

다엽 콜리메이터(Multileaf Collimator)와 합금납 차폐물(Lead Alloy Block)의 반 그림자영역의 선량 분포상의 특성 비교

연세대학교 의과대학 치료방사선과학교실, 연세 암센터

이상욱 · 오영택 · 김우철 · 금기창 · 윤성익
김 현 수 · 박 원 · 추 성 실 · 김 귀 언

= Abstract =

Dosimetric Characteristics on Penumbra Regions of the Multileaf Collimator as Compared with the Lead Alloy Block

Sang Wook Lee, M.D., Young Tack Oh, M.D., Woo Cheol Kim, M.D.
Ki Chang Keum, M.D., Seong Ick Yoon, B.S., Hyun Soo Kim, Ph.D.
Won Park, M.D., Seong Sil Chu, Ph.D. and Gwi Eon Kim, M.D.

*Department of Radiation Oncology, Yonsei Cancer Center, Yonsei University College of Medicine,
Seoul, Korea*

Purpose: The Conformal Radiation Therapy has been widely used under favour of development of computer technologies. The delivery of a large number of static radiation fields are being necessary for the conformal irradiation. In this paper, we investigate dosimetric characteristics on penumbra regions of a multileaf collimator(MLC), and compare to those of lead alloy block for the optimal use of the system in 3-D conformal radiotherapy.

Materials and Methods: The measurement of penumbra by MLC or lead alloy block was performed with 6 or 10 MV X-rays. The film was positioned at a d_{max} depth and 10 cm depth, and its optical density was determined using a scanning videodensitometer. The effective penumbra, the distance from 80% to 20% isodose lines and 90% to 10% were analyzed as a function of the angle between the direction of leaf motion and the edge defined by leaves.

Results: Increasing MLC angle ($0-75^\circ$) was observed with increasing the penumbra widths and the scalloping effect. There was no definite differences of penumbra width from 80% to 20% isodose lines, while being the small increase of penumbra width from 90% to 10% isodose line varying the depth and energy. The effective penumbra width of lead alloy block are agree resonably with those of MLC within 4.8mm.

Conclusion: The comparative qualitative study of the penumbra between MLC and lead alloy block demonstrate the clinical acceptability and suitability of the multileaf collimator for 3-D conformal radiotherapy.

Key Words: Multileaf collimator, Effective penumbra, Film dosimetry

서 론

다엽 콜리메이터(Multileaf Collimator MLC)란 다수의 leaf로 이루어진 Collimating System으로서 각각의 leaf가 컴퓨터화 되어 자동으로 제어되면서 치료하고자 하는 모양과 흡사한 조사면을 만들 수 있고, 이를 Collimating blocks 또는 leaf라고 한다¹⁾. 1906년 Robinsohn등에 의해 최초의 다엽 콜리메이터에 대한 아이디어가 진단용 방사선 기기에 적용된 후, 1959년 Gscheidlen등이 방사선 치료용의 다엽 콜리메이터를 고안하였다^{2, 3)}. 1965년에는 일본의 Takahashi가 conformation therapy를 시도 하기 위해, leaf 1개의 가로폭이 isocenter에 투영시 4.8cm인 9쌍의 초기 저해상도 다엽 콜리메이터를 제작 이용함으로써, 임상적으로는 처음 사용되게 되었다⁴⁾. 그러나 이러한 초기의 다엽 콜리메이터는 leaf의 가로폭이 2-3 cm로 투영해상도가 나빠 방사선 치료에 널리 쓰이지 못하였다⁵⁾.

그러나 컴퓨터와 진단 기기의 발전에 따라, 정상조직과 치료부위 내부의 방사흡수선량의 분포를 3차원적으로 재구성하여, 중앙에는 최대량의 방사흡수선량을 주면서 정상조직에는 최소량의 방사선량이 피폭되는 시도가 계속되면서, 소위 3차원입체조형치료(Conformal Radiotherapy)가 등장하였고 이에 따라 본격적으로 다엽 콜리메이터가 임상에 필수적인 장비로 사용되기 시작하였다^{4, 6-10)}. 더불어 3D planning의 완벽한 Treatment delivery를 위해서는 적용범위가 향상된 다엽 콜리메이터의 필요성이 대두되었다. 이런 요구에 부합하기 위해서 1980년대 후반에 고해상도의 다엽 콜리메이터가 연구 개발되어 이용되기 시작하였다⁸⁻¹²⁾. 한편, 다엽콜리메이터에 관한 실험연구가 국내에서도 진행되고 있다¹³⁾.

본 연세 암센터에는 국내최초로 다엽 콜리메이터를 도입하여, 1994년 1월 부터 다엽 콜리메이터를 이용한 임상적인 치료가 가능하게 되었다. 다엽 콜리메이터는 조사면의 모양을 합금납차폐물과 같이 정교하게 만들 수 없고, leaf 한개의 크기에 따라 1cm-1.25cm 크기의 단위로 치료하고자 하는 조사면을 만들 수 밖에 없다. 이렇게 1cm-1.25cm 단위의 계단모양으로 조사면을 만들 경우 기존의 합금납차폐물을 쓰는 경우와 비교하여 실제 환자를 치료하는데 적용을 하여도 안전한지에 대한 의문점이 제시되고 있다. 이에 본 저자들은 다엽 콜리메이터를 사용할 경우 조사면의 경계에서 반그림자의 크기와 선량 분포상의 특성을 알아보고, 합금납 차폐물의 반그림자와 비교하여 방사선치료

시 다엽 콜리메이터의 유용성을 평가해 보고자 한다.

대상 및 방법

1. 다엽 콜리메이터(Multileaf Collimator)

본 연구에 사용된 다엽 콜리메이터는 CLINAC 2100 C/D (Varian Associates Oncology System, Palo Alto, California, U.S.A.)에 장착된 기종으로, 각각 한쪽 면에 26개씩 총 52개의 leaf로 구성 되어있다. 한 개의 leaf를 정면에서 보면 단면이 5.94 cm x 0.53 cm의 크기이고, isocenter (SAD 100cm)에 투영시 leaf 한 개의 투영두께는 1 cm이다. 측면에서 보면 leaf의 종단면이 곡선으로 되어있고 반경은 8.001 cm으로 한 개의 초점(single focusing)으로 되어있다¹⁴⁾. 최대 조사면의 크기는 40×26 cm²이고 leaf는 정중앙선을 넘어서 13 cm까지 갈 수 있다. 방사선 조사시 leaf를 투과하는 방사선량은 4% 이내이고, leaf 사이의 새는 방사선량도 4% 이내이다. leaf의 이동시 최대 속도는 1.5cm/sec이고, leaf의 위치오차는 isocenter에서 1mm 이내 이다. isocenter에서 leaf까지의 거리는 42.4 cm 이다(Fig. 1).

선형 가속기를 이용하여 6MV, 10MV X-선 두 종류의 에너지를 사용하였다.

2. 측정 방법

1) 10×cm² 크기의 조사야에서 MLC의 종단면이 Y 축과 이루는 각도를 0, 15, 30, 45, 60, 그리고 75 도

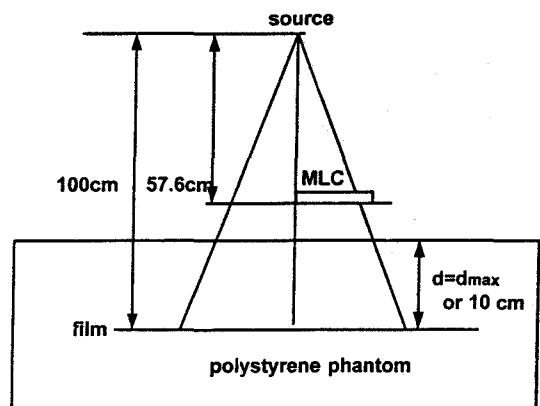


Fig. 1. Diagram of experimental setup for measuring dose distribution of MLC fields using film dosimetry. Measurements are performed at 100cm from the source at d_{max} and 10cm depth in polystyrene for 6 MV and 10 MV x-rays.

가 되도록 MLC 모양을 만들었다(Fig. 2).

2) 제어된 MLC가 차폐하는 조사면과 같은 모양의 합금납 차폐물을 제작하였다.

3) 폴리스티렌(polystyrene)관통 위에 측정필름(Kodak X-omat V, Eastman Kodak Company, Rochester, New York, U.S.A.)을 SAD 100 cm 되는 곳에 조사면으로 부터 수직이 되게 위치 시켰다.

4) 측정필름 위에 폴리스티렌관통을 일정 높이 (dmax, 10cm) 만큼 올려놓고 isocenter에 78 MU를 조사하였다(Fig. 1).

5) 방사선이 조사된 측정필름을 자동현상기를 이용하여 현상하였다.

6) 현상된 필름은 Wellhofer Dosimetrie WP 700 (Wellhofer, Schwarzenbruck, Germany) 비디오 밀도계(Video Densitometer)로 측정필름의 광학밀도를 분석하였다.

7) 광학밀도와 선량과의 비례관계를 알아보기 위하여 6MV, 10MV x-ray을 이용하여, $10 \times 10 \text{cm}^2$ 조사야의 크기로 dmax에서 측정필름에 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120cGy를 (3)과정과 동일하게 조사하여, 광학밀도를 선량으로 변환하기 위한 기준 그래프를 얻었다.

8) 필름의 농도를 선량으로 변환시켜 보았을 때 필름의 농도가 10cGy에서 100cGy까지는 비교적 일차함수의 비례관계가 있었고 측정한 필름의 광학밀도를 선량으로 환산하였다.

9) 이렇게 얻은 등선량곡선에서 반그림자의 크기를 측정하였다.

위의 측정 방법을 에너지는 6 MV 와 10MV X-선 두 가지를 사용하여 각각 반복하였고 필름을 dmax와 10 cm 깊이에서 각각 반복하여 같은 실험을 4회 반복 하였고 위의 모든 측정은 같은 날에 시행 하였다.

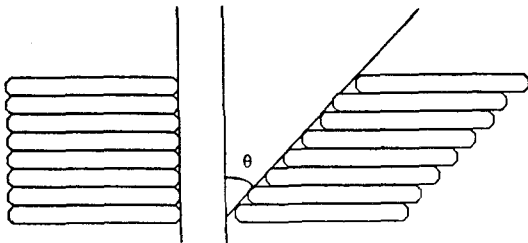


Fig. 2. Shows the pattern used for the Edge. Leaves were stepped from a θ angle with field edge.

3. 분석 방법

반그림자에 대한 분석은 에너지, 조사면의 크기가 주어질때 Effective penumbra(EP)와 10%~90% 반그림자를 비교 분석하였다. Effective Penumbra EP)의 정의는 Powlis의 정의에 따라 20% 등선량 곡선의 끝을 연결한 직선과 80% 등선량 곡선의 능선을 연결한 직선의 거리로 정하였다¹¹⁾.

결 과

다엽 콜리메이터가 일직선으로 나열해 있지 않은 경우 측정된 필름은 조사면의 경계가 계단 모양으로 감광되었고, 등선량곡선도 파동모양으로 나왔다. 조사면의 경계에서 계단 모양이 가장 심화되고 조사면의 경계에서 멀어질수록 계단모양이 완만한 곡선으로 변함을 볼 수 있다. 또한 계단 모양의 심화는 다엽 콜리메이터의 종단면과 조사면의 종축과 이루는 각도가(이하 MLC각도) 증가함에 따라 심화됨을 볼 수 있었다.

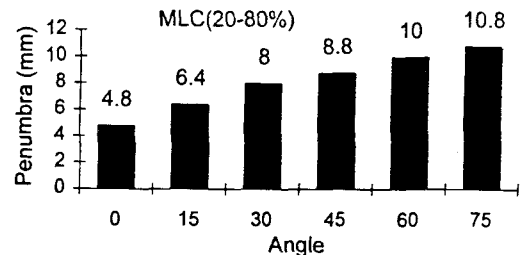


Fig. 3. Measured effective penumbra according to angle at depth=10cm, 6MV X-ray.

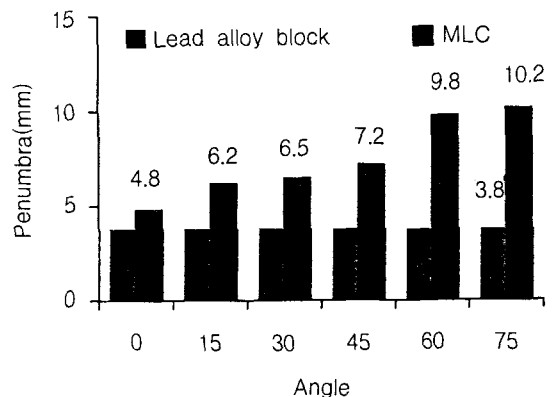


Fig. 4. Measured effective penumbra at Depth=10cm, 6MV X-ray.

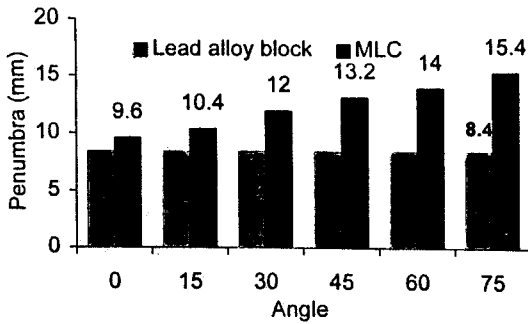


Fig. 5. Measured 10-90% penumbra at Depth=10cm, 6MV X-ray.

6 MV X-선으로 dmax에서 측정된 필름의 광학밀도를 선량으로 환산하여 얻은 등선량 곡선에서 MLC각도가 증가함에 따라 Effective penumbra(EP)가 증가하는 양상을 보인다. 그리고 다엽 콜리메이터의 Effective penumbra는 각도가 0도일때 4.8 mm, 15일때 6.4 mm, 30도일때 8.0 mm, 45일때 8.8 mm, 60도일때 10.0 mm, 그리고 75도일때 10.8 mm였다(Fig. 3).

합금납 차폐물의 20-80% 반그림자와 비교하여 보면 MLC각도가 0도일 때는 0.8mm 차이가 나고, 다엽 콜리메이터의 EP가 1.2배 이었다. 75도인 경우는 6mm 차이가 나고 2.5배 임을 볼 수 있었다(Fig. 4). 또한 10-90% 반그림자의 크기를 비교하여 보면 MLC 각도가 0도일 때는 약 1.1배 였고, 75도일 때는 약 1.8배이었다(Fig. 5).

에너지의 차이에 따라 6 MV, 10MV X-선일 때 각각 dmax 와 10cm에서 측정된 EP와 10-90% 반그림자를 비교하여 보면 EP 는 depth 와 에너지에 따라 별 차이가 없음을 볼 수 있으나 10-90% 반그림자에서는 depth가 깊어짐에 따라 에너지가 커짐에 따라 반그림자가 약간 커지는 경향을 보였다.

EP는 MLC각도가 0도일때 합금납 차폐물의 반그림자와의 차이가 가장 작았고, 0.5-1.0 mm 정도만큼 합금납 차폐물 보다 반그림자가 큼을 볼 수 있다. 계단 모양이 가장 심할 때인 45도에서 EP의 차이가 가장 컸고, 2.4-4.8 mm 차이가 남을 볼 수 있었다. 10-90 % 반그림자도 MLC각도가 0도 일때 합금납 차폐물의 반그림자의 크기와 가장 차이가 작았고, 비록 75도일 때 가장 큰차이를 보였지만 콜리메이터의 각도를 90 도 돌려 치료설계를하면 15도가 되므로, 45도일때 가장 차이가 많이 났다(Table 1).

Table 1. Difference of Penumbra Widths between MLC with Lead Alloy Block(unit.=mm)

	20-80%		10-90%	
	0	45	0	45
6MV Dmax	1.0	3.8	0.8	2.8
6MV D10	0.8	4.8	0.8	4.8
10MV Dmax	0.9	3.3	0.7	1.6
10MV D10	0.5	2.4	0.4	4.6

고 찰

정상 조직의 방사선 피폭을 줄이기 위해 4문 조사 이상의 여러 면에서 조사할 경우 각 조사시마다 매번 치료실에 들어가서 각각 차폐물을 갈아 끼워야 하는 불편함을 다엽 콜리메이터는 피할 수 있다⁹⁾. 이러한 장점 때문에 원활한 Conformal therapy를 실현하는데 있어 필수적이다¹⁴⁾. 그 외의 장점으로는 차폐물을 제작하는 시설과 공간의 필요하지 않고, 치료실내에 개별 차폐물의 보관장소와 그 관리가 필요없어지게 되며, 특히 차폐물 제작시 생기는 산업공해로부터 제작자를 보호할 수 있고, 폐기물 관리가 필요없어진다는 장점이 있다. 또한 개별 차폐물 제작으로 인한 치료의 지연이 없어지고, 조사면의 변경시 쉽게 차폐물의 변형을 할 수 있다는 장점도 있다¹⁴⁾. 그러나 이런 장점에도 불구하고 아직까지 널리 쓰이고 있지 못하는 이유는 첫째, 가격이 비싸다는 점과, 둘째, 방사선 물리학적, 방사선 생물학적인 안정성 여부에 대한 연구가 거의 없어 아직 적용 기준이 확립되어 있지 못한 실정이다.

다엽 콜리메이터는 정상조직의 차폐시 연속적이고 완만한 모양으로 차폐하지 못하고 isocenter에서 1cm 단위의 계단 모양으로 밖에 차폐를 하지 못하기 때문에 과연 효과적으로 차폐를 할 수 있을지에 대한 의문이 생기고, 둘째, 개별로 제작된 납 차폐물은 divergence를 고려하여 만들어지지만 다엽 콜리메이터는 각 조사면에 따라 divergence를 고려하여 만들어 질 수 없음으로 전자보다는 다엽 콜리메이터의 반그림자가 필연적으로 클 수밖에 없다⁸⁻¹²⁾. 이런 위의 두 가지 문제점이 과연 실제 조사면에서는 수치적으로 기존의 합금납 차폐물사용시와 비교시 반그림자의 크기가 어느 정도 차이가 나며, 다엽 콜리메이터의 조사면의 가장자리에서 선량분포상의 어떤 특징을 가지는지에 대한 몇몇 보고가 있고, 조사야의 경계에서 계단 모양이 가장 심해지고 양쪽으로 멀어질 수록 계단모양이 완만

한 곡선으로 변하다는 사실은 이미 알려져 있다⁸⁻¹¹⁾. Galvin 등의 연구 결과에서 보면 MLC 각도가 15도에서 45도로 증가함에 따라서 계단모양의 심화됨을 보고하였고, EP나 10-90% 반그림자의 크기를 합금납 차폐물의 반그림자의 크기와 비교하여 보고한 바 있다¹⁰⁾. 또한 본 연구에 사용된 것과 동일한 다엽성 콜리메이터를 이용한 MLC 각도를 0도, 15도, 그리고 45도에서 반그림자의 크기를 구하여 각도가 커짐에 따라 반그림자의 크기가 커지고 합금납을 이용할 때 생기는 반그림자의 차가 최대 3.8-3.9 mm 이라는 보고도 있다¹¹⁾. 역시 본 연구에서도 MLC 각도가 증가함에 따라서 EP나 10%-90% 반그림자가 커짐을 볼 수 있었다. 특히 본 연구에서는 60도와 75도에서도 측정하였는데 45도보다 더 반그림자가 커짐을 볼 수 있었다 (Fig. 3). MLC 각도상 45도 이상되는 경우는 다엽 콜리메이터(MLC)의 방향을 바꾸어 주면 계단모양의 심화를 막을 수 있으므로 가장 효과적인 다엽 콜리메이터(MLC)의 방향을 치료계획자는 고려하여야겠다. 본 연구 결과에는 계단 모양이 가장 심해지는 45도의 반그림자와 합성납 차폐물 반그림자와의 차가 최대 4.8 mm 이므로 통상적인 set up 오차를 고려한다면 실제 임상에서 충분히 수용 가능한 수치라고 생각되며, Losasso의 결과 3-5 mm 차이와 거의 대동 소이한 결과를 얻었다⁹⁾. 문헌상에서 에너지가 커짐에 따라 반그림자의 크기가 증가하였고^{9, 11)}, 깊이가 증가함에 따라서도 반그림자의 크기가 증가 하는 것으로 알려져 있다^{9, 10)}. 본 연구에서도 위의 보고와 유사한 결과를 보였다. 그러나 깊이가 깊어짐에 따라서 반그림자의 절대적인 수치는 커지지만 합성납 차폐물의 반그림자의 크기의 차는 감소하는 것으로 알려져 있는데, 본 연구에서도 다엽 콜리메이터의 반그림자와 합성납 차폐물의 반그림자의 비가 줄어들음을 볼 수 있었다^{9, 10)}. 그 이유로는 이차 전자선이 조직에서 발생하여 계단모양이 완만한 파동형의 모양으로 변하기 때문으로 생각된다¹⁰⁾.

위의 결과를 분석해보면 다엽 콜리메이터를 이용한 차폐시 계단모양의 차폐가 이루어진다고 하여도 다른 보고와 마찬가지로 95% 등선량곡선은 합금납 차폐물의 95% 등선량곡선과 비교하여 차이가 매우 적었기 때문에 Target volume에 조사되는 방사선이 작게 들어갈 경우는 배제 할 수 있겠다. 그러나 안구나 척추와 같이 비교적 세밀한 차폐를 원하는 경우 조사면이 아주 작은 경우 과연 효과적인 차폐가 되는지 아직까지 더 많은 연구가 필요하겠다. 그러나 작은 치료 용적이나 불균형적으로 방사선이 조사된 경우 합병증의

발생이 아주 적다는 주장에 근거 하다면 다엽 콜리메이터의 사용에는 제한점으로 작용하지 않은 것으로 생각된다^{15, 16)}.

다엽 콜리메이터를 사용하는 경우 transmission penumbra로 인한 10% 등선량 곡선이 조사면의 중심에서 합금납 차폐물보다 멀어지는 특성이 본 연구에서도 관찰되었고 이에 대한 더 많은 연구와 개선 필요성에 대한 검토가 필요할 것으로 생각된다¹⁴⁾.

결론적으로 MLC는 차폐하는 방향에 따라 계단모양이 심해질 수록 반그림자의 크기도 증가함을 볼 수 있었고, 꼭 치료 설계자와 치료방사선과의사의 상의 하에 조사면에서 비교적 세밀한 차폐를 원하는 면에는 MLC의 방향을 변화시켜가며 계단모양이 가장 심하지 않게 하여야겠다. 둘째, 합성납 차폐물의 반그림자와 비교하여 볼 때 차가 5mm 이내로 충분히 대처하여 사용할 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다.

REFERENCES

1. Khan FM. Treatment planning III: The physics of radiation therapy. Baltimore/Lodon, Williams & Wilkins 1994, pp 320-323
2. Robinsohn I. Apparat zur radiologischen Belichtung lebender unter lebloser Objekte. German patent nr. 1906; 192:300
3. S Webb. The physics of three-dimensional radiation therapy. Institute of physics publishing Bristol and Philadelphia 1993, pp 218-245
4. Takahashi S. Conformation radiotherapy, rotation techniques as applied to radiography and radiotherapy. Acta Radiol Suppl 1965: 242
5. Ishigaki T, Sakuma S, Banno T, et al. Computer-assited conformation radiotherapy system. Europ J Radiol 1983; 3:367-374
6. Leven MB, Kijewski PK, Chin LM, et al. Computer controlled radiation therapy. Radiology 1978; 129:769-776
7. Brahme A. Optimization of stationary and moving beam radiation therapy techniques. Radiothe Oncol 1988; 12:s129-139
8. Galvin JM, Smith AR, Lally B. Characterization of a multileaf collimator system. Int J Radiation Oncology Biol Phys 1993; 25:181-192
9. LoSasso T, Chui CS, Kutcher GJ, et al. The use of a multi-leaf collimator for conformal radiotherapy of carcinomas of the prostate and nasopharynx. Int J Radiation Oncology Biol Phys 1993; 25:161-170

10. Galvin JM, Smith AR, Moeller RD, et al. Evaluation of multileaf collimator design for photon beam. Int J Radiation Oncology Biol Phys 1992; 23:789-801
11. Powlis WD, Smith AR, Cheng E, et al. Initiation of multileaf collimator conformal radiation therapy. Int J Radiation Oncology Biol Phys 1993; 25:171-179
12. Jordan TJ, Willams PC. The design and performance characteristics of a multileaf collimator. Phys Med Biol 1994; 39:231-251
13. 이병용, 조병철, 장혜숙. Multileaf collimator의 적정 폭에 관한 연구. 의학물리 1994; 5:49-55
14. Boyer AL, Ochran TG, Nyerick CE, et al. Clinical dosimetry for implementation of a collimator. Med Phys 1992; 19:1255-1261
15. Kallman P, Agren A, Brahme A. Tumor and normal tissue responses to fractionated non uniform dose delivery. Int J Rad Biol 1992; 62:249-262
16. Brahme A. Dosimetric precision requirements in radiation therapy. Acta Radiol Oncol 1984; 26:403-412

= 국문초록 =

다엽 콜리메이터(Multileaf Collimator)와 합성납(Lead Alloy Block)의 반그림자영역의 선량 분포상의 특성 비교

연세대학교 의과대학 치료방사선과학교실, 연세 암센터

이상옥 · 오영택 · 김우철 · 금기창 · 윤성의
김 현 수, 박 원, 추 성 실, 김 귀 언

목 적 : 컴퓨터의 발달에 힘입어 3-D Conformal Radiotherapy(3-D CRT)가 가능하게 되었고 3-D CRT를 위해서는 다엽콜리메이터(MLC)가 필수적인 장치이다. 이에 본 저자들은 MLC 사용시 반그림자(Penumbra)의 크기와 그 특성을 알아보고 기존의 합성납(lead alloy block)을 사용할 때의 반그림자와 차이를 비교 분석하여 임상에서 다엽콜리메이터(MLC)의 이용에 도움이 되고자 본 연구를 계획하였다.

방 법 : MLC와 합성납의 반그림자를 측정하기 위해 6MV 와 10MV 에너지의 방사선을 이용하여 필름선량분석을 시행하였다. 필름에 각에너지의 dmax와 10cm 두께의 폴리스탈린 판통을 올려 놓고 측정하였고, MLC의 종단면과 조사면의 y축과 이루는 각도를 변화시키면서 Effective penumbra(20%-80%)와 10-90% 반그림자를 측정하였다.

결 과 : MLC의 각도가 0°에서 75°로 증가함에 따라 반그림자의 크기가 증가 하였고, 반그림자 영역에서 등선량곡선의 부채살모양이 심화 되었다. dmax에서 보다 10cm 깊이에서 반그림자의 크기가 약간 증가하였고, 에너지가 증가 하면서 약간 반그림자가 커지는 경향성만 보였다. 합성납을 사용할 경우의 반그림자보다 MLC를 사용할경우 최대 4.8mm가 더 크게 측정되었다.

결 론 : 3-D CRT를 시행함에 있어서 반그림자 영역에서는 기존의 합성납 차폐물을 대신하여 MLC를 사용하여도 무방하리라는 결론을 얻을 수 있었다.