

중준위 조사선량을 측정용 전리함의 설계 및 특성

우 흥*, 김성환**, 강희동**

경산대학교 물리학과*

경북대학교 물리학과**

초 록

조사선량을 5mR/h 이상에서 동작하는 원통형 전리함을 설계·제작하고 상용의 전류계를 이용하여 전하수집 특성을 조사하였다. 전리함은 전체 길이 15.5cm, 직경 5.22cm인 원통형이고 활성체적은 190.4cm³이다. 전리함의 전극은 벽면, 중심축 및 보호전극으로 구성하고, 이들을 동심축상에 배치하여 바탕전류가 $8.39 \times 10^{-14} \pm 1.5 \times 10^{-15}$ A이 되게 하였다. 전리함에 인가된 전압이 400V일 때 Cs¹³⁷에 대하여 99.7%의 수집효율을 보였으며, 상용의 선량계와 비교한 결과 교정정수 4.531×10^6 R/C를 구하였다. 에너지 응답특성은 Cs¹³⁷을 1로 하였을 때 Am²⁴¹과 Co⁶⁰는 각각 1.30, 1.05로 나타났다. 방사선이 전리함의 측면으로 입사할 경우 입사방향에 따른 응답특성의 차이는 무시할 수 있었다.

서 론

최근 수십년 동안 방사선 선량을 측정하기 위하여 다양한 고체 및 화학적인 방법이 개발되어 왔으나 칼로리메트리가 아직도 절대 표준선량계로 사용되고 있다. 전리함은 검출 신호가 다른 기체 검출기보다 상대적으로 미약하여 전리함의 활성체적이 여타 선량계보다 크다. 현재의 전기전자공학 기술은 정확성과 재현성을 가지고 아주 작은 신호의 검출을 가능케하여 전리함의 활성체적을 어느 정도 줄일 수 있고, 그 측정선량의 범위도 확대할 수 있게 되었다. Guiho와 Simoen¹⁾에 의하면 전리함을 사용한 선량계의 계통적오차는 0.55%로서 전리함은 상당한 재현성을 가지고 정확하게 조사선량 및 흡수선량을 측정할 수 있어 선량계로서 가장 중심적 위치에 있으며 또한 폭넓게 사용되고 있다.

전리함은 원리적으로 기체충진 검출기로서 가장 단순하며, 동작원리는 전장이 인가된 기체에 방사선의 직접적 전리작용에 의해 생겨난 모든 전하를 수집하는 것이다. 다른 방사선 검출기와 마찬가지로 전하 및 펄스 모드로 동작시킬 수 있다. 비례계수기, Geiger관 등은 펄스 모드로 동작시키지만 전리함은 일반적으로 전하 모드를 사용한다. 전리함의 모양은 방사선장에 따라 적합하게 선택되어야 한다. 균일한 방사선장에는 원통형 및 구형 전리함이 적합한 반면 조사선량의 변화가 현저한 영역에서는 평형판 전리함이 적합하다.

전리함을 이용한 선량계는 방사선 감지부분인 전리함과 전리함의 신호를 전기적 신호로 바꾸는 계측기 부분으로 나눌 수 있다. 본 연구는 전리함의 체적 및 전극간 거리를 고려하여 측정대상 방사선의 최소선량율이 5mR/h인 x- 또는 γ -선으로 한정하여 전리함을 설계·제작하고, 상용화되어 시판되고 있는 전류계 이용하여 검출 특성을 조사하였다.

재료 및 방법

전리함은 측정대상방사선을 x- 또는 γ -선으로, 병원의 진단방사선에서 주로 이용되는 조사선량을 범위에서 사용하도록 한정하였다. 따라서 전리함의 활성체적이 상대적으로 커야하고, 전극간 거리가 상당히 멀어야 되므로 수집효율을 고려할 때 전리함의 형태는 평형판이나 구형보다 원통형이 적합하다. 벽물질은 입사 방사선장에 교란을 주지 않는 공기가 좋으나 이는 현실적으로 어렵기 때문에 베이크라이트, 폴리스틸렌, A-150, PMMA, 등과 같은 플라스틱을 많이 사용하므로 PMMA($\rho=1.19\text{g/cm}^3$)를 전리함의 벽물질로, 모양은 내경 5cm, 길이 10cm, 활성체적이 190.5cm^3 인 원통형으로 전리함을 제작하였다.

벽물질의 두께는 Cs^{137} 에너지에 전자평형을 맞추어 $0.132\text{g/cm}^2/1.19\text{g/cm}^3=0.11\text{cm}$ 로 하였다. 원통의 안쪽 및 바깥쪽 벽면에 두께 0.1mm로 Eltrodag 109(Achson, USA)를 프린팅 기술로 코팅하여 전리함의 벽면전극으로 사용하였다. 충전기체는 조사선량의 표준매질이 공기²⁾이기 때문에 공기로 하였다. 전리함의 공기는 방사선 측정시 주변환경과 같은 기압 및 온도를 유지하도록 원통전리함의 아랫면에 직경 1mm의 작은 구멍을 뚫었다.

전리함의 전극은 벽면전극, 중심축전극과 보호전극으로 구성하여 모든 전극이 동심축상에 있도록 배열하였으며, 전하 수집전극으로는 벽면 전극과 중심축전극을 사용하였다. 고전압 인가시, 기타 외부 요인에 의해 발생하는 누설전류 방지를 위하여 사용된 보호전극은 두 전극 사이에 위치하며 활성체적에 영향을 주지 않도록 하였다. 보호전극은 원통형으로 하고 외부전선과 연결을 위하여 인청동을 사용하였으며, 내경 8.5mm, 외경 9mm, 두께 0.5mm, 길이를 11.5mm로 속이 빈 원통으로 제작하였다. 벽물질로 플라스틱을 사용한 대부분의 전리함이 벽물질에 Eltrodag코팅을 하여 전극으로 사용하듯이³⁾ PMMA 원통의 양쪽면 모두를 Achson사(USA)의 Electrodag 109를 메틸에틸케톤(MEK)에 희석하여 프린트 기술로 두께 약 0.1mm로 코팅하여 면저항이 $40\Omega/\text{cm}^2$ 이하인 벽면전극을 만들었다. 벽면전극과 외부전선의 연결전극은 보호전극에서 사용한 같은 재료인 인청동을 사용하였다.

중심축전극은 주로 원자번호가 낮은 금속을 많이 사용하며, 전극 주위 전장이 균일하도록 그 표면이 매끄러워야 한다. 중심축전극은 표면 돌출부의 크기를 0.001cm 이하로 알루미늄을 연마하여 길이를 7.5cm, 직경을 0.55cm으로 하였다. 원통형 전리함의 경우 중앙에 있는 중심축전극의 끝에서는 전기력선이 제일 강하게 형성되므로 중심축전극의 끝에서 형성된 이온들은 충전기체와 충돌하여 이온증식이 일어날 수 있다. 이러한 이온증식을 방지하려면 전장의 세기가 1kV/mm 이하⁴⁾가 되어야 하므로 중심축전극 끝의 반경을 r , 원통의 내경을 c , 인가전압을 V 로 하면 전극 끝에서의 전장의 세기는 $Vc/r(c-r)$ 로 주어지며, 원통의 내부에서는 $V/[r\ln(c/r)]$ 으로 주어진다. 전리함의 모든 점에서 전장의 세기를 1kV/mm 보다 약하게 하기 위하여 중심축전극의 끝을 반구형($r=0.275\text{cm}$)으로 하고, 중심축전극과 전리함벽의 간격을 2.5cm로 하였다.

최소 조사선량을 5mR/h 으로 하고 수집효율 1로 가정하면 계측기에 수집되는 최소 수집전류를 $Q=X\rho_{air}B$ 으로 구하면 $8.82\times 10^{-13}\text{A}$ 가 된다. 여기서 B 는 시험전리함의 활성체적이다. 동작전압을 400V로 하였을 때 최대누설전류의 허용치를 최소수집전류의 10%라면 전극간에 요구되는 최소절연저항은 $4.56\times 10^{11}\Omega$ 이 된다. 중심축전극과 보호전극 사이에 내경 5mm, 외경 8.5mm, 길이 8.5mm, 보호전극과 벽면전극 사이에 내경 9mm, 외경 13mm, 길이 12.5mm 인 속이 빈 테프론($10^{18}\sim 10^{19}\Omega\text{cm}$) 원통을 각각 삽입하여 절연하고 모든 전극은

서로 동축 상에 있게 하므로써 외부 전자기파의 영향을 적게 받도록 하였다.

그림 1은 전극 설계 단면도를 나타낸다. 사진 1은 제작된 전리함의 사진이고 전리함 전체 체적은 직경 5.22cm, 길이 15.5cm이며 전선의 길이는 5m이다.

전리함은 마이트로도트 x1으로 저잡음 처리한 Trompeter Eltronics사의 TRC-75-2 3중동축

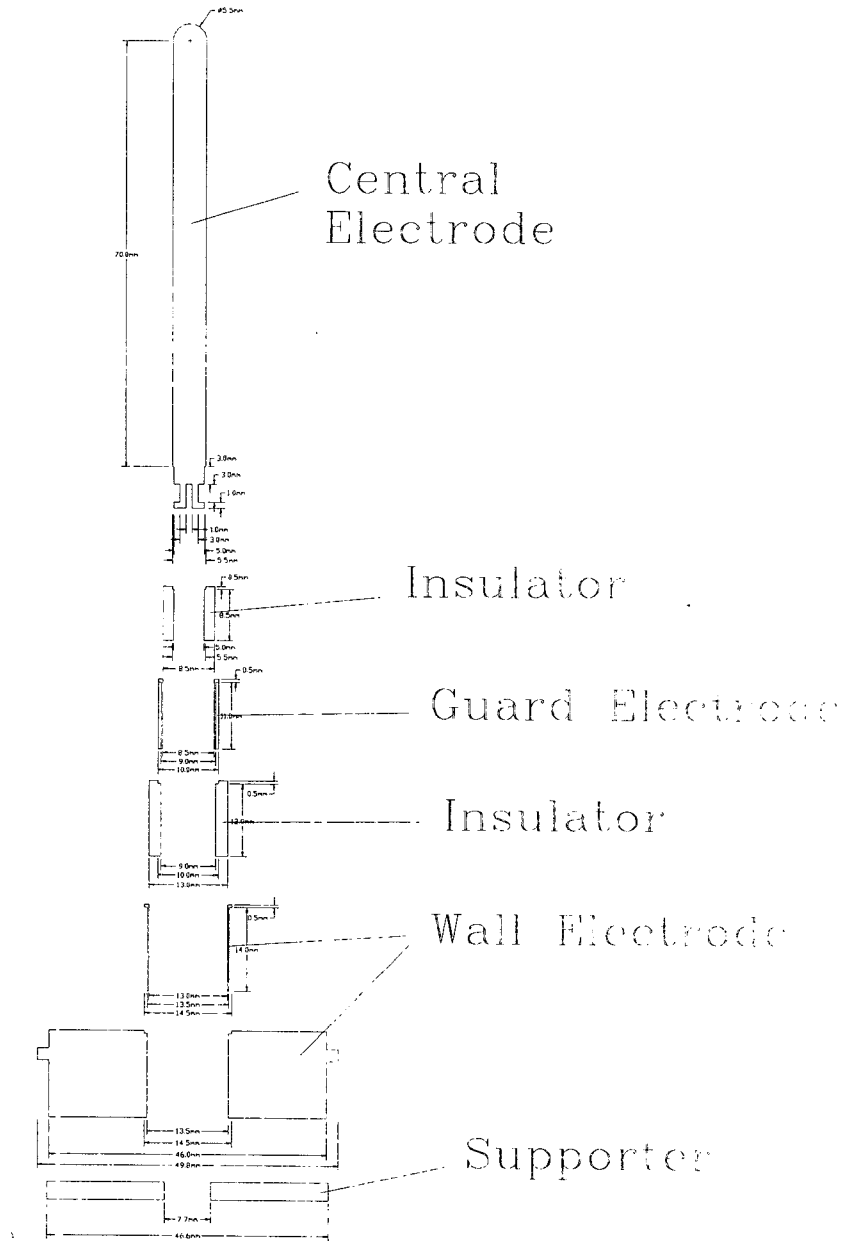


그림 1. 전극의 설계 단면도

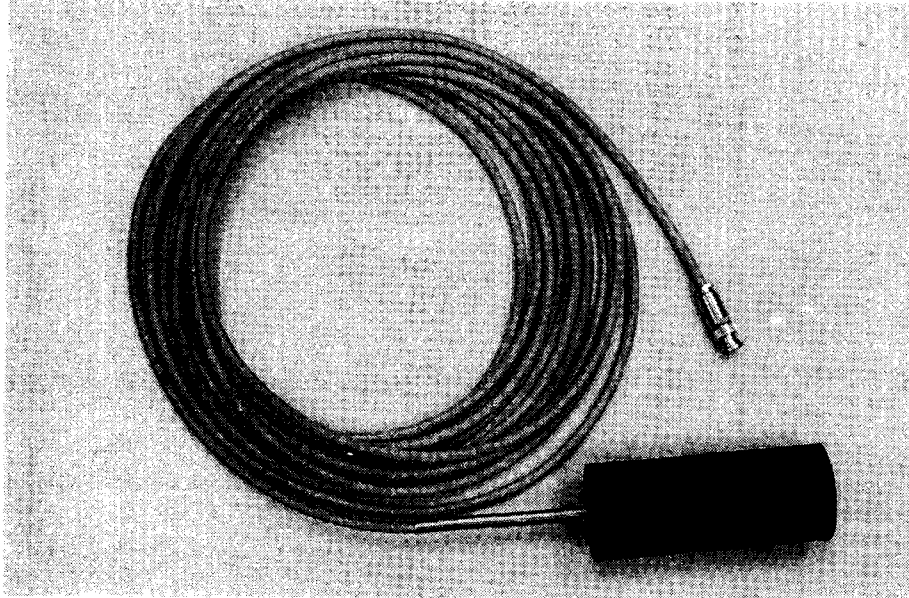


사진 1. 제작된 전리함의 사진

전선과 Textronix사의 TE114949 PL75-2 컨넥터를 사용하여 전류계(Keithley 6517 Elcetro-meter)와 참고문헌 5)의 방법으로 연결하여 수집전하를 측정하였다.

방사선 선원은 방사능이 1.1Ci인 Cs^{137} , 0.3Ci인 Co^{60} 밀봉선원(Buchler, Germany)을 이용하여 전리함과 거리 조절함으로써 조사선량을 변화시켜 전리함의 특성평가에 이용하였다. 아울러 에너지 응답특성과 바탕전류 측정에는 감마시험선원(Amersham, UK)을 사용하였다.

결과 및 고찰

포화곡선

Cs^{137} 을 이용하여 선량율이 16.99×10^6 R/s인 지점에 전리함을 두고 전리함의 인가전압을 50V에서 750V까지 50V 간격으로 변화하면서 전리함에 생성되는 전류를 측정하여 포화곡선을 구하였다. 그림 2는 측정된 전류값에 바탕전류를 제거한 값을 나타내었으며 이를 5차항복귀하였다. 포화곡선은 여타의 전리함과 같은 양상을 보여주고 있으며, 50V에서 250V까지는 급격히 증가하다가 차츰 그 증가폭을 둔화하여 285V부터 615V까지는 거의 선형적이었으며, 선형부분을 선형복귀하여 기울기 1.83×10^{-16} A/V를 구하였다. 이는 전리함의 동작전압이 285V부터 615V 범위 안에서 동작할 때 측정되는 전류 혹은 전하량의 최대오차(1.83×10^{-16} A/V \times 330V / 3.15×10^{-12} A)가 2% 이내에 있음을 의미한다. 그러나 동작전압을 400V \pm 50V로 하면 측정값의 오차는 무시할 수 있었다.

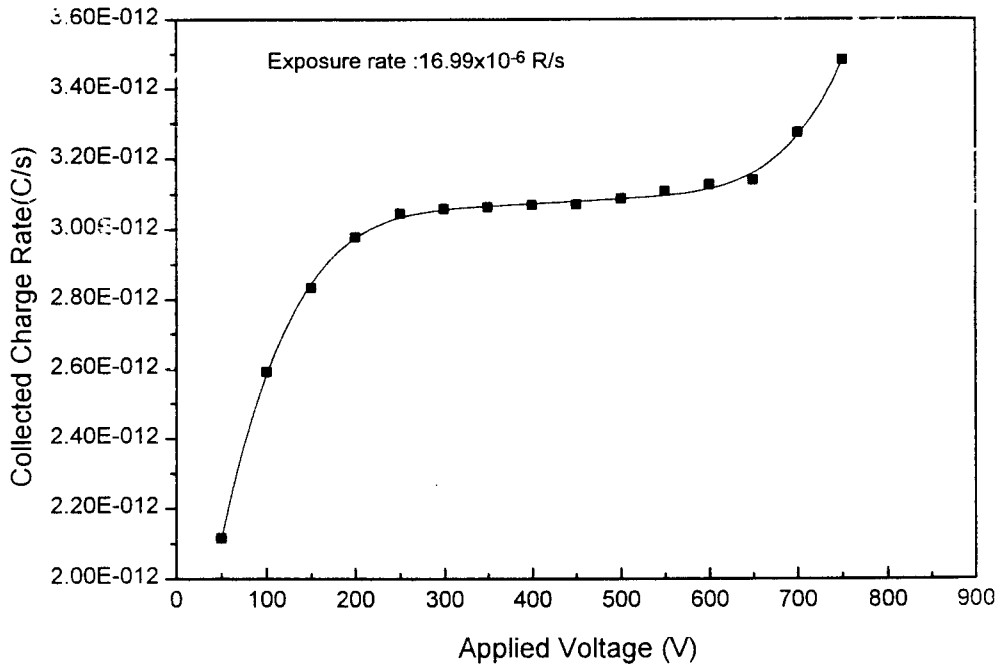


그림 2. 인가전압에 따른 단위시간당 수집전하량 : 곡선부는 5차항복귀한 값이다.

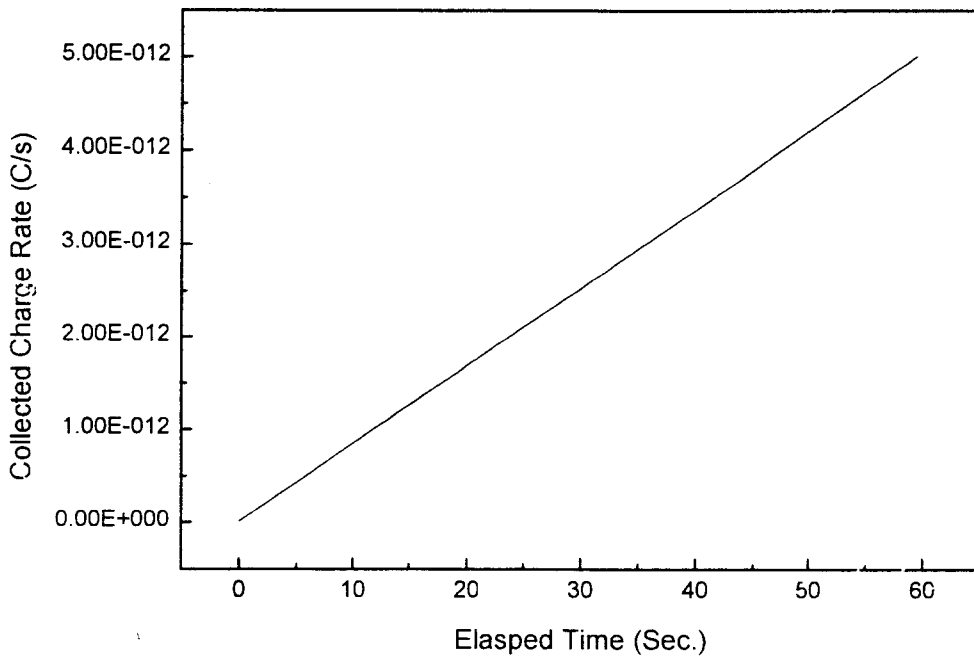


그림 3. 동작전압 400V에서 시간에 따른 바탕전하량.

바탕전류

전리함은 보호전극을 가지고 있으므로 누설전류는 전리함의 수집전류로 거의 나타나지 않는다. 그러나 보호전극과 중심축전극은 거의 동일 전위이지만 전극절연체 및 전류계에 의한 기전력, 환경방사선 때문에 아주 작은 전위차가 존재하므로 미세한 바탕전류가 흐를 수 있다. 그림 3은 동작전압 400V에서 측정된 시간에 따른 누설전하량을 선형복귀하여 그린 그림이다. 그림 3에서 직선의 기울기가 바탕전류로서 그 값은 $8.39 \times 10^{-14} \pm 1.5 \times 10^{-15}$ 였다.

수집효율

수집효율은 계산⁵⁷⁾이나 측정⁵⁾에 의해 구할 수 있다. 본 연구에서는 두 전압법 및 내삽법에 의하여 수집효율을 측정하였다⁸⁹⁾. 내삽법은 수집전류의 손실이 5% 이하인 인가전압 영역에서 수집전하에 대한 인가전압의 역수를 그래프로 그려 이를 내삽함으로써 무한대의 인가전압에 대한 포화전하(Q_∞)를 결정할 수 있는 방법이다. 수집효율은 포화전하를 주어진 동작전압에서 수집된 전하량으로 나누어 구할 수 있다. 두 전압법에 의한 수집효율, f 는 $f = [(V_1/V_2)^2 - Q_1/Q_2] / [(V_1/V_2)^2 - 1]$ 이고, 포화전하량은 $Q_\infty = Q_1/f$ 로 주어진다. 여기서 Q_1 과 Q_2 는 각각 인가전압 V_1 및 V_2 ($V_1 > V_2$) 일때 수집되는 전하량이다.

그림 4는 인가전압의 역수에 대한 수집전류량과 이를 선형복귀한 값을 함께 나타내었다. 그림 4로부터 내삽에 의해 구한 포화전하량은 $3.17 \times 10^{-12}C$ 이었다. 표 1은 두 전압법으로 구한 포화전하량을 나타낸다.

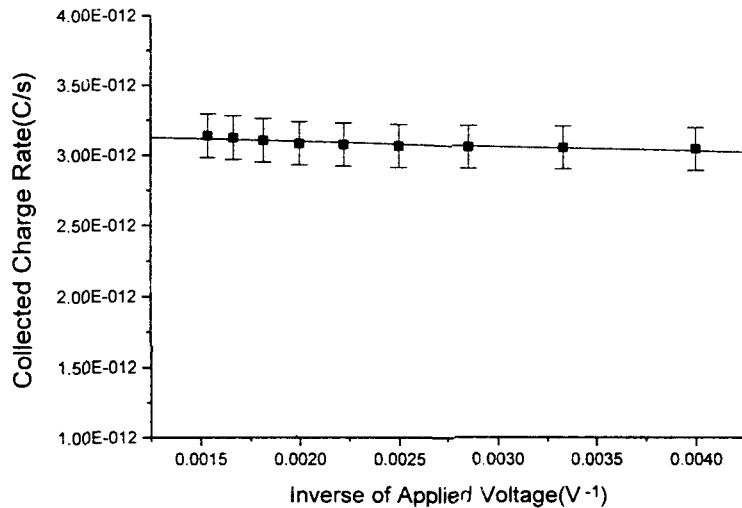


그림 4. 인가전압의 역수대 수집전하량. 직선은 선형복귀한 값이다.

표 1. 두 전압법으로 구한 포화전하량(Q_s).

V_1 (V)	Q_1	V_2 (V)	=450	400	350	300
		$Q_2(\times 10^{-12})$	=3.0703	3.0695	3.0634	3.0578
500	3.0864		3.1570	3.1169	3.1088	3.1027
450	3.0703			3.1007	3.0809	3.0804
400	3.0659				3.0860	3.0811
350	3.0634					3.0790

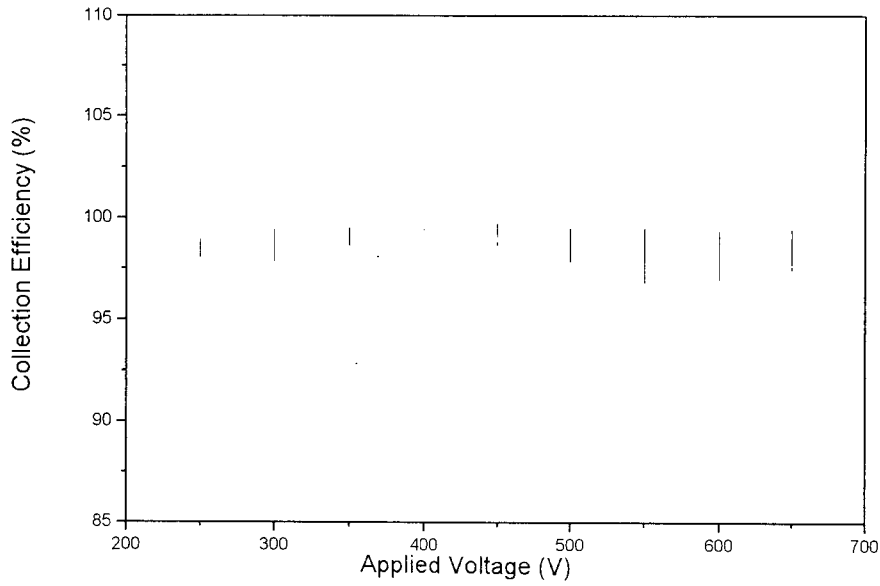


그림 5. 두 전압법으로 구한 인가전압에 따른 수집효율.

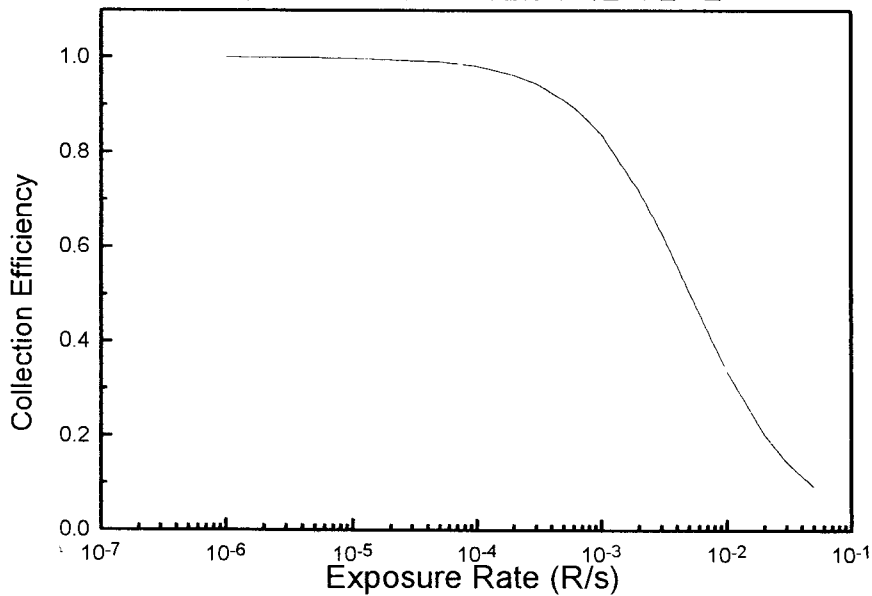


그림 6. 조사선량율에 따른 수집효율.

중준위 조사선량을 측정용 전리함의 설계 및 특성

내삽법과 두 전압법으로 구한 포화전하량은 내삽법에 의한 결과가 약간 높았으나 두 방법 모두 오차범위 2.8% 내에서 일치하였다. 그림 5는 두 전압법으로 구한 인가전압에 따른 수집효율과 표준편차를 바의 길이로 나타내었다. 수집효율은 그림 5에서 알 수 있듯이 표 1에 나타난 인가전압(V_i) 범위내에서 97.8%~99.8% 이었으며, 재결합에 의한 손실은 0.2%~2.2%였다. 특히 인가전압 400V 근처에서는 수집효율이 99.7%이상이었으므로 포화 곡선과 수집효율을 고려하여 전리함의 최적 동작전압을 400V로 하였다. 다음에 기술하는 실험의 전리함 동작전압은 모두 400V에서 시행한 것이다.

Boag⁶⁾와 Greening¹⁰⁾의 이론을 바탕으로 방사선이 연속적으로 조사 경우에 조사선량율에 따른 수집효율을 계산하면 0~3R/h로 나타났으며 이를 그림 6에 나타내었다.

조사선량 교정상수

검·교정 2차 표준기관인 Keithley사에서 검·교정한 선량계[전리함 : NE96020B (Nuclear Enterprise, UK), 전류계 : 35612E(Keithley, USA), 교정상수 : $2.529 \times 10^7 \text{R/C}$]와 동일한 조건하에서 두 전리함의 전하수집율을 비교·검토함으로써 조사선량 교정상수를 구하였다. Cs¹³⁷ 선원으로부터 시험전리함과 NE96020B 전리함을 동일한 조건(거리, 조사선량율, 온도, 등)하에 두고 각각의 계측기 지시치를 5번 반복하여 측정하여 평균값(시험전리함은 $3.75 \times 10^{13} \text{C/s}$, NE96020B 전리함은 $5.682 \times 10^{13} \text{C/s}$)을 얻었다. 이 평균값으로부터 산출한 시험 전리함의 Cs¹³⁷에너지에 대한 교정상수는 $4.531 \times 10^7 \text{R/C}$ 이었다.

에너지 응답특성

입사방사선의 에너지에 따른 응답특성은 전리함 재질의 유효원자번호, 평균에너지와 흡수계수 등을 사용하여 이론적으로 구할 수 있으나 감마시험선원(Amersham, UK)을 사용하여 구하였으며, Cs¹³⁷이상의 에너지에 대해서는 전리함의 벽물질과 같은 재료로 된 build-up cap을 덧씌워 측정하였다.

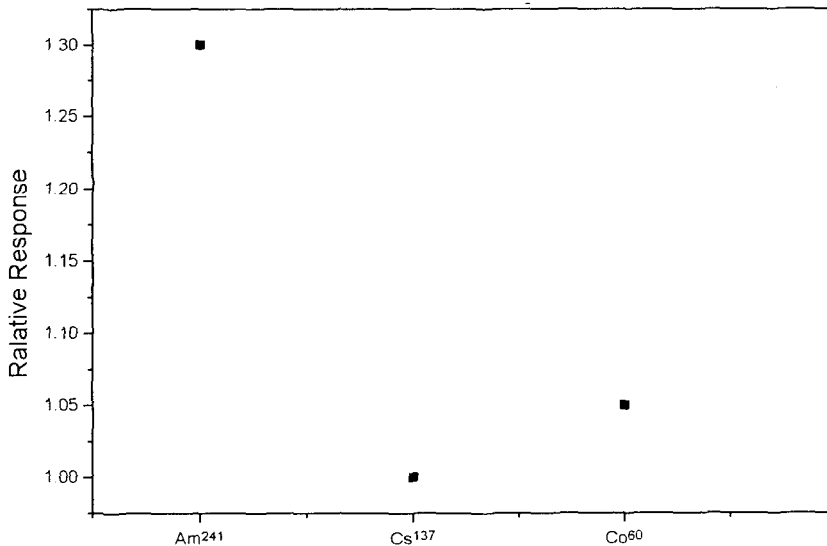


그림 7. 입사방사선에너지에 따른 상대적인 응답특성

그림 7은 입사방사선에너지에 따른 응답을 Cs^{137} 에너지로 규격화한 전리함의 에너지 응답특성을 보여준다. Cs^{137} 에너지에 대한 상대적인 응답특성은 Am^{241} 은 1.3이고, Co^{60} 은 1.05로서 상용의 전리함과 그 값이 일치하였다.¹¹⁾

응답특성의 등방성

방사선이 어느 방향으로 전리함에 입사하느냐에 따라 수집되는 전하량을 달라진다. 전리함이 완벽한 점대칭 구조라면 수집효율은 방사선의 입사방향과는 무관할 것이다. 그러나 제작된 전리함은 원통형 구조를 갖고 있으므로 방사선의 입사방향에 따라 수집효율의 차이가 있다. 전리함의 중심축상에 전리함의 표면으로부터 거리 2.5m인 지점에 1.1Ci의 Cs^{137} 밀봉선원을 두고, 이 때의 각을 0°로하여 15°간격으로 전리함의 중심축을 회전하면서 수집되는 전하량을 측정하였다. 수집되는 전하량은 방사선의 입사방향이 45°또는 315°에서 최대값을 나타내었으므로 이 값을 1로하여 상대적인 응답특성을 구하여, 전리함의 방위와 함께 그림 8에 나타내었다.

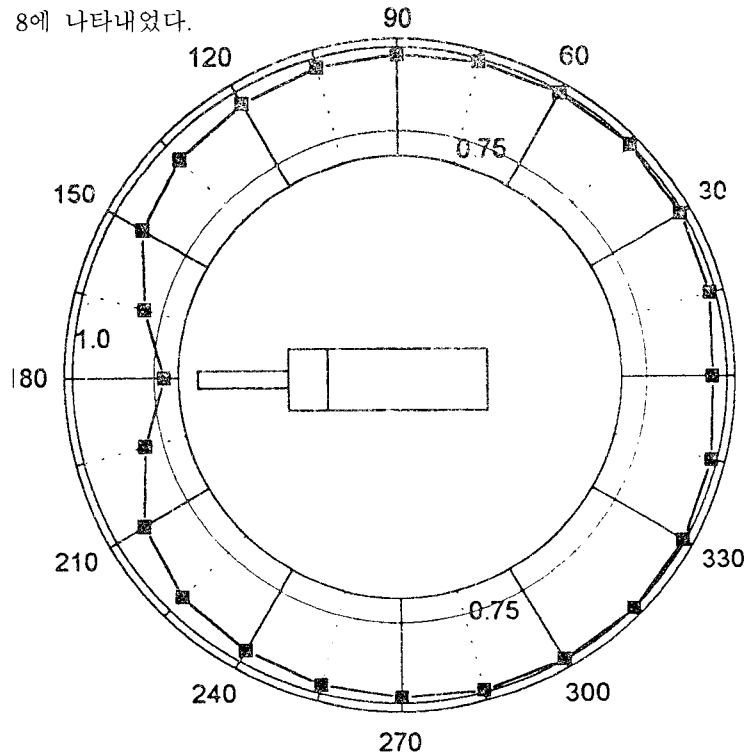


그림 8. 방사선의 입사방향에 따른 전리함의 상대적인 수집효율.

전리함의 중심축 방향(0°)에서의 상대적인 응답은 0.96이었으며, 각도가 증가할 수록 증가하여 45°에서 최대를 나타내었고, 그 후에는 차츰 감소하다가 150°까지는 그 값이 0.95로서 방사선의 입사방향과는 거의 관계가 없었다. 그러나 150°~180°에서는 전리함의 줄기 몸체와 연결 전선 등에 의해 입사방사선의 감소가 일어나 상대적인 응답은 그 이외의 각도에서 보다 적었다. 특히 180°에서는 입사방사선의 감소가 심하여 상대적인 응답이 약 0.72였다. 이는 제작된 전리함을 사용할 때 되도록이면 180°방향에서 방사선이 입사하는

것을 피해야 함을 의미한다.

극성효과와 줄기효과

입사방사선이 x-또는 γ -선인 경우 극성효과는 거의 없는 것으로 보고되고있다.¹²⁾ 그러나 입사방사선의 종류가 전자선 혹은 하전입자인 경우 각 입자는 전하를 갖고 있기 때문에 입자의 전하와 전리함 벽에서 전위 극성이 서로 전기적 상호작용을 하므로 인가전압에 따라서 극성효과가 나타날 수 있으며, 특히 고선량을인 경우 심하게 나타난다.¹³⁾

시험전리함을 동일한 조건(인가전압, 조사선량, 방사선입사방향 등)에서 다만 전리함에 인가되는 전압의 극성만을 바꾸어 수집되는 전하량을 조사하였으나 극성효과로인한 수집효율의 변화는 거의 찾아볼 수 없었다.

납 블럭을 사용하여 Cs¹³⁷로부터 거리 2m인 지점의 방사선 조사야가 15x15cm²가 되도록 차폐하여 이 조사야 내에 전리함 전체를 넣어 수집된 전하량과 전리함의 활성체적을 둘러싼 부분만 조사야 내에 두어 수집된 전하량을 상호 비교하므로서 줄기효과를 조사하였다. 줄기효과로 인한 수집효율의 차이는 약 0.3%로서 아주 적었다.

결 론

상용의 전류계를 이용하여 선량율이 5mR/h 이상에서 동작하는 원통형 시험전리함을 제작하여 전리함의 x- 및 γ -선에 대한 검출 특성을 조사하였다. 전리함의 형태는 전체길이가 15.5cm, 직경이 5.22cm인 원통형으로 하였으며, 활성체적은 190.4cm³으로 하였다. 전리함은 벽물질을 PMMA, 면저항이 40 Ω cm⁻²이하로 Electrodag코팅된 벽면전극, 인청등으로 구성된 보호전극, 알루미늄으로 된 중심축전극으로 구성하여 각각의 전극이 동심축상에 있게 하여 다음과 같은 특성을 얻을 수 있었다.

- 1) 바탕전류는 $8.39 \times 10^{-14} \pm 1.5 \times 10^{-15}$ A로 적었다.
- 2) 동작전압의 범위는 3% 오차내에서 285V~625V였다
- 3) 동작전압이 400V \pm 50V에서 전하수집효율은 99.7%이상으로 아주 우수하였다.
- 4) 조사선량 교정상수는 4.531×10^7 R/C였다.
- 5) 에너지에 따른 응답특성은 Cs¹³⁷의 에너지를 기준으로 하면 Am²⁴¹과 Co⁶⁰은 각각 1.30과 1.05로 상용의 전리함과 비슷하게 나타났다.
- 6) 방사선 입사방향에 따른 등방성은 0.95 이상으로서 우수하였다.
- 7) 줄기효과는 약 0.3%로서 약간 있었다.

참 고 문 헌

1. J.P.Guiho and J.P.Simoen "Determination experimental ..." Int. J. Applied Radiat. Isot. 26, 714-719, 1975
2. The Dosimetry of Ionizing Radiation vol.II, edited by K.R.Kase, B.E.Bjarngard, F.H.Attix, Academic press, Inc., 1987
3. L.J.Humphries and T.W.Slowey "Dosimetry instrumentation." In Radiation Oncology-1986 ed. J.G.Kereiakes etal, Areicam institute of physics, New York, 110-138, 1987
4. P.N.Jeffery,J.W.Boag,H.N.Johns "Electron avalanch application in x-ray imaging devices." Phys.

- Med. Biol. 19, 593-604, 1974
5. H.E. Johns and J.R.Cunningham "The Physics of Radiology" 4th, pp306, C.C. THOMAS, ILL, USA. 1983
 6. J.G.Boag "Ionization chambers" In Radiation dosimetry Vol.II edited by F.H.Attix and W.C. Roesch, New york, Academic press, 1966
 7. ICRU "Physical aspects of irradiation." report No. 10b, Washing D.C., 1964
 8. P.R.Almond "Use of Victoreen 500 electrometer to determine ionization chamber collection efficiencies." Med. Phys. 8, 901-904, 1981
 9. J.W.Boag "Dosimetry in magnetically swept electron beam." Radiother. Oncol., 2, 37-40, 1984
 10. J.R.Greening "Saturation characteristics of parallel-plate ionization chambers" Phys. Med. Biol. 9, 142, 1964
 11. Keithley "Radiation measurements dosimetry." 1990-1992 Catalog, 1991
 12. T.Nagatani and K.Inabe "Effect of contact potential difference in ionization chambers." Kanazawa Diagaku Kogabugu Kiyu, 5(5), 1970
 13. J.R.greening "A contribution to theory of the ionization chamber measurements of low pressures" Br. J. Radiol. 27, 163-170, 1954

A Fabrication and Properties of Ionization Chamber Using Medium Exposure Rate

U, Hong*, S. H. Kim**, H. D. Kan**

*Department of Physics College of Natural Science, Kyungsan University

**Department of Physics College of Natural Science, Kyungpook University

Abstract

We had designed and made the cylindrical ionization chamber which operated above 5 mR/h. Using commercial electrometer, we investigated the characteristic of charge collection in the ion chamber. The active volume was 190.4cm^3 and overall length and diameter in the chamber was 15.5cm, 5.22cm, respectively. The chamber had three electrodes(inner, central, wall electrode). And background current was 8.39×10^{-14} ~ $1.5 \times 10^{-15}\text{A}$ to arrange the electrodes which were coaxial in chamber axis. The collection efficiency of chamber for Cs^{137} was 99.7% when the operating voltage was applied 400V. Comparing with the commercial dosimetry system, the exposure calibration constant was $4.531 \times 10^7 \text{R/C}$. By normalizing to Cs^{137} the relative energy response of the chamber was 1.30 for Am^{241} , 1.05 for Co^{60} , respectively. When the irradiation transversed to the chamber axis, the isotropic effect of the chamber was not considerable.