

다엽콜리메터와 삼차원 방사선치료계획장치를 이용한 가상 선량보상체 설계 알고리즘

울산대학교 의과대학 서울중앙병원 방사선종양학과*
가톨릭대학교 의과대학 의공학교실[†], 계명대학교 의과대학 의공학과[‡]

송주영*[†], 이병용*, 최태진[‡]

물리적인 형태의 선량 보상체 제작 없이 삼차원 방사선치료계획장치 및 다엽콜리메터를 이용한 방사선의 세기변조를 통해 선량보상 효과를 구현할 수 있는 가상 선량보상체 설계 알고리즘을 고안하고 그 타당성을 분석하였다.

선량보상체 설계를 위한 모델로서 신체표면의 굴곡을 묘사할 수 있는 스티로폼 제작물과 소형 물팬텀을 사용하였으며, 이에 대한 정보를 삼차원 방사선치료계획장치에 입력하고, 주어진 조건하에서의 예상 선량분포를 구하였다. 이를 기준으로 가상 선량보상체 구현에 필요한 플루언스 지도를 작성하고, 이를 구현할 수 있는 다엽콜리메터의 구동 프로그램을 설계하였다. 다엽콜리메터 구동 알고리즘은 Ma의 이론을 근거로 설계하였으며, 모든 프로그램은 IDL5.4를 사용하여 작성하였다.

설계된 가상 선량보상체의 타당성을 검증하기 위해 선량보상체를 적용하였을 때와 적용하지 않았을 경우 각각에 대해 팬텀에 장착한 필름에 방사선을 조사한 후 그 선량분포를 비교, 분석하였으며 그 결과, 가상 선량보상체를 적용하였을 경우 적용하지 않았을 시 보였던 조직결손에 의한 높은 선량분포 영역이 제거되어 목적하고자 한 균일한 선량분포를 구현할 수 있음을 보였다.

중심단어 : 다엽콜리메터, 삼차원 방사선치료계획장치, 가상 선량보상체

서 론

방사선 치료시 조직내 선량은 기본적으로 입사선축에 수직인 평면에 균일하게 분포되는 것을 기준으로 계획하지만 신체 표면의 굴곡으로 인해 치료 부위면에 균일하지 못한 선량분포가 발생하게 되고, 신체 조직내 밀도의 불균질성에 의해서도 선량이 균일하지 않게 분포된다. 이러한 선량분포의 불균일성으

로 인한 치료계획의 문제점을 해결하고자 여러 방법이 고안되어 사용되어 왔으며, 그 중 하나로 선량보상체를 제작하여 특히 고에너지 광자선의 경우에 적용하여 균일한 선량분포를 획득하는데 사용하고 있다[1-2].

현재 임상에서 사용되고 있는 선량보상체는 신체 표면의 두께 결손에 의한 선량 차이를 보정하기 위해, 주로 신체 표면의 굴곡에 따라 틀을 제작하고, 결손 신체조직 두께의 방사선 감쇠 만큼에 해당하는 두께로 납등의 원자번호가 높은 물질로 제작되고 있다. 신체 조직의 굴곡에 따른 조직결손을 측정하기 위해 Moire camera를 사용하는 방법[3]과 컴퓨터로 제어되는 밀링머신을 사용하는 제작방법[4]이 개발되어 왔고, 이 밖에도 EPID(Electronic Portal Imaging Device) 영상을 이용하여 선량보상체를 설계하는 방법[5-6]등이 연구되어 왔다.

본 연구는 보건복지부 선도 기술, 의료 공학 기술 개발 사업 (HMP-98-G-1-016) 연구비 지원에 의해 수행되었음

통신저자 : 이병용, 138-736 울산대학교의과대학,
서울중앙병원 방사선종양학과 yiby@amc.seoul.kr

본 연구에서는 기존 선량보상체가 갖고 있는 설계 단계에서부터 실제 제작까지의 복잡하고 번거로움을 제거하고 치료의 정확도를 제고시킬 수 있는 새로운 개념의 가상 선량보상체를 제작하고자 하였다. 선량보상체의 원리가 기본적으로 방사선 세기를 변화시키는 것으로, 세기변조 치료에 적용되는 개념과 동일하다고 가정하고 다엽콜리메터를 사용하여 선량보상체 기능을 구현하고자 하였다[3,7-8]. 다엽콜리메터 leaf sequence 설계 및 실제 구동 프로그램 작성을 위한 기본 자료로 필요한 플루언스 지도는 삼차원 방사선치료계획장치를 통해 획득하였다. 이와 같이 고안한 가상 선량보상체의 타당성을 검증하기 위해 신체표면의 굴곡을 묘사할 수 있는 스티로폼 제작물과 소형 물팬텀을 사용하여 가상 선량보상체의 적용 여부에 따른 방사선 조사 결과의 비교, 분석을 수행하였다.

대상 및 방법

본 연구에서 고안한 가상 선량보상체 설계 알고리즘 구현 및 그 결과 분석을 위해 Fig.1과 같은 순서로 연구를 수행하였다.

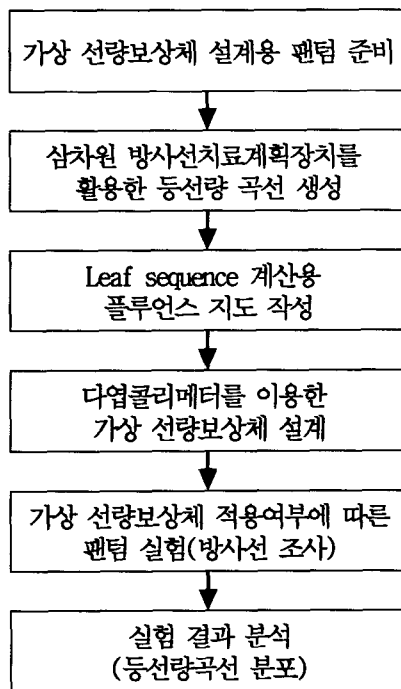


Fig. 1. Process of the study for the design of virtual compensator

1. 가상 선량보상체 설계 대상 팬텀 준비

본 연구에서 개발하고자 한 가상 선량보상체 설계 알고리즘의 검증에 위해 같이 팬텀을 제작하였다 (Fig.2). 신체 표면의 굴곡에 의한 조직 결손부위를 스티로폼으로 제작, 묘사하였으며, 필름을 장착할 수 있는 소형 물팬텀을 사용하여 가상 선량보상체 적용 여부에 따른 결과를 분석할 수 있게 설계하였다.

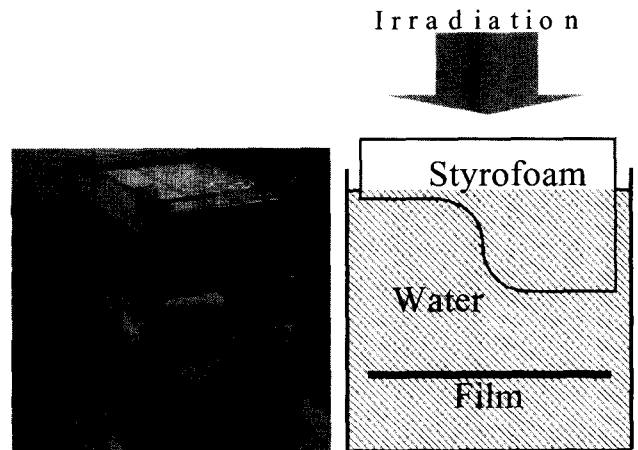


Fig. 2. Photograph and diagram of simulation phantom

2. 삼차원 방사선치료계획장치를 활용한 등선량 곡선 생성

다엽콜리메터를 이용한 가상 선량보상체의 기능은 조직결손에 의한 과선량 영역의 방사선 세기를 변조하여 구현하게 되며, 이를 위한 기본 자료로는 다엽콜리메터의 leaf sequence를 계산할 수 있는 플루언스 지도이다. 이를 작성하기 위해서 먼저 치료부위의 선량 불균일성에 대한 정보를 획득하여 한다. 본 연구에서는 삼차원 방사선치료계획장치를 사용하여 미리 설계한 팬텀의 정보를 입력한 후 예상되는 등선량곡선을 생성, 선량보상체가 없을 시 발생하는 선량분포의 불균일성에 대한 정보를 구하였다. 본 연구에서 사용한 삼차원 방사선치료계획장치는 Render Plan 3-D(Elekta, 미국)이며 Fig.3은 Fig.2의 팬텀에 100cm인 SSD(Source to Surface Distance), 14×18(cm²) 조사면으로 6MV 광자선을 조사하였을 때 삼차원 방사선치료계획장치로 분석한 결과를 보여주고 있으며, 우측의 조직결손(팬텀에서의 스티로

폼 두께가 두꺼운 부위)에서 더 높은 선량분포가 형성되어 있음을 알 수 있다.

3. Leaf sequence 계산용 플루언스 지도 작성

삼차원 방사선치료계획장치로부터 획득한 등선량곡선으로부터 선량보상체 없이 조사시 예측되는 불균일한 선량분포에 해당하는 플루언스 지도를 작성하고 이를 기준으로 가상 선량보상체 설계용 플루언스 지도를 재작성하였다. Fig.4의 (a)는 선량보상체를 적용하지 않았을 시 예상되는 선량분포에 해당하는 플루언스 지도로서 Fig.3에서와 동일한 선량분포를 보여주고 있다. Fig.4의 (b)는 Fig.4의 (a)에서 분포하고 있는 고선량분포 영역을 보정하여 균일한 선량분포를 얻기 위한 방사선 세기변조용 플루언스 지도로서 가상 선량보상체 설계의 기준이 되며 Fig.4 (a)에서의 선량분포를 역으로 구성할 수 있는 방사선 세기를 선량보상체를 통한 감쇠 개념으로 생각하여 (1)과 같은 수식으로 계산된 값으로 작성하였다.

$$I_{(b)} = 1/I_{(a)} \times \text{Max}(I_{(a)}) \times 100 \quad (1)$$

$I_{(a)}$: 선량보상체 없을 시 플루언스 지도 화소값

$I_{(b)}$: 선량보상체 설계용 플루언스 지도 화소값

플루언스 지도 생성과 관련한 프로그램은 IDL5.4를 사용하여 작성하였고, 삼차원 방사선치료계획장치로부터 획득한 등선량곡선분포도에 직접 사용자가 마우스를 이용하여 조사면 및 선량분포 정보를 입력토록 하였으며, 다엽콜리메터 크기의 기하학적 구조를 고려하여 구성되도록 설계하였다.

4. 다엽콜리메터 구동 알고리즘

Fig.4의 (b)에서 획득한 플루언스 지도를 근거로 다엽콜리메터를 구동할 수 있는 알고리즘을 설계하였다. 가상 선량보상체 기능은 이러한 다엽콜리메터의 정확한 이동과 해당 단계별 정확한 선량부여로 구현된다. 본 연구에서는 세기변조 방사선 치료에 적용되는 다엽콜리메터 구동 알고리즘중 Ma의 알고리즘[9]을 채택하여 가상 선량보상체 기능을 구현하였다. 이 Ma 알고리즘은 한 쌍의 마주보는 콜리메터

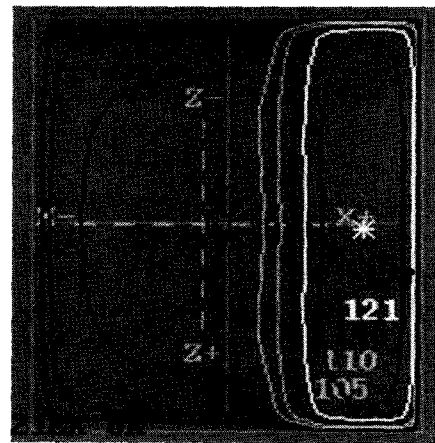


Fig. 3. Isodose curves generated by the 3D RTP (6MV photon, SSD: 100 cm, Field: 14×18 cm²)

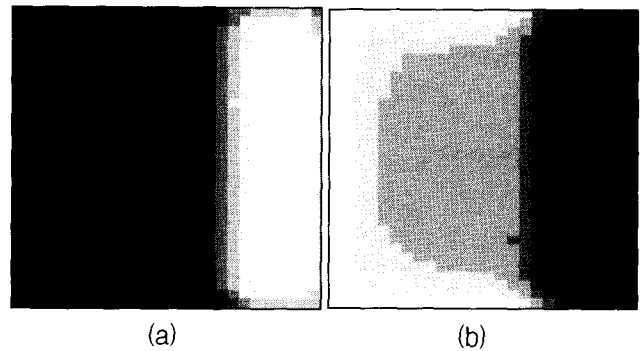


Fig. 4. Fluence maps to design the virtual compensator. (a) fluence map according to fig. 3 (b) fluence map for the design of MLC leaf sequence

leaf들의 충돌을 방지하고 최적의 MU(Monitor Unit) 효율을 가지며, 'step-and-shoot' 방식외에 DMLC (Dynamic MultiLeaf Collimator) 방식[9-10]에도 적용될 수 있는 특징을 가지고 있다. Fig.5는 이러한 Ma의 알고리즘과 관련하여 구현하고자 하는 플루언스 지도에 따른 leading leaf와 trailing leaf간의 위치 이동 및 조사 선량간의 관계를 보여주고 있다. 즉, 각 단위 위치 이동별 플루언스의 변화값이 음인 위치로 leading leaf가 먼저 이동하고, trailing leaf가 뒤를 따라 이동하면서 각 이동 단계별 플루언스 크기의 상대적 차이를 고려하여 선량을 조사하는 원리로 구성되어 있다.

본 연구에서는 이와 같은 Ma의 알고리즘을 적용하여 실제 다엽콜리메터 leaf sequence를 구현할 수 있는 프로그램을 IDL5.4를 사용하여 작성하였다. 프

로그래밍 설계시 대상이 된 다엽콜리메터는 60쌍의 leaf들로 구성된 Millenium MLC(Varian, 미국)로서 이 다엽콜리메터는 중심을 기준으로 아래위 20쌍씩 총 40쌍은 각각의 leaf두께가 5mm이며, 최상단부 10쌍과 최하단부 10쌍은 두께가 10mm이다. 이러한 다엽콜리메터의 기하학적 구조와 플루언스 지도 작성시 입력된 조사면의 위치 및 크기를 고려하여 leaf sequence를 계산하였다.

최종 결과물인 다엽콜리메터 구동 파일은 Varian사의 지침을 기준으로 작성하였고 그림 6과 같이 MLC Shaper 6.1(Varian, 미국)을 사용하여 각 segment별 다엽콜리메터의 이동 및 조사선량과 최종 예상 결과를 확인한 후 팬텀을 대상으로 한 실험에 적용하였다.

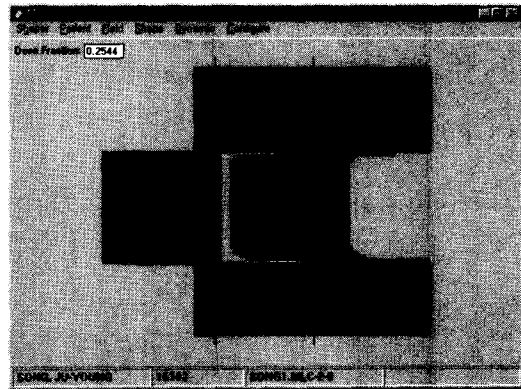


Fig. 6. Verification of the leaf sequence with 'MLC Shaper 6.1(Varian Medical Systems)'

5. 가상 선량보상체 적용여부에 따른 팬텀 실험

본 연구에서 고안한 가상 선량보상체의 타당성을 검증하고자 앞에서 설명한 팬텀을 대상으로 방사선 조사 실험을 수행하여 그 결과를 분석하였다. 먼저 가상 선량보상체를 적용하지 않고, 방사선을 조사하여 장착된 필름의 등선량 분포를 얻었고, 그 다음으로 본 연구에서 고안한 가상 선량보상체를 적용하여 방사선을 조사한 필름의 등선량 분포를 획득하여 상호 비교, 분석을 수행하였다.

사용된 선형가속기는 21EX(Varian, 미국)이고, 등선량 분포를 얻기 위해 X-OmatV(Kodak, 미국) 필름을 사용하였으며 조사된 필름으로부터 등선량곡선의 획득을 위해 VXR-12 Film Digitizer(Vidar Systems Corporation, 미국)와 Poseidon 4.1A(KPU-Data AB & Precitron AB, 스웨덴) 프로그램을 사용하였다.

결 과

본 연구에서 고안한 가상 선량보상체의 적용여부에 따른 팬텀 실험 결과는 Fig.7과 같다. Fig.7의 (a)는 가상 선량보상체 없이 조사한 결과로서 조직결손에 의한 높은 선량부위가 존재하여 불균일한 선량분포를 보이고 있으나, 가상 선량보상체 기능을 적용하여 조사한 결과인 Fig.7의 (b)에서는 Fig.7의 (a)에서 존재했던 조직결손 부위의 높은 선량부위를 제거하여 전반적으로 균일한 선량분포를 형성하였다.

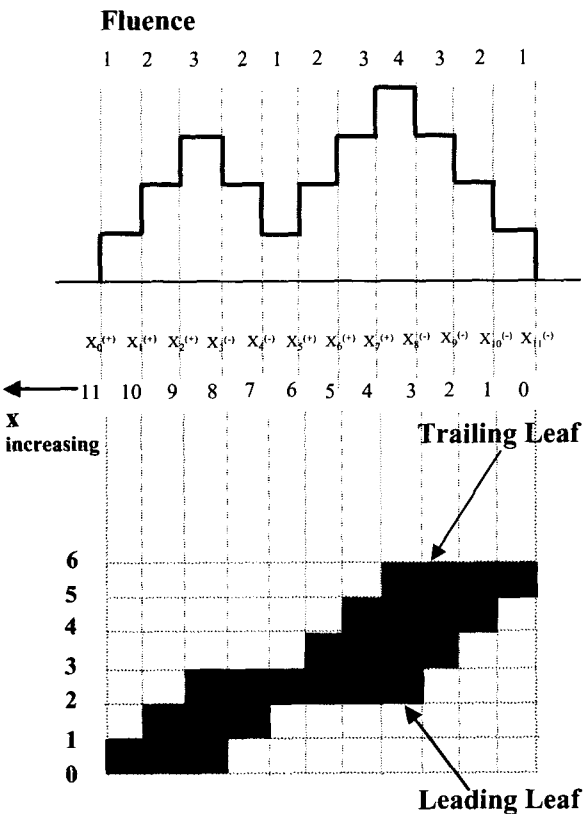


Fig. 5. Ma's algorithm for MLC leaf sequence (Ref 9)

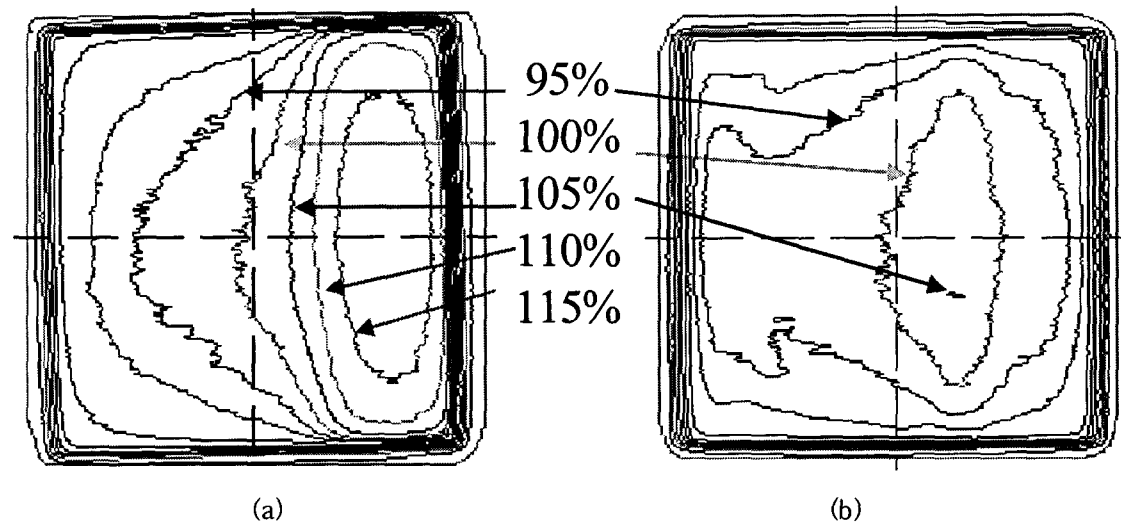


Fig. 7. Isodose curves of the films irradiated with or without virtual compensator
 (a) isodose curves without virtual compensator (b) isodose curves with virtual compensator

논의 및 결론

본 연구에서는 선량보상체의 설계 및 제작시 신체표면의 굴곡에 의한 조직결손의 측정과 납등의 물질로 실제 제작하는 작업을 배제하고 다엽콜리메터를 이용하여 방사선 세기를 변조함으로써 선량보상체의 기능을 구현할 수 있는 가상 선량보상체 알고리즘을 고안하였다. 삼차원 방사선치료계획장치를 이용하여 선량보상 효과가 필요한 영역과 정도에 관한 정보를 획득하고, 이에 적합하게 빔세기를 변조하여 조사할 수 있는 다엽콜리메터의 leaf sequence 계산 및 구동 프로그램을 작성하였다. 이와 같이 개발한 가상 선량보상체의 타당성을 검증하고자 실행한 실험에서 조직결손에 의한 고선량 영역의 발생과 이로 인한 선량분포의 불균일성이 가상 선량보상체를 적용하였을 경우 균일한 선량분포로 보정되는 결과를 얻을 수 있어 선량보상체의 기능을 적합하게 구현하였음을 입증하였다.

본 연구에서는 가상 선량보상체의 성능 분석시 필름의 등선량곡선 분포의 비교를 통한 정성적 분석에 치중하였는데, TLD등을 이용한 정량적 분석을 통해 선량보상 정도에 대한 추가적인 연구를 수행할 예정이다.

이 밖에 본 실험에서 살펴본 선량보상체 기능은 주로 신체표면의 굴곡에 의한 조직결손 영향만을 보정하였는데 컴퓨터단층촬영(CT) 영상을 사용시에는

조직내 물질의 밀도 불균질성에 의한 영향도 함께 보정할 수 있을 것으로 예측할 수 있다[11]. 즉, CT 영상을 삼차원 방사선치료계획장치에 입력하여 치료 계획 결과를 얻고 입사 방사선에 수직인 면에서 균일한 선량분포를 얻기 위해 본 연구에서 고안한 방법을 사용하여 플루언스 지도 및 다엽콜리메터 구동 프로그램을 작성한다면 조직내 물질의 불균질한 밀도로 인한 불균일한 선량분포 또한 보정할 수 있을 것이다.

이상에서 살펴본 바와 같이 본 연구에서 개발한 가상 선량보상체는 그 알고리즘 및 기능의 타당성이 검증되어 추가적인 보완연구를 통해 임상에 적용할 경우 치료과정의 편리성 및 정확도를 제고할 수 있을 것으로 사료된다. 향후 인체팬텀을 이용한 실험 등을 통해 실제 임상에 적용할 수 있는 가상 선량보상체 알고리즘 및 프로그램 개발에 대한 연구를 계속 수행할 예정이다.

참고 문헌

1. Johns H.E., Cunningham J.R.: *The physics of radiology*. Charles C Thomas Publisher, Springfield (1983), pp.389-390
2. 이상훈, 이병용, 권수일, 김종훈, 장혜숙 : Exit Beam Dose Profile을 이용한 3차원 보상체의 성능 확인. 의학물리 7(2):3-18 (1996)

3. Geis P., Boyer A.L., Wells N.H.: Use of a multileaf collimator as a dynamic missing tissue compensator. *Med. Phys.* 23(7):1199-1205 (1996)
4. Gunilla C., Bentel, R.N., R.T.T.: *Radiation therapy planning*. McGraw-Hill, New york (1996), pp.231-236
5. Pasma K.L., Kroonwijk M., Dieren E.B., Visser A.G., Heijmen B.J.M.: Verification of compensator thickness using a fluoroscopic electronic portal imaging device. *Med. Phys.* 26(8):1524-1529 (1999)
6. Roback D.M., Gerbi B.J.: Evaluation of electronic portal imaging device for missing tissue compensator design and verification. *Med. Phys.* 22(12):2029-2034 (1995)
7. Jiang S.B., Ayyangar K.M.: On compensator design for photon beam intensity-modulated conformal therapy. *Med. Phys.* 25(5):668-675 (1998)
8. Spirou S.V., Chui C.S.: Generation of arbitrary intensity profiles by dynamic jaws or multileaf collimator. *Med. Phys.* 21(7):1031-1041 (1994)
9. Webb S.: *Intensity-modulated radiation therapy*. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia (2001), pp.135-142
10. Boyer A.L.: Intensity-modulated radiation therapy with dynamic multileaf collimators. *Seminars Radiation Oncology*. 9(1):48-59 (1999)
11. Jursinic P.A., Podgorsak M.B., Paliwal B.R.: Implementation of three-dimensional compensation system based on computed tomography generated surface contours and tissue inhomogeneities. *Med. Phys.* 21(3):357-365 (1994)

Algorithm for the design of a Virtual Compensator Using the Multileaf Collimator and 3D RTP System

J.Y. Song^{*†}, B.Y. Yi^{*}, T.J. Choi[†]

*Department of Radiation Oncology, Asan Medical Center,
College of Medicine, University of Ulsan**

*Department of Biomedical Engineering, College of Medicine
The Catholic University of Korea[†]*

Keimyung University, School of Medicine, Taegu[†]

The virtual compensator which are realized using a multileaf collimator(MLC) and three-dimensional radiation therapy planning(3D RTP) system was designed. And the feasibility study of the virtual compensator was done to verify that it can do the function of the conventional compensator properly.

As a model for the design of compensator, styrofoam phantom and mini water phantom were prepared to simulate the missing tissue area and the calculated dose distribution was produced through the 3D RTP system. The fluence maps which are basic materials for the design of virtual compensator were produced based on the dose distribution and the MLC leaf sequence file was made for the realization of the produced fluence map. Ma's algorithm were applied to design the MLC leaf sequence and all the design tools were programmed with IDL5.4. To verify the feasibility of the designed virtual compensator, the results of irradiation with or without a virtual compensator were analyzed by comparing the irradiated films inserted into the mini water phantom. The higher dose area produced due to the missing tissue was removed and intended regular dose distribution was achieved when the virtual compensator was applied.

Key words : Multileaf collimator, Three-dimensional radiation therapy planning system, Virtual compensator