기계적 미세 형상 금형가공 기술

• 최 두 선 ▌한국기계연구원 지능형정밀기계연구부, 선임연구원
e-mail : choids@kimm.re.kr
• 제 태 진 ▌한국기계연구원 지능형정밀기계연구부, 선임연구원
e-mail : jtj@kimm.re.kr
• 이 응 숙 ▌한국기계연구원 지능형정밀기계연구부, 책임연구원
e-mail : les648@kimm.re.kr
• 신 영 재 ▌한국기계연구원 지능형정밀기계연구부, 선임연구원
e-mail : yjshin@kimm.re.kr

이 글에서는 기계적 미세 금형가공 기술을 중심으로 기술의 동향과 현재 수행 중인 내용에 관하여 소개함으로써 이 분야에서의 국내 연구자들의 관심을 높이고 참여를 유도하고자 한다.

현재 전 세계는 무한경쟁의 시대에 들어서면서 항공우주, 반도체 등을 비롯한 첨단산업 분야의 기술적 선점과 시장확보를 위해 많은 국가들이 정부주도하의 적극적인 연구와 투자를 아끼지 않고 있다. 이러한 상황 속에서 많은 기능성 부품과 제품들은 점차 소형화, 경량화, 고정밀화되어가는 추세에 있으며, 특히 마이크로 가공에 의한 마이크로 머신 부품의 개발과 가공기술 확보가 주요 쟁점으로 떠오르고 있다. 그러나 마이크로 가공은 mm, sub-mm order의 기판에 micron, sub-micron order의 구조물을 가공해야 하므로 공작물의 고정밀도 가공과 표면품위의 제어 측면에서 상당한 기술적 어려움을 겪어 왔다. 1988년 미국 캘리포니아 대학 전기공학과 리처드 뮬러 연구팀이 머리카락 굵기(76㎛)의 3분의 2 정도 크기의 초미니 모터를 세계 최초로 제작하여 500rpm으로 회전시키는데 성공한 이후 마이크로머신 개발의 열풍이 미국, 일본, 독일 등의 선진국을 중심으로 극대화 되고 있다. 또한 소재산업에 있어서도 일반 철계 금속 이외에도 티타늄, 니켈합금, 세라믹과 같은 합금소재와 FRP와 같은 복합재에 대한 수요가 증가하고 있다. 이와 같이 마이크로 부품의 생산원가 절감과 생산기간 단축 등 생산성을 향상시키려는 노력과 고부가가치 창출을 위한 가공물의 고품위 가공을 위한 마이크로 부품 가공기술의 필요성이 더욱 증대되고 있으며, 이러한 기술의 필요성을 만족시키기 위하여 마이크로 부품을 대량으로 생산할 수 있는 마이크로 금형가공 기술이 더욱 주목 받고 있다.

이와 같이 미세형상 금형가공 기술이란 크기가 수 mm의 공간적 개념을 갖는 미세부품을 반복 대량으로 성형, 가공하기 위한 다이(dies)와 몰드(mold)를 제작

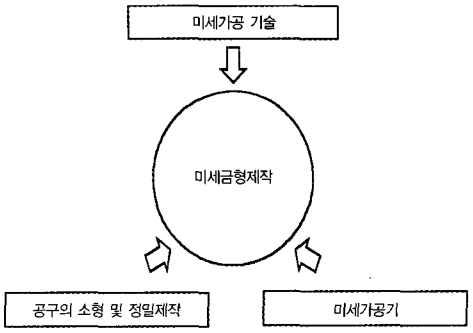

그림 1 미세형상 금형가공 기술

하는 기술로서 수 mm에서 수십 ㎛ 크기의 펀치와 다이, 코어와 캐비티를 가공할 수 있도록 그림 1과 같이 세 가지 분야로 나누어 미세금형 가공기술 개발을 연구개발하고 있다. 제품의 크기는 수 mm 이하이면서 형상정밀도는 1 미크론 이하의 초미세 정밀부품을 대상으로 하여 현재 범용의 미세 가공 기술보다는 한 단계 작으면서 MEMS에 의한 것보다는 조금 큰 치수로서 기계적인 강도를 가지는 크기의 부품 혹은 금형을 가공할 수 있는 새로운 가공기술이 기계적 마이크로머시닝 기술이라고 정의한다. 따라서, 기존의 공정을 개선하여 극미세 가공기술을 개발함과 동시에 새로운 가공 메카니즘에 의한 가공 공정의 개발이 동시에 이루어져야 한다.

국내외 동향

이러한 미세형상 금형가공 기술은 Micro-Meso Mechanical Manufacturing(M^4)기술로서 일본기계기술연구소(MEL)에서는 Laminated Piezo Actuator 방식에 의한 XY 구동 유닛과 마이크로 모터에 의한 주축 디바이스를 사용하여 세계에서 가장 작은 미소 선반을 제작한 바 있으며, 전자기술통합연구소에서는 멀티 마이크로 로봇 및 극미소 전자총을 이용한 3차원 가공기술에 관하여 연구 중에 있다. 또한 FANUC 사에서 선삭에서 3차원 형상가공까지 복합가공이 가능한 ROBOnano Ui의 초정밀 마이크로 머신을 개발하여 지금까지 lithography로 제작하기 어려웠던 자유곡면 형상의 회절격자나 비구면 렌즈의 금형가공에 적용하고 있다. 동경대에서는 최대속도 100,000rpm의 초고속 스핀들을 탑재한 마이크로 선반을 시제작하여 직경 10㎛ 정도의 마이크로 구조물을 가공하는 실험을 수행 중에 있으며, Kanazawa 대학에서는 micro lathe turning system을 개발하여 다이아몬드 공구를 이용한 다양한 형상의 micro Parts 가공기술을 개발하고 있다. 미국의 로체스터 대에서는 Moore Tool 사와 공동으로 Micro Grinding M/C을 개발하여 직경 10 mm급의 비구면 마이크로 렌즈에 대하여 진원도 1nm급, 가공면 결함층 1~2nm급의 정밀 성형 가공에 대한 연구를 수행하고 있으며, REMMELE Engineering 사에서는 8축 초정밀 소형 선반으로 미소 형상의 부품을 가공하고 있다. 캐나다의 MEMStek Products, LLC에서는 스위스의 RMB Miniature Bearings 사와 공동으로 DC 마이크로 브러시레스 모터를 개발하여 모터와 기어 트레인 등의 각종 초소형 공작 기계류 부품에 적용할 수 있는 응용 연구를 수행 중에 있다.

현재 국내에서의 기계적 가공에 의한 마이크로머시닝 기술은 최근 들어 회절격자, 프레넬렌즈 등 종래의 미세 형상 광학부품으로부터 LCD, PDP, 광통신, 전자 부품 등 각종 첨단 산업분야에서 마이크로 형상부품의 수요가 급증하고 있어 초정밀 미세 가공기술을 기반으로 한 연구개발이 출연(연) 및 기업주관으로 활발히 이루어지고 있다. 특히 나노미터 정밀도를 갖는 초정밀 가공기의 등장은 기계가공에 의한 마이크로머시닝 기술을 크게 발전시켜 기계가공이 어려웠던 micro encoder groove, grating, holographic lens, micro lens array, 미세 격벽구조물 등 광학용 미세 형상부품의 제작에도 폭 넓게 적용되고 있다.

한국기계연구원에서는 초정밀 경면 절삭가공 기술개발의 일환으로 초정밀 경면 가공기를 개발하였으며, 각종 재료 및 제품형상의 경면 가공기술개발에 대한 연구를 수행하여 0.3mm 피치의 미세한 그루브를 가진 프레넬 렌즈

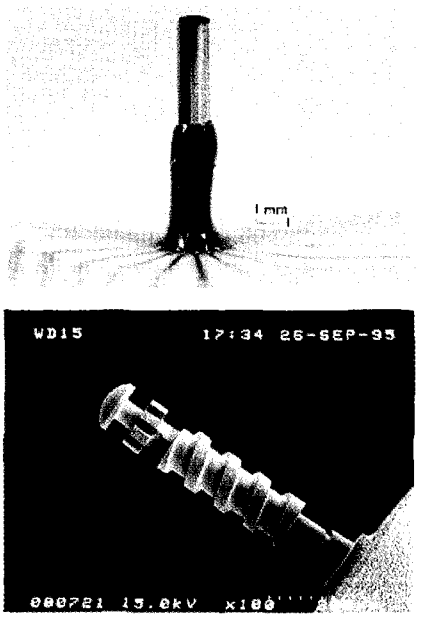

그림 2 직경 1mm 마이크로 모터 및 미세축 가공예

그림 3 KIMM의 기계적 미세가공시스템 및 응용구성 예

금형과 BLE(Back Lighit Unit), FLU(Front Light Unit), 홀로그램 광소자 등의 미세형상 금형을 가공하였다. 삼성전자는 국내 최고의 초정밀 경면 가공설비를 기반으로 다양한 초정밀 광학부품을 생산하고 있으며, 최근에는 자유곡면과 같은 비구면을 갖는 고난이도 가공공정의 레이저 프린트용 F-θ 렌즈의 개발에 성공하였다. 기초과학기술연구원에서도 '98년에 도입된 초정밀 경면 가공기를 기반으로 각종 초정밀 부품 및 금형 가공기술을 개발하고 있다. 이외에도 (주)테놉스, (주)엔투에이 등 초정밀 터닝머시닝을 자체 설계 제작하거나 도입하여 FLU, BLU 및 마이크로 렌즈류의 경면 미세 금형을 제작하고 있다.

기계적 미세 가공 시스템

그림 3은 한국기계연구원에서 구축한 초정밀 미세 가공시스템이다. 주요구조는 X-Y-Z의 기본 3축으로서 Z축은 고정공구대와 스핀들을 교차 사용할 수 있어 고정공구에 의한 형삭가공(shaper or planar)과 회전공구에 의한 드릴링, 앤드밀링, fly-cutting 등이 가능하다. 여기에 별도의 turning축이 부가되어 있어 소형 반사경, 디스크, 렌즈 등의 가공에도 적용할 수 있도록 하였고, rotary table 또는 tilting 축을 부가하면 전체적으로 6축 기능을 갖는 미세 가공시스템으로 된다. 시스템의 성능은 반복위치정밀도 0.1㎛ 수준이며, 레이저 인터페로메타에 의한 보정기능을 추가할 경우 2nm 수준의 정밀도를 갖게 되고, 회전공구용 스핀들은 최대 60,000rpm까지 사용 가능하다. 전체 시스템의 구동에는 8축 동시제어가 가능한 Deltatau 사의 PMAC Board Motion controller가 적용되었다. 가공 소프트웨어는 PC베이스 NC가공으로 구축되어 CAD/CAM에 의한 2, 3차원 형상의 자유로운 가공이 가능하다.

미세 그루브 가공

그림 3의 미세가공시스템에서 고정공구를 이용한 형삭(shaping)가공법으로 황동, 알루미늄, 니켈, PMMA 수지재료 등

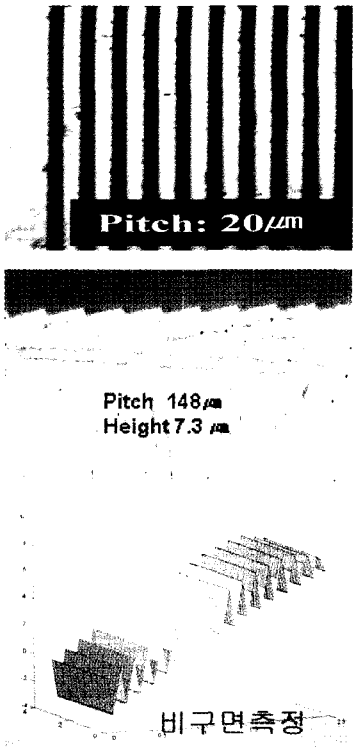

그림 4 미세 그루브 및 도광판 백라이트 가공 예

에 대한 미세 그루브 및 휴대폰용 도광판(BLU) 금형 의 가공실험을 수행하였다(그림 4 참조). 공구는 천연다이아몬드 공구를 국내에서 제작하여 사용하였고, 실험결과 현재 그루브 피치 1㎛ 수준의 미세 패턴을 달성하였다. LCD 도광판 금형의 경우는 피치

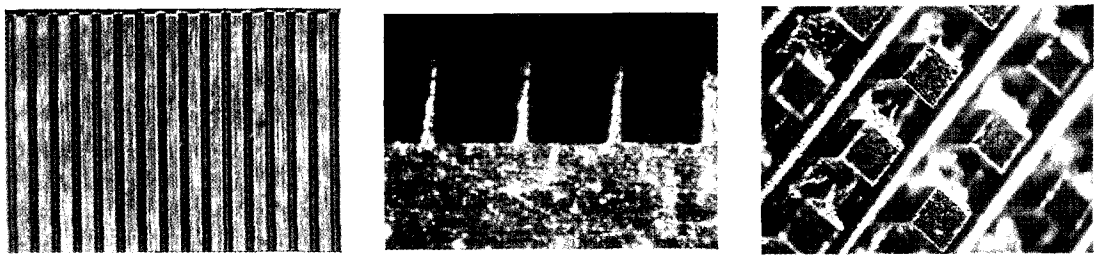

그림 5 미세 격벽 및 각주 어레이 가공 예

그림 6 마이크로 인벌루트 곡선 창성가공 예

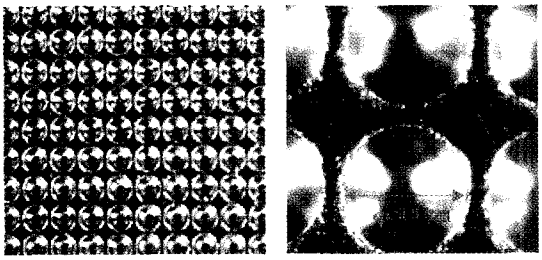

그림 7 마이크로 렌즈어레이 금형 예

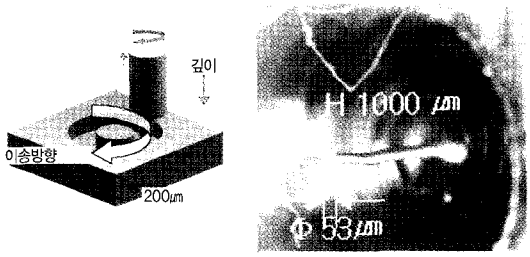

그림 8 미세 shaft 가공 예

148㎛, 치형 높이 7㎛의 평면 및 비구면 미세 형상 금형을 표면거칠기 8nm로 가공하여 실용화하는데 성공하였다.

마이크로 앤드밀에 미세형상가공

그림 5에는 마이크로 앤드밀을 이용한 미세 격벽 가공 및 미세 각주 어레이 구조물의 가공모습을 나타내었다. 절삭공구는 직경 200㎛ 초경 앤드밀공구이며, 격벽 가공에서 가공한 구조물의 최소 치수는 두께 10㎛, 깊이 200㎛이었으며, 각주 어레이는 200×200㎛ 크기로 제작되었다.

그림 6에는 마이크로 앤드밀로 마이크로 Scroll 펌퍼 형상의 인벌루트 곡선을 창성가공한 예를 보여주고 있다. 가공공구는 직경 100㎛ 앤드밀 공구이며, 내경 최소 곡률반경은 300㎛, 격벽 두께 10㎛, 구조물 깊이 500㎛이다.

그림 7은 마이크로 렌즈어레이 금형 가공 예를 보여주고 있다. 30×30mm 황동소재에 전체 5,200개의 렌즈어레이를 50㎛ 간격으로 6시간에 걸쳐 가공한 것으로서 가공공구는 직경 300㎛ 볼앤드밀 공구이고 가공깊이는 최대 반경 깊이인 150㎛이다.

그림 8에는 고세장비 마이크로 원주(또는 shaft)의 가공 예를 보여주고 있다. 원주 구조물의 직경은 53㎛, 높이는 1mm이다. 가공공구는 직경 300㎛볼 앤드밀이다.

그림 9는 마이크로 fan 금형의 가공 예를 보여주고 있다. 팬의 크기는 직경 3mm이며, 가공 깊이는 500㎛이다. 사용공구는 직경 100㎛ flat 앤드밀 공구이다.

그림 10은 고속가공의 일환으로 수행된 3차원 자유형상의 가공 예를 보여주고 있다.

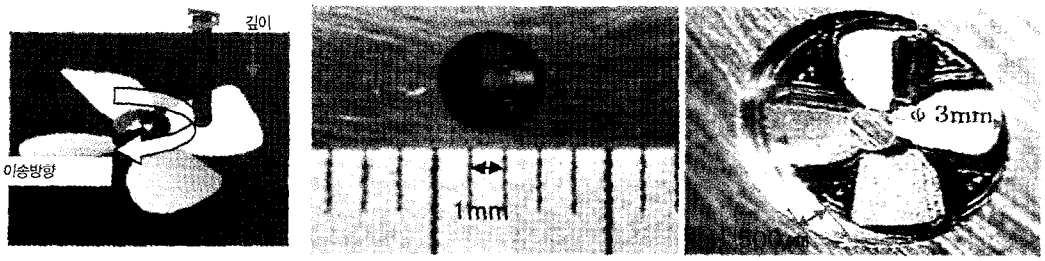

그림 9 마이크로 fan의 가공 예

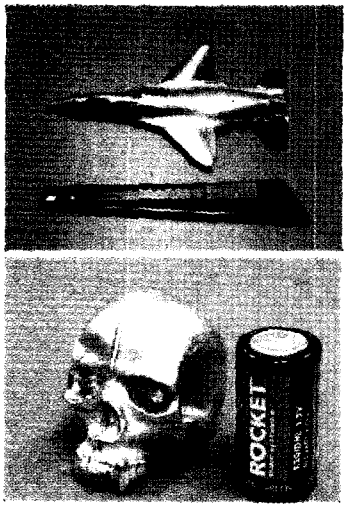

그림 10 3D 및 자유형상 구조물의 가공 예

CAD 모델링을 통하여 생성된 데이터를 NC화하여 CAM 프로그램에 연결하여 공구경로(tool path)를 생성하고 시뮬레이션 실험을 한 후 실제 형상을 가공한 것이다. 특수한 공작물 고정법을 사용하여 비행체와 인골의 자유형상가공을 완성하였다.

마이크로 드릴링 기술

그림 11에 KIMM에서 구축하고 있는 초미세 구멍 가공용 마이크로 드릴링 시스템의 모습 및 직경 25㎛급의 마이크로 드릴, 이를 이용하여 SKD11 재료에 직경 25㎛의 구멍을 가공한 예

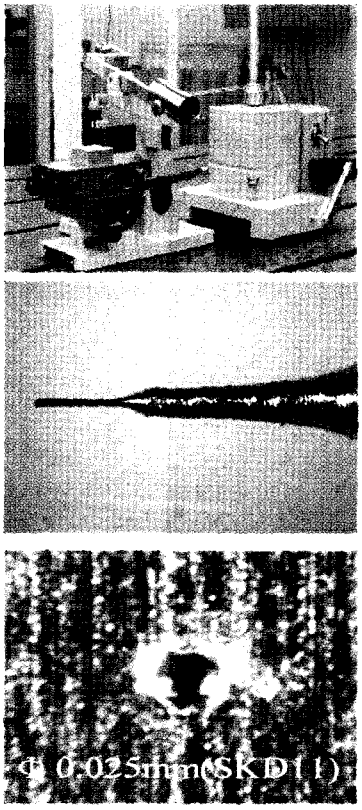

그림 11 미세 드릴링 머신, 25㎛ 드릴공구 및 구멍가공 예

를 나타내었다. 본 드릴링 머신은 직경 25㎛ 정도의 미세 드릴을 적용할 수 있도록 특수한 구조로 설계·제작되어 있으며, 직경 25㎛급의 미세 드릴은 전자빔(EB)으로 제작된 것을 수입하여 사용하였다.

그림 12는 KIMM에서 구축하고 있는 248nm(KrF)레이저 가공시스템 및 미세 구멍의 가공 예를 나타내었다. 현재 KIMM에서는 KrF Excimer 레이저 및 Nd-Yag 레이저 시스템을 보유하고 이를 이용하여 수㎛~수십㎛ 급의 마이크로 드릴링 기술, 미세패턴 가공기술 및 이를 이용한 미세형상 금형가공기술을 개발하고 있고, 향후 Femto-second 레이저 시스템을 구축하여 더욱 정밀한 미세 가공기술을 수행할 계획을 진행 중이다.

그림 13은 밀리스트럭쳐 개발

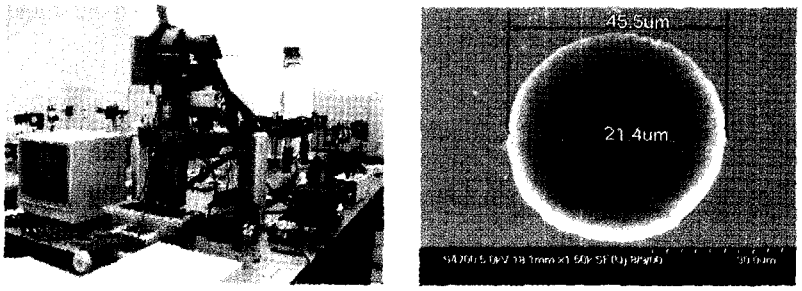

그림 12 248nm(KrF)레이저 가공시스템 및 미세 구멍 가공 예

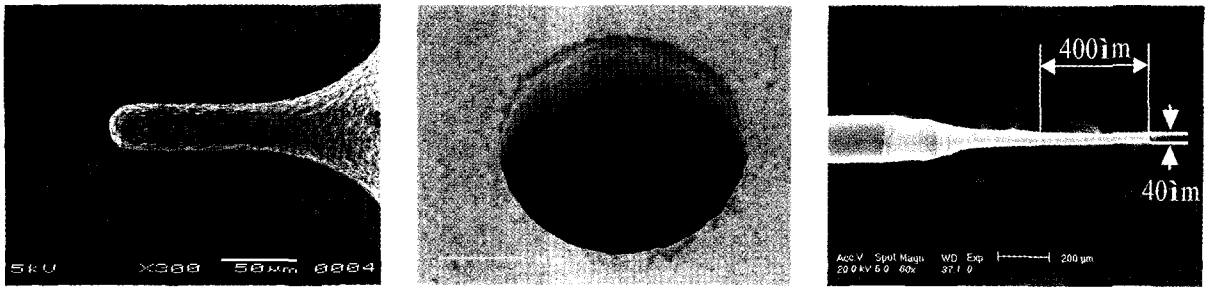

그림 13 방전 및 전해가공에 의한 텅스텐 카바이드 미세축 시제작 예

사업의 미세 금형가공 기술개발 과제의 일환으로서 서울대학교에서 수행 중인 미세 방전가공 및 전해가공의 결과에 대한 예를 나타내었다. 직경 50㎛ 급의 미세 반구형 전극을 개발하고 이를 이용하여 미세 구멍을 가공한 예를 보여주고 있다. 이 전극과 구멍은 마이크로 펀칭용 펀치 및 다이로 다시 적용되고 있다. 또한 전해가공에 의해서도 효과적으로 미세축이나 공구를 제작할 수 있는 결과를 보여주고 있다.

그림 14에는 밀리스트럭쳐 개발사업의 미세 금형 가공기술개발과제의 일환으로 생산기술연구원에서 수행 중인 마이크로 초음파 가공에 의한 미세 구멍가공 결과의 예를 보여주고 있다. 공구 재료는 텅스텐 카바이드이고 공구 끝의 진폭을 5㎛ 정도로 조절하는 미세 초음파가공으로 알루미나계 세라믹 소재에 50㎛ 구멍을 가공한 것이다.

그림 15에는 최근에 국내외적으로 신기술로 각광받으며, 개발되고 있는 화학 및 전자장, 자성 및 점성유체 등을 이용한 연마가공, 즉 ERF(ElectroRheological Fluid) 연마가공의 예를 보여주고 있다. ER 유체에 의한 연마가공은 미소 형상의 가공에 적합한 것으로 마이크로 렌즈 가공 등으로의 적용이 검토되고 있다. 이에 비하여 대면적 가공에는 MRF(MagnetoRheological Fluid)가공법이 연구되고 있으며, 향후 CMP 가공 이후의 반도체 웨이퍼 연마기술로의 적용이 기대되고 있다.

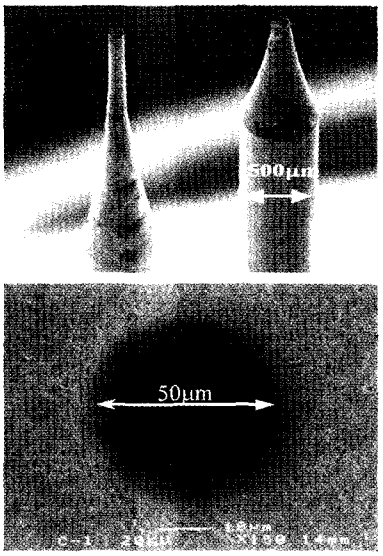

그림 14 초음파가공용 공구 및 세라믹 가공 예

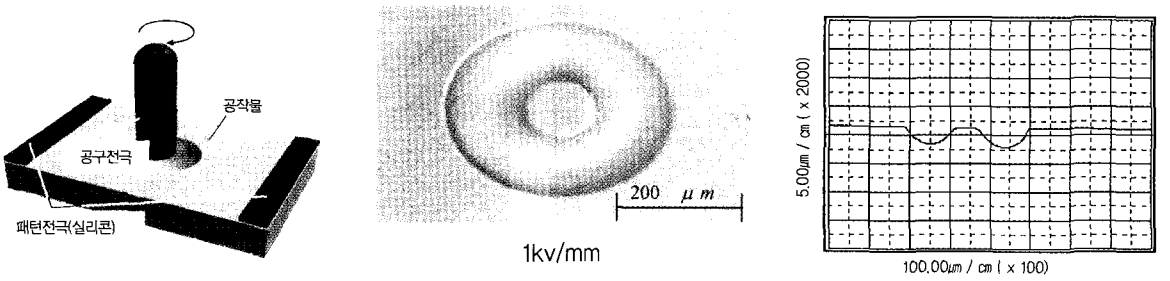

그림 15 ER 유체에 의한 미소 부위의 연마 특성실험