Calculation of Shielding Rate of Radiation Protective Equipment Using the X-ray Spectrum of IPEM Report-78

Dong-Hyun Han*

The Korean Society of Radiology Education Institute

Received: October 07, 2021. Revised: October 25, 2021. Accepted: October 31, 2021

ABSTRACT

In this study, the shielding rate of major X-ray protective equipment used in the medical environment was calculated using X-ray spectrum data emitted from the diagnostic X-ray generator of The Institute of Physics and Engineering(IPEM) Report-78, and the applicability of radiation protection was investigated. Radiation shielding rates were calculated through reduction rates of air-kerma and total intensity for lead apron (0.3 mmPb), thyroid shield (0.5 mmPb), lead goggles (0.5 mmPb), and lead glass (1.8, 2.7, 3.3 mmPb) used for diagnostic X-ray protection. As a result, the shielding rate calculated as the air kerma reduction rate ranged from 96.31 to 100% at 80 kV, and 90.35 to 100% at 120 kV. In addition, the results of this calculation were well matched with the results of previous studies measuring the actual shielding rate, and it is expected that the X-ray spectrum data of IPEM Report-78 can be used for radiation protection.

Keywords: IPEM Report-78, X-ray Spectrum, Radiation Protection, Shielding Rate

I. INTRODUCTION

1895년 Röntgen에 의해 엑스선이 발견된 이래 의료분야의 엑스선 이용은 급격한 증가 추세이며, 이용 빈도 역시 늘어날 것으로 예측되고 있다[1]. 최근 국내외의 원자력발전소관련 사고와 CT를 포함한 진단용 엑스선의 위해성 등이 언론에 이슈가 되면서, 국민들의 관심도 높은 편이다.

이에 환자의 피폭선량 저감을 위한 다양한 노력이 진행 중이다. 한편 방사선사 및 의사 등 방사선 작업종사자의 피폭선량도 전반적인 증가추세에 있음에도 방사선작업종사자들의 직업성 피폭에 대한 관심은 미흡한 수준이며[2], 방사선 방호에 대한 적극적인 노력이 필요한 시점이다. 국제적인 노력으로 국제방사선방호위원회(ICRP) 산하의 상설분과위원회에서 주로 환자측면의 방호와 종사자측면의 방호에 대해 다양한 연구와 권고를 제공하고 있다. 이는 방사선에 의한 인체의 장해에 있어 확률적 영향은 비록 매우 낮은 확률이지만 아주 작은 선량에서도 발생할 수 있다는 결론, 즉 방사선에 의해 유발되는 확률적영향의 확률은 선량과 함께 증가하고, 특히 저선량에서는 선량에 비례할 것이기 때문이다[3]. 따라서 방사선 방호활동을 포함한 차폐장비를 통해 방사선으로부터 안전을 확보하고 방어에 적정화를 기할 수 있는 특별한 장치들을 갖추어야 한다[4]. 특히 방사선 방호용 앞치마, 납안경, 갑상샘 차폐체, 납유리 등은 방사선 차폐목적으로 널리 이용되나[5], 중량감과 시술시 움직임의 제한성 등의 이유로 착용이 소홀시 되고 있다[6]. 따라서 매년 방사선 검사빈도가 증가하고 있는 현실에서 방사선 방호장비의 차폐능력을 확인하여 피폭선량 저감을 위한 노력은 매우 중요하다고 판단된다.

이에 본 연구에서는 IPEM(The Institute of Physics and Engineering in Medicine) Report-78의 진단용 엑스선 발생장치에서 방출되는 엑스선 스펙트럼 데

* Corresponding Author: Dong-Hyun Han E-mail: rth93@hanmail.net Tel:
Address: 30-14, Uncheon-ro 154beon-gil, Seo-gu, Gwangju, Republic of Korea

이터를 이용하여 의료 환경에서 사용되는 주요 엑스선 방어용구의 차폐능력을 평가하고, 방사선 방호분야 적용가능성을 알아보았다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. IPEM Report-78

Birch 등에 의해 반경험적 모델을 기반으로 개발된 최초 버전 Catalogue of Spectral data(SRS-30)는 진단방사선분야 및 유방촬영분야에 유용하게 적용할 수 있는 스펙트럼 자료를 제공한다[7]. IPEM Report No. 78 버전은 개인용 컴퓨터를 이용하여 적용할 수 있도록 발전되어 진단용 엑스선 및 유방촬영영역 엑스선의 스펙트럼을 제공한다. 텅스텐(W), 몰리브덴(Mo), 로듐(Rh) 표적에서 방출된 엑스선 스펙트럼, 광자 커마 데이터, 총여과에 따른 반가층 등과 감약 스펙트럼, 엑스선관 출력 계산, 광자의 평균에너지를 계산할 수 있다. 엑스선 스펙트럼 계산을 위해 관전압 30 kV에서 150 kV까지 1 kV 단계, 타겟의 각도는 6°에서 33°까지 1° 간격으로 설정할 수 있고, 정현파 리플백분율은 0%에서 30%까지의 엑스선 스펙트럼을 계산할 수 있다. 이와 같은 특성으로 진단용 엑스선발생장치의 스펙트럼 예측에 광범위하게 이용되고 있다.

2. 계산조건

혈관촬영장치를 포함한 진단용 엑스선 발생장치에서 일반적으로 사용되는 조건을 구현하기 위해 일반촬영장치 엑스선관 8기, 투시촬영장치 엑스선관 3기, 총 11기의 재원을 분석하여 타켓 각도와 총여과값을 Table 1에 제시하였다.

Table 1. Target Angle and Total Filteration.

X-ray system	Target angle	Total filteration
N=11	11.73±0.47	2.52±0.24

방호장비로는 현재 국내에서 판매되는 Standard 형, Wrap - Aound 형, Vest/Skirt Combe 형의 납 앞치마, 수정체 방호를 위한 고글, 고정형 납유리 및 이동형 납유리의 연당량을 조사하여 0.3, 0.5, 1.8, 2.7, 3.3 mmPb를 대상으로 하였다.

엑스선 스펙트럼 계산조건은 Table 1의 평균값에서 근사치를 취한 Target angle 12°, Total Filteration 2.5 mmAl으로 설정하고, 텅스텐(W) 타겟, 인버터방식의 고압변압기의 관전압리플백분율은 0%, 진단영역에서 사용되는 관전압 80 kV, 120 kV 조건에서 연당량을 0.3, 0.5, 1.8, 2.7, 3.3 mmPb으로 증가시키면서 엑스선 스펙트럼을 구하였다.

차폐율의 계산은 방호장비가 없을 때의 1 mAs·mm^2 당 에어커마(Air kerma)와 1 mm^2 당 광자수를 기준으로 방호장비의 연당량별로 에어커마(Air kerma) 및 총광자수를 Eq. (1)과 같이 계산하였다.

$$SR(\%) = \frac{NS - S}{NS} \times 100 \quad (1)$$

SR(%) : 차폐율(Shielding rate)
NS : 차폐없음(No shield)
S : 차폐(Shield)

여기서, SR(%)는 차폐율, NS는 방호장비가 없을 때의 에어커머 또는 총광자수, S는 연당량별 차폐용구가 존재할 때의 에어커머 또는 총광자수이다.

계산은 개인용 PC에 Windows Virtual PC, Windows XP Mode 조건에서 IPEM Report-78의 Spectrum Processor를 설치 후 계산하였고, 그 결과를 Excel과 Origin Pro 8.0을 이용해 분석하였다

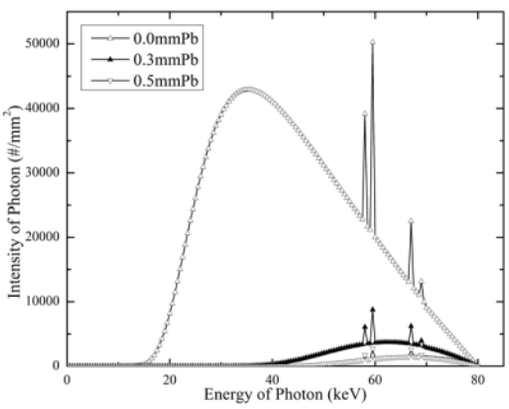
III. RESULT & DISCUSSION

1. 방호장비 차폐 전 · 후의 엑스선 스펙트럼 변화

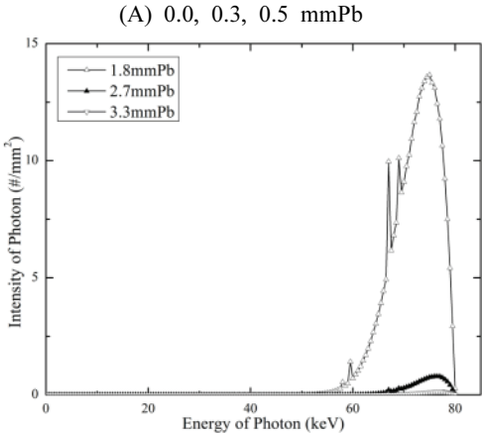
텅스텐 타겟, 총여과 2.5 mmAl, 관전압리플백분율 0%, 관전압 80 kV조건에서 방호장비 투과 전 · 후의 엑스선 스펙트럼은 Fig. 1, 이때의 에어커마, 평균에너지, 총강도를 Table 2에 제시하였다.

먼저 Fig. 1-(a)의 80 kV 조건의 방호장비 투과전 엑스선 스펙트럼(0.0 mmPb)에서 연속분포 형태의 제동방사선이 약 15 keV에서 최대 80 keV까지 관찰되었고, K_α 특성엑스선 피크와 K_β 특성엑스선이 선형분포의 피크형태로 나타났다. 에어커마는 mAs · mm^{2}당 161.2 μGy였고, 평균에너지는 43.4 keV, 단위면적당(mm^2) 엑스선의 총강도는 3,056,147이었다. 0.3, 0.5, 1.8, 2.7, 3.3 mmPb의 방호장비를 투과

한 엑스선 스펙트럼은 연당량 증가와 함께 총강도의 감소로 인해 스펙트럼의 면적이 현저히 감소하였다.



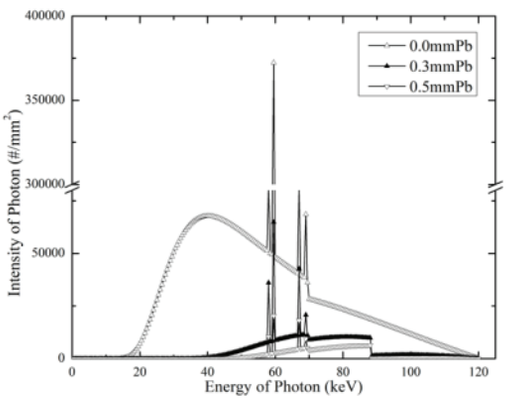
(A) 0.0, 0.3, 0.5 mmPb



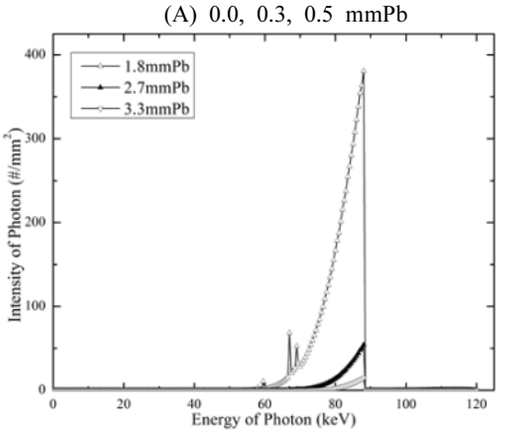
(B) 1.8, 2.7, 3.3 mmPb

Fig. 1. X-ray Spectra according to Lead Equivalent of Protective Instruments(80 kV).

특히 1.8, 2.7, 3.3 mmPb의 총강도가 투과전에 비해 0.0001%미만의 수준으로 스펙트럼을 직접 비교하기 어려워 Fig. 1-(b)로 제시하였다. 평균에너지는 연당량의 증가와 함께 증가하는 선속경화현상(Beam Hardening Effect)을 나타냈다. 반면 피폭선량 계산에 사용되는 에어커마는 연당량 증가와 함께 현저히 감소했다. Fig. 2-(a)의 120 kV의 투과전 엑스선의 에어커마는 mAs · mm^2당 304.7 μGy였고, 평균에너지는 55.4 keV, 단위면적당(mm^2) 엑스선의 총강도는 7,170,703이었다. 총강도, 에어커마, 평균에너지는 80 kV와 유사한 결과를 나타냈으며, 이는 Verhaegen 등[8] 연구와 잘 일치하였다. 또한 연당량의 증가와 함께 특성엑스선의 강도는 감소하였다. 이와 같은 결과를 엑스선 감약 측면에서 차폐현상을 검토해보면 진단용 엑스선의 에너지가 비교적 낮으므로 대부분의 차폐현상은 Eq. (2) 와 같이 설명된다[9].



(A) 0.0, 0.3, 0.5 mmPb



(B) 1.8, 2.7, 3.3 mmPb

Fig. 2. X-ray Spectra according to Lead Equivalent of Protective Instruments(120 kV).

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2)$$

I : 투과후 강도
I_0 : 투과전 강도
μ : 선형감쇄계수
x : 차폐체의 두께

동일한 에너지에서 투과후 강도의 감소 인자는 톰슨산란과 레일리산란을 포함한 고전산란, 콤프턴효과, 광전효과의 선형감쇄계수이다. 여기서 고전산란과 콤프턴효과는 산란선 유발인자이며, 차폐효과의 대부분은 광전효과에 기인한다. 광전효과는 엑스선 에너지의 3.5승에 반비례하고 물질 원자번호의 4~5승에 비례한다. 특히 80 kV와 120 kV의 에너지 분포가 납의 광전효과 흡수단(56~60

keV) 영역[10]과 중복되어 총강도, 에어커마가 현저히 감소하는 것으로 생각된다. 따라서 납은 진단영역의 엑스선에 대한 차폐체로써 그 특성이 매우 우수하다고 사료된다.

2. 방호장비의 연당량별 차폐율

계산된 에어커마 감소율로 예측한 차폐율 계산결과, 80 kV의 관전압 조건에서는 연당량 0.3, 0.5, 1.8, 2.7, 3.3 mmPb에서 차폐율은 Table 3에 제시한 바와 같이 96.31, 98.81, 99.99, 100 그리고 100%을 나타냈다. 120 kV에서는 90.35, 96.04, 99.93, 99.99 그리고 100%로 계산되었다. 위와 같은 결과는 송 등[11], 김 등[12]의 실제 측정결과와 잘 일치하였다. 총강도의 감소율로 예측한 차폐율은 0 kV의 관전압 조건에서는 연당량 0.3, 0.5, 1.8, 2.7 그리고 3.3 mmPb에서 차폐율은 93.59, 97.87, 99.99, 100 그리고 100%을 나타냈다. 120 kV에서는 86.77, 94.53, 99.91, 99.99 그리고 100%로 계산되었다.

진단용 엑스선장치의 방호장비에 대한 차폐 성능평가는 산업 표준화법에 의하여 국내 광공업의 기술적 사항을 통일화, 단순화하기 위하여 정한 표준 규격에 의거한 X-선 방호용품류의 납당량 시험[13]에 따르도록 되어있다. 그러나 선원과 검출부까지의 거리를 최대 2,232mm 이상 요구하는 항목도 있어, 일반적인 연구자가 직접측정법을 적용하는데 한계가 있다. 본 연구에서 사용된 IPEM Perport-78의 엑스선 스펙트럼을 이용한 계산은 방호장비 차폐성능을 예측할 수 있어 방사선작업종사자의 방호장비 제작 및 평가에 사전 시험으로 이용할 수 있을 것이다.

Table 2. Air kerma, Energy Mean and Total Intensity of X-ray Spectra

	Tube Potential	Lead equivalent of Protective Instruments					
		0.0 mmPb	0.3 mmPb	0.5 mmPb	1.8 mmPb	2.7 mmPb	3.3 mmPb
Air kerma ($uGy/mAs{\cdot}mm^2$)	80 kV	161.2000	5.9500	1.9200	0.0089	0.0004	0.0001
	120 kV	304.7000	29.3900	12.0600	0.2064	0.0205	0.0047
Energy mean (keV)	80 kV	43.4	61.1	64.4	72.1	74.1	74.9
	120 kV	55.4	71.2	74.1	81.7	83.5	84.2
Total intensity ($\#/mm^2$)	80 kV	3056147	195985.9	64975.44	303.331	13.15612	1.798806
	120 kV	7170703	948480.7	392204.4	6553.218	642.4423	146.2491

Table 3. The Shielding Rates according to Lead Equivalent of Protective Instruments

	Tube Potential	Lead equivalent of Protective Instruments					
		0.0 mmPb	0.3 mmPb	0.5 mmPb	1.8 mmPb	2.7 mmPb	3.3 mmPb
Air kerma Shielding rates(%)	80 kV	-	96.31	98.81	99.99	100.00	100.00
	120 kV	-	90.35	96.04	99.93	99.99	100.00
Total intensity Shielding rates(%)	80 kV	-	93.59	97.87	99.99	100.00	100.00
	120 kV	-	86.77	94.53	99.91	99.99	100.00

IV. CONCLUSION

본 연구는 IPEM Report-78의 엑스선 스펙트럼을 이용해 방사선 방호장비의 차폐율을 계산하였다. 그 결과 방호장비 연당량 증가와 함께 차폐율이 현저히 증가하였고, 계산 결과가 측정을 통한 선행연구결과와 잘 일치하였다. 따라서 엑스선 스펙트럼을 이용한 차폐율 계산은 방사선 방호장비의 개발

및 제작 시 사전시험으로 가치가 크다고 생각되며, 본 연구의 결과가 방사선작업종사자의 피폭선량 저감 노력에 이용되기를 기대한다.

Reference

[1] J. S. Song, "A Study on the Development of Optimization Procedure for Radiological Protection", Journal of Radiation Protection and Research, Vol. 19, No. 1, pp. 1-4, 1994.

[2] Ministry of Health and Welfare, "Rules on Safety Management of Diagnostic Radiation Generating Device"s, Ordinance No. 185 of the Ministry of Health and Welfare, 2013.

[3] ICRP, "Radiation Protection and Safety in Medical Care", Publications 73, pp. 6-10, 1998.

[4] Y. S. Park, J. S. Yoo, D. Y. Kim, *Medical Radiation Management*, ShinKwang Publisher, pp. 73-100, 1992.

[5] R. J. Vetter, "Medical Health Physics a review", Health Physics, Vol. 88. No. 6, 653-664, 2005. https://doi.org/10.1097/00004032-200506000-00010

[6] J. I. Yoo, J. W. Koo, "Musculoskeletal Symptoms and Related Factors for Nurses and Radiological Technologists Wearing a Lead Apron for Radiation Protection", Annals of Occupational and Environmental Medicine, Vol. 16, No. 2, pp. 166-177, 2004.

[7] Cranley K, et al, "*IPEM Report 78, Catalogue of Diagnostic X-ray Spectra and Other Data(CD-Rom Edition 1997) (Eletronic Version prepared by D sutton)*", The Institute of Physics and Engineering in Medicine, 1997.

[8] F. Verhaegen, A. E. Nahum, S. Van de Putte, Y. Namito, "Monte Carlo modelling of radiotherapy kV x-ray units", Physics in Medicine and Biology, Vol. 44, No. 7, pp. 1767-1789, 1999. https://doi.org/10.1088/0031-9155/44/7/315

[9] L. Ben Omrane, F. Verhaegen, N. Chahed, S. Mtimet, "An investigation of entrance surface dose calculations for diagnostic radiology using Monte Carlo simulations and radiotherapy dosimetry formalisms", Physics in Medicine and Biology, Vol. 48, No. 12, pp. 1809-1824, 2003. http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/48/12/310

[10] J. H. Hubbell, S. M. Seltzer, "*Tables of X-ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients*", National Institute of Standards and Technology(NIST), 1999.

[11] J. N. Song, G. W. Seol, S. G. Hong, J. G. Choi, "A Study on Protection Performance of Radiation Protective Aprons classified by Manufacturers and Lead Equivalent using Over Tube Type Fluoroscopy", Journal of the Korean Society of Radiolog, Vol. 5, No. 3, pp. 135-141, 2011. https://doi.org/10.7742/jksr.2011.5.3.135

[12] K. W. Kim, S. H. Choi, K. Y. Kim, I. P. Lee, S. G. Hwang, K. R. Dong, "Performance Evaluation of Aprons according to Lead Equivalent and Form Types", Journal of Radiation Industry, Vol. 10, No. 4, pp. 219-225, 2016. http://dx.doi.org/10.23042/radin.2016.10.4.219

[13] Korea Standard, "The lead equivalent test method of X-ray protective equipment", KS A 4025, 1990.

IPEM Report-78의 엑스선 스펙트럼을 이용한 방사선 방호장비의 차폐율 계산

한동현

한국방사선학회교육원

요 약

본 연구에서는 IPEM(The Institute of Physics and Engineering in Medicine) Report 78의 진단용 엑스선 발생장치에서 방출되는 엑스선 스펙트럼 데이터를 이용하여 의료 환경에서 사용되는 주요 엑스선 방호장비의 차폐율을 계산하고, 방사선 방호분야 적용가능성을 알아보았다. 진단용 엑스선 방호에 이용되는 납 앞치마(0.3 mmPb), 갑상샘 차폐체(0.5 mmPb), 납 고글(0.5 mmPb), 납 유리(1.8, 2.7, 3.3 mmPb)를 대상으로 에어커마와 엑스선 총강도의 감소율을 통해 방사선 차폐율을 계산하였다. 그 결과 에어커마 감소율로 계산한 차폐율은 80 kV에서 96.31~100 %범위였고, 120 kV에서는 90.35~100%범위로 나타났다. 또한 본 계산의 결과가 실제 차폐율 측정한 선행연구결과와 잘 일치하여 IPEM Report 78의 엑스선 스펙트럼 데이터가 방사선 방호에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

중심단어: IPEM Report 78, 엑스선 스펙트럼, 방사선 방호, 차폐율

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(단독저자)	한동현	한국방사선학회교육원	연구위원