

선형가속기를 이용한 방사선 수술의 선량분포의 실험적 확인

연세대학교 원주의과대학 치료방사선과학교실¹

연세대학교 의과대학 치료방사선과학교실²

박경란¹ · 김계준¹ · 추성실² · 이종영¹

조철우¹ · 이창걸² · 서창옥² · 김귀언²

= Abstract =

Verification of Dose Distribution for Stereotactic Radiosurgery with a Linear Accelerator

Kyung Ran Park, M.D.¹, Kye Jun Kim, B.S.¹, Sung Sil Chu, Ph.D.², Jong Young Lee, M.D.¹
Chul Woo Joh, M.S.¹, Chang Geol Lee, M.D.², Chang Ok Suh, M.D.² and Gwi Eon Kim, M.D.²

¹Department of Radiation Oncology, Yonsei University Wonju College of Medicine

²Department of Radiation Oncology, Yonsei University College of Medicine

The calculation of dose distribution in multiple arc stereotactic radiotherapy is a three-dimensional problem and, therefore, the three-dimensional dose calculation algorithm is important and the algorithm's accuracy and reliability should be confirmed experimentally. The aim of this study is to verify the dose distribution of stereotactic radiosurgery experimentally and to investigate the effect of the beam quality, the number of arcs of radiation, and the tertiary collimation on the resulting dose distribution.

Film dosimetry with phantom measurements was done to get the three-dimensional orthogonal isodose distribution. All experiments were carried out with a 6 MV X-ray, except for the study of the effects of beam energy on dose distribution, which was done for X-ray energies of 6 and 15 MV. The irradiation technique was from 4 to 11 arcs at intervals of from 15 to 45 degrees between each arc with various field sizes with additional circular collimator. The dose distributions of square field with linear accelerator collimator compared with the dose distributions obtained using circular field with tertiary collimator. The parameters used for comparing the results were the shape of the isodose curve, dose fall-offs from 90% to 50% and from 90% to 20% isodose line for the steepest and shallowest profile, and $A = \frac{90\% \text{ isodose area}}{50\% \text{ isodose area} - 90\% \text{ isodose area}}$ (modified from Chierago). This ratio may be considered as being proportional to the sparing of normal tissue around the target volume.

The effect of beam energy in 6 and 15 MV X-ray indicated that the shapes of isodose curves were the same. The value of ratio A and the steepest and shallowest dose fall-offs for 6 MV X-ray was minimally better than that for 15 MV X-ray. These data illustrated that an increase in the dimensions of the field from 10 to 28 mm in diameter did not significantly change the isodose distribution. There was no significant difference in dose gradient and the shape of isodose curve regardless of the number of arcs for field sizes of 10, 21, and 32 mm in diameter. The shape of isodose curves was more circular in circular field and square in square field. And the dose gradient for the circular field was slightly better than that for the square field.

Key Words: Stereotactic radiosurgery, Linear accelerator, Dose distribution, Film dosimetry

서 론

두개강내의 동정맥기형에서 높은 치유율을 보이고 있고 양성 및 악성 뇌종양의 치료에도 이용되고 있는 방사선수술에서는 대개의 경우 단 1회에 1500 cGy 이상의 고선량이 조사되기 때문에 정상조직에 조사되는 방사선량과 합병증에 대해 특별한 주의가 필요하다. 선형가속기의 X-선을 이용한 방사선수술은 gamma unit의 Co-60과 중성자나 헬륨이온을 이용한 방사선수술 방법등과 비교해 볼 때 dose gradient면에서도 유사한 선량분포를 보이고 동정맥기형의 치료에 있어서도 대등한 결과를 보이고 있다¹⁻⁹⁾.

방사선수술 계획시에는 삼차원적 geometry에 근거한 software가 필수적으로 사용되고 있으며 최근 여러 연구자들이 조사 선량과 뇌 정상조직의 tolerance나 합병증 발생율과의 관계를 평가하고, 여러 방사선 수술 방법들의 선량분포를 비교하는데 있어 삼차원적 geometry에 근거한 dose volume histogram을 개발하여 사용하고 있다^{3,10-12)}. 방사선수술의 선량분포를 얻는데 사용되는 이러한 삼차원 수식의 정확도와 신뢰도는 실제 측정에 의한 확인의 과정이 반드시 필요하다. 따라서 저자들은 film dosimetry를 이용하여 선형가속기를 이용한 방사선수술에서의 선량분포를 측정하여 분석한 결과들을 앞으로 3차원적 방사선수술 계획용 컴퓨터에 의해 얻어진 선량 분포의 결과들과 비교 확인하기 위한 기초 자료로 사용하고자 본 연구를 계획하였다. 선형가속기를 이용한 방사선수술시 target volume에 대한 주위 정상조직에 조사되는 선량의 비는 arc 수, arc geometry, 조사면의 크기와 X-선의 에너지에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 저자들은 6 MV X-선과 15 MV X-선 중 방사선 수술에 적절한 X-선의 에너지를 찾고, arc 수에 따른 선량분포의 차이를 보고자 하였으며, 3차 collimation의 효과를 알아보기 위하여 선형가속기의 collimator에 의한 정방형 조사면(square field)과 원형의 3차 collimator를 선형가속기에 부착하여 얻은 원형 조사면(circular field) 사이에 선량분포의 차이를 평가하고자 본 연구를 시행하였다.

재료 및 방법

선형가속기를 이용한 방사선수술에서의 선량분포를 측정하기 위하여 film dosimetry를 사용하였다. humanoid phantom의 머리 부위와 이와 똑같은 모양으로 저자들이 제작한 파라핀 phantom, Kodak XV2 필름(방사선치료 확인용), 컴퓨터와 연결된 photodensitometer와 연세암센터 치료방사선과에서 고안하여 8 cm 두께의 납으로 제작된 원형의 collimator를 이용하였다.

방사선수술 시행 방법은 6 MV와 15 MV X-선의 비교 실험에서는 직경 10, 21, 28 mm 크기의 원형조사면에서 각각 1 arc당 160°의 9 arc로 조사하였고, arc수에 따른 선량 분포의 변화를 평가하기 위하여는 1 arc당 120°로 하여 arc간 간격을 4 arc에서는 45°, 7 arc에서는 25° 간격으로, 11 arc에서는 15° 간격으로 직경 10, 21, 32 mm의 원형 조사면에서 각각 시행하였고, 3차 collimation의 효과를 보기 위하여는 선형가속기의 collimator에 의한 21×21 mm의 정방형 조사면과 3차 collimator에 의한 직경 21 mm의 원형 조사면으로 각각 1 arc당 120°의 4 arc로 조사하였다.

X-선의 에너지는 6 MV와 15 MV X-선을 비교하기 위한 실험을 제외하고는 6 MV X-선을 이용하였고 조사 선량은 isocenter에 광학밀도(optical density)와 선량 간에 1차원적 관계가 있는 2-3 Gy를 조사하였다.

phantom 중앙의 횡단(transverse)면, 시상(coronal)면, 관상(sagittal)면에 각각 필름을 넣고 위의 방법으로 방사선수술을 시행하여 얻은 필름(Fig. 1)을 photodensitometer로 scan하여 횡단면, 시상면, 관상면에서 각각 선량 분포 곡선을 얻고 그 결과를 비교 분석하기 위한 지표로 첫째 선량 분포 곡선의 모양을 비교하였고, 둘째 dose gradient를 비교하기 위하여 머리의 vertical axis에서 얻은 steepest dose profile에서와 전후축(anterio-posterior axis)에서 얻은 shallowest dose profile에서 각각 90%에서 50%와 90%에서 20% 선량분포 곡선 사이의 거리를 측정하였고, 셋째로 90%와 50% 선량분포 곡선의 면적으로 계산되는 A값으로 평가하였다

$$(A = \frac{90\% \text{ isodose area}}{50\% \text{ isodose area} - 90\% \text{ isodose area}}).$$

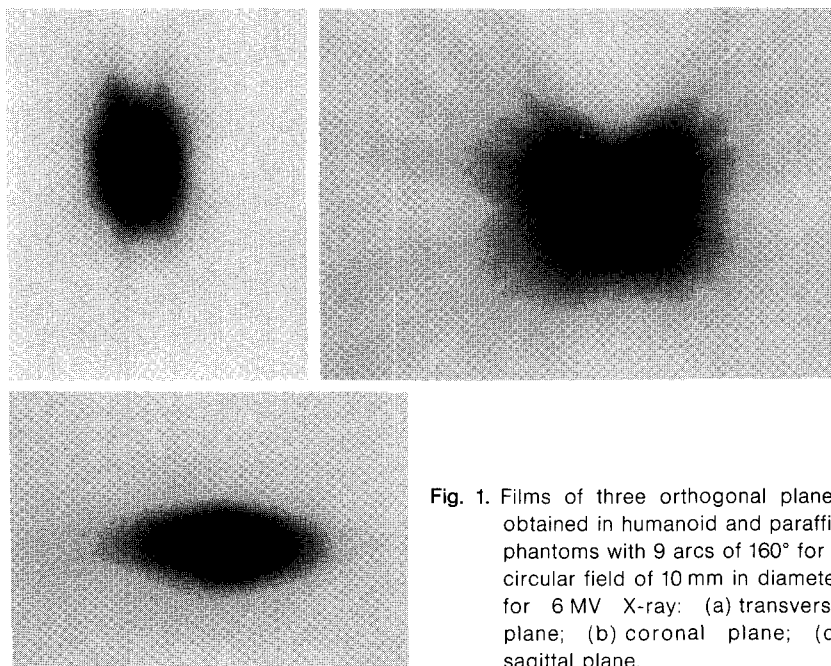


Fig. 1. Films of three orthogonal planes obtained in humanoid and paraffin phantoms with 9 arcs of 160° for a circular field of 10 mm in diameter for 6 MV X-ray: (a) transverse plane; (b) coronal plane; (c) sagittal plane.

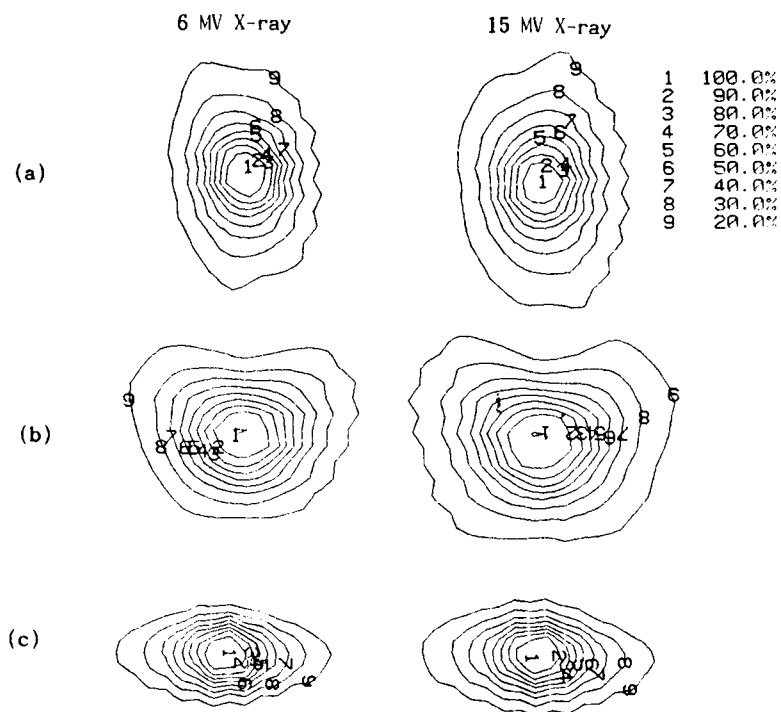


Fig. 2. Isodose contours in the transverse (a), coronal (b), and sagittal (c) planes with 9 arcs of 160° for a circular field of 10 mm in diameter for 6 MV and 15 MV X-ray.

즉 A 값은 target volume에 바로 인접한 정상 조직에 얼마나 방사선이 조사되는 가를 나타내주는 지표로 사용하여 A 값이 클수록 고선량을 받는 정상 조직에 조사되는 방사선량이 적은 것을 의미한다고 보았다.

결 과

1. 6 MV와 15 MV X-선의 선량 분포

6 MV와 15 MV X-선을 이용하여 각각 1 arc당 160°

의 9 arcs로 방사선을 조사하여 얻은 선량분포 곡선의 모양은 직경 10, 21, 28 mm 크기의 원형조사면에서 모두 두 에너지의 X-선 사이에서 동일한 분포를 이루었다(Fig. 2). steepest와 shallowest dose fall-offs면에서의 dose gradient와 A값은 모든 크기의 조사면에서 극히 미미한 차이로 15 MV에 비해 6 MV X-선에서 우수하였으나 유의한 차이는 없었다(Table 1, 2, 3).

Table 1. Steepest Dose Fall-offs Outside the Target Volume for 6 MV and 15 MV X-ray with 9 Arcs of 160°.

Circular field Diameter (mm)	Beam energy (MV)	Distance in mm for dose to fall from	
		90% to 50%	90 to 20%
10	6	3.5	7
	15	3.5	7
21	6	4.5	9.5
	15	5	11
28	6	4.5	10.5
	15	5.5	12

Table 2. Shallowest Dose Fall-offs Outside the Target Volume for 6 MV and 15 MV X-ray with 9 Arcs of 160°.

Circular field Diameter (mm)	Beam energy (MV)	Distance in mm for dose to fall from	
		90% to 50%	90 to 20%
10	6	6	17.5
	15	6.5	18.5
21	6	11.5	31
	15	12	33
28	6	14	40
	15	15	41

Table 3. Isodose Area and Ratio A for 6 MV and 15 MV X-ray with 9 Arcs of 160°.

Circular field Diameter (mm)	Plane	6 MV		15 MV	
		Isodose area (cm ²)		Isodose area (cm ²)	
		90%/50%		90%/50%	
10	T	0.4/2.4	0.2	0.4/2.6	0.182
	C	0.7/3.7	0.233	0.8/4.4	0.222
	S	0.3/1.7	0.214	0.3/1.8	0.2
21	T	3.0/10.4	0.405	3.2/11.7	0.377
	C	2.1/7.3	0.404	2.1/8.1	0.35
	S	2.8/8.4	0.5	2.8/9.2	0.438
28	T	6.5/17.9	0.570	6.3/19.3	0.485
	C	4.5/13.3	0.511	4.6/14.0	0.489
	S	6.0/15.3	0.645	5.9/17.1	0.527

T: transverse plane, C: coronal plane, S: sagittal plane.

$$*A = \frac{90\% \text{ isodose area}}{50\% \text{ isodose area} - 90\% \text{ isodose area}}$$

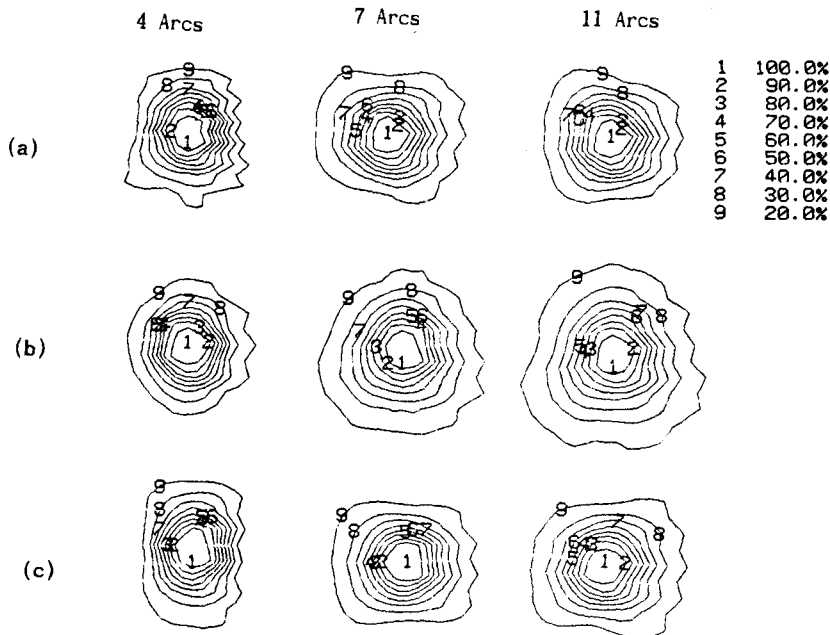


Fig. 3. Isodose contours in the transverse (a), coronal (b), and sagittal (c) planes for three different numbers of arcs of 120° for a circular field of 10 mm in diameter for 6 MV X-ray.

Table 4. Steepest Dose Fall-offs Outside the Target Volume for Three Different Numbers of Arcs of 120° for 6 MV X-ray.

Circular field Diameter (mm)	Number of arcs	Distance in mm for dose to fall from	
		90% to 50%	90 to 20%
10	4	3.5	7.5
	7	4	7.5
	11	4	7.5
21	4	5	11
	7	5	10
	11	5	11
32	4	6	11.5
	7	6	11.5
	11	6	11.5

2. arc 수에 따른 선량 분포의 차이

6 MV X-선으로 1 arc당 120° 로 하였을때 선량분포 곡선의 모양은 직경 10, 21, 32 mm 크기의 원형 조사면에서 모두 4, 7, 11 arcs 간에 유사한 분포를 보였고 (Fig. 3), steepest와 shallowest dose fall-offs 면에서의 dose gradient와 A값 모두 모든 크기의 조사면에서 arc 수에 따라 차이가 없었다(Table 4, 5, 6).

3. 3차 collimation의 효과

6 MV X-선으로 1 arc당 120° 의 4 arcs로 하였을때 선량 분포 곡선의 모양은 3차 collimation에 의한 직경 21 mm의 원형 조사면에서는 모든 면에서 원형이었고, 선형가속기에 의한 21×21 mm 정방형 조사면에서는 횡단면과 관상면에서 정방형에 가까운 각이진 모양을 보였다(Fig. 4). penumbra는 정방형 조사면에서 5 mm, 원형 조사면에서 2 mm였다. shallowest dose

Table 5. Shallowest Dose Fall-offs Outside the Target Volume for Three Different Numbers of Arcs of 120° for 6 MV X-ray.

Circular field Diameter (mm)	Number of arcs	Distance in mm for dose to fall from	
		90% to 50%	90 to 20%
10	4	4	9
	7	4	9
	11	4	10.5
21	4	6	12.5
	7	6	15
	11	6	16.5
32	4	7	15
	7	7	18
	11	8	20

Table 6. Isodose Area and Ratio A for Three Different Numbers of Arcs of 120° for 6 MV X-ray.

Circular field Diameter (mm)	Plane	4 Arcs		7 Arcs		11 Arcs	
		Isodose area (cm ²) 90%/50%	A*	Isodose area (cm ²) 90%/50%	A*	Isodose area (cm ²) 90%/50%	A*
	C	0.3/1.4	0.273	0.3/1.6	0.231	0.4/2.0	0.25
	S	0.4/1.5	0.364	0.4/1.5	0.364	0.4/1.8	0.288
21	T	2.5/6.1	0.694	2.7/6.9	0.643	2.9/7.4	0.644
	C	1.9/6.2	0.442	2.4/7.8	0.444	2.6/8.1	0.473
	S	2.6/6.4	0.684	2.7/6.7	0.675	2.9/7.6	0.617
32	T	5.2/10.6	0.963	5.4/11.9	0.831	5.7/7.6	0.76
	C	3.9/10.1	0.629	4.6/12.9	0.554	5.1/7.3	0.560
	S	5.2/11.5	0.825	5.3/11.5	0.855	5.8/7.2	0.773

T: transverse plane, C: coronal plane, S: sagittal plane.

$$*A = \frac{90\% \text{ isodose area}}{50\% \text{ isodose area} - 90\% \text{ isodose area}}$$

Table 7. Steepest Dose Fall-offs Outside the Target Volume for a Circular Field of 21 mm in Diameter with a Tertiary Collimator and for a 21×21 mm Square Field with Linear Accelerator Collimator with 4 Arcs of 120° for 6 MV X-ray.

Field	Distance in mm for dose fall from	
	90% to 50%	90% to 20%
Circular	5	11
Square	5.5	14

Table 8. Shallowest Dose Fall-offs Outside the Target Volume for a Circular Field of 21 mm in Diameter with a Tertiary Collimator and for a 21×21 mm Square Field with Linear Accelerator Collimator with 4 Arcs of 120° for 6 MV X-ray.

Field	Distance in mm for dose fall from	
	90% to 50%	90% to 20%
Circular	6	12.5
Square	6	12.5

Table 9. Isodose Area and Ratio A for a Circular Field of 21 mm in Diameter with a Tertiary Collimator and for a 21×21 mm Square Field with Linear Accelerator Collimator with 4 Arcs of 120° for 6 MV X-ray.

Plane	Circular		Square	
	Isodose area (cm ²) 90%/50%	A*	Isodose area (cm ²) 90%/50%	A*
C	1.9/6.2	0.442	2.1/7.3	0.404
S	2.6/6.4	0.684	3.1/8.2	0.608

T: transverse plane, C: coronal plane, S: sagittal plane.

$$*A = \frac{90\% \text{ isodose area}}{50\% \text{ isodose area} - 90\% \text{ isodose area}}$$

fall-offs 면에서의 dose gradient는 두 군간에 차이가 없었고 steepest dose fall-offs 면에서의 dose gradient와 A값은 원형 조사면에서 우수하였으나 유의한 차이는 없었다(Table 7, 8, 9).

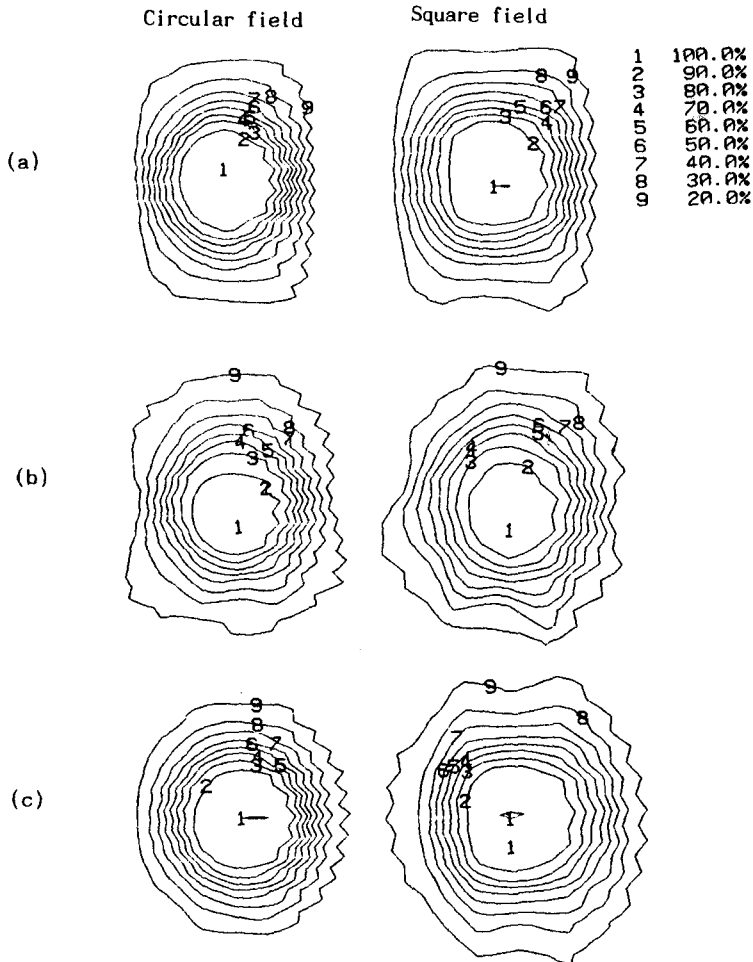


Fig. 4. Isodose contours in the transverse (a), coronal (b), and sagittal (c) planes for a circular field of 21 mm in diameter with tertiary collimator and for a 21×21 mm square field with linear accelerator collimator with 4 arcs of 120° for 6 MV X-ray.

고 찰

film dosimetry는 megavoltage X-선의 계측에서 $\pm 3\%$ 의 오차를 갖고 있으나 전체적인 등선량분포를 용이하게 얻을 수 있는 장점이 있어, 본연구에서도 선형가속기의 X-선을 이용한 방사선수술의 선량분포를 측정하는데 film dosimetry를 이용하였다¹³⁻¹⁵⁾.

선형가속기를 이용한 방사선수술시 가장 적합한 에너지에 대한 연구로는 Chierego등이 방사선치료 계획용 컴퓨터를 이용하여 140°의 1 arc로 Co-60에서 18

MV X-선 사이의 선량분포를 비교한 결과 4~6 MV 사이의 X-선이 가장 우수한 선량분포를 보인다고 보고하였으나¹⁾ 이 연구는 1 arc를 이용하였기 때문에 방사선수술의 결과로 보기가 어렵고, Pike등이 삼차원적 치료계획용 컴퓨터를 이용하여 선형가속기에 의한 dynamic radiosurgery 시 4~25 MV X-선 사이에 steepest dose fall-offs면에서 dose gradient는 완전히 같았으며 shallowest dose fall-offs 면에서는 저 에너지의 방사선에서 dose gradient가 약간 떨어지는 결과를 보였으나 그 차이가 극히 미미하여 4~25 MV X-선 사이의 모든 에너지의 방사선이 방사선수술에 이용

될 수 있다는 결론을 얻었다¹⁶⁻¹⁸⁾. 본 연구에서도 film dosimetry를 이용하여 6 MV와 15 MV X-선을 비교한 결과, steepest와 shallowest dose fall-offs면에서의 dose gradient와 A값 모두 극히 미세한 차이로 6 MV X-선이 우수하였으나 유의한 차이가 없어 Pike의 결과와 본연구의 측정결과를 근거로 모든 에너지의 megavoltage X-선은 방사선수술에 이용이 가능할 것으로 생각된다.

arc 수에 따른 선량분포의 차이에 대해서는 Schell 등이 3차원적 geometry에 근거한 cumulative dose volume histogram을 이용한 분석에서 선형가속기를 이용한 방사선수술시 10 arcs와 5 arcs 간에 선량분포의 차이는 10% 이하의 선량에 국한되고 유의한 차이가 없어, 환자에서 방사선수술시 시간 효율면에서 10 arcs보다 5 arcs를 선호한다고 보고하였다¹²⁾. Podgorsak등도 컴퓨터를 이용하여 dynamic radiosurgery시 4에서 11 arcs 사이에 근본적인 선량분포의 차이가 없음을 보고하였고⁴⁾ 본연구에서도 4, 7, 11 arcs 간에 dose gradient에서 차이가 없음을 보였다. 이러한 결과는 어느 정도까지는 arc 수가 증가할수록 target 밖으로 조사되는 방사선이 더 큰 범위로 분산되기 때문에 더욱 급격한 dose gradient를 얻을 수 있으나, 이러한 효과는 arc 수를 늘이면 늘일수록 연이은 arc 사이에 각도가 작아지므로 target에 가까이 인접한 arc들이 서로 겹쳐져 target 바로 주위에서 dose fall-offs면에서 아무런 향상을 기대할 수 없기 때문이다. 따라서 방사선수술 계획시 병변의 위치와 크기에 따라 optimization이 선행되어야 하겠으나 일반적으로 치료 과정과 시간을 고려한다면 4~7 arcs 정도가 적합할 것으로 생각된다.

선형가속기를 이용한 방사선수술시에는 원형의 collimator를 기존의 선형가속기에 부착하여 사용하므로써 구(spherical)형의 선량분포를 얻을 수 있고 또한 collimator에서 isocenter까지의 거리가 짧아지므로 penumbra를 최소화하고 조사면을 맞추는 데 오차를 줄일 수 있는 장점이 있어 거의 모든 기관에서 원형의 collimator를 사용하고 있다^{2,5,19-22)}. 그러나 Smith등이 film dosimetry를 이용하여 3차 collimator의 장점을 보고한 것²³⁾ 이외에 선형가속기의 collimator에 의한 정방형 조사면과 원형의 3차 collimator에 의한 원형조사면에서의 방사선수술시의 선량분포를 측정하여

분석한 연구 결과는 거의 없는 상태이다. 본 연구에서는 연세암센터 치료방사선과에서 고안하여 제작한 원형의 collimator를 이용한 원형 조사면과 선형가속기의 collimator에 의한 정방형 조사면에서의 선량분포를 비교한 결과, 원형 조사면에서는 원형의 선량 분포 곡선을 얻을 수 있었으나 정방형 조사면에서는 정방형에 가까운 각이진 모양이었다. penumbra 역시 원형조사면에서 작았고, 유의한 차이는 없었으나 dose gradient도 원형 조사면에서 근소한 차이로 우수하였다.

결론적으로 6 MV X-선에서 약간 우수한 선량분포를 보였으나 유의한 차이가 없어 6 MV와 15 MV X-선 모두 방사선수술에 이용되어도 무방할 것으로 생각되며, 1 arc당 120°로 하였을때 4, 7, 11 arcs 사이의 의미있는 차이가 없어 arc 수를 많이 함으로써 선량분포의 향상을 가져오지 못하였고, 원형의 3차 collimator를 이용함으로써 구형의 선량분포 곡선을 얻을 수 있었고 유의한 차이는 아니었으나 선형가속기의 정방형의 조사면에 비해 우수한 dose gradient를 얻을 수 있었다.

본 실험의 정확도를 확인하기 위해서 저자들은 앞으로 본 실험의 측정결과들을 소조사면 측정자료를 이용한 방사선 수술 계획용 컴퓨터로 얻은 선량분포와 비교하고자 하며 결과들을 좀더 정확히 평가하기 위해서는 평가기준으로 volume이 사용되어야 하므로 본 실험에 덧붙여서 cumulative dose volume histogram을 이용하여 분석한 결과를 추가하여 보고할 예정이다.

결 론

film dosimetry를 이용하여 선형가속기를 이용한 방사선수술의 선량분포를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 선량분포 곡선의 모양과 dose gradient면에 있어서 모든 크기의 조사면에서 6 MV와 15 MV X-선 사이에 유의한 차이가 없어 두 에너지의 X-선 모두 방사선수술에 사용되어도 무방할 것으로 생각된다.

2) 모든 크기의 조사면에서 선량분포 곡선의 모양과 dose gradient에 있어서 4, 7, 11 arcs 사이에 차이가 없어 arc 수를 많이하므로써 선량분포의 향상을 가져올 수 없었다. 따라서 방사선수술 계획시 병변의 위

치와 크기에 따라 optimization이 선행되어야 하겠으나 일반적으로 치료 과정과 시간을 고려한다면 arc 수를 너무 많이 하는 것보다 4~7정도의 arc 수가 적합할 것으로 생각된다.

3) dose gradient면에서는 선형가속기에 의한 정방형조사면에 비해 3차 collimator에 의한 원형조사면에서 극히 미미한 차이로 우수하여 유의한 차이가 없었으나 선량분포곡선의 모양이 선형가속기의 정방형조사면에서는 정방형의 각이진 모양을 보인 반면 원형의 collimator를 사용하여 원형의 선량분포를 얻을 수 있었고 collimator와 isocenter 사이의 거리가 짧아지므로 penumbra를 줄이고 조사면을 맞추는데 오차를 줄일 수 있으므로 3차 collimator가 반드시 필요할 것으로 생각된다.

REFERENCES

- Chierego G, Marchetti C, Avanzo RC, et al: Dosimetric consideration on multiple arc stereotactic radiotherapy. *Radiation Oncol* 12:141-152, 1988
- Hartmann GH, Schlegel W, Sturm V, et al: Cerebral radiation surgery using moving field irradiation at a linear accelerator facility. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 11:1185-1192, 1985
- Phillips MH, Frankel KA, Lyman JT, et al: Comparison of different radiation types and irradiation geometries in stereotactic radiosurgery. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 18:211-220, 1990
- Podgorsak EB, Pike GB, Oliver A, et al: Radiosurgery with high energy photon beams: A comparison among techniques. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 16:857-865, 1989
- Betti OO, Munari C, Rosler R: Stereotactic radiosurgery with the linear accelerator: Treatment of arteriovenous malformations. *Neurosurgery* 24:311-321, 1989
- Colombo F, Benedetti A, Pozza F, et al: Linear accelerator radiosurgery of cerebral arteriovenous malformations. *Neurosurgery* 24:833-839, 1989
- Loeffler JS, Alexander III E, Siddon RL, et al: Stereotactic radiosurgery for intracranial arteriovenous malformations using a standard linear accelerator. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 17:673-677, 1989
- Loeffler JS, Rossitch Jr E, Siddon RL, et al: Role of stereotactic radiosurgery with a linear accelerator in treatment of intracranial arteriovenous malformations and tumors in children. *Pediatrics* 85:774-782, 1990
- Souhami L, Oliver A, Podgorsak EB, et al: Radiosurgery of cerebral arteriovenous malformations with dynamic stereotactic irradiation. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 19:775-782, 1988
- Chen GTY: Dose volume histograms in treatment planning. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 14:1319-1320, 1988
- Flickinger JC: An integrated logistic formula for prediction of complications from radiosurgery. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 17:879-885, 1989
- Schell MC, Smith V, Larson DA, et al: Evaluation of radiosurgery with cumulative dose volume histogram in linac-based stereotactic external beam irradiation. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 20:1325-1330, 1991
- Patten LV, Purdy JA, Oliver GD: Automated film dosimetry. *Med Phys* 1:110, 1974
- Jacobson A: 4 MeV film dosimetry. *Radiology* 103:703-704, 1972
- Williamson JF, Khan FM, Sharma S: Film dosimetry of megavoltage photon beam: A practical method of isodensity-to-isodose curve conversion. *Med Phys* 8:94-98, 1981
- Pike B, Podgorsak EB, Peters TM, et al: Dose distributions in dynamic radiosurgery. *Med Phys* 14:780-789, 1987
- Pike B, Podgorsak EB, Peters TM, et al: Dose distributions in radiosurgery. *Med Phys* 17:296-304, 1990
- Pike B, Podgorsak EB, Peters TM, et al: Three dimensional isodose distributions in stereotactic radiosurgery. *Stereotact Funct Neurosurg* 54+55:519-524, 1990
- Freidman WA, Bova FJ: The University of Florida radiosurgery system. *Surg Neurol* 32:334-342, 1989
- Lutz W, Winston KR, Maleki N: A system for stereotactic radiosurgery with a linear accelerator. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 14:373-381, 1988
- Podgorsak EB, Oliver A, PLa M, et al: Dynamic stereotactic radiosurgery. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 14:115-126, 1988

22. **Winston KR, Lutz W:** Linear accelerator as a neurosurgical tool for stereotactic radiosurgery. *Neurosurgery* 22:454-464, 1988

23. **Smith V, Schell MC, Larson DA:** The role of tertiary collimation for linac-based radiosurgery. *Med Phy* 16:461, 1989
