

자기유변유체를 이용한 Al₂O₃-TiC 의 표면연마에 관한 연구 Surface finishing of Al₂O₃-TiC using magnetorheological(MR) fluid

*장경인¹, 정봉수², 석종원², 민병권¹, 이상조¹

*K. -I. Jang¹, B. S. Jung², J. Seok², #B. -K. Min (bkmin@yonsei.ac.kr)¹, S. J. Lee¹

¹ 연세대학교 기계공학부, ² 중앙대학교 기계공학부

Key words : Magnetorheological fluid, Abrasive wear, Roughness, Centrifugal force

1. 서론

최근 들어 정보저장 및 반도체 산업의 비약적인 발전에 따라 초소형, 초정밀 부품의 수요가 급증하고 있다. 이러한 부품이 그 기능을 하기 위해서는 수 nm 급의 형상정밀도 또는 표면조도를 필요로 한다. 이러한 특징을 가지는 초소형 부품 중에서도 특히 HDD의 헤드 슬라이더는 고경도의 재료로 이루어져 있으면서 동시에 복잡한 3차원 구조물이기 때문에 기존의 가공 및 연마기법으로는 제품의 성능 확보에 한계가 있다.

이러한 기술적 난제를 해결하기 위한 적절한 방법으로는 자기유변유체 (Magnetorheological Fluid, MR)¹를 사용하여 3차원 구조물의 표면을 연마하는 자기유변연마공정 (Magnetorheological finishing process)이 있다. 이 공정은 외부 자기장에 의해 항복응력 조절이 가능한 자기유변유체의 특징을 활용하여 선택적으로 미세 구조물의 표면을 연마하는 방법이다. 기존의 Lapping 또는 CMP (Chemical Mechanical Polishing)²과 같이 고체와 고체가 직접 접촉하여 연마하는 방식과 달리 일정한 항복응력을 가진 Bingham 유체를 활용하여 연마하는 방식이기 때문에 시편에 가해지는 물리적 손상도 적고 3차원 구조물의 표면연마가 가능하다.

따라서, 본 논문에서는 자기유변연마공정을 이용하여 초소형 및 고경도 재료의 표면연마의 가능성을 증명하기 위한 연구를 수행하였다.

2. 고경도 HDD 슬라이더의 표면연마를 위한 자기유변연마공정

자기유변유체는 대략 40~50% 정도의 Iron 입자와 물 또는 기름으로 구성되어 있는 일종의 혼합액이다. 이 유체에 외부 자기장을 인가하지 않았을 경우에는 Newtonian fluid와 같은 거동을 하지만, 외부 자기장을 인가 하였을 경우에는 일종의 항복응력을 갖는 Bingham fluid와 같은 거동을 하게 된다. 이는 내부의 자화된 Iron 입자들이 자기에너지에 의해 자기장방향으로 정렬하여 사슬형태의 구조물을 형성하기 때문이며 외부의 자기장의 세기의 제곱에 비례하는 항복응력을 갖는 것으로 알려져 있다.

자기유변연마공정은 구성 입자 자체가 수 μm 크기의 입자들로 구성되어 있으며 외부 자기장에 의해 선택적으로 항복응력을 조절할 수 있는 자기유변유체를 사용하기 때문에 미세 구조물의 3차원 표면연마가 가능하다는 장점이 있다. Fig.1은 자기유변연마공정의 개략도를 나타낸 그림이다. 연마성능을 높이기 위해 경도가 높은 연마제와 혼합된 자기유변유체는 노즐을 통하여 영구자석방향으로 공급이 된다. 영구자석의 자기장에 의하여 자기유변유체는 일정한 항복응력을 가지는 구조물형태로 영구자석 주위를 감싸게 되어 자기유변연마공정에서의 Tool 역할을 하게 된다. 이 Tool을 시편의 표면 위를 일정 압력하에서 고속으로 회전시켜 시편의 표면을 연마하게 된다.

본 연구의 연마대상인 마이크로 크기의 3차원 구조물인 HDD의 슬라이더는 경도의 크기가 단결정 실리콘에 비하여 3~4배 가량 큰 값을 가지는 Al₂O₃-TiC로 구성되어 있다. 이 슬라이더는 복잡한 형상의 초소형/고경도 부품이기 때문에 Lapping 또는 CMP 등과 같은 연마방식으로는 표

면을 연마하기에는 한계가 있다.

이러한 부품의 표면을 연마하기 위하여 기존의 자기유변연마공정에 높은 크기의 경도를 가지는 다이아몬드 입자를 자기유변유체에 혼합하였고 그 성능을 최대한 이끌어내어 고경도 재료의 표면을 효율적으로 연마하기 위한 연구를 수행하였다.

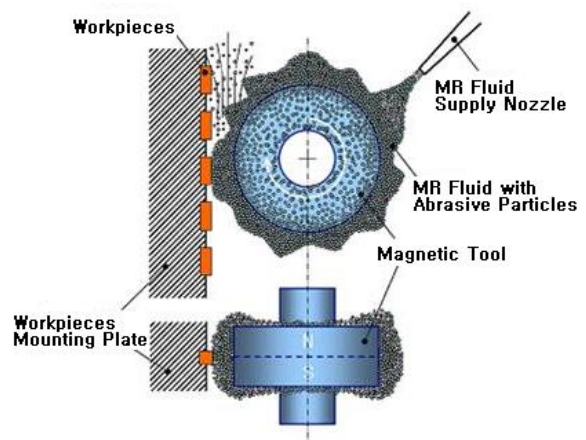


Fig. 1 Wheel type Magnetorheological finishing process

3. 자기유변연마공정의 성능 평가

Abrasive wear³에 의해 재료가 제거되는 자기유변연마공정에서는 연마효율에 영향을 미치는 인자들이 있는데 이들 중 가장 지배적인 인자는 시편의 표면에 가해지는 압력과 시편과 Tool 사이의 상대속도이다. 고경도 재료의 표면연마를 위해서는 시편 표면에 가해지는 압력도 중요한 요소이지만 시편과 Tool 사이의 상대속도를 증가시키는 것 역시 중요하다.

하지만, 고속으로 회전하는 Wheel type 자기유변연마공정에서는 자기력에 의하여 영구자석에 붙어 있는 자기유변유체 및 연마제가 회전에 의한 원심력 때문에 결합력이 감소될 수 있다. 따라서 Al₂O₃-TiC과 같은 고경도 재료의 시편을 표면연마하기 위해서는 Tool의 회전 속도에 따른 Wheel type 자기유변연마공정의 연마성능과 그 한계를 평가할 필요가 있다.

속도에 따른 연마성능을 평가하기 위해서는 우선 공통적으로 적용될 연마시간을 결정할 필요가 있다. 즉, 연마가 진행되면서 시편의 Ra 값이 최종 수렴되는 시간을 찾는 실험이 먼저 수행하여 다양한 속도 조건에서의 연마성능 평가 시 적용시켜야 하기 때문이다. 본 논문에서 사용된 Al₂O₃-TiC 재료의 시편은 450~500nm 사이의 비교적 거친 표면조도를 가지며 이는 연마공정시 달라지는 시편의 표면조도 변화의 폭을 크게 하여 그 변화 양상을 뚜렷하게 보기 위함이다.

Fig. 2는 Tool의 회전속도가 500rpm, Tool과 시편의 상대거리가 2mm, 다이아몬드와 자기유변유체의 비율 1:4로 혼합하여 사용했을 때의 연마시간에 따라 달라지는 시편의 표면조도의 값을 측정하여 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 연마하기 전 초기 표면의 Ra는 약 500nm 이었

으며 연마시간이 증가함에 따라 점차적으로 250nm 부근의 값으로 수렴하며 대략 90 분 이후부터는 일정한 값을 유지하는 것으로 나타난다. 이 실험결과를 활용하여 연마시간을 90 분으로 결정하였으며 이후의 실험조건에도 동일하게 적용하였다.

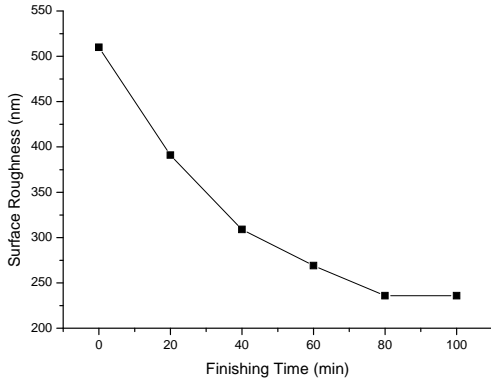


Fig. 2 Variation of surface roughness with finishing time

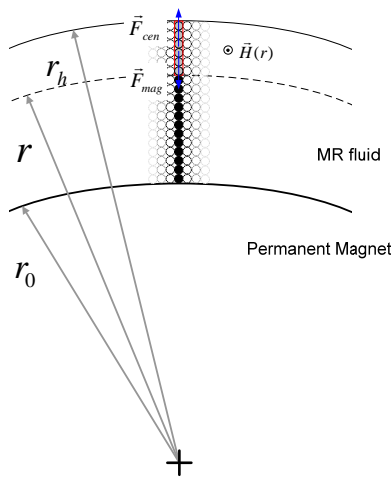


Fig.3 magnetic and centrifugal force in MR finishing

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

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

다음으로, 회전속도가 연마성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 이전 실험과 동일한 조건에서 회전속도만을 변화시켜가며 실험을 수행하였다. Fig. 4 에 나타난 것과 같이 시편의 표면조도 향상 폭은 초기에 회전속도가 증가하면서 증가하다가 500rpm 부근에서 최대가 되며 그 이후의 속도에서는 다시 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 다이어몬드 파우더가 혼합된 자기유변유체가 영구자석의 자기력에 의하여 사슬구조체를 형성하여 시편의 표면에 압력을 가하면서 지나가면서 연마를 하게 되는데 일정 속도 이상을 지나가면 Tool 의 회전에 의한 원심력에 의해 사슬구조체의 결합력이 약해지게 되고 결과적으로 연마성능을 저하시키는 것으로 판단된다.

즉, Tool 이 고속 회전하는 Wheel type 연마공정시 식 (1) 과 (2)에 각각 나타난 원심력 F_{CEN} 과 자기력 F_{MAG} 의 상호관계에 의해 연마성능이 최대가 되는 특정속도가 존재하는 것을 실험을 통해서 알 수 있다.

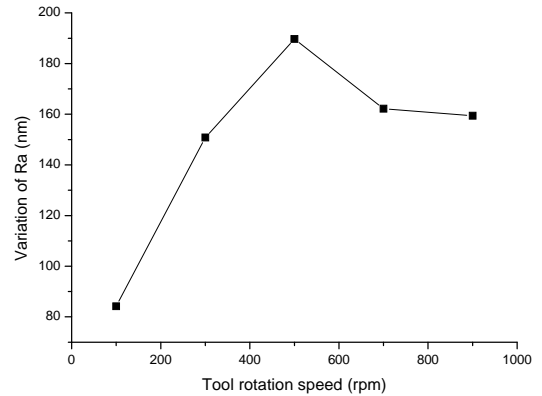


Fig.4 Variation of surface roughness with Tool rotation speed

4. 연마성능 향상을 위한 장치 개선 및 실험결과

앞 장에서 기술된 바와 같이 시편의 표면조도 향상 폭 즉, 연마성능의 최대치는 500rpm 에서 나타나며 원심력을 고정시킨 상태에서 Tool 과 시편의 상대속도를 증가시키는 선형왕복운동을 자기유변연마공정에 추가로 부여하였다. 이는 Tool 의 회전 속도 500rpm 의 상대적인 회전속도와 같은 크기의 선속도를 주는 선형 왕복운동이며 그 비교 실험을 3 회씩 수행하여 그 결과를 Table 1 에 나타내었다.

실험결과에 나타난 것과 같이 시편 표면의 표면정도 향상 폭은 Tool 의 회전운동만 부여할 때보다 시편에 선형 왕복운동을 부여할 때가 더 높은 것을 알 수 있다. 이는 선형왕복운동이 연마력은 유지시킨 상태에서 시편과 Tool 사이의 상대속도를 증가시켰으며, 결과적으로 연마성능이 향상된 것으로 판단된다.

Induced Motion	Variation of surface roughness
Rotation Only	183 nm
Rotation and alternating motion	275nm

Table 1. Effect of additional linear alternating motion

5. 결론

Wheel type 의 자기유변연마공정에서 Tool 의 고속 회전 시 내부에서 발생하는 원심력에 의해 연마성능을 감소시키는 부정적 요소임을 실험을 통해 확인하였으며, 이를 개선하기 위해 Tool 의 회전운동과 시편의 선형왕복운동을 동시에 부여하여 그 결과 시편의 표면조도향상 폭이 약 1.5 배 정도 향상된 것을 알 수 있었다. 결론적으로 Al_2O_3TiC 의 재질의 시편에 대한 연마성능을 향상시켰으며 이는 같은 구성성분으로 제조된 초소형/고경도의 HDD 슬라이더의 표면을 효율적으로 연마할 수 있는 가능성을 제시하였다.

참고문헌

1. Parshuram, B. Zantye, Ashok Kumar, A.K. Sikder, "Chemical mechanical planarization for microelectronics," Materials science and Engineering R 45, pp 89-220, 2004.
2. Lord corporation, MR fluid (MRF 241ES), <http://www.lord.com>
3. Ernest Rabinowicz, "Friction and Wear of Materials," Wiley-Interscience, 1995