

## 점 전극을 이용한 마이크로 전해가공 기구에 관한 연구

김봉규\*, 전종업\*\*, 박규열\*\*

### A Study on the Mechanism of Micro-ECM by Use of Point Electrode Method

Bong-Gyu Kim\*, Jong Up Jeon\*\*, Kyu-Yeol Park\*\*

#### ABSTRACT

This research aimed at from the establishment of theory on micro electrochemical machining mechanism to the implementation of a practical fabrication system of micro parts. In detail, the mechanism of micro-ECM was investigated with potentiodynamic method and the optimal condition for micro-ECM was selected by voltage-current-time curve with potentiostatic method. From the experimental result, the micro part which has extremely fine surface could be fabricated by use of micro-ECM with point electrode method.

**Key Words** : Micro Electrochemical machining (미세전해가공), Point electrode method (점 전극법), Potentiostat (포텐셔스타트), Polarization curve (분극곡선), Redox reaction(산화환원 반응)

#### 1. 서론

전해가공(Electrochemical Machining: ECM)은 전기화학가공이라고도 불리며, 전기화학적 용해작용(양극용출 또는 전해용출)을 재료의 필요한 부분에 집중, 제한함으로써 필요로 하는 형상이나 치수 및 표면상태를 얻는 가공법이다. 전해가공은 전기화학적 가공전체를 포함하고 있으나 협의적으로는 전기화학적 제거가공을 일컫는다. 전해가공에서는 기존의 기계가공에 비해 전해가공은 경도가 크고 인성이 큰 재료에 대해서도 가공속도가 높으며, 복잡한 3 차원 형상의 경우에도 가공재료 상에 공구의 흔적이나 버(Burr)의 발생이 없이 금속을 제거하는 것이 가능하다. 또한 일반 기계가공에서 발생하는 열이나 힘이 작용하지 않는 연유

에 금상학인 결함(Metallurgical Defect)이 방지됨과 동시에 전극소모가 없다는 장점을 가지는 반면, 가공정밀도에 한계가 존재한다는 가공기구 상의 문제로 인하여 높은 정밀도가 요구되는 초정밀 부품의 가공에는 적용이 제한되고 있는 실정이다<sup>(1)</sup>. 그러나 최근 마이크로 단위의 크기를 가지는 초정밀 부품의 제작기술 분야에서 전해가공의 효율성이 재고되고 있다. 이와 같은 사실은 마이크로 부품의 경우에 일반 기계부품에 비하여 질량효과의 감소에 따른 표면효과의 증대 및 이로 인하여 마이크로 트라이볼로지(Micro Tribology)의 역할이 중요하게 대두되며, 전해가공에서는 전술한 바와 같이 다른 제거가공법에서 발생하는 가공변질층의 문제가 해결된다는 점과 동시에 극히 평활한 면을 얻는 것이 가능하다는 사실을 배경으로 하고 있는

\* 2002 년 1 월 4 일 접수  
\* 울산대학교 기계자동차 공학부 대학원  
현재, 일진오토모티브 기술연구소  
\*\* 울산대학교 기계자동차 공학부

것으로 추정할 수 있다<sup>(2)</sup>. 미소형상의 초정밀 전해 가공과 관련된 대표적인 연구사례로써, Kunio Chikamori 는 공작물과 전극 사이에 정밀한 간극제어 시스템을 도입하고 가공전압과 전해액 농도를 낮게 하면 전해가공의 형상정밀도를 높일 수 있다고 보고하였다<sup>(3)</sup>. Masuzawa 는 미세방전가공으로 제작된 미세구멍의 표면을 질산나트륨 전해액을 사용하는 전해가공으로 Rmax: 92nm 까지 향상시키는 것이 가능하지만 단위 가공량이 많다는 점을 지적하였다<sup>(4)</sup>. 또한 전해가공에서 전류밀도가 낮으면 가공면이 흑색면으로 되고 전류밀도를 점차로 증가시키면 어느 시점에서 광택 면이 나타나게 되며, 이와 같은 흑색의 가공면에서도 가공변질층을 제거하는 작용이 발생된다는 사실을 확인하였으며, 광택면이 얻어지는 전기적 조건을 실험적으로 제시하였다<sup>(5)</sup> Rolf Schuster 등은 SPM(Scanning Probe Microscope)의 한 종류인 ECSPM(Electrochemical SPM)을 이용하여 Au 표면에 수 나노미터 정도의 홈을 가공하여 미세전해가공의 가능성을 제시하였다<sup>(6, 7)</sup>. 또한 Copper 플레이트에 Pt 전극을 이용하여 0.01M HClO<sub>4</sub> 와 0.1M CuSO<sub>4</sub> 액 중에서 극단파의 펄스를 공급함으로써 형상정도의 저하 없이 서브미크론 단위의 형상을 가공한다는 사실을 보고하였다<sup>(8)</sup>. 이 외에도 다양한 연구가 진행되고 있으며 국내에서는 미세전해가공을 이용하여 마이크로 단위의 크기를 가지는 미세 축을 제작한 사례가 발표되어 있다<sup>(9, 10)</sup>. 본 연구에서는 전해가공을 이용하여 극히 작은 단위의 크기를 가지는 부품의 제작기술로써 미세형상의 전극을 사용하는 점전극법을 제안하고 이의 가공기구를 조사하였다. 전해가공에서 미세전극을 사용하면 동일 전기조건에서 전류밀도가 높고 반응속도가 빠르며 전해액 내부에서의 전압강하를 현저하게 감소시킬 수 있는 등의 장점이 얻어지며, 이로 인하여 특히 높은 형상정밀도를 가지는 초미세 형상의 제작에 유리하다. 따라서 본 연구에서는 점 전극을 이용하는 전해가공 중에 발생하는 전해현상을 포텐서스타트(Potentiostat)를 이용하여 정량화함으로써 미세형상의 창성과 평활한 표면이 얻어지는 조건을 도출하였으며, 이를 효과적으로 이용하면 초미세 형상의 초정밀 전해가공이 실현된다는 사실을 확인하였다.

## 2. 미세전해가공의 이론적 배경

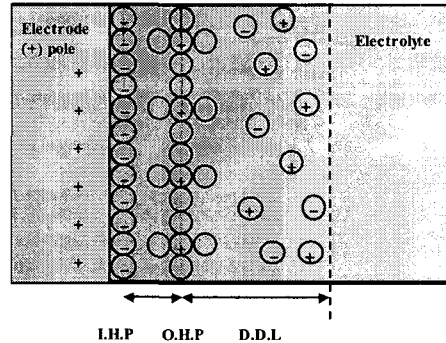


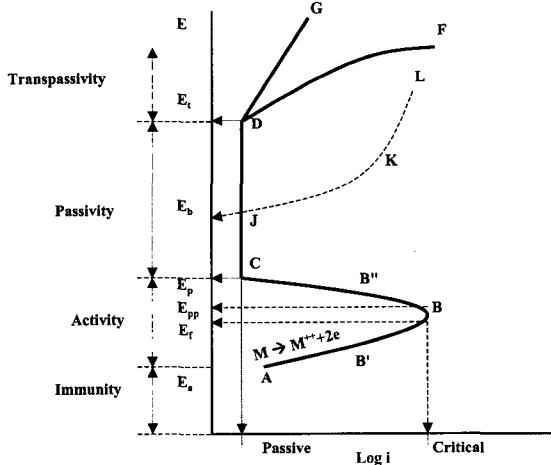
Fig. 1 Electrochemical Double Layer

### 2.1 전기적 이중층

Fig. 1 은 전기적 이중층의 구성도를 나타낸다. 금속의 용해가 시작하면 금속표면 주위에는 전하의 분리가 일어난다. 즉 금속표면은 음전하를 띠게 되고 표면에 접촉되어 있는 용액은 양전하를 얻게 된다. 이와 같이 음전하와 양전하가 분리, 열(Row)을 형성할 때 이를 전기적 이중층 또는, Helmholtz 이중층이라 한다<sup>(11)</sup>. 이 층에서 용액의 유동에 대해서 전혀 영향을 받지 않는 특이 흡착 분자가 금속표면에 정렬하게 되며, 이때 밀착된 음이온의 층을 I.H.P.(Inner Helmholtz Plane), I.H.P.에 인접하는 양이온의 층을 O.H.P.(Outer Helmholtz Plane)라고 한다. 또 O.H.P.의 외부에는 확산 2 층(Diffusion Double Layer)이 형성되어 있다. 이러한 금속표면에서의 이중층 형성은 전기전위의 차이를 초래하며, 전위에 따른 금속의 이온화 가능성이 결정된다. 예를 들어 전위가 증가할수록 용액 중의 금속이온의 농도는 증가하고 이로써 금속은 용출을 일으킨다.

### 2.2 양극분극곡선

Fig. 2 는 전해액 중에서 전압과 전류의 관계를 나타내는 양극분극곡선(Anodic Polarization Curve)이며, 이를 통하여 전해가공의 진행상태를 판정하는 것이 가능하다. 활성화 영역에서 금속은 기본적으로 Tafel 식을 따르며, 반대방향의 전류의 영향을 받아서 곡선의 형태를 취하게 된다. 전위가 상승함에 따라서 전류는 지속적으로 증가하지만 산화피막의 열역학적 안정권에 들어가면 증가하는 것이 중지된다. 즉 전류가 임계전류에 도달할 때 금속은 흡착된 산소의 피막이나 산화물 피막의 형성에 의해서 부동태화(Passivity)된다. 이러한 산화피막



$E_a^*$  : open circuit potential ( $E_{cop}$ ,  $E_{corr}$ ,  $E_R$ )  
 $E_{pp}$  : primary passive potential  
 $i_{critical}$  : critical current density  
 $E_p$  : passive potential  
 $I_p$  : passive current density  
 $E_t$  : transpassive potential  
 $E_b$  : breakdown potential ( $E_{pit}$ )

Fig. 2 Anode Polarization Curve

의 생성으로 전류가 감소하여 최소의 전류 밀도에 이르게 되는 전위를 부동태 전위라 하며, 이 점이 완전한 부동태의 시작점과 상응한다. 부동태 전위보다 높은 전위에서는 부동태 산화피막을 통해서 금속의 용해가 일정한 속도로 진행된다<sup>[12]</sup>. 이것은 전위의 증가로 전기장이 일정하게 유지 되도록 피막이 두터워지기 때문이다. 이 때의 전류 밀도를 부동태 전류밀도라 한다. 피막의 성장은 보통 양이온이 이동하여  $O^{2-}$  또는  $OH^-$  이온과 피막과 용액계면에서 결합함으로써 일어난다. 이와 같은 상태에서 지속적으로 전위를 증가시키면 전류가 급격하게 상승되는 현상이 발생되며 이 영역을 과부동태(Transpassivity) 영역이라 한다. 과부동태 영역에서는 산화피막이 수화된 이온으로 용해된다. 이 때의 전위를 과부동태 전위라고 한다. 단, 전해 가공에서의 분극곡선은 전해액과 재료특성에 따라서 서로 다른 형태와 특성을 가지게 된다.

### 3. 점 전극을 이용한 미세전해가공용 시스템 구성 및 실험방법

점전극을 이용한 미세전해가공에서 발생하는

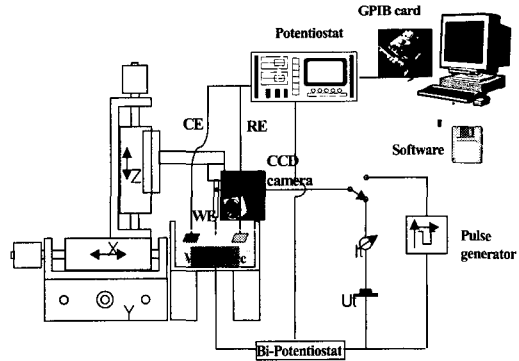


Fig. 3 Schematic Illustration of Micro ECM System

전해가공의 기구 및 특성을 조사하기 위하여 전용 시스템을 구성하였다. 미세전해가공용 시스템은 공작물 장착용의 주축 스피indle과 공구전극의 위치 결정기구를 포함하는 시스템 본체, 전원 공급장치와 포텐셔스타트를 포함하는 전해조건의 조절장치와 가공상태의 감시 및 평가장치로 구성된다. Fig. 3 은 점 전극을 이용한 미세전해가공 시스템의 개략도를 나타낸다. 본 시스템에서는 공작물이 전해액 중에 침적상태에서 가공이 진행되는 일반적인 전해가공방식과 전해액을 외부에서 가공부위로 공급하는 두 가지 방식이 가능하도록 설계하였다. 후자의 경우에는 전해액의 소모가 적을 뿐만 아니라 가공이 진행되는 부위를 현미경을 통해서 직접 관찰할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 주축부는 비교적 간단하면서도 높은 회전정밀도를 얻을 수 있는 V 블록과 직경  $\phi 15mm$  콜릿 척(Collet chuck)을 사용하였으며, 주축의 회전은 모터의 진동을 고려해서 O 링을 이용하여 모터와 주축을 분리하였다. 또한 전해가공을 이용한 미세형상의 가공을 전제로 하여 공구전극에 3 축이송을 부가하였으며, 각 축의 구동은 DC 서보모터를 이용하는 방식을 채용하였다. 공작물은 전해가공에서 많은 수요를 가지는 내식성이 우수한 직경  $\phi 600 \mu m$ 의 STS410의 스테인레스 선재를 사용하였으며, 전해액은 황산( $H_2SO_4$ )과 인산( $H_3PO_4$ ) 등을 사용하였다. 공구전극은 점 전극을 구현하기 위하여 공작물과 동일한 재료의  $\phi 600 \mu m$ 의 선재를 사용하여 끝 단면을 원추형상으로 성형하였으며 선단부위를 제외하고는 에폭시 수지로 피복하여 절연시켰다. 실험에 사용된 STS410의 재료특성을 Table 1에 나타낸다. 전해가공에서는 전해액의 조건에 따라서 가공성능의

Table 1 Material Properties of STS410

STS	Weight %(Fe balance)						Yield Strength Hardness	
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Y/S(kgf/mm <sup>2</sup> )	H <sub>R</sub> B
410	0.15	1.00	1.00	0.04	0.03	11.50	21	88

차이가 있으므로 전해액을 등온으로 공급하는 장치를 이용하였으며, 전해액은 자체제작한 미세노즐을 통하여 기포가 발생하지 않는 범위에서 일정하게 공급하는 방식으로 가공조건의 균일화를 도모하였다. 이와 같은 장치를 사용하고 전원공급장치 및 포텐서스타트를 이용하여 전해전류를 공급, 제어하면서 전해액의 종류와 전기적 조건에 따른 전해가공특성의 차이를 이를 토대로 미세전해가공 기구에 관하여 고찰하였다.

#### 4. 점 전극을 이용한 미세전해가공 특성

##### 4.1 분극곡선과 전해거동의 관계

미세전해가공에 앞서서 실험에 사용된 STS410의 전해거동을 조사하기 위하여 분극곡선을 구하였다. 분극실험에서는 미국 EG&G PARC 사의 포텐서스타트: 263A와 부식해석용 소프트웨어: M352를 사용하였다. 공작물(Working Electrode: WE)은 SUS304, 공구전극(Counter Electrode: CE)은 백금(Pt), 참조전극(Reference Electrode: RE)은 염화은(Ag/AgCl)을 사용하였으며, 전해액은 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>와 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 및 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 3H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>의 세 종류를 사용하였다. 실험 전에는 시편표면의 오염을 제거하고 국부부식을 방지하기 위하여 알코올 용액을 사용하여 초음파 세척을 진행하였으며, 모든 전해액은 원액과 2차 증류수를 이용하고 전해액의 정류를 위해 분극실험

Table 2 Measuring Condition of Potentiodynamic Polarization Curve

Parameter	Set-up
Initial Delay	10sec
Scan Rate	0.5mV/s
Scan Increment	1Mv
Step Time	2sec
Initial Potential	-250mV
Final Potential	1.6V
Current Range	Auto
Reference Electrode	Ag/AgCl(0.197)

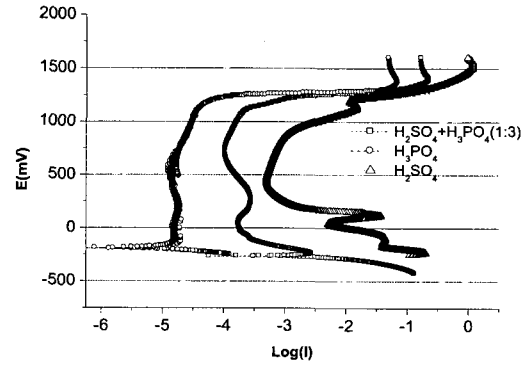


Fig. 4 Anode Polarization Curve of STS410

전에 N<sub>2</sub> 가스를 주입하였다. 또한 분극실험에서 시편은 전해액의 평형전위상태에서 한시간동안 침전 시킴으로서 순수한 Cell의 환경에 의해서 전위가 결정되어지는, 소위 개방회로전위(Open Circuit Potential)를 갖도록 하였다. 안정된 부식전위(E<sub>corr</sub>)가 얻어진 후 전위를 -0.25V에서 1.6V 혹은 그 이상의 원하는 지점까지 0.5mV/s 간격으로 증가시켰다. 모든 전위는 Ag/AgCl을 기준으로 나타내며, 실온에서 실험의 신뢰도를 높이기 위해 동일한 실험을 4회 반복하였다. 인가전압의 상승에 의한 시편의 표면상태의 변화는 실험 후에 주사전자현미경(SEM)과 주인택플러스의 광학식 표면거칠기측정기: ACCURA500M을 이용하여 관찰하였다. Table 2는 분극실험에 사용된 제반 조건을 나타낸다.

Fig. 4에 나타난 바와 같이, 활성형 전해액에 해당하는 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>의 경우에 비전도도가 높아서 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>에 비하여 상대적으로 높은 가공성을 가지는 것을 알 수 있다. 즉, 전해가공은 10<sup>-4</sup>~10<sup>-3</sup> (A/cm<sup>2</sup>)의 전류밀도에서 진행되는 것으로 판단할 수 있으며, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>은 급속한 전류의 변화로 금속의 용출속도가 매우 빠르며, Fig. 3에서 도시한 부동태 구간이 현저하게 짧아진다. 반면, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>은 비활성형 전해액으로 전류밀도가 너무 낮아서 정상적인 금속용출 자체가 어려운 것을 알 수 있다. 한편, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 3H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>의 전해액에서는 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>의 활발한 금속용출 작용과 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>이 가지는 크롬층 제거 및 크롬산화 생성으로 인한 광택발생 작용이 동시에 발생하는 영역이 존재하며, 체적제거와 표면의 평활화가 동시에 요구되는 마이크로 전해가공에서 유용하게 활용가능한 전해액 조성으로 판단할 수 있다. 단, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 3H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>의 경우에도 전압이 1.4V를 초과하면

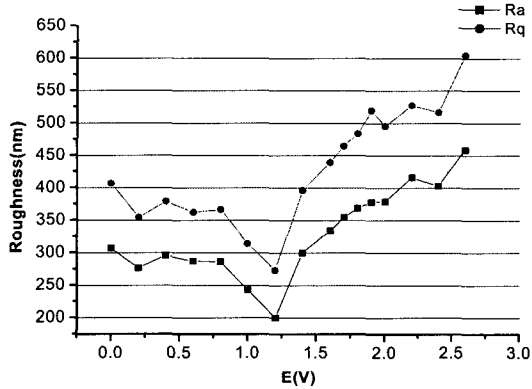


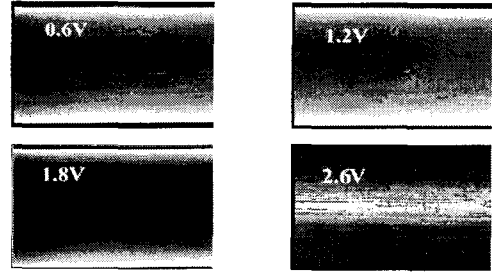
Fig. 5 Relationship between Voltage & Surface Roughness

산소의 발생과 더불어 합금성분의 이온화로 인하여 전류밀도가 급격하게 증가한다는 사실로부터 미세전해가공을 효과적으로 구현하기 위해서는 적절한 전압이 요구되는 것으로 판단할 수 있다.

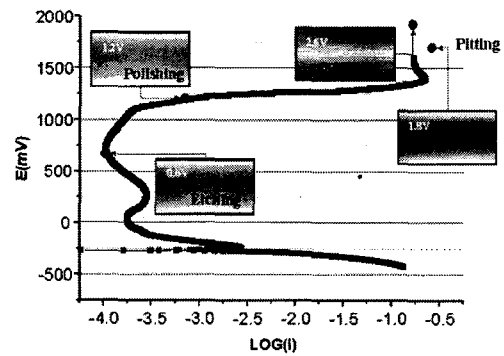
4.2 전압과 표면상태(표면거칠기)의 관계

전기의 Fig. 4에서 Potentiodynamic 방법으로 확인한 양극분극곡선에서 조사한 전압의 범위를 포함하도록 인가전압을 0V부터 2.4V까지 증가시키면서 인가전압에 따른 전류치의 변화가 공작물의 표면상태에 미치는 영향을 조사하였다. 사용된 공작물은  $\phi 600\mu\text{m}$ 의 STS410선재이며, 전해액은  $\text{H}_2\text{SO}_4$ :  $3\text{H}_3\text{PO}_4$ 의 혼합액을 사용하였다. 실험에 있어서는 인가전압 외에 전해가공에서 표면상태에 영향을 미치게 되는 가공간극 및 전해액의 공급조건 등은 동일하게 설정하였으며, 실험 후에는 표면상태의 측정에 앞서서 측정값의 정확성을 고려하여 공작물 표면의 이차부식을 방지하기 위해서 초음파세척을 하였다.

Fig. 5는 인가전압에 따른 표면거칠기의 차이를 조사한 결과로써, 인가전압에 따라서 전해현상 차이가 발생되며 이로 인하여 표면상태에 차이가 존재하는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 Fig. 4의 분극곡선과 표면거칠기의 결과를 중첩시켜서 나타낸 것으로, 초기 미세전류로 인하여 미약한 에칭이 진행되다가 부동태구간에서 산화환원의 평형을 이루며, 크롬산화층의 피막형성으로 인하여 표면상태가 향상되는 것을 알 수 있다. 즉, 전류가 미약한 0.6V까지는 미세한 에칭이 일어나며, 부동태 구간으로 추정되는 1.2V에서는 에칭구간의 표면거



(a) Surface Condition



(b) Anodic Polarization Curve

Fig. 6 Relationship between Voltage & Surface Condition

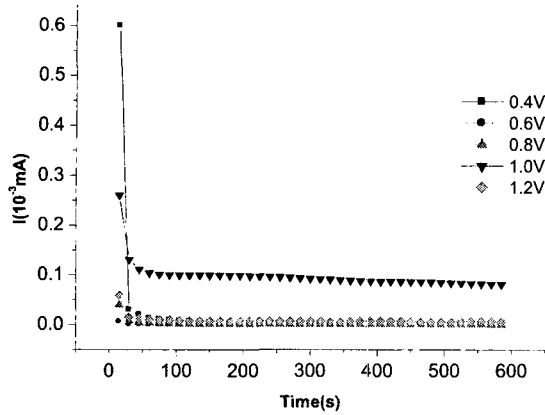
칠기를 극복하고 전해연마 특성이 발휘되어 표면거칠기가 향상된다. 그 후, 전압의 지속적인 상승으로 인한 전류치의 증대로 공작물 표면에서 급격한 산화가 진행되어 표면거칠기가 악화되며 인가전압이 높아질수록 그 정도가 심해지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 동 결과에 근거하면, 미세전해가공에서의 표면상태는 분극곡선의 추이를 추종하는 것으로 단정할 수 있다.

4.3 전압인가 시간과 전해전류(전류밀도)의 관계

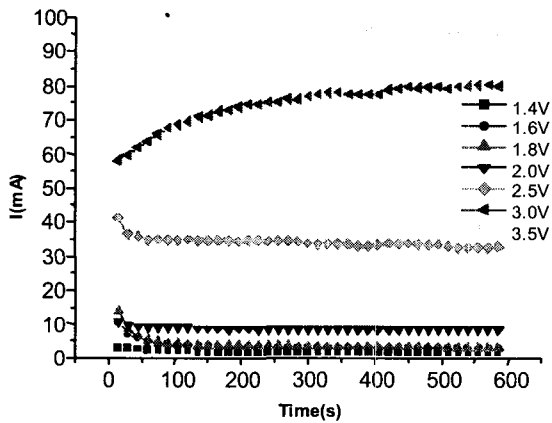
전기의 Fig. 4와 Fig. 6의 실험에서는 전압의 차이에 따른 전해반응의 대략적인 경향은 파악이

Table 3 Measuring Condition of Potentiostatic Time-Current Curve

Parameter	Set-up
Time Step	600sec
Time/Pt	15sec
No. of Points	39
Rise Time	High Stability
Density	7.900g/ml
Counter Electrode	Ag/AgCl



(a) 0.4V~1.2V



(b) 1.4V~3.5V

Fig. 7 Current-Time Curves of STS410 in  $H_3PO_4: 3H_2SO_4$

가능하지만 금속표면에서의 인가전압에 따른 산화 반응의 차이를 특성화하는 것은 곤란하다. 따라서 포텐서스타트를 이용하여 정전압을 일정시간 인가 하면서 인가전압 0V~3.5V의 범위에서 시간의 경과에 따른 전류치의 변화거동을 측정하여 각각의 전압조건에서의 전해가공 특성을 평가하였다. 가공 조건은 Table 3에 나타낸 바와 같으며, 포텐서스타트: 263A와 부식해석소프트웨어: M352를 사용하였다. Fig. 7(a)에 나타낸 바와 같이,  $\mu A$ 의 단위의 비교적 적은 전류밀도를 가지는 0.4V~1.2V의 구간에서는 1.0V의 조건에서 산화반응이 우선하여 전류 밀도가 다소 증가하지만, 이 후 1.2V에서는 산화 환원반응의 균형을 이루는 부동태의 영향으로 전류 밀도가 다시 저하되는 것으로 확인되었다. 이

영역에서는 전해반응이 미약하여 미세 에칭 및 연마작용이 발생하는 구간이라 판단할 수 있다. 반면, Fig. 7(b)에서 1.4V 이상의 인가전압에서는 전류 밀도가 mA를 초과하면서 급격하게 전해가공이 진행되며, 전압이 증가할수록 피팅(Pitting) 현상과 더불어 전해반응이 격렬해지는 것으로 관찰되었다. 또한 인가전압 3.0V와 3.5V의 결과에서 보이는 바와 같이 일정구간을 초과하는 인가전압의 조건에서는 셀 내부의 급격한 전해작용으로 인하여 데이터에 변동이 발생하며, 이 영역을 전후로 음극에서의 수소기포의 발생이 급격하게 증가하는 것이 육안으로 관찰되었다. 이와 같은 결과는 점 전극을 이용하는 미세전해가공에서는 미세형상의 창성과 표면의 평활화를 달성가능하기 위한 전기적 조건이 서로 다르며, 미세형상의 초정밀 전해가공을 실현하기 위해서는 인가전압을 포함하여 적절한 전해환경이 구성되어야 한다는 사실을 시사하는 것으로 판단할 수 있다.

#### 4.4 점 전극법을 이용한 마이크로 전해가공

$\phi 600\mu m$ 의 STS410선재와  $H_2SO_4: 3H_3PO_4$ 의 혼합액을 사용하여 마이크로 형상의 전해가공을 수행하였다. 공구전극은 30RPM으로 회전하는 공작물의 회전축에 대하여 일정각도로 수평운동시킴으로써 최종적으로는 가공형상이 피벗(Pivot) 형상을 가지도록 하였다. 가공에 있어서는 인가전압을 3단계로 분류하여 가공초기에는 황삭(Metal Removal Process) 과정에 해당하는 과도전류를 이용하여 기초형상을 제작하였으며, 중삭(Profiling Process) 과정을 통하여 최종형상을 완성한 후에 정삭과정(Polishing Process)에서 표면의 평활도를 얻는 단계로 구분하였다. 구체적으로, 최초에는 가공속도를 향상시키기 위하여 과부동태에 해당하는 10V의 전압을 인가하여 공작물을 과용출 시킨 후에 미세에칭에 해당하는 인가전압 3.5V에서 원하는 형상으로 제작하였으며 최종적으로는 부동태화에 이은 연마구간으로 1.2V~1.4V사이의 전압을 이용함으로써 선단부위가 수nm에 해당하는 미세 핀의 제작이 가능하였다. Fig. 8에는 제작된 마이크로 형상의 피벗과 인가전압에 따른 가공성능의 차이를 나타내며, 적절한 전해조건이 구성되면 점 전극을 이용하여 마이크로 형상의 초정밀 전해가공이 가능하다는 사실이 입증되었다.

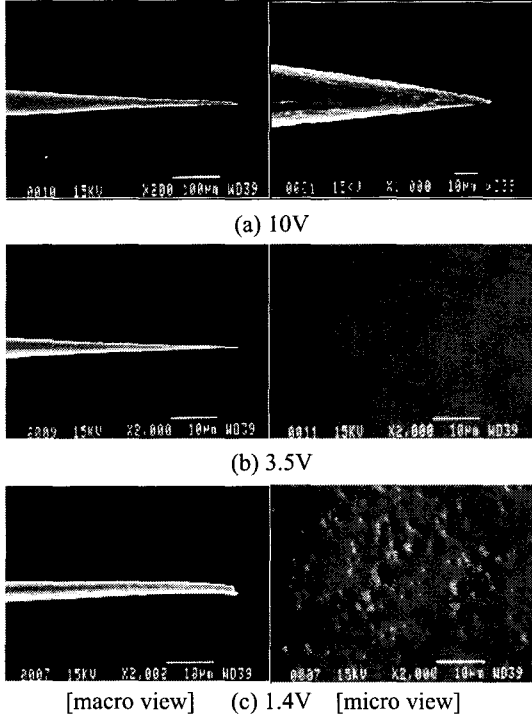


Fig. 8 SEM view of Micro Pivot Machined by Point Electrode Method

### 5. 결론

본 연구에서는 전해가공을 이용하여 마이크로 단위의 크기를 가지는 미세부품의 제작기술로써 점전극법을 제안하고 이의 가공기구를 조사하였으며, 적절한 전해조건이 구성되면 점 전극을 이용하여 마이크로 형상의 초정밀 전해가공이 가능하다는 사실을 입증하였다. 본 연구에서 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. 미세전해가공에서 최적조건의 선정에는 양극분극곡선이 매우 유용하며, 포텐셔스타트를 이용하면 효과적인 분극곡선의 조사가 가능하다.
2. 미세형상의 전해가공에서는 일반 전해가공에 비하여 형상창성과 표면의 평활화에 이용가능한 가공영역이 명확하게 구분되며, 미세전해가공에서의 표면상태는 분극곡선의 추이를 추종한다.
3. 금속의 미세전해가공에서 전압에 따른 전류와 시간의 변화를 측정하면 전해가공에서의 가공특성을 정량화하는 것이 가능하다.
4. 점 전극을 이용한 미세전해가공에서 인가전압을 통하여 전해현상을 제어함으로써 높은 형상

정밀도를 유지하면서 양호한 표면상태를 가지는 마이크로 형상의 제작이 가능하다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부 지원 국제공동연구(I-04-A-001)로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 近森邦夫, “電解加工におけるパルス電流の利用,” 日本機械技術研究所報告, No. 137, 1986.
2. J. W. Schultze, A. Bressel, “Principle of electrochemical micro-and nano-system technologies,” *Electrochimica Acta* 47, pp. 3-21, 2001.
3. K. Chikamori, “Possibilities of electrochemical micromachining,” *Int. J. of Jpn. Soc. Prec. Eng.*, Vol. 32, No. 1, pp. 37-42, 1998.
4. 木光太朗, 酒井茂紀, 増澤隆久, 藤野正俊, “微細穴の電解仕上げに関する研究,” 電氣加工學會全國大會論文集, pp. 35-38, 1996.
5. T. Masuzawa, S. Sakai, “Quick finishing of WEDM products by ECM using a mate-electrode,” *Ann. of the CIRP*, Vol. 36, No. 1, pp. 123-126, 1987.
6. V. Kirchner, L. Cagnon, R. Schuster, G. Ertl, “Electrochemical machining of stainless steel microelements with ultrashort voltage pulse,” *App. Phys. Lett.*, Vol. 79, pp. 1721-1723, 2001.
7. R. Schuster, “Nanoscale electrochemistry-a tool for forming structures of almost atomic dimensions,” *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 80, pp. 5599-5602, 1998.
8. R. Schuster, V. Kirchner, P. Allongue, G. Ertl, “Electrochemical micromachining,” *Science*, Vol. 289, pp. 98-101, 2000.
9. 인치현, 김규만 주종남, “전기화학적 에칭을 이용한 텅스텐 미세탐침 가공,” *한국정밀공학회지*, Vol. 18, No. 2, pp. 111-118, 2001.
10. 임영모, 임형준, 김수현, “전해 프로세스를 이용한 미세축 제작,” *한국정밀공학회지*, Vol. 18, No. 3, pp. 169-174, 2001.
11. 박용수, 금속부식, 대우학술총서, 民音社, pp. 137-148.
12. 佐藤教男, “金屬の不動態化と表面不動態皮膜,” *電氣化學*, Vol. 46, No. 11, pp. 584-591, 1978.