

우물형 감마검출기를 이용한 대기 낙진 중 극저준위 ^{137}Cs 측정

권은희^{1,2} · 이상한^{1,2†} · 허동혜¹ · 이종만^{1,2}

¹한국표준과학연구원, ²과학기술연합대학원대학교

Measurement of ultra-low-level of ^{137}Cs in the fallout using a well-type gamma spectrometry

Eun-Hee Kwon^{1,2}, Sang-Han Lee^{1,2†}, Dong-Hye Heo¹, and Jong-Man Lee^{1,2}

¹Korea Research Institute of Standards and Science (KRIS), Daejeon 34113, Rep. of Korea

²University of Science and Technology (UST), Daejeon 34113, Rep. of Korea

Received April 16, 2019/Revised May 27, 2019/Accepted May 28, 2019

The Korea Institute of Nuclear Safety (KINS) has been monitoring the radioactivity in the atmospheric fallout for a long time. Results show that ^{137}Cs was always below the Minimum Detectable Activity (MDA) except when the Fukushima Nuclear Power Plant accident occurred. The Ionizing Radiation Center at Korea Research Institute of Standards and Science (KRIS) also collected the atmospheric fallouts at the end of each month and measured ^{137}Cs using a well-type HPGe detector (GWL-300-15-s) since 2012. The annual ^{137}Cs depositions ranged from 79 to 225 mBq/m²/year. ^{137}Cs detected in the present atmospheric fallout is considered to be originated from the atmospheric nuclear bomb tests conducted by the USA and the former Soviet Union in the 1950s and early 1960s. The results of this study indicate that the well-type HPGe detector is more suitable for small size environmental samples (i.e., 0.5 - a few grams) and extreme low activity levels compared with the conventional detector (GEM90P4-95).

Key words: Well-type gamma spectrometry, Atmospheric fallout, ^{137}Cs , Fukushima Nuclear Power Plant accident

1. 서 론

환경 중 존재하는 인공방사성동위원소 ^{137}Cs ($T_{1/2}$: 30.05 y)은 1950년대 중반부터 1960년대초까지 미국과 옛 소련에 의해 수행된 대기 중 핵실험으로 인하여 환경 중에 대량으로 유출되었으며 (약 948 PBq) (UNSCEAR, 2000), 대기핵실험 금지조약 (1963년)체결 후 지수함수적으로 감소하다가, 1986년 구소련 체르노빌 핵발전소 사고로 인하여 추가적인 오염이 (약 85 PBq) 전 지구 규모로 발생하였다 (UNSCEAR, 2000).^{1,2)} 그 후 2011년 3월 발생한 대지진으로 인한 일본 후쿠시마 원전사고를 통하여 약 6-20 PBq의 ^{137}Cs 이 다시 환경 중에 유출되었다 (UNSCEAR, 2013).³⁾

대기 중 방출된 ^{137}Cs 은 대류권이나 상층권으로 확산

된 후 장기간에 걸쳐 강하물 (fallout)로서 지표 또는 수면에 떨어져 집적되어 왔다.^{4,6)} 특히 Cs은 물에 대한 용해성이 높기 때문에 지하수와 해수 등에서의 이동이 용이하고, 동·식물의 필수 원소인 K⁺과 화학적 거동이 유사하여 생물체에 이용성이 높아 최종적으로 생물농축에 의하여 인체에 흡수될 수 있다.^{7,8)} 따라서 ^{137}Cs 은 환경 방사능 감시와 관련하여 가장 중요하고 대표적인 감마방출핵종으로 인근 일본의 경우 1950년대 중반부터 낙진에서의 ^{137}Cs 농도를 측정해왔으며, 국내의 경우 1960년대 방사능 측정소를 설치함으로써 시작되었다.⁹⁻¹²⁾

현재는 한국원자력안전기술원 주관으로 각 지방측정소에서 강수 낙진 자동채집장비를 이용하여 월별낙진 시료를 채취하고 감마분광분석시스템을 이용하여 감마선방출핵종들을 측정하고 있다.¹²⁾ 낙진 중 ^{137}Cs 은 후

[†]To whom correspondence should be addressed.

쿠시마 원전사고 직후 수 개월 동안 측정되다가 그 후 현재까지 대부분의 측정기관에서 불검출 즉, MDA (minimum detectable activity)이하의 값을 보고하고 있다.¹²⁾ 대기 낙진 등과 같은 환경시료중에서 극 저준위 방사성핵종을 측정하기 위해서 다양한 조건 즉, 검출기의 측정기하 (measurement geometry)에 따른 효율, 시료 중량과 계측시간 등의 조건 등을 최적화시켜 MDA를 낮추어야 한다⁴⁾. 본 연구에서는 높은 측정 효율과 극소량의 시료 측정에 적합한 well-type High-Purity Germanium (HPGe)검출기를 이용하여¹³⁻¹⁶⁾ 최근 대기 낙진 중 ¹³⁷Cs을 측정하고 그 결과를 기술하였다. 또한 측정결과에 대한 품질보증을 위하여 IAEA-385 인증표준물질을 동시에 측정하여 측정결과의 유효성을 검증하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 대기낙진시료 채취 및 전처리

한국표준과학연구원 방사선동 옥상에 면적 1 m² 크기의 테플론으로 코팅 되고, 채집 장비 하단부에는 채취 용기가 설치되어 있는 대기 낙진 시료채집기 (쥘한진이엔아이)를 제작하여 설치하였다. 채취기간은 2011년 11월 이후부터 2018년 12월까지 수거된 낙진시료를 이용하였다. 낙진은 낙진채집수조에 약 30 L 증류수를 채운 후 1개월간의 낙진을 수집하여 매일 말일 낙진을 수거하였다. 수거한 시료는 용기 벽 등에 방사성물질의 흡착을 통한 손실을 방지하기 위하여 시료 1 L당 1 ml 염산원액을 첨가하여 보관하였다. 채취된 시료는 실험실로 옮겨 온 후 10 L glass beaker에 분할하여 90°C

로 설정된 가열판을 이용하여 증발하여 부피를 최소화 하였다. 이 후, 100 mL glass beaker로 옮겨 건조기를 이용하여 완전히 건조시킨 뒤 막자 사발을 이용하여 고운 입자로 분쇄한 후 시료용기에 충전하였다.

2.2. 검출기 에너지 및 효율 교정

측정에 사용된 감마분광분석시스템은 EG&G ORTEC 사 (Oak Ridge, Tenn., USA)의 well-type HPGe (GWL-300-15-s)이다. 우물형검출기의 상대 효율은 70 %이며, ⁶⁰Co의 1332.5 keV 감마선에 대하여 에너지 분해능(FWHM)은 2.26 keV이다. 우물형 감마검출기의 성능을 평가하기 위하여 사용된 비교용 감마검출기는 EG&G ORTEC사의 HPGe (GEM90P4-95)이다. GEM HPGe검출기의 상대 효율은 90 %이며, ⁶⁰Co의 1332.5 keV 감마선에 대하여 에너지 분해능 (FWHM)은 2 keV이다. 감마검출기의 교정은 표준과학연구원에서 인증한 혼합감마선원 (182MIX10STD, ref. 2018-05-01)을 사용하였으며, 혼합방사성선원들의 에너지와 방사능 농도를 Table 1에 표시하였다. 측정 용기는 한국표준과학연구원에서 자체 제작한 유리 재질의 직경 15 mm, 내경 13 mm, 높이 90 mm인 D15 용기를 사용하였다. 측정이 끝난 스펙트럼은 분석용 프로그램인 Gamma Vision (AMETEK ORTEC)을 이용하여 에너지와 효율 교정 및 스펙트럼을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 계측효율과 최소검출가능농도

우물형 (GWL) HPGe검출기와 GEM HPGe검출기

Table 1. Characteristics of standard gamma-ray sources

| Nuclide | Half-life (day) | Activity (Bq) | Energy (keV) | Yield |
|-------------------|-----------------|---------------|-------------------|-------------------------------|
| ²⁴¹ Am | 158004 ± 219 | 553 ± 22 | 59.54 | 35.9 ± 0.06 |
| ¹⁰⁹ Cd | 461.9 ± 0.4 | 2658 ± 106 | 88.03 | 3.66 ± 0.002 |
| ⁵⁷ Co | 271.8 ± 0.04 | 114 ± 5 | 122.06 136.47 | 85.49 ± 0.12 10.71 ± 0.02 |
| ¹³⁹ Ce | 137.6 ± 0.02 | 142 ± 6 | 165.86 | 79.90 ± 0.03 |
| ⁵¹ Cr | 27.7 ± 0.004 | 11387 ± 455 | 320.08 | 9.89 ± 0.002 |
| ¹¹³ Sn | 115.1 ± 0.03 | 263 ± 11 | 391.7 | 64.97 ± 0.1 |
| ⁸⁵ Sr | 64.9 ± 0.01 | 441 ± 18 | 514 | 98.50 ± 0.4 |
| ¹³⁷ Cs | 10976 ± 29 | 265 ± 11 | 661.66 1173.23 | 84.99 ± 0.2 99.85 ± 0.03 |
| ⁶⁰ Co | 1925 ± 0.3 | 312 ± 12 | 1332.49 | 99.98 ± 0.001 |
| ⁸⁸ Y | 106.63 ± 0.05 | 679 ± 27 | 898.04 1836.05 | 93.70 ± 0.28 99.35 ± 0.025 |

Table 2. The comparison of counting efficiency between the GWL and the GEM gamma spectrometry

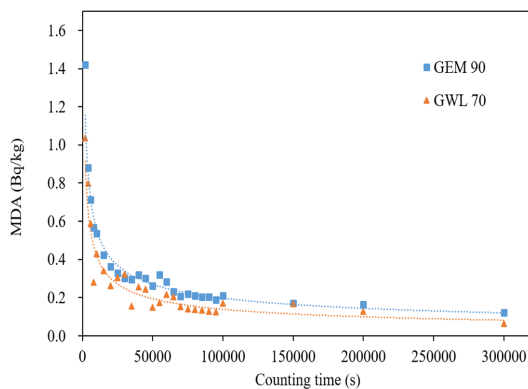
| Nuclide | Half-life (day) | Activity (Bq) | Energy (keV) | Yield | Counting Efficiency (%) | |
|-------------------|-----------------|---------------|--------------|-------------|-------------------------|------------|
| | | | | | GEM 90 | GWL 70 |
| ¹³⁷ Cs | 10976 ± 29 | 265 ± 11 | 661.66 | 84.99 ± 0.2 | 3.8 ± 0.04 | 18.2 ± 0.2 |

의 특성을 파악하기 위하여 D15용기에 제작된 교정용 표준선원을 각각 GEM HPGe검출기와 GWL HPGe검출기로 측정된 결과를 Table 2에 나타내었다. ¹³⁷Cs의 고유에너지인 662 keV에서 GEM HPGe 검출기는 약 4% 계측 효율을 나타낸 반면, GWL HPGe검출기는 18%를 기록하며 상대적으로 높은 계측 효율을 나타내었다. 이때 각각 감마검출기의 계측효율은 Table 1의 인증표준물질을 D15용기에 제작하여 두 검출기에서 각각 2,000 초씩 측정하여 계산하였다.

시료 중 방사능 농도 측정 시 방사능 존재 유무를 평가하는 근거로 사용되는 최소검출가능 농도 (Minimum detectable activity level, MDA)는 계측 효율, 시료양, 측정 시간과 핵종방출률이 클수록 낮게 된다.¹⁷⁾

$$MDA = \frac{2.71 + 4.65 \times \sqrt{B}}{\epsilon \times m \times t \times Y}$$

여기서 B는 백그라운드 계수치, ϵ 는 계측효율, m은 시료양, t는 계측시간 Y는 분석핵종의 방출률이다. 따라서 시료의 방사능의 농도가 극히 낮을 때는 가능한 조건들을 동원하여 MDA를 최대한 낮추어서 시료를 측정해야 효과적이다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 상대효율 70% GWL HPGe검출기와 일반적으로 사용되는 상대 효율 90% GEM HPGe검출기의 MDA를 평가하여 상호 비교한 그림이다. 두 감마검출기는 50,000 초까지 급격히 MDA가 낮아졌지만, 그 이후에는 완만한

**Fig. 1.** MDA of the measuring time between the two detectors.

감소세를 나타내었다. 또한 전체 측정시간 동안 GWL HPGe검출기에서 GEM HPGe검출기보다 낮은 MDA를 보여주었다. 결과적으로 극 저준위 시료 측정 시 50,000 초까지는 효과적으로 MDA를 낮추어 주지만 그 이후에는 측정 시간의 연장이 MDA를 극적으로 낮추는 효과를 보여 주시는 못한다는 것을 보여주었다.

3.2. 대기 낙진 시료량 차이에 따른 계측효율보정

대기 낙진 시료의 경우 월별로 시료양이 일정하지 않고 시료양이 적을 경우 교정된 높이까지 채우기에 충분하지 않아 정확한 측정결과를 얻을 수 없다. 따라서 본 연구에서는 높이 별 교정용 표준선원을 제작하고 측정하여 각각에 대한 계측효율을 산출하였으며 (Fig. 2.), 시료 별 높이에 따른 계측효율값을 적용함으로써 최종적으로 대기 낙진 시료의 방사능농도를 계산하였다.

시료 중 ¹³⁷Cs의 방사능 농도는 다음 식에 의하여 계산된다.

$$A = \frac{N}{\epsilon \times \gamma \times t_s \times K} \times \frac{1000}{M}$$

이때,

A = ¹³⁷Cs의 비방사능 농도 (Bq/kg),

N = 662 keV에서 ¹³⁷Cs의 순 photopeak 계측 값,

ϵ = 662 keV에서 ¹³⁷Cs의 photopeak 효율,

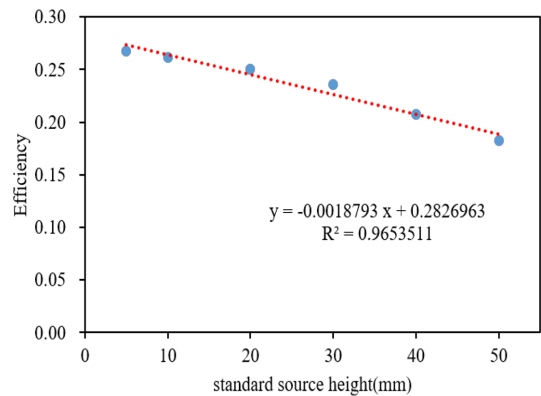
**Fig. 2.** Detector efficiency variation with radionuclide standard source height

Table 3. Analytical results of ¹³⁷Cs for IAEA reference material (reference date, 1996-01-01)

| Sample height (mm) | IAEA - 385 (sediment) | | |
|--------------------|-----------------------|---|--------------------|
| | Bq/kg (<i>k</i> = 2) | | |
| | This study | Reference value (decay correction value) | standard deviation |
| 5 | 32.7 ± 2.4 | 33 ± 0.9 | -0.9% |
| 10 | 34.6 ± 2.7 | | 4.8% |
| 20 | 32.2 ± 2.0 | | -2.5% |
| 30 | 34.62.7 | | 4.8% |
| 40 | 33.7 ± 2.6 | | 2.0% |
| 50 | 34.4 ± 2.4 | | 4.3% |

γ = 662 keV에서 ¹³⁷Cs의 gamma 방출량,
 t_s = 시료계측시간,
 M = 시료 질량 (g),
 K = 붕괴보정 factor

한편, 계측효율은 시료 높이에 따라 달라져 측정결과 값에 영향을 준다. 특히 낙진 시료양은 월별로 크게 차이가 나기에 시료양 (시료높이)에 따른 계측 효율 보정이 필요하다. 본 연구에서는 이에 대한 검증 절차로 IAEA-385 (Irish Sea sediment) 인증표준물질 (International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria) 을 높이별로 제작하여 ¹³⁷Cs를 측정하였다. 그 결과 측정값과 인증값이 최대 불확도 4.8 % (*k* = 2)범위 내에서 일치하는 것으로 나타나, 본 연구에서 적용한 측정방법의 유효성을 검증하였다 (Table 3).

3.3 우물형 감마 검출기를 이용한 대기 낙진 중 ¹³⁷Cs 측정

대기 낙진 시료에 대한 인공방사성핵종 그 중에서도

¹³⁷Cs에 대한 지속적인 감시 및 측정이 한국원자력안전기술원 주관으로 전국 지방환경방사능 측정소에서 전국적으로 수행되어왔다.¹²⁾ 시료 채취는 월간 누적된 낙진 시료를 사용하였으며 측정에 사용된 감마검출기는 본 연구에서 사용된 우물형 (GWL) HPGe검출기가 아닌 GEM형 HPGe검출기를 사용하였다. Fig 3은 2011년 이후 한국표준과학연구원에서 측정한 연도별 ¹³⁷Cs 낙진량과 KINS 환경방사선모니터링를 통하여 보고된 2001~2017년까지 연도별 ¹³⁷Cs 변동추이를 그래프로 나타내었다 (이때 한국원자력안전기술원에서 보고된 MDA 값을 최대 낙진량으로 추정). 2011년 후쿠시마 원전사고 이전 즉, 2001~2010년의 연간 누적된 ¹³⁷Cs 낙진량은 340~550 mBq/m²/year의 범위의 농도를 보였으나 2011년에는 후쿠시마 원전사고의 영향으로 1,300 mBq/m²의 ¹³⁷Cs 낙진량이 측정되었다. 후쿠시마 원전사고 낙진이 한반도에 영향을 미쳤다는 것은 후쿠시마 원전사고 이후 국내에서 진행된 몇몇 연구에서 증명되었다¹⁸⁻²⁰⁾. 그러나 2012~2017년도에는 480~670

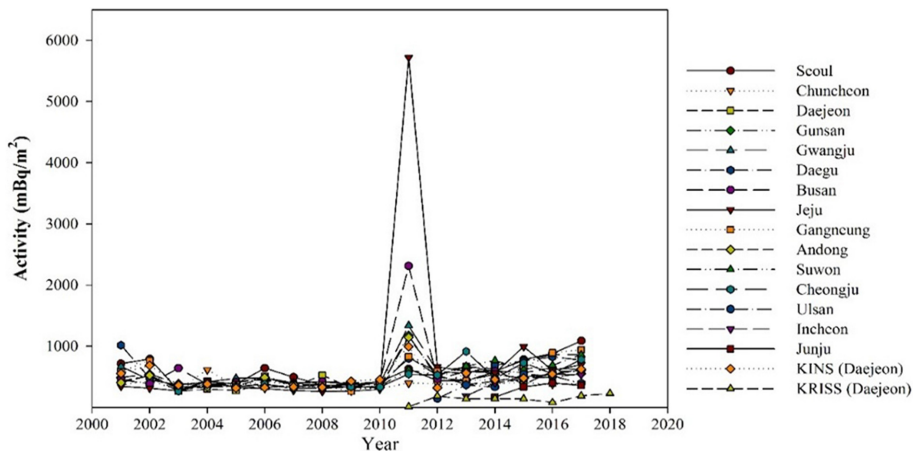


Fig. 3. Annual variation of ¹³⁷Cs in the fallout.

mBq/m²/year 범위의 농도로 후쿠시마 원전사고 이전 ¹³⁷Cs 낙진량과 유사한 값을 보여 주었다. 그러나 이들 ¹³⁷Cs값은 GEM HPGe검출기를 통하여 측정된 MDA 값을 최대 ¹³⁷Cs 낙진량으로 추정하여 계산한 결과로서

실제 낙진량 보다는 ¹³⁷Cs량이 과대 평가되었을 것으로 추정된다. 본 연구에서는 우물형 HPGe검출기를 이용하여 2012년부터 2018년까지 대기낙진에서 ¹³⁷Cs을 측정하였고 결과를 Table 4에 나타내었다. 이를 통하여

Table 4. Analytical results of ¹³⁷Cs for fallout by well-type HPGe (GWL-300-15-s)

| Date of sampling | ¹³⁷ Cs (mBq/m ²) | | | Date of sampling | ¹³⁷ Cs (mBq/m ²) | | |
|------------------|---|-------------------------|-----|------------------|---|-------------------------|------|
| | Fallout deposition | Uncertainty ($k = 1$) | MDA | | Fallout deposition | Uncertainty ($k = 1$) | MDA |
| Nov-2011 | 5.21 | 0.32 | | Jun-2015 | 6.12 | 0.34 | |
| Dec-11 | 4.88 | 0.26 | | Jul-15 | 6.12 | 0.35 | |
| Jan-12 | 9.78 | 0.23 | | Aug-15 | 6.48 | 0.27 | |
| Feb-12 | 7.82 | 0.33 | | Sep-15 | 6.53 | 0.26 | |
| Mar-12 | 29.39 | 0.62 | | Oct-15 | 8.23 | 0.31 | |
| Apr-12 | 33.88 | 0.68 | | Nov-15 | 7.35 | 0.28 | |
| May-12 | 15.31 | 0.51 | | Dec-15 | 8.27 | 0.32 | |
| Jun-12 | 20.22 | 0.35 | | Jan-16 | <MDA | | 3.08 |
| Jul-12 | 7.27 | 0.29 | | Feb-16 | 16.28 | 0.44 | |
| Aug-12 | 8.15 | 0.35 | | Mar-16 | 8.13 | 0.29 | |
| Sep-12 | 6.97 | 0.37 | | Apr-16 | 7.29 | 0.30 | |
| Oct-12 | 7.89 | 0.38 | | May-16 | 11.29 | 0.37 | |
| Nov-12 | 14.14 | 0.47 | | Jun-16 | 3.18 | 0.19 | |
| Dec-12 | 22.92 | 0.65 | | Jul-16 | 3.40 | 0.19 | |
| Jan-13 | 4.75 | 0.27 | | Aug-16 | 8.39 | 0.31 | |
| Feb-13 | 13.40 | 0.37 | | Sep-16 | <MDA | | 2.81 |
| Mar-13 | 20.81 | 0.51 | | Oct-16 | <MDA | | 2.83 |
| Apr-13 | 28.45 | 0.64 | | Nov-16 | 6.93 | 0.27 | |
| May-13 | 6.25 | 0.27 | | Dec-16 | 5.00 | 0.23 | |
| Jun-13 | 7.34 | 0.29 | | Jan-17 | 16.69 | 0.45 | |
| Jul-13 | 9.53 | 0.33 | | Feb-17 | 19.07 | 0.51 | |
| Aug-13 | 12.10 | 0.38 | | Mar-17 | 11.03 | 0.83 | |
| Sep-13 | 7.58 | 0.40 | | Apr-17 | 16.49 | 1.39 | |
| Oct-13 | 7.38 | 0.37 | | May-17 | 47.80 | 1.25 | |
| Nov-13 | 4.94 | 0.30 | | Jun-17 | 19.56 | 1.04 | |
| Dec-13 | 17.23 | 0.52 | | Jul-17 | <MDA | | 2.79 |
| Jan-14 | 11.18 | 0.38 | | Aug-17 | <MDA | | 1.12 |
| Feb-14 | 9.23 | 0.32 | | Sep-17 | <MDA | | 2.79 |
| Mar-14 | 25.18 | 0.72 | | Oct-17 | 20.94 | 1.08 | |
| Apr-14 | 16.80 | 0.61 | | Nov-17 | 11.93 | 0.78 | |
| May-14 | 12.95 | 0.44 | | Dec-17 | 17.55 | 0.98 | |
| Jun-14 | 8.77 | 0.42 | | Jan-18 | 25.14 | 1.23 | |
| Jul-14 | 6.98 | 0.38 | | Feb-18 | 20.73 | 1.07 | |
| Aug-14 | 9.37 | 0.41 | | Mar-18 | 12.45 | 0.79 | |
| Sep-14 | 7.86 | 0.33 | | Apr-18 | 43.27 | 1.69 | |
| Oct-14 | 9.71 | 0.33 | | May-18 | 21.42 | 1.13 | |
| Nov-14 | 14.17 | 0.40 | | Jun-18 | 19.50 | 1.03 | |
| Dec-14 | 11.43 | 0.37 | | Jul-18 | 54.71 | 4.18 | |
| Jan-15 | 11.30 | 0.46 | | Aug-18 | 6.03 | 0.49 | |
| Feb-15 | 16.21 | 0.41 | | Sep-18 | 8.29 | 0.37 | |
| Mar-15 | 29.60 | 0.79 | | Oct-18 | 3.16 | 0.29 | |
| Apr-15 | 14.16 | 0.56 | | Nov-18 | 4.10 | 0.33 | |
| May-15 | 16.87 | 0.64 | | Dec-18 | <MDA | | 6.20 |

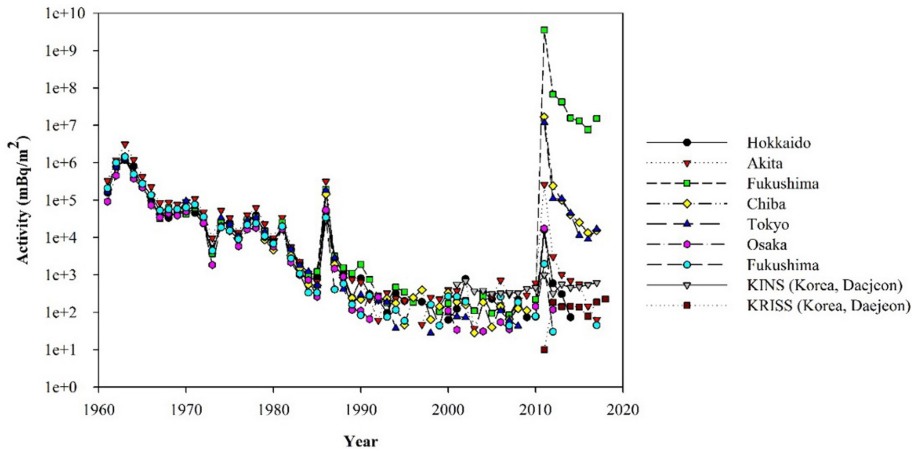


Fig. 4. The annual variation of ^{137}Cs (mBq/m^2) deposition through atmospheric input observed in S. Korea (Daejeon) and Japan

얻어진 연간 ^{137}Cs 낙진량은 $79\sim 225 \text{ mBq}/\text{m}^2/\text{year}$ 로 한국원자력안전기술원에서 보고한 값보다는 대체적으로 낮은 값을 나타내었다. 한편 본 연구를 통하여 2011년 11월부터 2018년 12월기간까지 측정된 연간 ^{137}Cs 낙진량은 2011년 후쿠시마 원전사고 당시 대전에 강하한 ^{137}Cs 의 양 ($1300 \text{ mBq}/\text{m}^2$)의 6~17%범위를 나타내었다.

일본화학분석센터 (Japan Chemical Analysis Center: JCAC)에서 측정된 ^{137}Cs (mBq/m^2) 낙진에 대한 연평균 변동추이를 한국원자력안전기술원과 한국표준과학연구원에서 측정된 결과와 함께 나타내었다 (Fig. 4). 1950-60년대 초반까지 미국과 구 러시아에서 수행했던 빈번한 대기핵실험으로 1960년대 초반 많은 양의 ^{137}Cs 낙진량이 대기를 통하여 유입됨을 볼 수 있으며 그 후 대기 핵실험금지조약 (1963년)으로 지속적으로 감소하다가 1986년 체르노빌원전사고로 다시 한번 상당량의 ^{137}Cs 이 대기를 통하여 유입되었음을 볼 수 있다. 또한 1990년대 이후부터 후쿠시마 원전사고 당해 (2011년)년도를 제외하고 현재까지 비교적 일정한 양의 유입이 대기를 통하여 유입되는데 이는 대기 중 분포하는 대부분의 인공방사성동위원소 기원이 과거에서 최근까지도 토양지표면에 축적된 ^{137}Cs 이 바람 등 다양한 기상 요인에 의하여 재부유 되어 측정되는 것으로 사료된다. 한편, 후쿠시마원전 사고의 영향으로 일본은 과거 대기 핵실험과 체르노빌 원전사고보다 훨씬 많은 양의 ^{137}Cs 낙진이 발생한 것을 볼 수 있으며 그 후 급격히 감소하는 양상을 보이나 현재까지도 후쿠시마원전사고 이전보다 높은 낙진량을 보여주고 있다. 국내의 경우 ^{137}Cs 낙진량은 후쿠시마 원전사고가 일어난 2011년 크

게 증가한 후 일본과 달리 2012년부터는 후쿠시마원전 사고 이전 측정값과 거의 유사한 분포를 보여준다. 그럼에도 불구하고 대기를 통한 추가적인 후쿠시마 원전 사고기원 방사성낙진 유입의 정확한 평가를 위하여서는 지속적인 모니터링이 필요한 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 우물형 HPGe검출기를 사용하여 대기 낙진 중 극 저준위 ^{137}Cs 을 분석하고 이를 통하여 후쿠시마원전 이후 국내에 유입되는 ^{137}Cs 의 분포 특성을 파악하였다. 우물형 (GWL) HPGe검출기 (GWL)는 일반적으로 쓰이는 GEM HPGe 검출기에 비하여 최소검출가능농도 (MDA)가 낮고 적은 양의 시료를 취하여도 측정이 가능하여 대기 낙진과 같은 환경, 식품시료에서 극 저준위 ^{137}Cs 을 측정하기에 적합한 것으로 나타났다. 두 가지 종류의 검출기 모두 시료 계측 시간이 50,000 초까지는 MDA가 급격히 낮아지다가 그 이후에는 완만한 감소경향을 나타내었다. 2012년부터 2018년까지 대기낙진에서 ^{137}Cs 을 측정하였고 이를 통하여 얻어진 연간 ^{137}Cs 낙진량은 $79\sim 225 \text{ mBq}/\text{m}^2/\text{year}$ 로 나타났으며, 이 양은 일본화학분석센터가 대기낙진시료에서 분석한 후쿠시마 원전사고 이전 측정값과 유사하였다. 결론적으로 우물형 HPGe 검출기는 수 gram 이하 소량의 시료 및 낮은 방사능 농도 (최소검출한계 약 $0.2 \text{ Bq}/\text{kg}$)를 가진 시료 즉, 대기낙진, 해양퇴적물등의 시료 중 방사능을 측정할 때 매우 유용한 검출기로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국표준과학연구원 방사선측정표준확립 연구사업 (19011053)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Laboratories National Henri Becquerel, http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm, December 2018.
2. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, "Sources and Effects of Ionizing Radiation", **2000**.
3. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, "Sources and Effects of Ionizing Radiation", **2013**.
4. S. H. Lee, D. H. Heo, H. B. Kang, P. J. Oh, J. M. Lee, T. S. Park, K. B. Lee, J. S. Oh and J. K. Suh, "Distribution of ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ concentrations in Korean rainwater after the Fukushima nuclear power plant accident", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **2013**, 296, 727-731.
5. J. S. Oh, S. H. Lee, J. K. Choi, J. M. Lee, K. B. Lee and T. S. Park, "Atmospheric input of ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ isotopes in Korea after the Fukushima nuclear power plant accident", *Applied Radiation and Isotopes*, **2014**, 87, 53-56.
6. S. H. Lee, J. S. Oh, K. B. Lee, J. M. Lee, S. H. Hwang, M. K. Lee, E. H. Kwon, C. S. Kim, I. H. Choi, I. Y. Yeo, J. Y. Yoon and J. M. Im, "Evaluation of abundance of artificial radionuclides in food products in South Korea and sources", *Journal of Environmental Radioactivity*, **2018**, 184-185, 45-52.
7. D. Delacroix, J. P. Guerre, P. Leblanc and C. Hickman, "RADIONUCLIDE AND RADIATION PROTECTION DATA HANDBOOK", **2002**, 2nd Ed.
8. S. V. Avery, "Caesium accumulation by microorganisms: uptake mechanisms, cation competition, compartmentalization and toxicity", *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, **1995**, 14, 76-84.
9. National Institute of Radiological Sciences, "Radioactivity survey data in Japan", 1963-2011.
10. Nuclear Regulatory Authority, <http://search.kankyo-hoshano.go.jp/servlet/search.top>, December 2018
11. 김창규, 이승찬, 이동명, 노병환, "대전지역 대기부 유진, 낙진 및 강수 중 ^7Be 및 ^{137}Cs 방사능 농도의 계절별 변화", *방사선방어학회지*, **2002**, 27, 11-19.
12. 한국원자력안전기술원, "전국환경방사능조사", **2001-2018**.
13. 한정희, 최만식, "동해 남서부 해역에서 210Pb를 이용한 퇴적속도 추정", *한국해양학회지*, **2007**, 12, 273-279.
14. M. Aoyama, K. Hirose, T. Miyao and Y. Igarashi, "Low level ^{137}Cs measurements in deep seawater samples", *Applied Radiation and Isotopes*, **2000**, 53, 159-162.
15. Sai'dou, F. Bochuda, J. P. Laedermann, M.G. K. Njockb and P. Froidevaux, "A comparison of alpha and gamma spectrometry for environmental natural radioactivity surveys", *Applied Radiation and Isotopes*, **2007**, 66, 215-222.
16. P. G. Appleby and G. T. Piliposian, "Efficiency corrections for variable sample height in well-type germanium gamma detectors", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **2004**, 225, 423-433.
17. L. A. Currie, "Limits for Qualitative Detection and Quantitative Determination", *Journal of Analytical Chemistry*, **1968**, 40, 586-593.
18. G. H. Hong, M. A. Hernández-Ceballos, R. L. Lozano, Y. I. Kim, H. M. Kim, S. H. Kim, S. W. Yeh, J. P. Bolívar and M. Baskaran, "Radioactive impact in South Korea from the damaged nuclear reactors in Fukushima: evidence of long and short range transport", *Journal of Radiological Protection*, **2012**, 32, 397-411 doi:10.1088/0952-4746/32/4/397.
19. C. K. Kim, J. I. Byun, J. S. Chae, H. Y. Choi, S. W. Choi, D. J. Kim, Y. J. Kim, D. M. Lee, W. J. Pack, S. A. Yim and J. Y. Yun, "Radiological impact in Korea following the Fukushima nuclear accident", *Journal of Environmental Radioactivity*, **2012**, 111, 70-82.
20. K. H. Park, T. W. Kang, W. J. Kim and J. W. Park, " ^{134}Cs and ^{137}Cs radioactivity in soil and moss samples of Jeju Island after Fukushima nuclear reactor accident", *Applied Radiation and Isotopes*, **2013**, 81, 379-382.