Journal of Radiation Industry 14(3) : 247~254(2020)

전자선 선형가속장치 사용시설 방사선차폐 평가

정교성[1,2] · 이진우[1] · 이상봉[1] · 이현진[1] · 최대성[1] · 김종일[2,*]

[1]한국원자력연구원 첨단방사선연구소, [2]전북대학교 방사선과학기술학과

Radiation Shielding Evaluation of Electron Beam Linear Accelerators Facilities

Gyo-Seong Jeong[1,2], Jin-Woo Lee[1], Sang-Bong Lee[1], Hyun-Jin Lee[1], Dae-Seong Choi[1] and Chong-Yeal Kim[2,*]

[1]*KAERI, 29, Guemgu-gil, Jeongup-si, Jeollabuk-do 56212, Republic of Korea*
[2]*Jeonbuk National University, 567, Baekje-dearo, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea*

Abstract - A Linear Accelerators is a kind of particle accelerator that produces a beam of charged particles for the production of medical, industrial, and research purposes. 10 MeV and 2.5 MeV linear accelerators were installed at Electron Beam Process Demonstration Reaserch Facility, ARTI (Advanced Radiation Technology Institute, KAERI). The facility supports technical transfer of electron beam process technology and its commercialization through development of electron beam process of large size products and a pilot-scale demonstration research by utilizing electron beam generated from electron accelerators (10/2.5 MeV) and automatic irradiation system. 10 MeV electron accelerator supports electron beam irradiation for large size product (up to 10 m), continuous production process design, and optimization. 2.5 MeV electron accelerator supports electron beam irradiation for various type samples (solid, liquid, film, fiber, and tube type products), continuous production process design, and optimization. In order to operate such an electronic accelerator facility, it is necessary to obtain a license to use a radiation generating device in accordance with the Nuclear Safety Act, the enforcement decree and enforcement regulations of the same Act. The operator of an electronic accelerator facility must submit a radiation safety report as an attached document when applying for permission to use and pass the review by the regulatory agency, and the radiation safety report must include an assessment of the exposure dose when operating the accelerator. In this study using the Monte Carlo computer code, MCNP, calculates the radiation dose rate outside the irradiation room due to the radiation generated by the accelerators of two electron accelerators installed in the facility, and considers the operator's working time. Then, the evaluated exposure dose was compared and analyzed with the reference value according to domestic laws and regulations. It could be also helpful for organizations looking to build similar facilities.

Key words : Linear Accelerator, MCNP Code, Radiation protection, Nuclear Safety Act

* Corresponding author: Chong-Yeal Kim, Tel. +82-63-270-3433, Fax. +82-63-270-3434, E-mail. kimbo@jbnu.ac.kr

서 론

한국원자력연구원 첨단방사선연구소 전자선실증센터는 10 MeV 선형가속장치와 2.5 MeV 선형가속장치를 운영 중에 있으며, 원자력안전법에 규정된 방사선발생장치 사용시설 기술기준에 의거하여 운영하고 있다.

전자선실증센터에 설치된 선형가속장치는 방사선 산업체의 실증연구 지원을 통해 실용화 확대 및 미래 신산업 창출을 목표로 하고 있다. 선형가속장치의 용용분야는 다양하다. 연구·지원 분야로 베터리 및 태양전지 소재 등의 에너지용 소재 실증연구, 탄소섬유, 플로터 등 탄소복합소재 실증연구, 패치, 마이크로니들, 인공혈관 등 의료용 소재 실증연구 등이 있다. 따라서 전자선실증센터는 방사선 산업체 맞춤형 실증연구 지원을 통한 국내 방사선 산업 육성을 목적으로 하고 있다.

이러한 선형가속장치를 설치한 전자선실증센터의 안전한 운영을 위해 방사선차폐는 중요하다. 선형가속장치의 주변은 콘크리트 차폐벽으로 설치되어 있다. 선형가속장치 전자빔 또는 전자빔에 의한 제동복사선으로 인해 발생하는 방사선으로부터 조사실 외부에서의 작업자와 일반인의 피폭방사선량을 계산하여 원자력안전법 등 선량한도와 비교·분석하고, 동 시설과 같은 선형가속장치 사용시설을 운영하고자 하는 다른 기관들에게 표준지표를 제공하고자 함이 본 연구의 목적이다.

본 연구에서는, 몬테칼로 전산코드인 MCNP(Monte Carlo N-Particle Transport Code)를 사용하여, 전자선실증연구센터 내에 설치되는 전자가속기 2기의 가속기로 인해 발생하는 방사선으로 인한 조사실 외부에서의 방사선량률을 계산하고, 작업자의 작업시간을 고려하여 평가된 피폭선량을 국내 법규상 기준값과 비교·분석하였다.

재료 및 방법

1. 몬테칼로 코드(MCNP Code) 방법론 개요

본 연구에서는 몬테칼로 전산코드인 MCNP(Monte Carlo N-Particle Transport Code)를 사용하여 전자선실증센터 내에 설치되는 10 MeV 선형가속장치로 인해 발생하는 방사선으로 인한 시설 내외부의 방사선량을 측정할 것이다.

미국 로스알라모스 국립연구소(Los Alamos National Laboratory)에서 개발된 MCNP Code는 방사선 수송해석 분야에서 가장 널리 사용되는 코드로서 처음에는 핵분열과 같은 핵반응의 전산모사 용도로 사용되다가 점차 중성자, 광자, 전자를 포함한 입자의 반응에 대한 전산모사 능력을 갖추게 되었다. 이 코드는 다양한 물질 구조를 상세하게 모델링 할 수 있어서 복잡한 구조에서도 차폐계산이 가능하다(LANL 2003).

MCNP Code는 세계적으로 계산의 정확성을 인정받고 있을 뿐만 아니라 그동안 이 코드의 가장 큰 단점으로 거론되던 계산시간에 있어서도 최근 전산시스템의 소프트웨어 및 하드웨어의 발전으로 계산시간을 획기적으로 줄일 수 있게 되었다.

본 연구에서 사용한 광자의 핵단면적 라이브러리로는 ENDF/B-VI 기반의 MCPLIB04를 사용하였다(IAEA 1999).

2. 선형가속장치 빔덤프(Beam Dump)의 방사선원

다목적 전자선 실증연구센터 내에 설치될 10 MeV 및 2.5 MeV 에너지 전자빔 조사시설은 각각 30 kW 및 100 kW급 선형 가속기에서 전자빔을 생성한다. 본 조사시설의 가동목적은 가속기 하단에 위치한 컨베이어 시스템을 통과하는 물질을 조사하는 것이므로, 전자빔을 퍼뜨려 컨베이어 벨트 위를 지나가는 물체를 조사하게 된다.

전자선 조사시설 내에서 전자선이 조사되는 물체는 실리콘, 탄소 등 낮은 원자번호로 이루어져 있으며, 물체가 컨베이어를 지나지 않을 때 전자선을 직접 맞는 위치의 빔 덤프는 알루미늄 합금 재질로 이루어져 있다. 전자는 높은 원자번호의 원자와 반응했을 때 제동복사선을 더 많이 생성하므로, 본 계산에서는 모든 전자가 빔 덤프에 입사한다고 보수적으로 가정하여 방사선량을 계산하였다.

전자를 직접 수송하여 방사선량을 계산하는 데에는 많은

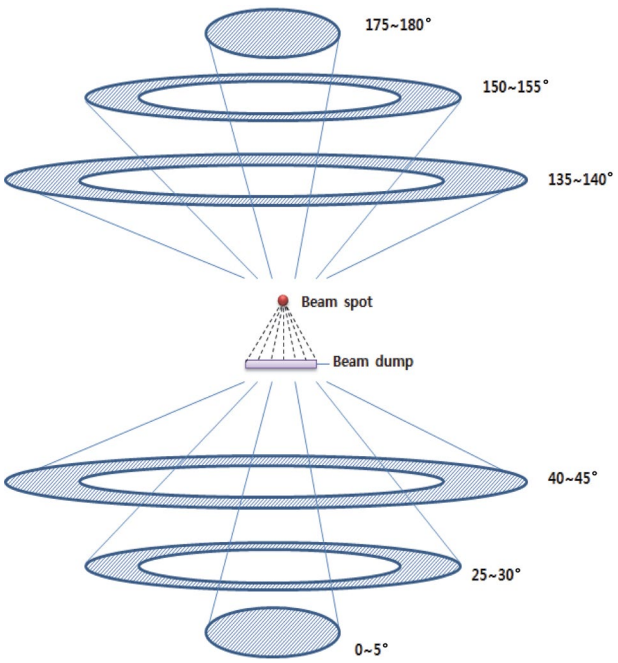

Fig. 1. 10 MeV linear accelerator source term.

Table 1. Linear Accelerators electrons per unit time

	10 MeV Accelerator	2.5 MeV Accelerator
Electron energy	$10\,\text{MeV} = 1.602 \times 10^{-12}\,(\text{J}\cdot\#^{-1})$	$2.5\,\text{MeV} = 4.005 \times 10^{-13}\,(\text{J}\cdot\#^{-1})$
Power	$30\,\text{kW} = 30{,}000\,(\text{J}\cdot\text{s}^{-1})$	$100\,\text{kW} = 100{,}000\,(\text{J}\cdot\text{s}^{-1})$
Electrons per unit time $(\#\cdot\text{s}^{-1})$	$30{,}000\,(\text{J}\cdot\text{s}^{-1})/1.602 \times 10^{-12}\,(\text{J}\cdot\#^{-1}) = 1.87 \times 10^{16}\,(\#\cdot\text{s}^{-1})$	$100{,}000\,(\text{J}\cdot\text{s}^{-1})/4.005 \times 10^{-13}\,(\text{J}\cdot\#^{-1}) = 2.50 \times 10^{17}\,(\#\cdot\text{s}^{-1})$

Table 2. Linear attenuation coefficient and survival probability of photon energy for concrete

Photon energy (MeV)	Linear attenuation coefficient (cm^{-1})	Survival probability at 2 meter $(e^{-\mu t})$	Survival probability at 3 meter $(e^{-\mu t})$
1.00×10^{-2}	4.82×10^{1}	0*	0
1.50×10^{-2}	1.49×10^{1}	0	0
2.00×10^{-2}	6.60×10^{0}	0	0
3.00×10^{-2}	2.26×10^{0}	0	0
4.00×10^{-2}	1.19×10^{0}	0	0
5.00×10^{-2}	8.01×10^{-1}	2.49×10^{-70}	0
6.00×10^{-2}	6.25×10^{-1}	5.06×10^{-55}	3.60×10^{-82}
8.00×10^{-2}	4.72×10^{-1}	9.38×10^{-42}	2.87×10^{-62}
1.00×10^{-1}	4.09×10^{-1}	3.04×10^{-36}	5.31×10^{-54}
1.50×10^{-1}	3.38×10^{-1}	4.05×10^{-30}	8.14×10^{-45}
2.00×10^{-1}	3.01×10^{-1}	7.46×10^{-27}	6.45×10^{-40}
3.00×10^{-1}	2.59×10^{-1}	3.52×10^{-23}	2.09×10^{-34}
4.00×10^{-1}	2.30×10^{-1}	1.09×10^{-20}	1.14×10^{-30}
5.00×10^{-1}	2.10×10^{-1}	6.20×10^{-19}	4.89×10^{-28}
6.00×10^{-1}	1.94×10^{-1}	1.52×10^{-17}	5.90×10^{-26}
8.00×10^{-1}	1.70×10^{-1}	1.75×10^{-15}	7.30×10^{-23}
1.00×10^{0}	1.53×10^{-1}	5.40×10^{-14}	1.25×10^{-20}
1.25×10^{0}	1.37×10^{-1}	1.38×10^{-12}	1.63×10^{-18}
1.50×10^{0}	1.24×10^{-1}	1.59×10^{-11}	6.36×10^{-17}
2.00×10^{0}	1.07×10^{-1}	4.92×10^{-10}	1.09×10^{-14}
3.00×10^{0}	8.70×10^{-2}	2.80×10^{-8}	4.69×10^{-12}
4.00×10^{0}	7.57×10^{-2}	2.68×10^{-7}	1.38×10^{-10}
5.00×10^{0}	6.84×10^{-2}	1.15×10^{-6}	1.23×10^{-9}
6.00×10^{0}	6.35×10^{-2}	3.08×10^{-6}	5.41×10^{-9}
8.00×10^{0}	5.71×10^{-2}	1.10×10^{-5}	3.63×10^{-8}
1.00×10^{1}	5.36×10^{-2}	2.22×10^{-5}	1.05×10^{-7}

*0: $\leq 1 \times 10^{-100}$

시간이 소요되므로 본 연구에서는 전자빔을 선원항으로 2차 입자를 생산하는 계산과 2차 입자를 선원항으로 방사선량을 계산하는 단계를 구분하였다. 10 MeV 전자빔으로 인해 발생하는 광자의 최대 에너지는 10 MeV이며, 빔 덤프 재질인 알루미늄과 광자의 반응으로 인해 중성자가 생성되는 문턱에너지(threshold energy)는 13.06 MeV이므로, 중성자는 발생하지 않으며, 2.59 MeV 전자가속기 역시 동일한 이유로 중성자가 발생하지 않으므로, 본 연구에서 중성자에 의한 영향은 고려하지 않고 광자만을 고려하였다(한국원자력연구원 2017).

2차 입자인 광자를 생성하기 위한 계산의 개념도는 Fig. 1에 나타내었다. 그림과 같이 빔을 빔 덤프 영역에 퍼뜨린 후, 빔 덤프 기준 반경 100 m의 공간을 진공으로 가정하여 빔 방향을 기준으로 5도 간격으로 각 각도별 반경 100 m 구의 표면에 도달하는 광자의 수 및 에너지 분포를 계산하였다. 이때, 반경 100 m의 넓은 공간을 이용하여 계산하는 이유는 빔 덤프 내 전자와 알루미늄 원소의 반응 위치에 따라 발생할 수 있는 각도별 광자 생성량의 오류를 최소화하기

위함이다(한국원자력연구원 2017).

선형가속장치에서 발생하는 단위 시간당 전자수는 Table 1과 같다.

한편, 광자 에너지에 따라 차폐체 투과능력의 차등이 있으므로, 빔 덤프에서 발생된 광자의 에너지 분포를 방사선량률 계산의 입력으로 적용해야 한다. 이 때 합리적으로 에너지 그룹을 나누기 위하여, 콘크리트 차폐체의 두께에 따른 광자 에너지별 투과 능력을 개략적으로 분석하였다.

Table 2은 본 연구에서 차폐체로 사용되는 콘크리트의 광자 에너지별 선형감쇠계수(linear attenuation coefficient)를 나타내었으며, 10 MeV 가속기시설의 경우 약 3 m, 2.5 MeV 가속기시설의 경우 약 2 m 두께의 콘크리트 차폐체로 이루어져 있으므로 해당 두께를 투과했을 때 광자 생존률도 함께 나타내었다. 이 계산에는 식 (1)이 사용되었다.

$$I(x) = I_0 e^{-(\frac{\mu}{\rho})\rho x} \quad = I_0 e^{-\mu x} \tag{1}$$

I: t 두께의 매질 투과 후 광자 에너지별 세기
I_0: 최초 광자 에너지별 세기
μ: 콘크리트 선형감쇠계수
t: 매질의 두께(300 cm)

Table 2와 같이 콘크리트 투과 시 생존확률은 광자의 에너지가 높을수록 급격하게 커진다. 1 MeV의 광자 입자는 2 m 콘크리트 투과 시 생존률이 0.1 MeV의 광자 입자의 10^{22}배 수준이며, 3 m 콘크리트 투과 시에는 10^{34}배 수준이다. 본 연구에서 고려하고 있는 전자가속기 시설과 같이 2 m 이상의 두꺼운 콘크리트 차폐체를 사용하는 시설에서는 고에너지 광자의 방사선량 기여도가 지배적일 것으로 예상된다.

이에 따라 중요도가 낮은 0.1 MeV 이하의 에너지 영역에서는 시설에 관계없이 일괄적으로 0.01 MeV 단위로 등분하여 에너지 스펙트럼을 계산하였다. 10 MeV 전자가속기 조사시설에 대해서는 3 m 두께 콘크리트 투과 시 광자 생존률 변화를 고려하여 0.1 MeV~1 MeV 영역은 0.1 MeV 단위, 1 MeV~10 MeV 영역은 1 MeV 단위로 구분하여 총 30 그룹 구조를 적용하였다. 한편, 2.5 MeV 전자가속기 조사시설에 대해 2 m 두께 콘크리트 투과 시 광자 생존률 변화를 고려하여 0.1 MeV~1 MeV 영역은 0.05 MeV 단위, 1 MeV~2.5 MeV 영역은 0.15 MeV 단위로 구분하여 총 38 그룹 구조를 적용하였다.

이와 같은 에너지 그룹 구조를 사용하여 두 가속기 시설 내 빔 덤프에서의 각도별 발생 입자 수 및 에너지 스펙트럼을 계산하였다. 각도별 광자 수와 주요 각도별 에너지 스펙트럼은 10 MeV 전자가속기 조사시설의 경우 Table 3 및 Fig. 2에 나타내었고, 2.5 MeV 전자가속기 조사시설의 경우 Table 4 및 Fig. 3에 나타내었다.

본 장에서 계산된 에너지 스펙트럼은 4장 및 5장의 방사선량률 계산의 입력으로 사용된다. 이때, 광자 수 및 에너지 계산 수행 시 발생하는 오차로 인해 보수적이지 않은 방사선량률 계산이 수행될 수 있다. 이에 대한 보수성을 확보하기 위해 에너지 구간 내 최댓값인 단일에너지 분포를 적용하여 방사선량률 계산을 수행하였다.

선형가속장치 빔덤프 반응의 계산된 에너지 스펙트럼은 방사선량률 계산의 입력으로 사용된다. 이때, 광자 수 및 에너지 계산 수행 시 발생하는 오차로 인해 보수적이지 않은 방사선량률 계산이 수행될 수 있다. 이에 대한 보수성을 확보하기 위해 본 연구에서는 에너지 구간 내 최댓값인 단일에너지 분포를 적용하여 방사선량률 계산을 수행하였다.

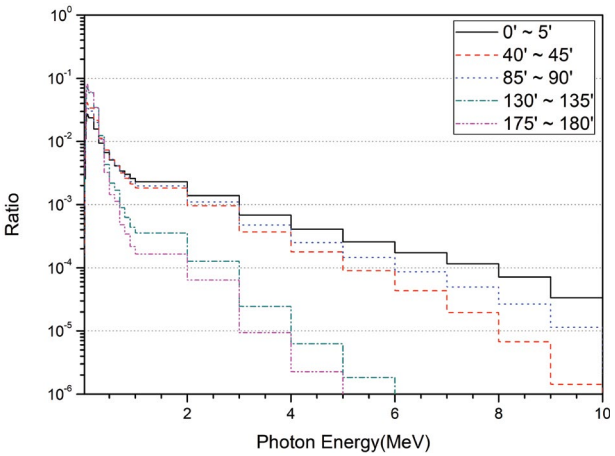

Fig. 2. Energy spectrum: 10 MeV electrons beam.

Table 3. Photons per angle: 10 MeV electrons beam

Angles	Photons (#)	Angles	Photons (#)
0~5	1.48×10^{13}	90~95	7.03×10^{13}
5~10	4.48×10^{13}	95~100	1.73×10^{14}
10~15	7.35×10^{13}	100~105	2.82×10^{14}
15~20	9.92×10^{13}	105~110	3.82×10^{14}
20~25	1.26×10^{14}	110~115	4.75×10^{14}
25~30	1.48×10^{14}	115~120	5.72×10^{14}
30~35	1.77×10^{14}	120~125	6.55×10^{14}
35~40	1.92×10^{14}	125~130	7.40×10^{14}
40~45	2.09×10^{14}	130~135	8.19×10^{14}
45~50	2.21×10^{14}	135~140	9.17×10^{14}
50~55	2.29×10^{14}	140~145	1.02×10^{15}
55~60	2.32×10^{14}	145~150	1.11×10^{15}
60~65	2.28×10^{14}	150~155	1.21×10^{15}
65~70	2.14×10^{14}	155~160	1.26×10^{15}
70~75	1.90×10^{14}	160~165	1.22×10^{15}
75~80	1.55×10^{14}	165~170	1.04×10^{15}
80~85	9.89×10^{13}	170~175	7.37×10^{14}
85~90	4.83×10^{13}	175~180	2.74×10^{14}

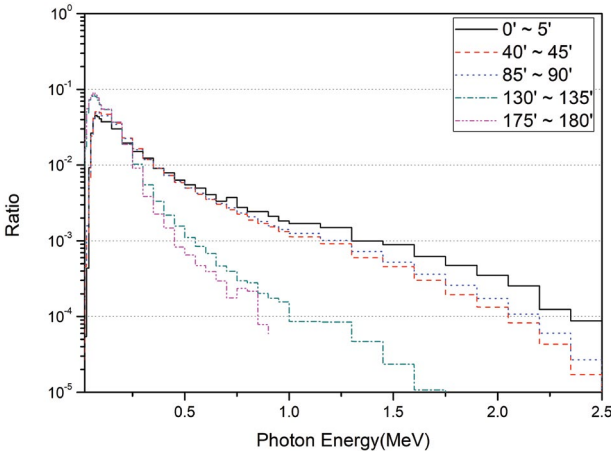

Fig. 3. Energy spectrum: 2.5 MeV electrons beam.

Table 4. Photons per angle: 2.5 MeV electrons beam

Angles	Photons (#)	Angles	Photons (#)
0~5	6.26×10^{13}	90~95	2.14×10^{14}
5~10	1.96×10^{14}	95~100	3.20×10^{14}
10~15	3.25×10^{14}	100~105	4.71×10^{14}
15~20	4.50×10^{14}	105~110	6.46×10^{14}
20~25	5.71×10^{14}	110~115	8.28×10^{14}
25~30	6.88×10^{14}	115~120	9.92×10^{14}
30~35	8.04×10^{14}	120~125	1.15×10^{15}
35~40	9.11×10^{14}	125~130	1.28×10^{15}
40~45	1.00×10^{15}	130~135	1.40×10^{15}
45~50	1.10×10^{15}	135~140	1.50×10^{15}
50~55	1.16×10^{15}	140~145	1.56×10^{15}
55~60	1.23×10^{15}	145~150	1.59×10^{15}
60~65	1.25×10^{15}	150~155	1.57×10^{15}
65~70	1.25×10^{15}	155~160	1.47×10^{15}
70~75	1.20×10^{15}	160~165	1.29×10^{15}
75~80	1.10×10^{15}	165~170	1.02×10^{15}
80~85	8.78×10^{14}	170~175	6.64×10^{14}
85~90	4.44×10^{14}	175~180	2.29×10^{14}

3. 선형가속장치 MCNP 모델링

3.1 10 MeV 선형가속장치 MCNP 모델링

10 MeV 선형가속장치 사용시설은 바닥으로부터 지붕까지의 높이가 11.45 m, 가로 31 m, 세로 16.15 m의 대단위 시설이다. Figs. 4~6은 MCNP 전산코드로 모델링한 시설물의 구조와 A~F까지의 방사선량 계산 위치를 나타내고 있다(한국원자력연구원 2017).

Fig. 4의 방사선량 계산위치 F의 바로 아래에는 가속기 설치 후 두께 45 cm의 철판으로 덮어 차폐를 보강하였다.

해당 시설은 크게 1층과 2층으로 분류할 수 있으며 각 층의 평면도를 Figs. 5, 6에 나타내었다. 1층은 Fig. 5와 같이 컨베이어 벨트 수송통로이며, 대규모 조사체의 출입을 위하여 방사선량 계산위치 B 방향에 도어가 설치되어 있다. 본 연구에서는 도어의 제작공차를 고려하여 차폐도어가 벽면과 1.5 cm 간격을 두고 설치되어 있는 상황을 가정하였다. 시설 2층(Fig. 6)의 방사선량 계산위치 E에는 15 cm 철판 재질의 도어가 설계에 반영되어 있으나, 이를 모델링하지 않는 보수적인 상황을 적용하여 방사선량을 계산하였다(한국원자력연구원 2017).

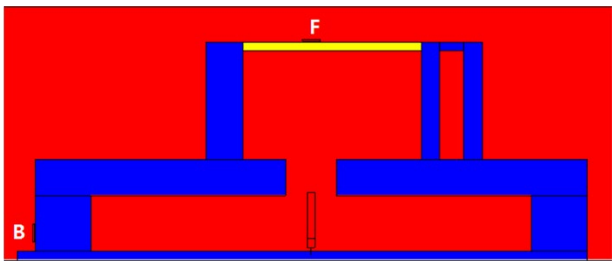

Fig. 4. MCNP Model of 10 MeV linear accelerator facility (side view).

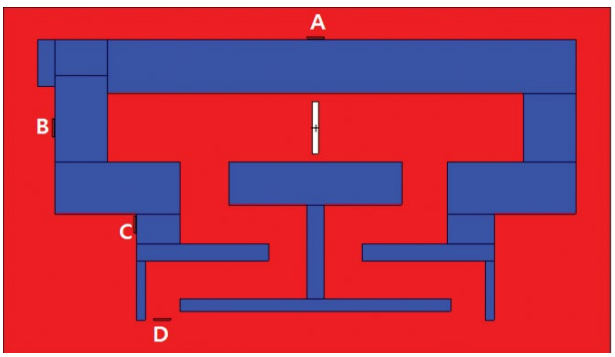

Fig. 5. MCNP Model of 10 MeV linear accelerator facility (side view) (1st floor plan).

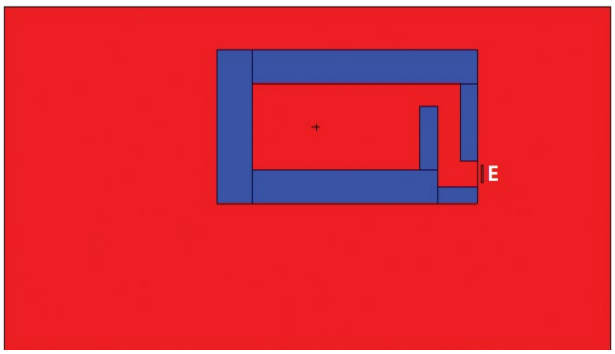

Fig. 6. MCNP Model of 10 MeV linear accelerator facility (side view) (2nd floor plan).

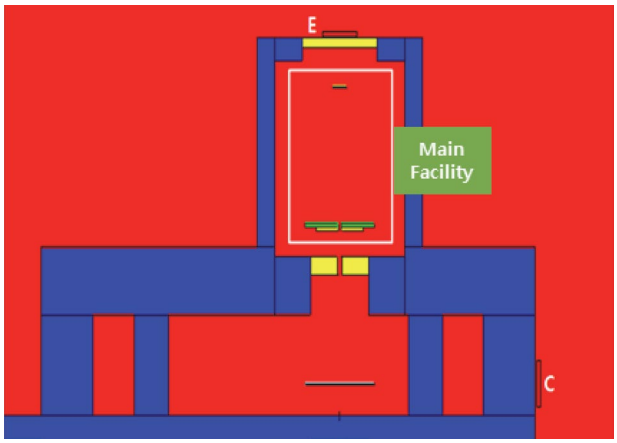

Fig. 7. MCNP Model of 2.5 MeV linear accelerator facility (side view).

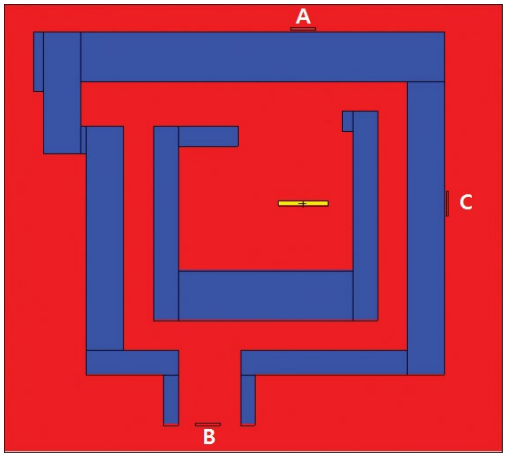

Fig. 8. MCNP Model of 2.5 MeV linear accelerator facility (side view) (1st floor plan).

3.2 2.5 MeV 선형가속장치 MCNP 모델링

2.5 MeV 전자가속기 조사시설은 바닥으로부터 지붕까지의 높이가 8.3 m, 가로 16.5 m, 세로 15.8 m의 시설이다. Figs. 7~9는 MCNP 전산코드로 모델링한 시설물의 구조와 A~E까지의 방사선량 계산 위치를 나타내고 있다(한국원자력연구원 2017).

Fig. 7의 방사선량 계산위치 E는 가속기 설치 후 두께 12 cm의 철판으로 덮을 예정이므로 이를 모사하였다. 또한, 빔덤프에서 발생한 광자가 E 지점의 방사선량에 미치는 영향을 합리적으로 반영하기 위하여, 가속기 내에 존재하는 수많은 구조물 중 차폐에 영향을 미칠 것으로 예상되는 세 가지 주요 구조물을 모사하였으며 그 위치는 Fig. 7에 나타나 있다. 가속기 구조물 중 최하단에 있는 구조물은 스테인리스 재질로 두께 7 cm, 반경 70 cm의 실린더형 구조물에 중심부에 반경 5 cm의 홀이 있는 도넛 형태이다. 이 구조물의

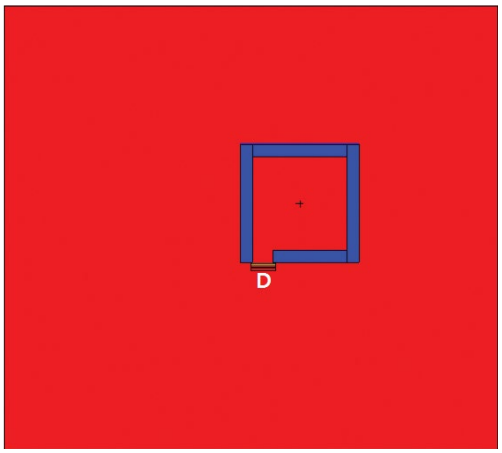

Fig. 9. MCNP Model of 2.5 MeV linear accelerator facility (side view) (2nd floor plan).

Table 5. density and elemental composition

Material	Density (g·cm^{-3})	Element	Content (wt%)
Air	0.0012047	N	78.7
		O	21.3
Concrete	2.3	H	0.6
		O	51.0
		Si	32.3
		Ca	8.4
		Al	4.7
		Na	1.7
		Fe	1.3
Aluminium	2.7	Al	100.0
Iron	7.86	C	0.4
		Mn	1.0
		P	0.03
		S	0.03
		Si	0.04
		Ni	0.4
		Cr	0.2
		Mo	0.1
		V	0.1
		Fe	97.7

상단에 맞닿아있는 구조물 역시 도넛 형태이고 구리 재질로 이루어져 있으며, 두께 8 cm, 반경 100 cm의 실린더 형태 중심부에 반경 5 cm의 홀이 있다. 또한 가속관 상부는 스테인리스 재질로 구성된 반경 20 cm, 높이 4 cm의 실린더형 구조물로 구성되어 있다.

시설은 크게 1층과 2층으로 분류할 수 있으며, 1층은 Fig. 8과 같이 컨베이어 벨트 수송통로이고, 2층은 가속기가 위

Table 6. ICRP-74 flux-dose conversion factors

Energy (MeV)	$(mSv \cdot h^{-1})/(\# \cdot cm^{-2}\ s^{-1})$	Energy (MeV)	$(mSv \cdot h^{-1})/(\# \cdot cm^{-2}\ s^{-1})$
0.01	2.20×10^{-7}	0.5	1.06×10^{-5}
0.015	2.99×10^{-6}	0.6	1.24×10^{-5}
0.02	3.78×10^{-6}	0.8	1.58×10^{-5}
0.03	2.92×10^{-6}	1	1.87×10^{-5}
0.04	2.30×10^{-6}	1.5	2.48×10^{-5}
0.05	1.98×10^{-6}	2	3.10×10^{-5}
0.06	1.84×10^{-6}	3	4.00×10^{-5}
0.08	1.91×10^{-6}	4	4.82×10^{-5}
0.1	2.20×10^{-6}	5	5.58×10^{-5}
0.15	3.20×10^{-6}	6	6.34×10^{-5}
0.2	4.32×10^{-6}	8	7.78×10^{-5}
0.3	6.48×10^{-6}	10	9.22×10^{-5}
0.4	8.57×10^{-6}		

Table 7. Calculation Results of 10 MeV linear accelerator

	Points	Dose rate $(\mu Sv \cdot h^{-1})$	Relative error (%)*
A	backward	0.0014	0.9
B	entrance of facility	0.00035	4.4
C	side	0.0080	0.5
D	entrance of conveyor	0.35	3.8
E	entrance of 2^{nd} floor	0.39	4.2
F	roof	1.53	7.1

*relative error $= \frac{\sigma_{\hat{x}}}{\hat{x}}$

치하며 Fig. 9와 같이 접근하기 위한 도어가 설치되어 있다. 방사선량 계산위치 D 방향에는 15 cm 철판 재질의 도어로 구성되어 있으며, 본 계산에서는 공차를 고려하여 차폐도어가 벽면과 1.5 cm 간격을 두고 설치되어 있는 상황을 가정하였다(한국원자력연구원 2017).

또한 계산에서 사용된 물질은 공기, 콘크리트, 철, 알루미늄으로 각 물질의 밀도 및 원소별 함량은 Table 5와 같다.

결 과

1. 10 MeV 선형가속장치 방사선량 계산 결과

10 MeV 선형가속장치 사용시설 외부에서의 방사선량 계산에는 MCNP의 기본 tally인 F4 tally를 사용하였다. F4 tally는 공간에서의 선속(particles $\cdot cm^{-2}\ sec^{-1}$)을 계산하므로 이를 선량으로 환산하는 선속 선량 환산인자(flux-to-dose conversion factor)가 필요하며, 본 연구에서는 Table 6과 같이 ICRP-74를 적용하였다(LANL 2003).

Table 8. Calculation Results of 2.5 MeV linear accelerator

	Points	Dose rate $(\mu Sv \cdot h^{-1})$	Relative error (%)*
A	backward	0.0019	1.8
B	entrance of facility	0.17	1.0
C	side	0.000039	7.6
D	entrance of conveyor	0.03	2.1
E	entrance of 2^{nd} floor	0.52	2.5

*relative error $= \frac{\sigma_{\hat{x}}}{\hat{x}}$

10 MeV 선형가속장치 사용시설은 Figs. 4~6에 나타난 바와 같이 두꺼운 차폐체와 미로 구조를 가지고 있어 몬테칼로 전산해석을 장시간 수행하더라도 오차의 감소율이 적다. 이를 효율적으로 계산하기 위한 분산 감소 기법으로서 weight window를 생성하여 이를 입력문에 적용하였다. 상기의 사항을 적용하여 사용시설에 대해 방사선량률 계산 결과를 Table 7에 나타내었다(한국원자력연구원 2017).

2. 2.5 MeV 선형가속장치 방사선량 계산 결과

2.5 MeV 선형가속장치 사용시설 외부에서의 방사선량 계산은 10 MeV와 동일하게 MCNP의 기본 tally인 F4 tally를 사용하였고 환산인자 또한 ICRP-74를 적용하였다(LANL 2003).

2.5 MeV 선형가속장치 사용시설 또한 Figs. 7~9에 나타난 바와 같이 두꺼운 차폐체와 미로 구조를 가지고 있어 분산 감소 기법으로서 weight window를 입력문에 적용하였다. 상기의 사항을 적용하여 사용시설에 대해 방사선량률 계산 결과를 Table 8에 나타내었다(한국원자력연구원 2017).

결 론

두 조사시설의 모든 방사선량률 계산 위치에서 F4 tally의 신뢰성을 기대할 수 있는 상대오차 10% 이하까지 계산하였다. 10 MeV 전자가속기 조사시설에서는 천장인 F 지점에서의 방사선량률이 1.53 $\mu Sv \cdot h^{-1}$로 가장 높게 나타나고 있으며, 2.5 MeV 전자가속기 조사시설에서는 천장인 E 지점에서의 방사선량률이 0.52 $\mu Sv \cdot h^{-1}$로 가장 높게 나타나고 있다(LANL 2003).

국내 원자력안전법 시행령 별표에서는 방사선 작업 종사자의 제한 선량을 5년간 100 mSv 미만, 연간 50 mSv 미만으로 제한하고 있다. 따라서, 작업자가 연속적으로 작업할 수 있는 연간선량 기준치는 20 mSv가 된다(원자력안전법).

방사선 작업 종사가 매일 8시간, 주 5일, 연간 50주 동안 근

무하면, 작업자는 연간 2000시간 동안 작업하게 된다. 작업자가 조사시설 외부의 최대방사선량률 지점(10 MeV 전자가속기 천장, 1.53 $\mu Sv \cdot h^{-1}$)에서 2000시간 동안 작업했을 때 받는 연간선량은 3.06 mSv로 상기 안전기준인 연간 20 mSv의 15% 수준이므로 작업자 피폭선량 제한치를 만족한다.

참 고 문 헌

원자력안전법. 동법 시행령 및 동법 시행규칙.

한국원자력연구원. 2017. 전자선실증센터 사용변경허가 방사선안전보고서, 21-23.

한국원자력연구원. 2009. 방사선 장해와 방호, 40-55.

IAEA. 1999. Handbook on Photonuclear Data for Applications Cross-sections and Spectra, IAEA-TECDOC-1178.

LANL. 2003. MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, LA-CP-03-0245.

Received: 2 July 2020
Revised: 19 July 2020
Revision accepted: 23 August 2020