2D 어레이 다이오드 검출기를 통한 IMRT 계산선량의 정확성 평가 및 효용성 연구

*가톨릭대학교 의과대학 의공학교실, †가톨릭대학교 의과대학 생체의공학연구소, ‡분당서울대학교병원 방사선종양학과, §Department of Radiation Oncology, Mayo Clinic, Jacksonville, FL, USA

김태호*† · 오승종*† · 김민주*† · 정원균*† · 정진범‡ · 김재성‡ · 김시용§ · 서태석*†

2D 어레이 다이오드 검출기를 이용하여 전립선과 두경부 IMRT 환자(전립선 2사례, 두경부 2사례)를 대상으로 선량계산 격자 크기(calculation grid size)에 따른 계산선량 정확성(dose calculation accuracy)을 평가했으며, 그 결과를 바탕으로 2D 어레이 다이오드가 IMRT 계산선량과 조사선량 검증에 적합한지 여부를 확인했다. 치료계획장치(treatment planning system, TPS)에서 제공되는 4종류의 격자 크기(1.25 mm, 2.5 mm, 5 mm, 10 mm) 별로 계산된 선량과 2D 어레이 다이오드 검출기를 이용하여 얻어진 측정선량을 감마 분석방법을 이용, 비교하는 방식으로 실험을 진행하였으며, 선량분포의 변화 범위에 따른 정확성 변화 또한 확인했다. 3 mm/3%의 평가기준(acceptance criteria)을 적용한 감마 분석방법에서는 10 mm를 제외한 격자 크기 별 평균 통과율(pass rate)에 뚜렷한 차이를 확인할 수 없었으나, 평가기준을 3 mm/3%, 2 mm/2%, 1 mm/1%로 세밀하게 적용하였을 경우, 1.25 mm를 제외한 격자크기의 통과율이 각각 5%와 20%, 31.53% 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 격자 크기에 따른 선량계산시간은 1.25, 2.5, 5, 10 mm 격자 크기에서 각각 11.5, 4.77, 2.95, 1.5 min 소비됐으며 격자 크기가 2배 증가할수록 선량계산시간은 약 1/2로 감소되는 결과를 확인할 수 있었다. 또한 저경사도영역(low gradient area)과 고경사도영역(high gradient area)을 구분하여 격자 크기영향을 평가하였으며, 격자 크기가 계산선량 정확성에 미치는 효과는 low gradient area보다 high gradient area에서 더 크게 작용한다는 결과를 확인했다. 본 연구의 결과를 종합해 봤을 때 2.5 mm의 격자 크기로 선량계산을 수행하는 것이 계산선량 정확성과 계산시간 면에서 적절한 것으로 여겨지며, high gradient area에 있어서는 가능한 세밀한 격자크기(1.25 mm)를 적용할 것이 권장된다. 또한 이상의 결과가 기존 연구의 이론 및 필름을 이용한 측정과 동일함을 고려해 봤을 때 2D 어레이 다이오드 검출기가 IMRT 계산선량과 조사선량 검증에 적합함을 확인할 수 있었다.

중심단어: 선량계산 격자크기, 계산선량 정확성, 감마 분석법

서 론

치료계획장치(treatment planning system, TPS)의 역할 중 하나는 실제 방사선을 조사하기 전에 환자에게 주어질 방사선량을 계산하여 방사선치료의 효과를 극대화시키며, 부작용을 최소화시키는데 있다. 이러한 역할 수행을 위해서는 정확한 방사선량 계산이 필수적이며, 이를 위한 연구가 진행되어 왔다.[1-3] 이러한 연구에도 불구하고 치료계획시스템에서의 선량분포도(dose distribution) 계산은 선량계산점(calculation point) 사이의 보간(interpolation)에 기반하고 있어 선량계산에 오차의 원인이 내재되어 있다.[4]

TPS 연구초기에는 선량계산점 사이의 보간이 계산선량 정확성에 미치는 영향을 줄이기 위한 새로운 알고리즘 개발 및 이론적 검증이 주된 연구의 대상이었고 결과적으로 많은 발전 또한 이루어져 왔다.[5] 하지만 모든 선량계산점에서 선량계산이 수행되지 않는 한, 보간에 의해 발생되는 선량오차를 완전히 제거하는 것은 불가능하며 이로 인해 현재의 발전된 치료계획시스템상에서도 여전히 선량계산 격자크기에 관한 논의가 진행되고 있다. 이론적으로는 선량계산 격자크기를 작게 적용할수록 보간에 의하여 발생되는 선량계산 오차의 크기를 줄일 수 있다. 하지만 격자크기를 작게 적용할수록 선량계산시 소요되는 시간은 반대로

본 연구는 교육과학기술부 지원을 받아 2010년도 원자력기술개발사업을 통해 수행됨(차세대 지능형 방사선 치료계획 시스템 개발, 과제번호: 2010-0003315).
이 논문은 2011년 1월 19일 접수하여 2011년 4월 4일 채택되었음.
책임저자 : 서태석, (137-701) 서울시 서초구 반포4동 505
가톨릭대학교 의과대학 의공학교실
Tel: 02)2258-7232, Fax: 02)2258-7506
E-mail: suhsanta@catholic.ac.kr

늘어나기 때문에 현실상 무한히 작은 선량계산 격자크기를 적용할 수는 없으며, 실제 임상에서는 계산된 선량의 정확성과 선량계산시간 사이의 적절한 타협을 통해 격자크기를 결정하고 있다. 그러나 이는 어디까지나 사용자의 주관과 경험에 의한 결정이며 격자크기의 적용에 있어서 적절한 기준이 될 수는 없다.

특히 최근 널리 이용되고 있는 세기변조방사선치료(intensity-modulate radiation therapy, IMRT) 기법과 같이 빔 세기를 달리하는 수많은 소조사면의 중첩에 의해 병변에 방사선을 집중적으로 조사하는 치료기법의 경우, 이전의 전통적 방사선치료기법과는 달리 조사면 내부에 high gradient 영역이 생성되기 때문에 정확한 선량계산이 필수적이다. 이러한 이유로 선량계산의 정확성은 더욱 강조되고 있으며, 선량계산 격자크기는 계산선량정확성에 영향을 미치는 중요 요소 중 하나이기 때문에 이에 대한 평가 및 검증은 필수적이다.

본 연구는 새로운 알고리즘 개발 및 팬텀을 이용한 이론 검증에 주된 목적을 두었던 Chung 등[6]의 연구와는 달리 앞선 연구의 이론적 배경을 기초로 보다 임상적인 대상에 이론을 적용시킴으로써, 실제 방사선 치료에서 선량계산 격자크기가 계산선량 정확성에 미치는 영향을 평가해 보았다. 또한 본 연구의 결과를 바탕으로 최근 사용상의 편의성으로 인해 그 이용이 증가되고 있는 2D 어레이 다이오드 검출기가 IMRT 계산선량과 조사선량 검증에 적합한지 여부를 확인하고자 했다.

정량적 평가를 위해 전립선과 두경부 IMRT 치료계획을 이용하여, 4종류의 격자크기로 선량을 계산한 후, 각각의 격자크기에서 계산된 선량분포를 2D 어레이 다이오드 검출기를 이용하여 얻어진 측정선량과 비교하였다.

재료 및 방법

1. 장비 및 대상

방사선조사를 위해서 21EX 선형가속기(Varian Medical Systems, Palo Alto, CA, USA)를 이용하였고, 선량계산을 위한 TPS는 Eclipse (Version 7.3.10, Varian Medical Systems, Palo Alto, CA, USA)를 사용하였다. 선량계산 시 적용된 알고리즘은 Anisotropic Analytical Algorithm (AAA)이며, 두경부 IMRT 2사례와 전립선 IMRT 2사례를 대상으로 적용했다.

두경부 환자의 경우 6 MV의 빔 에너지로 총 8개의 빔 (165°, 125°, 80°, 35°, 195°, 235°, 280°, 325°)이 사용되었다. 치료계획상의 표적(target) 크기는 Inferior-Superior에서 최대 19.2 cm, Lateral에서 최대 11.3 cm, Anterior-Posterior에서 최대 8.3 cm이었으며 PTV (PTV1+PTV2+PTV3)는 약 514 cc이다.

전립선 환자의 경우 15 MV의 에너지로 총 7개의 빔 (140°, 70°, 50°, 220°, 260°, 310°, 0°)이 사용되었고, Inferior-Superior에서 최대 7.1 cm, Lateral에서 최대 8 cm, Anterior-Posterior에서 최대 5.2 cm의 target 크기를 가지며, PTV는 130 cc이다.

측정선량을 얻기 위해 2D array diode detector (The MapCheck 1175 2D array, Sun Nuclear, Melbourne, FL, USA)를 사용하였다. MapCheck은 22×22 cm의 평판 구조로 이루어져 있으며 그 내부에는 총 445개의 N-type diode가 배열되어 있다. 또한 MapCheck은 중앙 10×10 cm 영역에는 0.707 cm 공간 분해능을 그 외 바깥 부분은 1.414 cm 공간 분해능을 가지고 있다(Fig. 1).

2. 장비 set up

측정선량과 계산선량 사이의 정밀한 비교를 위해 감도

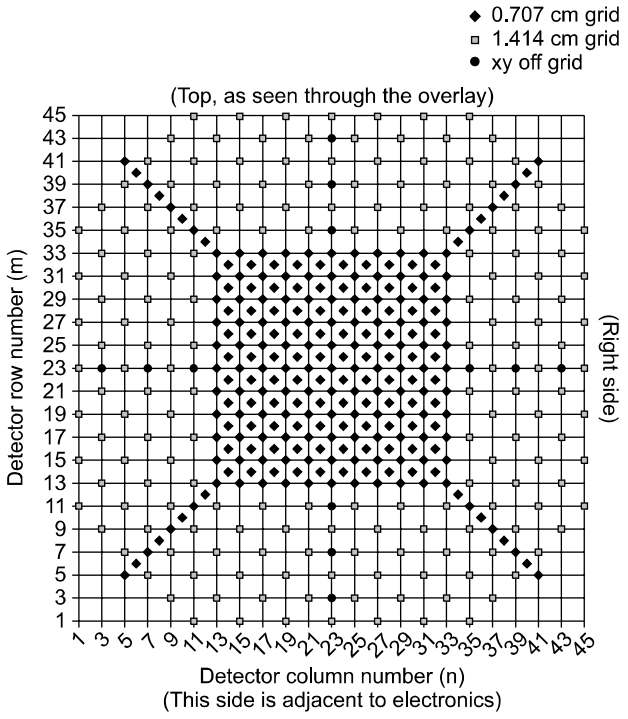

Fig. 1. The 445 silicon diode detectors are arranged in a 22-cm octagonal grid. The 10×10 cm center portion of the grid contains detectors with 7-mm spacing. The outer area surrounding the center grid contains detectors with 14-mm spacing.

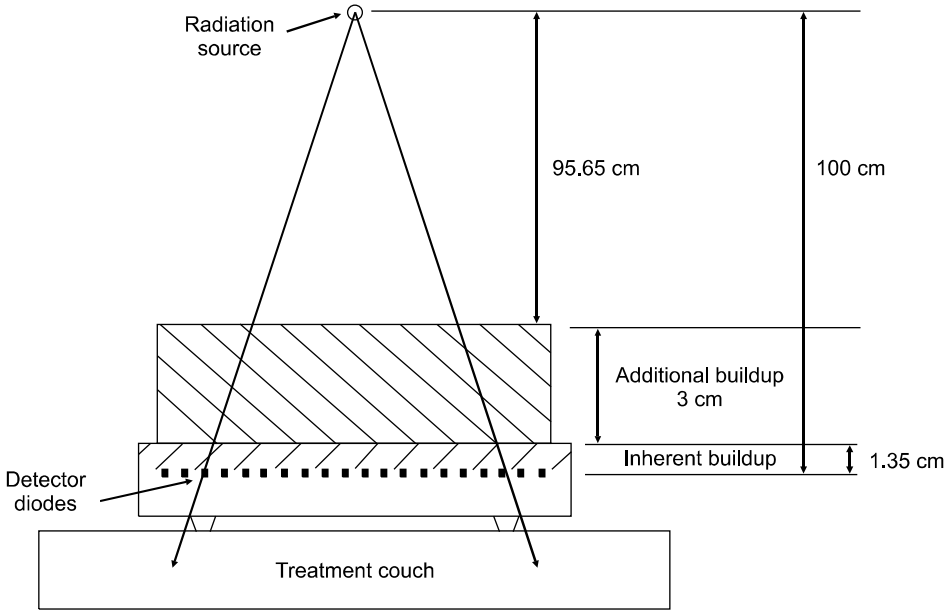

Fig. 2. Schematic diagram of measurement set up using 2D array detector. Additional build-up (3 cm solid water) is added in order to make a planned depth dose.

및 에너지 보정, 그 외 기하학적 조건의 재현성 등은 User's Guide, MapCheck (version 3.2)를 참고하였다.[7] MapCheck은 장치 내부에 diode 위쪽으로 2 g/cm^2 (1.35 cm physical thickness)의 물 등가 물질(buildup material)을 가지고 있으며 diode 아래쪽으로 2.7 g/cm^2 (1.97 cm physical thickness)의 물 등가 물질을 가지고 있다. 따라서 이를 고려한 장치 set up이 필요하며, 그 모식도는 Fig. 2와 같다.

TPS 상의 계산 조건과 동일한 기하학적 조건 유지를 위해 3 cm의 추가적인 물 등가물질(additional buildup material)이 필요했으며, 100 cm의 SAD 유지를 위해 선원과 등가물질 표면과의 거리는 95.65 cm으로 유지했다.

3. 측정 및 분석방법(Gamma analysis)

계산선량과 측정선량 사이의 선량분포도 비교를 위해 MapCheck에서 제공되는 소프트웨어를 이용하여 감마 분석 방법[8-10]을 수행했다. 감마 분석방법은 선량 차이(dose difference)와 물리적 거리(physical distance) 두 요소 모두를 평가하는 방법이며 계산선량과 측정선량 사이의 차이가 사용자에 의해 정해진 평가기준을 만족하는지 여부를 평가하는 방법이다. 만약 감마 값이 1 또는 그 이하일 때에는 그 측정 점은 'pass point', 즉 평가기준을 만족하는 값이 되며, 감마 값이 1 이상일 경우에는 'failed point', 즉 평가기준을 만족시키지 못하는 값이 되는 것이다. 감마 분석방법에서 사용된 평가기준은 3 mm/3%, 2 mm/2%, 1 mm/1%이다.

또한 본 연구에서는 전립선 환자의 치료계획을 대상으로 low gradient area와 high gradient area를 구분하여 계산선량 격자크기가 선량계산의 정확성에 미치는 영향을 평가했다. 상대선량이 0~5% mm^{-1}인 영역을 low gradient area로 설정하고 그 이상으로 변화되는 영역을 high gradient area로 설정했다. 격자크기 별로 계산된 선량과 측정선량을 3 mm/3%의 기준을 적용하여 gamma 평가하였으며, 각 영역별(high gradient area, low gradient area)로 fail 된 포인트의 비율을 비교했다.

결 과

1. 격자 크기에 따른 계산선량 정확성 및 선량계산시간 변화

평가기준을 3 mm/3%로 설정했을 때 격자 크기에 따른 감마 분석방법의 통과율은 Table 1을 통해 확인할 수 있다. IMRT 치료계획 4사례의(전립선 2사례, 두경부 2사례) 각 격자 크기별 통과율(pass rate)의 표준편차 값은 1.25 mm에서 98.45±0.81%로 가장 높았으며, 2.5 mm, 5 mm, 10 mm에서 각각 98.48±0.78%, 98.00±1.15%, 94.45±0.58%의 값을 가졌다. 전립선과 두경부 두 케이스 모두 1.25 mm와 2.5 mm 사이의 계산선량 정확성 차이는 나타나지 않았으며, 격자 크기가 2배 증가할수록 선량계산시간은 약 1/2로 감소되는 결과를 확인할 수 있었다.

Table 2는 두경부와 전립선 사례에서 평가기준을 달리할 때 선량계산 격자크기 별 통과율의 변화를 나타낸 결과이

Table 1. The pass rate of gamma analysis with 3 mm/3% acceptance criteria. There was no significant difference between 1.25 mm and 2.5 mm grid size.

Acceptance criteria (3 mm/3%)

Grid size	Prostate		Head & Neck		Standard deviation	Calculation time
1.25 mm	100%	100%	97.70%	99.10%	98.45±0.81%	11.5 min
2.5 mm	100%	100%	97.80%	99.10%	98.48±0.78%	4.8 min
5 mm	100%	99.3%	96.50%	98.50%	98.00±1.15%	3.0 min
10 mm	94.3%	94.9%	94.60%	93.90%	94.45±0.58%	1.5 min

Table 2. The pass rate of gamma analysis of a prostate and H&N IMRT case with three acceptance criteria. The grid size effect could be observed obviously in tight criteria (1 mm/1%).

	Acceptance criteria					
	3 mm, 3%		2 mm, 2%		1 mm, 1%	
Grid size	Prostate/H&N		Prostate/H&N		Prostate/H&N	
1,25 mm	100%	99.10%	100%	89.1%	100%	86.4%
2.5 mm	100%	99.10%	97%	81%	95%	79.5%
5 mm	100%	98.50%	91%	74%	80%	67.4%
10 mm	94.3%	93.90%	80.16%	62%	62.77%	50.6%

다. 격자크기가 커질수록 통과율이 감소하는 경향(grid size effect)은 세밀한 평가기준을 적용할수록 명확히 확인되었다.

2. Low gradient area와 high gradient area에서의 격자크기효과 비교

Table 3은 전립선 환자의 치료계획을 대상으로 선량분포가 변화하는 범위에 따라 격자크기가 계산선량 정확성에 미치는 영향을 평가한 결과이다. Low gradient area와 high gradient area 모두에서 격자 크기가 증가할수록 fail 되는 포인트의 비율은 증가하였다. 하지만 증가폭은 high gradient area에서 더 크게 나타났으며 특히 격자 크기가 커질수록 그 경향성은 두드러졌다.

고 찰

Table 1은 IMRT 치료계획에서 일반적으로 사용되는 평가기준(3 mm/3%)을 적용한 결과이다. 1.25 mm와 2.5 mm 사이에 계산선량 정확성 차이는 없었으며 선량계산시간은

Table 3. Failed point rate of gamma analysis for the relative dose gradient ranges. The failed point rate in low and high gradient regions according to grid sizes. The grid size effect is obviously observed in high gradient region than low gradient region.

Acceptance criteria (3 mm/3%)

	Prostate	
Grid size	Low gradient area	High gradient area
1,25 mm	0.14%	0.18%
2.5 mm	0.21%	0.23%
5 mm	0.89%	1.36%
10 mm	1.47%	4.72%

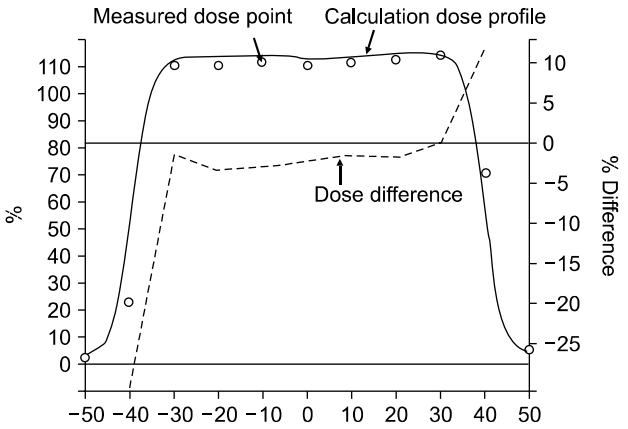

Fig. 3. Dose difference in high and low gradient region. The circles indicate measured dose at a point and the solid line indicates calculated dose profile. The dashed line is dose difference between measured dose and calculated dose.

1.25 mm의 격자 크기가 2.5 mm의 격자 크기에 비해 약 2배 이상 소비되었다. 격자크기가 증가할수록 계산선량 정확성은 다소 감소하는 결과를 확인할 수 있었지만 뚜렷한 경향성을 찾을 수는 없었다. 이는 계산에 적용된 격자 크기보다 큰 평가기준을 적용하여, 격자크기의 영향을 확인할 충분한 분해능을 갖지 못하기 때문이다. 따라서 격자크기에 따른 효과 확인을 위해 좀 더 작은 평가기준의 적용이 필요했으며, Table 2에서 확인할 수 있듯이 격자크기를 작게 적용할수록 계산선량 정확성이 향상되는 결과가 나타났다. 이는 기존의 Chung 등[6]의 연구와 동일한 결과이며, 이상의 결과를 종합해 봤을 때 IMRT 치료계획에 있어서 2.5 mm의 격자크기로 선량계산을 수행하는 것이 적절한 것으로 여겨진다. 그러나 선량변화가 급격한 부분(high gradient area) 또는 매우 작은 field를 사용하는 SRS 같은 경우는 최

대한 작은 격자 크기를 적용할 것이 권장된다. 그 이유는 Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 high gradient area에서는 선량계산 점에서 약간만 벗어나도 선량오차(dose error)의 크기가 매우 커질 위험성이 있기 때문이다. 또한 Table 3의 결과에서 확인할 수 있듯이 격자크기에 따른 영향은 low gradient area보다 high gradient area에 더 크게 작용하기 때문에 이상의 특성을 고려한 격자크기의 결정이 필요하겠다.

본 연구의 결과는 계산선량 정확성 평가에 영향을 미칠 수 있는 장비의 방사선 전달, 선량측정(dosimetry) 등 잠재된 에러의 영향을 고려하기에는 적용사례가 너무 적었으며 계산선량의 정확성 평가에 있어 필수적인 알고리즘에 대한 분석이 결여되어 있다는 점에서 IMRT 계산선량 자체의 정확성 평가로 확대하기에는 다소 부족함이 있다. 하지만 이론 검증에 주된 목적을 두었던 기존 연구와는 달리 실제 IMRT 환자의 치료계획에 이론을 적용시켰으며 그 외 대부분의 연구조건을 실제 임상환경과 동일하게 적용시킴으로써 최대한 임상적 유용성을 얻기 위해 노력했다. 또한 본 연구에 이용된 2D 어레이 다이오드 검출기(Mapcheck)는 필름에 비해 공간분해능이 떨어지기 때문에 IMRT 계산선량과 조사선량 검증용 검출기로서 타당성이 의심되어 왔다. 비록 다수의 논문들이 Mapcheck의 공간분해능이 문제가 되지 않음을 증명하고 있지만[11,12] 공간분해능(0.707 cm) 이하의 영역에서는 측정점 사이의 보간에 기초한다는 점에서 계산선량과 비교대상이 되는 기준선량으로서 신뢰할 수 있는지 여부를 확신할 수 없었다. 하지만 본 연구의 결과가 기존 연구의 이론 및 필름을 이용한 측정결과와 일치함을 고려해 봤을 때 2D 어레이 다이오드 검출기가 IMRT 계산선량과 조사선량 검증에 타당함을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 간편한 측정을 위해 전체 치료 조사면을 연속 조사하여 측정 후 총 선량을 계산하여 비교하였다. 그러나 이러한 방법은 각 조사면에서 발생한 오차가 조사면의 중첩에 의해 상쇄 혹은 과장될 수 있기 때문에 이 문제를 해결하기 위한 추가 실험이 필요할 것으로 생각된다.[13] 또한 추후의 연구에서는 적용사례를 높여 잠재적인 에러의 영향을 고려한 연구를 진행할 계획이며 적용된 알고리즘에 따른 변화 또한 분석할 계획이다.

결 론

본 연구를 통해 작은 선량계산 격자 크기를 적용할수록 계산선량 정확성은 향상된다는 사실을 확인할 수 있었다. 또한 계산선량 정확성과 선량계산시간의 결과를 종합해 봤을 때 2.5 mm의 격자 크기로 선량계산을 수행하는 것이 적절한 것으로 여겨진다. 다만 high gradient area 또는 SRS와 같이 매우 작은 조사면(field)을 이용하는 방사선치료의 경우에는 최대한 작은 격자 크기를 적용하는 것이 권장된다. 본 연구를 통해 얻어진 결과는 기존연구의 이론 및 필름을 이용한 측정과 동일함을 확인할 수 있으며, 이상의 결론을 종합해 볼 때 2D 어레이 다이오드 검출기가 IMRT 계산선량과 조사선량 검증에 적합함을 확인할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Niemierko A, Goitein M: The use of variable grid spacing to accelerate dose calculations. Med Phys 16:357-366 (1989)
2. Niemierko A, Goitein M: Random sampling for evaluating treatment plans. Med Phys 17:753-762 (1990)
3. Niemierko A, Goitein M: The influence of the size of the grid used for dose calculation on the accuracy of dose estimation. Med Phys 16:239-247 (1989)
4. Andrzej N, Michael G: The influence of the size of the grid used for dose calculation on the accuracy of dose estimation. Med Phy 16:239-247 (1989)
5. Dempsey JF, Romeijn HE, Jonathan GL, et al: A Fourier analysis of the dose grid resolution required for accurate IMRT fluence map optimization. Med Phys 32:380-388 (2005)
6. Heeteak C, Hosang J, Jatinder P, et al: Dose variations with varying calculation grid size in head and neck IMRT. Phys Med Biol 51:4841-4856 (2006)
7. User's Guide, Map CHECK, Version 3.2. Melbourne, FL: Sun Nuclear Corporation; 2006
8. Low DA, Harms WB, Mutic S, et al: A technique for the quantitative evaluation of dose distributions. Med Phys 25:656-661 (1998)
9. Daniel AL, James FD: Evaluation of the gamma dose distribution comparison method. Med Phys 30:2455-2464 (2003)
10. Tom D, Ann VE, Dominique PH, et al: A quantitative evaluation of IMRT dose distributions: refinement and clinical assessment of the gamma evaluation. Radiother Oncol 62:309-319 (2002)
11. Paul AJ, Ben EN: A 2-D diode array and analysis software for verification of intensity modulated radiation therapy delivery. Med Phys 30:870-879 (2003)
12. Daniel L, Misbah G, Di Yan, et al: Evaluation of a 2D diode array for IMRT quality assurance. Radiother Oncol 70:199-206 (2004)
13. Jon JK: On the insensitivity of single field planar dosimetry to IMRT inaccuracies. Med Phys 37:2516-2524 (2010)

Efficiency Study of 2D Diode Array Detector for IMRT Quality Assurance

Tae-Ho Kim*†, Seungjong Oh*†, Min-Joo Kim*†, Won-Gyun Jung*†, Jin-Beom Chung‡, Jae-Sung Kim‡, Siyong Kim§, Tae-Suk Suh*†

*Department of Biomedical Engineering, †Research Institute of Biomedical Engineering, The Catholic University of Korea College of Medicine, Seoul, ‡Department of Radiation Oncology, Seoul National University Bundang Hospital, Seongnam, Korea, §Department of Radiation Oncology, Mayo Clinic, Jacksonville, FL, USA

In this study, we evaluated the effect of grid size on dose calculation accuracy using 2 head & neck and 2 prostate IMRT cases and based on this study's findings, we also evaluated the efficiency of a 2D diode array detector for IMRT quality assurance. Dose distributions of four IMRT plan data were calculated at four calculation grid sizes (1.25, 2.5, 5, and 10 mm) and the calculated dose distributions were compared with measured dose distributions using 2D diode array detector. Although there was no obvious difference in pass rate of gamma analysis with 3 mm/3% acceptance criteria for the others except 10 mm grid size, we found that the pass rates of 2.5, 5 and 10 mm grid size were decreased 5%, 20% and 31.53% respectively according to the application of the fine acceptance criteria, 3 mm/3%, 2 mm/2% and 1 mm/1%. The calculation time were about 11.5 min, 4.77 min, 2.95 min, and 11.5 min at 1.25, 2.5, 5, and 10 mm, respectively and as the grid size increased to double, the calculation time decreased about one-half. The grid size effect was observed more clearly in the high gradient area than the low gradient area. In conclusion, 2.5 mm grid size is considered acceptable for most IMRT plans but at least in the high gradient area, 1.25 mm grid size is required to accurately predict the dose distribution. These results are exactly same as the precious studies' results and theory. So we confirmed that 2D array diode detector was suitable for the IMRT QA.

Key Words: Calculation grid size, Dose calculation accuracy, Gamma evaluation