

## 토모테라피 치료 시 Bodyfix System에서 진공압박에 따른 환자 위치잡이오차(Setup errors)의 평가

\*가톨릭대학교 의과대학 의공학교실, †순천향대학교 부천병원 방사선종양학과, ‡건국대학교병원 방사선종양학과, §고려대학교 보건과학연구소, ¶가톨릭대학교 의과대학 생체의공학연구소

정재홍\*<sup>†</sup> · 조광환<sup>†</sup> · 이정우<sup>‡§</sup> · 김민주\*<sup>¶</sup> · 임광채<sup>†</sup> · 문성권<sup>†</sup> · 김용호<sup>†</sup> · 서태석\*<sup>¶</sup>

본 연구의 목적은 토모테라피(Hi-Artill, TomoTherapy, USA) 치료 시 Bodyfix system (Medical Intelligence, Ele-hta, Schwabmuchen, Germany)에서 진공압박(Vacuum compression)에 따라 환자 위치잡이오차(Patient's setup-errors)를 평가하고자 하였다. Bodyfix system와 진공압박을 적용한 토모테라피를 이용하여 치료를 시행한 홍복부 환자 21명을 선정하였으며, 모든 환자는 치료 전 촬영된 총 477개의 메가볼테이지 전산화단층촬영(Mega-voltage computed tomography, MVCT)영상을 얻었다. 이를 통하여 확인된 좌우방향(Medial-Lateral direction, ML), 앞뒤방향(Anterior-Posterior direction, AP), 상하방향(Superior-Inferior direction, SI)과 SI중심축 회전각(Rotational angle of SI axis direction, Roll)에 대한 오차를 기록하고, 분석하였다. 세 방향 및 Roll에 대한 상관관계와 진공압박 정도가 다르게 적용된 다섯 그룹에 대하여 setup-errors를 분석하기 위해 각각 Pearson's product-moment coefficient와 One-way ANOVA를 이용하여 통계적으로 분석하였다( $p < 0.05$ ). 분석결과 Systematic errors의 평균은 AP에서 6.00 mm, 표준편차는 SI에서 5.95 mm로 큰 오차를 보였다. Random errors의 평균은 SI방향에서 4.72 mm로 큰 오차가 발생하였다. 관계분석에서는 상관계수가 ML-Roll과 AP-Vector는 0.485, 0.244이고, SI-Vector에서 관계가 제일 높았다(0.637). 또한, 진공압박 정도가 다르게 적용된 다섯 그룹 (Pressure range: 30~70 mbar) 사이의 setup errors를 분석한 결과 ML, SI방향과 Roll에서 모두  $p=0.00$  ( $p < 0.05$ )로써 유의한 차이를 보였으며, SI방향에서 진공압박에 따른 오차 평균은 40 mbar과 70 mbar그룹에서 4.78 mm, -0.74 mm였다. 본 연구에서는 진공압박과 setup-errors의 평가를 통계적으로 분석하였으며, 압박 정도에 따라 SI방향에서 setup-errors의 차이를 확인하였다. 최종적으로 setup-errors와 내부장기의 움직임을 고려하자면 Bodyfix system을 이용한 진공압박을 적용 시 최소 50 mbar 이상을 사용해야 할 것이다. 본 연구결과를 토대로 진공압박의 정확성과 내부장기 및 종양의 움직임을 정량적으로 분석할 필요가 있다고 판단된다.

**중심단어:** 토모테라피, Bodyfix system, 진공압박, ANOVA

### 서 론

홍복부 환자를 대상으로 하는 방사선치료에 있어서 호흡에 의한 움직임은 치료의 표적이 되는 육안적 종양체적(Gross tumor volume, GTV)에 정확한 선량전달에 어려움을 주고, 정상조직의 손상으로 인한 치료성적에 영향을 줄 수

있다.<sup>1,2)</sup>

ICRU 보고서 62 (ICRU report 62)에 따르면 치료 간 오차 (Intrafraction uncertainties)는 치료의 불확실성을 유발하고, 그에 따른 환자위치잡이 시 준비여유(Setup margin)를 고려할 것을 권고하고 있다.<sup>3)</sup> 이와 같은 치료의 불확실성을 줄이고자 최근 영상유도 방사선치료기술(Image guided radiation therapy, IGRT)의 발전과 함께 호흡주기를 이용한 호흡동조 방사선치료(Respiratory gating therapy)와 종양의 움직임을 고려한 종양 추적방사선치료(Tumor tracking radiation therapy)가 활발히 시행되고 있다. 특히, Gating therapy는 4D-CT, 4D-PET CT를 이용하여 호흡주기에 따라 영상을 얻게 되며, 각 영상들은 방사선치료계획시스템(Radiation therapy treatment planning system, RTP)으로 전송된 후 관심영역(Region of Interest, ROI) 및 GTV 등을 결정하는 데 적용

본 연구는 교육과학기술부 지원을 받아 2011년도 원자력기술개발사업을 통해 수행됨(차세대 지능형 방사선 치료계획 시스템 개발, 과제번호: 2011-0001851).

이 논문은 2011년 5월 3일 접수하여 2011년 6월 3일 채택되었음.

책임저자 : 서태석, (137-701) 서울시 서초구 반포4동 505

가톨릭대학교 의과대학 의공학교실

Tel: 02)2258-7232, Fax: 02)2258-7506

E-mail: suhsanta@catholic.ac.kr

된다.<sup>4)</sup>

그러나, 토모테라피(Hi-Art II, TomoTherapy, USA) 방사선 치료는 현재까지 호흡주기 및 종양의 움직임에 대해 반영을 못하고 있는 실정이다. 토모테라피는 나선식 전산화단층촬영(Helical computed tomography)과 선형가속기(Linear accelerator, LINAC)를 통합한 형태로써 치료 전 종양의 위치 파악과 보정을 위해 메가볼테이지 전산화단층촬영(Megavoltage computed tomography, MVCT)을 이용하고 있고, 이진 다엽콜리메이터(Binary multi-leaf collimators, binary MLC)를 이용하여 세기조절 방사선치료(Intensity modulated radiation therapy, IMRT)를 실현하고 있다.<sup>5,6)</sup> 그러나, 호흡에 따른 장기의 움직임을 최소화하는 방법으로는 환자 고정기구에 의존할 수밖에 없다.

Bodyfix System Medical Intelligence, Ele-cta, Schwabmuchen, Germany)은 전신을 고정시키고, 진공펌프(Vacuum pump)와 비닐커버(foil) 등을 이용한다. 보통, 두정부(Head and neck) 환자를 제외한 거의 모든 환자에 적용할 수 있으며, 진공압박(Vacuum compression)은 호흡에 의한 내부장기의 움직임을 최소화하기 위해 적용되며, 쿠션(Cushion)과 비닐커버를 이용하여 진공에 의해 압축하는 형태로써 횡격막 주위를 압박하게 된다. 타 연구에서는 Bodyfix system의 유용성에 대해 언급한 바 있다. Fuss 등<sup>7)</sup>은 정위적 방사선 치료(Stereotactic body radiation therapy, SBRT) 환자 36명을 대상으로 Bodyfix system을 이용하여 환자 위치잡이(Patient setup position)의 정확성을 평가한 바 있으며, Nevinny-Stickel 등<sup>8)</sup>은 재현성을 확인하기 위해 최대의 진공압박을 적용하여 setup-errors를 3D-Vector로 분석하였으며, 그 결과는 평균 2.5 mm, 표준편차 1.1 mm로 보고된 바 있다. 또한, Heinzerling 등<sup>9)</sup>은 다른 형태의 고정기구로써 복부압박기구장치(Abdominal compression plate, ACP)의 유용성을 평가하기 위해 평균압박(Mean compression, MC)과 최대압박(High compression, HC)을 적용하였다.

최근 연구에서 Han 등<sup>10)</sup>은 Stage I NSCLC 환자 24명을 대상으로 Bodyfix system과 ACP간의 효과와 효율성을 비교 평가하기 위해 4D-CT를 이용하여 종양의 움직임을 평가한 바 있으며, 두 고정기구의 압박강도는 최대로 적용되었다. 그러나, 압박강도는 매우 중요한 요소이며, 특정한 면적에 대해 압박하는 형태의 ACP와 다른 형태의 Bodyfix system은 진공을 이용한 것으로써 환자에게 적용되는 압박의 정도는 다를 수 밖에 없다. 아직까지 진공압박에 따른 환자 위치잡이오차 및 GTV변화에 대한 평가는 연구된 바 없다. 본 연구에서는 Bodyfix system에서 진공압박에 따른 환자

위치잡이오차를 평가하고자 하였다.

## 재료 및 방법

본 연구를 위해 흉부부를 대상으로 하는 토모테라피 치료 환자 21명을 선정하였으며, 각 환자는 kVCT SOMATOM EMOTION, SIEMNES, Germany)을 이용하여 모의치료를 실시하였다. 모든 환자는 Bodyfix system을 사용하였으며, 진공압박은 환자가 매우 불편하지 않을 정도의 압력을 적용하였다. 압력은 10 mbar 간격으로 진공펌프를 통해서 조절이 가능하며, 범위는 20~100 mbar이다. 치료계획을 위해 기준점(Reference points)을 환자 체표면을 기준으로 좌, 우와 상부에 납볼(Lead Points) 3개를 위치시켜 표식을 하였으며, 토모테라피 치료 시 환자 위치잡이를 재확인하기 위해 고정기구에 상하방향(Superior-Inferior direction, SI)으로 모의치료실에 설치된 레이저(Laser)를 이용하여 표시하고, 치료실에서 동일하게 적용하였다. 여기서, 레이저를 이용한 기준거리 즉, 납볼과 고정기구에 표시한 기준선간의 거리를 기록하였으며, 치료 시 납볼의 위치에서 최종 환자위치잡이를 결정하였다. kVCT는 슬라이스 두께(Slice-thickness: 3 mm), 해상도(Resolution: 512×512 pixels)로 촬영하였으며, 영상정보는 RTP로 전송하였으며, ROI 및 GTV 윤곽선을 그렸다.

이후, 토모테라피 RTP로 해상도(Resolution: 256×256 pixels)로 전송하여 치료계획을 시행하였다. 치료 시 모든 환자는 똑바로 누운 자세(Supine position)로 모의치료 시 사용된 고정기구와 진공압박 수치를 똑같이 적용하였다(Fig. 1). 치료 전 MVCT영상을 촬영하였으며, kVCT 치료계획영상과 MVCT영상을 이용하여 자동 뼈 영상정합(Automatic bone registration)을 시행하였다. 이후, GTV를 중심으로 수동 영상정합(Manual image registration)을 실시하였다. 토모테라피에서 오차 보정은 좌우방향(Median-lateral directions, ML), 상하방향(Superior-Inferior directions, SI), 앞뒤방향(Anterior-posterior, AP)에 대한 setup-errors는 치료 테이블로 조정이 가능하며, SI의 중심축에 대한 회전(Rotation of SI axis direction, Roll)은 겐트리 위치로 조정이 가능하다. 나머지, ML-AP방향의 중심축에 대한 회전(Pitch)과 ML-SI방향의 중심축에 대한 회전(Yaw)은 조정이 불가능하다.

모든 환자는 치료 전 MVCT를 촬영하였으며, 총 477개의 MVCT영상을 얻었다. 매회 치료 시 조정이 가능한 ML, SI, AP와 Roll에 대한 setup-errors 수치를 기록하였으며, 이를 분석하기 위해 Bijhold 등<sup>11)</sup>이 제시한 시스템과 무작위 환



**Fig. 1.** (a) Patient position used the Bodyfix system. (b) Display of vacuum pressure values. Arrow keys are controlled the values level.

자위치잡이 오차(Systematic and random setup errors)를 확인하는 방법을 적용하였다. Systematic errors는 각 환자별 전체 치료과정에서 setup error의 평균(Mean)을 나타낸 것으로 Systematic errors의 평균과 표준편차(Standard deviations, SD)는 기호로 각각  $\Sigma$ ,  $\mu$ 로 표기하였다. Random setup errors는 각 환자별 전체 치료과정에서 setup error의 표준편차를 나타낸 것이며, 모든 환자에 대한 Random setup errors의 평균을 기호  $\sigma$ 로 표기하였다. 세 방향(ML, AP, SI directions)의 setup errors에 대한 3D-Vector를 계산하였다(식1).

$$(\Delta ML^2 + \Delta AP^2 + \Delta SI^2)^{1/2} \quad (1)$$

또한, 세 방향과 Roll 사이의 상관관계를 알고자 피어슨 적률상관관계(Pearson's product-moment coefficient)를 이용하여 분석하였고, 그 식은 아래와 같다.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

위의 식에서 X, Y는 방향 및 Roll을 의미하고, 해석기준은 상관관계 계수가  $\pm 1$ 에 가까울수록 관련성이 높다는 것으로 판단할 수 있다. 여기서, 상관관계분석은 진공압박 정도를 다르게 적용한 그룹간의 차이를 보기 위한 사전분석으로 이용하였다.

본 연구에서 환자에게 적용된 진공압박 정도를 그룹으로

나뉘었으며, 각 그룹별에 대한 세 방향과 Roll에 대한 오차를 비교하기 위해 일원변량분석(ANOVA) 통계적 분석을 실시하였다. 일원변량분석은 두 집단 이상이 한 변수에 대한 평균의 차이를 검정할 때 사용되는 통계분석으로써 진공압박 정도를 요인으로 기준하여 각 방향에 대해 종속변수로 설정하였다.<sup>12)</sup> 모든 통계적 분석은 SPSS 14.0를 사용하였으며, 신뢰구간 95%, 유의수준 5%로 설정하였다.

## 결 과

Table 1에서는 본 연구를 위해 선정된 환자 21명의 정보를 보여주고 있으며, 병변 위치는 Lung (N=5), Liver (N=11), Pancreas (N=2), Kidney (N=2), CBD (N=1)이다. Bodyfix system을 이용하여 적용된 진공압박범위는 30~70 mbar이며, 환자수(N)는 30 mbar (N=5), 40 mbar (N=6), 50 mbar (N=3), 60 mbar (N=5), 70 mbar (N=2)이다.

Table 2에서는 총 477개의 MVCT영상을 토대로 각 방향에 대한 setup-errors를 보여주고 있다. Systematic errors의  $\mu$ 는 AP에서 6.00 mm,  $\Sigma$ 는 SI에서 5.95 mm로 큰 오차를 보였다. Roll ( $^{\circ}$ )에 대한  $\mu$ 과  $\Sigma$ 는 각각 0.05 $^{\circ}$ , 0.50 $^{\circ}$ 의 오차를 보였다. 모든 환자에 대한 Random errors의  $\sigma$ 는 SI에서 4.72 mm로 다른 방향에 비해 큰 오차를 확인할 수 있었다. 또한, Systematic errors와 Random errors를 이용하여 치료계획에서 CTV 처방선량(Prescribed dose: 99%)과 PTV 처방선량(Prescribed dose: 95%) 사이의 여백(Margin)을 정할 때

Stroom 등<sup>13)</sup>이 제시한 수식( $2\Sigma + 0.7\sigma$ )을 이용한 결과가 Table 2에서 보여주고 있으며, ML, SI, AP에서 각각 4.80 mm, 15.16 mm, 9.60 mm이다.

Table 3에서는 모든 환자에 대한 setup-errors의 ML, SI, AP과 Roll 및 3D-Vector 사이의 상관관계 분석결과를 보여 주고 있다. 세 방향과 Roll에 대한 상관계수는 ML-Roll, AP-Vector, SI-Vector에서 0.485, 0.244, 0.637로써 통계적으로 유의한 차이를 보였으며( $p < 0.001$ ), Roll에 따른 ML의 변화를 통계적 분석을 통해 알 수 있었다. 또한, Table 2에

서 보여주듯 SI에서 최대 오차(Mean: 6.01 mm)로 인하여 3D-Vector에 영향이 매우 큰 것으로 알 수 있었다.

마지막으로, 진공압박범위 내에서 다르게 적용된 다섯 그룹에 대하여 ANOVA 분석결과를 Table 4에서 볼 수 있다. 통계적으로 유의한 차이를 보여주는 ML, SI, Roll에서 확인할 수 있었다( $p < 0.05$ ). 특히, SI에서는 40 mbar를 적용한 그룹을 제외하고는 압박 정도가 높을수록 setup errors가 적어지는 경향을 확인할 수 있었다(Fig. 2). 이를 제외한 나머지 방향 및 Roll에 대해서는 Table 3의 결과로 볼 때 각 방향에 대한 상관관계와 연관이 큰 것으로 확인할 수 있었다(i.e. ML-Roll). 그러나, SI과 3D-Vector와의 상관계수로 볼 때 그룹간 통계적으로 유의한 차이를 볼 수 없었다(SI:  $p = 0.00$ , 3D-Vector:  $p = 0.217$ ).

**Table 1. Patient, applied vacuum pressure values and MVCT data characteristics.**

Patient	Sex	Age	Diagnosis	Vacuum pressure (mbar)	MVCT images (#)
1	F	45	Lung	30	15
2	M	68	Lung	30	10
3	M	42	Liver	30	25
4	M	43	Liver	30	10
5	M	60	Kidney	30	30
6	M	62	Lung	40	30
7	F	76	Liver	40	30
8	F	48	Liver	40	18
9	F	84	Liver	40	20
10	M	74	Pancreas	40	24
11	M	45	CBD	40	30
12	F	42	Liver	50	30
13	M	58	Liver	50	20
14	M	48	Liver	50	20
15	M	61	Lung	60	11
16	F	58	Lung	60	20
17	M	53	Liver	60	30
18	M	58	Liver	60	10
19	F	71	Kidney	60	20
20	M	60	Liver	70	30
21	F	59	Pancreas	70	30

## 고 찰

본 연구에서 흉복부 토모테라피 환자를 대상으로 Bodyfix

**Table 2. Setup errors depended on the directions for 21 patients (477 MVCT data sets).**

Direction	Displacement			
	$\mu$	$\Sigma$	$\sigma$	$2\Sigma + 0.7\sigma$
ML	1.67 mm	1.82 mm	1.65 mm	4.80 mm
SI	3.30 mm	5.93 mm	4.72 mm	15.16 mm
AP	6.00 mm	3.50 mm	3.71 mm	9.60 mm
Roll	0.05°	0.50°	0.44°	N/A
Vector	10.62 mm	3.22 mm	4.58 mm	9.65 mm

N/A: not applicable,  $\mu$ : average of systematic errors,  $\Sigma$ : standard deviation of systematic errors,  $\sigma$ : average standard deviation of random errors.

**Table 3. Correlation analysis of directional setup displacement for 21 patients by Pearson's product-moment coefficient.**

Directions	Inter-Construct correlations						
	Directions						
	Mean	SD	ML	AP	SI	Roll	Vector
ML	1.54 mm	2.58 mm	1.00				
SI	2.68 mm	7.49 mm	-0.67	1.00			
AP	6.02 mm	6.00 mm	-0.61	0.32	1.00		
Roll	0.05°	0.69°	-0.485 <sup>†</sup>	0.117*	-0.14	1.00	
Vector	10.23 mm	6.29 mm	0.55	0.242 <sup>†</sup>	0.637 <sup>†</sup>	-0.04	1.00

Mean: average of the over all patients, SD: standard deviation of the over all patients, \*Significance of these differences ( $p < 0.05$ ),

<sup>†</sup>Significance of these differences ( $p < 0.001$ ).

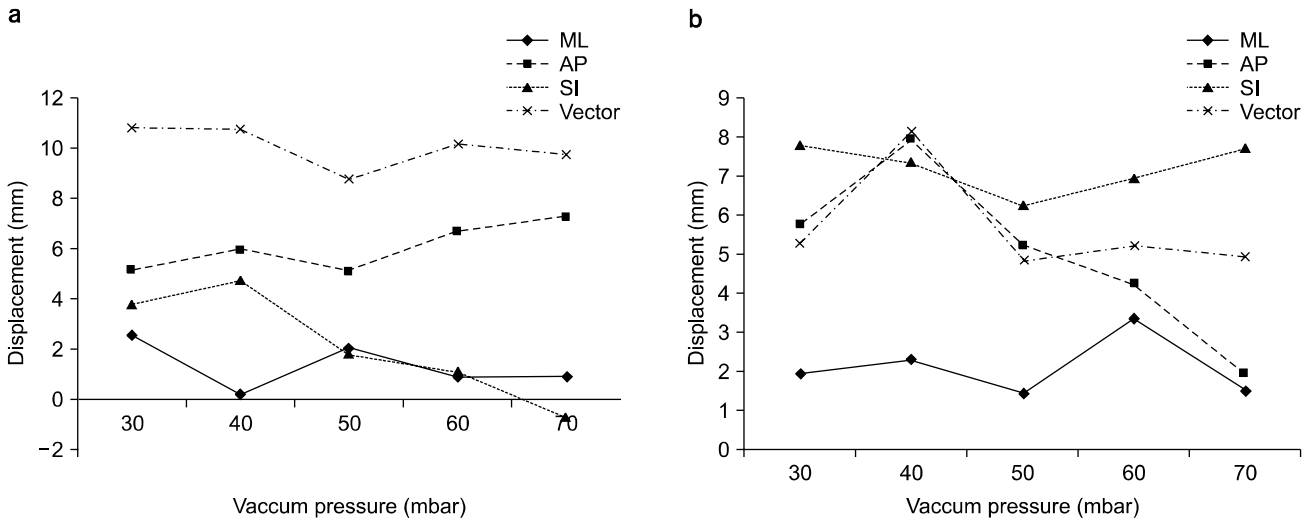


Fig. 2. Translation directions (ML, AP, SI) and 3D-Vector setup errors depending on the different applied Vacuum compression levels. (a) Mean of setup errors (b) SD of setup errors.

Table 4. Results of ANOVA test between directions and applied differently vacuum values groups.

Directions	Groups (mbar)	Mean	SD	F	P
ML (mm)	30	2.56	1.94	28.079	0.000 ( $p < 0.05$ )
	40	0.17	2.32		
	50	2.01	1.44		
	60	0.87	3.35		
	70	0.87	1.52		
SI (mm)	30	3.78	7.80	8.684	0.000 ( $p < 0.05$ )
	40	4.78	7.36		
	50	1.80	6.26		
	60	1.04	6.96		
	70	-0.74	7.70		
AP (mm)	30	5.16	5.76	1.916	0.107 ( $p > 0.05$ )
	40	6.00	7.98		
	50	5.09	5.22		
	60	6.69	4.23		
	70	7.31	1.93		
Roll (°)	30	-0.13	0.63	27.394	0.000 ( $p < 0.05$ )
	40	0.39	0.76		
	50	0.16	0.38		
	60	-0.41	0.64		
	70	0.03	0.37		
Vector (mm)	30	10.80	5.28	1.449	0.217 ( $p > 0.05$ )
	40	10.75	8.14		
	50	8.80	4.86		
	60	10.19	5.23		
	70	9.76	4.93		

system을 사용하여 진공압박에 따른 setup-errors를 평가하였다. 타 연구에서 고정기구에 대한 정확성 및 재현성을 평가한 바 있다. Fuss 등<sup>7)</sup>과 Nevinny-Stickel 등<sup>8)</sup>의 연구에서는 Bodyfix system을 사용할 때 오차를 분석하였으며, 그 정확성과 재현성이 높다고 언급한 바 있다. 그러나, 이는 진공압박을 최대로 설정하였으며, SBRT 환자를 대상으로 분석한 결과이다. 본 연구는 SBRT와 같이 정밀함이 요구되는 환자와는 다른 일반적인 토모테라피를 이용한 IMRT 환자를 대상으로 선정하였으며, 각 환자마다 진공압박이 다르게 적용되었다. 이런 이유는 환자의 신체에 따라 제작되는 고정기구와 환자 체표면 그리고, 비닐커버간의 접촉면적과 진공이 적용되는 공간이 다르며, 환자에 따라서 호흡근란, 압박으로 인한 불편감 등 여러 가지 이유로 제약이 따르기 때문이다.

많은 연구에서 고정기구 사용에 따른 setup-errors를 평가한 결과에서는 SI에 대한 오차가 제일 큰 것으로 확인된 바 있다.<sup>7-10,14)</sup> 이는 호흡에 따른 기하학적 움직임에 의한 것으로 볼 수 있으며, 본 연구에서 MVCT를 이용하여 오차를 분석한 결과와 일치한 것으로 나타났다. Han 등<sup>10)</sup>은 Bodyfix system를 사용하여 Cone-beam CT영상을 통해서 종양의 움직임을 평가한 결과 ML, AP, SI에서 평균 오차는 0.8 mm (0~2.5 mm), 0.9 mm (0~2.7 mm), 1.5 mm (0~5.7 mm)로 보고한 바 있다. Chen 등<sup>14)</sup>은 토모테라피에서 식도암환자 10명을 대상으로 총 250 MVCT를 분석한 결과 SI에서 Systematic errors는 -2.2 mm이고, Random errors는 4.8

mm로써 다른 방향 및 회전에 비해 큰 차이를 확인한 바 있다. 그러나, 본 연구에서 AP에 대해 Systematic errors의 평균과 표준편차는 각각 6.00 mm, 3.50 mm로써 SI에 비해 평균은 크지만 표준편차가 작다는 점을 알 수 있었으며, 이는 치료실에서 환자 위치잡이 시 재확인을 위해 표시한 고정기구의 기준선과 환자 체표면에 그려진 기준선간의 정확히 일치하지 못하는 점과 진공압박을 시행할 때 비닐커버로 인하여 피부가 밀려나는 현상으로 인한 납볼의 위치변화 때문이고, 치료 과정에 있어서도 GTV의 변화 등 여러 가지 이유로 예측된다.

본 연구에서는 GTV의 변화에 대해 평가를 못하였으며, 체중 및 나이 등에 따른 환자정보에 대해서는 고려하지 않았다. Chen 등<sup>14)</sup>은 식도암 환자를 대상으로 나이, 체중, 키 등에 따른 setup-errors와는 상관관계가 없다는 통계적 분석 결과를 언급한 바 있다. 이 결과로 볼 때 AP와 SI에서 치료 계획 시 PTV를 정할 때 여백이 많이 필요하다는 점을 나타내고 있으며, 매번 환자 위치잡이 시 AP, SI에 대해 고려해야 한다는 점을 확인할 수 있었다. 그러나, 폐, 간, 췌장과 같은 흉복부에 해당하는 종양은 위치, 체적변화 등으로 setup-errors가 다르게 나타날 수 있으며, 특히, 치료과정에서 환자의 체중 및 GTV체적변화를 들 수 있다.<sup>1,2,8,9)</sup>

Table 3에서 세 방향과 Roll 및 3D-Vector사이의 상관관계에서는 기하학적으로 Roll이 클수록 ML에 대한 보정이 필요함을 확인할 수 있었으며, 3D-Vector는 ML, SI에 대한 오차를 반영한다는 점을 알 수 있었다. 특히, SI의 오차로 인한 3D-Vector에서 큰 차이를 유발할 수 있다는 점이 상관관계를 통해 확인되었으며, Table 4에서는 다섯 그룹에 대한 분석결과 SI에서 유의한 차이를 확인할 수 있었다. 오차 평균은 4.78 mm, -0.74 mm로 각각 40 mbar과 70 mbar 그룹에서 확인할 수 있었다(Fig. 2). Heinzerling 등<sup>9)</sup>은 ACP 고정기구에서 최대압박이 평균압박보다 오차가 적었다는 점과 일치하지만, 본 연구에서 사용되는 고정기구는 진공도를 이용한 압박이며, 조절가능범위 20~100 mbar에서 9 단계가 실제 환자의 호흡을 최소화하기 위해 압박하는 정도와 매번 진공도가 일정한지에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 4D-CT 등을 이용한 내부장기(Internal organ)를 평가하지는 않았지만, Han 등<sup>10)</sup>의 연구에서 환자에게 적용된 진공압박을 분석한 결과는 평균 94 mbar (60~100 mbar)이고, 4D-CT을 통해서 종양의 움직임을 평가한 결과는 SI에서 평균 4.6 mm (0~22.4 mm)로 보고 된 바 있다. 이 결과와 본 연구에서 진공압박이 40 mbar (Mean: 4.78 mm), 50 mbar (Mean: 1.80 mm), 60 mbar (Mean: 1.04

mm)와 70 mbar (Mean: -0.74 mm)그룹의 결과를 종합해 볼 때 Bodyfix system을 이용한 진공압박을 적용 시 최소 50 mbar이상을 사용해야 setup-errors가 큰 SI에 대한 오차를 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

## 결 론

본 연구에서는 Bodyfix system을 이용하여 토모테라피 방사선치료를 시행한 21명의 흉, 복부 환자로부터 얻은 MV-CT영상을 토대로 Setup-errors를 통계적으로 분석하였으며, 진공압박(Vacuum compression)에 따라 SI방향에서 큰 오차를 줄 수 있다는 점을 확인하였다. 모의치료에서부터 환자 위치잡이 시 고정기구 제작, Laser alignment, Cushion 위치 그리고, 진공압박의 일관성이 Setup-errors를 줄일 수 있으며, 최종적으로 내부장기를 평가하는 Han 등<sup>10)</sup>의 연구결과를 비교했을 때 Bodyfix system을 이용한 진공압박을 적용 시 최소 50 mbar 이상을 사용해야 좋을 것이며, 치료성적을 향상시킬 수 있을 것이다. 추후 본 연구결과를 토대로 진공압박의 정확성과 내부장기 및 종양의 움직임을 정량적으로 판단할 예정이다.

## 참 고 문 헌

1. Stevens CW, Munden RF, Forster KM, et al: Respiratory driven lung tumor motion is independent of tumor size, tumor location, and pulmonary function. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 51:62-68 (2001)
2. Plathow C, Ley S, Fink C, et al: Analysis of intrathoracic tumor mobility during whole breathing cycle by dynamic MRI. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 59:952-959 (2004)
3. ICRU Report 62: Prescribing, recording and reporting photon beam therapy. International Commission on Radiation Units and Measurements, Supplement to ICRU Report 50 (1999)
4. Underberg RW, Lagerwaard FJ, Slotman BJ, Cuijpers JP, Senan S: Use of maximum intensity projections (MIP) for target volume generation in 4DCT scans for lung cancer. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 63:253-260 (2005)
5. Mackie TR, Holmes T, Swerdloff S, et al: Tomotherapy: A new concept for the delivery of dynamic conformal radiotherapy. *Med Phys* 20:1709-1719 (1993)
6. Mackie TR, Kapatoes J, Ruchala K, et al: Image guidance for precise conformal radiotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 56:89-105 (2003)
7. Fuss M, Salter BJ, Rassiah P, Cheek D, Cavanaugh SX, Herman TS: Repositioning immobilization system for stereotactic body radiation therapy. *Technol Cancer Res Treat* 3:59-67 (2004)
8. Nevinny-Stickel M, Sweeney RA, Bale RJ, Posch A,

- Auberger T, Lukas P:** Reproducibility of patient positioning for fractionated extracranial stereotactic radiotherapy using a double-vacuum technique. *Strahlenther Onkol* 180:117-122 (2004)
9. **Heinzerling JH, Anderson JF, Papiez L, et al:** Four-dimensional computed tomography scan analysis of tumor and organ motion at varying levels of abdominal compression during stereotactic treatment of lung and liver. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 70:1571-1578 (2008)
10. **Han K, Cheung P, Basran PS, Poon I, Yeung L, Lochray F:** A comparison of two immobilization systems for stereotactic body radiation therapy of lung tumors. *Radiotherapy and Oncology* 95:103-108 (2010)
11. **Bijhold J, Lebesque JV, Hart AA, Vijlbrief RE:** Maximizing setup accuracy using portal images as applied to a conformal boost technique for prostatic cancer. *Radiother Oncol* 24:261-271 (1992)
12. **송지순:** 논문작성에 필요한 SPSS/AMOS 통계분석방법. 21세기사, 경기 (2010), pp. 121-214
13. **Stroom JC, de Boer HC, Huizenga H, Visser AG:** Inclusion of geometrical uncertainties in radiotherapy treatment planning by means of coverage probability. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 43:905-919 (1999)
14. **Chen YJ, Han C, Liu A, et al:** Setup variations in radiotherapy of esophageal cancer: evaluation by daily megavoltage computed tomography localization. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 68:1537-1545 (2007)

## Evaluation of Setup Errors for Tomotherapy Using Differently Applied Vacuum Compression with the Bodyfix Immobilization System

Jae Hong Jung<sup>\*†</sup>, Kwang Hwan Cho<sup>†</sup>, Jeong Woo Lee<sup>†§</sup>, Min Joo Kim<sup>\*||</sup>, Kwang Chae Lim<sup>†</sup>,  
Seong Kwon Moon<sup>†</sup>, Yong Ho Kim<sup>†</sup>, Tae Suk Suh<sup>\*||</sup>

\*Department of Biomedical Engineering, The Catholic University of Korea College of Medicine, Seoul, †Department of Radiation Oncology, Soonchunhyang University Bucheon Hospital, Bucheon, ‡Department of Radiation Oncology, Konkuk University Medical Center, §Research Institute of Health Sciences, Korea University, ||Research Institute of Biomedical Engineering, The Catholic University of Korea College of Medicine, Seoul, Korea

The aim of this study is to evaluate the patient's setup errors in TomoTherapy (Hi-Art II, TomoTherapy, USA) Bodyfix system (Medical Intelligence, Elekta, Schwabmünchen, Germany) pressure in the vacuum compression, depending on and were evaluated. Bodyfix immobilization system and vacuum pressure was compression applied to the patients who received Tomotherapy thoracic and abdominal area, 21 patients were selected and Tomotherapy treatment total 477 of MVCT images were obtained. The translational (medial-lateral: ML, anterior-posterior: AP, superior-inferior: SI directions) and rolling were recorded and analyzed statistically. Using Pearson's product-moment coefficient and One-way ANOVA, the degree of correlation depending on the different vacuum pressure levels were statistically analyzed for setup errors from five groups ( $p < 0.05$ ). The largest average and standard deviation of systematic errors were 6.00, 5.95 mm in the AP and SI directions, respectively. The largest average of random errors were 4.72 mm in the SI directions. The correlation coefficients were 0.485, 0.244, and 0.637 for the ML-Roll, AP-Vector, and SI-Vector, respectively. SI-Vector direction showed the best relationship. In the results of the different degree of vacuum pressure in five groups (Pressure range: 30~70 mbar), the setup errors between the ML, SI in both directions and Roll  $p=0.00$  ( $p < 0.05$ ) were shown significant differences. The average errors of SI direction in the vacuum pressure of 40 mbar and 70 mbar group were 4.78 mm and -0.74 mm, respectively. In this study, the correlation between the vacuum pressure and the setup-errors were statistically analyzed. The fact that setup-errors in SI direction is dependent in vacuum pressure considerably setup-errors and movement of internal organs was identified. Finally, setup-errors, and it, based on the movement of internal organs in Bodyfix system we should apply more than 50 mbar vacuum pressure. Based on the results of this study, it is suggested that accuracy of the vacuum pressure and the quantitative analysis of movement of internal organs and the tumor should be studied.

**Key Words:** TomoTherapy, Bodyfix system, Vacuum compression, ANOVA