

A Study on Activation Characteristics Generated by 9 MeV Electron Linear Accelerator for Container Security Inspection

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 and Disaster Management, Inje University

²Department of Nuclear Applied Engineering, Inje University

Received: October 5, 2020. Revised: October 30, 2020. Accepted: October 31, 2020

ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate the activation characteristics that occur in a linear accelerator for container security inspection. In the computer simulation design, first, the targets consisted of a tungsten (Z=74) single material target and a tungsten (Z=74) and copper (Z=29) composite target. Second, the fan beam collimator was composed of a single material of lead (Z=82) and a composite material of tungsten (Z=74) and lead (Z=82) depending on the material. Final, the concrete in the room where the linear accelerator was located contained magnetite type and impurities. In the research method, first, the optical neutron flux was calculated using the MCNP6 code as a F4 Tally for the linear accelerator and structure. Second, the photoneutron flux calculated from the MCNP6 code was applied to FISPACT-II to evaluate the activation product. Final, the decommissioning evaluation was conducted through the specific activity of the activation product. As a result, first, it was the most common in photoneutron targets, followed by a collimator and a concrete 10 cm deep. Second, activation products were produced as by-products of W-181 in tungsten targets and collimator, and Co-60, Ni-63, Cs-134, Eu-152, Eu-154 nuclides in impurity-containing concrete. Final, it was found that the tungsten target satisfies the permissible concentration for self-disposal after 90 days upon decommissioning. These results could be confirmed that the photoneutron yield and degree of activation at 9 MeV energy were insignificant. However, it is thought that W-181 generated from the tungsten target and collimator of the linear accelerator may affect the exposure when disassembled for repair. Therefore, this study presents basic data on the management of activated parts of a linear accelerator for container security inspection. In addition, When decommissioning the linear accelerator for container security inspection, it is expected that it can be used to prove the standard that permissible concentration of self-disposal.

Keywords: Container security inspection, MCNP6, FISPACT-II(4.0), Linear accelerator, Activation Product.

I . INTRODUCTION

컨테이너는 마약, 총기류, 대량살상무기(Weapons of Mass Destruction, WMD) 및 핵물질 등을 운반하는 용기로 이용되거나 테러 수단으로 사용될 수 있는 잠재적 위협이 될 수 있다.^[1,2] 따라서, 컨테이너 보안 검색(Container Security Inspection, CSI)은 국가 간 교역(Trade)에서 사회 안전과 국민 건강 보호를 위한 중요한 검사이다. 게다가, 컨테이너는 국가 간

교역에서 사용이 편리하고 범용적으로 사용되고 있다.^[3] 또한, 컨테이너는 전 세계적으로 2억 개 이상이 항구 간 선박으로 이동하고 있다.^[4] 컨테이너를 통한 불법 무기 운송은 2013년 북한 선박 청천강호에서 전투기 엔진 및 지대공 미사일 시스템용 부품, 탄약 등 불법 무기를 실었던 컨테이너가 적발되기도 하였다.^[5]

컨테이너 보안 검색(CSI)은 9 MeV 선형가속기(Linear Accelerator)에서 발생한 엑스선(X-Ray)을 이

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

용한 비파괴 검사(Non Intrusive Inspection, NII)이다. 왜냐하면, 9 MeV 선형가속기에서 발생한 엑스선은 투과력(Penetration)이 강해 컨테이너 내부의 두꺼운 화물을 투과하여 영상(Image)으로 만들 수 있기 때문이다.^[6] 한국 관세청은 사회 안전과 국민 건강 보호를 위해 컨테이너 보안 검색 장비를 2002년 부산항 도입하여 2019년 기준 총 14대가 인천 및 부산 등에 설치되어 운영 중이다.^[7]

9 MeV 선형가속기에서 발생한 엑스선은 표적과 상호작용하여 광중성자(Photonutron)를 발생시킨다. 왜냐하면, 임계(Threshold) 에너지를 초과하는 엑스선은 거대 쌍극자 공명 현상(Giant Dipole Resonance, GDR)으로 광핵반응(Photonuclear reaction)을 일으켜 광중성자를 생성하기 때문이다.^[8] 광핵반응을 위한 텅스텐($Z=74$) 표적(Target)의 임계에너지는 7.41 MeV이다.^[9]

9 MeV 선형가속기에서 발생하는 광중성자는 가속기 주변 물질과 조준기(Collimator) 그리고 콘크리트를 방사화시킨다. 이러한 광중성자에 의한 방사화는 가속기 시설을 운영 및 해체 시 영향을 준다.^[10] 또한, 높은 광중성자 플럭스(Flux) 조건에서 재료의 미세 구조 및 기계적 특성에 손상(Damage)이 발생할 수 있다.^[11] 따라서, 9 MeV 선형가속기에 대한 방사화 특성 및 방사화 생성물(Activation product)에 대한 평가가 필요하다.

국내외 선행 연구는 방사화 및 방사화 생성물의 중요성을 언급하고 있다. 8 MeV 의료용 선형가속기에서 광중성자 검출에 관한 연구가 이루어졌다.^[12] 그리고, 의료용 선형가속기에서 발생한 방사화(Activation) 및 방사화 생성물(Activation product) 재고량(Inventory)을 평가에 관한 연구되었다.^[13] 게다가, 9 MeV 컨테이너 보안 검색용 선형가속기에서 방사화 평가를 통한 작업종사자에 피폭선량에 관해서도 연구가 되었다.^[14] 또한, NCRP 49 (1976)^[15], 79 (1984)^[8] 보고서에서 의하면, 10 MeV 미만의 중성자 수율(Yield)은 무시할 수 있었다. 하지만, NCRP 151 (2005)^[16] 보고서에서는 10 MeV 이하 납(Lead)과 강철(Steel)과 같은 높은 원자번호(Z)의 물질만으로 구성된 차폐나 수소 함량이 적은 차폐벽(Barrier)에서 예외적인 상황일 수 있다고 언급하였다.

본 논문은 컨테이너 보안 검색 시설에서 사용하는 9 MeV 선형가속기에서 발생한 광중성자에 의한 방사화 및 방사화 생성물에 대해 MCNP6와 FISPACT-II(4.0) 코드를 이용해 평가하였다. 그 결과를 분석하여 표적과 조준기 차이에 의한 방사화 생성물이 선형가속기의 운영 및 해체 시 영향 여부를 판단하고자 하였다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. 몬테카를로 전산모사 코드 시스템 구성

1.1. 입자 수송(Particle Transport) 해석 코드

MCNP (Monte Carlo N-Particle) 수송 코드는 미국 로스앨러모스 국립 연구소에서 개발했다.^[17] MCNP 코드는 광자, 전자, 중성자를 포함하며 방사선 입자 수송 해석 코드 중 가장 널리 사용되는 코드이다.^[18] 본 연구는 MCNP6 ver. 1.0을 사용하였다.

1.2. 방사화(Activation) 해석 코드

FISPACT 코드는 영국 원자력청(UKAEA)에서 개발하였다.^[19] FISPACT 코드는 범용적인 방사화 계산에 사용된다.^[20] 본 연구는 FISPACT-II ver. 4.0을 사용하였다. 핵 데이터는 TENDL-2017 library data 중성자 그룹을 적용하였다.

1.3. 방사화 해석 방법(Method)

컨테이너 보안 검색(CSI) 시설 운영 및 해체 시 선형가속기 및 주변 구조물에서 시료를 채취하여 방사화 생성물을 평가하는 데는 한계가 있다.^[20] 따라서 전산 코드를 이용하여 방사화 생성물에 대한 재고량(Inventory) 평가가 이루어진다.^[20]

본 연구는 일반적인 방사화 해석방법인 Rigorous Two Step (R2S) 방법을 이용하였다. R2S 방법은 2 단계(2 Step)로 구성된다. 1 단계(1 Step)는 선원 입자 분포와 핵반응률을 계산을 위해 일반적으로 사용하는 입자 수송 해석용 전산 코드인 MCNP6를 사용하였다.^[21] 2단계(2 Step)는 방사화 생성물 계산을 위해 재고량(Inventory) 계산 코드인 FISPACT-II를 사용하였다.^[21] Fig. 1은 R2S 방법을 구성하는 전산 코드 시스템 개요를 나타낸다.^[20]

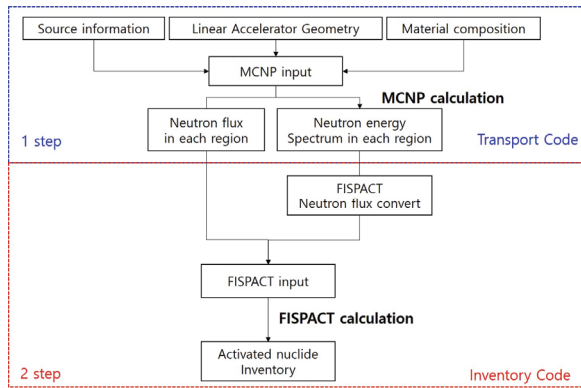


Fig. 1. Computer code system that constitutes the R2S method by MCNP6/FISPACT-II.

2. 광중성자 계산을 위한 전산모사 설계

2.1. 표적 종류에 따른 설계

Fig. 2는 표적 종류에 따른 설계를 보여준다. 표적은 텅스텐($Z=74$) 단일 물질(a)과 텅스텐($Z=74$)과 구리($Z=29$)로 이루어진 복합 물질(b)로 구성하였다.^[22-24] 단일물질 표적(a)은 한국원자력연구원^[25]에서 개발한 선형가속기이며, 복합물질 표적(b)은 미국 베리안 메디컬 시스템^[26]에서 개발된 선형가속기이다. 이를 통해, 단일물질 표적(a)과 복합물질표적(b)에서 발생하는 광중성자에 의한 방사화(Activation) 정도를 비교하고자 하였다. Table 1은 표적 정보를 나타내었다.^[25,26]

Table 1. Geometry information of the target

Type	Composition	Atomic number	Thickness [mm]
Single material	Tungsten(W)	$Z=74$	2
Composite material	Tungsten(W)	$Z=74$	1.8
	Copper(Cu)	$Z=29$	2.5

2.2. 부채꼴 조준기 물질에 따른 설계

Fig. 3은 부채꼴 조준기(Fan beam collimator)를 보여준다. 부채꼴 조준기의 엑스선 빔 방출 각도(a)는 22.75° 를 설정하였다.^[27] 또한, 부채꼴 조준기를 구성하는 물질은 납($Z=82$) 단일 물질(b)과 텅스텐($Z=74$)과 납($Z=82$)으로 구성된 복합 물질(c)로 구성하였다.^[22-24] 이를 통해, 단일물질(b)과 복합물질(c) 조준기에서 발생하는 광중성자 방사화 정도를 비

교하고자 하였다.

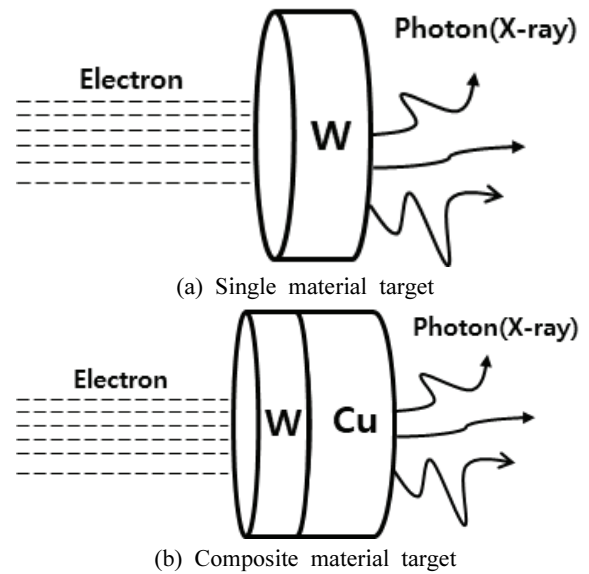
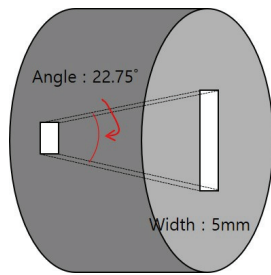


Fig. 2. Geometry (a) Single material target and (b) Composite material target.

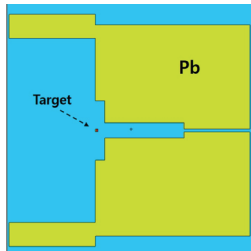
Table 2는 조준기 물질 정보를 나타낸다.^[28] Table 3은 광핵반응을 위한 표적 및 조준기 임계(Threshold) 에너지를 나타낸다.^[29] 표적의 구리($Z=29$)는 임계에너지가 9 MeV 이상으로 광핵반응을 일으키기 어려우므로 제외하였다. 또한, $(\gamma,2n)$ 반응을 일으키기 위해서는 10 MeV 이상의 에너지가 필요하다. 따라서, 본 연구는 (γ,n) 반응만 고려되었다.

Table 2. Materials information of the 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
		Pb-204	1.40
Lead(Pb)	11.35	Pb-206	24.10
		Pb-207	22.10
		Pb-208	52.40



(a) Fan beam collimator



(b) Fan beam collimator using only lead

Fig. 3. Diagram for MCNP calculation. (a) is a model of fan-beam collimator, (b) is drawing designed with MCNP.

을 기준으로 우측 벽과의 거리는 185 cm, 좌측 벽과의 거리는 215 cm, 뒷벽과의 거리는 520 cm, 1차 조준기용 벽(1st concrete wall)과의 거리는 130 cm으로 설정하였다.^[30] 차폐벽 두께는 천장, 우측, 좌측, 뒷벽은 150 cm이고, 조준기용 벽은 70 cm, 바닥은 50 cm로 설정하였다.^[30] Table 4는 콘크리트 차폐벽의 구성 성분^[31] 및 불순물^[32]을 나타낸다.

광중성자 측정은 Fig. 4에서 가속기가 설치된 방(a)의 콘크리트 두께를 10 cm 간격으로 세분화하여, 구조별로 관심영역(Cell)을 지정하였다. 구조별 관심영역(Cell)은 F4 tally를 적용하여 평균 광중성자 플럭스(Flux)를 측정하였다. 방사화 생성물 재고량 계산을 위한 선형가속기 0.1 mA의 전류는 FM tally를 이용하여 6.24150E+14 electrons·s⁻¹을 적용하였다.^[30] 보수적 평가를 위해 전류의 오차는 고려하지 않았다. 이를 통해, FISPACT-II 입력 파일에서 요구하는 초(second)당 단위면적(cm²)당 생성된 광중성자 수를 생성하였다.

Table 3. Threshold energies 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
$\gamma + W-186$	28.60	7.19	12.95
$\gamma + Pb-206$	24.10	8.09	14.82
$\gamma + Pb-207$	22.10	6.74	14.83
$\gamma + Pb-208$	52.40	7.37	14.11

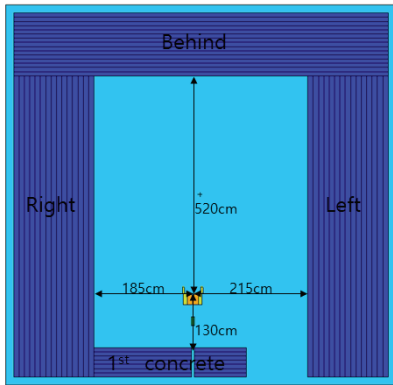
2.3. 컨테이너 보안 검색 시설 설계

Fig. 4는 컨테이너 검색 시설에서 본 연구에 사용된 가속기실(Accelerator room)을 보여준다. 본 연구에서 컨테이너 보안 검색 시설 설계는 김익현 연구를 바탕으로 설계하였다. 왜냐하면, 김익현^[30] 연구는 컨테이너 보안 검색 시설에 대해 차폐 설계 평가하였기 때문이다. 또한, NCRP 49 (1998)^[15], NCRP 151 (2005)^[16] 및 조영호^[14] 연구 결과에 따라, 컨테이너 보안 검색 시설 중 가속기가 설치된 방(Room)만을 고려하였다.

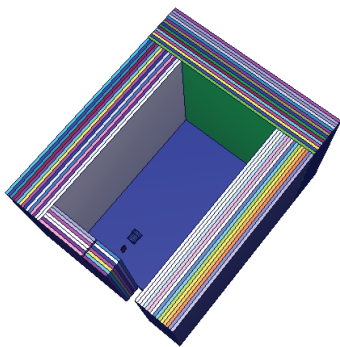
Fig. 4에서 가속기가 설치된 방(a)은 표적(Tager)

Table 4. Information of concrete material and impurity

Type	Element	Abundance [%]
Density		3.53 g/cm ³
Magnetite	Hydrogen	1.1
	Oxygen	8.7
	Mangan	3.3
	Aluminum	8.3
	Silicon	9.1
	Sulfur	0.5
	Calcium	25.1
	Titanium	19.2
	Vanadium	1.1
	Chrom	0.6
	Magnesium	0.7
Impurity	Ferrum	167.6
	Nickel	1.55E-04
	Cobalt	2.97E-04
	Cesium	1.21E-04
	Europium	3.93E-05



(a) Floor plan of room of linear accelerator



(b) Three-dimensional view of room of linear accelerator

Fig. 4. MCNP design drawings for accelerator room.

(a) is a plan view, (b) is three-dimensional view.

2. 방사화 생성물 계산

9 MeV 선형 가속기에서 발생한 광중성자는 표적 및 주변 구조물과 콘크리트 차폐벽을 방사화(Activation)시킨다. 방사화된 표적, 조준기 및 구조물들은 가동시간이 증가할수록 방사능이 증가한다. 따라서, 방사화 평가는 방사화 생성물의 방사능 변화를 평가해야 한다.

컨테이너 검색 시설의 가동 기간은 15년 내외였으나, 실제 조사 시간은 2,000시간 이내였다. 방사화는 선형가속기의 운영 조건에 따라서 달라질 수 있다. 따라서, 조사 시간은 보수적 평가를 위해 2,000시간 연속 가동으로 적용하였다.

방사화 평가를 위해 FISPACT-II 4.0에서 중성자 스펙트럼(Neutrons spectra)은 영국 국립 핵융합 연구소인 Culham센터(Culham Center for Fusion Energy, CCFE)의 CCFE-709 에너지 그룹을 수정하여 적용

하였다.^[19] 중성자 스펙트럼 변환은 LIMGRP와 GRPCOVERT 키워드를 이용하였다.^[19] 광중성자 최대 에너지는 2.34 MeV로 수정하였다. 중성자 스펙트럼 2.34 MeV는 기존 연구에서 표적으로부터 100 cm 거리에서 측정된 광중성자 최대 에너지였다.^[33] 또한, 기존의 광중성자 특성 연구^[33]에서 측정된 광중성자 스펙트럼을 적용하여, FISPACT-II fluxes file을 변경하여 계산하였다.

3. 해체 평가

해체(Decommissioning) 평가는 방사화 평가결과로부터 방사성폐기물의 비방사능을 산출해야 한다.

따라서, 해체 평가는 가동 정지(Shutdown) 후 시간에 따른 비방사능(Specific activity)을 통해 원자력 안전법에서 정하는 자체 처분 규정에 따라 처분 방법을 평가해야 한다.

컨테이너 검색 시설의 해체 평가는 가동 정지(Shutdown) 후 30일, 60일, 90일, 120일, 180일, 그리고 1년, 3년, 10년으로 설정하였으며, 컨테이너 검색 시설의 표적, 구조물 및 콘크리트 차폐벽에 대한 비방사능 변화량을 계산하였다. 이를 통해, 해체를 위한 적정 기간을 평가하고자 하였다.

해체 평가는 자체처분 허용농도를 만족하는지를 계산하였다. Table 5는 자체처분 허용농도는 원자력 안전위원회고시 제2020-6호인 「방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정」의 별표1을 적용하였으며, 이 표에 수록되지 않는 핵종은 0.1 Bq/g의 비방사능을 적용하였다. 또한, Fig. 5는 방사성폐기물의 평가 및 처분 방법을 요약한 것이다.^[34-36]

Table 5. Standard of permissible concentration of self-disposal

Radioactive nuclide	Permissible concentration [Bq/g]
I-129	0.01
Co-60, Cs-134, Eu-152, Eu-154, Ta-182,	0.1
C-14, Cl-36, Mn-52, Fe-59, Hf-181,	1
Ca-47, Co-62m, Ni-65, W-181, W-187,	10
H-3, Ca-45, Cr-51, Mn-53, Ni-59, Ni-63, Cu-64, Re-188, Os-191, Os-193	100
Si-31, P-33, Fe-55, Co-60m, Cs-134m, W-185, Re-186, Os-191m,	1,000
Co-58m, Ge-71, Rh-103m, Fm-254	10,000

Radioactivity waste classification	Classification Standard	Method of disposal
High Level Waste (HLW)	$T_{1/2} \geq 20\text{yr}$ and Specific activity emitting α -ray > 4000 Bq/g, and Heat generation > 2 kW/m ²	Deep geological disposal
Intermediate Level Waste (ILW)	Radioactivity concentration limit for LLW	Intermediate depth disposal
Low Level Waste (LLW)	$100 \leq \sum \frac{A_i}{CW_{L,i}} < ILW$	Near surface disposal
Very Low Level Waste (VLLW)	Exemption level $\times 100$ $CW \leq \sum \frac{A_i}{CW_{L,i}} < 100$	Landfill disposal
Clearance Waste (CW)	Exemption level $\sum \frac{A_i}{CW_{L,i}} < 1$	Restrictions on disposal Self-disposal of radioactive wastes

A_i = Specific activity of isotope (Bq/g) $CW_{L,i}$ = Permissible concentration for self-disposal(Bq/g)

Fig. 5. Summary of radioactivity waste evaluation standard and disposal methods.

III. RESULT

1. 광중성자 분포

1.1 컨테이너 검색 시설 구조물의 광중성자 분포

Fig. 6은 컨테이너 검색 시설 구조물의 광중성자 플럭스(Flux)를 나타낸다. 텅스텐 표적은 복합물질 표적과 납 조건기에서 광중성자 플럭스가 2.72870E+09 n·cm⁻²·s⁻¹으로 가장 높게 나타났다. 구리 표적은 복합물질 표적과 납 조건기에서 광중성자 플럭스가 7.72817E+08 n·cm⁻²·s⁻¹으로 가장 높게 나타났다. 납 조건기는 단일물질 표적에서 광중성자 플럭스가 2.90582E+07 n·cm⁻²·s⁻¹으로 가장 높게 나타났다. 복합물질 조건기는 단일물질 표적에서 광중성자 플럭스가 8.59987E+06 n·cm⁻²·s⁻¹으로 가장 높게 나타났다. 강철(Steel) 조건기는 단일물질 표적에서 광중성자 플럭스가 2.26058E+05 n·cm⁻²·s⁻¹으로 가장 높게 나타났다. 콘크리트 차폐벽은 단일물질 표적에서 광중성자가 9.3521E+04 n·cm⁻²·s⁻¹으로 가장 높게 나타났다.

1.2 콘크리트 벽 두께에 따른 광중성자 분포

Fig. 7은 컨테이너 검색 시설 콘크리트 차폐벽에서의 광중성자 플럭스를 보여준다. 콘크리트 벽은 10 cm 간격으로 세분화하여, 두께에 따라 광중성자 계산을 수행하였다. 콘크리트 차폐벽은 1차 콘크리트 조건기에서 광중성자 플럭스가 9.35321E+04 n·cm⁻²·s⁻¹으로 가장 높게 나타났다. 또한, 두께가 증가할수록 광중성자 플럭스가 지수함수적으로 감소하는 것을 볼 수 있다.

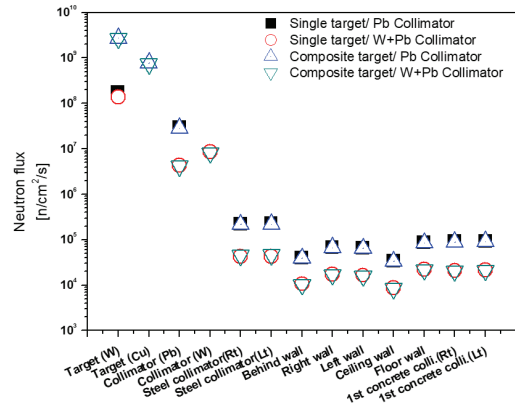


Fig. 6. Distribution of photoneutron flux in the structure wall of the container security inspection facility.

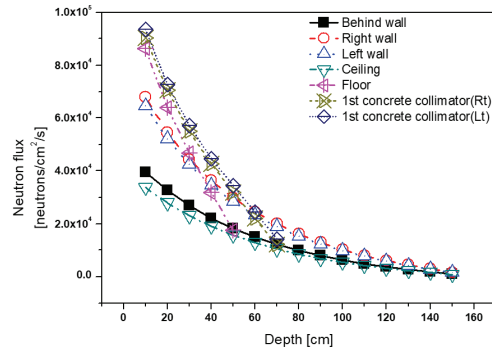


Fig. 7. Distribution of photoneutron flux in the shielding concrete wall of the container security inspection facility.

2. 방사화 생성물 평가

2.1 방사화 생성물에 대한 선행 연구 비교

본 연구 결과에 대한 신뢰성 확보를 위해 선행연구와 동일한 방사화 생성물을 비교하였다. 동일한 핵종만 비교한 이유는 물질의 조성에 따라 방사화 생성물이 다르기 때문이다. Table 6은 조사 (Irradiation) 후 1년에 대한 방사화 생성물을 비교한 결과이다.^[37]

Table 6. Comparison between previous studies and this study.

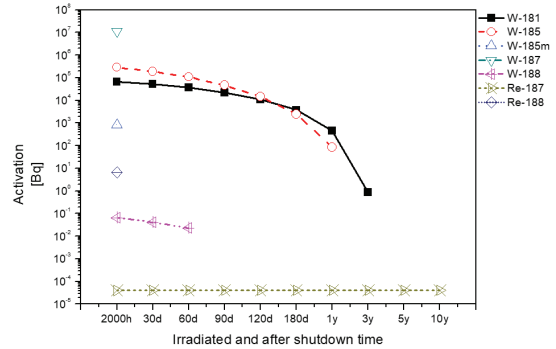
Activation product	Activity [Bq] of 1 year after start-up		Relative value (A-B)/B
	Cho & Kang ^[37] (A)	This study (B)	
12-Mg-27	4.92E+07	8.88E+06	4.54E+00
13-Al-28	2.79E+08	2.84E+07	8.82E+00
14-Si-31	3.02E+07	4.17E+04	7.24E+02
20-Ca-41	1.50E+02	3.98E-03	2.39E+09
20-Ca-45	4.37E+05	3.24E+00	4.53E+01
20-Ca-47	1.43E+04	2.09E+06	-7.90E-01
20-Ca-49	6.03E+05	3.41E+05	-9.58E-01
24-Cr-51	2.18E+04	1.92E+02	3.13E+03
24-Cr-55	6.70E+04	3.94E+06	-9.94E-01
25-Mn-56	2.62E+06	1.13E+05	-4.08E-01
26-Fe-55	1.29E+06	5.76E+07	-9.55E-01
26-Fe-59	4.14E+04	9.20E+06	-8.60E-01
74-W-185	2.67E+07	3.97E+02	1.03E+02
74-W-187	5.67E+07	1.08E+06	2.38E+01
82-Pb-209	1.34E+06	4.04E+04	1.40E+03

2.2 표적에서의 방사화 생성물

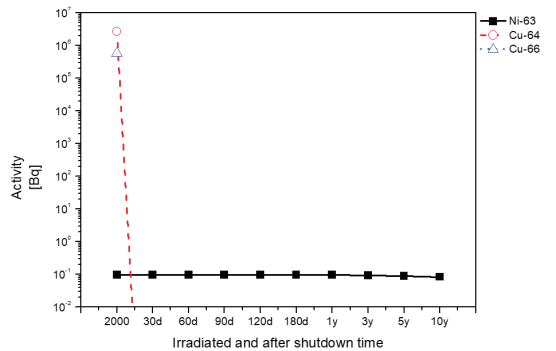
Fig. 8은 표적에서의 방사화 생성물의 방사능 및 변화량을 보여준다. 텅스텐 표적(a)의 구성 물질로부터 발생하는 주요 방사성 핵종은 텅스텐(W), 레늄(Re)이 측정되었다. 텅스텐 동위원소는 W-181, W-185, W-187, W-188이며, 안정 동위원소(Observationally stable)는 W-183, W-184, W-186이 계산되었다. 2,000시간 조사에 따른 W-181, W-185, W-187, W-188의 방사능은 각각 6.74E+04 Bq, 2.888E+05 Bq, 1.12E+07 Bq, 6.54E-02 Bq로 계산되었다. 한편, W-185m, W-187, Re-188의 반감기(Half-life)는 1.6분, 24시간, 17시간이며, 짧은 반감기로 인해 조사 후 30일 이내 완전히 붕괴(Decay)하였다.

구리 표적(b)의 구성 물질로부터 발생하는 주요 방사성 핵종은 니켈(Ni)과 구리(Cu)가 측정되었다. 2,000시간 조사에 따른 Ni-63, Cu-64, Cu-66의 방사능은 9.68E-02 Bq, 2.72E+06 Bq, 5.82E+05 Bq로 계산되었다. 한편, Cu-66의 반감기는 5.1분으로 짧은

반감기로 인해 조사 직후 완전히 붕괴(Decay)하였다.



(a) Tungsten targets



(b) Copper targets

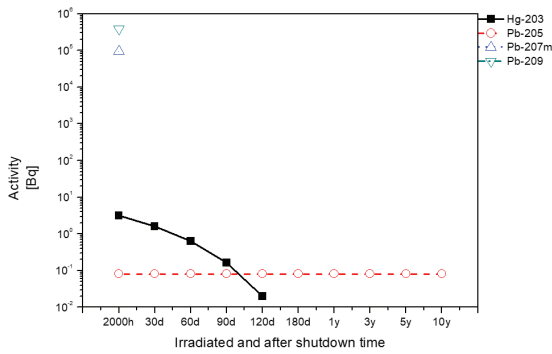
Fig. 8. Activation products at the targets of (a) tungsten and (b) copper.

2.3 조준기에서의 방사화 생성물

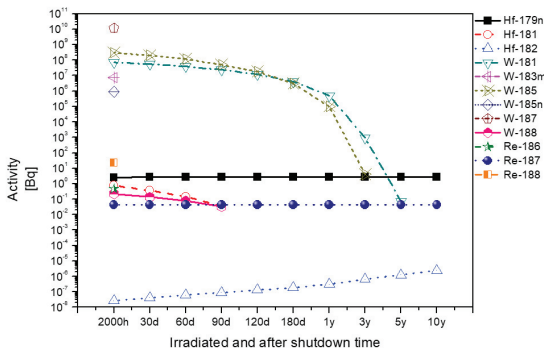
Fig. 9는 조준기(Collimator)에서의 방사화 생성물의 방사능 및 변화량을 보여준다. 납(Lead) 조준기(a)의 구성 물질로부터 발생하는 주요 방사성 핵종은 납(Pb)과 수은(Hg)이 계산되었으며, 안정 동위원소(Observationally stable)는 Pb-204가 계산되었다. 2,000시간 조사에 따른 Pb-205, Pb-207m, Hg-203의 방사능은 5.31E-08 Bq, 1.58E+00 Bq, 3.48E-06 Bq로 계산되었다. 한편, Pb-207m 과 Pb-209의 반감기는 806E-3초, 3.2시간으로 매우 짧아 조사 후 30일 이내 완전히 붕괴하였으며, Hg-203의 반감기는 46.6일로 조사 후 120일에 완전히 붕괴하였다.

텅스텐(W) 조준기(b)의 구성 물질로부터 발생하

는 주요 방사성 핵종은 하프늄(Hf), 텅스텐(W), 레늄(Re)이 계산되었다. 2,000시간 조사에 따른 Hf-179n, Hf-181, Hf-182의 방사능은 2.52E+00 Bq, 7.60E-01 Bq, 2.79E-08 Bq이며, W-181, W-185, W-187의 방사능은 7.11E-07 Bq, 3.03E+08 Bq, 6.28E+09 Bq이다. 반감기가 짧은 W-183m, W-185m, W-187, Re-186, Re-188은 조사 후 30일 이내 완전히 붕괴하였다.



(a) Lead collimator



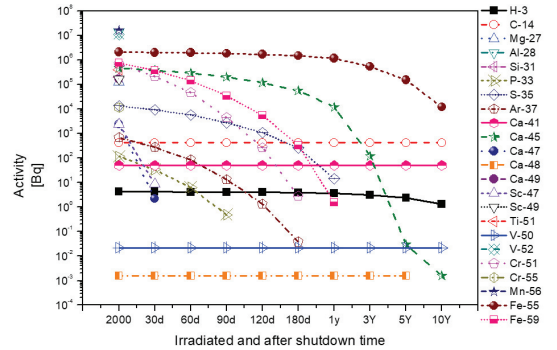
(b) Tungsten collimator

Fig. 9. Activation products at (a) lead collimator and (b) tungsten collimator.

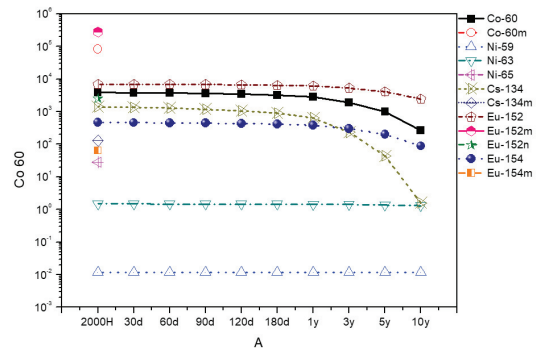
2.4. 콘크리트 차폐벽에서의 방사화 생성물

Fig. 10은 콘크리트 차폐벽에서의 방사화 생성물을 나타냈다. 불순물을 포함하지 않는 콘크리트 차폐벽(a)의 구성 물질로부터 발생하는 주요 방사성 핵종은 H-3, C-14, Ca-41, Mn-56, Fe-55 등이 있다. 2,000시간 조사에 따른 H-3, C-14, Ca-41, Fe-55의 방사능은 4.20E-00 Bq, 4.15E+02 Bq, 5.01E+01 Bq, 1.61E+07 Bq, 7.50E+05 Bq로 계산되었다.

불순물을 포함하는 콘크리트 차폐벽(b)의 구성 물질로부터 발생하는 주요 방사성 핵종은 Co-60, Ni-63, Cs-134, Eu-152, Eu-154 등이 있다. 2,000시간 조사에 따른 Co-60, Ni-63, Cs-134, Eu-152, Eu-154의 방사능은 3.84E+03 Bq, 1.48E+00 Bq, 6.0E+03 Bq, 4.60E+02 Bq이었다.



(a) Impurity without concrete



(b) Impurity within concrete

Fig. 10. Activation products at concrete (a) without impurity and (b) within impurity.

3. 해체 평가 결과

선형가속기에 2,000시간 조사에 따른 방사화 생성물 평가 결과는 표적(Target)을 제외한 구리 표적, 조준기, 콘크리트는 조사 직후 자체처분 허용농도를 초과하지 않았다. 다만, 표적은 자체처분 허용농도 기준을 만족하는 기간을 평가하였다.

Table 7은 텅스텐 표적에서의 방사화 생성물에 대한 자체처분 허용농도 및 2,000시간 조사 후 가동정지하는 동안의 핵종별 비방사능(Specific activity)을

보여준다. 계산은 Fig. 5의 규제 해제(Clearance) 준위에 해당하는 자체처분 허용농도($\sum_i \frac{A_i}{CW_{L,i}}$)을 적용

하였으며, 그 결과 표적은 90일에 자체처분 허용농도 이하가 되는 것을 확인하였다.

Table 7. Result of the evaluate of permissible standards for self-disposal

Activation product	Permissible concentration for self-disposal (A_i) [Bq/g]	Specific activity of activation product ($CW_{L,i}$) [Bq/g]	Specific activity after shutdown time ($CW_{L,i}$) [Bq/g]		
			30 d	60 d	90 d
74-W-181	10	2.50E+01	1.93E+01	1.37E+01	8.14E+00
74-W-185	1,000	1.07E+00	7.04E-01	4.04E-01	1.73E-01
74-W-185m	0.1	1.36E-01	-	-	-
74-W-187	10	4.16E+03	-	-	-
74-W-188	0.1	2.89E-06	1.85E-06	1.02E-06	-
75-Re-187	0.1	1.49E-07	1.51E-07	1.51E-07	1.51E-07
75-Re-188	100	2.48E-04	-	-	-
Total specific activity		4.20E+02	1.93E+00	1.37E+00	8.14E-01
Waste level ($CW < 1$)		LLW	VLLW	VLLW	Clearance waste

IV DISCUSSION

본 연구는 컨테이너 보안 검색용 선형가속기에서 발생하는 방사화 평가에 관한 연구이다. 첫째, 선형가속기에서 발생한 광중성자를 분포를 분석하였다. 그 결과, 표적(Target)에서 가장 많은 분포를 하는 것을 보였다. 특히, 복합물질 표적과 납 조준기를 사용할 때 더 많은 광중성자 분포를 확인할 수 있었다. 또한, 콘크리트에서의 중성자 분포는 10 cm 깊이에서 가장 높았으며, 깊이가 증가할수록 지수함수적으로 감소하는 경향을 보였다. 여기서 측정된 총 광중성자 플럭스(Total photoneutron flux)는 FISAPCT-II의 입력 파일에 적용하였다.

둘째, FISAPCT-II를 이용한 방사화 생성물을 분석하였다. 2,000시간 조사는 대부분 중성자와 물질과의 상호 작용 중 포획(n,γ)이 발생하였다. 텅스텐 표적은 2,000시간 조사 후 W-187에 의한 감마선의 영향이 큰 것으로 확인되었다. 또한, 표적 및 텅스텐 조준기에서 W-181이 검출되었으며, 이는 샌디아 국립 연구소의 Varex 9 MeV 선형가속기 운영

경험 자료에서도 언급되었다.^[38] 특히 W-181은 휴대형 핵종분석기로 검출되지 않을 수 있다. 또한, 콘크리트는 불순물을 포함하는 경우 Co-60, Cs-134, Eu-152, Eu-154 핵종이 부산물(By-product)로 생성됨을 확인하였다. 불순물은 ppm 정도로 미량 포함되지만, 반응 단면적이 크고 딸핵종에서 고에너지의 붕괴 감마선을 발생시킨다. 측정된 핵종은 규제 면제 최소 수량 및 자체처분 허용농도 이하로 나타났다. H-3는 고속 중성자(Fast neutron)에 의한 (n,α) 및 (n,p) 반응 때문에 생성되는 것을 알 수 있습니다. 이러한 방사화 생성물의 분석에서는 H-3, C-14, Ni-63, Cu-66, W-188, Pb-209와 같은 순수 베타 방출체(Pure beta emitter)로 측정 및 분석에 어려움이 있다.

셋째, FISAPCT-II를 이용한 방사화 생성물의 붕괴에 따른 비방사능이 자체처분 허용농도를 만족하지는 여부를 분석하였다. 그 결과 표적을 제외한 구조물 및 콘크리트에서는 조사 직후 자체처분 허용농도를 만족하여, 일반폐기물로 처분할 수 있었다. 하지만, 텅스텐 표적의 경우 W-181 핵종으로

인해 90일 이후 자체처분 허용농도를 만족하는 것으로 평가되었다.

NCRP 151 보고서에서는 10 MeV이하 납(Lead)과 강철(Steel)과 같은 높은 원자번호(Z)의 물질만으로 구성된 차폐나 수소 함량이 적은 차폐벽(Barrier)에서 예외적인 상황일 수 있다. 이에 따라, 본 연구는 납과 강철 그리고 수소 함량이 적은 차폐벽을 구성하고, 높은 중성자 스펙트럼을 적용하였다. 본 연구 결과는 중성자 수율 및 방사화 정도가 미미한 것으로 보였다. 이는 기존 연구와 유사한 결과로 나타났다. 하지만, 표적(Target)에서는 W-181 핵종이 검출되고, 불순물을 포함할 경우 콘크리트에서 Co-60, Cs-134, Ni-63, Eu-152, Eu-154 핵종이 부산물로 생성됨을 확인하였다는 점을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과에 따라 W-181은 수리 또는 해체를 위해 분해할 때 문제가 될 것으로 생각된다. 더욱이, 콘크리트 불순물에서 생성된 Co-60, Cs-134, Ni-63, Eu-152, Eu-154 핵종이 잔류 방사선의 90% 이상 차지하는 것으로 알려져 있기 때문이다.^[39]

본 연구 제한점은 첫째, 표적에서의 (ν, p) 반응은 고려하지 못했다. 그래서, 양성자(Proton)에 의한 핵변환을 고려하지 못했다. 둘째, 본 연구가 실험적 분석이 아닌 전산 모사(Computer simulation)라는 점이다. 따라서, 시료 측정을 통한 검증이 필요하다.

V. CONCLUSION

본 연구는 컨테이너 검색용 선형 가속기 9 MeV 에너지에서의 방사화 생성물을 평가하였다. NCRP 151 보고서 예외적인 상황을 고려하고자 하였다. 이를 위해, 에너지 조건을 고정한 상태에서 중성자 스펙트럼과 높은 원자번호의 구조물을 설정하였고, 악조건 상황을 가정하여 보수적인 방사화 평가를 진행하였다.

본 연구 결과 중성자 수율 및 방사화 정도는 미미한 것으로 나타났으며, 표적(Target) 및 텅스텐 조건기에서 W-181이 발생하여 해체 시 고려해야 할 것으로 생각된다. 또한, 불순물이 포함된 콘크리트에서 높은 감마선을 방출하는 Co-60, Cs-134, Ni-63, Eu-152, Eu-154 핵종이 부산물로 미량 생성됨을 확

인하였다. 결과적으로, 9 MeV 선형가속기 해체는 보수적으로 가동 정지 후 90일 진행하는 것이 안전할 것으로 생각된다.

본 연구는 선형가속기에서 발생하는 방사화 생성물을 평가하였다. 기존 연구들은 대부분 의료용 선형가속기 10 MeV 이상의 에너지에서 방사화 평가가 진행되었다. 하지만, 본 연구는 컨테이너 검색용 9 MeV 에너지를 평가하였다. 본 연구는 선형가속기 방사화 폐기물 부품 관리에 관한 기초 자료를 제시하였다. 또한, 컨테이너 검색용 선형가속기 해체 시 처분 제한치 및 자체 처분치를 만족하는 농도 기준을 입증하는데 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

본 연구는 컨테이너 보안 검색용 9 MeV에서 발생하는 방사화 및 방사화 생성물을 평가하였다. 본 연구는 고체 재료(Solid material)에서 발생한 방사화 및 방사화 생성물을 평가하였다. 하지만, 선형가속기 방사화는 표적 및 구조물 외에도 공기, 냉각수 및 지하수에서 발생할 수 있다. 따라서, 향후 연구는 선형가속기에서 생성된 광중성자에 의한 공기, 냉각수 및 지하수에 대한 방사화에 관한 연구가 필요하다.

Reference

- [1] S. W. Cho, J. S. Koo. "A Study on the Impact and Countermeasure of US 100% Container Scanning on Korean Parties concerned in Global Supply Chain", *Journal of Industrial Economics and Business*, Vol. 22, No. 3, pp. 1461-1485, 2009.
- [2] C. K. Youn, *A Study on Security Reinforcement of International Transport for Import and Export Cargo*, Konkuk University, pp. 23-46, 2010.
- [3] L. H. Lee, "Supply Chain Security-Are you ready?", *Stanford Global Supply Chain Management Forum*, Stanford University, GSCMF-W1-2004, 2004.
- [4] S. H. Han, "The Security Strategy and the Misuse by Terrorists of the Maritime Container System Focused on Transport Authorities", *The Journal of Korea Research Society for Customs*, Vol. 9, No. 3, pp. 29-49, 2008.
- [5] B. H. Seo, M. C. Lee, J. G. Seo, S. S. IM, H. S.

- Im, *Status of sanctions against North Korea and prospects for easing*, Korea Institute for National Unification, KINU Policy Research Series 18-03, pp. 25-33, 2018.
- [6] G. S. Jo, "Large Container Radiation Inspection Technology and Domestic Status", *Radioisotope Journal*, Vol. 21, No. 2, pp. 26-32, 2006.
- [7] 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.
- [8] NCRP, *Neutron Contamination from Medical Electron Accelerator*. National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP Report No. 79, 1984.
- [9] IAEA, *Radiation protection in the design of radiotherapy facilities*. International Atomic Energy Agency, Safety Reports Series No. 47, 2006.
- [10] J. H. Lee, S. W. No, J. K. Lee, H. K. Jang, J. Y. Kim, T. S. Ha, "Evaluation of Activation Characteristics of 10 MeV Electron Accelerator", Koreans Association For Radiation Protection, A Summary of the Spring Conference papers, pp. 368-369, 2014.
- [11] IAEA, *Material Properties Database for Irradiated Core Structural Components for Lifetime Management for Long Term Operation of Research Reactors*. International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-1871, pp. 8-16, 2019.
- [12] 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.
- [13] D. Y. Lee, *Neutron Activation Analysis of the Medical Linear Accelerator – Maintenance, Repair and Dismantling-*, Catholic University of Pusan, 2017.
- [14] Y. H. Cho, *Analysis of Activation Products by (n, γ) Reaction in a Cargo Inspection Facility Based on High Energy X-Ray*, Seoul National University, 2006.
- [15] NCRP, *Structural Shielding Design and Evaluation for Medical Use of X Ray and Gamma the Rays of Energies up to 10 MeV*, National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP Report No. 49, 1976.
- [16] NCRP, *Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities*, National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP Report No. 151, 2005.
- [17] LANL, *MCTN6TM USER'S MANUAL*, Los Alamos National Laboratory, LA-CP-13-00634, Rev. 0, 2013.
- [18] NCRP, *Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities*, National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP Report No. 144, 2005.
- [19] UKAEA, *The FISPACT-II User Manual*, UK Atomic Energy Authority, UKAEA-R(18)001, 2018.
- [20] G. Y. Cha, S. Y. Kim, J. M. Lee, Y. S. Kim, "The Effects of Impurity Composition and Concentration in Reactor Structure Material on Neutron Activation Inventory in Pressurized Water Reactor", *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology*, Vol. 14, No. 2, pp. 91-100, 2016.
<http://dx.doi.org/10.7733/jnfcwt.2016.14.2.91>
- [21] KARA, *Implementation Level Diagnosis for the Field Study of Radiation Safety Management and Development of Assessment Technology*, Korean Association for Radiation Application, pp.143-186, 2013.
- [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] C. H. Lee, J. O. Kim, Y. J. Lee, C. H. Jeon, J. E. Lee, B. I. Min, "A Study on Photon Characteristics Generated from Target of Electron Linear Accelerator for Container Security Inspection using MCNP6 Code", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 14, No. 3, pp. 193-201. 2020.
<http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2020.14.3.193>
- [24] C. H. Lee, J. O. Kim, Y. J. Lee, C. H. Jeon, J. E. Lee, B. I. Min, "A Study on Photoneutron Characteristics Generated from Target and Collimator of Electron Linear Accelerator for Container Security Inspection using MCNP6 Code", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 14, No. 4, pp. 445-465. 2020.
<http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2020.14.4.455>
- [25] 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.
- [26] W. R. Nelson, "X-ray Production Yields for Linatrons 200A, 1000A and 3000A", WRN-98-1, pp. 1-3, 1998.
- [27] 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>
- [28] Nuclear Data Center at KAERI
"http://atom.kaeri.re.kr"
- [29] IAEA, *Hnadbook on photonuclear data for applications Cross-sections and spectra*, International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-1178. pp.18-264. 2000.
- [30] 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.
- [31] ANSI/ANS, *Nuclear Analysis and Design of Concrete Radiation Shielding for Nuclear Power Plants*, American Nuclear Society, pp. 1-25, 2006.
- [32] S. B. Hong, B. K. Seo, D. K. Cho, G. H. Jeong, J. K. Moon, "A Study on the Inventory Estimation for the Activated Bioshield Concrete of KRR-2", Journal of Radiation Protection, Vol. 37, No. 4, pp. 202-207, 2012.
<http://dx.doi.org/10.14407/jrp.2012.37.4.202>
- [33] C. H. Lee, J. O. Kim, Y. J. Lee, C. H. Jeon, J. E. Lee, B. I. Min, "A Study on Photoneutron Characteristics Generated from Target and Collimator of Electron Linear Accelerator for Container Security Inspection using MCNP6 Code", Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 14. No. 4, pp. 455-465, 2020.
- [34] Regulation on radioactive waste classification and self-disposal standards, attached table 1.
- [35] Regulation on radioactive waste classification and self-disposal standards, attached table 2.
- [36] G. Y. Cha, S. Y. Kim, J. M. Lee, Y. S. Kim, "The Effects of Impurity Composition and Concentration in Reactor Structure Material on Neutron Activation Inventory in Pressurized Water Reactor" Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology, Vol. 14, No. 2, pp. 91-100, 2016.
<http://dx.doi.org/10.7733/jnfewt.2016.14.2.91>
- [37] Y. H. Cho, B. S. Kang, "Analysis of the Photoneutron Activation Effects Generted by 9 MeV X-ray in a Container Cargo Inspection Facility", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 140, No. 1, pp.1-8, 2020. <http://dx.doi.org/10.1093/rpd/ncq033>
- [38] SAND, Operational Experience with Varex 6/9 MeV Linac, Sandia National laboratory, SAND2018-2797C
<https://www.osti.gov/servlets/purl/1503427>
- [39] D. H. Kim, " Analysis of Activation and Use the code", Korean Association for Radiation Application, 8th Specialty Course, 2019.

컨테이너 보안 검색용 9 MeV 전자 선형가속기에서 발생한 방사화 특성평가에 관한 연구

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

¹인제대학교 재난관리학과

²인제대학교 원자력응용공학부

요 약

본 연구 목적은 컨테이너 보안 검색용 선형가속기에서 발생하는 방사화 특성을 평가하는 것이다. 전산모사 설계는 첫째, 표적은 텅스텐(Z=74) 단일물질 표적 및 텅스텐(Z=74)과 구리(Z=29) 복합물질 표적으로 구성하였다. 둘째, 부채꼴(Fan beam) 조준기는 물질에 따라 납(Z=82) 단일 물질과 텅스텐(Z=74)과 납(Z=82)의 복합물질로 구성하였다. 셋째 선형가속기가 위치한 방(Room)의 콘크리트는 Magnetite type 및 불순물(Impurity)을 포함하였다. 연구 방법은 첫째, MCNP6 코드를 이용하여 선형가속기 및 구조물을 F4 Tally로 광중성자 플럭스(Flux)를 계산하였다. 둘째, MCNP6 코드에서 계산된 광중성자 플럭스를 FISPACT-II에 적용하여 방사화 생성물을 평가하였다. 셋째, 방사화 생성물의 비방사능을 통해 해체 평가를 진행하였다. 그 결과 첫째, 광중성자 분포는 표적에서 가장 높게 나왔으며, 조준기 및 10 cm 깊이의 콘크리트 순으로 나타났다. 둘째, 방사화 생성물은 텅스텐 표적 및 조준기에서 W-181, 불순물이 포함된 콘크리트에서 Co-60, Ni-63, Cs-134, Eu-152, Eu-154 핵종이 부산물(by-product)로 생성되었다. 셋째, 해체 시 텅스텐 표적은 90일 이후 자체 처분 허용 농도를 만족하는 것으로 보였다. 이러한 결과는 9 MeV 에너지에서의 광중성자 수율(Yield) 및 방사화 정도가 미미한 것으로 확인할 수 있었다. 하지만, 선형가속기 텅스텐 표적 및 조준기에서 발생한 W-181은 수리를 위한 분해 시 피폭의 영향을 줄 수 있을 것으로 생각된다. 따라서, 본 연구는 컨테이너 보안 검색용 선형가속기 방사화된 부품관리에 관한 기초 자료를 제시한 것이다. 또한, 컨테이너 보안 검색용 선형가속기 해체 시 자체처분을 만족하는 농도 기준을 입증하는데 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

중심단어: 컨테이너 보안 검색, MCNP6, FISPACT-II(4.0), 선형가속기, 방사화 생성물

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