

Quantitative Evaluation of Gated Radiation Therapy Using Gamma Index Analysis

Sun Young Ma, Ji Hoon Choi, Tae Sig Jeung, Sangwook Lim

Department of Radiation Oncology, Kosin University College of Medicine, Busan, Korea

Generally, to evaluate gated radiation therapy, moving phantoms are used to simulate organ motion. Since the target moves in every direction, we need to take into account motion in each direction. This study proposes methods to evaluate gated radiation therapy using gamma index analysis and to visualize adequate gating window sizes according to motion ranges. The moving phantom was fabricated to simulate motion in the craniocaudal direction. This phantom consisted of a moving platform, the I'm MatriXX, and solid water phantoms. A 6 MV photon field with a field size of $4 \times 4 \text{ cm}^2$ was delivered to the phantom using the gating system, while the phantom moved in the 1-, 2-, 3-, 4-, and 5-cm motion ranges. The gating windows were set at 40~60%, 30~40%, and 0~90%, respectively. The I'm MatriXX acquired the dose distributions for each scenario and the dose distributions were compared with a $4 \times 4 \text{ cm}^2$ static field. The tolerance of the gamma index was set at 3%/3 mm. The greater the gating window, the lower the pass rate, and the greater the motion range, the lower the pass rate in this study. In case treatment without gated radiation therapy for the target with motion of 2 cm, the pass rate was less than 96%. But it was greater than 99% when gated radiation therapy was used. However gated radiation therapy was used for the target with motion greater than 4 cm, the pass rate could not be greater than 97% when gating window was set as 30~70%. But when the gating window set as 40~60%, the pass rate was greater than 99%.

Key Words: Gated radiation therapy, Gamma index, I'm MatriXX, Gating window, Motion range

서 론

호흡에 따른 장기의 움직임은 흉부 및 복부에 위치한 종양의 방사선치료를 시행함에 있어 중요한 문제로 인식되어 왔다.¹⁻⁴⁾

폐의 경우 호흡에 따른 움직임영역(motion range)은 최대 5.5 cm이며, 흉부뿐 아니라 복부에 위치한 췌장이나 신장과 같은 장기들도 호흡에 따라서 4 cm 이상 움직일 수 있다고 보고하고 있다.⁵⁾ 따라서 방사선치료시 종양표적에 장기의 움직임에 대한 추가적 여유분(margin)을 주고 치료계획을 세운다. 국제방사선단위측정위원회(ICRU, international commission on radiation units and measurements) 보고서 62

에서는 내부여백(IM, internal margin)을 장기의 움직임에 대한 여백(margin)이라고 하고 임상표적부피(CTV, clinical target volume)에 내부여백을 포함한 부피(volume)를 내부표적체적(ITV, internal target volume)으로 정의했다. 그리고 계획용표적체적(PTV, planning target volume)을 결정하는데 내부표적체적을 포함하여 움직임을 충분히 고려하도록 권고하고 있다.⁶⁾ 그러나 호흡에 따라 운동하는 표적을 치료하기 위해 충분한 여백을 주게 되면 정상조직이 필요이상으로 피폭되어 정상조직손상확률(NTCP, normal tissue complication probability)이 증가할 수 있다. 따라서 호흡연동방사선치료(respiration gated radiation therapy)기법^{7,8)} 등이 많이 이용되고 있다.^{9,10)}

호흡연동방사선치료를 검증하기 위해서는 다양한 움직이는 팬텀을 이용한다.¹¹⁾ 분석하는 방법에 있어서는 대개 가로선량분포(profile) 비교분석 등 1차원적 분석방법을 사용하나 실제로 타겟은 모든 방향으로 움직이고 있기 때문에¹²⁾ 각각의 방향에 대한 분석이 필요하다.

본 연구에서는 감마지표 평가를 통하여 호흡동기방사선치료의 정량적평가 방법을 제시하고, 움직임영역에 따른

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0013701).

이 논문은 2013년 8월 27일 접수하여 2013년 9월 6일 채택되었음.

책임저자 : 임상욱, (602-702) 부산시 서구 암남동 34

고신대학교 의과대학 방사선종양학교실

Tel: 051)990-6393, Fax: 02)6280-6247

E-mail: medicalphysics@hotmail.com

적절한 연동창(gating window) 크기를 알아보고자 한다.

대상 및 방법

환자의 호흡운동을 모사하기 위하여 움직이는 팬텀(moving phantom)을 제작하였다. 움직임은 호흡에 의한장기의 움직임이 가장 큰 두미축(craniocaudal)으로만 모사하도록 하였다. 움직이는 팬텀은 2차원 이온전리함배열(I¹mRT MatriXX, IBA Dosimetry, Germany)과 1.3 cm 두께 고체물팬텀(solid water phantom), 움직이는 받침대(moving platform)로 구성되어있다. 움직이는 받침대는 기어 모터(gear motor)의 회전운동을 크랭크축을 거쳐 직선왕복운동을 하도록 설계하였다. 운동영역은 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 및 5.0 cm 중 하나를 선택할 수 있도록 설계하였으며, 호흡주기는 환자의 평균호흡주기인 3.6초로 고정하였다.

움직이는 받침대 위에는 2차원 이온전리함을 올려놓고 그 위에 1.3 cm의 고체물팬텀(solid water phantom)을 올려 놓아 2차원 이온전리함의 유효층정깊이(active layer) 0.3 cm와 고체물팬텀의 두께 1.3 cm으로 6 MV 광자선의 최대선량깊이 1.6 cm가 되도록 하였다(Fig. 1). 선원에서 팬텀표면까지의 거리 100 cm에서 6 MV 광자선 4×4 cm² 정사각형 조사면을 400 MU/min의 선량율로 100 MU를 호흡위상 50%에 해당하는 팬텀의 위치를 기준으로 삼았으며, 팬텀을 각각 1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm, 및 5 cm 씩 움직이도록

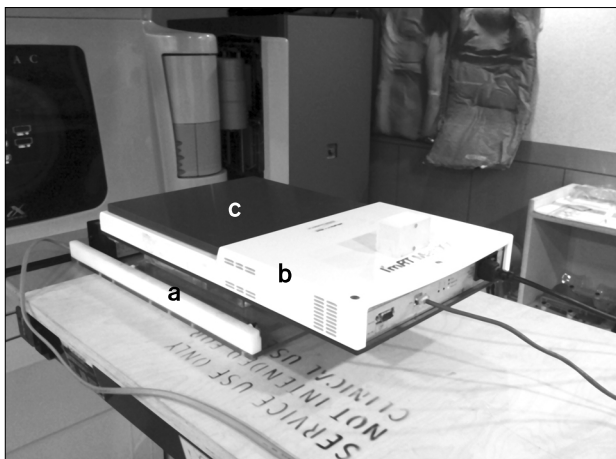


Fig. 1. Moving phantom consists of; (a) Moving platform, (b) I¹m MatriXX, and (c) Solid water phantom. The platform moves by crank connected to the geared motor. This phantom designed to simulate respiratory-induced organ motion in craniocaudal direction.

하고 방사선치료를 시행하였다. 연동창을 40~60%, 30~70%, 및 0~90% 이렇게 3가지 시나리오로 호흡연동방사선치료(gated radiotherapy)를 시행하였다. 호흡연동방사선치료는 영상기반추적시스템(real-time position management, Varian Medical Systems, Inc., USA)을 이용하였다. 방사선 조사시 2차원 이온전리함은 초당 10 프레임으로 데이터를 수집하였다. 팬텀이 멈추어있을 때를 기준으로 하여 각각의 호흡연동방사선치료를 OmniPro I¹mRT (IBA Dosimetry, Germany) 프로그램에서 비교하였다. 두 선량분포의 비교는 감마지표(gamma index)로 하였는데 3%/3 mm를 기준으로 합격률(pass rate)을 계산하였다.

결 과

Fig. 2는 운동영역 5 cm의 예로 호흡연동방사선치료의 적용 여부와 연동창의 크기별 선량분포를 보여준다. Fig. 2a는 정지해 있을 경우 가장 이상적인 선량분포이며, Fig. 2b~e는 5 cm의 움직임이 있을 경우이다. Fig. 2d는 움직이는 표적에 호흡연동방사선치료를 적용하지 않았을 경우이며 선량분포가 움직이는 방향으로 편향됨을 볼 수 있다.

Fig. 3에서 검은색 영역은 허용범위 3%/3 mm 조건을 만족시키지 못한 불합격 영역이다. 운동영역이 길수록 그리고 연동창이 클수록 검은색 영역이 증가하였다. 연동창을 40~60%로 작게 설정할 경우 감마지표는 운동영역에 크게 영향을 받지 않았다.

Table 1은 호흡연동방사선치료시 연동창의 크기에 따른 감마인덱스 분석으로 계산되어진 합격률을 보여준다. 연동창 0~90%는 호흡연동방사선치료를 미적용한 경우이다.

고찰 및 결론

Fig. 2d에서 선량분포가 팬텀이 움직인 반대방향으로 편향된 것을 볼 수 있는데 이유는 기준 위치를 호기(end of expiration)시 즉, 50%의 위상의 위치로 설정했기 때문이다. 호흡에 의한 장기의 움직임으로 인해 선량분포가 예상보다 크게 벗어남을 알 수 있다.

Fig. 3에서 호흡연동방사선치료시 연동창을 작게 선택할 수록 잔여움직임(residual motion)이 작아지기 때문에 감마지표가 작아졌으며, 연동창을 크게 선택하면 감마지표가 커짐을 알 수 있었다. Table 1에서 운동영역과 연동창 크기에 따라 감마지표의 합격률이 달라짐을 알 수 있었다. 운동영역이 1 cm 미만의 경우 호흡연동방사선치료를 시행하지

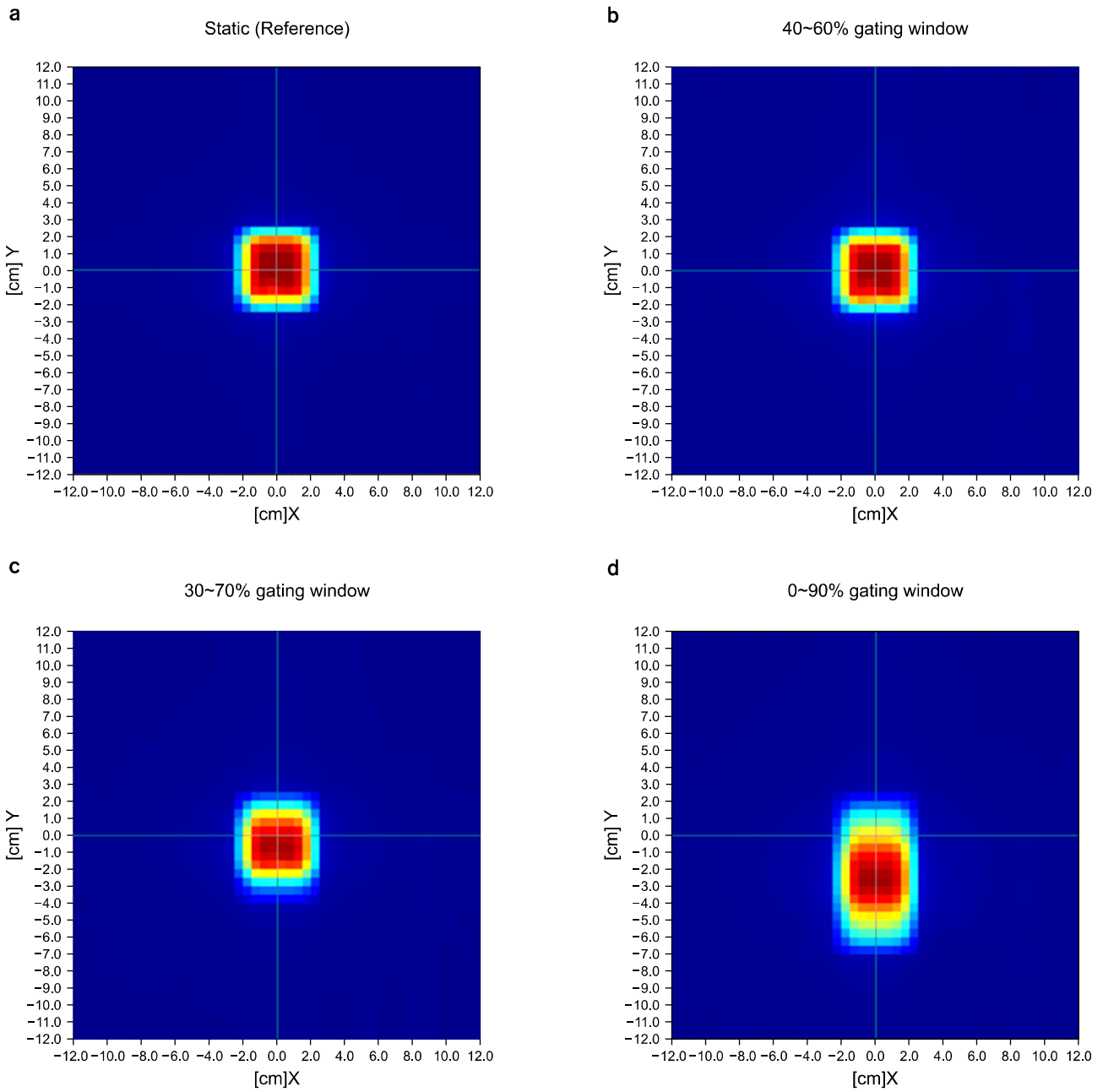


Fig. 2. Example of 4×4 cm² field dose distribution for 5 cm motion range: the larger gating window, the larger penumbra to the motion directions. No gating for the moving target caused shift of dose distribution.

않고 치료를 하더라도 98% 이상의 합격률을 보이지만 운동영역이 2 cm만 되어도 합격률은 현저히 떨어졌다. 그러나 운동영역이 2 cm 이상이라도 30~70% 연동창 크기로 호흡연동방사선치료를 시행 할 경우 99% 이상의 합격률을 보인다. 따라서 운동영역이 2 cm 이상일 경우 호흡연동방사선치료가 효과적이라는 것을 알 수 있다. 운동영역이 4

cm 이상일 경우 호흡연동방사선치료를 하더라도 연동창을 30~70%로 선택할 경우 합격률이 97%를 넘지 못하였다. 그러나 연동창을 40~60%를 선택할 경우 합격률은 99% 이상이었다. 따라서 운동영역이 4 cm 이상일 경우 호흡연동방사선치료시 연동창을 40~60%로 선택하는 것이 효과적으로 나타났다. 그러나 앞의 실험은 사인곡선(sinusoidal

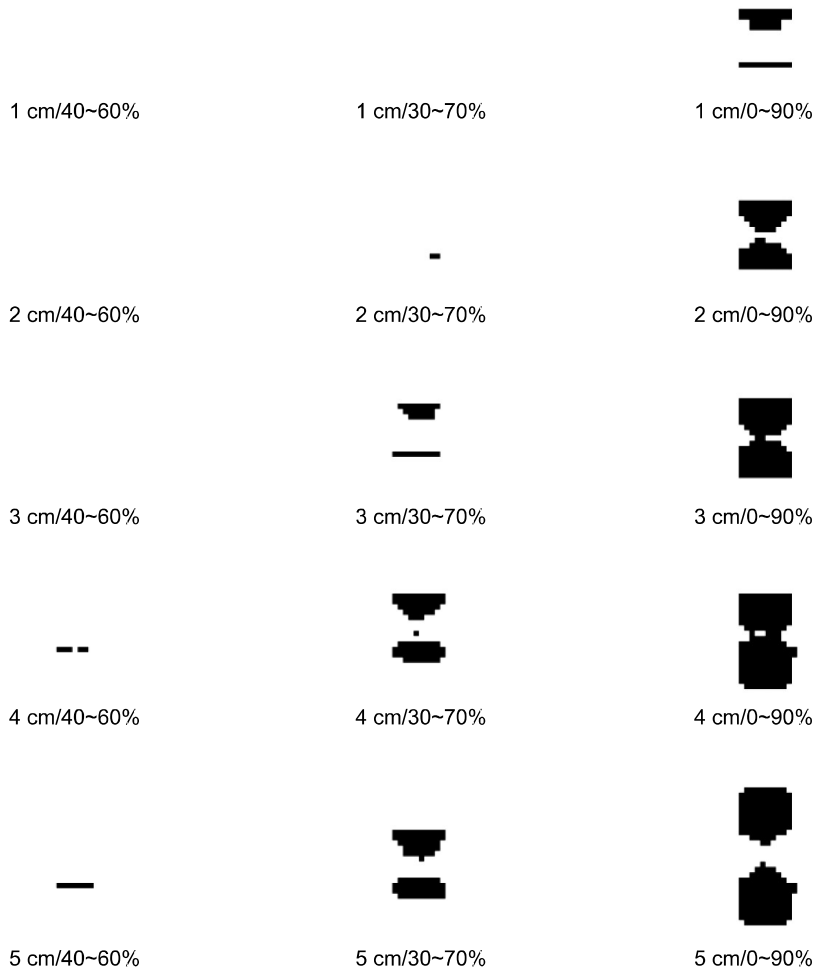


Fig. 3. Results of gamma distribution for each gating window comparing to the reference (static field); white: pass/black: fail. Increase of motion range causes decrease pass rate.

Table 1. Results of pass rate calculated from gamma index for each gating window comparing to reference (static field).

Motion range	Gating window			
	40~60%	30~70%	0~90%	0~90% (w/margin)
1 cm	100.00%	100.00%	98.18%	97.83%
2 cm	100.00%	99.91%	95.83%	95.18%
3 cm	100.00%	98.78%	94.31%	93.75%
4 cm	99.78%	96.83%	92.75%	91.58%
5 cm	99.70%	96.57%	91.58%	90.06%

curve) 운동을 가정하였기 때문에 호기(end of expiration) 상태에서 상대적으로 긴 실제 환자의 호흡운동에서는 연동창 30~70%를 선택하더라도 결과가 더 좋을 수 있다. 호흡운동을 시행하지 않은 경우 표적의 움직임에 따른 정상조직

의 피폭으로 불합격률이 높아졌다.

연동창을 작게 선택할 경우 3차원 재구성 컴퓨터단층촬영(CT, computed tomography) 영상의 질이 떨어지고 치료시간이 늘어나는 단점이 있다. 호흡연동방사선치료를 시행함으로써 늘어나는 치료 시간은 연동창 40~60%의 경우 호흡연동방사선치료를 시행하지 않을 경우보다 운동영역에 관계없이 약 5배가 늘어났고, 30~70%의 경우 약 2.5배가 늘어났다(Fig. 4). 다만 실제 환자 호흡곡선의 경우 호기 상태의 시간이 사인곡선에 비하여 길기 때문에 치료시간이 이보다 짧을 수 있다.

참 고 문 헌

1. Allen AM, Siracuse KM, Hayman JA: Evaluation of the influence of breathing on the movement and modeling of lung

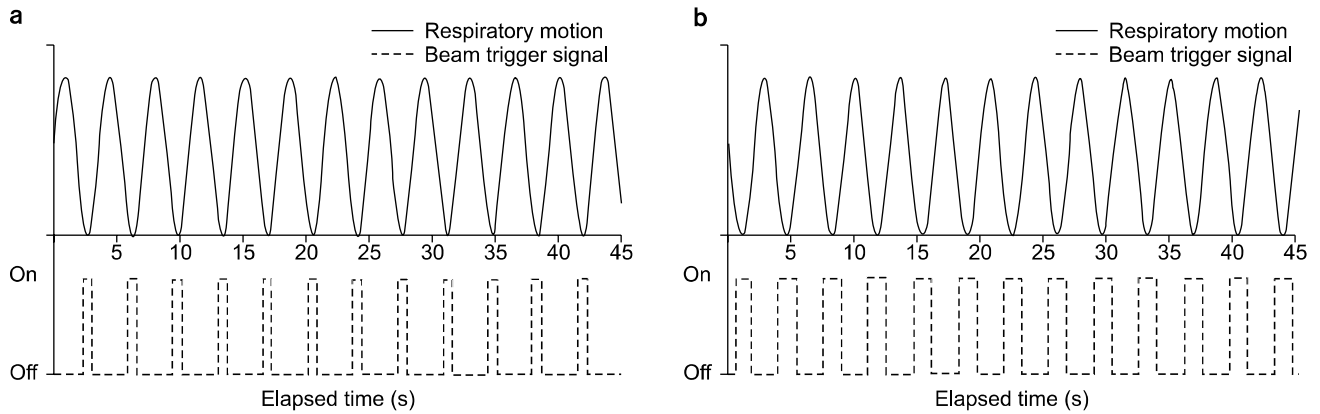


Fig. 4. (a) Gating window at 40%~60% with 5 cm motion range, (b) Gating window at 30%~70% with 5 cm motion range: Sum of beam on time for each gating level were compared with total treatment time, respectively.

- tumors. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 58(4):1251-1257 (2004)
2. **Lim S, Park S, Ahn S, et al:** Guiding curve based on the normal breathing as monitored by thermocouple for regular breathing. *Med Phys* 34(11):4514-4518 (2007)
3. **Arugr T, Ltami J, Aruga M:** Target volume definition for upper abdominal irradiation using CT scans obtained during inhale and exhale phases. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 48(2):465-469 (2000)
4. **Gagné IM, Robinson DM:** The impact of tumor motion upon CT image integrity and target delineation. *Med Phys* 31(12):3378-3392 (2004)
5. **Suramo I, Päivänsalo M, Myllylä V:** Cranio-caudal movements of the liver, pancreas and kidneys in respiration. *Acta Radio Diagn (Stockh)* 25(2):129-131 (1984)
6. **ICRU Report 62:** *Prescribing, Recording, and Reporting Photon Beam Therapy (Supplement to ICRU Report 50)*, International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda. (1999)
7. **Kubo HD, Hil BC:** Respiration gated radiotherapy treatment: a technical study. *Phys Med Biol* 41(1):83-91 (1996)
8. **Ramsey CR, Scaperoth D, Arwood D, Oliver AL:** Clinical efficacy of respiratory gated conformal radiation therapy. *Med Dos* 24(2):115-119 (1999)
9. **임상욱:** 동적 병소추적 방사선치료를 위한 호흡연동시스템에 관한 연구. 경기도, 경기대학교 박사학위논문 (2008)
10. **성지원, 윤명근, 정원규, 배선현, 신동오, 김동욱:** RapidArc를 이용한 호흡연동 회전세기조절방사선치료 할 때 전달선량의 정확성 평가. *의학물리* 24(2):127-132 (2013)
11. **임상욱, 안승도, 박성호 등:** 열진쌍 마스크를 이용한 호흡모사 팬텀 연구. *대한방사선종양학회지* 23(4):217-222 (2005)
12. **Seppenwoodle Y, Shirato H, Kitamura K, et al:** Precise and real-time measurement of 3D tumor motion in lung due to breathing and heartbeat measured during radiotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 53(4):822-834 (2002)

감마지표 분석을 통한 호흡연동방사선치료의 정량적 평가

고신대학교 의과대학 방사선종양학교실

마선영 · 최지훈 · 정태식 · 임상욱

일반적으로 호흡연동방사선치료(gated radiation therapy)의 평가를 위해 호흡에 의한 장기의 움직임을 모사하는 움직이는 팬텀(moving phantom)을 사용한다. 표적(target)은 모든 방향으로 움직이기 때문에 모든 방향의 움직임을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 감마지표(gamma index) 분석을 통한 호흡연동방사선치료의 평가방법을 제시하고 움직임영역(motion range)에 따른 적절한 연동창(gating window)의 크기를 알아보려고 한다. 두미축(craniocaudal) 방향으로 움직임을 모사하는 팬텀을 제작하였다. 이 팬텀은 움직이는 받침대(moving platform), 2차원 이온전리함배열(l'm MatriXX, IBA Dosimetry, Germany), 및 고체물팬텀(solid water phantom)으로 이루어졌다. 6 MV 에너지의 광자선을 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ 의 조사면(field size)으로 호흡연동방사선치료 시스템을 이용하여 팬텀을 각각 1, 2, 3, 4, 및 5 cm 만큼 움직이도록 하고 방사선을 조사하였다. 연동창은 각각 40~60%, 30~70%, 및 0~90%로 설정하였다. 2차원 이온전리함배열은 각 시나리오에 따라 선량분포를 획득하였고 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ 조사면으로 정지한 상태에서 조사한 선량분포와 비교하였다. 허용범위를 3%/3 mm로 설정하고 감마지표를 계산하였다. 연동창(gating window)의 크기가 클수록 합격률(pass rate)는 낮아졌고, 운동영역(motion range)이 커질수록 합격률은 낮아졌다. 호흡연동방사선치료를 시행하지 않고 운동영역이 2 cm의 병소를 치료할 경우 합격률은 96% 이하로 현저히 떨어졌다. 그러나 호흡연동방사선치료를 시행하면 합격률은 99% 이상으로 올릴 수 있었다. 운동영역이 4 cm 이상일 경우 호흡연동방사선치료를 하더라도 연동창을 30~70%로 선택할 경우 합격률이 97%를 넘지 못하였다. 그러나 연동창을 40~60%를 선택할 경우 합격률은 99% 이상이었다.

중심단어: 호흡연동방사선치료, 감마지표, 2차원 이온전리함배열, 연동창, 움직임영역