

폐암 영상유도방사선 치료 시 CBCT와 4D-CBCT를 이용한 흡수선량 및 유효선량에 관한 선량 평가

울산의대 강릉아산병원 방사선종양학과

김대용, 이우석, 구기래, 김주섭, 이상현

목 적 : 폐암 환자의 CBCT와 4D-CBCT를 이용한 영상촬영 시 인접 장기에 미치는 방사선량을 비교 평가해 보고자 한다.

대상 및 방법 : 본 실험을 진행하기 위해 인체모형팬텀(Anderson Rando Phantom, USA)을 이용하였고, 선량측정 위치는 주요 장기가 위치하는 단면에 광유도발광선량계(Optically Stimulated Luminescent Dosimeter, OSLD) 1~6개를 부착하였다. 인체내부의 주요 장기를 표현하기 위해 전산화단층촬영(Lightspeed GE, USA)을 하였다. 선형가속기(CL-IX)와 선형가속기(Truebeam 2.5) thorax 모드에서 인체모형팬텀 폐 하부 기준으로 CBCT 방사선량을 측정하였고, 추가적으로 선형가속기(Truebeam 2.5) thorax 모드에서 4D-CBCT 방사선량을 측정하여 기존 CBCT와 비교 하였다. 각각 3회 반복 측정하여 평균값을 얻었다.

결 과 : CBCT로 촬영한 평균 흡수선량 측정치는 CL-IX의 경우 폐 2,505 cGy, 심장 2,595 cGy, 간 2,156 cGy, 위 1,934 cGy, 피부에 2,233 cGy 이었으며, Truebeam의 경우 폐 1,725 cGy, 심장 2,034 cGy, 간 1,616 cGy, 위 1,470 cGy, 피부에 1,445 cGy 이었다.

4D-CBCT 촬영 시 폐 3,849 cGy, 심장 4,578 cGy, 간 3,497 cGy, 위 3,179 cGy, 피부에 3,319 cGy 이었다.

조직 가중치와 방사선 가중치를 고려한 평균 유효선량 값은 CBCT의 경우 CL-IX에서 폐 2,164 mSv, 심장 2,241 mSv, 간 0,136 mSv, 위 1,668 mSv, 피부 0,009 mSv 이었고 Truebeam의 경우 폐 1,725 mSv, 심장 1,757 mSv, 간 0,102 mSv, 위 1,270 mSv, 피부에 0,005 mSv 이었다. 4D-CBCT에서는 폐 3,326 mSv, 심장 3,952 mSv, 간 0,223 mSv, 위 2,747 mSv, 피부에 0,013 mSv 이었다.

결 론 : 폐암 환자의 CBCT 촬영 시 Truebeam보다 CL-IX 장비에서 받는 선량이 1.3배 정도 더 높게 나왔으며, Truebeam 장비에서 CBCT 보다 4D-CBCT에서 환자가 받는 선량이 2.2배 정도 높게 나왔다. 하지만 4D-CBCT는 환자의 움직임이 큰 경우나 호흡동조 영상유도방사선치료 시 좀 더 정확한 방사선 치료를 할 수 있어 선택적으로 사용하는 것이 타당 할 것이다.

핵심용어 : CBCT, 4D-CBCT, 흡수선량, 유효선량

서 론

폐 하부에 위치한 폐암 환자의 방사선치료 시 호흡으로 인한 움직임으로 종양에 계획된 선량을 정확히 전달 못하여 정상장기에 불필요한 선량을 주게 된다. 특히 체부정위적방사선치료(Stereotactic Body Radiation Therapy, SBRT)와 같이 1회에 고선량을 주는 방사선치료 방법에서는 그 역할이 더욱 중요하다¹⁾. 이러한 set-up 오차를 줄이고 정확한 선량전달을 위해 매 치료 시마다 영상유도방사선치료(Image

Guided Radiation Therapy, IGRT)가 필요하게 된다.

방사선 치료를 하기 전 치료 부위를 확인하기 위해 본원에서는 선형가속기(CL-IX)에 부착된 온보드 영상장치(On-Board Imager, OBI)와 선형가속기(Truebeam 2.5)에 있는 XI System(X-ray imaging system)을 이용하여 CBCT(Cone Beam Computed Tomography)와 4D-CBCT(Four-dimensional Cone Beam Computed Tomography) 촬영을 실시하고 있다. 4D-CBCT는 기존 CBCT 보다 갠트리가 느린 속도로 회전 하면서 20 주기 이상의 환자 호흡주기를 확인 한다. 획득된 영상은 재구성 알고리즘을 통해 움직임에 의한 인공물을 줄인 최대강도투사(Maximum intensity projection, MIP) 영상을 얻어 낸다²⁾. MIP 이미지는 4D 재구성을 통해 치료계획프로그램(Eclipse, Version 10.0

본 논문은 2016년 5월 27일 접수하여 2016년 6월 23일 채택되었음.

책임저자 : 김대용, 강릉아산병원 방사선종양학과

강원도 강릉시 사천면 방동길 36

Tel : 033) 610-5306

E-mail : lithdrangon@naver.com

Varian USA)에서 0~90% Phase 영상을 확인할 수 있다.

정확한 방사선치료를 위해 기술은 끊임없이 발전해 왔으며 영상유도방사선치료 성능 향상으로 다양한 기능이 추가되었다. 그러나 정확한 치료를 위해 실시한 CBCT나 4D-CBCT 촬영은 환자에게 추가적인 방사선량을 주어 치료하는 부위의 인접장기에 부작용을 초래할 수 있다^{3,5)}.

따라서 본 연구에서는 본원에서 보유하고 있는 선형가속기 CL-IX와 Truebeam을 이용하여 폐암 환자의 방사선 치료 시 촬영하는 CBCT가 환자의 인접장기에 얼마나 영향을 미치는지 흡수선량 및 유효선량을 측정하여 비교 평가하였고⁶⁾, 환자의 호흡을 고려하여 촬영하는 4D-CBCT가 인접장

기에 얼마나 영향을 미치는지 흡수선량 및 유효선량을 알아보았다.

대상 및 방법

1. 전산화 단층 촬영 및 영상획득

인체모형팬텀을 이용하여 2.5 mm로 전신을 포함하여 전산화단층촬영을 하였다.(Fig. 1) 획득 된 영상을 치료계획시스템을 사용하여 폐, 심장, 간, 식도, 척수 등 폐 하부 쪽에 인접한 중요장기의 윤곽을 묘사 하였고, 선량 측정 부위를

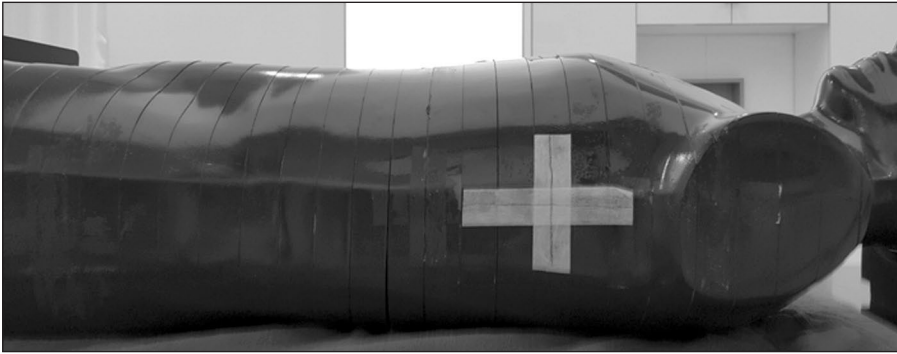


Fig 1. Anderson rando phantom, USA

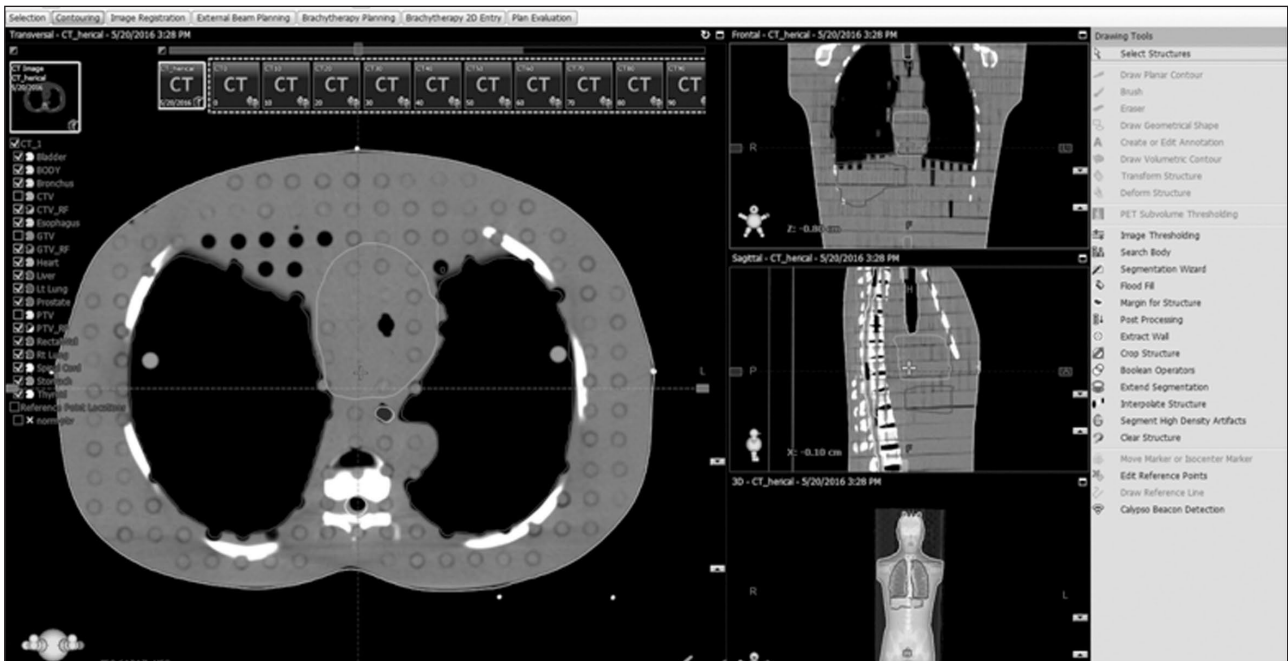


Fig 2. CT contouring images



Fig 3. MicroStar reader or NanoDot dosimeters

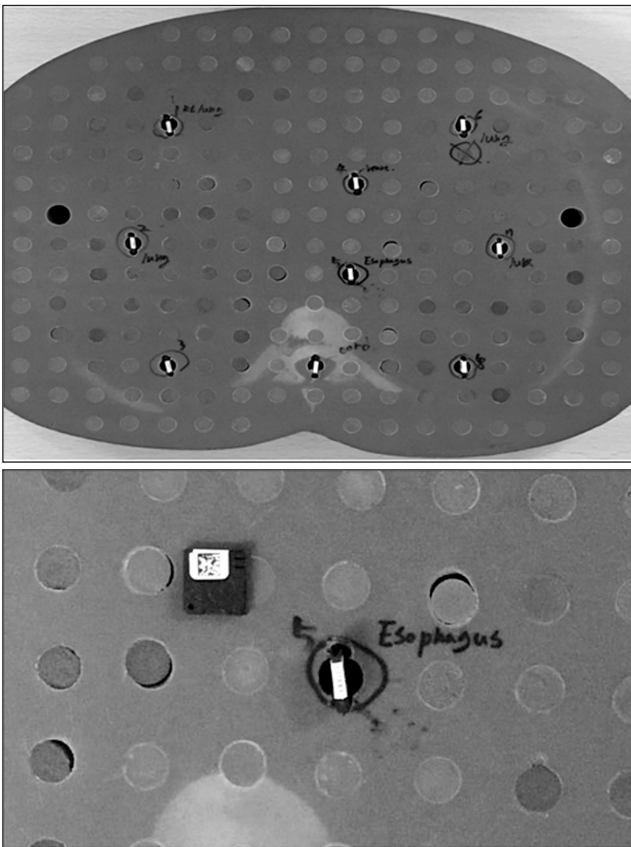


Fig 4. OSLD Positions for measurement of organs

로 TLD와 비슷하나 한번 관독 시 빛의 자극으로 트랩 된 전자에너지의 0.2 % 정도만 소모하기 때문에 수차례 재 관독 할 수 있다는 차이점을 갖고 있다. 또한 TLD 소자보다 화학적, 기계적 강도가 좋아 안정적이며 열, 습기 등 환경적인 요소에 강하여 방사선 치료 선량측정에 많이 사용되고 있다⁷⁻⁸⁾.

선량측정방법은 인체모형팬텀을 이용하여 폐, 심장, 간, 식도, 척수 등 중요 장기가 위치하는 단면과 피부에 OSLD를 부착하였고, 스캔범위 밖의 감상선과 전립선 주위에도 OSLD를 부착하였다.(Fig. 4)

인체모형팬텀의 폐 하부를 기준으로 잡고 선형가속기 (CL-IX) CBCT 모드에서 thorax 조건으로 half fan을 사용하여 2.5 mm CBCT를 이용하여 촬영하였다. Truebeam에서도 비슷한 조건으로 CBCT로 촬영 하였다.(Table 1) OSLD는 정확한 선량측정을 위해 측정 전 annealing을 하였고 촬영 후 OSLD를 안정화를 위해 10분 뒤에 선량을 측정하였다⁹⁻¹⁰⁾. 측정오차를 줄이기 위해 각각 3회 반복 측정하여 평균값을 얻었다. 유효선량을 비교 평가하기 위하여 측정된 흡수선량을 이용하여 ICRP 60 에서 권고한 각 장기의 조직 가중치와 방사선 가중치를 곱하여 유효선량을 계산하였다.(Table 2)

확인 하였다.(Fig. 2)

2. 선형가속기 CL-IX VS Truebeam CBCT 흡수선량 및 유효선량 평가

본 실험에서는 방사선 선량측정을 위해 OSLD를 사용하였다.(Fig. 3) OSLD는 방사선에 노출된 크리스탈에 트랩 된 위치로부터 형광방출을 측정하여 선량을 평가하는 것으

$$D_{eff} = \sum_T W_T \sum_R W_R D_{T,R} \text{ ----- [식 1]}$$

W_T = 조직에 대한 가중치

W_R = 방사선에 대한 가중치

$D_{T,R}$ = 방사선에 대한 조직의 평균 흡수선량

3. Truebeam CBCT VS 4D-CBCT 흡수선량 및 유효선량 평가

Truebeam 치료장비를 이용하여 XI System으로 OSLD가

Table 1. CBCT Exposure condition

Machine	CBCT mode	Scan mode	kVp	mAs	Slice thickness
CL-IX	Thorax	Half	110	262	2.5mm
Truebeam	Thorax	Half	125	268	2.5mm
Truebeam	4D-Thorax	Half	125	672	2.5mm

Table 2. Tissue weighting factor for calculation of effective dose

Tissue	W_T	$\sum W_T$
Bone marrow, Colon, lung, Stomach, Breast, Rematinder tissues※	0.12	0.72
Gonads	0.08	0.08
Bladder, Esophagus, Liver, Thyroid	0.04	0.16
bone surface, Brain, Salivary gland, Skin	0.01	0.04
Total		1

※ Remainder tissues: Adrenals, Extrathoracic (ET) region, Gallbladder, Heart, Kidneys, Lymphatic nodes, Muscle, Oral mucosa, Pancreas, Prostate, Small intestine, Spleen, Thymus, Uterus/cervix



Fig 5. Truebeam 4D-CBCT system

Table 3. Mean Absorbed dose from CBCT(cGy)

Tissue/organ	Thorax mode	
	IX	Truebeam
Thyroid	0,232±0,006	0,116±0,002
Lung	2,505±0,091	1,725±0,094
Heart	2,595±0,035	2,034±0,073
Esophagus	2,426±0,027	2,103±0,191
Spinal cord	2,182±0,110	1,474±0,012
Liver	2,156±0,085	1,616±0,026
Stomach	1,934±0,086	1,470±0,019
Skin	2,233±0,017	1,445±0,060
Rectum	0,026±0,001	0,023±0,125
Prostate	0,026±0,003	0,021±0,042
Bladder	0,026±0,002	0,017±0,013

Table 4. Mean Effective dose from CBCT(mSv)

Tissue/organ	Thorax mode	
	IX	Truebeam
Thyroid	0,014±0,001	0,007±0,001
Lung	2,164±0,006	1,491±0,073
Heart	2,241±0,030	1,757±0,006
Esophagus	0,154±0,002	0,134±0,001
Liver	0,136±0,007	0,102±0,002
Stomach	1,668±0,074	1,270±0,017
Skin	0,009±0,001	0,005±0,001
Rectum	0,021±0,001	0,020±0,002
Prostate	0,021±0,003	0,018±0,001
Bladder	0,001±0,001	0,001±0,001

Table 5. Mean Absorbed dose from CBCT vs 4D-CBCT(cGy)

Tissue/organ	Truebeam(Thorax mode)	
	CBCT	4D-CBCT
Thyroid	0,116±0,002	0,238±0,007
Lung	1,725±0,094	3,849±0,005
Heart	2,034±0,073	4,578±0,014
Esophagus	2,103±0,191	4,464±0,011
Spinal cord	1,474±0,012	3,718±0,003
Liver	1,616±0,026	3,497±0,003
Stomach	1,470±0,019	3,179±0,031
Skin	1,445±0,060	3,319±0,032
Rectum	0,023±0,125	0,033±0,001
Prostate	0,021±0,042	0,033±0,001
Bladder	0,017±0,013	0,034±0,001

Table 6. Mean Effective dose from CBCT VS 4D-CBCT(mSv)

Tissue/organ	Truebeam(Thorax mode)	
	CBCT	4D-CBCT
Thyroid	0,007±0,001	0,015±0,001
Lung	1,491±0,073	3,326±0,001
Heart	1,757±0,006	3,952±0,012
Esophagus	0,134±0,001	0,285±0,001
Liver	0,102±0,002	0,223±0,002
Stomach	1,270±0,017	2,747±0,001
Skin	0,005±0,001	0,013±0,001
Rectum	0,020±0,002	0,029±0,001
Prostate	0,018±0,001	0,028±0,001
Bladder	0,001±0,001	0,002±0,001

부착된 인체모형팬텀을 4D-CBCT mode로 촬영하였다. 4D-CBCT 촬영을 위해 인체모형팬텀에 구동팬텀을 올려두고 호흡 움직임을 파악하였다.(Fig. 5) 촬영 조건은 thorax 조건을 사용하였고 측정오차를 줄이기 위해 각각 3회 반복 측정하여 평균값을 얻었다. 측정된 흡수선량으로 조직 가중치와 방사선 가중치를 곱하여 유효선량을 계산하였고 Truebeam CBCT에서 측정된 값 과 비교 평가 하였다.

결 과

1. 선형가속기 CL-IX VS Truebeam CBCT 흡수선량 및 유효선량 평가 결과

폐암 환자에서 CBCT 촬영 시 피부 및 장기에 흡수되는 평균 흡수선량 측정치는 CL-IX의 Thorax 모드의 경우 폐 2.505±0,091 cGy, 심장 2.595±0,035 cGy, 간 2.156±

0.085 cGy, 위 1.93 ± 0.086 cGy, 피부에 2.233 ± 0.017 cGy, 스캔 범위 밖에는 갑상선 0.232 ± 0.006 cGy, 전립선 0.026 ± 0.002 cGy 이었다. Truebeam의 Thorax 모드의 경우 측정값은 폐 1.725 ± 0.094 cGy, 심장 2.034 ± 0.073 cGy, 간 1.616 ± 0.026 cGy, 위 1.470 ± 0.019 cGy, 피부에 1.445 ± 0.060 cGy 이었으며, 스캔 범위 밖에는 갑상선 0.116 ± 0.002 cGy, 전립선이 0.021 ± 0.042 cGy로 측정되었다. (Table 3)

CBCT 1회 촬영 시 인체에 미칠 수 있는 유효선량 평균값은 CL-IX의 Thorax 모드의 경우 폐 2.164 ± 0.06 mSv, 심장 2.241 ± 0.030 mSv, 간 0.136 ± 0.007 mSv, 위 1.668 ± 0.074 mSv, 피부 0.009 ± 0.001 mSv 이었으며, 스캔 범위 밖에는 갑상선 0.014 ± 0.001 mSv, 전립선이 0.021 ± 0.001 mSv로 나타났다. Truebeam의 Thorax 모드의 경우 폐 1.491 ± 0.073 mSv, 심장 1.757 ± 0.006 mSv, 간 0.102 ± 0.002 mSv, 위 1.270 ± 0.017 mSv, 피부가 0.005 ± 0.001 mSv 로 나타났으며, 스캔 범위 밖에는 갑상선 0.007 ± 0.001 mSv, 전립선이 0.018 ± 0.001 mSv로 나타났다. Truebeam 보다 CL-IX에서 유효선량 평균값이 약 1.3배 정도 높음을 알 수 있었다. 특히 촬영 범위 밖 갑상선에서 가장 큰 2배의 선량 차이를 보였다. (Table 4)

2. Truebeam CBCT VS 4D-CBCT 흡수선량 및 유효선량 평가 결과

Truebeam 4D-CBCT 로 촬영할 경우 피부 및 장기에 흡수되는 평균 흡수선량은 폐 3.849 ± 0.005 cGy, 심장 4.578 ± 0.014 cGy, 간 3.497 ± 0.003 cGy, 위 3.179 ± 0.031 cGy, 피부에 3.319 ± 0.032 cGy 로 측정되었다. 스캔 범위 밖에는 갑상선 0.238 ± 0.007 cGy, 전립선이 0.033 ± 0.001 cGy 이었다. (Table 5)

Truebeam에서 4D-CBCT 1회 촬영 시 폐암 환자에게 피폭되는 유효선량 평균값은 폐 3.326 ± 0.001 mSv, 심장 3.952 ± 0.012 mSv, 간 0.223 ± 0.002 mSv, 위 2.747 ± 0.001 mSv, 피부에서 0.013 ± 0.001 mSv 이었으며, 스캔 범위 밖에서 갑상선 0.015 ± 0.01 mSv, 전립선이 0.028 ± 0.001 mSv 이었다.

Truebeam에서 4D-CBCT 가 CBCT 보다 유효선량 평균값이 약 2.2배 정도 높게 나타났다. (Table 6)

고안 및 결론

본 연구는 VARIAN 사의 두 종류의 선형가속기(CL-IX, Truebeam 2.5)를 이용하여 폐암 환자의 영상유도방사선치료를 위한 CBCT 촬영 시 인접장기에 조사되는 흡수선량을 측정하고 유효선량을 평가하였다.

CL-IX와 Truebeam 장비의 Thorax 모드는 흉부, 복부 환자 촬영 시 주로 사용하고 있으며 본원에서 폐암 환자 CBCT 촬영 시 많이 사용하고 있기 때문에 이번 연구에서 Thorax 모드 조건으로 흡수선량을 측정하였다.

두 선형가속기의 CBCT 촬영조건이 비슷함에도 불구하고 Truebeam이 CL-IX보다 정상장기에 들어가는 유효선량이 적게 평가되었다. 평균 1.3 배 정도 유효선량 차이가 낮으며, 특히 CBCT 촬영 범위 밖인 갑상선에 들어가는 유효선량이 최대 2배의 차이를 보였다. 이는 Truebeam에서 새로운 x-ray source 안에 있는 kV beam hardening filter 가 에너지 스펙트럼에서 낮은 에너지의 광자를 제거하여 흡수선량이 줄어들게 되었다. 또한 CL-IX에 비해 더 많은 이미지를 획득하여 영상의 질도 향상 되었다¹¹⁾.

Truebeam 장비의 CBCT와 4D-CBCT 유효선량 차이가 평균 2.2배 정도 나타났는데, CBCT는 영상을 획득할 때 1초당 15 프레임의 영상을 얻으면서 갠트리각 1초당 6° 씩 움직이는데 반해, 4D-CBCT는 1초당 2° 씩 갠트리각 느리게 움직이면서 환자의 호흡 및 주기를 확인하면서 영상을 획득하기 때문에 촬영 조건이 커지고 총 영상 획득 수가 많아져 CBCT 보다 선량이 높게 나타났다.

그러나 4D-CBCT는 호흡을 고려하기 때문에 움직임에 의한 인공물을 줄인 MIP 영상을 얻을 수 있고, 영상 재구성을 통해서 촬영한 환자의 0~90% phase 영상을 치료계획프로그램에서 기존 4D-CT와 비교 평가 할 수 있다.

폐암 방사선치료 시 선형 가속기의 CBCT와 4D-CBCT는 영상 유도 방사선 치료를 위한 좋은 기술이다. 특히 4D-CBCT는 치료 전 움직이는 종양의 위치 및 크기를 정확히 결정하는데 있어 호흡에 의한 기하학적 불확실성을 줄여 좋은 영상을 제공한다. 그러나 환자에게 CBCT 보다 치료 이외의 많은 선량을 요구하기 때문에 촬영 시 선택적으로 사용하는 것이 타당할 것이다.

참고문헌

1. L. Wang, S. Hayes, K. Paskalev, et al. Dosimetric comparison of stereotactic body radiotherapy using 4DCT and multiphase CT images for treatment planning of lung cancer: evaluation of the impact on daily dose coverage
2. TrueBeam Technical Reference Guide-Volume2: imaging. VARIAN medical system.
3. Jeng SC, Tsai CL, Chan WT, et al. Mathematical estimation and in vivo dose measurement for cone-beam computed tomography on prostate cancer patients. *Radiother Oncol* 2009;92:57-61.
4. Perks JR, Lehmann J, Chen AM, et al. Comparison of peripheral dose from image-guided radiation therapy (IGRT) using kV cone beam CT to intensitymodulated radiation therapy (IMRT). *Radiother Oncol* 2008;89:304-10.
5. Walters BR, Ding GX, Kramer R, et al. Skeletal dosimetry in cone beam computed tomography. *Med Phys* 2009;36:2915-22.
6. 나종익, 이도근, 김진수, 백금문, 권경태. kV Cone Beam Computed Tomography(CBCT)를 이용한 전립선암 영상유도방사선치료 시 흡수선량 및 유효선량에 관한 고찰. *대한방사선치료학회지*. 2009
7. Timilsina B, Gesell TF: Independent evaluation of optically stimulated luminescence (OSL) 'dot' dosimeters for environmental monitoring. *Radiat Prot Dosimetry* 2011, 143:27-32. Epub 2010 Oct 14.
8. E.G. Yukihara, S.W. McKeever. Optically stimulated luminescence (OSL) dosimetry in medicine. *Phys Med Biol*, 53 (2008), pp. R351-R379
9. L.A. DeWerd, L.K. Wagner. Characteristics of radiation detectors for diagnostic radiology. *Appl Radiat Isot*, 50 (1999), pp. 125-136
10. Pual A. Jursinic, et al.: Optically stimulated luminescence dosimeters for clinical dosimetric measurements. *Med Phys* 2007; 34:4594-4604
11. G Ding , P Munro. Reduced CBCT Imaging Dose Due to the New X Ray Source in TrueBeam. *Med. Phys.* 38, 3372 (2011)

Abstract

Absorbed Dose and Effective Dose for Lung Cancer Image Guided Radiation Therapy(IGRT) using CBCT and 4D-CBCT

Department of Radiation Oncology, GangNeung Asan Hospital, Gangneung, Korea

Kim Dae yong, Woo Suk Lee, Ki Lae Koo, Joo Seob Kim, Sang Hyeon Lee

Purpose : To evaluate the results of absorbed and effective doses using CBCT and 4D-CBCT settings for lung cancer.

Materials and Methods : This experimental study. Measurements were performed using a Anderson rando phantom with OSLD(optically stimulated luminescent dosimeters). It was performed computed tomography(Lightspeed GE, USA) in order to express the major organs of the human body. Measurements were obtained a mean value is repeated three times each. Evaluations of effective dose and absorbed dose were performed the CL-IX-Thorax mode and Truebeam-Thorax mode CBCT. Additionally, compared Truebeam-Thorax mode CBCT with Truebeam-Thorax mode 4D-CBCT(Four-dimensional Cone Beam Computed Tomography)

Results : Average absorbed dose in the CBCT of CL-IX was measured in lung 2.505cGy, heart 2.595cGy, liver 2.145cGy, stomach 1.934cGy, skin 2.233cGy, in case of Truebeam, It was measured lung 1.725cGy, heart 2.034cGy, liver 1.616cGy, stomach 1.470cGy, skin 1.445cGy.

In case of 4D-CBCT, It was measured lung 3.849cGy, heart 4.578cGy, liver 3.497cGy, stomach 3.179cGy, skin 3.319cGy

Average effective dose, considered tissue weighting and radiation weighting, in the CBCT of CL-IX was measured lung 2.164mSv, heart 2.241mSv, liver 0.136mSv, stomach 1.668mSv, skin 0.009mSv, in case of Truebeam, it was measured lung 1.725mSv, heart 1.757mSv, liver 0.102mSv, stomach 1.270mSv, skin 0.005mSv, In case of 4D-CBCT, It was measured lung 3.326mSv, heart 3.952mSv, liver 0.223mSv, stomach 2.747mSv, skin 0.013mSv

Conclusion : As a result, absorbed dose and effective Dose in the CL-IX than Truebeam was higher about 1.3 times and in the 4D-CBCT Truebeam than CBCT of Truebeam was higher about 2.2times

However, a large movement of the patient and respiratory gated radiotherapy may be more accurate treatment in 4D-CBCT. Therefore, it will be appropriate to selectively used

Keyword : CBCT, 4D-CBCT, absorbed dose, effective dose