

MCNPX를 이용한 선형가속기의 6 MeV 전자선에 대한 에너지분포 계산

원광보건대학 방사선과, *원광대학교병원 방사선종양학과

이 정 옥 · 정 동 혁*

본 연구에서는 MCNPX 코드를 사용하여 6 MeV 전자선의 에너지분포를 계산하였다. 이를 위하여 선형가속기(ML6M; Mitsubishi, Japan)의 헤드를 모델화하였다. 전자선의 초기에너지 분포는 가우시안으로 가정하였으며, 이 때 평균에너지는 측정과 계산으로 구한 R_{50} 과 공기중 선량프로 파일을 평가하여 결정하였다. 결정된 빔 변수를 적용하여 선형가속기 헤드 속 주요 위치에서의 전자선 에너지분포를 계산하였다. 어플리케이션 출구에서의 광자에 대한 에너지분포를 이용하여 깊이선량률에서 오염광자의 영향을 분석하였다.

중심단어: MCNPX, 전자선, 에너지분포

서 론

의료용 선형가속기는 수 MeV의 광자선 또는 전자선의 발생장치로서 고에너지 방사선치료에서 핵심 장비라고 할 수 있다. 선형가속기에서 방출되는 빔의 물리적 특성은 표적, 산란막, 콜리메이터 등 각종 장치들로 구성된 선형가속기 헤드(Head)에서 대부분 결정된다. 그렇지만 헤드 내부의 복잡한 기하학적 구조로 인하여 외부로 방출되는 방사선의 에너지와 세기분포는 단순히 결정되지 않는다. 만약 광자선 또는 전자선에 대하여, 정확한 에너지분포를 결정할 수 있다면 선량측정 프로토콜, 치료계획장치의 알고리즘, 각종 보상체, 오염광자 및 진자의 특성 등을 연구하는데 매우 도움이 될 것이다.¹⁾ 그렇지만 이를 직접 측정하는 것은 어렵기 때문에 실용적인 방법으로서 선형가속기 헤드에 대한 몬테칼로 계산이 수행되고 있다.²⁾

1995년 발표된 EGS4 (Electron Gamma Shower 4)³⁾ 기반의 사용자코드인 BEAM^{4,5)}은 코드화된 헤드의 부품들을 조합하고 전체 헤드에 대한 몬테칼로 계산을 수행함으로써 관심점(일반적으로 헤드의 출구)에서 입자에 대한 phase

space data (PSD)를 구하는 특수한 계산코드이다. PSD가 구해지는 경우에 BEAM의 보조 코드인 BEAMDP (BEAM Data Processor)⁶⁾를 사용하여 PSD로부터 에너지분포를 출력할 수 있다. BEAM의 개발과 함께 NRC, VARIAN, PHILIPS, AECL, SCANDITRONIX, SIEMENS사의 선형가속기 주요 모델들에 대한 다양한 에너지의 전자선과 광자선의 에너지분포가 보고된 바 있다.^{4,7)} BEAM^{4,5)}은 추후 다양한 연구에 응용될 것으로 생각하지만, 파일구조가 복잡하고 생성되는 PSD 파일이 대용량(입자 백만개당 약 28 Mbyte)을 가지며 또한 유닉스(Unix) 운영체제에서 실행되므로 일반적 사용에는 다소 어려움이 있다.

한편, LANL (Los Alamos National Laboratory)에서 개발한 MCNP (Monte Carlo N-particles)⁸⁾는 범용의 방사선수송 코드로서 전자, 광자, 중성자, 양성자 등 다중 입자의 수송이 가능하며 다양한 기하학적 구조를 지원한다. 그리고 Tally (출력 연산자)를 사용하여 플루언스, 에너지분포, 에너지흡수 등 다양한 물리량을 출력할 수 있다. 아울러 이 코드는 윈도우(Windows) 운영체제를 사용하는 개인용 컴퓨터에서 실행 가능하므로 보다 편리한 점이 있다. MCNP를 이용한 선형가속기 광자선에 대한 연구는 Lewis 등,⁹⁾ 그리고 Mesbahi 등¹⁰⁾에 의하여 수행된 바 있으나, 전자선에 대한 연구 결과는 많지 않다. 본 연구에서는 MCNPX⁸⁾를 사용하여 ML6M (Mitsubishi, Japan) 선형가속기의 6 MeV 전자선에 대한 에너지분포를 계산하였다. ML6M 선형가속기의 전자선에 대한 에너지분포는 현재까지 연구된 바가 거의 없다.

본 연구는 2006학년도 원광보건대학 교내연구비 지원에 의해 수행되었음.
이 논문은 2006년 10월 27일 접수하여 2006년 12월 14일 채택되었음.
책임저자 : 정동혁, (570-711) 전북 익산시 신용동 344-2
원광대학교병원 방사선종양학과
Tel: 063)850-1526, Fax: 063)850-1528
E-mail: physics@wmc.wonkwang.ac.kr

본 연구에서는 에너지분포의 평가를 위하여 DOSXYZnrc 코드⁵⁾를 사용하여 물팬텀에서의 깊이선량률(depth dose)을 계산하였다. 이 코드의 사용은 구해진 에너지분포의 타당성을 평가할 목적이므로 본 연구의 목적인 에너지분포의 계산과는 독립적이라고 할 수 있다. 본 연구에서 DOSXYZnrc 코드⁵⁾를 선택한 이유는 Jeraj 등¹¹⁾의 연구에서와 같이 전자선에 대한 깊이선량에 있어서 EGS의 전자수송 알고리즘이 측정과 가장 잘 일치하는 결과를 보이기 때문이다.

일반적으로 선형가속기 헤드에 대한 계산에서 결정이 어려운 변수는 최초 산란막에 입사하는 전자의 초기에너지(initial energy)와 크기, 선속, 방향 등과 같은 빔의 정보이다. 선형가속기 헤드의 몬테칼로 계산에 관한 연구들^{10,12,13)}에서는 팬텀속 선량분포가 초기에너지와 빔의 크기에 강하게 의존한다고 보고하고 있다. 이에 본 논문에서는 에너지분포에 영향을 미치는 초기에너지의 결정에 대하여 상세히 기술하였다. 결과에서는 선형가속기 헤드의 주요 위치에 대하여 계산한 전자 및 광자의 에너지분포를 제시하고 치료위치에서 전자와 오염광자에 대한 깊이선량률의 영향을 분석하였다.

본 연구에서 모델화하여 계산한 ML6M 선형가속기의 경우에 에너지분포 관련 자료가 거의 알려져 있지 않으므로, 본 계산 결과는 측정 프로토콜의 적용, 선량계산, 오염선원 관련연구에 응용될 수 있다. 또한 헤드의 각 위치에서 에너지분포가 변화하는 형태를 고찰함으로써 내부 장치들의 역할을 쉽게 이해할 수 있으므로 교육 자료로도 사용될 수 있다. 아울러 다양한 기능을 보유한 MCNPX의 방사선치료 분야 응용에도 기여할 것으로 생각한다.

재료 및 방법

1. 초기인자 결정

선형가속기의 전자선 모드에 대한 헤드의 구조는 Fig. 1과 같다. 이 그림과 같이 ML6M의 헤드는 이중 산란막(dual scattering foil)을 사용하며 나머지 부분은 일반적인 구성과 형태를 가진다.¹⁴⁾ 전자선 모드에서 이차 콜리메이터는 35 × 35 cm² (SAD=100 cm)로 고정되며, 조사면의 크기는 어플리케이터에 의하여 결정된다. MCNPX 계산을 위하여 먼저 Fig. 1의 기하학적 구조를 입력파일의 형식에 따라 작성하였다. 이 때 물질의 종류와 형태는 기하학적 인자는 제작사의 자료¹⁴⁾를 참조하고 또한 실측을 병행하여 작성하였다. 이 그림에서 (a), (b), (c), (d) 위치는 입자의 에너지분포를 계산하기 위한 검출기의 위치이다. 이 때 검출기는 구형

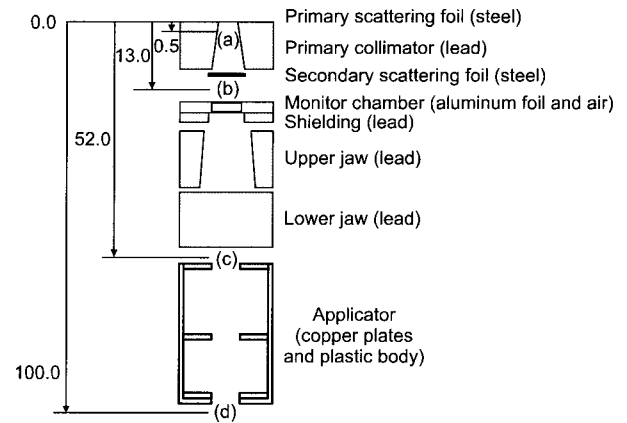


Fig. 1. Geometry of the ML6M linac used for this study, where (a), (b), (c), and (d) are the detector positions for calculating energy spectra in MCNPX simulations.

이며 반경은 0.25 cm이다. 에너지분포의 출력은 먼저 F2 Tally (출력 연산자)를 사용하여 검출기 표면을 통과하는 총플루언스를 구하고, 다시 E2 Tally를 써서 총플루언스를 해당 에너지 구간(energy bin)에 나누어 저장하는 방법으로 하였다. 이 때 에너지분포의 검출 구간은 0.0~8.4 MeV이며 검출 간격(energy bin)은 0.2 MeV이다. 상단에 입사하는 전자선의 직경은 제작사의 자료¹⁴⁾로부터 0.3 cm를 적용하였다. 이 계산에서 미지의 변수는 일차 산란막 상단에 입사하는 전자의 에너지이다. 제작사의 자료¹⁴⁾에서는 단지 가속관 출구에서 전자의 에너지분포를 약 10% (Full width at half maximum, FWHM)로 제시하고 있을 뿐 보다 상세한 자료는 없다. 따라서 본 연구에서는 전자의 초기 에너지분포를 FWHM=0.1E_{inc}인 가우시안으로 가정하였다. 여기서 E_{inc}는 가우시안 분포의 평균에너지이다.

E_{inc}를 결정하기 위하여, 임의의 E_{inc}에 대한 SDD (source to detector distance)=100 cm에서 에너지분포를 구하고 그 결과를 이용하여 깊이선량률을 계산하였다. 각 E_{inc}에 대한 깊이선량률이 계산되면, 이로부터 R₅₀을 구하고 측정값(R₅₀)과 일치하는 E_{inc}를 찾으려 하였다. 여기서 R₅₀은 물에서 깊이선량률이 50%인 길이이다.¹⁵⁾ 이 절차는 빔 튜닝(beam tuning)으로 알려진 절차로서 측정값을 이용하여 해당 선형가속기의 초기 인자들을 결정하는 과정이다.^{9,10,12)} MCNPX의 계산에서 입사 전자수는 2 × 10⁷개를 적용하였으며, cutoff 에너지는 ECUT (전자)=PCUT (광자)=0.1 MeV (운동 에너지)를 적용하였다. 이 외에 몬테칼로 계산의 매개 변수들은 코드의 기본값(default value)을 적용하였다.

본 연구에서는 깊이선량률의 계산을 위하여 DOSXYZnrc

코드⁵⁾를 사용하였다. 이 계산에서 팬텀의 물질은 물이며 체적은 $21 \times 21 \times 5 \text{ cm}^3$, 그리고 선량계산을 위하여 빔축을 따라 설정된 계산요소의 체적은 $1 \times 1 \times 0.1 \text{ cm}^3$ 였다. 본 연구에서는 실제 빔의 형태를 잘 반영하고 있는 점선원 모델 (isource=3; Frontal point source)을 적용하였다. 이 모델에 적용된 입사전자에 대한 매개변수는 $i_{\text{qin}}=-1$, $x_{\text{inl}}=-5$, $x_{\text{inu}}=5$, $y_{\text{inl}}=-5$, $y_{\text{inu}}=5$, $ssd=100$ 이었는데,⁶⁾ 이는 팬텀 표면에서 전자선 조사면의 크기가 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 이며, ssd (source to surface distance)=100 cm임을 나타낸다. 이 모델에서는 x_{inl} 과 x_{inu} 사이 및 y_{inl} 과 y_{inu} 사이에서 무작위로 x 좌표와 y 좌표를 취하여 입사좌표(x_{in} , y_{in} , ssd)를 정하고, 방향코사인을, $u=x_{\text{in}}/l$, $v=y_{\text{in}}/l$, $w=ssd/l$ 와 같이 결정한다[단순화를 위해 선원의 위치를 원점(0, 0, 0)으로 취하였음]. 여기서 $l=\sqrt{x_{\text{in}}^2+y_{\text{in}}^2+ssd^2}$ 이다. 이 계산에 적용된 입사전자수는 10^6 개였으며, 이 때 계산의 cutoff 에너지는 전자와 광자에 대하여 $ECUT=0.7$ (총 에너지), $PCUT=0.01 \text{ MeV}$, 그리고 스텝(step) 간 에너지손실은 4% ($E_{\text{STEP}}=0.04$)를 적용하였다.

깊이선량률의 측정에는 소형 물팬텀에 전리함과 홀더를 장착하고 팬텀 표면으로부터 0.2 cm 간격으로 이동시켜 전하를 측정하였다. 이 때 사용된 전리함은 Markus (PTW, Germany) 그리고 전기계는 525 모델(Victoreen, US)이었다. 측정값을 흡수선량 및 깊이선량으로 환산하는 과정은 TRS-277 프로토콜¹⁵⁾을 사용하였다.

본 연구의 결과에서는 $E_{\text{inc}}=7.05, 7.15, 7.25, 7.35 \text{ MeV}$ 에 대하여 $SDD=100 \text{ cm}$ 에서의 계산된 에너지분포를 제시하고 이 자료를 사용한 깊이선량률의 계산결과를 보였다. 또한 결정된 초기에너지를 적용하여 계산한 선형가속기 헤드 내부에서의 각 검출 위치별 전자 및 광자의 에너지분포를 제시하였다.

2. 공기중 선량 프로파일

위와 같은 방법으로 결정한 E_{inc} 는 측정과 일치하는 깊이선량률을 유도한다. 그렇지만 E_{inc} 가 선량 프로파일의 측면에서도 적합성 여부를 조사해야 한다. 또한 계산에 적용된 전자선의 직경에 있어서도 타당성을 확인해야 한다. 그렇지만 DOSXYZnrc를 사용하여 선량 프로파일을 계산하기 위해서는 $SDD=100 \text{ cm}$ 에 대한 PSD가 필요하지만 MCNPX에서 이 자료를 생성하지 못하므로 본 연구에서는 공기중 선량 프로파일을 계산하고 측정값과 비교하는 방법을 사용하였다. 이 계산과 측정을 위한 기하학적 구조는 Fig. 2와

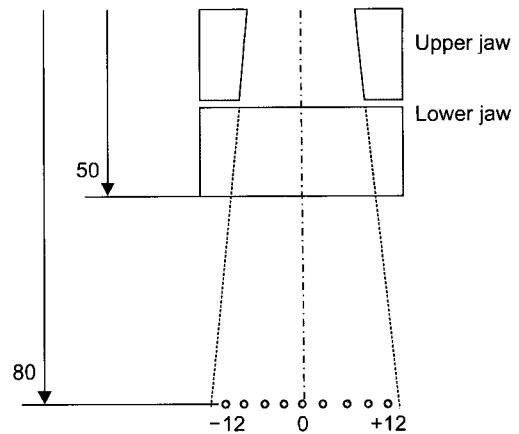


Fig. 2. Geometry for air profile calculation and measurement without electron applicator.

같다. MCNPX 계산에서는 공기등가플라스틱(C-552)으로 구성된 반경 0.5 cm의 구형 검출기를 그림과 같이 -12 cm에서 12 cm까지 3 cm 간격으로 배치하고, F6:E Tally를 적용하여 각 구형 검출기에 흡수선량을 구하도록 입력파일을 작성하였다. 이 계산에서 입사 전자수는 10^7 개이며, cutoff 에너지는 0.05 MeV이었다.

선량 프로파일의 측정에서는 소형 전리함인 550-6A (0.33 cc, Victoreen, USA)에 두께 1.4 cm의 PMMA 재질의 선량증가두껍을 씌우고 Fig. 2에 나타난 각 위치에서 100 MU를 3회 조사하여 측정된 전하의 평균값을 중심에 대하여 규격화하였다. 이 방법은 하나의 검출기를 이동시키면서 측정하기 때문에 모든 측정점의 흡수선량을 동시에 구하도록 되어있는 계산과는 다르다. 즉, 계산의 경우에 검출기가 다른 검출기들로부터 산란선의 영향을 받지만 측정은 그렇지 않다. 따라서 공기 선량프로파일의 계산과 측정의 상호 일치에 대한 분석은 근사적으로 수행하고자 한다.

3. 오염광자의 영향 계산

본 연구에서는 오염광자의 영향을 평가하기 위하여, 어플리케이션의 출구($SDD=100 \text{ cm}$)에서의 광자의 에너지분포를 적용하여 깊이선량률을 계산하였다. 이를 위하여 먼저 임의 깊이에서의 총흡수선량을, $D=n_E D_E+n_P D_P$ 와 같이 놓았다. 여기서 D_E 와 D_P 는 DOSXYZnrc로 계산한 전자와 광자에 대한 흡수선량으로서 Gy/incident fluence 단위이다. 그리고 n_E 와 n_P 는 전자와 광자에 대한 비중인자인데, 팬텀 표면에서 전자와 광자의 플루언스의 차이를 고려하는 인자이다. 따라서 헤드 계산에서 구한 $SDD=100 \text{ cm}$ 에서의 전자와

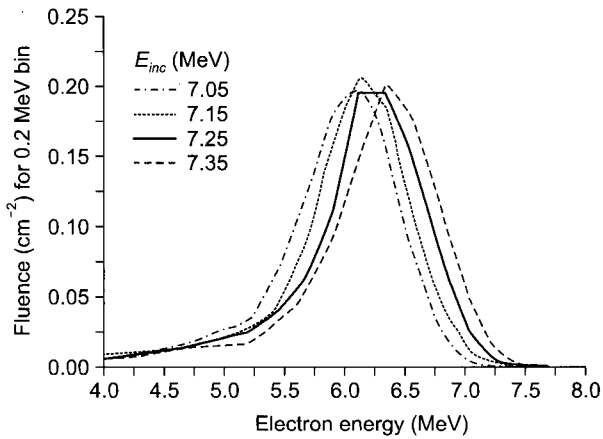


Fig. 3. Energy spectra of the electron beam at SDD=100 cm in air as a function of initial electron energy (E_{inc}).

광자에 대한 입사 플루언스(Φ_E 와 Φ_P)를 사용하여, $n_E = \Phi_E / (\Phi_E + \Phi_P)$, $n_P = \Phi_P / (\Phi_E + \Phi_P)$ 와 같이 결정하였다. 여기서 Φ_E 와 Φ_P 는 전자 또는 광자에 대한 에너지분포(에너지 bin별로 저장된 플루언스)를 모든 에너지에 대하여 합한 값과 같다. 이와 같이 결정된 D 의 단위는 Gy/total particle fluence와 같다. DOSXYZnrc의 계산에서 입사 전자수(또는 광자수)는 10^6 개이며 ECUT=0.7 MeV, PCUT=0.01 MeV이었다. 그리고 전자스텝 변수는 ESTEP=0.04였다. 본 논문의 결과에서는 DOSXYZnrc의 계산결과와 $n_E D_E$, $n_P D_P$, 그리고 D 를 제시하였으며, 아울러 이들로부터 오염광자의 영향도 분석하였다.

결과 및 분석

Fig. 3은 연구에 사용된 E_{inc} 값들에 대하여 SDD=100 cm에서 전자선의 에너지분포를 보여준다. 전자선의 에너지분포는 그림과 같이 저에너지 성분이 포함된 근사적 가우시안 형태를 가지는 것을 알 수 있다. 이 결과들을 각각 입력하여 깊이선량률을 계산한 결과를 Fig. 4에 나타냈다. 이때 깊이선량률은 최대선량깊이에 대하여 규격화되어있다. 이 결과에서 알 수 있듯이 $E_{inc}=7.25$ MeV인 경우에 깊이선량률이 측정값과 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이때 각 에너지분포에 대하여 평균에너지를 계산한 결과를 Table 1에 제시하였다. 이 표에서 $E_{inc}=7.25$ MeV인 경우에 평균에너지는 5.9 MeV이다. 이 값은 TRS-277 프로토콜¹⁵⁾에서 정의하는 팬텀표면에서 평균에너지, $E_0=2.33 R_{50}=5.6$ MeV보다 0.3 MeV 높다. 이는 계산된 에너지분포가 팬텀이

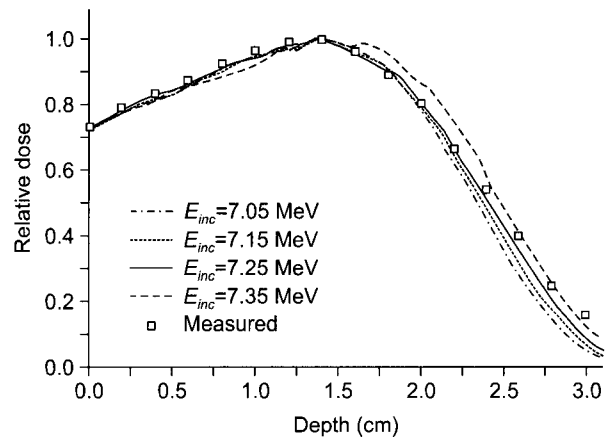


Fig. 4. Electron depth dose curves calculated with DOSXYZnrc as a function of initial electron energy (E_{inc}), where symbols denote measured data using Markus chamber.

Table 1. Mean energy in air calculated with full head geometry at SDD=100 cm as a function of E_{inc} (see text) of the electron beam incident on the scattering foil.

E_{inc} (MeV)	Mean energy (MeV)
7.05	5.69
7.15	5.78
7.25	5.89
7.35	5.99

없는 공기 중에서 결정된 값이기 때문으로 생각한다. 즉, 팬텀이 있는 경우에 표면 근처에서 이차전자의 발생과 후방산란되는 저에너지 전자들의 영향으로 인하여 표면에서의 평균에너지는 팬텀이 없을 때보다 낮아질 것으로 예상되기 때문이다.

Fig. 5는 Fig. 4로부터 결정한 R_{50} 값들과 측정된 R_{50} 을 보여준다. 여기서 측정값 R_{50} 은 2.4 cm이다. 이 결과에서도 $E_{inc}=7.25$ MeV인 경우가 측정값에 가장 근접하는 R_{50} 값을 보이고 있다.

공기중 선량프로파일의 경우 $E_{inc}=7.15$ 및 7.25 MeV인 경우에 측정값과 가장 가까운 결과를 보였다. Fig. 6에 측정결과와 $E_{inc}=7.15$ 및 7.25 MeV에 대한 계산결과를 제시하였는데, 가장 큰 차이를 보이는 OAD=9 cm와 12 cm를 제외하고 다른 점들에서 측정값과 2.1% 이내로 일치하였다. 여기서 OAD는 Fig. 2에 나타낸 바와 같다. 가장 차이가 큰 OAD=12 cm에 있어서 두 에너지의 경우 모두 측정값과 약

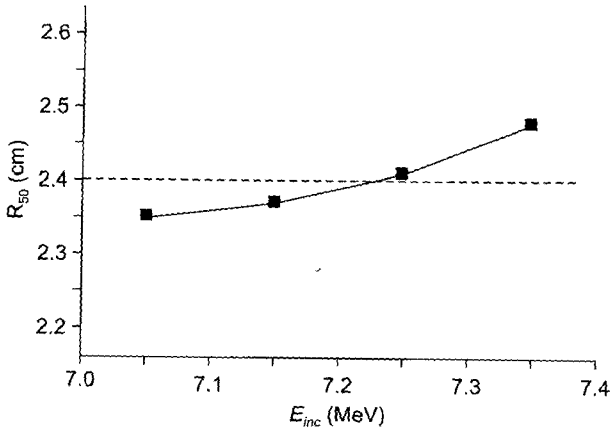


Fig. 5. The R_{50} depths as a function of initial electron energy (E_{inc}), where dotted line is the measured R_{50} .

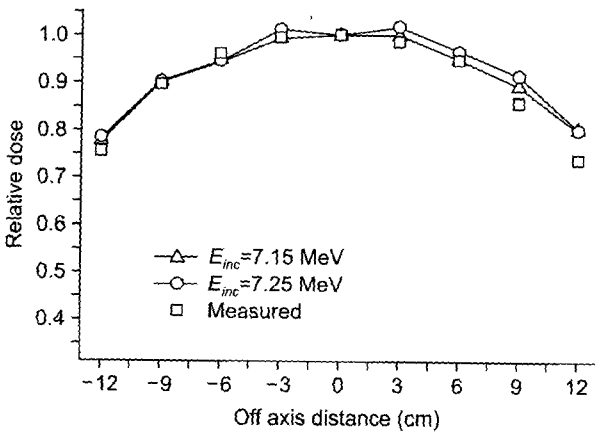


Fig. 6. Calculated and measured electron dose profiles without applicator in air.

8.5% 높게 나타났다. 이 때 OAD=9 cm에서 $E_{inc} = 7.15$ MeV 인 경우에 4.1%, $E_{inc}=7.25$ MeV인 경우에 6.7% 높게 나타났다. 선량 프로파일의 상호 차이들은 몬테칼로 계산의 통계적 오차, 측정의 오차, 측정과 계산의 방법상 차이(재료 및 방법 참조), 그리고 선형가속기 실제 빔의 기하학적 오차들이 기인한 것으로 보여진다. 여기서 계산결과의 통계적 오차는 입사 전자수 10^7 에 대하여 약 $\pm 1.6 \sim 2.0\%$ 범위를 보이고 있다. 측정에 있어서 향후에는 보다 정밀하게 평가된 기하학적 조건과 다양한 측정기를 사용하여 수행해야 할 것으로 생각한다. 그렇지만 측정값과 비교적 일치율을 보이는 OAD= ± 9 cm는 SDD=100 cm에서 22.5×22.5 cm²인 조사면으로 투영되는데, 이는 실제 치료에 사용되는 면적(20×20

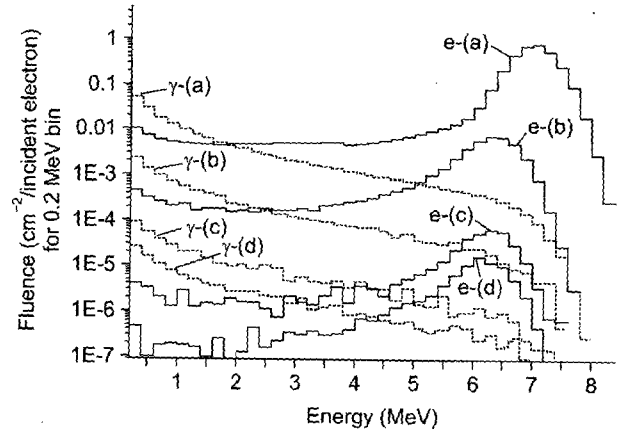


Fig. 7. Calculated energy spectra for electrons and photons at the 4 detector positions in ML6M linac head, where (a), (b), (c), and (d) are detector positions described in Fig. 1.

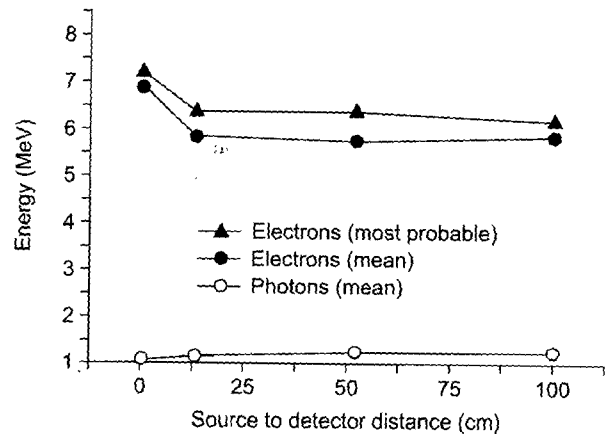


Fig. 8. Most probable and mean energies as a function of detector position in the geometry of the ML6M head for electrons and photons.

cm² 이내)보다 커서 이 결과는 잠정적으로 수용 가능하다.

Fig. 7은 선형가속기 헤드의 다양한 위치에서의 전자와 광자(또는 오염광자)에 대한 에너지 스펙트럼의 계산결과를 보여준다. 이 그림에서 (a), (b), (c), (d)의 위치는 Fig. 1에서 표기된 바와 같다. 이 그림의 세로축은 각 에너지구간에 해당하는 검출된 전자 플루언스(electrons/cm²)를 초기 입사 전자수(2×10^7 electrons)로 나눈 값으로서 단위 입사전자당 전자 플루언스(cm⁻²/incident electron)를 의미한다. 이 그림은 헤드 속에서 전자의 에너지분포가 이차 산란막, 모니터전리함 및 콜리메이터, 그리고 어플리케이터를 통과하면서 저에너지 영역으로 서서히 이동되는 것을 보여준다. 각 위치에 대한 최빈에너지(most probable energy)와 평균에너지

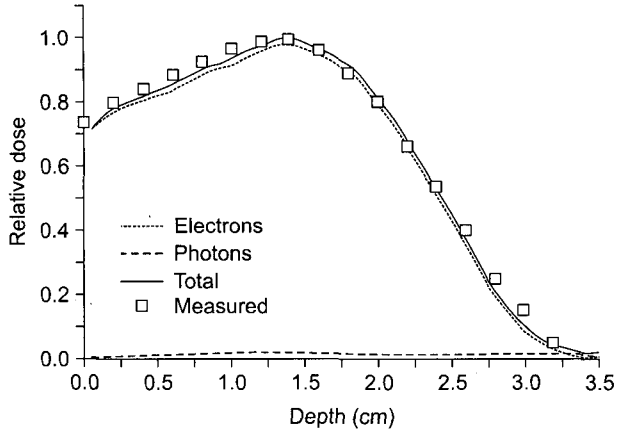


Fig. 9. Calculated and measured depth dose curves including the effect of the contaminant photons for a 6 MeV electron beam from ML6M linear accelerator.

지를 계산한 결과를 Fig. 8에 나타냈다. 이 그림에서 가로 축은 선원과과의 거리이다. 전자선의 최빈에너지와 평균에너지는 이차 산란박을 통과하면서 급격하게 줄어들지만 공기로 구성된 이후 (d) 위치(SDD=100 cm)까지는 거의 일정하다. 광자의 경우에 거리의 증가에 따라 평균에너지의 적은 증가를 보인다. 그 이유는 대부분 저에너지의 성분으로 구성된 광자들이 헤드의 부품들에 의하여 쉽게 흡수 또는 산란되어 SDD의 증가에 따라 고에너지 성분들의 비율이 점차 증가하기 때문으로 생각된다. Fig. 7의 결과는 입사 전자수 2×10^7 에 대한 결과이며, 이 결과의 통계적 오차는 선원과 멀어질수록 증가하는 경향을 보이는데, (d) 위치의 경우 검출되는 총입자수에 대하여 전자선의 경우에 $\pm 2.1\%$, 광자선의 경우 $\pm 1.7\%$ 로 평가되었다.

Fig. 9는 SDD=100 cm에서 전자와 광자의 에너지분포를 각각 적용하여 계산한 깊이선량률을 측정값과 함께 보여준다. 이 결과의 통계적 오차는 입사 전자 및 광자수 10^6 에 대하여 1.0~2.6% 범위로서 깊이에 따라 증가하는 경향을 보인다. 이 그림에서 각 선원에 대한 깊이선량(D_E , D_P)의 원시 자료(DOSXYZnrc 결과)와 총 흡수선량(D)을 Table 2에 제시하였다. 이 때 D 의 결정은 재료 및 방법에서 언급한 바와 같으며, 이 때 적용된 입자 플루언스는 전자에 대하여 $\phi_E = 7.7947 \times 10^{-5}$ electrons/cm², 광자에 대하여 $\phi_P = 1.2514 \times 10^{-4}$ photons/cm²였다. Fig. 9의 결과를 분석할 때 깊이선량률에서 오염광자의 기여는 표면에서 0.8%, 최대선량깊이에서 1.8%, 그리고 R_{50} 에서 3.5%로 나타났다. 총 흡수선량(Fig. 9에서 total)의 경우 표면영역(깊이 1.3 cm 이내)에서 계산값이 측정값보다 2.1~2.4% 정도 낮게 나타났다.

Table 2. Depth dose for electrons and contaminant photons in unit of Gy · cm² (absorbed dose per incident fluence). The total dose is given by weighed sum of the particle fluences evaluated from the head calculation (see text). The total dose means absorbed dose per total incident fluence.

Depth (cm)	Electron dose (D_E) ($\times 10^{-10}$)	Photon dose (D_P) ($\times 10^{-12}$)	Total dose (D) ($\times 10^{-10}$)
0.05	2.871	1.506	1.111
0.15	3.014	2.174	1.170
0.25	3.105	3.038	1.211
0.35	3.186	3.782	1.246
0.45	3.261	3.209	1.271
0.55	3.310	3.495	1.292
0.65	3.393	4.082	1.328
0.75	3.482	4.267	1.363
0.85	3.589	4.176	1.403
0.95	3.623	4.139	1.416
1.05	3.706	4.831	1.452
1.15	3.801	4.921	1.489
1.25	3.853	4.951	1.509
1.35	3.922	4.535	1.533
1.45	3.909	4.323	1.527
1.55	3.832	4.606	1.499
1.65	3.772	4.336	1.475
1.75	3.638	4.768	1.425
1.85	3.529	4.639	1.383
1.95	3.289	4.364	1.289
2.05	3.061	4.687	1.204
2.15	2.790	4.775	1.100
2.25	2.477	2.843	0.968
2.35	2.217	3.808	0.874
2.45	1.893	4.310	0.753
2.55	1.573	4.566	0.362
2.65	1.238	4.370	0.502
2.75	0.917	4.026	0.377
2.85	0.676	3.613	0.282
2.95	0.444	3.555	0.192
3.05	0.271	4.292	0.130

이 차이의 가장 중요한 원인은 계산에 적용된 에너지분포라고 보여지는데, 표면선량의 기여가 높은 낮은 에너지 전자들의 수가 실제보다 낮게 평가되었다고 생각된다. 즉, 선형가속기 헤드에서 방출되는 실제 빔에는 낮은 에너지 전자들이 계산으로 예상한 것보다 더 많이 포함되어있다고 분석된다.

본 연구의 초기 가정에서 산란박에 입사하는 초기 전자선의 에너지분포를 좁은 폭을 가지는 가우시안으로 가정한

바 있다. 따라서 실제 빔을 정확하게 반영하지 못한 결과로서 이와 같은 차이가 발생한 것으로 해석할 수 있다. 그렇지만 실제 빔의 에너지분포를 알 수 없으므로 이러한 가정으로 구한 에너지분포를 사용하는 경우 팬텀 표면 근처의 흡수선량이 약 2.4% 낮게 평가될 수 있다는 것은 본 연구에서 얻은 단편적 결과라고 할 수 있다.

결 론

본 연구에서는 MCNPX를 사용하여 ML6M 선형가속기 헤드에서 방출되는 전자선 및 광자선의 에너지분포를 계산하였다. 초기에너지를 가우시안으로 가정하고, 측정된 R_{50} 에 일치하는 조건을 적용한 결과, $E_{inc}=7.25$ MeV를 결정할 수 있었다. 또한 이 값이 공기중 선량 프로파일의 계산에서도 측정과 근사적으로 일치함을 확인하였다. 선형가속기 헤드 속 다양한 위치에서 전자와 광자에 대한 에너지분포를 계산하였으며, 그 결과를 헤드 속 주요 부품들에 의한 영향의 측면에서 논의하였다. 마지막으로 SDD=100 cm에서의 광자와 전자에 대한 에너지분포를 적용하여 깊이선량을 계산하고 측정과 비교한 결과 약 2.4% 이내에서 상호 일치하는 것을 알 수 있었다. 오염광자의 전체 깊이선량률에 대한 기여는 표면에서 R_{50} 까지 0.8~3.5% 범위를 가지며 깊이에 따라 증가하는 경향을 보였다.

본 연구를 통하여 에너지자료가 알려지지 않은 ML6M 선형가속기의 전자선에 대한 에너지분포를 계산할 수 있었다. 본 결과는 전자선 관련 측정 프로토콜이나 선량계산 관련연구 또는 오염선원에 대한 연구에 적용될 수 있으며 또한 선형가속기 관련 교육자료로 활용될 수 있다고 생각한다.

참 고 문 헌

1. Rogers DWO: Monte Carlo techniques in radiotherapy, Physics in Canada 58:63-70 (2002)
2. Ma CM, Jiang SB: Monte Carlo modelling of electron beams from medical accelerators. Phys Med Bio 44:R157- R189 (1999)
3. SLAC Report-265: *The EGS4 Code System*, Stanford Linear Accelerator Center (1985)
4. Rogers DWO, Faddegon BA, Ding GX, Ma C-M, Wei J: BEAM: a Monte Carlo code to simulate radiotherapy treatment units. Med Phys 22:503-524 (1995)
5. Walters BRB, Rogers DWO: DOSXYZnrc user manual. PIRS Report 794:31-46 (2002)
6. Ma CM, Rogers DWO: BEAMDP user manual. PIRS Report 0509:19-19 (1999)
7. Sheikh-Bagheri D, Rogers DWO: Monte Carlo calculation of nine megavoltage photon beam spectra Using the BEAM code. Med Phys 29:391-402 (2002)
8. Los Alamos National Laboratory: MCNPX (Monte Carlo N-Particle Code System) user's Manual V2.4.0, LANL (2002)
9. Lewis RD, Ryde SJS, Hancock DA, Evans CJ: An MCNP-based model of a linear accelerator x-ray beam. Phys Med Biol 44:1219-1230 (1999)
10. Mesbahi A, Reilly AJ, Thwaites DI: Development and commissioning of a Monte Carlo photon beam model for Varian Clinac 2100ex linear accelerator. Appl Radiat Isot 64:1-7 (2005)
11. Jeraj R, Keall PJ, Ostwald PM: Comparisons between MCNP, EGS4 and experiment for clinical electron beams. Phys Med Biol 44:705-717 (1999)
12. Tzedakis A, Damilakis J, Mazonakis M, Stratakis J, Varveris H, Gourtsoyiannis N: Influence of initial electron beam characteristics on Monte Carlo calculated absorbed dose distribution for linac photon beam. Eur J Cancer Sup Issue 5:s156 (2003)
13. Aljarrah K, Sharp GC, Neicu T, Jiang SB: Determination of the initial beam parameters in Monte Carlo linac simulation. Med Phys 33:850-857 (2006)
14. Mitsubishi: *Operation Manual of the Linear Accelerator Model ML6M (TM-M120524)*, Misubishi Electric co. Japan (1991)
15. TRS-277: *Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams: An International Code of Practice*. Technical Report Series No. 277. 2nd ed, IAEA Vienna (1997)

Calculation of Energy Spectra for 6 MeV Electron Beam of LINAC Using MCNPX

Jeong Ok Lee, Dong Hyeok Jeong*

Department of Radiotechnology, Wonkwang Health Science College,

*Department of Radiation Oncology, Wonkwang University Hospital

The electron energy spectra for 6 MeV electron beam were calculated using a MCNPX code. The head of the linear accelerator (ML6M; Mitsubishi, Japan) was modelled for this study. The energy spectrum of the initial electron beam was assumed to be Gaussian and the mean energy was determined by evaluating the measured and calculated values of R_{50} and dose profiles in air. The energy distributions for electrons and photons at the interested points in the head of the linear accelerator were calculated by applying the initial beam parameters. The effect of contaminant photons on depth dose curves were estimated by the photon energy spectra at the end of the applicator.

Key Words: MCNPX, Electron beam, Energy distribution