한국정밀공학회지 제 21 권 제 12 호 (2004 년 12 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, No. 12, December 2004.

# 분말 특성에 따른 자기연마에 의한 Deburring 성능분석

채종원*, 고성림#, Yuri M. Baron**

# Analysis of the Performance of Magnetic Abrasive Deburring according to Powder Characteristics

Jong-Won Chae*, Sung-Lim Ko#, Yuri M. Baron**

## ABSTRACT

The performance of magnetic abrasive finishing for surface is evaluated by the characteristic curve. The characteristic curve is generated by experiment in surface finishing. For experiment, new magnetic inductor is designed and manufactured. 15 kinds of powders are provided to find the relationship between powder characteristic and finishing performance. As powder, Fe-TiC, Polymer-TiC and Fe-NbC are used with different size. The size of abrasives and location are also important factor for the performance. From characteristic curve, two index are obtained, which specify the initial finishing performance and endurance of finishing performance. It is proved that the performance index can be applied to select proper powder for efficient deburring. It is shown that the characteristic curve can be used as good tools for evaluating powder performance in surface finishing and deburring.

**Key Words** : magnetic-abrasive finishing (MAF 자기 연마), burr(버), deburring(디버링), magnetic inductor (자기 유도자), abrasive(연마재), characteristic curve(특성곡선)

## 1. 서론

정밀한 기계가공이 요구되는 추세에서, 밀링이나 드릴링 가공 시 예리하고 불규칙한 버가 발생되어왔다.이를 위하여 1 차적으로 버형성 최소화를 위한 노력이 이루어져 왔다.[1] 이러한 버의 위치가 제거하기 어려운 위치이거나, 과도한 물리적인 힘을 가하여 디버링 하였을 때 제품의 정밀도와 성능의 저하를 가져오기 때문에 많은 디버링 방법들이 연구되어 왔다.[2,3,4]

그 중 자기 연마법(Magnetic Abrasive Finishing)은 철의 자기화 성질과 연마제의 연마특성을 이용하는 방법이다. 자기 유도자(magnetic inductor)에 자기장 형성 시 자기력선의 응집현상으로 연마제를 포함한 철 분말(이후 분말이라 칭함)이 브러쉬 역할을 하게 되어 연마효과가 발생한다. 이와 같은 특징은 제품의 형상 정밀도 보다는 표면상태를 양호하게 하는데 매우 효과적이기 때문에 정밀 표면 가공에 주로 사용되어왔다.[3,4,5,6,7] 이 방법은 전류에 의해 자기장의 세기를 조절할 수 있어, 공작물

접수일: 2003 년 12 월 1 일; 게재승인일: 2004 년 10 월 7 일
* 건국대학교 대학원 기계설계학과
# 교신저자: 건국대학교 기계설계학과
E-mail: slko@konkuk.ac.kr, Tel: (02) 450-3465
** St. Petersburg State Polytech University

에 작용하는 물리적인 힘의 세기를 조절할 수 있다는 장점이 있다. 최근에는 자기연마법이 정밀부품에 형성된 미세한 버를 제거 시에 균일하고 미세한 절삭력으로 제품정밀도를 손상시키지 않고 효율적으로 버 제거가 이루어짐이 판명되었다.[3,4]

본 연구실에서는 이러한 자기 연마법을 디버링에 적용하고자, 적합한 성능의 자기유도자(magnetic inductor)를 개발하였다.[4] 이전의 SM45C 재료에 적용된 연구에 의하면 [4] 원심력으로 지립이 흩어지기 전까지 자기유도자의 회전속도를 높일수록, 테이블 이송속도가 낮을수록 디버링효과가 좋았다. 또한 지립의 크기가 100μm 이상에서 디버링 효과가 발생하고, 자기유도자와 시험 시편의 거리가 2mm 일 때 자기 유도자의 안과 바깥쪽에서 고른 효과를 보았다. 이상의 연구에서 인덕터의 최적의 디버링조건을 선정하였고, 이번 실험에서는 그에 따라 분말에 따른 디버링효과를 알아보고자 하였다. 각기 다른 연마재 재료, 분말의 크기 및 연마재의 크기 및 위치 등을 달리하여 실험하였다.[4]

본 연구에서는 자기연마용 분말의 가공성능을 정량화하여 비교할 수 있는 방법으로서 가공성능 특성곡선을 실험에 의해서 구하는 방법을 소개하였다.이러한 방법으로 선정된 분말을 디버링 작업에 적용 함으로서 효율적인 디버링을 위한 방법을 소개하였다. 실험에 사용된 분말의 성분 및 입자의 크기와 연마입자의 크기와 분말에서의 입자위치에 따른 표면 가공성능을 정량화하여 디버링에 적합한 분말을 선정하여 적용하였다.

## 2. 실험

### 2.1 자기유도자(Inductor) 설계 및 제작

자기연마장치는 Fig.1 에서 처럼 자기 유도자(1), 보 호기(2), 전원 공급 슬라이더(3), 전원 공급장치(4), 시편 고정장치(5) 등의 부분으로 이루어져 있다.

자기유도자 는 수직 밀링 머신에 장착 되어 Fig. 2 (a)에서 나타난 바와 같이 전류가 흐르면 유도자 안쪽에 감긴 코일에서 자기장이 형성되어 지립이 정렬하게 설계되었다. 전류의 양에 따라 자기장의 세기가 달라지고, 전류공급 시 인덕터의 안팎이나 시편과의 간격에 따라 다양한 세기의 자기장이 형성된다. 또한, 전류 차단 시 자기장의 형성을 중단할 수 있는 장점이 있다. 이것은 영구자석에 의한 인덕터에 비하여 자기유도자가 가지는 장점이라 할 수 있다.

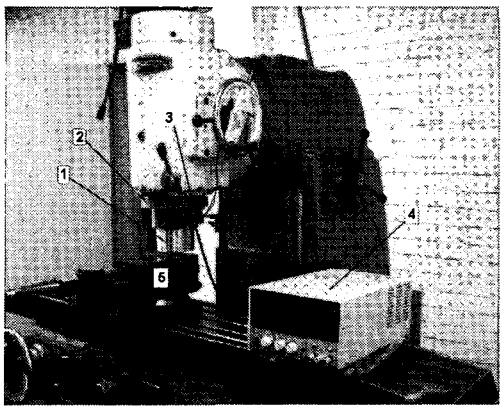
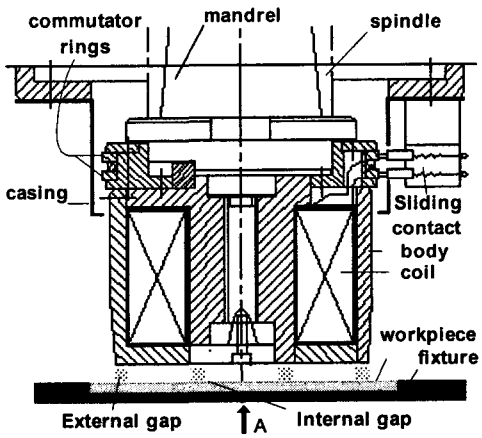
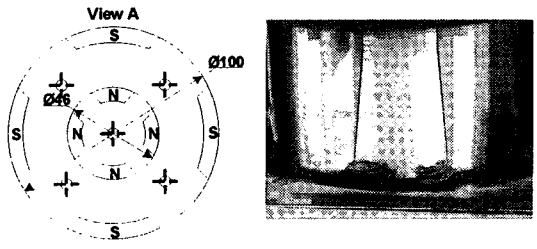



Fig. 1 MAF device in vertical milling machine




(a)




(b) (c)

Fig. 2 Draft and picture of magnetic inductor

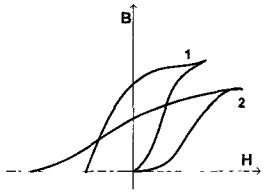



Fig. 3 magnetizing and demagnetizing curves for magnetic materials

자기장은 인덕터의 재료에 따라 다르게 형성되는데, 강자성체 중 Fig. 3 의 자화/소자 곡선에서 나타난 것처럼 적은 전류에도 강한 자장을 형성하는 2 번 재료가 우수한 자기장 형성능력을 가지기 때문에 이러한 재료 중 가장 우수한 재료로 인덕터의 몸체를 제작하였다. 여기서 B(T)는 자화된 재료의 단위 면적 S($m^2$)당 흐르는 자기밀도(magnetic density) Φ (Wb)이고, H(A/m)는 자기세기(magnetic intensity)를 나타낸다.

인덕터의 밑면은 디버링 효과를 높이고자 Fig. 2 (b)에서처럼 안팎으로 각각 4 개의 극을 만들어 자기장이 집중되도록 설계 하였으며 자기연마용 분말이 Fig. 2 (c)처럼 정렬하게 된다.

## 2.2. 분말의 특성곡선을 얻기 위한 실험

이전 연구 결과 Table 1 에서와 같이 최적조건을 선정하였으며 [4], SM45C 판재의 모든 면을 밀링으로 가공한 뒤 모서리를 연삭 하여 표면거칠기가 μ m Ra 2 이하인 시편을 제작하였다. 오차를 줄이고자 Fig. 4 처럼 3 개의 시편으로 실험을 하였다.

분말의 특성에 따른 연마 효과에 미치는 영향을 알아보고자, 일정 시간간격에 따라 표면연마 가공 후 시편의 무게를 측정함으로서 연마에 의한 제거량의 변화를 관찰하여 각 파우더에 따른 특성곡선을 다음 식에 의하여 파악하고자 하였다. Fig.4 에 나타난 각 분말의 특성곡선을 얻기 위하여 일정시간 간격으로 가공 후 시편 1, 2, 3 의 제거량의 평균값을 이용하여 가공시간에 따라서 나타낸 후 최소오차를 갖는 근사식을 다음과 같이 구하였다.

Table 1 Conditions of MAF experiment

| | | | |
|---|---|---|---|
| Coil current | 1.0A | Material of samples | SM45C |
| Working gap(h) | 2mm | Volume of powder | 13$cm^3$ |
| Table feed | 187mm/min | Rotational speed | 130rpm |

$$q = q_1 \cdot \tau^m \quad (1)$$

여기서 q 는 단위 면적당 제거된 양($mg/cm^2$)이고, τ 는 가공시간(min)을 나타낸다. 계수 $q_1$ 은 각 파우더의 초기 가공성능(initial productivity)을 나타내는 지수로서 가공시간 1 분 후의 제거량을 나타내며, 지수 m 은 분말성능의 지속적인 성능을 나타내는 상수이다. 지속적인 성능상수 m 은 위 (1) 식을 log 로 표시하면 가공량을 나타내는 일차방정식의 기울기를 나타냄으로서 지속적인 가공능력을 나타낸다. 계수 $q_1$ 값이 크고 m 값이 작은 경우의 분말은 초기 가공능력은 크지만 지속적인 가공능력이 떨어져서 가공 수명이 짧음을 알 수 있다.

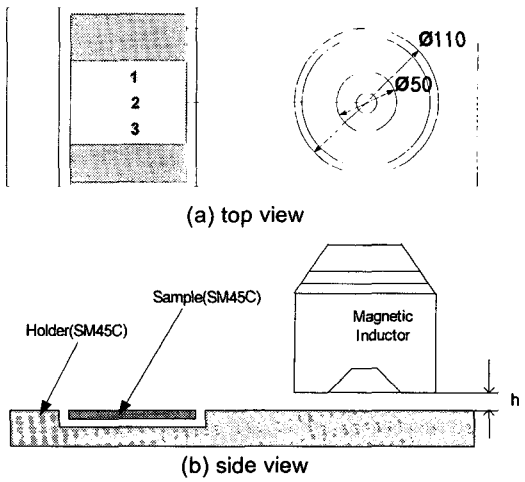



Fig. 4 Arrangement of magnetic inductor and sample in MAF experiment

## 2.3 분말의 종류에 따른 특성곡선 작성

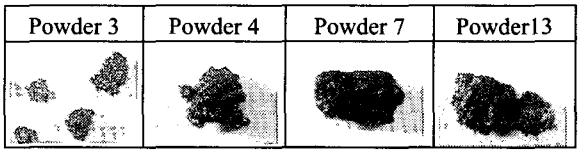



Fig. 5 Pictures of the powders

Table 2 Specification of the magnetic abrasive powder

| No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| material | Fe-TiC | | | | | | Polymer-TiC | | | | | Fe-NbC | | | |
| Grain size (μm) | 500 ~ 400 | 400 ~ 300 | 180 ~ 100 | 500 ~ 400 | 400 ~ 300 | 180 ~ 100 | 500 ~ 400 | 400 ~ 300 | 180 ~ 100 | 500 ~ 400 | 400 ~ 300 | 500 ~ 400 | 300 ~ 200 | 200 ~ 180 | 100 ~ 40 |
| Abrasive size (μm) | 20~14 | | | 40~28 | | | | | | 20~14 | | | 40~10 | | |
| Location of abrasive | In a body | | | On surface | | | | | | In a body | | | | | |
| $q_1$ | 0.55 | 0.54 | 0.44 | 1.09 | 0.51 | 0.47 | 0.49 | 0.27 | 0.36 | 0.44 | 0.23 | 0.45 | 0.49 | 0.60 | 0.31 |
| m | 0.46 | 0.48 | 0.49 | 0.44 | 0.58 | 0.59 | 0.58 | 0.62 | 0.45 | 0.64 | 0.68 | 0.60 | 0.28 | 0.46 | 0.61 |
| $q_{10}$ | 1.59 | 1.63 | 1.36 | 3.00 | 1.94 | 1.83 | 1.86 | 1.13 | 1.01 | 1.92 | 1.10 | 1.79 | 0.93 | 1.73 | 1.26 |

자기연마용 분말은 자성을 띄게 될 Fe 분말과 피삭재와 상대운동 시 가공을 하게 될 연마재와의 혼합분말로서 Fe-Tic, polymer-TiC 그리고 Fe-NbC 로서 3 가지를 사용하였다. 이 재료들은 자기연마용 분말 제작업체로부터 추천받은 분말들이다.

자기연마용 혼합분말은 각 성분별 입자의 크기, 그리고 사용된 연마재의 성분 및 입자크기 그리고 연마재의 부착위치에 따라서 분류할 수 있다.

분말의 크기는 크게 400~500 , 300~400 , 100~180 , 40~100μm 로 구분되었으며 분말에 사용된 연마재의 종류와 크기에 따라서 TiC(14~20μm), TiC(28~40μm), NbC(10~40 μm) 3 가지로 분류된다. 사용된 15 종류의 분말들의 특징이 Table 2 에 나타나있다. 이중 성능이 좋은 대표적인 4, 7, 13 번과 작은 크기의 3 번 분말의 사진을 Fig. 5 에서 나타내었다.

실험에 의하여 자기연마용 분말의 초기 가공성능을 나타내는 $q_1$ 과 가공성능의 지속성을 나타내는 m 값을 구한 값이 Table. 2 에 나타나 있다. 이 계수를 이용하여 각 분말의 특성곡선은 Fig.6 에 각 분말에 대하여 나타내었다. 특성곡선을 이용하여 각 분말의 가공성능을 예측할 수 있으며 적정 분말의 선택에 결정적인 역할을 할 것으로 기대된다.

## 3. 분말의 특성곡선에 의한 성능 분석

Table 2 에 표시되어 있는 $q_{10}$ 은 Fig.6 로 표시되는 가공성능을 나타내기 위하여 사용되었으며, 10 분 동안의 가공 후 제거되는 양을 나타내며 식(1) 로부터 구할 수 있다. $q_1$ 은 초기 가공성능을 나타내며, m 은 분말의 성능 지속성을 나타내지만, $q_{10}$ 을 이용하여 일반적인 성능 비교가 가능하다.

결과적으로, Fig.5 에서 나타난 것처럼 자기연마용 분말의 성분이 Fe-TiC 이고, 그 크기가 500~400μm 이며 연마재인 TiC 입자 크기가 40~28μm 로서 지립이 분말의 표면에 부착되어 있

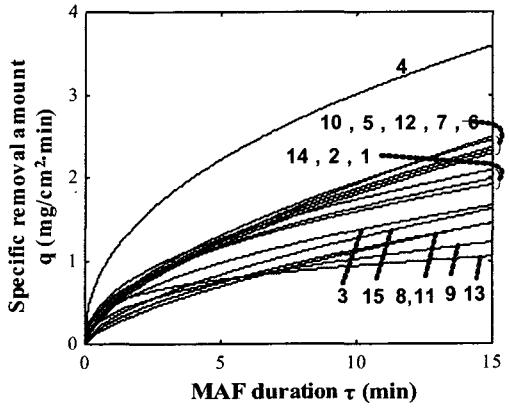



Fig. 6 Characteristic curve of the powders ($q = q_1 \cdot \tau^{m}$)

는 4 번 분말의 경우에 가장 우수한 가공특성을 나타내고 있다. $q_1$ 은 1.09 로서 가장 큰 초기가공성능을 나타내고 있으며 m 의 값은 0.44 를 나타내고 있다. 반복실험에서도 조금의 차이는 있으나 큰 차이점은 없었다. $q_{10}$ 이 3.0 으로서 가장 좋은 성능을 나타냄을 알 수 있다.

### 3.1 분말의 성분에 따른 성능 분석

자기연마용 분말은 철분말과 연마재의 혼합물로서 Fe-TiC, Polymer-TiC, Fe-NbC 3 가지 종류의 분말의 성능을 비교하였다. 동일한 조건에서의 성능 비교를 위하여 동일한 입자크기와 연마재 크기 및 위치를 보유한 분말을 사용하였다.

Table 2 에서 분말 #1, #10 그리고 #12 의 분말은 성분 이외의 특성으로서 분말의 입자크기와·연마재의 크기를 동일한 조건으로 유지하였다. 그 결과 Fig. 7 에서 처럼 Fe-TiC 는 초기 연마 효과를 나타내는 $q_1$ 이 다른 재료보다 좋게 나왔으나, 연마 효과의 지속성을 나타내는 m 은 Polymer-TiC 와 Fe-NbC 에 비해 떨어지는 것으로 나타났다. Fig.5 로부터 초기성능을 제외하고는 10 번과 12 번 분말의 성능이 우수함을 알 수 있다. $q_{10}$ 은 1.59, 1.92, 1.79 를 각각 나타냄으로서 10 번인 Polymer-TiC 가 가장 우수하게 나타났다. 즉 Polymer-TiC 와 Fe-NbC 가 상대적으로 연마재를 견고하게 지지해 준다고 볼 수 있다. 그러나 이와 같은 현상은 분말 2 번과 11 번의 비교에서는 오히려 반대로 나타남으로써 성분에 따른 성능에 미치는 영향은 분명하지 않다고 여겨진다.

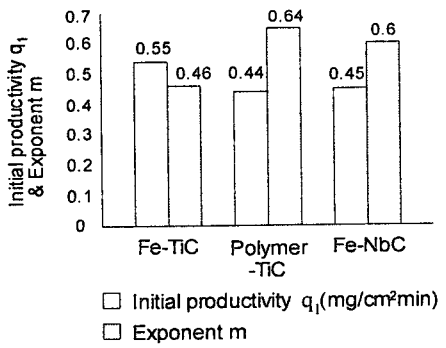



Fig. 7 Comparison of initial productivity and exponent according to the powder material

### 3.2 분말 크기에 따른 성능 분석

분말의 입자 크기에 따른 가공성능을 비교하기 위하여 Fe-TiC 분말의 연마재입자의 크기가 40-28μm 인 #4, #5 그리고 #6 의 분말을 비교하였다. Table 2 로부터 $q_{10}$ 의 값이 3.0, 1.93 그리고 1.83 을 나타냄으로써 분말입자가 클수록 가공성능이 우수한 것을 알 수 있다. 이것은 예측 가능한 현상이기도 한다. 그러나 미소 가공 시 적절한 입자크기는 개별적으로 주어진 조건에서 구체적으로 구해져야 한다고 본다. Fig.8 로부터 분말입자의 크기가 클수록 초기의 성능은 좋아지고, 연마성능의 지속성은 거의 차이가 없이 비슷하게 나타났다. 이와 같은 현상은 분말 #1,2,3 이나 #7,8,9 에서의 비교를 통해서도 알 수 있다. 분말입자 크기가 초기가공성능에는 분명한 영향을 미침을 알 수 있으나 수명지수에는 분명한 연관성을 발견하기 어렵다. 이것은 가공 시 분말의 질량이 클수록 자기유도에 의한 절삭력이 증가하기 때문이다. 자기유도에 의한 절삭이 증가하기 위하여 또한 Fe 성분의 증가도 필요하다. 그러나 가공은 연마재를 통하여 발생하기 때문에 연마재 성분의 비율은 적정량이 결정되어야 한다.

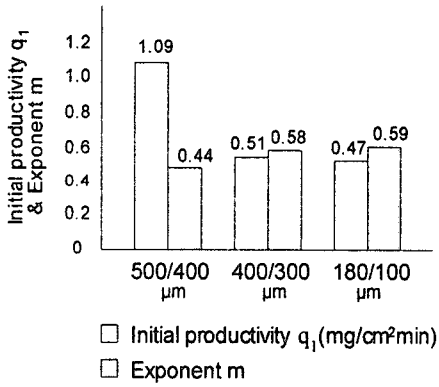



Fig. 8 Comparison of initial productivity and exponent according to the powder size

### 3.3 연마재의 크기와 위치에 따른 성능 분석

연마재 입자가 혼합분말에서 전체적으로 분포되었는지 혹은 표면에만 분포되었는지에 따라 분말의 가공성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Fe-TiC 분말에서 연마재 입자크기가 다른 Table 2 의 #1 과 #4 를 비교하였다. 분말의 제작특성에 의하여 연마재 입자가 작은 경우에는 분말입자 전체에 골고루 분포하며 연마재 입자가 큰 경우에는 분말 표면에 입자가 분포한다. Fig.9 로부터 연마재 입자가 크고 표면에 분포하는 분말의 초기가공성능이 매우 우수함을 알 수 있다. 이에 비하여 가공성능의 수명에는 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 이는 가공에 깊이 관여하는 연마재를 연삭에서 연삭 숫돌에 부착된 연마입자로 생각할 수 있는데 연마입자가 크고 표면에 부착되어 있는 경

우가 가공성능이 매우 우수함을 알 수 있다. $q_{10}$ 의 값이 1.59 와 3.0 을 나타내고 있다. 이와 같은 현상은 동일한 성분의 분말에서 연마재 입자가 다른 모든 경우(분말 2,5 번 3,6 번 7,10 번의 비교)에서 분명하게 관찰할 수 있다. 이를 통하여 가공성능은 연마재가 분말의 표면에 부착되어 있고 큰 입자의 경우에 우수함을 분명히 알 수 있다.

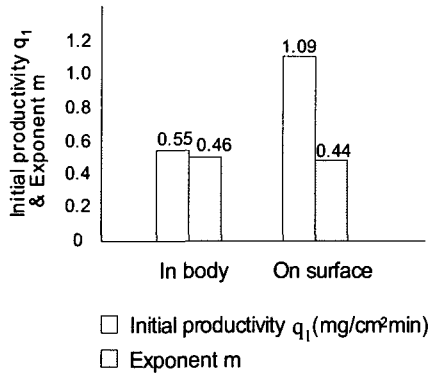



Fig. 9 Comparson of initial productivity and exponent according to the situation of abrasive

## 4. 자기유도에 의한 드릴링 버의 deburring

자기연마용 분말의 특성곡선에 의한 성능평가를 통하여 표면연마성능을 예측할 수 있었다. 이 결과에 의하여 선정된 동일한 분말을 사용하여 드릴링시 발생된 버제거 성능을 바교하고자 한다.

특성곡선으로부터 분말의 초기 성능과 지속성 및 $q_{10}$ 을 비교하여 Fe-TiC, Polymer-TiC, Fe-NbC 로 이루어진 것 중 뛰어난 효과를 발휘한 분말 중에서 분말의 크기가 500~400μm 인 #4, #7 그리고 #12 분말 3 가지를 선정하여 deburring 효과를 실험하였다. deburring 을 위한 조건으로서 Table 1 에 나타난 가공조건을 이용하였다.

디버링을 위한 버의 형성은 SM45C 합금강을 직경 3mm 인 구멍가공에 의해서 균일한 버를 형상하였다. 형성된 버의 모양과 크기는 Fig.10 과 11 에 나타나있다. 형성된 버는 균일한 형태로서 레이저를 이용하여 정밀하게 측정되었다. Fig.12 에 초기 버와 최종 가공 후 측정한 그래프가 예시되어 있다. Fig.4 에 나타난 3 개의 각 시편마다 9 개의 구멍가공 후에 발생된 버에 대하여 deburring 전과 작업 중에 측정된 버의 형상의 평균값으로

Fig.10 에 나타냄으로서 deburring 효과를 표시하였

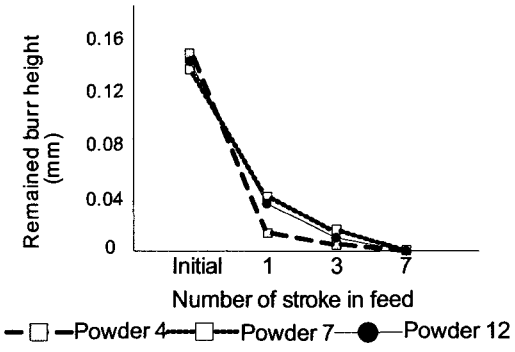



Fig. 10 Comparative deburring effect according to the powder and deburring time

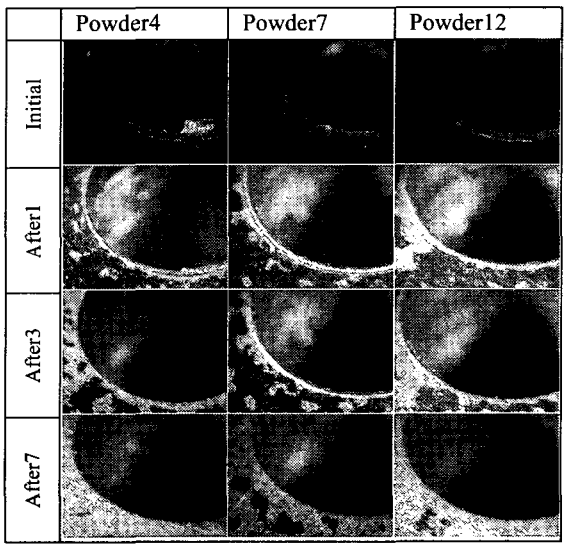
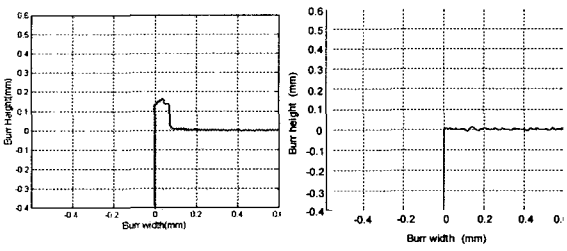



Fig. 11 Deburring process according to different powders and deburring time




(a) (b)

Fig. 12 Burr geometry graph (a) Initial (b) Final

다. 가공 중 단계별 버의 상태를 Fig.11 에 나타내었다. 각 단계별 버의 평균 높이를 Fig.10 에서 각 분말에 대하여 나타냄으로써 deburring 효과를 비교하였다. 자기유도자의 왕복횟수에 따른 버제거 효과를 잘 나타내고 있다. #4 분말의 경우 3 번의 가공 후 버 제거가 거의 이루어졌음을 Fig.11 로부터 알 수 있다. 이에 비하여 #7 과 #12 분말의 경우 아직 버가 남아 있음으로써 #4 분말의 버 제거 능력이 가장 우수함을 알 수 있다. 이것은 앞의 표면연마 가공능력을 나타내는 특성곡선으로부터도 예상 가능한 결과임을 알 수 있다. 이로써 자기연마용 분말의 deburring 특성이 표면연마용 특선곡선으로 어느 정도 예측 가능한 것으로 생각할 수 있다.

분말 #4 의 경우 대부분의 버가 3 번의 가공 후 제거됨을 알 수 있으며 #7 과 #12 의 경우도 7 번의 가공 후에는 거의 제거되었음을 알 수 있다. 이로부터 자기연마에 의한 버 제거 방법은 타당한 방법으로 여겨진다. 가공의 효율성을 높이기 위하여 적정 분말을 선정하는 것이 필요하다. 또한 적정 가공조건의 선정 또한 효율성을 높이기 위한 주요한 요소임을 사전 연구에 의해서 증명하였다.

## 5. 결론

1. 자기연마에 의한 표면연마 및 디버링을 위한 밀링용 자기유도자를 설계 및 제작하였다.
2. 자기연마용 분말을 이용한 표면연마성능을 나타내는 특성 곡선인 $q = q_1 \cdot \tau^m$ 은 초기 가공성능과 가공수명의 평가에 적합함을 알게 되었다.
3. 분말 입자의 크기가 클수록 초기가공성능이 우수하나 가공수명에 미치는 영향은 미약하다. 연마재 입자의 크기가 크고 분말입자 표면에 위치할수록 가공능력이 우수하다.
4. 자기연마용 분말의 표면연마 가공성능 특성의 시험 결과가 deburring 성능 평가에도 동일 하게 적용됨을 알 수 있다. 이를 바탕으로 deburring 성능 평가 및 향후 자기연마용 분말 개발 및 성능 평가에 중요한 기준이 될 것으로 기대 된다.

## 후 기

이 논문은 2003 학년도 건국대학교 학술 연구비 지원에 의한 논문임.

## 참고문헌

1. Ko, Sung-Lim, Chang, Jae-Eun, "Development of Drill Geometry for Burr Minimization in Drilling," CIRP. Vol.52, pp.45-48, 2003.
2. Baron ,Yuri. M., "Technology of abrasive finishing in magnetic field," – Leningrad, Mashinostroenie.- pp.128, 1975.
3. Baron, Yuri. M., "Magnetic abrasive and magnetic finishing of products and cutting tools," - Leningrad (Rus) pp.172, 1986.
4. Baron, Yuri. M., Ko, Sung-Lim, Repnikova, Elena, "Experimental Verification of Deburring by Magnetic Abrasive Finishing method," 2nd Asia Pacific Forum on Precision surface Finishing and Deburring Technology, Seoul, Korea, pp. 166-178, 22-24, July, 2002.
5. Shimura, Takeo, Takazawa, Koya, Hatano, Eiju, "Study on Magnetic-abrasive Finishing – Effects of Various Types of Magnetic Abrasive on Finishing Characteristics," Bull. Japan Soc. of Prec. Engg. (JSPE), Vol 21, No.2 (June 1987), pp. 139-146.
6. Hitomi, Yamaguchi, Shinmura, Takeo, "Study of an internal magnetic abrasive finishing using a pole rotation system .Discussion of the characteristic abrasive behavior," Precision Engineering Journal of the International Societies, pp.237-244, 2000.
7. Lee, Yong-Chul, Lee, Eung-Sook, Choi, Hon-Jong, "A Study on Ball Screw Polishing Using Magnetic Assisted Polishing," Proc. of kspe, pp. 43-47 October 1997.