

비구면 렌즈 몰드 코어 연마를 위한 MR Fluid Jet Polishing System의 경로 제어에 관한 연구

김기범¹ · 조명우^{1, #} · 하석재¹ · 조용규¹ · 송기혁¹ · 양지경¹ · Cai Yue¹ · 이정원²

Path Control of MR Fluid Jet Polishing System for the Polishing of an Aspherical Lens Mold Core

K. B. Kim, M. W. Cho, S. J. Ha, Y. K. Cho, K. H. Song, J. K. Yang, Y. Cai, J. W. Lee

(Received October 6, 2015 / Revised October 27, 2015 / Accepted November 9, 2015)

Abstract

MR fluid can change viscosity in the presence of a magnetic field. A characteristic of MR fluid is reduced scattering during jetting. For these reasons a MR fluid jet polishing system can be used for ultra-precision polishing. In the current paper, the polishing path was calculated considering the aspherical lens profile equation and the experimental conditions for the MR fluid jet polishing system. Then the polishing of an aspherical lens mold core using the MR fluid jet polishing system with the calculated path control was made and the results were compared before and after polishing.

Key Words: MR Fluid, Jet Polishing, Aspherical Lens, Path Control, Mold Core, Ultra Precision

1. 서 론

비구면 렌즈는 기존의 구면 형상의 렌즈에서 발생하는 수차 문제를 극복할 뿐만 아니라 렌즈의 소형화 및 경량화 등의 장점을 가지고 있기 때문에 CDP, 복사기, 빔 프로젝터 등 다양한 광학기기의 부품으로 활용되고 있다. 하지만 비구면 렌즈의 경우가공 경로가 자유곡면이기 때문에 제작이 어렵고 생산 비용이 높다는 문제 때문에 사용에 제약이 있다[1].

일반적으로 렌즈는 유리 재질을 사용하여 DTM(Diamond Turning machine), 5축가공기 등을 이용하여 제작되고 있다[2]. 하지만 생산성 향상과 비용 절감을 위하여 재질은 유리에서 플라스틱으로 대체되었고 제작도 금형을 이용하여 사출하는 방법으로 변화되고 있다. 금형을 이용하여 사출하는 경우 금

형 표면이 그대로 사출 품에 전사되어서 표면의 품위가 굉장히 중요한 요소이므로 금형 표면의 연마를 통한 표면 품위 향상이 필수적이다.

일반적으로 사용되는 연마방법에는 화학적 연마 방법과 기계적 연마 방법이 있다. 화학적 연마 방법은 전해연마와 같이 용액 안의 대상물에 전기를 인가하여 전기화학적 반응으로 표면을 연마 한다. 이러한 방법은 대상물을 용액에 담그기 때문에 형상에 대한 제약은 없지만 연마되는 형상 제어가 어렵다는 단점이 있다. 이와는 다르게 기계적 연마 방법은 래핑과 같이 직접적인 접촉을 통하여 표면을 연마한다. 이 경우 표면에 잔류 응력과 같은 문제가 발생하며 또한 금형 코어와 같이 오목한 형상의 경우 간섭에 의해 연마가 어렵다는 단점이 있다.

MR fluid jet polishing system은 유체를 분사하여 연마하기 때문에 오목한 형상에서도 간섭이 일어나지

1. 인하대학교 기계공학과

2. 한국발명진흥회

Corresponding Author: Dept. of Mechanical Engineering, Inha University, E-mail: chomwnet@inha.ac.kr

않으며 표면에 잔류응력을 발생시키지 않는다. 또한 일정한 연마 스팟을 유지하기 때문에 연마 형상 제어를 할 수 있다.

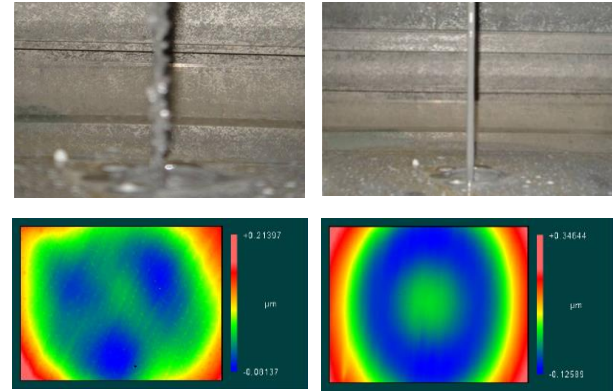
본 논문에서는 MR fluid jet polishing system 이용하여 비구면 렌즈 금형 코어 연마를 수행하였다. 이를 위하여 유압 시스템 및 모션 시스템을 구성하였고 수학적 계산을 통하여 비구면 경로를 도출하였다. 도출된 비구면 경로는 모션 컨트롤러를 이용하여 제어 하였고 이를 통하여 비구면 렌즈 금형 코어 연마 및 결과를 측정하였다.

2. MR fluid jet polishing system

MR fluid jet polishing 공정은 자기유변유체를 대상물 표면에 분사하여 연마하는 공정으로 이때 사용되는 자기유변유체는 자성입자인 CI(Carbonyl-Iron) Powder가 포함되어 있어서 자성에 따라 그 점성이 변화하게 된다. 이러한 특징은 일반적인 워터 젯에서 발생하는 유체의 분산을 획기적으로 줄일 수 있어 초정밀 연마에 적합하다. 자기장 유무에 다른 자기유변유체의 분산 및 연마 스팟 프로파일은 Fig. 1에 나타나 있다. 연마 스팟 프로파일 측정은 비접촉식 측정기인 Newview 7200(ZYGO, USA)을 이용하여 측정하였다.

비구면 렌즈 금형 코어에 사용되는 MR fluid jet polishing system은 크게 자기유변유체를 안정적으로 토출할 수 있는 유압시스템과 공작물을 정밀하게 이동시킬 수 있는 모션시스템으로 나눌 수 있다. 먼저 유압시스템의 경우 Fig. 2와 같이 펌프, 체크 밸브, 릴리프 밸브, 어큐뮬레이터, 노즐, 전자석으로 구성되어 있다. 펌프는 모터를 이용하여 유체를 고압의 상태로 만들어 주고, 체크 밸브의 경우 유압시스템에서 유체가 역방향으로 흐르는 것을 방지하여 주며 릴리프 밸브는 유압시스템에서 유체압력이 일정 압력 이상 올라가지 않도록 해준다. 어큐뮬레이터의 경우 유압시스템 내의 불안정을 안정화 시켜 준다. 노즐은 최종적으로 유체가 분사되는 직경을 결정해주고 전자석은 노즐에 자기장을 인가하여 자기유변유체의 점성을 변화시킨다.

모션시스템의 경우 Fig. 3과 같이 직선으로 이송하는 X, Y, Z축 3축과 공작물에 기울기를 줄 수 있는 틸팅 축, 그리고 공작물을 회전시킬 수 있는 스핀들 축으로 구성하였다. 직선 축의 경우 분해능 1 μ m/Pulse,



(a) Without Magnetic field (b) With magnetic field
Fig. 1 MR fluid jet shape and spot profile

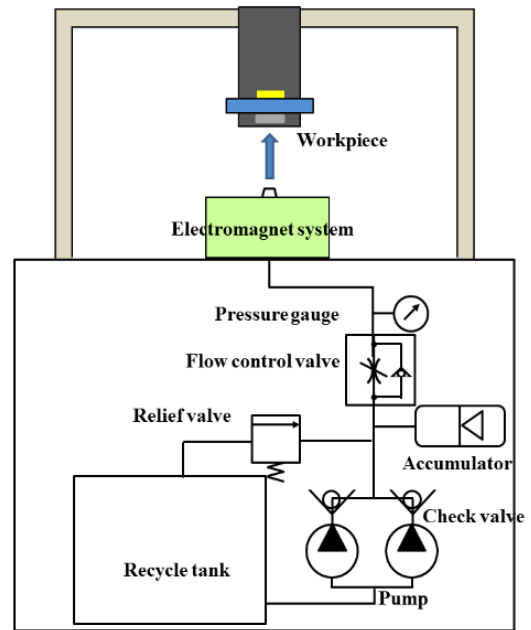


Fig. 2 MR fluid jet polishing hydraulic system

정밀도 $\pm 0.02\text{mm}$ 를 가지는 Alpha robotics社의 리니어 스테이지를 사용하였으며 틸팅 축의 경우 분해능 0.004°/Pulse, 정밀도 0.025°를 가지는 Rotation 스테이지를 사용하였다. 마지막으로 회전 축의 경우 최대 7800rpm까지 일정한 회전이 가능한 maxon motor社의 DC 서보 모터를 사용하였다.

일반적인 NC 데이터를 이용하여 제어하는 방식의 경우 G-code를 이용하기 때문에 비구면 경로는 제어하기 어렵지만 Delta Tau社의 PMAC 컨트롤러의 경우 직접 함수를 이용하여 제어하기 때문에 비구면 경로 제어에 적합하다.

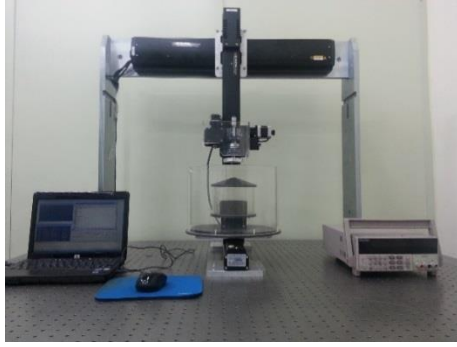


Fig. 3 MR fluid jet polishing motion system

3. 비구면 렌즈 금형 코어 경로 생성

비구면 렌즈의 금형 코어 형상은 비선형적인 곡선으로 이루어져 있어 동일한 재료 제거율 확보를 위한 가공 경로 생성이 필수적이다. 따라서 본 논문에서는 비구면 형상 정보와 MR fluid jet system의 최적 연마 조건을 이용하여 초정밀 연마를 위한 가공 경로를 생성하였다.

이전 연구를 통하여 확인한 MR fluid jet polishing system을 이용한 초정밀 연마 공정의 최적 연마 조건은 유체가 대상물 표면에 수직하게 분사되어야 하며 노즐 끝에서 대상물 표면까지의 거리인 Stand-off distance를 일정하게 유지하는 것이다. 이를 위해서 틸팅 스테이지를 이용하여 분사 유체와 대상물 표면이 수직을 유지하게 하고 또한 직선 축의 이송을 통하여 MR fluid jet polishing system의 Stand-off distance가 일정하도록 위치 제어를 동시에 진행하였다.

금형 코어의 바닥 면과 분사되는 유체가 이루는 각도 식(3)는 다음과 같은 비구면 렌즈식 식(1)과 이에 대한 미분 방정식 식(2)를 이용하여 계산된다. 여기서 c 는 곡률이며 a_n 은 비구면계수 이다.

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

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

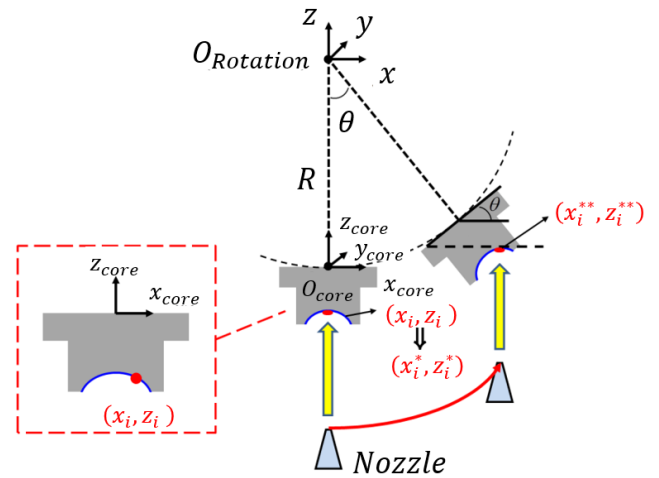


Fig. 4 Parameter of motion system

$$\theta_i = \tan^{-1}(z'(x_i)) \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} x_i^* \\ y_i^* \\ z_i^* \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -R \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} x_i^{**} \\ y_i^{**} \\ z_i^{**} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i^* \\ y_i^* \\ z_i^* \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \cos\theta + (R - z_i) \sin\theta \\ y_i \\ x_i \sin\theta + (z_i - R) \cos\theta \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} x_i^{***} \\ y_i^{***} \\ z_i^{***} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -R \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i^{**} \\ y_i^{**} \\ z_i^{**} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$= \begin{bmatrix} x_i \cos\theta + (R - z_i) \sin\theta \\ y_i \\ x_i \sin\theta + (z_i - R) \cos\theta + D_N \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$f_i = F \times |x_i|$$

여기에서 회전 스테이지가 θ 만큼 회전함에 따라 식(4)와 같이 좌표 변환 과정을 거치게 된다.

이 때 R 은 회전 스테이지의 중심으로부터 금형 코어 바닥 면까지의 거리가 된다. 변환된 좌표는 다음과 같은 회전변환 과정을 거치게 되어 실제 연마 곡면의 좌표로 변환된다.

연마 스팟 위치 및 Stand-off distance를 일정하게 유지시키기 위해 회전 스테이지의 회전 이송에 따른 연마 곡면의 좌표 변화에 대한 노즐의 x 축 위치와 z 축 위치 보상이 필요하다. 이 때 노즐의 궤적은 연마 곡면의 좌표 변화와 같은 궤적을 가지며 다음 식(6)과 같이 나타낼 수 있다. 여기에서 D_N 은 회전 스테이지의 회전 중심축으로부터 노즐 끝까지의 거리를 의미한다.

회전 대칭 형상의 연마 시 균일한 연마를 위해서는 시편의 회전 반경에 따라 각속도 또는 이송 속도의 제어가 필수적이다. 이송 속도는 이전의 기초 실험 데이터를 바탕으로 다음 식(7)을 이용하여 계산하였다[3].

여기에서 F 는 이전의 연구에서 산출된 최적 이송 속도이고 $|x_c|$ 는 코어의 중심축으로부터 연마 위치까지의 거리를 의미한다.

일련의 계산을 통하여 최종적으로 비구면 렌즈 연마를 위한 회전 스테이지의 회전 각도, 회전 이송 따른 노즐 위치의 x , z 축 좌표, 연마 위치에 따른 이송 속도를 계산하여 비구면 금형 코어 연마를 위한 경로를 도출하였다.

4. 비구면 렌즈 금형 코어 연마 경로 생성

본 논문에서는 비구면 렌즈 금형 코어의 재질로 일반적으로 많이 쓰이는 Nickel과 Brass를 선정하였다. 설계된 금형 코어의 3차원 형상과 치수는 Fig. 5에 나타내었으며 가공은 범용 CNC 선반을 이용하였다. 가공은 황삭과 정삭 두 단계로 하여 진행하였으며 공작물과 공구 홀더와의 간섭을 피하기 위하여 공작물 외곽부터 중심부로 이송경로를 설정하였다. 공구는 다이아몬드 팁을 이용하였다.

실험에 사용된 자기유변유체의 조성은 Table 1과 같으며 연마 효율을 높이기 위해서 연마재인 Nanoceria 입자를 첨가 하였고 또한 분산 안정제로 글리세린과 산화 방지를 위해 Na_2CO_3 를 첨가 하였다. 실험 조건은 이전 연구의 기초실험을 참고로 하여

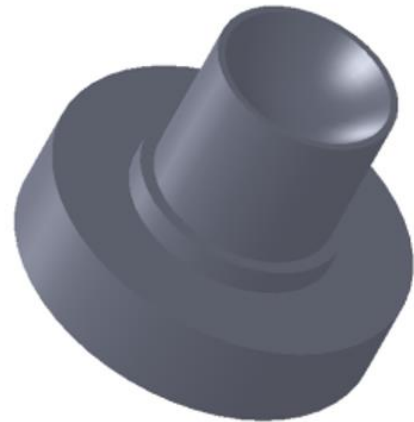
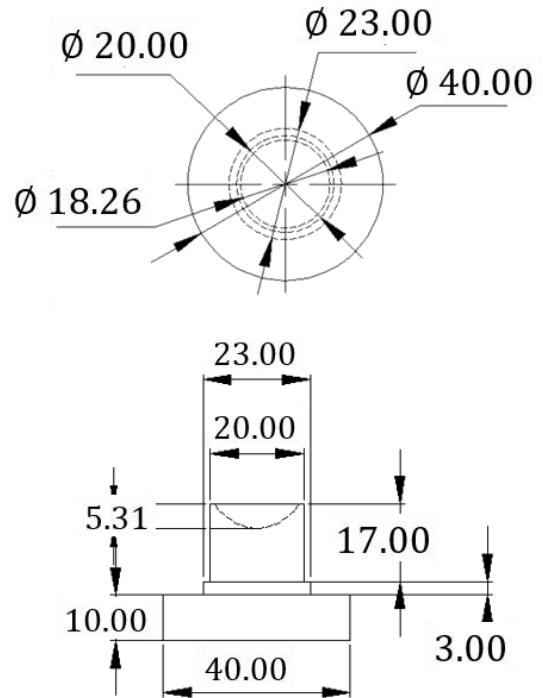


Fig. 5 Design of Aspherical lens mold core

Table 2와 같이 자기장 1500G, Stand-off distance 30mm, x 축 이송 속도 0.033mm/s, 스피들 회전 속도 100rpm, 토출 압력 10bar로 하였다.

5. 실험 결과 및 분석

비구면 렌즈용 금형 코어의 연마 전 가공시편, 연마 후 시편은 그림에 나타나 있다. Fig. 6에서 보듯이 연마 전 가공 시편의 경우 표면에 다이아몬드 팁에 의한 선명한 툴 마크가 남아 있었으나 연마 후에는 Fig. 8과 같이 툴 마크가 사라지고 표면이 매끄러워졌다.

Table 1 Compositions of the MR fluid

	CI	Nano ceria	Di-water	Stabilizer	
				Glycerine	NA ₂ CO ₃
Ratio (wt%)	65	13	20	1	1

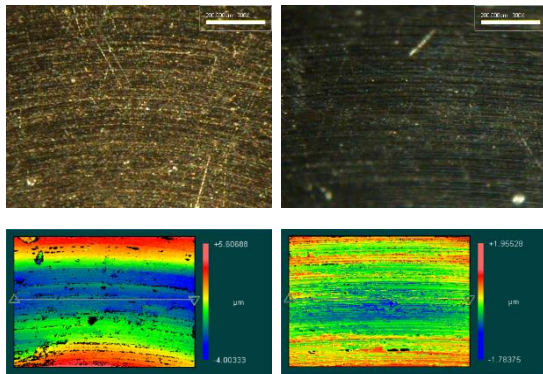
Table 2 Experimental conditions

Magnetic field [G]	Stand-off [mm]	Feed rate [min/sec]	Spindle [rpm]	Pressure [bar]
1500	30	0.033	100	10



(a)Brass (b)Nickel

Fig. 6 Aspherical lens mold core before polishing



(a)Brass (b)Nickel

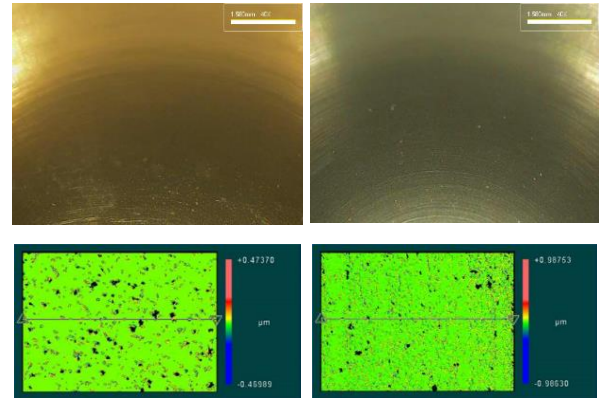
Fig. 7 Surface roughness of aspherical lens mold core before polishing

러워진 것을 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 7, Fig. 9와 같이 표면 거칠기를 측정된 결과 Nickel의 경우 연마 전 시편의 표면 거칠기는 PV 1.5 μ m, Ra 204nm에서 연마 후 시편의 표면 거칠기는 PV 0.22 μ m, 1.04nm로 향상되었고 Brass의 경우 연마 전 시편의 표면 거칠기는 PV 1.7 μ m, Ra 190nm에서 연마 후 시편의 표면 거칠기는 PV 0.085 μ m, Ra 0.52nm로 향상된 것을 확인하였다.



(a)Brass (b)Nickel

Fig. 8 Aspherical lens mold core lens after polishing



(a)Brass (b)Nickel

Fig. 9 Surface roughness of aspherical lens mold core after polishing

6. 결론

본 논문에서는 자성에 따라 점성이 변화하는 유체인 자기유변유체를 사용하는 MR fluid jet polishing system을 이용하여 비구면 렌즈용 금형 코어를 연마하였다. 이를 위하여 MR fluid jet polishing system을 유체를 분사하며 자기장을 인가할 수 있는 유압시스템과 복잡한 형상을 연마할 수 있도록 직선 스테이지와 틸팅, 스테이지 그리고 스피들로 되어있는 모션 시스템으로 구성하였다. 또한 비구면 렌즈 형상 방정식과 MR fluid jet polishing system의 연마 조건을 고려하여 가공 경로를 생성하였고 PMAC 컨트롤러를 이용하여 제어하였다. 연마 실험 결과 측정을 통하여 Nickel과 Brass 재질 모두 연마 전 시편에 비하여 연마 후 시편의 표면 품질이 상당히 향상되었음을 확인하였다. 이를 통하여 MR fluid jet polishing system의 비구면 렌즈 금형 코어 연마에 대한 적용 가능성을 확인하였다. 이후 금형 코어 뿐만 아니라

공구 간섭과 표면 형상에 의해 제한을 받아 초정밀 연마가 어려운 대상물에 대한 연구가 필요하다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(NRF - 2012R1A1A2008399)와 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF - 2015R1A2A2A01005811).

REFERENCES

- [1] H. Y. Kim, D. H. Cha, D. G. Lee, S. S. Kim, H. J. Kim, J. H. Kim, 2006, The Optical Society of Korea Summer Meeting, Opt. Soc. Kor., Seoul, Korea, Vol.19, No. 11, pp. 425~426.
- [2] M. H. Kook, N. J. Chun, Y. I. Kim, G. H. Kim, 2008, Proc. Kor. Soc. Precis. Eng. Spring Conf., Kor. Soc. Precis. Eng., Seoul, Korea, pp. 391~392.
- [3] J. W. Lee, 2013, A Study on MR Fluid Jet Polishing System Development and Ultra Precision Polishing Method of Mold Core for Aspherical Lens Fabrication, Ph. D. Dissertation, Inha University.
- [4] K. B. Kim, J. W. Lee, K. P. Hong, S. J. Ha, Y. G. Cho H. J. Lee, M. W. Cho, 2013, Proc. KSMTE Autumn Conf., Kor. Soc. Manuf. Technol. Eng., Seoul, Korea, pp.246.
- [5] H. C. Lee, J. U. Kim, H. H. Kang, D. S. Kim, 2009, Tool Mark Removal Method of Aspherical Glass Lens Mold by Reverse-rotational Eccentric Motion, Trans. Mater. Process., Vol. 18, No. 2, pp. 172~176.