

## 2.5D 전자선 선량계산 알고리즘 개발

한림대학교 의과대학, 강동성심병원 치료방사선과

조병철, 고영은, 오도훈, 배훈식

본 연구에서는 외부조사 전자선에 대한 3차원 선량계산 알고리즘 모델을 개발하기 위한 기초 연구로서 기존의 2D 펜실빔 알고리즘을 확장시켜 3차원 geometry를 적절히 고려할 수 있는 선량계산 모델을 개발하고자 한다.

선량계산 모델은 IDL5.2(Research Systems Inc. 미국)를 사용하여 프로그램하였으며, Hogstrom의 펜실빔 모델에 의한 선량계산에 필요한 중심축 상의 깊이선량분포는 Siemens M6740의 12MeV 전자선에 대한 측정치를 사용하였고, 전자선의 공기 및 물에서의 선형저지능(linear stopping power), 선형산란능(linear scattering power)은 ICRU 보고서 35로부터 인용하여 사용하였다. 선량계산의 정확도를 확인하기 위하여 정형 조사면에 대한 선량분포, 공기 간격 효과, 인체 외곽 보정에 대해 전리함, 필름 등을 사용하여 얻은 측정값과 비교, 분석하였다.

PC(Pentium III 450MHz) 상에서 프로그램 실행 결과, 단일 조사 빔에 대한 선량계산에 약 120초가 소요되어, 선량계산 알고리즘의 최적화를 통한 선량계산 시간 단축이 필요하다 하겠다. 선량 평가에 대한 비교 결과, 정형 및 비정형 조사면에 대한 선량분포는 선량변화가 급격한 반음영(penumbra)영역에서  $\pm 3\text{mm}$  이내의 오차를 보였으며, 측방 선량분포에 따른 비교 결과, 측정치와 5%이내에서 일치하였다. 또한 공기 간격 및 인체 외곽선 보정의 경우,  $\pm 10\%$  내외에서 측정값과 일치하였다.

결론적으로, 전자선에 대한 2차원 펜실빔 모델을 확장하여 3차원 치료계획에 적합하게 3차원상의 임의의 단면 선량계산이 가능하도록 구현되었다. 또한 비정형 조사면에 대한 선량계산 뿐만 아니라, 인체외곽 및 공기 간격 등과 같이 3차원적 geometry에 대한 보정이 필요한 경우에 대하여도 이를 선량계산 시 적절히 고려함을 확인할 수 있었다. 추후, CT를 통한 비균질 보정방식을 구현할 계획이며, 이들 선량계산 모델은 교육 및 연구용으로 적절히 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

**중심 단어 : 전자선량계산 알고리즘, 펜실빔 모델**

### 서론

본 연구는 외부조사 전자선에 대한 3차원 선량계산 알고리즘 모델을 개발하기 위한 기초 연구로서 기존의 2D 펜실빔 선량계산 알고리즘을 확장시켜 2.5D 선량계산 모델을 개발하였다.

Hogstrom의 펜실빔 모델<sup>1)</sup>은 대부분의 상용 치료계획장치에 전자선 선량계산 알고리즘으로 채택될 만큼 전자선 선량계산의 표준 모델로 이용되어 오고

있어, 전자선 선량계산 알고리즘의 개발을 위한 출발점으로 이용할 수 있을 것으로 판단하였다. 이로부터 공기간격이나 인체외곽 등과 같이 3차원 geometry나 이로 인한 산란선의 영향을 적절히 반영할 수 있도록 2D 펜실빔 모델을 확장시켜 2.5D 선량계산 알고리즘을 구현하고자 하였다. 또한 단계적으로 계산의 정확도를 향상 시켜 나갈 수 있도록 고려하여, 선량계산의 정확도와 계산 속도를 상호 절충할 수 있는 선량계산 모델을 구현하고자 하였다.

This study was supported by a grant (#HMP-98-G-1-016) of the HAN (Highly Advanced National) Project, Ministry of Health & Welfare, R.O.K

구현된 프로그램의 선량계산 정확도를 평가하기 위해, 본원의 Mevatron 6740(Siemens,미국)의 12MeV 전자선에 대하여 측정값과 계산 결과를 비교하였다.

이론

Hogstrom의 2차원 펜실빔(pencil-beam) 알고리즘은 Fermi-Eyges 이론에 의한 전자의 다중 쿨롱 산란(multiple Coulomb scattering) 이론에 기초하고 있다. 즉 입사 전자가 매질을 진행해 가면서, 매질 내 전자와 전자-전자간 윌러 충돌을 거듭함으로써 진행 방향이 가우시안 형태의 분포를 형성하게 되며, 이때 진행방향에 수직인 평면상에 투영시킨 평균 산란각은 선형각산란능(linear angular scattering power,  $\frac{d\sigma_{MCS}^2}{dZ}$ )의 n차 모멘트를 사용하여 다음과 같이 표현된다

$$\sigma_{\theta_i}^2 = \sigma_{\theta_j}^2 = A_0 - A_i^2/A_2$$

$$A_i = \frac{1}{2} \int_0^{SCD} (SCD - Z)^n \frac{d\sigma_{MCS}^2}{dZ} dZ \quad (1)$$

Hogstrom 등은 이 이론에 근거하여, cone을 출발한 각각의 펜실빔이 공기와 매질을 통과할 때 축방향에서의 각분포(angular spread)를 (1)식을 사용하여 구하고, 빔축상의 깊이 선량분포는 측정값( $D_0(0,0, Z_{eff})$ )을 사용하여 계산한 후, 아래 (2), (3) 식과 같이 한 점에서의 선량계산에 모든 펜실빔에 의한 영향을 컨벌루션(convolution) 방법을 사용하여 합산함으로써 얻을 수 있었다. 이를 통해 Hogstrom 등은 전자선량분포가 깊이에 따라 급속히 측면 방향으로 퍼지는 현상을 물리이론에 근거하여 적절히 설명할 수 있게 되었다. 이때, 오차함수(error function),  $erf(x)$  는,

$erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$  이고,  $\sigma_{air}^2, \sigma_{MCS}^2$  는 공기중/매질내에서의 펜실빔에 대한 radial분포의 평균치를 나타내고,  $S_{air}$ 는 순수하게 공기중 산란에 의해서 점( $x'', y'', z$ )의 위치에 도달되는 전자 플루언스 cone 바닥의 면적소,  $dX'dY'$ 로부터 직하방으로 출발된 펜실빔 중 점( $x'', y'', z$ )에 도달되는 전자 플루언스들을 모두 합산하여 위의 식과 같이 얻을 수 있게 된다. 또한 점( $x'', y'', z$ ) 위치에 도달된 전자 플루언스,  $S_{air}$ 가 매질 내 점 P( $x, y, z$ ) 위치에 전파하는 선량은, 커널 함수

$\frac{1}{2\pi \sigma_{MCS}^2} \exp - \frac{(X - X'')^2 + (Y - Y'')^2}{2 \sigma_{MCS}^2}$  와의 컨벌루션을 시행하여 구할 수 있다.

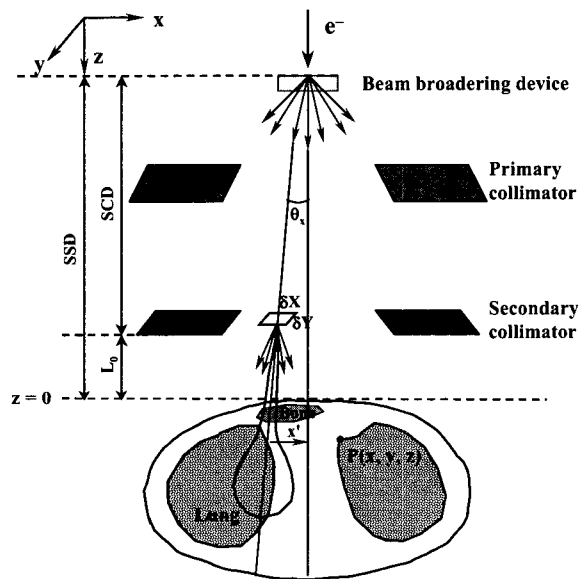


Fig. 1. Schematic representation of the pencil-beam algorithm. ( from the reference 1)

$$D(X, Y, Z) = \iint S_{air}(X'', Y'', Z) \times \frac{1}{2\pi \sigma_{MCS}^2} \exp - \frac{(X - X'')^2 + (Y - Y'')^2}{2 \sigma_{MCS}^2} \times D_0(0,0, Z_{eff}) \left( erf \frac{WX\phi Z/2}{\sqrt{2} \sigma_0} \right)^{-2} \left( \frac{SSD + Z_{eff}}{SSD + Z} \right)^2 dX'' dY'' \quad (2)$$

$$S_{air}(X'', Y'', Z) = \frac{1}{2\pi \sigma_{air}^2} \iint_{collimator \ at \ Z} S(X', Y') \times \exp - \frac{(X' - X'')^2 + (Y' - Y'')^2}{2 \sigma_{air}^2} dX' dY' \quad (3)$$

대상 및 방법

1. 알고리즘 구현

선량계산 모듈은 IDL5.2 (Research Systems Inc. 미국)를 사용하였으며, Pentium III 450MHz(256 MByte RAM), Windows NT 상에서 프로그램을 구현하였다. 선량계산에 필요한 빔데이터,  $D_0(z)$ 는 Siemens M6740의 12MeV 전자선 ( $R_p=5.7\text{cm}$ , SCD, secondary collimator distance = 100cm)에 대한 측정치를 사용하였고, Linear stopping power( $\frac{dE}{dz}$ ),

Linear scattering power( $\frac{d\theta^2}{dz}$ )는 ICRU 보고서 35<sup>2)</sup>로부터 인용하여 사용하였다.

비정형 조사면의 공기중 플루언스,  $S_{air}$  계산 시 초기 입사 플루언스,  $S(X', Y')$  인자를 아래와 같이 설정함으로써 결정되고,

$$S(X', Y') = \begin{cases} 1 & \text{if } p(X', Y') \text{ inside} \\ 0 & \text{if } p(X', Y') \text{ outside} \end{cases} \quad \text{--- (4)}$$

또한,  $S_{air}$ 는 동일 깊이(z)에서는 x, y의 위치에 관계없이  $\sigma_{air}^2$ 이 일정하므로 2차원 컨벌루션 계산방식을 적용시켜 계산 시간을 줄일 수 있도록 하였다. X-ray contamination 선량  $D_X$ 는 거리역제곱 관계만을 고려하였고, 측정값과 식 (5)를 사용하여 계산하였다.

$$D_X(z) = D_X \times \left( \frac{SSD + R_p}{SSD + z} \right)^2 \quad \text{--- (5)}$$

beam map의 크기는 0.25cm 간격으로  $81 \times 81 \times 32$  ( $20 \times 20 \times 8\text{cm}^3$ )의 3차원 배열로 설정하였고, dose grid는 크기가  $32 \times 32 \times 32\text{cm}^3$ 인 가상 팬텀 내에서 0.5cm 간격으로  $64 \times 64 (32 \times 32\text{cm}^2)$ 의 2차원 배열로 설정하여 계산하였다.

이때, 한 지점에서의 선량계산은 펜실빙 합산알고리즘<sup>3)</sup>은 식 (6), (7)과 같이 구현하였다.

2. 선량 평가

1] 수직 및 45° Oblique 입사 빔에 대한 선량계산 평가

수직 및 45° Oblique 입사 빔에 대한 선량계산의 정확도를 확인하기 위하여, Kodak XV-2 필름을 필름면이 빔 입사방향과 나란하게 되도록 폴리스티렌 고체 팬텀 내에 위치시키고, 12MeV 전자선을 조사하였다. 이때, 팬텀과 삽입된 필름간의 공간간격을 최소화하기 위해 팬텀 양쪽을 프레스를 사용하여 최대한 압축시켰고, 필름의 흡수선량에 대한 흑화도의 선형성을 유지시키기 위해 25cGy이하의 방사선량을 조사하였다.

조사된 필름은 VXR-12(VIDAR사, 미국)을 사용하여 흑화도를 측정하였고, 측정된 흑화도의 흡수선량과의 일치도를 확인하기 위해, 수직입사 측정으로부터 얻은 깊이선량분포(percentage depth dose)를 물팬텀 내에서 이온전리함, IC-10(Wellhofer, 독일)을 사용하여 얻은 결과와 비교하였다.

$$D_e(x, y, z) = \sum_{l=1}^{N_l} \sum_{k=1}^{N_k} S_{air} \times \frac{1}{2} \left\{ \text{erf} \left[ \frac{x_k + \Delta x/2 - x}{\sqrt{2} \sigma_{mcs}(x_k, y_l, z)} \right] - \text{erf} \left[ \frac{x_k - \Delta x/2 - x}{\sqrt{2} \sigma_{mcs}(x_k, y_l, z)} \right] \right\} \times \frac{1}{2} \left\{ \text{erf} \left[ \frac{y_l + \Delta y/2 - y}{\sqrt{2} \sigma_{mcs}(x_k, y_l, z)} \right] - \text{erf} \left[ \frac{y_l - \Delta y/2 - y}{\sqrt{2} \sigma_{mcs}(x_k, y_l, z)} \right] \right\} \times D_e^{measure}[0, 0, d_{eff}(x_k, y_l, z)] \left[ \frac{SSD + d_{eff}(x_k, y_l, z)}{SSD + z} \right]^2 \quad \text{---- (6)}$$

$$S_{air} = \sum_{j=1}^{N_j} \frac{1}{2} \left\{ \text{erf} \left[ \frac{x_j + \Delta x/2 - x}{\sqrt{2} \sigma_{air}(z)} \right] - \text{erf} \left[ \frac{x_j - \Delta x/2 - x}{\sqrt{2} \sigma_{air}(z)} \right] \right\} \cdot \sum_{k=1}^{N_k} \frac{1}{2} \left\{ \text{erf} \left[ \frac{y_k + \Delta y/2 - y}{\sqrt{2} \sigma_{air}(z)} \right] - \text{erf} \left[ \frac{y_k - \Delta y/2 - y}{\sqrt{2} \sigma_{air}(z)} \right] \right\} \quad \text{---- (7)}$$

2] 흡이 파여진 팬텀 입사면에 대한 선량 측정  
 면적이 2cm×2cm이고, 깊이가 3cm인 흡이 파여진 고체 팬텀(Fig. 8 참조)내에 radiochromic 필름, GafChromic MD-55(Nuclear Associates, 미국)를 입사면의 모양에 맞게 절단하여 삽입하고, 빔을 수직 입사시켰을 때, 선량계산의 정확도를 평가하였다.

결 과

1. 알고리즘 구현

Fig. 2는 정형 조사면에서 12MeV 전자선의 빔중심 축 단면상의 선량분포 계산 결과를 3차원적으로 보여주고 있으며, Fig. 3은 T자 형태의 비정형 조사면에 대해 계산된 공기중 플루언스,  $S_{air}$  를 나타낸다.

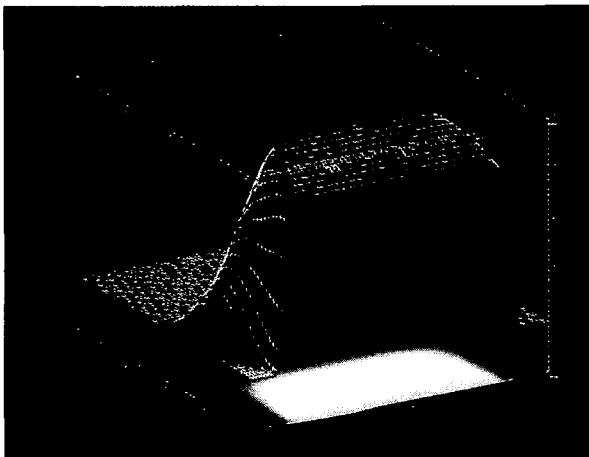


Fig. 2. 3D representation of dose distribution of the 12MeV electron beam on the plane containing the central beam axis.

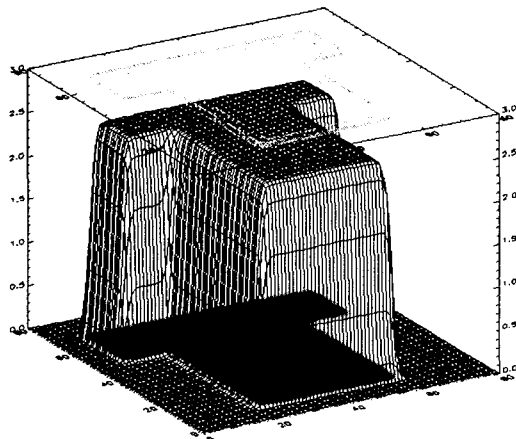


Fig. 3. In-air relative fluence,  $S_{air}$  for the T-shaped irregular field.

한편, 펜실빔의 초기 각분포,  $\sigma_{\theta}$ 는 식 (1)에 의해 구한 결과 32mrad이었으나, 선원필름간 거리, SFD (source-film distance)를 달리하면서 얻은 공기중 반응영 측정치를 이용하여 결정할 수 있으며<sup>1)</sup>, 실제 선량계산에는 측정을 통하여 얻은 39mrad를 사용하였다.

2. 선량 평가

1] 수직 및 45° Oblique 입사 빔에 대한 선량계산 평가

빔의 방향과 평행하게 측정된 필름의 깊이선량분포를 물팬텀 내에서 전리함을 사용하여 측정된 깊이전리(depth-ionization) 값을 AAPM TG25 보고서<sup>4)</sup>에 제시된 물과 공기의 저지능비를 사용하여 깊이선량(depth-dose) 값으로 환산한 결과와 필름을 사용하여 얻은 깊이흡화도(depth-optical density) 값을 Fig. 4에 전시하였다.

Dutreix 등<sup>5)</sup>이 필름과 고체팬텀간의 공기간격에 의한 영향에 대하여 지적한 바와 같이 XV-2 필름의 포장지로(두께 0.25 mm) 인한 공기 간격에 의해 build-up 영역에서의 깊이 선량분포가 15% 까지 차이를 보였으나, 최대 선량점 이후 깊이에서의 선량분포 값은 2% 이내에서 일치하였다.

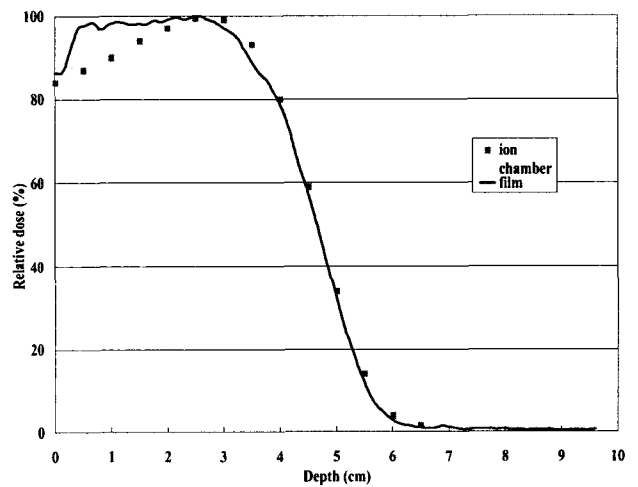


Fig. 4. Comparison of film dosimetry results with ionization chamber results for the central-axis depth-dose curve of 12MeV electron beam.

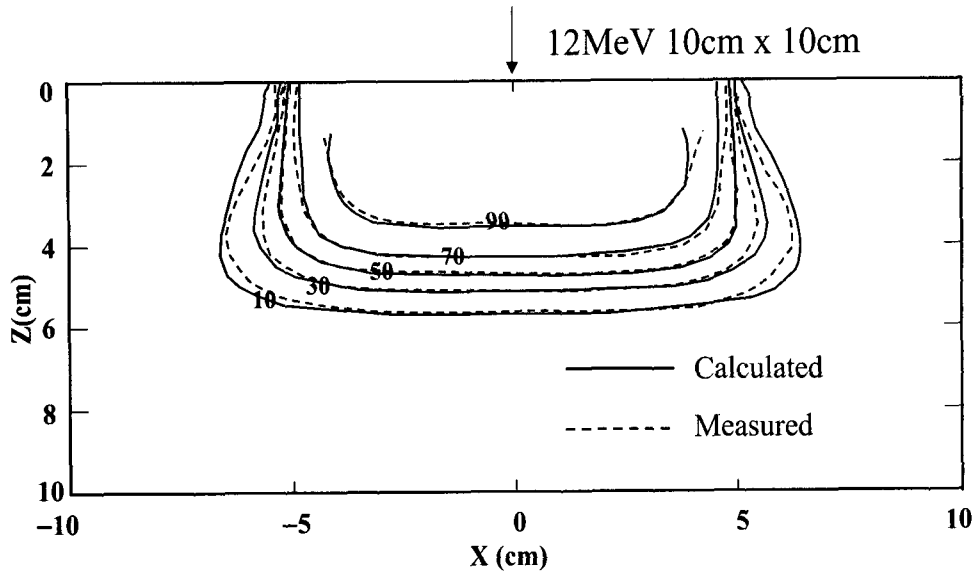


Fig. 5. Comparison of the measured dose distribution(broken line) with the calculated one (continuous line) for the 12 MeV electron beam of 10cm×10cm field-size.

beam profile로 각각 1cm, 2cm, 2.5cm, 4cm, 4.5cm,

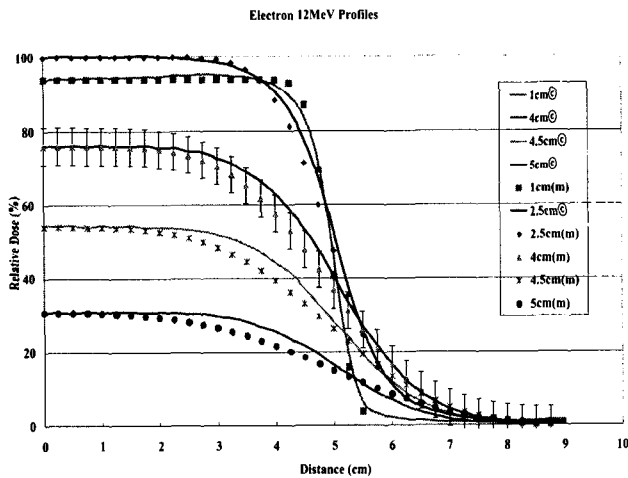


Fig. 6. Dose profiles for a 10cm×10cm cubic field at different depths of 1cm, 2cm, 2.5cm, 4cm, 4.5cm, 5cm. The deviations between the measured data (dot) and the calculated data(continuous line) are less than ±5%, which is represented by the error bar in the figure.

Fig. 5는 10×10cm<sup>2</sup> cone을 사용하여 12MeV 전자선을 조사했을 때, 실제 실험으로 측정된 선량분포와 본 연구에서 개발한 알고리즘에 의해 계산된 선량분포를 비교하였다. 선량변화가 급격한 반응영역에서 ±3mm 이내의 오차를 보였다.

Fig. 6은 계산된 선량분포와 측정된 선량분포의

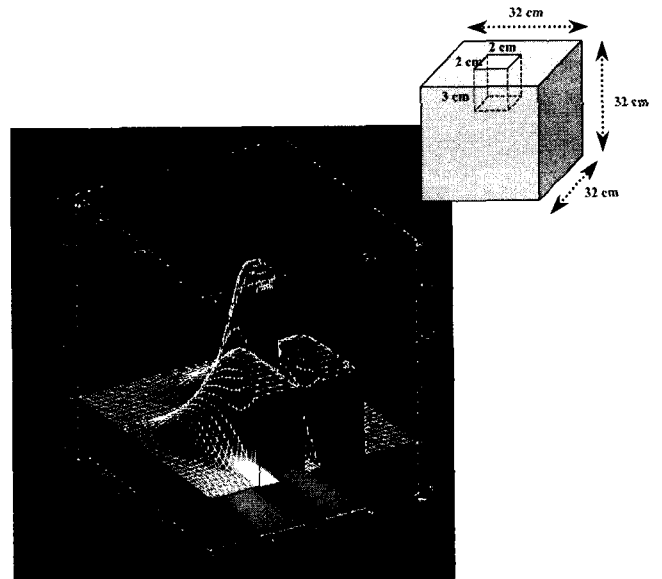


Fig. 8. 3D dose distribution of incident beam on the pit-shaped phantom. The embedded picture shows the geometry of the pit.

5cm의 깊이에서 두 선량분포의 차이를 비교하였고, 이때 두 profile은 ±5% 이내의 차이를 나타내었다.

Fig. 7은 빔을 45° Oblique(10cm×10cm field) 입사시켰을 때, 계산된 선량분포와 측정된 선량분포를 비교한 것으로, 공기간격이 커짐으로써 증가하는 전자선의 공기중 산란으로 인해 반응영역이 급격히 증가되

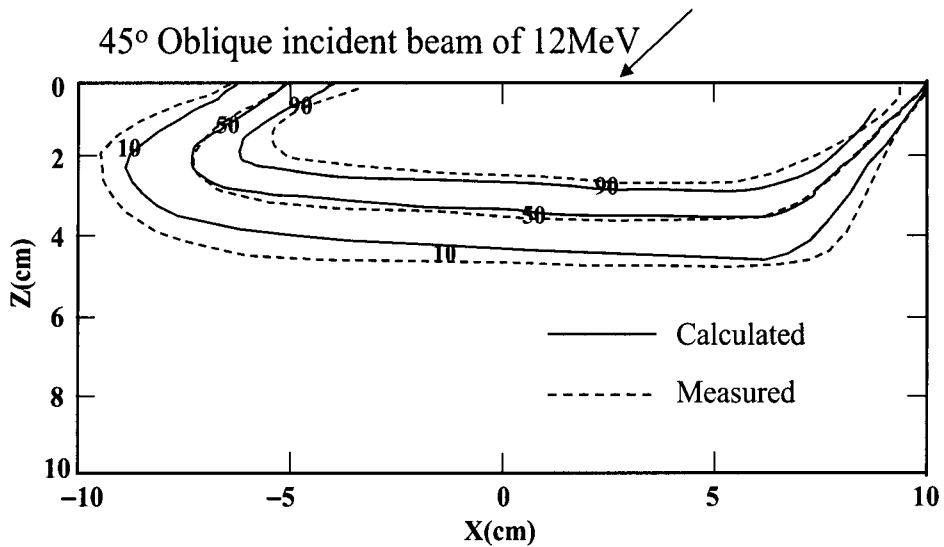


Fig. 7. Comparison of dose distribution of a 45° oblique incident beam between measured data (broken line) and calculated data (continuous line) on 10cm×10cm field size

내부에 도시하였으며, 또한 Fig. 8은 이때의 빔중심

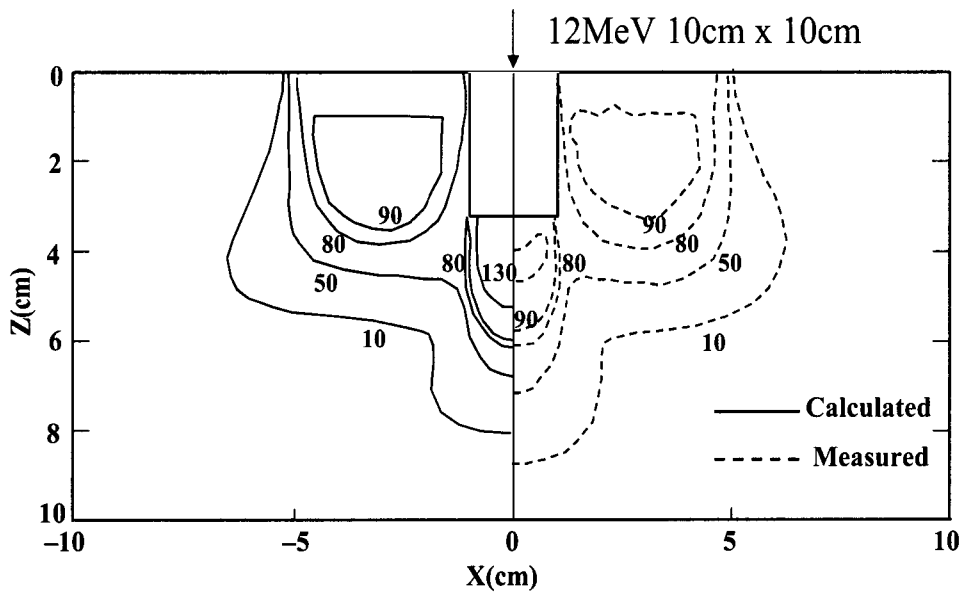


Fig. 9. Comparison of the measured dose distributions with the calculated one for the incident beam on the pit-shaped phantom.

는 현상을 적절히 계산할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 전반적으로 깊이선량분포가 10% 내외의 오차를 수반하였다.

2] 흠이 파여진 팬텀 입사면에 대한 선량 측정 평가  
3차원적 입사 geometry에 대한 선량계산을 평가하기 위해 실시한 본 실험의 팬텀 구조를 Fig. 8의

측을 포함하는 면상의 선량분포를 3차원적으로 나타내었다. Fig. 9는 radiochromic 필름을 이용한 선량 측정치와의 비교를 나타내었다. 전자선의 측방 산란선의 영향으로 인해, 흠의 측면을 따라 형성되는 cold spot과 흠의 바닥면 아래쪽으로 형성되는 hot spot이 계산 결과에서도 잘 나타나 있음을 확인할 수 있었다<sup>6)</sup>.

## 고안 및 결론

본 연구에서 저자들은 공기간격, 3차원적 입체 입사면 등에 대해 적절히 고려된 전자선 펜실빔 모델을 구현하였다. 또한 구현된 모델의 정확성을 평가하기 위해 수직 입사빔, 45° oblique 입사빔, 그리고 흠이 파여진 팬텀에 입사한 빔에 대해 필름을 통한 측정치와 계산치를 비교, 분석하였다. 그 결과, 정형 및 비정형 조사면을 갖는 수직 입사빔의 경우, 반응영역에서 최대  $\pm 3\text{mm}$ 의 오차를 보였고, 45° oblique 입사빔, 흠이 파여진 팬텀에 입사한 빔의 경우, 전반적으로 10%내외의 오차를 보였다. 또한, 45° oblique 입사빔의 경우, 공기간격 증가로 인한 공기중 산란선에 의한 효과가 반응영역에 적절히 반영되고 있었고, 흠이 파여진 팬텀에 입사한 빔과 같이 표면에 예리한 불균일이 존재할 경우, 산란선 변화로 인한 cold spot과 hot spot이 발생됨을 확인할 수 있었다. 아직 비균질에 대한 보정은 이루어지지 못했으며, 추후, CT 데이터로부터 전자밀도를 얻어 비균질 보정을 구현<sup>7)</sup>할 계획으로 있다. 한편, 선량계산에 소요되는 시간을 줄이기 위한 최적화 방법에 대한 연구도 병행되어야 할 것으로 판단된다. 이러한 기능적인 보안이 이루어진다면, 본 연구에서 구현된 선량계산 모듈을 교육 및 연구용으로 활용 할 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고 문헌

- [1] Hogstrom K. R., Mills M. D., Almond P. R.: Electron beam dose calculations. *Phys. Med. Biol.* 26(3):445-459 (1981)
- [2] ICRU Report 35: *Radiation Dosimetry: Electron Beams with Energies Between 1 and 50 MeV*. International commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD (1984)
- [3] Starkschall G., Shiu A. S., Bujnowski S. W., et al.: Effect of dimensionality of heterogeneity corrections on the implementation of a three-dimensional electron pencil-beam algorithm. *Phys. Med. Biol.* 36(2):207-227 (1991)
- [4] AAPM TG25: Clinical electron-beam dosimetry : Report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No.25, *Med. Phys.* 18(1) : 73-109 (1991)
- [5] Dutreix J., Dutreix A.: Film dosimetry of high energy electrons. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 161:33-42. (1969)
- [6] Kahn F. M. : *The Physics of Radiation Therapy*. 2nd ed., Williams & Wilkins, Baltimore, MD (1994), p.381.
- [7] Siddon R. L.: Fast calculation of the exact radiological path for a three-dimensional CT array. *Med. Phys.* 12(2):125-255 (1985)

## Development of 2.5D Electron Dose Calculation Algorithm

Byung Chul Cho, Young Eun Ko, Do Hoon Oh, Hoonsik Bae

*College of Medicine, Hallym University*

*Dept. of Radiation Oncology, Kangdong Sacred Heart Hospital*

In this paper, as a preliminary study for developing a full 3D electron dose calculation algorithm, We developed 2.5D electron dose calculation algorithm by extending 2D pencil-beam model to consider three dimensional geometry such as air-gap and obliquity appropriately.

The dose calculation algorithm was implemented using the IDL5.2(Research Systems Inc.,USA). For calculation of the Hogstrom's pencil-beam algorithm, the measured data of the central-axis depth-dose for 12 MeV(Siemens M6740) and the linear stopping power and the linear scattering power of water and air from ICRU report 35 was used. To evaluate the accuracy of the implemented program, we compared the calculated dose distribution with the film measurements in the three situations; the normal incident beam, the 45° oblique incident beam, and the beam incident on the pit-shaped phantom.

As results, about 120 seconds had been required on the PC(Pentium III 450MHz) to calculate dose distribution of a single beam. It needs some optimizing methods to speed up the dose calculation. For the accuracy of dose calculation, in the case of the normal incident beam of the regular and irregular shaped field, at the rapid dose gradient region of penumbra, the errors were within  $\pm 3$  mm and the dose profiles were agreed within 5%. However, the discrepancy between the calculation and the measurement were about 10% for the oblique incident beam and the beam incident on the pit-shaped phantom.

In conclusions, we expended 2D pencil-beam algorithm to take into account the three dimensional geometry of the patient. And also, as well as the dose calculation of irregular field, the irregular shaped body contour and the air-gap could be considered appropriately in the implemented program. In the near future, the more accurate algorithm will be implemented considering inhomogeneity correction using CT, and at that time, the program can be used as a tool for educational and research purpose..

This study was supported by a grant (#HMP-98-G-1-016) of the HAN (Highly Advanced National) Project, Ministry of Health & Welfare, R.O.K

**Key Words :** Electron dose calculation, pencil-beam model