

입방정질화붕소입자 전착지식에 의한 전해디버링 시스템

(Electrochemical Deburring System by the Electroplated CBN Wheel)

최 인 휴*, 김 정 두**

* KAIST 기계공학과 대학원, ** KAIST 기계공학과

ABSTRACTS

Deburring and edge finishing technology as the last process of machining operation is required for manufacturing of advanced precision components, deburring has treated as a difficult problem on going to the high efficiency, automation in the FMS. Removal of burr with various shapes, dimensions and properties couldn't has a standard and has depended on manual treatment. Especially, deburring for cross hole inside owing to passing through out perpendicular to a main hole is more difficult, the electrolytic method is proper as its solution at practical aspects. Therefore, for the high efficiency and automation of internal deburring in the cross hole, development of electrolytic deburring technology is needed. So, the new process in the burr treatment is supposed. In this study, in the eliminating burr inside cross hole, the principle and machining performances of electrochemical deburring by Cubic-Boron-Nitride abrasive electroplated wheel are investigated, Design and manufacture of CBN electroplated wheel and analysis of characteristics with electrolytic deburring are achieved. Also deburring efficiency and electrolytic performance for cross hole were examined according to electrolytic current and electrolytic deburring condition corresponding to acquired edge quality was found out.

Key Words : Electrochemical Deburring(전해 버제거), CBN Abrasive(입방정질화붕소입자), Cross Hole(교차구멍), Pulse Current(펄스 전류), Electroplated Wheel(전착지식),

1. 서론

마무리 가공으로서 버제거(Deburring)와 에지사상(Edge Finishing) 기술은 가공의 고효율화, 자동화, 무인화를 추구 하는데 있어서 항상 현상의 문제점으로 지적되어 왔다. 다양한 형상, 치수, 성질을 가진 버(Burr)는 그 처리법에 있어서 표준화하는 어려움을 안고 있으며, 현재 버 제거의 대부분이 수작업에 의존하고 있으며 가장 자동화가 늦어진 분야이기도 하다. 가공품에 버가 존재하게 되면 측정면이 잘못 설정될 수 있으며, 최종 가공된 부품의 조립이 용이하지 않게 된다. 또한, 서로 상대운동을 하는 부품인 경우 접촉과 스틱(Stick)에 의한 마찰과 마멸은 에지의 품질에 영향을 받는다. 더욱이 이러한 현상은 소음과 진동마저 유발할 수 있어서 생산공정에 치명적인 영향을 미칠 수가 있다. 날카로운 에지나 버는 사람에게 해를 끼칠 수 있으며 전기적 쇼트 등 예상치 못한 결과를 발생시키며, 열처리를 하는 동안에 에지크랙은 인장응력의 원인이 되고, 공압 시스템에서 품질이 떨어지는 에지는 공압이나 유압의 누수 현상의 원인이 되기도 하는 등 에지 처리가 생산 현장 곳곳에서 큰 영향을 미치는 아주 중요한 인자이다. 특히, 전체 가공 시간의 40% 이상을 소요하는 드릴가공중 생성되는 버로 인하여 전체 생산능률이 낮아지므로 생산원가가 상승하고, 제품의 품질이 떨어지는 등 산업재해가 발생하는 각종 문제점이 유발되고 있다. 드릴가공은 드릴의 형상과 가공 메카

니즘이 매우 복잡하므로 드릴가공에서 생성되는 버생성 기구는 매우 복잡하게 나타나며, 구멍 입구와 출구에서 버의 생성이 다르게 나타난다¹⁾. 특히, 교차구멍(cross hole)은 구멍의 직각 방향으로 관통하는 형상을 가지므로 구멍 내경에 버가 발생되기 때문에 그 처리가 더욱 어렵게 된다. 이에 대응할 수 있는 방법으로 전해디버링의 관심이 높아지고 있다.²⁻¹²⁾ 자동차 디젤엔진의 핵심부품인 거버너 샤프트의 교차구멍에 대한 버 제거 기술은 수작업 후처리 공정에 의존하여 생산성이 낮아지는 원인이 될 뿐만아니라 생산비 증가요인을 내재하고 있어 공정개선의 필요성이 대두되고 있으며, 저렴한 비용으로 버를 제거할 수 있는 공정이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

본연구에서는 교차구멍에 대한 내부 버가공의 고효율화와 자동화를 추구하는데 있어서 입방정질화붕소(Cubic Boron Nitride) 입자 전착지식에 의한 전해디버링 원리를 정립하고 가공성능을 밝혀내고자 한다. CBN 전착지식을 설계 제작하여 전해디버링 특성에 대한 체계적인 해석으로 제반인자의 영향을 분석·규명하고, 디버링 효과에 기여하는 정도를 해석하고자 한다.

2. 전해디버링의 이론적고찰

전해디버링에서 전극과 공작물사이의 간격은 가공속도에 크게 영향을 미치며 전해작용에 의해 평형 가공간격이 존재

한다. 공구가 이송될 때 시간 t 에 대한 가공물 표면의 y 좌표와 가공속도는 다음과 같다.

$$y = y_0 + (\eta V_s k E t / y) - vt \quad (1)$$

$$\frac{dy}{dt} = (\eta V_s k E / y) - v = (K/y) - v \quad (2)$$

여기서 전해상수 $K = \eta V_s k E$ 는 전해액과 가공물의 조합에 의해 결정되는 값이다. 평균간격을 l 로 가정하여 다음변수를 지정한다.

$$y' = \frac{v}{K} y, \quad t' = \frac{v^2}{K} t \quad (3)$$

여기에서,

η : 전류효율 (current efficiency, %)

v : 공구 이송속도 (tool feeding velocity, m/sec)

y_0 : 초기간격 (initial gap, mm)

E : 공급전압 (supply voltage, V)

k : 비전도도 (specific conductivity, $1/(\Omega \cdot \text{cm})$)

K : 전해상수

V_s : 비가공체적 (specific removal volume, $\text{mm}^3/(\text{A} \cdot \text{min})$)

식(2)를 변환하여 풀고 초기조건을 대입하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$t' = (y_0' - y') + \ln \left(\frac{1 - y_0'}{1 - y'} \right) \quad (4)$$

이 식은 가공간격의 시간적 변화식을 나타낸 것으로서 초기간격 및 가공간격이 달라도 가공간격은 가공시간의 경과와 더불어 처음 일정치에 접근한다. 이 일정치의 간격을 평형가공 간격이라 한다. 평형간격의 값 y_b 는 $y'=1$ 로 했을 때의 y 의 값이다. 즉,

$$y_b = K/v = \eta V_s k E / v \quad (5)$$

이 값의 물리적 의미는 전해가공에서 공작물의 재질과 전해액이 결정되었을 경우 공급전압과 전극의 이송속도에 따라 결정되며, 전기화학적 피드백 효과를 주는 값이다. 즉, 전극의 이송속도가 빨라져서 전극이 공작물에 이깝보다 더 가까이 접근하게 되면 빠르게 용출이 되어 평형가공간격을 유지하려고 더 멀어지게 되면 용출이 천천히 일어나게 되어 안정한 가공특성이 어느 범위내에서는 스스로 조절되는 특성을 가진다.

3. 실험장치 및 방법

가늘고 긴 구멍에 직각으로 교차구멍을 가지는 부품의 경우 외부에 들어난 구멍출구의 버는 커운터 싱킹 등으로 간단히 제거가 가능하지만, 내경에 발생한 버는 처리가 곤란하고 숙련된 작업자의 수작업에 의한 드릴링을 수회 반복하여야 한다. 따라서 구멍출구 원주부의 에지품질을 보장할 수 없으므로 이를 좀더 확실하고 능률적인 방법으로 버를 제거 할 수 있는 방법을 제안한다. 기계적인 버 제거 가공은 필연적으로 2차 버를 수반하므로 직교구멍의 내경 버 제거를 위하여 지석에 의한 돌출 버제거와 전해용출에 의한 에지버제거

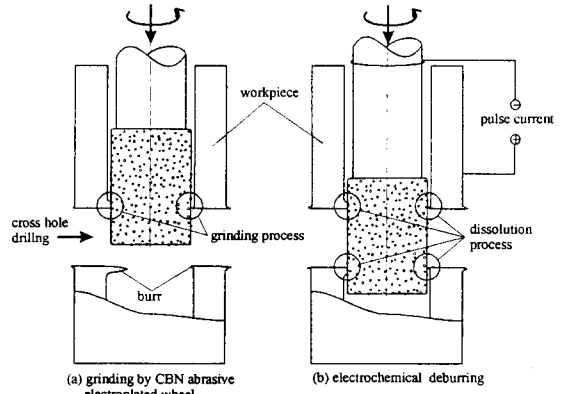


Fig.1 Principle of electrochemical deburring by CBN wheel

두 가지의 복합에 의하여 디버링 공정을 수행한다. Fig.1은 CBN전착 지석에 의한 전해디버링 원리를 나타낸 것으로서 (a)는 고경도 입자를 가진 CBN전착 지석의 연삭작용으로 구멍출구에서 돌출된 버를 제거하는 것을 보여주며, (b)는 지석 회전으로 인한 가공후에도 잔여하고 있는 에지 표면의 버를 전해용출에 의하여 제거하는 것을 나타낸 것이다. 지석회전에 의한 버제거 작업시 전해 전류를 인가하게 되면 버와 공구부분의 초기 접촉시 고전류에 의한 스파크가 발생하여 공구에 전기적인 손상을 입기 때문에 지석의 회전에 의한 버제거 시에는 전류를 차단한다.

Fig.2 는 입방정질화붕소입자 전착 초경봉의 설계도와 상세도를 나타낸 것으로서 고경도와 내마멸성, 내열성 및 높은 열전도도를 가진 CBN 입자를 긴 봉의 회전 정밀도를 유지하기 위하여 초경재질의 기저에 전착한 것이다. CBN입자의 크기는 $49 \sim 65 \mu\text{m}$ 이며 두께 0.1mm 의 Ni습식 전착층으로 제작하였다. CBN 입자를 기저 재료위에 단일층(single layer)으로 전착한 연삭 지석의 장점은 제작기술이나 경제적인 관점에서 유리할 뿐만 아니라 그 성능 면에서도 다층지석에 비하여 떨어지지 않는다. 부품의 버 발생위치에만 CBN 전착을 길이 방향으로 3mm 씩 두부분을 지석으로 이용한다.

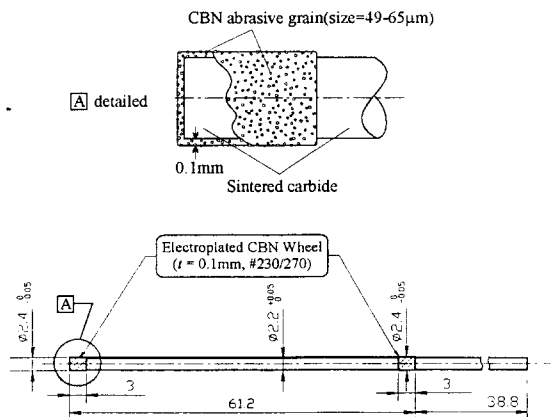


Fig.2 Tool design for electrochemical deburring in inner face at cross hole

Fig. 3은 입방정질화붕소 전착지석에 의한 전해 디버링 시스템의 개략도와 사진이다. 본 시스템은 회전 터릿형 드릴 머신과 모터에 의한 공작물 자동물림 장치, 전해전류제어기로 구성하였다. 주축스핀들에 긴 내경의 교차 버를 제거하기 위하여 개발된 입방정질화붕소 전착 지석을 콜릿적으로 장착하였고, 이것은 고속회전과 회전정밀도의 양호한 상태로 유지할 수 있도록 한 것이다. 공작물은 테이블 위에 고정된 3점 조우를 가진 척으로 자동고정되도록 하였으며 신속 정확하게 공구회전 중심과 일치하도록 하였다. 전해작용을 부가하기 위하여 공구와 공작물을 절연하였고, 전기적인 입력은 피크 전류를 1-10A로 조정할 수 있는 펄스 전류를 인가하였고 τ_{on}/τ_{off} 시간조정으로 펄스 주파수와 한 펄스 주기당 인가되는 에너지를 조정할 할 수 있다. 전해액은 에델전형 절삭유를 30배 희석하여 사용하였고, 공구와 공작물 접촉 부위에 분사하였으며, 공구의 하사점은 리미트 센서로서 미리 한계를 설정하여 둔다. Table. 1은 실험에 사용된 장치의 제원을 나타낸 것이다. 공작물은 디젤엔진의 배기밸브 부품인 거버너 샤프트로서 축방향의 긴구멍(ϕ 2.4x69.5mm)과 두 개의 교차구멍(ϕ 1.8mm)을 가지며 재질은 SCM40이다. 입방정질화붕소 전착지석에 의한 전해 디버링은 지석의 회전과 전해용출의 복합작용에 의하여 버를 제거시키므로 각각의 버제거 성능을 파악하기 위하여 전해전원 부가 전과 후의 차이를 살펴보고 전해조건에 따른 버제거 특성을 알아본다. 실험조건은 절삭속도를 14.3m/min (1900rpm)으로 고정하였고, τ_{off} 를 10 μ sec로 고정하고, τ_{on} 을 10~30 μ sec로 변화시켜가며 펄스 시간에 따른 버제거 결과를 조사한다. 또한, 피크 전류, I_p 를 1~10A의 범위에서 변화함에 따라 버제거 특성을 조사하였다.

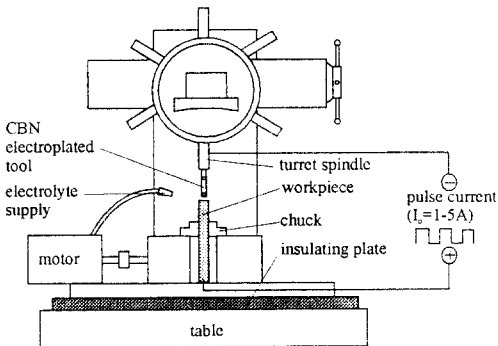
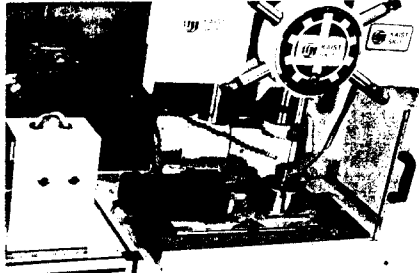


Fig.3 Schematic diagram of electrochemical deburring with CBN wheel

Table 1. Specification of deburring system with CBN electroplated tool

Deburring tool (electrode)	Sintered Carbide(ϕ 2.2x100mm)	
Abrasive	material	Cubic Boron Nitride
	mesh size	# 230/270(49 ~ 65 μ m)
Bonding method	electroplating (matrix : Ni)	
Current	pulse form	$\tau_{on} = 10 \sim 30 \mu$ sec $\tau_{off} = 10 \mu$ sec
	peak value	$I_p = 1 \sim 5A$
	DC	$V = 10 \sim 30V$
Electrolyte fluid	Emulsion(Most cut EC3105) 30%	
Cutting speed	14.3m/min (1900rpm)	
Workpiece	SCM4 (long hole : ϕ 2.4mm, cross hole : ϕ 1.8mm)	

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 전해전류 및 전압의 영향

거버너샤프트 내경의 버를 제거 하기 위하여 CBN 입자 전착지석을 이용하여 지석의 회전에 의한 디버링 실험을 실시하였다. Fig. 4는 CBN 전착 지석에 의한 디버링 결과로서 (a)는 버제거 가공전의 형상으로 0.3~0.5mm 높이의 버가 직교구멍 내경에 발생하고 있음을 알 수 있으며, (b)는 이를 14.3 m/min의 절삭속도로 가공한 결과를 보여 주는 것으로서 돌출 된 버는 제거되었으나 공구이송 방향으로의 2차 버가 약 0.15mm 높이로 발생하고 있음을 알 수 있다 이것은 고경도 입자를 가진 지석의 회전에 의하여 표면에서 수직으로 돌출 한 버는 연삭 작용에 의하여 제거가 되지만 지석이 이송할 때 버는 굽힘작용을 받게 되므로 완전한 제거가 되지 않는다. 이 잔여 버를 제거하기 위하여 기계적인 접촉가공이 아니라 비접촉 전기화학반응에 의한 전해디버링 작용을 부가한다.

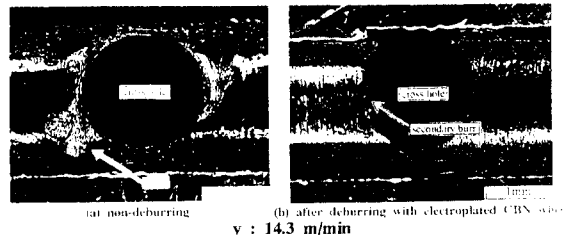


Fig. 4 Deburring performance by electroplated by CBN wheel

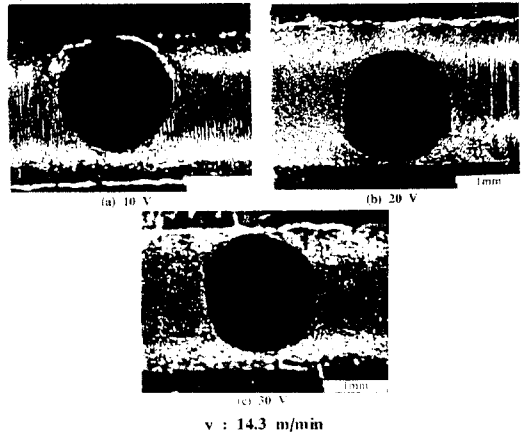


Fig. 5 Electrolytic Deburring by CBN electroplated wheel with DC

Fig. 5는 전착지식을 전극봉으로 사용하여 기계적인 가공에 전해작용을 추가하여 가공한 결과로서 (a),(b),(c)는 각각 전해작용에 공급한 직류전류를 10V, 20V, 30V로 변화시켜 가공한 결과이며 돌출 버저와 2차 버의 제거가 이루어지고 있으나, 공작물 내벽에 전착한 입자와 본드재료가 녹아 붙어버리는 현상이 생긴다. 이것은 직류전원이 버 발생부위와 전극이 만날 때 전류밀도가 집중되어 과도한 전류에 기인한 것으로 사료된다. 이런 전류의 특성을 펄스의 형태로 전해에너지를 공급하면 좀더 안정적인 가공을 달성할 수 있다.

Fig. 6은 직류전원에 의한 전해디버링한 후 2차 버의 높이를 나타낸 것으로 10V일 때 가장 버의 크기가 작게 나타 나고 있으며 전압이 이보다 높으면 공작물 내벽에 전착한 입자와 본드재료가 녹아 버에 붙어버리는 현상이 발생한다. Fig. 7은 펄스 폭(τ_{on}), $10\mu\text{sec}$ 와 휴지폭(τ_{off}), $10\mu\text{sec}$ 의 펄스전류를 인가한 후의 디버링 결과를 나타낸 것으로서 피크 전류(I_p)가 변함에 따라 디버링 특성이 다르게 나타나고 있다. (a)와 (b)는 피크 전류가 1A, 5A일 때 전해디버링 된 구멍 출구의 현미경 사진으로서, 돌출 된 버와 2차 버가 완전히 제거됨을 보여준다. (c)는 피크 전류가 10A일 때 직교구멍 내벽의 현미경 사진으로서 가공중 공구에 전착된 CBN 층의 소실로 이것이 공작물 내벽에 붙어버린 현상을 보여준다. 이것은 전해디버링을 위해 공작물과 공구 사이에 가해진 전기에너지의 양이 CBN 입자의 전착에너지를 초과하게 되어 순간적으로 용융되어 흩어져서 재응고된 것으로 사료된다. 따라서, 안정적인 직교구멍 내경의 전해디버링을 위하여서는 펄스간격, τ_{on} 과 τ_{off} 가 각각 $10\mu\text{sec}$ 일 때 I_p 는 5A이하로 유지하여야 함을 알 수 있다.

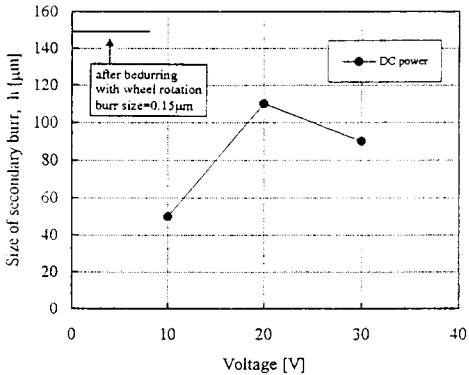
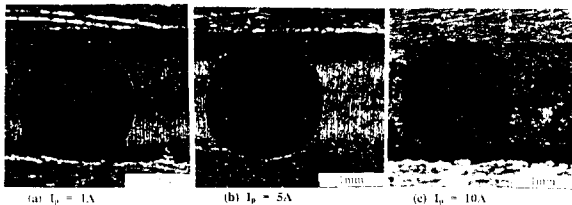


Fig.6 Effect of voltage on the size of secondary burr

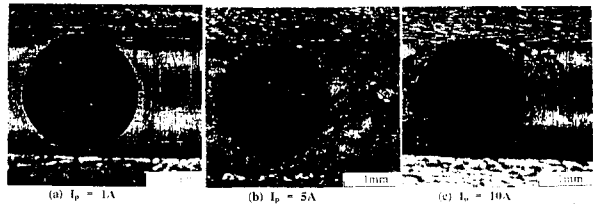


$v = 14.3\text{ m/min}, \tau_{on} = 10\mu\text{sec}, \tau_{off} = 10\mu\text{sec},$

Fig. 7 Electrolytic Deburring by CBN electroplated wheel with pulse current

4.2 펄스 폭(τ_{on})의 영향

펄스 전원에 의한 전해디버링에 대한 펄스 폭(τ_{on})의 영향을 고찰하기 위하여 휴지폭(τ_{off})은 $10\mu\text{sec}$ 고정하고 펄스 폭(τ_{on})을 $30\mu\text{sec}$ 로 증가시켜 가공하였다. Fig. 8은 펄스 폭(τ_{on}), $30\mu\text{sec}$ 와 휴지폭(τ_{off}), $10\mu\text{sec}$ 의 펄스전류를 인가한 후의 디버링 결과를 나타낸 것으로서 피크 전류(I_p)가 변함에 따라 디버링 특성을 살펴 본 것이다. (a)는 피크 전류가 1A일 때 전해디버링 된 구멍 출구의 현미경 사진으로서, 돌출 된 버가 제거되면서 그 접촉부에 공구에서 떨어져 지나간 CBN입자 층의 일부 붙어 있다. 이것은 부분적으로 접촉부에서만 일어난 것이고 (b)와 (c)는 전체적으로 붙은 것을 볼 수 있다. 펄스 폭(τ_{on})이 커지면 단위 펄스 당 전해작용에 추가되는 에너지 커지게 되므로 피크 전류(I_p)를 증가 시키는 것과 유사한 효과를 보이고 있음을 알 수 있다. Fig. 9는 펄스 전원에 의한 전해디버링한 후 2차 버의 높이를 나타낸 것으로 펄스 폭과 피크 전류에 따라 나타난 것이다. 펄스폭(τ_{on})이 $10\mu\text{sec}$ 인 경우 I_p 가 5A이하일 때, 펄스폭(τ_{on})이 $30\mu\text{sec}$ 인 경우에는 I_p 가 1A이하일 때 2차 버는 0.01mm 이하로 완전 제거됨을 볼 수 있다.



$v : 14.3\text{ m/min}, \tau_{on} = 30\mu\text{sec}, \tau_{off} = 10\mu\text{sec},$

Fig. 8 Electrolytic Deburring by CBN electroplated wheel with pulse current

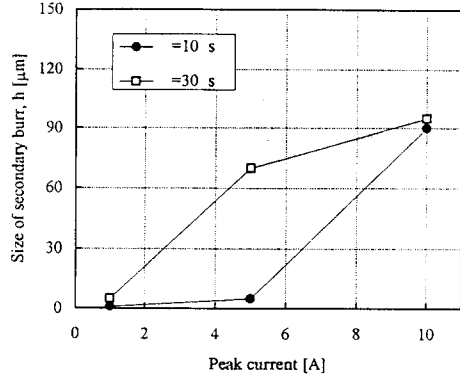


Fig.9 Effect of peak current on the size of secondary burr

4.3 디버링 공구의 마멸

Fig. 10은 CBN 전착지식의 표면을 가공전후에 현미경 사진으로 분석한 것으로서 (a)는 개발된 CBN 전착 지식의 표면이며, $\phi 2.2$ 초경봉에 CBN 입자를 두께 0.1mm로 전착한 디버링 공구이다. (b)는 지식의 회전운동에 의해서 디버링 가공한 후의 지식의 표면이며 거의 마멸이나 손상이 없다. (c)는 직류 전원에 의한 전해작용을 추가하여 디버링 가공한 공구로서 끝단 부에 CBN 전착층이 떨어져 나가는

현상이 발생한다. 이것은 전기도금에 의하여 전착된 CBN 입자를 지지하고 있는 Ni 매트릭스 층이 용융되어 버부분과 접촉되면서 소실 된 것이다. (d),(e)는 펄스전류에 의한 전해작용을 부가하여 피크 전류가 각각 1A, 5A일때 디버링 가공한 지석의 표면으로서 직류전원에 의한 전착층의 소실이 현저히 줄어들고 있음을 알 수 있다. 이것은 펄스 on/off 제어에 의한 전류특성을 안정화할 뿐만 아니라 양극의 전해 용출을 양호하게 함에 기인한다. (f)는 피크 전류가 10A일 때의 디버링 가공한 지석의 표면으로서 지석 표면이 과도한 전류에 의하여 거의 소실됨을 볼 수 있다. CBN 전착지석에 의한 전해디버링은 두 가지 작용에 의하여 내부에 들출한 버를 제거하게 된다. 대부분이 전착된 CBN 지석에 의하여 버가 제거되며, 기계적인 작용에 의하여 발생된 2차 버를 전해 작용으로 마무리 제거하게 된다. CBN 입자의 전착층이 소실되지 않고 전해디버링을 수행 할 수 있는

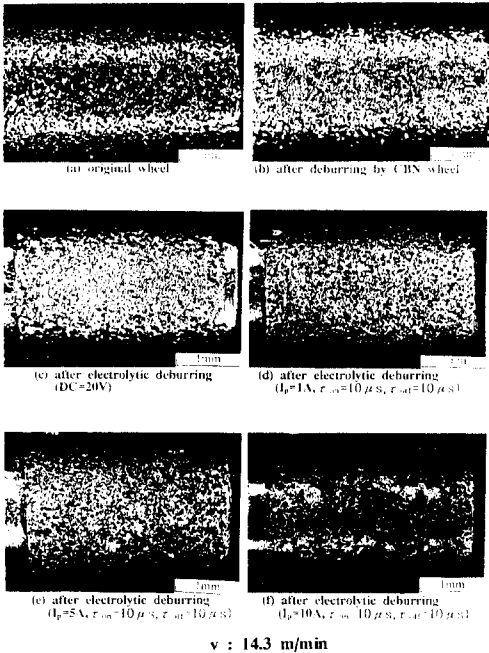


Fig. 10 Wear of deburring tool electroplated by CBN

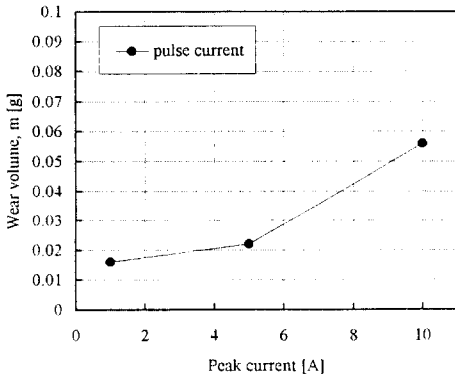


Fig.11 Wear of deburring tool electroplated by CBN

전해 조건은 CBN입자의 전착시 가한 전류밀도한계인 $1A/cm^2$ 이하로 전해 전류밀도를 유지하는 것이다. Fig. 11은 CBN 전착지석의 마멸을 정량적으로 측정 한 것으로서 가공정후의 공구의 중량의 차이를 미소저울에 의하여 측정 한 것이다. 펄스폭(τ_{on})이 $10\mu sec$, 휴지폭(τ_{off})이 $10\mu sec$ 인 펄스 전원을 공급했을 때 가공전후의 공구 마멸량은 피크전류(I_p)가 쿨수속에따라 증가하고 있다. 이 것은 Fig.10의 가공후 공구상태에서 보듯이 과도한 전류의 증가는 CBN전착층을 연화하여 버제거 가공중에 소실됨을 알 수 있다.

5. 결론

1. 입방정질화붕소(CBN) 전착지석은 평균입자 크기 $57\mu m$. 두께 $0.1mm$ 의 층으로 초경봉에 전착방식에 의하여 개발 되었으며, 가늘고 긴 구멍의 직교구멍 내경에 발생한 버 제거를 위하여 적용되었다.
2. 전착지석에 의한 전해디버링은 피크 전류와 펄스 및 휴지폭의 범위를 적절히 선택한다면 직류전류보다 펄스전류가 디버링 성능이 우수하다.
3. 거버너 샤프트의 전해디버링조건에 최적범위는 τ_{on} 이 $10\mu sec$ 일 때 I_p 는 $5A$ 이하이며 τ_{off} 이 $30\mu sec$ 일 때 I_p 는 $1A$ 이하이다.

참고 문헌

- [1] K. Takazawa, S. Xiong, K. Kitajima, T. Miyake and Y. Tanaka, Burr formation mechanism in drilling and basic considerations -cutting behavior and basic considerations on burr formation-, 3rd International Conf. on Precision Surface Finishing and Burr Technology, 1994, pp.232-245.
- [2] K.P. Rajurkar, B. Wei, J. Kozak and J.A. McGeough, Modelling and monitoring interelectrode gap in pulse electrochemical machining, Annals of the CIRP, Vol.44, No.1, 1995, pp.177-180.
- [3] K. P. Rajurkar, J. Kozak and B. Wei, Study of pulse electrochemical machining characteristics, Annals of the CIRP, Vol.42, No.1, 1993, pp.231-243.
- [4] R.E. Ilhan, G. Sathyanarayanan, R.H. Steorer and R.E. Phillips, A study of wheel wear in electrochemical surface grinding, Trans. of the ASME, J. of Eng. for Ind., Vol.114, 1992, pp.82-93.
- [5] T. Masuzawa and M. Kimura, Electrochemical surface finishing of Tungsten Carbide alloy, Annals of the CIRP, Vol.40, No.1, 1991, pp.199-202.
- [6] A.K. Cattopadhyay, L. Chollet and H.E. Hintermann, On performance of chemically bonded single-layer CBN grinding wheel, Annals of the CIRP, Vol.39, No.1, 1990, pp.309-312.
- [7] A.K. Chatteropadhyay and H.E. Hintermann, On improved bonding of TiC-coated CBN grits in Nickel-Based matrix, Annals of the CIRP, Vol.42, No.1, 1993, pp.413-416.
- [8] Y. Onchi, N. Matsumori, N. Ikawa and S. Shimada, Porous fine CBN stones for high removal rate superfinishing, Annals of the CIRP, Vol.44, No.1, 1995, pp.291-294.
- [9] H.K. Tönshoff, H.G. Wobker and G. Brunner, CBN grinding with small wheels, Annals of the CIRP, Vol.44, No.1, 1995, pp.311-316.
- [10] F. Klocke and W. König, Appropriate conditioning increase the performance capabilities of vitrified-bond CBN grinding wheels, Annals of the CIRP, Vol.44, No.1, 1995, pp.305-310.
- [11] V.K. Jain, S. Tandon and P. Kumar, Experimental Investigations into Electrochemical Spark Machining of Composites, Trans. of the ASME, J. of Eng. for Ind., Vol.112, 1990, pp.194-197.
- [12] A. McGeough, "Principles of Electrochemical Machining" Chapman and Hall Ltd., 1974.