

第2回

放射線管理(2)

서 두 환

한국원자력연구소 원자로관리실장

II 放射線計測器의 種類와 特徵

1. 電離를 이용한 計測器

전리를 이용한 계측기에는 기체의 전리를 이용하는 전리함, 비례계수관, GM계수관 등과 고체의 전리를 이용하는 반도체검출기 등이 있다.

처음에 기체의 전리를 이용하는 계측기에 대하여 기술한다. 일반적으로 그림 1과 같이 도전성원통의 중심에 원통에서 절연한 중심선을 놓고, 원통을 마이너스, 중심선을 플러스전극으로 하여 이 사이에 직류전압을 걸어 주면, 방사선과 기체와의 상호작용으로 생성된 \oplus 이온과 전자는 각각 원통전극과 중심선전극으로 이용하여, 양전극사이에 병렬로 접속된 저항과 컨덴서의 양단에 펄스신호를 낸다.

인가전압과 펄스높이의 관계는 그림 2처럼 되어 영역 I을 재결합영역, II를 전리함영역, III을 비례계수관영역, IV를 GM계수관영역, V를 방전영역이라 부른다. 이하에 각 영역의 특징을 나타낸다.

再結合領域: 전계가 약하기 때문에, \oplus 이온·전자는 전극으로의 이동속도는 늦고 \oplus 이온과 전자와의 재결합이 일어나기 쉽다. 재결합에 의한 손실은 전자와 \oplus 이온의 밀도를 곱한 것에 비례하고, 펄스높이는 낮다.

電離函領域: \oplus 이온과 전자의 대부분은 전

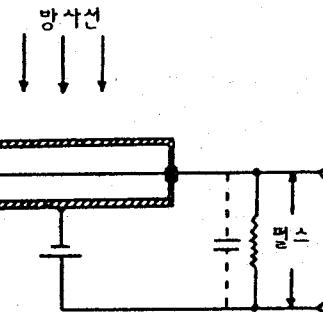


그림 1. 원통형 계수관

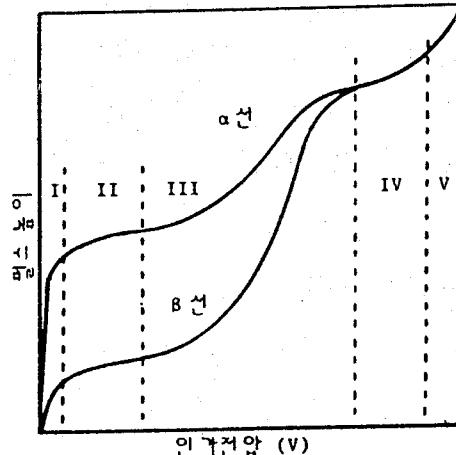


그림 2. 계수인가 전압과 펄스 높이의 관계

극에 모이고 재결합에 의한 손실은 없기 때문에, 펄스높이는 방사선으로 원통내에 생긴

전리전하량에 대응하여 인가전압에 관계없이 일정하다. 방사선의 수가 많아지면 펄스신호가 중첩하여 전리전류로 되어 저항의 양단에 일정전압을 낸다.

比例計數管領域: 전극간의 인가전압을 더 높히면, 방사선으로 기체내에 생긴 전자는 전계에 따라 이동하는 사이에 에너지를 얻어, 다시 기체를 전리시켜 전자가 증식된다. 이 현상이 가스증폭이며, 이 영역에서 가스증폭율은 $10\sim 10^3$ 이다. 펄스높이는 증식전자의 뜻이 가산되어 높아지고, 또 처음에 생긴 전자수(이온쌍수)에 비례하기 때문에 비례계수관영역이라 부르고 있다.

GM計數管領域: 인가전압을 더욱 높이면 가스증폭율이 커져, 전자눈사태가 광전자방출을 통하여 계수관전체에 퍼져서 눈사태로 방전이 생긴다. 눈사태방전에 의한 전리량이 거의 일정하며, 펄스높이도 일정한 영역으로 된다. GM계수관은 이 영역을 이용하며, 가스증폭율은 $\sim 10^6$ 정도이다.

放電領域: 더욱더 인가전압을 높히면 계수관내는 방전상태로 되어, 연속적으로 전류가 흐르게 된다.

고체의 전리를 이용하는 계측기에 대해서는 1.5에서 기술한다.

1.1 電離函

전리함은 가장 오래된 방사선계측기의 하나이며, 동작원리가 간단하고 작동이 안정하기 때문에, 유효한 계측기로서 많은 분야에서 사용하고 있다.

전리함을 사용하여 방사선을 측정할 때의 기본적인 항목에 대하여 기술한다.

1) 一般的인 特性

空氣壁電離函

조사선량/율의 측정은, 공기중에 생긴 전리량을 측정하는 것이다. X, γ 선으로 공기를 쪘었을 때, 공기중의 문제시되는 특정공간내에서 전리로 생긴 전자는, 그 공간내의 공기를 전리시키는 이외에 특정공간이외의 공기도 전리시킨다. 조사선량의 정의에 따라 이를 전리량의 전부를 정확히 측정한다는 것은 기술적

으로 어렵기 때문에, 특정공간외에서 자유전자가 특정공간내로 들어와서 생긴 전리량으로 보상하는 방법을 취한다.

공기벽전리함은 그림 3과 같이 전리함의 전극을 적당히 배치하는 것과 동시에, X, γ 선의 입사영역을 특정짓기 위한 슬릿을 설치함으로써 그 특정공간내의 전리량만을 측정하는 것이다. 이 특정공간 둘레는 공기이기 때문에, 이 공간내에서의 자유전자에 의해서 이 이외의 공간에서 생긴 전리량은, 공기벽중에서의 자유전자에 의한 전리량으로 보상된다. 이와 같은 전리함을 공기벽전리함(Free Air Chamber)이라 하고, 조사선량/율의 절대측정에 사용한다.

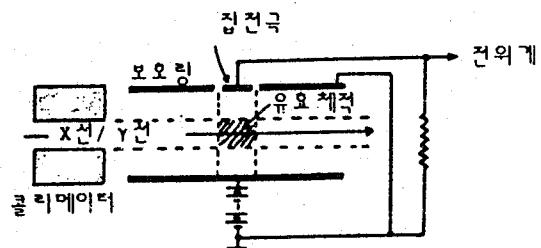


그림 3. 공기벽영 전리함

照射線量率과 電離電流

유효체적 $V(cm^3)$ 의 공기전리함에 충분히 높은 전압을 걸어, 전리함영역에서 작동시켰을 때의 조사선량 $X(R)$ 과 모아진 전하 $Q(C)$ 와의 사이에는 다음의 관계식이 성립한다.

$$X = \frac{Q \cdot V}{3 \times 10^9} \cdot \frac{273}{T} \cdot \frac{p}{760} \quad (1)$$

여기서 T 는 대기온도($^{\circ}\text{K}$), p 는 전리함내의 공기압(mmHg)이다. 또 조사선량을 $dx/dt(R/h)$ 일때의 전리전류 $I(A)$ 는

$$I = 0.926 \frac{dx}{dt} \cdot V \cdot \frac{273}{T} \cdot \frac{p}{760} \times 10^{-13} \quad (2)$$

이다. 예로서 전리함의 유효용적을 $500cm^3$, 조사선량율이 $1R/h$, 상온상압에서 측정하였을 때의 전리전류는 $4.3 \times 10^{-11}A$ 이다.

Bragg-Gray의 空洞原理

매질속의 흡수에너지측정에 적용하는 원리

● ● ● 連 載 ●

로서, 매질속에 작은 공동을 만들어 기체를 넣고, 이것에 전리방사선을 훜다. 이때 매질의 단위질량당의 흡수에너지 D와 공동내 기체의 단위질당에 생기는 이온쌍수 J와의 사이에 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$D = S_m \cdot W \cdot J \quad (3)$$

여기서 S_m 은 매질과 공동내 기체의 질량저지능비이며, W은 공동내 기체속에서 1이온쌍을 만드는데 필요한 평균에너지이다.

이 공동원리를 적용하기 위해서는 다음 4 가지의 조건이 필요하다.

- ① 공동의 크기는 그 속에서 전리입자가 앓는 에너지가 충분히 적도록 작아야 할 것. 즉, 공동의 크기는 공동에 들어오는 전자의 비정에 비하여 충분히 작을 것.
- ② 공동내의 기체를 위한 방사선의 직접 에너지흡수는 무시할 수 있을 정도의 비율이라 할 것.
- ③ 공동은 전자평형 이상의 고체로 둘러싸여 있을 것.
- ④ 전리입자에 의한 에너지손실은 공동을 둘러싼 매질속에서는 균일해야 할 것. 이것은 방사선원이 공동으로부터 충분히 멀어진 곳에 있고, 공동크기 정도의 매질속에 대한 방사선의 감쇠는 무시할 수 있는 상태에 있음을 뜻한다.

표 1. 공기에 대한 평균질량 저지능비

γ 선원	γ 선 에너지	폴리 에틸렌	물	인체 인조직	폴리 스틸린	루 사이트	그라 파이브
Au-198	0.41	1.233	1.149	1.149	1.139	1.124	1.013
Cs-137	0.67	1.225	1.145	1.145	1.133	1.120	1.010
Co-60	1.25	1.209	1.135	1.133	1.120	1.109	1.002

γ 선 에너지 (MeV)	그라 파이브	Al	P	Ca	Cu	Sn	Pb
0.15	1.017	0.835	0.823	0.776	0.657	0.458	0.380
0.25	1.015	0.853	0.850	0.816	0.696	0.538	0.443
0.4	1.013	0.866	0.867	0.842	0.723	0.575	0.487
0.6	1.011	0.874	0.879	0.857	0.740	0.605	0.518
1.0	1.005	0.881	0.888	0.873	0.758	0.634	0.548
1.5	0.999	0.883	0.894	0.883	0.768	0.650	0.567

표 2. 1이온쌍을 만드는데 필요
한 평균에너지 : W(eV)

입자에너지 (MeV)	β 선 ≈ 0.3	양자 선 1	α 선 5
H ₂	36.6		36.2
He	41.5		46.0
N ₂	34.6	36.6	36.39
O ₂	31.8	31.5	32.3
Ne	36.2	28.6	35.7
A	26.2	26.4	26.3
Kr	24.3		24.0
Xe	21.9		22.8
공기	33.7	36.0	34.98
CO ₂	32.9	34.9	34.1
CH ₄	27.3		29.1
C ₂ H ₂	25.7		27.3
C ₂ H ₄	26.3		28.03
C ₂ H ₆	24.6		26.6
C ₂ H ₈	27.8		
C ₂ H ₁₀	23.0		24.8
C ₂ H ₁₄	22.4		
BF ₃			35.6
NH ₃	34.8		30.5
C ₂ H ₅ OH			32.6
CCl ₂ F ₂			29.5
SO ₂			32.5
H ₂ O	30.1		37.6

참고로, 공기에 대한 평균질량저지능비와 W치를 표 1, 표 2에 각각 나타내었다.

2) 電流電離函

방사선에 의하여 기체중에 생긴 이온쌍이

전극에 모아진 결과 생기는 전리전류를 측정하는 전리함을 직류전리함이라 한다. 이런 전리함을 이용한 방사선계측기에는 전리함서비미터, 에리어모니터, 고압전리함 등이 있다.

직류전리함은 벽재를 공기와 등가한 것을 사용하면 에너지특성이 우수하기 때문에, 조사선량/율을 매우 충실히 측정할 수 있다는 이점이 있다. 한편, 전리전류의 측정은 500cm^3 유효용적의 전리함에서 0.1mR/h 에 대하여 $\sim 4 \times 10^{-15}\text{A}$ 정도이기 때문에, 감도측면에서 반드시 충분하다고는 할 수 없다. 이것을 개선하기 위한 목적으로 전리함의 용적을 크게 하는 동시에 수기압으로 가압봉입한 전리함이 있다. 예를 들면 유효용적 14ℓ , 고순도 Ar 가스를 8기압 봉입한 전리함은 $1\mu\text{R/h}$ 까지 측정할 수 있다. 그러나 고압전리함은 벽재로서 스테인레스 등을 사용하기 때문에, 에너지특성이 나빠져서 최대 약 50%정도 감도가 변한다.

3) 放電型電離函

전리함을 정전컨덴서로서 미리 충전해 놓고, 전리로 생긴 이온쌍이 전극으로 모아지면, 충전하여 놓았던 전하를 상쇄시킴으로써 전하의 감소분을 측정하는 방식이다. 컨덴서R미터나 포켓선량계 등이 이에 속한다. 이 방식도 벽재를 공기와 등가한 것을 사용함으로써 조사선량을 고정도로 측정할 수 있는 이점이 있다. 그 반면에 하나의 전리함으로는 조사선량의 측정범위에 제한이 있기 때문에, 측정범위가 넓은 경우에는 그것에 대응하여 용적이 다른 전리함의 수를 증가시킬 필요가 있다.

4) 氣體試料測定用 電離函

^{14}C 나 ^{3}H 등 저에너지의 β 선을 방출하는 핵종의 방사선측정은 시료가 전리함 바깥에 있을 때는 백재에 의한 β 선의 흡수가 있고, 또 시료를 고체로 만들면 자기흡수가 있기 때문에, 정도, 효율이 나쁘다. 이와 같은 경우에는 기체상의 화합물을 만들어 전리함속에 넣거나 이를 기체가 전리함속을 지나가도록 하여 측정한다.

이 전리함의 구조는, 보통 원통형이며, 시료의 봉입 또는 유통을 위한 마개가 달려 있다.

시료를 액체실틸레이터속에 녹일 수 있으면, 그것을 사용하는 쪽이 정도와 효율이 좋다. 그러나 액체실틸레이터를 사용할 수 없는 가스모니터, 특히 ^{3}H 모니터처럼 기체중의 농도를 연속감시하기 위해서는 이런 전리함이 우수하며 널리 사용되고 있다.

기체중의 농도와 전리전류와의 관계는 전리함의 크기, 압력으로 결정되기 때문에, 미리 교정해 놓으면 상대측정뿐만 아니라 절대측정도 가능하다.

5) 格子電極付着 電離函

그림 4와 같이 평행평판전리함의 전주 중간에 양쪽의 중간정도의 전위를 갖는 격자전극을 붙인 펄스전리함이며, γ 선의 에너지측정 등에 사용한다. 전리함전체를 기밀시켜 Ar·메탄 혼합가스를 1기압 또는 그 이상으로 하거나, Ar을 8기압 채우는 경우도 있다. 시료와 격자

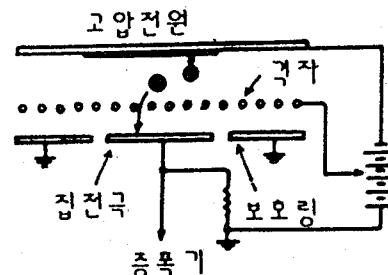


그림 4. 격자전극부 착영 전리함

전극과의 거리는 측정하려고 하는 하전입자의 전리함내에서의 비정보다 길게 한다. 그러면 하전입자에 의한 전리는 고압전극과 격자전극과의 사이의 공간내서만 일어나고 \oplus 이온은 이 범위내에서만 있고 전자만이 격자전극을 통하여 집전극에 도달한다. 이 때, 펄스의 크기는 전자수에 비례하고 전자가 처음으로 생긴 위치에 무관하므로, 결국 하전입자의 에너지에 비례하기 때문에, 펄스 크기의 분포를 측정하므로서 하전입자의 에너지스펙트럼을 구할 수 있다. 천연U의 α 선에너지를 측정한 경우, 반치폭이 약 150keV 로서 3%의 분해능을 가진다. 이 값은 후술할 반도체검출기에 비하면 멀어지지만 면적이 넓은 시료를 측정할 수

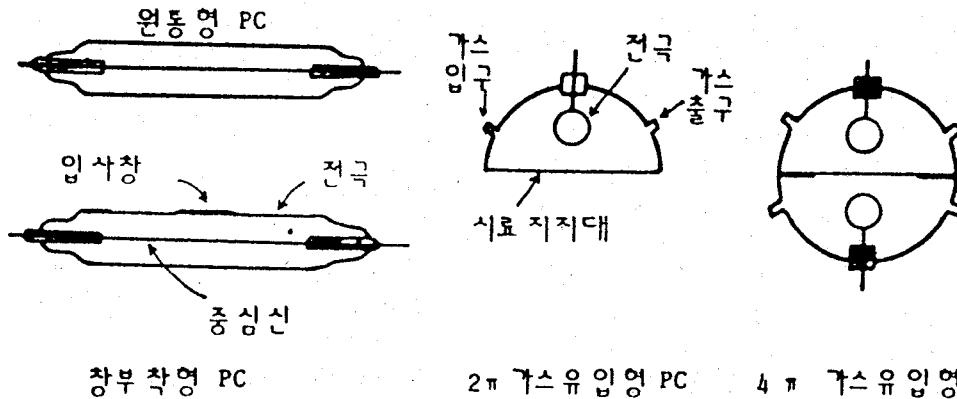


그림 5. 비례계수관 (Proportional Counter : PC) 의 구조

있다는 장점이 있다.

이 외에 β 선의 흡수에너지를 측정하기 위한 외삽형전리함, 두 종류의 방사선이 혼재하는 곳에서 한쪽 방사선만을 측정할 수 있도록 한 보상형전리함, 벽재에 핵분열물질을 바르거나 ^{10}B 을 칠한 중성자용전리함 등이 있지만 생략 한다.

2. 比例計數管

비례계수관의 일반적인 구조를 그림 5에 나타낸다. 비례계수관은 인가전압을 높히면 방사선에 의하여 계수관내의 기체속에서 생성된 전자가 전계에 따라 이동하는 사이에 충분한 에너지를 얻어 다시 기체분자를 전리시켜, 처음에 생긴 전자수에 비례한 펄스높이를 측정할 수 있다.

비례계수관의 특징은 펄스전리함과 비교하면 펄스의 오름시간에는 대차 없지만, 펄스높이가 두드러지게 크다는 점이다. 따라서 β 선의 펄스도 쉽게 계측할 수 있고, 특히 저에너지 β 선에 유효한 계측기이다.

2.1 가스증폭

비례계수관영역에서는 처음에 생성된 1개의 전자는 증폭되어 n 개의 전자무리로 된다. 이것을 “첫째의 전자눈사태”라한다. 이 때, 광자가 방사되어 그 광전효과로 광전자가 방출

된다. 가령, 1개의 전자로 $r(r \ll 1)$ 개의 광전자가 생겼다면, 첫째의 전자눈사태에는 rn 개의 광전자가 생겨, 이를 광전자무리는 증식되어 rn^2 개의 2차전자눈사태로 된다. 이와 같이 계속하여 생기는 전자눈사태의 모든 전자수가 가스증폭도 M 이며, 다음식으로 주어진다.

$$M = n + rn^2 + r^2n^3 + \dots = \frac{n}{1 - rn} \quad (4)$$

rn 가 무시할 수 있을 정도로 작을 때는 $M = n$ 로 되어 비례계수가 올바르게 성립한다. 즉, 전리작용으로 생긴 이온쌍의 수 N 와 M 을 곱한 것이 전전자수가 된다.

rn 가 커지면 M 은 매우 커져서 전자눈사태가 갑자기 증대하여 드디어 계수관전역에 미쳐서 GM계수관영역으로 된다. 더욱 rn 가 커져서 1에 접근하면 $M \rightarrow \infty$ 가 되어 계수관은 방전관으로 된다.

2.2 計數特性

비례계수관으로 Ra과 같이 α 선과 β 선을 방출하는 시료를 측정하였을 때의 계수특성을 그림 6에 나타낸다. α 선은 계수관의 인가전압이 낮고 가스증폭율이 작은 영역에서도 비전리가 크기 때문에, 충분히 높은 출력펄스를 얻어 계수된다. 이 영역이 α 선에 의한 플래토

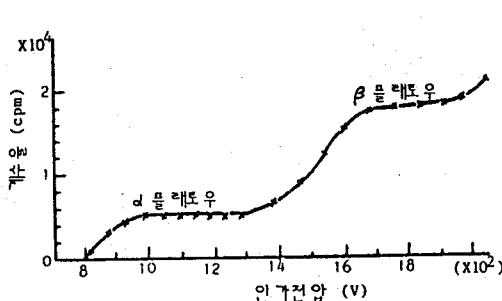


그림 6. 비례계수관의 계수특성

우영역이다. 이에 대하여 β 선은 비전리가 작기 때문에, 인가전압을 높혀 가스증폭율을 크게 하지 않으면 안된다. 이 영역에서는 β 선이 계수된다. 이와 같은 계수특성을 이용하면 낮은 인가전압에서 β 선만을, 높은 인가전압에서 β 선을 각각 선택적으로 측정할 수 있다.

2.3 計數管用ガス

비례계수관용 가스로서는 ① 저에너지 X선에 대해서는 높은 광진효과를 갖는 Ne, Ar 등, ② β 선에 대해서는 가스증폭율이 큰 메탄 또는 메탄과 Ar의 혼합가스, ③ α 선에 대해서는 가스증폭율이 작아도 되기 때문에 PR가스(Ar 90%, 메탄 10%) 등이 사용된다.

비정이 짧은 α 이나 β 선을 방출하는 시료를 계속관속에 넣어서 측정할 경우, 측정할 때마다 가스의 배기, 충전을 반복하는 것은 불편하기 때문에, 계수관용가스를 대기압으로 흘리면서 측정한다(가스유입형비례계수관).

2.4 2π , 4π 型比例計數管

α 선이나 β 선처럼, 비정이 짧은 방사선을 방출하는 시료를 측정할 때는, 시료를 계수관 안에 넣어서 측정하는데, 이 때, 검출효율을 높히기 위하여 그림 5에 볼 수 있는 것과 같이 2π 형 및 이것을 두개 겹친 4π 형비례계수관을 사용한다. α 선 또는 β 선의 에너지가 계수관 내에서 전부 잃도록 계수관의 크기, 가스압을 택하면, 계수효율은 2π 형, 4π 형에서 각각 거의 50%, 100%로 된다.

2.5 BF_3 比例計數管

열중성자의 측정에 널리 사용되고 있는 계수관이며, 열중성자와 B와의 핵반 $^{10}B(u, \alpha)$ 7Li 에서 생기는 α 선 및 반발 Li 원자핵의 전리작용을 이용하여, 직접 전리작용하지 않는 열중성자를 검출한다. 계수관은 비례계수관영역에서 작동하기 때문에, α 선이나 반발 Li원자핵에 의한 출력펄스는 β 선, α 선에 의한 출력펄스에 비교하면 매우 크고, 펄스파고판별회로를 이용하여 열중성자만을 검출할 수 있다.

^{10}B 은 계수관용가스로서 $^{10}BF_3$ 을 집어넣어서 사용한다. 또 ^{10}B 을 계수관의 내벽에 칠하는 경우도 있다.

$^{10}B(n, \alpha)^{7Li}$ 의 핵반응단면적은 열중성자(0.025eV)에서 수100eV까지의 범위에서는 중성자속도에 반비례하며, 속중성자에 대해서는 거의 반응하지 않는다. 따라서 속중성자를 검출할 때는 수소를 많이 함유한 파라핀, 폴리에칠린 등의 감속대로 계수관을 둘러싸서 속중성자들 열중성자화 시켜 측정한다.

2.6 렘카운터

중성자인 경우, 질량계수가 에너지에 따라 크게 변화하여 단순한 함수로서 나타낼 수 없기 때문에, 선량당량 측정은 매우 복잡하다. 이것을 간단화한 것이 BF_3 비례계수관과 감속재를 조합한 것이 렘카운터(rem counter)이다. 감소재로서는 파라핀을 사용하고 그 두께를 바꾼 경우, BF_3 비례계수관의 감도는 그림 7과 같이 변화한다. 렘카운터는 이 특성을 이용하여 단위중성자속당의 선량당량율이 ICRP가 제시한 값과 같게 한 것이다.

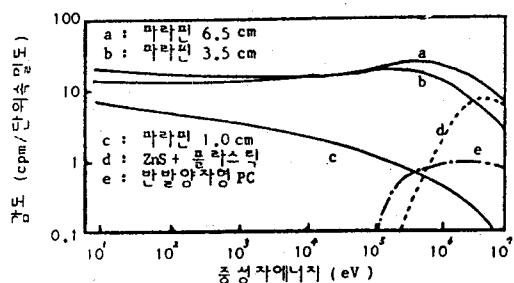


그림 7. 각종 중성자 경출 거의 에너지특성