

Dose Assessment of Orbital Adnexa in Electron Beam Therapy for Orbital Lymphoma

Dong Hwan Kim¹, Yong In Cho^{2,*}

¹Department of Radiation Oncology, Dongnam Institute of Radiological & Medical Sciences Cancer Center

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

Received: May 30, 2024. Revised: June 20, 2024. Accepted: June 30, 2024.

ABSTRACT

Radiation side effects and complications on the ocular adnexa during electron beam therapy for orbital lymphoma can increase the incidence of posterior subcapsular cataracts. This study simulated a medical linear accelerator and a mathematical model of the eye using monte carlo simulations to evaluate the dose to the ocular adnexa and compare the shielding effectiveness on different parts of the ocular adnexa based on lens shield thickness. The dose assessment results of the ocular adnexa showed that the lens's sensitive area had the highest absorbed dose distribution when no shield was used, followed by the lens's non-sensitive area, the anterior chamber, vitreous humor, cornea, and eyelid in descending order. With the use of a shield, a 2 mm thick shield demonstrated a dose reduction effect of over 90% in the lens's sensitive area, over 83% in the non-sensitive area and anterior chamber, and a dose reduction effect of 30 to 62% in the vitreous body, cornea, and eyelid. For dose reduction in the lens's sensitive area during electron beam therapy for orbital lymphoma, it is necessary to use a shield of at least 2 mm thickness. Additionally, shielding strategies considering the thickness and area of the shield for other ocular adnexa besides the lens are required.

Keywords: Electron beam therapy, Orbital lymphoma, Lens shield, Monte carlo simulation

I. INTRODUCTION

안와림프종은 주로 결막 및 안와에 발생하며, 피부 표면에 가깝게 위치한 경우 전자선 치료가 시행되고 있다^[1]. 하지만, 방사선 치료 시 안구 및 주변 조직에 부작용을 초래할 수 있는 위험도 함께 고려되어야 한다. 경미한 부작용으로는 안구 건조나 결막염이 발생할 수 있고, 심각한 경우에는 백내장, 망막질환 및 시신경 손상 등이 나타날 수 있다^[2,3]. 방사선 치료의 부작용 중 백내장은 결정론적 효과로서 수정체 혼탁은 0.5 Gy ~ 2 Gy, 백내장은 5 Gy 이상의 선량에 의해 발병할 수 있고, 이를 초과하는 경우, 방사선 백내장의 발병률이 증가하고 잠복기가 단축된다^[4].

Merriam 등^[5]은 외부 방사선 치료 환자에게 2.5 ~ 6.5 Gy의 분할 조사로 인해 평균 8년 7개월 후 백내장이 형성된 것을 관찰하였으며, 그보다 높은 선량인 6.51 ~ 11.5 Gy의 분할 조사에서는 평균 4년 4개월 후에 백내장 형성이 시작되었다고 보고하였다. 과거 안와림프종 혹은 눈의 방사선 치료 후 백내장 발병에 대한 추적 연구는 이뤄져 왔으나, 치료 시 환자의 눈에 대한 정확한 선량 측정 및 평가에 어려움이 있다^[6,7]. Behrens 등^[8]은 몬테카를로 방법론을 활용하여 광자, 전자, 중성자의 입자 유형 및 에너지에 따른 선량 변환 계수를 계산하였다. 또한, 수정체의 앞쪽 1/3을 민감한 영역으로, 나머지 뒤쪽 부분을 비민감 영역으로 구분하여 전자 플루언스로부터 수정체의 선량 변환 계수를 정량화했다.

* Corresponding Author: Yong In Cho

E-mail: yicho@cup.ac.kr

Tel:

국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP)의 Publication 118에서는 수정체 혼탁에 대한 선량 임계값을 0.5 Gy로 낮추고 종사자의 수정체 등가선량 한도를 연간 150 mSv에서 20 mSv로 하향 조정할 것을 권고하고 있다^[9]. 이는 과거 역학조사와 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)의 백내장 연구에 따른 변화이며, 저선량 및 중등도 선량에서도 백내장을 유발할 수 있다는 것을 의미한다. 또한 최근 연구들은 수정체뿐만 아니라 그 외 조직에서 백내장 발생에 영향을 미친다는 연구들이 제기되고 있다. Shore 등^[10,11]은 원자폭탄 생존자와 체르노빌 청소 작업자에 대해 0.08 Gy의 임계값을 관찰했으며, Richard B 등^[12]은 망막 및 유리체와 같은 다른 안구 부위의 손상이 후낭하백내장(Posterior Subcapsular Cataracts) 유발에 간접적으로 영향을 줄 수 있음을 보고하였다. 이는 방사선 노출 시 눈의 수정체뿐만 아니라, 안구 부속기관에 대한 방호 역시 고려해야 함을 시사하며, 정량적인 선량평가와 안구 부속기관의 선량 저감화를 위한 차폐 분석이 필요하다.

이에 본 연구는 몬테카를로 전산모사를 이용하여 의료용 선형가속기와 안구의 수학적 모델을 모사하고, 안와림프종의 전자선 치료 시 수정체를 포함한 안구 부속기관에 대한 선량 평가를 수행하고자 한다. 또한 수정체 차폐체 사용 시 두께 변화에 따른 차폐 분석을 통해 안구의 방사선 부작용 최소화를 위한 차폐 방안에 대한 기초자료를 제공하고자 한다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. 몬테카를로 전산모사

몬테카를로 방법은 확률적인 접근을 통해 물리적 시스템의 동작을 모델링하며, 다양한 종류의 입자 전송과 에너지 스펙트럼을 정밀하게 분석할 수 있다^[13]. 본 연구에서는 미국 로스앨러모스 국립연구소(LANL)에서 개발된 MCNPX(Monte Carlo N-Particle Extended, ver 2.5.0)를 이용하였다. 이는 입자 전송 시뮬레이션 소프트웨어로서 핵공학, 의

학물리, 방사선 치료, 비파괴 검사 등 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다.

1.1. 의료용 선형가속기

본 연구에서 사용된 선형가속기(Infinity, Elekta, Sweden)는 치료기 구성품에 따른 물리적 특성을 고려하여 모사하였다. 선형가속기의 구조는 Fig. 1과 같이 전자선 발생지점을 설정한 후, 1차 콜리메이터(First Collimator), 산란막(Scattering Foil), 2차 콜리메이터(Secondary Collimator), 전자선 조사기구(Electron cone)를 순차적으로 배치하였다. 1차 콜리메이터는 텅스텐 재질로 설정하였으며, 타격을 3 cm 두께로 둘러싸고 있는 구 형태로 구성하였다. 산란막은 철 재질로 구성하였으며, 0.1 ~ 0.3 mm 두께의 얇은 판 형태로 설정하였다. 2차 콜리메이터는 텅스텐 재질로서 9 cm 두께의 육면체 형태로 구성하였으며, X jaw 및 Y jaw 형태로 배치하였다. 전자선 조사 기구는 2차 콜리메이터 아래 위치한 구리 재질의 정사각형 형태로 가장 아래에 위치한 조사 기구의 조사면이 10 cm × 10 cm 크기가 되도록 설정하였다.

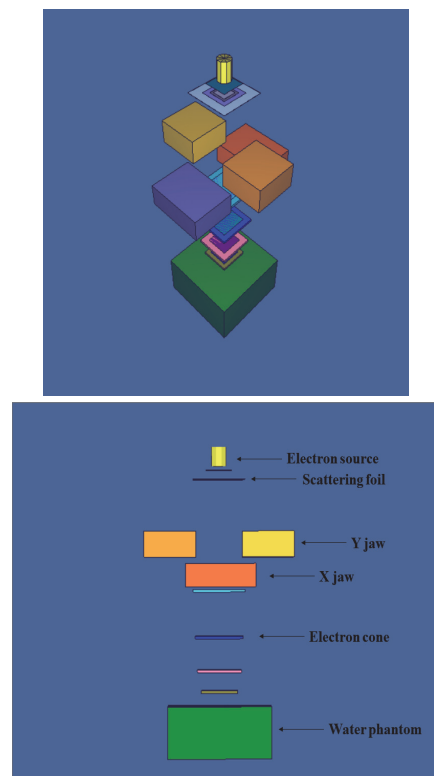
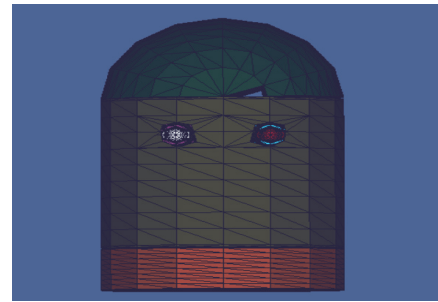


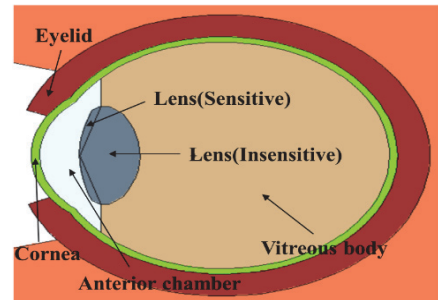
Fig. 1. Simulation of a linear accelerator.

1.2. 안구 부속기관에 대한 수학적 모델

전자선 치료 시 안구 부속기관에 대한 선량 평가를 위해, 국제방사선방호위원회(ICRP)의 간행물 116에 근거한 두 기하학적 모델을 사용하여 Fig. 2와 같이 모사하였다. 모델링은 첫째, 성인 남성과 여성의 기준 팬텀인 MIRD(Medical Internal Radiation Dose) 팬텀 내 머리, 눈, 수정체를 복셀 기반으로 설정하였다. 둘째, Behrens 등¹⁸⁾의 안구 모델로 수정체를 민감 영역(Sensitive volume)과 비민감 영역(Insensitive volume)으로 정량화한 모델로 설정하였다. 전산모사를 통한 안구 부속기관의 선량평가를 위해 수정체는 민감 영역과 비민감 영역으로 분류하였고, 수정체 외 부속기관을 눈꺼풀(Eyelid), 각막(Cornea), 유리체(Vitreous body), 전방(Anterior chamber)으로 구분하여 총 여섯 가지 주요 영역으로 지정하였다. 각 영역의 밀도, 무게 및 원소 조성비 등의 물리적 특성은 ICRP 간행물 118에서 제시된 정보를 참조하여 Table 1과 같이 설정하였다.



(a) 3D view of head phantom



(b) 2D view of multi-tissue eyes coloured by material composition

Fig. 2. Description of eye models embedded in MIRD phantom generated from MCNP Visual Editor.

Table 1. Physical properties of ocular adnexa

Tissue	Isotopic composition (% mass fraction)					
	Eyelid	Cornea	Vitreous body	Anterior chamber	Insensitive volume	Sensitive volume
H	10.0	10.16	11.20	11.20	9.60	9.60
C	20.4	12.62	-	-	19.50	19.50
N	4.20	3.69	-	-	5.70	5.70
O	64.5	73.14	88.80	88.80	64.60	64.60
Na	0.20	0.0065	-	-	0.10	0.10
P	0.10	0.0065	-	-	0.10	0.10
S	0.20	0.195	-	-	0.30	0.30
Cl	0.30	0.065	-	-	0.10	0.10
K	0.10	-	-	-	-	-
Density (g/cm^3)	1.09	1.076	1.0089	1.003	1.06	1.06
Volume (cm^3)	4.30	0.978	5.99	0.308	0.179	0.0368
Mass (g)	4.684	1.053	6.045	0.309	0.190	0.039

2. 실험 방법

2.1. 선원향 평가

전자선 치료에 대한 전산모사를 위해 의료용 선형 가속기와 전산모사 간 선원향 평가를 수행하였다.

선원향 평가는 국제원자력기구(IAEA)의 TRS-398 지침을 참조하여 깊이선량백분율(PDD) 및 단면선량분포(Profile)를 측정하여 비교 분석하였다. 실험은 $40\text{ cm} \times 40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ 의 물 팬텀을 사용하였으며, 선원으로부터 표면까지의 거리(Source-

Surface Distance, SSD) 100 cm 지점에 10 cm × 10 cm의 조사야를 설정하여 전자선 조사 후 Semiflex Ionization Chamber(Type 31010) 전리함으로 전하량을 측정하였다.

전산모사는 동일한 팬텀 크기와 SSD, 조사야를 설정하고 0.1 cm 간격으로 6, 9 MeV 전자선을 조사하여 측정하였다. 전산모사와 실측을 통해 측정된 전자선 빔의 깊이선량백분율, R_{50} 을 비교하여 빔의 일치도를 평가하였다. R_{50} 은 물에서 빔축상 최대선량의 50%가 되는 깊이를 의미하며, 전자선 선량 측정 프로토콜에서 선질 결정 지표로 사용된다. 단면선량분포는 전자선의 대칭도 및 평탄도를 비교하여 전산모사에 대한 신뢰성을 분석하였다.

2.2. 안구 부속기관별 선량평가

전자선 치료 시 안구 부속기관별 선량평가를 위해 안구의 위치를 Fig. 3과 같이 선형가속기와 수직을 이루는 평면에 위치시켰다.

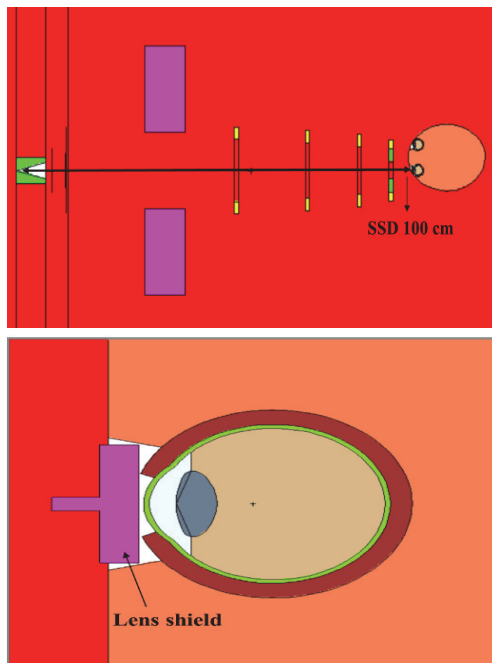


Fig. 3. Linear accelerator and MIRD phantom setup with lens shield.

선원으로부터 표면까지의 거리(SSD)는 100 cm로 설정하였으며, 조사야는 10 cm × 10 cm로 지정하였다. 본 연구는 6 MeV, 9 MeV 전자선을 이용한 좌측 안구 치료를 가정하여 두 가지 평가를 수

행하였다. 첫째, 수정체 차폐체 미사용 시 전자선의 입자당 노출되는 안구 부속기관별 흡수선량(fGy/electron)을 평가했다. 둘째, 수정체 차폐체 사용 시 두께 변화에 따른 안구 부속기관의 선량감소 효과를 분석하였다. 6 MeV, 9 MeV 전자선의 차폐체 미사용 시 선량을 기준으로, 두께 변화에 따른 차폐율을 각각 2 mm ~ 8 mm 범위에서 산정하였다. 차폐체는 안구 전면에 배치하였으며, 조성 및 밀도는 임상적으로 사용하는 제품을 참조하여 텅스텐 차폐체(W, 19.25g/cm³)와 동일하게 구현하였다. 모의실험 내 관심지점은 F6 Tally를 사용하여 단위 질량당 축적된 에너지 분포(MeV/g)를 획득하였으며, 흡수선량(fGy) 단위로 변환했다. 몬테카를로 전산모사 수행에 대한 모의 추정횟수(nps)는 10⁷ 번 반복하였으며, 결과에 대한 불확도(uncertainty)는 5% 미만으로 확인되었다.

III. RESULT

1. 전자선의 선원향 평가

몬테카를로 기법을 통해 모사된 선형가속기와 실제 선형가속기의 6 MeV, 9 MeV 전자선에 대한 선원향을 비교 분석하였다. 실측 데이터와 시뮬레이션의 평가 결과는 Fig. 4에 나타내었다. IAEA TRS-398 보고서에서 제시한 전자선 측정 권고사항을 기준으로 R_{50} 을 비교한 결과, 6 MeV와 9 MeV 에너지에서 측정된 깊이선량백분율은 모두 1 mm 오차 범위 내에서 일치함을 확인하였다. 또한, 전자선의 대칭도 및 평탄도를 평가하는 단면선량분포 그래프에서도 두 에너지가 2% 미만의 차이로 일치함을 확인하였다.

2. 6, 9 MeV 전자선 치료 시 안구 부속기관별 흡수선량 평가

몬테카를로 전산모사를 통해 안와림프종의 전자선 치료 시 안구 부속기관의 흡수선량을 평가한 결과는 Fig. 5와 같다. 6 MeV 전자선의 경우, 차폐체 없이 노출된 수정체의 민감 영역에서는 311 fGy/particle으로 가장 높은 흡수선량을 나타내었다.

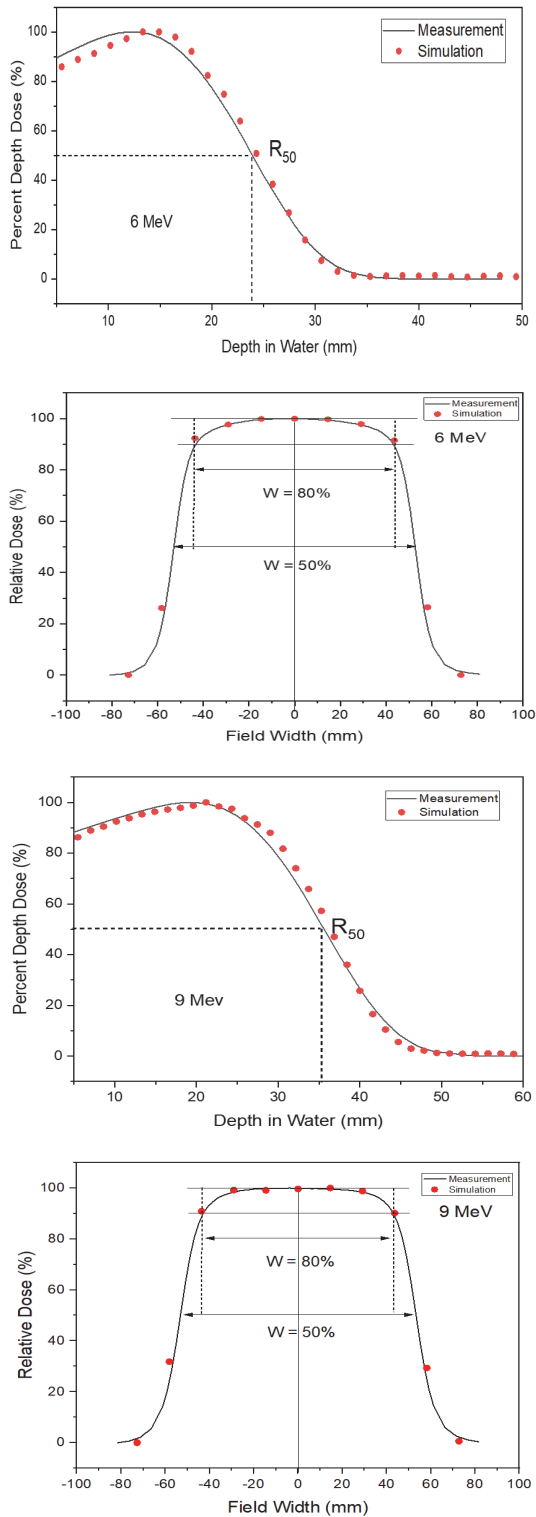


Fig. 4. Analysis of Percent Depth Dose(PDD) and dose Profile for 6 MeV and 9 MeV Electron Beams.

그 외 수정체의 비민감 영역은 30.6 fGy/particle, 전방은 27.5 fGy/particle, 유리체는 26.9 fGy/particle,

각막은 24.7 fGy/particle, 눈꺼풀은 22.3 fGy/particle로 평가되었다. 9 MeV 전자선의 경우, 수정체의 민감 영역에서 485 fGy/particle로 가장 높은 흡수선량을 나타내었으며, 그 외 수정체의 비민감 영역은 47.7 fGy/particle, 전방은 42.6 fGy/particle, 유리체는 47.9 fGy/particle, 각막은 46.9 fGy/particle, 눈꺼풀은 45.1 fGy/particle로 평가되었다. 6 MeV 전자선은 수정체의 비민감 영역, 전방, 유리체, 각막, 눈꺼풀 순서로 점차 낮아지는 양상을 나타내었고, 9 MeV 전자선은 유리체, 수정체의 비민감 영역, 각막, 눈꺼풀, 전방 순서로 낮은 분포를 나타내었다.

안구 부속기관의 전체 흡수선량을 기준으로 한 선량 비율 분석 결과, 6 MeV 및 9 MeV 전자선 조사 시 수정체의 민감 영역이 전체 흡수선량의 70.1%, 67.8%로 가장 높은 비율을 차지하였다. 6 MeV 전자선의 경우, 수정체의 비민감 영역은 6.9%, 전방은 6.2% 유리체는 6.1% 각막은 5.6% 눈꺼풀은 5.0%의 비율을 보였으며, 9 MeV 전자선은 수정체의 비민감 영역에서 6.7%, 전방은 6.0%, 유리체는 6.7%, 각막은 6.6%, 눈꺼풀은 6.3%로 평가되었다.

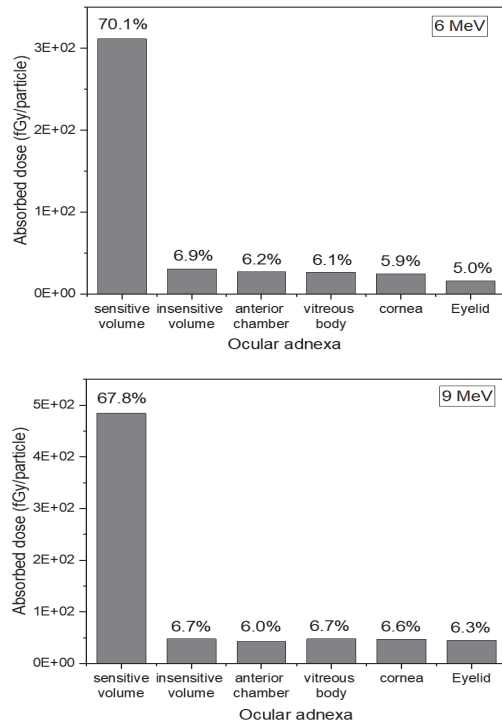


Fig. 5. Absorbed dose in the ocular adnexa without shielding for a 6 MeV and 9 MeV electron beam.

3. 수정체 차폐 두께에 따른 안구 부속기관별 차폐율 평가

6 MeV 전자선 치료 시 수정체 차폐체 두께에 따른 선량 분포는 Table 2와 같다. 2 mm 두께 사용 시, 수정체 민감 영역에서는 29.9 fGy/particle로 가장 높은 선량을 나타내었다. 그 외 안구 부속기관에서는 눈꺼풀 16.1 fGy/particle, 각막 14.3 fGy/particle, 유리체 10.7 fGy/particle이 측정되었으며, 수정체의 비민감 영역 4.96 fGy/particle, 전방 3.63 fGy/particle를 나타내었다.

6 MeV 전자선의 차폐체 사용 시 안구 부속기관의 차폐율 비교 분석 결과는 Fig. 6에 나타내었다.

2 mm 사용 시 수정체의 민감 영역에서는 90.4%로 가장 높은 차폐율을 보였다. 그 외 수정체의 비민감 영역과 전방에서는 각각 84%, 86.8%의 차폐율을 나타내었고, 유리체는 60.2%의 차폐율을 나타내었고, 눈꺼풀은 28%로 다소 상이한 차폐율을 보였다. 차폐체 두께 증가에 따라 수정체의 민감 영역에서는 최대 1.1%, 비민감 영역에서는 3%, 전방은 1.8%, 유리체는 1%, 각막은 1.5%, 눈꺼풀은 1.8% 정도로 다소 미미한 차폐율 증가를 나타내었다.

Table 2. Absorbed dose in ocular adnexa as a function of shielding thickness for 6 MeV electron beam

Tissue	Absorbed Dose [Unit : fGy/Particle]			
	2 mm W	4 mm W	6 mm W	8 mm W
Sensitive volume of lens	29.9	28.0	27.4	26.4
Insensitive volume of lens	4.96	4.51	4.22	4.04
Anterior chamber	3.63	3.21	3.15	3.12
Vitreous body	10.7	10.6	10.3	10.2
Cornea	14.3	14.1	14.1	13.9
Eyelid	16.1	15.9	15.8	15.7

Table 3. Absorbed dose in ocular adnexa as a function of shielding thickness for 9 MeV electron beam

Tissue	Absorbed Dose [Unit : fGy/Particle]			
	2 mm W	4 mm W	6 mm W	8 mm W
Sensitive volume of lens	46.3	35.7	35.4	30.9
Insensitive volume of lens	4.59	3.45	3.23	3.12
Anterior chamber	5.07	3.22	2.95	2.87
Vitreous body	21.3	20.8	20.4	20.2
Cornea	30.4	30.0	29.5	29.2
Eyelid	35.4	35.0	34.7	34.4

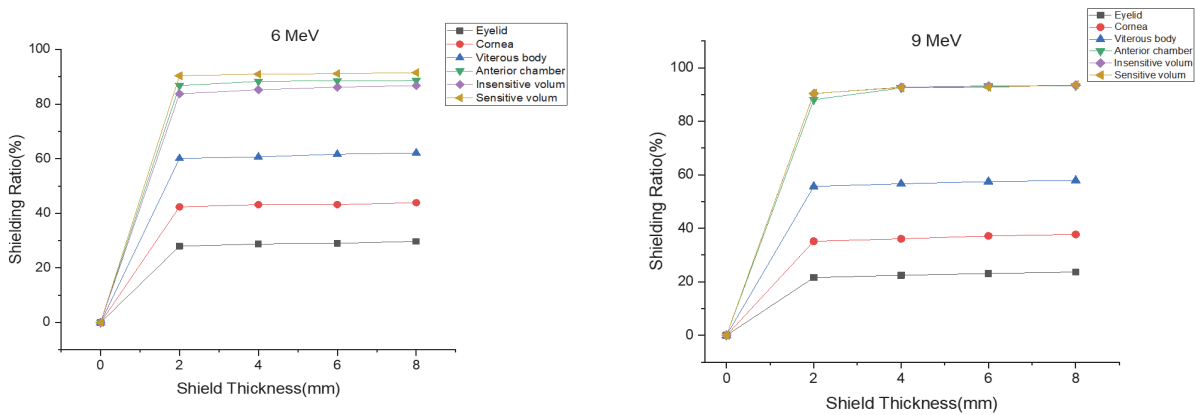


Fig. 6. Shielding rate of tungsten shield on ocular adnexa at 6 MeV and 9 MeV electron beam.

9 MeV 전자선의 수정체 차폐체의 두께별 선량 분포는 Table 3에 나타내었다. 2 mm 두께 적용 시, 수정체의 민감 영역에서 46.3 fGy/particle로 가장 높은 선량을 나타내었으며, 눈꺼풀은 35.4 fGy/particle, 각막 30.4 fGy/particle, 유리체 21.3 fGy/particle, 전방 5.07 fGy/particle, 수정체의 비민감 영역 4.59 fGy/particle를 나타내었다. 6 MeV 전자선의 결과와 유사하게 수정체 차폐체의 두께가 증가함에 따라 안구 부속기관의 선량은 점차 감소하였다. 안구 부속기관의 차폐율 비교 분석 결과는 Fig. 6과 같이, 2 mm 두께에서 수정체의 민감 영역 및 비민감 영역의 차폐율이 90.4%로 가장 높게 평가되었다.

전방은 88.1%의 차폐율을 보였으며, 유리체, 각막, 눈꺼풀은 각각 55.7%, 35.2%, 21.6%의 차폐율을 나타내었다. 차폐체 두께 증가에 따라 수정체의 민감 영역 및 비민감 영역은 최대 3%, 전방은 5%, 유리체 및 각막, 눈꺼풀은 2%의 차폐율 증가를 나타내었다.

IV. DISCUSSION

안와림프종은 전자선을 이용한 방사선 치료가 널리 시행되지만, 백내장과 같은 방사선 부작용 또는 염증성 질환을 유발할 수 있다. 또한, 방사선에 의한 망막질환 및 유리체 손상이 후낭하백내장의 발병에 영향을 줄 수 있다는 연구 결과가 제기되면서, 수정체 이외 안구 부속기관에 대한 선량평가의 중요성이 대두되고 있다. 하지만 국내·외 수정체 이외 안구 부속기관의 방호에 관한 연구는 미비한 실정이다. 이에 본 연구는 전자선 치료 시 선형가속기와 안구 모델링을 통해 수정체 및 안구 부속기관에 대한 선량 분포를 평가하였으며, 차폐체의 두께 변화에 따른 선량감소효과를 산정하고자 하였다.

전자선의 선원향 평가는 전산모사의 심부선량백분율, R_{50} , 단면선량분포를 실측 데이터와 비교 분석하여 허용 오차 범위 내 일치함을 확인하였으며, 전산모사에 대한 신뢰성을 확보하였다. 안구 부속기관의 선량평가 및 차폐분석 결과에 따르면, 6 MeV 및 9 MeV 전자선의 수정체 민감 영역과 비민감 영역에서 흡수된 선량은 전체의 77%, 75%로 가

장 높은 비율을 나타내었다. 그 외 안구 부속기관은 약 5 ~ 7%로 평가되어 전자선 치료 시 수정체 뿐만 아니라 안구 부속기관에 대한 선량 또한 고려되어야 할 것으로 생각된다. 수정체 차폐체 두께에 따른 차폐율 산정 결과, 수정체 민감 영역은 전자선 에너지별 2 mm 두께 사용 시 90% 이상의 높은 선량감소효과를 나타낸 것으로 확인하였다. 이는 안와림프종의 전자선 치료 시 최소 2 mm 이상의 차폐체 사용이 수정체 선량 저감에 효과적인 도구임을 시사한다. 반면, 눈꺼풀, 각막, 유리체는 전자선 에너지별 모든 두께에서 62% 이하의 상대적으로 낮은 차폐율을 보였다. 이는 빔 조사 시 차폐체가 완전히 차폐하지 못한 영역에서 흡수된 선량이 합산되어 높은 평균 선량이 계산된 결과로 분석된다. 수정체와 안구 부속기관의 차폐율 향상을 위해 차폐체의 규격 개선과 보완적 차폐 방안이 필요할 것으로 생각된다.

차폐체의 두께 증가 시 안구 부속기관별 차폐율은 다소 미미한 변화를 보였는데, 이는 두 가지 요인으로 해석된다. 첫째, 차폐체의 규격은 수정체 방호에 중점을 두고 있으며, 이로 인해 차폐체의 경계 부분에서 발생한 산란선이 수정체 및 전방 조직에 흡수되어 평균 선량을 증가시킨 것으로 분석된다. 둘째, 차폐체의 두께가 증가함에 따라 전자선과 텅스텐 차폐체의 상호작용으로 발생하는 제동복사가 안구 부속기관에서의 에너지 흡수에 영향을 미친 것으로 추정된다. 제동복사는 고속전자가 높은 원자번호 물질과 상호작용할 때 주로 발생하며, 이 과정에서 방출되는 광자는 주변 조직에 추가적인 방사선 노출을 유발할 수 있다^[14].

Yousif 등^[15]의 연구에서는 전자선 치료 시 눈 차폐체의 투과선량을 평가하여 수정체 영역 및 주변부에서 산란선의 기여로 인해 상대적으로 높은 선량이 측정됨을 보고하였다. 이는 본 연구 내 수정체 및 안구 부속기관에서 노출된 선량 결과와 상응한 결과를 나타낸다. 조 등^[16]의 연구에서는 석고를 이용해 환자의 안구를 본떠 Lens shield device (LSD)를 제작하고, 수정체의 깊이부터 3 mm 간격으로 선량을 측정하였다. 이에 비해, 본 연구는 가상공간 내 실제 전자선 치료와 유사한 환경을 모사

하고, 눈의 수학적 모델을 통해 안구 부속기관별 정량적인 선량평가 및 차폐분석을 수행하였다는 것에 의미가 있다. 여러 선행연구에서는 물 팬텀 또는 등가 물질 위에 차폐체를 배치하고 다양한 에너지 수준에서 두께별 차폐율을 분석하였다^[17,18]. 모사된 안구에서 수행된 차폐체 실험 결과는 선행 연구와 다소 상이한 결과를 보였다. 이는 안와림프종의 전자선 치료에 사용되는 차폐체 규격의 제한으로 인해 안구 부속기관에 대한 산란선이 증가된 영향으로 분석되며, 이러한 이유로 동일 두께의 차폐체에서 예상보다 낮은 차폐율이 확인되었다. 향후 추가적인 연구를 통해 안구 부속기관의 위치와 크기를 고려하여 개선된 차폐 방안 마련을 위한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

V. CONCLUSION

본 연구는 몬테카를로 전산모사를 활용하여 전자선 치료 시 수정체와 안구 부속기관에 대한 선량평가 및 차폐 분석을 수행하였다. 6 MeV 및 9 MeV 전자선 치료 시 최소 2 mm 이상 두께 사용 시 수정체의 민감 영역은 90% 이상의 차폐율을 나타내었다. 반면, 눈꺼풀, 각막, 유리체의 경우 전자선 에너지별 차폐체 두께 변화에도 다소 낮은 차폐율을 보였다. 안와림프종의 전자선 치료 시 안구 부속기관의 차폐율을 증가시키기 위해서는 기존의 차폐체보다 넓은 면적을 가진 차폐체를 사용하거나 추가적인 차폐 방안이 필요할 것으로 판단된다. 하지만, 차폐율을 고려하여 차폐체의 두께 및 면적을 증가시킬 경우, 전자선과의 상호작용으로 발생하는 제동복사의 영향 및 차폐체 제작 시 구조적 안정성을 고려해야 한다. 따라서, 안구 부속기관에 대한 선량을 고려한 차폐체 설계가 필요하며, 안와림프종의 방사선 치료 시 수정체를 포함한 안구 부속기관의 방사선 방호와 선량 저감을 위한 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSTI) (No. RS-2023-00210036)

Reference

- [1] M. V. Pereira-Da Silva, M. L. Di Nicola, F. Altomare, W. Xu, R. Tsang, N. Laperriere, H. Krema, "Radiation therapy for primary orbital and ocular adnexal lymphoma", *Clinical and Translational Radiation Oncology*, Vol. 38, pp. 15-20, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ctro.2022.10.001>
- [2] N. Hamada, T. V. Azizova, M. P. Little, "An update on effects of ionizing radiation exposure on the eye", *The British journal of radiology*, Vol. 93, No. 1115, 2020. <https://doi.org/10.1259/bjr.20190829>
- [3] V. Swetha E. Jeganathan, Andrew Wirth, Michael P. MacManus, "Ocular Risks From Orbital and Periorbital Radiation Therapy: A Critical Review", *International Journal of Radiation Oncology · Biology · Physics*, Vol. 79, No. 3, pp. 650-659, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2010.09.056>
- [4] J. Valentin, "The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", ICRP Publication 103, 2007.
- [5] G. R. Merriam Jr, A. Szechter, E. F. Focht, "Effects of ionizing radiations on the eye", Columbia-Presbyterian Medical Center, New York. Columbia Univ., New York, Vol. 6, pp. 346-385, 1972. <https://doi.org/10.1159/000392817>
- [6] H. H. Park, S. W. Lee, S. Y. Sung, B. O. Choi, "Treatment outcome and risk analysis for cataract after radiotherapy of localized ocular adnexal mucosa-associated lymphoid tissue (MALT) lymphoma", *Radiation Oncology Journal*, Vol. 35, No. 3, pp. 249-256, 2017. <https://doi.org/10.3857/roj.2017.00374>
- [7] S. R. Durkin, D. Roos, B. Higgs, R. J. Casson, D. Selva, "Ophthalmic and adnexal complications of radiotherapy", *Acta Ophthalmologica Scandinavica*, Vol. 85, No. 3, pp. 240-250, 2007. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0420.2006.00822.x>
- [8] R. Behrens, G. Dietze, M. Zankl, "Dose conversion coefficients for electron exposure of the human eye lens", *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 54, No. 13, pp. 40-69, 2009. <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/54/13/008>
- [9] F. A. Stewart, A. V. Akleyev, M. Hauer-Jensen, J. H. Hendry, N. J. Kleiman, T. J. MacVittie, B. M. Aleman, A. B. Edgar, K. Mabuchi, C. R. Muirhead,

- R. E. Shore, W. H. Wallace, "ICRP publication 118: ICRP statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs—threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context", *Annals of the ICRP*, Vol. 41, No. 1-2, pp. 1-322, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.icrp.2012.02.001>
- [10] K. Neriishi, E. Nakashima, A. Minamoto, S. Fujiwara, M. Akahoshi, H. K. Mishima, T. Kitaoka, R. E. Shore, "Postoperative cataract cases among atomic bomb survivors: radiation dose response and threshold", *Radiation research*, Vol. 168, No. 4, pp. 404-408, 2007. <https://doi.org/10.1667/RR0928.1>
- [11] B. V. Worgul, Y. I. Kundiyeu, N. M. Sergiyenko, V. V. Chumak, P. M. Vitte, C. Medvedovsky, E. V. Bakhanova, A. K. Junk, O. Y. Kyrychenko, N. V. Musijachenko, S. A. Shylo, O. P. Vitte, S. Xu, X. Xue, R. E. Shore, "Cataracts among Chernobyl Clean-up Workers: Implications Regarding Permissible Eye Exposures", *Radiation Research*, Vol. 167, No. 2, pp. 233-243, 2007.
<https://doi.org/10.1667/RR0298.1>
- [12] R. B Richardson, E. A Ainsbury, C. R Prescott, F. J Lovicu, "Etiology of posterior subcapsular cataracts based on a review of risk factors including aging, diabetes, and ionizing radiation", *International journal of radiation biology*, Vol. 96, No. 11, pp. 1339-1361, 2020.
<http://dx.doi.org/10.1080/09553002.2020.1812759>
- [13] Joao Seco Frank Verhaegen, *Monte Carlo techniques in radiation therapy*, Imaging in Medical Diagnosis and Therapy, CRC press, pp. 1-20, 2013.
<http://dx.doi.org/10.1118/1.4922694>
- [14] E. Peri, I. Orion, "Shielding calculations for industrial 5/7.5MeV electron accelerators using the MCNP Monte Carlo Code", *EPJ Web of Conferences*, Vol. 153, No. 6, pp. 3-11, 2017.
<https://doi.org/10.1051/epjconf/201715303011>
- [15] Y. Yousif, J. Daniel, R. Hill, "Dosimetric Measurements of a Tungsten Eye Shield in Kilovoltage X-Ray and Megavoltage Electron Beams", Available at SSRN, pp. 1-9, 2023.
<http://doi.org/10.2139/ssrn.4427690>
- [16] J. K. Cho, H. S. Cho, T. J. Han, "Efficacy of Lens Shielding Device to Prevent Cataract with Radiotherapy for Orbit or Ocular Adnexal Tumor", *The Journal of the Korea Contents Association*, Vol. 7, No. 12, pp. 139-144, 2007.
<https://doi.org/10.5392/JKCA.2007.7.12.139>
- [17] S. H. Lee, S. Y. Cha, S. Y. Lee, "Aluminum, copper and lead as shielding materials in 6 MeV electron therapy", *The Journal of the Korea Contents Association*, Vol. 14, No. 2, pp. 457-466, 2014.
<https://doi.org/10.5392/JKCA.2014.14.02.457>
- [18] S. K. Kang, S. Park, T. J. Hwang, K. H. Cheong, T. J. Han, H. Y. Kim, M. Y. Lee, K. J. Kim, H. S. Bae, "Evaluation of the Radiochromic Film Dosimetry for a Small Curved Interface", *Progress in Medical Physics*, Vol. 23, No. 4, pp. 234-238, 2012.

안와림프종의 전자선 치료 시 안구 부속기관에 대한 선량평가

김동환¹, 조용인^{2,*}

¹동남권원자력의학원 방사선종양학과

²부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과

요 약

안와림프종의 전자선 치료 시 안구 부속기관의 방사선 부작용 및 합병증으로 인해 후낭하백내장 발생률이 높아질 수 있다. 이에 본 연구는 몬테카를로 전산모사를 활용하여 의료용 선형가속기와 안구의 수학적 모델을 모사하고, 안구 부속기관에 대한 선량평가와 수정체 차폐체 두께에 따른 안구 부속기관별 차폐율을 비교 분석하였다. 안구 부속기관의 선량평가 결과, 차폐체 미사용 시 선량을 기준으로 수정체의 민감 영역에서 가장 높은 흡수선량 분포를 보였으며, 그 외 수정체의 비민감 영역, 전방, 유리체, 각막, 눈꺼풀 순으로 점차 낮아지는 경향을 나타내었다. 차폐체 사용 시 선량 분석 결과, 2 mm 두께 사용 시 수정체의 민감 영역에서 90% 이상의 선량감소효과를 나타냈으며, 비민감 영역과 전방은 83% 이상, 유리체, 각막, 눈꺼풀에서는 30 ~ 62%의 선량감소효과를 보였다. 안와림프종의 전자선 치료 시 수정체 민감 영역의 선량 저감을 위해서는 최소 2 mm 이상의 차폐체 사용이 필요할 것으로 판단되며, 수정체 이외 안구 부속기관에 대한 차폐체 두께 및 면적을 고려한 차폐 방안이 필요할 것으로 사료된다.

중심단어: 전자선 치료, 안와림프종, 수정체 차폐, 몬테카를로 전산모사

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	김동환	동남권원자력의학원 방사선종양학과	방사선사
(교신저자)	조용인	부산가톨릭대학교 방사선학과	조교수