

MR Fluid Jet Polishing 시스템을 이용한 금형코어재료 연마특성에 관한 연구

이정원¹ · 하석재¹ · 조용규¹ · 조명우[#] · 이강희² · 제태진³

Polishing Characteristics of a Mold Core Material in MR Fluid Jet Polishing

J. W. Lee, S. J. Ha, Y. G. Cho, M. W. Cho, K. H. Lee, T. J. Je

(Received January 10, 2013 / Revised February 13, 2013 / Accepted February 26, 2013)

Abstract

The ultra-precision polishing method using MR fluid has come into the spotlight for polishing metals and optical materials. The MR fluid jet polishing process can be controlled using a change of viscosity by an imposed magnetic field. The MR fluid used for polishing process is a mixture of CI particles, DI water, Na₂CO₃ and glycerin. The efficiency of polishing depends on parameters such as polishing time, magnetic field, stand-off distance, pressure, etc. In this paper, the MR fluid jet polishing was used to polish nickel and brass mold materials, which is used to fabricate backlight units for 3-D optical devices in mobile display industries. In MR jet polishing, ferromagnetic materials like nickel can decrease the polishing efficiency by interaction with the cohesiveness of the MR fluid more than non-ferromagnetic materials like copper. A series of tests with different polishing times showed that the surface roughness of brass (Ra=1.84 nm) was lower than that of nickel (Ra=2.31 nm) after polishing for 20 minutes.

Key Words : MR Fluid, MR Fluid Jet Polishing, Brass, Nickel, Surface Roughness

1. 서 론

최근 우주 항공 및 의료산업의 발달로 인하여 고품질, 고정도 부품의 요구가 증가되며, 초정밀 부품 표면의 경면연마에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[1]. 특히 기계적 성질이 뛰어나며 금형코어 재료로 많이 사용되고 있는 재료들인 STAVAX, NAK80, SUS 계열, 인코넬 등 여러 금형 소재의 경우 그 품질을 향상시키기 위해 연삭 및 연마공정의 필요성은 더욱 더 증대되고 있다. 이에 따라 마이크로/나노 입자를 이용한 연마방법을

통해 잔류응력 및 재료 표면의 가공변질층이 거의 발생하지 않으며, 우수한 표면거칠기를 얻을 수 있는 초정밀 연마기술 및 시스템 연구가 진행되고 있다[2]. 특히 강자성재료의 경우 MR fluid가 연마패드가 되는 MR polishing으로 연마 시 자기장의 영향으로 인하여 금속자체가 자화가 되어 초정밀 연마가 상당히 어렵다. 또한 비구면이나 자유곡면과 같이 복잡하게 설계된 광학부품, 금형 등과 같은 경우에는 래핑, MR polishing 등과 같이 다양한 접촉식 초정밀 연마방법의 적용이 가능하나, 급격히 경사가 변화하는 오목한 형상

1. 인하대학교 기계공학과

2. 동양미래대학 로봇자동화 공학과

3. 한국기계연구원 나노공정연구실

Corresponding Author : Depart. Mechanical Engineering, Inha University, chomwnet@inha.ac.kr

(concave shape)의 경우에는 공구와 가공물의 간섭에 의해 기존의 연마방법의 적용이 어려울 수 있다[3~5]. 그 중 MR fluid를 이용한 MR fluid Jet Polishing 공정은 일반적인 water jet과 유사하지만 MR fluid와 연마슬러리 조성변화에 따라 분사하는 연마공정으로 자기장의 영향으로 분사유체의 점도를 조절하여 연마공정의 제어 가능한 특징으로 공작물의 가공표면에 집중적으로 충격을 가하여 재료가 제거되며 고품위의 표면거칠기 획득이 가능하다[6]. 또한 MR fluid의 특성을 활용한 분사 연마 방법은 인가된 자기장의 영향으로 분사된 유체가 집중성을 유지하여 균일한 연마 spot의 생성이 가능하기 때문에 초정밀 연마에 적합한 것으로 평가되고 있다. 따라서 본 연구에서는 MR fluid Jet polishing 시스템을 통하여 금형코어재료 중 디스플레이용 도광판 제작을 위한 금형재료인 비자성금속인 Brass와 강자성체 금속인 Nickel의 자기장 해석 및 초정밀연마를 통해 연마 특성을 분석하였다.

2. MR fluid Jet polishing

MR fluid Jet polishing 시스템은 전자석 시스템, 고압분사노즐, 분사 유압시스템 총 3가지 part로 나누어 제작하였다. 첫 번째로 전자석 시스템은 노즐 토출부로부터 고속분사 및 일정량이 연속적으로 분사되는 MR fluid가 정확히 자기장의 영향을 받기 위한 설계가 되어야 한다. 이를 위해 연속적인 MR fluid의 분사에 대한 자화시간을 고려하여 MR fluid의 형상유지와 장시간 자기장 변화에 따른 전자석의 발열을 줄이기 위해 본 시스템에서는 전자석의 코일을 1800회 정도로 구성하였으며 1.5A 일 때 약 1500G의 자기장의 세기를 가진 전자석 시스템을 제작하였다. 두 번째로 고압 분사노즐의 설계를 수행하였다. 적용분야에 따라 여러 가지의 종류의 노즐이 있으며 그 특성에 맞는 노즐을 제작하여야 한다. 일반적으로 사용되는 노즐의 경우 유체 분사 시 노즐의 입구부분과 출구부분의 압력의 차로 공기역학적인 난류가 발생하게 되어 유체가 분산되는 경우가 발생하게 된다. 따라서 MR fluid가 분산되지 않고 바로 가공물에 직선으로 분사되어야 하기 때문에 노즐의 설계 및 제작이 중요하다. MR fluid jet polishing 시스템에서는 MR fluid가 자기장의 영향에 따라 분사 시 노즐의 출구 부분에 직경 크기대로 분사되는

특징을 지니고 있어야 하며 환경적인 요소 및 노즐 내부의 직경의 차이에 따른 난류가 발생되지 않고 분사 유체의 형상 유지 및 직진성을 유지하기 위한 설계 및 제작이 필요하다. 따라서 본 분사 시스템에 노즐 내부에서의 난류가 발생하지 않고 노즐의 입구와 출구의 직경이 같은 스트레이트 노즐로 선정하여 설계 및 제작하였다. 노즐의 출구에 자기장의 세기 및 밀도를 집중시키기 위해서 탄소강 소재인 SM45C로 선정 $\phi 1.5$ 크기의 내경을 가진 노즐을 설계하였다.

마지막으로 연마 공정을 위해 MR fluid를 일정압력을 유지하며 분사유체를 분출 할 수 있는 유압 시스템을 구성하였다. 분사 유압시스템은 MR fluid의 정량분사 위하여 15bar 이상인 diaphragm 펌프를 단일 및 병렬 연결하여 사용하였으며, 흡입부와 토출부의 직경의 차이에 의하여 고압을 발생되도록 설계하였다. 이때 MR fluid의 분사노즐에서 최종적으로 분사될 때 자기장의 영향으로 점성이 높아지게 되는데 이로 인하여 노즐 내부의 압력이 높아지며 펌프에 과부화 및 맥동 현상이 일어나게 되며, 펌프의 진동으로 인하여 직선으로 분사가 이루어지지 않아 가공물 표면에 정확하게 분사가 안 되는 문제가 발생된다. 릴리프 밸브를 장착을 통해 압력을 우회시키는 방법으로 맥동 및 과부화를 해결할 수 있으나 지속적인 문제가 발생하게 되면 펌프의 맥동 및 진동을 줄여주는 시스템을 장착하여야 한다. 이때 사용되는 시스템으로 accumulator를 구성하여 압력에너지를 축적해 두었다가 펌프의 부하가 클 때 방출하는 에너지 보완 기기로 관로에 빠른 속도로 흐르는 MR fluid의 흐름이 멈추거나 감속함으로써 발생하는 압력 문제 해결과 동시에 펌프의 맥동현상 억제도 해결하였다. 최종 분사시스템의 구성은 MR fluid를 정밀 이송스테이지에 장착된 고압노즐 전자석 모듈에서 Z-axis에 장착된 재료 chucking 모듈로 즉 아래서 위쪽 방향으로 분사하는 방식으로 선정하였다. 이는 시스템 하부에 정밀 이송 스테이지에 장착된 고압노즐 전자석 모듈이 분사할 때에는 재료의 단순 spot 가공을 수행하지만, 이송 스테이지에 의한 고압노즐 전자석 모듈을 이송을 하면서 재료의 대면적 및 분사 각도를 변화하여 연마를 진행하기 위해 설계하였고 노즐과 재료의 간격(stand-off)이 중요한 가공변수이므로 이를 쉽게 컨트롤하기 위해 아래에서 위로 분사하는 방식으로 시스템을 제작하였다. 설계되어 제작된 시스템의 사진은 Fig. 1과 같다.



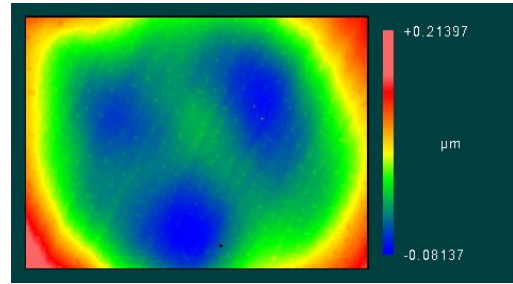
Fig. 1 Photography of MR fluid Jet Polishing



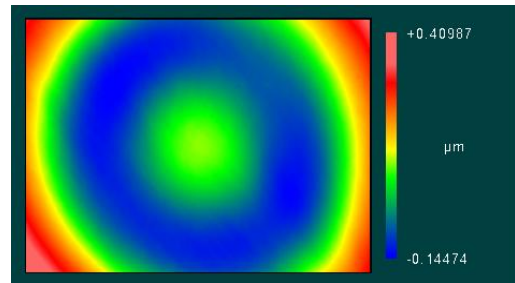
Fig. 2 Photography of MR fluid Jet Polishing

제작된 시스템을 통한 자기장의 인가 유무에 따른 차이점을 비교하기 위하여 Fig. 2에서처럼 분사되는 jet의 snap shot과 시편에 형성된 연마 spot을 비접촉식 3차원 표면형상 측정기(ZYGO NV6200)를 이용하여 측정된 후 그 결과를 비교한 것이다.

Fig. 3(a)는 자기장이 인가되지 않았을 때의 경우이며, (b)는 자기장이 인가된 경우를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 자기장이 인가되었을 경우 분사유체의 집중도가 확연히 증가함을 알 수 있으며, 연마된 spot의 형상도 자기장이 인가되었을 경우가 보다 안정적으로 형성되어 MR fluid jet polishing이 정밀연마에 보다 적합함을 알 수 있다. 또한 노즐에서 분사되는 MR fluid가 재료의 중심부에서는 가공이 거의 발생하지 않고 노즐에서 분사된 중심 기점으로 바깥지점에서 재료제거가 발생됨을 확인할 수 있다.



(a) Magnetic field off



(b) Magnet field on

Fig. 3 MR fluid Jet Polishing removal rate spot(x2.5)

3. 자기장 시뮬레이션을 통한 금형코어재료의 비교 분석

디스플레이용 도광판 제작을 위한 금형재료로 nickel과 brass는 내식성 및 내화화성이 우수하고 가공정밀도가 우수하며 사출성형 시 이형성이 우수하기 때문에 대표적으로 널리 이용되고 있다. 하지만 강자성재료인 nickel의 경우 MR fluid를 패드에 재료를 접촉하여 연마하는 시스템인 Wheel type MR polishing의 경우 연마 시 휠 주변으로 형성되는 자기장의 방향은 자성재료인 공작물이 MR fluid로 점차 접근함에 따라 인가된 자기장을 끌어당겨 MR fluid를 연마공구 형태가 아닌 불규칙한 형상으로 변형시켜 일정한 연마영역을 생성시키지 못한다. 따라서 Wheel type MR polishing 방법은 강자성재료의 경우 적용이 어렵다. 하지만 동일하게 자기장의 영향에 따라 연마특성이 변하는 MR fluid Jet polishing의 경우 지속적인 유체 분사를 통해 연마를 수행하는 방법이므로 강자성재료에도 적용이 가능하리라 예상할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 MR fluid Jet polishing 시스템으로 분사 시 자기장의 영향에 따른 비자성재료와 자성재료의 표면에 대한 자기력 특성에 대한 변

Table 1 Mechanical property of Nickel and Brass

| | Nickel | Brass |
|--------------------------------|----------------------|----------------------|
| Density (g/cm ³) | 8.90 | 8.73 |
| Electric conductivity (mhos/m) | 1.45×10 ⁷ | 1.50×10 ⁷ |
| Electrical resistivity (nΩ.m) | 69.3 | 64 |
| Specific permeability | 100-600 | 1 |
| Young's modulus (GPa) | 200 | 100-125 |
| Hardness (Hv, MPa) | 638 | 144 |

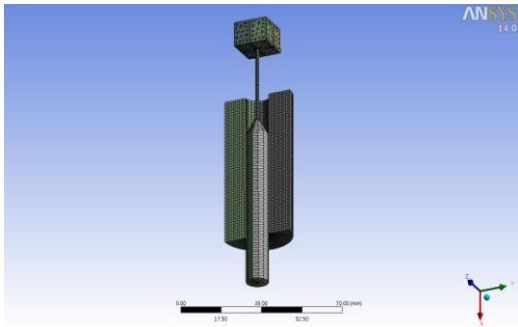


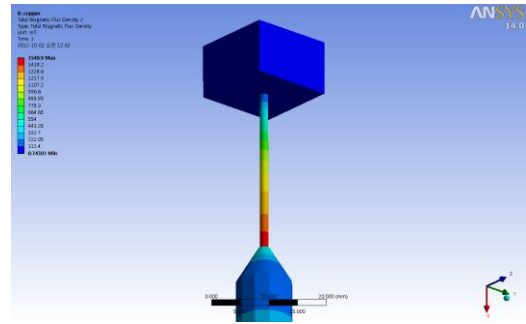
Fig. 4 Geometrical modeling and mesh

화를 ANSYS Workbench의 전자기장 해석툴을 이용하여 분석하였다. Table 1은 nickel 과 brass의 물성치이다.

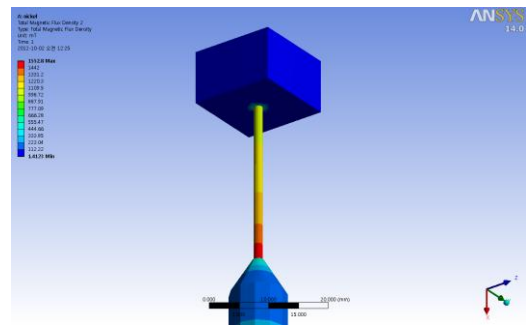
Fig 4와 같이 분사유체가 노즐에서 가공물까지 수직으로 가공물 표면 중심부에 분사유체가 정확하게 분사되도록 모델링을 하였으며, 노즐은 실제 시스템에 사용되는 노즐의 크기와 동일하게 모델링을 하였다.

해석결과는 Fig 5와 같다. 분사될 때의 전류의 세기는 1.5A로 두 조건에서 모두 노즐 분사되는 끝에서 자기장이 집중이 됨을 확인 할 수 있다. 자속밀도의 경우 두 경우 모두 MR fluid가 분사되어 시편에 도달하는 부분을 기준으로 자속밀도의 분포를 보이고 있음을 알 수 있었다.

Brass의 경우 0mT로 자기장의 영향이 전혀 없음을 확인할 수 있으며 nickel의 경우 223.04mT로 재료 표면의 전체적인 부분보다는 MR fluid가 충돌하는 부분 즉 가공이 진행되는 부분에 자기장의



(a) Magnetic flux density (brass)



(b) Magnetic flux density (nickel)

Fig. 5 Analysis of magnetic flux density according to change of material

영향이 있음을 확인 할 수 있다. 이는 nickel이 brass보다 비투자율이 100배에서 최대 600배까지 크기 때문에 전자석을 통해 분사되는 MR fluid내의 CI particle들이 집중되는 문제가 발생한다. 하지만 그 크기는 자기장의 세기의 영향보다 상당히 적으므로 분사를 통한 연마를 수행하는 MR fluid Jet polishing에서 강자성 금속인 nickel의 연마가 가능하리라 판단된다.

4. MR fluid Jet Polishing 미세 연마 실험

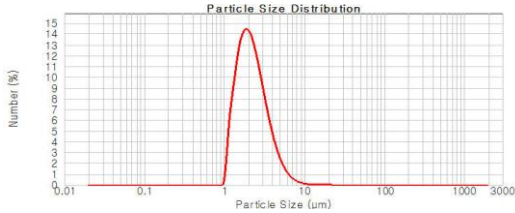
자기장 해석 후 이를 바탕으로 MR fluid Jet Polishing을 이용하여 금형코어재료의 미세 연마 실험을 통한 연마특성 분석을 위해 연구를 수행하였다.

조성된 MR fluid는 Table 2와 Fig. 6과 같이 Carbonyl iron 65wt%, DI-water 20wt%, stabilizer 2wt%(glycerin 1wt%, Na₂CO₃ 1wt%)로 조성하였으며 연마슬러리로는 50nm의 입자 크기를 가지는 Nanoceria slurry 13wt%로 조성하였다. 가공 조건으로는

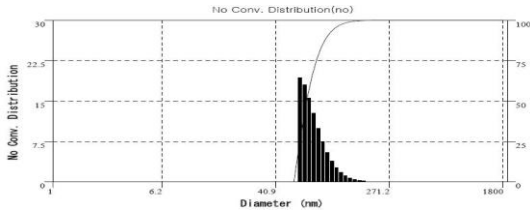
Table 2 Compositions of the MR fluid

| Carbonyl iron | Nano ceria slurry | DI-Water | Stabilizer |
|---------------|-------------------|----------|------------|
| 65wt% | 13wt% | 20wt% | 2wt% |

* Stabilizer (glycerol 1wt% + Na₂CO₃ 1wt%)



(a) CI particle



(b) Nano ceria particle

Fig. 6 Particle size distributions of CI and nano ceria

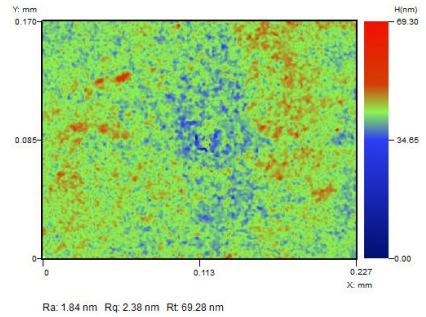
Table 3 Experimental conditions

| Magnetic field [G] | Stand-off [mm] | Polishing time [min] |
|--------------------|----------------|----------------------|
| 1500G | 30mm | 1~20min |

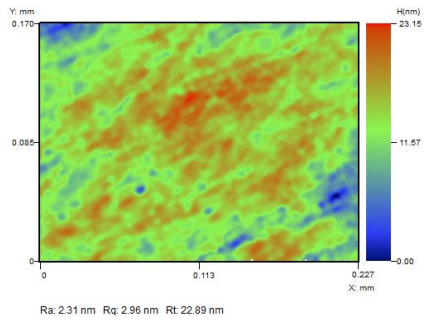
Table 3과 같이 분사 노즐의 직경 1.5mm, stand-off(노즐과 재료의 간격) 30mm, 전자석의 자기장의 세기는 1500G로 인가하고 분사 압력은 10bar로 분사시간은 1분, 3분, 5분, 10분, 20분으로 변화를 주어 실험조건별로 3회씩 분사실험을 수행하였다.

표면거칠기 측정 결과에서 가공조건인 분사시간 20분에서 연마를 수행하였을 때 Fig. 7 에서처럼 비자성 금속인 brass는 1.84nm 강자성 금속인 nickel은 2.31nm로 확인할 수 있었다.

Fig 8은 분사시간에 따른 각 재료의 표면거칠기의 변화를 그래프로 나타내었다. 분사시간이 증가할수록 표면 거칠기가 급격히 향상되다 일정 분사시간 10분 이상부터는 표면 거칠기가 일정해지는 현상을 확인할 수 있다. 또한 brass와 nickel의 표면 거칠기 결과를 비교해보면 brass의 표면거칠기가



(a) Brass (1.84nm)



(b) Nickel (2.31nm)

Fig. 7 Measure surface roughness of Brass and Nickel after 20min MR polishing

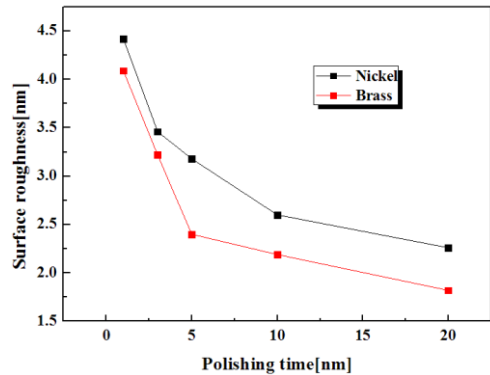


Fig. 8 Result of surface roughness after MR fluid Jet Polishing (Ra)

더 향상이 됨을 확인할 수 있다. 이는 앞서 전자석 해석결과에서 보듯이 강자성체인 nickel의 물성인 비투자율이 brass보다 크기 때문에 자기장의 영향으로 nickel이 자화되는 현상으로 인하여 가공면에 MR fluid의 CI particle 입자들이 달라붙는 현

상이 발생됨에 따라 표면거칠기가 차이가 있음으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 자기장의 인가에 의해 안정적이고 예측 가능한 연마 spot을 형성하여 미소부품의 초정밀 연마에 적용이 가능한 MR fluid jet polishing을 통하여 금형코어재료 중 비자성금속인 brass와 강자성금속인 nickel을 대상으로 분사시간을 변화시키며 표면거칠기의 변화를 고찰하였고 이를 simulation 결과와 비교하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 제작된 시스템으로 기초실험을 수행하여 자기장의 인가여부에 따라 분사유체의 집중성 및 연마 spot 형상의 변화를 고찰하였으며, 안정적이고 균일한 spot이 형성되는 것을 확인하였다.

(2) 분사시간을 변화시키며 실험을 수행하였으며, 자성 및 비자성 금속의 연마효과에 미치는 영향을 고찰하였다.

(3) 실험 결과 제작된 시스템이 안정적이고 예측 가능한 초정밀 연마에 적용이 가능함을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2009-0074199)의 일부이며 지식경제부 주관 전략기술개발사업 “마이크로 기능성 초정밀 핵심

요소부품 제조기반기술개발”의 제 4세부 “기능성 핵심요소부품 제조 초정밀 금형 기반기술 개발”의 결과로써 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] G. H. Kim, J. I. Sohn, G. S. Yoon, S. H. Lee, Y. M. Heo, M. Y. Cho, 2009, Proc. Kor. Soc. Manu. Tech. Eng. Autumn Conf.(editor: Jung. J. H), Pusan National University, Pusan, Korea, p. 131.
- [2] W. Kordonski, A. Shorey, 2007, Magnetorheological (MR) Jet Finishing Technology, J. Intell. Mater. Syst. Struct., Vol. 18, No. 12, pp. 1127~1130.
- [3] K. P. Hong, J. W. Lee, M. W. Cho, T. J. Je, 2011, Proc. Kor. Soc. Manu. Tech. Eng. (editor: Yang. M. Y), Jeju, Korea, p. 21.
- [4] J. W. Lee, S. J. Ha, B. C. Shin, D. W. Kim, M. W. Cho, H. J. Choi, 2012, Characteristics of MR Polishing using Carbonyl Iron Particles Coated with Xanthan Gum, Trans. Mater. Process., Vol. 21, No. 2, pp. 138~143.
- [5] M. Tricard, W. I. Kordonski, A. B. Shorey, C. Evansb, 2006, Magnetorheological Jet Finishing of Conformal, Freeform and Steep Concave Optics, CIRP Ann. Manuf. Technol., Vol. 55, No. 1, pp. 309~312
- [6] J. W. Lee, B. C. Shin, S. H. Choi, M. W. Cho, D. W. Kim, 2011, Proc. Kor. Soc. Manu. Tech. Eng.(editor: Yang. M. Y), Jeju, Korea, p. 585.