

# 미세 전해 가공에서 가공 속도에 영향을 미치는 인자 연구 Parametric Study on Machining Speed in Micro ECM

\*권민호<sup>1</sup>, #박민수<sup>2</sup>, 신흥식<sup>1</sup>, 주종남<sup>1</sup>

\*M. H. Kwon<sup>1</sup>, #M. S. Park(pminsoo@wku.ac.kr)<sup>2</sup>, H. S. Shin<sup>1</sup>, C. N. Chu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 서울대학교 기계항공공학부, <sup>2</sup> 원광대학교 기계자동차공학부

Key words : Micro machining, Electrochemical machining, Ultra short pulse, Electrolyte

## 1. 서론

전해 가공은 비접촉 가공이므로 난삭재의 가공에 많이 이용되어 왔다. 공구의 형상을 그대로 전사하는 특징이 있어 자유곡면 가공에 유리하고, 원자 단위로 재료의 제거가 이루어지기 때문에 다른 특수 가공법에 비해서 가공면의 품질이 우수하다<sup>1</sup>. 이러한 장점에도 불구하고 일반적인 전해 가공은 가공 정밀도가 기타 특수 가공에 비해 좋지 않기 때문에 미세 가공에는 적합하지 않은 것으로 알려져 왔다. 하지만 Schuster<sup>2</sup> 등은 초단 펄스(ultra short pulse)를 이용하여 구리 등의 금속에 미세 가공을 성공적으로 수행하였고 Kim<sup>3</sup> 등은 스테인리스강의 미세 구조물을 제작하였다.

하지만 기존의 초단 펄스를 이용한 미세 전해 가공 연구는 가공 정밀도와 표면 품질을 높이는 데 중점을 두어 가공 속도가 느린 단점이 있다. 이를 개선하기 위해 Jeon<sup>4</sup> 등은 미세 방전 가공을 황삭, 미세 전해 가공을 정삭으로 이용하는 복합 가공에 대한 연구를 진행한 바 있지만 방전 가공 시에 공구가 마모되고 황삭 공정과 정삭 공정 중간에 절연액을 전해액으로 교체해야 하는 번거로움이 있다.

본 연구에서는 미세 전해 가공의 가공 속도를 개선하기 위해서 펄스 전압 크기(pulse amplitude), 충격 계수(duty ratio), 펄스 폭(pulse on-time), 전해액 온도와 농도 등의 가공 속도에 영향을 미치는 인자에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 실험 장치

Fig. 1은 미세 전해 가공 시스템이다. 전극의 이송은 0.1 μm의 분해능을 갖는 3축 스테이지를 사용하였다. 초단 펄스 전압을 인가하기 위해 펄스 발생기(pulse generator)를 사용하였으며 전압 및 전류 파형은 오실로스코프(oscilloscope)를 이용하여 관측하였다. 일정 전위(potentiostat)를 사용하여 공작물과 공구 전극의 전위를 조절하였으며 기준 전극(reference electrode)과 대전극(counter electrode)은 백금 전극을 사용하였다. 한편, 가공 시스템에 대한 측정 시스템의 내부 임피던스의 영향을 최소화하기 위해 전압 폴로어(voltage follower)를 구성하여 시스템을 분리시켰다. 전해액의 온도를 조절하기 위해 내열성이 있는 용기를 저장소(reservoir)로 이용하고, ± 0.5 °C 범위로 디지털 피드백 온도 제어 가능한 가열기(hotplate)와 온도센서를 이용하여 저장소의 온도를 일정하게 유지시켰다. 그리고 펌프를 사용하여 가공 수조와 저장소의 전해액을 순환시켰다.

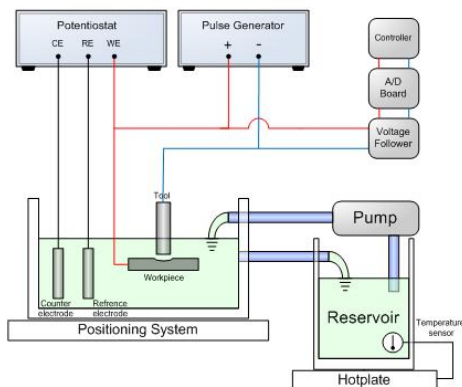


Fig. 1 Schematic diagram of electrochemical machining system

## 3. 실험 및 결과

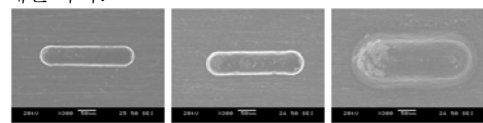
미세 전해 가공에서는 가공 시편의 종류에 따라서 전해액의 종류와 인가하는 펄스가 달라진다. 스테인리스강(304 SS)의 경우에는 일반적으로 0.1 M의 황산 용액과 6 V의 펄스 전압 크기, 1 μs의 펄스 주기에 100 ns 이하의 펄스 폭(10% 이하의 충격 계수)을 가진 펄스를 사용하였다<sup>3,5-6</sup>. 본 연구에서는 기존의 연구에서 사용한 가공 조건을 기본으로 하여 각 가공 인자들을 하나씩 조절하여 실험을 수행하였다. 또한, 가공량이 많은 조건에서도 작은 가공 간극을 유지할 수 있도록 가변 속도로 공구 전극을 이송시켰다. 단락이 일어나지 않으면 속도를 증가시키고, 단락이 일어나면 속도를 감소시켰다. 공구 전극의 파손 방지를 위하여 최대 이송 속도를 제한했다. 이와 같은 조건으로 길이 200 μm, 깊이 30 μm의 미세 홈 가공을 통해 가공 인자에 따른 가공 특성을 비교하였다.

### 3.1 펄스 전압 크기에 따른 가공 특성

앞서 언급한 가공 조건을 기본으로 펄스 전압 크기를 6 V, 8 V, 10 V로 순차적으로 증가시키면서 가공을 수행하였다. 그 결과 펄스 전압 크기가 증가할수록 가공 시간이 단축되어 10 V에서는 6 V와 비교했을 때 78%의 가공 시간이 단축되었다. 그러나 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 펄스 전압 크기가 커질수록 형상 정밀도가 점점 나빠졌고, 10 V에서는 미세 홈의 옆면이 완전히 무너졌다. 이는 가공량이 이온 공급에 비해서 지나치게 증가했기 때문이다. 미세 전해 가공에서 펄스 휴지기(pulse off time)는 반응 후의 금속 이온을 가공 간극 밖으로 배출하고, 간극의 전해액을 반응 가능 이온으로 채워주는 역할을 한다<sup>7</sup>. 펄스 전압 크기가 커지면 가공량의 증가에 따라 이온 소모량이 많아지지만, 펄스 휴지기는 그대로이기 때문에 이온 공급량이 이온 소모량에 비해 충분하지 못하여 가공이 원활히 이루어지지 않는다.

### 3.2 충격 계수(duty ratio)에 따른 가공 특성

1 μs의 펄스주기를 유지하면서 충격 계수를 10%, 20%, 30%로 하여 가공을 수행하였다. 충격 계수란 펄스 주기(pulse period)에 대한 펄스 폭(pulse on-time)의 비를 뜻한다. Fig. 3은 각 조건의 가공 사진이다. 20%와 30%의 조건에서 기존의 10%에 비해 가공 시간이 75% 이상 단축된 반면 두 조건 모두 형상 정밀도가 유지되지 않았다. 이는 앞의 실험과 같이 충격 계수가 커질수록 단위 시간당 가공 시간이 길어져서 가공량이 많아지지만 이온 공급을 위한 펄스 휴지기가 짧아지기 때문에 이온 결핍이 생겨 가공이 불안정해졌기 때문이다.



(a) 6 V (b) 8 V (c) 10 V  
Fig. 2 Machined surfaces according to pulse amplitude



(a) 10% (b) 20% (c) 30%  
Fig. 3 Machined surfaces according to duty ratio

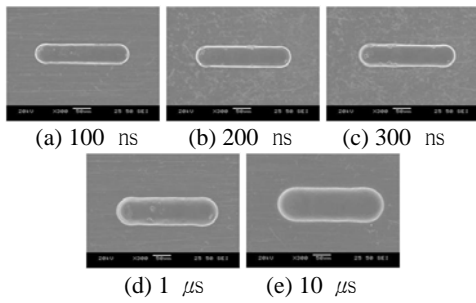


Fig. 4 Machined surfaces according to pulse on-time

3.3 펄스 폭(pulse on-time)에 따른 가공 특성

10%의 충격 계수를 유지하면서 100 ns, 200 ns, 300 ns, 1 μs, 10 μs의 펄스 폭에 대하여 가공을 수행하였다. 펄스 폭의 증가에 따라 가공 간극이 커졌지만, 앞의 두 실험에서와는 달리 미세 홈의 옆면이 무너지지 않고 유지되면서 가공 간극이 증가하였다. Fig. 4 를 보면 미세 홈의 옆면이 앞의 두 실험과는 달리 뚜렷하게 남아 있다. 이는 앞의 두 경우와는 달리 이온 공급이 비교적 충분하게 되었기 때문이다. 충격 계수를 유지하면서 펄스 폭을 증가시켰기 때문에 펄스 폭의 증가에 따라 가공량이 많아지지만 펄스 휴지기의 증가에 의하여 이온 공급량 또한 증가한다. 하지만 300 ns에서의 가공 시간은 100 ns에 비해서 20% 가량만 단축되어 효과가 미미했고, 1 μs 이상의 조건에서는 가공 간극이 과도하게 커져서 미세 가공에 사용하기에는 부적합하다.

3.4 전해액 온도에 따른 가공 특성

상온인 25 °C에서부터 55 °C까지 10 °C 씩 증가시키면서 가공을 수행하였다. Fig. 5 는 온도에 따른 미세 홈의 가공 사진이다. 온도가 높아질수록 가공 시간은 단축되지만 앞의 실험들과는 달리 가공 간극은 크게 증가하지 않았다. 55 °C에서는 10 μm 이내의 가공 간극을 유지하면서도 25 °C와 비교하여 35% 가공 시간을 단축할 수 있었다. 전해액 온도가 높아지면 가공 속도가 빨라지는 것은 아레니우스식(Arrhenius equation)에 의해서 설명할 수 있다. 온도가 높아질수록 반응 상수(reaction rate constant)가 증가하므로 반응이 빠르게 일어나서 가공 속도가 빨라진다.

Arrhenius equation:  $k = Ae^{-E_a/RT}$

- k : reaction rate constant
- A : pre - exponential factor
- $E_a$  : activation energy
- R : gas constant

그리고 형상 정밀도가 유지되는 것은 온도가 상승할수록 간극 사이에 전해액의 순환이 활발해져서 충분한 이온 공급이 유지되기 때문이다. 하지만 55 °C 이상에서는 전해액에서 연무 형태로 독성이 강한 황산 증기(fume)가 발생하므로 더 이상 온도를 높이는 데에는 한계가 있다.

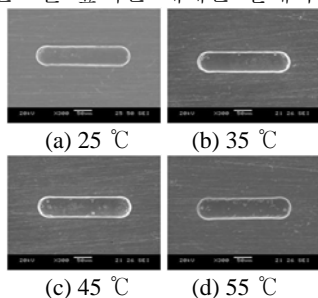


Fig. 5 Machined surfaces according to electrolyte temperature

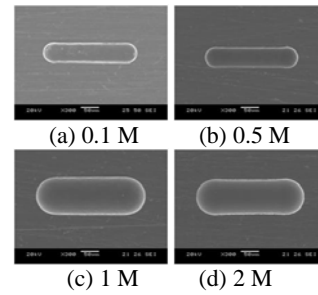


Fig. 6 Machined surfaces according to electrolyte concentration

3.5 전해액 농도에 따른 가공 특성

0.1 M, 0.5 M, 1 M, 2 M의 조건에서 가공을 수행하였다. Fig. 6 은 전해액 농도에 따른 미세 홈의 가공 사진이다. 0.5 M에서는 0.1 M과 비교하여 77% 단축된 가공 시간으로 가공 간극의 큰 변화없이 우수한 형상 정밀도와 가공면 품질을 가진 미세 홈을 가공할 수 있었다. 하지만 1 M과 2 M에서는 가공 간극이 10 μm 이상이였다. 이는 두 조건에서는 공구 전극과 가공물 사이의 단락이 거의 없지만, 이송 속도를 더 빠르게 할 경우 단락시 공구의 파손이 빈번하므로 이송 속도를 제한하였기 때문이다. 전해액 농도가 높아지면 전해액의 용액 저항이 낮아지고 전기 이중층의 충전 시정수가 작아지므로 전기 이중층에 높은 전위가 충전되기 때문에 가공 속도가 빨라진다<sup>3</sup>. 또한, 이온 활동도(ionic activity)가 커져서 반응 가능한 이온이 많아지므로 충분한 이온 공급이 유지되어 가공이 안정적으로 이루어져서 형상 정밀도도 유지된다.

4. 결론

본 연구에서는 미세 전해 가공의 가공 속도를 개선하기 위하여 가공 속도에 영향을 미치는 인자에 대한 연구를 수행하였다. 과도한 펄스 전압 크기나 충격 계수는 가공량에 비해 공급되는 이온이 부족하기 때문에 원활한 가공이 이루어지지 않으므로 가공 속도를 개선하는 데 적합하지 않다. 펄스 폭은 작은 가공 간극을 유지할 수 있는 조건에서는 속도 개선 효과가 크지 않고, 가공 속도를 키우면 가공 간극이 과도하게 커지기 때문에 가공 속도 개선에 적합하지 않다. 전해액 온도는 가공 간극이 작게 유지되면서도 가공속도가 커지는 경향을 보였지만 높은 온도에서의 독성 때문에 가공 속도 개선에 한계가 있다. 그러므로 본 연구에서는 전해액 농도를 높임으로써 형상 정밀도를 유지하면서 가공 시간을 단축할 수 있었다.

참고문헌

1. 佐藤敏一, “특수가공”, 기전연구소, 1996.
2. Schuster, R., Kirchner, V., Allongue, P., and Ertl, G., “Electrochemical Micromachining,” *Science*, **289**, 98-101, 2000.
3. 김보현, 이영수, 최덕기, 주종남, “디스크 전극을 이용한 미세 전해 밀링 가공에서의 테이퍼 형상 방지,” *한국정밀공학회지*, **22**(4), 167-172, 2005.
4. 전동훈, 김보현, 주종남, “방전 가공과 전해 가공을 이용한 미세가공,” *한국정밀공학회지*, **23**(10), 52-60, 2006.
5. Kim, B. H., Ryu, S. H., Choi, D. K., and Chu, C. N., “Micro electrochemical milling,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **15**, 124-129, 2005.
6. Ahn, S. H., Ryu, S. H., Choi, D. K., and Chu, C. N., “Electrochemical micro drilling using ultra short pulses,” *Precision Engineering*, **28**(2), 129-134, 2004.
7. Rajurkar, K. P., Kozak, J., and Wei, B., “Study of Pulse Electrochemical Machining Characteristics,” *Annals of the CIRP*, **42**(1), 1993.