

콘빔CT (CBCT)를 이용한 온라인 영상유도방사선치료 (On-line Image Guided Radiation Therapy)

중앙대학교 의과대학 방사선과교실*, 연세대학교 의과대학 방사선종양학교실†

박진호* · 정경근† · 금기창† · 박석원*

목 적: 방사선치료에서 콘빔CT (cone beam computerized tomography, CBCT)를 이용하여 방사선치료 시 환자의 위치를 모의치료 시 위치와 비교하고 보정함으로써, 온라인 영상유도방사선치료(on-line image guided radiation therapy, on-line IGRT)를 수행할 수 있다. 이러한 과정을 통하여 기존의 모의치료, 치료계획 후 환자의 피부에 표시된 표시점에 가속기를 조준하여 방사선 치료를 수행하는 과정에 비해 개선되는 점을 보고하고자 하였다.

대상 및 방법: 2006년 8월부터 2006년 10월까지 중앙대학교 의과대학 방사선종양학교실에서 방사선치료를 받은 환자 3명을 대상으로 하였다. 기존의 방사선 치료와 마찬가지로 모의치료, 치료계획 후 방사선치료를 위해 치료 테이블 위에 환자를 셋업한다. 이때 환자 피부에 표시된 표시점에 치료실의 레이저에 일치시킨 후, 콘빔CT를 이용한 영상을 얻는다. 콘빔CT (CBCT) 영상과 모의치료(simulation) 시 얻은 CT 영상을 이미지 퓨전을 이용한 비교를 통하여, 치료실에서 현재 환자의 위치와 모의치료 및 치료계획 시 환자의 위치에 대한 변위 벡터(displacement vector)를 산출한다. 이때 산출된 변위벡터만큼 환자의 테이블을 이동한 후, 방사선 치료를 수행한다. 수정된 위치에서 치료 후 KV X-ray (OBI 시스템)를 이용하여 위치를 확인한다.

결 과: 콘빔CT에 의해 셋업 오차로 주어진 변위 벡터의 방향 크기는 두경부 환자인 Pt. A와 Pt. B에서 평균은 각각 0.19 cm, 0.18 cm이며, 표준편차는 각각 0.15 cm, 0.21 cm이다. 반면 골반부 환자인 Pt. C에서 평균과 표준편차는 0.37 cm와 0.1 cm였다.

결 론: 콘빔CT를 이용한 온라인 영상유도방사선치료(on-line IGRT)를 통하여, 기존의 방사선치료 과정에 존재할 수 있는 셋업 오차를 보정할 수 있었다. 온라인 영상유도방사선치료에 의해 향상된 정확도는 단순한 대항조사야 치료뿐 아니라, 복잡한 모양의 표적 용적(target volume)과 급격한 선량 변화를 갖는 3차원 입체조형치료 및 세기조절방사선 치료에서 더욱 중요할 것으로 생각된다.

핵심용어: 영상유도방사선치료, 콘빔CT, 셋업 오차

서 론

현재 방사선 치료기술의 세계적인 흐름은 기존의 2차원적 방사선 치료에서 3차원 입체조형 방사선치료를 거쳐서 초정밀방사선치료의 분야인 세기조절방사선치료와 영상유도방사선치료로 발전하고 있다(Fig. 1). 3차원의 공간 개념을 바탕으로 하는 방사선 치료에서 종양과 종양 주변 정상

조직의 움직임, 매 치료 때마다 환자의 위치 등 여러 가지 시간에 따른 변화 요인들을 실시간으로 고려하여 치료에 반영하는 개념을 도입함으로써 방사선 치료의 정확성을 더욱 높이고자 하는 것이 영상유도방사선치료(IGRT)이다. 특히 세기조절방사선치료의 방사선 치료계획은 불과 수 mm 간격의 차이로 급격한 선량의 변화가 발생되므로, 환자의 자세 고정 및 위치 재현에 대한 오차의 극복 여부가 치료의 결과 직결된다 할 수 있다.

방사선치료 전반에 걸쳐 치료 정확도 및 오차의 발생에 영향을 주는 많은 요소들이 존재한다. 정도관리(quality assurance)에 의해 검증 가능한 부분 이외의 영역에 존재하는 “작은” 오차들은 치료 전반과정에 더 많은 작업량(예를 들면 전자포털 영상장치(electronic portal imaging device, EPID)

이 논문은 2006년 12월 7일 접수하여 2006년 12월 12일 채택되었음.
이 논문은 2005년도 중앙대학교 학술연구비(일반연구비) 지원에 의한 것임.

책임저자: 박석원, 중앙대학교 의과대학 방사선종양학교실
Tel: 02)6299-2671, Fax: 02)3280-2674
E-mail: oncodoc@paran.com

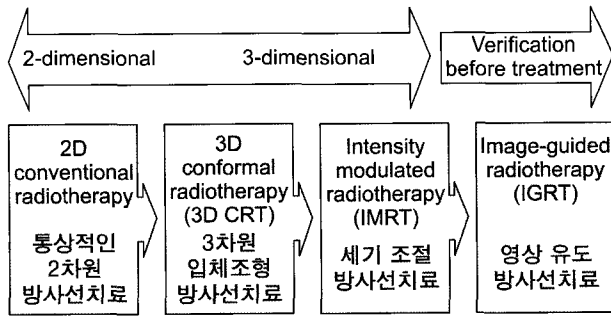


Fig. 1. Trend of radiation therapy.

나 온라인 영상유도방사선치료(on-line image-guided radiotherapy, on-line IGRT) 등의 도입)에 의해 감소시킬 수 있다.¹⁾ 이러한 “작은” 오차는 크게 무작위 오차(random error)와 체계적 오차(systematic error)로 나눌 수 있으며, 이미 많은 데이터들이 보고되었다.²⁻⁴⁾ 무작위 오차(random error) 중 하나인 셋업 오차(set-up error)에 대해서 전자 포털 영상장치와 필름을 이용하여 연구된 결과, 두경부의 경우는 1.1~2.5 mm 정도, 골반부의 경우는 1.1~4.9 mm 정도로 보고되었다.⁴⁾ 현재 국내에는 MV (megavoltage) CT를 장착한 Hi-ART 그리고 콘빔CT와 OBI (on-board imager) System을 장착한 Clinac iX 등과 같이 온라인 영상유도방사선치료(on-line IGRT)가 가능한 최신의 장비가 도입되어 있다.^{5,6)} 특히 KV (kilovoltage) 콘빔CT는 1회 촬영 시 방사선량이 매우 낮으므로(~3 cGy), 이를 이용하여 매회 치료 직전 치료실에서 영상을 이용한 환자의 위치를 한 번 검증하고 보정한 후 방사선 치료를 수행하면, 매우 안전하고 효과적으로 셋업 오차(set-up error)를 극복할 수 있다.⁷⁾ 본 연구에서는 치료 시 콘빔 CT를 이용하여 환자의 치료 부위를 확인하고, 치료계획 시 사용된 모의치료 영상과 콘빔 CT 영상을 이미지 퓨전을 이용한 비교한 후 치료 위치의 오차를 보정하여 치료를 수행해, 치료 정확도를 높이는 온라인 영상유도방사선치료를 임상에 적용한 결과에 대해 논의하고자 한다.

대상 및 방법

온라인 영상유도방사선치료에 사용된 장비는 2006년 3월 중앙대학교 의과대학 방사선종양학교실에 설치된 Varian사의 Clinac iX 및 OBI 시스템이며, 콘빔CT의 소프트웨어 버전은 2006년 8월 설치된 CBCT Application 2.0.11.1이다 (Fig. 2). 본 장비는 MV (megavoltage) 방사선을 사용하여 전자포털 영상장치를 이용할 수 있고, 갠트리와 수직으로 위치한 KV (kilovoltage) 방사선원을 사용하여 콘빔CT, 방사

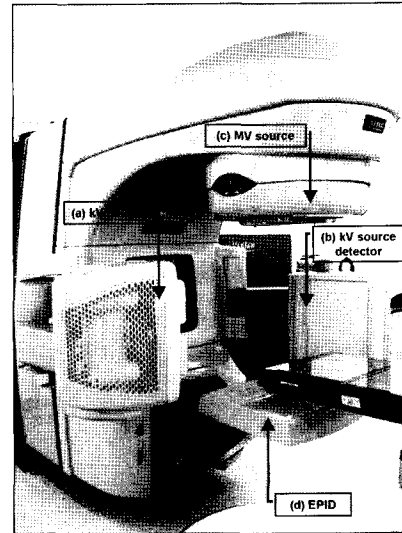


Fig. 2. Clinac iX with Cone-Beam CT and OBI System.

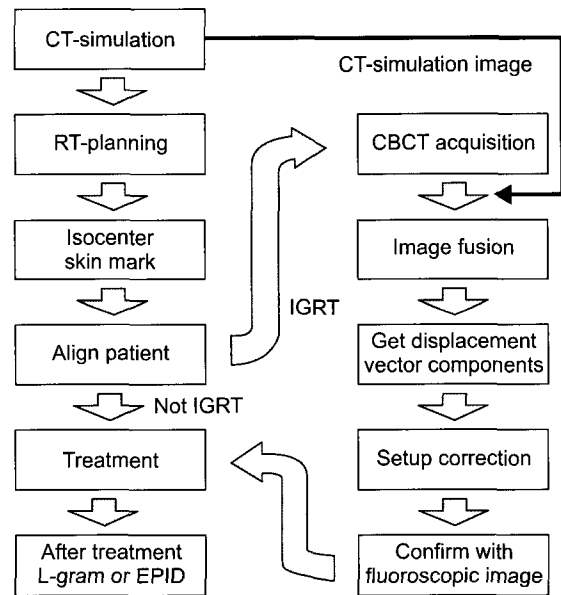


Fig. 3. Flow chart of on-line image-guided radiation therapy for one fraction.

선촬영(radiographic) 영상 그리고 형광투시(fluoroscopic) 영상을 얻을 수 있다. 이러한 기능을 이용하여 기존의 방사선 치료 과정보다 더욱 정확도가 향상된, 방사선치료 직전에 종양의 위치 및 환자 자세를 검증할 수 있는 온라인 영상유도방사선 치료를 수행할 수 있었다(Fig. 3). 이때 치료실 워크스테이션의 소프트웨어를 사용하여, 환자 셋업 시 얻은 여러 가지 영상들을 모의치료(simulation) 시 촬영되어 치료계획에 사용되었던 CT 영상과 이미지 퓨전을 이용한다(Fig. 4).

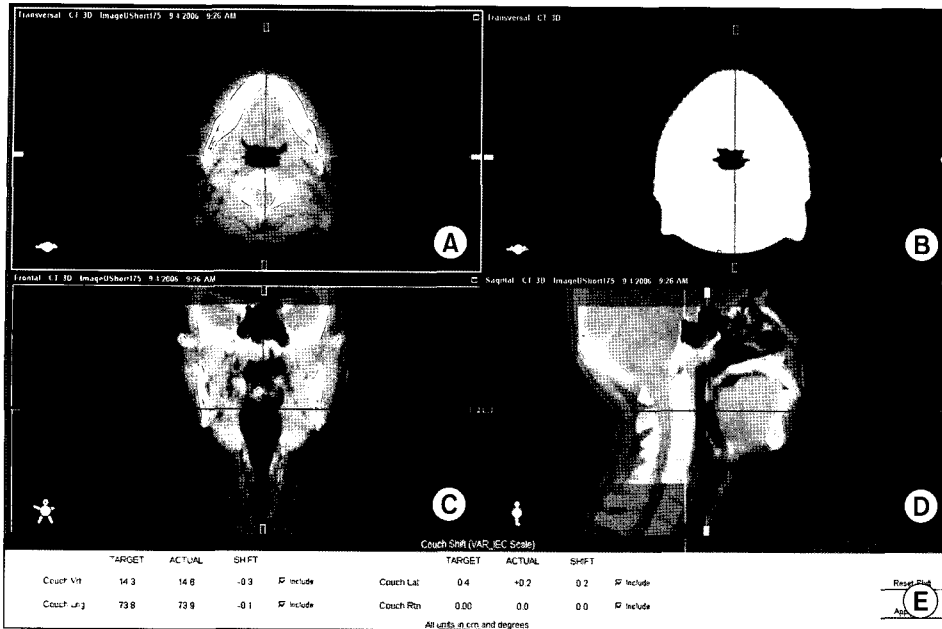


Fig. 4. Window of Image fusion (A) Simulation CT image (B) Cone-beam CT image (C) Fused sagittal image (D) Fused lateral image (E) Result of Image fusion with displacement vector components.

Table 1. Data of Set-up Error for Patient A (Nasopharyngeal Ca.)

Pt. A	Displacement vector				
	Lat	Vrt	Lng	Magnitude (cm)	Remark
	x (cm)	y (cm)	z (cm)		
20060818	0.1	-0.1	0.2	0.24	Before RTx
20060822	0.1	-0.1	-0.1	0.17	Before RTx
20060825	0.0	0.0	0.0	0.00	Before RTx
20060829	0.3	0.0	-0.2	0.36	Before RTx
20060901	0.0	0.0	0.0	0.00	Before RTx
20060901	0.1	-0.1	-0.1	0.17	After RTx
20060904	0.2	-0.3	-0.1	0.37	Before RTx
20060906	-0.4	0.1	0.0	0.41	Before RTx
20060908	0.0	0.0	0.0	0.00	Before RTx
20060913	0.0	0.0	0.1	0.10	Before RTx
20060915	0.2	0.1	0.1	0.24	Before RTx
20061002	0.0	0.1	0.1	0.14	Before RTx
Average	0.12	0.08	0.08	0.19	
StDev	0.13	0.09	0.07	0.15	

2006년 8월부터 2006년 10월까지 중앙대학교 의과대학 방사선종양학교실에서 방사선 치료를 받은 환자 3명을 대상으로 하였다. 3명의 환자 Pt. A, Pt. B 그리고 Pt. C는 각각 비인강암, 비암, 자궁경부암으로 진단되어 방사선 치료를 위해 내원하였다. 각 환자에 대해 CT 영상을 이용한 모의치료(simulation)를 수행한 후, 방사선 치료계획을 수립하고, 이에 따라 AP 및 Lateral 영상을 이용하여 환자 피부에

Table 2. Data of Set-up Error for Patient B (Nasal Cavity Ca.)

Pt. B	Displacement				
	Lat	Vrt	Lng	Magnitude (cm)	Remark
	x (cm)	y (cm)	z (cm)		
20060901	0.0	0.0	0.0	0.00	Before RTx
20060908	-0.1	-0.1	-0.2	0.24	Before RTx
20060915	-0.2	-0.1	0.1	0.24	Before RTx
20060922	0.0	-0.2	0.1	0.22	Before RTx
20060926	0.0	0.0	0.0	0.00	Before RTx
20060926	0.0	0.0	0.0	0.00	After RTx
20060929	-0.1	-0.6	-0.2	0.64	Before RTx
20061004	0.0	0.0	0.0	0.00	Before RTx
20061012	-0.2	-0.1	0.0	0.22	Before RTx
Average	0.09	0.12	0.06	0.18	
StDev	0.09	0.19	0.09	0.21	

치료 부위의 센터를 표시한다. 이를 치료실의 레이저에 일치시킨 후, 콘빔 CT를 이용한 영상을 얻는다(Fig. 4). 그리고 콘빔 CT 영상과 서버로부터 받은 모의치료 CT 영상을 이미지 퓨전을 통해 비교한다(Fig. 4). 이러한 과정은 환자가 테이블에 누워 있는 동안, 치료실에 위치한 워크스테이션에서 빠르게 진행된다. 워크스테이션에서는 두 영상의 차이를 직교좌표계의 변위 벡터 및 테이블의 회전각으로 산출시킨다(Fig. 3E). 주어진 변위만큼 환자가 위치한 테이블이 이동하게 되고, 이동 후 KV X-ray (OBI 시스템)를 이

Table 3. Data of Set-up Error for Patient C (Cervical Ca.)

Pt. C	Displacement			Magnitude (cm)	Remark
	Lat	Vrt	Lng		
	x (cm)	y (cm)	z (cm)		
20060821	0.0	0.4	-0.3	0.50	Before RTx
20060824	0.2	0.1	-0.2	0.30	Before RTx
20060828	0.0	0.0	0.4	0.40	Before RTx
20060830	0.1	-0.2	0.3	0.37	Before RTx
20060901	0.3	0.2	-0.2	0.41	Before RTx
20060904	0.0	0.1	-0.2	0.22	Before RTx
Average	0.10	0.17	0.27	0.37	
StDev	0.13	0.14	0.08	0.10	

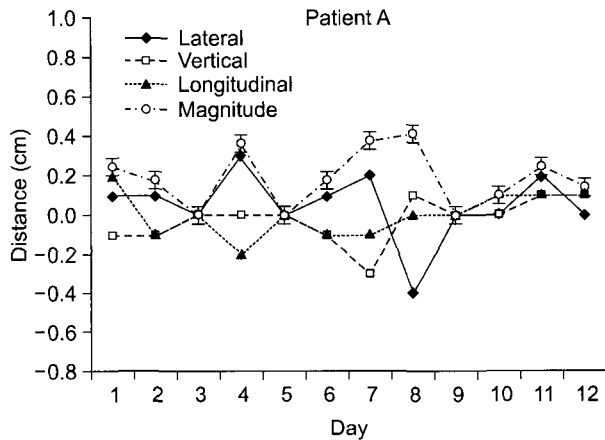


Fig. 5. Graph of set-up error for Patient A (Nasopharyngeal Ca.).

용하여 AP 및 Lateral 영상을 확인한 후 방사선 치료를 실시하였다. Pt. A, Pt. B 그리고 Pt. C에 대해 각각 11회, 8회, 6회의 온라인 영상유도방사선치료를 수행하였다.

결 과

직교좌표계로 주어진 변위 벡터의 방향은 3차원 공간상에서 완전히 임의적이므로 각 방향에 따른 결과를 논하기에는 어려움이 있다. 변위 벡터의 크기만을 살펴보면, Pt. A와 Pt. B에서 평균은 각각 0.19 cm, 0.18 cm이며, 표준편차는 각각 0.15 cm, 0.21 cm이다. 반면 Pt. C에서 평균과 표준편차는 0.37 cm과 0.1 cm였다(Table 1~3). 데이터를 그래프로 그려보면 셋업 오차의 변화를 쉽게 볼 수 있다(Fig. 5~7). 이때 변위 벡터의 크기는 표준 오차를 사용하여 그

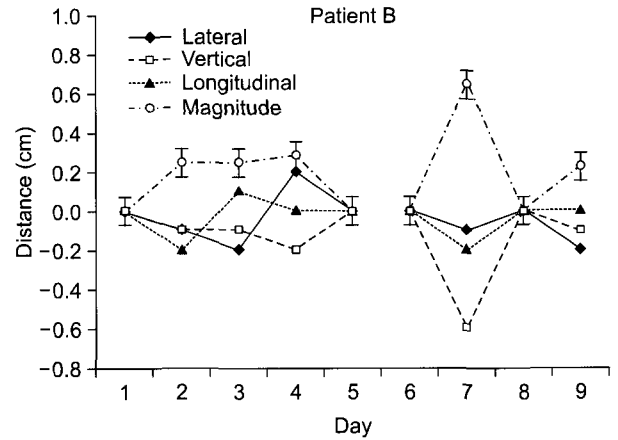


Fig. 6. Graph of set-up error for Patient B (Nasal Cavity Ca.).

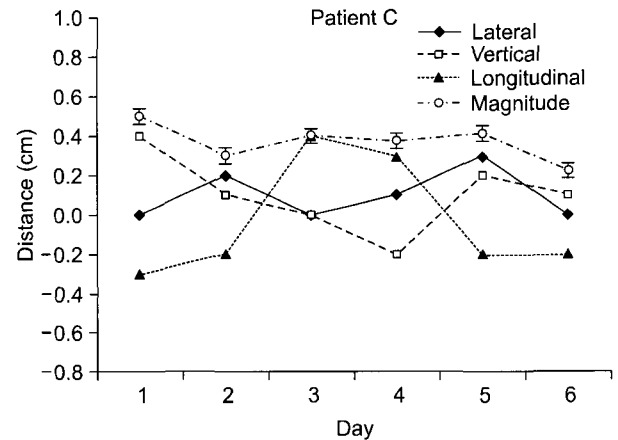


Fig. 7. Graph of set-up error for Patient C (Cervical Ca.).

래프로 표현하였다(Fig. 5~7). 두경부 경우인 Pt. A와 Pt. B는 각 좌표축 방향으로의 셋업 오차가 4 mm를 넘지 않으며, 대부분의 값은 ± 2 mm의 구간 내에 분포한다. 그리고 골반부 경우인 Pt. C는 두경부에 비하여 약 두 배에 가까운 오차가 존재하였고, 각 좌표축 방향으로의 오차는 ± 4 mm의 구간 내에 임의로 분포했다. 이러한 오차의 크기는 이미 보고된 결과인 두경부, 골반부의 경우 각각 2 mm, 3.0 mm와 큰 차이를 보이지 않는다.⁴⁾ 그리고 수정된 위치에서 치료 후 KV X-ray (OBI 시스템)를 이용하여 위치를 확인하여 치료조준점을 검증하였다.

또한 Pt. A와 Pt. B는 각 1회씩 치료 전후에 콘빔CT 영상을 얻어서 위치를 확인하여 보았다. Pt. A에서는 치료 시간이 지난 후, 0.17 mm 정도의 위치 변화가 발생하였으며, Pt. B에서는 치료 전후의 위치 변화가 없었다.

고안 및 결론

콘빔CT를 이용한 온라인 영상유도방사선치료를 통하여, 기존의 방사선치료과정에 존재하는 셋업 오차에 대한 측정할 수 있었고, 치료 전 오차에 대한 보정을 할 수 있었다. 이러한 보정은 방사선 치료 전반에 걸친 정확도 향상을 의미한다. 앞으로 좀 더 많은 임상 데이터의 분석과 연구를 통하여, 계획용표적체적(planning target volume, PTV)을 정의하는 마진(margin)의 증감에도 적용할 수 있다.

그리고 콘빔CT를 이용하여 기존에 제시된 정도의 셋업 오차가 존재함을 확인할 수 있었다. 현재 방사선치료 과정의 셋업 오차는 일반적으로 두경부의 경우 2 mm, 전립선, 골반부, 폐암의 경우 각각 2.5 mm, 3.0 mm, 3.5 mm라 알려져 있다.⁴⁾ 셋업 오차에 대해 이미 보고된 많은 데이터들은 전자포털 영상장치, 필름 또는 L-gram 등을 이용하였다.⁴⁾ 그러나 이러한 데이터들은 치료 전 산출되어, 위치 보정 후 방사선 치료를 수행하기에는 많은 어려움이 있다. 콘빔CT를 이용한 온라인 영상유도방사선치료를 의해 위치 보정 후 방사선 치료가 가능하다.

콘빔CT를 이용한 온라인 영상유도방사선치료에서 기존의 방사선 치료에 비해 추가되는 시간은 콘빔CT 촬영에 1~2분, 영상 비교 분석에 4~5분 정도이다. 이와 같은 추가 시간의 존재로 인하여, 콘빔CT를 이용한 온라인 영상유도방사선치료는 환자의 상태를 고려하여 적용되어야 할 것이다.

골반부의 경우에 두경부보다 약간 큰 값의 오차가 나타나는 것은 이미 여러 연구자들에 의해 보고되어 있고, 본 연구의 결과와 일치한다. 그러한 이유는 주변 장기의 움직임, 마스크 등 여러 가지 고정기구의 사용 가능 여부 등의 여러 복합적인 요인 때문이라 생각된다.⁴⁾

또한 Pt. A와 Pt. B에서 치료 전후에 각각 촬영된 콘빔CT 영상을 비교해 보면, 결론을 내리기에 충분한 양의 데이터는 아니지만 치료 시간 동안 발생할 수 있는 오차는

환자의 치료 준비 시 발생하는 셋업 오차보다 크지 않다고 생각된다. 그러나 이러한 부분은 방사선치료 전후 표적의 위치변화에 대한 충분한 양의 데이터 축적 및 분석 등 더 많은 연구가 필요하다.

이러한 콘빔CT를 이용한 온라인 영상유도방사선치료의 향상된 정확도는 3차원 입체조형치료에서보다 복잡한 모양의 표적용적과 급격한 선량분포의 변화가 나타나는 세기조절방사선 치료에서 더욱 필요할 것이며, 각 치료 부위별 콘빔CT를 이용한 온라인 영상유도방사선치료 시행에 관한 프로토콜(protocol)을 마련하는 연구가 시급할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. Van Herk M. Errors and margins in radiotherapy. *Semin Radiat Oncol* 2004;14:52-64
2. Ekberg L, Holmberg O, Wittgren L, et al. What margins should be added to the clinical target volume in radiotherapy treatment planning for lung cancer. *Radiother Oncol* 1998; 48:71-77
3. Tinger A, Michalski JM, Cheng A, et al. A critical evaluation of the planning target volume for 3-D conformal radiotherapy of prostate cancer. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1998;42:213-221
4. Hurkmans CW, Remeijer P, Lebesque JV, et al. Set-up verification using portal imaging: review of current clinical practice. *Radiother Oncol* 2001;58:105-120
5. Langen KM, Zhang Y, Andrews RD, et al. Initial Experience with megavoltage (MV) CT guidance for daily prostate alignments. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2005;62:1517-1524
6. Moseley DJ, White E, Haycocks T, et al. Comparison of implanted fiducial markers and cone-beam computed tomography for on-line image-guided radiotherapy of the prostate [Abstract]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2004;60:S229
7. Maria AH, Kristy KB, Cynthia E, et al. Assessment of residual error in liver position using kV Cone-Beam computed tomography for liver cancer high-precision radiation therapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2006;66:610-619

Abstract

On-line Image Guided Radiation Therapy using Cone-Beam CT (CBCT)

Jino Bak, Ph.D.*, Kyoungkeun Jeong, Ph.D.[†], Ki Chang Keum, M.D.[†] and Suk Won Park, M.D.*

*Department of Radiation Oncology, College of Medicine, Chung-Ang University,

[†]Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea

Purpose: Using cone beam CT, we can compare the position of the patients at the simulation and the treatment. In on-line image guided radiation therapy, one can utilize this compared data and correct the patient position before treatments. Using cone beam CT, we investigated the errors induced by setting up the patients when use only the markings on the patients' skin.

Materials and Methods: We obtained the data of three patients that received radiation therapy at the Department of Radiation Oncology in Chung-Ang University during August 2006 and October 2006. Just as normal radiation therapy, patients were aligned on the treatment couch after the simulation and treatment planning. Patients were aligned with lasers according to the marking on the skin that were marked at the simulation time and then cone beam CTs were obtained. Cone beam CTs were fused and compared with simulation CTs and the displacement vectors were calculated. Treatment couches were adjusted according to the displacement vector before treatments. After the treatment, positions were verified with kV X-ray (OBI system).

Results: In the case of head and neck patients, the average sizes of the setup error vectors, given by the cone beam CT, were 0.19 cm for the patient A and 0.18 cm for the patient B. The standard deviations were 0.15 cm and 0.21 cm, each. On the other hand, in the case of the pelvis patient, the average and the standard deviation were 0.37 cm and 0.1 cm.

Conclusion: Through the on-line IGRT using cone beam CT, we could correct the setup errors that could occur in the conventional radiotherapy. The importance of the on-line IGRT should be emphasized in the case of 3D conformal therapy and intensity-modulated radiotherapy, which have complex target shapes and steep dose gradients.

Key Words: IGRT, CBCT, Set-up error