

Evaluation of the Accuracy for Respiratory-gated RapidArc

Jiwon Sung^{*†}, Myonggeun Yoon^{*}, Weon Kuu Chung[†], Sun Hyun Bae[†], Dong Oh Shin[†], Dong Wook Kim[†]

^{*}Department of Bio-convergence Engineering, Korea University College of Health Science,
[†]Department of Radiation Oncology, [†]Kyung Hee University Hospital at Gandong,
[†]Kyung Hee University Medical Center, Seoul, Korea

The position of the internal organs can change continually and periodically inside the body due to the respiration. To reduce the respiration induced uncertainty of dose localization, one can use a respiratory gated radiotherapy where a radiation beam is exposed during the specific time of period. The main disadvantage of this method is that it usually requests a long treatment time, the massive effort during the treatment and the limitation of the patient selection. In this sense, the combination of the real-time position management (RPM) system and the volumetric intensity modulated radiotherapy (RapidArc) is promising since it provides a short treatment time compared with the conventional respiratory gated treatments. In this study, we evaluated the accuracy of the respiratory gated RapidArc treatment. Total sic patient cases were used for this study and each case was planned by RapidArc technique using varian ECLIPSE v8.6 planning machine. For the Quality Assurance (QA), a MatriXX detector and I'mRT software were used. The results show that more than 97% of area gives the gamma value less than one with 3% dose and 3 mm distance to agreement condition, which indicates the measured dose is well matched with the treatment plan's dose distribution for the gated RapidArc treatment cases.

Key Words: Gated RapidArc, RPM system, Respiratory gated radiotherapy, Treatment planning system, Dose distribution

서 론

암환자는 1999년부터 2010년까지 매년 3.5%씩 증가해왔으며 국내에서 성인이 평균나이(81세)까지 생존한다고 가정할 때, 암 발병률은 36.4%에 이를 수 있다고 보고 되었다.^{1,2)} 현재, 암 치료 기술은 수술, 항암화학요법, 방사선치료, 조혈모 세포이식, 면역요법 등으로 발전해 왔으며 특히 방사선치료의 경우는 방사선의 특징인 투과성과 암세포에 대한 세포의 치사 효과와 더불어 일반적인 수술이 가지는 수술과정 상의 위험성이 없고 입원하지 않고 외래로 치료할 수 있는 장점이 있어 기타 암 치료법 대비 치료비용이 증가하는 추세이다.

하지만 폐·간 등, 흉·복부에 위치한 내부 장기는 호흡

에 따라 위치가 변화하므로 치료 계획용 표적체적(planning target volume, PTV) 결정시 장기의 움직임을 고려하여 PTV 영역을 확장하게 되는데, 이는 방사선 치료 시 종양에 인접한 정상조직이 받는 선량이 증가하게 부작용을 발생시킨다.³⁾ 따라서, 호흡에 의한 종양의 움직임이 줄 수 있는 선량을 전달의 불확도와 주변 정상장기에 대한 추가적인 선량 전달에 따른 부작용 연구가 보고되어 왔으며⁴⁾ 이와 더불어, 환자 내부 장기의 움직임에 의한 선량조사의 불확도를 감소시키기 위해 표적이 정해진 범위 내에 있을 때만 방사선을 조사하는 호흡연동방사선치료(respiratory gated radiation therapy), 호흡을 강제로 제어하여 원하는 호흡 운동을 만들어 치료하는 호흡조절방사선치료(breathing control radiation therapy), 표적의 위치를 실시간으로 파악하여 추적 치료하는 동적병소추적방사선치료(dynamic tumor tracking radiation therapy)와 같은 호흡운동을 고려한 4차원 방사선치료 방법에 대한 관심이 고조되고 있다.⁵⁾

호흡연동방사선치료는 환자 배 위에 놓은 적외선-반사상자를 이용하여 호흡주기를 모니터링하여 표적 움직임이 적은 범위를 설정하고, 그 범위 내에 있을 때만 3차원 입체조형 방사선치료(3 dimension conformity radiotherapy, 3DCRT)나

이 논문은 2012년도 한국연구재단 기초연구사업 일반연구자 지원사업(NRF-2012R1A1A2003174)과 지식경제부 전력산업연구개발사업(57311-12)의 지원을 받아 수행되었음.

이 논문은 2013년 5월 6일 접수하여 2013년 6월 11일 채택되었음.
 책임저자 : 김동욱, (134-727) 서울시 강동구 상일동 149번지

강동경희대학교병원 방사선종양학과

Tel: 02)440-7390, Fax: 02)440-7393

E-mail: joocheck@gmail.com

세기조절방사선치료(intensity modulated radiotherapy, IMRT)의 방법으로 치료하는 기술이다. 호흡을 고려한 다른 치료법에 비해 작은 넓이에 조사되기 때문에 불필요한 선량을 줄일 수 있는 장점이 있지만 전체 호흡 주기에서 특정 범위만 방사선을 조사하기 때문에 환자치료 시간이 증대됨에 따라 치료실의 업무 부하가 증가되고 환자의 자세 불확정성 또한 증가할 수 있는 단점을 가지고 있으며, 환자의 호흡이 불규칙한 경우 적용이 어렵다는 단점이 있다.⁶⁾

최근에는 회전세기조절방사선치료(volumetric arc modulated therapy)를 RPM system와 결합하여 호흡연동 회전세기조절방사선치료(respiratory gated RapidArc)가 가능한 선형 가속기들이 소개 되었는데 이러한 방식을 적용한 선형 가속기들은 회전세기조절방사선치료의 빔 선량 분포의 정확성은 3차원 입체조형방사선치료나 세기조절방사선치료 등의 치료법과 비슷하면서도 치료시간은 다른 치료법에 비해 짧게 걸린다는 장점을 가진다.⁷⁾ 이에, 본 연구는 respiratory gated RapidArc의 선량 분포 정확도를 검증하여 임상 적용의 적절성을 평가하고자 한다.

재료 및 방법

1. 치료 계획

본 연구는 총 6개 케이스의 환자 데이터를 이용하여 수행되었다. 우선, 흉·복부에 위치한 종양은 환자 호흡에 따라 위치가 변화하므로 4차원 컴퓨터단층촬영장치(4 dimensional computed tomography, 4DCT, BigBore, Philips, USA)를 이용하여 호흡 주기에 따른 종양의 위치, 상태 변화 그리고 주변 정상장기들의 상대적인 위치 정보를 수집하였으며⁸⁾ 획득한 CT사진을 바탕으로 치료계획장치(Treatment Plan-

ning System, Eclipse, ver. 8.6, Palo Alto, USA)를 통하여 환자의 치료계획을 세우고 Anisotropic Analytical Algorithm (AAA 알고리즘)을 통해 선량계산하였다. 치료 빔 조사 범위는 한 주기 위상을 100%로 기준으로 했을 때 30~60%로 지정했으며 각 환자에 따른 치료계획 정보는 Table 1에 서술하였다.

2. 방사선치료기 및 RPM 호흡연동 시스템

방사선 치료기는 선형가속장치(Varian Clinac iX, USA)를 사용하였다. 120개의 leaf를 이용하여 세기조절방사선치료를 하는 다엽제한기(multileaf collimator)를 갖추고 있으며 광자선 에너지는 6, 10 MV 두 가지 가능하며 최대 선량율은 600 MU/min, 최대 monitor unit (MU)는 9,999 MU까지 가능하다.

RPM system (Varian Medical Systems, Palo Alto, USA)은 호흡에 따라 움직이는 범위가 큰 종양을 진단 및 치료할 때 환자의 호흡 운동을 모니터상으로 실시간 확인하는 시스템이다. 적외선 반사점이 있는 외부표지자를 환자 호흡에 따라 움직일 수 있도록 환자의 흉·복부 중간에 놓고 치료실 및 CT실에 설치되어있는 적외선 카메라를 통해 호흡운동을 실시간 감지한다. 외부 물체의 움직임으로 호흡운동을 감지하는 비침습적 방법으로, 금속표지자 삽입 방법보다는 편리하여 임상적으로 비교적 접근하기 쉬운 시스템이며 RPM연동 CT촬영을 통해 호흡 주기에 따른 종양의 위치를 확인한 후 종양의 움직임이 가장 적은 위상 및 주기를 선택하여 그 범위에서만 주기적으로 방사선 치료가 행하는 치료 계획을 수립한다.⁹⁾

RPM 시스템과 연동된 방사선치료에는 위상기반연동(Phase-based gating)와 진폭기반연동(Amplitude-based gating)

Table 1. Information of the patient radiotherapy plan (1 arc=360°, 2 arc=720°).

Case	Treatment site	Gantry angle	Collimator angle	Energy (MV)	Field size (cm ²)	Fraction size
A	Abdomen	1 arc	45.0°	6	7.9×7.9	250
B	Liver	2 arc	1 arc: 45° 2 arc: 15°	6	21.2×25.4	300
C	Liver	2 arc	1 arc: 46° 2 arc: 315°	6	19.1×20.1	400
D	Liver	2 arc	1 arc: 46° 2 arc: 315°	6	17.3×20.1	400
E	Liver	2 arc	1 arc: 45° 2 arc: 315°	6	14.8×14.8	400
F	Liver	2 arc	1 arc: 45° 2 arc: 315°	6	5.7×5.7	400

의 두 가지 방식이 있다. 위상기반연동방식은 환자의 호흡 운동 중 같은 위상일 때만 방사선을 조사하는 방식이며 진폭기반연동방식은 환자의 호흡 중 위상과 상관없이 적외선 상자의 절대적 위치가 같을 때마다 방사선을 조사하는 방식이다. 진폭기반연동방식은 호흡 신호의 전체적 위치가 호흡 도중에 변했을 때 다시 추적하여 재설정 하기 때문에 방사선 치료를 멈췄다가 다시 시작하는 반면 위상기반연동 방식은 호흡신호 위상만 고려하기 때문에 치료도중의 재설정은 필요하지 않는다.¹⁰⁾ 본 연구에서는 RPM respiratory gating 시스템의 위상기반연동방식을 토대로 수행하였다.

최근 Varian사(Varian Medical Systems Inc. Palo Alto, CA, USA)에서는 회전세기조절방사선치료기법의 일종인 Rapidarc치료 중에 RPM을 이용한 호흡연동 gating이 가능한 옵션을 제시하고 있으면 본 연구는 Varian사의 iX 치료기를 이용한 RPM 연동 Rapidarc 치료를 기반으로 수행 되었다.

3. 측정 및 분석

치료 선량 정확도를 평가하기 위해 6개 치료계획에 대하여 호흡동조기반 환자정도관리(Quality Assurance, QA)를 실시하였다. 환자의 복부 상하운동을 구현하기 위해 5.5 s의 주기, 1.3 cm 진폭으로 운동하는 일차원운동팬텀(1 dimension motion phantom)를 MatriXX 앞에 놓고 적외선반사상자를 그 위에 올려 놓아 RPM system (Varian Medical Systems, Palo Alto, USA)을 통해 운동 신호를 획득하였다. 또한 치료 선량을 측정하기 위해 MatriXX (IBA Dosimetry, Germany) 검출기를 이용하였다. MatriXX 측정기를 빌드 업(build-up) 시키기 위해 30×30×5 cm³의 물등가고체팬텀을 환자테이블에 놓고 그 다음 MatriXX, 같은 크기의 물등가고체팬텀 순으로 그 위에 올려 놓는다. 운동팬텀신호를

RPM 시스템으로 획득하여 위상이 30~60%일 때 주기적으로 방사선을 조사하였다(Fig. 1), MatriXX측정기를 통해 획득한 선량 분포는 정량적인 분석을 위해 상용화된 선량분석용 프로그램(I'mRT, IBA, Germany)으로 2차원 선량분포도로 나타내어 ECLISPE 선량계산값과 비교 분석하였다.

MatriXX 측정기는 IMRT, IGRT (image guided radiotherapy), arc therapy의 정도관리하기 위해 최적화된 정사각형 구조(24×24 cm²)의 2차원 이온함 배열의 선량측정기이다. 내부에는 1,020개의 직경 4.5 mm, 높이 5 mm의 이온함이 32×32 간격으로 정렬되어 있으며 20 msec/sample의 속도로 측정되며 0.42 Gy/nC의 민감도, 측정점간 거리 7.62 mm의 공간해상도를 가진다. 또한 MatriXX 측정기의 방사선 입사각에 따른 측정 편차를 보정해주기 위하여 각도화인센서(Gantry angle sensor)를 갠트리(Gantry)에 부착하여 각도에 따른 편차를 보정 하였다.¹¹⁾

MatriXX 측정기로 측정된 선량은 I'mRT (IBA Dosimetry, Germany) 프로그램을 통해 치료계획 시스템에서 계산된 선량과 비교-분석 되었다. 본 연구에서는 감마지표(Gamma Index) 값인 DD (Dose Difference), DTA (Distance to agreement)를 계산하여 히스토그램과 2차원 선량분포도를 이용하여 분석하였다.¹²⁾

결 과

호흡연동 회전세기조절방사선치료의 선량 분포의 정확도를 평가하기 위해 치료 계획을 통해 계산된 선량 값과 실제 치료 빔을 조사하여 검출된 선량 값을 2차원 선량 지도(2 dimension dose map)를 통하여 비교하였으며, 3 mm이 내의 DTA와 3%이내의 DD에 대해 0에서 1사이의 감마지

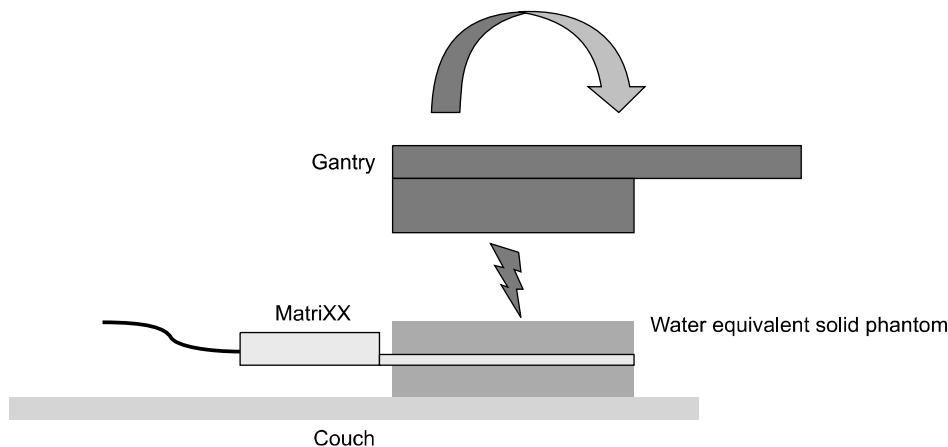


Fig. 1. Quality Assurance (QA) by using the MatriXX detector.

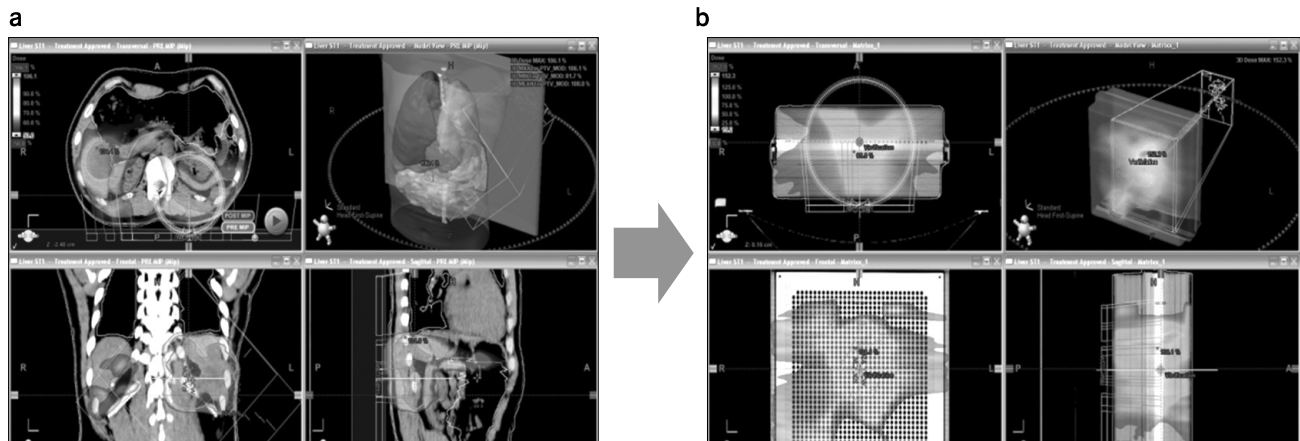


Fig. 2. (a) Radiation Therapy Planning (RTP) result using by ECLIPSE, (b) Dose distribution of same patient radiation therapy plan when it is projected into MatriXX detector.

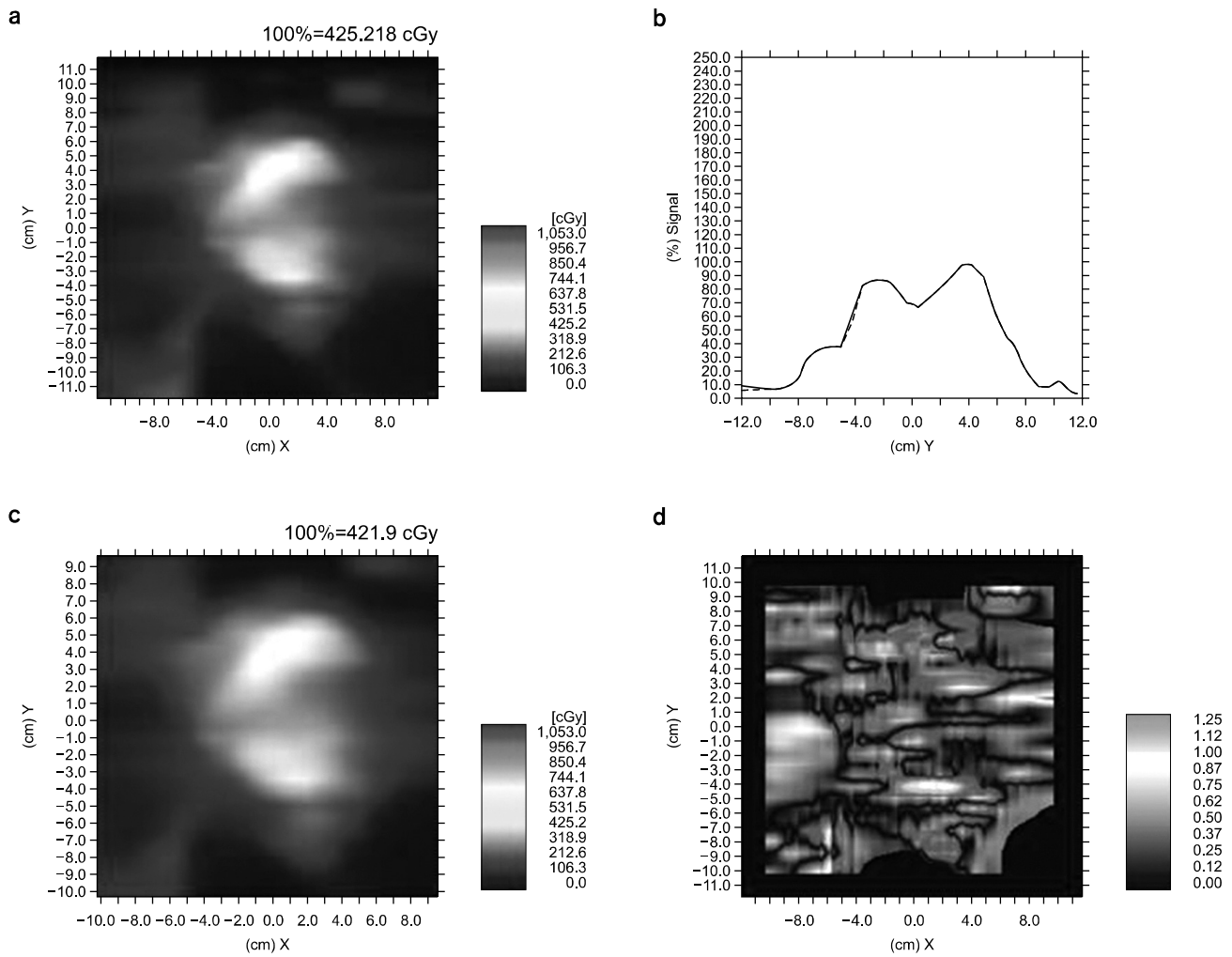


Fig. 3. (a) 2 dimensional dose distribution of the measurement by MatriXX, (b) dose comparison of x-axis profile between measurement and RTP plan, (c) 2 dimensional dose distribution of the RTP plan by ECLIPSE, (d) gamma distribution for same sample.

표 값을 가지는 면적을 전체 면적과의 비율을 통해 정량적으로 확인하였다.

Fig. 2a는 환자의 CT 데이터를 바탕으로 ECLIPES v8.6으로 치료 계획하여 종양과 종양 주변 기관에 흡수된 선량 크기를 색 차이로 나타낸 사진이며 Fig. 2b는 환자 정도관리하기 위해 기존의 치료 계획을 바탕으로 재 계획된 것을 나타낸 사진이다. 측정할 때와 같은 배열로 물등가고체팬텀 사이에 MatriXX 측정기를 놓고 촬영한 CT 데이터를 바탕으로 치료 계획하였다.

Fig. 3는 I'mRT 분석 프로그램을 통해 치료 계획된 선량 값과 실제로 조사하여 측정된 선량 분포 및 이를 비교한 그래프들이다. Fig. 3의 (a)는 실제 측정된 2차원 선량분포 그래프, (c)는 치료 계획된 2차원 선량 분포 그래프이며 (b)는 y축 방향에서 선량 측정값과 계산 값을 비교한 그래프이고 (d)는 (a)와 (c)에 대한 Gamma index 그래프이다. (a), (c)의 선량지도 형태는 비슷하지만 크기의 차이가 있음을 알 수 있지만 (a)그래프의 범위가 x, y축으로 $-12.0 \sim +12.0$ cm이고 (c)그래프는 x, y축으로 $-10.0 \sim +10.0$ cm임을 고려해 볼 때 두 개의 선량 지도의 크기와 형태는 비슷하다는 것을 정성적으로 확인할 수 있다. (c)를 통해 y축에서의 두 가지의 선량 값의 일치 정도를 정성적으로 확인할 수 있었으며 (d)는 계산값과 측정값을 비교하여 3 mm의 델타거리와 3% 델타거리 이내이면 0~1의 Gamma 값으로 계산되어 파란색 계통의 색으로 나타내고 1 이상의 Gamma 값으로 계산되면 적색 계통의 색으로 나타내어 전체적인 선량분포의 정확도를 정성적으로 평가할 수 있다.

감마 계산으로 산출된 전체 2차원 선량 면적에 대해 환자 정도 관리의 기준 값인 3 mm의 델타거리와 3% 델타거리 이내인 면적의 비율로 나타낼 때 A, B, C, D, E, F 순으로 각각 98.3, 99.8, 97.8, 98.6, 99.3, 98.4%의 결과를 보여주어 평균 98.7%의 일치율을 확인하였다.

고찰 및 결론

기존의 호흡연동방사선치료법은 호흡으로 인해 발생되는 불필요한 피폭선량을 줄이는 장점이 있는 동시에 환자 치료 시간이 증가하며 그에 따라 치료실의 업무 부하가 증가되는 단점이 있다. 회전세기조절방사선치료는 3차원입체조형방사선치료, 세기조절방사선치료 등에 비해 치료시간이 단축된다는 것을 고려해 볼 때, 호흡연동 회전세기조절방사선치료는 호흡연동치료의 단점인 긴 치료시간과 업무 부하 증가를 보완하는 치료법이다. 하지만 일반적으로 사

용되는 3차원 입체조형방사선치료에 비해 임상 적용 경험 이 적고 다엽콜리메이터(Multileaf collimator, MLC)의 위치 변화 및 갱트리(Gantry) 회전이 복합적으로 변화한다는 점을 고려해 볼 때 호흡연동 회전세기조절치료를의 정확성에 대한 검증이 필요하다. 본 연구는 호흡연동 회전세기조절 방사선치료의 치료 선량의 정확도를 검증하여 임상 적용의 적절성을 확인하고자 하였다.

치료 선량의 정확도는 치료 계획된 선량 값과 실제 조사된 선량 값을 2차원 선량분포 지도로 비교하였으며 감마 계산을 통해 6개의 회전치료선량 모두 오차를 3%이내로 일반적인 세기조절 방사선치료의 환자 정도관리 수준을 만족함을 발견하였다. 기존의 연구결과와 비교해 볼 때, 0에서 1사이의 감마지표 값을 가지는 면적의 비율이 최소 93%, 최대 100%으로 보고 됨에 따라 본 연구결과와 비슷함을 확인 하였다.^{13,14)}

본 연구는 고형의 팬텀을 사용하여 치료기의 조사 선량 관 관련한 호흡연동 회전세기조절 방사선치료 정확도를 평가한 것으로, 실제 환자는 본 연구에 사용한 균질한 고체 팬텀에 비해 다양한 물리적, 화학적 특성을 지닌 기관 및 세포가 복잡하게 구성되어 있으며 보다 유동적이므로 호흡연동 치료과정에서 환자 자체가 줄 수 있는 불확도에 대한 연구는 포함되어 있지 않으며 추후, 환자 신체와 호흡운동의 보다 세밀한 모사가 가능한 팬텀을 이용하여 호흡 동조 치료의 전체적인 불확도 측정이 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 국가암정보센터: 암발생률 추세 분석. <http://www.cancer.go.kr>
2. 국가암정보센터: 성별 10대암 조발생률. 2010. <http://www.cancer.go.kr>
3. Webb S: Motion effects in (intensity modulated) radiation therapy: a review. *Phys Med Biol* 51(13):R403-R425 (2006)
4. Ju SG, Hong C, Huh W, et al: Development of an offline based internal organ motion verification system during treatment using sequential cine EPID images. *Korean J Med Phys* 23(2):91-98 (2012)
5. 임상욱: 동적 병소추적 방사선치료를 위한 호흡연동시스템에 관한 연구 경기도, 경기대학교 박사학위논문 (2008)
6. Ono T, Takegawa H, Ageishi T, et al: Respiratory monitoring with an acceleration sensor. *Phys Med Biol* 56(19):6279-6289 (2011)
7. Popescu CC, Olivotto IA, Beckham WA, et al: Volumetric modulated arc therapy improves dosimetry and reduces treatment time compared to conventional intensity-modulated radiotherapy for locoregional radiotherapy of left-sided breast cancer

- and internal mammary nodes. Int J Radiat Oncol Biol Phys 76(1):287-295 (2010)
8. Weiss E, Wijesooriya K, Dill SV, et al: Tumor and tissue motion in the thorax during respiration: Analysis of volumetric and positional variations using 4DCT. Int J Radiat Oncol Biol Phys 67(1):296-307 (2007)
 9. Varian: Real-time Position Management™ (RPM) System. <http://www.varian.com>
 10. George R, Chung TD, Vedam SS, et al: Audio-visual bio-feedback for respiratory-gated radiotherapy: impact of audio instruction and audio-visual biofeedback on respiratory-gated radiotherapy. Int J Radiat Oncol Biol Phys 65(3):924-933 (2006)
 11. IBA Dosimetry: MatriXXEvolution system: The solution for Rotational Treatment QA. <http://www.iba-dosimetry.com>
 12. IBA Dosimetry: I'mRT MatriXX: The New Standard in 2D IMRT Pre-Treatment Verification. <http://www.iba-dosimetry.com>
 13. Qian J, Xing L, Liu W, et al: Dose verification for respiratory-gated volumetric modulated arc therapy. Phys Med Biol 56(15):4827-4838 (2011)
 14. Nicolini G, Vanetti E, Clivio A, et al: Pre-clinical evaluation of respiratory-gated delivery of volumetric modulated arc therapy with RapidArc. Phys Med Biol 55(12):N347-357 (2010)

RapidArc를 이용한 호흡연동 회전세기조절방사선치료 할 때 전달선량의 정확성 평가

*고려대학교 보건과학대학 바이오융합공학과, †강동경희대학교병원 방사선종양학과
‡경희대학교병원 방사선종양학과

성지원*[†] · 윤명근* · 정원규[†] · 배선현[†] · 신동오[†] · 김동욱[†]

환자 호흡할 때 흉·복부 내부에 있는 장기의 위치는 주기적으로 변한다. 이에 따라 방사선치료 동안 종양에 대한 선량 불확도가 발생하게 되며, 불확도를 줄이기 위한 여러 방사선치료방법이 제시되고 있다. 호흡연동방사선치료는 특정 위상 또는 진폭에만 방사선을 조사하는 방법으로 불필요한 피폭선량은 줄일 수 있는 장점이 있지만 긴 치료 시간과 노력이 필요하다는 단점이 있다. 호흡연동방사선치료 중 회전세기조절방사선치료(respiratory gated Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT)는 다른 호흡연동치료시스템에 비해 치료 시간이 짧다는 장점이 있기 때문에 본 연구는 respiratory gated VMAT 치료 선량의 정확성을 검증하여 임상 적용의 적절성을 평가하고자 한다. 본 연구는 총 6개의 VMAT 치료계획(Eclipse, ver. 8.6, Palo Alto, USA)을 토대로 수행되었으며, 각각의 치료계획은 AAA 알고리즘을 이용해서 선량이 계산되었다. 환자의 호흡운동을 구현하기 위해 환자 테이블 위에 1차원운동팬텀이 사용되었으며, 영상 기반 추적 시스템(Real-time Position Management, RPM, Varian Medical Systems, Palo Alto, USA)을 통해 운동 주기 신호를 획득하였다. 또한, 2차원-이온함-배열(MatriXX, IBA, Germany) 측정기를 이용하여 특정 호흡 신호 위상에 따른 전달 선량을 측정하였다. 측정된 선량과 치료 계획된 선량을 정성적인 분석을 위해 상용화되어 있는 선량분석용 프로그램(I'mRT, IBA, Germany)을 통해 2차원 선량분포를 0에서 1사이의 감마지표(Gamma index) 비교 결과 모든 케이스에서 97% 이상의 일치함을 확인하였다. 따라서 호흡연동 회전세기조절 방사선치료는 호흡연동방사선치료의 단점인 시간적인 제약을 일정 부분 해소할 수 있었으며 2차원 선량분포 비교 결과 오차값 3%이내의 정확도에서 환자정도관리 수준을 만족하였고 임상적용이 가능함을 확인하였다.

중심단어: Gated RapidArc, RPM system, 호흡연동방사선치료, 방사선치료계획시스템, 선량분포