

# X-선 발생장치 시설의 방사선 차폐 해석

권석근 · 최호신 · 문석형

한국에너지연구소

육            종            철

한 양 대 학 교

=요            약=

X선 발생장치 시설에 대한 방사선 차폐해석은 두가지 측면에서 고려된다. 먼저 1차 방사선과 누설방사선에 의한 영향을 고려하여야 하며 본 연구에서는 NCRP-49 및 51에 제시된 방법을 사용하였다.

둘째, 시설의 미로 출입구에서는 산란방사선에 의한 영향이 보다 중요하며, 본연구에서는 이 영향을 평가하기 위하여 Albedo 개념을 근거로 한 단순한 방법이 제시되었고, 이를 토대로 계산된 결과를 컴퓨터 코-드(MORSE-CG)의 계산치 및 실측된 결과와 비교하였다.

본 연구에서 제시된 방법에 의한 결과는 미로출입구 안쪽의 경우에 대한 해석에서는 약간의 오차를 보이고 있으나 미로출입구 문바깥에서는 비교적 잘 일치한다.

여기서 출입문바깥의 경우에 대한 해석이 방사선방어 측면에서 보다 중요하다는 관점에서 볼 때 이 방법은 의료용 또는 산업용의 X선 및 감마선시설의 차폐설계 및 해석에 응용될 수 있을 것이라고 판단된다.

## 서            론

방사성 동위원소나 방사선 발생장치를 이용하는 시설은 다른 일반시설과는 달리 방사선을 시설 내 외부로 방출하며 이 방사선으로 인하여 시설 종사자는 물론 인근 주민도 방사선에 어느정도 피폭되게 마련이다. 그러므로 세계각국은 이들 방사선에 대한 허용선량을 법제화하여 허용선량 이상의 방사선에 피폭되지 않도록 규정하고 있으며, 우리나라도 마찬가지로 제한선량(방사선작업종사자 : 50 mSv/y 일반인 5 mSv/y)을 설정하여 관리해 오고 있다.

이와 같이 불필요한 방사선 피폭을 줄이기 위해서는 방사선 이용시설로부터 방사선을 적절히 저감시켜 인체, 시설등 대상물에 방사선이 피폭되는 것을 가능한 적게 하는 것이다.

X선 발생장치에서 방출되는 X선은 그 성질면에서 감마선과 동일하다. 그러나 감마선원에서 방출되는 감마선은 그 에너지 분포를 알 수 있으나 X선 발생장치

에서 발생하는 X선은 그 에너지분포를 정확하게 분석하기가 매우 어려우므로 X선 발생장치 시설의 차폐설계는 감마선 이용시설에서와 같은 이론적인 해석방법 보다는 실험적인 해석방법<sup>1,2)</sup>이 주로 이용된다.

본 연구에서는 1차방사선과 누설방사선에 대해서는 실험적인 해석방법을 간단히 소개하고, 산란방사선에 의한 해석은 Monte-Carlo 방법등을 이용한 컴퓨터코-드를 사용하면 비교적 좋은 결과를 얻을 수 있으나 본 연구에서는 계산을 보다 간소화 할 수 있도록 Albeds 개념에 근거를 두어 모델화 시켰고 이 방법에 의한 결과를 Monte-Carlo 방법을 이용한 컴퓨터코-드인 MORSE-CG<sup>3)</sup>에 의한 결과치 및 실측치와 비교 검증하였다.

## 1차방사선 및 누설방사선(2차방사선)에 의한 차폐계산

### 가. 1차방사선에 의한 차폐계산

1차방사선이란 X선 발생장치에서 발생하는 X선이

어떤 대상물에 직접 조사되는 것으로서 이의 해석방법은 NCRP Report<sup>1)</sup>에 상세히 소개되어 있고 다음 식과 같이 표시된다.

$$K = \frac{Pd^2}{WUT} \quad (1)$$

(1) 식에서

$P$ =일반인 및 방사선 작업종사자에 대한 제한선량 (일반인 : 10 mrem/W, 방사선 작업종사자:100 mrem/W)

$d$ =조사장치와 피폭대상물과의 거리(m)

$W$ =가동하중(Workload, mA-min/w 혹은 1 m 거리에서의 주당선량)

$U$ =이용율(Use factor)

$T$ =접유인자(Occupancy factor)

(1) 식에서 얻은  $K$ 값을 참고문헌 [1]에 있는 X선 발생장치와 차폐체와의 감쇠대비표에서 찾아보면 필요한 차폐체의 두께를 얻을 수 있을 것이다.

#### 나. 누설 방사선에 의한 차폐계산

일반적으로 X선 발생장치에서 누설방사선은 장치의 설계요건에서 X선 발생장치로부터 1m 거리에서의 누설방사선량이 가용의 빔에 의한 선량의 0.1% 이하가 되도록 규정<sup>2)</sup>하고 있으므로 이의 차폐는 1차림에 비해 별 문제가 되지 않는다.

누설방사선에 의한 투과율(Transmission factor)를 계산하는 식은 X선 발생장치의 출력에 따라 차이가 있으나 다음 식<sup>1)</sup>과 같이 나타 낼 수 있다.

$$\text{투과율}(B) = \frac{1000 Pd^2}{WT} \quad (2)$$

(2) 식에서 얻은  $B$ 값을 일차 방사선에 대한 식인

(1)식과 같은 대비표에서 찾아보면 누 차폐체의 두께를 구할 수 있다.

일차 및 누설방사선에 대한 차폐해석과 위에 설명한 바와 같이 큰 문제가 되지 않으며 연구에서는 생략하였다.

#### 산란방사선(2차방사선)에 의한 선량평:

고 에너지 X선 발생장치 시설에서 방출되는 X선 산란문제는 시설의 복잡한 기하학적 구조와 여러대역에 의한 산란효과 때문에 간이계산방법은 그 계산과정이 번거롭고 복잡하므로 일반적으로 이용되지 않고, 이와같은 목적으로 개발된 전산기 코드들에 의해 비교적 정확한 해석결과를 얻고 있다. 그러나 전산코드의 이용에도 상당한 어려움이 존재한다. 즉, 전산기 사용에 따른 비용과 좋은 결과를 얻을때까지의 많은 노력이 필요한 점이다.

시설 내부에서의 산란방사선에 의한 1차 및 2차 차폐벽에서의 투과효과는 수차 산란된 방사선의 에너지는 1차림의 에너지 보다 현저히 적을 수 밖에 없으므로 별 문제가 되지 않고 단지 굴곡형 시설 출입구에서의 산란효과가 문제가 된다.

본 연구에서는 이와같은 미로 출입구에서의 산란방사선에 의한 선량평가에 알파도개념을 도입하여 개략적인 간이계산방법을 강구하였고 이 결과를 MORSE-CG 코드의 결과치 및 실측치와 비교검토하였다.

#### 가. 광자(Photon)에 대한 알베도(Albedos)

일반적으로 알베도는 어떤 표면에서의 입사 커런트

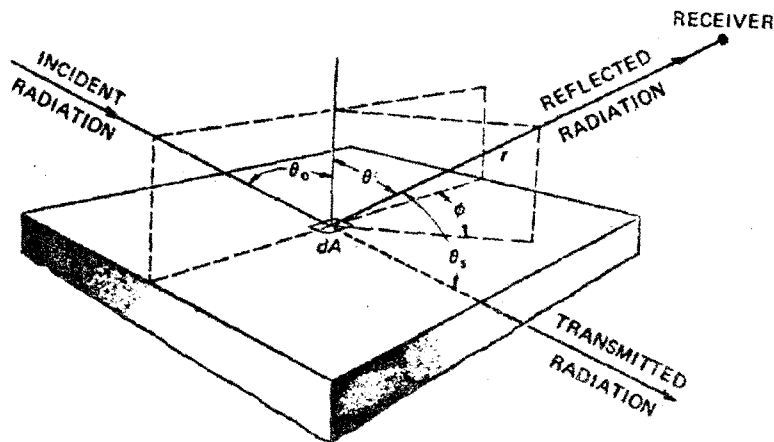


Fig. 1. Geometry for photon reflection from a surface.

(Current)와 반사 커런트와의 비율 말하며 다음과 같은 식으로 표현된다(그림 1참조).

$$J(E, \theta, \phi) = J(E_0, \theta_0) \cdot \alpha_0(E_0, \theta_0, E, \theta, \phi) \quad (3)$$

여기서,

$J(E, \theta, \phi)$  = 반사커런트

$J(E_0, \theta_0)$  = 입사커런트

$\alpha_0(E_0, \theta_0, E, \theta, \phi)$  = 미분선량알베도

$E_0$  = 입사방사선의 에너지

$\theta_0$  = 입사방사선의 극각

$E$  = 반사된 방사선의 에너지

$\theta$  = 반사방사선의 극각

$\phi$  = 반사방사선의 방위각

그리고 Fig. 1에서 미소면적  $dA$ 에서 반사된 방사선에 의한 피폭대상에서의 선량율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$dD = \frac{D_0 \cos \theta_0 \cdot dA \cdot \alpha_0}{r^2} \quad (4)$$

여기서,

$D_0 = dA$  면적에서의 입사방사선에 의한 선량

어떤 표면에서의 반사에너지에 기여하는 다른 반응은 광자의 에너지가 1.02 MeV보다 클때에 일어나는 쌍생성효과에 기인된다. 이때는 0.511 MeV의 광자가 2개 발생하게 되고 입사방사선의 에너지가 5 MeV보다 클때 현저하게 이 효과가 발생된다. 그리고 쌍생성에 의하여 발생되는 광자의 에너지는 콤프톤(Compton) 산란에서 산란각이 90°보다 크게 될때의 산란에너지(식 5참조)보다 크게 될 것이다. 그러므로 입사광자의 에너지가 5 MeV보다 크고 산란각이 90°보다 큰 경우에는 쌍생성에 의한 영향이 알베도값에 큰 비중을 차지하게 된다.

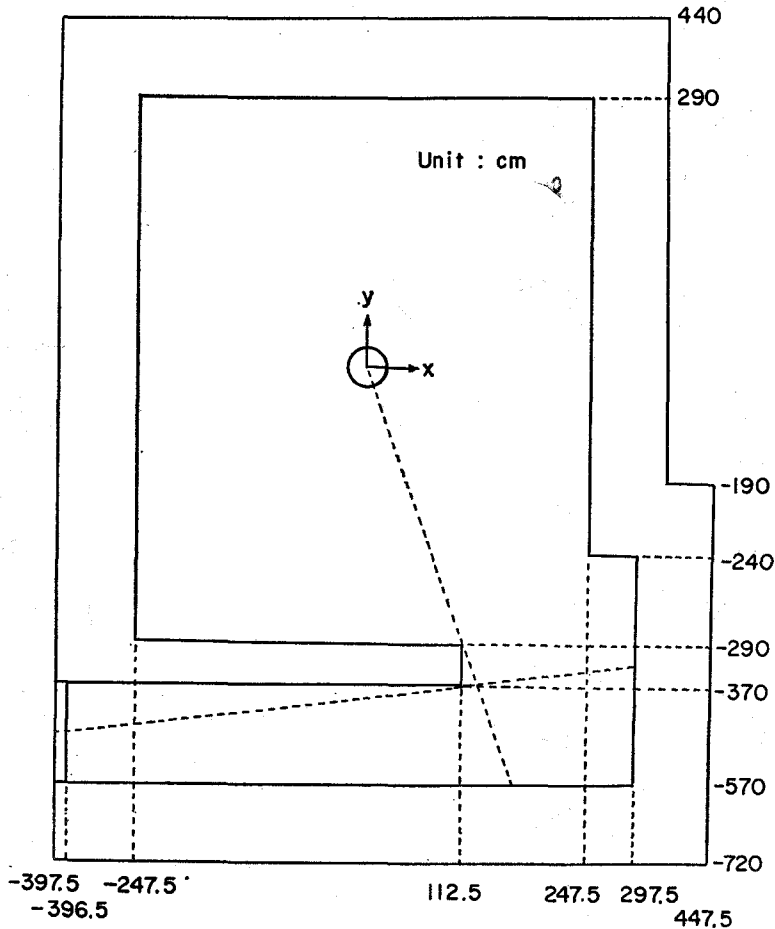


Fig. 2. Plane geometry of a 6 MeV X-ray facility.

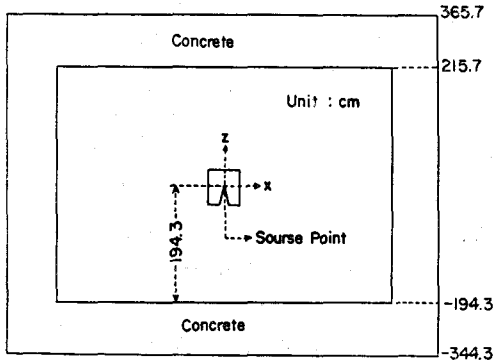


Fig. 3. Vertical geometry of a 6 MeV X-ray facility.

$$E = \frac{E_0}{1 + \left(\frac{E_0}{0.511}\right)(1 - \cos\theta_s)} \quad (5)$$

여기서,  $E_0$  = 입사방사선의 에너지 (MeV)  
 $E$  = 반사방사선의 에너지 (MeV)  
 $\theta_s$  = 산란각

나. 시설출입구에서의 방사선량계산

본 연구에서는 국내에 많이 설치되어 있는 6 MeV X선 발생장치 시설을 대상으로 하였고 시설의 구조는 Fig. 2와 3에 나타나 있다.

간이계산으로 출입구에 대한 모든 산란방사선에 의한 영향을 평가하는 것은 거의 불가능하므로 다음과 같은 가정하에서 계산을 수행하였다.

- 1) 선량을 평가위치는 바닥에서 1m 되는 출입구의 중앙위치
- 2) 산란위치는 평가위치에서 1차트 보이는 곳만을 선택
- 3) 시설의 천정과 바닥, 출입구의 틈을 통한 방사선 흐름현상은 무시
- 4) 출입구에 도달하는 X선의 에너지는 0.511 MeV로 가정
- 5) 선량강도는 1m 거리에서 100 cm<sup>2</sup>의 면적에 대하여 300 Rad/min으로 함
- 6) X선 발생장치에서 방출되는 X선의 에너지는 6 MeV로 함
- 7) 시설내의 콘크리트 구조물 이외의 장치들에 대한 산란효과는 무시
- 8) X선 발생장치의 누설선량은 설계요건인 가용의 빔에 의한 선량의 0.1%로 함

Table 1. Values of parameters for chilton-huddleston gamma-ray differential dose albedo formula.

Materia	$E_0$ (MeV)	C
Concrete	0.2	0.0023
	0.662	0.0347
	1.00	0.0503
	2.50	0.0999
	6.13	0.1717

간이 계산에 사용된 알베도는 Chilton-Huddleston<sup>3, 4, 6)</sup>이 개발한 콘크리트에서의 미분선량 알베도인

$$\alpha_D(E_0, \theta_0, \theta, \phi) = \frac{C \cdot K(\theta_s) \times 10^{26} + C'}{1 + (\cos\theta_0 / \cos\theta)} \quad (6)$$

여기서, C, C' = Chilton-Huddleston 상수로 Table 1에 나타나 있고

$$K(\theta_s) = \frac{R_s^2}{2} (P^2 + P^3 \sin^2\theta_s + P^4)$$

$$R_s = 2,818 \times 10^{-13} \text{ cm}$$

$$P = \frac{1}{1 + \frac{E_0}{0.511} (1 - \cos\theta_s)}$$

$\cos\theta_s = \sin\theta_0 \sin\theta \cos\phi - \cos\theta_0$ ,  $\cos\theta$  (Fig. 1참조)를 적용하였고, 출입문과 안에서의 선량을(D)은

$$D_{out} = \sum_{ijk} \frac{D_0 \times \alpha_{Di} \times S_{Ai} \times \cos\theta_k \times e^{-\mu t}}{r_i^2 \times r_j^2} \quad (7)$$

$$D_{in} = \sum_{ijk} \frac{D_0 \times \alpha_{Di} \times S_{Ai} \times \cos\theta_k}{r_i^2 \times r_j^2} \quad (8)$$

여기서,  $D_0$  = 반사면에서의 입사선량

$\alpha_{Di}$  = 반사면에서의 알베도값

$S_{Ai}$  = 반사면적

$\cos\theta_k$  = 반사면의 여현

$e^{-\mu t}$  = 출입문의 감쇠효과

$r_i$  = 선원에서 반사면까지의 거리

$r_j$  = 반사면에서 평가위치까지의 거리

와 같은 식에서 구할 수 있다. Fig. 4에 본 문제에서의 산란모형이 나타나 있다.

본 연구에서 사용한 컴퓨터코드는 현재 개발된 코드 중 이와 같은 산란모형에서 광자거동현상을 가장 적절히 해석할 수 있는 코드인 MORSE-CG였고, 본 문제에서는 20,000과 50,000히스토리(histories)가 적용되었다. 발생장치시설의 차폐재질은 차폐벽이 콘크리트, 발생장치 및 출입문은 납으로 하였으며, 기하학적 구조는 Fig. 2와 3과 같다.

Table 2. Results of calculation and measurement in a 6 MeV X-Ray facility

Unit:mR/h

	MORSE Calculation		Present Method		Measurement
	23 cm Head (50,000 Histories)	19cm Head (20,000 Histories)	6 Scattering Surface	10 Scattering Surface	
Outside Door	0.04±0.03	0.52±0.18	0.103	0.101	0.1~0.3
Inside Door	0.52±0.18	4.3±2	0.61	0.6	2~3

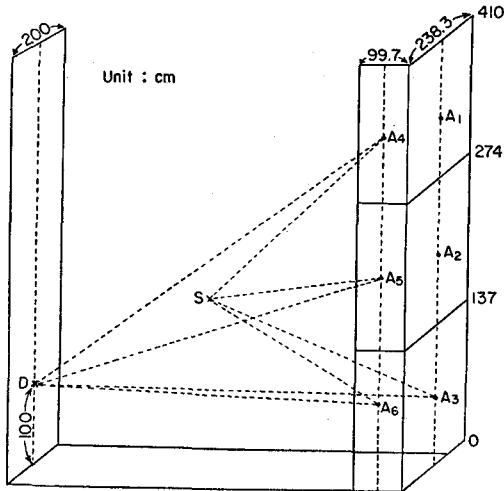


Fig. 4. Scattering model in a 6 MeV X-ray facility.

결과 및 검토

본 연구에서는 출입구에서의 선량평가를 간이계산, 컴퓨터코드에 의한 계산, 방사선측정기에 의한 측정 등 3가지 방법으로 수행하였다.

컴퓨터 계산에서는 출입구에 있어서의 주된 선량기여분을 알아보기 위하여 원통형 발생장치 자체의 납두께를 지경 및 축길이가 38 cm와 46 cm의 두가지로 분류하여 계산을 수행하였다. 여기서 38cm의 경우와 발생장치 자체의 설계요건인 누설선량이 가용의 빔에 의한 선량의 0.1%가 되는 크기이다. 그리고 컴퓨터계산에서는 간이계산에서 고려되지 않은 직접투과 방사선과 모든 산란방사선에 의한 기여분이 고려되었다.

간이계산에서는 미소 산란면의 증감에 대한 평가치의 변화를 알아보기 위하여 미소 산란면의 개수를 Fig. 4그림에서와 같이 6개 및 10개의 두가지 경우로 구분하여 계산하였다.

방사선측정기에 의한 직접측정에 있어서는 Thyac III survey meter(Model 490, Victoreen)를 이용하여

출입문 밖에서와 안에서의 선량율을 측정하였다.

이들 계산결과 및 측정결과는 Table 2에 나타나 있다. Table 2에서 알 수 있는바와 같이 컴퓨터계산에서 상대표준편차가 상당히 큰 값을 나타낸 것은 다중산란으로 인하여 아주 적은 에너지의 광자가 점출점에 기여한 영향이라고 판단된다.

출입문 밖에서의 측정치 및 간이계산값은 큰 차이를 나타내지 않으나 이들 값과 컴퓨터계산값과는 상당히 큰 차이를 나타내고 있다. 이와 같은 원인은 컴퓨터계산에 있어서는 발생장치 자체의 정확한 사양을 알 수 없어 납두께를 19 cm로 하였기 때문이라고 판단된다.

그리고 출입문 안에서의 선량율은 간이계산치와 측정치 및 컴퓨터계산치가 상당한 차이를 나타내고 있는데, 이는 간이계산에서는 누설선량에 의한 1차산란효과만 고려하였고 컴퓨터계산과 측정치에는 투과방사선 및 다중산란에 의한 기여분 등 모든 기여가능한 방사선에 의한 영향이 고려되었기 때문이라고 생각된다.

특기할만한 사항은 컴퓨터계산결과에서 알 수 있듯이 출입문에서의 선량율이 가용의 빔에 의한 산란방사선에 의한 영향(2차산란이상)보다 누설방사선에 의한 영향이 주가 됨을 알 수 있고, 간이계산에서는 일반적으로 미소 산란면적을 증가 시키면 더 좋은 결과를 얻을 수 있지만 본 연구에서와 비슷한 시설에서는 미소 산란면적의 증가에 따라 그 결과치가 크게 변동하지 않음을 알 수 있었다.

주 관심위치인 출입문 밖에서의 선량율은 서로 크게 차이가 나지 않으나 출입문 안에서의 값은 상당한 차이가 나고 있다. 이는 출입문 안에서는 다중산란에 의한 극 저준위의 방사선이 많이 존재하여 측정치 및 컴퓨터계산결과에 큰 영향을 미치지만 출입문 밖에서는 이들 극저준위의 방사선은 출입문에 의하여 거의 감쇠되어 큰 영향을 미치지 않기 때문이다.

결 론

본 연구에서는 X-선 발생장치시설에 대한 방사선차

폐해석 특히 시설 출입구에서의 산란방사선에 의한 영향을 두가지 계산방법과 측정방법에 의하여 평가하였다. 일반적으로 복잡한 기하학적 구조에서의 산란방사선에 의한 영향평가는 컴퓨터 계산에 의존하는 것이 원칙이나 컴퓨터 계산시의 과다한 계산비용과 노력등 문제가 없는 것은 아니므로 본 연구에서는 컴퓨터코드에 의한 계산이 아닌 간이계산방법을 개발하여 컴퓨터 계산시에 소요되는 많은 비용을 들이지 않고 비교적 좋은 결과를 얻을 수 있는 방안을 마련하였다. 그리고 간이계산 결과에 대한 신빙성을 확인하기 위하여 컴퓨터코드에 의한 계산과 실측제정을 하여 이들 결과를 서로 비교하여 본 결과 본 연구에서 개발한 간이계산방법을 이와 비슷한 시설에서는 적용할 수 있음을 입증하였다.

본 연구에서 얻은 결과는 앞으로 이와 비슷한 시설의 방사선 차폐설치에는 물론 이들 시설에 대한 안전성 평가에도 응용될 것으로 생각된다.

### 참 고 문 헌

- 1) *Structural Shielding Design and Evaluation for Medical Use of X Rays and Gamma Rays of Energies up to 10 MeV*, NCRP Report No. 49 (1976).
  - 2) *Radiation Protection Design Guidelines for 0.1~100 MeV Particle Accelerator Facilities*, NCRP Report No.51 (1977).
  - 3) N.M. Schaeffer, *Reactor Shielding for Nuclear Engineers*, TID-25951 (1973).
  - 4) A.B. Chilton, *Principles of Radiation Shielding*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ 07632 (1984).
  - 5) L.S. Abbott et al., *Neutron and Gamma Ray Albedos*, ORNL-RSIC-21 (1968).
  - 6) M.B. Emmett, *MORSE-CG, General Purpose Monte Carlo Multigroup Neutron and Gamma Ray Transport Code with Combinatorial Geometry*, ORNL/RSIC CCC-203 (1975).
- 1) *Structural Shielding Design and Evaluation*

## Radiation Shielding Analysis for the X-ray Facility

Seog-Guen Kwon, Ho-Sin Choi, and Philip S. Moon

*Korea Advanced Energy Research Institute*

Jong-Chul Yook

*Hanyang University*

### = Abstract =

Radiation shielding analysis for a 6MeV X-ray facility was carried out. The primary and leakage radiation for the facility can be evaluated based on the methodology in NCRP No. 49 and 51. The present study deals with radiation [scattering analysis for the outside and inside door of the facility based on the albedo concept. The calculated dose rates were compared with the results of MORSE-CG code calculation and the measured data, resulting in a good agreement, even though there existed some deviation for the inside door. These results can be utilized to the radiation shielding design of the medical and industrial X and gamma ray facilities, and to the safety evaluation of these facilities.