

방사선 전신 조사를 위한 임상적 선량 계획

연세대학교 의과대학 방사선과학교실

임수진 · 김귀언 · 이도행 · 추성실 · 박창윤

- Abstract -

Clinical Dosimetric Planning for Total Body Irradiation

S.J. Lim, G.E. Kim, D.H. Lee, S.S. Chu, C.Y. Park

*Department of Radiology and Nuclear Medicine
Yonsei University, College of Medicine Yonsei Cancer Center*

Widely applied total body irradiation (TBI) for bone marrow transplantation and treatment of lymphoma and disseminated other malignancies, can be effectively performed when uniformity of dose distribution is established.

Special considerations for TBI dosimetry are required as several problems associated with very large field size and long source-skin-distance (SSD) arose. For the TBI with LMR-13 linear accelerator, radiobiological aspects, techniques and methods were discussed and through direct phantom measurements, basic radiation physical data were obtained.

Following results are presented.

1. Adequate field size up to 130 x 130cm for the whole body at 4.1m from the source can be provided. Though about 20% decrease of beam intensity in the corners of the field was detected, uniformity of dose distribution can be established with the patient seated with flexion of the legs.
2. Lateral opposing two portals were used as the treatment geometry.
3. The bed made of styrofoam was devised for the fixation of the patient position and thick hospital gown itself acted as the bolus.
4. Compensation filters were designed for the uniform dose distribution and the central axis dose difference less than $\pm 5\%$ was achieved.
5. For the further repeated measurements, humanoid phantom in sitting position, as large as a man, was made with the use of soft tissue equivalent paraffin compound and lung tissue equivalent cork.
6. Dosage at several anatomic locations were monitored using TLD chips.

Ⅰ. 서 론

방사선 전신 조사는 여러가지 치료 목적으로 사람에게 실시되고 있다. 즉 급성 백혈병이나 재생 불량성 빈

본 논문은 1982년 1월 12일에 접수되었음.

* 본 논문은 1981년도 연세대학교 의과대학 학술연구비 보조로 이루어졌음

혈의 치료를 위한 골수이식 시술 전에 골수 파괴를 시키기 위해서나, 전신에 퍼진 악성 임파종이나 정상피종 등의 종양세포를 파괴하여 증상을 완화 시킬 목적으로, 또는 조직이식 시 면역의 억제를 위해 실시된다.

특히 근래에 각광받고 있는 골수이식의 성공에 Thomas, Lochte와 Ferrebee의 훌륭한 연구가 보고된 이후 방사선 전신 조사는 중요한 역할을 담당하고 있다.

방사선 전신 조사에 대한 개념은 1905년 Dessauer가 균일한 조사량을 전신에 주기 위해 방 중앙에 환자를 두고 주위로 돌아가며 여러개의 X-선 관구를 설치함을 구상함으로써 시작되었다. 그 후 1927년 Kraus가 전신에 퍼진 종양치료를 위해 방사선 전신 조사를 제시하였고, 같은 해 Werner Teschendorf는 백혈병 환자에 방사선 전신 조사를 시행하였다.

1932년 Heublein은 Memorial 병원에 방사선 전신 조사를 위해 특별히 고안된 방을 설치하고 임파종, 백혈병, 그의 다른 암환자들을 치료하는데 사용했다. 그 후 1953년에는 Bethesda의 Naval medical Research Unit에 방사선 전신 조사를 위한 장비가 설계되었고, 1958년에는 City of Hope Unit, Oak Ridge Institute of the Nuclear Studies Unit 등이 가동되었다.

그 당시는 주 용도가 조직이식과 관련된 면역 억제를 얻기 위함이었으나 곧 화학요법으로 대체되었고, 방사선 전신 조사는 다른 치료법이 실패한 말기의 파종성 암이나 백혈병에 증상 완화를 목적으로 계속 연구되었다. 그러나, 화학제제의 독성이나 부작용 등이 점차 문제시 됨으로써 면역 억제를 위한 방사선 전신 조사가 다시 부각되고 있다.

아직까지는 방사선 전신 조사를 실시하는 각 치료자나 치료기관에 따라 선량율, 환자의 자세, 선의 에너지, 총 조사선량 등이 각기 달리 보고되고 있으며 이를 일관성 있게 통일시키고자 하는 노력이 시도되고 있다.

방사선 전신 조사에 있어서 중요한 점을 어떻게 전신에 균일한 선량을 조사할 수 있는냐 하는 것이며, 이를 위해 흡수 선량을 결정하는 데는 일반 방사선 치료때 사용되는 자료와 같은 종류의 것이 필요하나 특수한 장거리 조사하는 면에 따른 교정이 요구 되어 진다.

에너지가 ^{60}Co 이상으로 커질 수록 이러한 교정은 점점 적어지지만, 방사선 전신 조사 선량 측정을 위해서는 기술, 기계에 따른 매개 변수, 환자의 자세 및 크기 등에 대한 특별한 고려를 해야 된다.

연세대학교 부속암센터에서도 시행 예정인 방사선 전신 조사를 위한 기본적인 선량 측정 자료가 필요시므로 저자는 부속암센터 병원에서 사용되고 있는 LMR-13 선형 가속기에서 발생되는 고에너지 X-선을 전신 조사에 이용하기 위하여 조직 등가인 Phantom을 제작하고, 조사방법에 따른 조직 보상 여과판 및 산란계자 침대 등을 고안하였으며, 전신조사면과 선량율의 생물학적 효과를 고려하여 선원과 피부간의 거리를 연장시키면서 조직내 선량을 측정하고 삽입용 소형 측정기 들로 조직내 최적

선량 분포도를 작성하는 등, 방사선 물리적인 면을 연구 고찰하여 임상응용에 정확도를 높이고져 하였다.

II. 실험 재료 및 방법

1. 고에너지 방사선 발생장치

전신조사를 위한 고에너지 방사선은 LMR-13 선형가속기를 이용하였으며, 이것은 그림 1과 같이 전자총에서 발생된 전자를 진행형 마이크로파에 의해서 약 13 메가 전자볼트로 가속시킨 후 텅스텐 타겟에 충돌시켜 에너지 폭이 좁은 10 MV의 X-선을 발생시키고, 타겟트를 사용하지 않으면 8, 10, 12 MeV의 고에너지 전자선을 발생시킬 수 있으며 선량율은 1 m 거리에서 분당 200~600 rads로서 인체에 적용하기에 가장 적당한 선량율을 얻을 수 있다.

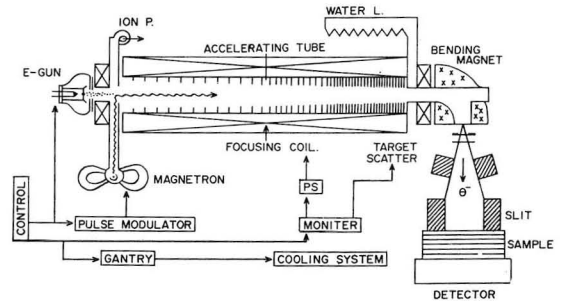


Fig. 1. Linear Accelerator.

10 MV X-선의 조직내 선량분포는 표면하 2.5 cm가 최대 선량분포를 이루고 있으며 반가중 두께는 약 18 cm이므로 전신조사에 가장 적합하다고 생각된다.

이 장치는 조사면이 1 m 거리에서 최대 40×40 cm 밖에 되지 않으므로 전신조사를 위한 약 150×150 cm의 조사면을 얻기 위해서는 장치의 입구를 측방으로 회전시켜야 가능하게 되었으며 거리를 띄우기 위해서 벽면에 있는 모든 기구를 제거하였다.

2. Phantom 제작

전신 조사에서 가장 중요한 것은 체내 각 부위에 부여되는 선량을 측정하는 동시에 각 부위에 대한 균일한 선량, 또는 계획된 선량을 정확히 부여하는 것이 가장 중요하며, 전신 조사이므로 약간의 초과 선량도 매우 위험하며 조금의 미달 선량은 치료 성과를 얻지 못한다.

이와같은 이유에서 인체와 등가물질이고 크기가 같은 phantom을 제작하여 각 부위를 충분히 측정한 후 실제

환자에게 이용해야 한다.

제작한 phantom의 구성 성분은 표 1과 같이 파라핀 85%, 송진 10%, 포리에치렌 5%를 혼합했으며, 이때 phantom의 밀도는 0.98 g/cm^3 으로서 고에너지 방사선에서는 거의 연조직과 동가인 물질로 측정되었고 폐조직의 등가물질로서는 밀도가 0.33 g/cm^3 인 콜크판을 이용하여 그림 2와 같이 인체 phantom을 구성하였으며 5 cm 두께의 횡단 판으로 구성 조립하여 각 부위의 선량을 구석구석 측정할 수 있었고 방사선 전신 조사시의 환자 체위와 같게 하기 위해 그림 3과 같이 굴곡 좌위 체위를 하도록 구성하였다.

Table 1. Composition of Tissue Equivalent Phantom

Tissue	Material	Percentage of weight	Density (g/cm^3)
Soft Tissue	Paraffin	85	0.95
	Resin	10	1.12
	Polyethylene	5	0.98
Lung	Cork	100	0.33

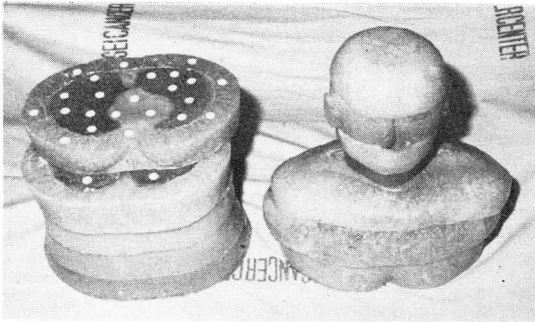


Fig. 2. The phantom made of soft tissue equivalent paraffin compound and lung tissue equivalent cork.

3. 공기 등가 침대와 Bolus의 제작

전신 조사를 받는 환자의 대부분이 기력이 없을 뿐 아니라 전신 조사 시간이 길기 때문에 기립상태 또는 어떤 특정한 체위로서 오래 견디기 곤란하므로 환자는 일정한 모양의 침대를 이용해야 하며 적당한 Bolus를 사용해야 한다.

침대는 고형물질을 이용하여 환자의 체위를 고정시키는 동시에 여기에서 발생된 방사선이 인체에 영향을 주지 않도록 공기 등가 물질을 사용해야 한다. 가장 적당



Fig. 3. Tissue equivalent humanoid phantom in treatment position.

한 공기 등가 물질은 스틸로폼으로서 밀도가 0.0015 g/cm^3 이고 여기서 산란된 방사선은 거의 무시될 수 있었으며 환자의 체위를 유지시킬 수 있었다.

10 MV X-선의 조직내 최대 선량지점은 표면하 2.5 cm이므로 피부표면의 선량을 증가시키기 위해서 조직 등가 Bolus를 사용하여야 하며 이를 위해 환자는 Bolus 등가의 가운을 이용하였다.

4. 보상 여과판의 제작

전신에 대한 측방 이문 대항 조사에서 발생하는 인체내의 불균등 선량분포를 보상하여 균일한 선량분포를 얻기 위해서 각 위치에 알맞은 보상 여과판을 제작하였다.

전신 조사를 위한 보상 여과판의 제작 계획은 인체의 굴곡과 두께의 차이 및 폐, 연조직 등의 조직 밀도, 그리고 여과판과 조직에 대한 두께 비율을 구해야 한다.

보상 필터는 산란선을 제거하기 위하여 그림 4와 같이 피부에서 멀리 떨어진 트레이 (shadow tray)에 고정시켰으며 방사선의 방사·방향에 따라 필요한 조직두께 만큼의 비율로 구성되도록 하였다.

보상 필터의 두께 비율은 phantom에서의 Bolus 두께와 보상 필터의 두께 비율로서 방사선의 에너지, 조사면, 조직의 결손 두께, 피부와의 거리에 따른 복잡한 함수관계가 있지만 보상 여과판이 20 cm 이상일 때는 $0.7 \pm 5\%$ 로 측정되었다.

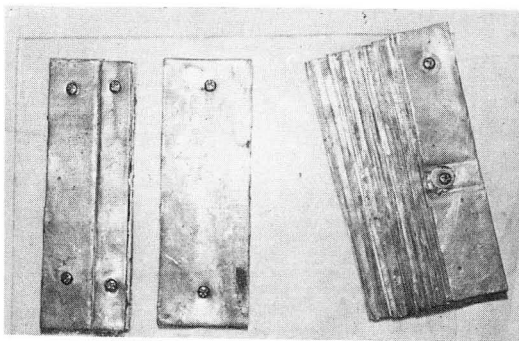


Fig. 4. Compensating lead filter on a plastic tray.

보상 여과판은 알루미늄, 구리, 납 등의 금속을 사용하고 있으며 본 실험에서는 납판을 이용하여 tray 위치에 부착시켰고 방사선의 방사 평행선에 따라 축소시켰다.

평행선에 따른 보상 여과판의 두께 (L_c)는 다음과 같이 주어진다.

$$L_c = \frac{T}{\rho_{comp}} \times \frac{TD}{2}$$

여기서 T 는 두께의 비율이고, ρ_{comp} 는 보상 필터 물질의 밀도이며 TD 는 전체 조직 결손 두께로서 다음과 같다.

$$TD = L_{max} - L + (1 - \rho_{lung}) L_{lung}$$

여기서 L_{max} 는 방사선이 지나가는 최대 신체 두께이며 L 은 방사선이 지나가는 실제 두께이고 L_{lung} 은 방사선이 지나가는 폐의 두께이다.

환자의 체구가 조사면의 가장자리까지 위치하여 있을 경우 조사면 내의 선량 분포가 균일하지 못하므로 다음과 같이 조정하였다.

그림 5에서 P점의 평탄도를 K라 하면 그림을 지나는

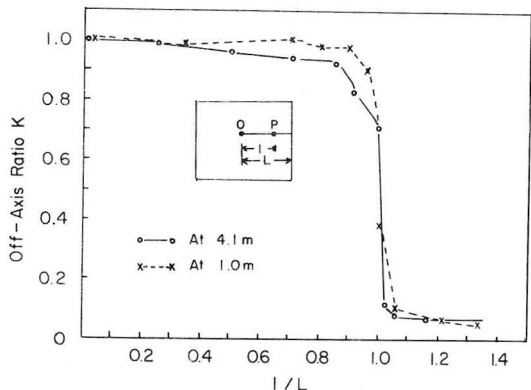


Fig. 5. Beam profiles along principal axes.

선의 피부와 조직 중앙점과의 거리 d 와 조직의 최대 두께의 반을 $d_o = \frac{1}{2} L_{max}$ 라면 전신 조사면 r 에서 각 점의 TMR은 다음과 같이 주어진다.

$$TMR(d, r) = K \times TMR(d_o, r)$$

여기서 d_o 의 값을 구한 후 보상 여과판의 축소율 ΔL_c 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta L_c = (d_o - d) T / \rho_{comp}$$

또 다른 방법은 그림 6의 기울기에 해당하는 전신 조사면에서의 실효 감약 계수 μ_{eff} 와 평탄도 K와의 관계에서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta L_c = \frac{\ln K}{\mu_{eff}} \cdot \frac{T}{\rho_{comp}}$$

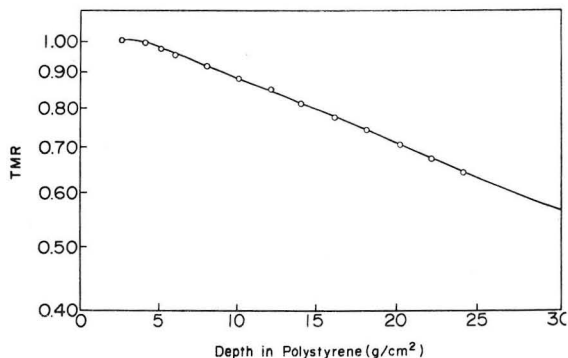


Fig. 6. TMR vs. Depth With 10 MV X-rays SSD 4.1m.

보상 필터는 그림 4와 같이 머리, 목, 가슴, 다리, 발 등으로 구분하여 제작 부착하였다.

그림 7은 전신 조사를 위한 보상 여과판의 제작 계획으로서 여과판을 제작하기 전에 환자의 체격을 조사하여

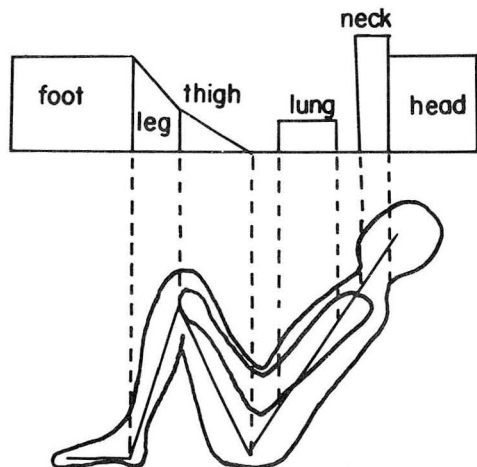


Fig. 7. Schematic diagram showing areas of compensation.

계산할 수 있도록 설계하였다.

5. 선량측정기구

전신 조사에 의한 체내 선량 분포의 측정은 동시에 각 부위를 측정할 수 있는 열 형광 측정기를 사용하였으며 그 중에도 조직 등가 물질로 구성된 TLD-100 (LiF), CaSO₄, Mn 을 이용하였으며 열 형광 반응은 그림 8 과 같고 감도 비율은 그림 9 와 같다.

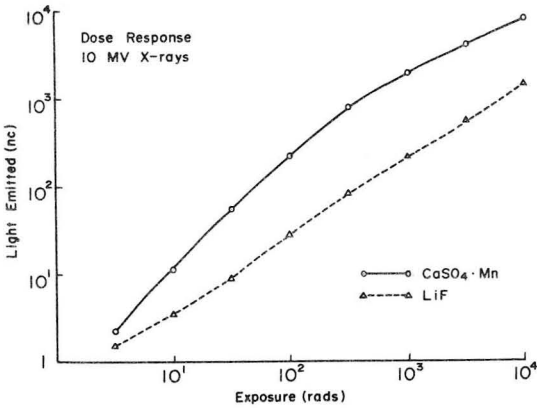


Fig. 8. Light Emitted Responses of LiF and CaSO₄ Mn.

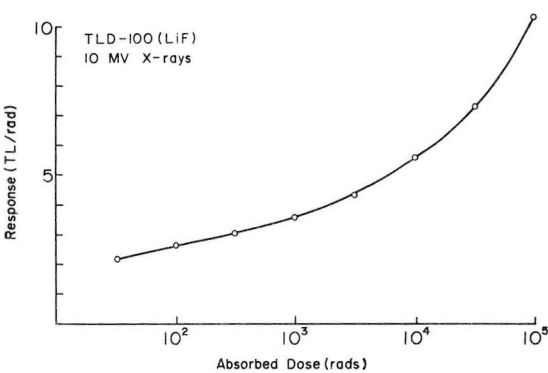


Fig. 9. TL/rad Response of TLD-100.

각 단면에 대한 선량분포는 공업용 필름을 증감지가 없는 검은 봉투에 삽입하고 이것을 Phantom 단면 사이에 밀착 시킨 후 정해진 방향에서 방사선을 조사하며 필름 특성 곡선에 의해서 선량율로 환산한 후 동일한 선량 지점을 연결하여 체내의 방사선 분포도를 측정한다.

표준 선량 측정은 Radocon III, 100 HA 및 R-meter 의 지두형 콘택트 측정기를 표준 선원 (Sr-90) 에 일정 시간 노출시켜 측정기를 교정한 후 phantom 내부에 장전하고 계획된 선량과 위치에 따라 측정한다.

III. 실험 성적

1. 선량율과 심부 백분율

선형 가속기에서 발생된 10 MV X-선의 출력선량은 국제 방사선 측정 협회 (ICRU-21) 의 정밀 측정 방법에 의하여 방사선 기본 측정기를 조직 등가 물질로 구성된 판톰 (phantom) 내의 최대 선량 지점인 2.5 cm 에 고정시키고 선원의 중심선과 측정기의 중심간의 거리가 100 cm, 조사면이 10 × 10 cm 되도록 조정된 후 일정한 선량율로 노출시키면서 계획선량 (monitor units) 과 일치시킨다.

전신 조사 방법은 선원에서 최대 선량 지점이 100 cm 에서 410 cm 로 연장됨에 따라 조사면도 최대 130 × 130 cm 까지 확산되며 선량율은 역자승 법칙과 콜리메터 (Collimeter) 및 판톰에 의한 산란선에 따라 변화하며 중심 깊이가 d 인 환자의 종양 D_T 에 대한 계획선량은 다음과 같다.

$$M \cdot U = \frac{D_T \times (f/f')^2}{TMR(r_d \cdot d) \times S_c(r_c) \times S_p(r_d)}$$

여기서 $TMR(r_d \cdot d)$ 는 그림 6 과 같이 조사면이 r_d 이고 깊이가 d 인 조직내와 최대 선량 지점과의 비율이며 $S_c(r_c)$ 는 전체면에 대한 콜리메터의 산란율이고 $S_p(r_d)$ 는 조직의 산란율이다.

또한 f 는 표준 거리이며 f' 는 선원과 환자 중심간의 거리로서 본 실험에서는 4.1 m 로 고정시켰다.

환자의 조사면에 따른 조사면 요소 (field factor) 는 면적과 둘레의 비 (Area per meter) 에 비례하며 측정치와 오차는 ± 2% 미만이었다.

고에너지 X-선에 의한 조직내 최대 선량 지점과 심부 백분율은 조사 X-선의 에너지, 조사면, 선원과 거리, 선속의 기울기, 환자의 체위 등의 많은 요인에 의하여 변화한다.

그림 10 은 선원과 피부간의 거리가 각각 1 m 와 4.1 m 일 때의 최대의 선량지점과 심부율을 표시하고 있으며 이 그림에서 최대 선량지점은 약 2.5 cm 로서 거의 비슷하지만 거리가 멀수록 더 높은 심부율을 나타내고 있다.

2. 조사면의 평탄도

일정한 평탄도의 넓은 조사면은 전신 조사에 있어 중요한 요인이 된다. 의료용 선형 가속기는 초점에서 1 m 거리의 조사면이 최대 30 × 30 cm 이고 평탄도는 ± 2%

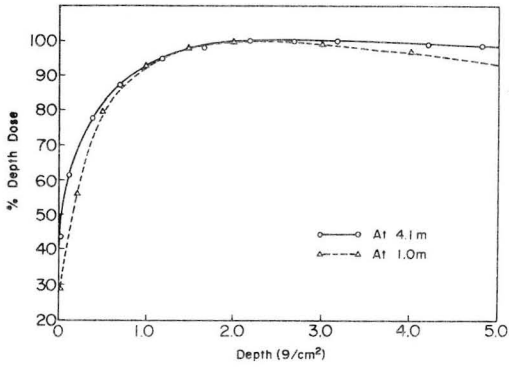


Fig. 10. Dose Build-up with Depth Compared at SSD = 1 m and 4.1 m.

미만이 되도록 평탄 여과판이 제작 고정되어 있으나 전신 조사를 위해 초점과의 거리를 4.1 m로 연장할 경우 조사면은 130×130 cm로 확대되고 조사면의 측면과 직각부분 (corners)의 평탄도가 매우 다르다. 특히 환자의 체격에 따라 조사면의 대각선 까지 이용할 경우가 많으며 이와 같은 경우 머리와 다리 부분의 선량이 약 20% 감소되기 때문에 선량 보상이 필요하다.

그림 5는 초점에서 각각 1 m와 4.1 m의 거리에서 최대 조사면의 중심 선량과 주축을 따른 중심 밖의 선량비를 측정 한 것이며 그림 11은 대각선을 따라 측정 한 것으로서 조사면을 직경으로 한 원형내의 선량분포는 일정하지만 원형외곽, 직각 부분의 선량은 급격히 줄어들었다.

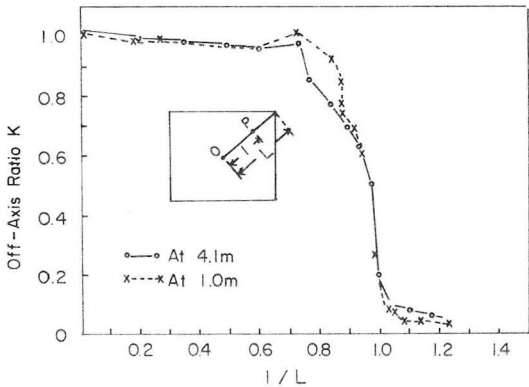


Fig. 11. Beam profiles in the diagonal direction.

3. 전신 선량분포

전신 조사 방법은 부분 조사보다 방사선 감수성과 적분·선량이 크기 때문에 적은 선량과 선량율로서 악성 종양 세포를 치료하려면 무엇보다도 균일한 선량분포를 정확한 선량의 측정이 필요하다.

한개의 넓은 조사면내에 일정 시간동안 조사된 동일한 계획 선량에 대하여 환자의 중심축의 선량분포는 그림 12와 같이 목부위는 둔부보다 약 10%의 많은 선량을 받게 되고 그림 13과 같은 불균일한 선량분포를 이룬다.

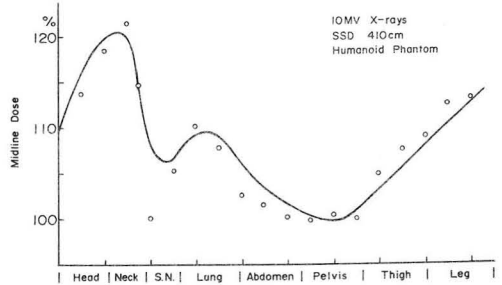


Fig. 12. Midline dose ratio without compensating filter.

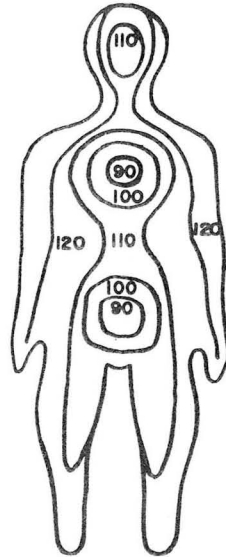


Fig. 13. Dose Distribution Without Compensating Filter.

전신에 균일한 선량분포를 얻기 위하여 표 2에 의하여 보상 여과판을 제작하고 이를 콜리메터에 고정시킨 후 二문축방향 조사를 하였을 때 그림 14와 같은 거의 균일한 선량분포를 얻을 수 있었으며 계산에 의한 중심축의 선량분포와 실제 측정에 의한 선량오차는 표 3과 같이 표시되었고 평균 5%의 오차내로 줄일 수 있었으며 표준편차는 약 2.45 이었다.

이상과 같이 실험을 통하여 얻어진 모든 자료를 이용하여 그림 15와 같이 환자를 직접 스티로폼 침대에 굴곡좌위를 취하게 하고 그림 16과 같이 초점간의 거리 4.1 m와 조사면 130×130 cm에서 전신 조사를 시행한

Table 2. Physical Data and Beam Parameters for a Patient

SSS 410 cm

Position	Half thickness (cm)	Fractional depth dose (TMR) (%)	Tissue deficit (cm)	Thickness of comp. filter (mmPb)
Top of head	3	98.0	17	1.38
Center of forehead	7.5	91.2	12.5	1.09
Base of chin	6.5	93.5	13.5	1.18
Neck	5	97.0	15	1.31
Suprasternal notch	20	66.8	0	0
Lung	20 (9)	77.9	6	0.52
Xyphoid process	21 (9)	79.0	7	0.61
Abdomen	18	70.3	2	0.17
Umbilicus	18	70.3	2	0.17
Pelvis	20	66.8	0	0
Thigh	13	79.8	7	0.61
Knee	11	83.8	9	0.78
Leg	10	85.9	10	0.87
Foot	8	90.2	12	1.05

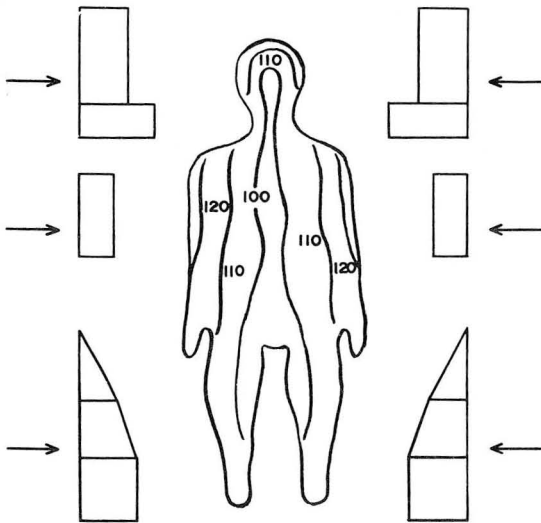


Fig. 14. Dose Distribution with Compensating Filter.



Fig. 15. The patient model seated on the styrofoam bed in treatment position.

수 있었다.

IV. 고 찰

방사선 전신 조사를 함에 있어서 물리적으로 가장 중요한 것은 어떻게 굴곡이 있는 전신에 균일한 선량을 조사할 수 있는가 하는 점이다. 한 조사면내에 전신이 포함되어야 하므로 조사면이 넓어지고 자연히 피부선원간 거리가 길어짐으로써 전신 조사를 위해서는 특수한 선량

측정에 대한 고려가 필연시 된다. 방사선의 에너지, 선의 방향, 환자의 체위 등에 따라 조직의 두께 및 구성이 달라지므로 신체의 축에 따른 선량분포는 상당히 불균일하게 되는데, 예를 들면 10 Mev 선형가속기로 양측 조사했을 경우 골반부위에 비하여 경부에는 최대 선량이 약 30%나 높게 되고 머리·목·가슴·다리·발에는 적절한 보상 여과판을 사용함으로써 이러한 불균일을 훌륭히 교정할 수 있다.

Table 3. TBI Phantom Dosimetry Bilateral Fields

10 MV X-Rays

Section	Without compensator		With compensator	
	Mid-point dose calculated (rad)	Mid-point dose measured (rad)	Mid-point dose calculated (rad)	Mid-point dose measured (rad)
Head	114	113	100	96.0
Neck	121	125	100	100.6
SN	98	99	100	93.9
Mid-mediastinum	109	106	100	99.0
Lung	106	106	100	98.1
Xyphoid	103	106	100	97.3
Abdomen	100	99	100	99.8
Pelvis	88	86	100	101.4
Thigh	95	92	100	101.3
Knee	103	98	100	101.1
Leg	112	120	100	102.0
Mean	104.45	104.55	100	99.14
Standard Deviation	8.90	11.04		2.45

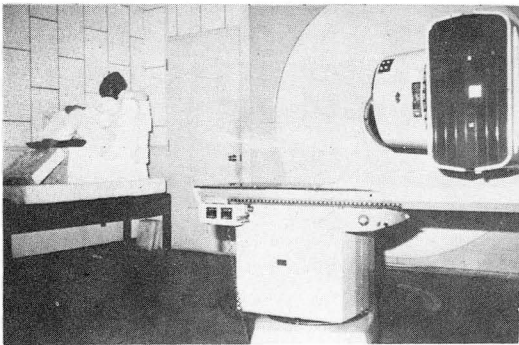


Fig. 16. The patient in position for lateral beam at SSD = 4.1 m and the field size 130 x 130 cm.

또한 M. D. Anderson 이나 Royal Marsden 병원에서 는 전면과 측면 조사를 혼용함으로써 선량의 균일도를 높 였고 D.O Findley 등은 환자를 침대에 누운 채로 두문 대항조사 방법을 취하였으며, C.M. LO 는 8분회전조 사, 그리고 G. P. Glasgow 는 환자가 앉은 상태에서 Co -60 를 조사하였고, V. Page 는 가속기를 상하로 운동 하면서 6 분조사방법을 구사하였으며, W. Sewchand 는 다문진자조사 방법을 발표하여 전신에 균일한 선량분포 를 도모하여 왔다.

한편, 방사선 전신 조사에서 목표는 치료성과비 (Therapeutic ratio), 즉, 가장 중요한 정상조직의 피해에

비해 표적세포의 파괴되는 비율을 최대화 시키는것으로 서 예를 들면 백혈병 치료를 위한 골수이식에 있어서 근 절시켜야 할 표적세포는 백혈병 세포, 정상 골수세포및 면역세포가 된다. 표적세포의 원형이 되는 정상 조혈간 세포 (hemopoietic stem cell) 는 방사선 생물학 적으로 두가지 방법으로 분석 측정할 수 있는데 하나는 30일 이 내에 50 %가 혈구생성부전 (hemopoietic failure) 으로 사망할 수 있는 방사선 조사량인 LD 50/30 를 측정하는 것이며, 다른 하나는 정맥 주사한 세포로부터 비장내 에서 세포집락 (Colony) 을 형성할 수 있는 능력을 재는 CFUs 측정법이다.

McCulloch 와 Till 은 CFUs 분석법을 이용하여 쥐에서 생체내 실험으로는 처음으로 골수 간세포 (Stem cell) 의 방사선 조사에 대한 생존 특성을 실험하였는데, 그 결 과 생존곡선상에서 평균치사선량 (Do) 는 95 rads 였으 며 N은 1.5 로서 이들 세포는 아사상태 (Sublethal injury) 에 대한 회복력이 적음을 나타내었으며, 이후 다 른 연구자들도 비슷한 결과를 보고함으로써 조혈간세포 와 비장세포는 비교적 낮은 평균치사선량 (Do) 과 적은 또는 거의 없는 견부 (shoulder) 를 갖는다고 알려져 있 다. 실험적으로 백혈병이나 임파종 세포들도 그들의 근 원이 된 정상세포와 비슷한 양상으로 생존곡선의 적은견 부 (shoulder) 를 갖는다고 하며 Whitmore 와 Till의 보

고에 의하면 이들의 평균 N은 1.6 이었고 견부선량(D_0)은 65 rads 였다.

전신조사에 있어서 선량을 제한시키는 가장 중요한 정상조직은 아직까지 명확히 밝혀지지는 않았으나, 급성 반응을 일으키는 조직은 장관으로서 이는 치명적인 문제를 일으키지는 않으며, 아마도 폐조직이 가장 쫓점이 되는 조직으로 알려져 있고, 특히 방사선 조사와 함께 이식편대숙주반응 (GVH reaction) 이나 바이러스성 폐염이 동반되었을 때는 더욱 위험하게 된다. 또 다른 가능한 선량 제한 정상조직은 심장으로서 심장에 독성이 있는 아드리아마이신이나 루비다존과 같은 약물을 쓰는 환자에 방사선 조사가 첨가됨으로써 심부전을 일으킬 수 있다. 또한 중추신경계가 제한조직이 될 수 있으며 특히 환자가 이전에 두부와 척수에 방사선 조사를 받았거나 척수관내 케토타렉세이트 주입을 받았던 일이 있을 때 중요하다. 그 외에도 이미 손상되어 있다면 신장이나 간장도 중요한 제한 장기가 될 수 있다.

Eric Hall 은 chinese hamster V79 세포에서 간량울에 따라 유효 Do (effective Do) 가 어떻게 변화하느냐를 실험하였으며 선량울이 감소함에 따라 유효 Do 는 증가하였다. 선량울이 50 rads/min에서 1 rad/min 사이에 그 영향력은 최대였으며 전신 조사에 흔히 이용되는 선량울도 이 범주내에 속하므로 그에 따른 생물학적 효과는 매우 달라질 것이므로 선량울을 명시하는 것은 매우 중요하다 하겠다.

생존곡선상에서 좁은 견부를 가진다는 것은 매우 낮은 선량울이나 분할조사당 조사량이 매우 적을 경우 외에는 분할 조사나 선량울이 세포 생존에 미치는 영향이 적음을 의미한다.

그 반대로 견부가 클수록 분할 조사에 의한 보호효과 (sparing effect) 는 더 크다 하겠다. 한편, 선량을 제한시키는 정상조직의 경우 Wara 등은 쥐에 방사선 조사 150일 후 생긴 폐의 섬유화로 인한 치사에 미치는 분할 조사의 영향을 보고하였으며 고선량울로 1회 조사시 LD_{50} 은 1324 rads 였고 2회 분할조사시는 374 rads 더 높아졌으며 분할 횟수가 늘수록 쥐를 치사시키는데 요구된 조사량은 점점 커졌다. 즉, 분할조사를 함으로써 보호효과가 커진다고 할 수 있다.

중요한 것은 표적세포에 비해 중요장기들의 D_2-D_1 치가 더 크다는 점으로 우리가 분할조사를 하거나 또는 중요 장기의 아사상해가 회복될 수 있는 충분한 저선량울을 이용함으로써 치료성과비를 높일 수 있다는 것이다.

총 선량은 어느 정도까지 줄 수 있느냐 하는 것은 액

티노마이신-D와 폐 방사선 조사를 같이 사용한 National Wilms Tumor Study 에 근거해 볼 때 전신 조사시 폐의 내성의 절대하한 선은 6회 분할조사로 1200 rads 가 된다.

그러나, 골수이식은 다음 몇가지 점을 고려할 때 이러한 조사량은 절대하한치라 할 수 있는데 첫째로, 방사선 전신 조사시는 화학치료와 동시에 하는 것이 아니므로 약물과 방사선의 상호작용이 감소될 수 있으며, 둘째로, 현재 상용되는 약물들, 즉, 사이클로포스파마이드, 6-치오구아닌, 사이토신아라비노사이드, 다우노루비신 등이 액티노마이신-D와 같이 강력한 radiosensitizer 가 아니라는 점, 세째로, 골수이식을 받은 많은 환자들이 청장년으로서 어린아이에 비해 방사선 손상에 대한 감수성이 낮다는 점이다.

고선량울을 단일 조사로 사용하면 치료성과비는 떨어지며, 분할조사하거나 저선량울을 사용함으로써 치료성과비를 높일 수 있으나, 저선량울을 사용할 경우 조사시간이 매우 길어지며 환자 자신은 물론 치료자도 힘든 치료가 되며, 분할 조사의 단점은 골수이식 시행일이 연기되며 감염될 기간이 길어진다는 점이다.

M.D. Anderson 병원에서는 200 rads 씩 1일 2회 조사로 3일간 계속하는 방법을 쓰고 있으며 이러한 방법이 상기의 단점을 어느정도 보완할 수 있다고 하겠다. 분할조사를 200 rads 씩 할 경우 대부분 장기에서 선량울에 의한 영향은 미미하므로 낼 수 있는 최대 고선량울을 이용하여 각 조사시간을 짧게 할 수 있다. 다량 단일 조사에 비하여 방사선멀미 (Radiation sickness) 도 덜하며 발생하더라도 늦게 일어나므로 치료가 중단되는 일이 없다.

V. 결 론

악성 임파종이나 백혈병등 전신에 오염된 악성종양세포는 방사선의 균일한 전신 조사 방법에 의하여 가장 효과적인 치료를 할 수 있다.

그러나 방사선 전신 조사에서 한 조사면 내에 전신이 포함되어야 하므로 조사면이 넓어지고, 자연히 피부선원간 거리가 길어짐으로서 특수한 선량측정이 필요하며 굴곡이 있는 전신에 균일한 선량분포를 얻기 위해서는 방사선의 에너지, 조사면, 방사선의 방향, 환자의 체위, 굴곡의 정도에 따른 가장 적합한 보상 여과판을 제작 사용하여야 한다.

의료용 13 MeV의 선형가속기에서 방출되는 10 MV

X-선을 전신 조사 방법에 이용하기 위하여 우선 방사선 물리적인 기본 실험과 방사선 생물학적인 면을 검토하여 방사선 전신 조사에 이상이 없는 기본 실험 방법을 개발하고 측정된 결과는 다음과 같다.

1) 촛점으로 부터 4.1 m의 거리에서 전신에 충분한 130×130 cm의 조사면을 얻을 수 있었으며 조사면의 직각 부분은 약 20%의 선량이 감소되었으나 굴곡재위를 취하므로써 균일한 선량을 받을 수 있었다.

2) 방사선 조사 방향은 환자의 상태와 균일한 선량분포를 위해서 환자의 굴곡좌위 상태로 좌우이분대향 조사 방법을 택하였다.

3) 환자의 고정은 산란선이 거의 없는 스티로폼 등판을 사용하였고 환자의 가운을 두껍게 하여 자체 불러스 역할을 하였다.

4) 신체의 굴곡에 의한 중심축 선량의 변동을 줄이기 위하여 특별히 고안된 보상 여과판을 제작 사용함으로써 중심축 선량을 $\pm 5\%$ 이내로 감소할 수 있었다.

5) 실험을 반복하기 위해서 연조직 등가인 판톰과 폐조직 등가인 콜크를 이용하여 인체크기 굴곡좌위형의 인체 판톰을 제작하였으며 실험과의 오차는 $\pm 10\%$ 미만이 었다.

6) 인체 및 판톰에 대한 선량측정은 조직 등가인 판톰이고 직선적인 선량반응을 가진 열형광 측정기를 사용했으며 표준선량 측정기와 비교하여 일치하였다.

REFERENCES

1. Aget H, Van Dyk J, Leung PMK : *Utilization of a high energy photon beam for whole body irradiation. Radiology* 123:747-751, 1977.
2. Cunningham JR, Wright DJ : *A simple facility for whole body irradiation. Radiology* 78:941-949, 1962.
3. Dyk JV, Leung PMK, Cunningham JR : *Dosimetric consideration of very large cobalt-60 fields. Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys. Vol. 6, 753-759, 1980.*
4. Findley DO, Skov DD, Blume KG : *Total body irradiation with 10 MV linear accelerator in conjunction with bone marrow transplantation. Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys. Vol. 6, 695-702, 1980.*
5. Galvin JM, D'Angio GJ, Walsh G : *Use of tissue compensators to improve the dose uniformity for total body irradiation. Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys. Vol. 6, 767-771, 1980.*
6. Glasgow GP and Mill WB : *Cobalt-60 total body irradiation dosimetry at 220 cm source-axis distance. Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys. Vol. 6, 773-777, 1980.*
7. Hall EJ : *Radiation dose-rate; A factor of importance in radiobiology and radiotherapy. Br. J. Radiol. 45:81-97, 1972.*
8. Heublein AC : *A preliminary report on continuous irradiation of the entire body. Radiology Vol. 18: 1051-1062, Jun. 1932.*
9. Jacobs ML, Marasso FJ : *A four-year experience with TBI. Radiology 84:452-456, Mar. 1965.*
10. Karzmark CJ, Deubert A, Loevinger R : *Tissue-phunptom ratios; An aid to treatment planning. Br. J. Radiol. 34:158-159, 1965.*
11. Khan FM, Williamson JF, Swechand W, Kim TH : *Basic data for dosage calculation and compensation. Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys. Vol. 6, 745-751, 1980.*
12. Kim, TH, Kersey JH, Sewchand W, Nesbit ME Krivit W, Levitt SH : *Total body irradiation with a high dose rate linear accelerator for bone marrow transplantation in aplastic anemia and neoplastic disease. Radiology 122:523-525, 1977.*
13. Kim, TH, Khan FM, Galvin JM : *Comparison of total body irradiation techniques for bone marrow transplantation. Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys. Vol. 6, 779-784, 1980.*
14. Lo CM, Salzman FA, Moschella SL, Tolman EL, Wright KA : *Whole body surface electron irradiation in the treatment of mycosis fungoides. Radiology 130:453-457, Feb. 1979.*
15. McCullough EA and Till JE : *The sensitivity of cells from normal mouse bone marrow to gamma-radiation in vitro and in vivo. Radiat. Res. 16:822-832, 1962.*
16. Medinger FG, Craver LF : *Total body irradiation with review of cases. AJR 48:651-671, Nov. 1942.*
17. Page V, Gardner A, Karzmark CJ : *Patient dosimetry in the electron treatment of large superficial lesions. Radiology 94:635-641, Mar. 1970.*
18. Peters L : *Discussion; The radiobiological bases of TBI. Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys. Vol. 6, 785-787, 1980.*
19. Peters LJ, Withers JR, Cundiff JH, Dicke KA :

- Radiobiological considerations in the use of TBI for bone marrow transplantation. Radiology 131:243-247, Apr. 1979.*
20. Sewchand W, Khan FM, Williamson J : *Total-body superficial electron-beam therapy using a multiple-field pendulum-arc technique. Radiology 130: 493-498, Feb. 1979.*
 21. Thomas ED, Lochte HL, Ferrebee JW : *Irradiation of the entire body and marrow transplantation: Some observations and comment. Blood 14:1-23, 1959.*
 22. Wara WM, Phillips TL, Margolis LW, Smith V : *Radiation pneumonitis: A new approach to the deviation of time-dose factors. Cancer 32:547-552, 1973.*
 23. Webster E : *Physical considerations in the design of facilities for uniform whole-body irradiation in man. Radiology 75:19-32, 1960.*