

절연 전극을 이용한 미세 전해 가공

박병진*(서울대 대학원 기계항공공학부), 김보현(서울대 정밀기계설계공동연구소),
주종남(서울대 기계항공공학부)

Micro Electrochemical Machining Using Insulated Electrode

B. J. Park(Sch. of Mech. and Aero. Eng., SNU), B. H. Kim(Institute of Adv. Machinery and Design, SNU),
C. N. Chu(Sch. of Mech. and Aero. Eng., SNU)

ABSTRACT

In the micro electrochemical machining (MECM) using ultra short pulses, the machining rate is closely related to the tool electrode area. The machining rate varies according to the machining depth or the immersion depth. When using insulated tool electrodes, those depths do not matter. In addition, micro structures with high machining depth can be fabricated because the machining characteristics do not vary with the machining depth. Another advantage of insulated electrodes is prevention of taper shape. Micro structures with high machining depth or high aspect ratio were fabricated using insulated tool electrodes.

Key Words : Micro electrochemical machining (미세 전해 가공), Insulated electrode (절연 전극), Taper (테이퍼), Micro structure (미세 구조물)

1. 서론

미세 전해 가공(micro electrochemical machining)은 전해액 속에서 두 전극 사이에 초단 펄스를 인가하여 재료를 원하는 부위에서만 전기 화학 반응이 일어나도록 함으로써 미세 형상을 제작하는 기술이다.¹ 두 전극 사이에 전위를 인가하면 각 전극 계면의 전기 이중층(electrical double layer)에서 전위차가 생기는데 이에 의한 전기화학 반응으로 재료를 용해시키는 방법이다.² 펄스파를 이용하면 가공물을 선택적으로 용해시키는 것이 가능하여 미세 가공에 응용되고 있다.^{1,3} 이 때 전기화학적 반응 속도는 계면의 전기 이중층에 충전되는 전위차에 의해서 결정되며 그 전위차는 국부적으로 전극 사이의 거리에 따라 달라진다.

전극 사이의 거리가 먼 부분에서는 가공이 일어나지 않더라도 실제적으로는 가공 부위 이외에서도 전류가 흐르게 된다. 가공 부위 이외로 흐르는 전류를 줄이기 위하여 공구의 윗부분을 코팅한 전극을 공구로 사용하기도 한다.⁴ 이러한 전류를 최소화

하고 가공 전류의 거동을 관찰하기 위해서는 공구의 옆면을 완전히 절연할 필요가 있다. 또한 절연을 하였을 경우 공구의 옆면을 통해서 가공이 일어나지 않으므로 테이퍼 형상을 방지할 수 있다. 직류 전압을 사용하는 범용 전해 가공에서도 전류 밀도를 높이기 위해 옆면이 절연된 전극을 사용한다. 이 때에는 가공 간극이 비교적 크기 때문에 절연 두께의 문제가 작지만 미세 가공에서는 가공 간극이 수 마이크로미터 이내이므로 얇은 절연막이 필요하다.

이 논문에서는 절연되지 않은 전극을 공구로 사용하였을 때 나타날 수 있는 문제점과 가공 안정성을 위한 절연의 효과를 살펴보았다. 전극의 절연을 위해 필요한 사항을 조사하였고, 미세 전해 가공에 적합한 얇은 절연막을 얻을 수 있는 방법을 제시하였다. 이렇게 제작된 절연 전극을 이용하면 가공 깊이에 따른 문제가 줄어들기 때문에 세장비가 높은 구조물을 제작할 수 있다. 또한 테이퍼가 나타나지 않으므로 미세 격벽이나 채널을 제작할 때 유용함을 보였다.

2. 가공 시스템 및 전극 절연

2.1 실험 장치

미세 전해 가공 시스템의 개략도는 Fig. 1 과 같다. 전해 가공 셀은 시편, 공구, 기준 전극 및 상대 전극으로 구성되고, 각 전극에 전위를 인가하기 위한 일정전위기(potentiostat)와 펄스 제너레이터로 구성된다. 시편은 304 스테인리스강(Cr 18%, Ni 8%)을 사용하였고, 공구는 텅스텐 카바이드(WC) 전극을 사용하였다. 위 두 금속은 전위에 따라 부동화(passivation)⁵되는 특성이 있어서 일정전위기(model 366A, AMETEK PAR)를 사용하여 가공 중 산화막이 발생되지 않도록 안정한 전위($\Phi_{work} = 0.4 V_{Pt}$, $\Phi_{tool} = -0.05 V_{Pt}$)에 있도록 조절하였다. 기준 전극(reference electrode)과 상대 전극(counter electrode)은 백금 전극을 사용하였고, 전해액으로는 0.1 M 황산 용액을 사용하였다. 황산 용액은 가공 시 전해 생성물을 남기지 않아 미세 가공에 적합하며 마이크로 단위의 가공 간극을 얻기 위해 낮은 농도를 사용하였다.⁶ 펄스 제너레이터(AVPP-1-B, Avtech)는 일정전위기의 전위에 펄스를 중첩하여 공구 전극 쪽으로 연결하였고, 공구와 시편 사이의 전위차를 실시간으로 측정하여 단락의 발생 여부에 따라 이송을 조절하였다. 전극의 이송은 0.1 μm 의 분해능을 갖는 3축 스테이지에서 제어하였다.

미세 전해 가공을 위한 미세 전극은 방전 가공법(electrical discharge machining)을 이용하여 제작하였다. 전극 재료는 열 및 전기 전도도가 좋아야 하고 강성이 커서 가공 중에 변형이 일어나지 않아야 한다. 텅스텐 카바이드는 이러한 특성을 만족하므로 공구 전극으로 사용하였다. 미세 전극의 제작은 와이어 방전 가공을 이용하여 필요한 직경을 가지도록 제작한 후 전해 가공에 공구로 사용하였다.

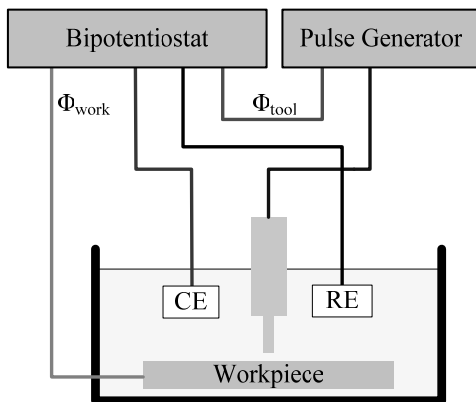


Fig. 1 Schematic diagram of micro electrochemical machining system

2.2 전극 절연

미세 전해 가공에 효과적으로 절연된 전극을 사용하기 위해서는 몇 가지 조건이 먼저 충족되어야 한다. 절연 재료가 금속으로 된 전극에 잘 접착되어야 하고, 산성 용액에서 가공이 이루어지므로 내식성을 갖춰야 한다. 그리고 미세 전해 가공에서 가공 간극이 매우 작으므로 절연 두께를 그 이하로 할 수 있어야 한다. 절연 후 가공에 사용될 부위는 다시 노출되어야 하는데 이 때에도 방전 가공을 이용하였다. 따라서 방전 가공액에도 안정한 재료가 필요하다. 이를 만족시키는 절연 재료로서 에나멜(enamel or lacquer)을 이용하였다. 에나멜은 니트로셀룰로스(nitrocellulose), 용제 및 고형제로 이루어진 것으로, 금속에 잘 접착되고 위의 용액에 내식성을 가지고 있다. 에나멜은 공기 중에서 아세트이트나 에탄올과 같은 용제가 휘발된후 수 분 이내에 고형화되므로 간단한 방법으로도 절연막을 형성시키는 것이 가능하다.

전극 절연 순서는 다음과 같다. 먼저 와이어 방전 가공으로 제작된 전극을 위로 세워놓는다. 그리고 에나멜과 아세톤을 3 대 1의 부피비로 혼합한 후 전극 위에 한 방울 떨어뜨린다. 에나멜의 점성이 높을 경우 절연막이 두꺼워질 수 있으므로 적당한 두께로 균일하게 절연이 되도록 실험적으로 혼

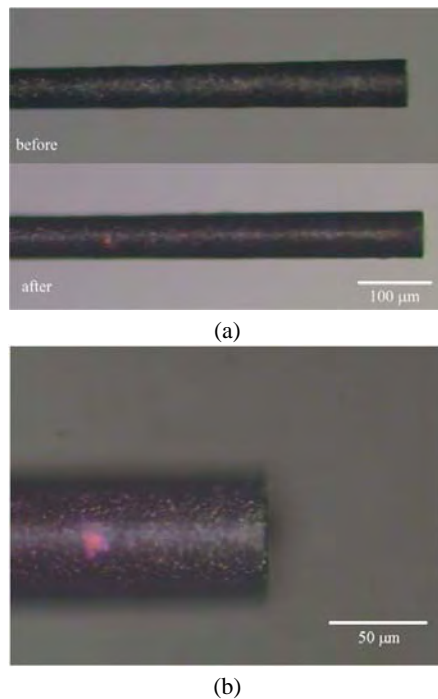


Fig. 2 Insulated tool electrode: (a) before and after insulation, (b) enlarged view

합비를 결정하였다. 에나멜을 수 분 동안 말리면 절연막이 생기는데 전해 가공에 필요한 전극 아래 쪽 면에도 에나멜이 남는 경우가 생긴다. 이를 제거하기 위하여 아래쪽 면을 방전 가공으로 재료를 약간 가공하였다. 방전 가공 중에는 고온의 열이 발생하는데 이 때 에나멜이 전극 재료와 함께 순간적으로 증발되므로 몇 번의 방전 만으로도 제거가 된다. Fig. 2는 이러한 방법으로 제작된 절연 전극이다. Fig. 2(a)와 같이 원래의 전극에 비해 두께는 3~4 μm 정도로 유지되었으며, 미세 전해 가공 시 보통 5 μm 정도의 가공 간극을 가지는 가공 조건에서 충분히 전해 가공이 가능하다. Fig. 2(b)에서 전극의 옆면이 충분히 절연되어 있음을 확인할 수 있다.

3. 절연 전극의 특성

절연되지 않은 전극을 공구로 사용하였을 때는 용액 속에 잠겨있는 공구 전극의 면적에 따라 가공 속도가 달라진다. 그리고 가공 깊이가 커질 경우에도 비슷한 원리로 가공 속도는 감소하게 되는데 어느 한도 이상이 되면 거의 가공이 되지 않는다. 이는 가공 부위 이외에서도 펄스에 의해 전기 이중층에서 충전과 방전을 반복하면서 전류를 소모하는 것으로 생각할 수 있다. 또한 가공 깊이가 커지면 전해 셀의 임피던스가 감소하여 실제로 펄스 제너레이터에서 인가한 전압보다 낮은 전압이 걸리게 되는데, 이에 따라 가공 특성이 달라질 수 있다. 따라서 공구 면적과 가공 속도와의 밀접한 관계가 있으며, 전극을 절연하면 높은 가공 속도를 얻고 가공 깊이의 제한을 없앨 수 있다.

Fig. 3은 절연 전극을 사용하였을 때의 펄스 파형이다. 이와 같은 파형은 가공 깊이에 따라 일정하게 유지되며 실제 측정되는 전압도 깊이에 따라 줄어들지 않았다. 전류의 크기도 비절연 전극에 비해서 절반 이하로 나타났다. 가공 영역 만으로 전류가 흐르기 때문에 전극의 옆면이 잘 절연되었음을 확인할 수 있다.

공구 전극이 절연되어 있지 않으면 전극의 옆면으로도 가공이 일어나게 된다. 일반적으로 초단 펄스를 사용하는 미세 전해 가공에서는 가공 간극이 가공 시간에 따라 달라지는데, Fig. 4에서와 같이 가공 시간이 증가할수록 가공 간극이 커지며 어느 정도 진행되면 간극은 수렴한다. 따라서 비절연 전극으로 깊이 방향으로 가공할 경우 가공되는 형상의 옆면에 테이퍼 형상이 남게 된다. 그러나 절연 전극은 한번 가공된 부분에서는 다시 가공이 일어나지 않으므로 테이퍼가 나타나지 않는다. 그래서 절연 전극을 사용할 경우 가공 깊이의 제한이 없을 뿐만 아니라 형상 정밀도를 높일 수 있다.

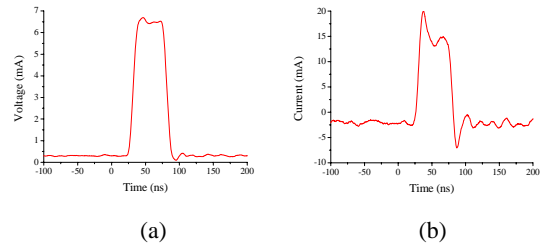


Fig. 3 Pulse shape of insulated tool electrode (ϕ 65 μm , pulse: 6 V, 50 ns / 1 μs): (a) voltage, (b) current

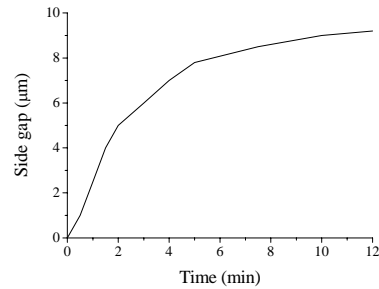


Fig. 4 Side gap variation with machining time (ϕ 65 μm , initial gap: 1 μm , pulse: 6 V, 50 ns / 1 μs)

4. 절연 전극을 이용한 형상 제작

절연 전극은 앞서 살펴본 바와 같은 장점을 가지므로 미세 형상 제작에 유리하다. Fig. 5는 비절연 전극으로 사각 기둥을 가공한 예이다. 테이퍼로 인해 형상이 많이 왜곡되어 원하는 사각 기둥의 형상을 얻을 수 없다. 이와 반대로 절연 전극을 사용했을 때는 Fig. 6과 같이 균일한 폭의 기둥이 성공적으로 제작되었다. 사각 기둥의 크기는 폭 81 μm , 높이 380 μm 이다. 옆면으로 가공이 일어나지 않기 때문에 테이퍼가 생기지 않은 것으로 보아서도 전극 옆면이 확실히 절연되어 있음을 보여 준다. 또한 가공 깊이가 깊어져도 가공 속도가 전혀 감소되지 않았다. 따라서 전극의 길이만 충분하면 가공 깊이의 제한이 없다고 할 수 있다.

Fig. 7은 두 개의 홈을 가공하여 미세 격벽을 제작한 사진이다. 가공 깊이는 약 160 μm 로 테이퍼가 생기지 않기 때문에 세장비가 높은 형상을 제작할 수 있다. 여기에서 격벽의 두께는 15 μm 이다. 각 홈의 가공 간극은 7 μm 로서 절연막은 그보다 얇아서 두께가 적당함을 알 수 있다. 가공 간극이나 홈의 간격을 잘 제어한다면 더 얇은 두께를 가지는 격벽의 제작이 가능하다. 미세 전해 가공은 그 특성상 좋은 표면을 얻을 수 있으므로 가공면의 표면조도가 우수함을 볼 수 있다. 또한 비접촉식 가공 방식으로서 형상에 하중을 가하지 않으므로

로 얇은 형상을 제작하는 데 유리하고 잔류 응력을 남기지 않기 때문에 미세 형상을 제작하는데 좋은 방법이 될 수 있음을 알 수 있다.

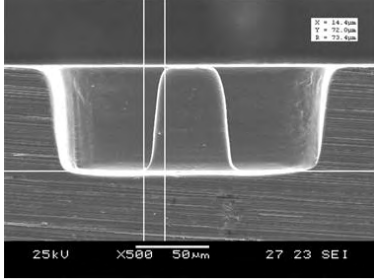
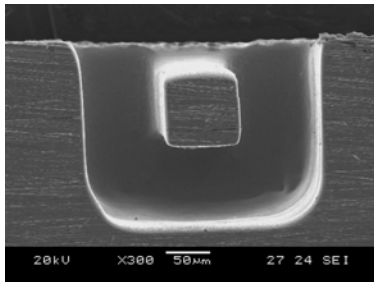
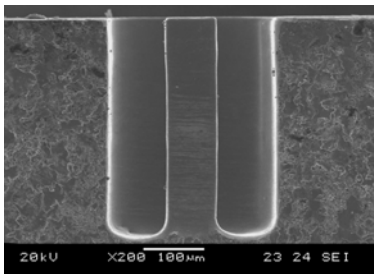


Fig. 5 Taper generation with uninsulated electrode (ϕ 50 μ m, pulse: 6 V, 60 ns / 1 μ s)



(a)



(b)

Fig. 6 Square column with insulated electrode (ϕ 75 μ m, pulse: 7 V, 60 ns / 1 μ s): (a) top view, (b) side view

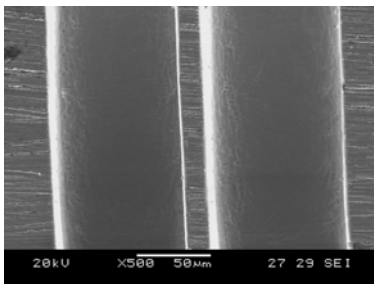


Fig. 7 Micro wall with insulated electrode (ϕ 75 μ m, pulse: 6 V, 60 ns / 1 μ s)

5. 결론

이 논문에서는 절연 전극을 이용하여 전해 가공으로 미세 형상을 제작하였다. 일반적으로 미세 전해 가공에서는 가공 깊이나 침지 깊이에 따라서 가공 속도가 달라지게 된다. 절연 전극을 사용하면 이러한 제약에 구애받지 않으므로 미세 구조물 제작에 도움이 된다. 또한 비절연 전극을 사용했을 때 나타나는 테이퍼 문제가 해결되므로 형상 정밀도를 높일 수 있는 수단이 된다. 에나멜을 사용하여 효과적으로 전극을 절연하였고 절연막의 두께를 수 마이크로미터 이내로 형성시키는데 성공하였다. 이러한 절연 전극을 이용하여 테이퍼 없이 비교적 큰 깊이의 형상을 제작하였다. 절연 전극을 이용하여 금속에 세장비가 높은 다양한 형상의 구조물의 제작을 기대할 수 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부 산업기술개발사업인 “마이크로 전기화학 복합 형상 제거 시스템 개발” 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. 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.
2. Bard, A. J, and Faulkner, L. R., "Electrochemical Methods: Fundamentals and Application," John Wiley & Sons, Inc, New York, 2001.
3. Schuster, R., Kirchner, V., Allongue, P., and Ertl, G., "Electrochemical Micromachining," Science, Vol. 289, pp. 98 - 101, 2000.
4. Cagnon, L., Kirchner, V., Kock, M., Schuster, R., Ertl, G., Gmelin, W. T, and Kuck, H. "Electrochemical Micromachining of Stainless Steel by Ultrashort Voltage Pulses," Zeitschrift für Physikalische Chemie, Vol. 217, pp. 299 - 313, 2003.
5. Kaesche, H., "Corrosion of Metals," Springer, Berlin, 2003.
6. 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.