

〈논 문〉

## 거버너샤프트 교차구멍 내경의 전해디버링 특성에 관한 연구

최인휴\* · 김정두\*\*

(1996년 6월 20일 접수)

### A Study on the Characteristics of Electrochemical Deburring in the Governor Shaft Cross Hole

In-Hyu Choi and Jeong-Du Kim

**Key Words :** Electrochemical Deburring(전해 버제거), Cross Hole(교차구멍), Burr Height(버 높이), Edge Quality(에지품질)

#### Abstract

Recently burr technology is rising in the fields of the precision manufacturing and the high quality machining, 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 be standardized 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 electrochemical method is proper as its solution at practical aspects. Burr elimination in the cross hole drilling of governor shaft used in the automobile engine so far has been worked by a manual post-processing by a skillful worker, which becomes a factor of productivity-down and cost-up so that improvement of machining process is needed. Therefore, for the high efficiency and automation of internal deburring in the cross hole, development of electrochemical deburring technology is needed. So, the new process in the burr treatment is supposed. In this study, characteristics of electrochemical deburring through experiments were identified and factors such as electrolytic gap and electrolytic fluid contributed to removal burr height were analyzed. Also deburring efficiency and electrolytic performance for cross hole were examined according to electrolytic current and electrochemical deburring condition corresponding to acquired edge quality was found out.

#### 1. 서 론

가공현장에서는 정밀가공 및 고품위 가공분야에서 새로운 공정의 개발과 CNC나 머시닝센터를 이용한 가공공정의 자동화에 노력을 집중하고 있으나, 다양한 가공에서 버(burr)의 제거는 고효율화,

무인화를 추구하는데 있어서 항상 애로로 취급되었다. 갖가지 형상, 치수, 성질을 가진 버는 그 처리법에 있어서 표준화될 수 없는 어려움을 안고 있어 대부분이 수작업에 의존하고 있는 실정이며, 자동화가 절실하게 요구되는 분야이다.<sup>(1)</sup> 특히, 교차구멍(cross hole)은 긴 구멍의 직각방향으로 관통하는 형상을 가지고 내경에 버가 생기기 때문에 그 처리가 더욱 어렵게 된다. 이에 대응할 수 있는 방법으로 전해디버링이 실용화면에서 최적의 대응책

\*한국과학기술원 대학원 기계공학과

\*\*회원, 한국과학기술원 기계공학과

이며, 점점 비중이 증가하고 있는 수작업 버제거작업에 응용성이 우수할 것이다.<sup>(2,3)</sup> 따라서, 교차구멍에 대한 내부 버가공의 고효율화와 자동화를 추구하는데 있어서 그 효과가 입증된 전해원리에 의한 가공법을 이용하여 전해디버링 기술을 개발하고자 한다. 자동차엔진의 핵심부품인 거버너샤프트의 교차구멍 전해디버링 기술은 숙련자의 수작업 후처리에 의해 파생되는 저능률 가공을 대체하고, 가공공정 및 시간의 단축으로 생산성 향상에 기여할 수 있고, 버처리의 새로운 공정을 제시함으로써 버처리·제거 기술수준의 향상과 여러 가지 타 부품의 디버링 공정개선으로의 기술전파가 기대된다.

본 연구에서는 전해디버링의 특성에 대한 체계적인 해석으로 제반인자의 영향을 분석·규명하고, 전해간극 및 전해액 등이 디버링효과에 기여하는 정도를 전해전류와 버제거량에 의하여 검사하고자 한다. 또한, 전류밀도에 따른 버제거 효율 및 성능의 평가를 가공시간 및 제거량을 대상으로 수행하여 교차구멍 내부의 버제거를 위한 전해디버링 특성을 규명하고자 한다.

## 2. 전해디버링의 이론적 배경

전해디버링(electrolytic deburring)은 전기화학가공(electrochemical machining)의 응용으로서 전해용출을 재료의 필요한 부분에 집중하거나 제한함으로써 필요로 하는 형상이나 치수, 표면상태를 얻는 가공법이다. 필요로 하는 형상으로 만들어진 전극(-)을 가공물(+)에 아주 가까운 위치에 놓고 전해액을 흘린 후 통전하면 음극의 바로 근처에만 전해용출을 집중시킬 수 있다. 전류밀도가 클수록 가공속도가 커지고 동시에 가공정밀도가 좋아지며, 다듬질면의 거칠기가 향상된다.<sup>(4~6)</sup> 양극에서 일어나는 전해용출현상에 의하여 가공물은 전류밀도에

대응한 가공속도로 공구에 의해 가공이 일어난다. 또한, 전해용출작용을 이용하여 금속재료에서 원자를 1개씩 이온으로 제거하여 가공을 행하는 것으로서, 종래의 기계가공과 같은 기계력이 작용하지 않고, 또 방전가공과 같은 열적인 영향도 거의 없다. 재료의 경도나 인성에 관계없이 일정한 속도로 가공이 가능하고, 가공전후의 재료표면의 경도가 변하지 않는 이점이 있다. 그러나 전해액은 일반적으로 부식성이 있어 대책이 요구된다.<sup>(7~9)</sup> Fig.1은 전해가공의 원리를 도시한 것으로서 NaNO<sub>3</sub> 수용액을 전해액으로 공급하고 철을 공작물로 했을 경우를 나타낸다. 양극에서 Fe가 전해용출하고 음극에서는 수소가스가 발생하며, Fe(OH)<sub>3</sub>가 침전하여 슬러지가 생긴다. 가공간극이 매우 작기 때문에 전해생성물은 빨리 제거하지 않으면 가공이 거의 진행되지 않게 된다. 이 때문에 가공간극에는 상당히 빠른 전해액의 흐름을 형성할 필요가 있으며, 일정한 전해액의 흐름을 형성하기 위하여 펌프에 의해 가압하는 방법을 쓰고 있다. 또한, 전해액은 전해생성물과 열을 실어나르는 기능을 하고 필터를 통해 여과한 후 재사용한다.

### 2.1 전해디버링을 위한 평형가공간격

전극과 공작물사이의 간격은 가공속도에 크게 영향을 미치며, 전해작용에 의해 평형가공간격(y<sub>0</sub>)이 존재한다. 공구가 이송될 때 시간 t에 있어서의 가공물 표면의 y좌표와 가공속도는 다음과 같다.

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

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

여기서, 전해상수  $K = \eta V_s k E$ 는 전해액과 가공물의 조합에 의해 결정되는 값이다. 단순화를 위해 다음 무차원 변수를 지정하여 풀다.

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

여기서,

$E$  : 공급전압(V)

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

$K$  : 전해상수( $\text{mm}^2/\text{min}$ )

$t$  : 시간(sec)

$t'$  : 시간 무차원 변수

$v$  : 공구 이송속도(m/sec)

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

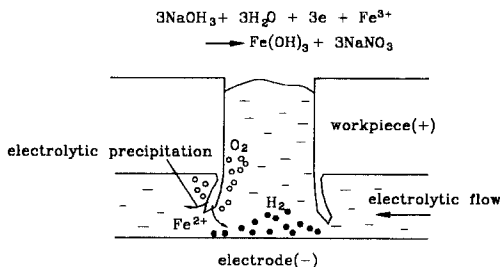


Fig. 1 Mechanism of the electrolytic deburring

- y : 가공표면의 위치(mm)
- y<sub>0</sub> : 초기간격(mm)
- y' : 위치 무차원 변수
- y<sub>0</sub>' : 초기간격 무차원 변수
- η : 전류효율(%)

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 변화를 나타낸 것으로서 초기간격이 달라도 가공간격이 달라도 가공간격은 가공시간의 경과와 더불어 차츰 일정치에 접근한다. 이 일정치의 간격을 평형가공간격이라 한다. 평형간격의 값 y<sub>b</sub>는 y'=1로 했을 때의 y의 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 따라서 결정되며, 전기화학적 피드백효과를 주는 값이다, 즉, 전극의 이송속도가 빨라져서 전극이 공작물에 이 값보다 더 가까이 접근하게 되면 빠르게 용출이 되어 평형가공간격을 유지하려하고 더 멀어지게 되면 용출이 천천히 일어나게 되어 안정한 가공특성이 어느 범위 내에서는 스스로 조절되는 특성을 가진다.

2.2 평형가공간격의 시뮬레이션

공작물을 SCM4에 대해서 평형가공간격 y<sub>b</sub>를 구

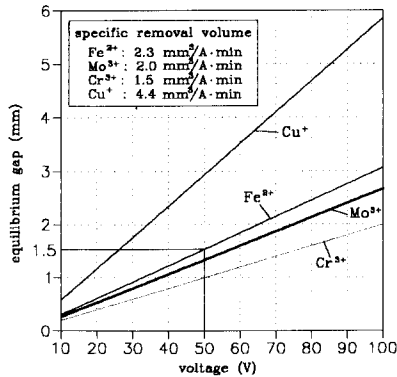


Fig. 2 Equilibrium gap distance at steady state with various voltages

하면 Fig. 2와 같으며, 전압을 10 V에서 100 V로 변화시켰을 때의 평형가공간격(y<sub>b</sub>)을 표시하고 다른 공작물의 원소들의 y<sub>b</sub>와 비교하였다. 공급한 전압이 커질수록 평형간격은 증가함을 알 수 있으며, 이것으로 가공간격을 좁힐수록 낮은 공급전압에서도 가공이 가능하며, 공급전압을 증가할수록 더 큰 평형가공간격이 형성됨을 알 수 있다. 공급전압을 50 V부근으로 유지하면 SCM4의 전해가공시 평형가공간격이 1.5 mm이므로 원통형 공작물의 경우 내경을 전해가공할 때 전극과 공작물사이의 간격을 1.5 mm로 두고 전극의 외경치수를 결정할 수 있다. 그래서 돌출된 내경의 버는 공작물 내경까지 가공이 일어난 후 그 간격을 계속 유지함으로써 치수정밀도를 유지할 수 있도록 한다. 공급전압이 30 V인 경우에 평형가공간격은 1 mm이고, 100 V인 경우에는 3.1 mm이며, 공작물과 공구사이의 간격(y<sub>0</sub>)과 공급전압(E) 사이에는 비례관계가 형성된

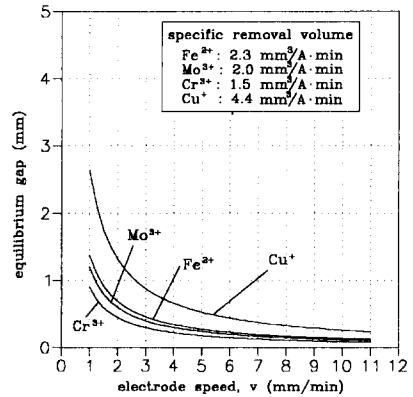


Fig. 3 Equilibrium gap distance with various speeds of electrode (E=30 V)

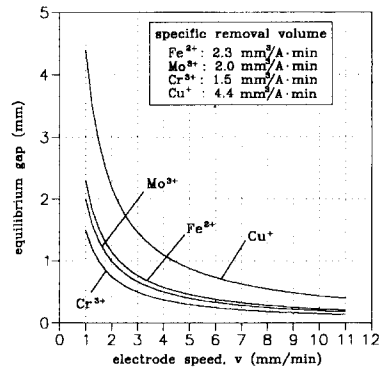


Fig. 4 Equilibrium gap distance with various speeds of electrode (E=50 V)

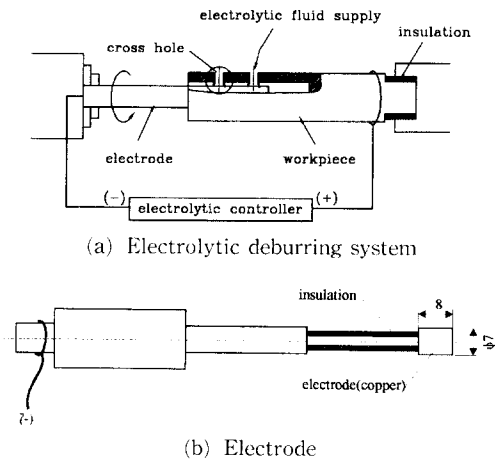


Fig. 5 Schematic diagram of the electrolytic deburring system

다.

Fig. 3은 공급한 전압을 30 V로 일정하게 유지할 때 전극의 이송속도에 따른 평형간격  $y_b$ 의 변화를 도시한 것으로서 전극의 이송속도가 증가할 수록 평형간격은 지수함수형태로 감소하고 있다. 따라서, 너무 느리면 가공제거량이 감소하므로 적당한 평형간격을 선택했을 때의 전극이송속도를 선정하여야한다. Fig. 4는 공급한 전압을 50 V로 일정하게 유지할 때 전극의 이송속도에 따른 평형간격  $y_b$ 의 변화를 나타낸 것으로서 공급전압의 증가에 따라서 전체적으로 가공간격이 증가함을 볼 수 있다. SCM4의 경우 평형간격을 1 mm로 하였을 때 전극 이송 속도는 공급전압이 30 V이면 1.2 mm/min, 50 V이면 2.3 mm/min이 적당하다. 이 평형가공 사발레이션 결과로부터 공급전압을 30 V로 설정하고 공구와 버를 가진 부품사이의 초기간격을 1 mm 부근에서 실험을 실시한다. 거버너샤프트와 같은 재질의 교차구멍을 가진 실린더를 준비하고 내경이 최소  $\phi 8$ 에서 최대  $\phi 11$ 까지 1 mm 간격으로 구멍을 뚫고, 전극과 공작물의 초기간격은 0.5 mm에서 2 mm로 0.5 mm씩 설정한다. 여기서, 전극의 직경은  $\phi 7$ 이다. 따라서, 초기간격이 달라도 가공간격은 가공시간의 경과와 더불어 평형가공간격( $y_b$ )으로 접근함으로써 디버링작용이 일어난다.

Table 1은 계산에 사용된 실제 가공조건과 불성치를 나타낸 것이다. 여기서, 전류효율은 전해액이  $\text{NaNO}_3$ 의 가능한 최대효율을 사용하였으며, 비가공체적은 단위 전기량당의 용출체적이고, 금속재료

Table 1 Conditions of electrochemical deburring simulation

Parameters	Values
Current efficiency $\eta$	100%
Specific removal volume $V_s$	$\text{Fe}^{2+} : 2.3 \text{ mm}^3/\text{A} \cdot \text{min}$
Specific conductivity $k$	$0.2 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$
Voltage $E$	10 V ~ 100 V
Electrolytic fluid	$\text{NaNO}_3$ 15%

Table 2 Specifications of electrochemical deburring experiment

Contents		Specifications
Workpiece		SCM4 D[mm] : $\phi 14$ d[mm] : $\phi 8, \phi 9, \phi 10, \phi 11$ Cross hole : $\phi 5$ mm
Electrode		Copper ( $\phi 7$ )
Power supply	DC	DC 30 V
	Pulse	AC 150 V Peak current : 20A $\tau_{on} : 10$ msec $\tau_{off} : 10$ msec
Gap distance		0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm
Electrolytic fluid		Permasol-60, $\text{NaNO}_3$ 15%, NaCl 15%

의 종류에 따라 결정되는 재료상수이다.

### 3. 실험장치 및 방법

Fig. 5는 전해디버링 실험장치의 개략도로서, 교차구멍의 내경에 발생한 버를 제거하기 위하여 고안된 것이다. 선반의 주축에 동전극을 물리고 심압대 척에 절연된 공작물을 물린후 전원을 공급하게 하였다. 이때 공급된 전원은 두 가지 종류를 사용하였다. 전해액은 구멍내부에 충분히 침투시키기 위하여 구멍위치에 맞추어 뿌어서 공급하고, 전극의 형상은 버발생 부위만을 제거하기 위하여 교차구멍 이외의 부분에는 절연재를 부착하여 원치않는

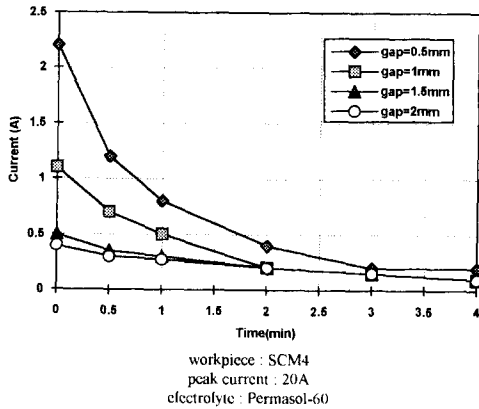


Fig. 6 Electrolytic current with various gaps between electrode and workpiece

가공은 최대한 억제하였다. 전극과 가공물사이의 간격은 0.5~2mm 사이에서 0.5mm 간격으로 설정하였다. Table 2는 전해다버링 실험에 사용된 재료와 사양을 나타낸다. 공작물과 공구의 초기 간격을 변화시키기 위하여 공작물의 내경을 다르게 하였고, 전극의 재질은 동(copper)을 사용하였으며 공작물과의 간격을 미소하게 유지하도록 정밀가공하였고, 전해가공 부위를 한정하기 위하여 접촉부(8mm)를 남기고 절연을 하였다.

전원은 직류전원과 펄스전원을 사용하며, 전원은 직류전원과 펄스전원을 사용하며, 직류전원은 시플레이션 결과로부터 30V로 설정하고, 펄스전원은 피크전류 20A이고, 전류인가/휴지시간( $\tau_{on}/\tau_{off}$ )을 각 10 msec로 고정하였다. 직류전원은 버발생부와 전극이 만날 때 과도한 전류밀도가 좁은 부분에 집중됨에 의하여 스파크의 발생으로 가공면에 손상을 줄 가능성이 크다. 펄스전원은 이런 현상을  $\tau_{on}$ 과  $\tau_{off}$ 의 조정함으로써 개선할 수 있으며, 안정적인 전해에너지의 공급이 가능한 이점이 있다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 펄스전원에 의한 전해다버링 결과

Fig.6은 전해가공 시간에 따른 공작물과 전극사이의 전해전류의 변화를 나타낸 것으로서 피크전류가 20A인 150V의 전원을 사용하였으며, 시간이 경과함에 따라 전해용출에 기여하는 전류값이 감소하고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 전해용출이 진행함에 따라 공작물에서 용출한  $Fe(OH)_3$ 가 침전하여 슬러지가 생겨서 전해작용을 방해하기 때문이

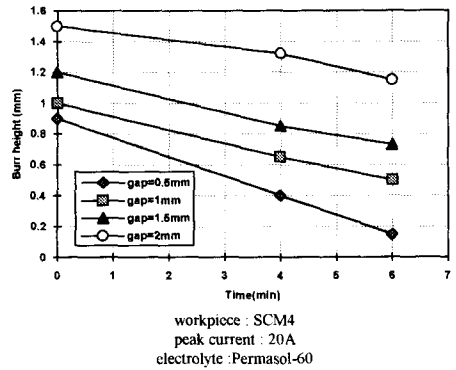


Fig. 7 Burr height with various gaps between electrode and workpiece

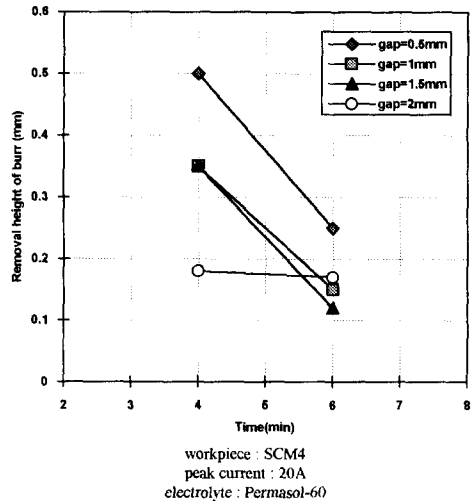


Fig. 8 Removal height of burr with various gaps between electrode and workpiece

다. 초기 2분동안 대부분의 용출이 발생하고 그 이후에는 전류가 거의 흐르지 않아 전해작용이 일어나지 않는다. 또한, 초기 간격에 따라서 전해전류의 세기가 다르며 간격이 가까울 수록 전류가 많이 흐르고 있음을 알 수 있다. 이것은 전해액 일종의 저항으로서 거리가 멀어질 수록 전기저항이 증가하는 것으로 설명된다.

Fig.7은 시간에 따른 버제거 높이를 쟀 것으로 기울기는 제거율을 나타낸다. 버높이 측정은 다이얼 게이지와 V-블록 게이지를 이용하여 측정하였으며, 평균값을 도시하였다. 공작물과 전극의 간격이 좁을수록 기울기가 급하며, 가공속도가 빠른 것을 알 수 있다. Fig.8은 버제거높이를 나타낸 것으로 간격이 좁을 수록 제거량이 많고 초기에 대부

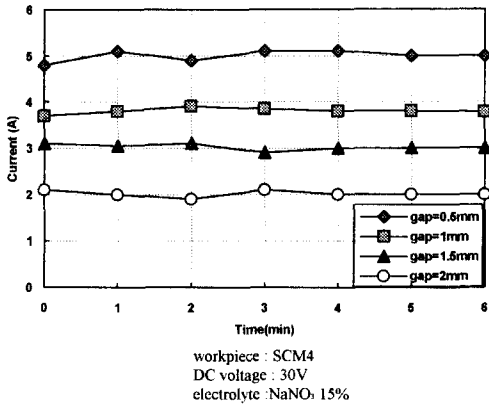


Fig. 9 Electrolytic current with various gaps between electrode and workpiece

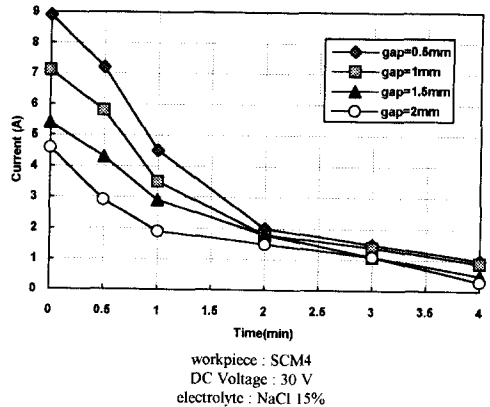


Fig. 11 Electrolytic current with various gaps between electrode and workpiece

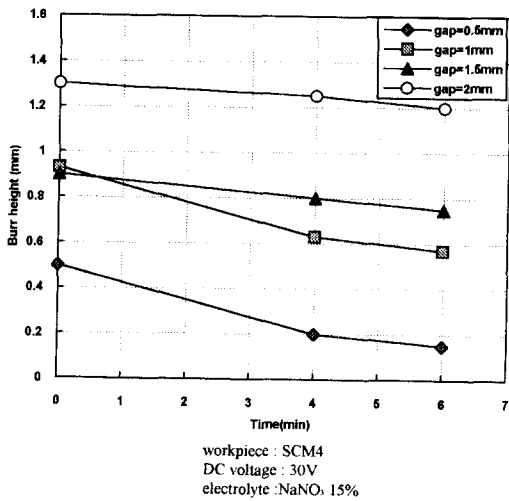


Fig. 10 Burr height with various gaps between electrode and workpiece

분이 제거되고 시간이 지날수록 제거높이가 작아진다. 이것을 버가 뿌리부분으로 갈수록 두께가 두터워지는 기하학적인 형상과 전류량의 감소로 전해공정이 둔화되는 것에 기인한다. 간격이 좁을수록 간격이 전해디버링에 유리한 조건임은 분명히 알 수 있다. 따라서, 전해디버링에서 공작물과 전극의 간격이 좁을수록 유리하지만 너무 접근하면 돌출 버와 전극사이에 접촉에 의한 전기적인 쇼트가 일어나 스파크가 발생할 수 있다. 따라서, 버높이는 일반적으로 0.5 mm이하이므로 이것을 고려한 공작물과 전극간의 초기간격 설정이 필요하다.

#### 4.2 직류전원에 의한 전해디버링 실험결과

Fig. 9는 전해가공 시간에 따른 공작물과 전극사이의 전해전류의 변화를 나타낸 것으로서 시간이 경과함에 따라 전해전류는 일정하게 유지되고 간격에 따라 결정됨을 알 수 있다. 이것은 NaNO<sub>3</sub> 전해액이 전기저항이 적어서 활발히 용출이 진행함에 기인한다. 여기서, 가공조건으로 30V의 DC전원을 전극과 버를 가진 공작물사이에 인가하였고, 전해액은 NaNO<sub>3</sub> 15% 수용액을 사용하였다. 초기간격에 따라서 전해전류의 세기가 다르며, 간격이 가까울 수록 전류가 많이 흐르고 있음을 알 수 있다. 이것은 전해액이 일종의 저항으로서 거리가 멀어질수록 전기저항이 증가하는 것으로 설명된다. Fig. 10은 시간에 따른 버세거 높이를 쟀 것으로 기울기는 제거율을 나타낸다. 공작물과 전극의 간격이 좁을 수록 기울기가 급하며, 가공속도가 빠른 것을 알 수 있다. 전극소모량은 가공전 전극의 무게  $W_0=99.58$  g이고, 가공후 전극의 무게  $W_1=99.465$  g으로 0.118g이 소모된 것이며, 이것은 60 min정도 전해가공시간에 해당하는 소모량이다.

Fig. 11은 전해액을 NaCl 15%를 전해액으로 사용하였을 때의 시간에 따른 전해전류를 나타내었고 빠르게 감소함을 나타내고 있다. Fig. 12는 전해가공이 진행됨에 따라서 시간에 따른 버높이를 측정 한 것이다. 전류곡선과 비슷한 경향을 가지며 감소함을 볼 수 있고, 가공초기에 디버링 양이 크며 점점 시간이 지날수록 전해전류의 감소와 함께 가공량에서도 감소함을 보여준다. NaNO<sub>3</sub> 전해액을 사용했을 때 보다 가공이 활발히 일어남을 알 수 있다. 30 V의 직류전원과 피크전류 20 A이고,  $\tau_{on}$ ,

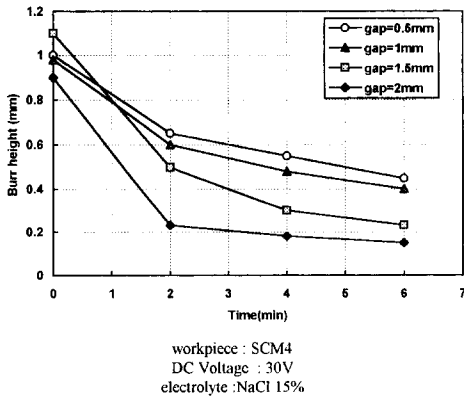
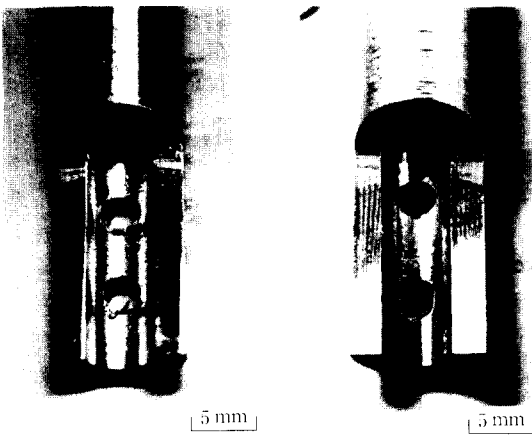


Fig. 12 Burr height with various gaps between electrode and workpiece



(a) Before deburring (max. borrh height = 0.9 mm) (b) After deburring (max. borrh height = 0.15 mm)

Fig. 13 Comparison of burrs inside of the cross hole

$\tau_{off}$ 가 각 10 msec인 펄스전원을 사용하며, 디버링한 결과를 비교하면 시간에 따라 전류의 변화와 디버링 가공량에서 차이가 있음을 알 수 있다. 펄스전원의 경우 가공시간에 따른 전해가공 전류는 초기 간격에 크게 영향을 받으며, 시간이 지남에 따라서 부동태 피막에 의하여 전류가 감소하며 2 min 후에는 모든 경우에 대하여 거의 0.3 A이하만 흐름을 알 수 있고, 직류전원의 경우에는 전해액에 민감하게 영향을 받으며  $\text{NaNO}_3$ 보다  $\text{NaCl}$ 의 경우에 가공이 활발하게 일어남을 알 수 있다.

Fig. 13은 교차구멍 내경에 발생한 버제거를 위하여 전해디버링된 부품의 내경을 디버링 전의 것과 비교하여 나타난 것으로서 최대 버높이 0.9 mm에서 0.15 mm로 제거되었음을 보여준다.

### 5. 결 론

(1) 전해디버링시 평형가공간격( $y_b$ )은 공급한 전압이 커질수록 증가하고, 공급한 전압을 일정하게 유지했을 때 전극의 이송속도가 증가할 수록 평형간격은 지수함수형태로 감소함을 알 수 있다.

(2) 전해가공시간에 따른 공작물과 전극사이의 전해전류의 변화는 전해용출이 진행하면서 용출한  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 의 침전 슬러지에 의하여 전해작용을 방해하기 때문에 전해작용에 기여하는 전류값이 감소함을 알 수 있었다.

(3) 직교구멍 내경의 버제거는 전해원리를 이용한 전극봉에 의하여 0.1 mm이하의 버높이까지 제거 가능하며, SCM 재료의 전해디버링에서 전해액은  $\text{NaNO}_3$  수용액과  $\text{NaCl}$  수용액이 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

### 참고문헌

- Gillespie, L. K. and Blotter, P. T., 1976, "The Formation and Properties of Machining Burrs," *Trans. of the ASME, J. of Eng. for Ind.*, Vol. pp. 66~74.
- Yoshitake Araki, 1995 "Electro-chemical Deburring Technology," 3rd International Conf. on Precision Surface Finishing and Burr Technology, pp. 246~255.
- Takazawa, K., Xiong, S., Kitajima, K., Miyake, T. and Tanaka, Y., 1994, "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, pp. 232~245.
- Bejar, M. A. and Gutierrez, F., 1993, "On the Determination of Current Efficiency in Electrochemical Machining with a Variable Gap," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 37, pp. 691~699.
- Thorpe, J. F. and Zerkle, R. D., 1969, "Analytic Determination of the Equilibrium Electrode Gap in Electrochemical Machining," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 9, pp. 131~144.

- (6) Kops, L. and Quach, V. B., 1976, "Investigation on the Role of Workpiece Grain in Electrochemical Machining Process," *Trans. of the ASME, J. of Eng. for Ind.*, pp. 360~368.
- (7) Hardisty, H., Mileham, A. R. and Shirvarni, H., 1993, "A Finite Element Simulation of the Electrochemical Machining Process," *Annals of the CIRP*, Vol. 42, No. 1, pp. 201~204.
- (8) Jain, V. K., Sreenivasa, Rao, P. and Choudhary, S. K., 1991, "Experimental Investigations wire Electrochemical Spark Machining (TW-ECSM) of Composites," *Trans. of the ASME, J. of Eng. for Ind.*, Vol. 113, pp. 75~84.
- (9) Dietz, H., Gunther, K. G. and Otto, K., 1973, "Reproduction Accuracy with Electrochemical Machining : Determination of the Side Gap," *Annals of the CIRP*, Vol. 22, No. 1, pp. 61~62.