

<원저>

몬테카를로 시뮬레이션을 통한 중하전입자의 콘크리트 방사화 비교평가

배상일¹⁾·조용인²⁾·김정훈³⁾¹⁾동남권원자력의학원 방사선종양학과·²⁾동남권원자력의학원 영상의학과·³⁾부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과

Comparative Evaluation of Radioactive Isotope in Concrete by Heavy Ion Particle using Monte Carlo Simulation

Sang-Il Bae¹⁾·Yong-In Cho²⁾·Jung-Hoon Kim³⁾¹⁾Dept. of Radiation Oncology, Dongnam Institute of Radiological & Medical Science²⁾Dept. of Radiology, Dongnam Institute of Radiological & Medical Science³⁾Dept. of Radiological Science, College of Health Sciences, Catholic University

Abstract A heavy particle accelerator is a device that accelerates particles using high energy and is used in various fields such as medical and industrial fields as well as research. However, secondary neutrons and particle fragments are generated by the high-energy particle beam, and among them, the neutrons do not have an electric charge and directly interact with the nucleus to cause radiation of the material. Quantitative evaluation of the radioactive material produced in this way is necessary, but there are many difficulties in actual measurement during or after operation. Therefore, this study compared and evaluated the generated radioactive material in the concrete shield for protons and carbon ions of specific energy by using the simulation code FLUKA. For the evaluation of each energy of proton beam and carbon ion, the reliability of the source term was secured within 2% of the relative error with the data of the NASA Space Radiation Laboratory(NSRL), which is an internationally standardized data. In the evaluation, carbon ions exhibited higher neutron flux than protons. Afterwards, in the evaluation of radioactive materials under actual operating conditions for disposal, a large amount of short-lived beta-decay nuclides occurred immediately after the operation was terminated, and in the case of protons with a high beam speed, more radioactive products were generated than carbon ions. At this time, radionuclides of ⁴⁴Sc, ³H and ²²Na were observed at a high rate. In addition, as the cooling time elapsed, the ratio of long-lived nuclides increased. For nonparticulate radionuclides, ³H, ²²Na, and for particulate radionuclides, ⁴⁴Ti, ⁵⁵Fe, ⁶⁰Co, ¹⁵²Eu, and ¹⁵⁴Eu nuclides showed a high ratio. In this study, it is judged that it is possible to use the particle accelerator as basic data for facility maintenance, repair and dismantling through the prediction of radioactive materials in concrete according to the cooling time after operation and termination of operation.

Key Words: FLUKA, Heavy ion Accelerator, Neutron, Activation product, Bragg peak

중심 단어: 몬테칼로시뮬레이션, 중입자가속기, 중성자, 방사화 생성물, 브래그 피크

I. 서론

암 치료 시 전자 또는 광자를 이용하는 가속기가 존재하지

만, 중입자를 사용할 때에 치료의 효율이 높다는 점이 발견되면서 전 세계적으로 이용이 확대되고 있는 추세이다[1]. 중하전입자를 이용한 방사선 치료는 현재 보편적으로 활용되고

This work was supported by the Dongnam institute of Radiological & Medical Sciences(DIRAMS) grant funded by the Korea government(MSIT) (No.50606-2021)

Corresponding author: Jung-hoon Kim, Department of Radiological Science College of Health Sciences, Catholic University, Department of Radiological Science College of Health Sciences, Catholic University of Busan, Bugok 3-Dong, Geumjeong-gu, Busan, 46252, Republic of Korea / Tel: +82-051-510-0583 / E-mail: donald@cup.ac.kr

Received 15 June 2021; Revised 21 June 2021; Accepted 24 June 2021

Copyright ©2021 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

있는 광자선에 비해 종양 조직에 대한 높은 생물학적 효과 (relative biological effectiveness; RBE)를 가진다[2,3]. 또한, 브래그 피크 효과(Bragg peak-effect)를 이용하여 목표 조직에 하는 종양 조직에는 고선량을, 정상조직에는 저선량을 전달하여 방사선 치료에 매우 적합한 치료 방법이다[3,4].

그러나 고에너지 방사선에 의해 2차 중성자 및 입자 파편이 생성된다[5,6]. 특히 생성된 2차 방사선 중 중성자는 전하를 띠지 않아 핵과 직접 상호작용을 통해 방사화를 일으킬 확률이 높다[7]. 그러나 기존 연구는 중성자 발생으로 인한 공간 선량 및 피폭평가에 국한되어 있어 중성자로 인한 방사화에 대한 연구는 미비한 실정이다[8].

이를 위해 양성자와 탄소이온을 비교 대상으로서 설정하고, 몬테카를로 모의 모사 프로그램인 FLUKA(ver.2020.0.08)를 활용하여 양성자와 탄소이온의 에너지에 따른 방사성 생성물질을 비교·분석하고자 한다.

II. 대상 및 방법

본 연구는 중입자의 사용 시설 중 차폐 콘크리트의 방사화 평가를 시행하였다. 양성자와 탄소이온이 차폐체와 상호작용으로 발생하는 2차선의 경우 실측의 한계로 몬테카를로 기법을 이용한 모의 모사를 적용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 실측의 한계를 극복할 수 있고 결과 예측이 가능한 몬테카를로 기법을 활용한 모의실험을 진행하였다[9].

1. 몬테카를로 법

본 실험에 사용된 몬테카를로 기법이란 반복적인 난수 추출로 전체 시행 횟수와 해당 조건을 만족하는 방정식, 함수, 적분의 해를 찾는 통계적인 계산 알고리즘이다. 본 실험은 몬테카를로를 이용한 모의실험 프로그램 중 핵종 생산, 붕괴 및 잔류 방사선의 이동과 유도 방사능 연구에 사용되는 코드인 FLUKA(ver.2020.0.08)를 사용하였다[10].

2. 선원향 평가

모의 모사의 선원향 평가를 위하여 각 에너지의 Bragg peak 비정을 국제적으로 표준화된 자료인 NASA 우주 방사선연구소(NASA Space Radiation Laboratory; NSRL)자료와 비교 평가하였다. 비정은 고밀도 폴리에틸렌(HDPE, $\rho = 0.97 \text{ g/cm}^3$)을 사용하여 빔 입자를 감속 및 정지시켜 계산하였다[11]. 양성자의 경우 에너지 205 MeV, 250 MeV에 대한 비정을 획득하고, 탄소이온의 경우 에너지 200 MeV,

293 MeV에 대한 비정을 획득하였다. 모의 모사의 불확도를 5% 이하로 줄이고 신뢰도를 확보하기 위해 10^7 번 반복하여 실험하였다.

3. 차폐체의 모의 모사와 실험방법

중입자 후방 차폐체인 콘크리트를 몬테카를로 시뮬레이션의 방사선 수송코드인 FLUKA를 이용하여 모의 모사하였으며, 콘크리트는 미국표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology)의 ordinary 콘크리트에 불순물(ANSI/ANS-6.4-2006)을 추가한 반지름 5 cm, 길이 20 cm의 콘크리트를 사용하였으며, 콘크리트 조성은 Table 1과 같다[12]. 실험에 사용된 환경은 임상 환경의 보수적인 방사화 평가를 위하여 가동 최대치인 양성자 2×10^{10} pps, 탄소이온 4×10^8 pps의 입자를 방출하도록 설정하였다[13]. 하루 8시간, 연 25주 가동하는 조건으로 최대 15년까지 가동하도록 설정하였다. 이후 냉각시간에 따른 방사화 생성물의 변화를 관찰하고자 가동종료 직후, 5년, 10년, 15년의 분석을 시행하였으며, 모의 모사의 불확도를 5% 이하로 줄이고 신뢰도를 확보하기 위해 10^7 번 반복하여 실험하였다.

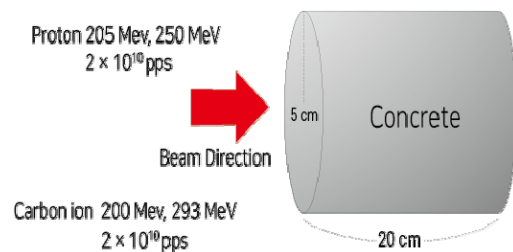


Fig. 1. Schematic draw of Concrete simulation

Table 1. Information on the composition of Concrete

Concrete - Ordinary (NIST)	
Element	Weight Fractions
H	2.21×10^{-2}
C	4.84×10^{-3}
O	5.75×10^{-1}
Na	1.52×10^{-2}
Mg	1.27×10^{-3}
Al	1.99×10^{-2}
Si	3.05×10^{-1}
K	1.00×10^{-2}
Ca	4.29×10^{-2}
Fe	6.44×10^{-3}

Table 1. Information on the composition of Concrete (Cont.)

Impurities Material	
⁶ Li	6.53×10^{-6}
⁵⁹ Co	3.21×10^{-5}
⁵⁸ Ni	9.46×10^{-5}
⁶² Ni	7.42×10^{-6}
¹³³ Cs	8.68×10^{-6}
¹⁵¹ Eu	3.04×10^{-6}
¹⁵³ Eu	3.33×10^{-6}
Density = 2.3 g/cm ³	

III. 결과

1. 선원향의 평가

Fig. 2와 3에서는 모의 모사를 통해 얻은 양성자와 탄소이온 Bragg peak spectrum과 비정을 NASA 우주 방사선연구소(NASA Space Radiation Laboratory; NSRL)자료와 비교하였다. Table 2에서는 양성자 205 MeV, 250 MeV와 탄소이온 200 MeV, 293 MeV의 실험 에너지에 대하여 비교를 진행하였으며 상대오차 2% 이내의 일치율을 나타내었다.

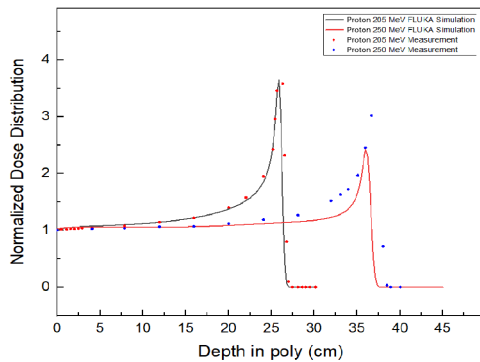


Fig. 2. Depth dose curve for proton beam

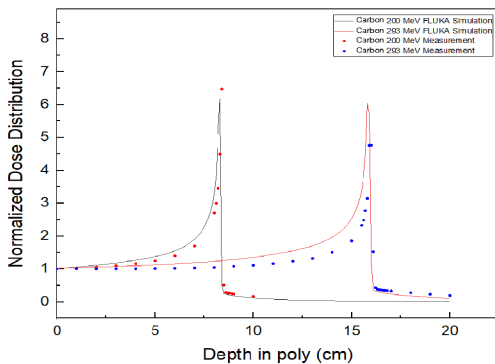


Fig. 3. Depth dose curve for Carbon ion beam

Table 2. Range comparison with reference and simulation for in polyethylene

Nuclide	Energy (MeV)	Range (cm)		Difference (%)
		NSRL	This study	
Proton	205	26.1	25.9	0.80
	250	36.7	36.1	1.63
Carbon ion	200	8.4	8.3	1.20
	293	16.1	15.8	1.86

2. 중성자 선속 평가

입사한 중하전입자는 가속 에너지에 따른 생성된 중성자를 에너지에 따라 분류한 결과는 Fig. 4와 Table 3과 같다. 0.1 eV의 에너지를 가지는 중성자가 가장 많은 발생량을 보였으며, 이후 중성자 에너지가 증가함에 따라 발생량도 감소하는 양상을 나타냈다. 양성자보다 탄소이온에서 더 많은 중성자가 발생하였으며, 동일 입자에서는 에너지가 높을수록 더 많은 양의 중성자가 발생하는 것으로 분석되었다. 양성자와 탄소이온 모두 100 MeV 이후로 급격히 감소하는 모습을 보이는 등 그래프의 기울기가 비슷하게 형성되었으나, 탄소이온의 경우 입자의 가속에너지가 293 MeV로 더 높아 양성자보다 더 높은 에너지의 중성자가 생성되었다.

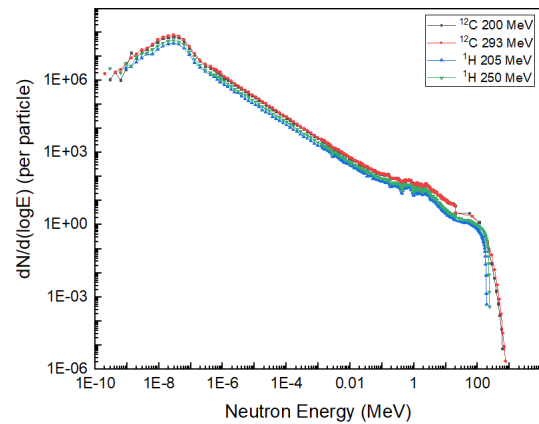


Fig. 4. Results of Neutron Flux in heavy charged particle

Table 3. Results of Neutron Flux in heavy charged particle

Neutron Energy	Proton		Carbon ion	
	205 MeV	250 MeV	200 MeV	293 MeV
Less than 1 MeV	2.45×10^8	3.30×10^8	4.72×10^8	5.56×10^8
1 MeV ~ 10 MeV	9.74×10^2	1.32×10^3	2.27×10^3	2.24×10^3
above than 10 MeV	8.41×10^1	1.13×10^2	2.22×10^2	2.17×10^2

3. 방사성 물질 생성 평가

1) 가동종료 직후 방사성 물질 생성 평가

방사성 물질 생성 평가 실험의 가동 환경은 각각 양성자 2×10^{10} pps, 탄소이온 4×10^8 pps로 진행하였다. Fig. 5, 6과 Table 4는 가동종료 직후 입자의 종류에 따라 생성되는 핵종과 방사능을 분류한 결과이다. 이를 세부적으로 살펴보면, 가동조건의 차이로 인하여 양성자가 탄소이온에 비해 방사성 핵종의 종류와 비방사능의 양이 더 높은 것으로 관측되었다.

양성자의 경우 탄소이온에 비해 ^{17}C , ^{54}Mn , ^{51}Cr , ^{49}V 를 추가 생성하고 ^{44}Sc 과 ^3H 를 제외한 모든 핵종을 약 2~3배 더 많이 발생시켰으며 가속 에너지에 따라 핵종의 발생량에 큰 차이를 보이는 것을 확인하였다. 탄소이온의 경우 양성자에 비해 ^{11}C 를 추가 생성하고, ^3H 를 약 1.5배 더 많이 발생시켰으며, 가속 에너지에 따른 비교에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 4개의 조건 모두 ^{44}Sc 핵종이 가장 높은 생성물을 나타내었고, ^3H , ^{22}Na 순으로 높은 비율을 보였다. 이 중 대부분의 방사화 생성물이 단 반감기 핵종으로 베타붕괴와 전

자포획의 붕괴 형태를 나타내었다.

2) 가동종료 15년 경과 후 방사성 물질 생성 평가

냉각 시간이 경과할수록 장 반감기 핵종의 비율이 높아지는 경향을 나타냈다. 이 중 비 입자성 방사성핵종의 경우 ^3H 와 ^{22}Na 순으로 가장 많이 발생하였다. 또한, 입자성 방사성 핵종의 경우 ^{55}Fe , ^{152}Eu , ^{60}Co , ^{44}Ti , ^{154}Eu 핵종이 높은 비율을 나타냈다. 이와 같은 입자성 방사성핵종은 투과력이 강한 광자를 발생시켜 위험도가 높다. 이에 따라 주요 핵종을 ^3H , ^{22}Na , ^{55}Fe , ^{154}Eu , ^{152}Eu , ^{60}Co , ^{44}Ti , ^{55}Fe 으로 선정하여 시간별 방사능 변화를 평가하였다(Fig. 7, 8), (Table 5).

양성자와 탄소이온 모두 ^{22}Na , ^{55}Fe , ^{60}Co 순으로 시간 변화에 따라 비방사능이 감소하는 것으로 분석되었다. 탄소이온은 가속 에너지 차이에 따른 비방사능 감소 양상의 차이를 보이지 않았다. ^3H 는 가동종료 후 다른 핵종에 비해 많이 발생했을 뿐 아니라 시간이 지남에 따라 비방사능의 감소폭이 작아 냉각이 진행될수록 존재 비가 높아져 냉각 15년 후 비방사능의 95%를 차지하며, 가장 많이 남아있는 핵종으로 분석되었다.

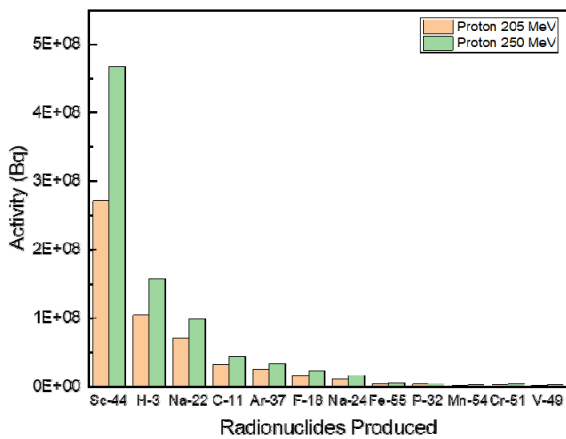


Fig. 5. Radionuclide Produced in Proton

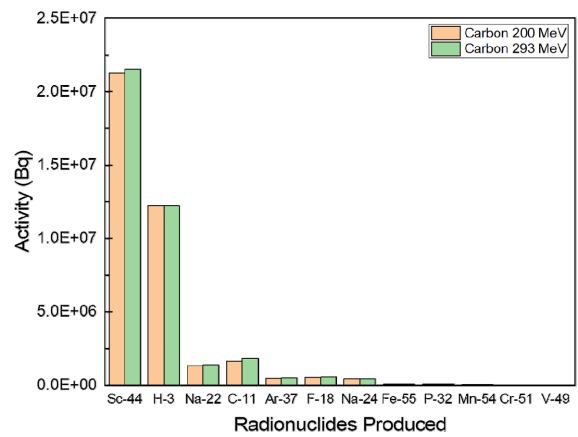


Fig. 6. Radionuclide Produced in Carbon ion

Table 4. Radiation of elements immediately after shutdown

Energy of particle	Radioactivity of elements immediately after shutdown [Unit : Bq/cc]												
	$^{44}\text{Sc}(4\text{h})$	$^3\text{H}(12.3\text{y})$	$^{22}\text{Na}(2.6\text{y})$	$^{17}\text{C}(0.2\text{s})$	$^{37}\text{Ar}(35\text{d})$	$^{11}\text{C}(20.3\text{m})$	$^{18}\text{F}(1.7\text{h})$	$^{24}\text{Na}(15\text{h})$	$^{55}\text{Fe}(2.7\text{y})$	$^{32}\text{P}(14.3\text{d})$	$^{54}\text{Mn}(312\text{d})$	$^{51}\text{Cr}(27.7\text{d})$	$^{49}\text{V}(329\text{d})$
Proton 205 MeV	2.72×10^8 (50.51%)	1.04×10^8 (18.71%)	7.1×10^7 (13.28%)	3.2×10^7 (5.99%)	2.5×10^7 (4.68%)	None	1.5×10^7 (2.81%)	1.1×10^7 (2.06%)	3.50×10^6 (0.65%)	2.83×10^6 (0.53%)	9.40×10^5 (0.18%)	2.01×10^6 (0.38%)	1.24×10^6 (0.23%)
Proton 250 MeV	4.67×10^8 (54.64%)	1.56×10^8 (18.60%)	9.8×10^7 (11.39%)	4.4×10^7 (5.12%)	3.3×10^7 (3.84%)	None	2.2×10^7 (2.56%)	1.6×10^7 (1.86%)	5.61×10^6 (0.65%)	4.27×10^6 (0.50%)	2.72×10^6 (0.32%)	2.74×10^6 (0.32%)	1.87×10^6 (0.22%)
Carbon ion 200 MeV	2.1×10^7 (55.91%)	1.2×10^7 (31.95%)	1.34×10^6 (3.56%)	None	4.70×10^5 (1.25%)	1.65×10^6 (4.38%)	5.20×10^5 (1.38%)	4.27×10^5 (1.14%)	7.01×10^4 (0.19%)	8.64×10^4 (0.23%)	None	None	None
Carbon ion 293 MeV	2.2×10^7 (56.64%)	1.2×10^7 (30.89%)	1.39×10^6 (3.58%)	None	4.85×10^5 (1.25%)	1.83×10^6 (4.71%)	5.41×10^5 (1.39%)	4.37×10^5 (1.12%)	7.26×10^4 (0.19%)	8.91×10^4 (0.23%)	None	None	None

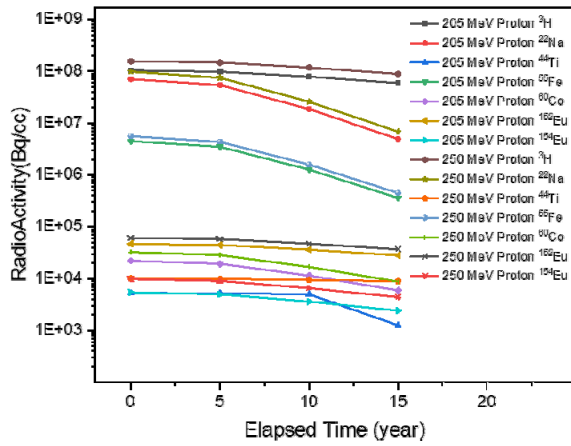


Fig. 7. Radioactivity of proton nuclide by time

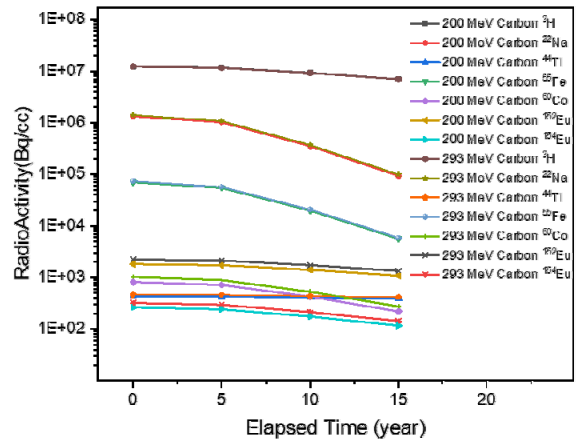


Fig. 8. Radioactivity of carbon nuclide by time

Table 5. Radioactivity of nuclide by time [Unit : Bq/cc]

Energy of particle		Radioactivity of elements 15 years after shutdown. [Unit : Bq/cc]						
		³ H(12.3y)	²² Na(2.61y)	⁴⁴ Ti(63y)	⁵⁵ Fe(2.73y)	⁶⁰ Co(5.27y)	¹⁵² Eu(13.5y)	¹⁵⁴ Eu(8.59y)
Proton 205 MeV	1 hr	1.0 × 10 ⁸	7.1 × 10 ⁷	5.3 × 10 ³	4.5 × 10 ⁶	2.2 × 10 ⁴	4.7 × 10 ⁴	5.4 × 10 ³
	5 yr	9.9 × 10 ⁷	5.4 × 10 ⁷	5.2 × 10 ³	3.5 × 10 ⁶	1.9 × 10 ⁴	4.5 × 10 ⁴	5.0 × 10 ³
	10 yr	7.9 × 10 ⁷	1.9 × 10 ⁷	5.0 × 10 ³	1.3 × 10 ⁶	1.2 × 10 ⁴	3.6 × 10 ⁴	3.6 × 10 ³
	15 yr	5.9 × 10 ⁷	4.9 × 10 ⁶	1.3 × 10 ³	3.6 × 10 ⁵	5.9 × 10 ³	2.8 × 10 ⁴	2.4 × 10 ³
Proton 250 MeV	1 hr	1.6 × 10 ⁸	9.8 × 10 ⁷	1.0 × 10 ⁴	5.6 × 10 ⁶	3.2 × 10 ⁴	6.1 × 10 ⁴	9.8 × 10 ³
	5 yr	1.5 × 10 ⁸	7.5 × 10 ⁷	9.9 × 10 ³	4.4 × 10 ⁶	2.8 × 10 ⁴	5.8 × 10 ⁴	9.0 × 10 ³
	10 yr	1.2 × 10 ⁸	2.6 × 10 ⁷	9.4 × 10 ³	1.6 × 10 ⁶	1.7 × 10 ⁴	4.7 × 10 ⁴	6.5 × 10 ³
	15 yr	8.9 × 10 ⁷	6.9 × 10 ⁶	8.9 × 10 ³	4.5 × 10 ⁵	8.7 × 10 ³	3.7 × 10 ⁴	4.4 × 10 ³
Carbon ion 200 MeV	1 hr	1.2 × 10 ⁷	1.3 × 10 ⁶	4.4 × 10 ²	7.0 × 10 ⁴	8.2 × 10 ²	1.8 × 10 ³	2.6 × 10 ²
	5 yr	1.1 × 10 ⁷	1.0 × 10 ⁶	4.3 × 10 ²	5.4 × 10 ⁴	7.2 × 10 ²	1.7 × 10 ³	2.4 × 10 ²
	10 yr	9.2 × 10 ⁶	3.5 × 10 ⁵	4.1 × 10 ²	2.0 × 10 ⁴	4.2 × 10 ²	1.4 × 10 ³	1.8 × 10 ²
	15 yr	7.0 × 10 ⁶	9.3 × 10 ⁴	3.9 × 10 ²	5.6 × 10 ³	2.2 × 10 ²	1.1 × 10 ³	1.2 × 10 ²
Carbon ion 293 MeV	1 hr	1.2 × 10 ⁷	1.4 × 10 ⁶	4.6 × 10 ²	7.3 × 10 ⁴	1.0 × 10 ³	2.2 × 10 ³	3.2 × 10 ²
	5 yr	1.2 × 10 ⁷	1.1 × 10 ⁶	4.5 × 10 ²	5.6 × 10 ⁴	8.9 × 10 ²	2.1 × 10 ³	3.0 × 10 ²
	10 yr	9.2 × 10 ⁶	3.7 × 10 ⁵	4.3 × 10 ²	2.1 × 10 ⁴	5.3 × 10 ²	1.7 × 10 ³	2.1 × 10 ²
	15 yr	7.0 × 10 ⁶	9.7 × 10 ⁴	4.1 × 10 ²	5.8 × 10 ³	2.7 × 10 ²	1.3 × 10 ³	1.4 × 10 ²

IV. 고찰

본 연구에 모의 모사된 양성자와 탄소이온의 선원항 평가 결과를 NASA 우주방사선연구소(NASA Space Radiation Laboratory; NSRL) 자료의 비정교 비교한 결과, 상대오차 2% 이내의 일치율을 보여, 본 연구의 선원항에 대한 모의 모사의 신뢰도를 확보하였다.

중하전입자 사용 시 차폐체와의 상호작용으로 인해 생성되는 중성자의 발생량을 분석해 본 결과, 입사 입자의 에너지가 높을수록 다량의 중성자가 발생하였다. 이 중 0.1 eV

의 에너지를 가지는 중성자가 가장 많이 발생하였으며, 탄소이온이 양성자와 달리 높은 에너지의 중성자를 생성함과 동시에 더 많은 중성자를 발생시킨 것으로 분석되었다. 이는 하전입자의 전하수가 커질수록 저지능이 증가하므로 탄소이온이 차폐체 내에서 더 많은 상호작용이 이루어졌기 때문으로 생각된다[14]. 또한, 입사 하전입자의 에너지가 높을수록 중성자 스펙트럼이 더 길게 생성된다는 Agosteo 등 (2014) 실험과 일치하는 경향을 나타내었다[15].

가동종료 직후 베타붕괴와 전자포획의 붕괴 형태를 가지는 단 반감기 핵종이 다량 발생하였다. 실제 가동 환경을 고

려하여 선속이 높게 설정된 양성자의 경우 탄소이온보다 방사화 생성물의 종류와 비방사능이 더 높게 발생하였다. 또한, 가속 에너지에 따라 핵종의 발생량에 큰 차이를 보였으며, ^{44}Sc , ^3H , ^{22}Na 등의 방사성핵종이 높은 비율로 관측되었다. 이는 콘크리트 내의 원자번호가 높은 물질보다 원자번호가 낮은 물질의 발생량이 많다는 Masumoto 등 (2008) 실험과 일치하는 경향을 나타내었다[16].

방사화되어 생성된 핵종 중 반감기가 길어 15년간 냉각 후에도 유의미한 선량을 방출하는 핵종은 양성자와 탄소이온 모두 ^3H , ^{22}Na , ^{55}Fe , ^{154}Eu , ^{152}Eu , ^{60}Co , ^{44}Ti 로 나타났다. 이 중 ^3H , ^{22}Na 의 경우 존재 비가 높으나 콘크리트 내 물과 섞여 지하수로 이행되어 정량적인 잔류량 분석이 어렵다[17]. 나머지는 입자성 핵종으로 존재 비는 낮지만, 투과력이 강한 광자를 방출하였다. 위 7개의 핵종을 주의 핵종으로 선정하였으며, (n, γ) 반응을 통한 콘크리트 방사화 평가에서 ^{60}Co , ^{152}Eu , ^{154}Eu 가 높은 비율을 나타내는 장동근 등의 실험과 일치하는 경향성을 보였다[18,19].

냉각 후 남아있는 입자성 핵종들은 모두 방사성폐기물 분류 기준에 따른 현행법상 자체처분 허용 농도 0.1 Bq/g, ^{55}Fe 의 허용 농도인 1,000 Bq/g 이상의 비방사능을 가진 것으로 확인되어 중·저준위 방사성폐기물로 처분해야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 임상 환경의 보수적인 방사화 평가를 위하여 가동 최대치를 기준으로 실험을 진행하였으며, 향후 각 가동조건에 맞는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한, 입자가속기 가동 및 가동종료 후 냉각 시간에 따른 콘크리트 방사화 물질의 예측을 통해 시설의 유지, 보수 및 해체의 기초자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

V. 결 론

본 연구는 몬테카를로 모의 모사를 이용하여 양성자와 탄소이온의 방사화 정도를 비교 평가하여 시설의 유지, 보수 및 해체의 기초자료를 제공하고자 하였다. 연구 결과, 탄소이온이 양성자에 비해 방사화 정도가 적은 것으로 평가되었다. 가동 종료 직후 베타붕괴와 전자포획의 붕괴 형태를 가지는 단 반감기 핵종들이 다량 발생하였으며 냉각 후 장 반감기 핵종들의 비율이 높아졌다. 본 연구의 데이터는 중입자 가속기의 시설 관리에 기초자료로서의 활용과 동시에 작업자의 피폭선량 연구에 응용이 가능할 것으로 보이며, 각 가동조건에 따른 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

REFERENCES

- [1] Nunes MdA. Hadron therapy physics and simulations, Springer; 2014.
- [2] 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.
- [3] Bae SI, Kim JH. A study on the radioactive products of components in proton accelerator on short term usage using computed simulation. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2020;43(5):389-95.
- [4] Choi SG. Literature review of clinical usefulness of heavy ion particle as a new advanced cancer therapy. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2019;42(6):413-22.
- [5] Wang YZ, Evans MD, Podgorsak EB. Characteristics of induced activity from medical linear accelerators. *Medical Physics*. 2005;32(9):2899-910.
- [6] Soltani-Nabipour J, Khorshidi A, Shojai F, Khorami K. Evaluation of dose distribution from ^{12}C ion in radiation therapy by FLUKA code. *Nuclear Engineering and Technology*. 2020;52(10):2410-4.
- [7] Woo R, Kim Y, Song M, Cho D, Lee J, Kim W. A study on the adoption of cyclotron decommissioning plan criteria by the analysis of domestic relocation and abroad dismantling practices. *Journal of Radiation Protection and Research*. 2013;38(2):91-9.
- [8] Bae SI, Sin SH. Calculation of neutron energy distribution from the components of proton therapy accelerator using MCNPX. *Journal of the Korean Society of Radiology*. 2019;13(7):916-24.
- [9] Böhlen T, Cerutti F, Chin M, Fassò A, Ferrari A, Ortega PG, et al. The FLUKA code: Developments and challenges for high energy and medical applications. *Nuclear Data Sheets*. 2014;120:211-4.
- [10] Ferrari A, Sala PR, Fasso A, Ranft J, Siegen U. FLUKA: A multi-particle transport code. *Citeseer*; 2005.
- [11] <https://www.bnl.gov/nsrl/userguide/bragg-curves-and-peaks.php>
- [12] Ryman J, Alpan F, Durani L. Revision of ANSI/ANS-6.4.

- 3, Transactions. 2008;99(1):613-4.
- [13] Chu W. Relativistic ion beams for treating human cancer. Proceedings of IPAC'10:21-5.
- [14] El-Ghossain M. Calculations of stopping power, and range of ions radiation (alpha particles) interaction with different materials and human body parts. International Journal of Physics. 2017;5(3): 92-8.
- [15] Agosteo S, Mereghetti A, Sagia E, Silari M. Shielding data for hadron-therapy ion accelerators: Attenuation of secondary radiation in concrete. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2014;319:154-67.
- [16] Masumoto K, Matsumura H, Bessho K, Toyoda A. Role of activation analysis for radiation control in accelerator facilities. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2008;278(2):449-53.
- [17] Ipe N. Shielding design and radiation safety of charged particle therapy facilities. PTCOG Report 1. Particle Therapy Cooperative Group; 2010.
- [18] Jang D, Lee D, Kim J. Radioactivation analysis of concrete shielding wall of cyclotron room using monte carlo simulation. Journal of the Korean Society of Radiology. 2017;11(5):335-41.
- [19] Lee D, Kim J. Comparison of general concrete and low-radiation concrete as shielding materials for medical linear accelerators. Journal of the Korean Society of Radiology. 2019;13(1):45-54.

구분	성명	소속	직위
제1저자	배상일	동남권원자력의학원	방사선사 / 연구원
공동저자	조용인	동남권원자력의학원	방사선사 / 연구원
교신저자	김정훈	부산가톨릭대학교	교수