

와이어 펄스 전해 가공을 이용한 미세 홈 제작

나찬욱#, 박병진*, 김보현*, 최덕기**, 주종남***

Micro-groove Fabrication by Wire Electrochemical Machining with Ultra Short Pulses

Chan Wook Na#, Byung Jin Park*, Bo Hyun Kim*, Deok Ki Choi** and Chong Nam Chu***

ABSTRACT

In this paper, wire electrochemical machining (Wire ECM) with ultra short pulses is presented. Platinum wire with 10 μm diameter was used as a tool and 304 stainless steel was locally dissolved by electrochemical machining in 0.1 M H_2SO_4 electrolyte. Wire ECM can be easily applied to the fabrication of arbitrarily shaped micro-grooves without tool wear. The change of machining gap according to applied pulse voltage, pulse on-time and pulse period was investigated and the optimal pulse condition for stable machining was obtained. Using this method, various micro-grooves with less than 20 μm width were fabricated.

Key Words : Electrochemical Machining (전해 가공), Wire Electrochemical Machining (와이어 전해 가공), Micro-groove (미세 홈), Micro Machining (마이크로 가공)

1. 서론

전해 가공은 전해액과 가공하려는 금속 간의 전기 화학적 용해 반응을 이용해서 재료를 원하는 형상으로 가공하는 방법이다. 산업 현장에서는 보통 난삭재의 금형 제작 및 표면 거칠기 향상을 위한 마무리 가공의 목적으로 전해 가공을 이용하고 있다. 전해 가공은 비접촉식 가공이므로 공작물의 변형이나 잔류 응력을 발생시키지 않고, 공구의 마모가 없으며, 원자 단위로 일어나는 가공이므로 표면 거칠기 또한 우수하다.¹ 이런 장점에도 불구하고

고 전해 가공은 다른 특수 가공법에 비해 가공 간극이 비교적 커서 마이크로 단위의 초정밀 가공에 적용하기가 어려웠다. 하지만 최근 Schuster^{2,3} 등은 직류 전원 대신에 초단 펄스를 이용하여 가공 간극을 수 마이크로 정도로 줄였으며 미세 탐침을 전극으로 사용하여 구리나 스테인레스강에 미세 3차원 구조물을 가공하였다. 향후 미세 부품의 수요가 급증할 것으로 예견되며 미세 전해 가공 기술은 미세 노즐과 채널, MEMS / NEMS 의 각종 부품 및 센서, 미세 다이 및 몰드 등의 미세 구조물 제작에 응용될 것으로 보인다.^{4,5}

접수일: 2004년 9월 24일; 게재승인일: 2005년 3월 11일

교신저자: 서울대학교 대학원 기계항공공학부

E-mail: hy95ncw@empal.com (02) 880-7147

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

** 강릉대학교 정밀기계공학과

*** 서울대학교 기계항공공학부

탐침을 이용하여 미세 홈을 제작할 경우에는 탐침을 홈의 방향으로 이송시켜야 하므로 가공 시간이 이송 시간만큼 걸리게 된다. 그런데 홈이 깊을수록 이송 속도가 떨어져서 가공 시간이 늘어나고, 층층이 가공하는 경우에도 이송 횟수에 비례하여 가공 시간이 늘어나며 홈의 벽면에 테이퍼 형상을 남길 수도 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 와이어 방전 가공과 같이 와이어를 전극으로 사용하여 금속의 미세 홈을 가공하는 방법에 대하여 연구하였다. 전해 가공은 방전 가공과 달리 공구의 마모가 없기 때문에 와이어를 갈을 필요가 없고 보다 작은 직경의 와이어를 사용할 수 있어서 방전 가공에서보다 작은 폭의 홈을 제작할 수 있다. 또한 와이어를 사용할 경우 탐침을 이용하는 것에 비해 가공 속도가 빠르고 홈의 깊이에 제약이 없으며 다양한 모양의 홈을 제작하는 것이 가능하다. 여기에서는 지름 10 μm 의 백금 와이어를 사용하여 304 스테인레스강에 수십 나노 초의 펄스를 인가하여 미세 홈을 제작하였다. 미세 홈 가공에 적합한 조건을 선정하기 위하여 펄스 인가 전압(applied voltage), 펄스 주기(pulse period), 펄스 온타임(pulse on-time) 등의 펄스 조건에 따른 가공 간극의 변화를 연구하였다. 선정된 조건을 바탕으로 폭 20 μm 이하의 미세 홈 어레이와 임의 형상의 미세 홈을 가공하였다.

2. 펄스 전해 가공 원리

전해액 안에서 전극과 공작물 사이에 전위를 인가하면 전극 계면에서 이온 분포로 인한 전기 이중층이 형성된다.^{6,7} 이는 Fig. 1 과 같이 축전기와 저항으로 이루어진 등가 회로로 나타낼 수 있다.^{2,7} 여기서 C_{DL} 는 전기 이중층의 축전용량을 나타내며 보통 금속 전극의 경우 10-30 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ 의 비축전용량(c)을 갖는다.^{6,7} R 은 용액 저항이며 전극과 공작물 사이의 거리(d)와 용액의 비저항(ρ)에 비례한다. 전극과 공작물에 전위를 인가하면 전기 이중층이 충전되며 그 충전 시정수는 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$\tau = \rho cd$$

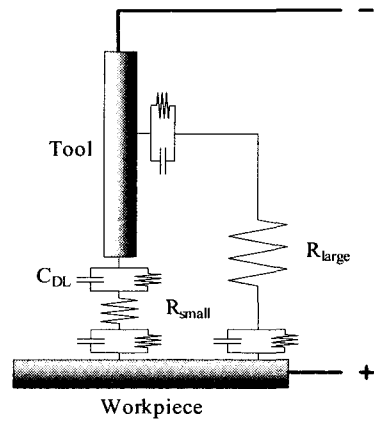


Fig. 1 Model of electrochemical cell²

이 때 전극과 공작물 사이의 거리가 먼 부분(d_{large})은 용액 저항이 크기 때문에(R_{large}) 충전 시정수가 크고($\tau_2 = \rho cd_{large}$) 상대적으로 느리게 충전이 된다. 반면에 거리가 가까운 부분(d_{small})은 충전 시정수가 작아($\tau_1 = \rho cd_{small}$) 충전이 빨리 이루어진다. 만약 펄스 폭이 이 두 시정수, τ_1 와 τ_2 사이의 값을 갖는 펄스 전원을 인가하면, 거리가 가까운 부분에서 상대적으로 높은 전압이 충전된다. 전기 화학 반응 속도는 인가 전압에 지수 함수적으로 증가하므로 펄스 폭을 조절하여 전극과 공작물 사이의 거리가 가까운 부분에서만 반응이 일어나도록 할 수 있다.

3. 최적 가공 조건 설정

3.1 실험장치

Fig. 2 에서 보는 바와 같이 전해액 안에서 공작물은 펄스 발생기의 양극에 연결되어 있고 백금 와이어 전극은 음극에 연결되어 있다. 전압, 전류 파형은 오실로스코프로 관측하였으며, 각 축의 이송은 Delta Tau 사의 PMAC (Programmable Multi-Axis Controller) 으로 제어하였다. 가공 깊이는 와이어 전극과 공작물간의 최초 단락 시 발생하는 전압 강하를 A/D 변환기에서 측정하여 초기 위치를 정하고 PMAC 제어기를 통하여 조절하였다. 가공 중에 발생하는 공작물과 공구의 단락도 동일한 방법으로 측정하였으며 공구와 공작물을 1~2

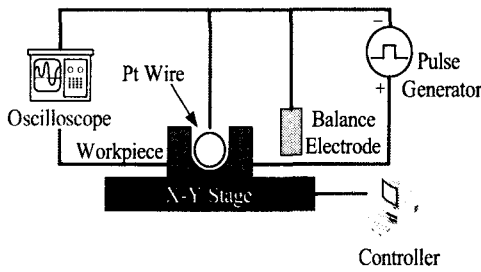


Fig. 2 Experimental system of pulsed wire ECM

μm 의 간극으로 일정하게 유지하였다. 와이어 전극은 제작된 지그를 통하여 고정하였으며 전류를 가공 영역에 집중시키기 위해서 가공 부위 외에는 열가소성 수지(apiezon wax)로 코팅을 하였다. 공작물은 크롬 18.36 %, 니켈 8.64 %를 포함한 304 스테인레스강을 사용하였고 가공 전 # 1000 사포를 이용하여 표면 처리를 하였다. 가공된 미세 홈의 형상은 JEOL 사의 JSM 5600 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy)으로 촬영하였다.

전해액은 0.1 M 황산 용액을 사용하였다. 황산은 가공 후 가공면의 품질이 우수하고 공작물의 전해 생성물이 발생하지 않는 장점을 가지고 있다. 또한 농도와 가공 간극은 비례하므로 0.1 M 의 용액 농도에서 가공 간극을 최소화 할 수 있으며 가공에 필요한 적정 이온 유지가 가능하다.

공구로는 지름 10 μm 의 백금 와이어를 사용하였다. 백금은 공기나 수분에 대해 매우 안정하여 고온에서 가열해도 변화하지 않고 산, 알칼리에 강하며 내식성도 매우 크다. 단 왕수에는 서서히 녹으며 고온에서는 수산화알칼리에 침식된다. 또한 용해된 금속이 가공 중에 다시 환원되지 않고 황산 전해액에 의한 부식이 일어나지 않으므로 백 금 와이어를 공구로 선정하였다.

Balance 전극은 공구와 함께 음극에 병렬로 연결되어 있으며 공작물과 전해액 사이의 전위를 조절하는 역할을 한다. Balance 전극 없이 높은 전압을 인가할 경우는 마치 DC 전압이 인가된 것처럼 가공 영역이 국부화되지 않고 홈의 형상이 왜곡된다.⁸ Balance 전극을 사용할 경우는 전해액과 공구 계면상에서의 전압 강하를 줄이며 공작물과 전해액의 전압 강하를 높이는 효과가 있어 원활한 가공이 가능해진다.

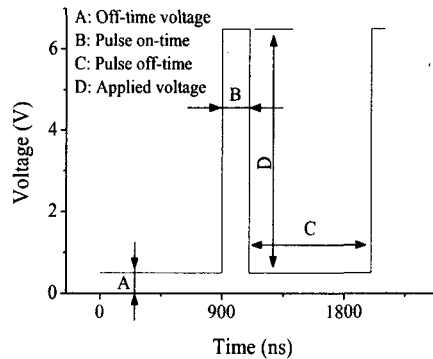


Fig. 3 Terminology of applied pulse shape

3.2 최적 가공 조건의 설정

3.2.1 펄스 오프 타임 전압

실험에 사용된 펄스 형태는 Fig. 3 과 같다. A 는 펄스 오프 타임 전압을 나타내며 B 는 펄스 온 타임, C 는 펄스 오프 타임, D 는 펄스 인가 전압을 나타낸다. 오프 타임 전압은 인가 전압과 함께 가공에 중요한 역할을 한다. Abdallah⁹ 는 0.5 M 황산 전해액 안에서 304 스테인레스강의 순환 전압전류 실험(cyclic voltammetry)을 통해 스테인레스강의 주 성분인 크롬, 니켈, 철 등의 산화막(passive layer)이 생성되기 시작하는 활성화 영역(active region)을 - 250 mV ~ - 100 mV(SCE), 생성된 산화막이 성장하여 더욱 두꺼워지며 전류가 흐르지 않는 부동태 영역(passive region)을 - 100 mV ~ 900 mV(SCE), 과전위로 인하여 산화막이 제거되며 급격히 전류가 흐르는 과부동태 영역(transpassive region)을 900 mV(SCE) 이상으로 구분하였다.

오프 타임 전압은 산화막이 생성되는 활성화 영역과 부동태 영역을 피해야 하며 산화 전류가 증가하기 시작하는 과부동태 영역의 시작 전위로 선정하여야 한다. 본 연구에서는 백금 와이어를 공구로 사용하였기 때문에 백금을 기준으로 순환 전압전류 실험을 하였고 과부동태 영역이 시작하는 시점인 400 mV ~ 500 mV(Pt) 값으로 오프 타임 전압을 선정하였다. 만약 오프 타임 전압이 부동태 영역에 놓이게 되면 산화막이 형성되어 과부동태 영역의 인가 전압이 가해지더라도 수십 나노 초의 짧은 펄스 온 타임에서는 가공이 일어나지 않는다. 이는 전해액이 산화막을 깨고 금속 양이온을 용출시키기 위한 시간이 필요하기 때문이라 생각된다.³ 이에 따라 부동태 영역에서 수백 나노 초의 펄스 온 타임을 인가해 보면 가공은 가능하나 가

공 간극과 재료제거율(material removal rate)이 커지며 Fig. 4 와 같이 형상 정밀도가 매우 떨어지는 미세 홈이 가공된다. 반면에 500 mV 의 오프 타임 전압을 인가한 경우는 수십 나노 초의 펄스 온 타임에서 가공이 가능하며 Fig. 5 와 같은 폭 17 μm , 깊이 50 μm 의 미세 홈이 가공 되었다.

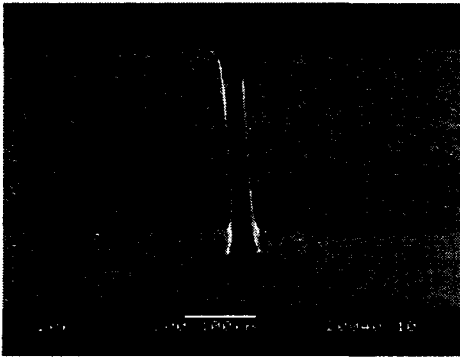


Fig. 4 Micro groove on 304 stainless steel, 6.5 V applied voltage, 0 V off-time voltage, 500 ns on-time, 8 μs period

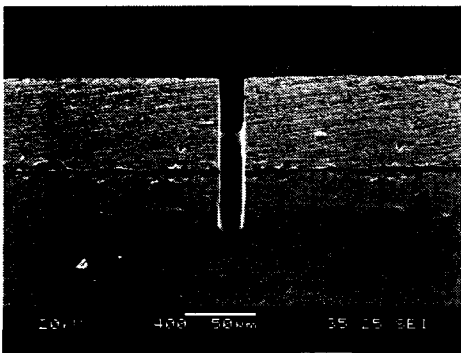


Fig. 5 Micro groove on 304 stainless steel, 6.5 V applied voltage, 500 mV off-time voltage, 75 ns on-time, 6 μs period

으로 고정하고 펄스 인가 전압에 따라 50 μm 깊이로 가공된 미세 홈을 관찰하였다. 6 V 미만의 인가 전압에서는 공구의 이송 속도가 가공 속도보다 커서 공구와 공작물간의 단락이 많았으며 재료제거율이 매우 낮았다. 따라서 단락이 발생하지 않는 인가 전압 영역인 6 V 에서 0.5 V 씩

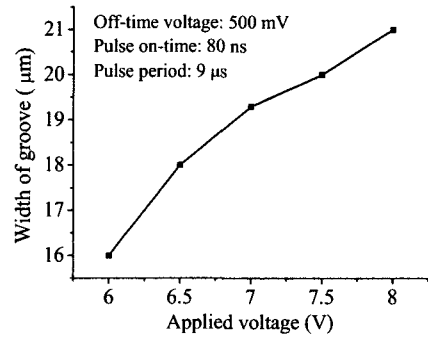


Fig. 6 Width of groove according to applied voltage, 500 mV off-time voltage, 80 ns on-time, 9 μs pulse period

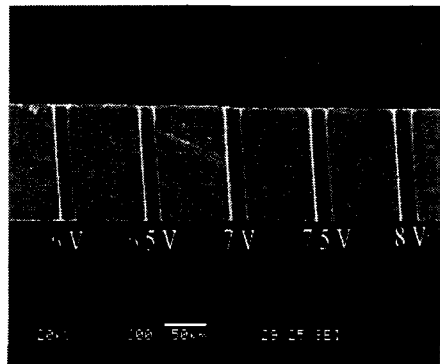


Fig. 7 Shape of groove on 304 stainless steel according to applied voltage, 500 mV off-time voltage, 80 ns on-time, 9 μs period

3.2.2 펄스 인가 전압

인가 전압에 따른 가공 특성을 파악하기 위하여 오프 타임 전압, 펄스 온 타임, 펄스 주기, 공구의 이송 속도를 각각 500 mV, 80 ns, 9 μs , 0.1 $\mu\text{m}/\text{sec}$

인가 전압을 증가시키며 가공된 미세 홈의 폭과 형상을 관찰하였다. Fig. 6 은 인가 전압에 따른 미세 홈의 폭을 나타내는 그래프이며 홈의 폭이 인가 전압에 따라 증가함을 보인다. Fig. 7 은 가공된

미세 홈의 형상을 나타내며 7 V 이상의 인가 전압에서는 홈의 양 끝부분이 둥글어짐을 보여준다. 따라서 6 V ~ 6.5 V 의 인가 전압을 최적 조건으로 선정하였다. 인가 전압 6.5 V 에서 가공된 미세 홈은 폭 18 μm , 깊이 54 μm 이며 가공 중 공구와 공작물 간의 단락 은 발생하지 않았고 재료제거율은 12000 $\mu\text{m}^3/\text{min}$ 이다.

$\mu\text{m}/\text{sec}$ 으로 고정하고 가공 중 단락이 발생하지 않는 60 ns 이상의 펄스 온 타임에서 50 μm 깊이로 가공된 미세 홈의 폭과 형상을 펄스 온 타임의 변화에 따라 관찰하였다. Fig. 8 은 펄스 온 타임에 따른 미세 홈의 폭의 변화를 나타내는 그래프이다. 온 타임에 따라 미세 홈의 폭은 증가하며 100 ns 이상의 온 타임에서 20 μm 이상의 폭을 가

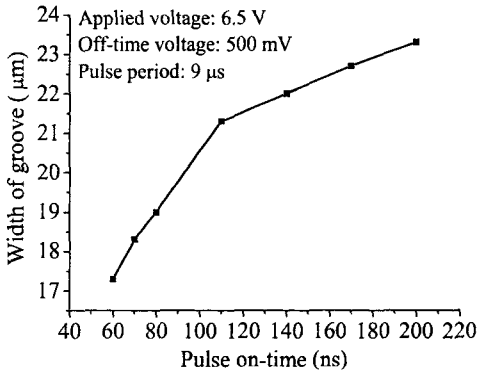


Fig. 8 Width of groove according to pulse on-time, 6.5 V applied voltage, 500 mV off-time voltage, 9 μs period

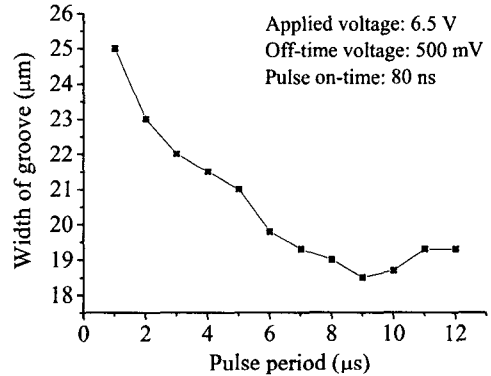


Fig. 10 Width of groove according to pulse period, 6.5 V applied voltage, 500 mV off-time voltage, 80 ns on-time

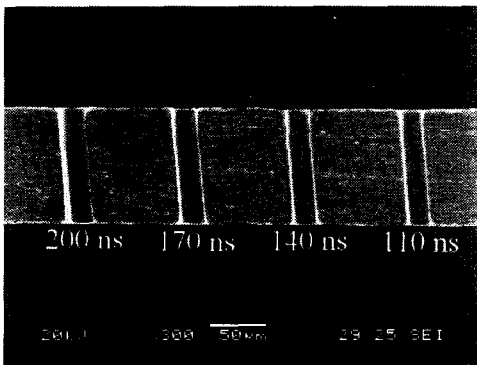


Fig. 9 Shape of groove on 304 stainless steel according to pulse on-time, 6.5 V applied voltage, 500 mV off-time voltage, 9 μs period

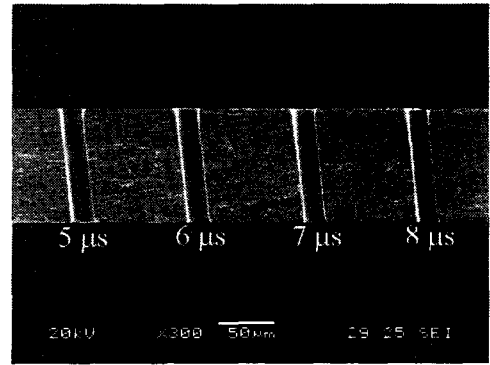


Fig. 11 Shape of groove on 304 stainless steel according to pulse period, 6.5 V applied voltage, 500 mV off-time voltage, 80 ns on-time)

3.2.3 펄스 온 타임

펄스 온 타임에 따른 가공 특성을 파악하기 위해 펄스 인가 전압과 오프 타임 전압, 펄스 주기, 공구의 이송 속도를 각각 6.5 V, 500 mV, 9 μs , 0.1

지는 가공 간극이 큰 미세 홈이 가공되었다. 홈의 형상은 Fig. 9 에서 보듯이 100 ns 이상의 온 타임에서 양 끝부분이 둥글어지기 시작하였다. 따라서 단락이 발생하지 않으며 가공 간극이 작고 형상

정밀도가 뛰어난 60 ns ~ 100 ns 의 펄스 온 타임을 최적 조건으로 선정하였다.

3.2.4 펄스 주기

펄스 주기에 따른 가공 특성을 파악하기 위해 펄스 인가 전압과 오프 타임 전압, 펄스 온 타임, 공구의 이송 속도를 각각 6.5 V, 500 mV, 80 ns, 0.1 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 으로 고정하고 펄스 주기의 변화에 따라 50 μm 깊이로 가공된 미세 홈의 폭을 관찰하였다. Fig. 10 에서 보듯이 펄스 주기가 길어짐에 따라 미세 홈의 폭은 줄어드는 경향을 보인다. 9 μs 이상의 주기에서는 공구와 공작물의 단락이 관찰되며 공구의 역방향 이송으로 인한 가공 시간의 증가로 홈의 폭이 1 μm 내외로 커짐을 알 수 있다. Fig. 11 은 5 μs ~ 8 μs 주기에서의 미세 홈의 가공 형상을 나타낸다. 가공 간극과 형상 정밀도를 고려하여 펄스 주기는 6 μs ~ 9 μs 이 최적 조건으로 선정되었다.

4. 임의 형상의 미세 홈 제작

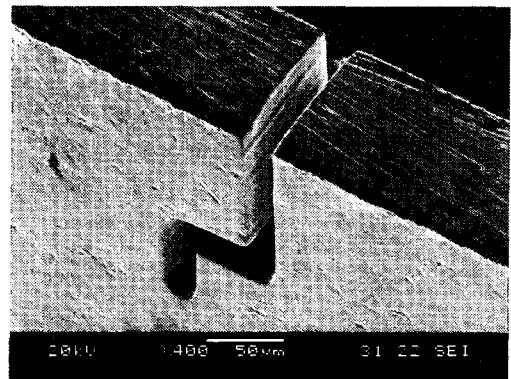
4.1 가공 조건

최적 조건으로 선정된 6 V ~ 6.5 V 의 인가 전압, 400 mV ~ 500 mV 의 오프 타임 전압, 60 ns ~ 100 ns 의 펄스 온 타임, 6 μs ~ 9 μs 의 펄스 주기를 이용하여 임의 형상의 미세 홈과 미세 홈 어레이를 제작하였다. 임의 형상의 미세 홈 가공에서는 와이어와 공작물이 1 ~ 2 μm 이내의 간극으로 유지되며 가공 중 단락이 발생할 경우 와이어 공구는 가공 방향과 반대로 이송된다. 하지만 가공 중 단락이 발생하지 않도록 하는 것이 바람직하다. 가공 도중에 와이어와 공작물 간의 단락이 발생하면 일정한 간극을 유지하기 위하여 와이어를 역방향으로 이송하여야 한다. 이것은 그 부분의 가공 시간을 증가시켜 역방향 이송이 없는 다른 곳보다 더 많은 가공이 일어나게 하며 결과적으로 홈의 폭을 불균일하게 만든다. 특히, 와이어가 가공 방향을 바꾸는 코너 부분에서 단락이 일어나면 와이어를 역방향으로 이송하기가 힘들며 원하지 않는 곳이 가공될 수도 있다. 이송 속도는 모든 가공에서 일정하게 0.1 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 으로 유지 하였다.

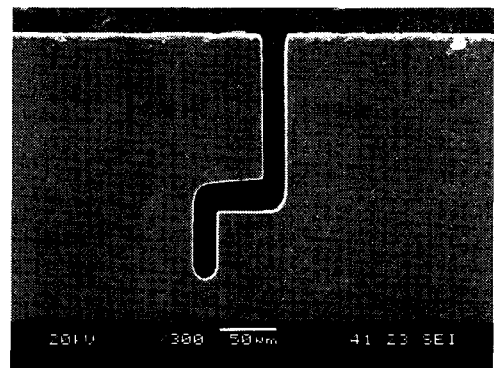
4.2 가공 결과

Fig. 12 는 인가전압 6.5 V, 오프 타임 전압 500 mV, 펄스 온 타임, 주기는 각각 75 ns, 7 μs 의 가공

조건으로 가공한 미세 홈이며 폭과 깊이는 각각 21 μm , 215 μm 이며 와이어 총 이송 거리는 270 μm 이다. 와이어의 깊이 방향 가공 경로에 따라 홈의 폭이 21 μm 로 일정하게 유지되었으며 와이어와 공작물 간의 단락이 없었다. Fig. 12(b)는 Fig. 12(a)의 측면 모습이며 Fig. 12(c), (d)는 Fig. 12(a)를 확대한 모습으로 모서리 부분의 곡률 반경이 1 μm 이하이다. Fig. 13 은 인가전압 6.5 V, 오프 타임 전압 500 mV, 펄스 온 타임, 주기는 각각 85 ns, 8 μs 의 가공 조건으로 가공한 미세 홈이며 폭과 깊이는 각각 22 μm , 151 μm 이다. Fig. 14 은 인가전압 6.5 V, 오프 타임 전압 500 mV, 펄스 온 타임, 주기는 각각 75 ns, 8 μs 의 가공 조건으로 가공한 미세 홈 어레이 이다. 홈 폭은 20 μm 이며 깊이는 100 μm , 2 개의 격벽은 각각 27 μm 의 폭을 갖는다.



(a)



(b)

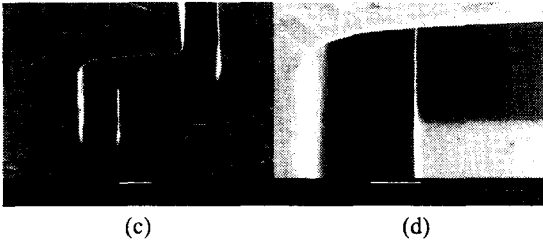


Fig. 12 Arbitrarily shaped micro groove on 304 stainless steel, (a) 6.5 V applied voltage, 500 mV off-time voltage, 75 ns on-time, 7 μ s period, (b) side view, (c) and (d) details of edge

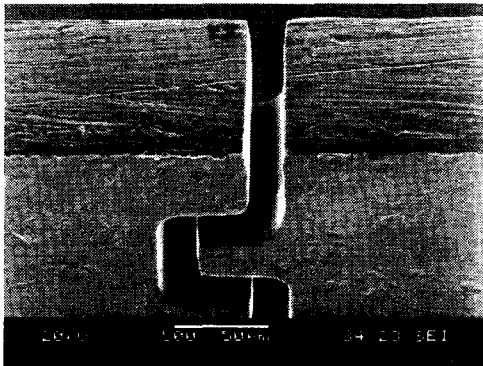


Fig. 13 Arbitrarily shaped micro groove on 304 stainless steel, 6.5 V applied voltage, 500 mV off-time voltage, 85 ns on-time, 8 μ s period

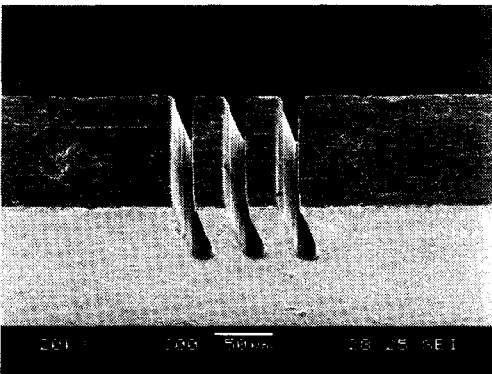


Fig. 14 Micro groove array on 304 stainless steel, 6.5 V applied voltage, 500 mV off-time voltage, 75 ns on-time, 8 μ s period

5. 결론

수십 나노 초의 펄스를 공구와 공작물에 인가하여 미세 홈을 가공하였다. 오프 타임 전압의 역할을 정의하였으며 미세 홈의 가공 간극과 형상, 가공 중 공구와 공작물의 단락을 고려한 최적 가공 조건을 펄스 인가 전압, 펄스 온 타임, 펄스 주기로 제시하였다. 얻어진 최적 조건으로부터 폭과 깊이가 각각 17 μ m, 50 μ m 인 미세 홈과 폭 21 μ m, 깊이 215 μ m, 와이어 총 이송 거리 270 μ m 의 임의 형상의 미세 홈을 가공하였다. 본 연구는 합금 및 순 금속 소재의 다양한 미세 홈 가공에 응용될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 나노 메카트로닉스 기술 개발 사업의 연구 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. McGeough, J. A., "Principles of Electrochemical Machining," Chapman and Hall, London, 1974.
2. Schuster, R., Kirchner, V., Allongue, P. and Ertl, G., "Electrochemical Micromachining," Science, Vol. 289, pp. 98-101, 2000.
3. Cagnon, L., Kirchner, V., Kock, M., Schuster, R., Ertl, G., Gmelin, W. T. and Kück, H., "Electrochemical Micromachining of Stainless Steel by Ultrashort Voltage Pulses," Zeitschrift für Physikalische Chemie, Vol. 217, No. 4, pp. 299-314, 2003.
4. McGeough, J., "Micromachining of Engineering Materials," Marcel Dekker, Inc., New York, 2002.
5. Choi, S. H., Ryu, S. H., Choi, D. K. and Chu, C. N., "WC Micro-shaft Fabrication Using Electrochemical Etching," J. of the KSPE, Vol. 21, No. 6, pp. 172-178, 2004.
6. Paik, W. K. and Park, S. M., "Electrochemistry: Science and Technology of Electrode Processes," Cheongmoongak, Seoul, 2001.

7. Bard, A. J. and Faulkner, L. R., "Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications," 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 2000.
8. 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.
9. Abdallah, M., "Corrosion Behaviour of 304 Stainless Steel in Sulphuric Acid Solutions and its Inhibition by some Substituted Pyrazolones," Materials Chemistry and Physics, Vol. 82, No 3, pp. 786-792, 2003.