

조직 불균질성에 의한 고에너지 광자선의 선량변화

계명대학교 의과대학 치료방사선과학교실

김 영 애 · 최 태 진 · 김 옥 배

= Abstract =

Dose Alterations at the Distal Surface by Tissue Inhomogeneity in High Energy Photon Beam

Young Ai Kim, M.D., Tae Jin Choi, Ph.D. and Ok Bae Kim, M.D.

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

Purpose : This study was performed to measure dose alteration at the air-tissue interface resulting from rebuild-up due to the loss of charged particle equilibrium in the tissues around the air-tissue interfaces.

Materials and Methods : The 6 and 10-MV photon beam in dual energy linear accelerator were used to measure the surface dose at the air-tissue interface. The polystyrene phantom sized $25 \times 25 \times 5 \text{ cm}^3$ and a water phantom sized $29 \times 29 \times 48 \text{ cm}^3$ which incorporates a parallel-plate ionization chamber in the distal side of air gap were used in this study. The treatment field sizes were $5 \times 5 \text{ cm}^2$, $10 \times 10 \text{ cm}^2$, and $20 \times 20 \text{ cm}^2$. Air cavity thickness was variable from 10 mm to 50 mm. The observed-expected ratio (OER) was defined as the ratio of dose measured at the distal junction, that is air-tissue interface, to the dose measured at the same point in a homogeneous phantom.

Results : In this experiment, the result of OER was close or slightly over than 1.0 for the large field size but much less (about 0.565) than 1.0 for the small field size in both photon energy. The factors to affect the dose distribution at the air-tissue interface were the field size, the thickness of air cavity, and the photon energy.

Conclusion : Thus, the radiation oncologist should take into account dose reduction at the air-tissue interface when planning the head and neck cancer, especially pharynx and laryngeal lesions, because the dose can be less nearly 29 % than predicted value.

Key Words : Air-tissue interface, Rebuild up

서 론

고에너지 광자선의 조직흡수선량 및 심부선량분포율은 방사선학적으로 인체와 유사한 물렌텀에서 공기

전리함을 이용하여 측정되며, 공기전리함은 에너지 의존도가 비교적 낮고, 흡수선량 환산에 필요한 전리에너지가 34 eV 로 일정하며, 선량재현성이 높고, 전리함의 벽이 공기등가벽으로 이루어져 있으므로 표준선량계로 이용되고 있다¹⁾. 심부선량분포율은 팬텀 속의

방사선 중심선속상 최대선량점의 선량에 대한 임의 값의 선량백분율로 정의되며, 이 심부선량백분율은 선원과 피부간의 거리, 조직의 밀도, 조사면의 크기 등에 따라 달라진다²⁾. 밀도가 다른 불균질 조직층이 있는 경우에 밀도가 높은 골조직을 통과한 지점의 조직 선량은 균질층의 조직선량과는 달리 조직감쇄에 의한 선량을 감소를 보이며³⁾, 한편 밀도가 낮은 공기층 또는 폐조직층을 통과한 지점의 선량은 조직감쇄의 영향이 적어 오히려 높은 선량율을 보이게 된다. 밀도차에 의한 경계면의 선량변화 요인은 전자평형, 산란선발생 및 일차선속감쇄에 의한 변화를 생각할 수 있다. 전자평형은 낮은 밀도에서 높은 밀도로 입사할 때 선량증가 현상을 보이게 되며, 이와같은 현상은 조직내에서도 적용되어 조직 불균질성에 의한 선량 중복재생 (rebuild-up) 효과가 나타날 수 있으며, 고에너지의 광자선일수록 더욱 크게 나타나게 된다. 산란선발생은 광자선의 에너지가 높은 경우에 입사방향의 전방향으로 주로 산란되어지므로 전후방에 놓인 조직밀도층에 따라 산란선발생 기여가 달라진다. 일차선속감쇄에 의한 선량변화는 질량에너지흡수차로 아래의 수식과 같이 표현된다. 즉 밀도가 낮은 층에서 높은 층으로 방사선이 입사될 때 buildup factor 는 선속이 조직과 충돌한 경우의 선속밀도 (I) 와 충돌되지 않은 선속밀도 (I_0) 에 대하여 임의의 거리벡터 r 에서 각 에너지에 대한 질량에너지흡수로부터 구해진다. Buildup factor $B_{air}(r)$ 는

$$B_{air}(r) = \frac{\int \frac{\mu_{en}(E)}{\rho} I(r, E) dE}{\int \frac{\mu_{en}(E)}{\rho} I_0(r, E) dE}$$

이다. 여기서 $\mu_{en}(E)/\rho$ 는 질량에너지흡수계수이다. 조직경계면 및 불균질층내 한점의 선량은 위의 모든 변화요인의 총합으로 나타나게되며, 불균질층내의 선량변화에 대한 실험식은 Power method, TAR method 및 일차선속감쇄에 의한 변화를 이용한 알고리즘이 발표된 바 있다⁴⁾. 그러나 경계면의 선량은 간단히 계산되지 않으며 이론적으로 Monte Carlo 시뮬레이션에 의한 선량평가가 최근 발표되고 있다⁵⁾.

방사선조사면내 공기층 또는 밀도가 낮은 폐조직 주위에 종양이 존재할 경우 종양의 가장자리 선량은 rebuild-up 효과에 의해 낮아질 수 있으나, 현재까지 조직 불균질층에 의한 경계면의 선량변화에 대하여 발표한 연구는 많지 않다. 이에 본 연구에서는 6, 10 메가볼트 광자선을 이용하여 구강 및 인후두 종양 부위

와 같이 조직내 공기층이 있는 경우와 폐조직에 둘러싸인 종양의 경계면 선량을 실험적으로 측정하여 균질한 재질의 펜텀에서 얻은 표준선량과 비교하여, 경계면의 조직 불균질층이 종양선량에 미치는 영향을 분석하여 방사선 치료선량 결정에 이용하고자 하였다.

대상 및 방법

고에너지 방사선의 조사면내 조직 불균질성에 의한 선량변화를 얻기 위하여 6, 10 메가볼트 광자선 선형 가속기 (Mitsubishi, Japan) 선원과 창두께 0.5 mg/cm² 이며 직경 16 mm, 전극간 거리 2.4 mm 인 평행판형전리함 (PS-033) 과 전위계 (Capintec, Model 192A)을 이용하여 선량을 측정하였다. 조사면내 조직 불균질층으로 사용한 펜텀재질은 29×29×48 cm³ 수조펜텀과 25×25×5 cm³ 크기의 폴리스티렌 (밀도 1.045 g/cm³) 고체펜텀, Rando humanoid phantom 중 폐조직층 (# 16, 17) 이다.

조직 불균질층의 선량변화는 조직층과 공기층의 두께변화, 광자선의 에너지와 조사면적의 크기에 따른 경계면의 선량을 측정하였다. 방사선원과 폴리스티렌 펜텀 표면과의 거리는 100 cm 로 고정하고, 조직내 공기층에 의한 경계면 선량변화를 측정하기 위하여 조

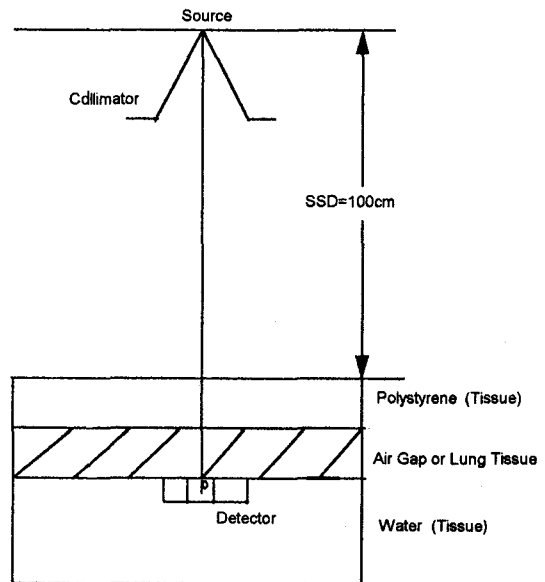


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup. SSD; Source-surface distance Detector; Parallel-plate ionization chamber (PS-033)

직층에 해당되는 폴리스티렌 고체팬텀의 두께가 10, 30, 50 mm 인 경우 공기층의 두께를 10, 20, 30, 50 mm로 변화시켜서, 이러한 조직층과 공기층을 지나 종양의 가장자리에 해당하는 수조팬텀의 표면에 도달되는 방사선량을 평행평판형전리함으로 측정하였다. 폐조직에 인접한 종양의 경계면 선량을 구하기 위하여, 폴리스티렌 팬텀 두께 30 mm 와 Rando humanoid phantom 중 폐조직층의 두께를 25, 50 mm로 변화시켜서 조직 경계면의 선량을 측정하였다(Fig. 1). 6, 10 메가볼트 광자선의 방사선 조사면적은 임상에서 비교적 많이 이용되는 5×5 , 10×10 , 20×20 cm^2 을 사용하였다.

균질한 조직에서 얻은 표준선량과 폴리스티렌 고체팬텀층과 공기층을 지나 조직 경계면에 해당하는 수조팬텀 표면에 도달되는 선량을 구하여 OER (Observed-Expected Ratio) 을 얻었으며, OER 은 동일 깊이에서 표준심부선량에 대한 불균질 조직층 선량의 비로 정의하였다. 표준선량곡선과 비교할 때 실험곡선에서는 rebuild-up 효과에 의하여 수조팬텀 표면에 도달되는 저선량 부위를 관찰할 수 있었다. 불균질 공기층에서 전자평형점의 최대선량에 대한 공기층에 접한 수조팬텀 표면선량의 비로부터 선량재생계수의 역수 (inverse of the buildup ratio, BUR^{-1}) 을 구하여 비교 분석하였다.

한편 폴리스티렌 고체팬텀층과 폐조직층을 지나 조직 경계면에 도달되는 선량을 측정하여 균질한 조직에서 얻은 표준선량과 동일한 방법으로 비교하였다.

결 과

균질한 조직에서 고에너지 광자선의 조직내 선량분

포는 피부 표면에 적은 선량이 도달되고 피하 수 밀리미터 부위에서 급격히 증가하여 최대선량점에 이른 후 서서히 감소되는 특성을 갖고 있다. 실험에서는 불균질층인 폴리스티렌 고체팬텀층과 공기층을 지나 수조팬텀 표면에 도달되는 방사선량은 rebuild-up 효과에 의해 같은 깊이에서의 표준선량에 비해 1-3 mm 까지 저선량 부위를 나타내었다.

6 메가볼트 광자선에서 폴리스티렌 고체팬텀 두께 30 mm, 공기층 두께 10 mm, 조사면적 5×5 cm^2 일 때 표준선량백분율은 90.4 % 이고 수조팬텀 표면의 선량백분율은 89.3 % 로 나타났으나, Fig. 2 와 같이 공기층 두께를 50 mm로 증가시켰을 때 표준선량백분율 72.0 % 에서 42.9 % 로 훨씬 낮게 나타났다. 한편 Fig. 3 과 같이 동일한 팬텀두께에서 조사면적 20×20 cm^2 이고 공기층 두께 50 mm 일 때 표준선량백분율은 78 % 이고 수조팬텀 표면의 선량백분율은 85.1 % 로 나타났다. 10 메가볼트 광자선에서 폴리스티렌 고체팬

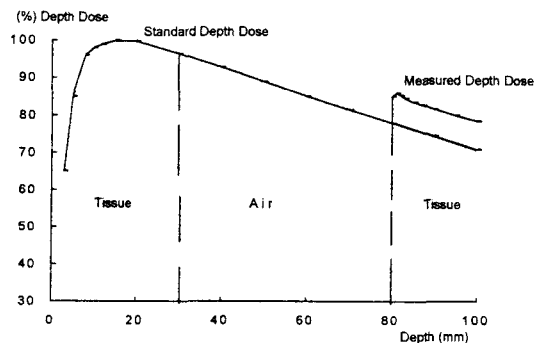


Fig. 3. Percent depth dose of 6 MV photon beam at 20×20 cm^2 field size, polystyrene thickness 30 mm, and air gap 50 mm.

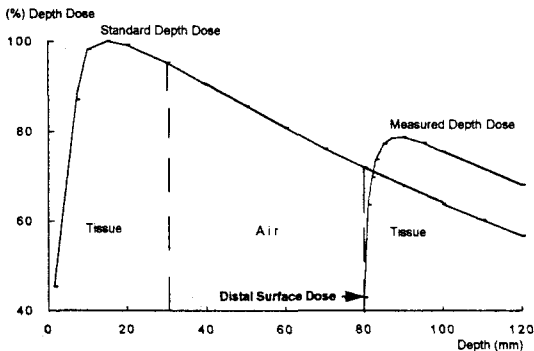


Fig. 2. Percent depth dose of 6 MV photon beam at 5×5 cm^2 field size, polystyrene thickness 30 mm, and air gap 50 mm.

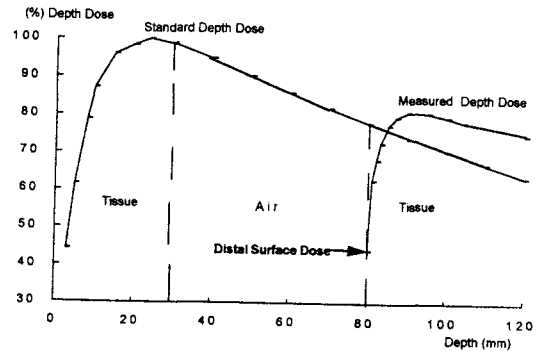


Fig. 4. Percent depth dose of 10 MV photon beam at 5×5 cm^2 field size, polystyrene thickness 30 mm, and air gap 50 mm.

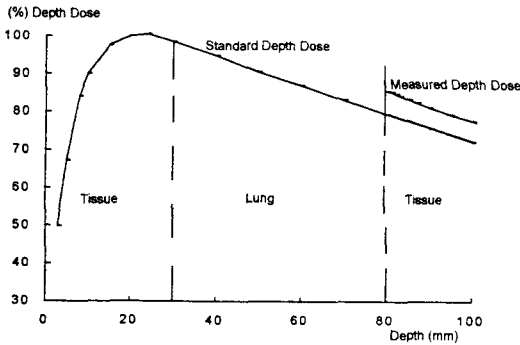


Fig. 5. Percent depth dose of 10 MV photon beam at $10 \times 10 \text{ cm}^2$ field size, polystyrene thickness 30 mm, and lung thickness 50 mm.

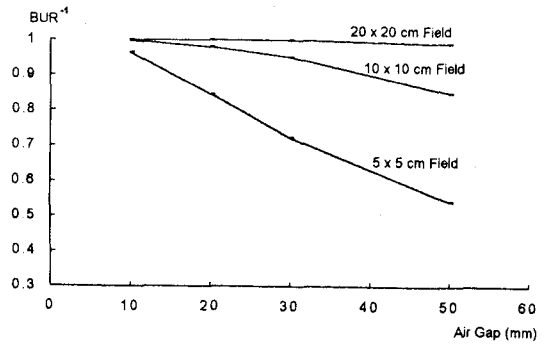


Fig. 6. BUR^{-1} of 6 MV photon beam at given field size and air gap. Polystyrene thickness : 30 mm BUR^{-1} : Inverse of buildup ratio

Table 1. Observed-Expected Ratio (OER) of 6 and 10 MV Photon Beam at Given Field Size and Air Gap in Open Beam (Polystyrene Thickness : 30 mm)

Air gap (mm)	Field size (cm^2)		
	5x5	10x10	20x20
10	0.988 (0.956)	1.032 (1.026)	1.042 (1.030)
20	0.875 (0.834)	1.038 (1.014)	1.063 (1.042)
30	0.749 (0.724)	0.992 (0.982)	1.056 (1.060)
50	0.596 (0.565)	0.933 (0.907)	1.091 (1.086)

(): OER of 10 MV Photon Beam

텀 두께 30 mm, 공기층 두께 10 mm, 조사면적 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 일때 표준선량백분율은 94.9 % 이고 수조펜텀 표면의 선량백분율은 90.7 % 로 감소하였다. 그러나 Fig. 4 와 같이 공기층 두께를 50 mm 증가시켰을 때 표준 선량 백분율 78.0 % 에서 수조펜텀 표면의 선량 백분율은 44.1 % 로 현저히 감소되었다. 에너지 변화에 따른 공기층에 인접한 경계면 선량변화는 표준선량에 비해 6 메가볼트 광자선에서는 29.1 %, 10 메가볼트 광자선에서는 33.9 % 정도 낮게 나타나 에너지가 높을수록 경계면 선량감소가 다소 컸다. Fig. 5 는 10 메가볼트 광자선에서 불균질층의 폴리스티렌 고체펜텀 두께 30 mm, 폐조직층 두께 50 mm, 조사면적 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 일때 표준선량백분율은 79.4 % 이고 불균질층의 경계면 선량은 85.5 % 로 다소 높게 나타났으며 실험오차 범위내에서 rebuild-up 은 측정되지 않았다.

Table 1 은 공기층과 조사면적에 따른 OER 변화를

나타낸 것으로 6 메가볼트 광자선에서 폴리스티렌 펜텀 두께 30 mm, 공기층 두께 10 mm, 조사면적 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 일때 OER 값은 0.988 이며, 동일 조건에서 공기층 두께 50 mm 일때는 0.565 으로 낮아졌다. 그러나 조사면적 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 이상에서는 OER 이 1 보다 크거나 1 에 가까운 값을 보였다. 한편 10 메가볼트 광자선에서도 동일한 방법으로 얻어진 결과에서 공기층 두께 10 mm 일때 OER 값은 0.956 으로 나타났으며, 같은 조건에서 공기층 두께 50 mm 일때는 0.565 였다. 6 메가볼트 광자선에서와 마찬가지로 조사면적이 커지면 OER 값은 1 보다 크거나 1 에 가까운 값을 보였다. Fig. 6 은 공기층과 조사면적에 따른 BUR^{-1} 변화를 나타낸 것으로 6 메가볼트 광자선에서 폴리스티렌 펜텀 두께 30 mm, 공기층 두께 10 mm, 조사면적 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 일때 BUR^{-1} 는 0.964 이며, 같은 조건에서 공기층 두께 50 mm 일때는 0.544 로 공기층이 두꺼워질수록 낮아졌다. 조사면적에 따른 BUR^{-1} 변화를 보면 같은 폴리스티렌 펜텀 두께와 공기층 두께에서 조사면적이 커질수록 1 에 가까운 값을 나타냈다.

고 찰

방사선조사내내 방사선 입사지점의 buildup 함수변화는 조직내에서 전방향의 전자평형, 후방산란 및 조직에서 생성된 2차전자의 기여, 방사선장치의 target 와 이온 전리함, 콜리메이트벽에서 생성된 2차전자의 영향을 받게되며, 선원-피부간 거리와 2차 차폐블록판의 유무, 조사면의 크기 등에 따라 달라지는 것으로 알려져 있다^{6,7)}. 조직 불균질층에 의한 각 매질층내 선량계산은 각 층의 밀도와 두께를 이용한 유효깊이와

유효조직-공기선량비 또는 Power 법을 이용해서 비교적 정확한 조직선량을 계산할 수 있으나 불균질층의 두께와 밀도 등에 따라 영향을 받게 되므로⁸⁾ 선량재생영역에는 정확한 선량계산이 어렵다. 특히 buildup은 고에너지 방사선이 낮은 밀도의 매질에서 높은 밀도의 매질로 진행되는 경우 2차전자평형이 이루어질 때 까지 선량증가 현상을 보이게 되므로 임상 방사선 치료시 조사면내 불균질층이 있는 경우 중앙선량의 균등성을 유지하도록 유의하여야한다. 이러한 조직 밀도차에 의한 선량변화는 침윤성 중앙 치료시에 중앙의 재발 및 방사선치료 성적 저하를 초래하게 되므로 비교적 정확한 선량평가의 필요성이 있다.

고에너지 광자선에서 조직 불균질층이 존재하는 경우에 광자선의 에너지에 따른 경계면의 선량변화를 보면, Epp 등은 10 메가볼트 광자선을 이용한 공기층이 있는 상기도 병변의 표면선량에 대한 연구에서 공기층 깊이 2 cm, 조사면적 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ 일때 병변의 표면선량이 표준선량곡선에서 예측되는 방사선량보다 15 % 정도 낮았다고 한다⁹⁾. 본 연구에서는 임상에서 널리 사용되는 6, 10 메가볼트 광자선을 이용하여 실험하였으며 방사선 조사면적 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 이고 조직층 두께 30 mm 일때 6 메가볼트 광자선에서 공기층 두께 변화에 따른 표면선량 변화는 표준선량보다 1.1 % 에서 29.1 % 까지 낮아졌으며 공기층 두께가 두꺼워질수록 방사선량 감소가 현저했다. 같은 조건에서 10 메가볼트 광자선에서 공기층 두께 변화에 따른 선량변화는 표준선량보다 4.2 % 에서 33.9 % 까지 낮아졌다. 특히 동일한 소조사면적에 같은 폴리스티렌 펜텀과 공기층에서 광자선의 에너지가 증가할수록 경계면의 선량감소가 다소 컸다.

조직 불균질층에 의한 경계면의 선량변화에 방사선 조사면적이 미치는 영향을 보면, Beach 등은 코발트-60 과 6, 10 메가볼트 광자선을 이용한 후두 부위의 표면선량에 대한 실험에서 조사면적이 코발트-60 에서는 $5 \times 5 \text{ cm}^2$, 6 메가볼트 광자선에서는 $6 \times 6 \text{ cm}^2$, 10 메가볼트 광자선에서는 $7 \times 7 \text{ cm}^2$ 이상되면 표면의 저선량부위는 생기지 않는다고 보고하였다¹⁰⁾. 본 연구에서는 같은 깊이에서 표준심부선량에 대한 불균질 조직층 선량의 비인 OER 을 조사면적에 따라 비교하였으며, 6 메가볼트 광자선에서 조직층 두께 30 mm 와 공기층 두께 30 mm 일때 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 에서는 0.749, $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 에서 0.992, $20 \times 20 \text{ cm}^2$ 에서 1.056 으로 나타나 조사면적이 커지면 OER 이 1 보다 크거나 1 에 가까워져서 표면의 저선량부위는 나타나지 않았다. 이것은 방사선 조사면적이 큰 경우 공기층에 의한

선량재생효과에 비해 산란선의 기여가 큰 것으로 생각된다. 따라서 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 이하의 소조사면 치료시 불균질층 경계면의 중앙에 대한 치료선량 평가는 rebuild-up 효과에 유의할 필요가 있다. Haselow 등은 치료부위내 공기층과 같은 조직 불균질층이 있는 강동의 점막층에 충분한 치료선량을 얻기 위해 water bag bolus 를 사용하기도 하였다¹¹⁾.

본 연구의 6 메가볼트 광자선에서 얻은 OER 은 조직 불균질층에 대한 선량 중복재생효과를 나타내며, 김 등과 이 등의 3차원 조직보상체 실험에서 얻은 표면선량의 재생효과와 유사한 경향을 보였다^{12, 13)}.

Rando humanoid phantom 중 폐조직층을 사용한 조직 불균질층 경계면의 선량측정에서 rebuild-up 효과는 관찰되나, 공기층 존재시에 나타나는 표면의 저선량부위는 나타나지 않았다. 이것은 아마도 사용한 Rando humanoid phantom 폐조직층 부위의 코팅처리와 방사선 조사면적으로 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 를 사용한 것 때문으로 생각되며, 향후 인체 폐조직에 좀 더 가까운 재질 선택과 조사면적 변화 등의 보완 연구가 필요할 것으로 사료된다.

결 론

6, 10 메가볼트 광자선을 이용하여 조직 불균질층의 공기층과 접한 수조펜텀 표면선량을 측정하여 분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 같은 에너지 광자선에서는 조사면이 작아질수록 공기층과 인접한 경계면의 선량이 현저하게 감소되었다.

둘째, 동일 조사면에서는 광자선의 에너지가 높을수록 공기층과 인접한 경계면의 선량 감소가 다소 컸다.

셋째, 조사면적이 커지면 공기층과 인접한 조직 경계면의 선량감소는 거의 나타나지 않아 조사면적에 대한 산란선의 기여가 큰 것으로 생각되며, $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 이하의 소조사면 치료시 조직 경계면의 중앙에 대한 치료선량 평가에는 rebuild-up 효과를 고려하여야 한다.

넷째, 임상에서 공기층이 존재하는 구강과 인후두 중앙의 방사선 치료에 6 메가볼트 광자선을 사용했을 때, 공기층에 인접한 점막층 (1-3 mm) 의 선량은 표준선량에 비해 29 % 까지 적게 도달될 수 있으므로 방사선 치료선량 결정에 이러한 결과를 필히 고려하여야 될 것으로 사료된다.

REFERENCES

1. **Gerbi BJ, Khan FM.** Measurement of dose in the buildup region using fixed-separation plane parallel ionization chamber. *Med Phys* 1990; 17:17-26
2. **Kahn FM.** The physics of radiation therapy. 2nd edition, Williams & Wilkins, Baltimore/London, 1994, pp179
3. **박정호, 최태진, 김옥배.** 6 MV X-선 조사시 중두개 와에서의 선량감쇠. *대한치료방사선과학회지* 1990; 8:125-131
4. **Sontag MR, Cunningham JR.** The equivalent tissue-air method for making absorbed dose calculations in a heterogeneous medium. *Radiology* 1978; 129:787-794
5. **Perliden.** Monte Carlo simulation of multiple scattering in Compton spectroscopy. *Acta Radiologica* 1992; 33:384-387
6. **Rao PS, Pillai K, Gregg EC.** Effect of shadow trays on surface dose and build-up for megavoltage radiation. *Am J Roentgenol* 1973; 117:168-174
7. **Gangon WF, Grant W.** Surface dose from megavoltage therapy machines. *Radiology* 1975; 117:705-708
8. **Werner BL, Das IJ, Khan FM, Meigooni AS.** Dose perturbations at interfaces in photon beams. *Med Phys* 1987; 14:585-595
9. **Epp ER, Boyer AL, Doppke KP.** Underdosing of lesions resulting from lack of electronic equilibrium in upper respiratory air cavities irradiated by 10 MV X-ray beams. *Int J Rad Oncol Biol Phys* 1977; 2:613-619
10. **Beach JI, Mendiondo MS, Mendiondo OA.** A comparison of air-cavity inhomogeneity effects for cobalt-60, 6- and 10-MV X-ray beams. *Med Phys* 1987; 14:140-144
11. **Haselow RE, Khan FM, Sharma SC, Williamson J.** Water bag bolus in external air cavities to produce dose homogeneity. *Int J Rad Oncol Biol Phys* 1982; 8:137-139
12. **김옥배, 최태진, 서수지.** 6 MV X-선에 대한 삼차원적 조직보상체의 연구. *대한치료방사선과학회지* 1989; 7:133-140
13. **이호준, 최태진, 김옥배.** 두경부 방사선조사시 3차원조직보상체에 의한 피부선량. *대한치료방사선과학회지* 1992; 10:147-152

국문초록 =

조직불균질성에 의한 고에너지 광자선의 선량변화

계명대학교 의과대학 치료방사선과학교실

김영애 · 최태진 · 김옥배

목적 : 임상 방사선치료에서 병소선량은 인체 연부조직의 방사선흡수와 유사한 수조펜텀에서 측정환산된 흡수선량자료를 이용하여 얻어지고 있으며, 방사선 치료부위내 공기층 또는 밀도가 낮은 폐조직 주위에 종양이 존재할 경우 공기층과 만나는 종양의 경계면 선량은 rebuild-up에 의해 낮아질 수 있으나 현재까지 연구 발표된 것은 많지 않다. 이에 본 연구에서는 6, 10 메가볼트 광자선을 이용하여 조직 불균질층 경계면 선량을 실험적으로 측정하여 종양선량에 미치는 영향을 분석하여 방사선 치료선량 결정에 이용하고자 하였다.

방법 : 고에너지 광자선의 조사면내 조직 불균질성에 의한 선량변화를 얻기 위하여 조직층에 해당되는 폴리스티렌 고체펜텀의 두께가 각각 10, 30, 50 mm 인 경우 공기층의 두께를 10, 20, 30, 50 mm 로 변화시켜서, 이러한 조직층과 공기층을 지나 종양의 가장자리에 해당되는 수조펜텀의 표면에 도달되는 방사선량을 평행평판형전리함으로 측정하였다. 방사선 조사면적은 임상에서 비교적 많이 이용되는 5×5 , 10×10 , 20×20 cm² 를 사용하였다.

결과 : 방사선 조사면적 5×5 cm² 이고 조직층 두께 30 mm 일때 6 메가볼트 광자선에서 공기층 두께변화에 따른 표면선량 변화는 표준선량보다 공기층 10 mm 에서는 1.1 %, 50 mm 에서는 29.1 % 낮아졌으며 공기층 두께가 두꺼워질수록 방사선량 감소가 현저했다. 같은 조건에서 10 메가볼트 광자선에서 선량변화는 표준선량보다 4.2 %에서 33.9 % 까지 낮아졌다. 동일 깊이에서 표준심부선량에 대한 불균질 조직층 선량의 비인 OER 은 조사면적 10×10 cm² 이상에서는 1 보다 크거나 1 에 가까운 값을 보였다.

결론 : 방사선 조사면적이 커지면 공기층과 인접한 조직 경계면의 선량감소는 거의 나타나지 않으며, 10×10 cm² 이하의 소조사면 치료시 조직 경계면의 종양에 대한 치료선량 평가에는 rebuild-up 효과를 고려하여야 될 것으로 생각된다. 임상에서 6 메가볼트 광자선을 사용하여 공기층이 존재하는 구강과 인후두 종양을 치료할 때, 공기층에 인접한 점막층 (1-3 mm) 의 선량은 표준선량에 비해 29 % 까지 적게 도달될 수 있으므로 방사선 치료선량 결정에 이러한 결과를 필히 고려하여야 될 것으로 사료된다.