

# MR 유체 제트 연마를 이용한 광학유리의 가공성능

## Machining Performance of Optical Glass with Magnetorheological Fluid Jet Polishing

김원우<sup>1</sup>, 김욱배<sup>1,✉</sup>  
Won-Woo Kim<sup>1</sup> and Wook-Bae Kim<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 한국산업기술대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design Engineering, Korea Polytechnic Univ.)  
✉ Corresponding author: wkim@kpu.ac.kr, Tel: 031-8041-0430

Manuscript received: 2011.2.10 / Accepted: 2011.5.11

*As a deterministic finishing process for the optical parts having complex surface, machining performance of the magnetorheological(MR) fluid jet polishing of optical glass are studied and compared with a general water jet polishing. First, design of the jet polishing system which has the special electromagnet-nozzle unit for stabilizing the slurry jet based on MR fluid and the change of jet shape as magnetic field is applied are explained. Second, for the BK7 glass, machining spot and its cross section profile are analyzed and the unique effect of MR fluid jet polishing is shown. Third, both material removal depth and surface roughness are explored in order to investigate the polishing performance of MR fluid jet. With the same ceria abrasives and amount in the polishing slurries, MR fluid jet shows superior machining performance compared to water jet and the difference of material removal mechanism and its resulting performance are described.*

Key Words: Magnetorheological Fluid (MR 유체), Optical Fabrication (광학 제조), Material Removal Rate (재료제거율), Surface Roughness (표면거칠기), Fluid Jet Polishing (유체 제트 연마)

### 1. 서론

초정밀 렌즈류의 광학부품, 또는 광학부품을 성형하기 위한 금형코어 등의 제조공정에서는 연마 기술이 매우 중요하다. 연마 작업은 부품의 사상단계에서 표면거칠기 개선 및 경면화 뿐만 아니라 미세 형상보정(local correction)을 목적으로 수행되기도 하며 오늘날 렌즈 및 금형류에 있어서 비구면이나 자유표면과 같이 설계의 복잡성이 증가되면서 그 필요성이 증가하고 있다.<sup>1,4</sup> 즉 공정변수에 의한 재료제거량을 공구함수(tool function)로 사용하여 가공표면에서 정량적 재료제거량을 얻을 수 있는 방법을 결정론적 연마(deterministic polishing)라고 부르며, 이는 복잡한 가공대상에 대

해 높은 정밀도를 구현하고, 동시에 가공공정에서의 자동화를 가능하게 함으로써 최근 수년간 대폭 발전하고 있다. 이러한 연마기술로서 비기계적인 방법에 이온빔이나 상압플라즈마를 이용한 연마법이 있고, 기계적인 방법으로서 Computer-controlled polishing (CCP), Fluid jet polishing (FJP), Magnetorheological finishing (MRF), Elastic emission machining (EEM) 등이 있다.<sup>5</sup> 상용성이 높은 기계적인 방법을 중심으로 살펴보면 CCP는 유연한 구 또는 패드를 가공표면에 가압-회전시켜 화학-기계적 방법으로 가공하고 체류시간을 제어하여 표면 형상을 제어하는 연마법이다. EEM은 CCP와 유사한 가공 형태를 가지지만 공구와 표면의 접촉이 없고, 나노입자에 의해 원자 규모의 재료제거만

발생하므로 가공변질층을 유발하지 않는다. FJP 는 고속의 연마액을 피가공물에 분사시켜 연마를 행하는 방법으로서 워터젯 가공과 거의 동일하지만, 유체의 압력이 낮아(3~20bar) 광학유리 등의 가공에서 비교적 낮은 표면거칠기를 구현할 수 있다. MRF 는 MR 유체 기반의 슬러리를 피가공 표면에서 상대운동 시키되 자기장에 의해 점성이 높아진 MR 유체가 피가공물과 전단마찰을 하도록 고안된 공정으로서, 기존의 타 연마법 대비 높은 재료제거율과 매우 낮은 수준의 표면거칠기를 구현가능하며, 기상(on-machine) 간섭계의 측정기능으로 인해 최근 상용화가 확장되고 있다. CCP 와 EEM 은 1970 년대부터, FJP 와 MRF 는 1990 년대 이후부터 확산되었다.

FJP 나 MRF 는 별도의 공구를 사용하지 않기 때문에 공구마모가 없고, 표면거칠기 개선과 형상보정이 동시에 가능하며, 슬러리를 회수하여 반복 사용한다는 장점이 있어 최근 다수의 연구결과가 보고되고 있다.<sup>6,7</sup> 그런데, 또 하나의 새로운 연마 기술로서 FJP 와 MRF 를 결합한 형태로서 MR-Jet 이라는 새로운 공정이 최근 제안되었다.<sup>8,9</sup> 이는 노즐에서 고속으로 분사되는 MR 유체에 자기장을 인가하여 분사제트를 안정화시킨 것이다. 즉 노즐에서 분사된 연마 슬러리는 주변압력의 변화와 공기역학적 교란으로 인해 원형의 정형성을 잃어버리게 된다. 워터젯의 경우, 속도가 증가할수록 노즐에서 분사된 슬러리가 방울로 파편화됨과 동시에 확산 분출된다. 그런데 MR-Jet 에서는 분사 슬러리가 원형의 노즐형태를 일정하게 유지하고, 고도의 진직성을 갖는다. 이러한 효과에 의해 MR-Jet 은 노즐과 가공표면과의 오프셋량, 유체 압력의 변화에도 일정하여 안정적인 재료제거 프로파일을 얻을 수 있어 형상보정 및 형상화 연마 공정에 적합할 것으로 기대되고 있다. 그러나 MR-Jet 에 관하여 연마 공정으로서 재료제거율 및 표면거칠기의 주요 성능이 정량적으로 보고된 바는 없다. 본 논문에서는 MR 유체에 의한 제트 연마법을 구현하고, 광학유리에 대한 가공흔적(machining spot)을 분석하여 시간당 재료제거 깊이와 표면거칠기를 확인하고자 한다. 이 때 유사한 가공기구를 갖는 FJP 를 적용하여 양자간의 성능을 비교하였다.

## 2. MR 유체 제트 연마 시스템

### 2.1 연마장치

Fig. 1 과 Table 1 에 실험을 위한 장치의 개요와 사양을 나타내었다. 연마장치는 FJP 의 장치와 유사하며, 수십 bar 이내의 압력을 구현할 수 있는 펌프를 구비하고 노즐을 통해 분사된 슬러리를 수거-교반-순환시키는 구조로 설계, 제작하였다. 단, MR 유체가 노즐에서 분사될 때 자기장을 인가하기 위하여 노즐은 동심원의 실린더 형태를 지닌 전자석의 중심부에 삽입하였다. 전자석의 외곽은 강(steel)재를 이용하여 자기차폐하였으며, 노즐은 끝 단에 자기장이 집중될 수 있도록 역시 강재를 이용하여 제작하였다. 연마슬러리로서 MR 유체와 Ceria (CeO<sub>2</sub>)를 섞어서 사용하였다. MR 유체는 Carbonyl iron powder(평균입경 4μm) 40vol%가 함유된 것으로 유체 밀도는 3.3g/cm<sup>3</sup> 이다. MR 유체 95vol%, ceria(평균입경 1.8μm)를 5vol%의 비율로 섞어서 실험에 사용하였고, 비교실험을 위해서 물과 연마제만 사용할 때에는 DI water 95vol%, ceria 5vol%의 비율로 슬러리를 조성하였다.

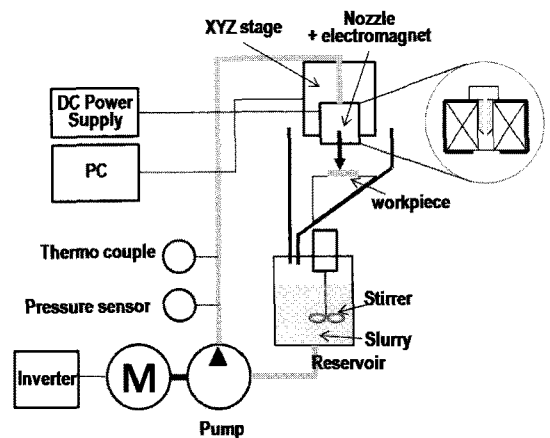


Fig. 1 Schematic view of MR fluid jet polishing system

Table 1 Specifications of MR fluid jet polishing system

Motorized stage	Type	Step motor, ball screw, LM guide
	Stroke(mm)	130×130×200
	Resolution(mm)	0.01
Pump	Type	Diaphragm pump
	Max. flow rate (l/min)	11
	Max.pressure(bar)	69
Electromagnet	Magnetic strength	4kG at 1A (measured at nozzle end)
	Size (mm)	φ110×h50
Nozzle	Diameter (mm)	2
	Material	Steel

연마장치에서는 압력과 온도를 측정할 수 있다. Fig. 2 는 일정압력에서 단위시간 동안 분사된 유체 유량을 측정하고 속도로 환산하여 압력과 상호 관계를 나타낸 것이다. 압력은 유량 또는 유속과 선형성을 보이며 따라서 측정압력을 통해 유체속도를 추정할 수 있다. 유체의 온도는 유체의 순환에 따라 조금씩 상승하나 본 연구에서는 증가량이 5℃ 안팎으로서 크지 않으므로 고려하지 않았다.

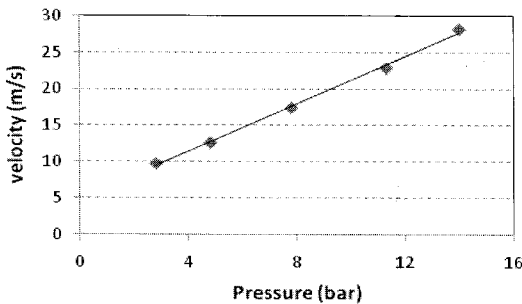


Fig. 2 Relationship between jet velocity and pressure

## 2.2 MR 유체의 분사특성

Fig. 3 은 전자석-노즐( $\phi 2\text{mm}$ ) 유닛으로부터 분사되는 연마재 함유 MR 유체 제트를 촬영한 사진이다. 제트의 속도는 25m/s 이며, MR 유체의 점도가 높기 때문에 층류영역의 흐름이다. 좌측의 그림이 자기장을 걸지 않았을 때, 우측의 그림은 자기장을 걸었을 때이다. 자기장이 없는 경우, 노즐에서 분사된 유체가 공기의 저항 등으로 인하여 그 제트 직경이 다소 확대된다. 그런데 자기장을 인가하면 노즐의 끝단에서 급격히 점도가 높아진 유체는 노즐구멍과 형태와 직경에서 동일한 제트를 생성한다. 한편 자기장이 없는 경우에도 제트의 진직성은 잘 나타나지만 제트 줄기의 표면은 공기와의 교란에 의해 일부가 분무화 되기도 하는 등 매끈하지 못하다. 자기장을 인가하는 순간 제트 줄기는 반경이 일정한 원기둥처럼 더욱 높은 진직성을 보이며 그 표면이 매끈하고 그 형태가 뚜렷하게 관측된다. 노즐을 떠난 유체는 자기장을 벗어나므로 원래 상태의 점성을 회복하며, 수직벽면에 충돌한 후에는 방사형 흐름(radial flow)으로 분산된다. 위와 같은 분사특성은 자기장을 인가하지 않은 경우에 노즐의 치수나 유체 분사 압력의 변화에 따라 분사 흐름 특성의 차이가 조금씩 발생하지만, 자기장을 인가하면 유체 줄기의 형태는 자기장이 없는 경우에 비해 뚜렷한 변화를 보이며

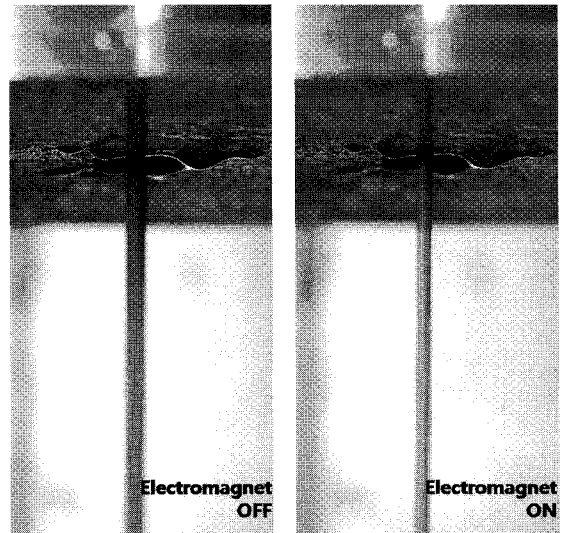


Fig. 3 Photography of the MR fluid-based slurry jet ejected from electromagnet-nozzle unit (20m/s)

원형의 정형성, 높은 진직성과 매끈한 표면으로 항상 변화한다.

## 3. 광학용 유리의 가공 실험

### 3.1 재료제거 프로파일

2 절에서 기술한 연마장치와 슬러리를 이용하여 가공실험을 행하였다. 피가공소재로서는 렌즈류 등 광학부품 제작 및 시험에 주로 사용되는 불규산 유리 BK7(flat type, f50mm)을 사용하였다. BK7 유리의 밀도는 2.51g/cm<sup>3</sup>, 종탄성계수는 81GPa, 누프경도는 5.84GPa 이다. 가공표면의 형상측정은 광간섭계(New View 6300, Zygo)와 1 배의 대물렌즈를 장착하여 실시하였다.

Fig. 4 에 제트에 의한 표면의 가공형상을 나타내었다. 노즐과 BK7 간의 간격은 30mm 로 유지되 상대 움직임이 없이 20m/s 로 2 분간 가공하였는데 (a)는 전자석을 켜지 않았을 때이며 (b)는 전자석을 통해 노즐끝단에 약 2500Gauss 를 발생시켰을 때의 결과이다. 자기장을 인가하지 않으면 재료제거 형상이 원형에 가까우나 불규칙적이다. 이러한 불규칙성은 자기장을 인가하지 않았을 때 공통적으로 나타나며 노즐-시편간의 거리가 커질수록 그 불규칙성이 커진다. 그러나 자기장을 인가하면 재료제거 패턴이 완전한 원형에 가깝게 나타난다. 한편, 자기장이 부여된 경우의 가공패턴이 더 크게 나타

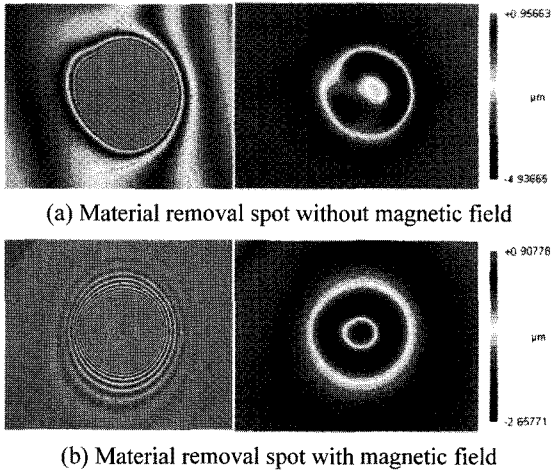


Fig. 4 Fringe and digitized image on BK7 glass with MR fluid jet

나는데, 이는 분사제트 직경 내 유체의 연속성이 확보되고, 표면충돌 후 재료제거기구의 지배적 원인이 되는 방사흐름의 운동에너지가 더 높기 때문으로 판단된다.

Fig. 5 는 노즐-시편간 거리를 30mm 로 한 Fig. 4(b)의 결과와 70mm 로 변경하여 동일한 조건으로 가공했을 때의 가공단면을 비교한 그래프이다. MR 유체 제트의 정형성으로 인하여 가공단면의 프로파일이 거의 동일하다. 기존의 워터젯 절단 등에서는 입자의 운동에너지가 재료를 취성과파괴시키지만, 제트 연마법에서는 슬러리 제트의 표면 충돌 후 확대칭 방사흐름에 의해 연마입자가 재료를 문질러 연성모드(ductile-mode) 가공을 행하게 된다. 중심축에서는 면에 평행한 슬러리의 속도성분이 없으므로 가공량도 거의 없으며, 반경방향의 흐름

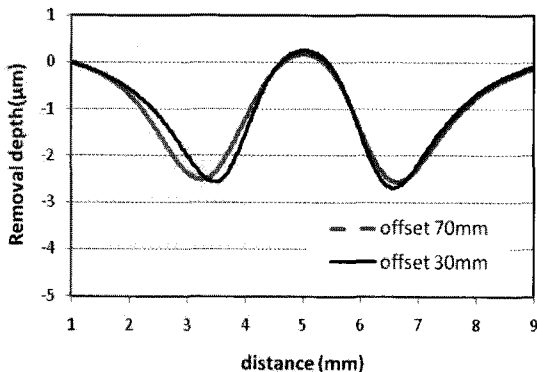


Fig. 5 Comparison of removal profile between the nozzle-surface offset of 30mm and 70mm

에 의해 확대칭의 가공량 분포가 발생하게 된다. Fig. 5 의 가공흔적 프로파일은 서론에서 언급한 결정론적 연마법의 공구함수가 될 수 있다. 즉 공구함수와 제트의 이동경로(공구경로) 상에서의 이동속도(체류시간)을 제어함으로써, 비구면 렌즈 등의 공간적 형상오차를 크게 줄일 수 있다. 공구함수로서, 자기장을 인가한 MR 유체 제트에서 제반 조건이 일정하다면 가공흔적의 프로파일 역시 항상 일정하다고 판단할 수 있다. 또한 이러한 가공 프로파일은 프레스턴 방정식(Preston equation)으로 알려져 있는 압력 및 속도 의존성에 따라 이론적으로도 예측가능하므로 초정밀 부품의 가공공정으로 효율성을 높일 수 있다.

### 3.2 재료제거 속도

MR 유체 제트 연마에서 주요 가공성능인 재료제거율을 일정시간 동안의 제거 깊이를 통해 알아 보았다. Fig. 6 은 ceria 연마재를 함유한 MR 유체를 BK7 에 분사할 때, 속도에 따른 가공량을 간접적으로 측정하고 최대 가공 깊이를 기준으로하여 분당 재료제거 깊이를 나타낸 것이다. 아울러 FJP 의 성능과 비교하기 위해 DI water 에 ceria 를 MR 유체에서와 같은 함량비로 슬러리를 조성하여 재료제거 깊이를 측정하였다. 노즐-시편 거리는 30mm 로 고정하였다. MR 유체 제트 연마법은 그래프에 나타난 대로 최대 7μm/min 의 속도가 가능하였으며, 제트 속도와 재료제거 속도의 관계는 속도의 제곱승에 비례하지만 20m/sec 이상에서는 다소 선형성을 보인다. 전통적인 피치 연마법의 전형적인 재료제거 속도가 1μm/min 이하임 고려하면 우수한 성능을 갖는다고 볼 수 있다.

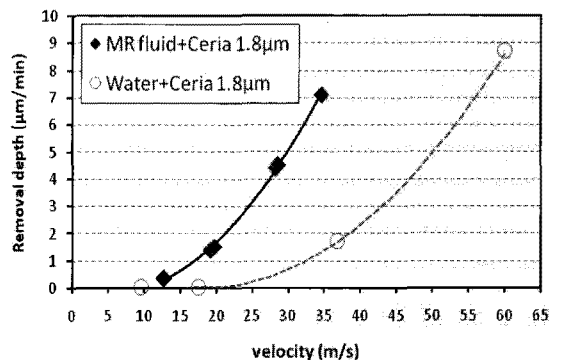


Fig. 6 Material removal rate of BK7 glass according to jet velocity for MR fluid jet and water jet polishing

특히 그래프에 함께 표시한 FJP 에 비해 30m/sec 기준으로 볼 때 재료제거 속도가 5 배 이상 높다. 특히 FJP 는 10m/s 이하에서는 가공량이 거의 없고, 수  $\mu\text{m}/\text{min}$  을 얻으려면 제트 속도를 크게 올려야한다.

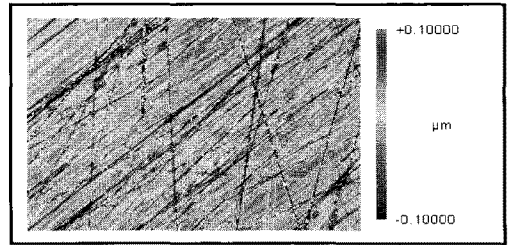
FJP 에서는 연마입자의 관성력이 물의 항력을 이기지 못하면 제트가 표면에 충돌할 때라도 입자는 표면과 접촉하지 못하게 된다. 즉 연마입자의 크기가 작을수록 관성력이 줄어든다.<sup>10,11</sup> 반면 MR 유체에서는 다수의 크고 무거운 철 입자 슬러리에 의해 연마입자의 운동이 지배된다. 따라서 연마입자의 크기가 작아도 슬러리의 흐름에 따라 표면과 접촉하게 된다. 재료제거가 경질의 연마입자에 의해 발생하는 만큼, 가공량의 차이가 현격한 이유에는 이러한 원인이 작용하는 것으로 판단된다.

다만 초정밀 광학소자에 적용하는 경우, 최종의 사상단계에서 필요한 가공 깊이는 대체로 11 이하인 경우가 많으므로 FJP 의 효과성은 무시할 수 없다.

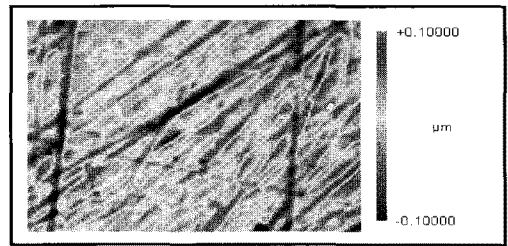
### 3.3 표면거칠기

또 다른 중요 성능지표인 표면거칠기를 평가하기 위해 BK7 유리 평면(초기 Rms 2nm, Ra 1nm)을 인위적으로 거칠게 만들고 MR 유체제트로 연마한 후 고배율 간섭계로 표면거칠기를 확인하였다. 동시에 MR 유체를 사용하지 않고 물과 ceria 연마제만을 이용하여 나타나는 표면거칠기와 비교하였다.

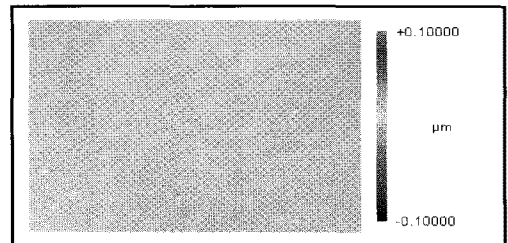
Fig. 7(a)는 BK7 유리를 샌드페이퍼 #2500 을 이용하여 약 1 분간 수작업에 의해 인위적으로 표면을 거칠게 한 결과로서 Rp-v  $2.5\mu\text{m}$ , Rms 79nm, Ra 44nm 로 측정되었으며 고정지립에 의한 스크래치가 뚜렷하다. Fig. 7(b)는 (a)의 시편을 앞 절에서 설명한 조성의 MR 유체 연마 슬러리를 이용하여 입사각 90 도, 연마조건 20m/s, 3 분간 노즐 고정하여 가공한 표면거칠기 결과이다. 측정부위는 원형의 가공흔적에서 가공량이 많은 원주 부위이며, 측정 후 단면 가공 프로파일로 나타나는 곡면성분을 제거하였다. 초기의 스크래치가 완전히 제거되지 않고 잔존해있지만 초기표면의 고주파수 성분이 제거되고 경면화가 진행중임을 알 수 있다. 표면거칠기는 Rp-v 기준으로는 1/10 수준으로 크게 저감되었고 Rms 35nm, Ra 27nm 로 측정되었다. 이어서 제트 속도를 35m/s 로 올려 다시 3 분간 가공한 결과 Fig. 7(c)와 같이 기존 스크래치가 완전히 제거되고 피트(pit) 등 결함의 발생이 없이 Rms 2 nm, Ra



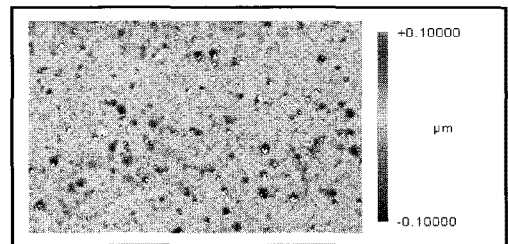
(a) Initial ground surface: Rp-v  $2.5\mu\text{m}$ , Rms 79nm, Ra 44nm



(b) After 1<sup>st</sup> polishing with MR fluid jet(20m/s, 3min): Rp-v  $0.29\mu\text{m}$ , Rms 35nm, Ra 27nm



(c) After 2<sup>nd</sup> polishing with MR fluid jet(35m/s, 3min): Rp-v  $72\text{nm}$ , Rms 2nm, Ra 1nm



(d) After polishing with water-based fluid jet(36m/s, 3min): Rp-v  $3\mu\text{m}$ , Rms 25nm, Ra 16nm

Fig. 7 Areal surface roughness of BK7 glass before and after polishing for the area of  $0.36\text{mm} \times 0.27\text{mm}$

1nm 의 표면을 얻을 수 있었다.

Fig. 7(d)는 인위적으로 거칠게 하지 않은 원래의 BK7 면에 물에 ceria 를 섞은 슬러리를 36m/s 의 속도로 분사하여 가공한 결과를 나타낸다. 동 속도에서 Fig. 6 에 나타낸 것처럼 약  $1.7\mu\text{m}/\text{min}$  의

재료제거 속도를 나타내는 수준이며 표면거칠기는 Rms 25nm, Ra 16nm로서 MR 유체 제트 연마에 비하면 그 재료제거율과 표면거칠기 성능이 모두 좋지 않다. 특히 그림에서 나타나듯이 다량의 피트가 발생하고 있어 광학소자로서 표면품위를 유지할 수 없다. 피트는 몇 가지 추정원인이 있지만 속도를 줄이지 않는 이상 발생을 피할 수 없다. 기존의 FJP 에 관한 연구를 참조하면 유사한 조성비의 물과 ceria 에 의해 BK7 유리가 Ra 1nm 수준까지 달성된다고 보고되고 있는데,<sup>6</sup> 이는 제트의 속도가 10~20m/s 범위에서 재료제거 속도가 0.1 $\mu$ m/min 이하다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 초정밀 광학소자 제조공정에 적용가능한 MR 유체 제트 연마 장치를 구현하여 그 제트 분사특성을 확인하고, BK7 유리에 대해 가공 시험을 실시하여 본 방법에서 나타나는 고유의 가공흔적, 재료제거 깊이 및 표면거칠기를 분석하였다.

본 실험을 통해 MR 유체 제트 연마는 결정론적 연마법으로서의 효용성이 높을 것으로 기대된다. 이는 노즐에서 분사되는 MR 유체에 자기장을 인가함으로써 분사 제트의 정형성과 안정성을 구현하고, 표면 충돌 후에 이상적인 방사형 흐름을 통해 표면에 일정한 가공패턴, 즉 공구함수를 얻을 수 있기 때문이다. 자기장을 인가하여 MR 유체를 BK7 유리에 수직 분사하였을 때, 뚜렷한 원형의 가공흔적을 구현할 수 있었으며 재료제거 단면의 형상 균일도가 매우 높다. 두께 방향의 단면 형상은 제트의 직경보다 넓은 W 자를 나타내며, 그 가공깊이는 제트 속도에 의해 제어할 수 있다.

연구결과 MR 유체 제트 연마는 10 $\mu$ m/min 에 가까운 재료제거율과 Ra 1nm 안팎의 표면거칠기를 동시에 구현할 수 있다고 판단된다. 이는 마무리 공정으로서 타 연마법과 비교할 때, 그 성능이 우수하다.<sup>12</sup> 특히 1.8 $\mu$ m 의 ceria 입자를 사용하여, 유사한 가공법인 FJP 와 성능을 비교할 때 그 차이가 두드러졌다. 그 이유로서 고농도, 고점도 슬러리인 MR 유체가 연마입자를 구속하여, 유체의 방사형 흐름이 표면을 따라 가속될 때 연마입자에 의한 연성모드의 가공이 일어나기 때문으로 판단된다. 또한 피트의 발생이 없이 높은 표면품위를 보여주고 있다. 다만 미사적 관점에서 재료제거

메커니즘은 재료의 물성 등을 고려하여 추가적인 연구가 필요하다.

서론에서 언급한 바와 같이 제트 연마법은 특성이 일정한 유연한 공구를 이용한 연마법으로서 복잡한 형상에 대해서도 정밀하고 미세한 가공이 가능하다. 공구자체의 마모가 없고, 저압의 제트를 이용하기 때문에 노즐의 마모도 거의 없으므로 향후 광학부품을 비롯한 초정밀 부품의 제조에서 사상공정으로서 경면화 및 형상보정 등에 적용될 수 있을 것이다.

#### 후 기

이 논문은 2010 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 (No.2010-0004018) 및 지식경제 기술혁신사업(공동연구기반구축사업)의 지원을 받아 수행되었음.

#### 참고문헌

1. Yi, H. S., Yang, H. S. and Lee, Y. W., "Deterministic Pitch Tool Polishing Using Tool Influence Function," *Hankook Kwanghak Hoeji*, Vol. 19, No. 4, pp. 422-428, 2008.
2. Yang, M. Y. and Lee, H. C., "A Study on PC-NC Based Aspherical Lens Polishing System with Minimum Translation Mechanism," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 18, No. 8, pp. 65-71, 2001.
3. Horiuchi, O., Ikeno, J., Shibutani, H., Suzuki, H. and Mizkamid, Y., "Nano-abrasion machining of brittle materials and its application to corrective figuring," *Precision Engineering*, Vol. 31, No. 1, pp. 47-54, 2007.
4. Evans, C. J., Paul, E., Dornfeld, D., Lucca, D. A., Byrne, G., Tricard, M., Klocke, F., Dambon, O. and Mullany, B. A., "Material Removal Mechanisms in Lapping and Polishing," *CIRP Annals*, Vol. 52, No. 2, pp. 611-633, 2003.
5. Braunecker, B., Hentschel, R. and Tiziani, H. J., "Advanced Optics Using Aspherical Elements," *SPIE Press*, pp. 41-54, 2008.
6. Booij, S. M., Brug, H., Singh, M. and Braat, J. J. M., "Nanometer deep shaping with fluid jet polishing," *Proceedings of SPIE*, Vol. 4451, pp. 222-232, 2002.

7. Kordonski, W. I. and Jacobs, S. D., "Magnetorheological Finishing," *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 10, No. 23-24, pp. 2837-2848, 1996.
8. Tricard, M., Kordonski, W. I., Shorey, A. B. and Evans, C., "Magnetorheological jet finishing of conformal, freeform and steep concave optics," *CIRP Annals*, Vol. 55, No. 1, pp. 309-312, 2006.
9. Kordonski, W. I., Shorey, A. B. and Sekeres, A., "New magnetically assisted finishing method: material removal with magnetorheological fluid jet," *Proceedings of SPIE*, Vol. 5180, pp. 107-114, 2003.
10. Sugiyama, K., Harada, K. and Hattori, S., "Influence of impact angle of solid particles on erosion by slurry jet," *Wear*, Vol. 265, No. 5-6, pp. 713-720, 2008.
11. Turenne, S. and Fiset, M., "Modeling of abrasive particle trajectories during erosion by a slurry jet," *Wear*, Vol. 162-164, No. 2, pp. 678-687, 1993.
12. Brinksmeire, E., Riemer, O., Gessenharter, A. and Autschbach, L., "Finishing of structured surfaces by abrasive polishing," *Precision Engineering*, Vol. 30, No. 3, pp. 325-336, 2006.