

## 방사선 수술시 Isocenter, 콜리메이터 변수에 따른 선량 분포 비교연구

가톨릭대학교 의과대학 의공학교실  
가톨릭대학교 의과대학 강남성모병원 신경외과\*

오승중 · 박정훈 · 광철은 · 이형구 · 최보영 · 이태규\* · 김문찬\* · 서태석

방사선 수술시 예상되는 치료효과를 위해 종양에 미리 정의된 방사선량이 조사되도록 수술을 계획한다. 이러한 수술계획시 다양한 모양의 종양에 대해 수술 계획을 수행하는 것은 많은 시간과 숙련된 수술계획자가 요구된다. 최근 들어, 뛰어난 컴퓨터 기술의 발달로 컴퓨터를 이용한 수술계획 방법들이 많이 연구 발표되고 있으나 현재 대부분의 수술계획은 주로 시행착오를 통한 방법으로 이루어진다. 본 연구에서는 방사선 수술계획시 고려되는 많은 빔관련 변수들을 고려하고 다양한 형태의 종양들을 원통형으로 가정한 후 이 종양모델을 50% 등선량 곡선내에 포함시킬수 있는 변수들을 찾아 이들을 비교 분석하였다. 수많은 변수들 중 본 연구에서 고려한 변수는 콜리메이터 크기, isocenter의 개수와 isocenter 간의 거리이고 이때 얻어진 선량분포는 Dose Volume Histogram(DVH)과 Dose Profile로 서로 비교하였다. 비교 결과 우리가 가정한 50% 등선량 곡선내에 종양모델을 포함시키기 위해서는 일정 개수 이상의 isocenter의 사용은 치료의 복잡성만을 증가시킬뿐 Dose Profile과 DVH에서의 변화는 눈에 띄게 향상되지 않았다. 또한 같은 콜리메이터 크기로 같은 개수의 isocenter를 사용할 때 isocenter의 거리가 지름대비 1.0-1.2 일 경우의 DVH와 Dose profile이 상대적으로 우수하게 나타났다.

**중심단어** : 방사선 수술, 수술계획, 종양모델, 최적화 변수

### 서 론

정위적 방사선 수술은 한번에 고선량의 방사선을 병변에 조사하여 치료한다. 일반적인 방사선 치료와는 달리 단 1회로 치료가 끝나기 때문에 병변에 충분한 양의 방사선이 조사되도록 수술계획을 세우는 것이 중요하다. 수술계획시 수술계획자는 병변에 처방선량내의 방사선이 조사되면서 주위의 정상조직에는 가능한 적은 양의 방사선이 조사되도록 수술계획을 수립한다. 현재 감마나이프, 선형가속기, 대전입자빔 등이 정위적 방사선 수술을 하는데 사용되고 있으며, 본 연구에서는 선형가속기를 사용한 방사선 수술의 수술계획에 대해 고려하고자 한다.

선형가속기에 특수 제작한 콜리메이터를 사용하여 하나의 isocenter에 대해 다중호(multi arc)를 균등하게 위치

시키면 고선량(70-80%)에서의 등선량이 isocenter를 중심으로 구형으로 이루어진다.<sup>1,2)</sup> 이러한 성질을 이용하여, 선형가속기를 이용한 정위적 방사선 수술에서의 수술계획은 표적의 대략적인 3차원적 모양을 바탕으로 하여 isocenter의 수를 결정한 후 각 isocenter의 위치와 콜리메이터의 크기, isocenter에 대한 호(arc)의 위치를 결정한다. 이후 선량계산을 통해, 등선량 곡선이 표적과 일치하는지를 확인한다. 이 과정에서 만족스럽지 못한 등선량 곡선이 얻어질 경우 위의 과정을 반복하여 최종적인 수술계획을 수립한다.<sup>3)</sup>

이러한 시행착오를 통한 수술계획의 경우 계획결과는 계획자의 숙련정도와 판단에 많이 의존하며 많은 시간을 소비한다. 이런 이유로 컴퓨터 기술의 발달과 더불어 컴퓨터를 사용한 수술계획 방법들이 많이 연구되어왔다.<sup>3-5)</sup> 이러한 연구들은 isocenter의 개수와 위치, 콜리메이터 크기 등을 표적에 따라 최적화 시키는 방법들을 설명하고 있다. 그러나 이러한 최적화 기법들은 너무 많은 변수들을 고려하기 때문에 많은 계산시간을 필요로 한다. 본 연구에서는 최적화 기법에서의 고려 변수를 줄이고자 위의 변수들의 변화와 선량분포와의 변화를 비교연구해 보고자 한다.

이 논문은 2002년 7월 5일 접수하여 8월 26일 채택됨.  
본 연구는 보건복지부 선도기술·의료공학 기술개발사업(HMP-98-G-1-016) 연구비 지원에 의해 수행되었음.  
책임 저자: 서태석, 서울특별시 서초구 반포동 505  
가톨릭대학교 의과대학 의공학교실  
Tel: 02)590-2420, E-mail: suhsanta@catholic.ac.kr

대상 및 방법

1. 연구 모델 및 목적

본 연구는 실제 환자의 영상자료를 바탕으로 하지 않고 임의로 정의한 계산영역과 표적에 대해 수행되었다. 이처럼 정의된 표적이 50% 등선량 곡선에 포함되도록 isocenter 간의 거리와 개수, 콜리메이터 크기를 변화시켜가면서 이에 따른 치료효과를 비교 연구하고자 하였다. 이를 위해 정의된 계산영역은 4×4×4 cm<sup>3</sup>의 정육면체이고 이를 1 mm간격으로 40×40×40개의 point로 나누어 각 point에서 선량계산을 수행하였다. 표적은 원통형의 표적을 선택하였으며 원통의 지름(D)과 높이(H)의 비를 1:2, 1:3, 1:5로 다르게 하여 총 3종류의 모델에 대해 연구를 수행하였다(Fig. 1).

2. 선량계산 알고리즘

선형가속기를 이용한 다중호(multi arc) 방사선 수술에서 선량계산모델은 선량 분포가 구형으로 이루어짐을 이용한 많은 구형선량모델들이(spherical dose models) 있다.<sup>7-10)</sup> 특히 Rice 등<sup>7)</sup>은 Cunningham model<sup>6)</sup>에 바탕을 둔 Single isocentric dose model을 제안하였다. 임의의 갠트리와 치료테이블의 조합(ij)에서 한 점, m에서의 선량은

$$D(C_j, STD_{ijm}, d_{ijm}, r_{ijm}) = D_{ref} \times ROF(C_j) \times TMR(w_{ijm}, d_{ijm}) \times (SAD/STD_{ijm})^2 \times OAR(C_j, STD_{ijm}, r_{ijm}) \dots (1)$$

C: SAD에서의 콜리메이터 크기

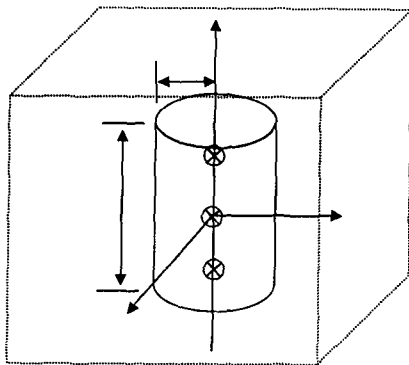


Fig. 1. Cylindrical target model.

SAD: 소스와 회전축과의 거리(100 cm)

STD: 소스와 표적과의 거리

d: 표면에서 m까지의 거리

로 나타낼 수 있다. 이를 모든 갠트리와 치료테이블에서의 조합에 대해 나타내면 임의의 한 점, m에서의 선량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_m = \sum_j \sum_i D_{ijm} \dots (2)$$

본 연구에서 사용한 선량계산식은 Single isocentric dose model을 5개의 상수를 사용해 곡선회귀 시킨 Spherical Dose Model<sup>8)</sup>이다. SAD에서의 콜리메이터의 크기가 C일 경우 isocenter에서 C/2이내의 거리에 위치한 곳에서의 선량은

$$D = 1 - S_1 \cdot \exp[-S_2 \times (\frac{C}{2} - r)] - S_3 \times (\frac{C}{2} - r^2) \dots (3)$$

와 같이 나타내어지며, C/2 이상의 거리에 위치한 곳에서의 선량은

$$D = S_4 + (1 - S_1 - S_4) \cdot \exp[-S_3 \times (r - \frac{C}{2})] \dots (4)$$

와 같이 나타내어진다.

위의 선량계산식을 바탕으로 C언어를 이용해 선량계산 프로그램을 작성하였다. 선량계산 프로그램은 표적모델의 높이와 지름을 입력받아 표적모델을 생성한 후, isocenter의 개수, 각 isocenter의 x, y, z 좌표, 콜리메이터 크기를 입력받아 계산영역의 각 point에서의 선량을 계산한다. 계산결과는 최대값을 100으로 놓고 이에 대해 정량화(normalization)하여 출력하도록 하였다.

3. 최적화 관련 변수 결정

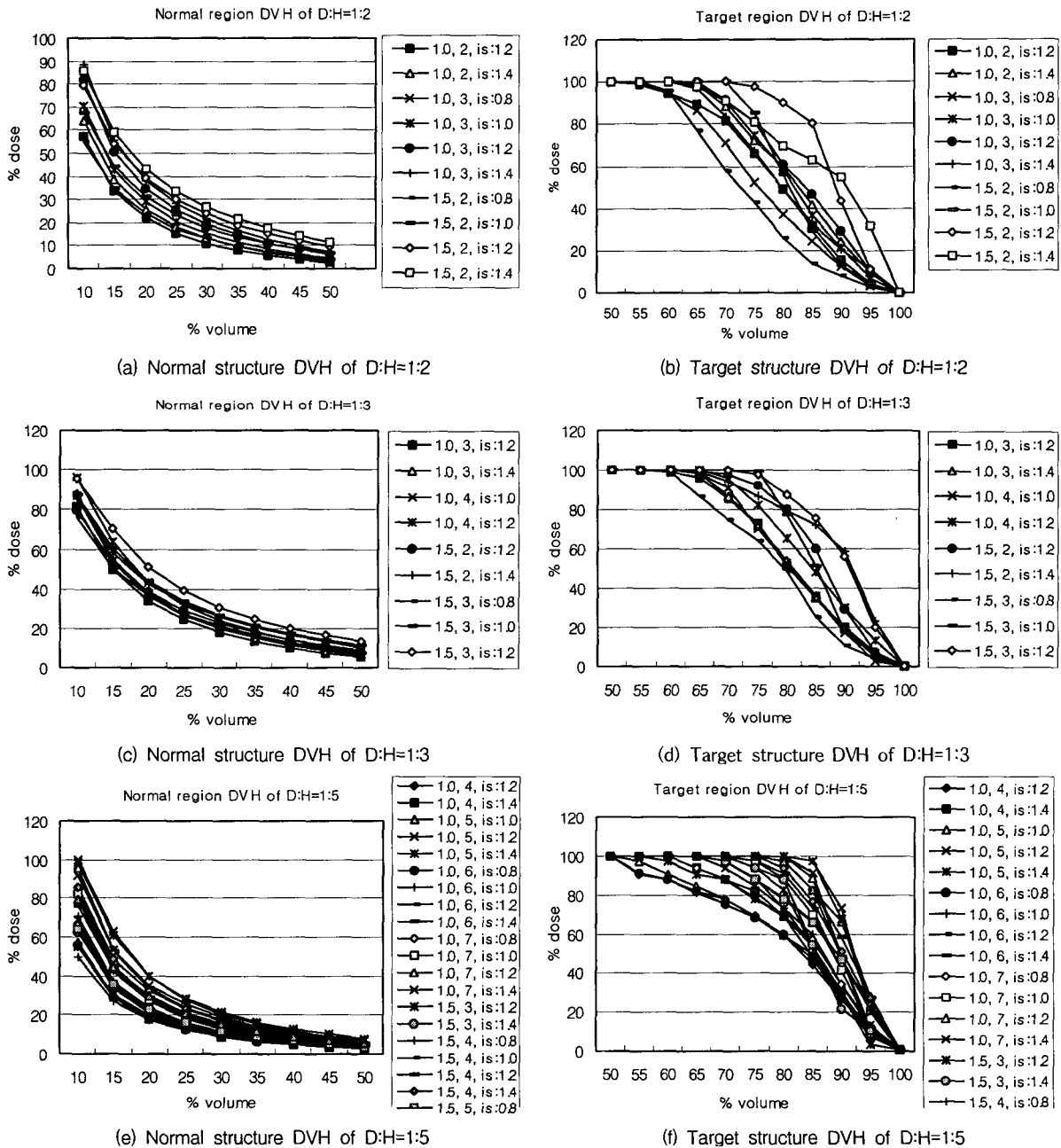
실제 방사선수술시에는 isocenter의 위치와 개수, 각 isocenter에 대한 콜리메이터 크기, isocenter에 대한 호(arc)의 위치 등 매우 많은 변수들을 고려해야 한다. 본 연구에서는 이러한 변수들 중에서 콜리메이터 크기, isocenter의 개수, isocenter 간의 거리, 세 가지만을 고려하

Table 1. Beam parameter

빔관련 변수	콜리메이터 크기	Isocenter 개수	Isocenter 간 거리
변수 범위	1.0, 1.5	2-7개	0.2씩 증가 0.8-1.4

**Table 2.** The %volume difference between using minimum isocenters and the others

	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
D:H=1:2 C=1.0	0.47±0.81	1.88±3.26	4.55±6.69	7.48±8.51	10.27±8.58	8.35±12.01	9.21±7.10	6.57±4.27	3.10±2.79	0.02±0.03
D:H=1:3 C=1.0	0	0	0.96±1.35	6.21±3.38	5.90±5.86	6.25±6.48	6.30±8.56	6.34±6.47	5.46±1.07	0.04
D:H=1:3 C=1.5	0	0.53±0.92	4.81±6.66	9.32±11.17	13.35±12.95	13.60±15.39	19.62±13.65	18.90±7.55	6.01±5.61	0.01±0.02



**Fig. 2.** DVH result

였다(Table 2). 이 세가지 변수들을 변경시켜 가면서 이때의 선량 분포를 DVH<sup>11)</sup>와 Dose Profile을 통해 비교분석 하였다. 콜리메이터 크기는 표적의 지름(D)과의 비(ratio)로서 1.0, 1.5의 두 가지를 사용하였으며, isocenter의 개수는 최소 2개에서 최대 7개까지 종양모델의 크기에 따라 다르게 하여 사용하였다. isocenter 간의 거리는 콜리메이터 크기(C)와의 비(ratio)로 0.8에서부터 0.2씩 증가시켜가면서 역시 마찬가지로 표적의 크기에 따라 최대 1.4까지 변화시켰다.

4. 결과

세 가지 표적모델(D:H=1:2, 1:3, 1:5) 각각에서의 연구 결과중 목적으로 한 50% 이상의 등선량 곡선내에 표적을 포함시키는 경우들이 많이 나타났다. Fig. 2는 우리가 정의한 표적(Target structure)과 전체 계산영역에서 표적을 제외한 부분(Normal structure)에 대한 DVH를 나타내고 있다. Fig. 2(a)에서 첫 번째 계열인 1.0, 2, is:1.2은 콜리메이터 크기가 표적모델의 지름과 같고 2개의 isocenter를 원점을 중심으로 z축상에 콜리메이터 크기의 1.2 배만큼 균등하게 위치시켰을 경우의 결과임을 나타낸다. 이 그래프들 중 표적영역에서의 DVH를 살펴보면 isocenter의 개수가 적을지라도 50% 내에 표적을 포함시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

전체 영역에 비해 표적의 부피가 상대적으로 작기 때문에 Normal structure에서의 DVH는 별다른 차이를 보이고 있지 않다. 그러나 D:H=1:2, 1:3인 경우 표적에서의 DVH를 살펴보면 isocenter 개수가 하나 이상 증가되더라도 별다른 변화를 주지 못하고 있음을 볼 수 있다(Table 3). 또한 이 그래프에서 isocenter 간의 적정 거리가 콜리메이터 크기와 비교해 1.2배 일 경우임을 확인할 수 있다.

D:H=1:5인 경우 이를 더 잘 나타내고 있다. 즉 iso-

Table 3. Results of D:H=1:2, 1:3, 1:5

D:H 비율	콜리메이터 크기	Isocenter 개수	Isocenter 간 거리	종양 커버 등 선량곡선
1:2	1.0	2	1.2	50%
	1.5	2	0.8	55%
1:3	1.0	3	1.2	55%
	1.5	2	1.2	60%
1:5	1.0	4	1.2	50%
	1.5	3	1.2	55%

center의 개수가 콜리메이터 크기 1.0을 사용할 경우 4-7 개까지 다양하게 변화하고 있으나 역시 마찬가지로 4개의 isocenter를 사용해 1.2배 정도의 거리를 두고 배치할 경우 많은 개수의 isocenter를 사용하여 0.8, 1.0, 1.4의 거리를 두고 배치한 경우보다 상대적으로 우수한 DVH를 보이고 있다. 콜리메이터 크기를 증가시켰을 경우에 대해서도 많은 수의 isocenter를 사용할 경우보다 콜리메이터를 증가시켜 사용되는 isocenter의 수를 줄이더라도 DVH 결과는 비슷하거나 오히려 뛰어남을 확인 할 수 있다. 또한 적은 크기의 콜리메이터를 사용할 경우보다 사용되는 isocenter의 수를 줄이면서도 비슷한 결과를 보이고 있다.

이러한 결과들 중 적은 수의 isocenter를 사용하여 50% 선량내에 표적을 포함한 경우를 나타내면 Table 3과 같다.

이상의 결과들에 대한 Dose Profile을 원점에서의 원통의 z축 방향(H), x축 방향(C), 원통의 윗면에서의 y축 방향(T)으로 도시하였다(Fig. 3-5).

위의 결과들을 보면 콜리메이터 크기를 증가시킬 경우

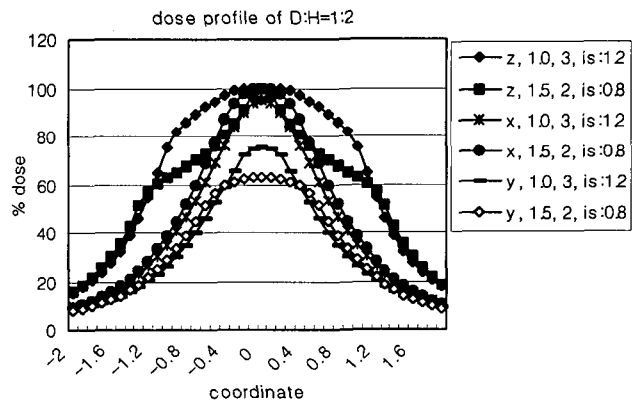


Fig. 3. Dose profile of D:H=1:2.

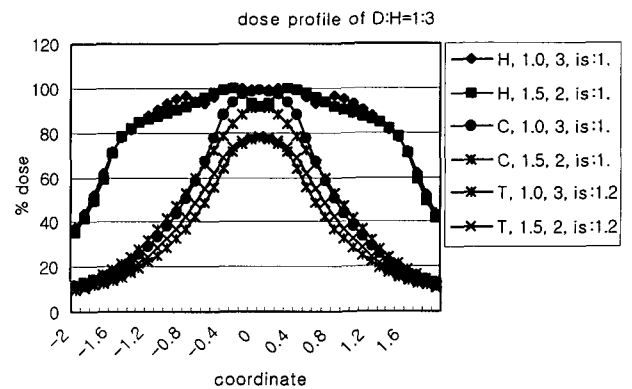


Fig. 4. Dose profile of D:H=1:3.

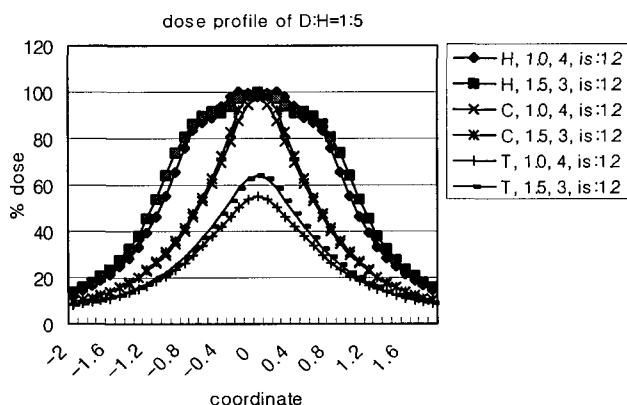


Fig. 5. Dose profile of D:H=1:5.

Table 4. Dose difference in target structure

	D:H=1:2	D:H=1:3	D:H=1:5
중심에서의 x축	11.07±2.23	8.37±1.62	3.48±1.14
표면에서의 y축	6.87±4.55	2.76±2.09	8.54±0.72
중심에서의 z축	14.07±6.02	2.25±2.13	3.92±2.73

isocenter의 수를 적게 사용하여도 비슷한 profile을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. Table 4는 위의 결과들에서 선량값의 차들에 대한 평균값과 표준편차를 나타낸 것이다.

### 결 론

본 연구에서는 세 가지 표적모델에 대해 표적을 50% 등선량 곡선내에 포함시키기 위하여 세 가지 빔관련 변수들을 변화시켜가며 결과를 얻었다. 이상의 결과들에서 D:H=1:3, 1:5인 모델의 경우 콜리메이터 크기를 증가시키면 선량분포에 별다른 변화를 주지 않고 많은 수의 isocenter를 사용하는 것과 비슷한 dose profile을 얻을 수 있었으나, 높이가 지름에 근접하면(D:H=1:2) 콜리메이터 크기가 증가할 경우 dose profile의 차이가 증가하는 것을 확인할 수 있다(Table 4). 종양의 비대칭성이 감소(D/H가 1에 근접)할 경우 콜리메이터 크기를 증가시키기 보다는 isocenter의 수를 증가시키는 것이 선량 균일성에 좋은 영향을 미칠 것이라 사료되어진다(Fig. 3).

이번 연구에서는 원통형 모델의 경우에 대해 수행되었으나 다른 모델들에 대해서도 후속연구가 필요하다고 보여진다. 이를 통해 각기 다른 모양의 실제 종양을 우리가 구한 이상형 종양모델로 근사하고 이후 미리 수행된 연구 결과를 바탕으로 방사선수술시 빔관련 변수들을 설정함으

로 수술계획시 계획의 초기값으로서 도움이 될 것이다.

### 참 고 문 헌

1. Wendell Lutz, Ken R. Winston, Nasser Maleki: A system for stereotactic radiosurgery with a linear accelerator. *Int. J. Radiation Oncology Biol Phys.* 14:373-381 (1988)
2. Sanford L. Meeks, John M. Buatti, Francis J. Bova, William A. Friedman, William M. Mendenhall: Treatment planning optimization for linear accelerator radiosurgery. *Int. J. Radiation Oncology Biol Phys.* 41(1):183-197 (1998)
3. Hsiao-ming Lu, Hanne M. Kooy, Zach H. Leber, Robert J. Ledoux: Optimized beam planning for linear accelerator-based stereotactic radiosurgery. *Int. J. Radiation Oncology Biol Phys.* 39(5):1183-1189 (1997)
4. Thomas H. Wagner, Tael Yi, Sanford L. Meeks, Francis J. Bova, Beverly L. Brechner, Yunmei Chen, John M. Buatti, William A. Friedman, Kelly D. Foote, Lionel G. Bouchet: A geometrically based method for automated radiosurgery planning. *Int. J. Radiation Oncology Biol Phys.* 48(5):1599-1599 (2000)
5. Q. Jackie Wu, J. Daniel Bourland: Morphology-guided radiosurgery treatment planning and optimization for multiple isocenter. *Med. Phys.* 26(10): 2151-2160 (1999)
6. Johns HE and Cunningham JR: *The Physics of Radiology.* 4th ed. Thomas, Springfield, IL (1983), pp. 371
7. Rice RK, Hansen JL, Sevansson GK, Siddon RL: Measurement of dose distribution in small beams of 6MV X-rays. *Ibid.* 32:1087 (1987)
8. Suh TS, Bova. F, Yoon SC, Shinn KS, Bahk YW: Optimization of dose distribution for linear accelerator-based stereotactic radiosurgery. *Med. & Biol. Eng. & Comput.* 31:S23-S30 (1993)
9. Treuer U, Treuer H, Hoevens M, Muller RP and Strum V: Computerized optimization of multiple isocenters in stereotactic convergent beam irradiation. *Phys. Med. Biol.*, 41:675-696 (1998)
10. Paul S Cho, H Gorkem Kuterdem and Robert J marksII: A spherical dose model for radiosurgery plan optimization. *Phys. Med. Biol.*, 43:3145-3148 (1998)
11. Drzymala RE, Mohan R, Boewster L, Chu J, Goitein M, Harms W, Urie M: Dose-volume histograms. *Int. J. Radiat. Oncol Biol Phys.* 21:714 (1991)

## A Comparison Study with the Variation of Isocenter and Collimator in Stereotactic Radiosurgery

Seung-Jong Oh, Jeong-Hoon Park, Cheol-Eun Kwark, Hyung-Koo Lee,  
Bo-Young Choe, Tae-Kyu Lee\*, Mun-Chan Kim\*, Tae-Suk Suh

*Department of Biomedical Engineering, Catholic University of Korea*

*\*Department of Neurosurgery, Catholic University of Korea*

The radiosurgery is planned that prescribed dose was irradiated to tumor for obtaining expected remedial value in stereotactic radiosurgery. The planning for many irregular tumor shape requires long computation time and skilled planners. Due to the rapid development in computer power recently, many optimization methods using computer has been proposed, although the practical method is still trial and error type of plan. In this study, many beam variables were considered and many tumor shapes were assumed cylindrical ideal models. Then, beam variables that covered the target within 50% isodose curve were searched, the result was compared and analysed. The beam variables considered were isocenter separation distance, number of isocenters and collimator size. Dose distributions obtained with these variables were analysed by dose volume histogram(DVH) and dose profile at orthogonal plane. According to the results compared, the use of more isocenters than specified isocenter doesn't improve DVH and dose profile but only increases complexity of plan. The best result of DVH and dose profile are obtained when isocenter separation was 1.0-1.2 in using same number of isocenter.

**Keywords :** SRS, Planning, Ideal model, Optimization parameter