Journal of Radiation Industry 12(3) : 209~216(2018)

MCNPX 시뮬레이션을 이용한 엑스선관 모델링 비교

정재홍[2] · 이준재[1] · 이우필[1] · 안현준[1] · 김상현[1,*]

[1]신한대학교 방사선학과, [2]순천향대학교부속 부천병원 방사선종양학과

Comparison between General X-ray Tube Modeling and Apply Energy-spectrum by MCNPX Simulation

Jae-Hong Jung[2], Jun-Jae Lee[1], Woo-Pil Lee[1], Hyun-Jun Ahn[1] and Sang-Hyun Kim[1,*]

[1]*Department of Radiological Science, Shinhan University, 95, Hoam-ro, Uijeongbu-si, Gyeonggi-do 11644, Republic of Korea*

[2]*Department of Radiation Oncology, Soonchunhyang University Hospital, 170, Jomaru-ro, Wonmi-gu, Bucheon, Gyeonggi-do 14584, Republic of Korea*

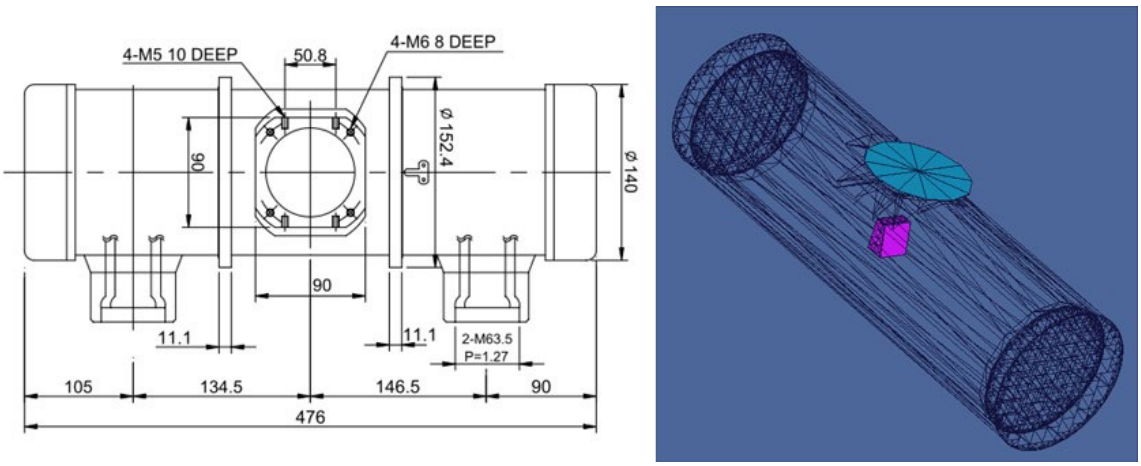
Abstract - The MCNPX (Monte Carlo N-Particle Extended) is a program defined as the simulation using a stochastic system for decision making in an uncertain situation. In this study, general X-ray tube modeling and apply energy-spectrum were compared physical characteristics including the photon fluence, percent depth dose (PDD) and energy-spectrum. For photon fluence, X-ray tube modeling was lower than apply energy-spectrum modeling. For PDD and energy-spectrum, X-ray tube modeling was similar to other modeling. However, simulation time at X-ray tube modeling was higher than other modeling. Consequently, apply energy-spectrum modeling could be useful in terms of simulation time with reliability in MCNPX simulation

Key words : MCNPX, SRS – 78, Photon flux, PDD

서 론

1895년 엑스선이 발견된 이후 현대 의학에서 일반 X선 영상, 전산화 단층촬영(computed tomography, CT), 방사선 치료, 핵의학 분야까지 널리 사용되고 있다(An *et al*. 2016). 방사선은 구성요소에 따라 입자선과 전자기파로 나눠지며, 입자선은 질량을 가진 빛으로 알파선과 베타선이 있다. 반대로 질량이 없지만 투과력이 높은 전자기파인 엑스선과 감마선이 있다. 특히, 엑스선관(x-ray tube)에서 사용하는 방사선은 공기를 여기 및 이온화 시키는 능력을 가진 전자기파로써 물질과 광자의 여러 가지 상호작용을 통해 발생하게 된다(Kang *et al*. 2014). 즉, 엑스선관 내에서 고압의 광자가 빠른 속도로 진행하다 금속 원자의 영향을 받으면 급속하게 감속 또는 정지가 되어 전하를 가진 모든 입자와 상호작용을 하면서 발생하게 되는 것이다. 엑스선관내에서 생성된 광자(photon)는 전자기파의 형태로 변환되며 물리적인 특성을 기반으로 산업 및 의료분야에서 중요한 역할을 한다. 다양한 연구 분야에서 엑스선을 사용한 실험은 엑스선관 제작 및 방사선의 특성을 분석함에 있어서 실험 등을 통하여 확인할 수 있다. 그러나 실제적으로 물리적 특성을 확인하기 위해서는 실제적인 실험은 여러 가지 이유 때문에 연구에 어려움이 존재한다. 가령 엑스선관의 재질 및 형태에 따라서 엑스선관의 효율이 달라질 수 있으며, 효율을 높이기

* Corresponding author: Sang-Hyun Kim, Tel. +82-31-870-3413, Fax. +82-31-870-3419, E-mail. kbm0821@shinhan.ac.kr



(a) (b)

Fig. 1. Blue print of Toshiba (E7252X) X-ray tube (a) and three-dimensional view of real modeling in MCS (b).

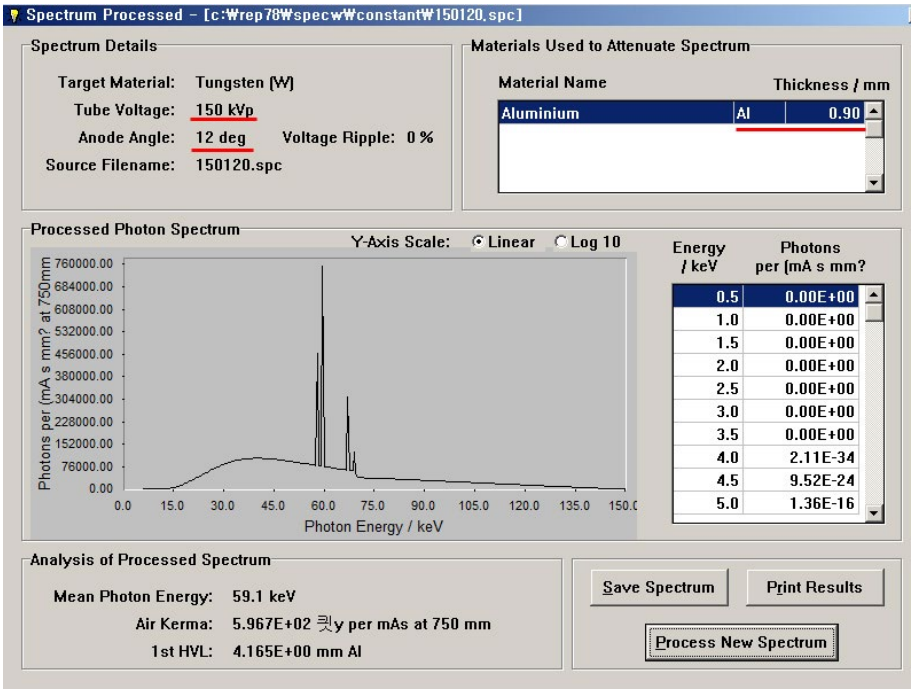


Fig. 2. Energy-spectrum by SRS-78 program.

위하여 실험적 측면에서 연구자의 위험성은 배제할 수 없을 뿐만 아니라, 위험성을 내포하기 때문에 다양한 실험을 진행하기 힘들 수 있다.

몬테카를로 시뮬레이션(Monte-Carlo simulation, MCS)은 난수(random number)를 이용하여 함수의 값을 확률적으로 계산하는 알고리즘이며 알고리즘의 반복과 큰 수의 계산이 관련되기 때문에 다양한 컴퓨터 모의실험 기술을 사용하여 계산하는 프로그램이다(Park *et al*. 2014). MCNPX (Monte Carlo N-Particle Extended)은 MCS기반의 프로그램 중의 하나이다. MCNPX는 예상하지 못한 여러 가지 경우의 수를 얻을 수 있고 가상의 실험을 통해서 현실적으로 불가능한 연구에 있어서 폭넓게 사용되고 있다(Bae *et al*. 2015). 가령 연구, 산업 및 의료분야에서 폭넓게 사용되는 선형가속기(Linear accelerator, LINAC)를 대상으로 구성요소 변화에 따른 후방 산란에 관한 연구, 방사선 차폐성능 비교 분석, 영유아의 입사한 피부선량 측정 및 저에너지 엑스선 조사 시의 흡수선량 평가 등 다양한 연구가 진행된 경우가 있다(Kim 2012; Lee *et al*. 2016).

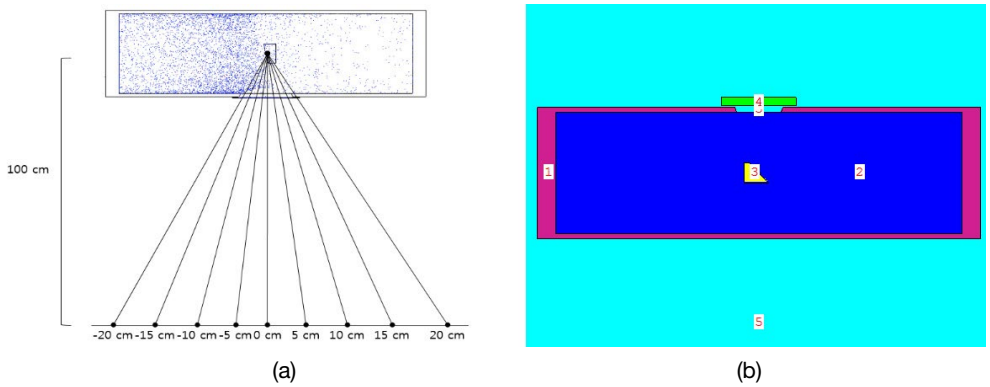


Fig. 3. Measurement points of photon fluence (a) and MCNPX view (b) for X-ray tube modeling with anode target (case 1).

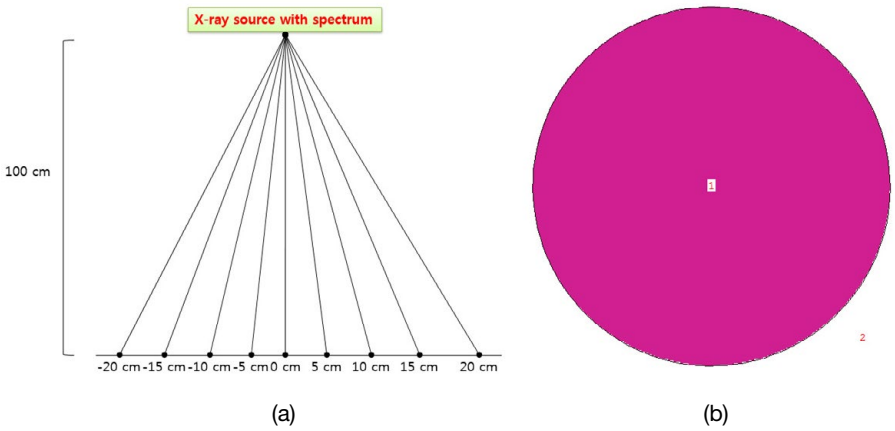


Fig. 4. Measurement points of photon fluence (a) and MCNPX view (b) for apply energy-spectrum without x-ray tube structure (case 2).

본 연구의 목적은 MCNPX을 이용하여 진단용 엑스선관을 대상으로 타겟, 필터 등을 포함한 엑스선관 모델링 (x-ray tube modeling)과 에너지 스펙트럼 (apply energy-spectrum)을 적용한 경우를 비교 분석함으로써 몬테카를로 시뮬레이션의 특성에 대하여 고찰하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 진단용 엑스선관

본 연구는 크게 두 가지 경우: 엑스선관 모델링과 에너지 스펙트럼 적용, 기준으로 MCS를 진행하였다. MCS 프로그램은 MCNPX (Radiation and Nuclear Safety Authority, SRUK, version 2.5.0)이며, 32비트 윈도우 7 운영체제 기반의 3.5 GHz CPU 프로세서 (inteal core i3-4150) 컴퓨팅 환경에서 수행하였다.

본 실험에서 모든 모델링은 진단용 촬영장치 (E7252X, Toshiba, Japan)를 기반으로 진행하였고, Fig. 1은 엑스선관 설계도면 (a)와 MCS의 모델링된 3차원 형태 (b)를 보여주고 있다. 엑스선관의 재원 및 특징은 제작사에서 제공된 자료를 바탕으로 연구에 적용되었다. 엑스선관의 재원은 전체 길이 476 mm, 지름 152 mm, 타겟 각도 (anode angle)는 12°, 최대 관전압은 150 kV이다. 또한, 엑스선관의 재질은 납 (Pb)으로 구성되었으며 관내 (tube)는 진공 상태이다. 또한, 필터 (filter)는 두께 0.9 mm 알루미늄 (Al)이 적용되었고, 타겟 재질은 텅스텐 (tungsten, W)이다. 초점의 크기 (focal spot size)는 일반적인 크기 (2 mm)로 설정하였다.

Fig. 2는 에너지 스펙트럼을 생성해주는 SRS-78 프로그램을 보여주고 있으며, Toshiba E7252X 엑스선관과 동일한 조건 (타겟 재질, 관전압, 타겟 각도, 부가필터)으로 에너지 스펙트럼을 0.5 keV 간격으로 데이터를 얻었다.

2. 데이터 획득

본 연구는 타겟이 포함된 엑스선관 모델링 (case 1)과 에너지 스펙트럼 (case 2)을 비교하기 위하여 광자플루언스 (photon fluence, #), 심부선량백분율 (percent depth dose,

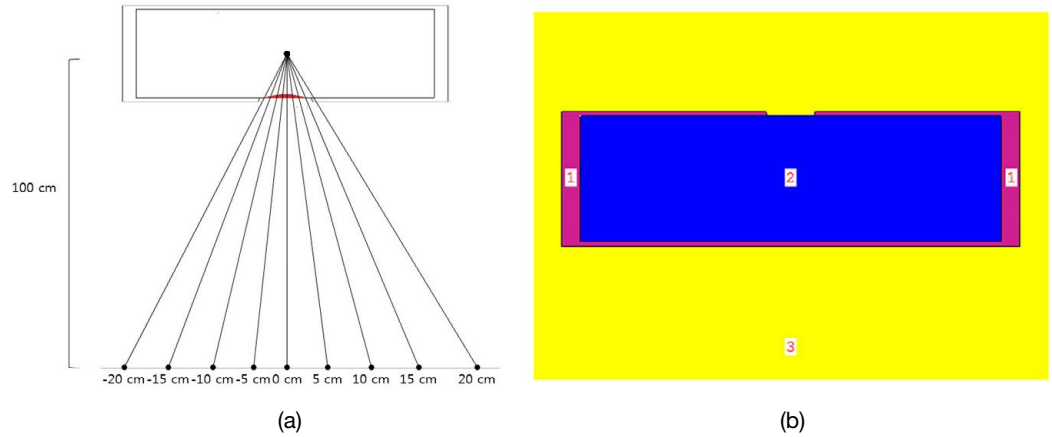


Fig. 5. Measurement points of photon fluence (a) and MCNPX view (b) for apply energy-spectrum without x-ray tube structure excluding anode target (case 3).

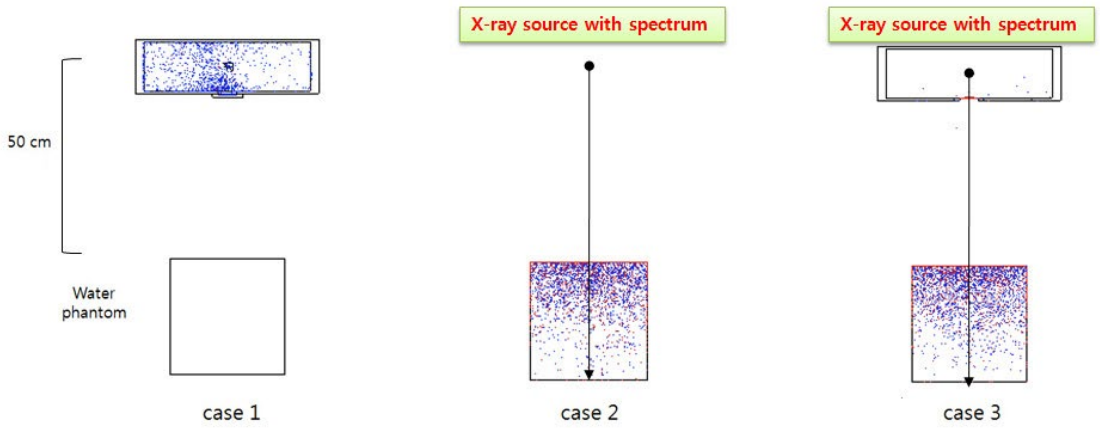


Fig. 6. Diagram of different simulations (case 1, 2, and 3) for PDD measurement with SSD 50 cm.

PDD), 에너지 스펙트럼을 구하였다. MCNPX에서 사용된 tally는 f5번이고, 시뮬레이션 난수 계산횟수(nps)는 10만 번(10e6)으로 계산하였다. 또한, 타겟을 제외한 모델링된 엑스선관에 에너지 스펙트럼이 적용된 경우(case 3)에 대하여도 분석하였다.

2. 1 광자플루언스(Photon fluence, #)

광자플루언스는 SCD (source-chamber distance) 100 cm 기준에서 중앙을 포함하여 5 cm 간격으로 총 9개 지점을 측정하였다. 총 3가지 경우(case 1, 2, 3)에 대하여 광자플루언스의 분포와 플루언스율 에러(errors) 그리고 측정시간(minute, min.)을 구하였다.

Fig. 3은 MCS를 이용하여 모델링된 엑스선관(타겟포함)을 보여주고 있으며, 총 9개의 측정 지점(a)과 엑스선관 단면 (b)를 보여주고 있다. Fig. 3(b)에서 모델링된 셀(cell) 카드 번호를 확인할 수 있으며, 숫자 1번 셀은 엑스선관, 3번은 타겟, 4번은 알루미늄 필터이다. 엑스선관 내부(숫자 2번 셀)는 진공상태이고, 외부는 공기로 구성했다.

Fig. 4는 SRS-78 프로그램으로부터 얻어낸 에너지 스펙트럼이 적용된 경우이다(case 2)이며, 총 9개의 측정 지점(a)과 MCNPX 시뮬레이션 단면(b)을 보여주고 있다. 여기서, Fig. 4(b)에서 숫자 1번 셀(원형)은 방사되는 지점인 공기로 구성된 공간을 나타내고, 2번 셀은 물질 적용이 없는 외부 공간을 나타낸다.

Fig. 5는 MCS를 이용하여 모델링된 엑스선관(타겟 제외)을 보여주고 있으며, 엑스선관(타겟제외)에 SRS-78 프로그램으로부터 얻어낸 에너지 스펙트럼이 적용된 경우이다(case 3)이다. Fig. 5(b)에서 숫자 1번 셀은 엑스선관(타겟 제외)이고, 2번 셀은 엑스선관 내부 공간(진공상태)을 나타낸다. 그 외 외부공간은 공기로 구성되었다.

2. 2 심부선량백분율(PDD)

Fig. 6은 총 3가지 경우(case 1, 2, 3)에 대한 PDD 측정을 보여주고 있으며, 물팬텀(water phantom, 밀도 1 $g \cdot cm^{-3}$)을

Table 1. Photon fluence (#), simulation error, and time of different three simulations (case 1, 2, and 3) in different measured points by MCNPX simulation

Case	Measurement point (cm)									Error (%)	Time (min.)
	−20	−15	−10	−5	0 (Center)	5	10	15	20		
1	1.84×10^{-8}	7.51×10^{-8}	1.01×10^{-7}	1.17×10^{-7}	1.27×10^{-7}	1.33×10^{-7}	1.37×10^{-7}	1.38×10^{-7}	1.38×10^{-7}	0.011	17.93
2	1.77×10^{-4}	1.80×10^{-4}	1.82×10^{-4}	1.83×10^{-4}	1.84×10^{-4}	1.83×10^{-4}	1.82×10^{-4}	1.80×10^{-4}	1.77×10^{-4}	0	0.1
3	1.77×10^{-4}	1.80×10^{-4}	1.82×10^{-4}	1.83×10^{-4}	1.84×10^{-4}	1.83×10^{-4}	1.82×10^{-4}	1.80×10^{-4}	1.77×10^{-4}	0	0.23

Table 2. Photon fluence (#) for the percentage depth dose (PDD, %), simulation errors, and time of different simulations (case 1, 2, and 3).

Case	Depth (cm)							Error (%)	Time (min.)
	0 (surface)	5	10	15	20	25	30		
1	6.78×10^{-7}	3.29×10^{-7}	1.69×10^{-7}	7.77×10^{-8}	3.58×10^{-8}	7.98×10^{-9}	2.10×10^{-9}	0.216	17.91
2	1.08×10^{-3}	6.63×10^{-4}	3.6×10^{-4}	1.57×10^{-4}	7.16×10^{-5}	3.05×10^{-5}	1.01×10^{-5}	0.067	2.93
3	1.05×10^{-3}	7.01×10^{-4}	3.08×10^{-4}	1.76×10^{-4}	6.88×10^{-5}	2.98×10^{-5}	1.19×10^{-5}	0.045	0.87

이용하였다. 조건은 SSD (source-surface distance) 50 cm를 기준으로 팬텀의 깊이 방향으로 5 cm 간격으로 총 7개의 측정 지점을 설정하였다.

물팬텀의 깊이에 따른 흡수선량(Depth dose, D_d)과 시뮬레이션 에러(errors), 그리고 측정시간(minute, min.)을 산출하였으며, 수식(1)을 바탕으로 PDD을 구하였다. 여기서 D_d는 임의의 지점에서의 흡수선량(absorbed dose at depth)이며, D_s는 표면에서의 흡수선량(absorbed dose at surface)이다.

$$PDD = \frac{D_d}{D_s} \times 100\,(\%) \quad (1)$$

2. 3 에너지 스펙트럼(energy-spectrum)

마지막으로 모델링된 엑스선관(타겟 포함과 불포함) 경우(case 1과 3)의 에너지 스펙트럼을 SRS-78 프로그램으로부터 얻은 에너지 스펙트럼과 에너지(0.1 keV) 간격으로 비교 분석하였다.

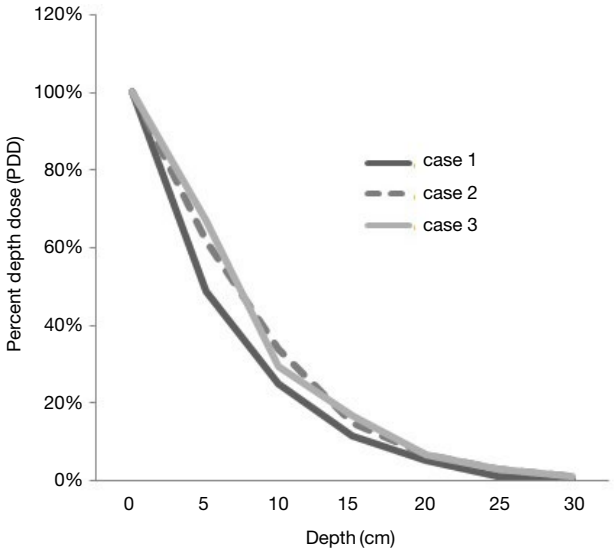


Fig. 7. PDD curve for different simulation (case 1, 2, and 3) with waster phantom.

결 과

1. 광자플루언스

광자플루언스의 결과 값은 Table 1과 같이 확인할 수 있다. 측정 지점 중앙(center)에서의 플루언스는 case 1은 1.27×10^{-7}, case 2는 1.84×10^{-4}, case 3은 1.84×10^{-4}개였다. case 1에 대한 주변 측정 지점에 대하여 엑스선관의 음극 방향(cathode) −20, −15, −10, −5 지점은 각각 1.84×10^{-8}, 7.51×10^{-7}, 1.01×10^{-7}, 1.17×10^{-7}개였다. 반대 방향인 타겟 방향(anode) 5, 10, 15, 20 지점은 각각 1.33×10^{-7}, 1.37×10^{-7}, 1.38×10^{-7}, 1.38×10^{-7}개였다. case 2에 대한 주변 측정 지점에 대하여 음극 방향 −20, −15, −10, −5 지점은 각각 1.77×10^{-4}, 1.80×10^{-4}, 1.82×10^{-4}, 1.83×10^{-4}개였다. 타겟 방향 5, 10, 15, 20 지점은 각각 1.83×10^{-4}, 1.82×10^{-4}, 1.80×10^{-4}, 1.77×10^{-4}개였다. case 3의 광자플루언스는 case 2와 동일하였다. 전반적으로 case 1에서는 case 2, 3에 비하여 광자플루언스가 적었다. 측정 에러(%)는 case 1, 2, 3에서 각각 0.011%, 0%, 0%였다. 시뮬레이션에 소모된 시간은 case 1, 2, 3에서 각각 17.93분, 0.1분, 0.23분이었다.

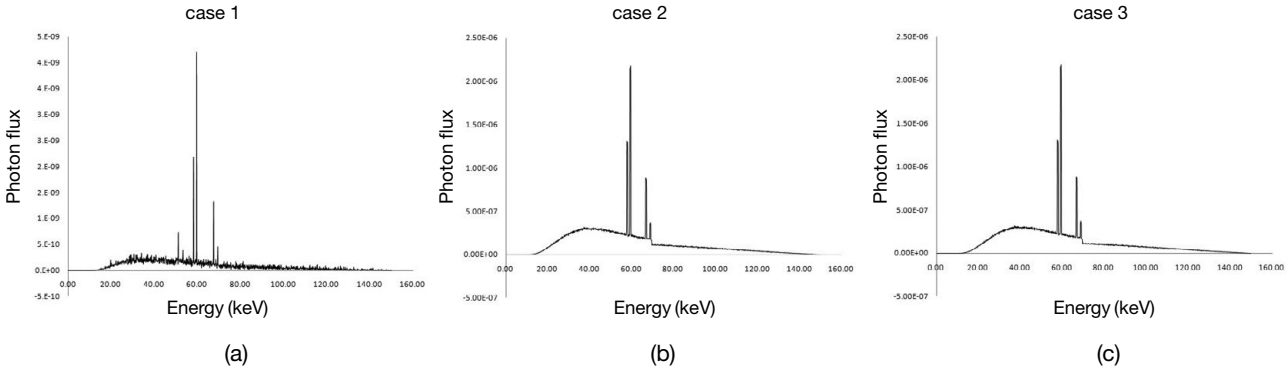


Fig. 8. Energy spectrum for case 1 and 2.

2. 심부선량백분율

Table 2는 깊이에 따른 광자플루언스, 측정 에러, 소요된 시간을 보여주고 있다. 최대선량 지점임 표면에서의 광자플루언스는 case 1과 case 2는 각각 6.78×10^{-7}과 1.08×10^{-3}였다. 또한, Fig. 7은 도출된 심부선량백분율을 보여주고 있으며, 표면(surface)에서의 PDD 100%를 기준으로. case 1의 PDD는 물팬텀의 5, 10, 15, 20, 25, 30의 깊이에서 각각 48.25%, 24.87%, 11.45%, 5.28%, 1.18%, 0.31%였다. case 2의 PDD는 5, 10, 15, 20, 25, 30의 깊이에서는 61.54%, 33.82%, 14.57%, 6.64%, 2.83%, 0.94%였다. 마지막으로 case 3의 PDD는 측정한 물팬텀의 5, 10, 15, 20, 25, 30의 깊이에서 각각 66.78%, 29.34%, 16.79%, 6.56%, 2.84%, 1.13%였다. 전반적으로 case 1은 case 2와 3에 비해 심부선량률이 낮았지만 깊이가 깊어질수록 그 차이가 감소했다. 측정 에러(%)는 case 1, 2, 3에서 각각 0.216%, 0.045%, 0.067%였다. 시뮬레이션에 소모된 시간은 case 1, 2, 3에서 각각 17.91분, 0.87분, 2.93분이었다.

3. 에너지 스펙트럼

Fig. 8은 case 1, 2, 3에 대한 에너지 스펙트럼을 보여주고 있다. case 2와 3은 에너지 스펙트럼이 동일하다. 최대 피크치(maximum peak, #)는 case 1에서 59.42 keV에서 2.0×10^{-10}였고, case 2에서 59.42 keV에서 2.17×10^{-10}였다. 두 번째 피크치는 case 1에서 58.02 keV에서 3.0×10^{-10}였고, case 2에서 59.92 keV에서 1.29×10^{-6}였다. 마지막으로 세 번째 피크치는 case 1에서 67.31 keV에서 1.0×10^{-10}였고, case 2에서 66.71 keV에서 8.65×10^{-7}였다.

고 찰

광자플루언스는 공간상의 단위 면적에 입사하는 광자의 수를 의미하며 선속(fluence)라고 칭한다. 광자플루언스 또는 에너지플루언스는 시간의 개념으로 방사선피폭의 조사선량과 흡수선량 등의 계산과 평가를 위한 기본량이다(Lee *et al*. 2017). 모든 실험에서 음극선관과 타겟 방향에 대한 거리에 따른 heel effect 현상을 확인할 수 있었다. 그러나, 광자플루언스 결과 값에서 살펴보면 SRS-78을 이용하여 광자수를 얻어서 시뮬레이션 후 시행한 case 2와 case 3은 동일하였고, case 1은 case 2와 3에 비하여 광자플루언스가 작았다. 이러한 원인은 엑스선관을 직접 모델링하여 타겟에서 전자의 충돌로 발생한 광자가 타겟 자체의 흡수와 함께 진공상태의 엑스선관 내에서 산란, 흡수되었다고 추측할 수 있다. 그에 반해 case 2와 3에서는 충돌형태가 아닌 타겟 위치에서 이미 생성된 광자의 스펙트럼으로 광자방출형태를 가지고 있기 때문에 case 1과의 결과로써 추출된 광자플루언스가 차이나는 것으로 판단된다.

엑스선관의 타겟 재질과 두께를 선택하는 측면에 있어서 차이가 있었다. 실제 타겟 재질은 일반적으로 몰리브덴과 함께 텅스텐이 일부 사용하는데(Seoung 2014)에 비하여 본 연구에서는 타겟를 오로지 텅스텐으로만 구현하였고, 초점크기를 2 mm로 설정된 부분에 있어서, 본 연구에 사용된 엑스선관의 정확한 정보습득이 어렵다는 한계도 고려할 수밖에 없다. 즉, 모델을 정확히 재현하기 위해서 제공되는 모든 엑스선관의 제원을 적용하지 못하는 어려움이 있었다. 특히 타겟의 경사 각도를 제원에서 제공되는 12° 각도에서 정확한 타겟의 위치 설정에 따라서 SRS-75로 구현된 광자 수에 의한 경우와 MCNPX에서 구현된 광자플루언스가 차이가 있을 수 있다. 측정 오류(%)는 모든 실험에서 3% 이내로 신뢰성을 확인하였다. 마지막으로 시뮬레이션 시간을 살펴보면 case 1 (17.93분)이 case 2 (0.1분)과 case 3 (0.23분)보다 시간이 많이 걸린 이유는 엑스선관의 직접 모델링에 따른 전자와 타겟간의 상호작용에서 발생되는 산란, 흡수 등의 물리적인 시뮬레이션 시간이 다소 소모되었다는 점을 확인 할 수 있었다. 이는 엑스선관과 같은 모델링을 바탕으로 제작 및 변경 등의 구조적 시뮬레이션을 진행할 경우에는 컴퓨팅 파워 및 용도에 따라 고려해야 할 것으로 판단된다.

PDD 실험은 MCNPX에서 모사한 모델링의 물리적 반응에 대한 신뢰성을 확인할 수 있다(Kim *et al*. 2017). 본 연구의 PDD 측정에서 case 1은 case 2와 3에 비해 최대선량 지점은 표면(입사면) 지점을 기준으로 깊이에 따라 광자플루언스는 낮았고, 측정 시간에서 case 1 (17.91분)이 case 2 (2.93분)와 case 3 (0.87분)에 비하여 높다는 점도 시뮬레이션의 상황 즉, 엑스선관의 구조적 모델링과 에너지 스펙트럼을 이용한 방법적 차원에서 차이가 날 수 있다는 점을 확인 할 수 있었다. 측정 오차(%)는 모두 3% 이내로 신뢰성을 확인할 수 있었다. 영역에 입사한 광자는 물팬텀속의 원자들과 광전효과, 콤프턴산란, 쌍생성 등 상호작용하는 과정에서 에너지 잃고, 상호작용과정에서 생성된 전자는 여기, 이온화, 제동복사에 의하여 에너지를 잃는다. 흡수선량은 해당영역을 통과하는 전자의 에너지 손실 값의 합으로 결정할 수 있다. 몬테카를로 계산의 결과는 입사 플루언스(단위면적당 조사면에 입사하는 광자수)가 Ø (cm^{-2})일 때, 단위 입사 플루언스당 흡수선량으로 계산된다(Jeong *et al*. 1998). 본 연구에서 실제적으로 PDD는 case 1, 2, 3 모두 표면(입사면)에서 깊이에 따라 선량률이 감소되는 형태를 확인할 수 있었다.

엑스선 선질을 표현하는 방법은 스펙트럼 분해능, 동질계수, 반가층, 평균에너지 등이 있다. 엑스선의 선원과 검출기의 중간에 흡수재를 설치하고 선량을 측정하여 반가층 결정하는 방법은 선질 측정 및 확인에 일반적 방법이나 엑스선에 대해 얻을 수 있는 정보가 제한이 있다. 스펙트럼 측정의 경우 별도의 장비가 필요하나, 추가적인 처리가 필요하지만 선질을 표현하는 모든 인자들의 정보를 알 수 있다는 장점이 있다(Jang *et al*. 2013). 에너지 스펙트럼 측정은 경험적 모형, 반경험적 모형, 몬테카를로 모형이 있고 경험적 모형은 선속밀도가 높으면 정확하게 측정이 어려움이 있고(Wilkinson *et al*. 2001), 검출기 반응도가 에너지에 의존도가 에너지에 의존하는 데 반해서 검출기에 대한 반응도가 정확하게 알려져 있지 않는 문제점도 있다(Lee *et al*. 1999). 그럼에도 불구하고 몬테카를로 모형은 다양한 변수와 한계를 극복하여 적용할 수 있으며, 계산시간이 증가하는 문제를 가지고 있지만 정확한 물리 모델과 상호작용을 적용하기 때문에 정확한 스펙트럼 계산이 가능하다(Kim *et al*. 2015). 본 연구에서 엑스선관 모델링에서 얻은 에너지 스펙트럼은 SRS-78 프로그램으로부터 얻은 에너지 스펙트럼과 거의 동일하였다. 이를 통하여 엑스선관의 구조적 모델링의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

결 론

본 연구는 진단용 엑스선관에 대한 MCNPX 시뮬레이션에서 엑스선관을 직접 모델링한 경우와 SRS-78 프로그램으로부터 얻은 에너지 스펙트럼을 적용한 경우에 광자플루언스, 심부선량백분률, 에너지 스펙트럼을 비교 분석하였다. 에너지 스펙트럼을 적용한 경우는 엑스선관 모델링보다 시뮬레이션 시간이 짧았을 뿐만 아니라 여러 가지 변화요인(타겟의 위치, 재질, 엑스선관의 환경 등)을 고려할 필요 없이 유용하게 적용할 수 있었다.

참 고 문 헌

An H, Lee DY, Ko SJ and Kim CS. 2016. Evaluation fo Image Quality & Absorbed Dose using MCNPX Simulation in the Digital Radiography System. *J. Korean Soc. Radiol*. **10**(5): 327-334.

Bae MJ and Lee HM. 2015. A Study on Radiation Shielding Materials for Protective Garments using Monte Carlo Simulation. *J. Korean Soc. Qual. Manag*. **43**(3):239-252.

Jang SY, Oh WK, Park JB and Jin KH. 2013. The Energy Spectrum and Phantom Image Quality according to Mammography Target-Filter Combination. *J. Korean Soc. Radiol*. **7**(1):51-55.

Jeong DH, Lee JO, Kang JK, Kim SK, Kim SK and Moon SR. 1998. Measurement and Monte Carlo Simulation of 6 MV X-rays for Small Radiation Fields. *J. Korean Soc. Ther. Radiol. Oncol*. **16**(2):195-202.

Kang SS, Kim KT, Noh SC, Jung BJ and Park JK. 2014. The Study on Design Customized Radiation Protective Layer for Medical Radiation Dose Reduction. *J. Korean Soc. Radiol*. **8**(6):333-338.

Kim JB, Kim JH and Park ET. 2017. Analysis of Photon Characteristics and Absorbed Dose with Con Beam Computed Tomography (CBCT) using Monte Carlo Method. *J. Korean Soc. Radiol*. **11**(3):161-169.

Kim SH and Choi JH. 2015. Analysis of Effectiveness of Spectrum of Energy and Image Quality Evaluation by Aluminium Filter in the added Compund Filtration. *Journal of Radiological Science and Technology*. **38**(3):187-197.

Kim ST. 2012. Monte Carlo Simulation for the Measurement of Entrance Skin Dose on Newborn and Infants. *Jour. of KoCon. a*. **12**(6): 346-352.

Lee DY, Park ET and Kim JH. 2017. Analysis of the Photon Beam Characteristics by Medical Linear Accelerator According to Various Target Materials Using MCNP-code. *J. Korean Soc. Radiol*. **11**(4):197-203.

Lee JO, Jeong DH and Moon SR. 1999. Calculation of Photon Spectra from the Tungsten target for 10 MeV Electron Beam. *Kor. J. Med. Phys*. **10**(1):55-62.

Lee SH, Heo SS, Lee EJ, Kim CK and Cho KS. 2016. Calculation of Concrete Shielding Wall Thickness for 450 kVp

X-ray Tube with MCNP Simulation and Result Comparison with Half Value Layer Method Calculation. *J. Radiat. Ind.* **10**(1):29-35.

Pakr JK, Lee SH, Cha SY and Lee SY. 2014. Study of Radiation dose Evaluation Using Mote Carlo Simulation while Treating Extrahepatic Bile Duct Cancer with High Dose Rate Intraluminal Brachytherapy. *Jour. of KoCon a*. **14**(2): 467-474.

Seoung YH. 2014. Quantitative Analysis of Spatial Resolution for the Influence of the Focus Size and Digital Image Post-Processing on the Computed Radiography. *Journal of Digital Convergence*. **12**(11):407-414.

Wilkinson LE, Johnston PN and Heggie JCP. 2001. A Comparison of Mammography Spectral Measurement with Spectra produced using several different Mathmatical Model. *Phys. Med. Biol*. **46**(5):1579-1589.

Received: 26 June 2018
Revised: 22 July 2018
Revision accepted: 30 July 2018