

전신 피부 전자선 치료(TSET)에서 EBT2 필름을 사용한 선량측정

*국립암센터 양성자 치료센터, †경희대학교 동서신의학병원 방사선종양학과,
†국립경상대학교병원 방사선종양학과, §서울삼성병원 방사선종양학과

황의중* · 라정은* · 정호진* · 안성환* · 김동욱† · 이상엽* · 임영경†
윤명근* · 신동호* · 이세병* · 박성용* · 표홍렬§ · 정원규†

전신 피부 전자선 치료(total skin electron beam therapy, TSET)를 위해서는 흔히 행해지는 일반적인 방사선 치료와 달리 치료 전 다양한 조건에서의 선량 측정과 더불어, 치료 중 지속적인 환자 신체부위별 선량 측정이 요구된다. 본 연구에서는 선형 가속기에 기반한 modified Stanford Technique으로 전신 피부 전자선 치료를 할 때 치료에 필요한 치료 전자선의 에너지와 선량의 공간적 분포 및 치료 중 환자의 각 부위별 조사선량을 EBT2 필름을 이용하여 측정 하였다. 전자선의 에너지는 이온전리함으로 측정한 값과 비교하였을 때 잘 일치하였고, 선량의 공간 분포 및 환자 각 신체부위에서의 선량 분포는 EBT2 필름을 이용하여 편리하게 측정할 수 있었다. 또한 TSET 치료중 EBT2 필름을 사용하여 *in-vivo*로 측정된 환자 신체 부위별 선량분포의 변화는 열형광선량계(thermoluminescent dosimeter, TLD)로 동시에 측정한 값과 비교하였을 때 잘 일치함을 알 수 있었다. 이로써 EBT2 필름의 전신 피부 전자선 치료를 위한 선량계로서의 가능성을 확인하였다.

중심단어: 전신 피부 전자선 치료, EBT2 필름, TLD, 선량계, *In-vivo*

서 론

전신 피부 전자선 치료(Total Skin Electron Beam Therapy, TSET)는 mycosis fungoid로 불리는 만성 T-cell lymphoma를 치료하기 위하여 피부에서 약 1 cm 근방 되는 깊이의 전신에 방사선을 고르게 조사하는 치료법으로 1970년대 이후 주로 사용 되어왔다.¹⁻³⁾

전신 피부 전자선 치료는 피부 근처의 얇은 깊이에만 방사선이 흡수되어야 하고 신체 내부의 장기에는 영향이 적어야 하므로 침투 깊이가 1 cm 내외인 2~4 MeV의 전자선 에너지가 주로 사용이 되며 전신에 고르게 조사하는 것이 매우 중요하다. 전자선을 전신에 균일하게 조사하기 위한 방법으로 여러 가지 방법이 제안되었는데 사용하는 방사선 조사(radiation field)의 수에 따라 하나의 필드만으로 치료를 하는 단일선속(single beam) 방법,⁴⁻⁶⁾ 선형가속기의 갠트리(gantry)를 회전하여 두 개의 필드를 합해 균일한 선량분포

를 얻는 두 선속(dual beam) 방법⁷⁻¹⁶⁾이 있으며, 환자의 고정 방법에 따라 환자가 고정된 채 치료를 받는 일반적인 방법 외에 필드는 고정된 채 환자가 이동하는 patient moving 방법^{17,18)} 등도 보고되었다. 또한 환자의 자세 및 위치에 따라 누운 자세로 방사선이 조사되는 lying on position¹⁹⁾ 방법과 서 있는 채 조사되는 stand on position 방법, 그리고 환자의 둘레방향으로 고른 선량이 조사되도록 환자를 회전시키는 patient rotating¹⁰⁻¹⁵⁾ 방법 등으로 구분될 수 있다. 그러나 일반적으로 널리 사용되는 것은 Modified Stanford Technique으로⁷⁻⁹⁾ 이 방법은 선형가속기의 갠트리(gantry) 방향을 270° 또는 90°을 기준으로 상하 두 개의 필드를 조합하여 가장 균일한 선량분포를 찾고, 환자의 중심을 기준으로 6개의 균등한 방향으로 회전하여 anterior posterior (AP), right posterior oblique (RPO), left posterior oblique (LPO) 빔을 하나의 세트, 그리고 posterior anterior (PA), right anterior oblique (RAO), left anterior oblique (LAO) 빔을 또 하나의 세트로 하여 치료의 한 사이클이 완성되도록 하는 것이다.

환자를 기준으로 입사되는 전자선의 정확한 선량분포를 결정하기 위하여 일반적으로 이온 전리함, 열형광선량계(thermoluminescent dosimeter, TLD), metal oxide semiconductor field-effect transistor (MOSFET), 필름 등이 측정에 이용된다. 이온전리함은 표준 선량계로서 정확한 절대 선량

본 연구는 2009년도 국립암센터 기관고유연구사업(NCC-0910210, NCC-0910180)으로 이루어진 것임.

이 논문은 2010년 1월 8일 접수하여 2010년 3월 9일 채택되었음.

책임저자 : 김동욱, (134-727) 서울시 강동구 상일동 149

경희대학교 동서신의학병원 방사선종양학과

Tel: 02)440-6256, Fax: 02)440-6287

E-mail: dwkim@khnmc.or.kr, joocheck@gmail.com

을 측정할 수 있지만 넓은 평면 선량을 측정하기 위해서는 많은 시간이 소요되며 이에 따른 치료기의 과부하를 발생시킬 수 있으며 MOSFET은 선량-선형성(dose linearity)이 매우 우수하며 실시간 판독이 가능하나, 에너지 의존성(energy dependence)을 나타내며, 검출기 수명이 제한되는 등의 단점이 있다.^{20,21)} 또한 칩 형태의 TLD는 방향의존성(angular dependence)으로 인하여 환자의 굴곡 있는 신체 부위에 적용할 경우 측정 오차가 커질 수 있으며, 교정 및 판독의 단계가 복잡한 단점이 있다.^{11,12)}

이에 비해 필름은 선량계 자체의 유연성으로 굴곡이 있는 표면에 잘 밀착시킬 수 있으며 조직등가(tissue equivalent)물질로 인해 피부의 흡수선량 측정이 용이하며 방사선크롬필름(radiochromic EBT)²²⁾ 필름의 경우 기존의 방사선사진필름(radiographic film)인 X-Omat나 EDR 필름이 가지는 암실에서 현상과정이 생략되어 사용하는 데 편리하다.

전신 피부 전자선 치료와 같이 6 방향으로 환자의 자세를 변화시키면서 약 7주의 오랜 기간 동안 치료를 받는 경우, 환자에게 균일한 선량을 조사하기 위하여 환자 자세의 재현이 매우 중요하고 또한 신체 표면의 모든 부위가 동일한 모양이 아니므로 특정 신체 부위에 조사되는 선량이 다를 수 있으므로 신체부위와 치료기간에 따른 선량의 변화를 추적함으로써 신체 부위 중 누적 선량이 계획선량에 미치지 못하는 부위에 대하여 추가적인 치료계획을 세우는 것이 필요하다. 이와 같이 전신 피부 전자선 치료에서 선량계의 특성 및 활용을 고려했을 때 선량측정 도구로서 필름이 가지는 가능성이 매우 크다고 하겠다.

본 연구에서는 modified Stanford technique으로 전신 피부 전자선 치료시 최근 새롭게 개발된 갠크롬 EBT 필름(Gafchromic EBT, version 2, International Specialty Products, Wayne, NJ)의 전신 피부 전자선 치료를 위한 선량계로서의 가능성을 확인하기 위하여 EBT2 필름을 이용하여 치료용 전자선의 에너지와 선량의 공간적 분포 및 치료 중 환자의 각 부위별 조사선량선량 분포를 측정하였고 이온전리함과 TLD를 이용하여 측정한 결과와 비교하였다.

재료 및 방법

1. EBT2 필름의 교정

최근 개발된 갠크롬 EBT2 필름은 노란색 염료를 적용하여 기존의 갠크롬 EBT^{23,24)}에 비해 자외선이나 가시광선의 영향을 덜 받도록 설계되었고, 8 Gy의 선량까지는 marker

dye를 사용하여 필름의 두께의존도 없이 보다 정확하게 선량을 측정할 수 있고, marker dye를 사용하지 않고는 최대 50 Gy까지 측정할 수 있는 장점이 있다.²⁵⁾ 또한 EBT 필름은 조사면 크기와 선량을 의존도가 매우 미약하며 전자선 에너지에 대한 의존도는 6 MeV에서 22 MeV까지의 영역에서 $\pm 4\%$ 이내인 것으로 알려져 있으며, 광자선의 경우에도 연구에 따라 다르지만 대략 8% 이내의 에너지 의존도를 가지고 있음이 보고되었다.^{22,26,27)} 본 연구에서는 EBT2 필름의 감광곡선(sensitometric curve) 측정을 위하여 전자선 에너지 6 MeV에 대해 선량범위 0~6 Gy까지 각 0.25 Gy 간격으로 기준조건인 조사면 10×10 cm, SSD=100 cm에서 물-등가 고체팬텀(Plastic Water, Nuclear Associates, Carle Place, NY)의 최대 선량 깊이에 필름을 위치시키고 전자선을 조사하였다. 필름의 안정화를 위하여 약 9시간 동안 보관 후 필름스캐너(EPSON Expression 1680 pro, Epson Co., Japan)를 이용하여 필름의 픽셀값(pixel value, PV)을 읽어 조사된 선량과의 비교를 통하여 PV-선량 그래프로 나타내었다.

필름 스캐너의 스캔 위치 및 방향 의존성을 제거하기 위하여 스캔하려는 필름의 중앙이 스캐너의 중앙과 항상 일치되도록 위치시켰으며 EBT2 필름의 방향성을 최소화하기 위하여 모든 필름은 8인치 원단 EBT 필름의 장변방향으로 스캔하였다. 스캔은 음화(negative)-투과(transparency) 모드로 스캔하였다. 아무것도 조사하지 않은 EBT2 필름을 읽어 스캐너의 광원(light source)과 flat-bed 사이의 산란(scattering) 효과를 보정한 후 분석 소프트웨어(FilmQA, version 1.1, 3Cognition LLC, USA)를 사용하여 분석하였는데 Fig. 1의 감광곡선을 이용하여 선량값으로 변환하였다.

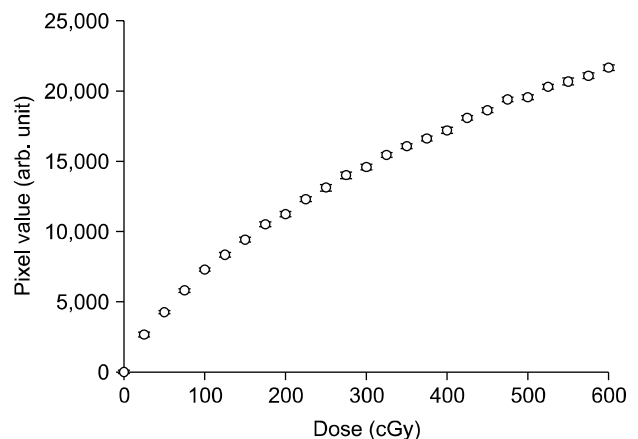


Fig. 1. Pixel values of film according to the dose. The film was scanned in negative transparency mode. This graph was used for converting pixel value of film to dose.

2. 전자선의 에너지

본 연구에서는 선형가속기 21EX (Varian Medical Systems, Palo Alto, CA)에서 발생하는 6 MeV의 전자선 에너지를 조사하여 전신 피부 전자선 치료 조건인 조사면 40×40 cm, SSD=390 cm에서 산란판(scatterer)을 통과하였을 때 깊이선량율(Percentage Depth Dose, PDD)의 변화를 측정하였다. 이때 EBT2 필름의 선량 반응도를 확인하기 위하여 기준조건인 조사면 10×10 cm에서 SSD=100 cm일 때 물 팬텀에서 pinpoint형 이온전리함(TW31014, PTW-Freiburg, Germany)과 전기계(UNIDOSE 1, PTW-Freiburg, Germany)를 사용하여 측정된 깊이선량율과 동일 조사조건에서 물-등가 고체 팬텀에 전자선 방향과 평행하게 위치한 EBT2 필름으로 측정된 깊이선량율을 비교, 분석하였다.

선형 가속기에서 방출되는 전자선이 390 cm 거리의 환자중심까지 도달되는 동안 산란 등에 의해 감소되는 에너지를 측정하기 위하여 환자가 위치할 자리에 고체 팬텀을 고정하고 팬텀 사이에 EBT2 필름을 빔의 진행방향과 나란하게 위치시킨 후 전자선을 조사하였다. 전자선은 선형가속기의 High-Dose Total Skin Electron (HDTS) 모드로 조사되었고, 0.5 cm 두께의 산란판을 전자선의 입사 경로에 두었다. 환자의 복부를 기준으로 그 두께를 40 cm으로 가정하여 결면선원거리(Source to Surface Distance, SSD)는 370 cm (Source to Axis Distance는 390 cm)로 하였다. 산란판의 위치는 환자의 피부표면에서 10 cm 떨어진 곳을 가정하여 선원(source)로부터 360 cm 떨어진 곳에 고정하고 조사하였다.

3. 환자 위치에서 2차원 평면의 선량 균일도

단일 방향의 전자선으로는 환자의 신장을 모두 포함하는 균일한 선량분포를 얻을 수 없으므로 선형가속기의 갠트리를 위 아래로 회전시켜 두 개의 전자선의 합으로 가장 균일한 선량분포를 얻을 수 있는 최적의 각도를 찾아내기 위하여 270°을 기준으로 0~20°까지 0.2° 간격으로 각도를 변화 시키면서 대칭으로 회전한 두 빔에 의한 선량이 270° 단일 빔의 중심선에서 얻은 선량과 동일한 선량이 측정되는 각도로 갠트리 각도를 정하였다. 최적의 균일한 선량분포를 얻을 수 있는 갠트리 각도는 측정결과를 토대로 270°을 기준으로 ±18.2°도, 즉 251.8°와 288.2°로 결정되었다. 또한 두 선속으로 전자선을 조사하였을 때 환자 치료위치에서 지표면과 수직인 평면에서의 선량 균일도를 평가하였다. 앞서 언급한 실제 환자 치료와 동일한 실험조건으로 전자

선이 산란판을 통과한 후 10 cm 떨어진 곳에 위치시킨 평평한 아크릴 판 위에 EBT2 필름을 5×5 cm의 크기로 잘라 중앙에서부터 가로 15 cm씩 ±45 cm, 세로 20 cm씩 ±80 cm의 영역에 부착한 후 전자선을 조사하였다. 조사된 필름은 스캐너를 사용하여 위와 동일한 과정으로 판독하여 선량 분포를 평가하였다.

4. 환자의 피부 깊이 선량 분포

전신 피부 전자선 치료는 6개의 각기 다른 방향으로부터 전자선이 조사되므로 환자 피부로부터 깊이에 따른 선량 변화는 수직 입사하는 단일 전자선에 의한 것과는 차이가 있다. 깊이 선량 분포는 전신 피부 전자선 치료에서 선량이 처방되는 데 중요한 참고가 된다.

앤더슨 랜도 팬텀 (RANDO[®], The Phantom Laboratory Inc., Salem, YN)에 EBT2 필름을 사용하여 피부 깊이 선량 분포를 측정하였다. 팬텀의 복부와 실제 환자의 복부가 일치되도록 높이를 조정하고, 두부, 흉부, 복부의 세 횡단면에 EBT2 필름을 각각 끼워 넣은 후 실제 치료와 동일한 조건으로 전자선을 조사하였다. 필름은 앞에서 언급한 동일한 과정으로 스캔하여 피부 깊이에 따른 선량변화를 확인하였다. 그 중에서 복부의 필름은 AP, RAO, LAO, LT의 4 방향의 깊이 선량 분포를 평균하여 처방선량에 대한 MU (monitor Unit)를 결정하는 데 사용하였다. 이 때 팬텀 표면 근처의 값은 필름의 잘못된 정렬로 인한 데이터 왜곡현상이 있어 1.6 mm 깊이 이내의 데이터는 제거하고 나머지 데이터를 사용하여 외삽법(extrapolation)으로 추정하여 사용하였다.

5. In-vivo 선량 측정

환자가 전신 피부 전자선 치료를 받는 동안 피부 각 부위에 받는 선량을 비교하였다. EBT2 필름과 TLD를 이용하여 선량을 측정하고 비교, 분석하였다. EBT2 필름은 약 1×2 cm의 크기로 잘라 환자 몸에 부착하였고, 선량분포 측정하기 위해 사용된 필름은 8 inch 크기의 한 장의 필름으로 절단하여 사용하였다. 전자선이 조사된 필름은 앞에서 언급한 동일한 과정을 거쳐 스캔하였다. 연구에 사용한 모든 필름은 스캐너의 중앙 부분에서 일정한 방향으로 스캔하여 오차가 발생 요인을 최소화하였다. 환자 몸에 부착했던 필름은 정확도를 높이기 위하여 판독을 위해 6 MeV의 전자선으로 100 cGy를 조사한 기준필름과 함께 스캔 후 그 값을 서로 비교하여 환자 각 부위에 조사되는 절대 선량으로 변환하였다

TLD는 전자선에너지 6 MeV에서 기준선량 2 Gy에 대해 교정하여 사용하였고, 환자 표면에 EBT2 필름과 가장 가까운 지점에 부착하였으며 환자 측정 전 400°C 오븐에서 1시간 동안 열처리과정을 거쳤으며 TLD 판독기(Harshow 5500, Harshow/ Bicron, Solon, OH)를 사용하여 그 값을 읽었다. Fig. 2는 환자의 피부에서 흡수되는 선량을 측정하기 위하여 EBT2 필름과 TLD를 부착한 부위를 보여준다. 매 치료마다 환자의 복부에 두 개의 선량계를 부착하고, 한 사이클의 치료가 끝난 후에 그 값을 판독하여 분석하였다. 이때 Umbilicus에서의 선량측정은 0.5 cm 두께의 볼러스(bolus)를 사용하였다.

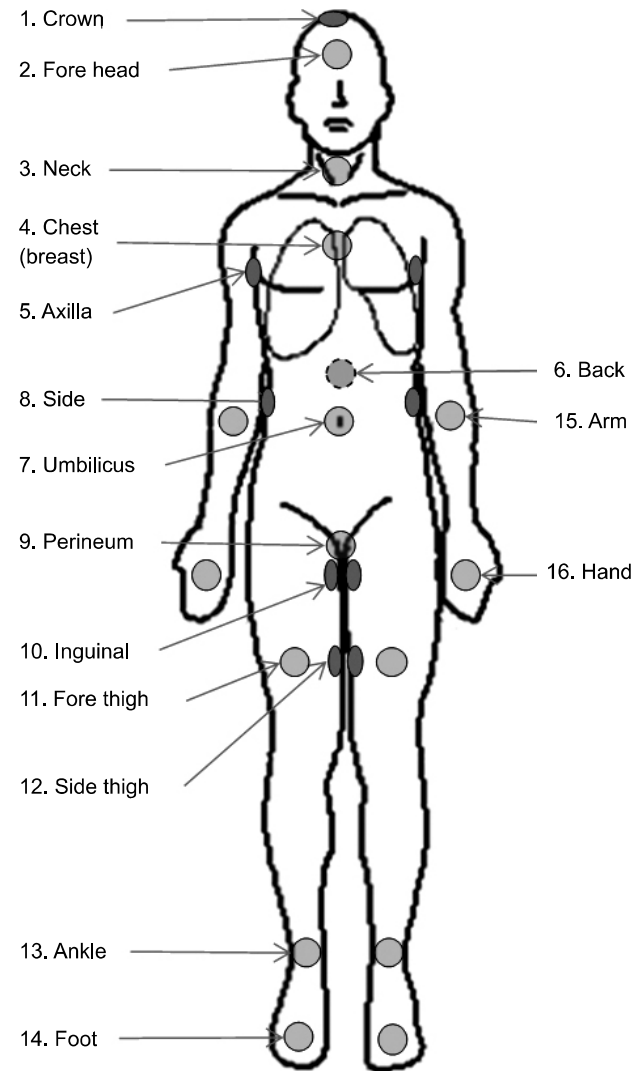


Fig. 2. Points for measuring *in-vivo* electron dose.

결과 및 고찰

1. 전자선의 에너지

6 MeV의 전자선에 대하여 SSD 100 cm에서 산란판이 있는 경우와 없는 경우 그리고 SSD 370 cm에서 산란판이 있는 경우에 각각 측정된 깊이선량을 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 표준 선량측정조건과 동일하게 SSD 100 cm에서 측정된 산란판이 없는 경우에 대한 깊이선량을 곡선으로부터 역으로 에너지를 계산해 본 결과 이온전리함으로 측정된 결과는 6.28 MeV, 필름으로 측정된 결과는 6.08 MeV로 계산되었다. 에너지의 계산은 실비정(practical range, R_p)과 전자선 에너지와의 근사 관계식인 식 (1)을 사용하였으며 각 조건에서의 R_p 는 Table 1에 표기 하였다.

$$E_p = C_1 + C_2 R_p + C_3 R_p^2 \quad (1)$$

여기서 C_1 은 0.22 MeV, C_2 는 1.98 MeVcm^{-1} , C_3 는 $0.0025 \text{ MeVcm}^{-2}$ 를 사용하였다.²⁸⁾

또한 위와 같은 조건에서 산란판이 있는 경우에는 에너지가 감소하여 이온전리함을 측정된 결과 5.09 MeV, 필름으로 측정된 결과 4.97 MeV의 에너지로 계산되었다. 산란

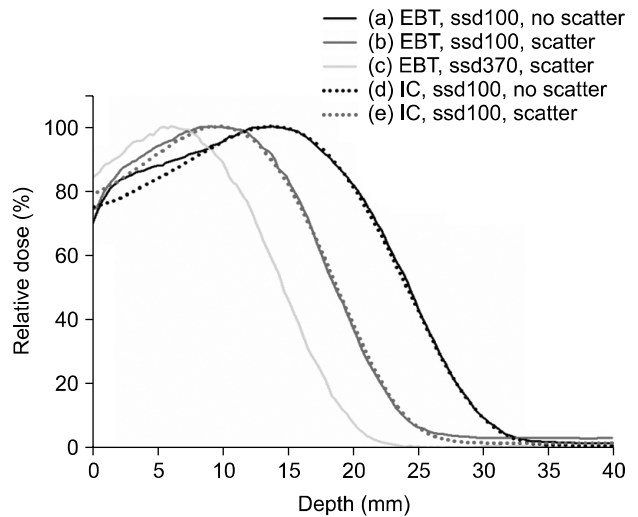


Fig. 3. Percent depth dose measured by EBT2 film. Electron energy from the accelerator was 6 MeV and the thickness of scatterer was 0.5 cm. (a) measured by EBT2 film without scatter at SSD 100 cm, (b) measured by EBT2 film with scatter at SSD 100 cm, (c) measured by EBT2 film with scatter at SSD 370 cm, (d) measured by Ion chamber without scatter at SSD 100 cm, (e) measured by Ion chamber with scatter at SSD 100 cm.

판에 의해 약 6 MeV의 전자선의 에너지가 약 5 MeV로 감소하였음을 알 수 있다.

이온전리함과 필름으로 각각 측정한 깊이선량을 변화와 이로부터 계산한 에너지가 서로 유사한 점으로부터 EBT2 필름을 사용한 깊이 선량 분포의 측정법이 신뢰할 수 있음을 확인할 수 있었다.

SSD 370 cm에서는 필름으로만 깊이선량을 측정하였는데 전자선과 공기 분자간의 산란으로 인하여 전자선의 에너지가 4.23 MeV로 더욱 감소하였다. 이 때 최고 선량 깊이도 약 0.66 cm의 깊이를 갖게 되어 6 MeV의 전자선을 사용하고 SSD 370 cm의 거리에서 0.5 cm 두께의 산란판을 두었을 때 전신 피부 전자선 치료에 매우 적합한 전자선을 얻을 수 있었다(Table 1).

2. 공간 선량 분포

최적의 공간 균일도를 제공하는 갠트리 각도 251.8°와 288.2°로 두 선속을 조사하였을 때 환자위치의 평면에서 공간적인 선량 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 각 측정값은 수평 중앙값의 수직선 상의 값의 평균을 100%로 정규화 한 것이다. 상하 선량 분포는 isocenter와 동일 높이를 기준으로 하였을 때 -80에서 80 cm까지 측정하였는데 측정된 구간 내에서 매우 좋은 상하 선량 분포를 가짐을 알 수 있다. 좌우 선량분포는 상하 선량 분포에 비해 상대적으로 변화가 심하였는데 좌우는 갠트리 각도와 상관없이 단일 필드의 분포와 동일하게 전자선이 퍼지기 때문으로 생각된다. 측정된 선량의 공간 분포를 보다 더 가시적으로 평가하기 위하여 측정값들을 상하 및 좌우로 각각 평균하여 그래프

Table 1. The energy of electron beam according to SSD and existence of scatterer. IC represents the results of the ion chamber.

SSD (cm)	Scatterer	D _{max} (cm)		R _p (cm)		E _p (MeV)	
		EBT2	IC	EBT2	IC	EBT2	IC
100	No	1.36	1.4	2.95	3.05	6.08	6.28
100	yes	0.87	1.0	2.39	2.45	4.97	5.09
370	yes	0.66	-	2.02	-	4.23	-

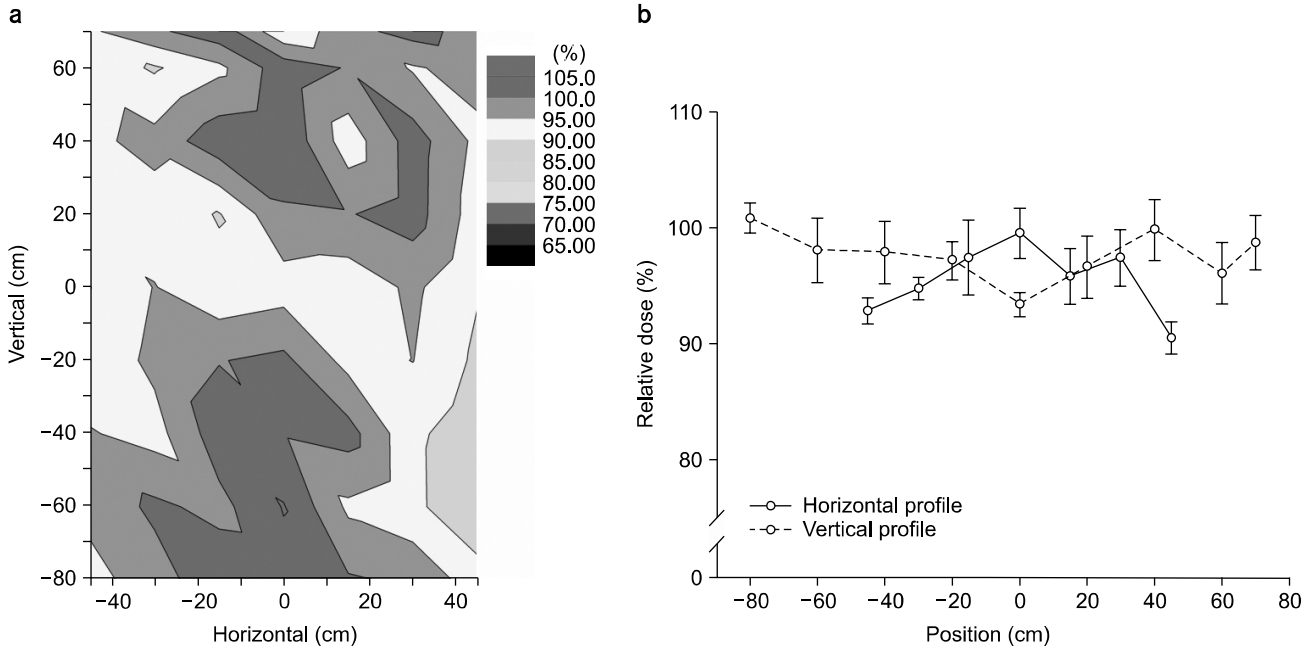


Fig. 4. 2-dimensional dose distribution at the position of the patient. (a) 2-dimensional dose map, (b) average dose profile of vertical and horizontal direction.

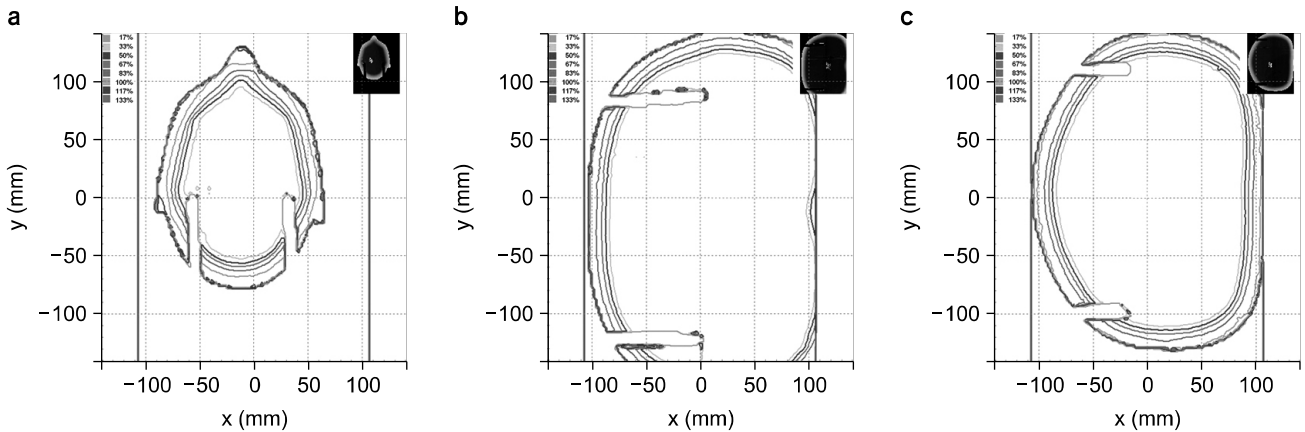


Fig. 5. Isodose profiles of body cross section measured by using the humanoid phantom. (a) Head, (b) thorax, (c) abdomen.

로 나타내었다. 평균은 상하 중심선에서 비교적 가까운 위치의 값들만을 평균하였는데, 상하 방향 평균은 수평위치 -30에서 30 cm까지를 평균하였고, 좌우(수평)방향 평균은 수직위치 -40에서 40 cm까지의 값들을 평균하여 나타내었다. Fig. 4b의 그래프에서 알 수 있는 바와 같이 상하방향의 선량분포는 측정범위 이내의 모든 값들이 9.0% (90.5~99.5%) 이내의 변화를 보였고, 좌우 방향의 선량분포도 상하방향의 선량분포와 동일하게 9.0% (90.5~99.5%) 이내의 변화를 보여주었다. 따라서 본원의 치료실에서 251.8°와 288.2°의 선형 가속기의 갠트리 각도를 사용하였을 때 전신 피부 전자선 치료를 하기에 적합한 선량 분포²⁹⁾를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

3. 피부 깊이 선량 분포

실제 환자 치료 상황과 유사하게 두 선속의 전자선이 6 방향에서 조사되었을 때 EBT2 필름을 이용하여 엘더슨 란도 펜톱으로 깊이선량율을 측정하였다. Fig. 5에서와 같이 두부, 흉부, 복부에서 피부에 고른 선량이 조사됨을 알 수 있다. 다만 두부에서 표면의 요철이 심한 코와 귀에서는 첨단 부분에서 다소 높은 선량이 조사되고, 그 주변 부분에서는 반대로 적은 선량이 들어감을 알 수 있었다. 이는 전자선이 6 방향으로부터 조사될 때 부위에 따라 첨단 부분에 가려지기 때문에 가려진 부위에 들어갈 선량이 첨단 부분에 집중되기 때문으로 다른 문헌에서의 결과와도 잘 일치한다.¹⁰⁾

환자에게 조사될 선량의 처방은 신체의 중심인 배꼽부분을 중심으로 한 복부에서의 깊이선량율을 참고하여 이루어졌다. Fig. 6에서 보여주는 6 방향에서 전자선을 조사하였

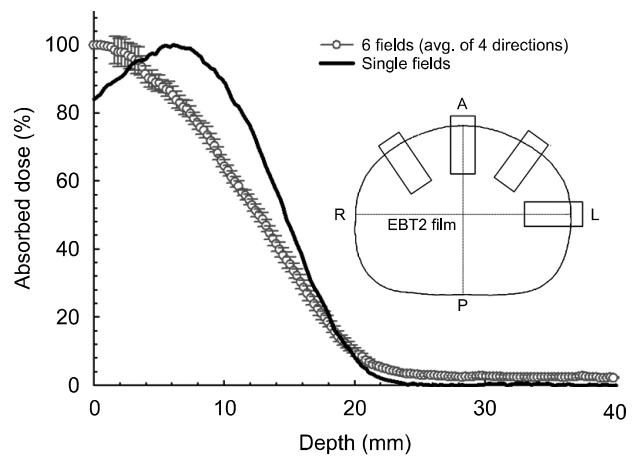


Fig. 6. Percent depth dose of abdomen of humanoid phantom.

을 경우의 깊이선량을 곡선을 살펴보면 선량증가영역(build up region)이 존재하지 않고, 단조 감소하는 곡선을 이루고 있음을 알 수 있다. 이는 경사방향에서 조사된 빔의 경우 피부선량이 증가하는데, 한 개의 수직 조사되는 빔에서의 선량증가영역이 두 개의 경사방향으로 조사되는 빔에 의해 채워진 결과로 이해할 수 있다.

앞서 측정된 단일 전자선에 의한 최대선량깊이인 0.66 cm에서의 깊이선량율은 83%이었고, 이 위치에 처방선량을 전달되도록 MU를 결정하였다.

4. 환자의 in-vivo 측정

환자를 치료하는 동안 신체 각 부위에서 측정된 선량의 결과가 Fig. 7에 나타나 있다. 앞서 측정된 깊이선량율을 고려할 때 환자의 피부 표면에서는 처방선량의 약 120%가

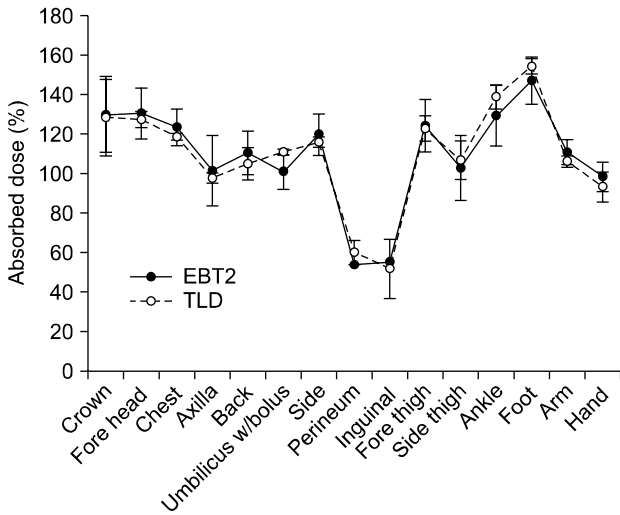


Fig. 7. Dose distribution at the positions of the patient measured by using EBT2 film and TLD. The points and error bars are the average values and the standard deviations of 3 treating cycles.

조사되게 된다. 따라서 그래프에서는 처방선량의 120%에 해당하는 선량을 다시 100%로 정규화하여 나타내었다. 측정 선량은 동일부위에서 3회 측정된 평균값과 그 표준편차로 나타내었다. EBT2 필름으로 측정된 선량값은 TLD로 동일한 부위에서 동시에 측정된 결과와 비교하였는데, EBT2 필름으로 측정된 결과의 평균이 TLD로 측정된 결과의 표준편차 내에 포함되고 있음을 알 수 있다. 굴곡이 심한 실제 환자의 몸에서 서로 인접한 부위에서의 선량도 차이가 있을 수 있음을 감안한다면 두 값은 서로 잘 일치함을 알 수 있다.

본 환자의 경우 정수리 부분에서는 예상 보다 많은 선량이 들어가고 있었는데, 이는 전자선이 조사되는 동안 환자가 머리를 자주 움직인 것이 원인으로 파악된다. 실제로 정수리 부분의 경우 환자의 다른 신체 부위에 비해서 표준편차가 TLD와 필름에서 모두 크게 나왔다. 사타구니와 회음부에서는 예상대로 적은 선량이 들어가는 것으로 측정되었는데, 약 60%의 선량은 유지하고 있었다. 발목을 포함한 발등에 조사되는 선량이 가장 높은 것으로 측정되었는데, 다른 부위가 약 3 방향의 전자선에 노출되는 데 반해 발등은 6 방향의 전자선에 모두 노출되기 때문으로 생각된다. 손등에서는 상대적으로 적은 선량이 조사되는 것으로 측정되었다. 손등은 원통이 아닌 판 형이고 환자의 자세의 특성상 3 방향에서는 손의 한 면에 대해 전자선이 모두 수직으로 입사되고 나머지 3 방향에서는 손의 반대 면에 수직으

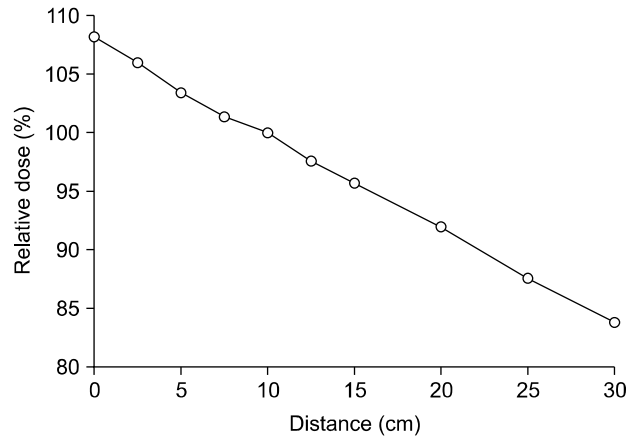


Fig. 8. Variation of dose according to the distance from the scatterer. Scatterer was positioned at 360 cm from the source. The dose was measured by ion chamber which was positioned at 0.6 cm depth inside the solid phantom.

로 입사되어 경사면으로 입사되는 전자선이 없는데다, 손의 두께를 약 3 cm으로 고려한다면 2 cm 보다 깊은 깊이에서의 선량은 거의 없으므로 반대면에서 입사되는 전자선에 의한 피부선량의 영향은 거의 무시할 수 있어, 앞서 인체모형 팬텀의 복부에서의 깊이선량율이 선량증가영역 없이 깊이에 따라 감소하는 경향을 보인 것과 달리 3개의 수직 입사하는 전자선에 의한 선량증가영역이 발생되어 피부 표면에서의 선량이 다른 부위에 비해 상대적으로 감소한 것으로 여겨진다.

위의 결과에서 TSET 치료에서 신체 각 부위에 조사되는 선량은 환자의 자세에 따라 매우 다양한 값을 가질 가능성이 있음을 알 수 있는데, 이는 환자 신체 표면의 굴곡상태가 다양하고, 환자의 자세가 달라질 경우 전자선이 조사되는 각도가 달라지기 때문이다. 추가적으로 산란판으로부터 거리가 달라지는 것 또한 원인이 될 수 있는데, 산란판과 환자 표면간의 거리에 따른 선량의 변화를 측정해 본 결과 산란판에서 멀어질수록 선량 또한 선형으로 감소함을 발견 하였다. Fig. 8은 산란판을 선원으로 부터 360 cm의 거리에 고정시킨 후 0.66 cm 두께의 물-등가 고체팬텀으로 선량증가(build up) 시킨 선량을 산란판과 물-등가 고체 팬텀 표면간의 거리에 따른 측정결과를 보여준다. 이 결과에는 선원으로 부터의 거리변화에 의한 역제곱법칙에 의한 선량 감소와 산란판으로부터의 거리에 변화에 의한 선량 감소가 모두 포함되어 있는데, 산란판으로부터 10 cm 떨어진 부분을 기준으로 산란판 직후방에서는 약 8% 정도 많은 선량이, 거리가 10 cm 멀어질 경우 약 8% 정도의 선량감소

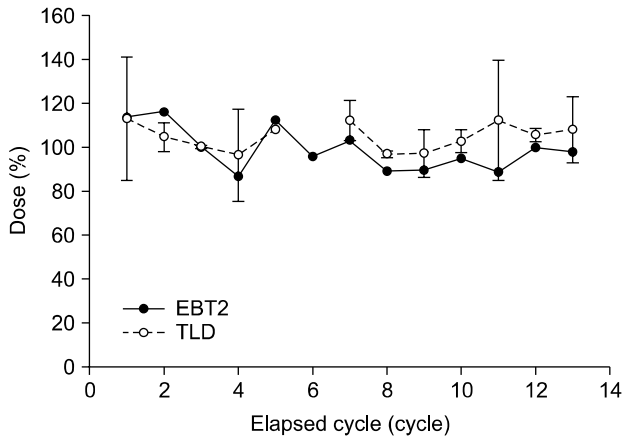


Fig. 9. Variation of dose according to each treating cycle. It was measured at the umbilicus of the patient by assistance of 0.5 cm bolus. The data are averaged for area of the film for EBT2, and averaged values of 3 TLD attached to the same position of the patient simultaneously.

가 일어남을 알 수 있었다. 억제곱법칙에 의한 감소가 370 cm을 기준으로 했을 때 10 cm당 약 5%임을 감안한다면 산란판에서의 산란에 의한 효과는 약 3% 정도의 변화를 추가로 주고 있음을 알 수 있다. 6개 방향에서의 전자선에 의한 선량이 합하여질 경우 그 효과가 줄어들 수도 있지만 거리에 따라 상당한 선량의 변화가 있음을 볼 때 전신 피부 전자선 치료시 환자의 자세에 유의해야만 적절한 치료가 이루어 질 수 있을 것이다.

전신 피부 전자선 치료에서는 매 치료 사이클마다 환자가 동일한 자세에서 치료를 받는다고 볼 수 없는데, 위의 결과를 볼 때 매 치료 사이클마다 환자에게 조사되는 선량 또한 변화가 있을 수 있음을 알 수 있다. 치료 사이클에 따라 환자에게 조사되는 선량의 변화 정도를 측정하기 위해 환자 복부에서의 선량을 매 치료시마다 측정하여 Fig. 9에 나타내었다. 그래프에서 보이는 바와 같이 매 치료 사이클마다 조사되는 선량은 TLD로 측정한 경우 16.6% (96.3~112.9%)의 변화가, EBT2 필름으로 측정한 경우 29.5% (86.3~115.8%)의 변화가 있어 실제로 매 치료 사이클마다 조사 선량의 변화가 큰 것으로 조사되었다.

다만 필름형 선량계는 TLD에 비해 불확도가 다소 큰 것으로 알려져 있으나 전신 피부 전자선 치료시에 적용하였을 때 TLD와 비교하여 ±6% 미만의 오차로 일치하는 결과가 보고된 바 있으며^{13,14)} MOSFET과의 비교에서는 ±10% 이내의 선량 차이가 보고된 적이 있다.¹⁵⁾ 환자의 위치 및 자세에 따른 선량의 영향을 고려한다면 실제의 차이는 보

고된 바에 비해 적다고 볼 수 있고, 선량 측정의 편리성을 고려했을 때 EBT 필름 선량계가 전신 피부 전자선 치료의 선량 측정 도구로서 적합하다 하겠다.

결 론

전신 피부 전자선 치료를 위한 선량측정을 EBT2 필름을 사용하여 측정하였다. EBT2 필름을 읽기 위한 스캐너는 먼밀한 교정을 한 후 읽었으며 기준선량필름을 동시에 읽는 방법으로 측정값을 미소 보정하였다. 측정한 선량 값들은 이온전리함 및 TLD로 동시에 측정한 값과 서로 비교하였다. 치료 전 EBT2 필름을 사용한 깊이선량분포 측정으로 전자선의 에너지 및 MU의 결정에 활용하였고, 환자가 위치하고 있는 평면에서 선량의 공간적 분포를 측정하였다. 실제 환자의 치료 중에 필름을 사용하여 신체 각 부위에 조사되는 선량 분포를 *in-vivo*로 측정하였고, 치료 사이클마다 처방점에서의 누적 선량을 측정하였다.

환자 치료를 위한 전자선 에너지의 결정에는 이온전리함으로 병행 측정하여 그 차이가 없음을 확인하였고, 환자 몸에 조사되는 선량의 측정에는 TLD로 병행 측정하여 그 결과를 비교하였다.

EBT2 필름을 사용하여 전신 피부 전자선 치료를 위한 선량을 측정하고 기준 선량계와 값을 서로 비교한 결과 EBT2 필름이 TSET 치료를 위한 선량계로 충분히 사용될 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Meyler TS, Blumberg AL, Purser P: Total skin electron beam therapy in mycosis fungoides. *Cancer* 42:1171-1176 (1978)
2. Micaily B, Vonderheid EC, Brady LW, Andrews C: Total skin electron beam and total nodal irradiation for treatment of patients with cutaneous T-cell lymphoma. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 11:1111-1115 (1985)
3. Maingon P, TrucG, Dalac S, et al: Radiotherapy of advanced mycosis fungoides: Indications and results of total skin electron beam and photon beam irradiation. *Radiat Oncol* 54:73-78 (2000)
4. Chen Z, Agostinelli AG, Wilson LD, Nath R: Matching the dosimetry characteristics of a dual-field Stanford technique to a customized single-field Stanford technique for total skin electron therapy. *Int J Radiation Oncology Biol Phys* 59:872-885 (2004)
5. Tetennes PJ, Goodwin PN: Comparative study of superficial whole-body radiotherapeutic techniques using a 4 MeV non angled electron beam. *Radiology* 122:219-226 (1977)
6. Welton LW, Jones GW, Kim D, et al: Experience with total

- skin electron beam therapy in combination with extracorporeal photopheresis in the management of patients with erythrodermic (T4) mycosis fungoides. *J Am Acad Dermatol* 43:54-60 (2000)
7. **Karzmark CJ, Loevinger R, Steele RE, Weissbluth M:** A technique for large field superficial electron therapy. *Radiology* 74:633-644 (1960)
 8. **Page V, Gardener A, Karzmark CJ:** Patient dosimetry in the electron treatment of large superficial lesions. *Radiology* 94:635-641 (1970)
 9. **Piermattei A, Rossi G, Azario L, Fidanzio A, Balducci M, Valentini V:** Electron beam dosimetry of total skin electron therapy. *Radiol Med* 108:549-559 (2004)
 10. **Gamble LM, Farrell TJ, Jones GW, Hayward JE:** Two-dimensional mapping of underdosed areas using radiochromic film for patients undergoing total skin electron beam radiotherapy. *Int J Radiation Oncology Biol Phys* 62:920-924 (2005)
 11. **Weaver RD, Gerbi BJ, Dusenbery KE:** Evaluation of dose variation during total skin electron irradiation using thermoluminescent dosimeters. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 33:475-478 (1995)
 12. **Antolak JA, Cundiff JH, Ha CS:** Utilization of thermoluminescent dosimetry in total skin electron beam radiotherapy of mycosis fungoides. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 40:101-108 (1998)
 13. **Fraass BA, Roberson PL, Glatstein E:** Whole-skin electron treatment: patient skin dose distribution. *Radiology* 146:811-814 (1983)
 14. **Bufacchi A, Carosi A, Adorante N, et al:** In vivo EBT radiochromic film dosimetry of electron beam for total skin electron therapy (TSET). *Physica Medica* 23:67-72 (2007)
 15. **Reynard E, Evans M, Devic S, et al:** Rotational total skin electron irradiation with a linear accelerator. *J Appl Clin Med Phys* 9:123-134 (2008)
 16. **Jones GW, Kacinski M, Wilson LD, et al:** Total skin electron radiation in the management of mycosis fungoides: Consensus of the European Organization for Research and Treatment of Cancer cutaneous lymphoma project group. *J Am Acad Dermatol* 47:364-370 (2002)
 17. **Trump JG, Wright KA, Evans WW, et al:** High-energy electrons for the treatment of extensive superficial malignant lesions. *Am J Ront Rad Ther Nuc Med* 69:623-629 (1953)
 18. **Johnston DO, Smedal MI, Wright KA, Trump JG:** Electron beam therapy of widespread superficial malignant lesions. *Surg Clin North Am* 39:1-6 (1959)
 19. **Wu JM, Leung SW, Wang CJ, Chui CS:** Lying-on position of total skin electron therapy. *Int J Radiation Oncology Biol Phys* 39:521-528 (1997)
 20. **Cheung T, Butson MJ, Yu PKN:** Energy dependence corrections to MOSFET dosimetric sensitivity. *Australasian Physical&Engineering Science in Medicine* 32:16-20 (2009)
 21. **Cho SK, Choi SH, Na SH, et al:** Determination of dose correction factor for energy and directional dependence of the MOSFET dosimeter in an anthropomorphic phantom. *J Korea Asso Radiat Prot* 31:97-104 (2006)
 22. **Fuss M, Sturtewagen E, De Wagter C, Georg D:** Dosimetric characterization of GafChromic EBT film and its implication on film dosimetry quality assurance. *Phys Med Biol* 52:4211-4225 (2007)
 23. **Todorovic M, Fischer M, Cremers F, Thom E, Schmidt R:** Evaluation of GafChromic EBT prototype B for external beam dose verification. *Med Phys* 33:1321-1328 (2006)
 24. **Cheung T, Butson MJ, Yu PK:** Independence of calibration curves for EBT gafchromic films of the size of high-energy X-ray. *Applied Radiation and Isotopes* 64:1027-1030 (2006)
 25. http://online1.ispsorp.com/_layouts/Gafchromic/content/products/ebt2/pdfs/GAFCHROMICEBT2TechnicalBrief-Rev1.pdf
 26. **Su FC, Liu Y, Stathakis S, Shi C, Esquivel C, Papanikolaou N:** Dosimetry characteristics of GAFCHROMIC EBT film responding to therapeutic electron beams. *Appl Radiat Isot* 65:1187-1192 (2007)
 27. **Butson MJ, Cheung T, Yu PK:** Weak energy dependence of EBT gafchromic film dose response in the 50 kVp~10 MVp X-ray range. *Appl Radiat Isot* 64:60-62 (2006)
 28. **Khan FM:** *The Physics of Radiation Therapy*. 3rd ed. Williams & Wilkins, Philadelphia, PA (2003), pp. 301
 29. **AAPM Report 23:** *Total Skin Electron Therapy: Technique and Dosimetry*. New York, NY, American Institute of Physics, Inc., 335 East 45 Street (1987)

Dosimetry by Using EBT2 Film for Total Skin Electron Beam Therapy (TSET)

Ui-Jung Hwang*, Jeong-Eun Rah*, Hojin Jeong*, Sung Hwan Ahn*, Dong Wook Kim[†],
Sang-Yeob Lee*, Young Gyung Lim[‡], Myonggeun Yoon*, Dong Ho Shin*,
Se Byeong Lee*, Sung Young Park*, Hong Ryull Pyo[§], Weon Kuu Chung[†]

*Proton Therapy Center, National Cancer Center, [†]Department of Radiation Oncology, Kyung Hee University International Medical Service, Seoul, [‡]Department of Radiation Oncology, Gyeongsang National University Hospital, Jinju, [§]Department of Radiation Oncology, Samsung Medical Center, Seoul, Korea

For treatment of Total Skin Electron beam Therapy (TSET), measurement of dose at various conditions is need on the contrary to usual radiotherapy. When treating TSET with modified Stanford technique based on linear accelerator, the energy of treatment electron beam, the spatial dose distribution and the actual doses deposited on the surface of the patient were measured by using EBT2. The measured energy of the electron beam was agreed with the value that measured by ionization chamber, and the spatial dose distribution at the patient position and the doses at several point on the patient's skin could be easily measured by EBT2 film. The dose on the patient that was measured by EBT2 film showed good agreement with the data measured simultaneously by TLD. With the results of this study, it was proven that the EBT2 film can be one of the useful dosimeter for TSET.

Key Words: TSET, EBT2 film, TLD, Dosimeter, *In-vivo*