

## 고에너지 광자선 조사면내 계층필터의 응용\*

계명대학교 의과대학 치료방사선과학교실

최 태 진 · 김 옥 배

= Abstract =

### The Application of Step Filter in High Energy Photon Beams

Tae Jin Choi, ME; Ok Bae Kim, MD

*Department of Therapeutic Radiology, Keimyung University  
School of Medicine, Taegu, Korea*

The half-value layer (HVL) of cerrobend alloy [ $\rho=9.4\text{g/cc}$ ] was examined by experimental measurements for 6MV X-ray beams.

The output factors are a function of field size, thickness of attenuator, especially those factors for a blocked field are less than that for the collimator open field size.

Measured dose distributions under attenuators, which are blocked with partially transmitted slab at whole field size, were presented.

The expected dose distributions under partial attenuators agree well with measured data, which has shown that partial attenuator method can be applied in radiation treatment planning.

#### 서 론

방사선치료시 정상조직을 정확하게 보호하는 작업은 환자의 내용선량을 증가시켜 주고, 종양에 더 많은 선량을 주게 되어 치유율을 올리는 데 큰 영향을 주게 된다.

고에너지 X-선의 차폐는 주로 납 또는 cerrobend alloy 등이 사용된다. 이러한 차폐물이 일차선속내 놓여지면 출력선량율, 심부선량배분을 및 산란계수 등이 변하게 될 것으로 생각되며, 종양에 도달하는 선량을 정확히 평가하고자 하는 연구가 필요하게 된다.

조사면내 종양의 외곽을 차폐하는 경우 종양에 기여되는 산란선량이 감소되어 심부선량율의 교정이

필요해진다. 한편 중심선속에 필터를 두면, 선량평가의 기준이 되는 선량최대점의 선량이 변하여 치료계획에 어려움을 주게 된다. 그러나 방사선의 차폐를 이용한 투과성 필터의 응용은 조직의 밀도, 장기의 방사선감수성에 따라 선량을 보정시킬 수 있으므로 그 잇점이 부각 되고 있다.

특히 임상에서 폐종양 치료시에는 척수에 선량이 과다하게 도달되는 것을 방지하여야 하고, 주위 임파절에 적절한 치료선량이 도달되도록 선택적조사가 되어야 한다.

저자들은 이를 해결하기 위해 계층필터를 사용함으로써 선택적조사가 가능하였기에 그 결과를 보고코자 한다.

\* 이 논문은 1989년도 계명대학교 응용연구비 및 동산의료원조사 연구비로 이루어졌음.

재료 및 방법

이론적 배경

조직내 한 점의 선량은 일차선량과 산란선량의 합으로 구할 수 있다. 동일 선원-피부간 거리에서 조사면내 일차선량은 일정하나 산란선량은 콜리메타와 조직내의 산란으로 구분되고, 이들 산란선에 의해 조사면의 크기에 따라 평가되는 출력선량율은 변한다. 조사면 10x10cm<sup>2</sup>의 선량 최대점(Dmax)의 선량에 대한 다른 조사면의 선량 비를 출력선량계수(output factor, Of)라고 정의 한다<sup>1)</sup>.

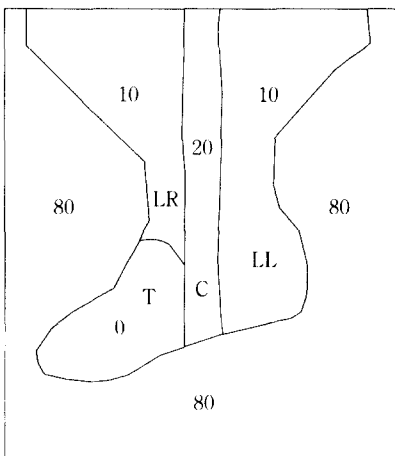


Fig 1. Design of partial attenuator for lung field in 6MV X-ray Beams.

The numeric values showed the thickness [mm] of cerrobend alloy, and 10 mm thick of partial attenuator is for lung, 20 mm for spinal cord. The "0" mm means open site for primary tumor.

Fig 1과 같이 동일 조사면내 차폐물질의 두께를 각부위 별로 달리함으로써 조직내 도달되는 선량을 적절히 제어함으로써 종양부위에는 정상 부위보다 많은 선량이 도달되도록 하며, 더욱 중요한 것은 종양의 크기나 모양에 따라 적절한 선량을 줄 수 있다.

조직내 한 점의 선량(Dp)의 변수는 에너지(E), 조사면(A), 선원피부간의 거리(SSD), 차폐판과피부간의 거리(TSD), 조직밀도(ρ)등에 따른 함수이다. Water phantom을 이용하여 조사면에 대한 심부선량곡선을 취한다면, 깊이 d인 점의 선량강도(I)는 다음과 같이 지수함수로 나타낼 수 있다. 즉

$$I [A,d] = I_0 [A,dm] \exp\{-u(d-dm)\} \quad \dots (1)$$

여기서 d, dm은 각각 측정점의 깊이와 선량최대점이며, μ는 평균선평수계수 이다. 또한 중심선속의 조직내 선량(Dp)은 선량최대점을 기준으로 한 심부선량백분율(PDD)과 기준조사면(Ao)의 선량(D(Ao))에 대한 조사면의 출력선량계수(Of(A))로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$Dp(E,A) = D(Ao) \cdot Of(A) \cdot PDD(E,A,SSD,\rho) \quad \dots (2)$$

한편 중심선속 이외의 조직내 선량(D[x,y,z])은

$$D[x,y,z]_{E,A} = \int I_0 [E,A] e^{-\int \mu[x,y,z] dz} dE \quad \dots (3)$$

과 같이 된다. 여기서 μ는 물질의 선평수계수이며, D[0,0,dm]에서 I<sub>0</sub>는 초기선량이며 중심선속에서 D(Ao)가 되어짐을 알 수 있다.

조사면내 차폐물을 투과한 X선의 량D(Ao)은

$$D(Ao) = I_0 \cdot \exp\{-\int \mu x' dx'\} \quad \dots (4)$$

으로 구할수 있다<sup>2)</sup>.

상기식에서 차폐물질이 균등하다면

$$D(Ao) = I_0 \exp\{-\mu t\} \quad \dots (5)$$

로 쓸 수 있다.

Johns<sup>3)</sup>에 의하면 식2의 실험적 측정에 의한 선량분포의 profile곡선은 적절한 실험상수를 사용하여 구할 수 있음을 보였다.

Dose profile은 조사면의 폭과 콜리메타의 구조에 따라 발생된 산란선의 영향에 따라 다음과 같이 주어진다. 즉 중심선속에서 X cm떨어진 점의 선량P(x)는

$$P(x) = 1.0 - 0.5 \exp\{(-a1/p) [(wd/2) - |X|]\} \quad \text{for } |X| < wd/2 \quad \dots (6a)$$

$$P(x) = t - (0.5-t) \exp\{(-a2/p) (|X| - wd/2)\} \quad \text{for } |X| > wd/2 \quad \dots (6b)$$

로 주어지며, 식에서 a1, a2는 실험상수이며, wd는 조사면의 한변 크기(cm), t는 콜리메타의 유효투과를 나타내고, P는 기하학적 반음영을 의미한다.

물질내 산란선량을 계산하기 위하여 선량최대점의 유효일차선량에 대한 환토크내 임의의 점에서 산란된 선량의 비(Scatter Maximum Ratio, SMR)를 이용하며 SMR은 아래와 같이 표현된다<sup>4)</sup>.

$$SMR(d,A) = TMR(d,A) \{Sp(A)/Sp(0)\} - TMR(d,0) \quad \dots (7)$$

여기서 TMR은 최대선량이 되는 기준깊이의 선량에 대한 펜툰내 임의의 점의 선량 비를 의미하며, 심부선량백분율로부터 계산하거나 또는 실측으로 구해진다. 그리고 TMR(d,0)은 일차선량을 뜻하게 된다. 방사선조사면내 일부 차폐된 조직 부분의 선량은 일차선량과 profile 곡선 및 차폐된 부분의 조직에 기여될 SMR(d,A)의 양으로써 예상될 수 있다. 즉 펜툰내 임의의 점에서 선량  $Dp[x,y,d]$ 는 기존의 개방조사면의 출력선량과 TMR로부터 아래와 같이 구할 수 있다.

$$Dp[x,y,d] = d(A_0) \cdot e^{-\mu} \{TMR(d,Ad) + SMR(d,Ad)\} \cdot Sp(0)/Sp(A) \quad \dots (8)$$

여기서 d는 표면에서 측정점까지의 깊이, Ad는 그 깊이에서의 조사면의 크기를 나타낸다.

### 방 법

실험에 사용된 방사선에너지는 국내에서 가장 많이 이용되고 있는 6MV X선을 선택하여 차폐물의 방사선흡수 특성을 조사하였다.

실험에 사용된 차폐체 cerrobend alloy는 납 26.7%, 비스무스 50%, 카드뮴 10.0% 및 주석 13.3%의 중량비로 구성되어 밀도가 9.4g/cc이며, 용융점이 약 섭씨 70도로 가공이 용이하고 방사선차폐효과가 뛰어난 것으로 알려져 있다<sup>3)</sup>.

일반적으로 X-선 연속에너지 분포를 보이며, 필터를 통과한 후 평균에너지는 더 커지게 되므로, 필터의 두께가 0에서 5cm까지 변화되었을 때, 각 차폐체를 통과한 선형가속기의 X-선 에너지는 TG-21규정에 따라 측정 조사되었다<sup>6)</sup>.

6MV X-선의 SMR(A)은 실측된 TMR표로부터 식7을 이용하여 구하였으며, Sp(0)은 후방산란계수(BSF[Ao])의 역수를 취하여 얻었다.

실험적 계측은 환자치료시 많이 이용되고 있는 선원과 검출기의 중심간 거리를 100cm SAD로 설정하였으며, 방사선조사면은 폐종양 치료에 쓰일 정도의 크기인 22x27cm<sup>2</sup>였으며, 이 조사면내 Fig 1과 같이 부분적으로 두께를 달리하여 종양 및 방사선감수성이 다른 장기에 각각 다른선량이 도달될 수 있으며, 도달선량이 예상가능하고 인위적으로 제어할수 있는지 확인하였다.

폐종양 조사면내 내용선량이 비교적 낮은 척수에는 종양선량에 비해 약 20-30% 적게 도달되도록 필터의 두께를 결정하였다.

방사선조사 방향은 전후 평행2분조사를 실시하였으며, 전방향 조사면의 차폐에서 정상장기 및 조직에는 8cm 두께의 필터를 사용하였고, 종양 부위에 비해 인과절 부위에는 약 10% 정도 적은 선량이 도달되도록 2mm 두께의 납판으로 차폐시켰다.

후방 조사면에서는 종양부위를 제외한 전조사면에 1cm 두께의 필터를 쓰고 특히 척수에는 폭 2cm에, 두께 2cm의 필터를 사용하였으며, 각 부위에 도달되는 선량 분포는 IC-10 전리상 검출기로 스캔되었다.

### 결 과

선형가속기의 6MV X선에 의한 cerrobend alloy의 방사선흡수 특성에서 유효선흡수계수( $\mu_{en}$ )는 5x5 cm<sup>2</sup>의 좁은선속으로 측정된 결과 0.4489를 얻었으며, 이 차폐체의 제1반가층은 1.43g/cm<sup>2</sup>으로 나타났다.

cerrobend alloy는 밀도가 9.4g/cc으로 11.3g/cc인 납에 비해 반가층의 두께는 더 크나 용융점이 섭씨 70도 임으로 모형 제작이 매우 용이 한 잇점이 있어 차폐체로서 많이 활용되고 있다.

선량 제어는 조사면내 각장기의 내용선량과 종양선량에 따라 이루어지며, 필터에 의한 일차선의 감쇄정도가 각 부위별로 유도되어 부위별 필터의 두께가 결정되어지게 된다.

이와같은 필터를 통과한 방사선은 평균에너지가 변하여 심부선량백분율에 영향을 줄수 있는지 조사되었다.

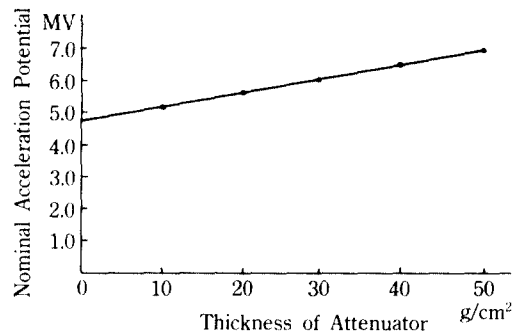


Fig 2. Nominal linear accelerator potential [MV] as a function of thickness of attenuator.

선형가속기의 6MV X-선은 필터를 통과한 후 에너지경화가 일어남을 알 수 있었다. 즉 TG-21규정에 따라 측정된 명목상 에너지는 Fig 2와 같이 개방조사면(10x10cm<sup>2</sup>)에서 4.6MV 였으며, 1.8g/cm<sup>2</sup>, 5.0g/cm<sup>2</sup>를

각각 투과한 X-선은 5.3MV와 6.3MV를 각각 나타내었으므로 partial attenuator에 의한 에너지 변화는 이온전리함의 전리량으로 부터 조직흡수선량을 결정하는 데 별 영향을 주지 않을 것으로 생각된다.

방사선 조사면의 크기에 따라 콜리메타에서 산란된 선량은 조직내 흡수선량에 직접 기여하게 되어 출력선량계수의 변화를 가져다 준다<sup>2)</sup>. Fig 3은 6MV X-선의 각조사면 크기와 콜리메타에 의한 출력선량 변화율과 TMR에 영향을 주는 조직내 산란계수로 실측에 의해 얻어진 것이다.

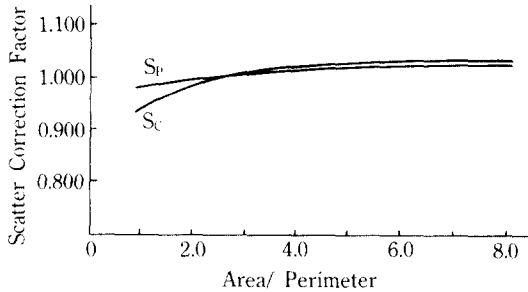


Fig 3. Collimator scatter correction factor(Sc) and Phantom scatter correction factor (Sp) as a function of field size (A/P).

콜리메타에 의한 산란은 기준조사면보다 작은 조사면에서 변화가 크게 나타났다. 이것은 콜리메타의 산란면의 면적에 의존 된다고 사료된다. 그러나 조직내에서 산란은 고에너지 일수록 산란각이 좁아지고 전방산란이 되므로, 본실험의 6MV X-선 조사면의 변화에 따른 조직내 산란율의 변화는 10x10cm<sup>2</sup> 조사면을 기준으로 불과 ±4%이내에 있음을 알 수 있었다. 조직내 방사선량은 일차선속과 콜리메타 및 조직내 산란선량의 합으로 결정되므로 고에너지 방사선에서 조직에 조사될 조사면의 크기보다는 콜리메타의 개방면적에 더 큰 영향을 받게 됨을 알 수 있고 특히 조사면적이 작을 때 더욱 영향이 커질 것으로 보인다.

조직내 도달되는 선량율은 TMR(d,0)와 SMR(d,A)의 합으로 구할 수 있다. SMR은 조사면의 크기와 깊이에 따라 달라지며, Fig 4와 같이 나타났다.

상기 그림에서 볼 때 조사면이 클수록 종양에 도달되는 산란선의 기여가 커지며, 깊이가 깊어질수록 산란이 많이되지만 15cm깊이에서 최대를 보였다. 이것은 산란선의 에너지와 비정에 의한 것으로 추측된다<sup>3)</sup>.

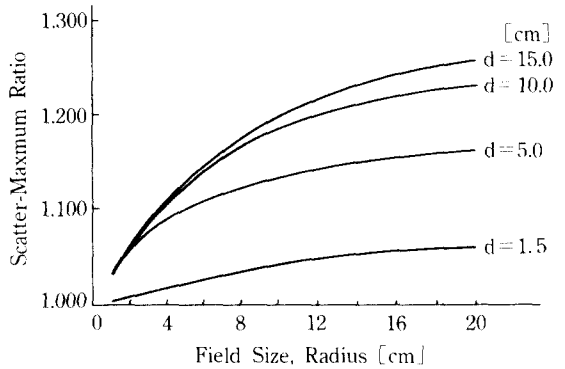


Fig 4. Scatter Maximum Ratio as a function of the radius of equivalent field size.

임상방사선치료에서 폐종양 조사면의 크기는 위로 상쇄골과 아래로 횡격막부위에 이르며, 좌우편의 정상폐의 일부분이 포함되는 경우가 많다. 전후방 조사면의 크기가 22x27cm<sup>2</sup>일때, 조사면내 필터의 두께를 결정하는 일은 식5와 7을 이용하였으며 개방조사면의 점 선량(point dose)에 대한 필터에 의한 점 선량의 비를 계산한 예상치와 실측치는 표 1과 같이 얻어졌다.

Table 1. Expected ratio of dose under partial attenuators at Dmax depth to open field at same depth (22x27cm<sup>2</sup> field size, 6MV X-ray beams)

Filter Thickness [cm]	Expected value [a]	Measurement Mean value [b]	Mean Error [a/b] [%]
0.2	0.929	0.950 + 0.016	-2.2
1.0	0.648	0.628 + 0.019	3.2
1.5	0.518	0.508 + 0.012	2.0
2.0	0.414	0.403 + 0.014	2.7

예상치와 실측치의 차이는 평균 3%이내의 오차를 보였으며, 이것은 필터의 제작과 실험측정 오차에 기인하는 것으로 여겨지며, 실험에 의해 임상적용이 충분히 가능함을 확인하게 되었다.

Fig 1과 같은 조사면의 각 부위별로 도달되는 선량을 달리함으로써 종양에 특히 더 많은 선량을 주고자 하여 종양(T), 좌우측 폐부(LLLR) 및 척수(C)부위에 각각 0, 2.0, 10.0과 20.0mm의 cerrobend alloy 필터로 선속을 수정하였다.

Fig 5a, b는 각각 fig 1의 중심선축 하방 4cm를 중

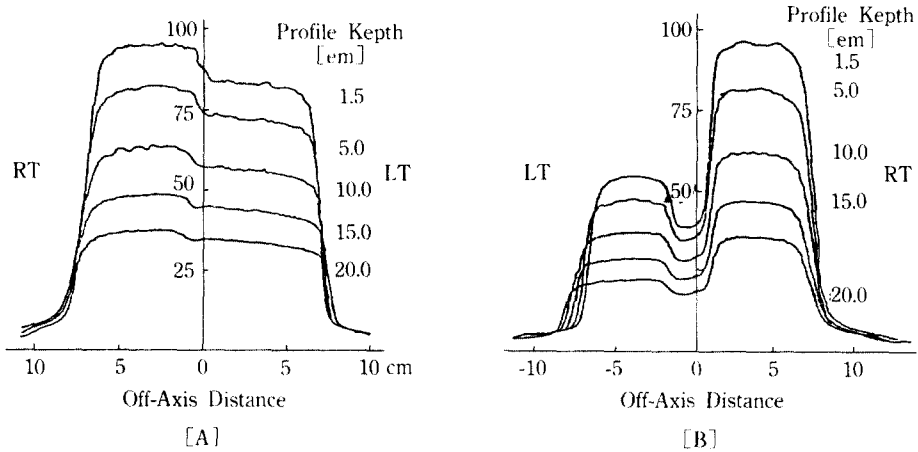


Fig 5. Dose profile of A-P [A], and P-A [B] field 22x27 cm<sup>2</sup> with partial attenuator in 6MV X-ray beams.

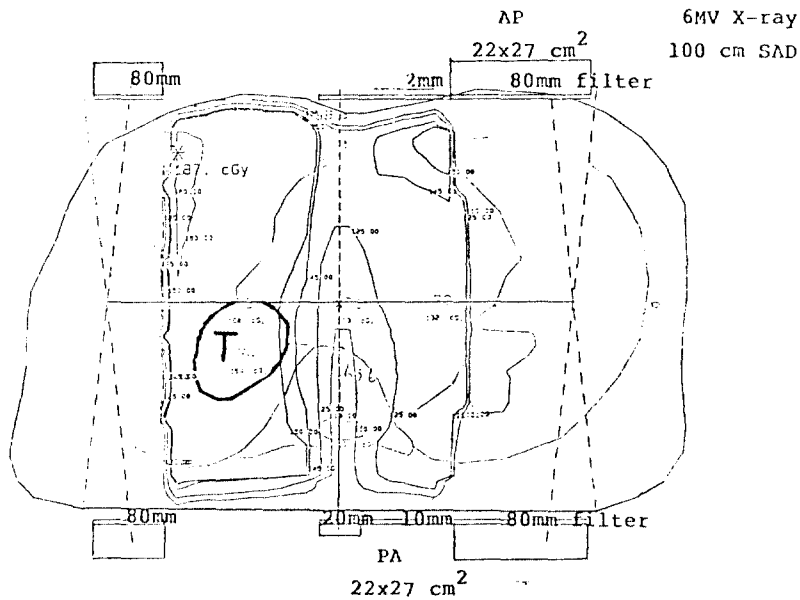


Fig 6. Dose distributions of lung tumor irradiations with step filters for partial attenuation in 6MV x-rays.

심으로 profile한 것으로 선량곡선에서 높은 부분은 조사면내 개방된 부분이고, 다른 부분은 필터에 의해 일부 차폐된 효과를 보이고 있다.

Fig 5a는 전방조사면의 선량분포로서 2.0mm필터를 투과한 선량이며, Fig 5b는 개방된 부분, 10mm와 20mm의 필터를 각각 투과한 선량이다.

고찰

투과성필터의 재질은 방사선차폐효과가 크고, 가공이 용이하며, 균질한 밀도를 가지며, 강도가 커야 되는 점에서 cerrobend alloy는 납의 83%에 해당되는

밀도(9.4g/cc)를 가지고 있으며, 용융점이 약70도이므로 가공이 매우 용이 하며, 균질하고 또 상온에서 강도가 납보다 강하여 차폐체나 투과성필터로 이용되고 있다<sup>1)</sup>.

일반적으로 조사면의 차폐는 5-6만가층의 두께로 차폐함으로써 충분히 정상 장기를 보호할 수 있다<sup>10)</sup>. 그러나 투과성필터는 각 장기에 도달하는 선량에 차이를 두는 것이 부적이므로 약 2만가층의 두께(일차선량의 25% 정도임)이면 그 효과를 가질 수 있다고 본다.

방사선차폐체 또는 투과성 필터가 측정의 기준이 되고 있는 조사면의 중심선속에 놓이면 일차선량과 산란선량의 감약비가 알려져 있지 않으므로, 전 조사면의 선량분포 계산에 오차를 크게 유발하게 된다.

투과성필터로 이용한 cerrobend alloy의 6MV X-선에 대한 유효흡수계수는 0.4489였으며, 이것은 Ellen등이 측정 한 값보다 약6% 낮았으나, 사용한 X-선의 유효에너지에 있어서 차이가 있는 것으로 생각된다.

조사면의 중앙이 2만가층 두께 이내의 필터로 차폐될 때 에너지의 변화가 크지 않으므로 심부선량 백분율 또는 TMR, SMR의 크기에 영향을 별로 주지 않을 것으로 보아진다.

투과성필터 아래의 선량을 일차선만의 감약 보정에 의한 때 예상치가 실측치보다 10% 이상 낮았음이 밝혀졌다<sup>1)</sup>.

따라서 투과성필터 아래의 선량은 일차선량의 감약과 산란선량의 기여 정도를 계산함으로써 임의의 깊이에 도달되는 선량을 큰 오차 없이 예상할 수 있을 것으로 본다.

저자들이 사용한 투과성계층필터하의 선량기대치와 실측치에는 평균 3%이내의 오차를 나타내었다. 이것은 개인오차와 계기오차에 의한 것으로 임상에 충분히 적용할 수 있을 것으로 확신된다.

Fig. 6은 폐종양 조사부위에 투과성 계층필터를 사용함으로써 중앙(T)에 조사되는 선량과 좌우측 폐조사부위, 종격동 및 척수에 도달되는 선량이 1회 조사당 각각 165,150,136와 110 cGy가 되도록 치료계획을 설정할 수 있었음을 보인다.

### 요 약

폐종양 치료시 평행2문조사로서 중앙선량과 척수선량 또는 임파절의 치료선량을 선택적으로 조사하기

위하여 cerrobend alloy를 이용하여 방사선투과성 계층필터를 제작하였다.

고에너지 방사선차폐체로 이용되는 cerrobend alloy의 6MV X-선에 대한 유효흡수계수(μeff)는 0.4489로 측정되었으며, 반가층은 1.54cm였다.

선량의 부분감쇄를 이용한 계층필터 아래의 조직 흡수 선량을 일차선량의 감쇄와 조직내 흡수선량의 합으로 계산된 예상치와 실측치는 약3%이내의 오차를 보였으므로 필터를 이용한 선량의 선택적 제어가 가능하다고 생각된다. 그리고 이러한 오차는 필터 제작과 측정오차에 기인한다고 본다. 조사면 22x 27cm<sup>2</sup>의 폐종양 치료부위의 합성선량분포는 치료부위를 기준으로 종격동에 90%, 척수에는 80%의 선량이 도달되도록 필터의 두께를 결정할 수 있었다.

저자들이 이용한 식으로부터 계층필터에 의한 출력선량과 조직내 흡수선량의 계산은 전산화치료계획에서 기준선량을 정하는 한 지침이 될 것이다. 계층필터의 응용 확대는 종양의 모양과 일치하는 합성선량분포를 얻게해줄 것이며 나아가서 조직밀도의 차이에 의한 선량 보정이 가능하리라고 확신한다.

### 참 고 문 헌

1. Khan F: *The Physios of Radiation Therapy*, ed 1. Baltimore/London, Williams & Wilkins, 1984, pp 162-180.
2. Hubbell JH: *Photon Cross Seotions, Attenuation Coefficients, and Energy Absorption Coeffioients from 10 KeV to 100 GeV*, NSRDS-NBS29. 1969, pp 3-5.
3. Jhons HE: *The Physios of Radiology*, ed 4. Springfield, Charles Thomas, 1983, pp 336-380.
4. Khan FM: *The Physios of Radiation Therapy*, ed 1. Baltimore/London, Williams & Wilkins, 1984, pp 182-188.
5. Ellen E, El-Khatib, Ervin B, et al: Broad beam and narrow beam attenuation in Lipowitz's. *Med Phys* 1987; 14(1): 135-139.
6. Task Group 21, Radiation Therapy Committee: A protocol for the determination of absorbed dose from high-energy photon and electron beams. *Med Phys* 1983; 10(6): 741-771.
7. Meli JA: Output factors and dose calculations for blocked x-ray field. *Med Phys* 1986; 13(3): 405-408.

- 
8. Brown LH: Day's integration of scatter dose with an analytical expression. *Med Phys* 1981; 8(2): 184-189.
  9. Khan FM: *The Physics of Radiation Therapy*, ed 1. Baltimore/London, Williams & Wilkins, 1984, pp 274-278.
  10. ICRU report 24: *Determination of Absorbed Dose in a Patient Irradiated by Beams of X or Gamma Rays in Radiotherapy Procedures*. 1976, pp 4-14.