

# 미세 방전/전해 가공 및 장치

이 글에서는 미세 부품 가공 방법의 하나로 주목받고 있는 미세 방전/전해 가공(micro EDM/ ECM : micro Electro-Discharge/Electro-Chemical Machining) 기술과 미세 방전/전해 장치들을 통합하기 위한 플랫폼인 2차원 평면 모터를 이용한 마이크로 팩토리에 대해 소개한다.

**최** 근 미세한 크기의 기계/전기적 부품을 가공과 관련한 연구가 다양한 측면에서 진행되고 있으며, 특히 미세 가공 기술(micro-machining) 및 초소형 가공 설비(micro-factory) 등의 분야로 집약되어 진행되고 있다. 이러한 분야에서 사용되는 효과적인 가공 기술의 하나로 종래의 특수 가공 기술의 하나로 분류되어 있던 방전/전해 가공 기술이 도입되었다. 이 가공 기술들은 기계적인 접촉 및 변형이 아닌 전기적 에너지로부터 재료의 제거에 필요한 에너지가 비롯되는 것을 특징으로 하고 있고,

이로 인해 얻어지는 미세 가공 측면에서 효과적인 몇 가지의 장점들로 인해 많은 주목을 받고 있다. 최근에는 난삭재를 포함한 다양한 재료에 대한 미세 3차원 형상을 가공하는 데 초점이 맞추어져 있다. 또한 이러한 방전/전해 가공을 미세 부품의 가공에

실질적으로 적용하기 위한 장비의 개발 또한 중요한 연구 분야로 자리 잡고 있다. 특히 이들 각 가공 공정이 가지는 장점을 최대한 가공에 활용하기 위하여 통합하는 방안이 고려되고 있으며, 그 대표적인 방법의 하나로 마이크로 팩토리가 고려되고 있다. 이는

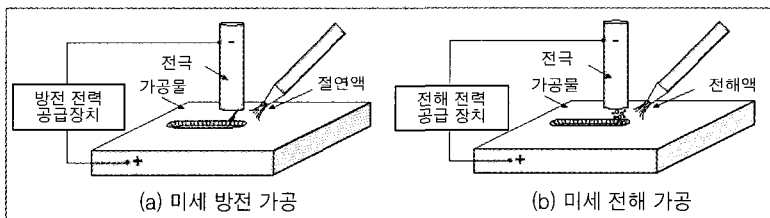


그림 1 미세 방전/전해 가공의 기본 구성

정영훈 | 연세대학교 기계공학과, 연구원  
김영민 | 연세대학교 기계공학과, 부교수  
이성준 | 연세대학교 기계공학과, 교수

e-mail : jeongyh@yonsei.ac.kr  
e-mail : bkmin@yonsei.ac.kr  
e-mail : sjlee@yonsei.ac.kr

미세 방전 가공과 미세 전해 가공 그리고 이들을 이용한 부가적인 가공 등 다양한 장비들을 통합하여 하나의 소형화된 공장으로 구성하고자 하는 것으로, 이미 다양한 미세 가공 기술을 통합하기 위한 방안으로 활발히 연구되고 있다. 그림 1(a)와 (b)는 각각 미세 방전가공과 전해가공에 대한 기본적인 구성을 보여준다.

### 미세 방전가공 기술

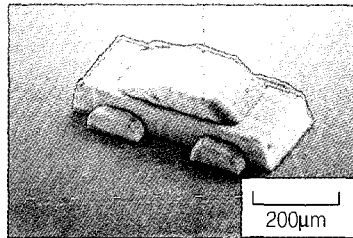
방전가공 기술은 현재 가장 널리 사용되고 있는 특수 가공 기술의 하나이다. 이 가공 기술이 가지는 다른 가공 기술과의 차이점은 전도체인 가공재료에 열에너지 공급하여 가공한다는 점에 있다. 이는 전도체인 가공물(workpiece)과 전극(electrode) 사이에 절연 특성을 가지는 유체 또는 기체를 두고 높은 전압을 걸어 전극과 가공물을 통전시킬 때 발생하는 플라즈마가 가공물의 국소영역에 짧은 시간 동안 높은 온도를 가하여 국소영역의 재료를 제거하는 것을 기본 메커니즘으로 하고 있다. 이러한 가공 메커니즘은 전극과 가공물 사이에 물리적 접촉을 가지지 않기 때문에 접촉에 의한 기계적 응력을 발생시키지 않아 변형에 의한 공구 또는 장비의 정밀도 저하가 없다는 점, 가공 공구의 채터(chatter)와 같은 진동 문제를 야기하지 않는다는 점이 큰 장점

으로 인식되어 있다. 그러나 그 무엇보다도 가장 큰 장점은 전통적인 절삭가공과는 달리 가공물의 강도에 상관없이 가공이 가능하기 때문에 난삭재를 가공할 수 있다는 점이 방전 가공 기술을 계속적으로 요구하는 이유라고 할 수 있다.

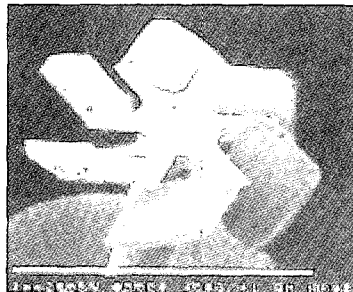
이러한 방전 가공 기술이 최근에는 크게 두 가지 측면에서 관련 분야의 주목을 끌고 있다. 한

가지는 기존의 형조 방전(die-sinking EDM)을 대체할 목적으로 원 또는 사각형 등 단순한 단면을 가지는 막대 모양의 전극을 이용하여 기존의 3차원 밀링 가공과 같이 방전가공을 하여 다양한 3차원 가공을 하는 것이다. 또 다른 한 가지로는 단순 형상 전극을 이용한 방전 가공에서 와이어 방전 장치로 전극의 측면을 가공(WEDG : Wire Electro-Discharge Grinding)하여 얻어지는 수십에서 수  $\mu\text{m}$ 의 직경을 가지는 미세 전극을 이용하여 미세한 크기의 3차원 형상을 가공하는 것이다. 이러한 측면들은 기존의 방전 가공에 대해 가공 측면에서의 유연성과 미세 정밀 가공 성능을 추가하는 것으로 볼 수 있다.

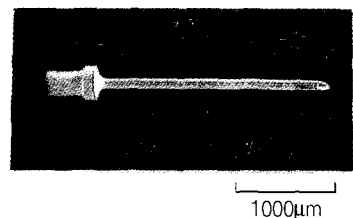
미세 방전가공 기술을 이용한 대표적인 가공 사례로 미세 구멍(hole)을 들 수 있다. 현재까지 발표된 미세 구멍은 직경은 수  $\mu\text{m}$ 의 수준에까지 이르고 있다. 특히 가공된 구멍은 높은 직선도를 가지고 있기 때문에 기존의 절삭 가공에 의한 가공 구멍과는 크게 차별화될 수 있다. 그 외에도 수  $\mu\text{m}$ 에서 수백  $\mu\text{m}$ 의 단면 폭을 가지는 다양한 단면의 핀이나 빔을 가공할 수 있고, 수십  $\mu\text{m}$ 의 폭과 수백  $\mu\text{m}$ 의 깊이를 가지는 미세 홈의 가공도 가능한 것으로 보고되어 있다. 특히, 3차원의 복잡한 형상을 가지는 미세 구조물의 가공도 활발히 이뤄지



(a) 미세 자동차 형상 (University of Tokyo)



(b) 미세 터빈로터 (K. U. Leuven)



(c) 미세 주사바늘 (University of Tokyo)

그림 2 미세 방전에 의해 가공된 다양한 3차원 형상들

고 있다. 500 $\mu\text{m}$ 의 길이를 가지는 자동차 형상이나 400 $\mu\text{m}$  크기의 터빈 로터, 반경 100 $\mu\text{m}$  이하의 반구형 몰드 등이 가공되는 수준에 도달해 있다. 그림 2의 (a)와 (b)는 미세 방전 가공을 통해 가공된 3차원 형상들로서 미세 자동차 형상과 터빈 로터이다. 그림 2의 (c)는 전기증착, WEDG 등을 이용하여 가공된 미세 주사바늘로서 외경은 100 $\mu\text{m}$ 이며, 내경은 수에서 수십  $\mu\text{m}$ 까지 가능하다고 한다.

이러한 미세 방전가공 기술은 현재 다음과 같은 몇 가지 문제에 대해 집중적으로 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 방전가공에서는 몇몇의 특정 조건을 제외하고는 가공재가 제거되는 양에 비례하여 전극에서도 마모가 발생한다. 특히 타 가공에 비해 그 정도가 심하기 때문에 미세 방전 가공에서 전극의 마모 문제는 반드시 해결되어야 한다. 현재까지 주로 사용되고 있는 방법은 가장 기본적인 방법인 반복적인 가공이며, 또 다른 방법들로 마모를 미리 예측하여 가공길이에 비례하여 일정 속도로 깊이 방향으로 전극을 넣어주는 방법과 가공 길이 방향으로 균일마모를 유도하기 위한 가공 경로 설정, 전극과 가공재 사이의 간극을 추정하여 마모를 보상하는 방법 등 몇 가지의 방법이 있다. 또 다른 주제로 절연물질의 가공을 들 수 있다. 주로 세라믹의 가공에 초점이

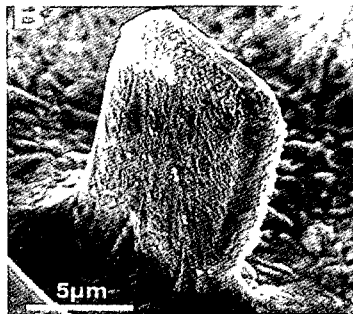
미세 방전/전해 가공은 미세한 크기의 3차원 형상의 가공에 있어 기계적 에너지가 아닌 전기적 에너지를 이용함으로써 높은 수준의 가공 정밀도를 얻게 하고 동시에 재료의 강도에 영향을 받지 않아 난삭재 가공이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

맞춰지고 있으며, 이는 미세 부품 재료의 다양성에 부합하고 동시에 난삭재 가공의 장점을 살리기 위한 것이다. 이를 위해 주로 희생층 역할을 하는 전도물질을 세라믹 층 위에 증착시켜 여기에 방전을 일으키며 이때 발생하는 열을 이용하여 아래에 있는 세라믹을 가공하는 방식을 택하고 있

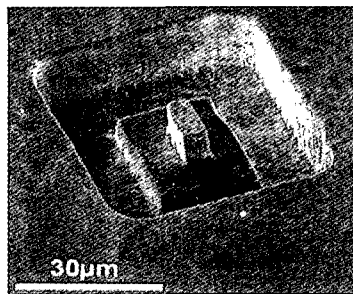
다. 이 외에 핵심적인 문제의 하나로 미세 방전 가공을 지원하는 CAM 도구의 개발이 있다. 그러나 이는 3차원의 복잡한 형상의 가공을 위한 전극의 경로를 전극의 마모와 가공 방향 등을 고려하여 생성하는 것이 매우 복잡하고 해석하기 힘들기 때문에 아직까지 효과적인 결과가 제시되지 못한 상태이다. 그러나 최근 이에 대한 연구가 미국의 University of Nebraska, Lincoln과 연세대학교 등에서 활발히 시도되고 있다.

### 미세 전해 가공 기술

전해 가공은 전기적 에너지를 이용하여 재료간의 화학 반응을 일으키는 가공 방법으로 특수 가공 기술에 속해 있다. 전해 가공 메커니즘을 간단히 설명하면, 양극의 가공물과 음극의 전극과 이들 사이에 전해액이 존재하며, 이들 사이에 전기적 에너지가 공급되면 음극인 전극에서는 수소가 발생하고, 양극의 물질이 전해액과 화학적으로 반응하여 이온화(용해)되면서 재료가 제거되는 점을 이용하는 것이다. 이때 전해액은 화학적 작용 외에도 산화물의

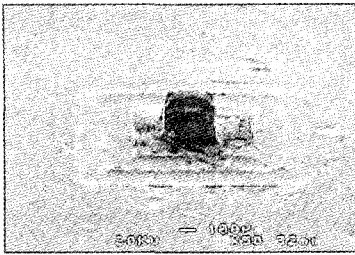


(a) 미세 방전 가공

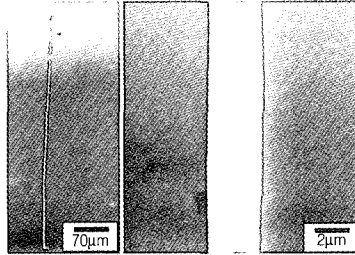


(b) 미세 전해 가공

그림 3 미세 전해 가공에 의해 가공된 미세 3차원 구조물(Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft)



(a) 미세 방전 증착 및 가공에 의한 사각 기둥 (연세대학교)



(b) 미세 전해 적층에 의한 원형기둥 (Uppsala Univ.)

그림 4 미세 방전/전해 증착에 의해 가공된 미세 기둥

제거와 주위 온도의 안정화 등의 기능도 함께 수행하게 된다.

전해 가공 기술은 전극 주위를 포함한 넓은 영역에 대해 가공이 이뤄지기 때문에 미세 가공에 불리한 특성도 가지고 있으나, 최근의 전해 가공 장치는 펄스 전원을 사용하여 가공영역을 좁히고 치수 정밀도와 가공 품질을 한층 더 높임으로써 미세 가공 기술에 있어서 효과적인 기술의 하나로 자리 잡을 수 있게 되었다. 한 사례로 수 나노 초 주기로 전원을 공급-차단하는 초단파 전원을 미세 공구에 공급할 경우 나노 혹은 마이크로미터에 이르는 전극간의 거리에서 전극 주변을 충전하는 데 소요되는 시간은 극히 작고, 양극의 전기 분해는 충전된 전극 주변의 전압강하에 크게 의존하기 때문에 전해되는 부위는 공구 주변의 국소적인 영역으로 한정될 수 있음을 보였다.

전해 가공 기술이 미세 가공 영역에서 주목을 받는 이유는 기본적으로 기계적 접촉이 이뤄지지 않는다는 점 외에도 가공면의

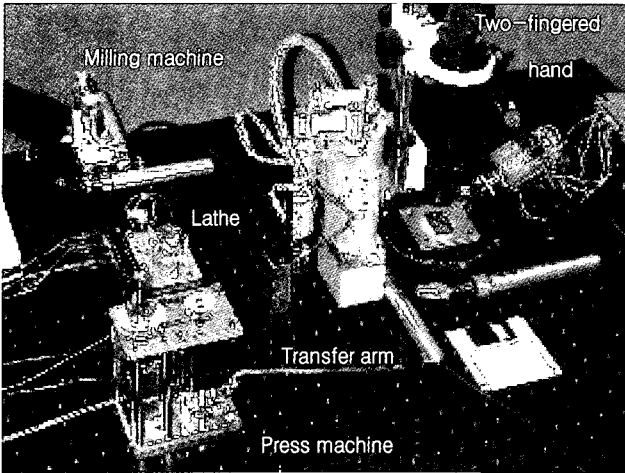
조도가 좋고 열적 영향층(heat affected zone)이 존재하지 않아 미세 가공물의 마무리 가공(finishing and smoothing)에 강점을 가지고 있기 때문이다. 또한 재료의 제거가 원자 단위로 이뤄지는 특성을 가지고 있는 점도 미세 가공에 큰 장점으로 작용할 수 있다. 특히 재료 측면에서도 티타늄, 동합금 계열, 스테인리스 스틸 등 의료 장비나 의공학 재료로 사용되는 물질 등의 가공이 가능하다는 점도 강점을 보이는 이유가 될 수 있다. 특히 이 방법은 전극의 마모가 없고 재료에 잔류 응력이 남지 않으며 가공 간극이 작아서 매우 정밀한 형상을 제작하는 데 유리하다. 그림 3은 미세 전해 가공을 이용하여 가공된 미세 3차원 구조물을 보여준다.

### 미세 방전/전해 증착 기술

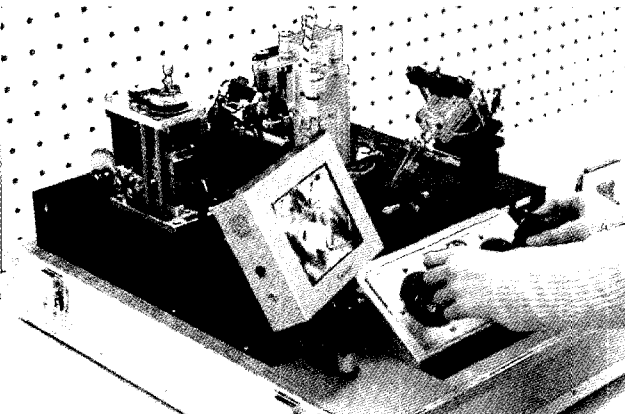
최근 미세 방전 기술을 이용하여 재료 가공물에 증착시키는

연구가 진행되고 있다. 이러한 가공 기술은 이종 재료간의 접합을 통한 증착이 가능할 뿐만 아니라 미세 부품 및 금형에서의 부분적인 수정이 가능하기 때문에 시간과 비용을 절약할 수 있는 장점을 가지고 있다. 미세 방전을 이용한 미세 증착 공정은 미세 분말의 추가 외에는 미세 방전에 의한 재료 제거와 유사하다. 따라서 전극과 가공물 그리고 증착하고자 하는 재질의 미세 분말을 절연액과 함께 공급하여 가공물의 상단에 위치되도록 한다. 이후 미세 방전 가공에 비해 상대적으로 높은 전기적 에너지를 공급함으로써 금속 분말이 녹아 가공물에 증착되게 된다. 특히 방전 가공에서와 마찬가지로 전극의 형상이 증착형상에 영향을 미치기 때문에 증착 형상이나 면적을 제어할 수 있다는 점은 기존의 전기도금과는 크게 구별되는 점이라 볼 수 있다.

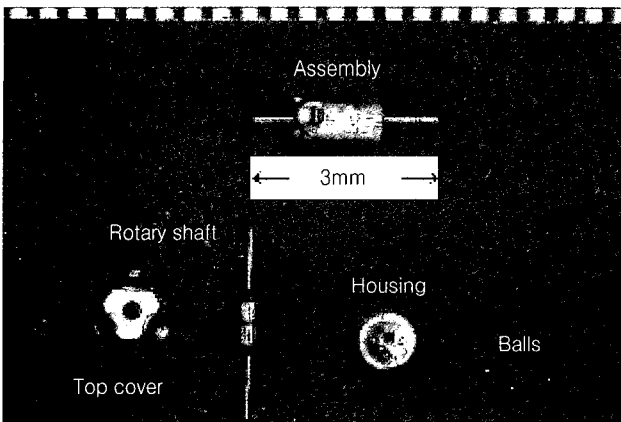
전기증착(electro-deposition)의 개념과 동일한 방법으로 전해 장치에서 미세량의 증착효과를 얻을 수 있다. 최근 발표된 바에 따르면, SPM(Scanning Probe Microscope)를 이용한 표면 개질에서 나아가 SPM 팁과 다른 전극을 한 쌍의 전극으로 하고 이온 전도성 전해질 용액에 담고 두 전극에 전압을 인가하면 양극인 팁에서는 산화가 발생하고 다른 전극에서는 금속이 적층되는 것을 보였다. 이 효과를 확



(a) 데스크탑 마이크로 팩토리



(b) 포터블 마이크로 팩토리



(c) 피봇 볼베어링 어셈블리

그림 5 일본에서 발표된 마이크로 팩토리 시작품과 가공물(AIST)

대하여 간극을 조절함으로써 높은 세장비를 가지며 밀도가 높은 미세 직경의 기둥을 세운 결과를 발표하였다. 이상과 같이 미세 방전 및 전해를 이용한 증착 방식은 재질의 밀도가 뛰어나면서도 미세한 크기의 3차원 구조물을 적층하여 얻어낼 수 있다는 점에서 매우 효과적인 미세 증착 기술로 볼 수 있다. 그림 4 (a)는 미세 방전 증착을 통해 얻어진 원형 기둥에 다시 방전을 통해 가공함으로써 얻은 사각 기둥을 보여주며, 그림 4 (b)는 미세 전해 적층을 통해 얻어진 높은 세장비의 미세 원형 기둥을 보여준다.

## 2차원 평면 모터를 이용한 마이크로 팩토리

다양한 미세 가공 장비를 통합하는 개념으로 마이크로 팩토리 (micro-factory)가 제시되어 있다. 이는 여러 미세 가공 공정을 위한 각각의 소형화된 장비를 하나의 소형 생산 라인으로 통합하는 것을 목표로 하고 있는 시스템이다. 이러한 마이크로 팩토리는 이미 몇몇의 연구 개발을 통해 시작품들이 발표되고 있는 추세이다. 대표적인 사례로 일본에서는 500mmx700mm의 영역 안에 밀링 머신, 선반, 프레스 머신, 트랜스퍼 암, 그리퍼 등으로 구성된 데스크탑 형식과 625mmx490mmx380mm의 크기와

2차원 평면 모터를 이용한 마이크로 팩토리는 가공 장비의 효율적 사용과 함께 생산 공정의 유연성 등을 극대화 할 수 있는 개념으로서 앞으로의 미세 가공 공정용 생산 시스템의 모범적인 형태로 제시될 수 있다.



그림 6 2차원 평면 모터를 이용한 미세 방전/전해 가공용 마이크로 팩토리(연세대 학교)

34kg의 중량을 가지는 포터블 타입을 발표하였다. 특히 이 시스템으로 길이 3mm, 직경 900 $\mu$ m의 소형 피봇 볼 베어링 어셈블리를 제작할 수 있음을 보였다. 그림 5는 발표된 데스크탑 및 포터블 타입의 마이크로 팩토리 시

작품들과 이를 이용해 제작된 볼 베어링 어셈블리를 보여준다.

현재까지 다양한 형태의 마이크로 팩토리가 제안되고 있으며, 마이크로 팩토리를 운영하기 위한 효과적인 방법의 하나로서 2차원 평면 모터(planar motor)

를 플랫폼으로 이용하는 방식을 들 수 있다. 이 방식은 리니어 스테핑 모터를 대면적의 테이블 위를 2차원으로 움직이도록 한 2차원 평면 모터를 이용하며, 리니어 스테핑 모터 위에 미소 이송 축 등을 포함하는 개별의 소형화된 장비를 설치하고 이들이 테이블 주위의 여러 위치에 설치된 각종 공정 유닛과 특정 위치에서 동시운동을 함으로써 개별의 가공 공정이 이뤄지도록 할 수 있다. 이 방법은 다양한 공정 작업 시 가공물의 잦은 탈부착에 따른 정밀도 저하 문제를 해결할 수 있는 장점을 가질 뿐만 아니라 실제 요구되는 공정 수에 따른 장비의 이송축수가 상당히 줄어들 수 있으며, 동시에 생산 공정의 유연성을 꾀할 수 있기 때문에 데스크탑 수준의 마이크로 팩토리에 대한 플랫폼으로 큰 효율성을 제공할 수 있다. 그림 6은 현재 마이크로 전기·화학 복합형상 제거 시스템이라는 제목 하에 성장 동력 개발 사업의 일환으로 연세대학교에서 개발되고 있는 미세 방전/전해 가공용 마이크로 팩토리로서 2차원 평면 모터를 플랫폼으로 하는 마이크로 팩토리의 개념도를 보여준다.