

초단펄스 전해 국부화를 이용한 미세 가공

안세현* · 최세환* · 류시형* · 최덕기† · 주종남**

Localized Electro-chemical Micro Machining Using Ultra Short Pulses

Se Hyun Ahn, Se Hwan Choi, Shi Hyoung Ryu, Deok Ki Choi and Chong Nam Chu

Key Words : Electro-chemical Machining(전해 가공), Micro-hole(미세 구멍), Micro-groove(미세 홈), Machining Localization(가공 국부화), Ultra Short Pulses(초단펄스)

Abstract

The possibility of micro/nano machining through electro-chemical process is discussed in this research. Electro-chemical dissolution region is localized within 1 μm by applying ultra short pulses with tens of nanosecond duration. The effects of voltage, pulse duration, and pulse frequency on the localization distance are investigated. Localization distance can be manipulated by controlling the voltage and pulse duration, and various hole shapes are produced including stepped holes and taper free hole. High quality micro-hole with 8 μm diameter with 20 μm depth and micro-groove with 9 μm width with 10 μm depth are machined on 304 stainless steel.

1. 서 론

국내외적으로 마이크로/나노 구조물 제작 기술에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 리소그라피 공정을 응용한 기술들이 주류를 이루고 있으며, 이 방법은 크기의 미세화와 대량 생산에 이점을 지니고 있다. 반면 A/R 을 높이거나 삼차원 형상을 제작하는데 어려움이 있으며 Si 등 사용 재료가 한정되어 있고, 시스템 구축에 비용이 많이 드는 단점이 있다. 이온 빔 밀링은 재료의 제약은 적으나 공정이 복잡하고 시간이 많이 걸려 효율성이 떨어진다. 미세 밀링, 방전 가공 등은 고정도 금속을 가공할 수 있으나 공구가 마모되어 나노 정밀도의 형상 제어가 용이하지 않을 것으로 생각된다.

전해 가공은 방전 가공과 더불어 복잡한 형상의 금형 가공에 많이 이용되어 왔다. 특히 전극 마모

없이 공구의 형상을 그대로 전사하는 특징이 있어서 터빈 블레이드 등 자유 곡면을 가공하는데 유리하며, 원자단위로 재료의 제거가 이루어지기 때문에 다른 특수 가공법에 비해서 가공면의 품질이 매우 우수하다. 또한 전해 가공은 비접촉 가공으로 공작물 표면에 잔류응력이나 열변형층을 발생시키지 않는다.⁽¹⁾ 이러한 장점에도 불구하고 일반적인 전해 가공은 가공 정밀도가 방전 가공 등 기타 특수 가공에 비해 좋지 않은 것으로 알려져 있어 미세 형상 제작에 사용되지 못했다.

최근에 Schuster 는 DC 대신 초단펄스 전원을 이용하여 전해 영역을 국부화 함으로써, 전해 가공에서 마이크로 이하의 형상제어가 가능함을 보였으며 수 마이크로미터 크기의 미세 형상을 제작하였다.⁽²⁾ 본 논문에서는 초단펄스를 이용한 전해 가공에서 가공 조건에 따른 전해 국부화와 가공면 내부의 부동화막 생성 억제, 테이퍼 감소 방법에 대해서 연구하고 이로부터 형상 정밀도가 우수한 미세 구멍과 미세 홈을 가공하였다. 미세 전해 가공 기술은 미세 노즐과 채널, MEMS 의 각종 부품 및 센서, 미세 다이 및 몰드 등 미세 구조물의 제작에 광범위하게 응용될 수 있으며, 향후 삼차원 나노 구조물 제작에 이용될 수 있을 것이다.

† 강릉대 정밀기계공학과

E-mail : choidk@kangnung.ac.kr

TEL : (033)640-2394 FAX : (033)640-2394

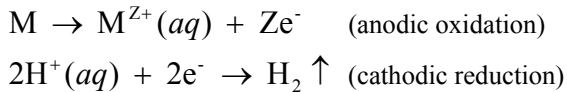
* 서울대 대학원 기계항공공학부

** 서울대 기계항공공학부

2. 초단펄스를 이용한 전해 국부화

2.1 전해 가공의 원리

전해 가공에서 공구는 전원의 음극에 연결되어 양극으로 대전되는 공작물을 용출시키는 대전극의 역할을 한다. 공작물에서는 양극 산화가 일어나 금속이 이온화되어 용출되고 자유 전자는 회로를 따라 음극에 모이게 된다. 전해액의 수소 양이온 즉, 양성자는 음극에서 전자를 얻어 환원됨으로써 수소 기체를 발생시킨다. 공작물과 전해액의 계면에서 금속 양이온은 전해질의 음이온과 결합하여 금속 수화물 또는 산화물이 된다. 이러한 과정을 통해 양극의 금속은 용출되어 제거된다.



2.2 전해 국부화

Figure 1 에서 보듯이, 공구와 공작물 양단에 전압이 인가될 때 공작물 쪽에 있는 전하와 용액 쪽에 있는 전하는 서로 마주하는 층을 이루게 되며 이를 전기이중층 (electrical double layer) 이라 한다.^{(3),(4)} 이 때 금속 전극에서 전하는 0.1 Å 이내의 표면에 위치한다. 용액 내에서 음이온들은 금속 표면과 화학적 상호 작용으로 전극에 밀착하게 되는데 이를 특수 흡착 (specific adsorption) 이라 하고, 특수 흡착된 음이온의 중심 궤적을 내부 Helmholtz 평면 (IHP) 으로 정의한다. 양이온 주위에는 물분자의 쌍극자들이 붙어 수화되어 있으며 금속 표면에도 물의 단분자층이 있어, 이온의 중심과 전극사이는 대체로 물분자 두 개 크기 정도의 거리가 떨어져 있는데 이렇게 전극에 최대한 접근할 수 있는 양이온의 중심 궤적을 외부 Helmholtz 평면 (OHP) 이라 한다. 전극 표면에서 OHP 까지를 조밀이중층이라 하며 약 3 Å 의 두께를 갖는다. OHP 에서부터 대전된 전극의 영향으로 전기적으로 용액내에 분포하는 이온층까지를 확산이중층이라 하고, 전해액의 농도가 0.01 M 보다 클 때 일반적으로 확산이중층의 두께는 100 Å 이하이다. 전기이중층과 용액으로 구성된 전해셀은 Fig. 2 와 같이 축전기와 저항으로 이루어진 등가 전기회로로 근사화하여 설명할 수 있다.⁽²⁾ 여기서 C_d 는 전기이중층의 축전용량으로 주로 확산이중층의 축전용량에 의해 지배되며 일반적인 축전기와는 달리 전위에 따라 값이 달라진다. R_p 는 분극 저항으로 전극과 용액사이 전자 이동할 때

극복해야 할 저항이며 과전압에 대한 Tafel 기울기의 역수로 주어진다.^[3]

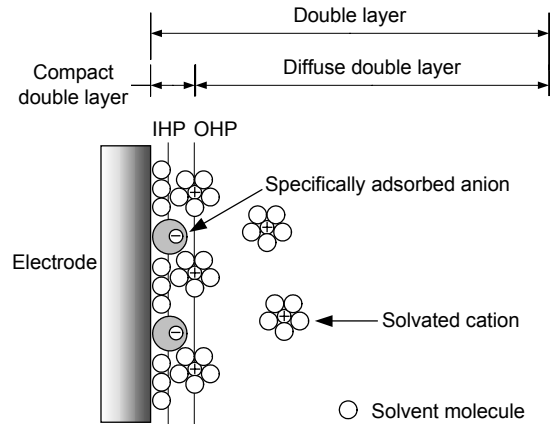


Fig. 1 Electrical double layer

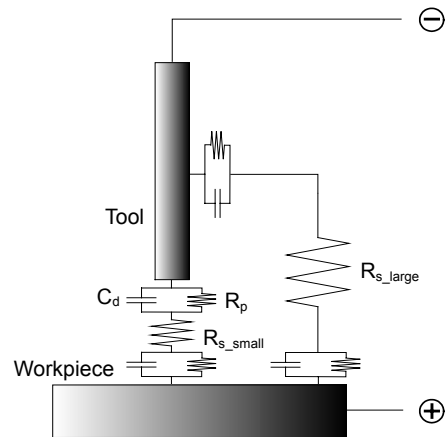


Fig. 2 Equivalent circuit model of electro-chemical cell

초단펄스를 인가할 경우, 전극과 먼 거리에 위치한 가공물은 용액저항 (R_{s_large}) 이 크기 때문에 전기이중층의 충전 시정수 τ 가 비교적 크다. 만약 이 시정수보다 작은 온-타임이 가해질 경우, 분극은 거의 이루어지지 않고 따라서 전해 작용이 발생하지 않는다. 반면 공작물과 가까운 위치에서는 상대적으로 작은 용액저항 (R_{s_small}) 으로 인해 시정수 τ 는 작은 값을 갖는다. 공구와 가까운 거리의 전기이중층 시정수를 τ_1 , 먼 위치의 전기이중층 시정수를 τ_2 라고 할 때, $\tau_1 \leq T \ll \tau_2$ 인 온-타임 T 동안 전원이 양단에 가해질 경우, 시정수 τ_1 인 가까운 거리까지만 전해작용이 일어나게 되고 따라서 가공 영역은 국부화된다. 그리고 이때의 가공 범위 d 는 $d = \tau / \rho C_{DL}$ 로 근사화될 수 있다. 여기서 ρ 는 전해액의 비저항이고, C_{DL} 은 전기이중층의 단위면적당 축전용량을 의미한다.

2.3 전해액 및 공구의 선정

산성 전해액은 금속과 반응하여 전해 생성물을 발생시키지 않으므로 간극 사이의 찌꺼기 제거를 위한 플러싱 공정이 필요없어 미세 가공의 전해액으로 적합한 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾ 본 실험에서는 황산 용액을 사용하여 스테인레스 스틸 304 SS 를 가공하였다. 황산의 농도 선정에서 고려한 사항은 가공 간극의 최소화, 가공에 필요한 적정 이온의 공급과 가공면의 거칠기 등 표면 품질이다. 전해액의 농도는 용액의 비저항에 반비례하므로 농도가 높으면 가공 영역이 넓어지게 된다. 직경 200 μm WC 원통형 전극을 이용해서 4 V, 온-타임 400 ns 조건에서 용액의 농도에 따른 구멍 직경의 변화를 실험하였다. 주어진 범위에서 황산 0.05 M 일 때 시간에 따라 구멍 직경의 증가가 가장 작은 것을 알 수 있었으나, 이온이 상대적으로 부족하여 가공 중 빠르게 고갈이 되고 확산에 의한 이온 공급이 원활하지 않은 관계로 전해 작용이 고르게 일어나지 못해 가공면이 거칠어짐을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 전해액을 황산 0.1 M 로 선정하였다.

전해 가공에서의 공구가 갖추어야 할 조건은 열 및 전기 전도도가 좋아야 하고 강성이 커서 가공 중에 변형이 없어야 한다.⁽¹⁾ 본 실험에서는 전해 가공으로 제작이 가능하고 강성이 우수한 텅스텐카바이드 (WC) 를 사용하였다. Figure 3 에서와 같이 직경 200 μm 의 텅스텐카바이드 축을 황산 전해액에서 깊은 침지법으로 각각 직경 30 μm, 20 μm, 7 μm, 6 μm, 4 μm 로 가공하여 미세 구멍 가공을 위한 전극으로 사용하였다.⁽⁵⁾

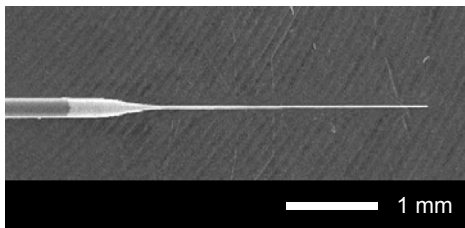


Fig. 3 WC electrode fabricated using the deep immersion method ($\phi 30 \mu\text{m}$)⁽⁵⁾

3. 실험 및 결과

3.1 실험 장치

실험에 사용된 펄스 발생기는 TARBO electronics 사의 8551 Pulse Generator (50MHz) 이고 공구와 공작물 양단의 전압과 전류는 Tektronix 사의 TD3034 (300MHz) 오실로스코프로

측정하였으며, Z 축은 DeltaTau 사의 PMAC Motion Controller 로 제어하였다. 가공 중의 상태는 CCD 비전 시스템으로, 최종 형상은 주사 전자 현미경 (SEM) 으로 관찰하였다.

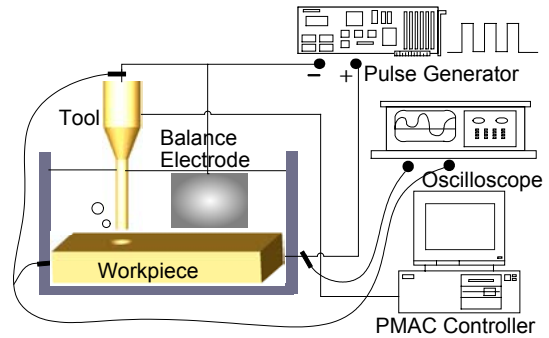


Fig. 4 Schematic diagram of pulsed ECM system

Figure 4 에서 보듯이 공작물은 펄스 발생기의 양극에, 공구는 음극에 연결한다. 여기에서 백금 balance 전극은 공구와 전해액, 가공물과 전해액의 전압 강하 차이를 보상해주는 역할을 한다. 공구는 가공물에 비해 용액에 침지된 표면적이 매우 작기 때문에 접촉저항이 크고 이로 인해 대부분의 전압 강하는 공구와 가공물 사이에서 일어나게 된다. 이에 반해 실제적으로 가공과 관련된 용액과 공작물 양단에는 매우 낮은 전위가 인가된다. $-300 \text{ mV} \sim 1000 \text{ mV}$ Ag/AgCl 의 전위 범위에서는 304 SS 의 표면에 Fig. 5 와 같이 크롬 산화막이 생성되어 더 이상의 가공을 방해하게 된다.^{(6),(7)} Balance 전극을 사용하지 않고 전위만을 높일 경우, 대부분의 전압 강하가 공구와 용액 사이에서 이루어지고, 이로 인해 용액의 비등과 물의 전기분해에 의한 기포가 발생하여 구멍의 형상을 왜곡시키게 된다. 백금 Balance 전극을 위치시킴으로써 기포의 발생을 최소화하면서 크롬 산화막의 생성을 효과적으로 방지할 수 있었다.

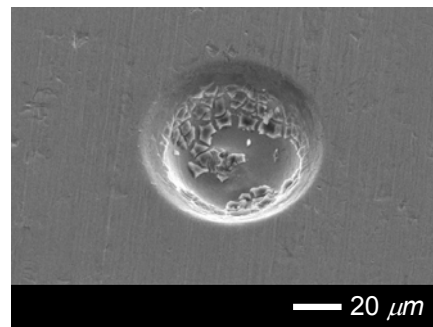


Fig. 5 Blind hole surface covered with Cr oxide layer after machining without balance electrode

3.2 전해 영역 국부화

전해 작용을 이용해 구멍을 가공할 경우, 구멍의 크기는 공구의 직경과 반경 방향의 가공 거리에 의해 결정된다. 구멍 가공 시 가공 조건에 따른 반경 방향의 가공 거리를 알아보기 위해 ϕ 30 μm 의 공구를 가공물 표면에서 깊이방향으로 10 μm 이송 시킨 상태에서 정지한 채로 주어진 시간동안 전압 펄스를 가한 후 표면에서의 구멍 크기를 측정하였다. 가공 시에 용액의 공급을 원활하게 하기 위해 공구의 끝단을 전해 가공으로 제거하여 선단 반경 5 μm 의 둥근 모서리를 갖도록 하였다.

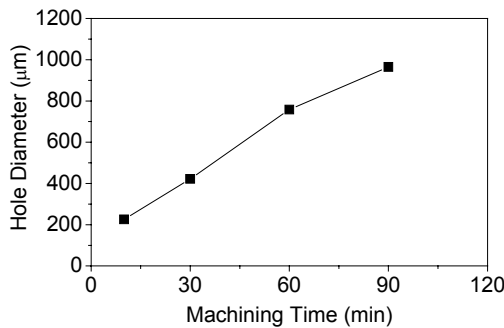


Fig. 6 Hole diameter according to machining time using DC voltage (3.5V)

Figure 6 은 3.5 V DC 전압을 인가했을 때 가공 시간에 따른 입구 구멍 직경의 크기 변화를 나타낸 것이다. 예상했던 바와 같이 주어진 가공 시간 범위에서 구멍 크기가 계속 증가하고 있음을 볼 수 있다. Figures 7, 8 은 펄스 온-타임과 전압에 따른 구멍 크기의 변화를 보여준다. 구멍 직경은 가공 시간이 길어짐에 따라 계속적으로 증가하는 것이 아니라 일정한 크기로 수렴하는 양상을 띤다. 6.0 V, 온-타임 80 ns 에서 구멍 직경은 60 μm 로 수렴하여 반경 방향으로 15 μm 의 가공 여유를 가졌다.

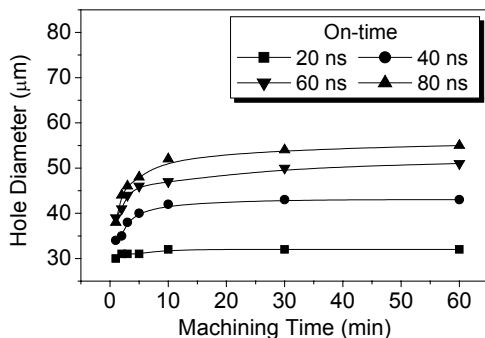


Fig. 7 Hole diameter according to pulse on-time (5.0 V, 2 μs period)

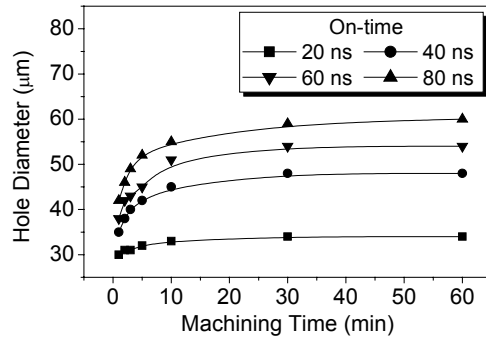


Fig. 8 Hole diameter according to pulse on-time (6.0 V, 2 μs period)

그러나 5.0 V, 온-타임 20 ns 에서는 직경 32 μm 로 수렴하여 단지 1 μm 의 반경 방향 가공여유를 갖게 됨을 볼 수 있다. 이 그래프에서 주목해야 할 점은 초기 10 분 이내의 짧은 시간에 대부분의 가공이 이루어지고 그 이후로는 완만한 추이로 증가하다가 일정한 크기로 수렴한다는 것이다. 이로부터 초단펄스를 이용하면 전해 영역을 국부화 시킬 수 있고 가공 조건을 적절히 선정하면 가공 여유의 크기를 서브 마이크로미터 이내로 유지하는 것이 가능함을 알 수 있다.

펄스 전해 가공에서 가공 영역의 국부화에 대한 가공 조건을 결정함에 있어서 펄스 온-타임 이외에도 오프-타임에 대한 영향이 고려되어야 한다. 오프-타임의 역할로는 첫째, 전기이중층에 충전되었던 전하를 제거하고 둘째, 온-타임에서 발생하는 열을 냉각시키며 셋째, 가공 중 고갈된 이온을 전해액의 유동과 확산으로 공급해주는 것을 들 수 있다.⁽⁸⁾ 전기이중층에 충전되었던 전하가 충분히 제거되지 못하면 마치 DC 전압을 인가한 것과 유사한 조건이 되어 전해 영역이 계속적으로 증가하게 되며 따라서 가공 영역의 국부화를 얻지 못한다. 또한 열이 냉각되지 못하면 가공 중에 전해액이 비등하면서 많은 기포가 발생하여 전해 작용이 불균일 해져 가공면이 좋지 않게 된다. 구멍의 바닥면에서 기포의 밀도가 가장 높기 때문에 용액저항이 바닥면에서 국부적으로 상승하게 된다. 그렇게 되면 전류는 상대적으로 저항이 낮은 공구의 측면이나 구멍 외곽으로 흐르게 되어서 구멍의 직경은 커지고 구멍 외부 표면이 전체적으로 부식되어 가공면이 거칠어지게 된다. Figure 9 는 동일한 온-타임 40 ns 와 6.0 V 에서 펄스 주기를 변화시켜 주면서 오프-타임에 따른 구멍 직경의 변화를 나타낸 그래프이다. 500 ns 주기 즉 460 ns 오프-타임의 경우가 2 μs 주기 즉 1960 ns 오프-

타입 조건에서 보다 빠른 시간에 비슷한 크기의 한계 직경에 도달하는 것을 알 수 있다. 그러나 오프-타입이 더욱 짧아진 주기 200 ns 에서는 60 분까지 구멍 직경이 계속적으로 증가함을 볼 수 있으며, 이 때는 가공물이 전체적으로 부식되면서 표면이 거칠어졌다. 이는 오프-타입의 길이가 충분치 않아 DC 를 인가했을 때와 유사한 결과를 나타낸 것으로 생각된다.

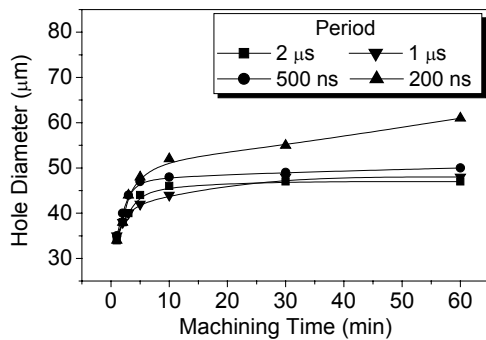


Fig. 9 Hole diameter according to pulse off-time (6.0 V, 40 ns on-time)

3.3 미세 구멍 가공

3.3.1 막힌 구멍의 가공

전해 가공으로 구멍을 가공할 때의 가장 큰 문제점 중의 하나가 테이퍼의 발생이다. 구멍 가공 시의 테이퍼 문제는 관통 구멍에서보다 막힌 구멍을 가공할 때 더욱 심각하게 나타난다. 그 이유는 다음 몇 가지로 설명될 수 있다. 첫째, 가공물 표면에서는 측면에서의 전해액 공급이 용이해서 가공이 원활이 이루어지지만 구멍의 깊은 부분은 용액의 침투가 어렵기 때문에 가공이 점차 둔화된다. 둘째, 용액의 비등과 전해반응으로 인한 기포의 발생을 이유로 들 수 있다. 기포는 용액의 국부적인 저항을 변화시켜서 구멍 바닥면보다 입구로 많은 전류가 흐르게 되고 이로 인해 테이퍼가 발생된다. 셋째, 스테인레스강의 경우 가공이 진행됨에 따라 크롬이나 니켈 산화막이 구멍 내부면에 형성되어 원활한 가공을 방해한다. 특히 크롬은 이온 확산이 원활하지 못할 경우, 부식 깊이가 깊어질수록 원자들이 모이는 경향이 강하며 따라서 이를 중심으로 산화막을 생성시킬 확률이 커지게 된다.⁽⁷⁾ 이러한 이유로 인해 구멍이 깊어질수록 가공이 원활하게 이루어지지 못하여 테이퍼가 발생하고 때로는 가공이 더 이상 진행되지 않기도 한다. 마지막으로 가공시간의 차이를 들 수 있다. 입구

부분은 구멍 안쪽에 비해 이송에 소요되는 시간만큼 가공시간이 상대적으로 길기 때문에 가공이 더 이루어 졌다고 볼 수 있다. 그러나 이는 가공 시간이 짧을 때에만 성립이 되고 가공영역이 수렴되는 한계시간에 도달한 이후의 테이퍼 현상을 설명하기에는 부적절하다. 즉 막힌 구멍에서 이송을 멈추고 한계시간까지 계속적으로 가공을 하면 입구와 마찬가지로 바닥면도 더 이상 반경이 커지지 않는 영역에 이르게 된다. 실험 결과, 한계시간까지 가공하여도 테이퍼는 계속 존재함을 볼 수 있었다. 깊이 방향의 가공이 진행됨에 따라 테이퍼 각도는 줄어들지만 입구와 출구의 직경차는 감소하지 않았다. 관통이 되면 출구쪽의 용액 공급이 원활지면서 빠른 속도로 출구의 직경이 증가하고 테이퍼 역시 감소하였다.

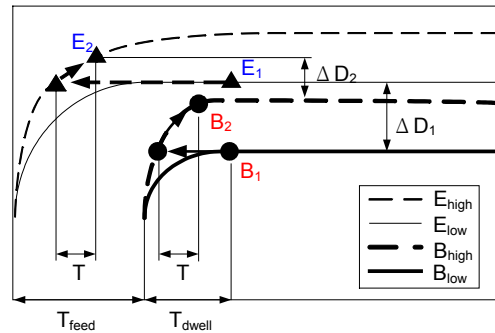
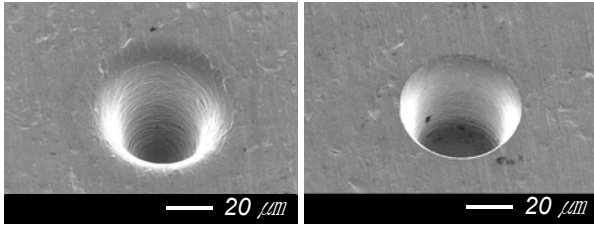


Fig. 10 Schematic diagram of taper reduction process

본 논문에서는 Fig. 10 의 원리로 막힌 구멍 가공에서 발생하는 테이퍼를 효과적으로 줄일 수 있는 실험적인 방법을 제시하고자 한다. 초기 입구 진입 시, 낮은 전압과 짧은 온-타임 조건으로 가공을 시작한다. T_{feed} 시간 동안 이송을 한 후, 이송을 멈추고 T_{dwell} 시간동안 가공을 하면 입구의 직경은 E_{low} 곡선을 따라 E_1 이 되고 바닥면의 직경은 B_{low} 곡선을 따라 B_1 으로 수렴한다. 이때의 입구와 바닥면의 직경 차이는 ΔD_1 이다. 전압과 온타임을 증가시키면 입구의 가공 곡선은 E_{high} 로, 바닥면은 B_{high} 로 각각 옮겨진다. 여기서, 동일한 시간 T 동안 가공을 하면 상대적으로 간극이 작은 바닥면은 입구보다 빠른 속도로 가공이 진행되어 바닥면의 직경은 B_2 가 되고 입구 직경은 E_2 가 된다. 초기의 입구와 바닥면의 직경차이 ΔD_1 은 이러한 과정을 통해 ΔD_2 로 감소하게 된다 ($\Delta D_2 < \Delta D_1$). 그러나 계속 가공을 하여 입구가 한계 직경에 이를 경우 다시 초기와 비슷한 크기의 테이퍼를 갖게 된다. 따라서 가공 조건을 변화시킨 후 수 분 정도의

시간을 유지하면 효과적으로 테이퍼를 줄일 수 있다.



(a) Continuous condition: 6.0 V, 80 ns on-time, 2 μ s period, 20 min machining time, 60 μ m depth, ϕ 49 μ m, and 12.7° taper angle
 (b) Two-step condition, first step: 6.0 V, 80 ns on-time, 2 μ s period and 30 min machining time and second step: 7.0 V, 100 ns on-time, 2 μ s period and 5 min machining time, 60 μ m depth, ϕ 52 μ m, and 4.8° taper angle

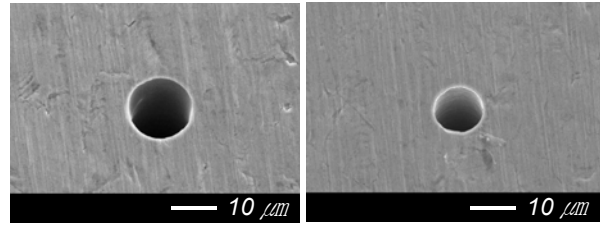
Fig. 11 Blind hole machining. ϕ 20 μ m tool and 100 μ m thickness 304 SS

Figure 11 은 본 절에서 제시한 방법의 효용성을 검증하기 위해, 막힌 구멍을 가공할 때 일정한 조건으로 가공한 것과 테이퍼를 감소시키기 위해 두 단계의 가공 조건으로 가공한 결과를 비교한 것이다. 같은 조건으로 계속 가공한 경우 테이퍼가 크고 입구부 모서리가 분명하지 않으나, 두 단계 조건으로 가공한 경우에는 테이퍼가 작고 모서리도 예리하게 살아있음을 볼 수 있다. 따라서 본 절에서 제시한 방법이 막힌 구멍 가공에서 테이퍼 제거에 매우 효과적임을 확인할 수 있었다.

3.3.2 관통 구멍의 가공

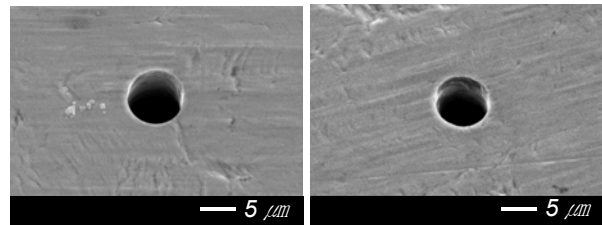
가공 간극이 작은 미세 구멍을 가공하기 위해서는 인가 전압을 낮추고 펄스 온-타임을 짧게 해주어야 한다. 304 SS 의 경우, 일정 범위의 전압조건에서 부동태막이 형성되어 가공을 방해하므로 가공 조건을 선정할 때 이를 고려하여야 한다. 본 논문에서는 백금 balance 전극을 부가함으로써 기포의 발생을 최소화하고 전해액과 공작물 양단의 전위를 높여서 과부동화 영역에서 가공이 이루어지도록 하였다. 이로부터 구멍 내부의 크롬 산화막 생성을 방지하면서 깊은 구멍 가공이 가능하였다. 깊이 100 μ m 의 구멍을 가공할 때에는 두 단계의 가공 조건을 사용하여 테이퍼를 줄이고 입구부 모서리의 곡률반경을 최소화하였다. Figure 12 는 두께 100 μ m 의 304 SS

에 직경 12 μ m 인 세장비 8 이상의 미세 구멍을 가공한 사진이며, Fig. 13 은 두께 20 μ m 의 304 SS 에 직경 8 μ m 의 미세 구멍을 가공한 것으로 가공 여유는 1 μ m 였다.



(a) ϕ 13.6 μ m entrance (b) ϕ 10.5 μ m exit

Fig. 12 Hole on 100 μ m thickness 304 SS. ϕ 4 μ m tool and two-step condition. 1_{st} step: 4.8 V, 32 ns on-time, 2 μ s period, and 50 min machining time. 2_{nd} step: 5.2 V, 32 ns on-time, 2 μ s period, and 10 min machining time. 0.9° taper angle



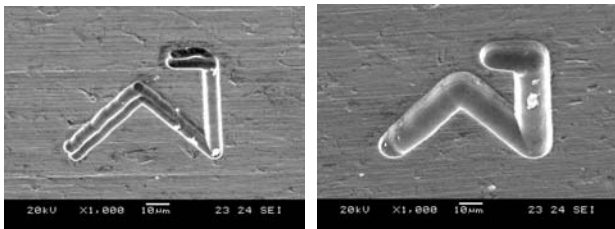
(a) ϕ 8.0 μ m entrance (b) ϕ 7.3 μ m exit

Fig. 13 Hole on 20 μ m thickness 304 SS. ϕ 6 μ m tool, 4.2 V, 21 ns on-time, 2 μ s period, and 30 min machining time. 1.0° taper angle

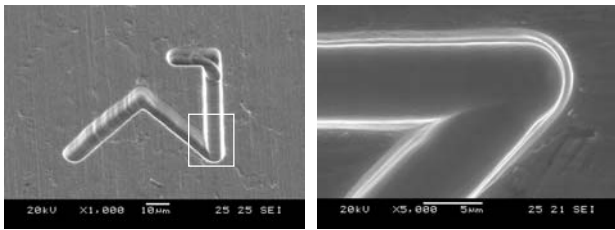
3.4 미세 홈 가공

삼차원 미세 형상 제작의 적용 가능성을 살피고 가공 조건에 따른 전해 국부화와 형상 정밀도를 비교하기 위해 간단한 형상의 미세 홈을 가공하였다. 전해 밀링은 구멍 가공과는 달리 하단과 측면에서의 전해 작용이 동시에 발생하므로, 가공 조건이 달라지게 되며 전해 속도를 고려하여 이송 속도를 적절하게 선정하여야 형상 정밀도를 높일 수 있다. 전극의 초기 위치를 공작물 표면에서 1 μ m 띄운 후 X, Y 축 이송을 통하여 가공하고, 각 경로가 끝나면 Z 축으로 2 또는 3 μ m 이송시킨 후, 다시 동일한 경로로 4 단계에 걸쳐 가공하였다. Figure 14 (a) 는 측면방향 전해 영역이 매우 작아 가공된 홈의 폭이 전극 직경에 근접해 있으나, 이송 시 공작물과 접촉하여 전극이 변형됨으로써 각 단계마다 가공경로가 어긋나 있음을 볼 수 있다. 반면에 펄스 온-타임이 길어진 (b) 의 조건에서는 전해 영역이 다소 넓어졌으며, 따라서 모서리부에

전해가 발생하여 형상 정밀도가 좋지 않음을 알 수 있다. (c) 의 조건에서는 온/오프 타임과 전극 이송 속도 등 가공 조건이 적절하게 선정되어 전극과 공작물의 물리적 접촉없이 전해 영역이 국부화 되어 측면부 가공 갭이 1 μm 정도로 유지되었다. 또한 (d) 에서 볼 수 있듯이 모서리부가 예리하게 살아있으며 가공면의 표면 품질도 예상한 바와 같이 매우 우수함을 확인할 수 있었다. 이상의 결과를 통해서 펄스 폭과 전극의 직경을 줄이고 가공 갭 등 가공 조건을 적절히 선정하면 전해 가공을 통한 삼차원 나노 구조물 제작이 가능함을 예상해 볼 수 있다.



(a) 40 ns on-time, 600 ns period, 500 nm/s feed-rate, 2 μm depth/step
 (b) 100 ns on-time, 1 μs period, 500 nm/s feed-rate, 3 μm depth/step



(c) 9 μm width, 10 μm depth, 60 ns on-time, 1 μs period, 1000 nm/s feedrate, 3 μm depth/step
 (d) enlarged view of (c)

Fig. 14 Groove on 304 SS. ϕ 7 μm tool, 6.0 V, 4 step

4. 결론

전해 가공에서 전해 영역의 국부화를 통한 마이크로/나노 구조물의 제작 가능성에 대해서 연구하였다. 0.1 M 황산 전해액에서, WC 미세축과 공작물을 근접시킨 후 양단에 수십 ns 의 전압 펄스를 인가하여 전해 영역을 국부화함으로써 304 SS 에 미세 구멍과 미세 홈을 가공하였다. 펄스 온/오프-타임, 전압 조건을 변화시키면서 시간에 따른 가공 영역의 변화 추이를 살펴보았다. 이를 통해 초단펄스 전해 가공에서 가공 영역이 더 이상 증가하지 않는 전해 국부화가 이루어지고,

가공 조건을 적절히 선정하면 반경 방향 가공 여유를 1 μm 이내로 유지할 수 있음을 확인하였다. 미세 구멍 가공 시 기포 발생을 최소화 하고, 크롬 산화막의 생성을 방지하기 위하여 백금 balance 전극을 사용하였다. 그리고 막힌 구멍 가공 시에 발생하는 테이퍼에 대해 고찰하였으며 효율적으로 테이퍼를 감소시킬 수 있는 새로운 방법을 제시하였다. 미세 홈 가공 시 펄스 온/오프 타임과 이송 속도를 적절히 선정하면 가공면 품질과 형상 정밀도가 우수한 미세 형상을 제작할 수 있음을 확인하였다. 위의 결과를 이용하여 깊이 100 μm , 직경 12 μm 인 세장비 8 이상의 미세 구멍과, 깊이 20 μm , 직경 8 μm 의 미세 구멍 그리고 폭 9 μm , 깊이 10 μm 의 미세 홈을 가공하였다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Sato, T., 1994, *Nontraditional Machining*, Yokendo, Tokyo.
- (2) Schuster, R., Kirchner, V., Allongue, P., and Ertl, G., 2000, "Electrochemical Micromachining," *Science*, Vol. 289, pp. 98~101.
- (3) Paik, W. K., Park, S. M., 2001, *Electrochemistry: Science and Technology of Electrode Processes*, Cheongmoongak, Seoul.
- (4) Bard, A. J., Faulkner, L. R., 2000, *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, 2nd ed., Wiley, New York.
- (5) Choi, S. H., Ryu, S. H., Choi, D. K., and Chu, C. N., 2002, "Optimal Machining Condition of WC-Microshaft Using Electrochemical Machining," *Proceedings of the Fall Conference of Korean Society of Precision Engineering*, Seoul, Korea, pp. 245~249.
- (6) Fujimoto, S., Tsujino, K., and Shibata, T., 2001, "Growth and Properties of Cr-rich Thick and Porous Oxide Films on Type 304 Stainless Steel Formed by Square Wave Potential Pulse Polarisation," *Electrochimica Acta*, Vol. 47, pp. 543~551.
- (7) Legrand, M., Diawara, B., Legendre, J. -J., and Marcus, P., 2002, "Three-dimensional Modelling of Selective Dissolution and Passivation of Iron-chromium Alloys," *Corrosion Science*, Vol. 44, pp. 773~790.
- (8) Rajurkar, K. P., Kozak, J., and Wei, B., 1993, "Study of Pulse Electrochemical Machining Characteristics," *Annals of the CIRP*, Vol. 42/1, pp. 231~234.