

스윙암 방식의 형상 측정기를 이용한 대형 반사경의 정밀가공에 관한 연구

이기암*, 김옥현#, 이응석**

Study on Fabrication of a Large Concave Mirror Surface Using a Swing-Arm Type Profilometer

Ki-Am Lee*, Ock-Hyun Kim#, Eung-Suk Lee**

ABSTRACT

Generally optical components are fabricated by grinding, lapping and polishing processes. Those processes take long time to obtain optical high surface quality. In the case of large optical components, the on-machine measurement is strongly recommended because the workpiece is fragile and difficult to set up for fabricating and measuring. This paper is concerned about a swing-arm mechanism which can be used for on-machine measurement of a surface profile with a sensing probe end-effect, and also for grinding or lapping the surface with a corresponding tool. The measuring accuracy and uncertainty using a swing arm type profilometer have been studied. The experimental results show that this method is useful specially in lapping process with the accuracy of $5\mu\text{m}$. Those inspection data are provided for correcting the residual figuring error in next processes.

Key Words : Aspherical optics(비구면광학), Lapping(랩핑), On-Machine Measurement(기기상측정), Profilometer(형상측정기), Swing-Arm(스윙암)

1. 서 론

천체망원경이나 반도체, LCD 공정 등에 사용되는 리소그래피(lithography)에는 반사경 등 많은 초정밀 대형 광학부품이 사용된다. 정밀 광학면은 보통 그라인딩(grinding), 랩핑(lapping), 폴리싱(polishing) 공정에 의해 가공되며, 매우 정밀한 형상치수와 동시에

높은 표면조도가 요구된다. 폴리싱은 매우 극소량의 가공이 이루어지므로 주로 가공면의 높은 표면조도를 얻기 위해 수행되며, 광학면의 형상 정밀도는 주로 그라인딩과 랩핑에 의해 얻는다^[1]. 국내의 정밀광학부품 가공기술은 대학 및 연구소의 실험실 수준에 있으며, 산업화 기술은 아직 매우 취약한 상황에 있다. 정밀광학기술은 미래 첨단기술의 기반기술로서 이에 대한 기술역량의 확보는 매우 중요한 과제인 것으로 생각된다.

광학렌즈나 미러(mirror)의 곡면형상은 구면과 비구면(aspherical surface)이 있다. 비구면은 구면에 비해

* 충북대학교 대학원 기계공학과
교신저자 : 충북대학교 기계공학부
E-mail : ohkim@chungbuk.ac.kr
** 충북대학교 기계공학부

가공과 측정이 어려우나, 비구면을 사용함으로써 광학계를 보다 콤팩트하게 구성할 수 있으므로 최근에는 점차 그 사용이 확대되고 있다. 비구면 가공은 보통 기준이 되는 구면가공을 수행한 후에 정밀한 수정가공을 통해 원하는 비구면을 얻는 것이 일반적이다²⁻⁴⁾.

본 연구는 스윙암을 이용한 형상 측정과 그 응용에 관한 것이다. 스윙암의 구조는 그 끝단이 구면 위를 운동하게 되어있다. 이와 같은 스윙암 끝단의 운동은 대형 광학곡면의 가공과 형상측정에 유용함을 제공한다. 본 연구에서는 스윙암의 운동에 관한 기하학적 해석과 이를 이용한 형상 측정 방법을 제시하고 있다. 본 연구내용은 주로 형상측정에 관하여 수행되었으나, 제시된 결과는 대형 광학곡면의 가공에도 유용하게 이용될 수 있다.

2. 스윙암 메카니즘

2.1 스윙암 끝단의 운동

Fig.1은 스윙암 메카니즘을 보이고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 스윙암의 회전축이 가공물(work-piece) 곡면의 곡률반경 중심점 C와 교차하도록 설치한다. 이때 C점과 스윙암 끝단 D점을 잇는 직선은 스윙암의 회전에 따라 스윙암 회전축을 중심축으로 하고 C점을 꼭지점으로 하는 원뿔면을 이루게 된다. 따라서 원뿔면의 모선인 C점과 D점의 길이는 일정하므로 D점은 C점을 중심으로 하고 직선길이 CD를 반경으로 하는 구면 위를 움직이게 된다.

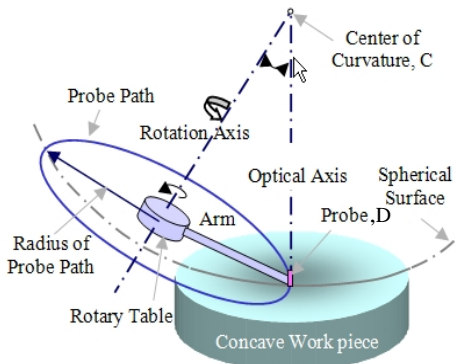


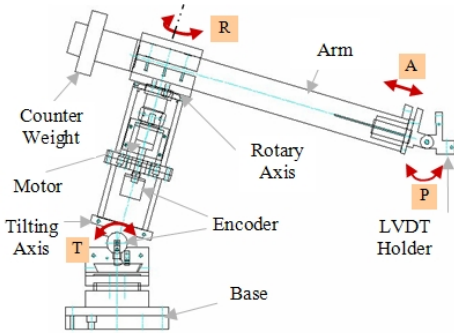
Fig. 1 A swing arm mechanism

2.2 스윙암의 응용

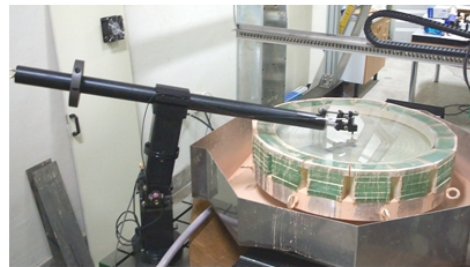
Fig.1에서 보이고 있는 바와 같이 스윙암 끝단에 접촉식 프로브⁵⁾로서 LVDT를 측정방향이 가공물의 중심축과 일치하도록 설치하고, 스윙암을 회전시키면서 LVDT로부터 길이변화를 측정하면 이 길이변화는 곧 중심을 C점으로 하고 직선길이 CD를 반경으로 하는 구면으로부터의 이탈 길이가 된다. 이와 같은 원리를 이용하여 가공물을 일정 각도씩 회전시켜 가면서 LVDT로부터 길이 신호를 측정하면 가공물 곡면의 전체 형상을 측정할 수 있게 된다.

한편 스윙암 끝단에 측정 프로브 대신에 가공공구, 즉 그라인딩휠 또는 랩핑패드를 설치하고 가공물을 한 방향으로 회전시키면서 스윙암을 왕복 운동시키면 앞에서 설명한 바와 같은 반경의 구면을 얻게 된다.

이와 같이 스윙암 끝단이 구면 위를 움직이는 원리를 이용하여 끝단에 길이 측정 센서를 설치하여 스윙암 메카니즘을 형상 측정기로서 이용할 수 있으며, 또한 끝단에 공구를 설치함으로써 스윙암을 구면가공기로서 이용할 수 있게 된다.



(a)



(b)

Fig. 2 A developed swing arm
(a) drawing (b) photograph

2.3 스윙암의 설계

Fig.2는 본 연구에서 설계 제작된 스윙암 구조물의 도면과 사진을 보이고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 구조물은 스윙암의 원리를 구현하기 위하여 스윙암 회전(R), 회전축 틸팅(T), 암 반경길이(A), 끝단 틸팅(P)의 4자유도를 갖는다.

3. 스윙암 측정기의 오차해석

앞 절에서 설명한 바와 같은 원리의 스윙암을 이용한 형상 측정을 실제로 구현할 때에는 스윙암의 설치 오차에 의해 발생하는 측정오차를 피할 수 없게 된다. 즉 측정 대상의 곡면이 완벽한 구면의 경우에도 스윙암의 설치 오차로 인해 측정결과는 곡면이 구면으로부터 이탈되어 있는 것으로 측정된다. 따라서 스윙암의 설치오차에 의한 측정오차 성분을 해석하여 실제 측정 결과로부터 설치오차에 의한 성분을 제거해 주어야 실제로 측정곡면이 갖고 있는 형상오차를 얻게 된다.

Fig.3는 P점의 좌표계 {B}에서의 위치벡터 ${}^B P$ 를 좌표계 {A}에서의 위치벡터 ${}^A P$ 로 좌표변환 하는 것을 설명하는 그림이다. 이와 같은 좌표변환식은 아래의 식(1)과 같다^[5].

$${}^A P = {}^A_B R {}^B P + {}^A P_{BOR} \quad (1)$$

이 식에서 ${}^A P_{BOR}$ 는 {B}좌표계 원점의 {A}좌표계에서의 위치벡터이고, ${}^A_B R$ 은 변환 매트릭스이다.

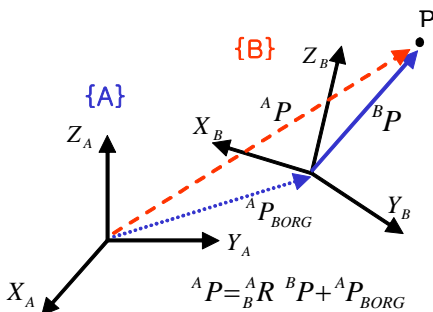


Fig. 3 Coordinate transformation

이제 Fig.4와 같이 {A}, {B}, {C}, {D} 좌표계를 각각 스윙암 기둥의 바닥점, 틸팅 힌지점, 스윙암 회전면의 중심점, 스윙암 끝점에 잡자.

스윙암의 설치 오차로서 틸팅각 θ 에 대한 오차와 롤링각 오차(아암의 X_C 축을 중심으로 하는 회전각) ϕ 를 고려하자. 이제 좌표변환을 이용하면 프로브의 아래끝 가공물과의 접촉점 P의 {A}좌표계에서의 위치는 아래의 식(2),(3)과 같이 얻는다.

$$\begin{aligned} P_x &= F_1(\theta) \cdot \cos(\alpha) + F_2(\theta) \\ P_y &= F_3(\theta, \phi) \cdot \sin(\alpha) + F_4(\theta, \phi) \cdot \cos(\alpha) + F_5(\theta, \phi) \\ P_z &= F_6(\theta, \phi) \cdot \sin(\alpha) + F_7(\theta, \phi) \cdot \cos(\alpha) + F_8(\theta, \phi) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} F_1 &= M \cdot c^2(\theta) - s(\theta) \cdot c(\theta) + L \cdot c(\theta) \\ F_2 &= -M \cdot s^2(\theta) + N \cdot s(\theta) \cdot c(\theta) + H \cdot s(\theta) \\ F_3 &= L \cdot c(\phi) - N \cdot s(\theta) \cdot c(\phi) \\ F_4 &= M \cdot c(\theta) \cdot c(\phi) + M \cdot s(\theta) \cdot c(\theta) \cdot s(\phi) \\ &\quad - N \cdot s^2(\theta) \cdot s(\phi) + L \cdot s(\theta) \cdot s(\phi) \\ F_5 &= -M \cdot s(\theta) \cdot c(\theta) \cdot s(\phi) - N \cdot c^2(\theta) \cdot s(\phi) - H \cdot c(\theta) \cdot s(\phi) \\ F_6 &= L \cdot s(\phi) - N \cdot s(\theta) \cdot s(\phi) \\ F_7 &= M \cdot c(\theta) \cdot s(\phi) - M \cdot s(\theta) \cdot c(\theta) \cdot c(\phi) \\ &\quad + N \cdot s^2(\theta) \cdot c(\phi) - L \cdot s(\theta) \cdot c(\phi) \\ F_8 &= M \cdot s(\theta) \cdot c(\theta) \cdot c(\phi) + N \cdot c^2(\theta) \cdot c(\phi) \\ &\quad + H \cdot c(\theta) \cdot c(\phi) + H_b \end{aligned} \quad (3)$$

where $c = \cos$ and $s = \sin$.

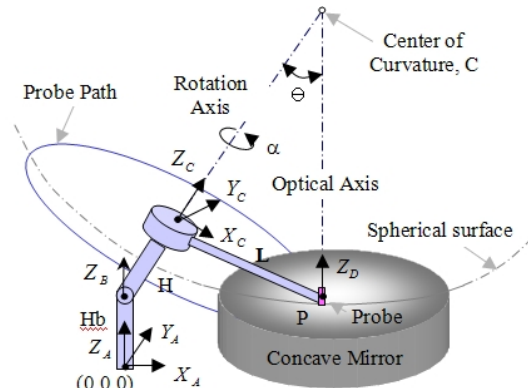
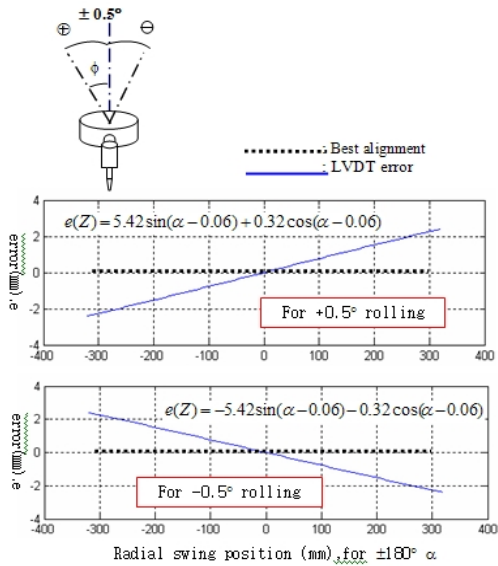


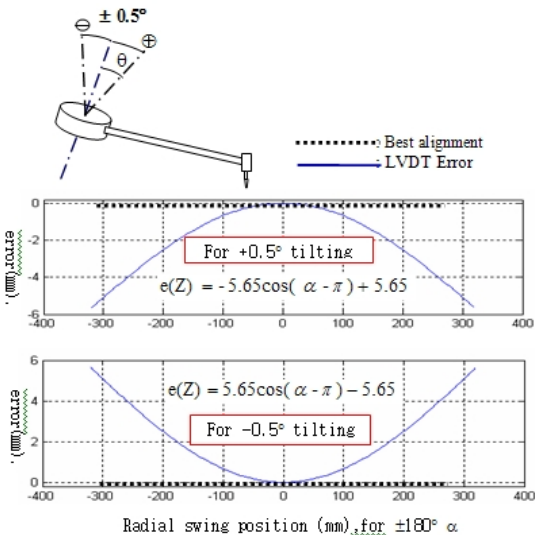
Fig. 4 Coordinates of a swing arm structure

윗 식에서 H_b, H, L 은 Fig. 4에서 보인바와 같은 스윙암 구조물의 형상치수이며 M, N 은 {D} 좌표계에

서 정의되는 P점의 위치벡터 ${}^D P=(M,0,N)$ 로 규정되는 프로브의 설치위치이다. 측정곡면이 완전한 구면이고 설치오차가 없는 경우 P점의 궤적은 XY 평면상의 원이 된다.



(a) Reading error with rolling angle $\phi = \pm 50$



(b) Reading error with tilting angle $\Theta = \pm 50$

Fig. 5 Numerical simulation of reading error

롤링각 오차 $\phi = \pm 5^\circ$ 와 기준 틸팅각에 대한 틸팅각 오차 $\Theta = \pm 5^\circ$ 가 존재할 때 측정면이 곡률반경이 3000mm인 완벽한 이상적인 구면에 대하여 본 연구에서 개발된 스윙압 측정에 의한 오차를 위의 식 (1)~(3)을 이용하여 수치계산 하였으며 그 결과를 Fig.5에 보였다. 이 그림에서 보는 바와 같이 롤링각 오차에 의한 측정오차는 가공물의 측정점의 반경방향 위치(Fig.5의 수평축)에 따라 거의 직선적으로 변하며, 틸팅각 오차에 의해서는 측정점의 반경방향의 위치에 따라 대칭적으로 변함을 보이고 있다.

4. 실험

Fig. 2(b)에 보인 바와 같이 폴리싱(polishing) 가공된 구면의 오목면을 측정시편으로 하여 분해능(resolution) $0.5 \mu\text{m}$ 인 LVDT 프로브를 사용하여 측정 실험을 수행하였다. 측정시편의 오목면은 앞의 3절의 측정오차의 수치시뮬레이션에서 사용된 값과 같이 곡률반경이 3000mm이며 직경 640mm인 오목 반사경이다.

시편은 광학적 방법인 Hartmann Test^[1,6]에 의해 구면으로부터 오차가 최대 $0.9 \mu\text{m}$ 인 것으로 사전에 측정되었다.

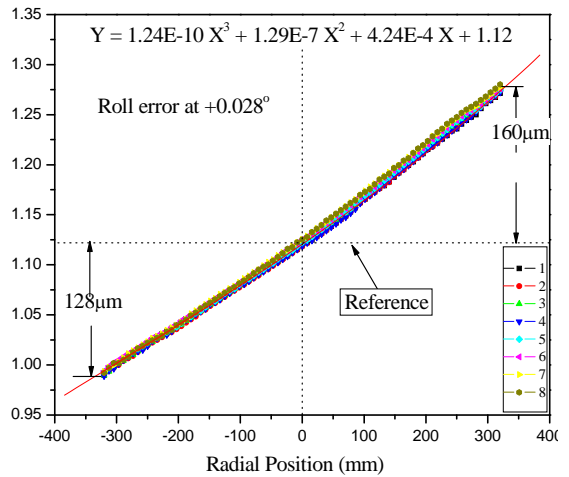


Fig. 6 Raw data of the surface profile error

Fig. 6에 본 연구에서 개발된 스윙암 측정에 의한 결과를 보이고 있다. 이 결과는 앞절에서 서술된 바와 같이 틸팅각 오차, 롤링각 오차, 기타의 오차가 포함된 측정면의 완전한 구면으로 부터의 오차이다. 그림의 측정 결과를 보면 측정점의 반경방향 위치에 따라 오차가 거의 직선적으로 변하는 것을 알 수 있으며 이것으로 부터 본 스윙암은 롤링각 오차가 크게 존재하는 것으로 유추할 수 있다.

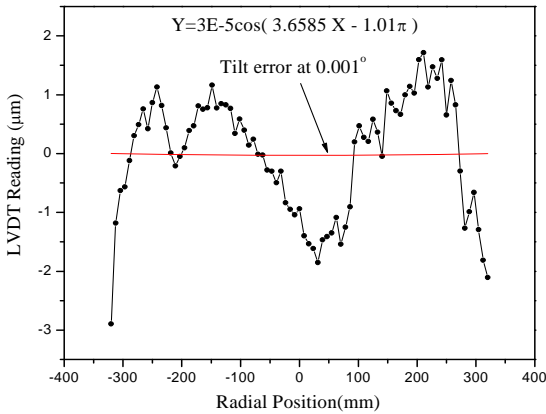


Fig. 7 Data after removing rolling error

Fig. 8의 결과는 시편의 측정면이 완전 구면으로부터 최대 4 μm 이탈되어 있음을 보인다. 시편의 광학적 측정법으로 사전 측정한 결과인 측정면의 오차 0.9 μm를 고려하면 본 스윙암 측정기의 측정정밀도는 최대 4.9 μm, 약 5 μm 정도인 것으로 추정된다.

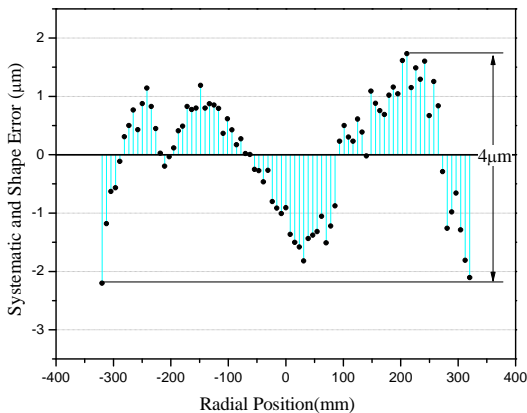


Fig. 8 Data after removing rolling and tilting error

5. 결 론

스윙암 메카니즘을 이용한 대형 반사경면의 형상 측정과 가공에 관한 연구를 수행하였다. 스윙암 메카니즘은 3차원 측정기^[7]와는 달리 기기상 측정(on-machine measurement)에 이용될 수 있는 장점을 갖는다.

스윙암 형상 측정시 발생하는 오차로서 스윙암의 설치오차인 롤링오차와 틸팅오차에 의한 영향을 해석하였다. 롤링오차에 의한 측정오차는 측정면의 반경방향에 따라 직선적으로 변하는 특징을 가지며, 틸팅오차에 의한 측정오차는 측정면의 중심에 대하여 대칭적인 특징을 갖는다. 대형 광학 반사경면의 경우 곡률 반경이 보통 수 m인 것을 고려할 때 스윙암의 설치시 틸팅오차에 의한 영향은 상대적으로 롤링오차에 의한 영향보다 작게 될 것으로 예측되며 이것은 본 연구결과와 일치한다.

본 연구에서 개발된 스윙암의 측정오차는 최대 5 μm인 것으로 판명되었다. 스윙암 메카니즘은 형상 측정뿐 아니라 구면가공에도 효과적일 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 홍정희, 오창진, 이용석, 김옥현, "On-Machine 구면 기준 Shack-Hartmann 장치를 이용한 대형 반사경의 가공정밀도 연구," 대한기계학회논문집 A, 29권, 5호, pp. 726-733, 2005.
2. Ho Soon Yang and David Walker, "Development of Prototype Stylus Profilometry for Large Optics Testing", Journal of the Optical Society of Korea, Vol.6, No.2, pp.60-66, 2001.
3. David Williamson, Robert Kestner and Daniel Bajuk, "Asphere in Microlithography", Fabrication and Testing of Aspheres, Optical Society of America, pp.8-16, 1999.
4. David Walker, Ho-Soon Yang and Sug-Whan Kim, "Novel hybrid stylus for nanometric profilometry for large optical surface", Optics Express, Vol.11, No.15, 2003.
5. 유승봉, 장인철, 김승우, "비구면 렌즈의 형상측정

을 위한 접촉식 프로브 개발,” 한글정밀공학회 춘계학술대회, pp.1-2, 2000.

6. Daniel Malacara-Hernandez and Daniel Malacara-Doblado, "Testing of Aspheric Wavefronts", Fabrication and Testing of Aspheres, Optical Society of America, pp.74-85, 1999.
7. M. Negishi, A. Deguchi, M. Ando, M. Takimoto and N. Nakamura, "A High-precision Coordinate Measuring System for Super-smooth Polishing", Nanotechnology 6, pp.139-147, 1995.