

A Study on Photoneutron Characteristics Generated from Target and Collimator 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: August 17, 2020. Revised: August 26, 2020. Accepted: August 31, 2020.

ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate the photoneutron characteristics generated by the linear accelerator target and collimator. The computer simulation design firstly, consisted of a target, a single material target and a composite material target. Secondly, it consisted of a cone beam and a fan beam depending on the type of the collimator. Finally, the material of the fan beam collimator is composed of a single material composed of only lead (Pb) and a composite material collimator composed of tungsten (W) and lead (Pb). The research method calculated the photoneutron production rate and energy spectrum using F2 tally from the surface of a virtual sphere at a distance of 100 cm from the target. As a result, firstly the photoneutron production rate was 20% difference, depending on the target. Secondly, depending on the type of the collimator, there was a 10% difference. Finally, depending on the collimator material, there was a 40% difference. In the photoneutron energy spectrum, the average photoneutron flux tended to be similar to the photoneutron production rate. As a result, it was confirmed that the 9 MeV linear accelerator photoneutron are production increased more by the collimator than by the target, and by the material, not the type of the collimator. Selecting and operating targets and collimator with low photoneutron production will be the most active radiation protection. Therefore, it is considered that this research can be a useful data for introducing and operating and radiation protection of a linear accelerator for container security inspection.

Keywords: Container security inspection, MCNP6, Linear accelerator target, Collimator, Photonuclear characteristics,

I . INTRODUCTION

컨테이너 보안 검색(Container Security Inspection, CSI)은 전 세계적으로 국토 안보를 위한 중요한 수단이다. 왜냐하면, 컨테이너 검색은 전통적으로 밀수(Smuggling) 단속 목적으로 수행되었으나, 2001년 미국에서 발생한 9·11테러 이후 무기, 폭발물, 핵물질 및 대량살상무기(WMD) 단속으로 보안(Security) 영역까지 목적이 확대되었기 때문이다.^[1] 미국은 9·11테러 이후 자국의 국토 안보를 위해

2002년부터 컨테이너 검색제도를 시행하고 컨테이너 화물에 대한 100% 사전 검색하는 제도를 법제화하였다.^[2] 한국은 총기 및 테러 위협 등으로부터 국민을 보호하기 위해 컨테이너 보안 검색 장비를 2002년 부산항 7부두에 최초 도입하여 현재 주요항만에 총 14대가 설치되어 전국 7개 세관에서 운영 중이다.^[3] 이처럼 컨테이너 보안 검색은 국민 안전과 국토 안보를 지키는데 중요한 요소이다.

컨테이너 보안 검색은 전자 선형가속기(Linear accelerator)에서 발생한 엑스선(X-Ray)을 이용한다.

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

왜냐하면, 컨테이너 보안 검색은 엑스선이 컨테이너를 투과(Penetrates)하여 컨테이너를 개장(Devenning)하지 않고, 비파괴(Non Intrusive Inspection, NII)적으로 검사할 수 있기 때문이다.^[4] 전자 선형가속기에서 발생하는 엑스선 에너지는 3 MeV, 6 MeV 또는 9 MeV 이다. 컨테이너 검색기는 화물 종류와 관계없이 대부분 화물을 투과하는 9 MeV 선형가속기가 주로 사용되고 있다.^[5]

9 MeV 선형가속기는 엑스선뿐만 아니라 광중성자(Photoneutron)도 발생한다. 왜냐하면, 광중성자는 엑스선 에너지가 임계(Threshold) 에너지를 초과할 때 발생되며, 텅스텐(W) 표적(Target)의 임계에너지는 7.41 MeV이기 때문이다.^[6] 박은태^[7] 연구는 의료용 선형가속기 8 MeV에서 광중성자 발생을 평가하였으며, 에너지가 높아질수록 중성자 양이 증가하는 것을 확인하였다. 조영호^[8] 연구는 9 MeV 컨테이너 보안 검색용 선형가속기에서 광중성자 발생을 평가하였으며, 컨테이너 보안 검색 시설 외부에서의 광중성자 선량률을 확인하였다.

선형가속기 표적 및 조준기(Collimator)를 구성하는 물질은 광중성자 발생에 중요한 요소이다. 왜냐하면, 광중성자는 광핵반응에 의해 발생되며, 광핵반응은 원자번호(Z)와 질량수(A)의 함수로서 단면적 크기에 의존하기 때문이다.^[9] 선형가속기에서 광중성자 발생은 표적과 조준기(Collimator)에서 대부분 발생한다.^[10] 선형가속기 표적과 조준기를 구성하는 물질에 따라 광중성자 발생량이 차이가 난다.^[11]

본 논문은 표적과 조준기를 구성하는 물질과 형태에 따른 광중성자 발생량과 에너지 스펙트럼을 평가하였다. 이를 통해, 광중성자 발생의 저감화 방안을 모색하기 위함이다.

II. MATERIAL AND METHODS

본 연구는 몬테카를로 코드를 이용하여 9 MeV 선형가속기 표적(Target)과 조준기(Collimator)에서 발생하는 광중성자 평가를 위한 전산모사이다.

이러한 전산모사는 충돌(Collision), 제동복사(Bremsstrahlung), 쌍생성(Pair production), 콤프턴 산란(Compton scattering), 광핵반응(Photonuclear reaction) 등

에 의한 에너지 손실 등 모든 상호작용이 고려되어야 한다.^[12] 특히, 광핵반응은 거대 쌍극자 공명(Giant dipole resonance, GDR) 에너지 영역에서 발생하며, 이 영역의 에너지는 몬테카를로 계산이 가능하다.^[13] 따라서, 이러한 계산은 몬테카를로(Monte Carlo) 컴퓨터 프로그램 사용이 효과적이다.^[12]

본 연구는 몬테카를로 전산모사는 입자 수송에 범용적(General purpose code)으로 사용하는 MCNP6 (ver. 1.0) 코드를 사용하였다.^[14] 광핵반응은 LA-150U 데이터 라이브러리가 적용되었다. LA-150 데이터는 ENDF-6 형식(Format)의 12가지 광핵 평가를 포함한다.^[15,16] 또한, ENDF/B-7.0 광중성자 라이브러리가 적용되었다.^[17] 측정 결과에 대한 오차(error) 신뢰 수준은 10% 이하이다.^[18] 하지만, 본 연구는 3% 이하가 되도록 유지하였다. 측정된 결과는 입사 전자 1개에 대한 확률적 수치이다.^[19] 입사 전자(NPS)는 1E+11개를 적용하여, 통계적 오차를 줄여 광중성자 계산의 신뢰성을 확보하고자 하였다.

1. 표적(Target) 및 조준기(Collimator) 구성

본 연구는 컨테이너 보안 검색기에 사용되는 선형가속장치 중 표적과 조준기를 전산모사 하였다.

Fig. 1은 선형가속기에 대한 모식도이다.

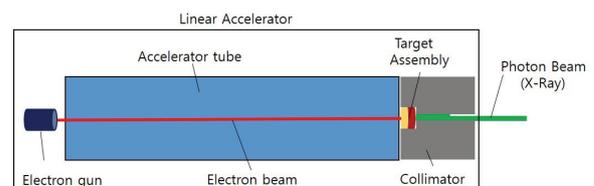


Fig. 1. Conceptual design of linear accelerator for container security inspection.

표적(Target)은 텅스텐(W)으로만 구성된 단일물질(Single material)과 텅스텐과 구리(Cu)로 구성된 복합물질(Composite material)로 설계하였다. 단일물질 표적은 한국원자력연구원^[20]에서 개발한 선형가속장치이며, 복합물질 표적은 Varian 사의 컨설팅 리포트(WRN-98-1, 1998)^[21]에서의 선형가속장치를 적용하였다. Table 1은 표적에 사용되는 텅스텐과 구리의 물질 및 치수(Dimension)이다.

표적에서 텅스텐은 입사 전자와 상호작용하여

엑스선(X-Ray)를 발생시키는 중요한 역할을 한다.^[22] 또한, 텅스텐은 추가적으로 광중성자가 발생한다. 하지만, 구리는 열 전도성이 좋아 표적에서 발생하는 열을 발산시키고 표적과 상호작용하지 않는 전자 거동을 멈추게 한다.^[23,24] 그리고, 9 MeV 선형 가속기에서 구리는 임계에너지가 9.91 MeV로 높기 때문에 광중성자 발생에는 영향을 미치지 않는다.

Table 1. Geometry information of the target

Type	Composition	Dimension [mm]	
		Thickness	Diameter
Single material	Tungsten(W)	2	30
	Tungsten(W)	1.8	4
Composite material	Copper(Cu)	2.5	4

조준기(Collimator) 물질은 납(Pb)으로만 구성된 단일물질과 텅스텐(W)과 납(Pb)으로 구성된 복합물질로 설계하였다. 또한, 조준기 종류는 비파괴 검사(Non-Destructive Testing, NDT) 분야에서 사용되는 원뿔형 빔(Cone beam)과 컨테이너 보안 검색(NII)에 이용되는 부채꼴 빔(Fan beam) 형태이다. 조준기에서의 엑스선(X-Ray) 빔 방출 각도는 22.75° 가 되도록 설계하였다.^[25] 이를 통해 물질과 빔 형태에 따른 광중성자 발생량과 스펙트럼을 비교하고자 하였다. Table 2는 표적 및 조준기에 사용하는 텅스텐, 구리 및 납의 밀도 및 조성이다.^[26,27]

Table 2. Component and density of target and collimator

Material	Density [g/cm ³]	Isotope	Abundance [%]
Tungsten(W)	19.30	W-180	0.12
		W-182	26.50
		W-183	14.31
		W-184	30.64
		W-186	28.43
Copper(Cu)	8.96	Cu-63	69.15
		Cu-65	30.85
Lead(Pb)	11.35	Pb-204	1.40
		Pb-206	24.10
		Pb-207	22.10
		Pb-208	52.40

2. 광중성자 특성 평가를 위한 전산모사 설계

9 MeV 선형가속기 표적에서 발생한 엑스선(X-Ray)이 표적과 조준기와 상호작용에 의해 광중성자가 발생한다.

이때 상호작용은 거대 쌍극자 공명(GDP) 현상에 의한 광핵반응이다. 따라서 표적에서 발생한 광자가 표적 및 조준기에서 거대 쌍극자 공명(GDP) 현상에 의한 광핵반응으로 발생한 광중성자를 평가해야 한다.

이때 발생한 광중성자는 증발 중성자(Evaporation neutron)가 지배적인 경향을 보인다.^[28] 증발 중성자에서 발생한 평균 에너지는 Maxwell 분포를 가지는 1~2 MeV 정도로 나타난다.^[28,29] 이때 발생하는 중성자 방출 각도는 등방향(Isotropic)이다.^[29]

Table 3은 중성자 임계에너지이다.^[30]

MCNP6에서 광핵 데이터 라이브러리는 텅스텐(Z=74)은 W-184, 구리(Z=29)는 Cu-63 핵종만 제공되며, 납(Z=82)은 Pb-206, 207, 208이 제공된다.^[18,31] 따라서, 텅스텐은 W-180, W-182, W-183 및 W-186 핵종에 대한 광핵반응을 계산할 수 없다.

그리고 구리는 임계에너지가 9.91 MeV으로 광중성자가 발생하지 않는다.

본 연구에서 중성자 플럭스 스펙트럼은 3 MeV 에너지 구간을 적용하였다. 또한, 중성자 반응 단면적(Cross-section)이 작고 등방향 분포 성질에 따라 각-분포 없이 에너지 스펙트럼만 평가하였다.

Tally card는 F2를 사용하여 표면(Surface)에서의 중성자 평균 플럭스(Flux)를 평가하였다.

MCNP6 MX card를 사용하여 텅스텐은 W-184, 구리는 Cu-63, 납은 Pb-207 핵종 정보를 적용하여 광중성자가 많이 발생하도록 보수적으로 설계하였다.^[16]

또한, 임계에너지 미만의 전자 및 광자는 광중성자 발생에 영향을 주지 않는다. 따라서, 본 연구는 계산 시간 절약을 위해 MCNP CUT card를 사용하여 전자 및 광자에 컷(CUT) 에너지를 5.5 MeV로 설정하였다.

Table 3. Threshold energy of photonuclear

Nuclear	Abundance [%]	Threshold Energy [MeV]	
		γ, n	$\gamma, 2n$
$\gamma + W-180$	0.12	8.41	15.35
$\gamma + W-182$	26.30	8.07	14.75
$\gamma + W-183$	14.28	6.19	14.26
$\gamma + W-184$	30.70	7.41	13.60
$\gamma + W-185$	28.60	7.19	12.95
$\gamma + Cu-63$	69.17	10.85	19.74
$\gamma + Cu-65$	30.83	9.91	17.83
$\gamma + Pb-204$	1.40	-	-
$\gamma + Pb-206$	24.10	8.09	14.82
$\gamma + Pb-207$	22.10	6.74	14.83
$\gamma + Pb-208$	52.40	7.37	14.11

2.1 표적 종류에 따른 설계

Fig. 2는 표적 설계를 나타낸다. 표적은 단일물질과 복합물질로 구성하였으며, 표적으로부터 100 cm 거리에 가상의 구(Sphere)를 설정하여 F2 Tally를 적용하였다. 입사 전자가 광중성자로 변하는 발생량과 중성자 플럭스(Flux) 스펙트럼은 100 cm으로 결정하는 것이 바람직하기 때문에 이 거리를 설정하였다.^[16]

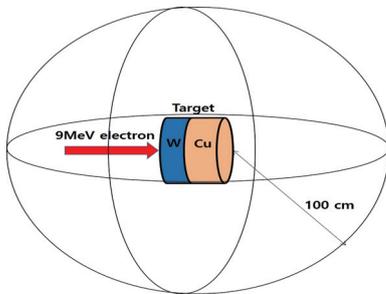


Fig. 2. Target geometry for this calculations by MCNP6.

2.2 조준기 종류에 따른 설계

Fig. 3은 조준기(Collimator) 종류에 따른 설계를 보여준다. 조준기는 비파괴검사에서 주로 사용되는 원뿔형(Cone beam) 조준기(a)와 컨테이너 보안 검색용에서 사용하는 부채꼴(Fan beam) 조준기(b)를 설계하고 조준기 물질은 납(Pb)으로 구성하였다. 엑스선 방출 각도는 22.75°를 적용하였으며,^[25] 표적으로부터 100 cm 거리에 F2 Tally를 적용하였다.

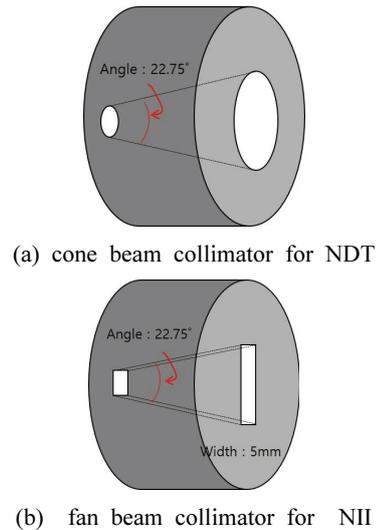


Fig. 3. Geometry of MCNP6 input for the calculation from (a) cone beam and (b) fan beam collimator.

2.3 부채꼴 조준기 물질에 따른 설계

Fig. 4는 부채꼴(Fan beam) 조준기 물질에 따른 설계를 나타낸다. 부채꼴 조준기 물질은 납으로만 차폐하는 단일물질(a)과 텅스텐과 납으로 구성된 복합물질(b)로 구성하였으며, 표적으로 100 cm 거리에서 F2 Tally를 적용하였다.

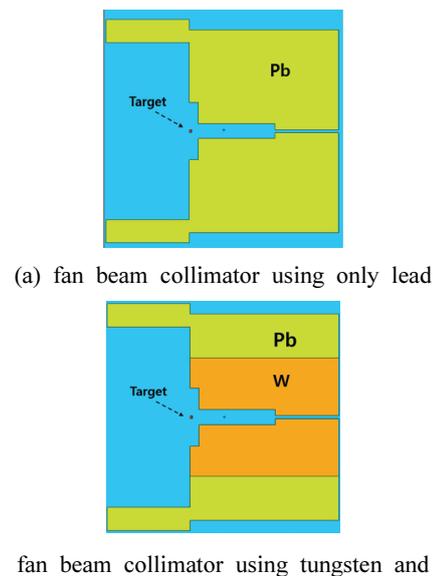


Fig. 4. Geometry of MCNP6 input for the calculation from fan beam collimator of (a) lead (b) tungsten and lead.

III. RESULT

1. 광중성자 발생

표적 및 조준기의 종류 및 물질에 따른 광중성자 발생량을 측정하였다. 중성자 선원 강도(Neutron source strength) 결정을 위한 전류는 0.1 mA를 적용하였다.^[32] Table 4는 광중성자 측정 결과를 나타낸다.

1.1 표적에 따른 광중성자

단일 물질 표적에서 광중성자는 입사 전자 1E+07개당 8.59개가 발생되었다. 이 결과에 전류를 고려한 중성자 선원 강도는 초(Second)당 5.36E+04개의 광중성자가 발생한다. 표적 밖으로 중성자 전달(Transmission)은 이탈 가중치(Escape weight) 8.59E-07을 발생된 가중치(weight produced) 8.61E-07로 나눈 결과로 99.80%이다. 광핵 흡수당 발생된 평균 광중성자 수는 발생된 광중성자 가중치 8.61E-07을 광핵 흡수로 손실된 광자 가중치 1.02E-06으로 나누어 광핵 흡수당 0.844 중성자이다. 광핵 흡수로 손실된 평균 광자 에너지는 가중 에너지 8.27E-06 MeV를 가중 손실 1.02E-06으로 나눈 8.112 MeV이다.

복합 물질 표적에서 광중성자는 입사 전자 1E+07개당 7.23개가 발생되었다. 이 결과에 전류를

고려한 중성자 선원 강도는 초당 4.51E+04개의 광중성자가 발생한다. 표적 밖으로 중성자 전달은 이탈 가중치 7.32E-07을 발생된 가중치 7.24E-07로 나눈 결과로 99.91%이다. 광핵 흡수당 발생된 평균 광중성자 수는 발생된 광중성자 가중치 7.24E-07을 광핵 흡수로 손실된 광자 가중치 1.42E-06으로 나누어 광핵 흡수당 0.510 중성자를 얻었다. 광핵 흡수로 손실된 평균 광자 에너지는 가중 에너지 1.10E-05 MeV를 가중 손실 1.42E-06으로 나눈 7.771 MeV이다.

1.2 조준기 종류에 따른 광중성자

납(Pb)으로만 구성된 원뿔형(Cone beam) 조준기에서 발생된 광중성자는 입사 전자 1E+07개당 단일 물질 표적은 161.57개, 복합 합 물질 표적은 159.42개이다. 이 결과에 전류를 고려한 중성자 선원 강도는 초당 단일 물질 표적은 1.01E+06개, 복합 물질 표적은 9.95E+05개의 광중성자가 발생한다. 조준기 밖으로 광중성자 전달은 단일 물질 표적은 96.87%, 복합물질 표적은 96.94%이다. 광핵 흡수당 발생된 평균 광중성자 수는 단일 물질 표적은 0.995개, 복합 물질 표적은 0.962개이다. 광핵 흡수로 손실된 평균 광자 에너지는 단일 물질 표적 7.626 MeV, 복합 물질 표적은 7.601 MeV이다.

Table 4. Result of neutron created from target at 100cm

Target	Collimator		Result				
	Type	Material	Created neutron number [# / 1E+07e]	Neutron source strength [# / s]	Transmission rate of neutrons out of the target [%]	Average number neutron produced per photonuclear absorption	Average photon energy lost to photonuclear absorption [MeV]
Tungsten		None	8.59	5.36E+04	99.80	0.844	8.112
	Fan beam	Lead	172.56	1.08E+06	96.86	0.996	7.635
		Tunsten+Lead	44.19	2.76E+05	81.88	0.880	8.077
	Cone beam	Lead	161.57	1.01E+06	96.87	0.995	7.626
		Tunsten+Lead	41.878	2.61E+05	83.44	0.874	8.066
	Tungsten + Copper		None	7.23	4.51E+04	99.91	0.510
Fan beam		Lead	169.87	1.06E+06	96.93	0.964	7.611
		Tunsten+Lead	42.657	2.66E+05	81.11	0.801	7.992
Cone beam		Lead	159.42	9.95E+05	96.94	0.962	7.601
		Tunsten+Lead	40.421	2.52E+05	83.66	0.791	7.978

납(Pb)으로만 구성된 부채꼴(Fan beam) 조준기에 서 발생된 광중성자는 입사 전자 1E+07개당 단일 물질 표적은 172.56개, 복합 합 물질 표적은 169.87 개이다. 이 결과에 전류를 고려한 중성자 선원 강 도는 초당 단일 물질 표적은 1.08E+06개, 복합 물 질 표적은 1.06E+06개의 광중성자가 발생한다. 조 준기 밖으로 광중성자 전달은 단일 물질 표적은 96.86%, 복합물질 표적은 96.93%이다. 광핵 흡수당 발생된 평균 광중성자 수는 단일 물질 표적은 0.996개, 복합 물질 표적은 0.964개이다. 광핵 흡수 로 손실된 평균 광자 에너지는 단일 물질 표적 7.635 MeV, 복합 물질 표적은 7.611 MeV이다.

1.3 부채꼴 조준기 물질에 따른 광중성자

납(Pb)으로만 구성된 부채꼴 조준기에서 발생된 광중성자는 입사 전자 1E+07개당 단일 물질 표적 은 172.56개, 복합 물질 표적은 169.87개이다. 이 결 과에 전류를 고려한 중성자 선원 강도는 초당 단일 물질 표적은 1.08E+06개, 복합 물질 표적은 1.06E+06개의 광중성자가 발생한다. 조준기 밖으로 광중성자 전달은 단일 물질 표적은 96.86%, 복합물 질 표적은 96.93%이다. 광핵 흡수당 발생된 평균 광중성자 수는 단일 물질 표적은 0.996개, 복합 물 질 표적은 0.964개이다. 광핵 흡수로 손실된 평균 광자 에너지는 단일 물질 표적 7.635 MeV, 복합 물 질 표적은 7.611 MeV이다.

텅스텐(W)과 납(Pb)으로 구성된 부채꼴 조준기에 서 발생된 광중성자는 입사 전자 1E+07개당 단일 물질 표적은 44.19개, 복합 합 물질 표적은 42.657 개이다. 이 결과에 전류를 고려한 중성자 선원 강 도는 초당 단일 물질 표적은 2.76E+05개, 복합 물 질 표적은 2.66E+05개의 광중성자가 발생한다. 조 준기 밖으로 광중성자 전달은 단일 물질 표적은 81.88%, 복합물질 표적은 81.11%이다. 광핵 흡수당 발생된 평균 광중성자 수는 단일 물질 표적은 0.880개, 복합 물질 표적은 0.801개이다. 광핵 흡수 로 손실된 평균 광자 에너지는 단일 물질 표적 8.077 MeV, 복합 물질 표적은 7.992 MeV이다.

2. 광중성자 스펙트럼

표적 및 조준기 종류 및 물질에 따른 광중성자

스펙트럼을 측정하였다. Table 5는 광중성자 스펙 트럼 측정결과를 나타낸다.

Table 5. Calculated neutron flux

Target	Collimator		Result		
	Type	Material	Average neutron energy [MeV]	Maximum neutron energy [MeV]	Average neutron flux [#cm ² /e]
Tungsten		None	0.619	1.59	2.14E-09
	Fan beam	Lead	0.634	2.34	4.53E-08
		Tungsten +Lead	0.614	2.19	1.12E-08
	Cone beam	Lead	0.627	2.34	4.25E-08
		Tungsten +Lead	0.607	2.19	1.06E-08
	Tungsten + Copper		None	0.629	1.59
Fan beam		Lead	0.631	2.34	4.48E-08
		Tungsten +Lead	0.611	2.19	1.08E-08
Cone beam		Lead	0.625	2.34	4.21E-08
		Tungsten +Lead	0.605	2.19	1.03E-08

2.1 표적 종류에 따른 광중성자

Fig. 5는 입사 전자가 변환된 9 MeV 광자가 표적 과 상호작용을 통한 광중성자 에너지 스펙트럼을 나타낸다. 표적에서 발생한 광중성자 최대에너지는 1.59MeV이다. 단위 면적(cm²)당 평균 중성자 플럭 스(Flux)는 단일물질 표적이 2.14E-09 neutrons/cm² 고, 복합물질 표적은 1.80E-09 neutrons/cm²이다. 광 중성자 평균 에너지는 단일물질 표적이 0.619 MeV 이고, 복합물질 표적이 0.629 MeV이다.

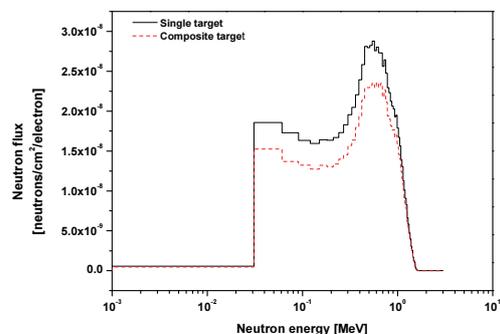


Fig. 5. Photoneutron energy spectrum according to the target type.

2.2 조준기 종류에 따른 광중성자

납(Pb)으로만 구성된 조준기를 통해 발생한 광중성자 최대에너지는 2.34 MeV이다. 단일 물질 표적에서 평균 광중성자 플럭스는 원뿔형은 $4.25E-08$ neutrons/cm², 부채꼴은 $4.53E-08$ neutrons/cm² 이다. 복합 물질 표적에서 평균 광중성자 플럭스는 원뿔형은 $4.21E-08$ neutrons/cm², 부채꼴은 $4.48E-08$ neutrons/cm² 이다. Fig. 6은 입사 전자가 변환된 9 MeV 광자가 표적 및 조준기 종류에 따른 광중성자 에너지 스펙트럼을 나타낸다.

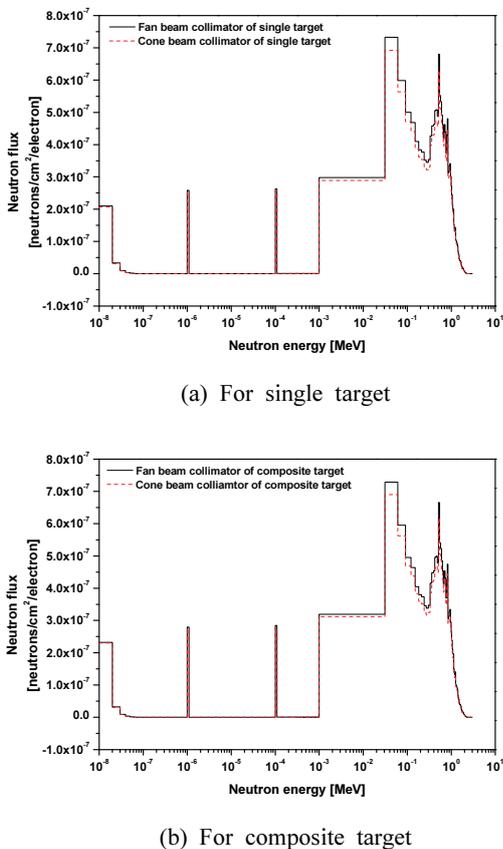


Fig. 6. Photoneutron energy spectrum according to the type of collimator of (a) single target (b) composite target.

2.3 부채꼴 조준기 물질에 따른 광중성자

조준기에서 발생한 광중성자 최대에너지는 단일 물질 조준기는 2.34 MeV, 복합물질 조준기는 2.19 MeV이다. 단일 물질 표적에서 평균 광중성자 플럭스는 단일 물질(Pb) 조준기는 $4.53E-08$ neutrons/cm²,

복합 물질 조준기는 $1.12E-08$ neutrons/cm² 이다. 복합 물질 표적에서 평균 광중성자 플럭스는 단일 물질(Pb) 조준기는 $4.48E-08$ neutrons/cm², 복합 물질 조준기는 $1.08E-08$ neutrons/cm² 이다. Fig. 7은 입사 전자가 변환된 9 MeV 광자가 표적 및 조준기 물질에 따른 광중성자 에너지 스펙트럼을 나타낸다.

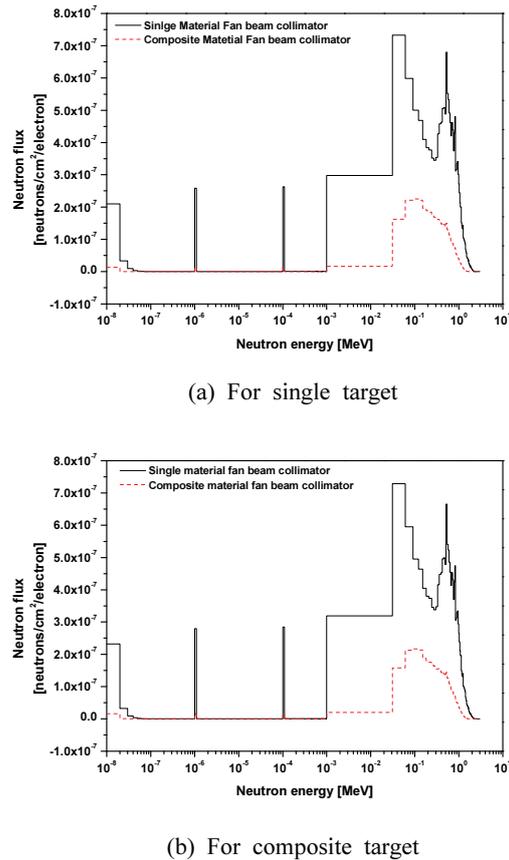


Fig. 7. Photoneutron energy spectrum according to the material of collimator (a) single target (b) composite target.

IV. DISCUSSION

본 연구 핵심은 표적 구성 물질과 조준기 형태 및 물질에 따른 광중성자 발생에 미치는 영향을 분석하는 것이다. 첫째, 표적 구성 물질은 텅스텐 단일 물질과 텅스텐과 구리의 복합 물질을 비교 분석하였다. 그 결과 텅스텐과 구리로 구성된 복합물질은 에서 광중성자 발생이 더 작게 나타나는 경향을 보였다. 그 이유는 텅스텐 두께가 더 얇아 상호작용하는 두께가 적어진 것으로 보인다. 그리고, 기존

연구 결과들과 유사한 경향을 보였다. 둘째, 조준기 형태는 납으로 물질을 구성하고, 원뿔형과 부채꼴 형태를 비교 분석하였다. 부채꼴 형태 조준기에서 더 많은 광중성자가 발생하였다. 이러한 결과는 부채꼴 형태 조준기에서 얇은 선속 제한으로 인해 광자와 상호작용하는 면적이 커진 효과로 보인다. 셋째, 부채꼴 조준기는 납으로 구성된 단일 물질과 텅스텐과 납으로 구성된 복합 물질을 비교하였다. 그 결과 텅스텐과 납으로 구성된 복합 물질에서 큰 수치로 광중성자가 감소하는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 텅스텐(W)이 납(Pb)보다 임계에너지가 높지만, 복합 물질 조준기의 광중성자가 낮게 발생된 것은 원자번호와 질량수에 영향을 받는 것으로 생각된다. 이러한 결과는 기존 연구 결과와 유사한 경향을 나타냈다.

대부분의 선행연구는 물질을 고정하고, 에너지를 변화시켜 광중성자 플럭스(Flux) 스펙트럼을 분석하였으며, 10 MeV 이상의 에너지를 가지는 의료용 선형가속기를 연구하였다. 의료용 선형가속기의 광중성자 평가는 인체에 영향을 고려하는 것이다. 하지만, 본 연구는 에너지를 고정하고 물질을 변화시켜, 광중성자 저감화 방안을 모색하여 효과적인 방사선 안전관리를 위한 것이다.

본 연구의 의의는 컨테이너 보안 검색용으로 사용하는 9 MeV 선형가속기에서 발생하는 광중성자 발생률 및 에너지 스펙트럼을 평가함에 있다. 또한, 표적 및 조준기의 재질 및 형태를 다르게 구성하여 평가하였다. 이것은 기존 연구에서 보여준 에너지 변화와 달리 표적 및 조준기의 형태 및 재질을 변화시켜 그 차이를 보여준 것으로 기존 연구들과 차이가 있다.

본 연구는 컨테이너 보안 검색용 9 MeV 선형가속기에서 발생한 엑스선(X-Ray)이 표적 물질 및 조준기와 광핵반응을 통해 발생한 광중성자를 평가하였다. 이때 발생하는 광중성자는 선형가속기 및 주요 구조물과 콘크리트 차폐벽을 오염(Contamination)시킨다. 따라서, 향후 연구는 광중성자로 인한 방사화(Activation)의 재고량(Inventory)에 관한 연구가 필요하다.

V. CONCLUSION

본 연구는 컨테이너 보안 검색용 9 MeV 선형가속기의 광중성자 발생률 및 에너지 스펙트럼을 분석하였다. 첫째, 표적에 종류에 따른 결과는 복합 물질 표적이 단일 물질 표적과 비교해 중성자 방출이 약 20% 감소한 것으로 나타났다. 이러한 이유는 표적 두께 차이로 인한 것으로 생각된다. 둘째, 조준기 종류에 따른 결과는 부채꼴(Fan beam) 조준기가 원뿔형(Cone beam) 조준기와 비교해 약 10% 더 많은 중성자를 방출한 것으로 나타났다. 이렇게 차이가 작게 나는 이유는 부채꼴 조준기가 더 많은 선속 제한으로 상호작용 면적이 커진 것으로 생각된다. 셋째, 조준기 물질에 따른 결과는 복합물질 조준기가 단일물질 조준기와 비교해 약 40% 광중성자가 감소한 것으로 나타났다.

결과적으로, 광중성자 발생은 표적보다는 조준기에 의해 많이 발생한다는 것을 알 수 있다. 또한, 조준기 형태보다는 물질에 따라 더 큰 영향을 받은 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 물질의 원자번호(Z)와 질량수(A)에 의존하는 기존의 연구결과와 유사한 경향을 나타냈다.

본 연구 제한점은 첫째, 선형가속기 표적 및 조준기의 기하학적 구조를 단순화하여 설계하였다. 둘째, 광핵반응 데이터 라이브러리가 12종으로 제한적이며, 전산 모사라는 일반적인 한계점을 지니고 있다. 이러한 제한점을 보완하기 위해, 광중성자가 많이 발생할 수 있는 조건으로 보수적 평가를 시행하였다.

본 연구는 컨테이너 보안 검색용 9 MeV 선형가속기에서 발생하는 광중성자 발생률 및 스펙트럼을 평가하였다. 왜냐하면, 9 MeV 선형가속기에서 광중성자 발생은 필수적이기 때문이다. 따라서, 광중성자 저감화 대책은 적절한 표적 및 조준기 물질로 구성된 선형가속기를 선택하는 것이 될 것이며, 이는 가장 적극적인 방사선 방호 될 것이다. 이러한 결과는 컨테이너 보안용 선형가속장치 도입 및 운영 그리고 방사선 방호에 유용한 자료가 될 수 있을 것으로 기대한다.

Reference

- [1] J. H. Choi, J. U. Kang, "Main Contents and Countermeasures of New Security Law of U.S.A for Trade Safe", Korea Trade Review, Vol. 32, No. 3, 155-173, 2007.
- [2] J. S. Choi, *Mandatory 100% pre-inspection of container cargo and policy implications*, Korea Maritime Institute, pp. 1-14, 2007.
- [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] *WCO, Guidelines for the Procurement and Deployment of Scanning/NII Equipment, World Customs Organization, 2018.*
- [5] G. S. Jo, "Large Container Radiation Inspection Technology and Domestic Status", Radioisotope Journal, Vol. 21, No. 2, pp. 26-32, 2006.
- [6] IAEA, *Radiation protection in the design of radiotherapy facilities*. International Atomic Energy Agency, Safety Reports Series No. 47, 2006.
- [7] E. T. Park, "Evaluation of Photoneutron Dose in Radiotherapy Room Using MCNPX", The Journal of the Korea Contents Association, Vol. 15, No. 6, pp. 283-289, 2018.
<http://dx.doi.org/10.5392/JKCA.2015.15.06.283>
- [8] Y. H. Cho, "Assessment of Neutron Skyshine Dose in a Cargo Inspection Facility Using High Energy X-ray", Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 2, No. 3, pp. 27-31, 2008.
- [9] X. S. Mao, K. R. Kase, W. R. Nelson, "Giant dipole resonance neutron yields produced by electrons as a function of target material and thickness", Health Physics, Vol. 70, No. 2, pp. 207-214, 1996.
<http://dx.doi.org/10.1097/00004032-199602000-00008>
- [10] ORNL, *Monte Carlo Simulation for LINAC Standoff Interrogation for Nuclear Material*, OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, ORNL/TM-2007/079, 2007. <http://dx.doi.org/10.2172/931590>
- [11] NCRP, *Structural Shielding Design and Evaluation for Medical Use of X Rays and Gamma Rays of Energies up to 10 MeV*, National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP Report No. 49, 1976.
- [12] NCRP, *Neutron Contamination from Medical Electron Accelerator*. National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP report No. 79, 1984.
- [13] IAEA, *Radiological Safety Aspects of the Operation of Electron Linear Accelerators*, International Atomic Energy Agency, Technical Report No. 188, , pp.61-136, 1979.
- [14] Y. H. Chung, C.H. Back, S. J. Lee, "Monte Carlo Simulation Codes for Nuclear Medicine Imaging", Nuclear Medical and Molecular Imaging, Vol. 42, No. 2, pp. 127-136, 2008.
- [15] NNDC, *ENDF-6 Manual*, Brookhaven National Laboratory, BNL-90365-2009. 2009.
- [16] LANL, *A Brief Primer for Simulating Photonuclear Interactions with MCNP(X)*, Los Alamos National Laboratory LA-UR-01-1599, 2000.
- [17] LANL, *Photonuclear Physics in MCNP(X)*, Los Alamos National Laboratory LA-UR-99-4827, 1999.
- [18] LANL, *MCNP6 USER'S MANUAL(ver.1.0)*, Los Alamos National Laboratory, LA-CP-13-00634, 2013.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] W. R. Nelson, "X-ray Production Yields for Linatrons 200A, 1000A and 3000A", WRN-98-1, pp. 1-3, 1998.
- [22] 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.
- [23] E. James, Clayton, Henderson, "X-ray Radiation Source with Low Neutron Emissions for Radiation Scanning", Patent Application Publication, US 2009/0041197A1, pp.1-2, 2008.

- [24] 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>
- [25] Y. H. Cho, "Monte carlo estimation of activation products induced in concrete shielding around electron linac used in an X-Ray container inspection system", Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 11, No. 3, pp. 1035-1039, 2010. <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2010.11.3.1035>
- [26] Nuclear Data Center at KAERI
"http://atom,kaeri.re.kr"
- [27] 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. <http://dx.doi.org/10.2172/1023125>
- [28] J. C. Liu, K. R. Kase, X. S. Mao¹, W. R. Nelson, J. H. Kleck, S. Johson. "Calculations of Photoneutrons from Varian Clinac Accelerators and Their Transmissions in Matreials", International Conference on Radiation Dosimetry and Safety, SLAC-PUB-7404. pp. 1-5, 1997.
- [29] H. S. Lee, *Differential photoneutron yields from C, Al, Cu, Sn, Pb and Bi targets by 2 GeV incident electrons*, Seoul National University, 2000.
- [30] IAEA, *Hnadbook on photonuclear data for applications Cross-sections and spectra*, International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-1178. pp.18-264. 2000.
- [31] LANL, *Listing of Available ACE Data Tables*, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-17-20709, pp. 3-461, 2017. <http://dx.doi.org/10.2172/1342828>
- [32] I. H. Kim, *Study of X-Ray Shielding Design of Dual Imaging Container Inspection Facility using Monte Carlo Computer Simulation Method*, Chungnam National University, 2018.

MCNP6 코드를 이용한 컨테이너 보안 검색용 전자 선형가속기 표적과 조준기에서 발생한 광중성자 특성에 관한 연구

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

¹인제대학교 재난관리학과

²인제대학교 원자력응용공학부

요 약

본 연구 목적은 선형가속기 표적(Target) 및 조준기(Collimator)에서 발생한 광중성자 특성을 평가하는 것이다. 전산모사 설계는 첫째, 표적은 단일물질 표적과 복합물질 표적으로 구성하였다. 둘째, 조준기 종류에 따라 원뿔형(Cone beam) 조준기와 부채꼴(Fan beam) 조준기로 구성하였다. 셋째, 부채꼴 조준기의 물질을 납(Pb)으로만 구성된 단일물질과 텅스텐(W)과 납으로 구성된 복합물질 조준기로 구성하였다. 연구 방법은 표적으로부터 100 cm 거리에서 가상의 구(Sphere) 표면에서 F2 Tally를 이용하여 광중성자 발생률과 에너지 스펙트럼을 계산하였다. 그 결과 광중성자 발생률은 첫째, 표적에 따라서는 20% 차이가 발생하였다. 둘째, 조준기의 종류에 따라서는 10% 차이가 발생하였다. 셋째, 조준기 물질에 따라서는 40% 차이가 발생하였다. 광중성자 스펙트럼에서도 평균 광중성자 플럭스(Flux)가 광중성자 발생량과 유사한 경향으로 나타났다. 이러한 결과로 9 MeV 선형가속기 광중성자 발생은 표적보다는 조준기에 의해 광중성자 발생이 증가하며, 조준기의 종류보다는 물질에 영향을 더 크게 받는 것을 확인할 수 있었다. 광중성자 발생이 적은 표적 및 조준기를 선택하여 운영하는 것이 가장 적극적인 방사선 방호가 될 것이다. 따라서, 본 연구는 컨테이너 보안 검색용 선형가속기 도입 및 운영 그리고 방사선 방호에 유용한 자료가 될 수 있을 것으로 생각된다.

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

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