

몰리브덴(Mo) 특성방사선 획득을 위한 다층박막 거울의 최적 설계 및 공차 분석

천권수

대구가톨릭대학교 방사선학과

Optimum Design and Tolerance Analysis of Multilayer Mirror for Obtaining Characteristic X-ray of 17.5 keV

Kwonsu Chon

Department of Radiological Science, Catholic University of Daegu

요약

단색 엑스선은 적은 방사선 피폭으로 대조도가 높은 의료영상을 만들 수 있다. 엑스선 튜브와 다층박막 거울을 결합하면 높은 플루언스의 단색 엑스선을 얻을 수 있다. 몰리브덴(Mo) 타겟을 갖는 엑스선 튜브에서 Mo 특성방사선(17.5keV)을 높은 반사율로 획득하기 위한 W/C 다층박막 거울의 최적화를 수행하였다. 반사율이 최대가 되는 조건에서 두께주기와 두께비를 결정하였다. 최적 설계된 다층박막 거울에 대한 두께주기와 브래그 정렬에 대한 공차를 구하였다. 증착(deposition) 공차 0.2nm와 회전정렬 공차 $\pm 0.01^\circ$ 에서 이론 반사율의 85% 이상에 해당하는 반사율이 얻어질 수 있다. 다층박막 거울을 이용하면 높은 플루언스의 특성방사선을 얻어 낼 수 있기 때문에 의료영상 획득 장치에 많이 사용될 것이다.

Abstract

Monochromatic X-ray can make a medical image of high contrast under a low radiation dose and can be easily generated by combining an X-ray tube and a multilayer mirror. A W/C multilayer mirror was optimally designed for a characteristic X-ray generated from a X-ray tube with Mo target. The d-spacing and the thickness ratio in design parameters were determined under the maximum-reflectivity condition. Tolerances for deposition and alignment of the W/C multilayer mirror were calculated. Within a deposition tolerance of 0.2nm and a alignment tolerance of $\pm 0.01^\circ$, 85% of the theoretical peak reflectivity could be achieved. A multilayer mirror can be widely used for making medical images because of generating high fluence monochromatic X-ray.

Key Word : 엑스선, 다층박막 거울, 특성방사선, 반사율

I. 서론

윈트겐에 의해서 엑스선(X-ray)이 발견된 이래로 엑스선을 이용한 많은 응용들이 가능해 졌다. 가장 대표적인 것이 엑스선 튜브(X-ray tube)를 이용한 의료영상 획득장치이다. 엑스선 튜브는 다양한 에너지를 가지는 엑스선 광자를 발생시킨다^[1]. 즉, 다색(polychromatic X-ray) 스펙트럼이 발생된다. 다색의 스펙트럼은 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.

최근 CT(computed tomography) 및 맘모그래피(mammography)에서는 low dose에 대한 관심이 높아지고 있다^[2, 3]. Low dose를 가능하게 하는 가장 유망한 방법 중 하나는 다색의 엑스선 대신에 단색 엑스선(monochromatic X-ray)을 사용하는 것이다. 단색의 엑스선은 방사선 피폭 뿐 만 아니라 영상의 대조도(contrast) 증가에도 기여하여 영상의 질 개선에도 효과적이다^[4]. 단색 엑스선을 이용하여 영상을 획득하기 위해서는 높은 플루언스(flouence)의 엑스선 발생이 필수적으로 요구된다.

단색 엑스선은 방사광 가속기에서 쉽게 얻을 수 있다^[5]. 방사광가속기는 높은 휘도(brightness)를 가지고 있어, 짧은 시간에 단색 엑스선 영상을 획득할 수 있다. 그러나 높은 에너지(>100keV)를 가지는 단색 엑스선을 얻기 어렵고 시간 및 공간적 제한이 있기 때문에 실용 목적으로 널리 사용되기 어렵다는 단점이 있다. 실용 목적으로는 높은 출력(power)을 가지는 엑스선 튜브에 모노크로메터(monochromator)를 결합시켜 단색 엑스선을 얻는 방법이 사용되고 있다. 이 방법에서 모노크로메터는 통상한 쌍(two channel) 또는 두 쌍(four channel)의 단결정 실리콘(Si)이나 게르마늄(Ge)이 사용된다. 단결정 모노크로메터는 단색성(monochromaticity)이 매우 높은($E/\Delta E > 500$) 장점을 가지고 있으나, 실리콘이나 게르마늄 단결정의 회절효율이 매우 낮기(<1%) 때문에 높은 출력의 엑스선 튜브와 결합되더라도 높은 플루언스의 단색 엑스선을 얻기 어렵다. 단결정 모노크로메터를 사용하는 대신 높은 반사효율(>50%)을 갖는 다층박막 거울

(multilayer mirror)을 사용하면 높은 플루언스의 단색엑스선을 얻을 수 있다^[6]. 하지만 단색성이 떨어진다(~수 keV)는 단점이 있다. 다층박막 거울에 입사하는 엑스선의 각도를 조절함으로써 엑스선 튜브에서 발생하는 넓은 영역의 제동복사(bremsstrahlung)에너지를 선택적으로 얻어 낼 수 있는 장점이 있다^[6].

이 논문에서는 높은 플루언스의 단색 엑스선을 획득하기 위하여 몰리브덴(Mo) 타겟(target)에서 발생하는 다양한 에너지의 광자들 중에서 가장 높은 플럭스를 가지는 특성방사선만을 선택적으로 획득하도록 하는 다층박막 거울의 최적설계 및 공차분석에 대해 다룬다. MoK α 특성방사선(17.5keV) 자체의 단색성이 매우 높기 때문에 반사효율이 높은 하나의 다층박막 거울을 이용하더라도 높은 플루언스와 높은 단색성을 동시에 만족하는 단색엑스선을 얻을 수 있다.

II. 다층박막 거울의 최적설계

다층박막 거울은 그림1과 같이 중원소(high atomic number element)와 경원소(low atomic number element)가 번갈아 적층되어 있는 구조로 되어 있으면, 중원소와 경원소 층(layer)이 하나의 쌍(bilayers)을 이룬다^[7]. 중원소와 경원소는 경 엑스선(hard X-ray) 영역에서 높은 반사율을 나타내는 텅스텐-탄소(W/C)를 선정하였다. 다층박막 거울의 설계변수는 두께주기(d-spacing: d), 두께비(thickness ratio: χ), 계면거칠기(interfacial roughness: σ), 중원소와 경원소 막의 쌍 개수(number of bilayers: N) 이다^[8]. 두께주기, 브래그 각도(Bragg angle), 엑스선 파장은 브래그 식(Bragg equation)으로 연결되어 있다.

다층박막 거울 설계의 첫 단계는 브래그 각도를 결정하는 것이다. 시료에 최대의 특성방사선을 조사하기 위해서는 다층박막 거울의 입사 각도를 크게 할수록 유리하다. 그러나 입사각이 증가하면 다층박막 거울의 반사율이 감소하기 때문에 입사각과 반사율 사이에 조화가 필요하다. 즉, 입사각과 다층박막 거울의 반사율의 곱이 최대가 되는 입사각을 브래그 각도로 선정하면 시료에 최대의 특성방사선을 조사할 수 있다. 그림2는 브래그 각 0.55°에서 입사각과 반사율의 곱이 최대가 되는 것을 보인 것이다.

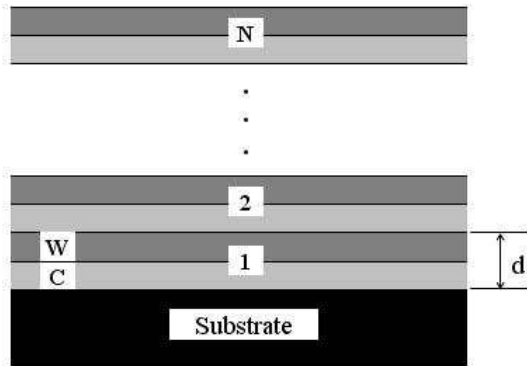


그림1. 다층박막 거울의 구조

그림2는 각 입사각에 따른 첫 번째 브래그 피크 반사율이 최대가 되도록 두께주기를 변화시키면서 구하였다.

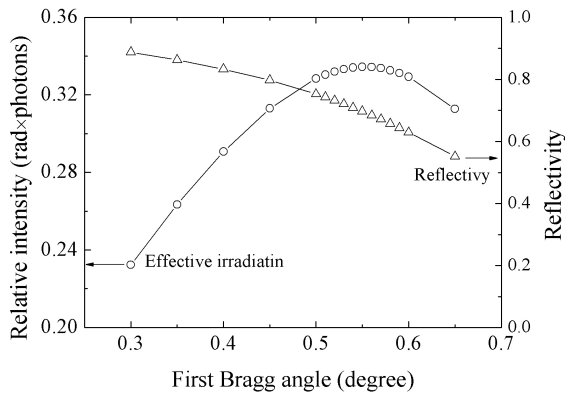


그림2. 입사각과 반사율의 곱에 의한 최적의 브래그 각도(0.55°) 결정

다층박막 거울의 반사율은 단일막 공식(single-film formula)의 연속계산에 의해 수치적으로 계산되었다⁹⁾. 다층박막의 기판은 실리콘으로 가정하였다. 표1은 다층박막 거울의 반사율 계산에 사용된 물질의 광학상수를 나타내었다.

표1. 다층박막 거울의 반사율 계산에 사용된 물질의 광학상수^[10, 11]

물질	δ^*	β^*
W	1.0463×10^{-5}	9.6294×10^{-7}
C	1.4943×10^{-6}	3.9891×10^{-10}
Si	1.5875×10^{-6}	7.9261×10^{-9}

*굴절률 $n = 1 - \delta - i\beta$

브래그 각도와 특성방사선의 파장은 두께주기의 결정을 가능하게 한다. 반사율 계산을 통해 최적의 두께주기를 결정하였다. 그림3은 엑스선 에너지 17.5keV와 0.55°의 브래그 각도에서 두께주기에 대한 반사율을 나타낸 것이다. 계산에서 두께비(중원소의 두께/두께주기)의 변화는 반사율을 민감하게 변화 시키지 않았다. 그림4에서 최적 두께비는 0.401에서 나타나며, 두께비 0.3에서 0.5사이에서 최대 반사율의 6% 정도의 반사율 변화를 보인다.

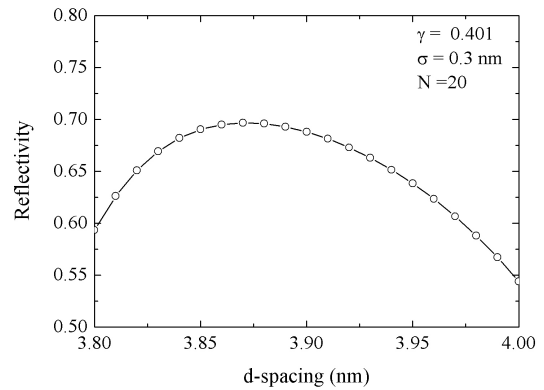


그림3. 3.87nm의 두께주기에서 반사율이 최대가 된다

이론적으로 다층박막 거울의 층수(N)가 증가 할수록 피크(peak) 반사율도 증가한다. 사입사(grazing incidence) 다층박막 거울의 반사율은 층수가 증가할수록 포화된다. 그리고 다층박막 거울의 반사율은 각 박막 사이의 계면 거칠기에 의존하며, 이상적인 계면($\sigma=0$)을 갖는 다층박막 거울을 만들기

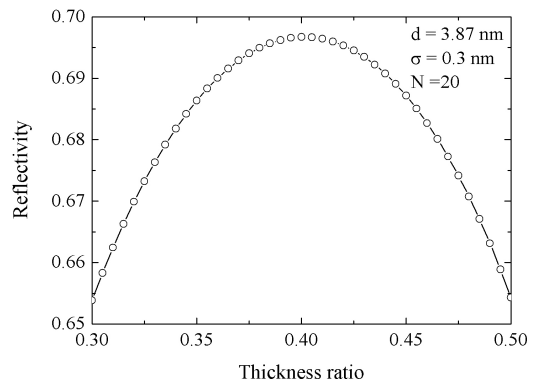


그림4. 0.401의 두께비에서 반사율이 최대가 된다.

거의 불가능하다. 즉, 중원소와 경원소 사이의 경계면에는 계면거칠기가 존재하기 때문에 반사율 계산에서 계면의 엑스선 산란을 고려해야 한다^[12]. 계면의 거칠기는 다층박막 거울의 제작 공정 및 층수에 의존하게 된다. 통상 다층박막 거울의 층수가 증가 할수록 계면의 거칠기도 함께 증가한다. 계면의 거칠기가 증가 할수록 반사율은 급격하게 감소하기 때문에 제작의 측면에서 다층박막 거울의 층수를 높게 하는 것은 항상 반사율 증가를 가져오는 것은 아니다. 따라서 설계시 다층박막 거울의 제작 능력을 고려하여 최적화 할 필요가 있다. 그림5는 여러 계면의 거칠기에 따른 첫 번째 브래그 피크의 반사율을 다층박막 거울의 층수에 따라 나타낸 것이다. 계면거칠기가 0.5nm 일 때 N=30인 다층박막 거울은 0.69의 반사율을 보인다. 반면 계면거칠기가 0.3nm 일 때 같은 반사율은 N=20인 다층박막 거울에서 얻어진다. Chon et. al.은 W/C 다층박막 거울에서 N=20까지는 다층박막 거울의 계면의 거칠기가 증가되지 않고, 계면의 거칠기가 0.3nm 이하로 유지됨을 보였다^[7]. 다층박막 거울의 제작 실험의 결과를 고려하여, 다층박막 거울의 반사율 계산에서는 계면 거칠기를 0.3nm로 하고 층수를 20으로 하였다. N=20에서의 반사율은 포화반사율 0.778의 대략 90%인 0.697이 얻어진다. 그림6은 $d=3.87\text{nm}$, $\gamma=0.401$, $\sigma=0.3\text{nm}$, $N=20$ 을

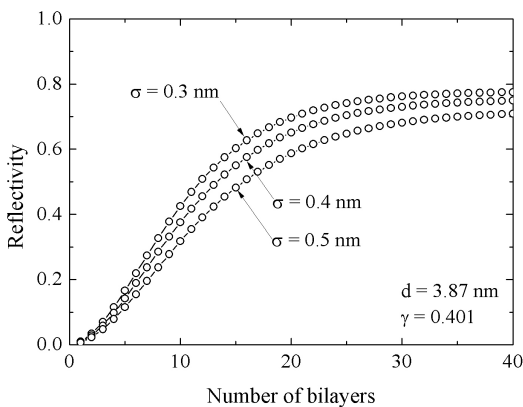


그림5. 계면거칠기에 따른 다층박막 거울의 피크 반사율과 층수와의 관계

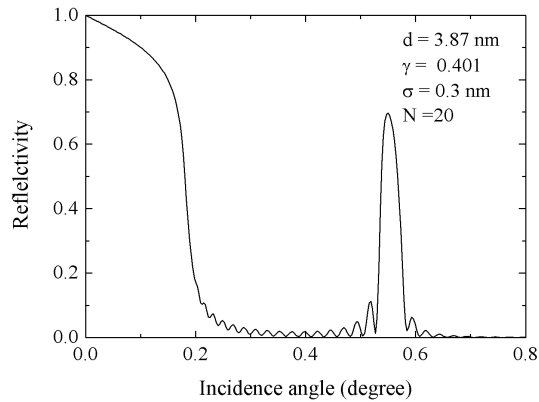


그림6. 최적 설계 된 다층박막 거울의 각도에 대한 반사율 그래프

맞는 다층박막 거울의 각도의 함수에 따른 반사율을 표시하였다. 첫 번째 브래그 각 0.55°에서 반사율 0.697이 얻어짐을 알 수 있다.

III. 다층박막 거울의 공차분석

설계된 다층박막 거울은 서브나노미터(sub-nanometer) 스케일의 두께조절이 가능한 박막증착장치(예, ion-beam sputtering system^[7])에 의해서 제작된다. 박막증착장치에 의해 텅스텐(W)과 탄소(C)의 각 층이 적층 될 때 전원의 불안전성, 가스의 변동(fluctuation) 등 외부 및 내부 조건(condition)들의 실시간 변동에 의해 박막의 두께 오차가 생기게 된다. 이 오차는 다층박막 거울의 성능(반사율) 저하를 유발하게 된다.

박막증착장치의 실시간 변동은 무작위적(random)인 성질을 가진다. 이러한 무작위적인 조건에서 제작된 다층박막 거울의 각 층도 설계 값에서 무작위로 벗어난 두께 변화를 보일 것이라는 가정을 할 수 있다. 이러한 조건에서 다층박막 거울의 무작위적인 두께주기의 변화에 대한 반사율의 저하를 계산하였다. 그림7은 최적 설계된 다층박막 거울에서 텅스텐(W)과 탄소(C) 층의 무작위적인 변화에 의한 반사율 저하를 나타낸 것이다. 증착에러가 없을 때는 이론적인 반사율을 나타내고, 증착에러가 증가할수록 반사율은 감소한다. 증착에러가 0.2nm 이하 일 때 반사율은 0.6(이론 반사율의 85%) 이상이 얻어 질 수 있다. Ion-beam sputtering system에서는 증착오차를

0.2nm 이하로 줄일 수 있어, ion-beam sputtering system을 이용하여 최적 설계된 다층박막 거울을 제작한다면 적어도 이론 반사율 값의 85% 이상을 얻을 수 있을 것이다.

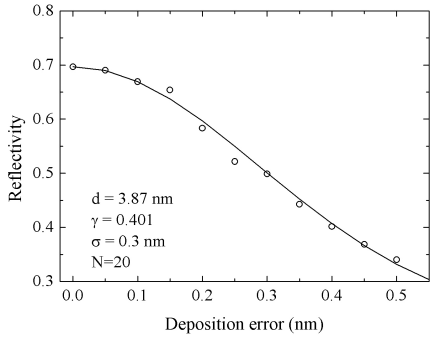


그림7. 텅스텐(W)과 탄소(C)의 무작위적인 두께 변화에 의한 반사율의 저하

제작된 다층박막 거울과 고출력 엑스선 튜브를 결합하여 17.5keV의 특성방사선을 얻기 위해서는 0.55°의 브래그 각도로 다층박막 거울을 정렬하여야 한다. 다층박막 거울은 모터로 구동되는 병렬 및 회전스테이지로 정렬된다. 회전의 정밀도 때문에 브래그 각도 정렬에 오차가 발생할 수 있어 정렬각도의 오차에 의한 반사율의 저하가 예상된다. 그림8은 최적 다층박막 거울의 정렬오차에 대한 반사율의 저하를 나타내었다. 각도 정렬은 0.55°를 기준으로 회전오차가 감소하는 것이 증가하는 것보다 반사율 저하가 더 크다는 것을 알 수 있고, 0.55° ± 0.01°의 회전 정렬에서 이론 반사율의 85% 이상이 얻어질 수 있다.

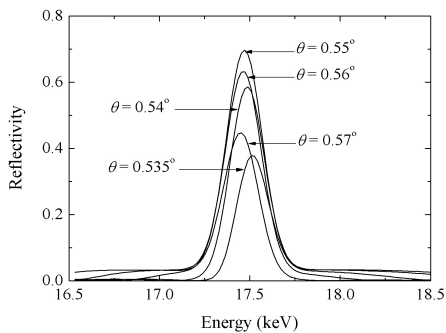


그림8. 최적 설계된 다층박막 거울의 정렬공차

IV. 고찰

다층박막 거울을 이용하면 엑스선 튜브에서 발생하는 다색의 스펙트럼에서 단색 엑스선(특성방사선)을 얻을 수 있다. 몰리브덴의 특성방사선 17.5keV에서 W/C 다층박막 거울의 반사율이 최대가 되는 다층박막 거울의 설계 변수(두께주기 및 두께비)를 최적화 하였다. 계면거칠기와 다층박막 층수는 제작이 가능한 범위에서 결정하였다. 17.5keV의 특성방사선을 얻기 위한 최적의 W/C 다층박막 거울의 설계에서 첫 번째 브래그 피크의 반사율은 0.697로 계산되었다. 최적의 두께비는 0.401로서 텅스텐(W) 및 탄소(C) 층의 두께는 각각 1.55nm와 2.32nm가 된다. 중원소의 두께가 1nm 보다 작아지면 박막 제작시 계면 거칠기가 증가하기 때문에 최적 설계 단계에서 실험적 결과를 참고해서 결정하여야 한다. 최적 설계에서는 텅스텐 층의 두께가 1.55nm이므로 W/C 다층박막 거울의 제작시 텅스텐의 적층 결정구조에 의해 계면의 거칠기가 나빠지는 것을 방지할 수 있다.

설계된 W/C 다층박막 거울에 대한 제작 공차 및 정렬 공차를 분석하였다. 텅스텐(W)과 탄소(C)의 두께가 각 설계 값에서의 벗어난 정도가 0.2nm 이하가 되면 이론 반사율의 85% 이상의 반사율을 얻을 수 있다. 브래그 각도의 정렬 오차도 ± 0.01° 범위에서 이론 반사율의 85% 이상의 반사율이 얻어질 수 있다. 최적 설계된 다층박막의 증착 공차와 회전정렬 공차는 다층박막 거울을 제작할 수 있는 박막증착장치의 선정과 정렬에 필요한 회전스테이지의 정밀도에 대한 기준을 제공할 수 있다.

단색 엑스선 광원은 의료영상의 대조도를 향상시키고 방사선 피폭을 저감할 수 있어 의료영상에 사용되는 방사선원으로서의 발전가능성이 매우 높다. 다층박막 거울을 이용하면 빔폭이 작은 슬릿빔이 만들어져 추가적인 영상처리기술이 필요하지만, 플루언스가 높은 단색 엑스선을 쉽게 획득할 수 있다. 단색 엑스선의 장점 때문에 다층박막 거울을 이용한 특성방사선(단색 엑스선) 획득에 많은 연구와 발전이 기대된다.

[참고문헌]

- [1] Bushberg JT, Seibert JA, Leidholdt Jr. EM, Boone JM, The essential physics of medical imaging, Lippincott Williams & Wilkins, 2001
- [2] Dinkel HP, Sonnenschein M, Hoppe H, Vock P, Low-dose multislice CT of the thorax in follow-up of malignant lymphoma and extrapulmonary primary tumors, European radiology 2003; 13(6): 1241-1249
- [3] Tao W, Alexander S, Martin S, Thomas M, Walter P, Daniel BK, Richard HM, Jeffrey WE, Beale OO, Loren N, Mark BW, Tomographic mammography using a limited number of low-dose cone beam projection images, Medical Physics 2003; 30(3): 365-380
- [4] Carroll FE, Tunable Monochromatic X-Rays: A New Paradigm in Medicine, American Journal of Roentgenology 2002; 179(3): 583-590
- [5] Chapman D, Thomlinson W, Johnston RE, Washburn D, Pisano E, Gmür N, Zhong N, Menk R, Arfelli F, Sayers D, Diffraction enhanced x-ray imaging, Physics in Medicine and Biology 1997; 42: 2015-2025
- [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): 2571-2577
- [7] Chon KS, Juhng SK, Yoon KH, Interdiffusion Region in a Tungsten-Carbon Multilayer Coating of Small d-spacing, Journal of the Korean Physical Society 2009; 54(1): 23-28
- [8] Chon KS, Namba Y, Yoon KH, Wolter type I x-ray focusing mirror using multilayer coatings, Applied Optics 2006; 45(19): 4609-4615
- [9] Spiller E, Soft X-ray Optics, SPIE Optical Engineering Press, 1994
- [10] Henke BL, Gullikson EM, Davis JC, X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at E=50-30,000eV, Z=1-92, Atomic Data and Nuclear Data Tables 1993; 54(2): 181-342
- [11] http://henke.lbl.gov/optical_constants/
- [12] Névot L, Croce P, Caractérisation des surfaces par réflexion rasante de rayons x application à l'étude du polissage de quelques verres silicates, Revue de Physique Appliquée 1980; 15: 761-779