

## 각도교정용 실리콘 다면체의 제작과 이를 이용한 회전엔코더의 각도교정

박진원, 엄천일\*, 엄태봉\*, 최영진, 임용석, 이영락, 최옥식  
영남대학교 물리학과  
\*한국표준과학연구원 역학연구부

### Fabrication of Silicon Angle Standard and Calibration of Rotary Encoder Using Silicon Angle Standard

J. W. Park, C. I. Eom\*, T. B. Eom\*, Y. J. Choi, Y. S. Im, Y. R. Lee and O. S. Choe  
Department of physics, Yeungnam University  
\*Division of Mechanical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science

#### 요 약

X-선을 이용한 초정밀 측정은 길이, 각도, 결정구조분석 등 많은 분야에서 응용되고 있다<sup>1,2)</sup>. 본 논문은 실리콘 결정을 이용한 초정밀 각도측정에 대한 결과이다. 실리콘 단결정 내부의 여섯개의 [220] 격자면들은 60°의 사이각(정확도  $\sim 10^{-8}$  rad)을 이루고 있으므로 육각기둥형의 다면체를 만들어 각도 표준물로 이용하였다. 이러한 각도교정용 실리콘 다면체(silicon polygon)를 사용하여 분해능이 0.36" 인 회전엔코더(rotary encoder)의 정확도를 교정하였고, 그 결과를 기존의 회전눈금원판(indexing table)을 사용하여 교정한 결과와 비교하였다.

#### Abstract

Highly pure silicon crystals with an almost perfect lattice structure constitute a powerful metrological tool. The stereographic standard projection for the (111) orientation of diamond structure found by the Laue method shows angles between net planes of 60°. This value is known to be certain to some  $10^{-8}$  rad. We have made a six-faced silicon polygon, and the (220) lattice planes of the polygon act as a reference angular standard. The information of angles between lattice planes could be taken by the x-ray diffraction. The angle of the rotary encoder have been calibrated using the silicon angle standard. The x-ray optics was double crystal arrangement.

1. 서론

정밀길이를 측정하기 위해서는 미터표준에 대하여 소급성을 가져야하기 때문에 특정한 원기가 필요하지만 각도는 원주의 일부분으로 정의되어있기 때문에 항상 재현할 수 있어 특별한 원기가 필요하지 않다. 하지만 실제 각도를 측정할 때는 정확한 기준이 되는 각도 표준기가 있으면 사용이 편리하다.

일반적으로 각도표준기는 원주를 일정 각도씩 분할하여 많은 각도를 형성할 수 있는 원주분할기준(회전엔코더, optical polygon)과 어느 특정한 각도를 갖고 있는 단일각도기준(각도 게이지블록)으로 구분할 수 있다.<sup>3)</sup> 회전엔코더와 각도 게이지블록의 각도오차를 측정하는 방법을 간략하게 살펴보면 다음과 같다.

먼저, 회전엔코더와 같이 많은 간격으로 각도 분할된 각도측정장비를 교정할 때는 회전눈금원판과 시준기(autocollimator)를 이용한다. 그림 1과 같이 회전엔코더가 부착된 회전테이블(rotary table) 위에 회전눈금원판을 올려놓고 그 위에 거울을 설치한다. 회전눈금원판과 회전엔코더의 각도값을 0°로 맞춘뒤에 시준기를 거울면에 정렬시킨다. 회전눈금원판을 시계방향으로 10° 회전시킨 뒤, 회전눈금원판은 고정시켜놓고 회전테이블을 즉, 회전엔코더를 반시계방향으로 10° 회전시킨다. 거울이 처음 정렬한 상태로 되돌아 왔으므로 시준기의 눈금값이 처음 정렬했을 때의 값과 동일해야 하지만, 회전눈금원판을 기준으로 하였을 때 회전엔코더의 각도오차 만큼 시준기의 정렬이 틀어져 있을 것이다. 따라서 시준기의 눈금값을 알면 회전엔코더의 정확

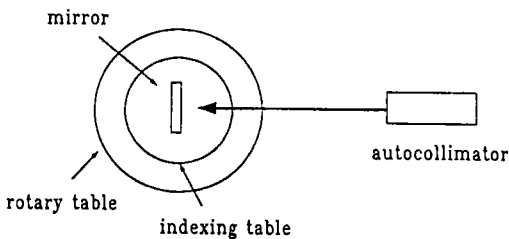


Fig. 1. Setup for calibration of a rotary encoder using an indexing table.

도를 알 수 있다. 계속하여 10° 간격으로 반복측정하여 매 위치에서의 오차를 측정하면 회전엔코더의 전체오차를 알 수 있다.

둘째로, 각도 게이지블록은 광학적으로 편평하게 연마된 두 면이 이루는 각이 일정하도록 만든 것으로 각도의 단면표준물이라 할 수 있다. 이들을 서로 조합하면 임의의 각을 만들 수 있다. 각도 게이지블록을 교정하는 방법에는 이미 교정된 블록을 사용하여 비교 교정하는 방법과 회전눈금원판을 사용하여 교정하는 방법이 있다. 여기서는 비교 교정하는 방법을 설명한다. 그림 2와 같이 회전테이블 위에 교정된 기준블록을 올려놓고 두 개의 시준기를 사용하여 기준블록의 두 면에 기준기를 각각 정렬시킨다. 이때 두 시준기 A, B에 의한 시준기 눈금값 A<sub>1</sub>, B<sub>1</sub>을 읽는다. 기준블록을 치우고 기준블록과 같은 공칭각도의 피교정블록을 올려놓고 회전테이블을 돌리면서 두 시준기의 상이 맞히도록 하여 두 시준기의 눈금값 A<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>를 읽는다. 이때 기준블록의 각도오차가 ε 이라면 피교정블록의 오차는 다음과 같다.

$$(A_2 - B_2) - (A_1 - B_1) + \epsilon \quad (1)$$

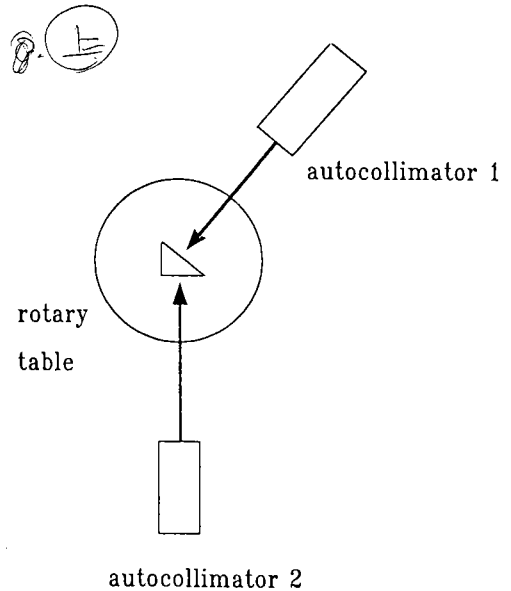


Fig. 2. Setup for calibration of an angle gage block.

위에서 예를 든 각도 기준물들은 광학적인 방법으로 측정 및 교정을 하며 그 측정 정확도는 0.1~1" 정도이다.

X-선을 이용한 각도측정은 기존의 각도측정법 보다 훨씬 더 높은 정확도를 가진다. 본 논문에서는 위에서 예를 든 기존의 각도 기준물과는 전혀 다른 새로운 각도 표준물로서의 실리콘 다면체와 X-선 회절을 이용하여 각도를 정밀측정할 수 있는 방법을 소개한다.

각도교정용 실리콘 다면체는 실리콘 단결정으로 만들어 그 격자면에 의한 X-선 회절을 이용하여 각도를 측정한다. 실리콘 결정은 (111)방향의 표준투상에서 6개의 (220)면을 가지며 격자면의 사이각이 60°를 이룬다. 실험에 사용된 실리콘 결정은 거의 완전한 격자구조를 가지고 있는데, 이러한 사이각의 정확도가  $\sim 10^{-8}$  rad 이므로<sup>4)</sup> 새로운 각도 표준물로 사용될 수 있는 것이다. 실리콘 다면체는 육각기둥의 형태이며 optical polygon과 비교할 때 외형은 비슷하지만, optical polygon은 광학적인 면을 이용하여 각도를 측정하는 반면 실리콘 다면체는 단결정의 격자면을 이용한다는 점이 서로 다르다.

## 2. 각도교정용 실리콘 다면체의 제작

원기둥 형태(orientation (111), 길이 30 cm, 직경 11 cm)인 실리콘 덩어리를 약 5 cm의 두께로 절단한 후 결정의 방향을 찾는 것이 매우 중요하다. 이 결정의 윗

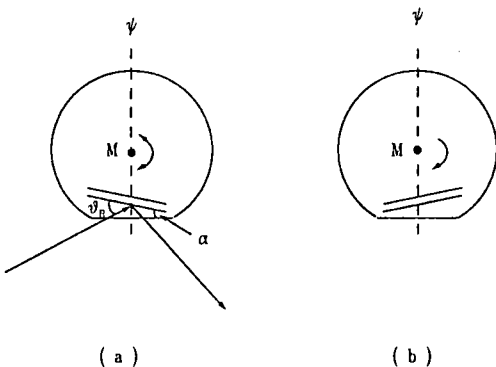


Fig. 3. Alignment of the (220) lattice plane and the crystal surface.

면은 (111)면이 되고 측면에 6개의 (220)면이 존재하므로 X-선을 이용하면 60°의 간격으로 6개의 Bragg peak를 검출할 수 있다. X-선의 입사각과 검출된 X-선의 신호로 대략 (220)면을 찾는다. 이 면을 원기둥의 측면에 표시한 뒤 원기둥의 측면이 평면이 되도록 약간 절단한다. 곡면인 원기둥의 측면을 평면으로 만들어 격자면을 찾으면 보다 쉽고 정확하게 격자면을 찾을 수 있다. (220)면을 찾은 뒤에 격자면과 절단한 결정표면이 서로 나란하도록 다시 가공한다. 아직도 결정표면이 격자면과 완전히 나란하다고는 볼 수 없으므로 다시 X-선 회절신호를 검출한 뒤 가공하는 작업을 되풀이한다. 격자면과 결정표면이 나란하게 되었다면 이 절단된 결정표면을 기준으로 삼아 기하학적인 육각형의 형태로 가공한다.

격자면을 결정표면과 나란하게 만드는 방법을 간략하게 기술해 보면 다음과 같다. 그림 3(a)와 같이 원기둥형의 결정에서 격자면과 절단된 결정표면이 서로  $\alpha$ 만큼 기울어져 있을 때, 먼저 회절곡선의 봉우리 위치를 회전엔코더의 눈금값으로 측정한다. 그림 3(b)는 결정을  $\psi$ 축으로 180° 회전시킨 상태이다. 이 상태에서 X-선을 입사시키면 Bragg 회절이 일어나지 않는다. M을 축으로하여 결정을 시계방향으로  $2\alpha$ 만큼 회전시켜야만 Bragg 회절이 일어난다. 이 회전각도  $2\alpha$ 의 값을 측정하므로써 결정표면과 격자면이 어긋나 있는 각도  $\alpha$ 를 알 수 있다.

이와 같은 과정을 통하여 각도표준물로 사용될 결정의 표면과 격자면이 수" 이내로 평행하도록 가공한다. 가공이 끝난 결정에 묻어 있는 불순물(주로 집착제)은 황산에 담궈 제거하고, 가공으로 인한 표면의 결함은 식각(etching)을 시켜 제거하였다. 식각용액은 HNO<sub>3</sub>(65%)와 HF(48%)의 부피비가 19:1이 되도록 만들어 주위 온도 20°C에서 사용하였다.

## 3. 실험방법

X-선의 단색성을 향상시켜 검출되는 회절곡선의 선폭을 줄이기 위해서 이중결정법을 사용하였다.<sup>5)</sup> 첫 번째 결정(기준결정)과 실리콘 다면체로부터의 (440)

회절을 사용하였고, 각각의 결정을 두 축주위로 기울이고 회전시킬 수 있도록 두 개의 경사대를 하나의 회전대 위에 부착시켰다. X-선 선속은 길이 200 mm 직경 18 mm의 원통형 조준기(collimator) 끝에 있는 직경 1 mm의 원형구멍을 통하여 기준결정으로 입사된다. 입사하는 X-선에는 여러 파장성분들이 섞여있기 때문에 기준결정에서 회절되는 선속의 반치폭(FWHM)은 약 0.2° 정도로 매우 넓다. 기준결정에서 회절된 선속이 각도교정용 실리콘 다면체로 입사할 때 다면체의 옆면에 수직하게 입사되도록 하였다. 그리고 실리콘 다면체를 60° 간격으로 회전시킬 때 다면체의 결정축과 다면체를 회전시키는 회전테이블의 회전축을 서로 일치시키는 것이 매우 중요하다.

본 실험에서 실리콘 다면체를 이용하여 각도를 측정할 대상물은 회전엔코더이다. 이 회전엔코더는 회전테이블 내부에 부착되어 있다. 회전엔코더의 각도오차 측정장치는 그림 4에 나타나 있으며, 측정방법은 다음과 같다.

- ① 실리콘 다면체의 어느 한 면에서 Bragg peak를 검출하고, 이때의 회전엔코더의 각도값을 0°로 둔다.
- ② 회전테이블을 180° 회전시켜 회절신호를 다시 얻은 뒤, 0° 위치에서 검출된 회절강도와 비슷하도록 결정을 기울이거나 회전시킨다.
- ③ 0°와 180° 위치에서의 회절강도가 같게된 후, 60°와 240° 위치, 120°와 300° 위치에서의 회절강도도 각각 같도록 실리콘 다면체를 정렬하면, 여섯면으로부터의 회절강도는 모두 일정하다.

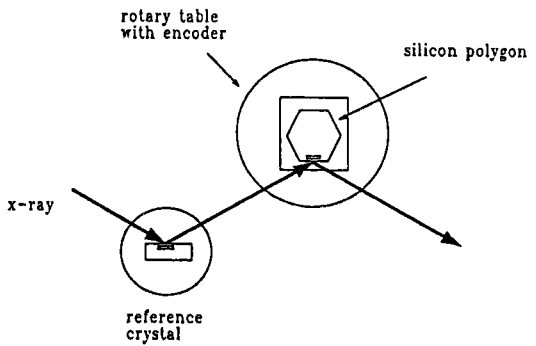


Fig. 4. Experimental setup for rotary encoder angle measurement using silicon polygon.

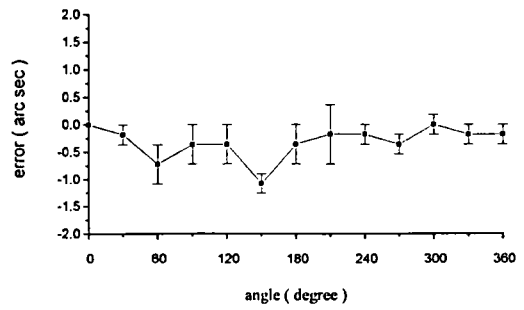


Fig. 5. Accuracy of rotary encoder measured by silicon polygon.

게 된다. 이는 곧, 결정축이 회전축과 일치하였음을 의미한다.

- ④ 60°의 각도값을 측정하기 위하여 먼저 0° 부근에서의 록킹곡선(rocking curve: 일정한 간격으로 결정을 회전시키면서 매 위치에서 회절된 X-선의 강도를 측정하여 이를 각도의 함수로 나타낸 곡선)를 구하고 그 봉우리 위치를 회전엔코더의 각도값 0°로 설정한다. 회전테이블을 60° 돌린 후 다시 록킹곡선의 봉우리 위치를 찾는다. 이 두 봉우리 위치의 간격이 각도기준으로 사용되며, 이로부터 벗어난 정도가 회전엔코더의 각도오차가 된다.
- ⑤ 회전테이블을 60°씩 회전시키면서 ④와 같은 방법으로 매 위치에서 회전엔코더의 각도오차를 측정한다.

실리콘 다면체를 사용하여 측정한 회전엔코더의 각도오차를 시준기와 회전눈금원판을 사용하여 측정한(그림 1 참조) 회전엔코더의 각도오차와 비교하였다. 측정에 사용된 회전눈금원판의 정확도는 0.1", 시준기의 반복성은 0.03"이며 회전엔코더는 Heidenhain의 ROD 800 모델로써 분해능은 0.36"이다.

#### 4. 실험결과 및 토의

그림 5는 실리콘 다면체를 사용하여 측정한 회전엔코더의 각도 정확도를, 그림 6은 회전눈금원판을 사용하여 측정한 회전엔코더의 각도 정확도를 각각 나타낸

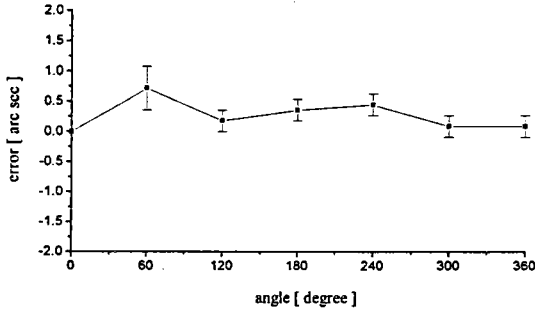


Fig. 6. Accuracy of rotary encoder measured by indexing table.

다. 실리콘 다면체로 측정된 회전엔코더의 각도 정확도와 회전눈금원판으로 측정된 각도 정확도가 모두 0.72" 로 측정되었다. 위의 두 결과는 회전엔코더의 같은 위치에서 측정된 것이 아니라 임의의 각도에서 출발하여 60° 간격으로 측정하였기 때문에 서로 절대적인 비교는 어렵지만 회전엔코더의 전체적인 정확도는 평가할 수 있었다.

### 5. 결론

본 논문에서는 기존의 각도표준물보다 높은 정확도를 가진 새로운 각도표준물을 소개하였다. 이 각도표준물은 실리콘 단결정을 사용하여 만들었으며, 여섯개의 측면이 모두 (220)면인 육각기둥의 형태로 되어있다. 이러한 실리콘 다면체를 사용한 정밀각도측정의 한 예로써 회전엔코더의 정확도를 측정하였다. 측정을 위하여 구성된 X-선 광학계는 이중결정법을 사용하였으며, 이로 인하여 록킹곡선의 선폭을 좁게 만들 수 있어 측정 정확도를 높일 수 있었다. 실리콘 다면체로 측정된 회전엔코더의 각도 정확도는 0.72" 이었으며, 이 결과를 기존의 각도교정방법으로 측정된 결과와 비교하였다.

### References

1. Appel and U. Bonse, Phys. rev. lett. 67, 1673 (1991)
2. D. Windisch and P. Becker, J. Appl. Cryst. 25,

377 (1992)

3. 정명세 등, 한국표준연구소 KSRI-ET-63 (1984)
4. P. Becker et al., Phys. rev. lett. 46, 1540 (1981)
5. P. F. Fewster, J. Appl. Cryst. 18, 334 (1985)