

Cs-137 및 Co-60감마선 조사장치 설치 연구

김원식 · 하석호 · 황선태

한국표준연구소 · 방사선연구소

=요 약=

Cs-137 및 Co-60감마선 조사장치를 사용하여 비임의 입체각이 $2.4\pi \times 10^{-3}\text{sr}$ 에서 $17.3\pi \times 10^{-3}\text{sr}$ 로 변함에 따른 공기의 산란인자와 두께 2.9 cm 납 흡수체 사용에 따른 축적인자를 결정하였다. 그 결과 산란인자는 1~1.064, 축적인자는 1.054~1.194범위의 값을 갖는 것으로 각각 나타났다. 결정된 인자들의 검증에 위하여 계산값과 측정값을 비교한 결과 그 차이는 3.3%이하인 것으로 나타났다.

1. 서 론

방사선 표준의 확립, 유지 및 보급을 수행하고 있는 한국표준연구소의 방사선 연구실에서는 1Ci 급 Cs-137 및 Co-60감마선 조사기를 이용하여 4 m track을 갖는 감마선 교정장치를 제작 설치하므로써 0.5~4 m 범위에서 0.662 MeV에 대하여 20~1,000 mR/h 및 1.25 MeV에 대하여 40~2,200 mR/h 범위의 조사능력을 확보하여 휴대용 방사선 측정기기 교정에 활용하고 있으나 더 낮은 선량률 범위의 방어급 측정장비의 교정을 위하여 평판형 납흡수체를 이용한 선량률 감소를 시도하였으며, 흡수체 사용에 따라 예상되는 에너지 스펙트럼변화를 측정하였다.

한편, 측정장치, 실험실 바닥, 후방벽 등으로부터의 산란방사선에 의한 산란인자를 고찰해 보았으며 평판형 납흡수체에 조사되는 비임의 입체각 변화에 따른 축적인자의 변화에 관하여 연구해 보았다.

2. 이 론

감마선 조사장치로부터 선량률 측정시 특히 고려해야 할 점은 측정장치 및 실험실바닥, 후방벽 등으로부터의 산란 방사선에 의한 산란인자의 기여와 선량률 감소를 위해 흡수체를 사용할 때 흡수체로부터의 2차 방사선 및 산란방사선에 의한 축적인자의 기여에 대한 보정이다.

(가) 산란인자(Scattering factor)

좁은 비임 또는 "good geometry"에서 선량률은 선

원으로부터 거리의 역자승에 비례하고, 거리가 멀어짐에 따라 공기에 의해 지수함수적으로 감소한다.

$$\text{즉, } \dot{X} = {}_1\dot{X} \frac{e^{-\mu(r-1) \cdot 100}}{r^2} \quad \dots\dots(1)$$

여기에서 \dot{X} : 선원으로부터 r(m)지점에서의 선량률,
 ${}_1\dot{X}$: 선원으로부터 1 m 지점에서의 선량률,
 μ : 공기의 선형감쇠계수(cm⁻¹).

그러나 좁은 비임의 조건은 이상적이고(설령 좁은 비임일지라도 거리가 멀어지게 되면 공기에 의한 산란에 의해 넓은 비임이 됨)

실제적으로는 넓은 비임 또는 "poor geometry" 조건이므로 이 경우에는 공기 및 주위물체로부터 산란되어 들어온 광자의 기여가 1차 광자의 기여와 합해져서 검출기에 나타난다. 이렇게 더하여진 선량률을 보정해 주기 위해 (1)식은 다음과 같이 수정되어야 한다.

$$\text{즉, } \dot{X}_s = {}_1\dot{X} \cdot S \cdot \frac{e^{-\mu(r-1) \cdot 100}}{r^2} \quad \dots\dots(2)$$

여기에서 산란인자, S는 산란방사선의 기여에 대한 보정인자이다.

공기에 의한 감쇠효과를 무시하고 거리변화에 따른 좁은 비임조건에서의 선량률(\dot{X})변화와 넓은 비임 조건에서의 선량률(\dot{X}_s)변화를 비교하면 Fig. 1과 같은데 이때 공기에 의한 산란인자는 $S = \frac{\dot{X}_s}{\dot{X}}$ 으로 나타나며 \dot{X} (log-log scale에서 직선으로 나타남)과 \dot{X}_s 이 평행상태인 영역(Fig. 1에서 1~3 m 영역)은 공기에 의한 산란효과를 나타내고 평행이 어긋나는 부분은(Fig. 1에서 3~4 m 영역) 측정장치의 기하학적 조건에 따른 주위물체로부터의 산란효과를 나타내는데 특히 Fig. 1에서와 같이 끝부분이 조금씩 올라가는 경우는 후방벽으로부터의 산란효과를 나타낸다[1](Fig. 1에서 A는 1 m

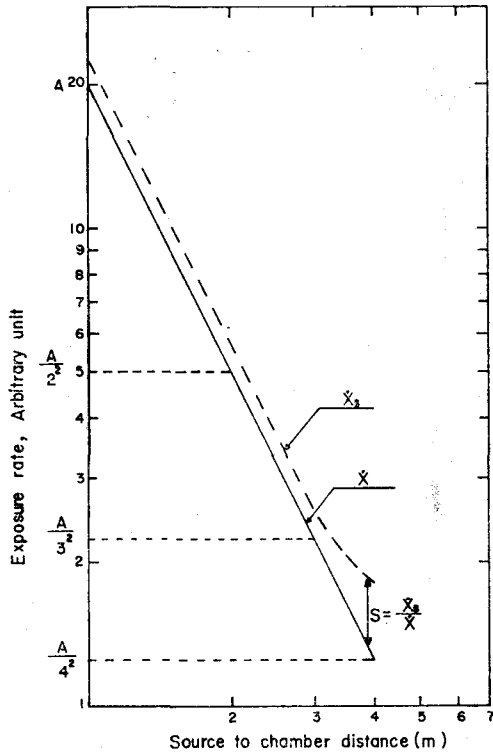


Fig. 1. The physical meaning of scattering factor, S

지점에서의 좁은 비임에 대한 선량률이다.)

(나) 축적 인자(Buildup factor)

좁은 비임 조건하에서 흡수체 사용시 흡수체와 상호 작용한 광자는 비임 밖으로 제거되므로 흡수체의 두께에 따른 선량률은 1차 광자의 기여에만 의존하게 되어 지수함수형으로 감쇠한다. 즉,

$$\dot{X} = \dot{X}_0 e^{-\mu x} \quad \dots\dots(3)$$

- 여기에서 \dot{X} : 흡수체 사용시의 선량률
- \dot{X}_0 : 흡수체가 없을 때의 선량률
- μ : 흡수체의 선형감쇠계수(cm^{-1})
- x : 흡수체의 두께(cm)

그러나 실제적 조건하에서는 넓은 비임이므로 산란되어 검출기 쪽으로 들어오는 광자 및 2차 광자의 기여가 1차광자의 기여에 합해지므로 이렇게 더하여진 선량률을 보상해 주기 위하여 (3)식은 다음과 같이 수정되어야 한다. 즉, 실제 선량률 값 \dot{X}_B 는

$$\dot{X}_B = \dot{X}_0 B e^{-\mu x} \quad \dots\dots(4)$$

여기에서 축적인자 B는 항상 1보다 크며 다음과 같이 정의된다.

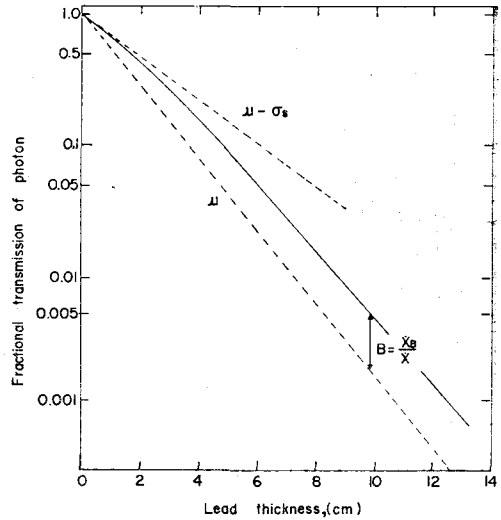


Fig. 2. The physical meaning of buildup factor, B

$$B = \frac{\text{전체 관측된 선량률}}{\text{1차 광자에 의한 선량률}} = 1 + \frac{\text{산란 및 2차 광자에 의한 선량률}}{\text{1차 광자에 의한 선량률}} \quad \dots\dots(5)$$

축적 인자의 개념은 Fig. 2에 나타내었는데 선형 콤프턴 산란계수(linear compton scattering coefficient)를 σ , 선형 흡수계수(linear absorption coefficient)를 μ_a 로 표현하면 선형 감쇠 계수(linear attenuation coefficient)는 $\mu = \mu_a + \sigma$, 가 되고, 차폐체 외부에서 실험적으로 관측된 선량률 \dot{X}_B 와 μ 의 감쇠를 받고 투과하는 1차광자에 의한 이론적 선량률 \dot{X} 의 비가 축적인자 B이다[2].

이와 같은 개념으로 광자의 세기 또는 에너지 선속, 광자수, 공기 공동 내에서의 선량률 및 매질 내에서의 에너지 흡수에 관한 각각의 축적인자가 연구되어 오고 있다(이하축적인자는 선량률 축적인자를 의미한다).

점선원에 관한 축적인자에 대하여 Goldstein과 Wilkins가 무한매질에 대하여 계산한 결과를 Table화[3]하였는데 이것을 공식화하기 위해 여러 사람들이 아래와 같이 시도하였다.

선형공식 :

$$B(\mu x) = 1 + k(\mu x), \quad k = B(1) - 1 \quad \dots\dots(6)$$

Berger의 공식 :

$$B(\mu x) = 1 + a\mu x \exp(b\mu x) \quad \dots\dots(7)$$

Capo의 공식 :

$$B(\mu x) = \sum_{i=0}^3 \beta_i (\mu x)^i \quad \dots\dots(8)$$

$$\beta_i = \sum_{j=0}^4 C_{ij}(1/E)^j$$

Taylor의 공식 :

$$B(\mu x) = A \exp(-\alpha_1) + (1-A) \exp(-\alpha_2) \dots (9)$$

여기에서 B(1)은 Goldstein & Wilkins table로부터, Berger 공식의 매계변수 a, b는 Chilton[4]이 구한 것을, Capo 공식[5]의 C_{ij} 및 Taylor 공식의 A, α₁, α₂는 Capo 및 Taylor가 구한 값을 사용하면 된다.

일반적으로 선형공식(linear formula)은 1 평균자유행로 크기 정도의 거리에서만 유효하고 Berger의 공식은 10 평균자유행로까지 Goldstein & Wilkins table과 오차범위 ±5~10%내에서 일치하며 Capo의 공식은 0.5~10 MeV 범위에서 15 또는 20 평균자유행로까지 잘 일치하고 Taylor의 공식은 널리 알려져 있지만 정확도가 다른 공식들에 비하여 떨어진다.

3. 실험장치 및 측정방법

(가) 감마선 조사장치 제작

방사선 방어급(1~100 mR/h)에 대한 교정능력 확보를 위해 Cs-137 및 Co-60 감마선 교정장치 2 sets를 제작 설치하였으며(Fig. 3 참고) 그 주요 구성장치는 다음과 같다 :

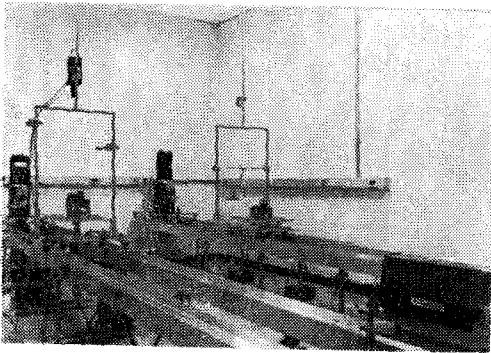


Fig. 3. Cs-137 and Co-60 gamma-ray irradiation systems

- 감마선 비임 방향 조절대
- 2중 레일 스탠드
- 측정기기 받침대
- 레이저 비임 방향 조절대
- 페회로 카메라 및 chamber 지지대
- 거리 이동용 받침대
- 콜리메이터 및 콜리메이터틀

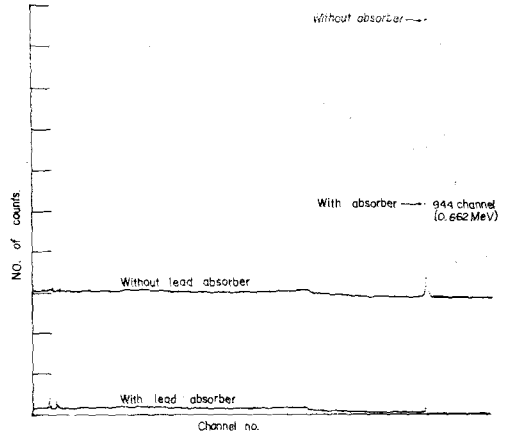


Fig. 4-a. Cs-137 gamma-ray energy spectrum

Fig. 4-a. Cs-137 gamma-ray energy spectrum

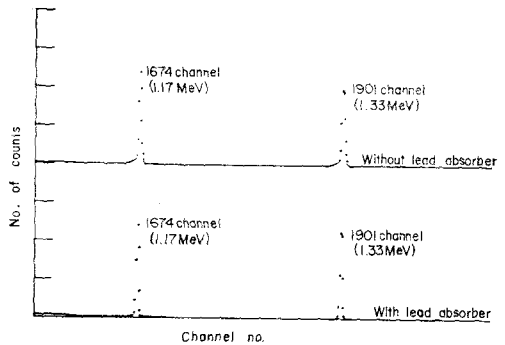


Fig. 4-b. Co-60 gamma-ray energy spectrum

조사대는 감마선 비임이 ±10°까지 수평, 수직회전 할 수 있고 지면으로부터 높이(Cs-137: 93±5 cm, Co-60: 98±5 cm) 조정이 가능하도록 제작하였으며 감마선 비임의 진행경로에 따른 주위물체로부터의 산란효과를 방지하기 위하여 선원으로부터 1 m 되는 지점에서 비임의 직경이 각각 ϕ10 cm, ϕ15 cm, ϕ20 cm, ϕ27.15 cm, 즉 입체각이 각각 2.4π×10⁻³sr, 5.3π×10⁻³sr, 9.4π×10⁻³sr, 17.3π×10⁻³sr(이하 콜리메이터 ϕ10, ϕ15, ϕ20, ϕ27로 표기)로 조절가능하도록 제작하였다.

(나) 선량률 측정 및 에너지 스펙트럼 측정

선량률 감소방법으로는 더 낮은 선원을 사용하던가 선원과 측정점간의 거리를 늘이던가, 선원 앞에 흡수체를 사용하는 방법이 있는데 앞의 두경우는 신규선원 도입 또는 공간상의 문제가 있지만 세번째 경우는 흡수체 사용에 따라 예상되는 에너지 스펙트럼 변화 및 측정인자에 대한 적절한 보정만하면 되므로 본 논문에서는 두께 2.9 cm, 직경 10 cm 밀도 11.34 g/cm³(순

도 : 99%)인 평판형 납흡수체(이하 평판형 납흡수체로 표기)를 Cs-137 및 Co-60 감마선 선원으로부터 조사기 표면까지의 거리, 즉 19.6 cm 및 22.4 cm 위치에 고정시키고 선량을 감소를 시도하였다. 이때 흡수체 사용에 따른 에너지 변화의 측정을 Cs-137 및 Co-60 각 10 μ Ci 급 표준선원에 대해 에너지 분해능이 좋은 Ge(Li)반도체 검출기(FWHM: 2.0keV at 1.33MeV)와 8192채널 다중과교 분석기를 사용하여 측정하였다.

한편 선량을 측정시 비임의 중심축이 검출기의 중심점과 일치하도록 레이저로 정렬하였으며 선량을 측정은 선원으로부터 1, 2, 3, 4 m(후방벽으로부터 각각 4.5, 3.5, 2.5, 1.5 m) 거리에서 콜리메이터 ϕ 의 변화에 따라 평판형 납 흡수체를 사용하는 경우 및 사용하지 않는 경우에 대하여 상호 비교용 기준기(Exradin A-5, 정밀도 : 1.5%)와 전류계(Keithley 642 electrometer, 정밀도 : 0.3%)를 사용하여 측정하였고 이로부터 우리의 감마선 조사장치에 유효한 산란인자와 축적인자를 산출하였다. 검출기에 조사되는 조사야는 $\pi\left(\frac{\phi}{2}\right)^2$ 으로 구해지며, 여기에서 ϕ 는 측정지점에서 비임의 직경이다.

4. 실험결과 및 고찰

(가) 평판형 납흡수체 사용에 따른 감마선 에너지 스펙트럼 변화 고찰

Cs-137 및 Co-60감마선 표준선원에 대하여 평판형 납흡수체(두께 2.9 cm)의 사용에 따른 에너지 스펙트럼 측정결과를 Fig. 4-a, b에 각각 나타내었는데, 이 결과로부터 photo-peak 에너지의 변화가 나타나지 않았으므로 에너지 스펙트럼 변화에 따른 보정은 무시하였다.

(나) 산란인자 및 축적인자 결정

Cs-137 및 Co-60감마선 조사장치로부터 콜리메이터 ϕ 10, ϕ 15, ϕ 20, ϕ 27에 대해 납흡수체를 사용하지 않은 측정결과를 Table 1에, 평판형 납흡수체를 사용하여 측정한 결과를 Table 2에 각각 실었다.

(ㄱ) 산란인자

감마선 조사장치의 산란 방사선에 의한 효과를 고찰하기 위해 Table 1의 결과로부터 공기감쇠효과를 제거하기 위하여 $\dot{X} = \dot{X}_0 e^{-\mu r}$ 와 같이 보정한 후 거리변화에 따른 선량률 변화를 log-log 그래프에 그리면 Fig. 5와 같이 나타나는데 각각의 콜리메이터 ϕ 에 대하여 그래프가 직선으로 나타나므로 4 m 범위에서 기하학적 조건에 따른 주위물체로부터의 산란방사선(후방산란 포함)의 기여는 무시할 수 있음을 알았다.

선원으로부터 거리별, 콜리메이터 ϕ 변화에 따른 산란방사선의 기여를 더 자세히 고찰하기 위해 선원으로부터 1 m 되는 지점에서 좁은 비임일 때의 산란인자를 "1"이라 하면 1, 2, 3, 4 m 각 지점에서 콜리메이터 ϕ 변화에 따른 선량률 값을 1 m 지점에서의 값으로 환산한 뒤 이 값을 1 m의 좁은 비임 선량률, ${}_1\dot{X}_0$,에 대하여 규격화시키면 되겠으나, 실제적으로는 좁은 비임조건을 만족시킬 수 없으므로 좁은 비임에 가장 가까운 콜리메이터 ϕ 10에 대한 선량률, ${}_1\dot{X}_{10}$,에 대하여 규격화시켰다. 따라서 선원으로부터 거리 r(m)되는 지점에서 콜리메이터 ϕ 사용시 산란인자를 $S(r, \phi)$ 라 하면

$$S(r, \phi) = \frac{{}_r\dot{X}_\phi}{{}_1\dot{X}_{10}} \cdot r^2 \cdot e^{-\mu(r-1)100} \dots\dots(10)$$

이다. 여기에서 ${}_r\dot{X}_\phi$ 는 콜리메이터 ϕ 를 사용시 선원으로부터 r(m)지점에서의 선량률이고 공기에 대한 선형감쇠계수 μ 값은 J.H. Hubbell Table(Cs-137, Co-60

Table 1, Exposure rate \dot{X} (mR/h), without absorber

Collimator : ϕ SCD : r(m)	10	15	20	27	Gamma-ray Source
1	240.10	246.77	250.79	252.90	Cs-137(0.6616 MeV)
2	58.62	61.03	61.48	62.19	
3	26.04	27.09	27.45	27.76	
4	14.51	14.93	15.27	15.60	
1	564.01	574.46	579.63	584.81	Co-60(1.2522 MeV)
2	138.11	141.43	142.99	144.39	
3	60.43	62.69	63.34	63.61	
4	33.58	34.80	35.50	35.92	

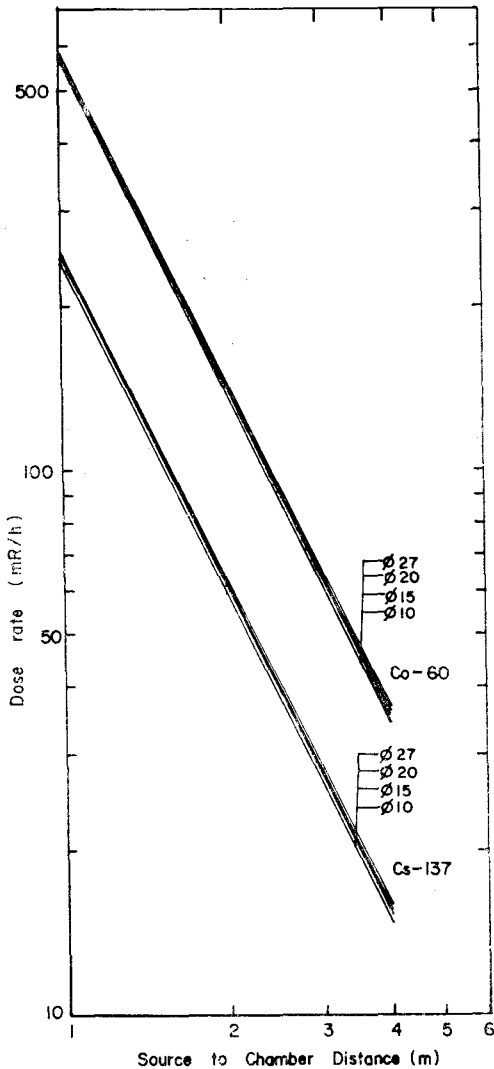


Fig. 5. Exposure rate vs. source to chamber distance for variable collimator ϕ , which represents scattering effect

각각에 대하여 $9.135 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$, $6.727 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$)로부터 구하였다[6]. 식(10)을 사용하여 Table 1으로부터 얻은 산란인자는 콜리메이터 ϕ 의 변화에 따라 4 m 범위에서 최대 6.4%까지 증가하는 것으로 나타났으며 그 결과는 Table 3에 실었다. 한편 이 때의 S는 각 거리에서의 값 (S_r)에 대한 평균 값으로서 편차는 $\pm 1\%$ 로 나타났다.

(L) 축적인자

흡수체를 사용시 고려되는 축적인자는 Goldstein & Wilkins가 무한 매질의 흡수체인 경우에 대하여 계산

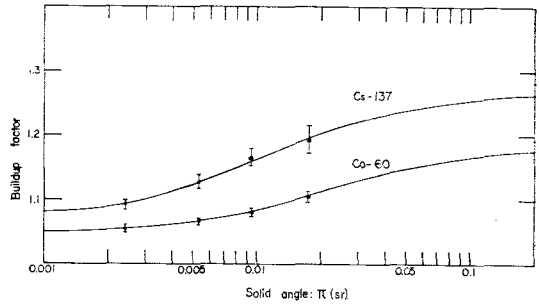


Fig. 6. Buildup factor vs. gamma-ray beam solid angle

한 값을 이용할 수 있지만 우리 실험에서는 유한 두께의 평판형 납흡수체가 콜리메이터 ϕ 변화에 따라 비임에 조사되는 부분의 입체각이 변하므로 축적인자는 $B(\mu x)$ 대신 $B(\mu x, \phi)$ 로 표현되며 다음과 같이 공식화할 수 있다.

$$B(\mu x, \phi) = \frac{(\hat{r} \hat{X}_\phi)_a}{r \hat{X}_\phi} e^{\mu x} \quad \dots (11)$$

여기에서 $(\hat{r} \hat{X}_\phi)_a$ 는 콜리메이터 ϕ 사용시 선원으로 부터 r(m)지점에서 평판형 납흡수체를 사용한 선량률이며, x는 납흡수체의 두께를 나타내고 Cs-137 및 Co-60 감마선에 대한 납흡수체의 선형감쇠계수 μ 는 각각 1.24cm^{-1} 및 0.67cm^{-1} 를 사용하였다[7].

(11)식을 이용하여 Table 1, 2로부터 산출한 축적인자는 각 콜리메이터 ϕ 에 대해 선원과 측정점 사이의 거리가 1~4 m로 변함에 따라 Cs-137 및 Co-60에 대한 값이 $\pm 4\%$ 및 $\pm 1.1\%$ 의 편차 범위 내에 있는데 이 결과는 Table 3 및 Fig. 6에 나타내었다.

본 연구에서 얻은 축적인자와 Goldstein & Wilkins의 data, Pieper & Beach의 data 및 식(6)~(9)로부터 계산한 결과 등을 비교해 보기 위해 Table 4에 실었다. 이 결과로부터 평판형 납흡수체를 사용시 고려되는 축적인자, B는 동일한 감마선 에너지와 μx 에 대하여 흡수체가 무한대 매질일 때보다 평판형일 때가 흡수체와 공기 사이의 경계면에서 공기로부터의 반사 선속이 무시될 수 있으므로 줄어듦을 알 수 있다(Table 4참고). 그리고 흡수체에 조사되는 비임의 입체각이 작을수록 B는 더 작아지고 동일한 두께의 납흡수체에 대해서는 Cs-137보다 Co-60의 값이 더 작아짐을 알 수 있었다(Table 4 및 Fig. 6 참고).

한편 본 실험에서 사용된 감마선원은 직경이 5 mm 인 구슬형이므로 선원으로 부터 0.5 m~4 m 거리 범위

Table 2. Exposure rate \dot{X} (mR/h), with 2.9 cm thick lead absorber

Collimator : ϕ SCD : r(m)	10	15	20	27	Gamma-ray Source
1	7.26	7.67	8.07	8.44	Cs-137(0.6616 MeV)
2	1.73	1.84	1.91	1.96	
3	0.78	0.83	0.87	0.88	
4	0.43	0.47	0.50	0.53	
1	83.96	87.59	90.18	93.41	Co-60(1.2522 MeV)
2	20.98	21.84	22.27	22.77	
3	9.21	9.56	9.84	10.19	
4	5.08	5.32	5.47	5.61	

Table 3. Scattering factor $S(\phi)$ and Buildup factor $B(\mu x, \phi)$

Factor	Collimator : ϕ				
	Gamma-ray source	10	15	20	27
$S(\phi)$	Cs-137	1	1.035	1.050	1.064
	Co-60	1	1.029	1.042	1.051
$B(\mu x, \phi)$	Cs-137($\mu x=3.599$)	1.091	1.128	1.167	1.194
	Co-60($\mu x=1.945$)	1.054	1.067	1.082	1.105

Table 4. Comparison of buildup factors obtained from our experiment with others

Gammaray Source	Data ref. Our Experiment	Goldstein & Wilkins Table	Linear formula (eq. 6)	Berger formula (eq. 7)	Capo formula (eq. 8)	Taylor formula (eq. 9)	Pieper & Beach Figure
Cs-137($\mu x=3.599$)	1.091~1.186	1.779	2.011	1.822	2.324	1.364	-
Co-60($\mu x=1.945$)	1.054~1.107	1.687	1.729	1.909	1.564	1.214	1.63
Remark	Point Source, Slab Shield, Solid angle: $2.4\pi \times 10^{-3}$ sr ~ $17.3\pi \times 10^{-3}$ sr	Point Source, Infinite Medium, Solid angle: 4π sr				Broad Parallel Beam, Slab Shield, Solid angle: 2π sr	

에서 점선원으로 간주할 수 있으며 선량률 측정값이 갖는 오차는 $\pm 2.5\%$ 이고 결정된 산란인자 및 축적인자의 오차는 각각 $\pm 1\%$ 와 $\pm 4\%$ 이다. 그러므로 Table 3과 식(10) 및 (11)을 이용하여 선량률 계산을 수행하는 경우 0.5 mR/h~2,200 mR/h 범위에서 계산값이 갖는 오차는 흡수체 사용 유무에 따라 각각 $\pm 4.9\%$ 및 $\pm 2.7\%$ 로 평가되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 콜리메이트된 비임을 사용하는 경우 비임의 입체각 변화에 따라 첫째, 공기의 산란효과에

의한 선량률 변화에 대한 평가와 둘째, 흡수체 사용시 산란 및 2차 광자의 기여에 의한 축적인자의 변화를 고찰하였다. 그 결과 공기의 산란효과는 비임의 입체각이 $2.4\pi \times 10^{-3}$ sr로부터 $17.3\pi \times 10^{-3}$ sr로 변환에 따라 Cs-137의 경우 6.4%, Co-60의 경우 5.1%증가하는 것으로 나타났으며 본 조사시설의 기하학적 구조로 인한 산란효과는 4m 범위내에서 관측되지 않았다. 또한 두께 2.9cm인 평판형 납흡수체를 사용시 축적인자는 비임의 입체각 변화에 따라 Cs-137의 경우 1.091~1.194의 값을 갖고 Co-60의 경우 1.054~1.105의 값을 갖는다.

본 실험에서 결정된 산란인자와 축적인자의 검증을 위해 식(10), (11) 및 Table 3을 이용하여 계산한 선량률 값을 실제 측정값(Table 1, 2)과 비교한 결과 그 차이가 3.3%이하로 나타났는데 계산값 자체가 갖는 오차 범위 $\pm 4.9\%$ 내에서 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나 사용된 감마선 조사기의 기하학적 제약으로 인하여 비임의 입체각이 $17.3\pi \times 10^{-3}\text{sr}$ 이상인 조건에서는 측정을 수행하지 못하였으므로 입체각 변화에 따른 보다 일반화된 추가연구가 요구된다.

이와 같은 결과는 교정을 목적으로 하는 조사장치의 평가기준으로 활용될 것이며 비임의 크기 조절을 위하여 콜리메이터를 사용하는 경우와 흡수체 사용에 따른 축적인자의 평가에 응용될 것이다.

參 考 文 獻

- 1) IAEA, *Calibration of Dose Meters Used in Radiotherapy*, Technical Report Series No. 185, IAEA, Vienna(1979).
- 2) F.H. Attix and W.C. Roesch, *Radiation Dosimetry*, Vol. 1, pp.149-151, Academic Press, New York(1968).
- 3) H. Goldstein and J. Ernest Wilkins, Jr., *Calculations of the penetration of Gamma Rays*, NYO-3075(1954).
- 4) R.G. Jaeger, E.P. Blizard, A.B. Chilton, M. Grotenhuis, A. Honig, Th. A. Jaeger H.H. Eisenlohr, *Engineering Compendium on Radiation Shielding*, Vol. 1, pp.210-230, Springer-Verlag, New York(1968).
- 5) M.A. Capo, *Polynomial Approximation of Gamma Ray Buildup Factors for a Point Isotropic Source*, APEX-510(1958).
- 6) J.H. Hubbell, "Photon Mass Attenuation and Energy-absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV", *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* 33, 1269-1290, (1982).
- 7) H. Cember, *Introduction to Health Physics*, pp. 280-291, Pergamon Press, New York(1969).

Installation Study of Gamma-ray Irradiation Systems Using Cs-137 and Co-60 Sources

Wuñn-Shik Kim, Suck-Ho Hah, Sun-Tae Hwang

Radiation Laboratory, Korea Standards Research Institute, Daejeon, Korea

= Abstract =

Using Cs-137 and Co-60 gamma-ray irradiation systems, the buildup factors for 2.9 cm thick lead absorber and the air scattering factors are determined for different beam solid angles from $2.4\pi \times 10^{-3}\text{sr}$ to $17.3\pi \times 10^{-3}\text{sr}$. The corresponding buildup factors are turned out to be the values from 1.054 to 1.194 and the scattering factors to be the values from 1 to 1.064, respectively.

To verify our results, calculated values using these factors and experimental values are compared. The differences between them are not more than 3.3%.