

Derivation of a Verification Formula for the Dose Rate Contributing to the Maze Door of the 6 MV Treatment Room

Cheol Seo Park¹, Jong Eon Kim², Eun Bo Kang^{3,*}

¹Corporate Subsidiary Research Institute, Korea Best Engineering Co. Ltd

²Department of Radiological Science, Kaya University

³Department of Radiological Science, Dong-Eui Institute of Technology

Received: January 08, 2021. Revised: February 25, 2021. Accepted: February 28, 2021.

ABSTRACT

The purpose of this study is to derive an equation to verify the accuracy of the dose rate for each component calculated at the measurement point outside the maze door when designing the maze door of 6 MV X-ray beam. Based on the component-specific dose rate calculation formula for the measurement point outside the maze door described in NCRP Report 151 and IAEA Safety Report Series 47, the dose rate calculation formula for each component when applying the values of the drawing-based parameters and the dose rate calculation formula for each component when applying the values of conservative parameters are derived. From the two dose rate calculation formulas for each component, the dose rate verification formula for each component at the measurement point outside the maze door was derived. The resulting dose rate verification formula for each component at the measurement point outside the maze door can be compared and analyzed whether the dose rate for each component at the measurement point outside the maze door calculated by the designer falls within the range of the dose rate obtained from the derived dose rate verification formula for each component. This verification formula is considered to be practically useful in verifying the accuracy of the dose rate for each component calculated by the designer.

Keywords: Maze door, Primary beam, Scattered ray, Secondary barrier.

I. INTRODUCTION

선형가속기로부터 발생하는 6 MV X선 빔을 사용하는 치료실의 2차 방벽 부분에 배치되는 미로 도어는 차폐설계목표에 해당되는 선량률(주간 선량당량 또는 주간 흡수선량)이 미로 도어 바깥 측정 지점에서 측정되도록 설계되어 건축된다^[1-5]. 미로 도어의 건축이 완료된 후에, 차폐 평가로서 미로 도어 바깥 측정지점에서 선량률을 측정하여 차폐 설계목표인 선량률과 비교분석으로 차폐 적합성을 평가한다^[3]. 그러나 종종 측정된 선량률이 차폐 설계목표인 선량률과 일치하지 않는 경우가 발생한

다. 이러한 문제가 발생하는 근본적인 원인은 미로 도어 설계 시 도어 바깥 측정지점에 기여하는 선량률을 설계자의 잘못된 파라미터들의 값 적용으로 인한 계산의 실수로 추정된다. 이 문제를 해결하기 위한 방법으로, 설계 시 미로 도어 바깥 측정지점에 기여하는 선량률의 계산 정확성을 검증할 수 있는 식의 유도에 대한 필요성이 대두된다.

이 연구의 목적은 NCRP 보고서 151^[3]과 IAEA 안전 보고서 시리즈 47^[4]에 기술된 미로 도어 바깥 측정지점에 대한 성분별 선량률 계산식 기반으로 도어 기반 파라미터들의 값 적용 시 성분별 선량률 계산식과 보수적 파라미터들의 값 적용 시 선량률

* Corresponding Author: Eun Bo Kang

E-mail: kebwind@dit.ac.kr

Tel:+82-10-6503-9102

계산식을 유도한 후 성분별 선량률 검증식을 유도하는 데 있다.

미로 도어는 치료실 안에 설계된 미로(maze) 통로의 입구에 설치되는 도어이다. 미로 통로를 설계 시에는 도어의 바깥 측정지점에 측정되는 선량률을 낮추어 도어의 차폐 두께를 줄일 수 있다¹⁻⁵⁾. 반대로 치료실 안에 미로 통로 설계없이 입구에 설치되는 도어가 직접차폐식 도어이다. 이 직접차폐식 도어 바깥 측정지점에서 측정되는 선량률은 미로 도어보다 높게 측정되어, 도어의 차폐 두께가 미로 도어보다 두껍게 된다³⁻⁹⁾. 따라서 도어의 두께를 얇고 가볍게 만들기 위해 건축되는 도어가 미로 도어이고, 대부분의 병원에서 건축하는 도어이다.

이 연구는 미로 도어 바깥 측정지점에 대한 도면 기반 파라미터들의 값 적용 시 환자산란-벽산란, 헤드누설-벽산란, 1차 빔 환자투과-1차 방벽투과-벽산란 그리고 헤드누설-2차 방벽투과에 기인한 선량률 계산식과 보수적 파라미터들의 값 적용 시 환자산란-벽산란, 헤드누설-벽산란, 1차 빔 환자투과-1차 방벽투과-벽산란 그리고 헤드누설-2차 방벽투과에 기인한 선량률 계산식을 유도한 다음 성분별 선량률 검증식을 유도하였다.

II. MATERIAL AND METHODS

치료실 안에서 갠트리 회전축과 미로 축이 평행을 이루는 배치도는 Fig. 1에서 보여준다. 이 배치도 기반으로 도어 바깥 측정지점에 대한 환자산란-벽산란, 헤드누설-벽산란, 1차 빔 환자투과-1차 방벽투과-벽산란 그리고 헤드누설-2차 방벽투과에 기인하는 선량률의 계산식과 검증식을 유도하였다.

1. 미로 도어 바깥 측정지점에서 성분별 선량률 계산식

미로 도어 바깥 측정지점에서 성분별 선량률들은 아래와 같이 환자산란-벽산란, 헤드누설-벽산란, 1차 빔 환자투과-1차 방벽투과-벽산란, 그리고 헤드누설-2차 방벽투과에 기인하는 선량률 계산식으로 부터 산출된다.

1.1 환자산란-벽산란에 기인하는 선량률(DR_{ptSd})

Fig. 1의 (a)에서 보여주는 바와 같이, 환자 산란 후 도어의 끝 지점에서 보이는 벽(A_1)에서 산란하는 방사선에 의한 도어 바깥 측정지점에서 선량률($Sv/week$)의 계산식은 Eq. (1)로 유도된다.

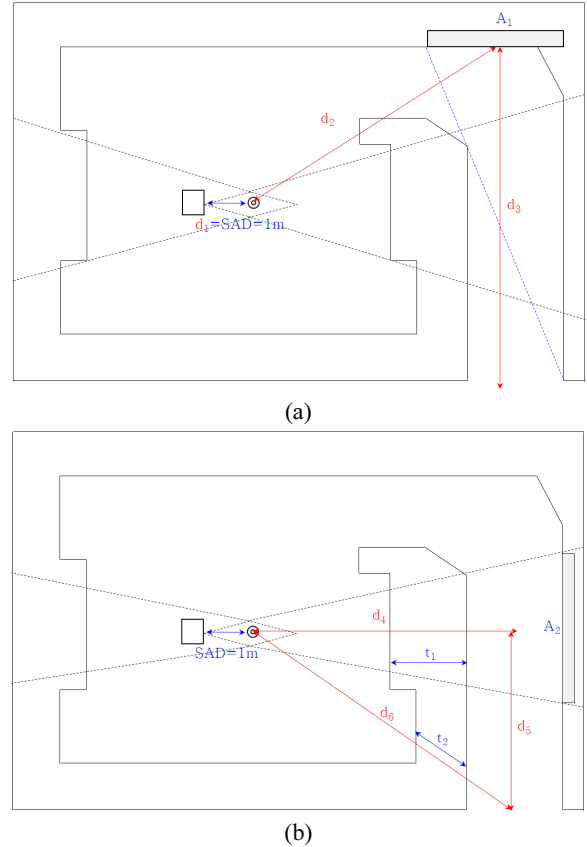


Fig. 1. The layout of the gantry axis of rotation and the maze axis in the treatment room.

$$DR_{ptSd} = \frac{a_{pt} \frac{F}{400} a_{0.5} A_1 W U_0}{d_1^2 d_2^2 d_3^2} \quad (1)$$

여기서 a_{pt} 는 400 cm² 입사빔에 대한 1 m거리에서의 선량 산란분율, $a_{0.5}$ 는 0.5 MeV 광자에 대한 벽 반사계수, A_1 은 도어의 끝지점에서 보이는 면적(m²), W 는 방사선 치료기기의 부하로서 일주일 동안 등선량중심(isocenter)으로 전달되는 흡수선량(Gy/week), U_0 는 사용계수(use factor)로서 임의의 1차 방벽으로 향하는 1차 빔 부하의 분율(0.25적용), d_1 은 선원에서 등선량중심까지의 거리(1 m), d_2 는 등선량중심에서 반사벽까지의 거리(m), d_3 은 반사

벽에서 도어까지의 거리(m)이다.

1.2 헤드누설-벽산란에 기인하는 선량률(DR_{hLS})

Fig. 1의 (a)에서 보여주는 바와 같이, 헤드누설빔의 벽을 투과한 후 벽(A_1)에서 산란하는 방사선에 의한 도어 바깥 측정지점에서 선량률(Sv/week)의 계산식은 Eq. (2)로 유도된다.

$$DR_{hLS} = \frac{a_1 \times A_1 \times 0.001 CWU_0}{d_2^2 d_3^2} \quad (2)$$

여기서 a_1 은 A_1 벽의 반사계수, 0.001(0.1%)는 헤드누설에 기인하는 선량 분율이고, C 는 IMRT인자^[10-12]로서 2~10 또는 그 이상의 값을 가질 수 있다.

1.3 1차 빔 환자투과-1차 방벽투과-벽산란에 기인하는 선량률(DR_{ptwTS})

Fig. 1의 (b)에서 보여주는 바와 같이, 1차 빔이 환자와 1차 방벽(미로 벽)을 투과한 후 벽에서 산란하는 방사선에 의한 도어 바깥 측정지점에서 선량률(Sv/week)의 계산식은 Eq. (3)로 유도된다.

$$DR_{ptwTS} = \frac{a_2 A_2 f WU_0 \times 0.1 \frac{t_1}{TVL}}{(d_1 + d_4)^2 d_5^2} \quad (3)$$

여기서 a_2 은 A_2 벽의 반사계수, A_2 는 내부 미로 개구의 면적(m^2), f 는 환자투과율, TVL 은 1차 빔에 대한 십가층, t_1 은 1차 방벽의 두께, d_4 는 등선량중심에서 1차 방벽 투과 후 미로지점(maze point)까지의 거리(m), d_5 는 반사벽에서 미로지점(maze point)까지의 거리(m)이다.

1.4 헤드누설-2차 방벽투과에 기인하는 선량률(DR_{hLT})

Fig. 1의 (b)에서 보여주는 바와 같이, 헤드누설빔이 2차 방벽(미로 벽)을 투과한 후 도어 바깥 측정지점에서 선량률(Sv/week)의 계산식은 Eq. (4)로 유도된다.

$$DR_{hLT} = \frac{0.001 CWU_0 \times 0.1 \frac{t_2}{TVL_L}}{d_6^2} \quad (6)$$

여기서 TVL_L 은 누설빔에 대한 십가층, t_2 는 2차 방벽의 빗각두께, d_6 은 등선량중심에서 2차 방벽 투과 후 도어까지의 거리(m)이다.

2. 미로 도어 바깥 측정지점에서 총선량률 계산식

미로 도어 바깥 측정지점에서 총선량률(DR_d)은 Eq. (1), (2), (3)과 (4)에서 계산된 선량률을 더한 후에 2.64를 곱하여 산출되며, 총선량률 계산식은 Eq. (5)로 기술된다.

$$DR_d = 2.64(DR_{ptSl} + DR_{hLS} + DR_{ptwTS} + DR_{hLT}) \quad (5)$$

여기서 2.64는 안전계수이다.

3. 도면 기반 파라미터들의 값 적용 시 미로 도어 바깥 측정지점에서 성분별 선량률 계산식

도면 기반 파라미터들의 값 적용 시 미로 도어 바깥 측정지점에서 성분별 선량률 계산식을 유도하기 위하여, 파라미터의 값들은 IAEA 안전 보고서 시리즈 47에 기재된 자료를 사용하였고, 이 파라미터들의 값은 Table 1에 보여준다.

Table 1. Drawing-based parameter values.

Parameter	value
a_{pt}	0.00297
$F[cm^2]$	400
$a_{0.5}(45^\circ\text{입사}, 0^\circ\text{반사})$	0.0203
U_0	0.25
$SAD[m]$	1
$a_1(45^\circ\text{입사}, 0^\circ\text{반사값})$	0.00635
$a_2(\text{수직입사}, 75^\circ\text{반사값})$	0.00260
f	0.23

Table 1의 파라미터들의 값들을 Eq. (1), (2), (3)과 (4)에 대입하여 미로 도어 바깥 측정지점에서 성분별 선량률 계산식을 유도하였다.

4. 보수적 파라미터들의 값 적용 시 미로 도어 바깥 측정지점에서 성분별 선량률 계산식

보수적 파라미터들의 값 적용 시 미로 도어 바깥 측정지점에서 성분별 선량률 계산식을 유도하기 위하여, 보수적 파라미터들의 값(최대값)은 IAEA 안전 보고서 시리즈 47에 기재된 자료를 사용하였고, 이 보수적인 파라미터들의 값은 Table 2에 보여 준다.

Table 2. Values of conservative parameters.

Parameter	Value
a_{pt}	0.0168
$F[\text{cm}^2]$	400
$a_{0.5}(45^\circ\text{입사, 최대반사값})$	0.0215
U_0	0.25
$SAD[\text{m}]$	1
$a_1(45^\circ\text{입사, 최대반사값})$	0.00769
$a_2(\text{수직입사, 최대반사값})$	0.00535
f	0.23

Table 2의 파라미터들의 값을 Eq. (1), (2), (3)과 (4)에 대입하여 미로 도어 바깥 측정지점에서 성분별 선량률 계산식을 유도하였다.

III. RESULT

도면 기반 파라미터들의 값 적용 시 미로 도어 바깥 측정지점에서 성분별 선량률 계산식은 Table 3과 같이 유도되었다.

Table 3. Dose rate calculation formula for each component at the measurement point outside the maze door when applying the values of the drawing-based parameters.

Dose rate for each component	Calculation formula
$DR_{ptSd}[\mu\text{Gy}/\text{week}]$	$\frac{15.1A_1 W}{d_2^2 d_3^2}$
$DR_{hLS}[\mu\text{Gy}/\text{week}]$	$\frac{1.59A_1 CW}{d_2^2 d_3^2}$
$DR_{ptwTS}[\mu\text{Gy}/\text{week}]$	$\frac{149.5 WA_2 \times 0.1 \frac{t_1}{TVL}}{(1+d_4)^2 d_5^2}$
$DR_{hLT}[\mu\text{Gy}/\text{week}]$	$\frac{250CW \times 0.1 \frac{t_2}{TVL_L}}{d_6^2}$

보수적 파라미터들의 값 적용 시 미로 도어 바깥

측정지점에서 성분별 선량률 계산식은 Table 4와 같이 유도되었다.

Table 4. Dose rate calculation formula for each component at the measurement point outside the maze door when applying the values of conservative parameters.

Dose rate for each component	Calculation formula
$DR_{ptSd}[\mu\text{Gy}/\text{week}]$	$\frac{90.3A_1 W}{d_2^2 d_3^2}$
$DR_{hLS}[\mu\text{Gy}/\text{week}]$	$\frac{1.923A_1 CW}{d_2^2 d_3^2}$
$DR_{ptwTS}[\mu\text{Gy}/\text{week}]$	$\frac{307.7 WA_2 \times 0.1 \frac{t_1}{TVL}}{(1+d_4)^2 d_5^2}$
$DR_{hLT}[\mu\text{Gy}/\text{week}]$	$\frac{250CW \times 0.1 \frac{t_2}{TVL_L}}{d_6^2}$

Table 3와 Table 4에서 나타낸 도면 기반 파라미터들의 값 및 보수적 파라미터들의 값 적용 시 미로 도어 바깥 측정지점에서 성분별 선량률 계산식들로부터 미로 도어 바깥 측정지점에서 성분별 선량률의 검증식은 Table 5와 같이 유도되었다.

Table 5. Dose rate verification formula for each component derived from the formulas for calculating the dose rate for each component shown in Tables 2 and 4.

Dose rate for each component	verification formula
$DR_{ptSd}[\mu\text{Gy}/\text{week}]$	$(15.1\sim 90.3) \times \frac{A_1 W}{d_2^2 d_3^2}$
$DR_{hLS}[\mu\text{Gy}/\text{week}]$	$(1.59\sim 1.923) \times \frac{A_1 CW}{d_2^2 d_3^2}$
$DR_{ptwTS}[\mu\text{Gy}/\text{week}]$	$(149.5\sim 307.7) \times \frac{WA_2 \times 0.1 \frac{t_1}{TVL}}{(1+d_4)^2 d_5^2}$
$DR_{hLT}[\mu\text{Gy}/\text{week}]$	$250 \times \frac{CW \times 0.1 \frac{t_2}{TVL_L}}{d_6^2}$

Table 5에 나타낸 성분별 선량률 검증식에 안전 계수 2.64를 곱하여 얻어진 미로 도어 바깥 측정지점에서 성분별 선량률 검증식은 Table 6으로 나타내었다.

Table 6. Dose rate verification formula for each component applying safety factor (2.64).

Dose rate for each component	verification formula
DR _{ptSa} [μGy/week]	$(39.9\sim 238.4) \times \frac{A_1 W}{d_2^2 d_3^2}$
DR _{hLS} [μGy/week]	$(4.2\sim 5.1) \times \frac{A_1 CW}{d_2^2 d_3^2}$
DR _{ptwTS} [μGy/week]	$(394.7\sim 812) \times \frac{WA_2 \times 0.1 \frac{t_1}{TVL}}{(1+d_4)^2 d_5^2}$
DR _{hLT} [μGy/week]	$660 \times \frac{CW \times 0.1 \frac{t_2}{TVL}}{d_6^2}$

IV. DISCUSSION

이 연구는 NCRP 보고서 151과 IAEA 안전 보고서 시리즈 47에 기술된 미로 도어 바깥 측정지점에 대한 성분별 선량률 계산식 기반으로 도면 기반 파라미터들의 값 적용 시 성분별 선량률 계산식과 보수적 파라미터들의 값 적용 시 선량률 계산식으로부터 성분별 선량률 검증식은 Table 5와 Table 6에 나타낸 식들로 유도하였다.

미로 도어 바깥 측정지점에서 성분별 선량률 검증식을 유도한 근본적인 이유는 미로 도어를 설계 시에 도어 바깥 측정지점에 기여하는 성분별 선량률 계산 시 설계자의 잘못된 파라미터들의 값 적용으로 잘못된 성분별 선량률이 산출된다. 이렇게 잘못 계산된 성분별 선량률의 합인 총선량률과 차폐설계목표인 선량률을 미로 도어의 차폐 두께 계산식에 대입하면 차폐 두께는 계산된다. 이 잘못 계산된 차폐 두께로 도어를 건축했을 시, 차폐 평가로서 미로 도어 바깥 측정지점에서 측정된 선량률은 차폐설계목표인 선량률과 일치하지 않게 된다. 잘못 건축된 도어는 재건축에 대한 필요한 시간 낭비와 추가 비용을 발생시키는 문제를 야기한다. 이러한 문제의 해결책으로 미로 도어 바깥 측정지점에서 성분별 선량률 검증식을 유도하게 되었다. 미로 도어 바깥 측정지점에서 성분별 선량률 검증식은 설계자가 계산한 미로 도어 바깥 측정지점에서 성분별 선량률이 유도된 성분별 선량률 검증식에서 얻어진 선량률 범위 안에 포함되는지 비

교분석함으로써 계산된 성분별 선량률의 정확성을 검증하고 또한 오차를 줄이는데 기여할 수 있다.

본 연구에서 유도한 미로 도어 바깥 측정지점에서 성분별 선량률 검증식은 1차 빔의 회전축이 미로 축과 평행인 경우에 대하여 유도하였다. 그리고 1차 빔의 회전축이 미로 축에 수직인 경우에 대하여 미로 도어 바깥 측정지점에서 성분별 선량률 검증식을 유도하여 사용할 수 있다.

V. CONCLUSION

이 연구는 NCRP 보고서 151과 IAEA 안전 보고서 시리즈 47에 기술된 미로 도어 바깥 측정지점에 대한 성분별 선량률 계산식 기반으로, 도면 기반 파라미터들의 값 적용 시 성분별 선량률 계산식 및 보수적 파라미터들의 값 적용 시 성분별 선량률 계산식을 유도하였다. 각각의 성분에 대한 두 개의 선량률 계산식들로부터, 미로 도어 바깥 측정지점에서 성분별 선량률 검증식이 유도되었다.

결과로서 얻어진 미로 도어 바깥 측정지점에서 성분별 선량률 검증식은 설계자가 계산한 미로 도어 바깥 측정지점에서 성분별 선량률이 유도된 성분별 선량률 검증식에서 얻어진 선량률 범위 안에 포함되는지 비교분석하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

Acknowledgement

본 연구는 동의과학대학교 교내연구비의 지원에 의해 수행되었다.

Reference

- [1] A. M. Morrow, "Radiation shielding and bunker design", Biomedical Journal of Scientific & Technical Research, Vol. 18, No. 1, pp. 13320-13330, 2019. <http://dx.doi.org/10.26717/BJSTR.2019.18.003106>
- [2] B. Mishra, T. Palani Selvam, P. K. Dash Sharma, "Structural shielding design of a 6 MV flattening filter free linear accelerator: Indian Scenario", Journal of Medical Physics, Vol. 42, No. 1, pp. 18-24, 2017. http://dx.doi.org/10.4103/jmp.JMP_99_16
- [3] NCRP Report No. 151, "Structural shielding design

- and evaluation for megavoltage X- and gamma-ray radiotherapy facilities", National Council on Radiation Protection & Measurements, 2005.
- [4] Safety Reports Series No. 47, "Radiation protection in the design of radiotherapy facilities", International Atomic Energy Agency, 2006.
- [5] P. H. McGinley, M. S. Miner, "A method of eliminating the maze door of medical accelerator rooms", Radiation Protection Management, Vol. 12, No. 5, pp. 29-37, 1995.
- [6] G. A. Ezzell, "Shielding evaluation and acceptance testing of a prefabricated, modular, temporary radiation therapy treatment facility", Journal of Applied Clinical Medical Physics, Vol. 5, No. 4, pp. 120-125, 2004.
<http://dx.doi.org/10.1120/jacmp.v5i4.2025>
- [7] M. F. Uddin¹, M. M. Ahasan, R. Khatun, S. Akter, H. M. Jamil, A. N. Monika, M. A. Rahman, "Shielding design basis and its calculation of high energy medical linac installed in bangladesh atomic energy commission, bangladesh", Universal Journal of Medical Science, Vol. 25, No. 2, pp. 27-31, 2017.
<http://dx.doi.org/10.13189/ujmsj.2017.050202>
- [8] M. C. Martin, "Linear Accelerator Direct Shielded Doors - An Approach for Calculating the Specialized Shielding Required Adjacent to the Door", World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, IFMBE Proceedings Vol. 25, No.3, pp. 431-434, 2009.
http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-03902-7_122
- [9] R. J. Barish, "Minimizing entrance door thickness for directentry radiotherapy rooms", Health Physics. Vol. 89, No. 2, pp. 168-171, 2005.
<http://dx.doi.org/10.1097/01.hp.0000160802.82833.9d>
- [10] D. Followill, P. Geis, A. Boyer, "Estimates of whole-body dose equivalent produced by beam intensity modulated conformal therapy", International Journal of Radiation Oncology·Biology·Physic, Vol. 38, No. 3, pp. 667-672, 1997.
[http://dx.doi.org/10.1016/s0360-3016\(97\)00012-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0360-3016(97)00012-6)
- [11] S. Mutic, D. A. Low, E. E. Klein, J. F. Dempsey, J. A. Purdy, "Room shielding for intensity-modulated radiation therapy treatment facilities", International Journal of Radiation Oncology·Biology·Physic, Vol. 50, No. 1, pp. 239-241, 2001.
[http://dx.doi.org/10.1016/s0360-3016\(01\)01463-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0360-3016(01)01463-8)
- [12] J. E. Rodgers, "Radiation therapy vault shielding calculational methods when IMRT and TBI procedures contribute", Journal of Applied Clinical Medical Physics, Vol. 2, No. 3, pp. 157-164, 2001.
<http://dx.doi.org/10.1120/jacmp.v2i3.2609>

6 MV 치료실의 미로 도어에 기여하는 선량률의 검증식 유도

박철서¹, 김종언², 강은보^{3,*}

¹케이비엔지니어링(주) 기업부설연구소

²가야대학교 방사선학과

³동의과학대학교 방사선학과

요 약

이 연구의 목적은 6 MV X선 빔의 미로 도어 설계 시 미로 도어 바깥 측정지점에서 계산되는 성분별 선량률의 정확성을 검증하는 식을 유도하는데 있다. NCRP 보고서 151과 IAEA 안전 보고서 시리즈 47에 기술된 미로 도어 바깥 측정지점에 대한 성분별 선량률 계산식 기반으로, 도면 기반 파라미터들의 값 적용 시 성분별 선량률 계산식 및 보수적 파라미터들의 값 적용 시 성분별 선량률 계산식을 유도하였다. 각각의 성분에 대한 두 개의 선량률 계산식들로부터, 미로 도어 바깥 측정지점에서 성분별 선량률 검증식은 유도되었다. 결과로서 얻어진 미로 도어 바깥 측정지점에서 성분별 선량률 검증식은 설계자가 계산한 미로 도어 바깥 측정지점에서 성분별 선량률이 유도된 성분별 선량률 검증식에서 얻어진 선량률 범위 안에 포함되는지 비교분석할 수 있다. 이 검증식은 설계자가 계산한 성분별 선량률의 정확성을 검증하는데 실무적으로 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

중심단어: 미로 도어, 1차 빔, 산란선, 2차 방벽

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	박철서	케이비엔지니어링(주)	상무이사
(공동저자)	김종언	가야대학교 방사선학과	부교수
(교신저자)	강은보	동의과학대학교 방사선과	조교수