

MR Fluid Jet Polishing 개발에 관한 연구

Study on MR Fluid Jet Polishing Process

*#김욱배¹, 김원우¹, 고차원¹

*#W. B. Kim¹(wkim@kpu.ac.kr), J. H. Cho², W. W. Kim¹, C. W. Ko¹

¹ 한국산업기술대학교 기계설계공학과

Key words : MR fluid, Fluid jet polishing, MR Jet, Material removal, Surface roughness

1. 서론

소재의 표면을 연마하는 것은 역사적으로 매우 오래된 기술로서 오늘날에는 부가가치가 높은 제품에 적용되는 고도의 가공기술이 되었다. 연마는 형상정밀도를 개선하거나 표면을 매끄럽게 하는 작업으로서, 재료제거의 원리나 가공기구가 매우 다양하지만 대체로 경질의 연마입자를 물이나 기름에 분산시켜 피가공표면에 공급하고 랩이나 폴리셔 등의 공구를 이용하여 가압-상대운동시켜 피가공모재를 소량 제거해내는 것이 공통적 특징이다. 연마공정에서는 재료제거속도와 최소표면거칠기가 주요 성능지표이며 재료제거량의 예측을 통한 공정의 자동화와 스크래치 등의 결함 발생, 공구마모 등의 문제는 기술의 실용화에 있어서 매우 중요한 평가항목이다. 이러한 측면에서 연마공구를 사용하지 않고, 초정밀 광학 및 금형분야에 상용개발이 추진된 기술로서 Fluid Jet Polishing(FJP)과 Magnetorheological Finishing(MRF)이 있다.^{1,2} FJP는 고속의 연마액을 피가공물에 분사시켜 연마를 행하는 방법으로서 워터젯 가공과 동일한 가공법이지만, 유체의 토출압력이 낮고(3~20bar) 광학 유리 등의 가공에서 높은 수준의 표면거칠기를 얻는다.³ 유체 제트에 의한 가공법은 랩과 같은 연마공구의 마모가 없고 노즐의 형상과 공구-공작물간 거리 등에 따라 일정한 재료제거율 프로파일을 예측하여 CNC 공정으로 적용하기가 용이한 특징이 있다. 한편 MRF는 MR fluid 기반의 연마액을 피가공표면에서 흐르게 하되 자기장에 의해 높은 전단 저항을 갖도록 고안된 공정으로서, 기존의 타 연마법 대비 높은 재료제거율과 매우 낮은 수준의 표면거칠기를 구현가능하며 기상(on-machine) 간섭계의 지원으로 인해 최근 광학제조 등의 분야에서 상용화가 확장되고 있다.

MRF를 개발한 QED사는 2004년경 MR-Jet이라는 새로운 공정을 발표하였는데 이는 FJP와 MRF를 결합한 형태로서 노즐에서 고속으로 분사되는 MR fluid에 자기장을 인가함으로써 새로운 특성을 보여주었다.² 즉 FJP에서는 노즐에서 분사된 유체가 난류·퍼짐 특성을 보이는 반면, MR-Jet에서는 분사 유체가 원기둥과 같이 층류·진직의 흐름특성을 보인다. 이와 같은 독특한 결과는 노즐 끝단에 집중된 자기장에 의해 유체의 겉보기 점도가 급격히 상승하기 때문이다. 직진하는 층류의 제트 특성으로 인해 가공에너지를 집중시킬 수 있고, 피가공물의 형상에 구애를 받지 않으며, MR fluid의 고유한 슬러리로서의 특징을 유지할 수 있으므로, 기존의 MRF와 FJP의 단점은 보완하고 장점을 합하는 효과를 기대할 수 있다. 본 연구에서는 MR fluid jet polishing의 가공성능을 평가하고 다양한 기대효과를 시험하고자, 기본 장치를 설계 및 제작하여 기초가공시험을 행하였는데 그 결과를 설명한다.

2. 가공시스템 구성

가공시스템은 크게 분사 모듈, 펌프 시스템, 유체 수거부로 구분되며 Fig. 1에 개요를 나타내었다. 분사 모듈은 전자석과 노즐로 구성되는데 노즐(S10C, 외경 \varnothing 10mm, 내경 \varnothing 2mm)이 전자석(1900turn)의 코어로 사용되었으며 자기장 해석을 통해 노즐 끝단(중심부)의 자기장강도가 약 4kG가 되도록 설계하였다. 펌프 시스템은 70bar급의 다이어램

펌프를 사용하였으며 배관상에 바이패스를 설치하였다. 가공부 주위는 표면층돌 후 튀어오르는 유체를 수거하기 위한 구조로 제작하였다.

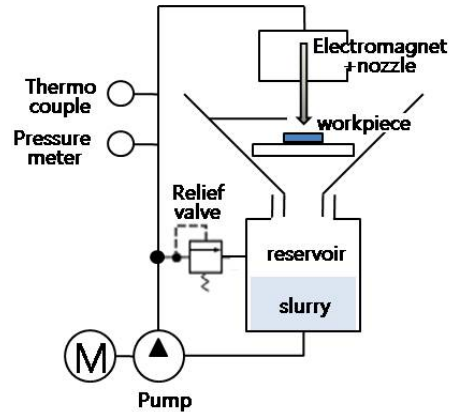


Fig. 1 Schematic view of MR-FJP system setup

MR fluid는 carbonyl iron(입경 $4\ \mu\text{m}$) 78wt%, DI water 14wt%, ethylene glycol 7wt%, stabilizer 1wt%를 교반하였다. Fig. 2에 노즐에서 분사되는 MR fluid의 사진을 제시하였다. 왼쪽 그림은 자기장을 인가하지 않았을 때로서 전자석 내부의 노즐로부터 분사된 MR fluid는 바로 난류화되고 제트의 진행에 따라 직경이 넓어지고 있는 반면, 오른쪽 그림에서처럼 같은 분사속도에서 자기장을 인가한 경우는 유체의 퍼짐이 없이 일정한 직경을 유지하며 제트기둥의 표면이 매끈함을 관찰할 수 있었다. 실험시 노즐로부터 최대 155mm의 토출거리에서도 직경의 변화는 육안으로 감지하기 어렵다.

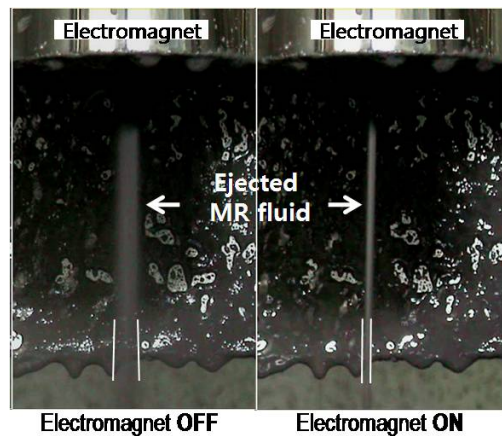


Fig. 2 Photography of MR fluid jet ejected from electromagnet-nozzle (velocity 6.4m/sec)

3. 재료제거량과 표면거칠기

상기의 시험장치를 이용하여 Fused silica glass를 대상으로 재료제거량을 관측하고 표면거칠기를 측정하기 위한 가공시험을 행하였다. 재료제거시험을 위한 MR fluid는 Carbonyl iron 62wt%, Water+Ethylene glycol 34wt%, Stabilizer 1%,

Ceria powder ($\phi 1.8 \mu\text{m}$) 3wt%로 조성하였으며 가공시편은 별도의 전처리없이 원래의 사각 plate 형태를 그대로 사용하였다. 가공 시편의 전형적인 단면프로파일을 Fig. 3에 제시하였다. 이 때의 가공조건은 노즐직경 2mm, 노즐-피가공표면간 stand-off 45mm, 입사각도는 표면에 수직하며, 노즐분사속도 20m/sec, 전자석 전류입력 0.6A (예상 자기장강도 2400G)하에 10분간 spot 가공하였다. 노즐에서 분사된 MR 유체의 직경이 노즐직경과 동일하다고 간주하면, 분사제트의 중심부에서는 가공이 거의 발생하지 않고 가장자리 바깥지점에서 가공량이 가장 많으며 전체적으로 W자 형태의 재료제거 프로파일을 나타낸다. 이는 제트 분사 연마법의 재료제거량을 시험한 연구논문의 결과와 일치하며, 유체제트의 표면 충돌 후 슬러리의 방사 유동에 의해 피가공표면에 abrasion이 지배적인 발생하기 때문이라고 설명할 수 있다.¹² 측정깊이는 대략 $0.6 \mu\text{m}/\text{min}$ 이상의 재료제거율을 추정할 수 있다.

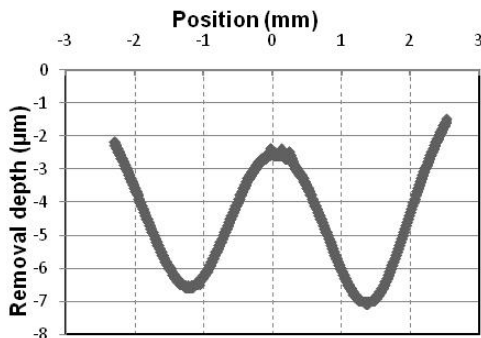


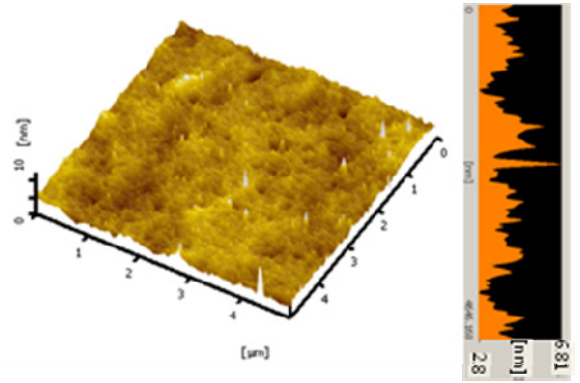
Fig. 3 Sectional profile of polished spot

Fig. 4(a)에 연마전의 표면 $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ 에 대한 AFM 측정결과를, Fig. 4(b)에 Fig. 3에 나타난 연마된 부위의 AFM 측정결과를 나타내었다. 각 그림의 왼쪽은 3차원 맵이며 오른쪽에는 2차원 단면을 나타내었다. 연마 전 표면거칠기는 Ra 0.6nm, Rp-v 12.5nm이었으며 연마 후 표면거칠기는 Ra 1.2nm, Rp-v 21.6nm로서 2배정도 증가하였다. 표면거칠기가 증가한 요인으로는 연마제의 크기로 추정되나 슬러리에 대한 추가연구를 통해 보다 낮은 수준의 표면거칠기가 구현될 것으로 생각한다. 2차원 단면 거칠기 프로파일을 볼 때 연마 전에 비해 연마 후 단면이 상당히 부드러워졌음을 알 수 있는데 Bearing ratio를 비교해보면 연마 전이 0.64, 연마 후에는 5.6으로 9배 정도 증가하였다. Ceria 연마제를 사용한 공정의 고유한 특징이며 연마제가 재료제거에 직접적인 영향을 주는 증거로 판단할 수 있다.

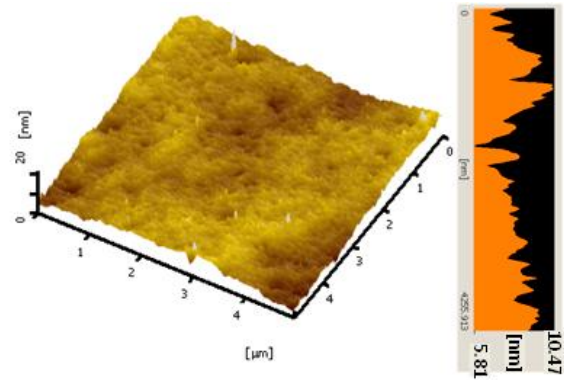
4. 결론

MR fluid jet polishing은 빠른 재료제거율, 낮은 표면거칠기, 피가공물의 형상과 크기에 따른 적용의 장애가 적고, 표면에 스크래치 등의 결함이 적은 새로운 공정으로 기대되며 본 연구에서 그 가능성을 확인하였다. 분사 노즐 근방에 자기장을 인가하여 분사제트가 퍼짐없이 진직하는 특성을 관측하였고, 자기장을 가하지 않았을 때 보다 재료제거량이 급격히 높아짐도 알 수 있었다.

이 가공법은 광학 연마 뿐 아니라 형상보정가공, 미세 패턴 연마, 금형 및 난삭재 사상가공, 반도체 응용 등 다양한 실용적 응용 가능성을 갖는다고 생각되며 이에 필요한 연구를 진행할 예정이다. 본 가공의 단점은 고가의 슬러리 비용, 슬러리의 컨디셔닝 및 유지의 어려움을 들 수 있고 이에 대한 대책과 해결을 위한 연구도 필요하다.



(a) Original surface (Ra 0.6nm, Rp-v 12.5nm)



(b) Polished surface (Ra 1.2nm, Rp-v 21.6nm)

Fig. 4 Roughness map and sectional profile of fused silica surface by AFM before (a) and after (b) MR fluid jet polishing

후기

본 연구는 2009년 지식경제 기술혁신사업(공동연구기반구축사업)의 “자원절약형 고충형비형상 공정기술 기반구축사업”의 지원을 받아 수행되었음.

참고문헌

1. Booij, S. M., Brug, H., Singh, M., and Braat, J. J. M., “Nanometer Accurate Shaping with Fluid Jet Polishing”, Proceedings of SPIE, 4451, 222-229, 2001.
2. Shorey, A., Kordonski, W., and Tricard, M., “Deterministic, Precision Finishing of Domes and Conformal Optics”, Proceedings of SPIE, 5786, 310-318, 2005
3. Barunecker, B., Hentschel, R., and Tiziani, H. J., “Advanced Optics Using Aspherical Elements”, SPIE Press, 44-52, 2007