

결합된 자성연마입자를 이용한 초정밀 피니싱 기술 개발

박성준⁺, 안병운⁺⁺, 윤종학^{*}

(논문접수일 2003. 6. 17, 심사완료일 2003. 8. 18)

Development of Ultraprecision Finishing Technique using Bonded Magnetic Abrasives

Sung-Jun Park⁺, Byung-Woon Ahn⁺⁺, Jong-Hak Yoon^{*}

Abstract

This study suggests the new ultraprecision finishing techniques for micro die and mold parts using magnetic field-assisted polishing. Conventional magnetic abrasives have several disadvantages, which are missing of abrasive particle and unequal mixture between magnetic particle and abrasive particle. Therefore, bonded magnetic abrasive particles are fabricated by several method. For example, plasma melting and direct bonding. Carbonyl iron powder is used as magnetic particle where silicon carbide and alumina are abrasive particles. Developed magnetic abrasives are analyzed using SEM. Feasibility of magnetic abrasive and polishing performance of this magnetic abrasive particles also have been investigated. After polishing, surface roughness of workpiece is reduced from 85.4 nm Ra to 9 nm Ra.

Key Words : Magnetic Field-assisted Polishing(자기연마), Magnetic Particle(자성입자), Abrasive Particle(연마입자)

1. 서론

최근 들어 생산제품 및 부품들이 점차 미세화 되고 있으며 높은 정밀도를 필요로 하고 있다. 이러한 요구에 대해 마이크로/나노기술의 일부로서 미세 부품 제작 기술에 대한 연구가 활발할 뿐 아니라 일부 기술은 이미 실용화되고 있다. 이러한 미세 부품 제작 기술은 기계, 전자에 관련되는

제조업 뿐 만 아니라 화학, 의료, 생물 분야 등에 걸쳐 광범위하게 발달하고 있다.

대표적인 제작 기술로 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 공정이 사용되고 있으며, 주 활용 분야는 자동차용 센서, 잉크젯 프린터 헤드, 평판 디스플레이, 바이오 칩 등이다. 최근에는 정보통신, 정밀기기, 의료 기기 등의 제품 개발에 응용되고 있어 제작 가능한 제품의 수는 해아

+ 연세대학교 NT연구단 (sjpark@yonsei.ac.kr)
++ 서울산업대학교 대학원 기계공학과
* 주저자, 서울산업대학교 기계공학과
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172

리기 어렵다. 또한 기존의 기계적 가공 방법을 초정밀화, 미세화한 미세 부품 제작 기술도 발전을 거듭하여 수백 μm 에서 수십 μm 의 두께를 지닌 3차원 미세 구조물의 가공 및 제작이 가능하다. 하지만 이러한 비약적인 미세 제품 생산 기술과는 달리 표면 처리 또는 표면 연마 기술은 아직 미개척 분야이다.

표면 연마는 실제로 정밀 기기 부품 및 금형 관련 산업현장 등에서 전체 공정의 30~40%⁽¹⁾ 이상을 차지하는 중요한 공정이며, 미세 부품 제작에서도 마찬가지로 매우 중요하다. 그럼에도 불구하고 기술적으로 미세 부품의 표면 연마를 할 수 있는 방법은 그리 많지가 않다.

몇 가지 가능한 공정으로 미세 연삭 스톨을 이용한 표면 연마, 미세 전해가공(Micro ECM)과 전해연마 또는 약간 변형된 방법⁽²⁾ 등이 미세 부품 표면 연마에 적용될 수 있으나 미세 스톨을 이용한 방법은 스톨의 제작이 어렵고 스톨에 배치된 입자의 수가 부족하여 비효율적이며, 미세 전해가공은 공정에 따라 조건이 까다롭고 환경에 유해한 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 특별한 대응책이 없는 3차원 미세 부품의 표면 연마 기술로 기존의 자기 연마법^(3,4)을 응용한 초정밀 피니싱 기술을 제안하였다.

기존 자기 연마법은 구 소련에서 최초로 고안되어 불가리아 등의 동구권을 중심으로 연구, 개발되었으며 일본은 1980년대에, 국내에는 1990년대 초에 일부 도입되어 연구되어 왔다. 최근 들어 금형 표면의 연마 자동화 기술^(5,6)과 청정기술의 한 분야인 클린 파이프 제조 기술^(7,8) 등의 공정에 적용하는 연구가 진행되고 있으며, 플라즈마 용융법으로 자기 연마 공정에 사용되는 자성연마입자를 제조한 연구도 진행되었다.

이러한 기존의 자기 연마방법은 대상 부품의 전체 영역을 가공하기에는 적합하지만, 특정 영역이나 단차가 있는 부분을 작업하기에는 곤란한 점이 많다. 따라서, 본 연구에서는 3차원 미세 부품의 선택적인 표면 연마에 적용하기 위하여 자기 연마장치를 설계 제작하였고, 결합체에 의한 직접 결합 방법으로 자성연마 입자를 제조하였다. 그리고, 미세 부품 표면연마에 적용하기 위해 금형 재료로 널리 사용되는 SKD-11 시편에 대한 연마 성능과 자성연마입자로 사용할 수 있는 가능성을 평가하였다.

2. 표면 연마 기술

2.1 자기 연마 가공의 원리

자기 연마법의 개략적인 가공 기구는 Fig. 1에 나타내었

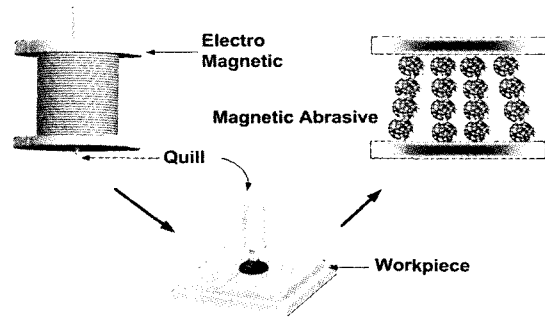


Fig. 1 Structure of polishing process

다. 전자석의 코어를 연마공구(Quill)로 하여 공구의 끝단과 공작물 사이에 간극을 주고 그 공간에 자성입자와 연마입자를 일정 비율로 혼합하여 슬러리 형태로 공급한다. 전자석에 전류를 부가하면 전류에 의해 전자석 코어인 공구가 자화되어 자성입자를 구속하게 된다. 연마 공구와 공작물 사이의 자성입자는 사슬구조(chain-like structure)로 정렬되며 자성입자의 정렬로 인하여 연마입자는 자성입자들 사이에 위치한다. 이처럼 사슬구조로 형성된 입자들이 유연성을 가진 연마스톨의 역할을 하게 된다.

자기 연마법에서 가공압력은 자력을 가진 연마공구와 공작물 사이의 인력 그리고 사슬구조로 정렬된 입자들에 의한 자력 및 자화 특성과 관련이 있다. 공구가 회전하면 사슬구조로 정렬된 입자가 회전력을 가지게 되고 이것이 가공력이 된다. 또한 간극에서의 자속 밀도 크기 및 분포상태 등에 의하여 가공력에 영향을 미치게 된다.

기존의 공정을 응용하여 미세 부품 표면 연마에 적용하기 위한 핵심기술로서 일정한 크기의 자력을 발생하는 전자석과 수 μm 에서 수nm 크기의 자성연마입자가 요구되며 이 입자는 자성과 연마성능을 동시에 가지고 있는 기능성 입자이어야 한다. 또한 가공압력 강화의 한 방법으로 자성연마입자의 분산 및 이탈을 방지하기 위해 전자석 코어의 역할을 하는 연마공구 끝단 형상을 변화시켰으며 전류에 의한 자력의 세기가 고루 분포 되도록 하였다.

2.2 자성 연마 입자

자성입자와 연마입자를 단순 혼합하여 슬러리 형태로 사용하면 연마공구에 인가된 자기력과 회전력에 의해 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 상대적으로 자기장의 세기가 낮은 쪽으로 연마입자가 이동하고 공구 회전에 의한 원심력의 영향으로 가장자리에 모이게 된다. 또한, 공구를 이동하게 되

면 연마입자가 탈락되는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 자성 입자와 연마입자를 물리적으로 결합하여 자성과 연마제의 성능을 동시에 가지게 되면 가공성능이 향상될 것을 쉽게 예측할 수 있다.

지금까지 가장 많이 알려진 제조법은 플라즈마 용융법으로 자성입자를 용융하여 연마 입자와 결합하는 방법이다. 입자간의 결합력은 우수하나 제조 공정이 복잡하고 플라즈마 발생기 등 고가의 장비를 필요로 한다. 또한 Fe계 자성입자의 curie point가 일반적으로 400~900℃이므로 자성입자의 성질이 강자성에서 상자성으로 변화되어 자력이 낮아지며, 밀도 차가 큰 두 입자의 결합에서는 큰 편석이 발생하여 자성입자와 연마입자 각각의 밀도에 따른 제약 등 여러 형태의 문제점들이 나타난다.

본 연구에서는 이와같은 문제점에 대한 대안으로 결합제에 의한 직접결합으로 자성연마입자를 제조하는 방법을 선택하였다. 결합제의 성분은 Cyanoacrylate 계열이며 높은 결합력과 습윤 특성을 가지므로 자성입자와 연마입자로 이

루어진 혼합체내에 침투하여 분말 혼합체의 입자가 얇은 층의 필름으로 둘러싸이게 한다. 이와 같은 공정은 1분 이내에 이루어지며 제조된 혼합체의 완전경화까지는 4시간이 소요되므로 기존 방법에 비해 입자 제조 시간이 짧고 공정이 간단하며 고가의 장비를 필요로 하지 않는다.

Fig. 3에 나타낸 바와 같이 자성입자와 연마입자가 결합제에 의하여 자성입자를 연마입자가 둘러싸는 형태로 결합되는 것이 자성연마입자의 가장 이상적인 결합형태라고 할 수 있다. 특히 자성입자와 연마입자간의 물리적인 직접 결합으로 인하여 자성입자의 자성 변화가 없어 초정밀 피니싱 기술에 적용성이 매우 높다고 생각한다.

3. 입자 제조 및 제조 결과

3.1 입자 제조 방법

본 연구에서 사용하는 자성입자와 연마입자의 종류와 입자의 크기는 Table 1에 나타내었다.

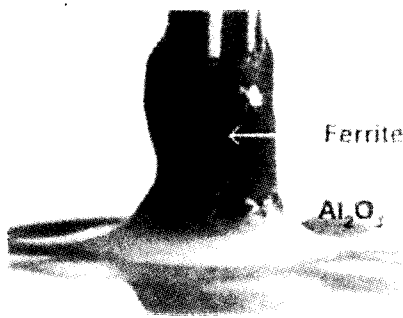


Fig. 2 Separation of abrasive particle from magnetic particle

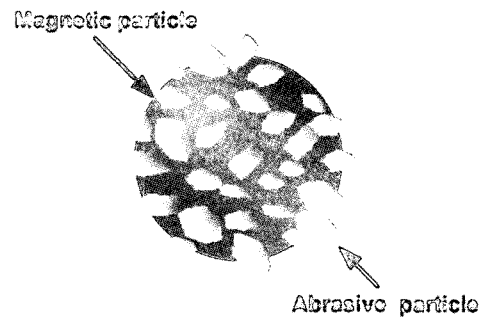


Fig. 3 Bonded magnetic abrasive

Table 1 Experimental system

Equipment	Machining center : TNV-40A (SAEIL Co.,Ltd)
Magnetic field-assisted finishing head	Electro magnetic rod (Quill) Magnetic flux strength : 0.55T (DC 50V, 2A)
Magnetic particle	Carbonyl Iron (average grit size : 5~7 μ m)
Abrasive particle	Silicon Carbide (average grit size : 1~3 μ m) Alumina (average grit size : 1~3 μ m) Diamond (average grit size : 1 μ m)
Magnetic polishing abrasive (average grit size : 20 μ m, 70 μ m)	Carbonyl Iron and Alumina Carbonyl Iron and Silicon Carbide Carbonyl Iron and Diamond

2.2 절에서 나타난 바와 마찬가지로 결합제에 의한 입자 결합방법으로 제조하며 자성연마입자 제조는 혼합, 결합, 분쇄의 공정을 거치게 된다.

입자의 혼합은 무게 비율로서 자성입자(50%)와 연마입자(50%)를 Ball mill (혹은 Attrition mill)을 사용하여 약 30분 동안 건식으로 혼합공정을 진행하며 자성입자와 연마입자가 혼합된 분말체를 준비된 용기에 균일하게 분포시킨 후 결합제를 침투시킨다. 이때 사용되는 결합제는 Cyanoacrylate 계열이며 속 경화용으로 경화시간은 20~40분, 완전경화까지는 4시간이 소요되고 결합제 성분은 100%의 혼합 분말체에 대하여 3~5%로 한다.

최종 단계로서 결합제에 의해 결합된 결정을 Ball mill (혹은 Attrition mill)을 이용한 분쇄공정을 통하여 미세 자기연마공정에 적합한 크기로 파쇄 하며, 연고자하는 입자의 크기에 따라서 공정 시간을 결정한다.

파쇄된 자성연마입자는 시험망(sieve)를 통하여 최종적으로 분류 작업을 거친 후 공정에 맞게 사용한다.

3.2 입자 제조 결과

입자제조에 사용된 자성입자를 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 자성입자로 사용된 Carbonyl iron powder는 입자모양이 구형이고 순도 99.5% 이상의 분말로서 자성의 성질이 매우 우수하다고 할 수 있다.

자성입자와 연마입자를 결합 후 파쇄하여 제조한 결과를 Fig. 5, Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 5(a)와 (b)는 카르보닐 아이언과 알루미늄, Fig. 6(a)와 (b)는 카르보닐 아이언과 실리콘 카바이드, Fig. 7은 카르보닐 아이언과 다이아몬드를 결합제에 의한 직접 결합 방법으로 제조된 입자를 배율을 달리하여 관찰한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 구형의 카르보닐 아이언 입자에 예리한 모서리를 가지고 있는 연마재가 결합되어 있는 형태를 관찰할 수 있다. 특히 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 자성입자인 카르보닐 아이언을 연

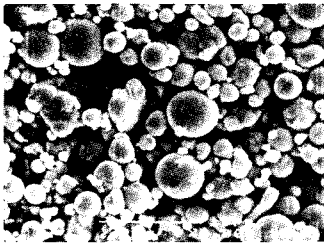


Fig. 4 Carbonyl iron powder

마입자인 다이아몬드가 둘러싸고 있는 형태가 가장 이상적인 결합이며 연마성능 또한 다른 결합입자들보다 성능이 향상될 것을 예상할 수 있다.

이와 같이 자성입자와 연마입자를 같이 결합하여 자성연마 입자로 사용함으로써 연마입자의 이탈을 방지하고 균일한 혼합비율을 일정하게 유지함으로써 연마성능을 향상시킬 수 있다.

4. 실험 장치

4.1 실험 장치의 구성

자기연마가공은 3축 머시닝센터에 전자석과 연마공구로 구성된 Magnetic field-assisted finishing head를 부착하여 사용하였다.

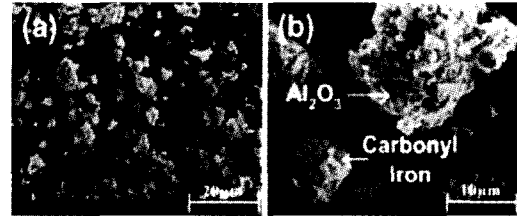


Fig. 5 SEM image of bonded magnetic abrasive (Carbonyl Iron and Alumina)

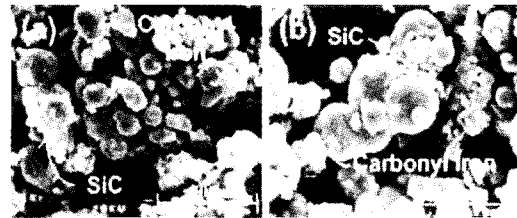


Fig. 6 SEM image of bonded magnetic abrasive (Carbonyl Iron and Silicon carbide)

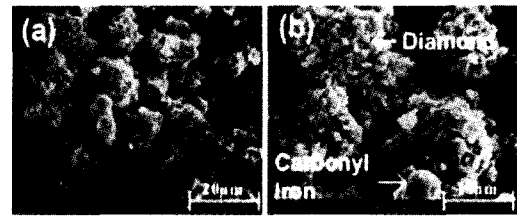


Fig. 7 SEM image of bonded magnetic abrasive (Carbonyl Iron and Diamond)

Table 2 Experimental Conditions

No.	Magnetic polishing abrasive	Gap (mm)	Feed (mm/min)	Quill (rpm)	Workpiece
1	Carbonyl Iron and Alumina	0.5	20	1000	SKD-11
2	Carbonyl Iron and Silicon Carbide	0.5	20	1000	SKD-11
3	Carbonyl Iron and Diamond	0.5	20	1000	SKD-11

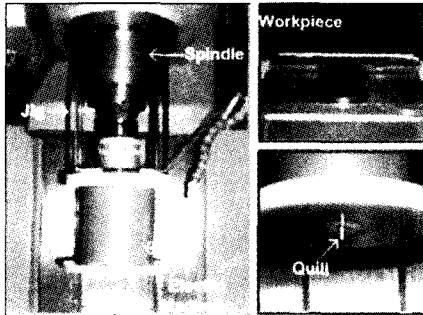


Fig. 8 Experimental set-up

본 실험에서는 미세 부품의 표면 연마에 적용가능성이 높도록 전자석을 설계 제작하였으며 연마공구인 전자석의 코어는 미세 부품 표면 연마공정과의 적용성을 파악하기 위하여 직경에 변화를 주면서 실험하였다.

실험장치의 대략적인 구조는 Fig. 8에 나타내었다. 간략하게 설명하면 머시닝센터 주축에 고정구를 이용하여 전자석의 중심이 주축의 중심선과 일치하게 고정시킨다. 그리고 연마공구가 전자석 코어의 기능을 하도록 전자석 공심을 통과시키며 전원공급장치를 설치하여 전자석에 전압을 부가하는 방식이다.

4.2 전자석의 설계

미세 공구를 사용하여 균일한 자기장의 세기를 얻기 위해서는 전자석 코어의 지름, 공구 끝단의 지름 등 자화될 소재의 치수 및 형상에 대한 설계가 매우 중요하다. 또한, 전자석의 형상, 권선의 재질, 권선의 지름, 감는 횟수 등이 필요한 자기장의 세기를 얻기 위한 설계변수 들이다.

전자석은 Table 1에 정리한 것처럼 50V, 2A의 전류를 부가하여 코일을 4800회 감도록 설계하여 전자석의 코어인 연마공구 끝단에 약 0.5 Tesla의 자속 밀도를 얻을 수 있도록 하였다. 또한 전자석은 장시간 사용시 전류에 의한 발열

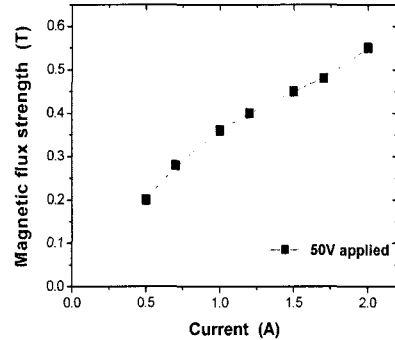


Fig. 9 Change of magnetic flux strength by current

이 전자석의 성능에 악영향을 미치므로 냉각과 실험에 필요한 시간을 고려하였다.

Fig. 9에서는 전류의 변화에 따른 자속 밀도의 변화를 그래프로 보여주고 있다. 결과에서 알 수 있듯이 전류가 0~2.0 A까지 점차적으로 증가할 때 자속 밀도가 0~0.55T까지 비례적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

실험에서 가공력을 얻기 위해 연마 공구가 1000rpm으로 회전을 하게 되며 이 때 약간의 자속 밀도 변화가 발생하지만 그 변화의 정도는 미미하므로 가공력에 큰 영향을 미치지 않는다.

5. 실험 결과 및 고찰

5.1 실험

실험에 필요한 전자석과 연마공구에 대한 설계 값과 연마시 실험조건은 Table 1과 Table 2에 정리하였다. 또한 연마공구의 회전속도와 이송속도는 각각의 자성연마입자에 대해 회전속도(200, 500, 800, 1000, 1200rpm)와 이송속도 (3, 10, 15, 20, 25mm/min)를 변화시켜가며 예비실험을 진행하였다. 예비실험을 통해 분석한 결과를 참고하여 실험조건 등을 결정하였으며, 시편은 금형의 재질에 널리 사

용되는 SKD-11을 사용하였다. 시편의 표면은 주축속도 3400rpm인 성형 연삭기를 이용한 전처리과정을 통하여 표면 거칠기를 Ra 0.0854 μm , Rmax 0.687 μm 로 하였다. 이때 사용된 연삭숫들은 WA60K7V이다. 본 실험에서는 Al₂O₃, SiC, diamond의 각각 다른 연마입자로 제조된 자성 연마입자의 연마성능을 시간대별로 평가하였다. 결합된 입자의 연마 성능은 표면거칠기의 개선 정도를 기준으로 하였으며 각각의 자성연마입자에 따른 실험은 Table 2에 나타낸 실험조건으로 동등한 실험을 진행하였다. 또한 연마공구와 공작물사이의 간극에 입자를 슬러리 형태로 공급하였다.

5.2 실험 결과

5.2.1 연마입자에 따른 연마성능 비교

초기 시편의 형상은 Fig. 10, 11, 12의 (a)에 나타내었다. 시편의 표면에 연삭 방향에 따른 스크래치가 발생한 것을 공구현미경을 이용하여 확인 할 수 있다.

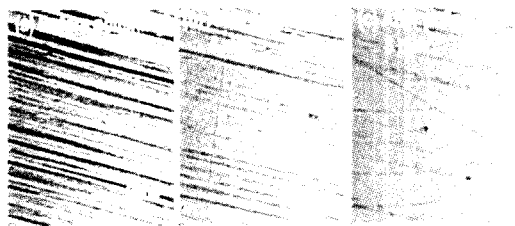


Fig. 10 Photographs of surface (with Al₂O₃)

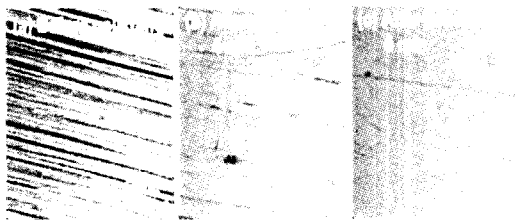


Fig. 11 Photographs of surface (with SiC)

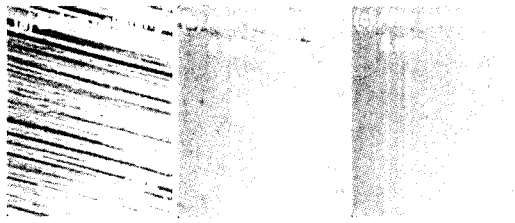


Fig. 12 Photographs of surface (with Diamond)

자기연마법의 가공 메커니즘은 앞서 나타낸 바와 같이 가공압력과 전단력 두 가지로 나타낼 수 있다. 가공 압력은 연마공구와 시편사이의 간극에 슬러리 형태로 입자가 공급된 후 자기력에 의해 입자가 사슬구조로 정렬되면서 발생하는 힘이다. 전단력은 공구 끝단에서 시편사이에 정렬된 입자가 공구의 회전운동에 의해 표면에 수직방향으로 운동하면서 발생한다. 이러한 가공 기구에 의하여 시편 표면에 평면 연삭 과정에서 생성된 초기의 스크래치가 가공 시간이 경과함에 따라 점차적으로 소멸되고 수십 마이크로 미터 크기의 자성연마 입자에 의해 원형 또는 임의의 방향으로 미세한 스크래치가 남아있는 것을 확인 할 수 있다.

연마 후 표면 거칠기는 연마입자의 종류에 따라 Al₂O₃는 Ra 0.0284 μm Rmax 0.2702 μm SiC는 Ra 0.0127 μm Rmax 0.1188 μm , Diamond는 Ra 0.0106 μm Rmax 0.0916 μm 으로 나타난다. 표면 거칠기의 개선 정도를 살펴보면 결합된 연마입자의 종류에 따라서 연마성능이 다른 것을 알 수 있다.

연마 입자로 Al₂O₃를 사용한 경우 Fig. 10 (b), (c)에서 볼 수 있듯이 연마 후에도 표면에 초기표면에서 볼 수 있었던 스크래치가 흐릿하게 나타나며 연마 입자에 의해 생성된 스크래치를 뚜렷하게 볼 수 있다. 반면 SiC와 Diamond는 연마 후 표면에 연마 입자에 의해 생성된 스크래치가 상당히 소멸되어진 것을 Fig. 11과 Fig. 12의 (b), (c)를 통하여 알 수 있다.

연마된 표면을 공구현미경으로 관찰한 결과와 측정된 표면 거칠기 값을 통해 알 수 있듯이 SiC를 결합한 자성연마 입자보다 Diamond를 결합한 자성연마입자의 연마 성능이 비교적 더 좋으며, Al₂O₃를 결합한 자성연마입자는 두 자성연마입자에 비해 그 성능이 떨어지는 것을 확인 할 수 있었다.

이 결과는 연마입자의 경도가 공작물 보다 상대적으로 높을수록 표면 연마시 자성연마입자의 연마성능이 좋아지는 것을 나타낸다. 그리고, 입자의 결합형태에서 볼 수 있듯이 연마 입자가 카르보닐 아이언의 둘레에 균일하게 배치되도록 결합된 자성연마입자를 사용한 경우는 표면의 스크래치가 상당히 감소된 결과를 볼 때 자성입자와 연마입자간의 결합 형태도 연마성능에 영향을 미치는 중요한 요인임을 알 수 있다.

또한 연마 시간의 경과에 따른 연마성능의 변화를 입자별, 시간대별로 평균 거칠기(Ra)와 최대높이 거칠기(Rmax)를 측정하여 평가하였다. 그 결과를 Fig. 13, Fig. 14에 나타내었다.

그래프에서 보듯이 연마시간이 증가할수록 표면 거칠기가 감소하며 일정 시간이 지나면 더 이상 표면 거칠기가 향

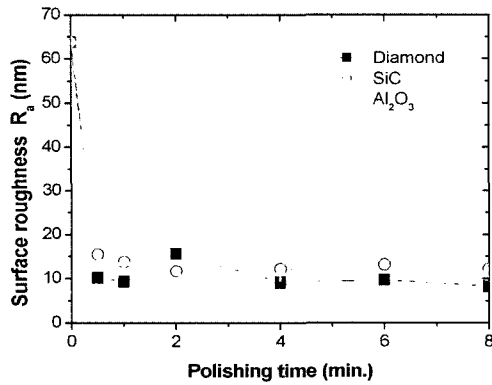


Fig. 13 Polishing result (R_a)

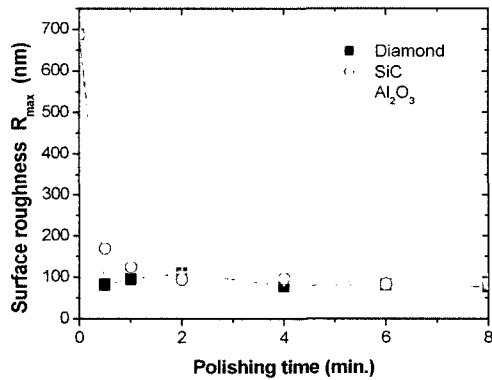


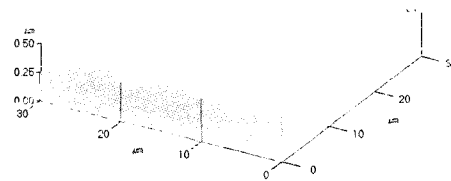
Fig. 14 Polishing result (R_{max})

상 되지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 초기 시편 표면에 생성되어있던 스크래치는 1분대를 전후해서 소멸이 되며 그 이후에는 자성연마입자에 의해 시편 표면에 미세한 스크래치가 반복 생성되어 표면 거칠기의 값이 거의 일정하게 유지되는 것으로 설명할 수 있다. 즉, 사용된 자성연마입자의 크기에 따라서 최종 표면의 거칠기 정도를 조절할 수 있을 것으로 생각된다.

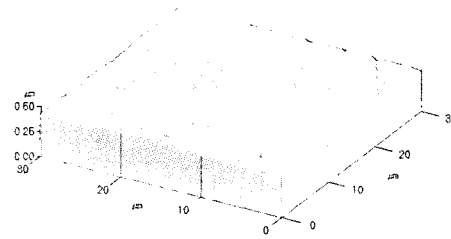
연마 시간에 따른 연마성능은 입자에 따라 조금씩의 변화는 있지만 Al_2O_3 , SiC, Diamond의 3가지 연마입자 모두 시간에 따른 변화 경향은 거의 같다고 볼 수 있다.

5.2.2 초정밀 연마

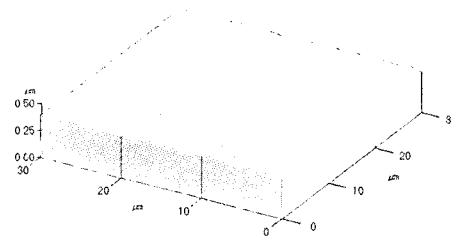
연마 시간이 1분을 경과하는 경우 표면거칠기는 거의 일정한 값을 유지하였으며 평균 거칠기를 기준으로 다이아몬드의 경우 약 10 nm, 실리콘 카바이드의 경우는 약 13 nm



(a) Before polishing
(R_a : 43 nm, R_{max} : 328 nm)



(b) With SiC powder
(R_a : 5.8 nm, R_{max} : 136 nm)



(c) With Diamond powder
(R_a : 2.4 nm, R_{max} : 90 nm)

Fig. 15 AFM images of polished surface

였다. 이러한 결과는 전 절에서 설명한 바와 같이 사용한 자성연마입자의 크기에 따라 최종적으로 얻을 수 있는 표면 거칠기 값이 존재한다는 것을 의미한다. 즉, 자성연마입자의 크기를 줄이면 줄어들수록 표면의 거칠기 값이 감소할 수 있다. 상대적으로 큰 자성연마입자에 의해 생성된 미세한 스크래치를 제거하기 위해 $45\mu m$ 이하의 입자(평균 입자 지름은 약 $20\mu m$)를 이용한 2차 연마를 진행하였다. 그 결과 diamond의 경우 2.4nm, SiC의 경우 5.8nm의 표면 거칠기를 가지는 경면을 가공할 수 있었다.

Fig. 15에 시편의 초기 표면과 자성연마입자에 따른 최종 표면의 개선 정도를 AFM으로 측정하여 나타내었다.

6. 결론

본 연구에서는 결합된 자성연마입자를 이용한 초정밀 피닝 기술 개발에 목적을 두고 미세 부품의 선택적 연마 가능성을 파악하기 위하여 자기 연마법의 가공 메커니즘을 분석하였다.

선택적 연마 공정에 적합하도록 자성입자와 연마입자가 결합된 자성연마입자를 제조하여 가공성능을 평가하고 결과를 제시하였다. 또한, 전자석을 이용하여 균일한 자기장을 발생시켰으며 자기력이 연마공구 끝단에 집중 될 수 있는 장치를 설계 제작하였다.

자성연마입자의 제조 방법으로 결합제를 이용한 직접 결합법을 제안하였다. 그 결과 플라즈마 용융에 의한 제조 방법에 비하여 공정의 간소화와 제조시간, 비용 등의 사항을 개선할 수 있었으며 결합제에 의한 직접 결합으로 인하여 자성의 변화 없이 수십 마이크로 미터 크기의 기능성입자를 제조할 수 있었다. 실험 결과 결합제를 이용한 직접 결합법으로 제조한 자성연마 입자는 미세 구조물 및 3차원 표면 연마가공에 적용성이 매우 높다는 것을 확인 할 수 있었다.

사용된 자성연마입자의 크기에 따라서 가공성능이 달라지는 것을 관찰하였고, 가공물의 초기 표면상태에 따라 입자의 크기를 알맞게 선정하여 연마공정을 반복하면 최종적으로 원하는 표면 거칠기를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Lin, W. and Ohmori, H., 2001, "Potential Micro Fabrication by Magnetic Polishing for Surface Quality Control", *RIKEN*, Vol. 34, pp. 35~37.
- (2) Lee, S. H., Bae, S. H. and Park, K. Y., 1998, "A Proposal of the Electrochemical Polishing Method Using the Point Electrode Tools", *Proceedings of Trans. of KSMTE*, pp. 48~53.
- (3) Chen, Y. Q. and Dong, S., 1990, "Study of the Compound Polishing Process on SnSb Alloy Moulds", *Annals of CIRP*, Vol. 39, pp. 517~521.
- (4) Lee, J. J., Lee, E. S., Hwang, K. H. and Min, S. K., 2002, "Characteristics of Micro-polishing using the Electro-rheological Fluid", *Proceedings of Trans. of KSMTE*, pp. 38~42.
- (5) Yamaguchi, H. and Shinumura, T., 1999, "Study of on the Surface Modification Resulting from an Internal Magnetic Abrasive Finishing Process", *J. of Wear.*, Vol. 225~229, pp. 246~255.
- (6) Lee, Y. C., Anzai, M. and Nakagawa, T., 1996, "A Study on Improving the Efficiency Magnetic Abrasive Polishing for Die & Mold Surface", *Trans. of KSPE*, Vol. 13, No. 6, pp. 59~65.
- (7) Yamaguchi, H., Shinumura, T., 2000, "Study of on Internal Magnetic Abrasive Finishing using a Pole Rotation System Discussion of the Characteristic Abrasive Behavior", *J. of Int. SPEN*, Vol. 24, No. 6, pp. 237~244.
- (8) Park, W. K., Rho, T. W., Seo, Y. I., Choi, H., Lee, J. C. and Cheong, S. H., 2000, "The Internal Finishing Characteristics of Non-ferromagnetic Pipe Polished by Magnetic Abrasive Machining(1)", *Fall Conference of Trans. of KSPE*, pp. 779~782.