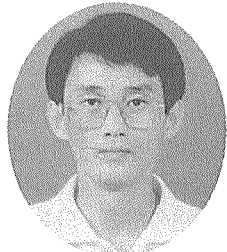


# 회귀공식에 의한 조사선량평가



하 석 호

한국표준과학연구원  
화학방사선부 책임연구원

## I. 서 론

방사선의 양을 측정한다는 것은 모든 방사선이용현장에서의 가장 기본이 되는 개념이며 그 측정량을 근거로 모든이용 행위는 정당성을 평가할 수 있게 되는 것이다.

일반적으로 방사선 측정기는 방사선에 대하여 고유한 반응을 보이는 센서를 특정 매질내에 삽입시켜 그 반응을 측정하는 원리로 작동되며 이와 같은 특징에 의해 방사선의 종류 및 에너지에 따라 반응특성은 달라지게 된다. 그러므로 측정기에 의한 측정값으로부터 참값을 평가하기 위하여는 적절한 반응특성의 고려가 요구되며 단지 측정기를 이용한 측정값 그 자체는 수치의 나열에 불과할 뿐 방사선의 양으로서는 무의미한 것이다.

따라서 각 측정기의 방사선에 대한 반응특성을 보정하는 행위는 중요한 의미를 지니게 되며 이러한 반응특성을 밝혀 내는 작업을 교정이란 행위로 통칭하게 되는 것이다.

한편 이와같은 교정을 수행하기 위하여는 기준이 되는 양을 설정하는 작업이 선행되어야 하며 그 기준은 방사선의 종류 에너지 및 양의 시간변화율 등 다양한 조건을 만족시킬 수 있는 기능을 갖추어야한다. 따라서 이 글에서는 휴대용 방사선 측정기 교정에

주로 이용되는 기준 감마선장의 평가기법으로서 회귀법에 의한 계산식을 제시하고 측정값을 근거로 회귀공식의 정당성을 검증하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 선량률 평가

일반적인 휴대용 방사선 측정기의 교정에는 정해진 선량률을 특정공간내에 형성시켜야 하는 경우가 발생되며 이와같이 지정된 선량률은 여러 측정점에서의 측정결과로부터 물리적 현상을 고려한 계산에 의하여 예측이 가능하여진다. 감마선원을 이용한 방사선조사에 있어 선량률은 선원과의 거리에 따라 변화되며 그 변화는 다음식에 따른다.

$$\dot{X} = \dot{X}_1 \cdot \frac{1}{D^2} \cdot e^{-\mu \cdot r} \cdot S \dots\dots\dots (1)$$

여기에서

- $\dot{X}$  : 관심점에서의 선량률
- $\dot{X}_1$  : 기준점(선원으로 부터 1m 지점)에서의 선량률
- $D$  : 선원과 관심점 간의 거리
- $\mu$  : 공기의 선형에너지 감쇠계수
- $r$  : 기준점과 관심점 간의 거리
- $S$  : 조사시설의 기하학적 구조등에 의한 산란선기여도

식(1)에서 공기에 의한 감쇠 효과는 662 keV인 감마선과 거리 4m인 경우 약 3.7% 정도로서 이는 선량률을 감소 시키는 역할을 하게 되며 또한 방사선장내의 주변물질(구조물, 바닥, 후방벽 등)에 의한 산란선이 측정지점에 도달하는 산란효과는 선량률을 증가시키는 역할을 하게 되는데 교정을 목적으로 하는 조사시설의 경우 산란효과가 최대 5% 이하가 되도록 주변물질을 배치하도록 요구하고 있으므로 이와같은 감쇠효과 및 산란효과가 서로 복합적으로 작용할 때 그 영향은 무시할 수 있게 되므로 실제의 경우 선량률은 거리의 자승에 반비례하는 것으로 평가할 수 있게된다.

$$\dot{X} = \dot{X}_1 \cdot \frac{1}{D^2} \dots\dots\dots (2) \text{의}$$

법칙에 주로 지배되고 있다고 가정하고 식(2)의 양변에 log를 취하면

$$\log \dot{X} = \log \dot{X}_1 - 2 \cdot \log D \dots\dots (3) \text{이 된다.}$$

따라서 거리 별로 측정된 선량률 데이터를 log-log 그래프상에 기록하면 식(3)에 의해 기울기가 -2.0 이며 y 절편이 log  $\dot{X}_1$  인 직선으로 나타나게 된다.

실제 측정 데이터를 사용하여 회귀시키는 경우 직선의 기울기가 -2.0에 가까운 수치를 갖게 되는데 이와같이 -2.0과 정확히 일치하지 않는 원인은 감쇠효과 및 산란효과의 복합적인 영향이 나타난 결과이다.

그러므로 식(3)에서의 기울기를 -b, log  $\dot{X}_1$ 를 상수 a 라 하고 이식의 양변에 지수승을 취하면 다음과 같이 간단히 표현할 수 있게된다.

$$\dot{X} = 10^a \cdot D^{-b} \dots\dots\dots (4)$$

또한 식(4)를 변형시키면

$$D = 10^{\frac{a - \log \dot{X}}{b}} \dots\dots\dots (5) \text{이 된다.}$$

따라서 거리 별로 측정된 데이터를 회귀시켜 상수 a, b 값을 결정하면 조사장치를 이용한 임의 지점에서의 선량률 또는 임의 선량률이 형성되는 지점의 거리를 계산에 의하여 정확히 산출 할 수 있게된다.

2.2 오 차  
2.2.1 측정오차

선량률 측정값이 갖는 오차는 우연 및 계통오차로 분리하여 평가하며 그 상세 내용은 다음과 같다.

첫째, 우연오차

우연오차는 측정회수가 10회 이상이며 95%의 신뢰도를 갖는 조건하에 다음식으로 구한다.

$$\begin{aligned} L(p,n) &= \pm t u \\ &= \pm t \cdot \frac{100 \cdot S(\bar{x})}{\bar{x}} \\ &= \pm t \cdot \frac{100}{\bar{x}} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum (xi - \bar{x})^2} \end{aligned} \dots\dots\dots (6)$$

여기에서

- L(p,n) : 우연오차
- p : 신뢰도(95%)
- n : 측정회수
- u : 평균값의 표준오차(standard error)

이때 측정회수에 따른 t 값의 변화는 <표1>과 같다.

표 1. 측정회수에 따른 t값

측정회수	t 값	
	95% 신뢰도	99% 신뢰도
10	2.3	3.2
20	2.1	2.9
∞	2.0	2.6

둘째, 계통오차

측정에 사용되는 기준기의 교정인자 및 우발적이 아닌 측정장치의 기기오차

그러므로 우연 및 계통오차를 고려한 측정값의 측정오차는 다음과 같다.

$$U = \pm \sqrt{(tu)^2 + 1.13 \sum (xi)^2} \dots\dots\dots (7)$$

여기에서 U : 측정오차  
 tu : 우연오차  
 xi : 계통오차

### 2.2.2 회귀오차

측정된 값을 근거로 선형회귀시켜 수식화 하는 경우 측정지점에서의 측정값과 회귀공식에 의해 동일거리에서 결정된 계산값과는 차이가 발생되는데 이와같은 점은 회귀공식에 의해 전 측정 구간의 측정값을 획일화 시킴에 따라 나타나는 현상으로서 측정값과 계산값의 차이를 계산값에 대한 백분율로 표시하여 이를 회귀오차라 하면 이는 다음과 같이 구할수 있다.

$$R = \sqrt{\frac{\sum (Ri)^2}{n-1}}$$

$$= \sqrt{\frac{\sum [100 \cdot (Mi-Ci)/Ci]^2}{n-1}} \dots\dots\dots (8)$$

여기에서 R : 회귀오차  
 M : 측정값  
 C : 계산값  
 n : 측정값의 수

### 2.2.3 전체오차

이상에서 측정값 자체가 갖는 오차를 우연오차 및 계통오차로 구분하여 평가하였고 회귀공식을 사용하는데 따른 회귀오차를 분석 하였으나 측정점이 아닌 임의의 지점에서의 계산값이 갖는 오차는 측정오차와 회귀오차가 복합적으로 작용될것으로 예견되므로 이와같은 오차를 전체오차라 하고  $U_{total}$  이라 표시하면 이는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$U_{total} = \sqrt{U^2 + R^2} \dots\dots\dots (9)$$

## 3. 측정장치

### 3.1 감마선 조사장치

밀봉선원을 차폐된 용기내에 고정시켜 셔터를 개폐하거나 선원을 조사위치로 이동시킴으로서 특정 공간내에 충분한 재현성을 갖는 감마선장을 형성시킬 수 있는 장치로서 생성된 감마선빔은 조사시설의 천장, 바닥, 측벽 등에 직접 닿지 않도록 적절한 크기로 제한 되어야 하며 적정조사 범위는 선원으로 부터 최소 50cm 이상의 지점으로 부터 후방벽과 최소 1.5m 이상의 공간을 확보한 지점까지로 한다. 감마선 비임의 크기를 조절하기 위하여는 납 또는 열화우란등으로 제작된 콜리메이터를 부착하며 이때 콜리메이터의 두께를 갖어야 한다.

이와같은 감마선 조사장치의 성능은<표2>의 조건을 만족하여야 한다.

표 2. 감마선 조사장치

구 분	허용범위
조사능력	2mR/h - 50R/h 이상
조사장의 균질도	± 2 % 이하
조사시간의 오차	± 0.1초 이하
셔터의 개폐속도 또는 선원 이동속도	총 조사시간의 ± 0.1 % 이하
재현성	10회 반복시 ± 0.5% 이하
산란선 기여도	5% 미만

한편 선량률의 변화를 위한 조사시설의 거리이동 범위는 4m 이상을 확보하며 이때 선원과 측정점 간의 거리는 ±0.1% 오차범위 이내에 측정이 가능하여야 하고 감마선 비임 중심축의 위치 확인을 위하여 후방벽에 레이저를 설치하며 측정점의 위치 재현을 위하여 측벽에 텔레스코프를 설치한다. 또한 다양한 크기를 갖는 여러 종류의 측정기를 교정하기 위하여는 지정된 지점에 측정기의 중심점을 고정시키기 위하여 수직, 수평 및 전후 방향으로 ± 10cm 이동 범위

를 갖는 측정기 이동장치가 필요하며 아날로그식 지시부를 갖는 측정기의 측정값을 읽기 위한 원격 감시 장치로서 폐쇄회로 TV 시스템이 요구 된다.

### 3.2 선량률 측정장치

선량률 측정장치는 주 측정기인 이온 전리함과 전류측정장치 및 환경인자 측정장치로 구성되며 그 성능은 다음 조건을 만족하여야 한다.

첫째, 측정용 기준기의 에너지 의존성 변화는 10 keV-300 keV 범위에서  $\pm 3\%$  이내, 300 keV-3MeV 범위에서  $\pm 2\%$  이하의 성능을 유지하여야 하며 전리함의 두께는 하전입자 평형을 유지 할 수 있는 충분한 크기를 가져야 한다.

둘째, 전류측정장치는 축전기를 이용한 시간에 대한 전압 변동률을 측정하여 다음식에 따라 전류값으로 산출한다.

$$I = \frac{C \cdot \Delta V}{\Delta t} \dots\dots\dots (10)$$

여기에서 I : 이온화 전류  
 C : 축전기의 축전용량  
 V : 축전기 양단의 전압  
 t : 축전시간

따라서 전류계, 전압계 및 타이머가 요구되며 그 성능은 <표3>의 조건을 만족하여야 한다.

표 3. 선량률 측정장치

구 분	측 정 범 위	허용오차
전류계	전류 : $10^{-15} \sim 10^{-9} A$	$\pm 1\%$ 이하
	전하 : $10^{-14} \sim 10^{-9} C$	$\pm 1\%$ 이하
전압계	0~1 V	$\pm 0.1\%$ 이하
타이머	0~10000 초	$\pm 0.1\%$ 이하

셋째, 환경 보정인자인 온도, 기압 및 습도 측정을 위하여 <표4>의 성능을 만족하는

측정기가 요구된다.

표 4. 환경 측정 장비

구 분	측 정 범 위	허용오차
온도계	0°C~50°C	$\pm 0.1^\circ C$ 이하
기압계	900~1100 mbar	$\pm 4$ mbar 이하
습도계	0 ~100% RH	$\pm 5\%$ 이하

한편 기준기 내의 전기장 형성을 위하여  $\pm 1000$  DCV 범위의 조절능력을 갖는 직류 전원 공급장치가 요구되며 직류전압의 허용오차는  $\pm 1\%$  이하이다.

## 4. 측정 및 분석

### 4.1 선량률 측정

감마선원으로 부터 형성되는 방사선장의 조사선량률은 방사선에 의해 기준 측정기 내부에 생성된 이온화 전류를 근거로 다음식에 의해 산출된다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= M \cdot I \cdot K_{tp} \\ &= M \cdot I \cdot \frac{t}{t_0} \cdot \frac{P_0}{P} \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

여기에서  $\dot{X}$  : 조사선량률  
 M : 기준기의 교양인자  
 I : 이온화 전류  
 $t_0, P_0$  : 기준온도 및 기압  
 $t, P$  : 측정온도 및 기압

이와같이 식(11)에 의해  $\dot{C}_s-137$  감마선원을 장진한 조사장치의 선량률 측정 결과는 선원과 측정기와의 거리 별로<표5>와 같이 나타났다.

표 5. 선량률 측정결과

거리(cm)	조사선량률(R/h)
50	274.89
100	63.26

150	27.01
200	14.81
250	9.31
300	6.37

#### 4.2 회귀분석

측정된 거리별 선량률을 식(4)에 따라 수식화 하기 위하여 거리와 선량률에 각각 log를 취하여 선형회귀 시킨 결과 상수항 a, b는 각각 6.0060 및 -2.1010으로 결정되었고 이때의 상관계수는 0.999992 로 나타났다. 따라서 사용된 감마선 조사장치의 거리별 선량률은  $X = 10^{6.0060} \cdot D^{-2.1010}$ 에 의해 변화 됨이 밝혀졌다. 한편 이와같이 결정된 수식에 의해 계산된 값과 실제 측정값의 비교 데이터는 <표6>과 같다.

표 6. 회귀결과 분석

거리(cm)	측정값(R/h)	계산값(R/h)	회귀오차
50	274.89	273.19	+ 0.62%
100	63.26	63.68	- 0.66%
150	27.01	27.17	- 0.59%
200	14.81	14.84	- 0.20%
250	9.31	9.29	+ 0.22%
300	6.37	6.33	- 0.63%
회귀오차(R) = $\sqrt{\frac{\sum (Ri)^2}{n-1}}$			± 0.58%

#### 4.3 오차평가

측정된 결과를 근거로 결정된 회귀공식에 의해 계산되는 선량률값이 갖는 오차는 측정오차와 회귀오차의 조합을 전체오차로 평가하였으며 측정오차 및 회귀오차는 식(7) 및 (8)에 의해 전체오차는 식 (9)에 의해 평가한 결과 <표7>과 같이 ±1.9%임이 밝혀졌다.

<표 7> 전체오차

구분	내용	오차
측정오차	$U = \sqrt{(tv)^2 + 1.13\sum(xi)^2}$	1.76% (0.2%)
	우연오차 (n=10,95% 신뢰도)	
	계통오차	
	교정인자	
	전압	
	축전용량	
	시간	
	온도	
	기압	
	거리	
회귀오차	$\sqrt{\frac{\sum (Ri)^2}{(n-1)}}$	0.58%
전체오차	$\sqrt{U^2 + \frac{\sum (Ri)^2}{(n-1)}}$	1.9%

#### 5. 결과의 응용

실제 회귀공식으로 주어지는 측정결과를 이용하여 임의의 조사선량률이 형성되는 지점의 거리를 계산하는 경우 측정일로부터 계산일 사이의 경과시간에 따른 감마선원의 자연감소율이 선량률에 영향을 미치게 되므로 식(4)에 붕괴율에 대한 보정을 추가로 실시 하여야 한다.

따라서 임의 거리에서의 선량률을 구하기 위하여는 다음식에 의하며

$$X = 10^a \cdot D^{-b} \cdot e^{-\lambda t} \dots\dots\dots (12)$$

여기에서 λ : 붕괴상수  
t : 경과시간

선량률에 따른 거리를 구하기 위하여 식 (12)를 변형시키면  $X \cdot e^{\lambda t} = 10^a \cdot D^{-b}$ 이 되고 양변에 log를 취하면

$\log(\dot{X} \cdot e^{\lambda t}) = a - b \log D$  이 되며

$$\log D = \frac{a - \log(\dot{X} \cdot e^{\lambda t})}{b} \quad \text{이므로}$$

$$D = 10^{\frac{a - \log(\dot{X} \cdot e^{\lambda t})}{b}} \dots\dots (13) \text{이 된다.}$$

그러므로 식(12)와 (13)을 사용하면 거리별 선량률 또는 선량률별 거리를 쉽게 구할 수 있게 된다.

예) Cs-137 감마선 조사장치의 측정결과가 측정일 1993.1.1을 기준일로  $\dot{X} = 10^{6.0060} \cdot D^{-2.1010}$ 으로 주어 졌을때 1993.10.1 현재 일자의 거리 150cm에서의 선량률과 20R/h의 선량률이 형성되는 거리는 각각 아래와 같이 구한다.

해) Cs-137의 붕괴상수는  $6.28926 \times 10^{-5}$ /day 이며 경과시간은 273day이므로 150cm에서의 선량률은 식(12)에 의해

$$\begin{aligned} \dot{X} &= 10^{6.0060} \cdot 150^{-2.1010} \cdot e^{(-6.28936 \times 10^{-5} \cdot 273)} \\ &= 26.70(\text{R/h}) \text{ 이며} \end{aligned}$$

또한 20R/h의 선량률이 형성되는 거리는 식(13)에 의해

$$D = 10^{\left( \frac{6.0060 - \log(20 \cdot e^{6.28936 \times 10^{-5} \cdot 273})}{2.1010} \right)}$$

= 172.13(cm)이다.

## 6. 맺 음 말

감마선 조사장치를 사용하여 특정한 조사 행위 또는 교정을 수행할 때 치환법에 따라 기준기를 사용하여 측정된 지점에서 조사 및 교정이 실시되어야 하나 많은 수량의 작업을 여러 위치에서 반복 수행할 때에는 시간적인 이유로 매번 기준기를 사용한 측정

을 실시하기 어려운것이 현실이다. 이와같은 불편함을 해소하기 위하여 측정 데이터를 semi-log 그래프상에 제시하고 측정값들을 수작업으로 연결한 그래프 결과를 이용하여 왔으나 이 경우 수작업에 의한 그래프화 과정에서 발생하는 오차와 제시된 그래프를 이용하여 역시 수작업으로 찾아내는 임의 선량률 등이 갖는 오차는 개인에 따라 많은 차이를 나타낼 수 있으므로 그 결과에 대한 오차는 일률적으로 평가 하기가 불가능하다.

이 글에서는 이와같은 수작업에 기인된 오차를 배제하기 위하여 회귀공식의 사용을 제안 하였으며 실제 측정값과 계산값의 차이를 오차 요인으로 평가하여 모든 계산값의 오차 선정 근거를 마련하였다. 한편 본 실험에서 수행한 회귀 결과의 기울기가 -2.1010 으로 나타나 이론적인 기울기의 예상치 -2.0과 일치하지 않았던 점은 공기의 감쇠효과와 주변물질의 산란효과가 나타난 것으로 해석되었으며 선원과의 근접 위치인 50cm지점에서는 콜리메이터 및 후방 차폐체인 납에 의한 산란효과가 기여되는 것으로 판단되고 특히 근접거리에서는 감마선의 크기가 점선원으로 가정하기에는 무리가 따르므로  $\frac{1}{r^2}$ 의 법칙이 지배되지 않는 것으로 평가되므로 50cm미만의 거리에서는 회귀공식을 적용하지 않는 것이 타당할 것으로 판단된다.

이와같은 선량평가 기법은 측정된 값을 기준으로 한 회귀공식을 근거로 계산값을 산출하기 때문에 그 적용범위가 측정이 수행된 거리범위를 벗어날 수 없다는 제약조건이 있으나 흡수체를 사용하는 경우 보다 낮은 선량률의 확보가 가능하게 되어 감마선 조사장치의 선량평가에 정확성을 기할 수 있게 되므로 향후 국가표준의 보급업무에 기준으로 활용될 것이다.