pISSN : 1976-0620, eISSN : 2384-0633
https://doi.org/10.7742/jksr.2019.13.1.119 "J. Korean Soc. Radiol., Vol. 13, No. 1, February 2019"

A study of Curved Dosimeter for Flattening Filter Free Beam Quality Assurance Evaluation using Curved Dosimeter in Radiotherapy

Moojae Han,[1,2] Yohan Shin,[1,2] Jaehoon Jung,[3] Seunguk Heo,[3] Kyotae Kim,[4] Yeji Heo,[2] Heunglae Cho,[5] Sungkwang Park[2,5,*]

[1]Department of Radiation Oncology, Collage of Medicine, Inje University
[2]Department of Medical Imaging Research Institute, Inje university
[3]Research for Convergence of Biomedical Science and Technology, Pusan National University Yangsan Hospital
[4]Korea Institute of Radiological and Medical Sciences
[5]Department of Radiation Oncology, Busan Paik Hospital, Inje University

Received: January 25, 2019. Revised: February 25, 2019. Accepted: February 28, 2019

ABSTRACT

Radiation therapy using flattening filter free beam can prevent beam attenuation caused by flattening filter and can improve treatment efficiency. However, accurate dose control is not established for nonuniform iso dose distributions. In this study, curved dosimeter based on photoconductive material HgI_2 was fabricated and its reproducibility and linearity were evaluated at 6 MV photon energy to verify its performance. In order to show the usefulness of the curved measurement, the signals measured on the flat substrate and the curved substrate were compared in the flattening filter free beam using the acrylic filter. As a result, the reproducibility of the unit cell dosimeter was evaluated as SE 0.613%, and the linearity was evaluated as R-sq 0.9999. The usability evaluation of the array curve dosimeter demonstrated its usefulness by indicating a curvature error rate of 11.073%p and a reduced error rate.

Keywords: FFF Beam, Quality Assurance, Curve measurement, flatness, Radiotherapy

Ⅰ. INTRODUCTION

일반적으로 방사선 치료에서 사용되는 선형가속기(LINAC; linear accelerator) 장비는 조사면적에 따라 빔의 균일한 조사를 위해 평탄화 필터(FF; Flattening Filter)가 장착된다. 이러한 FF 빔은 선량률이 낮아지는 단점이 있지만, 균일한 선량분포를 나타내기 때문에 3차원 입체조형치료(3D-Conformal Radiation Therapy의 치료계획(Radiation Treatment Plan)에 용이하다. 이때 정도관리(QA; Quality Assurance)는 단면적 선량분포의 균일성을 평가하기 위한 flatness 항목으로써 오차범위 3% 기준에서 엄격하게 평가되어 진다.[1]

최근 방사선 치료분야에서는 FFF(Flattening Filter Free) 빔을 활용하여 정위적체부방사선치료(Stereo tactic Body Radiotherapy) 뿐 만 아니라 세기조절방사선치료(Intensity Modulated Radiation Therapy) 및 체적변조방사선치료(Volumetric Modulated Arc Therapy)를 수행하고 있다. 이러한 FFF 빔은 고선량률 조사가 가능하기 때문에 선량 전달 효율이 높으며, 이로인해 선량 전달 시간을 감소할 수 있어 치료효율을 증가시키는 장점을 가진다.[2,3] 이에 다양한 부위에 따른 선량계산 및 전달속도 향상을 위한 FFF 빔 치료계획연구가 활발히 이루어지고 있지만[3], 균일하지 않은 단면적 선량분포를 나타내기 때문에 장비의 QA 항목으로써 flatness 평가를 수행하기 어렵다.

* Corresponding Author: Sungkwang Park E-mail: physicist@inje.ac.kr Tel: +82-051-891-1754
Address: 75, Bokji-ro, Busanjin-Gu, Busan, 47392 Korea

그러므로 FFF beam의 정확한 선질 평가를 위한 계측 기준이 구축되고 있지 않는 실정이다.[4]

한편 방사선 계측 분야에서는 성능 개선 및 목적에 따른 기능성을 포함하는 물질연구가 이루어지고 있다. 이중 광도전체 물질 HgI_2는 높은 원자번호를 나타내기 때문에 컴프턴 효과에서 야기되는 고에너지 전자기파에 대한 방사선 데미지를 줄일 수 있으며, 높은 전하수집효율을 나타내기 때문에 치료방사선 선량계로써 다양한 연구가 수행되었다.[5,6] 이는 입자 바인더(PIB; Particle In Binder) 증착 방식에서 HgI_2는 Silicon rubber binder와 혼합되어 기계적인 안정성을 나타내기 때문에 곡면 구조의 선량계 제작이 가능하다.[7,8]

이에 본 연구에서는 FFF 빔의 flatness를 평가하기 위한 film형 HgI_2 선량계를 제작하였으며, 성능 검증을 위해 재현성 및 선형성을 평가하였다. 또한 곡면 계측의 유용성을 나타내기 위하여 아크릴 필터가 적용된 FFF 빔에서 평면기판과 곡면기판에서 계측되는 line array 선량계의 신호차이를 제시하였다.

Ⅱ. MATERIAL AND METHODS

1. Polycrystaline HgI_2 Dosimeter fabrication

본 연구에서는 LINAC에서 조사되는 고에너지 방사선을 계측하기 위한 HgI_2 기반의 선량계를 제작하고자 하였다. 이때 선량계의 검출효율의 우수성을 제시하기 위한 ITO(Indium Tin Iodide)가 도포된 film 기반의 Unit cell dosimeter와 곡면 계측의 유용성을 나타내기 위해 7개의 pixel을 가지는 line array 곡면 선량계를 제작하였다. Fig. 1은 필름기반의 line array 곡면 선량계 제작에 대한 모식도를 나타내고 있다.

제작에 사용된 원료는 Mercury (II) iodide (Kojundo chemical laboratory Inc., Japan)를 사용하였으며 PIB 증착법을 활용하여 물질을 증착하였다. 이를 위한 바인더 용액은 Silicon rubber binder(DC-184)를 첨가하여 제조하였다. 하부전극층은 곡면을 형성할 수 있는 ITO film을 활용하였으며, 이물질 제거를 위해 30분간 초음파 공정을 수행하였다.

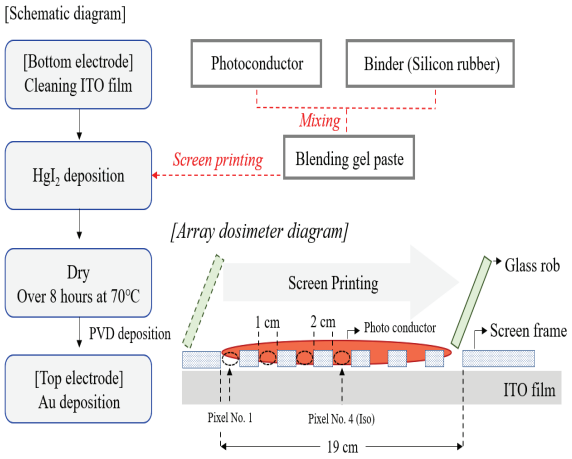


Fig. 1. Scematic diagram of the procedure adopted for the fabrication of the HgI2-based dosimeter.

광도전체층은 바인더 물질과 파우더 형태인 HgI_2 물질을 혼합한 paste-gel 상태에서 Three roll mill 공정을 수행하여 고르게 혼합하였다. 이에 혼합된 물질은 1 cm × 1 cm로 틀이 형성된 ITO film 상에 Screen printing 증착 방법으로 도포하였다.[8] 이 후 우수한 표면 균일성을 나타내기 위해 30분 동안 석정반 공정을 수행한 후, 70℃에서 8시간 동안 오븐 공정을 수행하였다. 상부전극층은 99.999 순도인 wire type의 Au(Sigma Aldrich Inc. U.S.A.)를 사용하였으며 PVD 방식을 이용하여 0.8 cm × 0.8 cm 크기로 증착하였다. Line array 곡면 선량계의 경우 동일한 제작 방식으로 pixel 7개를 포함하는 array 선량계를 제작하였다. 이 때, 조사야 면적 20 cm × 20 cm를 고려하여 pixel의 최대 길이는 19 cm로 설정하였으며, pixel 간 간격을 2 cm로 설정하였다.

2. Evaluation of unit cell dosimeter

본 연구에서는 전자 가속을 통해 방사선치료에서 일반적으로 사용되는 6 MV 광자에너지를 발생하기 위한 LINAC system(Varian Inc., U.S.A.)을 활용하였다. 표면 간 선원거리(Source to Surface Distance; SSD)는 환자의 종양 체적 부위를 기준으로 하는 치료조건과 같이 100 cm로 설정하였다. Build-up 물질은 조직 등가를 나타내는 Slab phantom(PTW, RW3, Germany)을 사용하였으며, 팬텀의 두께는 6 MV 에너지의 최대 투입량을 고려하여 가속 1.6 cm로 설정하였다. 또한 후방 산란으로 발생되는 전자 교란을 방지하기 위해 Slab phantom을 10 cm 두께로 설정하

였다.[8] 제작된 선량계는 Electrometer(Keithley, 6517A, USA)로 구동전압 1 V/μm를 인가하였다. 또한 신호 파형을 획득하기 위해 Unit cell dosimeter는 Oscilloscope (LeCroy Inc, 62 Xi, USA)를 활용하였다. 이에 본 연구에서는 제작된 film형 Unit cell dosimeter의 성능 검증을 위해 재현성 및 선형성을 분석하였다. Table 1은 본 실험에서 사용된 선형 가속기의 가속 전압을 포함하여 일반적인 특성 및 실험 조건을 나타내고 있다.

Table 1. Measurement condition.

Beam Information	
Photon energy	6 MV
Radiation Intensity	1, 10, 50, 100, 200, 300, 500, 1000 MU
Dose rate	500 MU/min
SSD	100 cm
Build up meterial	1.6 cm
Electric field	1 V/um
Field size	20 cm × 20 cm

재현성 평가의 경우 제작된 film형 Unit cell dosimeter를 조사야 중앙에 위치시킨 후, 치료 시 비교적 안정적인 조사 선량률을 나타내는 500 MU/min에서 100 MU의 동일한 방사선량을 10회 조사하였다. 이후 얻어진 모든 측정값에 대하여 첫 번째 조사된 빔을 기준으로 정규화 하였으며, SE(Standard Error)를 산출하였다. 이 때 SE는 95% 신뢰구간을 만족하는 1.5% 이하를 기준으로 평가하였다.[9] 이러한 기준은 방사선 계측분야의 선량계 재현성 성능을 평가하기 위한 지표로 활용되고 있다.[10] 선형성 평가의 경우 점차적으로 증가하는 방사선량에 대한 검출 반응을 평가하기 위하여 500 MU/min의 선량률에서 방사선량을 1, 10, 50, 100, 200, 300, 500, 1000 MU로 점차적으로 증가시켜 조사하였다. 이후 측정된 데이터는 100 MU를 기준으로 정규화 하였으며, 선형회귀분석 결과로부터 나타나는 결정계수(R-sq)를 통하여 평가하였다. R-sq는 결정 계수가 '1' 에 가까워질수록 회귀 분석에서 높은 적합성을 의미한다. 선형성 평가는 0.9900 이상의 R-sq을 기준으로 선형성을 평가하였다.

3. Evaluation of array dosimeter

Line array 곡면 선량계는 National Instruments에서 제공하는 NI cDAQ-9178(NI 9102) 장비를 활용하여 각 픽셀에서 얻어지는 waveform을 획득하였다. 또한 DAQ NI 9102 sampling 조건은 sample 500, speed 500인 최대 조건으로 입, 출력되는 데이터양을 동일하게 설정하였다. 이 후, 획득된 파형은 ACQ(Biopac, Acqknowledge 4.2, CANADA) 프로그램을 사용하여 수집된 전하량을 산출하였다. 이때 제작된 line array 곡면 선량계는 Fig. 1의 모식도와 같이 동일한 간격으로 7개의 pixel을 포함하고 있으며, pixel No. 4의 경우 조사면의 중앙점에 위치하게 된다. 본 연구에서는 line array 곡면 선량계의 pixel 간 성능을 동일하게 설정하기 위해 중심점에 위치하는 No.4 pixel 신호를 기준으로 보정계수를 산출하여 적용하였다.

또한 곡면 선량계의 유용성을 평가하기 위해 FFF 빔을 나타낼 수 있는 아크릴 필터를 gantry 출력부에 위치하였으며, 필터와 같은 기울기를 나타내는 곡면 기판과 평면기판에서 계측된 평균 오차율을 비교하였다.

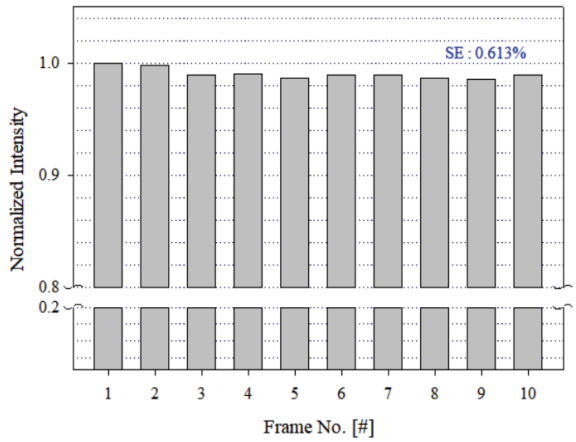
Ⅲ. RESULT

1. Evaluation of unit cell dosimeter

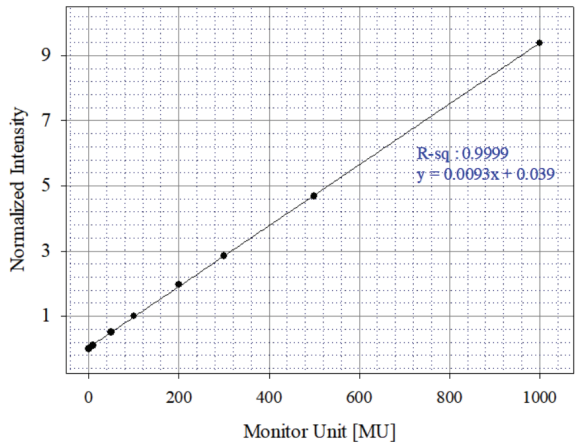
Film형 Unit cell dosimeter 재현성 평가는 6 MV 에너지 대역에서 500 MU/min의 선량률에서 재현성과 선형성을 평가하였다. Fig. 2는 각 에너지 대역에서 성형된 빔에 대한 (a) 재현성 및 (b) 선형성을 나타내고 있으며, 정규화된 신호를 나타내고 있다.

재현성 평가 결과는 SE 0.613%를 나타내었다. 이에 신뢰구간 95%를 만족하는 1.5% 이하의 수치를 보였으며, 반복적으로 조사됨에 따른 수집신호가 점차적으로 감소하는 추세를 보였다.

선형성 평가 결과는 R-sq 0.9999로 나타났으며 제작된 HgI_2 선량계는 결정계수 0.9900 이상인 우수한 선형성을 나타내었다.



(a) Reproducibility



(b) Linearity

Fig. 2. Properties of Unit cell dosimeter at 6 MV.

2. Evaluation of array dosimeter

본 연구에서는 곡면 계측의 유용성을 나타내기 위해 아크릴 기반의 성형 필터를 적용하여 빔을 성형하였으며, Fig. 3은 6 MV 에너지대역에서 아크릴 필터 적용 유무에 대하여 pixel 4.를 기준으로 정규화된 선량분포를 나타내고 있으며, 아크릴 필터 적용 유무에 따른 FF beam과 FFF beam에 대한 결과를 나타내고 있다.

아크릴 필터가 적용되지 않은 FF 빔에서는 Gain이 적용된 평탄한 특성을 나타내고 있으며, 아크릴 필터가 적용된 FFF beam에서는 iso center인 4 pixel에서 멀어질수록 세기가 낮아지는 특성을 보였다. 본 연구의 결과는 평면 기판에서 23.337%, 곡면 기판에서 12.264%로 11.073%p 감소된 신호 차이를 보였다.

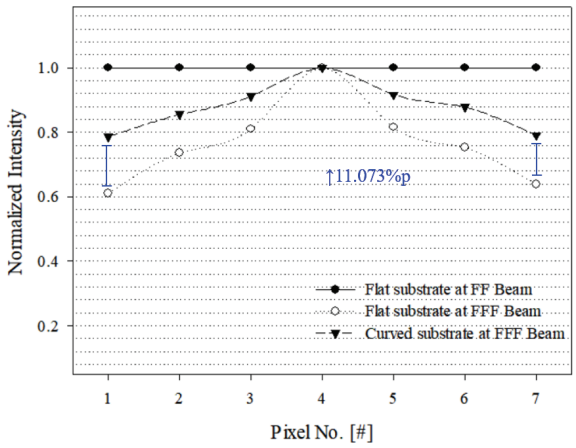


Fig. 3. Signal error for flat and curved substrate at 6 MV.

Ⅳ. DISCUSSION & CONCLUSION

본 연구는 고선량률의 FFF 빔을 활용하는 Varian사의 True beam 장비의 FFF 모드의 QA flatness 평가를 수행하기 위한 기초 연구로써, curved dosimeter를 제작하여 평면 및 곡면 계측에서 나타나는 신호특성을 비교하였다. HgI_2 물질을 포함하는 film형 unit cell dosimeter에 대한 반응 특성은 재현성의 경우 6 MV에서 SE 는 95% 신뢰구간을 만족하는 1.5% 이하를 모두 만족하였다. 이때 점차적으로 신호가 감소하는 추세는 charge trapping으로 인한 전하누설 결과로 사료된다.[10] 또한 선형성의 경우 0.9999로 '1'에 가까운 우수한 선형성을 나타내었다. 이는 기존 ITO glass 기판상의 HgI_2 dosimeter연구와 유사한 특성을 나타내고 있다.[8] 또한 line array 곡면 선량계를 제작하여 곡면 계측의 유용성 평가를 수행하였다. 곡면 계측 결과 평면 계측에 비해 평균 오차율은 6 MV에서 11.073%p 감소된 오차율을 나타내었다.

이러한 신호 차이는 cone beam에서 발생되는 거리 역 자승 법칙에 근거한 방사선 강도 변화를 나타내며, 방사선의 방출 방향, 각도 및 산란에 인해 dosimeter의 계측 위치 변화에 따른 차이를 크게 발생시키는 것으로 사료된다. 그러므로 FFF 빔의 선량 계측은 광자에너지 대역과 구부림 반경에 따라 오차가 발생되며 curved dosimeter로써 이러한 오차를 줄일 수 있음을 의미한다. 하지만 본 연구결과에서 나타나는 그래프 추세는 아크릴 필터로 인한

산란 영향도 있지만 pixel size 제작 공정의 한계로 정밀하지 못한 원인을 포함한다. 이에 소형화된 pixel size에서 평가가 이루어진다면 보다 정밀한 수치를 나타낼 수 있을 것으로 사료된다. 또한 광자 에너지 대역에 따른 신호 특성과 인체 팬텀을 이용한 계측 연구가 이루어진다면, 인체에 미치는 피부선량 또는 흡수선량에 대한 계측이 가능할 것이며, FFF 빔의 가장 큰 차이점을 나타내는 선량률에 대한 비교연구가 이루어진다면 빔의 특성 분석이 이루어 질 것으로 사료된다. 구부림 기능성을 나타내는 line array 곡면 선량계는 고에너지를 이용하는 산업비파괴분야에서 영상 잡음을 초래하는 piecewise의 형태학적 한계를 개선하기 위한 기초연구로써 활용될 수 있으며, 모든 방사선 계측 분야에서 다양한 어플리케이션을 제공할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

본 연구는 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(No. 2017R1A2B4007511)

Reference

[1] F. M. Khan, K. P. Doppke, K. R. Hogstrom, G. J. Kutcher, R. Nath, S. C. Prasad, J. A. Purdy, M. Rozenfeld, B. L. Werner, "Clinical Electron-beam dosimetry: report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 25," Medical Physics, Vol. 18, No. 1, pp. 73-109, 1991.

[2] A. Fogliata, J. Fleckenstein, F. Schneider, M. Pachoud, S. Ghandour, H. Krauss, G. Reggiori, A. Stravato, F. Lohr, M. Scorsetti, L. Cozzi, "Flattening filter free beams from TrueBeam and Versa HD units: Evaluation of the parameters for quality assurance," Medical Physics, Vol. 43, No. 1, pp. 205-212, 2016.

[3] J. B. Chung, S. W. Kang, K. Y. Eom, C. H. Song, K. S. Choi, T. S. Suh, "Comparison of Dosimetric Performance among Commercial Quality Assurance Systems for Verifying Pretreatment Plans of Stereotactic Body Radiotherapy Using Flattening-Filter-Free Beams," Journal of Korean medical science, Vol. 31, No. 11, pp. 1742-1748, 2016.

[4] D. Paynter, S. J. Weston, V. P. Cosgrove, D. I. Thwaites, "Characterisation of flattening filter free (FFF) beam properties for initial beam set-up and routine QA, independent of flattened beams," Physics in Medicine & Biology, Vol 63, No. 1, pp. 15-21, 2017.

[5] G. Hajdok, J. J. Battista, I. A. Cunningham, "Fundamental X-ray interaction limits in diagnostic imaging detectors: Spatial resolution," Medical Physics, Vol 35, No. 7, pp. 3194-3204, 2008.

[6] K. M. Oh, J. S. Kim, J. W. Shin, S. U. Heo, G. S. Cho, D. K. Kim, J. G. Park, S. H. Nam, "Improvement in pixel signal uniformity of polycrystalline mercuric iodide films for digital X-ray imaging," Japanese Journal of Applied Physics, Vol 53, No. 3, 031201, 2014. DOI: DOI10.7567/JJAP.53.031201

[7] K. M. Oh, et al., "Flexible X-ray detector for automatic exposure control in digital radiography," Journal of Nanoscience and Nanotechnology, Vol 16, No. 11, pp. 11473-11476, 2016.

[8] J. Y. Kim, S. K. Park, H. L. Cho, S. H. Nam, C. J. Kim, Y. K. Lee, K. M. Oh, S. W. Kim, J. W. Shin, T. S. Suh, K. J. Ahn, S. J. Noh, "Study on the feasibility of the HgI2 dosimeter for quality assurance of radiotherapy," Journal of Instrumentation, Vol 8, No. 5, P05020, 2013. DOI: 10.1088/1748-0221/8/05/P05020

[9] L. A. da Rosa, D. F. Regulla, U. A. Fill, "Reproducibility study of TLD-100 micro-cubes at radiotherapy dose level," Applied radiation and isotopes. Vol. 50, No. 3, pp. 573-579, 1999.

[10] C. W. Moon, K. T. Kim, S. K. Park, M. J. Han, Y. J. Heo, J. K. Park, J. E. Kim, "Development of a stable and sensitive semiconductor detector by using a mixture of lead(II) iodide and lead monoxide for NDT radiation dose detection," Journal of Instrumentation, Vol. 13, No. 3, C03023, 2018.

Flattening Filter Free Beam의 정도관리를 위한 곡면선량계 가능성 연구

한무재,[1,4] 신요한,[1,4] 정재훈,[2] 허승욱,[2] 김교태,[3] 허예지,[4] 조흥래,[5] 박성광[4,5,*]

[1]인제대학교 의과대학 방사선종양학과
[2]양산부산대학교병원 의생명융합연구소
[3]한국원자력의학원
[4]인제대학교 의료영상연구소
[5]인제대학교 부산백병원 방사선종양학과

요 약

최근 도입된 FFF 빔을 활용하는 방사선치료는 flattening filter에서 비롯되는 빔의 감쇠를 막을 수 있어 치료효율을 높일 수 있지만, 불균일한 단면적 선량분포에 대하여 정확한 정도관리가 구축되어 있지 않은 실정이다. 이에 본 연구에서는 광도전체 물질 HgI_2 기반의 곡면 선량계를 제작하였으며, 성능을 검증하기 위하여 6 MV 광자에너지에서 재현성 및 선형성을 평가하였다. 또한 곡면 계측의 유용성을 나타내기 위하여 아크릴 필터를 적용한 FFF beam에서 평면 기판과 곡면 기판 상에서 계측되는 신호를 비교하였다. 그 결과 Unit cell 선량계의 재현성은 SE 0.613%, 선형성은 R-sq 0.9999로 나타났으며, line array 곡면 선량계의 유용성 평가는 평면 기판에서 23.337%, 곡면 기판에서 12.264%로 11.073%p 감소된 신호 차이를 보였다.

중심단어: FFF 빔, 정도관리, 곡면계측, 평탄도, 방사선치료

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	한무재	인제대학교 의과대학 방사선종양학과	연구원
(공동저자)	신요한	인제대학교 의과대학 방사선종양학과	연구원
	정재훈	양산부산대학교병원 의생명융합연구소	연구원
	허승욱	양산부산대학교병원 의생명융합연구소	연구원
	김교태	한국원자력의학원	연구원
	허예지	인제대학교 의료영상연구소	연구원
	조흥래	인제대학교 부산백병원 방사선종양학과	정교수
(교신저자)	박성광	인제대학교 부산백병원 방사선종양학과	부교수