

습식자기연마(WMAP)에서 입자의 구속과 가공효과에 관한 연구[§]

손출배* · 진동현** · 곽재섭***

* 한국정밀(주), ** 부경대학교 기계공학과

Study on Abrasive Adhesion and Polishing Effect in Wet Magnetic Abrasive Polishing

Chul-Bae Son^{*}, Dong-Hyun Jin^{**} and Jae-Seob Kwak^{***†}

^{*} Hankuk Precision Co. LTD

^{**} Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong Nat'l Univ.

(Received April 9, 2014 ; Revised May 2, 2014 ; Accepted May 2, 2014)

Key Words: Wet Magnetic Abrasives Polishing(습식자기연마), Abrasives Adhesion(연마재 구속), Polishing Efficiency(가공 효율), Highly Viscous Matter(고점성 물질)

초록: 일반적인 자기연마가공에서 브러쉬는 연마입자와 자성입자 그리고 약간의 절삭유가 혼합되어 형상을 갖는다. 그러나 공구가 고속으로 회전하게 되면 대부분의 연마입자는 원심력의 증가로 공구에서부터 떨어져나간다. 이러한 현상은 가공 효율을 저하시키는 결과를 야기한다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방법 중 하나는 절삭유 대신에 실리콘 겔과 같은 고점성의 물질을 사용하여 입자의 구속을 증가시키는 것이다. 연마입자의 과도한 탈락에 대응하는 또 다른 방법은 습식자기연마(WMAP)이다. 습식자기연마는 절삭유가 공작물의 표면에 충분히 공급된 상태의 자기연마를 의미한다. 본 연구에서는 습식자기연마에서 구속된 연마입자의 구속량과 표면거칠기 향상의 상관관계를 분석하였다. 그 결과 습식자기연마에서 연마입자의 구속률이 낮음에도 불구하고 표면거칠기가 더 많이 향상됨을 알 수 있었다.

Abstract: In a conventional magnetic abrasive polishing process, the polishing abrasives are mixed with ferrous particles and slight cutting oil to form a cluster of abrasives. However, when a tool rotates at a high revolution speed, most of the polishing abrasives are scattered away from it due to the increase in centrifugal force. This phenomenon directly reduces the polishing efficiency. The use of a highly viscous matter such as silicone gel instead of cutting oil for mixing is one method to solve this problem and increase abrasive adhesion. Another method to avoid high abrasive scattering is the application of wet magnetic abrasive polishing (WMAP). In WMAP, abundant mineral oil is preliminarily applied to the workpiece surface. This study experimentally evaluated the effect of WMAP on abrasive adhesion. The relationship between the amount of working abrasives and polishing conditions was characterized. Despite the lower adhesion ratio of polishing abrasives, the surface roughness was found to be significantly improved as the result of WMAP.

1. 서 론

최근 항공, 반도체 등 다양한 산업분야의 발전으로 부품들에 대한 높은 정밀도가 요구되고 있다.

그러나 산업계에서 활용되고 있는 마이크로나노 단위의 표면정밀도는 CMP 등과 같은 폴리싱 기술에 의존하고 있는 현실이다.

자기연마가공은 이러한 산업계에서 요구하고 있는 표면정밀도를 충족시키기 위한 가공방법들 중의 하나로, 페리데이의 법칙을 공학적으로 응용한 것이다.⁽¹⁾ 자기연마가공은 기존의 연마가공과 달리 유연한 공구를 사용하여 공작물 표면을 정밀하게 연마하는 방식이다. 자기연마공정에서 사용

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2014. 4. 24.-25., 라마다프라자호텔) 발표논문임

† Corresponding Author, jskwak5@pknu.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

하는 공구는 자성입자와 연마입자를 용융결합 또는 단순혼합하여 사용한다.^(2,3) 자기력선 방향으로 연마입자와 자성입자가 정렬하여 브러쉬 형상을 유지하고 공구가 회전하면서 금속표면을 연마하는 가공법이다.

Kwak 등⁽⁴⁾은 자기연마가공에서 공구의 회전으로 생성된 원심력에 의해 연마입자가 공구로부터 탈락하고 공구의 끝에 구속된 연마입자의 양이 공작물의 표면거칠기에 영향을 미침과 공구에 구속된 연마입자의 양이 일정비율 이상일 때 정상적인 가공이 가능함을 제시하였다. 그리고 공구에 구속된 연마입자의 분포형상은 자기력의 영향을 받는다는 것을 규명하였다. 또, 1600rpm에서 가장 많은 표면거칠기의 향상이 이루어지는 것을 실험적으로 확인하였다. Kim 등⁽⁵⁾은 연마입자의 매개물로 점도가 높은 실리콘 겔을 이용하고 가공시간을 동일하게 하였을 때, 오일을 이용한 가공보다 높은 가공효율을 보임을 규명하였다. 자기연마공정에서 공구가 회전할 때 원심력에 의해 연마입자가 탈락하게 되고 입자의 탈락으로 인하여 가공효율이 감소하는 현상이 생긴다. 따라서 입자의 분포특성과 가공효율 사이의 관계를 규명할 필요가 있다.⁽⁶⁾

본 논문에서는 자기연마공정의 가공효율 향상을 위해 공작물의 표면에 충분한 오일을 공급하고, 습식자기연마가공을 실시하여 연마입자의 구속률과 표면거칠기 향상을 평가하고자 한다.

2. 습식자기연마(WMAP)

일반적인 자기연마공정에서는 연마입자와 자성입자 그리고 매개물인 오일을 혼합하여 사용한다. 공구가 회전하면 원심력에 의해서 연마입자의 탈락이 발생하는데 이것으로 인해 가공에 참여하는 연마입자의 양이 감소되어 가공효율이 저하된다. 자기연마공정에서 자기력을 매우 크게 증가시키면, 더 많은 표면거칠기의 향상을 기대할 수 있다. 그러나 실제 자기연마장치에서 자기력을 증가시키기 위해서는 코일의 감긴 횟수를 증가시켜야 하고, 이는 장치의 무게와 코일의 발열이 증가해서 정밀도를 저하시키는 요인으로 작용하게 될 것이다. 또, 자기력의 크기에 따라서 공작물이 자화(Magnetization)하는 현상 등의 문제가 발생하기 때문에, 자기력을 매우 크게 증가시키는 것에 한계가 있다.

따라서 자기력의 크기를 증가시키지 않고도 연마입자들의 효과를 증가시킬 수 있는 방안이 요구된다. 그 중 한가지 방법이 습식자기연마(Wet

Table 1 Conditions of magnetic brush

Items	Conditions
Combination	GC(#1500) + Fe powder(#100) + Mineral oil(300cSt)
Mixing ratio	2:2:1(GC:Fe-powder:Mineral oil)
Amount of abrasives	2g

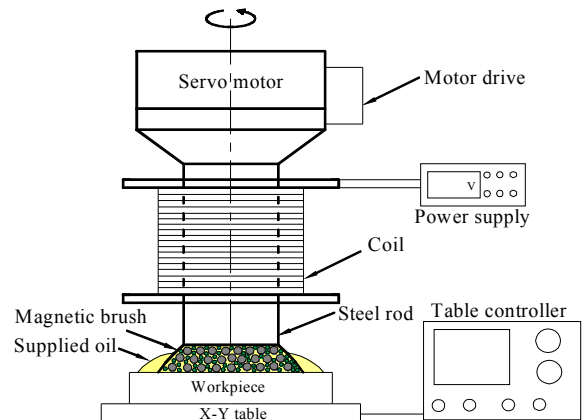


Fig. 1 Wet magnetic abrasives polishing

magnetic abrasive polishing, WMAP)이다.^(7,8) 습식자기연마공정은 가공 전 공작물의 표면에 충분한 양의 오일을 공급하고, 가공효율을 높이는 공정이다. Fig. 1은 본 연구에서 적용한 습식자기연마공정을 도식적으로 나타낸 것이다.

3. 실험 장치 및 조건

Table 1은 습식자기연마가공에서 사용된 연마입자의 구성과 혼합비 등을 나타낸 것이다. #100 크기의 자성입자와 #1500 크기의 탄화규소 세라믹 입자, 300cSt의 점도를 가지는 오일을 각각 2:2:1의 질량비로 혼합하여 사용하였다. 초기에 공구에 부착시킨 연마입자의 양은 2g이며 모든 실험에서 동일하게 적용하였다.

Table 2는 습식자기연마가공을 위한 실험조건을 나타낸 것이다. 공작물은 다른 소재에 비해 경도가 높은 냉간금형강인 SKD-11을 사용하였다. 공구의 직경은 16mm이고, 공작물의 표면에 공급된 오일의 양은 3.5ml로 하였다. 자속밀도와 공구의 회전수는 각각 20, 40, 60mT와 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800rpm을 적용하였다. 공구와 공작물의 간극은 1mm, 이송속도는 100mm/min, 가공시간은 20분으로 모든 실험에 동일하게 적용하였다. 자기연

Table 2 Experimental conditions for WMAP

Items	Conditions
Workpiece	SKD-11(60x40x7mm)
Amount of supplied oil on the workpiece surface	3.5ml
Magnetic flux density	20, 40, 60mT
Spindle speed of tool	800, 1000, 1200, 1400 1600, 1800rpm
Working gap	1.0mm
Feed	100mm/min
Working time	20min
Tool diameter	16mm

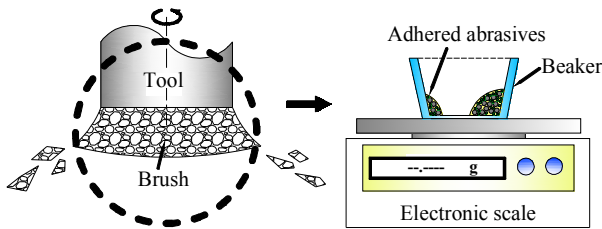


Fig. 2 Measurement of adhered abrasives on a tool

마와 습식자기연마를 실시하고 표면거칠기 향상과 공구에 부착된 입자의 잔여량을 측정하였다.

본 연구에서 연마입자의 잔여량은 Fig. 2에 도시한 것과 같이, 자기연마가공 전후에 공구에 부착되어 남아있는 입자들의 무게를 측정하여 그 비로 구속률(Adhesion ratio)을 구하였다.

4. 실험 결과

습식자기연마 실험에 앞서 공구의 회전수 변화에 따른 입자의 구속률을 평가하였다. Fig. 3은 입자의 구속률을 나타낸 것이다. 실험에서 구속률은 공구가 회전하여 안정이 되는 5분 후에 측정하였다. 입자의 구속률은 실제 가공에 참여하는 입자의 양을 의미한다. 공구의 회전수가 증가함에 따라 원심력이 증가하고 원심력에 의해 입자가 공구로부터 탈락하기 때문에 입자의 구속률이 감소하는 것을 알 수 있다.

또, 공구의 회전수가 같을 때 자기력이 증가함에 따라 입자의 구속률이 증가하는 것을 알 수 있는데, 이는 자기력이 증가하면서 공구의 끝에 구속되는 자성입자의 양이 증가하기 때문이다. 공구의 회전수가 증가하면서 입자가 급격하게 줄어드는 구간이 존재하는 것을 알 수 있다.

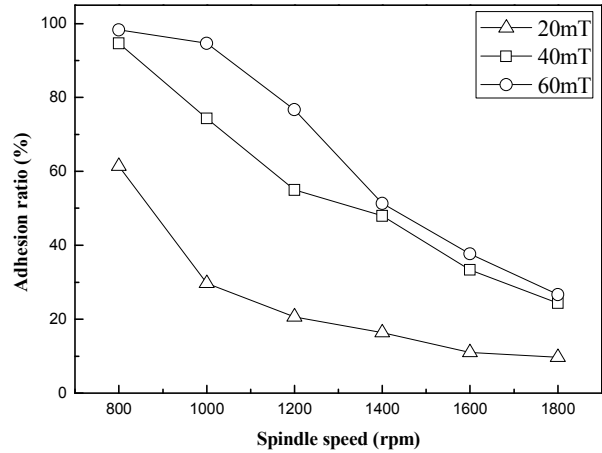
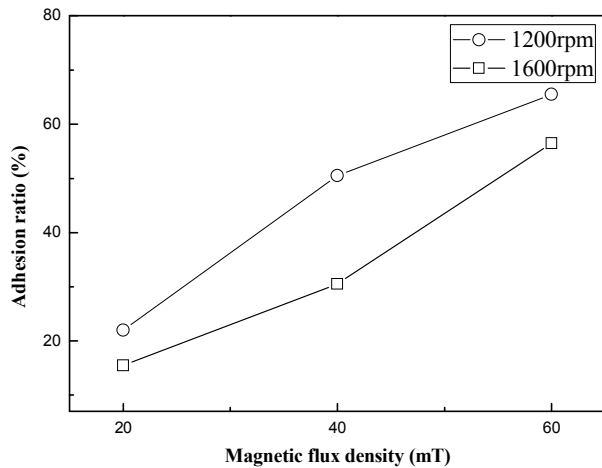
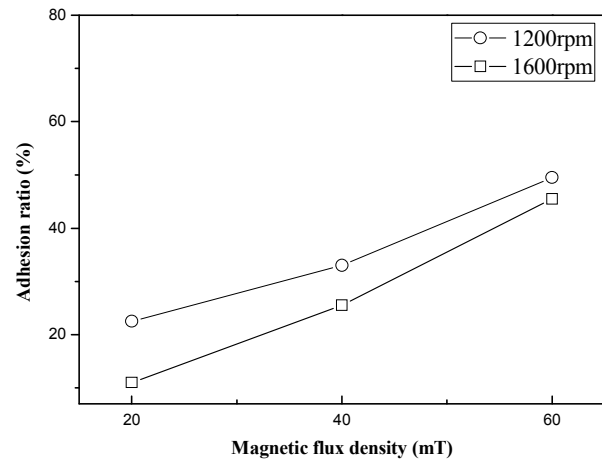


Fig. 3 Measurement of adhered abrasives on a tool



(a) Magnetic abrasives polishing



(b) Wet magnetic abrasives polishing

Fig. 4 Adhesion ratio of magnetic abrasives on a tool

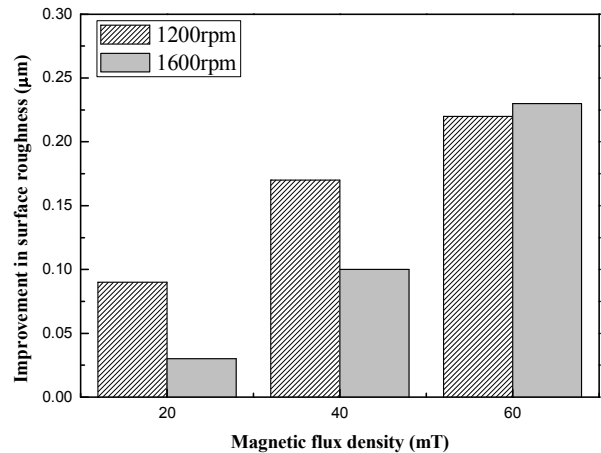
Fig. 4는 일반적인 자기연마와 습식자기연마에서 자속밀도에 따른 연마입자의 구속률 변화를 나타낸 것이다. 공구의 회전수가 1200rpm 이고, 자속밀도가 20mT 일 때는 입자의 구속률은 변화가 없다.

그 이유는 낮은 자속밀도에서 연마입자의 구속률은 공구가 회전하면서 생기는 원심력에 크게 영향을 받기 때문이다. 이 경우를 제외하면 대체적으로 자속밀도가 증가함에 따라 구속된 연마입자의 양이 증가한다. 그러나 공구의 회전속도가 증가함에 따라 구속된 연마입자의 양이 감소하는 것을 알 수 있다. 그리고 자기연마와 습식자기연마를 비교하였을 때 습식자기연마에서 공구에 더 적은 양의 연마입자가 구속됨을 알 수 있다. 특히 공구의 회전수가 1200rpm이고 자속밀도가 40mT일 때 입자의 구속률이 가장 큰 차이를 보이고, 기존의 자기연마에 비해 전체적으로 약 22% 감소하였다. 이러한 현상은 습식자기연마에서 연마입자는 유체 저항성으로 인해 전단력이 발생하여 브러쉬로부터 더 많은 양의 연마입자가 탈락하기 때문이다.

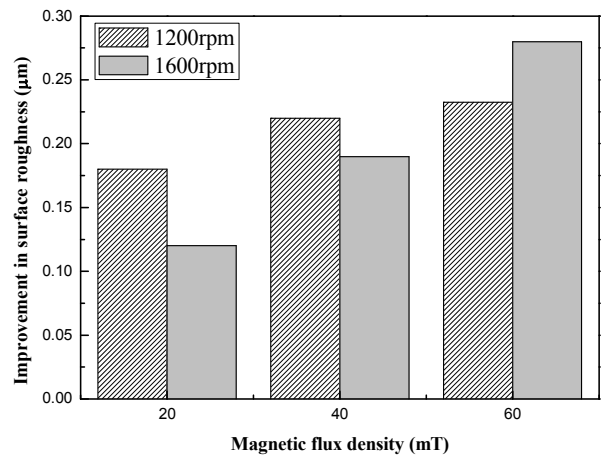
습식자기연마의 가공효과를 평가하기 실험을 진행하였고, 표면거칠기 향상 정도(Improvement in surface roughness)를 Fig. 5에 나타내었다. 가공 전 공작물의 평균 표면거칠기는 0.7 μ m이다. 자속밀도가 증가함에 따라 표면거칠기 향상 정도가 대체적으로 높아짐을 알 수 있다. 그러나 자기연마와 습식자기연마에서 자속밀도가 20, 40mT이고, 공구의 회전수가 1200rpm에서 모두 표면거칠기의 향상이 1600rpm에서의 표면거칠기의 향상보다 높은 것으로 나타난다. 이러한 현상은 낮은 자속밀도에서는 원심력이 입자의 구속률에 많은 영향을 미치기 때문에, 공구의 회전수가 증가할수록 입자의 탈락이 많아지고 표면거칠기의 향상이 낮아진다. 이에 반해 공구의 회전수가 1600rpm이고 자속밀도가 60mT일 때, 표면거칠기의 향상이 가장 높게 나타났다. 그 이유는 높은 자속밀도의 자기연마가공에서는 입자의 구속률은 공구의 회전수보다 자속밀도의 영향을 크게 받기 때문이다.

실험결과에서 습식자기연마가공은 기존의 자기연마에 비해 표면거칠기가 평균적으로 약 45% 향상됨을 알 수 있었다. 그 이유는 기존 자기연마가공에서는 공구가 회전하면서 연마입자의 탈락이 발생하고, 탈락한 연마입자가 가공에 영향을 미치지 못한다. 그러나 습식자기연마가공에서는 공구의 회전에 의해 탈락한 연마입자도 일정한 범위 내에서 사전에 공급된 오일과 같이 회전하면서 상대운동을 하기 때문이다. 거칠기 향상에 기여한다.

Fig. 6은 공구의 회전수가 1600rpm이고 자속밀도를 20, 40 및 60mT로 변화시켜 실험한 후 브러쉬의 상태를 나타낸 것이다. 자속밀도가 증가함에 따라 연마입자가 크라운(Crown) 형태로 길게 늘어짐을 알 수 있다. 가공 후 공구에 붙어있는 크라운



(a) Magnetic abrasives polishing

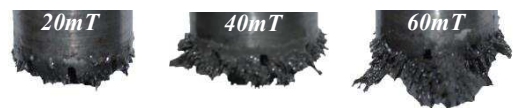


(b) Wet magnetic abrasives polishing

Fig. 5 Improvement of surface roughness



(a) Magnetic abrasives polishing



(b) Wet magnetic abrasives polishing

Fig. 6 Magnetic brushes according to magnetic flux density

운 형태의 연마입자가 길수록 구속된 연마입자의 양이 많아지는 것을 의미하고, 구속된 연마입자의 양이 많을수록 가공에 실질적으로 참여하는 연마입자의 양이 증가하게 된다.

또한, 기존의 자기연마와 습식자기연마의 브러쉬 형태를 비교하면, 습식자기연마에서 입자의 구속률이 더 적음을 알 수 있다. 이는 입자의 구속

량에 따른 표면거칠기의 향상과 비교하였을 때, 상반되는 결과이다. 이러한 결과가 얻어지는 이유를 설명하기 위해 Fig. 7을 나타내었다. 습식자기연마에서는 유체의 저항으로 인해 전단력이 발생하여 연마입자가 브러쉬로부터 더 많이 탈락하고, 연마입자의 구속률이 기존의 자기연마보다 낮아진다. 그러나 기존의 자기연마와 달리, 탈락한 연마입자도 일정한 범위 내에서는 사전에 공급된 오일과 같이 회전하여 공작물과 상대운동을 하면서 가공에 참여하고 표면거칠기를 향상시킨다.

Fig. 8은 기존의 자기연마와 습식자기연마의 실제 가공사진을 나타낸 것이다. 습식자기연마에서는 공구가 회전하면서 공작물의 표면에 있는 오일을 전체적으로 회전시켜 브러쉬의 면적이 증가하였다. 가공하는 면적이 증가하였기 때문에 더 넓은 면적을 가공할 수 있음을 알 수 있다.

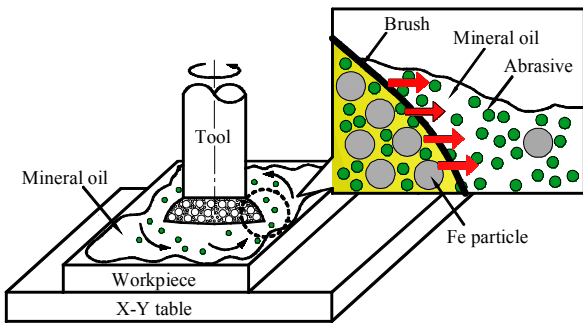
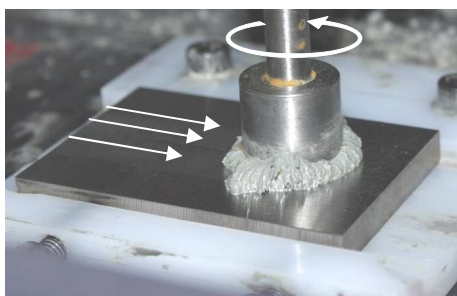
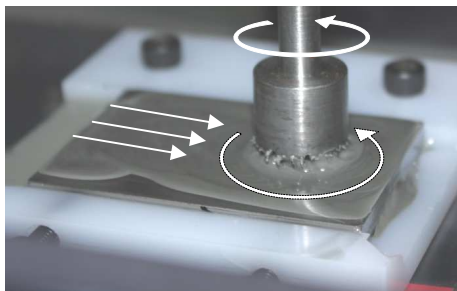


Fig. 7 Effect of polishing abrasives into mineral oil



(a) Magnetic abrasive polishing



(b) Wet magnetic abrasive polishing

Fig. 8 Actual polishing at MAP and WMAP

5. 결론

본 연구에서는 공작물의 표면에 충분한 오일을 공급하는 습식자기연마를 적용하고, 연마입자의 구속률과 표면거칠기 향상을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 습식자기연마가공에서 연마입자의 구속률은 기존의 자기연마가공과 비교하였을 때, 평균적으로 약 22% 감소하였다.

(2) 동일한 가공조건에서 습식자기연마가공이 기존의 자기연마가공보다 평균적으로 약 45% 표면거칠기 향상을 나타내었다.

(3) 습식자기연마가공에서는 입자의 구속률이 낮음에도 불구하고 표면거칠기가 향상되었다. 그 이유는 탈락한 입자들이 일정한 범위 내에서는 오일과 같이 회전하면서 가공에 참여하기 때문임을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2014년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌 (References)

- (1) Kwak, T. S. and Kwak, J. S., 2012, "Magnetic Abrasive Polishing and Its Application," *Journal of the Korean Society Precision Engineering*, Vol. 29, No. 3, pp. 226~272.
- (2) Chang, G. W., Yan, B. H. and Hsu, R. T., 2002, "Study on Cylindrical Magnetic Abrasive Finishing Using Unbonded Magnetic Abrasives," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, pp. 575~583.
- (3) Sin, D. K., Jain, V. K., Raghuram, V. and Komanduri, R., 2005, "Analysis of Surface Texture Generated by a Flexible Magnetic Abrasive Brush," *WEAR*, Vol. 259, pp. 1254~1261
- (4) Kwak, T. S. and Kwak, J. S., 2013, "Magnetic Abrasive Polishing Technology with Ceramic Particles," *Journal of the Korean Society Precision Engineering*, Vol. 30, No. 12, pp. 1253~1258.
- (5) Kim, S. O. and Kwak, J.S., 2010, "Study on Performance Improvement in Magnetic Abrasive Polishing Assisted by Silicone Gel Medium," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, No. 10, pp. 1499~1505.
- (6) Shimada, K., Shuchi, S., Kanno, H., Wu, Y. and Kamiyama, S., 2005, "Magnetic Cluster and Its Applications," *Journal of the Magnetism and*

- Magnetic Materials*, Vol. 289, pp. 9~12
- (7) Lee, Y. C., Kim, K. S., Kwak, T. S. and Lee, J. R., 2013, "An Experimental Study on Magnetic Assisted Polishing of Polycarbonate Plate for Recycling," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 12, No. 3, pp. 1~6
- (8) Furuya, T., Wu, Y., Nomura, M., Shimada, K. and Yamamoto, K., 2008, "Fundamental Performance of Magnetic Compound Fluid Polishing Liquid in Contact-Free Polishing of Metal Surface," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 201, pp. 536~541