

국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

방사선 취급기술

최준범

 한국원자력안전기술원
KOREA INSTITUTE OF NUCLEAR SAFETY



Contents

I

방사선계측 기초

II

검출기별 특성

(기체충전형 검출기, 섬광 검출기, 반도체 검출기)

III

방사선 측정 및 분석

(방사선 측정, 통계, 감마선 분광분석, 선량 측정)

IV

방사선 취급

V

문제 풀이



국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

I. 방사선계측 기초

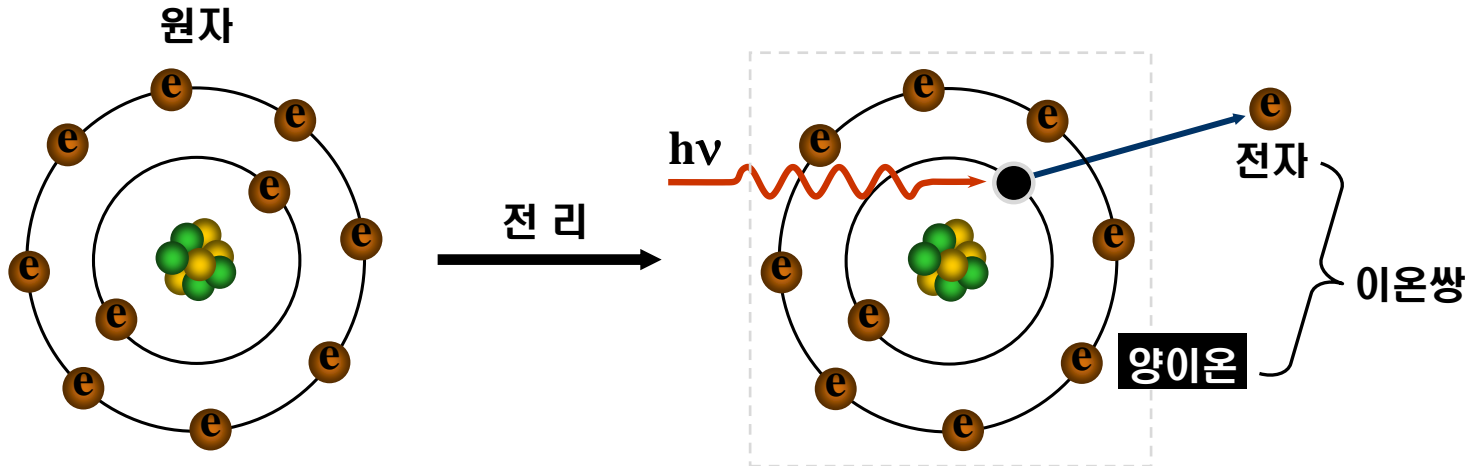


■ 방사선 검출 원리

- 방사선과 물질(계측기의 유효체적을 구성)의 상호작용에 의해 만들어지는 정보를 간접 측정
에너지를 잃으면서 발생하는 물리적, 화학적 변화 ←

■ 정보 전달자

- 기체 충전형 검출기: 양이온, 전자



- 반도체 검출기: 전자, 정공 쌍



방사선 측정기의 종류

■ 검출 원리에 따른 분류

검출원리	물질특성	검출기 명칭	주요 용도	비고
전리작용	기체전리	전리함	베타/감마 선량(률)측정	
		비례계수관	알파/베타, 중성자	방사선 구별, 에너지 측정
		GM관	베타/감마	
	고체전리	HPGe	엑스선, 감마선	에너지 분해능 탁월
		Si(Li)	엑스선	저에너지 엑스선 측정
		표면장벽형	알파	
	CdTe, HgI ₂ , GaAs	엑스선, 감마선	상온에서 냉각 필요치 않음	
여기작용	고체섬광 (무기)	NaI(Tl), CsI(Tl)	엑스선, 감마선	
		ZnS(Ag)	알파	
		LiI(Eu)	중성자	
	고체섬광 (유기)	플라스틱 섬광체	베타	가공성 우수
	액체섬광 (유기)	액체섬광계수관(LSC)	알파, 저에너지 베타	³ H, ¹⁴ C 측정에 적합
	열형광	TLD	선량측정	
화학작용	산화반응	프리케선량계	선량측정	대선량 측정에 적합
감광작용	필름감광	필름벤티	선량측정	
결함유발	비적생성	고체비적검출기(CR-39, LR115)	중하전입자/중성자	

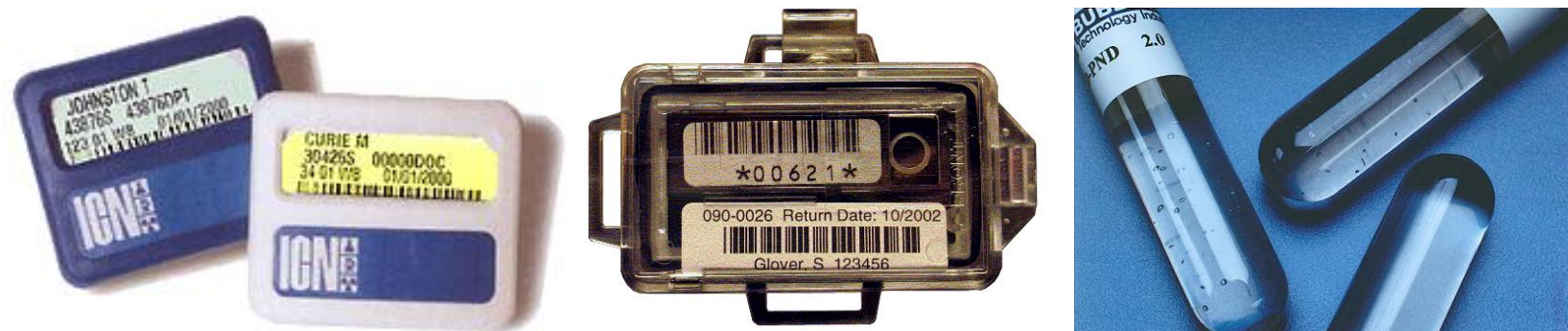
방사선 측정기의 종류

■ 능동형 측정기: 실시간으로 변화량을 통해 확인



- 배터리를 내장한 휴대형 또는 고정형으로 현장에서 방사선량률, 핵종 정보 등을 얻을 수 있음.

■ 수동형 측정기: 방사선과의 반응에 따른 결함 등 영향을 판독을 통해 확인

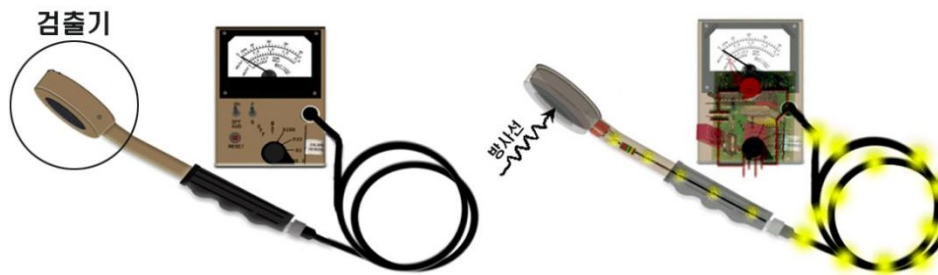
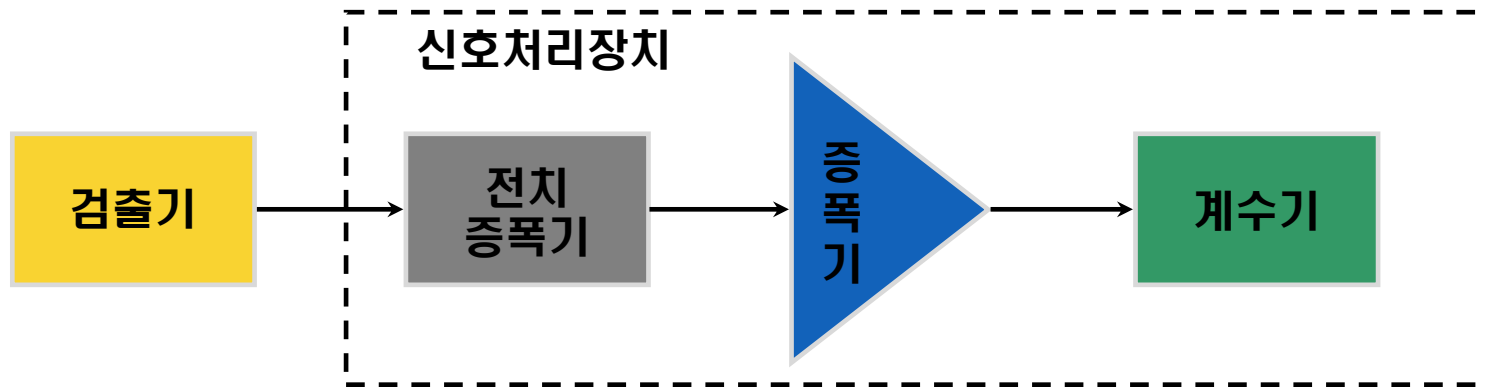


- 전원 공급이 불필요하며, 일정기간 노출 후 판독과정을 통해 방사선량 등 정보를 얻을 수 있음.



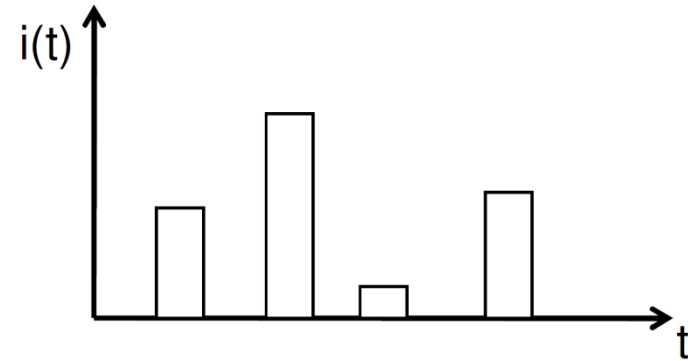
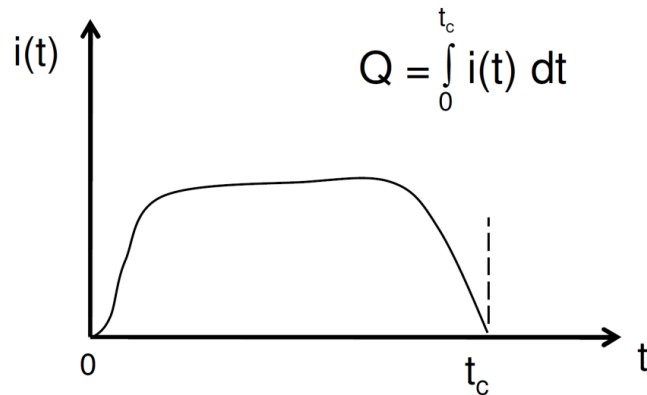
방사선 측정기의 시스템 구성

- 검출기: 방사선과 상호작용하여 정보(신호)를 전달
- 신호처리장치: 검출기에서 발생한 신호를 사람이 감지하기 쉬운 형태로 변환
 - 전치 증폭기, 주증폭기, ADC, MCA, SCA 등



일반적 특성

- 검출기 내 상호작용에 의해 t_c 시간동안 전하 축적
 - t_c : 전하량 Q 를 수집하는 데 걸리는 시간(Collection time), 검출기 고유 특성



- 1개의 반응에 의해 1개의 전류 펄스 형성
 - 각 전류 펄스 형태(크기, 폭)는 반응의 종류에 따라 상이함.



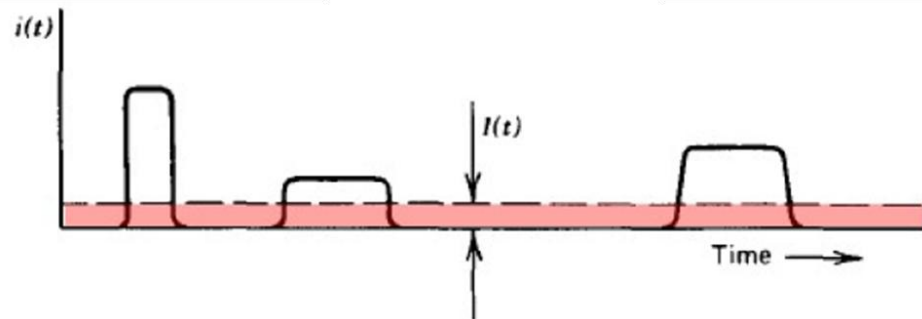
전류 방식(Current mode)



- 전류펄스 간의 변동을 검출기 반응시간 동안 평균 전류로 변환하여 측정 (총 전하량의 시간 평균값)
 - 반응시간이 길어질수록 통계적 변동 최소화
 - 방사선장 변화에 대한 반응은 느려짐
- 방사선량률이 높은 환경 등 방사선의 상호작용 빈도가 높아 개별 전류펄스 확인이 불가능한 경우 유용

$$I(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t i(t') dt'$$

- T: 검출기의 반응시간



전류 방식(Current mode)



- 전류를 측정하게 되면 에너지 플루언스율로 변환 가능
 - 방사선량률, 플루언스율 측정 시 유용

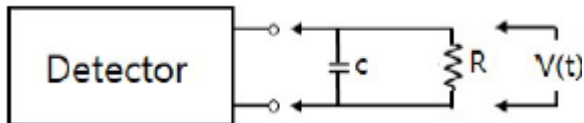
$$I_0 = rQ = r \frac{E}{\left(\frac{W}{e}\right)}$$

- r : 입사율
- Q : 사건당 전하량
- W : 정보전달자를 만들기 위해 필요한 평균 에너지
- E : 사건당 축적되는 평균 에너지
- e : 1.6×10^{-19} C
- rE : 에너지플루언스율



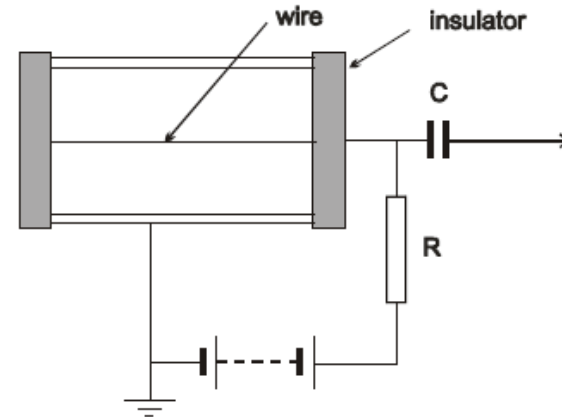
펄스 방식(Pulse mode)

- 개별 전류펄스를 전압펄스 형태로 변환하여 측정
 - 개별펄스에 대한 정보(에너지, 시간 등) 획득 가능



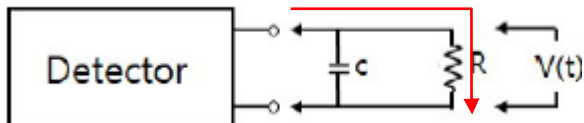
$$V(t) = V_0(1 - e^{-t/RC})$$

- R : resistance
- C : capacitance
- $\tau = RC$, 시정수, 신호처리장치의 특성

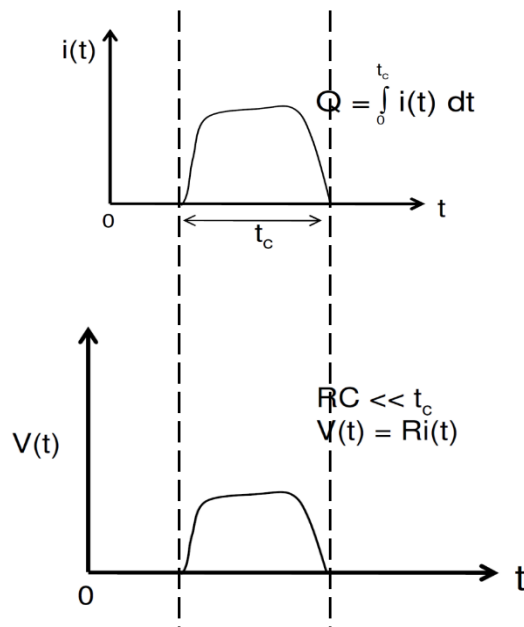


펄스 방식(Pulse mode)

- Small RC ($RC \ll t_c$)



- 저항이 작아 전자가 저항을 통해 흐르는 경향
- 축전기 용량이 작아 모든 전하를 수집하지 못함

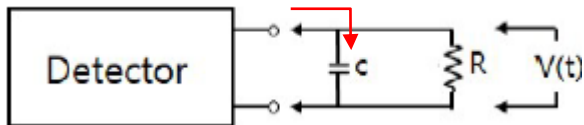


- 에너지 정보를 얻기 어려움
- 시간정보가 중요한 경우 사용
- 고방사선량률에서 사용

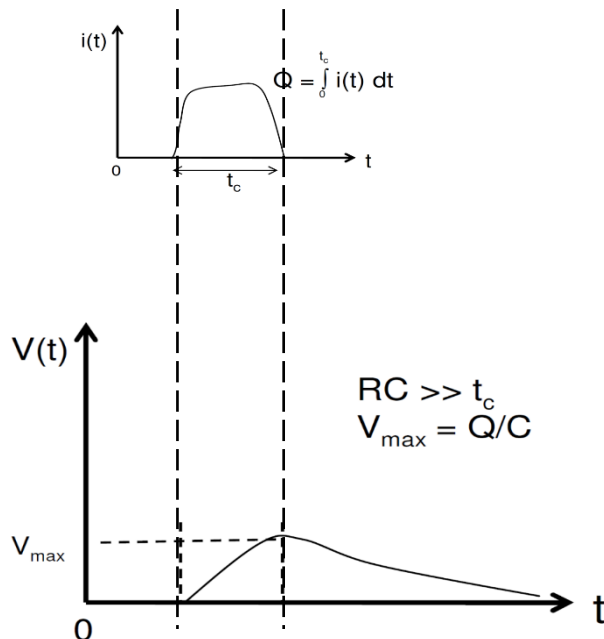


펄스 방식(Pulse mode)

- Large RC ($RC \gg t_c$), 주로 사용되는 형태



- 저항이 크고 축전기 용량이 크에 따라 전하가 축전기에 축적되고 t_c 이후 서서히 방전됨



- 에너지 정보를 얻을 수 있음

$$V_{\max} \propto Q \propto \text{deposit } E$$

- 에너지 분광분석에 용이

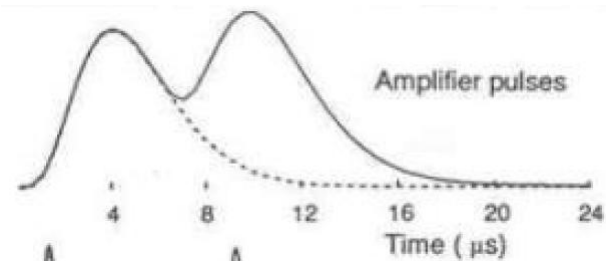
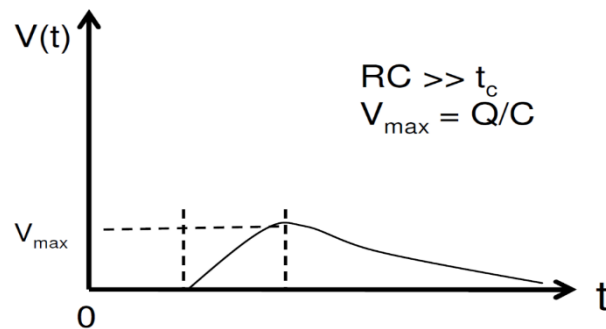
- 펄스 파고 및 shape 분석으로 신호 분리 용이

- Background discrimination
- Pulse shape analysis, n/γ 분리



펄스 방식(Pulse mode)

- Large RC ($RC \gg t_c$), 주로 사용되는 형태



Pile-up

- RC가 작아지면 full collection이 불가하므로 에너지 정보를 얻을 수 없음
- RC가 너무 커지면 펄스 붕괴시간이 길어짐에 따라 Pile-up 현상이 나타나고 noise의 영향이 커짐



국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

Ⅱ. 검출기별 특성

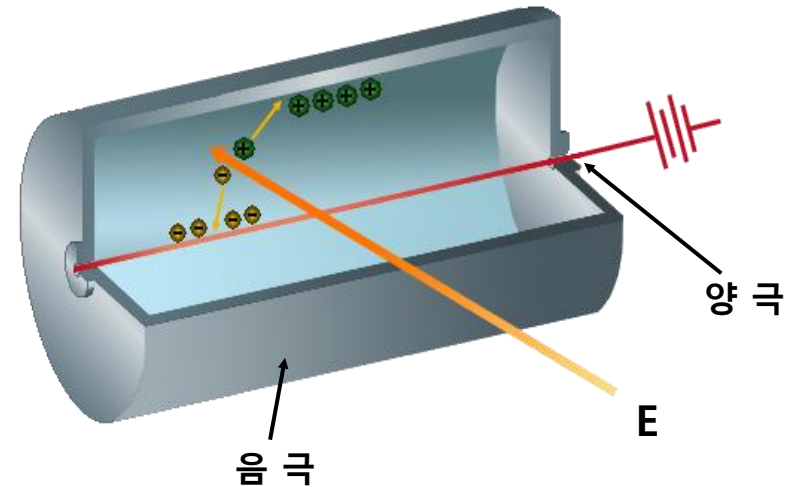
기체충전형 검출기(전리함, 비례계수관, GM 계수관)



기체충전형 검출기의 검출 원리

■ 방사선 입사 시 검출기 내부 기체를 이온화(전리작용)하여 양이온, 전자 이온쌍 생성

- 생성되는 이온쌍의 수(N) = $\frac{E}{W}$
 - E : 입사 방사선 에너지
 - W : 한 개의 이온쌍을 생성하는데 필요한 에너지
- 방사선당 생성되는 전하량(Q) = Ne
 - e : 1.6×10^{-19} C



■ W값은 기체의 종류, 방사선의 종류 등에 따라 차이가 있음.

- 공기에서의 W값은 약 34 eV/ip

$$V = \frac{Q}{C} \quad I = \frac{Q}{t} \quad I = nQ = \frac{enE}{W}$$

- n : 초당 입사하는 방사선 수

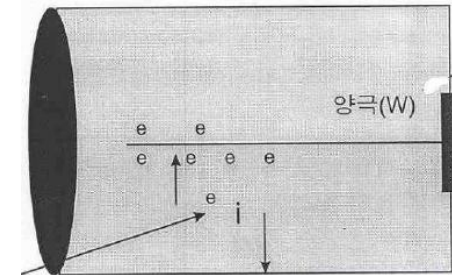
Gas	W-Value (eV/ion pair)	
	Fast Electrons	Alpha Particles
Ar	26.4	26.3
He	41.3	42.7
H ₂	36.5	36.4
N ₂	34.8	36.4
Air	33.8	35.1
O ₂	30.8	32.2
CH ₄	27.3	29.1

REF: Radiation Detection and Measurement, Glenn F.Knoell

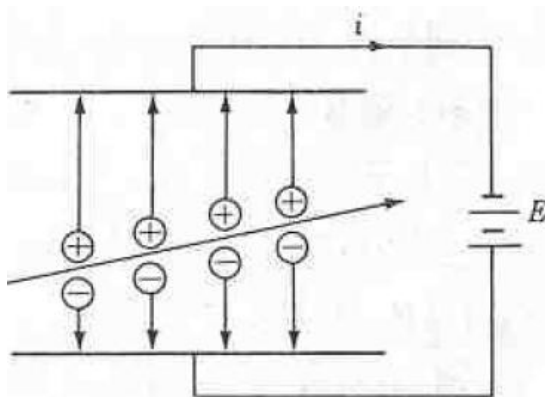
기체충전형 검출기의 검출 원리

- 양극인 중앙전극과 음극인 검출기 외벽에 전위차가 걸리면 생성된 이온쌍이 이동하면서 전극에 포집되어 전류 생성

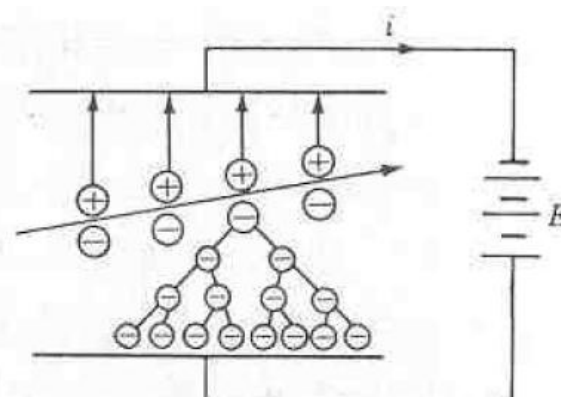
- 전위차가 없는 경우 매우 짧은 시간 내 이온쌍이 재결합



- 이온쌍을 포집하는 방식, 인가 전압에 따라 가스충전형 검출기의 영역이 구분되어짐



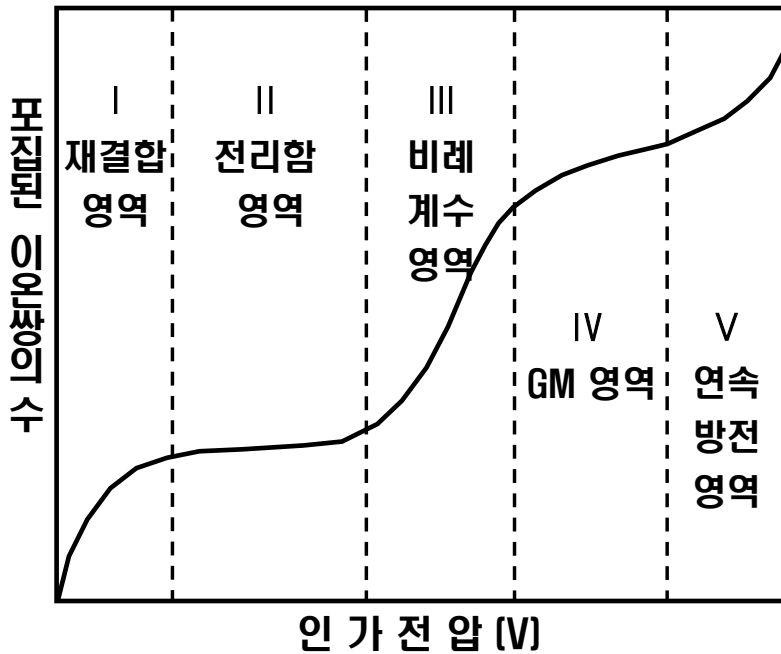
- 1차 전리만 수집
- 이온전리함



- 기체증폭 수집
- 비례계수관, GM계수기



인가전압 변화에 따른 출력신호 변화



I. 재결합 영역

- 여전히 생성된 이온쌍 일부가 재결합
- 방사선 측정 이용 불가

II. 전리함 영역(포화 영역)

- 재결합 현상 소멸, 모든 이온쌍 전극 포집
- 넓은 영역에서 전류 크기 일정
- 전리함 사용

III. 비례계수 영역

- 기체증폭 발생
- 비례계수관 사용

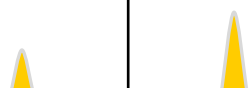

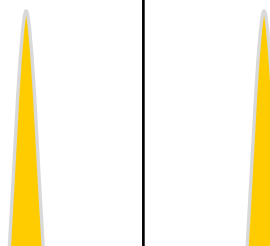
IV. GM 영역

- 양극주변 모든 영역에서 기체증폭 발생
- GM 계수관 사용



기체충전형 검출기별 출력신호의 이해

- 가정: 입사되는 방사선은 검출기 내에서 모든 에너지를 잃어 버림
 - W값 34 eV/ip 적용

검출기	전리함		비례계수관		GM	
방사선 에너지	340eV	3400eV	340eV	3400eV	340eV	3400eV
초기에 생성되는 이온쌍	10	10^2	10	10^2	10	10^2
증배율	1	1	10^5	10^5	10^8	10^8
양극에 포집되는 전자수	10	10^2	10^6	10^7	한번의 방전에 해당하는 양	한번의 방전에 해당하는 양
출력펄스의 크기						
방사선의 에너지 구분	가 능		가 능		불가능(개수만 측정) 선량을 측정하려면?	



주요 특징

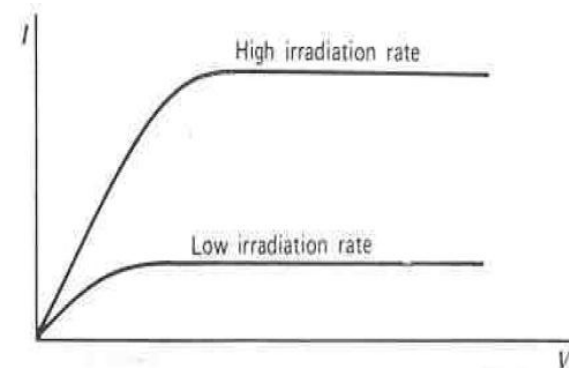
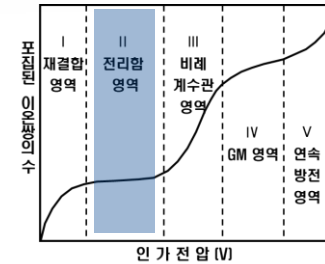
- 일차적으로 생성된 모든 이온쌍이 전극에 포집
- 생성된 모든 이온이 전극에 도달함으로써 전압에 관계없이 **일정한 포화전류**를 얻음
 - 전리함 크기, 기체 종류, 밀도, 방사선 에너지, 종류에 따라 포화전류에 도달하는 전압 변화

장점

- 전원장치의 고성능을 요하지 않음.
- 입사 방사선의 **에너지 선별** 가능
- **조사선량을** 직접 측정 가능
- 모든 종류의 방사선 측정 가능

단점

- 출력 펄스 신호가 작아 Noise와 구분이 어려움
- 봉입 기체 **밀도의 영향**을 받음(온도, 압력)



전리함을 활용한 조사선량률 측정

- 조사선량 : X선 또는 γ 선에 의해 공기의 단위 질량당 생성된 전하량 [C/Kg]
 - $1 R = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/Kg}$
 - 전리함을 통해 흡수된 전하량을 측정한 후 전리함 내부 공기 질량을 나누면 조사선량
- 측정 환경의 온도(T), 압력(P)에 따른 공기 질량(m) 변화 고려
 - $PV = \frac{m}{M}RT$ V : 공기 체적, R : 기체상수
 - $m = m_0 \left(\frac{P}{P_0}\right) \left(\frac{T_0}{T}\right)$ $P_0 : 1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg}, T_0 : 0 \text{ }^\circ\text{C} = 273 \text{ }^\circ\text{K}$



Bragg-Gray 원리

■ 전자평형 상태

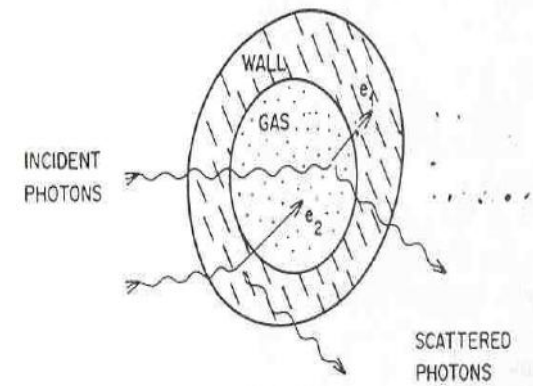
- 전리함 내부기체에서 생성된 하전입자가 전리함 외벽에서 에너지를 잃는 양과 외벽에서 생성된 하전입자가 전리함 내부기체에서 에너지를 잃는 양이 평형을 이루는 상태
- 2차 전자의 비정보다 외벽을 두껍게 설정, 너무 두꺼워지는 경우 1차선이 일부 차폐
- 3 MeV 이하의 광자에 대해 성립

■ 전리함 벽과 내부기체의 흡수선량비

- $\frac{D_W}{D_g} = \frac{S_W}{S_g}$ ■ S : 질량저지능

$$D_W = D_g \left(\frac{S_W}{S_g} \right) = \left(\frac{nW}{m} \right)_g \left(\frac{S_W}{S_g} \right) \leftarrow E = nW$$

- 조직등가물질로 외벽 구성 시 조직의 흡수선량을 얻을 수 있음 [조직등가 전리함]



전리함의 사용 예

■ 포켓선량계

- 축전기에 충전된 전하가 입사한 방사선에 의해 생성된 전하와 결합함에 따라 발생하는 전하량의 변화, 전압강하를 이용
 - 휴대용 보조선량계로 이용
- $$\Delta V = \frac{\Delta Q}{C}$$



■ 가압전리함(PIC; Pressurized ion chamber)

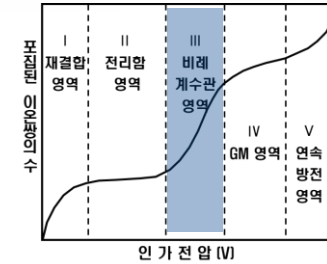
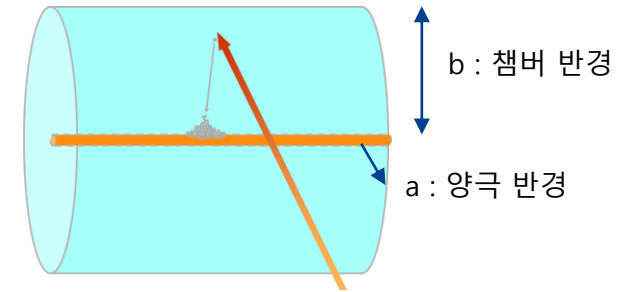
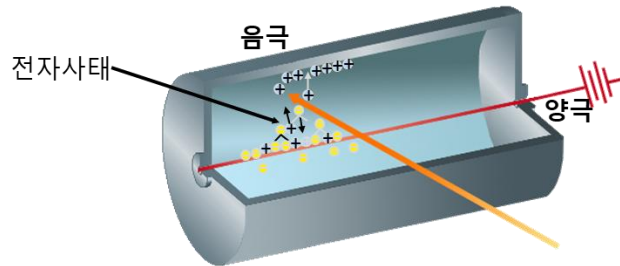
- Ar 기체를 대기압의 약 25배로 가압하여 내부 기체로 충전
- 준위가 낮은 환경에서 밀도를 높혀 민감도를 높이기 위함
- Ar 기체는 전자 친화성이 공기 대비 약 0.001 배로 매우 작음
전자 친화성이 높은 경우 전자를 흡수하여 측정 효율이 낮아짐
- 환경방사선 감시용으로 이용



주요 특징

■ 기체 증배 현상 발생

- 전자가 양극으로 포집되는 과정에서 또 다른 전리를 일으키는 현상



- 2차 생성된 이온 수 \propto 1차 생성된 이온 수 (비례계수 영역)
- 인가전압, 전극의 구조, 가스의 종류 및 압력에 따라 증배계수 변화

$$E(r) = \frac{V_0}{\ln(b/a)} \frac{1}{r}$$

양극으로부터 r 거리의 전기장 E(r)

■ 주요 내부 기체 : P-10 gas

- Ar(90%) + CH₄(10%)로 구성
- Quenching gas : 여기된 원자가 방출하는 자외선 등에 의한 전자사태를 방지하는 역할, 자외선 등 흡수

■ 장점

- 입사방사선의 에너지선별 가능, 특히 α/β 분리 계수에 탁월
- 전리함에 비해 출력펄스가 크므로 Noise 구분 용이



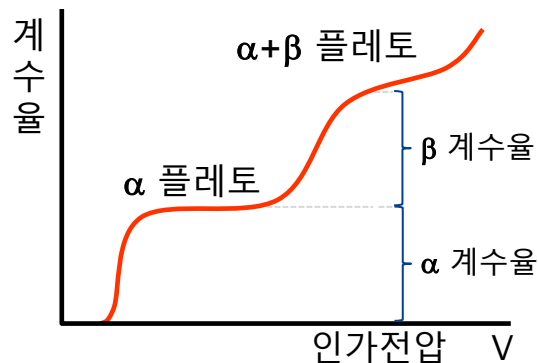
비례계수관을 활용한 α/β 계수

■ 출력 펄스의 크기 $\alpha > \beta$

- 통상 알파선 에너지는 4~6 MeV, 베타선은 2 MeV 이하
- 알파선의 비전리도 > 베타선의 비전리도
- 고 에너지 베타선은 검출기를 이탈할 수 있음

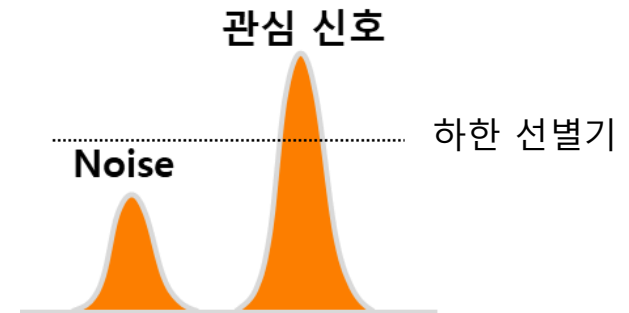
■ 플레토 곡선이 β 에서 곡선 형태로 나타나는 원인

- 알파선은 단일 에너지를 갖지만 베타선은 스펙트럼 형태
- 베타선의 경우 검출기의 하한선별기를 넘는 펄스가 인가전압 증가에 따라 지속 증가

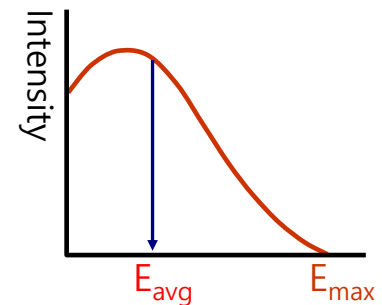


※ 입자별 공기중 비정

- 4 MeV 알파입자 : 1 cm 이하
- 1 MeV 베타입자 : 수 m



베타선의 에너지 스펙트럼



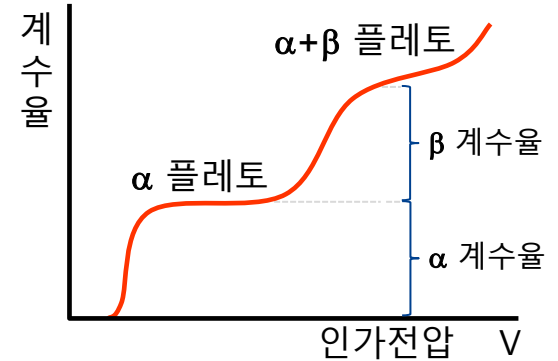
비례계수관을 활용한 α/β 계수

■ 플레토 곡선이 형성되는 인가전압 차이를 이용

- 알파선이 검출기에 더 많은 에너지를 전달

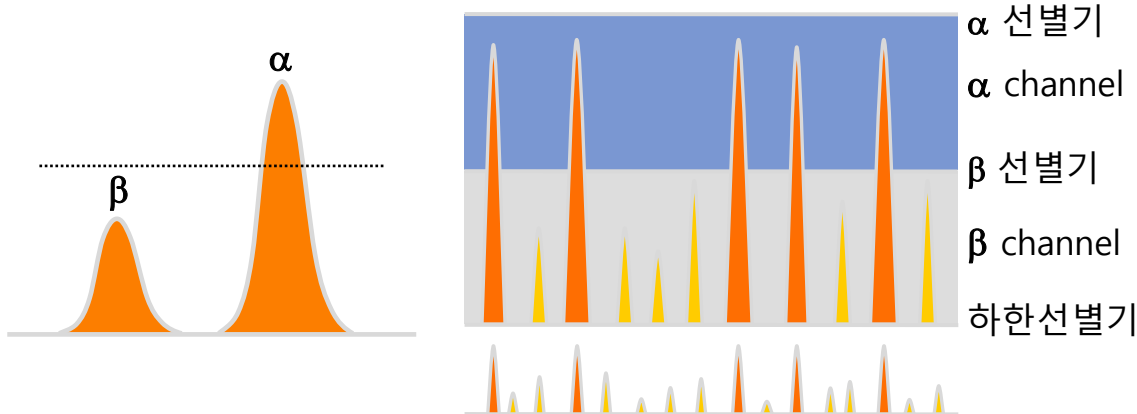
$$V_{\max} \propto Q \propto \text{deposit } E$$

- 낮은 전압에서 알파선의 플레토 곡선이 먼저 형성
- 알파선을 먼저 측정 후 알파, 베타 동시 측정하여 분리 계수



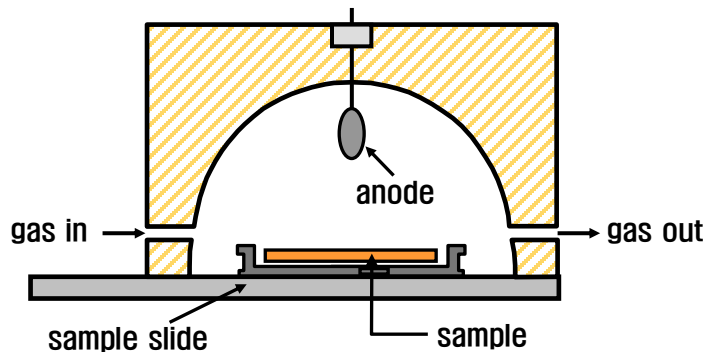
■ α/β 출력 펄스의 파고차이를 이용

- 펄스 자체의 파고 차이를 구분하는 선별기(discriminator)를 사용하여 분리 계수 가능

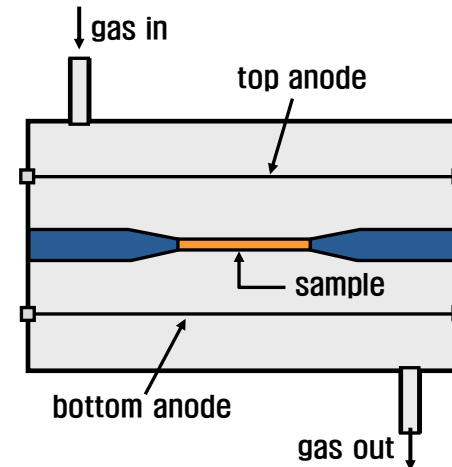


비례계수관의 유형

- **기체 흐름형:** 입사창이 없고 내부기체를 밀봉하지 않은 형태의 비례계수관
 - 입사창이 없으므로 저 에너지 알파 및 베타 측정 가능, 검출 효율 우수
 - 내부 기체를 연속적으로 주입하는 형태이므로 자체 성능 손실을 보상



2π 기체 유입형 비례계수관



4π 기체 유입형 비례계수관

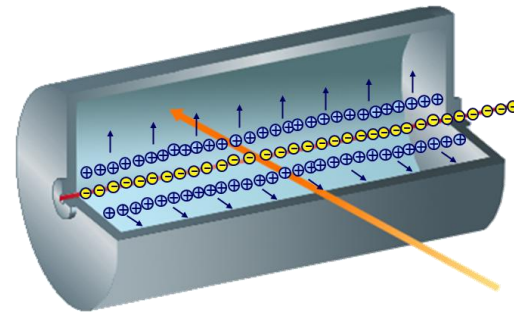
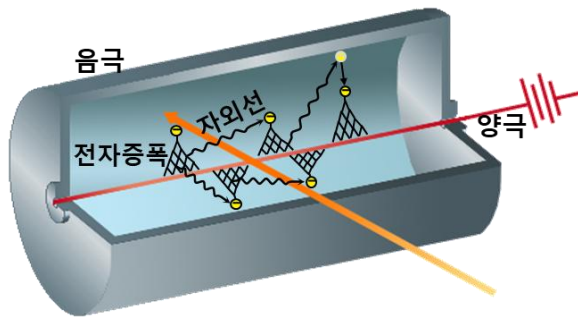
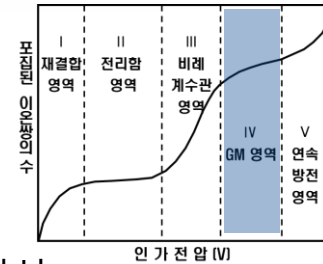
- **밀봉형:** 검출기 외벽과 입사창으로 내부 기체를 밀봉
 - 기체가 밀봉됨에 따라 대기압보다 높게 충전하여 효율을 높일 수 있음



주요 특징

■ 양극 근처 거의 전역에서 기체 증배 현상 발생

- 입사 방사선 에너지와 무관하게 이온쌍 최대 생성, 유사한 출력펄스 형성



- 입사 방사선의 종류, 에너지 정보 상실, 선별 불가

■ 장점

- 계수 효율이 매우 높음
- 출력신호가 크므로 후속 회로 소형화 가능
- 여러 종류의 방사선 측정 가능

■ 단점

- 소멸기체 분해로 수명이 유한
- 입사방사선 정보 상실
- 긴 불감시간



주요 특징

■ 후속 전자사태 발생에 따른 연속방전

- 전자에 비해 느린 양이온의 특성 상 출력 펄스 생성 후에도 음극으로 이동
- 전위차가 크기때문에 음극과 충돌하면서 2차적인 전자사태를 유발 가능
- Quenching gas : 2차 전자를 내지 않는 소멸기능을 하여 후속 전자사태 예방

■ 주요 내부 기체 : Ar, He 등 불활성 기체

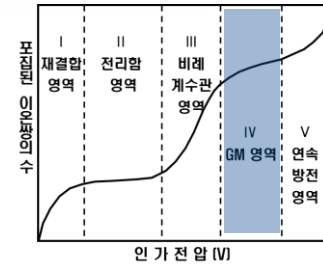
- 주요 기체 + Quenching gas로 구성

- 할로젠 가스(Cl_2, Br_2) : 소멸작용 후 재생
- 유기 가스(에틸알콜, 에틸포메이트) : 분해되어 감소

■ 외부소멸법

$10^8 \sim 10^9$ 계수 수명

- 높은 외부저항을 걸어주어 전압 회복을 지연 → 불감시간이 더욱 길어짐



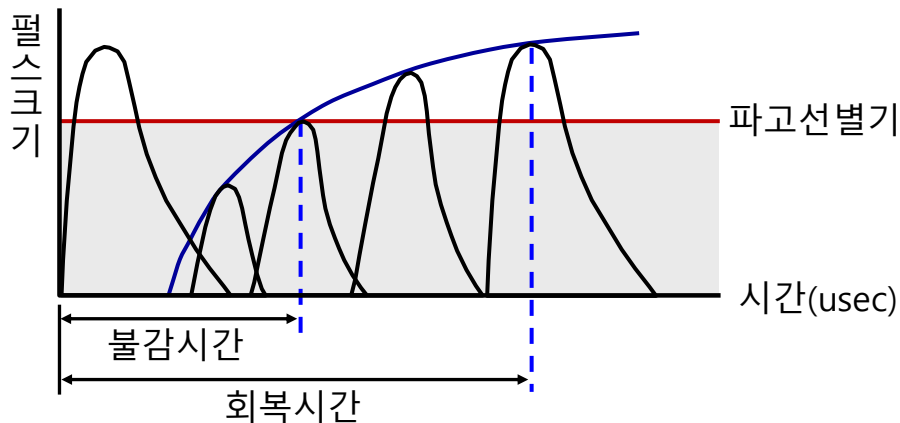
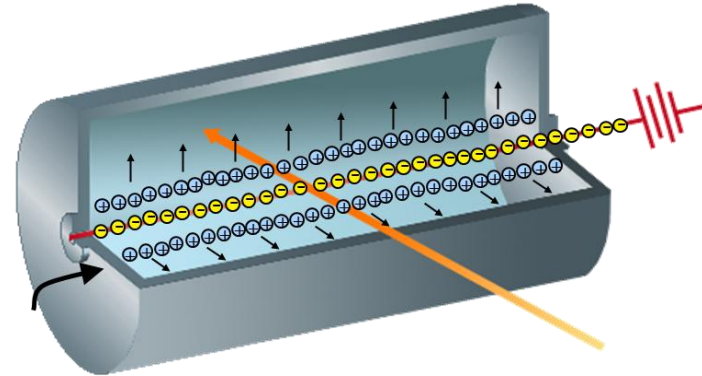
불감시간과 회복시간

■ 불감시간

- 전자사태 후 양극부근에서 양이온이 형성하는 공간전하에 의한 전압강하
- 양이온의 속도는 전자의 1/1000 수준
- 내부 기체 종류, 압력, 전기장 강도, 선별기 준위 영향

■ 회복시간

- 전자사태 후 출력펄스 크기가 원래대로 돌아오는 시간



- GM 불감시간 : 100 ~ 400 μsec
- 비례계수관 불감시간 : 수 μsec
- NaI(Tl) 불감시간 : 수 μsec
- 유기 섬광, 반도체 불감시간 : 수십 nsec

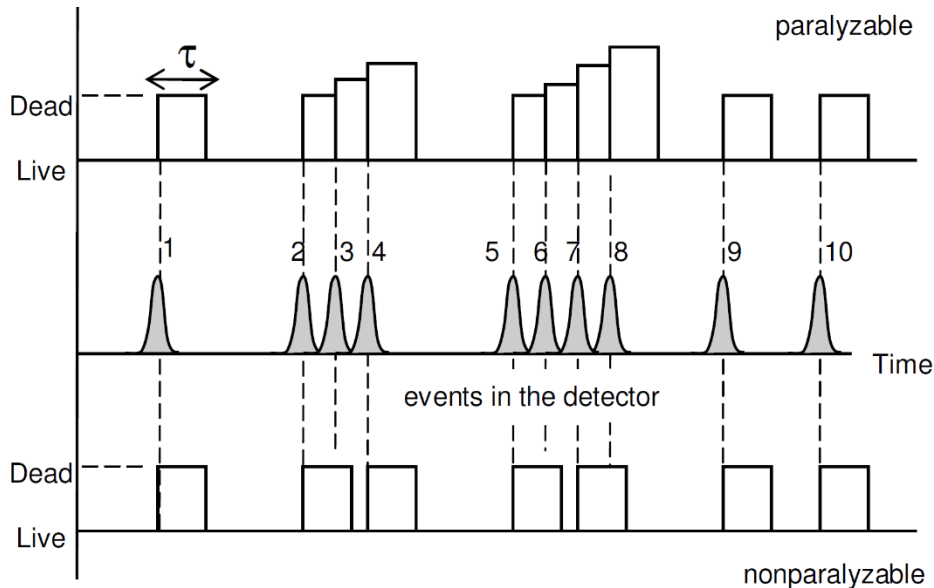


불감시간과 분해시간

■ 불감시간의 종류

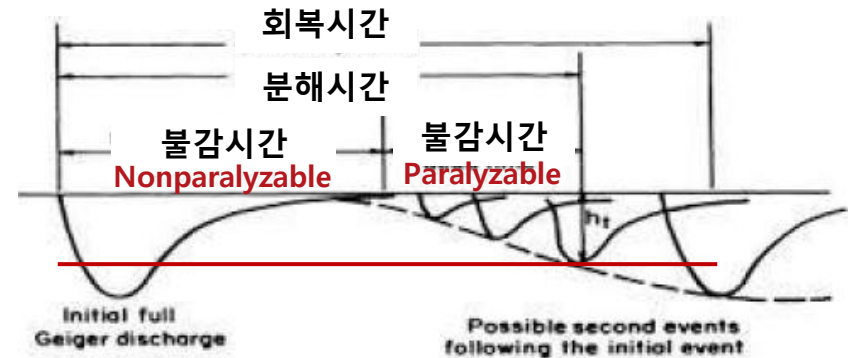
■ 비정체(Nonparalyzable) 불감시간

- 검출기 고유 특성
- τ 시간 동안은 펄스 중첩 없음

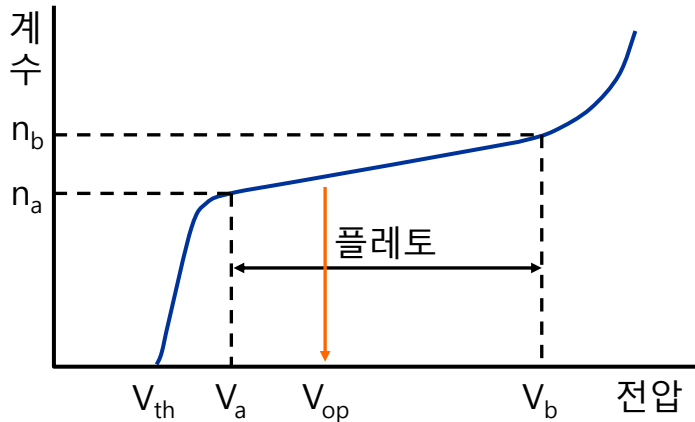


■ 정체(Paralyzable) 불감시간

- 회로 관련 특성
- 펄스 크기가 충분히 커질 때까지



GM 계수관의 플레토



■ GM 플레토 특성

- 플레토 구간이 길고(통상 250 V) 안정적
 - 플레토 구간이 **100 V 이상**이어야 양호
 - 100 V 변화 당 계수 변화 **경사율이 수 %** 이내
- 불감시간으로 인해 작은 펄스분포가 높으므로 플레토에 경사가 발생

$$\text{경사율}(\alpha) = \frac{\frac{n_b - n_a}{n_a + n_b}}{\frac{V_b - V_a}{100}} \times 100 = 2 \times 10^4 \frac{n_b - n_a}{(n_a + n_b)(V_b - V_a)} (\%)$$

- 플레토 폭이 넓을 경우 → $V_{op} = V_a + \frac{1}{3}(V_b - V_a)$
- 플레토 폭이 좁을 경우 → $V_{op} = V_a + \frac{1}{2}(V_b - V_a)$

GM 계수관의 사용기간이 경과함에 따라 플레토의 기울기가 증가하는 이유

- 가스의 미시적 누설
- 소멸기체의 성능저하
- 방사선과 검출기와의 상호작용으로 생성된 불순물에 의한 계수관 내 전기장의 변화



단창형, 보상형 GM

■ 단창형 GM

- 원통형 GM의 한 면을 α 또는 β 가 투과될 수 있도록 얇은 막으로 설계
 - 광자에 대한 검출 효율 낮음
 - 창을 닫으면 광자를 측정 가능한 형태도 있음



■ 보상형 GM

- 저 에너지 광자의 반응도가 다른 에너지 대비 매우 높음
 - 광전효과로 인한 영향 / 광전효과 $\propto 1/E^{3\sim 4}$
- Pb, Sn 등으로 검출기 외벽을 차폐, 저에너지 광자 반응도를 낮추어 반응도를 평탄화
 - 계수치를 통해 선량률을 근사적으로 획득

