

Study of Calculating Shielding Wall Thickness in Cyclotron Room

Min-Jeong Kim, Ri-Woo Kang, Hui-Jeong An, Seo-Young Lee, Hong-Gu Lee,
Joo-Young Lee, Hoon-Hee Park*

Department of Radiological Science, Shingu Colledge

Received: October 19, 2024. Revised: November 22, 2024. Accepted: November 30, 2024.

ABSTRACT

With the increasing utilization of cyclotrons in medical, research, and industrial applications, effective shielding in cyclotron rooms has become crucial to ensure worker safety. This study focuses on optimizing the shielding wall thickness by using a water-based composite shielding wall in cyclotron rooms. The Moyer model was employed to calculate the external dose rates from neutron reactions at various energy levels (8.4, 13, 18, 30, and 50 MeV) on an Nb target. The neutron energy spectra required for the calculations were derived using the Talys program. The shielding efficiency of the water-based composite wall was compared with that of a conventional concrete wall. The results showed that the optimal thicknesses of the composite shielding wall were 1.38m at 8.4 MeV, 1.58m at 13 MeV, 15.8m at 18 MeV, 15.8m at 30 MeV, and 1.58m at 50 MeV. The composite wall demonstrated its potential for more efficient neutron shielding by reducing the required thickness across various energy levels. This study provides foundational data for neutron shielding design in cyclotron facilities and is expected to contribute to the optimization of practical shielding materials and thicknesses.

Keywords: Neutron-ray, Water, Moyer-model, Talys, Shielding effect, Shielding wall

I. INTRODUCTION

고에너지를 사용하는 사이클로트론(Cyclotron)은 의료, 연구 및 산업 현장에서 사용이 지속적으로 증가하는 추세이며 대학 연구, 의학적 치료, 동위원소의 생산 등 광범위한 용도로 사용되고 있다^[1,2]. 사이클로트론은 양자알파 입자 및 기타 가벼운 원소 이온을 가속하는 데 사용되는 장치이다. 본 연구는 PET에서 주로 사용되는 사이클로트론을 대상으로 하였으며, 8.4~50 MeV의 고에너지를 사용한다. 이러한 고에너지 입자는 DNA를 직접적으로 손상할 수 있다. 방사선에 의한 손상이 신체에 미치는 영향은 가장 빠르게 분열하는 세포의 DNA 손상에 의해 결정된다^[3]. 또한, 중성자 생산 단면적은 약 14 MeV에서 피크(Peak)가 발생하며 넓은 범위의 중성자가 생성되어 평균은 약 1 MeV이다. 이

에너지 범위의 중성자는 체외(in vitro) 및 체내(in vivo) 동물의 종양 유발 및 종양 변형을 유도한다^[4]. 그러므로 작업종사자(의료인, 연구자 등)의 안전을 위해 사이클로트론실의 차폐가 필요하다. 국내병원에서 사용하는 사이클로트론의 에너지는 16.5 MeV이며, 차폐벽의 두께는 콘크리트 1.8 m에 달한다^[5]. 방사선으로부터 작업종사자를 보호하기 위한 차폐벽의 물질로 납, 철, 흑연, 물, 폴리에틸렌 또는 콘크리트와 같은 다양한 재료가 사용될 수 있다^[6]. 본 연구에서는 사이클로트론 차폐체에서 발생하는 외부 선량률을 표적에서 일어나는 중성자 반응에 대해 line-of-sight 범으로 구하는 모이어 모델(Moyer model)을 이용하여 중성자 차폐율이 높은 물을 이용한 차폐벽을 사이클로트론실에 적용해 물 두께에 따른 차폐벽의 효율을 비교·평가하고자 한다. 이를 바탕으로 사이클로트론실의 효과적인 차폐 물질을 선정하고 혼합차폐물질의 두께를 변화시켜

* Corresponding Author: Hoon-Hee Park

E-mail: hzpark@shingu.ac.kr

Tel: ***-****-****

효과적인 중성자 차폐의 방법을 제시하고자 한다.

II. MATERIAL AND METHODS

본 연구는 사이클로트론실의 고에너지 양성자 빔을 Nb(Niobium) 타겟과 반응시켜 발생하는 중성자, 감마선 등을 효과적으로 차폐하기 위한 방안을 고안하였다.

중성자 차폐에 효과적인 물을 이용하여 혼합 차폐체를 구성해 현재 사용되는 콘크리트 차폐벽과 비교하였다. 현재 사용되는 차폐벽은 콘크리트만을 사용하였다고 가정하여 실험을 진행하였다. 혼합 차폐벽의 구성 및 재료의 배치는 ‘납 - 콘크리트 - 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) - 물 - 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) - 콘크리트 - 납’이다. 각각의 두께는 납을 0.044 m, 콘크리트를 0.3 m, 고밀도 폴리에틸렌을 0.05 m로 고정하여 설정하였다. 다만, 물은 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 m로 변화를 주었다.

이를 비교하기 위해, Moyer model과 Talys를 사용하여 차폐율을 계산하였다. Moyer model은 차폐실 외부 선량률을 계산하기 위해 사용되었으며, Talys는 Moyer model을 사용하기 위해 필요한 에너지 스펙트럼에 대해 계산하기 위해 사용되었다.

1. Talys

Talys는 200 MeV 이하의 핵반응 시뮬레이션을 위한 소프트웨어로 최첨단 핵 구조 및 반응 모델을 기반으로 한다^[7]. Talys를 이용하여 양성자에서 각 에너지대별(8.4, 13, 18, 30, 50 MeV)로 Nb 타겟과 반응시켜 발생하는 중성자의 에너지 스펙트럼을 구하였다. 이때, 차폐체에서 중성자에 대한 반응 단면적을 구하기 위하여 NIST(National Institute of standards and technology, cross-section calculator)를 사용하였다^[8]. Talys의 식은 (1), (2)와 같다^[7]. 식 (1)은 반응 초기 단계에서 발생한 입자에 대한 스펙트럼을 나타낸다. 식(2)는 특정 방출 입자가 있을 때 수치적 확인 용도로 사용된다.

2. Moyer model

중성자 차폐를 추정하기 위해 개발된 경험적 모델인 Moyer model을 사용하여 차폐 과정에서 발생하는 상호작용을 간단하게 표현하였다. 계산하여 나온 flux 값을 ICRP 116의 Table A.5(for mono-energetic particles incident in various geometries)에 나와 있는 수치를 참고하여 선량률로 변환하였다^[9,10]. Moyer model의 식은 (3)과 같다.

$$\frac{dS}{dE_k'}(i_n, i_p, i_d, i_t, i_h, i_\alpha, E_x(i')) = \sum_{k=\gamma, n, p, d, t, h, \alpha} \sum_i \left[\frac{s_k(Z, N, E_x(i), E_x(i'))}{P(Z, N, E_x(i))} \frac{dS}{dE_k'}(i_n - \delta_{nk}, i_p - \delta_{pk}, i_d - \delta_{dk}, i_t - \delta_{tk}, i_h - \delta_{hk}, i_\alpha - \delta_{\alpha k}, E_x(i)) \right. \\ \left. + \delta_{kk'} \frac{ds_k(Z, N, E_x(i), E_x(i'))}{dE_k'} S(i_n - \delta_{nk}, i_p - \delta_{pk}, i_d - \delta_{dk}, i_t - \delta_{tk}, i_h - \delta_{hk}, i_\alpha - \delta_{\alpha k}) \right] \quad (1)$$

$$\frac{d\sigma_{n, xn}}{dE_n'} = \sum_{i_n=0}^{\infty} \sum_{i_p=0}^{\infty} \sum_{i_d=0}^{\infty} \sum_{i_t=0}^{\infty} \sum_{i_h=0}^{\infty} \sum_{i_\alpha=0}^{\infty} \frac{d\sigma^{ex}}{dE_n'}(i_n, i_p, i_d, i_t, i_h, i_\alpha) \quad (2)$$

$$H(E_p, \theta, d/\lambda) = \frac{h(E_p)}{r^2} \exp(-\beta\theta) \times \exp(-d(\theta)/\lambda) \quad (3)$$

θ : Angle between the beam direction

r : Distance between the beam direction

β : Constant

$d(\theta)$: Effective shielding thickness at angle θ

λ : Attenuation length for neutrons in shielding material

3. 실험방법

사이클로트론의 에너지를 각각 8.4, 13, 18, 30, 50 MeV로 설정하여 Moyer model을 적용하였다. 이때 필요한 에너지 스펙트럼은 Talys로 계산하였다. 이를 토대로 기존 콘크리트 벽과 연구에서 구상한 혼합 차폐벽의 차폐 효율을 비교·분석하였다.

혼합 차폐벽의 구성 및 재질의 배치는 ‘납 - 콘크리트 - 고밀도 폴리에틸렌 - 물 - 고밀도 폴리에틸렌 - 콘크리트 - 납’이다. 위와 같이 차폐체를 배치한 이유는 다음과 같다.

콘크리트는 벽의 지지를 위해 사용하지만, 이때 콘크리트는 물을 흡수할 수 있기에 미연에 방지하고자 고밀도 폴리에틸렌을 중간에 두는 방식을 고안하였다. 이때 콘크리트 구성 비율은 H(0.013 g/cc), O(1.165 g/cc), Si(0.737 g/cc), Ca(0.194 g/cc), Na(0.040 g/cc), Mg(0.006 g/cc), Al(0.107 g/cc), S(0.003 g/cc), K(0.045 g/cc), Fe(0.029 g/cc)이며 밀도는 2.35 g/cc이다^[1].

또한, 방사화 과정에서 발생하는 감마선을 차폐하기 위해 추가로 납을 덧대었다. 혼합 차폐벽에서 사용된 물의 두께를 0.6 - 1.2 m까지 0.2 m씩 차이를 두어 각 에너지대별로 계산하였다.

사이클로트론의 Nb 타겟을 기준으로, 8.4, 13, 18, 30, 50 MeV의 에너지로 설정해 Moyer model을 이용하여 계산할 때, 계산에 필요한 각 물질의 중성자 반응 단면적은 NIST(cross-section calculator) 사용하여 구하였다.

Moyer model 사용 시, 선원으로부터 벽까지의 거리는 1.5 m, 빔의 각도는 90도로 설정하여 계산하였다. 빔의 각도를 90도로 설정한 이유는 빔의 각도에 따라 값이 변동될 수 있기에 수직입사로 가정하여 계산했다. 선량 단위를 맞추기 위해 ICRP 116 Table A.5를 이용해 선량 계수 변화를 통해 선량을 구하였다^[11].

III. RESULT

본 연구 실험을 바탕으로 사이클로트론의 각 에너지별로(8.4, 13, 18, 30, 50 MeV) Nb (Niobium) 타겟과 반응시켜 발생하는 중성자의 에너지 스펙트럼은 Fig. 1 - 5와 같다. 이를 토대로 외부선량률($\mu\text{Sv/h}$)을 계산한 결과는 다음과 같다.

8.4 MeV는 Table 1과 같이, 기존 콘크리트 차폐벽 외부선량률은 0.792 $\mu\text{Sv/h}$ 이다. 물을 사용한 혼합 차폐벽의 경우, 물 두께 0.6 m에서 0.759 $\mu\text{Sv/h}$, 0.8 m에서 0.711 $\mu\text{Sv/h}$, 1.0 m에서 0.668 $\mu\text{Sv/h}$, 1.2 m에서 0.628 $\mu\text{Sv/h}$ 이다.

13 MeV는 Table 2와 같이, 기존 콘크리트 차폐벽 외부선량률은 1.897 $\mu\text{Sv/h}$ 이다. 물을 사용한 혼합 차폐벽의 경우, 물 두께 0.6 m에서 1.927 $\mu\text{Sv/h}$, 0.8 m에서 1.805 $\mu\text{Sv/h}$, 1.0 m에서 1.693 $\mu\text{Sv/h}$, 1.2 m에서 1.593 $\mu\text{Sv/h}$ 이다.

18 MeV는 Table 3과 같이, 기존 콘크리트 차폐벽 외부선량률은 2.357 $\mu\text{Sv/h}$ 이다. 물을 사용한 혼합 차폐벽의 경우, 물 두께 0.6 m에서 2.397 $\mu\text{Sv/h}$, 0.8 m에서 2.245 $\mu\text{Sv/h}$, 1.0 m에서 2.103 $\mu\text{Sv/h}$, 1.2 m에서 1.978 $\mu\text{Sv/h}$ 이다.

30 MeV는 Table 4와 같이, 기존 콘크리트 차폐벽 외부선량률은 2.670 $\mu\text{Sv/h}$ 이다. 물을 사용한 혼합 차폐벽의 경우, 물 두께 0.6 m에서 2.707 $\mu\text{Sv/h}$, 0.8 m에서 2.573 $\mu\text{Sv/h}$, 1.0 m에서 2.374 $\mu\text{Sv/h}$, 1.2 m에서 2.270 $\mu\text{Sv/h}$ 이다.

50 MeV는 Table 5와 같이, 기존 콘크리트 차폐벽 외부선량률은 2.891 $\mu\text{Sv/h}$ 이다. 물을 사용한 혼합 차폐벽의 경우, 물 두께 0.6 m에서 2.927 $\mu\text{Sv/h}$, 0.8 m에서 2.819 $\mu\text{Sv/h}$, 1.0 m에서 2.607 $\mu\text{Sv/h}$, 1.2 m에서 2.452 $\mu\text{Sv/h}$ 이다.

본 연구에서 구상한 혼합 차폐벽에서 가장 이상적인 물의 두께는 8.4 MeV에서 0.6 m, 13 MeV에서 0.8 m, 18 MeV에서는 0.8 m, 30 MeV에서 0.8 m, 50 MeV에서는 0.8 m로 확인되었다. 혼합 차폐벽의 총 두께는 에너지대별로 8.4 MeV에서 1.38 m, 13 MeV에서는 1.58 m, 18 MeV에서는 1.58 m, 30 MeV에서는 1.58 m, 50 MeV에서는 1.58 m로 확인되었다.

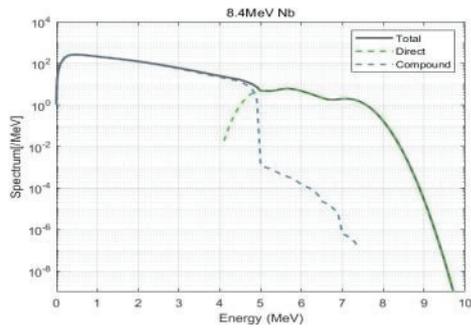


Fig. 1. The energy spectrum of neutrons at 8.4 MeV.

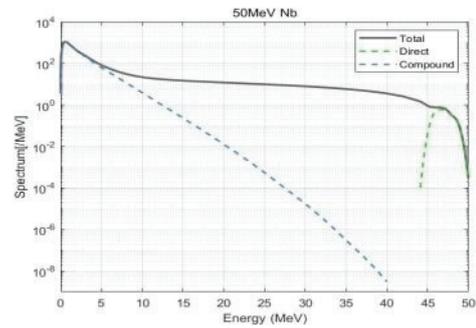


Fig. 5. The energy spectrum of neutrons at 50 MeV.

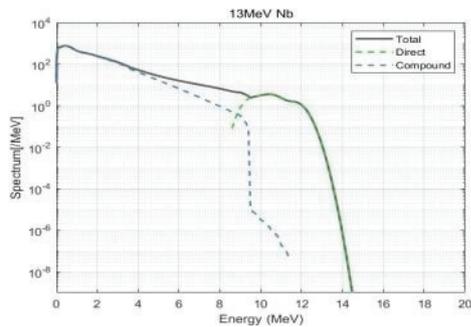


Fig. 2. The energy spectrum of neutrons at 13 MeV.

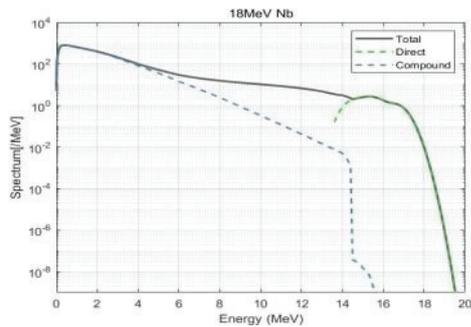


Fig. 3. The energy spectrum of neutrons at 18 MeV.

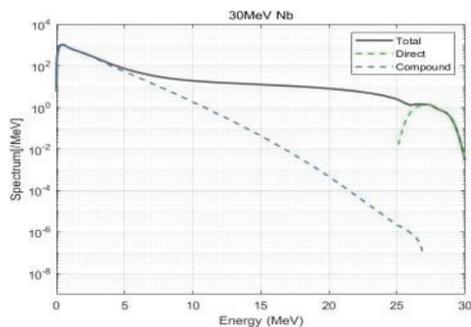


Fig. 4. The energy spectrum of neutrons at 30 MeV.

Table 1. Efficiency of the existing shielding wall and the combined shielding wall at 8.4 MeV

	Water (m)	Total Thickness (m)	External dose rate (μSv/h)
Existing wall	0	1.5	0.792
	0.6	1.38	0.759
Composite wall	0.8	1.58	0.711
	1	1.78	0.668
	1.2	1.98	0.628

Table 2. Efficiency of the existing shielding wall and the combined shielding wall at 13 MeV

	Water (m)	Total Thickness (m)	External dose rate (μSv/h)
Existing wall	0	1.8	1.897
	0.6	1.38	1.927
Composite wall	0.8	1.58	1.805
	1	1.78	1.693
	1.2	1.98	1.593

Table 3. Efficiency of the existing shielding wall and the combined shielding wall at 18 MeV

	Water (m)	Total Thickness (m)	External dose rate (μSv/h)
Existing wall	0	1.8	2.357
	0.6	1.38	2.397
Composite wall	0.8	1.58	2.245
	1	1.78	2.103
	1.2	1.98	1.978

Table 4. Efficiency of the existing shielding wall and the combined shielding wall at 30 MeV

	Water (m)	Total Thickness (m)	External dose rate ($\mu\text{Sv/h}$)
Existing wall	0	2.2	2.670
	0.6	1.38	2.707
Composite wall	0.8	1.58	2.573
	1	1.78	2.374
	1.2	1.98	2.270

Table 5. Efficiency of the existing shielding wall and the combined shielding wall at 50 MeV

	Water (m)	Total Thickness (m)	External dose rate ($\mu\text{Sv/h}$)
Existing wall	0	2.5	2.891
	0.6	1.38	2.927
Composite wall	0.8	1.58	2.819
	1	1.78	2.607
	1.2	1.98	2.452

IV. DISCUSSION

PET(Positron Emission Tomography)의 발전과 그에 따른 수요 증가로 인해, 사이클로트론이 많이 사용된다^[12]. 이에 따라 사이클로트론실에서의 중성자 차폐의 중요성이 대두되고 있다. 추가로, BNCT 등의 중성자를 이용한 치료기기의 발전 또한 중성자 차폐 필요성의 증가로 이어진다^[13].

방사선작업종사자의 피폭선량 감소를 위한 노력으로 물을 사용한 차폐벽을 통해 피폭선량을 줄이는 것은 중요하다. 따라서 본 실험에서 기존 콘크리트 차폐벽과 혼합 차폐벽을 비교하고자 하였다.

비교한 결과, 각 에너지대별로 감소한 두께는 8.4, 13, 18, 30, 50 MeV에서 각각 0.12, 0.22, 0.22, 0.62, 0.92 m가 감소하였다.

차폐 물질을 물로 선정 한 이유는 방사화로 인해 처리가 어려운 고체 방사성폐기물이 될 수 있는 콘크리트의 사용량을 줄일 수 있기 때문이다. 실험 결과에 따르면, 물을 사용할 경우 콘크리트만을 사용한 벽에 비해 두께가 감소함을 확인할 수 있다.

이는 콘크리트와 물을 비교하였을 때, 물이 콘크리트에 비해 수소 함량이 높기 때문에 중성자 단면적이 높아 위와 같은 결과가 나왔을 것이라 예상된다. 또한, 방사화된 물을 처리하는 방법으로 여과처리법을 고려할 수 있다. 여과 처리법은 부유물질이 많이 함유된 액체 폐기물을 처리 시 사용한다. 차후 이를 도입한다면 물의 농도를 배출 농도 관리 이하로 낮추어 방류할 수 있을 것이라 생각된다.

본 연구에서는 효과적인 차폐벽 감소가 나타나지 않았지만, 차후 중성자 흡수 단면적이 큰 붕소(B), 가돌리늄(Gd)을 이용한 추가 연구로 차폐벽의 두께를 줄일 수 있을 것이라 사료된다^[14]. 또한, 계산 시에 빔의 각도를 수직입사만 고려하였기에, 각도로 인한 감쇠를 반영하지 못하였다. 이에 따라, 임상에서의 선량률과 비교하여 선량이 비교적 높게 나올 수 있다는 한계점이 있다. 추가적으로 차폐벽의 내진 설계를 고려하지 않았다는 한계점도 있다.

실제 임상에서는 사이클로트론의 차폐는 1차 차폐와 2차 차폐, 두 가지의 차폐가 이루어진다. 다만, 실험은 1차 차폐를 고려하지 않고 2차 차폐만을 위주로 선량을 계산하였다. 이에 따라 실제 값보다 높은 선량이 나왔으리라 예상된다. 추후 연구를 통해 차폐체 두께를 더욱 줄임으로써, 효과적인 공간 확보가 될 것으로 사료된다.

V. CONCLUSIONS

본 연구는 중성자에 대한 물의 차폐 효과를 알아보기 위해 Moyer, Talys 계산을 시행하였으며, 이를 바탕으로 사이클로트론실에서 혼합 차폐벽의 최적 두께를 산출하였다. 그 결과 기존 콘크리트 벽과 유사한 외부선량률이 나타난 혼합 차폐벽의 총 두께는 에너지대별로 8.4 MeV에서 1.38 m, 13 MeV에서는 1.58 m, 18 MeV에서는 1.58 m, 30 MeV에서는 1.58 m, 50 MeV에서는 1.58 m로 나타났다. 이는 기존 차폐벽의 두께보다 더 낮은 두께를 사용할 수 있음을 나타낸다. 그렇기에 물을 차폐체로 사용하면 차폐벽의 두께를 줄여 공간의 확보가 됨을 확인하였다. 따라서 본 연구를 바탕으로 양성자 가속기 시설의 차폐와 함께 중성자 차폐 시설 설계에서

기초적인 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

Reference

- [1] B. C. Lee, H. I. Kim, "Shielding technology for high energy radiation production facility", Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI/TR-2783/2004, 2004.
- [2] A. Paul, "An exploration of the production of negative ions from neutral gases using a negative hydrogen ion source driver", Carleton University, Master of Science, 2019.
- [3] K. O. M. Elsayed, "The Effect of the High-Energy Proton Component of Cosmic Rays on the DNA Structure", Saint-Petersburg State University, the PhD degree of physico-mathematical sciences, 2020.
- [4] E. J. Hall, "Neutrons and carcinogenesis: a cautionary tale", *Bulletin du Cancer/Radiothérapie*, Vol. 83, No. 1, pp. 43-46, 1996.
[https://doi.org/10.1016/0924-4212\(96\)84883-3](https://doi.org/10.1016/0924-4212(96)84883-3)
- [5] Cyclotron, Samsunghospital, From URL;
http://www.samsunghospital.com/dept/main/index.do?DP_CODE=NM&MENU_ID=008019
- [6] E. A. Amirabadi, M. Salimi, N. G. Eh, G. R. Etaati, H. Asadi, "Study of Neutron and Gamma Radiation Protective Shield", *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol. 3, No. 4, pp. 1079-1080, 2013.
- [7] A. Koning, S. Hilaire, S. Goriely, "TALYS-2.0", *TALYS*, pp. 1-92, 2023.
- [8] Neutron activation and scattering calculator, NIST Center for Neutron Research, From URL;
<https://www.ncnr.nist.gov/resources/activation/>
- [9] G. I. Britvch, A. A. Chumakov, R. M. Ronningen, R. A. Blue, L. H. Heilbronn, "Measurements of Thick Target Neutron Yields and Shielding Studies Using Beams of He, ¹²C and ¹⁶O at 155 MeV/neutron from the K1200 Cyclotron at the National Superconducting Cyclotron Laboratory", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 70, No. 5, pp. 9, 1998. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1149757>
- [10] N. P. Henss, W. E. Bloch, K. F. Eckerman, A. Endo, N. Hertel, J. Hunt, M. Pelliccioni, H. Schlattl, M. Zankl, "Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures", *Annals of the ICRP*, Vol. 40, No. 2-5, pp. 130, 2010.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.icrp.2011.10.001>
- [11] Korean Association for Radiation Application, "Radiation handling technology that ends in one volume", Korean Association for Radiation Application, pp. 262, 2020.
- [12] S. Vichi, F. Zagni, G. Cicoria, A. Infantino, S. Riga, M. Zeller, T. S. Carzaniga, K. P. Nesteruk, S. Braccini, M. Marengo, D. Mostacci, "Activation studies of a PET cyclotron bunker", *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 161, pp. 48-54, 2019.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.04.001>
- [13] A. J. Kreiner, J. Bergueiro, D. Cartelli, M. Baldo, W. Castell, J. G. Asoia, et al., "Present status of Accelerator-Based BNCT", *Reports of Practical Oncology & Radiotherapy*, Vol. 21, No. 2, pp. 95-101, 2016.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rpor.2014.11.004>
- [14] T. Piotrowski, "Neutron shielding evaluation of concretes and mortars: A review", *Construction And Building Materials*, Vol. 277, pp. 122238, 2021.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122238>

사이클로트론실 차폐벽 두께 산정에 관한 연구

김민정, 강리우, 안희정, 이서영, 이흥구, 이주영, 박훈희*

신구대학교 방사선학과

요 약

사이클로트론의 의료, 연구 및 산업적 활용이 증가함에 따라, 사이클로트론실의 효과적인 차폐가 작업자의 안전을 보장하기 위해 매우 중요해지고 있다. 본 연구는 사이클로트론실에서 물 기반 혼합 차폐벽을 사용하여 차폐벽 두께를 최적화하는 데 중점을 두었다. Moyer model을 활용하여 Nb 타겟에서 발생하는 중성자 반응에 따른 다양한 에너지 수준(8.4, 13, 18, 30, 50 MeV)에서의 외부 선량률을 계산하였고, 계산에 필요한 중성자 에너지 스펙트럼을 산출하기 위해 Talys 프로그램을 사용하였다. 물 기반 혼합 차폐벽의 차폐 효율을 기존 콘크리트 벽과 비교하였으며, 연구 결과 최적의 혼합 차폐벽 두께는 에너지대별로 8.4 MeV에서 1.38 m, 13 MeV에서는 1.58 m, 18 MeV에서는 1.58 m, 30 MeV에서는 1.58 m, 50 MeV에서는 1.58 m로 나타났다. 혼합 차폐벽이 다양한 에너지 수준에서 필요한 차폐 두께를 감소시켜 보다 효율적인 중성자 차폐 가능성을 보여주었다. 본 연구는 사이클로트론 시설의 중성자 차폐 설계에 기초 자료를 제공하며, 실용적인 차폐체 및 두께 최적화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

중심단어: 중성자선, 물, 모이어(Moyer) 모델, 탈리스(Talys), 차폐효과, 차폐벽

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	김민정	신구대학교 방사선학과	학부생
(공동저자)	강리우	신구대학교 방사선학과	학부생
	안희정	신구대학교 방사선학과	학부생
	이서영	신구대학교 방사선학과	학부생
	이흥구	신구대학교 방사선학과	학부생
	이주영	신구대학교 방사선학과	교수
(교신저자)	박훈희	신구대학교 방사선학과	교수