

# 기계적 합금화 공정을 이용한 초미세 자성연마입자의 제조 및 특성 평가

박성준<sup>#</sup>, 이상조<sup>\*</sup>

## Fabrication of the Fine Magnetic Abrasives by using Mechanical Alloying Process and Its Polishing Characteristics

Sung-Jun Park<sup>#</sup> and Sang-Jo Lee<sup>\*</sup>

### ABSTRACT

A new method to fabricate the fine magnetic abrasives by using mechanical alloying is proposed. The mechanical alloying process is a solid powder process where the powder particles are subjected to high energetic impact by the balls in a vial. As the powder particles in the vial are continuously impacted by the balls, cold welding between particles and fracturing of the particles take place repeatedly during the ball milling process using a planetary mill. After the manufacturing process, fine magnetic abrasives which the guest abrasive particles clung to the base metal matrix without bonding material can be obtained. The shape of the newly fabricated fine magnetic abrasives was investigated using SEM and its polishing performance was verified by experiment. It is very helpful to finishing the injection mold steel in final polishing stage. The areal rms surface roughness of the workpiece after several polishing processes has decreased to a few nanometer scales.

**Key Words:** Magnetic abrasive (자성연마입자), Mechanical alloying (기계적 합금법), Polishing (폴리싱), Cold welding (압접), Fracture (파괴), Ball milling (볼 밀링), Surface roughness (표면거칠기)

### 1. 서론

초정밀 금형기술은 최근에 첨단 전자기기를 비롯한 각종 기계장치의 경량화, 소형화 및 고정밀도에 대한 요구가 증가함에 따라 필요성이 점차적으로 늘어나고 있다. 광학부품용 비구면 렌즈, 도광판 또는 프리즘 시트용 스탬퍼, CD 와 DVD 광픽업용 렌즈 및 휴대폰 또는 디지털 카메라용 소형 렌즈를 제작하기 위한 플라스틱 사출 금형은

초정밀 금형의 대표적인 예이다.

일반적으로 플라스틱 금형과 프레스 금형이 전체의 70% 이상을 차지하고 있다. 프레스 금형은 주로 자동차 산업이나 중,대형의 기계부품에 주로 이용되고 있으며, 그 크기나 가공제품의 특성상 요구되는 표면거칠기는 대부분 절삭가공에 의한 커슥(cusp)을 제거하는 정도의 수준이다. 왜냐하면 가공 후에 도장이나 다른 후처리 공정을 거치기 때문이다. 하지만, 렌즈 금형과 같은 사출

접수일: 2004 년 4 월 20 일; 게재승인일: 2004 년 8 월 13 일

<sup>#</sup> 교신저자: 연세대학교 나노과학기술연구원

E-mail sjpark@yonsei.ac.kr Tel.(02) 2123-2818

<sup>\*</sup> 연세대학교 기계공학부

금형의 경우에는 프레스 금형과는 달리 금형의 표면 형상과 표면거칠기가 그대로 최종 제품에 전사되므로 금형에 요구되는 표면거칠기는 바로 최종 제품의 광학적 특성을 결정짓는 요인이 된다. 광학제품의 경우에는 대부분 수 나노미터의 평균 거칠기 값을 요구하고 있다.<sup>1</sup>

이러한 초정밀 금형 표면을 얻기 위해서는 폴리싱 공정이 반드시 필요하다. 일반적인 폴리싱 방법을 적용하기 위해서는 패드를 사용하여야 하지만, 소모성의 패드를 소형으로 제작하는 것은 어려움이 따른다.

Kuriyagawa<sup>2</sup>는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 기능성 유체를 사용하여 패드를 대체할 시도를 하였다. 인가된 전기장의 크기에 비례하여 점도가 변하는 전기유변유체(electrorheological fluid)를 이용하여 비구면 렌즈 및 미세 3 차원 구조물의 초정밀 폴리싱 방법을 제안하였다. 제안된 기구를 이용하여 정밀 연삭된 비구면 렌즈를 폴리싱 한 결과 나노미터 수준으로 표면거칠기를 향상 시켰다.

Park<sup>3</sup>은 이전 연구에서 미세 공구와 자기유변 유체의 자기체인구조를 이용한 선택적 초정밀 폴리싱 방법을 제안하였는데, 이 방법의 적용을 위해서는 결합된 초미세 자성연마입자의 개발이 선행되어야 한다. 자기장을 이용하여 공구를 자화시키고 공구 주변의 자성연마입자를 체인구조로 정렬시켜 유연한 브러쉬의 기능을 하도록 만드는 방식이므로 공구의 지름이 작아 질수록 포화자화밀도가 감소하여 자성연마입자에 전달할 자기장의 세기가 약해지기 때문이다.

본 논문에서는 미세 공구를 이용한 선택적 초정밀 폴리싱 공정에 적용하기 위해서 초미세 자성연마입자를 제조하기 위한 방법을 제안하고 입자 제조 결과에 대해 고찰한다. 또한 기계적 합금법으로 제작된 초미세 자성연마입자에 대해 기초적인 폴리싱 특성을 평가하였다.

## 2. 입자 제조

### 2.1 기계적 합금법<sup>4,5</sup>

기계적 합금법(mechanical alloying)이란 불활을 사용하여 합금 구조를 변형시키거나 고상반응을 통하여 새로운 화합물을 제조하는 방법을 말한다. 기계적 합금법은 1970 년대에 용융온도의 차이가 큰 금속간의 화합물을 제조하기 위하여 시작된 공

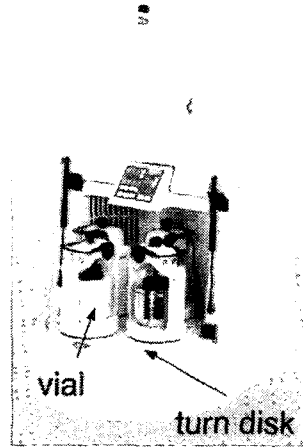


Fig. 1 Planetary ball mill

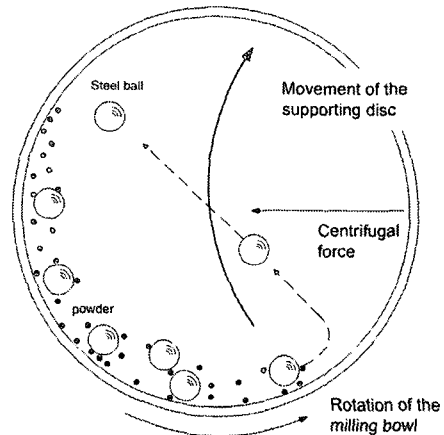


Fig. 2 Schematic view of motion of the balls and powder mixture

정이다. 기계적 합금법의 적용범위는 비정질재료, 금속간 화합물, 고용합금 등 매우 다양하며, 수많은 비평형상 합금이 제조되었다. 금속-금속 분말의 경우 최종 화합물은 금속분말의 반복된 냉간 압접 및 파괴 과정에 의하여 생성된다. 금속이 갖는 연성 때문에 판상 조직이 형성되며, 분쇄 시 발생하는 압력에 의하여 판상 조직이 미세화 된다. 그러나, 금속-비금속 분말의 경우는 비금속 분말이 분쇄되어 연성이 높은 금속조직 내에 분산되는 과정을 반복하여 화합물이 형성된다.

이러한 공정은 금속 분말의 산화를 방지하기 위하여 불활성 가스 분위기에서 실시되며, 금속과 세라믹과 같은 비금속 입자를 고상반응으로 제조

할 수 있는 대안으로 각광받고 있다.

기계적 합금법을 실시하기 위해서는 기본적으로 Fig. 1 에 나타낸 볼 밀링 기계가 필요하여, 화합물을 제조하기 위한 기본 파우더는 볼밀 기계의 용기(bowl 또는 vial)에 철제 볼이나 세라믹 볼과 함께 장착해야 한다. 혼합된 파우더는 공정 중에 압접과 파괴를 반복하게 되는데 이 두 가지 기구간의 균형을 적절히 유지하도록 충격 에너지를 조절하는 것이 성공적인 공정 수행의 관건이다.

개략적인 플래너터리 볼밀의 형태는 Fig. 1 에 나타내었다. 일반적으로 1 개의 회전 디스크와 2 개 혹은 4 개의 대칭형 용기를 구비하고 있다. 회전 디스크는 단일방향으로 공전하고, 동시에 용기는 반대방향으로 자전한다. 디스크의 회전과 용기 자체의 자전에 의해 원심력이 발생하며 용기 안의 볼과 파우더에 가해진다. 이러한 용기내부의 볼과 파우더의 운동은 Fig. 2 에 나타내었다.

용기와 디스크의 회전 방향이 서로 반대이기 때문에 원심력은 교대로 동기화 된다. 용기 내벽의 볼과 파우더는 원심력에 의해서 반대편 벽을 향해 고속으로 이동하게 되며 충격량은 볼이 서로 충돌할 때 극대화 된다. 보통 볼의 충격 에너지는 중력 가속도에 의한 에너지의 40 배에 달하며 볼에 의한 충격 에너지는 볼의 크기와 디스크의 회전 속도 변동을 통해 조절이 가능하다.

## 2.2 기본 개념

결합된 자성연마입자를 제조하는 방법은 여러 가지가 존재한다. 우선 소결이나 플라즈마 용융에 의한 방법이 있으며 입자제조 공정은 Fig. 3 에 나타낸 것과 같이 서로 유사한 과정을 거친다.<sup>6,7</sup> 이렇게 만들어진 입자는 고온, 고압에서 성형되기 때문에 입자간의 결합력은 매우 우수하지만 공정이 복잡하고 고가의 장비를 필요로 하며, 입자간의 밀도차이에 의해 편석이 발생하므로 입자선택의 제약이 있다. 또한, 자성재료로 사용되는 금속을 퀴리점(Curie point) 이상으로 가열하여 용융시키기 때문에 자성이 강자성에서 상자성으로 변화하는 단점이 존재한다.

시아노아크릴레이트 계열의 결합제를 사용하는 제조 공정은 Fig. 4 에 나타내었다.<sup>8</sup> 용융 및 소결에 의한 방법에 비해 공정이 단순하며 제조시간이 짧고 제조비가 저렴한 장점이 있다. 하지만, 이 공정 역시 결합제를 경화 시킨 후에 분쇄 공

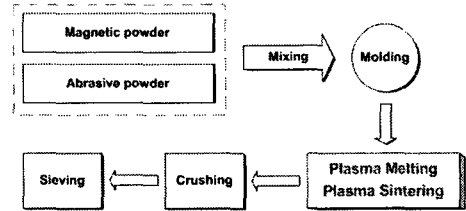


Fig. 3 Fabrication process by plasma melting (or sintering) method

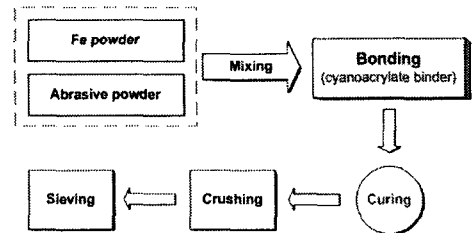


Fig. 4 Fabrication process by direct bonding method

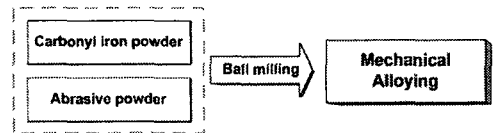


Fig. 5 Fabrication process by mechanical alloying

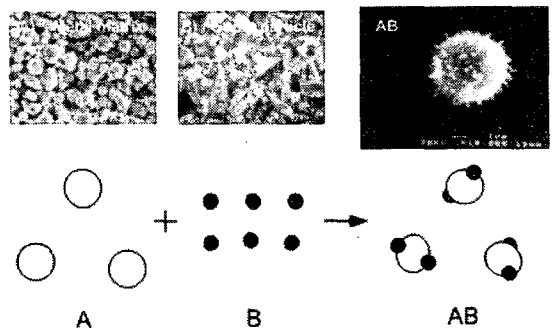


Fig. 6 Basic concept of the fabrication of magnetic abrasives by mechanical alloying

정을 거치고 표준체로 입자의 크기를 선별해야 하는 점은 기존의 공정과 같다.

살펴본 바와 같이 기존의 입자 제조 공정은 금속분말과 연마입자 분말을 열을 가하여 용융시킨 금속에 연마입자를 분산시키거나 혹은 결합제

를 사용하여 서로 다른 재질의 분말을 성형하는 형태이다. 덩어리 형태의 공정 결과물을 분쇄 공정을 통하여 원하는 입자 크기로 만들어야 하며, 이 과정에서 결합된 연마입자들이 탈락하기도 하기 때문에 초미세 입자를 제조하기에는 부적합하다. 하지만 본 연구에서 제안한 방법은 분쇄 공정이 필요없고 표준체를 사용할 필요가 없이 기저금속 분말(base metal matrix)의 크기로 입자를 합성할 수 있기 때문에 최종 생성물의 입자 크기를 자유로이 선택할 수 있으며 연마입자의 혼합량에 따라 금속입자 외곽의 연마입자 분포를 조절할 수 있다.

본 논문에서 제안한 기계적 합금법에 의한 제조 공정은 Fig. 5 에 나타내었으며 자성연마입자를 제조하기 위한 기본적인 개념을 Fig. 6 에 개략적으로 도시하였다. 결합제를 사용하지 않고 미세한 연마 입자들이 금속 입자 표면에 반복적인 압접에 의하여 분산되는 기구이다. 적절한 공정 조건을 선택하면 Fig. 5 와 같이 구형의 입자형태를 얻을 수 있다. 기계적 합금법은 상온에서 반응이 이루어지므로 금속입자의 자성의 변화가 없고, 공정비용이 저렴하며, 최종 생성물이 분말 형태이므로 분쇄 공정이 별도로 필요없다. 따라서, 본 논문에서 제안한 공정을 사용하면 분쇄 공정으로는 제조

가 불가능한 초미세 나노입자의 합성도 가능하며, 구형입자형태의 형상 제어도 가능하다.<sup>9</sup>

### 2.3 실험 조건

입자 제조에 사용한 자성입자는 자기유변유체의 주성분인 카르보닐기 철(BASF 제품)이며, 연마입자는 산화 알루미늄( $Al_2O_3$ , Showa Denko 제품)을 첨가하였다. 카르보닐기 철은 입자형태가 구형이며 평균 입자크기는 약 5-7 $\mu m$  이다. 연마입자로 사용한 산화 알루미늄은 예리한 모서리를 가진 형태로 평균 입자크기는 약 50nm 와 1 $\mu m$  이다.

실험에 사용한 장치는 Fig. 1 과 같은 형태의 플래너터리 볼밀이다. 볼밀 장치는 그 구조상 마주보는 용기에 서로 내용물을 채워넣고 공정을 해야 한다. 따라서, 산화 알루미늄의 입자 크기를 달리하여 공정을 실시하였다.

충격 에너지를 가할 볼의 재질은 세라믹이며 지름 1mm 이다. 볼과 분말의 무게비는 20:1 로 설정하였으며 용기 내부에는 계면활성제인 알코올 5%와 올레인산 1%를 첨가하였다. 디스크의 회전 속도는 500rpm 으로 설정하였다. 공정시간은 24 시간까지 실시하였고, 실험 도중에 시료를 채취하여 형태를 주사전자 현미경(SEM)으로 측정하였다.

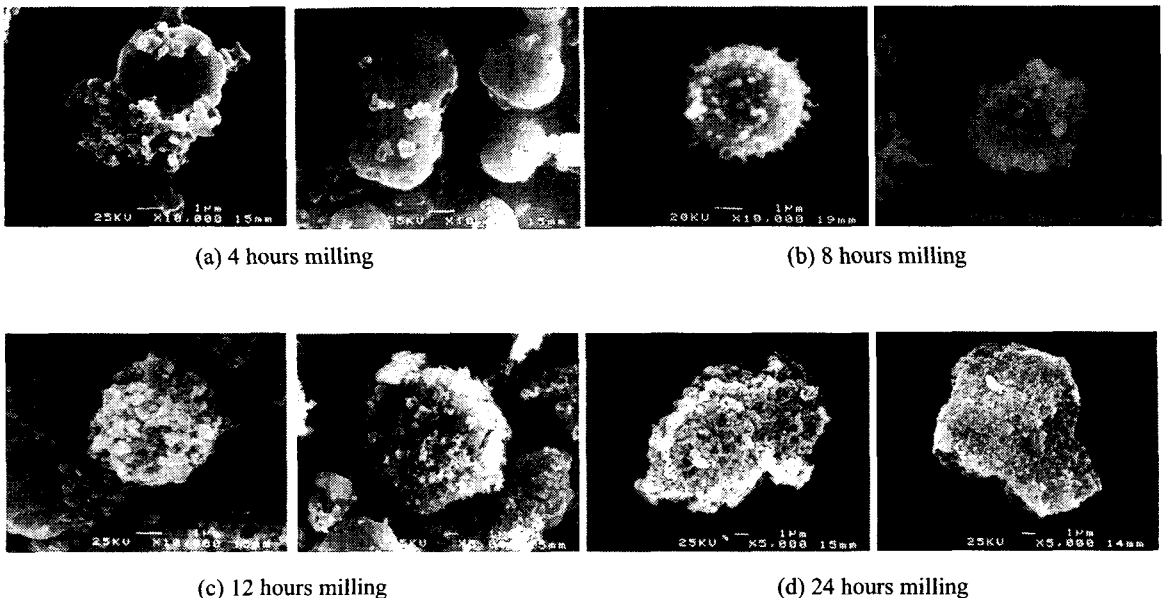


Fig. 7 SEM images of a mechanically bonded magnetic abrasive

### 2.4 제조 결과

공정 시간대 별로 채취한 시료를 주사전자 현미경(SEM)으로 측정 한 결과는 Fig. 7 에 나타내었다. 구형의 카르보닐기 철의 입자 형태가 유지되면서 외곽에 산화 알루미늄 연마입자가 분산되어 결합되어 있는 것을 관찰할 수 있다. 전체적으로 합성된 입자의 크기는 원래 카르보닐기 철 입자 크기(약 5-7 $\mu\text{m}$ )를 유지하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 7(a)의 결과 즉, 4 시간 불 밀링 한 후를 살펴보면 불의 충격에너지와 입자 간의 마찰에 의하여 금속 입자 표면이 국부적으로 용융되며 입자가 들러붙는 압접현상을 확인할 수 있다. 공정 초기이기 때문에 압접이 전체적으로 진행되지 않고 일부 영역에만 연마입자가 부착되어 있다.

Fig. 7(b)와 Fig. 7(c)는 각각 8 시간, 12 시간 공정을 진행한 결과이다. 점차적으로 연마입자가 금속 입자에 압접되어 결합되는 기계적 합금 현상이 진행되고 있는 것을 발견할 수 있다. 또한 알루미늄 나노 분말이 금속입자 표면에 고루 분포하고 있는 것도 확인할 수 있다.

24 시간의 공정이 진행된 후 측정 한 결과는 Fig. 7(d)에 나타내었다. 알루미늄 나노 분말( 50nm) 과 1 $\mu\text{m}$  의 입자들이 고르게 분산되어 있다. 하지만 초기의 구형이던 금속 입자의 형상은 반복적인 충격에 의하여 판상화가 진행되고 있는 것을 볼 수 있다.

## 3. 특성 평가

### 3.1 실험 방법 및 조건

제작된 자성연마입자의 가공 특성을 평가하기 위하여 폴리싱 실험을 실시하였다. Fig. 8 에 나타낸 기구와 같이 미세공구를 유도 코일에 의해서 자화시킨 후 자성연마입자를 슬러리 형태로 공급하면 공구 끝에서부터 가공물 표면까지 체인구조를 형성하게 된다.<sup>3</sup> 이와 같이 정렬된 입자들의 체인구조가 유연한 공구의 역할을 하여 표면에 적당한 가공압력을 유지한 상태에서 공구 회전에 의한 전단력이 표면에 반복적으로 마이크로 스크래치를 생성하여 폴리싱하게 된다.

가공 대상은 경면이 요구되는 렌즈용 플라스틱 금형으로 주로 사용되는 STAVAX 를 사용하였다. 초기 연삭된 금형강을 2 회에 걸친 폴리싱을 통해 표면거칠기의 개선정도를 평가하였다.

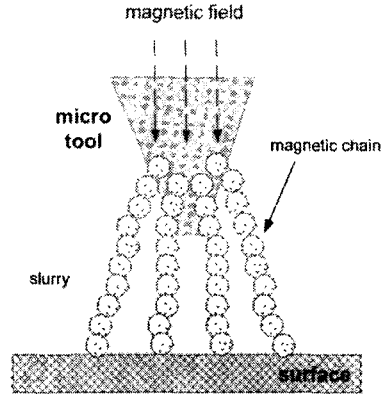


Fig. 8 Polishing mechanism

폴리싱 조건과 사용한 연마입자의 크기와 종류는 Table 1 에 정리하였다. 1 차 폴리싱과 최종 폴리싱 모두 10 분간 실시하였으며 간극은 0.5mm 로 일정하게 유지하여 실험하였다.

Table 1 Machining conditions

|                       | Rpm  | feed (mm/min) | abrasive                                       | size ( $\mu\text{m}$ ) |
|-----------------------|------|---------------|--|------------------------|
| preliminary polishing | 1000 | 50            | diamond 1 $\mu\text{m}$                        | 25-75                  |
| final polishing       | 1000 | 50            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 1 $\mu\text{m}$ | 5-7                    |

### 3.2 이론적 고찰

비균일 자기장 내에 위치한 자성 입자는 Fig. 9 에 나타낸 바와 같이 자기장의 세기가 강한 쪽으로 힘을 받게 되는데 이러한 현상을 자기영동 (magnetophoresis)이라고 한다.

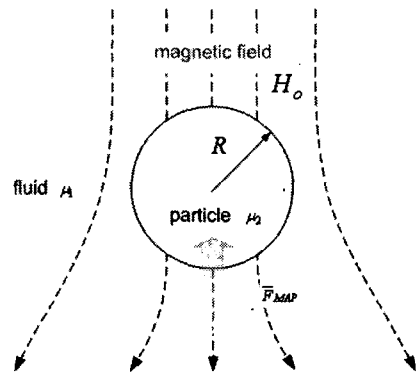


Fig. 9 Magnetizable particle acted on a force in a non-uniform magnetic field

이때, 구형의 자성입자가 자기장 내에서 받는 힘은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{F}_{MAP} = 2\pi\mu_1 R^3 K(\mu_2, \mu_1) \nabla H_o^2 \quad (1)$$

여기서,  $R$  은 자성입자의 반지름,  $\mu_2$  는 입자의 투자율(permeability),  $\mu_1$  은 매질의 투자율이며 자기장의 세기는  $H_o$  이다.  $K$  는 Clausius-Mossotti 함수로써 다음 식과 같이 투자율에 대해 정리하여 나타낼 수 있다.

$$K(\mu_2, \mu_1) = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + 2\mu_1} \quad (2)$$

자기영동현상에 의해 발생하는 힘은 입자 간의 인력으로 작용하여 체인구조를 형성하게 된다. 이러한 체인구조는 Fig. 8 에서 볼수 있듯이 브러쉬(brush)형태의 유연한 공구로 기능을 하게 되며 가공물 표면을 누르게 된다. 이러한 가공압력의 크기는 식(1)과 같이 자기장의 세기가 일정한 경우 입자의 체적과 매질의 투자율에 비례한다.

다시 말하면, 다른 조건이 일정한 경우 가공압력은 입자의 체적에 비례한다. Fig. 10 에는 자속밀도가 0.6 Tesla 일때, 지름 1mm 의 미세공구에 0.5g 의 자성연마입자를 슬러리 형태로 공급했을 경우 입자의 크기와 간극에 따른 가공압력을 공구동력계로 측정 한 결과를 나타내었다. 실험결과로부터 또 다시 확인할 수 있듯이 가공압력은 입자의 크기에 비례하며 간극에 반비례한다.

Preston<sup>10</sup> 은 패드를 이용한 폴리싱에 관한 고전적인 실험식을 발표하였는데 그 형태는 다음과 같이 쓸 수 있다.

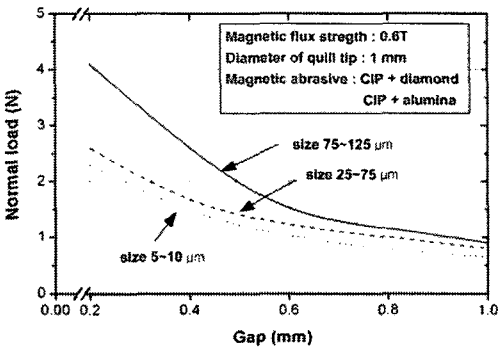


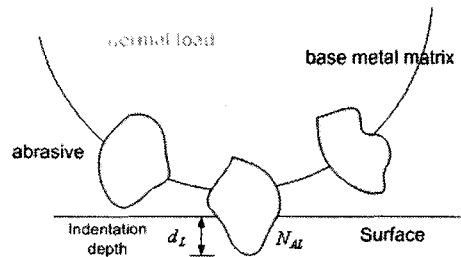
Fig. 10 Measured normal load acting on the surface

$$\frac{dz}{dt} = C_p \frac{L}{A} \frac{ds}{dt} \quad (3)$$

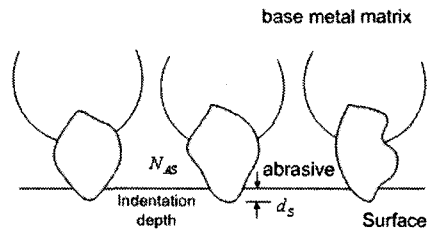
여기서, 좌변은 시간 변화에 대한 재료 높이의 변화량 즉, 재료제거율을 의미한다.  $C_p$  는 재료에 따라 달라지는 Preston 상수이며,  $L$  은 가공압력,  $A$  는 작용하는 면적이다. 마지막 항은 공구와 공작물의 상대속도를 나타낸다.

Preston 에 의하면 식(3)과 같이 재료제거율은 단위면적당 가공압력과 공구와 공작물의 상대속도, 즉 연마입자의 이송속도에 비례한다. 이러한 내용은 가공압력은 연마입자로 하여금 계속해서 표면과 접촉하도록 하는 역할을 하며 공구회전에 의한 전단력이 연마입자가 표면을 긁고 지나가 스크래치를 생성하도록 하여 재료를 제거한다는 Cook<sup>11</sup> 이 제안한 재료 제거기구와도 유사하다.

이러한 점들을 종합해보면 Fig. 11 와 같이 비교해 볼 수 있다. 연마입자의 크기가 일정하지만 결합된 형태의 크기가 다를 경우 상대적으로 큰 입자는 Fig. 11(a)와 같이 표면에 전달하는 가공압력이 크게 된다. 따라서, 작은 크기의 자성연마입자에 비해서 압입깊이가 크다( $d_L > d_S$ ). 이러한 경우 재료제거율이 클 것을 쉽게 예측할 수 있다. 초기 표면의 거친 상태를 빠르게 평탄화 시키는데



(a) Large particle



(b) Small particle

Fig. 11 Comparison of two particles with different size

적합하다. 반면에, 상대적으로 작은 크기의 자성연마입자는 각각의 입자가 표면에 가하는 가공압력은 작지만 단위면적 당 스크래치 발생에 참여하는 연마 입자의 수는 많게 된다( $N_{AL} < N_{AS}$ ). 또한, 작은 가공압력으로 인하여 연마입자의 압입깊이가 작다. 그러므로, 점차적으로 평탄화 된 표면을 최종적으로 다듬질 하는데 효과적이다.

### 3.3 실험 결과

플라스틱 사출금형에 사용되는 STAVAX 에 대해서 Table 1 과 같은 가공조건으로 폴리싱 실험을 하였다. 초기 시편은 평면 연삭된 상태이며  $R_a$  는 158nm,  $R_{p-v}$  는 980nm 이다. 1 차 폴리싱에서는 25-75 $\mu$ m 크기의 자성연마입자를 사용했으며, 1 $\mu$ m 의 다이아몬드 연마입자가 결합되어 있다. 이전 실험결과<sup>3</sup>에 의하면 초기에는 급격히 표면거칠기 값이 감소하다가 시간이 경과하면 표면거칠기가 일정하게 유지된다. 폴리싱 시간은 기존 실험결과를 바탕으로 10 분으로 결정하였다.

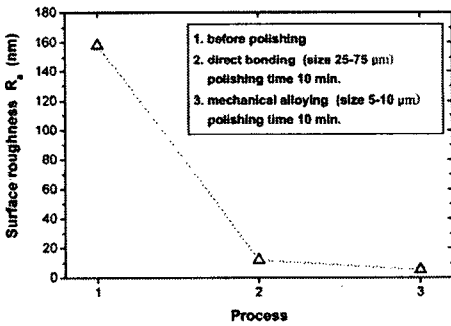


Fig. 12 Change of average surface roughness

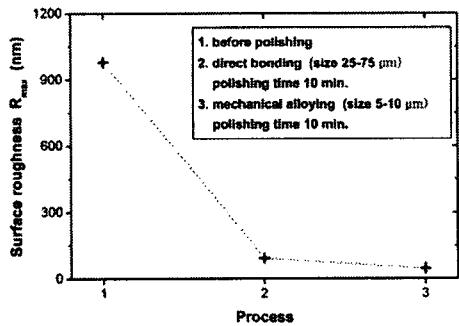


Fig. 13 Change of peak-to-valley surface roughness

2 차 폴리싱은 기계적합금법으로 제작한 5-10 $\mu$ m 크기의 입자를 사용하여 1 차 폴리싱한 표면에 적용하였다. 연마입자는 산화 알루미늄 1 $\mu$ m 이다.

각 공정마다 표면거칠기를 광학식 비접촉 측정장치를 이용하여 측정한 결과는 Fig. 12 와 Fig. 13 에 나타내었으며 Table 2 에 정리하였다. 평균 표면거칠기와 최대 표면거칠기의 감소경향은 거의 일정하였다. 1 차 폴리싱공정에 의하여 초기 표면의 거칠기는 급격히 개선되며, 이 후 폴리싱 시간 10 분까지는 일정한 표면거칠기 값을 유지한다. 이때 2 차 폴리싱 공정을 실시하게 되면 표면 거칠기 값이 약 1/2 로 감소하여 수 나노미터 수준의 거칠기 값을 가지는 것을 실험결과를 통해 확인할 수 있다. 이 것은 전절에서 제시한 입자 크기에 따른 비교를 통해 설명 될 수 있다. 마찬가지로 연마입자의 크기를 작게한다면 나노미터 이하의 표면거칠기로 표면품위를 향상시키는 것도 가능할 것으로 예측된다.

Table 2 Measured surface roughness

| Process                   | $R_a$ (nm) | $R_{p-v}$ (nm) | Size ( $\mu$ m) |
|---------------------------|------------|----------------|-----------------|
| initial                   | 158        | 980            | -               |
| 1 <sup>st</sup> polishing | 12         | 93             | 25-75           |
| 2 <sup>nd</sup> polishing | 5          | 52             | 5-10            |

### 4. 결론

광학부품의 성능을 결정하는 주요한 인자중의 하나인 표면거칠기를 나노미터 수준으로 향상시키기 위하여 초미세 자성연마입자를 개발하였으며 플라스틱 렌즈용 사출 금형강을 대상으로 특성 평가를 하였다. 기존의 소모성의 패드를 이용하던 폴리싱 공정을 자기유변유체의 특성을 응용한 유연한 공구로 대체하는 시도를 하였으며 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다..

1. 기존의 분쇄공정을 통해서 는 제조가 불가능한 초미세 자성연마입자를 기계적 합금법을 이용하여 제작하였다. 결합된 형태의 자성연마입자의 크기 및 형상과 연마입자의 분포를 자유롭게 조절할 수 있으며 자성의 변화가 없다.
2. 표면거칠기를 개선하기 위한 효율적인 폴리싱 공정을 위해서는 입자의 크기를 달리하여 수회

에 걸쳐 진행하여야 한다. 자성연마입자의 크기가 작아지면 가공압력은 작아지지만 단위면적당 가공에 참여하는 연마입자의 수가 증가하기 때문에 최종 다듬질 공정에 적합하다. 제작한 초미세 자성연마입자를 이용하여 폴리싱 한 결과 평균표면거칠기 약 5nm 로 표면품위를 개선하였다.

### 후 기

본 연구는 산업자원부의 차세대 신기술 개발 사업 중 밀리 스트럭처 생산기술 개발사업의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

### 참고문헌

1. Choi, J.Y., Kim, H.H., Park, J.H., Jeong, H.D., Seo, H.D., "A Study on Nano-polishing of Injection Molds using Fixed Abrasive Pad," *Journal of the KSPE*, Vol. 19, No. 10, pp. 212-220, 2002.
2. Kuriyagawa, T., Saeki, M., Syoji, K., "Electro-rheological Fluid-assisted Ultra-precision Polishing for Three-dimensional parts," *Precision Engineering*, Vol. 26, pp. 370-380, 2002.
3. Park, S.J., Ahn, B.W., Lee, S.J., "Nano-scale Precision Polishing Characteristics using a Micro Quill and Magnetic Chain Structure," *Journal of the KSPE*, Vol. 21, No.8, 2004.
4. Lue, L., Lai, M.O., *Mechanical Alloying*, Kluwer Academic Publishers, 1998.
5. Otterstedt, J.E., Brandreth, D.A., *Small Particles Technology*, Plenum Press, 1998.
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 the JSPE*, Vol. 27, No. 4, pp. 357-358, 1993.
7. Mori, T., Hirota, K., Kawashima, Y., "Clarification of Magnetic Abrasive Finishing Mechanism," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 143, pp. 682-686, 2003.
8. Feign, S., Kremen, G., "Magnetic Abrasive Powder and Method of Producing the Same," *United States Patent No. 5846270*, 1998.
9. Ahn, B.W., Park, S.J., Min, B.K., Lee, S.J., "Method for Manufacturing Magnetic Abrasive Particle by Mechanical Alloying," *Patent pending*, No. 10-2003-0102044.
10. Preston, F.W., "The Theory and Design of Plate Glass Polishing Machines," *Journal of Glass Technology*, Vol. 11, pp. 214-256, 1927.
11. Cook, L.M., "Chemical Processes in Glass Polishing," *Journal of Non-crystalline Solids*, Vol. 20, pp. 152-171, 1990.