

첨단 헤드업 디스플레이 장치용 비구면 자유형상 금형의 초정밀 가공에 관한 연구

박영덕^{1,2}, 장태석^{2*}

¹충남테크노파크 디스플레이센터, ²선문대학교 공과대학 신소재공학과

A study on the ultra precision machining of free-form molds for advanced head-up display device

Young-Durk Park^{1,2}, Taesuk Jang^{2*}

¹Display Center, Chungnam Techno Park

²Department of Advanced Materials Engineering, SunMoon University

요약 차량용 HUD는 자동차 전면 유리창에 안전 운전과 편의 운전 관련 다양한 정보를 표시해 주는 장치로 중요한 역할을 수행한다. 본 논문에서는 증강현실 기술에 적용이 가능한 대면적 비구면 자유형상 미러를 가공하기 위해 초정밀 가공기를 이용하여 가공을 실시하였고 그 결과를 측정하였다. 초정밀 다이아몬드 절삭은 정밀도가 높을 뿐만 아니라 표면 거칠기와 잔류 응력을 낮게 할 수 있어서 우수한 표면 무결성을 갖는 고급 부품의 생산에 유리하다. 또한 비구면 자유형상의 몰드를 사용함으로써 광학 전달 함수의 개선, 왜곡 경로의 감소 및 특수 이미지 필드 곡률의 실현과 같은 장점을 얻을 수 있다. 이와 같은 비구면 자유형상 금형을 가공하기 위한 방법으로는 초정밀가공기를 이용한 다이아몬드 절삭 방법을 사용하였으며, 제작된 비구면 자유형상 미러 금형의 평가는 비구면 형상 측정기를 이용하여 실시하였다. 이러한 방법에 의해 $1\ \mu\text{m}$ 이하의 형상 정밀도(PV)와 $0.02\ \mu\text{m}$ 이하의 표면 거칠기(Ra)를 갖는 비구면 자유형상 금형을 제작할 수 있었다.

Abstract Head-up displays for vehicles play an important role in displaying various information about the safety and convenience of driving on the windshield of the vehicle. In this study, ultra-precision machining was performed and evaluated as a method for machining a large-area aspheric free-form mirror that is applicable to augmented reality technology. Precision diamond cutting is highly accurate and suitable for the production of advanced parts with excellent surface integrity, low surface roughness, and low residual stress. By using an aspheric free-form mold, it is possible to improve the optical transfer function, reduce the distortion path, and realize a special image field curvature. To make such a mold, the diamond cutting method was used, and the result was evaluated using an aspherical shape-measuring machine. As a result, it was possible to the mold with shape accuracy (PV) below $1\ \mu\text{m}$ and surface roughness (Ra) below $0.02\ \mu\text{m}$.

Keywords : Augmented-Reality, Aspheric lens, Free-form mold, Head-Up Display (HUD), Peak to Valley (PV), Surface roughness (Ra)

1. 서론

최근 자동차 시장은 자동차 고유의 성능 향상뿐만 아니라 첨단 IT, 편리기능이 장착된 지능형 자동차를 선호

하는 추세로 빠르게 성장하고 있다. 또한 차량용 디스플레이 시장의 활성화와 자동차의 전장화가 빠르게 확산되면서 IT 기술과 무선통신 기술이 접목되어 운전자의 안전성과 편의성을 지원하는 기능들이 빠르게 증가하고 있

본 논문은 충남테크노파크 디스플레이센터 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Taesuk Jang(SunMoon Univ.)

Tel: +82-41-530-2341 email: tsjang@sunmoon.ac.kr

Received October 31, 2018

Accepted January 4, 2019

Revised December 20, 2018

Published January 31, 2019

으며, 차량용 헤드업 디스플레이가 다양한 제품군으로 점점 더 주목받고 있다.

차량용 헤드업 디스플레이 기술은 크게 디스플레이 표시 기술과 차량 정보 제어 기술, 유저 인터페이스 기술, 광학 설계 및 가공 기술, 영상 보정 기술, HUD 모듈의 구조 및 배치 기술로 분류할 수 있으며, AR- HUD (Augmented Reality Head Up Display)는 운전자의 시선이 위치하는 전면 유리에 다양한 주행정보를 제공함으로써 보다 안전한 정보를 제공한다 [1].

기존의 내비게이션 장치는 도로로부터 운전자의 시선을 빼앗고, 2D 맵은 사람의 뇌가 정보를 해석하고 적용하는데 시간 지연 (lag)이 발생하는 등의 문제점이 있다. 그러나 Fig. 1.의 광학계 구조에 나타난 바와 같이, 증강현실 (Augmented Reality, AR) 헤드업 디스플레이는 운전자의 시선 위치 (운전석부터 전방 7.5M에서 약 50인치 화면)를 도로 상에 위치한 상태로 현실의 이미지나 배경에 3차원 가상 이미지 및 영상을 겹쳐 보여 줌으로써 주행 안전성을 높일 수 있다 [2].

또한, 운전자에게 제공되는 정보량이 증가하는 추세에 맞춰 차량용 디스플레이의 증가와 함께 운전자 편의 및 안전성을 높이기 위해 차량용 디스플레이 역시 대형화, 고 해상도, 고 시인성을 갖출 수 있도록 HUD용 고정밀 비구면 자유형상 미러 금형에 대한 가공기술을 필요로 하고 있다. 따라서 이를 위한 자유곡면 미러에 대한 광학설계, Distortion 보정 기술, AR-HUD 기구설계, 정밀측정평가 등 초정밀가공 기술을 활용한 Aspherical Free-form mirror 가공 기술에 대한 다양한 연구 및 개발이 지속적으로 증대되고 있다.

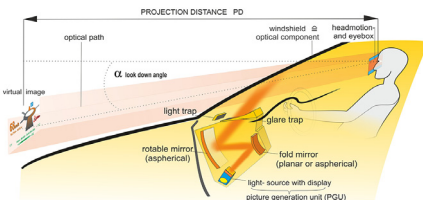


Fig. 1. AR-HUD system and optical system structure [2].

일반적인 결상광학계나 조명 광학계의 경우 물체면과 화상면이 결정되어 있어서 이에 대한 일반적 설계를 해야 하나, 자동차는 운전자가 운전 중 사용하는 것으로 특히 HUD와 같은 투사 광학계에 있어서는 운전자의 자세 및 관측 위치에 따라 수차 없는 광학계가 필요하다 [3].

이러한 비구면 자유형상 광학부품의 생산 및 측정기술이 첨단 기술로 부각되고 있으며, 요구되는 광학 성능이 고 사양화됨에 따라 초정밀 가공을 통한 고정밀 부품이 광학부품 산업에서 중요한 역할을 하고 있다.

초정밀 가공기술에서는 고정밀도의 형상가공을 위해 터닝(Turning), 절삭(Cutting), 연삭(Grinding), 밀링(Milling) 등 다양한 가공방식이 적용된다 [4].

비구면 자유형상의 가공 정밀도에 따라 광 성능이 달라 질 수 있으므로 광학 설계에 따른 금형 제작 및 가공 방법 선정이 매우 중요한 인자이다.

또한, 가공 후에는 Fig. 2.에 나타난 바와 같이 가공면 목표 대비 실제 가공제품의 형상정도 측정을 통해 제품의 형상편차를 최소화 하여야 한다.

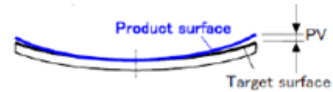


Fig. 2. PV (Peak to Valley) of machined surface.

초정밀 가공기술을 활용하면 Sub-micron의 형상 정밀도 (P-V)와 수 nm의 표면조도 (Ra)를 갖는 가공면의 제조가 가능하여 초 정밀성이 요구되는 정밀 광학부품 제작에 사용된다 [5].

본 논문에서는 증강현실 헤드업 디스플레이 (AR-HUD) 장치에 적용하기 위한 대면적 비구면 자유형상 미러 제작에 초정밀 가공기술의 적용을 시도하였다. 실험을 위해 초정밀가공 장비와 측정 장비를 사용하였으며, 형상 정밀도와 표면 거칠기를 측정한 후 보정가공을 통해 가공정밀도를 향상시킴으로써 최적의 가공방법 및 가공조건을 수립하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

HUD 광학계용 비구면 자유형상 금형을 제작하기 위해 Concave Mirror 기구설계와 초정밀 자유곡면 가공기 (DTM, FG350, Moore Nanotech사)를 사용하여 비구면 자유형상 미러를 가공하였으며, 가공면은 비구면 형상 측정기 (Form Talysurf Series, RTH사)와 비접촉 표면조도 측정기 (NY 6300 system, Zygo사)를 이용하여 형상 정밀도(PV)와 표면거칠기(Ra)를 측정하였다.

2.1 초정밀 가공기

초정밀 가공기는 최첨단 유정압 이송 슬라이드 및 제어 기술, 초정밀 스피들 제어기술을 바탕으로 가공 시 발생하는 열과 진동의 간섭요인을 최소화하기 때문에 나노 단위의 가공결과를 얻을 수 있다.

실험에 사용한 초정밀 프리폼 가공기 (DTM)는 5축 자동제어가 가능한 가공장비로, Turning, Grinding, Milling, Raster Fly-cutting, S3 (Slow Slide Servo), FTS (Fast Tool Servo) 등의 가공방법을 이용하여 비철금속 및 폴리머 광학 소재에 다양한 구면, 비구면, 자유곡면 형상을 가공할 수 있다.

Fig. 3은 본 연구의 비구면 자유형상 미러 금형제작에 사용된 초정밀 프리폼 가공기(Moore Nanotech 사, 모델명 FG350)를 나타낸다. 이 가공장비는 5축으로 구성되어 있으며, 이송축 3개(X, Y, Z)와 회전축 2개(C, B)로 구성되어 있다. 이송축의 분해능은 1nm 이며, 수평 직진도는 0.3 μm 이하, 회전축 (C axis)의 Spindle 회전속도는 1,500 rpm으로 고정밀도의 Turning, Grinding이 가능하다. 또한, FTS와 마이크로 Milling의 부가장치가 장착되어 있어 자유곡면, 패턴가공, 회절렌즈 등 다양한 광학부품의 제작이 가능하다.

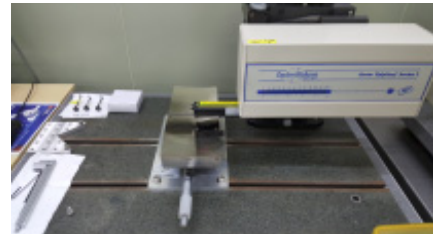


Fig. 3. FG350, Diamond turning machine & capacity.

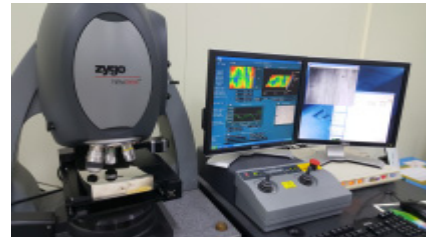
2.2 측정장비

초정밀 가공에서 측정 평가는 필수로 수행되어야 한다. 가공품에 대한 체계적인 측정과 분석을 통해 최적의 가공방법을 찾을 수 있으며, 초정밀 가공에서 가공정밀도를 향상시키기 위해 이를 검증할 수 있는 측정기술 및 검사방법이 확보되어야 한다. 일반적으로 가공한 부품의 표면 검사방법에는 미세한 촉침 (프로브)으로 표면을 긁어서 알아내는 방법과 반사광과 산란광의 광량에 대한 비율을 정량적으로 측정하여 알아내는 방법이 있다 [6].

Fig. 4(a)는 비구면의 산과 골 사이 값 (Peak to Valley)을 측정하고자 할 때 사용되는 비구면 형상 측정기 (Form Talysurf Series, RTH사)를 보여주고 있으며, Fig. 4(b)는 비접촉식 백색광 간섭계인 비접촉 표면조도 측정기 (NY 6300 system, Zygo사)로, 초정밀 가공 부품의 미세한 표면형상을 비접촉식 광간섭 원리를 이용, 측정시료를 확대하여 표면의 거칠기 및 곡부 현상을 측정하는 계측장비이다 [7].



(a)



(b)

Fig. 4. System of data acquisition and analysis: (a) Form Talysurf Series, (b) Surface measurement system NewView NY6300.

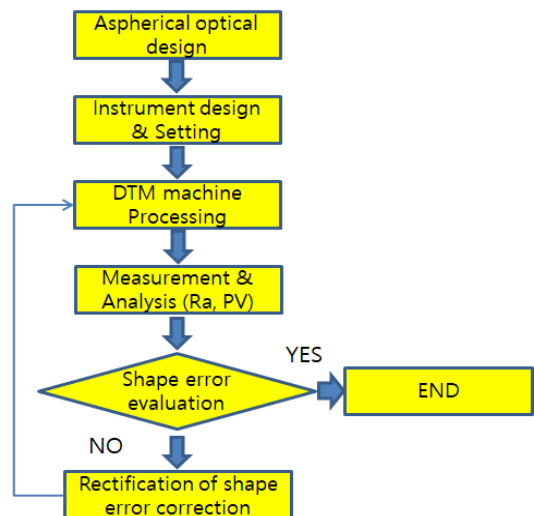


Fig. 5. Flow chart for design of experiment.

Fig. 5는 초정밀 프리폼 가공기를 이용하여 Aspheric free-form mirror를 가공하기 위한 Flow chart를 보여주고 있다. 가장 중요한 것은 가공된 가공품을 정확하게 측정하고 보정 가공하는 것이 필수적으로 수행되어야 한다는 점이다.

본 연구에서는 비구면 자유형상 금형의 측정을 접촉식 프로브 시스템 방식과 비접촉 간섭계 방식을 이용하여 실시하였으며, 그 측정결과를 분석하였다.

2.3 대면적 Aspheric free-form mirror 설계

HUD는 차량내의 앞 유리창 윈드쉴드(Win shield)를 광학계의 일부로 사용하고 있는데, 일반적으로 광학계는 회전 대칭 구조를 사용하나, 자동차의 앞 유리창이 회전 대칭 구조가 아니기 때문에 Fig. 6에 나타난 것처럼 회전 대칭이 아닌 비축(Off-axis) 광학계가 AR-HUD에서는 사용된다. Aspheric free-form mirror 광학설계를 위해서는 통상적인 비구면 계수를 사용하여 설계할 수 없어서, X, Y Polynomial과 같은 자유곡면식을 사용하여 Free-form 형상을 생성하였다.

$$z = f(x, y, z)$$

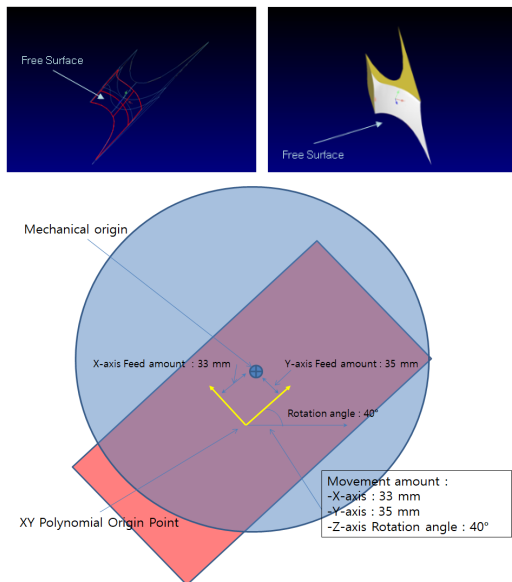


Fig. 6. Freeform surface & aspheric shape.

또한, 다이아몬드 터닝(Turning) 가공을 위해 생성된 Free-form 형상의 중심과 기구적 원점을 매칭하기 위해,

Fig. 7에 나타난 것과 같이 Free-form 형상을 X축으로 33 mm, Y축으로 35 mm 이동시키고 Z축 방향으로 40°를 회전하여, 제작된 Jig의 기구적 원점(중심점)과 Free-form 형상을 일치시켰다.

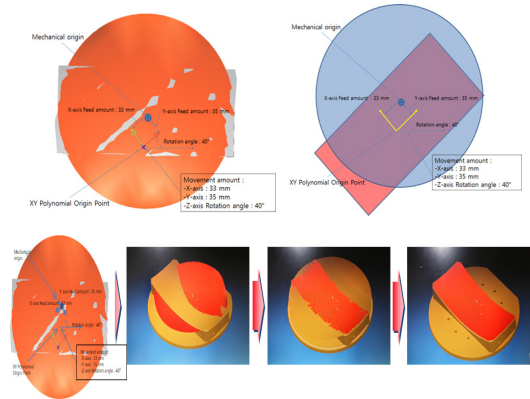


Fig. 7. The free-form shape and the mechanical origin of the Jig.

2.4 Aspheric free-form DTM 가공

초정밀 가공기술 중 하나인 단결정 다이아몬드 터닝 선삭기술은 일반적으로 회전 대칭인 경우에 사용된다. 그러나 최근의 광학 및 광학부품 산업에서는 비구면, 회전 비대칭, 자유곡면 등의 표면 가공을 요구하고 있으며, 가공기술 또한 다이아몬드 터닝 선삭 기술의 발전으로 가능해져 해당 산업에 큰 변화를 일으키고 있다.

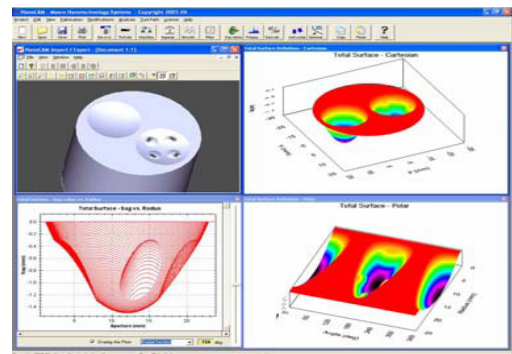


Fig. 8. Nano-Cam Software (Surface generated from CAD file).

또한, Fig. 8은 Nano-Cam software (CAM software)를 보여주는 것으로, 그동안 광학계 디자인에서 가장 난제 중의 하나였던 CAD, STEP, IGES 등의 전문 Program

과 Image file 등 다양한 설계 Data를 결합하여 Simulation 및 가공 Program화하는 것을 현실화한 것이다. 이를 사용함으로써 초정밀 장비의 다축제어 및 가공 방식 선정 등 CAM program을 이용한 가공 및 분석이 가능하였다.

DTM 절삭 가공에서 회전 비 대칭면을 가공하기 위한 가공방법은 S3 (slow slide servo)와 FTS (fast tool servo) 2가지로 분류할 수 있다.

S3는 초정밀 프리폼 가공기 스피들 C축의 제어와 Z축 이동을 동시에 제어하여 가공하는 기술이고, FTS는 압전소자 액츄에이터 (piezo electric actuator)를 이용하거나 리니어 모터를 이용하는 방법으로, 공구대를 구동 시킴으로써 공구 끝단의 Z축 위치를 빠르게 제어하여 높은 정밀도의 회전 비대칭 가공물을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 비구면 가공을 위해 알루미늄 소재를 사용하여 범용 공작기계 (고속가공기)로 외형 형상을 가공하고, 가공성 향상을 위해 가공면에 니켈 전해도금을 하였다. 터닝(Turning) 가공을 위해 천연다이아몬드공구 (NCD-Tool)를 DTM 공구축에 장착하여 Tool setting을 한 후 S3 가공방법을 사용하여 광학면의 비구면 자유형상을 가공하였다. 이때 S3 가공방법을 위해 Nano-CAM S/W를 이용하여 NC Data를 생성하였으며, 추출된 가공 프로그램을 이용해서 황삭 (Rough Cut) - 중삭 (Semi-Finish Cut) - 정삭 (Finish Cut) 과정을 통해 비구면 형상을 가공을 완료하였다.

비구면 자유형상 미러를 제작하기 위해서는 기존의 일반적인 가공물 고정방식만으로는 부족하므로 가공물 전용 Jig를 제작하여 가공을 실시해야 한다. 특히 회전 대칭 구조가 아니기 때문에 Jig 제작 시 무게 중심을 원점에 일치시키는 Jig 제작이 필요하며, 사각형 형상의 금형을 만들어 제작하기 때문에 연속회전 가공에 한계가 있다. 또한 중심부와 외곽부의 가공속도 조절이 필요하며, 가공면의 형상정밀도와 표면조도를 향상시키기 위해서는 가공조건과 가공방법을 달리 해야만 한다.

Fig. 9는 C축 Spindle 제어 Turning 가공을 위한 주축 (C-axis) 회전 Spindle 방식을 보여주는 것으로, 스피들 축의 이동과 Z축 이동을 동시에 제어하며 가공하는 S3 가공방법을 사용하였다. 대면적 비구면 자유형상 미러를 가공할 때에는 주축 회전속도와 이송속도의 관계에 따라 표면조도와 형상정밀도에 차이가 나게 되므로 많은 주의가 요구가 된다. 또한, 터닝가공 시 보통 주축 회전속도

는 500 rpm 이하로 설정하여야 하며, 이송속도는 10 mm/min을 넘지 않아야 한다.

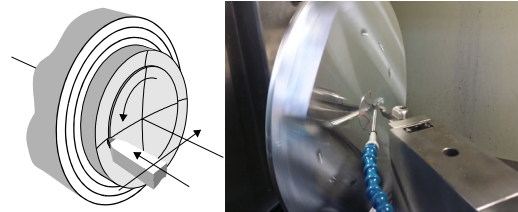


Fig. 9. S3 (slow slide servo) turning machining.

이러한 초정밀 절삭가공에 있어 절삭유의 급유 방식은 압축공기와 방전유를 혼합하여 분사하는 Mist 방식을 사용하였다. Table. 1은 Al 소재에 Ni이 전해 도금된 Free-form concave mirror의 터닝 가공조건 및 다이아몬드공구 (NCD Tool)의 사양을 나타낸다.

Table 1. Cutting condition for free-form concave mirror.

Processing conditions	Rough Cut	Semi-Finish Cut	Finish Cut
Depth of cut	10 μm	5 μm	2 μm
Cutting times	4 times	3 times	2 times
NCD Tool	Radius : 0.5mm, Rake Angle : 0°		
Spindle Speed	10~500 rpm		
Feed rate	10 mm/min	5 mm/min	1 mm/min

3. 실험 결과 및 고찰

비구면 자유형상 Concave mirror는 가공면의 절삭 가공성 향상과 표면거칠기를 개선하기 위해서, 전술한 바와 같이 알루미늄 소재 가공면에 니켈을 전해도금 후 가공하였다. 이때 초정밀 가공기 (FG 350)를 이용하여 가공한 비구면 Concave 미러 가공면의 형상정밀도 및 표

면조도 규격 사양은 각각 형상정밀도 (PV) 1.0 μm 이하, 표면조도 (Ra) 0.020 μm 이하를 목표로 하였다.

Fig. 10은 가공된 Concave mirror의 비구면 형상정밀도를 비구면 형상 측정기 (Form Talysurf Series, RTH 사)를 이용하여 측정한 결과를 나타낸 것이다. 측정결과, PV는 0.3126 μm , Ra는 0.0162 μm 로, AR-HUD용 자유형상 미러의 목표 규격 대비 만족한 결과를 얻을 수 있었다.

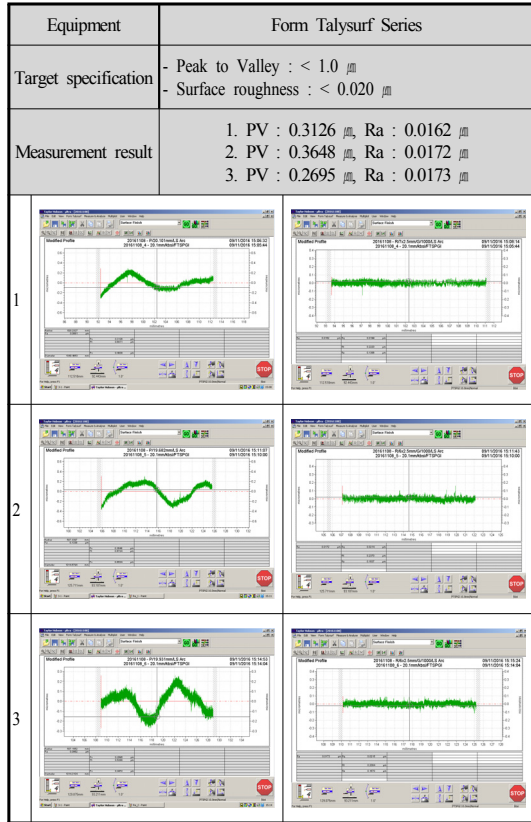


Fig. 10. Measurement results obtained with a Form Talysurf.

표면측정은 표면을 구성하고 있는 미세한 조직의 3차원 형상을 측정하는 것을 목적으로 한다. 가공된 표면이 광학적 기능을 수행하는 미러나 렌즈일 경우, 표면의 거칠기는 빛의 반사율과 투과율에 직접적인 영향을 미친다. Fig. 11은 비접촉식 광위상 간섭법을 이용하여 표면조도를 측정한 것을 나타낸 것이다. 측정결과 표면조도 Ra는 모두 0.010 μm 이하의 값을 얻었음을 알 수 있었다.

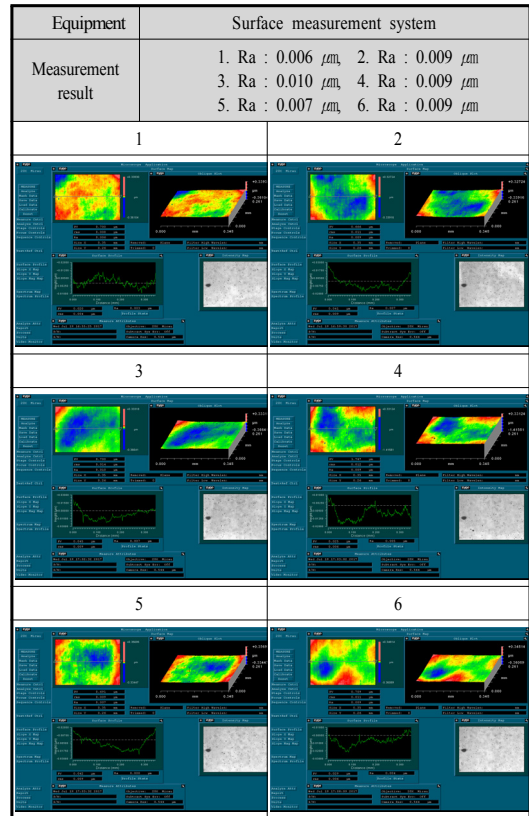


Fig. 11. Measurement results obtained with a NewView NY6300 system.

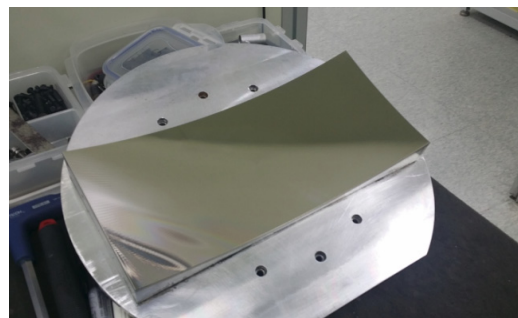
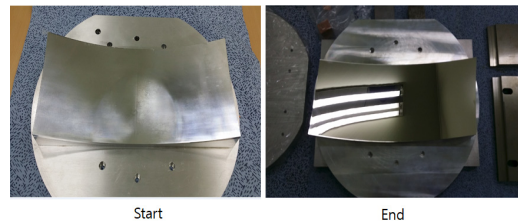


Fig. 12. Free-form shape mold (Concave Mirror) for HUD.

4. 결론

본 연구에서는 비구면 자유형상 미러의 목표규격을 형상정밀도 $1\ \mu\text{m}$ 이하, 표면조도 $0.02\ \mu\text{m}$ 이하로 설정 하였으며, 이를 만족시키기 위해 다이아몬드 터닝머신에 최적의 가공조건을 적용하여 AR-HUD 광학계용 대면적 비구면 자유형상 미러를 제작하였다. 제작된 비구면 자유형상 미러를 접촉식 비구면 형상 측정기 (Form Talysurf Series, RTH사)로 측정한 결과, 형상정밀도 (PV)는 $0.3648 \sim 0.2695\ \mu\text{m}$, 표면거칠기 (Ra)는 $0.0173 \sim 0.0162\ \mu\text{m}$ 로 나타났으며, 비접촉식 간섭계 측정기 (NewView NY6300 system, Zygo사)로 측정한 결과, $0.010 \sim 0.006\ \mu\text{m}$ 범위의 표면거칠기를 얻음으로써 설정된 목표규격 이하의 결과를 얻었음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 대면적 초정밀 광 응용부품의 개발이 한층 수월해 졌음을 의미한다. 또한 본 연구를 통하여 수립된 초정밀 다이아몬드 터닝머신 (DTM)을 이용한 대면적 비구면 자유형상 미러의 초정밀 가공기술은 향후 다양한 광학부품 및 렌즈금형의 제작에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] D. J. Han, H. H. Kim "Optical System Design of Compact Head-Up Display(HUD) using Micro Display". J. of the Academia-Industrial Society. Vol 16, No. 9 pp. 6227-6235, 2015.
- [2] Continental "Augmented Reality Head-up Display" <http://holistic-human-machine-interface.com/home-en-2-0/>
- [3] W. B. Lee, C. F. Cheung, W. M. Chiu, and T. P. Leung, "An investigation of residual form error compensation in the ultra-precision machine g of aspheric surfaces", J. of materials Processing Technology 99, pp 129-134, 2000.
- [4] S. C. Park and Y. S. Kim, "Compact Optical System Design of a Digital Camera Using Lens Modules", J. of the Korean Physical. Sci., Vol. 41, pp205-211, 2002.
- [5] Tusty, J., Smith, S. and Zamudia, C., "Operation Planning Based on Cutting Process Model," Annals of the CIRP, 39, 517-521, 1990.
- [6] R.J.P. Schrama, J. Franse., "The precision cutting process as a non-linear closed loop system" PE, Vol 10, pp. 199-207, 1988.
- [7] Dumas, P., Golini, D., & Tricard, M., "Improvement of figure and finish of diamond turned surfaces with magneto-rheological finishing (MRF)", In Window and Dome Technologies and Materials X, Vol. 5786, pp. 296-305, 2005.

박 영 덕(Young-Durk Park)

[정회원]



- 2001년 2월 : 선문대학교 산업공학과 (학사)
- 2005년 2월 : 선문대학교 일반대학원 전자통신공학과 (석사)
- 2019년 2월 : 선문대학교 일반대학원 신소재공학과 (박사)
- 2005년 5월 ~ 현재 : (재)충남테크노파크 디스플레이센터 수석연구원

<관심분야>

디스플레이 광학부품, 초정밀가공, 금속재료

장 태 석(Taesuk Jang)

[종신회원]



- 1981년 2월 : 한양대학교 공과대학 금속공학과 (학사)
- 1983년 2월 : 한양대학교 대학원 금속공학과 (석사)
- 1991년 12월 : North Carolina 주립대 재료공학과 (박사)
- 1992년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 교수

<관심분야>

자성재료, 금속재료, 전자재료