

## Study of Scatter Influence of kV-Conebeam CT Based Calculation for Pelvic Radiotherapy

KyoungJun Yoon\*, Jungwon Kwak\*, Byungchul Cho\*, YoungSeok Kim\*,  
SangWook Lee\*, SeungDo Ahn\*, SangHee Nam†

\*Department of Radiation Oncology, Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine,

†Department of Biomedical Engineering, University of Biomedical Science and Engineering, Seoul, Korea

The accuracy and uniformity of CT numbers are the main causes of radiation dose calculation error. Especially, for the dose calculation based on kV-Cone Beam Computed Tomography (CBCT) image, the scatter affecting the CT number is known to be quite different by the object sizes, densities, exposure conditions, and so on. In this study, the scatter impact on the CBCT based dose calculation was evaluated to provide the optimal condition minimizing the error. The CBCT images were acquired under three scatter conditions ("Under-scatter", "Over-scatter", and "Full-scatter") by adjusting amount of scatter materials around an electron density phantom (CIRS062, Tissue Simulation Technology, Norfolk, VA, USA). The CT number uniformities of CBCT images for water-equivalent materials of the phantom were assessed, and the location dependency, either "inner" or "outer" parts of the phantom, was also evaluated. The electron density correction curves were derived from CBCT images of the electron density phantom in each scatter condition. The electron density correction curves were applied to calculate the CBCT based doses, which were compared with the dose based on Fan Beam Computed Tomography (FBCT). Also, 5 prostate IMRT cases were enrolled to assess the accuracy of dose based on CBCT images using gamma index analysis and relative dose differences. As the CT number histogram of phantom CBCT images for water equivalent materials was fitted with a gaussian function, the FWHM (146 HU) for "Full-scatter" condition was the smallest among the FWHM for the three conditions (685 HU for "under scatter" and 264 HU for "over scatter"). Also, the variance of CT numbers was the smallest for the same ingredients located in the center and periphery of the phantom in the "Full-scatter" condition. The dose distributions calculated with FBCT and CBCT images compared in a gamma index evaluation of 1%/3 mm criteria and in the dose difference. With the electron density correction acquired in the same scatter condition, the CBCT based dose calculations tended to be the most accurate. In 5 prostate cases in which the mean equivalent diameter was 27.2 cm, the averaged gamma pass rate was 98% and the dose difference confirmed to be less than 2% (average 0.2%, ranged from -1.3% to 1.6%) with the electron density correction of the "Full-scatter" condition. The accuracy of CBCT based dose calculation could be confirmed that closely related to the CT number uniformity and to the similarity of the scatter conditions for the electron density correction curve and CBCT image. In pelvic cases, the most accurate dose calculation was achievable in the application of the electron density curves of the "Full-scatter" condition.

**Key Words:** CBCT, Dose calculation, Electron density phantom, Pelvic radiotherapy

## 서론

This project was supported by Ministry of Science, ICT and Future Planning and Radiation Technology Development Program of National Research Foundation of Korea (NRF-2013M2A2A7043506).

Received 24 February 2014, Accepted 16 March 2014

**Correspondence:** Byungchul Cho (bcho@amc.seoul.kr)

Tel: 82-2-3010-4437, Fax: 82-2-3010-6950

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

근래의 방사선치료에서는 치료 위치의 정확성을 향상시키기 위하여 여러 종류의 영상을 취득하는 영상유도방사선 치료가 보편화되고 있으며 방사선 치료 중에 얻은 영상을 이용하여 치료 결과를 분석하고자 하는 연구가 활발하게 진행되고 있다.<sup>1-4)</sup> 그 하나의 예로 선형가속기의 kV-Cone-Beam Computed Tomography (CBCT)를 이용하여 치료 후

환자에 대한 선량계산 및 검증, 더 나아가서는 적응방사선 치료에 대한 활용으로 연구되고 있다.<sup>5,6)</sup> 하지만, Cone형태의 Beam은 피사체에서 산란하여 영상에 영향을 줌으로 FBCT를 기반으로 하는 일반적인 선량 계산에 비하여 선량 계산의 정확성이 떨어지는 문제를 가지고 있으며 이를 해결하고자 하는 많은 연구가 보고되고 있다.<sup>7-9)</sup>

Yang 등<sup>10)</sup>의 환자호흡이 고려된 팬텀의 모션 유무에 따른 CBCT의 선량계산 정확도에 대한 연구에 의하면 FBCT와 비교하여 전립선암 환자의 경우 전립선치료부위는 6% ~ 10% 이상, 방광부위에서는 8% 이상 차이가 나는 것으로 보고하고 있다. 이 연구에서는 지름 15 cm의 작은 Catphan 팬텀(Catphan-504, Phantom Laboratory, Salem, NY)을 사용할 때에는 FBCT와 CBCT에서 동일 전자밀도에 대한 HU 값의 차이가 작게 나타났으며 지름이 30 cm 내외의 큰 팬텀에서는 차이가 크게 나타나는 것으로( $\pm 200$  HU) 보고 되었다. Cone Beam의 조사 체적의 크기 및 부위의 밀도를 고려하여 전자밀도 교정을 달리 실시할 수 있도록 전자밀도 교정용 CIRS062 팬텀(CIRS062, Tissue Simulation Technology, Norfolk, VA, USA)을 두부, 흉부, 체부로 구성하여 전자밀도 교정을 달리 적용했을 때 일반적으로 2% 이내의 선량 정밀도를 가지는 것으로 보고되고 있다.<sup>11)</sup> 하지만 실제 임상에서 CBCT 영상을 획득할 때 빔의 조사범위 안의 피사체 조사 부피의 변화에 따라 선량계산의 정확도에 미치는 영향에 대해서 분석한 결과는 보고된 바가 없다. 다만, Masahiro 등<sup>12)</sup>에 의한 연구에서 피사체 크기에 따른 2차 산란선이 CBCT 영상의 질에 미치는 영향에 대하여 피사체를 원통 형태로 단순화하여 수식적으로 계산한 결과를 발표한 바가 있다. 본 연구에서는 조사 체적의 크기에 따른 산란에 의한 영향이 가장 클 것으로 예상되는 골반부위에 대하여 서로 다른 산란조건에서 취득된 CIRS062 팬텀의 CBCT 영상과 전자밀도 교정곡선(Hounsfield unit to electron density calibration curve)을 이용하여 영상에서의 CT number에 대한 균질성과 선량 계산의 정확성에 산란이 미치는 영향을 분석하였고 실제 골반 방사선치료에서 취득된 CBCT 영상을 이용하여 이를 확인하고자 하였다.

## 대상 및 방법

### 1. 실험 조건 및 영상 획득

CIRS062 팬텀은 장경 330 mm, 단경 270 mm, 두께 50 mm의 물 등가 체부 팬텀에 서로 다른 8가지 전자밀도를 가지며, 동일 전자밀도에 한 쌍씩 그리고 가운데 물 등가물

질을 넣을 수 있도록 총 17개의 전자 밀도봉들을 삽입할 수 있도록 되어 있다. 본 연구에서는 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 전자밀도가 동일한 각 쌍의 봉들을 중심부(Inner)와 주변부(Outer)에 서로 대칭이 되도록 배치하였다. 산란 정도의 기준은 실제 임상에서 환자들의 골반 CBCT 영상을 취득할 때 빔이 조사된 부피의 평균으로 하고자 하였다. 대부분 환자의 골반 부위의 일반적인 단면적과 전자밀도 교정팬텀의 단면적은 거의 일치하여 Superior-inferior 방향의 ConeBeam 조사 범위에 전자밀도 교정 팬텀의 단면적을 가지는 원통형으로 산란물질을 채운 경우를 산란충분 조건으로 정하였고, 이를 기준으로 산란선의 기여 정도가 다른 조건을 얻기 위하여 Fig. 2에 나타난 바와 같이 팬텀, 물, 스티로폼을 이용하여 산란부족, 산란과다의 산란 조건을 구성하였다. 테이블 위에 팬텀만을 두고 CBCT 영상을 획득하는 방법을 “산란부족(Under Scatter)” (Fig. 2a), 아크릴 사각물통(W38×H38×T30.5 cm) 내에 팬텀을 두고 물을 채우는 방법을 “산란과다(Over Scatter)” (Fig. 2b), 그리고 스티로폼을 이용하여 원통형태의 물통(27(W)×33(H)×25 cm(D))을 만들어서 팬텀을 두는 방법을 “산란충분(Full Scatter)” (Fig. 2c)로 정의하였다. Masahiro 등<sup>12)</sup>에 의한 연구에서와 같이 CBCT 영상 취득할 때에 조사된 체적을 갠트리 회전축 방향으로 16 cm 길이의 원통으로 단순화하여 그 등가지름(Equivalent Cylindrical Diameter, ECD)으로 산란의 정도를 나타내었다.

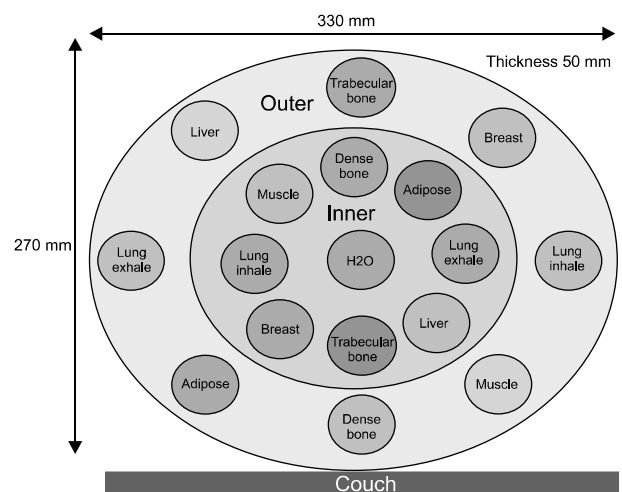
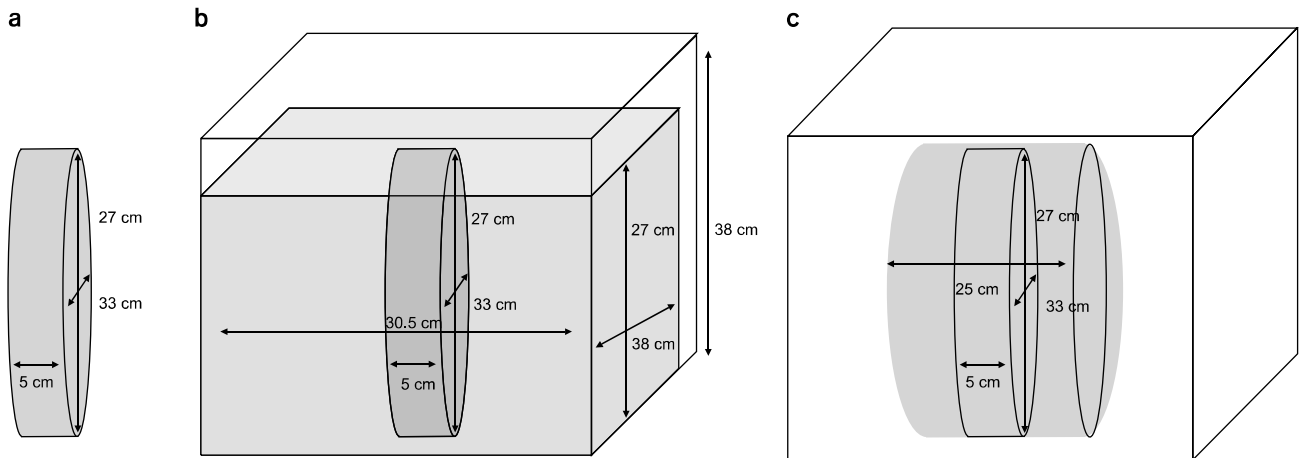


Fig. 1. CIRS062 phantom and Inserts position; CIRS062 phantom consists of inner (head) and outer (lung) parts. Eight different tissue equivalent inserts pairs were arranged symmetrically around the phantom center at the inner and outer region of the phantom.



**Fig. 2.** Phantom scatter conditions; three different scatter conditions were implemented by adding different amount of scatter material around the CIRS062 phantom. (a) “Under-scatter (U)” condition: the phantom was only placed inside the exposure volume of kV beam. (b) “Over-scatter (O)” condition: the phantom was immersed in a  $\sim 30 \text{ cm}^3$  cubic water tank. (c) “Full-scatter (F)” condition: the phantom was immersed in a cylinder-shaped water with the same diameter of 33 cm and 25 cm length, which is of similar scatter condition for the CBCT acquisition of pelvic regions.

$$ECD = \sqrt{\frac{\text{volume}}{16 \text{ cm} \pi}} \times 2 \quad (1)$$

FBCT 영상은 16 slice CT스캐너(Lightspeed RT16, GE healthcare, USA)장비를 이용하여 영상을 획득하였고, CBCT 영상은 Trilogy<sup>TM</sup> 치료용 선형가속기(Varian Medical Systems, Palo Alto, CA)에 장착된 OBI 장비(version 1.5)를 사용하여 영상을 획득하였다. 임상에서 골반 영상 취득을 할 때 사용되는 방식과 같이 FBCT에서는 120 kV, 250 mAs, 2.5 mm scan mode를 이용하였고, CBCT의 경우 125 kV, 680 mAs, Half-Fan mode에서 촬영되었다.

## 2. 영상의 균질성(Uniformity)

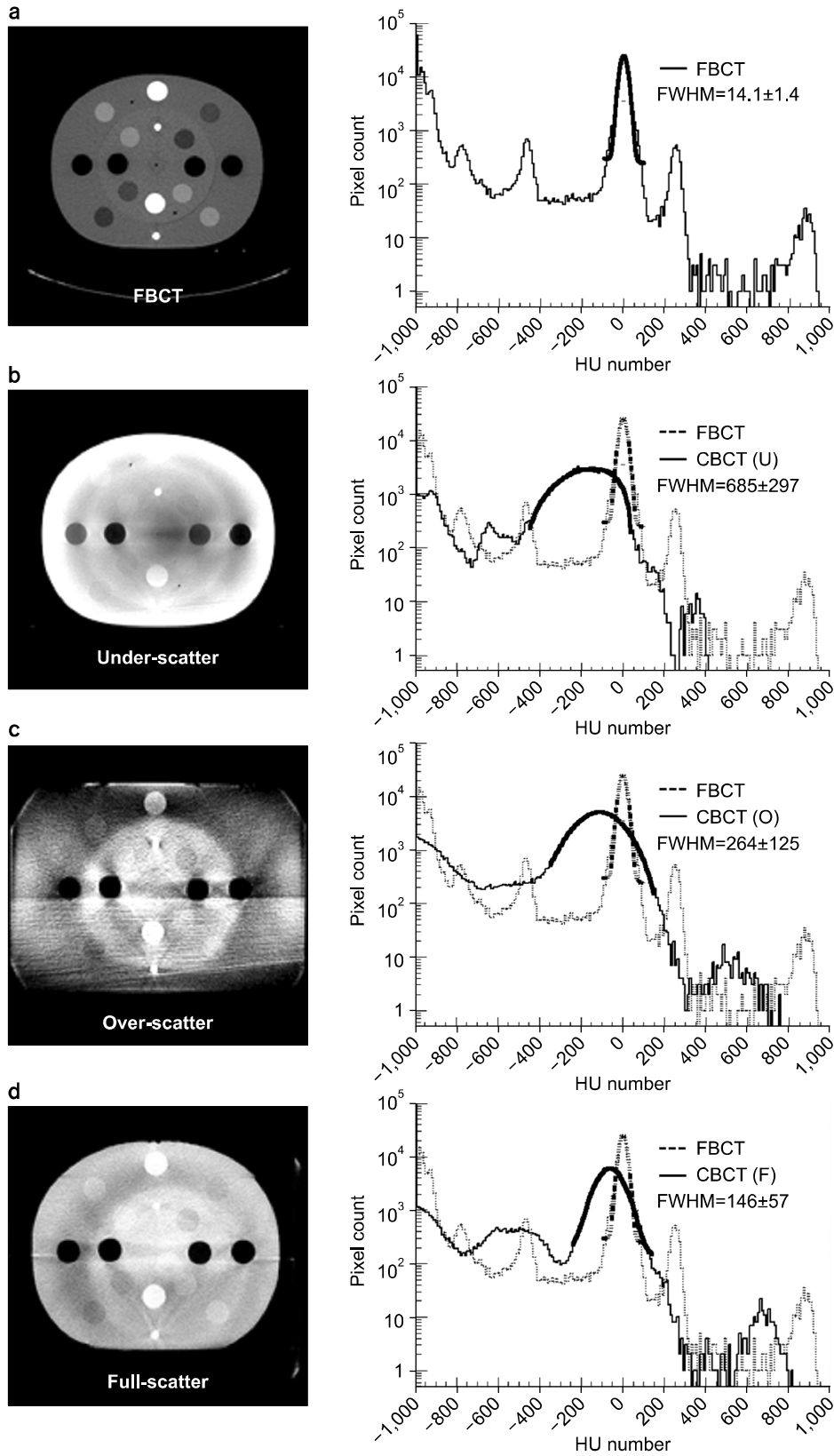
3가지 산란조건에 따라 획득한 CBCT 영상들의 각 픽셀 HU 값에 대한 히스토그램에서 가장 많은 부피를 차지하는 물 등가 영역에 대한 피크(Peak)를 Gaussian함수로 Fitting하여 FBCT와 비교하여 평가하였다. 또한 팬텀 중심부(In)와 주변부(Out)의 위치에 따른 동일 성분에 대한 HU 값의 차이에 대하여 전자밀도 교정 관계식을 구하여 비교하였다. 선량계산에 필요한 전자밀도 교정관계는 FBCT 및 각 산란조건에서의 CBCT 영상에서 팬텀의 중심부와 주변부에 대하여 따로 구하였다. FBCT에 대한 교정관계를 기준으로 각 산란조건에서의 CBCT의 경우와 비교할 때에는 중심부와 주변부의 교정 값의 평균으로 평가하였고 이를 선량 계산에 적용하였다.

## 3. 선량계산의 정확성(Accuracy)

### 1) 팬텀 CBCT의 3차원입체조형치료에 대한 선량계산:

치료계획시스템으로는 Eclipse Ver. 10.0 (Varian, USA)을 사용하였으며, 광자선에 대한 선량계산 알고리즘은 Analytical Anisotropic Algorithm (AAA)를 사용하였다.<sup>13)</sup> 골반 크기에 의한 영향을 평가하기 위하여 여러 환자의 골반 CBCT 영상들에 대해 하나의 보정관계를 적용하였을 때 선량계산의 정확성에 대하여 확인하고자 하였다. 산란조건들에서 취득된 전자밀도 교정 팬텀의 CBCT 영상과 전자밀도 교정곡선을 조합한 9가지의 시나리오에 대하여 같은 3차원 방사선 치료계획을 적용하여 FBCT 영상 기반의 선량 계산과 비교 평가하였다. 빔 에너지는 모두 15 MV 광자선을 이용하였고 8문 조사영역(Field)에 각각 100 MU를 조사하였다. 겐트리 각도는 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 335°로 하여 17개의 전자밀도봉이 빔 조사야 안에 모두 위치하도록 방향을 설정하였다. 선량분포 비교에서 OmniPro I'mRT (IBA Dosimetry, Germany) 프로그램이 사용되었으며, 감마합격률과 처방선량 대비 상대오차를 확인하였다. 감마지표로 3% 미만의 선량 차이에 대하여 더 분별력 있게 확인하기 위하여 일반적으로 사용하는 3%/3 mm가 아닌 1%/3 mm의 기준이 적용되었다.

### 2) 환자 CBCT의 IMRT에 대한 선량계산: Intensity Modulated Radiation Therapy (IMRT)를 받은 5명의 전립선암 환



**Fig. 3.** HU histograms of the FBCT and CBCT images with various scatter conditions. (a) FBCT image and HU histogram, (b) CBCT image and histogram with “Under-scatter” condition. (c) CBCT image and histogram with “Over-scatter” condition. (d) CBCT image and histogram with “Full-scatter” condition. The main peak on each histogram represents the histogram of the water equivalent material that composes the main body of the phantom.

자의 첫 분할 치료에서 획득된 CBCT 영상을 이용하였다. 치료계획용 FBCT와 CBCT 사이의 해부학적 불일치에 따른 영향을 최소화하기 위해서 MIM 프로그램(MIMVista Corp, Cleveland, Ohio)을 이용하여 FBCT 영상을 기준으로 변환영상정합을 한 CBCT 영상 기반으로 선량계산을 하여 치료 선량과 비교, 평가하였다.<sup>14)</sup> 선량의 차이는 동일한 치료계획으로 CBCT에서 해당 전자밀도 교정 조건으로 계산된 선량과 FBCT에서 계산된 선량의 차이를 처방선량에 대한 백분율을 구하여 처방선량 대비 10% 이상인 불륨에 대하여 평균을 취하여 구하였다.

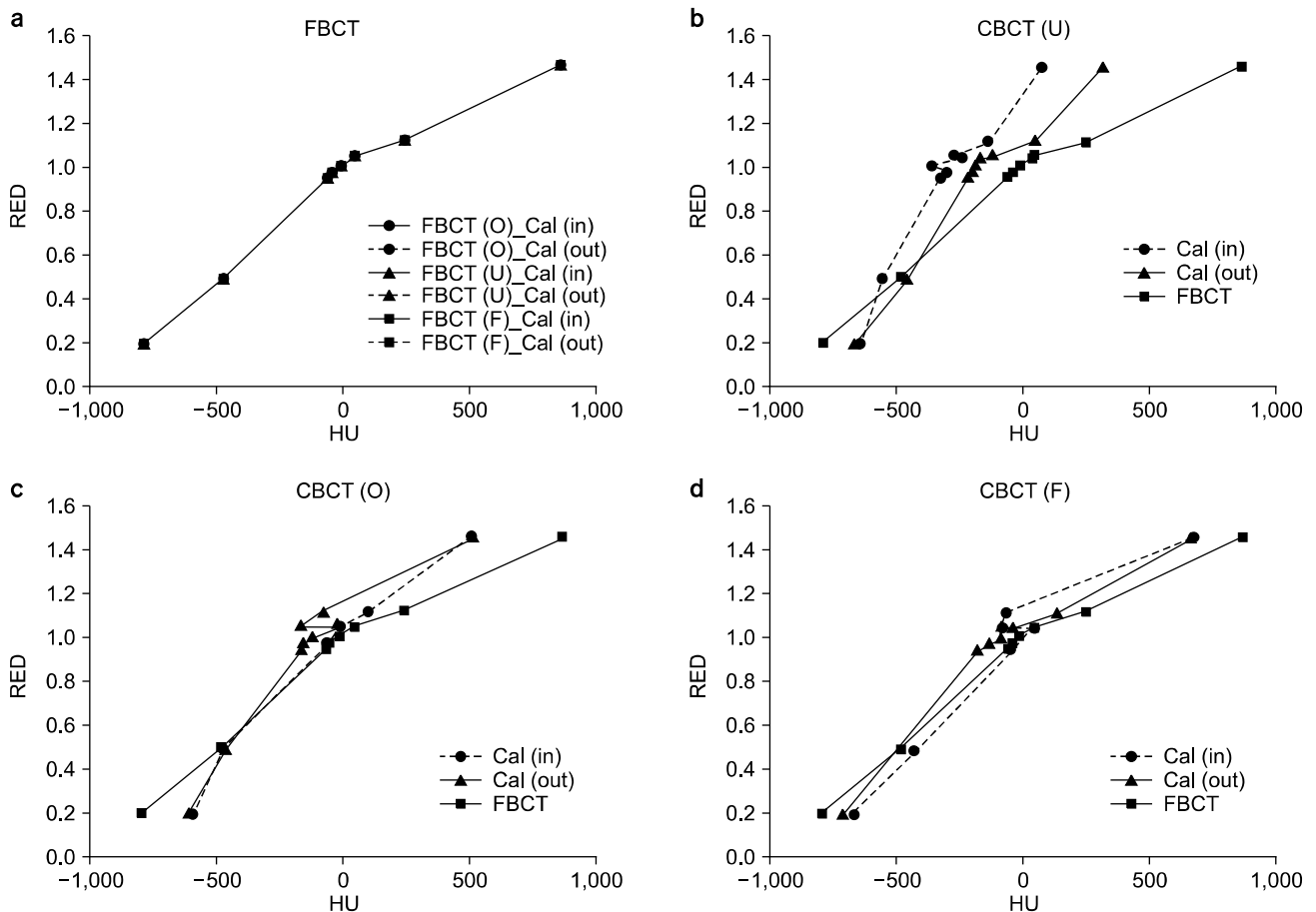
## 결 과

### 1. CBCT 영상 획득

Fig. 3은 산란의 영향이 거의 없는 FBCT 영상과 3가지 산란조건에서 획득한 CBCT 영상 및 해당 HU 히스토그램을 나타내고 있다. 각 산란조건에서의 ECD는 17.7 cm (산란부족), 37.8 cm (산란과다), 31 cm (산란충분)으로 산란에 따른 영상의 영향을 충분히 확인할 수 있었다.

### 2. 영상의 균질성(Uniformity) 평가

1) HU 히스토그램과 HU difference: Fig. 3의 HU 히스토그램에서는 FBCT 영상의 경우 팬텀에 삽입된 전자 밀도 봉들 중에 호흡의 Exhale과 Inhale에 해당되는 폐, 물, 소주



**Fig. 4.** Comparison of FBCT and CBCT HU-ED calibration curves and HU differences of the same ED insert-pairs between their locations (inner and outer parts of phantom). (a) FBCT HU-ED calibration curve with three scatter condition. (b) CBCT HU-ED calibration curve with "Under-scatter" condition. (c) CBCT HU-ED calibration curve with "Over-scatter" condition. (d) CBCT HU-ED calibration curve with "Full-scatter" condition.

꿀, 조밀한 뼈에 대해서 명확하게 구분이 가능한 5개의 피크(Peak)를 나타내었다. 그러나 산란부족과 산란과다 조건의 CBCT 영상에서는 조밀한 뼈만이 구분이 가능하였고 주변 물질에서의 산란에 대한 영향으로 FBCT에 비하여 낮은 HU 값을 나타내었다. 취득된 CBCT영상들 중에서 산란충분조건의 CBCT영상이 FBCT의 경우와 가장 근접한 히스토그램을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 물 등가물질에 해당하는 피크를 Gaussian 함수로 Fitting하여 구한 Full Width at Half Maximum (FWHM)을 비교하였을 때 산란부족에서  $685 \pm 297$ , 산란과다에서  $264 \pm 125$ , 산란충분에서는  $146 \pm 57$ 의 값을 나타내어 산란충분에서 물 등가 물질에 대한 가장 균일한 HU를 나타내었다.

### 3. 전자밀도 교정곡선 평가

Fig. 4a는 FBCT로 팬텀 영상을 획득할 때 3가지 산란조건에서 팬텀 중심부와 주변부에 대한 6가지 전자밀도 교정곡선을 나타내는 것으로 모든 곡선이 거의 일치함을 확인

**Table 1. Average gamma indices of the dose distributions of the phantom CBCTs with a combination of three different HU-ED calibrations.**

HU-ED Calibration curve	CBCT image	Gamma 1%/3 mm		
		Ave (*gamma index)	SD	$\Gamma < 1$ (%)
Under scatter	Under scatter	0.42	0.34	95.65
	Over scatter	0.53	0.32	94.92
	Full scatter	0.56	0.34	91.12
Over scatter	Under scatter	0.65	0.35	81.43
	Over scatter	0.36	0.24	97.94
	Full scatter	0.19	0.12	100.00
Full scatter	Under scatter	0.66	0.34	80.28
	Over scatter	0.37	0.24	97.62
	Full scatter	0.15	0.13	100.00

**Table 2. Average gamma indices and percentage dose differences between the FBCT and CBCT dose distributions based on different HU-ED calibrations for all the 5 patients.**

HU-ED calibration curve	Gamma index (1%/3 mm)			Absolute dose difference (%)		
	Ave (*gamma index)	SD	$\Gamma < 1$ (%)	Min	Max	Ave  (*dose difference)
Under scatter	0.73	0.51	77.57	0.15	6.31	2.80
Over scatter	0.31	0.23	97.45	1.06	2.23	0.45
Full scatter	0.25	0.22	98.16	1.30	1.62	0.22

할 수 있었다. Fig. 4의 (b)~(d)에서는 각 산란조건에서의 CBCT에 대한 전자밀도 교정곡선을 나타내고 있다. Fig. 4b의 산란부족의 경우, 중심부와 주변부에 대한 교정 함수가 HU 전 영역에서 크게 차이가 나타났으며, Fig. 4c의 산란과다에서는 산란부족에 비하여 그 차이가 줄어드는 것을 확인할 수 있었으며, Fig. 4d에서의 산란충분에서 가장 작은 차이를 나타냄을 확인할 수 있다. 산란조건에 따른 CBCT 영상에서 팬텀 중심부와 주변부에 대한 HU 차이의 절대값( $\Delta$ HU)은 물 등가 영역을 기준으로 산란부족에서 176 HU, 산란과다에서 106 HU, 산란충분에서 90 HU 결과를 보여 HU 히스토그램에서의 결과와 마찬가지로 산란충분 조건에서 가장 적음을 확인할 수 있었다.

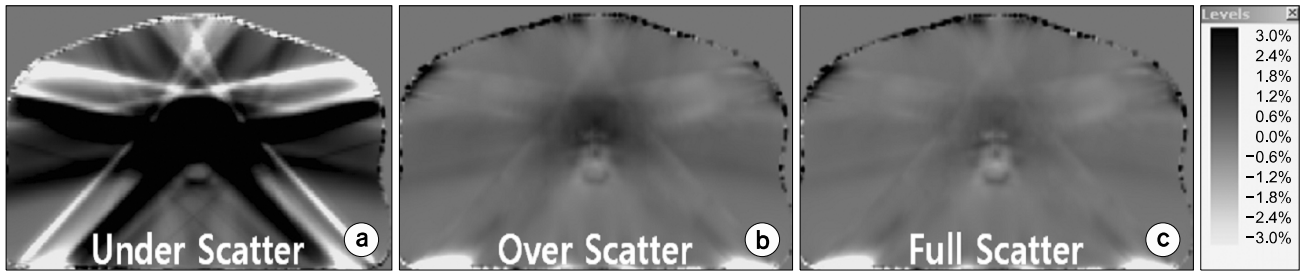
### 4. 팬텀 연구에서의 선량계산 및 평가

각 산란조건에서 취득된 3개의 CBCT 영상과 3개의 전자밀도 교정곡선으로 조합된 9가지의 경우에 대하여 선량계산을 수행한 후 FBCT를 기준으로 감마지표(1%/3 mm)에 대한 감마합격률을 비교한 결과를 Table 1에서 보여주고 있다. 당연한 결과로 영상과 동일한 산란조건의 전자밀도 교정곡선을 적용하였을 때 가장 높은 합격률을 나타내었다. 하지만 모든 환자에 대하여 동일한 산란조건을 맞추어 전자밀도 교정을 하는 것은 불가능하기 때문에 환자들의 다양한 산란조건에 안정적인 선량계산을 위한 조건을 구하기 위하여 특정 전자밀도 교정을 적용한 여러 산란조건의 CBCT영상에서의 선량계산 결과를 비교하여 확인하고자 하였다. 산란부족조건에서의 교정곡선을 적용하여 각각의 CBCT 영상들을 기반으로 선량을 계산하였을 때 감마합격률은 산란부족에서 취득한 영상에 대하여 1%/3 mm 기준에서의 감마합격률 95% 이상을 나타내었고 다른 영상에 대하여 90~95%를 나타내었다. 산란 충분 및 산란 과다 조건의 교정곡선의 경우 산란부족의 영상에서만 80%의 감마 합격률을 나타내었고 이외의 경우는 모두 97% 이상이었다.

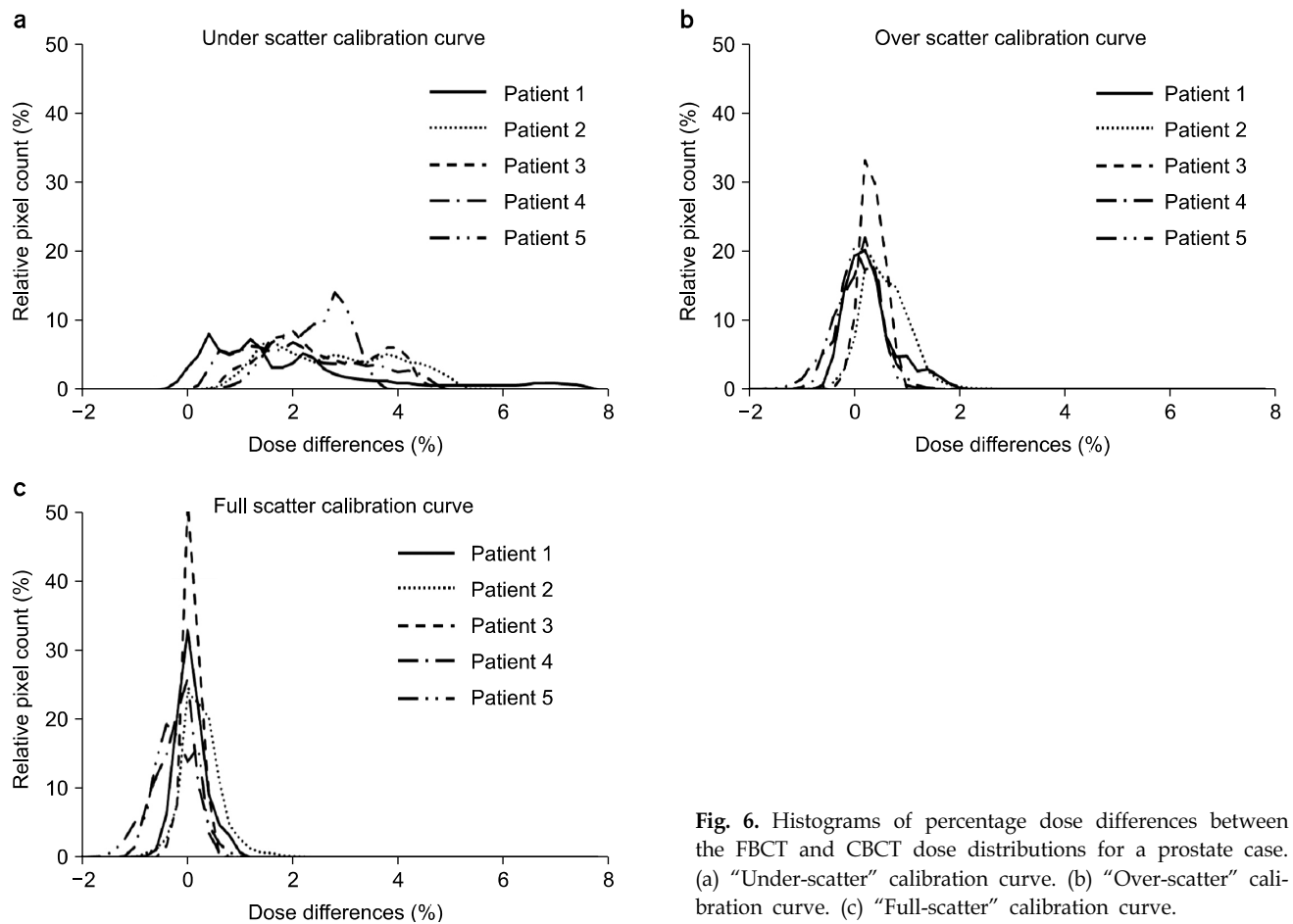
## 5. 감마지표를 사용한 선량계산 및 평가(환자, IMRT)

Table 2에서는 전립선암 환자 5명을 대상으로 환자의 치료 중에 획득한 CBCT 영상에 각각 산란조건에 따른 3개의 교정곡선(부족, 과다, 충분)을 적용하여 선량계산을 한 후 선량 차이를 FBCT 기반의 치료계획 선량과 비교한 결과를

나타내고 있다. 5명 모든 환자에서 산란부족의 전자밀도 교정을 적용했을 때에 선량 차이는 평균 2.80% (0.15~6.31%)로 크게 나타났으며 산란충분에서 평균 0.22% (1.30~1.62%)로 가장 오차가 작음을 확인하였다. Fig. 5에서는 환자 1명에 대하여 여러 전자밀도 교정에 따른 선량오차 분포를 나타내었다. 산란부족에서는 가운데의 치료 부위를 중심으로



**Fig. 5.** Percentage dose difference map of different HU-ED calibration based CBCT dose distributions for prostate patient 1. (a) "Under-scatter" calibration curve. (b) "Over-scatter" calibration curve. (c) "Full-scatter" calibration curve.



**Fig. 6.** Histograms of percentage dose differences between the FBCT and CBCT dose distributions for a prostate case. (a) "Under-scatter" calibration curve. (b) "Over-scatter" calibration curve. (c) "Full-scatter" calibration curve.

3% 이상의 선량차이를 보이는 부분이 넓게 분포함을 보여 주는 것에 반하여 산란과다와 산란충분조건의 전자밀도 교정에 의한 선량분포의 오차는 3% 미만이었으며 가운데 치료 목표부근에 대한 선량 오차는 산란충분조건에서 가장 작게 나타났다. Fig. 6에서는 5명의 환자 모두에 대하여 FBCT에서 계산된 선량 값을 기준으로 각각의 전자 교정관계식에 적용할 때의 CBCT 기반의 선량 계산 오차를 히스토그램으로 나타내었을 때 산란충분이 골반환자의 CBCT 영상을 기반으로 한 선량계산에서 가장 최적화된 전자밀도 교정을 위한 조건임을 확인할 수 있었다.

## 고찰 및 결론

Varian OBI 시스템에서는 기본적으로 CBCT 영상교정으로 역동범위(dynamic range)를 증가시키기 위한 이중이득(Dual gain) 교정, 링 허상(Ring Artifact)을 줄이기 위한 IO 교정, 방사선산란과 선속경화(Beam hardening)를 교정하기 위한 Norm-팬텀 교정이 있다.<sup>15)</sup> 하지만 CBCT를 이용한 선량계산의 결과에 의하면 영상 피사체 크기의 차이에 의한 산란 차이가 영상에 미치는 영향이 이 기본적인 교정 과정 이후에도 존재하며 선량계산 정확성과 관련이 있음을 확인할 수 있었다. CIRS062 팬텀의 크기는 가로 33 cm, 세로 27 cm이며, 부피 3,933 cm<sup>3</sup>로 HU number 교정용 Catphan팬텀(15 cm) 보다 실제 환자의 골반 부위와 유사한 크기를 가졌다. 하지만 Cone Beam 조사가 내에서 피사체의 부피는 일반 전립선암환자와 비교할 때에는 많은 차이가 있었다. 산란부족, 과다, 충분의 조건들에 대한 Cone Beam 조사야 내의 유효부피를 등가지름으로 확인하였을 때 각각 17.7 cm, 37.8 cm, 31.0 cm을 나타냈으며 5명의 전립선암 환자의 평균 등가지름 27.2 cm은 산란 충분의 조건에서 가장 환자의 등가지름과 비슷하였다. 산란부족에서 취득한 영상의 경우 팬텀의 중심부와 주변부에서 동일한 성분에 대한 HU 값의 차이가 가장 크게 나타났고 HU에 대한 히스토그램에서도 연조직 부분을 중심으로 조직 간에 구분이 어려웠다. CBCT 영상의 HU 값에 대한 균질도의 평가에서는 골반 영상의 취득 조건 중에는 산란 충분에서 가장 좋았다.

크기가 비슷한 전자밀도 팬텀만을 사용한 산란부족의 조건에서 취득된 전자밀도 교정관계를 적용한 CBCT 기반의 선량계산에서는 실제 환자의 경우에 대한 적용에서 가장 나쁜 선량 계산의 정확성을 보였다. 반면 산란충분 및 산란과다의 조건, 즉 등가지름에 맞추어 전자밀도 팬텀에 부가적인 산란체를 더하여 취득된 전자 밀도교정 관계를 적용

하였을 때 보다 정확한 선량계산이 됨을 확인하였다. 다만, 팬텀 연구에서의 결과에 의하면 산란 충분 및 과다의 조건에서 취득한 전자밀도 교정 관계를 적용할 때 ECD가 작은 환자, 즉 소아 혹은 심하게 마른 환자같이 산란부족과 비슷한 조건의 영상을 기반으로 한 선량계산에서는 오차가 더 크게 날 수 있음을 알 수 있었다.

골반 부위 CBCT 영상을 기반으로 선량계산을 할 때에는 실제 팬텀의 지름보다는 산란체의 등가지름을 기준으로 환자의 경우와 비슷한 산란 조건에서 획득한 전자밀도 교정 곡선을 적용하여 선량 계산을 하여야 정확한 선량계산을 할 수 있을 것으로 사료되었다.

## References

1. Xing L, et al: Overview of image-guided radiation therapy. Med Dosim 31(2):91-112 (2006)
2. Hector CL, Webb S, Evans PM, et al: The dosimetric consequences of inter-fractional patient movement on conventional and intensity-modulated breast radiotherapy treatments. Radiother Oncol 54(1):57-64 (2000)
3. Coolens C, et al: The susceptibility of IMRT dose distributions to intrafraction organ motion: an investigation into smoothing filters derived from four dimensional computed tomography data. Med Phys 33(8):2809-2818 (2006)
4. Hugo GD, Agazaryan N, Solberg TD, et al: The effects of tumor motion on planning and delivery of respiratory-gated IMRT. Med Phys 30(6):1052-1066 (2003)
5. Yoo S, Yin FF, et al: Dosimetric feasibility of cone-beam CT-based treatment planning compared to CT-based treatment planning. Int J Radiat Oncol Biol Phys 66(5):1553-61 (2006)
6. Ding GX, et al: A study on adaptive IMRT treatment planning using kV cone-beam CT. Radiother Oncol 85(1):116-25 (2007)
7. Siewerdsen JH, Jaffray DA, et al: Cone-beam computed tomography with a flat-panel imager: magnitude and effects of x-ray scatter. Medical physics 28(2):220-231 (2001)
8. Lee L, Le QT, Xing L, et al: Retrospective IMRT dose reconstruction based on cone-beam CT and MLC log-file. Int J Radiat Oncol Biol Phys 70(2):634-344 (2008)
9. Guan H, Dong H, et al: Dose calculation accuracy using cone-beam CT (CBCT) for pelvic adaptive radiotherapy. Phys Med Biol 54(20):6239-6250 (2009)
10. Yang Y, et al: Evaluation of on-board kV cone beam CT (CBCT)-based dose calculation. Phys Med Biol 52(3):685-705 (2007)
11. Rong Y, et al: Dose calculation on kV cone beam CT images: an investigation of the Hu-density conversion stability and dose accuracy using the site-specific calibration. Med Dosim 35(3): 195-207 (2010)
12. Masahiro Endoa, et al: Effect of scattered radiation on image noise in cone beam CT. Med Phys 28:469 (2001)
13. Calvo Ortega JF, et al: A dosimetric evaluation of the



- Eclipse AAA algorithm and Millennium 120 MLC for cranial intensity-modulated radiosurgery. Med Dosim (2013)
14. **Lu W, et al**: Deformable registration of the planning image (kVCT) and the daily images (MVCT) for adaptive radiation therapy. Phys Med Biol 51(17):4357-4374 (2006)
15. **Matsinos E, et al**: Current status of the CBCT project at Varian Medical Systems Proc. SPIE 5745:340-351 (2005)

## 골반 방사선 치료에서 산란이 kV-Conebeam CT 영상 기반의 선량계산에 미치는 영향에 대한 연구

\*울산대학교 의과대학 서울아산병원 방사선종양학과, <sup>†</sup>인제대학교 의생명공학대학 의공학과의

윤경준\* · 박정원\* · 조병철\* · 김영석\* · 이상욱\* · 안승도\* · 남상희<sup>†</sup>

ConeBeam Computed Tomography (CBCT) 영상을 기반으로 한 선량계산에서는 Fanbeam Computed Tomography (FBCT)와 비교하여 산란에 의한 영향이 크고 그 양상이 다양하게 나타나 오차의 주요한 요인으로 작용하는 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 골반 방사선 치료에서 산란이 CBCT 기반으로 한 선량계산에 미치는 영향을 평가하여 오차를 최소화할 수 있는 조건에 대하여 연구하였다. 다양한 산란조건에서의 CBCT 영상 취득을 위하여 전자밀도 교정용 팬텀에 크기가 각기 다른 산란물질을 추가하여 “산란부족”, “산란과다”, 그리고 “산란충분”의 3가지 조건을 정하였다. 산란조건에서 취득된 CBCT 영상에서 팬텀 중심부와 주변부의 위치에 따른 CT number값의 차이와 분포를 분석하여 균질도를 평가하였으며 FBCT 영상 기반의 선량 분포를 기준으로 하여 다양한 산란조건에서의 전자밀도 교정관계를 적용하였을 때 팬텀 및 전립선암 환자 5명의 CBCT 영상에서 계산된 선량분포의 감마합격을 및 상대적 오차를 구하였다. 팬텀 CBCT 영상에 대한 CT number들의 히스토그램에서의 분포에서 물 등가 물질에 해당하는 피크의 폭(FWHM)은 산란부족(685 HU)이나 산란과다(264 HU)보다 산란충분(146 HU)의 조건에서 가장 작게 나타나 균질도가 제일 좋은 것으로 평가되었고 팬텀의 중심부와 주변부에서 동일 성분에 대한 CT number의 차이 역시 같은 결과를 나타내었다. 또한 팬텀의 CBCT 영상을 취득할 때와 동일한 산란조건에서의 교정조건을 적용한 경우 선량계산이 가장 정확하였으며 산란충분의 교정곡선 조건을 적용하였을 때 5명의 전립선암환자(평균 등가지름 27.2 cm)의 CBCT 영상 기반의 선량분포는 FBCT의 경우와 대비하여 1%/3 mm의 감마지표에서 감마합격을 98% 이상을 나타내었다. 이때 FBCT 선량에 대한 CBCT 선량오차는 처방선량 대비 2% 이하(평균 0.2%, -1.3%~1.6%)로 평가되었다. CBCT 골반 촬영을 할 때 일반적인 성인 골반의 원통 등가지름(ECD, Equivalent Cylindrical Diameter)의 산란조건에서 동일 성분에 대한 HU 값이 가장 균질하게 나타나 골반 촬영모드가 최적화되었음을 확인하였으며 일반적인 골반부위와 ECD가 유사한 산란조건, 즉 산란충분조건에서 취득된 전자밀도 교정관계를 적용하여 골반 CBCT 기반에서 선량을 계산하였을 때 최적의 선량 정확성을 확보할 수 있었다.

**중심단어**: CBCT, 선량계산, 전자밀도팬텀, 골반방사선치료, 치료계획