

방사선 수술시 경험적 표적 근사화에 근거한 최적화 방법 개선

가톨릭대학교 의과대학 의공학교실, *전남대학교병원 방사선종양학과

오승종 · 최경식 · 송주영* · 서태석

정위적 방사선수술(stereotactic radiosurgery, SRS)은 한번에 고선량의 방사선을 병변에 조사하는 방사선 치료법으로 단 한번의 조사로 고선량의 방사선이 환자에게 주어지므로 정확한 수술계획의 수립이 필요하다. 현재, 수술계획은 수술계획자에 의해 직접 시행착오를 거듭하며 수립되고 있으며 이로 인해 계획의 재연성과 신뢰성에 문제가 제기되고 있다. 본 연구에서는 경험적 표적 근사화에 근거한 오등의 연구방법을 바탕으로 각 단계를 개선하여 더 나은 수술계획 결과를 얻을 수 있도록 하였다. 주어지는 병소의 다양한 모양을 동일한 높이의 원통을 사용해 근사화하고, 각각의 원통의 중심점의 위치와 지름에 의해 주변의 원통과 하나로 결합시켰다. 그 후 각각의 원통 내에 등선량중심점(isocenter)을 모사한 구를 미리 정의된 규칙에 의해 채워 나갔다. 두 개의 가상 표적을 이용해 기존 알고리즘과 본 연구에서 개선한 알고리즘을 이용해 최적화를 수행하였다. 그 결과 두 개의 가상 표적에서 PTV (prescription isodose to tumour volume ratio)와 MDPD (maximum dose to prescription dose ratio)의 별다른 차이가 보이지 않았으며, 사용된 구의 수를 각각 36%, 26% 줄일 수 있었다. 원통과 구형을 이용한 이러한 기법은 정위적 방사선 수술시 수술 계획자에게 도움을 줄 수 있을 것으로 생각된다.

중심단어: SRS, 수술계획 최적화, 표적 근사화, Sphere packing

서 론

정위적 방사선수술은 정위적 기구를 사용하여 수술 부위를 고정하고 외부에 절대 좌표계를 두어, 이를 기준으로 병소의 정확한 위치를 찾아 고선량의 방사선을 한번에 조사하여 치료하는 방사선 치료법이다. 일반적인 방사선 치료와는 달리 단 1회로 치료가 끝나기 때문에 병소에 충분한 양의 방사선이 표적에 조사되도록 하는 것이 중요하다. 이를 위해서 환자의 자기공명영상(magnetic resonance imaging)과 컴퓨터단층촬영(computed tomography)영상을 이용하여 사전에 수술계획을 수립해, 병소에 처방선량의 방사선이 조사되면서 주위의 정상조직에는 가능한 적은 양의 방사선이 조사되도록 한다. 현재 감마나이프, 선형가속기, 대전입자빔 등이 정위적 방사선수술을 하는데 사용되고 있으며, 본 연구에서는 선형가속기를 사용한 방사선수술의 수술계획에 대해 고려하고자 한다.

선형가속기에 특수 제작한 콜리메이터를 사용하여 하나의 등선량중심점(isocenter)에 대해 다중호(multi arc)를 균등하게 위치시키면 60~80%의 등선량 영역이 등조사선 구를 중심으로 구형으로 이루어진다.^{1,2)} 이러한 성질을 이용하여, 선형가속기를 이용한 정위적 방사선수술에서의 수술계획은 표적의 대략적인 3차원적 모양을 바탕으로 하여 등선량중심점의 수를 결정한 후 각 등선량중심점의 위치와 콜리메이터 크기, 등선량중심점에 대한 호(arc)의 위치를 결정한다. 이후 선량계산을 통해, 등선량 곡선이 표적과 일치하는지를 확인한다. 이 과정에서 만족스럽지 못한 선량 분포가 얻어질 경우 위의 과정들을 반복하여 최종적인 수술계획을 수립한다.³⁾

이러한 시행착오(trial and error)를 통한 수술계획의 경우 계획결과는 계획자의 숙련도와 판단에 많이 의존하며 계획 과정에서 많은 시간을 소비한다. 이러한 이유로 컴퓨터 기술의 발달과 더불어 컴퓨터를 사용한 수술계획 방법들이 많이 연구되어졌다. 그러나 이러한 방법들은 많은 최종 결과를 얻기까지 많은 시간들을 필요로 하기에 현실적으로 이용하기에 많은 어려움이 있다. 이런 문제를 해결하기 위하여 오등은 원통을 사용해 표적을 근사화한 후 일정한 규칙을 따라 각각의 원통안에 등선량중심점에서 이루어지는 선량을 대표하는 구를 채워 넣는 방법을 개발·제안하였다.⁴⁾ 그러나 오등의 방법을 사용할 경우 너무 많은 등선량중심점을 사용하는 결과가 얻어지기에 현실적으로 이를 사

본 연구는 보건복지부의 지원으로 수행되었음(A04-0030-AG0301-05A2-00020B).

이 논문은 2005년 12월 6일 접수하여 2005년 12월 23일 채택되었음.

책임저자 : 서태석, (137-701) 서울특별시 서초구 반포동 505

가톨릭대학교 의과대학 의공학교실

Tel: 02)590-2420, Fax: 02)532-1779

E-mail: suhsanta@catholic.ac.kr

용하기에는 많은 문제가 존재한다.

본 연구에서는 오등의 연구방법을 바탕으로 원통을 사용해 표적을 근사화하는 방법과 구패킹 규칙을 개선하여 등선량중심점을 줄인 결과를 얻고자 한다.

대상 및 방법

연구진행 방법은 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 표적좌표계를 생성하는 단계이다. 임의의 표적이 주어질 경우 표적의 특성을 이용한 표적 좌표계를 생성하였다. 이렇게 할 경우 동일한 모양의 표적은 어떻게 주어질 지라도 표적 좌표계상에서 동일하게 나타낼 수 있다. 이는 결과의 재현성 측면에서 매우 우수한 성질을 가지고 있다. 두 번째 단계는 원통을 이용한 표적의 재구성 단계로 오등의 연구와는 달리 원통으로 표적을 재구성한 후 원통의 중심점의 위치와 반지름을 비교하여 주위의 원통과 하나로 합치는 과정이 추가되었다. 마지막 단계는 각각의 원통 안에 등선량중심점을 대표하는 구를 배치하는 것이다. 이때 사용되는 구는 원통의 높이와 같은 크기의 지름을 가지는 것으로 선형가속기를 사용한 정위적방사선수술에서 얻어지는 등선량중심을 중심으로 60~80%의 등선량 영역이 3차

원적으로 콜리메이터와 비슷한 크기의 구로 나타나는 성질을 이용하였다.

1. 표적 좌표계 생성

정위적 방사선 수술계획시에 고려되는 많은 좌표계가 있다. 이것들 중 대표적인 좌표계가 정위적 기구의 좌표계이다. 그러나 이러한 좌표계들을 이용해 수술계획을 수립하게 되면 동일한 표적이 주어질지라도 표적이 회전 또는 이동에 의해 단층영상 내에 보이는 표적의 모양이 달라지면 그에 따른 수술계획의 결과도 달라진다. 이러한 단점을 보완하고자 표적자체의 특성을 이용한 새로운 표적좌표계를 생성하였다. 새로운 좌표계를 생성하기 위해 사용할 수 있는 표적의 물리적 특성들은 많이 존재한다. 본 연구에서는 많은 물리적 특성들 중 표적내에 존재하는 최장축을 이용해 표적 좌표계를 생성하였다.

자기공명영상 또는 컴퓨터 단층영상을 이용해 표적의 2차원적 단면영상을 획득하고 이를 3차원 상에 재구성하면 3차원상에 존재하는 표적의 최장축을 구할수 있게 된다. 이렇게 얻어진 표적의 최장축을 새로운 좌표계의 z축으로 하고 좌표변환을 수행하였다(Fig. 1).

2. 원통형을 이용한 표적 재구성

표적좌표계를 생성하기 위해 찾은 최장축의 길이를 L이라 하면 표적은 표적좌표계의 z축상에 $z=L/2$ 과 $z=-L/2$ 사이에 존재한다. 동일한 높이의 원통을 z축상에 쌓아가며 아래와 같은 방법으로 표적을 재구성한다(Fig. 2).

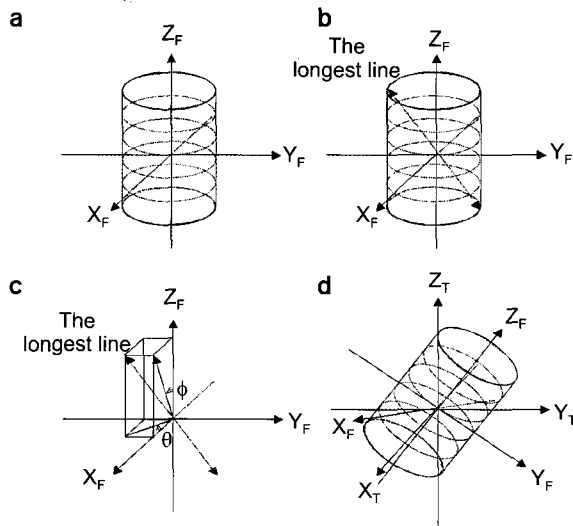


Fig. 1. Coordinate transformations from the frame coordinates to new target coordinates. (a) The target contour was obtained from MR or CT images in frame coordinates. (b) The line of longest dimension in the target was identified. (c) the angles of rotation, θ about the z-axis and ϕ about the y-axis were calculated, and the longest line was rotated sequentially about these axes. (d) the target in new target coordinates.

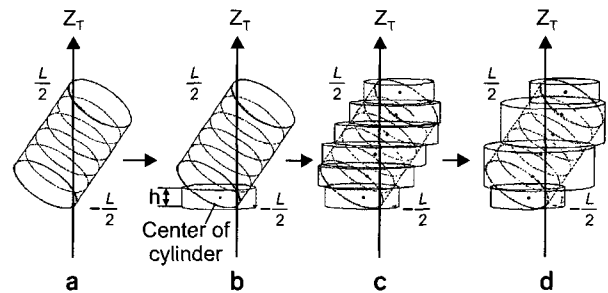


Fig. 2. Target reconstruction method using cylinders. (a) The target was transformed to the target coordinates. (b) Determine the diameter of the cylinder, D_c to include all target volume from $z=-L/2$ to $z=L/2$. The z coordinate of the cylinder center was $(8-L)/2$ and the bottom of the cylinder was parallel to the xy plane. (c) Represent the result of the construction target by the cylinders. (d) Two cylinders with 8 mm height were replaced by one with 16 mm cylinder.

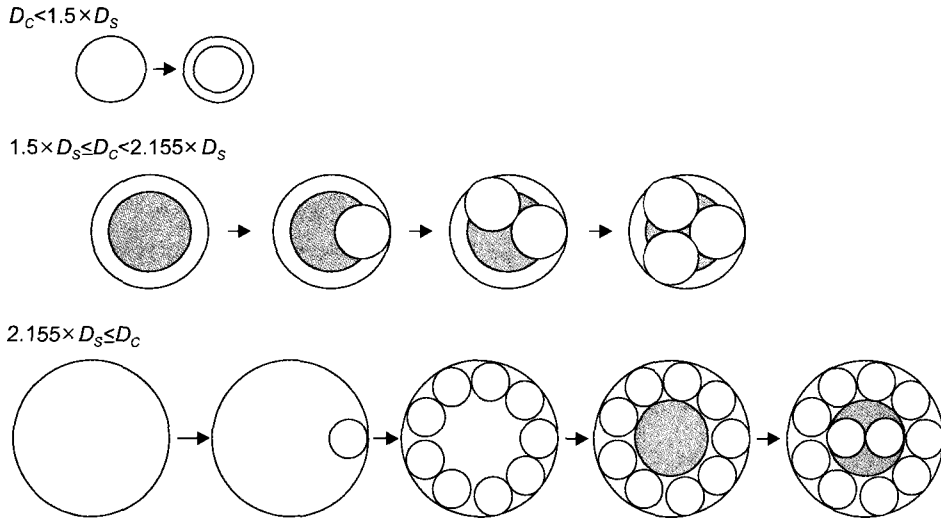


Fig. 3. The sphere packing rule for the initial 8 mm height cylinder. The spheres were packed within the cylinders according to the ratio of cylinder diameter (D_c) and sphere diameter (D_s).

1) 높이가 8 mm인 원통을 $z = -L/2$ 와 $z = 8 - L/2$ 상에 존재하는 모든 표적을 포함할 수 있도록 중심점의 위치와 반지름의 길이를 결정하여 xy 평면과 평행하도록 위치시킨다.

2) 또 다른 8 mm 높이를 가지는 원통을 마찬가지로 $z = 8 - L/2$ 와 $z = 16 - L/2$ 상에 위치하는 모든 표적을 포함하도록 위치시킨다.

3) 모든 표적이 원통 내에 포함되도록 위의 과정을 반복한다.

4) 각 원통의 중심점의 위치와 반지름을 이웃하는 원통과 비교하여 일정 범위 내에 위치할 경우 원통을 하나로 합치고 그 범위내에 존재하는 표적을 포함하도록 중심점의 위치와 반지름을 다시 결정한다.

오등의 연구에서는 3번째 단계까지만 수행하여 결과를 획득하였다. 그 결과 원통의 지름이 높이의 2.155배를 넘게 되면 원통안에 채워 넣는 구의 수가 급격하게 증가한다는 문제가 발생하였다. 본 연구에서는 이를 해결하기 위해 인접한 원통들의 하나의 원통으로 가정해도 선량분포에 큰 영향을 미치지 않도록 인접한 원통들의 반지름과 중심점의 오차범위를 결정하였다. 그 후 인접한 원통들의 반지름과 중심점의 위치가 이 오차내에 들어올 경우 원통들을 하나로 합쳐 높이를 증가시켜 지름과 높이의 비를 줄이는 해결 방법을 고안하였다.

3. 구 패킹

방사선 수술계획 시에 가장 많은 시간을 들이는 과정은 등선량중심점을 추가하고 제거하거나 콜리메이터의 크기

를 변경함에 따라 선량분포를 새로이 구하는 선량계산 과정이다. 선형가속기나 감마나이프를 사용한 방사선 수술시 선량분포는 60~80%의 등선량 영역에서 구형으로 분포한다.^{2,5,6)} 따라서 본 연구에서는 하나의 등선량중심점에 의해 얻어지는 선량분포를 그때의 콜리메이터 크기의 지름을 가지는 구로 가정하고 다음과 같은 규칙에 따라 원통내에 원통의 높이를 지름으로 하는 구를 빈틈없이 채워 넣었다. 구 배치 규칙은 구의 지름(D_s)과 원통의 지름(D_c)과의 관계와 원통의 높이에 따라 달리 선택된다. 만약 합쳐지지 않은 원통이라면 아래와 같은 규칙에 의해 구가 배치되어진다 (Fig. 3).

1) $D_c < 1.5 \times D_s$: 하나의 구를 원통의 중심에 위치시킨다.

2) $1.5 \times D_s \leq D_c < 2.155 \times D_s$: 세 개의 구를 원통으로부터 일정한 거리에 위치시키고 인접한 구와 동일한 간격을 가지도록 배치하였다.

3) $2.155 \times D_s \leq D_c$: 하나의 구를 원통에 내접하도록 위치시키고 다른 구들을 원통에 내접하며 인접한 구에 외접하도록 배치한다. 배치가 끝난 상태에서 구 사이에 공간이 남아있게 되면 구 사이에 동일한 간격을 가지도록 구를 재배치한다. 만약 내부에 남아있는 공간의 크기가 구 지름의 2배 이상이 되면 이 과정을 되풀이한다. 만약 내부에 남아있는 공간의 크기가 구 지름의 1배 초과 1.2배 미만이라면 하나의 구를 정가운데 배치한다.

오등의 연구의 문제점인 사용되는 구의 수를 줄이기 위해 하나로 합쳐진 원통의 경우에는 사용되는 구의 지름(D_s)과 원통의 지름(D_c)의 비를 달리 적용하였다(Fig. 4).

1) $D_c < 1.0 \times D_s$: 하나의 구를 원통의 중심에 위치시킨다.

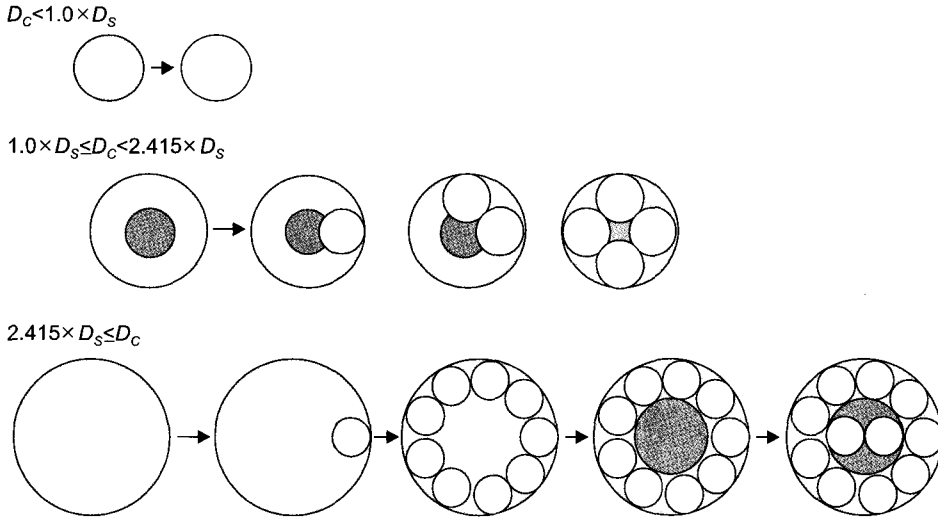


Fig. 4. The sphere packing rule for the combined 16 mm height cylinder. The spheres were packed within the cylinders according to the ratio of cylinder diameter (D_c) and sphere diameter (D_s).

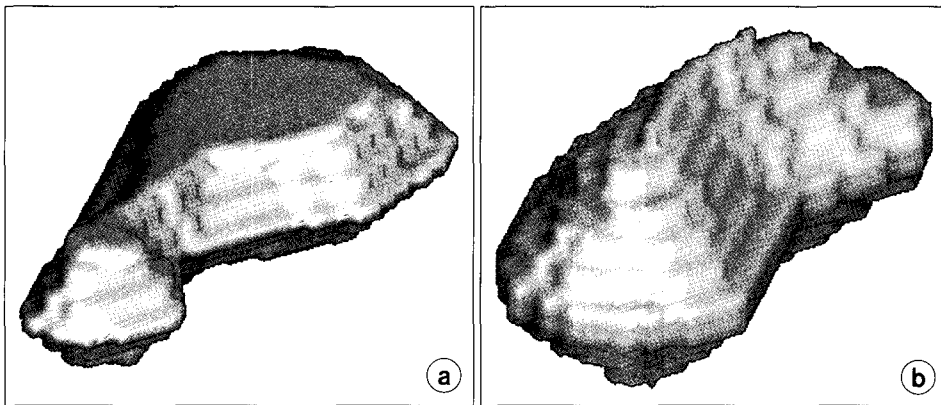


Fig. 5. 3D shade representation of the two virtual targets. (a) Target 1. Its volume is about 8.98 cc and the longest line is 53 mm. (b) Target 2. Its volume is about 9.08 cc and the longest line is 45 mm.

2) $1.0 \times D_s \leq D_c < 2.415 \times D_s$: 네 개의 구를 원통으로부터 일정한 거리에 위치시키고 인접한 구와 동일한 간격을 가지도록 배치하였다.

3) $2.415 \times D_s \leq D_c$: 하나의 구를 원통에 내접하도록 위치시키고 다른 구들을 원통에 내접하며 인접한 구에 외접하도록 배치한다. 배치가 끝난 상태에서 구 사이에 공간이 남아있게 되면 구 사이에 동일한 간격을 가지도록 구를 재배치한다. 만약 내부에 남아있는 공간의 크기가 구 지름의 2배 이상이 되면 이 과정을 되풀이 한다. 만약 내부에 남아있는 공간의 크기가 구 지름의 1배 초과 1.2배 미만이라면 하나의 구를 정 가운데 배치한다.

위의 규칙들에 의해 원통내에 등선량중심점을 나타내는 구를 배치하고 최종적인 계획 결과를 확인하기 위해 선량 계산이 필요하다. 방사선 수술을 위해 제안된 많은 선량모델들 중에서 본 연구에서는 구형선량모델을 사용하였다.

이 선량계산모델은 6 MV 선형가속기가 하나의 등선량중심점에 대해 표준 4호(arc)를 가지고 조사될때 얻어진 측정값에 대해 5개의 상수를 사용해 곡선 맞추기(curve fitting)를 이용하여 얻어진 것으로 다른 모델들과 비교하여 볼 때 빠른 계산시간과 만족할만한 계산 결과를 나타내고 있다.³⁾ 이 모델은 회전중심점의 중심에서부터 계산하고자 하는 지점의 거리(r)와 이때 사용된 콜리메이터 크기(C)라는 두 가지 변수만을 사용한다. 수식 1은 회전중심점에서의 거리 $r \leq C/2$ 일 경우의 선량모델을 나타내며 수식 2는 $r > C/2$ 일 경우의 선량모델을 나타낸다. 이 선량모델을 사용하여 계산된 선량 값은 최대값을 100%로 정량화하였다.

$$D_s = 1 - S_1 \cdot \exp[-S_2 \times (C/2 - r)] - S_3 \times (C/2 - r^2) \quad (1)$$

$$D_s = S_4 + (1 - S_1 - S_4) \cdot \exp[-S_5 \times (r - C/2)] \quad (2)$$

위의 구배치 규칙에 따라 원통내에 원통의 높이를 지름으로 하는 구를 빈틈없이 채워 넣고 구형선량모델을 이용해 선량분포를 계산해 보면 원통은 40% 이상의 등선량 내에 포함되어짐을 확인할 수 있었다. 최종적으로, 원통에 의한 구배치의 효율성을 평가하기 위하여, 가상 표적을 이용해 오 등의 연구결과와 RTOG (Radiation Therapy Oncology Group)에서 권고하는 표적에 대한 선량분포의 일치성 (prescription isodose to tumour volume ratio, PITV)과 균질성 (maximum dose to prescription dose ratio, MDPD)^{7,9)}에 대한 수치 값으로 비교하였다. 비교에 사용된 표적들의 최장축 길이는 각각 53 mm와 45 mm이며, 부피는 각각 8.98 cc와 9.08 cc이다(Fig. 5).

결 과

위에서 개발한 최적화 과정을 IDL (The Interactive Data Language, RSI, USA) 버전 5.5를 이용해 구현하였다. 먼저, 각각의 표적들은 8 mm 높이의 원통을 이용하여 재구성 하

였으며, 원통들의 중심점의 위치와 지름을 비교하여 2 mm 이내에 들었을 경우 16 mm 원통으로 합쳐주었다. 그 후 8 mm 높이의 원통내에는 8 mm의 지름을 가지는 구를 16 mm 높이의 원통내에는 16 mm의 지름을 가지는 구를 구패킹 규칙에 따라 채워 넣으며, 선량모델을 이용하여 선량분포를 확인하였다. 표적 1의 경우 오 등의 연구에서는 8 mm 원통 7개를 사용하여 표적을 재구성하였으며, 원통내에 구를 채워 넣기 위해 총 38개의 8 mm 지름의 구가 사용되었다. 본 연구에서 개선한 방법을 사용한 결과 5번째와 6번째 원통을 16 mm 높이의 원통으로 합친 후 20개의 8 mm 구와 4개의 16 mm 구를 사용하여 각각의 원통내에 채워 넣었다. 이후 선량모델을 가지고 계산한 결과 PITV는 2.97로 동일하였으며, MDPD의 경우 1.96과 2.04로 비슷하였다(Fig. 6).

두 번째 표적의 경우 이전연구에서는 8 mm 높이의 원통 6개를 사용하여 표적을 근사하였으며, 총 30개의 8 mm 구가 사용되었다. 본 연구에서 제안한 방법을 사용한 결과 3번째와 4번째 원통을 16 mm 높이의 원통으로 합치고 총

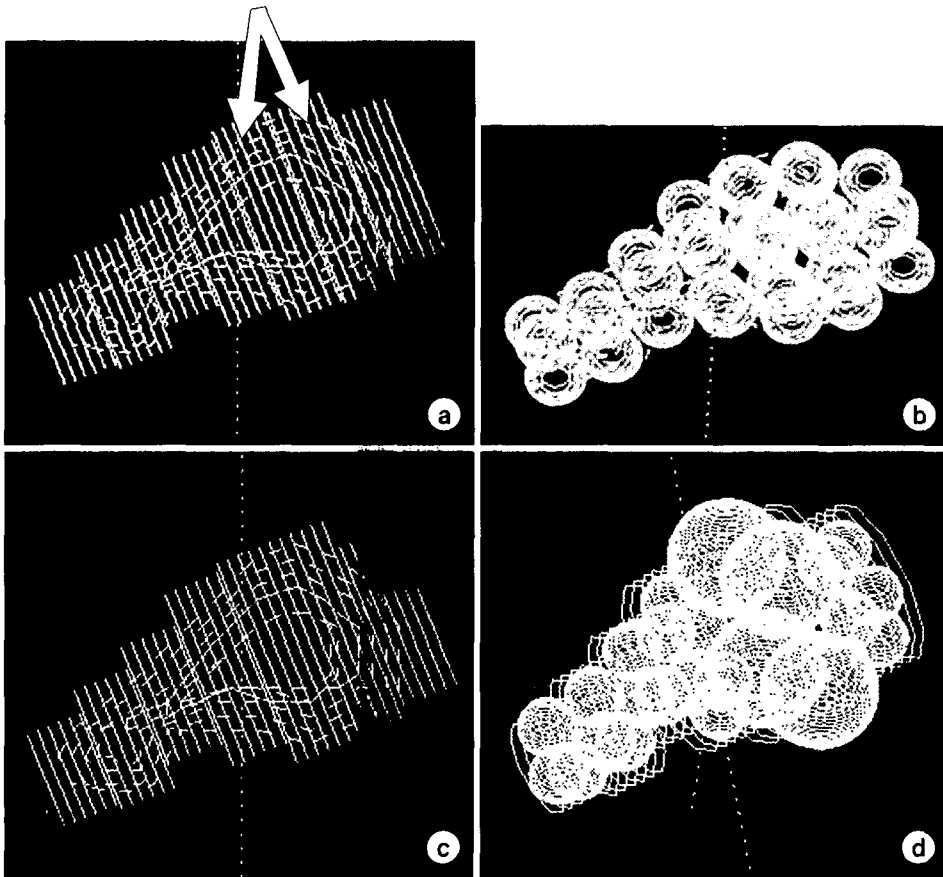


Fig. 6. The result of target 1, (a, b) The result of previous work. Cylinder piling and sphere packing. (c, d) the result of this study. cylinder piling and sphere packing. The 5th and 6th cylinders were very similar and these cylinders were combined one 16 mm cylinder

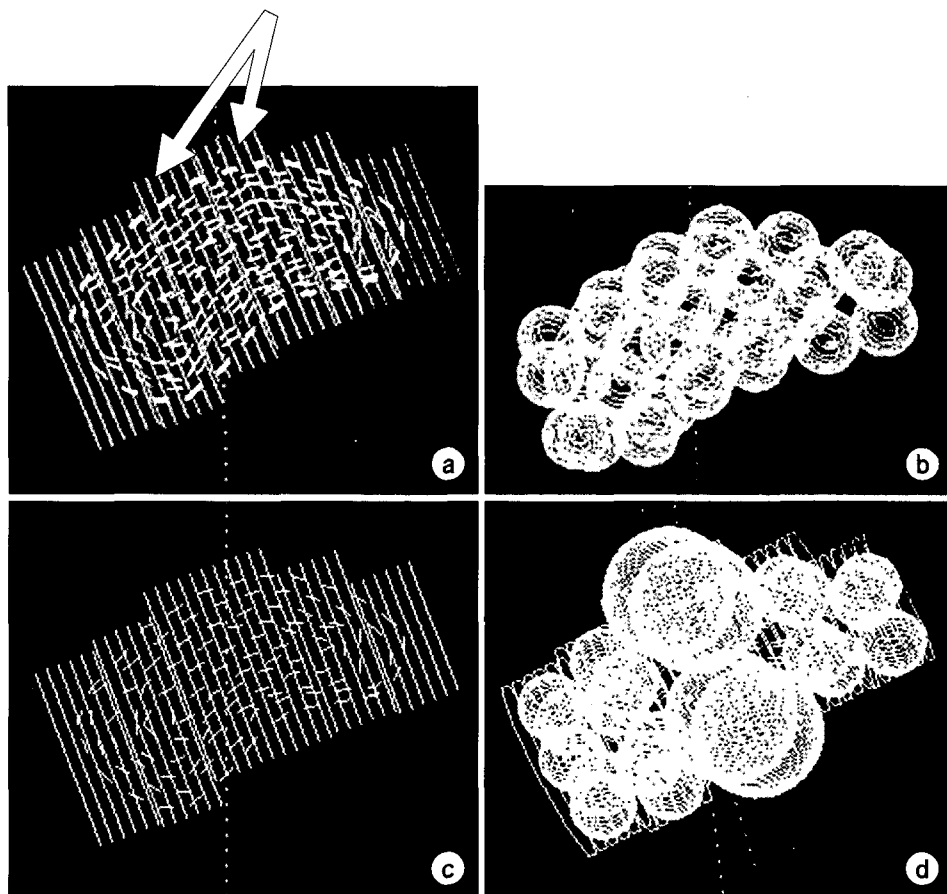


Fig. 7. The result of target 1, (a, b) The result of previous work. Cylinder piling and sphere packing. (c, d) the result of this study. cylinder piling and sphere packing. The 3rd and 4th cylinders were very similar and these cylinders were combined one 16 mm cylinder.

Table 1. The comparison results between the previous and this study.

Target	Method	MDPD	PITV	Prescription dose (%)	#Of spheres
1	Previous	1.96	2.97	51%	38
	Improved	2.04	2.97	49%	24
2	Previous	1.67	1.92	60%	30
	Improved	1.67	2.26	60%	22

22개의 구를 사용하여 각각의 원통안에 채워 넣었다. MDPD는 두 경우 모두 1.67로 동일하게 얻어졌으며 PITV는 각각 1.92와 2.26으로 얻어졌다(Fig. 7).

고 찰

본 연구에서는 방사선 수술계획 자동화를 위해 수행되었던 오등의 연구에서의 문제점 중 하나인 너무 많은 등선량 중심점을 이용한 결과를 개선하고자 원통을 이용한 표적 재구성 방법과 구 패킹 규칙을 개선하였다. 오등의 연구에

서 사용한 구 패킹은 하나의 등선량중심점에 의해 얻어지는 선량분포의 60~80% 등선량 영역이 콜리메이터의 지름과 비슷한 크기의 구로 얻어지는 성질을 이용한 것으로 이는 등선량중심점을 이동 혹은 추가·제거 할 때 매번 새로이 선량계산을 수행하지 않고 구로 대체하기 때문에 수술 계획을 수립할 때 많은 시간을 절약 할 수 있는 장점을 지니고 있다. 또한 합쳐지지 않은 모든 크기의 원통에 대해 그 내부에 본 연구에서 사용한 규칙에 따라 구를 배치한 후 선량 계산을 수행한 결과 40% 이상의 등선량내에 포함되어짐을 확인하였다. 그러나 표적을 근사화한 원통 내부

에 구를 채워 넣는 과정에서 구의 지름과 원통의 지름의 비가 일정범위(>2.155) 이상이 되면 원통을 채우기 위해 필요로 하는 구의 수는 갑작스럽게 증가하게 된다. 이를 개선하기 위하여 원통의 중심점의 위치와 지름이 인접하고 있는 원통과 비교하여 일정 범위 안에 들 경우 두 원통을 하나로 합하여 구의 지름과 원통의 지름비를 줄여 나갈 수 있었다. 2개의 가상 표적을 이용하여 이전 연구와 선량 분포를 비교하였다. 그 결과 첫 번째 가상표적의 경우 38개에서 24개로 36% 이상, 두 번째 가상표적의 경우 30개에서 20개로 26% 이상 사용된 구의 수를 줄일 수 있었으며 MDPD와 PITV를 비교하였을 때 비슷하거나 약간의 차이를 나타냄을 확인할 수 있다(Table 1).

참 고 문 헌

1. 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)
2. Wagner TH, Yi T, Meeks SL, et al: A geometrically based

- method for automated radiosurgery planning. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 48:1599-1611 (2000)
3. Suh TS, Bova FJ, Yoon SC, Shin KS, Bahk YW: Optimization of dose distribution for linear accelerator-based stereotactic radiosurgery. *Med Biol Eng Comput* 31:23-30 (1993)
4. Oh SJ, Suh TS, Song JY, et al: Development of a rapid planning technique based on heuristic target shaping for stereotactic radiosurgery. *Med Phys* 31:175-182 (2004)
5. Meeks SL, Buatti JM, Bova FJ, et al: Treatment planning optimization for linear accelerator radiosurgery. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 41:183-197 (1998)
6. Wu QJ, Bourland JD: Morphology-guided radiosurgery treatment planning and optimization for multiple isocenters. *Med Phys* 26:2151-2160 (1999)
7. Panitsa E, Rosenwald JC, Kappas C: Developing a dose-volume histogram computation program for brachytherapy. *Phys Med Biol* 43:2109-2121 (1998)
8. Wagner TH, Meeks SL, Bova FJ, et al: Isotropic beam bouquets for shaped beam linear accelerator radiosurgery. *Phys Med Biol* 46:2571-2586 (2001)
9. Shaw E, Kline R, Gillin M, et al: Radiation therapy oncology group: radiosurgery quality assurance guidelines. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 27:1231-1239 (1993)

Improvement of a Planning Technique Based on Heuristic Target Shaping for Stereotactic Radiosurgery

Seungjong Oh, Kyoung-Sik Choi, Ju-Young Song*, Tae-Suk Suh

Department of Biomedical Engineering, The Catholic University of Korea,
*Department of Radiation Oncology, Chonnam National University Hospital

Stereotactic radiosurgery (SRS) is a technique to deliver a high dose to a target region and a low dose to a critical organ through only one or a few irradiation. The SRS must be planned exactly. Currently the surgery plan is performed by trial and error method. There are many questions about the reliability and reproducibility of the plan result. This study improve each step of the Oh's method based on heuristic target shaping to obtain the better result. The target was reconstructed using cylinders with same height and the neighbored cylinders were combined according to the difference of each center and diameter. Then, spheres were packed within each cylinders by the packing rules. Two virtual targets were used to compare this method with Oh's method. As a result, the numbers of isocenter were successfully reduced - more than 36% and 26% - without serious differences of prescription isodose to tumour volume ratio (PITV) and maximum dose to prescription dose ratio (MDPD). This technique using cylinder piling and sphere packing will be a helpful tool to planner in stereotactic radiosurgery.

Key Words: SRS, Planning, Optimization, Heuristic, Data base