

A Study on Photon Characteristics Generated from Target of Electron Linear Accelerator for Container Security Inspection using MCNP6 Code

Chang-Ho Lee,¹ Jang-Oh Kim,¹ Yoon-Ji Lee,¹ Chan-hee Jeon,¹ Ji-Eun Lee,¹ Byung-In Min^{2,*}

¹Department of Emergency Management, Inje University

²Department of Nuclear Applied Engineering, Inje University

Received: June 01, 2020. Revised: June 29, 2020. Accepted: June 30, 2020

ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate the photon characteristics according to the material and thickness of the electrons incidented through a linear accelerator. The computer simulation design is a linear accelerator target consisting of a 2 mm thick tungsten single material and a 1.8 mm and 2.3 mm thick tungsten and copper composite material. In the research method, First, the behavior of primary particles in the target was evaluated by electron fluence and electron energy deposition. Second, photons occurring within the target were evaluated by photon fluence. Finally, the photon angle-energy distribution at a distance of 1 m from the target was evaluated by photon fluence. As a result, first, electrons, which are primary particles, were not released out of the target for electron fluence and energy deposition in the target of a single material and a composite material. Then, electrons were linearly attenuated negatively according to the target thickness. Second, it was found that the composite material target had a higher photon generation than the single material target. This confirmed that the material composition and thickness influences photon production. Finally, photon fluence according to the angular distribution required for shielding analysis was calculated. These results confirmed that the photon generation rate differed depending on the material and thickness of the linear accelerator target. Therefore, this study is necessary for designing and operating a linear accelerator use facility for container security screening that is being introduced in the country. In addition, it is thought that it can be used as basic data for radiation protection.

Keywords: Container security inspection, MCNP6, Linear accelerator, Target, Photon characteristics

I. INTRODUCTION

전 세계적으로 사용되는 해상 운송 컨테이너에 대한 보안 검색은 2001년 9·11 테러 이후 컨테이너를 통한 테러 수단을 방지하기 위해 그 중요성이 대두되었다.^[1] 해상 컨테이너 화물에 대한 보안 검색은 비파괴 검색(Non Intrusive Inspection, NII)으로 한다.^[2] 선형가속기는 비파괴 검색(NII)을 위해 고 에너지 X-Ray를 발생시켜 컨테이너 내부를 영상(Imaging)화하는 장비이다.

컨테이너 검색기 세계 시장 규모는 매년 증가하

고 있다. 해양수산부(2017)^[3] 보도 자료에 따르면 세계 컨테이너 검색 시장 규모는 2015년 기준 약 8억 5천만 달러이며, 2019년도에는 약 15억 달러까지 성장할 것으로 예상했다. 또한, 해양수산부에서 2017년에 수출용 컨테이너 검색기 테스트 베드를 광양항에 1곳 설치하였다. 관세청 컨테이너검색기는 2002년 부산항 7부두에 처음 도입되었다. 현재는 전국 주요 항만에 14대가 설치되어 운영 중이다.

컨테이너 보안 검색을 위해 사용하는 가속기는 주로 전자 선형가속기이다. 컨테이너 보안 검색 영상화를 위해 방사선 에너지는 3, 6 또는 9 MeV를

* Corresponding Author : Byung-In Min E-mail : rimbi@inje.ac.kr
Address : 197, Inje-ro, Gimhae-si, Gyeongsangnam-do, Republic of Korea

사용하고 있으며, 대부분 9 MeV 선형가속기를 운영하고 있다.^[4]

컨테이너 검색기에 사용되는 선형가속장치를 설치 및 운영을 위해서는 원자력안전법에 따라 차폐 해석이 요구된다.^[5] 전산모사를 통한 차폐해석을 위해서는 광자(photon) 특성 평가가 필요하다.^[6] 컨테이너 검색용 선형가속기 연구 분야는 대부분 영상처리 연구가 많다. 반면에, 컨테이너 검색용 9 MeV 선형가속기에서 생성되는 광자에 관한 특성 연구는 미흡하다.

선형가속기 표적(target)은 입사된 전자가 상호작용하여 광자(photon)를 생성하는 역할을 한다. 광자 생성은 표적을 구성하는 물질과 두께에 따라 영향을 미치게 된다.^[7,8]

이에 본 연구에서는 컨테이너 보안 검색용 선형가속기 표적을 구성하는 물질과 두께가 다른 단일물질 표적과 복합물질 표적에서의 광자 특성 평가를 하고자 하였다.

II. MATERIAL AND METHODS

본 연구는 컨테이너 보안 검색용으로 사용되는 9 MeV 선형가속장치 차폐해석에 적용되는 광자 특성을 평가는 선형가속기 설계 및 운영 시 인허가에 적용해야 한다. 이러한 차폐해석에는 방사선 고유한 확률론적 행동으로 몬테카를로 방법으로 전산모사 하는 일반적인 도구이다.^[9,10] 이를 위해, 미국 로스앨러모스 국립 연구소에서 개발한 몬테카를로 방사선 수송 코드인 MCNP6 (ver.1.0)을 사용하였다.^[11]

컨테이너 보안 검색에 사용되는 선형가속기 표적은 두께와 물질 밀도에 따라 다른 변환 효율을 갖는다.^[7,8,12] 따라서 본 연구에서는 선형가속기 표적을 단일물질(single material)과 복합물질(composite material)로 구성한다. 그리고, 단일물질과 복합물질 표적 내에서 전자 거동과 광자 특성 차이를 평가하고자 한다.

이 연구 결과에 대한 신뢰성 확보를 위해 본 연구 결과와 W. R. Nelson^[11] 연구의 0°, 10°, 20° 및 30°에서 발생한 이차 광자를 비교하여 신뢰성을 확

보하고자 한다. 선형가속장치에서 발생하는 X-ray 조사야(field size) 각도인 30°로 비교하였다.^[13]

1. 전산 모사 설계

본 연구에서 사용한 전자 선형가속기 표적 모형은 단일물질과 복합물질로 설정하였다. 단일물질 표적은 한국원자력연구원^[6]에서 개발한 선형가속기 자료이며, 복합물질 표적은 W. R. Nelson^[12] 자료에 근거하여 표적을 모형화하였다. 복합물질 표적은 텅스텐(W)과 구리(Cu)로 구성되었으며, 단일물질 표적은 텅스텐(W)으로만 구성되었다.

Fig. 1과 같이 복합물질 표적에서 일차 입자(primary particle)와 부딪치는 텅스텐은 원자번호(Z=74)가 높은 물질로 이차 광자 생성에 중요한 역할을 한다.^[7] 복합물질 표적에 사용되는 구리(Z=29)는 열 전도성이 높은 물질로 전자빔(electron beam)에서 발생하는 열을 발산하며, 텅스텐 표적을 통과하는 전자를 멈추게 하는 역할을 한다.^[14,15]

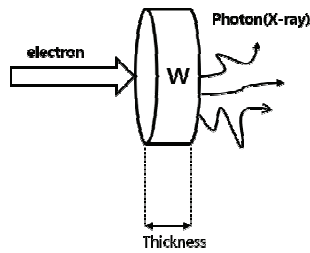
Fig. 2는 모사된 선형가속기 표적이다. Table 1과 같이 단일물질 표적은 디스크 형태로 두께 2 mm, 지름 30 mm인 텅스텐으로만 구성되어 있다. 복합물질 표적은 디스크 형태로 지름이 4 mm이고 두께 1.8 mm 텅스텐과 두께 2.5 mm인 구리로 구성되어 있다. Table 2는 표적에 사용되는 텅스텐과 구리의 밀도 및 조성이다.^[16,17]

Table 1. Geometry information of the target

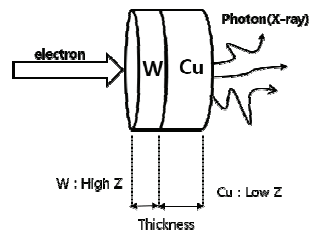
Type	Composition	Dimension [mm]		Energy [MeV]
		Thickness	Diameter	
single material	Tungsten(W)	2	30	9
composite material	Tungsten(W)	1.8	4	9
	Copper(Cu)	2.5	4	

Table 2. Component and density for target material

Material	Density [g/cm ³]	Isotope	
		Isotope	Abundance [%]
Tungsten(W)	19.30	¹⁸⁰ W	0.120
		¹⁸² W	26.498
		¹⁸³ W	14.314
		¹⁸⁴ W	30.642
		¹⁸⁶ W	28.426
Copper(Cu)	8.96	⁶³ Cu	69.17
		⁶⁵ Cu	30.83



(a) single material target



(b) composite material target

Fig. 1. Geometry of MCNP6 input for the calculation from (a) a single and (b) composite material target.

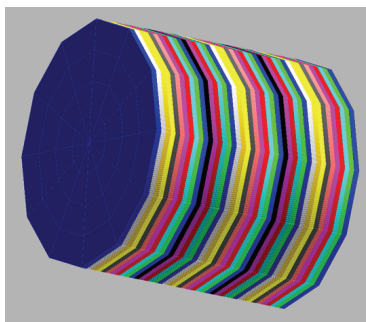


Fig. 2. Geometry of MCNP6 output for the calculation from a 2mm thick target divided by 1mm thick.

2. 특성평가

본 연구는 이수민(2019)^[6], W. R. Nelson(1998)^[12], 이철우(2016)^[18], Xu Hai-Bo(2010)^[19], 이 사용하였던 전자 거동 및 광자 특성 평가 방법을 적용하여 평가하였다.

2.1 표적 내 전자 플루언스

선형가속기 가속관(accelerator tube)에서 가속된 일차 입자가 표적 내에서 거동과 표적 외부로 방출되는지를 평가하기 위해 2 mm 두께의 단일물질 표

적과 4.3 mm 두께의 복합물질 표적을 0.1 mm 두께로 나누어 모형화하였다. Tally cards는 F4를 사용하여 표적에서의 두께 변화에 따른 전자 플루언스(Fluence)를 평가하였다.

2.2 표적 내 전자 에너지 축적

선형가속기 가속관에서 가속된 전자가 표적과 상호작용하여 발생한 전자 에너지 축적(energy deposition)은 F6 Tally cards 사용하여 표적에서 0.1 mm 두께 변화에 따라 평가하였다.

2.3 표적 내 광자

선형가속기 가속관(accelerator tube)에서 가속된 일차 입자가 표적 내에서 광자로 변환되는지 평가하기 위해 2 mm 두께의 단일물질 표적과 4.3 mm 두께의 복합물질 표적을 0.1 mm 두께로 나누어 모형화한다. 그리고, Tally cards는 F4를 사용하여 표적에서의 두께에 따른 광자 플루언스(Fluence)를 평가하였다.

2.4 광자 각에너지(Angular-Energy)

표적에서 발생하는 광자 특성을 평가하기 위해 각-에너지 분포를 계산하였으며, 전산모사에 사용되는 에너지는 10 keV ~ 9 MeV 에너지 구간을 100 그룹으로 분할 적용하였다. 각 분포는 10° 간격으로 평가하였으며, Tally cards는 F4를 사용하였다.^[6] 일차 입자 및 이차 광자에 대한 컷-오프(cut-off) 에너지는 10 keV로 설정하였다.^[8,12] Fig. 3은 표적에서 발생한 광자 분포와 각-에너지 평가 모식도를 보여준다.^[6]

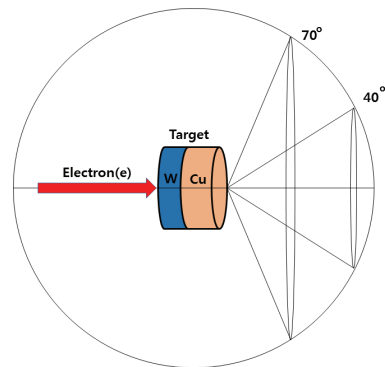


Fig. 3. Schematic diagram of angular-energy distribution modeling for secondary photons.

III. RESULT

본 연구에서 계산된 결과값의 상대 표준 오차는 MCNP 권고에 따른 모든 계산에서 3% 미만으로 유지되었다.^[8] MCNP6 코드에 계산된 결과는 일차 입자 및 이차 광자 1개에 대한 확률적 수치이다.^[20]

1. 전산모사 타당성 검토

본 연구 결과에 대한 타당성 검토를 위해 W. R. Nelson 자료와 0°, 10°, 20° 및 30°에서 발생한 이차 광자 플루언스 자료와 비교하였다.^[12]

Fig. 4와 같이 측정된 광자 각-에너지 누적(stack) 결과는 W. R. Nelson 결과의 0°, 10°, 20° 및 30°와 유사함을 확인할 수 있었다.^[12,13] 이를 통해 표적 설계에 대한 신뢰성을 확보하였다.

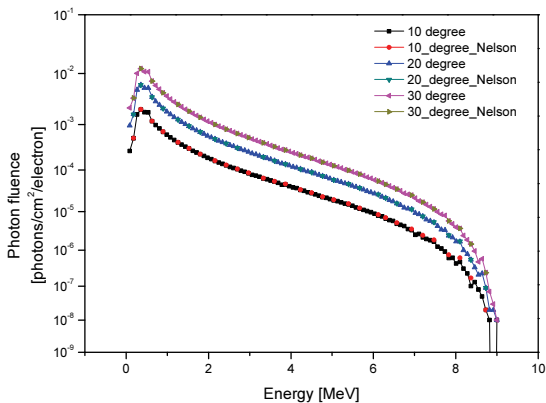


Fig. 4. Comparison result according to the angle between this study and the Nelson study.

2. 표적 내 전자 거동 평가

일차 입자인 전자가 표적에 입사할 때 표적 두께 0.1 mm씩 변경될 때 전자 거동 변화를 보기 위해 전자 플루언스를 평가하였다.

Fig. 5와 같이 전자 플루언스 결과는 단일물질 표적과 복합물질 표적에서 전자 플루언스 최대값이 0.5 mm 두께에서 4.07E-01 electrons/cm² 와 2.26E+01 electrons/cm²로 나타났다. 단일물질 표적에서 전자 플루언스 최솟값은 2.0 mm 두께에서 2.32E-02 electrons/cm²이고, 복합물질 표적에서는 4.3 mm 두께에서 5.70E-02 electrons/cm²로 나타났다. Table 3은

단일물질과 복합물질 표적에서의 전자 플루언스에 대한 평균값과 오차를 보여준다.

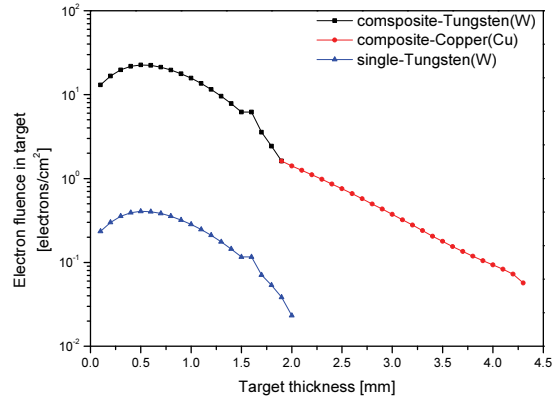


Fig. 5. Result of an electron fluence when the target thickness changes by 1 mm.

Table 3. Result of electron fluence when the target thickness changes by 1 mm

Target Type	Mean [electrons/cm ²]	Error
Single Material	1.99260E-01	0.0007
Composite Material	6.14500E+00	0.0006

이러한 결과는 단일물질과 복합물질 표적 모두에서 0.5 mm 두께까지 빌드 업(Build-up)되었다가 이후부터 감소하는 것을 나타낸다. 또한, 표적 두께에 따른 전자 플루언스는 2 mm 두께 단일물질은 약 12.61%, 4.3 mm 복합물질은 0.31%를 나타냈다.

3. 표적 두께에 따른 전자 에너지 축적 분포

일차 입자 에너지가 표적에 입사할 때 표적 두께 0.1 mm씩 변화할 때 전자 에너지 축적을 평가하였다. 이를 통해 전자의 거동을 알 수 있다.

Fig. 6과 같이 전자 에너지 축적 결과는 단일물질 표적과 복합물질 표적에서의 에너지 축적 최대값이 0.5 mm 두께에서 5.79E-01 MeV/g 와 3.25E+01 MeV/g로 나타났다. 단일물질 표적에서 최솟값은 2.0 mm 두께에서 1.80E-02 MeV/g이고, 복합물질 표적에서는 4.3 mm 두께에서 9.40E-03 MeV/g로 나타났다. Table 4는 단일물질과 복합물질 표적에서의 전자 에너지 축적에 대한 평균값과 오차를 보여준다.

이러한 결과는 일차 입자인 전자 거동에 따른 에너지 변화가 일치함을 보여준다. 또한, 표적 두께에 따른 전자 플루언스는 2 mm 두께 단일물질은 약 7.01%, 4.3 mm 복합물질은 0.03%를 나타냈다.

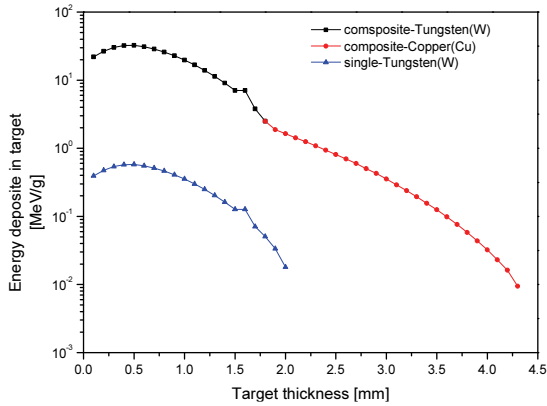


Fig. 6. Distribution of energy deposition of electron according to target with a thickness of 1mm.

에서 0.8 mm 두께까지 빌드 업(Build-up)되었다가 이후부터 감소하는 것을 보여준다. 또한, 복합물질 표적에서 단일물질 표적보다 광자에 대한 변환이 더 잘 일어나는 것을 보여준다.

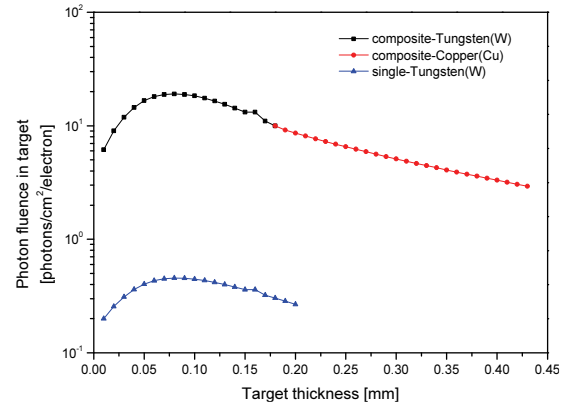


Fig. 7. Distribution of photon fluence according to target with a thickness of 1mm.

Table 4. Result of energy deposition in Target

Target Type	NPS	Mean [MeV/g]	Error
Single Material	1.0E+07	4.90800E-04	0.0045
Composite Material	1.0E+07	2.27970E-03	0.0021

Table 5. Result of photon fluence in Target

Target Type	NPS	Mean [MeV/g]	Error
Single Material	1.0E+07	1.9926E-01	0.0007
Composite Material	1.0E+07	6.1450E+00	0.0006

4. 표적 두께에 따른 광자 플루언스 평가

일차 입자인 전자가 표적에 입사할 때 표적 두께 0.1 mm씩 변화할 때 표적에서의 광자 생성을 보기 위해 9 MeV 에너지를 가지는 전자가 표적에 입사할 때 표적 내 광자 변환을 광자 플루언스로 평가하였다.

Fig. 7과 같이 광자 플루언스 결과는 단일물질 표적과 복합물질 표적에서 광자 플루언스 최댓값이 0.8 mm 두께에서 $4.56E-01 \text{ photons/cm}^2$ 와 $1.91E+01 \text{ photons/cm}^2$ 로 나타났다. 단일물질 표적에서 전자 플루언스 최솟값은 2.0 mm 두께에서 $1.99E-01 \text{ electrons/cm}^2$ 이고, 복합물질 표적에서는 4.3 mm 두께에서 $2.93E+00 \text{ photons/cm}^2$ 로 나타났다. Table 5는 단일물질과 복합물질 표적에서의 광자 플루언스에 대한 평균값과 오차를 보여준다.

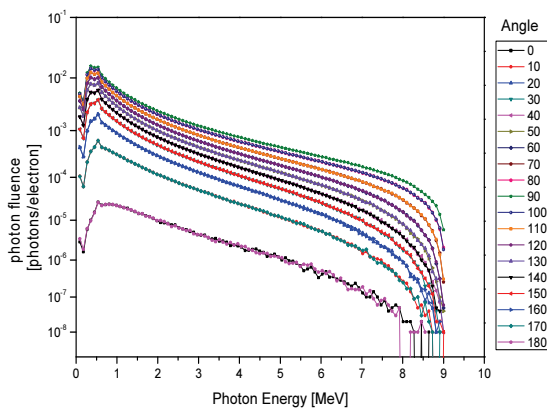
이러한 결과는 단일물질과 복합물질 표적 모두

5. 광자의 각-에너지 분포 평가

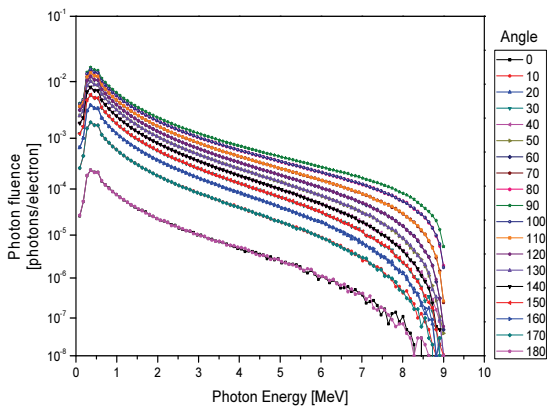
이차 광자 평가는 일차 입자와 표적과 상호작용으로 이차 광자(secondary photons)를 0°부터 180°까지 10° 간격으로 나누어 평가하였다. 표적에 1 m 거리에서의 이차 광자의 각-에너지 평가 결과는 Fig. 8과 같이 나타났다. Table 6은 단일물질과 복합물질 표적으로부터 1 m 거리에서의 각도에 따른 광자 플루언스에 대한 평균값과 오차를 보여준다.

단일물질과 복합물질 표적에서의 이차 광자 각-에너지를 비교하였다. 이를 위해 0°, 10°, 20° 및 30°에서 발생한 이차 광자 플루언스 자료와 비교하였다. Fig. 9와 같이 각 에너지 광자 플루언스 결과는 복합물질이 단일물질 표적보다 0°, 10°, 20° 및 30°에서 높게 나타났다. 복합물질 표적에서 단일물질 표적보다 광자에 대한 변환이 더 잘 일어나는

것을 보여준다.



(a) single material target



(b) composite material target

Fig. 8. Result of angular-energy calculation of photon fluence at 1 m from target (a) single material target (b) composite material target

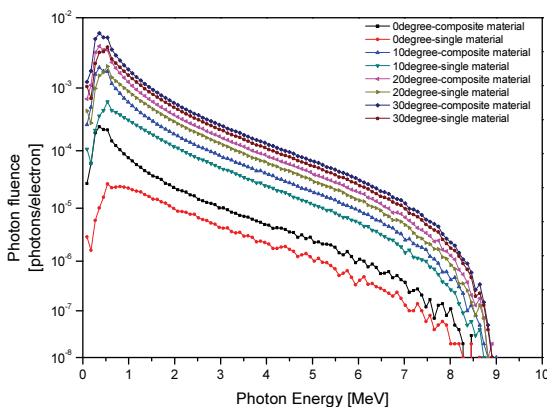


Fig. 9. Comparison result according to the angle between single material and composite material.

Table 6. Result of angular-energy calculation of photon fluence at 1 m from target

Target Type	NPS	Mean [photons/cm ²]	Error
Single Material	1.0E+07	3.91860E-01	0.0006
Composite Material	1.0E+07	2.20420E+01	0.0006

IV. DISCUSSION

본 연구에서는 첫째, 전자 거동은 전자 플루언스와 에너지 축적을 평가하였다. 표적 두께에 따른 일차 입자 거동 및 에너지 변화가 일치하였다. 또한, 복합물질 표적은 일차 입자인 전자가 표적 밖으로 방출되지 않았다. 반면에, 단일 물질 표적에서는 9 MeV 전자 중 약 12.61% 방출하였다. 그러나 표적은 조준기(collimator)로 덮여 있어, 일차 입자가 선형가속기 외부로 빠져나갈 가능성은 거의 없다. 둘째, 표적에서 변환된 이차 광자는 단일물질보다 복합물질에서 이차 광자 발생 효율이 높게 나타났다. 이는 물질 구성에 따른 표적 두께와 밀도 차이에 기인한 것으로 생각된다.

Q. Gao 등^[7]의 연구에서는 복합물질 표적에서 높은 선량률과 낮은 누설율을 나타냈다. 본 연구에서도 Q. Gao 등의 연구와 유사한 결과인 복합 물질 표적에서 더 높은 전자 및 광자 플루언스를 나타냈다. 하지만, Q. Gao 등^[7]의 연구는 표적의 최적화 두께를 찾는 연구이며, 본 연구는 실제 사용 중인 표적의 물질과 두께에 따른 전자 및 광자 플루언스 평가이다.

본 연구에서는 표적에서 발생하는 광자(photon)에 대해 평가하였다. 이때 발생하는 9 MeV 이차 광자는 표적 물질 및 조준기(collimator)와 광핵반응(photoneuclear reaction)을 통해 광중성자(photoneutron)을 발생시킨다. 따라서, 향후 연구에서는 거대 쌍극자 공명(giant dipole resonance) 현상에 의한 광핵 반응을 고려한 연구가 필요하다.

V. CONCLUSION

본 연구는 컨테이너 보안 검색용에 사용되는 선형가속기 표적을 구성하는 물질과 두께가 다른 표

적에서의 광자 특성을 평가하였다. 전자의 거동과 표적 내외부에서의 광자 발생은 표적 두께와 물질을 구성하는 성분의 밀도 차이에 따라 차이가 나타나는 것을 확인하였다.

일차 입자인 전자는 대부분 표적 내에서 정지하는 것으로 평가되어, 이때 발생하는 이차 광자가 차폐해석에 사용되는 선원항으로 적용할 수 있었다. 하지만, 9 MeV 광자를 선원항으로 적용하기 위해서는 표적 물질과 조준기(collimator)와 광핵반응을 일으켜 광중성자를 생성한다. 이에 대한 평가도 이루어져야 할 것이다.

이차 광자의 변환 효율은 단일물질 표적보다 복합물질 표적에서 더 높게 나타났다. 단일물질 표적과 복합물질 표적에서 각-에너지 분포를 계산하였다. 이러한 계산의 목적은 차폐 해석에 필요한 광자 플루언스 정보를 제공하는 것이다.

본 연구에서는 컨테이너 보안 검색용 선형가속기에서 사용되는 단일물질 표적과 복합물질 표적에서의 광자의 물리적인 특성 평가하였다. 이는 국가에서 도입 중인 컨테이너 검색용 선형가속기 사용시설의 설계 및 운영 시 차폐해석에 필요한 자료 및 방사선 안전관리에 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

Reference

- [1] P. W. Nam, S. H. Han, "A Study on the Current Situations and Some Problems of Container Security Initiative(CSI) in Korea", *Journal of Industrial Economics and Business*, Vol. 17, No. 6, pp. 2651-2672, 2004.
- [2] WCO, *Guidelines for the Procurement and Deployment of Scanning/NII Equipment*, 2018
- [3] Ministry of Oceans and Fisheries press release, "Development of the World's First 3-D High-Speed Container Inspection System", Port Management Division, pp. 1-2, 27. Feb. 2017.
- [4] G. S. Jo, "Large Container Radiation Inspection Technology and Domestic Status", *Radioisotope Journal*, Vol. 21, No. 2, pp.26-32, 2006.
- [5] Nuclear Safety Act, 2020.
- [6] S. M. Lee, "A Study on Evaluation of Dose Rate of Shielding Facility for Air cargo Security System using Monte Carlo Method", Hanyang University, pp. 10-17, 2019
- [7] Q. Gao, H. Zha, H. Chen, J. Shi, "Design and optimization of the target in electron linear accelerator", 4th International Particle Accelerator Conference, pp. 3663-3665, 2013.
- [8] F. A. A. Ajaj, N. M. H. Ghassal, "An MCNP-based model of a medical linear accelerator x-ray photon beam", *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine*, Vol. 26, No. 3, pp. 140-144, 2003. <https://doi.org/10.1007/BF03178784>
- [9] M. Mauricio, B. Daniel, O. Emico, M. Helio, B. Marcio, M. Mario, "Application of the Monte Carlo in nuclear physics using the GEANT4toolkit", *AIP conference Proceedings*, Vol. 1139, No. 1, pp.51-56, 2009. <https://doi.org/10.1063/1.3157829>
- [10] S. I. Bae, S. H. Shin, "Calculation of Neutron Energy Distribution from the Components of Proton Therapy Accelerator Using MCNPX", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 13, No. 7, pp. 917-924, 2019.
- [11] Denise B. Pelowitz, *MCNP6 USER'S MANUAL Version 1.0*, LA-CP-13-00634, Rev.0, 2013.
- [12] W. R. Nelson, "X-ray Production Yields for Linatrons 200A, 1000A and 3000A", *WRN-98-1*, pp. 1-3, 1998.
- [13] *Linatron-M9&M9A Modular high-energy X-ray Source*, Varian Medical systems, 2012.
- [14] James E. Clayton, Henderson, "X-ray Radiation Source with Low Neutron Emissions for Radiation Scanning", Patent Application Publication, US 2009/0041197A1, pp.1-2, 2008.
- [15] Z. Wang, H. Zha, J. Shi, H. Chen, "Thermal and Stress Analysis of an X-ray Target for 6 MeV Medical Linear Accelerators", 9th International Particle Accelerator Conference, pp. 572-574, 2018. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2018-MOPML070>
- [16] Nuclear Data Center at KAERI
"http://atom.kaeri.re.kr"
- [17] McConn, Ronald J, Gesh, Christopher J, Pagh, Richard T, Rucker, Robert A, & Williams, III,

Robert, *Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling*, United States, pp. 116-318, 2011. <https://doi.org/10.2172/1023125>

- [18] C. W. Lee, "Evaluation of Radiation Shielding in the Center for Proton Accelerators", Summer Workshop of The Korean Association for Radiation Protection", 2010.
- [19] Xu Hai-Bo, "Monte Carlo simulation for bremsstrahlung and photoneutron yields in high-energy x-ray radiography", *Chinese Physics, B*, Vol. 19, No. 6. 2010.
<http://dx.doi.org/10.1088/1674-1056/19/6/062901>
- [20] I. Park, K. H. Kim, S. C. Oh, J. Y. Song, O. H. Kwon, K. P. Kim, "Evaluation of Radiation Dose to Patients in Intraoral Dental Radiography Using Monte Carlo Method", *Journal of Radiation Industry*, Vol. 10, No. 3, pp. 139-144, 2016.

MCNP6 코드를 이용한 컨테이너 보안 검색용 전자 선형가속기 표적에서 발생한 광자 평가에 관한 연구

이창호,¹ 김장오,¹ 이윤지,¹ 전찬희,¹ 이지은,¹ 민병인^{2,*}

¹인제대학교 재난관리학과

²인제대학교 원자력응용공학부

요 약

본 연구 목적은 선형가속기를 통해 입사된 전자가 표적(target)을 구성하는 물질과 두께에 따른 광자 특성을 평가하는 것이다. 전산모사 설계는 2 mm 두께의 텅스텐 단일물질과 1.8 mm 와 2.3 mm 두께의 텅스텐과 구리 복합물질로 구성된 선형가속기 표적(Target)이다. 연구 방법은 첫째, 표적 내 일차 입자의 거동은 전자 플루언스와 전자 에너지 축적으로 평가하였다. 둘째, 표적 내에서 발생하는 광자는 광자 플루언스로 평가하였다. 셋째, 표적으로부터 1 m 거리에서의 광자 각-에너지 분포는 광자 플루언스로 평가하였다. 그 결과 첫째, 단일물질과 복합물질 표적에서의 전자 플루언스와 에너지 축적을 통해 일차 입자인 전자가 표적 밖으로 방출되지 않았으며, 표적 두께에 따라 전자가 음의 선형적으로 감쇄하였다. 둘째, 복합물질 표적이 단일물질 표적보다 광자 생성이 더 높은 것으로 나타났다. 이는 물질 구성 성분과 두께가 광자 생성에 영향을 준다는 사실을 확인하였다. 셋째, 차폐 해석에 필요한 각 분포에 따른 광자 플루언스를 계산하였다. 이러한 결과는 선형가속기 표적을 구성하는 물질과 두께에 따라 광자 생성률이 차이 나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 본 연구는 국가에서 도입 중인 컨테이너 보안 검색용 선형가속기 사용시설의 설계 및 운영 시 필요한 자료이며, 방사선 방호에 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

중심단어: 컨테이너 보안 검색, MCNP6, 선형가속기, 표적, 광자특성

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	이창호	인제대학교 재난관리학과	박사 수료
(공동저자)	김장오	인제대학교 재난관리학과	박사 수료
	이윤지	인제대학교 재난관리학과	대학원생
	전찬희	인제대학교 재난관리학과	대학원생
	이지은	인제대학교 재난관리학과	대학원생
(교신저자)	민병인	인제대학교 원자력응용공학부	부교수