

24 MV 의료용 선형가속기의 중성자 발생에 관한 연구

*원광보건대학 방사선과, †원광대학병원 방사선종양학과, ‡전주예수병원 방사선종양학과

이 정 옥* · 정 동 혁† · 강 정 구‡

본 연구에서는 몬테칼로 계산(MCNPX 2.4.0)을 이용하여 24 MV 의료용 선형가속기에서 발생하는 이차중성자의 에너지분포와 선량계산을 수행하였다. 먼저 선형가속기 두부(head)에서 방출되는 광자와 중성자의 에너지분포를 계산하였으며, 이를 이용하여 물팬텀에서 광자와 중성자의 흡수선량을 계산하였다. 몬테칼로 계산결과 물표면에서 5 cm까지 중성자의 흡수선량은 0.66~0.35 mGy/photons Gy로 나타났으며, 상호작용 자료를 이용한 근사적 계산결과는 전자평형 깊이에서 0.52 mGy/photons Gy로 나타났다. 다른 연구결과들과 비교를 통하여 본 연구가 고에너지 선형가속기에서 발생하는 중성자의 선량평가에 응용될 수 있음을 제시하였다.

중심단어: 중성자, MCNPX, 선형가속기

서 론

방사선치료에서는 의료용 선형가속기로부터 발생하는 4~25 MV 범위의 X-선을 이용하는데, 이 때 고에너지 X-선의 경우에 깊이선량률이 높고 표면선량이 낮기 때문에 방사선치료 시 선호되고 있다. 그러나 X-선의 에너지가 10 MV 이상이 되는 경우에 선형가속기로부터 중성자가 발생되어 X-선과 함께 방출될 수 있다.¹⁾ 이러한 중성자의 발생 과정은 광핵반응(photonuclear reaction)으로 알려져 있으며,²⁾ 중성자뿐만 아니라 양성자, 알파입자, 중수소 등도 발생할 수 있음이 보고되어 있다.³⁾ 이러한 이차입자들 중 가장 투과력이 높은 중성자의 영향은 X-선 흡수선량에 약 0.5% 정도 기여하는 것으로 알려져 있는데,^{4,5)} 이는 방사선치료의 측면에서 무시할 수 있지만, 치료실의 차폐 또는 선형가속기 두부(head)의 구성품들의 방사화와 같은 방사선방어의 측면에서는 중요하다. 이와 관련하여 보고된 연구결과들^{4,11)}로부터 선형가속기에서 발생하는 입자의 종류와 에너지 및 선량 등에 대한 근사적 정보를 얻을 수 있다. 그렇지만 생성되는 입자의 종류가 다양하고 입자들의 에너지분포

가 X-선 에너지와 선형가속기 두부의 물질과 형태에 의존하기 때문에 이차입자들에 대한 연구는 매우 어렵다고 할 수 있다. 특히 다양한 종류의 입자들과 에너지들을 완전히 분리하여 측정할 수 없기 때문에 측정에 의한 연구는 높은 불확정성을 유발할 수 있다. 중성자의 경우에 열중성자 범위로부터 수 MeV 영역까지 에너지가 연속적으로 분포하기 때문에 측정기의 에너지 반응을 보정하기 어렵고, 또한 높은 선속의 광자선과 구별하여 측정해야 하기 때문에 정확한 측정은 더욱 어렵다. 해석적 계산의 경우에도 우선 선형가속기에서 발생하는 X-선의 에너지분포를 알기 어려우며 또한 다양한 물질들에 대한 반응 단면적이 충분히 알려져 있지 않기 때문에 중성자의 흡수선량은 단순히 계산되지 않는다.

이러한 측면에서 몬테칼로 계산을 이용한 연구는 다루기 어려운 중성자의 발생에 관하여 보다 많은 정보를 얻을 수 있을 것으로 생각한다. 본 연구에서는 단편적 연구로서 일반적으로 방사선치료에서 가장 높은 에너지로 인식되는 24 MV 선형가속기에 대하여 중성자 에너지분포와 물 흡수선량에 관한 몬테칼로 계산을 수행하고 결과를 보고하고자 한다. 보다 다양한 선형가속기 에너지와 기하학적 조건에 대한 계산은 본 연구를 기반으로 수행할 계획이다. 본 연구에서는 먼저 표적(target)으로부터 발생한 X-선이 치료기 두부의 주요 구성품들과 상호작용을 일으키는 모형을 대하여 계산을 수행하고 기준점에서 광자와 중성자의 에너지분포를 구하였다. 그리고 얻어진 에너지분포를 이용하여 물팬텀에서 광자와 중성자의 깊이선량률을 몬테칼로 계산으로 구하였으며, 상호작용 자료들을 사용하여 전자평형 깊이

본 연구는 2004학년도 원광보건대학 교내연구비 지원에 의해 수행되었음. 이 논문은 2005년 4월 28일 접수하여 2005년 6월 14일 채택되었음.

책임저자: 이정옥, (540-711) 전북 익산시 신용동 344-2
원광보건대학 방사선과
Tel: 063)840-1232, Fax: 063)840-1239
E-mail: jolee@wkhc.ac.kr

Table 1. Summary of photonuclear reaction data for photons in tungsten and lead.

	Threshold energy	E_m	$\sigma(E_m)$	* $\sigma(14 \text{ MeV})$ photon
Tungsten (W-184)	7.412 MeV	13.712 MeV	0.3771 barn	16.1 barn
Lead (Pb-207)	6.736 MeV	13.788 MeV	0.6467 barn	19.0 barn

*: photon cross section obtained from ref. 15

서 물 흡수선량을 독립적으로 계산하여 결과를 상호 비교하였다.

본 연구에서 몬테칼로 계산은 MCNPX¹²⁾ 코드를 사용하였으며, 수치연산은 자체 작성한 포트란 프로그램을 사용하였다. 다음의 재료 및 방법에서는 몬테칼로 계산에서 사용된 주요 물질들에 대하여 광핵반응의 물리적 요소를 논의하였으며, 상호작용 자료로부터 중성자의 흡수선량을 평가하는 과정을 제시하였다. 결과에서는 광자 및 중성자의 에너지분포와 깊이선량률의 계산결과들을 제시하고 다른 연구결과들과도 비교하였다. 결론에서는 계산결과와 평가 및 연구의 응용 방향 등을 제시하였다.

재료 및 방법

1. 몬테칼로 계산 및 물리적 요소

선형가속기 표적으로부터 발생되는 광자는 두부(head)의 모든 구성 물질들과 상호작용하므로 중성자는 표적뿐만 아니라 다른 구성요소에서도 발생할 수 있다. 따라서 두부를 구성하는 요소들의 물질과 형태를 실제와 가깝게 취하여 상호작용 등을 계산함으로써 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다. 그렇지만 복잡한 두부의 기하학적 구조를 상세히 묘사하는 것은 한계가 있으므로, 계산목적에 따라 주요부분만을 묘사하여 계산을 수행하는 경우가 많은데, Facure 등¹³⁾은 두부를 구형(반경 10 cm)의 텅스텐으로 취하고, 구의 중심(표적)에서 X-선이 발생하는 경우에 대하여 두부의 외부로 방출되는 중성자 스펙트럼을 계산한 바 있다.

본 계산에서는 X-선 표적과 검출기 사이에서 중성자의 발생에 높은 영향을 줄 수 있는 표적, 일차제한기(primary collimator), 평탄화거르개, 이차제한기(secondary collimator)만을 고려하도록 하였다. 본 계산에서 사용한 선형가속기 두부의 기하학적 구조는 Fig. 1과 같은 형태를 가진다. 이 형태는 Varian 사의 고에너지 모델을 단순화한 것과 같은데, 본 연구에서 빔 중심축에 대한 에너지 스펙트럼과 흡수선량 계산을 다루기 때문에 이러한 기하학적 구조는 큰 문제가 없을 것

로 생각한다. 본 계산에서 조사면의 크기는 축선원거리(SAD) 100 cm에서 직경 40 cm인데, 이는 근사적으로 선형가속기의 최대 조사면의 크기와 같다. 물질의 경우에 표적은 텅스텐으로 설정하였으며 그 외의 일차제한기 영역, 평탄화거르개, 이차제한기는 납으로 설정하였다. 따라서 본 계산에서 광핵반응이 적용되는 물질은 텅스텐과 납이다.

Rauscher-Thielemann¹⁴⁾이 발표한 자료에 의하면 광핵반응에 의한 중성자 발생의 광자 임계에너지는 텅스텐의 경우에 7.41 MeV이며 납의 경우에 6.74 MeV이다. 임계에너지 이상에서 광핵반응의 발생 확률은 서서히 증가하다가 약 10 MeV 이상에서 급격히 증가하는 경향을 보이며, 약 14 MeV 근처에서 최대값을 가진 후 감소하는 경향을 보인다. 광핵반응의 단면적과 일반적 상호작용(광전효과, 콤프턴산란, 쌍생성)의 단면적¹⁵⁾을 비교하면, 광자에너지 10 MeV에서 광핵반응은 텅스텐의 경우에 약 1/483, 납의 경우에 약 1/214 정도임을 알 수 있다. 그리고 약 14 MeV 영역에서 텅스텐은 약 1/43, 납은 약 1/30로서 급격한 증가를 보인다. 이를 정리하면 10~14 MeV 범위에서 광핵반응은 일반적 상호작용에 비하여 텅스텐의 경우에 0.2~2.3%, 납의 경우에 0.5~3.3% 정도 발생할 것으로 예상된다. Table 1에 텅스텐과 납에 대하여 광핵반응과 이와 관련된 물리적 자료를 제시하였다.

본 계산에서 사용한 몬테칼로 계산코드는 MCNPX (Ver. 2.4.0)¹²⁾이다. MCNPX는 2002년 LANL (Los Alamos National Laboratory)에서 기존의 MCNP4 계열의 코드에 양성자에 대한 계산을 확장하여 발표한 코드이다. MCNPX에서 광핵반응의 단면적은 LA-150이라는 자료¹²⁾를 이용하여 계산하는데, 여기에는 텅스텐과 납을 포함하여 10종의 원소에 대한 광핵반응 및 중성자와 양성자 생성의 단면적이 수록되어 있다. 계산을 위하여 입력파일(inp-file)에 먼저 Fig. 1의 기하학적 구조를 입력하였으며, 선원과 상호작용 인자 및 검출기 인자들을 차례로 입력하였다. 여기서 최초 입사 선원은 운동에너지 24 MeV의 전자이며 표적의 상단에 반경 0.1 cm를 가지고 수직으로 입사하도록 하였다. 중요도 인자는 광자와 중성자의 경우에는 모든 물질영역으로 하였

으며, 전자의 경우에는 표적, 일차제한기 영역, 평탄화거르개로 제한하였다. 입자의 검출을 위한 검출기는 X-선 표적과 거리 100 cm 지점이며, 이 위치에서 광자 및 중성자의 에너지분포를 분리하여 검출하도록 하였다. 이 때 사용된 출력인자(tally)는 F5:p(광자)와 F5:m(중성자)이며 검출 반경은 2.5 cm이다. 여기서 광자의 에너지분포를 검출하는 이유는 중성자의 흡수선량을 광자의 흡수선량에 대한 상대적 값으로 나타내기 위해서이다(다음절 참조). 본 계산에서 하한에너지는 전자와 광자에 대하여 각각 1.0 MeV와 0.25 MeV, 중성자의 경우에는 0으로 설정하였다. 이러한 조건에서 천만개의 입사전자에 대하여 계산을 수행하고 결과를 분석하였다.

2. 선량계산 및 결과평가

앞 절에서 계산한 광자와 중성자의 에너지분포를 이용하여 동일 계산 코드로 깊이선량률을 계산하였다. 이 때 계산 구조는 반경 30 cm인 팬텀에 반경 1.5 cm, 두께 1 cm의 검출기가 표면에서 깊이 20 cm까지 배열된 형태이며, 팬텀표면의 위치는 SSD=100 cm 그리고 조사면의 크기는 반경 20 cm이다. 여기서 Fig. 1과 같은 구조에 팬텀을 포함시켜 직접 선량계산을 수행하지 않는 이유는 먼저 기준점(SAD=100 cm)에서 팬텀이 없을 경우에 중성자의 에너지분포에 대한 정보를 얻기 위해서이며, 또한 계산을 분리함으로써 선량계산의 효율을 증가시키기 위해서이다. 아울러 기준점에서 구해진 에너지분포는 다른 연구의 자료로도 활용할 수 있는 이점이 있다. 광자의 흡수선량의 계산에서는 광핵반응은 고려하지 않았는데, 그 이유는 MCNPX 코드에서 물

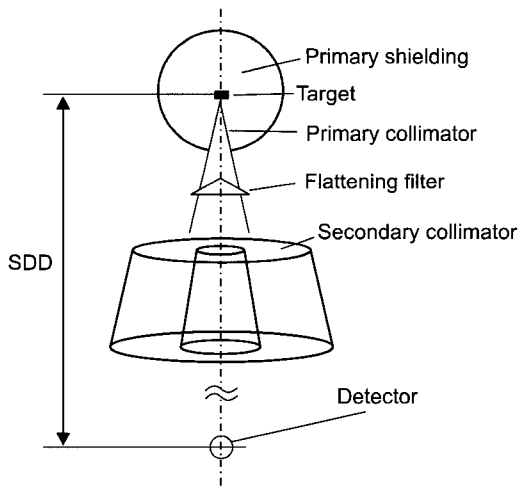


Fig. 1. Linac head geometry used in this study.

에 대한 광핵반응 자료가 없기 때문이다. 이 때 광핵반응은 저원자번호인 경우에 발생확률이 낮기 때문에 일차선(광자)만을 고려해도 오차는 거의 없을 것이다.

흡수선량의 계산은 광자와 중성자 각각에 대하여 3×10^6 히스토리 조건에서 수행하였으며, 계산 후 중성자의 선량을 다음과 같이 광자의 최대선량에 대하여 일반화하였다.

$$RD_N(d) = \frac{Neutron\ dose(d)}{Photon\ dose(d_{max})} \times \frac{\phi_N}{\phi_P} \times 10^3 \quad (1)$$

여기서 ϕ_N , ϕ_P 는 기준점에서 중성자와 광자의 선속의 비이다. 이 인자는 광자와 중성자의 계산이 동일한 입자수에 대하여 수행되었기 때문에 계산결과를 실제 값으로 변환시키기 위하여 사용되었다. RD_N 의 단위는 mGy/Photon Gy 인데, 이는 광자의 흡수선량에 대한 중성자 흡수선량의 상대적 수치로서, 이러한 표현(또는 gram rad/photon rad 등)은 다른 연구들^{1,3,4,6-8)}에서도 쉽게 발견할 수 있다. 예를 들어 0.5 mGy/photon Gy는 광자선 출력선량이 1 Gy인 경우에 주어진 깊이에서 중성자의 선량이 0.5 mGy와 같다. 물팬텀에서 깊이에 따른 RD_N 의 몬테칼로 계산결과는 본 논문의 결과에 제시한다.

입자의 점에서 광자와 중성자의 에너지분포가 주어질 때, 전자평형 조건에서 RD_N 의 수학적 표현은 다음과 같다.

$$RD_N = \frac{\left[\int_E \phi F dE \right]^{neutron}}{\left[\int_E \phi E \frac{\mu_{en}}{\rho} dE \right]^{photon}}, \quad (2)$$

여기서 ϕ 는 중성자 또는 광자의 플루언스, F 는 중성자 커마 변환인자(neutron kerma factor), $(\frac{\mu_{en}}{\rho})$ 는 질량에너지 흡수계수(mass energy absorption coefficient)이다. 따라서 (2)

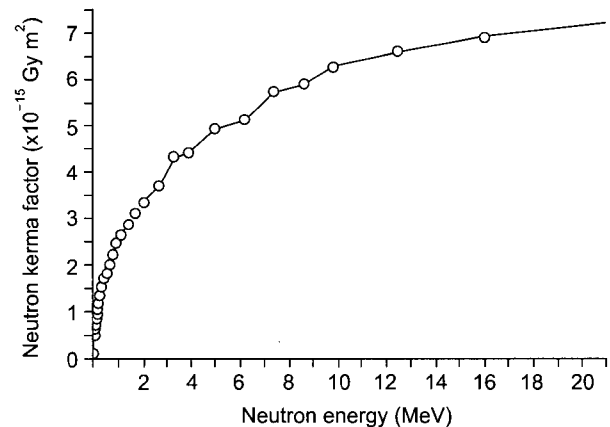


Fig. 2. Neutron kerma factor (Chadwick et al.¹⁵⁾ 2003).

식에서 분자는 물질속 전자평균 조건에서 중성자의 커마와 같으며 분모는 광자의 흡수선량과 같다.¹⁶⁾ 본 연구에서는 수치연산을 통하여 (2)식을 계산하고 흡수선량의 계산결과와 비교하였다. 이 때 플루언스는 앞절에서 계산한 에너지분포를 이용하였으며, F 는 Chadwick¹⁷⁾이 발표한 자료, $(\bar{\mu}_{en}/\rho)$ 는 Johns-Cunningham¹⁸⁾의 자료를 이용하였다. Fig. 2는 (2)식의 계산에서 사용한 물의 중성자 커마 변환인자이다.

결 과

Fig. 3은 24 MV X-선에 대한 광자선 에너지분포의 몬테칼로 계산결과이다. 광자선 에너지분포는 2~3 MeV의 구간에

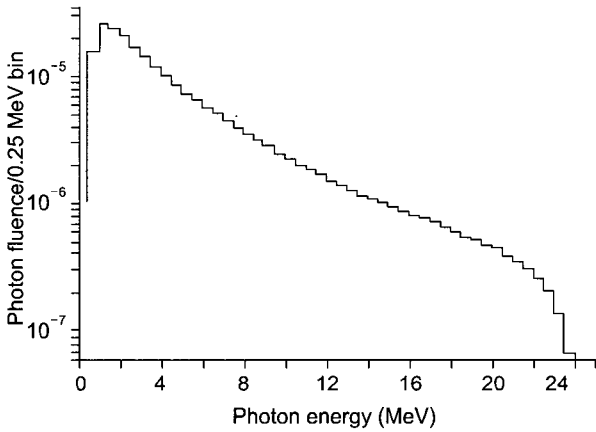


Fig. 3. Photon energy spectrum calculated with Monte Carlo at the distance of 100 cm from the target.

서 높은 빈도를 보이며 광자의 평균에너지는 4.90 MeV로 계산된다. 이 계산결과와 통계적 불확정성(uncertainty)은 전체 선속의 약 97%에 해당하는 15 MeV까지 $\pm 2\%$ 이내를 보였으며 그 이상의 에너지에서는 $\pm 2\sim 7\%$ 를 보였다.

Fig. 4는 기준점에서 중성자의 에너지분포를 계산한 결과이다. 여기서 Fig. 4(a)는 10 keV 이하(중에너지 이하), (b)는 고에너지 중성자의 에너지분포이다. 이 때 열중성자의 선속(flux)은 Fig. 4(a)에 표시된 바와 같다. 이 결과에서 계산의 불확정성은 중에너지 영역의 경우에 약 $\pm 25\%$, 고에너지 영역에서는 5 MeV까지 $\pm 4.1\%$ 이내를 보였으며 그 이상의 에너지에서는 $\pm 4.5\sim 20\%$ 범위를 보였다. 이 때 불확정성이 높은 10 keV 이하와 5 MeV 이상의 중성자 선속의 값들은 전체 중성자 선속의 1% 미만으로 계산되므로 선량 평가에 그다지 영향을 주지 못할 것으로 생각한다.

Fig. 3과 4의 결과에서 중에너지 구간에서 중성자의 선속은 고에너지 구간에 비하여 약 1/100~1/1,000의 값을 가지며 열중성자의 경우에는 이보다 더 낮음을 알 수 있다. 따라서 24 MV 선형가속기에서 발생하는 중성자는 대부분 고에너지 중성자들임을 알 수 있으며, 특히 5 MeV 이하의 중성자 선속이 전체의 99% 이상을 차지하는 것으로 나타났다.

중성자의 평균에너지는 전체 에너지분포에 대하여 계산한 결과 약 1.7 MeV로 나타났는데, Facure 등¹³⁾의 25 MV에 대한 계산값 1.46 MeV보다 높으며, AAPM TG-27¹⁹⁾에서 중성자 계측을 위하여 권고하는 25 MV 선형가속기의 평균에너지 2.2 MeV보다는 낮다.

Fig. 5는 Fig. 3과 4의 에너지분포를 입력자료로 이용하여 몬테칼로 계산으로 구한 물팬텀에서 깊이선량률의 계산결

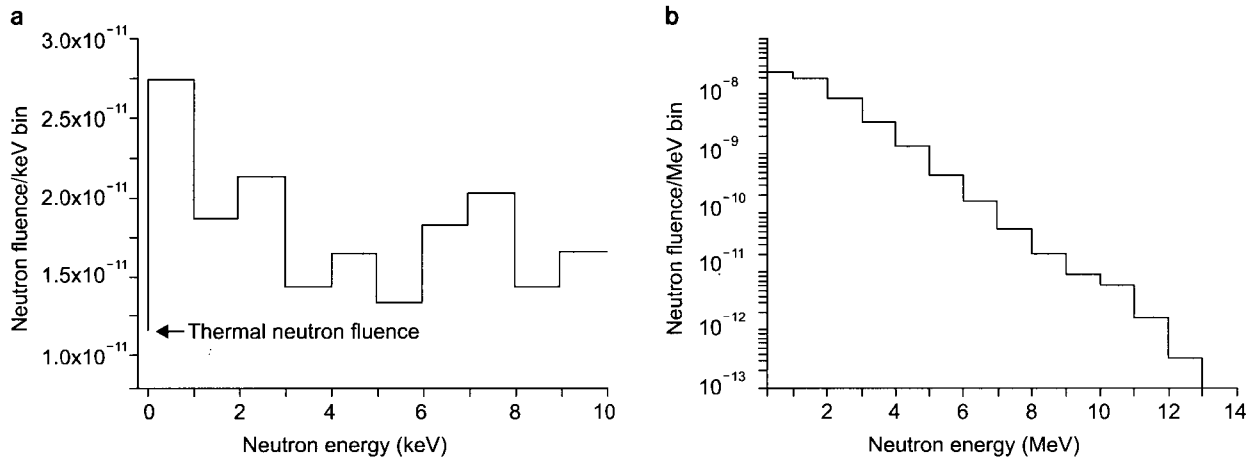


Fig. 4. Neutron spectra calculated with Monte Carlo, where (a) and (b) are neutron energy spectra for low to medium energy and high energy respectively.

과이다. 이 결과의 통계적 불확정성은 $\pm 5\%$ 미만이며, 모든 값들은 (1)식을 사용하여 계산한 결과이다. (1)식의 계산에서 $\phi_N/\phi_P=2.675 \times 10^{-4}$ 가 적용되었는데, 이는 앞서 구한 에너지분포에서 얻어진 값으로서, 중성자와 광자의 전체 플루언스, 5.893×10^{-8} neutrons/cm²와 2.203×10^{-4} photons/cm²의 비와 같다.

RD_N 의 계산 결과, 물의 표면에서 $RD_N=0.66$ mGy/photons Gy로 나타났으며, 깊이 2, 4, 10, 15, 20 cm에서 0.54, 0.41, 0.17, 0.09, 0.04 mGy/photons Gy로서, 깊이에 따라 급격하게 감소하는 경향을 보였다. 그리고 (2)식을 이용하여 계산한 결과는 $RD_N=0.52$ mGy/photons Gy로 나타났는데 몬테칼로 계산결과에서 깊이 2와 4 cm사이의 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 (2)식의 경우에 전자평형 조건에 대하여 성립하므로 수치계산의 결과가 근사적으로 최대선량깊이의 값과 일치함을 보여주는 결과이다. 이로부터 광자와 중성자의 에너지분포가 주어지는 경우에 상호작용 자료들을 이용하여 물표면 근처에서 중성자의 흡수선량을 근사적으로 계산할

수 있음을 알 수 있다.

본 논문에서는 본 연구와 동일한 조건에 대하여 연구한 결과가 없으므로 유사한 조건에서 수행한 결과들을 조사하여 Table 2에 제시하였다. 이 표에서 나타난 바와 같이 중성자에 대하여 평가되는 값들은 다양한 범위를 가지므로 본 결과를 정확히 평가할 수는 없으나, Gur 등¹⁾ 또는 Nath 등⁷⁾의 연구결과와 근사적으로 일치함을 알 수 있다. 따라서 본 연구의 방법은 단순하지만 측정이 어려운 중성자에 대하여 일반적 결과를 얻을 수 있음을 보여준다. 한편, 결과들로부터 중성자의 흡수선량은 광자의 에너지, 조사면, 등에 다양하게 의존함을 알 수 있는데, 일반적으로 광자의 에너지와 조사면 크기의 증가에 따라 증가함을 알 수 있다.

결론

본 연구에서는 몬테칼로 계산 및 수치계산을 통하여 의료 선형가속기에서 발생하는 중성자에 대하여 고찰하였다. MCNPX 코드를 사용하여 선형가속기 두부의 기준점 (SAD=100 cm)에서 중성자 및 광자선의 에너지분포를 구하였으며, 이를 이용하여 물팬텀에서 중성자의 깊이선량률을 몬테칼로 계산으로 구하였다. 그리고 이와는 독립적으로 중성자 에너지분포와 상호작용 인자들을 사용하여 중성자에 대한 물 흡수선량을 수치로 구하였는데, 전자평형깊이 근처에서의 몬테칼로 계산결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 본 계산에서 구한 중성자의 흡수선량을 다른 유사한 조건에서 수행된 연구결과들과 비교하는 경우에 근사적으로 일치함을 알 수 있었다.

본 연구에서 선형가속기에서 방출되는 중성자에 대해서만 계산하였으므로 차폐계산 등에 응용하기 위해서는 선형가속기실 내벽으로부터 산란되는 중성자와 조사면 외부로 누설되는 중성자를 추가로 고려해야 한다. 따라서 이를 직

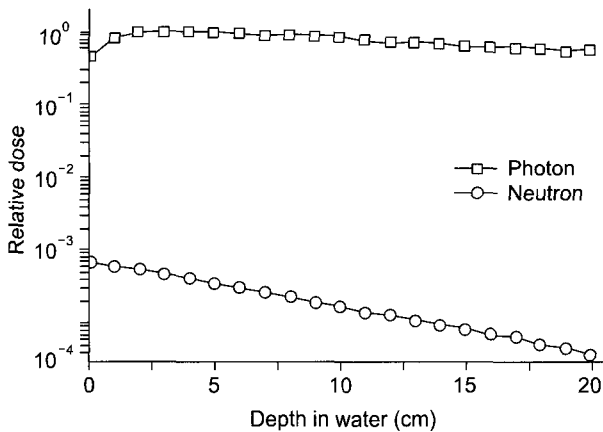


Fig. 5. Monte Carlo calculated relative dose for photons and neutrons from a 24 MV LINAC.

Table 2. Comparison of this results with others for contaminated neutron dose and dose equivalent.

Workers and linac parameters		Estimated neutron dose
Gur et al. ¹⁾ (Philips 18 MV, 20×20 cm ²)		*0.43 mGy/photons Gy
Swanson ⁴⁾ (25 MV, 30×30 cm ²)		†4.3 mGy/photons Gy
Nath et al. ⁷⁾ (25 MV, 30×30 cm ²)		†0.65 mGy/photons Gy
Chibani and Ma ³⁾ (Siemens 18 MV, 10×10 cm ²)		†0.0503 mGy/photons Gy
This work (24 MV, 40 cm dia.)	Monte Carlo (d=0~5 cm) calculation (Eq. 2)	†0.66~0.35 mGy/photons Gy †0.52 mGy/photons Gy

*: measured value, †: calculated value

접 평가하기 위해서는 치료실 형태를 포함하는 넓은 기하학적 구조에 대한 계산이 필요하며 추후에 시도할 예정이다. 그렇지만, 이에 앞서 보다 다른 에너지 선형가속기 및 조사면에 대해서도 연구를 수행하여 결과를 비교하고 평가하는 것이 보다 중요하다.

본 연구에서는 에너지분포가 주어지는 경우에 물포면 근처에서 중성자의 흡수선량을 상호작용 자료만으로 계산할 수 있음을 보였는데, 이 방법은 측정이 어려운 이차중성자의 흡수선량을 복잡한 몬테칼로 계산에 의하지 않고 근사적으로 계산하는데 응용될 수 있다고 생각한다. 그렇지만 중성자의 에너지분포가 주어져야 하므로 현재로서는 실용적이지 못하다. 따라서 다양한 선형가속기의 두부에 대한 몬테칼로 계산을 통하여 중성자의 에너지에 관한 자료를 충분히 확보하는 것이 요구된다.

본 연구에서 선형가속기 기하학적 구조를 단순화하여 광자와 중성자의 에너지분포(Fig. 3, 4)와 깊이선량률(Fig. 5)을 얻었는데, 이 결과들의 정확성을 평가하기는 어렵지만 모든 결과가 빔의 중심축에 대한 값으로서 기하학적 구조에 대한 의존성이 낮을 것으로 생각한다. 따라서 본 연구에서 취한 단순한 기하학적 구조는 본 계산결과에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 보이며, 만약 빔축과 벗어난 위치에 대하여 흡수선량을 평가하거나(예: 빔측면도 등), 중심축이 아닌 임의 방향으로 누설되는 빔을 계산하는 경우(예: 콜리메이터 누설 등)에는 보다 정확한 기하학적 구조를 대상으로 해야 할 것이다. 본 연구에서 계산한 광자선의 에너지분포와 깊이선량률은 향후 BEAM 코드²⁰⁾ 계산결과 또는 전리함을 이용한 측정결과와 비교해 볼 예정이다. 그렇지만, 중성자의 에너지분포와 흡수선량의 계산결과는 현재 검증할 적절한 자료나 도구가 없기 때문에 향후 이에 관한 평가 방법이 연구되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- Gur D, Rosen JC, Bukovitz AG, Gill AW: Fast and slow neutrons in an 18-MV photon beam from a Philips SL/ 75-20 linear accelerator. *Med Phys* 5:221-222 (1978)
- Levinger JS, Bethe HA: Neutron yield from the nuclear photo effect. *Phys Rev* 85:577-581 (1952)
- Chibani O, Ma C-MC: Photonuclear dose calculations for high-energy photon beams from Siemens and Varian linacs. *Med Phys* 30:1990-2000 (2003)
- Swanson WP: Estimate of the risk in radiation therapy due to unwanted neutrons. *Med Phys* 7:141-144 (1980)
- Khan FM: *The Physics of Radiation Therapy*. 3rd ed. Williams & Wilkins, Baltimore (2003) pp. 412-413
- Palta JR, Hogstrom KR, Tannanonta C: Neutron leakage measurements from a medical linear accelerator. *Med Phys* 11:498-501 (1984)
- Nath R, Epp ER, Laughlin JS, Swanson WP, Bond VP: Neutrons from high-energy x-ray medical accelerators: An estimate of risk to the radiotherapy patient. *Med Phys* 11: 231-241 (1984)
- d'Errico F, Nath R, Tena L, Curzio G, Alberts W: In-phantom dosimetry and spectrometry of photoneutrons from an 18 MV linear accelerator. *Med Phys* 25:1717-1724 (1998)
- Difilippo F, Papiez L, Moskvina V, et al: Contamination dose from photoneutron processes in bodily tissues during therapeutic radiation delivery. *Med Phys* 30:2849-2854 (2003)
- Followill DS, Stovall MS, Kry SF, Ibbott GS: Neutron source strength measurements for Varian, Siemens, Elekta, and General Electric linear accelerators. *J App Clin Med Phys* 4:189-194 (2003)
- Roig M, Panettieri V, Ginjaume M, Sanchez-Reyes A: Photonuclear isotope characterization of a Siemens KDS 18 MV linac head. *Phys Med Biol* 49:N243-N246 (2004)
- Los Alamos National Laboratory: *MCNPX (Monte Carlo N-Particle Code System) user's Manual V2.4.0*. LANL (2002)
- Facure A, Falcao RC, Silva AX, Crispim VR, Vitorelli JC: A study of neutron spectra from medical linear accelerators. *Appl Radiat Isotop* 62:69-72 (2005)
- Rauscher T, Thielemann FK: Predicted cross-sections for photon-induced particle emission. *Atomic Data Nuclear Data Tables* 88:1-81 (2004)
- web site <http://physics.nist.gov/PhysRefData/contents.htm>
- Attix FH: *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. John Wiley & Sons, New York (1986) pp. 266-466
- Chadwick MB, Barchall HH, Caswell RS, et al: A consistent set of neutron kerma coefficients from thermal to 150 MeV biologically important materials. *Med Phys* 26:974-991 (1999)
- Johns HE, Cunningham JR: *The Physics of Radiology*. 4th ed, Springfield, US:723 (1983)
- AAPM Report-19: *Neutron Measurements around High Energy X-ray Radiotherapy Machines*. AAPM Task Group 27 (1986)
- 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)

Neutron Generation from a 24 MV Medical Linac

Jeong Ok Lee*, Dong Hyeok Jeong[†], Jeong Ku Kang[‡]

*Department of Radiotechnology, Wonkwang Health Science College,

[†]Department of Radiation Oncology, Wonkwang University Hospital,

[‡]Department of Radiation Oncology, Presbyterian Medical Center, Jeonju, Korea

The energy spectra and dose calculations were performed for secondary neutrons from a 24 MV LINAC using MCNPX code (V2, 4, 0). The energy spectra for neutrons and photons emitted from the LINAC head, and absorbed dose to water were calculated in water phantom. The absorbed doses calculated with Monte Carlo were 0.66~0.35 mGy/photon Gy at the surface to d=5 cm, and calculated with interaction data was 0.52 mGy/photon Gy at the depth of electron equilibrium in water. We have shown that this work can be applied to dose estimation of neutrons from high energy LINAC through the comparison of our results with other results.

Key Words : Neutron, MCNPX, LINAC