

◆특집◆ Micro Machining

절 · 연삭에 의한 Micro Machining 기술

이응숙*, 제태진*, 신영제*

Micro Machining Technology Using Turning and Grinding

Eung Sug Lee*, Tae Jin Je*, and Young Jae Shin*

Key Words : Micro Fabrication Technology (미세형상가공기술), Micro Turning (미세선삭), Micro Milling (미세밀링), Micro Grinding (미세연삭)

1. 서론

지금까지의 기계산업의 발달은 대규모의 플랜트 혹은 대형기계 개발 등 대형화를 추구해왔다. 그러나, 최근 에너지와 환경에 대한 인식과 정보통신, 전자산업, 생명산업의 발달로 소형화와 미세화의 기술 개발이 요구되고 있다. 그 예로 크기가 micron 혹은 sub-millimeter 단위인 초소형기계(Micro Machine)이 등장하게 되었고, 이러한 부품 및 시스템을 제작하는 미세 가공 기술을 Micro Machining이라고 할 수 있다.¹⁾

일반적인 마이크로 머시닝기술은 반도체 공정 기술을 응용한 MEMS 기술이 주로 이용되어왔다. 이것은 마스크 패턴의 전사에 의한 가공기술로 매우 미세한 가공과 대량생산이 가능하고 가공과 조립이 동시에 진행 할 수 있는 특징이 있다. 그러나 현재 마이크로 센서 혹은 미세구조물의 제작에 있어 3차원 구조물의 제작이 힘들고 적용재료가 한정되어있으며 고품위의 표면조도를 실현시키기 힘든 문제점으로 기술적 응용이 제한되고 있다.

또한, 가공물의 크기가 너무 작아 부품의 조립 및 취급이 어렵고, 실제로 응용 가능한 힘을 전달하기 어려우므로 기계적 부품으로 사용하기가 힘들다. 최근 서브 마이크론의 정밀도와 1mm 이하의 치수로 가공 제작할 수 있는 전용공작기계류의 개발에 힘입어 기계적인 미세 가공을 통해서 반도체기술로는 얻지 못하는 3차원 미세 형상의 생성등 다양한 요구에 대응하고자 하고 있다.

이러한 기계적인 미세 가공 기술은 생산 활동에 응용되어 현재 일본 등의 기술선진국의 첨단산업을 떠받치는 핵심기술이 되었다. 대표적인 미세 가공 기술로서는 절연삭, 방전 및 전해가공, 초음파가공, 레이저가공, 드릴링 및 밀링기술을 비롯하여 기계 화학적 또는 전자장을 이용하는 복합 가공 기술 등이 있다. 그 외에도 반도체 프로세스, LIGA, 비임가공, 광조형, 사출성형, 이온주입, STM 등이 있으며, 여기서는 기계적인 미세 가공 기술 중에서 대표적인 기술에 대해 살펴보기로 한다.

2. 미세 절삭 가공 기술

3차원 형상을 자유로이 가공가능한 방법으로서 전통적인 절삭/연삭 가공법이 널리 이용된다. 기존의 절연삭가공은 가공력이 커 미세한 구조물의 가공에는 적합하지 않은 것으로 생각되어지기 때문에 많은 예가 없었지만, 최근에는 정밀 운동제어,

* 한국기계연구원 자동화연구부 정밀가공그룹

Tel. 042-868-7140, Fax. 042-868-7149

Email les648@mailgw.kimm.re.kr

초정밀 경면가공, 초미세 가공 기술개발을 위한 절삭, 연삭, 래핑, 폴리싱등을 비롯하여 반도체분야의 기계가공연구수행.

계측, 정밀 가공용 공구의 진보에 의해 서브미크론 단위까지 쉽게 가공할 수 있는 단계에 이르렀다. 그러나 현재 실험실적으로는 이미 절입 1nm에서 절삭이 이루어지고 있고²⁾, nm 오더의 절입에서 절삭력도 측정되고 있다.³⁾ 이러한 초정밀 마이크로 절삭에 있어서의 결정된다. 향후 마이크로 절삭의 가공한계가 어디까지 향상할 지는 이러한 기계, 공구 등의 하드웨어는 공작기계의 운동정도와 공구 인선에 있어서의 공구형상의 전사정도, 즉 가공프로세스에 의해의 발전에 달려있다. 한편으로는 분자 동력학을 이용하여 분자 레벨의 절삭 시뮬레이션에 대한 연구⁴⁾⁵⁾가 이루어지고 있어 분자 레벨의 절삭가능성도 기대해볼 만하다.

초정밀 절삭가공에서 치수정밀도는 공작물 치수에 따라 현재 0.1~0.01 μm 수준이고 표면조도는 이 보다 한 단위 아래인 것으로 판단된다. 주로 단결정 다이아몬드 공구를 이용하여 공구의 형상정밀도를 그대로 공작물에 전사하는 경우이다. 그러나 다이아몬드 공구의 재질 특성상 알루미늄, 구리, 플라스틱등 연질 금속에 주로 이용되고 세라믹, 철등의 가공에는 크게 응용되지 못하고 있다.

초미세 절삭 가공의 공구로는 단결정 다이아몬드 바이트를 이용한 선삭, 플라이 커팅, 또는 특수형상의 다이아몬드 엔드밀을 이용한 마이크로 부품의 밀링가공이 시도되고 있다.

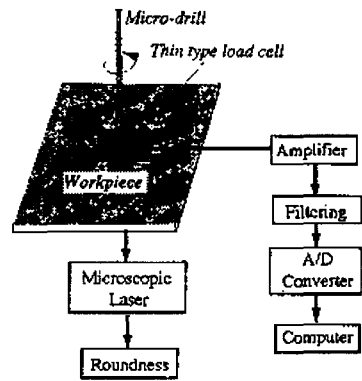
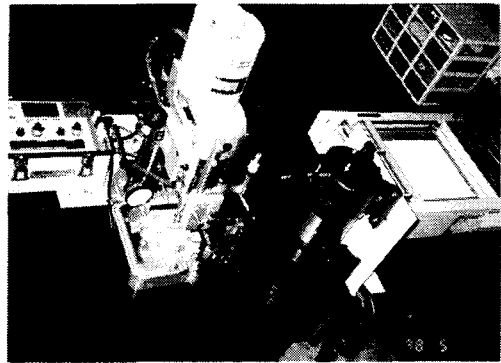


Fig. 1 Micro Drilling System

2.1 국내관련기술개발 현황

종래의 초정밀 절삭 가공 기술로는 소재의 고품위 가공면을 달성할 수 있지만 선반을 이용한 실제적인 초미세 부품화로의 적용 예는 그다지 많지 않다. 따라서 초정밀 가공기 상에서 단결정 다이아몬드 바이트를 이용한 밀링 가공을 수행하여 3차원형상의 초정밀 마이크로 부품을 생산하기 위한 관련 연구가 진행 중에 있다.⁶⁾

국내의 경우에는 한국기계연구원에서 직경 50-100 μm 의 마이크로 드릴을 제조할 수 있는 공정 및 평가 기술에 관한 연구를 수행하는 한편, 스테핑 모터를 적용한 전용 가공 시스템을 활용하여 박판에 대한 고세장비의 천공 실험을 수행하고 있다.

Fig. 1은 KIMM과 참여기업이 공동개발한 마이크로 드릴링 시스템과 드릴링 공정 및 성능평가 시스템이며, Fig. 2는 본 시스템을 적용하여 직경 100 μm 및 50 μm 의 마이크로 구멍을 가공한 모습이다.



Fig. 2 Drilling Example (Diameter 100 μm , 50 μm)

또한 한국기계연구원에서는 초정밀 경면 절삭 가공기술개발의 일환으로 Fig. 3과 같은 초정밀 경면 가공기를 개발하였으며, 각종 재료 및 제품형상의 경면 가공기술개발에 대한 연구를 수행하였다. Fig 4에는 0.3mm 피치의 미세한 그루브를 가진 프레넬 렌즈 금형 가공 예를, Fig 5에는 이때 사용된 미세 인선 다이아몬드 공구(날끝 반경 10 μm 및 1.5 μm) 형상을 나타내었다.

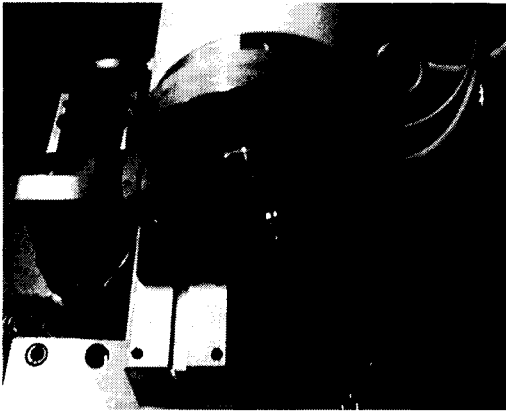


Fig. 3 Ultra Precision Machine (KIMM)

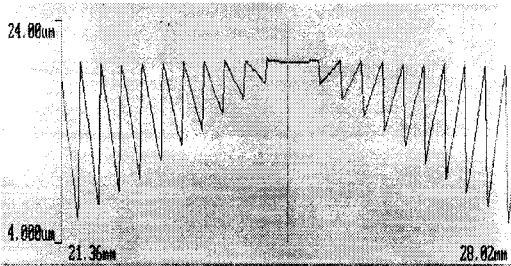
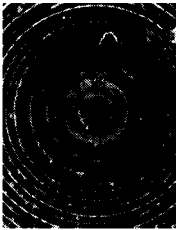
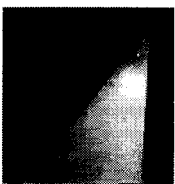


Fig. 4 Machining Sample of Fresnel Lens Die



Nose R= 1.5µm



Nose R=10µm

Fig. 5 Diamond Tools for Fresnel Lens

이와 더불어 최근 한국기계연구원에서는 차세대 신기술개발 사업의 일환으로 초소형 부품 즉, Milli-Structure 또는 Micro machine용의 미세 부품 개발하기 위한 미세 금형 가공 기술에 대한 연구를 진행하고 있다.⁷⁾

제품의 크기는 수mm이하이면서 형상정밀도는 1 마이크로 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 가공기술을 구현하고자한다. 따라서, 기존의 공정을 개선하여 극미세 가공 기술을 개발함과 동시에 새로운 가공 메카니즘에 의한 가공 공정의 개발도 겸하고 있다.

가공기술의 종류는 절연삭, 미세 방전 및 전해 가공, 초음파가공, 레이저가공, 미세 드릴링 및 밀링기술을 비롯하여 기계화학적 복합가공을 이며, 평면, 구멍, 그루브, Cavity등의 미세 금형 형상 가공의 단위 공정 기술을 개발한다.

미세 금형 가공기술이란 크기가 수mm의 공간적 개념을 갖는 미세부품을 반복 대량으로 성형, 가공하기 위한 다이(dies)와 몰드(mold)를 제작하는 기술로서 수 mm에서 수십 µm 크기의 펀치와 다이, 코어 와 캐비티를 가공할 수 있도록 Fig 6과 같이 세가지 분야로 나누어 미세금형가공기술개발을 시도한다.

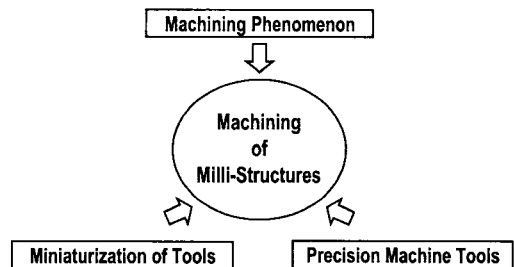


Fig. 6 Approach of Milli-Structure

가공기로는 기존의 초정밀 가공기를 활용하여 Fig. 7 과 같은 대표적인 미세 부품의 성형에 응용할 수 있는 기존의 미세 절연삭가공, 방전가공, 전해가공과 새로운 화학 기계적인 방법에 의한 미세제거기술을 개발하며, 금형의 경면가공을 위하여 전기점성 유체에 의한 연마기술을 개발할 예정이며, 제거가공에 의한 가공이외에 적층에 의한 금형제작

기술도 개발할 예정이다.

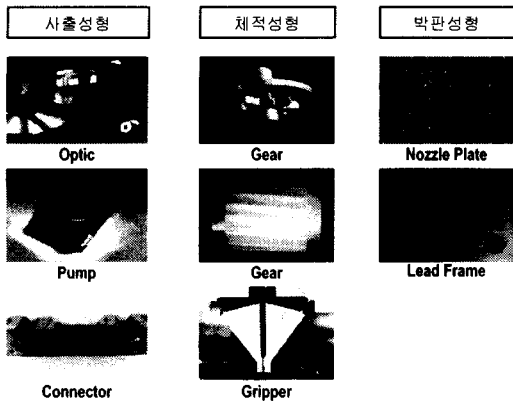


Fig. 7 Example of Micro Machining

2.2. 국외의 마이크로 가공기술동향

일본은 마이크로 절삭가공 기술 분야에서 세계에서 가장 활발하다고 볼 수 있다. 기계 기술 연구소(MEL)에서는 기존의 축적된 초정밀 기계 가공 기술들을 기반으로 하여 미세 가공기의 새로운 체계 구축을 위한 요소 기술 측면에서 관련 기술 개발을 시도하고 있다. 현재 미소 기능 요소 기술, 에너지 공급 기술, 시스템 제어 기술, 평가 기술 및 총합 시스템 기술 등에 관한 연구들을 수행하고 있으며 마이크로 공장의 실현을 위한 기초 연구를 수행함으로써 Fig. 8과 같은 세계에서 가장 작은 미소 선반을 제작한 바 있다.¹⁰⁾

Laminated Piezo Actuator 방식에 의한 XY 구동 유닛과 마이크로 모터에 의한 주축 디바이스 등을 중심으로 제작되었으며, 32×25×30.5mm의 초소형화된 사이즈이고 전체 중량은 100g, 주축 디바이스의 구동 용량은 1.5W 이다. 보통의 선반에 비하여 크기는 1/50, 중량은 1/10000, 소요동력은 1/1000 이라는 특징을 가지고 있다. 이와 같은 미소 선반을 이용하여 직경 2mm의 황동봉을 절삭 가공하여 1.5 μ m(Rmax)의 가공면 거칠기와 2.5 μ m의 진원도를 획득함으로써 일반 선반과 동등 이상의 성능을 발휘할 수 있다는 것을 확인하였다. 최소 직경 60 μ m까지의 공작물에 대한 가공이 가능하며 Fig. 9는 아세틸 레진 봉의 가공 예이다. 마이크로 선반을 이용하는 경우의 에너지 소비량을 살펴보면, 마이크로 모터를 사용하므로 일반 선반에 비하여 1/100 정도의 에너지만 소비되며, 어떠한 가공에서

라도 실제 절삭가공에 소요되는 에너지 소비량은 전체의 약 5% 정도인 것에 불과하다. 이는 소형 제품 가공시 대부분의 에너지는 기계가동에 소요되며, 공작기계가 소형화되면 공작기계도 축소될 수 있고, 마이크로 공장은 공기조화에 필요한 에너지를 절감할 수 있다는 장점을 유추할 수 있다.

일본의 전자 기술 통합 연구소에서는 발전용 고기능 유지 기술 평가 관련 분야 중에서 마이크로 머신의 군제어 기술 및 원격 제어 기술 등에 대하여 연구를 수행중이며, 멀티 마이크로 로봇 및 극미소 전자총을 이용한 3차원 가공 기술 등의 세부 연구 과제를 추진하고 있다

일본의 FANUC사에서 고속 에어 스피너들을 탑재하여 새로 개발된 선반형의 초정밀 소형 밀링

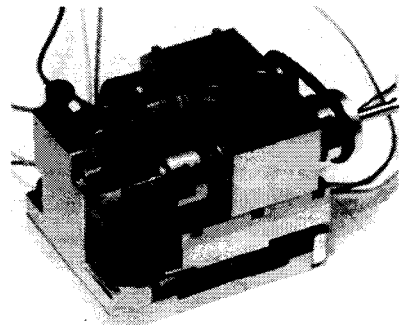


Fig. 8 Micro Lathe

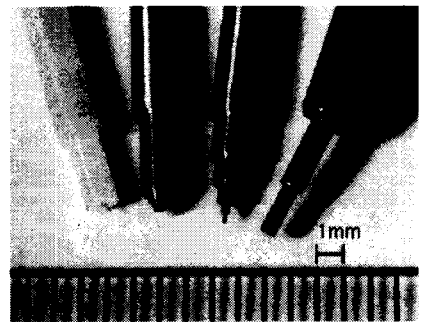


Fig. 9 Examples of Micro Turning

머신으로 금속에 대하여 부조형의 조각 방식으로 마이크로 가공한 예를 Fig. 10의 (a)와 (b)에 나타내었다. Fig. 10의(a)는 CAD에 의해 작성된 인상이며 Fig. 10의 (b)는 이를 이용하여 금속재에 대하여 가공면 거칠기 77nm(Rmax)를 지니는 직경 3mm 크기

의 고품위의 소형 인상 가공을 한 예를 나타내고 있다.

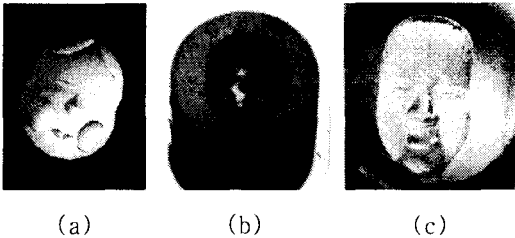


Fig. 10 (a) CAD Mask, (b) Micro Machining Sample (Metal) (c) Micro Machining Sample (Glass)

기존의 연구에 의하여 미소 절입량 부가 방식에 의한 연성 제거 모드 방식의 가공으로 취성재를 가공할 수 있다는 보고가 있으나 미소 형상의 가공에 대한 초정밀 3차원 고품위화의 적용은 매우 힘들다고 할 수 있다. 그러나 Fig. 11과 같은 초정밀 밀링 가공기를 활용하여 직경 1mm의 글라스에 대하여 가공면 거칠기 50nm(Rmax)의 고품위를 생성할 수 있으며 Fig. 10의 (c)에 그 예를 나타내었다.¹¹⁾

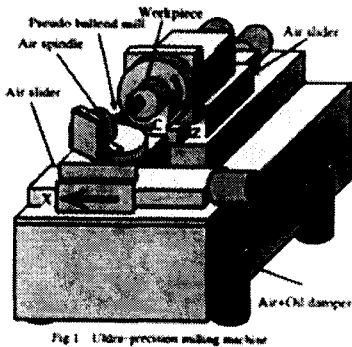


Fig. 11 Micro Milling Machine

일본의 동경대에서는 각종 정보 기기와 관련한 분야의 기술이 고도화되면서 이러한 기기를 구성하는 부품이나 장치가 점차 고밀도화, 초소형화됨에 따라 마이크로 미케니즘의 가공, 제작 및 응용에 관한 연구를 진행중에 있으며, Fig. 12와 같은 최대 속도 100,000rpm의 초고속 스피들을 탑재한 마이크로 선반을 시제작하여 직경 10 μ m 정도의 마이크로 구조를 가공하는 실험을 수행 중에 있다.

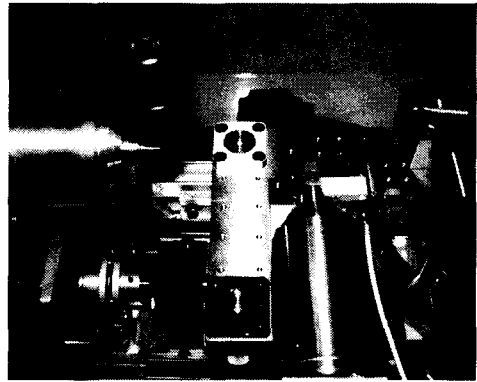


Fig. 12 Micro Lathe

미국의 로체스터대에서는 Moore Tool사와 공동으로 Micro Grinding M/C을 개발하여 직경 10 mm 급의 비구면 마이크로 렌즈에 대하여 진원도 1nm 급, 가공면 결함층 1-2nm급의 정밀 성형 가공을 수행하고 있으며, REMMELE Engineering사에서는 8축 초정밀 소형 선반으로 미소 형상의 부품을 가공하고 있다.

캐나다의 MEMStek Products, LLC에서는 스위스의 RMB Miniature Bearings사와 공동으로 Fig. 13과 같은 DC 마이크로 브리쉬레스 모터를 개발하여 모터와 기어 트레인 등의 각종 초소형 공작 기계류 부품에 적용할 수 있는 응용 연구를 수행 중에 있다.

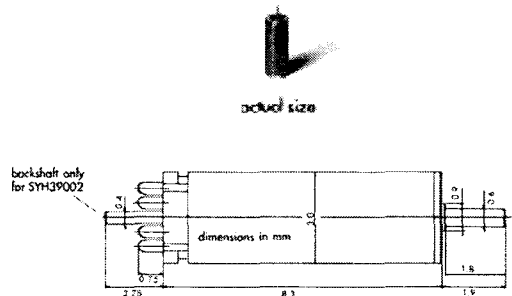


Fig. 13 Micro DC Motor (Diameter less than 2mm)

독일의 Fraunhofer 연구소에서는 미세 절삭과 밀링 가공을 적용하여 마이크로 구조 요소 부품을 가공 제작하였으며, 초미세 선반을 이용하여 Fig.

14와 같은 미세한 축를 가공하였다. 큰 직경은 50 μm , 작은 직경은 8 μm 이며 가공면 거칠기는 약 10nm(Ra)이다.

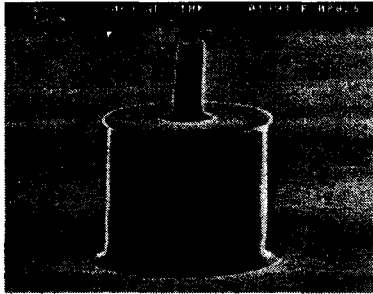


Fig. 14 Example of Micro Shaft

FANUC사에서선 선삭에서 3차원 형상 가공까지 복합가공이 가능한 ROBO nano Ui의 초정밀 마이크로 머신을 개발하였다(Fig. 15, 16).. 지금까지 lithography로 제작하기 어려웠던 자유곡면 형상의 회절격자나 비구면 렌즈의 금형을 가공이 가능하게 되었으며, 200mm의 이송거리와 1nm의 분해능을 갖는 Non-friction servo system, 2nm 오차 이내의 이송서보모터트랙을 채용하고 있다. Fig 17은 이 기계를 사용하여 직경 1mm, 높이 30 μm 의 가면 마스크를 경면 가공한 예이다. 재질은 황동이며 공구회전수는 50,000rpm, 가공속도는 5mm/min으로 약2시간 가공으로 58nmRmax의 표면조도를 얻었다.

Fig. 18 은 가공에 이용된 단결정 다이아몬드 공구의 형상이다. 공구를 회전시켜 엔드밀과 같은 효과를 내는 일종의 Fly-cut 방식이다.

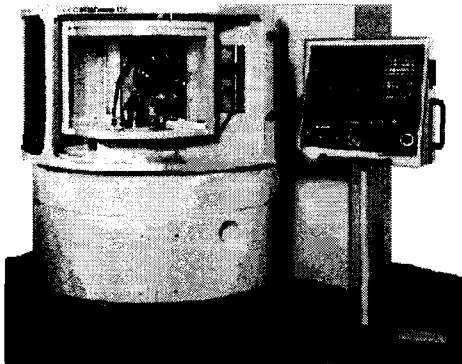


Fig. 15 ROBO nano Ui Micro machine

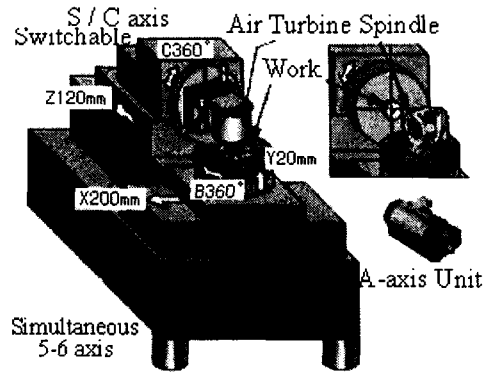
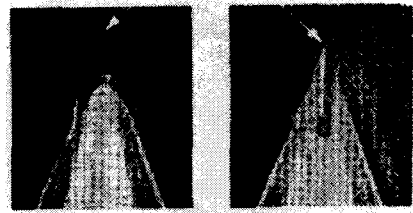


Fig. 16 Structure of ROBO nano Ui Machine



Fig. 17 ϕ 1mm Face Mask



단결정 다이아몬드 바이트

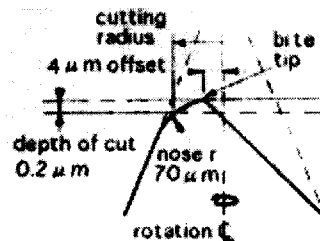


Fig. 18 Diamond Tool Shape

일본 Kanazawa 대학에서는 Micro lathe turning system을 개발하여 다이아몬드 공구를 이용한 다양한 형상의 Micro Parts 가공기술을 개발하고 있다. (Fig. 19, Fig. 20). 기계의 크기는 200mm이고, 15,000rpm의 스피들을 장착하여 공작물 직경 0.3mm를 최소 10 μ m 까지 가공할 수 있으며, 3방향의 Force Sensor로 절삭력을 측정할 수 있게 하였다. (Fig. 21)

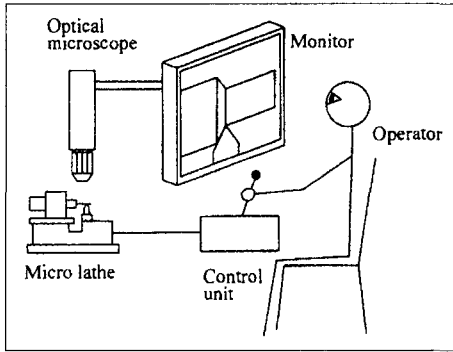


Fig. 19 Micro Cutting System

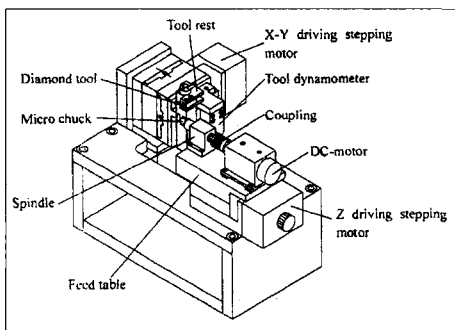


Fig. 20 Schematic of Micro Lathe

가공 공구는 직경 0.25mm 붕에 경사각이 0° 또는 60° 인 삼각 피라미드형 단결정 다이아몬드 공구를 부착사용하며, 공구대는 회전이 가능하여 facing, forming, taper turning, internal cutting 등 다양한 형태의 절삭에도 적용 가능하도록 되어 있다

공구동력계는 Fig. 21과 같이 가공중 3방향의 절삭력을 측정할 수 있도록 0.3mm 평판 위에 스트레인게이지를 부착하는 형식으로 구성되었으며 하중측정 범위는 1mN~1N 이다.

가공 예로는 단결정 다이아몬드 공구로 직경

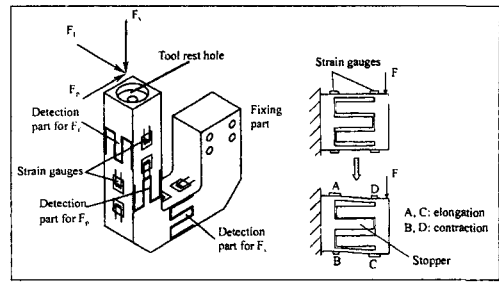


Fig. 21 Cutting Dynamometer

0.3mm의 황동 wire를 사용하여 직경 200 μ m, 최소직경 10 μ m 까지 가공하였으며, 직경 100 μ m 붕의 단면 가공, 30 μ m 깊이로 100 μ m 길이의 groove 가공, 직경 120 μ m에 피치 12.5 μ m의 screw 가공 등을 하였고, 표면조도는 모두 1 μ mRmax 이하를 달성하였다.

스위스의 경우는 전문 제조 업체에서 PCB 보드 및 반도체 관련 제품, 특수 섬유사 제조용 노즐 헤드 등의 초미세 천공 가공을 위한 직경 100 μ m 이하의 마이크로 드릴을 생산하여 전세계에 고가로 시판하고 있다.

미국 Purdue 대학교에서는 미세 방전 가공 중 정확한 방전상태 진단과 전극 이송제어에 관한 연구가 진행중이며, 로체스터 대학에서는 Moore Tool사와 공동으로 Nanotech150AG라는 절연삭 공용 초정밀 가공기를 개발하여 직경 10mm급의 비구면 마이크로 렌즈에 대하여 진원도1nm, 가공면 결함층 1-2nm급의 정밀가공을 수행하고 있다.

또 National Jet사에서는 마이크로 드릴링 머신 및 드릴을 개발하여 25 μ m의 구멍을 2.5 μ m의 정밀도로 가공하는데 성공하고 있다.

그외, Hologram 광학소자, Micro Mirror Array, DVD, Projection TV, CDP, Printer, Camera, LCD용 LGP, Laser Printer-용 f- θ Lens 등 첨단 제품에 들어가는 렌즈 및 금형등에 다양한 개발사례가 보고되고 있다.

3. 미세 연삭 가공 기술

기존의 가공 방법들 중에서 연삭가공은 다른 가공공정이 지니지 못한 고정밀도와 고품위 가공면을 얻을 수 있는 반면 폭넓은 소재에 적용할 수 있는 게 장점이다. 특히 대량생산을 위한 금형의 수요가 점차 다양화되고 증대되고 있다. 또한 최근 반도체

체, 정밀 전자부품 등에서는 그 사용되는 부품이 고기능화 되고 3차원형상으로 복잡화되며 고정밀도를 요구하며 더욱 미소화 되어가고 있다. 예를 들어 특히 반도체 재료인 실리콘 웨이퍼의 절단 및 표면가공은 고품위 연삭기술에 의해서만 실현할 수 있고, 레이저 프린터의 폴리곤 미러, 비디오 드럼 등은 초정밀 연삭/연마 가공에 의해 실현되어 상품화되고 있는 실정이다. 초정밀 고품위 미세 연삭/연마 가공기술이야말로 제품의 질을 최종적으로 결정짓고, 모든 산업제품의 기초가 되기 때문에 그 중요성이 어느 분야보다도 크다 할 수 있다.

그러나 마이크로 요소부품의 연삭공정에서는 가공저항에 의한 변형이나 가공결함이 발생할 가능성이 있다. 그러므로 마이크로 기계 요소 부품에 대하여 연삭 가공을 효율적으로 적용하기 위해서는 연삭 저항의 억제 및 적절한 소재의 선정을 위하여 연삭 저항, 연삭 조건, 연삭휠 사양 등과 재료 특성간의 관계를 명확히 규명할 필요가 있게 된다.

마이크로 머신의 크기를 1mm 정도라고 감안하면 이를 구성하는 부품은 100 μm 정도라고 할 수 있으며, 이를 위한 가공 기술은 대상이 가볍고, 작고, 약하기 때문에 조심스럽게 취급하여 가공할 필요가 있으며 가공 정도는 0.1 μm 정도가 바람직하다는 특징을 지닌다.

마이크로 요소 부품을 생산하기 위한 최근의 마이크로 연삭 관련 기술 개발은 연삭공구의 개발, 사용기술, 공작물의 취급, 가공공정의 최적화, 가공부품의 기능평가등을 중심으로 일본 등에서 활발히 연구 진행중에 있다.

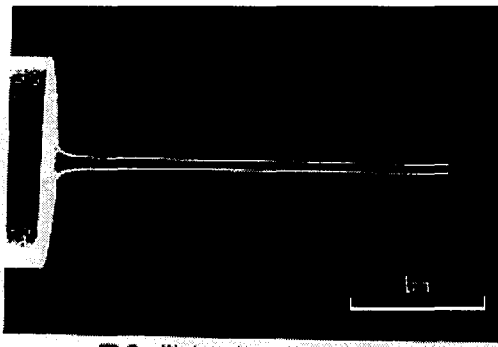


Fig. 22 Cylindrical shape micro grinding

Fig. 22는 초소형 정밀 선반을 이용하여 직경 1, 1.5mm의 고속도강과 초경 합금에 대하여 길이 1~

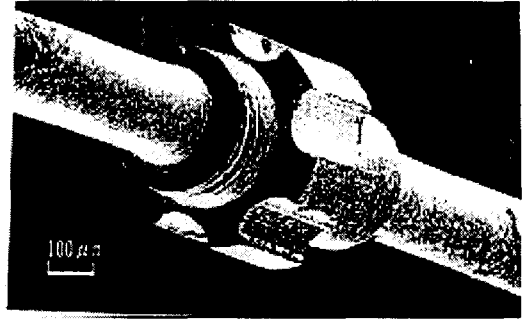


Fig. 23 Gear shape micro grinding

3mm, 직경 50~250 μm 의 마이크로 원통 형상 공작물을 가공한 결과이며, Fig 23은 기어 형상을 성형 가공한 예를 나타낸다.¹⁴⁾

기존의 절삭, 연삭 혹은 폴리싱등의 단위공정만으로는 각기 적용재료, 형상, 생산성등 여러 가지 제한적 요소가 많으므로 복합공정의 기술개발의 연구도 활발히 이루어지고 있다. 메탈 본드 스톨의 개발과 함께 ELID라는 전해 인프로세스 드레싱기법의 개발을 비롯하여 화학기계인 복합공정의 개발이 다양하게 이루어지고 있다. 즉, 화학적인 반응에 의한 재료표면의 연질층의 생성과 기계적인 미세 제거가공의 융합에 의한 가공력감소, 가공능률의 향상 공구마멸의 감소등의 효과로 정밀 미세가공이 가능하게 된다. 이의 대표적인 예로서 화학기계연마인 CMP공정이며, Fig. 24는 화학기계 복합공정에서의 가공능률 비교를 그림으로 표시한 것이다.

또한, 기존의 미세한 비구면의 형상가공은 미세

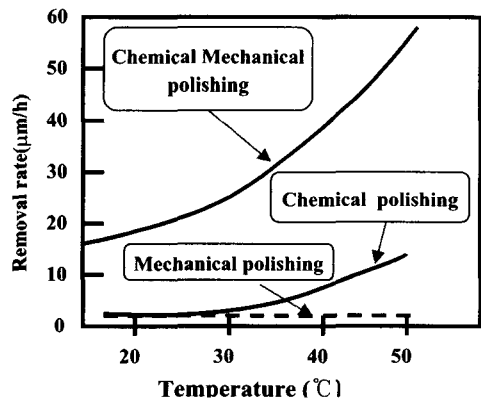


Fig. 24 Removal Rate Comparison

한 다이아몬드 스톨을 이용하였으나 직경이 1mm이하의 비구면 금형의 가공등을 대상으로 스톨 제작의 어려움이 있어, 전장속에서 공구로 작용할 수 있는 ER유체를 이용하는 기술이 등장하였다. ER(Electrorheological Fluid)유체란 전기장을 가하면 점성이 변하는 유체의 총칭이며, 이를 이용하여 유체에 미세 지립을 첨가하고 공구를 회전시키면 공구주변에 지립이 집중,반고정화될 수 있다. 이와같은 가공법을 구현하여 비구면의 생성 및 연마에 이용할 수 있다. Fig. 25는 전기장을 걸었을때의 ER유체의 거동과 실제 연마입자의 배열 상태를 나타낸다.

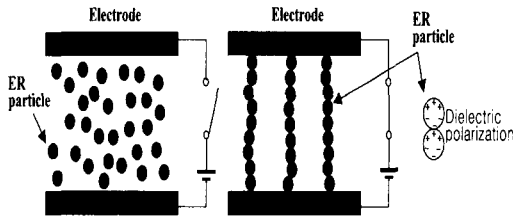


Fig. 25 Mechanism of electrorheological behavior

4. 결론

절삭, 밀링, 연삭, 연마기술등 기계적인 방법에서의 미세가공의 기술은 고정밀화, 고품율화, 초미세화를 위한 가공프로세스 및 가공시스템의 개발과 더불어 공구의개발, 각종 재료에 대한 대응등으로 광, 전자, 기계산업의 요구에 따른 기능성 부품 및 마이크로 금형등에 대한 정밀 가공을 가능케하였다. 앞으로 더욱 더 Sub-micron, Nanometer, 원자단위 가공등으로 기술개발이 발전함에 따라 Micro Mechanical Machining의 생산기술로서의 활용 요구가 더욱 높아질 것으로 많은 기대를 받고 있다.

참고문헌

1. 이용숙, 이성국, 황경현, "마이크로 머시닝 기술," 기계와재료(한국기계연구원), 제7권, 제4호, pp. 16-28, 1995.
2. Ikawa, N., Donaldson, R.R., Komanduri, R., Koenig, W., McKeown, P.A. and Moriwaki, T., "Ultraprecision Metal Cutting-The Past, the Present and the Future," Annals of the CIRP, 40, 2, 1991.

3. Moriwaki, T., Okuda, K., "Machinability of Copper in Ultra-Precision Micro Diamond Cutting," Annals of the CIRP, Vol. 38,1, 1989.
4. Shimada, S., "Thermal Aspect of Micro to Nano Scale Metal Cutting," American Society for Precision Engineering, Proceeding Vol. 18, pp. 116-119, 1998.
5. Kug Weon Kim, Woo Young Lee, Hyo Chol Sin, "A finite element analysis for the characteristics of temperature and stress in micro machining considering the size effect," Intenational Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 39, pp. 1507-1524, 1999.
6. 제태진, 이재경, 김부태, "초정밀 절삭 가공기술 현황," 기계와재료(한국기계연구원), 제11권, 제4호, pp. 49-61, 1999.
7. 이용숙외, "미세금형제작을 위한 가공기술개발," 한국정밀공학회 2000년도 춘계 학술대회 논문집, pp. 1047-1050, 2000.
8. Yamagata, Y., Higuchi, T., "精密切削による微細形状創成," 精密工學會誌, Vol. 61, No. 10, pp. 1361-1364, 1995.
9. Zinan, L., Yoneyama, T., "Micro cutting in the micro lathe turning system," Intenational Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 39, pp. 1171-1183, 1999.
10. Kitahara, T., Ishikawa, Y., Terda, T., Nakajima, N., Furta, K., "Development of micro-lathe," Mechanical Engineering La. Report, AIST/MITI, Vol. 50, No. 5, pp. 117-123, 1996.
11. Takeuchi, Y., Nishie, M., Sawada, K., Sata, T., "Machining of micro parts by ultra-precision milling machine," JSPE, Vol. 62, No. 8, 1996.
12. 이후상 외, Nanotechnology를 위한 가공시스템 연구, 과학기술부, 한국기계연구원 연구보고서, 1999.
13. 이용숙, 강재훈, 신영재, "초정밀 연삭 가공기술 현황과 전망," 기계와재료(한국기계연구원), 제11권, 제4호, pp. 62-79, 1999.
14. Waida, T., Okano, K., 研削によるMicro 形状創成," 精密工學會誌, Vol. 61, No. 10, pp. 1365-1368, 1995.