



pISSN 0253-4231

eISSN 2466-2461

<http://dx.doi.org/10.14407/jrpr.2016.41.1.041>

# Journal of Radiation Protection and Research

Paper

Received December 21, 2015 / 1st Revised February 7, 2016 / 2nd Revised March 15, 2016 / Accepted March 15, 2016

## Development of Unfolding Energy Spectrum with Clinical Linear Accelerator based on Transmission Data

Hyun Joon Choi\*, Hyo Jun Park\*, Do Hyeon Yoo\*, Byoung-Chul Kim†, Chul-Young Yi†, and Chul Hee Min\*

\*Department of Radiation Convergence Engineering, Yonsei University

†Center for Ionizing Radiation, Korea Research Institute of Standards and Science

### ABSTRACT

**Background:** For the accurate dose assessment in radiation therapy, energy spectrum of the photon beam generated from the linac head is essential. The aim of this study is to develop the technique to accurately unfolding the energy spectrum with the transmission analysis method.

**Materials and Methods:** Clinical linear accelerator and Monte Carlo method was employed to evaluate the transmission signals according to the thickness of the observer material, and then the response function of the ion chamber response was determined with the mono energy beam. Finally the energy spectrum was unfolded with HEPROW program. Elekta Synergy Flatpanel and Geant4 tool kits was used in this study.

**Results and Discussion:** In the comparison between calculated and measured transmission signals using aluminum alloy as an attenuator, root mean squared error was 0.43%. In the comparison between unfolded spectrum using HEPROW program and calculated spectrum using Geant4, the difference of peak and mean energy were 0.066 and 0.03 MeV, respectively. However, for the accurate prediction of the energy spectrum, additional experiment with various type of material and improvement of the unfolding program is required.

**Conclusion:** In this research, it is demonstrated that unfolding spectra technique could be used in megavoltage photon beam with aluminum alloy and HEPROW program.

Correspondence to Chul Hee Min  
chmin@yonsei.ac.kr

**Keywords:** Linac, Unfolding energy spectra, Transmission measurement, Monte Carlo simulation

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

# 물질투과율 측정정보 기반 의료용 선형가속기의 에너지스펙트럼 유도기술 개발

최현준\*, 박효준\*, 유도현\*, 김병철†, 이철영†, 민철희\*  
\*연세대학교 방사선융합공학과, †한국표준과학연구원 방사선표준센터

2015년 12월 21일 접수 / 2016년 2월 20일 1차 수정 / 2016년 3월 15일 2차 수정 / 2016년 3월 15일 채택

**연구배경:** 세기조절방사선치료와 같이 고선량을 암조직에 정밀하게 전달할 수 있는 방사선 치료기술이 개발됨에 따라, 보다 정확한 선량평가 기술의 개발이 요구되고 있다. 본 연구에서는 선형가속기에서 발생된 광자선의 물질투과율 정보를 통해 간접유도방식으로 에너지스펙트럼을 예측할 수 있는 기술의 개발을 목적으로 한다.

**재료 및 방법:** 의료용 선형가속기를 사용한 측정과 몬테칼로 전산모사를 통해 감쇠물질의 두께에 따른 X-선의 투과율이 평가되었으며, 이와 더불어 단일에너지에 의한 이온함의 반응함수가 결정되었다. 최종적으로 Unfolding 방법을 사용하는 HEOROW 프로그램을 통해 고선량률의 치료용 선형가속기에서 발생된 광자선의 에너지스펙트럼이 유도되었다. 본 연구에서 실험을 위해 Elekta Synergy Platform 선형가속기가 사용되었으며, 몬테칼로 방법을 사용하는 Geant4 전산모사 프로그램이 사용되었다.

**결과 및 논의:** 감쇠물질의 두께에 따른 X-선 투과율과 몬테칼로 전산모사를 통해 계산된 X-선 투과율의 비교 결과 0.43%의 평균제곱근오차가 확인된다. 물질투과정보를 통해 간접적으로 유도된 에너지스펙트럼은 몬테칼로 전산모사를 통해 직접적으로 계산된 에너지스펙트럼과 비교분석 되었으며, 피크위치 및 평균에너지의 오차가 각각 0.066 MeV와 0.03 MeV로 평가되었다. 하지만 보다 정확한 에너지스펙트럼을 예측하기 위해서는 다양한 감쇠물질의 사용과 에너지스펙트럼 유도프로그램의 정밀도 향상을 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

**결론:** 본 연구를 통해 확인된 물질투과율 기반의 에너지스펙트럼 측정 기술은 에너지가 높고 선량률이 높기 때문에 광자선을 직접적으로 측정하는 것이 제한적인 의료용 선형가속기에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

중심어 : 의료용 선형가속기, 에너지스펙트럼 유도, 방사선투과율 측정법, 몬테칼로 전산모사

## 1. 서론

의료용 선형가속기를 사용한 방사선치료는 각종 전산모사 기술과 다양한 선량측정장비 또는 침단 진단장치가 개발됨에 따라 치료기술 또한 발전하여 현재는 세기조절 방사선치료, 체적변조회전치료, 4차원 호흡동조 방사선치료 등의 방법과 같이 복잡한 기술이 임상에 적용되고 있다[1, 2]. 국제 방사선단위측정위원회(International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU)에서는 치료방사선의 측정 정확성이 표적 체적 내에서  $\pm 2\%$  이하, 그리고 표적체적의 바깥쪽의 급격한 선량 감소 영역에서는  $\pm 5\%$  이내에서 유지되어야 한다고 권고하고 있다[3]. 따라서 복잡한 치료기술을 사용하기 위해서는 정밀도가 높은 시스템뿐만 아니라 정확한 선량 계산 기술이 필요하다.

실제 임상에서는 선량계산을 위해 방사선치료계획 시

스템(radiation treatment planning, RTP)을 사용하고 있으며 계산 알고리즘으로는 주로 pencil beam, convolution/superposition, anisotropic analytical algorithm (AAA) 등이 사용되고 있다. 이러한 알고리즘은 짧은 시간 내에 정확한 선량계산이 가능하다는 점에서 매우 유용하나 특수한 경우, 예를 들어 조사야 크기가 매우 작고, 환자 내의 비균질한 부위에서 치료가 수행되는 경우에 대해서는 계산이 부정확해질 수 있기 때문에 몬테칼로 전산모사를 통해 정확한 계산이 수행될 필요가 있다 [4]. 그러나 몬테칼로 전산모사를 통해 의료용 선형가속기로부터 발생되는 X-선의 물리적 특성을 구현하기 위해서는 헤드 구성 부품에 대한 정밀한 모델링이 필요하고, 물팬텀 내에서 실제 측정된 선량분포와 계산된 선량분포를 일치시키는 과정이 필요하나, 이를 위해서는 상당한 시간이 필요하기 때문에 몬테칼로 전산모사에 관한 전문적인 지식 없이는 임상에서의 적용이 쉽지 않다. 따라서 이러한 경우, 선형가속기로부터 발생되는 X-선의 에너지스펙트럼을 정확히 측정할 수 있다면 이 정보를 통해 임

책임저자 : 민철희, chmin@yonsei.ac.kr  
강원도 원주시 연세대길 1 연세대학교 원주캠퍼스 백운관 431호

상에서 정확한 환자선량을 보다 수월하게 예측하는 것이 가능하다.

일반적으로 X-선의 에너지스펙트럼을 측정하는 방법으로는 X-선의 조사 방향에 검출기를 놓고 측정되는 펄스파고를 분석하는 직접 측정법이 사용된다. 그러나 의료용 선형가속기로부터 발생하는 X-선은 고에너지, 고선량률이기 때문에 직접적으로 에너지스펙트럼을 측정하는 것이 불가능하다. 따라서 고에너지, 고선량률 X-선의 에너지스펙트럼을 간접적으로 유추해내기 위해서는 수학적 이론에 근거하여 이온함으로부터 측정된 특정 감쇠물질에 대한 X-선 투과율(transmission) 정보로부터 에너지스펙트럼을 유도하는 방법이 사용될 수 있다[5]. 이 방법은 보통 임상에서 사용되는 장비들로 실험 조건 구성이 가능하고 측정 결과가 상당히 정확하기 때문에 임상적용이 용이하다. 이때 X-선 투과율은 다음의 식과 같이 Fredholm 방정식으로써 표현이 가능하다.

$$T(x) = \frac{M(x)}{M(0)} = \frac{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} R(E)\psi(E)e^{-\frac{\mu(E)x}{\rho}} dE}{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} R(E)\psi(E)dE} \quad (1)$$

이때 식(1)의 T(x)는 M(x)와 M(0)의 비율로서 M(x)는 얇은 X-선 빔이 두께 x의 감쇠물질을 투과하여 검출기에 측정된 신호를 의미하고 R(E)는 검출기의 에너지에 대한 반응 즉, 측정에 사용된 검출기에 단일에너지의 광자를 조사하였을 때 측정된 단위 에너지플루언스당 선량을 의미하며,  $\psi(E)$ 는 검출기 중심 위치에서 검출기가 없을 때 특정 에너지 E에 해당하는 에너지플루언스를 의미하고,  $\frac{\mu}{\rho}$ 는 에너지에 따른 감쇠물질의 질량감쇠계수를 의미하며,  $E_{\max}$ 와  $E_{\min}$ 은 각각 빔의 에너지 분포 중 가장 높은 에너지, 가장 낮은 에너지를 의미한다.

X-선 투과율 정보로부터 에너지스펙트럼을 유도하기 위하여 사용되는 수학적 방법으로는 라플라스 변환, 직접적인 행렬 변환, 단위 에너지 간격별 비교 등이 있다. 미국의 Sain D. Ahuja 등은 광자선의 방사선투과율

곡선과 제동복사선의 에너지스펙트럼 간의 관계가 라플라스 변환 형태로 표현될 수 있다는 이론을 바탕으로 에너지스펙트럼 유도를 수행하였다[6]. 그러나 이 방법은 사용되는 함수에 따라 결과에 매우 민감한 영향을 미치고 특히 MeV 단위 광자선의 에너지스펙트럼 유도과정에는 잘 사용되지 않는다. 프랑스의 A. Catala 등은 감쇠물질의 두께와 에너지스펙트럼의 단위 에너지 간격에 해당하는 물리량을 행렬로 표현하여 가우스소거법을 통해 역행렬을 구함으로써 에너지스펙트럼 유도를 수행하였다[7]. 그러나 이 방법은 역행렬을 구하는 과정에서 수치적 오차를 발생시킬 수 있는 특정한 가정이 사용되기 때문에 그만큼 왜곡된 결과가 도출될 수 있다. 일본의 T Shimozato 등은 초기에 에너지스펙트럼의 값을 임의로 가정하여 수학적으로 방사선 투과율 값을 계산하고 이를 측정된 방사선 투과율 값과 일치시키는 방법을 사용하여 에너지스펙트럼 유도를 수행하였다[8]. 그러나 초기에 어떠한 형태로 에너지스펙트럼 값을 가정했는지, 어떠한 기준에서 평활화(smoothing) 또는 정규화(regularization) 과정이 수행되었는지 등에 따라 결과값이 크게 바뀔 수 있다.

따라서 본 연구에서는 방사선치료계획 시 정확한 선량계산을 수행하기 위해 실제 의료용 선형가속기를 사용하여 고에너지, 고선량률 X-선의 에너지스펙트럼을 효과적으로 유도해내는 기술을 개발하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 재료 및 방법

본 연구를 통해 유도된 에너지스펙트럼을 비교·검증하기 위해서는 신뢰할 수 있는 비교대상이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 Geant4 몬테칼로 전산모사 툴킷을 사용하여 Elekta Synergy Platform 의료용 선형가속기(Elekta, Stockholm, Sweden)가 모델링되었고, 물팬텀 내에서의 선량분포를 실제 측정값에 일치시키는 Monte Carlo (MC) commissioning 과정을 통해 초기 입사 전자선의 특성이 결정되었다[9]. 전산모사 시간을 단축시키기

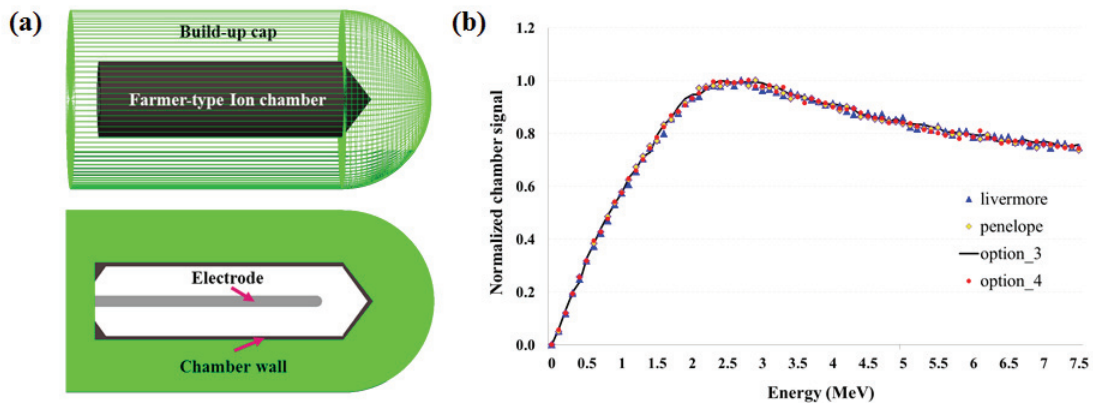


Fig. 1. (a) Modeled Farmer-type ion chamber using Geant4, (b) Monte Carlo photon response curve of ion chamber according to the four kinds of physics model in Geant4.

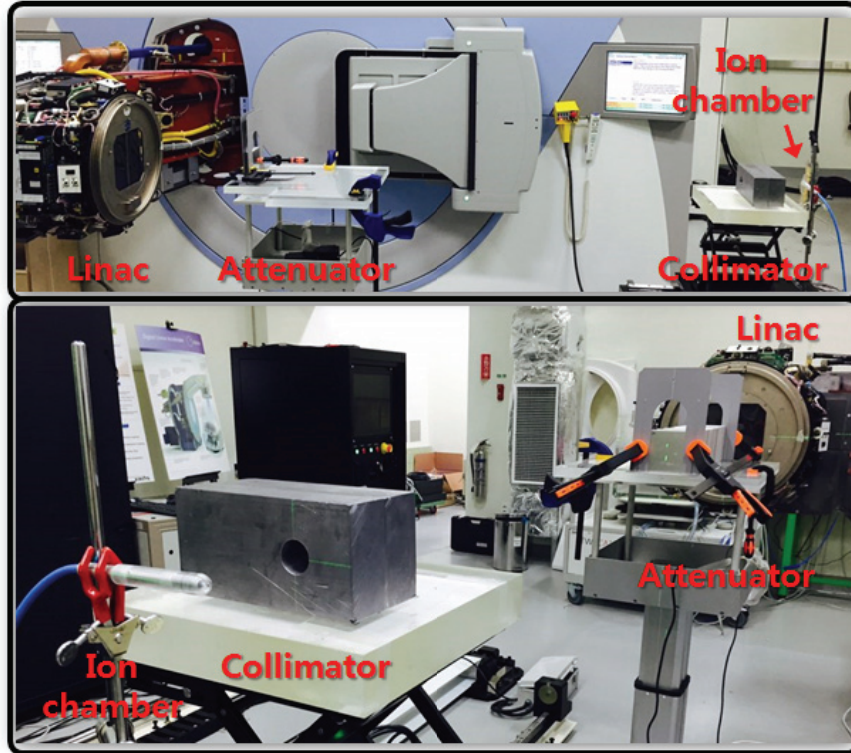


Fig. 2. Transmission measurement setup in Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS). 6 MV x-ray beam of  $3 \times 3 \text{ cm}^2$  field incident on aluminum attenuators and transmitted x-rays passing through the hole of lead collimator in 3 cm diameter are detected in the Farmer-type ion chamber.

위하여 선원으로부터 70 cm인 위치에서 위상공간파일 (phase space file)이 기록되었으며 이로부터 선원과 표면간의 거리(source to surface distance, SSD)가 300 cm인 지점에서 에너지스펙트럼이 계산되었다.

X-선 투과율 측정실험에서는 유효체적이  $0.6 \text{ cm}^3$ 인 N30013 PTW Farmer형 이온함 검출기(PTW, Freiburg, Germany)가 사용되었고, 앞서 언급한 바와 같이 X-선 투과율 정보로부터 에너지스펙트럼을 유도하기 위해서는 이온함의 단일에너지에 대한 반응정보(R(E))가 필요하다. R(E)값은 실험을 통해 측정하는 것이 불가능하기 때문에 몬테카를로 전산모사가 필수적이다. 따라서 Fig. 1A와 같이 Geant4 전산모사 툴킷을 사용하여 4.55 mm 두께의 PMMA 빌드업 캡이 장착된 Farmer형 이온함 모델링되었으며, Fig. 1B와 같이 R(E)값을 구하기 위하여 3 m 거리에 있는 Farmer형 이온함에 0부터 7.5 MeV 까지 0.1 MeV 단위간격으로 단일에너지의 광자선을 조사하여 이온함의 유효체적 내에서 흡수된 에너지를 계산하는 전산모사가 수행되었다. 즉, 광자선의 에너지에 따라 이온함의 벽물질, 빌드업 캡, 전극물질에서 발생된 이차방사선으로부터 유효체적 내에 흡수되는 선량이 어떻게 변하는지를 확인하기 위하여 전산모사가 수행되었다. 이때 물리 모델에 따른 R(E)값의 변화를 확인하기 위하여 저에너지 영역에서 정확한 것으로 알려진 Livermore, Penelope, EmStandardPhysics\_option4와 의료방사선의 에너지영역에서 일반적으로 사용되는 EmStandardPhysics\_option3의 총 네 가지 모델을 사용한 전산모사

가 수행되었다. 전산모사 결과, Fig. 1B와 같이 네 가지의 물리 모델에 따른 R(E)값은 거의 유사한 경향성이 확인되었고, 저에너지 영역의 전산모사에 주로 사용되는 물리 모델은 EmStandardPhysics\_option3에 비해 더 많은 전산모사 시간이 필요하므로 X-선 투과율 계산 시 효율적인 전산모사를 위해 EmStandardPhysics\_option3의 물리 모델이 사용되었다.

X-선 투과율 측정 실험은 Fig. 2와 같이 6 MV Elekta Synergy Platform 선형가속기로부터 발생하는 X-선이 바닥과 평행하게 조사되도록 구성되었으며 검출기에 측정되는 산란선의 양을 최소화 하기 위하여 조사야는 SSD 100 cm에서  $3 \times 3 \text{ cm}^2$ 가 되도록 설정되었다. 선형가속기에서 발생하는 광자선의 출력율은  $560 \text{ MU} \cdot \text{min}^{-1}$ 이었으며 각각의 측정에서 사용된 출력은 200 MU이었다. 감쇠물질은 표면이 100 cm에 위치하도록 위치되었고 이때 사용된 감쇠물질은 정사각형 형태의 #1050 알루미늄 합금(순도 99.5%)판이 사용되었다. 알루미늄 판의 크기는  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , 두께는 2 mm 이었으며 총 250개의 판이 사용되어 0-50 cm 범위에서 1 cm 간격으로 두께가 조절되었다[10]. 각각의 알루미늄 판은 디지털 버니어캘리퍼스를 사용하여 네 방향에서 두께를 측정된 뒤 네 개의 두께를 평균하여 한 개의 판에 대한 두께가 평가되었다. X-선 투과율 측정 시 산란선의 영향을 줄이기 위하여  $20 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ 의 납벽돌이 이온함의 위치로부터 10 cm 앞에 놓였으며 직경 3 cm의 구멍이 뚫려있다. 이때 납벽돌은 가로길이 20 cm 중 11 cm가 이온함의 몸통부분



을 차폐하고 이온함의 유효체적 부분에 구멍이 위치할 수 있도록 구성되어 있다. 또한 벽으로부터 발생하는 후방산란의 영향을 최소화하고자 이온함과 벽의 사이 간격이 100 cm 되도록 구성되어 있다.

방사선 투과율 정보로부터 에너지스펙트럼을 유도하기 위하여 본 연구에서는 초기에 임의로 에너지스펙트럼을 가정하는 과정 없이 단위에너지간격 별 반복적으로 비교하는 방법(bin-by-bin iterative method)이 사용되었다. 이 과정을 수행하기 위해서는 검증된 알고리즘이 필요하며, 이때 중성자의 에너지스펙트럼을 유도하기 위해 개발된 HEPROW 프로그램이 본 연구에 사용되었다[11]. HEPROW 프로그램은 검출기를 통해 측정된 중성자 또는 광자의 펄스 높이 신호(에너지스펙트럼)로부터 검출기가 놓인 위치에서의 실제 이상적인 에너지스펙트럼을 유도하는 목적으로 개발되었다. HEPROW 프로그램은 총 7가지 종류의 프로그램이 내장되어있으며 이 중 최소자승법(least square method)이 적용된 GRAVELW 프로그램을 통해 에너지스펙트럼이 유도되었다. 본 연구에서는 고에너지 X-선의 에너지스펙트럼을 유도하기 위해 GRAVELW 프로그램의 입력 값인 펄스 높이 스펙트럼은

측정된 X-선 투과율 값으로 치환되었고 총 51개의 X-선 투과율 정보가 입력되었다. 또 다른 입력 값인 단일에너지에 대한  $R(E)$ 는 몬테카를로 전산모사를 통해 계산된 이온함의 단일에너지에 대한 반응정보와 X-선 투과율 측정 시 사용되는 감쇠물질의 두께별 방사선 투과확률  $(e^{-\frac{\mu}{\rho}(E)x})$ 을 모두 포함한 값으로써 치환되었다. 즉, 단일에너지에 대한 검출기의 반응정보가 단일에너지에 대한 두께별 방사선투과율 정보로 치환되었다.

### 3. 결과 및 논의

X-선 투과율은 각 두께의 알루미늄 물질을 투과한 X-선이 이온함에 검출된 신호와 알루미늄 물질이 없을 때 이온함에 검출된 신호의 비를 의미하므로 X-선 투과율 곡선은 지수함수의 형태를 보인다. Fig. 3은 51번의 실험을 통해 측정된 X-선 투과율과 몬테카를로 전산모사를 통해 계산된 X-선 투과율의 비교 결과를 보여준다. 전체적인 경향성은 거의 일치하며 두 그래프는 0.43%의 평

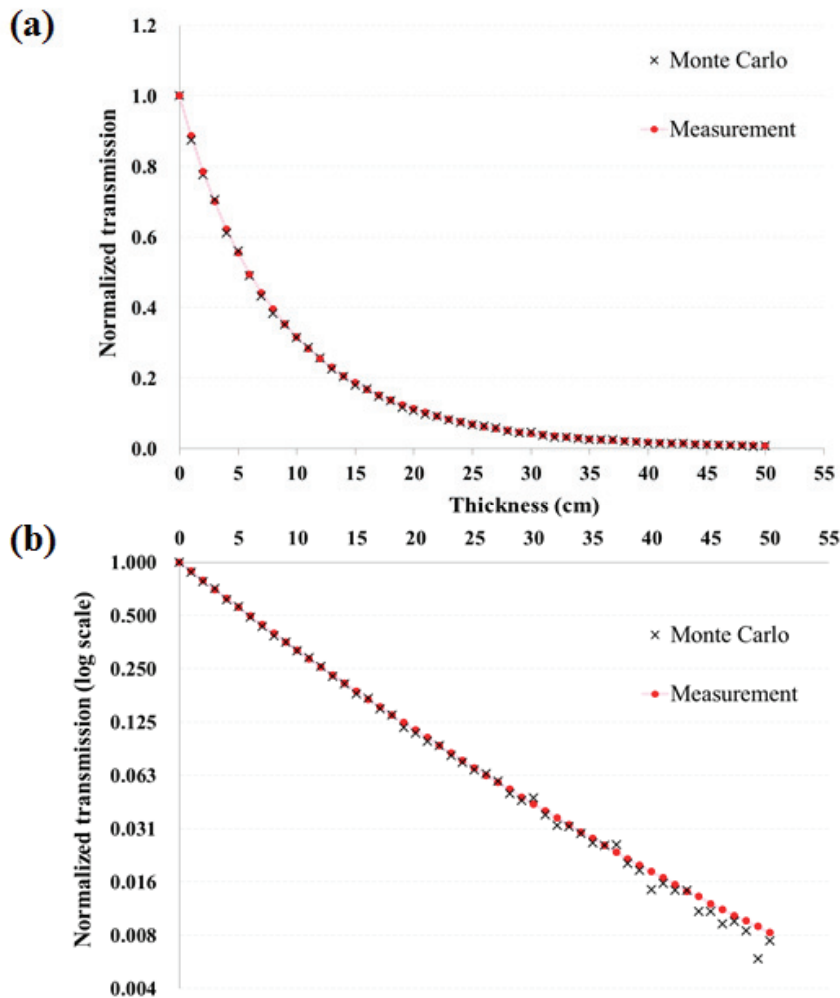


Fig. 3. Comparison of the simulated and measured transmission curve: (a) linear scale, (b) logarithmic scale.

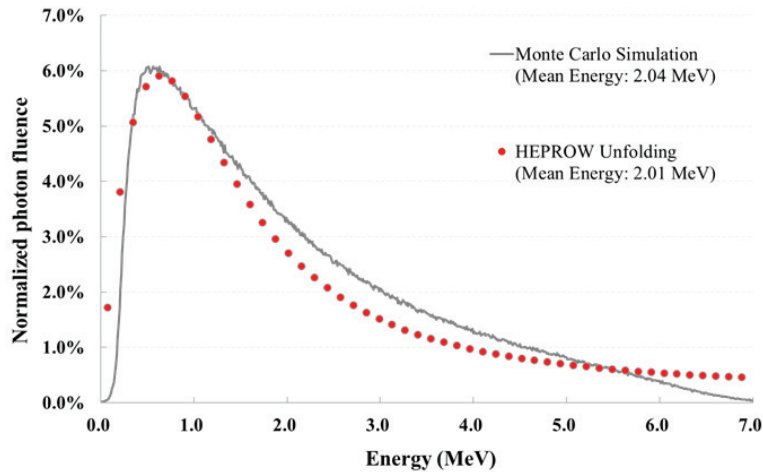


Fig. 4. Comparison of the simulated and unfolded energy spectrum using Geant4 and HEPROW program, respectively.

균제곱근오차가 확인된다. 검출기의 측정신호에 대한 오차를 확인하기 위하여 감쇠물질이 없을 때, 감쇠물질의 두께가 2 cm, 6 cm, 12 cm, 50 cm 일 때 5 번 반복하여 신호를 측정하였으며, 그 결과 신호의 오차는 0.2% 이하로서 오차가 거의 없음이 확인되었다. Fig. 3 하단부의 로그 스케일로 표현한 그래프의 경우, 만일 X-선 투과율 측정 시 단일에너지의 광자선이 사용되었다면 회색선과 같이 선형그래프로 표현될 수 있지만 실험에 사용된 X-선은 다중에너지이기 때문에 비선형 형태가 확인된다. 몬테칼로 전산모사로부터 계산된 X-선 투과율은 알루미늄 두께가 얇은 경우에 비해 두꺼운 경우 상대적으로 통계적 오차가 큰 것이 확인되었으나 측정된 값과 비교했을 때 전체적인 경향성은 크게 변하지 않았다.

Fig. 4는 몬테칼로 전산모사를 통해 계산된 에너지스펙트럼과 측정된 X-선 투과율 정보 및 HEPROW 프로그램을 통해 유도된 에너지스펙트럼을 보여준다. 이 때, 두 에너지스펙트럼 그래프는 면적을 1로 정규화하여 비교되었다. 몬테칼로 전산모사를 통하여 계산된 에너지스펙트럼은 검은 실선형태이며 에너지스펙트럼의 0.511 MeV를 제외한 최대지점 및 평균에너지는 각각 0.56, 2.04 MeV이었다. 51개의 X-선 투과율 정보로부터 유도된 에너지스펙트럼은 HEPROW 프로그램으로부터 총 3,000번의 반복 유도과정을 통해 얻은 결과이다. 몬테칼로 전산모사로부터 계산된 에너지스펙트럼과 최대위치를 비교해보았을 때 약 0.066 MeV의 차이가 확인되며 평균 에너지의 경우 약 0.03 MeV의 차이가 확인되었다. HEPROW 프로그램으로부터 유도된 에너지스펙트럼의 에너지 간격이 0.139 MeV인 것을 고려했을 때 피크 에너지의 차이는 0.139 MeV 오차범위 내에 존재하므로 물리적으로 타당한 에너지스펙트럼의 형태가 도출된 것으로 판단된다. 그러나 전체적인 그래프의 개형은 차이가 있음이 확인되었다. 두 그래프의 개형 차이의 원인은 다음과 같이 2가지로 추정된다; (1) X-선 투과율 정보가 불충분한 스펙트럼 정보를 담고 있는 경우, (2) X-선

투과율 측정 시 주변물질로부터 발생된 산란선이 에너지스펙트럼 유도결과에 영향을 주는 경우. (1) 번의 경우, 알루미늄 물질은 관심에너지영역(0.1-8 MeV)에서 비교적  $\mu$  값의 변화가 작아 치료용 방사선의 에너지스펙트럼을 유도하는 과정에서 에너지 분별력이 떨어진다고 판단된다. (2) 번의 경우, 실험실의 각종 기구들과 벽으로부터 발생되어 검출기에 도달하는 산란선은 측정된 X-선 투과율 값의 부정확성을 야기하고, 이 정보로부터 유도된 에너지스펙트럼은 산란선의 영향 정도에 따라 그래프 개형에 차이를 줄 수 있다. 이에 대해서는 추후 몬테칼로 전산모사를 통해 실험실 구조 및 주변 물질에 따라 X-선 투과율 값에 미치는 산란선의 영향에 관한 평가와 X-선 투과율 곡선의 변화 정도에 따른 유도된 에너지스펙트럼의 변화 경향성에 관한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 의료용 선형가속기에서 발생하는 고에너지 X-선의 에너지스펙트럼을 유도하기 위하여 알루미늄 합금을 사용한 X-선 투과율 측정법 및 HEPROW 프로그램이 응용되었으며 이를 평가하기 위한 몬테칼로 전산모사 기술이 개발되었다. 선형가속기의 모델링 및 MC Commissioning 과정을 통해 평가의 척도로 사용되는 에너지스펙트럼이 계산되었으며, 기록된 위상공간파일을 사용하여 X-선 투과율 및 이온함의 단일에너지에 R(E)이 계산되었다. 계산된 X-선 투과율 값과 실제 실험으로부터 측정된 X-선 투과율 값은 거의 유사하였으며, 고에너지 X-선의 에너지스펙트럼을 유도하기 위하여 적절한 HEPROW 프로그램이 적용되었다. 위 과정을 통해 유도된 에너지스펙트럼은 몬테칼로 전산모사를 통해 계산된 스펙트럼과 비교하였을 때 물리적으로 타당한 값이 도출

되었다고 평가된다. 그러나 고에너지 영역에서 과평가, 중간에너지 영역에서 저평가되는 부분은 추후 감쇠물질 또는 빌드업 캡의 물질에 따른 유도과정에서의 에너지 분별력에 대한 평가, 빌드업 캡 종류에 따른 단일에너지에 대한 이온함의 반응성 평가, X-선 투과율 측정 시 발생하는 산란선의 영향에 관한 추가 연구가 필요하다.

**감사의 글**

본 연구는 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원(한국연구재단 No. 2014R1A1A1007789) 및 한국표준과학연구원원의 저차원 격자 물성 제어평가기술 개발 사업 재원으로 지원을 받아 수행되었음(한국표준과학연구원-2015-15011032)

**REFERENCES**

1. Dong KR, Park BS, Kim SS, Kweon DC, Goo EH, Chung WK. Target motion analysis of the respiratory gated guided radiotherapy in liver cancer patients using 4D-CT. *Journal of Radiation Protection and Research*. 2010;35(2):63-68.
2. Lee J, Kang J, Kim J, Kim B, Jeong D. Analysis by synthesis for estimation of dose calculation with gMOCREN and GEANT4 in medical image. *Journal of Radiation Protection and Research*. 2012;37(3):146-148.
3. Nath R, Biggs PJ, Bova FJ, Ling CC, Purdy JA, van de Geijn J, Weinhaus MS. AAPM code of practice for radiotherapy accelerators: Report of AAPM Radiation Therapy Task Group No. 45. *Med. Phys.* 1994;21(7):1093-1121.
4. Stathakis S, Esquivel C, Quino LV, Myers P, Calvo O, Mavroidis P, Gutiérrez AN, Papanikolaou N. Accuracy of the small field dosimetry using the Acuros XB dose calculation algorithm within and beyond heterogeneous media for 6 MV photon

- beams. *International Journal of Medical Physics, Clinical Engineering and Radiation Oncology*. 2012;1:78-87.
5. Huang PH, Kase KR, Bjärngård BE. Spectral characterization of 4 MV bremsstrahlung by attenuation analysis. *Med. Phys.* 1981; 8(3):368-374.
6. Ahuja SD, Steward PG, Roy TS, Slessinger ED. Estimated spectrum of a 4-MV therapeutic beam. *Med. Phys.* 1986;13(3):368-373.
7. Catala A, Francois P, Bonnet J, Scouarnec C. Reconstruction of 12 MV bremsstrahlung spectra from measured transmission data by direct resolution of the numeric system AF=T. *Med. Phys.* 1995;22(1):3-10.
8. Shimozato T, Tabushi K, Kitoh S, Shiota Y, Hirayama C, Suzuki S. Calculation of 10 MV x-ray spectra emitted by a medical linear accelerator using the BFGS quasi-Newton method. *Phys. Med. Biol.* 2006;52(2):515.
9. Yi CY, Chun KJ, Kim IJ, Kim BC, Kim JH et al. Development of measurement standard of medical ionizing radiation. 1711007782. Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Republic of Korea. 2015;233-235.
10. Hinson WH, Bourland JD. Spectral reconstruction of high energy photon beams for kernel based dose calculations. *Med. phys.* 2002;29(8): 1789-1796.
11. Matzke M. The HEPROW program system. NEA-1666/01. Nuclear Energy Agency, Boulogne-Billancourt, France. 2004;18-25.