

환경준위 알파입자측정을 위한 다중선 비례계수기 개발(I)

오필제[†] · 박태순 · 이민기 · 김경화
한국표준과학연구원 화학방사선연구부
(1996. 6. 26. 접수)

Development of Multiwire Proportional Counter for Measurement of Environmental-level Alpha Particles

Pil Jae Oh[†], Tae Soon Park, Min Kie Lee and Kyung Hwa Kim
Korea Research Institute of Standards and Science, Taejeon 305-306
(Received Jun. 26, 1996)

요약 : 저준위 및 환경준위의 알파입자 방출핵종의 방사능을 측정하기 위한 다중선 비례계수기를 개발하였다. 비례계수기의 외부 크기는 $350 \times 290 \times 30\text{mm}$ 이고, 측정이 가능한 측정선원의 최대 면적은 $250 \times 200\text{mm}$ 이다. 비례계수기의 재질은 최소의 background와 외부충격에 의한 형태변형을 방지하기 위해 스테인리스 스틸을 사용하였고, 양극선 및 음극선의 재질은 직경 $50\mu\text{m}$ 의 스테인리스 스틸 wire로서, 전체 전극선의 수는 각각 21개와 42개이다. 계수효율을 최대로 하고 검출기벽에 의한 흡수효과를 제거하기 위해서 측정선원은 검출기 내부에 위치하도록 하였으며, 선원두께에 의한 효율변화를 방지하기 위하여 선원 높이를 10mm까지 조절할 수 있도록 설계하였다.

제작된 검출기는 plateau, 작동전압, background, 계수효율, 선원위치에 따른 감도, 에너지분해능 등의 특성조사를 수행하였다. ^{241}Am 핵종의 경우, 시료 1L를 처리하여 50,000초를 측정하였을 때의 LLD(Lower Limit of Detection)는 5.0 mBq/L로 산출되어 ISO(International Organization for Standardization)에서 규정하고 있는 환경준위의 알파입자 측정용 장치의 LLD인 40mBq/L보다 낮은 방사능을 분석할 수 있는 양호한 환경방사능 측정장치인 것으로 판명되었다.

Abstract : The multiwire proportional counter for the measurement of low-level and environmental α particles emitting nuclides was developed. External dimension of the developed multiwire proportional counter is $350 \times 290 \times 30\text{mm}$ and the sensitivity area is $250 \times 200\text{mm}$.

The wall material of the detector was selected the stainless steel to prevent the deformation by external impact and to obtain minimum background. The anode and cathode wires were used the stainless steel material of diameter $50\mu\text{m}$. The spacing of each wires are 10.0mm, 5.0mm and the numbers of total wire are 21, 42 lines, respectively.

The multiwire proportional counter was designed that the measurement source is placed within the detector to prevent the wall absorption effect and the efficiency variation by various source heights.

The characteristics of the developed detector have been investigated to obtain the plateau, operating voltage, background, counting efficiency, position sensitivity and energy

resolution etc. For the ^{241}Am nuclide, the calculated LLD(Lower Limit of Detection) is 5.0mBq/L which is lower than 40mBq/L of recommended LLD value by ISO(International Organization for Standardization)

Key words : multiwire, environmental, absorption effect, LLD.

1. 서론

다중선 비례계수기(multiwire proportional counter, MWPC)는 특정의 측정분야에서 기존의 여러 검출기보다 독특하고 많은 장점을 가지고 있다. 이러한 장점은 1) 높은 계수효율 2) 고계수율의 측정능력 3) 양호한 공간분해능(spatial resolution) 4) 양호한 에너지분해능 5) 넓은 측정면적 등으로 나눌 수 있다. 다중선 spark chamber 및 섬광검출기 등도 위에 열거한 몇몇의 장점을 가지고는 있으나 모두를 만족시키지 못한다. 즉, 다중선 spark chamber는 양호한 공간분해능 및 다양한 형태와 크기로 얇게 제작할 수 있으나 에너지 선형성이 양호하지 않고 방전 후 비교적 긴 세정시간(~ms)이 요구되므로 고계수율 측정에는 적합하지 않다. 또한 섬광검출기는 고계수율 및 에너지 선형성은 양호하지만 공간분해능을 좋게 하기 위한 박막형태(~20mg/cm²)로의 제작이 곤란하다.

다중선 비례계수기는 오래 전에 개발된 기술로서 방사선 방호 목적으로 10개 미만의 wire를 사용한 검출기가 상업화되어 알파나 베타입자 측정용으로 보급되고 있다. 그러나 수십 개 이상의 wire를 갖는 다중선 비례계수기는 고도의 제작기술이 요구되고 기능의 안정성과 측정정확도를 유지하기 위해서는 엄격한 품질 관리가 필요하다.

계수기의 구조, 계수가스의 종류, 제작방법에 따른 계수효율, 공간분해능 및 시간특성 등에 대한 심도 있는 연구가 계속 진행중이다.¹⁻⁴

G. A. Erskine(CERN)은 한정된 크기의 chamber에서 대칭적, 또는 비대칭적인 wire 형태의 경우에 대한 전기장분포의 program을 개발하였다.^{5,6} Wire의 직경, wire 간격, 양극간의 거리를 각각 d, s 및 L이라 하고 wire 평면을 x, 수직방향을 y라 할 때, 대칭적으로 wire는 단위 길이당 q의 동일한 전하를 갖는다. Wire가 동등한 공간을 유지하고, 매우 가는 경우의 potential은

$$V=q \ln[\sin^2(\pi x/s) + \sin^2 h(\pi y/s)] \quad (1)$$

의 식으로 나타낼 수 있다. 대칭선을 따라 $x=0, y=0, x=s/2$ 라면

$$V(0, y)=2q \ln \sin h \frac{\pi y}{s} \rightarrow E_y = \frac{2q\pi}{s} \cot h \frac{\pi y}{s}, \quad (2)$$

$$V(x, 0)=2q \ln \sin \frac{\pi x}{s} \rightarrow E_x = \frac{2q\pi}{s} \cot \frac{\pi x}{s}, \quad (3)$$

$$V(s/2, y)=2q \ln \cos h \frac{\pi y}{s} \rightarrow E_y = \frac{2q\pi}{s} \tan h \frac{\pi y}{s} \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다. 이들 식은 wire 두께가 매우 가는 경우에는 정확하다. 예로서 wire 두께가 100 μm 이고 공간거리가 1mm일 때 $\sin(\pi y/s)$ 와 $\sin h(\pi y/s)$ 의 차이는 8×10^{-3} 정도이므로 이 두께에서의 potential 변화는 전기장분포의 변화를 초래하지는 않는다. 따라서 계수기의 치수와 인가전압을 결정하면 q를 계산할 수 있다.

$$q = \frac{V_0}{2[\ln \sin h(\pi L/s) - \ln \sin h(\pi d/2s)]} \quad (5)$$

양극선 사이의 전기장은 symmetrical geometry로 균형을 이루어야 안정되고, 이 전기장을 극복하기 위한 wire의 tension이 부족하다면 양극과 양극의 반발력에 의해 계수기는 불안정하게 작동한다.⁷

양극선의 단위 길이당 반발력을 계산하는 근사식은

$$f = \frac{\pi^2 q^2 u}{s^2} \quad (6)$$

여기서 q : 양극선의 단위 길이당 전하

u : 평형에서 양극선의 변위

d : 양극선의 간격

으로 나타낼 수 있다. 이 변위는 wire의 tension에 의

한 복원력에 의해 증화된다.

Wire의 단위 길이당 복원력은

$$R = T \frac{d^2u}{dy^2} \quad (7)$$

여기서 T : wire tension

y : wire로부터의 거리

따라서 윗식을 조합하여 계산된 임계 tension은

$$T_b = \frac{q^2 l^2}{s^2} \quad (8)$$

여기서 L 은 wire의 전체 길이이다. 따라서 wire는 큰 tension을 가질수록 중간지점에서는 더욱 안정되고, 작은 tension일수록 더욱 불안정해진다.

Wire 사이의 간격이 좁을 때, q 는 V 의 함수로 비교적 정확하게 표현할 수 있다.

$$q = \frac{sV}{2\pi L} \quad (9)$$

따라서 이 구조는 평범한 평판형 용량의 계수기와 유사하다. 이 경우 안정도를 직접적으로 적용할 수 있는 식은

$$T \leq \frac{V^2 l^2}{4\pi^2 L^2} \quad (10)$$

을 사용하면 된다.

2. 실험

2.1. 다중선 비례계수기 설계 및 제작

다중선 비례계수기는 저준위 알파 및 베타입자 측정용으로 널리 사용되고 있으며, 특히 환경 중 방사능에 오염된 정도를 검사하는 데 매우 유용하다. 다중선 비례계수기는 비교적 넓은 선원을 측정할 수 있도록 양극선을 일정한 거리로 여러 개를 사용하며 낮은 작동 전압에서 사용할 수 있고, 일정한 전기장(electric field)을 얻을 수 있으므로 선원의 크기에 따른 보정을 하지 않고도 방사능을 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 많은 전극선을 사용하고 검출기의 물리적 형태가 비교적 크기 때문에 background나 잡음에 의한 영향이 크게 나타날 수 있으므로 세심한 주의를 기

여 설계·제작하여야 한다. 일반적인 환경방사능 측정용 다중선 비례계수기는 방사능 오염 정도를 검사하는 용도가 대부분으로, 이들은 검출기 한쪽 면을 얇은 mylar film 등의 입사창을 사용하는 것이 보통이다.

그러나 이러한 측정기들은 측정이 간단하고, 사용이 편리하지만 측정 선원을 검출기 내부에 위치시키는 형태보다 입사창에 의한 방사선흡수효과에 의해 상대적으로 검출효율이 낮고, 검출기의 형태 변화 등으로 인해 측정 정확도에 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 다중선 비례계수기 내부에 선원을 위치시켜 측정할 수 있는, 유효 입체각이 거의 2π 에 가까운 특수 형태의 검출기를 설계·제작하였다.

본 연구에서 개발한 다중선 비례계수기는 측정 부분, 선원 위치부분 및 양극 및 음극선 제작부분 등의 3부분으로 나누어 설계·제작하였다.

측정 부분은 계수가스의 출입구가 서로 상대편 대각선 방향으로 위치되어 계수가스의 흐름을 전체 계수기로 유도할 수 있고, 고전압을 공급할 수 있는 단자를 측면 중심부에 위치시켰다. 외부 크기는 $360 \times 300 \times 35\text{mm}$ 이고 내부 크기는 $350 \times 290 \times 30\text{mm}$ 이며, 실제 측정 가능한 부피는 $250 \times 200 \times 20\text{mm}$ 이고, 측정 가능한 선원의 최대 면적은 $250 \times 200\text{mm}$ 이다. 검출기 자체의 재질은 최소의 background를 나타내고 충격이나 시간 경과에 따른 검출기의 형태변형이 거의 무시될 수 있는 스테인리스 스틸의 피를 가공하여 제작하였다. 검출기 내면은 전기장이 일정하고 잡음효과를 제거하며 방사능 오염이 발생하였을 경우, 오염 제거를 용이하게 하기 위해 매끄럽게 연마하였다.

선원위치 부분은 선원이 일정한 위치에서 측정되고, 선원 두께에 의한 효율변화 등의 보정을 방지하기 위해 선원 높이를 조절하여 교정과 측정이 일정한 조건을 유지할 수 있도록 설계·제작하였다. 측정 선원을 위치할 수 있는 최대 넓이는 측정 가능 면적인 $250 \times 200\text{mm}$ 로 하였으며, 선원의 수직이동거리는 상하 5.0mm 로 하였다.

양극 및 음극선 제작 부분은 각각 2개로 나누어 제작하였으며, 검출기에는 조립식으로 설치할 수 있게 하였다. 양극선과 음극선 사이의 거리는 10.00mm 이고, 각 전극선과 검출기 벽 사이의 거리는 10.00mm , 양극선과 양극선 사이의 간격은 10.00mm 로 총 21개, 음극선과 음극선 사이의 간격은 5.00mm 로 총 42개의 wire

를 사용하였으며, 모든 제작 치수는 1/100mm 이하의 오차로 제작하여 일정한 전기장을 얻을 수 있도록 하였다. 양극선과 음극선의 재질은 직경 50 μ m의 스테인리스 스틸이고 지지대의 재질은 비교적 전기절연도가 양호하고 wire의 tension에 의해 형태가 변형되지 않는 베크라이트를 사용하였다. 양극선과 음극선이 각 지지대와 접하는 곳은 진동에 의한 영향이나 wire의 일정한 tension을 유지할 수 있도록 납땜으로 처리하였으며, 납땜 처리 부분에서의 잠음효과를 최소화할 수 있도록 절연 cover를 베크라이트로 제작하여 설치하였다.

Fig. 1에 각 부분의 상세도를 나타내었다.

2.2. 특성조사

제작된 다중선 비례계수기의 특성조사는 Fig. 2와 같은 측정장치를 구성하여 조사되었다.

특성조사는 알파입자에 의한 개시전압(starting voltage), plateau, 작동전압(operating voltage), background 계수율 등의 측정을 통해 ²⁴¹Am 선원의 계수효율을 산출하였다. 또한 본 검출기는 물리적 형태가 비교적 크고 많은 전극선을 사용하고 있어 위치변화에 따른 감도(position sensitivity)가 다를 수 있으므로 각 위치에서의 감도를 측정하였고, 선원과 양극선 사이의 거리 변화에 따른 감도를 각각 측정하였다.

측정을 위한 증폭기의 이득률 등은 s/n ratio를 고

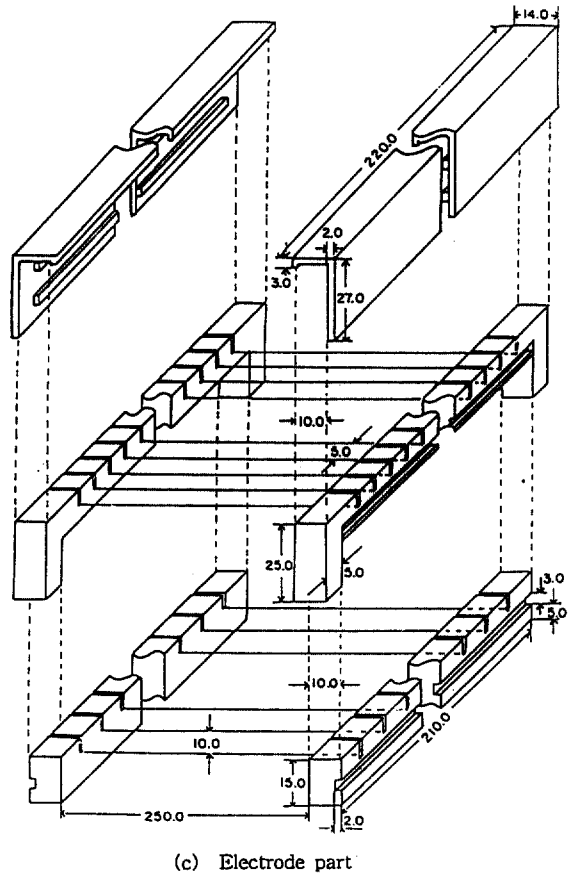
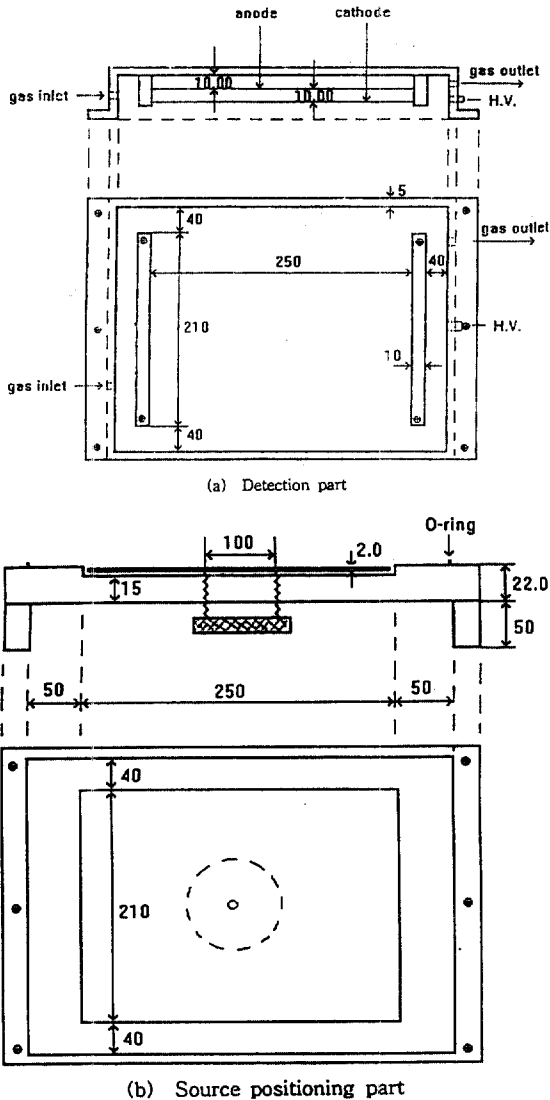


Fig. 1. Lateral views of KRISS MWPC

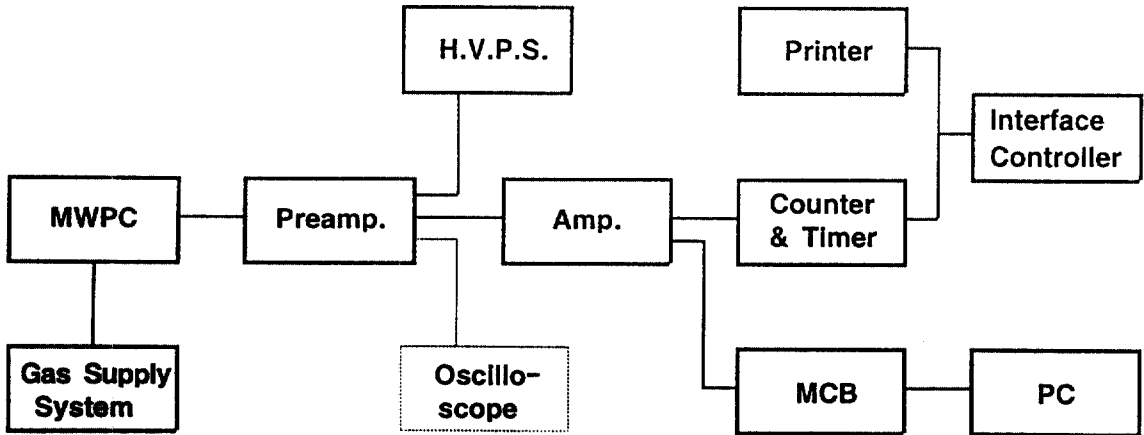


Fig. 2. Block diagram of counting system

려하여 coarse gain은 200, fine gain은 1.0으로 하였으며, auto pole-zero, auto BLR 등을 고정하여 사용하였다. 펄스 shaping time은 각 시간에 따른 스펙트럼을 측정하여 붕괴율, 에너지 분해능, 에너지 linearity 등을 고려하여 가장 적당한 0.5 μ s로 하였다. Fig. 3에 조절된 측정조건에서 얻어진 ²⁴¹Am 핵종의 스펙트럼을 나타내었다.

알파입자를 방출하는 ²⁴¹Am 선원은 미국 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 제작된 방사능 인증표준물질로서 백금판 위에 선원을 전기침착방법으로 deposition하였고, 방사능은 1994년 6월 1일 현재 1932 Bq인 점선원 형태이다.

먼저 ²⁴¹Am 선원을 검출기의 중앙에 위치한 후,

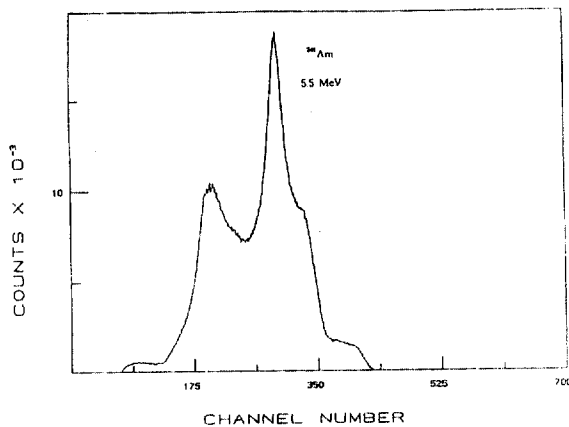


Fig. 3. Obtained ²⁴¹Am spectrum with KRIS MWPC

P-10(90% Ar+10% CH₄) 계수 가스⁸를 약 5분 동안 일정한 유속으로 빠르게 흘려 검출기 내부의 공기 및 수분을 제거한 다음, P-10 가스를 초당 5mL 정도로 flowing하였다. 다음으로 positive 고전압을 전치증폭기를 통해 양극선에 천천히 인가하여 전기장이 안정된 이후, 계수가 시작되는 전압으로부터 10V씩 전압을 올려 100초 간격으로 30회 정도씩 계수율을 측정한 결과 plateau는 80~300V로 나타났다.

Background 측정은 선원이 없는 상태에서 모든 측정조건을 위와 동일하게 한 후, 산출된 작동전압에서 계수율을 측정하였다. 1,000초 간격으로 50회 측정된 background 계수율은 0.013cps \pm 2.3%로 산출되었다.

제작된 검출기에 대한 ²⁴¹Am 핵종의 계수효율은 인증표준물질을 검출기의 중앙에 위치하고 계수 가스를 충분히 flowing하여 검출기 내 공기 및 수분을 완전히 제거한 후 계수 가스를 초당 5mL의 flow rate로 유지시키고, 산출된 작동전압을 서서히 인가하여 전기장이 안정되는 시간인 약 30분 후에 계수율을 1,000초 간격을 50회 측정하여 background 등을 보정하여 산출하였다.

검출기 내 선원위치에 따른 감도는 검출기 중앙을 기점으로 50.0mm 간격으로 좌우 상하로 선원을 이동하며 측정하였다. 전체 측정한 위치는 25 point로서 면적은 250.0 \times 250.0mm(62,500mm²)였고, 한 point당 측정시간은 100초씩 20회로 하였다.

또한 ²⁴¹Am 점선원을 사용하여 선원의 수직방향 이동에 의한 감도변화는 선원을 검출기 내 선원위치대의

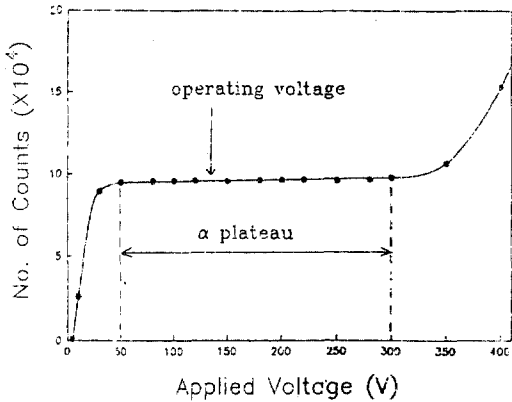


Fig. 4. Alpha plateau and operating voltage of KRIS MWPC

중앙에 고정하고 1.0mm 간격으로 변화시켜 계수율을 측정하여 선원의 표면을 기준으로 비교하였다.

3. 분석 및 결과

개발된 다중선 비례계수기의 작동전압, 안정도, 계수 효율, background, 측정위치 변화에 따른 감도 등의 특

성조사를 수행하였다. 따라서 이들 data를 기준으로 저준위 알파입자의 측정능력, 즉 LLD(Lower Limit of Detection)를 계산하였다. 또한 알파입자 에너지분해능을 측정하여 알파입자 방출핵종분석의 가능성에 대한 실험도 동시에 수행하였다.

알파측정을 위한 작동전압은 150V였고, 이 때 산출된 각 plateau의 기울기는 100V당 1.01%로 나타나 표준기급 2 π 비례계수기와 비슷한 성능을 가지고 있는 것으로 나타났다.

작동전압에서 ²⁴¹Am 선원을 50,000초 동안 측정하여 계산된 표준편차는 0.01% 이하로, 동일 조건에서의 background 계수율은 0.013cps \pm 2.3%로 산출되어 알파입자의 측정 안정도는 매우 양호한 것으로 나타났다.

알파입자에 대한 검출장치의 계수효율은 선원지대 표면 중심에서 48.82%로 산출되어 이론적 계산값인 47.07%보다 1.75% 높게 나타났다. 이것은 시료 및 검출기에 의한 후방산란에 의한 영향으로 판단된다.

본 검출기의 알파입자 에너지분해능은 ²¹⁰Po에서 방출되는 5,304.38keV에 대해 FWHM이 2.78%로 나타나 비교적 양호한 에너지분해능을 갖는 검출기로 판명

Table 1. Sensitivity variations by flow-rate of counting gas

Flow rate (mL/min)	No. of counts	Sensitivity
100	105,770 \pm 0.28%	1.0000
200	105,760 \pm 0.29%	0.9999
300	105,830 \pm 0.35%	1.0006
400	105,600 \pm 0.34%	0.9984
500	105,720 \pm 0.32%	0.9995
600	105,680 \pm 0.30%	0.9992
700	105,790 \pm 0.34%	1.0002
800	105,720 \pm 0.28%	0.9995
900	105,820 \pm 0.09%	1.0005
1,000	105,900 \pm 0.37%	1.0012

되어 알파입자 방출핵종의 대략적인 핵종분석에도 사용할 수 있을 것이다.

계수가스 유량에 의한 감도변화는 P-10 가스의 유량을 100~1000mL/min 범위에서, 100mL/min 단위로 증가하며 동일 선원을 측정하였다. 유량이 100mL/min을 1.0으로 하였을 때, 각 유량에서의 감도를 Table 1에 나타내었다. 이 결과에서, 본 검출장치는 100~1,000mL/min의 계수가스 유량에서는 감도변화가 측정오차 범위 내에 있으므로 측정에 큰 영향은 없는 것으로 확인되었다.

검출기 위치에 대한 감도는 선원을 양극선에 평행방향으로 이동하였을 때, 중심으로부터 50mm 간격으로 전체 250×250mm를 동일한 측정조건에서 조사한 결과 Fig. 5(a)와 같은 결과를 얻었다. 그림에서 보는 바와 같이 중심에서의 감도를 1.0000으로 하였을 때 각 위치에서의 감도는 대부분 측정오차범위 내에서 일치하고 있으나 계수가스 인입구쪽의 감도가 상대적으로 0.5~5.0% 낮게 나타났고 이 결과는 계수가스 흐름에 의한 영향인 것으로 판단된다. 따라서 150×150mm 크기의 선원을 측정할 경우의 감도는 1.0006으로, 250×250mm 크기의 선원을 측정할 경우의 감도는 0.9958로 산출되어 single wire 비례계수기의 감도변화보다는

매우 안정된 결과를 보이고 있다. 또한 상대적으로 감도가 낮게 나타나고 있는, 계수가스 인입구 방향의 지점을 제외한 부분, 즉 측정중심을 좌측으로 50mm 이동하여 측정할 경우, 150×150mm 면적의 감도는 0.9993, 200×150mm 면적의 감도는 1.0003으로 산출되어 단지 0.1% 이하의 감도변화가 있는 것으로 산출되었다.

또한 검출기 중심에서 양극선에 수직방향으로 선원의 표면을 이동하였을 때, 감도 변화 결과를 Fig. 5(b)에 나타내었다.

선원의 표면으로부터 수직방향으로 1mm씩 5mm 이동하여 측정하였을 때의 감도변화는 guard wire가 없는 경우에는 이동거리에 거의 지수함수적으로 변화하고 있으나, 본 검출기에서는 전기장에 의한 영향은 거의 없고 geometry에 의한 계수효율 저하로 나타났다. 즉 수직으로 5mm의 거리를 이동하였을 때 감도변화는 전체 0.35%로 나타나, 대부분의 측정선원 두께가 5.0mm 이하이므로 수직방향의 거리이동에 의한 오차는 0.35% 이내로 산출되었다.

측정된 계수효율, background(S_b), 측정시간(t : 50,000초) 등을 고려하여 계산한 각 핵종의 최소검출 방사능은 95% 신뢰도에서

- gas - outlet	(14)	(13)	(18)	(20)	(3)	H.V.
	1.0027	1.0048	0.9970	0.9967	0.9506	
	(12)	(22)	(19)	(2)	(4)	
	1.0030	0.9969	0.9985	1.0013	0.9952	
	(21)	(24)	(1)	(9)	(11)	
0.9973	0.9990	1.0000	1.0033	0.9888		
(23)	(6)	(8)	(10)	(16)	gas inlet	
0.9975	1.0011	1.0001	1.0053	0.9712		
(5)	(7)	(25)	(15)	(17)		
1.0009	1.0007	1.0010	1.0007	0.9823		

(a) parallel

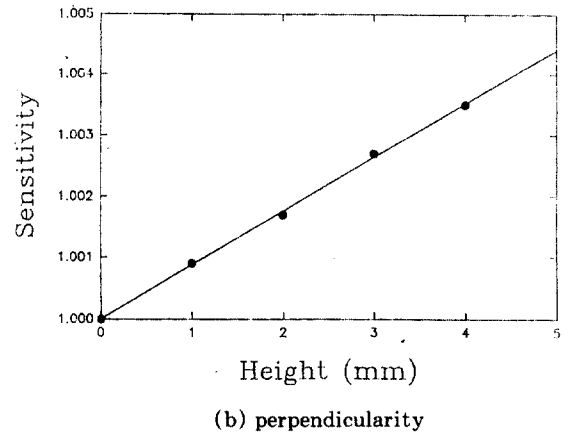


Fig. 5. Position sensitivity of alpha particle with KRIS MWPC

$$LLD = \frac{4.66}{\epsilon} \sqrt{\frac{S_b}{t}} \quad (13)$$

의 식을 사용하였을 때 ²⁴¹Am의 경우 5.0mBq로 산출되어 저준위는 물론 환경방사능 측정에 극히 양호한 측정장치인 것으로 나타났다.

4. 결론

저준위 및 환경방사능 수준의 알파입자 방출핵종의 방사능 측정을 위한 다중선 비례계수기를 설계·제작하였으며, 개발된 검출기의 특성조사를 수행하였다.

개발된 다중선 비례계수기는 알파입자 측정을 위한 작동전압이 150V로 산출되었고, plateau 길이는 약 250V, plateau slope는 100V당 1.01%, 작동전압에서 50,000초 동안 측정된 계수율의 표준편차가 0.01% 이하로 나타났으며, 작동전압에서의 background 계수율이 0.013cps로 매우 안정된 상태로 동작하는 것이 확인되었다. ²⁴¹Am 인증표준물질에 의해 측정된 계수효율은 48.82%로 산출되었고, 이들 data를 이용하여 산출된 LLD는 5.0mBq로서 ISO(International Organization for Standardization)에서 규정하고 있는 환경수준의 알파입자 측정용 장치의 LLD인 40mBq/L⁹보다 낮은 방사능을 분석할 수 있는 양호한 환경방사능 측정용 장치인 것으로 판명되었다. 또한 검출기의 각 위치에 따른 감도를 조사한 결과, 단지 전극선 지지대 부근에서 전장약화의 원인에 의해 0.5~5% 정도의 낮은 감도로 나타났으나 전체적으로 250×250mm 면적의 감도는 검출기 중앙의 감도와 비교하여 0.9958로 산출되어 전체적으로 위치변화에 의한 영향은 계수통계 오차범위 내에서 일치하고 있으며, 중앙에 150×150mm 크기의 선원을 위치하여 측정하였을 때의 감도변화는

1.0006으로 나타나 위치변화에 의한 감도의 영향은 거의 무시할 수 있었다. 본 연구에서 개발한 다중선 비례계수기를 사용하여, ²¹⁰Po에서 방출되는 5304.38keV에 대한 에너지 분해능은 2.78%로 나타나 알파입자를 방출하는 핵종분석에도 사용이 가능한 것으로 확인되었다.

다중선비례계수기의 개발로 환경시료 중 방사능농도 분석능력 확보 및 환경방사능오염의 측정정확도 향상을 기할 수 있게 되었으며, 이를 이용한 환경용 방사능 인증표준물질(RCRM)의 개발을 통하여 국내외에서 필요한 RCRM을 보급할 수 있는 기반을 마련하게 되었다.

참고문헌

1. D. P. Almeida, *Nucl. Instr. and Meth.*, **A314**, 131-135(1992).
2. T. M. K. Marar, *Nucl. Instr. and Meth.*, **141**, 529-531(1977).
3. H. E. Habermehl, W. Kriegseis and A. Scharmann, *Nucl. Instr. and Meth.*, **A303**, 370-373(1993).
4. L. J. Koester, Jr., U. Koetz and S. Segler, *Nucl. Instr. and Meth.*, **82**, 67-71(1970).
5. G. Charpak, R. Bouclier, T. Bressani, J. Favier and C. Zupanicic, *Nucl. Instr. and Meth.*, **62**, 262-268(1968).
6. G. Charpak, D. Rahm and H. Steiner, *Nucl. Instr. and Meth.*, **80**, 13-34(1970).
7. K. Kleinknecht and V. Luth, *Nucl. Instr. and Meth.*, **91**, 221-230(1971).
8. P. Kliauga, H. H. Rossi and G. Johnson, *Health Physics*, **57**(4), 631-636(1989).
9. World Health Organization, "Guidelines for drinking-water quality", 2nd eds, Vol. 1, WHO, Geneva(1993).