

Comparison of General Concrete and Low-radiation Concrete as Shielding Materials for Medical Linear Accelerators

Dong Yeon Lee,¹ Jung Hoon Kim^{2,*}

¹Department of Radiation Oncology, Dongnam Inst. of Radiological & Medical Science, Korea

²Department of Radiological Science, College of Health Sciences, Catholic University of Pusan, Korea

Received: January 02, 2019. Revised: February 20, 2019. Accepted: February 28, 2019

ABSTRACT

This study is a neutron activation for concrete that shields medical linear accelerator facilities. Comparison of general concrete and low activation concrete. The simulation method was simulated using MCNPX (Ver. 2.5.0) and FISPACT-2010, and the shielding ability for photon and neutron beams was calculated and neutron activation evaluation was carried out. As a result, the shielding capacity was 20 ~ 50 cm efficient in general concrete, and activate evaluation in low activation concrete was calculated to be low in radioactivity concrete, but all were estimated to not exceed their own allowable concentration in self - disposal. As a result of the comprehensive analysis, it is considered effective to use ordinary concrete.

Keywords: LINAC, Activation, MCNPX, Fispact-2010, Concrete

1. INTRODUCTION

국내에는 1978년 고리 원자력 1호기 가동을 시작으로 고에너지 방사선을 사용하는 시설이 많이 구축 되어있는 상태이며, 현재 가동기간이 약 30~40년이 경과하여 해체를 앞두고 있는 시점이다.^[1] 대표적으로 2017년에 고리원전 1호기에 대한 가동을 중단하고 해체가 결정되었다.^[2] 이에 국내에서는 해체에 관한 핵심 기술의 개발, 해체 비용, 인력 산정에 대한 개발을 진행 중에 있으며, 2030년까지 이를 상용화 시킬 계획에 있다.^[1]

방사선 시설을 해체하는데 있어서 가장 크게 차지하는 부분은 비용적인 측면이다. 특히 방사성 폐기물의 경우 준위에 따라 폐기를 진행해야 하며, 자체 처분 허용 농도를 초과한다면, 폐기물 드럼통(2016년도 200 L 기준 약 1,200만원)을 이용하여 처리해야하기 때문에 비용적으로 높은 비율을 차지할 것으로 판단된다.^[3] 이에 해체 비용에 대한 문제

를 해결하기 위해 IAEA에서는 시설의 구축에 있어서 가동하면서 발생하는 비용의 일정 비율을 해체 비용으로 책정하는 것을 권고하고 있다.^[4]

방사성 폐기물은 시설 가동을 중단한 상태 즉, 정상적인 상태에서 방사선을 방출하는 물질이 해당되며, 시설을 구성하고 있는 장비 부품은 물론 차폐를 이루고 있는 차폐벽 등 모든 물질이 해당될 수 있다. 이 중 차폐벽은 대부분 콘크리트로 구성되어 있으며, 차지하는 비중이 높고, 무게와 부피가 굉장히 크다. 따라서 콘크리트가 방사화가 진행되어 준위가 자체 처분 허용 농도를 초과한다면, 해체 비용의 상당한 비율을 차지할 것이며, 해체 비용의 상승을 가져올 것이다.

이에 국외에서는 2000년 초반부터 콘크리트에 대한 방사화를 줄일 수 있는 방안에 대하여 활발히 연구하고 있으며, 그 중 대표적으로 개발한 것이 저 방사화 콘크리트이다.^[5] 콘크리트 구성 성분을 저 원자번호를 사용하여 차폐효율을 유지하면서

* Corresponding Author: Jung Hoon Kim

E-mail: donald@cup.ac.kr

Tel: +82-51-510-0589

방사화 진행을 최소화할 수 있는 재질을 개발하였고, 실제 덴마크에 위치한 Authors 대학병원에 이를 적용한 시설을 구축하였다.^[6]

국외와 마찬가지로 국내에서도 저방사화 콘크리트에 대한 연구를 활발히 진행하고 있으며, 특히 원전 구축에 있어서 적용하려는 노력이 계속 되고 있다.^[5] 반면에 상대적으로 낮은 에너지를 사용하는 소형 가속기 시설에 대한 적용은 미미한 것이 현실이며, 특히 의료 분야에는 적용한 사례가 없다.

이에 본 연구에서는 의료 분야 중 선형가속기 시설에 저 방사화 콘크리트 적용에 따른 영향을 평가하고자 하였으며, 현재 사용하고 있는 일반 콘크리트와 저 방사화 콘크리트를 비교하여 시설의 구축과 해체 시 모두를 고려한 보다 적절한 콘크리트 차폐 물성을 제안하고자 한다.

II. MATERIAL AND METHODS

일반적으로 방사선과 물질과의 상호작용은 확률적 반응으로써 실측을 통해 방사선량 평가 시 온도, 습도, 기압 등 여러 가지 변수가 영향을 미치기 때문에 표준화 된 데이터를 획득하기 어려운 단점이 있다. 또한, 방사화의 경우 방사화가 진행되기까지 일정 시간이 필요하며, 특히 저에너지의 경우 많은 시간이 필요하기 때문에 실측을 통해 평가하기에는 한계가 따른다.

이에 본 연구에서는 몬테칼로 법을 바탕으로 한 모의실험 프로그램을 사용함으로써 특정 환경에 대한 데이터가 아닌 이상적인 조건에서 표준화 된 데이터를 획득하고자 하였다.

1. 몬테칼로 모의실험

Fig. 1은 본 연구에서 진행한 모의실험의 전체적인 맥락을 이해하기 쉽게 표현한 것이다.

사용한 모의실험 프로그램은 MCNPX(Ver.2.5.0)와 FISPACT-2010을 사용하였다. 먼저, MCNPX를 사용하여 선형가속기 시설을 모의모사 한 후, 광자와 중성자의 특성, 콘크리트가 가지는 방사선 차폐능을 계산하였고, MCNPX를 통해 계산된 중성자 플럭스를 이용하여 FISPACT-2010을 통해 중성자 방사화를 평가하였다.

MCNPX 프로그램의 경우 몬테칼로 기법을 적용하여 중성자, 광자, 전자의 운송을 동시에 다룰 수 있으며 구조가 복잡한 방사선 치료실과 원자로 시설 등에서의 각 구조마다 정확한 방사선량을 예측할 수 있는 장점이 있다.^[7]

FISPACT-2010은 영국원자력공사와 유럽원자력공동체가 공동으로 개발한 프로그램으로써 중성자 방사화 계산에 특화된 코드이며, 방사화 진행 후 계산된 방사능에 대한 발생 핵종, 핵종 별 붕괴형식, 방출 방사선, 열 발생량 등을 제공하여 정량적

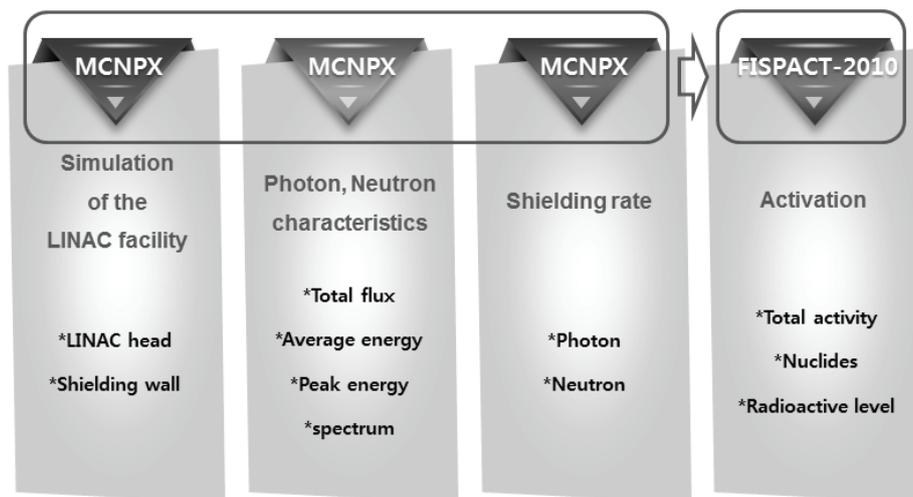


Fig. 1. Flowchart of the simulation performed in the research for activation evaluation.

인 방사화 분석이 가능한 장점이 있다.^[8]

2. 선형가속기, 차폐벽 모의모사

2.1 선형가속기 모의모사

본 실험에서 모사한 선형가속기는 광자선이 발생하며 광핵반응이 일어나는 원인이 되는 두부를 중심으로 모의모사 하였다.

현재 의료용 선형가속기는 Elekta, Siemens, Varian 등 여러 회사에서 제작하여 공급하고 있으며, 이 중 Varian 사의 장비가 전체 의료용 선형가속기의 약 90%이상을 차지하고 있다. 이에 본 연구에서는 Varian 사의 선형가속기를 바탕으로 국, 내외 문헌들을 참고하여^[9-12] 보편적으로 적용할 수 있으면서 보수적인 평가를 진행 할 수 있도록 기하학적 구조를 변형하여 모사하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 모사한 선형가속기 부품 모습이며, 타겟(Target), 1차 콜리메이터 (Primary Collimator), 플랫닝 필터(Flattening Filter), 2차 콜리메이터 (Secondary Collimator), 다엽 콜리메이터 (Multi-Leaf Collimator)를 모사하였다. Table 1은 각 부품에 적용된 재질 성분과 비율을 나타낸 것이다.

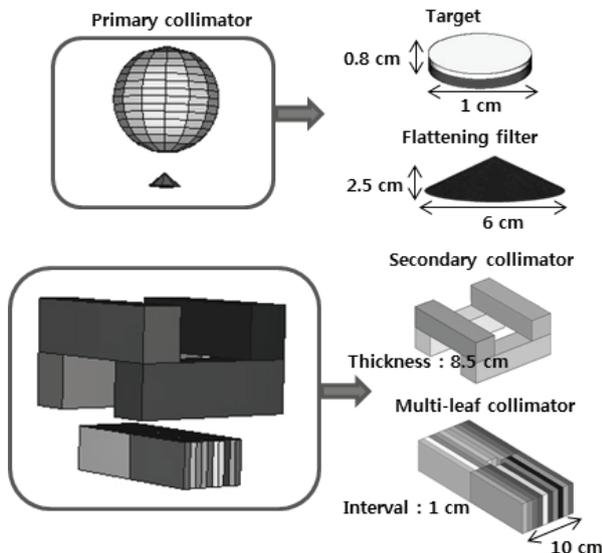


Fig. 2. LINAC head simulated in MCNPX.

2.2 차폐벽 모의모사

Fig 3은 본 연구에서 모사한 선형가속기를 차폐하고 있는 차폐벽의 모습이다. IAEA의 권고사항에 따라 선형가속기 두부를 중심으로 미로형으로 설계하였으며,^[13] 전신 방사선조사(Total Body Irradiation; TBI), 수술 중 방사선치료(Intraoperative Radiotherapy; IORT) 를 시행할 수 있도록 치료실의 크기를 충분히 확보할 수 있도록 하였다.^[14]

Table 1. LINAC head composition component

Components	Materials	Rate (%)
Primary Collimator	¹⁸² W	26.62
	¹⁸³ W	14.31
	¹⁸⁴ W	30.64
	¹⁸⁶ W	28.43
Target	¹⁸² W	26.62
	¹⁸³ W	14.31
	¹⁸⁴ W	30.64
	¹⁸⁶ W	28.34
	⁶³ Cu	69.15
	⁶⁵ Cu	30.85
Flattening Filter	⁶³ Cu	69.15
	⁶⁵ Cu	30.85
Secondary Collimator	¹⁸² W	26.62
	¹⁸³ W	14.31
	¹⁸⁴ W	30.64
	¹⁸⁶ W	28.43
Multi Leaf Collimator	¹⁸² W	26.62
	¹⁸³ W	14.31
	¹⁸⁴ W	30.64
	¹⁸⁶ W	28.43

이를 세부적으로 서술하면, 선형가속기 두부를 중심으로 전체 치료실의 크기를 600×800×270 cm³으로 설정하였으며, 미로 부분은 100 cm의 공간을 확보하였다. 콘크리트의 두께는 20 MV의 광자선을 고려하여 보수적인 관점에서 250 cm로 지정하였

다. 다만, 본 연구의 목적인 일반콘크리트와 저방사화 콘크리트에 대한 차폐능을 비교, 분석하기 위해 1차선이 향하는 바닥 부분을 선택하여 두께 400

cm로 설정한 후, 이를 10 cm 간격으로 세분화하여 관심지점을 각각 지정하였다.

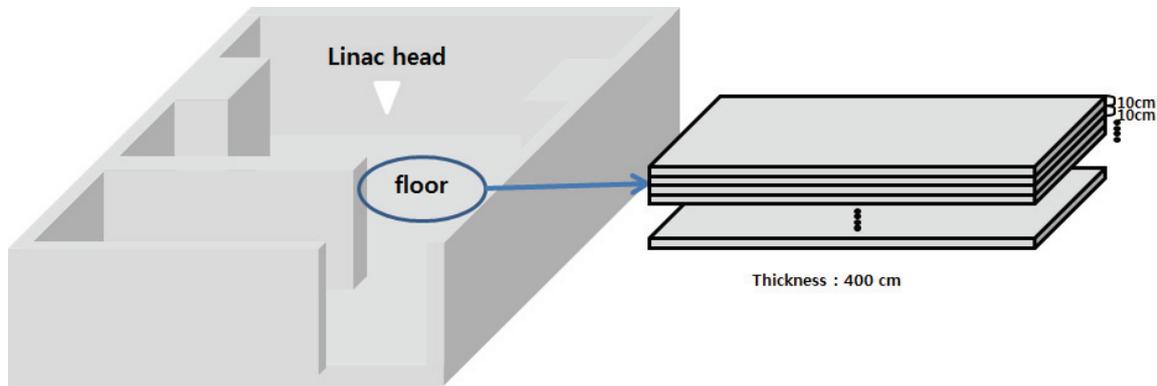


Fig. 3. schematic of a linear accelerator room.

콘크리트에 적용한 재질은 일반 콘크리트의 경우 한국원자력연구소의 ‘high energy 방사선 발생장치 차폐기술’ 과제 기술 보고서^[15]를 참고하여 제시되어있는 6 가지 콘크리트 중 철 함유량이 가장 높아 차폐효율이 좋은 Magnetite and steel 콘크리트를 선정하였으며, 저 방사화 콘크리트의 경우 덴마크에 위치한 Aarhus 대학병원의 입자 가속기 시설 구축 시 실제 사용한 재질을 적용하였다.^[6] 콘크리트 재질에 대한 세부적인 사항은 Table 2로 나타내었다.

Table 2. Concrete composition component [Unit : %]

Materials	Classification	General cement	Low activation cement
H		0.24	-
O		13.7	37.4
Si		1.57	2.3
Ca		5.56	47.3
C		-	10.4
Na		-	< 0.2
Mg		0.37	0.2
Al		1.03	0.6
Fe		75.25	0.9
Ti		1.59	-
V		0.64	-
Li		-	0.00037
Cs		-	0.00002
Co		-	0.00018
Eu		-	0.00001

3. 실험 방법

3.1 광자선 특성 분석

본 연구에서 모사한 선형가속기 두부의 신뢰성을 확보하기 위해 광자에 대한 에너지 스펙트럼 형태, 피크 에너지, 평균 에너지, 광자플럭스를 측정하였다. 이 때, Tally는 F4번을 이용하여 선원과 피부와의 거리 (Source to Skin distance; SSD) 는 100 cm인 지점에 반지름 5 cm 의 가상의 구를 설정한 후 단위 면적당 입자 수(photon number/cm²/e)를 계산함과 동시에 에너지 간격을 10 keV로 설정하여 광자 스펙트럼을 분석하였다.

3.2 광자선 및 중성자 차폐능 산정

일반 콘크리트와 저 방사화 콘크리트의 깊이에 따른 차폐능을 비교하기 위해 4 m 두께의 콘크리트 바닥을 10 cm 간격으로 관심영역을 설정하여 각 영역에 대한 결과 값을 계산하였다. 이 때, 사용한 Tally는 F5번으로 10 cm 간격으로 나눈 영역을 각각 관심 지점으로 설정하여 단위면적당 입사하는 방사선 수(photon or neutron/cm²/e)를 계산하였으며, 완전 차폐가 이루어지는 두께를 산정하였다.

3.3 중성자 스펙트럼

중성자 방사화를 예측하는 식은 (1)과 같다.

$$A = \sigma \phi N(1 - e^{-\lambda t}) \quad (1)$$

A = t 시간 조사 시 생성 방사능(dps)

σ = 반응단면적 (barn)

ϕ = 중성자속밀도 (number/cm²·sec)

λ = 생성 핵의 붕괴상수(sec⁻¹)

t = 조사시간

따라서 콘크리트에 대한 중성자 방사화를 예측하기 위해서는 반응단면적, 중성자속밀도, 조사시간 등 기본 인자를 산정해야 하며,^[16] 특히 중성자의 경우 에너지에 따라 반응단면적이 다르기 때문에 중성자 스펙트럼에 대한 분석이 반드시 필요하다. 이에 본 연구에서는 콘크리트에 입사하는 중성자 스펙트럼을 계산하였다. 이 때, 사용한 Tally는 F5로 콘크리트 바닥을 관심영역으로 설정하여 평균 에너지, 플럭스를 계산함과 동시에 에너지 간격을 1 eV으로 하여 스펙트럼을 계산하였다.

3.4 방사화 분석

MCNPX로 획득한 중성자 플럭스와 스펙트럼을 입력값으로 변환하여 FISPACT-2010을 통해 차폐벽 바닥 부분에 해당하는 콘크리트를 방사화 분석을 하였다. 선형가속기의 가동시간을 1일 8시간 쉬지 않고 가동한다는 가정 하에 50년 동안 가동하였을 경우 진행되는 방사화를 분석하였다. 방사화 분석은 총 방사능과 발생 핵종 별 방사능을 분석하여 일반 콘크리트와 저 방사화 콘크리트를 비교하였다.

III. RESULT

1. 광자선 특성 분석

MCNPX로 산출된 선형가속기 20 MV 광자선 스펙트럼 분포는 Fig. 4와 같이 산출되었다. 분석 결과 평균 에너지는 4.35 MV, 플럭스는 3.60E-04 #/cm²/e로 나타났으며, 에너지 분포는 약 0 ~ 6 MeV 사이에서 대부분 형성되는 것을 확인할 수 있다.

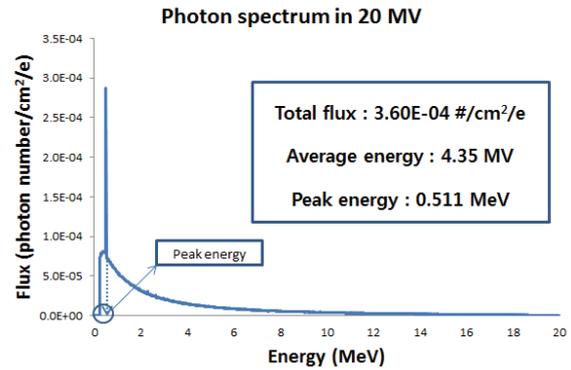


Fig. 4. Photon spectrum generated by LINAC.

2. 광자선 및 중성자선 차폐능 산정

2.1 광자선 차폐능 평가

광자선에 대한 차폐 효율을 산출하기 위해 차폐벽 깊이에 따른 광자선 투과율을 통해 차폐능을 계산하였다. 콘크리트 두께별 광자 플럭스를 Table 3으로 나타냈다.

이를 분석해보면, 일반 콘크리트의 경우 200 cm, 저 방사화 콘크리트의 경우 250 cm에서 결과 값 0을 나타내어 차폐가 되었음을 확인할 수 있다.

Table 3. Photon shielding ability according to depth [unit : Photon number/cm²/e]

Depth (cm)	General concrete	Low activation concrete
10	6.81E-09	6.51E-09
20	2.56E-09	2.56E-09
30	9.86E-10	1.04E-09
...
180	2.49E-14	1.43E-14
190	2.46E-15	1.89E-14
200	0.00E+00	4.08E-15
210	0.00E+00	3.46E-15
220	0.00E+00	3.54E-15
230	0.00E+00	1.74E-15
240	0.00E+00	5.76E-16
250	0.00E+00	0.00E+00

2.2 중성자선 차폐능 평가

중성자선에 대한 차폐 효율을 산정하기 위해 차폐벽 깊이에 따른 중성자선의 차폐능을 계산하였으며, 이를 Table 4로 나타내었다.

이를 평가하면, 일반 콘크리트의 경우 200 cm, 저 방사화 콘크리트의 경우 220 cm에서 결과 값 0을 나타내어 차폐가 된 것을 확인할 수 있다.

Table 4. Shielding ability of neutron beam according to depth [unit : Neutron number/cm²/e]

Depth (cm)	General concrete	Low activation concrete
10	3.82E-09	6.01E-09
20	2.73E-09	4.51E-09
30	1.87E-09	3.27E-09
...
150	4.08E-12	1.07E-11
160	9.52E-13	7.66E-12
170	3.79E-13	3.56E-12
180	1.12E-13	1.69E-12
190	3.81E-14	1.44E-12
200	0.00E+00	6.43E-13
210	0.00E+00	2.43E-13
220	0.00E+00	0.00E+00

2.3 중성자 스펙트럼 분석

중성자 방사화를 계산하기 위해 필요한 중성자 선속과 에너지 분포를 에너지 스펙트럼을 통해 분석하였다. 일반 콘크리트와 저 방사화 콘크리트 각각에 대하여 분석하였으며, 수치를 육안으로 확인하기 용이하도록 로그값을 취하여 Fig. 5와 같이 나타내었다.

에너지 스펙트럼을 분석하면, 중성자 선속은 일반 콘크리트에서 3.69E-09 #/cm²/e, 저 방사화 콘크

리트에서 5.77E-09 #/cm²/e로 계산되었으며, 중성자 에너지 분포는 대부분 저에너지 (0.1 MeV)이하에서 높게 분포하는 것을 확인할 수 있다.

3.4 방사화 평가

일반 콘크리트와 저 방사화 콘크리트에 대한 방사화 분석 결과를 Table 5로 나타냈다.

방사화 평가 결과 약 60 여 개의 핵종이 발생하였으나, 비교적 장 반감기에 해당하며 폐기물 준위 평가 시 주요 핵종 6 가지를 선정하여 분석하였다. 총 방사능은 일반 콘크리트 5.16E+02 Bq/kg, 저 방사화 콘크리트 1.97E+01 Bq/kg 로 저 방사화 콘크리트에서 약 38.2% 낮게 산정되었다.

이를 각 핵종 별로 분석해보면, ³H, ⁶⁰Co는 저 방사화 콘크리트, ²⁴Na, ⁴⁵Ca, ⁵⁴Mn, ⁵⁵Fe는 일반 콘크리트에서 높은 결과 값을 나타냈다.

Table 5. Concrete radioactive evaluation

Nuclides	Type	Half-live	General concrete (Bq/kg)	Low activation concrete (Bq/kg)
³ H	β-	12.26 y	6.87E-05	14.20
²⁴ Na	β-	15 h	1.11	0.27
⁴⁵ Ca	β-	0.45 y	5.78	0.11
⁵⁴ Mn	EC	0.85 y	30.54	0.01
⁵⁵ Fe	EC	2.73 y	199.90	0.06
⁶⁰ Co	β-,γ	5.27 y	145E-10	0.59
Total	-	-	5.16E+02	1.97E+01

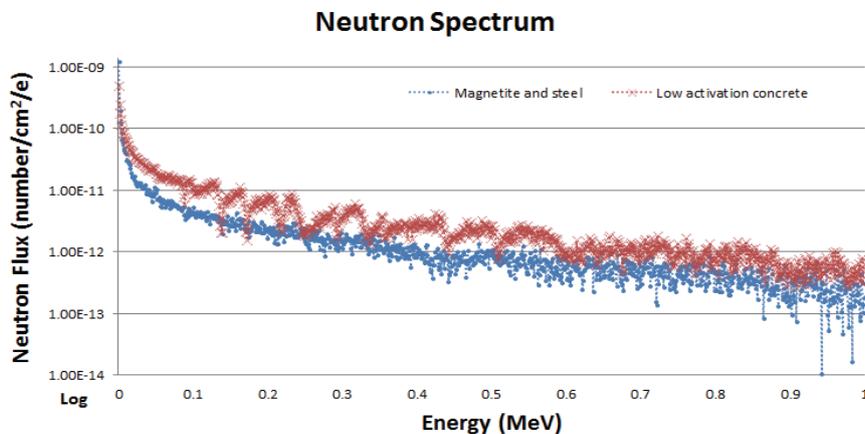


Fig. 5. Neutron spectrum generated by LINAC.

IV. DISCUSSION

본 연구는 의료용 선형가속기 시설에서 저 방사화 콘크리트 재질을 적용하고 이를 일반 콘크리트 재질과 비교하여 차폐능 및 차폐벽의 방사화 평가를 시행하였다.

첫째, 본 모의실험을 통해 획득한 모든 결과값에 대한 신뢰도를 확보하기 위해 결과값에 대한 상대 오차를 3% 이내로 유지하였으며, 충분한 반복 실험(10^8 번)을 통해 결과값에 대한 불확도를 최소화하여 하였다.

둘째, 모사한 선형가속기에 대한 신뢰도를 확보하기 위해 계산한 광자선 스펙트럼을 분석해 보면, 기존의 Mesbihi^[17], Baumgatner^[18]의 연구와 비교 시 스펙트럼의 그래프의 유형 및 평균 에너지가 유사하게 나타났으며, 동일한 피크 에너지가 발생한 것을 확인할 수 있다. 이에 모사한 선형가속기의 객관성을 확보하였다고 판단되며, 따라서 실험 결과값에 대한 신뢰도를 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

셋째, 일반 콘크리트와 저 방사화 콘크리트의 광자선 및 중성자선 차폐능을 비교하면, 광자선, 중성자선 모두 일반 콘크리트 일 때, 효과적인 것으로 나타났다. 이는 일반 콘크리트 구성성분 중 철이 다량 함유되어 실험원자번호가 높아 광자선에 대한 차폐 효과가 좋은 것으로 사료되며, 중성자의 경우 중성자 감속의 결정적인 역할을 하는 수소 함유량이 일반 콘크리트가 높기 때문인 것으로 판단된다.

마지막으로 각각 콘크리트에 대한 방사화 진행을 분석하면, 총 방사능은 저 방사화 콘크리트에서 낮게 나온 것을 확인할 수 있다. 이는 저 방사화 콘크리트 구성성분이 상대적으로 원자번호가 낮기 때문인 것으로 판단 할 수 있다.

반면에 방사화로 인해 발생한 핵종을 개별 분석하면, 피폭의 주요 원인이 되는 감마선 방출 핵종인 ^{60}Co 가 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 그 양은 일반 콘크리트 보다 저 방사화 콘크리트에서 높게 계산되었다. 이는 콘크리트 구성 성분에 있어서 저 방사화 콘크리트에 ^{60}Co 가 포함되어있기 때문인 것으로 사료된다. 또한, 이와 같은 결과로 추론 할 수 있는 점은 선형가속

기에서 발생하는 중성자의 경우 ^{60}Co 를 다량 생성할 수 있을 정도가 아닌 소량($1.0\text{E}-10$ Bq/kg 정도)을 발생할 수 있는 영향을 가진 것으로 판단할 수 있다.

V. CONCLUSION

본 연구는 의료용 선형가속기 시설에서 구축과 해체 시 콘크리트 적용에 있어서 더 합리적인 재질을 선택하기 위하여 모의실험을 진행한 연구이다.

차폐능과 방사화 진행정도를 평가하여 분석한 결과 두 재질 모두 방사화가 진행이 되었으며, 국내에서 사용 중인 일반 콘크리트에서 총 방사능이 높게 계산되었으나 그 수치는 자체 처분 허용 농도를 만족하는 범위를 벗어나지 않았다. 따라서 차폐능을 고려하여 경제적인 측면을 생각한다면 국내에서 사용 중인 일반 콘크리트가 더욱 효율적인 것으로 판단된다.

현재 높은 에너지를 사용하는 선형가속기의 개발로 중성자 발생과 방사화 문제가 부각되고 있으며, 이에 대한 다양한 차폐물이 개발되고 있다. 따라서 다양한 차폐물에 대한 맹목적 사용이 아닌 본 연구와 같이 정량적으로 방사화 계산을 할 수 있는 실험을 통해 의료용 선형가속기 차폐물에 대한 합리적이면서 효율적인 재질을 적용하는 것이 올바른 방안이라 생각된다.

Reference

- [1] J. S. Lee, J. Y. Min, J. H. Lee, "Manufacturing Technology of Low-activation Cement Binder Considering Decommissioning," Magazine of the Korea Concrete Institute, Vol. 28, No. 5, pp. 21-26, 2016.
- [2] B. N. Lee, J. S. Lee, J. Y. Min, H. H. Lee, "Development of Low-activation Cement for Decreasing the Activated Waste in Nuclear Power Plant," Korean Recycled Construction Resources Institute, Vol. 5, No. 3, pp. 223-229, 2017.
- [3] S. B. Hong, "A Study on the Optimization Method for Decommissioning Site Remediation," Department of Nuclear Engineering, Graduate School of Kyung Hee University, 2016.
- [4] IAEA safety standards series, Safety guide No. WS-G-2.2: Decommissioning of Medical, Industrial

- and Research Facilities, IAEA, Vienna, 1999.
- [5] J. Y. Lee, "Development and Application of Low Activation Cement," Korea Cement Association, Vol. 201c, No. 188, pp. 27-37, 2010.
- [6] L. H. Præstegaard, E. B. Klynkby, C. S. Sondergaard, O. Norrevang, "Low-activation concrete design of the Danish Center for Particle Therapy," Technical Information Center of Denmark, 2016.
- [7] Denis B. Pelowitz, MCNPXTM User's Manual Ver.2.5.0, Los Alamos National Laboratory, 2005.
- [8] R. A. Forrest, FISPACT-2010: User's Manual, UKAEA FUS 534, 2010.
- [9] W. L. Huang, Q. F. Li, Y. Z. Lin, "Calculation of photoneutrons produced in the targets of electron linear accelerators for radiography and radiotherapy applications," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B Beam Interactions with Materials and Atoms, B229, pp. 339-347, 2005.
- [10] O. Chibani, C. M. Ma, "Photonuclear dose calculations for high-energy photon beams from Simens and Varian linacs," Medical Physics, Vol. 30, No. 8, pp. 1990-2000, 2003.
- [11] J. P. Lin, W. C. Liu, C. C. Lin, "Investigation of photoneutron dose equivalent from high-energy photons in radiotherapy," Applied Radiation and Isotopes, Vol. 65, No. 5, pp. 559-604, 2007.
- [12] J. O. Lee, D. H. Jung, J. K. Kang "Neutron Generation from a 24 MV Medical Linac," Korean Journal Medical Physics, Vol. 16, No. 2, pp. 97-103, 2005.
- [13] IAEA, Radiation protection in the design of radiotherapy facilities, IAEA safety report series No. 47, vienna, 2006.
- [14] IAEA, Radiotherapy facilities : Master planning and Concept design considerations, Human Health Report No. 10, 2014.
- [15] B. C. Lee, H. I. Kim, Shielding technology for high energy radiation production facility, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 2004.
- [16] Y. S. Shin, "Evaluation aspect of activation implemented in the different MCNPX nuclear models by proton beam in material," Department of Radiological Science The graduate School, Catholic University of Daegu, 2016.
- [17] A. Mesbahi, M. Fix, M. Allahverdi, E. Grein, 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.
- [18] A. Baumgartner, A. Steurer, F. J. 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.

의료용 선형가속기 차폐 재질로써 일반 콘크리트와 저 방사화 콘크리트 비교

이동연,¹ 김정훈^{2,*}

¹동남권원자력의학원 방사선종양학과

²부산가톨릭대학교 방사선학과

요 약

본 연구는 의료용 선형가속기 시설을 차폐하는 콘크리트에 대한 중성자 방사화 연구로써, 일반 콘크리트와 저 방사화 콘크리트를 비교 분석하였다. 실험 방법은 MCNPX (Ver. 2.5.0)와 FISPACT-2010를 사용하여 모의실험을 진행하여, 광자선과 중성자선에 대한 차폐능을 산정하고 중성자 방사화 평가를 진행하였다. 그 결과 차폐능은 일반 콘크리트에서 20~50 cm 효율적이었으며, 방사화 평가의 경우 저 방사화 콘크리트에서 방사능이 낮게 계산되었으나, 모두 자체처분허용 농도를 초과하지 않는 수준으로 산정되었다. 이를 종합적으로 분석한 결과 일반 콘크리트를 사용하는 것이 효율적인 것으로 판단된다.

중심단어: 선형가속기, 방사화, MCNPX, FISPACT-2010, Concrete

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	이동연	동남권원자력의학원 방사선종양학과	시니어기사
(교신저자)	김정훈	부산가톨릭대학교 방사선학과	교수