

미세 전해 구멍 가공에서의 가공 특성과 시뮬레이션

김보현*(서울대 정밀기계설계공동연구소), 이영수(서울대 기계항공공학부),
최덕기(강릉대 정밀기계공학과), 주종남(서울대 기계항공공학부)

Machining Characteristics in Micro Electrochemical Drilling and Simulation

B. H. Kim(Institute of Adv. Machinery and Design, SNU), Y. S. Lee(Sch. of Mech. and Aero. Eng., SNU)
D. K. Choi(Dept. of Precision Mech. Eng., KNU), C. N. Chu(Sch. of Mech. and Aero. Eng., SNU)

ABSTRACT

Micro hole is one of basic elements for micro device or micro parts. By micro ECM, micro holes less than 50 μm in diameter can be machined easily. Machining characteristics of micro ECM were investigated according to machining conditions such as electrolyte concentration and pulse conditions. From the investigation, optimal machining conditions were suggested for micro ECM of stainless steel. For the micro machining with high resolution, the change of machining gap should be predicted. By using electrochemical principle equations, the change of machining gap was simulated.

Key Words : Electrochemical machining (전해 가공), Micro machining (미세 가공), Simulation (시뮬레이션)

1. 서론

전해 가공은 금속의 전기 화학적 반응을 이용한 가공법으로 재료의 경도와 무관하게 가공할 수 있어 금형 가공에 많이 이용되었다. 방전 가공이나 초음파 가공처럼 전극 형상이 가공물에 전사되는 특징이 있어 자유 곡면 가공에도 유리하다. 하지만 전해 반응이 일어나는 영역이 넓어 전극 형상보다 크게 가공이 되는 문제가 있어 정밀한 형상 가공에는 이용되지 못했다. 하지만 초단 펄스를 이용하면 가공 간극이 수 μm 정도로 줄어들어 전해 가공으로 미세 형상을 가공 할 수 있다.¹ 미세 구멍은 미세 부품에서 가장 기본적인 요소이다. 최근에는 스테인리스 강과 같은 난삭재에 더 작은 크기와 더 높은 정밀도가 요구되는 미세 구멍의 수요가 늘고 있다. 이러한 미세 구멍 가공 방법으로는 미세 드릴링, 레이저 가공, 미세 방전 가공 등이 있다. 하지만 요구되는 구멍 크기가 수 십 μm 이하가 되면 이러한 방법으로 가공하는 것이 쉽지 않다. 특히 공구나 전극의 파손, 마모로 인한 어려움이 생긴다. 하지만 전해 가공에서는 전극의 마모가 발생하지 않으므로 이러한 미세 구멍 가공에 적합하다. 본 논문에서는 전해 가공을 이용한 스테인리스 강

(STS 304)의 미세 구멍 가공 특성에 대해 연구하였다.

2. 가공 조건에 따른 가공 특성

Fig. 1 은 미세 전해 가공으로 가공한 미세 구멍의 예이다. 이러한 미세 구멍 가공을 위해서는 간극의 제어, 반응 속도의 제어 및 예측 등이 중요하다. 미세 전해 가공에서 가공 특성에 미치는 주요한 인자로서 전해액의 농도, 펄스 전압, 폭 등이 있다. 따라서 이들 조건에 따른 가공 간극의 변화 등을 살펴보았다.

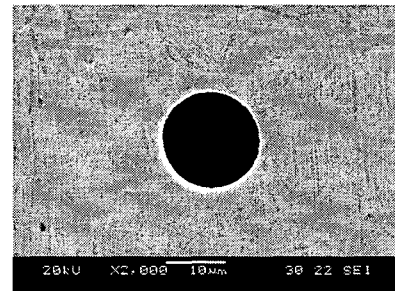


Fig. 1 Micro hole machined by micro ECM (STS 304, \varnothing 15 μm , 50 μm depth)

2.1 전해액의 농도

전해액의 선택은 미세 전해 가공에서 매우 중요하다. 일반 스테인리스 강의 전해 가공에서는 높은 농도의 NaCl 또는 NaNO₃ 를 사용해 왔다. 하지만 미세 전해 가공에서는 가공 정밀도, 가공 간극 등을 고려하여 전해액의 종류와 그 농도를 선택해야 된다. Schuster² 등은 스테인리스 강의 미세 전해 가공을 위해 3M 염산 용액(HCl)과 6M 불산 용액(HF)을 섞은 전해액을 사용하였다. 하지만 전해액의 농도가 높고 가공 표면도 좋지 않은 단점이 있다. 본 실험에서는 미세 전해 가공을 위해 황산 용액을 사용하였다. 미세 정밀도를 높이기 위해서는 전극과 공작물의 사이의 간극이 최소화 되도록 가공 조건을 설정해야 된다. 일반적으로 전해액의 농도가 낮을수록 간극이 감소하지만 너무 낮으면 가공 자체가 안될 수도 있다. 따라서 농도에 따라서 가공 간극의 변화를 살펴보았다. 실험 방법은, Fig. 2 와 같이 지름 35 μm 의 전극을 사용하여 깊이 10 μm 의 구멍을 가공한 뒤 구멍의 지름을 측정하여 간극의 크기를 평가하였다. 전극의 이송 속도는 0.1 μm/sec 으로 일정하게 하였다.

Fig. 3 은 전해액의 농도에 따른 가공 간극의 변화를 나타낸 그래프이다. 6 V, 60 ns 펄스 폭의 펄스를 인가하여 가공하였다. 전해액의 농도가 낮아질수록 간극이 줄었으며 0.1 M 농도에서는 간극이 약 6.5 μm 이었다. 하지만 농도가 0.1 M 보다 더 낮아지면 가공 자체가 불안정해지고 단락이 많이 발생하였다. 이는 간극에서 이온의 고갈로 인해 안정적인 전해가 일어나지 못하기 때문이다. 따라서 본 실험에서는 가공 정밀도와 안정적인 가공을 고려하여 전해액으로 0.1 M 의 황산 용액을 선택하였다.

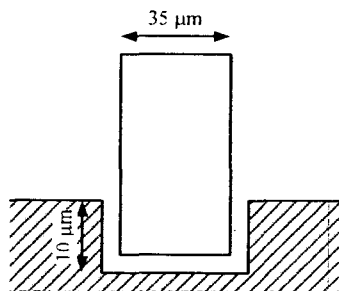


Fig. 2 Hole machining for measuring machining gap

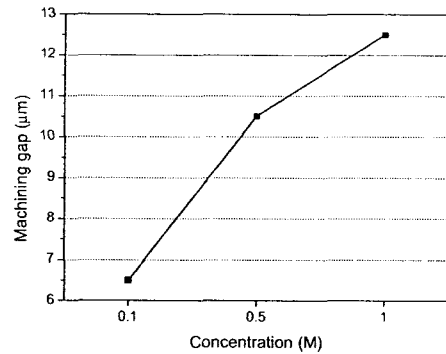


Fig. 3 The machining gap according to the electrolyte concentration (H₂SO₄, 6 V, 60 ns pulse on-time, 1 μs period)

2.2 펄스 조건

미세 전해 가공에서 펄스 조건은 가공 간극과 가공 속도를 결정하는 인자 중 하나이다. 전기 화학적 반응 속도는 인가 전위가 높을수록 증가하므로 가공 간극은 인가되는 펄스의 전압, 펄스 폭 그리고 가공 시간에 영향을 받는다.

Fig. 4 는 인가되는 펄스를 개략적으로 나타낸 것이다. 펄스는 펄스 전압 (pulse on-time voltage), 펄스 폭(pulse on-time), 펄스 휴지 기간 전압 (pulse off-time voltage), 펄스 주기(pulse period)로 나타낼 수 있다. 미세 전해 가공에서는 이러한 인자가 가공 특성에 영향을 미친다. 따라서 본 논문에서는 펄스 폭과 펄스 전압에 따른 가공 특성을 살펴보았다.

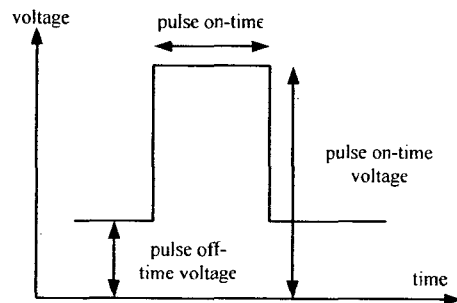


Fig. 4 The machining gap according to the electrolyte concentration (H₂SO₄, 6 V, 60 ns pulse on-time, 1 μs period)

펄스 폭과 펄스 전압이 가공 간극에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 지름 60 μm 의 전극으로 펄스 폭과 펄스 전압을 달리 하여 깊이 10 μm 깊이의 구멍을 가공한 뒤 간극을 측정하였다. Fig. 5 와 6 은 펄스 폭과 펄스 전압이 증가할수록 가공 간극이 증가하는 것을 보이고 있다. 가공 정밀도를 높이기

위해서는 폭이 작고, 전압이 낮은 펄스를 사용하는 것이 바람직하다. 하지만 전압이 4 V 이하가 되거나, 펄스 폭이 40 ns 이하가 되면 가공 속도가 아주 낮았으며 전극과 가공물의 단락도 많이 발생하였다. 4 V 가 스테인리스 강의 가공이 원활히 이루어지는 과부동화 영역임에도 불구하고 가공이 어려운 이유는 펄스 폭이 너무 낮아 이온 전달이 어렵기 때문이다. 따라서 원활한 가공을 위하여 어느 일정치 이상의 펄스 전압과 펄스 폭이 필요하다. 미세 전해 가공에서 단락이 많이 발생하면 가공 표면 품질에 영향을 미칠 수 있으므로 본 논문에서는 원활한 가공을 위한 펄스 조건으로 60 ns 폭의 6 V 펄스를 선정하였다.

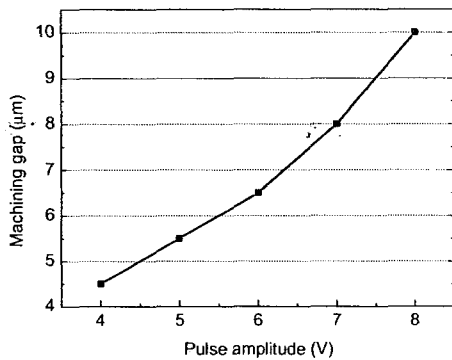


Fig. 5 The machining gap according to the pulse amplitude (0.1 M H₂SO₄, 60 ns pulse on-time, 1 μs period)

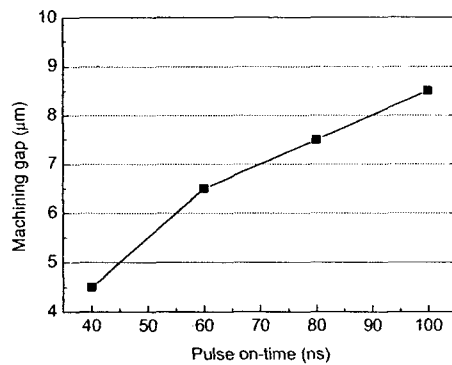


Fig. 6 The machining gap according to the pulse on-time (0.1 M H₂SO₄, 6 V, 1 μs period)

2.3 가공 시간

Fig. 7 은 가공 시간에 따른 간극의 변화를 나타낸 그래프이다. 각각의 시간마다 가공된 구멍의 직경을 측정하여 가공 간극을 나타내었다. 가공 시간이 길어질수록 간극은 계속 증가하며 가공 초기에는 간극이 빠르게 증가하다가, 시간이 지나면서 점차 그 속도가 느려지는 것을 알 수 있다.

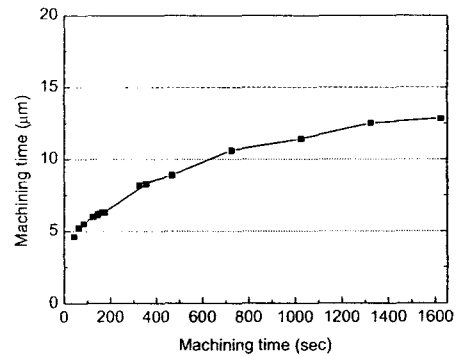


Fig. 7 The machining gap according to the machining time (0.1 M H₂SO₄, 6 V, 60 ns pulse on-time, 1 μs period)

3. 시뮬레이션

앞서 보인 바와 같이 전해 가공에서는 전해액의 농도, 펄스 전압, 펄스 폭 그리고 가공 시간에 따라 가공 간극이 변화한다. 미세 구멍 가공과 같은 정밀한 가공을 위해서는 이러한 가공 특성을 파악하는 것이 필수적이다. 구멍 가공뿐만 아니라 3 차원 미세 형상 가공에서도 정밀한 형상 제어 등을 위하여 가공 간극의 변화를 예측할 필요가 있다. 따라서 펄스 조건과 가공 시간에 따른 간극의 변화를 시뮬레이션하고 실제 가공 결과와 비교하였다.

Fig. 8 은 전해액 속에 담긴 전극과 가공물 사이의 전기 이중층을 전기적 모델로 나타낸 것이다.³⁴ 전극 계면의 전기 이중층은 저항과 축전기로 근사화할 수 있다. 전해액의 저항(R_s)는 전해액의 비저항(ρ), 간극(d)의 곱이므로 이중층의 충전 시정수(τ)는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau = \rho cd \quad (1)$$

c 는 전기 이중층의 축전 용량이다.

만약 이 시스템에 전압 Φ_0 의 펄스를 인가하게 되면 전기 이중층에 충전되는 전위(Φ_c)는 다음과 같다.

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

Butler-Volmer 식에 따라서 펄스를 인가하는 동안 반응 전류(i)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.³⁴

$$i = i_0 \exp\left(\alpha f \frac{\phi_0 t}{2 \tau}\right) \quad (3)$$

i_0 는 교환 전류 밀도, α 는 전자 이동 계수, $f = F/RT$, F 는 Faraday 상수, R 은 가스 상수, T 는 온도이다.

반응 속도(v)는 반응 전류에 비례하므로 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$v = \frac{i}{zF} \quad (4)$$

z 는 stoichiometric number 이다.

이 반응 속도(v)를 펄스 인가 시간(t_p)동안 적분을 하면 단위 시간당 반응량(Γ), 즉 용해된 이온량 (mol/sec)을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Gamma(t_p, \phi_0, d) &= \frac{1}{t_{period}} \int_0^{t_p} v(t) dt \\ &= \frac{1}{t_{period}} \int_0^{t_p} \frac{i}{zF} dt \\ &= A \frac{d}{\phi_0} \left[\exp\left(B \frac{\phi_0 t_p}{d}\right) - 1 \right] \end{aligned} \quad (5)$$

$$A = \frac{2\rho c}{t_{period} \alpha f F z}, \quad B = \frac{\alpha f}{2\rho c}$$

t_{period} 는 펄스 주기, t_p 는 펄스 폭이다.

전체 용해된 이온은 식 (5)를 가공 시간 동안 적분을 함으로써 구할 수 있고 이 용해된 이온의 양으로부터 간극의 변화를 계산해 낼 수 있다. Fig. 9 는 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 나타낸 것이다. 시뮬레이션에 사용된 계수의 값은 Table 1 과 같다. i_0 와 c 는 각각 1.7 mA/cm^2 , $13 \text{ } \mu\text{F/cm}^2$ 이 사용되었다. 계산된 시뮬레이션 결과는 가공 시간에 따른 간극의 변화 예측에 사용될 수 있다.

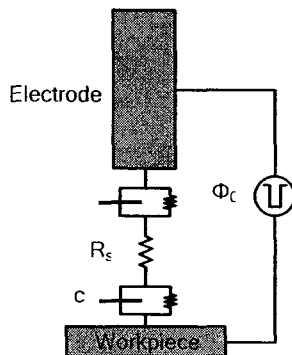


Fig. 8 The double layer model [6].

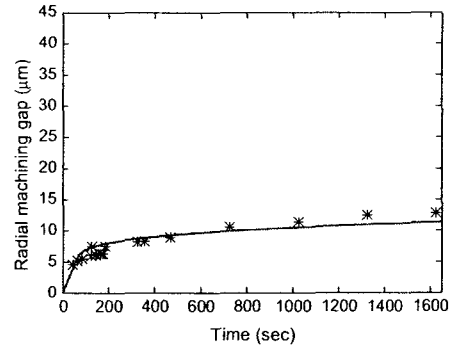


Fig. 9 The change of machining gap according to machining time

Table 1 Parameters for simulation

Φ_0	6 V	t_{period}	1 μ s
t_p	60 ns	α	0.5
P	50 Ω cm	z	2
F	96485.3 C/mol	R	8.314J/molK
T	298.15 K		

4. 결론

초단 펄스를 이용한 미세 구멍 가공의 가공 특성에 대해 연구를 하였다. 전해 가공에서 전해액과 인가된 펄스의 조건에 따라 가공 간극의 변화를 살펴 보았으며 적절한 가공 조건을 제시하였다. 또한 가공 시간에 따른 간극의 변화를 실험을 통하여 구하였으며 시뮬레이션을 통하여 간극 변화를 예측하였다.

참고문헌

- Schuster, R., Kirchner, V., Allongue, P. and Ertl, G., "Electrochemical Micromachining," Science, Vol. 289, pp. 98-101, 2000.
- Cagnon, L., Kirchner, V., Kock, M., Schuster, R., Ertl, G., Gmelin, W. T., Kück, H., "Electrochemical Micromachining of Stainless Steel by Ultra Short Voltage Pulses," Zeitschrift für Physikalische Chemie, Vol. 217, pp. 299-313, 2003.
- Bard, A. J. and Faulkner, L. R., Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 2000.
- Paik, W. K. and Park, S. M., Electrochemistry: Science and Technology of Electrode Processes, Cheongmoongak, Seoul, 2001.