

MR Polishing을 이용한 비구면 렌즈의 연마 메커니즘 및 연마 특성 분석

이정원*, 조명우*[#], 하석재*, 홍광표*, 조용규*, 이인철*, 김병민*

*인하대학교 기계공학과

Analysis of Polishing Mechanism and Characteristics of Aspherical Lens with MR Polishing

Jung-Won Lee*, Myeong-Woo Cho*[#], Seok-Jae Ha*, Kwang-Pyo Hong*,
Yong-Kyu Cho*, In-Cheol Lee*, Byung-Min Kim*

*Department of Mechanical Engineering, Inha UNIV.

(Received 1 October 2014; received in revised form 28 November 2014; accepted 10 December 2014)

ABSTRACT

The aspherical lens was designed to be able to array a focal point. For this reason, it has very curved surface. The aspherical lens is fabricated by injection molding or diamond turning machine. With the aspherical lens, tool marks and surface roughness affect the optical characteristics, such as transmissivity. However, it is difficult to polish free form surface shapes uniformly with conventional methods. Therefore, in this paper, the ultra-precision polishing method with MR fluid was used to polish an aspherical lens with 4-axis position control systems. A Tool path and polishing mechanism were developed to polish the aspherical lens shape. An MR polishing experiment was performed using a generated tool path with a PMMA aspherical lens after the turning process. As a result, surface roughness was improved from $R_a=40.99\text{nm}$, $R_{\text{max}}=357.1\text{nm}$ to $R_a=4.54\text{nm}$, $R_{\text{max}}=35.72\text{nm}$. Finally, the MR polishing system can be applied to the finishing process of fabrication of the aspherical lens.

Key Words : MR polishing(자기유변연마), Aspherical lens(비구면렌즈), PMMA(폴리메틸메타크릴레이트), Linear velocity control(선속도 제어), Surface roughness(표면 거칠기)

1. 서 론

비구면 렌즈는 렌즈의 구면 수차 문제를 해결하고 초점을 일치시킬 수 있도록 다수의 곡면 형상으로 설계된 렌즈로 다수의 구면 렌즈를 하나의 렌즈로 대체함으

로써 광학계의 소형화 및 경량화가 가능하다는 장점이 있다.^[1] 비구면 렌즈는 일반적으로 DTM (Diamond Turning Machine)을 이용하여 절삭가공을 하거나 금형을 이용한 성형 공정으로 제작되고 있다. PMMA(poly methyl methacrylate), PC등의 플라스틱 재료의 경우 사출 공정을 통해 제작되거나 소량의 제품을 생산 시 금형제작에 많은 비용 및 시간이 소요되어 비효율적이다.^[2] 따라서 소량 생산의 경우 다이아몬드공구를 이용한 기계 가공 기술을

[#] Corresponding Author : chomwnet@inha.ac.kr
Tel: +82-32-860-7306, Fax: +82-32-868-1716

이용하여 비구면 렌즈를 가공한다. 그러나 기계적 가공을 이용한 비구면 렌즈의 제작은 절삭 가공을 통해 발생하는 가공 흔적과 잔류 응력 발생의 문제점을 가지고 있어 광학적 특성의 향상을 위해서 연마 공정이 필수적이다.^[3,5] 비구면 렌즈의 연마 공정으로는 래핑(lapping), 연삭(grinding), CMP(chemical mechanical polishing) 등이 있다. 이러한 연마 공정은 우수한 표면 거칠기의 획득이 가능하지만 자유 곡면을 가지는 3차원 구조물의 경우에는 구조적인 제약으로 인해 적용이 어려운 문제점이 있다.^[7] 이를 해결하기 위해 최근 자유 곡면에 적용이 가능한 자기유변 유체(magneto-rheological fluid)를 이용한 연마 방법이 연구되고 있다.^[6] MR polishing은 자기장을 인가하여 유체의 점성 및 전단력을 제어함으로써 우수한 표면 거칠기 획득이 가능한 연마 방법이다. 또한, 유체 형태의 공구를 사용하여 연마 면에 직접적으로 기계적인 힘이 전달되지 않아 가공 변질층의 최소화가 가능하다. MR polishing을 이용한 3차원 형상의 초정밀 연마를 위해서는 MR 유체와 공작물 사이의 간격 및 표면 형상에 따른 공구 경로 제어를 통해 일정한 가공 깊이를 유지해야 한다. 따라서 본 논문에서는 비구면 렌즈와 같은 3차원 형상의 연마를 위해 4축 이송 시스템을 설계하였고 렌즈 형상에 따른 연마 공구의 이송 메커니즘에 대해 분석하였다. 또한 렌즈 형상에 따라 생성된 연마 경로를 이용하여 선삭 가공된 PMMA 소재의 비구면 렌즈에 대한 연마 실험을 수행하였다. 최종적으로 연마된 비구면 렌즈의 표면 품위 향상 정도를 분석하였고 비구면 렌즈 연마에 대한 MR polishing 공정의 유효성에 대해 확인하였다.

2. 비구면 렌즈

비구면 렌즈는 다수의 곡면으로 이루어진 렌즈로, 포물선, 쌍곡선, 타원 등의 곡면으로 이루어져 있으며 렌즈 중심부와 외곽부의 곡률을 변경함으로써 중심부와 외곽부에 입사 광선을 하나의 상점으로 일치시킬 수 있다. 비구면 렌즈의 형상은 식 (1)과 같이 곡률 c(base curvature), 원추계수 k (conic constant), 비구면 계수 a (aspheric deformation constant)로 나타낼 수 있으며 원추계수 값에 따라 Table 1과 같이 비구면의 형상이 다르게 표현된다.^[7] 본 논문에서는 직경이 20mm인 축대칭 형상의 비구면 렌즈를 연마 모델로 선정하였다. 비구면 곡선의 곡률, 원추계수, 비구면 계수는 조명용으로 사

Table 1 Conic constant value

Conic constant	Surface type
K<-1	Hyperboloid
K=-1	Paraboloid
-1<K<0	Prolate ellipsoid
k=0	Sphere
K>0	Oblate ellipsoid

용되고 있는 렌즈를 비접촉식 3차원 형상 측정기 (Opto-Top HE, Germany)로 획득하여 역설계 작업을 통해 획득하였다. 비접촉식 3차원 형상 측정기로 획득된 형상 정보는 역설계 프로그램(Imageware, Siemens, Germany)을 이용하여 단면 정보로의 변환한 후 곡선 맞춤(curve fitting) 과정을 통해 원추 계수 (k=1.21), 곡률 (c=0.113734mm) 값을 도출하였다.

$$Z = \frac{cx^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2x^2}} + \sum_{i=1}^n a_{2i+2} X^{2i+2} + \dots \quad (1)$$

역설계 과정을 통하여 획득한 곡률과 원추계수 값을 이용하여 고차항의 비구면 계수를 좌표 값을 대입하여 연립방정식의 해로 도출하였다. 비구면 방정식은 설계시 방정식의 차수가 증가할수록 형상과의 오차율이 적어지게 되며 일반적으로는 6차 항까지 적용하여 사용한다. 따라서 본 논문에서는 앞서 결정된 곡률 및 원추 계수 값을 이용하여 고차항의 계수(a₄=0.0000983, a₆=0.000000409)를 산출하였고, 이를 이용하여 선삭 가공을 통해 PMMA 소재 비구면 렌즈를 제작하였다.

3. MR fluid를 이용한 연마시스템

3.1 MR polishing system

MR fluid는 자기장의 영향이 큰 강자성체인 철(Fe) 성분이 30~40% 정도의 부피 비율로 포함된 현탁액의 한 종류이며 자기장의 인가에 따른 점성을 제어함으로써 항복 응력을 변화시킬 수 있다. 이 때 MR fluid 입자들은 자기장 방향으로 체인 구조를 이루며 전단력이 상승함에 따라, 이를 응용하여 Fig. 1과 같이 MR fluid와 휠 사이의 상대운동에 의한 재료제거를 통하여 연마 공정을 수행하

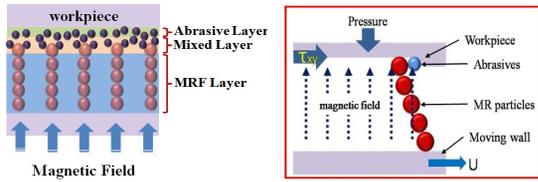


Fig. 1 Properties of MR fluid

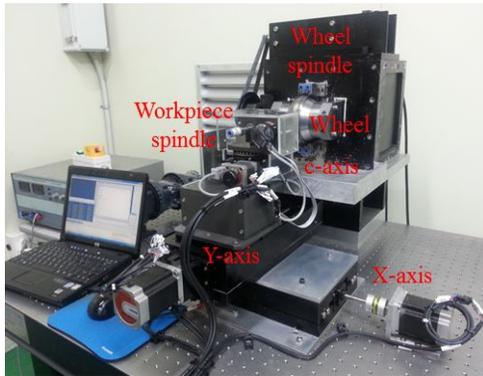


Fig. 2 Applied MR polishing system

게 된다. 이때 효율적인 연마를 위해 비자성의 연마슬러리를 공급하게 된다. 연마슬러리는 자기장에 의해 휠에 부착된 MR fluid 표면 위에 독립적으로 공급되고 공작물과의 마찰력을 증가시켜 연마 효율을 증대시킬 수 있다. Fig. 2는 제작된 MR polishing 시스템으로 공작물의 위치 제어를 위한 이송 스테이지(X, Y, Z축)와 공작물과 연마 휠 사이의 각도를 유지시키기 위한 회전 스테이지(C축)으로 구성되어 있어 비구면 렌즈의 표면 형상을 따라 연마 휠과 연마 면이 수직을 유지하면서 가공이 가능하다. 또한 축대칭 형상의 렌즈를 회전시키기 위한 스피ن들을 장착하여 선속도 제어를 통해 전체 연마 구간에서 일정한 재료 제거율을 유지하도록 시스템을 구성하였다. 공작물 회전을 위한 스피ن들은 약 7800 rpm까지 회전이 가능한 DC 서보 모터를 사용하였고 엔코더(encoder)를 장착하여 선속도 제어를 위한 피드백(feedback)이 가능하도록 구성하였다. 연마 시 공작물을 견고하게 고정시키기 위해 진공 펌프를 이용한 척킹 시스템(chucking system)을 스피ن들 부분에 장착하였다. 연마 휠 부분에는 동일 조건에서 일정한 재료제거율을 얻기 위해 MR fluid 형상 및 크기를 동일하게 유지시키도록 형상 보정장치(reformer)를

제작하였다. 정밀 이송을 위한 이송계의 제어는 PID 제어를 기반으로 하는 PMAC 제어기(Clipper, Delta tau, USA)를 사용하였고 산출된 비구면 형상의 연마 경로 좌표 값을 각 축의 이송 경로마다 지정하여 별도의 이송과 관련된 연산이 필요 없이 다음위치 좌표로 연속적으로 이송하는 방법으로 위치 제어를 수행하였다.

4. 비구면 렌즈용 PMMA 소재의 기초 연마실험

4.1 PMMA 소재 기초 연마 실험

MR polishing 시스템을 이용한 비구면 렌즈의 연마 실험을 위한 기초 연구로 PMMA 소재에 대한 연마 특성 분석에 대한 실험을 수행하였다. 연마 효율의 극대화를 위해 가공 깊이(0.4~1.2 mm)에 따른 재료 제거량을 분석하였고, 1.0 mm에서 연마 깊이가 $3.65 \mu\text{m}$ 로 나타나 가장 큰 재료 제거량을 획득하였다. 실험을 통해 산출된 가공 깊이를 적용하여 자기장의 세기(15.92 kA/m), 휠 회전속도(1236 mm/s), 이송속도(0.333 mm/s)를 고정하여 기초 이송 실험을 수행하였다. Fig. 3은 이송 실험 후 PMMA 연마 면의 표면 거칠기 측정 결과로 2.12 nm의 우수한 표면 거칠기를 획득할 수 있었다.

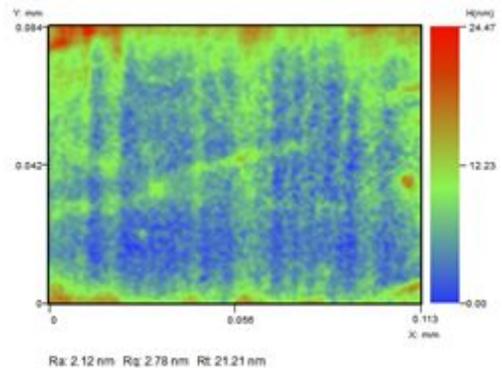


Fig. 3 Measured surface roughness at 15.92kA/m, 1236mm/s, 0.333mm/min (Ra=2.12 nm)

4.2 공작물 회전속도에 따른 표면 거칠기 분석

축대칭 비구면 렌즈의 연마 공정은 공작물의 회전을 통하여 이루어지게 된다. 공작물의 회전 시 각속도는 일정한 값을 가지며 이 때 선속도는 연마 위치에 따른 반경 r 에 따라 변화한다. 연마 시 선속도의 변화는 MR fluid와 공작물 사이의 상대 속도를 변화시키는 요인으로 작용하며, 이에 따른 재료 제거량의 변화는 형상 오차를 발생시키는 주요 원인이 된다. 이를 해결하기 위해서 Fig. 4와 같이 이송반경이 증가할수록 각속도를 감소시키는 선속도 제어를 통해 연마가공을 수행함으로써 모든 연마 구간에 대해 재료 제거량을 일정하게 유지시켜야 한다. 공작물 회전에 대한 선속도는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$v = r\omega = \frac{2\pi r}{T}$$

$$v_1 = v_2 = \dots = v_i \quad (3)$$

$$r_1\omega_1 = r_2\omega_2 = \dots = r_i\omega_i = constant$$

이 때, v 는 선속도, r 은 회전 중심과 연마 위치 사이의 반경, ω 는 공작물의 회전각속도이다. 따라서 회전 반경이 증가할수록 각속도를 감소시켜 연마 가공 시 선속도를 일정하게 유지하면서 연마 가공을 수행해야 한다. 선속도 제어의 기초 실험으로 비구면 렌즈의 공작물 회전 속도에 따른 표면 거칠기 분석에 대한 실험을 수행하였다. 실험을 위해 Table 2와 같이 휠 회전속도, 자기장 세기, 가공 깊이를 고정하고 공작물 회전 방향과 휠의 회전 방향을 반대로 회전시켜 공작물 회전 속도에 따른 표

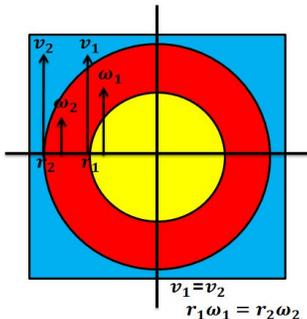


Fig. 4 Control mechanism of the linear velocity

Table 2 Experimental conditions for workpiece rotation speed

Workpiece rotation speed	209/418/628/836 mm/s (50/100/150/200 rpm)
Wheel speed	1236 mm/s
Magnetic field	15.92 kA/m
Gap distance	1.0 mm

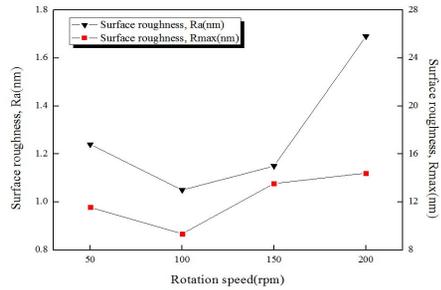


Fig. 5 Results of surface roughness with workpiece rotation speed

면 거칠기 변화를 분석하였다.

Fig. 5는 공작물 회전 속도에 따른 실험결과로 공작물 회전속도가 증가함에 따라 표면 거칠기가 향상되었으나 418mm/s 이상에서 표면 품질이 저하되었다. 이는 휠과 공작물의 상대속도가 증가함에 따라 표면이 향상되나 일정 크기 이상의 상대속도에서 연마 지점으로 연마재의 공급이 원활하게 이루어지지 않아 연마 효율이 저하되어 표면 거칠기가 상승된 것으로 판단된다. 기초 실험을 바탕으로 공작물의 회전 속도를 418mm/s로 유지하여 비구면 렌즈의 연마 실험을 진행하였다.

5. 비구면 렌즈의 초정밀 연마

5.1 가공 경로 생성 및 제어

개발된 MR polishing 시스템을 이용한 비구면 렌즈의 연마 공정을 위해서는 곡면 형상을 따라 연마 휠을 수직인 상태로 유지시켜야 한다. 본 연구에서는 비구면 방정식을 미분하여 연마 위치별 접선벡터(Tangent vector)와 법선벡터(Normal vector)를 계산하여

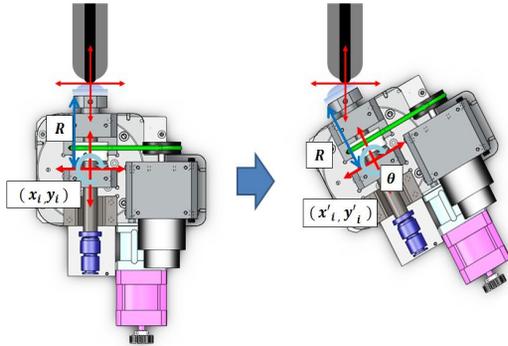


Fig. 6 Schematic of transformation system of rotation stage and coordinate

공작물의 기울임(Tilting) 각도를 도출하였고, 도출된 회전 각도를 이용하여 회전 변환을 통해 가공 경로를 생성하여 비구면 렌즈의 연마를 수행하였다.

가공 시 비구면의 각 위치별 법선벡터의 방향을 도출하기 위한 기울기 및 회전 각도를 계산하기 위해 앞서 도출된 비구면 방정식을 미분하여 계산하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$z'(x) = \frac{2cx(1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2x^2}) - c^3x^3(k+1)[1 - (k+1)c^2x^2]^{-\frac{3}{2}}}{2 + 2\sqrt{1 - (k+1)c^2x^2} - (k+1)c^2x^2 + 4a_4x^3 + 6a_6x^5} \quad (4)$$

앞서 미분된 비구면 방정식을 통하여 기울기 값을 도출할 수 있으며 비구면 곡면에 따른 각도 θ 값은 식(5)과 같이 표현된다.

$$\tan\theta = Z'(x) \quad \therefore \theta = \tan^{-1}Z'(x) \quad (5)$$

MR polishing system은 Fig. 6과 같이 공작물의 회전 중심이 회전 스테이지 중심에 있기 때문에 비구면 렌즈 좌표에서 회전 축 중심으로의 좌표 변환이 필요하며 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y-R \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x\cos\theta - (y-R)\sin\theta \\ x\sin\theta + (y-R)\cos\theta \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

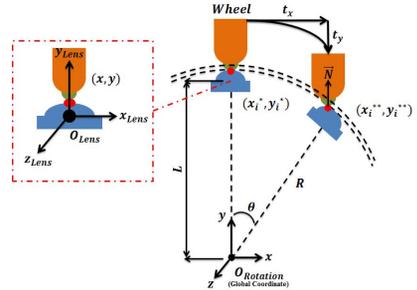


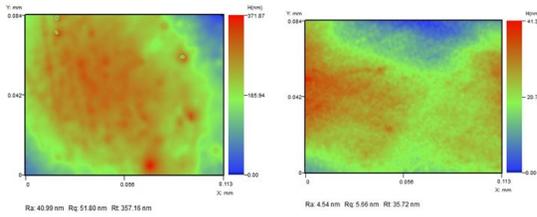
Fig. 7 Tool path and offset aspheric curve with rotation angle

MR polishing 공정에서 연마 깊이는 재료 제거량과 표면 거칠기에 영향을 주는 주요 인자로 작용한다. 따라서 일정한 재료 제거량을 유지시키기 위해서 비구면 형상의 법선 방향을 따라 연마 깊이만큼 오프셋 곡선(Offset curve)을 생성하여 이송 경로를 생성해야 한다. 비구면 렌즈의 형상에 대한 오프셋 곡선 좌표는 식(7)을 통하여 나타낼 수 있다. 여기서 g 는 MR polishing 공정에서 휠 표면과 비구면 렌즈에 대한 연마 깊이이며, θ_n 은 법선 벡터의 각도이다. Fig. 7은 회전 변환 후 최종적으로 도출되는 좌표값을 이용하여 비구면 렌즈 연마 가공 경로를 도식화한 그림이다.

$$\begin{aligned} x_i &= x^{**} + g\cos\theta_n \\ y_i &= y^{**} + g\sin\theta_n \end{aligned} \quad (7)$$

5.2 비구면 렌즈 연마 실험

비구면 렌즈의 경우 일반적인 DTM 또는 금형을 통한 비구면 렌즈 제작 시 $1\mu\text{m}$ 이하의 형상 정도를 가지고 있어야 하며 연마 공정 후 $0.1\mu\text{m}$ 이하의 형상 정도를 보유하고 있어야 한다.^[8] 본 연구에서는 3차원 형상 측정기 이용하여 위치별 좌표값을 도출하였으며 CNC 선반을 통해 PMMA 소재 비구면 렌즈를 제작하였다. 제작된 비구면 렌즈의 중심부 높이는 5.28mm, 직경은 18mm로 상용 CAM 프로그램인 Feature CAM을 통하여 황삭과 정삭으로 나누어 절삭 가공을



(a) CNC turning (b) MR polishing
Fig. 8 Comparison with surface roughness before and after MR polishing



Fig. 9 Comparison of aspheric lens before and after MR polishing

6. 결론

본 연구에서는 비구면 렌즈의 초정밀 연마를 위해 MR polishing 시스템을 구축하였고 연마 메커니즘에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 조명용으로 사용되는 비구면 렌즈를 형상 역공학을 통해 형상 데이터를 추출하고 비구면 방정식을 통해 비구면 계수를 도출하였다. 기초 실험을 통해 비구면 렌즈를 위한 최적의 조건을 도출하였고 균일한 연마를 위해 이송 경로 제어 및 선속도 제어 방법에 대한 연구를 수행하였다. 생성된 이송 경로를 이용하여 PMMA 소재에 대한 연마 공정을 수행한 결과, MR polishing 공정 전후 표면 거칠기는 $R_a=40.99$ nm, $R_{max}=357.16$ nm에서 $R_a=4.54$ nm, $R_{max}=35.72$ nm로 매우 우수한 표면 품질을 획득할 수 있었다. 이를 통해 기존 고가의 DTM 장비를 이용한 비구면 렌즈 제작 공정을 CNC 선반 가공 및 MR polishing 연마 공정으로의 대체 가능성을 확인하였다.

후기

수행하였다. 선반 가공에 사용된 공구는 고속도강 바이트를 이용하였으며 0.025 mm/rev의 이송속도로 가공하였다.

제작된 PMMA 비구면 렌즈를 이용하여 각 연마 구간별로 공작물의 회전 각속도를 제어함으로써 연마 지점의 선속도를 일정하게 유지하면서 연마 공정을 수행하였다. 가공 조건은 기초 실험을 바탕으로 산출된 최적 조건 하에서 연마를 진행하였다. Fig. 8은 CNC 선반 가공 이후의 표면과 연마 공정 이후의 표면을 분석한 결과로 선반 가공 후 측정된 표면 거칠기인 $R_a=40.99$ nm, $R_{max}=357.16$ nm에서 $R_a=4.54$ nm, $R_{max}=35.72$ nm로 각각 1/10 정도로 표면 거칠기가 감소함을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 CNC 선반을 통해 가공된 비구면 렌즈와 연마 공정을 거친 렌즈를 비교한 것으로 CNC 선반을 가공 이후의 비구면 렌즈는 가공 후 가공 흔적(tool mark)으로 인하여 낮은 투과 특성으로 인해 후면의 글씨가 보이지 않는 반면, 연마 이후의 렌즈는 높은 투과 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다.

이 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구 (No. 2012R1A1A2008399, 2014R1A1A1007840)의 결과로써 이에 감사드립니다.

References

1. Kim, H. S., Park, K. Y., 2007, Ashperical lens design and development of spherical aberration measuring system by use od spherical aberration., J. Kor. Soc. Mach. Tool. Eng. (16:6) 175-180.
2. Yank, J. S., Yang, S. C., Kim, G. H., Kim, H. S., kim, M. S., Won, J. H., 2006, Ultra Precision Machining Characetristics of HMD Optics System used PMMA, J. of the Kor. Soc. Pre. Eng. Menuf. (23:6) 1637-1653.
3. Yoshizumi, K. Murao, T., Imanaka, R., Okino, Y., 1987, Lutra High Accuracy 3-D profiler, App. Opt. (26:9)

1637-1653.

4. Lee, H. C., Kim, J. E., 2007, Development of polishing machine of aspherical glass lens mold with airbag tool, Proc. Kor. Soc. Mach. Tool. Eng. Autumn Conf. 51-54.
5. Faehnle, O. W. Hedser, H. Brug, Van, 1999, Novel Approaches to Generate Aspherical Optical Surfaces, Opt. Manuf. Test. III, 170-180.
6. Shin, Y. J., Kim, D. W., Lee. E. S., Kim, K. W., 2004, The Development of Polishing System a Magnetorheological Fluids, J. Kor. Soc. Pre. Eng. Manuf. (21:7) 46-52.
7. Kim, H. Y., Cha. D. H., Lee, D. G., Kim, S. S., Kim, H. J., Kim, J. H., 2006, Optical Properties of Aspheric Glass Lens for Mobile Phone Module, The Opt. Soc. Kor. Summ. Meet. 163-164.
8. Korea Research Institute of Standards and Science, 2005, Optical Testing and Evaluation 2, Kor. Res. Ins. of Stand. and Sci.