

초단 펄스를 이용한 미세 전해 가공



김보현

안동대학교 기계공학부



주종남

서울대학교 기계항공공학부

전해 가공(electrochemical machining, ECM)은 가공물의 기계적 성질에 무관하게 화학적으로 가공하는 방법이므로 난삭재 가공 등에 많이 이용되어 왔으며, 표면의 다듬질 공정으로 많이 사용되어 왔다. 하지만 가공물과 공구 전극의 간극이 방전 가공과 같은 다른 가공법에 비해 상대적으로 커서 미세 가공에 적용하는 것이 쉽지 않았다. 하지만 최근 펄스 폭이 수 십 나노 초(nano-second) 정도의 초단 펄스를 전원으로 사용하여 간극을 수 마이크로 미터로 떨어뜨릴 수 있는 기술이 개발되어 전 세계적으로 연구가 활발히 진행되고 있다.^[1-3] 이 글에서는 현재까지 개발된 미세 전해 가공 기술과 그 가공 예에 대해 기술하고자 한다.

1. 초단 펄스를 이용한 전해 가공의 원리

전해액 속에 금속 전극을 담그면 전극의 표면에서의 이

온 분포로 인해 그림 1과 같이 전기 이중층(double layer)이 생기게 되는데 이는 콘덴서와 같은 기능을 한다.^[4] 따라서 전기 이중층은 그림 2와 같이 저항과 콘덴서로 구성된 회로로 근사화할 수 있다. 이 때 공구 전극과 가공물 사이의 거리에 따라 용액 저항이 작은 곳과 큰 곳이 구별된다. 펄스 폭이 매우 작은 전압 펄스를 인가하면, 그림 3과 같이 전극과 가공물 사이의 용액 저항이 가장 작은 곳에서부터 전기 이중층이 충전이 되고 용액 저항이 큰 곳에서는 천천히 충전이 된다. 전극과 가공물 사이의 거리가 가장 가까운 곳에서는 용액 저항이 가장 작기 때문에 먼저 충전이 이루어지고 이로 인해 가공물에서 화학 반응이 일어나게 된다. 하지만 거리가 먼 곳에서는 충전이 충분히 이루어지기 전에 펄스가 끊어지도록 하면 화학 반응을 억제할 수 있다. 따라서 펄스 폭을 조절하면 그림 4와 같이 가공물과 가까운 공구 전극의 끝에서만 가공이 일어나게 할 수 있다.

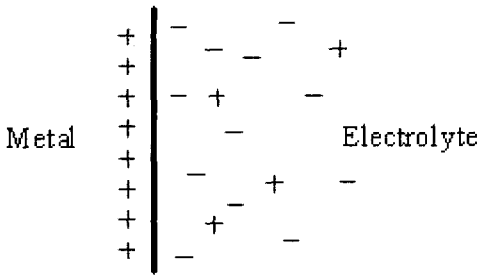


Figure 1. Metal-solution interface

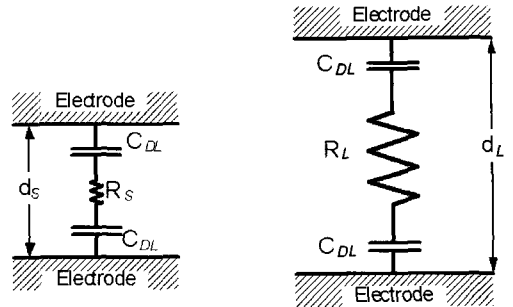


Figure 2. The double layer model

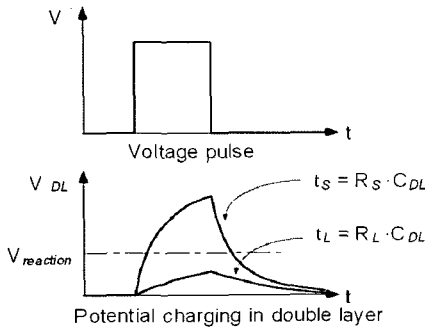


Figure 3. Charging in the double layer

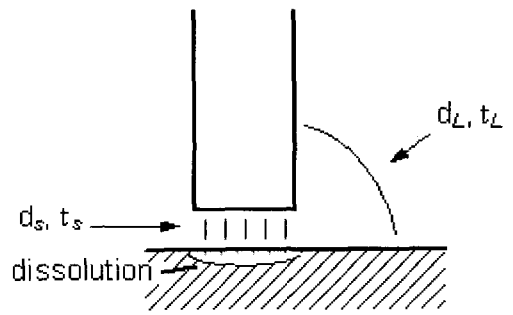


Figure 4. Restriction of electrochemical dissolution

2. 전해 가공 시스템 구성

그림 5에 전해 가공 시스템을 나타내었으며 일정전위기 (potentiostat), 펄스 발생기, X-Y-Z 이송장치, 그리고 공구 전극, 가공물, 전해셀(cell)로 구성되어 있다. 일정전위기는 가공물 전체의 부식을 막고 동시에 부동태화 (passivation)를 방지하기 위해 공구 전극과 가공물의 전위를 조절하는 기능을 한다. 펄스 발생기는 가공물에 초단 펄스 전압을 인가한다. 일반적으로 미세 가공을 위해서는 수 십 나노 초의 펄스를 사용하게 된다. 공구 전극의 재료로는 백금, 텅스텐, 초경 합금 등이 사용된다. 이러한 전극은 전해 에칭이나 방전 가공으로 수 마이크로 미터에서 수 십 마이크로 미터 크기로 가공되어 사용된다.

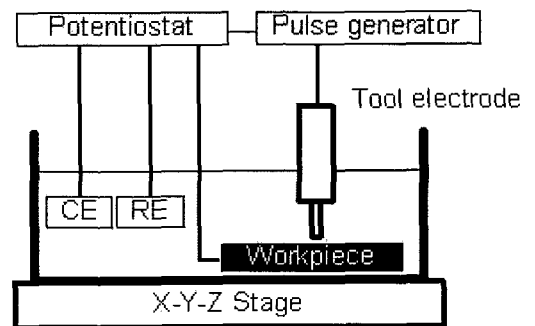


Figure 5. Experimental system
(CE: counter electrode, RE: reference electrode)

3. 가공 재료와 전해액

전해 가공은 가공물의 전기 화학적 반응을 이용하여 가공하는 방법이므로 가공물의 화학적 특성에 따라 가공 여부가 결정된다. 현재까지 초단 펄스를 이용한 미세 전해 가공법으로 구리^[1], 스테인리스 강^[2,5], 니켈^[3], 초경합금^[6], p-type 실리콘^[7] 등을 가공한 예가 보고되어 있으며, 그림 6에 그 예를 나타내었다. 또한 전해 가공에서는 가공물 재료에 따라 필요한 전해액의 종류가 달라지게 된다. 표 1은 가공물 종류에 따라 사용되는 전해액을 나타낸 것이다. 전해액의 농도는 가공 정밀도나 가공 속도 등에 따라 결정된다. 현재까지 연구된 전해액은 표 1과 같다.

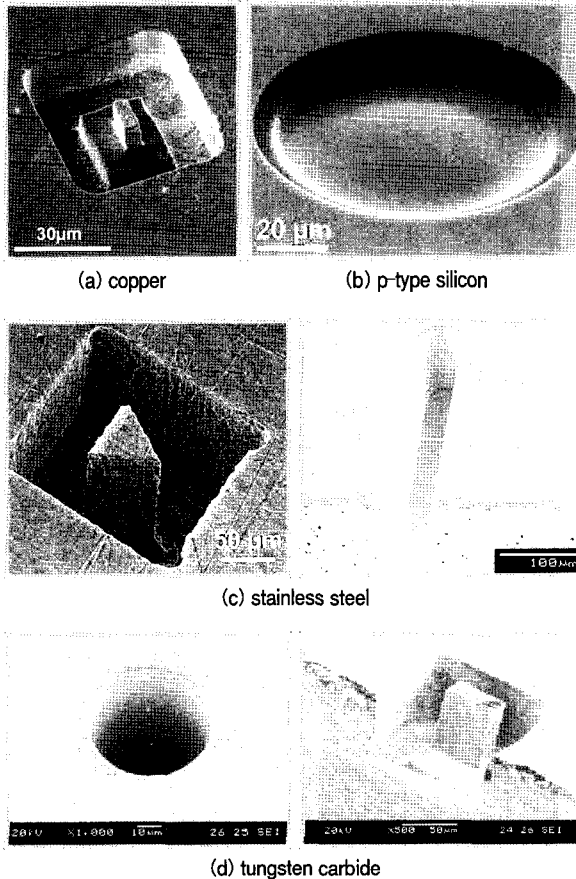


Figure 6. Examples of micro ECM on different materials

Table. 1 Electrolytes used for ECM

Workpiece material	Electrolyte
Copper	0.01 M HClO ₄ + 0.1 M CuSO ₄
Nickel	0.5 HCl
Stainless steel	3 M HCl + 6 M HF 0.1 M H ₂ SO ₄
Tungsten carbide	0.5 M NaNO ₃ + 0.2 M H ₂ SO ₄
p-type silicon	5 M HF + 0.1 M H ₂ SO ₄

4. 전해 가공을 이용한 미세 형상 가공

4.1 미세 전해 드릴링

미세 구멍은 마이크로 부품이나 장치에 가장 기본이 되는 요소이다. 스테인리스 강과 같은 고강도 재료에 10 마이크로 미터 내외의 고품질의 구멍을 가공할 수 있는 기술은 미세 드릴링, 방전 가공 또는 레이저 가공 등을 예를 들 수 있지만, 이들 또한 적용하기 쉬운 기술은 아니며, 드릴링과 방전 가공은 공구의 마모로 인해 그 어려움이 증가한다. 공구 크기가 작으면 작을수록 공구의 마모는 중요한 문제가 된다. 한편 전해 가공은 전기 화학적 반응을 이용한 가공법이므로 공구가 마모되지 않는다는 장점이 있다. 따라서 미세한 전극을 한번 만들면 공구 교체 없이 계속 사용할 수 있다. 그림 7은 50 µm 두께의 스테인리스 강에 전해 가공법으로 지름 15 µm의 구멍을 가공한 예이다. 전해 에칭으로 가공된 지름 약 10 µm의 초경합금 전극을 사용하였다. 공구 전극이 사용되었다. 공구 전극의 지름이 매우 작기 때문에 가공 중 발생하는 기포에 의해서도 쉽게 흔들리며 따

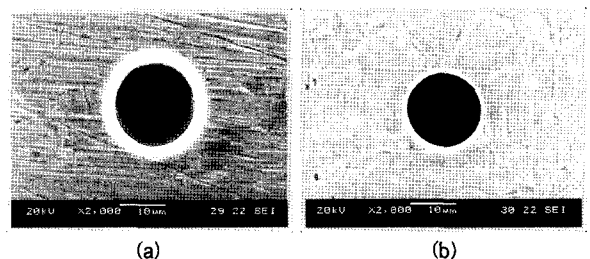


Figure 7. Micro hole machined by ECM (a) hole entrance, (b) hole exit (304 SS, ϕ 15 μ m, 50 μ m depth, 5 V, 40 ns, 0.05 μ m/sec).

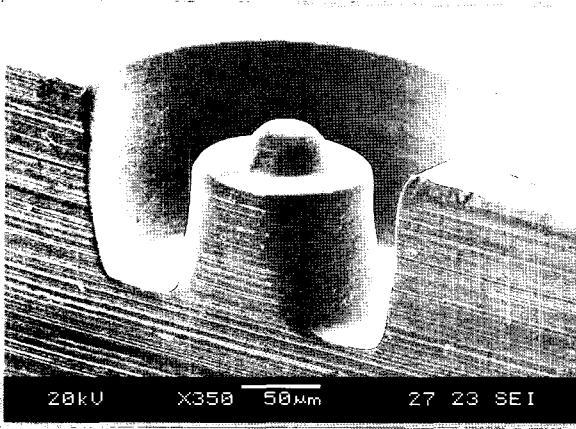


Figure 8. Micro hemisphere with 60 μm diameter on stainless steel (304 SS) (1 MHz, 6 V, 60 ns pulses used).

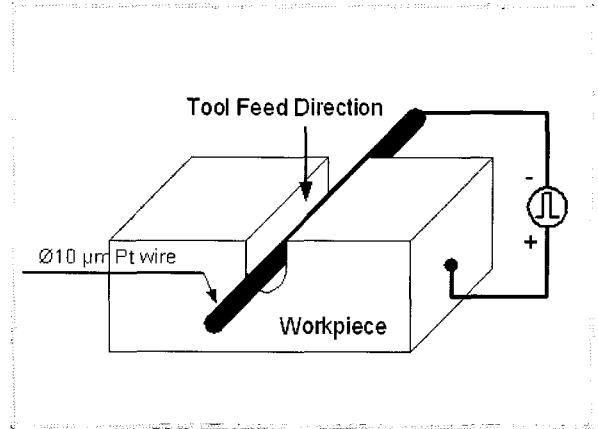


Figure 9. Schematic diagram of Wire ECM

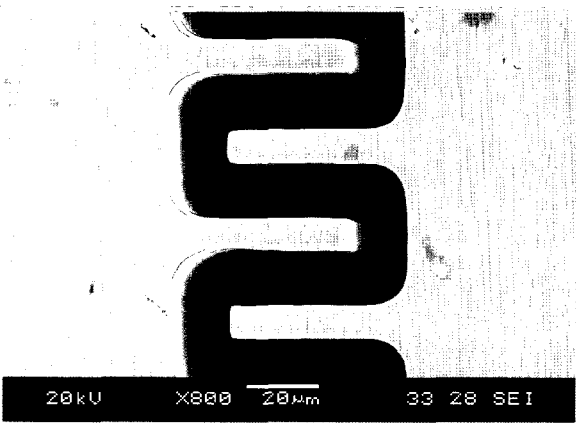
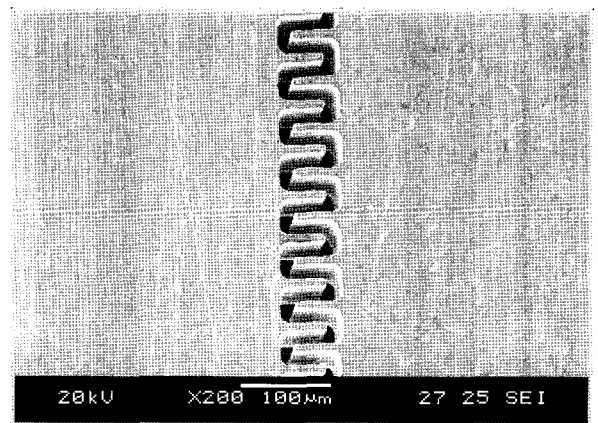


Figure 10. Micro groove shape on 304 stainless steel (applied voltage: 6.5 V, pulse period: 7 μs , pulse on-time: 75 ns, electrolyte: 0.1 M H₂SO₄).



라서 기포 발생을 억제하면서 가공 간극을 줄일 수 있는 가공 조건이 사용되었다.

4.2 미세 전해 밀링

미세 전해 가공에서도 밀링 공구와 마찬가지로 공구 전극을 경로에 따라 이송함으로써 3차원 형상을 가공할 수 있다. 전해 가공은 펄스 폭이나 펄스 전압 그리고 전해액의 농도에 따라 가공 간극이 달라지게 된다. 펄스 폭과 전압이 작을수록 농도가 낮을수록 간극이 작아지게 되는데, 일반적으로 0.1 M 황산 용액에서 스테인리스 강을 가공할 때 5

- 6 V, 50 ~ 100 ns 의 펄스를 사용하면 5 ~ 10 μm 의 간극을 얻게 된다. 또한 약 Ra 0.28 μm 의 우수한 표면 조도를 얻을 수 있다. 그림 8은 스테인리스 강에 실린더 형상을 가공하고 그 위의 반구 형상을 가공한 예이다. 이 형상은 3 번의 단계를 거쳐 가공하였으며 기존 밀링 가공과 같이 황상 및 정삭 단계를 거쳐 가공하였다.

4.3 미세 와이어 전해 가공

와이어 미세 전해 가공은 전해 드릴링이나 밀링과는 다른 또하나의 전해 가공 방식이다. 그림 9와 같이 공구 전극

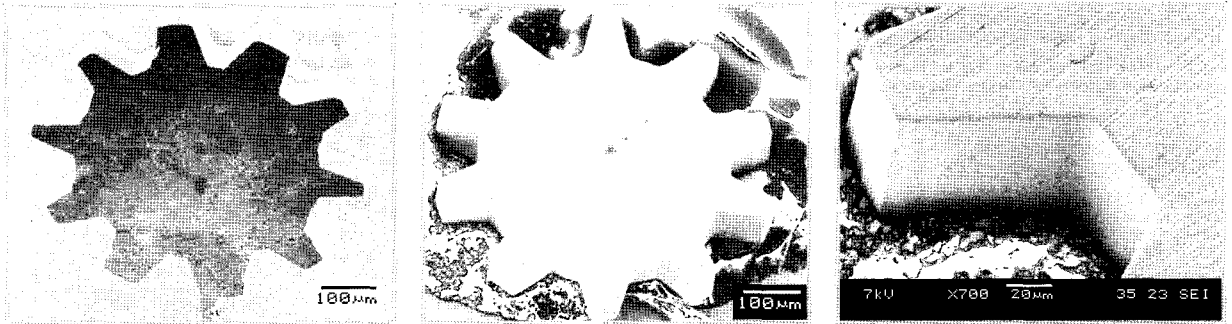


Figure 11. Micro gear (workpiece: 304 SS, applied voltage: 6.5 V, pulse period: 7 μ s, pulse on-time: 75 ns, electrolyte: 0.1 M H₂SO₄)

으로 미세 와이어를 사용하여 가공하게 된다. 방법은 와이어 방전 가공과 비슷하나 앞서 말했듯이 공구 마모가 없기 때문에 와이어 방전 가공처럼 와이어를 계속 공급해 줄 필요가 없으며 방전 가공에서 와이어 결선 때문에 사용하기 힘든 매우 작은 와이어도 사용할 수 있다. 와이어 전해 가공에서 사용되는 전극은 지름 10 μ m의 백금이나 텅스텐 와이어가 사용되며 가공물을 절단하는데 사용된다. 그림 10와 11은 스테인리스 강에 와이어 전해 가공 기술을 이용하여 미세 형상을 가공한 예이다.

초단 펄스를 이용한 미세 전해 가공은 기존의 미세 방전 가공과 비슷하지만 여러 가지 장점을 지니고 있다. 이 가공법은 전기 화학적 반응을 기본으로 하기 때문에 방전 가공에서 나타나는 열변형충이 없고 표면 품질이 뛰어나다. 또한 방전 가공에서 큰 문제점으로 여기던 공구 전극의 마모가 없기 때문에 정밀한 형상 가공을 할 수 있어 한번 제작한 공구 전극을 계속 사용할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 금속의 종류와 전해질의 종류에 따라 그 화학 반응이 각기 다르기 때문에 각각의 금속마다 적절한 전해액을 사용해야 하고 가공 속도가 아직 미세 방전 가공 보다 느린 단점이 있다. 이러한 문제점이 해결된다면 미세 금속 가공 기술로서 방전 가공만큼 전해 가공도 주목 받으리라 판단된다.

Vol. 289, pp. 98-101.

- Kim, B. H., Ryu, S. H., Choi, D. K., Chu, C. N., 2005, Micro Electrochemical Milling, J. Micromech. Microeng., Vol. 15, No. 1, pp. 124-129.
- Kock, M., Kirchner, V., Schuster, R., 2003, Electrochemical Micromachining with Ultrashort Voltage Pulses - a Versatile Method with Lithographical Precision, Electrochim. Acta, Vol. 48, pp. 3213-3219.
- Bard, A. J., Faulkner, L. R., 2001, Electrochemical Methods, Fundamentals and Applications, John Wiley and Sons, New York.
- Kirchner, V., 2002, Electrochemical Microstructuring with Ultrashort Voltage Pulses, Ph.D thesis, Freie Universitat Berlin.
- Choi, S. H., Kim, B. H., Chu, C. N., 2006, Micro Electrochemical Machining of Tungsten Carbide (Korean), J. Korean Soc. Prec. Eng., Vol. 23, No. 12, pp. 111-116.
- Allongue, P., Jiang, P., Kirchner, V., Trimmer, A. L., Schuster, R., 2004, Electrochemical Micromachining of p-Type Silicon, J. Phys. Chem., Vol. 108, pp. 14434-14439.

References

- Schuster, R., Kirchner, V., Allongue, P., Ertl, G., 2000, Electrochemical Micromachining, Science,