

## 외부 구형관절을 이용한 조정 독립형 거울조정기

길계환\* · 김창균 · 니승유 · 이재민 · 윤화식 · 윤무현 · 백성기

포항가속기연구소  
(논문접수일 : 2000년 4월 3일)

### Mirror Manipulator with Independent Adjustability Using an External Spherical Joint

K. H. Gil,\* C. G. Kim, S. Y. Rah, J. M. Lee, H. S. Youn, M. H. Yoon, and S. G. Baik

*Pohang Accelerator Laboratory, Pohang University of Science and Technology  
San 31, Hyoja-dong, Nam-gu, Pohang, Kyungbuk 790-784, Korea*

(Received April 3, 2000)

#### 요 약

조정독립성을 갖춘 새로운 형식의 조립식 거울조정기가 포항가속기연구소에서 건설중인 EPU6 빔라인용으로 개발되었다. 새로이 고안된 구형관절의 회전 중심에 거울면 중심을 위치시켜, roll 및 pitch의 회전변위가 병진변위를 인가하지 않고 서로 독립적이도록 설계하였다. 거울조정기의 roll 및 pitch 마이크로미터를 조정하면서 중력 기준형 각도기를 이용하여 임시거울의 회전각을 5  $\mu\text{rad}$ 의 정밀도로 측정하였다. 분해능의 설계치는 3.937  $\mu\text{rad}/\mu\text{m}$ 인데, 측정된 분해능은 roll 회전에 대해서 3.94  $\mu\text{rad}/\mu\text{m}$ 이었고 pitch 회전에 대해서는 3.85  $\mu\text{rad}/\mu\text{m}$ 이었다. pitch 각도에 대한 roll 회전의 영향은 -3.18%, roll 각도에 대한 pitch 회전의 영향은 -5.21%로 측정되었다. 본 거울조정기의 설계는 조정 독립성과 표준화에 중점을 두고 이루어짐으로써, 다종의 거울에 대한 거울조정기의 개발기간 단축과 설계비용 절감뿐만아니라 거울조정기의 제작, 설치 및 조정의 용이성을 도모할 수 있다.

#### Abstract

A new type of modular mirror manipulator with independent adjustability was developed for the EPU6 beamline under construction at the Pohang Accelerator Laboratory. The mirror manipulator was designed so that the angular displacements of roll and pitch rotations do not introduce translational displacements and are independent with each other by positioning the mirror center to the center of a newly devised spherical joint. Manipulating its roll and pitch micrometers, the rotation angles of a dummy mirror were measured at an accuracy of 5  $\mu\text{rad}$  using a gravity-referenced inclinometer. While the designed angular resolution was 3.937  $\mu\text{rad}/\mu\text{m}$ , measured angular resolutions were 3.94  $\mu\text{rad}/\mu\text{m}$  for roll rotation and 3.85  $\mu\text{rad}/\mu\text{m}$  for pitch rotation. The effect of roll rotation on pitch angles was measured to be -3.18% and the effect of pitch rotation on roll angles was measured to be -5.21%. As the mirror manipulator was designed with emphases on independent adjustability and standardization, it results in eases of manufacturing, installation and adjustment as well as reductions of development period and design cost of mirror manipulators for various types of mirrors.

---

\* E-mail : khgil@postech.ac.kr

## 1. 서 론

방사광 거울은 크기가 최대 1.5 m에 이르며 표면 조도는 수 Å 수준이고 형상기울기공차(*figure slope error*)는 0.5 arcsec rms 정도인 초정밀 조정을 요하는 방사광 반사체이다. 방사광 거울은 주로 빔라인 상에서 방사광을 집속시키기 위해서 사용되는데 그 초점거리는 거울로부터 수십 m에 이르기도 한다. 따라서, 거울자세의 조정범위는 적으나,  $\mu\text{m}$  수준의 선형 분해능(*linear resolution*)과  $\mu\text{rad}$  수준의 각형 분해능(*angular resolution*)의 고분해능이 요구된다. 진공자의선이나 X선은 방사광 거울에 스침각으로 입사하여야만 일정 수준의 반사율을 확보할 수 있으며, 빔의 출력을 높이고 거울 표면을 오염시키지 않기 위하여 초고진공 환경이 요구된다. 따라서, 그 조정기구도 초고진공 환경에 적합하여야 하며 거울의 하중은 물론 진공압(*vacuum force*)의 부하를 조정할 수 있어야 한다. 방사광 거울은 용도에 따라 수평집속형, 수직집속형 그리고 조향형 등으로 대별되며 취부방향으로는 거울면이 상방을 바라보는 상향식, 하방을 바라보는 하향식 그리고 측면을 바라보는 측향식 등으로 분류된다.

각국의 방사광 시설에서 그 직접적인 필요에 따라 방사광 거울조정기에 대한 연구가 추진되어 왔으며, 영국의 Oxford, 미국의 McPherson, 일본의 KOHZU, TOYAMA, 프랑스의 Jobin-Yvon 등의 기업에서도 새로운 기구와 다양한 구동방식을 채택한 개선된 성능의 거울조정기 제품을 공급해오고 있다. 특히, 독일의 PI사에서는 Hexapod 형식의 병렬형 기구를 이용한 거울조정기를 개발, 공급하고 있다 [1].

거울조정기의 각축의 조정변위가 다른 축의 변위와 독립이면, 한 조정축의 조정이 복합변위(*coupled displacement*)를 일으키지 않아 방사광에 대한 거울의 조정이 용이해진다. 따라서, 거울의 변위 조정을 독립시키려는 많은 연구가 진행되어 왔다 [2,3,4,5,6]. 특히, 복집발(*double gimbal*)을 이용한 기구가 많이 채택되어 왔는데, 복집발은 평형 상태에서 최초 회전시에도 외부의 원통형 관절(*revolute joint*)에 대해서 먼저 회전시켜야만 1회의 회전에 한해서 거울 축에 대해서 서로 독립이며, 그 이외의 경우에는 거울 축에 대해서 독립적이지 않다. 더군다나, 스침각

입사가 요구되는 방사광 거울에서 거울 장축 상의 원통형 관절은 방사광로를 막기 때문에, 복집발 기구의 원통형 관절을 거울면 상에 위치시키기가 용이하지 않다. 한편, 거울면 중심과 일치하지 않는 회전중심을 중심으로 거울을 회전시키면 거울면 중심의 병진변위를 유발시키게 된다.

다종의 거울에 대응하는 다양한 거울조정기는 장기간의 개발기간과 높은 제작단가로 이어지며 거울조정기간의 부품호환성도 기대할 수 없다. 거울의 종류에 따른 개발기간과 설계비용을 줄이기 위해서 거울조정기의 표준화에 대한 연구도 진행되어 왔다 [7].

본 연구에서는 거울 조정변위를 독립시키기 위하여, 외부 구형관절(*spherical joint*)을 고안하여 거울면 중심을 구형관절의 회전중심과 일치시킴으로써, 거울의 roll 및 pitch 회전이 거울면 중심의 병진변위를 인가하지 않으면서 roll 및 pitch 회전이 서로 독립적이도록 거울조정기를 설계, 제작하였다. 본 거울조정기는 자성물질 연구를 위하여 포항가속기연구소에 건설중인 EPU6 빔라인의 수직집속거울 조정용으로 설계되었으나, 표준형으로 설계함으로써 수평집속거울과 수직재집속거울의 조정기로도 적용 가능하도록 하였다. 본 논문에서는 수직집속 거울 조정기의 기구 상세와 설계 과정 그리고 그 실험 결과에 대해서 기술한다.

## 2. 기구 설명

본 연구에서는 다음의 설계개념에 준하여 5 자유도 조립식 거울조정기를 설계하였다.

- 1) x, y, z, roll 그리고 pitch의 5 자유도 변위를 조정 가능토록 하고, 추후 yaw 조정기를 단순 추가함으로써 수평집속거울과 수직재집속거울의 조정기로 확장 가능토록 한다.
- 2) 회전축이 거울면 중심을 지나도록 설계하여 회전변위의 조정이 병진변위를 인가하지 않도록 하고, 변위의 조정방향이 서로 직교하게 함으로써 복합변위를 최소화한다.
- 3) 선형 조정범위와 각형 조정범위는 각각  $\pm 15 \text{ mm}$ ,  $\pm 2.5^\circ$ 로 하고, 선형 분해능과 각형 분해능은 각

- 각  $5 \mu\text{m}$ 와  $5 \mu\text{rad}$ 을 만족하도록 한다.
- 4) 수동 조정을 기본으로 하되, 모터 구동과 압전 구동으로 확장할 수 있도록 한다.
- 5) 모든 조정기구의 작동이 진공 외부에서 행해지도록 하고, 진공을 저해할 부품이 진공용기 내부에 포함되지 않도록 한다.
- 6) 거울의 냉각방식은 직접냉각 방식을 채택하고 그 냉각수관은 진공과 접하지 않도록 한다.

Fig. 1에 수직집속거울 조정기의 전체 조립도가 나타나 있다. 거울용기의 중앙에 거울이 수평에 대해서  $1.5^\circ$  기울어져 하향식으로 설치되어 있다. 빔은 Fig. 1의 좌측 광로플랜지를 통하여 수평으로 들어와서 수직집속거울 면에 입사하고, 수평에 대해서  $3^\circ$  아래 방향으로 반사하여 우측 광로플랜지로 나간다. 이때, 수직집속거울이 곡률을 가지고 있어

빔은 3 m 후방의 입구슬림장치(entrance slit)에 수직적으로 집속된다. 거울용기 덮개(mirror chamber cover) 상부에 조정기 조립체가 위치하고, 거울용기는 지지대 상부의 x-z 테이블에 의해서 지지되며, 거울용기 하부에는  $360 \text{ l/sec}$ 의 이온펌프를 설치하였다. 본 연구의 거울조정기에서는 주요 구동기로서  $1 \mu\text{m}$  분해능의 마이크로미터를 채용하였다.

거울 지지는 상부지지 방식을 채택하여 안정성을 도모하였다. 거울의 하부지지 방식을 채택할 경우, 거울의 중량을 벨로우즈의 진공압으로 상쇄시킬 수 있어 구동토크 측면에서 유리하나, 조정기 조립과 시험의 용이성 그리고 외관을 고려하여 상부지지 방식을 채택하였다. 거울의 냉각수관은 벨로우즈를 통하여 외부로 인출함으로써 냉각수관으로부터의 누출사고가 진공에 직접적으로 영향을 주지 않도록 하였다.

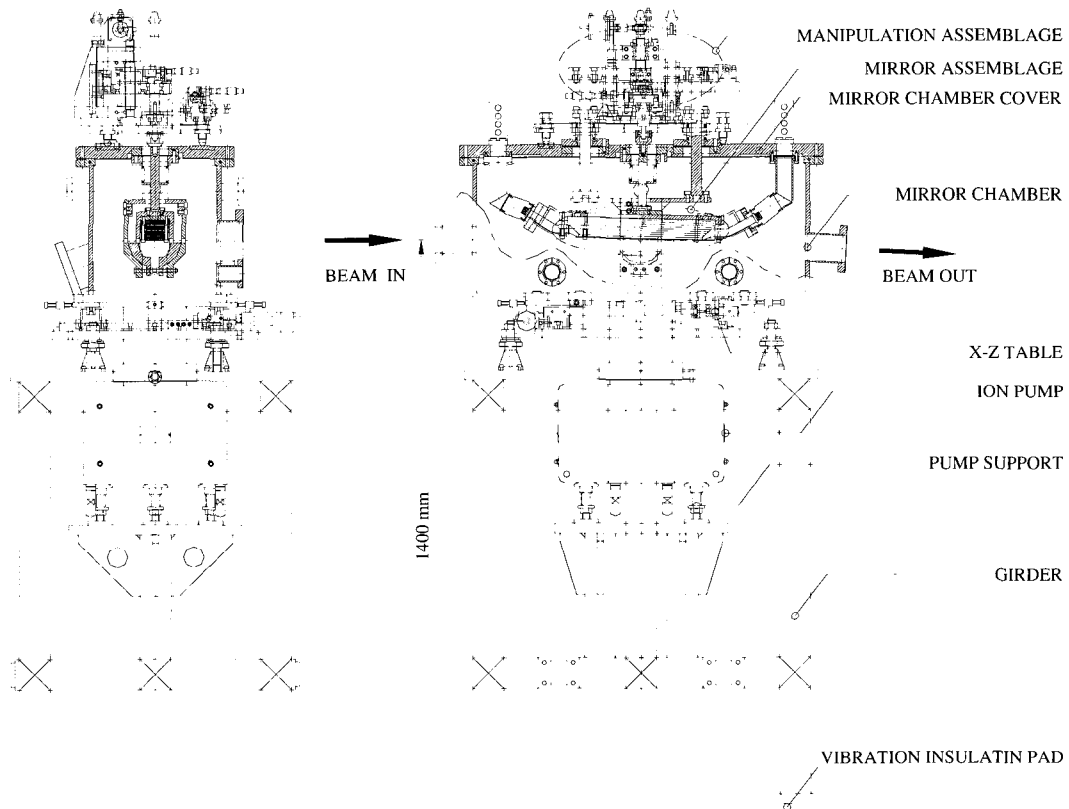


Fig. 1 Vertical focusing mirror manipulator.

평면상에서는 거울의 이상적인 자세에 평행하게 거울용기를 정렬시켰으며, 측면상에서는 거울용기를 수직 하방에 정렬시켰다. 거울용기의 광로플랜지는 이상적인 빔 방향에 정렬시켰으며, EPU6 빔라인 상에서 빔 폭이 가장 큰, 수평집속거울의 입구 영역에서 빔의 크기가 수평, 수직으로 모두 10 mm 수준 이하이므로 외경 4.5"의 나이프에지 플랜지를 광로플랜지로 사용하였다. 거울 냉각장치를 포함한 모든 조정기 조립체를 거울용기 덮개에 설치토록 설계함으로써, 거울용기 덮개 조립체를 완전히 조립한 후 거울용기 상부에 안착함으로써, 거울 및 거울 조정장치의 설치를 마칠 수 있도록 하였다.

x-z 테이블 하판은 4 개의 잭에 의해서 지지되는데 잭과 하판 사이에는 황동 재질의 구형 미끄럼판이 있어 하판의 굽힘모멘트가 잭에 전달되지 않도록 한다. M20×2.5의 스테인레스스틸 볼트로 구성된 4 개의 잭은 x-z 테이블 하판의 평면을 평면도 0.1 mm로 조정하는 역할을 수행한다. x-z 테이블은 거울용기의 넓은 영역을 지지하면서도 직교하는 두 방향의 선형운동 안내면(linear motion guide)이 필요하므로, THK사의 교차 직선운동 안내면(cross LM guide)인 CSR 20S를 채택하여 x-z 테이블의 높이를 줄여 안정성을 높였다. x-z 테이블은 x와 z 방향으로 ±15 mm의 병진변위가 가능하며, 그 구동기로는 1 μm 분해능의 마이크로미터를 채용하였다. x와 z 방향으로의 보통조정(coarse adjustment)과 정밀조정(fine adjustment)은 x-z 테이블만으로 수행되며, x-z 테이블이 거울용기 전체를 구동시킴으로써 거울만을 구동시키는 거울조정기에서 벨로우즈가 커져 진공압이 증가하는 문제를 피할 수 있고, 정치(alignment)용 장치가 별도로 필요치 않게 된다.

수직집속거울 조정기의 조립도와 투상도를 Fig. 2(a)와 (b)에 나타내었다. 거울용기 덮개에 위치한 설치테이블(setting table)은 기구학적 관절(kinematic joint)로 수평면을 정의하여 그 상부의 Y-잭과 roll/pitch 조정기의 변위가 수평면 상에서 이루어지도록 한다. 설치테이블은 y 변위의 보통조정에도 이용될 수 있고, 구조적으로는 조정막대(manipulating bar)를 구부러 Y-잭 등이 구형관절의 직방 상부에 근접하여 설치될 수 있게 하는 공간을 조성한다. 설치테이블의 기구학적 관절은 3 개의, 종단이 구형인 M20×1.0

볼트로 구성되어 있으며, 각각 구형 홈, V자형 홈 그리고 평판 위에 놓여진다.

Y-잭은 거울 조립체만을 y-축으로 구동시키는 기능을 수행하며 설치테이블 위에 설치된다. Y-잭의 볼나사는 직경 25 mm, 피치 5 mm로서 거울면 중심으로부터 거울용기 후면 쪽으로 60 mm 떨어져서 수직 상방으로 세워져 있다. 볼나사에 의해서 구동되는 승강판(elevating plate)은 후면의 직선운동 안내면과 거울용기 중심으로부터 75 mm 좌우에 위치한 2 개의 안내봉(guide rod)에 끼워진, 내경 20 mm의 스테인레스스틸 볼부쉬(ball bush)에 의해서 인도된다. 이 안내봉 상부에는 측량봉(fiducial post)이 나사로 체결되어 있다. 이 2 개의 측량봉은 Y-잭 상면에 용접되어 있는 다른 하나의 측량봉과 함께 삼각형의 측량망을 구성한다. Y-잭의 승강판에는 두 개의 베어링이 상하에 부착되어 있고, 그 중앙에 회전자(rotator)가 위치하여 가로보(cross bar)와 연결된다. 이 가로보는 추후 yaw 조정에 이용될 예정이다. 볼나사의 상단에는 웜기어(worm gear)가 체결되어 있고 Y-잭의 상면에 설치되어 있는 스텝핑모터의 축에 체결된 웜(worm)에 의해서 구동된다. 웜과 웜기어의 회전비는 10:1이다. Y-잭 우측에 광센서를 부착하여 승강판의 상하 종단 위치를 정의하였다.

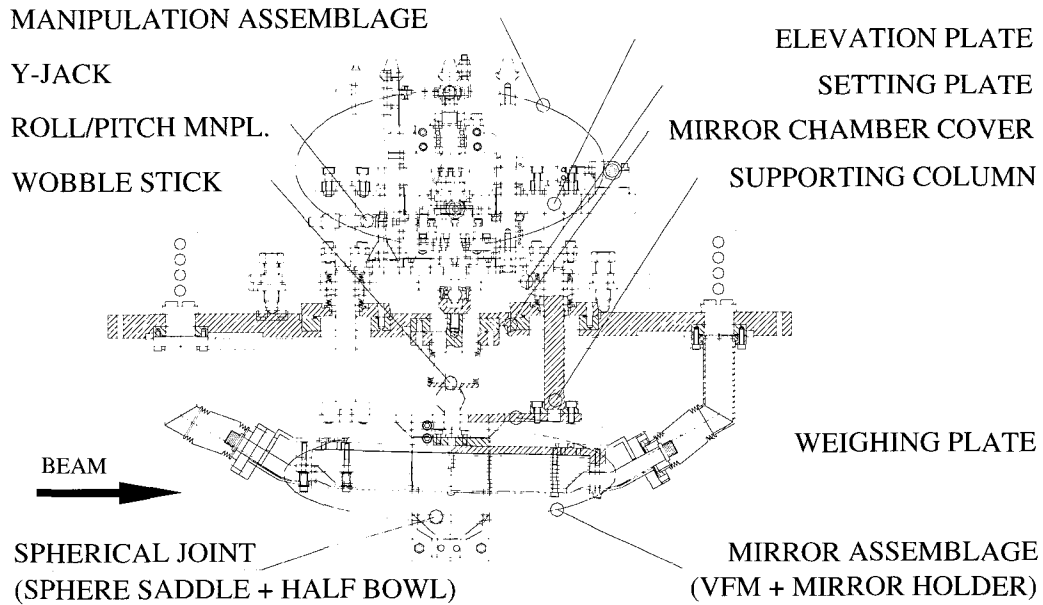
구동막대(wobble stick)는 벨로우즈를 거쳐 거울용기 내부의 구형안장(sphere saddle)에 연결되어 거울에 roll 및 pitch 회전을 인가한다. 구동막대는 그 상단에 무급유형 로드엔드 축수가 부착되어 있어 roll/pitch 조정기의 조정막대 변위에 순응하여 부드럽게 회전할 수 있다. roll/pitch 조정기의 지지판은 가로보의 양단 하부에 체결되어 있는 두 개의 지지봉(supporting column) 사이에 체결되어 있으므로, x-z 테이블로부터의 x 변위와 z 변위 그리고 Y-잭으로부터의 y 변위를 모두 수용한다. 이는 거울잡개(mirror holder)를 지지하는 중량판(weighing plate)에도 마찬가지로 적용된다.

거울은 거울잡개에 볼트 체결되어 있고, 구형안장과 구형용기(half bowl)로 이루어진 구형관절에 의해서 거울면 중심이 거울의 회전중심으로 설정된다. 거울잡개의 상부에 거울면 중심을 중심으로 하는 사분구형 철면(convex surface)이 가공된, 한 쌍의 구형안장이 볼트로 체결된다. 이 구형안장의 바깥

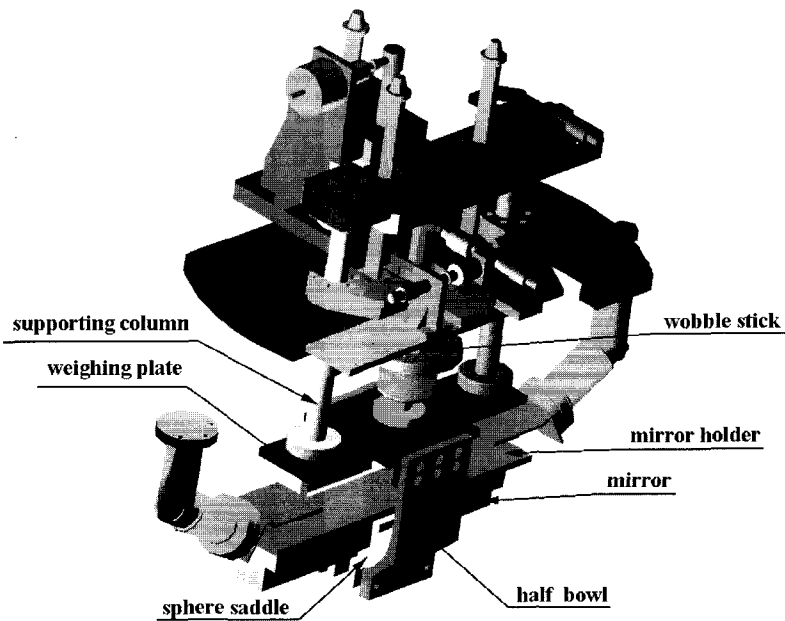
외부 구형관절을 이용한 조정 독립형 거울조정기

에는 동일 사분구형의 요면(concave surface)이 가공된, 한 쌍의 구형용기가 반구형 면상에서 접촉하고

있다. 이 구형용기는 중량판을 통해 지지봉에 연결되어 거울에 병진변위를 전달한다.



(a)



(b)

Fig. 2 (a) Assembly drawing and (b) isometric view of the VFM manipulator. The mirror chamber cover is omitted for clarity in Fig. 2(b).

구동막대를 거울잡개에 직접 연결시키지 않고 구형안장에 연결함으로써 거울잡개에 직접적으로 진공압이 가해지지 않도록 하였다. 진공압은 구형안장의 하부를 지지하는 힘과 구형안장 내에서 서로 상쇄된다. 따라서 거울잡개에는 그 자체의 하중과 거울의 하중만이 걸리게 되므로 거울잡개의 횡(sagittal) 방향에서의 변형이 작아지게 된다. 한편, 거울잡개의 거울 부착면에서는 주변부인 볼트 영역에서만 스프링을 통하여 거울과 접촉하게 되므로 거울잡개의 변형은 거울에 전달되지 않는다.

구형안장과 구형용기의 반구형 미끄럼 부위에는 마찰계수를 낮출 목적으로 은(Ag) 피막이 입혀져 있다. 구형용기의 하부는 거울, 거울잡개 그리고 구형안장의 하중과 진공압으로 인한 벌어짐을 방지하고 미끄럼 부위의 밀착성을 양호하게 하기 위하여 양단이 볼트로 체결되어 있고, 구형안장의 하부도 구형용기의 압축으로 인한 좁혀짐을 방지하기 위하여 역시 볼트로 내부 체결되어 있다. 구형관절 내에서 볼트의 위치는 거울의  $\pm 5^\circ$ 의 roll 및 pitch 회전을 방해하지 않도록 정하였다.

roll/pitch 조절기에 두 마이크로미터에 의한 x, z 방향의 병진변위를 인가함으로써, roll 및 pitch의 회전이 항상 거울면 중심에 대해서 상호 독립적으로 이루어지며, roll 및 pitch 회전의 순서와도 무관하게 된다. roll 및 pitch의 회전은 거울의 병진변위와도 독립적이다.

### 3. 설계

Y-책이 지지해야 할 하중이 80 kgf 정도이므로 볼나사의 직경  $d$ 는 25 mm로 그리고 볼나사의 피치  $p$ 는 5 mm로 결정하여 THK의 BIF 2505-5를 볼나사로 선정하였다. 볼나사의 분해능  $\delta y$ 는  $\delta y = p\theta_s/2\pi$ 이므로 Y-책의 볼나사에 필요한 스텝모터의 분해능  $N$ 은  $N = 2\pi/\theta_s = p/\delta y$ 로 구해진다. 여기서  $\theta_s$ 는 스텝모터의 스텝각이다. 수직집속거울의 y-축 분해능 요구조건에 기초하여  $\delta y = 1 \mu\text{m}$ 으로 잡으면, 모터 직결시 스텝모터의 분해능은 5000 이상이어야 한다. 본 연구에서는 Parker사의 마이크로스텝핑 모터를 선정하여  $N = 50800$  까지 가능하도록 하였으며, 방사광 거울은 저속 조정만을 요구하므로 부하 토

크만을 고려하여 모터를 선정하였다.

구형관절의 roll 회전의 각형 분해능  $\delta\phi$ 와 pitch 회전의 각형 분해능  $\delta\theta$ 는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\delta\phi = \delta x' / (R \cos \phi) \quad (1)$$

$$\delta\theta = \delta z' / (R \cos \theta) \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서  $R$ 은 구형관절의 회전중심에서 구동막대의 로드엔드 축수 중심까지의 거리이며,  $\delta x'$ 와  $\delta z'$ 는 각각 roll 마이크로미터와 pitch 마이크로미터의 선형 분해능이다.  $R = 254 \text{ mm}$ 로 설계하고 선형 분해능이  $1 \mu\text{m}$ 인 마이크로미터를 채택하면 식 (1)과 (2)로부터  $3.937 \mu\text{rad}$ 의 각형 분해능을 얻을 수 있다. 또한,  $0-2.5^\circ$  범위의 roll 및 pitch 각에 대해서 각형 분해능의 차이는 0.1% 미만임을 알 수 있다.

Fig. 3(a)에 좌표계에서 표현된 구형관절의 개요도가 나타나 있다.  $\phi_0$ 는 구형용기의 구면 하단점의 각도로서  $\phi_0 = 27.49^\circ$ 이며 미소면적(differential area)  $dA$ 는  $dA = r^2 \sin \phi d\phi d\phi$ 이다. 수직 하방으로부터의 각도  $\phi$ 의 위치에서 구형안장의 접촉 가장자리까지의 거리  $z_1$ 은  $z_1 = r(\cos^2 \phi_0 - \cos^2 \phi)^{1/2}$ 로 표현할 수 있다. Fig. 3(a)로부터  $r \sin \phi_1 = z_1$ 이므로  $z_1$ 에 대응하는 평면각  $\phi_1$ 과  $\phi$ 와의 관계는

$$\sin \phi_1 = (\cos^2 \phi_0 - \cos^2 \phi)^{1/2} \quad (3)$$

로 표현된다.

두 구형용기에 작용하는 전체 하중  $W$ 와 미소면적에 작용하는 하중강도  $w$ 는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$W/2 = \int w \cos \phi dA \quad (4)$$

Fig. 3(b)의 상부 그림과 같이 균일 하중강도로 가정하여  $w$ 를 일정하게 두면 식 (4)는

$$W = 4wr^2(AA) \quad (5)$$

가 되고, 여기서  $AA$ 는  $\int_{\phi_0}^{\pi/2} \sin \phi \cos \phi \sin^{-1}(\cos^2 \phi_0 - \cos^2 \phi)^{1/2} d\phi$ 를 대체한 것이다. 그러므로 하중강도는 다음과 같이 구해진다.

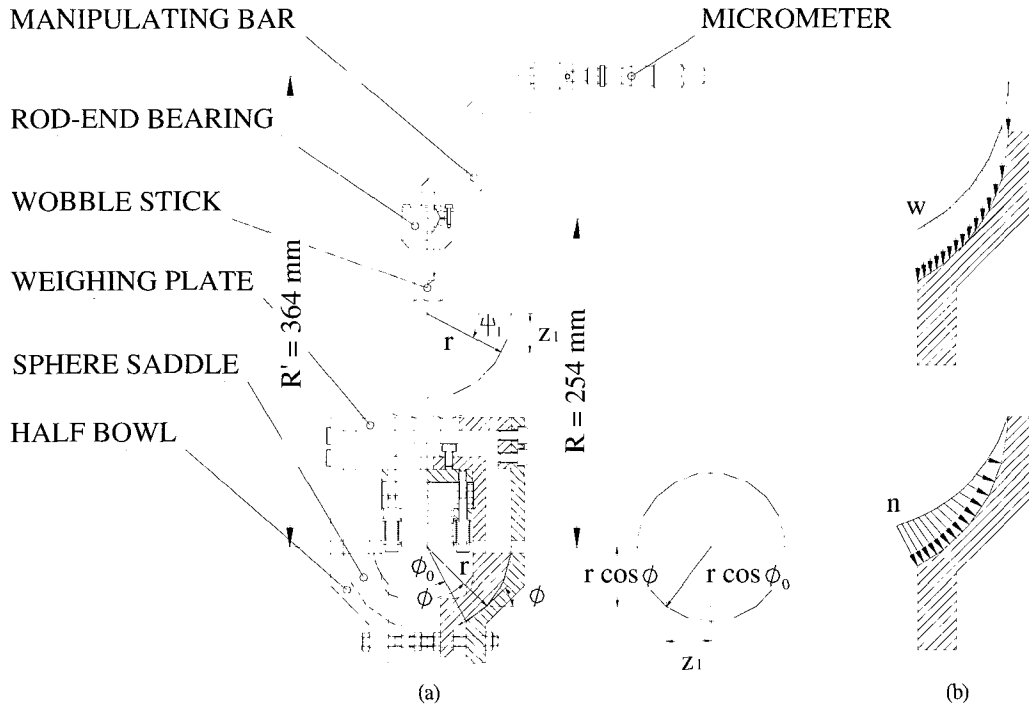


Fig. 3 (a) Schematic drawing of the spherical joint and (b) load intensity and normal load intensity on the half bowl.

$$w = W / (4r^2(AA)) \quad (6)$$

구형용기의 미소면적  $dA$ 에 가해지는 수직항력 강도  $n$ 은  $n = w \cos \phi$ 이므로 Fig. 3(b)의 하부 그림과 같이 나타나고, roll 회전에 대응하는 마찰력  $F_\phi$ 와 pitch 회전에 대응하는 마찰력  $F_\theta$ 는 각각

$$F_\phi = wf \cos \phi \cos \phi \quad (7)$$

$$F_\theta = wf \cos \phi \sin \phi \quad (8)$$

이다. 여기서  $f$ 는 구형안장과 구형용기 사이의 마찰계수인데 은 피막된 두 면 사이의 마찰계수인 0.25로 잡는다. 구형안장이 roll 및 pitch 방향으로 회전시에 각각의 마찰력에 의해 작용하는 모멘트인  $M_\phi$ 와  $M_\theta$ 는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$M_\phi / 2 = r \int F_\phi dA \quad (9)$$

$$M_\theta / 2 = r \int F_\theta dA \quad (10)$$

식 (3)을 이용하면 식 (9)와 (10)은

$$M_\phi = 4wr^3 f(BB) \quad (11)$$

$$M_\theta = 4wr^3 f(CC) \quad (12)$$

가 된다. 식 (11)과 (12)에서  $BB$ 는  $\int_{\phi_0}^{\pi/2} \sin \phi \cos \phi \sqrt{\cos^2 \phi_0 - \cos^2 \phi} d\phi$ 를,  $CC$ 는  $\int_{\phi_0}^{\pi/2} \sin \phi \cos \phi [1 - \sqrt{1 + \cos^2 \phi - \cos^2 \phi_0}] d\phi$ 를 대체한 것이다.  $w$ 를 식 (6)으로 치환하면  $M_\phi$ 와  $M_\theta$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$M_\phi = rfW(BB)/(AA) \quad (13)$$

$$M_\theta = rfW(CC)/(AA) \quad (14)$$

수치적분에 의해서  $AA=0.259$ ,  $BB=0.233$  그리고  $CC=0.093$ 을 구할 수 있으며, 구형용기에 가해지는 중량  $W$ 를 구동막대 벨로우즈에 걸리는 진공압

( $\approx 22$  kgf), 두 개의 냉각수관 벨로우즈에 의한 진공 압( $\approx 10$  kgf), 거울 및 거울잡개 등의 하중 ( $\approx 30$  kgf) 등을 고려하여 60 kgf으로 가정하고  $r=65$  mm로 설계 하면, 구형용기에 작용하는 모멘트중 큰 쪽은  $M_b$  이고  $M=0.88$  kgf · m로 계산할 수 있다. 모멘트 평형에 의해서 모멘트  $M$ 과 마이크로미터가 작용해야 할 축력  $F'$  사이에는  $M=F'R'$ 의 관계가 성립한다. 여기서 축력 반경  $R'$ 는 364 mm이므로 마이크로미터의 축력은  $F'=2.4$  kgf로 구할 수 있다. 마이크로미터를 구동하기 위한 모멘트  $M_{hand}$ 는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$M_{hand} = F' d_m \tan(\alpha + \beta)/2 \quad (15)$$

마이크로미터 나사부의 마찰을 강철끼리의 마찰로 고려하면  $\tan \alpha = p_m/\pi d_m$ 이고  $\tan \beta = f_m = 0.58$ 이므로  $M_{hand} = 0.58$  kgf · cm를 구할 수 있다. 여기서  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $f_m$ ,  $p_m$  그리고  $d_m$ 은 각각 마이크로미터 나사의 나선각, 마찰각, 마찰계수, 피치 그리고 직경이다.

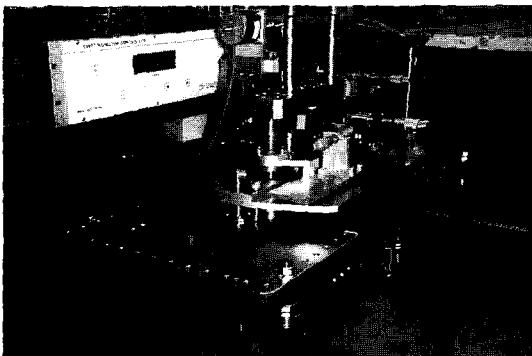
#### 4. 실험 및 고찰

본 연구에서는 Lucas사의 중력기준형(gravity-referenced) 각도기(inclinometer)인 LSOC-3을 이용하여 임시거울의 회전된 각을 대기중에서 5  $\mu$ rad의 정밀도로 측정하였다. LSOC-3의 각도 측정범위는  $\pm 3^\circ$ 이며 그 출력전압은 측정축의 수평면으로부터의 각도  $\gamma$ 와 다음의 관계를 가진다.

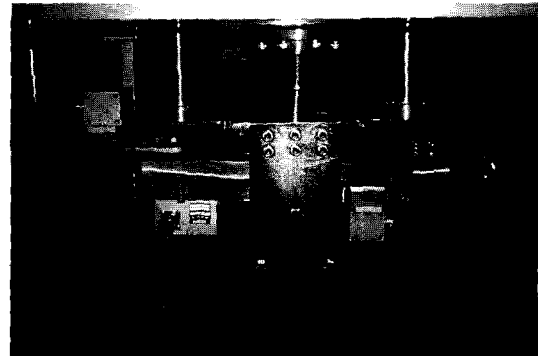
$$V = 5 \sin \gamma / \sin 3^\circ \quad (V) \quad (16)$$

Fig. 4는 제작된 수직집속거울 조정기에 각도기를 설치한 모습을 보여주고 있다. Fig. 5(a)와 (b)는 수직집속거울 조정기의 roll 및 pitch 마이크로미터를 조정하면서 임시거울에 설치된 각도기로 roll 및 pitch 회전각을 측정된 결과이다. Fig. 5(a)에서 거울의 pitch 각도는 이상적인 평형 각도인  $-1.5^\circ$ 로 잡고, 18.03-13.05 mm의 roll 마이크로미터 눈금 범위에서 거울의 roll 각을 측정하였는데, roll 각도는 이 구간에서 선형적으로 0.9998 $^\circ$ 에서  $-0.1077^\circ$ 로 변화하였다. 따라서 측정된 roll 회전의 각형 분해능은 3.94  $\mu$ rad/ $\mu$ m이다. 이는 각형 분해능의 설계치인 3.937  $\mu$ rad/ $\mu$ m에 매우 근접함을 알 수 있다. roll 구동의 측정 곡선중 마이크로미터 구동 초기의 18.03 mm 근처에서 직선이 완전한 것은 초기의 backlash에 의한 영향이다. roll 회전이 pitch 각도에 주는 영향을 측정하기 위해 일부의 roll 마이크로미터 구간에서 임시거울의 pitch 각도를 측정하여 Fig. 5(a)에 함께 도시하였다. 이 구간에서 roll 회전의 pitch 각도에 대한 영향은  $-3.18\%$ 이었다.

Fig. 5(b)에서는 거울의 roll 각도는 이상적인 평형 각도인  $0^\circ$ 로 잡고, 거울의 pitch 각을 7.45-4.6 mm의 pitch 마이크로미터 눈금 범위에서 측정하였는데, pitch 각도는 이 구간에서 선형적으로  $-1.0001^\circ$ 에서  $-1.6099^\circ$ 로 변화하였다. 3.85  $\mu$ rad/ $\mu$ m의 pitch 회전의 각형 분해능을 측정할 수 있었다. pitch 회전의 각형 분해능의 실험치도 설계치에 근접하나 roll 회



(a)



(b)

Fig. 4 Photographs of (a) the VFM manipulator supported by four temporary columns and (b) the inclinometer setup on the dummy mirror under the mirror chamber cover.



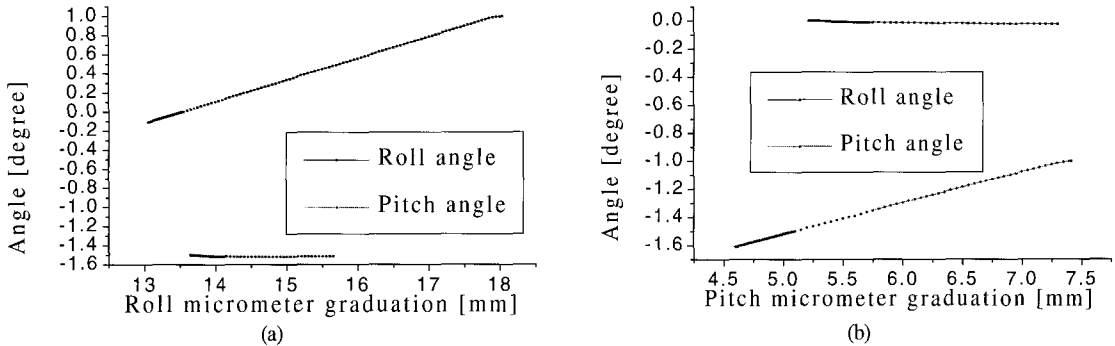


Fig. 5 Roll and pitch angles resulted from (a) roll micrometer actuation and (b) pitch micrometer actuation.

전의 각형 분해능에 비해서 다소 낮음을 알 수 있다. pitch 구동의 측정 곡선에서도 마이크로미터 구동 초기의 7.45 mm 근처에서 백래쉬에 의하여 직선이 완만한 것을 관찰할 수 있다. pitch 회전의 roll 각도에 대한 영향은 -5.21%로 측정되었다. roll 및 pitch 회전의 조정범위는  $\pm 2.5^\circ$  이상이였다.

수직집속거울 조정기의 선형 조정범위는  $\pm 15$  mm 이상이고 그 분해능은 채택된 마이크로미터의 선형 분해능과 같이  $1 \mu\text{m}$ 이었다. 구형거울인 EPU6 빔라인의 수직집속거울에서는 yaw의 조정이 필요하지 않으므로, 본 연구의 수직집속거울 조정기에는 yaw 조정 기능이 포함되어 있지 않다.

진공성능 시험에서는 가열배기(bake-out)를 수행하지 않고 520 l/sec의 터보펌프만으로  $3.0\text{E}(-8)$  Torr를 성취할 수 있었다. 가열배기를 수행하고 이온펌프를 가동하면  $5.0\text{E}(-10)$  Torr 이하의 진공도를 성취할 수 있을 것으로 기대된다.

### 5. 결 론

포항가속기연구소의 EPU6 빔라인에 설치되는 수직집속거울의 조정 분해능과 조정 범위의 요구조건에 맞춰 수직집속거울 조정기를 설계, 제작하였다. 새로운 구형관절을 고안하고 구형관절의 회전중심에 거울 중심을 위치시킴으로써, x, y 및 z의 병진 변위는 물론 거울의 roll 및 pitch의 회전변위도 다른 변위와 독립적이도록 설계하였다. 본 보고서에서는 그 조정기구의 상세와 구형관절의 설계 과정을 기술하였다.

roll 및 pitch 마이크로미터를 구동하면서 중력기 준형 각도기를 사용하여 임시거울의 각도를 측정함으로써 roll 및 pitch 회전의 독립성을 시험하였다. roll 회전의 pitch 각도에 대한 영향은 -3.18%, pitch 회전의 roll 각도에 대한 영향은 -5.21%로 측정되었다.

본 거울조정기는 초고진공용 성능을 보유하고 있으며, 조정기 설계가 구동 독립성과 표준화에 중점을 두고 이루어져 다양한 거울에 대하여 본 거울 조정기의 설계를 적용할 수 있으므로, 그 설계와 제작에 있어서 인력과 경비를 절감시킬 것으로 기대된다. 현재 yaw 조정성을 포함하는 6 자유도 거울 조정기로의 확장 방안이 강구되고 있다.

### 후 기

본 연구의 진행중 삼차원 도면화와 거울조정기의 조립 및 시험을 도와주신 포항가속기연구소의 김명진씨, 류춘길씨, 권혁채씨 그리고 서울대학교의 백 인규씨에게 감사드립니다. 아울러 포항가속기연구소 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. The M-850 Hexapod Six-Axis Parallel Kinematics Robot of Physik Instrumente GmbH & Co., Waldbronn, Germany.
2. J. P. Kirkland, and D. J. Nagel, *Nucl. Instr. and Meth.* **208**, 49 (1983).
3. J. P. Kirkland, R. A. Neiser, and W. T. Elam, *Nucl.*

- Instr. and Meth. in Phys. Res. A* **246**, 203 (1986).
4. R. Digennaro, B. Gee, J. Guigli, H. Hogrefe, and M. Howells, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A* **266**, 498 (1988).
5. M. Shleifer, F. A. Dilmanian, F. A. Staicu, and M. H. Woodle, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A* **347**, 356 (1994).
6. D. J. Wang, T. C. Tseng, S. Y. Perng, C. K. Kuan, J.-R. Chen, and C.T. Chen, *J. Synchrotron Rad.* **5**, 801 (1998).
7. L. Bittner, U. Hahn, and V. Saile, *Rev. Sci. Instrum.* **60**(7), 2038 (1989).