

진단영역 넓은 선속 X선 에너지에 대한 차폐물질의 투과 특성

— Broad Beam Transmission Properties of some Shielding Materials for Use in Diagnostic Radiology —

인제대학교 서울백병원 · 고려대학교 보건대학* · 中台醫護技術學院**

정희원 · 김정민* · 林松水**

— 국문요약 —

진단영역에서 사용하는 넓은 선속 X선 에너지에 대한 차폐물질의 투과 특성을 Archer의 수학적 모델을 적용하여 나타내었다. 인버터 방식의 고전압발생장치를 사용하는 X선 발생장치를 사용하여 관전압 60 kVp부터 140 kVp까지의 범위에서 납, 철, 콘크리트, 유리등의 차폐체의 투과 특성을 나타내었다.

이러한 인버터 방식의 고전압발생장치를 사용하는 진단영역방사선발생장치의 관전압별 투과도는 진단방사선발생장치를 사용하는 작업공간에서의 차폐 설계 시 차폐물질의 종류와 두께의 설정에 도움이 될 것이다.

I. 서 론

진단용 방사선발생장치의 방사선 방어시설은 보건복지부령에 의한 '진단용방사선발생장치의 안전관리에 관한 규칙'에 명시되어 있으며 이는 ICRP^{1,2)}(International Commission on Radiological Protection) 또는 NCRP³⁾(National Council on Radiation Protection and Measurements)을 근거로 실제 필요한 방사선 차폐물의 두께를 계산한다.

현재 사용되고 있는 ICRP 및 NCRP의 기준은 삼상X선 발생장치 이전의 장비를 기준으로 만들어진 자료들이다. 이러한 자료가 대부분의 장비에서 사용되고 있는 인버터 X선 발생장치에도 그대로 적용이 가능한지에 대한 자료는 아직 보고되어 있지 않다. 이에 진단용 인버터X선 발생장치의 차폐물질에 대한 투과특성을 알아보고자 한다.

진단영역 X선의 투과력에 대한 그래프는 비선형적인 값들로 나타난다. 이러한 그래프는 진단영역 X선이 단파장이 아니라 연속적인 파장이기에 물질투과에 따라 에너지별로 감약이 다르기에 나타나는 현상이다. 진단영역 X선의 투과력 그래프를 선흡수계수나 질량흡수계수 하나

만을 가지고 표현 하려하면 연속선의 특성을 나타낼 수 없기 때문에 정확한 그래프를 나타낼 수가 없었다. 이러한 진단영역 X선의 차폐체 투과 후 선량에 대한 기술방법은 Archer⁴⁾에 의해 성공적으로 표현되었다.

진단 영역 X선에서 넓은 선속의 투과력 B는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B = \frac{X_{sh}}{X_{un}} \dots\dots\dots (1)$$

X_{sh} : 차폐체가 있을 경우의 투과선량
X_{un} : 차폐체가 없는 조사선량
(단, 선원으로부터 측정기까지의 거리는 동일하다)

이러한 투과력 B에 대한 식은 투과력의 세 가지 요소인 α, β, γ로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B = \left[\left(1 + \frac{\beta}{\alpha} \right) e^{\alpha x} - \frac{\beta}{\alpha} \right]^{\frac{1}{\gamma}} \dots\dots\dots (2)$$

x : 차폐체의 두께

이 식을 투과력에 의한 x 로 나타내면 다음과 같다.

$$x = \frac{1}{\alpha\gamma} \ln \left[\frac{B^{-\gamma} + \frac{\beta}{\alpha}}{1 + \frac{\beta}{\alpha}} \right] \dots\dots\dots (3)$$

(2)에서 x 의 값이 무한히 큰 값에 대하여 log를 취하면 상수항인 $\frac{\beta}{\alpha}$ 는 그 값이 작아져서 마침내 사라지게 된다. 이것을 다시 쓰면

$$\ln B = -\alpha x - \left[\frac{1}{\gamma} \ln \left(1 + \frac{\beta}{\alpha} \right) \right] \dots\dots\dots (4)$$

이 된다. 이것은 높은 감약(즉, 아주 큰 x)에 대해서 투과력은 지수적으로 $-\alpha$ 에 근접하게 된다는 것을 나타낸다. 그러므로 높은 감약에서의 HVL은 $\frac{\ln 2}{\alpha}$ 가 된다. x 의 값이 작을 경우에는 (2)를 적용하여 Maclaurin 전개에 의해 식을 전개하면 다음과 같다.

$$\ln B = -\left(\frac{1}{\gamma}\right) \ln [1 + (\alpha + \beta) \gamma x] \dots\dots\dots (5)$$

이러한 식을 다시 로그함수를 소거하여 표현 하면

$$\ln B = -(\alpha + \beta)x \dots\dots\dots (6)$$

이 된다.

α , β 의 근삿값은 x 의 값이 무한히 클 경우에 대하여 (4)를 적용하고 x 의 값이 0에 근접함에 (6)을 적용함으로 구할 수 있다. 이렇게 구한 α , β 에 대한 근삿값들로 x 의 값이 클 때 (4)를 적용 유도하여 γ 의 근삿값을 구할 수 있다.

$$\gamma = \frac{-\ln \left(1 + \frac{\beta}{\alpha} \right)}{\ln B + \alpha x} \dots\dots\dots (7)$$

이렇게 구한 α , β , γ 의 값은 관전압별, 물질의 종류별로 그 값을 달라하기에 각 관전압 및 물질의 종류별로 그 값을 구하여야 한다. 또한 이렇게 구한 α , β , γ 의 값은 (1)과 (2)를 응용하여 각 관전압별 차폐체의 두께별 투과도를 구할 수 있다.

II. 실험 도구 및 재료

1. 실험기자재

- 1) X-ray equipment : Stingray DR(Listem co.)
: Inverter 방식의 High Frequency Generator System
- 2) X-ray tube : LTN-50(Toshiba co.)
: 회전양극식 텅스텐 타깃
: 양극 열축적용량 300KHU

표 1에 X선 발생장치의 출력 성능을 나타내었다.

2. 측정 장비

- 1) Muti-fuction meter - : Model 240A(RMI co.)
- 2) Ionization Chamber - PM-30
- 3) Reader - CN-175(Capintec co.)

3. 차폐체

표 2에 실험재료의 수량 및 물리적 특성에 대해서 나타내었다.

표 1. X선 발생장치의 출력 성능(고유 및 부가 필터는 2.5 mmAl eq.이다)

KVp	조사선량 (R · mA ⁻¹ min ⁻¹ at 1m)	First HVL (mm Al)	Second HVL (mm Al)	균일도 (Homogeneity coefficient)
60	0.230	1.9	2.6	0.73
80	0.364	2.4	3.4	0.71
100	0.517	3.0	4.4	0.68
120	0.681	3.7	5.5	0.67
140	0.833	4.2	6.5	0.65

표 2. 실험에 사용된 차폐체의 자원

	크기(mm)	밀도(gcm ³)	두께(mm)	수량
1) 납 ^{a)} (Pb)	500 X 500	11.35	0.1	6
2) 철 ^{b)} (Fe)	500 X 500	7.83	1	8
3) 콘크리트 ^{c)} (concrete)	500 X 500	2.39	20	6
4) 유리 ^{d)} (glass)	400 X 400	2.50	4	8

(^{a)}납과 철^{b)}은 고유 물질로써 다른 연구(Archer^{4,7)}, Rossi⁸⁾, Simpkin^{9,12)}, Trout¹³⁻¹⁶⁾, NCRP report 49³⁾등)자들에 의한 실험에서와 그 규격을 동일시하였다)

III. 실험방법

1. 실험에서 사용되는 조건에서의 장비의 관전압, 관전류, 타임의 정확성 및 재현성을 각각 Multi function meter로 측정하였다.
(실험사용조건 kVp 60, 80, 100, 120, 140, mA-100, 200, 400, sec-0.05, 0.1, 0.2, 0.4)
2. 각 실험조건에 대한 정확성 및 재현성을 5% 이내의 오차로 장비의 출력을 조절하였다.
3. 각 실험조건별로 조사선량과 알루미늄을 이용한 선질을 측정하였다.
4. 실험배치도는 그림 1과 같다.
5. X-ray Tube에서 거리가 100 cm인 곳에 측정기를 설치하였다.
6. X-ray Tube와 투과물질과의 거리는 투과물질 후면이 측정기와 10 cm의 거리를 유지하게끔 놓아두고 실험하였다.
(측정기와 투과물질과의 거리를 이격시키는 이유는 산란선의 영향을 배제하기 위해서이다)
7. 각 실험조건별 차폐체의 종류와 두께를 달리하여 투과선량을 측정하였다.

IV. 결 과

1. 투과도

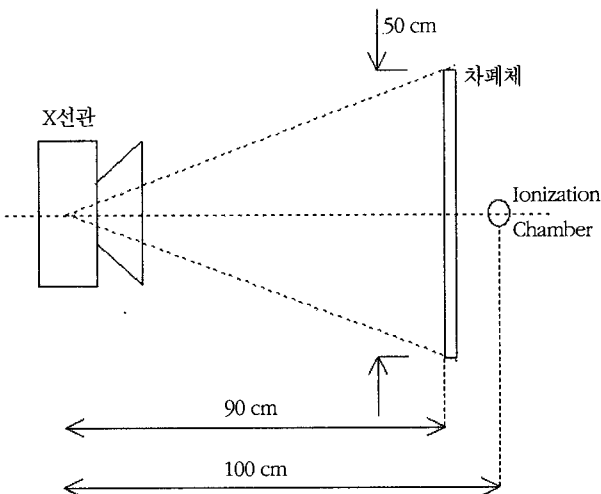


그림 1. 넓은 선속 X선 투과선량 측정을 위한 실험 배치도

그림 2부터 그림 5는 각 차폐체 종류대로 X선의 관전압별 넓은 선속 투과량을 나타낸 것이다. 가로축은 차폐체의 두께를 세로축은 조사선량($R/\text{mA} \cdot \text{min}$ at 1m)을 대수(log)로 나타낸 반대수(semi-log) 그래프이다.

2. 투과도의 세가지 요소(α , β , γ)

진단영역 X선의 차폐체 투과 후 선량에 대한 Archer⁴⁾의 기술방법 (2)를 사용하여 이번 실험을 통하여 획득한 투과도의 세 가지 요소(α , β , γ)에 대한 각 차폐체 종류별 관전압별 값을 표 3에 나타내었다.

3. HVL(Half-value layer)

관전압별 세 가지 요소(α , β , γ)에 의한 값에 의한 투과도를 차폐체에 제작에 직접 응용할 수 있지만 이보다는 HVL을 구하여 차폐체 제작에 많이 이용한다.

또한 차폐체의 기준에도 투과력을 나타내기도 하지만 보다 쉽게 HVL로 나타낸다.

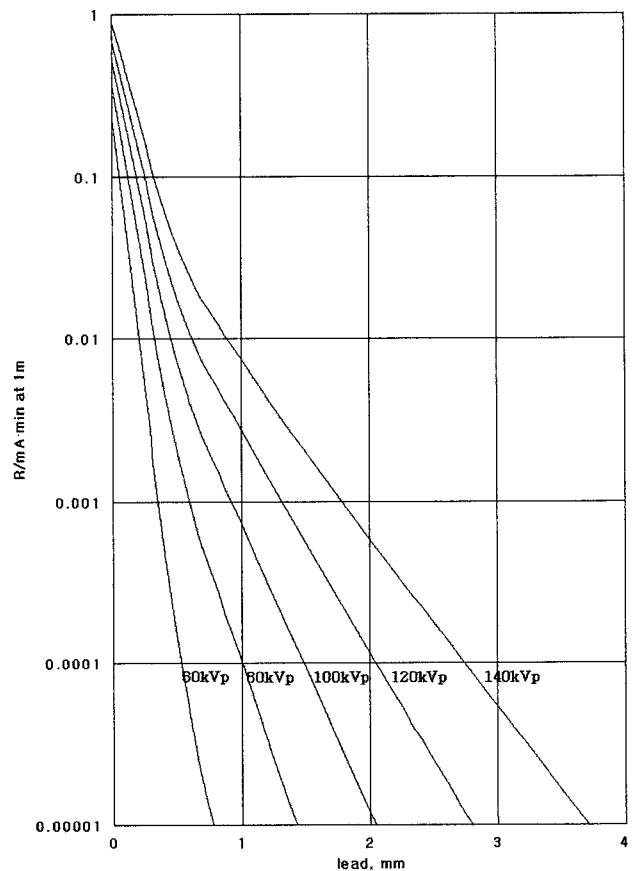


그림 2. 납에 대한 X선의 넓은 선속 투과량(밀도 11.35 gcm^{-3})

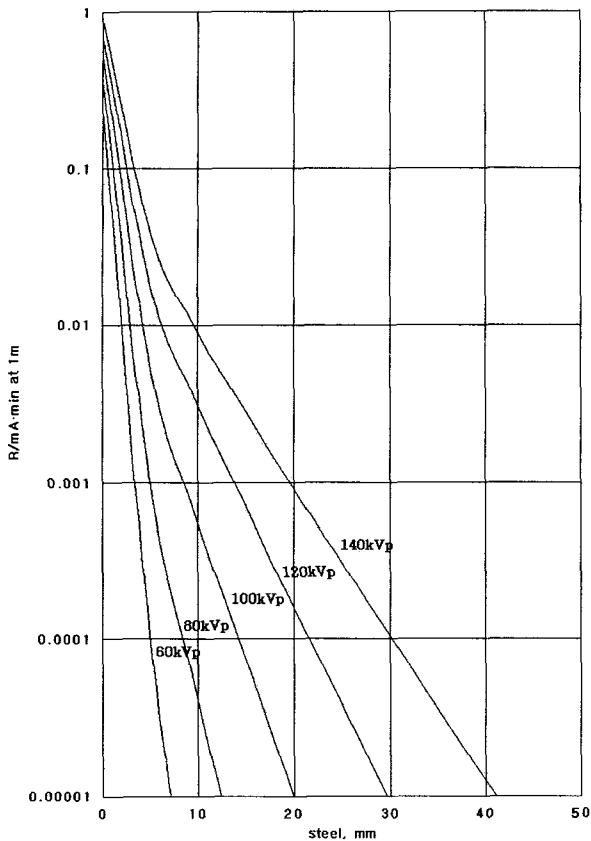


그림 3. 철에 대한 X선의 넓은 선속 투과량(밀도 7.83 gm⁻³)

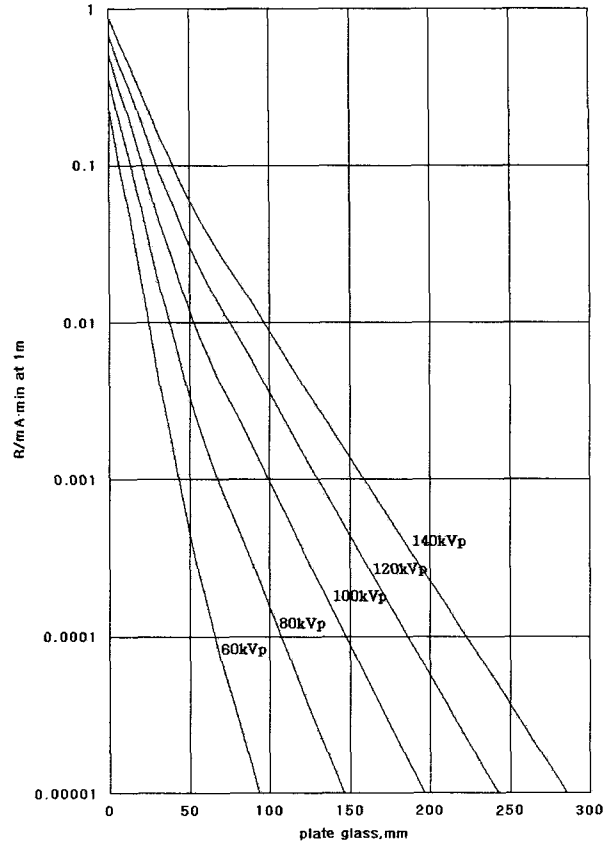


그림 5. 유리에 대한 X선의 넓은 선속 투과량(밀도 2.50 gm⁻³)

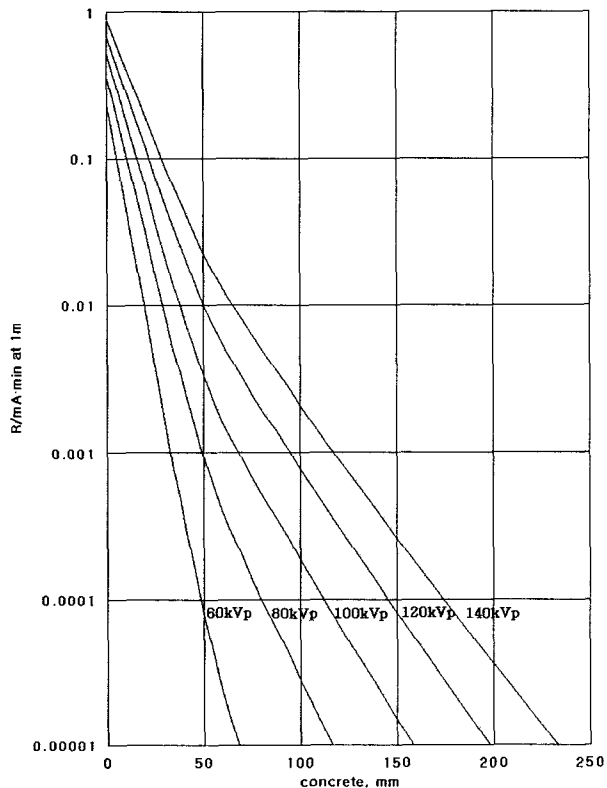


그림 4. 콘크리트에 대한 X선의 넓은 선속 투과량(밀도 2.39 gm⁻³)

관전압별 세 가지 요소(α , β , γ)를 통한 HVL을 구하는 공식은 Simpkin¹⁰⁾에 의해 제시되었다.

$$HVL(x) = \left\{ \frac{1}{\alpha\gamma} \ln \left[\frac{2^\gamma \left[\left(1 + \frac{\beta}{\alpha}\right) e^{\alpha x} - \frac{\beta}{\alpha} \right] + \frac{\beta}{\alpha}}{1 + \frac{\beta}{\alpha}} \right] \right\} - x \quad (8)$$

(8)에서 물질의 두께인 x 의 값이 점차 커지면서 HVL 역시 커지게 되지만 그 기울기는 점차 완만해져서 어느 값이 지나면 일정한 값($\frac{\log 2}{\alpha}$)을 나타내게 된다. 즉 x 의

값이 아주 큰 값을 가질 경우 HVL은 $\frac{\log 2}{\alpha}$ 에 이르게 되며 실제 투과체의 HVL을 나타낼 경우도 이 값을 사용하게 된다.

이 공식에 의한 각 차폐체의 종류별 HVL의 값들을 표 4에 나타내었다(오차율 5%).

표 3. 관전압별 투과도의 세가지 요소

kVp	R/mA · min at 1m	α (mm ⁻¹)	β (mm ⁻¹)	γ
납 (Pb)				
60 kVp	2.30X10 ⁻¹	7.84X10 ⁰	2.59X10 ¹	3.50X10 ⁻¹
80 kVp	3.64X10 ⁻¹	5.40X10 ⁰	2.35X10 ¹	5.88X10 ⁻¹
100 kVp	5.17X10 ⁻¹	4.04X10 ⁰	2.17X10 ¹	7.19X10 ⁻¹
120 kVp	6.81X10 ⁻¹	3.07X10 ⁰	1.88X10 ¹	7.73X10 ⁻¹
140 kVp	8.33X10 ⁻¹	2.36X10 ⁰	1.34X10 ¹	7.24X10 ⁻¹
철 (Fe)				
60 kVp	2.30X10 ⁻¹	9.17X10 ⁻¹	3.98X10 ⁰	4.92X10 ⁻¹
80 kVp	3.64X10 ⁻¹	5.79X10 ⁻¹	3.63X10 ⁰	5.91X10 ⁻¹
100 kVp	5.17X10 ⁻¹	3.97X10 ⁻¹	2.91X10 ⁰	7.20X10 ⁻¹
120 kVp	6.81X10 ⁻¹	2.85X10 ⁻¹	2.03X10 ⁰	7.90X10 ⁻¹
140 kVp	8.33X10 ⁻¹	2.13X10 ⁻¹	1.68X10 ⁰	8.22X10 ⁻¹
콘크리트 (concrete)				
60 kVp	2.30X10 ⁻¹	9.03X10 ⁻²	1.71X10 ⁻¹	2.32X10 ⁻¹
80 kVp	3.64X10 ⁻¹	5.53X10 ⁻²	1.70X10 ⁻¹	3.22X10 ⁻¹
100 kVp	5.17X10 ⁻¹	4.80X10 ⁻²	1.66X10 ⁻¹	4.49X10 ⁻¹
120 kVp	6.81X10 ⁻¹	4.23X10 ⁻²	1.14X10 ⁻¹	4.69X10 ⁻¹
140 kVp	8.33X10 ⁻¹	3.81X10 ⁻²	7.86X10 ⁻²	4.39X10 ⁻¹
유리 (glass)				
60 kVp	2.30X10 ⁻¹	8.55X10 ⁻²	1.66X10 ⁻¹	5.11X10 ⁻¹
80 kVp	3.64X10 ⁻¹	5.79X10 ⁻²	1.36X10 ⁻¹	5.97X10 ⁻¹
100 kVp	5.17X10 ⁻¹	4.72X10 ⁻²	1.14X10 ⁻¹	7.79X10 ⁻¹
120 kVp	6.81X10 ⁻¹	4.14X10 ⁻²	8.75X10 ⁻²	1.01X10 ⁰
140 kVp	8.33X10 ⁻¹	3.65X10 ⁻²	6.30X10 ⁻²	1.03X10 ⁰

표 4. 각 물질의 관전압별 HVL

	HVL(mm)				
	60 kVp	80 kVp	100 kVp	120 kVp	140 kVp
납 (Pb)	0.09±0.01	0.13±0.02	0.17±0.02	0.23±0.03	0.29±0.03
철 (Fe)	0.76±0.09	1.20±0.19	1.75±0.14	2.43±0.2	3.25±0.36
콘크리트 (Concrete)	7.67±0.67	12.54±0.96	14.45±0.66	16.39±0.63	18.20±0.61
유리 (glass)	8.11±0.49	11.97±1.00	14.68±0.52	16.73±0.52	18.98±0.67

표 5. 다른 실험에 의한 차폐물질의 종류별 HVL(mm)

차폐체	50 kVp	70 kVp	100 kVp	125 kVp
납 (Pb)				
Simpkin	0.08	0.13	0.28	0.31
NCRP report No. 49	0.07	0.17	0.28	0.28
철 (Fe)				
Trout	0.30	1.00	2.70	3.60
Simpkin	0.46	0.83	1.80	3.27
콘크리트 (concrete)				
Simpkin	9.32	10.36	15.31	18.33
NCRP report No.49	4.30	8.40	16.00	20.00
유리 (glass)				
Trout	5.30	8.90	13.50	16.00
Simpkin	8.47	10.66	15.06	17.54

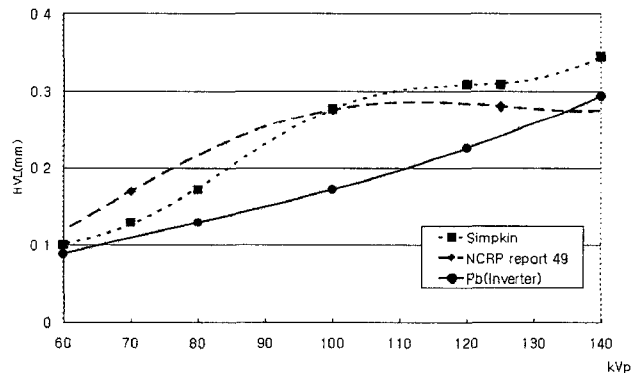


그림 6. 납(Pb)의 HVL 비교

IV. 고 찰

지금까지 인버터 방식의 고전압 발생장치를 사용한 진단 X선장치의 투과특성에 대해 언급했다. 이러한 차폐체들의 HVL과 다른 삼상 고전압발생장치를 사용한 HVL과의 비교를 하기 위하여 표 5에 다른 실험에 의한 HVL을 나타내었으며 그림 6부터 그림 9까지는 차폐체별로 HVL을 본 실험을 통한 값과 같이 나타내었다.

그림 6은 납의 HVL을 비교한 것이다. 이번 실험에 의한 HVL이 NCRP report No.49와 Simpkin의 HVL과 비교하여 60~125 kVp 범위에서는 더 작았으며 그 이상의 범위에서는 NCRP report No.49의 값 보다는 크고

Simpkin의 값 보다는 작은 것으로 나타났다.

그림 7은 철의 HVL을 비교한 것이다. 이번 실험에 의한 HVL이 Trout와 Simpkin의 HVL과 비교하여 60 kVp에서는 가장 크고, 70~100 kVp 범위에서는 Trout의 HVL보다는 작고 Simpkin의 HVL 보다는 크며 100 kVp 이상에서는 가장 작은 것으로 나타났다.

그림 8은 콘크리트의 HVL을 비교한 것이다. 이번 실

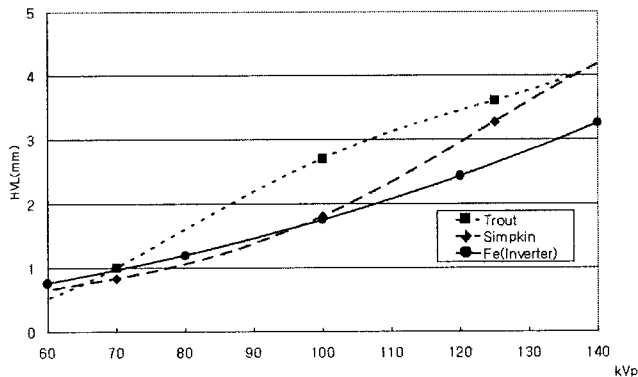


그림 7. 철(Fe)의 HVL 비교

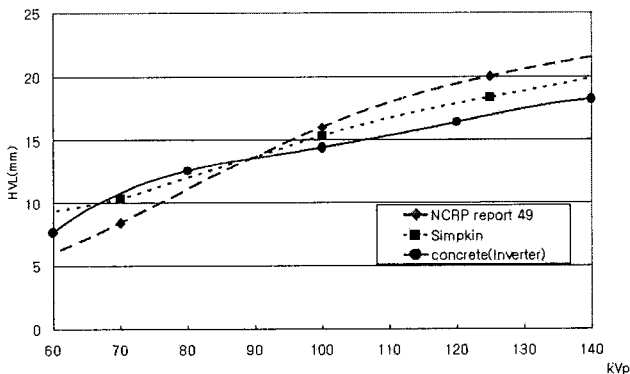


그림 8. 콘크리트(concrete)의 HVL 비교

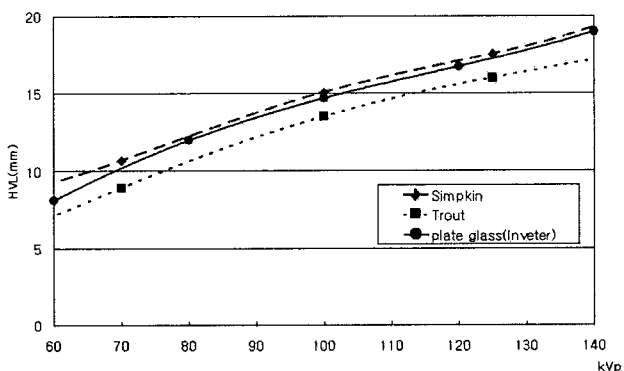


그림 9. 유리(glass)의 HVL 비교

험에 의한 HVL이 NCRP report No.49와 Simpkin의 HVL과 비교하여 60~90 kVp 범위에서는 더 크며 그 이상의 범위에서는 가장 작은 것으로 나타났다.

그림 9는 유리의 HVL을 비교한 것이다. 이번 실험에 의한 HVL이 전 범위에서 Trout의 HVL 보다는 크고 Simpkin의 HVL 보다는 작은 것으로 나타났다.

V. 결 론

현재 우리나라에서는 진단용방사선발생장치를 설치하는 의료기관은 안전관리규칙에 의하여 방사선방어시설을 별도로 하여야 한다. 이러한 방어시설을 하기 위하여 필요한 정보가 차폐체의 투과도에 대한 정보가 필요한 것이다.

최근 널리 사용하고 있는 인버터 방식의 고전압 발생장치를 사용하는 진단용 방사선 발생장치를 사용하여 진단영역 넓은 선속 X선 에너지에 대한 차폐물질(납, 철, 콘크리트, 유리)의 투과도 특성에 대하여 알아보았으며

Archer의 기술방법(2)에 의한 세 가지 요소(α , β , γ)를 사용하여 나타내었다.

이러한 인버터 방식의 고전압발생장치를 사용하는 진단용방사선발생장치의 관전압별 투과도는 진단방사선발생장치를 사용하는 작업공간에서의 차폐 설계 시 차폐물질의 종류와 두께의 설정에 도움이 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. International Commission on Radiological Protection: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Annal of the ICRP, 1990
2. International Commission on Radiological Protection: Protection against ionizing radiation from external source used in medicine, Oxford, pergamon Press, ICRP Publication 33, Annals of the ICRP, 9, 1-69, 1982
3. National Council on Radiation Protection and Measurements: Structural shielding design and evaluation for medical x rays and gamma rays of energies up to 10MeV, Bethesda, MD, NCRP, NCRP Report 49, 1976

4. Archer B.R., Thornby J.I., Bushong S.C.: Diagnostic x-ray shielding design based on an empirical model of photon attenuation, *Health phys*, 44, 507-517, 1983
5. 한국콘크리트학회: 콘크리트표준시방서해설, 한국콘크리트학회, 2003
6. 김병호: 유리공학, 청문각, 2001
7. Archer B.R., Fewell T.R., Conway B.J., Quinn P.W.: Attenuation properties of diagnostic x-ray shielding materials, *Med. Phys*, 21, 1499-1507, 1994
8. Rossi R.P., Ritenour R.I., Christodoulou E.: Broad beam transmission properties of some common shielding materials for use in diagnostic radiology, *Health phys*, 61, 601-608, 1991
9. Simpkin D.J.: Shielding a spectrum of workloads in diagnostic radiology, *Health phys*, 61, 259-261, 1991
10. Simpkin D.J.: Shielding requirements for constant-potential diagnostic x-ray beam determined by a Monte Carlo calculation, *Health phys*, 56, 151-164, 1989
11. Simpkin D.J.: Fitting parameters for medical diagnostic x-ray transmission data, *Health phys*, 54, 345-346, 1988
12. Simpkin D.J.: Shielding requirements for mammography, *Health phys*, 53, 267-279, 1987
13. Trout E.D., Kelly J.P., Herbert G.L.: X-ray attenuation in steel 50 to 300 kVp, *Health phys*, 29, 163-169, 1975
14. Trout E.D., Kelly J.P., Larson V.L.: The use of plate glass as shielding material in diagnostic radiologic installations, *J. Canadian Assoc, Rad*, 25, 173-177, 1974
15. Kelly J.P., Trout E.D.: Broad beam attenuation in lead for x-ray from 50 to 300 kVp, *Radiology*, 104, 171-175, 1972
16. Trout E.D., Kelly J.P., Lucas A.C.: Broad beam attenuation in concrete for 50 to 300 kVp x-ray and in lead for 300 kVp x-ray, *Radiology*, 72, 62-67, 1959

• Abstract

Broad Beam Transmission Properties of some Shielding Materials for Use in Diagnostic Radiology

Hoi-woun Jeong · Jung-min Kim · Song-Shei Lin*

*Inje University Seoul Paik Hospital · College of Health Science, Korea University
Chungtail Institute of Health Science and Technology***

The application of analytical model(Archer et al. 1983) to shielding calculations in diagnostic radiology combined with measurements of the broad beam transmission properties of lead, steel, concrete, and plate glass for x-ray tube potential of 60-140 kVp using an x-ray inverter generator and total initial beam filtration sufficient to provide half-value layer representative of those found in common practice and required by regulatory agencies.

Our transmission measurements and numerical fits to the mathematical model of broad beam transmission(Archer et al. 1983) will assist medical or health physicist faced with the task of designing protective barriers for medical diagnostic x-ray facilities.