

## 선형가속기의 6MV X선에 대한 소형조사면의 선량측정

계명대학교 의과대학 치료방사선과학교실

최 태 진 · 김 옥 배 · 김 영 훈

계명대학교 의과대학 신경외과학교실

손 은 익 · 김 인 흥

### Dose Characteristics of Small Radiation Fields for 6MV X-ray of Linear Accelerator

Tae Jin Choi, M.S., Ok Bae Kim, M.D. and Young Hoon Kim, M.D.

Department of Therapeutic Radiology, School of Medicine, Keimyung University, Taegu, Korea

Eun Ik Son, M.D. and In Hong Kim, M.D.

Department of Neurosurgery, School of Medicine, Keimyung University, Taegu, Korea

Radiation dosimetry has been extended to small fields less than  $4 \times 4 \text{ cm}^2$  which may be suitable for irradiation of small intracranial tumors.

Special consideration was given to the percentage depth dose and scatter correction factors with 0.14 ml ion chamber, film dosimetry and TLD measurement.

Calculated dose distributions were compared with measured data.

Key Words: Dosimetry, Small field

## 서 론

뇌조직에 발생한 종양은 체외 다문조사와 전자 및 회전조사로 치료하는 경우가 일반화 되어 있다. 최근 소형의 뇌종양 치료를 위한 방사선수술법이 시행되고 있고 BRW등의 stereotactic 기구를 사용하여  $4 \times 4 \text{ cm}^2$  이하의 소형 조사면으로 multiple non-coplanar arc 또는 회전조사를 시행함으로써 주위건강조직보다 종양에 더욱 많은 선량을 도달시킬 수 있는 방법의 개발이 연구되고 있다<sup>1,2)</sup>.

일반적으로  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  이하의 조사면에 의한 회전조사는 방사성물질을 조직내 자입조사한 선량분포와 매우 유사한 집중조사 분포를 얻을 수 있음이 발표되고 있다<sup>3)</sup>.

이와같은 소형 조사면으로 회전조사에 필요한 자료

를 얻기 위해 저자들은 6MV X-선으로  $1 \times 1 \text{ cm} \phi$ 에서  $3 \text{ cm}^2$  조사면에 대한 선량분포를 측정하였다.

## 실험 및 방법

방사선 선량계측에 있어서  $4 \times 4 \text{ cm}^2$  이하의 소형 조사면에 대한 측정에는 방사선 측정기의 선택이 매우 중요하다.

특히 전리상측정기의 사용에는 2차 전자 평형이 성립되는 경우에 비교적 정확한 측정이 가능하지만 2차 전자의 비정보보다 작은 조사면에서는 불가능하다<sup>4)</sup>. 이에 본 저자들은 광구경이  $1 \text{ mm} \phi$ 인 WP-102 photo densitometer와 X-OMAT V 필름 및 LiF TLD (25% LiF, 75% Teflon) rod ( $1 \text{ mm} \phi \times 6 \text{ mm}$ )를 사용하여  $4 \times 4 \text{ cm}^2$  이하의 조사면에서 심부선량, dose profile을 측정했으며, collimator, phantom 및 total scatter cor-

rection factor는 선원과 검출기의 거리를 100, 200, 300 cm로 두고 동일한 콜리메타에서의 선량을 0.14 ml IC-10 전리상(내경 반지름 2.88 mm, 외경 반지름 3.4 mm)으로 측정후 SAD 100 cm에서의 선량으로 환산하여 전리상 검출기의 선량과 TLD의 선량을 측정 비교하여 결정되었다.

필름계측은 X-OMAT V 필름을 polystyrene 펜톰에 삽입 밀착고정 시키고 6MV X-선을 조사하여 H-D 곡선을 구하고 필름특성곡선상 직선부를 결정하고, 이 부위의 선량을 조사한 뒤 자동현상조건에 의한 선량오차를 최소화하기 위하여 일괄 현상하는 방법을 택하였다.

TLD 조사는 필름계측과 동일한 위치, 조사면에서 이루어졌으며 심부선량을 측정 비교하였다. 이 때 TL판독기는 Victoreen (model 2800)을 사용하였으며, TL annealing은 섭씨 300도에 3시간, 80°에서 16시간 열처리하여 잔류 포획전자에 의한 선량오차를 줄였다.

이 실험에서는 각 조사면에 대한 심부선량백분율과 1.5, 5.0, 10.0, 15.0 및 20.0 cm 깊이에서 dose profile이 측정되었으며, 각 조사면의 반응영과 80% 등선량곡선이 차지하는 비율도 조사되었다.

1. 산란 보정 계수

조직내 임의 위치의 선량은 Dmax 깊이에서 흡수선량과 이 선량을 기준으로 한 심부선량백분율 및 dose profile로부터 결정되며 각 조사면의 흡수선량은 기준 조사면(10×10cm<sup>2</sup>)의 선량을 규격화함으로써 선량을 정하는 데 도움이 된다.

Holt et al<sup>6)</sup>등에 의하면 total scatter correction factor (Scp (r))은 기준조사면의 Dmax 깊이에서 측정된 흡수 선량에 대한 임의의 조사면(r)에서 Dmax 깊이의 흡수 선량의 비로 나타낸다. 또한 Scp(r)는 콜리메타(Sc)와 펜톰 산란보정계수(Sp)로 분리될 수 있으며, Scp(r)=Sc(r)·Sp(r)과 같이 계산할 수 있다.

이에 저자들은 전리상 검출기에 1.5 cm 두께의 폴리스탈린 buildup cap을 씌워 각 조사면의 흡수선량으로부터 Scp, Sc와 Sp를 구할 수 있지만, 1, 2 cm ϕ와 같은 소형 조사면에서는 Buildup cap을 완전히 포함시킬 수 없으며 선량분포가 평탄치 못함으로 선량평가에 오차를 일으키기 쉬우므로 SSD 200, 300 cm에서 구한 Scp, Sc를 비교함으로써 선량결정의 오차를 감소시키도록 하였다.

2. 조직최대선량비(TMR)

회전조사에는 조직-최대선량 비(TMR)가 필요하게 됨으로 심부선량백분율로부터 TMR (d, r<sub>d</sub>)를 구한다.

Khan등에<sup>4)</sup> 의하면 심부선량백분율 P (d, r, SSD)로부터 TMR (d, r<sub>d</sub>)은 다음식과 같이

TMR (d, r<sub>d</sub>) = [ P (d, r, SSD) / 100 ] \* [ (SSD+d) / (SSD+d<sub>m</sub>) ]<sup>2</sup> \* [ S<sub>p</sub> (r<sub>dm</sub>) / S<sub>p</sub> (r<sub>d</sub>) ] .....(1)

구할 수 있다. 여기서 r은 조사면, d와 d<sub>m</sub>은 각각 임의의 깊이와 최대선량깊이이다.

한편 dose profile은 조사면의 폭과 콜리메타의 구조에 따라 발생된 산란선량에 의한 변화를 일일이 측정하는 것은 어렵기때문에 실험적 함수를 이용하여<sup>6)</sup> 최적화 변수값을 구하는 것이 바람직할 것으로 생각되어 다음 실험식으로 부터 각 상수를 구하였다. 조사면의 중심에서 이탈된 지점의 선량율(F(x))은

F (x)=1.0-0.5 [ exp (-a<sub>1</sub>/p) ] [ (Wd/2) - | x | ] for | x | < Wd/2

F (x)=t-(0.5-t)exp(-a<sub>2</sub>/p) [ | x | - (Wd/2) ] for | x | > Wd/2 .....(2)

으로 나타낼 수 있다.

여기서 a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>는 실험상수이며 Wd는 조사면의 폭, t는 콜리메타의 유효투과를 의미하며, x는 중심선속에서 떨어진 거리를 나타내며, p는 반응영을 의미한다.

결 과

필름선량계측상 오차를 유발할 수 있는 현상조건을 제거하기 위하여 각 조사면에서 조사된 필름을 일괄처리 하여 판독하였다<sup>7)</sup>.

6MV X-선에서 X-OMAT V 필름의 필름특성곡선은 10에서 40 cGy까지 직선성을 보였다. Fig. 1은 SSD 100 cm에 직경이 1, 2, 3 cm ϕ인 조사면에 대한 등선량곡선이며, Fig. 1a, b는 직경 1과 2 cm ϕ의 등선량곡선으로 각 곡선이 매우 예리한 분포를 보여주고 있으며, 이것은 측방산란의 기여가 적은 것을 의미한다. 직경 3 cm ϕ의 곡선은 선량분포상 비교적 평탄부가 있음을 보여주고 있다.

한편 Fig. 2에서는 직경 3 cm ϕ 조사면의 반응영을 나

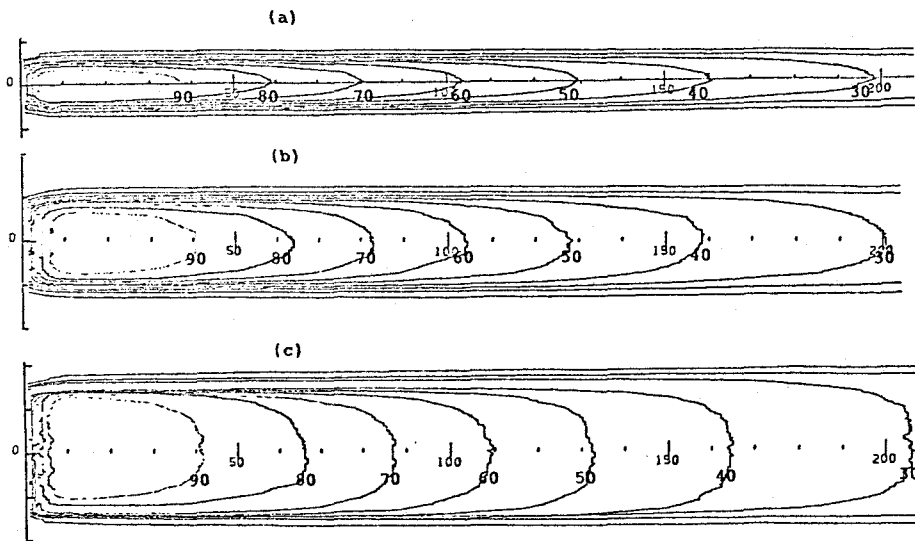


Fig. 1. Isodose curves of small field (a) 1 cm  $\phi$  (b) 2 cm  $\phi$  and (c) 3 cm  $\phi$  in 6 MV X-rays.

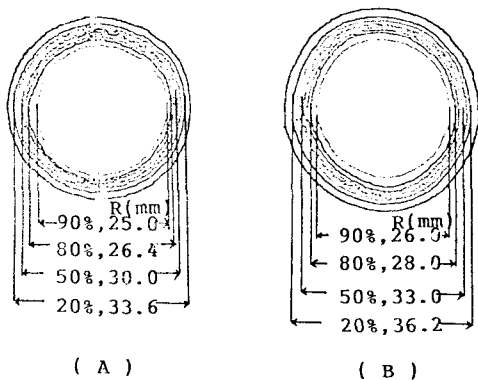


Fig. 2. Isodose distribution of A) 1.5 cm B) 10.0 cm depth in small radiation field 3 cm diameter.

타내며, Dmax 깊이에서 90% 곡선은 조사면의 약 83%, 10 cm 깊이에서는 79%를 나타내고 있다.

또한 각 조사면과 깊이에서의 반음영과, 80% 곡선의 반경( $r_{80}$ ) 및 80%곡선이 차지하는 비율  $\frac{r_{80}}{r}$ 은 Table. 1에 보여주고 있다.

Table. 1에서 직경 1 cm  $\phi$  조사면의 80% 등선량곡선이 접하는 조사면에 대한 비가 Dmax에서 80%, 10 cm 깊이에서 78%이며 소형 조사면으로 회전조사를 시행할 경우 조사면내 더욱 균등한 선량이 도달될 수 있음을 시사하게 된다.

Fig. 3은 직경 2 cm  $\phi$ 의 조사면에 대한 심부선량곡선

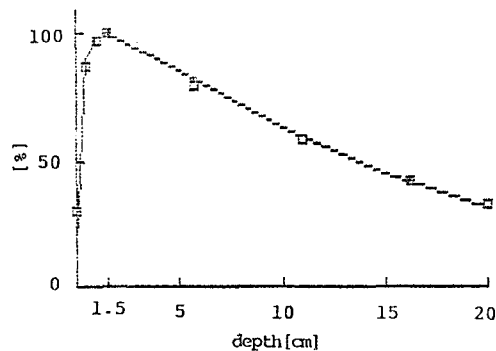


Fig. 3. Comparison of film (line) and TL (box) dosimetry with 2.0 cm dia, field in 6 MV X-ray.

Table 1. Penumbra of Small Fields in 6 MV X-Ray

Field size diameter [mm]	Depth [mm]	Penumbra 90-20% [mm]	$r_{80}$ [mm]	%
10	15	3.3	4.0	80
20	15	4.0	8.2	82
30	15	4.3	13.2	88
10	100	3.6	4.3	78
20	100	5.0	8.7	79
30	100	5.1	14.0	85

$r_{80}$  : radius of 80% isodose curve

$\frac{r_{80}}{r} \times 100$  : Percentage of radius for the 80% isodose curve to that for the field size

**Table 2.** Axis Percentage Depth Doses at SSD = 100 cm for 6MV X-ray from Mevatron KD 8067 Linear Accelerator

Depth (cm)	Radius (cm)				
	0.5	1.0	1.5	2.3	5.6
1.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2.0	98.8	99.1	99.2	99.4	99.6
3.0	94.7	94.9	95.1	95.3	95.6
5.0	85.1	85.7	86.1	86.4	87.1
8.0	71.2	71.5	72.6	73.1	74.9
10.0	62.7	63.3	64.1	65.5	67.5
12.0	54.2	55.0	56.8	57.2	60.6
15.0	44.4	45.7	46.4	47.2	51.5
20.0	30.8	31.4	33.2	34.9	39.1

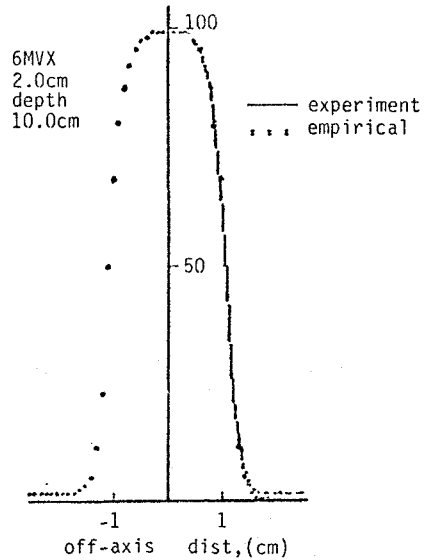
**Table 3.** The Calculated Total (Scp), Collimator (Sc) and Phantom (Sp) Scatter Correction Factors for Small Radiation Fields in 6MV X-ray by Using 0.14ml IC-10 Ion Chamber

Scatter correction factors	Radius (cm)				
	0.5	1.0	1.5	2.3	5.6
Scp	0.646	0.874	0.909	0.928	1.000
Sc	0.685	0.895	0.927	0.943	1.000
Sp	0.943	0.976	0.981	0.984	1.000

으로 필름계측(a)과 TL (b) dosimetry를 비교한 것으로 20 cm 깊이까지 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. Table. 2는 전리상으로 측정된 조사면 4×4, 10×10 cm의 심부선량과 직경 1, 2, 3 cmφ 조사면의 심부선량 백분율로써 각 조사면의 Dmax을 1.5 cm에 두고 이 깊이를 기준으로 한 백분율을 나타내었다.

출력선량을 결정하기 위하여 전산관교정계수(Scp), 콜리메터 산란교정계수(Sc) 및 팬텀 산란교정계수(Sp)는 buildup cap을 완전히 포함될 수 있도록 SSD를 200, 300 cm까지 띄워 측정된 값을 SAD 100 cm의 선량으로 환산하여 Table. 3과 같은 값을 얻었다.

Fig. 4는 직경 2 cm 조사면의 10 cm 깊이에서 dose profile을 나타낸 것으로 Jhons의 실험식에 잘 일치되고 있음을 알 수 있었다.



**Fig. 4.** Dose profile curve for 2cmφ at 100 cm SSD, 10 cm depth in 6MV X-rays.

### 고 찰

방사선치료기술은 날로 발전하여 수술이 어려운 위치에 발생한 뇌종양이나, 전이된 작은 종양등에 방사선 수술법으로 치유 가능하게 하고 있다.

최근에는 국내에서도 뇌종양치료에 BRW stereotactic 기구로 종양중심에 정확히 천자하여 이리듬 방사성선원으로 조직내 조사가 이루어지고 있으며, 또한 multi non-coplanar 회전조사를 시행했을때는 arc 각도에 따라 360도 회전조사보다 병소의 선량을 약 2.2배 더 높일 수 있음이 발표되고 있다.

체외입체회전조사는 초기에 orthovoltage X-선에 의한 조사에서 병소중심선량을 높이고자 고안된 치료법으로써 선형가속기의 고에너지 X-선 출범이후로 사용빈도가 줄었다고 생각된다. 그 이유는 병소중심에 정확한 조사가 이루어져야 효과를 얻을 수 있음에 비추어 실제 임상에서는 치료시간 중에 환자의 고정, beam alignment, dosimetry 및 선량치료계획등의 어려움이 산재한 데 있다고 여겨진다.

환자의 고정은 여러방법이 있겠으나 BRW stereotactic 기구나 이와 유사한 기구를 사용함으로써 충분히 제어할 수 있게 되었다. 방사선수술을 위한 소형

조사면에 대한 선량계측은 정확한 beam alignment가 필요함으로 light beam과 radiation beam을 정확히 교정한 뒤, 전리상 검출기는 전자평형이 이루어지는 조사면에서 이용됨으로 선원-검출기간의 거리를 충분히 간격을 두어 측정하고 SAD에 환산하는 방법이 권장되고 있다. 이에 저자들은 SSD 200, 300 cm에서 전산란 교정계수, 콜리메터 및 펜톰산란교정계수들을 구한 결과 1 cm $\phi$  조사면의 경우 Scp, Sc가 각각 SSD 300 cm에서 0.646과 0.685, SSD 200 cm에서 0.632와 0.644를 얻었다.

이 자료에 의하면 조사면이 buildup cap을 충분히 포함시킬 필요가 있음을 말해주며, 6MV X-선의 경우 SSD 100 cm에서 최소한 3 $\times$ 3 cm<sup>2</sup> 이상의 조사면에서 전리상 검출기(0.14 ml 외경 6.8 mm)를 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

한편 고에너지 X-선에서 선원-펜톰간 거리가 300 cm 정도에서 에너지 변화가 크지 않을 것이므로 펜톰 산란계수도 큰 변화를 보이지 않을 것으로 사료되며, 콜리메터 산란계수는 영향을 받을 것으로 생각되었으나 SSD 300, 200 cm에서 4 $\times$ 4와 10 $\times$ 10 cm<sup>2</sup>로 측정된 선량을 SAD 100 cm에서 측정된 free space 선량과 비교한 결과 잘 일치하고 있어 small field의 콜리메터 산란은 실험오차 범위에서 볼 때 거의 거리에 무관할 것으로 여겨진다. 이것은 Arcovito 등<sup>8)</sup>이 9MV X-ray의 콜리메터 산란계수를 측정한 결과 거리에 무관함을 보인 것과 잘 일치함을 알 수 있었다.

## 결 론

고에너지 선형가속기의 6MV X선을 이용하여 방사선 수술을 시도하기 위하여 4 $\times$ 4 cm<sup>2</sup> 이하의 소형조사면의 선량을 측정하였다. 전리상측정기의 측정범위는 최소한 buildup cap을 포함하는 조사면의 크기가 유지되어야 함으로 1 cm $\phi$  또는 2 cm $\phi$  등의 작은 조사면의 선량은 선원-펜톰간 300 cm 이상의 거리를 두고 측정하여 SAD의 선량값으로 환산함으로써 산란계수들을 구할 수 있었다. 콜리메터 및 전산란교정계수는 조사면의 크기에 따라 변화가 심하였으며 1 cm $\phi$ 에서는 각각 0.

646과 0.685이고 펜톰산란교정계수는 0.943으로 적은 변화를 보였다.

Film dosimetry에서 소형조사면의 물리적 반응영은 약 3~5 mm였으며 10 cm 깊이에서 80%의 등선량곡선의 폭은 조사면적의 약 78%로서 회전조사시 더욱 넓게 점유할 수 있을 것으로 사료된다.

TLD와 film dosimetry에 의한 소형조사면의 심부선량측정 결과  $\pm$ 3%의 범위에서 일치하지만 이는 측정기 및 개인 오차로 여겨지며 앞으로 더욱 정밀한 측정이 요하는 것으로 생각된다.

Non-coplanar 회전조사의 치료계획은 삼차원 선량계획이 필수적이며, 심부선량백분율에 의한 TMR 환산과 소형조사면의 dose profile에 대한 fitting이 실측치와 잘 일치하고 있어 앞으로 small field의 선량계획에 많은 이용이 예상된다.

## REFERENCES

1. Alexander E, Moore MR, et al: Successful management of intracranial arteriovenous malformations with stereotactic external beam using a standard linear accelerator. X meeting of the world society for stereotactic and functional neurosurgery. Abstract:93, 1989
2. Chu SS, Suh CO, et al: Treatment planning and dosimetry of small radiation fields for stereotactic radiosurgery. J Korean Soc Ther Radiol 7:101-112, 1989
3. Houdek PV: Dosimetry of small radiation fields for 10 MV X rays. Med Phys 10:333-336, 1983
4. Khan FM: A System of Dosimetric Calculations: The physics of radiation Therapy. Baltimore/London, Williams & Wilkins. 1984, pp182-188
5. Holt G, Laughlin J, Moroney J: The extension of the concept of Tissue-Air Ratio (TAR) to high-energy X-ray beams. Radiology, 96:437-446, 1970
6. Johns HE, Cunningham JR: The Interaction of Single Beams of X and Gamma Rays with a Scattering Medium. Springfield, Charles Thomas. 4th ed. 1983, pp336-380
7. Tadashi K, Hirohiko T, et al: Slit beam rotation therapy with the computer assisted linear accelerator. IEEE: 533-535, 1984
8. Arcovito G, Piermattei A: Dose measurements and calculations of small radiation fields for 9MV X-rays. Med Phys. 12:779-784, 1985