

10MV 이상 고에너지 사용시 wedge filter의 방사화가 작업환경에 미치는 영향평가

한림대학교 성심병원 방사선종양학과

이화중, 김대영, 김원택

- Abstract -

Evaluation on the radiation exposure from activated wedge filter

Dept. of Radiation Oncology, Hallym University

HwaJung Lee, WonTaek Kim, KangHyeok Lee, DaeYoung Kim

In the process of photon treatments, linear accelerators with energies higher than 10 MV produce neutrons through the (γ , n) interactions with the composite materials of the linac head and these materials further produce the induced radiations. We investigate the possible risks from these induced radiations especially in the wedge filters to the radiation workers. Wedge filters are used to modify the isodose profiles in the radiation treatment using the linear accelerator and always be handled by the radiation workers.

For the background radiation, we measured the radiation in both the waiting room and the outside of the building for two hospitals, S and H. The results of S hospital were 0.11 $\mu\text{Sv/hr}$ and 0.10 $\mu\text{Sv/hr}$ for waiting room and outside respectively, and in the case of H hospital, they were 0.12 $\mu\text{Sv/hr}$ and 0.11 $\mu\text{Sv/hr}$.

Using a survey meter, we measured the radiation from wedge filters inserted in 10 MV and 15 MV Siemens linear accelerators. The time series measurements were done in ~ 1 minutes after exposure of 5 Gy of monitor units for the field size of $25 \times 25 \text{cm}^2$. The starting value of 10 MV machine was about 3.26 $\mu\text{Sv/hr}$, which was three times higher than that of 10 MV. The measured radiation was from ^{28}Al and ^{53}Fe with a half life of 3.5 min.

If the treatment patients are 20~50 per day and the number of process of wedge filter change per patient is one or two, the annual dose equivalent is 0.08~0.4 mSv for 10 MV, and 0.27~1.36 mSv for 15 MV, which are in the range of dose equivalent limits of radiation workers.

I. 서 론

방사선 치료는 인체에 방사선을 조사하여 종양조직에는 처방된 선량을 정확하게 투입하면서, 정상조직에는 최소한의 선량이 투여되도록, 선원의 종류와 에너지, 그리고 조사위치와 방향 및 시간, 등을 결정하여 최적화된 체내선량분포(conformal dose distribution)를 얻어 종양조직을 괴사시키고 정상세포의 부작용은 최소화 시키는데 목적이 있다. 방사선 치료는 방사성 동위원소 물질을 인체내부에 직접 주입하여 치료하는 내부 방사선 치료와 선형가속기 등과 같은 방사선 발생장치를 이용하여 인체 외부에서 방사선을 조사하는 외부 방사선 치료로 나눌 수 있다. 특히, 외부 방사선 치료는 전자선과 X-선을 주로 이용한다.

방사선 치료 시 가속기의 Beam-on 시간 동안은 환자를 치료하고, Beam-off 후에는 치료실로 들어가 다음 환자의 치료를 준비하게 된다. 전자선 및 X-선의 경우 Beam-off 시간동안 방사선이 발생되지 않아 방사선과 무관한 환경에서 작업하게 된다. 그러나 가속기의 사용 에너지가 10 MV 이상일 경우 X-선에 의해 광중성자(Photoneutron)가 발생된다.

1986년 미국 의학물리 학회(American Association of Physicist in Medicine, AAPM)의 보고서 19번에서는 고 에너지 X-선 주변에서 중성자 측정에 대한 표준안을 제시하고 있으며¹, 1984년 미국의 방사선방호 및 측정위원회(National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP)의 보고서 79에서도 의료용 X-선 주변의 중성자에 대해 언급하고 있다².

10 MV 이상의 고에너지 X-선에 의해 발생한 중성자가 주변 물질을 방사화시켜 beam-off 기간에도 방사화된 물질의 유도 방사선에 의해 작업자의 피폭을 유발할 수 있다. 특히 등선량 분포를 만들어 체내선량분포를 효과적으로 향상시키며 작업자가 직접 손으로 접촉하는 썸기필터(wedge filter)의 방사화를 알아

보기 위하여 wedge filter를 장착한 후 10 MV, 15 MV Siemens 가속기에서 5 Gy 조사 후 wedge filter에서 방사선량을 측정하여 방사선 발생 메커니즘을 확인하고, 방사선량을 평가 하였다.

II. 이론적 배경

1. 광중성자(photoneutron)의 발생

가속기에서 발생된 전자는 target과 반응하여 광자를 발생시키고 이 광자(photon)가 가속기의 구성물질들과 반응하여 ${}^A X(\gamma, n) {}^{A-1} X$ 의 반응과정을 통해 중성자가 발생하게 된다. 표2-1³은 Italy 연구그룹의 계산 결과로서 Varian 2300 C/D, 18 MeV X-선 Mode에서 3가지 경우에 대하여 가속기 구성물질에서 발생하는 중성자량을 계산한 결과, 중성자는 target(15%), Flattering filter(9%), Primary collimator(44.3%), jaws와 MLC(31%)로 발생하는 것으로 계산되었다. Table 2-2에는 몇가지 물질에 대한 원자번호 및 (v,n)반응의 문턱에너지(threshold energy)를 나타내고 있다. Al 및 Fe의 경우 대략 13 MeV 이상의 광자가 필요하고 W 및 Pb의 경우 6.2~6.74 MeV 이상의 광자가 필요하게 된다. 일반적인 광자 치료용 선형가속기가 4, 6 MeV의 경우 중성자가 전혀 발생하지 않으며 10, 15, 18 MeV가 사용될 경우 중성자가 발생하게 된다.

대만 칭화 대학에서 선형가속기 주변에서 BF₃ 계측기를 이용해 중성자를 측정한 결과를 Table 2-3에 요약했는데⁷, Varian 1800, 10 MV의 경우 0.06×10^{12} n/Gy-X에서부터 GE의 Saturne 43, 25 MV의 경우 2.4×10^{12} n/Gy-X로 측정되었다.

본 실험에서 사용한 10 MV의 경우 대략 0.06×10^{12} n/Gy-X와 15 MV의 경우 $0.2 \sim 0.76 \times 10^{12}$ n/Gy-X의 중성자가 발생됨을 알 수 있다.

Table 2-1. Neutron production in photon collisions with various components of the accelerator head, calculated with MCNP4B-GN.

	Configuration 1	Configuration 2	Configuration 3
Target	15.2%	15.2%	15.2%
Flattening filter	8.9%	8.9%	8.9%
Primary collimator	44.3%	44.3%	44.3%
Jaws	31.0%	16.7%	30.7%
MLC	0.3%	14.6%	0.6%
Minor components	0.3%	0.3%	0.3%

Table 2-2. Minimum threshold energy for the (γ , n) reaction in metals*

Element	Atomic weight	Abundance(%)	Threshold Energy(MeV)
Al	27	100	13.1
Fe	54	5.8	13.4
Cu	65	30.8	9.9
W	183	14.3	6.19
Pb	207	22.1	6.74

*Adopted from NCRP 79.

Table 2-3. Photoneutron source strength of various medical linear accelerators.

Manufacturer	Type	Stated MeV*	Q (n per Gy-X)
Siemens	Primus	15	0.20×10^{12}
Siemens	KD	20	0.92×10^{12}
Varian	1800	18	1.22×10^{12}
Varian	1800	15	0.76×10^{12}
Varian	1800	10	0.06×10^{12}
Philips	SL-25	22	2.37×10^{12}
Philips	SL-25	17	0.69×10^{12}
GE	Saturne 43	25	2.40×10^{12}
GE	Saturne 43	18	1.50×10^{12}
GE	Saturne 41	15	0.47×10^{12}
GE	Saturne 41	12	0.24×10^{12}

*Adopted from Ref. 7

2. 방사화(Activation)

방사화 과정은 중성자와 핵과의 반응에 의해 변환된 핵이 방사능을 띄게 되어 beam-off 후에도 가속기 주변에서 방사선이 발생하는 과정을 말한다.

Table 2-4에는 Al, Cu, W등 가속기 구성물질의 방사화 과정, 붕괴모드, 반감기 및 붕괴시 수반되어 방출되는 광자의 에너지를 나타내었다⁸. wedge holder로 사용되는 Al의 경우 반감기가 2.3분이고 β⁻ 붕괴를 하는 ²⁸Al이 생성된다.

L. Ahlgren은 18 MV의 Varian Clinac 1800에서 2 Gy를 조사하고 isocenter에서 HPGe를 사용해 광스펙트럼을 측정하였다⁹. 가속기 구성물질의 여러 부분이 방사화되었는데 2.3분으로 반감기가 가장 짧은 ²⁸Al로부터 312일의 ⁵⁴Mn까지 다양한 방사화 물질이 확인되었다(Table 2-5). Table 2-6은 가속기 head와 wedge 등 악세서리에서 측정된 선량을 나타내었는데 wedge filter의 방사능이 210 μGy/hr로 가속기 head의 방사능 8.5 μGy/hr보다 약 25배 높은 것으로 나타났다.

Table 2-4. Decay modes, half-lives and the energy of emitted photons which have been used for identification of radionuclides

Reaction	Decay mode	T _{1/2}	E _{photon} (keV)
²⁷ Al(n, γ) ²⁸ Al	β ⁻	2.3 min	1780
⁶³ Cu(ν, n) ⁶² Cu	β ⁺	9.7 min	511
⁵⁵ Mn(n, γ) ⁵⁶ Mn	β ⁻	2.6 h	847
⁶³ Cu(n, γ) ⁶⁴ Cu	β ⁺ /β ⁻	12.7 h	1346
⁶⁵ Cu(ν, n) ⁶⁴ Cu			
¹⁸⁶ W(n, γ) ¹⁸⁷ W	β ⁻	23.9 h	479, 686
⁵⁸ Ni(ν, n) ⁵⁷ Ni	β ⁻	36.0 h	1378, 1920

Table 2-5. Activation products found in the accelerator accessories

Radionuclide	Half life	Identified by (keV)	
²⁸ Al	2.2 min	1779	Steel wedge filter
⁵³ Fe	8.5 min	378	
⁵⁶ Mn	2.6 h	847, 1811	
²⁷ Mg	9.5 min	844, 1014	Lead wedge filter 60°
²⁸ Al	2.2 min	1779	
¹²⁰ Sb	16 min	703, 989, 1172	
	5.8 d	1023	
¹²² Sb	2.7 d	564, 693, 1257	
¹²⁴ Sb	60.2 d	603, 646, 723, 1691	
¹⁵ O	2 min	511	Transparent lead-block holder
³⁴ Cl ^m	32 min	146, 1176	
³⁸ Cl	37 min	1642	

Table 2-6. Absorbed dose rate at the surface of the accelerator head and accessories 2 Gy at normal treatment distance.

Position	Dose rate (μGyh^{-1})		Dominating half life (min)
	one patient	ten patient	
Accelerator head	8.5	10	10 and 2.2
Lead holder	80	270	32
Lead wedge	130	-	16

III. 재료 및 실험 방법

1. 실험 재료

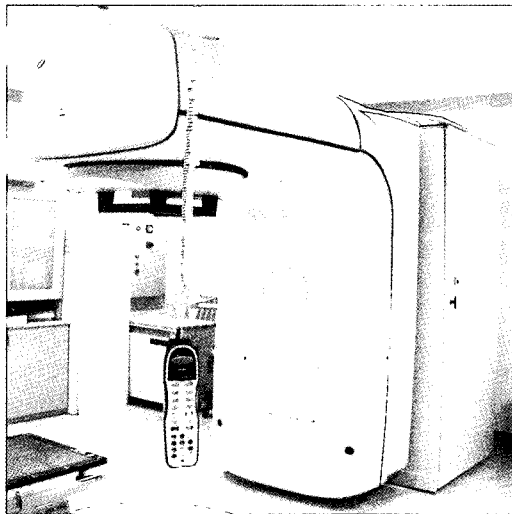
본 연구에서 사용한 방사선 치료용 선형가속기를 그림 3-1에 나타내었는데 a)의 경우 Siemens사의 10 MV Primus, b)의 경우 Siemens사의 15 MV Primus를 사용하였다.

L. Ahlgren이 측정⁹한 결과⁹서 볼 수 있듯이 wedge filter에서 측정되는 선량이 전체 선량의 대부분을 차지하기 때문에 본 연구에서 방사화 물질 및 선량측정에 Wedge filter가 사용되었다. Siemens사의 Wedge

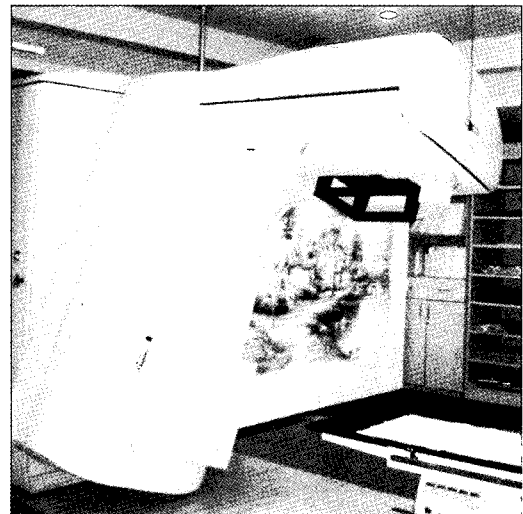
는 Fe, Wedge holder는 Al로 구성되어 있으며, Angle은 그림 3-2에서 볼 수 있듯이 15°, 30°, 45°, 60°가 사용되었다.

선량측정(그림 3-3)은 GM-측정기인 RDS-110 Model을 이용하였다. 본 실험에 사용된 GM-측정기는 50 keV~1.25 MeV의 X-선이 측정 가능하며, 0.05 $\mu\text{Sv/hr}$ ~100 mSv/hr까지 측정이 가능하다.

방사선 스펙트럼 측정에는 3"×3"인 NaI 계측기를 사용했으며, Preamp, Amp, McA의 통합 모듈인 Ortec사의 digiBASE를 사용 하였다. 계측기에 800 V를 걸어 측정하였고, 측정 Software는 Ortec사의 Maestro V 6.01을 사용하였다(그림 3-4).



(a)



(b)

Fig 3-1. a) Primus 10 MV linac.
b) Primus 15 MV linac produced by Siemens Medical Company.

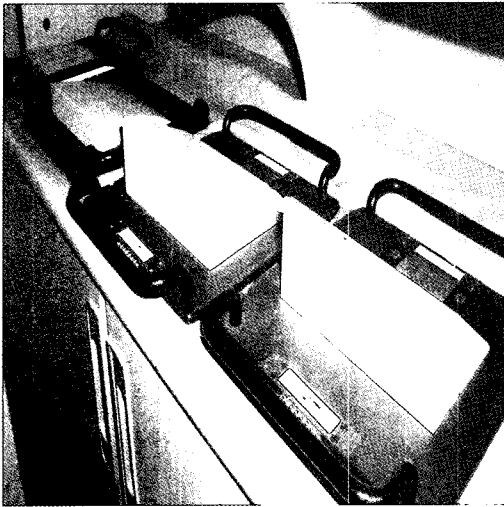


Fig 3-2. Wedge filter and tray manufactured by Siemens Medical Company 15°, 30°, 45°, 60° angle wedge.

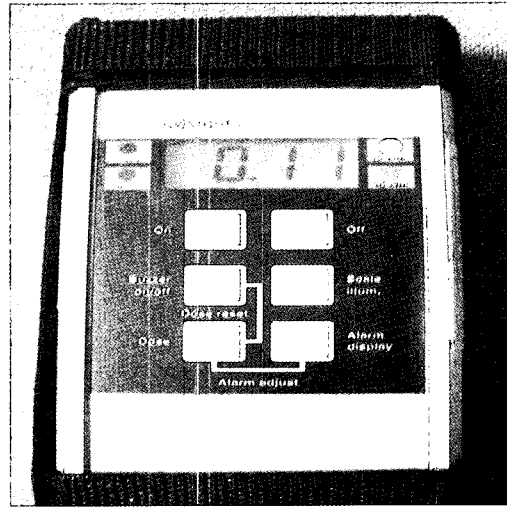


Fig 3-3. GM counter used to measure the dose rate of activated wedge filter and tray.

2. 실험 방법

GM survey meter를 사용하여 환자 대기실과 건물 밖, 두 지점의 자연 방사선량을 측정하여 background

사화를 진행시키기 위해 wedge를 장착한 상태에서 $0 \times 0 \text{ cm}^2$, $5 \times 5 \text{ cm}^2$, $25 \times 25 \text{ cm}^2$ Field size에 대하여 10 MV X선, 15 MV X선을 5 Gy(500 MU)를 조사하였고, beam-off 직후 wedge filter를 분리시켜 그림 3-5와 같이 GM survey meter를 이용하여 wedge

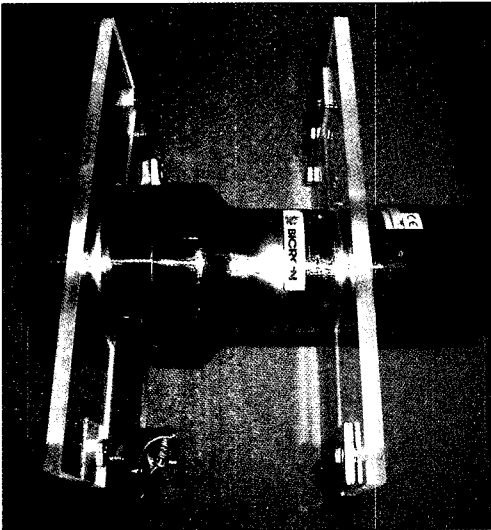


Fig 3-4. NaI detector and digiBASE

값으로 사용하였다. 광중성자를 발생시키고, 또한 방

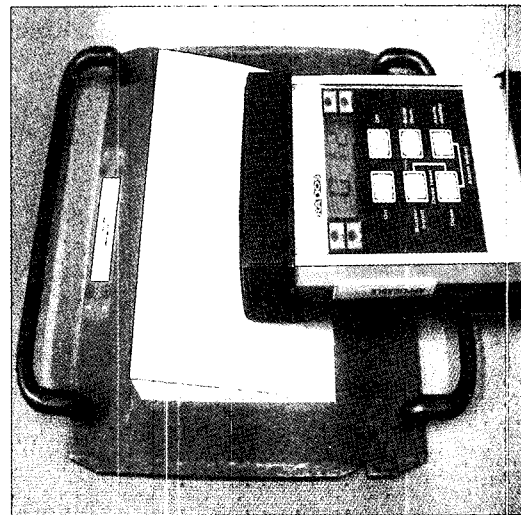


Fig 3-5. Measuring the dose rate of activated wedge filter in each 30 seconds.

filter 중심부분에서 30초 단위로 방사선량을 측정하였다. 또한 그림 3-6과 같이 Wedge filter에서 발생하는 방사선 스펙트럼을 측정하기 위해 X-선 조사 후 GM 측정과 동일 조건에서 스펙트럼을 5분간 측정 하였다.

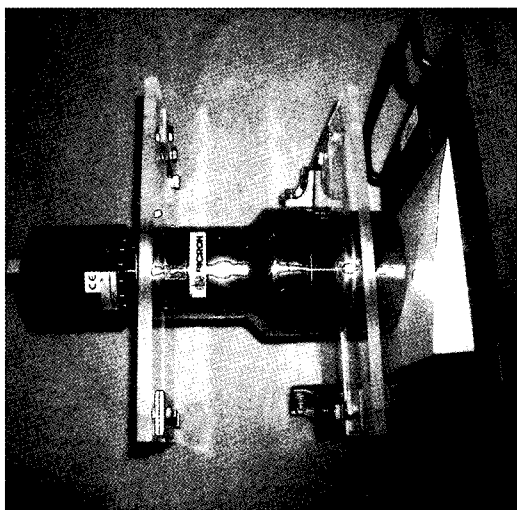


Fig 3-6. Measure spectrum emitted in the wedge filter 5 Gy irradiation using 3"×3" NaI detector.

IV. 결과 및 고찰

1. Control 선량 측정 결과

자연방사선량을 측정하기 위해 환자대기실과 건물 밖 임의의 지역에서 방사선량을 측정하였다. 측정 결과 S병원은 환자대기실 0.11 μSv/hr, 건물 밖은 0.10 μSv/hr가 측정되었고, H병원의 환자대기실은 0.12 μSv/hr, 건물 밖은 0.11 μSv/hr로 측정되었다 <Table 4-1> .

2. 빼기 필터의 선량 측정 결과

Primus 10 MV의 경우 H 병원에서 측정을 수행했으며, 0 × 0 cm², 5 × 5 cm², 25 × 25 cm² Field size에 대하여 500 MU 조사 후 방사선량을 측정하여 그림 4-1에 그 결과를 나타내었다. 측정결과 Field size의 영향은 거의 존재하지 않았으며, beam off 후 30초 뒤 측정시작 시점에서 대략 1 μSv/hr를 나타냈으며, 반감기는 약 3~4분인 것으로 측정되었다.

Primus 15 MV의 경우 S 병원에서 측정을 수행하였으며, 25 × 25 cm² field size에 대하여 500 MU 조사 뒤 방사선량을 측정하여 그림 4-2에 그 결과를 나타내었다. beam off 후 30초 뒤 측정시작 시점에서 대략 3.26 μSv/hr를 나타냈으며 10 MV X선 보다 대략 3.3 배 큰 값을 나타내었다.

J.P. Lin의 측정결과^[7] 15 MV와 10 MV 조사 후 중성자의 평균에너지가 0.55 MeV, 0.50 MeV으로 거의 같기 때문에 중성자 에너지에 의한 영향이 없는 것으로 간주할 수 있으므로 15 MV 가속기에서 발생된 중성자의 양은 Primus 10 MV 가속기에서 발생되는 양의 대략 3.3 배 많은 것을 알 수 있다. Varian 10, 15 MV의 사용 시 발생하는 중성자량은 0.76×10^{12} n/Gy-X, 0.06×10^{12} n/Gy-X으로 대략 13배 차이가 난다. Siemens 15 MV와 Varian 15 MV의 경우 0.2×10^{12} n/Gy-X와 0.76×10^{12} n/Gy-X로 대략 4배 차이가 난다. 간접비교로 Siemens 10 MV의 경우 중성자 발생량은 0.015×10^{12} n/Gy-X로 약산 할 수 있으며 Siemens 15 MV는 이 값의 13배 정도 높은 것으로 약산된다.

Siemens 10, 15 MV 두 경우 모두 반감기는 3.5분으로 측정된 방사화 물질로 반감기가 2.3분인 ²⁸Al과

Table 4-1. Background dose rates of inside and outside of hospital.

	Inside of Hospital	Outside of hospital
10 MV Primus	0.12 μSv/hr	0.11 μSv/hr
15 MV Primus	0.11 μSv/hr	0.10 μSv/hr

반감기 8.5분인 ^{63}Fe 로 구성되어 있음을 알 수 있으며, ^{28}Al 에 의한 기여분이 53%임을 알 수 있다. 또한, 그림 4-3에서 볼 수 있듯이 발생하는 광자를 ^{28}Al 의 β^- 붕괴 후 발생하는 1.780 MeV의 광자와 ^{53}Fe 의 β^+ 붕괴 후 발생하는 0.378 MeV인 광자이다.

췌기필터의 선량측정 조건과 동일한 조건에서 NaI를 췌기필터에 접촉시켜 5분간 2회 스펙트럼을 측정하였다. 측정결과 그림 4-4와 같이 ^{28}Al 에서 방출되는 1779 KeV 에너지를 확인 할 수 있었으며, ^{23}Al 방사화로 인한 방사선임을 확인 할 수 있었다.

3. 스펙트럼 측정 결과

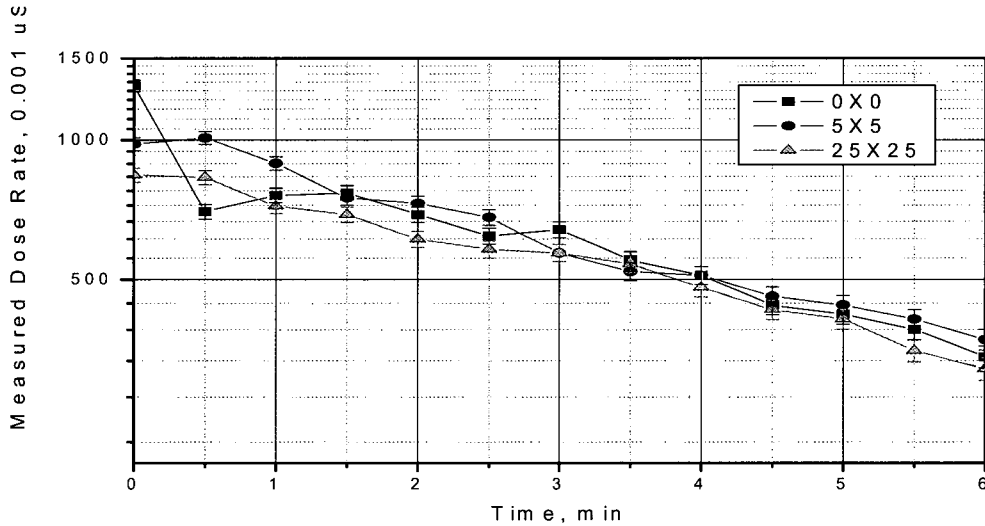


Fig 4-1. Measured dose rate using GM survey meter in activated wedge filters with various field size for 10 MV primus photon beam.

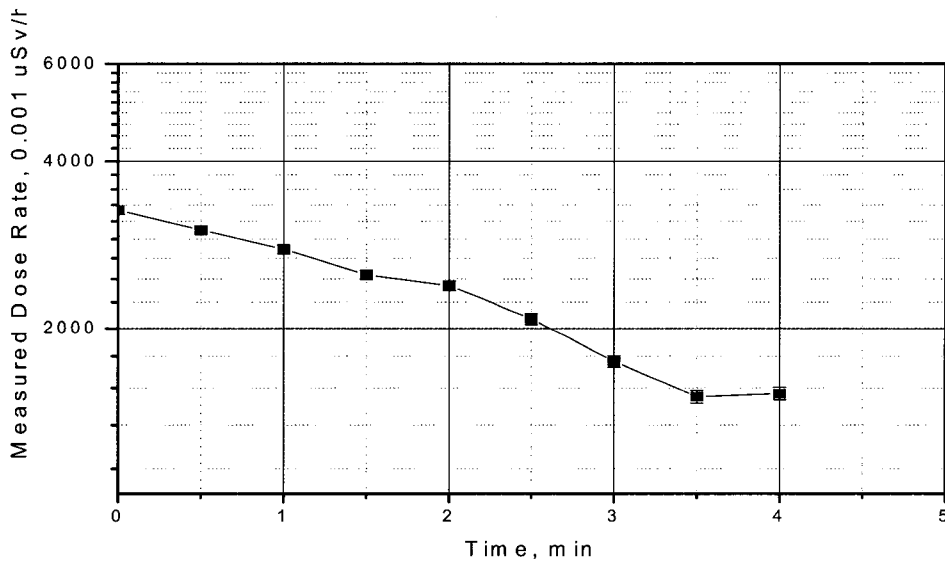


Fig 4-2. Measured dose rate using GM survey meter in activated wedge filters with various field size for 15 MV primus photon beam.

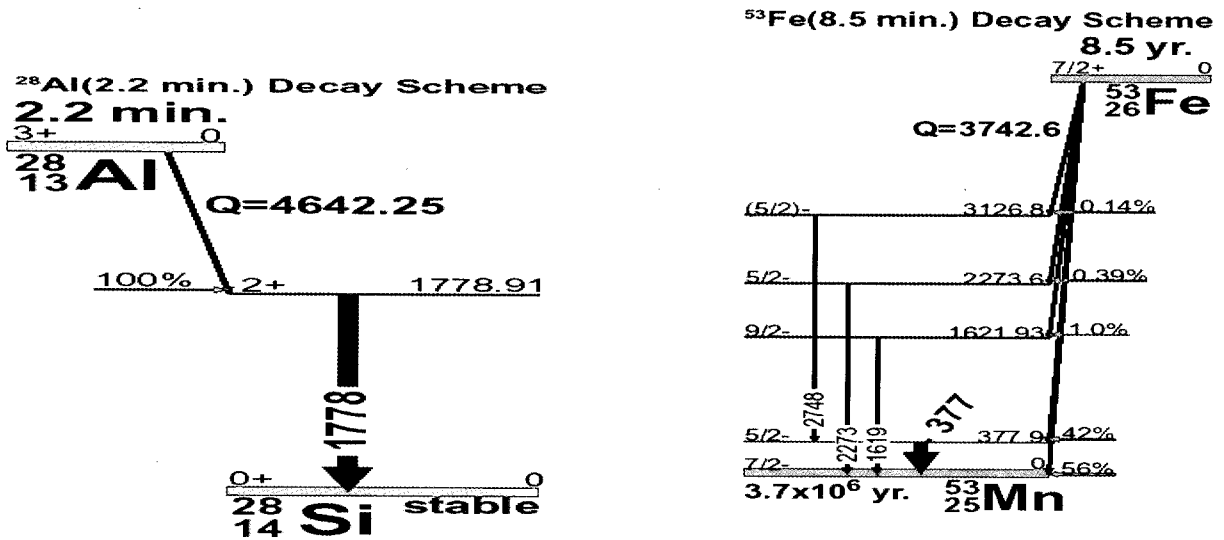


Fig 4-3. Schematic diagram of decay scheme of ²⁸Al and ⁵³Fe.

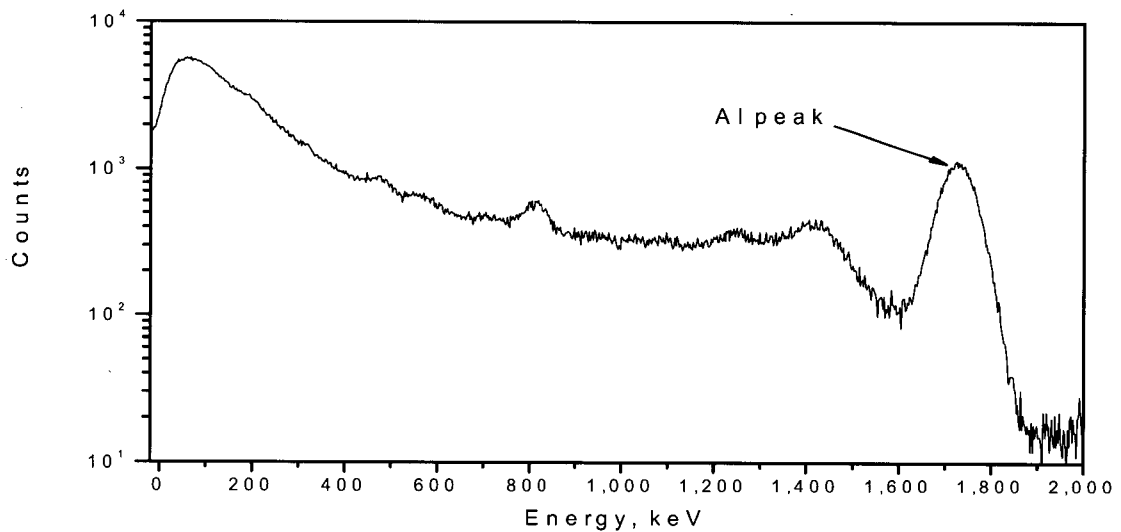


Fig 4-4. Measure spectrum emitted in the wedge filter 5 Gy irradiation using 3" x 3" NaI detector.

4. 방사선 작업종사자의 연간 방사선량 평가

방사선 치료실에서 10 MV 이상 고에너지 X선 치료 시 방사화된 물질 중 대부분은 Wedge filter에 의한 것이며, 본 연구를 통해 1~2분 뒤 wedge filter에

서 측정된 방사선량은 10 MV의 경우 1 μSv/hr이며, 15 MV는 3.26 μSv/hr로 평가되었다.

연간 250일을 근무하는 방사선 작업종사자가 1일 환자수를 20, 30, 40, 50명으로 가정하고 환자 1인당 평균 wedge filter 교체작업이 1, 2회로 가정했을 때

10 MV, 15 MV로 작업한 경우의 평가 결과를 Table 4-2에 나타내었다. 연간 방사선량은 10 MV의 경우

0.08~0.4 mSv, 15 MV의 경우는 0.27~1.36 mSv로 평가되었다.

Table 4-2. Estimated annual dose with varying of patients and exchange works when 10MV, 15MV Primus is used in treatments.

일일 환자수	환자당 작업	Primus 10 MV μSv/yr	Primus 15 MV μSv/yr
20	1	83.33	271.67
	2	166.67	543.33
30	1	125.00	407.50
	2	250.00	815.00
40	1	166.67	543.33
	2	333.33	1086.67
50	1	208.33	679.17
	2	416.67	1358.33

V. 결 론

참고문헌

10 MV 이상의 고에너지 광자선을 이용하여 환자를 치료할 때(v, n) 반응에 의해 생성된 중성자가 의료용 선형가속기의 wedge filter를 방사화시켜 발생될 때 유도방사선(Induced radiation)의 선량을 평가하고자 Wedge filter를 선형가속기에 장착하고 5 Gy 조사한 후 Wedge filter에서 방사선량을 측정하였다. Siemens사의 10 MV Primus와 15 MV Primus에서 측정된 결과 1 μSv/hr와 3.26 μSv/hr로 초기에 측정되었으며, 또한 방사선의 에너지를 측정하기 위해 스펙트럼을 측정하여 53 %의 ²⁸Al과 47 %의 ⁵³Fe에 의해 3.5분의 반감기를 가지고 방사능이 감소함을 확인 할 수 있었다. 일일 치료 환자가 20~50명이고, 환자 1인당 Wedge filter의 교체작업이 1~2회일 때 10 MV의 경우 연간선량이 0.08~0.4 mSv로 평가되었으며, 15 MV의 경우 0.27~1.36 mSv로 평가되어 작업종사자의 연간 허용선량인 20 mSv에 비해 안전한 것으로 평가되었다.

1. American Association of Physicists in Medicine, : Neutron measurements around high energy X-ray radiotherapy machine, AAPM No.19, New York, 1986
2. National Council on Radiation Protection and Measurement : Neutron contamination from medical electron accelerator. NCRP Report No.79, Washington, DC., 1984
3. Zanini A., Durisi E., Fasolo F., Ongaro C., Visca L., Nastasi U., Burn K. W., Scielzo G., Adler J. O., Annand J. R. M. and Rosner G.,: Monte Carlo simulation of the photoneutron field in linac radiotherapy treatments with different collimation systems, Phys. Med. Biol. 49(3), 571-582, 2004
4. McGinley P. H. and Landry J. C.: Neutron contamination of x-ray beams produced by the Varian Clinic 1800, Phys. Med. Biol. 34(6)

- 777-783, 1989
5. McGinley P. H.: Shielding Techniques for Radiation Oncology Facilities, Madison, Medical Physics Publishing, 2nd ed., 2002
 6. Metcalfe P., Kron T. and Hoban P.: The Physics of Radiotherapy X-rays from Linear Accelerators, Madison, Medical Physics Publishing, 1997
 7. Lin J. P., Chu T. C., Lin S. Y. and Liu M. T.: The Measurement of photoneutrons in the vicinity of a Siemens Primus linear accelerators
 8. Almen A., Ahlgren L. and Mattsson S.: Absorbed dose to technicians due to induced activity in linear accelerators for radiation therapy, Phys. Med. Biol. 36(6), 815-822, 1991.
 9. Ahlgren L. and Olsson L. E.: Induced activity in a high-energy linear accelerator, Phys. Med. Biol. 33(3), 351-354, 1988

- 국문요약 -

10MV 이상 고에너지 사용시 wedge filter의 방사화가 작업환경에 미치는 영향평가

한림대학교 성심병원

이화중, 김대영, 김원택

목 적 : 10MV 이상의 고 에너지를 사용할 경우 X선에 의해 광중성자(Photoneutron)가 발생되고 이 중성자는 주변 물질을 방사화(Activation)시켜 Beam-off기간에도 방사화된 물질의 유도 방사선(Induced radiation)에 의해 작업자의 피폭을 유발할 수 있다.

특히, 방사화된 물질중 방사선 치료시 작업자가 직접 손으로 접촉하는 wedge filter의 방사화를 알아보기 위해 10MV Siemens 가속기와 15MV Siemens 가속기에서 5Gy 조사 후 wedge filter에서 방사선량을 측정하여 방사선 발생 메커니즘을 확인하고, 선량측정을 통해 방사선 작업종사자의 작업환경에 미치는 영향을 평가하고자 한다.

대상 및 방법 : 본 연구에서 사용한 방사선 치료용 선형가속기는 Siemens사의 10MV Primus, Siemens사의 15MV Primus를 사용하였다. Siemens사의 Wedge filter를 사용하였으며, Wedge의 재질은 Fe, Wedge holder는 Al이다. 선량측정은 GM-측정기인 RDS-110 Model을 이용하였다. 본 실험에 사용된 GM-측정기는 50keV ~1.25MeV의 X-ray가 측정가능하며, 0.05 μ Sv/hr~100mSv/hr까지 측정이 가능하다.

GM survey meter를 사용하여 환자 대기실과 건물 밖, 두 지점의 자연 방사선량을 측정하여 background 값으로 사용하였다. 광중성자를 발생시키고, 또한 방사화를 진행시키기 위해 wedge를 장착한 상태에서 10MV X선, 15MV X선을 5Gy(500MU)를 조사하였고, beam-off직후 wedge filter를 가속기로부터 분리시켜 GM survey meter를 이용하여 wedge filter 중심부분에서 30초 단위로 방사선량을 측정하였다.

결 과 : Primus 10MV의 경우 H병원에서 측정을 수행했으며, 0 \times 0cm², 5 \times 5cm², 25 \times 25cm² Field size에 대하여 500MU 조사 후 방사선량의 측정결과 Field size의 영향은 거의 존재하지 않았으며, beam off 후 1~2분 뒤 측정 시작 시점에서 대략 1 μ Sv/hr를 나타냈으며, 반감기는 약 3~4분인 것으로 측정되었다. Primus 15MV의 경우 S병원에서 측정을 수행하였으며, 25 \times 25cm² Field size에 대하여 500MU 조사 뒤 방사선량을 측정한 결과, beam off 후 1~2분 뒤 측정시점에서 대략 3.26 μ Sv/hr를 나타냈으며 10MV X선보다 대략 3.3배 큰 값을 나타내었다.

결 과 : 일일 치료환자가 20~50명이고, 환자 1인당 Wedge filter의 교체작업이 1~2회일 때 10MV의 경우 연간선량이 0.08~0.4mSv로 평가되었으며, 15MV의 경우 0.27~1.36mSv로 평가되어 작업종사자의 연간 허용선량인 20mSv에 비해 안전한 것으로 평가되었다.

