

Co-60 감마선의 조사선량 측정

하석호 · 김현문

한국표준과학연구원, 방사선연구실

요 약

감마선 조사선량의 국가표준을 확립하기 위하여 Co-60 감마선에 대한 조사선량을 절대 측정을 수행하였고 그 값이 갖는 오차한계를 분석 평가하였다. 측정기로는 고순도 흑연으로 제작된 원통형 이온전리함을 사용하였고 이온화 전류 측정은 vibrating reed 증폭기를 사용한 전하모드법에 의해 수행되었으며 관련 물리상수 및 각종 관련 보정인자를 평가하여 이온화 전류 측정값으로부터 조사선량을 결정하였다.

Key words : 조사선량, 이온전리함, 공동이론, 이온화 전류, 이온 재결합, 질량 저지능비, 극성효과

서 론

전리방사선이란 물질과 작용하여 직접 또는 간접으로 이온을 만들 수 있는 모든 전자파 방사선 및 입자방사선을 말하며 그 존재는 감각적으로 확인할 수 없으나 필름을 감광시키거나 가스를 이온화 시키며 어떤 물질을 통과할 때 여기 또는 형광작용 등을 일으키게 되므로 이러한 현상에 대한 관측을 통하여 그 존재를 확인할 수 있게 되는 것이다.

이러한 방사선의 특성은 의학적인 진단 및 치료, 비파괴 검사 등 일상생활의 여러 분야에서 다양하게 활용되고 있으나 그 이용에는 필연적으로 위해가 따르게 되는 것이므로 방사선을 이용하는 데 있어 그 효과를 최대화 시키기 위하여는 그 양을 정확히 판단할 수 있는 기준을 보유함으로써 이용에 동반되는 위해를 최소화 시킬 수 있게 된다.

본 연구에서는 방사선량 평가의 기본이 되는 조사선량의 기준을 설정하기 위하여 원통형 전

리함에 의한 감마선 조사선량을 절대측정을 수행하였으며 그에 따른 오차 요인을 분석 평가하였다.

이론적 배경

측정원리

조사선량은 x, γ 선에 의해 표준상태의 건조 공기 단위질량에서 발생된 전자가 공기중에서 모든 운동에너지를 잃을 때까지 만든 “-” 또는 “+”의 총이온화 전하, $\frac{dQ}{dm}$ 로 정의되고 있으며 국제 단위계에서의 단위는 C/kg을 사용하고 있으며 종래의 단위 R은 C/kg과 $1R = 2.58 \times 10^{-4} C/kg$ 의 관계를 갖는다.

조사선량 절대측정에는 Attix 등이 제안한 자유공기전리함[1]과 Gray 등이 제안한 공동전리함[2]이 사용되어 왔으며 Wyckoff가 두 방법의 비교를 수행한 결과[3], 허용오차 범위내에서 일치함이 증명되었다.

일반적으로 500 keV 미만의 광자는 자유공기 전리함을 사용하여 절대측정이 이루어지며 500 keV 이상의 광자에 대하여는 광자와 상호작용이 공기의 그것과 유사한 흑연을 관벽물질로 이용하는 공동전리함이 절대측정에 사용된다.

따라서 본 연구에서는 1.25 MeV의 광자를 측정대상으로 하고 있으므로 공동전리함을 사용하게 되며 공동내에서 광자에 의해 흐르는 이온화전류를 i 라 하고 공동의 수감체적을 v 라 하면 조사선량률 \dot{X} 와는 다음과 같은 관계가 이루어진다.

$$\dot{X} [R/h] = 1.079 \times 10^{13} \frac{1}{v} \cdot \frac{.273.15+T}{273.15} \cdot \frac{.101.325}{P} //Ki \dots (1)$$

- 이때 i : 이온화 전류(A)
- v : 수감체적의 유효부피 (cm³)
- T : 공기의 온도(°C)
- P : 기압(kPa)
- //Ki : 기타 보정인자

위의 식(1)에서 온도, 기압 보정은 수감체적내의 공기가 vent hole에 의하여 외부공기와 유통되므로 대기조건에 따라 공기밀도가 변화하는 것을 보정하기 위한 항이다.

공동이론

방사선에 의하여 어떤 매질내에 흡수되는 에너지는 매질내에 공동을 만들고 그 공동내에서 발생된 이온의 수를 측정함으로써 매질 단위질량당 흡수되는 에너지를 산출할 수 있다.

공동이론이란 매질내에 흡수된 에너지 E_m 와 공동내 공기에 흡수된 에너지 E_{air} 와 관계를 정립하는 개념으로 [4, 5]

$$E_m = E_{air} \left(\frac{S_c}{\rho} \right)_{air} = J \cdot \left(\frac{W}{e} \right) \cdot \left(\frac{S_c}{\rho} \right)_{air} \dots (2)$$

이때 J : 공동내 공기에 발생된 단위부피당 이온수

$\frac{W}{e}$: 공기내에 이온 한쌍을 만드는 데 필요한 에너지

$\frac{S_c}{\rho}$: 전자의 질량충돌저지능

한편 조사선량 X는 에너지 전달을 $(K_c)_{air}$ 라 하면

$$X = (K_c)_{air} \cdot \left(\frac{W}{e} \right)^{-1} \dots (3)$$

따라서 식(2), (3)에서

$$X = J \cdot \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air} \cdot \left(\frac{S_c}{\rho} \right)_{air}^m \dots (4)$$

임을 알 수 있다.

측정기기

공동전리함

조사선량의 절대측정에 사용되는 전리함은 밀도 1.82 g/cm³인 reactor grade(순도 99.9% 이상)의 고순도 흑연을 사용하여 제작한 원통형 공동전리함으로서 측정대상이 Co-60에 의한 γ 선이므로 하전입자 평형상태를 유지하기 위하여 최대에너지 1.33 MeV 광자에 의해 생성되는 콤프톤산란 전자의 최대에너지인 1.1 MeV의 전자가 갖는 흑연내에서의 비정거리 0.65 g/cm² 이상의 두께가 요구되고 있으므로 본 연구에서는 4 mm(0.72 g/cm²) 두께의 벽을 사용하였고, 벽물질의 γ 선 감쇠효과를 보정하기 위한 부가 벽으로 두께가 3 mm, 5 mm, 7 mm, 9 mm인 별도의 원통을 준비하였다.

한편 원통형 전리함을 사용하는 경우 입사 광자의 입사각도가 전리함의 수직전극 중심축을 기준으로 하여 0° 또는 90°에 가까울 때 측벽 또는 상하 벽면에서 과도한 감마선의 감쇠가 일어나는 "distance effect"가 발생하게 됨이

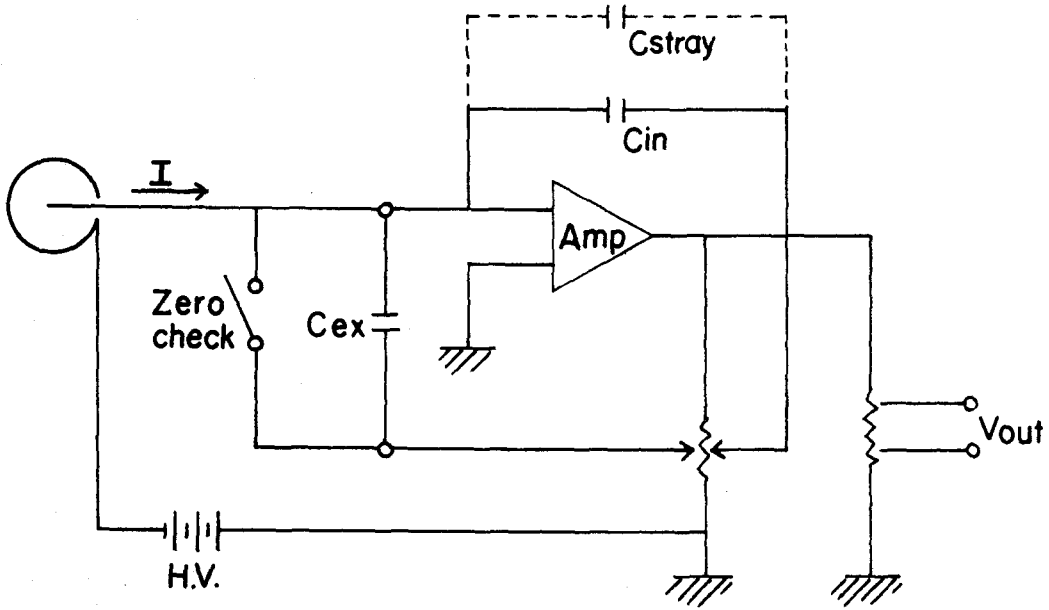


Fig. 1. Vibrating-reed electrometer circuit for charge measurement.

Attix와 Ritz에 의해 밝혀진 바 있으므로[6, 7], 본 실험에서는 광자의 입사각도를 45°로 설정하였다.

이온화전류 측정장치

전리함을 이용하여 절대측정을 수행하는 경우 이온화 전류의 측정이 기본적인 요구사항이 되고 있으므로 이에 관한 많은 시스템이 개발되어 왔다. 본 연구에서는 저전류 측정에 vibrating capacitor amplifier를 사용하였으며, 그 등가 회로는 Fig. 1에서와 같이 구성하였다[8].

Fig. 1에서 C_{in} 은 내부 충전용량, C_{ex} 는 외부 충전용량, C_{stray} 는 내부회로의 표류충전용량을 나타내며 시스템의 총용량 C_{tot} 은 연결 케이블의 유효충전용량을 $C_{eff.cable}$ 이라 할때

$$C_{tot} = C_{ex} + C_{in} + C_{stray} + C_{eff.cable} \dots\dots\dots(5)$$

으로 표시된다.

그러므로 이온화전류 i 는 다음식에 의해 간단히 산출할 수 있게 된다.

$$i = \frac{C_{tot} \cdot \Delta V}{\Delta t} \dots\dots\dots(6)$$

식(6)에서 $\Delta V/\Delta t$ 는 각각 충전기에 인가되는 단위시간당 전압 변동율을 의미한다. 본 실험에 사용된 전체 측정 시스템의 개략도는 Fig. 2와 같다.

실험결과 및 검토

보정인자 K_{at} (zero wall thickness)

조사선량은 2차 하전입자 평형을 충분히 만족시키는 공기중 특정 질량내에 생기는 이온화 전류를 근거로 결정되고 있으나 실제 흑연을 관벽물질로 사용하는 공동전리함이 이용되고 있으므로 관벽물질은 광자의 강도를 저하시키게 되므로 이에 대한 보정을 필요로 하게 된다[9].

K_{at} 는 관벽물질의 두께를 변경시켜 가며 이온화 전류를 측정한 후 무벽상태의 이온화 전류를 외삽에 의하여 찾아낸 후 실제측정에 이용되는

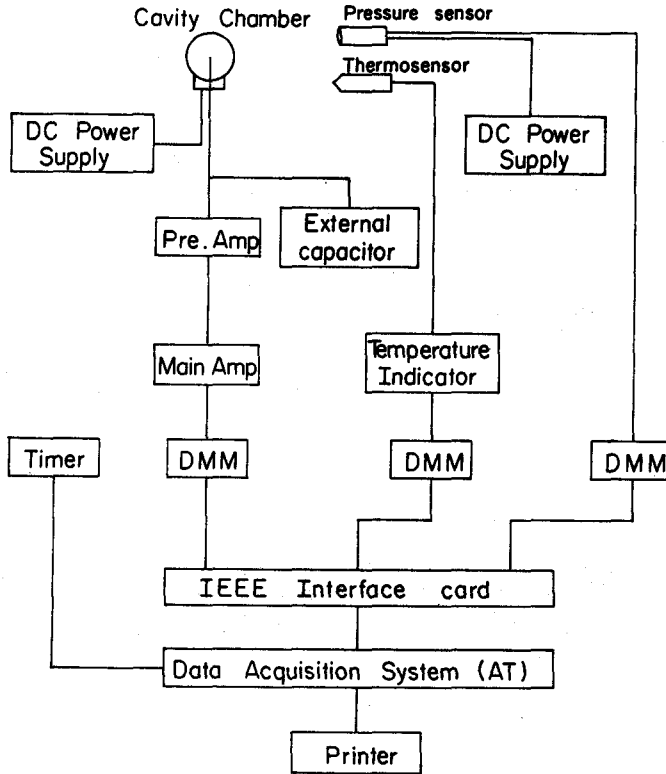


Fig. 2. Block diagram of measurement system.

관벽 물질의 두께에 기인된 감쇠효과를 역으로 보정하게 된다. 본 실험에서 측정된 결과는 그림 3과 같으며 외삽결과 K_{at} 보정인자는 1.032로 결정되었다.

K_{cep} (mean origin of electrons)

공동내에 이온화전류를 형성시키는 2차 전자는 관벽물질내에서 생성되며 Roesch는 2차 전자의 생성위치가 공동 안쪽 벽으로부터 실질전자비정의 0.3배 지점인 관벽물질내의 한점임을 확인하였다[10]. 이 경우 K_{at} 에 의한 보정을 수행하는 경우 광자의 감쇠효과를 과대 평가하게 된다. 따라서 실제 사용된 관벽물질의 두께중 0.3배의 실질 전자 비정은 감쇠효과가 나타나지 않으므로 이와 같은 평균 전자 생성점의 위치에 대한 광자 감쇠효과의 역보정이 필요하게 된다.

Wyckoff는 Co-60의 감마선의 2차 전자에 대한 공기중에서의 실질 전자 비정이 350 cm-atm임을 실험을 통하여 밝힌 바 있으므로[3] 광자에 대한 상호작용이 공기와 유사한 흑연에 대하여도 동일 수치를 적용하면 0.3배의 실질 전자 비정은 0.1358 g/cm²임을 알 수 있고 그림 3의 결과에서 계산된 광자의 질량감쇠계수가 0.0306 cm²/g이므로

$$K_{cep} = e^{-\mu/\rho \cdot \rho x} = 0.996$$

임을 알 수 있다.

K_{sa} (ion recombination)

공동내에 전자에 의해 생성된 전하는 손실없이 전량 수집되어야 하나, 전자장의 세기에 따라 수집효율의 저하현상이 나타나고 있으며 이

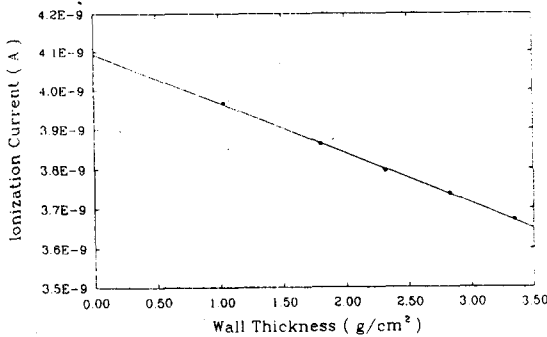


Fig. 3. Ionization current against the chamber wall thickness.

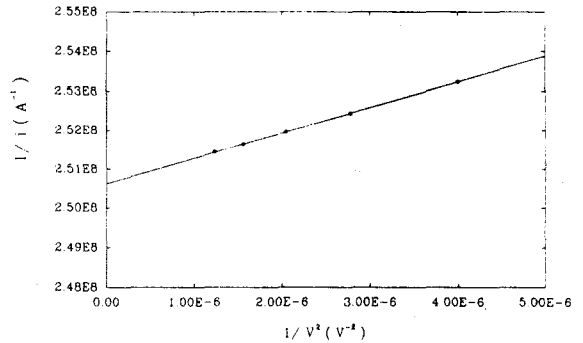


Fig. 4. Relation between $1/i$ and $1/v^2$

는 생성된 전하가 서로 재결합하는 현상에 기인된다. 이와 같은 재결합은 그 원인에 따라

첫째 : 초기 재결합(K_{sa1} : initial recombination)

동일 전자의 궤적을 따라 생성된 전하가 서로 재결합하여 소모되는 경우

둘째 : 일반 재결합(K_{sag} : general recombination)

서로 다른 전자의 궤적을 따라 생성된 전하가 전장의 세기에 따라 이동하다 서로 재결합하는 경우로 생각할 수 있다[11].

K_{sa1} 는 전장의 세기에 의존하며 k_{sag} 는 전장의 세기 및 충전하량에 의존하는 양이다. 이론적으로 초기재결합의 경우, $\frac{1}{i} = \frac{1}{i_0} + \frac{C_1}{V}$ 이고 일반재결합의 경우, $\frac{1}{i} = \frac{1}{i_0} + \frac{C_2}{V^2}$ 인 관계가 있으므로 두 효과가 복합적으로 나타나는 실제의 경우,

$$\frac{1}{i} = \left(\frac{1}{i_0} + \frac{C_1}{V}\right) \cdot \left(\frac{1}{i_0} + \frac{C_2}{V^2}\right) \dots\dots\dots (7)$$

임을 알 수 있다. 한편 K_{sa1} 효과는 K_{sag} 효과보다 작은 값을 지니므로 식(7)에서 K_{sa1} 효과를 배제시킨 후 K_{sag} 효과를 산출하기로 한다.

Loftus는 구형 공동전리함인 경우 $C_1=0.307$ V/cm임을 측정결과로 보여 주었으므로[12] 본

실험에서 사용한 원통형 공동전리함의 수감체적과 동일한 용량의 구형 공동전리함의 경우를 가상하여 구의 반지름을 산출한 후 인가전압이 900 V일때의 K_{sa1} 를 평가한 결과 $K_{sa1}=1.0008$ 로 나타났다. 이와 같이 인가전압에 따라 결정된 K_{sa1} 효과를 측정 data에 보정하면 K_{sag} 효과만이 존재하게 되는데 이를 $\frac{1}{i}$ 과 $\frac{1}{V^2}$ 에 대하여 외삽시키면 K_{sag} 효과를 산출할 수 있게 된다[13].

Fig. 4에 외삽결과를 나타내었다.

이상과 같이 K_{sa1} , K_{sag} 를 각각 평가하여 검토한 결과, 인가전압 -900V에서의 이론재결합 손실보정인자 K_{sa} 는 1.004로 평가되었다.

μ_{en}/ρ (mass energy-absorption coefficient ratio)

광자의 질량 에너지흡수 계수비는 에너지에 따른 고유값을 지니게 되는데 이를 정확히 평가하기 위하여는 스펙트럼을 알아야 한다. Co-60 으로부터 1.17 MeV 및 1.33 MeV의 단색에너지의 광자가 방출되나 측정기의 위치에 도달할 때에는 선원캡슐, 콜리메터, 차폐벽 등의 물질에 의해 산란된 광자가 포함되어 연속 스펙트럼을 갖게 된다. Costrell은 여러 종류의 선원 및 콜리메터에 따른 스펙트럼을 측정한 바 있으며 [14] 그 중 AHC 선원의 경우 본 실험에서 사

Table 1. Weighted mean of mass energy -absorption coefficient ratio

Photon energy (MeV)	relative intensity (%)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)	
		C	Air
0.1	0.74	2.144 E-2	2.318 E-2
0.3	2.6	2.869 E-2	2.872 E-2
0.5	3.8	2.967 E-2	2.966 E-2
0.7	3.7	2.920 E-2	2.918 E-2
0.9	3.8	2.838 E-2	2.835 E-2
1.25	85.36	2.670 E-2	2.666 E-2
$\left(\frac{\bar{\mu}_{en}}{\rho}\right) = \frac{\sum(W_i \cdot \mu_{en}/\rho)}{\sum W_i}$		2.699 E-2	2.697 E-2
$\left(\frac{\bar{\mu}_{en}}{\rho}\right)_{air}$		0.9993	

Table 3. Uncertainties in the determination of exposure rate.

Factors	Systematic (%)	Random (%)
i	0.1	0.1
v	0.2	0.3
T	0.05	
P	0.1	
K _{at}	0.1	0.2
K _{cep}	0.1	
K _{sa}	0.2	0.2
μ_{en}/ρ	0.1	
S/ ρ	0.5	
K _h	0.1	
K _{poi}	0.1	
K _{st}	0.1	
Others	0.1	
Square root of quadratic sum	0.66	0.42
Total uncertainty	0.78	

용된 조사장치와 조건이 일치하고 있으므로 Costrell의 에너지 스펙트럼과 Hubbell의 데이터를 사용하여 [15] 질량 에너지 흡수계수비를 산출하였다. 이때 각 에너지에 대한 강도를 가중치로 활용한 결과 그 값은 0.9993으로 결정되었다. (Table 1 참조)

Table 2. Correction factors and exposure rate.

Factors	Values	Remarks
IK_i	1.0306	
K _{at}	1.032	t=1.03 g/cm ²
K _{cep}	0.996	
K _{sa}	1.0040	-900 V
(K _{sa1})	(1.0008)	
(K _{sa2})	(1.0032)	700 R/h
$(\mu_{en}/\rho)_a^a$	0.9993	
$(S/\rho)_a^c$	1.0033	$\Delta=50$ keV
K _h	0.997	30-60% RH
K _{poi}	0.9996	-900 V
K _{st}	0.9995	
Reference date :		
\dot{X} at 1 m	690.81 R/h	1991.5.10

Table 4. Comparison of exposure standard.

Factors	Values	
	KRISS	ETL
K _{at}	1.032 (t=4 mm)	1.023 (t=3 mm)
K _{cep}	0.996	0.995
K _{sa}	1.0040 (-900 V)	1.0040 (-1200 V)
(K _{sa1})	(1.0008)	(1.0007)
(K _{sa2})	(1.0032)	(1.0033)
$(\mu_{en}/\rho)_a^a$	0.9993	0.9994
$(S/\rho)_a^c$	1.0033 ($\Delta=50$ keV)	1.006 ($\Delta=40$ keV)
K _h	0.997	0.9975
K _{poi}	0.9996	0.9995
K _{st}	0.9995	0.9995
IK_i	1.0306	1.0239
C.F. of A-4 (R/h.A)	4.134 E 11 (1%)	4.150 E 11 (1.5%)

S/ ρ (mass stopping power ratio)

매질로 둘러싸여진 공동내로 들어오는 전자는 매질에 조사되는 감마선과 매질이 상호작용하여 생성된 되튀김전자(recoil electron)가 매질 내에서 연속감속(continuous slowing down)되면서 형성된 스펙트럼을 갖게 된다. 이 경우 공동

내에 들어오는 전자의 평균생성위치는 하전입자 평형조건에 따라 공동과 매질의 경계면으로부터 매질내의 일정 깊이에 존재하는 지점이 되며 그 깊이는 전자가 매질내에서 갖는 실용전자비정의 0.3배이다.

그러므로 Co-60 감마선의 경우 0.1358 g/cm²의 거리에서 연속감속된 후 공동기체에 도달하게 된다.

공동이론에서 요구되는 질량충돌 저지능비는 공동기체에 도달한 전자 스펙트럼에 대한 비를 의미하고 있으므로 저지능비의 결정을 위하여 Costrell의 Co-60 감마선 스펙트럼을 근거로 뒤 튀김전자의 에너지분포를 산출하였으며 이때 광전효과, 콤프턴산란 및 전자쌍 생성에 의한 전자의 스펙트럼이 형성될 것으로 예상되나 광전효과에 의한 전자는 대부분 감속된 후 에너지 하한치 Δ 미만이 되며 전자쌍 생성효과에 의한 전자는 저지능비 산출에 미치는 영향이 미소하므로 컴퓨터 산란에 의한 전자만을 대상으로 스펙트럼을 평가하였다.

본 실험에서 사용된 원통형 전리함을 구형으로 가상하여 Δ 값은 50 keV로 정하였고, 이와 같이 전자의 스펙트럼과 Δ 값을 결정한 후 질량충돌 저지능비를 계산한 결과 1.0033으로 결정되었다.

K_{po1} (polarity effect)

전자가 공동내에서 수집전극에 전에너지를 전해주고 소멸되는 경우 공동내에 부정류가 흐르는 것과 동일한 현상을 보이게 되며 이와 같은 이유로 수집전압을 부로 선택하는 경우 이온화전류는 과대평가되며 반대의 경우 과소평가 된다.

따라서 이와같은 현상등을 보정하기 위하여는 부 및 정전압에 대한 이온화전류의 평균값을 정하고 각 극성에서의 K_{po1} 값을 취하면 된다 [16].

실험결과 부전압(-900 V)를 인가전압으로 하는 경우 K_{po1} 값은 0.9995로 결정되었다.

K_{st} (stem effect)

공동전리함에 감마선을 조사하는 경우 감마선장의 크기는 전리함의 그것보다 크게되며 이때 전리함의 연결부를 구성하고 있는 축이 감마선에 노출되게 되며 그 결과 축으로부터 산란되는 감마선이 측정에 기여하게 된다. 따라서 의 사측을 제작하여 기존의 축에 대칭되는 위치에 부착하여 축으로부터의 산란선 기여를 평가하여 보정하여야 하며 본 실험에서는 K_{st}=0.9995로 측정되었다.

조사선량률

조사선량률 절대측정은 선원으로부터 1m되는 지점을 기준점으로 선택하였으며 Laser 및 Cathetometer를 사용하여 공동전리함 수감체적의 중심점이 콜리메터에 의해 형성되는 빔의 중심축상에 정확히 위치하도록 조절하였다.

공동전리함은 조사각도를 45°로 조절하기 위하여 360° 회전이 가능한 회전대와 높이조절용 정밀 잭 및 지지대를 사용하여 설치하였으며 조사위치에 24시간 이상 방치하여 공동내의 공기가 외부공기와 평형상태가 되도록 하며 조사선량 100 R 이상의 예비조사를 실시한 후 측정을 수행하였다.

측정된 이온화 전류는 식(1)에 의해 관련 보정인자를 보정한 후 최종적으로 R/h의 단위를 갖는 조사선량률로서 결정이 되며 측정값의 우연오차를 최소화하기 위하여 측정은 20회 이상 반복 수행하였다. 인가 전압을 -900 V로 사용할 때의 관련 물리상수 및 보정인자들의 값과 조사선량률 값은 Table 2에 나타내었다.

오차평가

측정에서 그 결과는 오차한계를 지니게 되며 오차요인은 확률에 지배되는 우연오차와 시스템의 구성에 지배되는 계통오차로 생각할 수 있으나 실제 측정에서 두 개념을 분리하여 평가하는 데는 많은 어려움이 따르게 된다. 그러므로 본 실험에서의 오차평가는 우연오차와 계통오차가

복합작용하는 조건으로 두 오차의 역평방근을 산출하였다.

한편 전류측정장치의 교정인자, 물리상수 또는 고유값을 지니는 보정인자는 계통오차로 평가하였으며 이온화 전류, 수감체적등 측정에 의하여 결정되는 인자는 우연오차를 추가하여 평가하였고 신뢰는 95%로 선택하였다.

그 외에 공동의 중심점 위치, 측정온도와 공동기체 온도의 차이, 방사선에 의한 공동기체의 온도상승 및 산란효과 등의 변화는 기타 오차요인으로 평가하였다.

이와같은 개념에 따라 평가한 각 인자들의 오차평가 결과를 Table 3에 나타내었다.

결 론

본 연구에서는 국가표준확립 계획의 일환으로 Co-60 감마선에 대한 조사선량률 절대측정을 위하여 공동전리함에 관련된 공동이론을 검토하였고 각종 보정인자들을 평가하였으며 이온화 전류의 측정을 위하여 vibrating reed electrometer를 이용한 전류측정 장치를 구성하여 그 특성평가를 수행하였다.

선원에서부터 1 m지점에서의 조사선량률값은 690.81 R/h로 결정되었고 그 오차한계는 $\pm 0.8\%$ 임을 확인하였다. 이와같이 결정된 절대값의 검증을 위하여 일본전자기술총합연구소 (Electrotechnical Laboratory)로부터 주기적으로 교정된 바 있는 비교용 기준기인 Exradin 제품 A-4의 교정인자를 통하여 비교하였으며 그 결과 ETL과 본 연구의 결정값은 0.4%의 차이를 나타내고 있음이 밝혀졌으며 관련 보정인자의 비교를 통하여 살펴본 결과는 Table 4에서와 같다.

두 값의 비교과정에서 두 기관이 보여주고 있는 차이점의 주원인으로는 K_{at} 값과 $(S/\rho)_a$ 를 지적할 수 있으나 그중 K_{at} 값의 경우 전리함의 벽 두께가 각각 4 mm, 3 mm인 점을 감안하면 그 차이는 예견될 수 있으므로 $(S/\rho)_a$ 값이 주

된 원인임을 확인할 수 있고 $(S/\rho)_a$ 값의 차이는 이차전자 스펙트럼 산출과 Δ 에너지 설정값 차이에 기인된 결과로 판단된다.

한편 KRISS와 ETL이 제시한 A-4 전리함 교정인자의 오차한계가 각각 1%, 1.5% 인 점을 고려한다면 0.4%의 차이를 보이고 있는 두 기관의 절대측정값은 주어진 오차한계내에서 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

이상에서 평가한 비교는 본 연구의 측정결과를 검증하기 위한 KRISS 자체의 평가결과이므로 국가표준으로서의 당위성을 획득하기 위한 공식적인 국제비교가 수행되어야 할 것이며 그에 따른 국제소급성의 확보가 선행된 후 비로소 국가표준으로서의 가치를 부여할 수 있게 되므로 본 연구원에서는 일본 국가표준기관인 ETL과의 국제비교를 계획하고 있으며 동 비교시 $(S/\rho)_a$ 값 결정의 차이에 대한 보다 심도 깊은 분석이 실시될 예정이다.

참고문헌

1. F.H. Attix, *Electronic Equilibrium in Free Air Chambers and a Proposed New Chamber Design*, NRL Report 5646(1961).
2. L.H. Gray, "An Ionization Method for the Absolute Measurement of γ -Ray Energy", *Proc. Roy. Soc., A*, Vol. 156, 578-596(1936).
3. H.O. Wyckoff, "Measurement of Cobalt-60 and Cesium-137 Gamma Rays with a Free-Air Chamber", *J. Res. NBS.*, Vol.64C, No.2, 87-97(1960).
4. F.H. Attix and W.C. Roesch, *Radiation Dosimetry*, Academic Press, New York (1968).
5. 황성태의 2인. "공동전리함 이론", KSRI-SP-2(1982).
6. F.H. Attix and V.H. Ritz, "A

- Determination of the Gamma-Ray Emission of Radium", *J. Res. NBS*, Vol. **59**, 293-305(1957).
7. A Katoch and I. Yamachi, "Dependence on Gamma-Ray incident Angle of Exposure Rate Absolutely Determined by the Use of Cylindrical Cavity Chambers," *電總研彙報*, **47**, 862-869(1983).
 8. 황선태외 3인, "이온화 에너지 측정연구 (I)", KSRI-90-71-IR(1990).
 9. M.-T. Niatel, T.P. Loftus and W. Oetzmann, "Comparison of Exposure Standards for ^{60}Co gamma Rays," *Metrologia*, **11**, 17-23(1975).
 10. Roesch W.C., "Dose for nonelectronic equilibrium conditions", *Radiation Research*, **9**, 399(1958).
 11. A. Katoch and I. Yamachi, "Establishment of high Intensity Gamma-Ray Exposure Standard," *電總研彙報*, **47**, 846-861(1983).
 12. T.P. Loftus and J.T. Weaver, "Standardization of ^{60}Co and ^{137}Cs Gamma-Ray Beams in Terms of Exposure", *J. Res. NBS.*, Vol. **78A**, No. **4**, 465-476(1974).
 13. J.G. Holt, R.E. Stanton and R.E. Sell, "Ionization Collection Efficiencies of Some Ionization Chambers in Pulsed and Continuous Radiation Beams", *Med. Phys.*, Vol. **5**(2), 107-110(1978).
 14. L. Costrell, "Scattered Radiation from Rarge ^{60}Co Calibrating Source", *Health Phys.*, Vol. **8**, 261-272(1962).
 15. J.H. Hubbell, "Photon Mass Attenuation and Enrgy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV", *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, Vol. **33**, 1269-1290(1982).
 16. B. Markus, "Ionization chambers, free of polarity effects, intended for electron dosimetry", IAEA-SM-160/34, 463-472, IAEA(1973).

Exposure Measurements of Co-60 Gamma rays

Suck-Ho Hah, Hyun-Moon Kim

Korea Research Institute of Standards and Science

ABSTRACT

Measurement of Co-60 gamma rays has been made for establishment of exposure standard and analyze it's overall uncertainties. Exposure rate determined by the charge mode method using vibrating reed amplifier with cylindrical type cavity chamber. The values of a variety of physical constants and the correction factors are evaluated.

The resulting exposure rate is 690.81 R/h at the distance of 1 m from the source and the related uncertainties is $\pm 0.8\%$.

Key words: Exposure, Ionization chamber, Cavity theory, Ionization current, Ion recombination, Mass stopping power ratio, Polarity effect