



# 나선형 토모테라피를 이용한 세기조절방사선치료

## Helical Tomotherapy: Image-guided Intensity Modulated Radiation Therapy

금기창 | 연세의대 방사선종양학과 | Ki Chang Keum, MD

Department of Radiation Oncology, Yonsei University College of Medicine

E-mail : kckeum@yuhs.ac

J Korean Med Assoc 2008; 51(7): 619 - 629

### Abstract

Helical tomotherapy is an image-guided, intensity-modulated radiation therapy delivery system, a hybrid between a linear accelerator and a helical CT scanner. With its unique design features, tomotherapy has improved dose conformity and homogeneity of the target volumes, and conformal avoidance of the adjacent normal tissues. The daily pretreatment megavoltage computed tomography (MVCT) is a powerful tool used in image guided treatment delivery and patient setup verification. If anatomic changes occur during the course of treatment, MVCT images are utilized in correcting target volumes and constructing appropriate adaptive plans. Helical tomotherapy can be applied to more complicated cases, where conventional techniques find their limits: complex tumors with critical organ sparing, simultaneous irradiation of multiple targets, large volume and large superficial tumor irradiation, and recurrent tumor re-irradiation are a few examples. Tomotherapy may change the current paradigm in radiation oncology in the near future. Further studies regarding clinical implementation and treatment outcome of helical tomotherapy will be needed.

**Keywords:** Helical tomotherapy; Image-guided; IMRT; MVCT

**핵심용어:** 토모테라피; 영상유도방사선치료; 세기조절방사선치료

### 서론

효과적인 방사선치료는 종양에 높은 선량의 방사선을 조사하는 반면, 정상 장기에는 최소의 방사선이 조사되는 것이다. 1980년대 후반부터 1990년대 초반에 걸쳐 방사선치료 방법이 급속도로 발전하였다. 컴퓨터 과학의 발전과 더불어 인체에 전달되는 방사선 선량의 계산 알고리즘이 발전하였고 또한 전산화 단층촬영(computed tomography, CT)과 같은 진단적 영상 기술의 방사선치료 영역으로

의 적용을 통해 영상을 근간으로 한(image-based) 더욱 정확한 방사선치료가 가능해졌다(1). 3차원 입체조형 방사선치료는 CT 영상에 종양과 종양 주변의 정상 장기를 구분하여 그린 후, 3차원 재구성을 통하여 가능한 정상 장기를 피해서 방사선치료를 시행하는 방법이다. 이는 기존의 2차원 방사선치료보다 더 발전된 방법이지만 치료 범위 내에서 방사선이 균일하게 조사되어 불규칙한 종양의 형태인 경우 혹은 종양과 정상 장기가 인접한 경우에는 한계가 있다. 방사선치료 영역의 가장 최근 기술인 세기조절방사선치료



Figure 1. Hi-Art tomotherapy machine.

(intensity modulated radiotherapy, IMRT)는 선형가속기(LINAC)와 다엽 조절기(multi-leaf collimator)를 사용하여 방사선치료 범위 내에서 방사선의 강도를 조절하여 불규칙한 종양의 형태에 따라 방사선 조사가 가능하고 더불어 주위 정상 조직을 효과적으로 보호할 수 있다(2). IMRT는 2000년 전후로 환자에 적용되었으며 초기 치료 결과가 발표되는 중이다.

토모테라피(helical tomotherapy)는 진단용 CT 기계와 같은 갠트리(gantry) 안에 선형가속기를 탑재한 형태로 방사선 세기 조절이 가능할 뿐만 아니라 방사선치료 직전에 환자의 영상을 얻고 이를 이용하여 종양 및 주변 정상 장기의 위치를 확인한 후 방사선치료가 가능하다. 토모테라피는 몇 개의 고정된 방향의 빔을 사용하는 기존 IMRT와 달리 회전하며 세기가 조절되는 빔을 사용한다. 선형가속기가 들어 있는 갠트리가 360° 회전하면서 동시에 환자가 누워있는 테이블이 갠트리 안쪽으로 일정한 속도로 들어가게 되어 실제 환자에는 나선형으로 방사선이 조사된다. 이러한 방사선 조사는 나선식 전산화 단층촬영(helical computed tomogra-

phy)에서 영상을 얻기 위하여 엑스선이 조사되는 것과 비슷하며(3), 실제 기계 모습도 CT 기계와 유사하다(Figure 1). 토모테라피에서 사용되는 부채꼴 빔(fan beam)은 갠트리를 따라 일정한 너비로 움직이게 되는데, 보통 2.5, 5cm 너비씩 움직이며 치료 범위가 작을 경우에는 1cm 너비를 사용할 수도 있다. 빔은 0.625cm 두께의 64개 엽으로 구성된 양측 다엽 조절기로 조절된다(4). 치료 시간은 1회 방사선 조사량, 치료 영역의 길이(환자가 누워있는 테이블이 움직이는 방향으로), 환자의 피부 표면부터 치료 부위까지의 깊이, 방사선이 조절되는 정도에 따라 달라진다(5). 토모테라피는 위스콘신 대학에서 처음 개발되었고 현재는 Tomotherapy Hi-Art System에서 생산, 판매되고 있다. 필자는 기존 방사선치료 기기와 다른 토모테라피의 특성을 바탕으로 방사선 선량분포의 우수성을 살펴보고 또한 방사선치료 직전 토모테라피 자체에서 획득한 CT 영상의 유용성과 이를 이용한 보정 방사선치료 설계(adaptive radiotherapy plan)에 대하여 알아보았다. 실제로 임상에 적용할 수 있는 적용증과 적용한 결과에 대해서도 살펴보고자 하겠다.

## 방사선 선량분포의 우수성 및 특성

기존 IMRT가 3~7방향의 고정된 빔을 사용하는 것과 달리, 토모테라피는 갠트리가 360° 회전하며 한 번 회전시 51개의 방향에서 방사선을 조사하는 것이 가능하다. 이러한 기계의 특성으로 토모테라피 치료 계획과 기존 IMRT 치료 계획을 비교하였을 때, 토모테라피 치료 계획이 조형성(conformality), 동질성(homogeneity), 정상 조직 보호 면에서 더 우수하게 나타난다(6~8). 두경부 환자의 토모테라피 치료 계획을 보면 종양에는 충분한 양(검은색 실선으로 표시된 63Gy 이상)의 방사선이 치료할 부위에 정확히 들어가면서 이하선을 비롯한 주변 조직에는 방사선이 거의 들어가지 않는(흰색 실선으로 표시된 25Gy 미만) 것을 확인할 수 있다(Figure 2). 토모테라피는 그 특성상 테이블이 움직이는 방향으로 수직으로 들어가는 동일평면(coplanar) 빔만 사용할 수 있기 때문에 기존 IMRT에서 가능했던 비 동일평면(non-coplanar) 빔의 장점을 포기할 수 밖에 없다. 하지

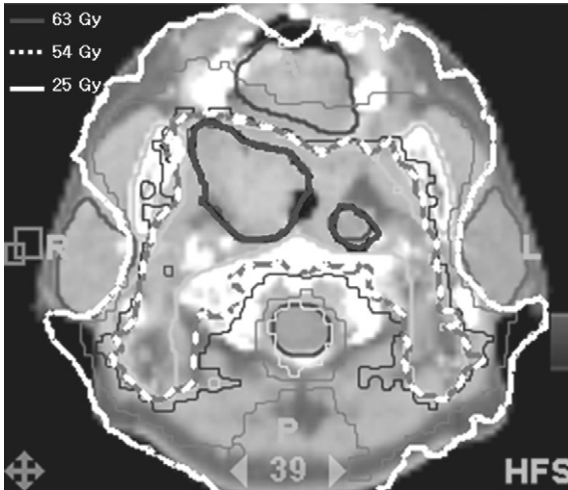


Figure 2. Tomotherapy plan for tonsillar cancer.

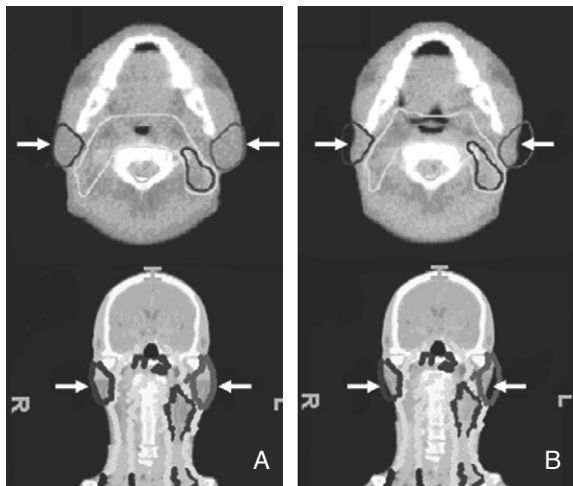
만 비 동일평면 빔은 빔 배열이 가능한 쇄골 위쪽 부위에서는 뇌줄기, 시각교차, 시각신경, 안구 등 주위 정상 조직을 보호하는 데 도움이 되지만 쇄골 아래쪽에서는 빔 배열이 힘들고 비 동일평면 빔을 사용하여 보호할 수 있는 정상조직이 많지 않다. 따라서 비 동일평면 빔을 사용하는 IMRT와 토모테라피의 비교는 뇌줄기, 시각교차, 시각신경, 안구 등이 치료 범위에 포함되는 뇌, 두개저, 두경부 종양에서의 의미가 있다(3). 이러한 부위를 치료할 때 비 동일평면 빔을 사용한 IMRT 치료 계획이 더 우수하다고 하는 보고도 있는 반면(9~11) 토모테라피 치료계획이 정상 조직 보호에 더 우수하다는 연구도 있고(12, 13), 비슷하다는 연구도 있어(14) 어느 것이 더 우수한지는 결론을 내릴 수 없다.

### 영상 유도 방사선치료 (Image-guided Radiotherapy)와 보정 설계(Adaptive Plan)

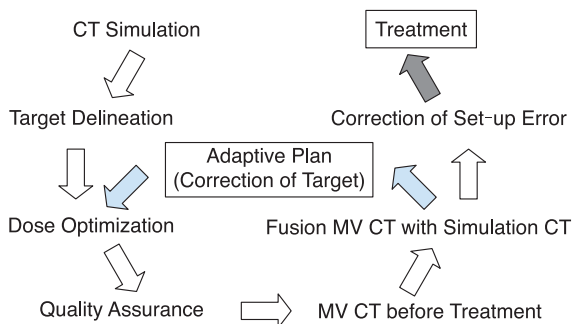
토모테라피의 선형 가속기는 치료에 사용하는 6MV (megavoltage) 광자선과 치료 전 MV CT 영상을 얻는 3.5MV 광자선을 만든다. 토모테라피와 다른 방사선치료 기계와의 가장 큰 차이점은 이 3.5MV 광자선을 이용한 온라인 MV CT 장치이다. 이를 통해 방사선치료 전 종양의 위치 및 주위

정상 장기의 위치를 확인 후 방사선치료를 시행하는 image guided radiotherapy가 가능하다. MV CT는 매번 치료시 치료 전에 촬영하며 한 개의 절편(slice)을 얻는 데 10초 정도 걸리고 MV CT를 촬영한 후에는 영상을 재건하는 시간이 2~4분 정도 추가된다. MV CT 영상은 즉시 서버에 등록되어 처음 촬영한 치료 계획용 kV CT 영상과 비교하여 치료 전 환자의 자세나 위치를 바로잡는 데 사용된다. 이로서 매일 치료간(interfractional, day-to-day) 준비 오차(set-up error)를 줄일 수 있고 복잡한 IMRT 치료 계획이 실제로 환자에게 정확히 들어가는지도 확인할 수 있다. 또한 MV CT 영상에서 치료 계획을 세울 때 그린 종양과 주위 정상 조직의 위치, 계획된 선량을 확인할 수 있어 정위적(stereotactic) 방사선치료를 가능하게 하고 정상 조직이나 종양의 변화를 평가하는 데 도움을 준다(4). 매일 촬영하는 MV CT의 선량은 0.015~0.03Gy로(15) 전체 치료 기간을 합하여도 1Gy 미만의 선량만 추가된다(4). 영상 품질은 모든 영상 유도 방사선치료의 관심사이다. Tome 등의 보고에 따르면, MV CT 영상은 밀도해상력(density resolution), 공간 정확도(spatial accuracy), 영상균일성(image uniformity), 공간해상력(spatial resolution)에서는 큰 문제가 없으나 저대비 해상력(low-contrast resolution)에서 영상 품질이 좋지 않아 연조직을 구별하기 힘든 단점이 있다(4). 따라서 폐실질의 종양은 MV CT 영상으로도 종양의 위치와 크기를 뚜렷하게 관찰할 수 있지만 종격동 종양은 주위 연조직과 구별되지 않는다(16). 병변을 직접 보거나 동결조직검사 등이 있어 빠른 피드백을 가능하게 하는 수술과 달리, 방사선 종양학은 일반적으로 치료 중간에 치료에 대한 반응을 가능하게 하기 어렵다. 하지만 토모테라피의 경우 MV CT 영상으로 주위 정상 조직이나 종양의 변화를 관찰할 수 있고 선량 분포를 재현할 수 있기 때문에 환자의 체중이 줄거나 종양의 크기가 감소하여 해부학적인 구조의 변화가 심한 경우, 치료 계획을 변경하는 근거가 될 수 있다(1, 17).

토모테라피를 시행받는 두경부 종양 환자에서 MV CT 영상을 관찰하다 보면 체중이나 종양의 감소에 따라 해부학적인 구조의 변화가 두드러지게 나타나는 경우가 있다. 방사선치료 전의 MV CT 영상(Figure 3A)과 방사선치료가 진행

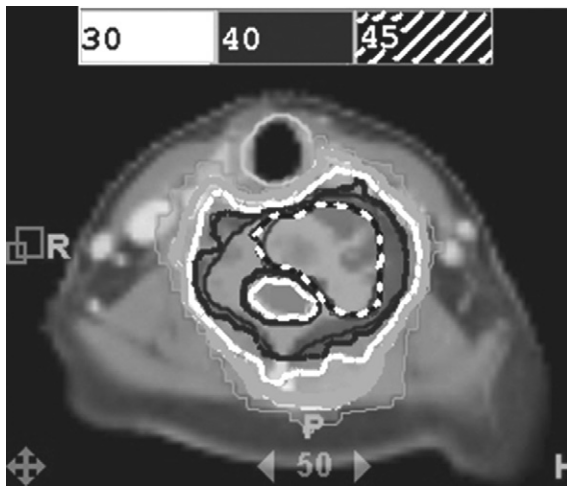


**Figure 3.** Shifting in parotid gland location due to patient's weight loss after radiation therapy for nasopharyngeal cancer: MVCT merged images (A) before, and (B) during tomotherapy (arrow: parotid gland).



**Figure 4.** Flow chart for tomotherapy with an adaptive plan.

된 후의 MV CT 영상(Figure 3B)을 비교해 보면 치료가 진행됨에 따라 이하선의 위치가 처음 위치보다 안쪽에 놓이게 되는 것을 볼 수 있다. 이러한 구조의 변화에 따라 계획상 높은 선량이 들어가는 부위에 보호해야 할 정상 조직이 포함되기도 하는데, 이 경우 계획용 CT를 다시 촬영하여 계획을 다시 하거나 치료 전 촬영한 MV CT 영상을 가지고 토모테라피 치료 계획 컴퓨터의 보정 설계를 통해 치료 계획용 CT를 새로 촬영하지 않더라도 MV CT 영상을 사용하여 변형된 위치에 대한 치료계획이 가능하다. 토모테라피의 보정 설계는 3D 영상화, MV CT를 이용한 준비(set-up) 확인, 준비 오차(set-up error)를 고려한 선량 전달 조절, 치료,



**Figure 5.** Dose distribution in metastatic spinal tumor irradiation.

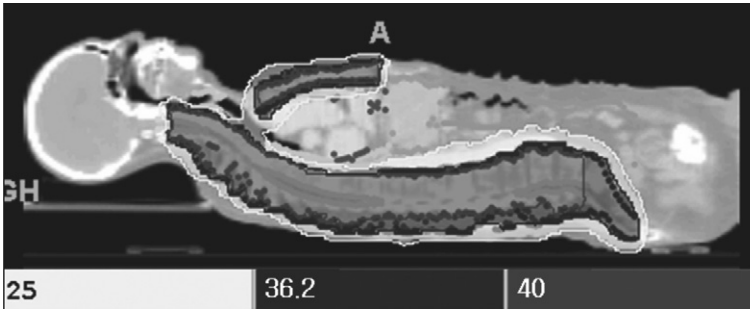
선량 재구성, 선량분포의 변형의 과정 순으로 이루어진다. 우선 시행한 치료의 MV CT 영상과 선량 분포를 얻고 MV CT 영상에서 종양의 감소와 주위 정상 조직의 위치 변화를 파악한다. 이것을 바탕으로 처음 계획상의 선량 분포와 실제로 종양과 정상 조직에 들어간 선량 분포를 비교하고 변화에 맞게 치료 계획을 수정하여 환자에 맞는 새로운 계획으로 치료할 수 있다(Figure 4)(18).

## 임상 적용

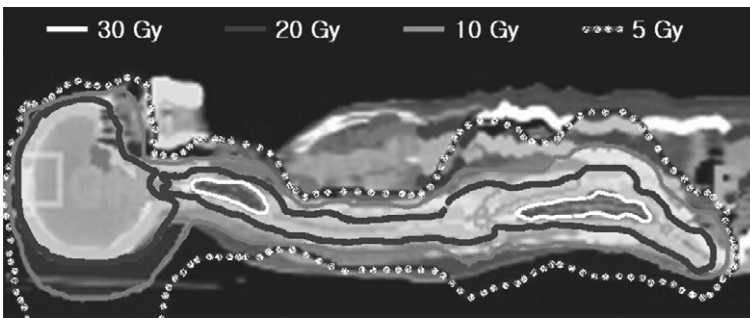
토모테라피는 결국 세기 조절 방사선치료의 한 방법이므로 그 적응증은 세기 조절 방사선치료의 적응증과 동일하다. 단지 기존 방사선치료에 비하여 토모테라피가 더 유리한 경우가 있는데, 그 중 몇몇 경우에 대하여 살펴보고자 하겠다.

## 두경부 종양

두경부 종양 환자에서 전통적인 방법으로 방사선치료를 시행할 경우, 가장 흔하고 오래 지속되는 부작용이 구강건조증이다. 이하선에 많은 선량이 들어가게 될 경우 구강건조증이 생기는데, 구강건조증이 생기면 맛을 잘 느끼지 못



**Figure 6.** Tomotherapy planning in a complicated case of multiple metastases including sternum and the whole spine.



**Figure 7.** Dose distribution in cranio-spinal irradiation.

하고 씹는 데 어려움이 있으며 말하거나 삼키기가 힘들고 충치나 구강 칸디다증이 증가하여 환자의 삶의 질을 떨어뜨리게 된다(17). 하지만 3차원 입체조형치료나 IMRT가 개발되면서 종양에는 충분한 방사선량을 주면서 주위 조직에는 방사선을 적게 주는 것이 가능해졌다. 기존 방사선치료에 비하여 IMRT 치료를 할 때 종양에 충분한 선량이 들어가면서도 이하선에 들어가는 방사선량은 급격히 감소한다는 연구 결과가 발표되었고 이것을 바탕으로 임상에서 환자에 적용되면서 실제로 부작용이 적게 나타났다(19~24). 따라서 두경부 종양 환자에서 토모테라피와 IMRT 치료 계획을 비교할 때 이하선량을 주로 비교하게 되는데, 토모테라피 치료 계획이 IMRT 치료 계획에 비하여 평균 이하선량이 적다(12, 13). 하지만 토모테라피가 임상에 적용된 지 6년 밖에 지나지 않았기 때문에 현재까지의 논문은 실제 환자의 임상 데이터를 기반으로 한 것보다는 각 계획의 선량 비교가 주가 되므로 계획상의 차이가 실제 환자에 미치는 영향은

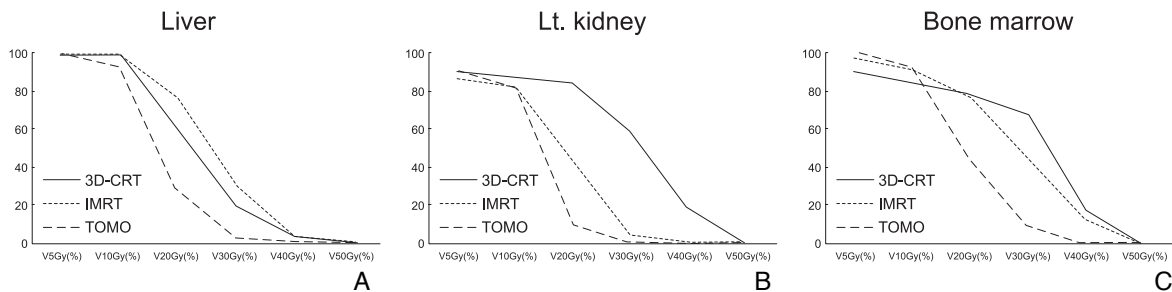
밝혀지지 않았다. 다만 선량비교 연구 결과로 추론해 볼 때 토모테라피를 시행하게 되면 적어도 IMRT를 시행할 때만큼은 구강건조증의 발생을 줄여줄 수 있을 것으로 사료된다.

## 폐 암

MV CT 영상은 kV CT 영상에 비하여 영상 품질이 떨어지지만 말초 T1-2 N0 M0 폐암과 같이 MV CT 영상에서 종양이 보이는 경우, 정위적 방사선치료를 시행할 수 있다(4). 폐암의 경우 호흡 주기에 따라 종양의 위치가 달라지게 되므로 정확한 폐암 치료를 위해서는 호흡 동조(respiratory gating)가 필요하다. 호흡 동조에는 두 가지 방법이 있는데, 첫 번째 방법은 호흡 주기의 일부분에 호흡을 멈추고 그동안 방사선치료를 하는 방법으로 이 방법은 환자가 호흡에 문제가 없어야 하며 순응도가 좋아야 한다. 두 번째 방법은 호흡 주기를 모니터링하는 장치를 사용하여 설정된 주기에 방사선치료를 시행하는 방법이다(17). 토모테라피에서 호흡 동조는 개발 단계로 현재는 종양 주위의 정상 폐 조직까지 포함하여 충분한 여유를 두어 치료 범위를 설정하여 치료하고 있다.

## 척추 종양

척추 신경에 방사선이 많이 들어가게 될 경우, 영구적인 신경 손상을 가져올 수 있다. 때문에 기존 치료방법으로는 척추나 그 근접 장기에 방사선치료를 할 경우에 총 선량에 제한이 있었다. 하지만 토모테라피로 치료할 경우, 치료해야 할 부분에는 원하는 선량을 주면서 척추강에만 적은 선량을 줄 수 있어서 처음 치료받던 부위는 물론, 이전 방사선치료를 했던 부분에 다시 방사선치료를 할 수도 있다. 또한 하



**Figure 8.** Comparisons of 3D conformal RT, LINAC based IMRT and tomotherapy for whole abdominal irradiation, using specific organ dose-volume histograms (A) Liver (B) Left kidney (C) Bone marrow.

나의 계획으로 다양한 방사선 선량을 줄 수 있다. 척추 뼈 전이로 토모테라피를 10회 시행받은 환자의 치료 계획(Figure 5)을 보면 척추 뼈에는 일정한 선량이 들어가면서(검은색 실선, 40Gy) 그 안에 있는 전이된 부분에는 더 많은 선량을 주고(점선, 45Gy), 척추강에는 적은 양(흰색 실선, 30Gy 미만)의 방사선을 줄 수 있다. 이것을 동시 집적 증대 기술(simultaneous integrated boost technique)이라고 하며 육안적 종양(gross tumor)과 현미경적 종양(microscopic tumor)을 동시에 치료하되 서로 다른 치료 선량을 주고자 할 때 많이 쓰는 방법이므로 토모테라피는 이를 효과적으로 시행할 수 있다.

### 넓은 범위에 걸쳐있는 다수의 병변

기존 선형 가속기의 치료 범위는 40cm 정도로 고정되어 있어서 넓은 부위를 치료하기 위해서는 위와 아래를 나누어 따로 치료를 하거나 치료 범위를 겹치게 하고 겹치는 부위를 순차적으로 이동시키는 방법을 사용하여 치료 범위가 겹치거나 빠지는 부위가 생기게 된다. 반면에 토모테라피는 머리-꼬리 축을 따라 테이블이 이동하기 때문에 테이블이 이동하는 범위(160cm) 내에서는 길이의 제한이 없다(4). 또한 기존 치료방법에 비하여 방사선 선량분포가 우수하여 병변에는 높은 선량을, 주위 정상 조직에는 낮은 선량을 줄 수 있어서 이를 이용하여 다수의 전이성 병변이나 대동맥 주위 림프절 전이를 한 번에 치료할 수 있다. Figure 6과 같이 흉골과 척추를 모두 치료해야 할 경우 기존 치료방법으

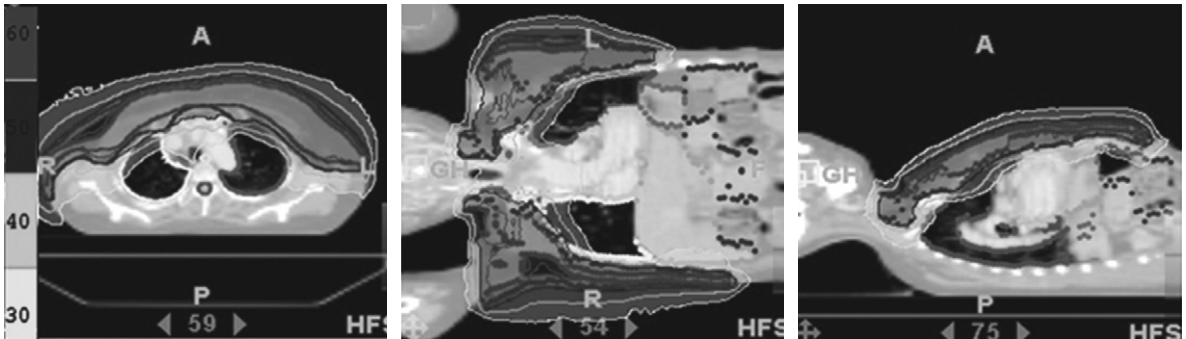
로는 병변에만 높은 선량을 주기 어려웠으나 토모테라피를 이용하면 심장이나 장에 방사선이 거의 들어가지 않고 병변을 치료할 수 있다. 단지 치료 범위가 넓고 치료 계획이 복잡할수록 치료 시간이 길어지기 때문에 유일한 제한은 환자가 움직이지 않고 누워있을 수 있는 치료 시간이라 할 수 있겠다.

### 전신 방사선치료

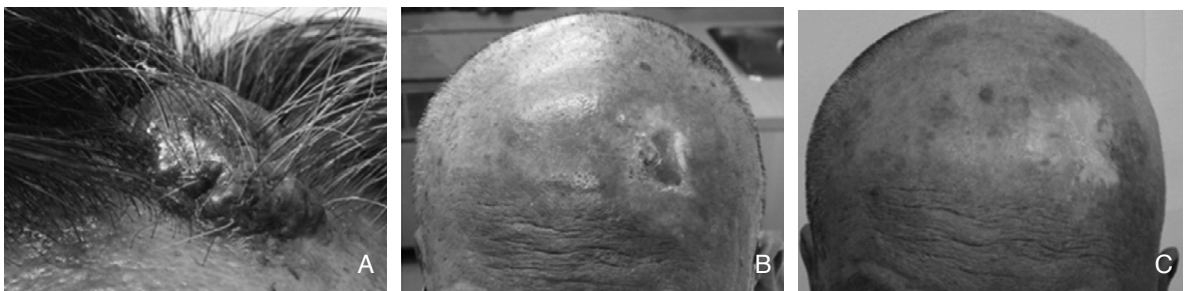
토모테라피는 테이블이 이동하는 범위 내에서 길이 제한이 없기 때문에, 넓은 범위를 치료하는 뇌척수 방사선치료(craniospinal irradiation), 전복부 방사선치료(whole abdominal irradiation), 전신 방사선치료 또는 전골수 및 전림프계통 방사선치료(total marrow and total lymphatic irradiation)(25, 26)도 가능하다. 뇌척수 방사선치료시 뇌와 척추강 전체에 균일하게 방사선을 주면서(Figure 7, 검은색 실선) 주변 장기에는 방사선이 거의 들어가지 않도록 할 수 있다. 전복부 방사선치료시 기존 방사선치료로는 방사선량이 많이 들어갔던 간, 신장, 골수와 같은 주변 정상 조직에 방사선이 적게 들어가는 것을 확인할 수 있다(Figure 8).

### 광범위한 표재성 피부 종양 (Large Superficial Skin Tumor)

기존 방사선치료방법으로 피부를 치료하기 위해서는 전자선을 사용해왔다. 하지만 치료할 범위가 넓고 복잡할 경



**Figure 9.** Dose distribution in irradiation of skin metastasis from breast cancer.



**Figure 10.** A 72-year-old man who received tomotherapy for scalp angiosarcoma (A) before, (B) immediately after, (C) 3 months after tomotherapy.

우 기존 치료방법으로는 치료하기 어렵다. 토모테라피는 6MV 광자선만 사용하지만 나선형으로 방사선이 조사되면서 피부에 비스듬하게 들어가기 때문에 기존의 광자선으로 치료하는 것보다 표면에 방사선량을 많이 줄 수 있다(27). 하지만 표면에 가까운 병변에는 계획한 것에 비해 방사선이 적게 들어가기 때문에 표면을 치료할 경우에는 선량 부족을 보상할 보정물을 적용하고 치료하는 것이 도움이 된다(28). 유방암이 피부 전이된 환자를 토모테라피로 치료하여 전이된 병변이 있는 피부에 방사선이 조사되면서 폐나 심장에는 방사선이 조사되지 않도록 치료 계획을 세울 수 있었다(Figure 9). 두피에 생긴 혈관육종암 환자를 치료한 결과 병변이 완전 관해 되었다(Figure 10).

## 선량 증가

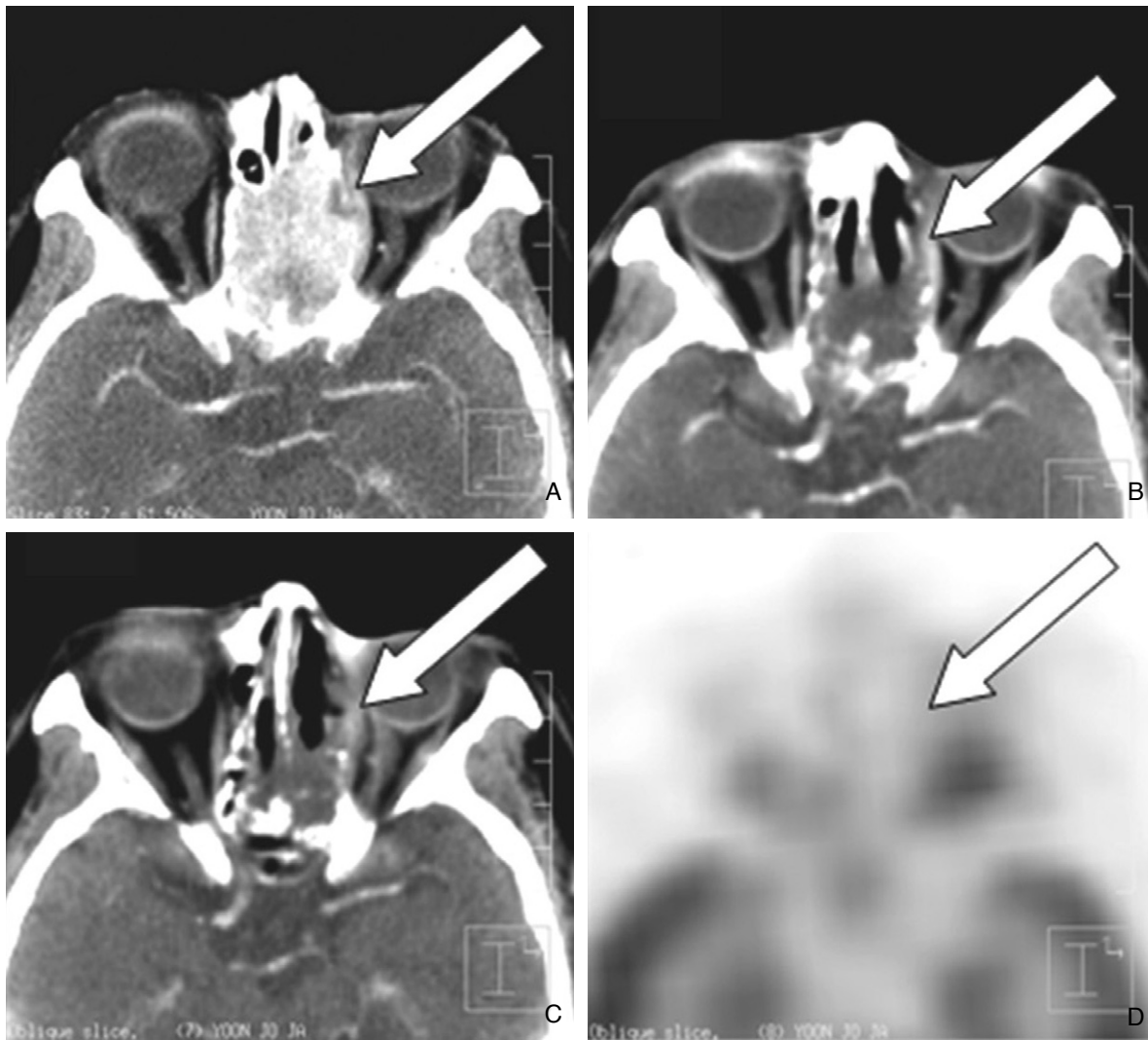
폐암이나 전립선 암의 경우, 방사선 총 선량이 늘어나면

종양의 국소재발률이 감소한다는 보고가 있었다. 종양의 국소 재발 방지를 위해서 총 선량을 올리게 될 경우, 1회 치료 선량이 기존과 같다면 치료 기간이 길어지게 된다.

치료 기간이 길어지면 환자가 정신적으로 부담을 느끼는 기간이 늘어나며 치료 횟수에 따라 치료비가 계산되므로 경제적으로도 부담이 늘어나게 된다. 총 선량을 올리면서 치료 기간을 줄이려면 1회 치료 선량을 증가시켜야 한다. 하지만 1회 치료 선량이 커지면 종양에 들어가는 선량도 커지지만 주위 정상 조직에 들어가는 선량도 커지기 때문에 부작용이 발생할 가능성이 커진다.

토모테라피의 선량적 이점과 MV CT 영상을 이용한 준비 오차(set-up error) 수정으로 정상 조직의 부작용을 최소화 하면서 1회 치료 선량을 증가시키려는 연구가 진행되고 있다(29).

전립선암과 같이 만기 반응(late responding)하는 경우에 치료 효과가 더 클 것으로 기대된다.



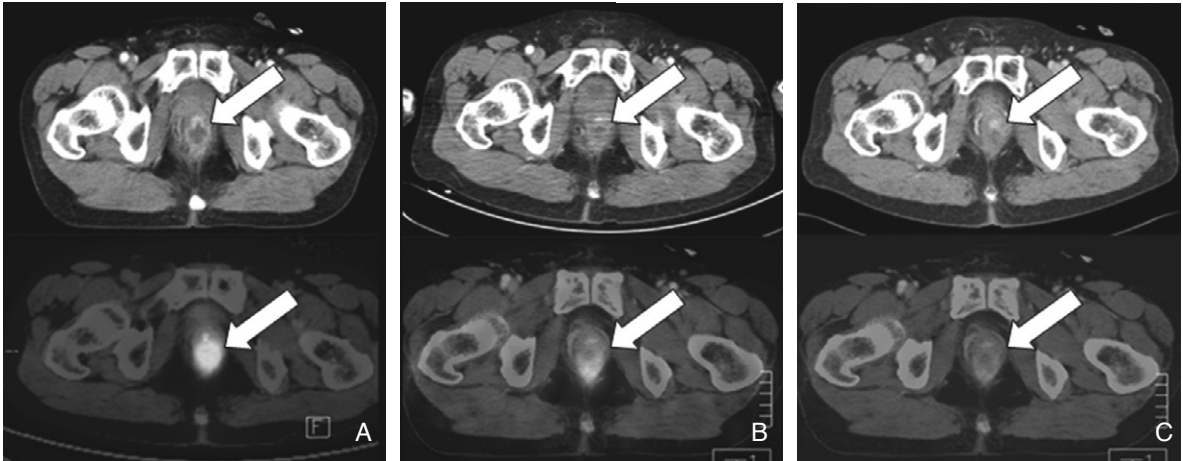
**Figure 11.** Re-irradiation of recurrent lacrimal sac cancer previously treated with 60 Gy eight years ago: CT images (A) before re-irradiation (B) immediately after and (C) 1 year after tomotherapy, and (D) FDG-PET Image 1 year after tomotherapy (arrow: recurred mass).

### 방사선 재조사(Re-Irradiation)

방사선치료를 받은 환자가 치료 범위 내에서 재발하였을 때 이미 주변 정상 조직에 방사선이 들어갔기 때문에 추가로 충분한 선량의 방사선치료를 시행하기에는 부작용이 예상되어 치료를 주저하는 경우가 많았다. 하지만 토모테라피는 목표 선량 분포나 정상 조직 보호가 기존 방사선 치료방법

에 비하여 향상되었기 때문에 국소제어가 가능한 선량으로 치료하면서 부작용을 최소화할 수 있게 되었다. Figure 11은 누액낭(lacrimal sac) 종양으로 60Gy 방사선치료를 받고 8년만에 사골동, 부비동 및 비강에 재발한 환자의 예로, 토모테라피로 치료한 후 종양이 완전히 소실되었고 시력 저하 등의 부작용이 관찰되지 않았다. 세브란스병원 연세암센터에서 재발성 직장암으로 토모테라피로 방사선 재조사를 받





**Figure 12.** Complete remission in recurrent rectal cancer after re-irradiation with tomotherapy: (A) before re-irradiation (B) 1 month after, and (C) 4 month after tomotherapy (upper: CT images, lower: PET-CT fusion images) (arrow: recurred mass).

있던 환자 8명을 분석한 초기 임상 결과, 5명에서 치료에 반응하였고(완전반응 1명, 부분반응 4명), 3명은 안정상태로 유지되었다. 부작용은 2번째 재발로 방사선치료를 3번 받은 환자에서만 나타났으며 다른 환자는 치료로 인한 심한 부작용은 관찰되지 않았다. Figure 12는 치료 환자의 예로 과거에 수술 후 약물치료 및 방사선치료를 시행받았는데 금번에 회음부에 종양이 재발하여 토모테라피를 시행하였고 종양이 완전관해 되었다.

재발성 종양에 대한 임상 결과는 더 많은 연구가 필요하겠으나 초기 경험은 매우 고무적이라고 하겠다.

물론 이 외에도 뇌종양, 간 담도암, 췌장암, 전립선암 등에서도 토모테라피 적용이 가능하고 그 효과가 기대된다.

## 결 론

토모테라피는 영상과 치료를 한 기계에 결합한 새로운 방사선 치료 방법이다. 아직 임상적인 결과가 많이 나와 있지는 않지만 기존 방사선치료방법에 비하여 우수한 선량 분포로 치료 부위에는 높은 선량을, 주변 정상 조직에는 낮은 선량을 줄 수 있다. 치료할 때마다 촬영하는 MV CT 영상을 이용하면 기존 치료에 비하여 치료간 준비 오차(set-up error)를 줄여 보다 정확하게 계획 대로 치료를 시행할 수 있고

MV CT 영상과 시행한 치료의 선량 분포를 이용하면 계획 변경도 비교적 손쉽게 할 수 있다. 또한 기존 방사선치료 방법으로는 어려웠던 다발성 병변이나 방사선 재조사도 가능하며 소분할 조사법도 가능하다. 치료하는 도중에 장기가 움직이면서 발생하는 오차는 아직 해결되지 않았으나 호흡동조 등의 다양한 연구가 계속 진행되고 있어 암 치료에 있어서 치료율을 높이고 암 환자의 삶의 질을 호전시킬 것으로 기대된다.

## 참고문헌

1. Mackie TR. History of tomotherapy. *Phys Med Biol* 2006; 51: R427-453.
2. Whitelaw GL, Blasiak-Wal I, Cooke K, Usher C, Macdougall ND, Plowman PN. A dosimetric comparison between two intensity-modulated radiotherapy techniques: tomotherapy vs dynamic linear accelerator. *Br J Radiol* 2008; 81: 333-340.
3. Fenwick JD, Tomé WA, Soisson ET, Mehta MP, Mackie TR. Tomotherapy and other innovative IMRT delivery systems. *Semin Radiat Oncol* 2006; 16: 199-208.
4. Tomé WA, Jaradat HA, Nelson IA, Ritter MA, Mehta MP. Helical tomotherapy: image guidance and adaptive dose guidance. *Front Radiat Ther Oncol* 2007; 40: 162-178.
5. Fenwick JD, Tomé WA, Kissick MW, Mackie TR. Modelling simple helically delivered dose distributions. *Phys Med Biol* 2005; 50: 1505-1517.

6. Kron T, Grigorov G, Yu E, Yartsev S, Chen JZ, Wong E, Rodrigues G, Trenka K, Coad T, Bauman G, Van Dyk J. Planning evaluation of radiotherapy for complex lung cancer cases using helical tomotherapy. *Phys Med Biol* 2004; 49: 3675-3690.
7. Wieland P, Dobler B, Mai S, Hermann B, Tiefenbacher U, Steil V, Wenz F, Lohr F. IMRT for postoperative treatment of gastric cancer: covering large target volumes in the upper abdomen: a comparison of a step-and-shoot and an arc therapy approach. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2004; 59: 1236-1244.
8. van Vulpen M, Field C, Raaijmakers CP, Parliament MB, Terhaard CH, MacKenzie MA, Scrimger R, Legendijk JJ, Fallone BG. Comparing step-and-shoot IMRT with dynamic helical tomotherapy IMRT plans for head-and-neck cancer. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2005; 62: 1535-1539.
9. Yartsev S, Kron T, Cozzi L, Fogliata A, Bauman G. Tomotherapy planning of small brain tumours. *Radiother Oncol* 2005; 74: 49-52.
10. Soisson ET, Tomé WA, Richards GM, Mehta MP. Comparison of linac based fractionated stereotactic radiotherapy and tomotherapy treatment plans for skull-base tumors. *Radiother Oncol* 2006; 78: 313-321.
11. Khoo VS, Oldham M, Adams EJ, Bedford JL, Webb S, Brada M. Comparison of intensity-modulated tomotherapy with stereotactically guided conformal radiotherapy for brain tumors. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1999; 45: 415-425.
12. Fiorino C, Dell'Oca I, Pierelli A, Broggi S, De Martin E, Di Muzio N, Longobardi B, Fazio F, Calandrino R. Significant improvement in normal tissue sparing and target coverage for head and neck cancer by means of helical tomotherapy. *Radiother Oncol* 2006; 78: 276-282.
13. Sheng K, Molloy JA, Read PW. Intensity-modulated radiation therapy (IMRT) dosimetry of the head and neck: a comparison of treatment plans using linear accelerator-based IMRT and helical tomotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2006; 65: 917-923.
14. Lee TK, Rosen, II, Gibbons JP, Fields RS, Hogstrom KR. Helical tomotherapy for parotid gland tumors. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2008; 70: 883-891.
15. Mackie TR, Olivera GH, Kapatoes JM. Helical tomotherapy. In; Palta JR, Mackie TR, eds. *Intensity-modulated radiation therapy-the state of the art*. Madison, WI: Medical Physics Publishing, 2003: 247-284.
16. Welsh JS, Bradley K, Ruchala KJ, Mackie TR, Manon R, Patel R, Wiederholt P, Lock M, Hui S, Mehta MP. Megavoltage computed tomography imaging: a potential tool to guide and improve the delivery of thoracic radiation therapy. *Clin Lung Cancer* 2004; 5: 303-306.
17. Welsh JS, Lock M, Harari PM, Tomé WA, Fowler J, Mackie TR, Ritter M, Kapatoes J, Forrest L, Chappell R, Paliwal B, Mehta MP. Clinical implementation of adaptive helical tomotherapy: a unique approach to image-guided intensity modulated radiotherapy. *Technol Cancer Res Treat* 2006; 5: 465-479.
18. Welsh JS, Patel RR, Ritter MA, Harari PM, Mackie TR, Mehta MP. Helical tomotherapy: an innovative technology and approach to radiation therapy. *Technol Cancer Res Treat* 2002; 1: 311-316.
19. Butler EB, Teh BS, Grant WH 3rd, Uhl BM, Kuppersmith RB, Chiu JK, Donovan DT, Woo SY. SMART (simultaneous modulated accelerated radiation therapy) boost: a new accelerated fractionation schedule for the treatment of head and neck cancer with intensity modulated radiotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1999; 45: 21-32.
20. Chao KS, Ozyigit G, Tran BN, Cengiz M, Dempsey JF, Low DA. Patterns of failure in patients receiving definitive and postoperative IMRT for head-and-neck cancer. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2003; 55: 312-321.
21. Claus F, De Gersem W, De Wagter C, Van Severen R, Vanhoutte I, Duthoy W, Remouchamps V, Van Duyse B, Vakaet L, Lemmerling M, Vermeersch H, De Neve W. An implementation strategy for IMRT of ethmoid sinus cancer with bilateral sparing of the optic pathways. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2001; 51: 318-331.
22. Dawson LA, Anzai Y, Marsh L, Martel MK, Paulino A, Ship JA, Eisbruch A. Patterns of local-regional recurrence following parotid-sparing conformal and segmental intensity-modulated radiotherapy for head and neck cancer. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2000; 46: 1117-1126.
23. Eisbruch A, Marsh LH, Dawson LA, Bradford CR, Teknos TN, Chepeha DB, Worden FP, Urba S, Lin A, Schipper MJ, Wolf GT. Recurrences near base of skull after IMRT for head-and-neck cancer: implications for target delineation in high neck and for parotid gland sparing. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2004; 59: 28-42.
24. Lee N, Xia P, Quivey JM, Sultanem K, Poon I, Akazawa C, Akazawa P, Weinberg V, Fu KK. Intensity-modulated radiotherapy in the treatment of nasopharyngeal carcinoma: an update of the UCSF experience. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2002; 53: 12-22.
25. Schultheiss TE, Wong J, Liu A, Olivera G, Somlo G. Image-guided total marrow and total lymphatic irradiation using helical tomotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2007; 67: 1259-1267.
26. Wong JY, Liu A, Schultheiss T, Popplewell L, Stein A, Rosenthal J, Essensten M, Forman S, Somlo G. Targeted total marrow irradiation using three-dimensional image-guided tomographic intensity-modulated radiation therapy: an alternative to standard total body irradiation. *Biol Blood Marrow Transplant* 2006; 12: 306-315.

27. Smith KS, Gibbons JP, Gerbi BJ, Hogstrom KR. Measurement of superficial dose from a static tomotherapy beam. *Medical physics* 2008; 35: 769-774.
28. Ramsey CR, Seibert RM, Robison B, Mitchell M. Helical tomotherapy superficial dose measurements. *Medical physics* 2007; 34: 3286-3293.
29. Scrimger RA, Tomé WA, Olivera GH, Reckwerdt PJ, Mehta MP, Fowler JF. Reduction in radiation dose to lung and other normal tissues using helical tomotherapy to treat lung cancer, in comparison to conventional field arrangements. *Am J Clin Oncol* 2003; 26: 70-78.



### Peer Reviewers Commentary

본 논문은 세기조절방사선치료(IMRT) 전용기기로서 방사선치료기에 CT 영상을 획득할 수 있는 기능이 포함된 최첨단 방사선치료기기인 토모테라피에 대한 소개와 초기 임상적용 경험에 대하여 기술하고 있으며 향후 발전 방향에 대해서도 언급하고 있다. 필자의 언급에 따르면 토모테라피와 선형가속기를 이용한 IMRT에서의 선량분포 상의 비교는 극히 제한된 조건에서만 그 장점이 부각될 수 있지만, 토모테라피는 IMRT에 비하여 임상적 적용이 더욱 광범위한 것으로 보인다. 이러한 토모테라피의 장점은 그 치료 방식이 나선형 치료법을 이용하기 때문인 것으로 생각되는데, 나선형 치료법이란 gantry가 360도 회전하면서 환자가 누워있는 테이블이 최대 160cm까지 이동함과 동시에 표적의 형태에 따른 다엽 콜리메이터의 개폐동작이 조화를 이루면서 방사선치료를 시행하는 방식이다. 이러한 나선형 방사선치료 방식은 기존의 치료 방식, 즉 환자와 gantry가 고정된 상태에서 방사선이 조사되던 방식에 비하여 매우 발전된 것이라고 할 수 있겠다. 그러나 토모테라피의 적응증이 더 확대되고 치료 효과를 높이기 위해서는 필자도 지적했듯이 MVCT 영상의 질적 향상과 호흡에 따른 종양 및 정상조직의 움직임에 따른 보정이 함께 이루어져야 할 것으로 사료되며 또한 선형가속기를 이용한 세기조절방사선치료 등과 비교할 때 임상적 효과 및 비용-효과 측면에서 향후 연구 및 검토가 필요하다. 본 논문은 개론과 초기 임상경험이 잘 정리된 논문으로 판단된다.

[정리: 편집위원회]