

조사면내 공동의 존재에 따른 선량분포의 변화측정

연세의료원 암센터 방사선종양학과

조정희 · 방동완 · 박재일

= Abstract =

The Measurement of Dose Distribution in the Presence of Air Cavity and Underdosing Effect Result from Lack of Electronic Equilibrium

Dept. Radiation Oncology, Yonsei University College of Medicine

When high energy photon beam is incident upon an air cavity interface the effect of ionization build-up observed. This phenomenon is resulting from the surface layers of the lesions are significant deficiency of electrons reaching the layers because of the replacement of solid scattering material by the air cavity, that is lack of electronic equilibrium.

Measurement have been made in an acrylic phantom with a parallel plate chamber and high energy photon beams, CO-60, 4MV, 6MV and 10MV X-rays have been investigated. The result of our study show that a significant effect was measured and was determined to be very dependent on field size, air cavity dimension and photon energy.

The reductions were much larger for 10MV beam, underdosage at the interface was 12, 12.2, 16.9 and 20.6% for the CO-60, 4MV, 6MV and 10MV, respectively. It was found that this non-equilibrium effect at the interface is more severe for the higher energy beams than that of lower energy beams and the larger cavity dimensions the larger beam reductions occur. This problem is of clinical concern when lesions such as carcinoma beyond air cavities are irradiated, such as larynx, glottic and the patients with maxillectomy and ethmoidectomy and so forth.

Key Words : Electronic equilibrium, Air cavity, Dose distribution, Build-up.

서 론

고에너지 방사선 치료시 공기와 조직의 계면(interface)에 의한 피부 보호 효과(skin sparing effect)가 일어난다는 것은 잘 알려진 사실이다. 이러한 요인으로 인해 피부에 인접한 병소의 방사선 치료시 적정선량을 조사기 위해서는 세심한 주의를 요하게 되며 전자 평형의 감소 현상을 줄이기 위해 Bolus와 같은 물질을 이용하게 된다. 그러나 조직내에 위치

한 병소, 인후두암과 상악동암 등의 환자에게서 전체상악골 제거술(total maxillectomy)을 받은 환자의 경우 이들 부위에 대한 고에너지 방사선 치료시 공동(air cavity)의 존재에 의해 방사선이 병소 부위에 도착하기 이전에 공동을 통과하게 됨으로 병소 부위에 도달하는 전자량은 현저히 감소하게 되는데 이는 고형(solid)의 산란 물질이 공동에 의해 대치되기 때문이다.^{1,2)} 이와 같은 현상은 공동의 기저(interface)에서 흔히 발생하며 공동의 크기가 4cm 이상이며 조

사야 면적이 적을수록 크게 나타난다^{3,4)}. 즉 조사면 내 공동이 차지하는 비율이 증가함에 따라 커진다. EFF 등(1977)의 연구에 의하면 소 조사야에 의한 상기도 치료시 병소 부위 표면에서 전자 평형의 결핍에 의한 선량 감소율이 10% 이상이라 보고하였고⁵⁾, Klain(1993) 등의 Linac 4MV를 이용한 대항 2문 조사시 계면에서의 선량 감소율이 10% 정도 나타났다고 보고했다⁶⁾. 이러한 전자 평형의 결핍 현상은 에너지 뿐만 아니라 공동의 크기와 조사야 면적에 의해서도 영향을 받는 것으로 보고되고 있는데, Scrimger(1972) 등의 연구에 의하면 공동의 크기가 3cm를 초과하지 않으면 임상적으로 큰 전자 평형 결핍 현상이 일어나지 않는 것으로 보고했다⁷⁾. 이와 같은 연구를 토대로 에너지별, 공동의 크기 변화별, 조사 면적의 변화에 따른 선량 분포의 측정은 공동이 존재하는 부위에 대한 고에너지 방사선 치료시보다 정확한 선량 분포에 관한 지식을 제공할 뿐만 아니라 이를 토대로 필요시 추가적인 선량을 조사함으로써 보다 양질의 치료를 가능케 하는데 그 의미가 크다 하겠으며 이에 관한 정보를 제공코자 하는데 본 연구의 목적이 있다.

실험재료 및 방법

측정은 에너지별로 1.25MV에서 10MV까지 시행하였으며 Cobalt-60 Teletherapy Unit, Clinac-600C, Clinac 2100C/D를 이용하여 각각의 에너지별 측정을 하였다. 측정을 위한 Phantom의 제작은 Polystyrene Phantom을 이용하였고 공동은 Polystyrene과 등 밀도(isodensity)를 가진 Paraffin을 이용하여 자체 제작한 Phantom을 이용하여 측정하였다. 선량 측정은 표면 선량을 측정하기 위해 Capintac model 192에 diameter가 2cm이며 2mm의 창(window)을 가진 parallel plate chamber를 이용하여 측정하였으며 이 측정기의 오차 범위는 $\pm 5\%$ 미만이다. 측정 방법에 있어서는 $2 \times 2 \times 2$ cm과 $2 \times \infty \times 2$ cm 크기의 공동을 만들어 Polystyrene Phantom 사이에 위치시켰으며 총 두께는 8cm이 되도록 제작하였다. 측정은 Cobalt-60은 SSD 80cm에서 4, 6, 10MV는 SAD 100cm에서 측정하였으며 반복 측정하여 평균치를 계산하여 대표값으로 제시하였다. 또한 공동이 존재치 않는 경우에 동일

한 방법에 의해 선량을 측정하였으며 이를 기준값으로 하고 공동의 존재시와 비존재시의 값을 비교하여 상대적 선량값을 계산한후 분석하였다.

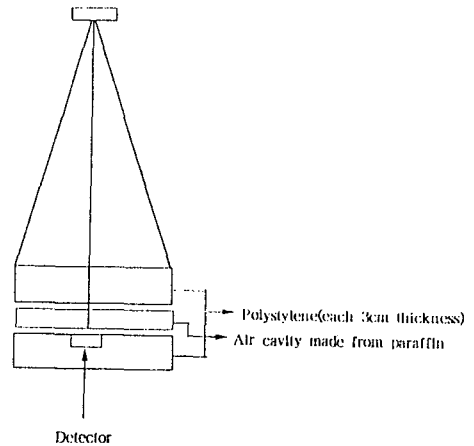


Fig. 1. Irradiation geometry measurements. The air cavity is $2 \times 2 \times 2$, $2 \times \infty \times 2$ cm in size

결 과

1) 공동의 존재에 따른 선량 분포의 변화 측정 결과
공동의 유무에 따른 선량 분포의 변화 측정 결과 공동의 비존재시 체표면에서 전자 평형을 이루는 깊이까지 점진적인 선량 증가 현상을 보이다 이후 깊이의 증가와 거리 증가에 따라 지수함수적인 선량 감소 현상을 보였다. 그러나 조사면내 공동의 존재에 따라 전자 평형은 깨어지며 공동의 기저에서는 급격한 선량 감소 효과가 나타나는 것으로 측정되었다. 특히 조사야 면적이 4×4 cm이고 공동의 크기 $2 \times \infty \times 2$ cm의 공동 기저에서는 CO-60, 4MV, 6MV 그리고 10MV가 각각 12%, 12.2%, 16.9% 그리고 20.6%의 선량 감소가 측정되었다. 그러나 이러한 선량 감소 효과는 깊이의 증가에 따라 다시 전자 평형 현상을 보이며 에너지별로 일정 깊이에서 다시 build-up 현상이 측정되었으며 CO-60은 0.3cm, 4MV 0.5cm, 6MV 0.8cm 그리고 10MV가 1cm 깊이에서 D_{max} 가 형성되었으며 이후 깊이의 증가와 더불어 선량은 깊이에 따라 감소하는 추세를 보였다 (Fig. 2).

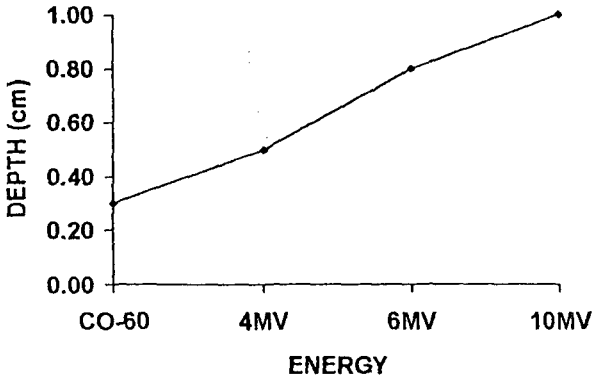


Fig. 2. Rebuild-up point varying to the energy

그러나 공동 기저 일정 깊이 이상에서는 선량이 오히려 공동의 비존재시 정상 선량 분포에 비해 오히려 증가하는 것으로 측정되었으며 이는 정상 조직에 더욱 많은 선량이 조사되는 결과를 보였다(Fig. 3, 4).

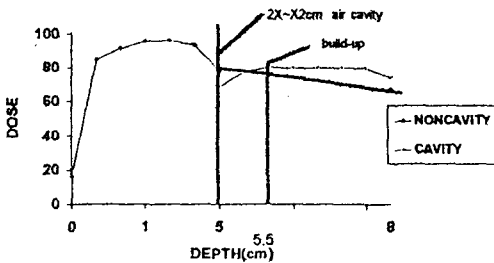


Fig. 3. Depth dose measured in the presence and absence of air cavity(4MV, FS = 4×4, 2×~×2)

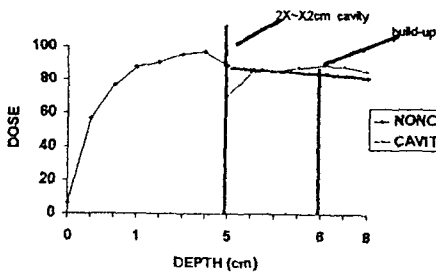


Fig. 4. Depth dose measured in the presence and absence of air cavity(10MV, FS = 4×4, 2×~×2)

깊이에 따른 선량 분포의 변화에는 공동의 크기와 에너지 그리고 조사야 면적의 변화와 높은 상관관계가 존재하는 것으로 나타났다. 공동의 크기가 증가하면 공동 기저에서 측정 선량은 현저히 감소하는 것으로 조사되었으며 공동의 크기와 기저에서의 측정 선량과의 관계는 반비례관계가 성립되는 것으로 조사되었다. 즉 CO-60에서 조사야 면적이 4×4cm이고 공동의 크기가 2×2×2cm인 경우 상대 선량비가 0.99%에서 공동의 크기가 2×∞×2cm으로 증가함에 따라 0.88%로 감소하였으며 10MV에서도 조사야 면적이 4×4cm이고 공동의 크기가 2×2×2cm인 경우 상대 선량비가 0.913%에서 공동의 크기가 2×∞×2cm으로 증가함에 따라 0.794%로 급격히 감소하는 결과를 보였다(Fig. 5, 6).

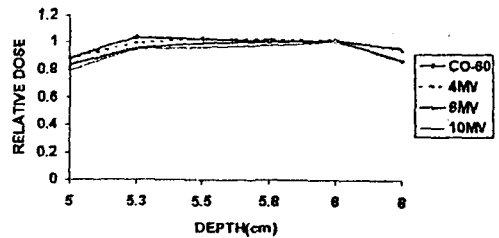


Fig. 5. Relative dose distribution varying to the energy((FS = 4×4, Air cavity = 2×~×2)

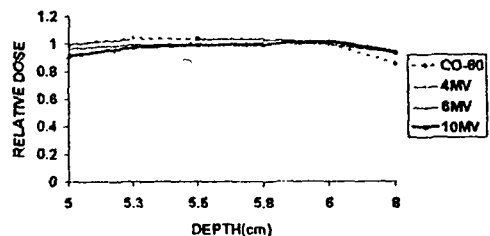


Fig. 6. Relative dose distribution varying to the energy((FS = 4×4, Air cavity = 2×2×2)

공동의 존재시 에너지와의 관계는 에너지가 증가함에 따라 선량 감소는, 즉 기대 선량과 측정 선량

과의 차, 커지는 것으로 조사되었으며 이는 공동의 크기가 증가하여도 같은 결과를 나타냈다. 즉 FS, 4×4cm과 공동의 크기가 2×2×2cm인 경우 CO-60, 4MV, 6MV 그리고 10MV가 각각 1.004, 1.0, -0.036, -0.087의 상대적 선량값이 측정되었으며 2×∞×2cm으로 공동의 크기가 증가함에 따라 CO-60, 4MV, 6MV 그리고 10MV에서 각각 12%, 12.2%, 16.9% 그리고 20.6%의 선량 감소가 측정되어 공동의 크기에 비례하여 상대적 선량 감소비는 커지는 것으로 측정되었으며 위의 측정값에서도 볼 수 있듯이 에너지에 따라서는 에너지가 증가함에 따라 선량 감소는 즉 전자 평형의 결여는 뚜렷한 것을 볼 수 있었다(Fig. 7, 8).

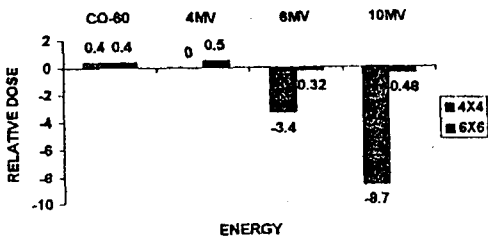


Fig. 7. Relative dose calculation beyond the air cavities(Air cavity = 2×2×2)

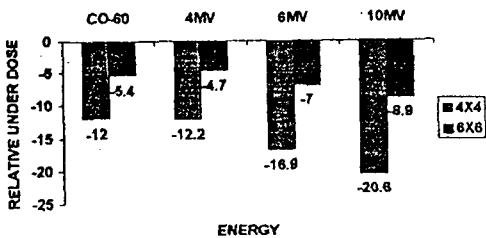


Fig. 8. Relative dose calculation beyond the air cavities(Air cavity = 2×~×2)

또한 선량과 조사 면적과의 관계 분석에서는 조사 면적이 증가함에 따라 산란선의 영향에 의한 선량의 증가 현상을 관찰할 수 있었다. 즉 CO-60에서

공동의 크기가 2×∞×2cm이고 조사야가 4×4cm일 때 측정 선량비는 0.88%였으나 조사야가 6×6cm으로 증가함에 따라 측정 선량비도 0.946%로 증가하였다.

이러한 현상은 측정된 모든 에너지에서 동일하게 나타났다(Fig. 9, 10).

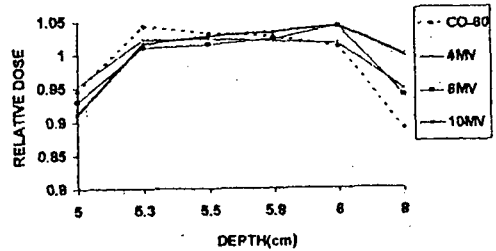


Fig. 9. Relative dose distribution varying to the energy (FS = 6×6, Air cavity = 2×~×2)

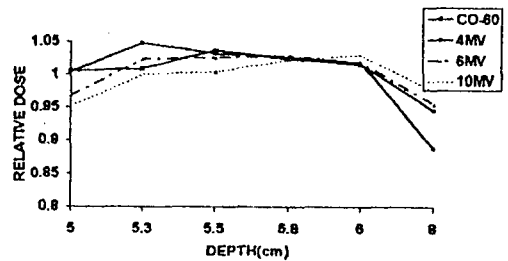


Fig. 10. Relative dose variation varying to the energy & cavities (FS = 6×6, Cavity = 2×2×2)

2) 공동에 따른 최종선량의 변화 측정

조사면내 공동의 존재시에는 공동의 크기 변화와 에너지에 따라 최종 출력 선량에 많은 차이를 나타내는 것으로 측정되었다. 즉 공동의 크기가 2×2×2cm이고 조사야가 4×4cm인 경우 CO-60, 4MV, 6MV 그리고 10MV가 각각 1.097, 1.099, 1.059, 1.032%였으나 동일한 조건에서 공동의 크기를 2×∞×2cm으로 증가시킴에 따라 각각 1.111, 1.099, 1.085, 1.053%로 증가함을 알 수 있었다. 또한 위에서 볼 수 있듯이 동일한 조건에서도 에너지의 증

가에 따라 최종 선량의 변화를 관찰할 수 있었는데 에너지가 증가함에 따라 최종 선량은 감소하는 것으로 나타났다. 즉 에너지가 증가함에 따라 기대 선량과 측정 선량간의 차이가 현저히 감소하는 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 조사 면적의 변화에 따른 차이는 크지 않은 것으로 측정되었다. 즉 CO-60의 경우 공동의 크기가 $2 \times \infty \times 2 \text{cm}$ 이고 조사야가 $4 \times 4 \text{cm}$ 일 때 선량비가 11.1%에서 $6 \times 6 \text{cm}$ 으로 넓혔을 경우 11.7%로 측정되었으나 유의한 차이를 보이지는 않는 것으로 나타났으며 측정된 모든 에너지에서 동일한 결과를 관찰할 수 있었다(Fig. 11, 12).

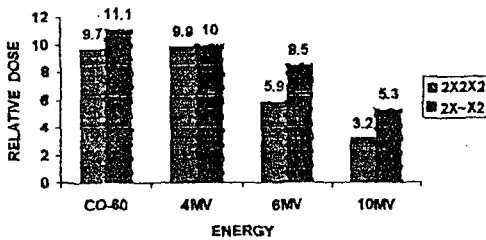


Fig. 11. Relative output measurement after 8cm sized in materials(FS = 4 x 4)

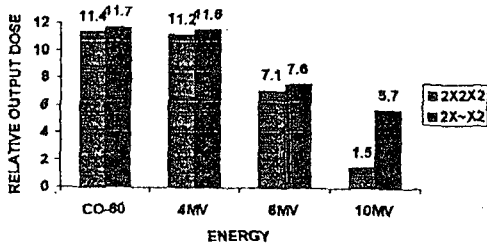


Fig. 12. Relative output measurement after 8cm sized in materials(FS = 6 x 6)

고찰

공동(air cavity)은 주로 두경부암 환자 치료시와 선량을 피부면에 쪽으로 이동시키기 위해 bolus 사용시 피부면과 밀착시키지 못함으로서 문제가 발생할

수 있다^{3,4,5,6}. 특히 maxillar cancer와 ethmoid cancer에서 maillactomy와 ethmoidectomy를 시행한 환자군에서 수술면이 중앙세포에 양성(resection margin positive)여서 수술면에 선량을 증가시키는 것이 중요한 경우 세심한 주의를 요하게 된다. 본 실험에서도 알 수 있듯이 수술면에 선량을 증가시키기 위해 총 선량을 증가시킬 경우 정상 조직내의 선량의 과도한 증가로 인해 더욱 문제점으로 대두될 수 있다¹. 본원에서는 이러한 경우 resin를 조직등가물질로 이용해 선량 분포가 균등하게 분포할 수 있도록 하고 있으며 상대적으로 공동 기저에서 선량 감소 효과가 덜한 저에너지 방사선을 사용하여 이를 보완하고 있으나 ethmoidectomy를 시행한 환자나 glottic ca 환자에게서는 실질적으로 공동에 의한 선량감소를 보상할 수 있는 방법이 없는 경우가 많기 때문에 이에 대한 대책이 요망된다. 그리고 bolus 사용시에는 피부면에 선량을 증가시키기 위해 반드시 피부와 밀착하여 사용하는 것이 바람직하며 그렇지 못할 경우 bolus를 사용하여 얻을 수 있는 잇점이 없으며 오히려 선량의 감소 효과를 유발할 수 있을 것이다.

조직내 선량 분포를 볼 수 있는 등선량 곡선과 관련하여 치료 계획시 문제점으로 2D plan에서는 일반적으로 밀도보정(density correction)을 안하는 경우가 있는데 이때 등선량 곡선상에서는 조직내 밀도 차이에 대한 감약이나 전자 평형의 파기로 인한 선량 분포의 변화를 보여주지 못함으로 조사면내 중요 장기(critical organ)의 존재시 밀도 보정을 못하는 2D plan을 치료에 적용할 경우에는 세심한 주의를 요하며 밀도 보정이 가능하다 하더라도 다시 공동의 존재로 인한 추가적인 선량의 감소현상을 보정하는 것이 바람직한 선량 계산이 될 수 있으리라 생각된다.

다음은 선량측정과 관련한 문제점들로 측정용 Phantom의 제작상 일정한 크기의 공동을 인위적으로 제작하기 위하여 Paraffin을 이용하였으나 모든 평면에서의 물질 두께가 동일하지 못하여 완전한 밀착이 어려웠으므로 이러한 요인이 측정 선량값에 어느 정도 영향을 미쳤는지를 확인하기가 곤란하였으며 Paraffin을 중심으로 위와 아래에는 acryl phantom을 위치시키고 측정을 하였기에 이들 두 물질간의 밀도 차이가 전자 평형에 어떠한 영향을 미쳤는지를 측정

할 수 없었으므로 이 변수에 대한 보다 정확한 연구가 이루어져야 하며 측정값은 위의 제한점을 고려하여 분석해져야 할 것이다.

본 연구에서 제시한 측정값들은 Capintac model 192 parallel plate chamber를 이용하여 측정하였으며 조사장비는 Cobalt-60 Teletherapy Unit와 Varian Clinac 600, 210C, 2100C/D를 이용하여 측정하였으나 측정 당시 측정기의 신뢰도와 재현성 등을 사전에 검증하지 않고 측정하였으며 2회 측정치 간의 차이가 존재하는 부문에 대해서는 단순히 평균치를 제시하였으므로 측정기의 오차로 인한 변수가 어느 정도인지를 알 수가 없으며 측정 당시의 기계적인 요인과 치료실내의 온도와 습도 등 치료실 환경에 의한 변수들의 영향을 고려하지 않았으므로 이들 변수가 측정값에의 영향 정도를 분석하지 못하였기에 본 자료를 이용시 이에 대한 각별한 주의를 요한다. 본 실험에서는 이론적으로 에너지가 증가함에 따라 공동 기저에서의 선량은 더 많은 감소를 보여 에너지와 선량 감소간에 상관 관계가 성립되어야 하나 CO-60과 4MV에서는 이러한 현상이 깨지는 결과를 얻었으며 이는 기계적인 변수에 의한 것인지 측정 방법이나 측정 장비상의 오차인지를 규명할 수 없었다. 그러나 Klein 등의 4MV를 이용하여 측정한 11%의 선량 감소 결과와는 일치하는 결과를 얻었다⁴⁾. 또한 EPP(1977) 등의 조사 면적의 증가에 따라 저에너지 일수록 전자 평형의 결핍현상이 줄어든다는 결과와도 일치하는 측정 결과를 얻었다³⁾.

측정 방법상의 제한점으로 공동의 크기와 위치 그리고 높이 등의 변화를 다양하게 측정하여 이들 간의 차이와 상관 관계를 분석하는 것이 바람직하나 실제 측정에서는 공동의 크기를 $2 \times \infty \times 2 \text{cm}$ 과 $2 \times 2 \times 2 \text{cm}$ 만을 시행하여 이들 간의 상관 관계만을 제시하였으므로 분석시에는 주의를 요한다. 그러나 본 실험을 통하여 공동의 존재에 따른 선량 분포의 변화를 알 수 있었으며 공동 기저에서 새로운 build-up 현상이 일어난 것을 확인하고 공동 기저 일정 깊이 이상에서는 공동의 비존재시에 비해 많은 선량이 조사됨으로 인해 정상 조직의 내용 선량 등의 변화로 인해 치료 결과에 영향을 줄 수 있는 현상 등을 관찰한 것을 실제로 임상에 적용시 치료 계획의 수립이나 치료시에 많은 도움을 줄 수 있으리라 사료되

며 이러한 연구를 계기로 향후 연구의 제약점으로 대두된 것을 보완하여 실험하면 보다 훌륭한 연구를 할 수 있으리라 생각된다.

결 론

공동의 존재에 따라 에너지별(1.25, 4, 6, 10MV), 조사야 크기별(4×4 , $6 \times 6 \text{cm}$), 공동의 크기별($2 \times 2 \times 2$, $2 \times \infty \times 2 \text{cm}$) 선량 분포의 변화에 관한 측정을 위해 Polystyrene Phantom을 이용해 Capintac Model 192 측정기에 Parallel Plate Chamber로 CO-60(1.25 MV)은 SSD 80cm에서 4, 6, 10MV는 SAD 100cm에서 측정한 결과는 다음과 같다.

1. 공동의 존재에 따라 공동 기저에서 급격한 선량 감소 현상을 보였다. 특히 에너지가 높아감에 따라 이러한 현상은 두드러졌으며 CO-60, 4MV, 6MV, 10MV에서 각각 12%, 12.2%, 16.9%, 20.6%의 선량 감소율을 보였다. 그러나 에너지에 따라 공동 기저 0.3cm-1cm 사이에서는 공동의 비존재시에 비해 상대적으로 높은 선량 분포율을 보여 정상 조직에 더 많은 선량이 조사되었다.

2. 공동의 존재에 따라 전자 평형이 깨어지며 에너지에 따라 공동 기저 일정 깊이에 새로운 build-up 현상이 일어나는 것으로 측정되었으며 에너지별 build-up 지점은 CO-60, 4, 6, 10MV에서 각각 0.3, 0.5, 0.8, 1cm 지점에서 발생하였다.

3. 공동의 유무에 따른 출력 선량 측정 결과 측정 한 모든 에너지에서 공동의 비존재시에 비해 높은 출력 선량율을 보였으며 공동의 크기에 의한 영향보다는 에너지에 따라 출력 선량의 변화가 심하게 나타났다. 즉 에너지 의존성이 강한 것으로 측정되었다. 출력 선량은 조사야 면적이 $4 \times 4 \text{cm}$ 이며 $2 \times \infty \times 2 \text{cm}$ 공동 통과시 CO-60과 4, 6, 10MV에서 각각의 출력 선량은 11.1%, 9.9%, 8.5%, 5.3%가 증가하는 것으로 측정되었다.

REFERENCE

1. Beach J.L. et al : A protocol for the determination of absorbed dose from high energy photon and electron beams. Med. Phys. 10 : 741-771,

- 1983.
2. Massey JB. : Dose distribution problems in megavoltage therapy. *Brit. J. Radiol.* 35 : 735-738, 1962.
 3. EPP E.R. et al : Underdosing of lesions resulting from lack of electronic equilibrium in upper respiratory air cavities irradiated by 10MV X-ray beams. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2 : 613-619, 1977.
 4. Eric E. Klein et al : The influence of air cavities on interface doses for photon beams. *Int. J. Rad. Oncol. Biol. Phys.* 27 : 419-427, 1993.
 5. Nilsson B. et al : Build up effects at air cavities measured with thin TLD. *ACTA Radiol. Ther. Phys. Biol.* 15 : 427-432, 1976.
 6. S.C. Prasad et al : Surface dose for tangentially incident photon beams in the presence of air gap and air cavity. *Medical dosimetry.* 20 : 15-19, 1995.
 7. Scrimger J.W. : Effect of air gap on absorbed dose in tissue. *Radiology.* 102 : 171-172, 1972.