

The Output Factor of Small Field in Multileaf Collimator of 6 MV Photon Beams

Ho Joon Lee*, Tae-Jin Choi*, Young Kee Oh[†], Kyung Soo Jeun[†], Yong Hee Lee[†],
Jin Hee Kim[†], Ok Bae Kim[†], Se An Oh[†], Sung Kyu Kim[†], Ji Woon Yea[†]

Department of Radiation Oncology, *Daegu Catholic University Medical Center,
[†]Keimyung University Dongsan Medical Center, [†]Yongnam University Medical Center, Daegu, Korea

The IMRT is proper implement to get high dose deliver to tumor as its shape and selective approach in radiation therapy. Since the IMRT is performed as modulated the radiation fluence by the MLC created the open shapes and its irradiation time, the dose of segment of radiation field effects on the cumulated portal dose. The accurate output factor of small and step shape of segment is important to improve the determination of deliver tumor dose as it is directly proportional to dose. This experiment performed with the 6 MV photon beam of Clinac Ex(Varian) from 3×3 cm² to 0.5×0.5 cm² small field size for collimator jaw in MLC free and/or for MLC open field in fixed collimator jaw 10×10 cm² using the CC01 ion chamber, SFD diode, diamond detector and X-Omat film dosimetry. As results of normalized to the reference field of 10×10 cm² of MLC, the output factor of 3×3 cm² showed 0.899±0.0106, 0.855±0.0106 for 2×2 cm², 0.764±0.0082 for 1×1 cm² and 0.602±0.0399 for 0.5×0.5 cm². The output factor of MLC open field has shown a maximum 3.8% higher than that of the collimator jaw open field.

Key Words: Small field, Output factor, Film dosimetry

서 론

광자선을 이용한 방사선치료에서 조사면내 선량플럭스의 변화를 이용하는 세기조절방사선치료(intensity-modulated radiation therapy, IMRT)는 발표된 지 20여년이 되었고 지금은 보편화된 치료방법이다.¹⁻³⁾

초기 당시에는 차폐블록을 사용하였으나, 폭이 좁은 다엽제한기(multileaf collimator, MLC)의 발명과 컴퓨터제어의 기술의 발전으로 치료선량전달 방법에도 혁신적인 결과를 가져왔다. 이와같은 결과는 방사선치료방법에 새로운 장을 열게 되었으며, 종양부위의 선택적 치료가 가능해 임상표적부위에 높은 선량을 집중함으로써 부작용을 현저히 줄이고 종양에 높은 치료선량을 높일 수 있어 예후에 좋은

영향을 주는 것으로 발표되고 있다.⁹⁾

종전 방사선치료는 차폐를 중심으로 종양에 높은 선량을 주고 병변주위 정상장기에 내용선량이하의 저선량이 도달하게 하고, 종양에 균등선량분포를 얻는 것을 최적치료방법으로 여겼다. 그러나 프로그램에서 제어되는 다엽제한기의 이용은 조사면내 선량분포를 변화시킬 수 있어 조사되는 빔의 통로 상에 위험도가 높은 정상표적(Organ at risk, OAR)에 적은 선량이 도달하도록 한다.

종전에 차폐함수에다가 시간함수를 더하여서 치료방법이 한 차원 더 높아지게 되었다. 조사면내 방사선의량을 달리하여 종양의 3차원 모양에 일치하는 치료뿐 만아니라, 조사면내 중요장기가 있는 곳에는 광자의 플루언스를 줄이고 손상위험장기가 없는 곳에서는 플루언스를 높여 입체적으로 종양장기와 일체가 되는 치료를 하게된다. 그리고 더 나아가서 전향적으로 처방된 종양선량과 위험장기에 허용된 선량을 정한 뒤 다엽제한기의 개방되는 조사면(r)을 시간으로 플루언스를 제어함으로 임의의 위치에 도달하는 선량은 다엽제한기의 기하학적 개방면적과 시간의 함수G(r,t)에 비례하게 된다.

This work was supported by research grants from the Catholic University of Daegu in 2010.

Received 11 February 2014, Accepted 13 March 2014

Correspondence: Young Kee Oh (ykoh@dsmc.or.kr)

Tel: 82-53-250-7683, Fax: 82-53-250-7984

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

$$D(x, y, z) \propto G(r, t) \quad (1)$$

다엽제한기의 폭은 SAD 100 cm에서 대개 3~10 mm 범위에 있다. Clinac Ex의 경우는 다엽제한기의 폭이 5 mm이고 좌우 각 열에 60개가 있다. 좌우의 다엽제한기가 이동하여 방사선을 조사할 모양을 만들게 되고 조사시간으로 플루언스를 결정하여 세기조절방사선치료가 이루어진다.

시간에 따라 제어되는 조사면의 플루언스는 정해진 기준 조사면 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 의 선량에 비교하여 얻으며, 조사면의 크기, 선량평가 깊이, 선원과의 거리, 광자선의 차폐율, 체포면의 입체적유효 등에 따라 도달선량이 평가된다.

이와 같은 이유로 다엽제한기에 의한 세기조절방사선치료에서는 조사면내 많은 구획 조사면들 갖게 된다. 따라서 작은 조사면에 의한 출력선량이 정확히 평가될수록 각 조사면에 조사되는 모니터선량이 정확히 누적 계산될 수 있으므로 많은 학자들이 소형조사면의 정확한 출력 선량률을 결정하기 위해 많은 방법을 제시하고 있다.^{6,7)}

이것은 조사면이 $3 \times 3 \text{ cm}^2$ 이하의 조사면에서 0.5 cm까지의 극소형조사면의 선량을 평가할 때는 플루언스 분포의 첨예한 가우시안분포를 갖는 선량분포와 측정기의 불일치, 측방전하입자의 비형성, 그리고 검출기의 전하수집오차 등이 있을 수 있다.

표준선량계로 알려진 공기전리함은 공기체적을 유지하기 위해 유한한 직경과 길이가 있어 극소형조사면의 선량 평가에는 제한이 커서 항상 과소평가될 수 있다.

이에 비해 다이오드 선량계는 두께가 0.25 mm 이하이고 1 mm 이하의 직경을 갖는 다이오드 선량계가 소형조사면 측정에 많이 이용되고 있으나 방향성과 에너지의존성이 있어 표준선량계와 항상 비교해서 사용하게 된다.

최근 다이아몬드 선량계는 조직등가물질로 안정된 선량 평가를 할 수 있어, 소형조사면의 선량평가에 몬테칼로 모델과 더불어 많이 이용되고 있다.⁸⁾

필름선량계는 조사된 필름의 흑화도를 흑화도-선량 표준곡선함수에 적용하여 선량을 평가한다. 최근 암실작업을 요하지 않는 EBT2 필름선량계는 ADC-선량 표준곡선으로부터 선량을 평가한 발표⁹⁾가 있으나 관독환경의 제약이 있어 본 실험에서는 제외하였다.

본 연구에서는 CC01 마이크로 이온함, 다이오드 전리함, 다이아몬드 전리 및 Xomat 필름을 이용하여 기준 조사면을 중심으로 $3 \times 3 \text{ cm}^2$ 의 소형 조사면에서 $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ 조사면까지 출력선량을 결정하고, 실험결과를 Eclipse 치료선량 프로그램(TPS)의 출력선량계수(Output factor)와 비교한 것을 발표하고자 한다.

재료 및 방법

소형 조사면은 선형가속기(Clinac Ex, Varian)의 제한기 jaw과 다엽제한기를 조합하여 얻었으며, Fig. 1과 같다. 방사선에너지는 6 MV 광자선으로 SSD 95 cm에 깊이 5 cm 측정점을 사용하였으며, 조사면은 다엽제한기를 완전히 개방하고 jaw로 $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ 에서 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 까지 측정하고 jaw $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 의 기준 선량으로 규격화 시켰다. 방사선세기조절치료는 다엽제한기로 조사면을 분할하고 X축 2차 제한기는 분할 조사면에 근접한 위치까지 도달되어 다엽제한기의 접면에서 누출되는 방사선을 차폐되도록 해서 방사선 조사가 이루어지므로 실험에서는 제한기를 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 로 고정해둔 채, 다엽제한기를 개방하여 $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ 에서 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 까지의 출력선량을 얻은 후, jaw $10 \times 10 \text{ cm}^2$ (MLC $10 \times$

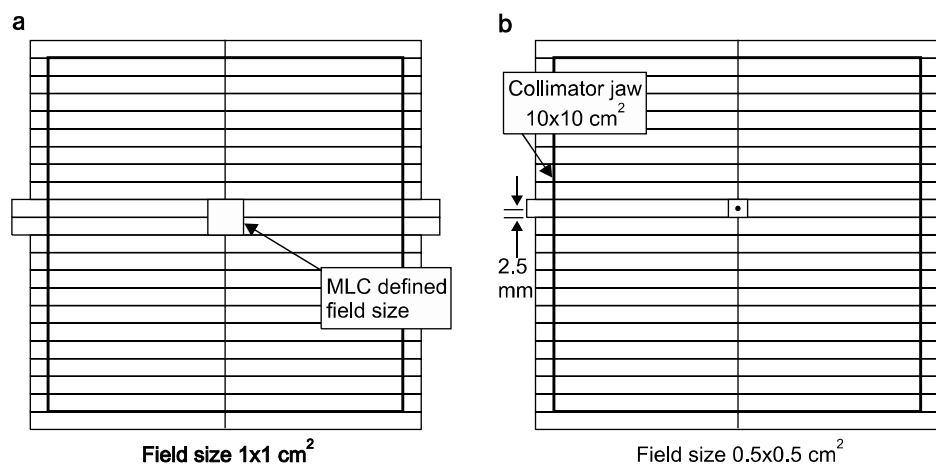


Fig. 1. Showing the small field size of MLC in cm for $10 \times 10 \text{ cm}^2$ collimator jaw. The pictures showed (a) $1 \times 1 \text{ cm}^2$ and (b) $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ on SAD 100 cm and SPD 95 cm.

10 cm²)의 출력선량을 기준으로 규격화하였다.

측정검출기는 내부직경이 2 mm이고 0.01 cc인 공기전리함(CC01, Scanditronix-Wellhofer)과 직경 0.6 mm이고 두께 500 μm인 P-type 실리콘 다이오드 검출기 SFD (Scanditronix-Wellhofer)이고 전위계는 DOS-1 (iba사)이다.

다이아몬드 검출기(PTW)의 직경은 3~4 mm에 두께 0.1~0.4 mm (6 mm³)인 다이아몬드 검출기(T60003, PTW)이며 전위계는 UNIDOSE (PTW)를 이용하였다.

측정 팬텀은 가로×세로×높이가 각각 35 cm인 물 팬텀을 사용하였으며, 측정 깊이는 선원-검출기 거리(SCD) 100 cm이고 선원-팬텀표면 거리(SSD)는 95 cm이다.

다이오드 검출기의 유효 측정점은 검출기 끝에서 0.83 mm 위치가 물 표면에 닿도록 설치하였으며, 다이아몬드 검출기는 검출기의 끝 표면에서 1 mm 위치에 물의 표면과 일치시켰다.

공기전리함 CC01을 이용한 출력선량은 수조 팬텀에서 광자선 빔의 축과 평행하게 설치하였으며, 전리함의 끝과 물 표면을 일치시키고 조사면 10×10 cm², 5×5 cm², 3×3 cm², 2×2 cm², 1×1 cm²과 0.5×0.5 cm²까지 동일한 5 cm 깊이에서 전리량을 측정평가 하였다.

X-Omat 필름은 물등가고체팬텀(RW3, PTW)을 사용하여 조사면 10×10 cm²에서 0, 30, 40, 70, 100, 150, 250 cGy를 조사한 필름과 소조사면에서 조사된 필름을 수작업으로 동시에 현상하였으며, 현상온도는 25°C에서 90초간, 정착은 5분을 각각 시행하였으며, 흑화도는 적외선 센서인 WP102 Densitometer를 이용하였다.

Clinac Ex의 헤드구조상 1차 제한기로 두께 6.1 cm의 납 차폐판이 가속기창에서 20.99 cm의 위치에 있고, 텅스텐 두께 7.8 cm의 이동형 제한기가 28.0 cm와 36.7 cm 위치에 상하부 각각 위치하고 있으며, 두께 5.9 cm의 다엽제한기가 48.25 cm에 설치되어 있다. 이동형 하부 제한기는 하부의 다엽제한기의 이동축과 평행하게 이동(X1, X2의 jaw 위치)하여 다엽제한기의 누출선량을 차폐하는 역할을 하고 있고 총 3개 층의 제한기가 차폐역할을 한다.

하부의 다엽제한기는 좌우 열에 총 120개로 구성되며, 각 열의 중앙에서 5 mm 폭 20개와 1 cm 폭 10개가 전후에 구성되어 있다. 다엽제한기 하부는 선원에서 54.15 cm 위치에 하부면에서 SAD 까지의 거리는 46.15 cm 떨어져 제한기 산란선의 영향을 줄이도록 고안되어 있다.

본 기관에 사용중인 Eclipse TPS장치에는 권고안에 따라 3×3 cm² 면적의 출력선량을 최소면적으로 지정되어 있다. Pencil Beam Convolution에 적용되는 TMR, CBSF (Collima-

tor Back Scatter Factor)의 모델링된 최소면적은 1×1 cm² 이다. 여기서 조사면의 크기(X,Y)의 CBSF는 아래와 같이 주어진다.¹⁰⁾

$$CBSF(X,Y) = \frac{1}{PSF(X,Y)} \cdot \frac{MUGy(10,10)}{MUGy(X,Y)} \quad (2)$$

여기서 PSF(X,Y)는 팬텀산란비율을 의미하고 MUGy(10,10)는 기준조사면의 중앙의 10 cm 깊이에 1 Gy를 조사할 MU를 의미하고, MUGy(X,Y)는 조사면의 크기(X,Y)에서 1 Gy를 주기 위한 MU로 정의 된다.

$$MU(X,Y)_{10} = CBSF(X,Y) \cdot \frac{MU_{calib}}{D_{calib}} \cdot \frac{D_{ref}}{D_{norm}(X,Y) \cdot SADF} \quad (3)$$

MU(X,Y)₁₀는 조사면(X,Y)에서 중앙의 깊이 10 cm에 임의의 선량(Gy)을 주기 위한 MU로 TPS에서 얻어진다.

MUcalib는 기준조사면(10×10 cm²)의 10 cm 깊이에 1 Gy를 조사하기 위해 결정된 MU이며, TMR값으로 결정되며, Dcalib는 사용자가 정한 기준깊이에 주는 선량이며, Dref는 사용자의 기준깊이에서 절대선량(Gy)를 의미한다. 또, Dnorm(X,Y)는 조사면(X,Y)의 규격깊이에서 AAA로 계산된 선량을 나타낸다.

SADF는 장비가 SSD방법으로 교정된 경우 6 MV 광자선에서는 최대선량깊이(dmax) 1.5 cm에 대한 거리역자승 값인 1.03을 적용한다.

확인을 위한 MU 값은 표준팬텀을 사용한 기준 조사면에서 얻었으며, 소조사면의 MU값은 모델링을 통한 TPS의 산출값을 사용하였다. 기준깊이에 100 cGy를 조사하기 위한 값을 설정하고 산출된 MU로 부터 아래와 같이 출력선량계수를 비교하였다.

$$MU = Gy / [MCF(ref) \times OPF(r) \times TMR(r,d) \times SADF] \quad (4)$$

MCF=기준조사면의 기기교정선량계수 [Gy/MU]이며, OPF=기준조사면의 선량에 대한 임의의 조사면(r)의 선량의 비로 주어지는 임의의 조사면의 출력선량계수를 나타낸다.

결 과

소조사면은 방사선세기조절은 다엽제한기의 이동거리와 각 다엽제한기의 정주시간에 따라 조절되는 점에서 섬세한 모양의 중앙을 조사할 때 소형으로 분할된 조사면이 차지

하는 비율이 증가되므로 1 cm 미만의 조사면에 대한 정확한 출력선량계수의 필요성이 커진다. 이에 본 실험에서는 소형조사면은 다엽제한기를 충분히 개방된 열린 다엽제한기 속에 상하부 텅스텐 제한기-상부 제한기의 Y1, Y2 지정과 하부의 X1, X2 지정 -로 $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$, 1×1 , $2 \times 2 \text{ cm}^2$, $3 \times 3 \text{ cm}^2$, $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 로 설정하여 얻은 선량을 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 의 기준조사면의 선량을 기준으로 출력선량계수를 구한 결과 Fig. 2a와 같다. Fig. 2b는 제한기 개방을 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 로 고정하고 다엽제한기를 $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$, $1 \times 1 \text{ cm}^2$, $2 \times 2 \text{ cm}^2$, $3 \times 3 \text{ cm}^2$, $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 및 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 를 설정하였고, $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 를 기준으로 출력선량계수를 구하고 비교하였다.

Fig. 2a는 열린 다엽제한기와 jaw에 의한 조사면 $3 \times 3 \text{ cm}^2$ 에서 공기전리함 CC01과 SFD 다이오드, 다이아몬드 및 Xomat 필름에 의한 출력선량계수는 각각 0.872, 0.852, 0.869, 0.870을 나타냈으며, 조사면 $3 \times 3 \text{ cm}^2$ 에서는 0.13 CC 공기전리함(CC13)이 유용한 것으로 발표되고 있어 비교한 결과 0.875을 보여 실험군과 차이가 거의 없게 나타났다.

열린 다엽제한기와 제한기 조사면 $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 에서는 각각 0.835, 0.816, 0.833 및 0.837로 나타났으며, 평균 0.830 ± 0.0096 이었다.

열린 다엽제한기와 제한기의 조사면 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 에서는 각각 0.740, 0.738, 0.743 및 0.742로 나타났으며, 평균 $0.741 \pm$

0.0022이었다.

열린 다엽제한기와 제한기의 조사면 $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ 에서는 각각 0.541, 0.586, 0.535 및 0.539로 나타났으며, 평균 $0.0.550 \pm 0.0240$ 이었다.

제한기를 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 로 고정하고 다엽제한기의 조사면을 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 에서 Fig. 1과 같이 줄여 $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ 까지 출력계수를 구한 결과 Fig. 2b와 같다. 단 조사면 $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 이하에서는 0.13 CC의 공기전리함의 내부 직경크기가 6 mm이고 길이가 6.4 mm 여서 작은 조사면에서 나타나는 선량분포의 가장자리효과에 의해 좁은 평탄부위에 부적합함으로 제외하였다.

Fig. 2b에서 다엽제한기 조사면 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 을 기준으로 규격화된 출력계수를 보여주고 있다. 다엽제한기 $3 \times 3 \text{ cm}^2$ 에서는 CC01이 0.907, SFD 다이오드가 0.885, 다이아몬드 전리함이 0.905, Xomat Film 0.897의 출력계수를 나타내었으며, 평균 0.899이고 편차는 ± 0.0106 이다.

다엽제한기 $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 에서는 각각 0.865, 0.841, 0.861, 0.855를 보였으며, 평균 0.855이고 표준편차는 ± 0.0106 이다.

다엽제한기 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 에서는 각각 0.758, 0.754, 0.771, 0.769를 얻었으며, 평균 0.763이고 편차는 ± 0.0082 이다.

다엽제한기 $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ 에서는 0.591, 0.637, 0.628, 0.550을 얻어 평균 0.602이고 표준편차는 ± 0.0399 의 실험오차를

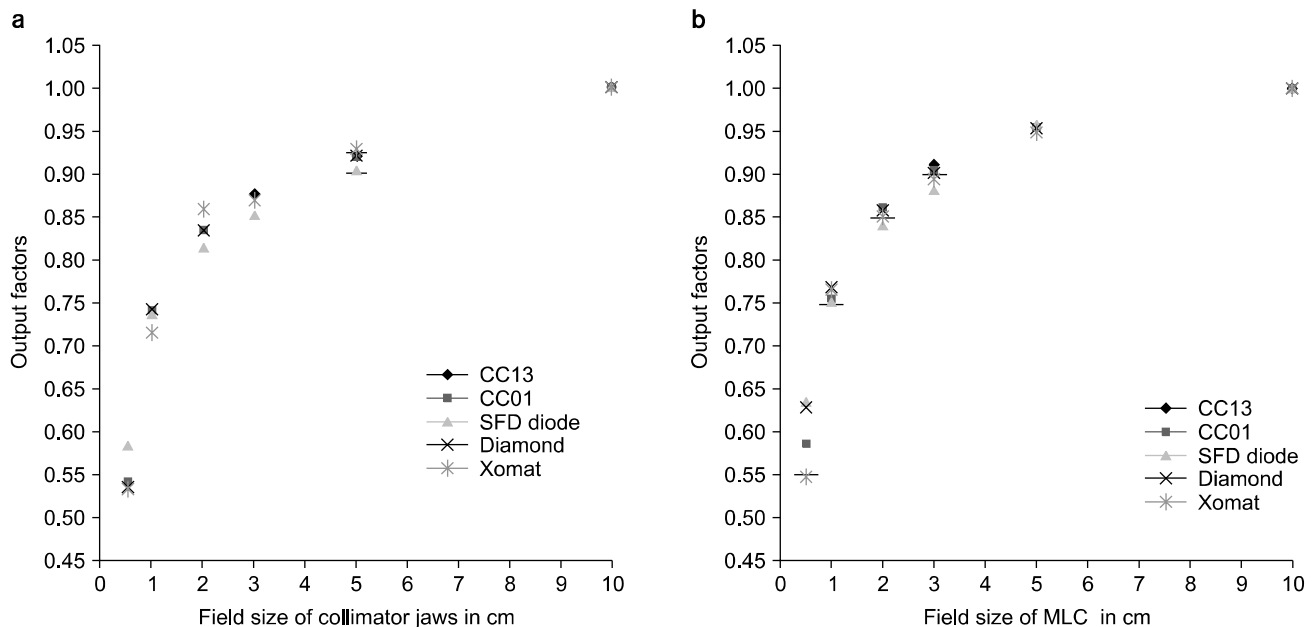


Fig. 2. Showing the output factors of small fields in 6 MVX rays using the SFD diode, Xomat film, diamond chamber and CC13 ion chamber used for reference output dose. The field size delivered from the collimator jaws in cm for MLC free (a) and the MLC open in collimator jaws set of $10 \times 10 \text{ cm}^2$ (b).

나타내었다.

X-Omat 필름에 의한 출력선량계수는 표준곡선 필름과 필드용 필름을 수작업으로 동시에 현상정착과정을 수행함으로써 측정환경변수를 줄일 수 있게 되었으며, 흐림과 이물질이 거의 없는 필름선량으로 평가되었다. 필름선량계를 이용한 출력선량계수는 $10 \times 10 \text{ cm}^2$, $5 \times 5 \text{ cm}^2$, $3 \times 3 \text{ cm}^2$ 에서는 표준전리함으로 사용되는 CC13이나 CC01 전리함에 근사한 값을 보였으며, 다이오드와 다이아몬드 전리함의 출력선량계수의 중간값을 보이고 있다.

반면에 SFD 다이오드 검출기와 다이아몬드 전리함은 평균보다 높은 값을 보이고 있으나 표준편차내에 있음을 확인할 수 있다.

실험에서 제한기 jaw의 개방면적과 동일한 다엽제한기 조사면의 출력선량계수를 비교한 결과는 Table 1, 2와 같으며, 다엽제한기 조사면에서 2.0~3.8% 높게 나타났다. 이는 다엽제한기가 측정점에 보다 가까운 위치에 있어 다엽제한기에 의한 산란선의 영향과 다엽제한기를 투과한 선량의 영향이 준 증가요인임을 알 수 있다.

TPS의 빔모델링에서 TMR(r,10)과 PSF(r)을 구하고, 선량 계획은 수조팬텀을 CT스캔하여 소조사면의 10 cm 깊이에 1Gy를 도달시킬 MU를 추출하고 출력선량계수를 구한 결과 Table 3과 같이 $5 \times 5 \text{ cm}^2$, $3 \times 3 \text{ cm}^2$, $2 \times 2 \text{ cm}^2$, $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 에서 각각 0.949, 0.942, 0.915, 0.815로 나타났으며, 실험적 평가된 출력선량계수에 비해 TPS의 OPF가 $2 \times 2 \text{ cm}^2$, $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 에서 각각 4.8%에서 7.0%까지 높은 오차를 보였다. 이는 사용자의 기준깊이에 주어질 선량이 상대적으로 낮은 선량이 주어짐을 의미한다.

고 찰

방사선치료의 선량 최적화는 종양의 입체적 모양과 크기에 따라 높은 선량이 조사되고, 주변 또는 방사선 통로상에 있는 정상장기에는 내용선량 이하의 적은 선량이 도달되게 하는 것이다. 이 선량분포를 이루는 방법으로 여러방향의 조사면과 각 조사면의 세기조절로 원하는 선량분포를 얻게 된다. 모든 방사선치료에서 정확한 선량계산과 평가는 항

Table 1. The averaged output factors obtained as function of the collimator field size for the MLC free.

	Jaw field (cm^2)	Output factor*
MLC free	10×10	1.000 ± 0.0000
	5×5	0.920 ± 0.0100
	3×3	0.866 ± 0.0093
	2×2	0.830 ± 0.0096
	1×1	0.741 ± 0.0022
	0.5×0.5	0.550 ± 0.0240

*The averaged output factors were delivered from the CC01 ion chamber, SFD diode chamber, diamond chamber and Xomat film dosimetry.

Table 2. The averaged output factors obtained as function of the MLC field size for the Collimator $10 \times 10 \text{ cm}^2$.

	MLC field (cm^2)	Output factor*
JAW $10 \times 10 \text{ cm}^2$	10×10	1.000 ± 0.0000
	5×5	0.955 ± 0.0035
	3×3	0.899 ± 0.0106
	2×2	0.855 ± 0.0106
	1×1	0.764 ± 0.0082
	0.5×0.5	0.602 ± 0.0399

*The averaged output factors were delivered from the CC01 ion chamber, SFD diode chamber, diamond chamber and Xomat film dosimetry.

Table 3. Comparison the output factors of experiments to that of derived' from TPS.

	Jaw field (r)	TPS* MUGy	CBSF (r)	Dnorm (X,Y) ₁₀	TMR** (r,10)	TPS OPF	Experiment OPF	Experiment diff (%)
MLC free	10×10	126	1.000	1.000	0.775	1.000	1.000	0.0%
	5×5	139	0.979	0.887	0.737	0.949	0.955	-0.6%
	3×3	146	0.950	0.820	0.707	0.942	0.899	4.8%
	2×2	154	0.930	0.761	0.689	0.915	0.855	7.0%
	1×1	180	0.909	0.636	0.662	0.815	0.764	6.7%
	0.5×0.5	-	-	-	-	-	0.602	-

TPS* MUGy represents MU for 1 Gy at 10 cm depth in a given jaw field(r) and TMR** was derived from PBC modeling in Eclipse TPS.

상 강조되고 있으며, 특히 세기조절에 의한 선량계획에는 기존과 달리 첫째, 조사면내 균등선량개념이 허락되지 않는다. 나아가 종양내에서도 균등선량분포를 얻기보다 손상 위험장기에 내용선량 이하가 도달되는 지에 관심이 치중하게 된다. 둘째, 가급적 종양내에서 분할조사면을 두지 않는다는 교과서적인 금기사항이 사라졌다. 셋째, 최소 조사면의 선량평가에 한계점이 있다.

넷째, 조사면이 비대칭성이고 조사면의 중심선량이 대표하지 못한다. 이런 점을 극복하기 위해 TPS에서는 측정빔을 약 합성곱 하거나 몬테칼로연산을 통해 얻은 커널빔으로 모델링한 선량분포를 사용자가 검출한 선량분포에 근접하게 Fitting 하여 사용한다.

세기조절치료는 구획조사에 기반을 둔 조사방법이므로, TPS는 사용자의 검출한계를 넘은 작은 조사면에 대해서 빔모델링한 것을 적용하고 있다. 따라서 의학물리학자는 적정 검출기로 세기조절방사선치료의 선량분포를 검증하여야 한다.¹¹⁾

선량평가를 위해서 고려되는 점은 선량측량분포상 평탄부위Plateau가 없는 작은 조사면은 검출기의 직경이 가능한 1~2 mm 이하의 크기가 바람직하다. 이에 적합한 검출기는 PinPoint 또는 CC01 전리함과 필름, Gel 검출기, TLD분말소자, 플라스틱 신틸레이터, 다이오드 전리함에 대한 연구발표가 되고 있으며, 이 검출기들은 절대선량측정에는 무리가 있으나 공기전리함에 대한 상대측정과 상호비교해 이용되고 있다.^{8,12,13)}

출력선량계수는 모든 조사면의 MU를 계산하는 데 비례적으로 적용되고, TPS에는 대개 빔모델링의 결과를 심사할 때 한 번 입력하고 자주 바꾸지 않게 되므로 품질보증시 지나칠 수 있으므로 유의할 필요가 있다.

최근 RPC센터¹⁴⁾에서 A16 전리함(Exradin 0.007 cm³)을 이용하여 SSD 100 cm, 조사면 2×2 cm², 깊이 10 cm에서 평가한 출력선량계수 Database 구축하고 발표한 바 있다. 이 가운데 Varian 선형가속기를 사용하는 64기관에서 참여하여 출력선량계수 자료에 의하면 3×3 cm²에서 RPC 0.828±0.017, 참여기관 0.841±0.025로 저자들의 실험값인 0.899±0.0106에 비해 낮은 값이다. 이는 SSD법의 10×10 cm²에 깊이 10 cm에서 측정평가 한 바 저자들의 실험이 SAD 법이고 깊이 5 cm 지점을 기준으로 수행되었으므로 직접적인 비교를 하는 것은 무리이며, 단지 조사면의 크기와 10 cm 깊이에서의 펜텀산란의 기여가 높으므로 기준값이 10×10 cm²에 비해 높은 점이 작용된 것으로 예상된다.

Scott 등¹⁵⁾은 2×2 cm²에서 0.5×0.5 cm²까지 몬테칼로 모델

링한 값과 필름측정 및 다이오드 검출기에 의한 출력선량계수가 저자들의 실험과 매우 근사한 값을 보여주고 있다.

Das 등¹⁶⁾은 몬테칼로 모델링과 다이아몬드, PinPoint 전리함, 다이오드 검출기 및 X-Omat 필름을 이용해 2×2 cm², 1×1 cm², 0.5×0.5 cm²의 출력선량계수를 비교 발표한 것과 Gavin 등¹⁷⁾이 다이오드를 상호비교한 0.5×0.5 cm²와 1×1 cm² 조사면의 출력계수가 모두 저자들의 발표와 매우 근사하고 오차범위에 일치하였다.

저자들의 실험에서 공기전리함은 내경 2 mm 유효길이 4.5 mm 여서 기하학적으로 빔의 축과 평행되게 설치하여 10×10 cm²의 출력선량을 기준으로 규격화하였다.¹⁸⁾ 이는 내경 2.0 mm×길이 3.6 mm이고 기준 측정점은 선량증가두 겹을 씌우지 않고 전리함의 끝에서 2.3 mm 위치이므로, 빔의 축과 수직되게 설치하지 않은 것은 공간해상도를 크게 하기 위해서였으며, 측정결과 다이오드 검출기나 다이아몬드 전리함과 유사한 선량계수를 얻을 수 있음을 보여주고 있다. 그러나 비록 빔의 축과 수평되게 측정하여 평가하는 것을 모든 세기조절방사선치료 품질유지에 확장하는 것은 무리라고 생각한다. 왜냐하면 소형조사면의 중앙에 두어 선량을 평가했으므로, 상대적으로 반음영 효과가 지배적인 소형조사면에서 중앙점 이외에는 정확한 선량평가를 하기 어렵기 때문이다.

필름선량계는 위치분해능이 높은 이점이 있고, 점검이 용이하며, 표준곡선과 필드필름을 수동 현상처리 하여 온도유지 및 처리시간에 동시성을 띄게 하였으며 자동현상의 롤러홈과 높은 현상온도에 의한 흐림현상을 줄여서 수행하여 배경흑화도가 0.03~0.05 범위에 있었다.

X-Omat필름선량이 10×10 cm²에서 1×1 cm²까지 표준전리함으로 사용되는 CC13 이나 CC01 전리함에 비하여 거의 일치하고, 다이오드와 다이아몬드 전리함의 출력선량계수의 중간값을 보이고 있으나, 다엽제한기 조사면 0.5×0.5 cm²에서는 실험오차를 조금 초과하는 낮은 값을 보였다. 그러나 CC01과는 근사한 값을 보여 작은 조사면에서는 산란선의 영향이 적어 낮은 에너지의 비율이 적은 것이 원인이 아닌가 생각 된다.

Scott 등¹⁵⁾ 의한 MC 모델링 검증에 이용한 X-Omat 필름, 다이아몬드 검출기에 의한 출력선량계수와 Klein¹⁹⁾ 등이 발표한 플라스틱 신틸레이터 검출기에 의한 0.5×0.5 mm² 조사면의 출력계수가 본 실험의 수치와 근사한 값을 보여 저자들의 실험에 신뢰성을 주고 있다.

특히, 저자들의 실험에서 다엽제한기 조사면과 동일한 제한기 jaw의 조사면과의 출력선량계수를 비교한 결과 5×5

cm², 3×3 cm²에서 각각 3.8%가, 2×2 cm²와 1×1 cm²에서 각각 3.0%가, 0.5×0.5 cm²에서 2.0% 높게 나타나 다엽제한기의 기하학적 위치에 의한 산란선과 투과선량에 기인하는 것으로 예상된다. Kim 등²⁰⁾은 6 MVX선에 대한 MLC (Varian 120 leaf)의 몬테칼로 모델링에서 조사면의 크기에 따라 1.6~1.9%의 누출선량이 있음을 발표한 바 있다. 따라서 Eclipse의 빔데이터를 입력할 때 jaw의 조사면으로 얻은 낮은 출력선량계수를 입력하는 경우 환부에 높은 MU를 설정하게 되므로 환부선량이 증가하는 요인이 됨을 의미한다.

결 론

조사면내 방사선플루언스의 세기는 다엽제한기의 개방 위치와 개방시간의 변화로 결정되고 소형 조사면 또는 계층형 소형조사면에 의한 선량이 누적되어 조사할 MU를 정하게 되므로 소형조사면의 출력선량계수의 정확성은 조사면 선량의 정확성에 직결됨을 인식하고 3×3 cm²에서 0.5×0.5 cm²까지 출력선량을 평가하였다.

선량검출기는 0.01 cm³인 CC01 이온전리함, SFD 다이오드, 다이아몬드 검출기와 X-Omat 필름을 이용하였으며, 다엽제한기 조사면의 해당 출력계수는 3×3 cm²에서 0.899±0.0106, 2×2에서 0.855±0.0106, 1×1 cm²에서 0.764±0.0082, 0.5×0.5 cm²에서 0.602±0.0399를 얻었다.

Jaw를 10×10 cm²로 고정하고 다엽제한기의 조사면의 출력계수는 다엽제한기를 40×40 cm²에 jaw에 의한 소형조사면의 것보다 최대 3.8% 높게 나타남을 확인하였다. 따라서 TPS에 출력계수를 입력시 다엽제한기에 의한 조사면의 출력계수가 설정되는 것이 중요함을 의미한다.

References

1. Klein EE, Hanley J, Bayouth J, et al: Task Group 142 report: Quality assurance of medical accelerators. Med Phys 36(9): 4197-4212 (2009)
2. Barbosa NA, Rosa LAR, et al: Development of a phantom for dose distribution verification in Stereotactic Radiosurgery. Physica Medica 29:461-469 (2013)
3. Thomas SJ, Eaton DJ, et al: Equivalent squares for small field dosimetry. The British Journal of Radiology. 81:897-901 (2008)
4. Choi TJ, Kim JH, Kim OB, et al: Development of a New Radiotherapy Technique using the Quasi-conformation Method. J Korean Soc Ther Radiol 9(2):343-350 (1991)
5. Kenichiro Hasumi, Yukimasa Aoki, Ryuko Wantanabe, Dean L Mann: Clinical response of advanced cancer patients to cellular immunotherapy and intensity-modulated radiation therapy. Oncoimmunology 2(10) (2013)
6. Cadman P, Sidhu NPS, Ibbott G, Nelson A: Dosimetric considerations for validation of sequential IMRT process with a commercial treatment planning system. Phys Med Biol 47: 3001-3010 (2002)
7. Alfonso R, Andreo P, Capote R, et al: A new formalism for reference dosimetry of small and nonstandard fields. Medical Physics 35:5179-5186 (2008)
8. Francescon P, Cora S, Cavedon C: Total scatter factors of small beams: A multidetector and Monte Carlo study. Medical Physics 30:341-347 (2003)
9. Oh SA, Kang MK, et al: Study of the Penumbra for High-energy Photon Beams with GafchromaticTM EBT2. Journal of the Korean Physical Society 60(11):1973-1976 (2012)
10. Varian medical system. Eclipse Algorithms Reference Guide. p43-45 (2009)
11. Francisco SD, Günther HH, Javier P, et al: Uncertainty estimation in intensity-modulated radiotherapy absolute dosimetry verification. Int J Radiation Oncology Biol Phys 68(1): 301-310 (2007)
12. Alfonso R, Andreo P, Capote R, et al: A new formalism for reference dosimetry of small and nonstandard fields. Medical Physics 35:5179-5186 (2008)
13. Das IJ, Ding GX, Ahnesjö A: Small fields: Nonequilibrium radiation dosimetry. Medical Physics 35:206-215 (2008)
14. Followill DS, Kry SF, Qin L, et al: The Radiological Physics Center's standard dataset for small field size output factors. Journal of Applied Clinical Medical Physics 13(5): 282-289 (2012)
15. Scott AJD, Nahum AE, Fenwick JD: Using a Monte Carlo model to predict dosimetric properties of small radiotherapy photon fields. Medical Physics 35:4671-4684 (2008)
16. Das IJ, Ding GX, Ahnesjö A: Small fields: Nonequilibrium radiation dosimetry. Medical Physics 35:206-215 (2008)
17. Gavin CS, Steve W, Narinder PS, et al: Experimental small field 6 MV output ratio analysis for various diode detector and accelerator combinations Radiotherapy and Oncology 100: 429-435 (2011)
18. Duggan DM and Coffey II CW: Small Photon Field Dosimetry for Stereotactic Radiosurgery. Medical Dosimetry 23(3):153-159 (1998)
19. Klein DM, Tailor RC. Measuring output factors of small fields formed by collimator jaws and multileaf collimator using plastic scintillation detectors. Med Phys 37(10):5541-5549 (2010)
20. Kim JO, Siebers JV, Keall PJ, et al: A Monte Carlo study of radiation transport through multileaf collimators. Med Phys 28(12):2497-2506 (2001)

다엽제한기 소조사면의 6 MV 광자선 출력선량계수

*대구가톨릭대학병원, [†]계명대학교 동산의료원, [‡]영남대학교병원 방사선종양학과

이호준* · 최태진* · 오영기[†] · 전경수[†] · 이용희[†] · 김진희[†] · 김옥배[‡] · 오세안[‡] · 김성규[‡] · 예지원[‡]

종양부위의 입체적이고 선택적인 치료가 가능해 임상표적부피(clinical target volume, CTV)에 높은 선량으로 집중조사하고 부작용을 현저히 줄이는 세기조절방사선치료는 치료예후를 향상시키고 있다. 방사선세기조절 치료는 MLC의 개방면적과 개방시간으로 조사면내 플루언스를 조정하므로 소형조사면의 선량이 누적되어 원하는 선량이 조사하게 된다. 따라서 소형조사면과 계층형 조사면의 출력선량계수의 정확성은 곧 Portal MU 결정에 정확성을 더할 수 있고, 종양에 조사되는 선량의 정확성을 향상할 수 있으므로, 이 연구는 Clinac Ex (Varian) 3×3 cm²에서 0.5×0.5 cm²까지 조사면을 선정하였고 방사선은 6 MVX선의 소형조사면의 출력선량계수를 평가하였다. 조사면은 다엽제한기를 40×40 cm²로 개방하고 Collimator jaw를 이용한 것과 Collimator를 10×10 cm²로 고정하고 다엽제한기에 의한 조사면으로 구분하여 출력선량계수가 결정되었다. 검출기는 유효체적이 0.01 cm³이고 내경 2 mm인 CC01 (Scanditronix-Wellope)이온전리함과 SFD 다이오드 검출기(0.6 mmØ, 500 µm 두께, Scanditronix-Wellope)와 다이아몬드 검출기(T60003, PTW)와 X-Omat film을 사용하였다. 결과는 다엽제한기 조사면의 출력선량계수는 3×3 cm²에서 0.899±0.0106, 2×2 cm²에서 0.855±0.0106, 1×1 cm²에서 0.764±0.0082, 0.5×0.5 cm²에서 0.602±0.0399를 얻었다. Jaw를 10×10 cm²로 고정하고 다엽제한기의 조사면의 출력계수는 MLC를 40×40 cm²에 jaw에 의한 소형조사면의 것보다 최대 3.8% 높게 나타남을 확인하였다. 따라서 세기조절방사선치료 TPS에는 collimator jaw 보다 다엽제한기 조사면 크기의 출력선량계수가 설정되는 것이 중요함을 의미한다.

중심단어: 소조사면, 출력선량계수, 필름 선량측정