

The Influence of Volume Effect in 2D-array Ion Chamber on the Measurement of IMRT Dose Distribution

Sung Joon Kim*[†], Seoung Jun Lee*[†], In Kyu Park*[†], Jeong Eun Lee*[†],
Shin Hyung Park*[†], Ki Ho Seol*[†], Jae Chul Kim*[†]

Department of Radiation Oncology, *Kyungpook National University Hospital,

[†]Kyungpook National University School of Medicine, Daegu,

[‡]Department of Physics, College of Science, Yeungnam University, Gyongsan, Korea

We evaluated the influence of volume effect on the measurement of IMRT dose distribution by comparing a 2D-array ion chamber and other dosimeters. Matrix phantom which is a 2D-array ion chamber having volume effect was compared with beam image system and film for the measurement of dose distribution. Five intensity-modulated radiation therapy plans were created using five fields in the virtual phantom. The measured dose distribution was compared with the calculated one by radiation treatment planning system and analysis program. We evaluated the conformity of dose distribution by calculating correlation coefficients and gamma values. The highest error rate of 1.3% was associated with matrix phantom in which volume effect in small field sizes was substantial.

Key Words: IMRT, Matrix phantom, Beam image system, Film, Volume effect

서 론

세기조절방사선치료(Intensity modulated radiation therapy, IMRT)를 환자에 적용하기 위해서는 치료계획에 의한 것과 실제 조사되는 선량 및 선량분포의 일치성 확인이 필수적으로 이루어져야 된다. AAPM (The American Association of Physicists in Medicine) 지침서에서 세기조절방사선치료계획의 각 조사면에 대한 선량분포(dose distribution)와 각 조사면 내에서 시험점 선량(test point dose)의 허용오차범위는 3~5%로 규정하고 있다.¹⁾ 이 규정에 따른 세기조절방사선치료 조사면의 선량 및 선량분포 측정을 위해 원통형 이온함, 평행평판형 이온함, 다이오드 및 다이아몬드 검출기, 필름 및 겔 선량계 등 다양한 검출기가 이용되어 오고 있다. 일반적인 이온함들은 상대적으로 큰 조사면에서는 허용오차범위 내에서 매우 높은 정확성을 보이고 있지만 작은 조사면에서는 다양한 원인으로 인하여 정확성이 감소하거나 허용오차범위를 벗어나는 것으로 여러 문헌들에서 확인되었다.²⁻¹⁰⁾ 이

문헌들에 따르면 조사면의 크기가 감소할수록 산란된 2차 전자오염(electron contamination)의 감소에 의해 측면전자평형(lateral electronic equilibrium)이 일어나지 않고 조사면의 선량측면도에서 고선량기울기영역(high dose gradient region)이 나타난다.⁴⁻⁶⁾ 특히 치료 특성상 다엽콜리메이터의 연속적인 움직임에 의해 많은 수의 세그먼트(segment)로 구성되는 세기조절방사선치료 조사면의 경우, 하나의 조사면 내에서 여러 개의 작은 조사면들을 형성하므로 이 현상은 더욱 두드러지게 발생된다. 이 고선량기울기영역에서는 이온함 자체의 부피효과(volume effect)로 인해 분해능(resolution)이 감소하게 되므로 측정의 정확도가 떨어지는 것을 보였다.⁷⁻⁹⁾ 크기가 작아 상대적으로 부피효과가 매우 적은 다이오드 및 다이아몬드 검출기, 물질 자체특성을 이용해서 부피효과가 없는 필름 및 겔 선량계는 높은 정확도를 보이고 있었다.¹⁰⁾ 다이오드와 다이아몬드 검출기의 경우 타 검출기에 비해 부피효과가 매우 적다고는 하나 그 효과 자체를 무시할 수 없으며, 부피효과가 없는 필름 및 겔 선량계의 경우 측정 및 분석하는데 있어서 현상기나 자기공명영상장치를 이용해야 되므로 불편한 점이 많다. 최근에는 부피가 매우 작은 이온함들로 구성된 2차원 배열형 이온함이 상용으로 개발되어 기존 방법에 비해 상대적으로 편리하고 정확하게 선량분포를 측정할 수 있다. 이 시스템

이 논문은 2012년 9월 3일 접수하여 2013년 2월 28일 채택되었음.
책임저자 : 김재철, (700-721) 대구시 중구 삼덕동 2가 50
경북대학교 의학전문대학원 방사선종양학교실
Tel: 053)200-5352, Fax: 053)426-3303
E-mail: jckim@knu.ac.kr

또한 부피효과를 가지기 때문에 매우 작은 세기조절방사선 치료 조사면에서는 다소 정확성이 떨어진다는 것은 확인되었으나¹¹⁻¹³⁾ 이 효과가 측정결과에 미치는 영향에 대한 정량적인 오차범위는 알려지지 않았다. 본 연구에서는 부피효과를 가지는 2차원 배열형 이온함으로부터 측정된 세기조절방사선치료의 선량분포와 부피효과를 가지지 않는 장치로부터 측정된 선량분포를 비교함으로써 이 효과가 측정결과에 미치는 영향에 대해 알아보려 한다.

재료 및 방법

Fig. 1은 본 연구의 수행과정을 대한 계략도를 나타낸 것이다. 세기조절방사선치료로 계획된 각 선량분포는 각 조사면 별로 전산화단층촬영장치에 의해 획득된 실제 세기조절방사선치료용 팬텀 영상에 2차원 선량분포로 재구성하고 분석프로그램으로 전송하였다. 측정장치들로부터 실제 측정된 세기조절방사선치료의 선량분포 또한 같은 분석프로그램으로 전송함으로써 치료계획에 의한 것과 측정에 의한 선량분포를 비교하였다. 비교된 선량분포는 분석프로그램 상에서 상관계수(correlation coefficient)와 감마값(gamma value)을 통해 측정장치의 부피효과 유무에 따른 차이를 분석하였다.

1. 세기조절방사선치료계획

측정을 위한 세기조절방사선치료의 선량분포 형성을 위해 전산화치료계획시스템(Eclipse V.8.6, Varian Co., USA) 상에서 3차원 가상의 팬텀을 만들었다. 이 팬텀 내에 가상

의 계획표적용적(planning target volume, PTV) 및 정상조직(normal tissue, NT)을 설정하고 조사면 크기에 따라 총 5개의 세기조절방사선치료계획을 시행하였다. 가상의 팬텀에 4개의 NT (NT1: 100 cm³, NT2, 4: 123.8 cm³, NT3: 27.6 cm³)와 정사각형 조사면의 한 변의 크기(square field side, SFS)가 1.5, 3, 5, 7, 10 cm이 형성될 수 있도록 Table 1과 같이 총 5개의 PTV를 설정하였다(Fig. 2). 여기서 가상 팬텀의 형태 설정은 전립선 암환자를 참고로 하였으며, NT1은 가상의 소장 또는 대장, NT2, 4는 가상의 대퇴골 두, NT3는 가상의 직장을 나타낸 것이다. 각 PTV와 NT의 크기 및 부피는 각 조사면 크기와 IMRT 선량분포만을 만들기 위한 것으로 특정한 임상적 상황은 고려하지 않았다. IMRT치료 계획은 각 PTV에 대해 슬라이딩 윈도우(sliding window) 방식으로 36°에서 324°까지 72° 간격의 5분 조사를 시행하였으며, 선형가속기(21-IX, Varian, USA)의 6 MV 광자선을 이용했으며, 본원에서 주로 이용되고 있는Pencil beam convolution (PBC) 알고리즘으로 IMRT 선량분포를 계산하였다.

Table 1. PTVs with square field side.

Square field side (cm)	PTV (volume, unit: cm ³)
1.5	PTV 1 (1.1)
3	PTV 2 (2.6)
5	PTV 3 (31.9)
7	PTV 4 (130)
10	PTV 5 (350)

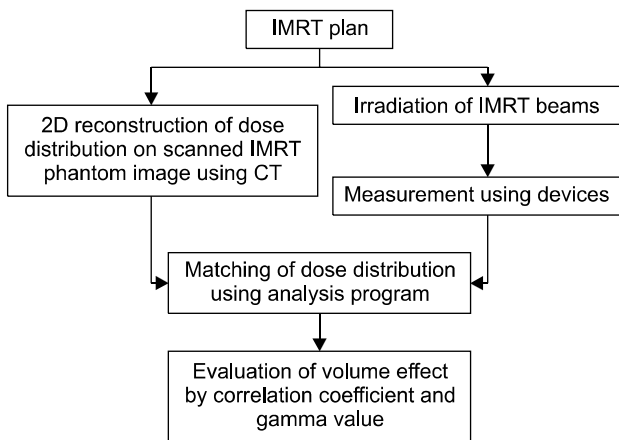


Fig. 1. Schematic overview of the various steps in the IMRT dose distribution measurement.

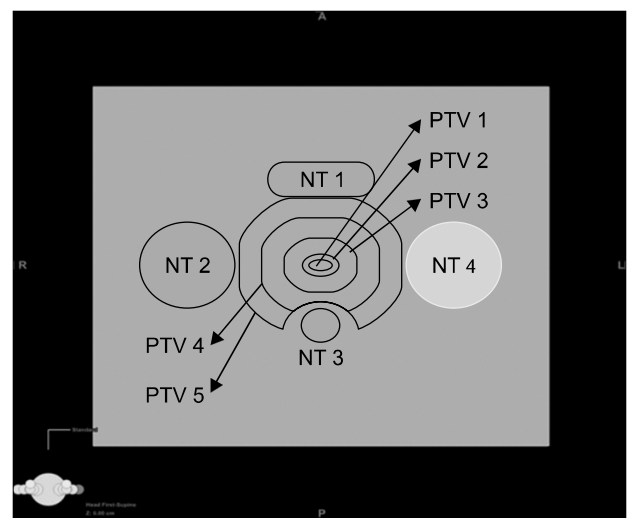


Fig. 2. Design of PTVs and normal tissues in the virtual phantom.

2. 선량분포 측정

본 실험에서는 2차원 배열형 이온함의 상용 장치인 매트릭스 팬텀(MatriXX, IBA, Germany)과 물질의 자체특성을 이용하여 부피효과를 가지지 않는 빔 영상시스템(Beam Image System, BIS, IBA, Germany)으로 각 PTV 크기 (또는 SFS 크기)에 따라 총 5개의 세기조절방사선치료계획에 대한 선량분포를 각 측정하였다. 측정결과들의 신뢰성을 검

증하기 위해 각 치료계획에 대해 필름(EDR2, Kodak, USA)으로 측정된 값을 기준으로 하였다. Table 2에 본 실험에서 이용된 측정장치들의 특성과 결과분석을 위한 분석프로그램을 제시하였다. 각 측정장치들은 선원과 측정표면과의 거리가 100 cm이 되도록 하였으며, 5 cm의 선량보강을 위해 1 cm 두께의 아크릴 팬텀 5장을 측정표면 상단에 위치시켰다(Fig. 3). 단 BIS의 경우 황동합금(brass alloy) 판을 이용하여 자체적으로 선량보강을 하기 때문에 아크릴 팬텀을

Table 2. Characteristics of detectors used this study.

Detector	Manufacturer	Model	Volume (cm ³) number of chamber	Effective area (cm ²)	Analysis program
Matrix phantom	IBA	I'mRT Matrix	0.08, 1,020	24.4×24.4	Omnipro-I'mRT
BIS	IBA	BIS 710	-	24×24	Omnipro-I'mRT
Film	Kodark	EDR2	-	25×30	Omnipro-I'mRT

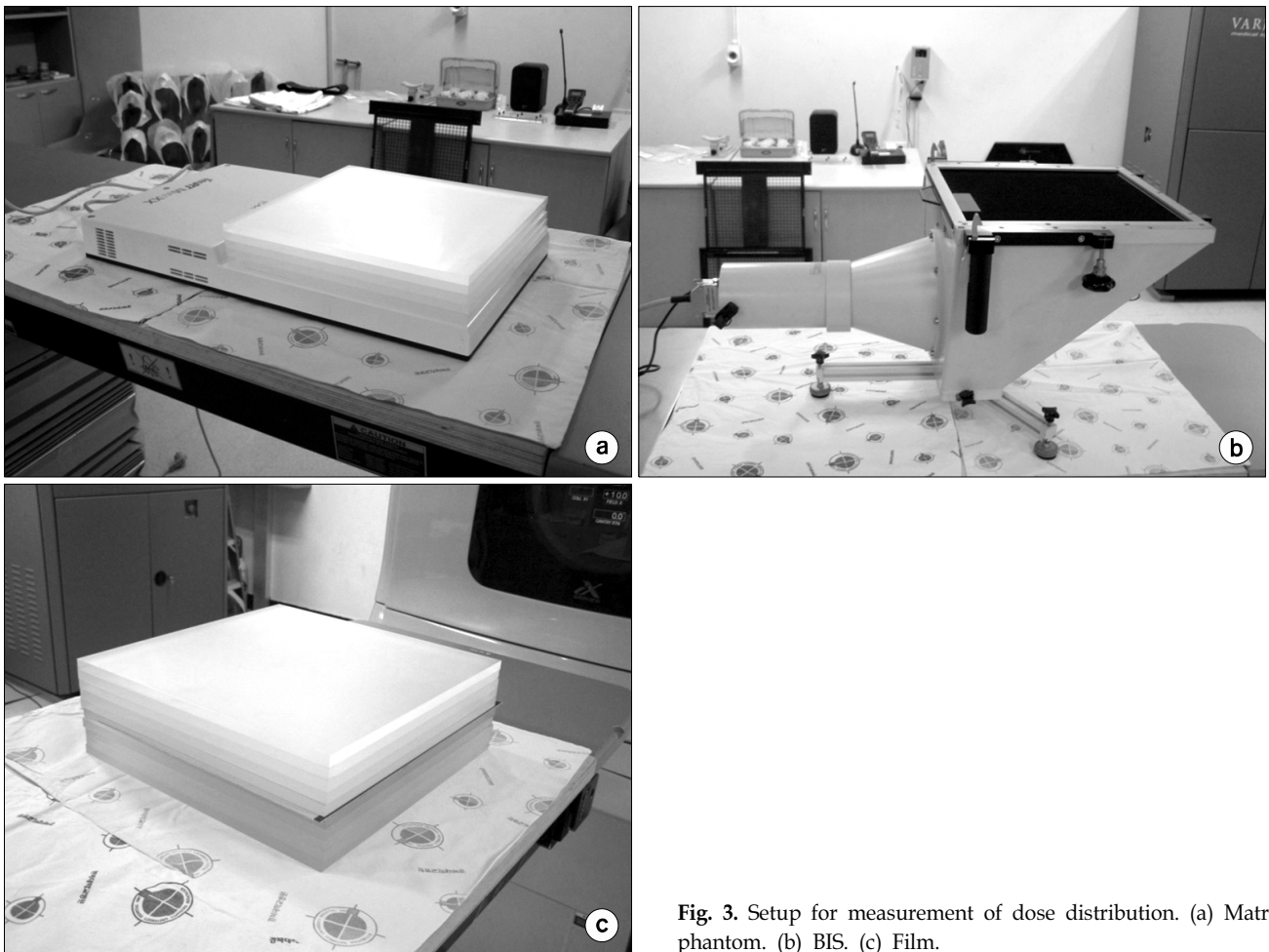


Fig. 3. Setup for measurement of dose distribution. (a) Matrix phantom. (b) BIS. (c) Film.

이용한 선량보장은 필요하지 않았다. 매트릭스 팬텀은 1,020개의 평행판형 이온함(용적: 0.08 cm³, 직경: 4.5 mm, 높이: 5 mm 배열간격: 0.762 mm)이 24.4×24.4 cm²격자 안에 일정한 간격으로 배열되어 있기 때문에 측정 시 약간의 부피효과를 포함하는 것으로 알려져 있다(Fig. 4).¹¹⁻¹³⁾ BIS는 픽셀 크기가 6.7×6.7 μm², 표본화 시간(sampling time)이 120~5,000 ms인 CCD (Charge Coupled Device) 카메라, 1 mm 두께의 황동합금과 0.8 mm 두께의 신틸레이터 판(scintillator plate)층으로 이루어진 40×40 cm²의 스크린 판으로 구성되어 있다. 광자선이 신틸레이터에 입사하게 되면 신틸레이션 현상에 의해 발광이 일어나게 되고 내부 거울에 의해 굴절된 빛을 CCD카메라를 통해 읽음으로써 결과 값을 획득한다(Fig. 5).¹⁴⁻¹⁶⁾ 이 원리는 신틸레이터의 물성 자체를 측정에 이용하는 것이므로 부피효과는 포함하지 않

는다.¹²⁾ 필름 또한 필름의 감광현상을 이용함으로 부피효과가 존재하지 않는다.³⁾

3. 선량분포 비교 및 분석

측정장치의 부피효과 유무에 따른 측정결과의 비교 및 분석은 상용분석프로그램(Omnipro-ImRT, IBA, Germany)을 통해 이루어졌다. 이 프로그램은 여러 종류의 결과분석법을 제공하고 있으며, 그 중에서 상관계수와 허용기준이 3%/3 mm로 설정된 감마값을 이용하여 결과를 분석하였다. 상관계수는 두 개의 선량분포가 일치하는 정도를 나타내는 것으로서 1이면 가장 높은 일치성을, 0이면 두 개의 선량분포 간에는 전혀 일치성이 없다는 것을 나타낸다.¹⁷⁾ 감마값은 저선량기울기영역과 고선량기울기영역을 적용하여 선량차이와 거리차이를 고려한 값으로 감마값이 1 이하일 때 신뢰할만한 측정값을 얻을 수 있다.^{17,18)} 본 실험에서는 이 분석법들을 이용하여 매트릭스 팬텀, BIS, 그리고 필름으로부터 실제 측정된 것과 각 치료계획에 의한 선량분포 간의 상관계수와 감마값을 확인하였다. 부피효과를 가지지 않아 기준결과로 많이 이용되고 있는 필름에 의한 결과와 매트릭스 팬텀과 BIS에 의한 결과 간의 오차를 상관계수를 통해 분석하고 매트릭스 팬텀과 BIS에 대한 감마값을 산출하였다.

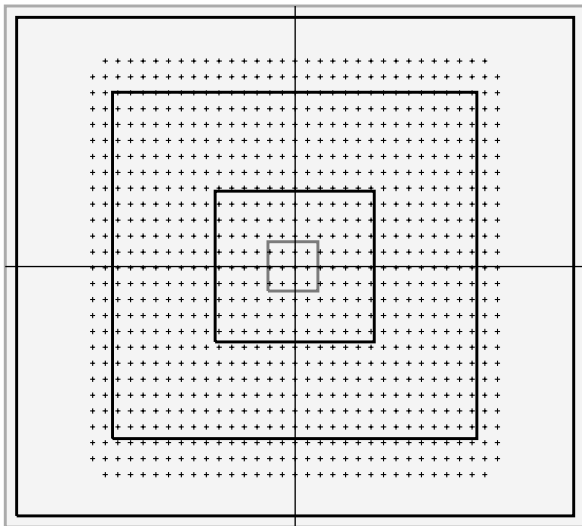


Fig. 4. Matrix phantom: 1,020 parallel plate chambers are on the matrix plate, spacing 0.762 mm internal.

결 과

Fig. 6은 SFS에 따라 치료계획 된 선량분포와 매트릭스 팬텀, BIS, 그리고 필름에 의해 측정된 선량분포를 상관계수로 분석한 것이다. SFS가 7 cm 이상에서 모든 측정장치에 의한 상관계수가 0.990에서 0.992로 0.01내에서 1의 값에 근접하는 결과를 보였으며, 5 cm 이하에서는 SFS가 작아질수록 7 cm 이상보다는 1의 값으로부터 점점 벗어남을

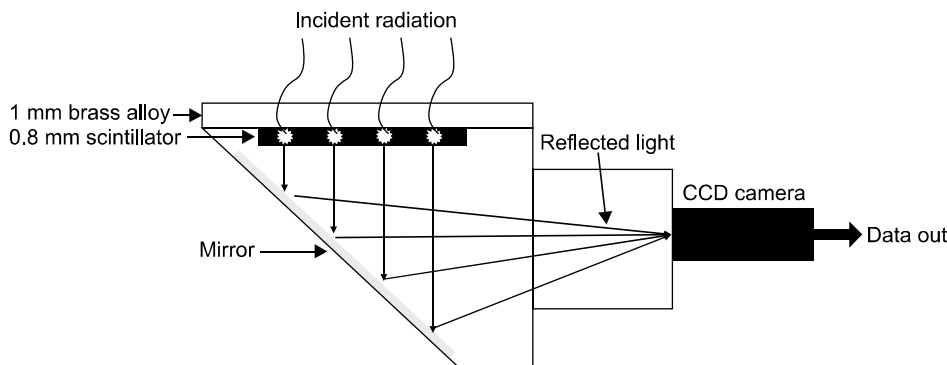


Fig. 5. Beam image system operated by the principle of scintillation consists of the following components: 1 mm brass alloy, 0.8 mm scintillator, mirror, ccd camera etc.

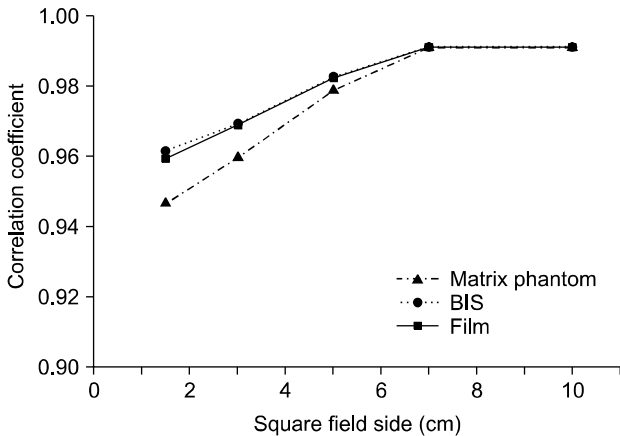


Fig. 6. The calculated correlation coefficient by analysis program with three different detectors in changeable side of square field.

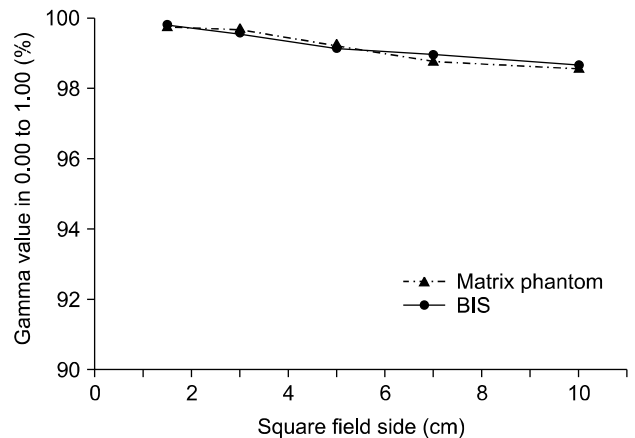


Fig. 8. The calculated gamma value by analysis program with Matrix phantom and BIS in changeable side of square field.

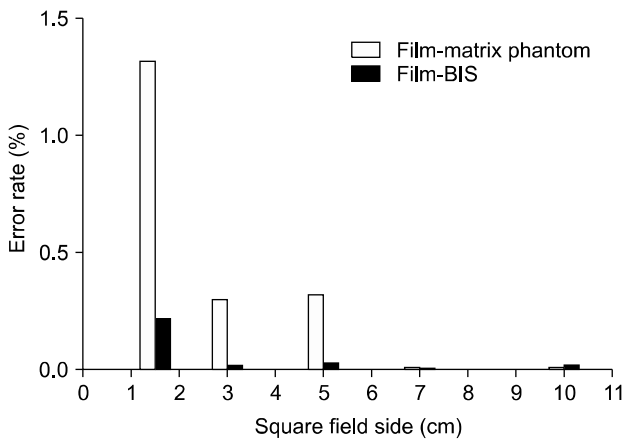


Fig. 7. Error rates with film-matrix phantom and film-BIS.

확인할 수 있었다. 이때 최소 상관계수는 SFS 1.5 cm에서 매트릭스 팬텀에 의해 측정된 값으로 0.945였다. 매트릭스 팬텀으로 측정된 상관계수는 SFS가 작아질수록 BIS나 필름에 의한 결과와의 차이가 점점 증가함을 볼 수 있었으며, 이 차이는 기준 선량계로 사용된 필름과 매트릭스 팬텀, BIS 간의 결과 차이를 오차율로 나타낸 Fig. 7로부터 자세히 확인할 수 있었다. SFS 7 cm 이상에서는 매트릭스 팬텀과 BIS 모두 필름으로 측정된 결과와 상관계수 차이가 최대 0.02% 미만이었다. SFS 5 cm 이하에서는 필름-BIS 간의 상관계수는 최대 차이가 0.25% 미만으로 나타났으나 필름-매트릭스 간에는 최대 1.3%로 필름-BIS에 비해 5배 정도 큰 결과 차이를 보였다. Fig. 6과 7의 결과로부터 필름-BIS

간 차이는 거의 없는 것을 보였으므로 감마값은 매트릭스와 BIS만으로 산출하였다. Fig. 8은 SFS에 따라 치료계획된 선량분포와 매트릭스 팬텀과 BIS의해 측정된 선량분포를 감마값으로 분석한 것이다. 허용기준 3%/3 mm에서 0.00에서 1.00 사이의 감마값이 매트릭스 팬텀과 BIS모두에서 98에서 99% 이상의 일치율을 보였으며, 두 장치 간의 결과 차이는 SFS 크기에 상관없이 0.2% 미만이었다.

고찰 및 결론

본 연구에서는 상용 2차원 배열형 이온함인 매트릭스 팬텀과 부피효과를 가지지 않는 BIS를 이용하여 측정된 세기조절방사선치료의 선량분포를 상관계수와 감마값으로 분석하였으며, 필름에 의한 결과와 비교하였다. 상관계수로 분석된 결과에서 부피효과가 없는 BIS의 경우 필름에 의한 것과 매우 유사한 결과를 보였으나 부피효과를 가지는 매트릭스 팬텀의 경우 조사면 크기가 작아질수록 필름과의 결과 차이가 증가함을 확인할 수 있었다. 세기조절방사선치료의 경우 MLC 움직임에 의해 많은 수의 세그먼트가 존재하고 이로 인해 선량측면도 상에 고선량기울기영역이 나타난다.^{4,6,13)} 이 영역은 등고선 형태로 된 선량분포도 상에서 매우 조밀한 지역에 해당되며, 이온함과 같이 부피를 가지는 것으로 이 영역을 측정 시 많은 오차를 발생시킬 수 있다. 상대적으로 큰 조사면에서는 고선량기울기영역 또는 조밀한 선량분포 영역이 구간구간에 걸쳐 나타나게 되지만 작은 크기의 조사면으로 갈수록 선량측면도 전체가 고선량기울기영역이 되며, 뾰족한 ‘중’ 모양의 형태를 띄게 된

다. 즉 등고선 형태의 선량분포도 전체에 걸쳐 조밀한 지역이 나타나게 된다. 1,020개의 이온함의 2차원 배열로 구성된 매트릭스 팬텀으로 선량분포를 측정 시 5 cm 이상의 SFS에서는 고선량기울기영역에서 발생하는 이온함의 부피효과가 전체 선량분포에 미치는 영향이 매우 작다. 따라서 BIS나 필름과 같이 부피효과를 가지지 않는 측정장치와의 오차가 거의 발생하지 않은 것으로 생각된다. 반면에 5 cm 이하의 조사면에서는 부피효과가 조사면 전체에 걸쳐 영향을 미치게 되므로 매트릭스 팬텀이 BIS에 비해 필름으로 측정된 결과와 큰 차이를 보이는 것으로 판단되었다. SFS 5 cm 이하에서 매트릭스 팬텀 뿐만 아니라 BIS와 필름에 의한 상관계수도 SFS가 작아질수록 1의 값으로부터 점점 벗어남을 확인하였다. 본 연구에서 이용된 전산화치료계획 시스템에 입력된 선량 인자들은 0.125 cc의 부피를 가지는 이온함으로 측정되었으며, 이 이온함의 부피효과가 고려되지 않았기 때문에 작은 조사면에서 실제 측정에 의한 선량분포와 차이가 발생할 수 있을 것으로 생각된다. Martens 등²⁾은 0.125 cc 이온함, 핀 포인트(Pinpoint) 이온함, 다이아몬드 검출기 등을 이용하여 이온함 혹은 검출기 부피에 따른 측정값의 차이를 비교하였으며, 부피가 작을수록 높은 정확도를 보였다. 만약 0.125 cc보다 부피가 작은 다이오드 검출기나 Edge 검출기 등을 이용하여 선량인자들을 측정한다면 SFS 5 cm 이하의 조사면에 대한 상관계수는 본 연구의 결과보다 1의 값에 더 근접할 것이며, BIS나 필름의 경우 SFS 5 cm 이상의 결과와 유사할 것으로 예상된다. 감마값에서는 부피효과로 인한 매트릭스 팬텀과 BIS간 측정 결과의 차이는 상관계수에 비해 상대적으로 매우 적었다. 본 실험에서 사용된 분석프로그램의 감마분석은 알고리즘상에서 매트릭스 팬텀 내부 이온함의 부피와 고선량 및 저선량기울기영역 등을 고려하여 보정되기 때문에 부피효과로 인한 오차가 매우 적은 것으로 생각된다.^{17,18)}

본 연구에서는 2차원 배열형 이온함이 가지는 부피효과로 인해 세기조절방사선치료의 선량분포를 측정 시 발생할 수 있는 영향에 대해 평가하였다. 금번 실험의 결과만으로 2 차원 배열형 이온함의 부피효과로 인한 선량분포의 측정 오차 유무를 판단하기에는 다소 부족하다고 생각된다. 하지만 상관계수로 분석한 결과로 미루어볼 때 작은 조사면에서는 2차원 배열형 이온함의 부피효과가 선량측정에 최대 1% 이상의 오차를 발생시키는 것으로 나타났으며, 더 작은 조사면에서는 그 오차가 증가할 것으로 예상된다. 좀 더 정량적이고 정확한 판단을 위해서는 부피가 매우 작아 부피효과를 최소화 또는 무시할 수 있는. 이온함으로 측정

된 선량인자가 입력된 전산화치료계획 시스템을 기반으로 실험이 수행되어야 할 것이다. 또한 Ong 등¹⁹⁾은 Anisotropic analytical algorithms (AAA) 이용한 선량계산이 작은 조사면에서 더 나은 분해능을 가지는 것을 보였다. 작은 조사면에서 AAA로 계산된 IMRT 선량분포와 PBC알고리즘으로 계산된 선량분포 간의 비교분석이 이루어져야 더 정량적인 결과가 도출될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. **AAPM Report 82:** Guidance document on delivery, treatment planning, and clinical implementation of IMRT: Report of the IMRT Subcommittee of the AAPM Radiation Therapy Committee. *Med Phys* 30:2089-2115 (2003)
2. **Martens C, De Wagter C, De Neve W:** The value of the PinPoint ion chamber for characterization of small field segments used in intensity-modulated radiotherapy. *Phys Med Biol* 45:2519-2530 (2000)
3. **Calcina CS, De Oliveira LN, Almeida CE, et al:** Dosimetric parameters for small field sizes using Fricke xylenol gel, thermoluminescent and film dosimeters, and an ionization chamber. *Phys Med Biol* 52:1431-1439 (2007)
4. **Mack A, Scheib SG, Major J, et al:** Precision dosimetry for narrow photon beams used in radiosurgery determination of gamma knife output factors. *Med Phys* 29:2080-2089 (2002)
5. **Nizin PS:** Eletronic equilibrium and primary dose in collimated photon beams: basic concepts and definitions. *Med Phys* 26:1893-1900 (1993)
6. **Das IJ, Ding GX, Ahnesjö A:** Small fields: Nonequilibrium radiation dosimetry. *Med Phys* 35:206-215 (2008)
7. **Laub WU, Wong T:** The volume effect of detectors in the dosimetry of small field used in IMRT. *Med Phys* 30:341-347 (2003)
8. **Sibata CH, Mota HC, Beddar AS, et al:** Influence of detector size in photon beam profile measurements. *Phys Med Biol* 36:621-631 (1991)
9. **Alfonso R, Andreo P, Capote R, et al:** A new formalism for reference dosimetry of small and nonstandard fields. *Med Phys* 35:5179-5186 (2008)
10. **Wong CJ, Ackerly T, He C, et al:** Small field size dose-profile measurements using gel dosimeters, gafchromic films and micro-thermoluminescent dosimeters. *Rad Meas* 44:249-256 (2009)
11. **고승영, 김성준:** IMRT 및 IMRS에서 Field의 선량분포 확인시 SAD 변화에 따른 측정의 유용성 평가. *대한방사선치료학회지* 22:33-39 (2010)
12. **Lee JW, Hong SM, Kim YL, et al:** Dosimetric characterization of ion chamber matrix for intensity modulated radiation therapy quality assurance. *Korean J Med Phys* 17(3):131-135 (2006)
13. **Poppe B:** Two-dimensional ionization chamber arrays for IMRT plan verification. *Med phys* 33(4):1005-1015 (2006)

14. Vagovic P, Korytár D, Cecilia A, et al: High-resolution high-efficiency X-ray imaging system based on the in-line Bragg magnifier and the Medipix detector. Synchrotron Rad 20:Part1 (2013)
15. Nikl M: Scintillation detectors for x-rays. Meas Sci Technol 17:R37-R54 (2006)
16. I'mRT QA Hardware Manual: Image Device and Accessories. Scanditronix Wellhofer, p.11 (2003)
17. Omnipro I'mRT System Manual: Algorithms. Scanditronix Wellhofer, p.203 (2008)
18. Winiecki J, Morgas T, Majewska K, et al: The gamma evaluation method as a routine QA procedure of IMRT. Rep Pract Oncol Radiother 14:162-168 (2009)
19. Ong CL, Cuijpers JP, Senan S, et al: Impact of the calculation resolution of AAA for small fields and RapidArc treatment plans. Med Phys 38(8):4471-4479 (2011)

2차원 배열형 이온함의 부피효과가 세기조절방사선치료의 선량분포 측정에 미치는 영향

*경북대학교병원 방사선종양학과, †경북대학교 의학전문대학원 방사선종양학교실, ‡영남대학교 물리학과

김성준*[†] · 이승준*[†] · 박인규*[†] · 이정은*[†] · 박신형*[†] · 설기호*[†] · 김재철*[†]

부피효과를 가지는 2차원 배열형 이온함으로부터 측정된 세기조절방사선치료의 선량분포와 부피효과를 가지지 않는 장치로부터 측정된 선량분포를 비교함으로써 이 효과가 측정결과에 미치는 영향에 대해 평가하였다. 조사면 크기에 따라 총 5개의 세기조절방사선치료계획을 5문 조사방식으로 가상의 팬텀에 시행하였다. 선량분포 측정은 매트릭스 팬텀, 빔 영상시스템, 필름 등 총 3가지 측정장치를 이용하였다. 측정된 값은 분석프로그램을 이용하여 전산화치료계획 시스템을 통해 획득된 선량분포와 비교하였다. 비교된 선량분포는 분석프로그램 상에서 상관계수와 감마값을 통해 측정장치의 부피효과 유무에 따른 차이를 분석한 결과 매트릭스 팬텀에서 최대 1.3% 이상으로 나타났다. 매트릭스 팬텀은 조사면의 크기가 작아질수록 내부의 이온함에 의해 부피효과가 커지게 되므로 다른 측정장치에 비해 더 큰 측정오차를 가지는 것으로 판단되었다.

중심단어: 세기조절방사선치료, 매트릭스 팬텀, 빔 영상시스템, 필름, 부피효과