

호닝의 버 생성 분석과 제거가공에 관한 연구

Characteristics of Burr Generation and Deburring on Honing

최민석 (KAIST 기계공학과 대학원), 김정두 (KAIST 기계공학과)
Min-Seog Choi (Graduate School, KAIST), Jeong-Du Kim (KAIST)

ABSTRACT

This paper describes the characteristics of micro-burr formation in the cross hatch and deburring in honed surfaces. Two types of micro-burrs formed in the cross hatch were defined as upper edge burr (type A) and side edge burr (type B). The size of micro-burrs were measured for the honed surfaces of several cross hatch angle. Deburring mechanism and system using magneto-electrolytic process including the abrasive pad for mechanical deburring effects together were introduced. Deburring experiments and analysis were carried out to confirm the effectiveness of the deburring process.

Key Words : Micro Burr (미세 버), Cross Hatch Angle (교차각), Deburring (디버링), Magneto-Electrolytic Process (자기전해공정)

1. 서 론

호닝가공된 실린더 내면에는 호닝스틱의 왕복운동과 스피들의 회전운동으로 인해 교차각 (cross hatch angle)이 형성된다. 교차각은 그 안에 액체를 함유할 수 있는 공간을 제공하기 때문에 공급된 윤활유를 함유하여 자체적으로 지속적인 윤활작용이 이루어질 수 있게 되기 때문에 내면 윤활이 필요한 기계부품들에서 매우 중요한 작용을 한다 [1-3].

일반 호닝가공에서 교차각이 형성될 때 교차선의 모서리 부분 및 끝단에는 미세 버 (micro burr)가 발생되는데 이러한 미세 버는 마찰에 의한 마모를 촉진시키고 찌꺼기를 발생시킬 수 있으며 조립상태의 치수 정밀도를 저하시킬 가능성이 있어 호닝가공 후 이를 제거해야할 필요성이 있다 [4]. 그러나 이러한 호닝 미세 버의 제거에 관한 연구는 아직까지 전무한 상태이다. 자기전해 연마공정은 표면의 경면다듬질 가공 뿐 아니라 미세한 가공량에 의해 초정밀가공이 가능한 공정으로써 전해작용, 자기작용 및 기계작용이 결합되어 금속표면의 미세한 재료를 제거하는데 매우 능률적인 공정이다 [5,6].

본 연구에서는 일반 탄소강 (SM45C)의 호닝가공 때 나타나는 교차각의 미세 버를 현미경 사진 및 표면조도 프로파일을 통해 관찰하고 교차각에 따른 버의 형상 및 크기를 분석하였으며 호닝조건에 따른 버 생성특성을 분석하였다. 또한 미세버를 제거하기 위한 방법으로 자기전해 공정을 이용한 디버링 장치를 제작하여 실험을 실시하고 호닝 미세 버의 제거 특성에 관한 실험결과를 분석하였다.

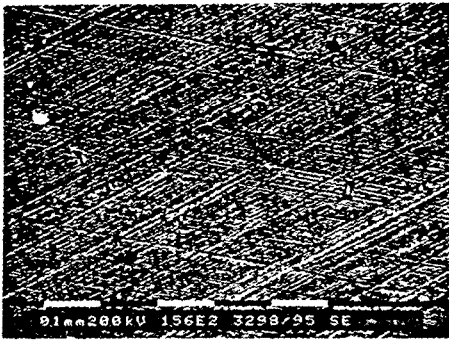
2. 호닝조건에 따른 버 발생특성 분석

2.1 호닝실험 및 버 생성 관찰

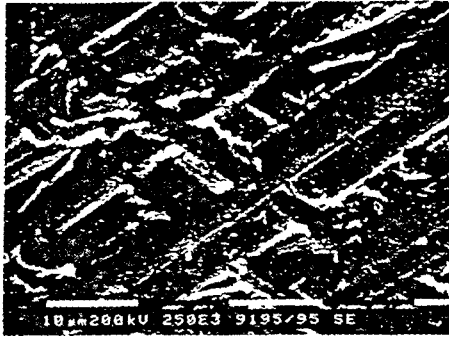
호닝가공 후 교차각에 나타나는 버를 관찰하기 위해 수평형 호닝기를 사용하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 공작물은 직경 50 mm, 길이 40 mm 크기의 SM45C를 사용하였다. 호닝가공 전의 초기 공작물은 선삭 및 내경 연삭을 수행하였으며 진원도는 10 μ m 정도로 가공하였다. 버 생성 분석을 위한 호닝실험의 주요 가공변수는 공구가 장착된 주축회전수와 공작물의 왕복 운동속도이며 각각 200 rpm 과 10, 13, 16, 19 mm로 설정하였다. 호닝 미세 버의 형상 및 크기는 현미경 사진 및 표면조도계를 통해 관찰하였다.

Fig. 1은 호닝가공 후의 공작물 표면에 형성된 교차선을 현미경으로 관찰한 것이다. 그림 (a)는 교차각이 30°이며 150배 확대한 사진으로써 전체적으로 균일하게 교차선이 형성되어 있다. 그러나 같은 재료의 한 부분을 2500배 확대한 그림 (b)에서는 교차선이 불균일하며 모서리를 따라 많은 버가 생성되어 있음을 알 수 있다. 그림 (c)는 교차각이 15°인 가공표면을 2500배 확대한 사진을 나타낸다. 마찬가지로 불균일한 교차선의 배열들이 존재하며 버의 생성형태도 일정치 않다. 여기에서 관찰할 수 있는 버는 두 가지로 구분할 수 있으며, 하나는 교차선 상단부 모서리를 따라 발생한 버이고 다른 하나는 측면 모서리에 생성된 버이다.

Fig. 2는 이 두 가지 형태의 버를 단순화시켜 나타낸 그림이다. 그림 (a)는 하나의 교차각을 구성하는



(a) cross hatch angle 30° (×150)



(b) cross hatch angle 30° (×2500)

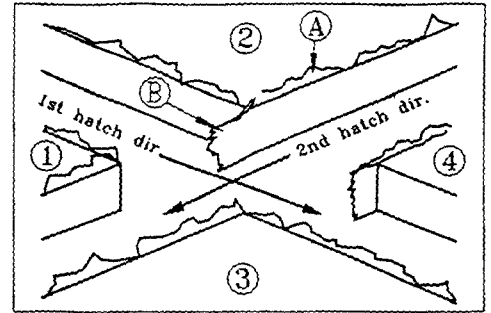


(c) cross hatch angle 15° (×2500)

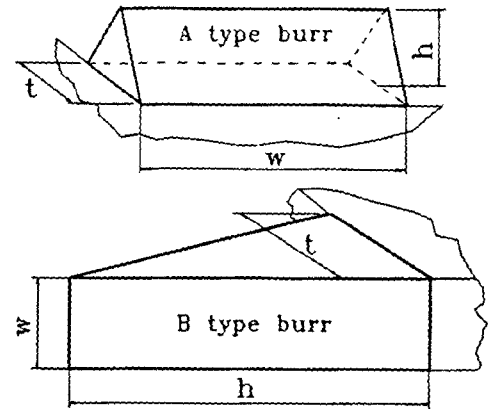
Fig. 1 SEM photograph of honed surface showing the micro-burr along the cross hatch lines.

는 네 개의 블록을 나타내며 상단 모서리 버와 측면 모서리 버의 발생위치를 알 수 있다. (A)로 표시된 상단 모서리 버는 절삭이 일어날 때 플라우잉 (p.oughing)에 의해 재료의 일부가 양쪽으로 유동하여 생성된 버이며 거의 모든 상단부 모서리에 존재하게 된다. 그러나 (B)로 표시된 측면 모서리 버는 절삭이 일어나는 방향으로 블록이 끝나는 지점에서 재료가 밀려 생성되기 때문에 그림에서와 같이 네 개의 블록 중 절삭이 시작되는 ①과 ③에는 측면 모서리 버가 발생하지 않고 절삭이 끝나는 ②와 ④에만 발생한다. 그림 (b)는 두 가지 버의 형태를 단순화시켜 나타낸 것이다. 버의 형태는 길이 (h), 두께 t 및 폭 (w)으로 표현할 수 있으며 각각 그림에

표시된 바와 같다.



(a)



(b)

Fig. 2 Honing micro-burr generated along the cross hatch line edges and its definition.

Fig. 3은 호닝 교차각의 변화에 따라 발생한 미세 버의 길이, 두께 및 부피를 측정된 결과이다. 여기서는 (A)형의 상단 모서리 버는 제거가 비교적 용이하고 측정이 어려워 (B)형의 측면 모서리 버에 대해서만 측정하였다. 버의 길이 (h)와 버의 두께 (t)는 현미경 사진을 통해 비례적으로 측정하였고 버의 폭 (w)은 교차선의 높이와 근사적으로 같다고 가정하고 표면조도계 및 현미경 사진을 통해서 그 깊이의 근사치를 측정하였으며 측정결과 평균적인 교차선의 깊이는 약 6 μ m로 나타났다. 버의 부피는 Fig. 2에서 정의한 형상에 따라 다음과 같이 계산하였다.

$$V_b = \frac{1}{2} h \cdot t \cdot w \quad (1)$$

교차각의 크기는 주축의 회전속도와 공작물의 왕복속도의 조합에 의해 15°, 20°, 25°, 30°로 하였으며 교차각이 증가함에 따라 버의 길이는 감소하고 두께는 약간 증가하는 경향을 나타낸다. 측정된 버의 길이와 버의 두께 데이터를 이용하여 식 (1)에 의해 계산된 버의 체적은 교차각 변화에 의해 크게 변화하지는 않으나 20°의 교차각에서 약간 크게 나타났다.

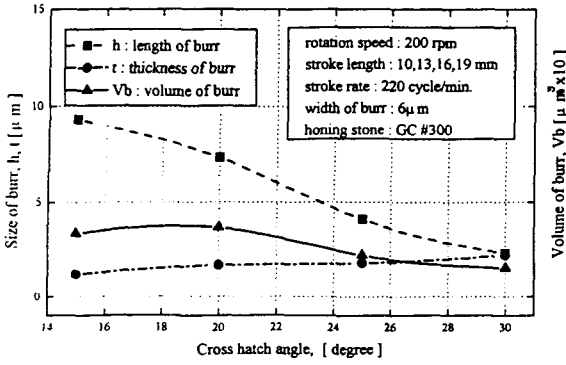


Fig. 3 Size of burr with respect to the cross hatch angle in honing.

3. 호닝 미세 버의 제거방법 및 실험

3.1 자기전해 디버링 장치 및 방법

호닝에서 발생하는 미세 버의 효과적인 제거를 위해 자기전해 공정 [5,6]을 이용하였다. Fig. 4는 자기전해 공정을 이용한 호닝 미세 버의 디버링 실험 장치를 나타낸다. 디버링 장치는 수평형 호닝머신 (SUNNEN 사의 MBB-1690)에 설치하였으며 주요 구조는 다음과 같다. 즉, 호닝스티크이 부착되는 회전

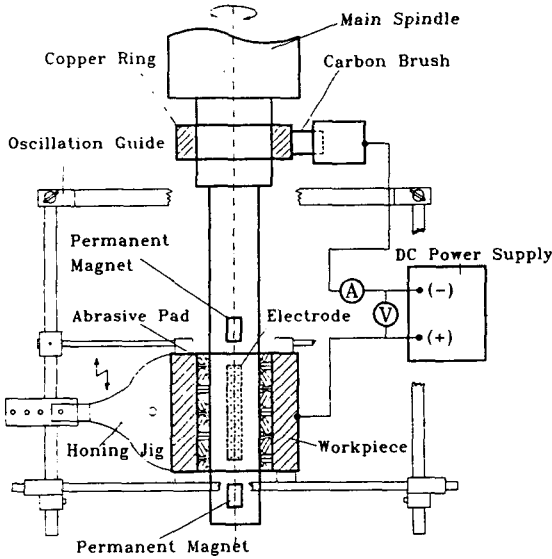


Fig. 4 Magneto-electrolytic deburring system.

주축에 호닝스티크 대신 장착한 동 (copper)전극, 영구 자석 (permanent magnet) 및 부직포 연마패드로 구성된 디버링 공구부와 호닝유 대신 전해액 (NaNO_3)을 공급하기 위한 펌프시스템 및 동 전극과 공작물에 전류를 공급하기 위한 전원 시스템이다. 디버링 방법은 호닝가공과 마찬가지로 주축에 부착된 디버링 공구부가 회전하고 공작물이 왕복운동하도록 하

였다.

Fig. 5는 디버링 공구부와 공작물의 관계에 의한 자기전해 디버링 원리를 나타내는 단면도이다. 영구 자석에 의한 가공영역의 자속밀도는 600 Gauss로 하였으며 전해액으로 NaNO_3 (20%) 수용액을 사용하였다. 직류전원으로부터 탄소브러쉬를 통해 동 전극에 (-) 전압이, 공작물에는 (+) 전압이 인가되어 양자간에 전해전류가 흐르도록 하였다.

호닝 미세 버를 효과적으로 제거하기 위한 자기전해 디버링 방법은 다음과 같다. Fig. 5에서 동 전극은 전해화학반응에 의해 버의 전해용출을 발생시키고 전기장에 수직인 방향의 자기장을 발생시키도록 한 전극 양측의 영구자석은 이러한 전해용출 능력을 향상시키는 역할을 한다 [5,6]. 부직포 연마패드는 동 전극과 공작물 사이에 전해반응이 일어나도록 간극을 형성시킴과 동시에 공작물 표면에 압력을 작용시킨다. 디버링이 진행되면 공작물 표면에 돌출된 상단 모서리 버에 전류가 집중되어 먼저 제거된다. 또한 상단 모서리 버가 제거되는 동안은 부직포 연마패드에 함유된 연마재의 기계적 디버링 작용이 동시에 작용하기 때문에 제거 능력이 빠르다. 그러나 측면 모서리 버는 표면에서 돌출되어 있지 않고 교차선 깊이까지 형성되어 있기 때문에 상대적으로 낮은 전류밀도에 의한 전해반응이 이루어져서 매우 느리게 제거된다. 모서리 버가 제거된 후 전해 전류 밀도 분포는 면적이 넓은 교차선 표면 자체 보다는 날카로운 끝단 버에 집중하게 되고 전해용출에 의한 디버링이 이루어진다.

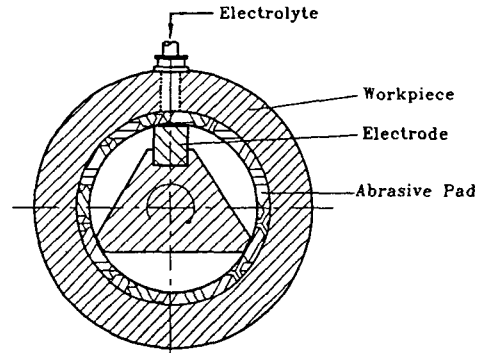


Fig. 5 Principle of magneto-electrolytic deburring.

3.2 디버링 시간의 선정

상단 모서리 버가 제거된 후 측면 모서리 버가 자기전해 공정에 의해 제거되는데 측면 모서리 버는 교차선 표면과 같은 높이에 형성되어 있어 디버링이 진행되는 동안 교차선 자체도 느린 속도로 제거됨을 예상할 수 있다. 디버링 시간을 너무 길게 하면 버가 완전히 제거되더라도 재료의 교차선 표면이 가공되어 없어지기 때문에 좋지 않다. 따라서 적절한 디

버링 시간을 찾아낼 필요성이 있다. 이와 같이 적당한 시간동안 디버링을 수행하게 되면 끝단 버의 제거와 함께 교차선 모서리 부분이 가공되어 부드러운 형상이 된다.

일반적인 전해가공에서 I A의 전류가 t 초 동안 흐름으로써 용출하는 재료의 제거체적 V_t 는 다음과 같다 [7].

$$V_t = \frac{Mit}{nF\gamma} \quad (2)$$

여기서 M은 원자량, I는 전해전류, t는 전해시간, n은 원자가, F는 패러데이 상수, γ 는 재료의 밀도를 각각 나타낸다. 식 (2)에서 $M/nF\gamma$ 는 단위전기량 (I=1A, t=1초)당의 용출체적이며 금속재료의 종류에 따라 결정되는 재료상수이고 비 가공체적이라 한다. 공작물이 순수한 철인 경우에 비가공체적 (V_s)은 $2.3 \text{ mm}^3/\text{A} \cdot \text{min}$ 으로 알려져 있다 [7].

동 전극과 공작물 사이의 순간 전류밀도 (J)는 평균적으로 공급되는 전류를 전극단면적으로 나눈값이 된다.

$$J = \frac{I}{l_e \times w_e} \quad (3)$$

여기서 l_e 및 w_e 는 동 전극의 길이 및 폭을 각각 나타낸다. 한 개의 버에 걸리는 등가전류는 근사적으로

$$I_{burr} = J \times \left(\frac{1}{2} h \cdot t\right) \quad (4)$$

과 같고 식 (1)과 식 (2)에서 미세 버를 제거하는데 필요한 시간 t_b 를 계산하면 다음과 같다.

$$t_b = \frac{1}{2} \frac{h \cdot t \cdot w}{V_s I_{burr}} \quad (5)$$

자기전해 공정에 대한 기존의 연구 [5]에 의하면 NaNO_3 (20%)를 전해액으로 사용하고 전해전류 밀도가 0.3 A/cm^2 인 경우 자속밀도 600 Gauss인 자기장이 전기장에 수직하게 공급되면 전해전류 및 가공량은 약 50% 상승하게 된다. 따라서 자기전해공정에 의한 최적 디버링 시간 t_m [분]은 다음과 같다.

$$t_m = \frac{2}{3} \cdot t_b = \frac{1}{3} \frac{h \cdot t \cdot w}{V_s I_{burr}} \quad (6)$$

동 전극은 특정한 크기를 갖고 있으며 회전 주축상의 한 부분에 장착되어 있기 때문에 회전하는 동안 각각의 미세 버는 연속적인 자기전해 반응을 일으키지 않고 단속적인 디버링이 일어난다.

Fig. 6에서 전극의 길이는 l_e , 폭은 w_e , 공작물의 내부 반경은 R, 전극이 부착된 주축의 회전속도는 N[rpm], 전극과 미세 버의 상대속도는 주축의 회전운동만을 고려하여 V_e 로 표시하였다. 미세 버의 크기는 동 전극의 폭에 비해 무시할 정도로 작다고 가정하면 주축 1회전당 전극과 미세 버의 실제 접촉시간 t_c 는 다음과 같다.

$$t_c = \frac{w_e}{V_e} = \frac{w_e}{2\pi RN} \quad (7)$$

식 (4)의 총 디버링 시간 t_m 을 1회전당 실제 접촉시간 t_c 로 나누면 디버링에 소요되는 총 회전수가 되고 여기에 1회전에 필요한 시간 $1/N$ 을 곱하면 실제 디버링 시간 t_d 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} t_d &= \frac{t_m}{t_c} \times \frac{1}{N} \\ &= \frac{4\pi}{3} \frac{l_e R w}{V_e} \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (8)$$

실험에 사용한 동 전극의 길이 (l_e)는 40mm, 공작물의 반경 (R)은 25mm, 표면조도계 및 현미경 사진을 통해 측정된 측면 모서리 버의 폭 (w)은 약 6 μm 이다. 전류밀도를 5 A/cm^2 로 설정하였으며 공급해야 할 전류값 (I)은 식 (3)으로부터 12A이다. 이 값을 식 (8)에 대입하면 디버링 시간 (t_d)는 약 36초이다. 그러나 NaNO_3 (20%)를 사용할 경우 공작물 표면에 절연피막이 형성되어 통전성을 떨어뜨리기 때문에 전류효율이 12%정도로 매우 낮다. 따라서 전류효율을 고려하여 실제 실험에 적용할 디버링 시간을 7분으로 선정하였다. 식 (8)에서 알 수 있는바와 같이 디버링 시간은 버의 체적보다는 단지 버의 폭에 비례하고 공급되는 전해전류에 반비례함을 알 수 있다.

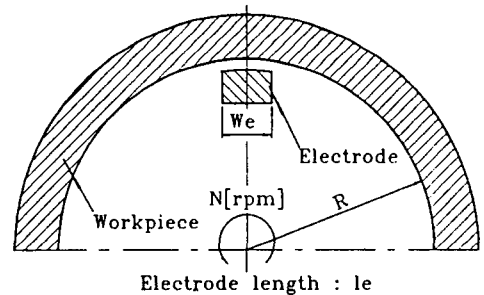


Fig. 6 Schematic diagram showing the relation between the workpiece and electrode.

3.3 실험결과 및 고찰

Fig. 7은 서로 다른 교차각을 갖는 호닝가공된 공작물의 자기전해 디버링 결과로써 앞에서 계산에 의해 예측한 바와 같이 7분동안 디버링한 후의 버 크기를 측정된 것이다. 디버링은 전극회전속도를 200 rpm, 공작물 왕복속도를 220 cycle/min, 왕복길이를 19 mm로하여 디버링 교차각이 30° 가 되도록 하였다. 버의 길이는 디버링 전에 교차각 15° 와 20° 에서 매우 크게 발생하였으나 디버링 후에는 25° 및 30° 의 경우보다 작게 남아있어 교차각이 작은 경우에 디버링이 잘됨을 알 수 있다. 버의 체적은 교차각이 작은 경우에 매우 작게 남아있고 25° 및 30° 에서는 특히 크게 남아있는데 이는 버의 폭 및

두께가 이러한 교차각에서는 많이 제거되지 않고 남아있기 때문이다. 그러나 버의 폭은 교차각 15° 의 경우 초기 $6\mu\text{m}$ 에서 디버링 후에는 $2\mu\text{m}$ 미만으로 줄어들어 뾰족한 교차각 표면 형상 자체가 디버링시 동시에 제거되어 전체적으로 낮아졌음을 예측할 수 있다.

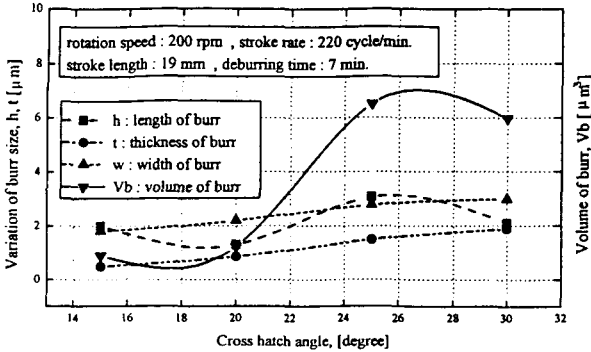


Fig. 7 Size of burr after deburring experiments with respect to cross hatch angle.

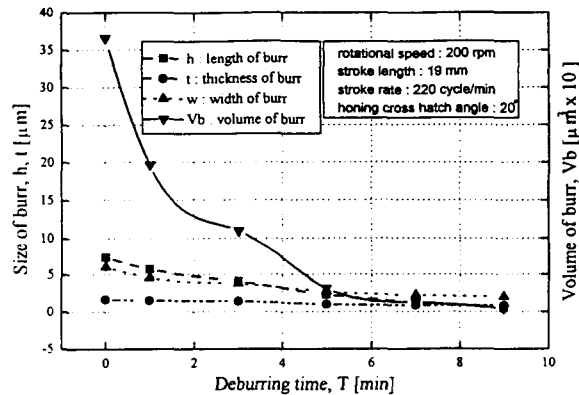


Fig. 8 Variation of micro-burr size with respect to the deburring time.

Fig. 8은 호닝 교차각이 20° 일때 디버링 시간에 따른 버의 크기변화를 나타낸다. 마찬가지로 디버링 교차각은 30° 로 하였다. 버의 두께는 디버링 시간에 따라 크게 감소하지 않으나 버의 길이 및 두께는 거의 일정하게 감소한다. 버의 체적은 초기에 빠르게 감소하다가 5분 이후에 약간씩 감소한다. 초기 버 체적의 90% 이상이 5분 이내에 제거됨을 알 수 있다.

6. 결론

호닝가공에서 발생하는 미세 버의 형태를 관찰하고 교차각에 따른 버의 크기를 측정하였으며 이를 제거하기 위해 자기전해 디버링을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 호닝가공에서 교차각의 상단 모서리 버와 끝

단 모서리 버가 발생함을 관찰하였다. 이러한 버는 크기가 수 μm 이내인 미세 버이다.

(2) 미세 버의 크기는 끝단 모서리 버의 경우 교차각이 작은 경우에 길이가 크며 버의 두께는 교차각이 큰 경우에 약간 크게 발생한다.

(3) 자기전해 공정을 이용하여 미세 버를 제거하기 위해 디버링 시간을 계산한 결과 디버링 시간은 7분이며 버의 체적에 무관하고 단지 버의 폭에 비례하며 공급되는 전해전류에 반비례함을 알았다.

(4) 디버링 시간을 증가시키면 미세 버가 완전히 제거되나 윤활에 요구되는 교차선들마저 제거하기 때문에 디버링 시간은 너무 크게하지 않는 것이 바람직하다. 실험에서는 호닝 교차각이 20° 인 경우에 초기 버 체적의 90% 이상이 5분 이내에 제거됨을 확인하였다.

(5) 교차선 상단부 모서리에 발생하는 미세 버는 자기전해 공정 및 연마재의 기계적 제거작용이 복합되어 능률적으로 제거하고 교차선 끝단의 모서리에 발생하는 미세 버는 자기전해 공정에 의해 제거하도록 하는 자기전해 디버링 방법이 호닝 미세 버의 제거에 효과적임을 확인하였다.

참고문헌

- [1] J.Lee and S.Malkin, "Experimental Investigation of the Bore Honing Process", ASME, vol. 115, pp. 406-414, 1993.
- [2] J.D.Kim, Y.B.Lee and S.H.Park, "A Study on the Honing of Zirconia Ceramics by Diamond Abrasive Sticks", JMPT, vol. 41, pp. 201-212, 1992.
- [3] Kazuhiro Yokoyama, "Analysis of Dimensional Error and Improvement of Honing Accuracy by In-process Compensation of Thermal and Elastic Deformation", JSPE, vol. 26, 1992.
- [4] La Roux K. Gillespie, "Process Control for Burrs and Deburring", 3rd International Conference on Precision Surface Finishing and Burr Technology, Seoul, 1994.
- [5] J.D.Kim and M.S.Choi, "Development of the Magneto-Electrolytic Abrasive Polishing(MEAP) (1st report) -Effect of Magnetic Field on Electrolytic Finishing Process-", Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, vol.4, no. 3, pp. 25-30, 1995.
- [6] J.D.Kim and M.S.Choi, "Development of the Magneto-Electrolytic Abrasive Polishing(MEAP) (2nd report) -Development of the MEAP system and Finishing Characteristics-", Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, vol. 4, no. 3, pp. 31-38, 1995.
- [7] J.A. McGeough, Principles of Electrochemical Machining, Chapman and Hall, London, 1974.