

Development and Utility Evaluation of Portable Respiration Training Device for Image-guided Stereotactic Body Radiation Therapy (SBRT)

Seon Bung Hwang*[†], Mun Kyu Park*, Seung Woo Park*, Yu Ra Cho*, Dong Han Lee*, Hai Jo Jung*, Young Hoon Ji*, Soo-Il Kwon[†]

*Korea Institute of Radiological and Medical Sciences, Seoul,

[†]Department of Medical Physics, Kyonggi University, Suwon, Korea

This study developed a portable respiratory training device to improve breathing stability, which is an important element in using the CyberKnife Synchrony respiratory tracking device, one of the typical Stereotactic Radiation Therapy (SRT) devices. It produced an interface for users to be able to select one of two displays, a graph type and a bar type, supported an auditory system that helps them expect next respiration by improving a sense of rhythm of their respiratory period, and provided comfortable respiratory inducement. By targeting 5 applicants and applying individual respiratory period detected through a self-developed program, it acquired signal data of 'guide respiration' that induces breathing through signal data gained from 'free respiration' and an auditory system, and evaluated the usability by comparing deviation average values of respiratory period and respiratory amplitude. It could be identified that respiratory period decreased $55.74 \pm 0.14\%$ compared to free respiration, and respiratory amplitude decreased $28.12 \pm 0.10\%$ compared to free respiration, which confirmed the consistency and stability of respiratory. SBRT, developed based on these results, using the portable respiratory training device, for liver cancer or lung cancer, is evaluated to be able to help reduce delayed treatment time due to respiratory instability and improve treatment accuracy, and if it could be applied to developing respiratory training applications targeting an android-based portable device in the future, even use convenience and economic efficiency are expected.

Key Words: Image guided robotic radiosurgery system, Respiratory training system, Synchrony

서 론

소형의 선형가속장치를 로봇팔에 장착시킨 영상유도 정위 방사선수술 및 분할정위방사선치료 장비인 사이버나이프의 Synchrony (Accuray Inc, Sunnyvale, CA) 시스템은 호흡주기에 따른 종양의 움직임을 추적하기 위해 종양이나 그 주변에 소수의 표적자(Fiducial)를 삽입하여 인체 내 치료목표의 움직

임을 실시간으로 추적하는 방식으로 흉부나 복부 장기의 치료에 있어서 매우 정확한 선량을 조사할 수 있으며, 정상조직이나 장기의 치료 후 부작용을 최소화 할 수 있다.^{1,2)} 이러한 최신 방사선치료기법에서도 방사선치료의 대상이 되는 장기나 종양의 움직임으로 인해 치료 시 대상 장기의 위치가 치료계획과 달라짐으로써 선량분포의 불일치가 발생할 수 있다.³⁻⁷⁾ 방사선치료 중 7~15% 정도의 방사선량 변화가 발생하면 심각하게 국부적으로 종양 치료효율이 떨어 질 뿐만 아니라 정상세포의 합병증까지 증가 시키는 부작용까지 나타날 수 있게 된다.⁸⁻¹⁰⁾ 장기나 종양의 움직임은 호흡과 심장박동이 주원인이 되어 발생할 수 있다. 심장박동에 의한 움직임은 그 범위 폭이 크지 않지만, 호흡에 의한 움직임은 횡격막을 포함한 그 아래에 있는 대부분의 장기에 영향을 주고 그 변동도 크다. 횡격막 움직임의 경우 깊은 숨을 쉬었을 때 최대 100 mm 까지 변위를 나타낸다고 보고되고 있다.¹¹⁾ 따라서 폐암, 간암 등과 같이 움직임이 큰 체부의 방사선치료나 방사선수술의

This research has been supported grants from the National Radiation Research Program of the Korea Institute of Radiological and Medical Sciences (No.50540-2014).

Received 12 November 2014, Revised 17 December 2014, Accepted 19 December 2014

Correspondence: Soo-Il Kwon (sikwon@kyonggi.ac.kr)

Tel: 82-31-249-9618, Fax: 82-31-253-1165

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

적용은 종양에 조사되는 고선량의 방사선으로부터 정상 조직이나 장기의 방어를 위해 호흡 운동에 따른 움직임의 보상이 근본적으로 이루어져야 하며, 이와 관련된 많은 연구들이 진행되고 있다.¹²⁾ 방사선치료에 있어 호흡에 의한 종양의 움직임을 보정하는 가장 간단한 방법으로는 방사선 조사 중 일시적으로 호흡을 멈추는 Active Breath Holding 기법이 있으며,^{13,14)} 일반적으로는 환자의 호흡주기 중 일정한 상태에 방사선을 조사하도록 미리 결정하는 방식의 호흡조절방사선치료(Respiration Gating Radiotherapy)가 있다.^{15,16)} 이와 같은 방법들은 공통적으로 안정된 호흡 하에 일정한 주기와 패턴으로 이루어질 때 치료의 효율성과 정확성이 향상 될 수 있다.¹⁷⁻¹⁹⁾ 따라서 일정한 호흡을 유도하기 위해 여러 호흡연습장치들이 개발되었다. 하지만 기개발된 대부분의 호흡연습장치들은 시스템이 구축되어 있는 장소에서 연습을 하도록 개발되었기 때문에 사용자에게 충분한 연습시간을 제공하지 못했다. 그러므로 이런 문제를 개선하기 위해서는 시간과 장소에 구애받지 않고 언제 어디서나 충분히 연습할 수 있는 휴대형 연습장치 개발이 필요하다. 본 연구에서는 대부분의 환자들이 보유하고 있는 안드로이드(Android)기반의 휴대용단말기를 대상으로 한 어플리케이션 형태의 호흡연습시스템 개발에 앞서 윈도우(Window) 운영체제의 휴대형 호흡연습프로그램을 개발하고 그 유용성을 평가하였다.

재료 및 방법

1. 휴대형 호흡연습장치의 개발

호흡 연습장치 프로그램은 그래픽기반의 언어로 쉽고 빠르게 프로그램을 만들고, 결과를 확인 할 수 있는 윈도우 기반의 LabVIEW 2012 (National Instruments, USA)를 이용하여 사용자 인터페이스를 개발하였고, 상용의 휴대용단말기와 사용법이 유사한 8인치 터치 스마트 패드(Touch Smart Pad, Iconia W3-810, Acer, TW)에 탑재하였다. LabVIEW 프로그램은 현재까지 윈도우 운영체제에서만 프로그램작업이 가능하며, 안드로이드 운영체제와의 호환은 지원되지 않고 있다. Dashboard 라는 일부 안드로이드 기반의 휴대용단말기 어플리케이션을 최근 NI사에서 제공하고 있지만, 기존의 윈도우 운영체제에서 프로그램을 완성한 후 웹브라우저용 인터페이스를 구축하여 데이터 통신을 통해 휴대용단말기에서 연동하는 방식으로, 단지 간단한 모니터링 정도만 가능하다. 또한 Wi-Fi 신호에서만 데이터 통신지원이 가능하다는 제한사항이 있다. 연습장치의 디스플레이방식은 신호그래프와 막대방식 2가지가 있으며, 사용자가 직접 선택하여 연습할 수 있도록 인터페이스를 구성

하였다. 신호그래프는 기존의 방식들처럼 끊임없이 이어져 나타나는 연속적인 호흡주기 파형이 사용자에게 스트레스를 유발하여 빠른 피로감을 불러일으킬 수 있다고 판단하였기 때문에, 인터페이스 개발에서는 개인고유 호흡주기 입력 시 주기당 표준화된 호흡신호 패턴 1개를 마커가 실시간으로 그리고, 1개의 패턴이 완성되면 화면이 초기화되어 다시 처음부터 나타나는 것으로 반복하게 된다. 따라서 사용자는 마커의 움직임에 따라 호흡연습을 하게 된다. 그래프 모양은 통상적인 사람과 모양이 아닌 사람의 실제호흡과 비슷한 패턴으로, 날숨의 후반부에서 평탄화가 지속되도록 나타내었다. 또한 실험 대상자가 반복연습을 통하여 자신의 호흡주기에 대한 리듬감을 향상시켜 다음 호흡을 예측하는데 도움이 될 수 있도록, 날숨의 일정 부분에 신호음이 울리는 청각시스템을 제공하였고, 개발된 호흡연습장치의 호흡신호 획득은 실험 1주일 전 미리 제공하여 매일 20분씩 연습하도록 유도하였다.

2. 휴대용 호흡연습장치의 유용성 평가

1) **신호 획득 및 대상:** 치료대상자의 호흡신호를 획득하는 방법은 다양하다. 카메라를 통하여 횡격막 부근에 위치시킨 표적의 상하 운동을 측정하여 호흡신호를 획득하는 방법, 가변저항(Strain gauge sensor)을 이용한 벨트 시스템을 착용하여 호흡 시 복부의 팽창 정도를 전기적 신호로 측정하는 방법, 폐활량 센서를 이용하는 호흡량 측정법 등이 많이 이용되고 있다.^{20,21)} 이번 연구에서는 가장 일반적이고 간단하게 측정할 수 있는 벨트 시스템을 이용하였다. 벨트타입 호흡센서(RESP Sensor, LAXTHA Inc, Korea)를 상복부에 착용하고 호흡에 의한 팽창 정도를 Fig. 1과 같이 전기적인 신호로 획득하였다.

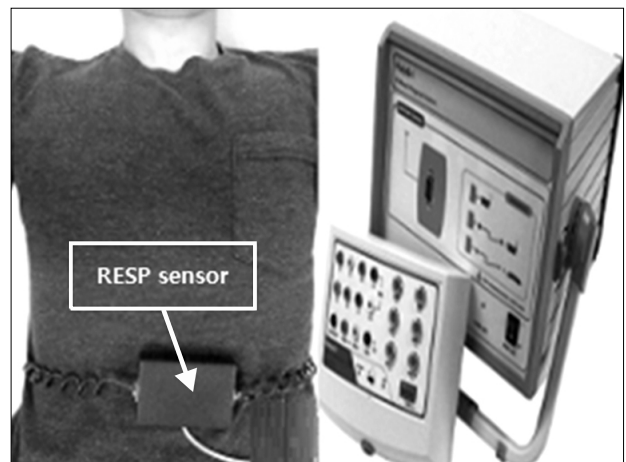


Fig. 1. Respiratory signal acquisition using the belt system.

획득한 호흡신호는 계측장비(PolyG-I, LAXTHA Inc, Korea)의 USB케이블을 통해 컴퓨터로 전송되며, 소프트웨어 인터페이스로 TeleScan (LAXTHA Inc, Korea)을 이용하여 실시간 모니터링, 데이터 수집 및 저장할 수 있다. 개인고유 호흡주기는 LabVIEW 2012를 이용하여 자체 개발한 프로그램을 통해 검출하였다. 개발한 휴대형 호흡연습장치의 유용성 평가를 위해 20대부터 50대까지 5명의 지원자를 대상으로 사용에 따른 호흡의 안정성 여부와 항상 정도를 알아보았다.

2) 호흡 신호 분석: 벨트시스템을 통하여 2분 동안 호흡유도 없이 획득한 ‘자유호흡’ 데이터와 개인고유 호흡주기를 적용한 시청각시스템을 통해 호흡을 유도하는 ‘모니터호흡’ 데이터를 텍스트 파일형식으로 저장하였다. LabVIEW 프로그램에서 생성된 호흡신호 텍스트 파일을 그래프로 나타낸 뒤, 신호 파형의 피크값을 분석하여 호흡주기를 결정하였다. 또한 진폭 검출 기능을 통해 각 주기에 해당되는 최대값(peak)과 최소값(valley)의 차로 진폭값들을 산출하였다. 자유호흡과 모니터호

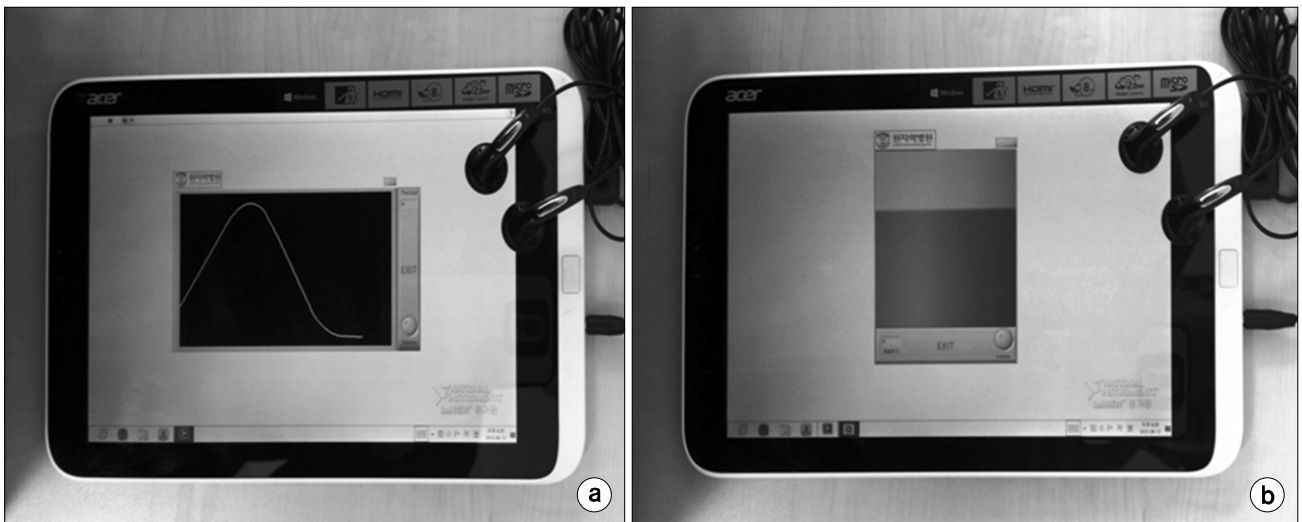


Fig. 2. A portable respiratory training device using window-based 8 inch Touch Smart Pad. (a) graph type (b) bar type.

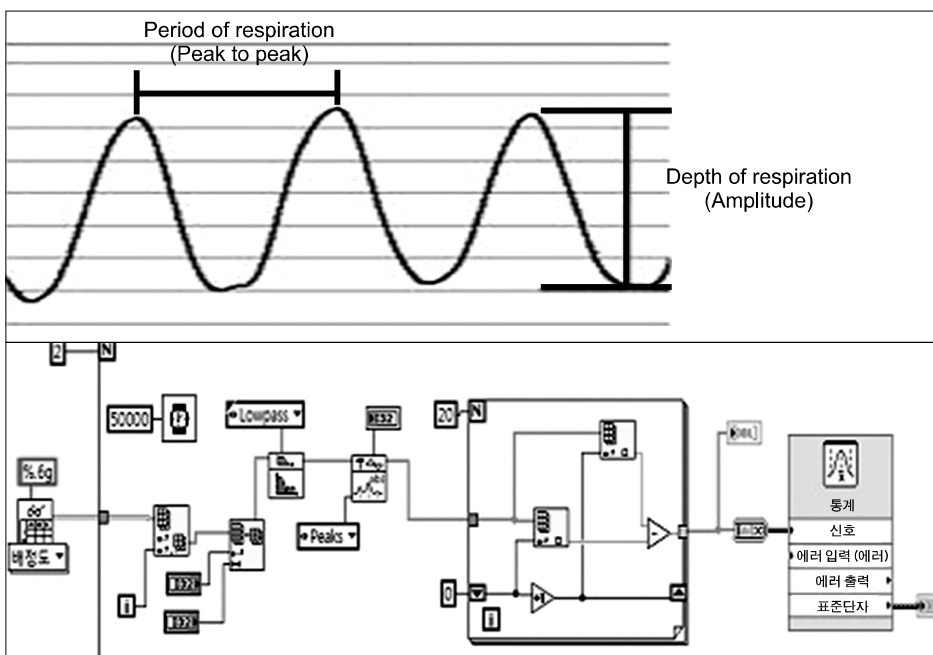


Fig. 3. A diagram of the respiratory signal detection and analysis program using LabVIEW 2012.

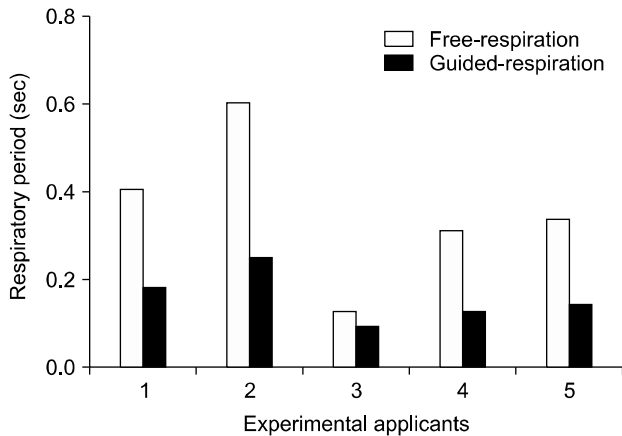


Fig. 4. Respiratory period deviation average values of free respiration and guide respiration.

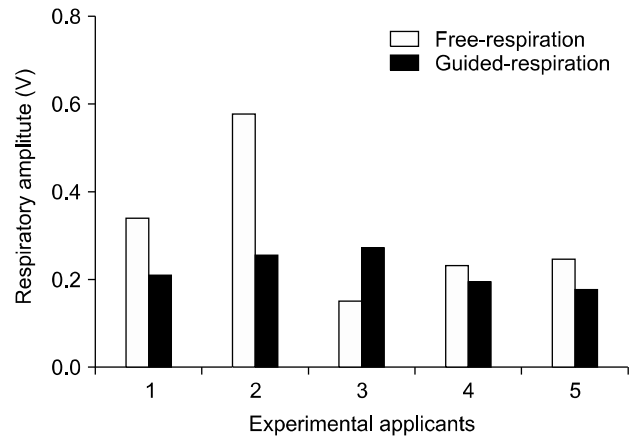


Fig. 5. Respiratory amplitude deviation average values of free respiration and guide respiration.

흡의 호흡주기 및 호흡깊이(amplitude)의 변화 정도를 알아보기 위해 Origin 8.0 프로그램(Origin Lab Corporation, USA)을 이용하여 각각의 호흡주기와 진폭값들의 평균에 대한 편차를 통해 개발한 시스템의 유용성을 평가하였다.

결 과

윈도우기반의 8인치 스마트패드에 사용자 인터페이스를 모듈화 시킨 휴대형 호흡연습장치(Fig. 2)와 측정된 신호데이터 분석 프로그램을 LabVIEW 2012를 통해 개발하였다(Fig. 3). 개발한 시스템의 유용성 평가를 위해 실험 대상자 5명에 대한 자유호흡과 호흡연습장치를 사용한 모니터호흡의 호흡주기와 호흡깊이 측정값들을 Fig. 4, 5에서 나타내었다. 측정값에서 호흡주기와 호흡깊이는 각각 PTP (peak to peak)의 평균값에 대한 편차, 진폭의 평균값에 대한 편차로 나타내었다. 자유호흡을 기준으로 측정한 개인별 평균 호흡주기의 분포는 2.3초에서 3.8초까지 다양하게 나타났다. 자유호흡과 모니터호흡의 호흡주기 편차의 평균값은 각각 0.357초, 0.158초로 모든 경우의 실험 대상자에서 모니터호흡의 결과값이 자유호흡 보다 감소하였다. 개개인 호흡깊이의 변화는 자유호흡과 모니터호흡에서 각각 0.313 V, 0.225 V로 1명을 제외한 나머지 실험 대상자 모두 모니터호흡의 편차 평균값이 자유호흡보다 감소하였다. 호흡연습장치를 사용하였을 때 호흡의 규칙성 향상 정도는 개개인에 따라 조금씩 차이가 있었지만, 대부분의 경우 호흡주기의 편차 평균값이 호흡깊이의 결과값에 비해 더 감소하여 호흡주기와 호흡깊이의 감소율은 각각 55.74±0.14%, 28.12±0.10%로 나타났다(Table 1).

Table 1. The average of deviation in period and amplitude for each applicant in free and guided respiration.

Average of deviation	Free respiration	Guided respiration	Difference (%)
Period (sec)	0.357	0.158	-55.74±0.14
Amplitude (V)	0.313	0.225	-28.12±0.10

고찰 및 결론

로봇을 이용한 영상유도 정위방사선 치료장비인 사이버 나이프의 Synchrony 호흡추적장치는 치료 중 목표물의 움직임을 관찰하고, 환자의 호흡주기에 따라 실시간 연속적인 로봇팔의 구동을 제어하면서 환자 호흡을 보상하여 목표물을 추적한다.²²⁻²⁷⁾ 이같이 호흡주기는 영상유도 체부정위방사선치료에서 매우 중요한 요소이다. 따라서 본 연구에서는 더욱 규칙적이고 안정된 호흡주기를 유도하여 치료 효율성을 높이기 위해, 윈도우운영체제의 스마트패드를 이용한 휴대형 호흡연습장치를 개발하고 유용성 평가를 통해 안드로이드기반의 휴대용단말기를 대상으로 한 호흡연습 프로그램 어플리케이션개발에 대한 적용 여부를 판단하고자 하였다. 기개발된 호흡연습장치의 경우 대부분 실험실 또는 모든 시스템이 갖추어져 있는 특정 장소로 연습 환경이 한정되어 있다. 따라서 정해진 일정에 따라 환자가 내원하여 시스템이 설치된 장소에서만 연습이 가능하지만, 개발된 연습장치는 휴대가 가능하고 사용이 편리하기 때문에 사용자가 언제 어디서나 편안한 상태에서 충분히 연습할 수 있다는 장점이 있다. 휴대형 호흡연습장치는 표준화 된 호흡패턴을 유도하는 시각시스템과 함께 개인 고유 호흡주기의 리듬감을 향

상 시킬 수 있는 청각시스템을 제공하였다. 이는 장시간 동안 호흡연습장치를 사용하게 되었을 때, 시각적으로 쌓이는 피로감을 청각으로 대체할 수 있게 해줌으로써 실험 대상자들이 더욱 효율적으로 연습할 수 있다. 또한 사용자가 원할 경우 실제 치료에서도 이어폰을 착용하여 영상유도치료에 필요한 영상획득과의 간섭 없이, 연습과 유사한 조건하에서 호흡유도를 할 수 있다. 호흡연습장치 사용법 미숙 및 부적응에 의한 영향을 줄이기 위해 간단한 사전교육을 실시하였기 때문에 대부분의 실험자는 호흡 유도시 큰 노력 없이도 쉽고 편안하게 연습장치를 사용할 수 있었다.

개발된 호흡연습장치의 유용성 평가에서 자유호흡과 모니터호흡을 2분간 측정된 신호의 편차 평균값을 비교한 결과, 호흡깊이의 경우 자유호흡에 비해 평균 28.12% 감소함으로써 호흡의 안정성이 향상됨을 알 수 있었다. 또한 호흡주기의 경우 모든 실험 대상자에서 자유호흡에 비하여 55.74%로 현저히 감소함으로써 호흡주기가 규칙적으로 유도되는 것을 실험을 통해 알 수 있었다. 이러한 결과를 관련 연구와 비교하면 일반 PC로 시각적 호흡신호를 유도하고 벨트시스템을 이용하여 호흡신호를 비교 분석한 Shin 등²⁸⁾의 경우, 자유호흡에 비해 모니터호흡에서 호흡주기와 크기에서 약 40%와 20% 정도 개선된 결과를 보였다. 고글을 이용한 시청각시스템으로 호흡을 유도한 Kang 등²⁹⁾의 연구에서는 호흡주기가 약 55%, 호흡크기에서는 33% 정도 향상된 결과가 나타났다고 보고하였다. 또한 Venkat 등³⁰⁾은 시청각시스템(Audio-visual biofeedback system)으로 호흡을 유도하고 카메라를 이용하여 유용성을 평가한 결과, 모니터호흡이 자유호흡에 비해 호흡주기와 크기에서 각각 30%와 45% 정도의 향상된 결과를 나타냈다고 보고한 바 있다. 관련연구의 결과들을 본 연구의 결과와 비교하면 호흡크기의 변화에서는 유사하였고 호흡주기의 규칙성 측면에서 높은 개선효과를 보였다.^{31,32)}

다엽콜리메이터(Multi-leaf collimator)가 장착된 선형가속기를 이용한 영상유도 방사선치료(Image Guided Radiation Therapy, IGRT)와 입체세기조절회전 방사선치료(Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT) 등에서 대표적으로 사용되는 호흡연동치료(Respiratory gating therapy)에서는 효과적인 호흡동조를 위해 호흡주기와 호흡크기의 규칙성이 모두 중요한 요소이다. 하지만 사이버나이프 Synchrony를 이용한 호흡추적에서는 환자의 호흡분석을 통한 호흡예측 프로그램을 사용하기 때문에 호흡주기의 규칙성이 고려되어야 하며, 로봇팔의 능동적 구동제어 측면에 있어 호흡의 크기와 일정성은 크게 중요하지 않다. 따라서 개발한 호흡연습장치의 우수한 호흡주기 향상 정도를 볼 때 호흡연동치료뿐

만 아니라, 사이버나이프를 이용한 영상유도 체부정위방사선치료에 있어서 더욱 우수한 임상효과를 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

실험 대상자에 대한 결과 분석에 있어서 2번 대상자의 경우, 호흡주기와 호흡크기의 편차 감소율은 각각 58.87%, 55.21%로 호흡유도 효과가 가장 높게 나타났다. 반면 실험 대상자 3번의 경우 호흡주기의 편차 평균값은 27.48% 감소하였으나 호흡깊이에 있어 모니터호흡에서의 호흡 편차 평균값이 자유호흡에서의 편차 평균값보다 오히려 77.29% 증가하는 불안정한 결과를 보여, 추가적인 연습시간을 부여하고 재측정 하였지만 결과는 크게 달라지지 않았다. 이러한 결과는 실험자가 시각적인 호흡유도파형에 과도하게 의식한 것으로 판단된다. 이는 대부분의 대상자에 있어서 호흡동조 방사선치료의 효과를 기대하기 위해서는 호흡연습장치의 적용을 통해 부적절한 대상을 미리 선별하고, 그 대상에 맞는 대처방안을 마련하는 것이 필요할 것이다.

이번 연구는 환자가 아닌 일반인 지원자를 대상으로 실험을 진행하였다. 실제 환자 개인의 신체적, 심리적 상태에 따라 생기는 여러 가지 변수들에 대한 대책을 세우기 위해서는 환자에게 있어서 호흡연습장치를 적용하여 호흡 안정성의 개선효과를 임상적으로 확인해 볼 필요가 있다고 생각된다. 또한 사용자에게 1개의 표준화된 호흡패턴이 아닌 들숨과 날숨의 비율을 고려한 몇 가지 형태의 표준패턴을 제공하여, 각 개인에 적합한 호흡패턴을 선택 할 수 있도록 방안을 마련해야 할 것이다. 본 연구를 기반으로 차후 연구를 통해 안드로이드기반의 휴대용단말기를 대상으로 한 호흡연습 어플리케이션 개발에 적용 한다면 사용자의 편의성을 비롯해 경제적 효율 까지도 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 개발된 호흡연습장치의 유용성 평가 결과를 바탕으로 윈도우 기반의 휴대형 스마트패드 호흡연습장치를 임상치료에 적용한다면 향상된 호흡의 규칙성과 안정성을 통해 치료정확도 향상에 도움을 줄 수 있을 것이며, 특히 사이버나이프를 이용한 체부정위방사선치료에서 치료정확도뿐만 아니라 호흡 불안정에 의해 발생하는 치료시간의 지연을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

References

1. Schweikard A, Glosser G, Bodduluri M: Robotic motion compensation for respiratory movement during radiosurgery. *Comp Aided Surg.* 5:263-277 (2000)
2. Schweikard A, Shiomi H, Adler J: Respiration tracking in radiosurgery. *Med Phys* 31:2737-2741 (2004)

3. **Herk V, Rasch C, Lebesque J. V:** The probability of correct target dosage : dose population histograms for deriving treatment margins in radiotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 47(4):1121-135 (2000)
4. **George R, Kini V, Vedam S, et al:** Is the diaphragm motion probability density function normally distributed?. *Med Phys.* 32:396-04 (2005)
5. **Herk V, Witte M, van der Geer J, et al:** Biologic and physical fractionation effects of random geometric errors. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 57(5):1460-1471 (2003)
6. **Yorke E D, Wang L, Rosenzweig K E, et al:** Evaluation of deep inspiration breath-hold lung treatment plans with Monte Carlo dose calculation. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 53(4):1058-070 (2002)
7. **American Association of Physicists in Medicine:** The Management of Respiratory Motion in Radiation Oncology. Report of AAPM Task Group 76 (2006)
8. **Goitein M, Busse J:** Immobilization errors: Some theoretical considerations. *Radiology* 117:407-412 (1975)
9. **Dutreix A:** When and how can we improve precision in radiotherapy?. *Radiother Oncol* 2:275-292 (1984)
10. **Mah K, VanDyk J, Keane T, et al:** Acute radiation-induced pulmonary damage: A clinical study on the response to fractionated radiotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 13:179-188 (1987)
11. **Langen KM, Jones DTL:** Organ motion and its management. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 265-278 (2001)
12. **Ozhasoglu C, Cheng B, Saw, et al:** SYNCHRONY Cyberknife Respiratory Compensation Technology. *Med Dosim* 33(2):117- 123 (2008)
13. **Mah D, Hanley J, Rosenweig KE, et al:** Technical aspects of the deep inspiration breath-hold technique in the treatment of thoracic cancer. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 48:1175-85 (2000)
14. **Rosenweig KE, Hanley J, Mah D, et al:** The deep inspiration breath-hold technique in the treatment of inoperable non-small-cell lung cancer. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 48:81-7 (2000)
15. **Kubo HD, Hill BC:** Respiration gated radiotherapy treatment: A technical study. *Phys Med Biol* 41:83-91 (1996)
16. **Li XA, Stepaniak C, Gore E:** Technical and dosimetric aspects of respiratory gating using a pressure-sensor motion monitoring system. *Med Phys* 33:145-54 (2006)
17. **Keall PJ, Mageras GS, Balter JM, et al:** The management of respiratory motion in radiation oncology report of AAPM TG 76. *Med Phys* 33(10):3874-3900 (2006)
18. **Song JY, Nah BS, Jung WK, et al:** Development of error analysis program for phase - based respiratory gating radiation therapy. *Korean J Med Physics* 17(3):136-143 (2006)
19. **Lim S, Park S, Ahn SD, et al:** Guiding curve based on the normal breathing as monitored by thermocouple for regular breathing. *Med Phys* 34:4514-4518 (2007)
20. **Ali I, Lovelock D, Kang H, et al:** Extraction of internal an-dexternal marker 3D-motion in liver patients with compression belt using kV cone-beam radiographic projections. *Med Phys* 34:2392 (2007)
21. **Zhang T, Keller H, O'Brien MJ, Mackie TR, Paliwal B:** Application of the spirometer in respiratory gated radiotherapy. *Med Phys* 30:3165-3172 (2003)
22. **Casamassima F, Cavedon C, Francescon P, et al:** Use of motion tracking in stereotactic body radiotherapy: Evaluation of uncertainty in off-target dose distribution and optimization strategies. *Acta Oncological* 45:943-947 (2006)
23. **Kuo JS, Yu C, Petrovich Z, et al:** The CyberKnife stereotactic radiosurgery system: description, installation and an initial evaluation of use and functionality. *Neurosurgery* 52:1235-1239 (2003)
24. **Kang YN, Jang JS, Choi BO, et al:** Evaluation of the Gating System Using Moving Phantom in *CyberKnife*. *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering*. 2006, Seoul, pp. 3446
25. **Schweikard A, Glosser G, Bodduluri M et al:** Robotic motion compensation for respiratory movement during radiosurgery. *Comput Aided Surg* 5, 263-277 490 (2000)
26. **Ozhasoqiu C, Saw CB, Chen H, et al:** Synchrony-CyberKnife respiratory compensation technology. *Med Dosim* 33(2):117-123 (2008)
27. **Ozhasoqiu C, Murphy MJ, Glosser G:** Real time tracking of the tumor volume in precision radiotherapy and body radiosurgery-A novel approach to compensate for respiratory motion. *Com Ass Radio Surg* 691-696 (2000)
28. **Shin EH, Park HC, Han YY, et al:** Efficacy of a Respiratory Training System on the Regularity of Breathing. *J Korean Radiol Soc* 26(3):181-188 (2008)
29. **Kang SH, Yoon JW, Kim TH, Suh TS:** Development of Respiratory Training System Using Individual Characteristic Guiding Waveform. *Korean J Med Physics* 23(1):1-7 (2012)
30. **Venkat RB, Keall P, Sawant A, George R:** Respiratory training using audio visual biofeedback. *Med Phys* 34:2370 (2007)
31. **Kini VR, Vedam SS, Keall PJ, et al:** Patient training in respiratory-gated radiotherapy. *Med Dosim* 28:7-11 (2003)
32. **Rohini G, Theodore D C, Sastry S V, et al:** Audio-visual biofeedback for respiratory-gated radiotherapy: Impact of audio instruction and audio-visual biofeedback on respiratory radiotherapy. *Int J Radiation Oncology Biol Phys* 65(3):924-933 (2006)

영상유도 체부정위방사선 치료시 호흡동조를 위한 휴대형 호흡연습장치의 개발 및 유용성 평가

*한국원자력의학원, †경기대학교 의학물리학과

황선봉*[†] · 박문규* · 박승우* · 조유라* · 이동한* · 정해조* · 지영훈* · 권수일[†]

본 연구에서는 영상유도 로봇 정위방사선치료장비(Stereotactic Radiation Therapy, SRT) 사이버나이프의 Synchrony 호흡추적장치의 사용에 있어 중요한 요소 중에 하나인 호흡의 안정성을 향상 시키고자 휴대형 호흡연습장치(portable respiratory training device)를 개발하였다. 그래프와 막대 형식의 2가지 디스플레이 중 사용자가 원하는 방식을 선택할 수 있도록 인터페이스를 제작하고, 자신의 호흡주기에 대한 리듬감을 향상 시켜 다음 호흡을 예측할 수 있도록 도와주는 청각시스템을 지원하여 편안한 호흡유도를 제공하였다. 5명의 지원자를 대상으로 자체 프로그램을 통해 검출한 개인고유 호흡주기를 적용하여, '자유호흡(free respiration)'에서 획득한 신호데이터와 시청각시스템을 통해 호흡을 유도하는 '모니터호흡(guide respiration)'의 신호데이터를 획득하고, 호흡주기(period)와 호흡깊이(amplitude)의 편차 평균값을 비교하여 유용성을 평가하였다. 호흡주기의 경우 자유호흡에 비하여 55.74±0.14%로 감소하였고, 호흡깊이의 경우에도 자유호흡의 비해 28.12±0.10% 감소함으로써 호흡의 규칙성과, 안정성이 향상됨을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 개발한 휴대형 호흡연습장치를 이용한 간암, 폐암 등의 체부정위방사선치료에 있어, 호흡 불안정에 의해 발생하는 치료시간의 지연을 줄이고 치료정확도 향상에 도움을 줄 수 있을 것으로 평가되며, 차후 안드로이드(Android)기반의 휴대용단말기를 대상으로 한 호흡연습 어플리케이션 개발에 적용한다면 사용 편의성과 더불어 경제적 효율까지 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

중심단어: 영상유도로봇방사선수술시스템, 호흡연습시스템, 싱크로니