

입체적횡다중회전조사를 병합한 방사선수술의 새로운 접근 : 포톤나이프

계명대학교 의과대학 치료방사선과학교실

최태진 · 김진희 · 김옥배

= Abstract =

A New Approach with Combined Stereotactic Trans-multiarc Beams for Radiosurgery Based on the Linear Accelerator : Photon Knife

Tae Jin Choi, Ph.D., Jin Hee Kim, M.D. and Ok Bae Kim, M.D.

Department of Therapeutic Radiology, School of Medicine, Keimyung University

Purpose : To get an acute steepness of dose gradients at outside the target volume in intracranial lesion and a less limitation of beam selection avoiding the high dose at normal brain tissue, this Photon Knife Radiosurgery System was developed in order to provide the three-dimensional dose distribution through the reconstruction of CT scan and the combined stereotactic trans-multiarc beam mode based on linear accelerator photon beam.

Materials and Methods : This stereotactic radiosurgery, Photon Knife based on linear accelerator photon beam was provided the non-coplanar multiarc and trans-multiarc irradiations. The stereotactic trans-multiarc beam mode can be obtained from the patient position in decubitus. This study has provided the 3-dimensional isodose curve and anatomical structures with the surface rendering technique.

The dose distribution from the combined two trans-multiarcs (2M 2TM) was compared to that of four non-coplanar multiarcs (4M) with same collimator size of 25 mm in a diameter and total gantry movements.

Results : In this study, it shows that the dose distributions of stereotactic beam mode are significantly depended on the selected couch and gantry angle in same collimator size. Practical dose distribution of combined stereotactic trans-multiarc beam has shown a more small rim thickness than that of the non-coplanar multiarc beam mode in axial, sagittal and coronal plane in our study.

3-Dimensional dose line displayed with surface rendering of irregular target shape is helpful to determine the target dose and to predict the prognosis in follow-up radiosurgery.

Conclusions : 3-Dimensional dose line displayed with surface rendering of irregular target shape is essential in stereotactic radiosurgery.

This combined stereotactic trans-multiarc beam has shown a less limitation of the selection couch and gantry beam angles for the target surrounding critical organs.

It has shown that the dose distribution of combined trans-multiarc beam greatly depended on the couch and gantry angles.

In our experiments, the absorbed dose has been decreased to 27 % / mm in maximum at the interval of 50 % to 80 % of isodose line.

Key Words: Stereotactic radiosurgery, Trans-multiarc beam, Linear accelerator

서 론

방사선수술은 일시에 다량의 방사선을 병소표적에 조사하여 병변을 소멸 또는 진행증지를 유발하고 주위 정상뇌조직의 손상을 극히 줄여, 두개부의 절개없이 수술효과를 얻는 치료방법이다.

현재 통용되고 있는 방사선수술법은 사이클로트론의 양성자선에 의한 Bragg peak를 이용하는 방법¹⁾, 코발트-60 선원을 고정점속배치한 감마나이프²⁾와 전자가속기의 선형가속기의 광자선을 이용한 비공면 다중회전조사 (Non-coplanar multiarc beam) 등 이 있다³⁾.

최근 선형가속기로 비공면회전조사를 이용한 방사선수술이 날로 증가하고 있으며⁴⁾ 비공면 회전조사에는 환자의 체위변화와 동시에 선속방향을 이동하는 다이나믹방사선수술^{5, 6)}과 선형가속기의 지지체를 임의의 각도에 고정하고 환자고정대를 회전하는 세차조사법⁷⁾이 이용되고 있으나 이들은 선형가속기의 치료대 이외 별도의 환자고정장치들이 요구된다.

Phillips 등⁸⁾은 방사선종류 및 기하학적 조사방법의 차이에 따른 선량분포에 있어서 선형가속기와 감마나이프의 선량-용적그라프 (dose-volume histogram) 간 차이가 거의 없음을 발표한 바 있다.

한편, 모든 방사선수술방법은 방사선이 병변표적을 중심으로 하여 입체적으로 조사가 이루어지고 공면평행선속이 없으므로 표적중심결정과 입체적 장기모양과 선량분포를 나타내는 소프트웨어 및 환부의 고정용 기구가 매우 중요하다. 특히 대부분의 영상 진단은 2차원평면영상으로 이루어지므로 평면상에 나타난 장기 및 표적을 입체적으로 표현할 수 있어야 한다. 이것은 입체영상분석을 통한 병변의 크기와 선속방향 및 선량분포가 결정되어지기 때문이다.

본 연구는 간편한 환자고정기구를 제작하여 다중입

체회전조사와 횡다중입체회전조사를 시행할 수 있게 하여⁹⁾, 방사선수술방법의 새로운 접근을 시도하였으며, X 선의 컴퓨터단층영상 (Computed Tomogram) 영상을 이용한 방사선수술선량계획을 지원하여 포톤나이프 (Photon knife)라 명명하고 선량특성을 발표하고자 한다.

입체적 다중회전조사는 선속의 종적이동에 의해 표적을 중심으로 일자형의 궤도상에서 회전조사가 이루어지는 데 반해 횡다중회전조사를 병합한 선속이동은 표적을 중심으로 종횡으로 조사되어져 회전조사사이거의 두배가까이 증가하게 되며, 치료대와 선원회전각을 적절히 선택하여 표적을 중심으로 사각궤도상의 회전조사를 시행하게 된다. 비공면 횡다중회전 조사에 의한 방사선수술은 표적 주위의 치명정상장기에 대해 선속을 종횡으로 변경할 수 있게 하여 선속선택제한을 줄였으며, 횡다중회전조사를 병합한 경우 기울기의 변경이 비교적 다양한 선량분포를 얻을 수 있음을 보이고, 다중회전조사와 횡다중회전조사를 병용한 선량 분포의 특징을 포톤나이프 소프트웨어를 통해 발표하고자 한다.

대상 및 방법

1. 구성장비 및 기구

본대학에서 개발된 방사선수술기구 포톤나이프는 선형가속기 (ML-15MDX, Mitsubishi)의 6 MV 광자선을 이용하여 조사되며, 포톤나이프의 구성은 Fig. 1과 같이 뇌정위수술 기구인 두부고정링과 고정판, 컴퓨터단층영상의 표적을 3차원으로 해석하는 표적위치 결정기구 (CT localizer), 표적과 방사선선속을 일치시키는 위치결정기구 (positioner), 콜리메이터와 고정대, 전산화단층영상자료를 재구성하여 방사선수술을 위한 입체선량계획용 소프트웨어로 구성되어 있다.

본 연구에서 개발된 뇌정위방사선수술기구는 신경

잇과적 두개부 조직검사에 이용되는 뇌정위수술기구와 호환성이 있도록 구성되어 있다.

두개부 고정대의 고정대는 포톤나이프조사방식에서 체택한 환자체위의 변경이 용이하게 구성되어 있으며, 양외위에서 다중회전을 시행한 다음, 우와위로 이동하여 횡다중회전조사가 이루어지도록 체축과 동일한 회

전축을 가지며, 치료대에 고정했을 때 치료대의 힘에 대한 보정이 가능하고, 체위 회전후 좌표축과 일치도록 되어 있으며, 좌우이동이 가능하여 회전조사시 선원지지체와의 충돌을 방지하도록 하였다.

콜리메이터의 날두께는 8.5 반가충에 해당하는 110 mm로 일차선속을 0.3 % 까지 차폐하는 효과를 갖도록 하였으며, 물리적반음영을 줄이기 위해 구경은 기하학적으로 빙의 확산과 일치하게 되어 있다.

방사선수술계획용 소프트웨어는 모델 VAX 4000-90 워크스테이션에서 실행되며, 선량계산은 두개부의 CT 영상 (SOMARIS, SIEMENS) 자료를 광디스크 (MOD)에 저장이송하고 Fig. 2와 같이 화상처리를 시행하고, 영상선택과 표적윤곽, 표적위치의 설정을 통해 3차원적 위치해석이 자동으로 시행되며, 이 때 전산화단층영상의 활영시 비직교성에 대해서는 교정된 좌표가 출력되도록 하였다¹⁰.

표적에 대한 콜리메이터 직경의 설정은 표적이 있는 전 영상의 윤곽을 입력하고, 입체해부학적구조가 시각방향에서 표적의 모양과 회전조사중심이 결정되는 Beam's Eye View를 통해 이루어 지게 하였다.

2. 입체선량계산

비공면다중회전조사는 가속기지지체의 회전축과 치료대의 회전축에 표적의 중심을 일치시켜 Fig. 3과 같이 치료대의 회전면 (XY 면) 인 관상면에 정사영

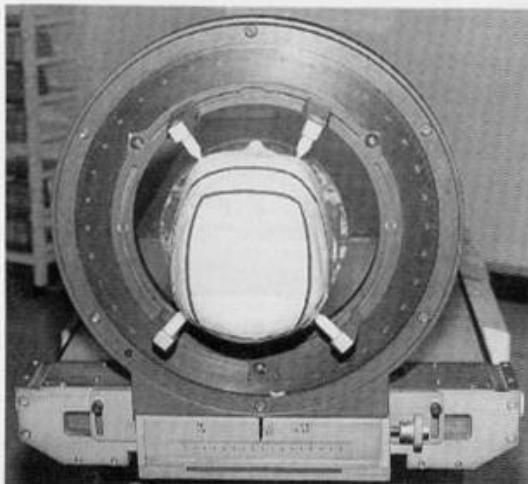


Fig. 1. Design of the combined trans-multiarcs for radiosurgery based on linear accelerator photon beam.

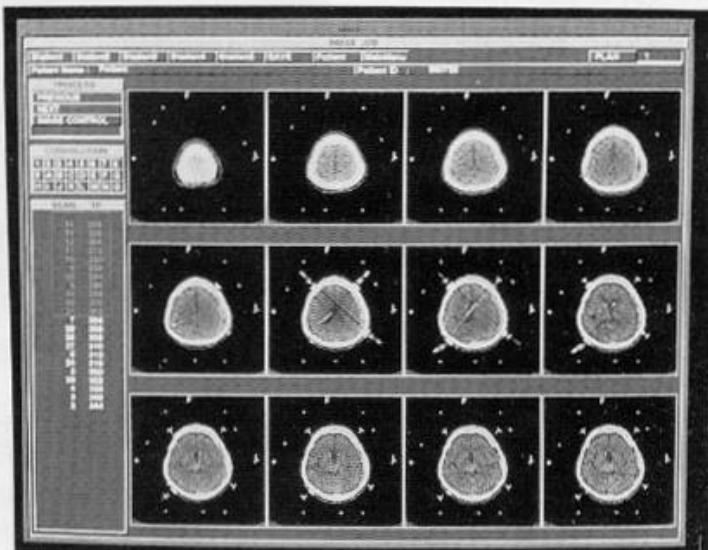


Fig. 2. Twelve-panel display of an reconstructed axial views of the computed tomogram.

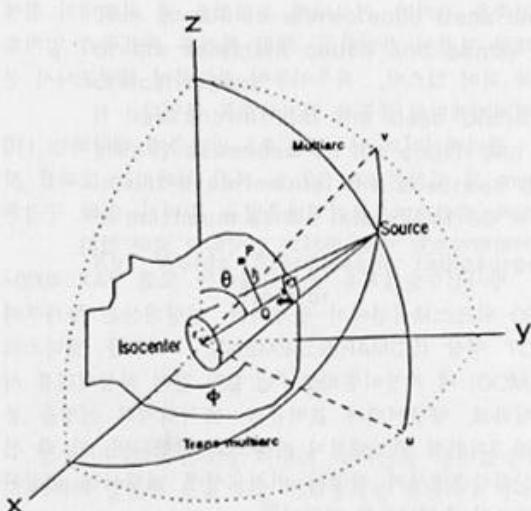


Fig. 3. Definition of the angles describing the gantry rotation and couch angle in multiarc and trans-multiarc beam modes.

Field size(r) on the isocenter is shown for the centrally located target in the sagittal plane. The X, Y and Z axes indicate the anatomical directions left, vertex and anterior, respectively.

(u) 된 선원이동을 통해 이루어진다. 한편 비공면 횡다중회전조사는 지지체와 치료대의 회전축에 표적의 중심을 일치시키고 환자를 우와위 시켜 시상면(YZ면)에 정사영(V) 된 선원이동을 통해 이루어진다.

Fig. 3에서 선원의 이동은 구면을 이루며, 선원위치는 다중 또는 횡다중회전조사의 회전 중심에서 선속반경 R 이 Z축과 이루는 극각 θ 과 XY 평면에 내린 선속반경의 정사영이 X축과 이루는 방위각 ϕ 로 결정된다.

표적주위의 임의의 한 점 $P(x,y,z)$ 에 도달되는 선량은 입사점의 피부에서 입사선속에 수선을 내린 점 $Q(x,y,z)$ 까지의 깊이 d 와 선속중심에서 멀어진 거리 PQ 거리 h 즉 선속이탈에 대한 선량곡선에 의해 결정될 수 있고 d 와 h 는 극각과 방위각 및 환자의 회전각에 의해 결정된다.

임의의 종양선량(TD)과 회전중심면의 조사면크기(r) 및 피부-표적간 거리 d_{so} 가 주어진 경우, 피부입사점의 최대선량은 심부선량백분율(PDD)로부터

$$D(r,d_{so}) = TD \times 100 / PDD(r,d_{so}) \quad (1)$$

와 같이 구하였다. 여기서 PDD는 입사면(r')에 대한 깊이 d_{so} 의 심부선량백분율로써 실험적으로 구한 조직최대선량비(TMR)로부터 환산하였다¹¹. 또

입사면의 조사면 r' 은

$$r' = r (1 - d_{so} / R) \quad (2)$$

이 된다.

따라서 비공면 회전조사시 극각 및 방위각에 변화에 따른 임의의 위치에 대한 선량 $D(x, y, z)$ 은 전방위각의 각 방위각과 회전극각에 따른 입사선량의 누적선량으로 나타낼 수 있으므로

$$D(x,y,z) = \int \int D(r',dm) PDD(r',d) K(h) d\theta d\phi \quad (3)$$

와 같이 구하였다.

여기서 중심이탈계수 K 는 실험적으로 구하며, 적분영역은 극각 $0^\circ < \theta < 180^\circ$, 방위각 $0^\circ < \phi < 180^\circ$ 이며, 횡다중회전조사에서도 동일한 영역이 주어진다.

또한 $P(x,y,z)$ 지점에 도달되는 누적선량은 선정된 방위각에 따라 극각을 5° 또는 10° 씩 분할하여 이산적으로

$$D(x,y,z) = A \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N D(r',dm) PDD(r',d) K(h) + B \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N D(r',dm) PDD(r',d) K(h) \quad (4)$$

와 같이 구할 수 있다.

여기서 A 는 다중회전조사의 방위각수 m , 극각분할수 n 에 대해 $1/mn$ 이고, B 는 횡다중회전조사의 방위각수 m , 극각분할수 n 에 대해 $1/mn$ 이다.

특히 후향을 "0"으로 두면 다중회전조사가 되며, 전향을 "0"으로 두면 횡다중회전조사가 됨을 알 수 있다.

본 연구의 포톤나이프는 전향과 후향의 선량비를 종양의 모양과 주위 치명 정상장기의 위치에 따라 적절히 조정할 수 있게 하였다.

3. 횡다중회전의 표적위치

횡다중회전각에 의한 회전조사는 비공면다중회전조사에 적용된 좌표계를 이용하여 Y축을 중심으로 물체와 좌표계를 시계반대방향으로 90도 회전(환자를 우측으로 누운 자세) 시켜 조사하므로써 환부를 중심으로 가속기의 빔이 횡으로 회전조사되는 것과 동일한 효과를 얻을 수 있게 하였다.

다중회전조사의 표적중심이 횡다중회전조사시에도 동일하게 조사되기 위한 횡다중회전조사시의 표적 x',y',z' 은 다중회전시의 표적좌표 (x, y, z) 로부터

$$x' = x \cos(-90^\circ) + z \sin(-90^\circ)$$

$$y' = y$$

$$z' = -x \sin(-90^\circ) + z \cos(-90^\circ) \quad (5)$$

와 같이 얻을 수 있으며 단 y' 는 불변이 된다.

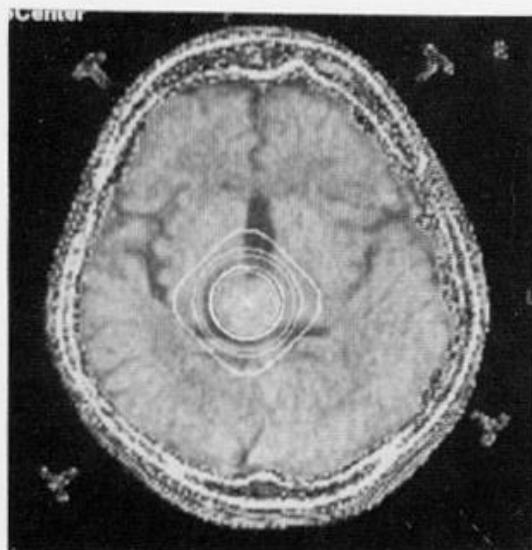


Fig. 4a. Axial CT image and isodose curves(90% to 10%) created from combined trans-multiarc with collimator size 25 mm in a diameter.

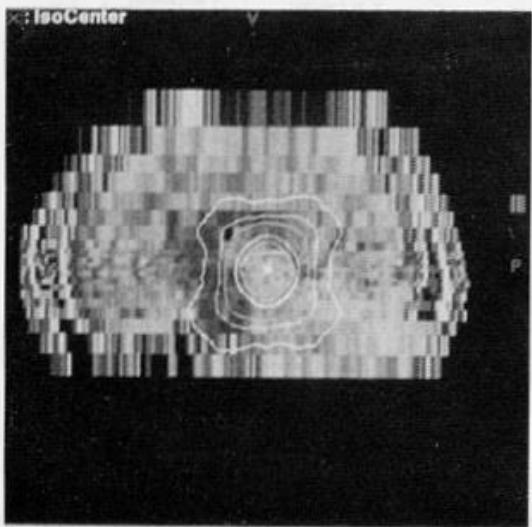


Fig. 4b. Isodose distributions(90 to 10%) showed on reformed sagittal image.

4. 병용횡다중조사와 선량분포

다중회전조사는 임의의 고정된 치료대각과 선원방의 회전조사로 표적을 중심으로 비공면 회전조사가 이루어지 병변에 집중된 선량이 도달될 수 있으나 표적 전후방에 치명장기가 있는 경우 범위의 회전각 선택에

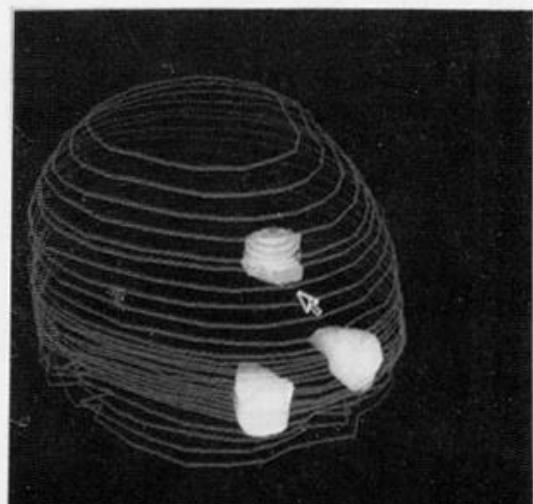


Fig. 5. Surface rendering image of the 80% isodose volume for two multiarcs with combined two trans-multiarcs to the irregular target shape. Arrow represents the cold area.

제한이 많이 따른다.

본 연구의 포토나이프의 조사방식은 표적중심을 기준으로 다중회전조사와 횡다중회전조사를 시행하므로 총회전각을 높이거나, 또는 동일한 설정상태에서 전후방의 치명장기를 피해 조사방향을 정할 수 있는 장점이 있으며, 표적외부의 치명장기의 위치에 따라 비교적 다양하게 선량분포기술을 변경시킬 수 있어 치명정상뇌조직의 손상을 줄일 수 있다.

Fig. 4a, 4b 는 가상표적에 대해 직경 25 mm 인 폴리메이터를 사용하여 각각 2개의 다중회전조사와 횡다중회전조사를 사용한 경우의 횡단면과 시상면의 선량분포를 나타낸다.

포토나이프 방사선수술의 방위각 (치료대의 회전각)의 설정범위는 다중회전조사 및 횡다중회전조사에서 모두 0~180 도 사이에 임의 선택할 수 있으며, 각각 (빔회전 각)은 20~160 도 사이에 임의의 값 선택 할 수 있다.

입체적선량계산은 Fig. 5 와 같이 입체해부학적구조와 함께 3차원적 선량분포를 나타내어 평면선량분포에 의한 선량계획에서 간과하기 쉬운 이면의 표적과 선량관계를 쉽게 파악할 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 2 개의 다중회전조사 범과 2 개의 횡다중회전조사 범을 혼합하여 치료대의 회전각과 범의 회전각의 변화에 따라 다양한 선량분포를 출력하여 Fig. 6 과 같이 횡단면, 시상면 및 관상면에서 비교하

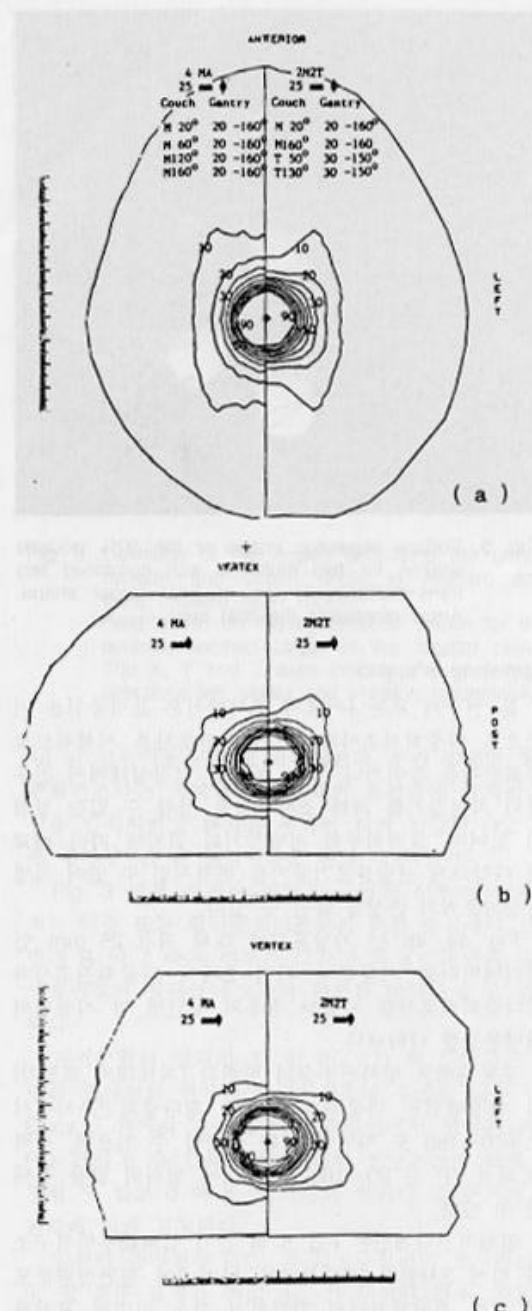


Fig. 6. Isodose curves in the three main plane through the target point. Left side for 4 multiarc beams and right for 2 multiarcs with combined 2 trans-multiarc beams with same collimator size 25 mm in a diameter.
(a) for axial, (b) for sagittal and
(c) for coronal view.

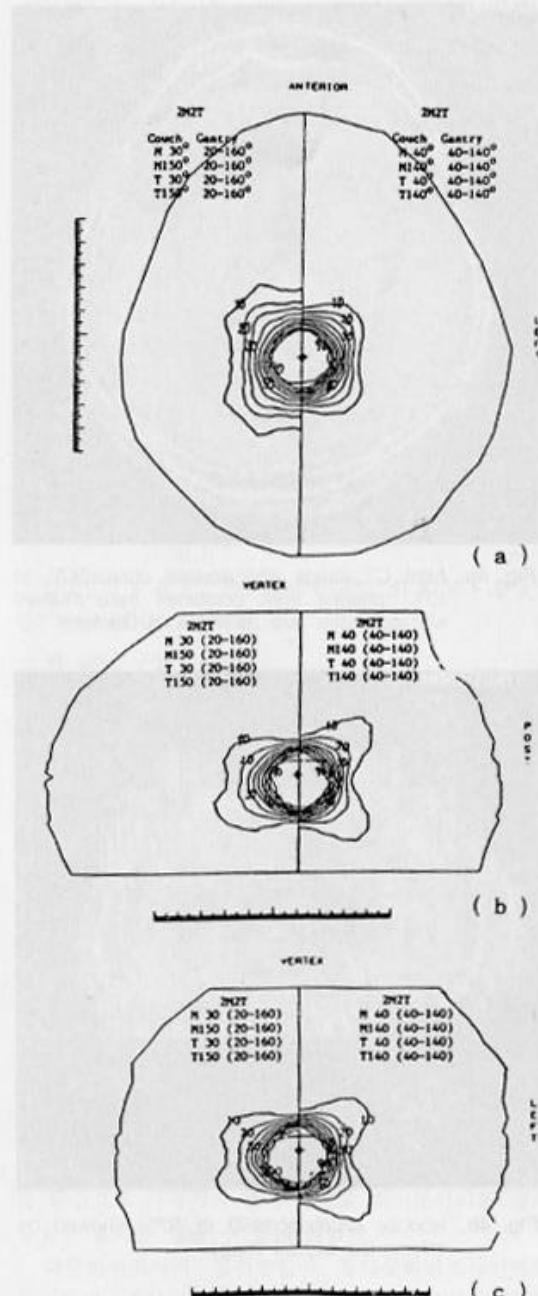


Fig. 7. Isodose curves from different couch angle and gantry movements presented in the three main plane through the target lesion with combined trans-multiarc beams.
(a) for axial, (b) for sagittal and
(c) for coronal view.

었으며, 이 때 다중회전조사는 치료대회전각을 20 도, 160 도에서 각각 빔 회전각 20 도에서 160 도 까지 회전조사를 하고, 병용횡다중회전조사는 양와위시 20 도, 160 도와 우와위시 50 도, 130 도의 치료대회전각에서 빔회전각 20 도에서 160 도로 회전조사를 시행하여 Fig. 7 과 같이 상호 비교하였다.

5. Dose Volume Histogram (DVH)

선량-용적표 (DVH)는 선량계획시 선량과 용적관계를 정확히 파악하여 선량계획을 비교할 목적으로 자주 이용된다.

포톤나이프의 소프트웨어는 누적 DVH 를 Fig 8 과 같이 나타낸다. 횡축은 전회전조사에 의한 선량값의 백분율을 의미하며, 종축은 각 선량백분률이 차지하는 용적(ml)을 나타낸다. 이 선량-용적표에서 횡축의 선

량백분률이 보이는 용적값은 3차원선량계산으로 부터 각 전산화영상단면에 표현되는 등선량곡선의 내부 면적을 구하고 영상절편의 두께와 간격을 곱해 구하였다.

결 과

본 연구실에서 개발된 포톤나이프 방사선수술계획의 특징은 표적을 중심으로 비공면 다중회전조사와 횡다중입체회전조사를 병용하여 방사선수술을 할 수 있게 한 것이다. 횡다중 회전조사를 병용 시험하면 표적을 중심으로 비공면입체회전각이 증가하게 되어, 빔의 회전각이나 치료대 설정각의 선택폭이 넓어지게 되며 곧 표적과 주위 정상치방장기에 도달되는 선량의 분포가 다양하게 됨을 의미한다.

포톤나이프 방사선수술프로그램은 Fig. 2 와 같이 3 차원선량 및 영상을 재현하기 위해 약 25~40 매의 영상을 입력한다. 임상에 이용할 때 스캔은 병변하단 30 mm 까지는 8 mm 간격으로, 표적상하단 30 mm 범위는 3 mm 간격으로 스캔하며, 두정부까지는 8 mm 간격으로 스캔한 영상자료를 광디스크 (SCSI II, MOD) 에 저장이송하고 화상처리를 통해 방사선수술 계획이 이루어진다.

Fig. 4a 는 포톤나이프 조사방법 중 다중 및 횡다중 회전조사법에 의해 직경 25 mm 콜리메이터로 표적을 조사한 것으로, 다중회전조사는 치료대 방위각 50 도, 130 도와 선원은 20도 - 160 도 회전조사를 시행하였으며, 횡다중회전조사의 치료대 각은 50 도, 130 도 설정에서 선원이동은 20 - 160 도 회전조사한 환부의 전산화단층영상에 90 % 에서 10 % 등선량분포를 나타내었으며, Fig. 4b 는 시상면의 선량분포를 나타낸다.

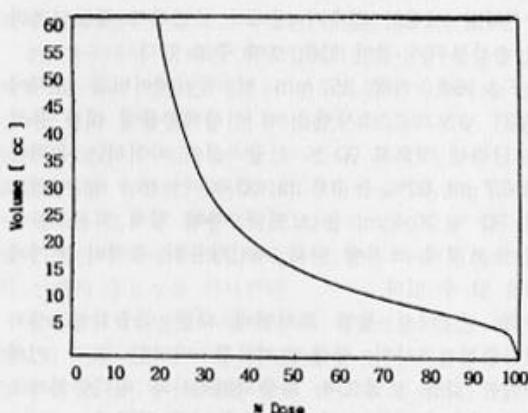


Fig. 8. Display the integral dose-volume histogram for field size 25 mm in a diameter with 2 multiarcs combined 2 trans-multiarc beams.

Table 1. Distance in mm of interval between two Isodose Curves Derived from Photon Knife Radiosurgery System (Collimator 25 mm in a Diameter, Gantry Angle 20-160°)

couch angle (degree)	Plane	Interval of the isodose curve				
		90-50%	90-20%	90-10%	80-50%	80-30%
•M 30, 50	Axi.	5.1/6.3	12.0/18.0	17.9/23.8	4.0/5.0	8.2/8.5
	Sag.	2.2/4.5	4.7/13.0	6.0/24.2	1.5/3.5	2.5/7.5
	Cor.	2.0/5.0	4.6/12.5	6.0/23.5	1.5/4.0	2.5/8.0
T 30, 150	Axi.	4.0/5.0	9.0/13.8	15.1/18.5	3.0/3.0	6.0/7.0
	Sag.	2.2/4.0	5.2/13.2	7.3/24.0	2.0/3.0	4.0/7.0
	Cor.	2.0/3.0	5.0/14.0	8.0/24.0	1.1/2.0	3.7/7.5
M 40, 140	Axi.	4.0/5.0	9.0/13.8	15.1/18.5	3.0/3.0	6.0/7.0
	Sag.	2.2/4.0	5.2/13.2	7.3/24.0	2.0/3.0	4.0/7.0
	Cor.	2.0/3.0	5.0/14.0	8.0/24.0	1.1/2.0	3.7/7.5

* M represents the multiarc and numeric couch angle
* T for trans-multiarc and couch angle

치료대 회전각이 비교적 체축방향에 집중되어 환부 횡단면상의 40% 이하의 등선량분포는 기울기 큰 마름모 형상의 분포를, 시상면에서는 표적주위로 비교적 균등한 기울기의 선량분포를 보였고, 등선량곡선중 80%가 각 영상면에서 병변표적을 거의 다 포함하였고, 대개 50% 등선량곡선까지는 구형이 됨을 알 수 있다¹¹⁾.

Table 1은 6 MV 광자선과 직경 25 mm 콜리메이터를 사용하여 2MA와 2TMA를 병합한 입체회전조사에서 각 단면상에 나타난 임의의 등선량분포간 최소 및 최대 간격을 나타낸 것으로 치료대 각이 체축의 외측으로 설정될 수록 횡단면상의 선량분포는 좌우측으로 확대됨을 알 수 있으며, 내측으로 설정될 수록 횡단면상의 좌우 선량분포가 축소되어 비교적 높은 기울기를 갖게 됨을 보여 준다.

표적주위의 선량을 평가할 수 있는 단위 mm 당 선량경사도는 50% 와 80% 등선량곡선간 거리에서 1.1 mm 와 3.0 mm 를 보여 최대 27%/mm 의 감소를 얻을 수 있으며, 치료대 각의 결정에 따라 각 단면에서 선량기울기는 크게 변함을 알 수 있다.

Fig. 5는 뇌간 전방에 있는 표적에 다중 및 횡다중입체회전조사를 이용하여 포톤나이프 방사선수술에 의한 중요장기의 입체화와 입체선량분포를 나타내며, 화살표는 임의의 선량분포가 표적을 충분히 포함하고 있는 부위와 불규칙한 표적의 일부가 포함되지 않음을 잘 보여 주고 있다. 포톤나이프에서 지원하는 소프트웨어는 화면상에서 해부학적 입체영상과 선량분포가 X 축과 Y 축 및 Z축을 기준으로 임의 회전할 수 있어 Beam's Eye View 의 입체구조와 입체선량분포를 쉽게 파악할 수 있으며, 확대축소가 자유롭도록 고안되어 환부와 선량영역을 보다 정확하게 평가할 수 있다.

Fig. 6 a,b,c는 직경 25 mm 구경의 콜리메이터를 이용하여 4 개의 다중회전조사 (치료대 각도 20, 60, 120 및 160 도에 각각의 선원 회전각 20 - 160 도)로 입체회전조사한 것과, 다중회전조사의 치료대 회전각 20, 160 도와 횡다중회전조사의 치료대회전각 40 도, 140 도에 선원회전각 30 - 150 도로 입체회전조사한 선량분포를 비교한 것이다.

횡다중회전조사를 병용한 선량분포는 90%에서 50% 곡선까지는 거의 유사한 선량값을 보였으나 50% 이하의 곡선에서는 다중회전조사를 시행한 것보다 표적의 좌우 및 전후 방향에서 현저히 낮게 나타나며, 선량기울기가 비교적 큰 분포를 임의의 방향으로 이동할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 다중 및 횡다중입체회전조사에 의한 방사선수술 계획에서 치료대 회전각과 선원 회전각을 변화

시켰을 때 변화된 선량분포를 확인할 수 있었다. Fig. 7에서 좌측은 다중회전조사의 치료대 회전각도를 M으로, 횡다중회전조사의 치료대 회전각도를 T로 두고, M30 (20-160°), M 150 (20-160°) 와 T30 (20-160°), T150 (20-160°)을 조사한 경우이며 팔호안은 선원회전각이다. 우측은 M40 (40-140°), M140 (40-140°) 와 T40 (40-140°) 과 T140 (40-140°)로 조사된 경우이다.

치료대 회전각이 비교적 내측으로 주어질 때 (Fig. 7에서 우측) 단면상에서 표적 주위에 도달 되는 선량이 월등히 감소됨을 알 수 있으며, 시상면 및 관상면에서 치료대 회전각이 외측에 놓인 경우 보다 전후측으로 감소된 선량분포를 보인 반면에 체축방향으로 늘어난 것을 알 수 있다.

선량분포에서 80%의 선량분포가 양측 다 표적을 포함하고 있음을 보여 주었으며, 50% 곡선까지는 양측 다 거의 동일하게 나타났으나 낮은 곡선의 선량분포는 좌측의 다중회전조사만을 시행 경우에 비해 횡다중선량을 시행한 경우가 임의의 단면에서 정상뇌조직의 손상부위가 작아짐을 보여 주고 있다.

Fig. 8은 직경 25 mm 의 콜리메이터를 표적에 2M2T 빔모드로 조사했을 때 선량백분율에 대한 용적을 나타낸 것으로 90% 선량곡선이 차지하는 용적은 약 6.7 ml, 80%는 8.6 ml, 50%는 16.1 ml 이었으며, 30% 30.4 ml 을 보였다. 특히 입체 회전조사에서는 표적의 크기에 따라 저선량율의 용적이 커지게 됨을 알 수 있다.

본 연구에서 동일 조사면에 대한 다중회전조사와 횡다중회전조사의 선량-용적표를 비교한 결과 거의 동일한 값을 보였으며, 다중회전조사와 횡다중회전조사를 병용한 경우도 거의 차이가 나지 않았다.

고찰

최근 방사선수술은 감마나이프와 선형가속기의 치료대 회전과 가속기지지체의 회전축을 표적중심에 둔 다중입체회전조사를 이용하여 일회조사로 종양치사선량을 주는 방법이 많이 시행되고 있으며, 선형가속기를 이용한 방사선수술이 증가추세에 있다^{3,4)}.

방사선수술의 중요변수는 정상조직의 세포와 종양조직의 방사선감수성차에 근거를 둔 분할조사와는 달리 물리적으로 표적에 집적되는 방사선의 선량과 분포이다.

일회 다량의 선량을 조사하게 되는 방사선수술의 부작용은 해부학적 병변위치와 모양에 대한 정확한 평가와 조사시간 동안 환부의 고정 및 정상조직의 최소

선량 등을 통해서 최소화 되어야 한다. 따라서 방사선 수술에서 뇌경위수술용 두부고정기구, 방사선집속용 콜리메이터, 표적결정기구와 더불어 표적과 선량을 입체로 나타내는 것은 매우 중요하며, 병변표적이 불규칙한 모양일 때 단면상의 선량분포로는 평가될 수 없는 부위가 생기므로 방사선수술에 있어서 Fig. 5와 같이 병변부위의 해부학적 구조의 입체화는 필수적이다¹²⁾.

본 연구실에서 고안한 포토나이프의 소프트웨어는 전산화영상에서 조직의 방사선흡수치를 나타내는 (일명, raw data)를 이용하여 Fig. 2 와 같이 화상처리를 시행하고, 입체선량을 전산화하고 선량분포를 영상에 중첩하여 얻으므로 선량계획과 표적중심이 잘 일치하게 될 것을 알 수 있다.

선형가속기의 광자선을 이용한 다중입체회전조사에 의한 선량분포는 빔의 회전궤도가 종적이므로 선속폭의 유한성으로 인하여 표적의 전후축으로 방사선이 중첩되어져 선량분포는 Fig. 6의 횡단면의 좌측에 나타난 것과 같이 전후방향으로 확장된 양상을 보이기 쉽다.

본 연구에서 선택한 다중입체회전조사에 횡다중입체회전조사의 병용은 병변의 전후좌우축 방향에서 정상뇌조직의 포함부위를 현저히 감소시킬 수 있는 선량분포를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 특히 횡다중입체회전조사를 병용한 병변주위의 선량기울기는 Fig. 6에서 볼 때 표적의 축방향에서 상당히 감소됨을 알 수 있어 병변과 치명장기의 위치와 모양에 따라 입체회전 각 선택의 중요성을 시사한다.

횡다중입체회전조사의 특성은 직교성을 갖는 회전궤도의 선량비중에 따라 선량분포를 입의의 변형이 가능하며, 불규칙형 표적에 대해 비교적 근사하는 선량분포를 얻을 수 있으며, 전체 선원이동각이 크므로 빔이 특정 치명장기를 통과하지 않고서도 충분한 회전조사를 시행할 수 있게 된다.

Fig. 6에서 표적이외의 정상부위의 선량기울기는 횡다중입체회전조사에서 높게 나타남을 알 수 있으며, Fig. 7에서 치료대 회전각과 선원 회전각이 3차원 선량분포에 많은 변화를 주고 있음을 알 수 있다.

한편 방사선수술계획시 예후에 영향을 주는 종양의 크기는 선량백분율에 대한 누적된 선량-용적표에서도 잘 나타나고 있다. 종축의 용적은 횡축의 선량백분율이 포함하는 모든 용적을 의미하며, 표적이 를 수록 저선량백분율에 대한 용적이 커게 되는 것으로 알려져 있다.

본 실험의 25 mm 직경의 표적에 대하여 선원회전 각이 총 540 도의 다중회전조사와 520 도의 병용횡다중회전조사의 선량-용적값은 거의 차이를 찾을 수 없

었다. 이것은 병용횡다중회전 조사에서 거의 동일한 회전각을 선택하는 경우 저선량분포영역의 이동이 비교적 용이하나, 용적선량에는 큰 영향을 주지 못함을 알 수 있었다.

결 론

선형가속기를 이용한 횡다중회전조사를 병용한 방사선수술선량계획은 표적병변을 중심으로 전후좌우방향의 선량폭이 좁아지는 특성을 갖게 되며, 병변표적 주위 선량기울기가 증가하여 치명장상장기의 손상을 줄일 수 있음을 알 수 있으며, 입체회전각이 다중회전조사에 의해 월등히 증가하므로 빔방향의 설정이 비교적 용이한 장점이 있다.

방사선수술계획에서 치료대 회전각, 선원회전각에 따라 주위 정상뇌조직에 도달되는 선량분포는 현저히 달라짐을 알 수 있었으며, 비공면횡다중회전조사를 병용한 경우 선량기울기가 큰 부위를 입의의 부위에 둘 수 있음을 알 수 있다.

방사선수술은 병변표적과 치명장기의 위치에 따라 적절한 각도를 얻을 수 있도록 해부학적 구조와 선량분포들이 입체화된 선량계획을 통해 이루어져야 하며, 특히 선량분포의 입체화는 병변내 저선량부위와 치명장기의 포함범위 등을 분석할 수 있으며, 불규칙형표적에 대해 복수개의 회전조사중심을 결정하는데도 도움을 줄 수 있다.

참 고 문 현

- Wilson RR. Radiological use of fast protons. *Radiology* 1946; 47:487-491
- Leksell L. The stereotactic method and radiosurgery of the brain. *Acta Chir Scand* 1951; 102: 316-319
- 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* 1985; 11:1185-1192
- Lutz W, Winston KR, Maleki PV. A system for stereotactic radiosurgery with a linear accelerator. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1988; 14:373-381
- Pike B, Podgorsak EB, Peters TM, et al. Dose distributions in dynamic stereotactic radiosurgery. *Med Phys* 1987; 14:780-789
- Podgorsak EB, Oliver A, Pla M, et al. Dynamic stereotactic radiosurgery. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1988; 14:115-125

7. McGinley PH, Butker EK, Crocker R, et al. A patient rotator for stereotactic radiosurgery. *Phys Med Biol* 1990; 35:649-657
8. 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* 1990; 18:211-220
9. Choi TJ, Kim OB. Dose characteristics of stereotactic radiosurgery in high energy linear accelerator photon beam. *J Korean Soc Ther Radiol* 1992; 10(2):137-145
10. Choi TJ, Kim OB, Son EI. Determination of target position with BRW stereotactic frame in non-orthogonal CT scans. *Korean J Med Phys* 1992; 3(1):53-62
11. 최태진, 김옥배, 김영훈 외. 선형가속기의 6 MVX선에 대한 소형조사면의 선량 측정. *대한치료방사선과학회지* 1989; 7(2):287-291
12. Kirpes BB, Schlegel W, Boesecke R, et al. Display of organs and isodoses as shaded 3-D objects for 3-D therapy planning. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1987; 13:135-140

= 국문초록 =

입체적 횡다중회전조사를 병합한 방사선수술의 새로운 접근: 포톤나이프

계명대학교 의과대학 치료방사선과학교실

최태진 · 김진희 · 김옥배

목 적 : 선형가속기의 광자선을 이용한 두개내 소병변의 방사선수술에서 다중회전조사와 횡다중회전조사를 병용한 방사선 수술방법을 개발하고, 컴퓨터단층영상을 재구성한 방사선수술계획을 통해 선량분포를 비교하여 병변이외 정상조직의 선량을 줄이기 위한 선량변수를 구하였다.

대상 및 방법 : 선형가속기 6 MV 광자선을 이용하여 치료대 각과 선원지지체 회전 및 환자체위변위를 이용한 입체적 다중 및 횡다중회전조사를 조사하여 선량분포를 비교하였다.

입체적 선량분포와 횡단면, 시상면 및 관상면 치료대 영상재구성의 선량분포는 본 대학에서 개발한 방사선수술기구 및 소프트웨어 (Photon Knife)를 통해 이루어졌다.

입체적 다중회전조사에 의해 얻은 선량은 치료대 각이 20, 60, 120, 160 도, 각각의 선원지지체 회전각은 20-160도이며, 다중회전조사의 치료대각 30, 150도와 횡다중회전조사의 치료대각 30, 150도에 선원 회전각 20-160도를 입체조사하여 비교하였다.

결 과 : 선형가속기를 이용한 방사선수술선량분포는 동일 콜리메이터에서도 치료대와 선원지지체 각에 따라 크게 변하였다. 입체횡다중회전조사를 시행한 경우 표적을 중심으로 전후방향의 선량분포는 다중회전조사만을 사용한 경우보다 선량기울기가 증가하여 정상뇌조직의 손상을 더 감소시킬 수 있음을 알 수 있었으며, 병변주위의 치명장기 위치에 따라 방사선 회전 방향을 적절히 정할 수 있다.

방사선수술의 입체선량과 주위 장기 및 표적의 On-Target 입체화는 방사선수술의 정확성, 복수개의 표적중심결정과 주위정상장기의 선량포함범위를 비교적 정확하게 보여줄 수 있다.

결 론 : 방사선수술선량계획의 입체화는 선량과 표적 및 주위장기의 선량범위를 입체적으로 정할 뿐만 아니라, 표적의 모양이 불규칙형일 때는 복수개의 표적중심결정에 필수적임을 알 수 있었다.

다중회전조사와 횡다중회전조사를 병합한 방사선수술은 표적주위의 치명정상장기의 손상을 줄이기 위해 종회전각의 변화없이 치명장기에 도달될 선량을 줄일 수 있으며, 25 mm 직경의 콜리메이터를 사용한 선량분포는 80-50 %의 간격이 1.1~3.0 mm, 90-50 %는 2.0~3.0 mm를 나타내었다.