

부동화 금속의 미세 전해 가공 시 전극 전위의 선정

박병진[#], 남호성^{*}, 김보현^{**}, 주종남^{***}

Determination of Electrode Potential in Micro Electrochemical Machining of Passive Metals

Byung Jin Park[#], Ho Sung Nam^{*}, Bo Hyun Kim^{**} and Chong Nam Chu^{***}

ABSTRACT

In micro electrochemical machining (ECM), electrodes should be prevented from unfavorable oxide and passive layer formation on the machined surface or overall corrosion of the entire surface. Generally, metal electrodes corrode, passivate or dissolve in the electrochemical cell according to the electrode potential. Therefore, each electrode must maintain its stable potential. In this paper, the stable electrode potentials of tool and workpiece were determined using the potentiodynamic polarization test and verified experimentally considering machining stability and surface quality. Stable workpiece electrode potentials of two different passive materials of 304 stainless steel and nickel were determined in the 0.1 M sulfuric acid. Experimental results show good machined surface and fast machining rate using the determined electrode potentials.

Key Words : Micro electrochemical machining (미세 전해 가공), Electrode potential (전극 전위), Polarization curve (분극 곡선), Passivation (부동화)

1. 서론

전해 가공(electrochemical machining)은 전해액 속에서 공구 전극과 가공물 사이에 전위를 인가하여 재료의 원하는 부위를 전기 화학 반응으로 용해시킴으로써 형상을 제작하는 기술이다. 전해 가공은 재료의 경도와 관계 없이 가공이 가능하고 잔류 응력을 남기지 않는 장점을 가지고 있어서 고경도 금속 등 난삭재의 가공에 이용되어 왔다.

최근 전해 현상의 국부화를 이용하여 전해 가공이 미세 가공에도 적용되고 있으며 금속에 미세 형상을 제작한 연구가 보고되고 있다.¹ 전원으로 초단 펄스파를 사용하면 가공 정밀도를 수 마이크로미터에서 수십 나노미터 정도까지 얻을 수 있어 미세 공구 전극을 이용하여 구리, 니켈 및 스테인리스강 등의 미세 전해 가공에 대한 연구가 진행되어 왔다.¹⁻⁴

한편 스테인리스강과 같은 부동화 금속은 전

☞ 접수일: 2005 년 10 월 31 일; 게재승인일: 2006 년 2 월 10 일

교신저자: 서울대학교 대학원 기계항공공학부

E-mail parkbj@prema.snu.ac.kr Tel. (02) 880-7147

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

** 서울대학교 정밀기계설계 공동연구소

*** 서울대학교 기계항공공학부

해액 속에서 전위에 따라 용해 가능한 전위와 표면에 산화막이 형성되어 용해 반응이 일어나지 않는 부동화 전위가 존재한다.⁵ 따라서 전해 가공 중에 이러한 산화막이 가공 표면에 나타난다면 더 이상의 가공이 어려워지므로 가공 중에도 전극은 부동화 현상을 피하고 펄스를 인가함에 따라 안정적인 용해가 가능하도록 일정한 전위를 유지 해야 한다. 또한 공작물의 가공 부위 이외에서 자발적인 부식 또는 용해가 일어나거나 전해액 속의 금속 이온이 다시 환원되어 전극에 달라붙지 않도록 하여야 한다. Kirchner⁶ 는 스테인리스강의 미세 전해 가공 시 부동화 막(passive layer)을 깨기 위하여 농도가 높은 불산과 염산의 혼합 용액을 사용하였으나 여기서는 용액의 독성으로 안전상의 문제를 유발할 수 있다. Ahn⁴ 과 Na⁷ 등은 농도가 낮은 황산 용액에서 스테인리스강을 전해 가공할 때 공구 전극과 시편 전극 사이의 상대 전위를 조절하여 전극이 안정한 상태에서 가공될 수 있도록 했다. 그러나 기준 전극이 없기 때문에 전해액과 두 전극 간의 전위 관계를 각각 고려할 수 없으므로 각 전극의 전위를 정확하게 조절하기 어렵다. Kock² 은 염산 용액에서 용해 전류가 흐르기 시작하는 영역에 시편 전극 전위를 선정하고 니켈의 미세 전해 가공을 수행하였으나, 부동화 현상이 불확실하고 전위에 따른 가공 특성이 제시되지 않았다.

본 논문에서는 0.1 M 황산 용액에서 텅스텐 카바이드(WC) 전극을 공구로 사용하여 스테인리스강(STS 304)과 니켈을 전해 가공할 때 적합한 전극 전위를 선정하였다. 이를 위해 일정전위기(potentiostat)를 사용한 분극 곡선 실험을 통해서 전극이 안정한 영역과 부동화되는 영역 그리고 시편 전체에서 용해가 일어나는 영역을 찾고, 실제 가공에서 전극 전위에 따라 가공에 어떠한 영향을 주는지에 대해 조사하였다. 또한 이렇게 선정된 전극 전위를 적용하여 안정된 조건에서 스테인리스강과 니켈에 미세 형상을 제작하는 것이 가능함을 보였다.

2. 금속의 부동화

일반적으로 화학 반응은 온도, 압력 및 농도 등에 의하여 반응 속도가 결정된다. 그런데 전극 반응은 전극의 전위나 전류를 조절함으로써 반응 속도를 조절할 수 있고, 반응이 정지하게도 할 수 있

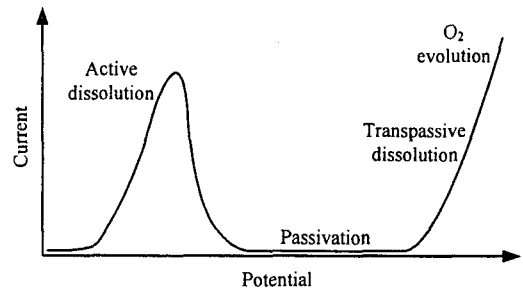


Fig. 1 Schematic current-potential curve for passivating metal

다. 금속에서 일어날 수 있는 전기화학적 산화 반응으로는 금속이 산화물이나 수산화물로 되는 부식(corrosion)과 양이온으로 되는 용해(dissolution)로 나뉜다. 이는 전극의 전위와 용액의 pH 와 관련되며 Pourbaix diagram 으로 나타내어 각 상태에 따라서 안정한 영역, 부식 가능한 영역 그리고 부동화 영역으로 구분된다.⁵

부동화되는 금속(passive metal)에서 나타나는 일반적인 전위-전류 관계(polarization curve, 분극 곡선)를 그래프로 나타내면 Fig. 1 과 같다. 일반적으로 전위가 커질수록 금속의 산화전류가 증가하나(active dissolution), 전위가 어느 값보다 커지면 반응 전류 밀도가 수 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 로 감소하여 반응이 실제적으로 멈춘 것과 같은 상태가 되며 이를 부동화(passivation)라고 한다.⁸ 이는 금속의 표면에 치밀한 구조의 산화막이 형성되어 내부 금속을 보호하기 때문이다. 이때 형성되는 산화막의 두께는 보통 산성 용액에서 스테인리스강의 경우 0.8~2.5 nm 정도이다.⁹ 한편 전위가 더욱 높아지면 부동화 막은 파괴되기 시작하여 빠르게 용해되는 과부동화 부식(transpassive dissolution)이 나타나며 물의 전기분해 반응이 함께 일어난다. 전기화학적으로 전위-전류 관계는 전해액과 재료에 따라서 서로 다른 형태와 특성으로 나타난다.

따라서 극초단 펄스파를 사용하는 미세 전해 가공에서도 가공에 이용되는 펄스 전원 이외에 전극의 전위에 따라 가공 상태가 달라질 수 있다. 펄스파가 가해지는 동안에는 펄스의 높은 전압으로 금속이 용해되어 나온다. 그러나 펄스 오프타임(pulse off-time) 동안에는 전극 전위에 따라 가공 표면에 산화막이 발생될 수 있다. 전극 전위를 안정한 영역에 두지 않은 경우에는 Fig. 2 와 같이

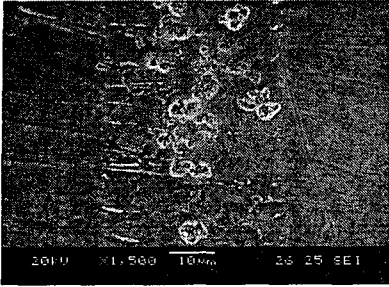


Fig. 2 Oxide formation during electrochemical machining on stainless steel

표면에 산화막이 생겨서 더 이상 가공이 진행되지 않는다. 따라서 공구와 시편이 접촉해도 단락이 발생되지 않기 때문에 그대로 가공이 계속 될 경우 공구가 파손될 수도 있다.

3. 전해 가공 시스템 구성

전극의 전위를 조절해 주기 위하여 전기 화학의 기본 장비인 일정전위기(potentiostat)를 이용하였다. 미세 전해 가공은 초단 펄스파를 이용하므로 두 개의 전원 장비가 사용되는데, Fig. 3 과 같이 가공 시스템을 구성하였다. 일정전위기는 AMETEK PAR 사의 263A potentiostat 을 사용하였고, 기준 전극의 전위에 대해 시편의 전극 전위(Φ_{work})를 직접 제어한다. 펄스 발생기(AVPP-1-B, Avtech)는 시편의 전위를 기준으로 공구 전극에 초단 펄스를 인가하며, 펄스 발생기의 오프셋(offset)을 조절함으로써 공구 전극 전위(Φ_{tool})를 제어할 수 있도록 하였다. 기준 전극(RE)과 대전극(CE)은 가공 셀의 크기를 줄이기 위하여 백금(Pt) 전극을 사용하였다. 전해액은 0.1 M 황산 용액을 사용하였다.

황산 용액은 가공 시 전해 생성물을 남기지 않아 미세 가공에 적합하며 마이크로미터 단위의 가공 간극을 얻고, 용액의 비저항을 크게 하기 위하여 낮은 농도를 사용하였다.³ 전극의 이송은 0.1 μm 의 분해능을 갖는 3 축 스테이지에서 제어하였고, 전극 사이의 전위차를 측정함으로써 단락의 발생 여부를 검출하여 이송량을 조절하였다. 전위차를 측정하기 위하여 A/D 변환기를 제어기와 연결하였고, 초단 펄스를 이용하는 고주파 시스템에서 가공 셀이 측정 시스템의 내부 임피던스의 영향을 받지 않도록 전압 폴로어(voltage follower)를 구성하여 각

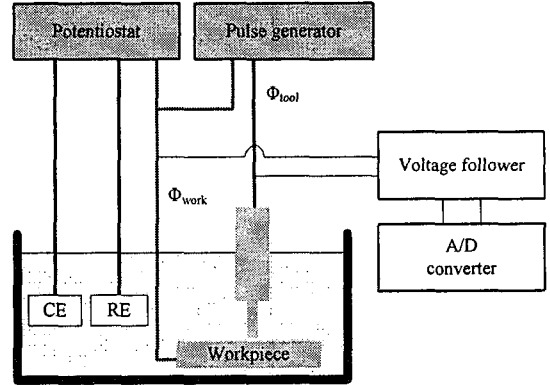


Fig. 3 Schematic diagram of electrochemical machining system

회로를 분리하였다. 또한 회로의 노이즈와 인덕턴스(inductance)를 최소화하기 위하여 동축 케이블을 사용하였고 전선의 길이를 최대한 줄였다.

시편은 합금인 304 스테인리스강(Cr 18 %, Ni 8 %)과 순물질인 니켈(99 %)을 사용하여 재료 특성에 따른 영향을 고려하였다. 공구 전극으로는 강성이 좋아서 미세 전극으로 유용한 텅스텐 카바이드를 재료로 하였다. 공구는 와이어 방전 가공으로 수십 마이크로미터 정도의 직경을 갖도록 제작하였다. 이 연구에서는 펄스 폭 50 ns, 주기 1 μs , 펄스 전압 6 V 로 미세 가공 실험을 수행하였다.

4. 전극 전위의 선정

4.1 공구 전극 전위(Φ_{tool})

전해 가공 시 공구는 대전극의 역할을 하는데 금속의 용해에 대한 상대 반응으로 수소가 발생된다. 전극은 전해액 안에서 전극 전위의 영향을 받으므로 전극 전체에서 산화가 일어나거나 용해된 금속 이온이 환원되지 않도록 안정한 전극 전위를 유지하여야 한다. 공구로 사용한 텅스텐 카바이드 전극의 분극 곡선은 Fig. 4 와 같다. 전극의 전위를 열린 회로 전위(open circuit potential)에서부터 0.9 V_{Pt} 까지 10 mV/s 의 속도로 변화시키면서 전류를 측정하였다. 텅스텐 카바이드는 앞서 살펴본 바와 같이 활성화 영역과 부동화 영역이 확실히 구분되는데, -0.6 V_{Pt} 근처에서 평형 전위가 나타나고 부동화 영역은 -0.08 ~ 0.2 V_{Pt} 이다. 활성화 영역이나 과부동화 영역에서는 전극 전체에 산화가 일어나며 두꺼운 산화막이 생긴다. 평형 전위 이하에서

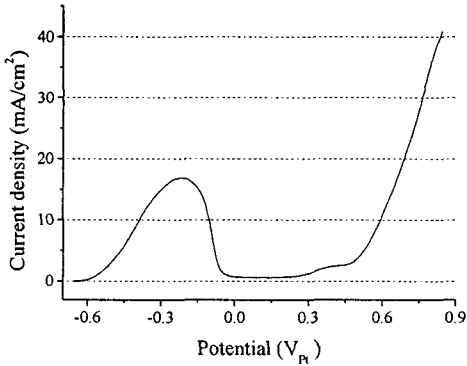


Fig. 4 Polarization curve of WC (RE: Pt, CE: Pt, electrolyte: 0.1 M H₂SO₄, scan rate: 10 mV/s)

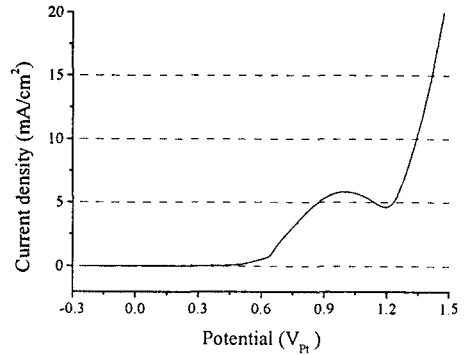


Fig. 5 Polarization curve of STS 304 (RE: Pt, CE: Pt, electrolyte: 0.1 M H₂SO₄, scan rate: 10 mV/s)

는 시편과 공구의 전극 전위 차가 큰 경우에 물의 전기 분해가 생겨서 다량의 기포가 발생되어 가공을 방해할 수 있다. 위와 같은 사항을 고려하여 공구의 전극 전위는 $\Phi_{\text{tool}} = -0.05 \text{ V}_{\text{Pt}}$ 로 선정하였다.

4.2 스테인리스강의 시편 전극 전위(Φ_{work})

스테인리스강의 전위-전류 관계를 알아보기 위하여 일정전위기로 Fig. 5 와 같이 분극 곡선을 구하였다. 위와 마찬가지로의 방법으로 열린 회로 전위에서부터 +1.5 V_{Pt} 까지 10 mV/s 의 속도로 전위를 변화시키면서 전류를 측정하였다. 황산 용액의 농도가 낮아서 활성 용해 영역은 거의 보이지 않으나¹⁰, 약 0.4 V_{Pt} 까지는 전류가 거의 흐르지 않는 부동화 영역으로 볼 수 있고 그 이상에서는 과부동화 부식 영역으로 나타남을 알 수 있다. 0.4 V_{Pt} 이상의 전위는 시편 전체에서 용해가 일어날 수 있으므로 전극 전위는 그 이하로 유지하여야 한다. 시편의 전극 전위에 따라 전해 가공 실험한 결과는 Fig. 6 와 같다. 전극 전위를 -0.3 V_{Pt} 에서 0.4 V_{Pt} 까지 0.1 V 단위로 변화시키면서 깊이 6 μm 의 홈을 가공하였을 때 Fig. 6(a),(b)에서와 같이 $\Phi_{\text{work}} = 0 \text{ V}_{\text{Pt}}$ 이하에서는 가공 표면에 산화물이 나타나며 가공이 불안정하였다. 이는 주어진 펄스 폭 동안에 산화막을 깨고 금속을 용해시키지 못하기 때문이라고 생각된다. Fig. 6(c),(d) 에서와 같이 전극 전위가 $\Phi_{\text{work}} = 0.1 \sim 0.4 \text{ V}_{\text{Pt}}$ 인 경우에도 전극 전위가 부동화 영역에 있으므로 산화막이 생성될 수 있는데 이 때에는 산화막이 생기는 속도보다 용해되는 속도가 빠르기 때문이라고 할 수 있다. 그러나 구멍

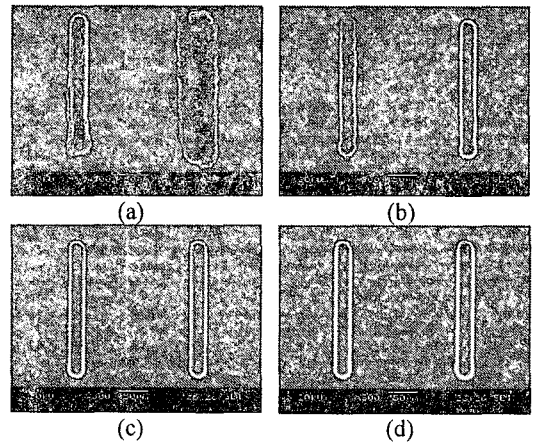


Fig. 6 Comparison of surface according to workpiece electrode potential, Φ_{work} : (a) -0.3, -0.2 V_{Pt}, (b) -0.1, 0 V_{Pt}, (c) 0.1, 0.2 V_{Pt}, (d) 0.3, 0.4 V_{Pt}

가공과 같이 용액의 확산이 원활하지 않는 경우에는 Fig. 7 과 같이 $\Phi_{\text{work}} = 0.2 \text{ V}_{\text{Pt}}$ 일 때에도 산화막이 생성되는 것을 볼 수 있다. 이 때에는 가공 중에 환원된 수소 이온의 농도가 줄어들어서 pH 가 국부적으로 높아지고, 또한 발생한 금속 이온의 농도가 높아져서 산화막을 이를 가능성이 커진다. 이를 중합할 때 시편의 전극 전위는 부동화 영역에서 과부동화 영역으로 넘어가는 부근의 전위인 $\Phi_{\text{work}} = 0.4 \text{ V}_{\text{Pt}}$ 로 선정하였다.

전해 가공된 면과 산화물을 EDX(energy dispersive X-ray spectrometer) 성분 분석해 본 결과는 Fig. 8 과 같다. 잘 가공된 면은 스테인리스강의 주 성분인 Fe, Cr, Ni 이 주로 나타나고 있는데, 산화막

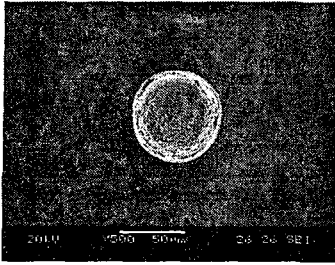


Fig. 7 Surface shape during drilling a hole ($\Phi_{work} = 0.2 V_{Pt}$, pulse: 6 V, 50 ns / 1 μ s, electrolyte: 0.1 M H_2SO_4)

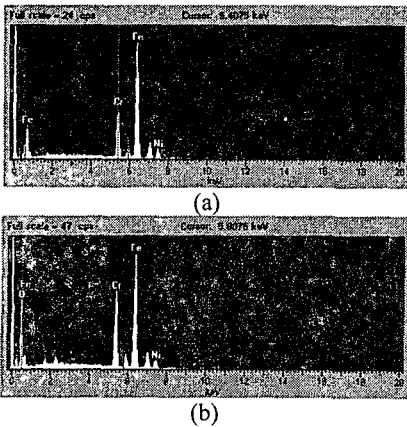


Fig. 8 EDX analysis of machined surface: (a) normal surface, (b) oxide layer

은 산소가 많이 함유되어 있는 것으로 보아 철과 크롬의 산화물로 볼 수 있다. 실제로 스테인리스강의 부동화 막을 이루는 성분은 주로 Fe_2O_3 , Cr_2O_3 로 구성되어 있다.¹⁰

4.3 니켈의 시편 전극 전위(Φ_{work})

일정전위기를 이용하여 얻은 니켈의 분극 곡선은 Fig. 9와 같다. 열린 회로 전위를 기준으로 +0.9 V_{Pt} 까지 10 mV/s의 속도로 전위를 변화시키면서 전류를 측정하였다. 니켈의 경우 스테인리스강과는 달리 황산 용액에서 전류 밀도는 낮으나 활성화, 부동화 영역의 구분이 뚜렷하게 나타난다. -0.70 V_{Pt} 근처에서 열린 회로 전위가 나타나며 -0.60 ~ -0.05 V_{Pt} 에서는 활성화 영역, 0.60 V_{Pt} 이후로는 과부동화 영역이 시작된다. -0.70 ~ 0.60 V_{Pt} 구간에서 각 영역 별로 활성화 영역이 시작되는 구간, 활성화와 부동화 영역의 경계 구간, 부동화 구간, 과부동화가 시작되는 구간에 전위를 선정하고 가공 특성을 비

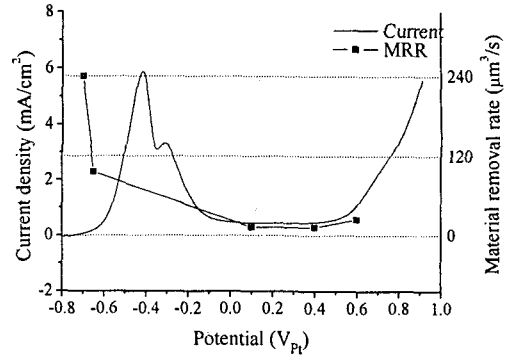


Fig. 9 Polarization curve of Ni (0.1 M H_2SO_4) and material removal rate according to workpiece potential

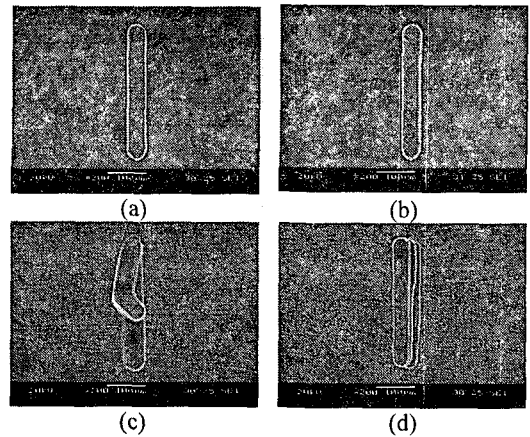


Fig. 10 Comparison of nickel surface according to workpiece electrode potential, Φ_{work} : (a) -0.70 V_{Pt} , (b) -0.65 V_{Pt} , (c) 0.10 V_{Pt} , (d) 0.60 V_{Pt}

교해보았다. 그래프에서 보는 바와 같이 시편 전위에 따라 재료 제거율의 차이가 발생하였다. 따라서 전극 전위에 따라 전해 반응 구조가 달라짐을 짐작할 수 있다. 가공 속도뿐만 아니라 가공된 표면 및 가공 후 시편의 상태에도 변화가 있었는데 그 실험 결과는 Fig. 10과 같다. 사용된 공구는 직경 35 μ m WC 전극이고, 제작된 홈은 길이 300 μ m, 깊이 8 μ m이다. 전위가 활성화 영역 이전에 있을 경우 산화막의 발생 및 단락 없이 가공이 원활하게 이루어졌다(Fig. 10(a)). 그러나 활성화 영역에 가까운 -0.65 V_{Pt} 에서는 가공시간이 길어질

경우 가공 면 주변에서도 미세하게 용해가 일어나 표면에 피트(pit)가 생긴다. 부동화 영역이 시작되는 $0.10 V_{Pt}$ 에서는 Fig. 10(c)와 같이 초기에 반응이 이루어지기는 하였으나 가공이 진행될수록 깊이 방향의 가공이 어려웠으며 가공 중에 공구 전극과의 단락을 판별할 수 없어 공구가 자주 파손되거나, 공구의 변형으로 가공형상이 정확하게 나오지 않았다. 또한 시편 전체에서 피트가 발생되어 표면이 나빠지는 것을 볼 수 있다. 한편 Fig. 10(d)에서와 같이 시편의 전위가 과부동화 영역에 가까운 부동화 영역에 있을 경우 $0.10 V_{Pt}$ 에서보다 가공속도가 약간 빨라지기는 했으나 활성화 영역에 비해 매우 느리며 산화막의 영향으로 단락이 나타나지 않는 등의 문제가 여전히 발생했다.

전기 화학 반응에서는 전극의 전위에 따라 다른 형태의 반응 구조가 적용되기 때문에 이러한 가공 특성의 변화를 가져온다. 니켈 시편의 전위가 부동화 영역에 있을 경우 니켈의 산화물(NiO)이 전극 표면에 발생해 용해 반응을 저해한다. 과부동화 영역에서는 활성화 영역과는 달리 니켈의 산화물이 물과 재결합하여 고가 산화물(Ni_2O_3 or Ni_3O_4)을 형성하며 동시에 용해 반응이 일어나는 원리로 활성화 영역에 비해 가공 속도가 더 빨라지지 않는다.^{11,12} 따라서 니켈의 황산 용액에서의 시편 전극 전위는 열린 회로 전위와 활성화 영역의 경계 지점의 전위인 $\Phi_{work} = -0.70 V_{Pt}$ 로 선정하였다.

4.4 선정된 전위에서의 미세 형상 가공

앞서 제시된 방법으로 선정된 전위를 이용하여 미세 구조물의 제작이 가능하였다. Fig. 11은 스테인리스강에 미세 홈을 가공한 그림이다. 사용된 공구의 직경은 $40 \mu m$ 이며 깊이 $10 \mu m$, $250 \mu m$ 길이의 홈이다. 시편의 가공 영역 외에서 피트가 없고 국부적인 용해 반응이 가능하였다. Fig. 11(b)는 가공된 표면을 확대한 사진으로 산화막이 없는 깨끗한 표면을 얻을 수 있었다. Fig. 12는 이러한 실험을 바탕으로 제작한 깊이 $30 \mu m$ 인 미세 유로로써 유로폭은 $38 \mu m$ 이며, 벽의 두께는 $2 \sim 5 \mu m$ 이다. 니켈에서도 같은 방법으로 길이 $400 \mu m$, 깊이 $10 \mu m$ 의 미세 홈을 가공하였다(Fig. 13). 사용된 공구의 직경은 $52 \mu m$ 이다. 가공 중에 산화막의 발생이나 단락이 없이 안정적인 가공이 가능하였으며, 가공 영역 외의 시편 표면에도 변화가 없었다.

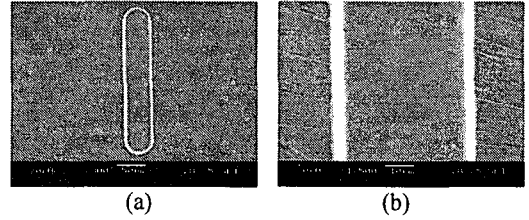


Fig. 11 Micro groove on stainless steel ($\Phi_{work} = 0.4 V_{Pt}$, $\Phi_{tool} = -0.05 V_{Pt}$, pulse: 6 V, 50 ns / 1 μs , electrolyte: 0.1 M H_2SO_4): (a) whole shape, (b) detail image of (a)

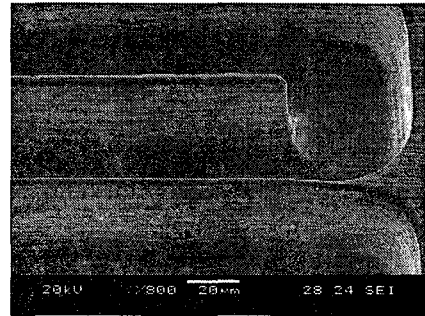


Fig. 12 Micro channel separated by micro walls on stainless steel ($\Phi_{work} = 0.4 V_{Pt}$, $\Phi_{tool} = -0.05 V_{Pt}$, tool: $\phi 31 \mu m$, pulse: 6.5 V, 60 ns / 1 μs)

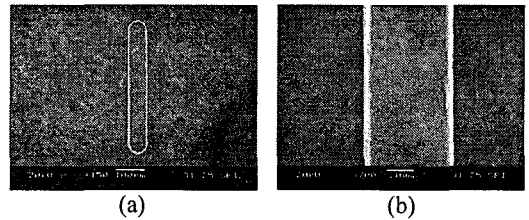


Fig. 13 Micro groove on nickel ($\Phi_{work} = -0.70 V_{Pt}$, $\Phi_{tool} = -0.05 V_{Pt}$, pulse: 6 V, 50 ns / 1 μs , electrolyte: 0.1 M H_2SO_4): (a) whole shape, (b) detail image of (a)

5. 결론

미세 전해 가공 시에는 전극 전위에 따라 가공상태가 달라진다. 스테인리스강과 같이 전극 전위에 따라 표면에 산화막이 생성될 수 있는 부동화 금속을 시편으로 사용할 때에는 가공 중에 산화막이 생기거나 전극 전체에서 용해가 일어나지 않도록 해야 한다. 스테인리스강과 니켈의 분극

곡선 실험을 통해 안정한 전극 전위를 찾고 전해 가공 실험에서도 가공에 적절한 조건임을 확인하였다. 공구도 마찬가지로의 방법으로 가공 영역 외 표면에 영향을 주지 않도록 전극 전위를 선정하였다. 실험을 통해 선정된 전극 전위는 스테인리스강의 경우 $\Phi_{work} = 0.4 V_{Pt}$, 니켈은 $\Phi_{work} = -0.7 V_{Pt}$ 이며, 공구 전위는 $\Phi_{tool} = -0.05 V_{Pt}$ 이다. 미세 전해 가공 시 이와 같은 전극 전위를 적용하여 가공 안정성을 확보하고 우수한 가공 품질을 얻을 수 있다. 이러한 원리를 이용해 다양한 종류의 부동화 금속에도 적용하여 전해 가공으로 미세 형상을 제작할 수 있을 것이다.

후 기

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

참고문헌

- Schuster, R., Kirchner, V., Allongue, P. and Ertl, G., "Electrochemical Micromachining," Science, Vol. 289, pp. 98-101, 2000.
- Kock, M., Kirchner, V. and Schuster, R., "Electrochemical Micromachining with Ultrashort Voltage Pulses-a Versatile Method with Lithographical Precision," Electrochimica Acta, Vol. 48, 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, 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.
- Kaesche, H., "Corrosion of Metals," Springer, pp. 203-293, 2003.
- 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.
- 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," Journal of the KSPE, Vol. 22, No. 5, pp. 37-44, 2005.
- Park, W. K. and Park, S. M., "Electrochemistry: Science and Technology of Electrode Process," Cheong Moon Gak, pp. 265-270, 2001.
- Wegrelius, L., Falkenberg, F. and Olefjord, I., "Passivation of Stainless Steels in Hydrochloric Acid," Journal of the Electrochemical Society, Vol. 146, pp. 1397-1406, 1999.
- Abdallah, M., "Corrosion Behavior of 304 Stainless Steel in Sulphuric Acid Solutions and Its Inhibition by Some Substituted Pyrazolones," Materials Chemistry and Physics, Vol. 82, pp. 786-792, 2003.
- Sato, N. and Kudo, K., "An Ellipsometric Study of Anodic Passivation of Nickel in Borate Buffer Solution," Electrochimica Acta, Vol. 19, pp. 461-470, 1974.
- Itagaki, M., Nakazawa, H., Watanabe, K. and Noda, K., "Study of Dissolution Mechanisms of Nickel in Sulfuric Acid Solution by Electrochemical Quartz Crystal Microbalance," Corrosion Science, Vol. 39, No. 5, pp. 901-911, 1997.