

고에너지 전자선 진자조사에 의한 선량분포

연세대학교 의과대학 방사선과학교실

추 성 실 · 김 귀 언 · 서 창 옥 · 박 창 윤

- Abstract -

The Dose Distribution of Arc therapy for High Energy Electron

S.S. Chu, Ph.D., G.E. Kim, M.D., C.O. Suh, M.D., C.Y. Park, M.D.

*Dept. Radiology and Nuclear Medicine, College of Medicine,
Yonsei University Seoul, Korea*

The treatment of tumors along curved surfaces with stationary electron beams using cone collimation may lead to non-uniform dose distributions due to a varying air gap between the cone surface and patient. For large tumors, more than one port may have to be used in irradiation of the chest wall, often leading to regions of high or low dose at the junction of the adjacent ports. Electron-beam arc therapy may eliminate many of these fixed port problems.

When treating breast tumors with electrons, the energy of the internal mammary port is usually higher than that of the chest wall port. Bolus is used to increase the skin dose or limit the range of the electrons. We investigated the effect of various arc beam parameters on the isodose distributions, and combined into a single arc port for adjacent fixed ports of different electron beam energies. The higher fixed port energy would be used as the arc beam energy while the beam penetration in the lower energy region would be controlled by a proper thickness of bolus.

We obtained the results of following:

1. It is more uniform dose distribution of electron to use rotation than stationary irradiation.
2. Increasing isocenter depth on arc irradiation, increased depth of maximum dose, reduction in surface dose and an increasing penetration of the linear portion of the curve.
3. The deeper penetration of the depth dose curve and higher x-ray background for the smaller field sized.
4. If the isocenter depth increase, the field effect is small.
5. The decreasing arc beam penetration with decreasing isocenter depth and the isocenter depth effect appears at a greater depth as the energy increases.
6. The addition of bolus produces a shift in the penetration that is the same for all depths leaving the shape of the curves unchanged.
7. Lead strips 5 mm thick were placed at both ends of the arc to produce a rapid dose drop-off.

본 논문은 1983년도 교수 연구비에 의해 이루어졌음

I. 서 론

절제 수술한 유방암의 흉벽과 내부유선의 치료는 고에너지 전자선에 의한 조사방법만이 폐조직의 피폭을 적감시키고 흉벽에 집중조사가 가능하다.

그러나 흉벽 역시 곡면이기 때문에 단일 cone 으로서 조사하게 되면 cone과 피부간의 공간 간격이 다르기 때문에 불균일한 선량분포를 얻게되며 단일 cone이 피부 곡면에 수직이 되도록 조사면을 분할하여 조사한다면 조사면 사이의 방사선 과다 선량지점과 과소 선량지점이 발생하여 불균등한 선량분포를 이루게 된다.

저자들은 13 MeV 선형가속기에서 발생하는 8, 10, 12 MeV의 고에너지 전자선을 다양한 방법으로 회전(ARC) 조사시켜 흉벽에 균등한 선량분포를 얻었으며 internal mammary 부분과 흉벽에 각각 다른 에너지의 조사면을 인접조사하는 대신 bolus와 회전조사로서 1회에 같이 조사하여 이상적인 선량분포를 얻을 수 있었다.

II. 실험 방법

본 실험에서는 13 MeV 선형가속기로부터 발생하는 8, 10, 12 MeV의 고에너지 전자선을 사용하였으며 가속기의 본체는 360° 회전하면서 전자선을 방출시킬 수 있고 회전속도는 0~1 rpm로 조종이 가능하며 선량율은 100~300 rads로 조절할 수 있고 사출된 전자선은 0.2 mm Pb의 산란막에 의하여 넓고 평탄한 선량분포를 이루지만 2%내외의 오염 X-선이 발생되고 있다.

전자선 collimator는 0~35 cm까지 가변시킬 수 있고 cone은 2×4 cm에서 18 cm ϕ 까지 여러 종류가 구비되어 있으며 회전조사를 위한 2 cm×15 cm의 조사면과 피부와의 간격을 5와 10 cm가 되도록 제작되었다.

조사면의 가장자리 차폐를 위한 납판의 두께는 3~5 mm Pb로서 6~12 MeV 전자선을 완전 차폐할 수 있었으며 공간 간격에 의한 산란선을 막기 위하여 조사면 이외에는 모두 차폐하였다.

전자선의 심부율과 등량곡선 및 선량분포의 측정은 필름 dosimetry와 TLD를 사용하였으며 필름측정을 위한 1 cm 두께의 폴리스틸렌판 20장과 카드형 필름홀더를 밀착시키는 나사형 폴리스틸렌 판통을 그림 1과 같이 제작 사용하였다.

사용한 필름은 관용도가 큰 공업용 필름과 이를 비교

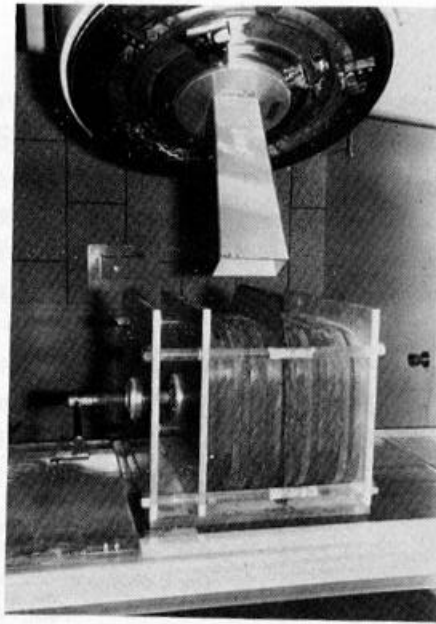


Fig. 1. Polystyrene phantom for dosimetry of high energy electron.

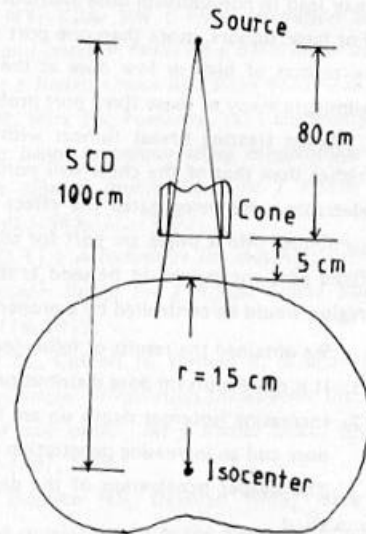


Fig. 2. A diagram of the setup used for stationary beam films and as the arc setup.

하기 위한 의료용 필름을 이용했으며 필름의 흑화도와 선량관계를 나타내는 특성곡선은 알루미늄 step wedge와 photodensitometer를 이용한 boot strip 방법으로 기술하였다.

필름은 암실에서 phantom의 countour에 따라 가위로 자른 후 흑지로 포장한 후 2장의 폴리스틸렌판 내에 삽

입하고 검은 테이프로 밀착시키거나 카드 필름홀더를 그대로 사용하는 방법을 택하였다.

모든 필름은 적당한 흑화도 ($D=0.5 \sim 2$) 가 되도록 회전속도와 선량을 조절하여 조사한 후 같은 조건으로 자동현상 시키고 전자선에 의해 흑화된 부위의 선량분포 곡선은 photovolt-700형 photodensitometer를 이용하였으며 필름의 특성곡선에 의하여 조사선량으로 환산하였고 물 phantom내에 ion chamber로 기록된 조사 중심선의 심부를 곡선과 동일한 에너지와 조사면에서의 필름 흑화도를 비교한 조사선량치로 교정하였다.

측정을 위한 장치는 그림 2와 같이 회전중심 즉 isocenter는 곡면의 곡률중심에 정하고 타겟트와의 거리가 100 cm로 고정시키며 cone과 phantom간의 간격은 곡률반경 r에 따라 약 5~10 cm로 떨어지도록 조정하였고 cone의 크기는 회전방향과 평행면이 2 cm와 8 cm, 수직면이 15 cm 즉 조사면이 2×15 cm와 8×15 cm가 되도록 설계 제작한다.

부위별 심부율을 변화시키기 위해서 1.5~3 cm 두께와 셀렌 겨즈의 bolus를 제작 사용하였으며 그림 3은 bolus를 쓰지 않고 10 MeV 전자선을 120° 회전조사한 필름의 흑화도로서 photodensitometer에 의해서 선량분포가 측정된다.

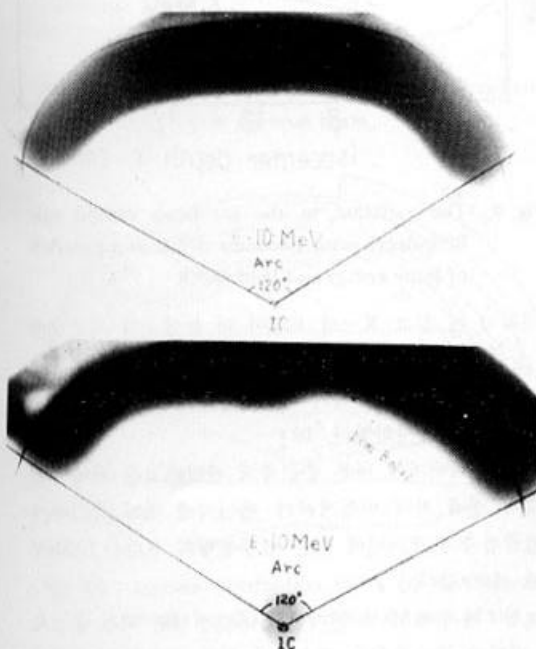


Fig. 3. Dose distribution of arc irradiation for 10 MeV electron.

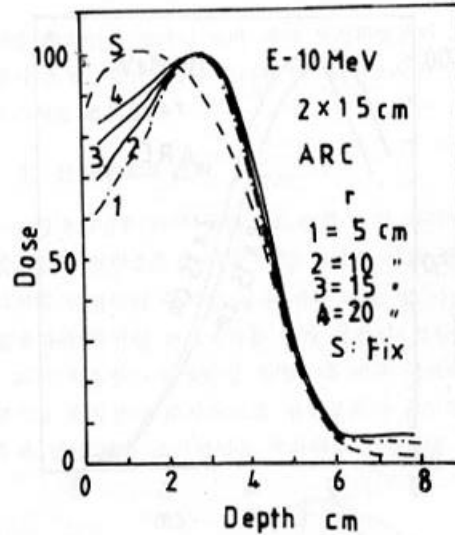


Fig. 4. Central axis depthdose for stationary and arc beam. Arc angle is 150° .

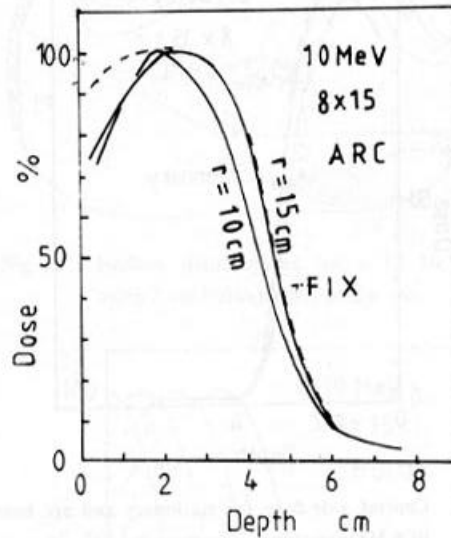


Fig. 5. Central axis depth dose for stationary and arc beam with large field size.

II. 실험 결과

1) 조사 중심축의 심부선량

회전 중심축을 변경하면서 회전조사하였을 때 표면선량이 감소되고 최대 선량지점의 깊이가 증가하였으며 어떤 깊이까지의 투과력이 증가하였다.

그림 4는 폭 2 cm로 150° 회전조사하였을 때 회전 중심축의 깊이에 따른 전자선의 심부율을 표시한 것으로서

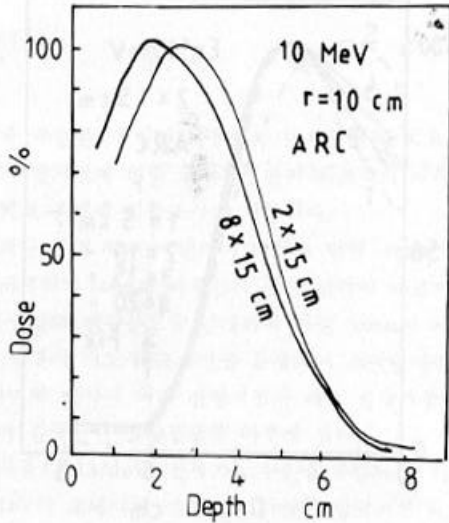


Fig. 6. Field width effect on central axis depth dose.

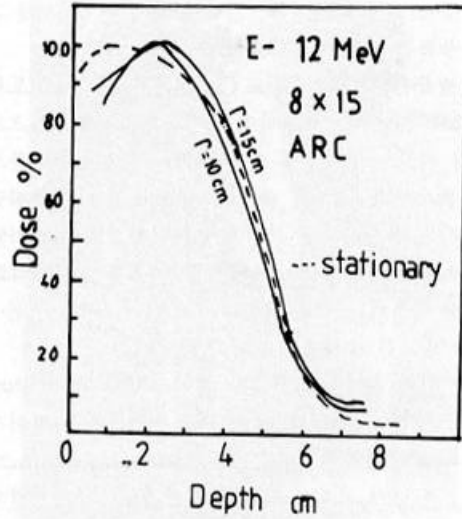


Fig. 8. Central axis depth dose distribution for stationary and arc beam of 12 MeV electron. Arc angle is 150°.

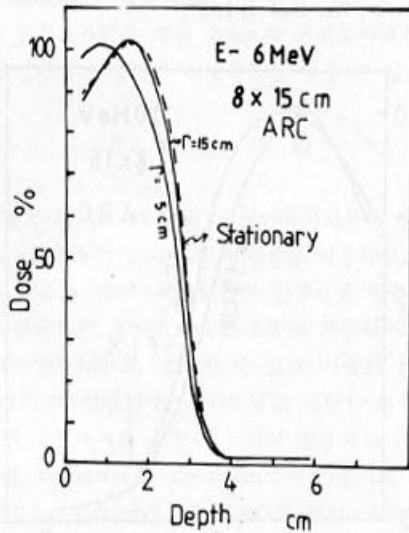


Fig. 7. Central axis dose for stationary and arc beam of 6 MeV electron. Arc angle is 150°.

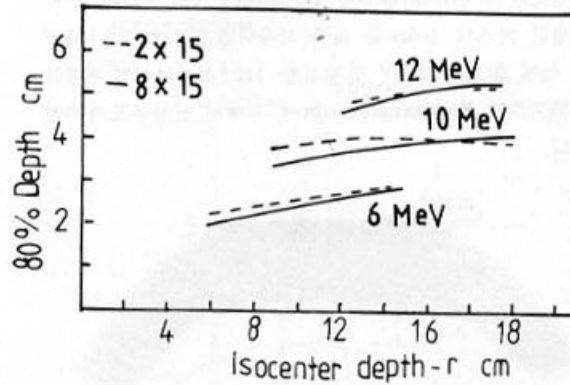


Fig. 9. The variation in the arc beam central axis 80% depth with isocenter depth as a function of beam energy and field width.

고정조사에 의한 심부율보다 표면선량이 감소되었으나 최대 선량지점이 더 깊어졌다.

한편 조사면의 폭을 증가시켰을 때 회전조사의 표면선량은 고정조사보다 감소되었지만 최대 선량지점은 거의 비슷한 결과를 얻었으며 최대 비경거리와 심부율곡선은 거의 비슷하였다.

그림 5는 조사면의 폭을 8 cm로 즉 8 x 15 cm로 회전 및 고정조사를 시행하였을 때의 심부율곡선으로서 최대 선량지점은 거의 비슷하였다.

그림 6에서는 폭이 좁은 조사면이 넓은 조사면 보다

투과력이 더 깊고 X-선 오염이 더 높았으며 회전중심의 깊이가 증가할수록 조사면에 의한 영향은 적었으며 대체적으로 조사면이 증가하면 고정조사와 회전조사의 심부율은 거의 유사하였다.

전자선 에너지에 따른 중심축의 선량변화는 최대 선량지점과 실제 최대 비경거리가 에너지에 따라 증가하며 회전중심축과 조사면에 따른 심부선량의 변화는 10 MeV 때와 거의 같다.

그림 7에서 6 MeV 전자선의 표면선량은 회전 중심축의 깊이가 증가할수록 감소하며 최대 선량점은 증가하는 반면 12 MeV 전자선에서는 그림 8과 같이 거의 비슷한 심부율을 가졌다.

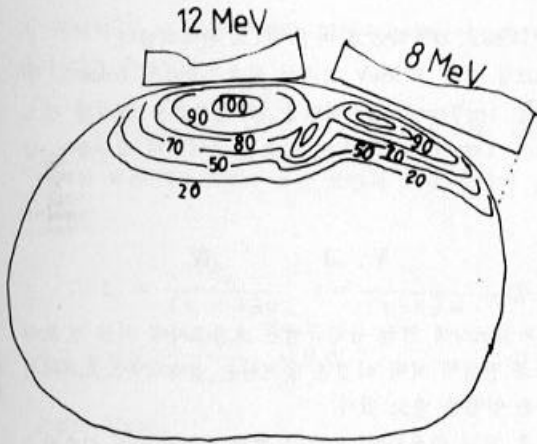


Fig. 10. Isodose distribution for stationary irradiation with 12 MeV and 8 MeV.

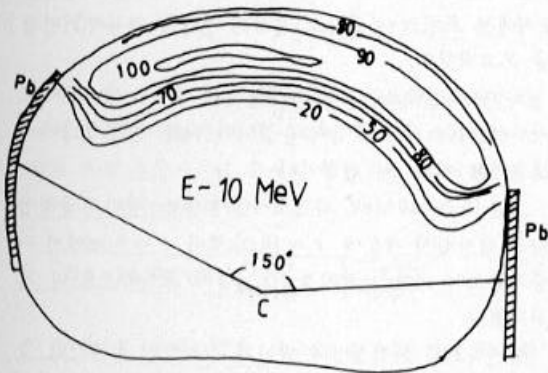


Fig. 11. Isodose distribution for rotating irradiation of 10 MeV electron beam.

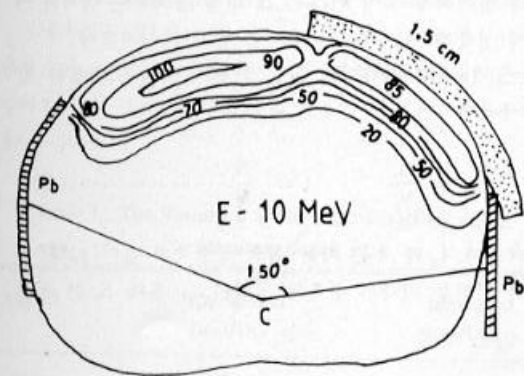


Fig. 12. Isodose distribution for a 10 MeV electron beam using 1.5 cm bolus in part of the arc.

그림 9는 회전 중심축을 변화시키면서 8, 10, 12MeV에 대한 중심축의 심부백분율 80% 선량지점의 깊

이를 조사면의 크기에 따라 각각 표시하였으며 모든 곡선이 회전 중심깊이가 증가될 때 회전조사의 투과력은 증가하였다.

2) 선량분포의 변화

고정조사면은 피부 곡면으로 인한 공간 간격에 의하여 불균일한 선량분포를 이룰 뿐만 아니라 서로 상이한 에너지를 인접하여 조사할 경우 선량 과도 및 과소지점이 발생하여 온전한 치료효과를 얻지 못한다(그림 10).

회전 치료법은 곡률중심 방향, 즉 피부 곡면에 수직방향으로 전자선이 조사됨으로 선량분포가 균일하며 그림 2와 같이 회전 조사방법을 계획하고 일부분에 bolus를

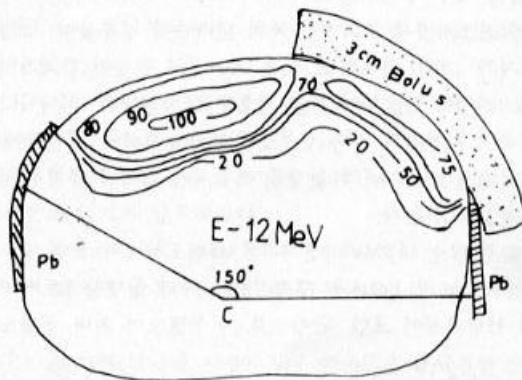


Fig. 13. Isodose distributions for a 12 MeV beam using 3 cm bolus in part of the arc.

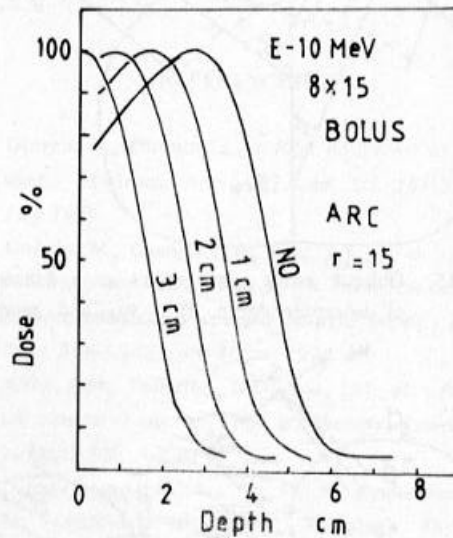


Fig. 14. The effect of added bolus on central axis depth dose distribution, arc angle is 150°.

부착시킴으로서 동시에 다른 에너지를 인접한 것과 같이 bolus를 부착시킨 부분의 심부율이 표면쪽으로 이동하였으며 등량곡선의 심한 굴곡없이 균등한 선량분포를 이루고 있다.

그림 10은 10 MeV 전자선을 조사면 (8×15 cm), 선원과 회전중심 사이의 거리 100 cm, 회전중심의 깊이가 15 cm, 회전각 150°로 회전조사하였을 때의 선량분포로서 곡면에 따라 균일하게 분포되었다.

그림 11은 10 MeV 전자선 회전조사에서 곡면 일부분을 1.5 cm의 와세린 bolus를 첨부하였기 때문에 표면의 선량은 증가하였고 최대 선량지점의 선량은 약 10% 감소했으며 심부경사는 10 MeV 전자선의 경사와 같았다.

회전조사에서 조사면의 폭이 넓을수록 심부율이 고정조사와 거의 일치하고 오염 X-선의 선량이 감소되며 조사시간도 단축되어 가장 적합한 조사방법의 하나이고 더욱이 회전각의 양쪽 끝부분에 5 mm두께의 납판을 놓으므로 가장자리의 선량을 격감시켜 경계가 분명한 선량분포를 얻는다.

그림 12는 12 MeV 전자선의 회전조사에서 표면 일부분에 3 cm의 bolus를 부착시켰을 때의 선량분포로서 최대 선량지점이 표면 근방으로 이동했으며 최대 선량도

약 75%로 감소하였고 비정거리도 단축되었다.

그림 13은 10 MeV 전자선 회전조사에서 bolus의 두께를 1~3 cm로 증가하였을 때 심부율을 표시한 것으로서 1 cm에 약 2 MeV씩 감소된 에너지의 심부율과 같다.

IV. 고 찰

회전조사에 의한 등량곡선은 고정조사에 의한 것보다 다소 변형이 되며 이것은 움직이는 선속의 속도효과에서 많은 영향을 받고 있다.

즉 회전 중심축에 가까운 점의 회전속도는 감소되고 멀리 떨어진 점 보다 선량이 증가되어 그림 4와 같이 심부율이 증가하였으며 Cunningham과 Wright는 회전운동 조사에서 표면의 선량감소 현상은 선속의 확산에 기인됨을 보고하였다.

또 다른 변형요인은 회전운동에서 생기는 경사입사 효과로서 이는 회전 중심축의 깊이가 다를 때 발생되며 속도효과와 거의 반대현상이다.

그림 15는 10 MeV 회전조사에서 5 cm 깊이의 중심선량은 경사입사 때문에 r = 18 cm보다 r = 9 cm에서 더 증가했으며 최대 선량지점 (D_{max})이 표면쪽으로 더 가까워졌다.

일반적으로 회전중심의 깊이가 감소되면 경사각의 효과는 증가되며 중심 선속의 심부율은 표면쪽으로 이동된다.

조직내 일정한 깊이의 선량은 회전 중심축의 깊이에 따라 상이하게 되며 이것은 그 점을 통과하는 선속의 시간과 선속의 폭, 거리의 역자승 법칙에 관계된다.

그림 16에서 선속내에 있는 P점의 시간은 다음과 같이 주어진다.

$$t_0 = \frac{S_0}{V_0}, \quad t = \frac{S}{V} \quad \text{----- ①}$$

여기서 t₀와 t는 각각 회전 중심축의 깊이 r₀와 r에서 P점을 지나는 선속의 시간이고, S와 S₀는 선속

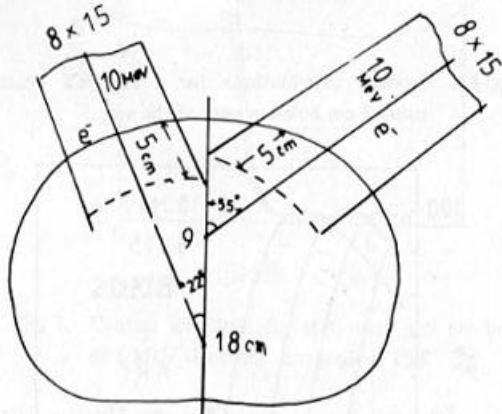


Fig. 15. Oblique entry angle effect as a function of isocenter depth, field size and energy.

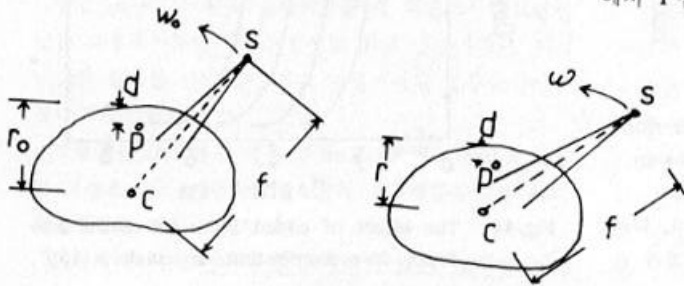


Fig. 16. A diagram defining the parameters used in the calculation of the arc beam dose as a function of isocenter depth.

의 폭이며 V_0 와 V 는 P점의 회전속도이며 이것은 다음과 같이 주어진다.

$$V_0 = (r_0 - d)W, \quad V = (r - d)W \quad (2)$$

여기서 W 는 각속도이며 d 는 표면과 P점 사이의 길이이다.

$$\therefore t_0 = \frac{S_0}{(r_0 - d)w}, \quad t = \frac{S}{(r - d)w} \dots\dots (3)$$

그리고 $S = S_0 \frac{f - r + d}{f - r_0 + d}$ 이므로 $\dots\dots (4)$

P점의 선량은

$$D(r) = \dot{D}(r)t, \quad D(r_0) = \dot{D}(r_0)t_0 \quad (5)$$

$$\dot{D}(r) = \dot{D}(r_0) \left(\frac{f - r_0 + d}{f - r + d} \right)^2$$

여기서 $\dot{D}(r)$ 와 $\dot{D}(r_0)$ 는 고정 조사면에 의한 선량율이고 f 는 선원과 회전 중심축 사이의 거리이다.

위의 식을 결합시키면 P점의 선량 $D(r)$ 와 $D(r_0)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$D(r) \approx D(r_0) \left(\frac{r_0 - d}{r - d} \right) \left(\frac{f - r_0 + d}{f - r + d} \right) \dots\dots (6)$$

이 방정식은 폴리스티렌 phantom을 이용하여 확인할 수 있으며 회전중심 깊이에 따른 비율 $K = D(r) / D(r_0)$ 는 표 1에 표시하였으며 여기서 P점과 표면과의 길이 d 는 3cm, 선원과 회전축 사이의 거리를 1m로 하였고 처음 회전중심의 깊이(r_0)를 16cm로 하였다.

실재측정은 TLD-100 (4 × 4 × 1mm) chip을 이용하였으며 측정치와 계산치는 거의 일치하였고 회전중심 깊이(r)가 1cm씩 감소되면 P점의 선량은 약 5~6% 증가하였다.

Table 1. The Variation of the ratio $D(r)/D(r_0)$ with isocenter depth

r (cm)	Calculated $D(r)/D(r_0)$	Measured $D(r)/D(r_0)$
18	0.819	0.8
15	1.000	
12	1.286	1.3
10	1.622	1.7
8	2.223	2.1

V. 결 론

고에너지 전자선 치료에서 유방암등 넓고 곡면을 이루는 흉벽과 3~5cm 깊이의 내부 유선(internal mammary nodes)을 동시에 조사하기 위하여 bolus를 이용한 회전조사 방법을 계획하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 회전조사는 고정조사 보다 곡면에 균등한 선량을 부여한다.

2) Bolus를 이용하여 심부율을 조정함으로써 동시에 흉벽과 내부 유선을 치료할 수 있다.

3) 회전조사는 고정조사 보다 표면선량이 적고 최대 선량지점이 깊어지며 어떤 깊이에서 급격한 선량감소 현상이 있다.

4) 회전 중심축이 얕을수록 심부율이 감소하며 최대 지점이 표면쪽으로 이동한다.

5) 회전조사의 폭과 조사면이 증가할수록 고정조사의 선량분포와 거의 일치하였다.

6) 회전조사에서 bolus를 부착한 부위의 선량은 표면에서 급격히 증가하였으나 최대 선량지점은 감소되었다.

7) 5mm의 납판을 가장자리에 놓으므로 급격한 선량경사를 얻을 수 있었다.

이상과 같이 회전조사에 의한 선량변화를 검토함으로써 최적의 선량분포를 얻을 수 있어 전자선 치료의 향상을 도모할 수 있었다.

REFERENCES

1. Dutreix, J., Dutreix, A. : *Film dosimetry of high energy electrons. Ann. NY Acad. Sci. 161:33-43, July 1969.*
2. Goitein, M., Chen G.T.Y., Ting, J.Y., et al. : *Measurements and calculations of the influences of thin inhomogeneities on charged particle beams. Med. Phys. 5:265-273, July-August 1978.*
3. Khan, F.M., Fullerton, G.D., Lee, J.M., et. : *Physical aspects of electron-beam arc therapy. Radiology 124:497-500, August 1977.*
4. Cunningham, J.R., Weight, D.J.A. simple facility for wholebody irradiation. *Radiology 78:941-948, June 1962.*
5. Rueggsegger, D.R., Lerude, S.D., Lydle, D. : *Elec-*

tron- beam Arc Therapy Using a High Energy Betatron. Radiology 133:483-489, November 1979.

6. Leavitt, D.D. : *A technique for optimization of dose distributions in electron rotational therapy. Presented at AAPM Annual Meeting, San Francisco, 30 July - 3 August 1978.*
7. Feldman, A., de Almeida, C.E., Almond, P.R. :

Measurements of electron-beam energy with rapid-processed film, Med. Phys. 1:74-76, March-April 1974.

8. Nath, R., Schulz, R.J. : *Modification of electron-beam dose distributions by transverse magnetic fields. Med. Phys. 5:226-230, May-June 1978.*