

자기유변유체를 이용한 연마가공 시스템의 개발

신영재*, 김동우*, 이웅숙**, 김경웅***

The Development of Polishing System a Magnetorheological Fluids

Young Jae Shin*, Dong Woo Kim#, Eung Sook Lee**, Kyung woong Kim***

ABSTRACT

The Magnetorheological fluid has the properties that its viscosity has drastic changed under some magnetic fields therefore, Magnetorheological fluids has been used for micro polishing of the micro part(for example, a aspherical surface in a micro lens). The polishing process may appears as follows. A part rotating on the spindle is brought into contact with an Magnetorheological finishing(MRF) fluids which is set in motion by the moving wall. In the region where the part and the MRF fluid are brought into contact, the applied magnetic field creates the conditions necessary for the material removal from the part surface. The material removal takes place in a certain region contacting the surface of the part which can be called the polishing spot or zone. The polishing mechanism of the material removal in the contact zone is considered as a process governed by the particularities of the Bingham flow in the contact zone. Resonable calculated and experimental magnitudes of the material removal rate for glass polishing lends support the validity of the approach.

Key Words : Magnetorheological fluid(자기유변유체), Magnetic field(전자장), Bingham flow(비행 유동)

1. 서론

최근에 들어 광학, IT 및 의학 분야에 있어서 급속한 발전과 더불어 산업 전반에 걸쳐 소자나 부품의 미세화, 초정밀화 및 다기능화에 대한 요구가 높아지고 있다. 이에 따라, 초정밀 형상 부품의 수요가 급속히 증가하고 있긴 하지만 미세 부품 제작의 기술은 매우 높으며 이를 해결하고자 하는 기술 또한 그리 흔하지 않다.

이러한 마이크로 부품들은 3차원 형상을 가지고 있기 때문에 기존의 연마에서 사용하는 방법으

로 가공하기가 무척 어려울 뿐만 아니라 연마 입자를 가공 면에 지속적이면서 안정적으로 공급하는 것이 힘들기 때문에 요구되는 수준의 표면 조도를 얻기가 어렵다.

특히 반도체 제조 장비인 스템퍼용 비구면 렌즈를 제외한 대부분의 비구면 렌즈는 기존의 구면 렌즈에 비해 훨씬 뛰어난 광학성능과 영상품질에도 불구하고 가공 난이도의 수준이 높음에 따라 수준이 제한되어 있다. 오늘날 대부분의 제조업체는 구면 렌즈용 연삭기라는 고정밀도의 값비싼 가공기를 사용하고 있으며, 폴리싱인 최종 마무리는 수 시간

* 접수일: 2003년 11월 3일; 게재승인일: 2004년 4월 9일
** 한국기계연구원 지능형정밀기계 연구부 나노메카니즘 그룹
인하대학교 대학원 기계공학과
E-mail gemini25@kimm.re.kr Tel. (032) 860-7306
** 한국기계연구원 지능형정밀기계 연구부
*** 한국과학기술원 기계공학과

또는 수일에 걸쳐 이루어지고 있다. 따라서 최근 고정밀도 비구면 렌즈를 효과적으로 가공하기 위한 연구가 미국, 일본을 비롯하여 활발하게 진행 중이다. 기존의 비구면 렌즈의 초정밀 연마 가공에서 발생되는 최소 가공부 형성, 연마 압력의 조절, 패드의 마멸, SSD(subsurface damage), 마이크로 크랙(micro Crack) 등의 난점과 3차원의 미세 구조물 연마에 있어서 전자기적으로 유체의 농도를 조절함으로써 응력과 전단력을 변화시켜 이를 표면에서의 가공력으로 활용하며 연마 표면의 품위를 높이고자 ER 유체(electrorheological fluids)¹ 또는 자기유변유체(magnetorheological fluids)²를 이용한 연마가 시도되었다. 따라서 본 논문에서는 자기유변유체를 이용한 미세연마 시스템을 구축하고 MR유체를 이용한 연마가공 원리와 실험을 통하여 MR 유체를 이용한 미세가공과 추가적으로 공급되는 연마입자의 특성에 따른 거동에 대하여도 논하고자 한다.

2. 이론적 원리

2.1 자기유변유체(MR fluids)의 특성

자기유변유체(이하 MR 유체)는 기름이나 물과 같은 비자성 유체에 철과 같은 자기장에 민감한 미세 크기(micro size)의 자성물질이 혼합되어 떠다니는 혼탁액으로 자장이 부과되면 유동특성이 실시간으로 제어되는 스마트 재료의 하나이다. 이 입자들의 직경은 수 마이크로미터 정도이고 30내지 40 퍼센트 정도의 부피 비율로 포함되어 있는데 이 물질의 기본적인 특성은 적절한 자기장이 형성되면 뉴턴유체(Newtonian fluid) 상태로부터 강한 반고체의 상태로 급속하게 변하게 되어 혼탁액의 점성과 항복응력은 수 배 정도 빠르게 증가하게 된다.

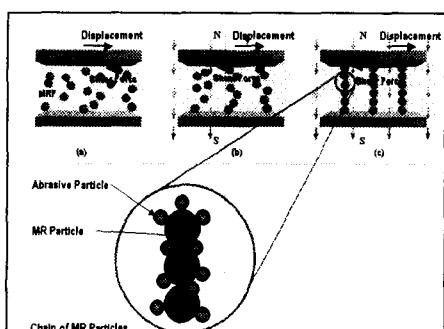


Fig.1 Chain of MR particles

MR 효과라 불리는 이런 특징들은 자기장이 형성되면 입자들은 자성을 띠게 되고 Fig.1에 나타낸 것처럼 자기장과 같은 방향으로 사슬과 같은 구조를 형성한다. 이 구조와 같은 미세 구조물은 전단률에 대한 저항을 높이게 되며 이런 특징을 이용하여 댐퍼, 클러치, 브레이크 등에 이용되는 것이다. 이러한 자성유체의 변화는 항복응력을 갖는 빙햄(Bingham) 소성체로 나타내어지며 식 (1)과 (2)같이 나타내어질 수 있다.^{3,4}

$$\tau = \eta_0 \dot{\gamma} + \tau_0(H) \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) \quad (1)$$

$$(|\tau| \geq |\tau_0(H)|)$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad (|\tau| \leq |\tau_0(H)|) \quad (2)$$

여기서 τ 는 전단 응력, η_0 는 소성 절도, $\dot{\gamma}$ 는 전단속도, $\tau_0(H)$ 는 자장에 의한 항복응력이다.

2.2 자기유변유체를 이용한 연마원리

보통 MR 유체는 일정한 전단율이 일어나는 좁은 틈(0.05~0.2mm)사이에 Couette flow가 형성되는데 대개 이 곳에 유동 방향과 유동 면에 수직인 자기력선의 일정한 자장이 있다. 따라서 Fig.2에서 보여준 것처럼 전단을 local Cartesian system(x, y, z; i, j, k)에서 속도 분포 $\mu = \gamma y i$ 에 따라 간단히 표현할 수 있다.

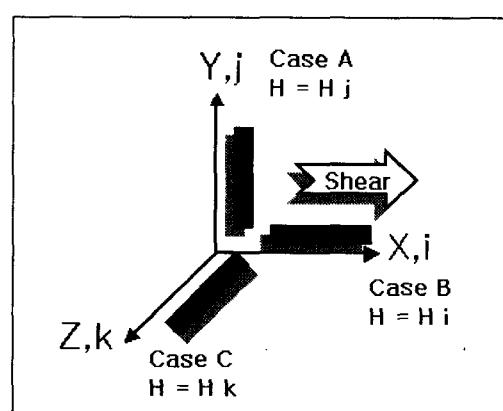


Fig.2 Three fundamental orientations between magnetic field and shear directions

일반적인 브레이크나 램프에 응용되는 시스템의 경우 $H=H_i$ 를 이루는데 이를 case A라고 부른다면 case B와 C의 경우는 $H=H_j$, $H=H_k$ 라고 상대적으로 정의할 수 있다. 대부분의 자성 유체를 사용하는 응용 시스템의 경우 위에서 언급한 것처럼 대부분 case A인 경우이지만 개발된 MR finishing(이하 MRF) system의 경우는 case C의 경우와 유사하다고 할 수 있다.

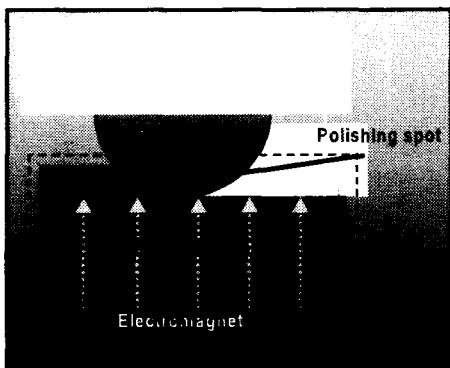


Fig.3 Schematic diagram of the mechanism for the MRF

MRF의 공정은 Fig.3에서 보여주는 것처럼 전형적으로 0.04와 0.1 Pa·s(shear rate 800s^{-1})의 경우 40에서 100 cps)의 점성을 갖는 유체가 약 1.9m/s의 속도로 움직이는 수직회전 바퀴의 표면 위에 공급된다. 이 휠은 직경 180mm 구의 부분 정도이며 MR 유체의 띠가 자기장의 영향을 받는 휠의 면위에 공급이 되면서 유체의 점성은 수 밀리초 동안에 세 단위 이상 증가하여 빙햄 소성(Bingham plastic) 유체가 된다. 이 자기유변유체는 자기장에 의해 휠의 면에 부착이 된 상태로 계속적인 회전을 하게 되는데 이 유체 위로 연동펌프에 의해 탈이온수와 연마재의 혼합물을 계속적으로 공급함으로써 가공물인 렌즈의 수화작용과 연마에 의해 생기는 온도 상승의 냉각효과를 주고 또한 연마 입자를 보충한다. 따라서 연마액과 자기유변유체가 함께 곡면 형태나 평면 형태의 공작물이 회전하는 휠 사이의 좁은 틈으로 이동을 하게 되는데 이때 비자기성을 가지는 연마 입자들은 자기유변유체의 상부 부분으로 격리되면서 이 연마 입자들이 공작물의 표면을 연마하게 된다.⁵⁾

여기서 주된 관심 영역은 연마가 일어나는 자기

장 내의 영역인데 Fig.4는 이 영역의 단면도를 나타낸다. 그림에서처럼 코일을 감은 전자석에 의하여 자극 사이의 중앙부에서는 강한 자기장이 형성되면서 자기유변유체에 자장을 가하고 수직방향으로 구배를 갖게 된다. 자기장은 비자성체인 가공물의 표면보다 훨씬 높으므로 훨씬 표면에서는 자성입자가 압축되면서 연마입자를 유리 표면으로 밀어내는 역할을 하게 되는 것이다.

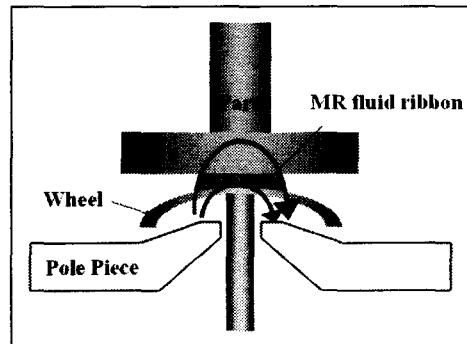


Fig.4 Cutaway view of the MRF system

연마가 이루어지는 영역에서 형성되는 자장의 효과를 이해하고자 가우스미터(gaussmeter)를 이용하여 측정한 후 Fig.5에 수평과 수직 자장 분포에 대한 성분을 나타내었다.

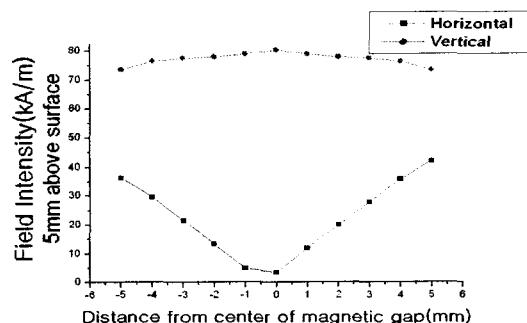


Fig.5 The field distribution in the polishing configuration

각 전자석은 2440회 정도의 코일을 감고 1A의 전류를 흘려 측정한 것으로 수직 방향에 대한 자장은 중심에서 거의 0을 나타내고 있지만 수평 방향 성분의 자장의 세기는 거의 최대값을 가지는 것을

볼 수 있다. 수직방향의 자장 세기가 떨어지기 시작하는 위치에서 자성 유체에 의한 폴리싱이 이루어지기 때문에 결국 이 그림을 통해 연마공정에 있어서 수직방향의 자장은 수평방향의 자장에 비해 상대적으로 중요하지 않다는 것을 알 수 있다.

2.3 MR 유체의 유동 특성 및 재료 제거율

MRF는 회전하는 휠과 공작물의 표면사이에 형성되는 좁은 틈을 통과시 전자장에 의해 강성을 이루게 되는 자성 연마액체의 흐름의 상태가 된다. 이 유동은 유체 윤활의 기본적인 지배 방정식에 의하여 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \quad (3)$$

여기서 $\frac{\partial P}{\partial x}$ 와 τ_{xy} 는 압력 구배와 전단응력이다. 여기서 위의 식을 적분하면

$$\tau_{xy} = \frac{\partial P}{\partial x}y + C_1 \quad (4)$$

이다. 여기서 C_1 은 적분 상수이며 식 (4)를 식 (1)에 대입하고 적분하면

$$\frac{1}{2} \frac{\partial P}{\partial x}y^2 - \eta_0 u \pm \tau_0(H)y + C_1y + C_2 = 0$$

$$|\tau| \geq |\tau_0(H)| \quad (5)$$

이다. 경계조건인 $u = U(\text{at } y=0)$, $u=0(\text{at } y = h(x))$ 에 의하여 적분상수 C_1 과 C_2 를 구하고 식(4)에 C_1 을 대입하여 정리하면

$$\tau_{xy} = \frac{\partial P}{\partial x} [y - \frac{h(x)}{2}] - \frac{\eta_0 U}{h} - \tau_0(H) \quad (6)$$

이 된다. $h(x)$ 는 기피 또는 틈새의 두께가 되며 u 는 wall 속도가 된다.[3]

따라서 MR 유체에 의한 재료 제거율은 일반적인 연마 가공에 의한 재료 제거율식인 Preston's equation을 적용된다.⁶

$$R = kP |U| \quad (7)$$

재료 제거율 R 은 가압력 P 와 공작물과 패드 사이의 상대속도 U 에 의해 제어된다. 여기서 프레스톤 상수 k 는 연마재, 가공물, 패드 등에 의하여 정해지는 상수이다. 식(7)은 좀 더 일반적으로 표현하자면

$$R = kPU = k \frac{L}{S} U = k \frac{\tau U}{\mu} = k \frac{\dot{W}}{\mu} \quad (8)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서 L 은 수직력, S 는 연마 가공이 일어나는 면적, F 는 공작물에 작용하는 마찰력, μ 는 마찰계수, τ 는 공작물 표면에서의 전단력이며 \dot{W} 는 단위면적당 일률이다.

3. MR 유체를 이용한 폴리싱

3.1 실험 장치 및 가공 조건

MRF에 이용되는 MR 유체를 생산하기 위하여 사용되는 입자들은 자기장에 민감한 카보닐 아이언(carbonyl iron : CI) 분말이다. 이 분말은 아이언 펜타카보닐(iron pentacarbonyl)을 분해할 때 생산되며 구형의 거의 순수한 철이며 수용성 또는 비수용성 운반유체, 첨가제, 그리고 자기장을 활용한다.⁷

폴리싱에 이용되는 표준 자기유연유체에는 36 vol% 자성입자, 연마입자 그리고 운반유체로 초순수로 구성되어 있으며, 여기에 약간의 분산 안정제가 첨가된다. 재료 제거율을 높이기 위해 MR 유체는 세륨 옥사이드(cerium oxide)입자, 다이아몬드 분말(diamond powder), 알루미나 입자(Al_2O_3 powder) 같은 비자성 연마재를 함유한다. 따라서 슬러리를 적절하게 조성하고 제어하면 다양한 종류의 재료를 실용적인 재료제거율로 연마할 수 있으므로 매우 우수한 연마방법의 하나라 할 수 있겠다.

또한 MR 유체는 글리세롤(glycerol)같은 안정제를 함유하는데 이는 자성 유체의 점성을 더해주고 연마 입자들과 자성 입자의 혼합을 조절하는데 도움을 주지만 글리세롤과 같은 안정제의 과도한 양의 첨가는 글리세롤의 영향이 물의 수화작용으로 인한 유리 표면의 연화를 방해한다.

녹은 자성 유체의 현 상태의 안정성 문제의 원인이 되는데 이는 유체가 수용성의 슬러리에서 미세하게 분해된 철 입자들을 취하기 때문이다. 산화된 철은 CI에 비해 상당히 다른 자성 특성을 가지

기 때문에 부식된 자성 유체의 자성 특성은 계속 변하게 되고 이로 인하여 부식이 폴리싱의 불예측 원인이 되는 것이다. 자성 유체는 부분적으로 대기 에 노출되기 때문에 이는 카본 디옥사이드를 흡수하고 이는 유체의 pH 농도를 떨어뜨리는 원인이 되며 금속 산화의 원인이 되기도 한다. 운반액으로 서 탈이온수(DI water)를 사용하여 부식을 늦출 수는 있지만 이 방법이 완벽한 해답이 되지는 않는다. 따라서 이러한 문제 해결 방법의 하나로 pH를 약 10정도로 올리는 Na_2CO_3 같은 알카리의 첨가를 들 수 있는데 이는 제거율의 상승과 안정성을 향상시키며 완충제의 역할도 한다.⁸

글래스 가공을 위한 MRF 장치 사진은 Fig. 6에 나타내었다. 기초 가공 실험을 위한 공작물의 재질은 BK7을 사용하였으며 Table 1에 BK7의 물성치를 나타내었다.



Fig.6 Photograph of the MRF system

Table 1 Physical properties of BK -7

| Material | BK-7 |
|-----------------------|--------------------------------|
| Structure | Single-crystal Cubic c -cut |
| Water solubility | 0.0017 |
| Surface hardness(GPa) | 2.47 |
| Young's module (GPa) | 110 |
| Fracture toughness | 0.33 |

MR 유체를 이용한 연마 실험은 기초실험 단계로 일정 조성으로 혼합된 MR 유체와 연마 입자 Al_2O_3 powder를 혼합한 DI water를 공급하고 가공

물과 휠 사이의 간격은 0.5mm로 유지 시킨 후 휠의 스픈들은 150rpm 으로 고정시켰다. 전자장을 가하기 위한 전류치는 3A를 주고 각 가공 시간은 20 분으로 고정하여 연마 입자의 조성에 따른 실험과 연마 입자의 크기에 따른 실험을 각 조건별로 3번 씩 실험을 하여 그 결과치를 나타내고자 하였다.

Table 2와 3에는 MR 유체 조성에 사용된 자성 입자(International specialty products Co.)의 물성치와 조성을 Table 4와 5에는 각 연마재로 사용되는 알루미나 파우더의 함량과 입자 사이즈에 따른 실험 조건을 나타내었다.

Table 2 The properties of the iron powder

| Micropowder iron grade R-2430 | |
|-------------------------------|-------------|
| Color | Gray |
| Apparent density | 2.0 - 3.0 |
| True density | 7.7 Maximum |
| Average particle diameter | 4-6 microns |
| % iron | 99.5 max |
| % carbon | 0.05 max |
| % oxygen | 0.5 max |
| % nitrogen | 0.1 max |

Table 3 Composition properties of the MR fluids used for material removal experiment

| CI powder | DI water | Glycerol | Na_2CO_3 |
|-----------|----------|----------|------------|
| 30% | 67.7% | 2% | 0.3% |

Table 4 Experimental condition of abrasive-DI water according to vol(%) of Al_2O_3 (1μm)

| | Abrasive | DI water |
|-------------|------------------|----------|
| Condition 1 | Al_2O_3 4.4 % | 95.6 % |
| Condition 2 | Al_2O_3 8.7 % | 91.3 % |
| Condition 3 | Al_2O_3 17.3 % | 82.7 % |

Table 5 Experimental condition of abrasive-DI water according to Al_2O_3 particle size

| | Particle size | Abrasive Vol |
|-------------|---------------|--------------|
| Condition 4 | 0.005 μm | 17.34 % |
| Condition 5 | 0.03 μm | 17.34 % |
| Condition 6 | 1 μm | 17.34 % |

4. 실험 결과

각 실험 조건에 의하여 MR 유체를 이용한 폴리싱을 수행한 후 3차원 표면조도 측정기(Veeco NT-1000)을 이용하여 연마된 가공면을 측정하였다.

Fig.7과 8에서 입자(particle) 사이즈 1um의 알루미나 파우더를 4.335% 첨가하여 가공 실험을 한 후 가공 형상과 표면 조도를 측정하여 나타내었다.

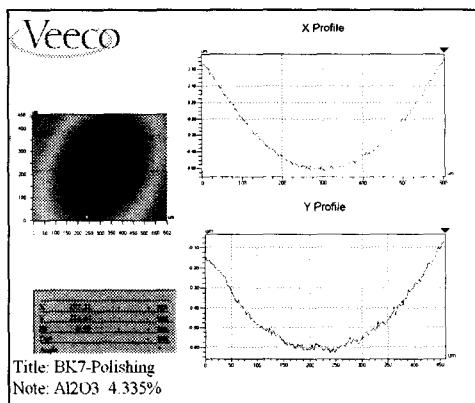


Fig.7 Surface contour plot of spot & 2D analysis(Al_2O_3 : Vol 4.335%)

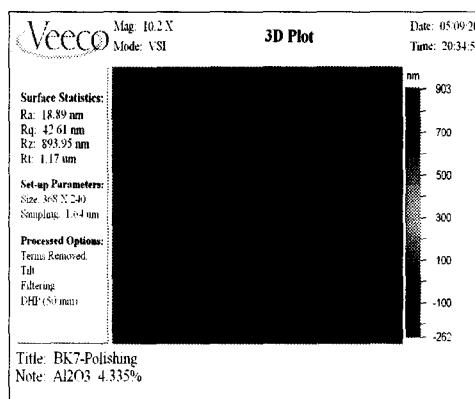


Fig.8 Measured surface roughness of spot (Al_2O_3 : Vol 4.335%)

각각의 실험 조건에 의하여 polishing된 BK7의 가공면에 대한 표면조도의 측정 결과는 아래의 그림 Fig.9와 Fig.10에 나타내었다.

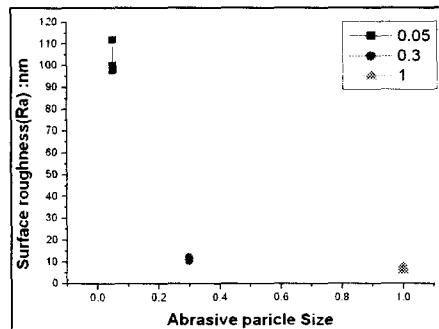


Fig.9 Result of surface roughness according to abrasive particle size

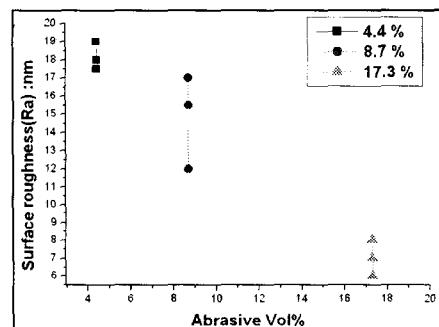


Fig.10 Result of surface roughness according to Al_2O_3 abrasive volume(size : 1um)

실험 결과 알루미나 파우더의 사이즈가 $1\mu m$ 의 경우 연마된 가공의 표면조도(약 7nm)가 다른 연마 입자의 사이즈(0.3um, 0.05um)의 경우보다 훨씬 좋은 결과를 나타내었으며 또한 연마 입자의 지름이 $1\mu m$ 의 경우 함량이 증가할수록 우수한 표면 조도를 얻었다. 따라서 연마 입자의 사이즈가 작은 경우는 연마재의 첨가를 증가시켜 연마 슬러리의 농도를 증가시킨다면 향상된 표면 조도를 얻을 수 있음을 예측할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 MR 유체를 이용한 연마 가공의 원리를 이용하여 폴리싱 시스템을 개발하였다. MR 유체에 전자석을 이용하여 자화를 걸어주면 MR 유체는 패드와 같은 역할을 하고 연마 슬러리가 가공 대상물을 폴리싱 하는 것을 실험적인 방법을 통해 검증하였다. 연마재인 알루미나 파우더의 입자 사

이즈와 조성을 변화시켜 가며 BK7에 폴리싱 가공을 실험한 결과 17.3 % 함량의 Al_2O_3 연마입자를 사용하여 연마를 하였을 경우 약 Ra 6nm 정도의 비교적 우수한 표면 조도를 얻음으로서 미세한 부품 및 클래스 연마에 대한 평탄화가 충분히 가능하리라는 것을 볼 수 있었다. 향후 지속적인 실험을 통하여 MR 유체와 연마 슬러리의 최적조건 검출과 MRF 시스템의 성능 향상을 통하여 비구면 렌즈의 평탄화 적용이 충분히 가능하리라 예상된다.

후기

본 연구는 과학기술부가 지원하고 있는 국가지정연구실 사업의 하나인 “화학 및 전자장을 이용한 평활가공기술” 과제 내용의 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사의 말씀을 올립니다.

참고문현

1. Kordonski, W. I., Golini, D., "Progress update in magnetorheological finishing," Int. J. Mod. Phys. B, Vol.13, No. 14, pp.2205-2212, 1999.
2. Akami, Y., Asari, K. I., "Characterization of particle motion for polishing and texturing under AC field by using particle dispersion type ER fluid," J. Int. Mat. Sys. Struc., Vol.9, pp.672-675, August, 1998.
3. Kim, K. D., "A Controllable Micro Damper Using Magneto-Rheological Fluids," J. of the KSPE, Vol. 17, No. 8, pp. 41-45, 2000.
4. Kormann, Cl., Laun, H. M., Laun, H. J., "MR Fluids with nano-magnetic particles," International Journal of Modern Physics B, Vol. 10, pp. 3167-3172, 1996.
5. Laun, S. D., Arrasmith, S. R., Kozhinova, I. A., Gregg, L. L., Shorey, A. B., Romanofsky, H. J., Golini, D., "Studies of Material Removal in MRF from Polishing Spots," in Symposium D: Finishing of Advanced Cramics and Glasses, edited by R. sabia, V. A. Greenhut, and Ceramic Transactions, Vol. 102, pp. 185-199, 1999.
6. Kordonski, W. I., Jacobs, S. D., "Magnetorheological Finishing," International J. of Modern Physics B, Vol. 10, No. 23, pp. 2837-2848, 1996.
7. Golini, D., Kordonski, W.I., Dumas, Paul., Hogan, Steve., "MRF in commercial precision Optics Manufacturing," Optcal Manufacturing and Testing III, Vol. 3782, pp. 80-91, 1999.
8. Kordonski, W. I., Prokhorov, I., Gorodkin, S., Gorodkin, R., "Magnetonrheological polihing device and methods," US Patent 5,449,313.