

전해 가공을 위한 미세 전극 제작

김보현*, 박병진+, 주종남**

Fabrication of Micro Electrodes for Electrochemical Machining

Kim, B. H.*, Park, B. J.+, Chu. C. N.**

Abstract

For micro electrochemical machining (ECM), tool electrodes with various sizes and shapes are necessary. In this paper, tool electrodes were fabricated by micro electrical discharge machining (EDM). Electrode material is tungsten carbide which has high rigidity and good conductivity for micro electrochemical machining. Disk-type and sphere-type electrodes were fabricated to prevent taper shape of side walls or to produce spherical features. Various 3D micro structures were fabricated by electrochemical milling with developed electrodes.

Key Words : Micro electrochemical machining(미세 전해 가공), Micro electrical discharge machining(미세 방전 가공), Disk-type electrode(디스크형 전극), Sphere-type electrode(구형 전극), Tungsten carbide(텅스텐 카바이드)

1. 서론

미세 전해 가공(micro electrochemical machining)은 금속에 미세 형상의 제작이 가능한 특수 가공법의 하나로서 전극의 마모가 없고 재료에 잔류 응력을 남기지 않으며 가공 간극이 작아서 매우 정밀한 형상을 제작하는데 유리하다. 전해 가공은 전해액 안의 두 전극 사이에서 전위를 걸어줄 때 생기는 용해 반응을 이용한 것으로 공구 전극에는 시편의 용해에 대한 상대 반응(counter reaction)으로 수소

발생이 일어난다.⁽¹⁾ 극초단 펄스를 이용한 미세 전해 가공에서는 수 마이크로미터 이하의 정밀도로 공구의 형상을 시편에 전사하는 것이 가능하며⁽²⁾, 가공 형상 크기 정도를 갖는 미세 전극이 필요하다. 미세 전극은 수십 마이크로미터의 직경을 갖는 와이어를 사용하거나 재료를 전기화학적으로 에칭(etching)⁽³⁾하여 제작할 수 있고 방전 가공 등을 이용하여 만들 수 있다. 이 중에서 방전 가공(electrical discharge machining)은 임의의 직경을 가진 전극을 제작할 수 있을 뿐만 아니라 직경이 변하는 다양한 형상을 제

* 주저자, 서울대학교 정밀기계설계공동연구소 (ssborry@plaza1.snu.ac.kr)

주소: 151-744 서울 관악구 신림9동 서울대학교 공과대학 301동 1315호

+ 서울대학교 대학원 기계항공공학부

++ 서울대학교 기계항공공학부

작하는 것이 가능하다. 본 논문에서는 미세 전해 가공에 필요한 다양한 형상의 전극을 미세 방전 가공법을 이용하여 제작하고 실제 미세 전해 가공에서 공구 전극으로 사용하여 미세 전해 가공에 적합하게 응용될 수 있음을 알아보았다.

2. 실험 장치

미세 전해 가공을 위한 시스템은 Fig. 1과 같다. 전해 가공 시스템은 시편, 공구 및 보조 전극과 펄스 제너레이터(50 MHz, TARBO), 전류 및 전압 측정을 위한 오실로스코프(300 MHz, Tektronix)로 구성되어 있다. 전해액은 0.1 M 황산 용액을 사용하였으며, 시편으로 스테인리스강(STS 304)에서 전해 가공으로 미세 형상을 제작하였다.⁽⁴⁾ 또한 전극의 회전축을 포함한 4축 스테이지에서 방전 및 전해 가공을 연속적으로 수행할 수 있도록 구성하였다. 두 가공 방법에 따르는 전기 회로와 가공 수조를 별도로 구성하였고, 방전 가공으로 제작된 전극은 바로 전해 가공에 이용할 수 있도록 하였다. 가공 중 전기적 접촉에 의한 전압 강하를 모니터링하여 가공 간극을 일정하게 유지하였다. 전극의 이송을 위한 Z축 스테이지 위에는 V 홈을 위치시켜서 만드렐 방식(mandrel type)의 카트리지 주축을 장착할 수 있도록 하여 위치 오차 없이 전극을 용이하게 교체할 수 있도록 하였다.

공구 전극의 재료는 방전 가공을 이용하여 제작할 때와 전해 가공에 사용될 때를 모두 고려하여 선정하였다. 전해 가공에서의 공구가 갖추어야 할 조건은 열 및 전기 전도도가 좋아야 하고 강성이 커서 가공 중에 변형이 없어야 한다. 또한 실험에 필요한 미세 전극을 위해 미세 가공이 용이한 재료여야 한다. 본 실험에서는 전해 가공과 방전 가공으로 제작이 가능하고 강성이 우수한 텅스텐 카바이드(WC)를 방전

사용하였다. 미세 전극의 제작은 Fig. 2와 같이 미세 와이어 가공(wire EDM)⁽⁵⁾을 이용하였다. 미세 와이어 방전은 앞서 설명한 바와 같이 기계적 가공 특성과 무관하게 다양한 재료를 가공할 수 있으며 다양한 형상의 전극을 비교적 쉽게 가공할 수 있다. Fig. 3은 와이어 방전 가공을 이용해서 지름 20 μm , 길이 300 μm 의 미세 전극을 제작한 사진이다.

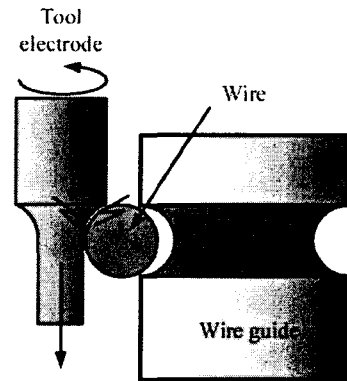


Fig. 2. Schematic diagram of wire EDM

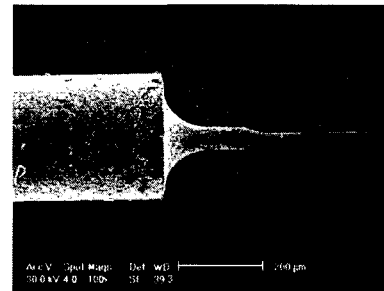


Fig. 3. Micro electrode fabricated by wire EDM (WC, 20 μm)

3. 디스크형 전극

3.1 전해 가공의 테이퍼 발생

전해 가공에서 전극과 가공물을 가깝게 위치시키고 전위를 걸어주면 전위를 인가해 준 시간이 길수록 가공량이 증가한다. 그 예로서, 전해 가공으로 구멍을 가공할 때 입구 측의 지름이 출구 측의 지름보다 크게 가공된다. 이는 입구 측의 전해 시간이 출구 측의 시간보다 길기 때문이다.⁽⁴⁾ 이러한 현상은 정확한 치수가 필요한 구멍 가공이나, 테이퍼가 없는 3차원 형상 가공을 위해서는 해결해야 될 문제이다.

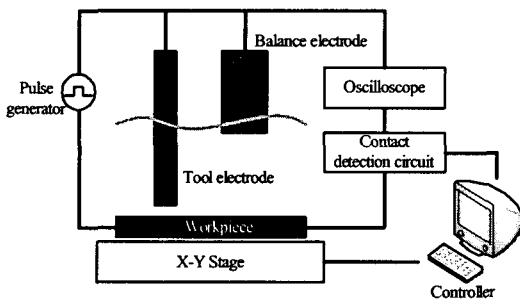


Fig. 1. Schematic diagram of ECM system

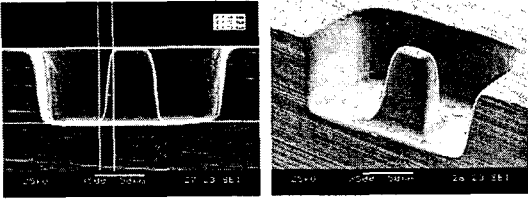


Fig. 4. Micro column machined with cylindrical electrode

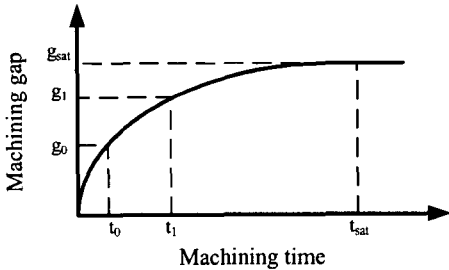


Fig. 5. Machining gap according to machining time

Fig. 4는 미세 원형 전극을 사용하여 스테인리스 강(STS 304)에 미세 기둥(micro column)을 가공한 예이다. 수 μm 의 깊이로 한 층씩 가공하였다(layer-by-layer machining). 처음 가공한 층에서의 가공 시간은 마지막으로 가공한 층보다 길기 때문에 간극이 더 커지게 된다. 따라서 Fig. 4에서 보듯이 테이퍼 형상이 가공된다.

Fig. 5는 가공 시간에 따른 간극 변화를 도식적으로 나타낸 것이다. 가공 간극은 가공 시간에 따라 점차 증가하는데 가공 초기(t_0), 즉 전극과 가공물의 간극이 좁을 때는 가공 속도가 가장 빠르고 가공이 진행되면서 간극이 넓어지면 속도는 점차 감소하여 어느 일정 거리(g_{sat}) 이상이 되면 가공이 더 이상 이루어지지 않는다.

가공 간극이 어느 일정 거리 이상이 되면 가공이 일어나지 않는 현상에 착안하여 전극 옆면에서 가공이 일어나 않도록 미세 전극의 형상을 디스크 형상으로 만들어 사용하면 테이퍼 형상을 막을 수 있다. 이 개념을 Fig. 6에 나타내었다. 전극의 디스크 형상 때문에 최종 간극은 가공 초기의 간극 g_0 로 유지되고 더 이상 늘어나지 않기 때문에 테이퍼를 방지할 수 있다.

3.2 디스크 전극 제작 및 응용

디스크 형상의 전극은 미세 방전 가공을 이용하여 제작하였다. 원기둥형의 전극을 와이어 방전 가공을 이용하여 가공한 뒤 Fig. 7과 같이 두께 $100 \mu\text{m}$ 의 금속판을 이용하여 디스크 형상으로 제작하였다. 먼저 전기적 접촉을 이용하여

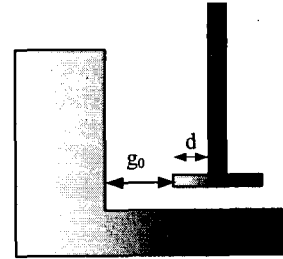


Fig. 6. Taper reduction by disk-type electrode

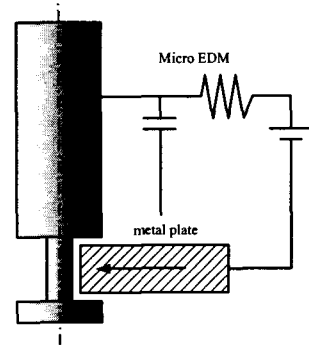


Fig. 7. Fabrication of disk-type electrode

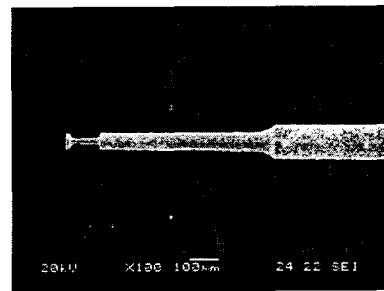


Fig. 8. Disk-type electrode

전극과 금속판의 상대적 위치를 측정하여 다음 전극 반경 방향으로 $10 \mu\text{m}$ 만큼 가공하였다. 이 때 금속판에도 마모가 일어나므로 그 마모만큼의 보정을 해 주어야 한다. 가공량이 매우 적으므로 가공 시간은 1~2분 정도가 소요되었다. Fig. 8은 이와 같은 방법으로 제작한 디스크 형상 전극이다. 디스크의 두께는 작을수록 좋지만 너무 얇으면 가공 도중 단락이 발생할 경우 변형이 될 우려가 있으므로 두께를 약 $10 \mu\text{m}$ 가 되도록 가공하였다.

Fig. 9은 미세 디스크형 전극으로 스테인리스 강 (STS 304)에 전해 가공을 이용하여 미세 형상 가공을 한 예이다. 폭 $40 \mu\text{m}$, 깊이 $20 \mu\text{m}$, 높이 $85 \mu\text{m}$ 의 미세 기둥을 제작하

였다. 지름 65 μm 의 디스크 형상 전극을 사용하였으며 전해 가공 전원으로 6 V 전압, 60 ns 폭과 1 μs 주기를 갖는 펄스를 사용하여 인가하였다. 사진에서 볼 수 있듯이 가공물의 테이퍼는 무시할 만큼 작아졌다. 이와 같이 디스크형 전극을 이용하면 원기둥형 전극으로 가공하는 경우와 달리, 테이퍼가 생기지 않기 때문에 높은 세장비의 미세 구조물을 가공하는 데 유리하다는 것을 알 수 있다.

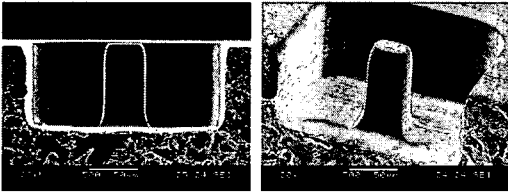


Fig. 9. Micro column machined with disk-type electrode

4. 구형 전극

4.1 구형 전극의 필요

3차원의 임의 곡면이나 구형의 형상을 제작하기 위해서는 전극의 형상을 구형으로 하는 것이 유리하다. 또한 미세 전해 구멍 가공 시에는 공구 끝이 평평한 것 보다는 둥글게 되어 있는 것이 구멍 안쪽으로 이온 공급을 원활하게 하는데 유리하기 때문에 구형의 전극을 제작할 필요가 있다.⁽⁴⁾ 구형 전극의 제작에 관한 연구들은 주로 방전 가공 방법을 이용하였다. Sheu⁽⁶⁾는 높은 단발 방전 에너지를 사용하여 전극 끝부분을 일시적으로 녹임으로써 구형 전극을 만들었으나 텅스텐 카바이드에는 구형의 제작이 어려웠으며, Kim 등⁽⁷⁾은 방전 가공 시 생기는 전극의 마모와 모서리의 방전 집중 현상을 이용하여 반구형 전극을 제작하였다. 그러나 이러한 방법들은 전극 재료나 가공 조건에 따른 기초 연구를 필요로 하고 와이어 방전 가공 외에 추가적인 공정이 필요하다. 여기에서는 와이어 방전 가공만을 이용하여 비교적 간단하게 구형의 전극을 제작하였다.

4.2 구형 전극의 제작 및 응용

구형 전극의 제작 순서는 Fig. 10과 같다. 먼저 높은 축전 용량을 사용하여 전극의 아래 부분을 평평하게 한 후 전극의 옆면을 가공하여 전극의 크기를 줄인다. 다음으로 낮은 축전 용량을 사용하여 와이어를 지정된 이송 명령에 따라 원형으로 움직여서 구형 전극을 제작한다. 이송 명령은 제작하고자 하는 전극의 크기와 가공 간극, 그리고 와이어의 반지름을

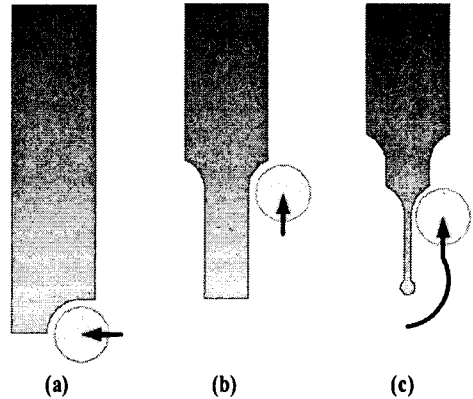
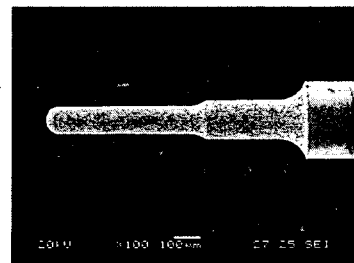


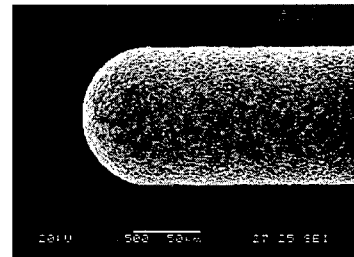
Fig. 10. Fabrication of sphere-type electrode by wire EDM: (a) flattening (b) rough cutting (c) finishing

고려하여 프로그래밍 하였다. 방전 가공 조건은 80 V의 전압을 사용하고 축전 용량은 황삭에서 4600 pF, 정삭에서 600 pF를 사용하였다. 실험에 사용된 와이어는 직경 200 μm 의 구리 와이어이고, 전극은 300 μm 직경의 텅스텐 카바이드이다.

위와 같은 방법으로 먼저 Fig. 11과 같이 반구형 전극을 제작하였다. 가공된 반구의 지름은 100 μm 이다. Fig. 11(b)는 반구 부분을 확대한 것으로 진원에 가까운 형태의 전극을 제작 가능함을 알 수 있다. Fig. 12는 약 60 μm 의 지름을 가지는 구형 전극을 제작한 것이다. 여기서 목 부분의 직



(a)



(b)

Fig. 11. Hemispherical electrode by wire EDM

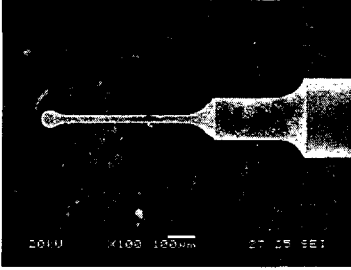


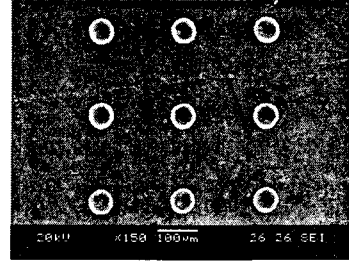
Fig. 12. Spherical electrode by wire EDM

경은 $28\ \mu\text{m}$ 이다. 두 경우에서 모두 정상 시 가공 간극은 약 $5\ \mu\text{m}$ 로 일정하게 유지되었다.

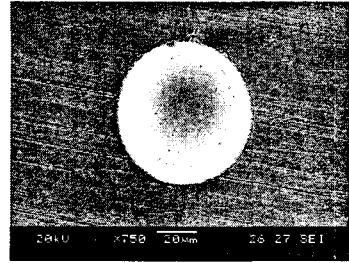
미세 가공으로 반구 형상을 제작하기 위해서는 구형의 전극을 공구로 사용하여야 한다. 위에서와 같이 제작된 공구를 가지고 미세 전해 가공을 이용하여 스테인리스강에 미세 형상을 제작하였다. Fig. 13은 지름 $50\ \mu\text{m}$ 의 구형 전극을 그대로 전사하여 반구형의 형상을 얻은 것이다. 미세 전해 가공 조건으로는 $6\ \text{V}$ 펄스 전압, $50\ \text{ns}$ 펄스 폭, $1\ \mu\text{s}$ 의 펄스 주기를 사용하였고 전극의 반지름만큼 깊이 방향으로 가공하였다. 9 개의 반구 형상이 동일한 크기로 재현됨을 볼 수 있다. 가공된 반구 형상의 지름은 약 $60\ \mu\text{m}$ 이다. 전해 가공법은 방전 가공과 달리 공구의 마모가 없기 때문에 하나의 공구를 사용하여 계속 가공할 수 있으며 가공 형상의 크기가 그대로 유지된다. 또한, Fig. 13(b)에서 보는 바와 같이 전해 가공의 장점으로서 표면이 우수한 반구 형상을 얻을 수 있다. 반구 형상뿐만 아니라 타원과 같이 곡률이 변하는 형상도 와이어 방전 가공을 이용하여 전극을 만들어 전사시키면 충분히 제작이 가능하다. 그리고 전해 밀링의 방법으로 3차원 형상을 제작할 수 있다. Fig. 14는 공구 전극을 3차원 이송시킴으로써 $100\ \mu\text{m}$ 의 직경을 갖는 반구 형상을 제작한 것이다. 구형 전극도 디스크형 전극과 마찬가지로 테이퍼를 방지하는데 유리하기 때문에 임의의 형상을 가공할 때에도 일정한 크기의 가공 간극을 유지하는 것이 가능하다.

5. 결론

미세 전해 가공에 필요한 전극을 제작하기 위해 방전 가공을 이용하여 여러 형상의 전극을 제작하였다. 전해 가공에서는 가공 시간에 따라 가공 간극이 커져서 벽면에 테이퍼 형상이 나타날 수 있는데 이를 방지하기 위해서 디스크형 전극을 제작하였다. 디스크형 전극을 사용하여 테이퍼



(a)



(b)

Fig. 13. (a) Micro hole array machined with sphere-type electrode
(b) half spherical shape

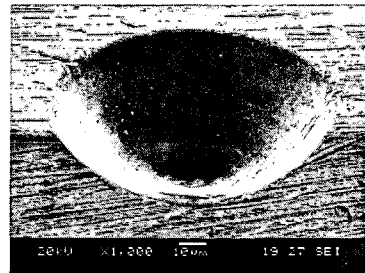


Fig. 14. Half sphere by electrochemical milling with sphere-type electrode

없이 높은 세장비를 가지는 구조물을 제작할 수 있다. 또한 구형 전극을 이용하여 테이퍼를 방지할 수 있을 뿐만 아니라 곡률을 가진 형상을 제작할 수 있다. 여러 형태의 전극을 바꿔서 사용함으로써 복합적인 구조물이나 형상을 제작할 때에도 유용할 것이다.

후 기

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

참고 문헌

- (1) McGeough, J. A., 1974, *Principles of Electrochemical Machining*, Chapman and Hall, London, pp. 1~6.
- (2) Trimmer, A. L. and Schuster, R., 2003, "Single-step Electrochemical Machining of Complex Nanostructures with Ultrashort Voltage Pulses", *Applied Physics Letter*, Vol. 82, No. 19, pp. 3327~3329.
- (3) Choi, S. H., Ryu, S. H., Choi, D. K. and Chu, C. N., 2004, "WC Micro-shaft Fabrication Using Electrochemical Etching", *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 21, No. 6, pp. 172~178.
- (4) Ahn, S. H., Ryu, S. H., Choi, D. K. and Chu, C. N., 2004, "Electro-chemical Micro Drilling Using Ultra Short Pulses", *Precision Engineering*, Vol. 28, pp. 129~134.
- (5) Masuzawa, T., Fujino, M. and Kobayashi, K., 1985, "Wire Electro-Discharge Grinding Method", *Annals of the CIRP*, Vol. 34, No. 1, pp. 431~434.
- (6) Sheu, D. Y., 2005, "Micro-spherical probes machining by EDM", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 15, pp. 185~189.
- (7) Kim, G. H. and Chu, C. N., 2001, "Half Spherical Electrode Machining in Micro EDM", *Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference*, pp. 1080~1084.