

호흡연습장치를 적용한 호흡교정법의 영향 평가

성균관대학교 의과대학 삼성서울병원 방사선종양학교실

신은혁 · 박희철 · 한영이 · 주상규 · 신정석 · 안용찬

목적: 호흡을 고려한 사차원방사선치료의 효용성 증대를 위하여, 규칙적이고 안정된 호흡주기 및 호흡량을 갖도록 환자를 교육하고 호흡을 연습시키는 호흡연습장치 및 프로그램을 자체 제작하여 유용성을 평가하였다.

대상 및 방법: 호흡연습장치를 사용시 및 사용후의 호흡의 규칙도의 변화를 측정하기 위해 11명(자원자 9명, 환자 2명)을 대상으로 실험을 실시하였다. 자유롭게 호흡하는 '자유호흡(free-breathing)'법, 자유호흡 시 시뮬레이션 된 표준 호흡주기를 따라함으로써 일정한 호흡주기를 만드는 '신호모니터-호흡(guided-breathing)'법 및 호흡연습 후 시뮬레이션 신호 없이 호흡하는 '연습 후 호흡(postguided-breathing)'법 등 3가지 방법으로 호흡주기를 기록하여 호흡주기(PTP (Peak To Peak))와 호흡크기(Amplitude) 및 호흡패턴(Area, RMS (Root Mean Square))의 변화를 정량적으로 분석하였다.

결과: 호흡주기를 보여주는 PTP 값은 '신호모니터-호흡'에서 표준편차 값(standard deviation)이 의미 있게 감소하여 호흡주기가 더 규칙적이었고(자유호흡 0.568 vs 신호모니터-호흡 0.344, $p=0.0013$), '연습 후 호흡'법에서는 '자유호흡' 시보다 표준편차가 낮아 호흡주기가 보다 안정적이었으나 통계적으로 유의한 차이는 없었다(자유호흡 0.568 vs 연습 후 호흡 0.512, $p=ns$). 호흡량 측정 결과는 '자유호흡'보다 '신호모니터-호흡'의 경우 호흡량의 표준편차 값이 낮아 호흡량이 보다 일정하게 유지되었으나 통계적으로 유의한 차이는 없었다(자유호흡 1.317 vs 신호모니터-호흡 1.068, $p=0.187$). 호흡 패턴은 '자유호흡'과 '모니터 호흡' 사이에는 큰 차이가 발생하지 않았지만, '연습 후 호흡'에서는 호흡주기 내 호흡함수의 평균 면적이 7% 감소하였고 RMS 값은 5.9% 감소를 보였다.

결론: '신호모니터-호흡'에서 호흡주기 및 호흡량이 가장 일정하게 유지되었다. 호흡연습의 효과는 시뮬레이션 신호 없이 호흡하는 '연습 후 호흡'의 경우 시간 경과에 따라 감소할 것으로 판단되었다. 본 연구에서 제작한 호흡연습장치 및 프로그램은 호흡의 주기의 규칙성과 호흡량을 일정하게 유지시키는데 효과적으로 평가되었다.

핵심어: 사차원방사선치료, 호흡연동방사선치료, 호흡주기

서 론

방사선치료는 삼차원입체조형방사선치료, 정위방사선치료 및 세기조절방사선치료 등 3차원 공간에서 방사선 분포를 제어하여 보다 정밀한 방사선치료를 하는 방향으로 발전해 가고 있으며, 이런 치료법은 정확한 시점 및 정확한 위치에 빔이 전달되어야 장점을 극대화할 수 있다.¹⁾ 그러나, 호흡에 의한 위치 변화가 큰 복부 또는 흉부의 방사선 치료 시 발생하는 종양 및 주변장기의 움직임은 방사선량

분포에 영향을 주어 표적흡수선량은 낮아지고 주변정상장기에는 고 선량이 주어지는 현상을 야기하기도 한다.²⁾

방사선치료 계획은 전산화단층촬영 등을 통하여 얻은 환자의 해부학적 정보를 이용하여 세운다. 이때 방사선치료의 대상이 되는 장기나 종양의 움직임 때문에 방사선치료 시 대상 장기의 위치가 치료계획 시와 달라짐으로써 방사선 분포가 서로 일치하지 않게 된다. 이로 인하여 의도한 방사선치료의 효과를 얻기 어려울 수 있다.³⁾ 장기나 종양의 움직임은 환자의 심장박동, 내부의 생리적인 장기의 불규칙한 움직임, 그리고 호흡 등에 의해 발생할 수 있다. 그 중에서 흉부 및 복부부위의 움직임은 주로 환자의 호흡에 의해서 발생하게 되는데, 이로 인한 영향을 줄이고 효과적인 치료를 하기 위해 많은 연구가 수행되고 있다.

호흡을 고려한 방사선치료 기법은 크게 환자의 호흡을

이 논문은 2008년 6월 17일 접수하여 2008년 8월 20일 채택되었음.
책임저자: 박희철, 삼성서울병원 방사선종양학과
Tel: 02)3410-2605, Fax: 02)3410-2619
E-mail: rophc@skku.edu

의도적으로 조절하는 방법,^{4,5)} 안정된 일정한 주기에만 빔을 조사하는 방법^{6,7)}과 능동적으로 표적의 움직임을 추적하여 치료하는 방법으로 나눌 수 있다. 이와 같은 사차원 방사선치료를 위해 호흡주기와 종양의 움직임, 그리고 선형가속기 방사선 조사 시점의 동기화를 이루는 여러 장치들이 개발되어 왔다.^{8,9)} 이런 장치들의 동기화에 사용되는 호흡신호(respiratory signal)는 종양이나 주위장기의 실시간 움직임을 간접적으로 나타내는 정보로써 장기의 움직임이 최소인 특정 호흡주기에만 선택적으로 빔을 조사하는 방법 등 호흡연동방사선치료 과정에 중요한 역할을 한다. 호흡신호를 얻는 방법은 매우 다양해서, 폐활량계(spirometer) 센서를 이용하는 호흡량 측정법,¹⁰⁾ 벨트 시스템(belt system)을 이용하여 호흡 시 복부의 팽창정도를 압력으로 측정하는 방법,¹¹⁾ 카메라를 이용해 복부에 위치한 표식자의 상하운동을 측정하여 호흡신호를 획득하는 방법(real-time position management (RPM) system) 등이 많이 이용되고 있다.

이렇게 호흡신호를 매개체로 사용하는 방법들은 호흡이



Fig. 1. Photo of respiration training system.

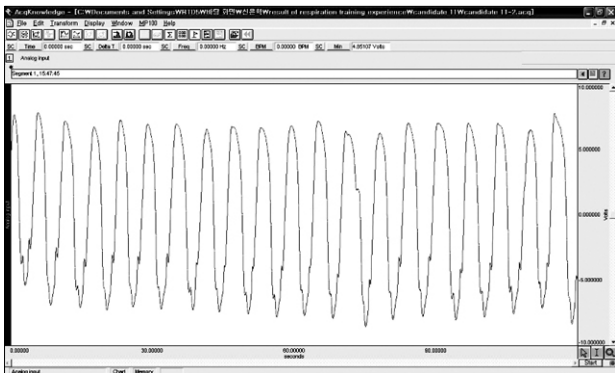


Fig. 2. Respiration signal measured and amplified by MP-100 system.

안정된 일정한 주기로 이루어질 때에만 가능하며 호흡이 주기성을 갖지 못하거나, 내부 장기의 움직임이 호흡주기와 동조를 이루지 못할 경우 심각한 오차를 유발시킬 수 있다.^{12,13)} 특히 전산화단층촬영 시 환자의 호흡주기 및 호흡량과 방사선치료 시의 호흡주기 및 호흡량이 다르게 되면 내부 장기의 움직임 패턴도 다르게 되어 치료계획 시 의도한 방사선량 분포를 재현할 수 없다. 따라서 호흡연동방사선치료 시 규칙적이고 안정된 호흡주기 및 호흡량을 갖도록 환자를 교육하고 호흡을 연습시키는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 호흡연동방사선치료 시 호흡을 안정적이며 규칙적으로 유지하도록 교육/연습하는 호흡연습장치를 자체 제작하여, 자유롭게 호흡하는 ‘자유호흡법(free-breathing)’, ‘자유호흡’ 시 시뮬레이션 된 표준 호흡주기를 모니터를 보고 따라함으로써 일정한 호흡주기를 만드는 ‘신호모니터-호흡법(guided-breathing)’ 및 호흡연습 후 시뮬레이션 신호 없이 호흡하는 ‘연습 후 호흡법(postguided-breathing)’ 등 3가지 방법을 통하여 호흡을 측정하고 각각의 호흡법에 대한 호흡주기와 호흡크기 및 호흡패턴의 변화를 정량적으로 분석하였다. 이를 통하여 본 연구에서 개발한 호흡연습장치 및 프로그램의 유용성 및 적용 대상별 맞춤형 호흡연습의 효과를 평가하고자 하였다.

대상 및 방법

1. 호흡 모니터 시스템(respiration monitoring system)

본 연구에서 제작한 호흡 모니터 시스템은 몸에 부착하여 호흡신호를 측정하는 벨트 시스템(TSD-201, Biopac, Goleta,

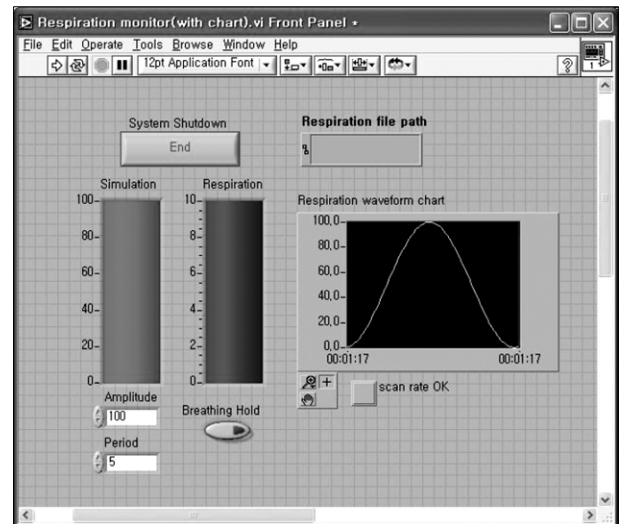


Fig. 3. A snapshot of home-made respiration training program.

US)과 측정된 호흡신호를 증폭시키는 증폭기(MP-100 system, Biopac, Goleta, US), 컴퓨터에 증폭된 신호를 보내주는 인터페이스(UIMI 100C, Biopac, Goleta, US)로 구성되어 있다. Fig. 1에서 보는 것과 같이 몸에 부착된 벨트는 호흡을 함으로써 변화하는 벨트의 팽팽함 또는 느슨함 정도를 벨트의 압력 게이지로 측정하게 되고 이때 발생하는 측정전압을 증폭시켜 Fig. 2에서 보는 것과 같은 호흡신호로 만들어 내게 된다.

2. 호흡연습 시뮬레이션 프로그램

호흡연습 시뮬레이션 프로그램은 LabView (National Instruments, Austin, US)로 제작하였으며 사용자 인터페이스는 Fig. 3에 예시하였다. 사용자 인터페이스에서 빨간색의 시뮬레이션 막대가 움직이면서 호흡을 유도하게 된다. 이 프

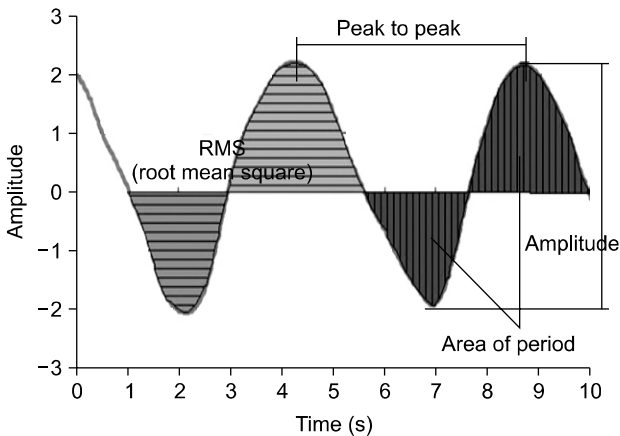


Fig. 4. Graphical representations of respiration analysis parameters.

로그래밍은 개개인의 호흡 특성을 구성해내기 위해서 호흡 유도 막대의 움직임을 프로그래밍 할 때 유도하고자 하는 호흡의 크기(진폭)와 호흡주기를 조절할 수 있도록 하였으며, 호흡연습 시 실시간으로 받은 호흡신호를 파란색의 막대로 나타내어 피드백하게 하였다. 또한 개개인에게 편한 호흡패턴으로 연습시키기 위하여, 최초 측정 시 얻어진 자유호흡의 신호를 파일로 읽어 들여 그 패턴(wave form)을 반복적으로 보여주는 기능을 추가하였다. 최대 호기 또는 흡기 상태에서 진산화 단층촬영을 할 수 있도록 호흡을 잠시 멈출 수도 있도록 하는 프로그램도 추가하였다.

3. 호흡연습을 통한 호흡교정의 결과 분석

본 연구에서 개발/제작한 호흡연습장치를 사용 시 호흡의 교정 정도를 알아보기 위해 20대에서 50대 사이의 자원자 9명과 호흡에 의해 움직임이 다른 부위보다 상대적으로 큰 간암 환자 2명을 대상으로 실험을 실시하였다.

호흡 연습 없이 자유롭게 호흡하는 ‘자유호흡’을 2분간 측정하였으며 자유호흡을 바탕으로 실험 대상자에 적합한 주기와 호흡량을 결정하였고, 여기서 결정된 표준 호흡주

Table 1. Distribution of Averaged Respiratory Periods for 11 Subject

Respiration period (sec)	No. of subjects
3.5	1
4.0	3
4.5	3
5.0	3
6.0	1

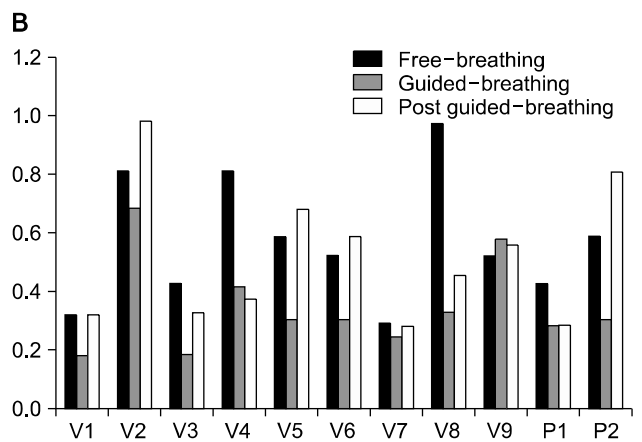
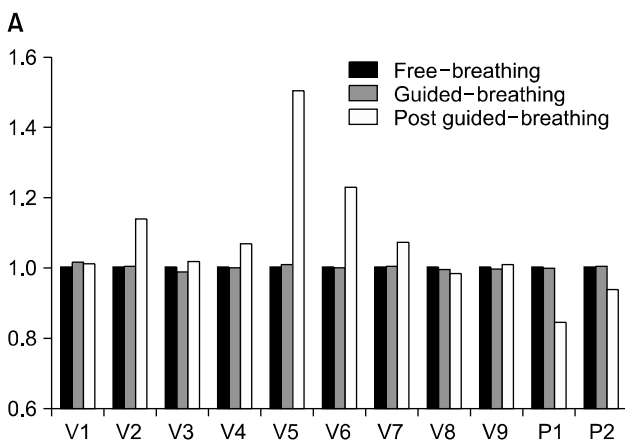


Fig. 5. Mean values of periods of peak-to-peak of the respiration signal for three different breathing method for 11 subjects. The mean periods are normalized to that of free breathing (A) and their standard deviations (B).

기와 호흡량을 규칙적으로 유도하도록 호흡 시뮬레이션 신호를 만들었다. 두 번째 단계로는 시뮬레이션 된 유도 호흡신호를 연습 없이 모니터하며 호흡하는 ‘신호모니터-호흡’을 2분간 시행하였다. 세 번째 단계로는 호흡 시뮬레이션 신호를 모니터 하면서 2분간 연습을 시행한 후 2분 뒤 시뮬레이션 신호 없이 실험 대상자가 자율적으로 호흡을 하도록 하는 ‘연습 후 호흡’을 2분간 측정하였다.

호흡연습을 통한 호흡교정의 결과를 분석하기 위해, Fig. 4에서와 같이 실험 대상자에게서 얻어진 호흡신호의 호흡 주기별 PTP (peak-to-peak)와 이의 표준편차(standard deviation)를 측정하여 호흡주기의 변화 정도를 알아보았다. 한 호흡 주기 내 최대전압 부분과 최소전압 부분의 차를 호흡크기(amplitude)로 정하여, 호흡크기의 평균값과 호흡주기 간 호흡크기 변화의 표준편차 값을 측정하고 호흡크기의 변화를 분석하였다. 또한 호흡패턴을 측정하기 위해서 각각의 호흡주기 내 호흡함수의 면적과 함께 각 호흡주기 면적의 RMS (root mean square) 값을 계산하여 호흡패턴을 직·간접적으로 정량화하였다.

결 과

11명의 호흡연습 실험 대상자에서 ‘자유호흡’을 기준으로 측정한 각 환자의 평균호흡주기는 3.5초부터 6초까지 다양하였다(Table 1).

호흡주기를 보여주는 PTP 값은 ‘신호모니터-호흡’의 경우 모든 실험 대상자에서 ‘자유호흡’의 평균 주기와 같게 유도되었음을 확인하였다(Fig. 5A). 그러나 PTP의 표준편차가 의미 있게 감소하여(자유호흡 0.568 vs 신호모니터-호흡 0.344, $p=0.0013$) ‘신호모니터-호흡’에서 ‘자유호흡’의 호

흡주기가 보다 규칙적이었다(Fig. 5B). 호흡연습 후 호흡 시뮬레이션 신호 없이 자율적으로 호흡하는 ‘연습 후 호흡’의 결과는 PTP의 크기가 자유호흡 대비 평균적으로 증가하였으며(평균 1.007, range : 0.844~1.501) 최대 50%까지의 증가가 관찰되었다. 표준편차는 ‘자유호흡’ 시(0.568) 보다 낮아(0.512) 조금 더 호흡의 주기가 안정적이었다.

호흡 시 호흡량을 측정하는 호흡크기는 ‘신호모니터-호흡’의 경우 모든 실험 대상자에서 ‘자유호흡’ 시 보다 평균적으로 감소하였으며(1.0 vs 0.966, range 0.698~1.120) 최대 30%의 감소를 보였다(Fig. 6A). 호흡크기의 표준편차를 보면 ‘신호모니터-호흡’에서 실험 대상자의 호흡량이 보다 일정하게 유지되었으나(자유호흡 1.317 vs 신호모니터-호흡 1.068, $p=0.187$) 통계적으로 유의한 차이는 없었다(Fig. 6B). ‘연습 후 호흡’에서도 호흡크기가 ‘자유호흡’과 비교하여 큰 변화는 없었으나 일부 대상자에게서는 큰 변화가 관찰되었다(1.0 vs 0.9416, range : 0.668~1.234). 호흡크기의 표준편차 값은 ‘연습 후 호흡’ 시 ‘자유호흡’보다 감소하였으나(자유호흡 1.317 vs 연습 후 호흡 1.169) ‘신호모니터-호흡’ 시(1.068)보다 감소의 정도는 작아 호흡량의 유지성은 조금 떨어졌다.

호흡패턴의 경우 ‘자유호흡’과 비교하여 ‘신호모니터-호흡’에서 호흡함수의 평균 면적은 1.2% 증가하였고(ratio: 1.012), 이의 표준편차는 ‘자유호흡’에 비하여 감소하였다(4.202 vs 2.895)(Fig. 7A). ‘연습 후 호흡’에서는 평균 면적이 7% 감소하였고(ratio : 0.930), 표준편차 역시 감소하였다(4.202 vs 3.084). 호흡주기와 호흡크기의 RMS 계산결과 ‘신호모니터-호흡’인 경우 그 평균값이 ‘자유호흡’ 시와 비교하여 1.7% 증가하였고(ratio : 1.0166), 이의 표준편차는 ‘자유호흡’에 비해 감소하였다(0.4008 vs 0.3881) (Fig. 7B). ‘연습 후 호흡’

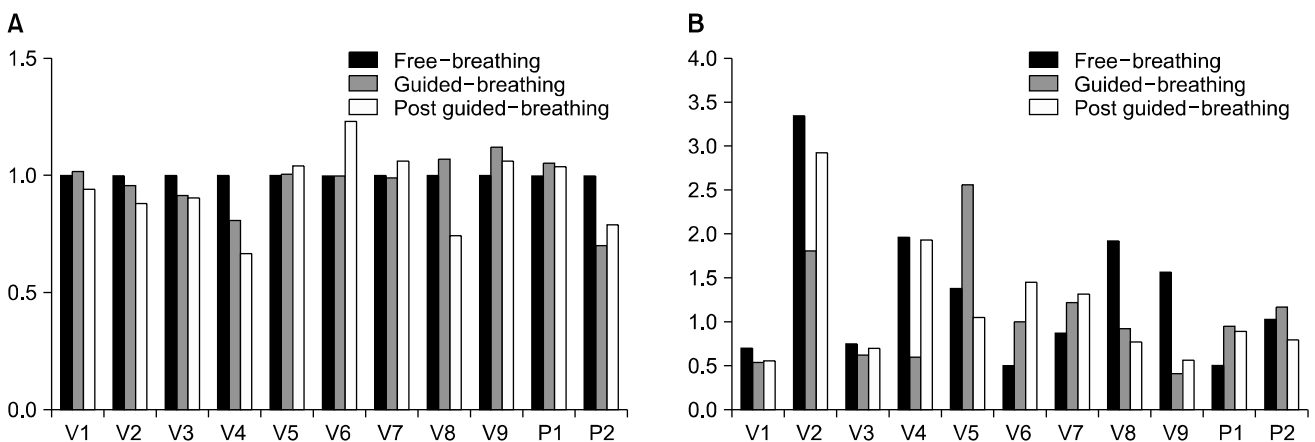


Fig. 6. Mean values of amplitude normalized to that of free breathing (A) and their standard deviations (B).

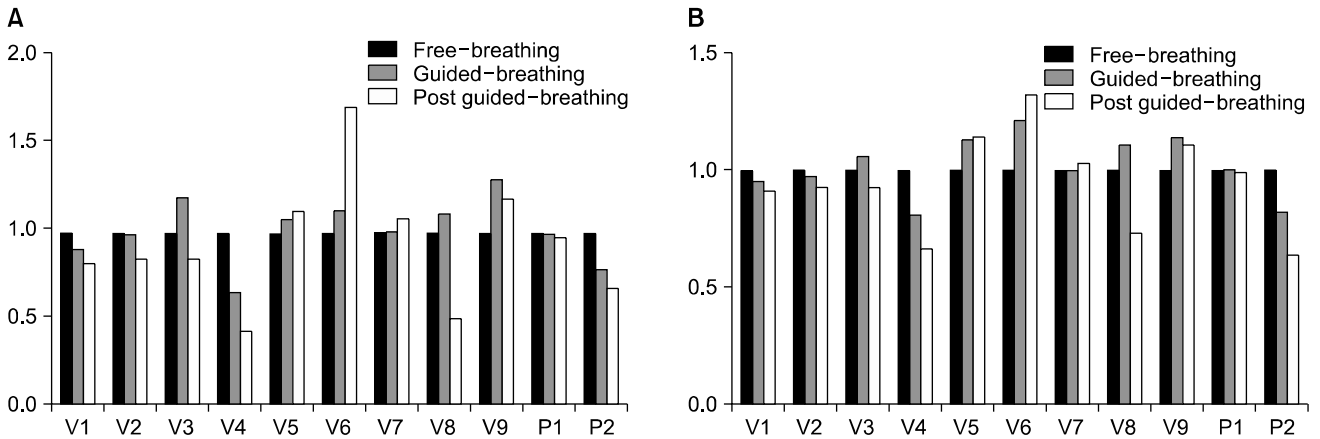


Fig. 7. Mean values of area enclosed by one respiratory cycle. Data are normalized to that of free breathing (A). RMS value of respiratory area of one respiratory cycle (B).

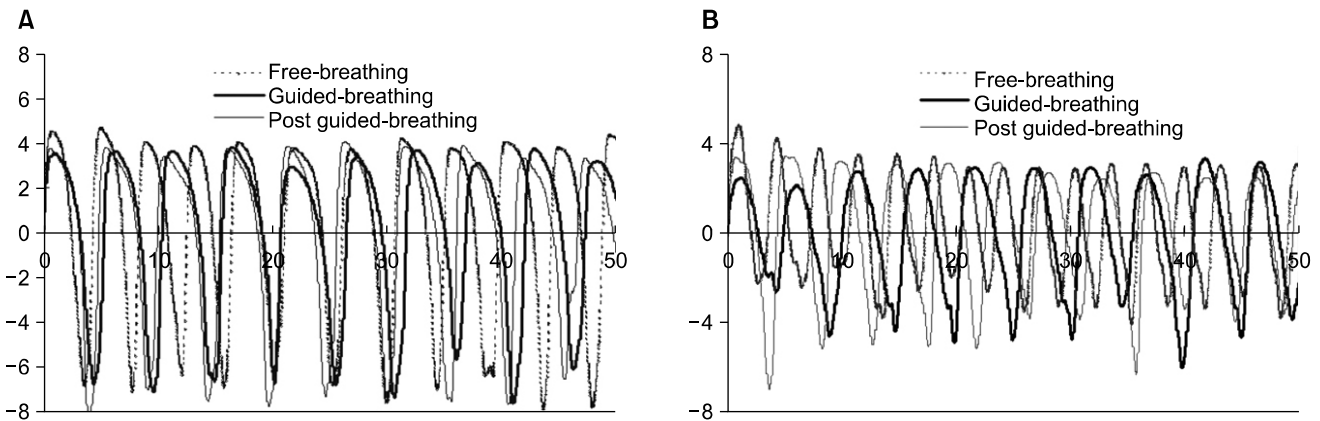


Fig. 8. Representative respiration signals of (A) a good candidate (V1) and (B) a poor candidate (V9) for respiration training system.

인 경우 그 평균값이 자유호흡 시와 비교하여 5.9% 감소하였고(ratio : 0.9411), 표준편차 역시 감소하였다(0.4008 vs 0.3575).

자원자 1과 9의 ‘자유호흡’과 ‘연습 후 호흡’의 호흡 측정 데이터 예시는 Fig. 8과 같다. 자원자 1의 측정 데이터는 ‘신호모니터-호흡’과 ‘연습 후 호흡’에서 ‘자유호흡’과 유사한 정도의 호흡량, 호흡크기 및 호흡패턴으로 ‘자유호흡’보다 일정하게 호흡이 유도되었음을 보여준다. 자원자 9의 측정 데이터는 ‘신호모니터-호흡’과 ‘연습 후 호흡’에서 ‘자유호흡’과 다른 호흡량, 호흡크기 및 호흡패턴을 나타내었으며, 각각의 호흡법에서도 시간의 경과에 따라 각각의 측정량이 일정하지 않음을 보여준다.

고안 및 결론

본 연구에서 제작하여 적용한 호흡연습장치는 실험 대상자에 대하여, 호흡주기의 규칙성과 호흡량을 일정하게 유지시키는데 효용성이 있는 것으로 평가되었다.

환자의 ‘자유호흡’에서 결정된 각 실험 대상자의 호흡패턴으로 호흡 운동을 유도함으로써 개개인에게 편안한 주기로 호흡을 유도할 수 있었으며, 2분간의 측정시간 중 호흡주기의 표준편차가 ‘자유호흡’ 시에 비하여 현저히 감소함으로써(자유호흡 0.568 vs 신호모니터-호흡 0.344) 호흡주기가 규칙적으로 유도되는 것을 증명하였다. 실험 대상 중 단 1명에게서만 표준편차가 증가하여 대부분의 실험 대상자에서 호흡주기를 규칙적으로 유도하는데 매우 효용성

이 있는 것으로 평가된다.

호흡으로 인한 내부 장기의 움직임과 밀접한 연관이 있는 호흡크기(호흡량)는 호흡의 주기보다는 유도의 효과가 상대적으로 적어서 호흡량이 평균 3% 정도의 감소를 보였으며, 개인별 편차가 심한 것을 알 수 있었다. 그러나 각각의 실험 대상자에서 호흡주기 간 호흡량의 변화 폭을 보여주는 표준편차는 평균적으로 감소하여(자유호흡 1.317 vs 신호모니터-호흡 1.068), ‘자유호흡’보다 호흡크기를 일정하게 유지시키는 효과가 있음을 확인하였다. 그러나 주시해야 하는 사항은 11명의 대상 환자 중 3명에게서는 오히려 표준편차가 크게 증가하여, 일부 실험 대상자에서 호흡량을 일정하게 유지하는데 도움이 되지 못하였다. 이것은 시각적으로 유도하는 유도호흡 시그널이 1로 정규화 되어 있어서, 이를 이용한 호흡 조절 시 위상에 더 민감하게 반응하는 것이 원인으로 판단된다.

호흡패턴을 알아보기 위한 각각의 호흡주기 내 호흡함수의 면적과 면적의 RMS값은 ‘자유호흡’과 비교하여 ‘연습 후 호흡’에서 감소하는 것으로 나타났다. 이에 비해 ‘신호모니터-호흡’법은 ‘연습 후 호흡’법과 비교하여 호흡함수의 면적과 RMS 값의 변화가 크지 않고 ‘자유호흡’법과 비슷하였다. 이는 치료 시에도 피드백을 지속하지 않는 경우 일일 변동(day-to-day variation)의 가능성이 높음을 의미한다.

호흡연습의 효과의 지속성을 알아보기 위하여 측정된 ‘연습 후 호흡’은 호흡주기와 호흡크기의 편차 값이 ‘자유호흡’에 비하여 역시 감소하여, 일정한 호흡 운동을 유지하는 측면에서 연습의 효과가 지속성이 있는 것으로 평가되었다. 그러나 ‘신호모니터-호흡’ 시 보다는 큰 표준편차 값을 보임으로서, 연습의 효과가 약간 감소하며, 시간이 지나면서 더 감소 될 수 있을 것으로 판단된다.

Venkat 등의 연구에 따르면 ‘신호모니터-호흡’법이 ‘자유호흡’법에 비해 호흡의 주기성이 30% 정도 향상되었고, 호흡크기의 변화는 45% 정도 향상되었다고 보고한 바 있다.¹⁴⁾ 본 연구에서도 주기의 표준편차가 40% 정도 향상되었고, 호흡량의 표준편차는 20% 정도 향상되었다. 호흡량의 변화가 종양이나 정상 조직의 위치 변화에 직접적 관계가 있는 것은 아니지만 많은 영향을 주기 때문에 환자에게 전산화단층촬영이나 치료 전에 호흡연습을 충분히 시키고 전산화단층촬영이나 치료 시에 호흡을 규칙적으로 유도하는 것은 방사선치료의 정확성과 호흡연동방사선치료의 시간적 효율성을 높이는데 매우 효과적일 것으로 생각된다.

또한 본 연구의 호흡연습장치를 사용한 데이터 측정과정은 사차원 방사선치료법을 적용할 수 있는 적정 환자 군을 선택하는데 유용할 것으로 판단된다. 호흡연습장치를 적용한 본 연구의 결과 1명의 실험 대상자에서 호흡주기의 표준편차가 ‘자유호흡’법에 비해 증가하였고, 3명의 실험 대상자에서 호흡크기의 표준편차가 ‘자유호흡’법에 비해 증가하였음은 모든 환자에서 방사선치료의 정확성과 호흡연동방사선치료의 시간적 효율성을 증가시킬 수는 없음을 나타낸다. Fig. 8의 예는 이런 상반된 결과를 보여주는데 9번 자원자의 경우와 같이 ‘연습 후 호흡’이나 ‘신호모니터-호흡’ 시 호흡 운동이 유도호흡 시그널을 잘 따르지 못하고 더 불규칙해지는 호흡연동방사선치료에 부적절한 대상 환자 군을 미리 골라내는데 유용한 방법이라고 판단된다.

그러나 이와 같은 방법으로도 호흡연동방사선치료를 정확하게 하는데 충분하지 않다. 여러 가지 고려해야 할 문제점들이 남아있는데, 피부의 움직임을 통한 간접적인 호흡 신호와 표적의 위치 추정의 상관관계,¹⁶⁾ 어느 정도의 호흡의 규칙성을 가진 환자를 대상으로 호흡연동방사선치료를 적용할 것인가 하는 문제, 방사선치료 시 사용되는 조사영

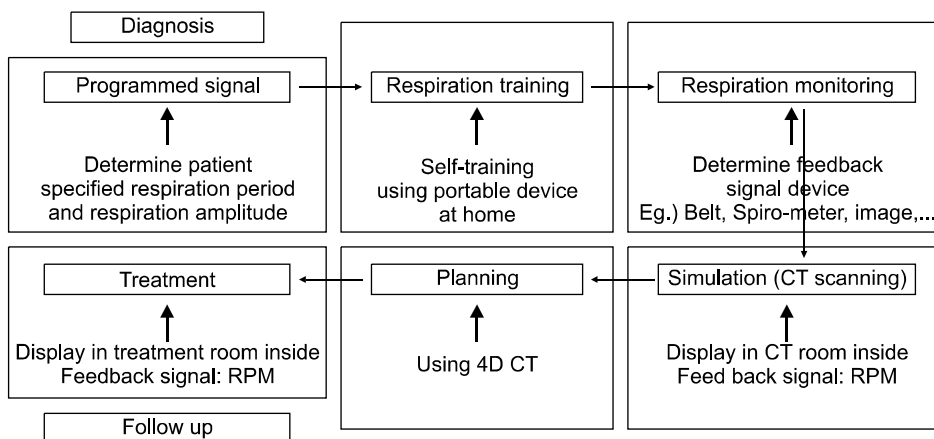


Fig. 9. Proposed respiration training procedure.

역의 여유분을 어느 정도까지 줄일 수 있는가 하는 문제, 같은 호흡주기라 할지라도 각각의 분할조사 시점마다 폐에 남아 있는 잔여 공기량(residual volume)의 정도가 다르므로 인한 표적의 위치 변동의 문제 등이 그러하다.^{2,12~15)} 또한, 호흡은 감정적, 육체적 상황이나 각각의 시점에 따라 상호 연관되어 변화하고 매우 다른 패턴을 보이게 된다. 환자의 호흡을 모델화하고 반복된 연습을 통하여 습관화한 후 치료계획을 실시하고 매 분할조사 시마다 미리 정해진 패턴으로 호흡을 유도하고 관찰할 경우에만 호흡연동 방사선치료는 소기의 목적을 이룰 수 있을 것이다(Fig. 9). 이를 위해서 본 연구에서 제시한 호흡연습 프로그램 및 시스템이 유용한 시스템이 될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. Park HC, Cho BC, Kim SS, Oh DH, Bae H. Clinical considerations for respiration synchronized high-precision radiotherapy. *Korean J Med Physics* 2005;Supple 1:16-21
2. Keall PJ, Mageras GS, Balter JM, et al. The management of respiratory motion in radiation oncology report of AAPM TG 76. *Med Phys* 2006;33:3874-3900
3. Pan T, Lee TY, Rietzel E, Chen GTY. 4D-CT imaging of a volume influenced by respiratory motion on multi-slice CT. *Med Phys* 2004;31:333-340
4. Wong JW, Sharpe MB, Jaffray DA, et al. The use of active breathing control (ABC) to reduce margin for breathing motion. *Int J Radiat Oncol Biol Physics* 1999;44:911-919
5. Hanley J, Debois NM, Mah D, et al. Deep inspiration breathing technique for lung tumors: the potential value of target immobilization and reduced lung density in dose escalation. *Int J Radiat Oncol Biol Physics* 1999;45:603-611
6. Kubo HD, Hill BC. Respiration gated radiation treatment: a technical study. *Phys Med Biol* 1996;41:83-91
7. Ramsey CR, Scaperoth D, Arwood D, et al. Clinical efficacy of respiratory gated conformal radiation therapy. *Med Dosim* 1999;24:115-119
8. Gierga DP, Brewer J, Shap GC. The correlation between internal markers for abdominal tumors: implications for respiratory gating. *Int J Radiat Oncol Biol Physics* 2005;61:1551-1558
9. Sonke JJ, Zijp L, Remeijer P, Marcel van Herk. Respiratory correlated cone beam CT. *Med Phys* 2005;32:1176-1186
10. Zhang T, Keller H, O'Brien MJ, Mackie TR, Paliwal B. Application of the spirometer in respiratory gated radiotherapy. *Med Phys* 2003;30:3165-3172
11. Ali I, Lovelock D, Kang H, et al. Extraction of internal and external marker 3D-motion in liver patients with compression belt using kv cone-beam radiographic projections. *Med Phys* 2007;34:2392
12. Song JY, Nah BS, Jung WK, Ahn SJ, Nam TK, Yun MS. Development of error analysis program for phase-based respiratory gating radiation therapy. *Korean J Med Physics* 2006;17:136-143
13. Lim S, Park S, Ahn SD, et al. Guiding curve based on the normal breathing as monitored by thermocouple for regular breathing. *Med Phys* 2007;34:4514-4518
14. Venkat RB, Keall P, Sawant A, George R. Respiratory training using audio visual bio-feedback. *Med Phys* 2007;34:2370
15. Vedam SS, Keall PJ, Kini V, Mohan R. Determining parameters for respiratory-gating radiotherapy. *Med Phys* 2001;28:2139-2146
16. Gierga DP, Brewer J, Sharp GC, Betke M, Willett CG, Chen TY. The correlation between internal markers for abdominal tumors: implications for respiratory gating. *Int J Radiat Oncol Biol Physics* 2005;61:1551-1558

— *Abstract* —

Efficacy of a Respiratory Training System on the Regularity of Breathing

Eunhyuk Shin, M.S., Hee-Chul Park, M.D., Youngyih Han, Ph.D., Sang-Gyu Ju, M.S.,
Jung Suk Shin, M.S. and Yong-Chan Ahn, M.D.

Department of Radiation Oncology, Samsung Medical Center,
Sungkyunkwan University School of Medicine, Seoul, Korea

Purpose: In order to enhance the efficiency of respiratory gated 4-dimensional radiation therapy for more regular and stable respiratory period and amplitude, a respiration training system was designed, and its efficacy was evaluated.

Materials and Methods: The experiment was designed to measure the difference in respiration regularity following the use of a training system. A total of 11 subjects (9 volunteers and 2 patients) were included in the experiments. Three different breathing signals, including free breathing (free-breathing), guided breathing that followed training software (guided-breathing), and free breathing after the guided-breathing (post guided-breathing), were consecutively recorded in each subject. The peak-to-peak (PTP) period of the breathing signal, standard deviation (SD), peak-amplitude and its SD, area of the one cycle of the breathing wave form, and its root mean square (RMS) were measured and computed.

Results: The temporal regularity was significantly improved in guided-breathing since the SD of breathing period reduced (free-breathing 0.568 vs guided-breathing 0.344, $p=0.0013$). The SD of the breathing period representing the post guided-breathing was also reduced, but the difference was not statistically significant (free-breathing 0.568 vs. guided-breathing 0.512, $p=ns$). Also the SD of measured amplitude was reduced in guided-breathing (free-breathing 1.317 vs. guided-breathing 1.068, $p=0.187$), although not significant. This indicated that the tidal volume for each breath was kept more even in guided-breathing compared to free-breathing. There was no change in breathing pattern between free-breathing and guided-breathing. The average area of breathing wave form and its RMS in postguided-breathing, however, was reduced by 7% and 5.9%, respectively.

Conclusion: The guided-breathing was more stable and regular than the other forms of breathing data. Therefore, the developed respiratory training system was effective in improving the temporal regularity and maintaining a more even tidal volume.

Key Words: 4-dimensional radiation therapy, Respiratory gating radiation therapy, Breathing cycle