

Acquisition of Monochromatic X-ray using Graded Multilayer Mirror

Cheolwoo Ryu*, Byoungjung Choi*, Hyunhwa Son*, Youngman Kwon*, Byoungwook Kim*, Youngju Kim*,
Kwonsu Chon**

Radiation Imaging Technology Center of Jeonbuk TECHNOPARK*, Department of Radiological Science of Daegu Catholic
University**

Graded 다층박막거울을 이용한 단색 엑스선 획득

유철우*, 최병정*, 손현화*, 권영만*, 김병욱*, 김영주*, 천권수**

전북테크노파크 방사선영상기술센터*, 대구가톨릭대학교 방사선학과**

Abstract

At a recent medical imaging technology, the major issue of X-ray diagnosis in breast cancer is the early detection of breast cancer and low patient's exposure dose. As one of studies to acquire a monochromatic X-ray, Technologies using multilayer mirror had been preceded. However, a uniform multilayer mirror that consists of uniform thin-film thickness can acquire a monochromatic X-ray only in the partial area corresponds to angle of incidence of white X-ray, so there are limits for X-ray imaging technology applications.

In this study, we designed laterally graded multilayer mirror(below GML) that reflects same monochromatic X-ray over the entire area of thin-film mirror, which have the the thickness of the linear gradient that correspond to angle of incidence of white X-ray. By using ion-beam sputtering system added the mask control system we fabricated a GML which has size of $100 \times 100 \text{mm}^2$. The GML is designed to achieve the monochromatic X-ray of 17.5keV energy and has thin-film thickness change from 4.62nm to 6.57nm(3.87nm at center). It reflects the monochromatic X-ray with reflectivity of more than 60 percent, FWHM of below 2.6keV and X-ray beam width of about 3mm. The monochromatic X-ray corresponded to 17.5keV using GML would have wide application in development of mammography system with high contrast and low dose.

Keyword : Monochromatic X-ray, Graded multilayer mirror, Characteristic X-ray, X-ray reflectivity, X-ray monochromaticity, Ion-beam sputtering

요 약

최근 의료영상기술에서 유방암 엑스선 진단기술의 주요 이슈는 정확한 조기암 진단과 환자의 피폭선량의 감소에 있다. 엑스선 영상대비도를 높이고 피폭선량을 줄이는 기술 중 하나로써 다층박막거울을 이용한 단색 엑스선을 획득하는 연구가 선행되어 왔다. 그러나 기존의 Uniform 다층박막거울은 거울면의 일부 반사영역에서만 원하는 파장대역의 단색 엑스선을 얻을 수 있어서 엑스선 영상기술 응용에 한계가 있다.

본 연구에서는 다층박막거울의 전 영역에 걸쳐 동일한 단색엑스선을 얻기 위해 거울에 입사하는 백색 엑스선의 입사각에 상응하는 선형적 기울기의 박막두께를 갖는 Graded 다층박막거울을 설계하였고, 기존 이온빔 스퍼터링 장치에

마스크 제어 장치를 추가 제작하여 $100 \times 100 \text{mm}^2$ 크기로 제작하였다. 제작된 Graded 다층박막거울은 17.5keV 의 단색 엑스선을 획득할 수 있도록 설계하였으며 박막두께주기는 $2.88 \text{nm} \sim 4.62 \text{nm}$ (Center 3.87nm)이다. 엑스선 반사율은 60% 이상이며, 단색 엑스선의 FWHM은 1.4keV 이하이고 엑스선 빔 폭은 3mm 정도이다. 유방촬영에 적합한 몰리브덴 특성엑스선에 해당하는 17.5keV 의 단색 엑스선을 얻음으로써 저선량·고감도 유방암 진단장치 개발에 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

중심단어: 단색 엑스선, Graded 다층박막거울, 특성엑스선, 엑스선 반사율, 엑스선 단색성, 이온빔 스퍼터링

I. INTRODUCTION

최근 의료영상기술에서 유방암 엑스선 진단기술의 주요 이슈는 정확한 조기암 진단과 환자의 피폭선량의 감소에 있다. 특히 조기암 진단에 있어 가장 어려운 분야는 유방암으로 알려져 있는데 그 이유는 유방의 조직이 밀도가 높지 않은 Soft tissue로 이루어져 있고 구조적으로 치밀하게 유선하고 겹쳐 있어 영상대비의 차이가 뚜렷하지 않기 때문이다.

일반적으로 종래의 엑스선 영상 장치는 엑스선발생 장치에서 나오는 다양한 에너지를 갖는 백색 엑스선 (polychromatic X-ray)을 사용하거나 특정 물질의 거울을 사용하여 일부 에너지를 선별하여 엑스선 영상을 획득하고 있다. 백색 엑스선의 사용은 의료영상 획득에 필요한 방사선 뿐 만 아니라 인체의 방사선 피폭에 크게 영향을 주는 낮은 에너지의 광자들과 엑스선 산란에 크게 기여하여 영상의 질(quality)을 저하시키는 높은 에너지를 갖는 광자들을 동시에 포함하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 기술 중 하나로써 모노크로메터를 이용한 단색 엑스선을 획득하는 연구가 선행되어 왔으며 이를 적용한 엑스선 영상 장치의 개발이 시도되고 있다^{[1]-[2]}.

주로 방사광가속기의 빔라인에서 사용되는 단결정 모로크로메터(Single Crystal Monochromator)는 엑스선의 회절 성질을 이용하는 엑스선 광학소자로 반사효율이 매우 낮기 때문에 실험실 규모의 엑스선발생장치에서는 단색 엑스선의 세기가 크게 떨어진다^{[3]-[4]}. 다층박막거울을 사용하면 매우 높은 효율로 단색 엑스선을 얻을 수 있는데, 다층박막거울의 각도를 조절함으로써 다양한 에너지를 선택적으로 얻을 수 있는 장점이 있다. 특히, 타깃 물질의 특성엑스선에 맞는 조건을 부과하면 높은 강도를 갖는 단색 엑스선을 얻을 수 있다. 단색 엑스선을 이용하면 엑스선 영상의 명

암도를 높여 영상의 질을 높일 수 있고, 방사선 피폭량을 현저하게 줄일 수 있다^[5-8].

그러나 기존의 Uniform 다층박막거울은 거울의 전 영역에 걸쳐 균일한 박막두께를 가지므로 백색 엑스선의 입사각에 상응하는 박막거울면의 일부 반사영역에서만 원하는 파장대역의 단색엑스선을 얻을 수 있어서 엑스선 단색성이 많이 떨어지기 때문에(수 keV) 엑스선 영상기술 응용에 한계가 있다.

본 연구에서는 유방촬영(Mammography)에 사용되는 몰리브덴 특성엑스선에 해당하는 17.5keV 의 단색 엑스선을 획득하기 위한 Graded 다층박막거울을 제작하고 그 특성을 분석한다. 먼저 다층박막거울의 전 영역에 걸쳐 동일한 단색엑스선을 얻기 위해 입사엑스선에 상응하는 선형적 기울기의 박막두께를 갖는 Graded 다층박막거울을 설계하였고, 설계값에 맞게 박막두께를 증착하기 위하여 기존 이온빔 스퍼터에 마스크 제어 시스템을 추가하여 $100 \times 100 \text{mm}^2$ 크기로 제작하였다.

Graded 다층박막거울을 이용하여 획득한 단색 엑스선의 응용은 Mammography, K-edge Imaging, Phase contrast imaging, time of flight imaging, small animal imaging, protein crystallography 등에서 현저한 개선효과가 있어서 임상에서 이용되는 시기가 도래할 것으로 예측하고 있다^{[9]-[10]}.

II. MATERIAL AND METHOD

1. Graded 다층박막거울의 설계

Graded 다층박막거울은 중원소인 텅스텐과 경원소인 탄소를 수 나노미터로 번갈아 적층되어 있는 구조로 중원소와 경원소 층을 하나의 쌍으로 단위막(bilayer)을 형성하고 총 N개의 단위막이 기판(Substrate) 위에 적층된다^[11]. 획득하고자 하는 단색 엑스선의 에

너지는 폴리브텐의 K α 특성에너지인 17.5keV를 목표로 하여 graded 다층박막거울을 설계하였다. Graded 다층박막거울 설계하기 위해서는 엑스선발생장치와 다층박막거울간의 거리(Source to Multilayer mirror Distance, SMD)와 거울의 크기가 우선적으로 고려되어야 하는데 본 연구에서 SMD는 300mm, 거울의 크기는 100×100mm²이다. 백색 엑스선의 입사각(Bragg angle)은 다층박막거울면의 앞쪽부터 뒤쪽까지 0.66°~0.47°에 해당한다(중앙에서 0.55°)[Fig. 1].

다층박막거울의 박막두께주기, 백색 엑스선 입사각, 엑스선 파장은 브래그 식(Bragg equation)^[12]으로 연결되어 있기 때문에 17.5keV의 단색 엑스선을 얻기 위하여 상기 계산된 입사각에 상응하는 박막두께 주기는 3.18nm~4.58nm으로 선형적인 기울기로 변화한다(중앙에서 3.87nm). 이때 단위막 박막두께주기의 두께비(Ratio of bottom layer thickness: γ)는 0.401이고, 계면거칠기(interfacial roughness: σ)는 0.3nm이하이며 단위막의 층수는 30층으로 설계하였다. 단위막 아래층 물질인 텅스텐의 박막두께 변화는 1.28nm~1.84nm이다[Fig. 2].

상기 백색 엑스선 입사각을 적용하여 100×100mm² 크기의 Uniform 다층박막거울과 graded 다층박막거울을 각각 설계하고 전체 거울면의 맨 앞쪽과 맨 뒤쪽을 포함한 임의의 5지점에서 이론적으로 얻을 수 있는 단색 엑스선의 스펙트럼을 시뮬레이션하여 비교해보았다. 먼저 uniform 다층박막거울에서는 반사되는 단색 엑스선이 14.25keV ~ 21.65keV로 단색성(monochromaticity)은 7.4keV FWHM을 갖는다[Fig. 3]. 반면에 graded 다층박막거울에서 얻어지는 단색 엑스선은 17.3keV~18.7keV로 FWHM이 1.4keV이하의 단색성을 나타낸다[Fig. 4].

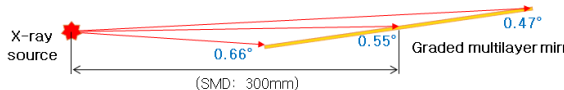


Fig. 1. Bragg angles over graded multilayer mirror.

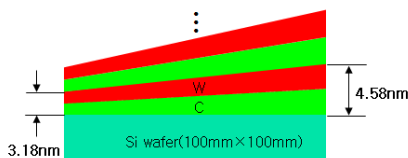


Fig. 2. Structure of graded multilayer mirror.

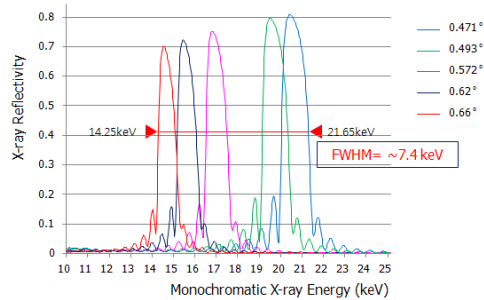


Fig. 3. Spectrum analysis of uniform multilayer mirror.

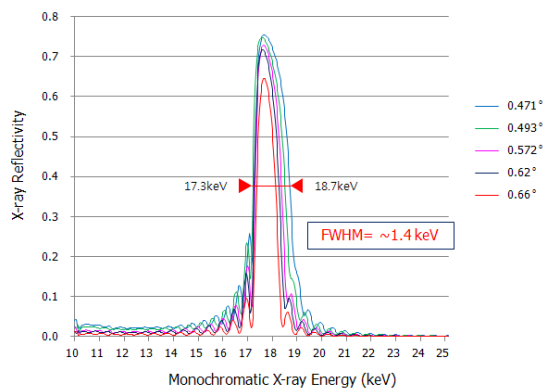


Fig. 4. Spectrum analysis of graded multilayer mirror.

2. Graded 다층박막거울의 제작

다층박막이 선형적인 두께 기울기를 갖도록 제작하기 위해서는 우선 다층박막이 증착될 기관에서의 증착율을 분석해야 한다. 이를 위해서 100×100mm²의 기관상 8지점에서 텅스텐의 단일박막과 탄소의 단일박막을 증착한 샘플을 제작한 후 XRR 분석을 통해 증착율을 얻었다. 분석된 증착율을 적용하여 Graded 다층박막거울이 전후 방향(x축 방향)으로 선형적 두께 기울기를 갖도록 하고 좌우 방향(y축)으로는 동일한 두께로 증착되도록 하기 위한 마스크 제어부를 제작하였다. 다층박막이 선형적인 기울기를 갖기 위해서는 기관의 임의의 지점에서 마스크 구멍(Mask hole)을 통해 증착이 시작되고 끝나는 시간을 계산하여 마스크 이동거리를 제어해야 한다. 결국 마스크 구멍을 통한 증착시간은 마스크 이동거리에 비례해야 함으로 $\Delta t = Px + Q$ 와 같은 1차항식으로 표현할 수 있고, 마스크 이동시간을 마스크 제어 위치에 대한 일반식으로 유

도하면 아래와 같이 정의할 수 있다. 여기서 L_0 는 마스크 구멍에서 가장 큰 폭이다[Fig. 5].

$$t(x) = \frac{q}{L_0}x + \frac{px}{2} \left(\frac{x}{L_0} - 1 \right)$$

다층박막거울을 제작하기 위하여 이온빔 스퍼터링 장비를 이용하였고 전원공급조건은 빔전류(Beam current) 49mA, 빔전압(Beam Voltage) 1500V와 가속전류(Accelerator current) 12mA, 가속전압(Accelerator Voltage) 200V를 사용하였다. 또한 상기 유도된 식을 적용하여 다층박막이 선형적 기울기를 갖도록 증착하기 위해 마스크 제어시스템을 구축하였다[Fig. 6].

Graded 다층박막거울의 제작은 기관으로는 한 면이 폴리싱된 실리콘 웨이퍼를 $100 \times 100 \text{mm}^2$ 의 크기로 다 이싱하여 사용하였고, 그 위에 증원소인 텅스텐을 먼저 증착한 후 경원소인 탄소를 증착하여 한 쌍의 단위막을 만들고 이를 총 30번 반복 적층하였다[Fig. 7].

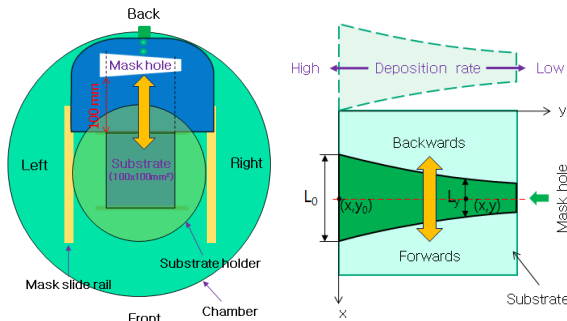


Fig. 5. Schematic diagram of mask control

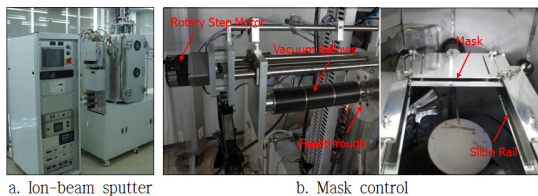


Fig. 6. Ion-beam sputter and mask control system.

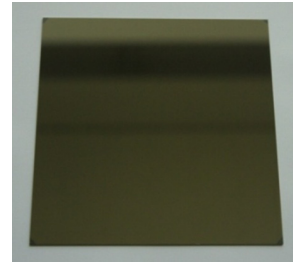


Fig. 7. Graded multilayer mirror fabricated on Si-wafer.

III. RESULT

1. Graded 다층박막거울의 스펙트럼 분석

제작된 graded 다층박막거울의 반사를 및 단색 엑스선의 에너지를 분석하기 위한 분석 시스템을 구축하였다. 엑스선 광원은 몰리브덴 타겟을 사용하는 Oxford의 Ultra-Bright microfocuss tube를 사용하였고 분광기(Spectrometer)는 Amtek의 X-123 Si-PIN, 엑스선 검출기는 Photonic science의 VHR ccd camera($12.5/\mu\text{m}$ Resolution)를 사용하였다. 다층박막거울을 고정하기 위한 하우징(Housing)을 자체 제작하였고 하우징의 앞에 1차 콜리메이터(Primary collimator)를 장착하여 불필요한 백색 엑스선을 차단하였다. 그리고 스펙트럼을 측정하는데 불필요한 전반사를 제거하기 위해 엑스선 광원 앞에 10mm 두께의 PMMA를 사용하였다. 또한 회전 및 기울기 각도와 위치 등을 정렬하기 위한 자동 정렬시스템을 구성하였다. 엑스선 광원으로부터 300mm의 거리에 다층박막거울을 배치하였고 다층박막거울과 스펙트럼 검출기간의 거리는 150mm, 광원과 엑스선영상 검출기의 거리는 780mm이다[Fig. 8].

Uniform 다층박막거울의 전면에서 반사되는 각 단색 엑스선의 에너지를 스펙트럼 분석한 결과 반사된 단색 엑스선은 12.24keV에서 22.7keV까지 다양하다. 각 단색 엑스선의 반사율은 51.4%에서 70.6%로 평균 58%이고, 다층박막거울 전면에서 얻어진 단색 엑스선의 FWHM은 대략 10.46keV 정도를 갖는다[Fig. 9]. 반면 graded 다층박막거울의 대부분의 영역에서 17.5keV의 단색 엑스선이 얻어짐을 확인하였다. 또한 얻어진 단색 엑스선의 반사율은 평균 63.3%(54.3%~68.3%)로

uniform 다층박막거울과 유사하고, 다층박막거울로 부터 얻어진 모든 단색 엑스선의 FWHM는 1.4keV 이하로 단색성이 매우 우수함을 알 수 있다[Fig. 10].

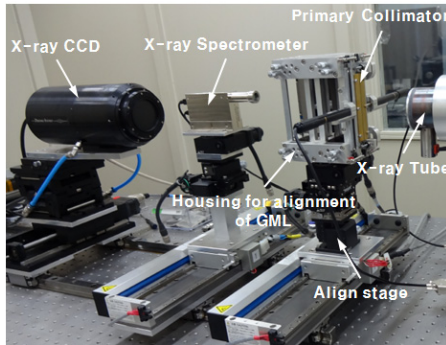


Fig. 8. Spectrum measurement system for GML.

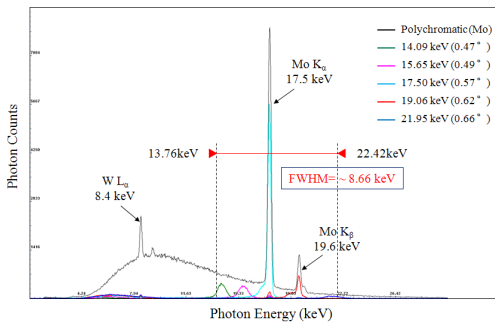


Fig. 9. Spectrum analysis for uniform multilayer mirror.

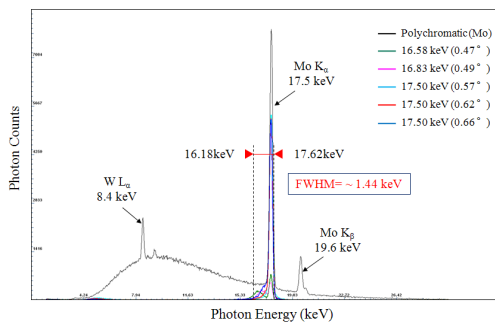


Fig. 10. Spectrum analysis for graded multilayer mirror.

2. 단색 엑스선 영상 및 빔 폭

단색 엑스선 분석시스템을 구축하고 동일한 실험조건하에 Uniform 다층박막거울과 graded 다층박막거울을 이용하여 각각 단색 엑스선을 획득하고 그 특성을

비교 분석하였다. Uniform 다층박막거울에서는 몰리브덴의 특성엑스선 K α 인 17.5keV와 K β 인 19.6keV를 포함하여 다양한 단색 엑스선(12.24keV ~ 22.7keV)이 얻어졌다. 특히 연구 목표로 했던 단색 엑스선인 17.5keV 에너지의 엑스선 빔 폭은 0.457mm(36 pixel)이고 전체 단색 엑스선량의 15%를 나타내었다[Fig. 11].

Graded 다층박막거울에서는 거울 대부분의 영역에서 몰리브덴의 특성엑스선 K α 에 해당하는 17.5keV의 단색 엑스선이 획득되었고 반사각이 큰 일부 영역에서는 16.5keV ~ 17.5keV가 얻어졌다. 여기서 17.5keV 단색 엑스선은 전체 단색 엑스선량의 75%를 차지하며, 엑스선 빔 폭은 1.905mm (150 pixel)로 uniform 다층박막거울로 얻은 빔 폭보다 4.2배 더 넓다[Fig. 12].

하지만 이론상 시뮬레이션을 통해 계산된 3mm에 크게 못 미치는 엑스선 빔 폭을 나타내고 있는데, 이는 단색 엑스선의 강도가 다층박막거울의 일부에서 급격히 감소하고 있기 때문이다. 그 원인의 한 가지로는 이 부분이 다른 반사면에서의 반사각보다 상대적으로 반사각이 크고 박막두께가 얇은 영역이기 때문에 반사율이 떨어져 단색 엑스선 강도가 감소한 것으로 판단된다. 일반적으로 반사각이 크면 반사율은 떨어지는 경향이 있다. 다른 이유로는 몰리브덴 타겟을 사용하는 엑스선 광원의 백색 엑스선 스펙트럼에서 볼 수 있듯이 특성엑스선에 비해 연속엑스선의 엑스선 강도가 매우 작기 때문이다. 여기서 효율적인 단색 엑스선을 얻기 위해서는 연속엑스선보다는 특성엑스선을 이용해야 함을 알 수 있다.

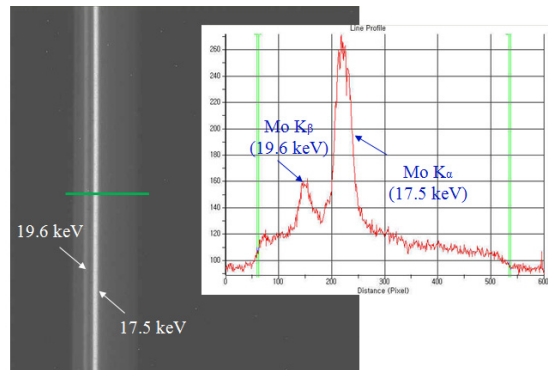


Fig. 11. Monochromatic X-ray Image for uniform multilayer mirror.

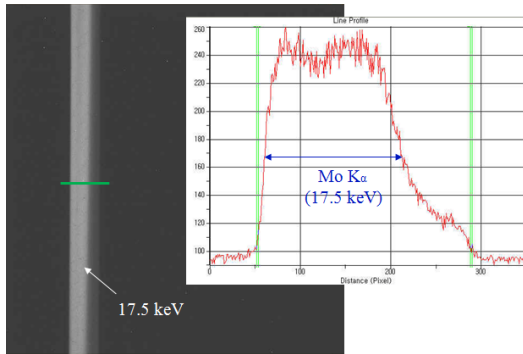


Fig. 12. Monochromatic X-ray Image for graded multilayer mirror.

IV. CONCLUSION AND DISCUSSION

1. 결론

본 연구에서는 몰리브덴의 $K\alpha$ 특성엑스선에 해당하는 에너지인 17.5keV의 단색 엑스선을 얻기 위해 다층박막의 두께가 선형적으로 변화하는 graded 다층박막거울을 제작하였다. 단위막의 박막두께주기(d-spacing)는 3.18nm에서 4.58nm이고 바닥층의 두께비는 0.401, 계면거칠기는 0.3nm 이하이며 단위막 층수는 30층이다. 제작된 Graded 다층박막거울을 이용하여 획득된 엑스선의 에너지는 거울의 전면에서 모두 몰리브덴의 특성엑스선 $K\alpha$ 인 17.5keV의 단색 엑스선이며 단색성으로 FWHM은 1.4keV 이하이다.

엑스선 검출기에서 얻어진 단색 엑스선의 빔 폭은 1.905mm로 uniform 다층박막거울에 비해 4.2배 넓은 폭을 갖으며, graded 다층박막거울의 반사율은 반사각이 가장 큰 거울면에서 55%로 가장 낮고 가장 높은 반사율 69%로 평균 65%이다.

2. 고찰

본 연구 결과로부터 uniform 다층박막거울에 비해 graded 다층박막거울을 이용하여 17.5keV 에너지대역의 단색 엑스선을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 그 단색성을 높이고 빔 폭을 더 확보할 수 있음을 확인하였다.

Graded 다층박막거울을 보다 개선하고 복수 개를 정밀하게 정렬하여 측정하고자 하는 대상물질의 엑스

선 검사에 적합한 단색 엑스선을 획득하면 엑스선 영상의 질을 높이고 방사선 피폭량을 현저하게 줄일 수 있어 의료 영상기기 뿐만 아니라 식품이물질검사나 산업용 비파괴검사 등에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Reference

- [1] Kwon Su, Chon., “Interdiffusion Region in a Tungsten-Carbon Multilayer Coating of Small d-Spacing,” Korean Physical Society 54, pp. 23-28, 2009.
- [2] Schnopper, H. W., Romaine, S., and Krol, A., “X-ray monochromator for divergent beam radiography using conventional and laser produced x-ray sources,” Proceedings of SPIE Vol. 4502, pp. 19-29, 2001.
- [3] Millar JJ, Barnea Z: A simple x-ray crystal monochromator, Journal of Physics E: Scientific Instrument, 3, pp. 570-571, 1970.
- [4] Tkachuk A, Duewer F, Cui H, Feser M, Wang S, Yun W: X-ray computed tomography in Zernike phase contrast mode at 8 keV with 50-nm resolution using Cu rotating anode X-ray source, Zeitschrift Kristallographie, 222, pp. 650-655, 2007
- [5] Carroll, F. E., “Tunable monochromatic x-rays: a new paradigm of medicine,” American Roentgen Rays Society 179, pp. 583-590, 2002.
- [6] Chon KS, Yoon KH, Monochromatic X-ray Imaging System Using a W/C Multilayer Mirror, Journal of the Korean Physical Society 2009, 55(6), pp. 2571-2577, 2009
- [7] Chon KS, Optimum Design and Tolerance Analysis of Multilayer Mirror for Obtaining Characteristic X-ray of 17.5 keV, Journal of the Korean Society of Radiology, v.3, no.4, pp. 23-28, 2009
- [8] Harms, R. J., Serlemitsos, P. J., Owens, S. M., “Thin film multilayer fan-beam x-ray monochromator,” Proceedings of SPIE Vol. 4501, pp. 193-200, 2001.
- [9] Lawaczeck, R., Rein, V., Deeg, W., “Dedicated mammography: Imaging with monochromatic X-rays and a clinical mammography unit,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 548, pp. 147-154, 2005.
- [10] Baldelli, P., Taibi, A., Tuffanelli, A., Gilardoni, M. C., and Gambaccini, M., “A prototype of a quasi-monochromatic system for mammography applications,” Phys. Med. Biol. 50 pp. 2225-2240, 2005.
- [11] Bushberg JT, Seibert JA, Leidhold Jr. EM, Boone JM : The

essential physics of medical imaging, 2nd ed., Lippincott
Williams & Wilkins, Philadelphia, 2001.

- [12] Spiller E, Soft X-Ray Optics, SPIE Optical Engineering Press,
Bellingham, 1994.