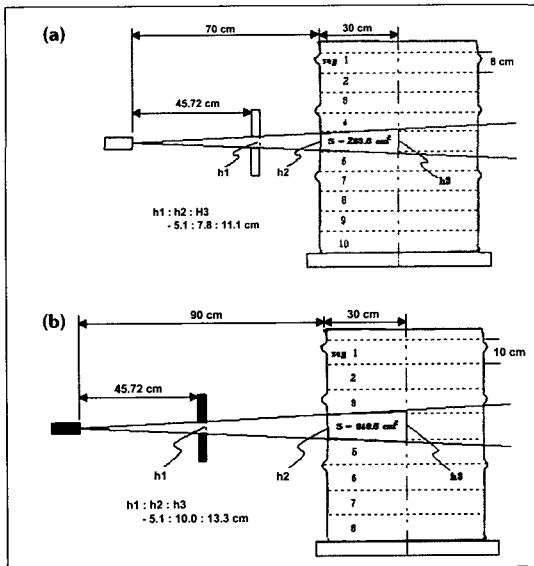


Fig. 3. Schematic of the measurement geometry for (a) short distance and (b) long distance.

몇 개의 구획(segment)으로 분할하여 각 구획별로 감마선을 계속하여 합산하였다. 즉, 검출기까지의 거리가 가까운 경우는 10개의 구획으로 나누었으며, 반대로 먼 경우에는 8개의 구획으로 나누어서 계속하였다(그림 3).

이렇게 합산된 감쇠보정이 되지 않은 측정값에 3 종류의 감마선 감쇠보정을 각각 실행하였으며, 그 결과를 빈 드럼에서 측정한 감쇠가 되지 않은 값과 비교하여 3 종류의 감쇠보정에 대한 정확성을 평가해 보았다. 그리고 3 종류의 보정방법과 드럼 매질의 종류에 따른 적절한 질량감쇠계수에 의해 보정된 최종 드럼 내 핵종 분석 값을 실제 선원의 방사능 값과 비교하여 측정의 정확성을 각각 평가하였다.

#### IV. 결과 및 고찰

##### 가. 70 cm 측정거리

HPGe 검출기를 드럼 표면으로부터 약 70 cm 떨어진 곳에 위치시켜 각 모델드럼 내에 존재하는 핵종의 양을 분석하였으며 그 결과를 빈 드럼 내에서 측정한 값과 비교하여 그림 4, 5에 각각 나타냈다. 먼저 밀도가 낮은 폴크드럼(0.2516 g/cm<sup>3</sup>)의 경우(그림 4), 높은 에너지 영역에 해당하는 <sup>60</sup>Co 피크들은 약 18%, 중간 에너지 영역에 해당하는 <sup>137</sup>Cs 피크는 약 31% 그리고 낮은 에너지 영역에 해당하는 <sup>133</sup>Ba 피크들은 약 55%의 감쇠를 보였다. 그리고 밀도가 높은

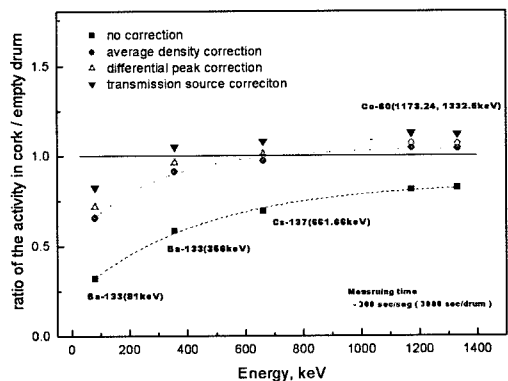


Fig. 4. The ratio of the activity in cork drum to empty drum at the short distance.

모래드럼(1,3480 g/cm<sup>3</sup>)의 경우(그림 5), <sup>60</sup>Co 피크들은 약 87%, <sup>137</sup>Cs 피크는 약 93% 그리고 <sup>133</sup>Ba 피크들은 약 97%의 감쇠를 보였다. 감마선 감쇠보정이 되지 않은 이 측정값에 3 종류의 감마선 감쇠보정을 각각 실행하였으며, 그 결과 폴크드럼의 경우 낮은 에너지를 제외하고서 대체적으로 3 종류의 감쇠보정에 의한 오차가 10% 이내를 유지하여 감쇠되지 않은 빈 드럼에서의 측정값에 가까웠으며, 밀도가 높은 모래드럼의 경우는 전송선원 보정방법만이 빈 드럼에서 분석된 값에 가까운 모습을 보였다. 그리고 드럼 내 밀도가 증가(약 5배)할 경우 평균밀도와 미분피크에 의한 보정방법으로 감쇠보정이 된 값은 감쇠되지 않은 빈 드럼에서의 측정값에 비해 약 25%의 감소를 나타내었다(그림 5).

3 종류의 감마선 감쇠보정방법에 의해 최종적으로 드럼 내 핵종을 분석한 결과를 실제 선원의 방사능 값과 비교하여 표 1에 나타내었으며, 낮은 에너지를 제외하고서는 대체적으로 전송선원 보정방법을 이용

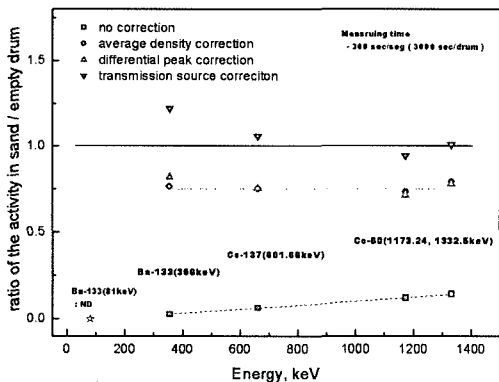


Fig. 5. The ratio of the activity in sand drum to empty drum at the short distance.

Table 1. The ratio of the analyzed activity to the standard activity in each model drum at the short distance.

Drum	Correction method	Analyzed / Standard		
		<sup>133</sup> Ba	<sup>137</sup> Cs	<sup>60</sup> Co
Cork	Average density	0,851	0,840	1,048
	Differential peak	0,808	0,788	0,985
	Transmission source	1,045	0,906	1,085
Sand	Average density	0,829	0,666	0,803
	Differential peak	0,841	0,672	0,791
	Transmission source	1,316	0,943	1,033

한 핵종 분석이 드럼의 밀도변화에 크게 의존하지 않으며, 실제 선원의 방사능 값에 잘 일치하였다. 그러나 모래드럼의 경우 높은 밀도에 의한 산란으로 그림 5에서 보듯이 <sup>133</sup>Ba의 81 keV 감마선 피크는 드럼 외부로 빠져나오지 못해 검출되지 않았으며, <sup>133</sup>Ba의 356 keV 피크로만 분석이 이루어져 전송선원 보정방법을 이용한 최종 핵종분석 시, 과대평가로 인해 오차가 크게 나타났다. 반대로 폴크드럼의 경우, <sup>133</sup>Ba의 81 keV 감마선 피크는 검출되었으며 356 keV 피크와의 가중 평균을 통하여 <sup>133</sup>Ba 핵종의 양을 계산한 결과 전송선원 보정방법을 이용하여 핵종을 분석한 값이 좋은 결과를 보였다.

#### 나. 90 cm 측정거리

HPGe 검출기를 드럼 표면으로부터 약 90 cm 떨

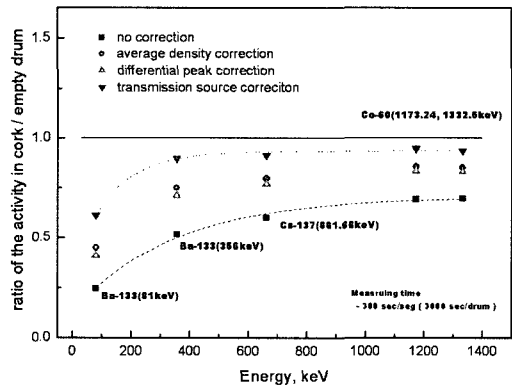


Fig. 6. The ratio of the activity in cork drum to empty drum at the long distance.

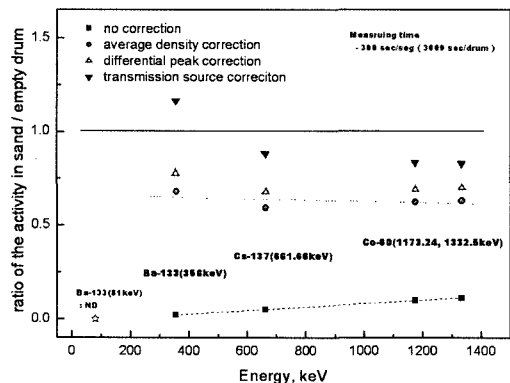


Fig. 7. The ratio of the activity in sand drum to empty drum at the long distance.

어진 곳에 위치시켜 시스템 교정을 한 후, 각 모델드럼 내에 존재하는 핵종의 양을 분석하였으며 그 결과를 빈 드럼 내에서 측정된 값과 비교하여 그림 6, 7에 각각 나타냈다. 먼저 밀도가 낮은 폴크드럼의 경우(그림 6), 높은 에너지 영역( $^{60}\text{Co}$  피크)은 약 30%, 중간 에너지 영역( $^{137}\text{Cs}$  피크)은 약 40% 그리고 낮은 에너지 영역( $^{133}\text{Ba}$  피크)은 약 62%의 감쇠를 보였다. 그리고 밀도가 높은 모래드럼의 경우(그림 7), 높은 에너지 영역은 약 90%, 중간 에너지 영역은 약 95% 그리고 낮은 에너지 영역은 약 98%의 감쇠를 보였다. 전과 같은 방법으로 감마선 감쇠보정이 되지 않은 이 측정값에 3 종류의 감마선 감쇠보정을 각각 실행하였으며, 그 결과 두 드럼 모두 전송선원 보정방법이 감쇠되지 않은 빈 드럼에서 분석된 값에 가깝게 나타났다. 그림 6에서 볼 때, 낮은 에너지를 제외하고서 전송선원 보정방법으로 감쇠보정이 된 값은 감쇠되지 않은 값에 대략 5~10%의 차이를 보였으며, 평균 밀도와 미분피크에 의해 보정된 값은 감쇠되지 않은 값에 대략 20~25%의 차이를 나타내었다. 그리고 같은 상태에서 드럼의 밀도가 약 5배 정도 증가한 경우(그림 7), 전송선원에 의해 보정된 값은 약 15%, 평균 밀도와 미분피크에 의해 보정된 값은 약 35%의 차이를 나타내었다.

그리고 3가지 보정방법과 드럼 매질의 종류에 따른 적절한 질량감쇠계수에 의해 보정된 최종 드럼 내 핵종 분석 값들을 실제 선원의 방사능 값과 비교하여 표 2에 나타내었다. 평균밀도와 미분피크에 의한 보정방법을 이용하는 경우 전 에너지 영역에서 오차가 크게 나타났으며, 전송선원 보정방법을 이용하는 경우에는 높은 에너지 영역에서는 대략 10% 정도의 오차로 비교적 잘 일치하지만 그보다 낮은 영역에서는

**Table 2. The ratio of the analyzed activity to standard activity in each model drum at the long distance.**

Drum	Correction method	Analyzed / Standard		
		$^{133}\text{Ba}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{60}\text{Co}$
Cork	Average density	0.647	0.674	0.844
	Differential peak	0.670	0.679	0.866
	Transmission source	0.783	0.768	0.927
Sand	Average density	0.638	0.533	0.667
	Differential peak	0.578	0.556	0.658
	Transmission source	1.084	0.795	0.889

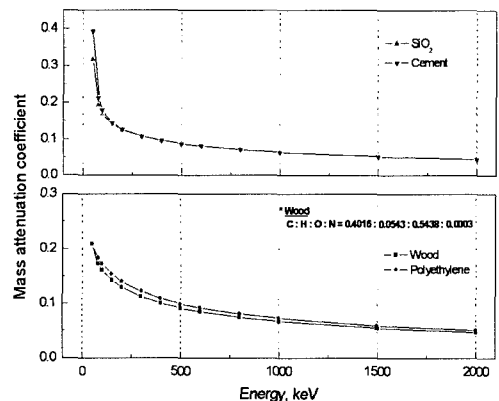
오차가 커짐을 알 수 있다.

90 cm 측정거리에서의 결과를 앞의 70 cm 측정거리에서의 결과와 비교해 볼 때, 보정되는 정도와 분석값 모두 떨어짐을 알 수 있으며, 이는 분석하고자 하는 드럼을 임의로 나눈 구획의 수에 의존하는 것으로 보여지는데, 이는 구획의 수가 많을 경우 한 구획이 담당하는 드럼 내 매질의 양은 그만큼 작아져, 각 구획에 대한 밀도측정의 오차 그리고 측정된 감마선의 산란에 의한 오차를 줄일 수 있기 때문인 것으로 판단된다.

**다. 질량감쇠계수의 변화**

측정위치 변화에 따른 위의 두 실험 모두 감마선 감쇠보정 과정에서 사용된 질량감쇠계수는 폴크드럼의 경우 목재에 대한 감마선의 질량감쇠계수, 모래드럼의 경우에는 이산화규소( $\text{SiO}_2$ )에 대한 감마선의 질량감쇠계수[8]를 각각 적용하였다. 그림 8에 몇 개의 매질에 대한 질량감쇠계수를 에너지에 대해 도식화하여 서로 유사한 매질별로 나타내었으며, 밀도가 큰 이산화규소와 시멘트의 경우 낮은 에너지 영역을 제외하고서는 거의 유사한 질량감쇠계수를 가지며, 밀도가 낮은 목재와 폴리에틸렌의 경우에는 전 영역에 걸쳐 목재의 질량감쇠계수가 낮음을 알 수 있다.

실제 드럼 내 핵종의 양을 정확하게 분석하기 위해서는 각각의 드럼에 들어 있는 매질에 대한 정확한 정보를 알아야 하며, 그로부터 드럼 내 매질에 알맞은 질량감쇠계수를 감마선 에너지 별로 만들어야 한



**Fig. 8. Mass attenuation coefficient for several mediums**



다. 그러나 드럼 내 매질의 정확한 조성을 안다는 것은 어려운 일이므로, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 원자력발전소에서 발생하는 방사성폐기물을 크게 몇 가지로 분류하여 이 분류된 드럼들에 대한 물질의 조성을 임의의 대표적 물질로 각각 가정하고 이러한 대표적 물질에 대한 질량감쇠계수를 구하여 드럼 분석에 이용하게 된다. 즉, 원자력발전소에서 발생하는 방사성폐기물 드럼 중, 잡고체 드럼은 드럼 내 매질의 조성이 비닐시트, 방호복, 종이, 목재 등으로 구성되므로 질량감쇠계수를 구하기 위한 대표적 물질 조성은 폴리에틸렌으로 가정하게 되며, 그리고 차폐잡고체드럼의 경우, 드럼 내벽이 콘크리트로 차폐되어 있으며 유리, 모래 등으로 구성되므로 대표적 물질 조성은 이산화규소로 가정하게 된다[9].

따라서 본 실험에서 사용한 콜크드럼은 매질의 조성을 폴리에틸렌으로 가정하고 있는 잡고체드럼에 해당되며, 모래드럼은 매질의 조성을 이산화규소로 가정하고 있는 차폐잡고체드럼에 해당된다고 할 수

있다. 실제 드럼 내 매질의 조성이 감쇠보정인자에 미치는 영향을 평가하기 위하여 콜크드럼의 경우, 질량감쇠계수를 목재에서의 값과 폴리에틸렌에서의 값으로 각각 변환하였으며, 모래드럼의 경우는 질량감쇠계수를 이산화규소에서의 값과 시멘트에서의 값으로 각각 변환하여 핵종분석을 수행하였으며 그 결과를 표 3, 4에 나타냈다.

밀도가 낮은 콜크드럼의 경우 전송선원 보정방법은 질량감쇠계수의 변화에 영향을 받지 않았으며, 평균밀도 및 미분피크 보정방법에 있어서 전 에너지 영역에서 목재의 질량감쇠계수를 이용하는 경우 폴리에틸렌에 비해 약 5% 정도 감소함을 알 수 있었다. 그러나 모래드럼에서는 낮은 에너지를 제외하고서는 3 종류의 감쇠보정방법 모두 다 질량감쇠계수의 변화에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있었으며 이는 그림 8의 결과와도 일치하였다.

### V. 결론

방사성 폐기물 드럼 내의 핵종을 정확하게 분석하기 위해서 드럼 내 매질에 의해 감쇠된 감마선을 평균 밀도 보정방법, 미분피크 보정방법 그리고 전송선원 보정방법에 의해 각각 보정하여 서로 비교해 보았다.

그 결과 밀도가 낮은 드럼의 경우, 3 종류의 감쇠 보정 방법 모두 감쇠되지 않은 측정값에 대한 오차가 10% 이내를 유지하여 비교적 보정정도가 좋았으나, 밀도가 큰 드럼의 경우 전송선원 보정방법을 제외한 평균밀도 보정방법과 미분피크 보정방법은 약 25%의 오차를 보였다. 그리고 드럼 분석 시, 드럼을 나누는 구획(segment)의 수에 따라 분석값이 영향을 받으며 구획의 수가 많을 경우 한 구획이 담당하는 드럼 내 매질의 양이 그 만큼 작아져, 각 구획에 대한 밀도측정의 오차 그리고 측정된 감마선의 산란에 의한 오차를 줄일 수 있어 더 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 구획의 수가 많아지는 만큼 한 드럼을 분석하는데 걸리는 시간은 그 만큼 증가하기 때문에 측정시간을 고려한 적절한 구획의 수를 선택하는 것이 필요하다.

그리고 드럼의 매질에 대한 조성을 임의의 대표적

**Table 3. The ratio of the analyzed activity by means of mass attenuation coefficient about wood to polyethylene in the cork drum.**

Distance	Correction method	Ratio of the analyzed value by means of $\left(\frac{\mu_{at}}{\rho}\right)_{wood}$ to $\left(\frac{\mu_{at}}{\rho}\right)_{polyethylene}$		
		$^{133}Ba$	$^{137}Cs$	$^{60}Co$
70 cm	Average density	0.963	0.938	0.948
	Differential peak	0.955	0.939	0.949
	Transmission source	1.053	0.996	0.990
90 cm	Average density	0.936	0.928	0.942
	Differential peak	0.984	0.952	0.961
	Transmission source	1.033	0.994	0.989

**Table 4. The ratio of the analyzed activity by means of mass attenuation coefficient about wood to polyethylene in the sand drum.**

Distance	Correction method	Ratio of the analyzed value by means of $\left(\frac{\mu_{at}}{\rho}\right)_{cement}$ to $\left(\frac{\mu_{at}}{\rho}\right)_{SiO_2}$		
		$^{133}Ba$	$^{137}Cs$	$^{60}Co$
70 cm	Average density	1.018	1.002	0.995
	Differential peak	1.039	1.012	0.999
	Transmission source	1.027	1.007	0.998
90 cm	Average density	1.019	1.002	0.994
	Differential peak	1.067	1.032	1.017
	Transmission source	1.029	1.006	0.998

물질로 가정하여 질량감쇠계수를 구하는데, 실제 드럼 내 매질의 조성이 감쇠보정인자에 미치는 영향을 평가한 결과, 밀도가 낮은 드럼의 경우 전송선원 보정방법은 질량감쇠계수의 변화에 영향을 받지 않았지만 평균밀도와 미분피크의 경우 사용하는 질량감쇠계수에 따라 영향을 받는 것으로 나타났다. 그러나 밀도가 높은 드럼의 경우에는 3 종류의 보정방법 모두 질량감쇠계수의 변화에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

### 참고 문헌

- [1] 과학기술부 고시 제2005-18호, 중저준위 방사성 폐기물 인도규정
- [2] J.L. Parker, "The Use of Calibration Standards and the Correction for Sample Self-Attenuation in Gamma Ray Nondestructive Assay", Los Alamos National Laboratory, LA-10045(1986).
- [3] B.M. Gillespie, "Detection and Correction of Inhomogeneities in Drum Waste Assay System", Proc. of Waste Management, Tucson, AZ(1994).
- [4] B.M. Gillespie, M. Zebarth, "Comparison of a Variety of Gamma Attenuation Correction Techniques for Different Waste Matrices", Proc. of the 14th Annual Symp. on Safeguards and Nuclear Material Management, Salamanca, Spain(1992).
- [5] S.T. Hsue, T.E. Sampson, "Nondestructive Assay Techniques and Associated Measurement Uncertainties", Journal of Nuclear Materials Management, 20, pp. 2-17(1992).
- [6] B.M. Gillespie, R. McElroy, D. Davidson, M. Villani, "Experience Gained and New Correction Techniques Developed Based on the Mixed Waste Focus Area NDA System Capability Evaluation Project", Canberra Industries Technical Report(1998)
- [7] E.R. Martin, D.F. Jones, J.L. Parker, "Gamma-Ray Measurements with the Segmented Gamma Scan", Los Alamos National Laboratory, LA-7059-M(1977).
- [8] J.H. Hubbell, "Photon Mass Attenuation and Energy-absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV", Int. J. Appl. Radiat. Isot., vol. 33., pp. 1269-1290(1982).
- [9] K.J. Kim, "Development of a Radioactive Waste Assay System", KEPRI-92N-J03(1996).