

HPGe 검출기를 사용한 감마분광분석계의 점검선원 개발

이모성

청주대학교 이공대학

2013년 5월 21일 접수 / 2013년 6월 7일 1차 수정 / 2013년 6월 10일 채택

HPGe 검출기를 사용하는 감마 분광분석계의 건전성을 점검하기 위한 실험실 선원이 개발되었다. 점검 선원은 0.154 mm 이하의 라듐이 풍부한 토양을 밀봉된 원통형 시료 용기에 담은 것으로, 검출기 교정에 사용할 12 개의 감마선이 방출된다. 점검 선원의 스펙트럼은 1년 동안 1개월 간격으로 측정하였으며, 스펙트럼에 나타난 감마선 피크들의 특성을 조사하였다. 감마 분광분석계가 정상일 때 라듐과 그 붕괴 생성물에서 3% 이상 방출률을 갖는 감마선들의 피크 면적과 반치폭은 77 keV 피크를 제외하고는 각각 표준편차 2%와 3% 이내에서 일정하였다. 따라서 점검 선원은 77 keV부터 2202 keV까지 영역에 있는 10개의 피크를 사용하여 분광분석계의 건전성을 점검하는데 충분한 것으로 판단되었다.

중심어: HPGe 검출기, 검출기 교정, 교정 선원, 점검선원, ²²⁶Ra

1. 서론

국가표준기본법에 따라 방사능 측정기도 주기적으로 교정을 하여야 한다[1]. 교정 주기는 측정기의 정확도, 안정성, 사용목적, 환경 및 사용빈도 등을 감안하여 자체적으로 정하는 것이 어렵기 때문에, 보통은 기술표준원에서 설정한 6 개월 주기로 정하고 있다[2]. 이와 같은 주기적 측정기의 교정 이외에도 측정기의 수리나 설정에 변화가 있을 경우에도 교정이 필요하다. HPGe 검출기와 다중과도 분석기로 이루어진 감마분광분석계는 에너지 및 피크의 분해능, 피크 효율 등의 교정이 필요하다[3,4]. 그런데 피크의 분해능과 피크 효율은 에너지에 따라 변하므로, 50 keV부터 3,000 keV까지 방사선을 방출하는 여러 핵종들이 혼합된 선원을 교정에 사용한다[5]. 보통은 ²⁴¹Am, ¹⁰⁹Cd, ⁵⁷Co, ¹³⁹Ce, ²⁰³Hg, ¹¹³Sn, ⁸⁵Sr, ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co, ⁸⁸Y 등의 핵종들이 혼합된 선원 혹은 이들 핵종 중에서 ¹³⁹Ce와 ²⁰³Hg 대신 ¹²³Te, ⁵¹Cr으로 교체된 혼합 선원도 사용되고 있다[6]. 교정용 선원에 포함된 핵종들 중에서 ¹³⁹Ce, ²⁰³Hg, ^{123m}TE, ⁵¹Cr, ¹¹³Sn, ⁸⁵Sr, 그리고 ⁸⁸Y 등은 반감기가 각각 137 일, 46.6 일, 119 일, 28 일, 115 일, 64.5 일, 106 일 등으로, 교정시 사용되는 표준선원의 방사능이 교정 주기 이내에 10% 이하로 감소할 수도 있다. 예를 들어 ²⁰³Hg은 5 개월이 지나면 교정 당시 방사능의 10%가 된다. 따라서 교정 주기 이내에 다시 교정이 필요할 경우

교정 선원의 재 사용이 곤란한 경우가 발생한다. 이 경우에는 제한적으로 측정기 교정의 필요성 여부를 판단할 수 있는 선원이 필요하다.

반감기가 수년 이상이면서 대략 2,000 keV 미만의 감마선을 방출하는 핵종 중에 ¹⁵²Eu와 ²²⁶Ra이 있다. 이 중에서 ²²⁶Ra은 토양에 존재하는 자연 방사성 핵종이므로 측정기의 교정 여부를 포함하여 건전성을 점검하는데 유용할 것으로 판단된다. ²²⁶Ra과 그 붕괴 생성물들이 방사성 평형을 이루면 3% 이상의 붕괴율로 186 keV부터 2,204 keV까지 12개의 감마선들이 방출된다[7]. 이들 감마선의 대부분은 다단붕괴하며 다른 감마선들과 동시에 방출되므로, 감마선 스펙트럼을 측정할 때 이들 감마선 피크에 동시합성 효과가 발생한다. 따라서 피크 효율의 교정을 위한 선원으로는 적합하지 않다. 그렇지만 ²²⁶Ra과 그 붕괴 생성물들이 방사성 평형을 이루게 되면, 이 핵종들로부터 방출되는 각 감마선의 강도는 일정하게 된다. 따라서 피크 효율이 교정된 감마 분광분석계로 측정된 ²²⁶Ra 선원의 스펙트럼에서 각 감마선 피크의 계수율을 감마 분광분석계의 건전성을 평가할 수 있을 가능성이 있다.

이 연구에서는 충청북도 괴산군 청천면 덕평리의 폐우라늄 광산에서 채취한 우라늄 함량이 높은 토양을 HPGe 검출기를 사용하는 분광분석계의 건전성 점검을 위한 선원으로 사용 가능성을 타진하였다.

교신저자 : 이모성, leems@cju.ac.kr
청주시 흥덕구 분평동 우성 아파트 102동 1207

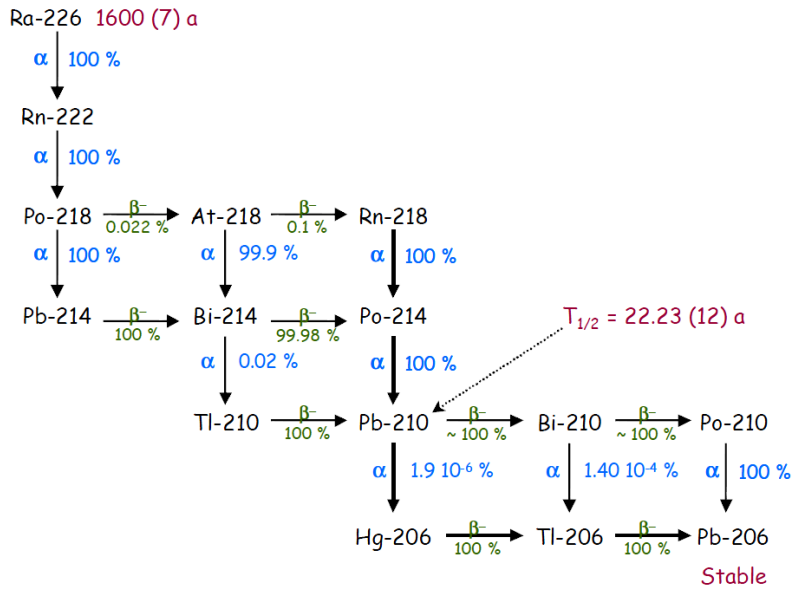


Fig. 1. ²²⁶Ra radioactive decay chain [7].

2. 재료 및 방법

2.1 ²²⁶Ra의 방사능 붕괴

²²⁶Ra은 1,600 년의 반감기로 Fig. 1과 같은 붕괴 사슬에 따라 안정된 ²⁰⁶Pb 원소로 붕괴한다. 이 과정에서 생성되는 ²²²Rn은 3.8 일의 반감기를 갖는 불활성 방사성 기체이어서 ²²⁶Ra 선원이 밀봉되지 않는다면, 생성된 다수의 ²²²Rn이 선원 외부로 이탈하게 된다.

²²²Rn의 이탈을 방지하여, ²²⁶Ra과 그 붕괴 생성물들이 방사성 평형 상태가 되었을 때, 이 선원으로부터 방출되는 광자의 에너지와 방출률 등을 Table 1에 보였다. 표의 감마선들을 분광분석계의 교정에 사용하기 위해서는 ²²⁶Ra으로부터 ²¹⁴Po까지의 방사성 평형 유지가 필요하다. 이 붕괴 사슬에 있는 핵종 중 ²²²Rn의 반감기가 3.8 일로 가장 길며, 나머지는 30분 미만이다. 따라서 이들 핵종들

Table 1. Energies and Emission Rates of Photons Emitted in Radioequilibrium State of ²²⁶Ra and its Decay Products.

Energy (keV)	Photons per 100 disint.	Emitted Photon	Nuclide
186.211	3.56	Gamma	²²⁶ Ra
241.997	7.27	Gamma	²¹⁴ Pb
295.224	18.41	Gamma	²¹⁴ Pb
351.932	35.60	Gamma	²¹⁴ Pb
609.312	45.49	Gamma	²¹⁴ Bi
768.356	4.892	Gamma	²¹⁴ Bi
934.061	3.10	Gamma	²¹⁴ Bi
1120.287	14.91	Gamma	²¹⁴ Bi
1238.111	5.83	Gamma	²¹⁴ Bi
1377.669	3.97	Gamma	²¹⁴ Bi
1764.494	15.31	Gamma	²¹⁴ Bi
2204.210	4.91	Gamma	²¹⁴ Bi

은 방사성 평형 상태에 도달하는데에는 약 4주가 소요된다. 한편 이 선원으로부터 1377.669 keV의 감마선까지는 200 keV 미만의 간격으로, 그리고 그 이상에서는 500 keV 미만의 간격으로 2204.21 keV까지 광자를 방출하고 있다. 따라서 스펙트럼의 에너지 교정 및 분해능 교정에 사용하는데에는 적합하다.

2.2 점검선원의 제작

감마선 분광분석계의 건전성을 점검하기 위한 선원은 괴산군 청천면 덕평리의 폐 우라늄 광산에서 채취한 암석을 0.154 mm 이하로 분쇄하여 사용하였다. HPGe 검출기로 이 암석의 스펙트럼을 측정하여 ²²⁶Ra의 방사능 농도를 평가한 결과 그 농도는 $6.79 \pm 0.03 \text{ Bq g}^{-1} (k=1)$ 이었다. 방사성 평형된 1 Bq의 ²²⁶Ra 핵종으로부터 방출되는 Table 1에 제시된 감마선들의 총 개수는 초당 1.83개이므로, 분쇄된 암석 30 g에서는 초당 375개의 감마선이 방출된다. 이러한 세기의 방사능을 갖는 방사선원에서 25% 효율의 HPGe 검출기를 사용하는 분광분석계에서 불감 시간이 0.5% 이내가 되므로, 분쇄된 토양 30.88 g을 48φ×62 mm² 크기의 플라스틱으로 만들어진 원통형 시료 용기(U-8)에 담았다. 토양으로부터 생성되는 라돈이 용기 외부로 방출되는 것을 방지하기 위해, 용기를 밀봉할 속 뚜껑을 플라스틱으로 제작하였다. 이 플라스틱 속 뚜껑을 분쇄한 암석이 위치한 곳까지 밀어 넣은 다음, Fig. 2에서 처럼 속 뚜껑과 U-8 용기를 에폭시로 밀봉하였다. 속 뚜껑의 역할은 분쇄된 토양으로부터 방출된 라돈 기체 및 그로부터 생성되는 붕괴 생성물들이 분쇄된 토양과 함께 위치하도록 하여, 토양이 위치한 부분과 토양 상층부에서 라돈 붕괴 생성물들의 방사능 농도 차이에 의한 검출 효율의 변화를 방지하기 위한 것이다.



Fig. 2. Check source with soil.

2.3 감마분광분석계

점검선원의 효용성을 검사하기 위한 감마분광분석계는 상대 효율이 25%인 p-형 HPGe 검출기(Canberra GC2520) 및 8192 채널의 ADC를 갖는 다중과도 분석기(Canberra DSA1000)로 구성되어 있다. 이 분석계는 2002년에 구입하여 현재까지 사용되고 있는 것으로, 그동안 고장에 의한 수리는 전혀 없었다. 사용하는 동안 2년에 한번씩 액체 혼합 교정 선원으로 에너지 및 피크의 분해능, 피크 효율 등을 교정하여 왔으며, 각 물리량의 변화는 교정값이 갖는 불확도 이내에서 일정하였다. 에너지 교정 함수의 2차 항이 갖는 상수는 대략 -5×10^{-8} 으로 8,000 채널에서 3,000 keV일 때 -30 keV 정도 벗어나고 있다. 이 감마분광분석계로 측정되는 스펙트럼 피크의 반

치폭은 1,332 keV의 감마선 피크에 대해 1.8 keV이다.

점검선원의 감마선 에너지 스펙트럼은 2012년 1월부터 1개월 간격으로 측정하였으며, 매 측정시간은 각각 80,000 초씩이었다.

3. 결과 및 논의

Fig. 3은 점검선원 제작 후 11 개월이 경과한 후 80,000 초 동안 측정한 점검선원의 감마선 에너지 스펙트럼이다. 그림에서 보는 바와 같이 3,000 keV 까지 에너지 교정이나 분해능 교정에 사용할 수 있는 여러 개의 피크들이 적절한 간격으로 나타나고 있다. 그림에 표시한 에너지 피크들 중 77 keV 피크를 제외하고는 모두 단일 피크로 나타나고 있다. 77 keV 피크는 ^{214}Pb 로부터 6.26%, 10.47%의 율로 방출되는 KX 선인 74.816 keV와 77.109 keV, 그리고 ^{214}Bi 로부터 0.427, 0.712%의 율로 방출되는 KX 선인 76.864 keV, 79.293 keV의 X-선에 의한 것이다. 단일 감마선 에너지 피크들은 스펙트럼 분석 프로그램에서 피크의 에너지 교정이나 분해능 교정에서 중첩 피크의 분리에 따른 불확도를 감소시킨다.

Fig 4는 U-8 용기에 액체 혼합 선원이 10 mm까지 담긴 교정선원의 1,173 keV 감마선 피크와 점검선원의 1,120 keV 감마선 피크를 감마 스펙트럼 분석 프로그램인 Genie2000 V3.0B로 피크 분석한 결과를 보인 것이다. 교정선원과 점검선원으로부터 방출되는 감마선의 강도 차이로 1,173 keV 감마선과 1,120 keV 감마선 피크의 계수율은 각각 4.008 c s^{-1} 와 0.516 c s^{-1} 로 차이가 있으나, 각 피크의 반치폭은 1.671 keV와 1.652 keV로 일치하고 있다. 그리고 피크를 만드는 계수들도 Genie2000 분석 프로그램에서 주어지는 피크 함수에 $\pm 2\%$ 이내에서 잘 일치하고 있다.

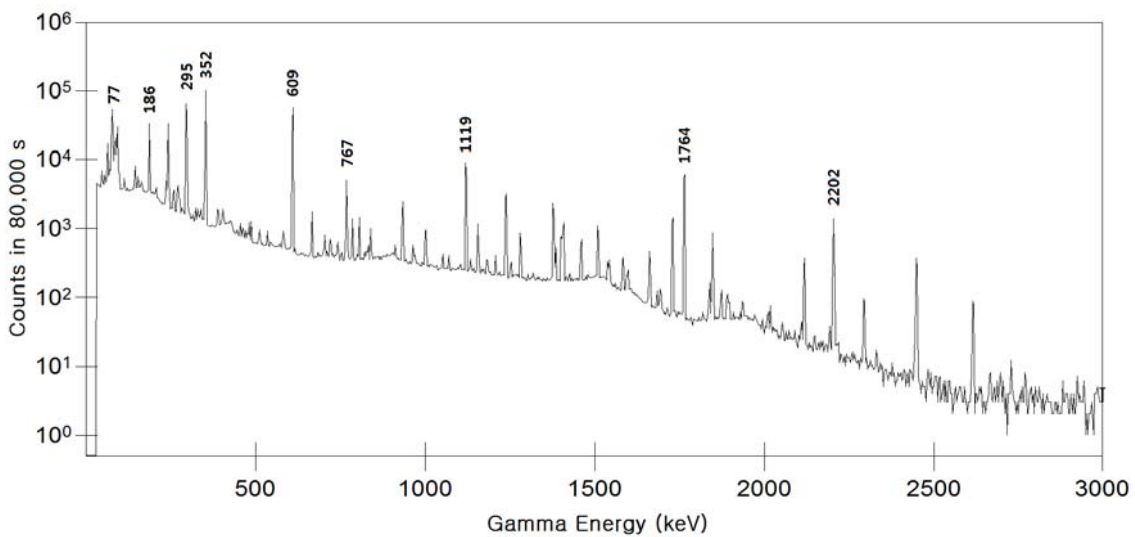


Fig. 3. Gamma energy spectrum of the check source.

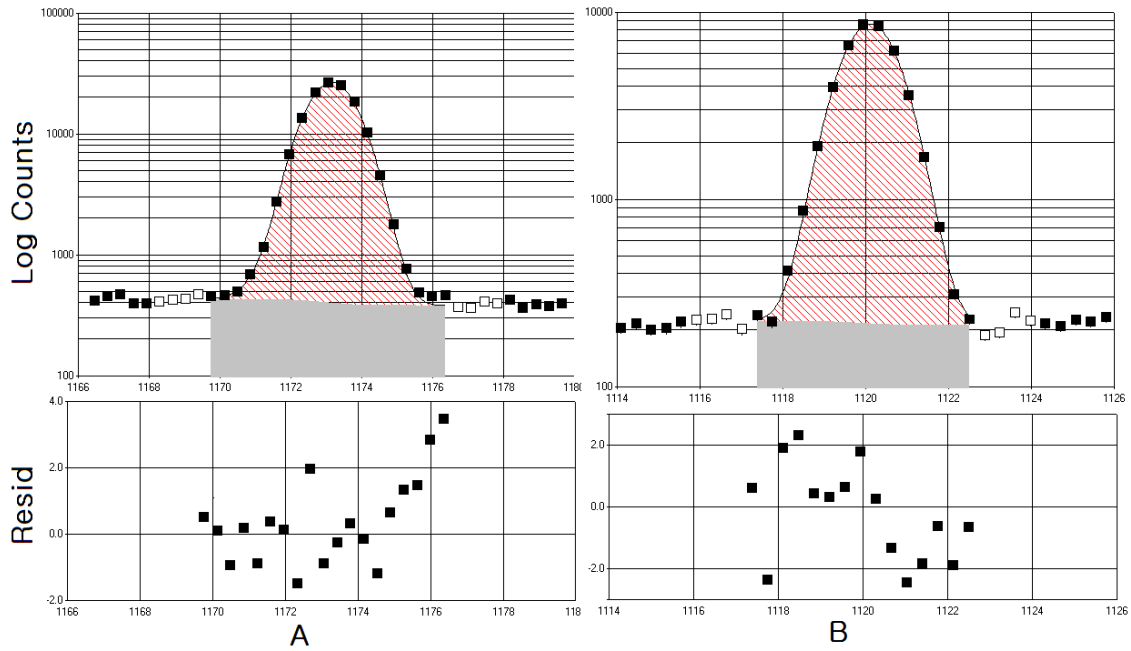


Fig 4. 1,173 keV gamma ray peak (A) of calibration source and 1,120 keV gamma peak (B) of check source.

Table 2. Peak Count Rates ($c s^{-1}$) and FWHM (keV) Measured Once Every Months from 1 January to 30 November 2012.

Characteristics	Energy (keV)	Month						Avg.	Rel. Dev. (%)
		1	3	5	7	9	11		
Net Area (cps)	77	1.34	1.86	1.75	1.68	1.70	1.71	1.67	14.3
	186	1.29	1.29	1.29	1.25	1.26	1.28	1.27	1.2
	295	2.54	2.54	2.54	2.50	2.50	2.54	2.52	0.8
	352	4.21	4.25	4.21	4.16	4.10	4.23	4.19	1.2
	609	2.70	2.73	2.70	2.69	2.69	2.73	2.70	0.5
	767	0.23	0.23	0.23	0.23	0.22	0.23	0.23	1.8
	1119	0.52	0.52	0.52	0.51	0.51	0.52	0.52	1.0
	1764	0.42	0.42	0.42	0.41	0.42	0.42	0.42	1.2
	2202	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	1.9
FWHM (keV)	77	0.93	0.92	0.91	0.93	0.95	0.95	0.93	5.1
	186	1.14	1.16	1.16	1.16	1.18	1.17	1.16	1.7
	295	1.06	1.08	1.07	1.1	1.11	1.11	1.09	2.6
	352	1.13	1.15	1.15	1.16	1.16	1.17	1.15	1.7
	609	1.30	1.31	1.31	1.33	1.34	1.33	1.32	1.6
	767	1.39	1.44	1.41	1.44	1.45	1.44	1.43	1.2
	1119	1.61	1.62	1.62	1.64	1.64	1.64	1.63	1.1
	1764	1.95	1.97	1.97	1.98	1.99	1.98	1.97	0.8
	2202	2.16	2.15	2.19	2.22	2.14	2.19	2.18	1.2

표준선원의 감마선 에너지 스펙트럼에서 에너지 교정 함수의 상수항과, 1차항, 2차 항의 계수는 각각 -0.3526, 0.366, -3.511×10^{-8} 이었으며, 점검선원의 감마선 에너지 스펙트럼에 대해 Table 1의 감마선을 사용하여 계산된 에너지 교정함수의 상수항과, 1차항, 2차항의 계수는 -0.3535, 0.3659, -3.807×10^{-8} 이었다. 이 값들은 2,000 keV의 감마선에 대해 0.6 keV의 차이가 발생하는 결과를

만든다. 보통 감마선 에너지 스펙트럼을 분석하는 상용 프로그램들에서 핵종을 식별할 때 감마선 에너지에서 1 keV 미만까지의 차이는 허용되므로 점검선원을 사용하여 에너지 교정하는데 지장이 없을 것이다.

감마선 에너지 스펙트럼에서 피크의 반치폭은 피크인 지 여부를 판단하거나 피크들의 중첩 여부를 판단하는 자료로 사용된다. 보통 피크의 반치폭 F 는 그 피크를 만든

는 하전입자의 개수에 따른 통계적 불확도에 비례하며, 이 하전 입자의 수는 감마선의 에너지에 비례하므로, 피크 에너지 E 의 0.5 제곱 함수로 나타낸다. 즉

$$F(\text{keV}) = a + bE(\text{keV})^{0.5}$$

교정선원의 스펙트럼으로부터 계산된 a 와 b 는 각각 0.6120과 0.03017이었는데, 점검선원 스펙트럼으로 계산된 값은 각각 0.5676, 0.03204이었다. 이 값은 감마선 에너지 2,000 keV 감마선 피크에 대해 반치폭의 차이가 2%인 0.04 keV이다. 이 또한 감마선 스펙트럼을 분석하는데 전혀 지장이 없는 수준이다.

Table 2에는 2012년 1월부터 11월까지 2 개월 간격으로 측정된 각 감마선 에너지 스펙트럼의 피크 계수율과 반치폭을 함께 보였다. Table 2에 보여진 10개 감마선에 대해 피크의 계수율을 0.1 c s^{-1} 이상이었다. 이런 계수율로 80,000 초 동안 스펙트럼을 측정하면 피크의 계수율이 8,000 counts 이상 되므로 피크 계수율의 통계적 불확도는 1% 미만이다. 1월부터 11월까지 각 피크 계수율(c s^{-1})의 평균치에 대한 상대 표준편차는 $\pm 2\%$ 미만으로 일정하다. 이것은 사용하고 있는 감마 분광분석계의 감마선 피크효율에 변화가 없다는 것을 의미한다. 또한 피크의 분해능을 나타내는 반치폭도 186 keV 이상의 에너지 감마선 피크에 대해 각 피크의 반치폭의 평균치에 대한 상대 표준편차는 $\pm 3\%$ 미만으로 안정되어 있다. 따라서 점검선원으로 측정된 스펙트럼에서 표의 에너지 피크의 계수율을 계산하여, 평균값과의 차이가 표준편차의 2배 이내라면 이상이 없는 것으로 판단할 수 있다.

4. 결론

^{226}Ra 이 포함된 암석을 분쇄하여 제작한 선원의 스펙트럼을 분석한 결과 3,000 keV의 감마선까지 에너지를 위한 10개의 감마선 피크가 존재하고 있었다. 이 피크

들의 간격은 77 keV부터 2,202 keV 까지 적절한 간격을 유지 하고 있어 에너지 교정에 적절하였다. 또한 77 keV 감마선 피크를 제외한 나머지 피크들은 중첩되지 않은 피크들이어서 피크의 반치폭을 교정하는 데에도 적합하였다.

1 년 동안 1 개월 간격으로 점검선원의 스펙트럼을 측정 한 결과, 피크의 계수율 표준편차 2% 이내에서 일정하였다. 이것은 사용 중인 감마분광분석계의 피크 효율에 변화가 없었다는 것을 의미한다.

따라서 ^{226}Ra 이 포함된 암석을 분쇄하여 제작한 선원으로 감마선 분광분석계의 에너지 교정이나 반치폭 교정에 사용할 수 있음이 입증되었고, 피크효율의 변화를 점검할 수 있을 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. 국가표준기본법. 법률 제10690호. 2013.
2. 한국인정기구. 교정대상 및 주기설정을 위한 지침, KOLAS-G-013. 2013.
3. American National Standards Institute, Calibration and use of gamma spectrometers for the measurement of gamma-ray emission rates of radionuclides, ANSI N42.14 1991.
4. IEC TC/SC 45. Nuclear instrumentation - Measurement of gamma-ray emission rates of radionuclides - Calibration and use of germanium spectrometers, IEC 61452 Ed. 1.0 b:1995.
5. Knoll GF. Germanium gamma-ray detectors. in: Bill Zobrist, Robin Factor, Sigmund Malinowski. Radiation detection and measurement, 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc. 1999.
6. http://www.ezag.com/fileadmin/ezag/user-uploads/isotopes/pdf/EZIP_Ref___Cal_Catalog.pdf.
7. http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Ra-226D_NT08-059.pdf.

Development of a simple laboratory-made radioactive source to check the integrity of a gamma spectrometry system with HPGe detector

Lee Mo Sung
Cheongju Univ

Abstract - A simple laboratory-made radioactive source to check the integrity of a gamma spectrometry system with HPGe detector was developed. The check source consists of radium-riched soil which was ground in size of less than 0.154mm and contained in air tight cylindrical vial, and provides photons with 12 distinct energies. The spectra of the check source were measured once a month during one year, analyzed the characteristics of their peaks. When the gamma spectrometry system was in normal state, the areas and FWHMs of the gamma rays with more than 3% gamma emission rate in radium and its decay products was constant within standard deviation 2% and 3%, respectively, except 77 keV peak. And it was found that this check source can play a sufficient role to check the integrity of a gamma spectrometry system using 10 peaks in the range of 77 to 2202 keV.

Keywords : HPGe detector, Detector calibration, Calibration source, Check source, ^{226}Ra