

미세공구와 자기체인구조를 이용한 초정밀 폴리싱 특성

박성준[#], 안병운^{*}, 이상조^{**}

Nano-scale Precision Polishing Characteristics using a Micro Quill and Magnetic Chain Structure

Sung-Jun Park[#], Byung-Woon Ahn^{*}, Sang-Jo Lee^{**}

ABSTRACT

A new polishing technique for three dimensional micro/meso-scale parts is suggested using a micro quill and a magnetic chain structure. The principle of this method is to polish the target surface with the collected magnetic brushes at a micro tool by the non-uniform magnetic field generated around the tool. In a typical magnetic abrasive finishing process magnetic particles and abrasive particles are unbonded each other. But, to finish the three dimensional small parts bonded magnetic abrasive have to be used. Bonded magnetic abrasives are made from direct bonding, and their polishing characteristics are also examined. Alumina, silicon carbide and diamond micro powders are used as abrasives. Base metal matrix is carbonyl iron powder. It is found that bonded magnetic abrasives are superior to unbonded one by experiment. Finally, the polished surface roughness is evaluated by atomic force microscope.

Key Words : Micro quill (미세공구), Magnetic chain structure(자기체인구조), Magnetic abrasive (자성연마입자), Polishing (폴리싱), Magnetic field (자기장), Surface roughness (표면거칠기)

1. 서론

최근 전 세계적으로 전자산업, 광학부품 산업, 생체 및 의학 분야 등 첨단 기술이 발전하고 있으며 사용 되는 기기나 구성 요소에

대하여 부품의 미세화, 초정밀화 및 경량화에 대한 요구가 급속히 증가하고 있다. 이러한 배경으로 인하여 초정밀 형상 부품에 대한 수요 역시 꾸준히 늘고 있으며, 미세 부품 제작기술 또한 같이 발전하고 있다.

비구면 렌즈, 마이크로 렌즈 및 마이크로 방전가공에 의한 몰드와 같은 미세부품은 형상정밀도와 표면품질(surface integrity)가 제품의 성능을 좌우하게 되지만, 이와 같은 3 차원 형상의 부품에 대한 표면품질 개선기술은 그리 흔하지 않다.

일반적인 피니싱 방법으로는 연삭, 패드를 이용한 방법 등이 있지만, 연삭숫돌과 패드를 소형으로 제작하기가 곤란하기 때문에 미세부품에 적용하기에는 어려운 점이 많다.

최근에 개발되고 있는 미세부품에 대한 표면

접수일: 2004 년 1 월 13 일; 게재승인일: 2004 년 4 월 9 일

[#] 교신저자: 연세대학교 나노과학기술연구원

Email: sjpark@yonsei.ac.kr Tel: (02) 2123-2818

^{*} 서울산업대학교 대학원 기계공학과

^{**} 연세대학교 기계공학부

품위 개선 기술로는 우선 자기장으로 기능성 입자를 구속하여 유연한 공구로 사용하는 방법인 MAP(Magnetic Abrasive Process)^{1,2}, 전위차에 의해 dielectrophoresis 현상이 나타나는 전기유변유체를 이용한 ERF(Electro-Rheological Finishing)^{3,4} 방법과 현재 널리 사용되고 있는 화학적 기계적 광역 평탄화공정인 CMP(Chemical Mechanical Polishing) 등과 같은 방법이 있다.

이러한 가공방법 중에 가장 많이 활용되고 있는 것은 CMP 라고 할 수 있다. 이 공정은 슬러리와 가공대상재료의 화학적 조성에 의해 발생하는 화학적 작용과 동시에 슬러리와 패드, 박막사이의 상대운동에서 발생하는 트라블로지적인 요소에 의해 박막의 표면에서 원자단위로 재료를 제거해 나가는 공정이다. 슬러리의 유동문제, 표면거칠기의 시간적 변화 및 공정 종료시점 검출의 어려움, 대면적 압력전달등 여러 문제점이 있지만, 초정밀 연마 기술로서뿐만 아니라 차세대 대규모 직접회로 공정의 일부로 인식되어 가고 있다. 하지만 CMP 공정을 미세 부품의 표면개선에 적용하기에는 가공기구상 제약이 많다.

MAP 방법과 ERF 방법은 전기장 또는 자기장에 의해 기능성 입자들이 공구와 공작물 사이에 체인구조로 정렬하게 된다. 이러한 체인구조의 형성이 유연한 공구의 역할을 하게 되므로 소모성의 패드가 불필요하고 입자 및 공구의 크기에 따라 원하는 영역만 선택적으로 폴리싱할 수 있는 공정으로 미세부품에 적용하기에 유리한 방법이다.

따라서, 본 연구에서는 3 차원 형상 미세 부품의 표면품위 개선 및 선택적 폴리싱 등에 폭넓게 적용하기 위하여 MAP 방법에 대한 기초적인 연구를 수행하였다. 또한, 자기력을 발생하기 위한 전자석을 설계, 제작하였고 기능성 입자인 자성연마입자를 제조하여 폴리싱 특성과 가공변수에 따른 성능을 분석하고 평가하여 미세부품의 표면품위 개선기술로 적용하고자 하였다.

2. Magnetic abrasive process

일반적으로 자기유변유체를 이용한 비구면 렌즈의 폴리싱이나 CMP 의 경우에는 연마입자를 혼합하여 사용하게 된다.⁵ 하지만, 미세 공구를 이용할 경우에는 Fig. 1 에 나타낸 것처럼 상대적으로 자기장의 세기가 낮은 쪽으로 연마입자가 이동하

고 공구 회전으로 인한 원심력의 영향으로 가장자리에 모이게 되므로 공구를 이동하게 되면 연마입자가 탈락하게 된다. 이러한 현상은 폴리싱 성능을 감소시키는 요인으로 작용하게 되며 4 절에 실험 결과를 나타내었다.

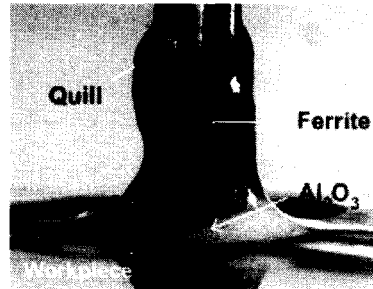


Fig. 1 Separation of magnetic particle and abrasive particle

하지만, 자성입자를 연마입자와 결합하여 사용하게 되면 Fig. 2(b)에 보이는 것처럼 연마입자의 탈락현상을 방지할 수 있으며, 연마입자가 고루 분포되고 회전에 의한 전단력의 크기가 증가하므로 혼합된 형태와 비교하여 가공성능이 향상될 것을 쉽게 예측할 수 있다.

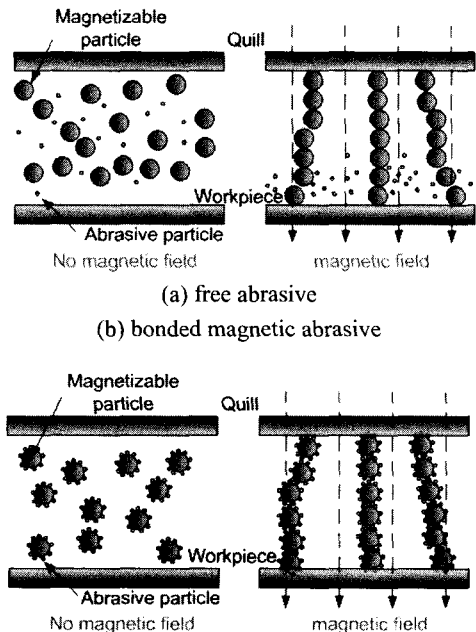


Fig. 2 Comparison of the magnetic abrasive process

2.1 입자 제조

2.1.1 기존 입자 제조 방법^{6,7}

알려진 자성연마입자 제조 방법으로는 소결이나 플라즈마에 용융에 의한 방법이 있으며 두 방법의 입자제조 공정은 Fig. 3 에서 나타낸 바와 같이 매우 유사하다.

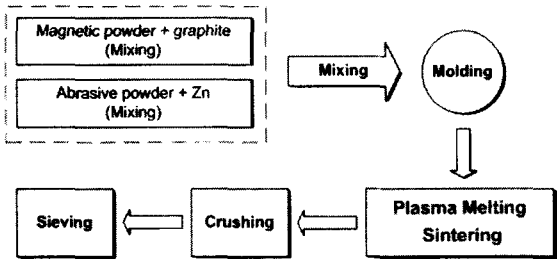


Fig. 3 Magnetic abrasive fabrication process by plasma melting (or sintering) method

기존의 입자 제조 방법으로 생산된 자성연마입자는 입자간의 결합력이 매우 우수하지만 공정이 복잡하며, 입자간의 밀도차이에 의한 편석이 발생하여 입자선택의 제약이 있다. 또한, 플라즈마 발생기, 진공로 및 프레스와 같은 고가의 장비를 필요로 한다.

Fe 계 자성입자의 퀴리점(curie point)은 일반적으로 400~900℃ 이지만 용융 온도가 1500℃ 이므로 자성입자가 용융되면서 자성이 강자성에서 상자성으로 변화되어 자력의 세기가 낮아지게 되는 단점이 발생하게 된다.

2.1.2 결합제에 의한 제조 방법

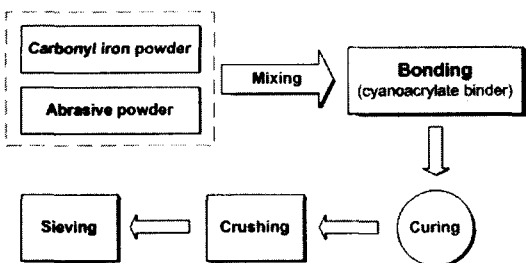


Fig. 4 Magnetic abrasive fabrication process by direct bonding method

본 연구에서는 기존의 자성연마입자 제조 방법의 문제점에 대한 대안으로 결합제에 의한 직접 결합 방식으로 자성연마입자를 제조하는 방법을 선택하였다.

결합제에 의한 제조 공정은 Fig. 4 에 나타내었다. 제조 공정이 기존 제조방법에 비하여 단순하며 제조 시간이 매우 짧은 장점이 있다. 또한, 기존 제조 과정에서 사용되었던 플라즈마 발생기, 진공로 등의 고가의 장비를 이용할 필요가 없으므로 제작 비용이 매우 저렴하다.

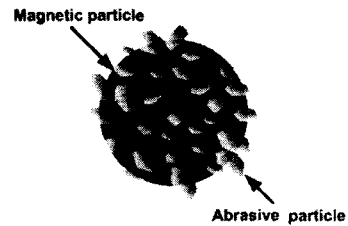


Fig. 5 Bonded magnetic abrasive

결합된 자성연마입자의 형상은 Fig. 5 에 나타낸 것과 같이 자성입자와 연마입자가 결합제에 의하여 결합되며 하나의 자성입자 외곽을 여러 개의 작은 연마입자가 뒤덮는 형태가 자성연마입자의 가장 이상적인 결합 형태이다.

기존 제조과정에서 발생되었던 자성입자의 자성의 변화가 발생하지 않고, 수 마이크로미터에서 수십 마이크로미터 크기의 자성연마입자를 손쉽게 제조할 수 있기 때문에 미세 부품 폴리싱에 적용하기가 유리하다.

2.2 입자 제조 결과

자성연마입자 제조에 사용한 자성입자와 연마입자 그리고 제조된 자성연마입자의 종류 및 크기를 Table 1 에 나타내었다.

자성입자는 자기유변유체의 주성분인 카르보닐기 철을 사용하였고 연마입자로는 알루미늄, 실리콘 카바이드, 다이아몬드를 사용하였다. 자성입자와 연마입자의 혼합 비율은 자성입자 80 vol%와 연마입자 20 vol%로 하였다.

입자제조에 사용된 자성입자를 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 결과를 Fig. 6(a) 에 나타내었다. 입자모양이 구형이어서 연마입자와의 결합형태를 파악하기 수월하며 순도 99.5% 이상의 분말

로서 자성의 성질이 매우 우수하다.

자성입자와 연마입자를 서로 결합한 후 파쇄하여 제조한 결과를 Fig. 6 (b), Fig. 6 (c), Fig. 6 (d) 및 Fig. 7 에 나타내었다.

Fig. 6(b) 는 카르보닐기 철과 다이아몬드, Fig. 6 (c)는 카르보닐기 철과 실리콘 카바이드, Fig. 6(d) 는 카르보닐기 철과 알루미나를 결합제에 의한 직접결합으로 제조한 후 관찰한 결과이다.

그림에서 볼 수 있듯이 구형의 카르보닐기 철 입자 주위를 예리한 모서리를 가지고 있는 연마입자가 둘러싸듯이 결합하고 있는 형태를 관찰할 수 있다. 다이아몬드 입자와 실리콘 카바이드 입자가 카르보닐기 철과 결합된 자성연마입자의 확대된 형상은 Fig. 7 에 나타내었다.

이와 같이 자성입자와 연마입자를 결합제에 의해 직접 결합하여 자성연마입자로 사용함으로써 연마입자의 이탈을 방지하고 균일한 혼합비율을 일정하게 유지함으로써 폴리싱 성능을 향상시킬 수 있다.

Table 1 Specification of the used particle

Magnetic particle	Carbonyl iron powder (average grit size: 5~7 μm)
Abrasive particle	Alumina (grit size: 1 μm)
	Silicon carbide (grit size: 1 μm) Diamond (grit size: 1 μm)
Magnetic abrasive	Carbonyl iron + Alumina Carbonyl iron + SiC
	Carbonyl iron + Diamond (grit size: 20,50, 100,150 μm)

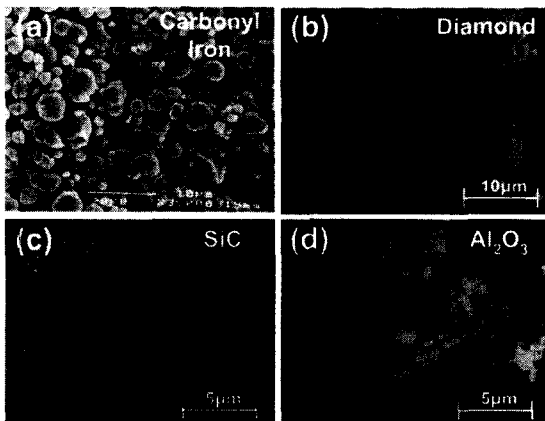
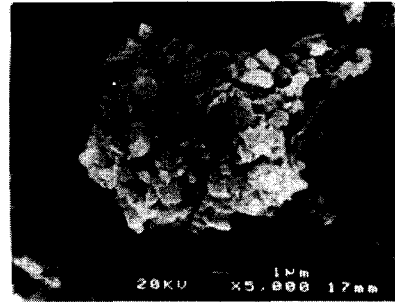
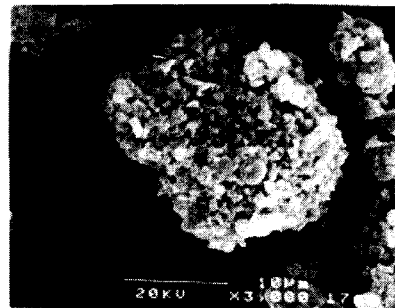


Fig. 6 SEM image of bonded magnetic abrasive



(a) Diamond



(b) Silicon carbide

Fig. 7 SEM image of bonded magnetic abrasive

2.3 폴리싱 기구

본 실험에서 사용한 폴리싱 기구는 자력 발생 장치에서 미세 공구로 부가되는 자기력에 의하여 자성연마입자를 구속하는 방식이다. 개략적인 가공기구는 Fig. 8 에 나타내었다.

자력발생장치로는 전자석을 이용하였으며, 전자석의 코어를 공구로 하여 공구의 끝과 공작물 사이에 간극을 주고 그 공간에 제조된 자성연마입자를 슬러리 형태로 공급하였다.

전자석에 전류를 부가하면 전자석 코어의 역할을 하는 공구가 자화되며 자성연마입자가 그림에서 나타낸 바와 마찬가지로 체인구조로 정렬한다. 이처럼 체인구조를 형성한 입자들이 버핑(buffing)공구와 같이 유연성을 가진 브러쉬의 역할을 하며 공구회전에 의해 재료를 제거한다. Magnetic abrasive process 에서 가공압력은 자력이 부가된 공구와 공작물 사이의 인력 그리고 체인구조로 정렬된 입자들에 의한 자력 및 자화 특성과 관련이 있다. 또한, 간극에서의 자속 밀도 크기의 변화가 가공압력에 영향을 미치게 된다. 공구가 회전하면 체인구조로 정렬된 입자가 회전에 의한 전단력을 가지게 된다.

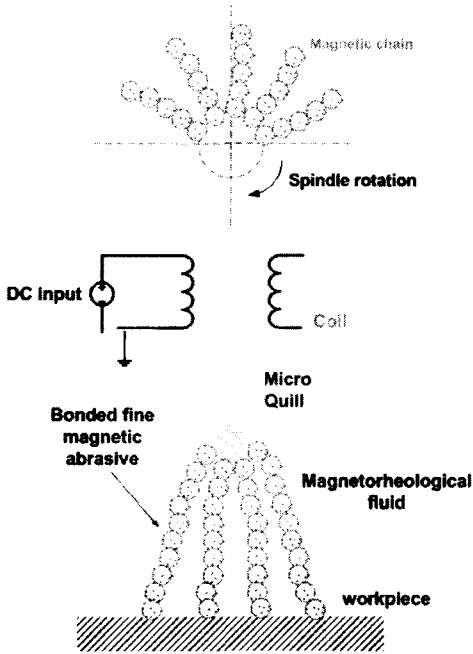


Fig. 8 Structure of polishing process

3. 실험 장치

폴리싱 기구에서 파악 할 수 있듯이 전자석의 코어 역할을 하는 공구 끝에서의 자속 밀도의 크기는 자성연마입자와 마찬가지로 가공성능을 향상시키는 중요한 인자이다.

본 연구에서는 균일한 자기장을 발생하도록 전자석에 구리 코일을 1800 회 감고 50V, 5A 의 전류를 부가하도록 설계하였다. 가우스미터를 이용하여 측정된 결과 공구의 끝에서 약 0.6 Tesla 의 자속 밀도를 얻을 수 있었다. 또한 전자석은 장시간 사용시 전류에 의한 코일의 발열이 전자석의 성능을 떨어뜨리게 되므로 압축공기에 의한 냉각 장치를 추가하여 가공시스템을 구성하였다.

폴리싱 시스템의 대략적인 구조는 Fig. 9 에 나타내었다. 간략하게 설명하면 자력발생장치인 전자석과 연마공구로 구성된 Magnetic field-assisted finishing head 를 머시닝센터 주축에 콜릿척을 이용하여 부착하였다. 또한 공구교환방식을 통하여 착탈식이 용이하도록 제작을 하였다.

공구의 재질은 자화특성이 좋은 SM45C 로 선택하였으며 다른 구성요소들은 알루미늄을 사용하

였다. 또한 공구의 회전 시 런아웃을 최소화하기 위하여 베어링으로 지지하였으며 누설자장이 생기지 않도록 특수베어링을 사용하였다.

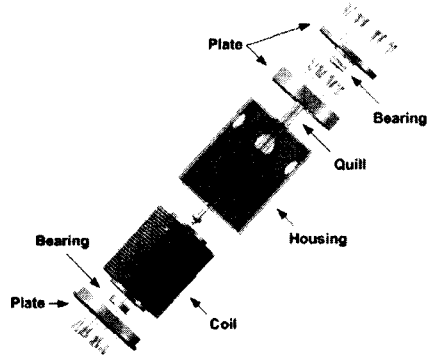


Fig. 9 Magnetic field-assisted finishing head

4. 성능 평가

본 연구에서는 미세공구와 결합된 자성연마입자를 이용한 폴리싱 방법에 대한 성능 및 특성을 가공물의 표면거칠기를 기준으로 분석, 평가하여 3 차원 미세부품 표면 연마 및 선택적 연마에 대한 적용성을 파악하고자 하였다. 따라서, 결합체에 의하여 결합된 자성연마입자에 대한 특성 및 성능 평가가 선행되어야 한다. 결합된 형태의 자성연마입자의 연마성능을 평가하기 위하여 시편의 표면거칠기의 개선 정도를 기준으로 혼합된 형태의 자성연마입자와 비교 분석하였다. 또한 알루미늄, 실리콘 카바이드, 다이아몬드의 다른 연마입자로 제조된 자성연마입자를 폴리싱 시간대별로 평가하였고 실험조건은 Table 2 에 정리하였다. 모든 측정값은 3 회 실험 후 평균값으로 구하였다.

Table 2 Experimental conditions

Magnetic abrasive	Gap (mm)	Feed (mm)	Quill (rpm)	Work-piece
Carbonyl iron Alumina	0.5	20	1000	STD11
Carbonyl iron SiC	0.5	20	1000	STD11
Carbonyl iron Diamond	0.5	20	1000	STD11

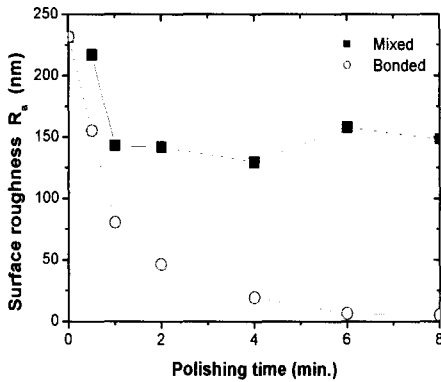


Fig. 10 Comparison of polishing performance

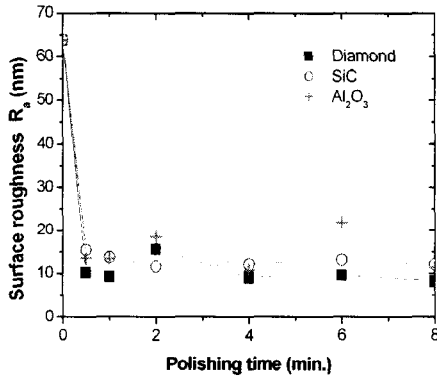


Fig. 11 Change of surface roughness with polishing time

Fig. 10 에 카르보닐기 철과 실리콘 카바이드를 단순하게 혼합한 경우와 결합한 자성연마입자를 가지고 실험한 결과를 서로 비교한 것을 나타내었다. 그래프에서 알 수 있듯이 자성입자와 연마입자를 혼합하여 사용하는 경우보다 결합된 자성연마입자의 성능이 우수한 것을 확인하였다.

Fig. 11 에는 폴리싱 시간에 따른 각 연마입자의 성능을 나타내었다. 표면거칠기의 개선정도를 살펴보면 결합된 자성연마입자의 종류에 따라서 폴리싱 성능이 약간씩 다른 것을 알 수 있다. 실리콘 카바이드를 결합한 자성연마입자보다 다이아몬드를 결합한 자성연마입자의 폴리싱 성능이 비교적 더 좋으며, 알루미늄을 결합한 자성연마입자는 두 자성연마입자에 비해 그 성능이 떨어지는 것을 확인 할 수 있다. 이 결과는 연마입자의 경도가 공작물 보다 상대적으로 높을수록 자성연마입자의 폴리싱 성능이 좋아지는 것을 나타낸다. 그리고, 입자의 결합형태에서 볼 수 있듯이 연마

입자가 카르보닐기 철분말의 둘레에 균일하게 배치되도록 결합된 자성연마입자를 사용한 경우는 표면의 스크래치가 상당히 감소된 결과를 볼 때 입자 간의 결합 형태도 폴리싱 성능에 영향을 미치는 중요한 요인임을 확인 할 수 있다.

4.1 입자 크기에 따른 특성

미세 공구를 사용한 초정밀 폴리싱 공정에서 최적의 자성연마입자 크기를 선정하기 위하여 입자의 크기에 따른 시편의 표면 거칠기 개선 정도를 파악하였다. 자성연마입자는 예비 실험결과를 참고하여 비교적 성능이 우수한 다이아몬드를 결합한 입자를 사용하였다. 입자크기를 달리하여 시간 대별로 표면거칠기의 개선정도를 나타낸 결과는 Fig. 12 에 보였다. 그래프에서 보듯이 평균크기 150 μ m 인 자성연마입자는 가공시간 초기에는 표면 거칠기가 급격히 향상되지만 가공시간이 2 분 경과한 후부터는 개선정도가 미약하다. 반대로 평균 크기 50 μ m 인 자성연마입자는 가공시간 초기에는 표면 거칠기의 변화가 미약하지만 2 분경과 후부터는 표면 거칠기가 급격히 향상되고 있다. 또한 가공 시간이 지날수록 표면 거칠기의 개선 정도가 좋아지고 있는 것을 볼 수 있다.

이러한 결과는 자성연마입자의 크기에 따라서 최종적으로 개선 할 수 있는 표면 거칠기의 한계 점이 존재한다는 것을 의미한다. 즉, 가공물의 초기 표면상태에 따라서 자성연마입자의 크기를 알맞게 선정을 하여야 한다. 폴리싱 초기에는 재료 제거율이 우수한 큰 입자를 사용하고 원하는 표면 거칠기의 값에 따라서 자성연마입자의 크기를 점차적으로 미세화하여야 한다.

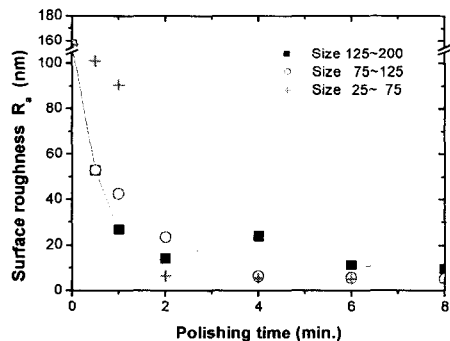


Fig. 12 Change of surface roughness with abrasive size

4.2 회전속도 변화에 대한 특성

공구의 회전속도가 폴리싱 성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여 이송속도와 회전속도를 Table 3 과 같이 설정하였으며, 회전속도를 단계적으로 변화를 주면서 표면 거칠기의 개선정도를 측정하였다. 자성연마입자는 실리콘 카바이드와 다이아몬드를 결합하여 사용하였으며 입자의 크기는 45 μm ~100 μm 이다. 폴리싱 시간은 일정한 구간을 1 회 왕복하는 것으로 설정하였다.

Table 3 Experimental Conditions

Magnetic abrasive (average grit size: 70 μm)	Gap (mm)	Feed (mm)	Quill (rpm)	Work-piece
Carbonyl iron and SiC	0.5	5~40	250~2000	SKD11
Carbonyl iron and diamond	0.5	5~40	250~2000	SKD11

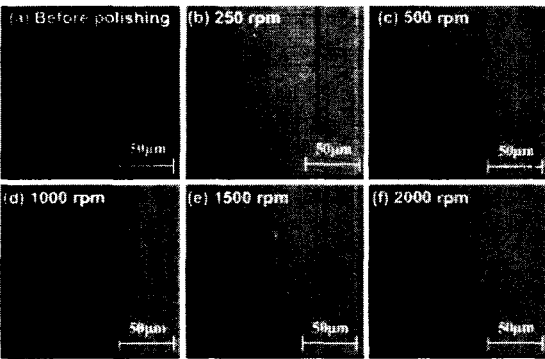


Fig. 13 Transition of the polished surface

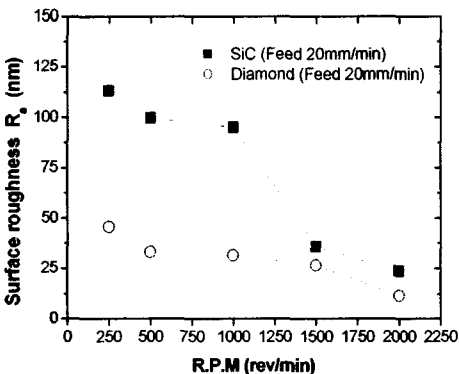


Fig. 14 Change of surface roughness with rpm

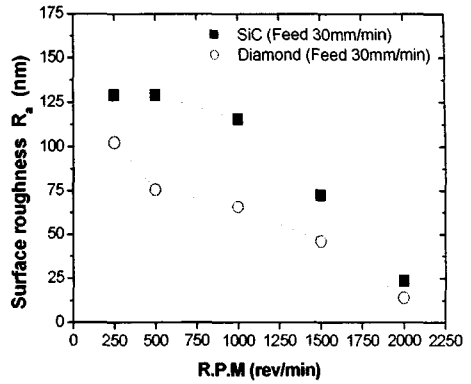


Fig. 15 Change of surface roughness with rpm

Fig. 13 (a)는 시편 표면의 초기상태를 나타내고 있으며 Ra 0.198 μm , Rp-v 3.060 μm 이다. Fig. 13(b) 부터 Fig. 13(f)까지는 이송 속도를 5mm/min 로 고정하고 공구의 회전속도를 변경하면서 시편 표면의 상태를 공구현미경으로 측정한 결과이다.

공구 현미경으로 관찰한 표면 상태에서 알 수 있듯이 공구의 회전속도가 빨라질수록 시편 표면의 스크래치가 비례적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 이송속도가 일정하고 회전속도가 증가하게 되면 자성연마입자가 시편 표면과 접촉하는 횟수가 증가하여 미세하게 재료를 제거해 나가면서 표면의 스크래치가 감소하여 표면이 개선된다. 비교적 짧은 폴리싱 시간에도 불구하고 최종적으로 Ra 11.3nm, Rp-v 102.8nm 인 결과를 얻었으며 초기 표면과 비교하여 약 20 배정도 향상되었다.

Fig. 14 와 Fig. 15 에는 이송속도를 각각 20, 30 mm/min 로 고정하고 공구의 회전속도를 250~2000 rpm 으로 변화시켜 측정된 표면 거칠기의 변화를 나타내었다. 그래프에서 알 수 있듯이 자성연마입자에 대하여 앞 절의 실험의 결과와 같이 다이아몬드를 결합한 자성연마입자가 실리콘 카바이드를 결합한 자성연마입자보다 연마성능이 우수한 것을 재차 확인하였다.

또한, 공구현미경을 이용하여 측정된 결과와 마찬가지로 회전속도가 증가할수록 표면 거칠기가 향상되는 것을 알 수 있다. 하지만 회전속도가 2000 rpm 이상일 경우에는 회전에 의한 힘이 체인 구조의 항복응력을 초과하여 탈락되는 입자가 발생하여 연마성능의 기복이 있으므로 입자 크기에 따라서 적절한 회전속도를 고려하여야 한다.

4.3 이송속도 변화에 대한 특성

본 절에서는 이송속도가 폴리싱 성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여 회전속도와 이송속도를 Table 3 과 같이 설정하였으며, 설정된 공구회전속도에 대해서 이송속도를 바꾸면서 실험한 시편의 표면 거칠기의 변화를 측정하였다.

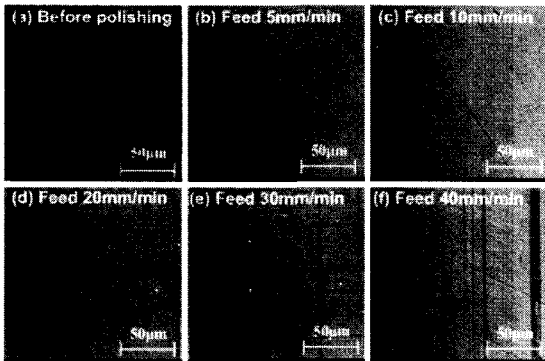


Fig. 16 Transition of the polished surface

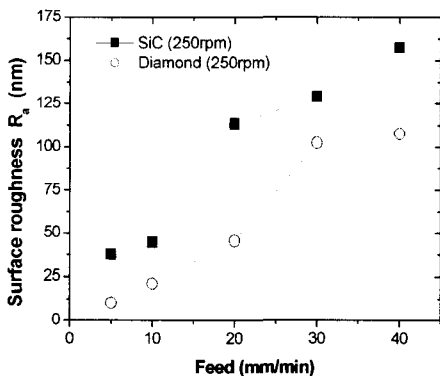


Fig. 17 Change of surface roughness with feedrate

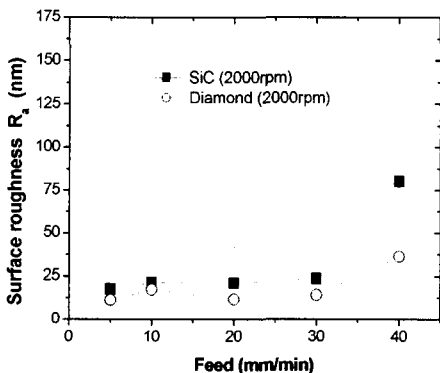


Fig. 18 Change of surface roughness with feedrate

자성연마입자는 실리콘 카바이드와 다이아몬드로서 입자크기는 45µm ~100µm 를 사용하였다. 시편의 초기상태와 이송속도를 달리하면서 공구현미경으로 측정된 표면상태는 Fig. 16 에 나타내었다. 공구현미경으로 관찰한 표면 상태에서 알 수 있듯이 이송속도가 느릴수록 초기 표면에 존재하는 스크래치들이 감소하는 것을 볼 수 있다. 공구회전속도를 변경하며 실험한 결과와 마찬가지로 한 영역에서 표면거칠기의 개선정도는 자성연마입자와 표면이 접촉하는 횟수에 의존한다.

결과를 살펴보면 이송속도가 5mm/min 인 경우에 Ra 0.0227µm, Rp-v 1.180µm 로 초기 표면의 거칠기에 비해 80% 이상 감소한 결과를 얻었으며, 이송속도가 40mm/min 인 경우에는 Ra 0.0707µm, Rp-v 1.260µm 로 초기 표면에 비해 50% 감소한 결과를 얻었다.

Fig. 17 과 Fig.18 에는 회전속도를 250, 2000rpm 으로 고정하고, 각 회전속도에 대하여 공구의 이송속도를 5~40 mm/min 으로 변화시키며 표면 거칠기의 변화를 나타내었다.

4.4 초정밀 폴리싱

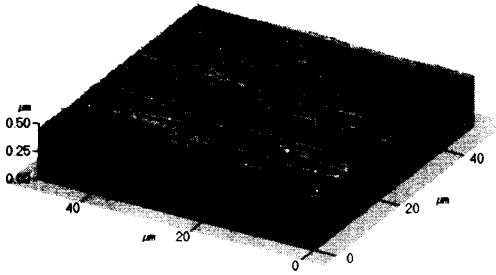
폴리싱 특성에 대한 실험결과를 기초로 하여 실험조건을 선정하고 자성연마입자의 크기를 점차적으로 변화시켜가면서 경면가공을 실시하였다.

가공 공정에 적용한 자성연마입자는 다이아몬드와 카르보닐기 철을 결합하여 사용하였다. 공구회전속도는 1500 rpm, 이송속도는 10 mm/min 으로 선정하였다.

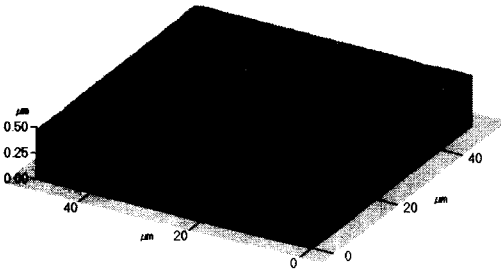
초기 시편의 거친 스크래치들을 빠른 시간에 제거하기 위하여 1 차 공정으로 125µm ~200µm (평균 입자 크기:150µm) 크기의 입자를 사용하였으며 2 차 공정은 75µm ~125µm (평균 입자 크기: 100µm) 크기의 입자를 사용하였으며 일정 구간을 2 회 왕복하였다. 마지막 3 차 공정으로 25µm ~75µm (평균 입자크기: 50µm) 크기의 미세한 입자를 사용하였으며 1 회 왕복 하였다. 재료제거율과 입자 크기에 따른 표면 거칠기의 한계를 고려한 3 회에 걸친 폴리싱 공정을 통하여 짧은 시간에 초기 Ra 198 nm 인 표면을 Ra 4.4 nm 로 개선 하였다.

Fig. 19 에는 2 차 공정과 3 차 공정을 통하여 표면이 개선되어지는 과정을 AFM 으로 측정된 결과를 나타내었다. 미세한 입자를 이용하여 추가의 폴리싱을 한 결과 Ra 값과 Rp-v 값 모두 약 2 배

정도 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 결합된 연마입자의 크기는 $1\mu\text{m}$ 로 같지만 자성연마입자의 크기가 작은 경우 좀 더 미세하게 재료를 제거할 수 있음을 의미한다.



(a) After second polishing (Ra 7.4nm, Rp-v 141nm)



(b) After third polishing (Ra 4.4nm, Rp-v 68nm)

Fig. 19 Topographical image of polished surface

5. 결론

본 연구에서는 미세 부품의 표면품위를 개선하기 위하여 미세공구와 결합된 자성연마입자를 이용한 초정밀 폴리싱 시스템을 제안하였다. 결합체를 이용한 새로운 제조 방법으로 자성연마입자를 제조하였으며 제조된 입자의 특성과 가공변수에 따른 폴리싱 성능을 분석 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

미세 부품의 초정밀 폴리싱을 위해서는 자성연마입자의 경도가 공작물보다 상대적으로 높을수록 표면거칠기 개선능력이 향상된다. 그리고, 입자 간의 결합형태를 관찰한 결과 자성입자를 연마입자가 둘러싸고 있는 형태가 성능을 향상시키는 중요 요인임을 확인하였다. 또한, 자성연마입자의 크기에 따라 표면 거칠기 개선의 한계점이 존재하며

가공대상의 종류 및 초기 표면상태에 따라 자성연마입자의 종류와 크기를 달리하는 공정의 변화가 필요하다.

공구의 회전속도와 이송속도 그리고 가공시간은 자성연마입자가 시편 표면과 접촉하는 횟수가 많아질수록, 즉 이송속도가 느리고 회전속도가 빠를수록 폴리싱 성능이 향상된다. 하지만, 이러한 속도가 자기체인구조를 이루는 입자들 간의 항복 응력을 초과해서는 안된다.

참고문헌

1. Komanduri, R., Lucca, D.A., Tani, Y., "Technological Advances in Fine Abrasive Processes," Annals of the CIRP, Vol. 46, No. 2, pp. 545-596, 1997.
2. Park, S.J., Ahn, B.W., Yoon, J.H., "Development of Ultraprecision Polishing Technique using Bonded Magnetic Abrasive," Transactions of the KSMTE, Vol. 12, No. 5, pp. 59-66, 2003.
3. Kuriyagawa, T., Saeki, M., Syoji, K., "Electrorheological Fluid-assisted Ultra-precision Polishing for Small Three-dimensional Parts," Precision Engineering, Vol. 26, pp. 370-380, 2002.
4. Lee, S.J., Kim, W.B., Park, S.J., Lee, S.J., "A Study on the Ultraprecision Polishing of Single Crystal Silicon using Electrorheological Fluid," Journal of the KSPE, Vol. 20, No. 6, pp. 27-36, 2003.
5. Kim, D.W., Shin, Y.J., Lee, E.S., Cho, M.W., "The Principle of Magnetorheological Finishing for a Micro Part," Proceedings of the KSPE, pp. 300-304, Spring 2003.
6. Anzai, M., Otaki, H., Sudo, T., Nakagawa, T., "Manufacturing of Iron Bonded Diamond Magnetic Abrasives by Sintering and Its Finishing Characteristics," International Journal of JSPE, Vol. 27, No. 4, pp. 357-358, 1993.
7. Mori, T., Hirota, K., Kaeshima, Y., "Clarification of Magnetic Abrasive Finishing Mechanism," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 143-144, pp. 682-686, 2003.