

## 방사선치료계획장치로 설계된 Cerrobend 선량보상체와 전자 선량보상체의 제작 및 특성 분석

전남대학교 의과대학 방사선종양학교실

송주영 · 나병식 · 정웅기 · 안성자 · 남택근 · 윤미선

상용화된 방사선치료계획장치에서 제공하는 선량보상체(compensator) 설계 기능의 타당성을 검증하고자 Cerrobend 재료를 대상으로 한 고밀도의 선량보상체 설계 및 제작과 동적다엽콜리메이터를 활용한 전자 선량보상체(Electronic Compensator)의 구현을 통해 그 기능을 분석하였다. 5개의 두께가 다른 영역으로 구성된 팬텀을 대상으로 전산화단층촬영(CT) 영상을 획득하고, 기준 깊이에서 균일한 선량분포를 형성하도록 방사선치료계획장치(RTP)에서 선량보상체를 설계하였다. Cerrobend 선량보상체 주조 틀을 제작하기 위해 컴퓨터로 자동 제어되는 스티로폼 절삭기를 사용하였고, 전자 선량보상체를 구현하기 위해 다엽콜리메이터를 사용하였으며, 선량분포의 측정을 위해서 선량측정용 필름을 사용하였다. 선량보상체를 적용하지 않았을 경우, 선량분포에서  $\pm 13.93$  cGy의 편차를 보였으나, Cerrobend 선량보상체와 전자 선량보상체를 적용하였을 경우, 각각  $\pm 0.99$  cGy와  $\pm 1.82$  cGy의 편차를 보여 선량분포의 균일도를 높이는 선량보상체로서 기능을 구현함을 증명하였다. 방사선치료계획장치에서 계획된 기준 선량값과의 평균 오차를 분석한 결과, Cerrobend 선량보상체는 +3.83%, 전자 선량보상체는 -4.37%의 오차를 보였으며, 이는 Cerrobend 선량보상체 제조과정에서의 오차와 절대 선량측정 도구로서 필름이 갖고 있는 한계성을 고려할 때, 선량보상체 기능의 정확도 입증에 타당성 있는 결과로 생각한다.

**중심단어:** 선량보상체, Cerrobend, 동적다엽콜리메이터, 등선량분포

### 서 론

선량보상체는 환자 신체 표면의 굴곡과 인체 내 조직의 불균일성으로 인해 발생하는 선량의 왜곡현상을 보정하여 균일한 선량분포를 만들기 위해 제작된다. 이러한 선량보상체의 하나로 조직등가 물질인 볼루스(bolus)를 사용할 수도 있지만, 수 MV 에너지 이상의 광자선의 경우, 피부보호효과(skin sparing effect)를 고려할 때 적합한 선량보상체라 할 수 없다. 실제 방사선치료에서 사용하고 있는 대부분의 선량보상체는 피부보호효과를 위해 인체 표면으로부터 일정 거리에 위치시킨다. 이러한 선량보상체는 beam divergence 영향을 고려하여 설계되며, 다양한 원자 번호와 밀도의 물질들로 제작된다.<sup>1-3)</sup> 근래에는 특정 물질로 가공 제작

한 형태의 선량보상체 대신 다엽콜리메이터를 이용한 빔세기(beam intensity) 분포의 변화를 통해 선량보상체 기능을 구현하는 방법이 개발되어 임상에 적용되고 있다.<sup>4-6)</sup> 최근에 개발된 방사선치료계획장치에서는 이러한 두 가지 형태의 선량보상체 제작을 위한 설계변수 값들의 계산과 다엽콜리메이터의 구동파일을 생성할 수 있는 기능을 제공하고 있다.<sup>7)</sup>

본 연구에서는 방사선치료계획장치에서 설계된 선량보상체의 임상적용 타당성을 검증하고자, Cerrobend를 사용한 선량보상체와 동적 다엽콜리메이터를 이용한 전자 선량보상체(Varian, 미국)를 각각 제작, 구현하여 선량보상체로서 적용 가능성을 확인하였다. 이와 함께 각 선량보상체의 기능 구현에 따른 선량분포 비교를 통해 높은 밀도의 Cerrobend 재질의 선량보상체와 전자 선량보상체의 특성을 분석하였다.

이 논문은 2004년도 전남대병원 진료연구보조비 지원에 의해 수행되었음.

이 논문은 2005년 4월 28일 접수하여 2005년 6월 14일 채택되었음.

책임저자: 송주영, (501-757) 광주광역시 동구 학동 8번지

전남대학교 의과대학 방사선종양학교실

Tel: 061)379-7225, Fax: 061)379-7249

E-mail: jysong@jnu.ac.kr

### 대상 및 방법

#### 1. 선량보상체 설계용 팬텀 제작

선량보상체를 설계하기 위해 본 연구에서는 Fig. 1에서와

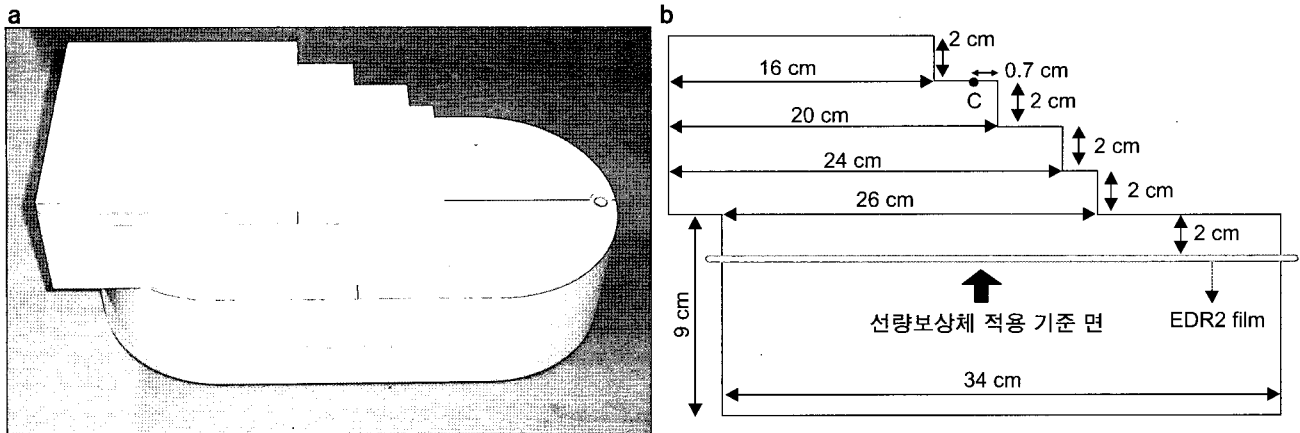


Fig. 1. Phantom for the design of a compensator. (a) Overview of the fabricated phantom. (b) Design parameter of the phantom.

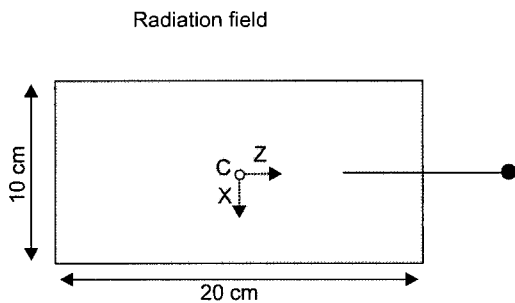


Fig. 2. Shape of the radiation field over the compensator applied area.

같이 선량보상체 적용 기준면에서 표면에 이르는 두께가 서로 다른 형태의 팬텀을 제작하였다. 팬텀으로 사용된 판 (slab)은 물 등가(water equivalent) 재질로서 밀도가  $1.045 \text{ g/cm}^3$ 인 RW3 (Scanditronix-Wellhöfer, 독일)이며, 세기변조 방사선치료(intensity modulated radiation therapy, IMRT)의 정도관리(QA) 목적으로 제작된 I<sup>m</sup>RT Phantom (Scanditronix-Wellhöfer, 독일)의 구성품을 재조립하여 제작하였다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 9 cm 두께의 팬텀 하단부는 1 cm 두께의 판으로 구성되어 있어, 특정 깊이에 필름을 삽입할 수 있도록 제작하였다.

## 2. 방사선치료계획장치를 이용한 선량보상체 설계

본 연구에서는 RTP장치인 Eclipse (Varian, 미국)를 사용하여 선량보상체 설계를 수행하였다. 먼저, Fig. 1과 같이 제작된 팬텀의 CT 영상을 획득한 후, 이 CT 영상을 기반으로 RTP에서 치료계획을 수립하였다. 치료조사야로 Fig. 2

와 같이  $10 \times 20 \text{ cm}^2$  크기의 6 MV 광자선을 사용하였고, 팬텀 표면에서 선원과의 거리는 두 번째와 세 번째 관 경계선에서 7 mm 떨어진 곳에 위치한 조사야 중심(c)에서 100 cm에 위치시켰다. 선량보상체 없이 조사하였을 경우의 선량분포를 구하고, 선량보상체 적용 기준면에서 140 cGy의 균일한 선량분포가 이루어지도록 선량보상체를 설계하였다. Eclipse에서 제공하는 선량보상체 설계용 프로그램은 선량보상체 물질의 선형감쇠계수와 기준 깊이의 입력을 요구한다. 본 연구에서는 1 cm, 1.5 cm 두께의 Cerrobend (밀도:  $9.4 \text{ g/cm}^3$ ) 블록을 사용하여 측정된 값을 통해 계산된 선형감쇠계수( $\mu_0=0.415 \text{ cm}^{-1}$ )를 입력하여 설계하였다.<sup>8)</sup> 이렇게 하여 설계된 선량보상체를 적용하여 선량분포를 계산한 후, 선량보상체 두께와 관련된 설계 변수 값들을 Dicom-RT 파일 형태로 저장하여 Cerrobend 선량보상체 제작에 사용하였다. 이와 함께 RTP에서 동적다엽콜리메이터(dynamic multileaf collimator, DMLC)를 이용하여 동일한 선량보상체 기능을 구현할 수 있도록 방사선 세기를 변화시키는 전자 선량보상체를 설계하였다. 설계된 전자 선량보상체는 동적다엽콜리메이터의 sliding window 방식으로 구현되도록 다엽콜리메이터 구동 파일을 작성하였다. 전자 선량보상체를 사용한 치료계획을 수행하여 선량계산과 함께 직접 선형가속기에서 구현이 가능하도록 해당 치료계획을 Dicom-RT 파일로 저장하였다.

## 3. Cerrobend 선량보상체 제작

Cerrobend 재질의 선량보상체를 제작하기 위해 차폐 블록을 만들 때 사용되는 8 cm 두께의 스티로폼을 주형틀로 사용하였으며, 스티로폼에 선량보상체 형태로 절삭하기 위

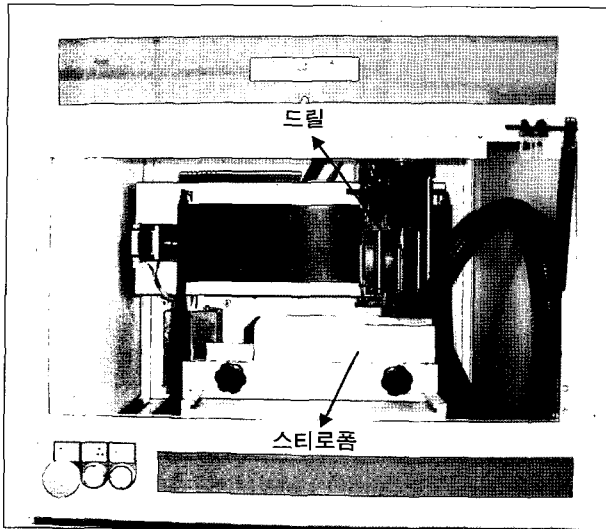


Fig. 3. Automatic cutting device for the manufacture of a styrofoam frame for the casting of compensator.

한 컴퓨터 자동 제어 절삭 장비로 ACD3-MK3 (PAR Scientific A/S, 덴마크)를 사용하였다(Fig. 3). RTP에서 설계된 Cerrobend 선량보상체 정보가 포함된 Dicom-RT 파일을 컴퓨터로 불러와 선량보상체 두께에 따라 절삭기 내의 원형 드릴이 스티로폼을 수직으로 이동, 절삭하며 주조 틀을 제작하게 된다. 이렇게 제작된 틀에 용융된 Cerrobend를 주입하여 Fig. 4와 같은 형태의 Cerrobend 선량보상체를 제조하였다.

#### 4. 선량보상체 기능 타당성 및 특성 분석

Fig. 1에서와 같이 제작된 팬텀의 선량보상체 적용 기준면에 EDR2 (Kodak, 미국) 필름을 삽입하여 선량보상체 기능의 타당성을 분석하였다. 선량보상체를 적용하지 않았을 경우와 Cerrobend 선량보상체를 적용한 경우, 그리고, 전자 선량보상체를 적용하였을 경우 각각에 대해 계획된 선량이 조사된 필름들을 스캔하여 선량분포를 획득하고, 그 특성을 분석하였다. 선형가속기 Clinac 21EX (Varian, 미국)를 사용하여 방사선을 조사하였으며, 전자 선량보상체를 구현하기 위해 사용된 다엽콜리메이터는 Millennium MLC-120 (Varian, 미국)이다. 상대적 선량분포가 아닌 선량의 절대값 분포를 획득하기 위해 EDR2 필름에 대한 교정 과정이 선행되었다. 10 cGy에서 250 cGy까지 10 cGy 단위로 선량을 증가하여 조사한 필름들의 필름농도(optical density)에 대한 선량 교정 결과를 사용하였다. 필름 스캔을 위해 VXR-16 (Vaidar system corporation, 미국)을 사용하였으며, OmniPro I'mRT (Scanditronix-Wellhöfer, 독일) 필름 계측용 프로그램

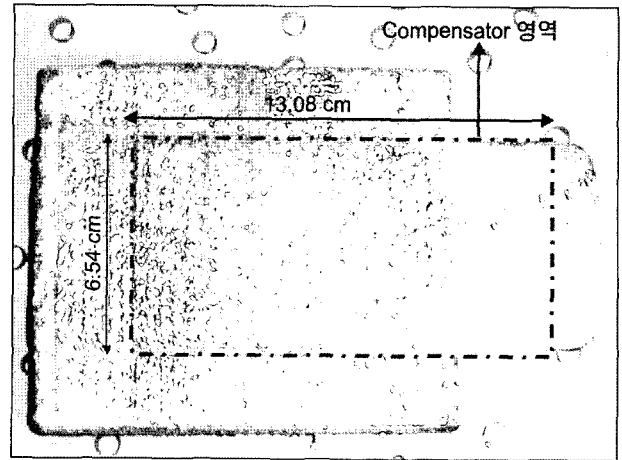


Fig. 4. Fabricated cerrobend compensator.

을 사용하여 선량분포의 변화를 분석하였다. 이와 함께 Cerrobend 선량보상체 설계 시 선형감쇠계수 계산의 오류로 인한 영향을 분석하고자, 측정된 선형감쇠계수에 임의의 오차를 가해 설정한 두 개의 선형감쇠계수( $\mu_1=0.40 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\mu_2=0.39 \text{ cm}^{-1}$ )를 적용하여 두께가 다른 두 개의 선량보상체를 추가로 설계, 제작한 후 동일한 실험을 반복하였다.

#### 결 과

본 연구에서 설계, 제작된 Cerrobend 선량보상체와 전자 선량보상체를 적용하여 수행한 방사선조사 결과는 Fig. 5와 같다. 선량보상체를 적용하지 않았을 경우, Fig. 5a에서와 같이 팬텀의 두께에 따라 최저 123 cGy에서 최고 167 cGy에 이르는 불균일한 선량분포를 보였다. Cerrobend 선량보상체를 적용하였을 경우, Fig. 5b에서와 같이 최저 137 cGy, 최고 150 cGy의 균일한 선량분포를 보였다. 팬텀 제작 시, 계단형태의 구성품 연결부분에서 방사선 누출로 인한 과조사 영역과 선량보상체 배치의 미세한 오차로 인한 과보상 영역의 영향을 배제하기 위해 계단형 팬텀의 5개 각 단계별 중심위치 값들만을 분석하였을 경우,  $145.36 \pm 0.99 \text{ cGy}$ 의 분포를 보여 계획한 기준 선량값 140 cGy에 평균 3.83%의 오차를 보였다. 동적다엽콜리메이터를 이용한 전자 선량보상체를 적용하였을 경우, Fig. 5c에서와 같이 최저 129 cGy, 최고 138 cGy의 균일한 선량분포를 보였으며, 팬텀의 5개 각 단계별 중심위치 값들만을 분석하였을 경우,  $133.88 \pm 1.82 \text{ cGy}$ 의 분포를 보여 계획한 기준 선량값 140 cGy에 평균 -4.37%의 오차를 보였다. 방사선치료계획

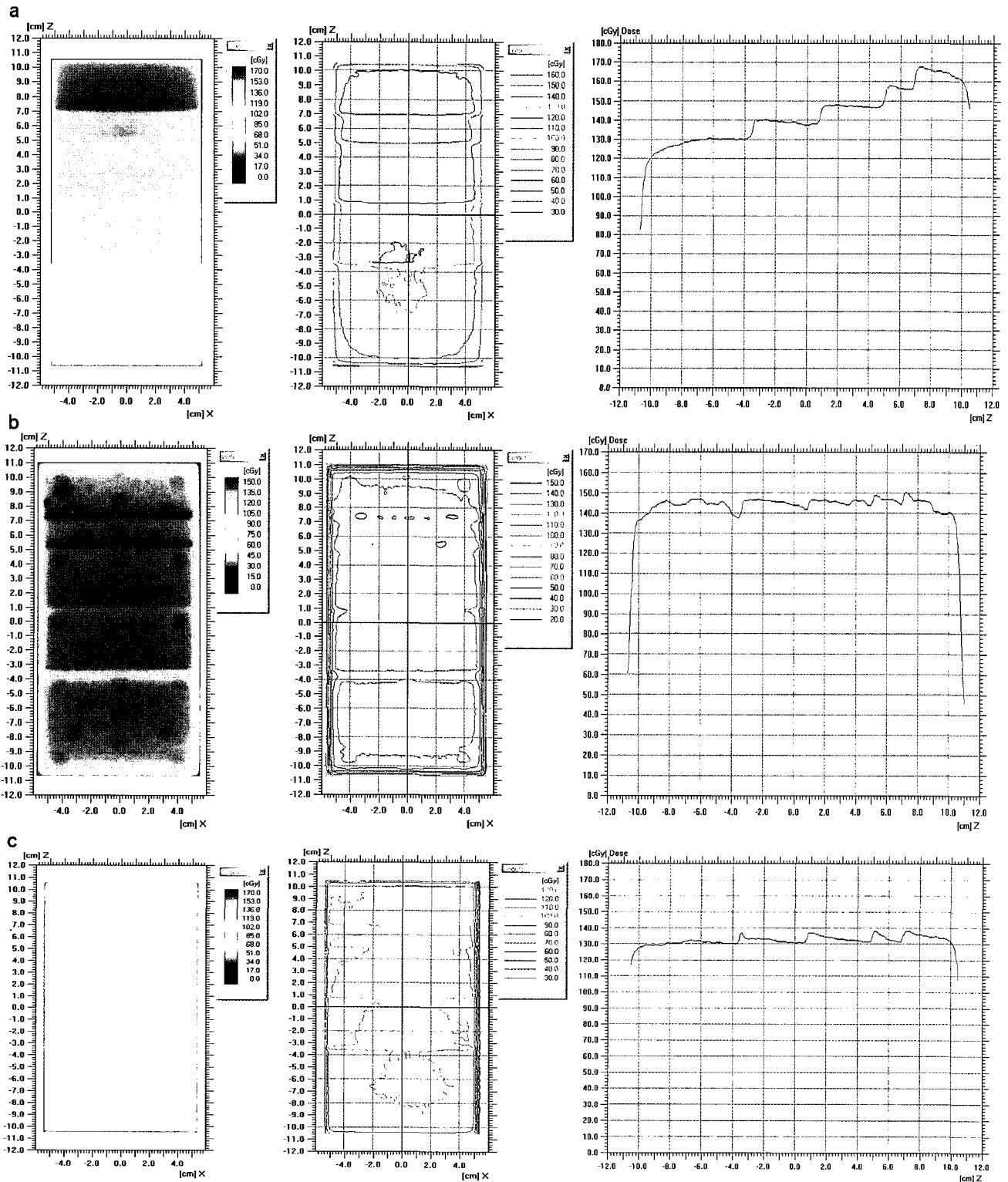


Fig. 5. Dose distribution of the irradiated film. Isodose curves and longitudinal dose distribution along the z axis in the case of (a) open field (b) Cerrobend compensator (c) electronic compensator.

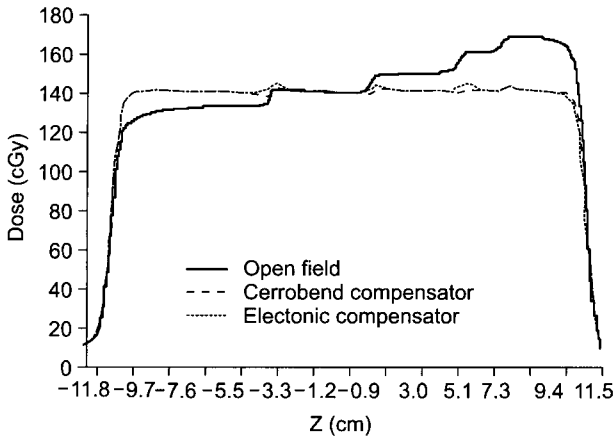


Fig. 6. Dose distribution along the z axis which are calculated by a RTP (radiation treatment planning) system.

장치에서 계산된 선량분포들을 도시한 Fig. 6은 선량보상체 적용면에서 기준 선량 140 cGy의 균일한 분포를 이루고 있으며, 필름 분석 결과인 Fig. 5에서와 같이 팬텀 구성품 연결 접합부위에서의 방사선 누출로 인한 과조사영역이 발생함을 보여주고 있다.

높은 밀도의 Cerrobend 선량보상체 설계 시 선형감쇠계수 계산의 오류에 따른 영향을 살펴본 결과는 Fig. 7과 같다. 실제 측정을 통해 계산된 선형감쇠계수에 임의의 오차를 가해 설정한 선형감쇠계수들( $\mu_1=0.400 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\mu_2=0.390 \text{ cm}^{-1}$ )을 적용하여 제작된 Cerrobend 선량보상체들은 각각  $113.36 \pm 0.82 \text{ cGy}$ ,  $98.40 \pm 0.94 \text{ cGy}$ 의 선량분포로 계획된 선량기준값 140 cGy와 큰 차이를 보였다.

### 고찰 및 결론

본 연구에서는 Eclipse에서 설계된 Cerrobend 선량보상체와 전자 선량보상체를 제작, 구현하여 선량보상체 기능상의 적합성과 특성을 분석하였다. 두께가 다르게 제작한 팬텀을 대상으로 실험한 결과, 선량보상체가 없을 때, 기준 선량 140 cGy에 대해  $\pm 13.93 \text{ cGy}$ 의 편차를 보였던 선량분포가 Cerrobend 선량보상체를 적용하였을 경우에  $\pm 0.99 \text{ cGy}$ , 전자 선량보상체를 적용하였을 경우에는  $\pm 1.82 \text{ cGy}$ 로 편차가 줄어 균일한 선량분포를 형성하여 선량보상체로서 기능 수행측면에서 타당성을 입증하였다. 팬텀 조립 과정에서 발생한 완벽하지 못한 연결부위의 접합상태로 인한 방사선 과조사 영향과 Cerrobend 선량보상체의 배치에서의 미세한 오차로 인한 과보상되는 영향으로 연결 접합부위에서의 불안정한 값을 보이긴 하였으나, 그 밖의 대부분의 영

역에서는 균일한 선량분포를 보였다.

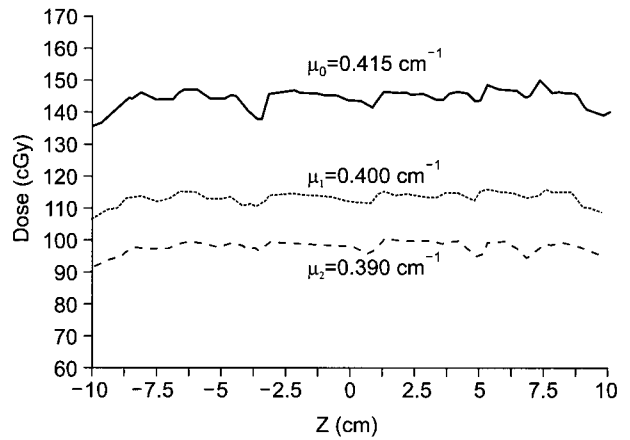


Fig. 7. Dose distribution according to the variation of linear attenuation coefficient of a Cerrobend compensator.

선량분포의 균일화 외에도 계획된 선량값으로 조사가 되었는지를 분석하기 위해, 사용된 EDR2 필름은 교정 과정을 수행한 후, 측정에 사용하였다. 필름은 절대 선량측정에 사용하기에는 필름 자체가 갖고 있는 성분의 불균일성, 현상조건 등의 영향에 의해 그 정확도에는 한계가 있지만, 본 연구에서 분석하고자 하는 선량보상체의 기능 분석과 Cerrobend 선량보상체와 전자 선량보상체의 특성 비교, 분석을 위한 사용에는 큰 문제점은 없다고 판단되었다. Cerrobend 선량보상체를 적용하였을 경우, 계획된 기준 선량값 대비 평균 3.83% 높은 선량분포를 보였는데, 이는 Cerrobend 선량보상체 제작과정에서 발생할 수 있는 스티로폼 절삭과정의 오차 및 용융된 Cerrobend 주입과정에서의 오차에 기인한 것으로 생각한다. 이와 반대로 전자 선량보상체를 적용하였을 경우에는 기준 선량값 대비 평균 4.37%의 낮은 선량분포를 보였다. 이 결과는 방사선치료계획장치가 갖고 있는 오류로 전자 선량보상체를 구현하는 동적다엽콜리메이터의 구동과일로의 변환과정에서 방사선치료계획장치가 계산한 빔세기와 실제 조사된 빔세기와와의 차이에서 발생한 것으로 해석될 수도 있다. 그러나 기존의 세기조절방사선 치료의 치료계획 확인과정에서 이온전리함 측정값 분석을 통해 2% 미만의 오차로 정확도가 이미 검증된 방사선치료 계획장치임을 고려할 때, 방사선치료계획장치의 오류보다는 필름을 이용한 선량분석 과정에서의 오차가 더 크게 기인한 것으로 생각한다. 비록, 기준 선량값과 비교하여 4% 내외의 오차를 보이긴 하였으나, 절대선량 측정에 있어 필름이 갖고 있는 한계성을 감안할 때, 두 선량보상체의 선량학적 기능의 적합성을 증명하기에는 타당성 있는 결과로

생각하며, 좀 더 정밀한 절대 선량값 측정을 위해서는 적합한 측정 장비와 효율적인 팬텀의 설계 및 분석 방법론에 대한 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 생각한다.

조직결손을 보상하기 위한 선량보상체의 재료로 왁스와 같은 낮은 원자번호의 물질에서부터 납과 같은 높은 원자번호의 물질까지 여러 종류의 물질이 사용될 수 있지만, 중간 원자번호에서 높은 원자번호의 재료를 선량보상체로 사용할 경우 이차 전자 발생을 줄여 전자 오염을 줄일 수 있는 장점이 있다.<sup>9,10</sup> 재료의 밀도 또한 선량보상체 제작에서 중요하게 고려되어야 사항으로 밀도가 높을수록 선량보상체 두께는 얇게 되며 환자로부터 더 멀리 위치시킬 수 있어 피부에 부여되는 전자오염을 줄일 수 있게 된다.<sup>11</sup> 본 연구에서는 이러한 높은 밀도의 장점과 일반적으로 방사선 종양학과에서 차폐블록 제조에 많이 사용되어 쉽게 구할 수 있는 점을 고려하여 Cerrobend를 사용한 선량보상체를 분석대상으로 설정하였으나, Cerrobend와 같은 높은 밀도의 선량보상체는 그 제조과정의 오차로 인한 선량보상효과 변화도의 민감도가 크므로 설계변수에 근거한 스티로폼의 절삭과 용융된 Cerrobend의 주입과정에서 세심한 주의가 요구되었다. Cerrobend 선량보상체 설계 시 입력되는 선형감쇠계수의 오차에 의한 영향도 Fig. 7에서와 같이 그 민감도가 커서 실제 예상되는 보상체 두께 영역에서 측정을 통해 정확한 선형감쇠계수를 입력하는 것이 중요함을 알 수 있었다.

이상에서와 같이 상용화된 방사선치료계획장치에서 제공하는 선량보상체 설계 기능을 활용하여 선량보상체를 제작할 경우, 임상 적용에 앞서 본 연구와 같은 선량보상체로서의 기능 및 선량값의 정확도에 대한 타당성 검증 과정이 반드시 선행되어야 할 것으로 생각한다.

## 참 고 문 헌

1. Boyer AL: Compensating filters for high energy x rays. Med Phys 9:429-433 (1982)
2. Ansbacher W, Robinson DM, Scrimger JW: Missing tissue compensators: Evaluation and optimization of a commercial system. Med Phys 19:1267-1272 (1992)
3. Chu T, Lee K, Dunscombe P: A technique for the evaluation of a missing tissue compensator system. Med Phys 20: 713-716 (1993)
4. Bortfeld TR, Kahler D, Waldron TJ, Boyer AL: X-ray field compensation with multileaf collimators. Int J Radiat Oncol Biol Phys 28:723-730 (1994)
5. Geis P, Boyer AL, Wells NH: Use of a multileaf collimator as a dynamic missing-tissue compensator. Med Phys 23:1199-1205 (1996)
6. Alecu R, Alecu M, Loomis T, Orchrn T, He T: Traditional and MLC based fdose compensator design for patients with hip prostheses undergoing pelvic radiation therapy. Med Dosim 24:33-37 (1999)
7. Basran PS, Ansbacher W, Field GC, Murray BR: Evaluation of optimized compensators on a 3D planning system. Med Phys 25:1837-1844 (1998)
8. Dimitriadis DM, Fallone BG: Compensators for intensity-modulated beams. Med Dosim 27:215-220 (2002)
9. Nilsson B: Electron contamination from different materials in high energy photon beams. Phys Med Biol 30:139-151 (1985)
10. Ahnesjö A: Modeling transmission and scatter for photon beam attenuators. Med Phys 22:1711-1720 (1995)
11. Mejadem Y, Lax I, Adakkai S: Procedure for accurate fabrication of tissue compensators with high-density material. Phy Med Biol 42:415-421 (1997)

## **The Analysis of a Cerrobend Compensator and a Electronic Compensator Designed by a Radiation Treatment Planning System**

Ju-Young Song, Byung-Sik Nah, Woong-Ki Chung, Sung-Ja Ahn, Taek-Keun Nam, Mi-Sun Yoon

Department of Radiation Oncology, Chonnam National University Medical School, Gwangju, Korea

In this study, the physical compensator made with the high density material, Cerrobend, and the electronic compensator realized by the movement of a dynamic multileaf collimator were analyzed in order to verify the properness of a design function in the commercial RTP (radiation treatment planning) system, Eclipse. The CT images of a phantom composed of the regions of five different thickness were acquired and the proper compensator which can make homogeneous dose distribution at the reference depth was designed in the RTP. The frame for the casting of Cerrobend compensator was made with a computerized automatic styrofoam cutting device and the Millennium MLC-120 was used for the electronic compensator. All the dose values and isodose distributions were measured with a radiographic EDR2 film. The deviation of a dose distribution was  $\pm 0.99$  cGy and  $\pm 1.82$  cGy in each case of a Cerrobend compensator and a electronic compensator compared with a  $\pm 13.93$  cGy deviation in an open beam condition. Which showed the proper function of the designed compensators in the view point of a homogeneous dose distribution. When the absolute dose value was analyzed, the Cerrobend compensator showed a +3.83% error and the electronic compensator showed a -4.37% error in comparison with a dose value which was calculated in the RTP. These errors can be admitted as an reasonable results that approve the accuracy of the compensator design in the RTP considering the error in the process of the manufacturing of the Cerrobend compensator and the limitation of a film in the absolute dosimetry.

**Key Words** : Compensator, Cerrobend, Dynamic multileaf collimator, Isodose distribution