

MR Fluid Jet Polishing 시스템을 위한 분사노즐 및 전자석 모듈 개발

이정원⁺, 조용규⁺, 하석재⁺, 신봉철⁺⁺, 조명우^{*}

(Manuscript received: May, 1, 2012 / Revised: Jun, 28, 2012 / Accepted: Jul, 8, 2012)

Development of an Injection Nozzle and an Electromagnet Module for a MR Fluid Jet Polishing System

Jung-Won Lee⁺, Yong-Kyu Cho⁺, Seok-Jae Ha⁺, Bong-Cheol Shin⁺⁺, Myeong-Woo Cho^{*}

Abstract

Generally, abrasive fluid jet polishing system has been used for polishing of complex shape or freeform surface which has steep local slopes. In the system, abrasive fluid jet is injected through a nozzle at high pressure; however, it is inevitable to lose its coherence as the jet exits a nozzle. This problem causes incorrect polishing results because of unstable and unpredictable workpiece material removal at the impact zone. In order to solve this problem, MR fluid jet polishing method has been developed using a mixture of abrasive and MR fluid which can maintain highly collimated and coherent jet by applied magnetic field. Thus, in this study, an injection nozzle and an electromagnetic module, most important parts in the MR polishing system, were designed and verified by magnetic field and flow analysis. As the results of experiments, it can be confirmed that stable fluid jets for polishing were generated since smooth W-shapes and uniform spot size were observed regardless of standoff distance changes.

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

최근 마이크로 광학렌즈 부품과 같은 고품질·고정도 부품의 수요가 증가되어 마이크로/나노입자를 사용하여 잔류응력 및 가공변질층이 거의 발생하지 않으며 우수한 가공면 거칠기들을 얻을 수 있는 초정밀 연마기술 및 시스템 개발에 대한 연구가 진행되고 있다. 급격하게 경사가 변화하는 오목한 형상(concave

shapes)을 가진 공작물의 경우 연마공구와 기하학적인 간섭이 발생하여 기존의 연마방법을 적용하는데 어려움이 있으며, 이러한 경우에는 연마재가 혼합된 유체를 분사하여 연마를 수행하는 유체분사연마(fluid jet polishing) 방식이 사용되고 있다^(1,2).

이러한 유체분사연마 방식에서는 고압으로 분사되는 유체가 노즐을 떠나자마자 응집성이 급격하게 감소되기 시작하여 공작물에 도달할 때 난류형태의 불안정한 유체 흐름을 발생시키

* 인하대학교 기계공학부 (chomwnet@inha.ac.kr)

주소: 인천광역시 남구 인하로 100 2북277 마이크로생산시스템연구소

+ 인하대학교 기계공학과

++ (주)삼성전기 HDD제조기술G

며, 이러한 현상은 연마유체의 분사속도가 낮을수록, 노즐에서 공작물까지의 거리(standoff distance)가 길수록 심하게 발생한다. 이러한 경우 가공물 표면에 일정하지 않은 연마 spot이 형성되며, 이는 유체분사연마 공정의 정확한 재료제거 정도 및 형상의 예측을 어렵게 하여 부정확한 연마결과를 초래하는 요인으로 작용하게 된다⁽³⁾.

이러한 문제를 해결하기 위해 최근 고속으로 분사되는 연마재가 혼합된 MR(Magnetorheological) fluid에 자기장을 인가하여 공작물을 연마하는 MR fluid jet polishing 방법에 대한 연구가 진행되고 있다⁽³⁾. 이러한 MR fluid jet polishing 공정은 연마유체를 저압으로 분사하여도 분사된 유체가 인가된 자기장에 의해 응집성을 유지하여 예측가능하고 균일한 연마 spot 생성이 가능하다는 장점이 있다⁽⁴⁾. 그러나 시스템 제작에 있어서 시스템 구성, 주요 가공 변수에 따른 시스템 설계, 설계된 시스템의 해석을 통한 검증 등에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 MR fluid jet polishing 시스템의 주요 구성요소인 고압 분사노즐, 전자석 모듈 및 분사 시스템에 대한 설계를 수행하였으며, 자기장 해석 및 유동해석을 통해 설계된 시스템에 대한 이론적인 검증을 수행하였다. 설계 및 해석자료를 바탕으로 MR fluid jet polishing 시스템을 제작하였고, 제작된 시스템의 연마특성을 검증하기 위한 기초실험을 수행하였다. 연마된 시편의 측정결과, standoff distance를 변화시켜도 균일하고 일정한 크기의 연마 spot을 얻을 수 있었으며, 자기장의 영향으로 노즐로부터 분사된 MR fluid의 응집성이 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 시편의 단면형상은 대칭형의 매끈한 W형상이 생성되었으며, 이는 전형적인 유체분사연마 결과와 일치하였다. 본 연구의 결과 개발된 시스템을 이용하여 고품위의 표면연마 공정이 안정적으로 가능함을 확인할 수 있었다.

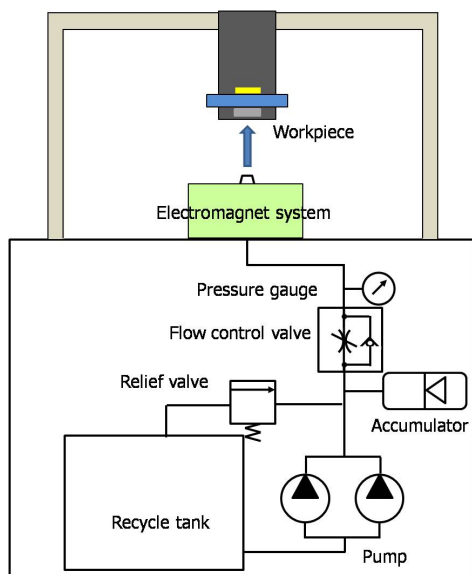


Fig. 1 Schematic diagram of a MR fluid jet polishing system

2. MR Fluid Jet Polishing 시스템 개발

MR fluid jet polishing 시스템에서는 자기장 내의 노즐에서 고속으로 분사되는 연마유체의 특성이 공작물의 재료제거율 및 가공면 거칠기에 결정적 영향을 미친다. 따라서 유체를 분사하여 일정한 흐름을 유지하여 공작물에 일정한 크기와 형상의 연마 spot을 생성하기 위한 노즐의 설계와 노즐에 자기장을 인가하여 분사되는 MR fluid의 직진성을 유지시키고 점도 및 항복응력 값을 조절하는 전자석의 설계가 핵심적인 요소라 할 수 있다. 제작된 시스템의 개요를 Fig. 1에 나타내었다.

2.1 고압 분사 노즐 설계 및 해석

일반적으로 분사연마공정에는 venturi nozzle과 직진노즐(straight bore nozzle)이 많이 사용된다. Venturi 노즐의 경우 출구에서 분사되는 유체가 확산되는 특성을 가지고 있어 넓은 면적을 연마하는 데는 유리하나, 불안정한 유동을 형성하여 균일한 연마 spot을 생성하는 데 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 MR fluid가 분산되지 않고 가공물에 직선으로 분사되어 균일하고 일정한 연마 spot 생성이 가능도록 직진노즐을 선정하였다. 본 연구에서 제작된 연마용 분사노즐의 주요 설계변수를 Fig. 2에 나타내었다.

노즐의 내경은 MR fluid의 분사속도를 결정하는 중요한 설계 변수 중 하나이다. 사용하는 펌프의 토출압력은 12bar이고 Ø3.5mm 관을 통과한 후 노즐의 입구에서 측정된 유체의 압력은 11bar이며, 펌프와 노즐 사이의 높이는 1m로 설계하였다. 이 때 노즐 입구에서의 유속은 베르누이 방정식으로부터 계산할 수 있다.

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 + z_1 \gamma = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 + z_2 \gamma \quad (1)$$

MR fluid의 밀도는 Table 1의 조성에 의해 6.26g/cm³이며, 노즐 입구의 내경은 표준 피팅 규격인 Ø3.5mm로 설정하였다. 이 때 계산된 입구의 유체 속도는 4.55m/s이며 노즐의 출구 직경에 따라 분사되는 유체의 속도가 결정된다. 노즐로부터 분사되는 유체의 속도는 기존 연구를 바탕으로 20m/s 이상으로 설

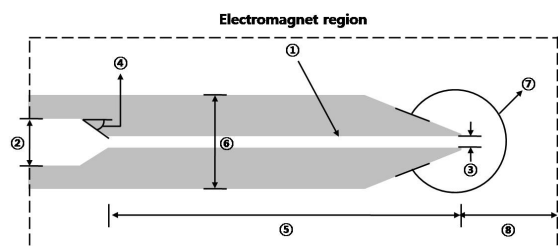


Fig. 2 Design parameters of a straight bore nozzle

정하여 설계를 진행하였고 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$Q = \frac{\pi d_1^2}{4} V_1 = \frac{\pi d_2^2}{4} V_2 \quad (2)$$

MR fluid의 분사속도가 20m/s 이상 도달하기 위해서 출구의 직경은 $\varnothing 1.66\text{mm}$ 보다 작아야 하며, 본 연구에서는 출구의 직경을 $\varnothing 1.5\text{mm}$ 로 설계하였다. 설계를 바탕으로 Table 2의 조건으로 ANSYS Fluent 6.0을 이용하여 노즐의 유동해석을 수행하였다.

Fig. 3은 노즐 내부의 테이퍼 각도에 따른 유동해석 결과를 나타내고 있다(Fig. 2의 ④영역). 해석결과 각도가 완만할수록 유동장이 완만하게 변화하고 노즐 내부의 유체 흐름은 안정된 속도분포를 가지는 것을 알 수 있다. 그러나 완만한 테이퍼 각도를 가질수록 노즐 내부 형상에 대한 가공성이 저하된다는 단점이 있어 본 연구에서는 대칭 형태의 안정적인 유동을 형성하면서 제작이 용이한 60°의 표준형 테이퍼 각도를 부여하여 노즐을 제작하였다.

직진노즐 내부에서 압력변화가 선형적으로 일어나고, 속도분포가 일정한 완전발달 유동(fully developed flow)을 형성시키기 위해서는 직진영역의 길이가 완전발달 유동의 입구영역보다 길어야 한다. 입구영역의 길이는 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$\frac{L_e}{d} \approx 4.4Re_d^{1/6} \quad (3)$$

유동해석으로부터 얻어진 속도에서의 Reynolds number=23,270이고 이 때 입구영역 길이 $L_e=35.26\text{mm}$ 이다. 또한 노즐은 전자석의 코어 역할을 하여 전자석 내부의 자기장 형성에 영향을 미치기 때문에 이를 고려하여 충분한 길이로 설계해야 한다. 그러나 노즐의 길이가 길어질수록 벽면과의 마찰에 의한 수두손실과 연마재에 의한 마멸이 증가하며, 높은 진원도 및 진직도를 가지는 노즐의 제작이 어려운 문제점이 발생한다. 따라서 본 연구에서는 안전을 및 자기장 형성을 고려하여 노즐의 길이를 입구 영역 길이의 2배 이상인 80mm의 길이로 설계하였다. Fig. 4는 직진영역의 길이에 따른 노즐내부의 유동해석 결과이며, 직진영역의 길이가 증가할수록 유동장이 길게 형성되어 안정적인 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다.

2.2 전자석 모듈 설계 및 해석

MR fluid jet polishing 시스템에서 전자석 모듈은 형성되는 자기장의 분포 및 세기에 따라 분사되는 MR fluid의 점도를 변화시켜 가공물의 연마형상에 영향을 줄 뿐만 아니라, 재료제거율 및 가공면 거칠기에도 직접적인 영향을 미친다. 본 연구에서는 노즐을 통과하는 MR fluid가 완전히 자장의 영향을 받고 토출부에 자기장이 집중적으로 형성하도록 하여 분사되는 MR

Table 1 Compositions of the MR fluid

	Cabonyl-iron	Nano ceria slurry	DI-water	Stabilizer	
				Glycerol	Na ₂ CO ₃
Composition ratio(wt%)	65	13	20	1	1
Density(g/cm ³)	7.2	7.65	0.998	1.261	1.51

Table 2 Simulation parameters

Parameter		Value
Fixed condition	Density	5029 [kg/m ³]
	Viscosity	0.00778 [Pa·s]
	Inlet diameter	$\varnothing 3.5$ [mm]
	Outlet diameter	$\varnothing 1.5$ [mm]
	Inlet pressure	10 [bar]
	Outlet pressure	Atmospheric pressure
Variatied condition	Taper	90 [deg]
		60 [deg]
		30 [deg]
	Length	10 [mm]
		40 [mm]
		80 [mm]

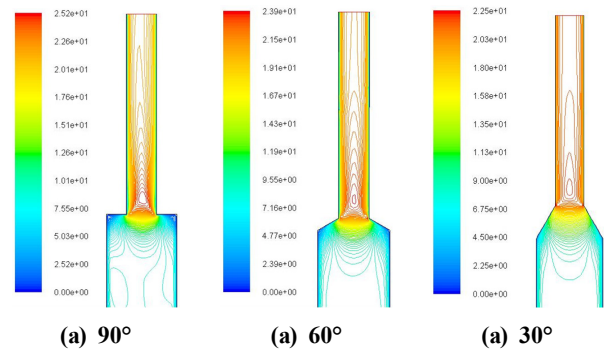


Fig. 3 Results of flow analysis according to inlet angle changes

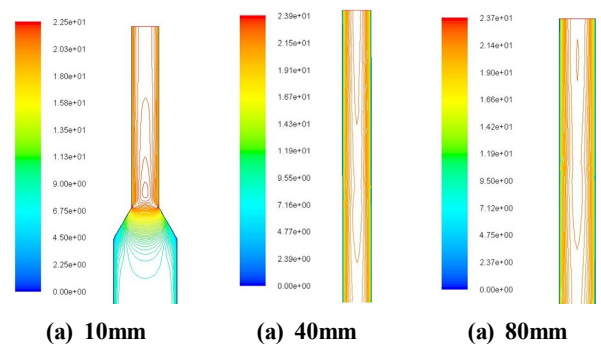


Fig. 4 Results of flow analysis according to nozzle length changes

fluid가 가공물에 도달할 때까지 일정한 유동형상을 유지할 수 있도록 설계하였다.

일반적으로 전자석의 설계 변수는 코일의 권선수, 인가되는 전류의 세기, 코일의 굵기 및 코어의 크기 등이며, 본 연구에서 요구되는 전자석의 제작을 위해 고려하여야 할 설계목표는 다음과 같다.

- (1) MR fluid가 노즐을 통과하는 동안 내부에서 자기장으로 부터 보호받으며 노즐 토출부에 자기장이 집중되어 유체를 분사하기 위한 전자석 설계(Fig. 2의 ⑦영역)
- (2) 노즐에서 분사되는 MR fluid가 가공물에 도달할 때 까지 직진성 및 원형성을 유지하기 위한 설계
- (3) 복잡한 형상의 가공물 및 면적의 연마를 위해 정밀 이송 스테이지에 장착하기 위한 크기를 고려한 전자석 설계

Fig. 5는 위의 사항을 고려하여 설계된 전자석의 결과이다. 전자석의 코어는 앞에서 설계된 노즐이며, 재질은 투자율이 높은 탄소강인 SM45C로 총길이 100mm이고 외경 $\varnothing 20\text{mm}$ 로 설계하였다. 전자석의 높이는 120mm이며 내경은 $\varnothing 21\text{mm}$ 로 설계하여 전자석 내에 노즐의 삽입이 용이하도록 하였다.

설계된 전자석을 이용하여 노즐에 형성되는 자기장에 대한 분석을 수행하였다. 자기장 해석을 위해 Ansys workbench V13을 이용하였고 코일의 권선수는 전자석 두께, 길이를 고려하여 1800회로 설계하였으며, 전자석의 코일 부분에 1.5A의 전류를 인가하였다. 이 때, MR fluid jet polishing 시스템에서 자기장 내의 노즐 토출부의 형상에 따라 자기장의 집중도가 달라지며, Fig. 6에 노즐 토출부의 각도가 0° 와 60° 인 경우에 대한 해석결과를 나타내었다⁽⁶⁾. 그림에서 보는 바와 같이 0° 인 경우 토출부 주변에 자기장이 집중되지 않고 분산되어 형성되었으며, 60° 각도를 가지는 경우 토출부에 자기장이 집중됨을 알 수 있다. 이는 60° 각도를 가지는 경우가 MR fluid가 분사될 때 토출부에 자기장이 집중되어 분사유체의 직진성 및 원형성을 유지하도록 하여 가공효율 및 정밀도를 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

다음으로 전자석 내에서 노즐의 적절한 위치를 결정하기 위하여 노즐의 위치에 따른 자기장 세기 변화에 대한 해석을 수행

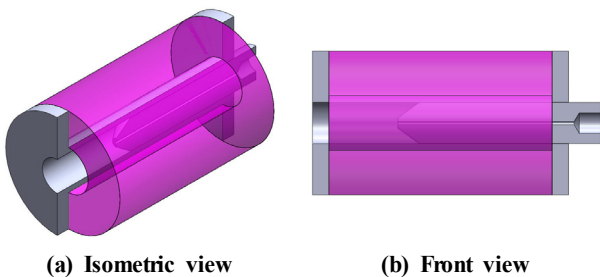


Fig. 5 3D design of an electromagnet head system

하였다. Fig. 7에 나타난 해석 결과로 노즐 토출부가 전자석의 1/3지점에 위치할 때 자기장의 세기가 가장 크게 형성되어 이 위치에서 MR fluid가 가장 안정적으로 형상을 유지하며 분사가 이루어 질 수 있음을 알 수 있다.

3. 기초 연마 실험

3.1 MR fluid jet polishing 실험

제작된 시스템의 고압 노즐 및 전자석 모듈의 성능을 확인하기 위해 자기장의 인가 여부에 따른 MR fluid의 유동 흐름 분석을 위한 기초 실험을 수행하였다. Fig. 8은 제작된 시스템의 사진이며, Fig. 9는 제작된 시스템의 고압 노즐에서 MR fluid

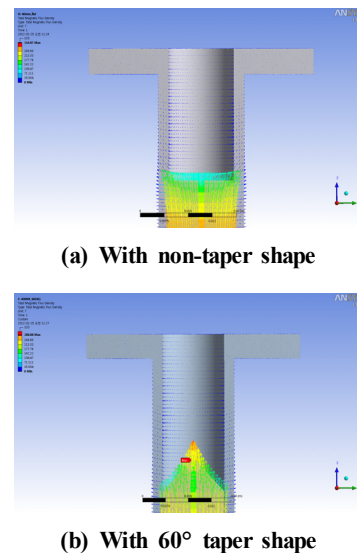


Fig. 6 Magnetic field intensity analysis according to nozzle shapes

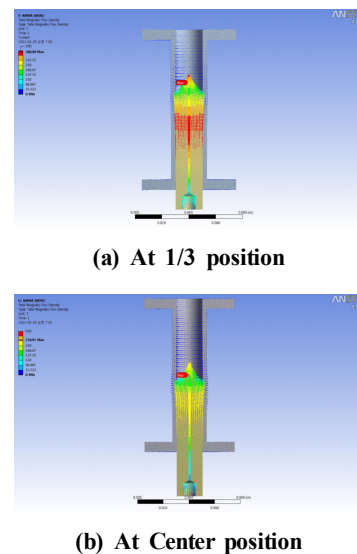


Fig. 7 Magnetic field analysis according to nozzle position changes

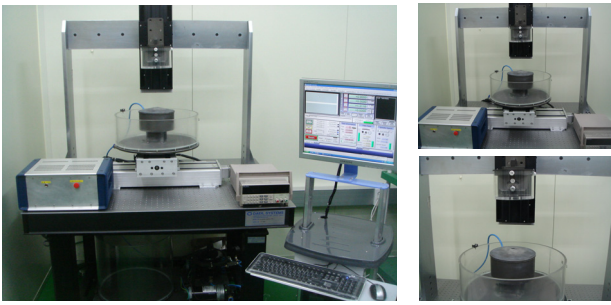


Fig. 8 Photography of developed MR jet polishing system



(a) Without magnetic field (b) With magnetic field

Fig. 9 Photography of MR fluid jet exited form a nozzle

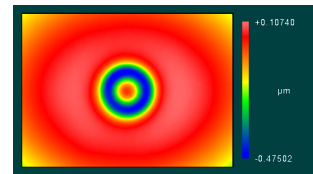
를 분사할 때 자기장의 인가유무에 따른 유동 흐름 사진이다. Fig. 9(a)와 같이 자기장을 인가하지 않았을 경우, 전자석 내부의 노즐로부터 MR fluid가 분사될 때 난류 유동이 형성되고 노즐로부터 거리가 증가할수록 직경이 넓어지는 반면 Fig. 9(b)와 같이 자기장을 인가한 경우에는 MR fluid가 퍼짐 없이 분사되고 있음을 알 수 있다.

다음으로 분사된 MR fluid에 의해 공작물에 형성되는 spot 형상의 분석을 위한 기초 연마실험을 수행하였다. 가공시편으로 fused silica glass plate를 사용하였으며, 노즐과 시편 사이의 거리인 standoff distance는 30mm와 70mm로 설정하였다. MR fluid의 분사각도는 시편 표면에 수직으로 설정하였고, 자기장의 세기는 1500G로 인가하여 5분 동안 연마실험을 수행하였다. 연마된 시편은 비접촉 3차원 표면형상 측정기(Zygo, NV-6200)로 형상을 측정하였다.

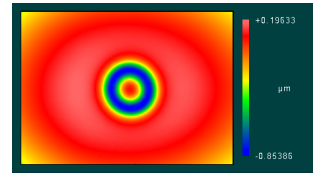
3.2 실험 결과 및 분석

Fig. 10은 standoff distance가 30mm와 70mm일 때의 가공된 형상을 측정한 결과를 나타내고 있다. Fig. 10(a)와 (b)에서 보는 바와 같이 모두 동심원 형상의 연마 spot이 생성되었으며, spot의 중심을 기준으로 모든 방향으로 연마된 높이가 일정하여 방향에 무관하게 연마가 고르게 진행되었음을 알 수 있다.

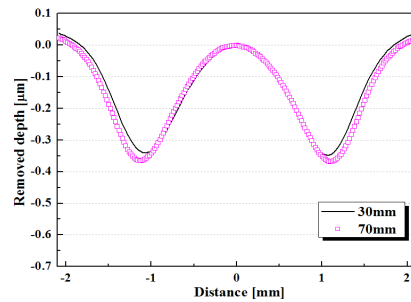
Fig. 10(c)는 연마된 spot의 단면형상을 측정한 결과이며, 전체적으로 W자 형태의 형상이 생성된 것을 알 수 있다. 이는 중심부에서 일정 거리 떨어진 지점(본 연구에서는 약 1.2mm)이 MR fluid의 유속변화가 최대가 되는 지점으로, MR fluid가 시편의 표면에 충돌한 후 유체의 방사방향 유동에 의해 가공표



(a) Standoff=30mm



(b) Standoff=70mm



(c) Polishing spot profiles

Fig. 10 Comparison of polishing spots according to standoff distance

면에 전단응력이 작용하고 이로 인하여 이 지점에서 연마량이 최대가 되기 때문이다⁽⁶⁾. 또한 standoff distance가 30mm와 70mm인 경우 연마 spot의 형상과 크기가 거의 동일한 것을 알 수 있으며, 이는 자기장에 의해 분사되는 유체가 퍼짐 없이 매우 양호하게 시편에 도달하고 있다는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 초정밀 경면연마를 위하여 MR fluid jet polishing 시스템을 개발하여 기초실험을 통해 타당성을 검증하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) MR fluid와 연마재의 분사를 위해 직진노즐(straight bore nozzle)이 설계되었으며, 주어진 조건을 만족하기 위해 유동해석을 수행하여 노즐의 내외경, 직진부의 길이 등이 설계되었다.
- (2) 요구되는 자기장의 형성을 위해 전자석 모듈의 설계가 수행되었으며, 해석을 통하여 노즐 토출부에 자기장을 가장 집중시킬 수 있는 노즐의 위치와 형상을 계산하였다. 그 결과 토출부의 각도는 60°, 위치는 1/3 지점에서 가장 강하게 자기장이 집중되는 것을 확인하였다.

- (3) 제작된 시스템으로 기초연마 실험을 수행하여 타당성을 검토하였다. 자기장의 유무에 따라 분사되는 유체가 확산 및 집중되는 것을 확인하였고, 비접촉 3차원 형상측정기로 측정한 결과 대칭형으로 W 형태의 spot이 형성되는 것을 확인하였다.
- (4) Standoff distance를 변화시키며 수행한 실험에서 거의 동일한 크기와 형상을 가지는 spot이 형성되는 것을 확인하여 MR fluid jet polishing 시스템이 적절하게 구축되었음을 확인하였다.

후 기

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

References

- (1) Fowler, G., Shipway, P. H., and Pashby, I. R., 2005, "Abrasive Water-jet Controlled Depth Milling of Ti6Al4V alloy- An Investigation of the Role of Jet-workpiece Traverse Speed and Abrasive Grit Size on the Characteristics of the Milled Material," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 161, No. 3, pp. 407~414.
- (2) Fahnle, O. W., Brug, H. V., and Frankena, H. J., 1998, "Fluid Jet Polishing of Optical Surfaces," *Applied Optics*, Vol. 37, No. 28, pp. 6771~6773.
- (3) Kordonski, W. I., Shorey, A. B., and Tricard, M., 2006, "Magnetorheological Jet (MR Jet) Finishing Technology," *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, Vol. 128, No. 1, pp. 20~26.
- (4) Tricard, M., Kordonski, W. I., and Shorey, A. B., 2006, "Magnetorheological Jet Finishing of Conformal, Freeform and Steep Concave Optics," *Annals of the CIRP*, Vol. 55, No. 1, pp. 309~312.
- (5) Kordonski, W., 2003, *Apparatus and method for abrasive jet finishing of deeply concave surfaces using magnetorheological fluid*, US Patent No. 6561874.
- (6) Kordonski, W., and Gorodkin, S., 2011, "Material Removal in Magnetorheological Finishing of Optics," *Applied Optics*, Vol. 50, No. 14, pp. 1984~1994.