

Analysis of Couch Sag Using Image Processing of MVCT Images in Tomotherapy

Ha Ryung Park*, Yong Ho Kim*, Dahl Park*, Wontaek Kim[†], Yongkan Ki[†], Donghyun Kim[†], Jin Suk Bae*

*Department of Radiation Oncology, Pusan National University Hospital,

[†]Department of Radiation Oncology, Pusan National University School of Medicine, Busan, Korea

In Tomotherapy the couch sags during the treatment due to the weight of the patient. In this study, we developed a simple method to obtain the amount of the sag and the pitch angle of the couch using the image processing technique of MVCT images in Tomotherapy. Using the method we evaluated the sag and pitch of couch for 22 head and neck patients and one craniospinal irradiation (CSI) patient. The sag and the average pitch angle of couch were 0.40~1.54 mm and 0.7° for head and neck patients, respectively. For head and neck patients, the sag increased as the longitudinal length of the irradiation volume increased and the pitch angle showed no relationship with the longitudinal length. For the CSI patient the sag was 4.97 mm. Using the method the amount of the couch sag could be measured easily and the measured data could be useful in determination of margins considering the table sag error.

Key Words: Tomotherapy, MVCT, Couch sag

서 론

최근 방사선치료는 CT, PET, MRI 그리고 초음파 등 각종 영상장비의 개발로 인해 날이 갈수록 발전하고 있으며 영상을 근간으로 하여 더욱 정확한 치료가 가능해졌다. 또한 의학 기술의 발달에 따라 암 환자의 생존율이 점점 늘어나고 있기 때문에 방사선 치료로 인한 부작용이 환자의 남은 삶의 질에 큰 영향을 미치게 되어 방사선 치료로 인해 발생하는 부작용을 줄이기 위해서 치료 부위에는 보다 정확한 선량을 전달하고 주위 장기는 보다 적은 선량을 조사하기 위한 방사선 치료 기술이 중요해 지고 있다. 이러한 방사선치료에 효과적인 치료로써 세기조절방사선치료(IMRT)가 있으며, 이는 종양에는 높은 선량의 방사선을 조사하고 주변 정상 장기에는 보다 적은 양의 방사선을 조사하는 것이다.¹⁾ 하지만 세기조절방법을 이용하여 정상조직의 선량이 최소화

되도록 설계하여도 이를 실제 치료 시 환자의 몸에 정확히 전달하기 위해서는 설계 영상과 실제 치료 시의 환자의 자세가 매우 근접하여야한다. 따라서 원하는 곳에 정확한 선량을 전달하기 위한 많은 연구들이 이루어지고 있으며, 특히 CT의 발달로 치료 직전 환자의 단층 영상을 획득하여 환자의 자세나 주요 장기를 설계 영상과 비교할 수 있게 됨으로써 영상유도방사선치료(IGRT)의 중요성이 세기조절 방사선치료 기술의 발전과 함께 날이 갈수록 높아지고 있는 추세이다.

토모테라피(Hi-Art, Accuray Incorporated, Sunnyvale, CA, USA)는 영상유도방사선치료의 대표적인 장비로 방사선 세기조절에 매우 큰 장점을 가지고 있고 치료전 MVCT를 촬영하여 설계영상과 비교하고 방사선 치료부위가 정확하게 조준되었는지 확인을 할 수 있다.^{2,3)}

하지만 토모테라피에서는 시스템의 특성상 환자 테이블의 자유도가 수직(Vertical), 측면(Lateral), 종단(Longitudinal) 방향으로 이동과 갠트리와 같은 방향으로의 회전(Roll)의 총 4개의 자유도만을 가지고 있다. 따라서 영상유도방사선 치료 중 레지스트레이션 과정에서 환자의 체중에 의한 수직 방향으로의 회전(Pitch)과 측면 방향으로의 회전(Yaw)을 테이블의 이동으로 보정할 수 없다.⁴⁾ 즉 치료 범위가 넓은 환자의 경우 이 오차 또한 증가하게 되며 기대했던 설계시의 선량 분포와 차이가 발생할 가능성이 생긴다. 또한 IGRT를 위한

This work was supported by clinical research grant from Pusan National University Hospital 2014.

Received 4 May 2015, Revised 11 June 2015, Accepted 11 June 2015

Correspondence: Dahl Park (dpark411@gmail.com)

Tel: 82-51-240-7924, Fax: 82-51-248-5747

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

영상 획득 과정에서 치료 설계 당시 계획했던 환자 오차 범위를 벗어날 확률이 높아지게 되고 이를 보정하기 위해서는 환자의 자세를 치료사가 직접 보정하고 다시 영상을 획득하여 확인하는 과정이 반복적으로 발생하게 된다.⁵⁾

본 연구에서는 정확한 방사선 선량 전달을 위해 토모테라피의 MVCT 영상에서 환자 테이블의 처짐의 정도를 영상 처리를 통해 객관적으로 분석하는 방법을 개발하였다. 개발한 방법을 통해 환자 테이블 처짐으로 인한 에러를 분석하여 치료 설계 시 필요한 셋업 오차에 대한 치료 범위(PTV)를 설정하는 것에 기여할 수 있을 것이다. 또한, 실제 치료 시 발생할 수 있는 처짐 정도를 예측 및 보정할 수 있도록 하기 위한 선행 연구이다.

재료 및 방법

1. 토모테라피의 MVCT에서 환자 테이블 처짐 발생원인

토모테라피는 Fig. 1a와 같이 환자테이블이 갠트리의 회전 중심축으로 이동하면서 치료를 진행한다. 이는 한쪽 단이

고정된 보의 처짐 현상과 같은 해석적 거동을 보인다.⁶⁾ 특히 환자테이블의 이동거리가 증가할수록 회전 중심부에서의 환자테이블의 처짐도 증가하기 때문에 MVCT 단층 영상의 각 영상 슬라이스에는 Fig. 1b와 같이 종축으로의 환자 테이블의 위치변화가 발생하게 된다.

2. 환자 테이블 처짐의 분석

영상유도방사선치료를 위해서는 환자 치료 설계에 이용하는 설계 영상과 실제 치료 시 정확한 환자 위치를 확인하기 위한 MVCT 영상을 이용하여 영상정합을 시도한다. 하지만 두 영상 시스템 간에는 환자테이블이 처지는 정도의 차이가 존재하기 때문에 실제 환자 치료 시 영상에서의 의도치 않은 환자의 기울기를 발생 시킨다. 따라서 본 연구에서는 MVCT 단층영상에서 환자 테이블 처짐 차이로 인해 발생하는 오차를 측정하고 보정하기 위해 토모테라피에서 4 MV 에너지로 촬영된 환자의 MVCT 영상과 치료 설계를 위해 Helical kVCT (Philips Brilliance, Philips Medical Systems, The Netherlands)에서 촬영한 설계 영상을 이용하

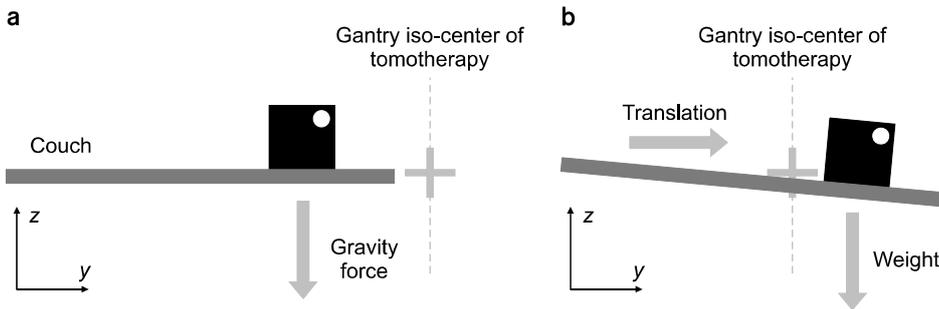


Fig. 1. 토모테라피 MVCT에서 환자 테이블 처짐으로 발생하는 영상에서의 전단현상.

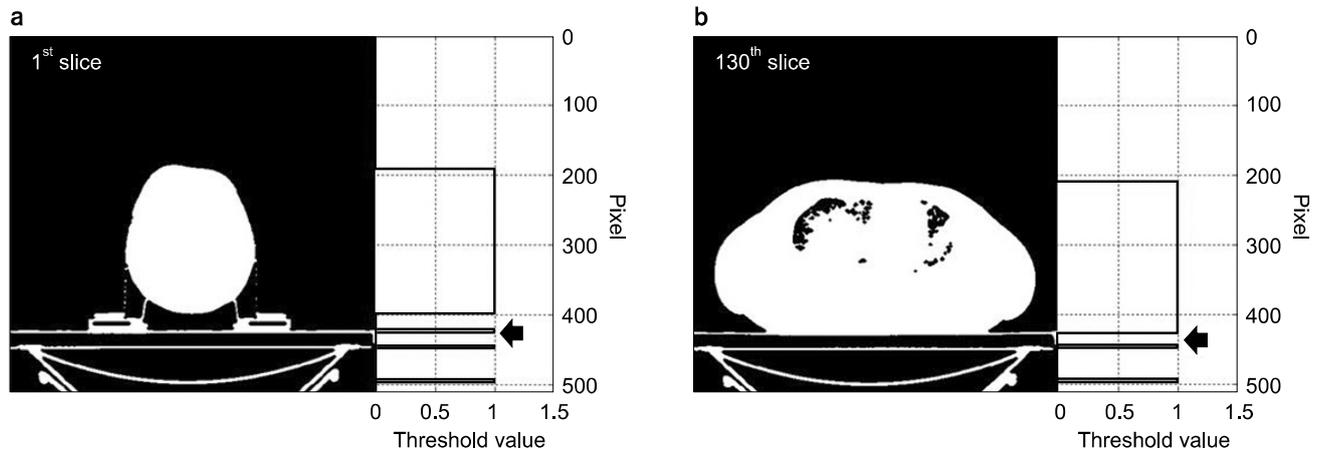


Fig. 2. 방사선 단층영상의 영상 이진화 결과. (a) 단층영상의 첫 번째 슬라이스에서의 영상 이진화 결과와 영상 중앙에서 종축으로의 프로파일. (b) 단층영상의 마지막 슬라이스에서의 영상 이진화 결과와 영상 중앙에서 종축으로의 프로파일.

였다. 각 영상에서 환자 테이블의 위치를 자체적인 알고리즘을 이용하여 찾고 이 차이를 분석하였다.

각 영상에서 효율적이고 객관적으로 환자 테이블의 위치를 찾기 위해 영상 이진화(thresholding) 과정을 수행하였다. 이진화 과정을 수행하기 전 가우시안 필터(Gaussian filter)를 적용하여 영상의 잡음을 최소화 하였다.⁷⁾ 이진화는 공기 그리고 테이블을 포함한 환자의 몸으로 각각 Fig. 2와 같이 하였다. 토모테라피에서 환자와 직접적인 접촉이 발생하는 부위는 Fig. 1a에서 볼 수 있듯이 환자 테이블의 위쪽 면이다. Fig. 2와 같이 환자 테이블의 중앙에서의 프로파일을 관찰하여 변곡 되는 두 점의 중간 값의 위치를 얻었다. 따라서 영상의 각 슬라이스에서 환자테이블 면의 위치 차이를 이용하면 환자 테이블의 처짐의 차이를 알 수 있다. 중앙에서부터 10개의 픽셀 위치 값을 평균하여 분석하였으며 촬영한 영상의 첫 번째 슬라이스와 마지막 슬라이스의 거리에 삼각함수를 적용하여 처짐 각도를 계산하였다. 처짐량 분석은 MATLAB (R2012b, Mathworks, Inc, CA, USA)을 이용하여 수행하였다.

3. 실제 치료 환자데이터 분석

개발한 분석 방법을 환자 데이터에 적용하였다. 22명의 두경부 환자 그리고 두개척수조사(Craniospinal Irradiation, CSI) 환자 1명에 대해서 분석 하였다. 설계용 CT 영상 촬영은 모두 3 mm 슬라이스 간격으로 촬영되었고 MVCT 영상 촬영은 두경부에서 3 mm 그리고 두개척수조사에서 6 mm의 슬라이스 간격으로 촬영되었다. 분석을 위해서 각 환자의 체중을 기록하였으며 각 환자의 첫 번째 치료의 첫 번째 MVCT영상에서 분석을 시도하였다. 이는 치료 설계영상 촬영시의 환자 셋업과 실제 치료 시 셋업을 연속적이라 가정한 것이다. 첫 번째 MVCT 영상촬영 이후 두 영상에서 발견된 오차를 치료사가 직접 환자의 자세를 움직여 수정하여 생기는 간접적 처짐 보정을 배제하기 위함이다. 획득한 MVCT 영상에서 첫 번째 슬라이스와 마지막 슬라이스에서의 환자테이블 위치를 개발한 방법으로 구하고 이 값들의 차이로 테이블의 처짐량을 구하였다. 테이블의 처짐량을 체중과 치료범위에 따라 분석하였다. 또한 설계영상에 대해서도 개발한 방법을 적용하여 환자테이블의 처짐이 있는지 평가해보았다.

4. 분석한 데이터를 기반으로 영상정합에 적용

앞선 방법으로 측정된 각 환자의 처짐을 Tomoport™ (Version 5.0.0.52, TomoTherapy Inc., Madison, WI, USA)을

이용하여 처짐의 정도가 실제 치료시에 유용하게 적용될 수 있는가에 대한 평가를 진행하였다. Tomoport™은 완료된 치료의 MVCT와 치료설계영상의 영상정합을 확인하고 분석 가능하도록 제공 되어진 웹 기반 프로그램이다.

우선 환자테이블의 처짐을 명확히 확인하기 위해 MVCT에서 첫 번째 슬라이스의 단면 영상을 치료설계 영상과 회전, 확대 그리고 축소를 제외한 영상이동을 통해 정합을 하였다. 이를 통해 MVCT와 치료설계영상을 비교할시 환자 테이블에 처짐이 MVCT의 마지막 슬라이스의 단면 영상에서 최대값으로 나타나게 된다. 또한 본 연구로 얻은 처짐량을 토대로 MVCT 영상을 획득한 환자 테이블을 수직방향(vertical)으로 이동한 후 MVCT의 마지막 슬라이스의 단면 영상과 치료설계영상의 영상정합 결과의 변화를 관찰하여 실제 환자 데이터에 적용에 대한 유용성을 살펴보았다.

결 과

1. 두경부 환자의 테이블 처짐

MVCT에서의 처짐 정도를 분석하기 전에 앞서 설계 영상에서의 환자의 처짐 정도를 분석하였다. MVCT 분석과 동일한 22명 환자에 대해서 환자 테이블 처짐을 분석해 본 결과 몸무게와 스캔 범위에 대해 측정된 환자테이블의 기울기가 1 mm 이내로 거의 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 MVCT 영상에서 환자 테이블의 처짐이 발생한다면 이때 발생하는 환자 테이블의 처짐이 치료 시 발생하는 선량전달 오차에 직접적으로 기여한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 MVCT의 환자 테이블의 처짐을 분석한 결과이다. Fig. 3a를 살펴보면 스캔 범위 즉 치료 범위가 커질수록 0.4~1.54 mm까지 환자 테이블의 처짐이 증가하는 것을 확인할 수 있으나 환자 테이블이 처지는 각도에 대해서는 Fig. 3b에서와 같이 평균 0.7°로 뚜렷한 관련성이 없는 것을 알 수 있다. Fig. 3c에서는 환자의 몸무게가 증가할수록 환자 테이블에 가해지는 중량의 증가로 인해 환자 테이블의 처짐 각도가 증가하는 경향이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

2. 두개척수조사 환자의 환자 테이블 처짐

환자테이블의 처짐을 명확하게 관찰하기위해 두개척수조사 환자에 대해 분석을 하였다. 설계용 영상 CT에서의 환자 테이블 처짐의 정도는 두경부 환자와 마찬가지로 1 mm 이하였다. MVCT 영상 획득을 위한 스캔 범위는 위턱(maxila)부터 요추(lumbar spine 3)까지 총 76.8 cm이며 환자의 체중은 73.5 kg 그리고 신장은 180 cm이다. 토모치료 시

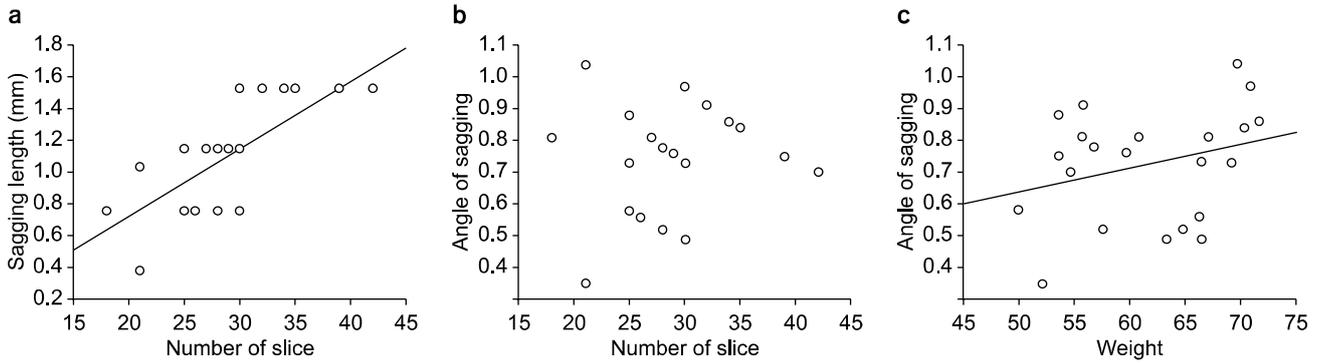


Fig. 3. MVCT의 환자 테이블 처짐 분석 결과. (a) 치료범위에 따른 환자테이블 처짐. (b) 처짐 각도의 측정 결과. (c) 환자 체중에 따른 환자테이블의 처짐 각도.

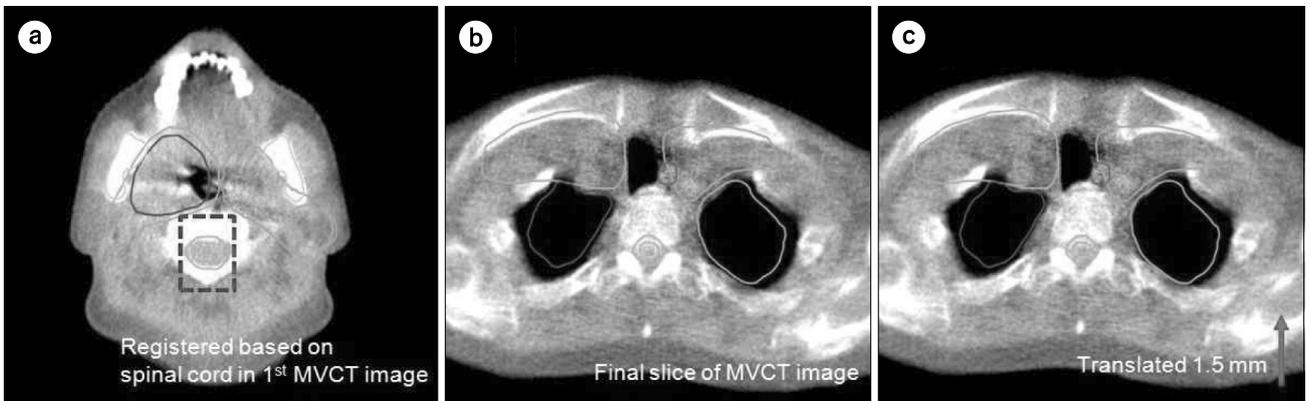


Fig. 4. 측정된 데이터를 바탕으로 두경부 MVCT 영상에서 환자테이블의 처짐을 보정한 결과. (a) MCVT의 첫 번째 슬라이스에서 spine을 기준으로 contour와 영상을 정합한 후 (b) 마지막 슬라이스에서 측정된 오차만큼 (c) 보정한 결과.

첫 치료의 첫 번째 촬영한 MVCT 영상에서 분석한 결과는 약 4.97 mm로 두경부 환자보다 3 mm 정도 증가된 차이가 나는 것을 알 수 있다.

3. 분석 결과를 이용하여 영상정합에 적용한 결과

실제 환자데이터로부터 분석한 테이블의 처짐 정도를 Tomoportal™을 이용하여 영상정합과정에 적용해 보았다. 먼저 실제 치료가 완료된 한 명의 두경부 환자에 대해 환자테이블 처짐량을 분석한 결과 1.54 mm의 처짐이 발생하였다. Fig. 4a와 같이 척수를 기준으로 치료 설계 시 그려진 컨투어와 단층영상의 첫 번째 슬라이스를 좌표이동을 통해 정확하게 정합하였다. 이때 단층 영상의 마지막 슬라이스를 비교하였다. Fig. 4b는 첫 번째 슬라이스를 정합하였을 시 마지막 슬라이스에서 나타나는 척수와 척수 윤곽선의 차이를 보여주며 Fig. 4c는 분석한 처짐량 1.54 mm를 수직 방향으로 보정하였을 시 척수와 척수 윤곽선의 차이를 나

타낸다. 마찬가지로 보다 명확한 처짐 정도가 나타나는 두 개척수조사 환자에 대해서 같은 방법으로 비교해보았다. 분석한 환자테이블 처짐량은 4.97 mm이고 이는 Fig. 5c와 같이 처짐량이 보상된 결과로부터 본 연구에서 제안한 환자테이블 처짐 분석 방법이 토모테라피와 같은 helical 단층 영상에서 나타나는 처짐을 비교적 정확하게 반영 한다는 것을 알 수 있다.

고찰 및 결론

앞 선 결과로부터 토모 치료 시 스캔 범위가 길어지거나 몸무게가 증가할 경우 실제 치료 시 환자 셋업 시 발생하는 시스템 오차가 커질 것이며, 이로 인해 선량 전달의 오차를 발생 시킬 수 있을 것이다. 또한 측정된 오차를 바탕으로 실제 치료 시 촬영한 영상을 보정하면 설계영상에서의 컨투어와 환자의 OAR (organ at risk)이 더욱 잘 맞는 것

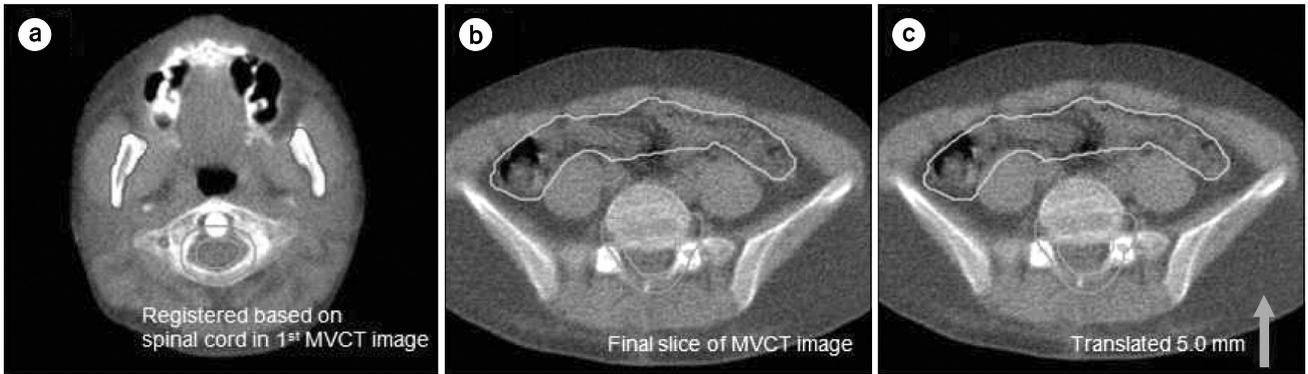


Fig. 5. 측정된 데이터를 바탕으로 두개척수조사 환자의 MVCT 영상에서 환자테이블의 처짐을 보정 한 결과. (a) MCVT의 첫 번째 슬라이스에서 spine을 기준으로 contour와 영상을 정합한 후 (b) 마지막 슬라이스에서 측정된 오차만큼 (c) 보정한 결과.

을 확인 할 수 있었다. 특히 약 18 cm 이상 되는 치료범위에 대해서 약 1.54 mm (약 2 pixel)의 처짐이 발생하며 이는 일반적인 kVCT영상의 픽셀 해상도(~1 mm)를 고려하였을 시 영상 정합 수행과정에서 환자테이블의 처짐으로 인해 발생하는 셋업 오차를 인지할 수 있을 만큼의 차이가 발생할 것이다.

본 연구에서 치료범위에 따른 환자테이블의 처짐 각도의 경우 일정한 경향을 나타내지는 않지만 그 값이 평균 0.7°로 측정되었다. 다른 연구에서 토모테라피에서 실제 측정된 환자의 평균 처짐 각도가 두경부 환자에서 $-0.24 \pm 1.19^\circ$ 로 측정되었다.⁸⁾ 이 오차는 환자의 자세에 대한 전반적인 오차로 테이블의 처짐과 환자의 해부학적인 변화 등 여러 가지 오차가 포함되어 있기 때문에 직접적인 비교는 불가능하나 같은 오차 범위에 있다고 볼 수 있다.

또한 무게와 환자테이블 처짐 각도의 결과로부터 환자테이블의 처짐 각도는 두경부 환자의 경우 치료범위보다는 체중에 더 큰 영향을 받을 것이라는 것을 알 수 있었다.

치료범위가 긴 두개척수조사 환자의 경우 환자테이블의 처짐 분석 결과가 4.97 mm로 두경부 환자에 비해 3배가 증가된 처짐이 발생한다. 환자테이블의 처짐으로 인해 회전 중심축에서 부터 4.97 mm의 오차가 발생한다면 명확한 선량 분포차이가 발생할 수 있다. 이는 환자 전체 치료범위의 중간에서 영상정합을 한다면 반으로 줄어들겠지만 두개척수조사 환자의 경우 주된 치료 부위가 뇌(brain)이기 때문에 만약 실제 치료 시 뇌를 위주로 영상정합을 한다면 환자테이블의 처짐량이 선량분포 차이로 실제 환자 치료에 발생될 수 있을 것이다.

분석된 결과를 토대로 영상정합에 반영하였을 시 비록 정량적으로 판단할 수는 없었지만 환자 테이블의 처짐을

보상하게 되면 일반적으로 환자 셋업의 기준이 되는 척수의 경우 셋업오차가 줄어드는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 본연구로부터 분석된 결과는 PTV 범위의 설정에 도움이 될 수 있을 것이다.

환자테이블의 경우 해석적 거동이 보의 처짐과 유사하기 때문에 이를 모델링하여 치료 시 환자테이블의 처짐 정도를 예측하고 치료 설계 영상에 이미지 프로세싱을 통해 인위적으로 MVCT 영상과 같은 처짐을 발생시킨다면 환자 테이블 처짐으로 인한 선량 전달의 오차를 줄일 수 있을 것이다.

현재까지 방사선 치료 시 발생하는 셋업 오차에 대한 많은 연구가 있었으나,^{9,10)} 본 연구는 치료기의 시스템적인 오차를 보다 객관적이고 일관적으로 분석할 수 있는 방법을 제시하였다.

References

1. Ramsey C, Dube S, Hendee WR, et al: Is it necessary to validate each individual IMRT treatment plan before delivery Med Phys 30:2271-2273 (2003)
2. Olivera GH, Shepard DM, Ruchala KJ, et al: "Tomotherapy." In The Modern Technology of Radiation Oncology: A Compendium for Medical Physicists and Radiation Oncologists. (Madison, WI) 521-587 (1999)
3. Ruchala KJ, Olivera GH, Kapatoes J, et al: Limited-data image registration for radiotherapy positioning and verification. Int J Radiat Oncol Biol Phys 54:592-605 (2002)
4. mackie TR, Olivera GH, Kapatoes JM, et al: Intensity-modulated radiation therapy. The state of the art. AAPM Summer School Proceedings. Colorado Springs, CO: Med Phys. Publishing 247-284 (2003)
5. Boswell SA, Jeraj R, Ruchala KJ, et al: A novel method to correct for pitch and yaw patient setup errors in helical tomotherapy. Med Phys 32:1630-1639 (2005)

6. Logan DL: First course in the element method. (Boston:PWS Publishing Company, Inc)
7. Kazubek M: Wavelet domain image denoising by thresholding and Wiener filtering. Signal Processing Letters IEEE 10:324-326 (2003)
8. Kaiser A, Schultheiss TE, Wong JYC, et al: Pitch, roll, and yaw variations in patient positioning. Int J Radiation Oncology Biol Phys 66:949-995 (2006)
9. Hornick DC, Litzenberg DW, Lam KL, et al: A tilt and roll device for automated correction of rotational setup errors. Med Phys 25:1739-1740 (1998)
10. Litzenberg DW, Balter JM, Hornic DC, et al: A mathematical model for correcting patient setup errors using a tilt and roll device Med Phys 26:2586-2588 (1999)

토모테라피에서 MVCT 영상을 이용한 환자 테이블의 처짐 정도의 분석

*부산대학교병원 방사선종양학과, †부산대학교 의학전문대학원 방사선종양학교실

박하령* · 김용호* · 박 달* · 김원택[†] · 기용간[†] · 김동현[†] · 배진숙*

토모테라피(Tomotherapy)는 치료 시 환자의 무게에 의한 환자 테이블의 처짐(sag)이 발생한다. 본 연구에서는 이 테이블의 처짐 정도를 토모테라피의 MVCT 영상 처리를 통해 객관적으로 분석하는 방법을 제시하였다. 이 방법을 사용하여 22명의 두경부 환자와 한명의 두개척수조사(CSI) 환자에 대하여 테이블 처짐을 측정하였다. 두경부 환자의 경우 0.4~1.54 mm의 환자 테이블 처짐과 평균 0.7°의 처짐 각도를 보였다. 치료범위가 길수록 처짐의 정도는 커졌고 처짐 각도는 큰 상관성이 없었다. 두개척수조사(CSI) 환자의 경우 4.97 mm의 환자 테이블 처짐을 보였다. 이 방법을 사용하면 객관적이고 간편한 방법으로 환자 테이블 처짐을 측정할 수 있고 이런 측정을 통하여 테이블 처짐에 의한 오차를 고려한 치료범위 설정에 도움이 될 것이다.

중심단어: 토모테라피, MVCT, 환자테이블 처짐