Journal of Radiological Science and Technology, 43(5), 389-395 ISSN 2384-1168(On-line) ISSN 2288-3509(Print)

<원저>

몬테칼로 시뮬레이션을 활용한 양성자가속기 단기사용 시 구성품의 방사화 평가

배상일[1)]·김정훈[2)]

[1)]동남권원자력의학원 방사선종양학과·[2)]부산가톨릭대학교 방사선학과

A Study on the Radioactive Products of Components in Proton Accelerator on Short Term Usage Using Computed Simulation

Sang-Il Bae[1)]·Jung-Hoon Kim[2)]

[1)]Dept. of Radiation Oncology, Dongnam Institute of Radiological & Medical Science

[2)]Dept. of Radiological Science, College of Health Sciences, Catholic University

Abstract The evaluation of radioactivated components of heavy-ion accelerator facilities affects the safety of radiation management and the exposure dose for workers. and this is an important issue when predicting the disposal cost of waste during maintenance and dismantling of accelerator facilities. In this study, the FLUKA code was used to simulate the proton treatment device nozzle and classify the radio-nuclides and total radioactivity generated by each component over a short period of time. The source term was evaluated using NIST reference beam data, and the neutron flux generated for each component was calculated using the evaluated beam data. Radioactive isotopes caused by generated neutrons were compared and evaluated using nuclide information from the International Radiation Protection Association and the Korea Radioisotope association. Most of the nuclides produced form of beta rays and electron capture, and short-lived nuclides dominated. However, In the case of ^{54}Mn, which is a radioactive product of iron, the effect of gamma rays should be considered. In the case of tritium generated from a material with a low atomic number, it is considered that handling care should be taken due to its long half-life.

Key Words : MCNP, Proton Accelerator, Neutron, Activation product, Bragg peak

중심 단어 : 몬테칼로 시뮬레이션, 양성자가속기, 중성자, 방사화 생성물, 브래그 피크

Ⅰ. 서 론

중하전입자를 이용한 방사선 치료는 현재 보편적으로 활용되고 있는 광자선에 비해서 종양조직에 대한 높은 생물학적효과 (relative biological effectiveness; RBE)와 브래그피크효과(bragg peak effect)를 이용하여 치료 선량을 전달하므로 목표로 하는 종양조직에는 고 선량을 정상조직에는 저 선량을 전달하는 방사선치료에 매우 적합한 치료 방법이다[1-5].

그러나 기존의 광자선과는 달리 높은 에너지의 중하전입자는 가속기 구성품과의 상호작용으로 2차 즉발 또는 지발 중성자를 발생시키며, 생성된 2차 중성자는 가속기 구성품의 방사화를 일으켜 잔류핵종(Resnuclie) 및 핵이성체(Isomer)를 생성하게 된다. 이러한 잔류핵종 및 핵이성체에서 방출되는 방사선은 작업자의 선량증가에 영향을 미치게 된다[6-8].

This work was supported by the Dongnam institute of Radiological & Medical Sciences(DIRAMS) grant funded by the Korea government(MSIT) (No.50600-2020)

Corresponding author: Jung-Hoon Kim, Department of Radiological Science College of Health Sciences, Catholic University, 57, Oryundae-ro, Geumjeong-gu, Busan, 46252, Republic of Korea / Tel: +82-51-510-0583 / E-mail: donald@cup.ac.kr

Received 26 August 2020; Revised 6 October 2020; Accepted 17 October 2020

Copyright ⓒ2020 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

하지만 생성되는 잔류핵종 및 핵이성체의 경우 장치의 내부에 생성 핵종이 존재하므로 사용 중 측정이 불가능하며, 또한 짧은 반감기 및 저에너지 베타선, 광자선의 경우 측정 시의 감쇠 및 연속스펙트럼 형태의 에너지로 측정에 많은 어려움을 동반하게 된다[9-11].

따라서 전산모의모사를 통한 방사선발생장치 및 시설의 선원항 평가는 방사성 물질의 생성량 및 입자가속기의 사용 상태에서 공간선량률을 평가할 수 있는 도구로 널리 활용되고 있다[12].

이에 본 연구는 전산모의모사를 통하여 중하전입자가속기를 모의모사하고 단기간 사용으로 인하여 구성품에 생성되는 방사화 물질의 종류 및 핵종별 방사능의 양을 산출하고자 한다. 이를 통해 중입자 가속기 사용자 또는 유지 보수 시 작업자에 대한 방사선학적 영향을 제공하고자 한다.

II. 대상 및 방법

1. 모의 모사방법

본 연구는 고에너지 입자 가속기의 모의모사에 널리 활용되는 FLUKA 코드(ver.2011.2)를 이용하여 실험을 진행하였다. FLUKA 코드는 일반적으로 하전입자의 물질과의 상호작용 및 에너지 전달을 산출하여 피폭선량을 평가하기 위하여 고안된 코드이며, 이를 활용하여 중성자 방사화 핵종의 생성 및 감쇠, 생성 핵종의 종류 및 그 방사능을 산출 및 평가할 수 있는 프로그램이다[13-14].

중입자 가속기 노즐의 경우 국내에 도입된 IBA(Ion Beam Application)사의 노즐을 모모사하였으며, Fig. 1에서는 FLUKA로 모의모사된 중입자 가속기의 모식도를 나타내었다. IBA사의 Passive Scattering System의 경우 양성자를 넓게 퍼뜨리는 2개의 산란체를 포함 총 9개의 구성품을 모의모사하였으며, 각 구성품의 물성, 구성원소, 밀도에 대한 정보는 Table 1과 같다[15].

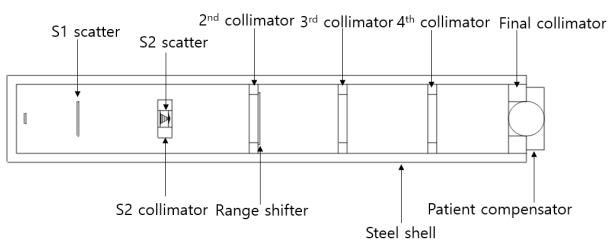

Fig. 1. Cross-sectional schematic diagram of the proton beam nozzle using FLUKA

Table 1. Proton accelerator material information

Component	Element	Material	Density (g/cm^3)
S1 scatter	Lead	Pb	11.35
S2 collimator	Brass	Cu, Zn	8.35
S2 scatter lexan	Polycarbonate	H, C, O	1.2
S2 scatter lead	Lead	Pb	8.35
2nd collimator	Brass	Cu, Zn	8.35
3rd collimator	Brass	Cu, Zn	8.35
4th collimator	Brass	Cu, Zn	8.35
Final aperture	Brass	Cu, Zn	8.35
Patient compensator	ABD resin	H, C, N	1.04
Steel shell	Iron	Fe	7.86
Range shifter	ABD resin	H, C, N	1.04

2. 분석방법

1) 선원항 평가

본 연구에 사용된 양성자의 에너지와 가동조건은 220 MeV, 7 nA이며, 모의모사된 선원항의 평가는 국제방사선측정위원회(ICRU)에서 권고하는 기준에 따라 양성자가속기의 SSD(source surface distance) 300 cm지점에 물팬텀을 위치시키고 깊이에 따른 흡수선량의 상대적인 비를 이용하여 비정을 산출하였으며, 그 결과 값을 미국 표준연구소의 (NIST)의 양성자 비정 데이터와 비교하여 모의모사의 신뢰도를 평가하였다[16].

사용된 FLUKA의 Scoring은 단위질량당 흡수선량을 산출하는 USRBIN card를 사용하였으며 실험의 오차를 5% 이내로 줄이기 위하여 10^7번 반복 실험을 진행하였다.

2) 양성자 및 중성자 플럭스 평가

중입자 가속기의 가동시간은 총 8시간이며, 가동 시 발생되는 총 양성자와 중성자의 플럭스 정보는 USRBIN card를 사용하여 산출하였으며, 실험의 오차를 5% 이내로 줄이기 위하여 10^7번 반복 실험을 진행하였다.

3) 방사능 및 방사화 핵종의 평가

중입자 가속기의 가동 종료 후 5분, 1시간, 8시간, 1일 단위로 냉각시간을 가졌으며, 각 냉각시간 별로 생성된 총 방사능 및 방사화 핵종에 대한 평가는 DCYTIMES card와 RESNUCLi card를 사용하여 산출하였으며 실험의 오차를 5% 이내로 줄이기 위하여 10^7번 반복 실험을 진행하였다.

구성품별로 생성된 방사성핵종의 평가는 국제방사선방호

협회(ICRP)와 한국방사성동위원소협회의 핵종 정보를 비교하여 평가하였다[17-19.]

Ⅲ. 결 과

1. 선원항의 평가

모의모사된 선원항의 평가를 위하여 물 팬텀에서 측정된 비정자료를 미국표준연구소의 220 MeV 양성자 비정자료와 비교하였다.

본 연구와 NIST와의 양성자 비정을 비교한 결과, 약 2.3%의 차이가 나타났다(Table 2). 물 팬텀에서 깊이별 양성자의 상대적 선량은 Fig. 2로 나타났다.

Table 2. Range in water compared to reference data for proton beam 220 MeV

Energy (MeV)	Range (cm)		Differnce(%)
	NIST	This study	
220	30.5	29.8	2.29

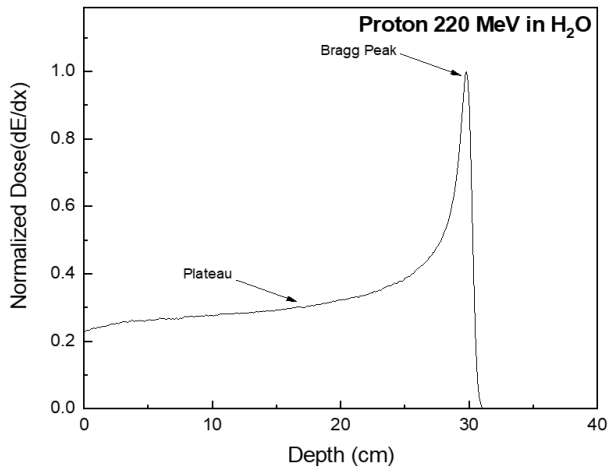

Fig. 2. Sptectrum of bragg peak 220MeV proton in water phantom

2. 양성자의 플럭스의 평가

Fig. 3은 중입자 가속기 노즐에서 발생되는 총 양성자의 플럭스를 나타내었다. 선원에서 선의 형태로 발생된 양성자는 S1과 S2 산란체를 거쳐 빔이 확산된 모형으로 나타났으며, 각 부분의 콜리메이터의 경우 양성자선 차폐 및 집속에 관여하는 것을 볼 수 있다.

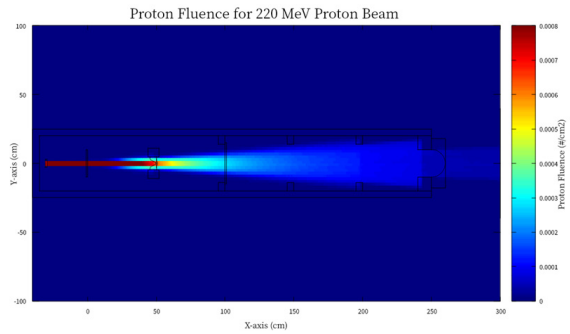

Fig. 3. Proton Flux distribution along the beam axis

3. 중성자 플럭스의 평가

중입자 가속기의 단기사용 시 노즐의 각 영역에 대하여 발생되는 중성자 플럭스는 Fig. 4에 나타내었으며 (a)에서는 각 부품별 생성되는 중성자의 플럭스를 수치로 나타내었다.

(b)의 경우 총 중성자를 Z-축 방향을 기준으로 나타내었으며, 양성자의 상호작용으로 생성된 중성자는 노즐을 구성하는 산란체 중 S1 부위에서 가장 높은 플럭스가 발생하였으며, 또 다른 산란체인 S2 산란체에서 두 번째 높은 플럭스가 관찰되었다. 대부분 양성자 빔의 진행에 있는 구성품에서 많은 중성자가 발생되었다. 콜리메이터의 경우에는 노즐의 끝에 위치한 Final collimator에서 높은 중성자 플럭스가 관찰되었다.

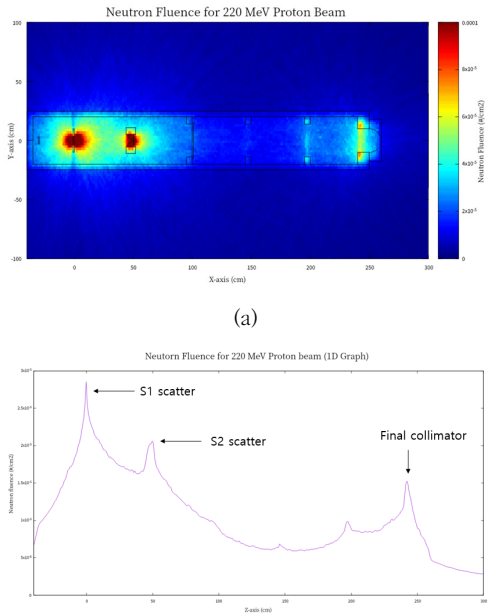

Fig. 4. Neutron Flux distribution along the beam axis(Z axis).

4. 방사화 핵종의 평가

중입자 가속기를 구성하고 있는 구성품의 물질정보와 생성 방사성 핵종을 Table 3에 나타내었다.

중입자 가속기의 산란체로 사용되는 원자번호가 높은 납의 경우 중성자 방사화에 의해 생성되는 방사성동위원소는 Pb, Tl, Hg이며 그 중 ^{201}Pb와 ^{200}Pb 핵종이 큰 비중을 차지하였다.

황동으로 이루어진 콜리메이터 부분의 경우 생성 핵종은 Cu, Zn의 방사성동위원소가 생성되었으며 이중 ^{64}Cu의 생성량이 가장 많았으며 노즐에 위치한 콜리메이터 중 빔의 진행경로의 마지막에 위치하는 Final Collimator에서 가장 높은 방사화 반응이 발생하였다.

원자번호가 낮은 물질로 구성된 Lexan, ABS resin의 경우 H, C의 방사성동위원소인 ^{3}H, ^{11}C, ^{14}C의 방사화생성물이 발생하였다.

5. 방사능에 대한 평가

Fig. 6은 각 냉각시간에 따른 총 방사능의 감쇠를 보여주는 그래프이며 시간이 지남에 따라서 많은 부분을 차지하는 짧은 반감기 및 핵이성체 핵종에 의하여 급격한 감쇠를 보였으며, 가속기 가동 종료 직후에는 지발중성자로 인하여 핵종의 생성과 감쇠가 혼재되어 정확한 예측에는 일정시간이 경과하여야 할 것으로 사료된다.

Table 3. Results of the activation analysis

Component	Element of component	Material	Activated radioisotope	Decay mechanism	Half-life	Radioactiviy change over time (Unit : Bq/cm^3)			
						5 min	1 Hr	8 Hr	1 Day
S1 scatter	Lead	^{82}Pb (100%)	^{200}Pb	EC	21.5 h	3.0E+07	2.9E+07	2.3E+07	1.4E+07
			^{200}Tl	β^+,EC	26.1 h	2.6E+07	2.5E+07	2.1E+07	1.4E+07
			^{201}Pb	β^+,EC	9.33 h	5.9E+07	5.5E+07	3.2E+07	9.9E+06
			^{203}Pb	EC	51.87 h	1.3E+07	1.3E+07	1.2E+07	9.3E+06
			^{197}Hg	EC	64.1 h	1.1E+07	1.1E+07	1.0E+07	8.6E+06
			^{201}Tl	EC	72.91 h	1.1E+07	1.1E+07	1.0E+07	8.6E+06
S2 scatter collimator	Brass	^{29}Cu (67%) ^{30}Zn (33%)	^{64}Cu	β^+,EC	12.7 h	6.7E+07	6.3E+07	4.3E+07	1.8E+07
			^{62}Zn	β^+,EC	9.26 h	9.6E+06	8.9E+06	5.3E+06	1.6E+06
S2 scatter lexan	Polycarbonate	^{1}H (0.05%) ^{6}C (75%) ^{8}O (18%)	^{3}H	β^-	12.3 y	4.7E+03	4.7E+03	4.7E+03	4.7E+03
			^{11}C	β^+,EC	20.39 m	2.3E+08	2.7E+07	1.8E+01	1.3E-13
S2 scatter lead	Lead	^{82}Pb (100%)	^{200}Pb	EC	21.5 h	8.0E+06	7.7E+06	5.8E+06	3.1E+06
			^{200}Tl	β^+,EC	26.1 h	5.6E+06	5.5E+06	4.6E+06	3.0E+06
			^{201}Pb	β^+,EC	9.33 h	1.2E+07	1.1E+07	6.8E+06	2.1E+06
			^{203}Pb	EC	51.87 h	2.6E+06	2.6E+06	2.4E+06	1.9E+06
			^{201}Tl	EC	72.91 h	2.3E+06	2.2E+06	2.1E+06	1.8E+06
			^{197}Hg	EC	64.1 h	2.2E+06	2.1E+06	2.0E+06	1.7E+06
2nd collimator	Brass	^{29}Cu,^{30}Zn	^{64}Cu	β^+,EC	12.7 h	1.1E+06	1.0E+06	7.2E+05	3.0E+06
3rd collimator	Brass	^{29}Cu (67%) ^{30}Zn (33%)	^{64}Cu	β^+,EC	12.7 h	9.3E+06	8.8E+06	6.0E+06	2.5E+06
			^{55}Co	β^+,EC	17.53 h	9.3E+04	8.9E+04	6.7E+04	3.6E+04
4th collimator	Brass	^{29}Cu,^{30}Zn	^{64}Cu	β+,EC	12.7 h	3.0E+07	2.8E+07	1.7E+07	8.2E+06
Final aperture	Brass	^{29}Cu,^{30}Zn	^{64}Cu	β^+,EC	12.7 h	1.5E+08	1.4E+08	9.7E+07	4.4E+07
Patient compensator	ABD resin	^{1}H (51%), ^{6}C (46%), ^{7}N (0.02%)	^{3}H	β^-	12.3 y	1.7E+03	1.7E+03	1.7E+03	1.7E+03
			^{11}C	β^+,EC	20.39 m	8.6E+07	1.1E+07	0.7E+01	4.8E-14
			^{14}C	β^-	5730 y	3.7E+00	3.7E+00	3.7E+00	3.7E+00
Steel shell	Iron	^{26}Fe (100%)	^{52}Mn	β^+,EC	5.591 d	1.5E+06	1.5E+06	1.4E+06	1.3E+06
			^{51}Cr	EC	27.70 d	9.9E+05	9.9E+05	9.8E+05	9.7E+05
Range shifter	ABD resin	^{1}H,^{6}C,7N	^{3}H	β^-	12.3 y	1.2E+03	1.2E+03	1.2E+03	1.2E+03

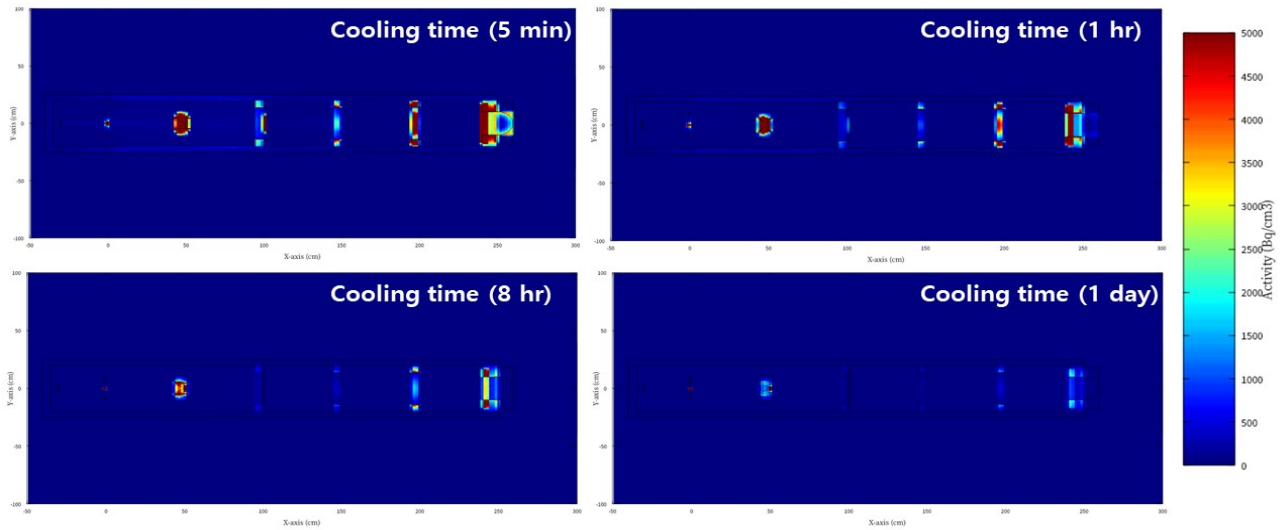

Fig. 5. Radioactivity changes over time in Proton Beam nozzle (5 min, 1 hr, 8 hr, 1 day)

Table 4. Total radioactivity changes over the time in Proton Beam nozzle

Elapsed time	5 min	1 hr	8 hr	1 day
Activity(Bq/cm^3)	7.68E08	4.65E8	3.03E8	1.57E8

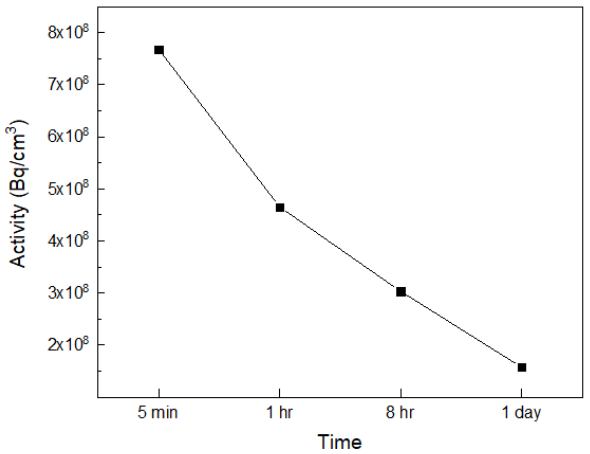

Fig. 6. Total radioactivity changes over the time in Proton Beam nozzle

Ⅳ. 고 찰

본 연구에서는 방사선 치료용으로 활용되고 있는 220 MeV의 중입자 가속기 노즐을 모의모사하고 7 nA의 환경으로 8시간 가동 시 각 구성품별 생성되는 방사성핵종 및 총 방사능을 시간의 경과에 따라서 분류하여 평가하였다.

선원항 평가를 위해 본 연구와 NIST와의 양성자 비정을 비교한 결과 약 5% 이내의 일치율을 나타내었다.

생성되는 중성자 플럭스의 경우 양성자 빔을 넓게 퍼뜨리는 역할인 S1, S2 Scatter에서 가장 많은 중성자 플럭스가 발생하였으며, 콜리메이터에서는 Final collimator에서 가장 많은 중성자 플럭스가 관찰되었다. 이는 Sang-Eun Han(2016)의 가속기 구성품의 중성자 플럭스 결과와도 일치하는 결과이다[19].

생성된 방사성 핵종분류는 국제방사선방호위원회(ICRP)와 한국방사성동위원소협회의 핵종 정보를 활용하여 방사화 핵종의 선정 및 재고량을 평가하였다[17-18].

중하전입자가속기 내부의 주요 구성 성분인 납, 아연, 구리 등에 생성되는 방사성동위원소의 경우 주로 짧은 반감기 핵종이며, 붕괴형식은 β^+와 EC의 형태를 가짐으로 투과력이 약한 방사선으로 인해 종사자의 외부 피폭에는 크게 영향이 없을 것으로 판단된다.

가속기의 외부를 둘러싸고 있는 Steel shell의 경우에는 중성자에 의하여 ^{52}Mn의 방사성동위원소가 생성될 수 있으며 상기 핵종의 경우 β^+붕괴 이후에 안정 상태로 천이하면서 감마선을 방출할 수 있으므로 생성량에 따라 사용 및 처분 시 주의가 필요할 것으로 생각된다.

원자번호가 낮은 물질인 수소, 탄소, 질소로 이루어진 구성품의 경우에는 삼중수소와 탄소-14 방사성동위원소가 생성되며 두 방사성동위원소의 경우 투과력이 매우 낮은 저에너지 B^-방출 방사성동위원소이지만 반감기가 수십 년 이상으로 매우 길어 처분 시 간과해서는 안 될 것으로 판단된다.

생성된 방사성동위원소의 경우 고에너지 입자 방사선과 구성품과 상호작용에 의하여 생성될 수 있음이 NCRP_

report_144와 PTCOG Report1에서 보고되었다[20-21].

그러나 방사선의 에너지 및 실제 사용 기간에 따라서 방사화 생성물이 상이하며, 활용되는 모의시뮬레이션 프로그램에 따라서도 결과의 차이를 보이므로 다양한 코드를 활용하여 비교하는 벤치마킹이 필요할 것으로 판단된다.

V. 결 론

고에너지 하전입자를 활용하는 가속기 시설의 구성품의 방사화 정도의 평가는 방사선의 안전 측면과 작업자의 피폭선량에 영향을 미치고 나아가 가속기 시설의 유지 보수 및 해체 시 폐기물의 처분비용을 예측할 때 중요한 지표로 활용된다.

이에 본 연구에서는 FLUKA code를 활용하여 양성자 치료기 노즐을 모의모사하고 단기간 가동 시 구성품별 생성되는 방사성핵종 및 총 방사능을 시간의 경과에 따라서 각각 분류 및 평가하였다.

향후 본 연구를 토대로, 방사선관리 측면에서 작업종사자의 일일피폭선량 산출이 필요하며, 가속기의 처리 및 처분을 위한 가속기 장기간 사용에 대한 방사화 평가도 필요할 것으로 사료된다.

REFERENCES

[1] Lundkvist J, Ekman M, Ericsson SR, Jönsson B, Glimelius B. Proton therapy of cancer: Potential clinical advantages and cost-effectiveness. Acta oncologica. 2005;44(8):850-61.

[2] Harrabi S, Bougatf N, Mohr A, Haberer T, Herfarth K, Combs S, et al. Dosimetric advantages of proton therapy over conventional radiotherapy with photons in young patients and adults with low-grade glioma. Strahlentherapie und Onkologie. 2016;192(11): 759-69.

[3] van de Schoot AJ, de Boer P, Crama KF, Visser J, Stalpers LJ, Rasch CR, et al. Dosimetric advantages of proton therapy compared with photon therapy using an adaptive strategy in cervical cancer. Acta Oncologica. 2016;55(7):892-9.

[4] Choi SG. Literature review of clinical usefulness of heavy ion particle as an new advanced cancer therapy. Journal of Radiological Science and Technology. 2019;42(6):413-22.

[5] Hwang SY, Kim YJ, Lee SW. Evaluation of residual radioactivity and dose rate of a target assembly in an IBA cyclotron. Journal of Radiological Science and Technology. 2016;39(4):643-9.

[6] Fassbender M, Shubin YN, Lunev V, Qaim S. Experimental studies and nuclear model calculations on the formation of radioactive products in interactions of medium energy protons with copper, zinc and brass: Estimation of collimator activation in proton therapy facilities. Applied Radiation and Isotopes. 1997;48(9):1221-30.

[7] Bäumer C, Bäcker CM, Gerhardt M, Grusell E, Koska B, Kröninger K, et al. Measurement of absolute activation cross sections from carbon and aluminum for proton therapy. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2019;440:75-81.

[8] Bennett G, Goldberg A, Levine G, Guthy J, Balsamo J, Archambeau J. Beam localization via 15O activation in proton-radiation therapy. Nuclear Instruments and Methods. 1975;125(3):333-8.

[9] Yan X, Titt U, Koehler A, Newhauser W. Measurement of neutron dose equivalent to proton therapy patients outside of the proton radiation field. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2002;476(1-2):429-34.

[10] Agosteo S, Birattari C, Caravaggio M, Silari M, Tosi G. Secondary neutron and photon dose in proton therapy. Radiotherapy and Oncology. 1998; 48(3):293-305.

[11] Newhauser W, Titt U, Dexheimer D, Yan X, Nill S. Neutron shielding verification measurements and simulations for a 235-MeV proton therapy center. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2002;476 (1-2):80-4.

[12] Zheng Y, Newhauser W, Fontenot J, Taddei P, Mohan R. Monte Carlo study of neutron dose equivalent during passive scattering proton therapy.

Physics in Medicine & Biology. 2007;52(15):4481.
[13] Battistoni G, Boehlen T, Cerutti F, Chin PW, Esposito LS, Fassò A, et al. Overview of the FLUKA code. Annals of Nuclear Energy. 2015;82:10-8.
[14] Aarnio P, Ranft J, Stevenson G, Moehring H, Fassò A, Zazula J, et al. FLUKA: hadronic benchmarks and applications. P00012231; 1993.
[15] Guan F. Design and simulation of a passive-scattering nozzle in proton beam radiotherapy. Texas A & M University; 2010.
[16] Firestone RB, Shirley VS, CD SFC, Baglin CM. Table of Isotopes (A= 263-272). 1996.
[17] Tuli JK. Evaluated nuclear structure data file. Brookhaven National Laboratory Nuclear Data Center, Brookhaven, NY; 1987.
[18] Data TID. Technical Report No. 261. Vienna: IAEA. 1986.
[19] Han SE, Cho G, Lee SB. An assessment of the secondary neutron dose in the passive scattering proton beam facility of the national cancer center. Nuclear Engineering and Technology. 2017;49(4):801-9.
[20] d'Errico F. NCRP Report no. 144—Radiation protection for particle accelerator facilities National Council on Radiation Protection and Measurements Issued 31 December 2003; revised 7 January 2005: NCRP, Bethesda, MD, USA ISBN: 0-929600-77-0, 499 pp, 100(Hardcover), 80 (electronic file downloadable from http://ncrppublications.org). Oxford University Press; 2005.
[21] Ipe N, Fehrenbacher G, Gudowska I, Paganetti H, Schippers J, Roesler S. PTCOG publications sub-committee task group on shielding design and radiation safety of charged particle therapy facilities. PTCOG Report. 2010;1.

구분	성명	소속	직위
제1저자	배상일	동남권원자력의학원	방사선사/대학원생(박사)
교신저자	김정훈	부산가톨릭대학교	교수