

텅스텐 와이어 초단 펄스 미세 전해가공

신흥식*, 김보현#, 주종남*

Tungsten Wire Micro Electrochemical Machining with Ultra Short Pulses

Hong Shik Shin*, Bo Hyun Kim# and Chong Nam Chu*

ABSTRACT

Tungsten wire micro electrochemical machining (W-wire micro ECM) with ultra-short pulses enables precise micro machining of metal. In wire micro ECM, platinum wire has been used because it is electrochemically stable. However, the micro metal wire with low strength is easily deformed by hydrogen bubbles which are generated during the machining. The wire deformation decreases the machining accuracy. To reduce the influence of hydrogen bubbles, in this paper, the use of tungsten wire was investigated. To improve machining accuracy, suitable pulse conditions which affect generation of bubbles were also investigated. The tungsten wire micro ECM can be applied to the fabrication of various shapes. Using this method, various micro-parts and shapes were fabricated.

Key Words : Micro machining (미세 가공), Wire micro electrochemical machining (와이어 미세 전해가공), Hydrogen bubble (수소 기포)

1. 서론

직류 전압(DC)을 사용하는 범용 전해가공과는 달리 초단 펄스 전압을 인가하면, 국부화된 영역에서만 전해 반응이 일어난다. 이 원리를 이용한 미세 전해가공(micro ECM)은 가공영역의 국부화가 가능하여 미세 형상의 제작이 가능하다.^{1, 2} 이러한 미세 전해가공은 미세 제조(micro fabrication)분야, 난삭재의 미세 금형제작, 미세 금속 부품 등의 제작에 응용될 것으로 보인다.

미세 와이어 전해가공(micro wire ECM)은 전극으로 와이어를 사용한다는 점에서 와이어 방전가공과 비슷하다. 하지만 와이어 방전가공에서는 와

이어 전극 마모 때문에 연속적으로 와이어를 이송시켜야하므로 미세 와이어의 사용에 어려움이 있다. 반면 미세 와이어 전해가공은 와이어 전극의 마모가 없으므로 지름 10 μm 의 와이어로도 재료를 가공할 수 있어 미세 형상 가공에 유리하다. 또한 공작물에 열변형층, 잔류응력, 버(burr) 등이 발생하지 않는 장점이 있다.

기존 미세 와이어 가공에서는 전기화학적으로 안정한 백금(Pt) 와이어를 사용하였다.³ 그러나 백금은 강도(strength)가 상대적으로 낮아 와이어의 변형이 쉽게 일어나므로 가공 형상의 정밀도와 재현성이 떨어지는 문제점이 발생한다. 이를 개선하기 위해서는 강도가 큰 재료를 와이어로 선택하여

접수일: 2006년 10월 23일; 게재승인일: 2007년 4월 10일

* 서울대학교 기계항공공학부

교신저자: 안동대학교 기계공학부

E-mail: kimbh@andong.ac.kr Tel. (054) 820-6301

가공 시 전기화학적으로 안정한 상태를 유지하고 와이어의 변형을 최소화 할 수 있는 가공 조건을 선정하여야 한다. 본 논문에서는 전해가공에 적합한 와이어의 재료 및 가공 조건을 선정하고 다양한 미세 형상을 제작 하였다.

2. 전해가공의 원리 및 공구 전극 재료 선정

2.1 전해가공의 원리

전해액 속에 침지된 전극에 전압을 인가하면 전극과 전해액 사이의 경계면에서는 전하가 서로 마주하는 층을 이루며 축전기(capacitor)의 기능을 갖는 전기이중층(double layer)이 발생한다. 전기이중층이 갖는 축전용량은 전해액의 농도와 무관하게 $10 \sim 30 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ 의 값을 갖는다.¹ 따라서 전해액 속에서 와이어 전극과 공작물에 전위를 인가하는 경우 시스템을 Fig. 1 과 같이 축전기와 저항으로 이루어진 등가회로로 나타낼 수 있다. R_s 는 용액저항, R_p 는 편극저항, C_d 는 전기이중층의 단위 면적당 축전용량이다. 전해셀에 펄스전압을 인가하면 충전시정수($\tau=RC$)에 따라 전기이중층에 전하가 충전된다. 용액 저항은 공구 전극과 공작물 사이의 거리에 비례하므로 전극 사이의 간극이 작은 쪽은 용액 저항이 작기 때문에 시정수($\tau_s = R_{s,small}C_d$)가 작고 간극이 큰 쪽은 용액 저항이 크기 때문에 시정수($\tau_L = R_{s,large}C_d$)도 크게 된다. 그러므로 펄스 온 타임(T)이 두 시정수 사이 값($\tau_s < T < \tau_L$)이 되면 간극이 작은 쪽의 전기이중층에서 상대적으로 큰 전위가 인가된다.⁴

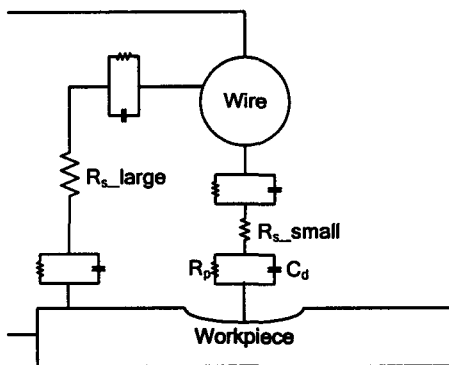


Fig. 1 Schematic of electrochemical cell

전해 반응이 일어나는 속도는 전극과 전해액

계면에서의 전기이중층 과전위(over-potential)에 지수함수적으로 비례하므로 펄스 온 타임을 조절하여 공구 전극에서 가까운 부분에서만 전해 반응이 일어나도록 할 수 있다. 일반적으로 가공 간극은 수 μm 이내가 되도록 하기 위해서는 펄스 온 타임이 수십 나노 초(nanosecond)의 범위를 갖는 초단 펄스가 필요하다.

2.2 공구 전극 재료의 선정

미세 전해가공에서 공구 전극의 형상이 공작물에 전사되므로 공구 전극의 크기가 작을수록 미세 형상 가공에 유리하다. 상용으로 쉽게 구할 수 있는 미세 금속 와이어의 재료는 백금, 텅스텐 등이 있다. 최근 Na³는 지름 $10 \mu\text{m}$ 백금 와이어를 공구 전극으로 이용하여 미세 홈 및 입의 형상을 제작 하였다. 백금은 전기 화학적으로 안정한 금속이므로 전해가공의 공구 전극으로 적합하지만 강도가 상대적으로 낮기 때문에 Fig. 2(a)와 같이 가공된 미세 홈이 진직도를 유지하지 못하고 휘는 경우가 발생하여 원하는 가공 형상과 정밀도를 얻지 못하는 경우가 발생한다. 이는 가공 시 와이어와 공작물 사이의 가공 간극 내에서 발생하는 기포가 백금 와이어의 변형을 일으키기 때문이다.

한편, 미세 와이어 전해가공에서는 지름 $10 \mu\text{m}$ 내외의 미세 금속 와이어를 지그(jig)에 장착하여 장력 조절 시 와이어의 변형이 일어나지 않도록 하고, 가공하는 동안 와이어와 공작물 사이에서 발생하는 기포에 의한 와이어 변형이 없도록 와이어의 장력을 일정하게 유지할 수 있어야 한다. 이를 위해서 백금에 비해 강도가 큰 금속 와이어를 공구 전극으로 선정하고, 가공 시 발생하는 기포의 영향이 최소화 되도록 가공 조건을 선정하는 것이 중요하다.

Table 1 과 같이 텅스텐은 백금에 비해 강도가 크다는 장점이 있다. 또한 가공 시 텅스텐 와이어가 산화되지 않도록 일정전위기(potentiostat)를 사용하여 일정한 전위를 인가하면 전기화학적으로 안정한 상태에서 가공이 가능하다. 기포에 의한 와이어 변형이 없는 가공 조건에서 $10 \mu\text{m}$ 텅스텐 와이어를 사용해 가공하는 경우, Fig. 2(b)와 같이 진직도가 매우 향상된 미세 홈을 얻을 수 있었다. 이를 바탕으로 공구 전극의 재료는 텅스텐 와이어로 선정하였다.

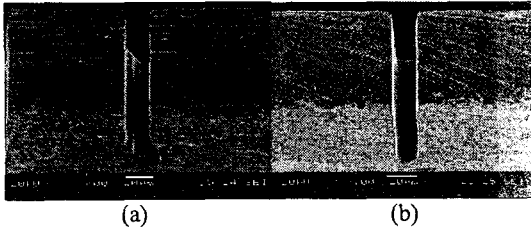


Fig. 2 Micro groove on stainless steel ($\Phi_{work} = 0.4 V_{Pt}$, applied voltage: 6.5 V, pulse period: 7 μs , pulse on-time: 75 ns, electrolyte: 0.1 M H_2SO_4); tool electrode: (a) Pt-wire, (b) W-wire

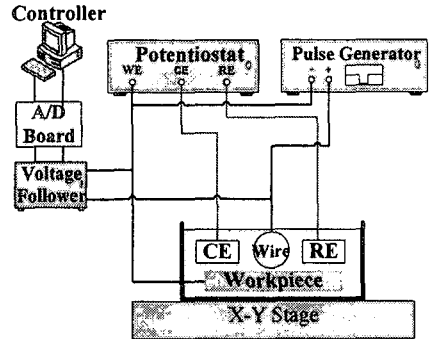


Fig. 3 Schematic diagram of electrochemical machining system

Table 1 Mechanical properties of platinum and tungsten

	Platinum	Tungsten
Yield Strength	14 ~ 35 MPa	550 MPa
Ultimate Strength	200 ~ 240 MPa	980 MPa

3. 실험 장치

와이어 미세 전해가공 시스템은 Fig. 3 과 같다. 전극의 이송은 0.1 μm 의 분해능을 갖는 3 축 스테이지를 사용하였다. 또한 초단 펄스 전압을 인가하기 위해 펄스 발생기를 사용하였으며 전압 및 전류의 파형은 오실로스코프를 이용하여 관측하였다. 일정전위를 사용하여 공작물과 공구 전극의 전위를 조절하였으며 기준전극(reference electrode, RE) 과 대전극(counter electrode, CE)은 백금 전극을 사용하였다. 전해액으로는 황산 용액을 사용하였다. 황산 용액은 가공 시에 전해 생성물이 남지 않아 가공액으로 적합하기 때문이다.⁴ 한편, 가공 시스템에 대한 측정 시스템의 내부 임피던스의 영향을 최소화 하기 위해 전압 폴로어(voltage follower)를 구성하여 시스템을 분리시켰다. 공작물은 304 스테인레스 강을 사용하였다. 공구 전극은 텅스텐 와이어를 사용하였으며, 가공 시 반응 전류를 가공 영역에만 집중 시키고 가공 속도를 높이기 위하여 와이어의 가공 영역 이외의 부분은 황산에 내구성을 가지고 있는 에나멜(enamel)을 사용하여 절연하였다.⁵

4. 가공 조건 선정

4.1 미세 가공을 위한 공작물 전위의 선정과 전해액 농도 선정

스테인리스 강(stainless steel)과 같은 부동화 금속의 전해가공을 위해서는 일정전위를 이용하여 전위를 조절할 필요가 있다. 금속의 전위가 부동화 영역(passivation region)에 있으면, 그 표면에 부동화 막(passive film)이 형성되어 부식 속도가 급격히 감소하고 반응 전류가 매우 낮아 반응이 실제적으로 일어나지 않는다.⁶ 그러나 전위가 더 높아지게 되면 부동화 막이 파괴되고 다시 반응 전류가 커지는 영역인 과부동화 영역에 이르게 된다.⁷ 하지만, 전위가 더욱 높아지면 금속 전체에서 용해가 일어나게 된다. 따라서 공작물의 전위는 두꺼운 산화막(oxide film) 생성과 공작물 전체에서 용해가 일어나는 것을 피하기 위해 부동화 영역에서 과부동화 영역으로 넘어가는 부근의 전위를 공작물의 전위로 선정해야 한다.

Fig. 4 와 같이 일정전위를 이용하여 열린 회로 전위(open circuit potential)로부터 약 $+1.5 V_{Pt}$ 까지 10 mV/s 의 속도로 전위를 변화시키면서 전류를 측정하여 0.1 M, 0.5 M, 1 M, 1.5 M 농도의 황산에서 스테인리스강의 분극 곡선(polarization curve)들을 얻었다. 황산 용액의 농도를 변화시켜 전류를 측정하면 용액의 농도가 높을수록 부동화 영역에서 과부동화 영역으로 넘어가는 부근의 전위가 양전위 쪽으로 이동한다.⁸ 그러나 전해액의 농도 변화에 따른 전위의 변화량은 미소하므로 공작물의 전극전위는 농도에 관계없이 $\Phi_{w,p} = 0.4 V_{Pt}$ 로 선정하였다.

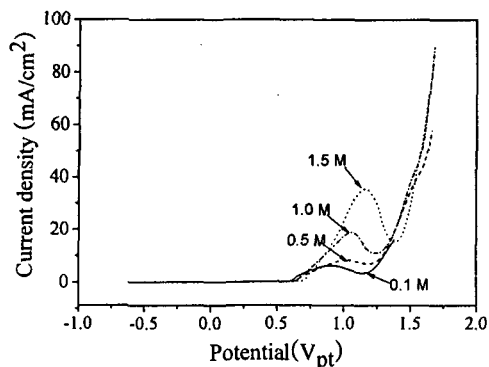


Fig. 4 Polarization curve of stainless steel (RE: Pt, CE: Pt, electrolyte: 0.1 M, 0.5 M, 1 M, 1.5 M H₂SO₄)

전해액의 농도가 1.5 M 이상이 되면 Fig. 5 와 같이 가공 된 미세 홈의 양끝단의 폭이 넓어지는 현상이 발생한다. 또한, Fig. 6 과 같이, 같은 가공 조건에서 전해액의 농도가 높을수록 전해액 속에 가공 시 반응에 참여하는 이온의 양이 많기 때문에 반응이 더욱 활발이 일어나, 가공 간극이 커짐을 볼 수 있다. 미세 형상의 가공을 위해서는 가공 간극이 작을수록 유리하지만 전해액의 농도가 0.1 M 이하인 0.05 M 과 0.01 M 가 되면 전해액 속에 가공 시 전해 반응에 참여하는 이온의 양이 적어지기 때문에 공작물이 용해되는 속도가 와이어 전극의 이송 속도보다 느려 단락이 자주 발생하며, 단락이 자주 발생하게 되면 와이어의 변형이 생겨 가공 형상이 균일하지 못하다. 그러므로 가공 간극을 최소화 하고 미세 홈의 양끝 단이 벌어지는 현상을 방지하며, 원활한 가공을 하기 위한 전해액의 농도는 0.1 M 로 선정하였다.

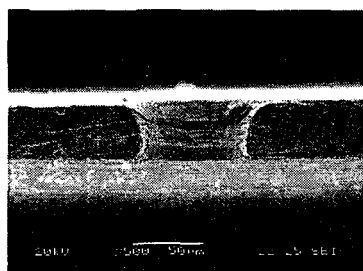


Fig. 5 Micro groove on stainless steel ($\Phi_{work} = 0.4 V_{Pt}$, pulse: 6.5 V, pulse period: 7 μ s, pulse on-time: 75 ns, electrolyte: 1.5 M H₂SO₄)

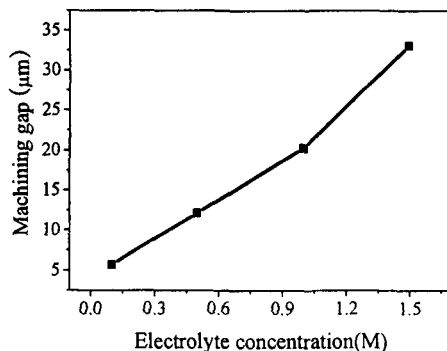


Fig. 6 Machining gap according to electrolyte concentration ($\Phi_{work} = 0.4 V_{Pt}$, applied voltage: 6.5 V, pulse period: 7 μ s, pulse on-time: 75 ns)

4.2 공구 전극 전위의 선정

공구 전극은 금속의 용해에 대한 상대 반응으로 수소가 발생하는 대전극의 역할을 한다. 그러므로 대전극 역할을 하는 공구 전극도 전해액 안에서 전극 전위의 영향을 받게 된다. 공구 전극의 전위는 전극 전체에서 산화가 일어나지 않고, 용해된 금속 이온이 환원되지 않도록 안정한 전극의 전위를 유지해야 한다. 이를 위해 Fig. 7 과 같이 0.1 M 황산 용액에서 텅스텐의 분극 곡선 (polarization curve)을 구하였다. 그래프에서 보듯이 공구 전극의 전위가 0.2 V_{Pt} 이상이 되면 공구 전극에서 산화가 일어나므로 그 이하의 전위를 유지하여야 하며, 공작물에 두꺼운 산화막이 생기는 것을 피하고 공작물과 공구의 전극 전위차를 적절히 유지하기 위해 공구 전극의 전위는 $\Phi_{tool} = 0 V_{Pt}$ 로 선정하였다.

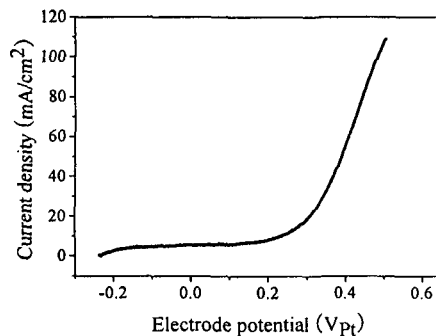


Fig. 7 Polarization curve of W (RE: Pt, CE: Pt, electrolyte: 0.1 M H₂SO₄, scan rate: 10 mV/s)

4.3 펄스 조건의 선정

공구 전극의 이송속도는 모든 실험에서 0.1 $\mu\text{m/s}$ 로 고정하여 실험하였다. 가공 시 펄스 조건은 공구 전극인 와이어가 기포에 의해 변형이 일어나지 않도록 하고, 공작물과 와이어 사이의 가공 간극을 최소화 하면서 단락이 일어나지 않는 조건이 되도록 선정해야 한다.

펄스 인가 전압(applied voltage)을 변화시켜 가공 간극을 측정하면 Fig. 8 과 같다. 인가 전압이 커질수록 가공 간극이 증가 함을 볼 수 있다. 그러나 인가 전압이 6 V 이하가 되면 가공 시 단락이 빈번히 발생하여 가공이 어렵다. 특히, 4 V ~ 5 V 범위의 전압에서는 단락의 횟수가 수 십회가 넘게 되어 가공 형상 정밀도가 떨어지며 3 V 이하에서는 공작물의 용해되는 속도가 매우 느려 가공이 거의 되지 않았다. 반면, 7.5 V 이상이 되면 가공 간극이 커지므로 미세 형상 가공을 위해 간극을 최대한 줄이고 또한 단락이 발생하지 않는 범위를 고려하여 인가 전압은 6.5 V ~ 7 V 로 결정하였다.

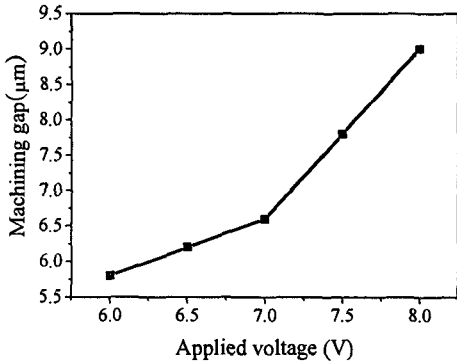


Fig. 8 Machining gap according to applied voltage ($\Phi_{\text{work}} = 0.4 V_{\text{Pt}}$, $\Phi_{\text{tool}} = 0 V_{\text{Pt}}$, pulse period: 7 μs , pulse on-time: 75 ns, electrolyte: 0.1 M H_2SO_4)

한편, Fig. 9 와 같이 펄스 온 타임(pulse on-time)을 증가시키면 가공 간극이 커지고 펄스 온 타임이 작아지면 간극이 줄어드는 경향을 볼 수 있다. 그러나 20 ns ~ 50 ns 범위의 펄스 온 타임을 인가하면 공작물이 가공되는 속도가 느려 단락이 발생한다. 펄스 온 타임이 작아질수록 단락 횟수가 더욱 증가하는 경향이 있는데 이는 와이어의 변형으로 이어져 가공 형상의 정밀도를 떨어지게 하므로 가공 조건으로 적합하지 않다. 또한 펄스 온 타임 10

ns 이하의 가공 조건에서는 가공이 거의 되지 않는다. 그러므로 원활한 가공을 하기 위해서는 펄스 온 타임이 60 ns 이상이 되어야 한다. 반면, Fig. 10 과 같이 펄스 온 타임이 200 ns 이상이 되면 가공 간극이 커지는 경향 이외에도 미세 홈의 양끝단이 벌어지는 현상이 발생한다. 그러므로 균일하고 안정적인 형상을 가공하기 위해서 펄스 온 타임의 범위는 60 ~ 150 ns 으로 선정하였다. 그러나 단락에 의한 와이어의 변형 이외에 가공 시 발생하는 기포가 와이어를 변형 시키는 경우가 있다. 가공 시 발생하는 기포의 형태는 펄스의 주기에 따라 바뀐다.

각각 동일한 펄스 온 타임인 100 ns, 150 ns 에서 펄스 주기를 변화 시킨 결과는 다음과 같다. Fig. 11(a)와 같이 펄스 주기가 1 μs 로 짧은 경우는 미세 홈의 형상이 균일하지 못하고, 가공 표면이 거친 반면, Fig. 11(b)와 같이 펄스 주기가 6 μs 인 펄스 조건에서는 진직도가 잘 유지된 형상을 얻을 수 있다. Fig. 12(a)와 Fig. 12(b) 에서 보듯이 삼각모양 패턴의 형상을 가공한 경우 단락이 일어나지 않는 인가 전압과 펄스 온 타임을 갖는 조건에서도 주기가 1 μs 로 짧은 경우는 그 표면이 거칠고 형상이 불규칙한 반면 6 μs 에서 가공한 경우는 가공 시 매끈한 표면과 진직도가 잘 유지된 형상을 얻을 수 있다. 가공된 형상이 진직도를 유지 못하는 이유는 가공 시 발생하는 기포 때문이다. 가공 시 발생하는 기포 형태는 펄스 주기에 따라 달라지므로 원활한 가공을 위해서는 펄스 주기를 적절하게 선정해야 한다.

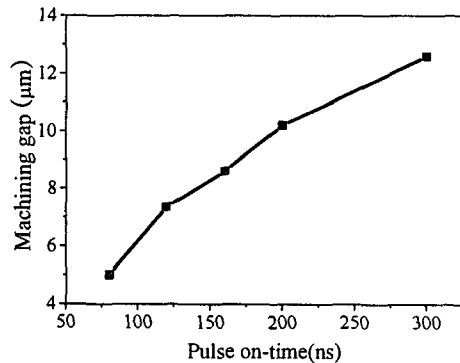


Fig. 9 Machining gap according to pulse on-time ($\Phi_{\text{work}} = 0.4 V_{\text{Pt}}$, $\Phi_{\text{tool}} = 0 V_{\text{Pt}}$, applied voltage: 6.5 V, pulse period: 7 μs , electrolyte: 0.1 M H_2SO_4)

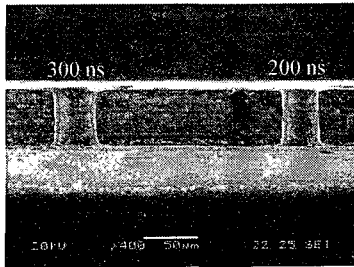
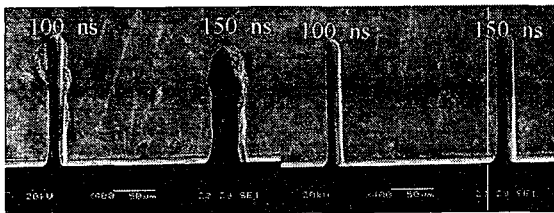


Fig. 10 Micro grooves with different pulse on-time (applied voltage: 6.5 V, pulse period: 7 μ s, electrolyte: 0.1 M H₂SO₄)



(a) pulse period: 1 μ s (b) pulse period: 6 μ s

Fig. 11 Micro grooves with different pulse period (applied voltage: 6.5 V, electrolyte: 0.1 M H₂SO₄)

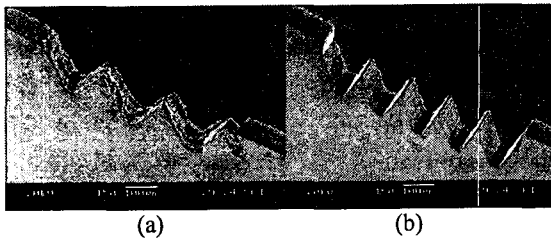


Fig. 12 Micro triangular shapes with different pulse conditions (applied voltage: 6.5 V electrolyte: 0.1 M H₂SO₄), (a) pulse period: 1 μ s, pulse on-time: 120 ns, (b) pulse period: 6 μ s, pulse on-time: 75 ns

펄스 주기에 따른 가공 간극 변화는 Fig. 13 과 같이 펄스 주기가 길어질수록 가공 간극이 줄어드는 경향을 보인다. 가공에 적합한 기포를 발생시키기 위해서는 펄스 주기에 따라 발생하는 기포들의 특성을 알아야 한다. 펄스 주기가 1 ~ 3 μ s 처럼 짧은 경우는 와이어의 표면에서 수소 기포가 빠르게 발생하고 이 기포가 공구 전극인 와이어의 표면에서 떨어져 나가기 전에 주변의 기포들과 결합하여 보다 큰 기포들을 형성한다. 지름이 큰 기포들은 와이어를 밀어내어 와이어의 변형을 일으키므로

가공에 적합하지 못하다. 그러나 펄스 주기가 6 ~ 8 μ s 인 경우는 펄스 주기가 짧은 경우에 비해 기포들이 느리게 발생하며, 또한 커다란 기포로 형성되지 않고 상대적으로 매우 작은 기포들이 발생한다. 이렇게 발생하는 작은 기포들은 와이어의 소성 변형을 일으키지 않으며, 용액을 순환시켜 가공 시 반응에 참여하는 이온의 공급을 원활하게 하는 장점이 있다. 한편, 펄스 주기가 9 μ s 이상인 경우는 공구 전극인 와이어의 이송 속도가 공작물이 가공되는 속도보다 빠르므로 단락이 자주 발생하여 원활한 가공에 적합하지 않다. 그러므로 가공 간극을 줄이고 단락이 발생하지 않으며, 큰 기포의 형성으로 인한 와이어의 소성 변형을 피할 수 있는 범위인 6 ~ 8 μ s 를 펄스 주기로 선정하였다. 지금까지의 실험 결과를 바탕으로 펄스 인가 전압은 6.5 ~ 7 V, 펄스 주기는 6 ~ 8 μ s 범위 내에서 펄스 온 타임 60 ~ 150 ns 으로 선정하였다.

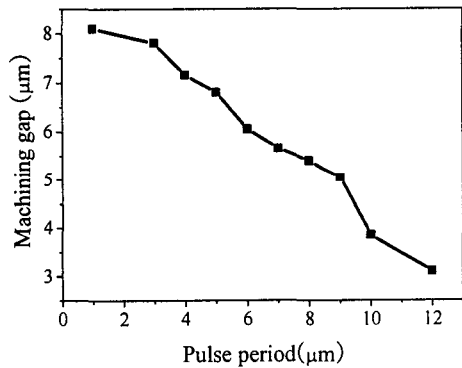


Fig. 13 Machining gap according to pulse period ($\Phi_{work} = 0.4 V_{Pt}$, $\Phi_{tool} = 0 V_{Pt}$, applied voltage: 6.5 V, pulse on-time: 75 ns, electrolyte: 0.1 M H₂SO₄)

5. 미세 형상의 제작

실험에서 얻어진 가공 조건을 바탕으로 여러 가지 다양한 형상을 제작하였다. 모든 형상의 가공 시 텅스텐 와이어 공구 전극의 이송속도는 0.1 μ m/s 으로 고정하였다. Fig. 14 는 격벽 형상을 가공한 것으로 각 격벽의 폭은 6 μ m 이다. 격벽과 같이 반복적인 패턴의 가공 형상으로부터 텅스텐 와이어를 이용한 가공이 재현성과 진직도가 우수함을 볼 수 있다. Fig. 15 는 미세 홈의 반복 패턴이다. 가공된 전체 깊이는 443 μ m, 가공된 격벽의 폭

은 각각 $9.3 \mu\text{m}$ 이다. Fig. 16 은 미세 기어 형상을 가공한 것이다. 기어의 외경은 $580 \mu\text{m}$, 내경은 $420 \mu\text{m}$, 이끝원(addendum circle)과 이뿌리원(dedendum circle) 사이의 높이인 온 이 높이(whole depth)는 $80 \mu\text{m}$ 이다.

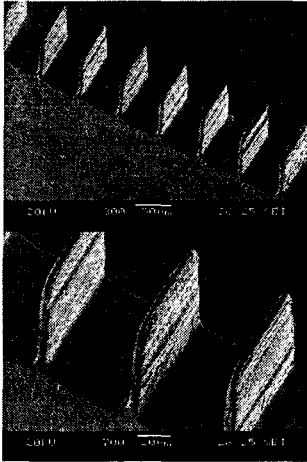


Fig. 14 Micro wall on 304 stainless steel ($\Phi_{\text{work}} = 0.4 V_{\text{Pt}}$, $\Phi_{\text{tool}} = 0 V_{\text{Pt}}$, applied voltage: 6.5 V, pulse period: 6 μs , pulse on-time: 70 ns, electrolyte: 0.1 M H_2SO_4)

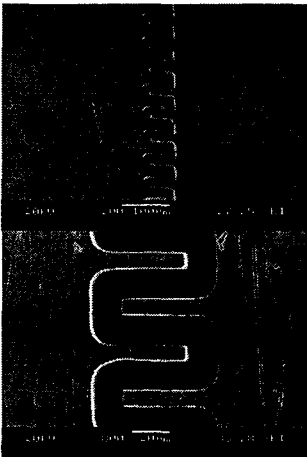


Fig. 15 Micro groove shape on 304 stainless steel ($\Phi_{\text{work}} = 0.4 V_{\text{Pt}}$, $\Phi_{\text{tool}} = 0 V_{\text{Pt}}$, applied voltage: 6.5 V, pulse period: 7 μs , pulse on-time: 75 ns, electrolyte: 0.1 M H_2SO_4)

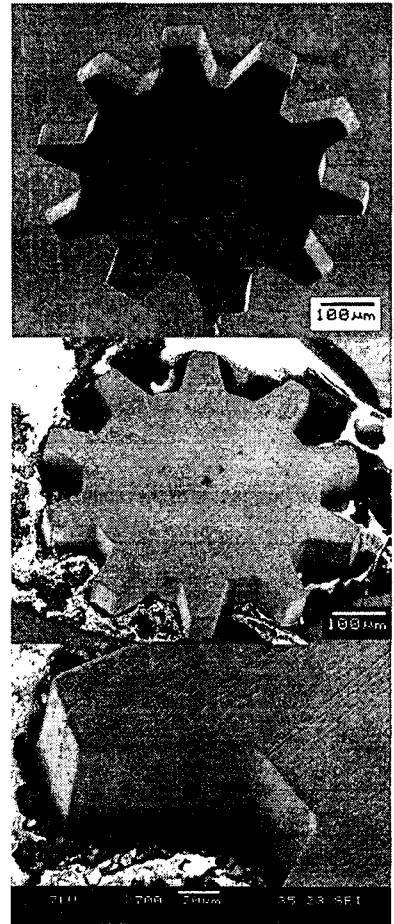


Fig. 16 Micro gear (workpiece: STS 304, $\Phi_{\text{work}} = 0.4 V_{\text{Pt}}$, $\Phi_{\text{tool}} = 0 V_{\text{Pt}}$, applied voltage: 6.5 V, pulse period: 7 μs , pulse on-time: 75 ns, electrolyte: 0.1 M H_2SO_4)

6. 결론

미세 와이어 전해가공은 와이어 방전가공과는 달리 와이어의 이송이 필요없고 지름 $10 \mu\text{m}$ 의 미세 와이어도 공구 전극으로 사용할 수 있으며 가공 간극이 수 μm 이기 때문에 미세 형상 가공에 장점이 많다. 하지만 백금 와이어를 공구 전극으로 사용한 기존 연구의 경우 와이어의 강성이 작기 때문에 공작물과의 단락이나 가공 중 발생하는 기포의 영향 등으로 쉽게 변형되어 가공 재현성이 우수하지 못하다. 따라서 본 논문에서는 와이어의

변형을 줄이기 위해 강도가 상대적으로 높은 텅스텐 와이어를 사용하였으며 가공 조건 선정 및 가공 특성에 대해 연구하였다. 특히, 가공에 도움을 주는 기포들이 발생하는 펄스 주기 조건과 가공시 단락이 발생하지 않는 펄스 온 타임 및 펄스 전압 조건을 선정하여 가공 형상의 진직도 및 재현성을 개선하였다.

and Physics, Vol. 82, No. 3, pp. 786 - 792, 2003.

후 기

본 연구는 산업자원부 산업기술개발사업인 “마이크로 전기 화학 복합형상 제거 시스템 개발” 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Schuster, R., Kirchner, V., Allongue, P. and Ertl, G., “Electrochemical Micromachining,” Science, Vol. 289, pp. 98 - 101, 2000.
2. Kirchner, V., Cagnon, L., Schuster, R. and Gerhard, E., “Electrochemical Machining of Stainless Steel Microelements with Ultrashort Voltage Pulses,” Applied Physics Letters, Vol. 79, No. 11, pp. 1721 - 1723, 2001.
3. Na, C. W., Park, B. J., Kim, B. H., Choi, D. K. and Chu, C. N., “Micro-groove Fabrication by Wire Electrochemical Machining with Ultra Short Pulses,” Precision Engineering, Vol. 22, No. 5, pp. 37 - 44, 2005.
4. Kim, B. H., Lee, Y. S., Choi, D. K. and Chu, C. N., “Taper reduction in micro electrochemical milling using disk type electrode,” Precision Engineering, Vol. 22, No. 4, pp. 167 - 172, 2005.
5. Park, B. J., “Effects of Tool Electrode Size on Micro Electrochemical Machining Using Ultra Short Pulses,” PhD Dissertation Seoul National University, 2006.
6. Paik, W. K. and Park, S. M., “Electrochemistry: Science and Technology of Electrode Processes,” Cheongmoongak, Seoul, 2001.
7. Kaesche, H., “Corrosion of Metals,” Springer, 2003.
8. Abdallah, M., “Corrosion Behaviour of 304 Stainless Steel in Sulphuric Acid Solutions and its Inhibition by Some Substituted Pyrazolones,” Materials Chemistry