

비접촉 변위센서를 이용한 초소형렌즈 정밀금형 형상측정

강승훈*, 장대윤*, 이주형*,#

*서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

Precision Surface Profiling of Lens Molds using a Non-contact Displacement Sensor

Seung-Hoon Kang*, Dae-Yoon Jang*, Joohyung Lee*#

*Department of Mechanical System and Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology

(Received 3 December 2019; received in revised form 14 December 2019; accepted 22 December 2019)

ABSTRACT

In this study, we proposed a method for surface profiling aspheric lens molds using a precision displacement sensor with a spatial scanning mechanism. The precision displacement sensor is based on the confocal principle using a broadband light source, providing a 10 nm resolution over a 0.3 mm measurable range. The precision of the sensor, depending on surface slope, was evaluated via Allan deviation analysis. We then developed an automatic surface profiling system by measuring the cross-sectional profile of a lens mold. The precision of the sensor at the flat surface was 10 nm at 10 ms averaging time, while 200 ms averaging time was needed for identical precision at the steepest slope at 25 deg. When we compared the measurement result of the lens mold to a commercial surface profiler, we found that the accuracy of the developed system was less than 90 nm (in terms of 3 sigmas of error) between the two results.

Key Words : Surface Profiling(형상측정), Chromatic Confocal Sensor(다파장 공초점 센서), Molds(금형)

1. 서 론

100 nm 수준의 가공정밀도가 요구되는 차세대 렌즈 금형의 표면 가공을 위해서는 수십 nm 수준의 정확도를 가지는 측정기술을 요구하고 있다^[1-5]. 이러한 정확도를 구현하기 위해서는 접촉식 프로브 기반의 CMM (coordinate measuring machine), 레이저 변위센서 또는 광간섭법원리를 이용한 비접촉식 측정 방법이 있다^[6-9]. 접촉식 프로브의 경우 측정시

금형표면의 손상으로 인해 적용에 한계가 있으며 광간섭법의 경우 비구면 금형 측정시 널렌즈 (Null lens) 또는 회절소자 (computer generated hologram, CGH) 등의 고난이도 광학부품의 설계/제작이 요구되며 금형의 형상이 바뀔 때 마다 해당 광학부품을 재설계해야 하는 한계점이 있다^[10-12].

본 연구에서는 수 nm 수준의 정밀도를 갖는 다파장 공초점 변위센서(chromatic confocal sensor)를 이용하여 금형 형상을 측정하기 위한 측정 자동화 시스템을 구축하고 그 성능을 평가하였다. 금형의 반사면의 기울기에 따른 센서의 정밀도를 평가하고 실제 렌즈금형을 측정한 후 그 결과를 상용 측정기

Corresponding Author : JLee@seoultech.ac.kr

Tel: +82-2-970-6343, Fax: +82-2-974-8270

결과와 비교하였다.

2. 기본 이론 및 실험장치

본 연구에서는 정밀금형의 형상측정을 위해 Fig.1 과 같이 금형을 고정시킨 후 x축 방향으로 변위센서를 이송시키며 측정된 센서와 금형간의 거리정보를 이용하여 금형의 단면형상을 측정하는 원리를 구현하였다. 이때 금형 형상 측정 정밀도를 확보하기 위해 다파장 공초점 원리 기반의 레이저 변위센서를 이용하였다. 이는 Fig. 1 와 같이 다파장의 광원이 광섬유를 통해 센서의 프로브로 전달되며 센서프로브 내의 초점광학계를 통해 측정대상물에 광원의 초점이 맺히게 된다. 이때 초점광학계에 색수차(chromatic aberrations) 를 의도적으로 유발시켜 파장별로 초점거리를 수백 μm ~ 수 mm 수준으로 확장시킨 후 측정대상물까지의 거리에 따라 반사되는 빛의 파장을 측정하여 거리 값을 도출하는 원리이다^[13]. 본 연구에서는 사용한 정밀 변위센서는 마이크로 엡실론사의 IFS2405-0.3 모델이며 주요 사양은 Table 1과 같다. 해당 센서는 0.3 mm 수준의 측정거리에서 10 nm 의 변위측정 분해능을 가지고 초점거리에서 6 μm 의 스폿 직경을 가지므로 본 연구에서 요구되는 금형측정 측정 정확도를 충분히 만족할 수 있는 사양이다.

위 기본원리를 기반으로 Fig 2 와 같이 측정시스템을 구축하였다. 먼저 변위센서를 x방향으로 이송하기 위해 스테이지에 센서를 장착하였으며 해당 스테이지는 20 mm 이송거리에서 1 μm 분해능을 갖는다 (Sigmakoki, SPSG20-20). 이때 금형의 중심점을 지나

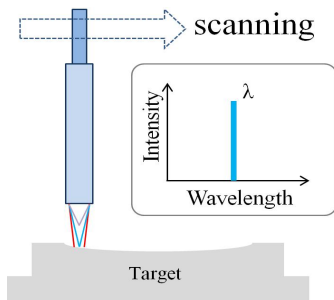


Fig. 1 Basic principle of the non-contact displacement sensor based surface profiling of lens molds

Table 1 Chromatic confocal sensor in use

Sensor Model	IFS2405-0.3 (Micro-Epsilon Inc.)
Measuring range	0.3 mm
Spot diameter	6 μm
Numerical Aperture	0.6
Resolution	10 nm
Linearity	< 0.3 μm
Max tilt	$\pm 34^\circ$

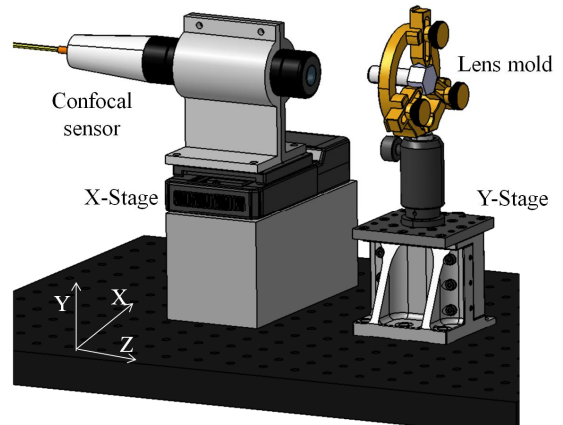


Fig. 2 Automatic measurement system using the displacement sensor and motorized stages

는 단면형상을 측정하기 위해 타겟을 y축으로 이송이 가능한 스테이지에 장착하였으며 타겟을 y축으로 이송시키며 측정된 변위센서와 금형간의 거리가 가장 긴 지점에서 측정을 수행하였다. x축 이송스테이지의 이송 정확도 확보를 위해 자체 제작한 호모다인 간섭계를 이용하여 x축 이송거리를 모니터링 하였다^[14]. 측정시스템 자동화를 위해 변위센서의 측정결과와 레이저 간섭계의 데이터 통신, 스테이지와 변위 센서 컨트롤러 제어 시스템을 C# 기반으로 구축하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 비접촉 센서의 반복능 평가

변위센서의 정밀도를 평가하기 위해 렌즈금형

Table 2 Aspheric coefficients of the lens mold

Mold surface	Coefficients
R	-4.00
K	0
A ₂	5.161×10 ⁻⁴
A ₄	-1.526×10 ⁻²
A ₆	1.208×10 ⁻³
A ₈	5.756×10 ⁻⁴
A ₁₀	-9.488×10 ⁻⁵

의 다양한 기울면에 대한 반복능 성능을 평가하였다. 측정에 사용한 렌즈금형의 비구면 계수 사양은 Table 2 와 같으며 반사면의 직경은 3.2 mm, 평면 플렌지를 포함한 직경은 6.4 mm으로 최대경사면은 25 도 수준이다. Fig. 3(a)와 같이 금형의 기울기 부호가 바뀌는 평면 지점, 중간 경사면 12.5 도 지점, 그리고 가장 경사각이 큰 지점에서 각각 센서 반복능을 각각 평가하였다. 센서에서 측정하는 데이터는 최대 1 nm digit 까지 확보가 가능하였으며 1 ms 의 샘플링 주기로 데이터를 획득하였다. 모든 데이터는 10초 동안 측정하였으며 총 10,000 데이터에 대한 Allan 편차 분석을 수행하였다^[15]. Allan 편차는 MATLAB에 내장된 allanvar 함수를 이용하여 평가하였다. 구축된 정밀도 평가시스템을 이용한 렌즈금형의 반사면의 경사에 따른 반복능 평가 결과는 Fig. 4와 같다. 1번 지점의 경우 데이터 평균없이 1 ms 샘플링 시간의 데이터를 이용하였을 경우 14 nm 의 반복능을 보였고 이를 10 ms 평균하였을 경우 4 nm, 그리고 1초 평균을 수행하였을 경우 0.7 nm 수준으로 100 nm 이하의 정밀도를 구현하기에 충분한 수준이다. 12.5 도의 경사면을 가지는 2번 지점의 경우 10 ms 평균시 8 nm, 1초 평균시 1 nm 수준으로 100 nm 이하의 정밀도를 구현하기에 충분한 수준이지만 최대각도 25도 에서는 10 ms 평균시에 반복능이 30 nm 수준으로 경사가 커질수록 반복능이 현저히 저하 되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 경사가 높아질수록 충분한 데이터 평균이 필요하며 현재 25도의 경사면에서 10 nm 정밀도 확보를 위해서는 200 ms 이상 데이터 평균을 수

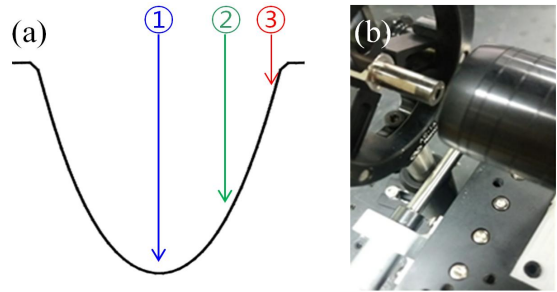


Fig. 3 (a) Precision test of the confocal displacement sensor at three positions of the lens mold which have difference surface slopes (b) Experiment apparatus of the developed surface profiler

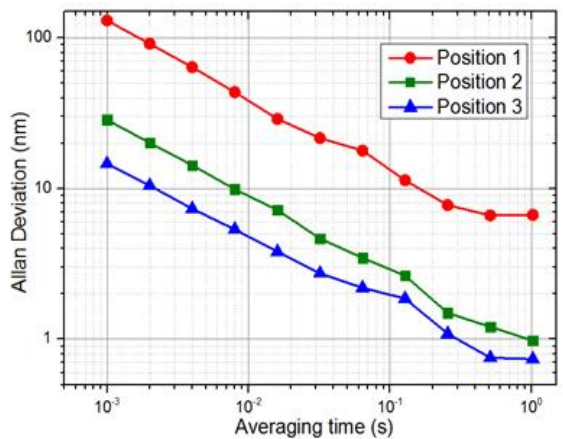


Fig. 4 Result of precision test using Allan deviation at different beam position, Position1(red): 25° slope, Position2(green): 12.5° slope, Position3(blue): flat surface where the sign of the slope changes

행해야 한다.

3.2 렌즈금형측정 측정결과

확보된 측정자동화 시스템을 이용하여 렌즈 금형의 형상을 Fig. 5와 같이 측정하였다. 이때 금형의 y축 방향으로 총 10 번의 측정을 수행하였으며 이중 profile 의 최대값이 가장 큰 측정결과가 금형의 중심을 지나는 측정결과 이므로 이를 형상

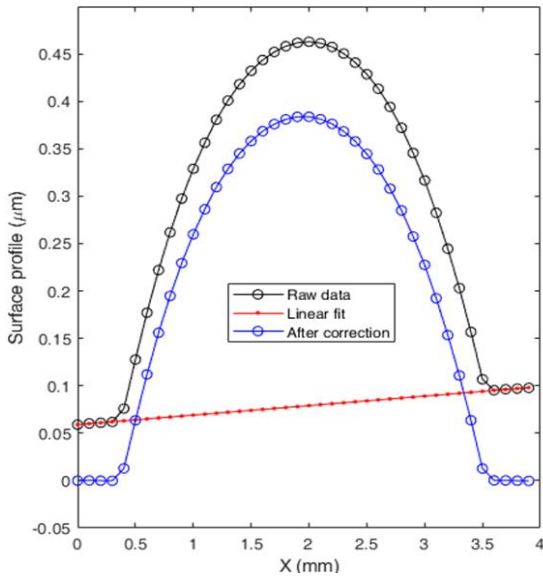


Fig. 5 Data processing of the raw data (black), Linear term (red) of the raw data was removed by linear fitting of the flange data. Corrected data (blue) was shown after the linear term removed

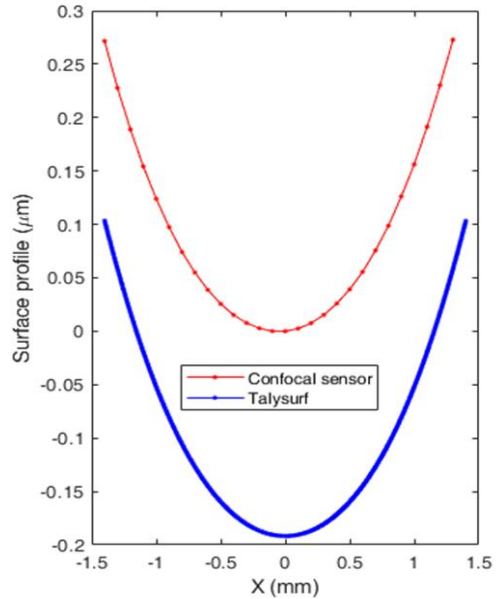


Fig. 6 Data comparison between the confocal sensor based measurement (red) and commercial profiler based measurement (blue)

분석에 이용하였다. x 축 스테이지 이송변위는 0.1 mm step 으로 총 4 mm 를 이송하였으며 이때 기울기 보상을 위해 플랜지영역을 포함하여 금형형상을 측정하였다. Fig. 5 의 Raw data 그래프와 같이 센서 이송축과 금형 축 간의 tilt 로 인해 금형의 플랜지 부분의 측정결과에 선형성분이 포함되어 있는 것을 확인할 수 있다. 플랜지 영역의 데이터를 이용하여 빨간색 그래프와 같이 linear fitting 을 적용하였으며 이 결과를 이용하여 파란색 그래프와 같이 측정데이터의 기울기를 보상하였다. Fig. 6는 상용표면형상 측정장비 (Taylor Hobson, Talysurf PGI) 이용한 측정결과와 본 연구를 통해 개발된 측정데이터를 비교한 결과이다. Talysurf 장비의 경우 1 nm 수준의 분해능을 가지기 때문에 본 연구를 통해 측정한 데이터를 검증하기에 충분한 성능을 가진다^[16]. Talysurf 장비를 이용하여 금형의 반사면과 플랜지 영역을 모두 측정 하였으며 앞서 기술된 동일한 기울기 보정을 수행하였다. 해당 장비를 이용하여 2 μm 의 step으로

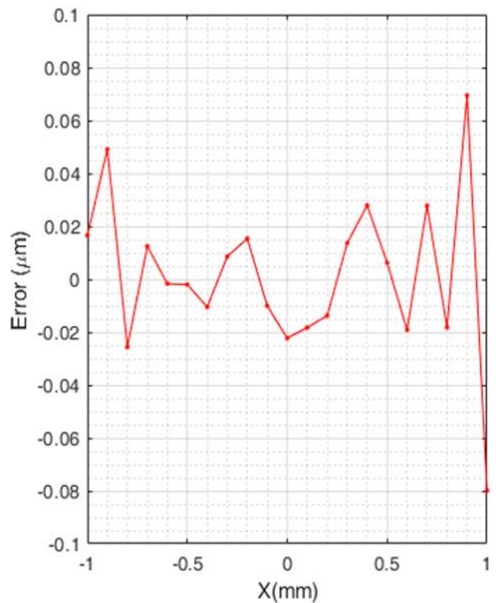


Fig. 7 Error between the confocal sensor based measurement system and commercial surface profiler

렌즈금형 형상을 측정하였고 본 연구를 통해 개발된 측정장비로 측정된 결과와 비교를 위해 0.1 m m step 으로 데이터를 보간하였다. 두 결과사이의 오차값을 도출한 결과는 Fig. 7 과 같으며 이때 j 오차에서 발생하는 offset, tilt 성분 그리고 coma 에 해당하는 것으로 판단되는 3차 polynomial term 들을 제거하였다. 오차의 PV값은 150 nm 수준이었으며 3 σ 값은 89 nm 수준으로 100 nm 이하의 측정정확도를 보이고 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 차세대 고정밀 렌즈금형의 가공을 위한 100 nm 이하의 정확도를 가지는 측정기술을 개발하였다. 이를 위해 다과장 공초점 원리를 이용한 정밀변위센서를 이용하였으며 변위센서가 렌즈금형의 중심점을 지나는 단면형상을 측정하였다. 이때 금형의 중심점을 지날수 있도록 y축 방향으로 금형을 이송시키며 반복측정하였고 자체 제작한 간섭계를 이용하여 스테이지 이송변위의 정확도를 확보하였다. Allan 편차평가기법을 이용하여 10 nm 이하의 센서정밀도를 확보하기 위한 데이터 평균시간 사양을 평가하였으며 최대 25도의 각도에서는 200 ms 수준의 데이터 평균시간이 요구되었다. 확보된 변위센서기반의 측정시스템을 이용하여 비구면 렌즈금형을 측정하였고 그 결과를 상용 표면형상측정기 (Talysurf)와 비교하였다. 그 결과 3 σ 기준으로 89 nm 수준의 오차를 보였다. 이러한 변위센서기반의 측정시스템은 측정원리가 간단하고 데이터 후처리가 용이하므로 100 nm 수준의 가공정밀도를 요구하는 다양한 광학반사면 측정에 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 해당 센서는 높은 광반사율을 보이는 정삭단계 이외에도 반사율이 낮은 황삭단계에서도 충분히 적용 가능하므로 렌즈금형 가공을 위한 기계가공의 모든 단계에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

“이 논문은 2019년도 산업통상자원부 및 산업기술

평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의하여 연구되었음. (20003945, 형상정밀도 100nm급 차세대 모바일용 광학렌즈 고균질 제조를 위한 4축 초정밀 가공시스템 및 렌즈모듈 제조 원천기술개발).”

REFERENCES

1. Zhang, Z., Yan, J., Kuriyagawa, T, "Manufacturing technologies toward extreme precision", International Journal of Extreme Manufacturing, Vol. 1, No. 2, 2019.
2. Pongs, G., Bresseler, B., Bergs, T., and Menke, G., "Precision molding of advanced glass optics: innovative production technology for lens arrays and free form optics", In Polymer Optics and Molded Glass Optics: Design, Fabrication, and Materials II, Vol. 8489, 2012.
3. Tohme, Y. E., "Grinding aspheric and freeform micro-optical molds", Proc. SPIE 6462, Micromachining Technology for Micro-Optics and Nano-Optics V and Microfabrication Process Technology XII, Vol. 6462, 2007.
4. Liu, L., Cheng, X., and Hao, Q., "Fabrication process and measurement of injection molding aspheric lens", Proc. SPIE 11053, Tenth International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation, Vol. 110533, 2019.
5. Aguirre, D., Diaz-Urbe, R., Campos, M., and Mendoza, B., "Precision Glass Molded Lenses Analysis via Null-Screen Test", In Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1221, 2019.
6. Jürgen, P. and Berger, G., "Non-contact profiling for high precision fast asphere topology measurement," Proc. SPIE 8788, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII, Vol. 8788, 2013.
7. Bugg, C. D., "Noncontact surface profiling using a novel capacitive technique: scanning capacitance microscopy," In Commercial Applications of Precision Manufacturing at the Sub-Micron Level,

Vol. 1573, 1992.

8. Hand, D. P., Carolan, T. A., Barton, J. S., and Jones, J. D. C., "Profile measurement of optically rough surfaces by fiber-optic interferometry," Optics letters, Vol. 18, No. 16, pp. 1361-1363, 1993.
9. Wyant, J. C. and O'Neill, P. K., "Computer Generated Hologram; Null Lens Test of Aspheric Wavefronts," Applied optics, Vol. 13, No. 12, pp. 2762-2765, 1974.
10. Reichelt, S., Pruss, C. and Tiziani, H. J., "New design techniques and calibration methods for CGH-null testing of aspheric surfaces," Proc. SPIE, Vol. 4778, Interferometry XI, 2002.
11. Arnold, S. M. and Kestner, R., "Verification and certification of CGH aspheric nulls," Proc. SPIE, Optical Manufacturing and Testing, Vol. 2536, pp. 117-126, 1995.
12. Kohno, T., Matsumoto, D., Yazawa, T., and Uda, Y., "Radial shearing interferometer for in-process measurement of diamond turning", Optical Engineering, Vol. 39, No. 10, pp. 2696-2699, 1997.
13. Browne, M. A. and Akinyemi, A. B., "Confocal Surface Profiling Utilizing Chromatic Aberration", SCANNING, Vol. 14, No. 3, pp. 145-153, 1992.
14. Birch, K. P., "Optical fringe subdivision with nanometric accuracy", Precision Engineering, Vol. 12, No. 4, pp.195-198, 1990.
15. Allan, D., "Statistics of Atomic Frequency Standards", Proceedings of the IEEE, Vol. 54, No. 2, pp. 221-230, 1966.
16. Conroy, M., and Armstrong J., "A comparison of surface metrology techniques", Journal of Physics Conference Series, Vol. 13, No. 1, pp. 458-465, 2005.