

# 모의실험을 통한 선형가속기 부품과 차폐벽의 방사화 평가

## Evaluate the Activation of Linear Accelerator Components and Shielding Wall through Simulation

이동연\*, 박은태\*\*, 김정훈\*\*\*

동남권원자력의학원 방사선종양학과\*, 인제대학교 부산백병원 방사선종양학과\*\*,  
부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과\*\*\*

Dong-Yeon Lee(gymnist@naver.com)\*, Eun-Tae Park(linacpet@hanmail.net)\*\*,  
Jung-Hoon Kim(donald@cup.ac.kr)\*\*\*

### 요약

본 연구는 의료용 선형가속기 사용에 따른 차폐벽과 가속기 주변 부품의 방사화에 대한 평가를 수행하였다. 평가방법은 에너지 20 MV와 가동시간 1 일부터 ~ 30 년까지 각각 모의실험을 진행 하였으며, 평가부분은 선형가속기 헤드 부분과 차폐벽을 이루고 있는 콘크리트에 대하여 실험을 진행하였다.

그 결과, 중성자 양은 광자가 생성되는 타깃을 중심으로 거리에 따라 중성자가 분포하는 것으로 분석되었다. 특히 타깃의 중성자 플럭스는  $9.19E+08$  개/cm<sup>2</sup>/sec로 가장 높게 나타났다. 차폐벽은 상대적으로 타깃과 인접한 부분이 높게 분석되었으며, 그 값은 28967 개/cm<sup>2</sup>/sec로 계산되었다. 이를 바탕으로 방사화를 분석한 결과 가동시간이 길수록 방사능이 높았으며, 대부분 10년부터 방사화가 포화되는 것으로 분석되었다. 또한 방사화로 인해 생성된 핵종은 대표적으로 Co-60, W-181, 185, 187, Na-24, Ca-45, Mn-54, 56, Fe-55, 59 등으로 나타났다.

■ 중심어 : | 선형가속기 | 방사화 | 방사능 | MCNPX | 모의실험 |

### Abstract

This study evaluated the activation of the shielding wall and the components around the accelerator by using the medical linear accelerator. We performed simulations for energy values of 20 MV with the operating time ranging from day 1 to 30 years, and linear accelerator head and shielding wall concrete were also evaluated. The results showed that neutrons in large quantities were analyzed using high energy around the target point where photons were formed. Based on the activation analysis with these results, radioactivity increased with an increase in operation time and activated nuclides usually start saturating in 10 years. Furthermore, the general types of nuclides formed owing to the activation were Co-60, W-181, 185, 187, Na-24, Ca-45, Mn-54, 56, and Fe-55, 59.

■ keyword : | Linear Accelerator | Activation | Radioactivity | MCNPX | Simulation |

\* 이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단-원자력연구개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2016M2B2A9A02944626).

접수일자 : 2017년 06월 19일

심사완료일 : 2017년 08월 03일

수정일자 : 2017년 07월 19일

교신저자 : 김정훈, e-mail : donald@cup.ac.kr

## I. 서론

1970년대 초반 대한민국에 의료용 선형가속기가 처음 도입된 이후, 2016년까지 약 160대가 운용되고 있다 [1]. 선형가속기를 이용한 방사선 치료는 4~25 MV 범위의 X-선을 이용하고 있으며[2], 표면선량은 낮추고 인체 내 깊은 곳까지 영향을 줄 수 있는 고에너지 X-선을 선호하고 있다[3].

그러나 특정 에너지 이상의 고에너지 X-선을 이용할 경우 광핵반응(Photonuclear Reaction)에 의한 중성자가 발생 될 수 있으며[4], 이 때 방출된 중성자는 환자 및 종사자에게 예측불가능한 방사선피폭을 유발 시킬 수 있다. 특히 중성자의 경우 입자 형태이면서 하전을 띠지 않기 때문에 산란과 흡수를 동반하며, 에너지에 따라 반응하는 상호작용 확률이 다르다. 따라서 이에 대한 영향을 예측하는 것은 상당히 어렵다[5].

선형가속기에서 광핵반응으로 발생하는 중성자에 대한 연구는 약 1990년대 후반부터 활발히 진행되고 있다. 선형가속기에서 발생하는 중성자 특성에 대한 연구를 시작으로 2000년 후반부터는 중성자로 인해 발생할 수 있는 2차적인 문제인 방사화에 대한 연구를 진행하여 현재까지 계속해서 보고하고 있다. 중성자 특성에 대한 연구를 진행한 논문은 Chibani et al(2003)[6], Julian (2007)[7], Lee JO(2005)[2] 등이 있으며, 방사화에 대한 연구를 진행한 논문은 rawlinson et al. (2002)[8], wang et al. (2005)[9], fischer et al. (2006)[10] 등이 대표적이다. 특히 방사화 관련한 연구는 감마스펙트로스코피를 이용하여 실측을 한 연구로서 실제 방사화가 일어난 다는 것을 확인할 수 있는 연구이다. 따라서 현재 사용하고 있는 의료용 선형가속기는 방사화가 진행되어 있을 가능성이 높고 이에 따라 유지, 보수 시 작업자에 대한 피폭문제가 발생될 것이며, 특히 설비의 노후화로 인한 선형가속기의 해체 시 방사선학적 안전성 확보가 현안으로 대두 될 것이다.

이에 본 연구는 선형가속기에서 발생하는 중성자에 대한 양을 먼저 파악한 후, 선형가속기 헤드를 구성하는 재질(텅스텐, 구리)과 치료실을 차폐하고 있는 콘크리트를 대상으로 모의실험을 통해 방사화 정도를 분석

하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

본 연구는 방사선량을 계산하기 위해 컴퓨터를 이용한 모의실험을 진행하였으며, [그림 1]은 실험에 대한 전체적인 흐름도이다. 선형가속기에서 발생하는 광자와 중성자의 양을 계산하기 위하여 MCNPX(ver.2.5.0)를 사용하였으며, 중성자로 인해 진행될 방사화 평가는 FISPACT-2010 코드를 사용하였다.

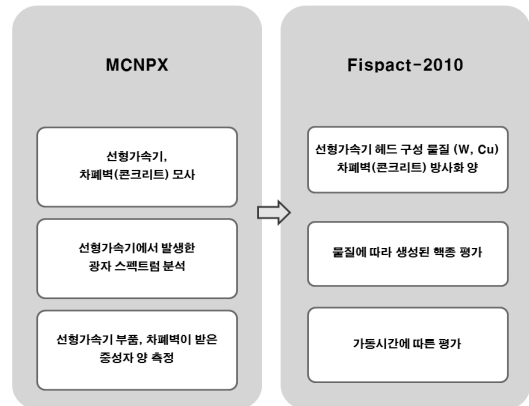


그림 1. 본 연구에서 모의실험에 대한 전체적인 흐름

### 1. 선형가속기 차폐벽의 기하학적 구조

선형가속기의 경우 실제 임상에서 사용하는 장비를 단순화시켜 두부(Head) 부분을 중점적으로 모사하였다. 모사한 부품은 타깃, 플랫폼필터, 1차콜리메이터, 2차콜리메이터, 다엽콜리메이터를 모사하였으며 각 부품별 기하학적 구조를 [그림 2]에 나타내었다. 콜리메이터는 밀도 19.4 g/cm<sup>3</sup>의 텅스텐, 플랫폼 필터는 8.94 g/cm<sup>3</sup>의 구리, 타깃은 구리와 텅스텐으로 설정하였다.

[그림 3]은 차폐벽에 대한 기하학적 구조이며, IAEA에서 제시한 방사선치료 장비에 대한 설계[11]를 참고하였다. 벽의 두께는 200 cm, 치료실 내의 크기는 가로 600 cm, 세로 800 cm, 높이 270 cm으로 설정하였으며, 미로형을 만드는 부분(maze)의 두께는 100 cm, 통로의

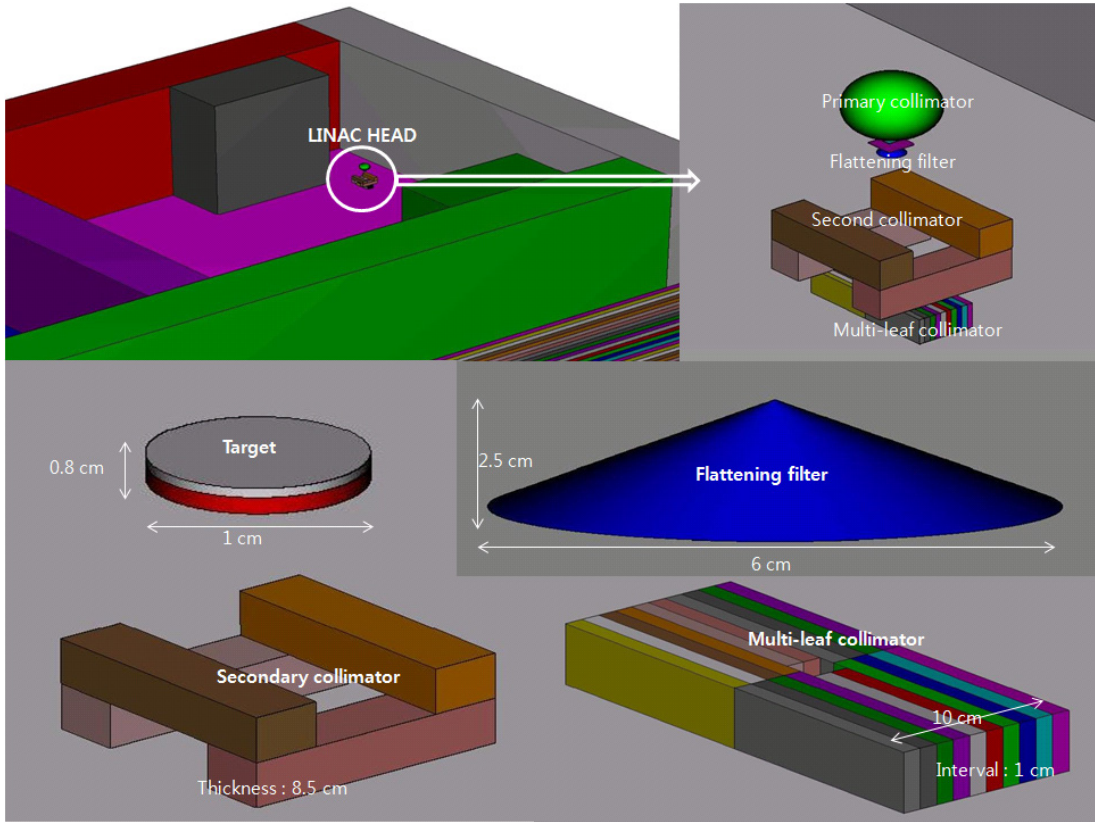


그림 2. MCNPX를 통해 모의모사한 선형가속기의 모습

너비는 150 cm로 하였다. 또한 선형가속기가 회전하면서 1차선이 조사되는 부분은 50 cm 두께의 콘크리트를 추가하였다.

콘크리트 재질은 구성하는 성분의 차이에 따라 NBS 03, NBS 04, Magnetite, Barytes, Magnetite and steel, Limonite and steel 6 등으로 분류하며[12], 이 중 본 연구에서는 Magnetite and steel을 사용하였다. 이것은 구성성분 중 철 함유량이 가장 높은 것을 사용함으로써 방사화 진행으로 인해 생성되는 코발트 핵종을 분석하기 위함이다. Magnetite and steel의 밀도는  $4.64 \text{ g/cm}^3$ 이며 철의 함유량은  $3.512 \text{ g/cm}^3$ 이다.

## 2. 광자 스펙트럼 계산

본 연구에서 모사한 선형가속기 두부에 대한 신뢰성을 먼저 검증하기 위해 발생한 광자에 대한 에너지 스펙트럼, 특성에너지, 평균에너지, 광자플럭스를 측정하여 분석하였다. 광자 측정 방법은 타겟 바로 아래에 반

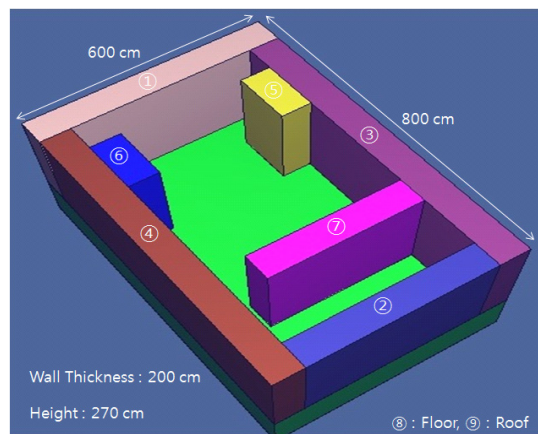


그림 3. 선형가속기를 차폐하고 있는 차폐벽의 구조

펙트럼, 특성에너지, 평균에너지, 광자플럭스를 측정하여 분석하였다. 광자 측정 방법은 타겟 바로 아래에 반

경 5 cm인 가상의 원형 검출기를 위치시켜 광자의 플럭스를 측정하였다. 이 때 Tally는 F5를 사용하여 전자 1개당 생성된 광자 플럭스(Photon number/cm<sup>2</sup>/e)를 측정하였으며, 10 keV 단위별로 광자 플럭스를 측정하여 에너지 스펙트럼을 획득하였다.

### 3. 중성자 플루언스 계산

선형가속기 헤드를 구성하는 부품(1차 조리기, 타깃, 선속평탄여과판, 2차 조리기, MLC)과 차폐벽이 받은 중성자의 양을 측정하였다. 차폐벽의 방사화 평가는 [그림 3]과 같이 ① ~ ⑨ 총 9개 구역으로 설정하여 분석하였다. 또한 각 부품을 대상으로 Tally F4를 사용하여 전자 한 개당 생성된 중성자 플럭스(Neutron number/cm<sup>2</sup>/e)를 측정하였다. 이후 선형가속기의 선량률은 분당 6 Gy로 가정하여 초당 측정된 중성자 플럭스(Neutron number/cm<sup>2</sup>/sec)를 환산하였다.

### 4. 방사화 평가

FISPACT-2010은 영국원자력공사(United Kingdom Atomic Energy Authority; UKAEA)에서 개발된 코드로서 핵융합시설, 핵분열로 고에너지 가속기 등의 방사화 평가에 적용할 수 있는 코드이다[13].

앞서 MCNPX를 이용하여 측정된 중성자 플루언스(Neutron number/cm<sup>2</sup>/sec) 값을 입력값으로 사용하였다. 선형가속기에서 발생한 중성자의 경우, 상대적으로 낮은 에너지 영역대로서 EAF-2007 WIMS 69 군 라이브러리를 사용하여 평가하였다.

방사화 평가는 부품과 차폐벽에서 중성자 플럭스가 가장 높게 측정된 부분을 선택하여 평가하였다. 방사화가 진행되는 시간에 해당하는 선형가속기 가동시간의 경우 24시간 중 하루 8시간 동안 사용한다는 가정 하에 1일, 1주일, 1달, 1년, 10년, 20년, 30년 기간을 나누어 평가를 실시하였다. 이와 같이 평가한 이유는 방사선 방어학적인 관점에서 보수적으로 평가하기 위함이다.

끝으로 방사화 평가 후 발생한 핵종들에 대하여 시간에 따른 비방사능(Bq/kg)을 산출하였으며, 실험결과 나타난 모든 핵종들 중 반감기와 방출 에너지, 규제해제 농도 등을 고려하여 방사선피폭과 선형가속기 해체 시

발생하는 방사성폐기물재고량 등 향후 문제를 일으킬 것으로 판단되는 핵종을 선택하여 분석하였다.

[표 1]은 본 연구에서 참고한 규제해제 농도에 대한 기준으로 원자력안전위원회 고시 제2014-003호 방사성 폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정에서 제시하고 있는 방사성핵종별 자체처분 허용농도이다[14].

표 1. 방사성 폐기물 분류 및 자체처분 기준

Radionuclide	Clearance (Bq/g)
Mn-54, Co-60, Zn-65, Ta-182, etc.	0.1
Na-24, Sc-48, Mn-52, Fe-59, Co-57, Co-58, Hf-181, Os-185 etc.	1
K-43, Ca-47, Mn-56, Fe-52, Co-55, Ni-65, W-181, W-187, etc.	10
S-35, Ca-45, Sc-47, Cr-51, Mn-53, Co-61, Ni-59, Ni-63, Os-191, etc.	100
Si-31, P-32, P-33, Fe-55, Co-60m, Zn-69, W-185, Re-186, Os-191m, etc.	1000

## III. 실험 결과

### 1. 광자 스펙트럼 분석

[그림 4]는 전자선 20 MeV를 가속시켰을 때 발생한 광자의 에너지 스펙트럼이다. 이를 토대로 생성된 광자 플럭스(Photon number/cm<sup>2</sup>/e)와 특성에너지, 평균에너지를 계산하였다. 특히 20 MeV 전자 한 개에서 발생하는 광자 플럭스는 2.05E-02 개/cm<sup>2</sup>/e, 특성에너지는 520 keV, 평균에너지는 3.75 MeV로 계산되었다.

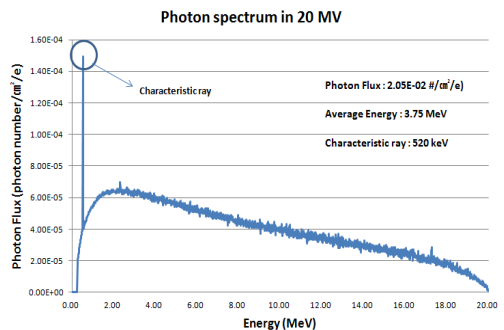


그림 4. MCNPX를 이용해 계산한 광자선 스펙트럼 결과

## 2. 중성자 플루언스 산출

[표 2]는 각 부품과 차폐벽이 받은 중성자 플럭스 (Neutron number/cm<sup>2</sup>/sec) 결과이다. 부품의 경우 타깃은 1.50E+09 개/cm<sup>2</sup>/sec로 가장 높게 나타났으며, 2차 콜리메이터는 1.63E+06 개/cm<sup>2</sup>/sec로 가장 낮은 값을 보였다. 차폐벽의 경우 ⑤구역에서 28967 개/cm<sup>2</sup>/sec로 가장 높게 나타났으며, 출입문 근처에 위치한 차폐벽 ②구역에서 1204 개/cm<sup>2</sup>/sec로 가장 낮게 나타났다.

표 2. 부품과 차폐벽이 받은 중성자 플루언스

부품	광자선 에너지 20 MV (#/cm <sup>2</sup> /sec)	
Target	1.50E+09	
Primary collimator	7.12E+07	
Flattening filter	1.59E+07	
Secondary collimator	1.63E+06	
Multi-leaf collimator	3.17E+06	
Shielding wall	①	15100
	②	1204
	③	6694
	④	6256
	⑤	28967
	⑥	28644
	⑦	13831
	⑧	4127
	⑨	3631

## 3. 방사화 평가

방사화 평가는 중성자가 가장 높게 계산된 타깃과 차폐벽 ⑤구역을 대상으로 평가하였으며, 타깃의 경우 구리와 텅스텐으로 이루어져 있기 때문에 각각의 경우를 산출하였다. 그 결과, 생성된 핵종들의 반감기는 구리의 경우 1.05 mins~1.5E+06 years, 텅스텐의 경우 0.28 secs~5.9E+17 years, 차폐벽의 경우 0.71 secs~5.3E+19 years으로 나타났다.

이 중 감마선 방출 핵종과 반감기가 1시간 미만인 단반감기에 속하는 핵종들 및 일정 시간 후 포화된 양이 규제해제농도를 넘지 않는 핵종을 제외하고, 의미 있는 방사능 수치가 계산된 핵종들을 선택하여 [그림 5]로 나타났다. 생성된 핵종 중 방사화 된 핵종들은 대부분 1년부터 방사능이 포화되는 것으로 평가되었으며, 그 양은 구리의 경우 Co-60 (1.57E+03 Bq/kg), 텅스텐의 경우 W-181(5.69E+07 Bq/kg), 콘크리트의 경우

Mn-54 (3.89E+02 Bq/kg)으로 규제해제농도를 초과한 것으로 분석되었다.

## IV. 고찰

본 연구는 의료용 선형가속기의 중성자 발생량을 예측하고 이를 바탕으로 선형가속기 헤드를 구성하는 부품과 차폐벽을 이루고 있는 콘크리트에 대하여 방사화 평가를 시행하였다.

본 연구에서 획득한 광자 스펙트럼의 경우 기존의 Mesbihi[15] 등의 연구와 Baumgatner[16] 등의 연구와 비교하면, 에너지 스펙트럼의 모양은 유사하였으나 광자에 대한 평균에너지 값은 본 연구의 결과값과 약 5% 정도 낮게 나타났다. 이는 선형가속기의 기하학적 구조 및 스펙트럼을 측정된 위치 때문인 것으로 판단된다.

다음으로 중성자 양은 선형가속기의 부품과 차폐벽을 비교하였을 때, 선형가속기 부품에서 대략 10<sup>3</sup>~10<sup>6</sup> 배 높게 나타났다. 또한 부품에서는 타깃이 가장 높게 나타났으며, 차폐벽은 ⑤구역에서 가장 높게 분석되었다. 이것은 중성자 발생의 원인이 되는 광핵반응은 광자 발생이 시작되는 타깃에서 먼저 일어나는 것을 의미하며, 생성된 중성자는 일정한 방향성을 갖는 것이 아니라 거리에 따라 분포한다는 것으로 사료된다. 이 결과는 선형가속기에서 발생하는 중성자 분포에 대한 연구를 진행한 W.L. Huang[17], 이동연 외[18] 등의 연구와 유사한 결과를 확인할 수 있었다.

또한 본 연구결과 얻은 중성자의 특성으로 미로형을 만드는 ⑦구역을 살펴보면, 상대적으로 타깃과 거리가 가까운 ③,④,⑧,⑨구역과 비교하였을 때, 높은 중성자 플루언스를 보였다. 이는 중성자의 특성을 고려하였을 때, 차폐벽과 상호작용 후 차폐벽에 모두 흡수되는 것이 아니라 주변으로 산란 작용이 있다는 것을 의미하며, 그 중에서 ⑦구역은 3면이 노출되어 있기 때문에 중성자 플루언스가 높게 나타난 것으로 사료된다.

끝으로, 타깃과 차폐벽에서 진행된 방사화를 보면, 발생한 핵종들에 대하여 감마선 방출 핵종과 반감기 그리고 규제해제농도를 고려하였을 때, 의미 있는 결과값을

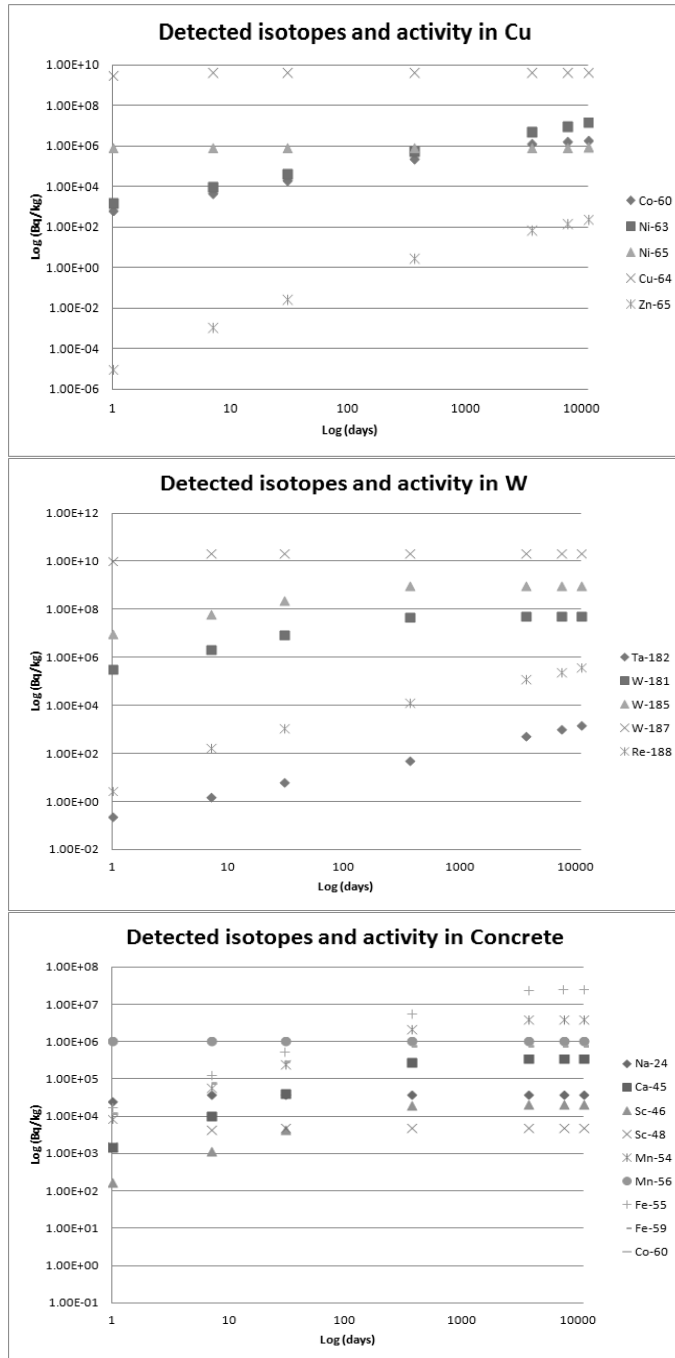


그림 5. FISPACT를 이용해 평가한 기간별 방사능 재고량

보인 핵종은 구리에서 Co-60, Ni-65, Cu-64, 텅스텐에서 W-181, 185, 187 차폐벽에서 Na-24, Ca-45, Sc-46,

48, Mn-54, 56, Fe-59로 분석되었다. 위의 결과값을 감마스펙트로스코피를 이용하여 방사능 평가를 진행한

Helmut[19] 등의 연구와 비교하였을 때, Helmut 등의 연구에서 분석된 핵종은 Na-24, Al-28, Mn-54, 56, Co-60, W-187 등이 검출되어 본 연구결과와 핵종이 일치하는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 분석된 결과값의 신뢰성을 확보한 것으로 판단된다.

## V. 결론

본 모의실험 결과, 선형가속기 부품과 차폐벽에서 가동간의 차이는 있었지만 모두 일정기간이 경과하면 방사화가 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 특히 선형가속기의 두부 부품은 차폐벽과 비교하였을 때, 상대적으로 높은 방사능을 띄고 있었다. 따라서 선형가속기 유지, 보수 시 작업자에 대한 피폭 가능성이 있을 것으로 사료된다. 또한 차폐벽에 대한 경우 선형가속기 부품과 비교하였을 때, 단기간에 발생하는 문제는 없을 것이지만 10년 이후에는 방사화에 대한 문제가 대두될 것이다.

이에 따라 선형가속기 유지 보수 및 해체 시 방사화 핵종의 재고량 및 폐기물 발생량 그리고 작업종사자와 엔지니어 피폭에 대한 기초적인 자료가 필요할 것이며, 이를 토대로 종합적인 대비책이 필요할 것으로 사료된다.

## 참고 문헌

- [1] 한국방사선진흥협회, 2015년도 방사선 및 방사성 동위원소 이용실태 조사, 미래창조과학부, 2017
- [2] 이정옥, 정동혁, 강상수, "24 MV 의료용 선형가속기의 중성자 발생에 관한 연구," 의학물리학회, 제16권, 제2호, pp.97-103, 2005.
- [3] 배성철, 김준호, 이철수, "선형가속기 10 MV 광자선에서 산란판(Beam Spoiler) 사용 시 표면선량 변화," 대한방사선치료학회지, 제18권, 제1호, pp.21-28, 2006.
- [4] National Council on Radiation Protection and Measurement, *Neutron Contamination from Medical Electron Accelerator*, NCRP Report No.79, 1984.
- [5] 박은태, "MCNPX를 이용한 방사선 치료실의 광중성자 선량평가," 한국콘텐츠학회논문지, 제15권, 제6호, pp.283-289, 2015.
- [6] O. Chibani and M. A. CMC, "Photonuclear dose calculations for high-energy photon beams from Siemens and Varian linacs," *Med. Phys.*, Vol.30, No.8, pp.1990-2000, 2003.
- [7] B. Julian, *Simulation of neutron production at a medical linear accelerator*, Institute of Experimental Physics University of Hamburg, 2007.
- [8] J. A. Rawlinson, M. K. Islam, and D. M. Galbraith, "Dose to radiation therapists from activation at high-energy accelerators used for conventional and intensity-modulated radiation therapy," *Med. Phys.*, Vol.29, No.4, pp.598-608, 2002.
- [9] Y. Z. Wang, M. D. C. Evans, and E. B. Podgorsak, "Characteristics of induced activity from medical accelerators," *Med. Phys.*, Vol.32, No.9, pp.2899-2910, 2005.
- [10] H. W. Fischer, B. E. Tabot, and B. Poppe, "Activation processes in a medical linear accelerator and spatial distribution of activation products," *Phys. Med. Biol.*, Vol.51, pp.N461-N466, 2006.
- [11] International atomic Energy Agency, *Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities*, Safety Report Series No.47, 2006.
- [12] Korea Atomic Energy Research Institute, *Shielding Technology for High Energy Radiation Production Facility*, 2004.
- [13] R. A. Forrest, "FISPACT-2007: User manual," UKAEA FUS, Vol.534, 2007.
- [14] International atomic Energy Agency, *Classification of Radioactive Waste*, General Safety Guide No. GSG-1, 2009.

[15] A. Mesbahi, M. Fix, M. Allahverdi, E. Grein, and H. Garaati, "Monte Carlo calculation of Varian 2300C/D Linac photon beam Characteristics: a comparison between MCNP4C, GEANT3 and measurements," Applied Radiation and Isotopes, Vol.62, No.3, pp.469-477, 2005.

[16] A. Baumgartner, A. Steurer, and F. Maringer, "Simulation of photon energy spectra from Varian 2100C and 2300C/D Linacs: Simplified estimates with PENELOPE Monte Carlo models," Applied Radiation and Isotope, Vol.67, No.11, pp.2007-2012, 2009.

[17] W. L. Huang, Q. F. Li, and Y. Z. Lin, "Calculation of photon neutrons produced in the targets of electron linear accelerators for radiography and radiotherapy applications," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Vol.B, No.229, pp.339-347, 2005.

[18] 이동연, 박은태, "몬테칼로법을 이용한 의료용 선형가속기 차폐벽의 방사화 특성 분석," 한국콘텐츠학회논문지, 제16권, 제10호, pp.758-765, 2016.

[19] Helmut W. Fischer, Ben E. Tabot, and Björn Poppe, "Activation processes in a medical linear accelerator and spatial distribution of activation products," Phys. Med. Biol. Vol.51, pp.N461-N466, 2006.

저 자 소 개

이 동 연(Dong-Yeon Lee)

정회원



- 2014년 2월 : 부산가톨릭대학교 방사선학과(이학석사)
- 2017년 2월 : 부산가톨릭대학교 방사선학과(이학박사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 동남권원자력의학원 방사선종양학과 재직

<관심분야> : 방사선치료물리학, 선량평가, 방사화학

박 은 태(Eun-Tae Park)

정회원



- 2012년 2월 : 부산가톨릭대학교 방사선학과(이학석사)
- 2015년 2월 : 부산가톨릭대학교 방사선학과(이학박사)
- 2000년 1월 ~ 현재 : 인제대학교 부산백병원 방사선종양학과

<관심분야> : 방사선치료, 방사선물리, 선량평가

김 정 훈(Jung-Hoon Kim)

정회원



- 2003년 2월 : 경희대학교 원자력공학과(공학석사)
- 2007년 2월 : 경희대학교 원자력공학과(공학박사)
- 2009년 3월 ~ 현재 : 부산가톨릭대학교 방사선학과 부교수

<관심분야> : 방사선량 평가, 문항개발 및 분석