

Application of the ExacTrac System in Respiratory Gated Radiotherapy for Lung Cancer Patients

Seung Young Ko,¹ Jung Il Lee^{2,*}

¹Department of Medical Physics, Kyonggi University, Suwon

²Department of Radiation Oncology, CHA University School of Medicine

Received: May 24, 2019. Revised: June 27, 2019. Accepted: June 30, 2019

ABSTRACT

This study analyzed the movement of tumors using 4DCT. Appropriate uniform IM were identified using TC, II and CI depending on ITV margins. DVH and NTCP were also compared in each case. Dose analysis on tumors with uniform IM showed that the optimal treatment plan for satisfying all TC, CI, II was evaluated as 2 mm in phase 20 and 3 mm in 40%. That was compared to the dose from the normal tissues of PTV₂₀, PTV₄₀. In the 20% radiation field, V5, V10, and V20 for the lungs increased 1.49, 1.26, and 0.65%, while 40% increased by 1.9, 2.41 and 1.23%. NTCP had a dose increase of 0.57 to 0.029% from 20% and 40%. There was a dose increase in the spinal cord and heart at uniform IM, but there was no significant difference. These data suggest that the ITV setting of 20%, phase for Respiratory Gated Radiotherapy using Novalis ExacTrac system can be applied with a uniform IM 2 mm and 40% with 3 mm for optimal treatment plan.

Keywords: Respiration gated radiotherapy, Internal margin, ExacTrac system

I . INTRODUCTION

최근 호흡 모니터링 시스템의 개발로 환자의 호흡 주기를 이용하여 일정 주기에만 방사선을 조사하는 호흡연동방사선치료(Respiration gated radiotherapy)가 시행되고 있다. 이와 같은 치료법은 정확한 시점 및 정확한 위치에 빔이 전달되어야 장점을 극대화 할 수 있다.^[1] 하지만 환자의 호흡에 의한 종양과 내부 장기의 움직임은 선량분포의 오차를 발생시키며, 이 효과는 특히 흉부와 복부에서 두드러지게 나타난다.^[2,3] 정상적인 호흡에서 폐종양 움직임의 크기는 종양의 위치와 환자에 따라서 20 mm 이상 일 수도 있으며, 실제 측정하지 않고서는 미리 예측하기 어려운 환자 특이적인 양상을 나타낸다.^[4,5] 따라서 계획용표적체적(PTV; Planning Target Volume) 결정시 통상적인 균일한 내부여유(IM; Internal Margin)가 사용되었을 때 실제 움직임이 추

정된 평균적인 움직임 보다 클 경우 표적에 대한 기하학적 누락(geometric miss)을 나타낼 수 있고 충분한 내부여유를 확보 할 경우 정상조직이 불필요하게 피폭되어 정상조직합병증확률(NTCP; Normal Tissue Complication Probability)이 증가 할 수 있다. Novalis ExacTrac™ 시스템(BrainLAB, Germany)을 사용하는 호흡연동방사선치료는 종양의 실시간 추적은 가능하지만 치료 계획 단계에서는 호흡에 따른 종양의 움직임을 예측할 수가 없다. 따라서 PTV 결정 시 내부표적체적(ITV; Internal target volume)은 통상적으로 균일한 IM이 사용되고 있다. 이는 종양의 움직임과 방사선 조사영역(Beam on area)의 결정에 따라 표적의 기하학적 누락 또는 정상조직에 불필요한 피폭이 있을 수 있다. 따라서 본 연구는 폐의 하엽에 위치한 종양을 대상으로 정위적체부방사선수술(SBRT; Stereotactic Body Radio Surgery)시 4차원단층촬영(4DCT; 4-Dimensional

* Corresponding Author: Jung Il Lee

E-mail: jileeeee@chamc.co.kr

Tel: +82-31-780-5430

Computed Tomography)을 적용한 호흡연동방사선 치료와 ExacTrac 시스템을 이용하여 균일 IM을 적용한 호흡연동방사선치료를 비교하였다. 여러 인자들을 적용하여 방사선이 조사되는 영역에 따라 적합한 균일 IM 크기를 확인하고 그에 따른 선량분포 결과를 분석하였다. 4DCT를 기반으로 한 선량분포와 비교하여 ExacTrac 시스템을 이용한 호흡연동방사선치료에서 방사선 조사 영역에 따른 적절한 균일 IM을 확인하고 유용성을 평가하고자 하였다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. 연구대상 및 4DCT 영상 획득

본 연구는 작은 표적 용적으로 SBRT가 가능한 10명의 폐종양 환자를 대상으로 하였다. The Varian Real-time Position Management™(RPM, Varian Medical Systems, Palo Alto, CA) 호흡연동 시스템을 이용하여 4DCT 촬영을 시행하였다. CT scanner (Light Speed RT, GE, USA)는 16채널로서 RPM과 연동되어 호흡연동 촬영이 가능한 장비이다. 각 환자의 4차원 CT 영상은 화소 크기 0.84 mm, 512 × 512의 해상도와 2.5 mm 슬라이스 두께 120 kVp 관전압, 400 mA 관전류의 조건으로 하였다. ExacTrac 시스템의 경우 위상(Phase)방식인 RPM과 다르게 호흡 신호를 진폭(Amplitude) 방식으로 기록하기 때문에 전체 호흡의 범위를 알 수 있는 RPM의 0(최대 흡기)~50(최대 호기)%까지 6시리즈의 영상을 획득하였다. 그리고 치료계획 시스템(I-plan 3.0.2, Brain-Lab, Germany)의 Intensity based 알고리즘을 이용하여 각 시리즈를 영상접합(image fusion) 하였으며, 모든 환자의 영상은 최대 흡기와 최대 호기를 제외한 중간 시리즈 (20%)를 Reference Level CT로 설정하고 영상 접합의 기준으로 하였다. 영상접합의 정확성과 치료시 준비오차를 줄이기 위하여 정위신체고정틀(Stereotactic body frame)을 사용하였다.

2. PTV 설정 및 치료계획 수립

0(최대흡기)~50(최대호기)% 호흡 주기에서 획득한 각각의 CT 영상은 ExacTrac 시스템의 위상 0% (최대 호기)~100%(최대 흡기)로 설정하였다. 그리고 한 사람의 방사선종양학과 의사가 6시리즈의

CT 영상에 각각의 육안적종양체적(GTV; Gross Tumor Volume)을 설정하였고 임상표적체적(CTV; Clinical Target Volume)은 GTV와 동일시 하였다. PTV는 치료 위치 설정 오차를 고려하여 GTV에 삼차원 등 방향으로 3 mm의 여유를 부여하여 설정하였다. 이는 영상 접합에 따른 오차 1 mm와 Novalis 선형가속기의 기계적 오차 1 mm, GTV 설정 시 발생하는 오차 1 mm를 고려한 값이다. 종양의 체적에 대한 설정은 AAPM(American Association of Physicists in Medicine) Task Group 101의 SBRT 프로토콜을 참고하였다.^[6] 각각의 PTV는 Reference Level로 설정되는 20% 위상의 CT로 전송하였고 전송된 각각의 PTV는 위상 i에 따른 호흡에 의한 ITV가 고려된 PTV_i(i; 20, 40, 60, 100)로 재구성하였다. 예를 들어 ExacTrac 시스템의 위상 0~20% 방사선 조사 영역을 설정할 경우에는 호흡 위상 0%와 20% CT에 그려진 PTV가 더해진 PTV₂₀으로 재구성하였다. Helical CT를 기반으로 한 호흡연동방사선치료와의 비교를 위해 Reference Level(20%) CT의 PTV에 균일 IM를 적용한 PTV_{20%+1mm}~PTV_{20%+5mm}까지 5개의 PTV를 설정하였으며, Fig. 1에 나타내었다.

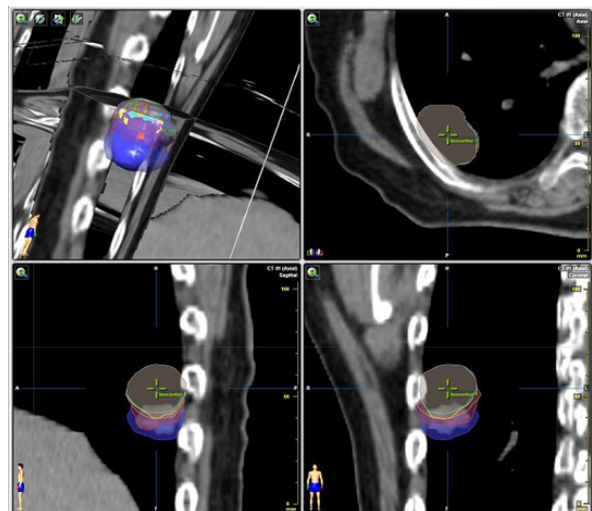


Fig. 1. Transverse, sagittal and coronal view of all phase planning target volumes. Line color: Skyblue (PTV100%), Yellow (PTV60%), Orange (PTV40%), Purple (PTV20%), Blue (PTV0%).

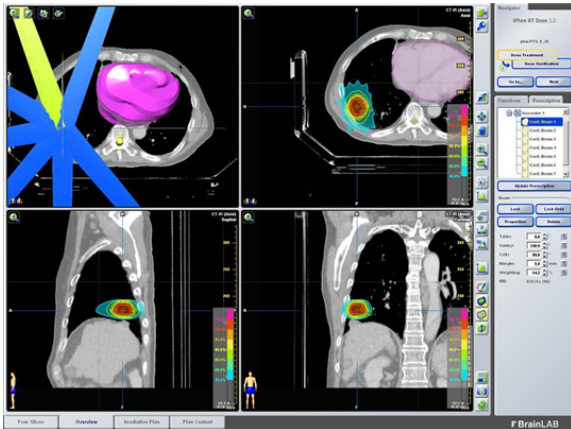


Fig. 2. 3D radiation therapy planning for patient using 4DCT with I-plan system.

치료계획은 Reference Level(20%) CT에서 한 명의 환자에 설정된 9개의 PTV를 이용하여 7~9개 빔을 사용하여 모든 PTV에 동일한 인자(parameter)를 이용하여 치료계획을 하였다. 처방선량은 PTV에 1일 1회 12 Gy씩 총 48 Gy의 선량이 전달되도록 하였으며, 다엽조준기(MLC; Multileaf Collimator)의 여유 5 mm를 더하여 치료계획 목표 제한치는 AAPM Task Group 101의 SBRT 프로토콜에 따라 PTV의 100% 용적이 최소 43.2 Gy(90%)의 선량이 부여되고 최대 선량은 50.4 Gy(105%) 미만 되도록 계획하였으며, Fig. 2와 같다.

3. 치료계획 평가 및 분석

3.1 방사선 조사 영역에 따른 균일 IM 평가

방사선 조사 영역에 따른 균일한 IM 적용 시 종양에 대한 선량 분석은 Yaparalvi *et. al.*의 연구결과를 참고하였다.^[7] PTV_{20%+1~5mm}에 대한 최소 표적포함범위(TC; Target coverage), 불균일성 지수(II; Inhomogeneity index) 그리고 일치도 지수(CI; Conformity index)를 비교하였다. 최소 TC는 90% 처방선량을 목표로 치료계획을 설정하였으므로 종양이 받는 선량이 최소 90% 이상 될 때 최적으로 평가하였다. II는 PTV의 최대선량에서 PTV의 최소 선량 차이에 PTV의 최대선량의 비율로 정의되며, 0에 가까울수록 최적의 방사선치료계획이라 평가할 수 있다. 일치도 지수는 종양체적과 등선량에

의한 체적의 윤곽 사이의 관계로부터 절대값을 얻는 것으로 정의되며, 조사된 선량의 질을 결정한다. 정상조직이 받는 선량의 체적(V_{normal})과 PTV가 받는 선량의 체적(V_{PTV})의 비율을 수치화하여 1.0~2.0값이 최적의 치료계획이고 1.0이하 또는 2.0이상은 좋지 않은 것으로 평가한다.

$$II = \frac{PTV_{max.dose} - PTV_{min.dose}}{PTV_{max.dose}} \quad (1)$$

$II \approx 0$ = excellent

$$CI = 1 + \frac{V_{normal}}{V_{PTV}}$$

$CI \approx 1.0 \sim 2.0$: excellent

0.9 ~ 1.0 or 2.0 ~ 2.5 : minor deviation

2.5 < : major deviation

3.2 선량적 비교

각각 다른 방법의 선량적 차이를 평가하기 위하여 PTV₂₀, PTV₄₀, PTV₆₀, 그리고 PTV₁₀₀에 대한 폐, 심장, 척수에 조사되는 선량을 비교하였다. 치료계획 시스템을 이용한 선량계산을 바탕으로 각 위상의 선량체적히스토그램(DVH: Dose Volume Histogram)을 추출하였고 심장과 척수는 최대선량을 비교하였다. 그리고 폐의 조사되는 선량은 방사선 폐렴과 밀접한 관련이 있는 5 Gy 이상 받는 폐용적(V_5), 10 Gy 이상 받는 폐용적(V_{10}), 그리고 20 Gy 이상 받는 폐용적(V_{20})을 비교하였으며, PTV에 따른 방사선 폐렴 발생 확률을 예측하기 위해 NTCP 곡선에 DVH를 대입하여 NTCP 값을 도출하였다.^[8] NTCP는 Lyman Kutcher Burman 모델에 Emami 등의 자료를 적용하였고, 선량부피 곡선을 이용하여 등가균일선량(EUD; Equivalent uniform dose)법으로 계산하였다. 균일 IM(1~5 mm)에 따른 정상조직의 손상 정도를 비교하기 위하여 동일한 방법으로 평가하였다. 본 연구에서 사용한 LKB NTCP 모델은 Eq. (2)와 같다.^[9]

$$NTCP = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

$$t = \frac{EUD - TD_{50}}{m \cdot TD_{50}} \quad (2)$$

$$EUD_{LKB} = \left(\sum_i D_i^n \frac{V_i}{V} \right)^{\frac{1}{n}}$$

TD50 : 50% tolerance dose in 5 years

EUD : equivalent uniform dose

n, m : tissue-specific parameter

D_i : dose element

V_i : Volume element

Parameter for complication (pneumonitis)

TD50=24.5, n=0.87, m=0.18

III. RESULT

1. 방사선 조사 영역에 따른 균일 IM의 치료계획 분석

방사선 조사 영역에 따른 균일 IM 적용 시 종양에 대한 선량 분석 결과로 최소 TC는 Table 1, CI는 Table 2, 그리고 II는 Table 3에 정리하였다.

최소 TC는 20% 방사선 조사 영역을 설정하였을 경우 모든 IM에서 처방하고자 하였던 90% 이상의 선량을 보였지만 PTV_{20%+1mm}에서는 2명의 환자에 있어서 누락이 있었다. 40%에서는 PTV_{20%+3mm}, PTV_{20%+4mm}, PTV_{20%+5mm}에서 92.5 ± 2.7, 93.6 ± 2.0, 94.5 ± 1.5로 IM 3 mm 이상에서 처방선량 이상의 값을 보였다. 60%는 평균적으로 모든 IM에서 처방선량에 많은 기하학적 누락이 보였지만 종양의 움직임 크기에 따라 PTV_{20%+5mm}에서는 3명의 환자를 제외한 7명은 90% 이상을 만족하였다.

CI는 20%에서 PTV_{20%+1mm}, PTV_{20%+2mm}에서 평균 1.61 ± 0.26, 1.77 ± 0.30으로 1.0~2.0의 최적의 치료계획 범위에 만족하였다. 40%는 PTV_{20%+1mm}, PTV_{20%+2mm}, PTV_{20%+3mm}에서 1.42 ± 0.23, 1.54 ± 0.24, 1.81 ± 0.25의 값으로 3 mm 이하에서 좋은 결과가 보였지만 PTV_{20%+3mm}에서 2명의 환자는 2.1 이하의 값을 보였다. 60%는 PTV_{20%+1mm~5mm} 모두 최

적의 치료계획으로 평가되었다. 60%역시 PTV_{20%+4mm}, PTV_{20%+5mm}에서는 2를 넘는 환자가 있었다.

II는 0에 가까울수록 최적의 치료계획으로 0~0.15의 범위에서 좋은 치료계획으로 평가하였다. 20%는 모든 IM에서 최적의 결과를 보였다. 40%는 PTV_{20%+3mm}, PTV_{20%+4mm}, PTV_{20%+5mm}에서만 최적의 치료계획으로 평가되었다. 하지만 60% 범위에서는 모든 IM에서 좋은 치료계획으로 평가될 수 없었다.

위의 각각의 지표를 모두 고려하여 20% 방사선 조사 영역을 설정할 때는 2 mm 균일 IM이 최적의 치료계획이었고 40%는 CI에서 2명의 환자가 2.1 이하의 수치를 보였으나 3 mm 균일 IM이 최적의 치료계획으로 평가되었다. 60%는 1~5 mm 모두 부적합한 치료계획으로 평가되었지만 환자의 특성에 따라 많은 차이가 있는 것으로 확인되었다.

2. 호흡연동 방사선치료의 선량 적 이득

폐의 조사되는 선량은 5 Gy 이상 받는 폐용적 (V₅) 20, 40, 60, 100% 위상에서 평균 26.07, 27.92, 29.8, 33.51%로 방사선 조사 영역이 증가할수록 용적도 증가되는 것을 볼 수 있었다. V₅의 PTV₂₀~PTV₁₀₀의 평균 증가율은 7.44%였으나 환자별로 최대 15.8%의 차이를 보였다. V₁₀은 16.71, 18, 19.86, 22.65%로 평균 5.94%, 최대 12.1% 증가하였다. V₂₀은 평균 2.71, 최대 5.5% 증가하였다. 폐에 조사되는 선량 차이는 위상이 증가할수록 저 선량 영역에서 많은 차이를 보이는 것을 Fig. 3을 통해 확인할 수 있다.

NTCP를 예측하여 보았을 때 20, 40, 60, 100% 위상의 평균은 0.322, 0.411, 0.506, 0.952%로 0.63% 증가하였다. Fig. 4와 같이 평균적으로 큰 증가율을 보이지 않았지만 방사선 조사 영역 설정이 커질수록 급격한 증가가 있었다.

Fig. 5는 척수와 심장에 조사되는 선량을 나타낸다. 척수에 조사되는 PTV₂₀~PTV₁₀₀의 평균선량의 차이는 0.73 Gy, 최대선량의 차이는 1.34 Gy로 큰 차이를 보이지 않았다. 심장의 평균선량 차이는 1.95 Gy, 최대선량차이는 6.07 Gy를 보였다. 척수와 심장의 선량은 방사선 조사 영역 설정에 따른 PTV

용적보다 종양의 위치에 따라 큰 차이를 보였다. 폐, 척수, 심장에서 호흡연동방사선치료는 PTV

용적, 종양의 움직임 크기, 위치에 따라 이점이 있었다.

Table 1. The target coverage according to uniform margin from beam on area.

Target coverage (mean% ± SD)					
Beam on area	PTV _{20%} +1mm	PTV _{20%} +2mm	PTV _{20%} +3mm	PTV _{20%} +4mm	PTV _{20%} +5mm
0 ~ 20%	91.1 ± 6.8	92.6 ± 2.4	94.9 ± 2.4	95.4 ± 1.9	95.8 ± 1.6
0 ~ 40%	83.6 ± 9.3	86.0 ± 6.8	92.5 ± 2.7	93.6 ± 2.0	94.5 ± 1.5
0 ~ 60%	54.1 ± 36	56.0 ± 3.6	69.7 ± 3.3	72.3 ± 3.2	74.7 ± 3.1

Table 2. The Conformity index according to uniform margin from beam on area.

Conformity index (mean ± SD)					
Beam on area	PTV _{20%} +1mm	PTV _{20%} +2mm	PTV _{20%} +3mm	PTV _{20%} +4mm	PTV _{20%} +5mm
0 ~ 20%	1.61 ± 0.26	1.77 ± 0.30	2.09 ± 0.32	2.34 ± 0.41	2.55 ± 0.46
0 ~ 40%	1.42 ± 0.23	1.54 ± 0.24	1.81 ± 0.25	2.03 ± 0.33	2.22 ± 0.38
0 ~ 60%	1.35 ± 0.24	1.45 ± 0.25	1.64 ± 0.25	1.84 ± 0.32	1.98 ± 0.36

Table 3. The Inhomogeneity index according to uniform margin from beam on area.

Inhomogeneity index (mean ± SD)					
Beam on area	PTV _{20%} +1mm	PTV _{20%} +2mm	PTV _{20%} +3mm	PTV _{20%} +4mm	PTV _{20%} +5mm
0 ~ 20%	0.12 ± 0.08	0.11 ± 0.06	0.08 ± 0.03	0.08 ± 0.02	0.07 ± 0.32
0 ~ 40%	0.19 ± 0.09	0.17 ± 0.06	0.11 ± 0.03	0.10 ± 0.02	0.09 ± 0.02
0 ~ 60%	0.48 ± 0.35	0.46 ± 0.35	0.32 ± 0.33	0.30 ± 0.31	0.27 ± 0.31

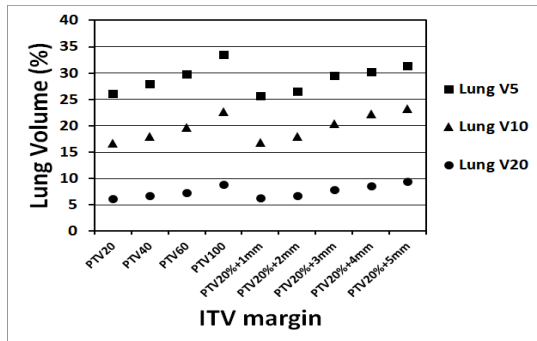


Fig. 3. PTV margin according to 5, 10, and 20% of lung volume receiving dose for patients.

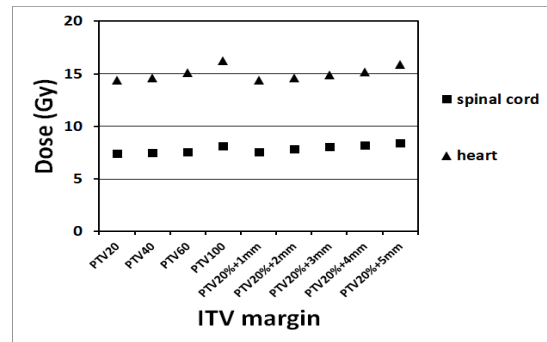


Fig. 5. PTV margin according to maximum spinal cord dose for patients.

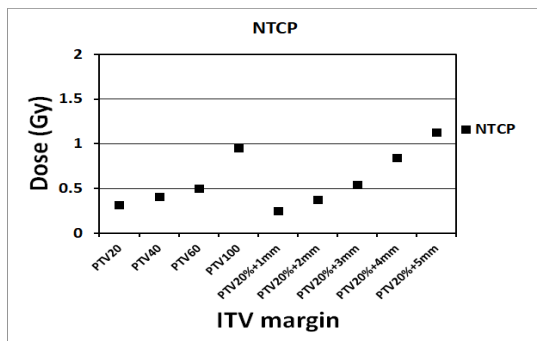


Fig. 4. PTV margin according to normal tissue complication probability for 10 patients with lung cancer.

IV. DISCUSSION & CONCLUSION

본 연구는 폐암 환자의 방사선수술에 ExacTrac 시스템을 이용하여 호흡연동방사선치료를 적용함에 있어서 적절한 IM을 확인하기 위하여 여러 예측 인자들을 확인하고 분석하였다. 적절한 균일 IM을 적용하기 위한 종양 선량분석 결과 최소 TC, II CI의 조건을 만족하는 균일 IM은 종양의 움직임에 따라 각 환자의 측정값은 차이가 있었으나 공통적으로 20% 방사선 조사 영역을 설정하였을 경우

PTV_{20%+2mm}, 40%는 PTV_{20%+3mm}에서 모든 조건을 만족하는 최적의 치료계획으로 평가되었다.

PTV_{20%+2mm}, PTV_{20%+3mm}의 폐선량을 4DCT를 적용한 PTV₂₀, PTV₄₀과 비교하였을 때 증가하였지만 그 차이는 크지 않았다. 방사선 폐렴에 대한 예측값으로 NTCP 역시 균일 IM에서 작은 증가를 보였으나 PTV₁₀₀과 비교에서는 많은 이점이 있었다. Tommasino *et. al.*의 연구결과에서처럼 NTCP의 정확도는 50~80% 정도로 방사선폐렴의 발생을 정확하게 예측할 수는 없지만 실질적인 생물학적 영향을 평가하는 지표로 사용된다.^[10] 현재 많은 연구결과에서 4DCT를 적용한 호흡연동방사선치료에 의한 폐 선량 감소율은 이미 입증되었다. Underberg *et. al.*의 연구결과에 의하면 15명의 병기 3기 폐종양에 균일 IM 10 mm를 적용하였을 때 보다 4DCT를 적용하여 호흡연동방사선치료를 하였을 때 V₂₀은 39.1%의 감소율이 보고되었다.^[11] Brtnett *et. al.*은 Active breath control 방법을 사용한 환자에서 통상적인 15 mm IM과 4DCT를 이용한 PTV 적용 시 21%의 V₂₀ 감소율이 있었고 호흡연동방사선치료를 통해 5~7% 추가적인 감소율이 있다고 보고하였다.^[12] 본 연구에서도 호흡의 위상에 따라 V₅, V₁₀, V₂₀에서 각각 평균 7%, 5.94%, 2.71% 선량감소로 비슷한 결과가 평가되었으며 방사선 조사 영역에 따른 적절한 균일 IM의 사용 또한 비슷한 선량 이득이 있었다.

최근에는 움직임에 의한 불필요한 선량을 감소하기 위하여 환자의 일정 호흡주기에만 방사선을 조사하는 호흡연동방사선치료에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 호흡에 따른 폐종양의 움직임은 일반적으로 예측되기 힘든 환자 특이적인 양상을 보이며, 특히 하엽에 위치한 종양들에서 큰 움직임들이 공통적으로 보고되었다.^[13-15] 일반적인 호흡연동방사선치료는 4DCT와 결합하여 치료계획 단계에서부터 움직임에 따른 호흡주기를 고려하여 치료가 결정되지만 Novalis ExacTrac 시스템은 종양의 움직임을 예측하여 균일 IM이 사용된다. 하지만 적절한 IM이 사용되지 않을 시에는 종양의 기하학적 누락 또는 정상조직에 과도한 선량 증가가 따른다. 따라서 본 논문에서 제시한 적절한 균일 IM의

사용으로 효율적인 호흡연동방사선치료가 가능할 것으로 예상된다.

본 연구를 통해 Novalis ExacTrac 시스템을 이용하여 호흡연동방사선치료 시 방사선 조사 영역에 따른 균일 IM의 유용성을 확인하였다. 하지만 4DCT 사용의 제한이 있는 Novalis ExacTrac 시스템만을 위한 것이며 특정 호흡주기에서 치료되는 방법 이외의 치료에서는 지양되어야 할 것이다. 그리고 환자 특성에 따라 호흡연동방사선치료를 적용하는데 따른 치료시간을 고려하여야 하며 치료 전 호흡에 대한 연습이 필요할 것이다. 또 본 연구를 통해 얻어진 결과를 효율적으로 임상에 적용하기 위해서는 4DCT 영상의 왜곡(artifact) 또한 해결되어야 할 것이며 좀 더 많은 환자를 대상으로 좀 더 세밀한 연구가 이루어져야 될 것이다.

결론적으로 종양의 움직임이 큰 폐암 환자에서 ExacTrac 시스템을 이용한 호흡연동방사선치료 시 방사선 조사 영역에 따라 20% 이내는 2 mm, 40% 이내는 3 mm의 균일 IM 적용으로 4DCT를 적용한 호흡연동방사선치료와 비슷한 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

Reference

- [1] W. P. Hogle, "The state of the art in radiation therapy," *Seminars Oncology Nursing*, Vol. 22, No. 4, pp. 212-220, 2006.
- [2] C. G. Willett, R. M. Linggood, M. A. Stracher, M. Goiten, K. Doppke, D. C. Kushner, T. Morris, J. Pardy, R. Carroll, "The effect of respiratory cycle on mediastinal and lung dimensions in Hodgkin's disease," *Cancer*, Vol. 60, No. 6, pp. 1232-1237, 1987.
- [3] G. S. Mageras, A. Pevsner, E. D. Yorke, K. E. Rosenzweig, E. C. Ford, A. Hertanto, S. M. Larson, D. M. Lovelock, Y. E. Erdi, S. A. Nehmeh, J. L. Humm, C. C. Ling, "Measurement of lung tumor motion using respiration-correlated CT," *International journal of radiation oncology, biology, physics*, Vol. 60, No. 3, pp. 933-941, 2004.
- [4] P. J. Keall, G. S. Mageras, J. M. Balter, S. B. Jiang, J. M. Kapatoes, D. A. Low, M. J. Murphy, B. R. Murray, C. R. Ramsey, M. B. Van Herk, S. S.

- Vedam, J. W. Wong, E. Yorke, "The management of respiratory motion in radiation oncology report of AAPM Task Group 76," *Medical physics*, Vol. 33, No. 10, pp. 3874-3900, 2006.
- [5] J. M. Balter, R. K. Ten Haken, T. S. Lawrence, K. L. Lam, J. M. Robertson, "Uncertainties in CT-based radiation therapy treatment planning associated with patient breathing," *International journal of radiation oncology, biology, physics*, Vol. 36, No. 1, pp. 167-174, 1996.
- [6] S. H. Benedict, K. M. Yenice, D. Followill, J. M. Galvin, W. Hinson, B. Kavanagh, P. Keall, M. Lovelock, S. Meeks, L. Papiez, T. Purpie, R. Sadagopan, M. C. Schell, B. Salter, D. J. Schlesinger, A. S. Shiu, T. Solberg, D. Y. Song, V. Stiever, R. Timmerman, W. A. Tome, D. Verellen, L. Wang, F. F. Yin, "Stereotactic body radiation therapy: the report of AAPM Task Group 101," *Medical physics*, Vol. 37, No. 8, pp. 4078-101, 2010.
- [7] R. Yaparalvi, K. M. Garg, J. Shen, W. R. Bodner, D. K. Mynampati, A. Gafar, H. C. Kuo, A. K. Basavatia, N. Ohri, L. X. Hong, S. Kalnicki, W. A. Tome, "Evaluating which plan quality metrics are appropriate for use in lung SBRT," *The British journal of radiology*, Vol. 91, No. 1083, pp. 20170393, 2018.
- [8] R. B. Barriger, J. A. Forquer, J. G. Brabham, D. L. Andolino, R. H. Shapiro, M. A. Henderson, P. A. Johnstone, A. J. Fakiris, "A dose-volume analysis of radiation pneumonitis in non-small cell lung cancer patients treated with stereotactic body radiation therapy," *International journal of radiation oncology, biology, physics*, Vol. 82, No. 1, pp. 457-62, 2012.
- [9] X. Liang, J. Penagaricano, D. Zheng, S. Morrill, X. Zhang, P. Corry, R. J. Griffin, E. Y. Han, M. Hardde, V. Ratanatharathom, "Radiobiological impact of dose calculation algorithms on biologically optimized IMRT lung stereotactic body radiation therapy plans," *Radiotherapy oncology*, Vol. 11, pp. 10, 2016.
- [10] F. Tommasino, A. Nahum, L. Cella, "Increasing the power of tumour control and normal tissue complication probability modelling in radiotherapy: recent trends and current issues," *Translational Cancer Research*, Vol. 6, No. S5, pp. S807-S821, 2017.
- [11] R. W. Underberg, F. J. Lagerwaard, B. J. Slotman, J. P. Cuijpers, S. Senan, "Benefit of respiration-gated stereotactic radiotherapy for stage I Lung cancer: an analysis of 4DCT datasets," *International journal of radiation oncology, biology, physics*, Vol. 62, No. 2, pp. 554-560, 2005.
- [12] S. S. Burnett, K. E. Sixel, P. C. Cheung, J. D. Hoisak, "A study of tumor motion management in the conformal radiotherapy of lung cancer," *Radiotherapy and oncology*, Vol. 86, No. 1, pp. 77-85, 2008.
- [13] V. A. Semenenko, A. Li. X, "Lyman-Kutcher-Burman NTCP model parameters for radiation pneumonitis and xerostomia based on combined analysis of published clinical data," *Physics in medicine and biology*, Vol. 53, No. 3, pp. 737-755, 2008.
- [14] Y. C. Ahn, S. Shimizu, H. Shirato, T. Hasgimoto, Y. Osaka, X. Q. Zhang, T. Abe, K. Miyasaka, "Application of real-time tumor-tracking and gated radiotherapy system for unresectable pancreatic cancer," *Yonsei medical journal*, Vol. 45, No. 4, pp. 584-590, 2004.
- [15] S. Shimizu, H. Shirato, S. Ogura, H. Akita-Dosaka, K. Kitamura, T. Nishioka, K. Kagei, M. Nishimura, K. Miyasaka "Detection of lung tumor movement in real-time tumor-tracking radiotherapy," *International journal of radiation oncology, biology, physics*, Vol. 51, No. 2, pp. 304-310, 2001.

폐암 환자의 호흡연동방사선치료를 위한 ExacTrac 시스템 적용

고승영,¹ 이정일^{2,*}

¹경기대학교 의학물리학과

²차 의과학대학교 방사선종양학과

요 약

본 연구는 4DCT를 이용하여 종양의 움직임을 분석하였다. ITV 여유에 따른 TC, II, CI를 이용하여 적절한 균일 IM을 확인하였다. 또한 각각의 경우에서 DVH와 NTCP를 비교하였다. 균일 IM 적용 시 종양에 대한 선량 분석 결과 TC, CI, II를 모두 만족하는 최적의 치료계획은 20% 위상에서 2 mm, 40%는 3 mm로 평가되었다. 이를 PTV₂₀, PTV₄₀의 정상조직에 조사되는 선량과 비교하였다. 20% 방사선 조사 영역에서 폐에 대한 V₅, V₁₀, V₂₀은 1.49, 1.26, 0.65% 증가하였고 40%는 1.9, 2.41, 1.23% 증가하였다. NTCP 역시 20%와 40% 각각 0.57, 0.029% 선량 증가가 있었지만 PTV₁₀₀ 보다 확실한 이점이 있었다. 척수와 심장은 각각 균일 IM에서 선량증가는 있었지만 큰 차이는 없었다. Novalis ExacTrac 시스템을 이용하여 호흡연동방사선치료 시 20% 위상의 ITV설정은 균일 IM 2 mm, 40%는 3 mm를 적용함에 있어서 종양선량의 기하학적 누락 없이 최적의 치료계획을 할 수 있음을 확인하였다.

중심단어: 호흡연동방사선치료, 내부 여유, ExacTrac system

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	고승영	경기대학교 대학원 의학물리학과	대학원생(박사)
(교신저자)	이정일	차 의과학대학교	교수