

고에너지 광자선의 선속 변화에 따른 쇄기인자의 의존성

경북대학교 의과대학 방사선종양학교실, 영남대학교 의과대학 방사선종양학교실*

오영기, 윤상모, 김재철, 박인규, 김성규*

쇄기인자의 조사면에 따른 변화는 여러 저자들에 의해 보고되었으나, 아직도 정량적인 설명이 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 4 cm × 4 cm에서부터 25 cm × 25 cm까지의 조사면에 대해서 10 cm × 10 cm 기준 조사면에 대한 상대적 쇄기인자를 조사하였다. 조사면의 증가에 따라 쇄기를 통과하는 고에너지 광자선의 선속변화로 인해 쇄기인자는 6MV 광자선에서 최고 8.0%까지 증가하였다. 이러한 증가는 조사면이 10 cm보다 작은 경우를 제외하고는 일반적으로 알려진 바와 같이 광자선이 통과하는 쇄기의 부피와 선형적인 관계를 갖고 있음이 밝혀졌다. 그러나 특히 쇄기의 경사면에 평행한 방향으로의 조사면이 증가하는 좁은 조사면의 경우에는 쇄기의 두께변화로 인해 야기되는 광자선의 선속변화가 상대적으로 작아짐에 따라 10-15 cm까지는 약간의 감소가 나타나고 있다. 따라서, 광자선의 중심축의 선량에 기여하는 주광자선의 선속변화로 인해 쇄기인자의 변화원인을 설명할 수 있으며, 그 광자선의 선속변화는 쇄기의 경사방향에 대한 조사면의 크기변화에 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 기존에 제안되어진 쇄기인자의 변환 식을 본 연구결과에 잘 맞도록 보정하여 제시하였다.

중심단어: 쇄기인자, 조사면 크기, 광자선 선속

서 론

고에너지 광자선이 쇄기필터를 거치면, 높은 원자번호의 물질과 광자의 상호작용으로 인한 광자선의 경화현상이나 쇄기필터로부터의 후방산란 등으로 인하여, 중심축 상의 측정점에서의 흡수선량이 변하게 되고 이러한 흡수선량에 대한 쇄기필터의 효과를 쇄기인자라 한다. 이 쇄기인자는 ICRU 보고서 24에 따르면 물속에서 광축상의 한 측정점에 대한 쇄기필터가 있을 때와 없을 때의 흡수선량의 비로 정의하고 있다.¹⁾ 이 쇄기인자는 실제 임상에서 환자의 치료부위에 대한 흡수선량을 계산하는 데 직접적으로 사용되고 있으며, 전산화 치료계획(RTP) 시에도 적용되고 있다. 본 병원에서도 이를 이용하여 흡수선량을 계산하고 있으나, 단순히 기준깊이(6MV에서는 5cm, 10MV에서는 10cm), 기준 조사면(10cm×10cm)에서 치료기에 대한 각 에너지 별로(6MV, 10MV), 각 쇄기 각도 별로(15°, 30°, 45°, 60°) 쇄기인자의 값을 측정하여 사용하여 왔다. 그러나, 최근에 많은 연구자들²⁻⁷⁾에 의해 쇄기인자의 조사면 의존성 및 깊이 의존성이 크게 연구되고 있는 바, 본 병원의 치료기에 대한 쇄기인자의 조사면에 따른 특성을 살펴보고자 한다.

특히, 쇄기인자의 에너지에 대한 조사면과 깊이 의존

성의 정량적인 결과들이 여러 연구자들에 따라 서로 다른 값을 보여주고 있으며, 이러한 다양한 결과들의 근원을 설명하기에는 아직도 타당성 있는 일반론이 제기되지 않고 있다. 다만, 깊이 의존성은 쇄기를 통과하면서 광자선의 경화가 일어나 심부선량이 다소 증가하기 때문이고, 조사면 의존성은 쇄기에 의한 산란효과 특히 상부산란효과로 설명하고 있는 것이 지배적이다.^{8, 15)} 그러나, 광자선의 면적이 같은 경우 통과하는 쇄기의 부피가 같아지게 되지만 동일면적에서 가로, 세로면의 길이가 독립적으로 변함에 따라 전체적인 부피에는 변화가 없다 할지라도 쇄기의 경사면으로 인해 투과하는 두께에 차이가 있기 때문에 이에 따른 쇄기에서의 흡수정도가 달라질 수 있으므로 쇄기를 통과하는 광자선의 성질이 변화될 수 있다. 지금까지의 여러 연구들이 광자선의 경화 및 산란을 단지 정방향 조사면에 대한 쇄기의 부피변화만을 고려했기 때문에 서로 다른 결과를 가져온 것이라고 생각된다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 쇄기인자의 다양한 결과를 설명할 수 있는 방법을 제시코자 다른 두 치료기에서 6MV와 10MV의 광자선에 대한 쇄기인자를 조사면에 따른 광자선이 통과하는 쇄기의 총 부피 및 가로, 세로면의 길이변화 등에 대한 고찰을 중점적으로 조사하고자 한다.

재료 및 방법

본 연구에서는 Mevatron MD67 (Siemens, USA) 의 6MV 광자선과 Mevatron KD77 (Siemens, USA) 의 6, 10MV 광자선에서 15°, 30°, 45°, 60° 의 각 썬기에 대한 측정을 수행하였다. 썬기는 Siemens사에서 제공한 것으로 알미늄 코팅된 받침위에 철이 주성분인 각진 썬기꼴로 만들어져 있다. Mevatron MD67에서는 45° 썬기까지는 4cm에서 20cm, 60° 는 15cm 까지, 또한 Mevatron KD77에서는 45° 썬기까지는 4cm에서 25cm, 60° 는 20cm 까지의 조사면에 대해서 가로면과 세로면을 독립적으로 변화시키면서 측정하였다.

본 실험에서의 모든 측정은 100cm SSD에서 Farmer형 0.6cc 원통형 이온전리함을 이용하여 물 속에서 최대선량점 깊이에서 수행하였다. 이는 ICRU 보고서 24에서도 썬기인자에 대한 기준 조사면과 기준 깊이가 추천되어 있지 않을 뿐 아니라 심부선량 관점에서 볼 때 최대선량점 근방에서의 깊이변화에 대한 선량변화가 5cm 또는 10cm 근방에서의 깊이변화에 대한 선량변화보다도 훨씬 적기 때문에 정확한 기준 깊이에 전리함을 놓아야 하는 데에 따른 실험적 오차를 줄이기 위해서는 최대선량점에서의 측정이 더 바람직한 것으로 생각되었기 때문이다. 또한, 썬기를 통과한 광자선과 썬기가 없을 때의 광자선에 대한 5cm, 10cm 깊이에서의 심부선량이 앞에서 언급된 광자선의 경화현상 등으로 인해 이미 다른 값으로 나타나므로 조사면 의존성만을 연구하기에는 좋지 않을 것으로 판단되었다. 일반적으로 썬기가 있는 경우의 계기단위값을 계산하기 위하여

$$M.U. = \frac{TD \times 100}{S_c \cdot S_p \cdot TMR(\text{or } PDD) \cdot F_w \cdot SAD(\text{or } SSD)factor} \quad (1)$$

를 이용하게 되는데, 여기서 조사면의 크기에 따라 열린조사면의 산란인자와 TMR(또는 PDD)을 사용하고 그 썬기에 대한 썬기인자를 기준조사면(10cm×10cm), 기준깊이(5cm 또는 10cm)에서 측정한 값을 그대로 적용하고 있다. 이 때, TMR(또는 PDD)는 최대선량점을 기준으로 결정되는 값이므로 썬기인자와 기준깊이에 있어 차이가 나게 되고, 기준깊이가 최대선량점이 아닌 경우에는 조사면에 따른 산란보정인자가 달

라지게 되므로 이를 보정하여야 한다. 따라서, 썬기인자를 최대선량점에서의 측정값을 이용하여야 타당할 것으로 생각하였다.

썬기인자는 정의에 따라

$$F_w(d, fs) = \frac{D_w(d, fs)}{D_o(d, fs)} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 Dw(d, fs)는 조사면 fs, 깊이 d에서의 썬기가 있을 때의 흡수선량이고 Do는 열린조사면에서의 선량이다. 동일한 조사면에서 최대선량점에 대한 깊이에 따른 상대적 썬기인자 RFw는 최대선량점 dmax에서의 측정값과 임이의 깊이 d에서의 측정값의 비로 정의 할 수 있으며 이는 다음 식 (3)와 같이 나타낼 수 있다.⁷⁾

$$RF_w(d, fs) = \frac{F_w(d, fs)}{F_w(d_{max}, fs)} = \frac{\frac{D_w(d, fs)}{D_o(d, fs)}}{\frac{D_w(d_{max}, fs)}{D_o(d_{max}, fs)}} = \frac{\frac{D_w(d, fs)}{D_w(d_{max}, fs)}}{\frac{D_o(d, fs)}{D_o(d_{max}, fs)}} = \frac{P_w(d, fs)}{P_o(d, fs)} \quad (3)$$

여기서 Pw(d, fs)는 썬기가 있을 때의 심부선량백분율이고 Po는 열린조사면에서의 심부선량백분율이다. 이는 썬기가 있을 때와 없을 때의 심부선량 비와 같으므로 단순히 심부선량을 비교함으로써 깊이 의존성을 조사할 수 있다. 이러한 이유로 최대선량점에서의 썬기인자에 대한 조사면 의존성만 얻어지면 깊이의존성은 그에 따라 간단히 도출될 수 있기 때문에 최대선량점에 대한 조사면 의존성을 규명하는 것이 중요할 것으로 여겨진다.

결과 및 논의

$l \times l$ 조사면에서 가로면과 세로면을 동일하게 Δl 만큼씩 증가 시킨 경우에 각각의 경우 광자선이 통과하는 쇄기의 전체 부피 변화는

$$\Delta V = l \times \Delta l \times h = \Delta l \times l \times h \quad (4)$$

로서, 가로면 또는 세로면을 독립적으로 변화시킨다 할지라도 그 변화량은 동일하며, 평균적 두께 또한 같아진다. 여기서 h 는 쇄기의 중심에서의 두께이다. 그러나 쇄기의 경사면을 따라 조사면이 증가하는 경우에 있어서는 광자선이 통과하는 쇄기의 두께는 한편으로는 더 얇아지고 그 반대편에서는 더 두꺼워지기 때문에 쇄기를 통과한 광자선의 선질 및 선속 또한 쇄기의 경사면 방향을 따라 달라지게 되고 그 변화로 인해 산란정도 또한 변하게 된다. 따라서, 조사면이 쇄기의 경사면을 따라 변하는 경우와 경사면에 수직 방향으로 변하는 경우는 동일한 등가조사면을 갖는다 하더라도 그 선질 및 선속이 다를 수 있으므로 이에 대한 고려가 필요하다. 특히 한쪽 면이 작은 좁은 조사면의 경우에는 조사면의 변화방향에 따라 쇄기를 통과한 광자선의 선질 및 선속이 매우 민감하게 영향을 받을 수 있다. 이런 개념에서 볼 때, 쇄기물질의 에너지 흡수계수와 부피변화와의 곱으로 쇄기인자의 조사면 의존성을 설명하려했던 Heukelom 등⁴⁾이나 Thomas 등⁵⁾의 결과가 만족스럽지 못한 것은 바로 이 두께의 변화에 대한 고려를 하지 않았기 때문인 것으로 생각된다. Mevatron MD67에서 기준조사면을 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 으로 했을 때 열린 조사면에 대한 흡수선량의 비는 Fig. 1-(a)에서 알 수 있는 바와 같이 $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ 에서는 91.9%, $15\text{cm} \times 15\text{cm}$ 는 102.8%, $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ 은 104.3%, $35\text{cm} \times 35\text{cm}$ 는 106.7%로 나타났다. 이는 조사야에 대한 콜리메이트와 팬텀에서의 산란에 의한 것으로 일반적으로 알려진 값들과 거의 일치하고 있다. 15° , 30° , 45° , 60° 쇄기의 경우에는 $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ 는 91.9, 91.4, 91.7, 91.5%이고, $15\text{cm} \times 15\text{cm}$ 는 103.2, 103.2, 103.5, 103.6%, $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ 은 105.4, 105.5, 106.1%로서 조사면이 작은 경우에는 열린 조사면과 차이가 없으나 $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ 에서는 45° 의 경우에 1.8%의 차이를 보이고 있다. 조사면이 작은 경우에는 쇄기를 통과하면서 발생하는 전자들에 의한 오

염이 적은 반면 조사면이 커질수록 그 정도가 심해짐을 확인하였다.

이를 쇄기인자로 나타내면 Table 1에서와 같이, 15° , 30° , 45° , 60° 쇄기의 경우에는 $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ 에서 0.741, 0.715, 0.573, 0.539이고, $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 은 0.741, 0.720, 0.575, 0.541, $15\text{cm} \times 15\text{cm}$ 는 0.744, 0.722, 0.579, 0.545, $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ 은 0.749, 0.728, 0.585 등으로 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 의 쇄기인자를 기준으로 할 때, 조사면이 작을 때는 쇄기에 의한 효과는 대체로 1% 미만의 값으로 다소 적게 나타나지만, 조사면이 큰 경우에는 최고로 $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ 에서 45° 쇄기일 때 1.7%까지 증가하였다. 이는 최근에 발표된 Cozzi 등⁷⁾의 결과--- 5cm 깊이, $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ 에서 45° 쇄기일 때 1.4% 증가---와 비교할 때 본 결과가 최고선량점에서의 측정값임을 고려하면 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Mevatron KD77의 6MV에서는 기준조사면을 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 으로 했을 때 열린 조사면에 대한 흡수선량의 비는 Fig. 1-(b)에서 볼 수 있는 것과 같이 $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ 에서는 90.3%, $15\text{cm} \times 15\text{cm}$ 는 102.9%, $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ 은 104.3%, $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ 는 105.3%, $35\text{cm} \times 35\text{cm}$ 는 106.8%로 나타났다. 이는 Mevatron MD67의 결과와 $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ 를 제외하고는 유사한 값을 나타내었다. 15° , 30° , 45° , 60° 쇄기의 경우에는 $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ 는 92.2, 91.7, 92.3, 91.4%이고, $15\text{cm} \times 15\text{cm}$ 는 102.8, 103.7, 104.6, 104.3%, $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ 은 105.7, 106.5, 109.2, 108.6%, $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ 는 107.8, 109.3, 113.8%로서 $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ 의 경우에는 약 1-2%, $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ 에서는 최고 8.5%의 차이를 보이고 있다. 이는 Mevatron MD67의 결과보다 훨씬 큰 변화로 임상에서 중요하게 고려해야 할 것으로 생각된다. 그 이유는 KD77에 사용하는 쇄기는 본래 10MV를 위한 것으로 재질과 두께 및 경사각도가 MD67과 다르기 때문이다.

이를 쇄기인자로 나타내면 Table 2에서 보는 바와 같이, 15° , 30° , 45° , 60° 쇄기의 경우에는 $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ 에서 0.695, 0.529, 0.321, 0.342이고, $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 은 0.681, 0.522, 0.314, 0.338, $15\text{cm} \times 15\text{cm}$ 는 0.685, 0.526, 0.319, 0.343, $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ 은 0.690, 0.532, 0.329, 0.352, $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ 는 0.697, 0.541, 0.339 등으로 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 의 쇄기인자를 기준으로 할 때, Mevatron MD67과 달리, 조사면이 작을 때에도 $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ 에서 1-2%의 증가를 보이고 있으며, 조사면이 큰 경우에서

Table. 1. Wedge transmission factors with field size on a MD67-6MV linear accelerators. (a) 15° , (b) 30° , (c) 45° , (d) 60° wedge

b \ a	4	6	8	10	12	15	20
4	0.741	0.743	0.747	0.749	0.751	0.753	0.755
6	0.735	0.741	0.744	0.747	0.747	0.753	0.753
8	0.733	0.738	0.741	0.744	0.747	0.751	0.753
10	0.731	0.735	0.738	0.741	0.744	0.747	0.751
12	0.727	0.733	0.736	0.739	0.742	0.746	0.749
15	0.730	0.731	0.734	0.738	0.741	0.744	0.748
20	0.730	0.732	0.735	0.738	0.741	0.743	0.749

b \ a	4	6	8	10	12	15	20
4	0.715	0.720	0.723	0.727	0.730	0.731	0.732
6	0.713	0.717	0.720	0.724	0.727	0.730	0.730
8	0.712	0.715	0.718	0.722	0.725	0.728	0.730
10	0.709	0.713	0.715	0.720	0.723	0.725	0.729
12	0.707	0.711	0.713	0.717	0.721	0.723	0.727
15	0.709	0.709	0.711	0.715	0.719	0.722	0.726
20	0.709	0.710	0.712	0.715	0.721	0.724	0.728

b \ a	4	6	8	10	12	15	20
4	0.573	0.577	0.579	0.581	0.583	0.585	0.586
6	0.571	0.575	0.577	0.579	0.581	0.583	0.586
8	0.569	0.572	0.575	0.576	0.579	0.582	0.585
10	0.568	0.571	0.573	0.575	0.577	0.580	0.583
12	0.566	0.570	0.571	0.573	0.577	0.579	0.583
15	0.567	0.568	0.570	0.573	0.576	0.579	0.583
20	0.567	0.570	0.572	0.574	0.577	0.581	0.585

b \ a	4	6	8	10	12	15
4	0.539	0.543	0.545	0.548	0.549	0.549
6	0.537	0.540	0.543	0.548	0.547	0.549
8	0.535	0.539	0.541	0.543	0.551	0.548
10	0.535	0.537	0.539	0.541	0.545	0.547
12	0.533	0.535	0.538	0.541	0.543	0.547
15	0.533	0.536	0.537	0.541	0.543	0.545

Table. 2. Wedge transmission factors with field size on a KD77-6MV linear accelerators. (a) 15°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 60° wedge

b \ a	4	6	8	10	12	15	20	25
4	0.695	0.700	0.698	0.703	0.703	0.705	0.705	0.706
6	0.684	0.685	0.688	0.690	0.690	0.692	0.693	0.693
8	0.675	0.682	0.685	0.686	0.688	0.684	0.686	0.691
10	0.673	0.680	0.683	0.681	0.683	0.684	0.686	0.690
12	0.675	0.681	0.681	0.684	0.681	0.687	0.689	0.695
15	0.672	0.683	0.679	0.686	0.684	0.685	0.687	0.688
20	0.673	0.681	0.681	0.684	0.685	0.688	0.690	0.696
25	0.673	0.681	0.682	0.685	0.687	0.690	0.696	0.697

b \ a	4	6	8	10	12	15	20	25
4	0.529	0.532	0.531	0.531	0.536	0.534	0.539	0.536
6	0.518	0.523	0.523	0.525	0.525	0.527	0.525	0.530
8	0.513	0.517	0.517	0.520	0.522	0.524	0.522	0.527
10	0.513	0.517	0.522	0.522	0.519	0.522	0.524	0.529
12	0.515	0.520	0.517	0.522	0.519	0.521	0.528	0.528
15	0.512	0.517	0.517	0.524	0.524	0.526	0.528	0.530
20	0.515	0.517	0.519	0.524	0.526	0.526	0.532	0.535
25	0.515	0.522	0.521	0.526	0.528	0.528	0.535	0.541

b \ a	4	6	8	10	12	15	20	25
4	0.321	0.321	0.323	0.323	0.323	0.326	0.326	0.325
6	0.311	0.315	0.317	0.315	0.320	0.318	0.322	0.322
8	0.310	0.313	0.315	0.314	0.317	0.316	0.319	0.324
10	0.312	0.310	0.317	0.314	0.317	0.316	0.319	0.324
12	0.310	0.314	0.314	0.316	0.319	0.317	0.321	0.325
15	0.308	0.312	0.316	0.319	0.316	0.319	0.327	0.330
20	0.312	0.314	0.319	0.321	0.324	0.326	0.329	0.332
25	0.312	0.319	0.318	0.319	0.322	0.329	0.322	0.339

b \ a	4	6	8	10	12	15	20
4	0.342	0.342	0.344	0.344	0.349	0.347	0.352
6	0.337	0.340	0.337	0.340	0.340	0.343	0.342
8	0.335	0.338	0.335	0.338	0.341	0.340	0.343
10	0.332	0.335	0.337	0.338	0.341	0.340	0.343
12	0.330	0.338	0.338	0.340	0.338	0.341	0.344
15	0.333	0.337	0.340	0.343	0.340	0.343	0.346
20	0.332	0.338	0.338	0.340	0.343	0.344	0.352

Table. 3. Wedge transmission factors with field size on a KD77-10MV linear accelerators. (a) 15° , (b) 30° , (c) 45° , (d) 60° wedge

b \ a	4	6	8	10	12	15	20	25
4	0.736	0.741	0.742	0.744	0.743	0.744	0.745	0.746
6	0.731	0.737	0.740	0.739	0.739	0.741	0.742	0.742
8	0.728	0.735	0.737	0.738	0.739	0.739	0.741	0.742
10	0.727	0.735	0.734	0.735	0.736	0.737	0.739	0.742
12	0.726	0.733	0.734	0.735	0.735	0.737	0.739	0.739
15	0.727	0.730	0.733	0.733	0.734	0.736	0.738	0.741
20	0.726	0.732	0.734	0.736	0.737	0.739	0.742	0.746
25	0.728	0.734	0.736	0.739	0.740	0.742	0.745	0.752

b \ a	4	6	8	10	12	15	20	25
4	0.579	0.584	0.584	0.586	0.586	0.586	0.588	0.589
6	0.576	0.580	0.582	0.582	0.582	0.584	0.586	0.586
8	0.575	0.579	0.580	0.584	0.585	0.585	0.587	0.589
10	0.574	0.581	0.580	0.581	0.582	0.583	0.586	0.589
12	0.574	0.579	0.580	0.581	0.582	0.584	0.587	0.588
15	0.574	0.576	0.579	0.580	0.581	0.584	0.587	0.591
20	0.573	0.579	0.580	0.582	0.583	0.587	0.591	0.595
25	0.575	0.581	0.583	0.585	0.587	0.589	0.594	0.602

b \ a	4	6	8	10	12	15	20	25
4	0.374	0.376	0.377	0.377	0.378	0.379	0.380	0.381
6	0.370	0.373	0.374	0.375	0.375	0.377	0.379	0.380
8	0.369	0.373	0.374	0.375	0.376	0.377	0.380	0.382
10	0.368	0.372	0.373	0.374	0.376	0.377	0.381	0.384
12	0.368	0.372	0.374	0.375	0.376	0.379	0.383	0.384
15	0.368	0.371	0.373	0.375	0.377	0.380	0.384	0.388
20	0.368	0.372	0.375	0.377	0.380	0.383	0.389	0.393
25	0.371	0.375	0.378	0.381	0.384	0.387	0.394	0.401

b \ a	4	6	8	10	12	15	20
4	0.397	0.400	0.400	0.402	0.402	0.403	0.404
6	0.396	0.398	0.400	0.400	0.401	0.402	0.404
8	0.395	0.398	0.399	0.400	0.401	0.402	0.405
10	0.394	0.398	0.399	0.399	0.401	0.403	0.406
12	0.394	0.397	0.399	0.400	0.401	0.404	0.408
15	0.394	0.397	0.399	0.401	0.403	0.405	0.409
20	0.394	0.398	0.401	0.402	0.405	0.409	0.414

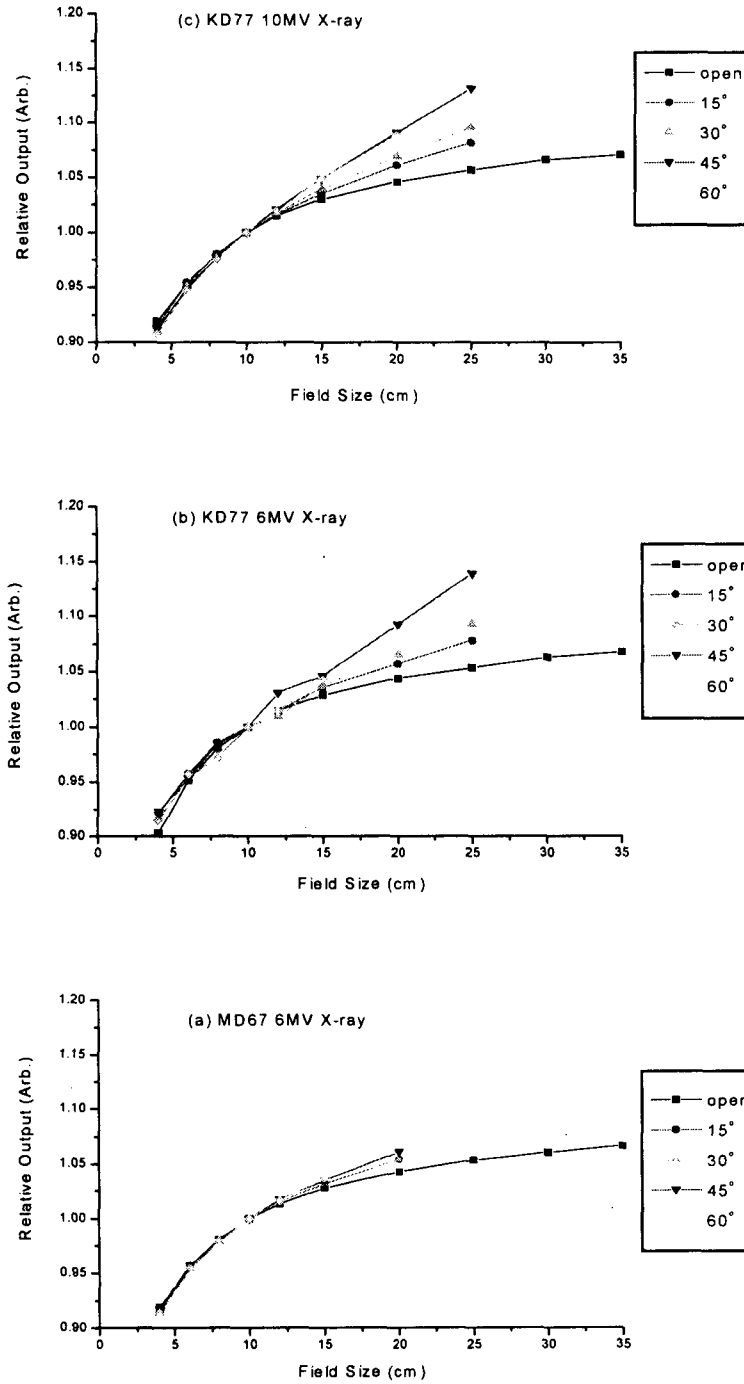


Fig. 1. Relative outputs as a function of square field size for (a) MD67 6MV, (b) KD77 6MV, and (c) KD77 10MV X-ray beam, respectively.

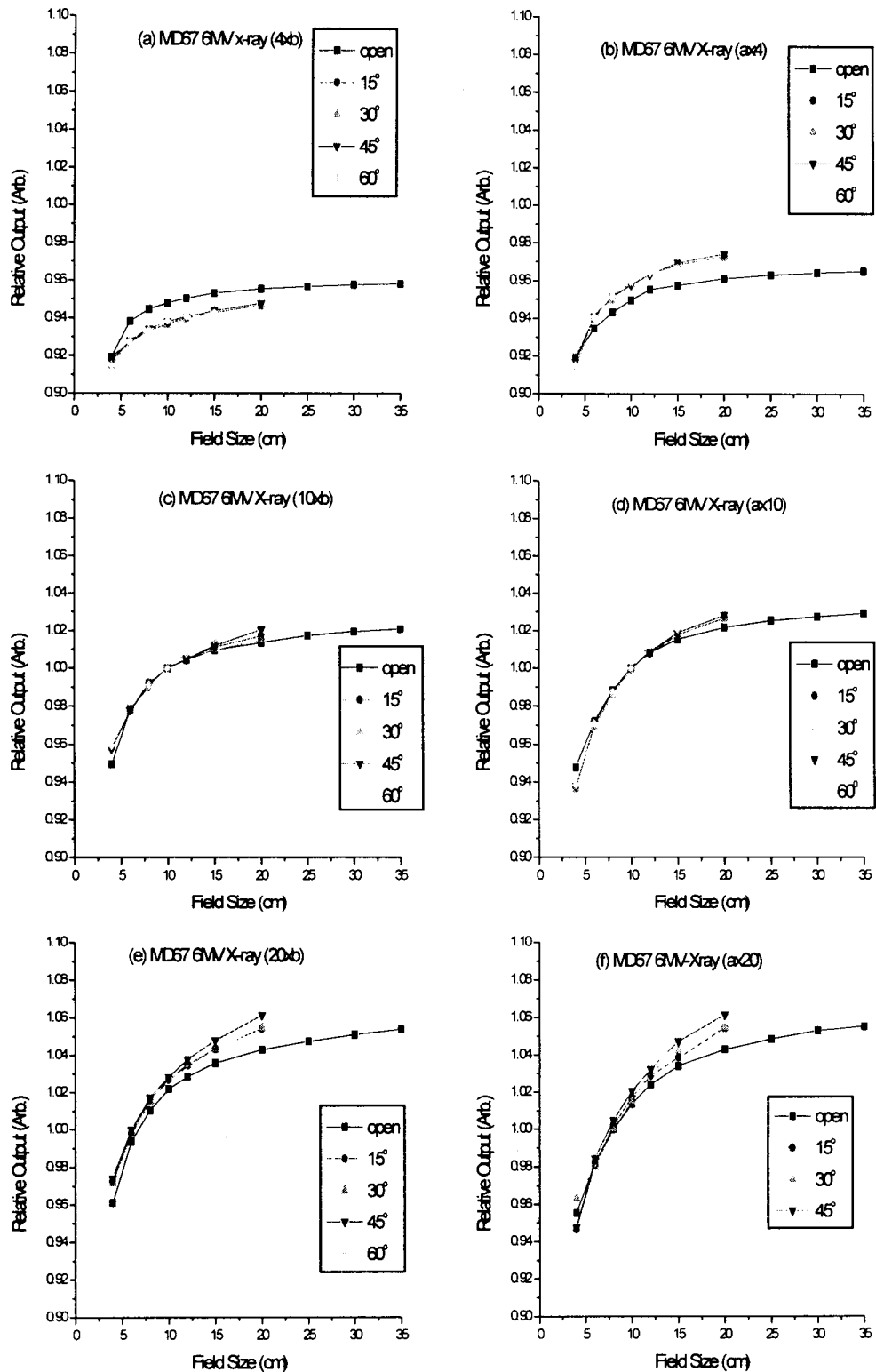


Fig. 2. Relative outputs as a function of rectangular field size for the MD67 6MV X-ray beam. (a) ($4 \times b$) field size, i.e., a field length of parallel direction to the gradient of the wedge, b , variable, and another field length, 4 cm, (b) ($a \times 4$) field size, i.e., a field length of parallel direction to the gradient of the wedge, 4 cm, and another field length, a , variable, (c) ($10 \times b$), (d) ($a \times 10$), (e) ($20 \times b$), and (f) ($a \times 20$), respectively.

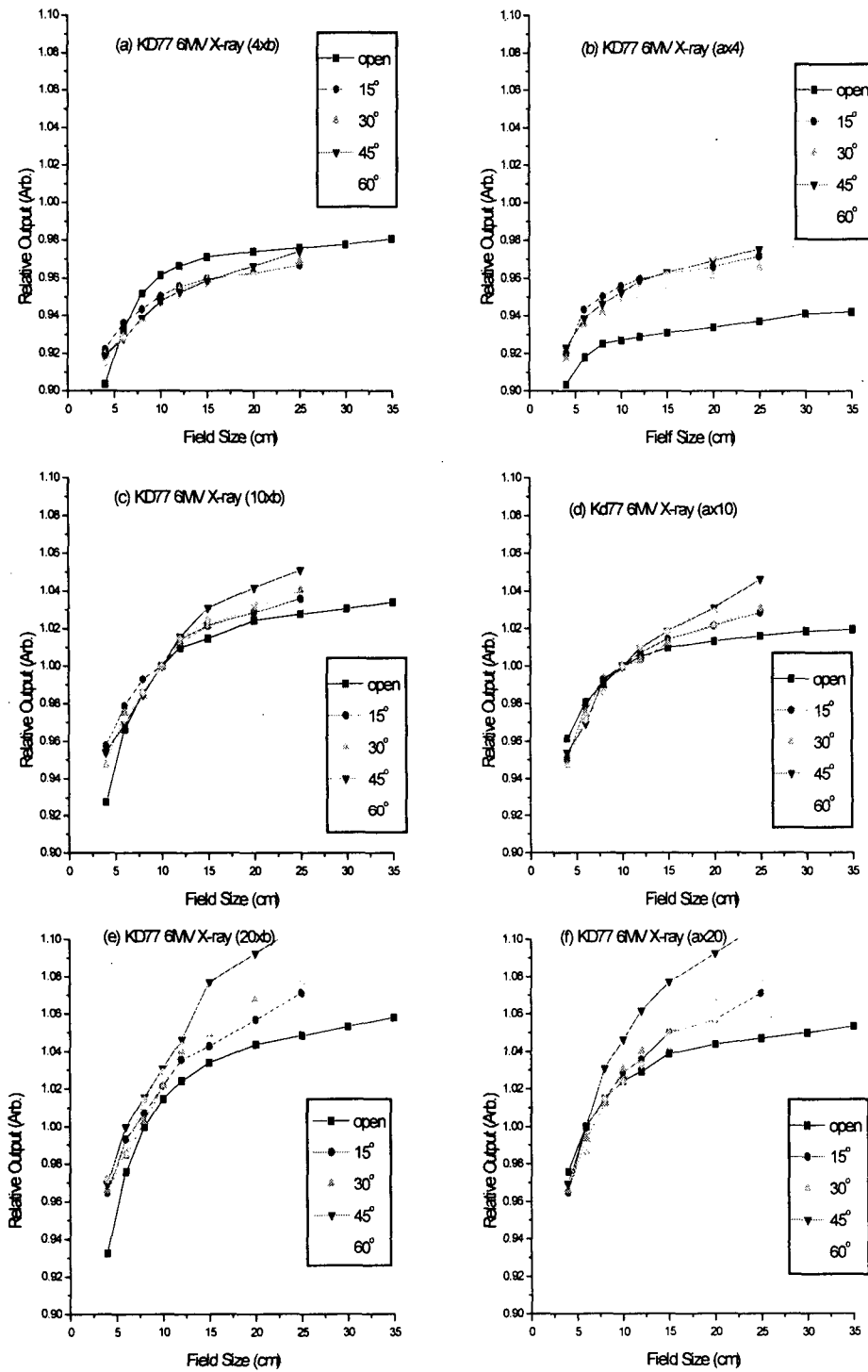


Fig. 3. Relative outputs as a function of rectangular field size for the KD77 6MV X-ray beam.

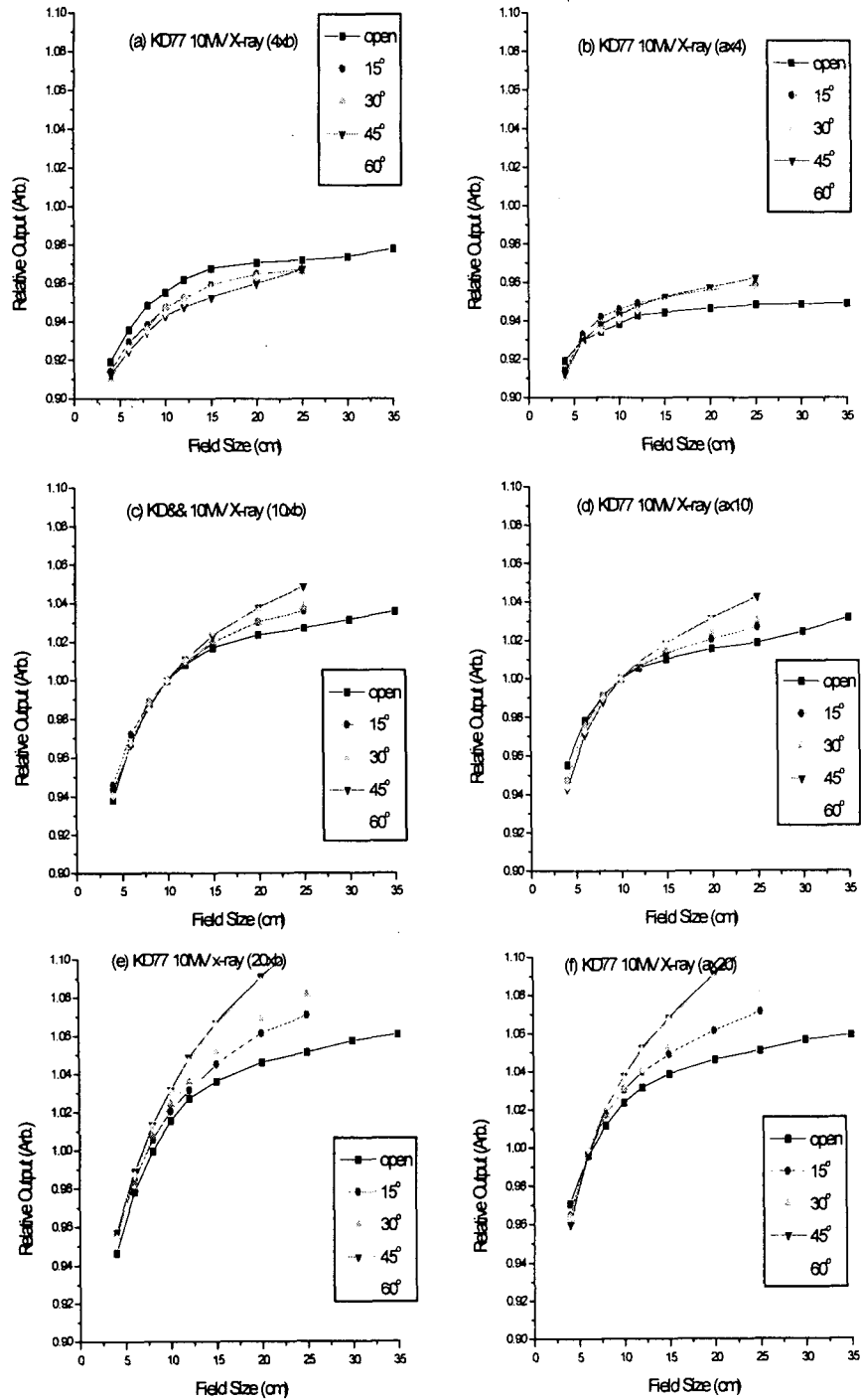


Fig. 4. Relative outputs as a function of rectangular field size for the KD77 10MV X-ray beam

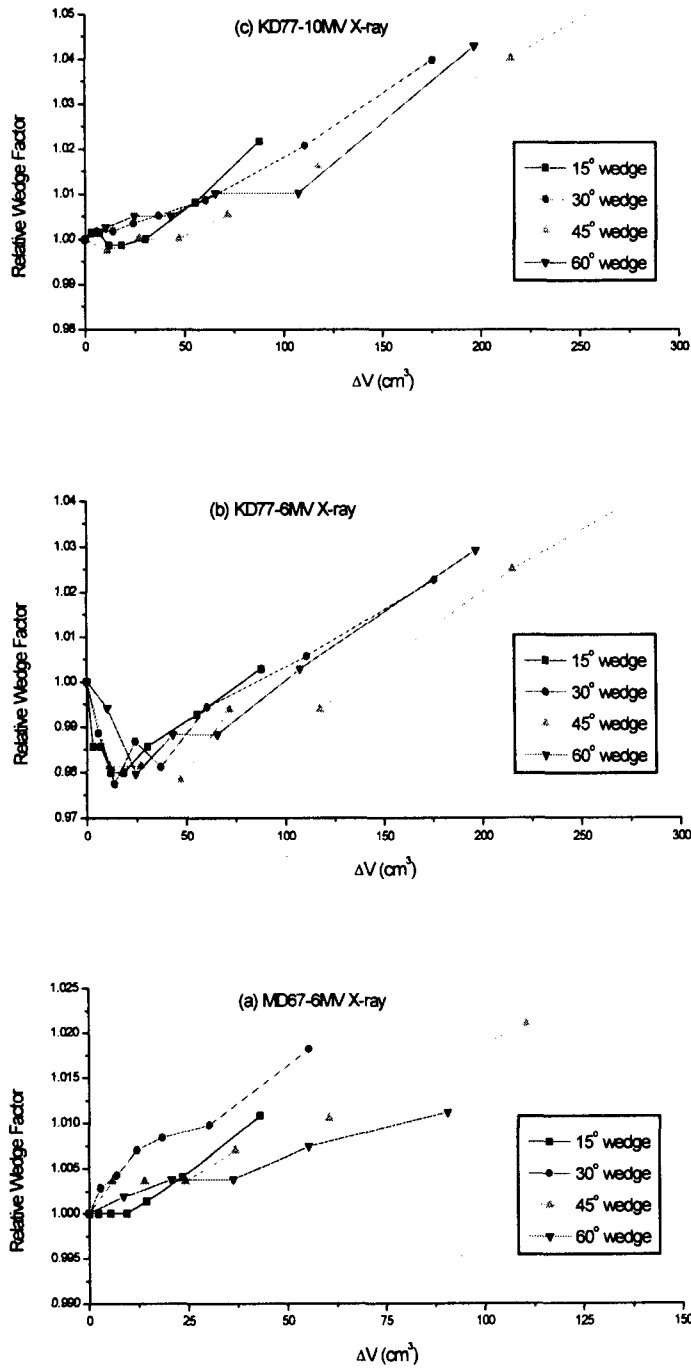


Fig. 5. Relative wedge factors as a function of irradiated wedge volume, ΔV for (a) MD67 6MV, (b) KD77 6MV and (c) KD77 10MV X-ray. The parameters along both axes are given with respect to the values for 4 cm × 4 cm field.

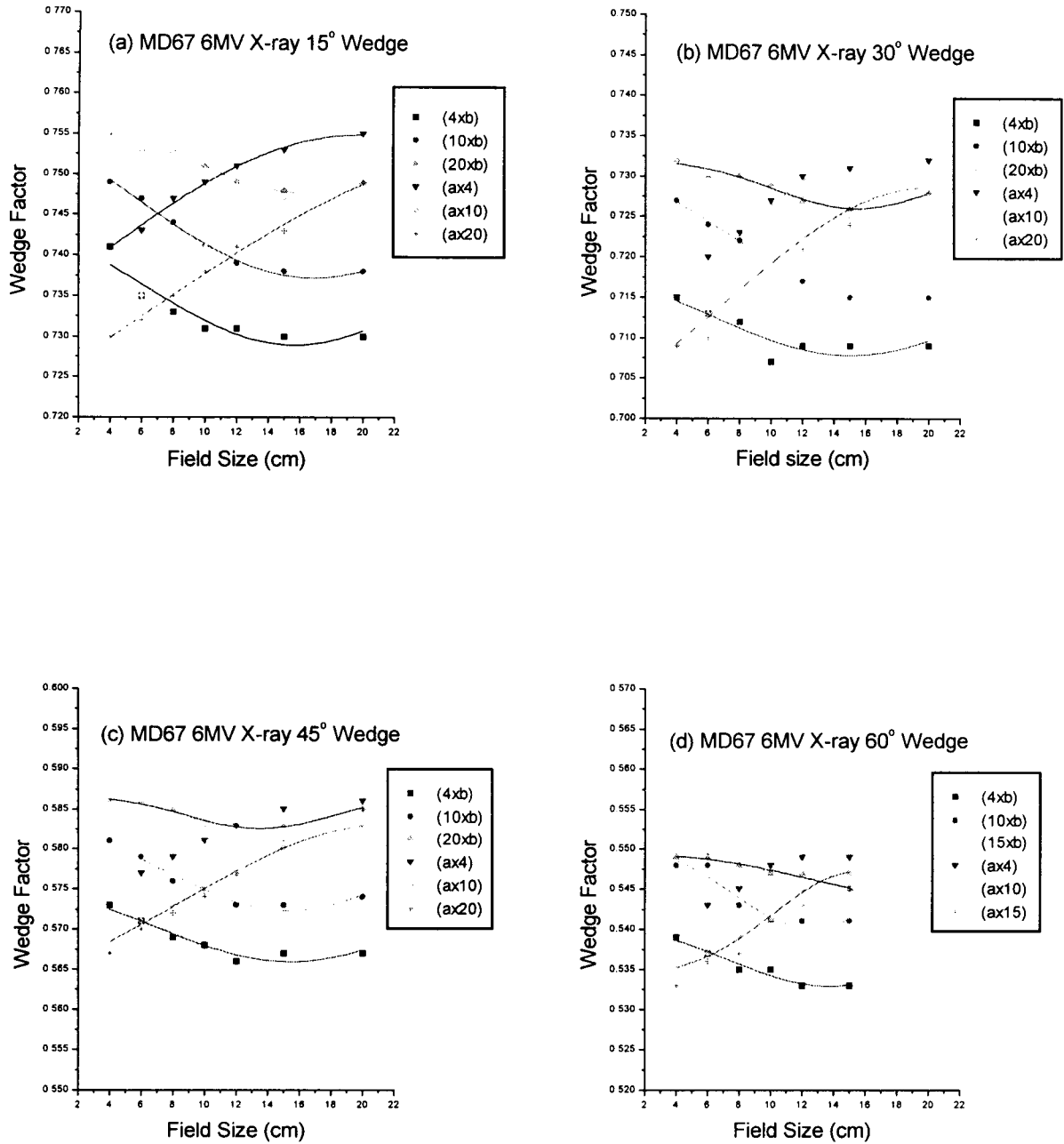


Fig. 6. The variations of the wedge factor with rectangular field size for (a) 15° , (b) 30° , (c) 45° , and (d) 60° wedge of MD67 6MV X-ray, respectively. The field sizes (4×b) means a field length of parallel direction to the gradient of the wedge, b, variable, and another field length, 4 cm, and the field size (a×4) is a field length of parallel direction to the gradient of the wedge, 4 cm, and another field length, a, variable

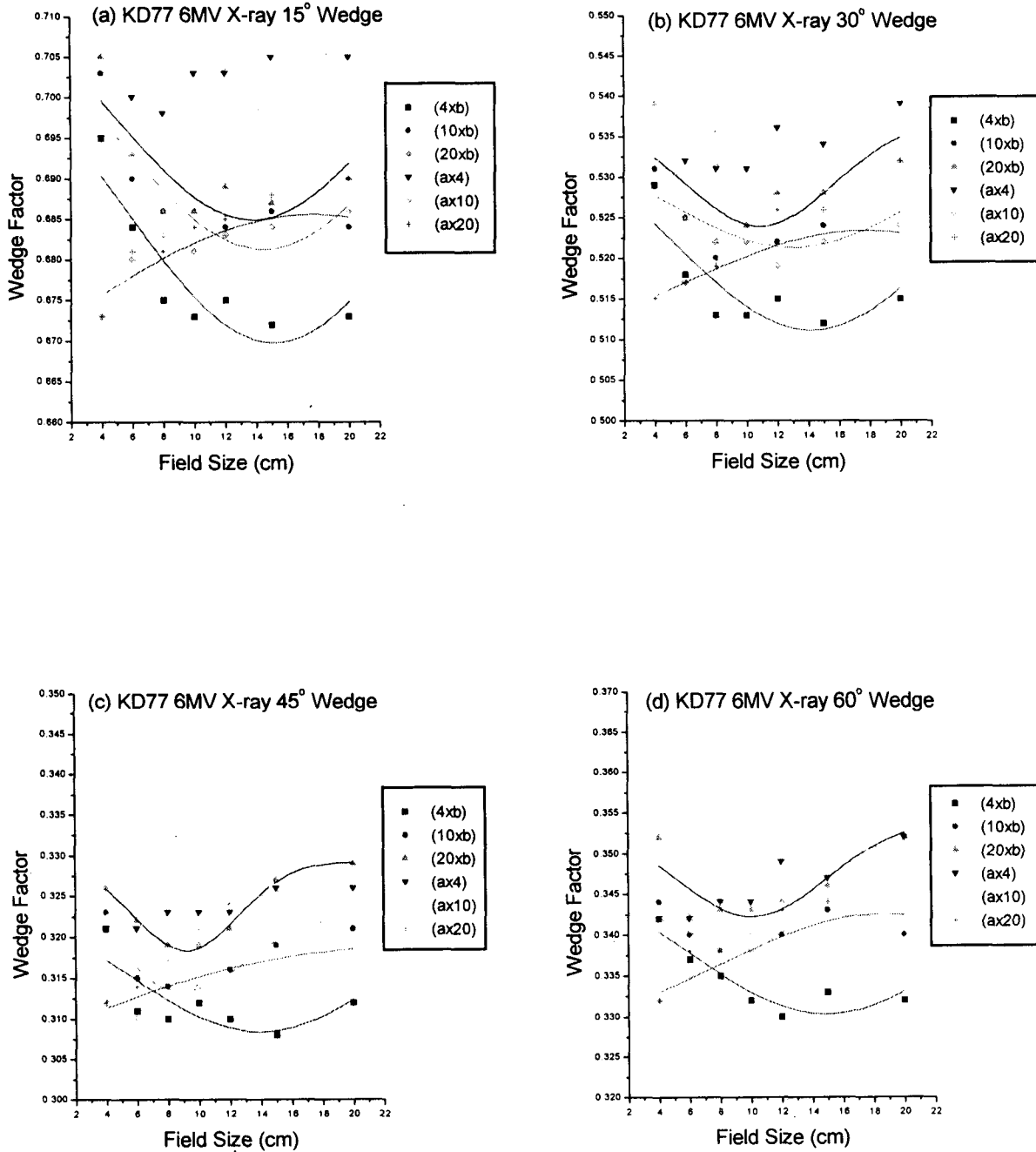


Fig. 7. The variations of the wedge factor with rectangular field size for (a) 15° , (b) 30° , (c) 45° , and (d) 60° wedge of KD77 6MV X-ray, respectively.

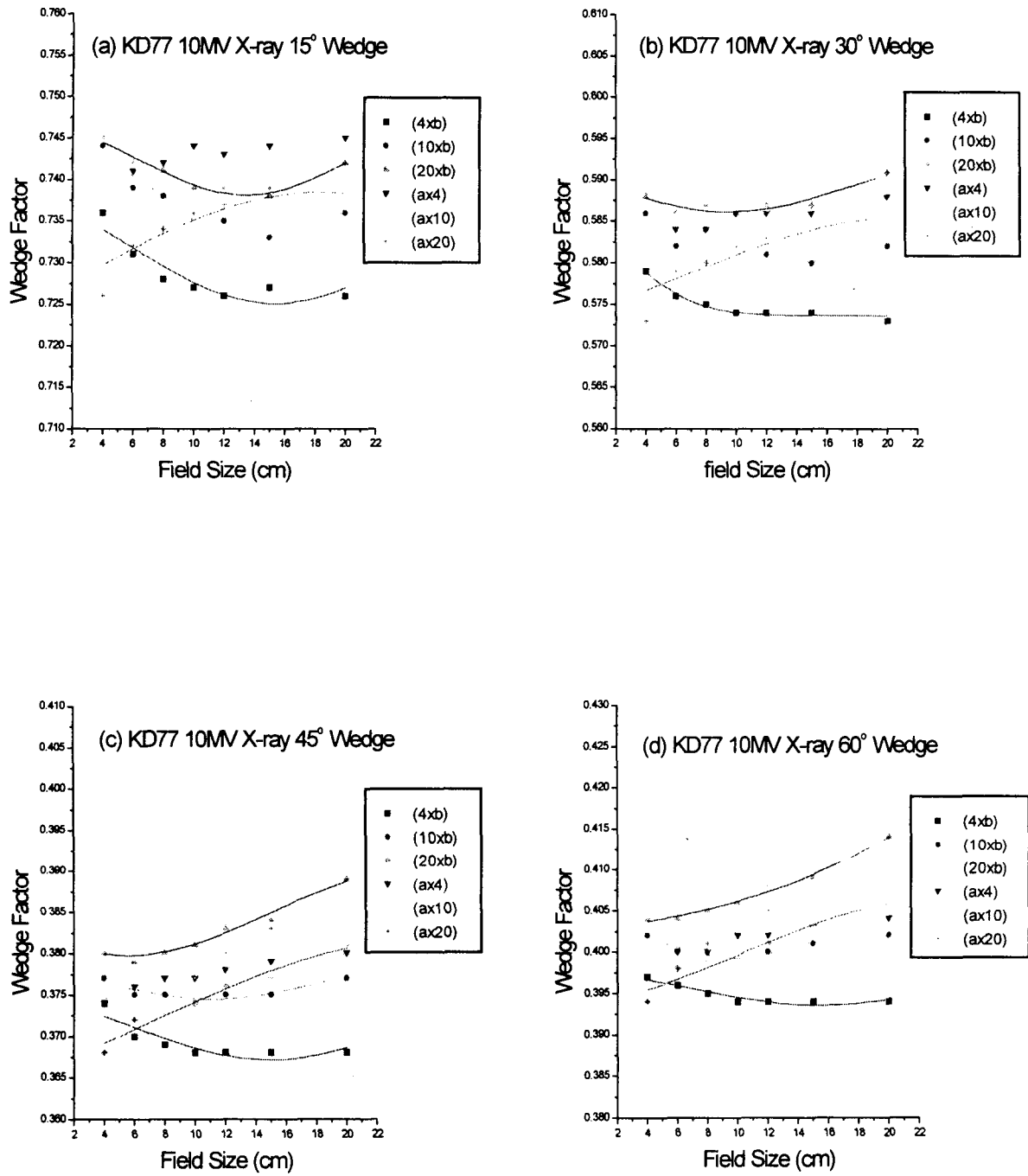


Fig. 8. The variations of the wedge factor with rectangular field size for (a) 15° , (b) 30° , (c) 45° , and (d) 60° wedge of KD77 10MV X-ray, respectively.

는 최고로 25cm×25cm에서 45° 쇄기일 때 8.0% 까지 증가하였다. 또한, 60° 쇄기의 쇄기인자가 45° 쇄기의 인자보다 더 적은 값으로 나타났는데 이는 60° 쇄기가 경사는 심하지만 두께가 더 얇기 때문이다.

Mevatron KD77의 10MV에서는 Fig. 1-(c)에 나타낸 것과 같이 기준조사면을 10cm×10cm으로 했을 때 열린 조사면에 대한 흡수선량의 비는 4cm×4cm에서는 91.3%, 15cm×15cm는 102.8%, 20cm×20cm은 105.1%, 25cm×25cm는 105.7%, 35cm×35cm는 107.1%로 6MV의 결과와 거의 같은 산란정도를 나타내고 있으며, 15°, 30°, 45°, 60° 쇄기의 경우에는 4cm×4cm는 91.4, 91.0, 91.2, 90.8%이고, 15cm×15cm는 103.5, 103.9, 104.9, 104.9%, 20cm×20cm은 106.1, 106.9, 109.1, 108.9%, 25cm×25cm는 108.2, 109.6, 113.2%로서 4cm×4cm의 경우에는 거의 열린 조사면과 같은 정도를 나타내고 있으나, 25cm×25cm에서는 최고 7.5%의 차이를 보이고 있어서 Mevatron KD77의 6MV와 마찬가지로 임상에서 고려하지 않으면 안될 변화정도이다.

Table 3에 나타낸 쇄기인자를 살펴보면, 15°, 30°, 45°, 60° 쇄기의 경우에는 4cm×4cm에서 0.736, 0.579, 0.374, 0.397이고, 10cm×10cm은 0.735, 0.581, 0.374, 0.399, 15cm×15cm는 0.736, 0.584, 0.380, 0.405, 20cm×20cm은 0.742, 0.591, 0.384, 0.414, 25cm×25cm는 0.752, 0.602, 0.401 등으로 10cm×10cm의 쇄기인자를 기준으로 할 때, 조사면이 작을 때에는 거의 같은 값을 유지하다가, 조사면이 커지면서 그 쇄기인자의 값이 증가하여 최고로 25cm×25cm에서 45° 쇄기일 때 7.2%를 보이고 있다.

위에서 살펴본 바에 의하면 Mevatron MD67의 경우는 쇄기인자가 조사면의 크기에 따라 그변화가 크지 않으나, Mevatron KD77에서는 6MV와 10MV 공히 같은 쇄기를 사용하였는데 두 경우 모두 쇄기인자가 조사면의 변화에 대해 최고로 약 7%의 큰 변화를 보인다. 이는 쇄기인자의 조사면의존성은 각 쇄기마다 그 정도가 다르다는 사실을 보여주고 있는데, 그 쇄기의 질량-에너지 흡수계수와 밀도의 곱에 의해 쇄기인자가 변할 수 있음을 밝힌 Heukelom⁵⁾ 등의 결과와 일치하고 있다.

이제 이러한 쇄기인자의 조사면에 따른 변화요인을 분석하기위해 MD67의 6MV, KD77의 6과 10MV에서 기준조사면(10cm×10cm)에 대한 직사각형 조사면

의 변화에 따른 최대선량점에서의 선량측정값을 Fig. 2, 3, 4에 각각 나타내었다. 일반적인 선량의 조사면의존성과 유사하게 조사면의 증가에 따라 선량도 증가하며 열린 조사면에 비해 더 큰 비로 나타남을 알 수 있다. 이는 쇄기를 통과하면서 발생된 이차전자들에 의한 오염으로 인한 것으로 다른 연구결과들과 일치하고 있다. 그러나, 쇄기의 경사면에 수직인 방향의 조사면이 4cm인 경우, 경사면에 평행한 방향으로 조사면을 증가시킬 때는 열린 조사면의 경우에 비해 더 낮은 값들을 보여주고 있는데(Fig. 2, 3, 4의 (a)의 경우), 그 이유를 설명하기위해 참고문헌 (5)에서와 같이 펜텀산란효과는 쇄기인자의 변화요인에 아무런 영향을 미치지 못하고 다만 쇄기를 통과하는 주광자선의 선 속의 변화만이 쇄기인자의 변화에 기여하는 것으로 가정하여 간단히 쇄기를 통과하는 광자선 선속을 구하면 다음과 같다.

미소면적 (dx) × (dy)으로 두께 h인 쇄기를 통과한 광자선 선속 dΦ는

$$d\Phi = \Phi_0 e^{-\mu h} dx dy \quad (5)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 Φ₀는 쇄기를 통과하기 전의 광자선 선속이다. 이제 쇄기의 경사면과 수직인 방향의 조사면 길이를 a, 경사면에 평행한 방향으로의 조사면 길이를 b라고 할 때, 조사면 a cm × b cm을 통과한 전체 광자선 선속 Φ는

$$\begin{aligned} \Phi_{a \times b} &= \Phi_0 \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} dx \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} e^{-\mu(1-\frac{y}{2L})h_0} dy \\ &\cong \Phi_0 e^{-\mu h_0} e^{\frac{\mu h_0}{4L} b} ab \end{aligned} \quad (6)$$

로 계산할 수 있다. 여기서 μ는 쇄기의 평균 감쇠상수, L은 쇄기의 경사면 방향의 최대길이, h₀는 쇄기 중심에서의 두께이다. 10cm × 10cm을 기준으로 할 때 전체 광자선 선속의 비는

$$\frac{\Phi_{a \times b}}{\Phi_{10 \times 10}} = e^{\frac{\mu h_0}{4L}(b-10)} \frac{ab}{100} \quad (7)$$

로 나타나므로 경사면 방향의 조사면 길이 b에 지수함수적 의존성을 갖게된다. 그러므로 b가 10cm보다 작은 경우에는 전체 광자선 선속이 단순한 조사면의 비에 의한 값보다 더욱 적어지게 되고 b가 10cm보다

큰 경우는 훨씬 더 큰 값이 됨을 알 수 있다.

Heukelom⁵⁾ 등과 Thomas^{8, 15)} 등에 의해 보고된 것과 같이 광자선이 통과하는 썬기의 부피변화에 따라 썬기인자의 변화가 비례하는 지를 조사하기 위해 본 실험결과 중 정방형 조사면에 대한 썬기인자의 부피 의존성을 Fig. 5에 나타내었다. MD67의 6MV 및 KD77의 6과 10MV에 대한 썬기인자의 썬기부피 의존성은 대략 10cm×10cm의 조사면보다 큰 경우에는 에너지에 관계없이 일정한 비례관계가 있으며, 또한 MD67 및 KD77의 기울기가 다른 것은 썬기의 재질(물질-에너지 흡수계수 및 밀도)에 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 그러나, 그보다 작은 조사면인 경우에는 부피가 증가하더라도 썬기인자가 그에 비례하지 않고 감소하거나 일정한 값을 나타낸다. 이는 앞서 설명한 것과 같이 썬기를 통과한 주광자선의 선속 변화가 상대적으로 줄어들기 때문으로 이해될 수 있다. 따라서 썬기인자의 변화는 광자선이 통과하는 썬기의 부피와 재질의 변화에만 기인한다는 것으로는 명확히 설명할 수 없고 동일한 부피변화일지라도 그 두께의 차이로부터 발생하는 선속의 변화까지 포함시켜야 할 것으로 생각된다. 이를 확인하기 위해, Table 1, 2, 3의 값들 중 한쪽면을 4, 10, 20cm으로 고정시킨 후 다른 한쪽면을 썬기의 경사면 방향과 경사면에 수직인 방향으로 변화시킬 때의 썬기인자 변화를 Fig. 6, 7, 8에 나타내었다. 조사면의 변화방향이 썬기의 경사면에 수직인 방향일 경우 일반적으로 밝혀진 것과 같이 조사면이 증가하면서 썬기인자 또한 증가함을 보여주고 있는 데 반해 조사면의 변화방향이 썬기의 경사면과 평행한 경우에는 앞서 언급한 바와 같이 변화되는 조사면의 크기가 10-15 cm까지는 대체로 줄어들고 있음을 알 수 있다. 이는 고정된 조사면의 길이가 같고 변화된 길이 또한 같은 경우 즉 (a×b) 조사면과 (b×a) 조사면인 경우는 동일한 등가조사면일지라도 썬기인자의 값은 달라질 수 있다는 가정을 뒷받침해 주고 있다. 특히 한쪽면이 좁은 직사각형 형태의 조사면인 경우 그 차이는 더욱 심하게 나타난다. 이는 단지 주광자선의 두께에 따른 선속의 변화만을 고려하고 팬텀산란효과를 무시하여 도출된 식 (6)에서 보여준 것과 같은 결과로 일반적으로 보고되고 있는 썬기의 두꺼운 부분과 얇은 부분을 통과한 광자선에 의한 팬텀산란효과는 썬기인자에 아무런 영향을 주지 않고 주광자선의 선속의 변화에 따른 상부산란효과

에 의해 썬기인자가 결정된다는 사실⁵⁾과 잘 일치하고 있으며, 그에 덧붙여 썬기인자는 조사면 변화방향에 따라 주광자선의 선속이 달라지는 변화방향 의존성이 있음을 보여주고 있다. 따라서, 계기단위값을 계산할 때의 썬기인자를 조사면의 크기, 특히 좁은 직사각형인 경우에는 썬기의 경사면 방향으로의 길이 등을 고려하여야 할 것이다.

이제 썬기인자의 조사면 변화방향에 따른 의존성을 수식화 하기 위해, 조사면의 크기에 따른 광자선의 선속변화 정도를 상부산란인자의 변화로 설명하고 있는 Heukelom 등의 썬기인자의 조사면 (a×b)에 대한 식을 인용하면 다음과 같다.

$$F_w(d, a \times b) = F_w(d, f_{ref}) \times [1 + p_0 \times \ln(\frac{f}{f_{ref}}) + p_1 \times [\ln(\frac{f}{f_{ref}})]^2] \quad (8)$$

여기서 p는 측정값에 의해 결정되는 매개변수이고, f와 f_{ref}는 (a×b)면과 기준조사면의 등가 정방형면의 길이로서 직사각형 형태의 조사면에 대한 조사면의존성을 정방형으로 바꾸어 설명하고 있다. 본 실험에서 밝혀진 것과 같이 조사면의 변화방향이 썬기의 경사면의 방향과 일치하거나 수직할 때에 따라 썬기인자의 변화가 다르기 때문에 위의 식으로는 그러한 변화요인을 규정지을 수 없으므로 보완이 필요하고 따라서 본 실험의 결과들을 적절히 만족시키는 조사면 변화에 따른 썬기인자 공식은 위의 식 (7)에서 나타낸 것과 같이 조사면의 변화방향에 따른 주광자선의 선속변화를 고려하여 식 (8)을 변형하면 다음 식 (9)과 같이 도출할 수 있다.

$$F_w(d_{max}, a \times b) = F_w(d_{max}, 10 \times 10) \times \frac{[1 + p_0 \times \ln(\frac{a}{10}) + p_1 \times [\ln(\frac{a}{10})]^2]}{[1 + q_0 \times \ln(\frac{b}{10}) + q_1 \times [\ln(\frac{b}{10})]^2]} \quad (9)$$

이 때, p와 q는 실험결과들을 잘 만족시키는 매개변수로서 각 썬기의 재질 및 경사각도와 방사선발생장치 및 에너지에 따라 결정될 수 있다. a는 썬기의 경사방향에 수직인 조사면 길이이고, b는 썬기의 경사방향과 평행한 조사면 길이이다.

결 론

조사면의 증가에 따라 MD67 6MV의 경우는 열린 조사면에서 최고 106.7%, 45° 썬기의 조사면에서 최

고 106.1%의 출력결과를 보이고 있어 썬기가 있으므로 인해 1.8%의 변화가 나타났으며, KD77 6MV과 10MV의 경우 열린 조사면에서 최고 106.8%와 107.1%, 45° 썬기의 조사면에서 최고 113.8%와 113.2%로 썬기로 인해 각각 8.5%와 7.5%의 출력변화를 보였다. 이들을 썬기인자로 나타내면 MD67 6MV와 KD77 6과 10MV에서 각각 .7%, 8.0%, 7.2% 증가함을 알 수 있었다. 이는 썬기인자의 변화가 썬기를 통과하는 주광자선의 변화에 의한 것임을 확인할 수 있었다. 또한, 좁은 직사각형 조사면의 경우에서 썬기의 경사면에 평행한 방향으로의 조사면이 증가함에 따라 10 cm - 15 cm까지는 일반적으로 보고된 것과 달리 약간의 감소를 보이고 있었다. 그에 따라 주광자선을 변화시키는 요인으로 기존에 발표된 광자선이 통과하는 썬기의 부피 의존성은 동일한 부피변화에서도 썬기의 경사면 방향에 따라 조사면의 변화에 의한 광자선 선속이 변할 수 있으므로 다소의 수정이 필요함을 알 수 있었다. 본 연구에서는 이를 보정하는 정성적인 썬기인자의 조사면 의존성에 대한 식 (9)를 제안하였고 이용하여 본 실험값들을 적용시키면 MD67 6MV에서는 평균적으로 약 0.7%, KD77 6MV에서는 약 1.3%, 10MV에서는 약 1.1%의 오차를 보여주고 있다. 다른 종류의 방사선 발생장치와 썬기에 대한 실험을 수행하지 못하였기 때문에 그 오차와 수식의 일반화는 아직도 많은 검증과 보다 자세하고 정확한 실험들이 뒤따라야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. ICRU(International Commission on Radiation Units and Measurements): Determination of Absorbed Dose in a Patient Irradiated by Beams of X or Gamma-ray Beams in Radiotherapy Procedure. Report 24, ICRU Publications, Washinton DC (1976)
2. Knoos T., Wittgren L.: Which depth dose data should be used for dose planning when wedge filters are used to modified the photon beam? Phys. Med. Biol. 36:255-267 (1991)
3. McCullough E.C., Cortney J., Blackwell, C.R.: A depth dependence determination of the wedge transmission factor for 4-10 MV photon beams.

- Med. Phys. 15:621-623 (1988)
4. Heukelom S., Lanson J.H., Mijnheer B.J.: Wedge factor constituents of high energy photon beams: field size and depth dependence. Radiother. Oncol. 30:66-73 (1994)
5. Heukelom S., Lanson J.H., Mijnheer B.J.: Wedge factor constituents of high energy photon beams: head and phantom scatter dose components. Radiother. Oncol. 32:73-83 (1994)
6. Palta J.R., Daftari I., Suntharalingam N.: Field size dependence of wedge factors. Med. Phys. 15:624-626 (1988)
7. Cozzi A.F., Cozzi L., Garavaglia G.: Wedge factors: dependence on depth and field size. Radiother. Oncol. 39:31-34 (1996)
8. Thomas S.J.: Letter to Editor. The effect on wedge factors of scattered radiation from the wedge. Radiother. Oncol. 32:271-273 (1994)
9. Kalend A.M., Wu A., Yoder V., etc.: Separation of dose-gradient effect from beam-hardening effect on wedge factors in photon fields. Med. Phys. 17:701-704 (1990)
10. Chui C.S., LoSasso T.: Beam profiles along the nonwedged direction for large wedged fields. Med. Phys. 21:1685-1690 (1994)
11. Wu A., Zwicker R.D., Krasin F., etc.: Dosimetry characteristics of large wedges for 4- and 6-MV x rays. Med. Phys. 11:186-188 (1984)
12. Huang P., Chin L.M., Bjärngard B.E.: Scattered photons produced by beam-modifying filters. Med. Phys. 13:57-63 (1986)
13. Podgorsak M.B., Kubsad S.S., Paliwal B.R.: Dosimetry of large wedged high-energy photon beams. Med. Phys. 20:369-373 (1993)
14. Tacher M., Bjärngard B.: Head-scatter factors and effective X-ray source positions in a 25-MV linear accelerator. Med. Phys. 19: 685-686 (1992)
15. Thomas S.J. : The variation of wedge factors with field size on a linear accelerator. Br. J. Radiol. 63:355-356 (1990)

The Dependence of the Wedge Factor with the Variation of High Energy Photon Beam Fluences

Young Kee Oh, Ph.D., Sang Mo Yoon, M.D.,
Jae Chul Kim, M.D., In Kyu Park, M.D., Ph.D., *Sung Kyu Kim, Ph.D.

*Dept. of Radiation Oncology, College of Medicine Kyungpook Nat. University,
Yeungnam University

For wedged photon beams, the variation of the wedge factor with field size was reported by several authors. However, until now such variation with field size had not been explained quantitatively. Therefore, the variation of the wedge factor was investigated by measuring outputs with field sizes increasing from 4 cm × 4 cm to 25 cm × 25 cm for open and wedged 6 and 10MV X-ray beams. The relative outputs for wedged fields to 10 cm × 10 cm have been obtained. The results show the increase of the wedge factor caused by the change in fluence of high energy photon beam with field size, up to 8.0% for KD77-6MV X-ray beam. This increase could be explained as a linear function of the irradiated wedge volume except small field size up to about 10 cm. In the cases of the narrow rectangular beam parallel to the wedge direction, the wedge factor decreases slightly with increasing field size up to about 10-15 cm due to a relatively reduced photon fluence from the change of the wedge thickness. We could explain the causes of a wedge factor variation with field size as the fluences of primary photon passed throughout the wedge, contributing to the dose at the central beam axis and that the fluences were affected by the gradient of the wedge with the change of field size. For clinical use, the formula developed to describe the wedge factor variation with field size has been corrected.

Key words : wedge factor, field size, photon fluence