

Monte Carlo Simulation of Transmission-Type X-ray Tube with Dual-Structured Target

Kwon Su Chon*

Department of Radiological Science, Daegu Catholic University

Received: February 13, 2023. Revised: February 24, 2023. Accepted: February 28, 2023.

ABSTRACT

X-ray fluorescence analysis has been widely used in the field of science and industry because it gives information about elements and their concentrations without destruction of samples. To increase analysis accuracy of fluorescence generated by photons of the transmission-type X-ray tube for mixture and compound samples would be recommend to have strong energy near 10 keV and 20 keV simultaneously. Tungsten of 9.65 keV and molybdenum of 17.48 keV were considered as targets with dual deposition structure for obtaining two strong characteristic X-rays, and the transmission-type X-ray tube was analyzed using Geant4 Monte Carlo simulation. The W-Mo structure resulted in strong characteristic X-ray near 10 keV and 20 keV simultaneously. A structure with Mo-W multilayers of 5 μm thick also gave optimal spectrum. Various material combination and thickness optimization for the dual-structured target can give X-ray spectrum with strong characteristic X-ray of specific energies.

Keywords: X-ray Fluorescence Analysis, Transmission-type X-ray Tube, Dual Structure Target, X-ray Spectrum

I. INTRODUCTION

엑스선형광분석(X-ray fluorescence analysis)은 비 파괴적으로 시료를 분석하는데 우수한 성능을 보인다. 엑스선형광분석 기법은 물리 화학적 방법보다 간단하고 분석하는 데 소요되는 시간이 짧기 때문에 과학, 산업, 고고학 등의 분야에서 광범위하게 활용되고 있다^[1]. 엑스선형광분석은 엑스선을 발생시키는 광원, 분석하고자 하는 시료, 시료에서 발생하는 형광엑스선을 검출하는 검출기로 구성되어 있다^[2]. 엑스선을 시료에 조사하면 시료를 구성하고 있는 물질에 발생하는 형광엑스선을 검출하고 이 특성엑스선의 파장 또는 에너지에 해당하는 강도를 측정하여 물질의 종류와 농도를 분석한다^[1,2]. 분석하고자 하는 시료가 단일 물질로 되어 있는 경우는 상대적으로 쉽게 분석할 수 있다. 하지만 여러 시료가 섞여 있는 혼합물이나 화합물의 경우에

는 각 물질을 구성하는 물질의 흡수단(absorption edge) 보다 높은 에너지의 엑스선이 외부로부터 입사해야만 물질에 대응하는 형광엑스선이 강하게 발생하여 분석의 정밀도가 높아진다^[3].

엑스선형광분석에는 시료를 구성하는 물질에서 발생하는 $K_{\alpha,\beta}$ 와 $L_{\alpha,\beta}$ 형광엑스선이 주로 활용된다^[4]. 후자는 주로 10 keV 전후로 많이 분포하고 전자는 20 keV 근처가 주를 이룬다^[5,6]. 따라서 시료에 입사하는 엑스선이 10 keV와 20 keV 근방에서 강한 광자 세기를 가지는 스펙트럼을 입사시키면 시료에서 높은 형광엑스선이 발생하여 분석의 정밀도가 높아지게 된다.

엑스선형광분석용 엑스선관은 상대적으로 멀리 떨어져 있는 10 keV와 20 keV의 두 에너지 영역에 모두 높은 강도 분포를 갖는 엑스선 스펙트럼을 발생시키기 어렵다^[7]. 이것은 엑스선관에 있는 표적(target)의 특성 때문이다. 텅스텐(W) 또는 몰리브덴

* Corresponding Author: Kwon Su Chon

E-mail: kschon@cu.ac.kr

Tel: +82-53-850-2521

(Mo)과 같은 엑스선관의 표적이 단일 물질로 구성되어 있어 엑스선 발생 시 표적의 특성엑스선에 해당하는 광자가 상대적으로 많이 발생하기 때문이다^[8-11]. 따라서 일반적으로 많이 사용하는 엑스선관의 표적 구조는 10 keV 주변의 상대적으로 낮은 에너지와 20 keV 주변의 높은 에너지 강도 분포를 동시에 갖는 엑스선 스펙트럼을 얻기가 어렵다. 대부분의 연구는 엑스선관 내부에 여러 물질의 표적을 준비하고 필요시 전자를 편향시켜 필요한 특성엑스선이 강한 스펙트럼의 엑스선을 얻었다^[12,13]. 시료의 종류에 따라 표적을 변경하면서 여러 번 형광 엑스선의 데이터를 얻어야 하는 불편함이 있다.

본 논문은 한 번에 2개의 특성엑스선을 동시에 갖도록 하는 이중 적층 구조 형태의 표적을 제시하고 전산모사를 통하여 적용 가능성을 확인하였다. 10 keV와 20 keV 주변에서 높은 특성엑스선 스펙트럼을 가지는 투과형(transmission-type) 엑스선관의^[14,15] 양극 물질의 구조를 Geant4^[16] 몬테카를로 전산모사(Monte Carlo simulation)로 분석했다. 20 keV 근방의 특성엑스선으로 몰리브덴(17.48 keV)과 10 keV 주변의 특성엑스선으로 텅스텐(9.65 keV)을 선정하였다. 단일 물질의 일반 표적과 달리 몰리브덴과 텅스텐 두 물질을 적층하여 W-Mo와 Mo-W 구조와 다층으로 적층한 표적을 조사하였다. 몰리브덴 특성엑스선을 강하게 발생시킬 수 있는 35 kV의 고전압을 고려하였다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. 투과형 엑스선관의 구조

투과형 엑스선관은 음극의 필라멘트나 탄소나노튜브(carbon nano-tube) 팁(tip)에서 발생하는^[15] 전자를 전자기 코일(electromagnetic coil)로 집속하여 표적에 충돌시켜 엑스선을 발생시킨다. 발생한 엑스선은 전자가 이동한 방향으로 투과하여 진행된다. 양극은 0.2 mm 두께의 다이아몬드 기판에 표적을 코팅하여 사용한다.

표적은 W, Mo, W-Mo, Mo-W, W-Mo multilayers, Mo-W multilayers의 구조를 갖도록 하였다. 텅스텐과 몰리브덴은 단일 물질의 표적이고 W-Mo는 Fig.

1과 같이 다이아몬드 기판(substrate) 위에 몰리브덴을 적층시키고 그 위에 다시 텅스텐을 적층한 구조를 가진다. 음극에서 발생한 전자는 텅스텐과 몰리브덴을 차례로 이동하면서 에너지를 잃는 과정에서 엑스선을 발생시킨다. Mo-W 구조는 반대로 몰리브덴-텅스텐-다이아몬드 기판의 적층 구조를 가진다. W-Mo multilayers는 다이아몬드 기판 위에 W-Mo를 연속적으로 배치한 구조를 가지고 텅스텐과 몰리브덴은 각각 1 μm 의 두께를 갖도록 하였다. 반대로 Mo-W multilayers는 Mo-W 구조를 연속적으로 배치한 구조를 갖는다.

엑스선관의 전압을 35 kV로 인가하면 몰리브덴의 특성엑스선을 강하게 발생시킬 수 있다. 35 keV의 에너지를 갖는 전자는 몰리브덴에서 대략 4.1 μm 의 비정(range)을 갖는다. 전자가 만드는 광자가 다시 몰리브덴과 상호작용하여 특성엑스선을 만들기 때문에 몰리브덴의 두께는 10 μm 정도의 두께를 갖도록 선정하면 된다. 그러나 텅스텐의 경우 2.8 μm 의 비정을 갖기 때문에 5 μm 의 두께 정도를 고려하면 된다. 그런데 Mo-W와 W-Mo 구조에서는 각 두께의 반을 합하는 것으로 하여 대략 7.5 μm 의 두께를 갖도록 하였다.

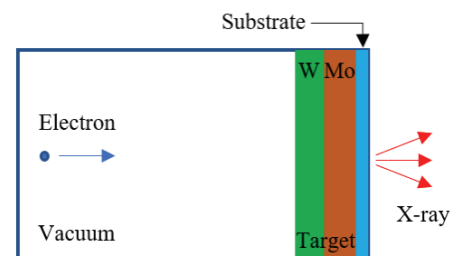


Fig. 1. Geometry of transmission-type X-ray tube with W-Mo target on the substrate.

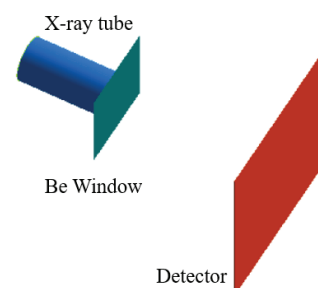


Fig. 2. Geometry of Geant4 simulation for obtaining X-ray spectrum.

2. Geant4 전산모사

투과형 엑스선관을 Fig. 2와 같이 Geant4로 구현하였다. 엑스선관의 초점에 200 mm 떨어진 곳에 검출기를 설치하고 광자의 에너지를 측정하여 스펙트럼을 얻었다. 엑스선형광분석 장치는 시료에서 발생하는 형광엑스선의 손실을 방지하기 위해 엑스선관과 검출기 사이의 거리를 짧게 하는 구조로 되어 있으므로 여기서는 200 mm 거리를 선정하였다. 엑스선관의 초점에서 5 mm 떨어진 거리에 0.5 mm 두께의 베릴륨(Be) 창(window)을 설치하였다.

투과형 엑스선관에 35 kV의 고전압을 인가하기 때문에 35 keV의 운동에너지를 갖는 전자를 직접 표적으로 입사시키고, 한 번의 전산모사에 총 1×10^9 개의 전자를 입사하도록 하여 스펙트럼의 불확도(uncertainty)가 1% 미만이 되도록 하였다.

III. RESULT

투과형 엑스선에서 단일 표적으로 텅스텐과 몰리브덴의 스펙트럼을 조사하였다. 텅스텐의 밀도($19.25 \text{ cm}^2/\text{g}$)가 높아서 두께가 두꺼울수록 발생한 엑스선의 감약이 크기 때문에 텅스텐 $L_{\alpha, \beta}$ 의 특성엑스선의 강도가 감소하였다. 몰리브덴은 밀도가 텅스텐보다 낮은 $10.28 \text{ cm}^2/\text{g}$ 로 두께가 $10 \mu\text{m}$ 이상으로 증가할수록 특성엑스선의 강도는 더 높게 나타났다.

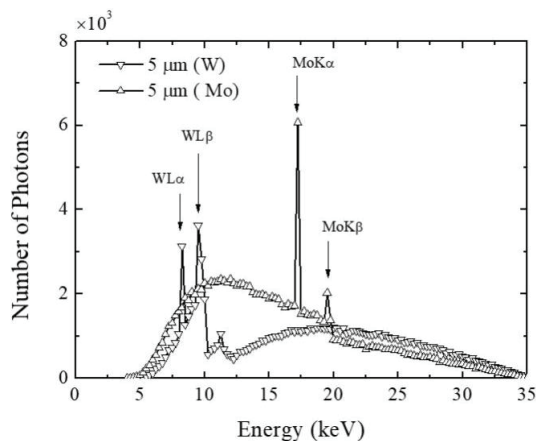


Fig. 3. X-ray spectra of tungsten and molybdenum simulated by Geant4 for the transmission-type X-ray tube.

Fig. 3은 두께 $5 \mu\text{m}$ 의 텅스텐과 몰리브덴 단일 표적에 대한 스펙트럼을 동시에 나타낸 것이다. 텅스텐의 스펙트럼에서 L_{α} 와 L_{β} 에서 피크가 강하게 나타났다. 그리고 예상한 것과 같이 12.1 keV 의 텅스텐 L 흡수단이 나타났다. 몰리브덴도 강한 K_{α} 가 나타났고 상대적으로 강도가 약한 K_{β} 도 관찰되었고, 20 keV 에서 K 흡수단도 강하게 나타났다. 통상적으로 K가 L 특성엑스선보다 강하기 때문에 몰리브덴의 경우에는 텅스텐의 L 특성엑스선보다 강도가 더 높았다. 같은 두께 $5 \mu\text{m}$ 에서 몰리브덴의 특성엑스선이 텅스텐보다 대략 67% 높게 나타났다.

단일 텅스텐과 몰리브덴의 표적에서 높은 강도를 보이는 특성엑스선을 관찰하였다. 텅스텐과 몰리브덴을 각각 조합하여 표적을 만들면 텅스텐과 몰리브덴 특성엑스선을 동시에 얻을 수 있다.

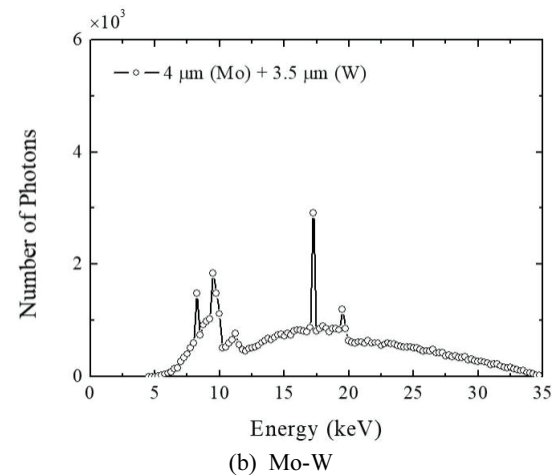
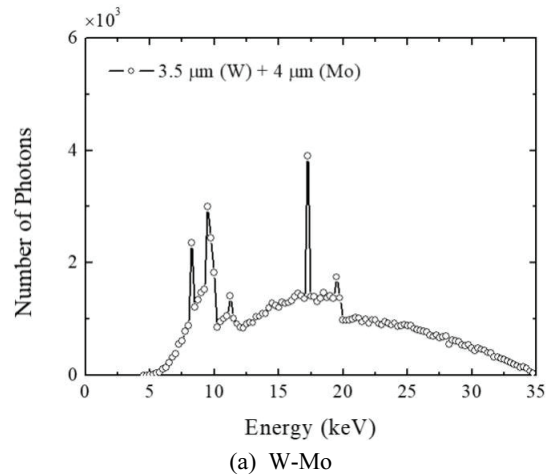
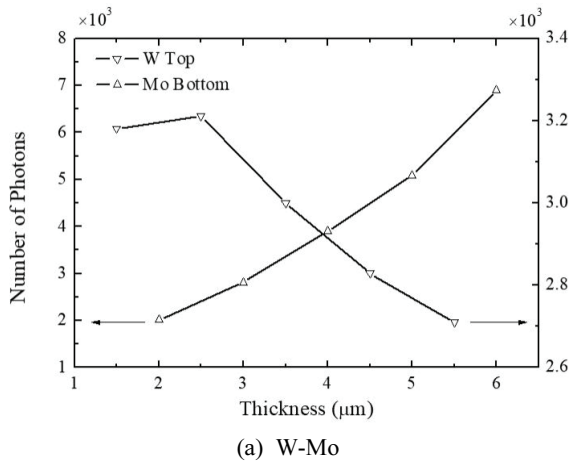


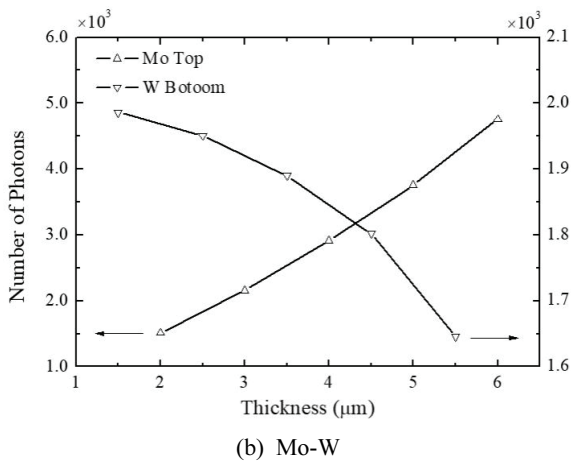
Fig. 4. Spectra for (a) W-Mo and (b) Mo-W targets. Both have the same thickness of $7.5 \mu\text{m}$.

Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 전산모사에서도 비슷한 결과가 얻어졌다. Fig. 4-(a)는 W-Mo 구조의 엑스선 스펙트럼을 나타낸 것이다. 텅스텐 3.5 μm 와 몰리브덴 4 μm 의 두께를 갖는다. 같은 두께를 갖는 경우라도 표적의 구조가 Mo-W가 되면 스펙트럼의 양상이 달라진다. 특성엑스선의 강도가 W-Mo보다 낮아진 것을 확인할 수 있다. 몰리브덴 K_{α} 의 경우에는 25%, 텅스텐 L_{β} 는 39% 낮은 값을 보였다. 표적의 순서도 스펙트럼을 결정하는 중요 인자 중의 하나임을 알 수 있다.

동일한 두께를 갖는 구조이지만 표적 물질의 순서에 따라 스펙트럼의 강도가 달라졌다. 다른 두께의 조합에서도 비슷한 결과가 얻어졌다. Fig. 5는 총 두께가 7.5 μm 인 W-Mo와 Mo-W 구조의 몰리브덴 (K_{α})과 텅스텐(L_{β}) 피크(peak)의 값을 표시하였다. Fig. 4와 같은 두께의 조합이더라도 텅스텐과 몰리브덴의 피크값이 달라진다는 것을 확인할 수 있다.



(a) W-Mo

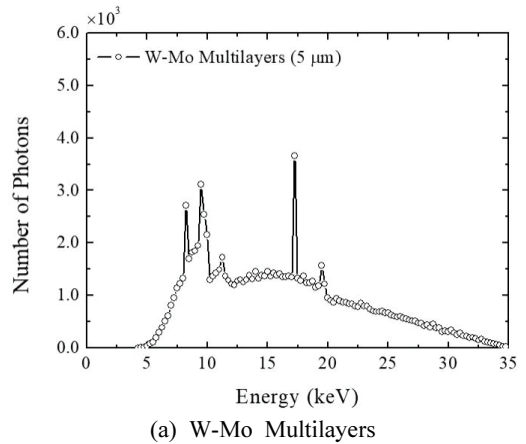


(b) Mo-W

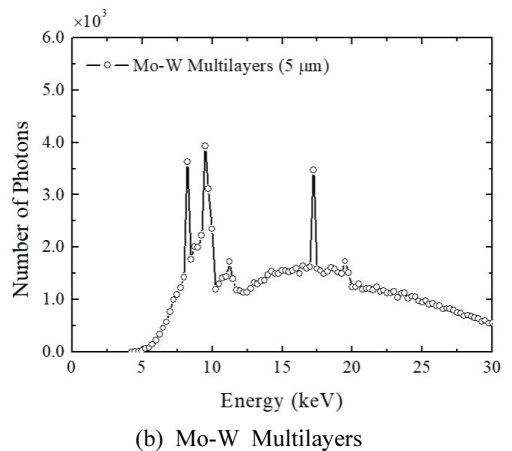
Fig. 5. Peak intensities for (a) W-Mo and (b) Mo-W targets of 7.5 μm thick.

모든 조합에서 W-Mo 구조가 더 높은 피크값을 나타내었다. 텅스텐의 두께가 2.5 μm 보다 얇아지는 경우 텅스텐 특성엑스선의 강도가 오히려 감소하였다. 텅스텐의 비정을 고려하면 이러한 감소 현상은 추측할 수 있고 두께가 두꺼워질수록 자기흡수(self-absorption)에 의해 피크 강도가 감소할 것임을 예상할 수 있다.

W-Mo와 Mo-W의 구조에서 스펙트럼의 피크값의 변화를 살펴보았다. W-Mo와 Mo-W 구조에서 각 물질의 두께를 1 μm 로 고정하고 두 구조를 여러 층 반복 적층한 W-Mo와 Mo-W multilayers 구조에서 피크의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6는 W-Mo와 Mo-W를 두 번 반복 적층한 4 μm 두께 표적에 관한 결과이다. W-Mo multilayers 표적의 경우 텅스텐의 특성엑스선보다 몰리브덴 특성엑스선의 강도가 18% 정도 세게 나타났고, Mo-W multilayers 표적은 반대로 텅스텐 특성엑스선의 강도가 13% 높게 나타났다.



(a) W-Mo Multilayers



(b) Mo-W Multilayers

Fig. 6. Spectra for (a) W-Mo and (b) Mo-W multilayers targets of 4 μm thick.

20 keV 이상의 제동복사는 Mo-W가 W-Mo multilayers보다 더 높게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 전체적인 엑스선의 발생은 Mo-W가 W-Mo multilayers보다 20.4% 높았다.

Multilayers의 두께를 추가로 증가시키면 특성엑스선의 발생보다는 자기흡수가 더 증가하여 특성엑스선의 강도가 더 낮아지는 경향을 보였다. 예를 들어 6 μm 의 두께의 W-Mo multilayers 표적은 4 μm 두께의 경우보다 텅스텐과 몰리브덴의 특성엑스선 강도가 각각 77.3%와 89.8%로 낮아졌다. Mo-W multilayers 표적은 각각 78.9%와 95.4%로 감소하였다.

IV. DISCUSSION

의료용이나 산업용으로 사용되는 반사형 엑스선관의 스펙트럼은 몬테카를로 전산모사를 통해 심도 있게 연구되었다^[17]. 그러나 투과형 엑스선관의 스펙트럼 연구는 제한된 연구 결과가 보고되고 있다. Nasser이 투과형 엑스선관의 텅스텐^[18]과 몰리브덴^[19] 두께의 최적화를 Geant4 몬테카를로 전산모사를 통해 연구하였다. Yu *et al.*은 펄스 형태의 전자빔 입사를 이용하는 500 keV 에너지 영역에서 최대의 플루언스(flucose)를 갖도록 하는 텅스텐과 몰리브덴의 두께를 최적화하였다^[20]. 그러나 이러한 사전 연구는 모두 단일 표적 물질로 구성된 텅스텐과 몰리브덴의 최적 두께를 연구하였다. Hei *et al.*은 투과형 엑스선관에 다중 표적을 갖도록 하고 전자빔을 편향시켜 원하는 표적에 전자를 집중함으로써 다양한 엑스선 스펙트럼을 얻는 연구를 수행하였다^[12]. 이러한 다중 표적 연구는 엑스선관의 구조를 복잡하게 하는 등 기존의 투과형 엑스선관의 구조를 그대로 사용하기에는 무리가 있다. 본 연구는 단일 표적에서 발생하는 엑스선관의 스펙트럼의 단점과 전자 편향을 통한 다중 표적을 이용하는 복잡한 구조의 단점들을 극복하고 기존의 투과형 엑스선관의 기술을 그대로 활용하여 표적을 다중 적층 구조로 변경만 하면 각각의 장점을 채용할 수 있는 새로운 방법이다.

기존 방법은 단일 표적에서 엑스선을 획득하였다. 이 엑스선 스펙트럼은 강한 K_{α} 와 같은 특성엑스선을 포함한다. 그러나 다중 물질을 적층한 구조

의 표적을 사용하면 각 물질에 해당하는 특성엑스선을 얻을 수 있지만, 단일 물질에서 얻을 수 있는 만큼의 강한 특성엑스선을 얻기는 어렵다. Fig.2와 Fig.6을 비교해 보면 대략 20% 정도의 낮은 몰리브덴 특성엑스선이 얻어진다. 다중 표적의 두께 최적화를 통해 각 특성엑스선의 강도를 최대로 할 수 있는 추가적인 연구가 필요하다.

기존의 엑스선관에서 많이 사용해왔던 열적 특성이 우수한 텅스텐과 몰리브덴을 선택하였다. 그러나 희망하는 특성엑스선을 얻기 위해서 다양한 종류의 물질을 조합할 가능성이 있다. 열적 특성이 우수하다고 알려진 기존 물질을 단순 적층하여 사용하는 구조이기 때문에 이중 구조의 표적 역시 열적 특성 우수할 것이라 예상된다. 경원소의 검출을 위해 3 keV 근방의 특성엑스선이 필요한 경우에는 로듐(Rh) 또는 은(Ag)을 표적 물질로 선정할 수 있다. 실제로 이들 물질은 휴대용 형광분석(handheld X-ray fluorescence) 장치에 이용되고 있다.

두 물질을 단순 적층하여 사용하는 방법 이외의 합금을 사용할 수 있다. 분말 야금 분야의 사용 목적으로 텅스텐-레늄-몰리브덴 합금을 사용한 사전 연구도 있다^[21]. 그러나 이 연구는 표적 물질을 텅스텐-레늄-몰리브덴 합금으로 사용한 예이다. 여러 특성엑스선을 얻기 위하여 다수 물질을 합금 형태로 사용할 수 있으나 이러한 조합이 합금으로 제작 가능한지 그리고 열적 특성이 우수한지 확인하는 추가적인 절차가 필요하다.

V. CONCLUSION

엑스선형광분석 장치의 엑스선 광원으로 사용되는 투과형 엑스선관에서 두 물질을 조합하여 적층하여 사용할 수 있는 새로운 형태의 표적 구조를 제시하였고 각 물질의 특성엑스선을 높은 강도로 얻을 수 있음을 Geant4 전산모사를 통해 확인하였다. W-Mo 구조의 표적을 통해 10 keV와 20 keV 근방의 강한 강도를 갖는 특성엑스선을 얻었다. 또한 5 μm 두께의 Mo-W multilayers 구조의 표적을 통해 최적의 강도 분포를 갖는 스펙트럼을 얻을 수 있음을 확인하였다. 텅스텐과 몰리브덴 이외 다양한 표적 물질을 선택 조합하고 최대의 특성엑스선 강도

분포를 가질 수 있도록 두께를 최적화하면 원하는 에너지 대역에서 최적의 엑스선 스펙트럼을 얻을 수 있을 것이다.

Acknowledgement

이 결과물은 2020년도 대구가톨릭대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었다.

Reference

- [1] B. Beckhoff, B. Kanngießner, N. Langhoff, R. Wedell, H. Wolff, *Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis*, Springer, 2006.
- [2] J. R. Lakowicz, *Principles of Fluorescence Spectroscopy*, Springer, 2006.
- [3] K. Sakurai, A. Iida, Y. Gohshi, "Chemical State Analysis by X-Ray Fluorescence Using Absorption Edges Shifts", *Advances in X-Ray Analysis*, Vol. 32, pp. 167-176. 1988.
- [4] S. I. Salem, S. L. Panossian, R. A. Krause, "Experimental K and L relative x-ray emission rates", *Atomic and Nuclear Data Tables*, Vol. 14, No. 2, pp. 91-109, 1974.
[https://doi.org/10.1016/S0092-640X\(74\)80017-3](https://doi.org/10.1016/S0092-640X(74)80017-3)
- [5] D. Gallhofer, B. G. Lottermoser, "The Influence of Spectral Interferences on Critical Element Determination with Portable X-Ray Fluorescence (pXRF)", *Minerals*, Vol. 8, No. 8 pp. 320, 2018.
<https://doi.org/10.3390/min8080320>
- [6] P. Moran, V. Delgado, A. Lopez-Fraguas, L. Gonzalez, E. Vaño, "Measurement of the photon spectrum from an X-ray tube above 10 keV using the induced XRF technique", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 242, No. 1, pp. 143-148, 1985.
[https://doi.org/10.1016/0168-9002\(85\)90899-X](https://doi.org/10.1016/0168-9002(85)90899-X)
- [7] V. Lohrabian, A. Kamali-Asl, H. G. Harvani, S. R. H. Aghdam, H. Arabi, H. Zaidi, "Comparison of the X-ray tube spectrum measurement using BGO, NaI, LYSO, and HPGe detectors in a preclinical mini-CT scanner: Monte Carlo simulation and practical experiment", *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 189, pp. 109666, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109666>
- [8] D. M. Tucker, G. T. Barnes, D. P. Chakraborty, "Semiempirical model for generating tungsten target x-ray spectra", *Medical Physics*, Vol 18. No. 2, pp. 211-218, 1991. <https://doi.org/10.1118/1.596709>
- [9] F. Zhang, X. Zhao, J. Zhang, "Simulation of X-Ray Shielding Effect of Different Materials Based on MCNP5", *Open Access Library Journal*, Vol. 7, No. 9, pp. 6727, 2022.
<https://doi.org/10.4236/oalib.1106727>
- [10] D. M. Tucker, G. T. Barnes, X. Z. Wu, "Molybdenum target x-ray spectra: a semiempirical model", *Medical Physics*, Vol. 18, No. 3, pp. 402-407, 1991. <https://doi.org/10.1118/1.596686>
- [11] S. Ketelhut, L. Büermann, G. Hilgers, "Catalog of x-ray spectra of Mo-, Rh-, and W-anode-based x-ray tubes from 10 to 50 kV", *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 66, No. 11, pp. 115013, 2021.
<https://doi.org/10.1088/1361-6560/abfbb2>
- [12] D. Hei, L. Jin, W. Jia, L. Zhao, A. Sun, G. Xiong, "Development and test of a multi-target transmission X-ray tube based on the electron deflection in an electric field", *Vacuum*, Vol. 193, pp. 110490, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110490>
- [13] L. Zhao, W. Jia, L. Jin, Q. Shan, C. Cheng, H. Zhu, D. Hei, "A design of transmission-type multi-target X-ray tube based on electric field modulation", *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 53, No. 9, pp. 3026-3034, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.net.2021.03.002>
- [14] P. Kandlakunta, A. Thomas, Y. Tan, R. Khan, T. Zhang. "Design and numerical simulations of W-diamond transmission target for distributed x-ray sources", *Biomed Phys Eng Express*, Vol. 5, No. 2, 2019. <https://doi.org/10.1088/2057-1976/2faae55f>
- [15] S. H. Heo, A. Ihsan, S. O. Cho, "Transmission-type microfocus x-ray tube using carbon nanotube field emitters", *Applied Physics Letter*. Vol. 90, pp. 183109, 2007. <https://doi.org/10.1063/1.2735549>
- [16] J. Allison et al., "Recent Developments in Geant4", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 835 pp. 186-225, 2016.

<https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125>

- [17] G. Poludniowski, A. Omar, R. Bujila, P. Andreo, "Technical Note: SpekPy v2.0—a software toolkit for modeling x-ray tube spectra", *Medical Physics*, Vol. 48, No. 7, pp. 3630-3637, 2021.
<https://doi.org/10.1002/mp.14945>
- [18] M. M. Nasser, "Determination of Tungsten Target Parameters for Transmission X-ray Tube: A Simulation Study Using Geant4", *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 48, No. 3, pp. 795-798, 2016.
- [19] M. M. Nasser, "Determination of molybdenum target parameters for transmission X-ray tube: A Geant4 simulation study", *Pramana-Journal of Physics*, Vol. 92, pp. 54, 2019.
<https://doi.org/10.1007/s12043-019-1718-2>
- [20] X. Yu, S. Zhang, I. S. Egorov, J. Zhao, C. Xiong, S. Yan, C. Tan, G. E. Remnev, X. Le, "Optimization of Transmission X-ray Target for Intense Pulsed Electron Beam Accelerators", *Applied Science*, Vol. 12, No. 9, pp. 4327, 2022.
<https://doi.org/10.3390/app12094327>
- [21] D. Dong, G. Liu, Z. Lu, Y. Wang, "Tungsten-rhenium-molybdenum alloy rotary anode target material for X-ray tube and preparation method thereof", *Chinese Patent*, CN106531599A, 2017.

이중 적층 구조 표적을 갖는 투과형 엑스선관의 몬테카를로 전산모사

천권수*

대구가톨릭대학교 방사선학과

요 약

엑스선형광분석은 비파괴적으로 시료에 포함된 원소와 농도를 분석할 수 있는 기법으로 과학 및 산업 분야에 광범위하게 사용되고 있다. 다양한 물질을 포함한 혼합물 또는 화합물 분석의 정밀도 향상을 위해 10 keV 근방의 저에너지와 20 keV 근방의 에너지 영역에 높은 강도 분포를 갖는 엑스선관이 요구된다. 두 에너지 영역에서 높은 강도 분포를 갖는 스펙트럼을 얻기 위하여 9.65 keV의 특성엑스선을 가지는 텅스텐과 17.48 keV의 몰리브덴 두 물질을 적층한 구조의 표적을 갖는 투과형 엑스선관을 몬테카를로 전산모사를 통해 스펙트럼을 분석하였다. W-Mo 구조의 표적을 통해 10 keV와 20 keV 근방의 강한 강도를 갖는 특성엑스선을 얻었다. 또한 4 μm 두께의 Mo-W multilayers 구조의 표적을 통해 최적의 강도 분포를 갖는 스펙트럼을 얻을 수 있음을 확인하였다. 다양한 표적 물질을 선택 조합하고 두께 최적화를 통해 원하는 에너지 대역에서 높은 강도 분포를 갖는 스펙트럼을 얻는 것이 가능하다.

중심단어: 엑스선형광분석, 투과형 엑스선관, 이중 구조 표적, 엑스선 스펙트럼

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(단독저자)	천권수	대구가톨릭대학교 방사선학과	교수