정보저장시스템학회논문집, 제 3 권 제 2 호, pp. 66~72

자기유변유체를 이용한 하드디스크 슬라이더의 표면연마를 위한 기초연구

A preliminary study on the surface finishing of a hard disk slider using magnetorheological (MR) fluid

정봉수*, 장경인**, 민병권***, 이상조***, 석종원 †

B. S. Jung, K. –I. Jang, B. –K. Min, S. J. Lee and J. Seok

Abstract

Surface finishing using magnetorheological (MR) fluid is useful to finish small but not too small workpieces such as those in a few millimeter scale. However, due to the high surface hardness, this finishing process does not seem to be suit for applying to a hard disk slider. In this work, a preliminary study is performed on the finishing of the hard disk slider surface with a mixture of an MR fluid and diamond powder. During a wheel type MR finishing process, centrifugal force is found to be a major factor to cause a reduction in material remove rate (MRR), which is supported by a theoretical model. To facilitate this founding, the rotational speed of tool is confined to 500rpm while a rectilinear alternating motion with the mean speed, which is equivalent to the rotational speed, is additionally applied to the workpieces. As a consequence, MRR of about 2 times of the sole rotational case is obtained. This paper shows that MR finishing process can be used to polish a hard material in millimeter scale efficiently by controlling the speeds of the tool and the workpiece.

Key Words : MR finishing, Hard disk slider , Centrifugal force, Magnetic force, Material Removal Rate, Surface Roughness

1. 서 론

최근에 전자산업의 비약적인 발전에 따라 소형화, 정밀화가 요구되는 기계부품의 수요는 급격히 증가하고 있으며 이러한 기계부품의 가공은 극한의 가공 정밀도까지 요구하고 있다. 특히 1990 년대에 들어서면서 정보 저장장치 등의 기기에 대한 폭발적인 수요가 요구됨에 따라 이러한 정밀표면 가공기술은 크게 주목을 받기 시작하였다. 대표적인 정밀표면 가공기술에는 반도체 및 MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 공정기술, 특별히 렌즈의 몰드 등을 제작하기 위한 Diamond turning[1] 및 마이크로 방전[2]기술 등이 있다. 그러나 반도체 또는 MEMS 공정으로 구조물을 제작하는 경우 주로 식각(Etching)이나 증착(Deposition), 또는 스퍼터링(sputtering) 등에 의해 표면을 가공하기 때문에 매우 우수한 표면조도를 얻을 수 있는 장점이 있지만 재료가 한정되어 있고 밀리미터 사이즈의 구조물은 가공이 힘들며 가공 공정이 복잡해 설계변경이 쉽지 않고 복잡한 형상을 제작하기 어렵기 때문에 다양한 제품을 제작하지 못하는 한계가 있으며 고가의 설비를 갖추어야 하는 단점이 있다[3]. 한편, Diamond turning 의 경우에도 장비가 매우 고가이며 툴의 상태에 따라 가공물의 표면이 결정되기 때문에 이의 마모에 항상 주의해야 하는 단점이 있으며, 마이크로 방전의 경우 현재 가공 가능한 표면 거칠기는 Ra 0.1 um 내외로써 만약 수 밀리미터 사이즈의 구조물을 생산할 몰드를 제작할 경우 사출(Ejection)에 있어 문제가 발생할 수 있다.

따라서 기존의 전통적인 가공 방법이나 방전가

† 중앙대학교 기계공학부
E-mail : seokj@cau.ac.kr
TEL : (02)820-5729
* 중앙대학교 기계공학부 대학원
** 연세대학교 기계공학부 대학원
*** 연세대학교 기계공학부
논문접수일 (2007 년 5 월 2 일)

공을 통해 제작한 구조물이 최근에 요구되는 정도의 집적도와 정밀도를 갖추기 위해서는 높은 표면 품위를 가질 수 있도록 표면을 연마하는 새로운 프로세스의 정립이 시급한 실정이다. 현재 이러한 정밀 미세 구조물의 표면에 대한 피니싱 방법들로 ECM(Electrochemical machining), ELID(Electrolytic in-process dressing), Sandblasting, AFM(Abrasive flow machining), 그리고 Magnetic field assisted finishing 등이 제안되고 있다. 하지만 ECM 은 부도체의 가공이 어렵고 환경오염 등의 단점이 있으며[4,5], ELID 는 3 차원 형상의 구조물에 대해 적용이 어려우며[6] 숫돌 내의 지립이 높은 가공 에너지를 필요로 하므로 쉽게 마모 되어 재현성을 확보하기 힘들고, 높은 가공 에너지 에 기인한 시편에 미소 크랙(crack)이나 잔류응력을 남기게 되는 단점이 있으며, Sandblasting 은 유리와 같은 취성재료만 가공이 가능하다는 단점이 있다. 한편, AFM 의 경우는 장비가 고가이며 가공 미디어를 재사용할 수 없어 유지비용도 많이 들고 가공상의 제약이 많은 단점이 있다.

이러한 기존의 표면연마 공정의 한계를 극복할 수 있는 방안으로 자기유변유체(Magnetorheological Fluid, MR)를 이용한 표면연마 방법이 있으며 이는 하드디스크의 슬라이더와 같은 초소형의 높은 표면경도를 가지는 부품에도 적용될 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 본 논문에서는 MR 유체를 이용하여 하드디스크 슬라이더 표면연마의 가능성을 제시하기 위한 기초적인 연구를 수행하였다.

2. MR 유체를 이용한 하드디스크 슬라이더의 표면연마

2.1 MR 유체의 특성 및 응용

MR 유체는 2~10 μm 크기의 Carbonyl Iron(CI)를 약 85 wt.% 함유하고 있으며 나머지는 물과 계면활성제로 구성되어 있다[7]. MR 유체는 자기장을 인가했을 때, 유체 속의 CI 입자들은 자속의 방향에 따라 기둥 형태의 사슬 구조를 형성하게 된다[8,9]. MR 유체의 사슬 구조의 개략도와 실제 사진을 각각 Fig. 1 과 Fig. 2 에 나타내었다.

이때 MR 유체는 인가되는 자기장의 세기에 따라 일정한 항복응력을 가지게 되며 이 항복응력을 기준으로 유체내의 전단면이 형성되게 된다. 즉, 전단면을 기준으로 고체적인 특성을 가지는 부분(Core)과 유체적인 특성을 가지는 부분으로 나뉘게 된다. 이러한 특성을 이용하여 가공물의

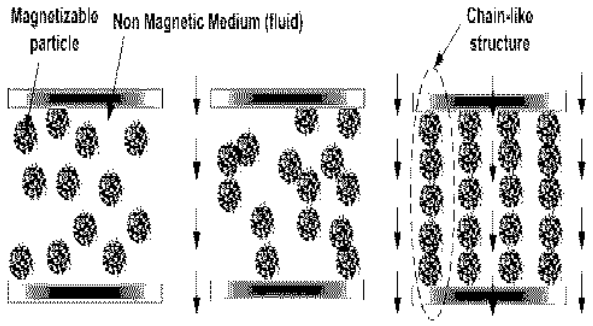


Fig. 1 Formation mechanism of chain structure of CI particles

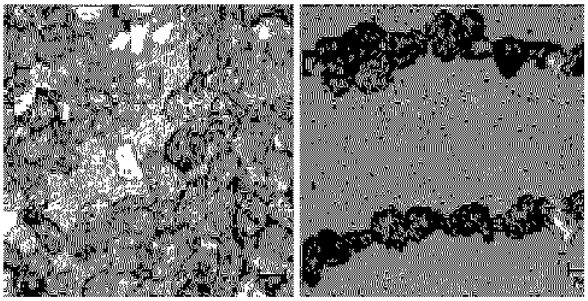


Fig. 2 Photographs of CI particles with and without the application of a magnetic field

표면을 연마하는 경우 전단면이 형성되는 위치와 MR 유체층의 두께 등 특성에 따라 가공물 표면에 가해지는 마찰력을 변화시킬 수 있다는 특징이 있다.

이러한 MR 유체의 성질을 이용하여 표면연마를 하는 Magnetic field assisted finishing 은 1990 년대 중반부터 파이프 내면이나 볼, 롤러, 튜브 등을 폴리싱하는 용도로 사용되기 시작하였는데[10], 이는 대상물의 표면 거칠기뿐 만 아니라 밀리(mili) 또는 마이크로(micro) 스케일의 3 차원 미세구조물의 형상 정밀도를 유지하면서 선택성(Selectivity)이 높은 표면연마를 할 수 있는 방법이다[11]. 또한 MR 유체의 표면연마 공정은 연삭(Grinding)과 같은 기존의 연마공정이 고체 표면끼리 직접 접촉하여 연마하는 방식과는 달리 앞서 기술한 대로 조절이 가능한(Controllable)점도를 가진 유체를 사용하여 연마하는 방식이기 때문에 시편에 가해지는 손상이 매우 적다는 장점이 있다. 최근에는 이러한 장점들 외에 높은 수직력과 전단력 등을 이용하여 비구면 렌즈의 표면가공에 사용되고 있으며[12] 그 개념도는 Fig. 3 과 같다.

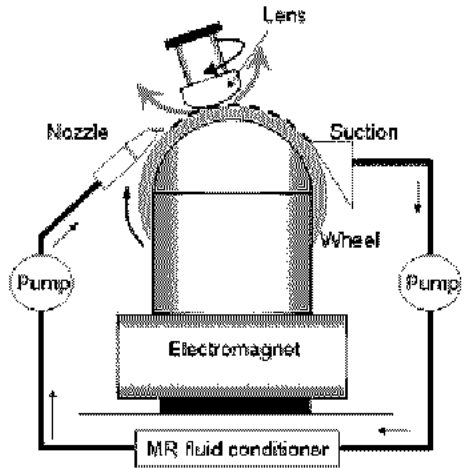


Fig. 3 Surface finishing equipment for aspherical lens using MR fluid

2.2 하드디스크 슬라이더 표면연마 기초실험

최근에 비약적으로 발전한 정보저장기기 분야의 가장 대표적인 핵심부품은 하드디스크 드라이버 (Hard Disk Driver, HDD)이다. 이러한 HDD 는 기계적인 부분 (VCM:Voice Coil Motor)과 내부에 포함되어 있는 5 가지 (바닥 고정물,스핀들 모터, 플레터, HGA(Head Gimbal Assembly, 헤드 서스펜션 및 슬라이더, 마그네틱 헤드로 구성) 부품으로 구성이 된다. 이 중 마그네틱 헤드는 디스크에서 읽고 쓰기 위한 적절한 트랙을 찾을 수 있도록 슬라이더의 끝 부분에 장착되어 있어서 데이터를 저장해서 미디어로 읽어 내거나 쓰게 된다. 데이터를 디스크에 쓸 때는, 전류를 헤드의 와인딩(winding)에 보내면 헤드가 자화되어 누설자속을 헤드갭을 통해 내보냄으로서 기록 미디어를 자화 시키게 되는 구조로 작동이 되며 읽을 때는 반대로 헤드가 저장 매체로부터 자화 자속을 인식하여 읽어들이게 된다.

HDD 의 읽기/쓰기 헤드(Head)는 하드디스크의 미디어(Media)에 데이터를 읽고 쓰는 기능을 담당하는 하드디스크의 중요하고 복잡한 부품으로, 디스크 표면과 일정한 간격을 두고 아주 빠르게 회전하는 플레터 위아래에서 회전하는 장치이다. 이러한 읽기/쓰기 헤드는 회전함에 따라서 디스크 표면 위를 약 0.1-0.5 ㎛ 떠서 돌게 된다.

또한, 플레터를 구동하는 모터는 전원이 인가됨과 동시에 데이터의 읽기나 쓰기에 관계없이 항상 회전한다. 플레터가 회전하게 되면 디스크 주위의 공기가 회전하게 된다. 이렇게 발생된 공기의 유동이 헤드 슬라이더와 디스크 사이에 에어쿠션 (Air cushion)을 만들어서 헤드를 디스크 표면으로부터 일정 거리만큼 부상시키게 된다. 이것은 HDD 의 운전 중 헤드가 디스크 표면에 직접적으로 기계적인 접촉을 하는 것을 방지하게 된다.

한편, HDD 가 정지 중에는 슬라이더가 디스크에 직접 기계적인 접촉을 하며 올려지게 되는데 플레터의 회전 시 정속에 이르기 전에는 HGA 가 충분한 양력을 얻지 못하므로 기계적인 접촉이 필연적으로 수반된다. 이 때 디스크 표면에 물리적인 손상이 가해질 수 있으며 이는 데이터 손실 및 하드디스크의 성능을 저하시키는 원인이 된다. 따라서 이러한 문제를 최소화하기 위해 하드디스크 슬라이더 표면의 연마공정이 반드시 필요하다. 그러나 현재 하드디스크 슬라이더와 같은 초소형의 높은 표면경도를 가지는 기계부품은 기술적인 난제에 기인하여 랩핑(Lapping) 등을 이용한 수가공에 의존하는 등 기술적으로 낙후되어 있는 상황이다. 이러한 한계를 극복하기 위해 MR 유체를 이용한 표면연마에 대한 연구가 필요하며 그 가능성을 증명하기 위해 Fig. 4 와 같은 연마장치를 이용하여 기초적인 실험을 수행하였다. 표면연마 효율을 극대화하기 위해 MR 유체에 연마제(다이아몬드 파우더)를 혼합하여 연마하였다. 하드디스크 슬라이더 시편의 촬영은 광학현미경을 이용하였으며 연마 후의 시편의 profile 은 비접촉 3 차원 형상 측정기를 이용하여 측정하였다. 광학현미경으로 촬영한 하드디스크 슬라이더의 사진은 Fig.5 와 같다.

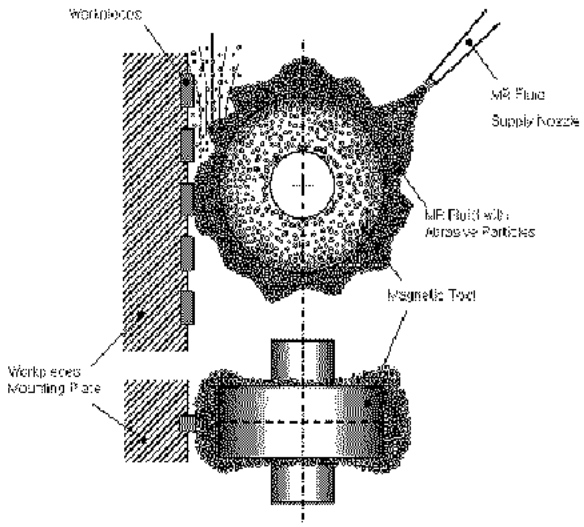


Fig. 4 Schematic figure of a wheel type MR finishing equipment

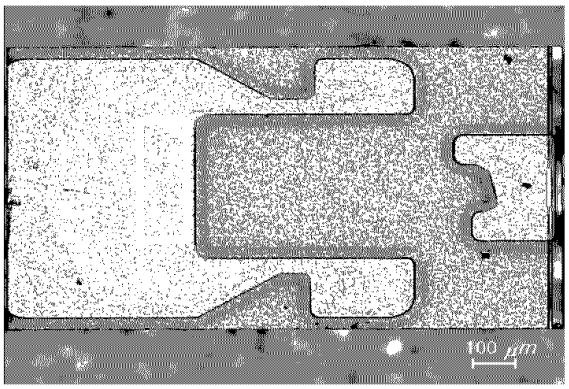
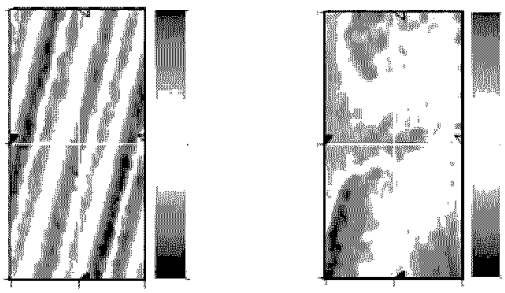


Fig. 5 A photograph of a hard disk slider

상기의 사진에 표기된 사각형은 연마 후의 시편의 profile 을 측정한 위치를 나타낸 그림이다. 또한 연마 전후의 시편 표면과 profile 을 측정한 데이터를 각각 Fig. 6 와 Fig. 7, Table. 1 에 나타내었다.



(a) Before (b) After

Fig. 6 Topological variation of hard disk slider surface

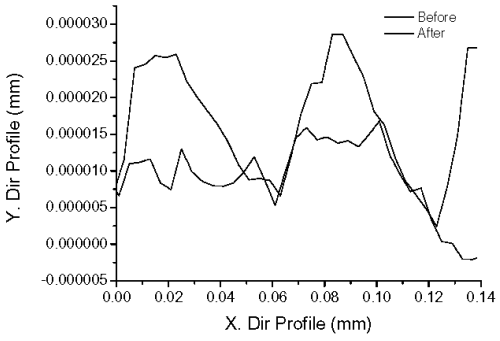


Fig. 7 Surface profile of original surface and finished surface

Table. 1 Variation of surface roughness

	Before	After
Ra (nm)	7.01	3.88
Rz (nm)	17.26	10.20

Table. 1 에서 나타난 것처럼 MR 연마로 슬라이더 표면에 존재하던 Tool path 를 없애면서 표면조도를 낮출 수 있었지만 연마공정에 소요된 시간은 약 5 시간으로 기존의 MR 연마공정은 고경도 재질의 표면을 연마하기 위한 공정으로서 경제적인 측면으로는 적합하지 않다.

3. MR 연마공정의 성능평가

3.1 회전속도와 간극거리에 따른 연마 성능

고경도 재질의 표면연마를 하기 위해서는 높은 MRR(Material Removal Rate)이 필수적이므로 현 MR 연마공정의 연마성능과 그 한계를 검토할 필요가 있다. 따라서 Wheel type 연마공정의 중요한 변수인 Tool 의 회전속도와 Tool 과 시편과의 간극거리에 따라 연마 후 시편의 MRR 과 Surface Roughness 를 측정하였다. 이때 피니싱 시간을 단축하여 공정의 불확실성을 최소화 하기 위해 시편은 표면경도가 낮은 실리콘 웨이퍼를 일정 크기로 절단하여 시험하였다. 그 결과 Fig. 8 에서 나타난 것과 같이 전체적으로 Tool 과 시편 사이의 거리가 가까울수록 MRR 및 Surface Roughness 가 증가하였고, Fig. 9 에서는 회전속도 500rpm 이하에서는 MRR 및 Surface Roughness 가 증가하다가 500rpm 이상에서는 다시 감소하는 경향을 나타내었다.

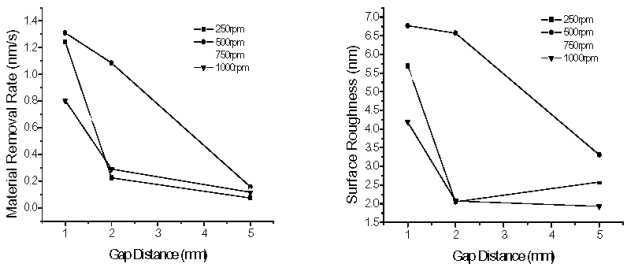


Fig. 8 Effects of gap distance on MRR and Surface Roughness

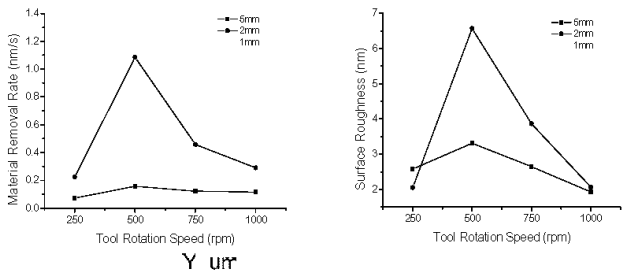


Fig. 9 Effects of rotational speed on MRR and Surface Roughness

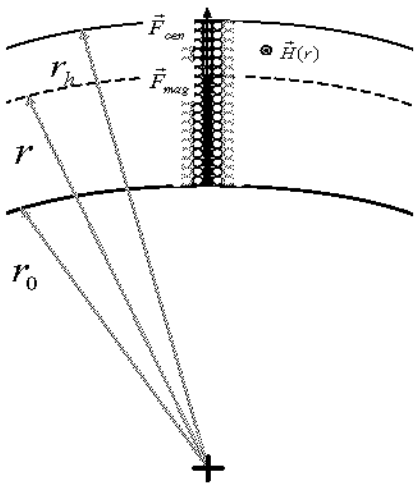


Fig. 10 Magnetic and centrifugal forces in MR particles

이러한 결과에 비추어볼 때, Tool 과 시편 사이의 거리가 가까울수록 자기력의 세기가 커져 연마효율이 증가하며 고속 회전 시 MR 입자에 작용하는 원심력에 의해 오히려 연마효율이 감소하게 되는 것으로 판단된다.

3.2 MR 연마공정에서의 원심력과 자기력간의 관계

Wheel type 의 MR 연마공정에서는 Tool 이 회전하면서 발생하는 원심력과 외부 자기장에 의해 자화된 MR 입자들 사이에서 자기력[13]이 발생된다. 이러한 두가지 힘의 상대적인 크기 차이는 Tool 의 성질을 결정하는 중요한 요소이다.

원심력에 의해 이탈하는 MR 입자는 응집된 형태로 균일하게 떨어져나간다는 가정하에 Fig. 10 와 같은 Axisymmetric model 을 세울 수 있으며, 이 때의 원심력(F_{CEN})과 자기력(F_{MAG})의 세기는 다음의 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{CEN} = \left(\frac{r_h - r}{2r_p}\right)\rho_p \frac{4\pi r_p^3}{3}\left(\frac{r_h + r}{2}\right)w^2 \qquad (1)$$

$$F_{MAG} = -\nabla E_{12} = -\frac{3|m(H)|^2}{4\pi\mu_0\mu_1(2r_p)^4} \qquad (2)$$

여기서, $r_p, \rho_p, \mu_0, \mu_1, m(H), E_{12}$ 는 각각 MR 입자의 반지름, MR 입자의 밀도, 진공의 유전율, 상대유전율, 입자의 자화율 그리고 두 입자 사이의 쌍극자 상호에너지를 의미한다. 이때, 자기장은 오직 반경방향에 대한 의존성이 있다고 가정하였으며 연마입자 외의 유체들의 영향은 무시하였다. MR 유체 내의 자기장의 세기를 구하기 위해 Fig. 11 에 나타낸 것처럼 거리에 따른 자기장의 세기를 FEM 을 이용하여 구하였으며 이를 토대로 임의의 거리 r에 따른 응집된 MR 입자가 받는 힘의 합 ($F_{TOTAL} = F_{CEN} + F_{MAG}$)의 변화를 Fig. 13 에 나타내었다. Fig. 13 에서 500rpm 이하의 F_{TOTAL} 은 전구간에서 음의 값을 갖는 안정한 상태 즉, 응집된 MR 입자들의 탈루 없이 일정한 두께를 유지하는 상태인 것을 알 수 있다. 이와는 대조적으로 500rpm 이상부터는 일부 구간이 양의 값을 가지는 것을 알 수 있으며, 이는 응집된 MR 입자들이 자기력보다 큰 원심력에 의해 고속으로 회전하는 Tool 외부로 떨어져나갈 수 있다는 것을 의미한다. 결론적으로 Fig. 9 의 500rpm 이상에서 MRR 이 감소하는 경향은 고속 회전 시 원심력에 의해 MR 입자들간의 결속력이 약해진 결과라고 판단된다.

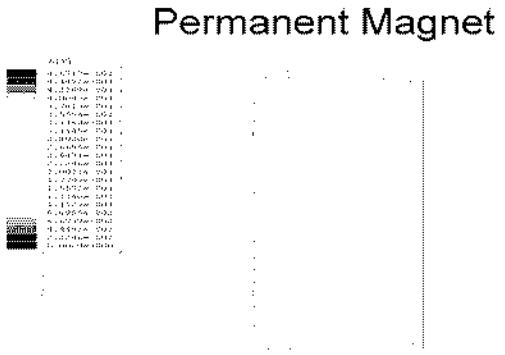


Fig. 11 Magnetic field in MR finishing tool system

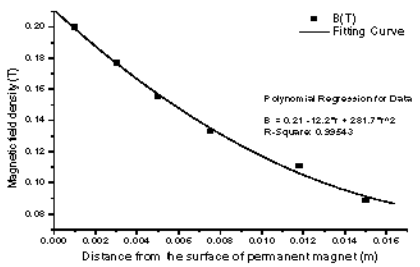


Fig. 12 Relation between the distance from the surface of the magnet and the maganetic density

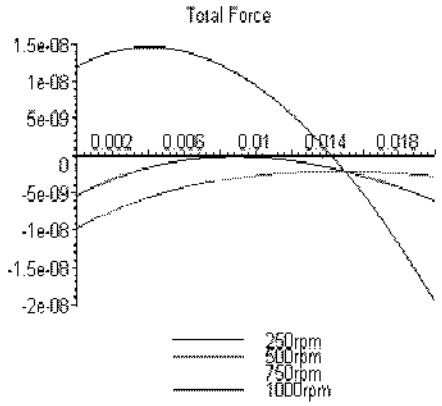


Fig. 13 Total force variations with respect to r

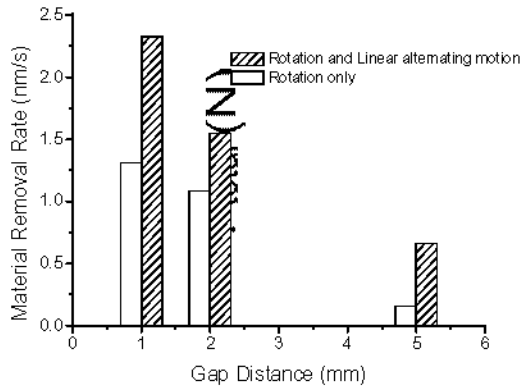


Fig. 14 Experimental results showing the effect of additional rectilinear alternating motion

4. MRR 향상을 위한 장치 개선 및 실험 결과

Fig. 9 에서 보인 것과 같이 MRR 의 최대치는 약 500rpm 에서 나타나며 이를 극복하기 위하여 원심력을 고정시킨 상태에서 tool 과 시편의 상대 속도를 증가시키는 선형왕복운동을 MR 연마공정에 추가로 부여하였다. 이는 500rpm 의 상대적인 회전속도에 등가한 선속도를 가지는 선형왕복운동이며 이때 실험 결과를 Fig. 14 에 나타내었다. Fig. 14 의 그래프를 통하여 MRR 의 증가는 선속도의 증가와 밀접한 관계가 있다는 것을 알 수 있다 [14].

5. 결 론

최근 극한의 가공 정밀도를 요하는 기계부품에 대한 수요가 증가함에 따라 기존의 연마공정의 단점을 보완할 수 있는 자기유변유체를 이용한 표면 연마 공정이 새롭게 주목받고 있다. 특히 하드디스크 슬라이더와 같은 초소형의 높은 표면 경도를 가지는 부품에도 적용될 수 있다. 또한 하드디스크 플레터가 회전 시 정속에 이르기 전에는 슬라이더가 디스크 표면에 손상을 입힐 수 있으므로 슬라이더 표면의 연마가 반드시 필요하다.

Wheel type 의 MR 연마공정 내부에서 발생하는 원심력이 MRR 을 감소시키는 가장 큰 원인임을 실험을 통해서 확인하였고, 이론적 모델로서 이의 타당성을 뒷받침하였다. 또한 MRR 의 한계를 극복하기 위한 방법으로 회전운동과 선형왕복운동을 동시에 부여하였고 그 결과 약 2 배정도의 MRR 을 향상 시킬 수 있었다. 결론적으로 MR 연마공정이 초소형/고경도의 재료를 효율적으로 연마하기 위해서는 Tool 의 회전에 의한 원심력의 효과를 최소화 하는 한편 선속도를 요구되는 일률에 비례하여 증가시켜야 함을 알 수 있었다.

r (m)

참고문헌

[1] H. Hocheng and M. L. Hsieh, 2004, "Signal analysis of surface roughness in diamond turning of lens molds," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.44, No.15, pp.107-1618.

[2] J. Fleischer, T. Masuzawa, J. Schmidt and M. Knoll, 2004, "New applications for micro-EDM," Journal of Materials Processing Technology, Vol.149 No.1-3, pp. 46-249.

[3] M. Madou, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1988, "Facilitation choices of Machining Tools and Materials for 'Miniaturization Science'; A review, "Tribology Issues and Opportunities in MEMS; Proceedings of the NSF/AFOSR/ASME Workshop on Tribology Issues and Opportunities in MEMS, pp.37-41.

[4] H. Ramasawmy and L. Blunt, 2002, "3D surface characterisation of electropolished EDMed surface and quantitative assessment of process variables using Taguchi Methodology," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.42, No.10, pp.1129-1133.

[5] D. Landolt, P. -F. Chauvy and O. Zinger, 2003, "Electrochemical micromachining, polishing and surface structuring of metals: fundamental aspects and new developments," Electrochimica Acta, Vol.48, No.20-22, pp.3185-3201.

[6] K. Katahira, H. Ohmori, Y. Uehara, Y. Watanabe, W. Lin et al, 2002, "Study on ELID ground micro-tool

and its applications," Industrial Technology, 2002. IEEE ICIT '02. 2002 IEEE International Conference on, Vol. 2, pp.1138 - 1141.
[7] Lord corporation, MR fluid (MRF 241ES), http://www.lord.com
[8] M.R. Jolly , J.D. Carlson , B.C. Mun, 1996, "A model of the behavior of magnetorheological materials," Smart Materials and Structures, Vol.5, pp.607-614.
[9] J. Rabinow, 1948, "The magnetic fluid clutch," AIEE Trans, Vol.67, pp.1308-1315.
[10] H. Yamaguchi, T. Shinmura , M. Takenaga, 2003, "Development of a new precision internal machining process using an alternating magnetic field," Precision Engineering, Vol.27, No.1, pp.51-58.
[11] S.N. Shafrir, J.C. Lambropoulos and S.D. Jacobs, 2006, "A magnetorheological polishing-based approach for studying precision microground surfaces of tungsten carbides," Precision Engineering, In Press.
[12] Ph.D dissertation, A. B. Shorey, 2000, "Mechanisms of Material removal in magnnetorheological finishing (MRF) of Glass," University of Rochester.
[13] M.R. Jolly , J.D. Carlson , B.C. Mun, 1996, "A model of the behavior of magnetorheological materials," Smart Materials and Structures, Vol.5, pp.607-614.
[14] F.W. Preston, 1927, "The theory and design of plate glass polishing machine," Journal of Society Glass Technology, Vol.11, pp.214-256.