

자기유변유체를 이용한 고경도 재료의 표면연마에 대한 실험적 연구

Experimental study of hard material finishing using magnetorheological fluid

*정봉수¹, 장경인², 민병권², 이상조², #석종원¹

*B. S. Jung¹, K. -I. Jang², B.-K. Min², S. J. Lee², #J. Seok(seokj@cau.ac.kr)¹

¹ 중앙대학교 기계공학부, ² 연세대학교 기계공학부

Key words : MR finishing, Al₂O₃-TiC, Abrasives, Centrifugal force, Magnetic force, Material Removal rate

1. 서론

현대 전자산업의 발전은 기계부품을 소형화시키고 정밀하게 제작하도록 요구하고 있으며 이에 따른 부품 가공의 정밀도 또한 점진적으로 증가하고 있다. 예를 들어 CCTV, PC 카메라 렌즈용 비구면 플라스틱 렌즈 금형은 형상정밀도가 0.3 μm 이하이고 표면 거칠기는 4nm 이하로 가공이 이루어지고 있다. 또한 초정밀 광학렌즈의 경우 직경 50mm에 대해 형상 정밀도는 5nm, 표면 거칠기는 0.2nm 이하의 수준을 요구하고 있다.

특히 1990년부터 정보 저장장치, 디스플레이 장치, 광통신 기기 등에 대한 수요가 폭발적으로 증가함에 따라 정밀표면 가공기술은 더욱 중요한 과제로 떠오르게 되었다. 기존의 정밀표면 가공기술은 반도체 및 MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) 공정기술과 렌즈 몰드 등을 제작하기 위한 Diamond turning 및 마이크로 방전 기술 등이 있다. 이 때 반도체 및 MEMS 공정은 주로 식각 (Etching), 증착 (Deposition), 또는 스퍼터링 (Sputtering)에 의한 방법으로 재료의 표면을 가공하기 때문에 매우 낮은 표면 거칠기를 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 가공이 가능한 재료가 한정되어 있고 밀리미터 스케일의 부품은 가공이 어려운 단점이 있다. 또한 공정이 까다롭고 복잡한 형상의 부품 제작이 어려워 다양한 제품 제조에 한계를 보이며 가공장비가 매우 고가인 단점도 존재한다[1]. 한편 Diamond turning 도 반도체 및 MEMS 공정과 마찬가지로 장비가 고가이며 가공 Tool의 상태에 따라 재료 표면의 상태가 결정되기 때문에 Tool의 마모에 항상 주의해야 한다. 마지막으로 마이크로 방전의 경우 이 기술로서 가공 가능한 표면 거칠기는 0.1 μm 내외로서 만약 밀리미터 스케일의 부품 제조를 위한 몰드를 제작할 경우 사출 (Ejection)에 문제가 발생할 수 있다.

따라서 기존의 정밀표면 가공기술을 이용하여 현재 산업현장에서 요구하는 수준의 부품 정밀도를 갖추기 위해서는 고수준의 표면 재질이 필수적이며 이에 대응할 수 있는 정밀표면 연마공정 또한 반드시 필요하다. 현재까지 제안된 정밀표면 연마공정으로는 ECM (Electrochemical machining), ELID (Electrolytic in-process dressing), Sandblasting, AFM (Abrasive flow machining) 등이 있다. 그러나 ECM 공정은 부도체 재료에 대해 가공이 어렵고 화학물질 사용으로 인한 환경오염의 단점이 있다[2]. 또한 ELID의 경우는 3차원 형상의 제품에 적용하는데 많은 제약이 따르며 공정 중에 높은 가공 에너지가 발생하므로 가공 Tool이 쉽게 마모되어 재현성을 필요로 하는 제품 제작이 힘들뿐더러 가공 대상물에 많은 데미지를 가하게 되기 때문에 미소 크랙 (crack)이나 잔류응력을 남기게 된다[3]. 한편, Sandblasting 공정은 유리나 같은 취성재료만 가공이 가능하며 AFM의 경우는 가공 공정이 복잡하고 장비가 고가이면서 가공 Tool 또한 재사용이 불가능하여 유지비가 많이 소모되는 단점이 있다. 특히 HDD의 헤드 슬라이더와 같이 높은 표면경도를 가지는 재료의 경우 현재 국내에서는 랩핑 (Lapping) 등을 이용한 수가공에 의존하고 있어 기술적으로 매우 낙후되어 있으며 이에 따른 제품의 낮은 수율과 신뢰

성 부족의 문제가 심각한 실정이다.

이러한 기존의 정밀표면 연마공정의 단점을 극복할 수 있는 대안으로 자기유변유체 (Magnetorheological Fluid, MR Fluid)를 이용한 표면 연마공정이 새롭게 제기되고 있으며 이는 앞서 언급한 HDD의 헤드 슬라이더와 같은 고경도의 재료에도 적용할 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 본 논문에서는 자기유변유체를 이용한 표면 연마공정을 HDD 슬라이더에 실질적으로 적용하기 위한 연구를 수행하였다.

2. 자기유변유체의 특성 및 응용

자기유변유체는 2~10 μm의 크기 분포를 가지는 Carbonyl Iron (CI)입자가 약 85 wt.%의 비율로 함유되어 있으며 나머지는 물과 계면활성제로 구성된다. 자기유변유체의 가장 큰 특징은 자기장이 인가되었을 때 자속의 방향에 따라 CI 입자들이 기둥 형태의 사슬구조를 형성한다는 점이다[4]. Fig. 1과 2는 각각 자기유변유체가 사슬구조를 형성하는 메커니즘을 설명하는 개략도와 그 실제 사진을 나타내고 있다.

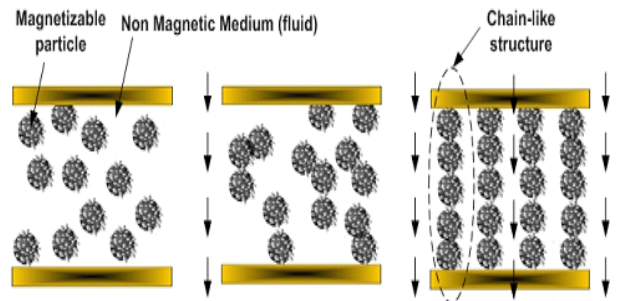


Fig. 1 Formation mechanism of chain structure of CI particles

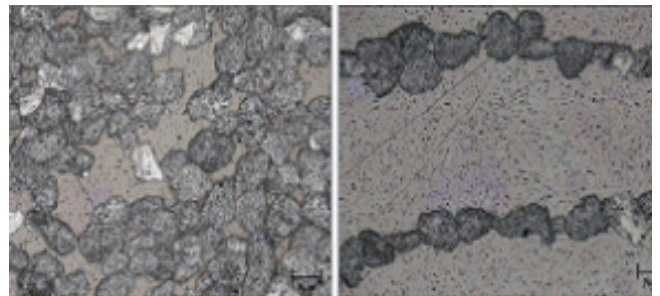


Fig. 2 Photographs of CI particles with and without the application of a magnetic field

자기유변유체에 자기장이 인가되고 그 세기를 계속 증가시키면 일정한 값에서 항복응력을 가진다. 이 때, 이 항복응력 값에서 유체 내에 전단면이 형성되게 되는데 전단면을 기준으로 고체적인 특성 (Core)과 유체적인 특성을 가지는 부분으로 각각 나뉘게 된다. 자기유변유체의 이러한 Non-Newtonian적인 성질을 재료의 표면연마 공정에 적용하

게 된 시기는 1990 년대 중반 이후이다. 초기에는 파이프의 내외경이나 볼, 튜브 등을 연마하는 용도로 사용하였으나 최근에는 자기유변유체의 높은 수직력과 전단력을 활용하여 비구면 렌즈의 표면연마에도 이용되고 있다. 또한 연마 효율을 극대화하기 위해 자기유변유체 이외에 다이아몬드 파우더 등과 같은 연마제 (Abrasives)를 첨가하게 되면 연마 공정 시에 자기부력현상 (Magnetic levitation force)에 의해 연마제가 자기유변유체의 표면으로 부상하게 되어 연속적인 연마가 가능해지게 되는데 이를 고경도 재료의 표면연마에 효율적으로 응용할 수 있다.

3. 자기유변유체를 이용한 Al₂O₃-TiC 의 표면연마

고경도 재료의 효율적인 표면연마를 위해서는 높은 MRR (Material Removal Rate)이 필수적이다. 따라서 Fig. 3 과 같은 Wheel type 연마 장치를 구성하고 이러한 연마 공정의 가장 중요한 변수인 연마 Tool 의 회전속도의 변화에 따른 연마 후 시편의 MRR 을 측정하였다. 실험에 사용된 시편은 HDD 슬라이더의 주재료로 이용되는 Al₂O₃-TiC 이다.

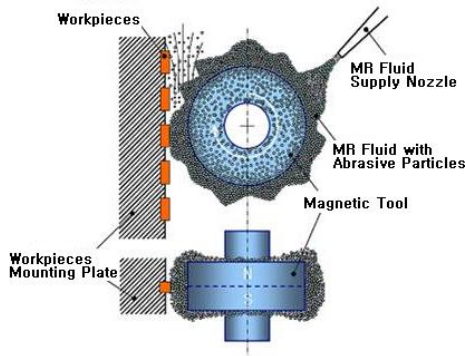


Fig. 3 Schematic of the wheel-type MRF equipment

서론에서 언급한대로 다이아몬드 파우더와 CNT (Carbonnanotube)를 연마제로 이용하여 자기유변유체 만으로 연마했을 경우와의 연마 효율을 비교하였다. 또한 연마제 외의 실험 조건을 Table. 1에 정리하였으며 각 조건에 따라 수행한 실험 결과를 Fig. 4 에 그래프로 나타내었다.

Table. 1 Conditions for MR finishing experiment

Rotational speed	250rpm, 500rpm, 750rpm, 1000rpm
Finishing time	60min
Gap distance	2mm
Abrasives	CNT, Diamond powder
Content	20% (Volume %)

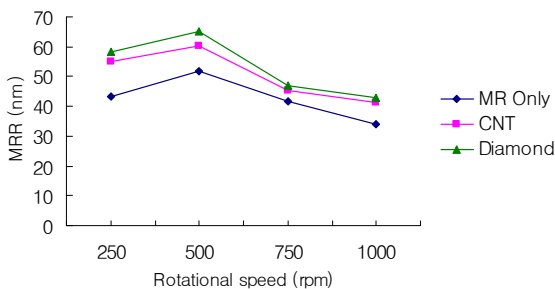


Fig. 4 Effect of rotational speed and abrasives on MRR

실험 결과 회전속도 500rpm 이하에서는 MRR 이 증가하

다가 500rpm 이상에서는 다시 감소하는 경향을 보였다. Wheel type 의 연마 공정에서는 연마 Tool 의 회전으로 인한 원심력과 자기유변유체 입자들 사이에서의 자기력이 동시에 발생한다[5]. 그러나 회전속도 500rpm 이상일 경우 응집된 자기유변유체 입자들이 자기력보다 상대적으로 커진 원심력에 의해 연마 Tool 로부터 이탈하게 되어 연마 효율이 감소하게 되는 것으로 판단할 수 있다. 따라서 MRR 의 최대치는 약 500rpm 에서 나타나며 이 때 각 연마제의 MRR 을 비교한 결과를 Fig. 5 에 표시하였다. 전체적으로 연마제를 혼합하였을 때 MRR이 높게 나타나며 CNT보다 Diamond powder가 더 높은 MRR 값을 보였다.

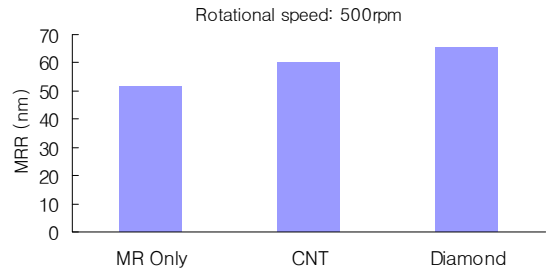


Fig. 5 Comparison of MRR about abrasives

4. 결론

최근 정밀표면 연마공정에 대한 수요가 증가함에 따라 자기유변유체를 이용한 표면 연마공정이 기존 연마공정의 단점을 보완할 수 있는 대안으로 새롭게 부상하고 있다. 특히 HDD 슬라이더와 같은 고경도 재료의 경우 연마제를 혼합하게 되면 자기부력현상에 의해 연속적인 연마가 가능하게 되어 효율적인 응용이 가능하다. 이에 대한 실제적인 적용을 위해 자기유변유체에 연마제를 혼합하여 연마 실험을 수행하였고 그 결과값을 비교하였다. 전체적으로 연마제를 혼합한 경우에 MRR 이 높게 나타났으며 따라서 고경도 재료의 효율적인 연마를 위해서는 연마제의 사용이 필수적임을 알 수 있었다. 또한 Wheel type 의 연마 공정에서는 Tool 의 원심력이 MRR 에 지대한 영향을 미친다는 사실을 실험을 통해 확인 할 수 있었다.

참고문헌

1. M. Madou, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, "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, 37-41, 1988.
2. H. Ramasawmy and L. Blunt, "3D surface characterisation of electropolished EDMed surface and quantitative assessment of process variables using Taguchi Methodology," International Journal of Machine Tools and Manufacture, **42**, 1129-1133, 2002.
3. K.Katahira, H. Ohmori, Y. Uehara, Y. Watanabe, W. Lin and T. Suzuki, "Study on ELID ground micro-tool and its applications," Industrial Technology, 2002. IEEE ICIT '02. 2002 IEEE International Conference, **2**, 1138 - 1141, 2002.
4. J. Rabinow, "The magnetic fluid clutch," AIEE Trans, **67**, 1308-1315, 1948.
5. M.R. Jolly, J.D. Carlson, B.C. Mun, "A model of the behavior of magnetorheological materials," Smart Materials and Structures, **5**, 607-614, 1996.