

필름을 사용한 세기변조치료법에 대한 선량측정

성균관의대 삼성서울병원 치료방사선과*, 경기대학교 의학물리학과†

주상규*† · 여인환* · 허승재* · 최병기* · 박영환* · 안용찬* · 김대웅* · 공영건†

목적 : 원자 번호가 높은 물질로 구성된 필름은 저 에너지 광자선에 과반응하여 선량 측정 시 인체조직에서와 다른 흡수양상을 보인다. 이러한 현상은 조사면의 경계인 반음영 및 그 외곽 부위에서 두드러지게 관찰된다. 따라서 반음영이 조사면내에 위치하게되는 세기변조치료법에서 필름을 이용한 선량 측정 시 이러한 현상이 미치는 영향을 분석하고 개선 방법을 강구하고자 한다.

대상 및 방법 : 6 MV X-선의 5~7개의 크기가 다른 고정형 조사면을 이용해 두가지 유형의 세기변조 조사면을 만들었으며 전리함 및 저감도 측정용 필름을 사용하여 각 조사면의 빔 프로파일을 측정했다. 측정 깊이와 최대 조사면적을 변화시켰으며 필름에 대해 수직 및 수평 조사하여 이에 따른 선량 분포 변화를 관찰했다. 또한 필름 선량 측정 시 저 에너지 광자선에 의한 선량 과평가 현상을 막기 위해 납 필터(0.01 inch)를 필름 양측에 부착하여 이로 인한 영향을 관찰했다.

결과 : 필름만을 사용한 빔 프로파일에서는, 전리함 측정치에 비해 저 선량 영역 및 조사면 경계에서의 선량 과평가 현상이 수직 및 수평 조사 모두에서 관찰되었다. 이러한 현상은 측정 깊이가 증가함에 따라 크게 나타났으며 10 cm 깊이의 역 피라미드형 세기변조 조사면 중심에서 최고 약 15%의 상대오차를 보였다. 필터를 사용한 경우에는, 수직 조사 시 필터에 의한 선량 저 평가 현상이 관찰되었으나 수평 조사에서는 전리함 측정치와 3% 이내의 오차를 보여 매우 잘 일치하였다.

결론 : 필름을 이용한 세기변조 조사면의 선량 측정 시 선량 과반응에 의한 오차는 조사면의 조합 형태 및 반음영 위치와 밀접한 관계를 가지며, 선량 평가 시 이에 대한 고려가 필요하다. 납 필터를 사용한 수평조사 방법은 이러한 오차를 줄이는데 도움을 주며 입사 방사선의 물리적 특성을 고려한 적정 두께의 필터 선택이 요구된다.

핵심용어 : 세기변조치료, 반음영효과, 납필터, 필름을 이용한 선량측정

서 론

방사선치료 시 표적에 조형된 선량분포를 얻는 것은 치료 효율을 향상시키고 방사선 장애를 줄이는데 매우 중요하다.¹⁾ 기존의 방법은 쉐기 필터나 보상체와 같은 선질 변형체를 사용하거나 다양한 조사 방향의 선택으로 이러한 목적을 달성하고자 했다.²⁾ 최근에는 조사면내의 선량분포를 변화시켜 방사선의 강도를 임의로 조절하는 세기변조 방사선치료법(Intensity Modulation Radiation Therapy : IMRT; 이하 세기변조법)을 도입함으로써 기존 치료법의 한계를 극복하고 좀더 효율적으로 최적화된 선량분포를 얻고자 하는 시도가 많이 이루어지고 있다.^{3~6)}

세기변조법이 많은 임상적 장점을 가지고 있어 방사선치

료의 새로운 대안으로 부각되고 있으나 이에 따른 개선점도 다양하게 제시되고 있다. 특히 시간에 따라 변하는 조사 면에 대한 선량 검증의 중요성이 강조되고 있으며 기존의 단일 검출기로는 이러한 누적선량 측정이 불가능하다. 이러한 단점을 보완하기 위해 전리함이나 다이오드 검출기⁷⁾ 그리고 열 형광 선량 계 등을 누적 선량 측정이 가능하도록 다 채널(multi channel) 형태로 제작하여 사용하고 있으나 고가이고 공간 분해능이 떨어지며 복잡하고 상대적으로 긴 측정 시간을 필요로 하는 단점이 있다.

이에 반해 일반적으로 사용되어 온 X-선 필름은 이러한 단점을 극복할 수 있는 장점을 가지고 있어 세기변조법의 선량 검증에 많이 이용되고 있다.^{8~11)} 그러나 필름은 광자선의 선량 측정 시 조사면의 경계인 반 음영(penumbra) 및 그 외곽 부위에서 선량과 평가 현상이 두드러지게 관찰되는 것으로 알려져 있다.¹²⁾ 동일한 크기의 조사 면을 사용하는 기존 방사선치료에서는 반음영 부위에서의 선량 과 평가 현상이 미치는 영향이 비교적 덜 중요하지만 반 음영이 조사면내에 위치하는 세기변조법에서는 매우 중요한 문제가 될 수

이 논문은 2001년 4월 9일 접수하여 2002년 3월 4일 채택되었음.

책임저자: 여인환, 성균관의대 삼성서울병원 치료방사선과
Tel: (02)3410-2609, Fax: (02)3410-2619
E-mail: dryeo@smc.samsung.co.kr

Table 1. Component of Two IMRT Field, The Unit is in cm

Static field	(X ₁ /X ₂)	(X ₁ /X ₂)	(X ₁ /X ₂)	(X ₁ /X ₂)	(X ₁ /X ₂)	(X ₁ /X ₂)	(X ₁ /X ₂)
IMRT field	(X ₁ /X ₂)	(X ₁ /X ₂)	(X ₁ /X ₂)	(X ₁ /X ₂)	(X ₁ /X ₂)	(X ₁ /X ₂)	(X ₁ /X ₂)
Pyramid	3	6	9	12	15	-	-
Inverse pyramid	-7.5/-4.5	-7.5/-3	-7.5/-1.5	-7.5/7.5	1.5/7.5	3/7.5	4.5/7.5
Remark	Y field size : 15 cm						

있다. 따라서 필름을 이용한 광자선의 측정 법을 세기변조법에 대하여 평가하는 것이 요구된다. 본 연구의 목적은 세기 변조법의 팬텀내에서 필름을 이용한 선량 분포 측정 시 조사 면의 반 음영 및 그 외곽 부위에서 관찰되는 저 에너지 산란 광자선에 의한 선량 과 평가 현상이 미치는 영향을 분석하고 저 에너지 산란선 제거용 납 필터¹²⁾를 사용하여 정확도를 개선하고자 한다.

대상 및 방법

1. 대상

본 연구는 선형가속기(Primus, Siemens, USA)의 6 MV X-선을 사용했다. 사용된 가속기는 직선형 끝(straight tip)으로 구성된 1 cm 간격의 다엽-콜리메이터(Multi-Leaf Collimator; 1 cm×27개)를 가지고 있으며 기하학적 반음영을 최소화하기 위해 이중 초점(double focus) 형태로 고안되었다. 물팬텀을 이용한 선량 측정은 체적 0.125 cc의 전리함(모델 9732, Multidata, USA; Thimble Ion Chamber)과 삼차원 스캔이 가능한 물팬텀(모델 9760, Multidata, USA; 59 (W)×68 (L)×54 (H) cm³)을 사용했다. 필름 선량측정에는 저감도 측정용 필름(X-Omat V2 film, Eastman Kodak, USA)과 폴리스틸렌 팬텀(Scrad, USA; 25 (W)×25 (L)×40 (H) cm³)을 사용했고 현상은 자동현상기(X-omat Multiloader 300, Kodak, USA; 처리시간 90초)를 이용했다. 현상된 필름은 선 검출(line detection)방식의 농도계(모델 9721, Multidata, USA; Iris Aperture Size 1.0 mm)로 필름의 흑화도를 구한 후 선량 분석 프로그램(Real-Time Dosimetry, Multidata, USA)을 이용하여 평가했다(Fig. 2). 또한 필름 선량 측정 시 저에너지 광자선에 의한 선량 과 평가 현상을 막기 위해 납 필터(Pb; 25 (W)×25 (L) cm², 두께 0.01 inch)를 6 mm 간격을 두고 필름 양측에 부착하여 이로 인한 영향을 관찰했다.

2. 실험 방법

세기변조법 조사면은 최대 크기 15×15 cm²을 기준으로 5~7개의 서로 다른 크기의 고정형 조사면(beamlet)을 사용해 만들었으며(Table 1) 조사면 형태에 따른 선량 분포 변화를

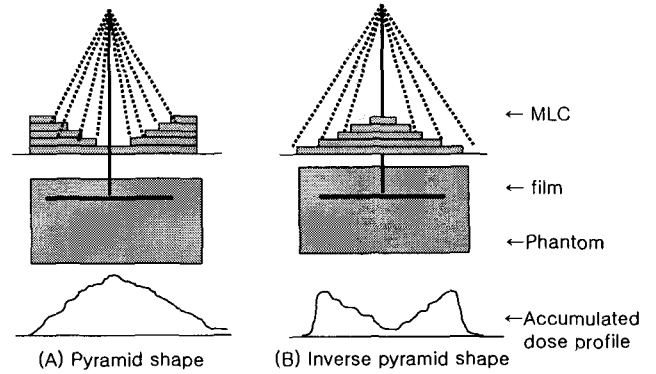


Fig. 1. Two IMRT fields used in this study.

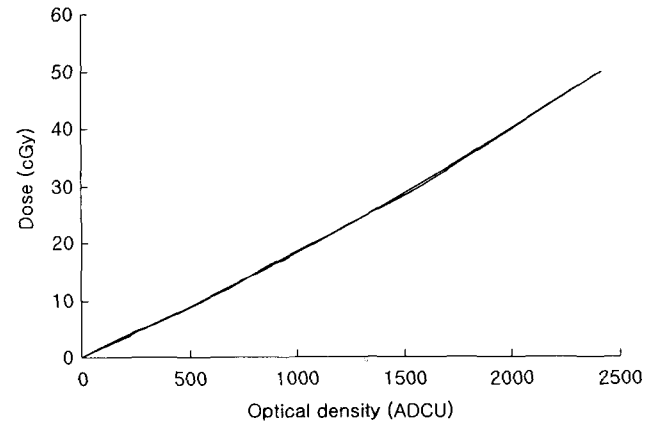


Fig. 2. Characteristic curve for film calibration to dose. ADCU value refers to the internal ADC (analog to digital converter) unit associated with the measurement scale of the optical density, which is between 0 and 4095.

분석하기 위해 두가지(피라미드, 역 피라미드형 : Fig. 1) 유형의 조사면을 대상으로 빔 프로파일을 측정하여 정확도를 분석하였다. 선량 측정의 기하학적 조건은 선원-팬텀 표면간 거리(SSD)를 100 cm으로 고정했다. 전리함을 이용한 선량 측정은 2개의 전리함을 이용한 상대 선량 측정법으로 각 beamlet의 1.5, 5, 10 cm 깊이에서의 빔 프로파일을 스캔한 후 조사면 중심에서의 상대 출력을 측정하여 보정하고 이를 합산하여 최고 선량점을 기준으로 정규화(normalize at dose maximum point) 시켰다. 필름을 이용한 선량 측정은 전리함을 이

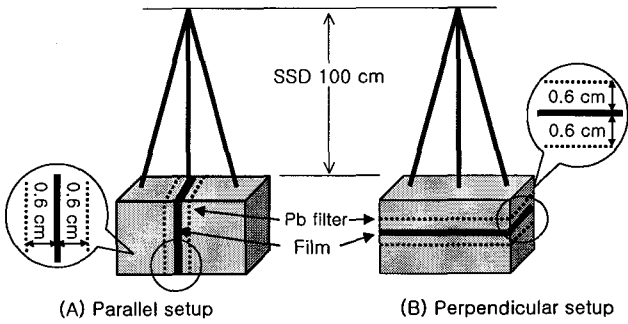


Fig. 3. Setup diagram of film dosimetry.

용한 측정과 동일한 기하학적조건에서 시행하였으며, 필름만을 사용한 경우와 저에너지 산란선을 제거하기 위해 0.01 inch 납 필터를 6 mm 간격을 두고 필름 양측에 부착한 경우로 구분하여 측정하였다. 또한 필터의 영향 및 필름의 측정 깊이에 따른 에너지 의존성을 평가하기 위해 조사되는 방사선에 대해 필름을 수평으로 위치한 경우와 수직으로 위치한 경우로 구분하였다(Fig. 3). 조사조건은 각 beamlet을 동일한 Monitor Unit (MU)으로 조사했으며 필름의 흑화도 포화현상(saturation)을 방지하기 위해 합산 선량이 50 MU를 넘지 않도록 하였다. 필름의 측정위치는 물팬톰과 동일한 깊이에서 시행했으며 처리된 필름을 통하여 얻은 빔프로파일은 산란선에 대응하는 주선량(Primary radiation dose)이 가장 높은 선량최대점에서 정규화 했다. 선량 평가는 전리함을 이용하여 얻은 실험치를 기준으로 필름만 사용한 경우와 납 필터를 부착하여 측정한 결과의 상대 오차를 구하여 정확도를 비교 분석하였다.

결 과

필름에 대해 수평 조사한 피라미드형 IMRT 조사면의 1.5 cm 깊이에서의 빔 프로파일에서(Fig. 4)는 전리함과 필름의 선량 분포가 비교적 잘 일치하는 결과를 보인다. 그러나 5 cm 깊이에서는 전리함에 비해 필름만 사용한 경우 최대 조사면의 외곽 부분에서 오차가 급격히 증가(50% 이상)하고 선량 정규화 지점인 조사면 중심에서 외곽으로 갈수록 오차가 커지는 경향을 보였다(Fig. 5). 이러한 오차는 측정 깊이와 함께 증가했으며 10 cm 깊이에서 최대 +8%의 오차를 보였다(Fig. 6의 화살표). 그러나 필터를 사용한 경우에는 오차 범위 3% 이내로 잘 일치함을 알 수 있었다.

역 피라미드형 조사면의 빔 프로파일도 피라미드형과 유사한 경향을 보였으며 필름만 사용한 경우 전리함 측정치에 비해 선량 정규화 지점으로부터 저 선량 영역인 최대 조사

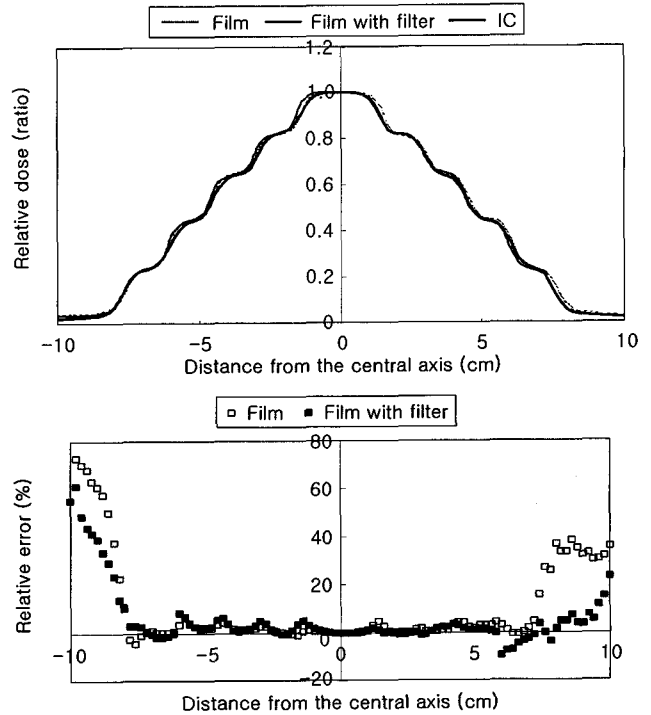


Fig. 4. Dose profile obtained using film (at 1.5 cm) in parallel with the pyramid-shaped beam (above) and its relative error (below).

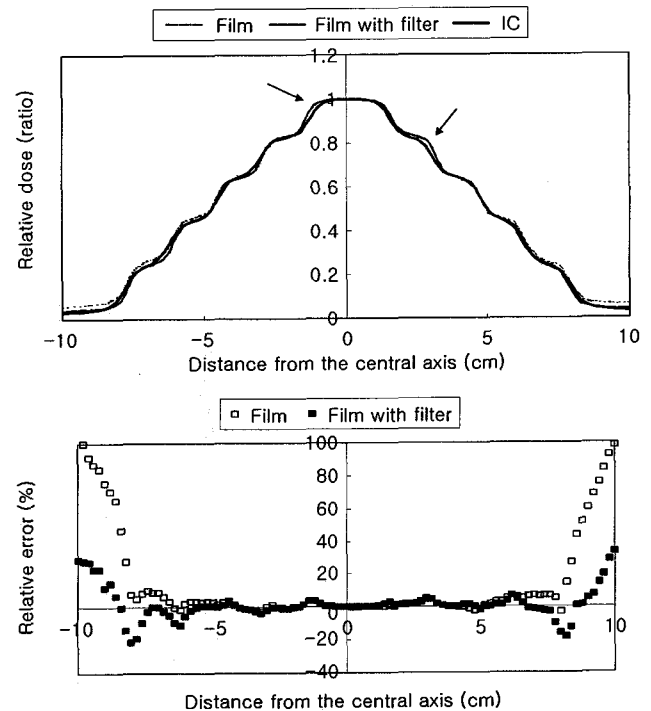


Fig. 5. Dose profile obtained using film (at 5 cm) in parallel with the pyramid-shaped beam (above) and its relative error (below).

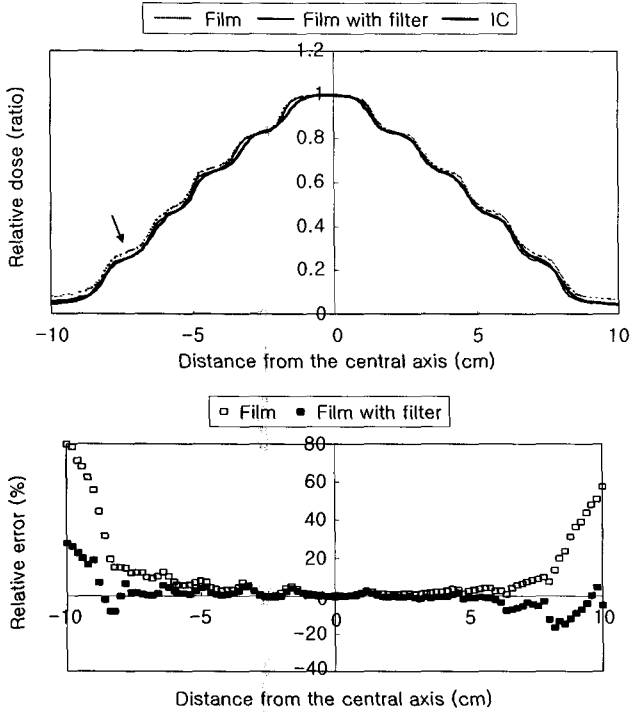


Fig. 6. Dose profile obtained using film (at 10 cm) in parallel with the pyramid-shaped beam (above) and its relative error (below).

면의 중심으로(position 0 cm) 갈수록 오차가 증가했다. 이러한 오차는 측정 깊이와 함께 증가하였으며 깊이 10 cm에서 전리함 측정치에 비해 최대 약 +15% (Fig. 7의 화살표)의 선량 과평가 현상이 관찰되었다. 그러나 필터를 사용한 경우 3% 이내의 오차로 필터에 의한 뚜렷한 개선 효과를 관찰할 수 있었다.

필름에 대해 수직 조사한 실험의 결과도 수평조사와 유사한 양상을 보였으며 측정 깊이와 함께 오차는 증가하였다(지면 관계상 10 cm 깊이에서의 측정치만 실음). 필름만 사용한 경우 최대 조사면의 경계에서 선량 과평가 현상이 피라미드 (Fig. 8) 및 역 피라미드(Fig. 9) 모두에서 관찰되었고 조사면 내에서의 선량 분포는 전리함에 비해 선량 정규화 지점으로부터 멀어질수록 오차가 증가하여 역 피라미드형 조사면의 중심에서 최대 +8%의 오차를 보였다. 필터를 사용한 경우 최대 조사면의 경계에서의 오차는 현저히 줄었지만 조사면 내에서 선량 저평가 현상이 관찰되었으며 역 피라미드형의 중심에서 최대 -8%의 오차가 관찰되었다.

고안 및 결론

필름을 이용한 선량 측정의 결과 해석 시 고려하여야 할

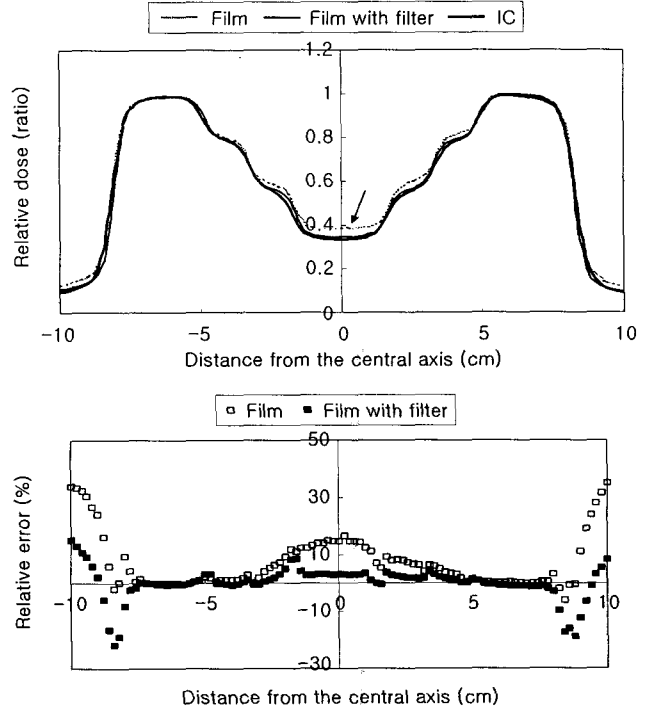


Fig. 7. Dose profile obtained using film (at 10 cm) in parallel with the inverse-pyramid-shaped beam (above) and its relative error (below).

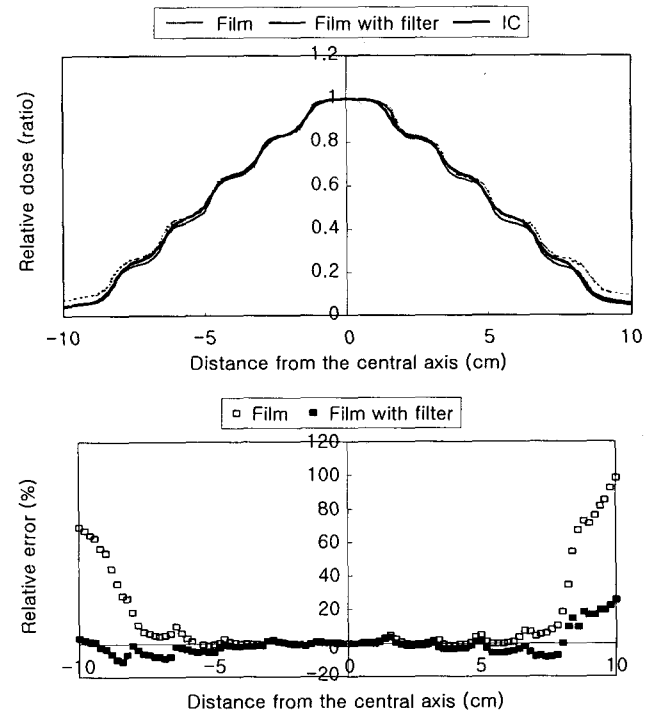


Fig. 8. Dose profile obtained using film (at 10 cm) in perpendicular with the pyramid-shaped beam (above) and its relative error (below).

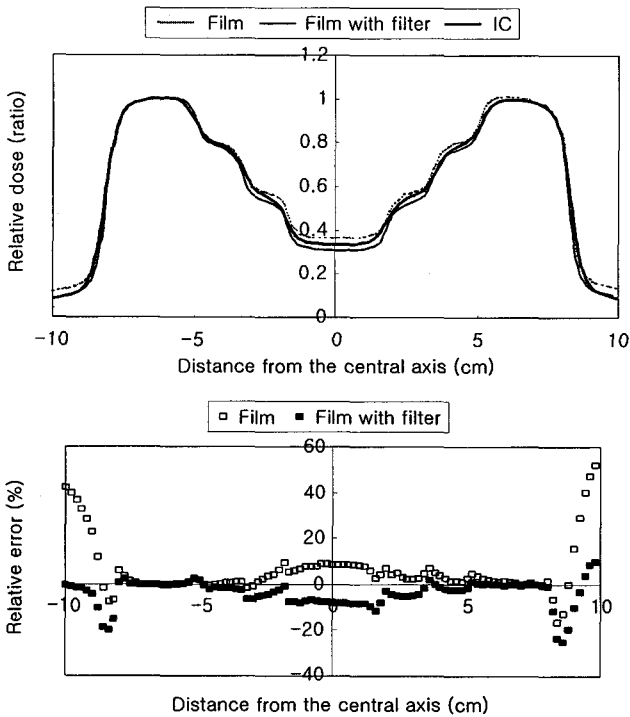


Fig. 9. Dose profile obtained using film (at 10 cm) in perpendicular with the inverse-pyramid-shaped beam (above) and its relative error (below).

사항 중 몇 가지를 든다면 (1) 전리함보다 필름의 공간분해능이 우수하다는 것과 (2) 전리함과 비교하여 상대적으로 에너지 의존성이 높다는 것이다. 이에 더하여 (3) 전리함과 필름의 측정데이터를 비교할 때 서로 겹치게 놓는 과정에서 기하학적인 오차가 발생할 수 있다는 점이 있고 마지막으로 (4) 이미 널리 알려진 필름반응성의 공간적인 불균일도, 처리 조건 의존성 등이 있다.

위 사항을 고려할 때 Fig. 5(화살표)와 같은 유형의 불일치는 기하학적인 오차에 의한 결과로 생각되며 IMRT 조사면을 구성하는 beamlet의 경계에서 주로 관찰되었다(전리함의 측정에 수반하는 오차와 빔 자체의 오차도 있음). 이러한 오차의 극복이 실험의 재현을 통하여 이루어지기 어려우므로 측정 결과 평가 시 이에 대한 고려가 필요하다.

조사면 유형에 따른 오차의 정도는 피라미드형에 비해 역 피라미드형에서 크게 관찰되었으며 선량 정규화 지점을 기준으로 저 선량 영역으로 갈수록 증가하였다. 이러한 현상은 산란 방사선의 밀도와 그 영향이 이 부분에서 최대인 점과 주선량이 다른 부분에 비해 상대적으로 낮기 때문에 오차가 높게 평가된 것으로 생각된다.

이러한 오차를 개선하기 위해 사용된 납 필터의 적용시 측정의 정확도를 높이기 위해서는 필터 두께의 균일도와 적

정 두께의 선택이 매우 중요하다. 본 실험에는 동일한 두께(0.01 inch)의 납 필터를 사용하여 수평조사에서만 필터에 의한 개선효과를 관찰할 수 있었고 수직조사에서는 최대 조사면의 경계를 제외하고는 오히려 선량 저 평가 현상이 관찰되었다. 필터의 사용이 수평 및 수직조사에서 상이한 효과를 보이는 것은 산란선의 필터에 대한 상대적인 입사각 및 이에 따라 필터에서 감쇄되며 진행되는 입자의 궤적(path length)이 두 세팅에서 다르기 때문이다. 따라서 산란조건에 따라 적절한 두께의 필터를 사용하면 수직조사에서도 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다. 첫째, 필름만을 사용한 측정에서는 저선량 영역 및 조사면 경계에서의 선량 과평가 현상이 수직 및 수평 조사 모두에서 관찰되었다. 둘째, 선량 측정 오차는 측정 깊이가 증가함에 따라 커짐을 확인하였다. 셋째, 필터(0.01 inch 두께)를 사용한 경우에는 수평 조사에서만 전리함 측정치와 매우 잘 일치하였다. 넷째, 세기변조조사면 중 반응영역이 마주 보는 역 피라미드형에서 오차가 가장 크게 나타났다.

본 연구는 X-선 필름을 이용한 세기변조 조사면의 선량 측정 오차를 평가하고 납 필터를 사용하여 정확도를 개선하고자 했다. 필름을 이용하여 세기 변조된 조사면을 측정하면 조사면의 경계 및 저 선량 영역에서 선량 과평가 현상을 유발하며 이러한 현상은 측정 깊이가 깊어질수록 두드러지게 나타남을 본 연구는 보였다. 필터(0.01 inch 두께)를 수평조사에 사용하면 필름을 이용한 선량측정에 따른 오차를 줄일 수 있다. 또한 필름을 이용한 세기변조 조사면의 선량 측정 정확도는 조사면의 조합 형태 및 반응영역 위치와 밀접한 관계를 가지는 것을 본 연구를 통하여 확인하였다.

선량 측정에 사용되는 X-선 필름은 잠재적인 많은 장점과 물리적인 단점을 동시에 가지고 있어 필름을 이용한 세기변조조사의 선량 측정 시 이에 대한 고려 및 필름에 입사하는 방사선의 조건, 특히 입사각 및 에너지 스펙트럼에 따른 적절한 두께의 필터가 필요하다.

참 고 문 헌

1. ICRU. Report50: Prescribing, Recording, and Reporting Photon Beam Therapy, International Commission on Radiation Units and Measurement Bethesda US 1993
2. Fuks Z, Leibel SA, Kutcher GJ, Mohan R, Ling CC. Three-dimensional conformal treatment: a new frontier in radiation therapy. *Important Adv Oncol* 1991;151-172
3. Verhey LJ. Comparison of three-dimensional conformal radi-

- ation therapy and intensity-modulated radiation therapy system. *Seminars in Radiation Oncology* 1999;19:78-98
4. **Webb S.** Advances in three-dimensional conformal radiation therapy physics with intensity modulation. *Lancet Oncology* 2000;1:30-36
 5. **Burman C and Chui CS.** Planning, delivery, and quality assurance of intensity-modulated radiotherapy using dynamic multileaf collimator: a strategy for large-scale implementation for the treatment of carcinoma of the prostate. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1997;39:863-73
 6. **Low DA, Mutic S, Dempsey FD, Gerber RL, Bosch WR, Perez CA.** Quantitative dosimetric verification of an IMRT planning and delivery system. *Radiother Oncol* 1998;49:305-316
 7. **Zhu TC, Ding L, Liu CR, Palta JR, Simon WE, Shi J.** Performance evaluation of a diode array for enhanced dynamic wedge dosimetry. *Med Phys* 1997;24:1173-1180
 8. **Wang X, Spirou S, LoSasso T, et al.** Dosimetric verification of intensity modulated fields. *Med Phys* 1996; 23:317-327
 9. **Burman C, Chui C, Kutcher G, et al.** Planning, delivery, and quality assurance of intensity-modulated radiotherapy using dynamic multileaf collimator: a strategy for large-scale implementation for the treatment of carcinoma of the prostate. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1997;39:863-873
 10. **LoSasso T, Chui C, Ling CC.** Physical and dosimetric aspects of a multileaf collimation system used in the dynamic mode for implementing intensity modulated radiotherapy. *Med Phys* 1998;25:1919-1927
 11. **Verellen D, Linthout N, Van Den Berge D, Bel A, Storme G.** Initial experience with intensity-modulated conformal radiation therapy for treatment of the head and neck region. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1997;39:99-114
 12. **Yeo IJ, Wang CK, Burch SE.** A filtration method for improving film dosimetry in photon radiation therapy. *Med Phys* 1997;24:1943-1953

Abstract

**Film Dosimetry for Intensity Modulated Radiation Therapy :
Dosimetric Evaluation**

Sang Gyu Ju, M.S.*[†], Inhwan Jason Yeo, Ph.D.*, Seung Jae Huh, M.D.*,
Byung Ki Choi, R.T.T.*, Young Hwan Park, R.T.T.*, Yong Chan Ahn, M.D.*,
Dae Yong Kim, M.D.* and Young Kun Kong, Ph.D.[†]

*Department of Radiation Oncology, Samsung Medical Center,
Sungkyunkwan University School of Medicine, Seoul,

[†]Department of Medical Physics, Graduate School Kyonggi University, Suwon, Korea

Purpose : X-ray film over responds to low-energy photons in relative photon beam dosimetry because its sensor is based on silver bromide crystals, which are high-Z molecules. This over-response becomes a significant problem in clinical photon beam dosimetry particularly in regions outside the penumbra. In intensity modulated radiation therapy (IMRT), the radiation field is characterized by multiple small fields and their outside-penumbra regions. Therefore, in order to use film dosimetry for IMRT, the nature the source of the over-response in its radiation field need to be known. This study is aimed to verify and possibly improve film dosimetry for IMRT.

Materials and Methods : Modulated beams were constructed by a combination of five or seven different static radiation fields using 6 MeV X-rays. In order to verify film dosimetry, we used X-ray film and an ion chamber were used to measure the dose profiles at various depths in a phantom. In addition, in order to reduce the over-response, 0.01 inch thick lead filters were placed on both sides of the film.

Results : The measured dose profiles showed a film over-response at the outside-penumbra and low dose regions. The error increased with depths and approached 15% at a maximum for the field size of $15 \times 15 \text{ cm}^2$ at 10 cm depth. The use of filters reduced the error to 3%, but caused an under-response of the dose in a perpendicular set-up.

Conclusions : This study demonstrated that film dosimetry for IMRT involves sources of error due to its over-response to low-energy photons. The use of filers can enhance the accuracy in film dosimetry for IMRT. In this regard, the use of optimal filter conditions is recommended.

Key Words : Film dosimetry, Penumbra effect, Lead filter, IMRT