

MR Fluid Jet Polishing 시스템에 의한 Fused Silica Glass 연마특성 고찰

이정원⁺, 조용규⁺, 조명우^{*}

(Manuscript received: May, 1, 2012 / Revised: Jun, 18, 2012 / Accepted: Jun, 20, 2012)

Investigation of Polishing Characteristics of Fused Silica Glass Using MR Fluid Jet Polishing

Jung-Won Lee⁺, Yong-Kyu Cho⁺, Myeong-Woo Cho^{*}

Abstract

Abrasive fluid jet polishing processes have been used for the polishing of optical surfaces with complex shapes. However, unstable and unpredictable polishing spots can be generated due to the fundamental property of an abrasive fluid jet that it begins to lose its coherence as the jet exits a nozzle. To solve such problems, MR fluid jet polishing has been suggested using a mixture of abrasives and MR fluid whose flow properties can be readily changed according to imposed magnetic field intensity. The MR fluid jet can be stabilized by imposed magnetic fields, thus it can remain collimated and coherent before it impinges upon the workpiece surface. In this study, MR fluid jet polishing characteristics of fused silica glass were investigated according to injection time and magnetic field intensity variations. Material removal rates and 3D profiles of the generated polishing spots were investigated. From the results, it can be confirmed that the developed MR fluid polishing system can be applied for stable and predictable precise polishing of optical parts.

Key Words : Magnetorheological(MR) fluid jet polishing(자기유변유체분사연마), Fused silica glass(석영유리), Ultra-precision polishing(초정밀연마), Material removal rate(재료제거율), Flow analysis(유동해석)

1. 서론

급속한 IT산업 발달과 더불어 마이크로 광학부품과 같은 초정밀 부품에 대한 요구가 증가하고 있으며, 이에 따라 효과적인 초정밀 연마기술 개발에 대한 연구가 진행되고 있다⁽¹⁾. 특히 비구면이나 자유곡면과 같이 복잡하게 설계되어진 광학부품, 금형 등에 적용을 위한 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 볼록한 형상(convex shape)을 가진 공작물의 경우에는 래핑, MR polishing

등과 같이 다양한 접촉식 초정밀 연마방법의 적용이 가능하나, 급격히 경사가 변화하는 오목한 형상(concave shape)의 경우에는 공구와 가공물의 간섭에 의해 기존의 연마방법의 적용이 어려울 수 있다. 이러한 경우 연마재가 혼합된 유체를 분사하여 연마하는 fluid jet polishing 방법의 적용이 사용될 수 있다⁽²⁻⁴⁾. 이러한 유체분사연마 방식에서는 분사되는 유체가 노즐을 떠나면서 집중성이 급격하게 약화되어 초정밀연마를 위한 안정적인 연마 spot의 형성이 어려워진다. 이러한 현상은 노즐과 가

⁺ 인하대학교 기계공학과

^{*} 교신저자, 인하대학교 기계공학부 (chomwnet@inha.ac.kr)

주소: 인천광역시 남구 인하로 100 2북277 마이크로생산시스템연구소

공물의 거리가 증가할수록 심화되며, 일정한 거리가 유지되지 않으면 안정적인 정밀한 연마가 불가능해지는 요인으로 작용한다.

이러한 문제의 해결을 위하여 최근 자기장의 세기에 따라 점성이 변화하는 MR fluid에 연마재를 혼합하여 노즐을 통하여 분사시켜 연마를 수행하는 MR fluid jet polishing 시스템에 대한 연구가 진행되고 있다⁽⁵⁾. 이러한 MR fluid의 특성을 활용한 분사연마 방법은 인가된 자기장의 영향으로 분사된 유체가 집중성을 유지하여 균일한 연마 spot의 생성이 가능하여 초정밀 연마에 적합한 것으로 평가되고 있으나 주요 가공 인자에 대한 분석이 미비한 실정이다.

본 연구에서는 제작된 MR fluid jet polishing 시스템의 적용 가능성 검증을 위하여 fused silica glass 시편을 대상으로 연마 특성 분석을 위한 기초실험을 수행하여 그 결과를 분석하였다. 먼저 자기장의 인가여부에 따른 분사유체의 집중성과 생성된 연마 spot 형상을 비교하였으며, standoff distance, 연마시간 및 자기장의 세기를 변화시키며 시편에 형성되는 연마 spot의 특성을 분석하여 그 결과를 도출하였다. 유동해석을 통하여 구한 simulation 측정된 spot의 형상과 wall shear stress simulation 결과를 비교하여 타당성을 검증하였다. 연마된 시편의 측정결과를 통하여 standoff distance를 변화시켜도 균일하고 일정한 크기의 연마 spot을 얻을 수 있고, 자기장의 영향으로 노즐로부터 분사된 MR fluid의 집중성이 유지되는 것을 확인하고자 하였다. 시편의 단면형상은 대칭형의 매끈한 W형상이 생성되어 전형적인 유체분사연마 결과와 일치함으로써 본 연구의 결과 개발된 시스템을 이용하여 고품위의 표면연마 공정이 안정적으로 가능함을 확인하고자 하였다.

2. MR Fluid Jet Polishing System

2.1 시스템 구성

본 연구에서 사용된 MR fluid jet polishing 시스템은 분사노즐, 전자석 모듈, 유체분사시스템 및 이송시스템 등으로 구성되어 있으며, 다음과 같이 설계 및 제작하였다.

1) 분사노즐 : 분사연마과정에서는 일반적으로 venturi nozzle 과 straight bore nozzle이 많이 사용된다. 그러나 venturi nozzle의 경우에는 불안정한 유동을 형성하여 균일하고 정밀한 연마 spot을 형성하는 데 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 입력단과 출력단까지 내径의 변화가 없는 직진노즐(straight nozzle)을 선정하였으며, SM45C 소재로 $\varnothing 1.5$ 의 내경으로 제작하여 사용하였다.

전자석 모듈 : 전자석 모듈은 분사되는 혼합유체의 점도를 변화시켜 분사되는 속도 및 재료제거율과 jet의 집중성에 영향을 주는 중요한 요소이다. 본 연구에서는 권선수 1800의

전자석을 제작하여 1.5A에서 약 1500G의 자기장을 형성하도록 설계하여 제작하였다.

2) 유체이송 시스템 : 연마를 위해 MR fluid를 고압으로 분사할 수 있는 시스템은 토출압력 15bar 이상인 diaphragm 펌프 2개를 병렬로 연결하여 사용하였으며, 흡입부와 토출부의 직경의 차이에 의하여 최대 20bar 이상의 압력을 발생되도록 설계하였다. MR fluid는 노즐에서 분사될 때 자기장의 영향으로 점성이 높아지게 되며 이로 인해 노즐내부의 압력이 증가하여 펌프에 과부하가 걸리는 현상이 발생하며, 불연속 유동에 의한 맥동현상이 발생할 수 있다. 본 시스템에서는 이의 방지를 위하여 check valve, relief valve, accumulator 로 구성되는 이송시스템을 설계하여 제작하였다.

3) 이송 스테이지 : 본 연구에 사용된 MR fluid jet polishing 시스템은 MR fluid를 하단의 정밀 이송스테이지에 장착된 고압노즐과 전자석 모듈에서 상단의 Z-axis에 장착된 재료 chucking 모듈로 분사하는 방식으로 구성되었으며, 이는 연마가 종료된 혼합유체가 가공물의 표면에 쌓여서 연마를 방해하는 현상을 방지하고, 사용된 혼합유체가 용이하게 재순환될 수 있도록 하기 위함이다. 스테이지의 이송제어와 chucking module의 제어에 의해 요구되는 다양한 형상의 연마가 가능하도록 구성되었다.

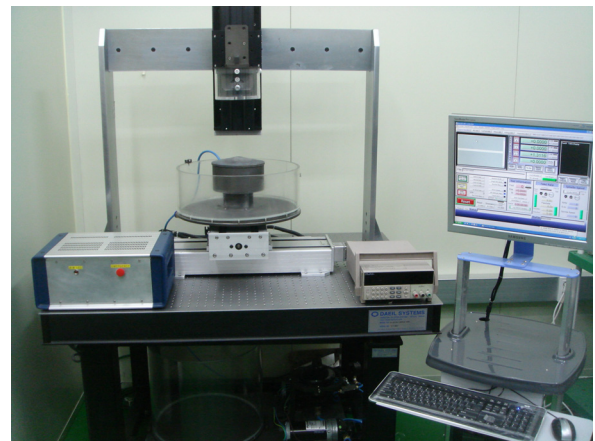


Fig. 1 A photograph of the used MR fluid jet polishing system

Table 1 Specification of the developed MR fluid jet polishing system

Electromagnet system	Magnetic spec(Gauss)	1500G at 1.5A
	Size(mm)	$\varnothing 70 \times 120$ mm
Nozzle system	Diameter(mm)	$\varnothing 1.5$ mm
	Length(mm)	70mm
	Material	Carbon steel(SM45C)
Hydraulic system	Pump type	Diaphragm pump
	Max. pressure(bar)	15 bar

Fig. 1에 본 연구에 사용된 MR fluid polishing system의 사진을 나타내었으며, Table 1에 시스템의 사양을 나타내었다.

2.2 Fluid jet polishing 개요

유체분사에 의한 연마시 공작물과 충돌하는 유체는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 free jet region, impingement region, 그리고 wall jet region으로 구분할 수 있으며, 전체 재료제거량 V 는 impingement region에서 유체와 입자의 충돌에 의해 제거되는 재료제거량 V_i 와 wall jet region에서 침식과 전단작용에 의해 제거되는 재료제거량 V_p 의 합으로 구할 수 있다⁽⁶⁾.

축방향(axial direction)으로 분사된 연마입자가 가공물과 충돌하며 재료가 제거되는 impingement region에서 흡수되는 전체에너지는 열이나 잔류에너지로 변환되어 소멸되는 소성변형 에너지(plastic deformation energy)와 가공물의 파괴와 내부 마찰로 소멸되는 변형파동 에너지(stress wave energy), 그리고 연마입자의 파괴와 입자와 입자조각의 반발로 소멸되는 잔류에너지(residual energy)의 합으로 나타낼 수 있으며, 그 중 stress wave energy는 다음의 식으로 표현된다⁽⁶⁾.

$$W = \frac{1}{2} m_p V^2 f_c \eta(\nu) \left(\frac{\rho}{\rho_p}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{H}{E}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

여기에서 각 변수들은 다음을 나타낸다.

분사되는 연마입자 변수		가공물 변수	
m_p :	분사입자의 질량	E :	가공물의 탄성계수
$\eta(\nu)$:	Poisson's ratio	H :	가공물의 경도
ρ_p :	분사유체 내 연마입자의 밀도	ρ :	가공물의 밀도
V :	연마입자의 분사 속도	f_c :	실험에 의해 구해지는 계수

특히 MR fluid jet polishing은 일반 water jet polishing과는 달리 MR fluid에 연마입자가 혼합되어 분사되며, 인가되는 자

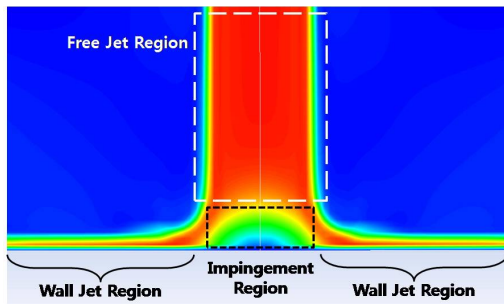


Fig. 2 Three regions of impinging MR fluid jet

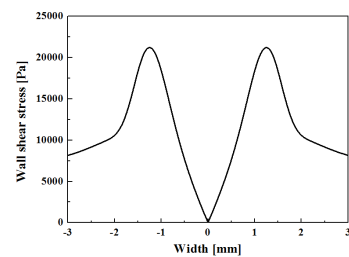
기장의 세기에 따라 노즐 내부에서 유동되는 MR fluid의 점성이 달라지기 때문에 연마입자의 분사속도도 변화하게 된다.

Wall jet region에서 연마슬러리는 반경방향(radial direction)으로 유동하며 최고 속도에 도달한 후 점진적으로 속도가 감소한다. 이 때 재료는 연마입자의 전단현상과 침식에 의해 제거되며, wall shear stress가 최대인 지점에서 최대 재료제거율을 나타내기 때문에 연마된 spot의 단면형상은 W자 형상을 나타내게 되며, 이 형상의 동심도와 진원도가 분사된 연마 jet의 특성을 나타낸다. Fig. 3(a)는 Fig. 2의 경우에 대한 wall shear stress의 ANSYS FLUENT 해석결과를 나타낸 것이며, Fig. 3(b)는 동일한 조건에서 실제 연마된 spot의 단면을 측정된 결과를 나타낸 것으로 두 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

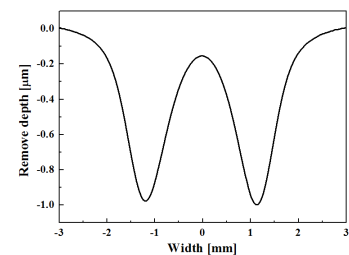
3. MR Fluid Jet Polishing 실험

3.1 기초 분사실험을 통한 특성 분석

기초 분사실험을 위한 혼합유체는 Table 2에 나타낸 바와 같이 CI(carbonyl iron) particle, DI-water 그리고 stabilizer로 조성된 MR fluid에 연마제로 nano ceria 입자를 13wt% 첨가하여 조성하였다. Fig. 4는 사용된 CI particle과 연마입자의 입도분석 결과를 나타내고 있으며, CI particle의 평균입자 크기는 2~3 μ m,



(a) Wall shear stress distribution



(b) Experimental result

Fig. 3 Comparison of simulation and experimental results

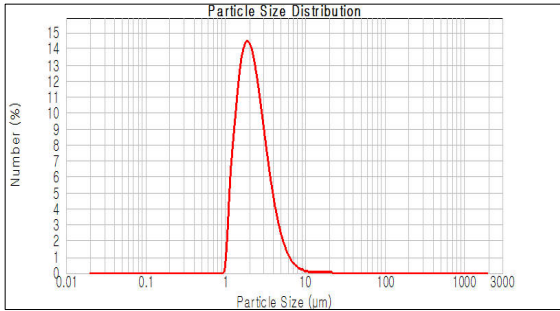
Table 2 Compositions of the MR fluid

Cabonyliron	Nano ceria slurry	DI-water	Stabilizer
65wt%	13wt%	20wt%	2wt%

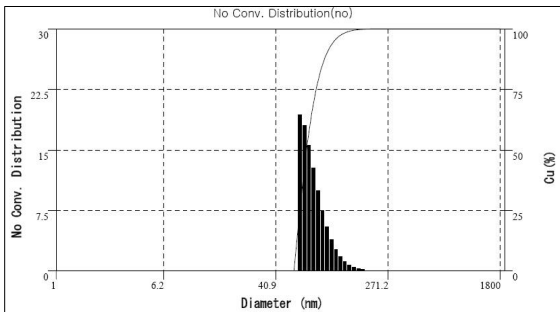
* Stabilizer(glycerol 1wt% + Na₂CO₃ 1wt%)

nano ceria의 평균입자 크기는 50nm 이내로 분석되었다.

기초실험을 위해 $\varnothing 1.5\text{mm}$ 의 straight bore nozzle를 제작하여 사용하였으며, 가공조건으로 standoff distance는 30mm, 분사각도는 90°, 인가된 자기장 세기는 1500G로 설정하였다. 노즐 입력단에서 측정된 유체의 압력은 9bar이었으며, 노즐 출력



(a) CI particle

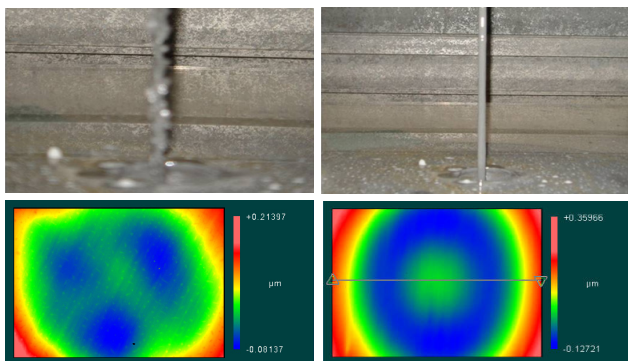


(b) Nano ceria particle

Fig. 4 Particle size distributions of CI and nano ceria

Table 3 Material properties of the fused silica glass

Birefringence Constant	3.54(nm/cm)/(kg/cm ²)
Density	2.201g/cm ³
Young' Modulus@20°C	7.2×10 ¹⁰ pa(10.5×106psi)
Coefficient of Exp	0.55×10 ⁻⁶ /°C
Dielectric Strength	250-400kV/cm at 20°C



(a) Magnetic field off (b) Magnetic field on(1500G)

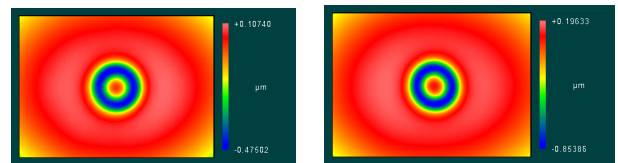
Fig. 5 Particle size distributions of CI and nano ceria

단에서의 혼합유체 분사속도는 15.8m/s로 계산되었다. 가공에 사용된 시편은 사각형 판재의 fused silica glass이며, Table 3에 시편의 주요 물성치를 나타내었다.

Fig. 5는 자기장의 인가 유무에 따른 차이점을 비교하기 위하여 분사되는 jet의 snapshot과 시편에 형성된 연마 spot을 비접촉식 3차원 표면형상 측정기(ZYGO NV6200)를 이용하여 측정 후 그 결과를 비교한 것이다. Fig. 5(a)는 자기장이 인가되지 않았을 때의 경우이며, (b)는 자기장이 인가된 경우를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 자기장이 인가되었을 경우 분사유체의 집중도가 확연히 증가함을 알 수 있으며, 연마된 spot의 형상도 자기장이 인가되었을 경우가 보다 안정적으로 형성되어 MR fluid jet polishing이 정밀연마에 보다 적합함을 알 수 있다.

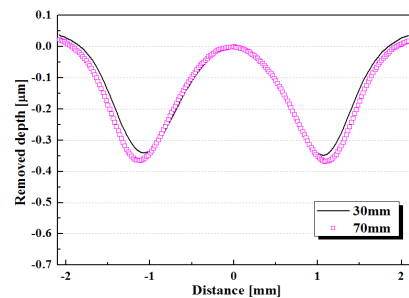
3.2 Standoff Distance에 따른 Spot 형상 분석

MR fluid jet polishing의 가장 큰 특징은 축방향(axial direction)으로 인가되는 자기장의 영향에 의해 분사되는 유체가 확산되지 않고 집중성을 유지한다는 것이며, 이는 분사유체가 안정적인 형태를 나타낸다. 본 연구에서는 이러한 특성의 확인을 위해 노즐의 standoff distance를 변화시키며 연마를 수행한 후 가공물에 형성되는 spot의 형상을 측정하여 그 결과를 비교하였다. 자기장 세기 1500G, 분사각 90°의 조건에서 30mm와 70mm의 두 가지 standoff distance에 대해 각각 3분간 분사하여 측정된 spot 형상을 비교한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 standoff distance의 변화에도 불구하고 spot의 크기와 형상에는 거의 변화가 없고 대칭형의 동심원을 유지하고 있는 것을 알 수 있다. 이로부터 분사되는 MR fluid가 인가된 자기장에 의해 확산되지 않고 집중성을 유지하며 안정적으로 가공



(a) Standoff=30mm

(b) Standoff=70mm



(c) Polishing spot profiles

Fig. 6 Comparison of polished spots for jet stability test

물에 도달하고 있다는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 안정적인 연마 spot의 생성은 가공물의 예측 가능한 초정밀 연마에 필수적인 것이라 할 수 있다.

3.3 분사시간과 자기장 변화에 따른 재료제거율 분석

분사 시간과 자기장 변화에 따른 재료제거율을 분석하기 위하여 분사 시간과 자기장 세기를 변화시키며 가공물의 재료제거율 분석 실험을 수행하였다. 가공조건으로 standoff distance는 30mm, 분사각은 90°로 고정하였으며, 자기장은 1500G와 2000G의 두 가지 경우, 분사시간은 1분과 5분의 두 가지 경우에 대해 분사실험을 수행하였다. 연마된 spot의 측정결과를 Fig. 7에 나타내었으며, 최대직경 기준으로 측정된 spot의 단면프로

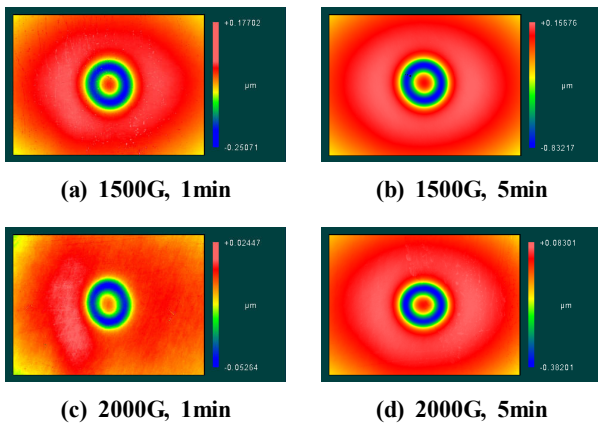


Fig. 7 Measured results after MR jet polishing(standoff=30mm)

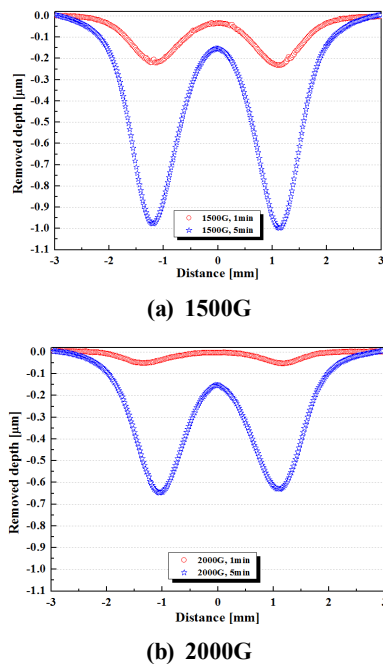


Fig. 8 Cross-section profiles of polishing spots according to polishing time and magnetic field intensity variations

파일은 Fig. 8에 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 동일한 자기장에서 재료제거율은 분사시간에 따라 증가하는 것을 알 수 있으며, 자기장의 세기가 증가하면 동일조건에서 분사유체의 집중도는 증가하나 재료제거량은 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 MR fluid jet polishing 시스템에서 노즐에 인가되는 자기장의 세기는 분사되는 MR fluid의 점도에 영향을 미치기 때문이다. 자기장의 세기가 약하면 분사되는 유체의 응집성이 저하되어 불균일한 연마 spot을 형성하게 되며, 반대로 강한 경우에는 점성증가에 의한 분사속도의 저하로 재료제거율이 낮아지고 노즐의 마모가 증가하게 된다.

Fig. 9는 실험에 사용된 MR fluid의 자기장의 세기 변화에 따른 점도변화를 측정된 것이며, 1500G에서 보다 2000G에서 점도가 증가하는 것을 알 수 있다.

그러나 점도변화의 측정결과만으로는 속도의 변화를 확인할 수 없으며, 이의 분석을 위해서 노즐내부의 유동특성을 분석하여야 한다. 본 시스템에서 사용된 노즐은 입·출구의 직경이 동일한 straight bore nozzle이기 때문에 노즐내부의 유동속도는 다음의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V \propto K \frac{\Delta p}{\mu} \tag{2}$$

식 (2)에서 보듯이 속도 V는 점도 μ 와 반비례하며, 노즐 내부의 압력변화 Δp 에 비례한다. 여기서 K는 상수로 노즐의 길이와 지름에 따라 변화하는 값이다.

자기장의 세기가 1500G와 2000G인 경우 노즐 입력단에서

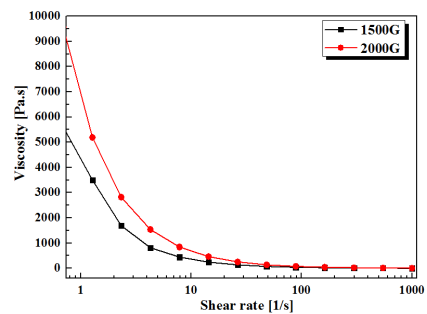


Fig. 9 Viscosity changes according to magnetic field intensity variations

Table 4 Jet speed variations according to magnetic field intensity

No.	Magnetic field intensity(G)	Fluid pressure(bar)		Jet speed (m/s)
		Nozzle inlet	Nozzle outlet	
1	1500G	9.0	1.0	15.8m/s
2	2000G	11.5	1.0	11.3m/s

측정된 혼합유체의 압력은 각각 9bar와 11.5bar로 동일한 시스템에서 점성의 증가로 압력이 증가하는 것을 알 수 있다. 측정된 점도 μ 값과 압력변화 Δp 값을 사용하여 식 (2)에서 계산된 혼합유체의 분사속도를 Table 4에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 자기장이 증가하면 분사속도는 감소하며 식 (1)에 의해 재료제거율이 감소한다는 것을 알 수 있다. 또한 질량유량의 경우 동일한 단면적을 가진 노즐에서 분사되는 유량은 속도에 비례하기 때문에 가공물에 도달하는 질량유량도 자기장의 세기가 증가하면서 감소하게 된다. 따라서 혼합유체 포함되어 있는 연마입자의 양도 감소되어 재료제거율 저하의 원인이 된다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 자기장의 인가에 의해 안정적이고 예측 가능한 연마 spot을 형성하여 미소부품의 초정밀 연마에 적용이 가능한 MR fluid jet polishing을 제작하여 fused silica glass 시편을 대상으로 가공조건을 변화시키며 연마 spot 및 재료제거율의 변화를 고찰하였고 이를 simulation 결과와 비교하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 제작된 시스템으로 기초실험을 수행하여 자기장의 인가여부에 따라 분사유체의 집중성 및 연마 spot 형상의 변화를 고찰하였으며, 실험 결과 standoff distance의 변화에도 안정적이고 균일한 spot이 형성되는 것을 확인하였다.
- (2) ANSYS FLUENT를 사용한 유동해석을 통하여 wall shear stress의 분포와 유동속도의 분포를 구하였으며, 그 결과와 실제 측정 결과가 잘 일치하고 있음을 확인하였다.
- (3) 연마시간과 자기장의 세기를 변화시키며 실험을 수행하였으며, 가공조건이 연마효과에 미치는 영향을 고찰하였다.
- (4) 실험 결과로 제작된 시스템이 안정적이고 예측가능한 초정밀 연마에 적용이 가능함을 확인하였다.
- (5) 향후 초정밀 렌즈 가공에 있어서 본 연구에서 제시된 연마

방법이 적용 가공할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단(No. 2009-0074199)과 2012학년도 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

References

- (1) Kim, D. G., and Sung, I. H., 2010, "A Closer Look at the Effect of Particle Shape on Machined Surface at Abrasive Machining," *Journal of the KSTLE*, Vol. 26, No. 4, pp. 219~223.
- (2) Fahnle, O. W., Burg, H. V., and Franken, H. J., 1998, "Fluid Jet Polishing of Optical Surfaces," *Applied Optics*, Vol. 37, No. 28, pp. 6771~6773.
- (3) Junkar, M., Jurisevic, B., Fajdiga, M., and Grah, M., 2006, "Finite Element Analysis of Single-particle Impact in Abrasive Water Jet Machining," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, No. 7, pp. 1095~1112.
- (4) Fang, H., Guo, P., and Yu, J., 2006, "Surface Roughness and Material Removal in Fluid Jet Polishing," *Applied Optics*, Vol. 45, No. 17, pp. 4013~4019.
- (5) Kordonski, W., and Shorey, A., 2007, "Magneto-rheological (MR) Jet Finishing Technological," *Journal of Intelligent Material System and Structures*, Vol. 18, No. 12, pp. 1127~1130.
- (6) Shi, C., Yuan, J., Wu, F., Hou, X., and Wan, Y., 2010, "Material Removal Model of Vertical Impinging in Fluid Jet Polishing," *Chinese Optics Letters*, Vol. 8, No. 3, pp. 323~325.