

4~10 MV X-선의 쐐기(wedge) 필터의 투과율과 출력계수, 선축상 선량분포의 변화에 관한 연구*

강위생

서울대학교 의과대학 치료방사선과학교실

초 록

쐐기필터를 통과한 방사선은 잦아진 일차선의 스펙트럼과 일치하지 않는다. 4~10 MV 엑스선의 15~60° 쐐기조사면에 대한 선량계산에서 쐐기에 의한 엑스선의 경화효과의 적용과, 조사면계수의 보정의 필요성 여부를 확립하고, 쐐기필터의 투과율 측정조건을 확립하는 것이 이 연구의 목적이다.

4 MV(Clinac 4/100, Varian), 6 MV(Clinac 6/100와 Clinac 2100C, Varian), 10 MV(Clinac 2100C, Varian) 엑스선의 민조사면과 15, 30, 45, 60°의 쐐기조사면의 깊이선량분포를 이온함으로 물에서 깊이 30 cm까지 측정하였다. 측정된 깊이선량율을 이용하여 광자선경화계수를 계산하였다. 쐐기필터의 조사면계수와 투과율은 최대선량점 깊이(d_{max})에서 측정하였다. 4MV 엑스선과 6MV 엑스선의 쐐기각과 쐐기조사면의 크기, d_{max} 보다 깊은 곳에서 깊이에 관계없이 광자선경화계수는 1보다 컸으며, 쐐기각과 깊이에 따라 증가하는 추세를 보였으나 조사면크기에는 거의 무관하였다. 조사면크기 $10 \times 10 \text{cm}^2$ 에 대해 15cm 깊이에서 4MV 엑스선의 광자선경화계수는 15, 30, 45, 60° 쐐기각에 대하여 각각 1.010, 1.014, 1.023, 1.034 이었으며, Clinac 6/100의 6MV 엑스선의 경우는 각 쐐기각에 대하여 1.005, 1.008, 1.019, 1.024, Clinac 2100C의 6MV 엑스선의 경우는 각각 1.011, 1.021, 1.032, 1.036, 10MV 엑스선의 경우는 각각 1.008, 1.012, 1.012, 1.012였다. 10MV 엑스선의 경우는 광자선경화계수가 1.2% 이내로 1이었다. 6MV 엑스선의 경우 광자선경화계수는 치료기의 영향도 있음이 밝혀졌다. 광자선경화계수와 깊이는 선형관계였다. d_{max} 에서 쐐기필터에 대한 출력계수는 민조사면에 대한 값과 비교해서 $15 \times 15 \times 14 \text{cm}^3$ 크기의 조사면을 제외하고는 거의 일치하였으며, 최대 차이는 4MV 엑스선에 대한 것으로서 1.4%였다. 쐐기투과율을 정할 때 측정하는 위치의 깊이가 d_{max} 인 경우는 조사면크기에 대한 의존성을 무시할 수 있지만 다른 깊이에서는 그렇지 않다. 4~6MV 광자선의 쐐기조사면에 대한 선량분포나 MU계산에서 광자선경화계수가 고려되어야 할 것이다. 그러나 10MV 엑스선의 경우는 무시해도 될 것이다. 쐐기 투과율을 정하는 위치가 d_{max} 나 공기중이라면 민조사면에 대한 출력계수를 적용할 수 있지만 다른 깊이에서는 쐐기필터 각각에 대한 출력계수를 또는 조사면크기에 따른 쐐기투과율을 적용해야 할 것이다.

Keyword : 쐐기 필터, 쐐기 투과율, 출력계수, 광자선경화계수

* 이 연구는 1990년도 서울대학교병원 임상진료연구비의 지원에 의하여 수행된 것임.

서 론

썬기필터는 선량분포 변경체로서 광자 방사선치료에서 늘 이용되는 기구이다. 썬기필터를 통과한 광자선은 잦아진 일차선과 썬기에서 오는 산란선으로 구성되어 있다.¹⁾ 산란선은 썬기에 의해 추가된 방사선이므로 일차선과 스펙트럼이 일치하지 않는 것은 분명하며, 물질과 광자선의 서로작용의 에너지 의존성 때문에 썬기에 의해 잦아진 일차선도 민조사면의 일차선의 스펙트럼과 일치하지 않을 것이다. 이와 같이 스펙트럼의 변화로 말미암아 썬기조사면의 깊이선량분포와 조사면계수도 민조사면에 대한 것과 일치하지 않을 것이 명백하다.

그럼에도 불구하고 썬기필터를 설계할 때는 일차선의 잦아지기 현상만을 고려하는 것이 일반적이다.²⁾ 이에 바탕을 두고 방사선치료계획에서 썬기효과 자체가 고려될 수 없는 민조사면에 대한 깊이선량분포와 조사면계수에 대한 자료를 썬기에 대해 그대로 이용하는 것이 일반적인 현실이다.²⁻⁵⁾ 단지 썬기조사면의 선량분포에 관한 자료로 기준 조건에서 썬기의 투과율과 몇 개의 깊이에서 측정된 썬기조사면의 측방선량분포만 이용되고 있다.

국제방사선단위계측위원회(International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU)는 방사선치료의 전 과정에서 선량의 오차가 $\pm 5\%$ 이내여야 한다고 권고하고 있다.⁶⁾ 이에 비취볼 때 썬기에 의한 방사선의 경화가 선량계산에 무시되어도 좋을지 고려해 볼 필요가 있다. 선량무게(weight)를 정하는 깊이에서 썬기 효과에 의한 선량의 증가율이 3%를 초과하는 경우에도 썬기효과를 무시해도 좋은지 의문을 갖게 된다.

썬기조사면의 방사선 스펙트럼과 진행방향이 민조사면과는 다르기 때문에 썬기투과율은 결정하는 위치에 무관할 것이라고 말할 수 없을 것이다. 그럼에도 썬기투과율은 각 썬기에 대해 적용되고 있을 뿐 조사면의 크기와 무관한 것으로 취급되고 있다.

썬기투과율은 공기중⁶⁻⁷⁾에서 측정하기도 하고 물팬텀속⁹⁻¹²⁾에서 측정하기도 한다. 물팬텀을 비롯한 팬텀에서 썬기투과율을 측정하는 경우도 최대선량점깊이(d_{max})⁹⁻¹²⁾에서 측정하기도 하고 5cm¹²⁻¹³⁾ 또는 10cm,¹²⁻¹³⁾ 또다른 깊이¹³⁻¹⁵⁾에서 측정하기도 한다. 이와 같이 썬기투과율의 측정깊이가 통일되어 있지 않았기 때문에 썬기투과율의 조사면크기 의존성에 관해 통일된 견해가 형성되지 않고 있다. 썬기투과율을 정의할 깊이를 정할 때 고려되어야 할 것은 광자선경화효과를 선량계산에 고려할 것인지 아닌지가 먼저 결정되어야 할 것이다.

광자선경화현상이 존재하는 한, 썬기조사면에 대한 출력계수는 썬기투과율을 정하는 깊이에 무관할 수 없다. 또 썬기투과율을 정할 때 조사면크기 의존성을 고려하느냐 또는 무시하느냐에 따라 썬기조사면의 출력계수로서 민조사면의 출력계수를 인용하지 않을 수도 있고 인용할 수도 있다. 썬기조사면의 출력계수와 투과율은 서로 독립적인 관계가 아닌 데다가 정의하는 지점의 깊이에까지 영향을 받기 때문에 두 가지 변수를 정하는 방법이 국제적으로 통일되어야 할 필요가 있다.

저자들은 4~10MV 엑스선의 15~60°의 썬기필터에 대한 광자선경화현상과 썬기투과율, 출력계수를 물에서 이온함으로 측정하여 그 결과를 분석하여 보고하고, 중요한 몇 가지에 대해 제안하고자 한다.

이 론

MV 엑스선 치료용 가속기에서 방출되는 엑스선의 스펙트럼은 광범위하다. 선량분포 변경체의 하나인 썬기필터는 금속으로 제작되어 있다. 광자선과 물질의 서로작용 확률은 광자선의 에너지와 물질의 구성원소의 영향을 받는다. 그 결과로 광자선의 잦아지기 현상에 의해 투과된 일차선의 에너지분포는 민조사면의 것과는 다르게 된다. 같은 바탕에서 투과된 일차선의 에너지분포는 썬기필터의 썬기각(두께와 모양)에 영향을 받게 될 것이다. 즉 썬기필터를 통과한 광자선의 투과력(quality)은 민조사면에 대한 것과 썬기필터에 대한 것이 일치하지 않을 것이며, 썬기각에 영향을 받게 될 것이라는 의미한다. 썬기필터는 콤프턴 산란작용으로 산란선을 발생시킨다. 썬기필터에서 발생된 산란선에 의한 선량은 썬기필터의 썬기각과 조사면의 크기에 영향을 받게 된다. 썬기필터는 일차선의 흡수체와 산란선의 발생원으로서 선량분포의 변화에 기여하게 된다. 썬기필터는 일차선의 투과력은 증가시키지만 산란선은 반대로 투과력의 감소를 초래할 수 있다. 조사면의 크기에 따라 산란선의 기여도가 증가한다. 이와 같은 사유로 말미암아 광자선경화는 조사면의 크기에 도 영향을 받게 될 것이다. 또한 썬기필터에 의한 산란선은 치료기 고유 구성요소 에 의한 산란선과 비교할 때 스펙트럼과 진행방향, 상대적인 기여도에 있어서 동일하지 않을 것이므로 썬기필터는 광자선의 출력계수에도 영향을 미칠 것이다.

민조사면과 썬기 조사면의 깊이선량을 각각 $PDD_o(r, d)$, $PDD_w(r, d)$ 라고 할 때 광자선경화계수 $H_w(r, d)$ 는 아래와 같다.

$$H_w(r, d) = \frac{PDD_w(r, d)}{PDD_o(r, d)} \quad (1)$$

여기서 r 과 d 는 각각 d_{max} 에서 조사면크기와 깊이이다. 무릎글자 o 와 w 는 민조사면과 썬기조사면을 의미한다.

공기중에서 조사면크기 r 에 대해 썬기투과율 $W_w(r)$ 는 동일한 MU에 대한 민조사면의 공기중선량 $D_o^a(r)$ 에 대한 썬기조사면의 공기중선량 $D_w^a(r)$ 의 비이다.

$$W_w(r) = \frac{D_w^a(r)}{D_o^a(r)} \quad (2)$$

최대선량점깊이 d_{max} 에서 조사면크기 r 에 대해 W_p 는 동일한 MU에 대한 민조사면의 조직선량 $D_o^p(r, d_{max})$ 에 대한 썬기조사면의 조직선량 $D_w^p(r, d_{max})$ 의 비이다.

$$W_p(r, d_{max}) = \frac{D_w^p(r, d_{max})}{D_o^p(r, d_{max})} \quad (3)$$

여기서 후방산란계수 BSF를 적용하면

$$D^p(r, d_{max}) = BSF(r) \times D^a(r) \quad (4)$$

의 관계가 있다는 것은 잘 알려져 있는 사실이다.

MV 광자선의 후방산란계수는 투과력에 대한 의존도를 무시할 수 있으므로 썬기필터에

4~10 MV X-선의 썰기(wedge) 필터의 투과율과 출력계수, 선축상 선량분포의 변화에 관한 연구

의해 광자선의 투과력이 약간 증가하였다고 할지라도 썰기조사면에 대한 *BSF*는 민조사면의 *BSF*와 같다고 볼 수 있다. 그 경우에 식 (2)와 (3), (4)에 의하여

$$W_p(r, d_{\max}) = W_a(r) \quad (5)$$

의 관계가 있음을 알 수 있다. 즉 공기중에서 측정된 썰기투과율은 팬텀내 d_{\max} 에서 측정된 것과 동일하다고 볼 수 있다.

썰기투과율을 팬텀내 임의의 깊이에서 정의하면 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$W_p(r, d) = \frac{D_w^p(r, d)}{D_o^p(r, d)} \quad (6)$$

깊이선량율 PDD의 정의를 적용하면 식(5)는 아래와 같이 정리될 수 있다.

$$W_p(r, d) = \frac{PDD_w(r, d) \cdot D_w^p(r, d_{\max})}{PDD_o(r, d) \cdot D_o^p(r, d_{\max})} \quad (7)$$

식(1)과 식(3)을 식(7)에 적용하면 임의 깊이에서 썰기투과율 $W_p(r, d)$ 는 아래와 같다.

$$W_p(r, d) = H_w(r, d) \cdot W_p(r, d_{\max}) \quad (8)$$

썰기투과율을 기준조사면크기 r_0 에 대해서 정의하고 민조사면과 썰기조사면의 출력계수를 각각 $S_{c,w}(r)$, $S_{c,o}(r)$ 라고 할 때 식(2)는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} W_a(r) &= \frac{S_{c,w}(r) \cdot D_w^a(r_0)}{S_{c,o}(r) \cdot D_o^a(r_0)} \\ &= \frac{S_{c,w}(r)}{S_{c,o}(r)} \cdot W_a(r_0) \end{aligned} \quad (9)$$

이 식에서 출력계수의 비 $S_{c,w}(r)/S_{c,o}(r)$ 은 썰기필터와 조사면크기에 좌우되는 값이다.

식 (9)에 식 (5)를 적용하면 팬텀내 최대선량점에서 썰기투과율은

$$W_p(r, d_{\max}) = \frac{S_{c,w}(r)}{S_{c,o}(r)} \cdot W_p(r_0, d_{\max}) \quad (10)$$

와 같이 표현할 수 있다.

식(8)에 식(10)을 적용하면 임의의 깊이에서 정의된 썰기투과율은 출력계수의 비와 광자선경화계수와 아래와 같은 관계가 성립된다.

$$W_p(r, d) = \frac{S_{c,w}(r)}{S_{c,o}(r)} \cdot H_w(r, d) \cdot W_p(r_0, d_{\max}) \quad (11)$$

이 식에서 $S_{c,w}(r) \cdot H_w(r, d)/S_{c,o}(r)$ 은 썰기조사면의 크기에 좌우되는 값이다. 기준조사면 크기 r_0 에서 썰기필터의 출력계수 $W_p(r_0, d)$ 는 아래와 같다.

$$W_p(r_0, d) = H_w(r_0, d) \cdot W_p(r_0, d_{\max}) \quad (12)$$

이 식에서 출력계수의 비가 1로 취급된 이유는 기준조사면에서 출력계수가 1로 정의된다는 점이다.

식(11)과 식(12)로부터

$$W_p(r, d) = \frac{S_{c,w}(r)}{S_{c,o}(r)} \cdot \frac{H_w(r, d)}{H_w(r_0, d)} \cdot W_p(r_0, d) \quad (13)$$

의 관계를 얻을 수 있다. 최대선량점깊이가 아닌 깊이에서 췌기투과율을 정의하면 출력계수의 비 이외에도 조사면크기에 의존하는 변수인 광자선경화계수의 비도 췌기투과율에 영향을 미친다는 것을 식 (13)은 보여주고 있다.

재료 및 방법

췌기필터에 의한 광자선의 경화계수의 조사면크기 및 깊이에 대한 의존성과, 췌기필터의 출력계수와 투과율의 조사면크기에 대한 의존성을 4, 6, 10MV 엑스선에 대해 측정하였다. 4MV 엑스선의 발생장치는 Clinac 4/100(Varian, 미국)이었고, 6MV 엑스선의 발생장치는 Clinac 6/100과 Clinac 2100C였으며, 10MV 엑스선의 발생장치는 Clinac 2100C였다. 방사선치료기에는 각각 췌기각이 15, 30, 45, 60 인 췌기필터가 갖추어져 있다. Clinac 6/100의 췌기필터는 텅스텐으로 만들어졌고, Clinac 4/100와 Clinac 2100C의 췌기필터는 텅스텐으로 만들어졌다. Clinac 2100C의 광자선 투과력이 6MV와 10MV 두 가지이지만 췌기필터는 공용이다. 선원에서 췌기필터까지의 거리는 Clinac 4/100는 49.1cm, Clinac 6/100는 42.4cm, Clinac 2100C는 49.2cm이다.

광자선경화계수는 3차원 물팬텀(Multidata, 미국)에서 이온함으로 깊이선량분포를 측정하여 민조사면의 깊이선량율에 대한 동일 기하학적인 조건에서 측정된 췌기조사면의 깊이선량율의 비로서 5, 10, 15cm인 정사각 조사면에 대해 최대선량점깊이(d_{max})에서 30cm 깊이까지 구하였다. 췌기필터의 출력계수와 투과율은 물팬텀의 d_{max} 에서 원통형이온함으로 측정하였다. 췌기필터의 출력계수는 4, 6, 10, 15cm인 정사각 조사면에 대해 측정하였다. 췌기필터의 출력계수는 기준조사면크기에 대해 측정하였으며, 기준조사면의 크기는 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 였다. SSD는 100cm로 하였다.

결 과

측정에서 얻어진 광자선경화계수를 Fig. 1과 Fig. 2, Table 1이 보여주고 있다. Fig. 1은 Clinac 4/100의 4MV 엑스선과 Clinac 6/100의 6MV 엑스선, Clinac 2100C의 6MV 엑스선, Clinac 2100C의 10MV 엑스선 각각의 췌기각 15 와 60 의 췌기필터에 대한 광자선경화계수를 조사면크기와 깊이에 따른 변화를 보여주고 있다. 조사면크기는 5, 10, 15cm였으며 깊이는 최대선량점깊이(d_{max})에서 30cm 깊이 범위이다. 모든 투과력과 조사면크기에 대한 광자선경화계수가 1보다 크다는 것을 확인할 수가 있으며, 깊이가 깊어짐에 따라 그 값은 대체로 선형으로 증가하고 있음을 보여주고 있다. 그러나 조사면 크기는 광자선경화계수에 그다지 영향을 미치지 않고 있다. 10MV 엑스선의 경우 4MV와 6MV 엑스선과 동일한 경향을 보여주고는 있지만 깊이에 따른 광자선경화계수의 변화가 다른 투과력의 엑스선에 비해

상당히 작다.

Fig. 2는 위의 네 가지 엑스선의 각각의 10cm 조사면크기에 대해 썬기각과 깊이에 따른 광자선경화계수의 변화를 보여주고 있다. 썬기각은 15°와 30°, 45°, 60°의 썬기필터에 대한 광자선경화계수를 최대선량점깊이(d_{max})에서 30cm 깊이까지 보여주고 있다. 썬기각이 증가함에 따라 광자선경화계수가 증가하고 있음을 알 수 있다. 깊이가 깊어짐에 따라 썬기각크기에 따른 광자선경화계수의 차이가 점점 커지고 있음도 알 수 있다. 10MV 엑스선의 경우 조사면크기와 마찬가지로 썬기각도 광자선경화계수에 미치는 영향이 무시될 수 있을 정도이다.

Table 1은 Fig. 1과 Fig. 2에 제시된 자료를 포함해서 광자선의 투과력과 조사면크기, 썬기각의 조합에 대해 5cm 간격으로 30cm 깊이까지의 광자선투과계수를 포함하고 있다. Table 1에서 조사면 크기 5cm와 15cm에 대해서도 Fig. 1과 Fig. 2에서 얻어진 것과 같은 경향을 확인할 수 있다.

Fig. 3에는 네 가지 투과력에 대한 민조사면과 썬기각 15°, 30°, 40°, 60°의 썬기조사면의 출력계수를 보여주고 있다. 네 가지 투과력 모두에 대해 15×15cm² 조사면에서는 민조사면의 출력계수가 가장 낮고 썬기각이 커짐에 따라 증가하였으며 그 차이는 투과력이 낮을수록 커졌다. 조사면의 크기가 10×10cm²이하인 경우에 4MV를 제외한 나머지 투과력의 엑스선은 썬기각에 상관없이 출력계수가 민조사면의 출력계수와 일치한다는 것을 보여주고 있다. 반면에 4MV 엑스선의 경우 8×8cm²이하에 대한 출력계수가 민조사면의 값이 가장 크고 썬기각이 클수록 감소하였다. Table 3은 민조사면의 출력계수이다. Clinac 6/100에서 방출되는 6MV 엑스선과 Clinac 2100C에서 방출되는 6MV 엑스선의 투과력은 같지만 출력계수는 일치하지 않음을 알 수 있다. 기준조사면 10×10cm² 보다 작은 조사면에 대해서는 Clinac 6/100의 6MV 엑스선의 출력계수가 Clinac 2100C의 6MV 엑스선의 출력계수보다 높았으며, 기준조사면보다 큰 조사면에 대해서는 출력계수의 대소관계가 바뀌었다.

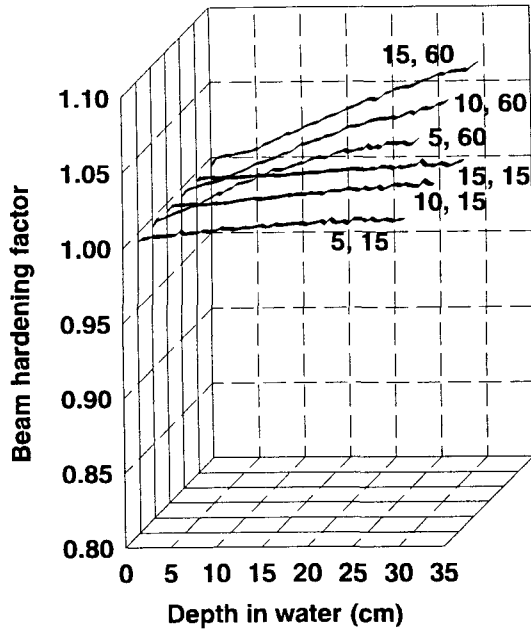
고 찰

MV 광자선에 의한 방사선치료에 썬기필터가 이용될 때 썬기필터의 효과를 선량분포 계산이나 MU 계산에 고려되어야 할 필요성이 인식되어 썬기필터의 효과에 관한 많은 연구가 수행되었다.

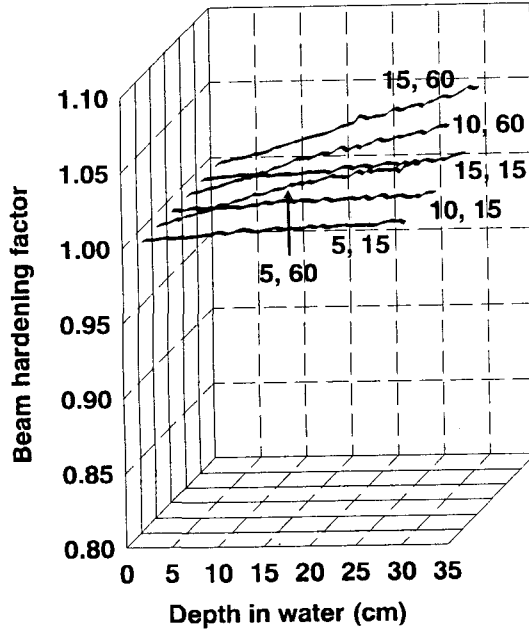
이 연구에서 4MV 엑스선과 6MV 엑스선의 경우 썬기필터에 의해 광자선경화현상이 존재하며 썬기각이 클수록 그 현상이 더 뚜렷해졌다. 광자선경화계수는 깊이와 선형적 관계라는 것을 알 수 있었으며 조사면크기에는 거의 무관하였다. 10MV 엑스선의 경우는 썬기필터에 의한 광자선경화효과가 있기는 하지만 크지는 않았다.

썬기조사면은 일반적으로 10cm 이내의 깊이에서 이용되지만 골반부위의 측방조사에도 이용되고 있어서 15cm 깊이에서 이 연구의 대상인 4가지 투과력의 광자선경화효과를 비교해 본다. 조사면크기가 10×10cm²인 경우에 15cm 깊이에서 Clinac 4/100의 4MV 엑스선의 광자선경화계수는 썬기각 15°, 30°, 45°, 60°에 대해 각각에 대해 1.010, 1.014, 1.023, 1.034 이었으며, Clinac 6/100의 6MV 엑스선의 경우는 각 썬기각에 대하여 1.005, 1.008, 1.019, 1.024, Clinac 2100C의 6MV 엑스선의 경우는 각각 1.011, 1.021, 1.032, 1.036, 10MV 엑스선의 경우는 각각 1.008, 1.012, 1.012, 1.012였다. 15cm 깊이에서 광자선경화계수의 최댓값은 Clinac

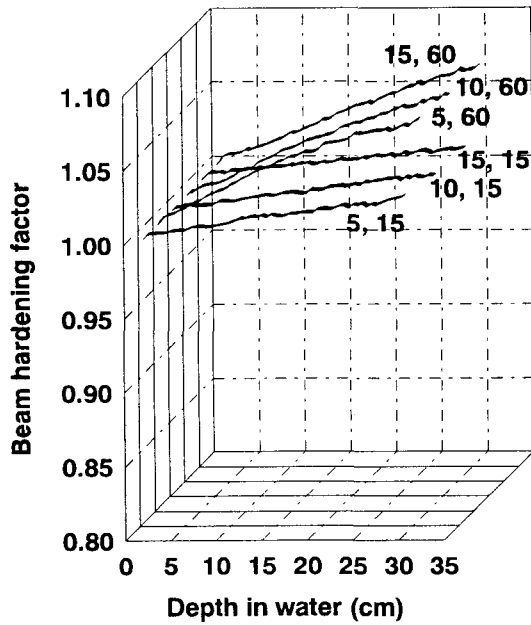
4MV X-Ray of Clinac 4/100



6MV X-Ray of Clinac 6/100



6MV X-Ray of Clinac 2100C



10MV X-Ray of Clinac 2100C

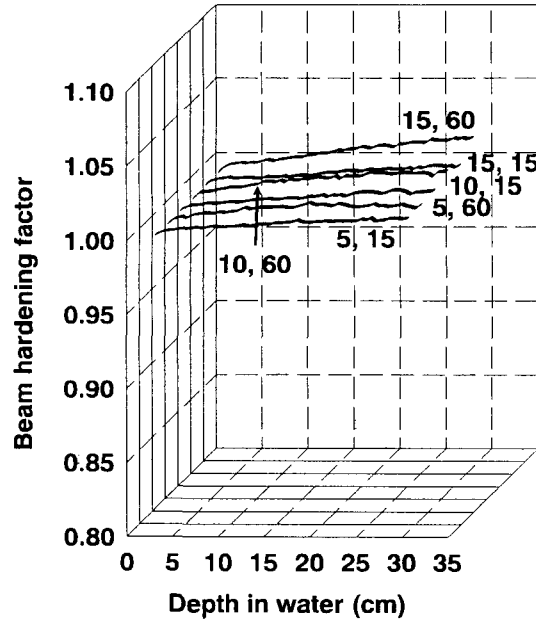


Fig. 1. Comparison of beam hardening effects for various field size and wedge angle. First one of each pair of numbering sides of square wedged field, and last one is wedge angle in degree.

4~10 MV X-선의 켜기(wedge) 필터의 투과율과 출력계수, 선속상 선량분포의 변화에 관한 연구

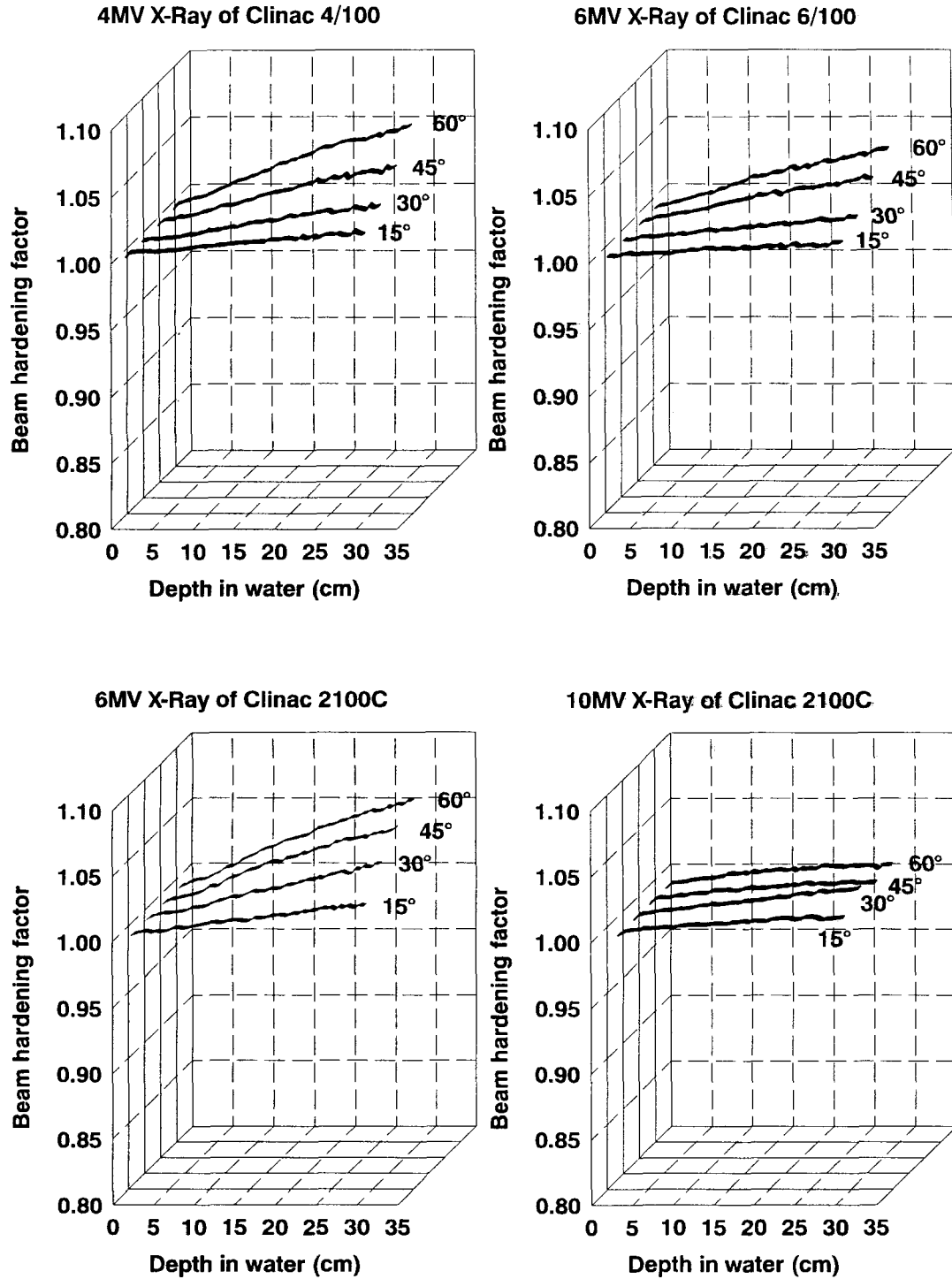


Fig. 2. Comparison of beam hardening factors for various wedge angles for 10×10cm² field.

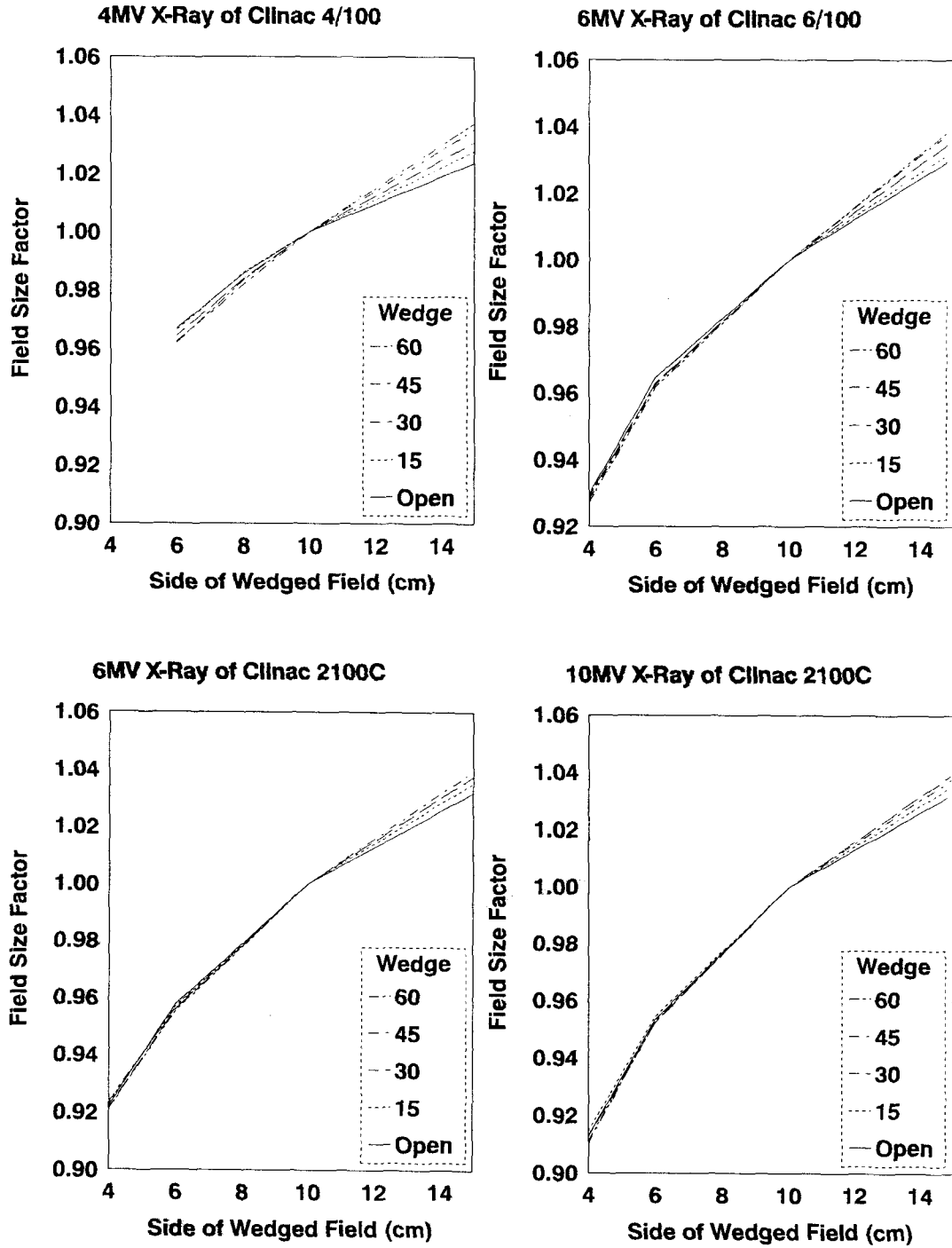


Fig. 3. Comparison of field size factors for several wedge angles.

4~10 MV X-선의 쉐기(wedge) 필터의 투과율과 출력계수, 선축상 선량분포의 변화에 관한 연구

Table 1. Beam hardening factors of wedged beams of 4 to 10 MV X-rays. At 15 cm depth, maximum beam hardening factors are 1.036 for 4MV, 1.035 for 6 MV (Clinac 6/100), 1.042 for 6 MV (Clinac 2100C), and 1.014 for 10 MV (Clinac 2100C).

a) 4 MV X-ray of Clinac 4/100

Field size	Wedge angle	Depth in water					
		5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm
5× 5 cm	15°	1.003	1.008	1.009	1.011	1.014	1.013
	30°	1.005	1.012	1.015	1.018	1.020	1.021
	45°	1.009	1.019	1.023	1.028	1.033	1.033
	60°	1.012	1.027	1.036	1.044	1.051	1.056
10×10 cm	15°	1.004	1.007	1.010	1.012	1.015	1.016
	30°	1.002	1.008	1.014	1.017	1.021	1.025
	45°	1.007	1.014	1.023	1.031	1.036	1.043
	60°	1.010	1.022	1.034	1.045	1.052	1.062
15×15 cm	15°	1.002	1.002	1.005	1.007	1.009	1.011
	30°	1.004	1.008	1.011	1.015	1.018	1.019
	45°	1.007	1.013	1.020	1.026	1.032	1.037
	60°	1.009	1.022	1.035	1.048	1.057	1.066

b) 6 MV X-ray of Clinac 6/100

Field size	Wedge angle	Depth in water					
		5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm
5× 5 cm	15°	1.001	1.005	1.006	1.008	1.009	1.010
	30°	1.002	1.006	1.008	1.008	1.009	1.013
	45°	1.006	1.014	1.020	1.025	1.029	1.035
	60°	1.006	1.016	1.024	1.030	1.034	1.038
10×10 cm	15°	1.001	1.003	1.005	1.006	1.006	1.010
	30°	1.002	1.005	1.008	1.011	1.014	1.017
	45°	1.006	1.012	1.019	1.024	1.028	1.033
	60°	1.006	1.014	1.024	1.031	1.037	1.044
15×15 cm	15°	1.002	1.002	1.005	1.007	1.009	1.011
	30°	1.004	1.008	1.011	1.015	1.018	1.019
	45°	1.007	1.013	1.020	1.026	1.032	1.037
	60°	1.009	1.022	1.035	1.048	1.057	1.066

장위생

c) 6 MV X-ray of Clinac 2100C

Field size	Wedge angle	Depth in water					
		5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm
5×5 cm	15°	1.005	1.009	1.014	1.017	1.023	1.027
	30°	1.008	1.016	1.025	1.030	1.036	1.039
	45°	1.011	1.024	1.037	1.046	1.055	1.059
	60°	1.013	1.027	1.042	1.054	1.062	1.067
10×10 cm	15°	1.002	1.008	1.011	1.015	1.020	1.022
	30°	1.006	1.014	1.021	1.028	1.035	1.042
	45°	1.007	1.020	1.032	1.041	1.049	1.058
	60°	1.008	1.023	1.036	1.048	1.059	1.066
15×15 cm	15°	1.006	1.008	1.011	1.015	1.018	1.021
	30°	1.006	1.011	1.018	1.024	1.031	1.036
	45°	1.008	1.017	1.027	1.037	1.044	1.052
	60°	1.009	1.021	1.034	1.046	1.057	1.066

d) 10 MV X-ray of Clinac 2100C

Field size	Wedge angle	Depth in water					
		5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm
5×5 cm	15°	1.004	1.006	1.008	1.010	1.011	1.012
	30°	1.006	1.009	1.013	1.017	1.021	1.022
	45°	1.004	1.007	1.010	1.012	1.013	1.013
	60°	1.005	1.008	1.011	1.012	1.013	1.012
10×10 cm	15°	1.004	1.007	1.008	1.011	1.012	1.013
	30°	1.005	1.009	1.012	1.017	1.021	1.024
	45°	1.004	1.010	1.012	1.014	1.014	1.016
	60°	1.005	1.011	1.012	1.014	1.017	1.018
15×15 cm	15°	1.005	1.005	1.008	1.010	1.010	1.013
	30°	1.006	1.008	1.012	1.016	1.018	1.023
	45°	1.007	1.009	1.012	1.014	1.016	1.017
	60°	1.006	1.009	1.014	1.018	1.020	1.023

Table 2. Wedge transmission factors. These factors were measured at d_{max} for 10×10cm² at 100cm SSD.

	Clinac 4/100	Clinac 6/100	Clinac 2100C	
	4MV	6MV	6MV	10MV
15°	0.806	0.817	0.780	0.811
30°	0.686	0.772	0.630	0.679
45°	0.544	0.628	0.487	0.525
60°	0.394	0.438	0.410	0.444

Table 3. Field size factors (Sc) for open field. These factors were measured in air.

A/P	Clinac 4/100	Clinac 6/100	Clinac 2100C	
	4MV	6MV	6MV	10MV
1.0	0.971	0.963	0.948	0.943
1.5	0.983	0.979	0.971	0.967
2.0	0.993	0.991	0.986	0.985
2.5	1.000	1.000	1.000	1.000
3.0	1.005	1.007	1.010	1.005
4.0	1.015	1.017	1.023	1.013
5.0	1.022	1.024	1.031	1.020
6.0	1.029	1.029	1.036	1.026
7.0	1.033	1.033	1.043	1.032
8.0	1.036	1.037	1.048	1.037
9.0	1.039	1.039	1.054	1.040
10.0	1.039	1.040	1.057	1.043

2100C의 6MV 엑스선의 60° 썬기필터에 대한 값으로서 1.036이었으며 무시될 수 없는 크기라고 생각된다.

Sewchand 등³⁾은 4MV 엑스선에 의한 광자선경화계수는 썬기의 두께와 조사면크기, 깊이에 따라 변하기는 하지만 민조사면과 썬기조사면의 TMR의 차이가 1% 이내였으므로 무시될 수 있다고 하였다. Podgorsak 등⁴⁾은 6MV 엑스선에 대해서는 광자선경화계수가 썬기각에 따라 증가하고 10MV 엑스선의 경우는 썬기각과 무관하였다고 보고하여 이 연구에서 얻어진 결과와 일치하였다. 24MV 엑스선은 광자선의 경화가 야나라 오히려 연화(softening)가 있음을 보고하였지만 이 연구에서 대상으로 삼은 4~10MV 범위에서는 관찰되지 않았다. Palta 등⁵⁾은 4MV 엑스선의 경우 16cm 깊이에서 광자선경화계수가 15°, 30°, 45°, 60°에 대해 각각에 대해 1.043, 1.046, 1.057, 1.061였다고 보고하였으며 이 연구에서 얻어진 값보다 훨씬 큰 값이다. Wu 등⁶⁾은 4MV와 6MV 엑스선의 조사면크기 20×20cm², 썬기각 15~45°에 대한 15cm 깊이까지 깊이선량율(PDD)을 측정하여 광자선경화효과가 있음을 보고하였다. 광자선경화계수를 도입하지 않고 PDD 차이를 계산하였다. 4MV와 6MV 엑스선 각각의 45° 썬기필터의 15cm 깊이에서 PDD 차이가 4.5%, 5.3%였다고 하였는데 광자선경화계수를 적용하면 이 연구에서 얻어진 값보다 클 것이라고 생각된다.

따라서 4~6MV 광자선치료에서 썬기조사면에 대해서는 광자선경화효과가 선량계산이나 MU계산에 고려되어야 할 것이다.

하지만 썬기조사면의 PDD와 광자선경화계수 중 어느 것을 이용하는 편이 편리할 것 인가하는 점이다. 썬기조사면의 PDD를 이용하기 위해서는 민조사면 이외에 각 썬기각마다 다른 PDD표를 구비해야 할 것이다. 광자선경화계수는 조사면크기에 무관하다고 할 수 있기 때문에 각 썬기필터의 광자선경화계수는 조사면크기 하나의 PDD에 해당하는 분량으로서 자료의 양이 굉장히 적다. 이런 이유로 필자는 썬기조사면에 대해서 각각의 PDD 표를 이용하는 것보다는 광자선경화계수를 이용하여 선량이나 MU를 보정하는 것이 바람직할 것이라고 생각된다.

썰기필터의 투과율은 어떻게 정의하느냐에 따라 조사면크기에 무관하다고 할 수도 있고 조사면크기의 영향을 받는다고도 할 수 있다. 썰기필터의 투과율을 기준조사면크기에 대해서 정의하면 썰기필터투과율의 조사면크기 의존성이 없어지고, 그와 달리 조사면크기마다 따로 정의하면 썰기필터투과율은 조사면크기 의존성을 갖게된다. 식 (9)와 (10), (13)이 이를 잘 설명해 주고 있다. 그럼에도 불구하고 썰기필터의 투과율을 정의하는 방법이 학계에서 국제적으로 통일되어 있지 않았기 때문에 썰기투과율의 조사면크기 의존성여부에 대해 논란이 지속되고 있다.

Islam 등⁷⁾은 Co-60과 6MV X 선의 썰기투과율이 조사면크기에 따라 증가한다고 하였다. Palta 등¹⁰⁾은 4MV 엑스선에 대해 같은 결론을 얻었다. 기준조사면크기에 대한 썰기투과율과, 출력계수의 비나 광자선경화계수와 같은 조사면크기에 대한 요인을 따로 떼어 선량계산과 MU 계산에 적용하는 것보다 두 가지를 하나로 묶는 편이 번거로움을 줄일 수 있을 것이다.

썰기필터 투과율을 공기중⁷⁻⁸⁾에서 측정하거나 팬텀내의 최대선량점깊이(d_{max})⁹⁻¹²⁾나 5cm 깊이¹²⁻¹³⁾ 또는 10cm 깊이¹²⁻¹³⁾, 또다른 깊이¹³⁻¹⁵⁾에서 측정하고 있다. 김현자 등¹⁵⁾은 썰기필터를 이용한 치료계획의 통계적 분석에 근거하여 8cm 깊이에서 썰기투과율을 정의하는 것이 바람직하다고 하였다. d_{max} 가 아닌 다른 깊이에서 썰기필터 투과율을 측정하는 경우에는 식 (13)에서 보는 바와 같이 썰기투과율은 광자선경화계수의 영향도 받는다.

투과율(transmission factor)이란 말 그 자체에 충실하게 따른다면 썰기필터의 투과율은 썰기필터 자체의 영향에 의해서만 광자선의 출력이 바뀐 것을 고려하겠다는 의지가 내포된 용어이지 팬텀내에서 유발되는 산란광자선의 기여까지 고려하겠다는 뜻으로 만들어진 용어는 아닌 것으로 보인다. 보고자는 이와 같은 이유 때문에 썰기필터의 투과율은 공기중에서 측정되어야 한다고 생각한다. 식 (5)는 최대선량점깊이(d_{max})에서 측정된 썰기필터의 투과율이 공기중에서 측정한 것과 동일하다는 것을 의미하고 있다. 따라서 썰기필터의 투과율은 d_{max} 에서 정의해도 좋을 것이다.

썰기필터의 투과율로서 조사면크기에 무관한 값으로 정의한다면 기준조사면에 대한 값을 투과율로 쓰고 조사면크기에 대한 의존성을 고려해야 할 것이다. 공기중이나 팬텀의 d_{max} 에서 썰기필터투과율을 정의하면 민조사면의 출력계수와 썰기조사면의 출력계수비를 적용하는 방법과 썰기조사면 출력계수를 적용하는 방법 중 하나를 택할 수 있다. d_{max} 이 아닌 다른 깊이에서 썰기필터 투과율을 정의한 경우에는 썰기조사면의 출력계수는 공기중 출력계수비와 광자선경화계수의 곱에 비례한다. 그 경우엔 썰기조사면출력계수를 측정하는 일이 용이할 것이라는 이점이 있을 수 있지만 다른 깊이의 선량을 평가할 때 계산절차가 좀더 복잡해질 수도 있을 것이다.

결 론

4MV와 두 가지의 6MV, 10MV 엑스선의 썰기조사면의 광자선경화계수와 썰기필터 투과율과 출력계수를 측정하여 아래와 같은 결론을 얻게 되었다.

1. 4MV와 6MV 엑스선의 썰기조사면의 선량분포나 MU 계산에는 광자선경화효과가 고려되어야 한다. 그러나 10MV 엑스선의 경우에도 광자선경화효과가 있으나 무시해도 좋다.
2. 썰기필터의 투과율은 조사면크기별로 최대선량점깊이나 공기중에서 측정하는 것이 바람직하다.

4~10 MV X-선의 썬기(wedge) 필터의 투과율과 출력계수, 선축상 선량분포의 변화에 관한 연구

3. 썬기필터의 투과율을 기준조사면에 대한 것을 대푯값으로 쓸 경우에는 썬기에 대한 출력계수를 적용하던지 민조사면에 대한 출력계수와 썬기조사면의 출력계수비를 적용해야 한다.

참고문헌

1. P.H. Huang, L.M. Chin, B.E. Bjarngard : *Scattered photons produced by beam modifying devices* : Med. Phys. 13, 57-63 (1986)
2. F.M. Khan : *The Physics of Radiation Therapy*. 2nd ed. : Williams & Wilkins, Baltimore (1994), pp238-239.
3. W. Sewchand, F.M. Khan, J. Williamson : *Variation in depth dose data between open and wedge fields for 4 MV X-rays* : Radiology 127, 789 (1978)
4. R. Van Der Laarse, P.A.M. Overbeek, J. Strackee : *Wedge filters for megavoltage roentgen ray beams* : Acta Radiol. Oncol. 23, 477-484 (1984)
5. B.E. Bjarngard, H. Shackford : *Attenuation in high-energy x-ray beams* : Med. Phys. 21, 1069-1073 (1994)
6. International Commission on Radiation Units and Measurements : *Determination of Absorbed Dose in a Patient Irradiated by Beams of X or Gamma Rays in Radiotherapy Procedures*. ICRU Report 24 : ICRU Publication, Bethesda, MD (1976)
7. M.K. Islam, J. Van Dyk : *Effects of scatter generated by beam-modifying absorbers in megavoltage photon beams* : Med. Phys. 22, 2075-2081 (1995)
8. R.D. Bar-Deroma, B.E. Bjarngard : *The relation between wedge factors in air and water* : Med. Phys. 21, 1043-1047 (1994)
9. M.B. Podgorsak, S.S. Kubsad, B.R. Paliwal : *Dosimetry of large wedged high-energy photon beams* : Med. Phys. 20, 369-373 (1993)
10. J.R. Palta, I. Daftari, M. Suntharalingam : *Field size dependence of wedge factors* : Med. Phys. 15, 624-626 (1988)
11. A. Wu, R.D. Zwicker, F. Krasin, et.al. : *Dosimetry characteristics of large wedges for 4- and 6-MV X rays* : Med. Phys. 11, 186-188 (1984)
12. A. Niroomand-Rad, H. Haleem, J. Rodgers, et.al. : *Wedge factor dependence on depth and field size for various beam energies using symmetric and half-collimated jaw settings* : Med. Phys. 19, 1445-1450 (1992)
13. A.M. Kalend, A. Wu, V. Yoder, et.al. : *Separation of dose-gradient effect from beam-hardening effect on wedge factors in photon fields* : Med. Phys. 17, 701-704 (1990)
14. E.C. McCullough, J. Gortney, C.R. Blackwell : *A depth dependence determination of the wedge transmission factor for 4-10 MV photon beams* : Med. Phys. 15, 624-626 (1988)
15. 김현자, 이병용, 김계준, 등 : 썬기인자 결정깊이에 관한 연구. 의학물리 3 : 13-21 (1992)

A Study on the Variation of Transmission Factors, Output Factors and Percent Depth Doses by Wedge Filters for 4~10 MV X-Ray Beams

Wee Saing Kang, Ph.D.

Dept. of Therapeutic Radiology, College of Medicine, Seoul National University
28 Yeongeon-dong, Chongno-gu, Seoul, 110-744 Korea

Abstract

Because a wedged beam consists of attenuated primary photons and scattered radiations from wedge, the spectrum of the wedged beam does not coincide with that of an open beam with same geometry. The aims of current report are to get exact information about whether effects of 15–60° wedge for 4–10 MV photon beams should be considered for dose calculation or not, and to suggest a reference condition for measurement of wedge transmission factor. Percent depth dose of both open and wedged fields with angles of 15, 30, 45, 60° for beams of 4 MV (Clinac 4/100, Varian), two 6 MV (Clinac 6/100 and Clinac 2100C, Varian), 10 MV (Clinac 2100C, Varian) X-rays were measured to 30 cm deep in water using ionization chambers. Hardening factors of photon beams were calculated with measured PDDs. Both field size factors and transmission factors of wedge filters were measured at d_{max} in water. Beam hardening factors of wedged fields of 4 and 6 MV X-ray were larger than 1 for all wedge angles, field sizes and depths deeper than d_{max} . Beam hardening factors for wedge angles 15, 30, 45, 60° for 10×10cm² were respectively 1.010, 1.014, 1.023 and 1.034 for 4MV X-ray, 1.005, 1.008, 1.019, and 1.024 for 6MV X-ray of Clinac 6/100, 1.011, 1.021, 1.032, 1.036 for 6MV X-ray of Clinac 2100C, and 1.008, 1.012, 1.012 and 1.012 for 10MV X-ray. Beam hardening factors of 10MV X-ray were 1 within 1.2% difference for all wedge angles, depths and field sizes. It was made clear that for 6MV X-rays, the beam hardening factor depends on treatment machine. The relationship of the factor and depth was linear. Field size factor at d_{max} was independent of wedge angle except for the field of 15×15cm². and maximum difference of the field size factors for the field size was 1.4% for 4MV X-ray. When the wedge factor is determined, dependence of the factor on field size is negligible at d_{max} but should be considered at deeper depth. Calculating dose distribution or MU, the beam hardening factor should be applied for 4~6MV X-ray beams, but might not be considered for 10MV beam. When wedge transmission factor was determined at d_{max} or in air, field size factors for open field are also applicable to wedged fields, but otherwise, field size factor for each wedge or wedge factor depending on field size should be applied.