

전기 화학적 미세 가공 기술

이 글에서는 전기·화학적 미세 가공 기술 중 가공물의 전기적 전도성에 따른 특수가공 공정으로 미세 방전 가공(μ -EDM: micro-electrical discharge machining)과 미세 전해방전 가공(μ -ECDM: micro-electrochemical discharge machining) 기술을 소개하고자 한다.

한민섭 연세대학교 기계공학부, 박사후 연구원
민병권 연세대학교 기계공학부, 부교수

e-mail : bkmin@yonsei.ac.kr

전기·화학적 미세 가공 기술(Electrical and electrochemical micromachining technology)은 전기적 스파크의 열에너지 또는 전기화학적 용출(dissolution)반응을 이용하여 재료제거를 수행하는 특수가공법을 지칭한다. 기존의 기계적 가공 방식의 경우 고경도 취성재료에 적용이 난해한 문제점을 해결하고 리소그래피 기반 공정이 지니고 있는 한계점을 극복하기 위한 특수가공법으로 제시되어 왔다. 특히 방전 가공(EDM: Electrical Discharge Machining)을 비롯하여 전해가공(ECM: Electrochemical Machining)은 가공물과의 물리적 접촉 없이 초정밀 고품위 미세 가공이 가능하기 때문에 기계산업 분야는 물론 항공우주 산업 및 생체 바이오산업 등 다양한 분야에 적용되고 있다[1]. 이러한 전기·화학적 미세 가공 기술은 별도의 마스크 제조 공정 없이 임의의 3차원 형상의 정밀 가공이 가능하며 치수 정밀도 및 표면 품질이 매우 우수하

다. 또한 알루미늄, 카바이드, 티타늄 등 다양한 전도성 재료의 가공이 가능하다.

이 글에서는 전기·화학적 미세 가공 기술 중 다양한 전도성 재료의 정밀 가공에 적용되는 대표적인 공정으로 미세 방전 가공(μ -EDM)과 유리, 세라믹 등과 같은 비전도성 재료 미세 가공 기술의 하나인 미세 전해방전 가공(μ -ECDM: micro-Electrochemical Discharge Machining) 기술을 소개하고자 한다. 표 1에서 해당 공정들의 기본적인 특성을 요약하였다.

미세 방전가공 공정

그림 1은 미세방전가공시스템의 기본 구성을 보여주고 있다. 미세방전가공 공정은 다양한 전도성 재료에 대하여 재료의 기계적 강성에 무관하게 정밀가공이 용이하기 때문에 광범위한 응용 분야를 지니고 있는 특

표 1 미세 방전가공 및 미세 전해방전가공의 공정 특성

	주요 공정 인자 특성				응용분야
	가공물	주요 공구 재질	가공 회로	가공액	
미세 방전 가공	전도성 재질	구리, 흑연, 초경 등	RC / 트랜지스터	탈이온수, 케로신	정밀 금형, 자동차, 우주항공 부품, 미세 버 제거
미세 전해 방전 가공	비전도성 재질	구리, 초경 등	수 밀리 초 단위 펄스	전해액 (NaOH, KOH 등)	Lab-on-a-chip 미세유로 시스템 시제품 제작

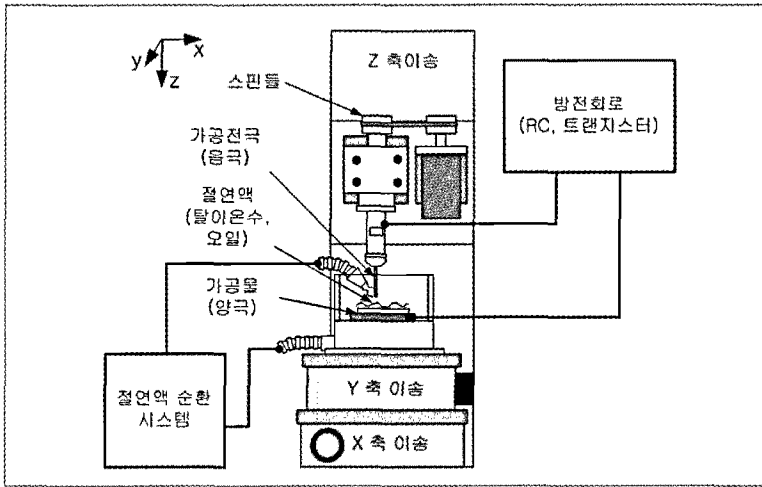


그림 1 미세방전가공시스템

수 가공방법이다. 절연액으로 사용되는 탈이온수 또는 오일(케로신)은 가공 중 발생하는 미세한 가공물 부스러기(debris) 등의 배출을 원활하게 하고 공구와 가공물 간의 전기적 절연 매개체 역할을 수행하여 지속적인 방전이 가능하도록 유도한다. 건식 방전(dry EDM)은 액상 가공액 대신 전극과 공작물 사이를 고압의 불활성 가스를 분사시켜 방전을 유도하는 방식의 공정이다. 이러한 건식 방전 가공은 가공 부스러기의 보다 효과적인 제거가 가능하며 향상된 재료 제거율(MRR: Material Removal Rate), 그리고 등유와 같은 가공액을 사용하지 않음으로써 친환경적인 특성을 살릴 수 있는 장점을 지니고 있다 [2].

방전가공용 회로는 독립적인 전류 펄스 파형을 발생시키는 트랜지스터 타입과 저항과 콘덴서를 사용한 RC 타입의 두 가지로 나뉘는데 보다 미세한 가공을 위해서는 저에너지 고주파 전류 펄스 생성에 유리한 RC 타입이 많이 사용되고 있다. 가공용 전극으로는 주로 황동이나 구리 등 전도성이 높은 재질을 이용하여 높은 표면조도 및 정밀도를 요구하는 미세 구멍 가공, 그리고 미세 구조물 가공이 가능하다. 주요 응용 분야

로는 그림 2와 같이 3차원 미세 구조물 가공 및 미세 버(micro-burr) 제거를 비롯하여 최소 직경 수 μm 대의 연료 노즐, 항공산업용 터빈 블레이드 냉각 홀, 의료용 바늘 및 정밀 수술용 기기 제작 등이 있다.

미세와이어방전 공정은 핸드폰, 정밀기계부품 등 고세장비 마이크로 금형 제조에 사용될 뿐만 아니라 와이어 방전 연삭(WEDG: Wire Electrical Discharge Grinding)공정을 통해 마이크로 가공용 공구 제작(micro tooling)에

도 널리 사용되고 있다. 본 공정은 수십 μm 직경의 구리 및 황동 와이어를 가공 전극으로 사용하여 일정 속도로 이송함으로써 가공 중 발생하는 전극 마모의 보상 없이 직경 10 μm 이하의 초미세 전극의 정밀한 제조가 가능하다.

최근 미세 금형의 형상이 복잡해지고 다양해지면서 기존의 다이아몬드 휠을 대체하여 다결정 다이아몬드 공구(이하 PCD 공구)를 이용한 3차원 미세금형가공 방법이 주목받고 있다. PCD 공구는 수백 나노에서 수십 마이크로 범위의 다이아몬드 입자와 코발트 결합 재료로 구성된 일종의 복합재료로 전기적 전도성을 지니고 있어 그림 3(a)에서와 같이 미세방전가공을 이용한 정밀가공이 가능하다. 제작된 금형의 내마모성 향상을 위해서는 금형의 표면 품질이 무엇보다 중요한데 PCD 공구를 이용한 연성모드(ductile mode) 연삭가공 시 표면 거칠기(Ra)를 약 10nm 내외까지 향상시킬 수 있다. 그러나 연성 모드 가공은 1 μm 내외의 매우 작은 절삭 깊이와 느린 공구 이송속도로 인하여 생산성이 낮은 문제점을 지니고 있다. 그림 3(b)는 초경 재료의 미세 금형 가공의 예를 보여주고 있다 [6].

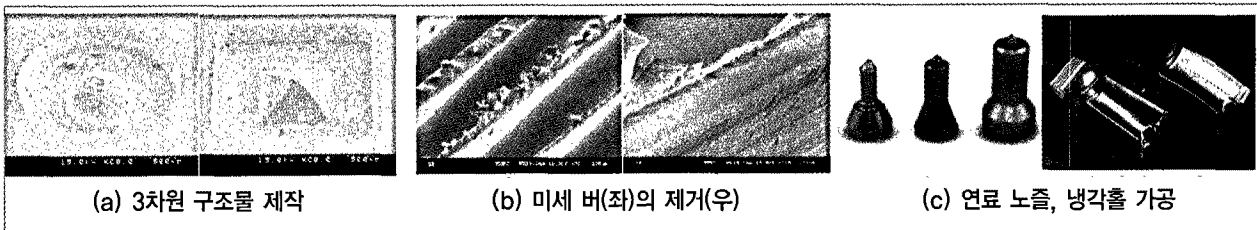


그림 2 미세방전가공의 응용 분야[3, 4, 5]

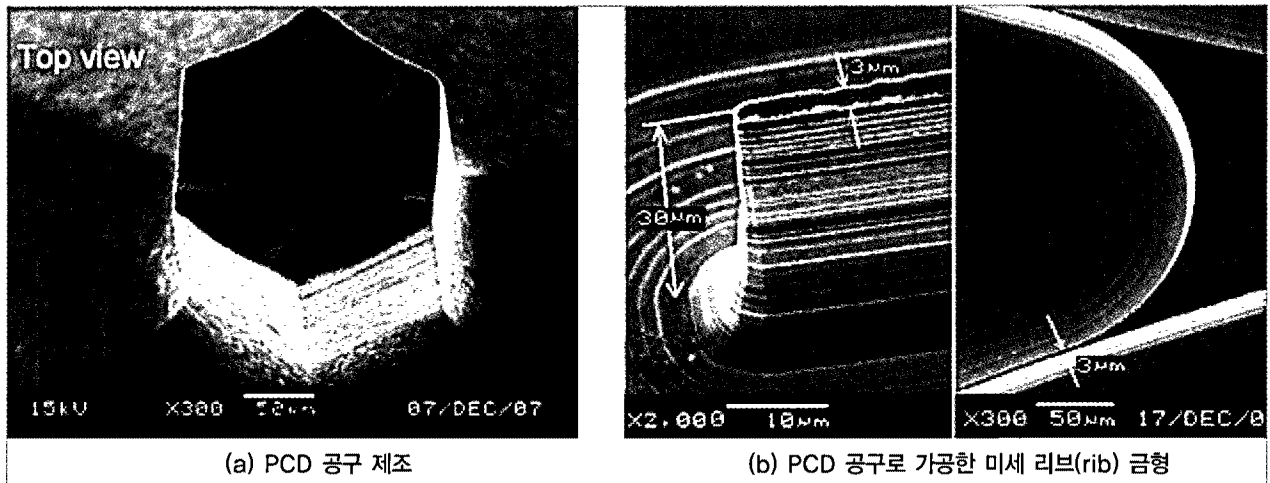


그림 3 와이어방전가공을 이용한 PCD 공구제조 및 이를 이용한 미세금형가공^[6]

미세전해방전가공 공정

전해방전가공 공정은 방전 및 전해 현상이 결합된 특수 가공법의 하나로 기본적으로 기체 방전에 의한 스파크 열에너지를 이용한 가공 공정이지만 앞서 언급한 방전 가공과는 달리 전해작용으로 생성된 기체 절연막이 절연 매개체 역할을 수행한다. 그림 4는 일반적인 미세전해방전가공시스템의 개략도를 나타낸다. 최근 수 msec 단위의 펄스 형태의 입력전압과 전극의 회전수를 조절하여 유리재료의 마이크로 3차원 미세 구조물 정밀 가공 연구가 진행된 바 있다. 일반적인 직류전압(constant DC voltage)을 사용하였을 경우 전극표면의 과도한 방전 열에너지에 의해 가공물 표면에 심각한 열 변형을 일으키는 문제가 발생하기 때문에 입력전압의 형태를 주기적인 펄스로 적용하고 펄스의 주파수 및 듀티 값을 조절함으로써 냉각효과를 증가시켜 이러한 현상을 억제할 수 있다. 기체 절연막의 안정적인 생성 시간을 고려하면 40VDC 가공 전압에 대해 약 2msec 정도의 펄스 입력 시간이 주로 사용되고 있으며 이때 약 1,500rpm 정도의 공구 회전은 가공물 표면에 보다 균일한 열에너지를 전달하여 가공 정밀도를 향상시킬 수 있다^[7].

가공에 사용되는 전해액으로는 30wt.% NaOH를 주로 사용하는데 미세구멍가공 시 가공 깊이가 증가함에 따라 가공된 구멍 안으로의 지속적인 전해액 주입을 유지하는 것이 매우 중요하다. 전해액의 공급 및 순

환이 원활하지 않을 경우 기체 절연막의 불안정성이 크게 증가하여 스파크 발생이 급격하게 감소하고 결과적으로 가공이 중단되기 때문이다.

최근 유리의 미세유로가공 및 미세절단 공정 시 전극 표면에 마이크로 텍스처(micro-texture)를 형성하여 가공 정밀도를 향상시킨 연구가 발표되었다. 가공 전극의 표면 거칠기 증가는 기체 절연막 내의 전기장 집중효과를 유도하여 가공 전압을 낮추고 방전 주파수를 증가시킬 수 있다. 그림 5는 이러한 방법을 적용하여 유리의 고세장비 미세 유로 제작 및 2차원 정밀 절단 가공을 수행한 결과를 보여준다^[8].

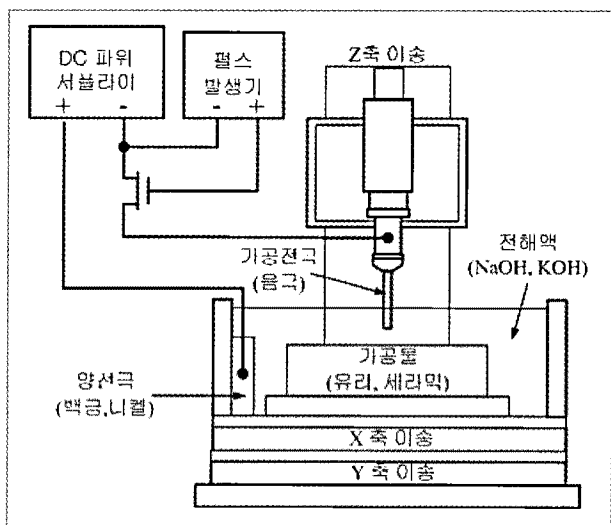


그림 4 미세전해방전가공 시스템 개략도

맺음말

방전가공은 현재 미세 정밀 부품 가공 공정에서 많이 적용되고 있으나 생산성의 향상 및 가공물의 재질에 따른 공정설계 시간 단축 등이 해결 과제로 남아 있다. 전해방전 가공은 현재까지 산업적으로

실용화되지는 못한 연구단계의 공정이지만 레이저, 초음파 가공을 대체할 수 있는 비전도성 취성재료의 미세 가공 기술로 주목받고 있다. 방전가공과 비교하여 기체 절연막의 불안정성에 의한 낮은 공정 재현성과 제한된 가공 범위 등은 지속적인 연구를 통해 해결해야 할 문제점들이다.

최근 전기·화학적 미세 가공 기술의 생산성 향상을 위해 제시된 방법들로는 초음파 진동을 적용한 복합 가공 공정(hybrid process)을 들 수 있다. 특히 전극 또는 가공물에 수십 kHz 대의 초음파 가진을 통해 공정의 안정성 및 재료 제거율을 향상시키는 연구는 방전가공 분야에서 활발하게 수행되어 왔다. 이러한 초음파 가진은 공구와 가공물 사이의 가공 부스러기들을 신속하게 제거하고 재응고 층(recast layer)을 감소시킬 뿐만 아니라 방전주기와 초음파 진동주기 동조화(synchronization)을 통해 가공속도 향상을 유도할 수 있다⁹⁾.

References

[1] Rajurkar K P, Levy G, Malshe A, Sundaram M M, McGeough J, Hu X, Resnick R and DeSilva A 2006 Micro and nano machining by electro-physical and chemical processes Ann. CIRP 55 643-66.
 [2] Kunieda M, Miyoshi Y, Takaya T, Nakajima N, ZhanBo Y and Yoshida M, 2003 High speed 3D milling by dry EDM

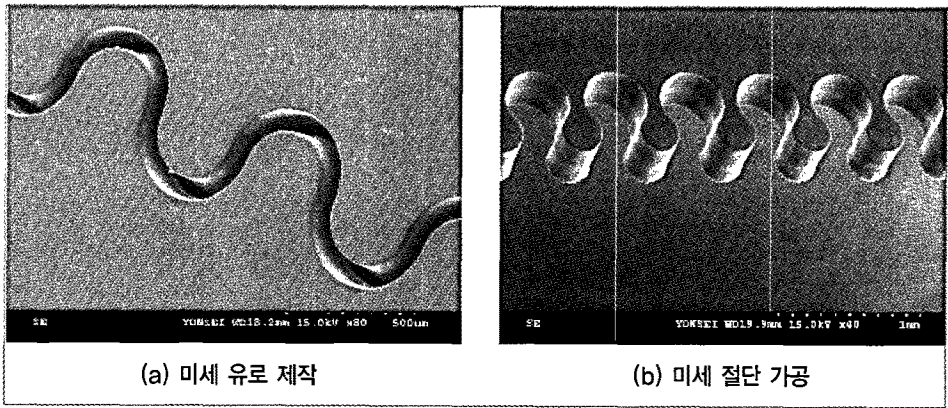


그림 5 전극 표면 거칠기 제어를 이용한 전해방전가공의 유리미세유로 제작 및 미세 절단 공정

Ann. CIRP 52 147-50.

[3] <http://www.aaedmcorp.com>
 [4] <http://www.preci-spark.co.uk>
 [5] Jeong Y H, Yoo B H, Lee H U, Min B-K, Cho D W and Lee S J 2009 Deburring microfeatures using micro-EDM J. Mat. Process. Technol. 209 5399-406.
 [6] Cheng X, Nakamoto K, Sugai M, Matsumoto S, Wang Z G and Yamazaki K 2008 Development of ultra-precision machining system with unique wire-EDM tool fabrication system for micro/nano-machining Ann. CIRP 57 415-20.
 [7] Zheng Z P, Cheng W H and Huang F Y 2007 3D microstructuring of Pyrex glass using the electrochemical discharge machining process J. Micromech. Microeng. 17 960-66.
 [8] Han M S, 2010, High aspect ratio micro-structuring of glass using electrochemical discharge machining process, Ph. D thesis Yonsei Univ.
 [9] Mohammad T. S-T, Amir A and Mohammad R S 2007 Numerical and experimental study on the effect of vibration of the tool in ultrasonic assisted EDM Int. J. Adv. Manuf. Technol. 32 719-31.