Journal of Radiation Industry 14(1) : 83~87(2020)

Technical Paper

엑스선 차폐 및 방사선량률 평가 프로그램의 개발

윤선영[1] · 정운관[1] · 박병목[2] · 여화연[3,*]

[1]조선대학교 원자력공학과, [2]세안에너텍㈜, [3]남부대학교 방사선학과

Development of a X-ray Shielding and Radiation Dose Rate Assessment Program

Sun Young Yoon[1], Woon Kwan Chung[1], Byeong Mok Park[2], Hwa Yeon Yeo[3,*]

[1]*Department of Nuclear Engineering, Chosun University, 309, Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 61452, Republic of Korea*
[2]*SAE-AN ENERTECH CORP., 184, Gasan Digital 2ro, Geumcheon-gu, Seoul 08501, Republic of Korea*
[3]*Department of Radiology, Nambu University, 23, Cheomdanjungang-ro, Gwangsan-gu, Gwangju 62271, Republic of Korea*

Abstract - Institutions using X-ray generators should have shielding facilities that comply with legal standards in the initial licensing or modification of existing shielding facilities. Shield thickness calculation methods for determining the shield thickness include computational simulation and hand calculation. In this study, we developed an X-ray shielding and radiation dose rate evaluation program that complements the advantages and disadvantages of computer simulation and hand calculation methods using Excel program. The program consists of the X-ray Data Base and the X-ray radiation dose rate evaluation program. The primary and secondary beams were divided to be applicable according to the evaluation point, and lead shielding thicknesses that satisfy the shielding standard dose were made possible.

Key words : X-ray, Shielding, Calculation program

서 론

엑스선 발생장치는 산업분야, 의료분야 그리고 연구분야 등에서 다양한 용도로 이용되고 있으며 특히, 방출되는 엑스선 에너지가 높을 경우 일정규모의 차폐 성능을 갖는 차폐 시설에서 운영되어야 한다. 이러한 시설은 최초 인허가를 신청할 때 법적 기준에 부합하는 차폐 성능을 갖추어야 한다. 또한 허가 받은 사항의 변경 등으로 인해 차폐 시설의 보강이 필요한 경우에도 변경된 변수에 적합한 차폐 성능을 갖추어야 한다.

* Corresponding author: Hwa Yeon Yeo, Tel. +82-62-970-0157, Fax. +82-62-972-6200, E-mail. yhy@nambu.ac.kr

이때 법적 기준을 만족하며 안전성을 충분히 보장하면서도 경제성을 고려한 차폐체의 두께를 결정하기 위한 차폐 계산이 수행되어야 한다. 차폐체의 두께를 계산하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 MCNP와 같은 전산모사 방법과 수(手)계산을 통한 방법이다. 이러한 차폐 계산에 의해 주요지점에 대한 방사선량률을 예측하고, 시설에 적합한 차폐 두께를 결정, 시공하게 된다.

그러나 전산모사 방법은 비용, 사용자 전문성의 문제 및 전산시간의 소요 등의 단점이 있으며(Kim *et al*. 2014), 수(手)계산 방법은 복잡한 계산 시 휴먼에러의 발생 가능성을 배제하지 않을 수 없다.

본 연구에서는 비교적 기하학적 구조가 단순한 시설의 차

폐 계산 시 사용자가 기존의 차폐 계산 방법보다 쉽고 간단하게 엑스선의 차폐 계산 및 방사선량률을 평가할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

대상 및 방법

1. 연구대상 및 재료

본 연구에서 개발한 프로그램의 적용 대상은 엑스선 발생장치이다. 엑스선 발생장치는 전자빔을 만들 수 있는 전자원, 가속된 전자빔을 급격히 감속시킬 수 있는 타깃, 전자빔이 움직이는 공간인 진공용기로 구성된 엑스선 튜브와 구동을 위한 전원 및 제어장치로 구성된다(Jeong *et al*. 2019).

엑스선의 차폐 선량 계산을 위한 계산프로그램으로는 Microsoft office 사의 Excel을 사용하였다. Excel은 널리 보편적으로 사용되고 있으며 사용방법이 간단하다는 장점이 있다(Kim and Kim 2009).

2. 연구방법

엑스선 발생장치의 차폐 계산은 사용하고자 하는 방사선인 일차선과, 사용과는 무관한 산란 및 누설에 의한 이차선으로 구분된다. 본 연구에서는 평가하고자 하는 지점에 따라 일차선 또는 이차선을 계산하고 차폐 후 기준선량을 만족하는 최종 납 차폐 두께를 결정하도록 하였다. 또한 차폐 기준선량(P)은 Fig. 4의 A, B 지점에 해당하는 일반인 구역의 법적 기준에 따라 0.02 mSv·week^{-1}로 하였다(Park 2010). 엑스선발생장치의 납 차폐 두께 계산은 NCRP Report No. 49의 차폐 계산식을 적용하였으며 적용 수식은 다음과 같다.

2.1 일차선

투과계수 $B_1 = \frac{d^2 0.1P}{WUT}$

d: 선원-평가지점 거리
P: 차폐 기준
W: 가동인자(전류×주당 사용시간)
U: 가동률
T: 점유도

납 차폐 후 방사선량률 $P_1 = \frac{10B_1WUT}{d^2}$

B_1: 일차선의 투과계수
W: 가동인자(전류×주당 사용시간)
U: 가동률
T: 점유도
d: 선원-평가지점 거리

2.2 산란선

투과계수 $B_2 = \frac{d_{sca1}^2 d_{sca2}^2 0.1P400}{WTaF}$

d_{sca1}^2: 선원-물체 거리
d_{sca2}^2: 선원-평가지점 거리
P: 차폐 기준
W: 가동인자(전류×주당 사용시간)
T: 점유도
a: 산란인자
F: 조사야

납 차폐 후 방사선량률 $P_2 = \frac{10B_2WTaF}{d_{sca1}^2 d_{sca2}^2 400}$

d_{sca1}^2: 선원-물체 거리
d_{sca2}^2: 선원-평가지점 거리
B_2: 산란선의 투과계수
W: 가동인자(전류×주당 사용시간)
T: 점유도
F: 조사야

2.3 누설선

투과계수 $B_3 = \frac{d^2 0.1P600I}{WT}$

d: 선원-평가지점 거리
P: 차폐 기준
I: 전류
W: 가동인자(전류×주당 사용시간)
U: 가동률
T: 점유도

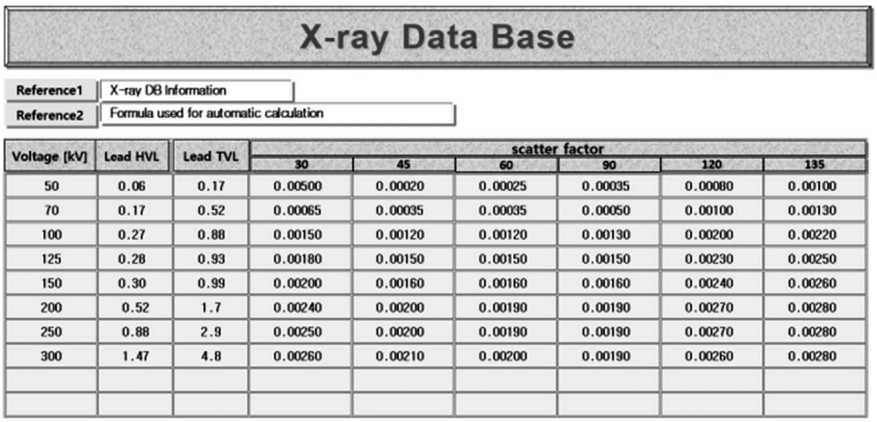
납 차폐 후 방사선량률 $P_3 = \frac{10B_3WUT}{d^2 600I}$

d: 선원-평가지점 거리
B_3: 누설선의 투과계수
W: 가동인자(전류×주당 사용시간)
T: 점유도
I: 전류

2.4 일차선의 최종 납 차폐 두께

일차선의 경우, 일차선의 투과계수(B_1)을 이용하여 TVL의 개수를 구한다.

일차선의 최종 납 차폐 두께는 TVL의 개수에 TVL을 곱



X-ray Data Base

Reference1 X-ray DB Information

Reference2 Formula used for automatic calculation

Voltage [kV]	Lead HVL	Lead TVL	scatter factor					
			30	45	60	90	120	135
50	0.06	0.17	0.00500	0.00020	0.00025	0.00035	0.00080	0.00100
70	0.17	0.52	0.00065	0.00035	0.00035	0.00050	0.00100	0.00130
100	0.27	0.88	0.00150	0.00120	0.00120	0.00130	0.00200	0.00220
125	0.28	0.93	0.00180	0.00150	0.00150	0.00150	0.00230	0.00250
150	0.30	0.99	0.00200	0.00160	0.00160	0.00160	0.00240	0.00260
200	0.52	1.7	0.00240	0.00200	0.00190	0.00190	0.00270	0.00280
250	0.88	2.9	0.00250	0.00200	0.00190	0.00190	0.00270	0.00280
300	1.47	4.8	0.00260	0.00210	0.00200	0.00190	0.00260	0.00280

Fig. 1. X-ray data base.

하여 구한 차폐 두께(t_1)에 HVL을 더하여 최종 납 차폐 두께를 결정한다.

$$B_1 = \left(\frac{1}{10}\right)^n$$

$$t_1 = (n \times TVL) + HVL$$

B_1: 일차선의 투과계수
t_1: 일차선의 차폐 두께
TVL: 납의 십가층
HVL: 납의 반가층

2.5 이차선의 최종 납 차폐 두께

이차선의 경우, 산란선의 투과계수(B_2) 및 누설선의 투과계수(B_3)을 이용하여 TVL의 개수를 구한 다음, TVL의 개수에 TVL을 곱하여 산란선의 차폐 두께(t_2)와 누설선의 차폐 두께(t_3)를 구한다.

$$B_2 = \left(\frac{1}{10}\right)^n$$

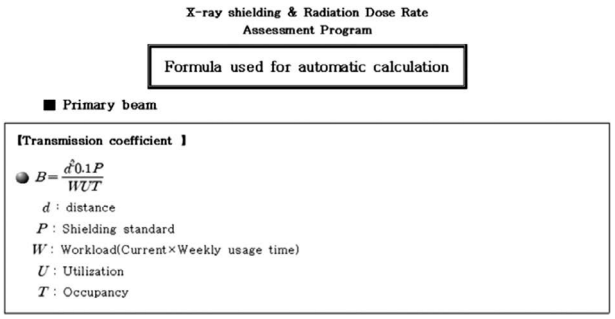
$$t_2 = (n \times TVL)$$

B_2: 산란선의 투과계수
t_2: 산란선의 차폐 두께
TVL: 납의 십가층
HVL: 납의 반가층

$$B_3 = \left(\frac{1}{10}\right)^n$$

$$t_3 = (n \times TVL)$$

B_3: 누설선의 투과계수
t_3: 누설선의 차폐 두께
TVL: 납의 십가층
HVL: 납의 반가층



X-ray shielding & Radiation Dose Rate Assessment Program

Formula used for automatic calculation

■ Primary beam

【Transmission coefficient 】

$B = \frac{d^2 0.1P}{WUT}$

d : distance
P : Shielding standard
W : Workload(Current×Weekly usage time)
U : Utilization
T : Occupancy

Fig. 2. Formula used for automatic calculation.

이차선의 최종 납 차폐 두께는 산란선의 차폐 두께(t_2)와 누설선의 차폐 두께(t_3)의 차가 TVL보다 크다면 두 값 중 큰 값으로 결정한다. 산란선의 차폐 두께(t_2)와 누설선의 차폐 두께(t_3)의 차가 TVL보다 작다면, 두 값 중 큰 값에 HVL을 더하여 최종 납 차폐 두께를 결정한다.

결 과

1. 프로그램의 구성

엑스선의 차폐 및 방사선량률 계산을 위한 프로그램은 엑스선의 관련 정보 및 사용된 수식의 정보가 입력된 X-ray Data Base 화면과 입력된 데이터와 수식을 이용해 자동 계산하는 엑스선 차폐 및 방사선량률 평가 화면으로 구성하였다.

1.1 X-ray Data Base

본 평가 프로그램의 데이터베이스에는 엑스선에 대한 각종 인자를 정리하여 차폐 계산 및 방사선량률 프로그램에 적용 가능하도록 DB화하였다. 인자에는 전압별 납의 반가

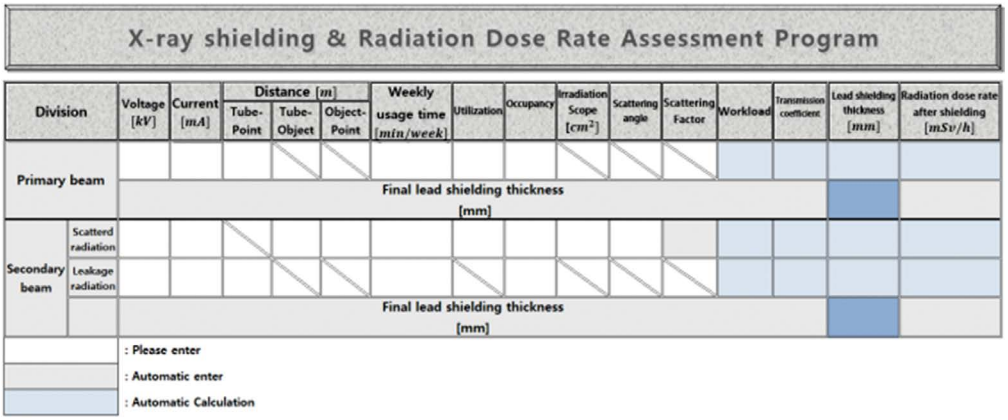


Fig. 3. X-ray shielding & radiation dose rate assessment program.

층 및 십가층 값, 산란각도별 산란인자 값 등이 있으며, DB는 추가로 입력 및 저장할 수 있는 확장성을 갖도록 하였다.

참고자료에는 십가층 및 반가층 표 등이 저장된 X-ray DB 기초자료와 자동연산에 적용된 수식 정보가 담겨있으며, 사용자가 프로그램 사용 시 참고할 수 있도록 하였다.

1.2 엑스선 차폐 및 방사선량률 평가 프로그램

"엑스선 차폐 및 방사선량률 평가 프로그램"의 구성은 전압, 전류, 거리, 주당 사용시간, 가동률, 점유도, 조사야, 산란각, 산란인자, 가동인자, 투과계수, 납 차폐 두께, 차폐 후 방사선량률로 되어 있다. 평가 프로그램은 평가지점에 따라 일차선 또는 이차선을 선택한 후 해당 전압, 전류, 거리, 주당 사용시간, 가동률, 점유도 등을 입력하고, 산란선의 경우 조사야와 산란각을 추가로 입력한다. 입력한 내용에 따라 데이터베이스에 입력된 납의 십가층 및 반가층, 산란각에 따른 산란인자 값이 연동되어 가동인자, 투과계수, 납 차폐 두께, 차폐 후 방사선량률이 계산된다. 일차선의 경우 계산된 납 차폐 두께에 사용시설의 안전성을 고려하여 반가층을 추가로 더하여 최종 납 두께를 결정하고, 이차선의 경우 산란선과 누설선을 고려하여 최종 납 두께를 결정한다.

2. 프로그램을 이용한 계산 결과 및 검증

엑스선 차폐 및 방사선량률 평가 프로그램을 이용하여 Fig. 4와 같은 도면의 방사선관리구역 외부의 일반인구역 A지점과 B지점의 차폐 두께를 계산하고자 하였다. 사용 전압 150 kV, 전류 10 mA, 주당 사용시간 100 min인 엑스선 발생장치의 방향은 정면(A 방향)을 향하고 있으며 관심물체를 투과한다고 가정하였다. 가동률은 엑스선 발생장치의 방향을 고정하여 사용한다는 가정하에 "1"로 하였으며, 점유도는 평가지점이 방사선관리구역 외부의 복도라는 가정 하에 NCRP Report No. 151에 제시된 점유도에 따라 "0.2"로 하

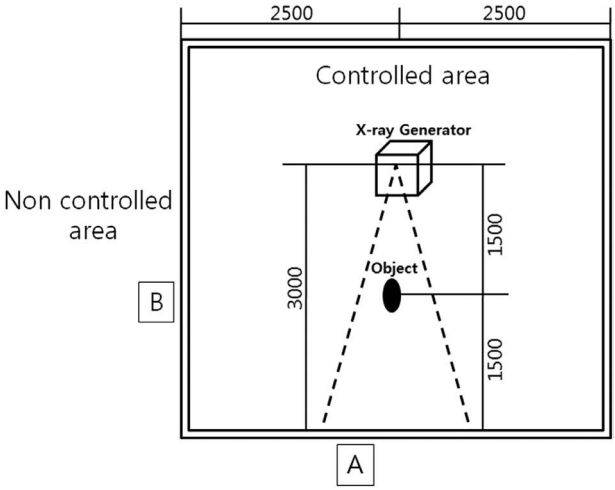
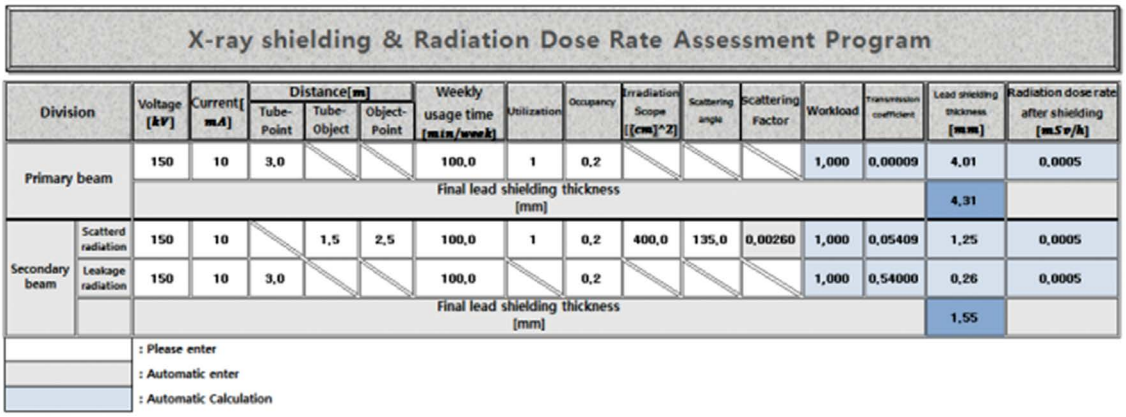


Fig. 4. Radiation controlled area drawing for calculation using the program.

였다. A지점은 엑스선 발생장치의 일차선 조사영역이므로 일차선 수식에 의해 계산되며, 엑스선 발생장치의 측면에 위치한 B지점은 조사물체에 의한 이차선의 영향을 받게 되므로 이차선 수식에 의해 계산된다.

먼저 A지점의 일차선 차폐 평가를 위해 X선 차폐 및 방사선량률 평가 화면에 일차선 전압 150 kV를 입력하면 데이터베이스에 저장되어 있는 전압 150 kV에 따른 십가층 값이 계산 프로그램 화면에 자동으로 입력됨을 확인 후, 그 외 다른 항목인 전류 10 mA, 선원~평가지점의 거리 3 m, 주당 가동시간 100 min·week^{-1}, 가동률 "1", 점유도 "0.2"의 입력을 수행하였고 저장된 수식에 따라 가동인자, 일차선의 투과계수(B_1), 일차선의 납 차폐 두께(t_1), 일차선의 납 차폐 후 방사선량률(P_1)이 계산됨을 확인하였다. 일차선의 납 차폐 두께(t_1)는 4.01 mm이며, 이 값에 HVL을 더하여 계산된 최종 납 차폐 두께는 4.31 mm로, 이 값은 수(手)계산 결과



X-ray shielding & Radiation Dose Rate Assessment Program

Division		Voltage [kV]	Current[mA]	Distance[m] Tube-Point	Tube-Object	Object-Point	Weekly usage time [min/week]	Utilization	Occupancy	Irradiation Scope [(cm)^2]	Scattering angle	Scattering Factor	Workload	Transmission coefficient	Lead shielding thickness [mm]	Radiation dose rate after shielding [mSv/h]
Primary beam		150	10	3,0			100,0	1	0,2				1,000	0,00009	4,01	0,0005
		Final lead shielding thickness [mm]													4,31	
Secondary beam	Scatterd radiation	150	10		1,5	2,5	100,0	1	0,2	400,0	135,0	0,00260	1,000	0,05409	1,25	0,0005
	Leakage radiation	150	10	3,0			100,0		0,2				1,000	0,54000	0,26	0,0005
		Final lead shielding thickness [mm]													1,55	

: Please enter
: Automatic enter
: Automatic Calculation

Fig. 5. X-ray shielding & radiation dose rate assessment program calculation result.

값과 일치하였다.

B지점의 경우 산란선과 누설선 항목에 일차선과 동일한 항목을 입력하였으며, 산란선의 경우 선원-물체간의 거리인 1.5 m 및 물체-평가지점 거리인 2.5 m를 입력하였다. 또한 산란각도 135°를 입력 후 데이터베이스에 저장된 산란인자 값이 자동 입력됨을 확인하였고, 저장된 수식에 따라 산란선과 누설선의 가동인자, 산란선의 투과계수(B_2) 및 누설선의 투과계수(B_3), 산란선의 납 차폐 두께(t_2) 및 누설선의 납 차폐 두께(t_3), 산란선의 납 차폐 후 방사선량률(P_1) 및 누설선의 납 차폐 후 방사선량률(P_2)이 계산됨을 확인하였다.

산란선의 납 차폐 두께(t_2)는 1.25 mm, 누설선의 납 차폐 두께(t_3)는 0.26 mm이며, 산란선과 누설선을 고려하여 계산된 이차선의 최종 납 차폐 두께는 1.55 mm로, 이 값은 수(手)계산 결과값과 일치하였다.

고찰 및 결론

본 연구에서는 Excel 프로그램을 이용하여 엑스선 차폐 및 방사선량률 평가 프로그램을 개발하였다. 프로그램은 X-ray Data Base 화면과 엑스선 차폐 및 방사선량률 평가 프로그램 화면으로 구성되어 있다. X-ray Data Base에 저장된 엑스선 관련 정보가 평가 프로그램 화면으로 연동되고, 저장된 수식을 통해 자동으로 계산된다. 본 프로그램은 일차선과 이차선으로 구분되어져 있어 평가지점에 따라 적용이 가능하도록 하였고, 차폐 기준 선량을 만족하는 납 차폐 두께 계산이 가능하도록 하였다.

본 평가 프로그램은 실무자가 엑스선 차폐체의 두께를 계산하고자 할 때 보다 쉽고 간단한 방법으로 사용할 수 있는 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램이다. 다만 수(手)계산 결과와의 비교뿐만 아니라 전산모사 프로그램 결과와의 비교를 통한 검증을 할 필요가 있다. 또한 콘크리트 및 철 등 다른 차폐체 정보를 추가함으로써 다양한 차폐체에 대한 계산이 가능하도록 한다면 더 높은 효용성을 기대할 수 있을 것으로 본다.

사 사

이 논문은 2020년도 남부대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

Jeong JW, Kang JT, Kim JW, Lee ML, Park SR and Song YH. 2019. Digital X-Ray Technology and Applications. *E.T.R.I.* **34**(5):1-13

Kim CS, Kang SS, Kim JH and Lee JS. 2014. Image Quality and Evaluation using Monte Carlo Simulation in Digital Mammography System. *J. of Korea Contents Association* **14**(6):247-254.

Kim SC and Kim JI. 2009. Production and Application of the Dose Calculation Program which used MS EXCEL and Bit System. *J.R.S.T.* **32**(1):39-43.

Park CS. 2010. A Study on Calculation of the Thickness of Concrete Protective Barrier of X-ray Radiographic Room. *J.R.S.T.* **33**(4):363-367.

Received: 23 January 2020
Revised: 15 February 2020
Revision accepted: 4 March 2020