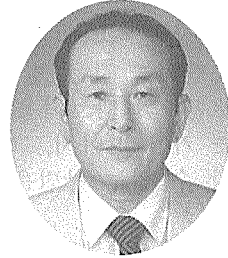


방사선 계측



박 인 용

원자력안전기술원 전문위원

머 리 말

‘방사선 계측’에 대해서 생각하기 전에 우선 현대의 과학 기술에 있어서 ‘계측’이 가지는 의미를 생각해 보자. 우리들은 과학 기술의 시대에 살고 있고 어느 전문 분야에서 일하고 있으면서도, “과학은 무엇인가!” 하고 물으면 쉽게 답할 수가 없다. 17세기 초부터 ‘갈릴레오 갈리레이’가 시작하여 오늘에 이르는 현대 과학은 Science의 낱말 뜻과 같은 막연한 지식을 뜻하지도 않고, 옛날의 관념적 철학이나 학문을 뜻하는 것도 아니다.

현대 과학은 “사물을 수량으로 파악하여 수학적 논리로 인식하는” 것이다. 따라서 “사물을 수량으로 파악하는” ‘계측’은 현대 과학의 근본이며 기반인 것이다. 어느 시대나 지역이나 민족의 과학 기술 수준은 이 계측 기술의 발달 정도로 평가된다. 계측은 사물의 현상을 검출하고 그것을 계량(計量)하여 수량으로 파악하는 일을 말한다. 따라서 과학이 인식할 수 있는 깊이와 넓이는 이 계측이 할 수 있는 정밀도와 범위로 한정되며, 과학적 지식을 인간 생활에 응용하는 기술의 정밀도와 범위도 마찬가지로 이 계측의 발달 정도 내에 한정되기 때문이다. 물론 인간의 사색은 이 계측 범위를 훨씬 넘어설 수가 있고, 그 사색에서 얻어진 개념이 과학 기술을 발전시켜 나가게도 한다. 그

러나 이와 같은 단계의 개념을 과학 기술이라고 할 수는 없다.

20세기 과학 기술의 발전 단계를 원자핵까지 파고 든 것이라고 한다면, 이것은 바로 여기서 논술하려는 ‘방사선 계측’의 토대 위에 이룬 것이다. 19세기말까지 원자에 대한 개념은 서 있었다. 원자는 그 중심에 원자핵이 마치 태양계의 중심에 태양이 있는 것과 같이 있고 그 주위의 궤도에 전자들이 돌고 있으며, 이 전자들의 수와 궤도 모양에 따라 그 원자의 화학적 특성이 결정된다는 것을 알고 있었다. 그러나 그 원자핵이 더 이상 쪼갤 수 없는 한알인지 몇알이 뭉친 복합체인지는 논란의 대상이 돼 있었다. 그런데 ‘큐리’부인이 원자핵에서 방사선이 방출하는 것을 검출함으로써, 한 원자핵은 여러 개의 입자가 매우 큰 힘으로 뭉친 것임을 알게 되었고, 그 원자핵을 분열시키면 막대한 에너지를 얻을 수 있다는 것도 알게 되었다. 그래서 우리들은 원자력에 의한 지구의 파멸과 인류 생활의 기본 요건인 에너지의 무궁한 공급원을 상정하는 극단적 공포와 희망 사이에 사는 원자력 시대를 맞게 된 것이다. 즉 이 원자력시대는 ‘방사선 계측’에 의하여 이루어진 것이다.

1. 방사선의 검출(檢出)

방사선의 검출에 대해서 살펴보기 전에,

우선 방사선은 무엇이며, 물질과의 상호 작용에서 어떤 현상을 나타내는가를 살펴보자. 방사선을 검출한다는 것은, 방사선은 무엇이고, 그것이 물질과의 상호작용에서 어떤 현상을 나타내는 가를 알아서, 그 현상 중에서 그것을 계량할 수 있는 방법을 찾아내는 것이기 때문이다.

원자핵은 그것을 구성하는 양성자(Proton), 중성자(Neutron) 등의 입자들이 일정한 수와 상태에 있을 때 안정되며, 그렇지 못할 때는 일정한 입자들을 일정한 '에너지'와 확률로 방출하여 안정 상태가 될려고 한다. 이때에 원자핵으로부터 방출되는 입자를 방사선(Radiation)이라고 하며, 이 방사선을 방출하는 능력을 방사능(Radio-activity)이라 말하며, 이 방사능을 가진 원자핵을 방사성 동위원소(Radio-Isotope)라고 한다.

이와 같은 좁은 의미의 방사선을 한마디로 정의하면, "원자핵에서 방출되는 입자(粒子)"라고 말할 수 있다. 이 입자의 개념 안에는 질량과 전하(電荷)도 없는 전자파인 빛도 광입자(光粒子)로 보고 포함시킨 것이다. 그리고 넓은 의미의 방사선은 운동 '에너지'를 가진 입자들의 방출을 뜻한다.

일반적으로 널리 알려진 방사선과 그의 특성은 아래 표와 같다.

방사선 이름	질량	전하	물질과의 작용
α (helium)	4AMU	+2e.c.	Ionization
β (electron)	1/1800	-1,+1	Ionization
γ (photon)	0	0	Photo-electric, Compton, Pair P.
n(neutron)	1	0	Nuclear reactions
p(proton)	1	+1	Ionization
f(fission f.)	~ 237	$\sim +96$	Ionization

위의 표에서 알 수 있는 것과 같이 전자(electric charge; electron charge를 단위로 했음)를 가진 방사선은 상대 물질의 원자핵 궤도 상의 전자들과 사이의 '쿨롬'(Coulomb)힘에 의하여 그 궤도 상의 전자를 떨어져 나가게 하여 +와 -의 '이온'쌍

을 생기게 하는 '이온'화(Ionization)에 의하여 그의 운동 '에너지'를 소멸한다. 그리고 질량과 전하가 없는 전자파(電磁波)인 광입자(光粒子) γ 선도 광전효과(photo-electric effect)와 '콤프톤'효과(Compton effect)에 의하여 그의 운동 '에너지'를 전자의 운동 '에너지'로 전환하거나 쌍 전자 생성(pair production)으로 전자를 생성하는데 소비하여 결국은 '이온'화를 하게 된다. 그리고 전하가 없는 중성자도 탄성 산란(彈性散亂: elastic scattering)이나 흡수(吸收; absorption)와 같은 핵반응(核反應: nuclear reaction)으로 전하를 가진 입자나 γ 선으로 전환 되어 결국은 '이온'화를 일으키게 된다. 즉 방사선을 검출한다는 것은 결국은 방사선이 물질과의 방사선 검출 방식과 검출기에 대하여 간략하게 설명하면 다음과 같다.

1) 기체 검출기(Gas Detector)

적당히 전압을 걸어 준 양전극 사이의 기체 속에 방사선이 들어와서 '이온'화하게 되면, '-이온'은 +전극에 '+이온'은 -전극에, 당겨 가게 되고 이 '이온'의 흐름은 전기 '펄스(pulse)'가 된다. 그런데 이 전극 사이의 전압이 없으면 '이온'화된 '이온'들은 재결합 하고 말며, 전압이 커질 수록 재결합이 적어지고 일정 범위에서는 방사선으로 생긴 '이온'들은 모두 전극으로 모이게 된다.

가) '이온'상(Ionization Chamber) :

이와 같이 방사선으로 생긴 '이온'들이 모두 전극에 모이는 영역을 '이온상 영역(Ionization-chamber region)'이라고 하며, 이 영역에서 작동하는 검출기를 '이온 상(Ionization Chamber)'이라고 한다.

나) 비례 계수관(Proportional Counter)

이 '이온 상'영역보다 더 높은 전압을 걸어 주면, 전극으로 당겨 가는 '이온'들이 다시 '이온'화 시킬 '에너지'를 가지게 되어, 소위 '가스 증배(Gas multiplication)'를 일으키게 된다. 이때에 전극에 모이는 전하량은

방사선으로 생긴 ‘이온’들의 수십 배에서 수십만 배까지 된다. 그리고 그 배율은 전압에 따라 결정된다. 이와 같이 방사선으로 생긴 ‘이온’수에 비례한 큰 전하량을 모으게 되는 영역을 ‘비례 영역(Proportional region)’이라고 하며, 이 영역에서 작동하는 것을 ‘비례 계수관(Proportional counter)’이라고 한다. 이것으로는 방사선의 수를 계수할 수 있을 뿐만 아니라 각 ‘펄스’의 크기가 방사선 각개에 의하여 생긴 ‘이온’ 수량에 비례함으로 방사선 각 알의 ‘에너지’도 검출할 수가 있다.

다) G.M.(Geiger Muller) 계수관(G-M Counter)

이 비례 영역 보다 전압을 더 높혀 가면, 비례 관계가 없어지고, 일정한 전하량이 모이는 영역이 나타난다. 이 영역을 ‘G-M 영역(G-M Plateau)’이라고 하며, 이 영역에서 작동하는 계수관을 G-M 계수관(G-M Counter)이라고 한다. 이것은 방사선 각 알의 ‘에너지’를 식별할 필요가 없는 방사선의 계수에는 가장 손쉽고 경제적인 검출기이다.

2) 반도체 검출기(Semi-conductor Detector)

역으로 전압을 걸어 준 반도체의 P-N 접합부(Junction)에 방사선이 들어 와서 ‘이온’화시키면, 이들은 가스 검출기와 마찬가지로 양전극에 모여 전기 ‘펄스’를 발생한다. 반도체의 밀도는 ‘가스 검출기’의 ‘가스’밀도 보다 수만 배나 크고, 하나의 ‘이온’쌍을 만드는데 소요되는 ‘에너지’는 몇 분의 1밖에 되지 않음으로, 아주 짧은 두께 안에 방사선의 대부분의 ‘에너지’를 다수의 ‘이온’쌍을 생성하여 흡수함으로, 이것들을 모은 ‘펄스’는 시간 폭이 매우 짧고 높이가 큰 것이 되어, 방사선의 계수와 더불어 그 각개의 ‘에너지’를 정밀 측정하는데 매우 적합한 검출기이다.

3) 섬광(閃光) 검출기(Scintillation Detec-

tor)

섬광체(Scintillator) 내에 방사선이 들어가면, 일정한 ‘에너지’를 가진 광자가 흡수된 방사선의 ‘에너지’에 해당하는 개수로 방출된다. 따라서 이 광자들을 광증배관(Photo-multiplier tube)로 증배 한 전기 ‘펄스’로 검출하면, 그 방사선 각개의 ‘에너지’에 비례한 ‘펄스’ 크기를 가진 전기 ‘펄스’를 계수할 수 있다.

4) 구름 상자(Cloud Chamber)

포화 증기압 보다 압력이 낮은 증기 속에 방사선이 입사되면, 그 방사선이 날아간 자리에 비행 운이 생긴다. 이 방사선이 날아가며 만든 비행 운의 길이밀도, 분기, 모양 등에서 그 방사선의 여러 특성을 검출할 수 있다.

5) 사진판

사진판 속을 방사선이 투과하면 투과한 자리에 화학변화를 일으켜서 감광하게 된다. 이것을 현상하여 그 감광 농도에서 그곳을 투과한 방사선량을 측정할 수 있고, 현미경으로 관찰하면, 구름 상자와 같이 그 방사선의 여러 가지 특성도 알아낼 수가 있다.

2. 방사선의 계량(計量)

계량은 그 계량으로 알고 자 하는 목적에 따라 계량의 단위와 방법이 결정된다. 방사선의 계량도 마찬가지이다. 방사선의 계측에 있어서 가장 기본적인 계량을 들어 간략하게 설명하면 다음과 같다.

1) 방사능(Radio-activity)

방사선은 전술한 것과 같이 불안정한 원자핵 즉 방사성 동위원소(Radio-Isotope)가 안정 상태로 될려고 입자를 방출하는 것이다. 이 현상을 그 원소의 붕괴(disintegration)라고 한다. 그리고 이러한 능력을 방사능(Radio-activity)이라고 하며, 그의 계량은 시간당 몇 개가 붕괴 하나를 측정하는 것이

다. 이러한 방사능의 계량 단위로서 종전에는 Ra-226 1 gram의 방사능을 기준으로 하여 1 Curie(Ci)라고 하였는데, 현재의 국제 표준(S.I) 단위는 1초당 하나 붕괴하는 것을 1 Becqurel(Bq)이라고 한다.

1 Bq(Becqurel)=1 dps(disintegration per second)

1 Ci(Curie)= 3.7×10^{10} dps= 3.7×10^{10} Bq=Activity of Ra-226 1g.

2) 방사선 선량(Radiation Dose)

방사선 선량(dose)이라 함은 어떤 대상물에 조사(照射)하거나 조사 받은 방사선의 량을 의미한다. 즉 조사하거나 조사 받은 방사선의 '에너지' 량을 의미한다. 그런데 이와 같은 량을 측정하기란 매우 어렵다. 일정한 '에너지' 량에 해당하는 방사성을 조사하거나 조사 받아도, 그것이 나타내는 효과는 조사한 방사선의 여러 가지 특성과 조사 받은 물질의 특성과 상태에 따라 다르기 때문이다.

가) '뢴트겐'(Roentgen) : R

X선과 γ 선의 조사 선량에 대해서는 일찍이 '뢴트겐'(Roentgen : R)이란 단위가 사용돼 왔다. 이것은 표준상태의 공기 1cm³(0.001293g)에 조사되며 1 cgs-esu의 '이온'쌍을 생성케 하는 선량이다. 즉

$1R = 1\text{cgs-esu/cm}^3$ of Standard Air = 2.58×10^{14} C/kg

나) 흡수 선량(Absorbed Dose : D)

근래에 일반적으로 사용되는 방사선 선량은 조사 받은 물질에 흡수된 '에너지'를 기준으로 계량하는 흡수 선량이다. 이것은 조사 선량이나 그것의 특성과 조사 받은 물질의 특성이나 상태에 관계없이, 조사 받은 물질의 단위 질량 당에 흡수된 방사선의 '에너지'를 나타낸 것이다. 즉

$D = \Delta E_p / \Delta m$

ΔE : 전리 방사선에 의하여 피 조사 물에 주어지는 '에너지'

Δm : 피 조사 물의 질량.

1rad = 100erg/g 1Gy(Gray) = 100 rad (=1J

/kg)

그리고 단위 시간 당의 선량($\Delta D / \Delta t$)을 선량율(Dose Rate : Gy/sec)이라고 한다.

다) 선량 당량(Dose Equivalent : DE)

방사선이 인체에 미치는 생물학적 효과는 그 방사선의 흡수 선량 뿐만 아니라, 그 방사선의 성질(Quality)과 체내의 분포(Distribution) 상태에 따라 달라진다. 흡수 선량(Dose : D)을 두 인자(Factor)에 대하여 교정해 준 값을 선량 당량(Dose Equivalent : DE)이라고 한다. 즉

$DE = D \times QF \times DF$

QF(Quality Factor) : 방사선 성질에 따른 생물학적 효과의 보정 인자.

DF(Distribution Factor) 방사성 물질의 체내 분포에 따른 보정 인자.

단위는 rem(rad equivalent men)을 일반적으로 사용해 왔으나, 국제 표준 단위(S.I. Unit)는 100 rem에 해당하는 Sv(Sievert)이다. 즉

1 Sv = 100 rem

3) 방사선 선속(線束 : Flux)

어떤 방사선 입자가 단위 시간과 단위 면적 당 통과하는 수를 그 방사선의 선속이라고 한다. 이것은 어떤 방사선에 대한 어떤 물질의 차폐 효과나 방사선에 의한 물체의 두께 측정에 매우 편리하다. 그리고 특히 중성자와 어떤 물질과의 핵반응 도수(단위 시간당의 회수)는 근본적으로 중성자 속(neutron flux)에 비례하므로, 원자로의 출력은 이 중성자 속으로 측정된다. 속도가 $v(\text{cm/sec})$ 인 중성자 속 ϕ 는,

$\phi = n(1/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}) = n(1/\text{cm}^3) \cdot v(\text{cm/sec}) = nv(1/\text{cm}^2 \cdot \text{sec})$

즉 중성자 속 ϕ 는 중성자의 밀도 n/cm^3 에 다 그 중성자의 속도 $v \text{ cm/sec}$ 를 곱한 것과 같으며, 이것은 단위 시간당 일어날 핵반응의 수에 비례한다.

4) 방사선 입자의 개별 '에너지'

방사선을 계수할 때, 각개 방사선 입자의

‘에너지’를 측정할 필요가 많다. 모든 방사성동위원소가 붕괴하며 방출하는 방사선 입자는 그 핵종에 따라 일정한 ‘에너지’를 가진다. 그리고 이 ‘에너지’는 일반 외계의 영향을 받지 않는다. 따라서 그 ‘에너지’를 식별한다는 것은 그것을 방출한 핵종을 정확하게 식별하는 것이 된다. 예를 들면, 방사화 분석에 있어서 방사선 각 입자들을 ‘에너지’별로 계수 하면, 그 방사성 물질에 포함된 핵종과 구성 비율을 정확하게 분석할 수가 있다. 그리고 인체 내의 특정 방사성 핵종의 분포량을 측정할 때, 그 핵종에 의한 방사선만을 선별하여 계수할 수 있다. 이러한 방사선 입자의 개별적 ‘에너지’는 비례 계수관, 반도체 검출기, 섬광 검출기 등에서 검출되는 전기 ‘펄스’의 크기(높이)는 그 입장의 ‘에너지’에 비례한다는 것에서 검출된다.

그리고 그 ‘에너지’의 기본 계량 단위는 전자 하나가 1 volt 전위에서 가지는 ‘에너지’ 1 eV(electron-volt)이며, 이것의 1000배인 keV와 백만 배인 MeV로 표기한다.

5) 방사선 측정(放射線 測定)

우리들이 방사선을 측정할 때, 무엇보다도 우선 염두에 두어야 할 것은, 방사선의 방출이나 그것을 검출하는데 일어나는 모든 현상은 확률적으로 생긴다는 사실이다. 그리고 또 하나는 우리들이 측정하려는 방사선 이외에도 우리들의 환경 안에는 항상 자연 방사선이 존재한다는 사실이다. 우리들이 측정하려는 방사선의 방사능이나 선량율이 아주 커서, ‘이온’상으로 그의 ‘이온’전류를 측정하거나, 사진판으로 감광된 농도를 측정할 때는 별로 문제가 되지 않으나, 우리들이 일반적으로 계측하는 약한 방사능이나 적은 선량을 계수(計數: Counting)할 때에는 확률적인 방사선을 통계적으로 측정한다는 것과, 환경 방사선에 의한 ‘백그라운드’(Back-ground)에 대한 고려를 잊어서는 안된다.

확률적으로 생기는 자연적인 것을 통계적으로 계량한 것은 일반적으로 정규분포

(Normal-distribution)를 하며, 가장 확률이 높은 값(Most Probable Value)을 중심으로 표준 오차(Standard Deviation: σ) 범위 안의 값만이 약 67%의 확률로 맞는 값으로서 의미가 있다. 그리고 이 표준 오차는 계수된 수의 제곱근에 해당한다. 즉 계수된 수를 N이라 하면,

$$\text{표준 오차} : \sigma = (N)^{1/2}, N \pm \sigma = N \pm (N)^{1/2}$$

예를 들어 환경 방사능을 계수한 결과 10시간에 40000 Count를 얻었다면, 계수 값: $N = [40000 \pm (40000)^{1/2}] = [40000 \pm 200]$ 이다. 따라서 이 수량의 유효한 값은, 표준 오차가 백보다 많음으로 백 자리까지이다. 그리고 이 수량을 기초로 한 모든 값은 백 자리까지의 세 자리만 유효하다. 이 계수가 방사능에 해당한다고 한다면, 그것은 $[66.6 \pm 0.3] / \text{min} = [1.11 \pm 0.005] / \text{sec} = 1.11 \text{ dps} = 1.11 \text{ Bq}$ 이다.

둘째로 어떤 방사성 물질의 방사능을 측정할 때 고려하여야 할 중요한 것은 Back-ground에 대한 교정을 잊어서는 안된다. 다소간에 반드시 Back-ground 방사선이 존재함으로 시료(試料)를 계수 하기 전에 시료를 계수 한 값에서 빼내 주어야 한다.

이런 것 외에도 방사선 원에서 검출기에 대한 입사각 즉 기하학적 인자, 검출기에 도달하기까지의 흡수와 차체 흡수에 대한 요인, 시료 대에 의한 반사와 주위 물체에 의한 산란 효과, 그리고 검출기의 검출 효율 등을 고려하여야 하나 설명을 생략하겠다.

끝 맺 음

이상으로 방사선 계측에 대한 개략적 설명을 했으나, 이것들 이외에도 방사선 계측의 응용 분야와 응용 방법에 대한 것과, 그러한 계측 목적에 따라, 계측 장치를 어떻게 선택하고 구성하여야 하는가 하는 문제가 실제로 방사선을 계측하는데 있어서 매우 중요한 문제로 남아 있다. 이것은 간단히 설명될 수 없는 것이므로, 별도로 공부해 주기

를 바라며 여기서는 논하지 않고 남겨 두었다. 이 글을 끝맺으면서 무엇보다도 강조하고 싶은 것은, 계측은 현대 과학기술의 근간이며, 그 기술 수준은 모든 과학 기술의 수준을 가늠하는 척도가 된다는 것이다. 이것은 강조하는 의미에서 필자가 겪은 부끄러운 경험을 한가지 소개하겠다.

우리나라는 1955년 발표된 미국의 “원자력의 평화적 이용 정책”에 부응하여, 해외에 원자력 연구생을 파견하였고, 이들이 돌아와서 1959년에 탄 부처보다 상위인 감사원과 나란히 원자력원을 설치하고 그 밑에 장관급을 소장으로 하는 원자력 연구소를 창설하였다. 그리고 미국이 기증한 TRIGA(Training Research Isotope production GA) Mark II 원자로와 함께 연구소 건물을 건축하게 되었고, 기증 받은 원자로 대금에 해당하는 약 50만\$ 상당의 연구 기자재를 미국으로 부터 도입하여 연구 설비를 갖추기 시작하였다. 그래서 1961년에는 어느 정도 연구 활동도 할 수 있게 되어, 이것을 기념하기 위하여, ‘노벨’ 물리학상의 수상자이며 당시에 미국 원자력 위원회 위원인 ‘에바솔드’ 박사를 초빙하여 서울 문리대 강당에서 ‘방사선 계측’에 관한 강연을 듣게 되었다. 당시 국내의 조교급 이상의 자연 과학자 100명 이상이, 유명한 물리학자의 강연에 큰 기대를 가지고 모였다. 그런데 뜻밖에도 그의 강연은 ‘빠! 빠!’ 소리를 내는 Pocket Chamber를 작동시켜 보이는 중학생 상대의 강연이었다. 강연을 끝마치고 식사에 초대된 ‘에바솔드’ 박사는 아무도 그의 강연에 대하여 말하지 않자, 옆자리에 앉은 나에게 ‘나

의 강연에 대한 반응이 어땠소?’ 하고 물기에 ‘미리 알려 드린 것과 같이 청중은 대학원생 이상의 자연과학자 이었소! 당신의 강연은 중학생을 상대로 한 것과 같아서 실망이 컸소!’ 하고 솔직히 답했다. 그는 손가방에서 강연 원고와 신문 한쪽을 내보이며 ‘사실은 이것이 내가 준비한 강연 내용이었소. 그런데 비행기 안에서 본 이 신문(미군이 발행한 Star & Strip)에 수일 전의 중공 핵폭탄 실험에 의한 한국 내의 방사성 낙진의 방사능이 1.333 dps 라고 당신들의 원자력 연구소가 발표한 기사를 읽었소. 한국의 최고 수준의 과학자들이 미국의 고등학교에서 가르치는 확률이나 통계를 모르니, 중학생 수준의 강연을 할 수밖에!’ 이라고 말하는 것이다. 후에 조사해 보니 이 기사는 미국에서 파견한 전문가가 발표한 것이 밝혀져서, ‘미국이 파견하는 전문가는 고등학교를 졸업 못한 사람인가요?’ 하는 농담이 오고 간 일이 있었다.

그런데 우리의 실상은 오늘날도 전문 학술지에 발표된 이와 같은 오류를 흔히 찾아볼 수 있으며, 신문지상에는 가장 보편적으로 쓰이는 전기의 계량 단위인 KWH와 KW를 구별못하고 쓰는 것을 볼수가 있다. 우리들은 과학기술의 선진국 대열에 끼기는 커녕 아직도 전기를 써보지 못한 고대의 개념 속에서 살고 있지나 않은지 반성해 볼 문제다.

과학기술의 발전은 요행으로 되는 것이 아니라 우리들의 과학적 정신활동의 결실로 나타난다는 것을 잊지 말자.