

# MR polishing에 의한 광경화성수지 성형용 글래스 몰드의 투과율 및 표면품위 향상

이정원<sup>1</sup>, 김동우<sup>2</sup>, 조명우<sup>#</sup>

## Improvement of Transmittance and Surface Integrity of Glass Mold for light-hardening polymer Using MR Polishing

J. W. Lee, D. W. Kim, M. W. Cho

### Abstract

In general, Light-hardening polymer was used UV nanoimprint technology. A light-hardening polymer was had the problem of poor hardness, durability. In order to overcome the problem of polymer, inter change optical glass. However glass is very manufacture and a lowering of standars transmittance. In order to glass recover was necessary polishing process. The process is magnetorheological fluids polishing. MR polishing has been developed as a new precision finishing technique to obtain a fine surface. Hence, Magnetorheological fluids has been used for micro polishing to get micro parts. This polishing process guarantees high polishing quality by controlling the fluid density electrically. The applied material in experiments is fused silica glass. Fused silica glass is widely used in the optical field because of high degree of purity. For MR polishing experiments, MR fluid was composed with DI-water, carbonyl iron and nano slurry ceria. The wheel speed and electric current were chosen as the variables for analyzing the characteristics of MR polishing process. Outstanding surface roughness of Ra=1.58nm was obtained on the fused silica glass specimen. And originally glass transmittance was recover on the fused silica glass.

**Key Words :** Light-hardening polymer(광경화성 수지), Fused silica glass(실리카 클래스), Transmittance(투과율), Surface roughness(표면거칠기), Magnetorheological fluids polishing(MR 폴리싱)

### 1. 서 론

자외선으로 경화하는 광경화 성수지는 대부분 쾌속 조형(rapid prototyping)에 사용되는 수지로 환경 친화적인 수지의 하나로 주목 받고 있다.[1] 광경화성 수지는 중합 후 그 수지의 물성과 성능을 그대로 결정하는 프레폴리머를 중심으로 수지 점도를 조정하는 역할을 하는 모노머 및 광 중합개시제, 첨가제로 구성되어 있다. 광경화성 수지의 장점으로는 열건조·열경화에 비하여 경화 시간이 짧아 생산성이 좋다. 또한 고온에서 성질이 변하지 않으며 굴절율이 유리 와 비슷하다.[2] 그래서 광경화성 수지는 반도체,

FPD, 바이오 산업에 많이 사용되고 있다. 이러한 장점들이 있는 광경화성 수지로 이용한 제품 제작 하는 방법으로는 UV를 이용한 나노임프린트 리소그래피 기술이 있다. UV light를 이용한 UV 나노임프린트는 광경화 반응을 이용하여 형상을 제작하는 방법으로 상온 저압에서 모사가 가능한 장점을 지니고 있다. 여기에 사용되는 형상 스템프 즉 마스터mold로는 polymer 재질인 PMMA나 PDMS를 이용하여 형상을 제작을 한다.[3] PMMA나 PDMS는 가볍고 가공이 용이하나 표면 경도가 낮고 마찰에 의해 긁히기 쉽고 용제에 대한 내구성이 좋지 않으므로 그대로 사용할 경우 쉽게 손상되어 투과성이

1. 인하대학교

2. 인하대학교

# 교신저자: 인하대학교, E-mail:chomwnet@inha.ac.kr

떨어지는 등 사용상 제한을 가지고 있다. 또한 열변형에 의해 여러층의 정렬이 어렵다는 단점을 지니고 있다.[4] 이러한 문제점을 해결하기 위하여 높은 투과성을 지니고 광학적 용도로 많이 사용되는 광학glass재질로 제작을 위한 연구가 진행중이다. 하지만 glass재질의 문제점으로 취성재료이므로 가공하기가 어렵고 가공 후 발생하는 투과성 저하라는 단점을 지니고 있다. 투과성 저하 해결하기 위해 연마기술의 연구가 진행이 되었는데 전자기적으로 유체의 농도를 조절하여 고품위의 형상 제작을 할 수 있는 방법으로 자기유변유체를 이용한 연마방법이 있다.[5]

본 논문에서는 glass 마스터 mold 제작을 위한 가공시 발생하는 투과성 저하에 대한 회복에 관한 연구를 수행하였다.

## 2. Glass 마스터 mold 재료

### 2.1 Fused silica glass

본 논문에 사용될 재료로 투과성이 높은 glass 소재인 fused silica glass 이다. Fused silica glass는 순수한 규산 (SiO<sub>2</sub>) 이루어진 불순물 이 수백 ppm이하인 고순도의 규산을 고온 (약 2,000도 이상)에서 용융하여 제조한 유리이다. Fused silica glass는 매우 낮은 열 팽창계수와 훌륭한 광학 성질 그리고 넓은 범위의 스펙트럼 레인지 중 특히 자외선에 우수한 투과율을 가지고 있다. Fused silica glass는 열 충격 및 스크래치에 대한 저항력을 가지고 있다. Fused silica glass의 특징으로 다음과 같다

1. 열 충격 저항에 상당히 좋음
2. 화학적 저항성이 좋음
3. 좋은 polished의 마무리 작업이 가능
4. 좋은 UV 투명도

**Table 1 Mechanical Properties of Fused Silica Glass**

Parameter	Standard
Density	2.201 g/cm <sup>3</sup>
Shear Modulus	31Gpa at 25°C
Young's Modulus	73Gpa at 25°C
Tensile Strength	50MPa
Compressive Strength	1.1Gpa
Knoop Hardness	500kg/mm <sup>2</sup>

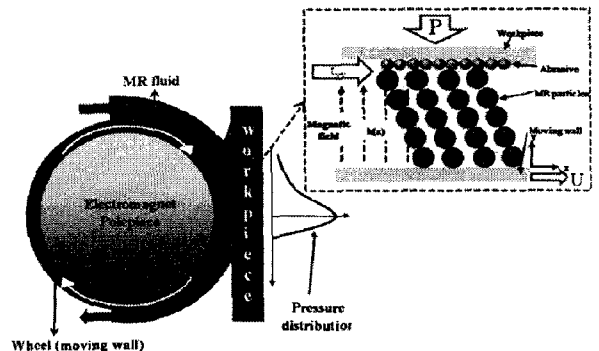
**Table 2 Mechanical Properties of Fused Silica Glass**

Parameter	Standard
Specific Heat Capacity	703 J/Kg K
Coefficient of Expansion	0.55x10 <sup>-6</sup> /°C
Softening Point	1600°C
Strain Point	1025°C
Melting Point	1713°C

## 3. 투과율 회복 위한 공정

### 3.1 MR Polishing 공정

자기유변유체(MR fluid)는 자기장에 민감한 철(Fe) 성분 입자들이 떠다니는 현탁액이며 자기장의 세기에 따라 유동 특성이 실시간으로 제어되는 스마트(smart) 재료 중 하나이다. 입자들의 직경은 수  $\mu\text{m}$  정도이고 30 ~ 40 % 정도의 부피 비율로 포함되어 있다. MR Polishing에 이용되는 자기유변유체를 제작하기 위하여 쓰이는 자장에 민감한 입자들은 carbonyl iron (CI) 분말이다.



**Fig. 1 The figure of polishing principle using a Magnetorheological**

Fig. 1 와 같이 carbonyl iron 분말은 iron pentacarbonyl을 분해할 때 생산되며 구(sphere)형상의 철이며 일반적으로 2~6 $\mu\text{m}$ 의 직경을 갖는다. 미세연마공정에 적용되는 표준 슬러리로 는 자성입자, 연마입자, 그리고 운반유체인 DI-water로 구성되어 있으며, 여기에 소량의 분산안정제가 첨가된다. 미세연마공정에서 재료제거율을 높이기 위하여 비자성 연마제를 함유한다. 분산안정제로서 글리세롤(glycerol)을 사용하는데 이는 자기유변유체의 점성을 증가시켜주고 연마입자들과 자기유변

유체의 혼합을 조절하는데 도움을 준다. 또 다른 분산안정제로  $\text{Na}_2\text{O}_3$ 를 사용하는데 이는 자기유변 유체의 부식을 막는 역할을 한다. MR유체를 이용한 연마공정은 MR유체가 자기장의 영향을 받는 휠에 부착이 되어 지속적으로 회전하는 동안 연마가 진행이 되고 이 유체위로 Pump에 의해 DI-water 와 연마 슬러리를 공급한다. 또한 자장의 분포 및 세기는 MR 유체의 항복응력을 상승시키므로 가공물의 재료 제거율에도 영향을 미치게 된다. 자기유변유체를 이용한 연마공정 중 재료제거율은 가공 영역에서 유동은 유체운환의 기본적인 방정식인 프레스톤 방정식 (1)와 같다.[6]

$$R = kP|U| \quad (1)$$

재료제거율 R은 가압력 P와 공작물과 패드(pad) 사이의 상대속도에 U에 의하여 제어된다. 여기서 프레스톤 상수는 연마재, 가공물, 패드 등에 의하여 정해지는 상수이다. 따라서 자기유변유체에 의하여 정해지는 상수이다. 따라서 자기유변유체에 의한 재료제거율은 압력구배, 상대속도, 자장에 의한 전단력에 의하여 제어된다.

### 3.2 MR Polishing 연마 시스템

자기유변유체를 이용한 연마 시스템 Fig 2와 같이 구성 되어 있으며 자기유변유체가 자기장의 영향을 받는 휠에 부착이 되어 지속적으로 회전하는 동안 연마가 진행이 되고 자기유변유체위로 Pump에 의해 DI-water 와 연마슬러리를 공급한다. 자작의 분포 및 세기는 자기유변유체의 항복응력을 상승시키므로 가공물의 재료제거율에도 영향을 미친다. X-Y축 및 가공물이 고정되는 회전축으로 구성되어 있고 linear stage(Newport 社)로 구현하였다. 가공물은 회전축 스테이지에 진공 흡착 방식을 통하여 고정된다. 공작물의 견고한 고정과 정확한 위치 제어는 시스템에 있어서 매우 중요한 조건이며 폴리싱 공정 초기 set-up에 대한 정밀도는 연마공정의 효율성을 좌우하게 된다. 따라서 고수준의 분해능을 가지는 레이저 센서를 사용하여 가공물의 고정중에 생기는 틸팅(Tilting)을 측정하였다.

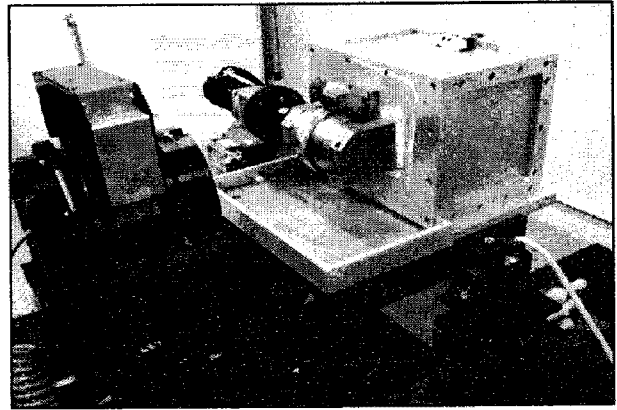


Fig. 2 An experimental setup for MR polishing

### 3.2 투과율 회복을 위한 실험

표면거칠기가 Ra 13nm인 fused silica glass를 실험에 사용하였다. 또한 투과율 측정을 위한 장비로 UV-VIS-NIR Spectrophotometer(Cary corp.,) 사용하여 측정 하였다. Fig. 3에서 보듯이 fused silica glass의 대역에서 높은 투과율을 가지고 있음을 알 수 있다.



Fig. 3 A photograph UV-VIS-NIR Spectrophotometer

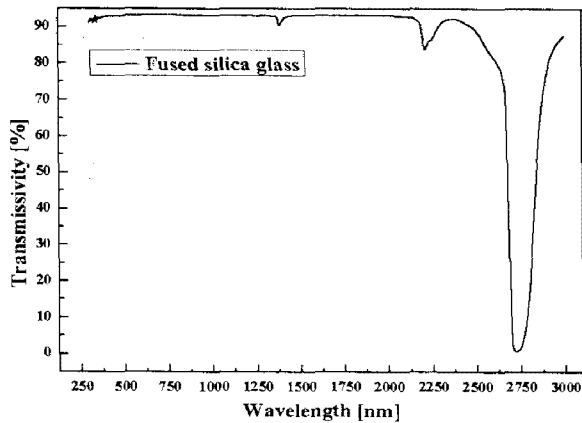


Fig. 3 Transmissivity of Fused Silica Glass

일반적으로 glass 형상 및 부품 가공을 위해 사용되는 powder blasting공정을 이용하여 마스터 mold 형상 가공을 위한 기초 실험을 진행 하였다. 실험한 결과 glass 표면거칠기가 저하되고 그로 인하여 투과성이 상당히 저하된다. 저하된 표면 거칠기와 투과율의 회복을 위해 자기유변 유체를 이용한 연마 실험을 진행하였는데 자기 유변유체를 이용한 연마 실험 중 가장 중요한 부분으로 자기유변유체와 연마슬러리의 구성에 있다. 연마슬러리는 미세 연마 가공 중에 중요한 부분을 차지하고 있다. 본 실험에서 사용된 슬러리는 수 나노크기의 입자를 가지고 있는 나노 세리아 슬러리를 사용하여 보다 좋은 표면 거칠기의 획득을 위해 사용 하였다. Fig 4. 는 CI-particle 과 나노 세리아 슬러리의 입자 구성 사진으로 하나의 CI-particle 입자에 여러 개의 나노세리아 슬러리 입자들이 형성 되어 있는 모습을 볼 수 있다.

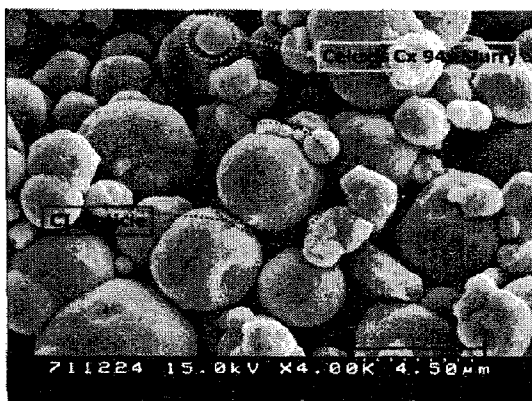
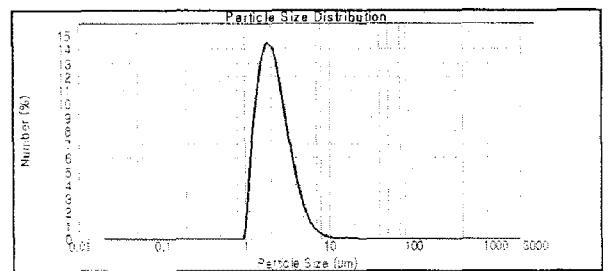
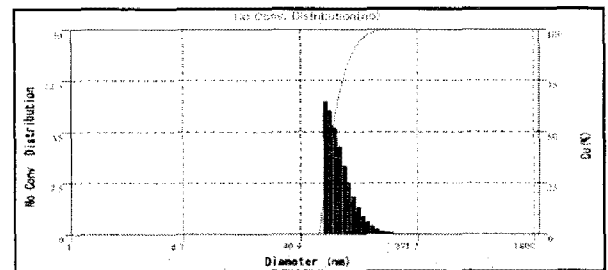


Fig. 4 SEM of MR fluids of CI partical

Fig 5. 은 가공 실험 전에 각 CI-particle와 나노 세리아 슬러리 입자를 입도 분석기를 통하여 측정하여 슬러리 내의 입자 크기 분포를 나타내었다. CI-particle의 크기는 2~3 $\mu$ m, 나노 세리아 슬러리의 크기는 1nm이내로 구성이 되어있음을 알 수 있고, CI-particle 입자에 여러 개의 나노세리아 슬러리 입자들이 응착 되어 있음을 확인 할 수 가 있다.



(a) Particle size analysis of CI powder



(b) Particle size analysis of nano ceria slurry

Fig. 5 Analysis of MR fluids and CI psrticle

연마를 위한 입자 구성을 Table 3 와 같이 조성하였다. MR Polishing에서 표면 거칠기에 중요한 영향을 미치는 요소로 휠 회전속도와 자기장, 연마 시간, 가공 깊이 등이 있다. Table 4는 연마를 위한 연마 조건으로 휠 회전속도는 250rpm, 자기장의 세기는 5.5kA/m, 가공깊이는 0.5mm로 조건을 선정하였다. 연마시간은 5분에서~25분까지 5분 간격으로 변경하였다. 연마 가공물과 휠 사이의 간격을 0.5mm로 유지하고, 연마가 시작되고 나서 X 축방향으로 이송하여 저하된 fused silica glass면을 연마 실험을 진행하였다.

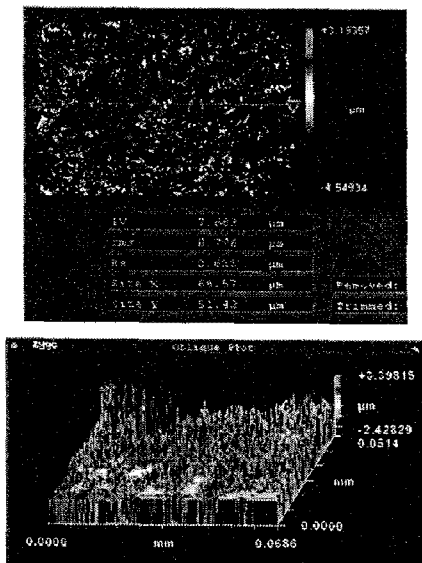
**Table 3 Comparison of MR fluids**

CI-powder	DI-water	Na <sub>3</sub> CO <sub>3</sub>	Glycerin
50wt.%	48wt.%	1wt.%	1wt.%

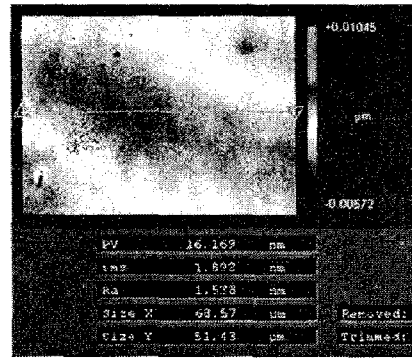
**Table 2 Mechanical Properties of Fused Silica Glass**

NO	Wheel speed (rpm)	Electric current (A)	Polishing time (min)	Gap size (mm)
1	250	1.0	5	0.5
2			10	
3			15	
4			20	
5			25	

실험 결과는 비 접촉식 3차원 표면조도 측정기 (Zygo NV-6200)를 이용하여 고 배율에서 표면거칠기를 측정, 결과를 분석하였다. 측정결과 연마 표면 거칠기가 향상이 됨을 알 수 있다. Fig 6,7.은 각 연마 시간에 따라 표면거칠기 결과를 나타내었다.

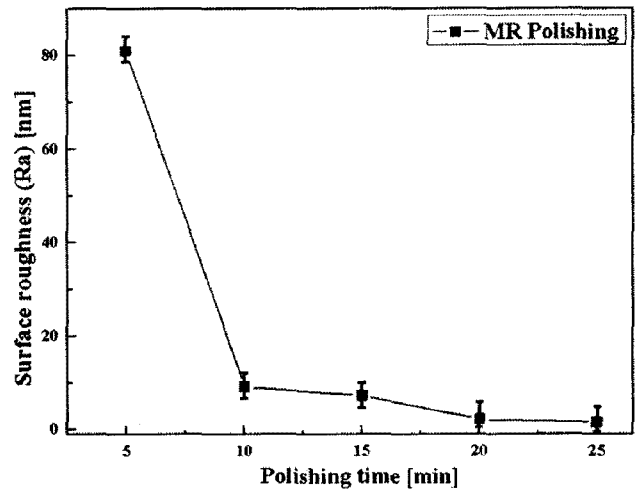


**Fig. 6 Machined shape of fused silica glass surface roughness by powder blasting (Ra=0.625μm)**



**Fig. 8 Measure surface roughness fused silica glass after 20 min MR polishing (Ra=1.538)**

Fig 8은 MR Polishing 공정 후 연마 시간에 따른 표면거칠기를 나타낸 그래프이다. Fused silica glass 가공 후 수 μm인 glass 표면거칠기가 연마 시간이 증가 할수록 표면 거칠기가 향상이 됨을 알 수 있다.



**Fig. 9 Result of surface roughness according MR Polishing (Ra)**

20분까지 연마시간이 증가하면서 표면거칠기가 큰 폭으로 향상이 되지만 그 이상이 되면 표면거칠기의 향상이 크게 변화가 없음을 알 수 있다. 이는 표면거칠기 향상을 위한 최적은 연마시간을 도출 할 수 있다.

### 3.3 공정 후 투과율에 미치는 영향

MR polishing 공정 후 glass의 투과성 확인을 위해 투과율 측정을 하였다. 측정 결과 가공을 하지 않은 glass 만큼의 투과율 회복을 할 수 있음을

알 수 있다. Fig. 19에서 (a),(b)는 powder blasting 공정 과 mr polishing 공정 후 투과율을 나타낸 그래프이다. 특히 가시광선 대역에서 많이 향상이 됨을 알 수 있다. 이는 fused silica glass의 장점 중 자외선과 가시광선 대역의 투과율 회복을 위한 연마공정으로 mr polishing 공정이 상당히 좋음을 알 수 있다. 가공 공정 후 표면이 상당히 거치지만 mr polishing 공정 후 본래의 glass보다 더욱 표면상태가 향상 됨을 알 수 있다.

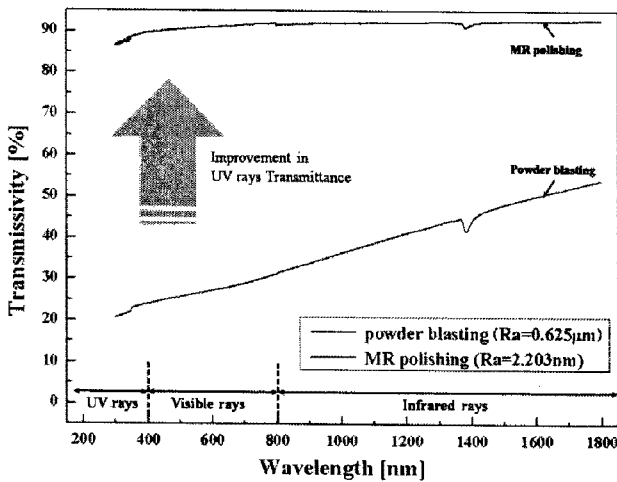


Fig. 10 Transmissivity of Fused silica glass

#### 4. 결론

광경화성 수지를 제품 제작에 사용되는 UV 나노임프린트 리소그래피 기술에 가장 중요한 마스터 mold 로는 polymer 를 이용하여 형상을 제작을 한다. 하지만 표면 경도가 낮고 마찰에 의해 긁히기 쉽고 용제에 대한 내구성이 좋지 않으므로 그대로 사용할 경우 쉽게 손상되어 투과성이 떨어지는 문제점을 해결하기 위해 광학 glass 재질로 마스터 mold 제작을 하고 있다. 하지만 glass 재질의 문제점으로 취성재료 이므로 가공하기가 어렵고 가공 후 발생하는 투과성 저하라는 단점을 지니고 있다. 이러한 문제점을 해결 하기 위하여 자기유변유체를 이용한 연마방법을 이용하여 투과성 회복을 위한 연구를 하였다. 실험 결과 마스터 mold 제작을 위한 가공시 투과율 저하는 미세크랙 및 가공 후 존재하고 있는 잔류응력에 의한 표면거칠기의 저하로 재료의 투과성 즉 투과율 저하의 원인이 된다. 하지만 고품위의 표면거칠기 구현할 수 있는 자기유변유체를 이용한 연마공정을 통하여 표면거칠기 향상 및 투과율 회복에 관한 실험을

한 결과 제작 공정 후 저하된 glass 표면거칠기 및 투과율이 MR polishing 공정을 통하여 원 재료의 투과율을 회복되었다. 지속적인 실험 연마 실험을 통하여 최적의 연마조건을 도출한다면 다양한 glass 재료의 가공 후 투과율 회복을 위한 연구에 및 광학 glass 및 mirror 연마에 적용이 충분히 가능하리라 예상된다.

#### 참고 문헌

- [1] J. W. Lee, S. J. Lee, E. S. Lee, J. H. Jeong, D. W. Cho, 2003, Development of UV curable polymer and curing characteristics estimation for UV nanoimprint, J. KSPE, pp. 1220~1223
- [2] I. L. Yeop, K. I Cho, S. H Cheong, H. N. Park and K. C. Song, 2007, Preparation of Hard Coating Solutions with High Refractive Index for Polycarbonate Sheet by the Sol-Gel Method, Korea Chem. Eng. Res, Vol. 45, No.4, pp. 335~339
- [3] J. H. Jeong, Young. J. Shin, E. S. Lee, K. H. Whang, 2003, Trend of Nanoimprint Lithography Technology, J. KSPE, Vol. 3, pp. 15~22
- [4] Colburn, M., Johnson, S., Stewart, M., Damle, S., Choi, B., Wedlake, M., Michaelson, T., Sreenivasan, S, V., Ekerdt, J and Willson, C, G, 1999, Step and flash imprint lithography : a new approach to high-resolution pattering, in SPIE's 24<sup>th</sup> International Symposium on Microlithography: Emerging Lithographic Technologies III, Santa Clara, CA, Vol. 3676(I), pp.379~389
- [5] Akami, Y., Asari, k. L., 1998, Characterization of particle motion for polishing and texturing under AC field by using partide disperation type ER fluid, Jounal. Int. Mat. Sys. Struc., Vol.9, pp. 672~675.
- [6] Shin, Y. J., Kim, D. W., Lee, E. S., Kim, K. W., 2004, The Development of Polishing System a Magnetorheological Fiuds, J. KSPE, Vol. 21, No. 7, pp. 46~52.