

## Development and Evaluation of Parallel Beam Optic for X-ray

Byunghun Park, Hyungwook Cho, Kwonsu Chon

Department of Radiological Science, Catholic University of Daegu

### 엑스선용 평행빔 광학소자 개발 및 평가

박병훈, 조형욱, 천권수

대구가톨릭대학교 방사선학과

#### Abstract

An X-ray diffractometer which has various X-ray optics can give qualitative and quantitative information for a sample using a nondestructive analysis method. A parallel beam optic passes the parallel beam and removes divergent beam generated from an X-ray tube. The parallel beam optic used in the X-ray diffractometer was fabricated by wire cut and grading of stainless steel plates and was evaluated its performance using an X-ray imaging system. The measured parallelization of 6.6 mrad for the fabricated the parallel beam optic was a very close to the expected value of 6 mrad. An X-ray imaging technique for evaluating the parallel beam optics can estimate parallelization for each plate and can be used to other X-ray optics.

Key words: X-ray, Diffraction, X-ray Diffractometer, X-ray Optics, Parallel Beam

#### 요약

엑스선 회절분석기는 비파괴적인 방법으로 시료의 정보를 정성 및 정량적으로 분석할 수 있다. 엑스선 회절분석기에는 다양한 광학소자가 사용된다. 평행빔 광학소자는 광축에 평행한 빔을 통과시키고 발산하는 빔을 제거하는 역할을 한다. 와이어 컷 제작과 스테인리스 스틸 평판을 연마하여 평행빔 광학소자를 제작하였고 엑스선 영상장치를 이용하여 그 평행도를 평가하였다. 설계된 6 mrad과 매우 가까운 6.6 mrad의 평행도를 갖는 평행빔 광학소자를 제작하였다. 엑스선 영상을 이용하면 개개의 평판의 평행도를 예측할 수 있을 뿐만 아니라 다양한 광학소자 평가에도 사용될 수 있을 것이다.

중심단어: 엑스선, 회절, 엑스선 회절분석기, 엑스선 광학소자, 평행빔 광학소자

#### I. 서론

엑스선을 이용한 물질의 분석은 과학분야 뿐만 아니라 산업계에서도 광범위하게 사용되고 있다<sup>[1-3]</sup>. 대표적인 예로 엑스선 형광분석(X-ray fluorescence analysis)<sup>[4]</sup>과 엑스선 회절분석(X-ray diffraction analysis)<sup>[5]</sup>

이 있다. 이 두 분석법은 비파괴적인 방법으로 시료를 분석할 수 있다는 장점이 있으며, 사용도 매우 간단하다. 특히 엑스선 회절분석법은 시료의 격자상수, 결정화 정도, 결정립 크기 및 변형 등의 정보를 분석할 수 있으며<sup>[6-7]</sup>, 고체, 분말, 판상 등 다양한 시료에 대해 정성 또는 정량적으로 분석할 수 있다<sup>[8-9]</sup>.

엑스선 회절현상을 이용한 엑스선 회절분석기(X-ray diffractometer)는 독립 형태(stand alone)의 장치로 광범위하게 사용되고 있으나, 최근 실험실 전용으로 간단한 형태의 분석이 가능한 실험실 형태(table top)의 회절 분석기가 개발되고 있고 관련 광학소자들도 연구되고 있다<sup>[10-11]</sup>.

통상적으로 엑스선 회절분석기는 구리를 양극으로 하는 엑스선관을 사용한다. 구리의 특성방사선( $Cu_{K\alpha}$ )은 8047.8 eV이며 파장( $\lambda$ )은 0.154 nm이다. 격자상수가 매우 작은 물질을 분석하고자 할 때에는 몰리브덴(Mo)을 양극으로 하는 엑스선관을 사용하기도 한다. 엑스선 회절분석은 시료속에 포함된 결정 입자의 격자간격( $d$ )과 시료에 입사하는 엑스선의 파장과 각도( $\theta$ ) 사이에 브래그(Bragg) 조건( $n\lambda=2d\sin\theta$ ,  $n$ =정수)을 만족하는 엑스선만이 회절되는 현상을 이용하는 기법이다<sup>[2]</sup>. 분석의 정밀도는 엑스선 회절분석기의 기계적인 정밀도, 입사 엑스선의 파장 단일성과 평행도에 의해 결정된다. 엑스선관에서 발생하는 특성방사선만을 포물면 기판을 가지는 다층박막 거울을 이용해 선택적으로 사용함으로써 두 가지 목적을 달성할 수 있다<sup>[12]</sup>. 그러나 엑스선관의 초점이 유한하기 때문에 발생하는 입사각도의 변화에 의한 파장의 퍼짐을 줄이고, 엑스선 빔의 평행도를 높이기 위하여 이중 반사 모노크로메터 (two bounce monochromator)와 평행빔 광학소자(parallel beam optics)가 추가적으로 사용된다.

본 연구는 실험실 형태의 엑스선 회절분석기의 분석 정밀도와 관련이 있는 빔의 평행도를 높이기 위한 평행빔 광학소자의 개발과 성능평가에 대해서 다룬다. 평행빔 광학소자의 평행도 분석을 위하여 엑스선 영상장치를 이용하였다.

## II. 실험기기 및 방법

### 1. 평행빔 광학소자의 제작

회절현상을 이용하여 물질을 분석하기 위해서는 시료에 평행하게 엑스선을 입사시킬 필요가 있다. 그러나 엑스선관에서 발생하는 엑스선은 유한한 초점 크기를 가지는 콘빔(cone beam) 형태이기 때문에 평행빔

으로 변환시킬 필요가 있다. 그림1은 엑스선 회절분석기의 광학계(optical system)를 간단히 나타낸 것이다. 엑스선관에서 발생한 빔은 콜리메이터에 의해서 제한되어 포물면 기판을 가지는 다층박막 거울에 입사된다. 포물면 기판의 다층박막 거울은 구리의 특성방사선만을 선택적으로 골라내는 역할과 콜리메이터를 통과한 팬빔(fan beam)을 평행빔(parallel beam)으로 전환하는 역할을 한다. 통상 다층박막 거울은 초점에서 출발한 빔에 대해 설계되기 때문에 구리의  $K_{\alpha}$  특성방사선 8047.8 eV 이외에 상대적인 강도는 약하지만  $K_{\beta}$  특성방사선 8905.3 eV도 같이 반사된다. 그러나  $K_{\beta}$  특성방사선은 분석 소프트웨어에서 그 효과를 제거할 수 있어 크게 문제는 되지 않는다.

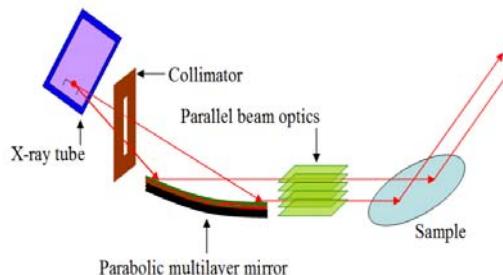


Fig. 1. Optical layout for an X-ray diffractometer

포물선의 특징에 의해 포물선의 초점에 엑스선관의 초점이 일치되도록 하면 엑스선관의 초점에서 발생한 엑스선은 포물면에 반사되면 평행빔으로 전환된다. 그러나 엑스선관의 초점이 유한하기 때문에 평행하지 않은 빔들이 상당히 발생된다. 이 빔들은 부정확한 시료의 정보를 주기 때문에 분석의 정밀도를 향상시키기 위하여 평행빔 광학소자를 이용하여 발산하는 빔들을 제거할 필요가 있다.

평행빔 광학소자는 얇은 금속판을 평행하게 규칙적으로 배열한 것이다. 광축에서 일정 각도를 벗어나는 빔들은 얇은 금속판에 의해 흡수되어 제거된다. 배열의 간격과 길이는 평행빔의 정도를 결정하는 중요한 인자가 된다. 그림2는 평행빔 광학소자의 구조 및 평행도를 표시한다. 평행도는 (식1)로 결정된다.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{d}{L}\right) \dots\dots\dots (1)$$

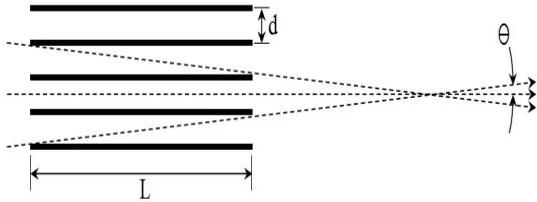
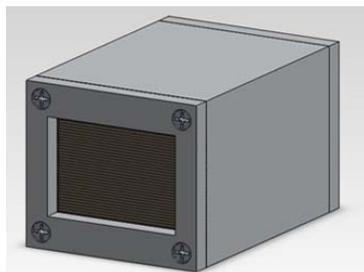
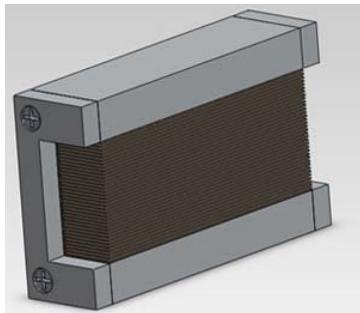


Fig. 2. Schematic view of the parallel beam optic and its parallelization



(a) 3D view



(b) Sectioning view

Fig. 3. Three dimensional drawing of the parallel beam optic

실제 개발되고 있는 실험실 형태(table top)의 회절 분석기에 장착될 평행빔 광학소자를 위해 시료홀더 중심에서 엑스선관까지의 거리가 180 mm인 경우에 대하여 평행빔 광학소자를 설계하고 제작하는 것을 고려하였다. 평판의 폭과 길이가 각각 30mm와 50 mm 이고 평판 사이의 거리가 0.3 mm가 되도록 하였다. 예상되는 이상적인 평행도는 6 mrad 이다. 그림 3은 3차원으로 설계된 평행빔 광학소자의 제작도면을 표시한 것이다. 정면 윈도우의 폭과 높이는 각각 30 mm와 20 mm가 되도록 하였다.

## 2. 평행빔 광학소자의 평가

평행빔 광학소자의 평행도를 평가하기 위하여 엑스선 영상시스템을 이용한 방법을 고려하였다. 엑스선 영상시스템은 콘빔 형태의 엑스선을 발생하고 가시광선의 정렬시스템을 가지고 있어 빔의 중심을 알 수 있다. 엑스선 광원과 검출기 중심 사이의 거리가 멀어질수록 평행도가 높은 엑스선 빔이 검출기 중앙부로 입사된다. 이 원리를 이용하면 그림4와 같이 평행빔 광학소자의 평행도를 평가할 수 있다.

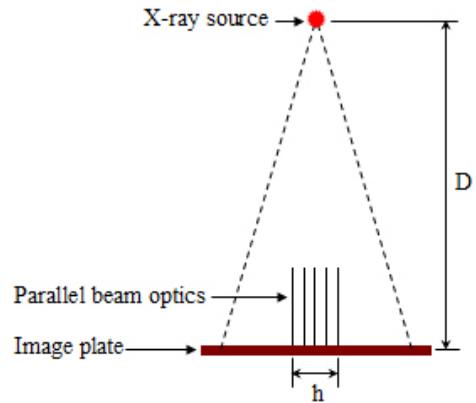


Fig. 4. Evaluation scheme for a parallel beam optic using X-ray imaging system

## III. 결과

### 1. 평행빔 광학소자의 제작

평행빔 광학소자의 0.3 mm 간격을 균일하게 제작하기 위해 텅스텐 와이어 컷(wire cut) 공정을 사용하였다. 알루미늄 기관에 평판이 삽입될 0.3 mm 간격을 2.0 mm 길이로 제작하고, 평판과 평판 사이의 거리가 0.3 mm가 되도록 하였다. 홈과 홈 사이의 제작 오차는 최대 2 μm 이하 이다. 한편 평행빔 광학소자에 사용되는 평판(plate)은 두께 0.5 mm의 스테인리스 스틸(stainless steel)을 사용하였다. 평판 자체의 평행도도 평행빔 광학소자의 성능에 영향을 미치기 때문에 양면을 0.1 mm씩 연마하여 0.3 mm가 되도록 하였다. 이 공정은

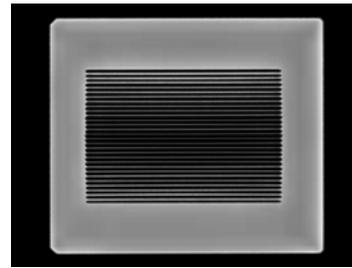
평판도의 평행도를 높이는 데 기여한다. 알루미늄 본체 내부에 스테인리스 스틸 평판을 삽입하고, 커버를 설치하고 나사를 이용하여 고정하게 하였다. 그림 5는 제작된 평행빔 광학소자를 나타내었다.



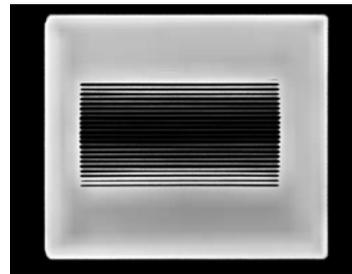
Fig. 5. Fabricated parallel beam optic for an X-ray diffractometer

## 2. 평행빔 광학소자의 평가

엑스선 광원을 검출기(image plate)로부터 충분히 먼 거리에 위치시킨 후 영상을 획득하면 평판에 해당하는 스테인리스 스틸 부분은 광자가 투과하지 못하고 슬릿 사이만 엑스선이 통과하게 되어 검출기에는 평판이 위치하는 부분은 흰색(실질적으로는 밝은 회색)으로 나타나고 슬릿과 슬릿 사이는 검게 나타난다. 엑스선 광원의 위치를 검출기 방향으로 거리를 조절하면서 영상을 검출하면 평행빔 광학소자의 중심부에서 떨어진 부분부터 엑스선 광원이 통과하지 못하게 되어 흰색으로 영상이 나타나게 된다. 그림 6은 50 kVp, 200 mA, 0.25 sec의 조건에서 획득한 평행빔 광학소자에 대한 영상이다. 그림 6 (a)와 (b)는 광원에서 검출기까지의 거리가 각각 1800 mm와 1000 mm이다.



(a) 1800 mm



(b) 1000 mm

Fig. 6. X-ray images for a parallel beam optic taken with an X-ray imaging system. The distances between an X-ray source and a detector are 1800 mm (a) and 1000 mm (b), respectively

광원과 검출기 사이의 거리가 1800 mm 인 경우에는 검출기의 중심부로 입사하는 엑스선의 평행도가 충분히 좋기 때문에 슬릿과 슬릿사이의 이미지가 선명하게 관찰된다. 반면 광원과 검출기 사이가 1000 mm에서는 평행빔 광학소자의 중심에서부터 6.6 mm 거리에 떨어진 슬릿과 슬릿 사이의 간격은 엑스선이 통과하지 못한다는 것을 알 수 있다. 이 영상을 통해 평행도는  $\tan^{-1}(6.6/1000)$ 로 6.6 mrad임을 예상할 수 있다. 이론적으로 예상한 6 mrad과 매우 근사한 값을 보인다는 것을 알 수 있다.

분석을 위하여 그림 6 (b)의 중심에서 슬릿과 직각인 직선에 대한 프로파일을 그림 7에 표시하였다. 슬릿이 규칙적으로 배열되어 있음을 알 수 있고, 중심부는 검은 회색으로 나타나 픽셀값(16비트 영상)이 작게 나타났다. 이는 검출기의 중심부 또는 평행빔 광학소자의 중심부는 빔의 평행도가 매우 높기 때문에 엑스선이 평행빔 광학소자의 슬릿을 대부분 통과했다는 의미로 해석될 수 있다. 그리고 중심부의 빔폭이 가장

자리의 빔 폭보다 작다는 것을 알 수 있다. 이는 스테인리스 스틸의 두께 0.3 mm 보다 작은 것으로 엑스선관의 유한한 초점에 의해 중심부의 빔폭이 매우 작게 나타남을 간접적으로 알 수 있다. 그림 7의 6 mm되는 지점에 위치한 스테인리스 스틸의 평판은 다른 곳에 위치한 평판보다 평판도가 떨어지기 때문에 엑스선의 차폐효과가 추가적으로 발생한 다는 것을 알 수 있다.

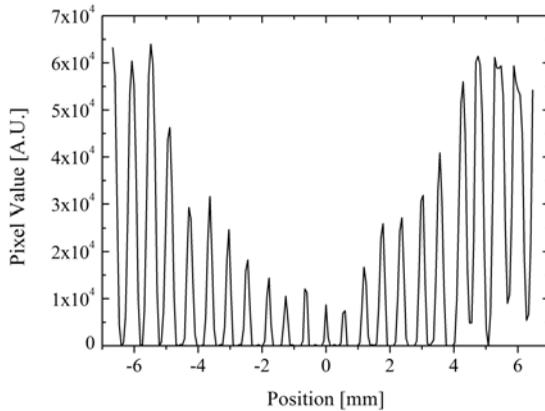


Fig. 7. line profile obtained from an X-ray image for the parallel beam optic at the distance of 1000 mm between an X-ray source and a detector

#### IV. 결론

실험실 형태(table top)로 개발되고 있는 엑스선 회절분석기에 사용되는 평행빔 광학소자를 개발하고 평가하였다. 와이어 컷(wire cut) 제작 기법과 스테인리스 스틸의 양면 연마 기법을 통해 평판의 평판도를 높임으로 이론값 6 mrad에 매우 가까운 6.6 mrad의 평행도를 갖는 엑스선 회절분석기용 평행빔 광학소자를 개발하였다.

평행빔 광학소자의 성능 분석을 위해 엑스선 영상을 이용하는 방법을 제시하였다. 기존의 회전스테이지를 이용하는 방식보다 평가가 쉬우며 개개의 슬릿을 한 번에 검사할 수 있는 장점이 있다. 엑스선 영상을 이용한 평가 기법은 엑스선 회절분석기에 사용되는 광학소자들 뿐만 아니라 다른 엑스선 광학소자의 개발 및 성능평가에도 적용이 가능할 것이다.

#### 감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 재원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 20120003841, No. 2012029974)과 지식경제부 첨단연구장비경쟁력향상사업(No. 10038749)의 지원으로 수행되었음.

#### 참고문헌

- [1] B. E. Warren, X-ray Diffraction, Dover publications, New York, 1990.
- [2] B. D. Cullity, S. R. Stock, Elements of X-ray diffraction, Prentice-Hall, New Jersey, 2001
- [3] D. M. Moore, R. C. Reynolds, Jr, X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals, Oxford University Press, 1997.
- [4] B. Beckhoff, B. Kanngießer, N. Langhoff, R. Wedell, H. Wolff (Eds.), Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis, Springer, Berlin, 2005.
- [5] U. Pietsch, V. Holy, T. Baumbach, High-Resolution X-Ray Scattering, Springer, New York, 2003
- [6] K. Barla, R. Herino, G. Bomchil, J. C. Pfister, A. Freund, "Determination of lattice parameter and elastic properties of porous silicon by X-ray diffraction", Journal of Crystal Growth, Vol. 68, No. 3, pp.727-732, 1984.
- [7] A. Kazimirov, J. Zegenhagen, M. Cardona, "Isotopic Mass and Lattice Constant : X-ray Standing Wave Measurements", science, Vol. 282, No. 5390, pp.930-932, 1998.
- [8] L. Lu, V. Sahajwalla, C. Kong, D. Harris, "Quantitative X-ray diffraction analysis and its application to various coals", Carbon, Vol. 39, No.12, pp.1821-1833, 2001.
- [9] L. E. Copeland, R. H. Bragg, "Quantitative X-ray diffraction analysis", Analytical Chemistry, Vol. 30, No. 2, pp.196-201, 1958.
- [10] L. D. Whittig, W. R. Allardice, A. Klute, "X-ray diffraction techniques", Methods of soil analysis, pp.331-362, 1986.
- [11] E. Spiller, Soft X-ray optics, SPIE-International Society for Optical Engineering, 1994.
- [12] J. V. Gilfrich, et al (Eds.), Advances in X-ray Analysis, Vol. 39, Springer, 1997.