

A Study on the Lead(Pb) Shield Thickness per Electron Beam Energy in Radiotherapy

Gha-Jung Kim*

Department of Radiological Science, Far East University

Received: November 14, 2022. Revised: November 29, 2022. Accepted: November 30, 2022.

ABSTRACT

This study aimed to measure, quantitatively evaluate, and set the criteria for the minimum lead(Pb) shield thickness per level of clinically applied electron beam energy. The lead shield thickness per electron beam energy was measured using the primary field 95% reduction based on the open field at the depth of maximum dose (d_{max}) and depth from the surface as the reference depth of tissue dose(10 mm). The measured values were 1.906 mmPb and 1.992 mmPb at the d_{max} and 10 mm, respectively, regarding the lead shield thickness for 6 MeV electron beam; 2.746 mmPb and 3.743 mmPb for 9 MeV electron beam, 3.718 mmPb and 6.093 mmPb for 12 MeV electron beam, 7.300 mmPb and 15.270 mmPb for 16 MeV electron beam, and 16.825 mmPb and 25.090 mmPb for 20 MeV electron beam. Consequently, a thicker lead shield was required if the measurement was at 10 mm. The required lead shield thickness was also higher than that of the theoretical formula for electron beams of ≥ 16 MeV.

Keywords: Electron beam, Lead shield, Lipowitz metal, Maximum dose depth, Tissue dose depth

I. INTRODUCTION

1970년 S-band 방식의 마이크로파 선형 가속장치가 개발되어 사용되었다. 이후 선형가속장치를 이용한 전자선 치료는 고에너지 광자선과 같이 다양한 영역의 전자선속을 이용하여 임상에 적용되고 있다. 고에너지 전자선 치료는 주로 표재성 종양 인 피부암, 유방암의 흉벽 조사, 림프절 추가 조사, 두·경부 종양 치료에 이용되고 있다. 전자선 치료는 종양 뒤쪽의 급격한 선량 감소의 특성을 이용하여 정상조직의 피폭을 최소화하고 있다^[1]. 현재 전자선 치료에 이용되는 에너지 범위는 6 ~ 20 MeV로 종양의 깊이에 따라 에너지를 선택하여 치료하고 있다.

고에너지 전자선은 물질 내를 통과하면서 원자의 쿨롱력에 의한 탄성 산란과 비탄성 산란으로 상호작용하며 에너지를 잃게 된다. 이때 전자선은 원자의 궤도 전자와의 비탄성 충돌과정에서 전리나

여기 현상이 발생하며 원자핵과 비탄성 충돌과정에서 제동방사선이 발생되기도 한다. 또한 전자선은 다중산란과 X선 오염으로 인해 정확한 비정을 측정하기 어렵다^[2-5]. 전자선의 에너지 손실은 물이나 연부조직에서 약 2 MeV/cm로 감소되며, 심부선량 80 ~ 90%까지 선량이 전달되는 깊이는 일반적으로 MeV 에너지의 1/3 ~ 1/4 cm 정도이다^[6]. 이에 임상에서 전자선 에너지 선택을 80% 치료 유효 범위, 90% 치료 유효범위로 종양의 깊이에 따른 전자선 에너지를 선택하고 있다^[1,7].

임상에서 적용되는 전자선의 경우 쿨롱력에 의한 다중산란으로 피부에 전달되는 선량이 80 ~ 90%로 피부 보호 효과는 크지 않거나 거의 없다^[6]. 또한 고에너지 X선과 달리 전자선의 표면선량은 에너지에 따라 증가되며, 최대선량과 표면선량의 비도 고에너지 전자선이 크게 나타난다. 이러한 이유로 전자선 빔의 차폐는 심부의 정상조직보다 피

* Corresponding Author: Gha-Jung Kim E-mail: gjms1225@hanmail.net Tel: +82-43-879-3690 Address: Far East University, 76-32 Daehak-gil, Gamgok-myeon, Eumseong-gun, Chungbuk, 27601, Korea

부나 깊이 얇은 조직에서의 차폐가 더욱 중요시되고 있다. 전자선 치료에서 차폐체의 두께는 1차선속의 5%이내의 투과 허용을 근거로 선택되어 최소 95%이상 차폐를 권고하고 있다^[7]. 차폐체로는 순수한 납판이나 Lipowitz 금속과 같이 용융점이 낮은 합금을 이용하고 있다. 전자선 차폐에서 중요한 고려사항은 투과 허용 선량 이내로 감소시키기 적절한 납 두께이다. 납이 너무 얇으면 투과된 선량이 차폐체 뒤에서 증강될 수 있어 최소 납 두께보다 더 두껍게 이용되는 것을 권고하고 있다^[8]. 미국의 핵물리학회(AAPM) Radiation Therapy Committee Task Group No. 25 보고서는 Fig. 1과 같이 전자선 에너지별 차폐에 필요한 최소한의 납 두께를 입사 전자선 에너지(MeV)의 1/2 mm로 대략적 법칙을 따른다고 발표하였다^[3,6]. 또한 보다 완전한 차폐를 위해 1 mm 추가될 수 있으며, Lipowitz 금속(저용융점 납합금)의 필요 두께는 순수 납보다 20% 두껍게 차폐가 필요하다^[9-11].

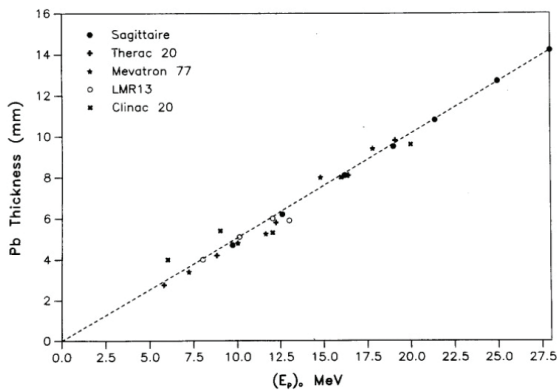


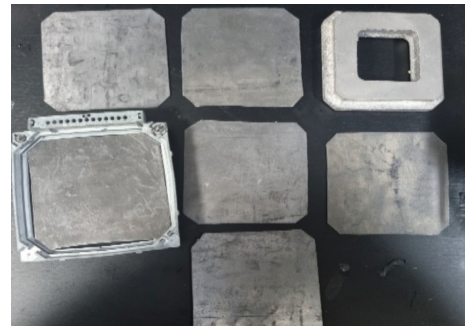
Fig. 1. A linear regression plot of published data for lead thickness required to stop primary electrons as a function of electron energy(From Khan FM, et al. Clinical electron-beam dosimetry. Report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 25).

그러나 이러한 법칙의 근거는 전자선의 에너지별 최대선량 깊이(d_{max})에서 측정된 값으로 피부 표면이나 깊이 얇은 정상 조직에 대한 차폐를 고려하여 적용하는데 한계가 있다. 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection) 103에서는 유효선량 평가를 위해 조직 선량의 기준 깊이로 피부표면으로부터 10 mm로 정하고 있다^[12]. 전자선 치료는 그 특성상 표면선량 증가에 따른 차

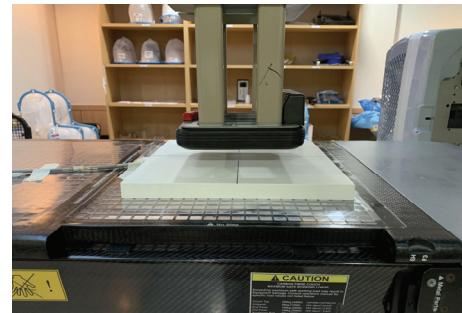
폐체의 기준 깊이를 최대선량 깊이가 아닌 조직선량 기준 깊이에 따른 투과 허용 선량의 측정이 필요할 것이다. 본 연구는 임상에서 이용되는 전자선 빔의 차폐를 위한 최소한의 납 두께를 최대선량 깊이와 조직 선량 깊이에서 측정하여 정량적으로 평가하고 측정 깊이 기준을 설정하고자 한다.

II. MATERIAL AND METHODS

전자선의 에너지별 납 차폐체의 두께를 측정하기 위해 Varian사의 선형가속장치(Varian Medical Systems, Milpitas, California)를 이용하였다. 차폐체의 두께는 1차 선속의 5% 이내의 투과 허용을 근거로 기준조사야 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 전자선 콘을 사용하였으며 1 mm 두께의 납판을 차폐 블록 틀에 맞게 자체 Fig. 2(a)와 같이 제작하였다^[7]. 실험에 앞서 선형가속장치(Clinac iX, Varian, USA)에서 발생하는 전자선 에너지 6, 9, 12, 16, 20 MeV 각각의 출력 선량을 최대선량 깊이에서 Farmer type 이온 챔버를 이용하여 교정을 실시하였다.



(a) Lead shield (1 mm)



(b) Measurement of electron beam

Fig. 2. Electron beam shielding thickness measurement using Farmer type ion chamber.

전자선 에너지별 납 차폐체의 두께 측정을 위한 조건으로 선원-표면간 거리(SSD, Source-Surface Distance) 100 cm, 기준조사야 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 전자선 콘을 장착하여 고체 팬텀(RW3, PTW, Germany)과 아크릴 팬텀을 이용하여 최대선량 깊이(d_{max})와 피부 표면 10 mm 깊이를 설정하였다. Fig. 2(b)와 같이 전자선의 에너지별 납 차폐체의 두께를 변화시켜 Farmer type 이온 챔버로 100 MU씩 3회 조사하여 측정하였다. 전자선 에너지별 차폐율을 측정하기 위해 개방 조사야(Open field)를 기준으로 납판 두께를 1 mm씩 증가시켜 1차선 속의 95% 이상 차폐가 가능한 납판 두께를 측정하였다. 전자선 에너지별 납 차폐체 두께의 정량 평가를 위해 측정된 납 두께를 보간법(Interpolation)을 사용하여 계산하였다. 최대선량 깊이(d_{max})와 조직 선량의 기준 깊이인 표면 10 mm 깊이에서의 1차 선속의 95%로 감소시킬 수 있는 납 차폐체의 두께를 에너지별로 측정하였다.

III. RESULT

연구 실험에 앞서 방사선치료용 전자선은 에너지별 출력을 측정하여 출력 선량을 1%이내로 교정하였다. Table 1은 6 MeV 전자선의 납 차폐체의 두께를 측정한 것으로 개방 조사야(Open field) 100 MU 당 측정된 전하량을 기준으로 납 차폐체의 차폐율을 측정하였다. 최대선량 깊이(16 mm)에서 개방 조사야 100 MU 당 측정값은 22.69 nC, 조직선량 기준 깊이인 10 mm에서 19.98 nC로 측정되었다. 개방 조사야에서 측정된 값을 기준으로 납 차폐체의 두께를 1 mm씩 증가시켜 측정된 95% 이상 차폐 두께를 측정하였다. 실험에서 측정된 값을 보간법으로 95% 차폐체 두께를 측정한 결과 최대선량 깊이에서의 납 차폐체의 두께는 1.906 mmPb 이었으며, 조직선량 기준 깊이 10 mm에서의 납 차폐체 두께는 1.992 mmPb로 측정되어 두 기준 깊이에서의 차이는 0.086 mm로 크지 않았다.

Table 2는 9 MeV 전자선의 납 차폐체 두께를 측정한 결과이다. 9 MeV 전자선의 최대선량 깊이는 20 mm로 100 MU 당 개방 조사야에서 측정된 전하량은 22.92 nC로 최대선량 깊이에서 95% 납 차폐체의 두께는 2.746 mmPb 이었으며, 조직선량 기준

깊이 10 mm는 100 MU 당 개방 조사야에서 측정 전하량은 20.15 nC로 95% 납 차폐체의 두께는 3.743 mmPb로 측정되었다. 두 지점에서의 차폐체 두께는 차이는 0.997 mm로 조직 선량 기준 깊이에서 더 두껍게 측정되었다.

Table 1. Measurement of thickness of lead shield of 6 MeV electron beam at maximum dose depth and tissue dose depth.

6 MeV	Max Dose Depth(d_{max}) 16 mm		Tissue Dose Depth Hd 10 mm		
	Shield thickness (mmPb)	Measurement (nC/100 MU)	Shielding rate(%)	Measurement (nC/100 MU)	Shielding rate (%)
Open		22.69	0.00	19.98	0.00
1		6.56	71.11	6.56	67.19
2		0.58	97.47	0.96	95.21
3		0.43	98.10	0.33	98.33
4		0.21	99.07	0.23	98.85
95% shielding thickness		1.906 mmPb		1.992 mmPb	

Table 2. Measurement of thickness of lead shield of 9 MeV electron beam at maximum dose depth and tissue dose depth.

9 MeV	Max Dose Depth(d_{max}) 20 mm		Tissue Dose Depth Hd 10 mm		
	Shield thickness (mmPb)	Measurement (nC/100 MU)	Shielding rate(%)	Measurement (nC/100 MU)	Shielding rate(%)
Open		22.92	0.00	20.15	0.00
1		11.54	49.65	11.96	40.65
2		2.60	88.66	5.29	73.77
3		0.65	97.16	1.83	90.91
4		0.44	98.08	0.71	96.48
95% shielding thickness		2.746 mmPb		3.743 mmPb	

Table 3은 12 MeV 전자선의 납 차폐체의 두께를 측정한 결과이다. 12 MeV 전자선의 최대선량 깊이는 29 mm로 100 MU 당 개방 조사야에서 측정된 전하량은 23.22 nC, 최대선량 깊이에서 납 차폐체의 두께는 3.718 mmPb 이었으며, 조직선량 기준 깊이 10 mm는 100 MU 당 개방 조사야에서 측정된

전하량은 21.25 nC, 납 차폐체의 두께는 6.093 mmPb로 측정되었다. 두 지점에서의 차폐체 두께는 차이는 2.375 mm로 조직 선량 기준 깊이로 측정했을 때 차폐체의 두께가 더 증가하였다.

Table 3. Measurement of thickness of lead shield of 12 MeV electron beam at maximum dose depth and tissue dose depth.

12 MeV	Max Dose Depth(d _{max}) 29 mm		Tissue Dose Depth Hd 10 mm	
Shield thickness (mmPb)	Measuremen t (nC/100 MU)	Shielding rate(%)	Measuremen t (nC/100 MU)	Shielding rate(%)
Open	23.22	0.00	21.25	0.00
1	16.24	30.06	16.24	23.58
2	5.06	78.23	10.07	52.64
3	1.85	92.03	5.78	72.82
4	0.89	96.17	2.74	87.13
5	0.71	96.96	1.43	93.25
6	0.64	97.24	1.07	94.96
7	0.97	95.82	0.97	95.44
95% shielding thickness	3.718 mmPb		6.093 mmPb	

Table 4는 16 MeV 전자선의 납 차폐체의 두께를 측정된 결과이다. 16 MeV 전자선의 최대선량 깊이는 30.5 mm로 100 MU 당 기준 개방 조사야에서 측정된 전하량은 23.71 nC, 최대선량 깊이에서 납 차폐체의 두께는 7.300 mmPb 이었으며, 조직선량 기준깊이 10 mm는 100 MU 당 개방 조사야에서 측정된 전하량은 22.21 nC, 납 차폐체의 두께는 15.270 mmPb로 측정되었다. 두 지점에서의 차폐체 두께는 차이는 7.97 mm로 조직 선량 기준 깊이에서 더 두껍게 측정되었다.

Table 5는 20 MeV 전자선의 납 차폐체의 두께를 측정된 결과이다. 20 MeV 전자선의 최대선량 깊이는 13.5 mm로 100 MU 당 개방 조사야에서 측정된 전하량은 23.61 nC, 최대선량 깊이에서 납 차폐체의 두께는 16.825 mmPb 이었으며, 조직선량 기준 깊이 10 mm는 100 MU 당 개방 조사야에서 측정된 전하량은 21.96 nC, 납 차폐체의 두께는 25.090 mmPb로 측정되었다. 두 지점에서의 차폐체 두께는 차이는 8.265 mm로 16 MeV 전자선과 마찬가지로

조직선량 기준 깊이에서 측정했을 때 납 차폐체의 두께가 더 증가하는 것을 알 수 있었다.

Table 4. Measurement of thickness of lead shield of 16 MeV electron beam at maximum dose depth and tissue dose depth.

16 MeV	Max Dose Depth(d _{max}) 30.5 mm		Tissue Dose Depth Hd 10 mm	
Shield thickness (mmPb)	Measuremen t (nC/100 MU)	Shielding rate(%)	Measuremen t (nC/100 MU)	Shielding rate(%)
Open	23.71	0.00	22.21	0.00
1	20.01	15.61	19.88	10.49
2	8.76	63.05	14.16	36.27
∴	∴	∴	∴	∴
7	1.19	94.98	1.90	91.44
8	1.18	95.04	1.68	92.45
∴	-	-	∴	∴
15	-	-	1.13	94.92
95% shielding thickness	7.300 mmPb		15.270 mmPb	

Table 5. Measurement of thickness of lead shield of 20 MeV electron beam at maximum dose depth and tissue dose depth.

20 MeV	Max Dose Depth(d _{max}) 13.5 mm		Tissue Dose Depth Hd 10 mm	
Shield thickness (mmPb)	Measuremen t (nC/100 MU)	Shielding rate(%)	Measuremen t (nC/100 MU)	Shielding rate(%)
Open	23.61	0.00	21.96	0.00
1	23.03	12.46	21.18	3.57
2	13.84	41.38	16.89	23.09
∴	∴	∴	∴	∴
16	1.23	94.79	1.70	92.28
17	1.17	95.04	1.66	92.46
∴	-	-	∴	∴
25	-	-	0.47	94.98
26	-	-	0.31	95.24
95% shielding thickness	16.825 mmPb		25.090 mmPb	

고에너지 전자선 치료는 20 mm 두께의 저용융점 납합금(Lipowitz metal, cerrobend)을 이용하여 정상 조직을 정형화된 틀을 이용하여 차폐를 실시하고 있다. Table 6과 같이 최대선량 깊이(d_{max})에서 전자

선 차폐율은 개방 조사야(Open field)를 기준으로 6 MeV 전자선은 99.49%, 9 MeV 전자선은 98.91%, 12 MeV 전자선은 97.95%, 16 MeV 전자선은 96.01%이었다. 16 MeV 전자선까지는 1차선의 95% 이상 차폐가 가능하나 20 MeV 전자선의 경우 91.38%로 충분한 차폐가 이루어지지 못하였다.

Table. 6 Measurement of shielding rate of lipowitz metal used in clinical practice.

		open field	Lipowitz Shielding
6MV	MU 100	22.69	0.12
	Shielding rate	0	99.49
9MV	MU 100	22.92	0.25
	Shielding rate	0	98.91
12MV	MU 100	23.22	0.48
	Shielding rate	0	97.95
16MV	MU 100	23.71	0.95
	Shielding rate	0	96.01
20MV	MU 100	23.61	2.04
	Shielding rate	0	91.38

IV. DISCUSSION

전자선을 이용한 방사선 치료의 경우 심부의 정상조직 차폐와 더불어 종양 깊이보다 얇은 정상조직에 대한 차폐가 중요한 고려 사항이다. 이론적으로 차폐에 필요한 최소한의 납 두께는 전자선 에너지의 $\frac{MeV}{2} mmPb$ 로 대략적인 법칙이 만들어진다고 하고 있다. 또한 안전한 차폐를 위해 1 mm의 납을 추가하며, 저용용점 납합금을 사용할 경우 순수한 납의 20%를 보상할 것을 권고하고 있다^[11]. 연구 결과를 토대로 Fig. 3은 미국의학물리학회 Radiation Therapy Committee Task Group No. 25 보고서의 대략적 규칙에 따른 차폐체의 두께와 최대선량 깊이와 조직 선량 기준 깊이에서의 납 차폐체의 두께를 비교하였다. 본 실험에서 6 ~ 12 MeV 전자선 치료는 충분한 차폐가 이루어지고 있음을 확인 하였으며, 16 MeV 전자선의 경우 최대선량 깊이에서 8 mmPb이내로 95% 차폐가 가능하지만 조직선량 기준 깊이 10 mm는 15.270 mmPb로 대략적인 규칙의 1.9 배의 차폐체 두께가 추가적으로 필요하다. 20 MeV는 최대선량 깊이에서 16.825 mmPb, 조직선량 기준 깊이에서 25.090 mmPb로 대

략적 규칙의 1.6 ~ 2.5 배의 납 차폐체가 필요한 것을 확인할 수 있었다. J. B. Wojcicka 등의 연구에서도 18 MeV이상의 전자선의 경우 선형가속장치의 헤드와 차폐 블록의 높은 원자번호로 인한 제동방사선 발생으로 표준 두께의 블록으로는 투과율 5% 수준으로 선량을 감소할 수 없으며, 투과율 5% 이하로 낮추기 위해서는 추가적인 차폐가 필요하다고 하여 본 연구에 같은 결과를 얻을 수 있었다^[7,13]. 다만 이번 연구는 기준 조사인 10 × 10 cm² 전자선 콘만을 이용하여 측정하였으나 추후 조사야 변화에 따른 차폐율의 변화를 측정하면 임상 적용에 명확한 차폐체 두께에 대한 기준을 세울 수 있을 것으로 여겨진다.

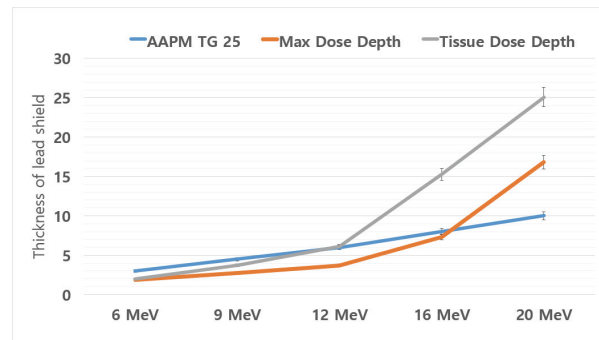


Fig. 3. Thickness of the lead shield compared to the rough rule of thumb.

V. CONCLUSION

전자선 치료는 인체 내에서 쿨롱력에 의한 다중산란으로 피부보호 효과가 거의 나타나지 않는다. 전자선 치료는 고에너지 X선과 달리 표면선량이 증대되어 심부의 정상조직보다 피부의 얇은 조직의 차폐가 더욱 중요시 되고 있다. 본 연구는 각각의 전자선 에너지별 납 차폐체의 두께를 정량적으로 측정하였으며, 차폐율에 대한 기준 깊이를 최대선량 깊이와 더불어 조직선량 기준 깊이인 피부 표면으로부터 10 mm 깊이에서 차폐율을 측정하였다. 6 ~ 12 MeV 범위의 전자선 치료는 기존의 저용용점 납합금에 의한 차폐 방법과 대략적인 규칙에 따른 차폐로 충분한 정상조직의 차폐가 가능한 것을 확인할 수 있었다. 16 MeV 전자선의 경우 임상 적용되고 있는 저용용점 납합금으로 96.01%

차폐가 가능하나 조직선량 기준 깊이에서는 차폐체의 두께가 15.270 mmPb로 대략적 규칙에 따른 두께보다 7.27 mmPb 이상의 추가 차폐가 필요하였다. 20 MeV 전자선의 경우 저용융점 납합금을 이용한 차폐율이 91.38%로 나타났으며, 최대선량 깊이나, 조직선량 기준점 깊이에서도 충분한 차폐를 위해 25 mmPb 이상의 차폐가 필요할 것 이다. 본 연구를 토대로 전자선을 이용한 방사선치료 시 차폐체의 두께를 정량적으로 측정하여 임상에 적용해야 환자의 피폭을 최소화 할 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 2021년도 극동대학교 교내연구비 지원에 의하여 수행되었다(FEU2021R28).

Reference

- [1] K. R. Hogstrom, P. R. Almond, "Review of electron beam therapy physics", *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 51, pp. 455-489, 2006. <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/51/13/R25>
- [2] F. M. Khan, P. D. Higgins, "Calculation of depth dose and Per monitor unit for irregularly shaped electron fields", *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 44, No. 6, pp.77-80, 1999. <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/44/6/401>
- [3] F. M. Khan, K. P. Doppke, K. R. Hogstrom, G. J. Kutcher, R. Nath, S. C. Prasad, J. A. Purdy, M. Rozenfeld, B. L. Werner, "Clinical electron-beam dosimetry: Report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 25", *Medical Physics*, Vol. 18, pp.73-109, 1991. <http://dx.doi.org/10.1118/1.596695>
- [4] J. E. Cygler, G. M. Daskalov, G. H. Chan, G. X. Ding, "Evaluation of the first commercial Monte Carlo dose calculation engine for electron beam treatment planning", *Medical Physics*, Vol. 31, No. 1 pp.142-153, 2004. <https://doi.org/10.1118/1.1633105>
- [5] B. J. Gerbi, J. S. Antolak, F. C. Deibel, G. S. Followill, M. G. Herman, P. D. Higgins, M. S. Hug, D. N. Mihailidis, E. D. Yorke, K. R. Hogstrom, F. M. Khan "Recommendations for clinical electron beam dosimetry: supplement to the recommendations of Task Group 25", *Medical Physics*, Vol. 36, No. 7, pp. 3239-3279, 2009. <https://doi.org/10.1118/1.3125820>
- [6] F. M. Khan, *The Physics of Radiation Therapy*, 3rd ed. Lippinkott Williams and Wilkins, Philadelphia, 2003
- [7] J. B. Wojcicka, R. Yankelevich, B. L. Werner, D. E. Lasher, "Technical Note: On Cerrobend shielding for 18-22 MeV electron beams", *Medical Physics*, Vol. 35, No. 10, pp. 4625-4629, 2008. <http://dx.doi.org/10.1118/1.2977801>
- [8] J. C. Giarrotano, R. J. Duerkes, P. R. Almond, "Lead shielding thickness for dose reduction of 7- to 28 MeV electrons", *Medical Physics*, Vol. 2, No. 6, pp. 336-337. 1975. <http://dx.doi.org/10.1118/1.594205>
- [9] J. A. Purdy, M. C. Choi, A. Feldman, "Lipowitz metal shielding thickness for dose reduction of 6-20 MeV electrons", *Medical Physics*, Vol. 7, No. 3, pp. 251-253. 1980. <http://dx.doi.org/10.1118/1.594680>
- [10] R. J. Stewart, T. J. Dredge, A. Langenegger, C. Wongse, C. Karolis, L. D. Oliver, "Lead Shielding for Electron Beams from 6-18 MeV", *Australasian Radiology*, Vol. 27, No. 1, pp. 73-78. 1983. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1440-1673.1983.tb02346.x>
- [11] B. B. Sorcini, S. Hyödynmaa, A. Brahme, "Quantification of mean energy and photon contamination for accurate dosimetry of high-energy electron beams", *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 42, No. 10, pp. 1849-1873, 1997. <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/42/10/001>
- [12] ICRP Publication 103, "The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", ICRP, 2007
- [13] T. C. Zhu, I. J. Das, B. E. Bjärngard, "Characteristics of bremsstrahlung in electron beams", *Medical Physics*, Vol. 28, No. 7, pp. 135-1358, 2001. <https://doi.org/10.1118/1.1382608>

방사선 치료용 전자선의 에너지별 납(Pb) 차폐체 두께 측정

김가중*

극동대학교 방사선학과

요 약

본 연구는 임상에서 이용되는 전자선 빔의 에너지별 차폐를 위한 최소한의 납 두께를 측정하여 정량적으로 평가하고 기준을 설정하고자 한다. 전자선 에너지별 납 차폐체의 두께는 최대선량 깊이(d_{max})와 조직선량의 기준 깊이인 표면 10 mm 깊이에서 개방 조사야를 기준으로 1차선속의 95%로 감소시킬 수 있는 납 두께를 측정하였다. 측정 결과 6 MeV 전자선의 납 차폐체 두께는 최대선량 깊이에서 1.906 mmPb, 조직선량 기준깊이(10 mm)에서 1.992 mmPb로 나타났으며, 9 MeV 전자선은 2.746 mmPb, 3.743 mmPb, 12 MeV 전자선은 3.718 mmPb, 6.093 mmPb, 16 MeV 전자선은 7.300 mmPb, 15.270 mmPb, 20 MeV 전자선은 16.825 mmPb, 25.090 mmPb로 측정 깊이를 조직선량 기준깊이로 할 때 더 두꺼운 납 차폐체가 필요하였다. 또한 16 MeV 이상의 전자선은 이론식보다 더 두꺼운 납 차폐체가 요구된다.

중심단어: 전자선빔, 납차폐, 저용융점 납합금, 최대선량 깊이, 조직선량 깊이

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(단독저자)	김가중	극동대학교 방사선학과	부교수