

표준 감마선 전리함 장치에 의한 방사능 비교 측정

한국 표준연구소

박태순 · 우동호 · 오필제 · 황선태

초 록

Well type 전리함과 미세전류 측정회로를 사용하여 표준 감마선 전리함 장치를 개발하였다. 미세전류는 automatic Townsend balance with stepwise compensation 방법을 사용하여 측정하였다. ^{226}Ra 을 기준 선원으로 택하여 감마 방출핵종인 ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{60}Co , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{22}Na 에 대한 비교 교정인자를 산출하였으며, 감마에너지의 함수로서 검출 효율 곡선을 구하였다.

^{22}Na 들에 대한 교정인자를 산출하였으며, 또한 감마에너지의 함수로서 효율곡선을 구하였다.

서 론

전리함(ionization chamber)은 방사성 핵종의 검출 및 분석 그리고 보진 물리 등 여러 분야에서 널리 사용되고 있으며, 그 형태와 계수 가스의 종류는 측정시료와 방사선의 세기에 따라 다양하다.

본 실험에 사용된 감마선 전리함은 well type 전리함으로서 측정 선원과 검출기간의 기하학적 조건이 거의 4π 이며, 계수 가스로는 20기압의 아르곤(Ar)으로 채워져 있다. 이 감마선 전리함은 한 방사성 핵종에 대한 교정이 한번 이루어지면 후에 같은 방사성 핵종에 대한 측정 및 교정을 수행함으로써 2차 표준을 유지할 수 있고, 다른 시기에 만들어진 표준 선원들과의 일관성을 비교 검사함은 물론 방사능 절대 측정장치인 $4\pi \beta - \gamma$ 동시계수장치에 의해 측정하기 힘든 방사성 핵종과 반감기가 짧은 핵종에 대해서도 0.02%까지의 높은 정밀도로 방사능 측정에 사용될 수 있다.

그러나 이런 조건을 만족시켜주기 위해서는 측정선원의 형태와 크기, 시료 받침의 재질 및 두께, 측정선원과 검출기 사이의 기하학적 인자들을 항상 일정하게 유지시켜야 하며, 전리함 주위의 차폐벽과 모든 방사선 산란물질은 일정한 조건을 유지해야 한다.

본 연구에서는 ^{226}Ra 을 기준 선원으로 사용하여 automatic Townsend balance with stepwise compensation 방법에 의해 ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{60}Co , ^{134}Cs , ^{137}Cs ,

실 험

1. 측정 표준 선원

본 연구에 사용된 측정선원들은 감마선 방출 핵종들로서 액체 선원과 점선원으로 나누어 측정하였다. 액체 선원은 미국 국립 표준국(NBS)과 독일 연방물리청(PTB)에서 동시계수장치와 4π 비례계수기를 사용하여 측정 제작된 4ml와 5ml의 앰플(ampoule) 속에 밀봉되어진 ^{137}Cs 및 ^{134}Cs 의 표준 선원들이다.

점선원은 영국 Radiochemical Centre(RCC) 제품으로서 크기는 직경 1mm의 구형이며, 0.5mm 두께의 폴리에틸렌에 의해 밀봉되어 있다. 이들의 방사능은 Ge(Li) 반도체 검출기를 이용한 분광측정 방법에 의해 결정되었다. 측정선원의 종류와 반감기, 화학적 상태를 Table 1에 표시하였으며, 방사능은 1983년 11월 19일 12시 현재로 나타내었다.

한편, 기준 선원으로 사용된 ^{226}Ra 선원은 반감기(1600±5년)가 길며, 감마에너지 전 영역에서 스펙트럼 분포가 다양하여 전리함의 주기적인 안정도 검사와 측정시료와의 비교 측정에 알맞은 선원이다¹⁾.

^{226}Ra 선원은 액체 선원으로 사용할 경우 앰플내의 액체와 그 위의 공간 사이에 ^{222}Rn 과 그의 자핵들의 분포변화에 의한 영향을 제거하기 어렵기 때문에 부적합하므로 직경 1.6mm, 길이 9.3mm의 원주형 밀봉고체 선원을 앰플 내에 저장하여 사용하였다.

본 연구는 1983년도 과학기술처의 일반 출연 연구사업비의 일부로 수행된 것이다.

Table 1. Measured Source

No.	Nuclide	Half life(year)	Chemical Composition	Activity($\mu\text{Ci} \pm \%$)	Reference
1	^{241}Am	432.6		10.905 ± 5	RCC Point Source
2	^{137}Cs	30.0		10.46 ± 3.7	"
3	^{133}Ba	10.74		8.74 ± 4.8	"
4	^{60}Co	5.271		7.12 ± 1.9	"
5	^{22}Na	2.602		4.55 ± 3.7	"
6	^{137}Cs	30.0	20 $\mu\text{g/g}$ CsCl in 0.2M-HCl	64.94 ± 0.7	PTB Ampoule-type Liquid Source
7	^{134}Cs	2.062	20 $\mu\text{g/g}$ CsCl in 0.2M-HCl	40.74 ± 0.1	"
8	^{137}Cs	30.0	100 $\mu\text{g/g}$ CsCl in 0.1M-HCl	5.672 ± 1.5	RCC Ampoule-type Liquid Source
9	^{134}Cs	2.062	57 $\mu\text{g/g}$ CsCl in 0.1M-HCl	18.016 ± 1.2	NBS Ampoule type Liquid Source

2. 실험장치

본 장치의 검출 부분인 전리함은 장기간에 걸쳐서 안정도가 좋고, 방사선의 세기에 대한 반응이 선형적이며 측정선원의 위치 변화에 적은 영향을 받는 well type 전리함이다.^{2,3)} 측정선원과 전리함간의 입체각은 거의 4 π 이며, 전리함 내부는 20기압의 아르곤 가스로 밀봉되어 있어 대기압 전리함에 비해 20배의 이온화전류를 얻을 수 있으며, 또한 10 μCi 이하의 방사능 세기에도 정확하게 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다.

전리함에 인가된 전압은 300V로서 이 값은 전압증가에 따른 이온화 전류를 측정하여 포화전류 곡선을 얻어 포화 전류 손실을 고려하여 결정하였으며, 전리함 주위에는 5cm 두께의 납벽돌로 차폐하여 background

전류와 전리함 주변의 방사선 산란물체로부터의 영향을 최소화시켰다.

다음 감마선 전리함에 의한 방사성 핵종의 방사능측정은 전류로 나타나며, 그 전류 측정범위는 방사성 핵종과 방사능에 따라 $10^{-7}\text{A} \sim 10^{-13}\text{A}$ 정도로 매우 작은 값이다. 따라서 이같은 미세전류는 측정시 잡음 전류(noise current)의 영향과 background 방사선에 의한 영향을 받으므로 이 측정장치는 10^{-15}A 이하의 전류를 측정할 수 있는 고감도를 가져야 한다. 미세전류 측정 회로에는 electrometer picoammeter 방법과 전류축적(current integration) 방법이 있는데 electrometer picoammeter 방법은 짧은 순간의 전류를 즉시 측정할 수 있는 장점이 있으나 noise의 영향을 많이 받을 경우 측정값이 매우 불안정하고 급격하게 변하므로 측정

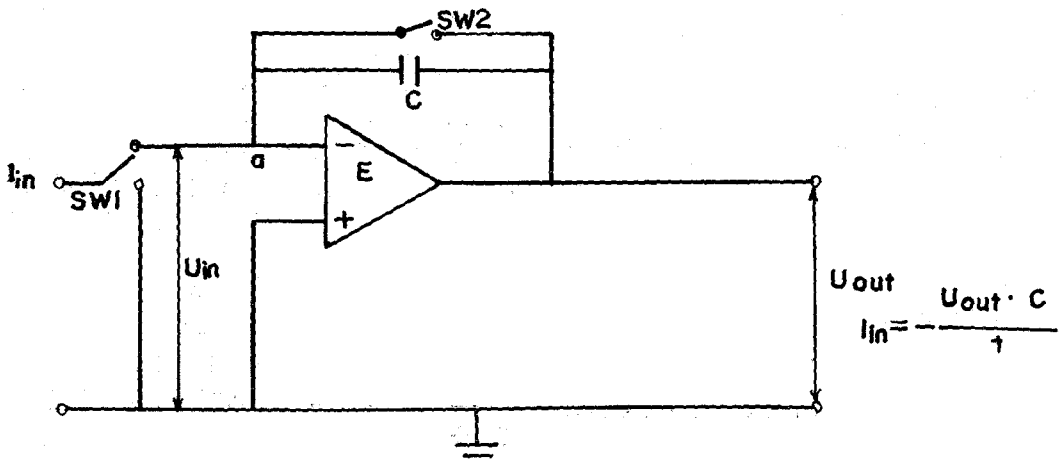
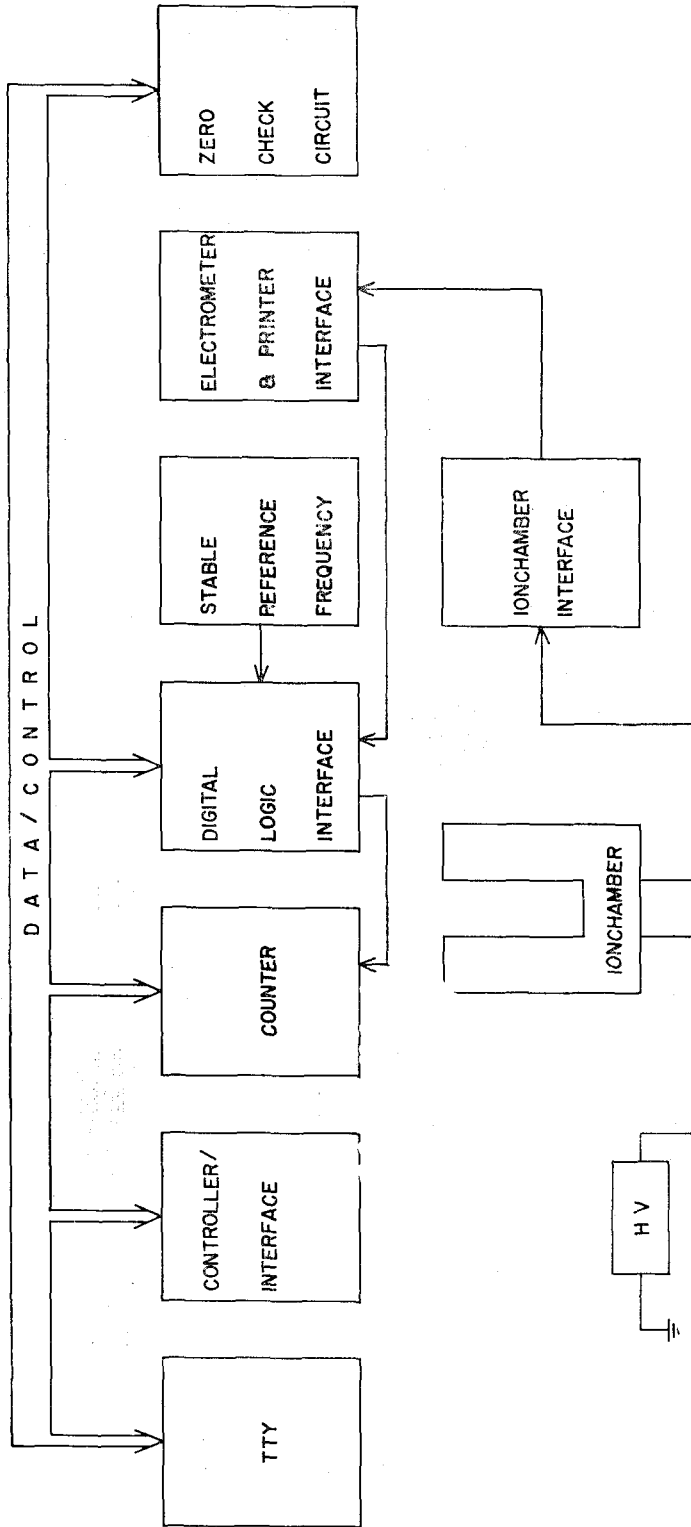


Fig. 1. Feedback-type current integrator



BLOCK DIAGRAM OF THE ELECTRONIC SYSTEM FOR THE MEASUREMENT OF IONIZATION SYSTEM

Fig. 2. Block diagram of the ionization current measurement system.

값에서 잡음 전류 값을 보정하기가 어렵다⁴⁾. 전류 측정방법은 잡음 전류나 누출 전류 및 background 방사선에 의한 전류 등을 제외한 측정하고자 하는 실제 전류만을 정확히 측정할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 실험에서는 측정 전류 값의 안정화와 누출 전류 및 잡음 전류에 영향을 거의 받지 않는 전류 측정방법을 채택하였다.

전류 측정방법에는 shunt-type과 feedback-type의 두 형태의 회로가 잘 알려져 있는데 본 실험에서는 전리함에서 미세 전류 측정장치까지 전류를 전송하는 전선에 등가전기용량을 무시할 수 있고, 입력 전기용량 값이 커짐에 따라 잡음 전류도 상당히 감소하는 feedback-type 전류 측정회로를 채택하였다. Fig. 1은 제작된 feedback-type 측정회로이다.

3. 측정방법

이온화전류를 측정하는 방법에는 여러가지가 있으나 본 실험에서는 방사성핵종에 대한 측정의 통계적 변동과 반복 측정에 적합하며, $10^{-15}A$ 의 전류에서도 고감도를 유지하는 automatic Townsend balance with stepwise compensation 방법을 사용하였으며, 미세전류 측정을 위한 개략도가 Fig. 2에 소개되었다.

Fig. 2와 같이 전류 측정은 전리함으로부터 interface를 거쳐 digital electrometer에 입력된 전류가 electrometer내의 축전기를 통하여 coulomb mode로 표시되어지며 전압 증폭기의 feedback-loop로 연결된 축전기에 의한 출력 전압은 digital logic 회로에 입력된다. Digital logic회로에 입력된 전압이 이 회로내에 설치

된 문턱준위전압(threshold level voltage) V_1 에 도달했을 때 timer는 작동을 시작하여 V_2 에 도달할 때까지의 시간 t 를 구한다. 본 실험에서는 timer대신에 전류 측정시간을 보다 정확하게 측정하기 위해 주파수 분배기(frequency divider)와 계수기를 사용하여 10^{-5} 초까지 측정할 수 있게 하였으며, 10^{-4} 으로 분주하여 100초를 측정했을 때의 오차는 ± 0.001 초로 나타났다. 또한 방사선에 의한 통계적 변동과 전기 용량, 고저항 등의 변화 및 선별기의 문턱 준위의 불안정 등에 의한 측정장치의 변화가 정밀 측정에 주는 영향을 제거하기 위해 기준 선원과 측정 선원을 번갈아가며 측정에 도입하였고, 각 측정에 대해 10회씩 반복하였다.

전리함의 진입관(reentrant tube) 내의 선원 위치에 따른 이온화 전류의 변화를 극소로 줄이기 위해 기준 선원 및 측정 선원은 tightfitting holder를 사용하여 전리함의 감도가 가장 좋은 곳에 위치하도록 하였으며 시료받침은 베타 입자의 투과를 방지하고 제동 복사의 발생을 최소화하기 위해 2.5mm 두께의 공기등가물 질인 perspex로 제작하였다.

결과 및 분석

전류의 정밀측정을 위하여 계측장치와 전리함은 일정 온도($22.5 \pm 0.5^\circ C$)하에서 유지되어졌으며 전리함의 특성을 알아보기 위해 다음의 실험을 수행하였다.

(1) ^{226}Ra 기준 선원 $10\mu g$ 을 사용하여 well type 전리함내 측정선원의 위치 변화에 따른 이온화전류의 변화를 측정하였다⁵⁾. 측정은 전리함내의 중심축으로부터

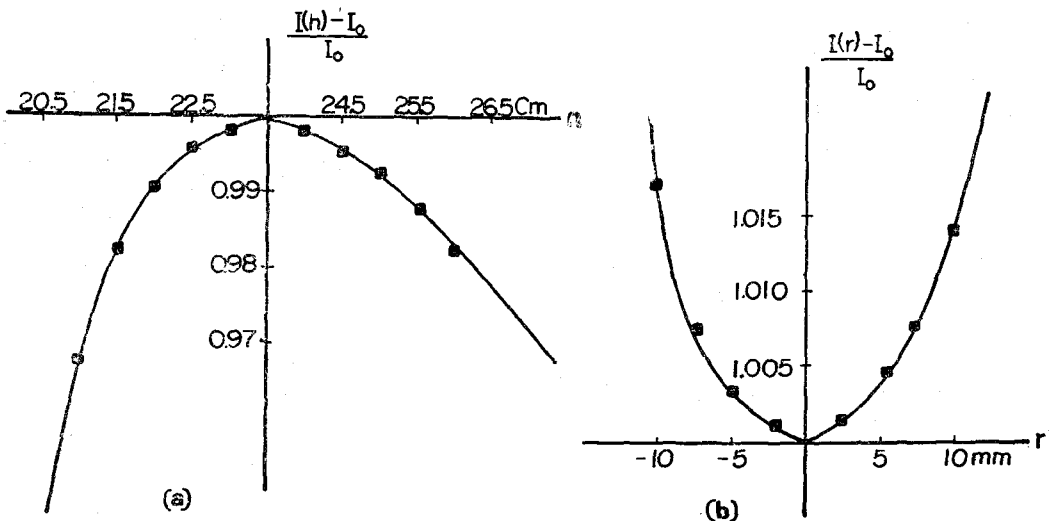


Fig. 3. Relative variation of the ionization current measured as a function of displacement of the reference source in (a) axial and (b) radial direction

반경 방향으로 옮겨 가면서 측정하여 이온화 전류값 $\frac{-I_0}{I_0}$ 가 최소가 되는 지점을 찾은 다음 측방향으로 전리함 진입관의 바닥으로부터 0.5cm 간격으로 전리함 입구까지 측정하여 감도가 제일 좋은 최대 지점을 찾은 결과 Fig. 3과 같이 측 방향으로 23.5cm 높이에서 최대값과 중심축에서 최소값을 얻었다. 따라서 본 실험에서는 측정 선원이 항상 위 최대, 최소지점에서 측정될 수 있도록 시료받침을 제작하여 사용하였다.

(2) 전리함의 재현성을 알아보기 위해 기준 선원을 계속 전리함내에 두어 반복 측정해 본 후 기준 선원을 전리함으로부터 꺼내어 기준 선원을 시료받침으로부터 빼후 다시 역순서에 의해 전리함에 집어 넣고 이와 같은 방법으로 30회 측정하였다. 측정 결과는 Fig. 4와 같이 두 방법이 거의 비슷하게 나타났으며, 한번 측정에 대한 값은 10회씩 반복 측정하여 그 평균치로 나타내었고, 표준 편차는 0.09% 정도였다.

(3) Electrometer내에 있는 축전기 C의 값을 알아보기 위해 picoampere source를 사용하여 전류를 일정 간격으로 증가시켜 가면서 측정한 결과 10pA부터 100pA까지 C값의 평균은 102.546pF로 나타났으며 평

균 값에 대한 오차는 0.07%로 좋은 결과를 얻었다.

이상의 결과로부터 측정 선원에 대한 교정인자와 효율곡선을 다음과 같이 구하였다.

일반적으로 기준 선원에 대한 단일 감마선을 방출하는 측정 선원의 비교 교정인자 $K_{R,r}$ 는 다음과 같이 주어진다⁶⁾.

$$K_{R,r} = P_r A \frac{R_R}{R} \quad \text{or} \quad A = \frac{K_{R,r} R}{P_r R_R} \quad (1)$$

여기서 R 은 붕괴확률 P_r 를 갖고, 감마선 에너지 E 를 방출하는 표준 선원에 대한 측정 전류값이며, A 는 표준 선원의 방사능, 그리고 R_R 은 기준 선원에 대한 측정 전류 값으로서 일반적으로 R 과 R_R 은 표준 축전기의 시간에 대한 전압 변화율을 나타낸다. 또한 감마 에너지의 함수로서 $1/K_r$ 에 대한 곡선을 도면화 하면 붕괴율을 알고 있고, 여러 감마선 에너지를 방출하는 핵종에 대한 유효 교정인자를 구하는 것도 가능하다.

이들 핵종에 대한 방사능은

$$A = \frac{R}{R_R} \sum_i \left(\frac{K_{R,r}}{P_r} \right) \quad (2)$$

로 주어진다. 여기서 K_R 은 방사능의 차원을 갖게 되며 실제에 있어 기준 선원에 대한 등가방사능을 나타낸다.

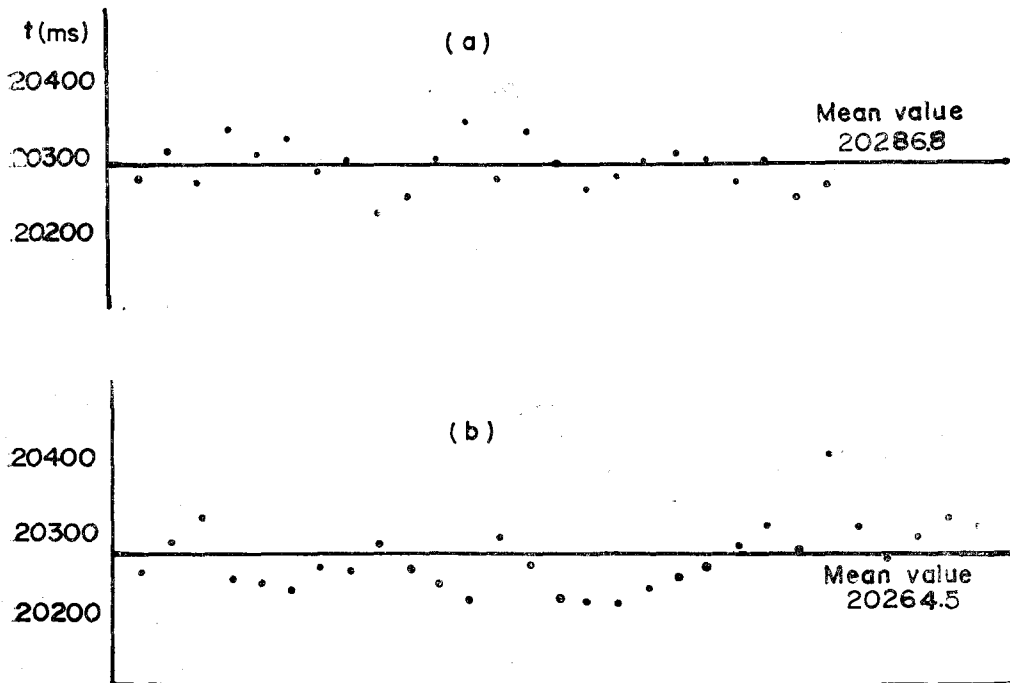


Fig. 4. Repeatability tests of the ionization current produced by the reference source
 a) source remained in the chamber at all times
 b) source taken out of the support at each time

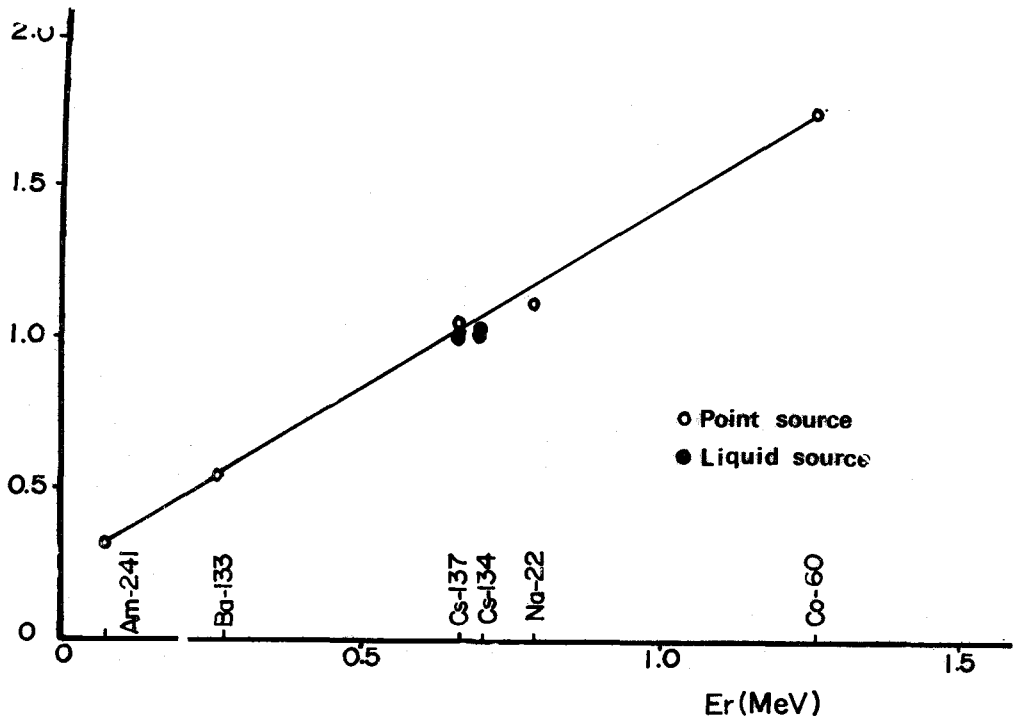


Fig. 5. Efficiency function

Table 2. Final results for 4π gamma ionization chamber

No.	Nuclide	Mean Energy (keV)	Abundance (%)	Measured Current		Calibration Factor ($K_{R,r}$)	Efficiency	Reference
				Sample (pA)	Reference (pA)			
1	²⁴¹ Am	57	43.2	1.412	21.794	72.713	0.301	Point Source
2	¹³⁷ Cs	662	85.4	9.442	21.873	20.694	1.057	Point Source
3	¹³⁷ Cs	662	85.4	55.220	21.900	21.317	1.027	PTB Ampoule
4	¹³⁷ Cs	662	85.4	5.070	21.897	20.920	1.047	RCC Ampoule
5	¹³³ Ba	267	136.0	6.582	21.791	10.405	0.554	Point Source
6	⁶⁰ Co	1253	199.9	24.913	21.661	12.375	1.750	Point Source
7	²² Na	782	281.2	14.653	21.922	19.142	1.144	Point Source
8	¹³⁴ Cs	696	223.2	94.360	21.840	21.047	1.037	PTB Ampoule
9	¹³⁴ Cs	696	223.2	41.929	21.035	21.037	1.042	NBS Ampoule

또한 에너지 E 의 감마선을 방출하는 핵종에 대한 전리함의 검출 효율 $\epsilon(E)$ 는 교정인자 $K_{R,r}$ 에 반비례하며 다음 식으로 주어진다.

$$\epsilon(E) = I_0 / A_0 P \quad (3)$$

여기서 A_0 는 이온화전류, I_0 의 크기를 갖는 등가방사능을 말하며, P 는 에너지 E 의 감마선 방출 확률이다. 따라서 실험에 사용된 측정 선원 중 ¹³⁷Cs를 제외한 나머지 핵종은 에너지가 다른 두 개 이상의 감마선

을 방출하므로 $\sum_{i=1}^n E_i P_i / \sum_{i=1}^n P_i$ 에 의해 각 핵종의 평균 에너지 \bar{E} 를 구하였다.

또 측정시간 t 로부터 그리고 (1)식과 (3)식에 의해 비교 교정인자 $K_{R,r}$ 과 검출 효율 $\epsilon(E)$ 를 산출하여 Table 2에 각 핵종에 대한 평균 감마에너지, 붕괴확률 측정선원과 기준 선원에 대한 이온화 전류를 함께 나타내었으며, Fig. 5에 감마 에너지의 함수로서 각 핵종

에 대한 검출 효율 $\epsilon(E)$ 를 나타내었다.

Fig. 5에서 저에너지 감마 방출 핵종으로부터 고에너지 감마 방출 핵종으로 갈수록 검출 효율은 높아진다는 것을 알 수 있고, ^{241}Am 의 $\epsilon(E)$ 가 0.301로 가장 작고 ^{60}Co 의 $\epsilon(E)$ 가 가장 큰 1.750이었다. 이들에 대한 효율 곡선은 거의 선형적으로 나타났으며, Weiss⁷⁾가 구한 값과 거의 일치함을 보여주고 있다. 이 때 측정선원의 상태에 따른 비교 교정인자와 검출 효율의 차이를 알아 보았는데, ^{137}Cs 의 점선원과 RCC 및 PTB에서 보급된 액체 선원들과의 차이는 점선원과 비교할 때, 그 교정인자는 3.0%와 1.1%, 검출효율은 0.95%로 나타났으며, ^{134}Cs 에 대해서는 PTB와 NBS의 액체 선원과는 비교 교정인자가 0.05%, 검출효율은 0.48%로 나타났다.

이와 같은 차이는 앰플의 벽두께, 밀도, 높이 등의 차이로 인한 것이다⁸⁾. Fig. 5에 보인 효율곡선으로 단일 감마선 에너지를 방출하는 핵종에 대한 감마선 붕괴확률과 교정인자를 산출할 수 있으며, 절대 측정이 어려운 핵종이나 특별한 측정기술을 요하는 핵종에 대해서도 이 방법을 이용하여 방사능을 구할 수 있다. 측정 오차의 가장 큰 원인은 액체 선원을 담고 있는 앰플의 형태와 전리함의 재현성인데 이것은 실험에 의해 결정될 수 있다. 본 실험에서는 점선원을 사용하였기 때문에 앰플 형태에 대한 오차는 무시되었으며, 재현성의 문제는 10회씩 반복 측정된 값들의 표준 편차에 대한 비로서 Fig. 4의 (a)의 경우는 0.16%, (b)의 경우에는 0.23%를 각각 얻었다. 따라서 측정 선원의 방사능값에 대한 오차와 비교할 때 실험장치와 측정기술에 기인된 오차는 이 오차 범위내에 모두 들어가므로, 한 표준 선원에 대한 교정 인자가 구해지면 같은 핵종에 대한 방사능 측정은 이 오차 범위안에서 정확하게 측정될 수 있다.

결 론

본 연구에서는 감마선 전리함 장치의 제작과 이를 이용한 측정 표준 선원들에 대한 비교 교정인자와 검출

효율곡선을 구하였다. 이 검출효율 곡선을 이용하여 미지의 핵종에 대한 방사능을 다른 장치에 비해 간단하고 신속 정확하게 구할 수 있게 되었으며, 본 연구 결과로부터 기존 선원을 사용하여 장기간에 걸친 주기적 측정으로 방사성 핵종의 반감기를 정확하게 구할 수 있게 되었다. 또한 본 연구실에서 제작되는 여러 가지 표준 방사선원을 사용하여 본 전리함의 검출 효율곡선을 보간법(interpolation)으로 보다 더 정확하게 구할 수 있게 될 것이다.

본 연구의 수행으로 방사능 표준 분야의 표준 선원의 제작, 유지 및 보급이 가능하게 되었으며, 또한 국제도량형국(BIPM) 산하 SIR(International Reference System)과 표준 감마선 전리함장치에 의해 측정된 감마 방출핵종의 결과를 상호 비교함으로써 방사능 측정의 국제적 소급성을 유지할 수 있는 능력을 갖게 되었다.

참 고 문 헌

- 1) J.W.G. Dale, W.E. Perry and R.F. Pulfer, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* **10**, 65(1961)
- 2) A. Rytz, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* **34**, 1047 (1983)
- 3) A. Sankaran and R.S. Gokarn, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* **33**, 341(1982).
- 4) K. ZSDANSZKY, *Nucl. Instru. and Meth.* **112**, 299(1973)
- 5) I. Bucina, K. Zlesky and P. Kucera, *Standardization of Radionuclides SM 79/35 IAEA, Vienna* (1967)
- 6) NCRP, *A Handbook of Radioactivity Measurements Procedures*, NCRP **58**, p.178~190(1978)
- 7) H.M. Weiss, *Nucl. Instru. and Meth.* **112**, 291 (1973)
- 8) M.J. Woods, and E.M. Lucas, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* **26**, 488(1975)

**Comparative Measurement of Radioactivity with Standard Gamma-ray
Ionization Chamber System**

Tae Soon Park, Dong Ho Woo, Pil Jae Oh, Sun-Tae Hwang

Korea Standards Research Institute

=Abstract=

A Standard gamma-ray ionization chamber system was developed with a well type ionization chamber and micro current measuring circuit. Micro current was measured by the automatic Townsend balance with stepwise compensation method.

For gamma emitting nuclides such as ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{60}Co , ^{134}Cs , ^{137}Cs , and ^{22}Na , relative calibration factors to ^{226}Ra reference source were calculated and detection efficiency curve was determined as a function of gamma energy.