

The Measurement of National Standard β -Rays Energy Spectrum

Chul-Hang Kim*[†], Chul-Young Yi*, Hyun-Moon Kim*, Suck-Ho Hah*, Gook-Jin Jeon*

*Center for Ionizing Radiation, Korea Research Institute of Standards and Science,

[†]Department of Medical Physics, University of Science and Technology, Daejeon, Korea

In the present study, we measured the pure beta particle energy spectra of ^{147}Pm , ^{85}Kr , $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ radionuclide sources. We confirmed the residual maximum energies of KRISS sources meet the requirement of ISO 6980 and calculated mass collision stopping power ratio, which is essential for absolute measurement of absorbed dose from the reference β -rays. The residual maximum energies of KRISS ^{147}Pm , ^{85}Kr , $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ sources are 0.14, 0.57 and 0.93 MeV, respectively and the mass collision stopping power ratios are 1.123, 1.120 and 1.109, respectively.

Key Words: Beta-rays, Energy spectrum, The residual maximum energy, Mass collision stopping power ratio

서 론

ISO 6980¹⁾에는 베타선 선량계의 교정에 사용되는 베타 선원이 갖추어야 할 요건이 기술되어 있다. 모두 6개의 베타 선원(^{14}C , ^{147}Pm , ^{85}Kr , ^{204}Tl , $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$, $^{106}\text{Ru}+^{106}\text{Rh}$)이 제시되어 있고 이들 베타 선원에서 방출되는 베타입자의 최대 잔여에너지의 하한은 각 핵종별로 규정되어 있는데 90 keV (^{14}C)부터 2.8 MeV ($^{106}\text{Ru}+^{106}\text{Rh}$)까지 분포한다. 최대 잔여에너지는 교정 위치에 도달한 베타입자의 최대 에너지로서 밀봉선원의 창을 포함하여 공기, 평탄필터 등 베타 방출 핵종과 교정 위치 사이에 존재하는 모든 매질에 의한 에너지 손실 후 베타입자가 가진 에너지이다. 최대 잔여에너지가 핵종의 붕괴시 방출되는 베타입자의 최대 에너지보다 크다면 이는 결국 다른 방사성 물질을 포함하고 있는 것이므로 교정용 기준선원으로 적합하지 않다. ISO 6980에서는 교정용 선원에 대해 최대 잔여에너지를 2년 마다 측정하도록 규정하고 있다.

최대 잔여 에너지는 Flammersfeld²⁾에 의해 제시된 방법에 따라 최대 잔여비정과 최대 잔여에너지의 관계식을 이용하

여 평가하는 방법과 Si(Li) 등과 같이 베타선 에너지 스펙트럼 측정에 적합한 검출기로 측정된 스펙트럼을 이용하여 평가하는 방법이 있다. Flammersfeld 방법으로 최대 잔여비정을 결정하기 위해서는 흡수매질의 두께를 변화 시켜가면서 베타선의 세기를 측정해야 하므로 다양한 두께의 흡수매질이 필요하며 준비된 흡수매질의 개수에 비례하여 측정 소요시간이 증가하게 된다. 또한 최대 잔여비정을 결정하기 위해 맞춤곡선을 찾는 과정에도 어려움이 있을 수 있다.

본 연구에서는 Si(Li) 베타선 분광분석장치를 이용하여 한국표준과학연구원에서 국가표준의 현시를 위해 보유하고 있는 베타선 방출 선원의 에너지 스펙트럼을 측정하고 측정된 스펙트럼의 분석을 통해 베타선의 최대 잔여에너지를 평가하였으며 베타선 흡수선량 평가에 필수적인 공기와 조직의 질량충돌저지능비(mass collision stopping power ratio)를 산출하였다.

재료 및 방법

한국표준과학연구원에서 보유중인 베타 선원은 ^{147}Pm , ^{85}Kr , $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ 이다. ISO 6980에 제시된 규격에 따라 빔 평탄필터(beam flattening filter)를 선원의 표면으로부터 10 cm 떨어진 거리에 설치하고 각 선원의 기준점에서 에너지 스펙트럼을 측정하였다. 각 선원 별 평탄 필터의 종류와 기준점까지의 거리는 동 국제규격에 제시된 바와 같다.

교육과학기술부지원 기관고유사업 및 방사선기술개발사업.
이 논문은 2012년 11월 2일 접수하여 2012년 12월 10일 채택되었음.
책임저자 : 이철영, (305-340) 대전시 유성구 가정로 267
한국표준과학연구원 방사선표준센터
Tel: 042)868-5370, Fax: 042)868-5671
E-mail: cyyi@kriss.re.kr

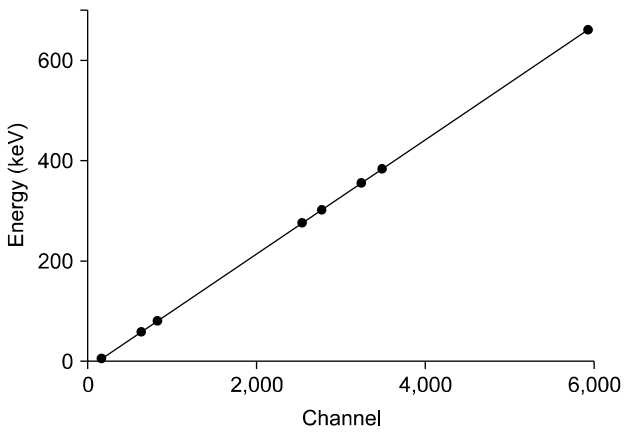


Fig. 1. Energy calibration of a KRIS Si(Li) detector using ^{55}Fe , ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{137}Cs sources.

측정에 사용한 검출기는 평면형 Si(Li) 검출기(Ortec, SLB-10490)로서 제조사에서 제공한 제원에 따르면 입사창의 두께가 0.05 mm Be이고 결정의 크기는 직경 10 mm, 두께 5.67 mm이었다. 이 검출기의 채널 대 에너지 교정은 Fig. 1에 표시한 바와 같이 ^{55}Fe , ^{241}Am , ^{133}Ba 및 ^{137}Cs 선원을 이용하여 수행하였다. 채널의 함수로 맞춘 에너지의 일차식이 갖는 결정계수(coefficient of determination)는 1.000000이었고 결정된 일차식으로부터 예측되는 에너지와 실험값의 최대 편차는 0.05% 미만이었다.

Fig. 2에 한국표준과학연구원에서 보유중인 베타 선원의 기준점에서 측정된 에너지 스펙트럼을 선원별로 나타내었다. 이 스펙트럼에는 핵종이 붕괴하면서 함께 방출되는 광자는 물론, 선원을 감싸고 있는 밀봉캡슐 등 주위 매질과 베타선의 상호작용으로 발생된 특성 X-선 및 제동방사선(bremsstrahlung radiation)이 혼재해 있다. 이러한 광자선의

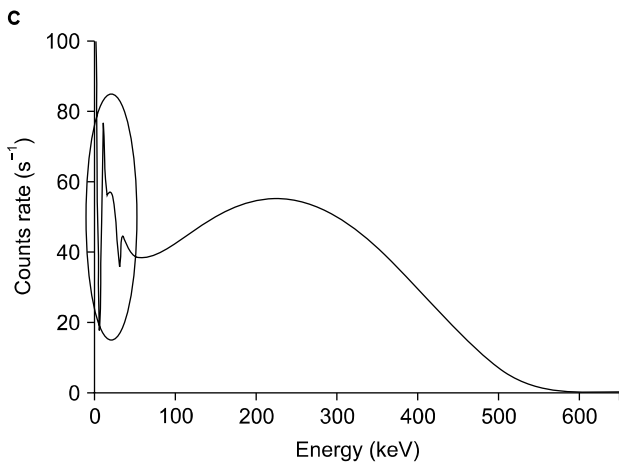
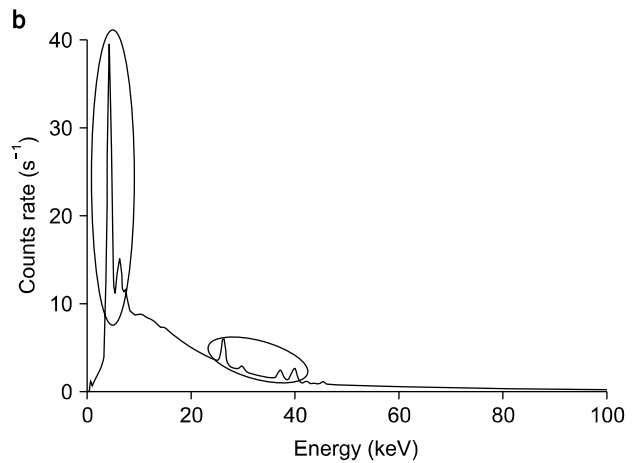
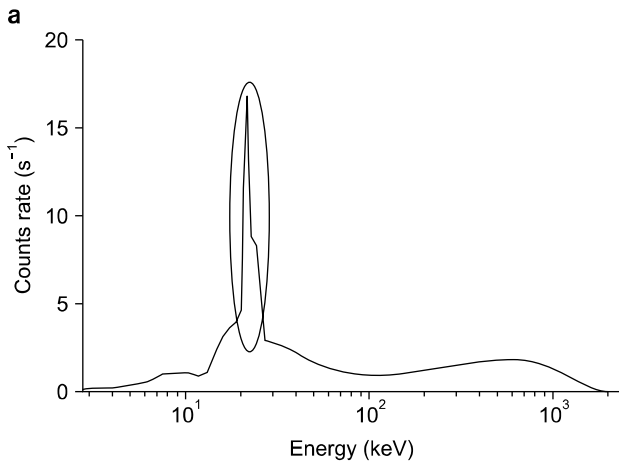


Fig. 2. Measured energy spectrum at the calibration distance without the PMMA absorber. Each energy spectra indicates $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ (a), ^{147}Pm (b) and ^{85}Kr sources (c). The broken line means photon contamination from bremsstrahlung and characteristic X-rays.

Table 1. CSDA and extrapolated ranges, and thickness of PMMA slabs used to absorb β -particles.

| Radionuclide | Maximum energy (keV) ⁵⁾ | CSDA range (g/cm ²) ⁴⁾ | Extrapolated range (g/cm ²) ⁶⁾ | Thickness of PMMA (g/cm ²) |
|------------------------------------|------------------------------------|---|---|--|
| ¹⁴⁷ Pm | 224.5 | 0.055 | 0.048 | 0.061 |
| ⁸⁵ Kr | 687.1 | 0.279 | 0.239 | 0.355 |
| ⁹⁰ Sr + ⁹⁰ Y | 2,279.8 | 1.169 | 1.019 | 1.186 |

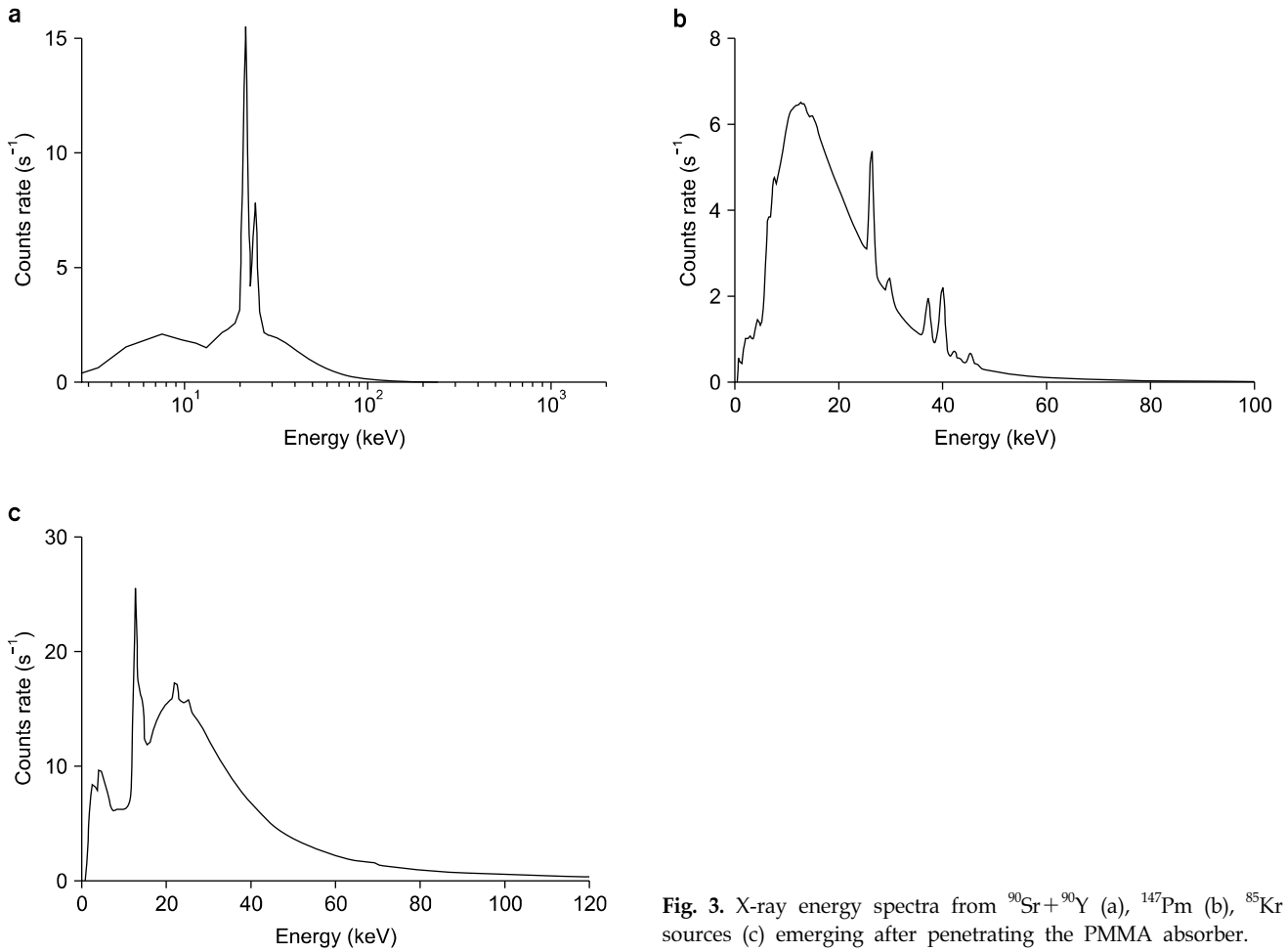


Fig. 3. X-ray energy spectra from ⁹⁰Sr+⁹⁰Y (a), ¹⁴⁷Pm (b), ⁸⁵Kr sources (c) emerging after penetrating the PMMA absorber.

영향이 두드러진 부분을 Fig 2.에 점선으로 표시하였다. 따라서 기준점에서 ¹⁴⁷Pm, ⁸⁵Kr, ⁹⁰Sr+⁹⁰Y 선원의 베타선 에너지스펙트럼을 얻기 위해서는 측정 스펙트럼에 혼재하는 광자선에 의한 기여분을 어떻게 배제하느냐하는 것이 중요한 문제 중 하나이다.

1. 광자선 에너지 스펙트럼 측정

베타선 스펙트럼을 측정할 때 베타선 최대 에너지의 비정보보다 두꺼운 차폐체를 검출기 전면에 설치하여 베타선

차폐에 이용하면 베타선 이외의 기여 분을 측정할 수 있으며, 원자번호가 낮은 물질을 차폐체로 이용함으로써 차폐체와 베타선의 상호작용으로 발생하는 제동방사선을 최소화할 수 있다. 본 연구에서는 polymethylmethacrylate (PMMA)를 차폐체로 이용하였다. PMMA의 유효원자번호³⁾는 6.7로 평가 되었다.

베타선을 완전히 차폐하는데 필요한 PMMA의 두께는 연속감속근사비정(CSDA range)⁴⁾을 고려하여 결정하였다(Table 1). Table 1에 표시한 베타선의 최대비정보보다 충분히 두꺼

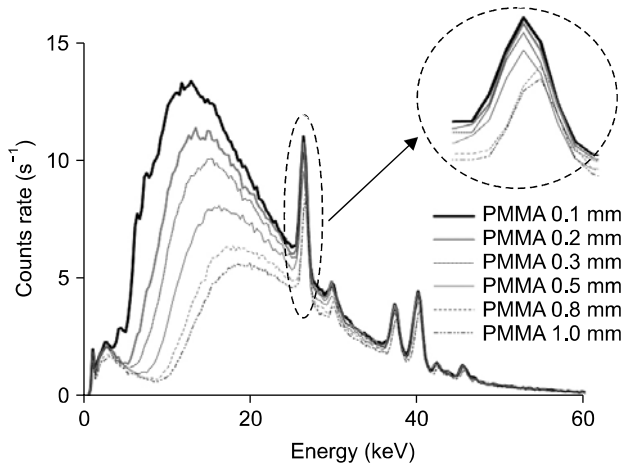


Fig. 4. X-ray energy spectra from ^{147}Pm source presented as a function of PMMA slab thickness.

운 PMMA 차폐체를 검출기 전면에 설치하여 베타선을 완전히 차폐하고 측정된 광자선 에너지스펙트럼을 Fig. 3에 나타내었다. 실험에 사용된 PMMA의 두께는 마이크로미터를 이용하여 측정하였다. 선원에서 방출된 광자선은 PMMA 차폐체에 의해 감쇠되므로 베타선 에너지스펙트럼에 포함된 광자선 기여분의 정확한 정량을 위해서는 차폐체에 의해 감쇠된 부분에 대한 보정이 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 PMMA 차폐체의 두께를 점차 증가시키면서 광자선 에너지스펙트럼을 측정하였다.

Fig. 4에 PMMA 차폐체의 두께를 증가시키면서 측정된 광자선 에너지스펙트럼의 변화를 PMMA 두께 별로 나타내었다. 10 keV 이하 에너지 구간을 제외하면 차폐체가 두께에 따른 채널당 입자수가 이론적인 지수함수 형태의 감쇠와 최대편차 6% 내에서 일치함을 확인하였다. 이를 표시하면 다음과 같다:

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\mu(E)(t_2 - t_1)} \quad (1)$$

여기서 $t_{1(2)}$ 는 차폐체 1 (또는 2)의 두께(cm), $N_{1(2)}$ 는 검출기 전면에서 PMMA 차폐체 1 (또는 2)를 설치하고 측정된 에너지스펙트럼에서 에너지 구간 $E \sim E + dE$ 사이에 있는 입자의 수, $\mu(E)$ 는 선형감쇠계수(linear mass attenuation coefficient, cm^{-1})이다.

기준점에서 광자선 에너지스펙트럼은 PMMA 차폐체를 검출기 전면에서 놓고 측정된 광자선 에너지스펙트럼으로부터 식 (1)을 이용하여 PMMA 차폐체에 의한 감쇠 분을 보

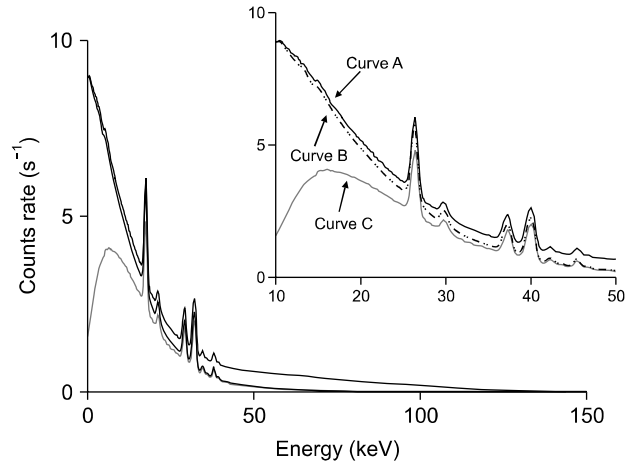


Fig. 5. Analysis of measured spectra from ^{147}Pm . Curve A is measured at the calibration distance without PMMA absorber thus it contains β and X-rays in the energy spectrum. Curve B is evaluated from curve C using Equation (1). Curve C is X-ray energy spectrum penetrating the PMMA absorber placed in front of Si(Li) detector at the reference distance.

정함으로써 PMMA 차폐체가 없을 경우에 대한 광자선 에너지스펙트럼을 산출할 수 있었고 그 과정을 Fig. 5에 나타내었다. 기준점에서 측정된 에너지스펙트럼으로부터 광자선 에너지스펙트럼을 빼주면 기준점에 대한 순수 베타선 스펙트럼을 얻을 수 있다.

2. 검출기 입사 창에 의한 베타선 에너지 손실 보정

베타선은 검출기 내의 Si 결정으로 입사하기 전에 입사창과의 상호작용으로 에너지 손실이 발생하게 되므로 Si 결정에 흡수된 베타선 에너지스펙트럼은 기준점의 베타선 스펙트럼과 근소한 차이가 있다. 본 연구에서는 이 효과를 정량하고 보정하였다.

입사 창에 의한 베타선 에너지 손실을 평가하기 위해 ^{207}Bi 선원에서 방출되는 단일 에너지 전환전자를 이용하여 검출기의 에너지 교정을 실시하였고 그 결과를 ^{55}Fe , ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{137}Cs 에서 방출되는 감마선을 이용해 교정한 결과와 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있듯이 에너지가 낮을수록 검출기 입사 창에 의한 에너지 손실이 크게 나타남을 확인하였다. 입사 창에서 손실되는 에너지를 베타선 에너지의 함수로 표시하면 다음과 같다:

$$\Delta E = -0.008 E + 28.3 \quad (2)$$

여기서 ΔE 는 손실 에너지(keV)이고 E 는 베타선 에너지

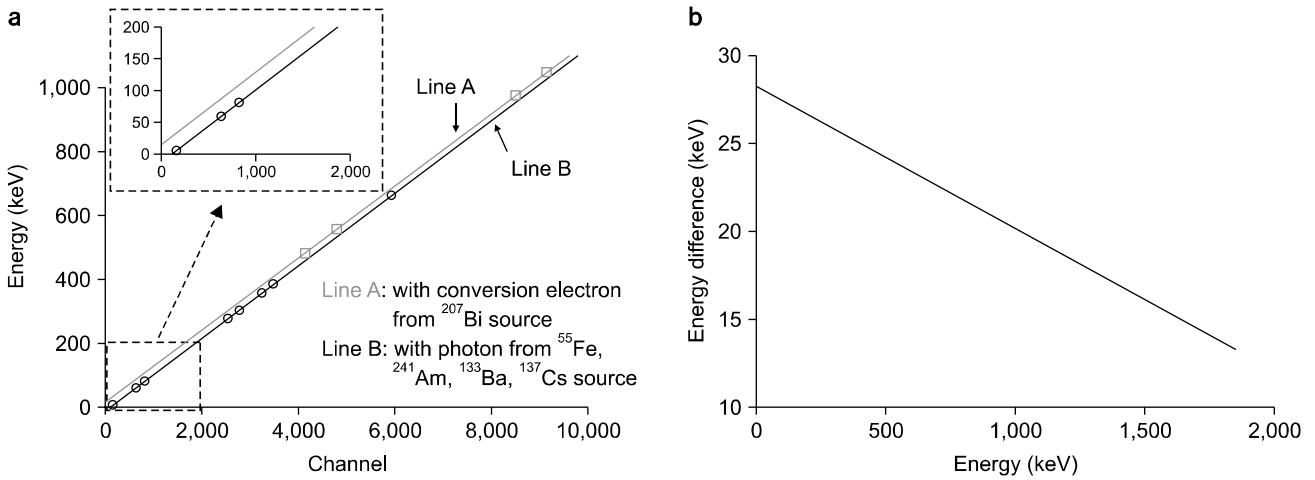


Fig. 6. Comparison of the energy calibration results obtained by conversion electrons and photons (a) and the energy difference of those two calibration results, i.e., line A and B (b).

(keV)이다.

3. 질량충돌저지능비 평가

공기 대 조직의 질량충돌저지능비는 각 선원의 베타선 에너지 스펙트럼으로부터 다음의 관계식을 이용하여 평가하였다:

$$\left(\frac{S}{\rho}\right)_t = \frac{\int_0^{E_{\max}} \frac{d\Phi(E)}{dE} \left(\frac{S}{\rho}\right)_t dE}{\int_0^{E_{\max}} \frac{d\Phi(E)}{dE} \left(\frac{S}{\rho}\right)_a dE} \quad (3)$$

여기서 $(S/\rho)_{a(t)}$ 는 공기(또는 조직)의 충돌저지능⁴⁾이며 $(d\Phi(E)/dE)$ 는 베타선 미분 플루언스이다.

결과 및 고찰

Fig. 4에서 ¹⁴⁷Pm, ⁸⁵Kr, ⁹⁰Sr+⁹⁰Y 선원을 감싸고 있는 밀 봉캡슐 등 주위 매질과 베타선의 상호작용으로 발생하는 특성 X-선과 제동방사선은 주로 100 keV 이내에 혼재해 있으며 베타선 방출 에너지가 높을수록 제동 방사선 발생 비율이 높다. 이 중 10 keV 미만의 광자는 차폐체 두께 변화에 따른 이론적인 지수함수 형태의 감쇠를 갖지 않음을 확인할 수 있었다. Si(Li) 검출기에 의해 측정된 ¹⁴⁷Pm, ⁸⁵Kr, ⁹⁰Sr+⁹⁰Y 선원의 베타선 에너지는 수십 keV 이상이므로 기

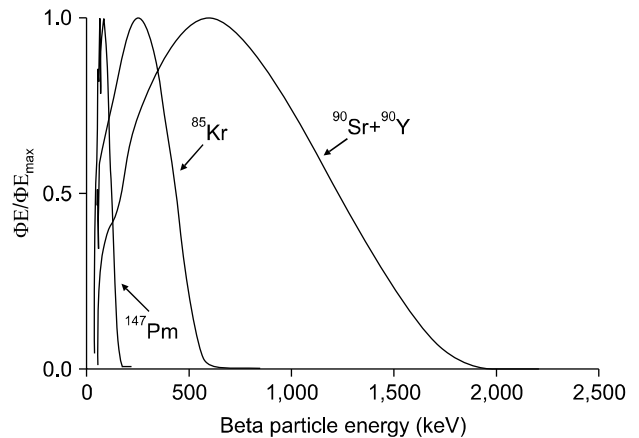


Fig. 7. Pure β -ray energy spectra of KRISS ⁹⁰Sr+⁹⁰Y, ¹⁴⁷Pm, ⁸⁵Kr reference sources at the calibration distance deduced from the measured energy spectra by means of Si(Li) spectroscopy.

준점에서 측정된 각 선원의 에너지 스펙트럼으로부터 10 keV 미만의 에너지 영역을 제외한 에너지 구간에 대해서 광자선 기여분을 뺀 순수 베타선 에너지 스펙트럼을 Fig. 7에 나타내었다.

베타선 에너지 스펙트럼 상에서 결정된 ¹⁴⁷Pm, ⁸⁵Kr, ⁹⁰Sr+⁹⁰Y 선원의 최대 잔여에너지는 각각 0.14, 0.57, 1.93 MeV로 확인되었다. 이 값들은 ISO에서 과도한 자기흡수 및 창 흡수(self absorption and window absorption)를 가지는 베타방출선원의 사용을 방지하기 위해 제안한 교정용 기준 선원의 최대 잔여에너지 요건을 만족하였으며, 각 핵종의 붕괴 시 방출되는 베타입자의 최대 에너지 이내에 있었다

Table 2. The measured residual maximum energies (E_{res}) of KRISS ^{147}Pm , ^{85}Kr , $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ sources and values suggested by ISO 6980 for the reference beta emitting radio-nuclides.

| Radionuclide | Residual maximum energy (MeV), $E_{res}^a)$ | | |
|-----------------|---|------------------|--------------------------------|
| | ^{147}Pm | ^{85}Kr | $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ |
| ISO Requirement | 0.13 | 0.53 | 1.80 |
| KRISS | 0.14 | 0.57 | 1.93 |

^{a)} E_{res} should be greater than the ISO requirements however, If E_{res} exceeds the maximum end point energy of beta-ray, the source contains a radioactive contaminant which emits higher energy particles than the reference radionuclide and it therefore does not meet the requirements of International Standard.

(Table 2).

^{147}Pm , ^{85}Kr , $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ 선원의 공기 대 조직의 질량충돌저지능비는 식 (3)으로부터 각각 1.123, 1.120, 1.109로 평가되었다. 참고로, 이 값들을 다른 표준기관에서 제시한 저지능비의 값과 비교한 결과 최대 0.3%의 차이 내에서 잘 일치하였다(Table 3).

기준점에서 ^{147}Pm , ^{85}Kr , $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ 선원에 대한 Si(Li) 검출기의 불감시간은 각각 1.4%, 37.1%, 2.2%으로 상대적으로 다른 선원에 비해 불감시간이 큰 ^{85}Kr 선원에서는 저에너지 부근에 과형중첩이 관찰되었다. ^{85}Kr 의 베타선 스펙트럼에 나타나는 과형중첩 현상은 선원의 방사능이 높아서 생기는 것으로 본 연구에서는 제거할 수 없었으나 본 연구의 목적이 베타선원의 최대에너지를 확인하는 것이므로 연구결과에 미치는 영향은 크지 않았다. ^{85}Kr 의 저지능비의 경우에도 국외의 다른 표준기관의 그것과 0.2% 내에서 일치함을 Table 3에서 확인할 수 있다. 주 증폭기의 과형 형성시간과 PUR (pile-up rejection)은 검출기의 불감시간과 분해능에 영향을 주었다. ADC의 PUR을 사용하면 저 에너지 영역에서 발생하는 X-선 중첩을 줄임으로써 스펙트럼 상에서 피크 사이의 구분이 명료한 반면, 고계수율 선원의 측정 시에는 불감시간이 증가되었다. 또한 과형 형성시간 값이 클수록 검출기의 불감시간은 증가하였지만 분해능은 개선되었다. 따라서 검출기의 불감 시간을 줄이고 동시에 분해능을 향상시키기 위해서는 ADC의 변환시간 보다 작은 범위 내에서 과형 형성시간을 설정하는 것이 바람직하다.

한편, ^{207}Bi 선원에서 방출되는 전환전자를 이용한 에너지 교정은 검출기 입사 창에 의한 에너지 손실로 인해 동일 채널 상에서의 광자 에너지와 최대 28 keV에 해당하는

Table 3. Comparison of mass electronic stopping power ratios of tissue to air for KRISS ^{147}Pm , ^{85}Kr , $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ sources.

| Organization | Mass electronic stopping power ratios in tissue/air | | |
|--------------|---|------------------|--------------------------------|
| | ^{147}Pm | ^{85}Kr | $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ |
| KRISS | 1.123 | 1.120 | 1.109 |
| PTB (1986) | 1.124 | 1.121 | 1.110 |
| ETL (1993) | 1.126 | 1.122 | 1.110 |

에너지 차이를 보였다. 이와 같은 에너지 차이는 검출기 입사 창의 두께와 베타 입자의 에너지에 의존하므로 특히 저에너지 베타선 측정 시에는 입사 창에 의한 에너지 손실에 대한 보정이 반드시 필요하다.

결론

Si(Li) 검출기를 이용하여 한국표준과학연구원이 보유한 ^{147}Pm , ^{85}Kr , $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ 베타선원의 에너지 스펙트럼을 측정하였다. 순수한 베타선 스펙트럼을 얻기 위하여 첫째, 측정된 스펙트럼에 포함된 광자선 기여분을 PMMA 흡수체를 이용하여 효과적으로 제거하였고 둘째, 검출기 입사창과 불감층에 의한 베타선 에너지 손실을 광자선 에너지 교정 결과와 단일 에너지 전환전자의 에너지 교정 결과의 차이를 이용하여 보정하였다. 순수 베타선 스펙트럼을 얻기 위해 사용한 위 두가지 독창적인 기술은 본 연구에서 이용한 Si(Li) 이외의 베타선 분광분석장치에도 적용이 가능한 기술이다.

한국표준과학연구원이 이미 보유하고 있던 $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ 선원의 베타선 스펙트럼 외에 본 연구를 통하여 ^{147}Pm , 및 ^{85}Kr 베타선 에너지 스펙트럼을 새로이 확보하였다. 측정된 베타선 에너지 스펙트럼을 분석함으로써 한국표준과학연구원이 보유한 베타선원의 최대 잔여에너지가 ISO 6980의 기준선원 요건을 만족함을 확인하였다. 베타선 흡수선량 및 ICRU 실용량 일차표준 현시에 필수적인 한국표준과학연구원이 보유한 베타선원의 공기 대 조직의 질량충돌저지능비를 실험적으로 결정하고 타 연구의 결과와 비교한 것도 의미있는 성과이다.

참고 문헌

1. ISO 6980: Reference beta radiations for calibrating dosimeters

- and dose-rate meters and for determining their response as a function of beta-radiation energy, ISO 6980:1996E (1996)
2. **Flammersfeld A**: Eine Beziehung zwischen Energie und Reichweite für Beta-Strahlen kleiner und mittlerer Energie. Naturwissenschaften 33:280 (1946)
 3. **ICRU Report 46**: Photon, Electron, Proton and Neutron Interaction Data for Body Tissues, Bethesda, MD (1992)
 4. **ICRU Report 37**: Stopping Powers for Electrons and Positrons. International Commission in Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD (1984)
 5. **Monographie BIPM-5**: Table of Radionuclides, Vol. 1-7 (2004-2012), [Online] Available: http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm
 6. **Tabata T. Ito R. Okabe S**: Generalized semiempirical equations for the extrapolated range of electrons. Nucl Instrum Methods 103:85-91 (1972)
 7. **Hubbell JH, Seltzer SM**: Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients (version 1.4). [Online] Available: <http://physics.nist.gov/xaamdi>. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (2004)

기준 베타선장의 에너지 스펙트럼 측정

*한국표준과학연구원 방사선표준센터, †과학기술연합대학원대학교 의학물리학과

김철항*[†] · 이철영* · 김현문* · 하석호* · 전국진*

Si(Li) 검출기를 이용해 한국표준과학연구원에서 보유한 베타선 선원인 ^{147}Pm , ^{85}Kr , $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ 선원의 순수 베타선 에너지 스펙트럼을 측정하였고 이 측정 스펙트럼에 대한 잔여에너지와 질량총돌저지능비를 산출하였다. 베타선의 잔여에너지는 ^{147}Pm , ^{85}Kr , $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ 선원에 대하여 각각 0.14, 0.57, 0.93 MeV으로 평가되었고 질량총돌저지능비는 각각 1.123, 1.120, 1.109이었다.

중심단어: 베타선, 에너지 스펙트럼, 잔여에너지, 질량총돌저지능비