

# 미세 전해 가공에서 반경 방향 오버컷 예측을 위한 시뮬레이션

## Simulation of the Radial Overcut in Micro Electrochemical Machining

김보현<sup>1,✉</sup>, 신흥식<sup>2</sup>, 오영탁<sup>3</sup>, 이강희<sup>4</sup>, 주종남<sup>2</sup>  
 Bo Hyun Kim<sup>1,✉</sup>, Hong Shik Shin<sup>2</sup>, Young Tak Oh<sup>3</sup>, Kanghee Lee<sup>4</sup> and Chong Nam Chu<sup>2</sup>

1 송실대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Soongsil Univ.)

2 서울대학교 기계공학과 (School of Mechanical Engineering, Seoul National Univ.)

3 안산공과대학 기계과 (Department of Mechanical Engineering, Ansan College of Tech.)

4 동양미래대학 로봇자동화공학부 (School of Robot and Automation Engineering, DongYang Mirae Univ.)

✉ Corresponding author: bhkim@ssu.ac.kr, Tel: 02-820-0653

Manuscript received: 2010.10.12 / Accepted: 2010.11.25

*The radial overcut in micro electrochemical machining was investigated. The prediction of overcut is important not only for the machining accuracy but also for the shape control of micro structures. In micro ECM, machining gap or overcut depends on electrolyte, pulse voltage, pulse duration and dissolution time etc. Understanding of electrochemical dissolution rate is necessary for the overcut prediction. In this paper, the radial overcut of micro electrochemical machining according to pulse duration and dissolution time was simulated using electrochemical principles and also experimentally estimated.*

Key Words: Micro Electrochemical Machining (미세 전해 가공), Micro Hole (미세 구멍), Simulation (시뮬레이션)

### 1. 서론

최근 금속의 미세 가공 기술 중 하나로서, 미세 전해 가공 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>1-5</sup> 미세 전해 가공은 재료의 강도나 경도와 무관하게 금속을 가공할 수 있어, 스테인리스강이나 초경합금 등의 금속을 이용한 미세 기계 부품 가공이나 금형 가공에 이용될 수 있다. 방전 가공과 마찬가지로 공구와 가공물과의 직접적인 접촉이 없기 때문에 미세 공구를 사용하는 것이 용이하고, 방전 가공의 큰 단점인 공구 마모가 발생하지 않아 공구 마모로 인한 형상 오차를 보정할 필요가 없다.

미세 전해 가공에서 사용되는 전원으로서, 일반적으로 초단 펄스가 이용된다. 기존 전해 가공의 전원으로서  $\mu\text{s} \sim \text{ms}$  정도의 폭을 갖는 펄스 전원

이 이용되어 왔으며, 이 때의 가공간극은 수 백  $\mu\text{m}$  에 이른다. 이에 반해, 가공 전원으로 초단 펄스를 이용하면 가공 간극을 수  $\mu\text{m}$  까지 줄일 수 있기 때문에 전해 가공으로 미세 형상을 가공할 수 있다.<sup>1</sup>

한편 전해 가공에서의 가공 간극은 가공 시간, 전해액의 농도, 펄스 전원의 조건 등에 따라 변화하며, 이는 가공 속도나 가공 정밀도에 직접적으로 영향을 미친다. 따라서 가공 형상 오차를 줄이기 위해 전해 가공 간극 또는 오버컷을 여러 가지 가공 조건에 따라 정확히 예측하는 것이 필요하다.

Hwang<sup>3</sup> 은 전해를 이용한 구리의 미세 홈 가공에서 펄스 폭에 따른 에칭의 예측(etch trends)과 시뮬레이션에 대해 연구하였다. 그러나, 가공 간극의 변화는 펄스 조건뿐만 아니라, 전해액의 종류 및

농도, 재료의 종류에 따라 달라지므로, 각각의 가공 조건에 대한 분석이 필요하다.

본 논문에서는 0.1 M 황산, 지름 100 μm 원형 전극을 이용하여 스테인리스 강(STS304)을 전해 가공할 때, 펄스 온 타임과 가공 시간에 따른 가공 오버컷 변화와 그에 대한 시뮬레이션을 연구하였다.

2. 미세 전해 가공 실험 장치

Fig. 1 에 나타낸 것처럼, 실험 장치는 전해셀, X-Y-Z 이송기구, 펄스제너레이터, 오실로스코프 등으로 구성되어 있다. 가공물의 재료로는 스테인리스 강(STS304)를 사용하였다. 가공물의 형상은 폭 15 mm × 15 mm, 두께 300 μm 의 사각형 판이며, 전해 가공 전에 표면 연마를 수행하였다.

미세 공구, 즉, 미세 전극의 재료로 초경합금을 사용하였으며 와이어 방전 연삭(WEDG, wire electrical discharge grinding)를 이용하여 수 십 μm 지름의 전극으로 제작하였다.

펄스제너레이터의 초단 펄스 전압은 공작물과 전극에 인가하였으며 이를 오실로스코프로 측정하였다. 또한 가공물의 접촉 유무를 판단하기 위한 회로를 제작하였으며 이 신호를 통하여 전극의 이송을 제어하였다. 가공 상태는 머신 비전을 통해 모니터링하였다.

본 실험에서는 펄스 조건과 가공 시간에 따른 오버컷을 측정하기 위해, Fig. 2 와 같이 지름 35 μm 의 미세 전극을 이용하여 깊이 10 μm 의 구멍을 가공한 뒤, 구멍의 지름을 측정하였다. 인가 펄스 전압은 6 V 이며 Fig. 3 에 가공물과 공구전극 양단에 인가된 펄스 파형의 예를 나타내었다.

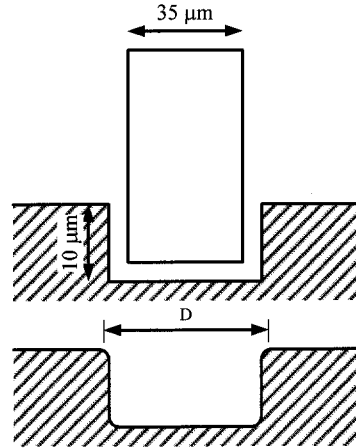


Fig. 2 Hole machining for measuring overcut

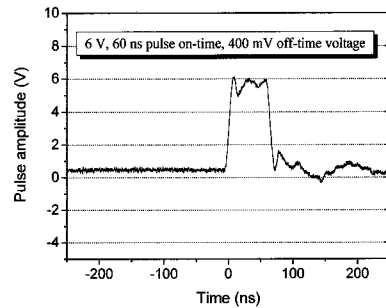


Fig. 3 Voltage pulse applied to a workpiece and a tool electrode

3. 전해 반응 모델링

미세 전해 구멍 가공에서의 오버컷 예측을 위해 먼저, 전해 반응을 모델링하였다. Fig. 4 는 전해액 속에 담긴 전극과 가공물 사이의 전기 이중층을 전기적 모델로 나타낸 것이다.<sup>7,8</sup> 전극 계면의 전기 이중층은 저항과 축전기로 근사화할 수 있다.

만약 이 시스템에 전압  $\Phi_0$  의 펄스를 인가하게 되면 전기 이중층에 충전되는 전위( $\Phi_c$ )는 다음과 같다.

$$\phi_c(t) = \frac{\phi_0}{2} \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \quad (1)$$

전해액의 저항( $R_s$ )는 전해액의 비저항( $\rho$ ), 간극(d)의 곱이므로 이중층의 충전 시정수( $\tau$ )는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

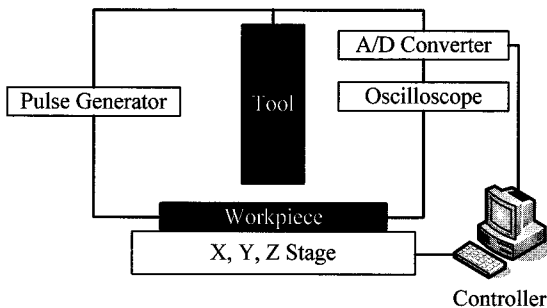


Fig. 1 Schematic diagram of ECM system

$$\tau = \rho cd \tag{2}$$

여기서  $c$ 는 전기 이중층의 축전 용량이다.

펄스 인가 시간,  $t$ 가  $\tau$ 일 때 충전된 전위는 펄스 전압( $\Phi_0/2$ )의 약 63%에 이르게 된다. 만약 충전 시간이 작은 경우 식(1)은 Taylor expansion 에 의해 다음과 같이 선형함수로 근사화 할 수 있다.

$$\phi_c(t) = \frac{\phi_0}{2} \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \approx \frac{\phi_0}{2} \frac{t}{\tau} \tag{3}$$

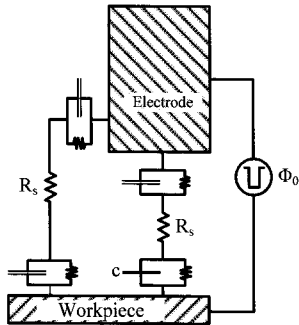


Fig. 4 The double layer model<sup>7,8</sup>

전해 반응 동안 전극을 통해 흐르는 순전류(net current)는 환원 전류( $i_c$ )와 산화 전류( $i_a$ )의 차이이다. 만약 산화 전류와 환원 전류의 양이 동일한 경우 순전류는 0 이 되고 이 상태를 평형 상태라 한다. 이처럼 평형 상태에서의 산화 전류 밀도와 환원 전류 밀도의 크기는 같으며 이 값을 교환 전류 밀도(exchange current density)라고 한다.<sup>7</sup>

환원 전류,  $i_c$ 와 산화 전류,  $i_a$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} i_c &= i_0 \exp(\alpha_c n f \eta) \\ i_a &= i_0 \exp(\alpha_a n f \eta) \end{aligned} \tag{4}$$

여기서  $i_0$ 는 교환 전류 밀도,  $\alpha$ 는 전자 이동 계수,  $f = F/RT$ ,  $F$ 는 Faraday 상수,  $R$ 은 가스 상수,  $T$ 는 온도,  $\eta$ 는 과전위이다.

순전류,  $i$ 는

$$i = i_0 \left( \exp(\alpha_a n f \eta) - \exp(-\alpha_c n f \eta) \right) \tag{5}$$

이 되며 이 식을 Butler-Volmer 식이라고 부른다.

옴의 법칙(Ohm's law)이 전류와 전압의 관계를 나타내는 것처럼 이 식은 과전위와 반응 전류의 관계를 나타낸다.

한편 금속의 양극 용해(anodic dissolution)를 이용하는 전해 가공의 경우 환원 전류는 산화 전류에 비해 상대적으로 작고 과전위는 높기 때문에 식(5)는 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$i = i_0 \exp(\alpha_a n f \eta) \tag{6}$$

펄스 휴지 기간의 전압(pulse off-time voltage)를 가공물 전체에서 전해가 일어나지 않도록 설정하기 때문에 펄스 휴지 기간 전압에서는 반응 전류가 흐르지 않는다고 가정할 수 있다. 즉, 펄스 휴지 기간 전압에서 전해가 일어나지 않고 펄스 인가 전압에 비해 상대적으로 작기 때문에 펄스 인가 전압은 과전위로 생각할 수 있다. 따라서 식(6)은 식(2)와 (3)을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i = i_0 \exp(\alpha n f \eta) = i_0 \exp\left(\alpha f \frac{\phi_0}{2} \frac{t}{\rho cd}\right) \tag{7}$$

$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ 와 같은 전해 반응에서 전자의 이동에 의해 패러데이 전류가 흐른다. 패러데이 전류는 반응 이온의 양만큼 흐르므로 반응 속도( $v$ )는 반응 전류에 비례하며 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$v(\text{mol/s}) = \frac{i}{zF} = \frac{i_0}{zF} \exp\left(\alpha f \frac{\phi_0}{2} \frac{t}{\rho cd}\right) \tag{8}$$

여기서  $z$ 는 stoichiometric number 이다.

펄스 인가 시간 동안의 반응양,  $n$ 은 펄스 인가 시간( $t_p$ )동안 반응속도를 적분함으로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n = \int_0^{t_p} v(t) dt = \frac{i_0}{zF} \frac{1}{\alpha f \phi_0} \rho cd \left[ \exp\left(\frac{\alpha f \phi_0 t_p}{2 \rho cd}\right) - 1 \right] \tag{9}$$

펄스 휴지 기간과 펄스 주기( $t_{\text{period}}$ )도 고려하면 단위 시간당 반응율,  $\Gamma$ 은

$$\Gamma(t_p, t_{period}, \phi_0, d) = \frac{n}{t_{period}} = \frac{2i_0 \rho c d}{t_{period} z F \alpha f \phi_0} \left[ \exp\left(\frac{\alpha f \phi_0 t_p}{2 \rho c d}\right) - 1 \right] \quad (10)$$

로 표현할 수 있으며, 위 식에서 간략화를 위해

$$A = \frac{2i_0 \rho c}{z F \alpha f t_{period} \phi_0} \quad B = \frac{\alpha f}{2 \rho c} \phi_0 t_p \quad (11)$$

라고 정의하면

$$\Gamma(d) = A d \left[ \exp\left(\frac{B}{d}\right) - 1 \right] \quad (12)$$

로 나타낼 수 있다.

## 4. 시뮬레이션

### 4.1 시뮬레이션 프로그램

위 식을 기본으로 가공 간극을 시뮬레이션하였다. 알고리즘은 Fig. 5 에 나타내었다. 먼저 초기 가공 간극( $d_0$ )와 일정 시간 간격( $\Delta t$ )를 식(12)에 넣은 뒤, 가공된 반응율을 구했다. 가공 간극이 매우 작은 경우 반응율은 이론적으로 무한대에 이르게 된다. 하지만 실제 가공에서는 이온 확산 속도에 의해 반응율이 제한을 받게 된다. 따라서 본 시뮬레이션에서는 최대 반응율(Max\_Rate)을 일정치 이하로 설정하였다. 최대 반응율은 가공 간극이 매우 작은 경우에 주로 영향을 미치므로 가공이 어느 정도 진행되어 간극이 커지게 되면 그 영향이 미미하게 된다. 반응율이 일단 구해지면, 반응율과 단위 시간과 곱하여 반응한 양을 구한 뒤 가공 간극( $d_{n+1}$ )을 다시 계산하였다. 이 과정을 반복(iteration)하여 시간에 따른 가공 간극의 변화를 시뮬레이션하였다.

### 4.2 시뮬레이션 결과

초단 펄스를 이용한 전해 가공에서 오버컷은 펄스 인가 시간과 전체 가공 시간에 따라 변화한다. 본 시뮬레이션에서는 가공 간극을 가공 시간에 대하여 가공율을 적분하여 구하였다. Fig. 6 은 가공 시간에 따른 가공 간극의 변화에 대해 실험

값과 시뮬레이션 값을 나타낸다. 그래프에서 볼 수 있듯이 가공 초기에 선형적으로 빠르게 증가하는 영역이 존재하는데 이는 앞서 설명하였듯이 간극이 매우 작아 이온의 확산에 의해 반응율이 일정하게 제한되는 구간이다. 가공 간극이 점차 증가하면서 반응율도 작아지게 되므로 가공 간극의 변화 속도는 점차 떨어지게 된다. 식(10)에서 나타내듯이 반응율은 몇 가지 변수에 의해 결정된다. 이 중 값이 알려진 상수는 Table 1 에 나타내었다.

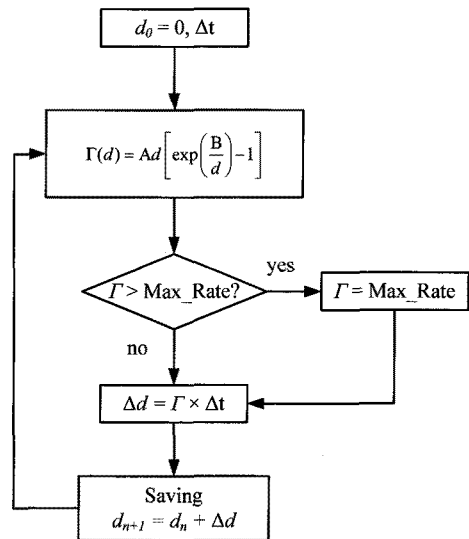


Fig. 5 The change of machining gap according to machining time

값이 알려지지 않은 상수는 교환 전류 밀도와 전기 이중층의 충전 용량, 그리고 최대반응율이다. 이 중, 전기이중층의 충전 용량은 일반적으로 금속의 경우 10 ~ 40  $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ 이지만 이러한 값들은 정확한 값을 구하기가 쉽지 않기 때문에 먼저 60 ns 폭의 펄스를 사용하여 구멍 가공을 한 뒤 가공 간극을 측정하여 이 결과를 바탕으로 각 값들을 유추하였다. 즉 이중층 충전 용량, 교환 전류 밀도, 최대 반응율을 각각 13  $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ , 1.7  $\text{mA}/\text{cm}^2$ , 300 monolayer/sec 으로 설정하여 Fig. 6 과 같은 그래프를 구하였다. 그래프에서 가공 초기의 경우 가공 간극의 변화가 시뮬레이션 결과와 잘 일치하지 않음을 볼 수 있는데 이 구간은 최대 반응율에 영향을 받는 영역이다. 최대 반응율은 주로 이온의 확산에 기인한 것이므로 전해액의 순환을 방해하는 기포 등이 이 오차의 원인이 될 수 있다.

이렇게 결정된 변수를 이용하여 다른 펄스 인가 시간(100, 150 ns)에 대해서도 시뮬레이션을 수행하였다. 펄스 인가 시간을 달리하여 나타내었다. Fig. 7 을 보면 시뮬레이션과 실제 가공 간극과 비교적 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 앞서 펄스 폭 60 ns 의 가공에서 유추한 상수의 설정이 타당함을 알 수 있다. 이렇게 계산된 시뮬레이션 결과는 가공 시간과 펄스 인가 시간에 따른 간극, 즉 오버컷 변화의 예측에 사용될 수 있다.

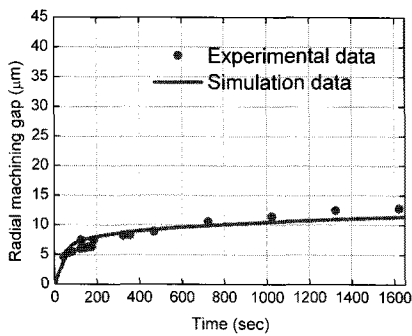


Fig. 6 The change of machining gap according to machining time

Table 1 Parameters for simulation

$\Phi_0$	6 V	$t_{period}$	1 $\mu$ s
$t_p$	60 ns	$\alpha$	0.5
P	50 $\Omega$ cm	z	2
F	96485.3 C/mol	R	8.314J/molK
T	298.15 K		

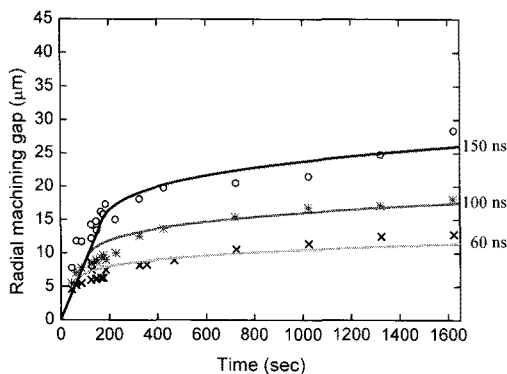


Fig. 7 The radial machining gap according to the pulse on-time (6 V, 1  $\mu$ s period, 60, 100, 150 ns pulse on-time)

### 4.3 깊은 구멍 가공에서의 응용

앞 장에서는 깊이 10  $\mu$ m 의 구멍 가공에서 반경방향 오버컷에 대한 연구를 하였다. 하지만, 구멍의 깊이가 깊어지면, Fig. 8 과 같이 전류밀도가 낮아져 반응율이 점점 낮아지고, 오버컷 양도 작아지게 된다. 따라서 보다 더 깊은 구멍 가공에서의 오버컷의 변화에 대해 실험을 하였다. 실험 방법은 구멍 깊이가 10  $\mu$ m 에서 100  $\mu$ m 까지의 각기 다른 구멍을 가공한 뒤에 소요된 시간을 측정하였으며 이 때의 반경 방향 오버컷을 측정하였다. 설정한 공구전극의 이송속도는 1  $\mu$ m/s 이지만, 단락으로 인해 실제 가공 속도는 이보다 느려졌다. Fig. 9 에 가공 시간(또는 깊이)에 따른 반경 방향 오버컷의 변화를 나타내었다. 깊이 10  $\mu$ m 깊이의 구멍 가공의 결과(Fig. 7)와 비교하였을 때, 반경방향 오버컷의 양이 약 20 % 가량 줄어든 것을 볼 수 있다. 그 이유는 구멍 깊이가 깊어질수록 이온 확산이 어렵고, 전류가 빠져나가는 벽면의 면적이 증가하게 되어 결과적으로, 평균 전류 밀도가 낮아짐으로 인해, 반경방향의 전해 반응이 줄어들기 때문이다. 이러한 깊은 구멍 가공에서도, 앞서 설명한 알고리즘을 이용하여, 반경방향 오버컷을

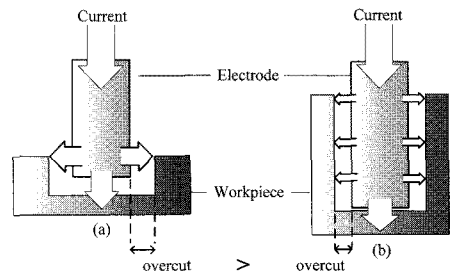


Fig. 8 The different current density; (a) 10  $\mu$ m deep hole machining, (b) 100  $\mu$ m deep hole machining

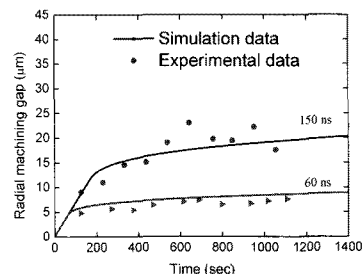


Fig. 9 The change of radial overcut according to the machining time and depth

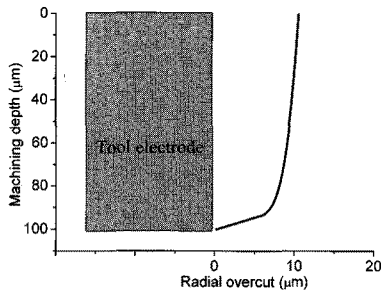


Fig. 10 the micro hole profile and the radial overcut (cylindrical electrode, 6 V, 60 ns pulse on-time, 1 μs period)

시뮬레이션 할 수 있으며, Fig. 9 에 직선으로 나타내었다. Fig. 10 은 시뮬레이션 값을 바탕으로, 깊이 100 μm 의 구멍 가공을 하였을 때 구멍 벽면의 형상 및 반경 방향 오버컷을 나타낸 그래프이다.

### 5. 결론

초단 펄스를 이용한 미세 전해 구멍 가공에서의 반경 방향 오버컷에 대해 연구하였다. 전해 가공에서 인가된 펄스의 조건과 가공 시간에 따라 오버컷의 변화 경향을 살펴보았으며 인가 펄스 폭이 커질수록, 구멍 가공 깊이가 작을수록 반경방향 오버컷이 커지는 것을 알 수 있었다. 또한 전기화학반응식을 이용하여 반경방향 오버컷을 시뮬레이션을 통하여 예측할 수 있었다. 전해가공에서의 가공 조건에 따른 오버컷 변화와 이에 대한 예측은 미세 전해를 이용한 구멍 가공뿐만 아니라 3차원 구조물 가공에 적용할 수 있다.

### 후 기

이 논문은 2007 학년도 안동대학교 학술연구지원 사업에 의하여 연구되었음.

### 참고문헌

1. Schuster, R., Kirchner, V., Allongue, P. and Ertl, G., "Electrochemical Micromachining," Science, Vol. 289, No. 5476, pp. 98-101, 2000.
2. Kim, B. H., Ryu, S. H., Choi, D. K. and Chu, C. N., "Micro Electrochemical Milling," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 15, No.

- 1, pp. 124-129, 2005.
3. Kenney, J. A. and Hwang, G. S., "Etch Trends in Electrochemical Machining with Ultrashort Voltage Pulses," Electrochemical and Solid-State Letters, Vol. 9, No. 1, pp. D1-D4, 2006.
4. Ahn, S. H., Ryu, S. H., Choi, D. K. and Chu, C. N., "Localized Electro-chemical Micro Drilling Using Ultra Short Pulses," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 20, No. 8, pp. 213-220, 2003.
5. Cagnon, L., Kirchner, V., Kock, M., Schuster, R., Ertl, G., Gmelin, W. T. and Kück, H., "Electrochemical Micromachining of Stainless Steel by Ultra Short Voltage Pulses," Zeitschrift für Physikalische Chemie, Vol. 217, No. 4, pp. 299-313, 2003.
6. Masuzawa, T., "State of the Art of Micromachining," Annals of the CIRP, Vol. 49, No. 2, pp. 473-488, 2000.
7. Paik, W. K. and Park, S. M., "Electrochemistry: Science and Technology of Electrode Processes," Cheongmoongak, pp. 39-56, 2001.
8. Bard, A. J. and Faulkner, L. R., "Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications, 2<sup>nd</sup> Ed.," John Wiley & Sons, pp. 98-99, 2000.