

Xanthan Gum으로 코팅된 Carbonyl Iron Particle를 이용한 자기유변유체 연마특성에 관한 연구

이정원¹ · 하석재¹ · 신봉철¹ · 김동우¹ · 조명우[#] · 최형진²

Characteristics of MR Polishing using Carbonyl Iron Particles Coated with Xanthan Gum

J. W. Lee, S. J. Ha, B. C. Shin, D. W. Kim, M. W. Cho, H. J. Choi

(Received November 29, 2011 / Revised February 15, 2012 / Accepted February 17, 2012)

Abstract

A polishing method using magnetorheological (MR) fluid has been developed as a new precision technique to obtain a fine surface. The process uses a MR fluid that consists of magnetic carbonyl iron (CI) particles, nonmagnetic polishing abrasives, water and stabilizers. But the CI particles in MR fluids cause a severe corrosion problem. When coated with Xanthan gum, the CI particles showed long-term stability in corrosive aqueous environment. The surface roughness obtained from the MR polishing process was evaluated. A series of experiments were performed on fused silica glass using prepared slurries and various process conditions, including different polishing times. Outstanding surface roughness of Ra=2.27nm was obtained on the fused silica glass. The present polishing method could be used to produce ultra-precision micro parts.

Key Words : Magnetorheological Fluid(MR Fluid), Carbonyl Iron Particle, Xanthan Gum, MR Polishing

1. 서 론

자기유변유체(MR fluid)를 이용한 연마공정은 표면 손상이 없이 재료의 다양한 종류, 형상, 크기에 대해 연마 할 수 있어서 높은 정밀도를 가지는 부품 및 제품의 연마를 위한 방법으로 사용되고 있다[1]. MR fluid를 이용한 연마공정은 carbonyl iron(ci-particle)과 비자성 연마제, 물이나 다른 비수성 유체, 그리고 분산안정제로 구성된 MR fluid를 기반으로 하고 있다[2]. MR fluid의 주된 재료 중 하나는 ci-particle로 MR fluid에 사용하는데 극심한 부식의 문제가 발생한다. 단지 비수성 유체 내에 ci-particle만 사용하여 연마는 가능하나, 재료

의 낮은 재료 제거율과 거친 표면 거칠기를 유발한다. 비자성 연마제와 물의 첨가는 재료 제거율의 증가시키고, 표면 거칠기를 향상시킬 수 있다. 그러나 물과 공기에 장시간 연마시 ci-particle의 산화에 의한 부식을 유발된다[3]. 이는 연마 형상에 대한 예측이 어렵고, 연마된 재료의 정확한 표면수치에 대한 결과분석이 힘들어진다. 또한 MR fluid의 수명을 단축시키는 원인이 된다. 따라서 최근에는 MR fluid내의 ci-particle 및 조성에 대한 유변학적인 연구가 활발히 진행되고 있다[4]. 그 중 ci-particle에 금속 산화물 층 코팅을 통해 이러한 문제를 해결을 위한 연구가 진행 중이다. 코팅은 부식에 잘 견디며 ci-particle에 코팅이 되어있는

1. 인하대학교 기계공학과
2. 인하대학교 고분자신소재공학과
교신저자: 인하대학교 기계공학과,
E-mail:chomwnet@inha.ac.kr

SiO₂와 ZrO₂와 같은 세라믹 산화물 코팅은 그 자체로 유용한 연마제이기 때문에 추가적인 제거 능력을 향상시킬 수 있다[5]. 그러나 코팅된 ci-particle은 표면 형상과 화학적 물성을 변화시키고, 낮은 점도를 유지하는 단점을 지니고 있다.

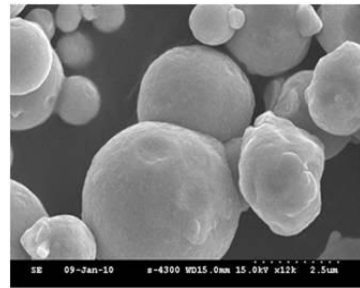
따라서 코팅이 된 ci-particle을 기반으로 하는 MR fluid의 자기적인 거동 분석 및 실질적인 적용하는데 있어 많은 연구가 필요하다. 본 연구에서는 수분과 친화성이 있는 xanthan gum로 표면처리된 ci-particle을 이용하여 Stability가 향상된 MR fluid를 제조하였으며, 제조된 MR fluid의 자기장의 세기에 따른 점성 및 중력에 대한 Stability 분석을 수행 하였으며 기존 사용되는 MR fluid와 xanthan gum으로 코팅된 MR fluid의 연마 실험을 통하여 비교 분석을 위한 연구를 수행하였다.

2. 조성된 자기유변유체의 분석

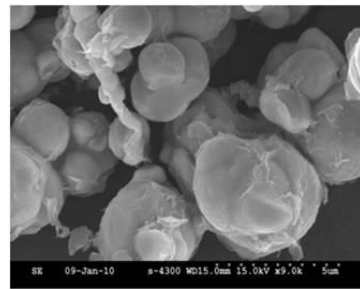
2.1 Xanthan gum 코팅 실험

Xanthan gum은 박테리아균의 발효에 의하여 얻어지는 미생물 exopolysaccharide로 D-glucopyranosyl, Dmannopyranosyl과 D-glucopyranosyl glucuronic acid 등으로 구성되어 있다. Xanthan gum은 이런 화학적 구조의 특징과 고분자라는 특성 때문에 낮은 농도에서도 높은 점성을 부여한다. Xanthan gum 분자의 3차원 그물망 구조는 현탁액과 유상액의 안정성을 부여한다고 보고되었다.

이들 구조는 온도에 의해서 크게 영향을 받는다. Xanthan gum 분자는 용해되는 온도에 의존하여 다른 구조를 보여주는데, 낮은 용해 온도(25~40℃)에서는 규칙적인 구조를 나타내면서 낮은 점도를 가지며 40~60℃의 높은 용해 온도에서는 불규칙적인 구조를 나타내면서 더 높은 점성 거동을 가지는 고유의 특성을 많이 가지고 있다. 대부분의 xanthan gum의 주요기능은 점도의 증가에 있다. Xanthan gum을 첨가하면 높은 전단율에서도 혼합물에 대한 점도에는 거의 영향을 주지 않는다. 코팅된 ci-particle 제작방법은 불순물을 제거하기 위해 먼저 ci-particle을 아세톤에 세척한 후 xanthan gum 과우더를 물과 함께 400rpm에서 30분 동안 혼합 후 교반한다. 이때의 중량비는 ci-particle : xanthan gum = 20 : 1의 비율로 혼합한다. 교반하는 동안 에탄올은 서서히 첨가시켜 주는데 이는 ci-particle표면에서 xanthan gum 입자들 사이의 수소 결합을 형성하는 데 이는 ci-particle의 코팅층 형성을 원활히 하기 위해서 이다.



(a) Uncoated CI particle



(b) Coated CI particle

Fig. 1 SEM images of CI particle

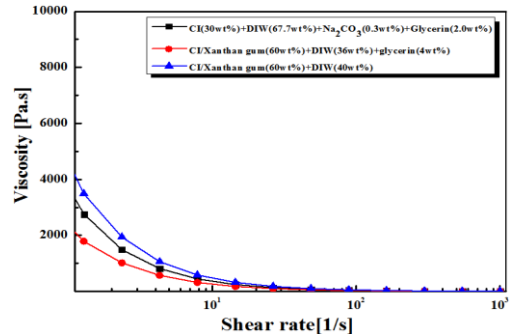


Fig. 2 Viscosity of uncoated and coated CI particle

2.2 자기장 세기에 따른 점성 변화

MR polishing은 자기장의 세기에 따라 MR fluid가 폴리싱 패드의 역할을 하기 때문에 자기장의 영향 따라 MR fluid의 점성에 대한 분석이 필요하다. 따라서 연마실험을 위해 조성이 되는 MR fluid와 코팅된 MR fluid의 점성 분석을 통해 코팅된 MR fluid의 연마를 위한 조성비 분석을 위한 연구를 수행하였다. MR fluid의 점성 분석을 위해 rotational rheometer(MCR 300, Physica, Stuttgart, Germany)를 이용하여 측정하였다. 20mm의 직경을 가지고 있는 rotational rheometer의 parallel-plate에 gap size는 0.8mm로 하여 분석을 수행하였다.

그 결과 Fig. 2와 같이 모든 유체가 전단율이 증가할수록 점도가 감소하였다. Xanthan gum으로 코팅되어진 ci-particle로 조성된 MR fluid가 기존 연마에 사용되는 MR fluid의 점성 보다 높으나 그 차이는 미세하므로 연마를 위한 점성으로는 크게 문제가 없음으로 판단된다. 또한 glycerin을 첨가하여 조성하였을시 점도가 2000Pa·s로 줄어들어 기존 4000Pa·s에서 반으로 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 따라서 glycerin은 수용성 기반으로 제작되는 MR fluid에 원활한 분산을 위해 일반적으로 사용되지만, MR fluid의 고유의 점성을 줄이는 문제점이 있음을 확인하였다.

2.3 침전을 측정

MR fluid는 빠른 응답시간, 높은 항복응력, 넓은 작동온도, 불순물에 대한 안정성등의 장점을 지니고 있으나 particle과 continuous phase와의 밀도차에 의한 침전의 문제를 지니고 있다. 따라서 장시간 연마를 위해서 ci-particle의 코팅을 통해 밀도를 변화시켜 침전 문제를 해결하는 연구를 수행하였다. 코팅된 ci-particle로 di-water와 함께 Stability가 향상된 MR fluid를 제조 후 중력에 대한 Stability를 기존의 침전율을 위해 제조되는 MR fluid와 코팅이 되어 있는 MR fluid의 침전율의 분석하였다.

분석 방법으로는 제조된 MR fluid를 test tube에 넣은 후 장시간동안 침전비율을 측정하였다. 침전율은 전체 Suspension의 높이에 대한 Particle-rich phase의 높이의 비율로 정의하였다. 측정 결과 Fig. 4에 보듯이 기존 ci-particle를 이용한 MR fluid는 약 10분 정도 경과 후 침전이 거의 진행되었으며, 코팅된 ci-particle를 이용한 MR fluid의 경우 서서히 침전이 계속 진행이 되고 있음을 확인할 수 있다.

이는 CI particle를 이용한 MR fluid 보다 코팅된 CI particle를 이용한 MR fluid가 Stability 측면에서 훨씬 안정적임을 확인할 수 있다.

3. 자기유변유체 연마실험

3.1 자기유변유체를 이용한 연마방법

MR polishing 공정은 MR fluid가 자기장의 영향을 받는 휠에 부착이 되어 지속적으로 회전하는 동안 연마가 진행이 되고 이 유체위로 Pump에 의해 di-water와 연마 슬러리를 공급한다. MR polishing 공정에서 자장의 분포 및 세기는 MR fluid의 항복

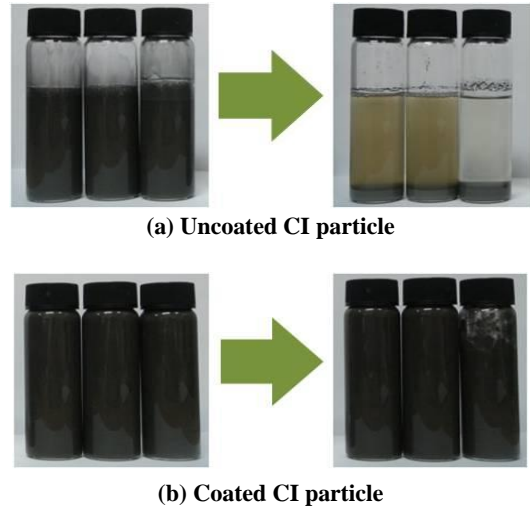


Fig. 3 Sedimentation of uncoated and coated CI particle

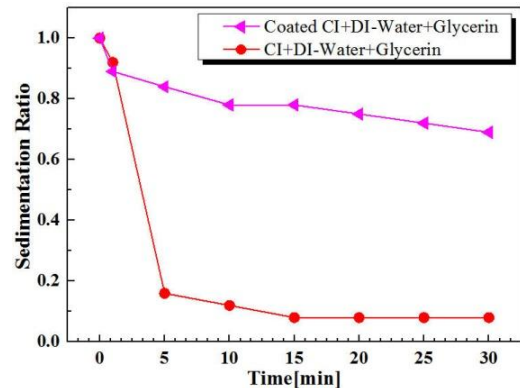


Fig. 4 Sedimentation test of uncoated and coated CI particle

응력을 상승시키므로 가공물의 재료 제거율에도 영향을 미치게 된다.[6]

MR fluid를 이용한 연마공정 중 재료제거율은 가공 영역에서 유동은 유체운환의 기본적인 방정식인 프레스톤 방정식(1)과 같다. 재료제거율 R은 가압력 P와 공작물과 polishing pad 사이의 상대속도 U에 의하여 제어된다. 여기서 프레스톤 상수는 연마재, 가공물, 패드 등에 의하여 정해지는 상수이다. 따라서 MR fluid에 의하여 정해지는 상수이다. 따라서 MR fluid에 의한 재료제거율은 압력구배, 상대속도, 자장에 의한 전단력에 의하여 제어된다.

$$R = kP|U| \quad (1)$$

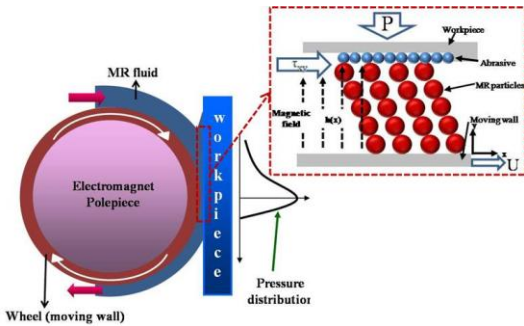


Fig. 5 The figure of polishing principle using a Magnetorheological

MR fluid를 이용한 연마 시스템 Fig 5와 같이 구성되어 있으며 MR fluid가 항상 휠에 부착되도록 하였으며 슬러리 주입구를 통하여 독립적으로 연마 슬러리를 유연하게 공급하도록 하였다. 이는 가공환경 및 친환경에 유해요소인 MR fluid의 최소량을 투입하여 연마환경을 만들 수 있고 연속적으로 제조하여 투입해야 할 번거로움도 없다. 또한 일정량의 연마재를 MR fluid에 독립적으로 공급을 해 줄 수 있기 때문에 연마 공정 시 최소량 투입과 동시에 투입량을 조절하여 안정적인 공정이 이루어 질 수 있도록 구성하였다.

X-Y축 및 가공물이 고정되는 회전축으로 구성되어 있고 리니어 스테이지(Newport 社)로 구현하였다. 가공물은 회전축 스테이지에 진공 흡착 방식을 통하여 고정된다. 공작물의 견고한 고정과 정확한 위치 제어는 시스템에 있어서 매우 중요한 요건이며 폴리싱 공정 초기 set-up에 대한 정밀도는 연마공정의 효율성을 좌우하게 된다. 따라서 고수준의 분해능을 가지는 레이저 센서를 사용하여 가공물의 고정중에 생기는 틸팅(Tilting)을 측정하였다.

3.2 자기유변유체를 이용한 연마실험

MR polishing 공정 중 연마 결과에 가장 중요한 요소로 MR fluid와 연마슬러리의 조성이다. 이는 연마공정 후 glass 표면 거칠기에 많은 영향을 미친다. 특히 연마슬러리는 재료에 따라 달라지기 때문에 미세 연마 가공 중에 중요한 부분을 차지하고 있다. 본 실험에서 유변학적 분석을 통해 조성된 두 개의 MR fluid와 연마슬러리는 나노 세리아 슬러리(Celexic Cx 94s Slurry)로 Fig. 7과 같이 입도 분석 결과 수 나노크기의 입자로 분포되어

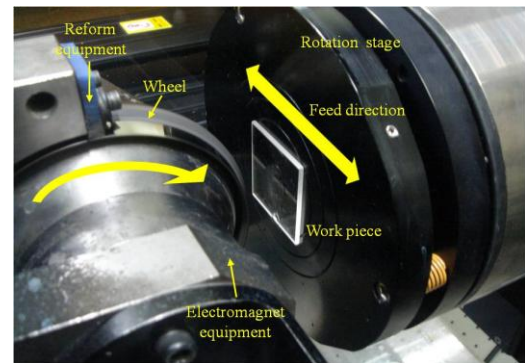
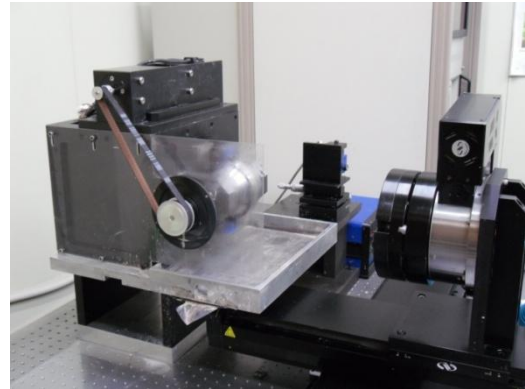


Fig. 6 Experimental setup for MR polishing of micro channels

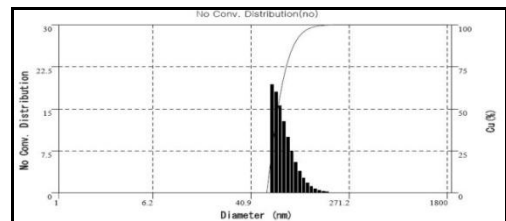


Fig. 7 Analysis of nano ceria slurry

있어 고품위의 표면 거칠기의 획득을 위해 사용하였다.

또한 MR Polishing에서 표면 거칠기에 중요한 영향을 미치는 요소로 휠 회전속도와 자기장, 연마시간, 가공 깊이 등이 있다. Table 1은 연마를 위한 연마 조건으로 휠 회전속도는 300rpm, 자기장의 세기는 4800A/m, 연마시간은 5분에서~20분까지 5분 간격으로 변경하였다. 연마 가공물과 휠 사이의 간격을 0.8mm로 유지하였다. 특히 자기장의 세기에 따라 연마특성이 달라지므로 실험을

Table 1 Experimental conditions for the MR polishing

	Wheel speed (rpm)	Electric current (A)	Magnetic field (A/m)	Polishing time (min)
1	300	1.0	4800	5
2				10
3				15
4				20

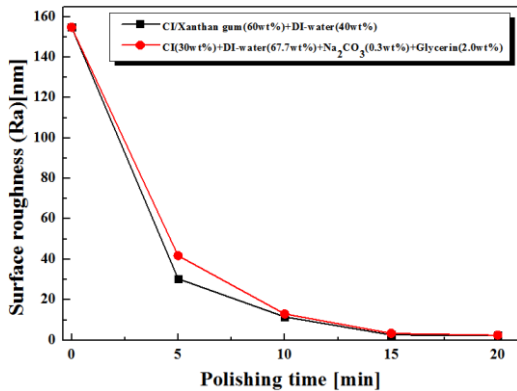


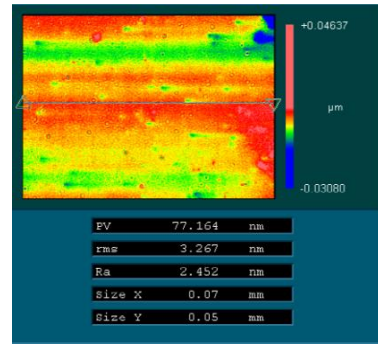
Fig. 8 Surface roughness variations according to MR Polishing time

수행 전 연마가 진행이되는 휠의 위치에서 가우스미터로 자기장의 세기의 변화를 측정결과 크게 변화가 없음을 확인하였다.

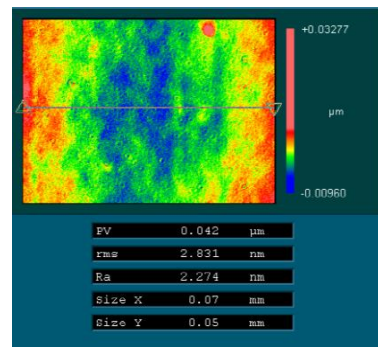
실험 결과는 비 접촉식 3차원 표면조도 측정기 (Zygo NV-6200)를 이용하여 고 배율에서 표면거칠기를 측정, 결과를 분석하였다.

실험 결과 Fig. 8,9와 같이 연마시간이 증가할수록 표면거칠기가 향상되는 것을 확인할 수 있다. 특히 연마시간이 10분까지는 표면거칠기가 큰폭으로 향상이되지만 그 이상의 연마시간이 증가하면서 표면거칠기의 향상이 크게 변화가 없음을 알 수 있다. 이 결과는 기존 MR fluid와 xanthan gum으로 코팅된 ci-particle로 조성된 MR fluid의 실험결과가 비슷한 경향이 보이는 것을 확인할 수 있다.

또한 각 연마시간에 따른 표면거칠기의 분석 결과는 xanthan gum으로 코팅된 MR fluid로 연마된 결과와 기존 연마시 사용되는 MR fluid 연마 결과 큰 차이가 없음을 확인하였다. 하지만 Fig. 8과 같이 동일한 연마 조건으로 비교시 코팅된 MR fluid로 연마시 낮은 표면거칠기 결과를 확인할 수



(a) Uncoated CI particle



(b) Coated CI particle

Fig. 9 Measured surface characteristics after MR polishing

있다. 이는 코팅 물질인 xanthan gum이 ci-particle의 보호막을 형성하여 자기장의 영향에 따라 형성되는 체인현상이 코팅으로 인하여 입자간의 거리가 멀어져 자기적 특성을 방해하고 재료 표면에 가하는 압력이 낮아져 재료제거가 작아지지만 표면거칠기가 향상됨으로 판단된다. 따라서 xanthan gum으로 코팅된 MR fluid가 다양한 자기장의 세기 및 시간에 따른 연마특성 분석 및 연구가 필요하며 이를 수행하면 더 좋은 결과가 예측이 된다.

4. 결론

본 연구에서는 MR polishing 공정을 위해 조성되는 MR fluid가 장시간 연마시 발생하는 산화에 의해 부식이 발생이 되는 문제로 인하여 연마형상 예측이 어려운 문제가 발생하며 또한 MR fluids의 수명을 단축시키는 원인이 된다. 따라서 이를 위하여 xanthan gum 코팅된 ci-particle을 제조하여 기

존 ci-particle 과의 유변학적 연구 및 연마실험을 수행 후 결과를 비교 분석을 하였다. 고품위의 표면거칠기를 위하여 나노세리아 슬러리를 연마제로 구성하였으며, fused silica glass 에 MR polishing 공정 시간에 따른 표면거칠기 변화에 대한 경향을 하였다. 수행된 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 코팅된 ci-particle로 제작된 MR fluid와 기준에 사용되어진 MR fluid의 유변학적인 분석결과 미세한 점도의 차이가 있지만 유체에 따른 침전에 대한 문제점은 향상이 됨을 확인할 수 있다.

(2) 연마실험결과 시간이 증가됨에 따라 표면거칠기가 향상이 되는 것을 확인 할 수 있었으며, xanthan gum으로 코팅된 ci-particle로 조성된 MR fluid 또한 유사한 경향을 확인할 수 있었다. 하지만 각 공정 시간에 따른 결과에 대한 차이가 발생을 하게 되는 것을 확인하였다. 따라서 이를 분석 하기 위해 연마시 부여되는 gap에 따라 발생하는 압력 즉 수직력(normal force)의 측정을 통해 표면 거칠기의 예측이 필요하다고 사료된다.

향후 MR polishing 의 연마 및 환경의 성능향상을 위한 지속적인 실험 및 MR fluid 의 유변학적 분석을 통해 최적 가공조건을 도출을 위한 연구가 수행된다면 미세연마공정 적용에 충분히 가능 하리라 예상된다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2009-0074199)

참 고 문 헌

- [1] J. W. Lee, D. W. Kim, M. W. Cho, 2009, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf. 2009 Spring Meeting(ed. Y. T. Keum), Proc. Kor. Soc. Tech. Plast., Incheon, Korea, pp. 78~83.
- [2] J. W. Lee, D. W. Kim, B. C. Shin, M. W. Cho, T. J. Je, 2010, J. Kor. Soc. Prec. Eng. 2010 Spring Meeting(ed. E. S. Lee), J. Kor. Soc. Prec. Eng., Jeju, Korea, pp. 689~690.
- [3] S. N. Shafrir, H. J. Romanofsky, M. Skarlinski, M. Wang, C. Miao, S. Salzman, T. Chartier, J. Mici, J. C. Lambropoulos, R. Shen, H. Yang, S. D. Jacobs, 2009, Zirconia-coated carbonyl-iron-particle-based magnetorheological fluid for polishing optical glasses and ceramics, App. Optic., Vol. 48, No. 35, pp. 6797~6810.
- [4] B. J. Park, I. B. Jang, H. J. Choi, A. Pich, S. Bhattacharya, H. J. Adler, 2006, Magnetorheological characteristics of nanoparticle-added carbonyl iron system, J. Magn. Magn. Mater., Vol. 303, No. 2, pp. 290~293.
- [5] C. Miao, R. Shen, M. Wang, S. Shafrir, H. Yang, S. Jacobs, 2011, Rheology of Aqueous Magnetorheological Fluid Using Dual Oxide-Coated Carbonyl Iron Particles, J. Am. Ceram. Soc., Vol. 94, No. 8, pp. 2386~2392.
- [6] D. W. Kim, M. W. Cho, T. I. Seo, Y. J. Shin, 2008, Experimental Study on the Effects of Alumina Abrasive Particle Behavior in MR Polishing for MEMS Applications, J. Sensors., Vol. 8, No. 1, pp. 222~235.