

가공 인자에 따른 미세 전해 가공 속도 변화 연구

Study on Machining Speed according to Parameters in Micro ECM

권민호¹, 박민수^{2,✉}, 신흥식¹, 주종남¹
Min Ho Kwon¹, Min Soo Park^{2,✉}, Hong Shik Shin¹ and Chong Nam Chu¹

¹ 서울대학교 기계항공공학부 (School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National Univ.)

² 서울과학기술대학교 제품설계금형공학과 (Dept. of Product Design & Manufacturing Eng., Seoul National University of Science & Technology)

✉ Corresponding author: pminsoo@seoultech.ac.kr, Tel: 02-970-6356

Manuscript received: 2009.9.24 / Revised: 2010.3.24 / Accepted: 2010.11.26

In micro electrochemical machining (micro ECM), machining conditions have been determined to maintain a small side gap and to machine a workpiece stably. However, machining speed is slow. To improve machining speed while maintaining the form accuracy, the paper investigates machining parameters such as pulse amplitude, duty ratio, pulse on-time, and the electrolyte's temperature and concentration. The experiment in this study shows that the electrolyte's concentration is the key factor that can reduce machining time while maintaining the form accuracy. Micro square columns were fabricated to confirm the machining parameters' effects.

Key Words: Micro Machining (미세 가공), Electrochemical Machining (전해 가공), Ultra Short Pulse (초단 펄스), Electrolyte (전해액)

기호설명

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

1. 서론

전해 가공은 비접촉 가공으로서 원자 단위로 재료의 제거가 이루어지기 때문에 다른 특수 가공법에 비해 가공면의 품질이 우수하여 난삭재의 가공, 자유곡면의 가공 등에 이용되어 왔다.¹ 또한, 초단 펄스(ultra short pulse)를 이용한 전해 가공은 형상 정밀도를 수 마이크로 미터에서 수십 나노미터 단위로 제어 가능하여 구리, 니켈 및 스테인리스강 등의 미세 전해 가공에 이용이 가능하다.²⁻⁵

그러나 기존의 미세 전해 가공 연구는 가공 품질을 높이는 데 중점을 두어 가공 속도가 느리다는 단점이 있다. 일반적으로 미세 전해 가공에서는 펄스 전압을 조절하면 가공량이 많아져서 가공 속도가 빨라지지만 가공 간극이 커져서 형상 정밀도를 유지하기가 어렵다.⁶ 이를 개선하기 위해 Jeon⁷ 등은 미세 방전 가공과 미세 전해 가공의 복합 가공에 대한 연구를 진행한 바 있지만 방전 가공 시의 공구 마모 문제와 방전 가공 후 방전 가공액을 전해 가공을 위한 전해액으로 교체해야 하는 문제가 있다.

따라서 본 논문에서는 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 수행하여 각각의 가공 인자가 가공 특성에 미치는 영향을 살펴보고,

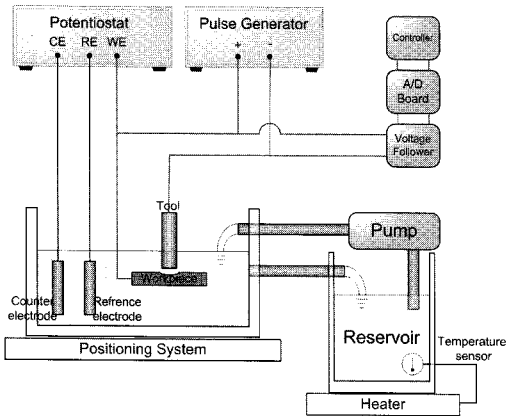


Fig. 1 Schematic of electrochemical machining system

이를 토대로 형상 정밀도를 유지하면서 가공 속도를 개선시킬 수 있는 방법을 모색하였다. 그리고 미세 형상의 제작을 통하여 가공 속도의 개선 효과를 확인하였다.

2. 시스템 구성

2.1 장치 구성

본 연구에 사용된 미세 전해 가공 시스템은 Fig. 1 과 같다. 정밀한 이송 및 위치 제어를 위하여 0.1 μm 의 분해능을 갖는 3 축 스테이지를 이용하였다. 일정 전위(potentiostat)를 이용하여 공작물과 공구 전극의 전위를 조절하고, 펄스 발생기(pulse generator)로 초단 펄스 전압을 인가하였다. 전압 및 전류의 파형은 오실로스코프(oscilloscope)로 관측하여 조절하였다. 전해액의 온도를 일정하게 유지하기 위해서 저장소(reservoir)를 두고, 펌프로 가공 수조와 저장소의 전해액을 순환시켰다. 전해액의 온도 조절이 필요한 경우에는 디지털 피드백 온도 제어가 가능한 가열기와 온도센서를 이용하여 저장소의 온도가 $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 의 오차 범위 이내로 일정하게 유지되도록 조절하였다.

2.2 가공 조건

미세 전해 가공에서 단위 시간당 가공량이 많아지면 가공 영역의 국부화가 어렵기 때문에 가공 속도는 빨라지지만 형상 정밀도를 유지하기 쉽지 않다. 따라서 일반적으로는 가공량이 적은 조건을 사용해왔다. 가공 시편의 종류에 따라서 전해액의 종류와 인가하는 펄스 전압 조건은 다르지만 단위 시간당 가공량이 많아지면 형상 정밀도를 유지하

Table 1 General machining conditions of micro ECM

Electrolyte	0.1 M H ₂ SO ₄ @ 25 °C
Tool electrode	WC-Co 50 μm diameter shaft
Workpiece electrode	304 SS
Pulse amplitude	6 V
Pulse on-time	Below 100 ns
Pulse period	1 μs
Tool feedrate	2 $\mu\text{m/s}$
Depth of cut	2 μm

기 어려운 경향은 같다. 특히 스테인리스강(304 SS)의 미세 전해 가공에서는 일반적으로 0.1 M 의 황산 용액에 6 V 의 전압 크기, 1 μs 의 주기, 100 ns 이하의 폭(10% 이하의 충격 계수)을 갖는 펄스가 사용되었다. 기존의 연구에서 주로 사용한 가공 조건을 Table 1 에 정리하였다.^{4,6,8}

본 논문에서는 느린 가공 속도를 개선하기 위해 기존의 연구에서 사용한 가공 조건을 기본으로 하여 각 가공 인자들을 하나씩 조절하여 실험을 수행하였다.

단위 시간당 가공량이 많은 가공 조건에서 안정적인 가공을 위하여 공구 전극을 천천히 이송할 경우 불필요한 가공이 증가하여 가공 간극이 커지

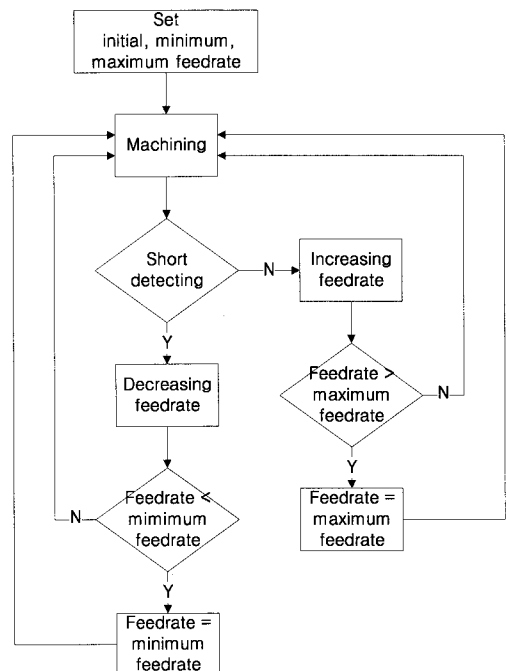


Fig. 2 Flow chart of variable feedrate

는 경향이 있으므로 가변 속도로 공구 전극을 이송시켰다. 2~100 $\mu\text{m/s}$ 의 범위에서 공구 전극과 공작물의 단락에 따라 이송 속도를 증감시켰다. 초기 이송 속도에서 가공을 시작하여 단락이 일어나지 않으면 이송 속도를 증가시키고, 단락이 일어나면 이송 속도를 감소시켰다. 공구가 미세 전극이므로 속도가 빠르면 공구 전극과 공작물 간의 단락 시에 파손이 빈번히 발생하므로 최대 이송 속도를 100 $\mu\text{m/s}$ 로 제한하고, 너무 느린 속도로 이송되면 가공 간극이 매우 커지므로 최소 이송 속도를 2 $\mu\text{m/s}$ 로 하였다. 간략한 알고리즘은 Fig. 2 와 같다.

위와 같은 조건으로 가로 이송 길이 200 μm , 깊이 30 μm 의 미세 홈 가공을 통해 가공 인자에 따른 가공 특성을 비교하였다.

3. 가공 인자에 따른 가공 특성

3.1 펄스 전압 크기에 따른 가공 특성

Table 1 의 가공 조건을 기본으로 하여 6 V, 8 V, 10 V 의 펄스 전압 크기에서 미세 홈 가공을 수행하였다. Fig. 3 은 펄스 전압 크기에 따른 미세 홈의 가공 사진이다. 전압 크기가 커질수록 가공 시간이 단축되는 경향을 보였지만 가공 간극이 커지고 가공면 품질도 안 좋아졌다. 전해가공에서 가공률은 그 부분의 전기이중층 전압에 비례한다. 즉, 가공 전압이 커질 경우 전기이중층에 충전되는 전압의 증가로 인해 가공량도 증가한다. 하지만, 가공량이 증가하여 이온 소모량이 많아짐으로써 가공

간극에 이온 결핍이 생긴다. 미세 전해 가공에서는 펄스 휴지기(pulse off-time) 동안 반응 후의 금속 이온이 가공 간극에서 배출되고, 반응 가능 이온이 가공 간극으로 유입된다.^{9,10} 전압 크기가 커져서 이온 소모량은 많아지지만 펄스 휴지기는 그대로이기 때문에 이온 공급량이 이온 소모량에 비해 충분하지 못하여 원활한 가공이 이루어지지 않는다. 또한, 가공이 불안정하여 전극 이송율을 증가시킬 수 없으므로 증가된 가공량에 의해 간극도 증가한다. 결국 가공량은 증가하지만 불안정한 가공으로 인해 형상 정밀도를 유지할 수가 없다.

3.2 충격 계수(duty ratio)에 따른 가공 특성

1 μs 의 펄스 주기를 유지하면서 10%, 20%, 30%의 충격 계수에서 가공을 수행하였다. 충격 계수의 정의는 식 (1)과 같다.

$$\text{Duty ratio (\%)} = \frac{\text{pulse on-time}}{\text{pulse period}} \times 100 \quad (1)$$

Fig. 4 는 충격 계수에 따른 미세 홈의 가공 사진이다. 충격 계수에 따른 가공 특성도 펄스 전압 크기에 따른 가공 특성과 유사한 경향을 나타냈다. 충격 계수가 커질수록 단위 시간당 가공량이 증가하여 가공 시간은 단축되었지만, 형상 정밀도는 저하되었다. 이는 펄스 전압 크기의 변화에 따라서 나타난 경향과 유사한 경향을 보였다. 즉, 충격 계수가 커질수록 이온 소모량은 늘어나지만 이온

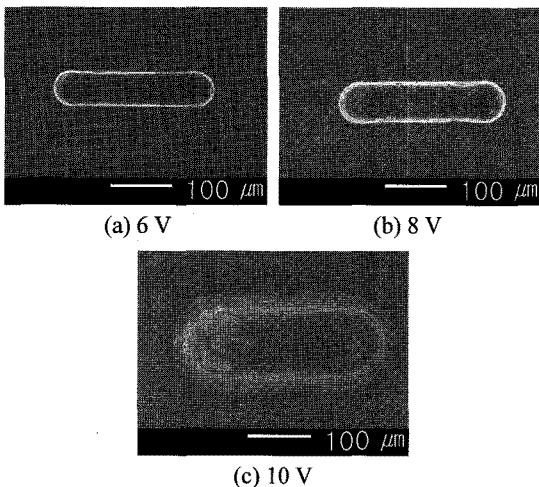


Fig. 3 Micro grooves according to pulse amplitude

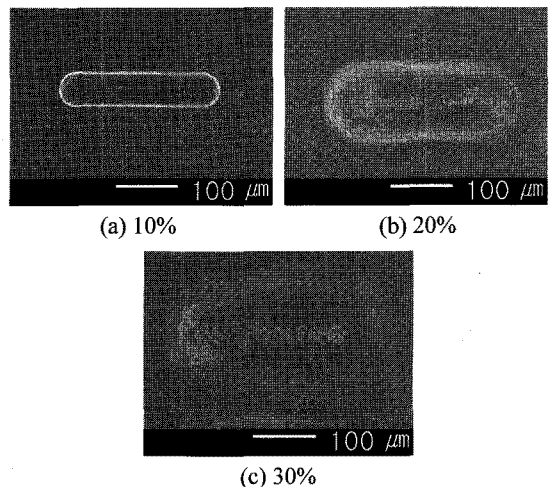


Fig. 4 Micro grooves according to duty ratio

공급을 위한 펄스 휴지기는 증가하지 않아서 이온의 수요 공급이 맞지 않아 가공이 불안정해지기 때문이다.

3.3 펄스 폭(pulse on-time)에 따른 가공 특성

10%의 충격 계수를 유지하면서 100 ns, 200 ns, 300 ns, 1 μ s, 10 μ s의 펄스 폭에서 가공을 수행하였다. Fig. 5는 펄스 폭에 따른 미세 홈의 가공 사진이고, Fig. 6은 펄스 폭에 따른 가공 간극과 가공 시간이다. 펄스 폭이 커질수록 가공 시간은 단축되고, 가공 간극은 커지는 경향을 보였다. 하지만 앞의 펄스 전압과 충격 계수 인자 실험과는 달리 가공된 미세 홈의 옆면이 무너지지 않고 뚜렷이 남아있었다. 이는 충격 계수를 유지하면서 펄스 폭을 증가시키면 펄스 휴지기도 늘어나서 이온 소모량이 많아지는 만큼 이온 공급량도 많아지기 때문이다. 따라서 가공 간극이 커지기는 하지만 가공이 비교적 안정적으로 이루어진다. 그러나 펄스 폭의 증가에 따라서 펄스휴지기도 증가하기 때문에 가공 속도의 개선에는 한계가 있다. 즉, 기본적으로 충격계수가 동일하기 때문에 일정 시간동안 인가되는 펄스 폭의 총 시간 합계는 모든 경우에

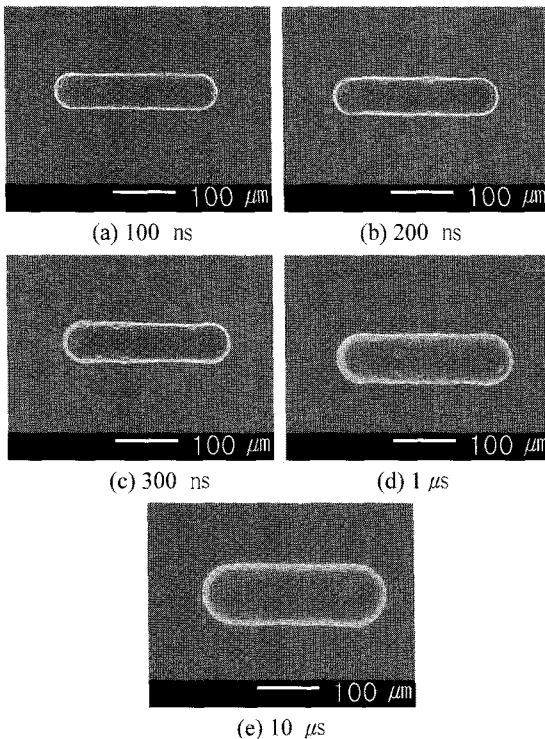


Fig. 5 Micro grooves according to pulse on-time

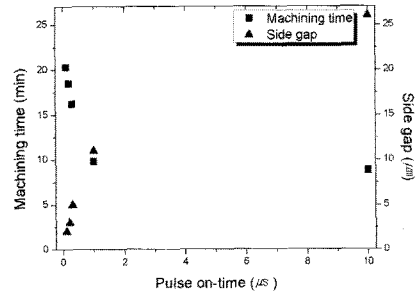


Fig. 6 Machining time and side gap according to pulse on-time (10% duty ratio)

동일하다. 그러므로 1 μ s와 10 μ s에서는 속도 차이가 거의 없다. 하지만 1 μ s 보다 짧은 펄스 폭에서는 펄스 폭의 크기에 따라서 가공 속도가 변화하였다. 이는 가공율을 결정하는 전기이중층의 전압이 상승하는데 시간이 소요되므로 초단 펄스를 인가시 완전히 충전되지 않을 뿐만 아니라 가공량에서도 손해를 보기 때문이다.⁸

3.4 전해액 온도에 따른 가공 특성

25 $^{\circ}$ C, 35 $^{\circ}$ C, 45 $^{\circ}$ C, 55 $^{\circ}$ C의 전해액 온도에서 가공을 수행하였다. Fig. 7은 전해액 온도에 따른 미세 홈의 가공 사진이고, Fig. 8은 전해액 온도에 따른 가공 간극과 가공 시간이다. 온도가 높아질수록 가공 시간은 단축되지만 앞의 실험들과는 달리 가공 간극은 크게 증가하지 않았다. 55 $^{\circ}$ C에서는 25 $^{\circ}$ C에 비해 35%의 가공 시간이 단축되면서도 6~7 μ m 정도의 가공 간극이 유지되었다. 전해액

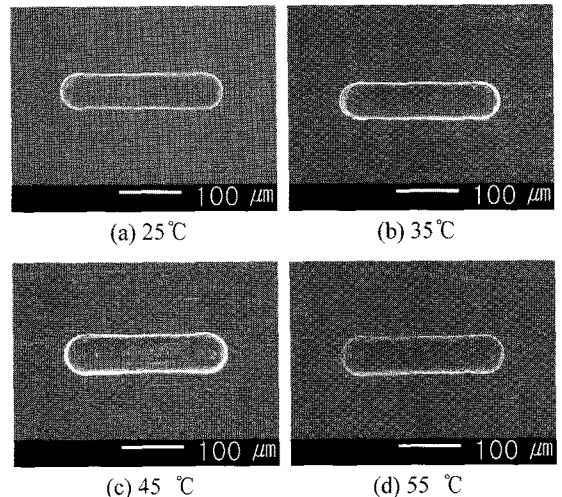


Fig. 7 Micro grooves according to electrolyte temperature

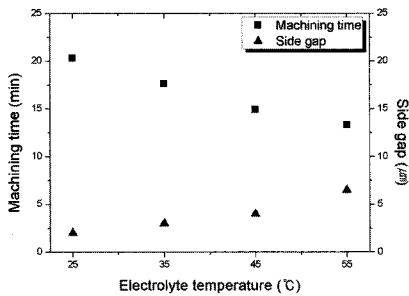


Fig. 8 Machining time and side gap according to electrolyte temperature

온도가 높아지면 가공 속도가 빨라지는 것은 식 (2)의 아레니우스 식(Arrhenius equation)에 의해서 설명할 수 있다.

$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad (2)$$

온도가 높아질수록 반응 상수 k(reaction rate constant)가 증가하므로 반응이 빠르게 일어나서 가공 속도가 빨라진다. 또한, 간극 사이에 전해액의 순환이 활발해져서 충분한 이온 공급이 유지되므로 형상 정밀도도 유지된다. 하지만 온도가 증가할수록 전해액에서 독성이 강한 황산 증기(fume)의 발생이 과도해지므로 온도를 높이는 데에는 한계가 있다.

3.5 전해액 농도에 따른 가공 특성

0.1 M, 0.3 M, 0.5 M, 0.7 M, 1 M, 2 M의 전해액 농도에서 가공을 수행하였다. Fig. 9는 전해액 농도에 따른 미세 홈의 가공 사진이고, Fig. 10은 전해액 농도에 따른 가공 간극과 가공 시간이다. 0.1 M에서 0.5 M까지는 전해액 농도가 증가할수록 가공 시간이 급격히 감소하여 0.5 M에서는 0.1 M에 비해 가공 시간은 77% 단축되면서도 가공 간극은 큰 변화가 없는 우수한 형상 정밀도와 가공면 품질을 지닌 미세 홈을 가공할 수 있었다.

전해액 농도가 높아지면 전해액의 용액 저항이 낮아지고 전기이중층의 충전 시정수가 작아지므로 전기이중층에 높은 전위가 충전되어 가공 속도가 빨라진다.⁶ 또한 이온 활동도(ionic activity)가 커져서 반응 가능한 이온이 많아지므로 충분한 이온 공급이 유지되어 안정된 가공이 이루어지고 형상

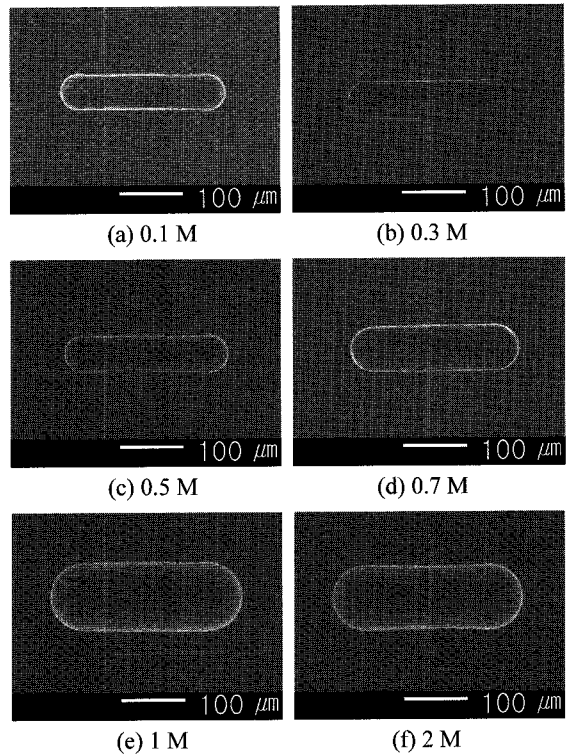


Fig. 9 Micro grooves according to electrolyte concentration

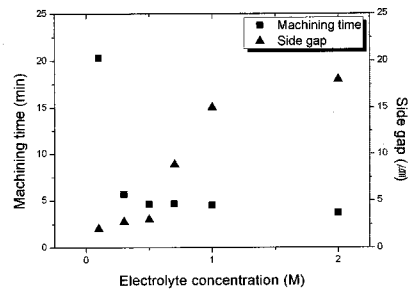


Fig. 10 Machining time and side gap according to electrolyte concentration

정밀도도 유지된다. 즉, 전압 크기나 충격 계수를 증가시켰을 경우에는 가공량이 증가하여 이온 소모는 많아졌지만 공급은 늘어나지 않았기 때문에 가공이 불안정해져서 불규칙적인 형상이 가공되었다. 반면 전해액 농도를 일정 수준까지 높여준 경우, 가공량이 증가하여 이온 소모가 많아졌지만 이온 공급도 함께 증가하였기 때문에 가공 안정성 뿐만 아니라 형상 정밀도도 유지되었다.

0.7 M 에서의 가공 시간은 0.5 M 과 크게 차이가 없지만 가공 간극이 9 μm 로 커졌다. 이와 같이 가공 간극이 증가한 이유는 공구 전극의 파손 우려 때문에 최대 이송 속도를 제한하였기 때문이다. 1 M 에서 가공 간극이 15 μm 로 커진 것도 이와 같은 이유이다.

또한, 2 M 에서는 가공 간극이 1 M 에서와 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 과거 Fernandes¹¹ 등의 연구 결과에서도 동일한 경향을 나타낸다. 전해액의 농도가 커질수록 전류 효율이 증가하지만 어느 한계 이상부터는 전류 효율이 증가하지 못하는 결과를 보인다. 따라서 가공률이 더 이상 증가하지 않아서 가공 간극의 차이가 거의 없다.

3.6 미세 형상 제작

가공 인자에 따른 가공 특성 실험을 통하여 가공 속도의 증가에 의해 이온 소모량이 증가하는 만큼 이온 공급이 충분하게 이루어져야 가공이 원활하고 형상이 유지되는 것을 알 수 있었다. 펄스 전압과 충격 계수만의 변화는 이온의 소모와 공급의 균형이 맞지 않아서 가공량이 많아지면 형상 정밀도가 유지되지 않았다. 또한, 충격 계수를 유지하면서 펄스 폭이 커지는 경우 이온 소모량이 많아지는 만큼 이온 공급도 많아지지만 펄스 휴지기도 증가하기 때문에 가공 속도 개선효과에 한계가 있다. 따라서 이온 소모와 공급의 균형이 맞아서 안정된 가공이 이루어지면서 속도 개선효과가 있었던 55 $^{\circ}\text{C}$ 전해액 온도 조건과 0.5 M 전해액 농도 조건에서 사각 기둥 형상을 각각 제작하여 가공 속도 개선 효과를 확인하였다. 공구 전극의 직경은 48 μm 이고 가로, 세로 90 μm 의 사각 경로를 따라 이송되었다. 절입 깊이는 2 μm 씩 30 μm 깊이의 형상을 가공하였다.

가장 우수한 결과를 보인 0.5 M 에서는 기본 가공 조건에 비해서 76%의 가공시간이 단축되었으며 이 때문에 가공 간극은 오히려 감소하였다. Fig. 11(c)를 보면 사각 기둥의 테이퍼(taper)도 기본 가공 조건과 비교했을 때 무시할만한 수준이었다. 즉, 0.5 M 에서는 4 배 정도 향상된 가공 속도로 형상 정밀도를 유지한 채 가공할 수 있었다. Fig. 12의 가공 시간, 가공 간극 비교 그래프를 보면, 0.5 M 의 조건에서 가장 짧은 가공 시간과 가장 작은 가공 간극을 얻었음을 알 수 있다.

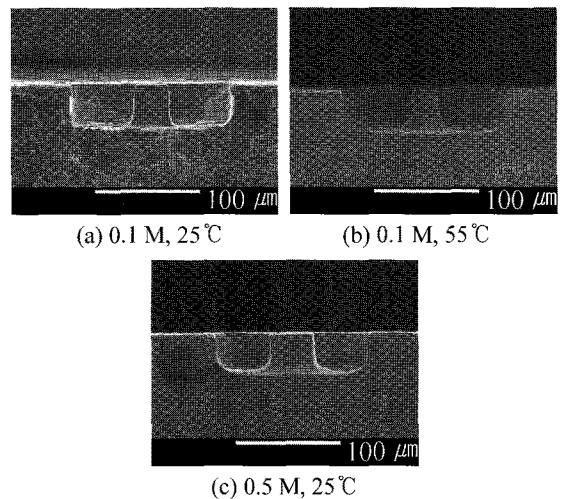


Fig. 11 Micro square column in micro ECM

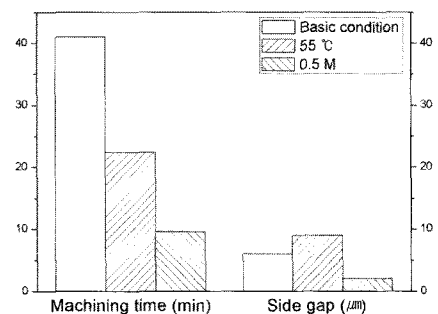


Fig. 12 Machining time and side gap for micro square column

4. 결론

본 논문에서는 미세 전해 가공의 가공 속도를 개선하기 위하여 가공 속도에 영향을 미치는 인자에 대한 연구를 수행하였다.

과도한 펄스 전압 크기나 충격 계수를 가할 경우 가공량에 비해서 공급되는 이온이 부족하기 때문에 원활한 가공이 이루어지지 않고, 결과물의 품질이 떨어진다. 그러므로 가공 속도를 개선하는데 적합하지 않다.

충격 계수를 유지하면서 펄스 폭을 증가시킬 경우에는 가공 형상은 유지가 되지만, 펄스 휴지기도 함께 커져서 가공 속도 개선에 한계가 있다.

전해액 온도는 가공 간극이 작게 유지되면서도 가공 속도가 증가하는 경향을 보였지만 높은 온도에서의 전해액 독성 때문에 가공 속도 개선에 한

계가 있다.

전해액 농도를 높임으로써 형상 정밀도를 유지 하면서 가공 시간을 단축할 수 있었다. 또한 실제 미세 형상 제작을 통하여 전해액 농도가 형상 정밀도를 유지하면서 가공 속도를 개선시킬 수 있는 주요 인자임을 확인하였다. 또한, 0.5 M 이하에서는 농도의 증가에 따라서 속도 개선 효과가 뚜렷이 나타났으며, 그 이상에서는 공구 파손과 전류 효율 문제로 인하여 그 효과가 저하되어 가공 간극이 커지는 경향을 나타냈다. 따라서 본 논문의 실험 조건 하에서 0.5 M 의 조건을 이용하여 속도 개선 효과를 얻을 수 있었으므로 다른 조건의 미세 전해 가공에서도 전해액 농도의 조절을 통하여 속도 개선 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2009 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20090080379).

참고문헌

- Sato, W., "Non-traditional Machining," Gijeonyeongusa, 1996.
- Schuster, R., Kirchner, V., Allongue, P. and Ertl, G., "Electrochemical Micromachining," Science, Vol. 289, No. 5476, pp. 98-101, 2000.
- Kock, M., Kirchner, V. and Schuster, R., "Electrochemical Micromachining with Ultrashort Volatges Pulses - a Versatile Method with Lithographical Precision," Electrochimica Acta, Vol. 48, No. 20-22, pp. 3213-3219, 2003.
- 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.
- Ahn, S. H., Ryu, S. H., Choi, D. K. and Chu, C. N., "Electro-chemical Micro Drilling Using Ultra Short Pulses," Precision Engineering, Vol. 28, No. 2, pp. 129-134, 2004.
- Kim, B. H., Lee, Y. S., Choi, D. K. and Chu, C. N., "Taper Reduction in Micro Electrochemical Milling Using Disk-type Electrode," Journal of the KSPE, Vol. 22, No. 4, pp. 167-172, 2005.
- Jeon, D. H., Kim, B. H. and Chu, C. N., "Micro Machining by EDM and ECM," Journal of the KSPE, Vol. 23, No. 10, pp. 52-59, 2006.
- Park, B. J., "Effects of Tool Electrode Size on Micro Electrochemical Machining Using Ultra Short Pulses," Ph.D Dissertation, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, 2006.
- Rajurkar, K. P., Kozak, J. and Wei, B., "Study of Pulse Electrochemical Machining Characteristics," Annals of the CIRP, Vol. 42, No. 1, pp. 231-234, 1993.
- Datta, M. and Landolt, D., "Electrochemical machining under pulsed current conditions," Electrochimica Acta, Vol. 26, No. 7, pp. 899-907, 1981.
- Fernandes, S. Z., Mehendale, S. G. and Venkatachalam, S., "Influence of frequency of alternating current on the electrochemical dissolution of mild steel and nickel," Journal of Applied Electrochemistry, Vol. 10, No. 5, pp. 649-654, 1980.