

환자고유의 호흡 패턴을 적용한 호흡 연습장치 개발 및 유용성 평가

가톨릭대학교 의과대학 *의공학교실, †생체의공학연구소

강성희*[†] · 윤제웅*[†] · 김태호*[†] · 서태석*[†]

본 연구에서는 환자 고유의 호흡 패턴을 적용하여 호흡의 규칙성을 향상 시킬 수 있는 호흡 연습장치(respiratory training system)를 개발하여, 호흡에 의한 움직임이 고려된 4D-RT (4-dimension radiation therapy) 또는 4D-CT (4-dimension computed tomography) 수행 시 효율성과 정확성을 높이고자 했다. 개발한 호흡연습장치는 푸리에 급수(Fourier series)를 기반으로 환자 고유의 호흡패턴을 만들어 환자에게 편안한 호흡 유도를 제공한다. 호흡연습장치를 사용했을 때 호흡의 규칙성 향상 정도를 알아보기 위하여 5명의 지원자를 대상으로 실험을 진행하였다. 10개의 자유호흡신호를 획득하여 실험 대상자의 고유한 호흡패턴(guiding waveform)을 만들고, 자유호흡(free breathing)을 3분 동안 시행한 후, 고유한 호흡패턴을 이용하여 호흡을 유도하는 신호모니터-호흡(guide breathing)을 3분 동안 시행하여 데이터를 획득하였다. 획득된 자유호흡과 신호모니터-호흡의 데이터를 이용하여 호흡크기(displacement)와 호흡주기(period)의 변동성을 Root mean square error (RMSE)를 적용하여 정량적으로 비교 분석하였다. 호흡의 변동성을 분석한 결과 신호모니터-호흡은 자유호흡과 비교하여 호흡크기의 경우 최대 40%, 호흡주기의 경우 최대 76%까지 RMSE 값이 감소하였으며, 모든 지원자들의 데이터를 분석한 결과 평균적으로 호흡주기의 경우 RMSE 값이 55% 감소되었고, 호흡크기의 경우 33% 감소하였다. 본 연구에서 개발한 호흡연습장치는 실험대상자의 고유한 호흡패턴을 이용하여 규칙적인 호흡을 유도했기 때문에 피실험자는 큰 노력 없이도 신호모니터-호흡을 따라 할 수 있었다. 따라서 규칙적인 호흡을 오랜 시간 지속시킬 수 있다는 측면에서 장점을 가질 수 있으며, 4D RT, 4D CT를 시행 할 경우 규칙적인 호흡을 통해 효율성과 정확성을 향상 시킬 수 있다.

중심단어: 호흡주기, 4D-RT, 4D-CT, 호흡 규칙성

서 론

흉부, 복부에서의 호흡에 의한 종양의 움직임은 SI (Superior-Inferior) 방향으로 최대 3 cm 가량 움직이기 때문에 호흡에 의한 움직임을 보상하기 위하여 큰 PTV가 필요하게 되고, 결과적으로 정상조직에 더 많은 선량이 조사된다.^{1,2)} 이를 해결하기 위하여 흉 복부에 위치한 종양의 치료 계획 시 의도된 선량을 전달하고 정상조직에 전달되는 선량을 최소화하기 위한 방사선 치료 방법에는 움직이는 종양을 추적하여 방사선이 조사되도록 하는 병소 추적 방사

선 치료(Tumor tracking radiation therapy) 방법, 치료 계획 시 미리 정해놓은 호흡 주기에 해당되는 일정 영역에만 방사선을 조사하는 호흡 연동 방사선 치료(Respiratory gated radiation therapy) 방법, 호흡의 변동을 최소화하기 위하여 환자의 호흡을 의도적으로 조절하는(Deep inspiration breath hold) 방법 등이 있다.³⁻⁵⁾ 이와 같이 환자의 호흡을 고려하는 치료(4-dimension radiation therapy)들은 호흡과 종양의 움직임이 동조를 이루어야 하며, 호흡이 안정되고 규칙적인 패턴을 이룰 때 치료의 효율성과 정확성이 향상 될 수 있다.²⁾

호흡을 규칙적으로 하여 치료의 정확성과 효율성을 향상 시키기 위해 호흡연습장치가 개발되어 왔다. George 등이 24명의 폐암환자를 대상으로 실험한 결과 호흡연습장치를 사용한 경우 호흡크기와 호흡주기의 변동성이 감소하였으며, 다른 여러 그룹에서도 호흡연습장치를 사용한 경우 호흡의 재현성과 규칙성이 향상되었음을 보고한 바 있다.⁶⁻¹⁰⁾ 호흡연습장치를 이용하여 만든 규칙적인 호흡을 통해 4DCT (4-dimension computed tomography)를 획득하는 경우 영상왜

본 연구는 교육과학기술부 및 한국연구재단의 지원을 받아 2011 년도 원자력연구개발사업을 통해 수행됨(원자력연구기반확충사업, 미래연구 원자력기초공동연구소, 과제번호: 2009-0078390). 이 논문은 2011년 12월 22일 접수, 2012년 2월 27일 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

곡을 줄일 수 있었으며, 흉부 또는 복부에서 호흡을 고려한 방사선 치료를 시행하는 경우 치료의 효율성이 향상 되었다는 것을 확인하였다.¹¹⁾

환자 고유의 호흡패턴(guiding waveform)을 이용하여 호흡을 유도 할 경우 흡기와 호기의 공기 양이 균형을 이루어 편하고 지속적으로 호흡을 유도할 수 있다. 그러나 환자의 호흡주기와 호흡크기만을 고려하여 호흡을 유도할 경우, 환자 고유의 호흡 특성을 반영할 수 없다. 결과적으로 환자의 호흡 유도 시 어려움을 겪게 되고, 그 효과는 시간에 따라 감소하게 될 것이다.⁹⁾ 따라서 환자가 오랫동안 편하게 호흡을 유도 받을 수 있는 고유의 호흡 패턴을 파악하는 것이 중요하며, 이를 이용해 환자의 호흡을 유도한다면 4DCT와 4DRT의 정확성과 효율성은 향상 될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 환자 고유의 호흡특성이 반영된 대표적인 호흡패턴을 만들고, 이를 이용해서 환자의 호흡을 규칙적으로 유도할 수 있는 호흡연습장치를 개발하고자 하였다. 개발된 호흡연습장치의 효용성을 평가하기 위하여 자유 호흡법(free breathing)과 지원자 고유의 호흡패턴을 이용하여 호흡을 유도한 신호모니터-호흡법(guided-breathing)의 호흡주기(period)와 호흡크기(displacement)의 root mean square error (RMSE)를 정량적으로 비교 분석 하였고, 비교한 결과를 통하여 본 연구에서 개발한 호흡연습장치의 유용성을 평가하고자 한다.

재료 및 방법

1. 호흡신호 획득 및 대상

Fig. 1(a), (b)는 벨트타입 센서를 복부에 부착하고 HMD

를 착용하여 환자의 호흡신호를 획득하는 그림이고, (c)는 SCB-668 DAQ card (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, National Instruments Inc, USA)이다. 환자의 호흡 신호를 획득하기 위하여 자체 개발한 벨트 타입의 센서를 복부에 착용하고 호흡에 의한 복부의 팽창 정도를 전기적 신호로 획득하였다. 20 Hz로 측정된 신호는 SCB-668 DAQ card를 이용하여 컴퓨터로 획득하였으며, 환자가 편안하게 호흡을 유도 받을 수 있도록 일반적인 모니터 대신 Head Mounted Displayer (HMD) (Vuzix, USA)를 이용하여 환자의 호흡을 유도하였다. 본 연구에서 개발한 호흡연습장치를 사용했을 때 호흡 규칙성의 향상 정도를 알아보기 위하여 5명의 지원자를 대상으로 실험을 진행하였다. Fig. 2를 통해 전체적인 실험 과정을 볼 수 있다. 실험은 실험 대상자의 고유한 호흡 패턴을 만들기 위하여 10주기의 호흡 신호를 획득하는 것으로 시작한다. 간혹 획득한 호흡샘플 중 기침 또는 침 삼킴으로 인한 진폭과 주기의 불규칙한 호흡패턴이 발견된 경우 해당 호흡주기의 데이터를 최대허용 기준으로 제거하여 실험 대상자의 고유한 호흡을 만들었고, 이는 신호모니터-호흡법에서 실험 대상자의 호흡을 유도하기 위하여 사용되었다.

그 다음 과정으로 호흡유도 없이 자유호흡 3분 동안 데이터를 획득하고, 실험 대상자의 고유한 호흡을 이용하여 3분 동안 신호모니터-호흡을 시행하여 데이터를 획득하였다. 각 3분 동안 획득한 호흡 신호를 이용하여 자유호흡과 신호모니터-호흡을 정량적으로 비교 분석 하였다.

2. 호흡 연습장치 프로그램

호흡 연습 장치 프로그램은 LabVIEW version 8.6 (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, National



Fig. 1. Patient set-up to acquire respiratory signals using in-house developed belt type sensor (a), head mounted displayer (b) and SCB-668 DAQ card (c).

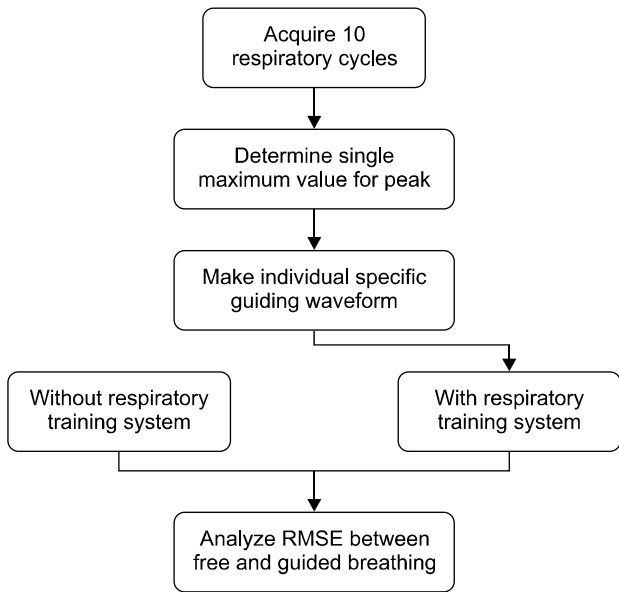


Fig. 2. Schematic diagram of analysis procedure to evaluate feasibility of respiratory training system.

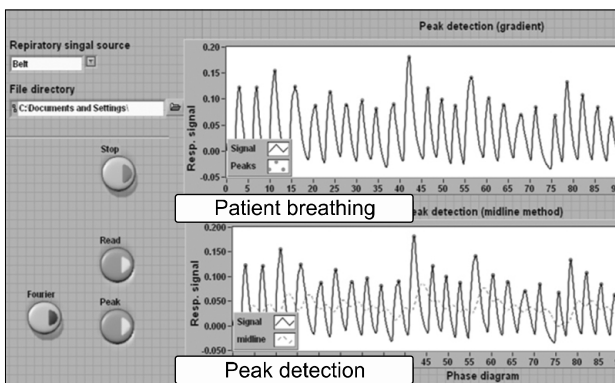


Fig. 3. The screen snapshot of the main program. The program displays respiratory signals acquired by belt type sensor and can divide single cycle by using peak detection program.

Instruments Inc, USA)을 이용하여 개발하였다. Fig. 3은 자체 개발한 프로그램의 실행 화면을 나타내고 있다. 본 연구에서 개발된 호흡 연습 장치는 크게 3부분으로 나뉜다. 첫 번째는 ASCII 형태의 호흡신호 텍스트 파일을 읽고, 이를 바탕으로 피크 점을 검출하는 프로그램이다. 호흡신호의 Peak window width 값을 결정한 후 호흡신호의 baseline을 만들어 피크점을 검출하고, 피크점을 기준으로 한 주기씩 구분할 수 있다.¹²⁾

두 번째는 환자의 고유한 호흡패턴을 만들기 위한 프로그램이다. 실험 지원자들의 고유한 호흡 패턴을 만들기 위

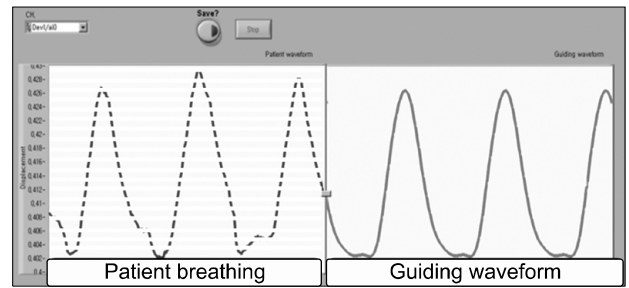


Fig. 4. The screen snapshot of guiding interface program. Two curves are shown in the window. Line curve is the guiding waveform, and dashed-line curve is the patient breathing signals. The small box in the middle shows the current respiratory signal.

하여 10개의 호흡을 획득하였고, 획득한 호흡은 식(1)을 이용하여 푸리에 급수(Fourier series)를 적용하였다. 그 다음 각 호흡 신호의 푸리에 계수(Fourier series coefficients)들을 평균화 하여 실험 지원자들의 고유한 호흡 패턴을 만들었다.⁷⁾

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^5 \left(a_n \cos \frac{2n\pi x}{p} + b_n \sin \frac{2n\pi x}{p} \right) \quad (1)$$

위 식의 f(x)는 실험 지원자의 고유한 호흡패턴을 나타내고, a_n , b_n 은 푸리에 계수, P는 호흡의 주기를 나타내고, x는 획득한 호흡 신호의 값을 나타낸다. n은 푸리에 급수의 차수로서 n이 클수록 높은 주파수 성분이 반영된다. 그러므로 호흡유도에 적합한 부드러운 파형을 얻기 위하여 5차 푸리에 급수를 이용하였다.⁷⁾ 만약 실험 지원자의 고유한 호흡패턴이 불편하다고 판단되면 다시 10개의 호흡을 획득한 후 고유한 호흡패턴을 만들었으며, 지원자가 편하게 느낀다면 그 호흡은 신호모니터-호흡에서 사용되었다.

세 번째 프로그램은 실험 지원자가 신호-모니터호흡을 시행할 때 보게 될 인터페이스이다. Fig. 4는 사용자가 보게 될 인터페이스를 나타낸다. 그림에서 실험 지원자의 고유한 호흡 패턴을 나타내는 빨간색 시뮬레이션 파형이 오른쪽에서 왼쪽으로 움직이면서 호흡을 유도하게 되고, 지원자는 현재 호흡을 나타내는 가운데 표식자를 확인하며 빨간색 시뮬레이션 파형을 따라 호흡을 하게 된다. 자신의 호흡을 확인 할 수 있도록 실시간으로 획득한 호흡신호를 파란색 파형으로 나타내어 호흡이 불규칙적일 경우 스스로 호흡을 조절할 수 있게 만들었다.

3. 호흡 신호 분석

본 연구에서 자체 개발한 호흡연습장치에 의한 호흡의 규칙성 향상 정도를 알아보기 위하여 자유 호흡과 신호모니터-호흡의 호흡크기와 호흡주기의 RMSE값을 정량적으로 비교 분석하였다. 자유호흡과 신호모니터-호흡에서 획득한 호흡 신호들을 푸리에 급수를 적용하여 자유호흡과 신호모니터-호흡의 평균호흡신호를 획득하였고, 획득한 평균호흡신호들과 각각의 호흡 신호를 비교 하였다. 호흡주기의 경우 평균호흡 주기와 실험 지원자들로부터 획득한 각 호흡 주기의 RMSE값을 계산하였다. 그러나 호흡크기의 경우 각 호흡들의 주기와 평균호흡의 주기가 다르며 각 위치에서 정확한 계산이 이루어 지지 않기 때문에 위상영역(Phase-domain)에서 계산되었다.

$$RMSE = \frac{\sum_{\text{all cycles}} \sqrt{\sum_{n=1}^{360} \frac{X_n - Y_n}{360}}}{\text{Total Cycles}} \quad (2)$$

모든 호흡 주기를 360개의 위상으로 나눈 뒤, 식(2)와 같이 평균호흡과 각 주기의 같은 위상 에서 호흡크기를 비교 함으로써 RMSE값을 계산하였다. 여기서 $X_n = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_{360}\}$ 는 실험 지원자들로부터 획득한 각 호흡 주기들을 나타내고, $Y_n = \{Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_{360}\}$ 는 모든 주기들로부터 획득한 평균호흡을 나타낸다.

결 과

본 연구에서 개발한 호흡 연습장치의 유용성을 평가하기 위하여 자유호흡과 신호모니터-호흡에서 3분 동안 획득한 호흡 신호의 RMSE값을 구하였고, 각 지원자들의 RMSE는 Fig. 5를 통해 확인 할 수 있다. Fig. 5는 신호모니터-호흡을 시행한 모든 지원자들의 호흡주기와 호흡크기의 RMSE값이 자유호흡에 비해서 감소하였다는 것을 보여 주고 있다. 신호모니터-호흡은 자유호흡에 비해 호흡크기의 경우 최대 40%, 호흡주기의 경우 최대 76%까지 RMSE 값이 감소하였으며, 호흡연습장치를 사용하였을 때의 호흡 규칙성의 향상 정도는 개개인에 따라 다르다는 것을 확인 할 수 있었다. 지원자 5번의 경우 호흡크기는 11%, 호흡주기는 76%의 RMSE 값이 감소하였으며, 호흡 크기에 비해 호흡주기의 RMSE 감소율이 매우 증가하였다. 지원자 1번의 경우 호흡 크기는 40%, 호흡주기의 경우 67%로 감소된 것을 확인 할 수 있었고, 이 지원자의 호흡 유도 효과가 가장 우수하다는 것을 확인하였다. 그러나 지원자 4의 경우 호흡크기는 28%, 호흡주기는 10% 정도의 RMSE 값이 감소하였기 때문에 다른 지원자들에 비해 호흡 규칙성 향상의 효과가 상대적으로 적은 것을 확인 할 수 있었다.

호흡 연습장치를 사용한 신호모니터-호흡이 자유호흡에 비해 호흡크기와 호흡주기의 변동성이 감소하였다는 것을 보여주는 대표적인 예를 Fig. 6에서 보여주고 있다. Fig. 6

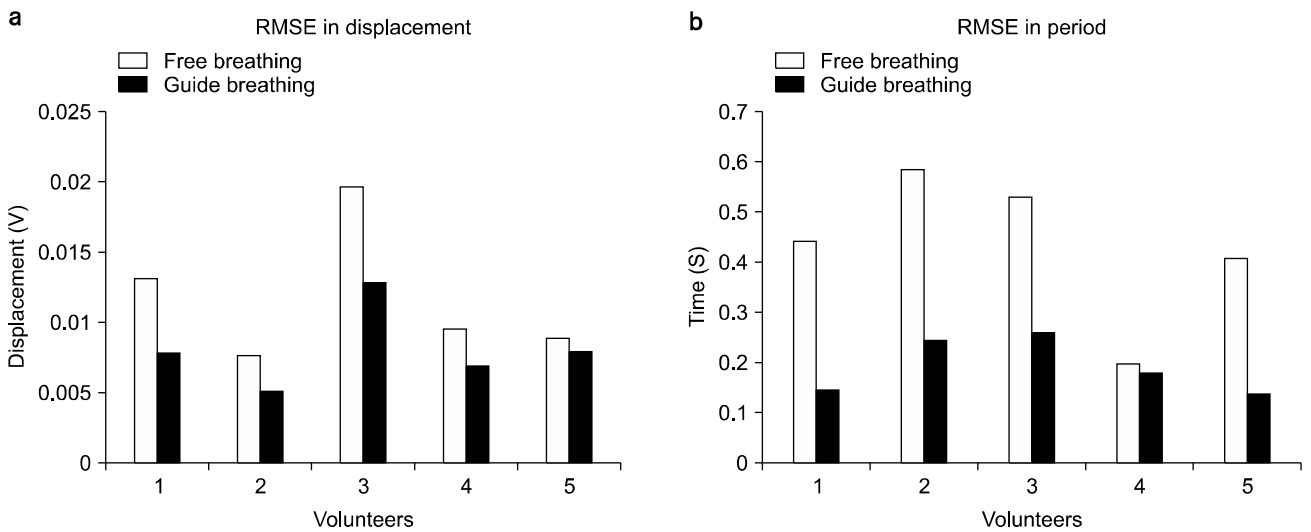


Fig. 5. RMSE in displacement and period for free and guided breathing of each volunteer. RMSE of guided breathing was reduced compared to RMSE of free breathing.

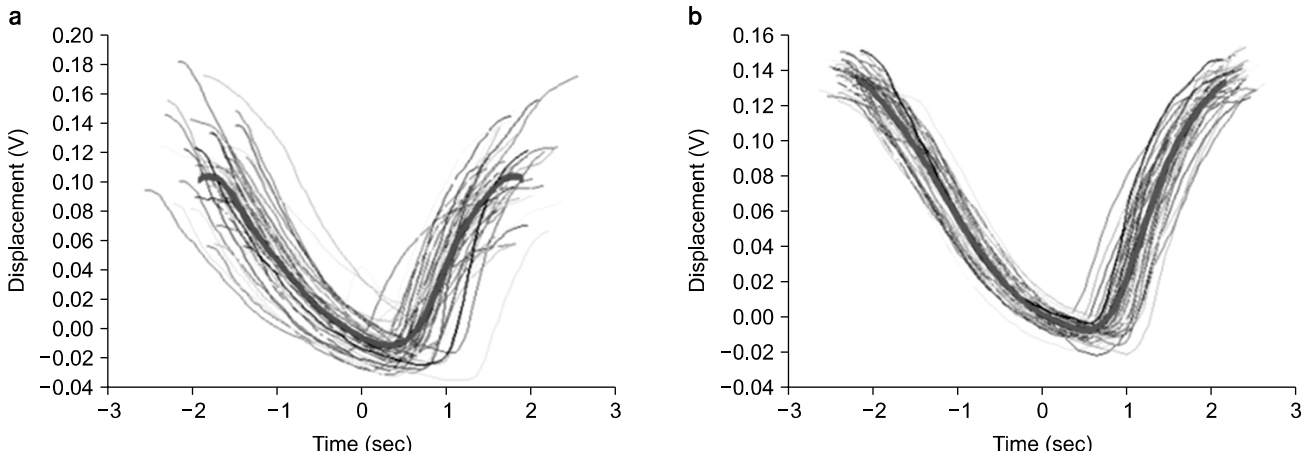


Fig. 6. Each breathing cycles and average waveform (bold curve). Breathing variation was reduced in guided breathing (b) compared with free breathing (a).

Table 1. The average RMSE in displacement and period for each volunteer in free and guided breathing. It is apparent that RMSE in displacement and period was reduced by using respiratory training system.

	Free breathing	Guided breathing	% Difference
RMSE in displacement (V)	0.012	0.008	-33
RMSE in period (sec)	0.432	0.192	-55

의 (a)는 2번 지원자의 자유호흡을, (b)는 같은 지원자의 신호모니터-호흡을 나타낸다. Table 1은 모든 지원자들의 호흡크기와 호흡주기의 RMSE값을 평균화한 것으로, 호흡주기의 경우 RMSE값이 평균 55%가 감소되었고, 호흡크기의 경우 평균 33%가 감소하였다.

고 찰

본 연구에서는 호흡의 규칙성 향상을 통하여 4D-RT를 시행할 때 발생될 수 있는 오차를 줄이고, 치료의 효율성과 정확성을 향상시키기 위하여 호흡연습장치를 개발하였으며, 그 유용성을 평가하였다. 일반적으로 4D-RT를 시행하는 경우 외부 표식자를 이용하여 복부의 움직임을 통해 간접적으로 표적의 위치를 추정한다. Hoisak 등의 연구는 호흡이 규칙적으로 유지된 환자의 경우 불규칙한 호흡패턴을 보여준 환자에 비해 복부의 움직임과 실제표적의 움직임 사이의 상관관계가 더욱 밀접함을 확인하였다.¹³⁾ 또한 환자의 호흡이 규칙적으로 유지될 경우 종양의 내부 움직임

을 예측함에 있어서 정확한 정보를 제공 받을 수 있게 되어 치료계획 시 의도한 방사선을 효과적으로 전달할 수 있다. 자유호흡과 호흡연습장치를 사용한 신호모니터-호흡의 RMSE를 비교한 결과 평균적으로 호흡크기의 경우 33%, 호흡주기의 경우 55% RMSE값이 감소하였고, 이것은 호흡의 규칙성이 향상되었다는 것을 의미한다. Neicu 등의 연구에서 호흡 연습장치를 사용하여 호흡의 규칙성이 향상된 경우 4D-RT의 효율성과 정확성이 향상됨을 확인하였으며,¹¹⁾ 본 연구에서 개발한 호흡연습장치를 이용하여 호흡의 규칙성 향상을 통해 4D-RT를 시행할 경우 효율성과 정확성의 향상을 기대할 수 있다.

평상시 안정된 호흡은 흡기와 호기의 호흡량이 균형을 이루기 때문에 폐에 남아있는 공기 양이 일정하다.⁹⁾ 그러므로 호흡주기와 호흡크기만을 반영하여 호흡을 유도할 경우 환자 고유의 호흡패턴이 반영되지 못한 채 흡기, 호기의 호흡량이 균형을 이루지 못하게 되고, 결과적으로 호흡 유도의 효율성이 감소하게 된다. 따라서 환자의 고유한 특성이 반영된 호흡 패턴을 파악하는 것은 호흡 유도뿐 아니라 치료 결과에 있어서 매우 중요한 부분이라고 판단된다. 또한 호흡을 유도할 때 환자가 보게 되는 인터페이스는 환자가 다음 호흡에 대해 파악할 수 있는 중요한 부분이다. 본 연구에서는 과거와 현재 자신의 호흡패턴을 확인할 수 있고, 앞으로 호흡 경향에 대해 쉽게 예측할 수 있는 wave model 시뮬레이션을 사용하였다. 이는 기존에 사용되었던 흡기와 호기의 크기에 따라 상한선과 하한선을 제시하는 방법과 bar model 시뮬레이션을 사용하여 환자의 호흡을 유도한 방법에 비해 더 많은 정보를 포함 하고 있다.^{6,7)} 즉,

환자 자신이 앞으로 어떻게 호흡해야 하는지 예측하기 쉽기 때문에 좀 더 편한 호흡 유도가 가능하였다.

각자 고유의 호흡패턴을 이용하여 호흡을 유도하더라도 시간이 지남에 따라 지원자의 집중력이 감소하게 되어 호흡 유도의 효과가 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 호흡연동 방사선치료의 경우 일반 방사선 치료와 비교하여 치료 시간이 증가하기 때문에 visual guiding의 효과가 더욱 감소할 수 있다. 따라서 환자의 호흡을 좀 더 편하게 오랫동안 유도하기 위하여 직관적이고 능동적으로 환자의 호흡을 유도할 수 있는 장치가 필요하다고 생각한다. 또한 본 연구는 신체가 건강한 지원자들을 대상으로 실험을 진행하였다. 그러나 실제 환자들의 신체적, 심리적 상태는 건강한 지원자들과는 다르기 때문에 환자들에게 호흡연습장치를 적용하여 호흡규칙성 개선효과를 확인해 볼 필요가 있으며, 임상에서 사용되고 있는 호흡신호획득 시스템에 본 연구에서 개발한 호흡연습장치를 적용해 볼 필요가 있다고 생각한다.

결 론

본 연구에서는 환자 고유의 호흡패턴을 변형시키지 않기 위해 푸리에 급수를 이용하여 대표적인 호흡 패턴을 만들고, 이를 이용하여 호흡을 유도하는 호흡연습장치를 개발하였다. 개발된 호흡연습장치는 환자 고유의 호흡패턴을 반영하기 때문에 호흡 유도 시 큰 노력 없이도 호흡의 규칙성을 향상시킬 수 있었다. 평균적인 호흡크기의 변동성은 33% 감소하였고, 호흡주기의 변동성은 55%가 감소하였다. 이런 결과를 바탕으로 호흡연습장치를 이용하여 향상된 호흡의 규칙성을 통해 4DCT 영상 획득 시 불규칙한 호흡에 의한 영상왜곡을 줄일 수 있고, 4DRT 수행 시 정확성과 효율성을 향상시킬 수 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. Markus S, Kristina K, Karin D, et al: Development and ap-

plication of a real-time monitoring and feedback system for deep inspiration breath hold based on external marker tracking. *Med Phys* 33:2868-2877 (2006)

2. Keall PJ, Mageras GS, Balter JM, et al: The management of respiratory motion in radiation oncology report of AAPM TG 76. *Med Phys* 33:3874-3900 (2006)

3. Shirato H, Shimizu S, Kitamura K, et al: Four-dimensional treatment planning and fluoroscopic real-time tumor tracking radiotherapy for moving tumor. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 48:435-442 (2000)

4. Ramsey CR, Scaperoth D, Arwood D, et al: Clinical efficacy of respiratory gated conformal radiation therapy. *Med Dosim* 24:115-119 (1999)

5. Hanley J, Debois MM, Mah D, et al: Deep inspiration breath-hold technique for lung tumors: the potential value of target immobilization and reduced lung density in dose escalation. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 45:603-611 (1999)

6. George R, Theodore D, Vedam S, et al: Audio-visual biofeedback for respiratory-gated radiotherapy: Impact of audio instruction and audio-visual biofeedback on respiratory-gated radiotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 65:924-933 (2006)

7. Venkat R, Sawant A, Suh Y, et al: Development and preliminary evaluation of a prototype audiovisual biofeedback device incorporating a patient-specific guiding waveform. *Phys Med Biol* 53:197-208 (2008)

8. Shin EH, Park HC, Han YI, et al: efficacy of a respiration training system on the regularity of breathing. *Korean J of Med Phys* 17:136-143 (2006)

9. Lim S, Park SH, Ahn SD, et al: Guiding curve based on the normal breathing as monitored by thermocouple for regular breathing. *Med Phys* 34:4514-4518 (2007)

10. Yoshitake T, Nakamura K, Shioyama Y, et al: Breath-hold monitoring and visual feedback for radiotherapy using a charge-coupled device camera and a head-mounted display: system development and feasibility. *Radiat Med* 26:50-55 (2008)

11. Neicu T, Berbeco R, Wolfgang J, et al: Synchronized moving aperture radiation therapy (SMART): improvement of breathing pattern reproducibility using respiratory coaching. *Phys Med Biol* 51:617-638 (2006)

12. Park HJ, Jung WG, Yoon JW, et al: Development of respiratory signal analysis program for accurate phase reassignment in 4D CT reconstruction. *Korean J Med Phys* 19:241-246 (2008)

13. Hoisak P, Sixel E, Tirona R, et al: Correlation of lung tumor motion with external surrogate indicators of respiration. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 60:1298-1306 (2004)

Development of Respiratory Training System Using Individual Characteristic Guiding Waveform

Seong-Hee Kang^{*†}, Jai-Woong Yoon^{*†}, Tae-Ho Kim^{*†}, Tae-Suk Suh^{*†}

^{*}Department of Biomedical Engineering, [†]Research Institute of
Biomedical Engineering, The Catholic University of Korea, Seoul, Korea

The purpose of this study was to develop the respiratory training system using individual characteristic guiding waveform to reduce the impact of respiratory motion that causes artifact in radiotherapy. In order to evaluate the improvement of respiratory regularity, 5 volunteers were included and their respiratory signals were acquired using the in-house developed belt-type sensor. Respiratory training system needs 10 free breathing cycles of each volunteer to make individual characteristic guiding waveform based on Fourier series and it guides patient's next breathing. For each volunteer, free breathing and guided breathing which uses individual characteristic guiding waveform were performed to acquire the respiratory cycles for 3 min. The root mean square error (RMSE) was computed to analyze improvement of respiratory regularity in period and displacement. It was found that respiratory regularity was improved by using respiratory training system. RMSE of guided breathing decreased up to 40% in displacement and 76% in period compared with free breathing. In conclusion, since the guiding waveform was easy to follow for the volunteers, the respiratory regularity was significantly improved by using in-house developed respiratory training system. So it would be helpful to improve accuracy and efficiency during 4D-RT, 4D-CT.

Key Words: Respiratory regularity, 4D-RT, 4D-CT, Respiratory cycle