

<원저>

의료용 선형가속기 차폐벽의 두께 산정에 관한 연구

- A study on the calculation of the shielding wall thickness in Medical Linear Accelerator -

¹⁾동남권원자력의학원 방사선종양학과 · ²⁾인제대학교 부산백병원 방사선종양학과 ·

³⁾부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과

이동연¹⁾ · 박은태²⁾ · 김정훈³⁾

— 국문초록 —

본 연구는 방사선 차폐 시 주로 사용되고 있는 콘크리트를 대상으로 차폐 두께를 계산한 연구로서 의료용 선형가속기를 차폐하기 위해 구성되는 벽에 대한 연구이다. 선형가속기에서 발생하는 광자선 에너지 10 MV를 대상으로 MCNPX(Ver.2.5.0)를 이용하여 적절한 차폐 두께를 계산하고자 하였다. 그 결과, 광자선 차폐를 위한 십가층은 순수 콘크리트의 경우 50~100 cm, Boron+polyethylene 첨가 시 80~100 cm에서 형성되었다. 중성자 차폐는 순수 콘크리트의 경우 100~140 cm, Boron+polyethylene 첨가 시 90~100 cm으로 계산되었다. 이를 바탕으로 분석하면, 콘크리트 재질은 Steel 계열을 사용하고 콘크리트에 Boron+polyethylene을 첨가하여 구성하는 것이 가장 효율적인 것으로 판단된다.

중심 단어: 방사선 차폐, 선형가속기, 차폐벽, 콘크리트, MCNPX

1. 서 론

의료분야에서 대표적으로 사용하는 입자가속기는 전자를 가속시켜 광자선을 얻는 선형가속기이다. 선형가속기에서 만들어진 광자선을 이용하여 암을 치료하는 역할을 하고 있다. 과거에는 대부분 4~6 MV의 광자선을 사용하였으나 현재는 기술의 발달로 인하여 10 MV 이상의 고에너지 광자선을 사용할 수 있게 되었으며, 국내의 경우 약 2000년대부터 10 MV 이상의 고에너지를 사용할 수 있는 선형가속기로 대부분 대체가 되었다[1].

의료용 선형가속기 차폐 방법에 대하여 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency; IAEA)에서

“Radiation protection in the design of radiotherapy facilities”를 발간하여 권고하였다[2].

IAEA에서 기술한 치료실의 구조에 대한 내용을 보면, 치료실의 넓이 $7 \times 7 \text{ m}^2$, 높이 최소 4 m, 치료실의 미로 폭은 2~2.2 m로 권고하고 있다. 이와 같은 이유는 환자가 위치하는 치료 테이블의 최대 크기를 포함할 수 있는 크기를 확보하기 위함과 선형가속기 장비가 이동할 수 있는 최소한의 공간을 확보하여야 하기 때문이다. 치료측면으로는 전신 방사선조사 (Total Body Irradiation; TBI), 수술 중 방사선 치료 (Intraoperative Radiotherapy; IORT) 등을 시행할 수 있는 최소한의 조건을 고려한 것이다[3].

또한 IAEA에서는 차폐벽을 구성하는 재료로서 콘크리트

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korean government(MSIP:Ministry of Science, ICT and Future Planning) (No. No. 2016M2B2A9A02944626)

Corresponding author: Jung-Hoon Kim, Department of Radiological Science, Catholic University of Pusan, 57, Oryundae-ro, Geumjeong-gu, Busan-si, 46252, Korea / Tel: +82-51-510-0586 / E-mail: donald@cup.ac.kr

Received 26 May 2017; Revised 6 June 2017; Accepted 8 June 2017

Table 1 Components and density of each concrete material[4]

(unit : g/cc)

| Element | H | O | Si | Ca | C | Na | Mg | Al | S | K | Fe | Ti | Cr | Mn | V | Ba | Density |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| Ordinary (nbs03) | 0.020 | 1,116 | 0.342 | 0.582 | 0.118 | - | 0.057 | 0.085 | 0.007 | 0.004 | 0.026 | - | - | - | - | - | 2.35 |
| Ordinary (nbs04) | 0.013 | 1,165 | 0.737 | 0.194 | - | 0.040 | 0.006 | 0.107 | 0.003 | 0.045 | 0.029 | - | - | - | - | - | 2.35 |
| Magnetite | 0.011 | 1,168 | 0.091 | 0.251 | - | - | 0.033 | 0.083 | 0.005 | - | 1,676 | 0.192 | 0.006 | 0.007 | 0.011 | - | 3.53 |
| Barytes | 0.012 | 1,043 | 0.168 | 0.168 | - | - | 0.004 | 0.014 | 0.361 | 0.159 | - | - | - | - | - | 1,551 | 3.35 |
| Magnetite and steel | 0.011 | 0,638 | 0.073 | 0.258 | - | - | 0.017 | 0.048 | - | - | 3,512 | 0.074 | - | - | 0.003 | - | 4.64 |
| Limonite and steel | 0.031 | 0,708 | 0.067 | 0.261 | - | - | 0.007 | 0.029 | - | 0.004 | 3,421 | - | - | - | 0.004 | - | 4.54 |

에 대한 조건을 제시하였다. 이에 대하여 주당 가동률, 사용하는 에너지 등을 고려하여 적절한 콘크리트 두께와 밀도에 대한 내용을 제공하고 있다[3].

하지만, IAEA 권고사항의 한계점을 보면, 현재 대부분 장비가 고에너지용 가속기로 대체되었으며, 이에 따라 광핵 반응으로 인해 발생하는 중성자에 대한 문제가 있다. 그럼에도 불구하고 IAEA에서 권고하는 중성자 차폐방법에 대한 내용은 중성자 흡수재를 콘크리트에 첨가하는 정도의 내용이 전부이며 자세히 다루고 있지 않다는 점이다. 또한, 한국 원자력연구소의 자료[4]에 따르면 방사선 시설의 차폐에 사용되는 콘크리트의 종류는 6가지로 보고하였으나, IAEA에서는 콘크리트 재질 별로 분석한 것이 아닌 일반적으로 사용하고 있는 콘크리트 한 종류에 대하여 기술하였다. 콘크리트 재질은 종류에 따라 수소와 철 성분의 함유량이 다르며, 함유량에 따라 차폐에 영향을 줄 수 있기 때문에 정확한 두께 산정을 위해서 반드시 고려되어야 할 부분이다.

이에 본 연구에서는 모의실험을 통해 콘크리트에 중성자 흡수재 첨가 유무에 따른 차폐 두께 변화를 평가하고자 하며, 콘크리트 재질을 변화하였을 때, 광자선과 중성자선에 대한 적절한 차폐 두께를 계산하고자 한다.

II. 실험 재료 및 방법

1. 방사선 발생시설 차폐 물질

방사선을 이용하는 시설의 차폐를 위해 사용되는 재질은 대표적으로 콘크리트를 이용하고 있다. 이는 운반이 용이하고 시공성과 경제성이 뛰어나기 때문이다[5].

일반적으로 방사선 차폐를 위해 사용되는 콘크리트는 기준 단위 용적중량이 25,000~40,000 kg/m³을 만족하여야

하며, 콘크리트의 슬럼프는 100 mm 이하, 물과 시멘트 비는 50% 이하로 권고되어 있다[6].

광자선의 경우 콘크리트의 밀도와 원자번호가 높을수록 광전효과 발생확률이 높아져 차폐율이 높아진다. 따라서 콘크리트의 두께를 두껍게 하고 원자번호가 높은 성분의 비율을 높일수록 차폐율이 높아진다[7].

중성자의 경우 차폐를 위해서는 수소계열의 감속재와 중성자를 흡수할 수 있는 흡수재를 사용하여 차폐를 하도록 되어있다. 이에 콘크리트에 수소성분 비율을 높이고 보론, 카드뮴 등 흡수재를 첨가하면 중성자에 대한 차폐율을 높일 수 있다.

방사선 차폐에 사용되는 콘크리트 재질은 한국원자력안전위원회에서 nbs03, nbs04, barytes, magnetite, magnetite and steel, Limonite and steel 총 6 종류로 분류하고 있으며, 각 재질별 구성성분과 밀도를 Table 1로 나타내었다[4].

2. 몬테칼로 시뮬레이션

방사선은 확률적영향의 대표적인 경우로써, 주변의 온도, 습도, 기압 등 환경의 영향에 따라 선량이 민감하게 반응을 한다. 따라서 실제 측정을 통한 데이터를 획득한다면, 표준 온도, 습도, 기압에 대하여 수치를 보정을 해야 하는 단점이 있다.

이에 반해, 몬테카를로법을 바탕으로 하는 모의실험을 한다면, 환경의 영향을 제어할 수 있기 때문에 특정 환경의 데이터는 물론 기준이 될 수 있는 표준화 된 데이터를 계산할 수 있는 장점이 있다.

몬테카를로를 기본원리로 한 모의실험 프로그램은 여러 가지가 있으며, 그 중 의료 분야에서 대표적으로 사용하는 것은 Fluka(FLU ktuierende KA skade), Geant4(GEometry ANd Tracking), MCNPX(Monte Carlo N-Paticle, Extended)

등이 있다[8].

본 연구에서는 입자의 수송 확률을 계산하는데 높은 정확성을 가지며, 데이터 결과값을 사용자가 원하는 단위로 받을 수 있는 장점을 가지고 있는 MCNPX(Ver. 2.5.0)를 사용하여 계산하였다.

3. 선형가속기, 차폐벽 모의모사

MCNPX프로그램을 이용하여 선형가속기에 대한 차폐벽 두께를 계산하기 위하여 전자를 가속하는 선형가속기와 이

를 차폐하는 차폐벽을 모사하였다.

먼저, 선형가속기의 경우 Fig. 1과 같이 타깃, 선속평탄여과판, 1차 조리개, 2차 조리개, 다엽조리개를 모사하여 광자선이 발생의 중심이 되는 헤드를 모사하였다. 또한 특정한 장비를 대상으로 모사한 것이 아닌 기존의 선형가속기의 구조와 특성에 관한 연구들을 바탕으로 하여 대표성을 가질 수 있는 형태로 모사하였다[9-12].

차폐벽의 경우 Fig. 2와 같이 현재 대부분 임상에서 구성되어있는 미로형으로 모사하였으며, IAEA에서 권고한 내용을 바탕으로 하였다[2]. 세부적으로 보면, 전체 넓이 7×7 m²,

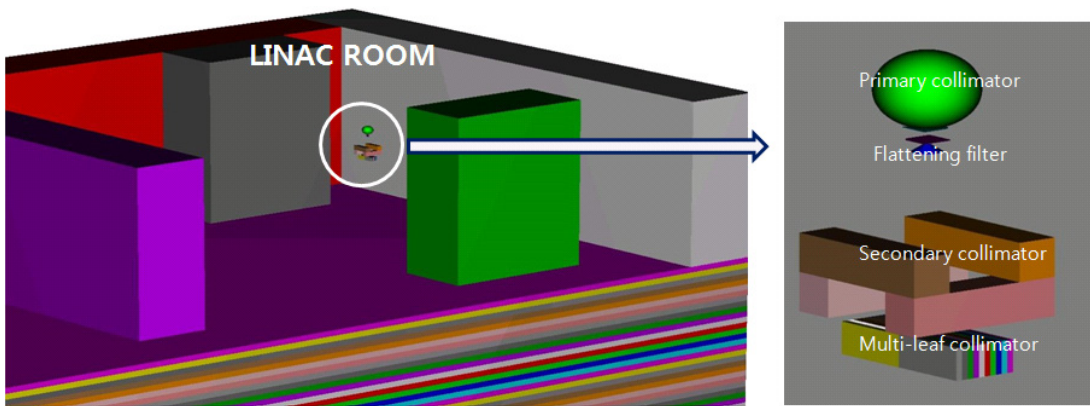


Fig. 1 Geometry of the Linac Room and Linac head

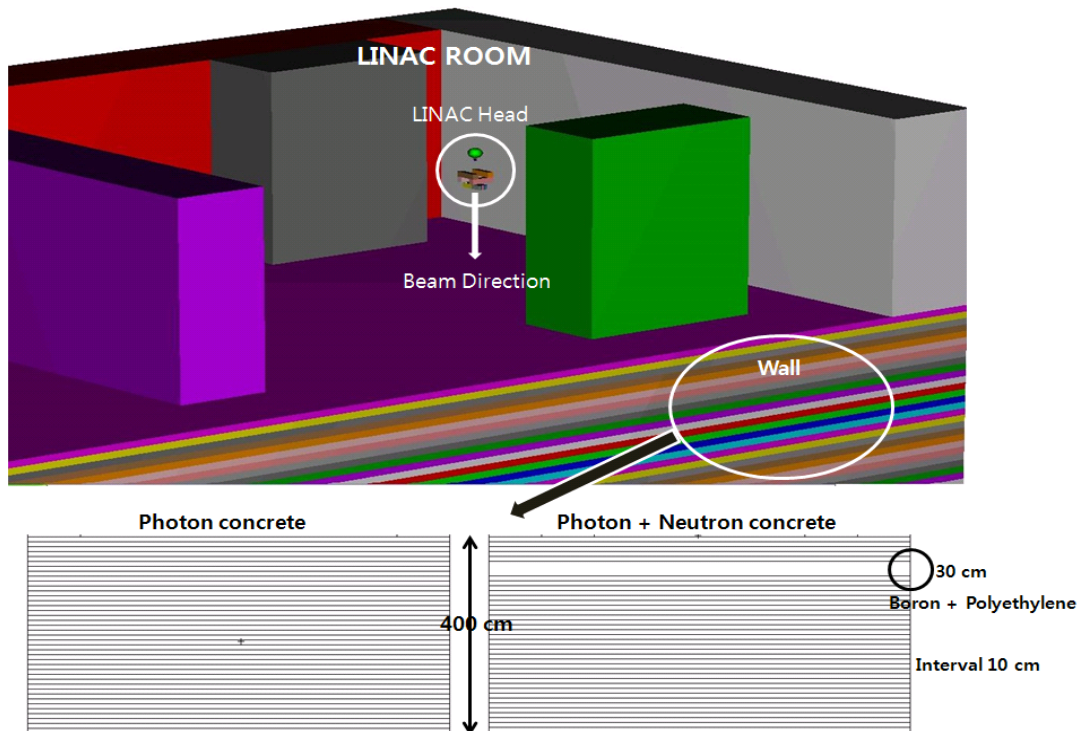


Fig. 2 View of the Shielding wall divided by 10 cm

높이 2.7 m, 미로폭은 2 m로 설정하였으며, 차폐벽의 두께는 2 m로 설정하였으나, 1차선이 직접적으로 조사되는 구간은 50 cm 두께를 추가하여 모사하였다. 마지막으로 광자선, 중성자선의 두께를 산정하기 위해 광자선이 향하는 바닥의 경우 두께를 4 m로 한 후, 10 cm 간격으로 층을 나누어 표현하였으며, 중성자선 차폐를 위해 Boron(5%)+Polyethylene을 두께 30 cm으로 하여 깊이 50 cm 부분에 첨가하였다.

4. 모의실험 방법

콘크리트 두께를 산정하기 전 본 연구에서 먼저 수행되어야 할 것은 모사한 선형가속기에 대한 신뢰성 검토이다. 따라서 모사한 선형가속기에서 발생하는 광자선에 대한 특성을 분석하여 기존의 연구들과 비교함으로써 신뢰성을 확보하였다. 광자선 특성 분석 방법은 Fig. 3과 같이 광자선이 발생하는 타겟 바로 아래 반지름 5 cm 구 형태의 가상의 검출기를 위치하여 전자 1 개당 발생하는 광자선의 플루언스(photon #/cm²/e)를 수집하고 에너지 간격을 10 keV로 나누어 스펙트럼을 계산하였다.

다음으로 차폐 두께를 계산하기 위해 Fig. 2와 같이 바닥 부분을 10 cm 간격으로 나누어 각 층별로 관심지점을 지정한 후 각 층에 입사하는 광자와 중성자의 플루언스(photon, neutron #/cm²/Gy)를 계산하였다. 이 때, 각 층별에 입사하는 플루언스는 선원과 표면사이의 거리(Source to Skin Distance; SSD) 100 cm, 조사야 10×10 cm²에서 최대선량지점(Build-up point)에 1 Gy가 조사되는 선량으로 환산하여 표현하였다.

마지막으로 광자선은 고에너지의 기준이 되는 10 MV일 때,

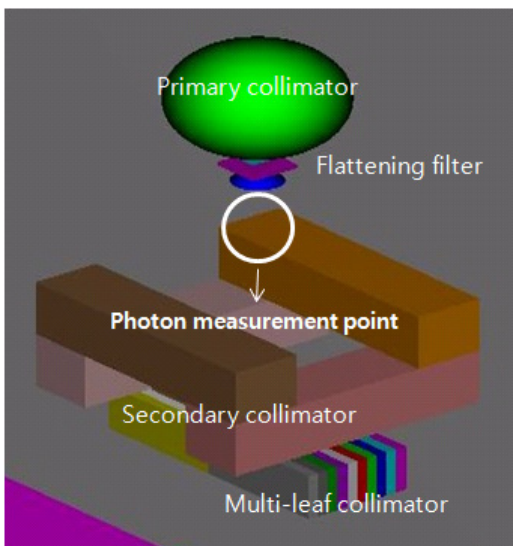


Fig. 3 Photon spectrum measurement point

한국원자력연구소에서 제시한 6 가지 콘크리트 재질에 따라 차폐율을 계산하였으며, 콘크리트에 Boron(5%)+Polyethylene 첨가 유무에 따른 변화를 분석하였다.

III. 결 과

1. 광자선 특성 분석

모의모사한 선형가속기에 대한 신뢰도를 확보하기 위하여 광자선에 대한 특성을 분석하였다.

이에 대한 결과값을 분석해보면, 전자 1개를 10 MV에너지로 가속하였을 때 발생하는 총 광자는 4.01×10^{-3} 개/cm²/e로 나타났으며, 평균에너지는 2.24 MeV, 특성에너지는 520 keV로 계산되었다.

에너지 스펙트럼은 Fig. 4과 같이 나타났으며, 약 0~2 MeV 사이에서 높은 광자 플루언스가 계산되었다.

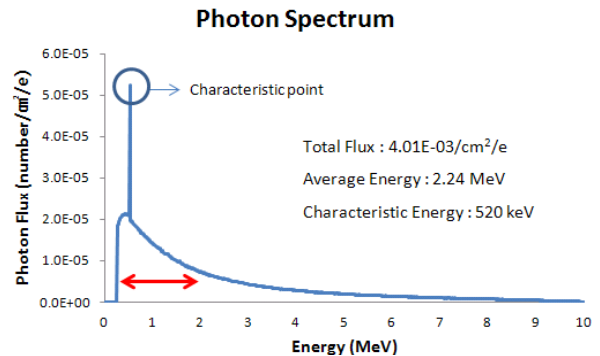


Fig. 4 Photon spectrum

2. 광자선 차폐 두께 계산

콘크리트 두께에 따른 광자선 감약율을 계산한 결과이다. Fig. 5는 순수 콘크리트를 대상으로 깊이 별 광자 플루언스를 나타낸 것이며, Fig. 6은 콘크리트에 Boron(5%)+Polyethylene을 추가하였을 때를 나타낸 것으로서 플루언스를 대수(Log)눈금으로 표시하였다.

이를 분석해보면, Boron(5%)+Polyethylene의 첨가 유무에 관계없이 차폐효과는 Limonite and steel, magnetite and steel, magnetite, barytes, nbs03, nbs04 순으로 분석되었다.

또한, 차폐벽 두께 계산에서 기준이 되는 십가층(Tenth Value Layer; TVL)은 순수 콘크리트에서는 재질 별로 약 50~100 cm에서 형성되었으며, Boron(5%)+Polyethylene

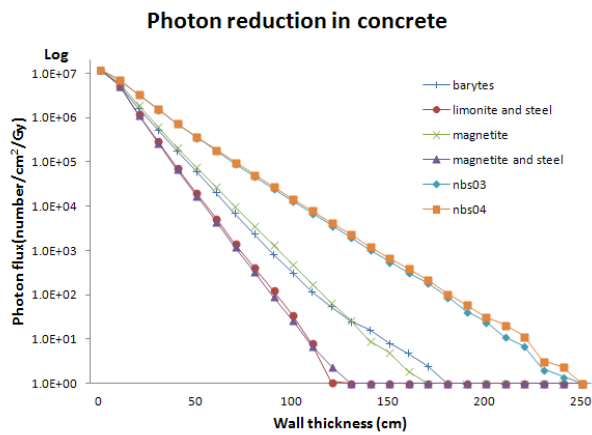


Fig. 5 Photon reduction in concrete

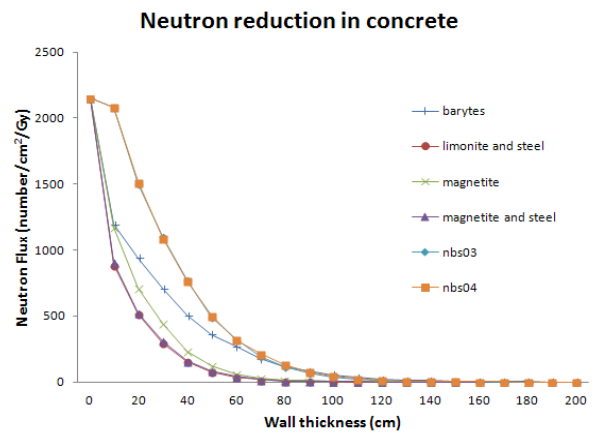


Fig. 7 Neutron reduction in of concrete

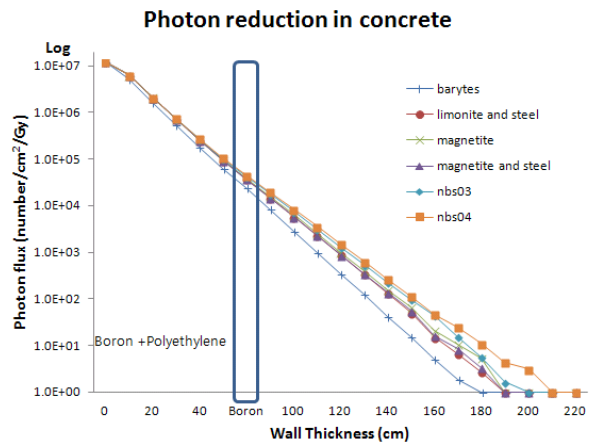


Fig. 6 Photon reduction in concrete add Boron

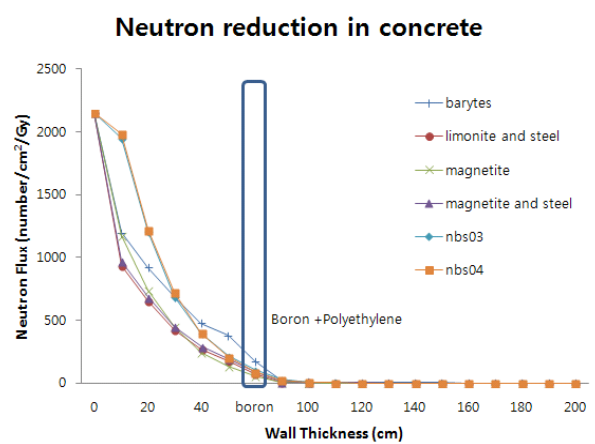


Fig. 8 Neutron reduction in concrete add Boron

첨가하였을 경우에는 80~100 cm에서 형성되었다.

3. 중성자선 차폐 두께 계산

콘크리트 두께에 따른 중성자선 감약율을 계산한 결과이다. Fig. 7은 순수 콘크리트이며, Fig. 8은 콘크리트에 Boron(5%)+Polyethylene을 추가하였을 때, 나타난 그래프이다.

결과값을 분석해보면, 차폐효과는 Boron(5%)+Polyethylene 첨가 유무에 관계없이 Limonite and steel, magnetite and steel, magnetite, nbs03, nbs04, barytes 순으로 높게 나타났다.

또한, 중성자선의 완전 차폐를 위한 두께는 순수 콘크리트의 경우 재질 별로 약 100~140 cm 정도 필요한 것으로 계산되었다. 반면에 Boron(5%)+Polyethylene 첨가 시 약 90~100 cm으로 순수 콘크리트와 비교하였을 때, 차폐 효과가 높은 것으로 계산되었다.

IV. 고찰

본 연구는 몬테칼로를 바탕으로 한 모의실험을 통해 10 MV 광자선 발생 시 필요한 차폐벽 두께를 계산하고자 하였다.

먼저, 차폐효과에 대한 계산을 진행하기 전 모의모사 한 선형가속기에 신뢰성을 확보하기 위해 선형가속기에서 발생하는 광자선에 대한 스펙트럼을 분석하였다. 본 연구 결과를 기존의 선형가속기 광자 선에 대한 연구[12]와 비교해보면, 그래프가 0~2 MeV 영역에서 높은 분포를 보이며 연속스펙트럼의 형태가 유사한 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 평균에너지는 타 연구[13]와 비교하였을 때, 약 5%정도 차이를 보였으나, 선형가속기의 기하학적 구조, 측정 위치 등을 고려하였을 때 같은 경향성을 보인 것으로 판단된다. 이를 종합적으로 평가하면, 본 연구에서 모사한 선형가속기에 대한 신뢰도는 확보한 것으로 판단된다.

다음으로 콘크리트 재질에 따른 차폐효과를 보면, 광자선에서는 Limonite and steel, magnetite and steel,

magnetite, barytes, nbs03, nbs04 순서로 효과가 좋았으나, 중성자에서는 Limonite and steel, magnetite and steel, magnetite, nbs03, nbs04, barytes 순으로 효과가 좋은 것으로 계산되었다. 이는 광자선의 경우 원자번호가 높고, 밀도가 높을수록 효과가 좋기 때문에 상대적으로 steel 계열의 콘크리트가 차폐효과가 높은 것으로 사료된다. 이에 반해 중성자는 열중성자로 만들기 위해 감속재가 필요하며, 이 때, 수소계열이 효과적이다. 따라서 수소함유량이 가장 낮은 Barytes 재질에서 차폐효과가 낮은 것으로 판단된다.

Boron(5%)+Polyethylene의 첨가 유무에 따른 차폐를 분석해보면, 광자선 차폐에서는 큰 영향을 보이지 않았으나, 중성자에서는 약 40 cm 정도 효과가 좋은 것으로 나타났다. 이는 콘크리트에 의해 감속된 중성자들이 흡수재로 사용된 Boron으로 인해 흡수되어 차폐효과가 높은 것으로 분석된다.

마지막으로 본 연구에서 계산된 광자선 차폐 두께를 IAEA에서 제공하는 자료[3]와 비교하면, 주 5일(8시간/1일) 기준, 1일 50명 치료한다는 것을 가정하였을 때, 10 MV에너지 사용 시 차폐 벽 두께를 198.4 cm를 권고하였다. 이를 본 연구와 비교하였을 때, IAEA에서 권고한 콘크리트 재질에서 190~200 cm에서 대부분의 선량이 차폐가 되는 것으로 계산되어 같은 경향성으로 분석되었다. 따라서 다른 재질에서 계산된 차폐 두께에 대한 결과값 역시 신뢰할 수 있는 수치인 것으로 사료된다.

V. 결 론

본 실험에서는 콘크리트 재질과 Boron(5%)+Polyethylene 첨가 유무에 따른 차폐 두께를 계산하였다.

일반적으로 차폐를 구성하는 물질의 선택에 있어서 차폐 효과, 경제성, 시공성 등 다양한 조건들을 고려하여야 한다. 또한 현재 중성자의 경우 핵과 상호작용이 용이하여 방사화가 일어나기 쉽기 때문에 2차적인 방사화에 대한 문제점을 무시할 수 없다.

하지만, 위 사항들을 배제하고 본 실험의 조건을 중심으로 분석한다면, 차폐에 용이한 콘크리트 재질은 steel 계열이며, 중성자 차폐를 위해 Boron(5%)+Polyethylene을 콘크리트에 첨가하여 구성하는 것이 가장 효율적인 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Park Eun Tae: Study on the characteristics of photo-neutron produced in medical linear accelerators, Dept. of Radiological science graduate school of catholic university of pusan, 2015
2. International Atomic Energy Agency: Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities, IAEA safety report series No. 47, 2006
3. International Atomic Energy Agency: Master Planning and Concept Design Considerations, IAEA human health report No. 10, 2014
4. Lee Byung Chul, Kim Heon Il: Shielding Technology for High Energy Radiation Production Facility, Korea Atomic Energy Research Institute, 2004.
5. Yang Seung Kyu, Um Tae Sun, Lee Jong Ryul et al.: Properties of Heavy-weight Concrete for Radiation Shielding, Korea concrete institute, 20(1), 561-564, 2008.
6. Yang Geun Hyuk: A study on the mixing design and structural characteristics of nuclear powerplant concrete, Korea Institute of Construction Engineering and Management, 14(1), 357-356, 2016.
7. Oh Jeong Hwan, Mun Young Bum, Lee Jae Hyung, et al.: Aggregate effects on γ -ray shielding characteristic and compressive strength of concrete, Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology, 14(4), 357-365, 2016.
8. Lee Dong Yeon: Neutron activation analysis of the medical linear accelerator, Dept. of Radiological science graduate school of catholic university of pusan, 2017
9. Kim Jeong Kee: A study on the characteristics of X-ray and electron beam generated from medical linear accelerator, Dept. of physics graduate school of Dong-A university, 2006
10. Lee Jeong Ok, Jeong Dong Hyeok, Kang Jeong Ku: Neutron generation from a 24 MV medical LINAC, Korean Society of Medical Physics, 16(2), 97-103, 2005
11. W.L. Huang, Q.F. Li, T.Z. Lin et al.: Measurements of photoneutrons produced by 15 MeV electron linac for radiography applications, Nucl. Instr. and Meth.

- in Phy. Res., B251, 361–366, 2006
12. A. Mesbahi, M. Fix, M. Allahaverdi et al.: Monte carlo calculation of Varian 2300C/D Linac photon beam characteristics: a comparison between MCNP4C, GEANT3 and measurements, Applied Radiation and Isotopes, 62(3), 469–477, 2005
13. A. Baumgartner, A. Steurer, F. Josef Maringer: Simulation of photon energy spectra from Varian 2100C and 2300C/D Linacs: Simplified estimates with PENELOPE Monte Carlo models, Applied Radiation and Isotopes, 67(11), 2007–2012, 2009

•Abstract

A study on the calculation of the shielding wall thickness in Medical Linear Accelerator

Dong-Yeon Lee¹⁾·Eun-Tae Park²⁾·Jung-Hoon Kim³⁾

¹⁾Dept. of Radiation Oncology, Dongnam Ins. of Radiological & Medical Science

²⁾Dept. of Radiation Oncology, Inje University Busan Paik Hospital

³⁾Dept. of Radiological science, college of health sciences, Catholic University of Pusan

The purpose of this study is to calculate the thickness of shielding for concrete which is mainly used for radiation shielding and study of the walls constructed to shield medical linear accelerator. The optimal shielding thickness was calculated using MCNPX(Ver,2,5,0) for 10 MV of photon beam energy generated by linear accelerator. As a result, the TVL for photon shielding was formed at 50~100 cm for pure concrete and concrete with Boron+polyethylene at 80~100 cm. The neutron shielding was calculated 100~140 cm for pure concrete and concrete with Boron+polyethylene at 90~100 cm. Based on this study, the concrete is considered to be most efficient method of using steel plates and adding Boron+polyethylene to the concrete.

Key Words : Radiation shield, LINAC, Shielding wall, Concrete, MCNPX