

# 기계산업에서의 나노테크놀로지



김재열

조선대학교 기전학과

## 1. 서론

### 1.1 기계산업에서의 나노기술 개요

나노(nano)라는 단어는 '난쟁이'를 뜻하는 '나노스(Nanos)'에서 유래되어 지금은 아주 미세한 물리학적 계량 단위로 쓰이고 있다. 나노는 10억분의 1이라는 단위로서, 나노초(ns)는 10억 분의 1초, 나노미터(nm)는 10억 분의 1m를 가리킨다. 예를 들어 1nm는 머리카락 굵기의 10만분의 1에 해당된다. 눈으로는 볼 수 없는 세계, 전자 현미경을 통해서 접근 가능했던 극미의 세계가 나노의 세계다. 나노기술이란 한마디로 이러한 나노미터크기의 물질(나노물질)들이 갖는 독특한 성질과 현상을 찾아내, 나노 물질을 정렬시키고 조합하여 매우 유용한 성질의 소재나 시스템을 생산하는 과학과 기술을 통칭한다. 이러한 나노 물질을 다루는 나노기술만큼 다양한 분야에 적용되는 기술은 흔치 않다. 기술의 용도도 각각 다를 뿐 아니라 과학·

산업·미디어 등의 분야에서 서로 다르게 받아들여진다.

처음 나노기술은 반도체 미세 기술을 극복하는 대안으로 연구가 시작되었으며, 전자와 정보통신은 물론 기계·화학·바이오·에너지 등 거의 모든 산업에 응용할 수 있어 인류 문명을 획기적으로 바꿀 기술로 떠올랐다. 이러한 나노기술이 기계산업에서 적용될 수 있는 분야는 그림 1에서 보는 바와 같이 미세가공 분야인 초정밀 절삭 가공기술과 초정밀 연삭 가공기술, 미세 방전가공기술 등을 예를 들 수가 있다. 기계 시스템에서 나노기술을 구현하기 위해서는 여러 가지 복합적인 기술을 요한다. 예를 들자면 초정밀 메카니즘 설계기술, 나노계측 기술, 초정밀 위치결정기술, 청정환경기술 등이 선행되어 연구가 진행되어야 한다.

또한 기계산업에서의 나노기술은 선진국의 기술보호가 가장 심한 분야로 국내에 기술보급이 제대로 이루어지지 않아 관련 핵심 부품의 자체 개발의 한계를 보이며, 외국업체에 개발을 의뢰하거나 외국업체에서 개발된 부품을 응용하는 단계를 벗어나지 못하고 있다. 물론 초정밀가공시스

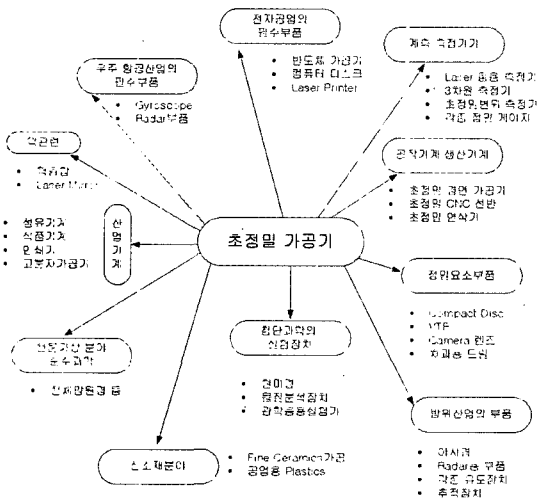


그림 1. 초정밀 가공의 응용분야

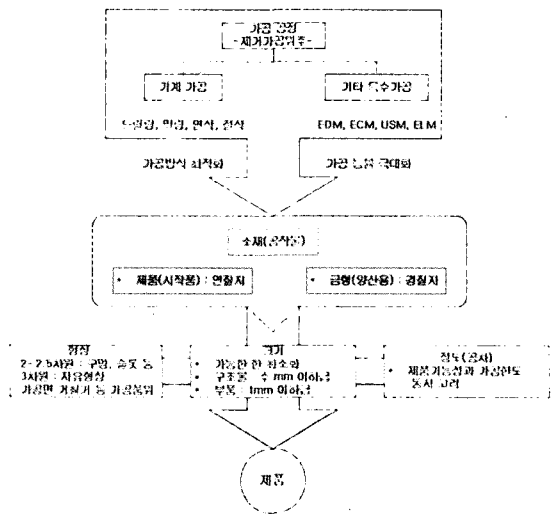


그림 3. 미소 구조물 및 부품의 제조와 관련된 생산 기술 개

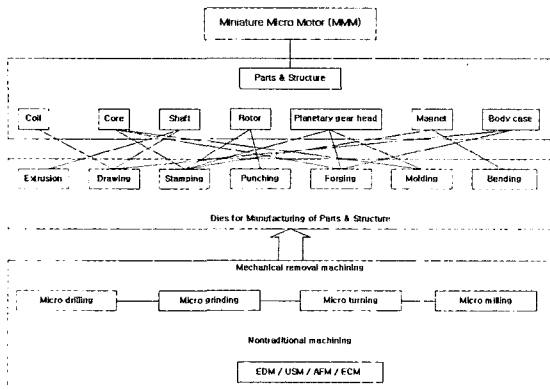


그림 2. 미세 가공 기술의 적용 예

템을 개발하기 위한 요소기술, 시스템 개발기술 등의 연구에 성공한 사례도 있지만 이미 나노미터 (nm) 수준의 가공 정밀도를 완성한 기술에 뒤떨어지지 않기 위해서는 보다 활발한 연구가 뒷받침되어야 할 것이다.

이와 같은 미세 가공을 수행하기 위해서는 기존의 공구보다 더욱 미소하고 고정도로 제작된 공구, 재현성과 신뢰성 있는 동작성과 고정도의 위치 및 이송, 절입량 설정 제어 가능한 전용 시스템, In-process 모니터링 기법 등의 적용이 요구되는 한편, 다양한 D/B의 확보와 축적된 가공

상의 노하우 등이 필요하다.

아울러 물리적인 측면에서는 가공 가능한 범위의 크기 규모, 가공 공정이 마이크로 구조에 미치는 영향, 마이크로 구조가 가공 공정에 미치는 영향 및 가공면의 화학적인 영향 등에 대하여 추가적으로 연구를 수행할 필요가 있다.

생산 기술적인 측면에서는 미소한 공구를 사용한 제거 가공에 있어서 요구되는 상대적인 강성 문제, 변형에 따른 정도 부족 현상 등을 보상하기 위한 동작 제어 문제, 미소한 공구와 공작물의 회전 정도 문제, 가공상의 신뢰성과 재현성 향상을 위한 공정 및 조건의 정립, 제어 문제와 각 가공 공정의 적용 가능 범위 설정 문제 등을 해결하기 위한 연구들을 수행할 필요가 있다.

상업화를 위한 측면에서는 경제성을 고려한 생산량 설정, 생산비용, 설계 시간을 포함한 생산 작업 시간, 제품화를 위한 제반 기술의 적용, 경제적인 조립 등을 다양하게 고려할 필요가 있다.

또한, 미소 구조물 및 부품을 개발하기 위해서는 적용 가공 기법, 공구와 가공물의 핸들링 및 취부, 장탈착 등 치구 설정 기법, 공구 교환, 미소 공구용 홀더, 공구 소재, 적응 제어 등의 툴링 및 가공면 품질 향상 기법, 측정과 In-situ 모니터링 기법 등에 대하여 전반적이고 체계적인 요소 기

술들이 해결되어야 할 필요가 있다. 그림 3에는 미소 구조물 및 부품의 제조와 관련된 생산 기술 개념을 도식적으로 나타내었다.

## 2. 기계산업에서의 나노기술 응용 분야

### 2.1 초정밀 절삭 가공

#### 2.1.1 초정밀 절삭 가공기술의 개념

초정밀 절삭가공기술은 0.1mm이하의 미세 드릴링 기술, 미세 앤드밀 가공기술 및 단결정 Diamond Bite와 초정밀 가공기를 이용한 서브 마이크론 단위의 초정밀 경면 절삭가공이 주류를 형성하였다. 이러한 기술들은 최근 수십 마이크론의 미세 드릴, 직경 0.2mm급의 앤드밀 및 미세 가공용으로 제작된 수십 나노메타 오다의 다이아몬드 공구 등에 의해 초미세 초정밀 가공 기술로 변천하고 있다. 또한 최근에는 고생산성을 위한 초정밀 고속 가공기술의 필요성과 함께 환경친화형 절삭가공 기술의 필요성이 이슈가 됨에 따라 이러한 분야에 대응한 초정밀 가공기술의 개발도 주요한 테마가 되고 있다.

#### 2.1.2 초정밀 절삭 가공기술의 특성

급변하는 기술환경의 변화와 더불어 절삭가공의 기본이 되는 가공조건 및 가공현상의 규명에도 많은 기술적 발전이 있었으며, 특히 실용화 가능한 초정밀 부품 가공 분야에서는 커다란 기술적 변화가 일어나고 있다. 가장 대표적인 예의 첫 번째는 기존의 초정밀 경면 가공기술을 이용한 비구면, 비축대칭 반사경, 마이크로 렌즈, 회절격자 등 초정밀 고성능 광학부품의 개발 분야이고, 두 번째는 밀리머신, 마이크로머신 등 초소형 미세 형상 부품의 수요에 대응하기 위한 각종 Micro parts의 초정밀 미세 가공기술의 발전이다. 이중 최근의 기계적 미세 가공기술 분야는 Micro parts 가공에 있어서 고에너지 가공이나 전기, 화학적 가공을 위주로 하는 MEMS 기술, 반도체가공기술 등에 대응하기 위하여 nm수준의 극한정밀도의 추구 및 가공방법의 획기적 개선을 위한 노력이 심혈을 기울이고 있다.

초정밀을 수치적으로 나타내기 위해 시대의 변화에 따른 표면가공정도의 발전 추세를 보면 현재의 한계는 0.005 $\mu$ m ~ 0.01 $\mu$ m 정도임을 알 수 있다. 단 절대 칫수에 대한 정밀도를 나타내는 형상가공정도의 경우에는 이보다 한 단계 위인 0.05 $\mu$ m ~ 0.1 $\mu$ m가 그 한계라고 생각할 수 있다. 또한 1 $\mu$ m  $\rightarrow$  0.1 $\mu$ m  $\rightarrow$  0.01 $\mu$ m로 정밀도가 한 단계씩 향상되는 데에는 약 25~30년 정도가 소요됨을 알 수 있으며 이러한 추세로 보아 2010~2020년대에는 가공정도가 가공재의 격자간격 정도까지 접근할 것으로 보여 2000년대의 초정밀가공은 분자의 배열까지를 고려한 새로운 방식의 가공이 추구되어야 할 것으로 보인다.

#### 2.1.3 초정밀 절삭 가공기술의 국내 동향

최근 선진국들을 중심으로 Milli structure나 Micro machine의 개발을 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그 중 미세 가공 기술(마이크로가공 기술)은 핵심 주요 소 기술로서 차지하는 중요성이 매우 크다.

현재 수행중인 마이크로 가공 기술은 리소그래피와 옛칭 등의 반도체 제조 기술을 응용한 것과 절삭, 연삭, 방전 가공 등의 일반 기계 가공 기술을 응용한 것으로 크게 분류될 수 있다.

전자는 두꺼운 소재나 혹은 소재의 재질에 따라 제한될 수 있으며, 후자는 연삭이나 방전 가공의 경우에 있어서는 생산성은 양호하나 우수한 가공면 품위를 얻기가 곤란하다. 따라서 생산성이 우수하고 가공 자유도가 높은 절삭 가공의 적용이 바람직한 경우가 있다. 그러나 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 밀리 가공을 수행하여 3차원 형상의 초정밀 마이크로 부품을 생산하기 위한 관련 연구가 진행 중에 있다.

국내의 경우에는 한국기계연구원에서 직경 50~100 $\mu$ m의 마이크로 드릴을 제조할 수 있는 공정 및 평가 기술에 관한 연구를 수행하는 한편, 스탬핑 모터를 적용한 전용 가공 시스템을 활용하여 박판에 대한 고세장비의 천공 실험을 수행하고 있다. 그림 4은 한국기계연구원과 참여기업이 공동

개발한 마이크로 드릴링 시스템과 드릴링 공정 및 성능평가 시스템이며, 그림 5는 본 시스템을 적용하여 직경 100 $\mu\text{m}$  및 50 $\mu\text{m}$ 의 마이크로 구멍을 가공한 모습이다.

또한 한국기계연구원에서는 초정밀 경면 절삭가공기술

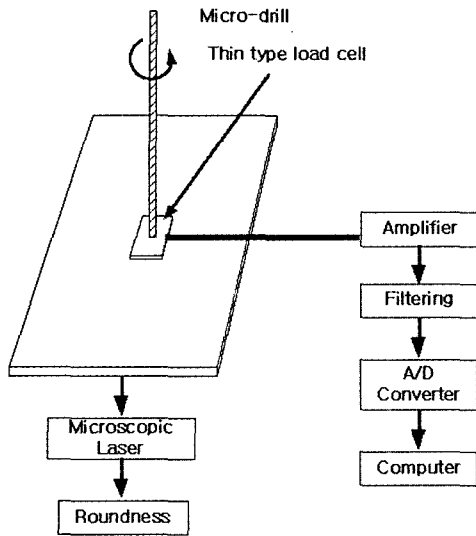


그림 4. 마이크로 드릴링 및 성능평가 시스템 구성도

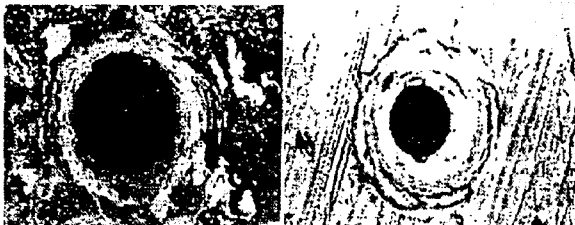
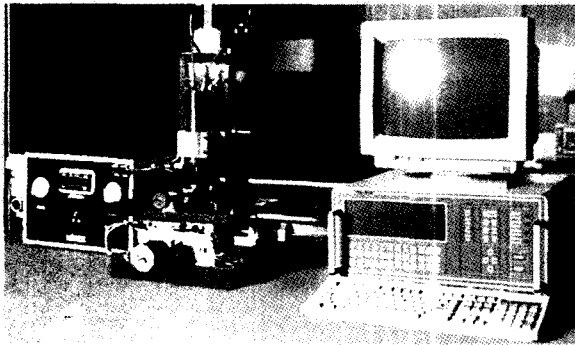


그림 5. 직경 100 $\mu\text{m}$ , 직경 50 $\mu\text{m}$  드릴링 예

개발의 일환으로 그림 6과 같은 초정밀 경면 가공기를 개발하였으며, 각종 재료 및 제품 형상의 경면 가공기술개발에 대한 연구를 수행하였다.

이와 더불어 최근 한국기계연구원에서는 초소형 부품 즉, Milli-Structure 또는 Micro machine용의 미세 부품을 초정밀 절삭가공을 통하여 실현하기 위한 준비를 진행하고 있다.

삼성전자는 국내 최고의 초정밀 경면 가공설비를 기반으로 다양한 초정밀 광학부품을 생산하고 있으며, 최근에는 자유곡면과 같은 비구면을 갖는 고난이도 가공공정의 레이저 프린트용 F- $\theta$ 렌즈의 개발에 성공하고 있다.

기초과학기술연구소에서도 98년에 도입된 초정밀 경면 가공기를 기반으로 각종 초정밀 부품 및 금형 가공기술을 개발하고 있다.

그러나 이와 같은 국내의 기술개발은 대부분 외국의 장비와 기술에 의존하기 때문에 아직 독자적인 마이크로 가공기술을 확보하지 못한 수준이라고 보여진다. 따라서 국내에서도 21세기를 주도할 Micro Machine용 부품들을 생산할 수 있는 초초정밀도 개념의 미세 절삭가공기술개발에 더욱 노력해야 할 것으로 보인다.

### 2.1.4 초정밀 절삭 가공기술의 국외 동향

#### 1) 일본

일본은 마이크로 절삭가공 기술 분야에서 세계에서 가장 활발하다고 볼 수 있다. 일본의 기계기술연구소에서는 마

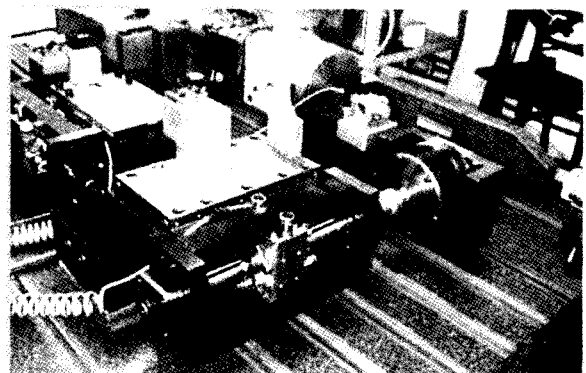


그림 6. KIMM의 초정밀 경면가공기

이크로 공장의 실현을 위한 기초 연구를 수행함으로써 그림 7과 같은 세계에서 가장 작은 미소 선반을 제작한 바 있다. Laminated Piezo 액츄에이터 방식에 의한 XY 구동 유닛과 마이크로 모터에 의한 주축 디바이스 등을 중심으로 제작되었으며,  $32 \times 25 \times 30.5\text{mm}$ 의 크기와 100g의 중량을 지닌다. 주축 디바이스의 구동 용량은 1.5W이며 일반 선반에 비하여 크기는 1/50, 중량은 1/10000, 소요 동력은 1/1000 정도라는 특징을 지닌다.

이상의 마이크로 선반을 이용하여 직경 2mm의 황동봉을 절삭 가공하여  $1.5\mu\text{m}$ (Rmax)의 가공면 거칠기와  $2.5\mu\text{m}$ 의 진원도를 획득함으로써 일반 선반과 동등 이상의 성능

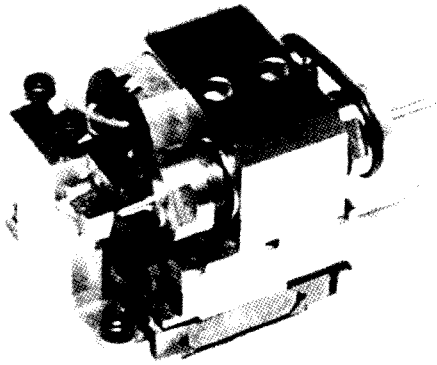


그림 7. 미소선반

을 발휘할 수 있다는 것을 확인하였다. 최소 직경  $60\mu\text{m}$ 까지의 공작물에 대한 가공이 가능하며 아세테르 레진 봉과 같은 소재도 가공이 가능하다.

마이크로 머시닝은 일반적으로 실리콘 옥사이드와 같이 취성재에 대한 리소그래피 가공으로 국한되어 알려져 있는 것이 사실이다. 그러나 최근 쉽게 제작할 수 있는 금속재에 대해서도 마이크로 머시닝과 마이크로 미케니즘의 도입이 요구되고 있다.

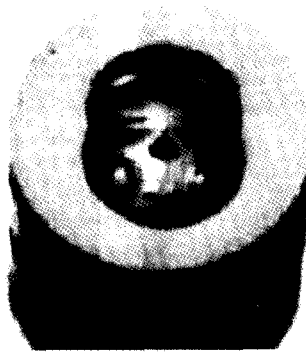
그림 8에는 고속 에어 스피너를 탑재하여 새로 개발된 선반형의 초정밀 소형 밀링 머신으로 금속재에 대하여 부조형의 조각 방식으로 마이크로 가공한 예를 나타내고 있다. 그림의 좌측은 CAD에 의해 작성된 인상이며 우측은 이를 이용하여 금속재에 대하여 가공면 거칠기 77nm(Rmax)를 지니는 직경 3mm 크기의 고품위의 소형 인상 가공을 한 예를 나타내고 있다.

동경대에서는 각종 정보기기와 관련한 분야의 기술이 고도화되면서 이러한 기기를 구성하는 부품이나 장치가 점차 고밀도화, 초소형화 됨에 따라 마이크로 미케니즘의 가공, 제작 및 응용에 관한 연구를 진행중에 있으며, 그림 9과 같은 최대속도 100,000rpm의 초고속 스피너를 탑재한 마이크로 선반을 시제작하여 직경  $10\mu\text{m}$  정도의 마이크로 구조를 가공하는 실험을 수행중에 있다.

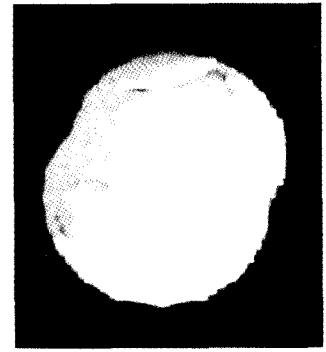
또한, 3차원 형상의 마이크로 구조물을 가공하기 위하여 그림 10과 같이 초음파 모터를 이용한 마이크로 머시닝 머신을 시제작하여 SEM의 진공 챔버에서 관찰계에 악영향



(a) CAD에 의한 인상



(b) 마이크로가공 예



(c) 마이크로가공 예

그림 8. 초정밀 소형 밀링 머신에 의한 마이크로 가공 예

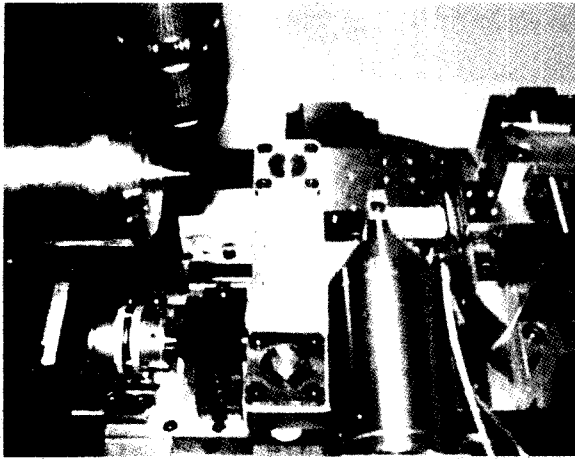


그림 9. 초고속 스피ndl을 탑재한 마이크로 선반

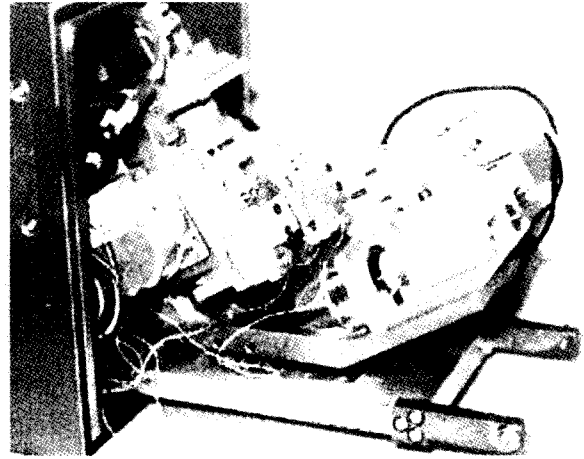


그림 10. 초음파 모터를 이용한 마이크로 머시닝 머신

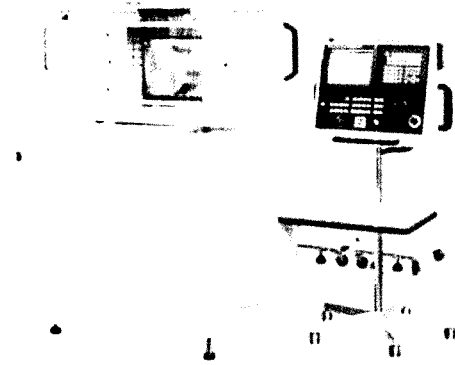


그림 11. ROBO nano Ui 초정밀 마이크로머신

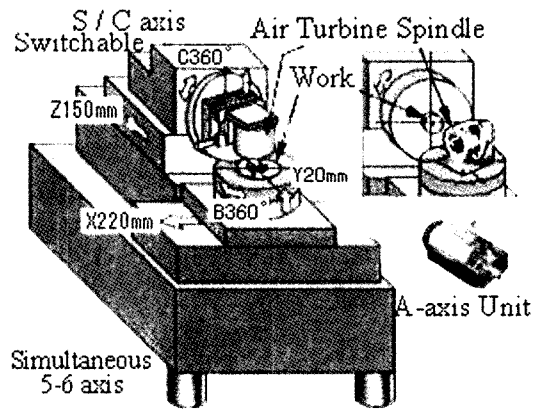


그림 12. ROBO nano Ui 머신 구성도

을 주지 않도록 하는 한편, 3차원의 입체 형상을 관찰할 수 있는 특수한 모델의 SEM을 개발하여 적용 관련 연구를 수행하고 있다.

히타치사에서는 직경 200 $\mu$ m급의 마이크로 드릴을 개발하여 상품화하고 있으며, 세이코사에서는 자체적으로 직경 80 $\mu$ m급의 마이크로 드릴을 가공 제작하여 시계용 초소형 무브먼트의 가공에 활용하고 있다.

일본 나고야 기술연구소와 미국 콜로라도 대학교는 전해 가공을 이용하여 FIM(field ion microscopy)용 미세 선단(sharp tip) 가공을 수행하여 선단 반경 5nm의 미세 선단

을 가공하였다. 그 이외에 다이아몬드 선삭을 비롯하여 일반 가공법의 극미세화, 정밀화를 통하여 기계적 미세 가공에 대한 연구가 진행 중에 있으며 특히 3차원 구조를 지닌 미세 금형 제작 기술에 많은 관심아 모이고 있는 추세이다.

일본 FANUC사에서는 그림 11과 같이 ROBO nano Ui라는 초정밀 마이크로 머신을 개발하여 선삭에서 3차원 형상 가공까지 복합가공이 가능하게 하였다. 그림 12는 이 머신의 구성도를 나타낸 것이다. 이 기계로 지금까지 lithography로 제작하기 어려웠던 자유곡면 형상의 회절격자나 비구면 렌즈의 금형을 가공하는 것이 가능하다. 공기 정



그림 13. 1mm가면 mask

압으로 200mm의 이송 거리와 1nm의 분해능을 갖는 Nonfriction servo system, 2nm 오차 이내의 이송서보 모터트랙 등의 특성을 가지고 있다.

그림 13에는 이 기계를 사용하여 직경 1mm, 높이 30 $\mu$ m의 가면 마스크를

경면 가공한 예를 나타내었다. 재질은 황동이며 공구 회전수는 50,000rpm, 가공속도는 5mm/min으로 약 2시간 가공으로 58nm Rmax의 표면조도를 얻었다. 공구를 회전시켜 엔드밀과 같은 효과를 내는 일종의 Fly-cut 방식이다.

## 2) 미국

미국의 경우 주로 빔 가공 및 에칭 가공 등에 의한 마이크로 머시닝 기술을 주력하여 개발하고 있다. 따라서 마이크로 기계 가공 분야의 연구는 상대적으로 활발히 이뤄지

지 않다고 볼 수 있으며 대표적인 관련 연구의 수행 내용은 다음과 같다.

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 진원도 1nm, 가공면 결함층 1~2nm급의 정밀가공을 수행하고 있다. 또 National Jet사에서는 마이크로 드릴링 머신 및 드릴을 개발하여 25 $\mu$ m의 구멍을 2.5 $\mu$ m의 정밀도로 가공하는데 성공하고 있다.

1966년 미국 Union Carbide사에 의해 다이아몬드 공구를 이용한 경면 절삭가공기가 발표된 이래 LLL, CUPE 등의 연구기관 및 Moore, Pneumo Precision, Philips, 東芝機械 등의 업체가 중심이 된 초정밀 선반의 개발경쟁은 최근 반도체, 전자, 광산업에 있어서의 괄목할만한 성장과 더불어 그 열기가 한층 더해가고 있다.

그림14는 Union Carbide사가 du Pont 사와의 계약에 의해 개발된 최초의 다이아몬드 선반 du Pont 1호기(Hemis-phere Turning Machine)의 구조로써 주축에

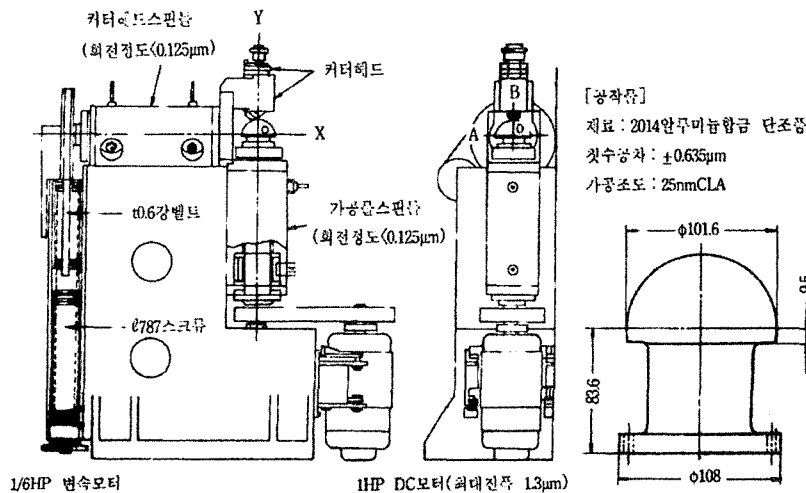


그림14. du Pont 1호기(Hemisphere Turning Machine)의 구조

다공질 소결 graphite제 공기 베어링을 이용하여 직경 4"의 반구면을 표면조도 0.025 $\mu$ m CLA 이내로 가공할 수 있는 성능을 갖추고 있다. 1966년에는  $\varnothing$ 150mm이하의 구를 칫수공차 0.51 $\mu$ m 이내로 가공할 수 있는 du Pont 2호기(Hemishell Turning Machine)가 제작되었으며 1972년에 제작된 du Pont 3호기(R- $\theta$  Lathe)는 2개의 공기베어링 주축을 사용,  $\varnothing$ 50~400mm의 내·외구면 및 방물면의 가공이 가능하도록 제작되었다.

한편 1977년부터는 미국공군병기연구소와 공동으로 직경 800mm의 비구면 광학부품을 0.1 $\mu$ m정도로 가공할 수 있는 POMA(point One Micrometer Accuracy)프로젝트를 수행하였으며 그 목표정도를 정리하면 표1 과 같다.

(1) Rank Pneumo Precision사

초정밀선반 전문제작업체인 Pneumo사에서는 1970년대 말부터 직경 300mm까지의 비구면 가공용 2축 제어 CNC선반인 MSG-325, polygon mirror가공기 MGS-500, 14"까지의 자기디스크가공용 정면선반인 MGS-700 등을 상품화하고 있으며 1988년에는 초정밀선반에 연삭 기능을 첨가한 비구면 가공기 ASG-2500을 발표하여 전자, 광산업 중심인 초정밀선반의 세계시장을 대부분 점유하고 있다. 또한 최근에는 1990년대 초정밀시장을 겨냥, 새로이 개발한 NANOFORM 600을 발표했는데 베드에는 granite재료, 주축에는 공기정압 베어링을 사용하였고, 안 내면에는 유정압방식을 사용하여 위치결정정도 0.25 $\mu$ m

//300mm, 분해능 1.25nm의 성능을 보이고 있으며  $\varnothing$ 600 $\times$ 300mm까지의 공작물을 가공 가능하도록 되어있다. 직경 75mm의 OFHC동에 대한 비구면가공 실험결과 형상정도 0.1 $\mu$ m이내, 표면조도 0.01nm Rmax이내의 가공정도를 보이고 있다.

(2) Cranfield Unit for Precision Engineering(CUPE)

CUPE에서는 대형 X선 천체망원경에 사용될 비구면 반사경(최대경 1,400mm, 최대길이 600mm의 원추경)을 가공하기 위한 초정밀 선반을 발표하였다. 이 기계는 British Science and Engineering Research Council과의 계약에 의해 X선 망원경에 사용될 내측회전방물면과 외측회전쌍곡면을 가공하기 위한 것으로 베드 재료로는 인조 granite를 사용하였으며 X방향 이동정도는 0.5arc sec/1,100mm, rotary table은 공기 베어링을 사용하여 회전정도 0.1 $\mu$ m, 반경방향 강성 876N/ $\mu$ m을 보이고 있다. 원추형 부품의 가공 실험 결과는 300mm의 길이에 대해 진직도 0.2 $\mu$ m, 진원도 0.4 $\mu$ m이내의 가공정도를 나타내었다.

3) 유럽

유럽 국가 공동체의 경우 미국과 동아시아권 경제권과의 미래 기술 경쟁력 강화를 위하여 마이크로 시스템 관련 기술의 확보를 목표로 연구를 수행 중에 있다. 이는 지구 환경 친화성을 주창하는 유럽 선진국들의 에너지 및 자원 절감의 역할과 폐기물 발생 억제 측면 등을 위해서라도 부품이나 구조물의 미소화를 통한 미래형 새로운 제품의 생산이라는 명분에도 충분히 합당되는 것이다.

기존의 생산 기법으로는 마이크로급 크기의 형상을 제어하여 고정도로 가공한다는 것이 거의 불가능하며, 따라서 새로운 가공 기법이나 핸들링 기술이 요구되는 한편, 적용 가능한 소재도 매우 국한될 수밖에 없다.

MicroMac이라는 연구 과제를 통하여 주로 마이크로 방전 가공 관련 기술 등을 중심으로 개발하며 강재나 신소재 등으로 마이크로 부품이나 구조물을 가공, 제작하여 적용하려는 추세이다. 예를 들어 터빈용 마이크로 홀 등의 항공기 산업 관련 분야, 마이크로 모터 등의 의료기기 산업 관련 분야, 시계 등의 정밀 산업 관련 분야와 ddsufy 분사기

표 1. POMA계획에서의 목표정도

오차요인		현상추정 오차( $\mu$ m)	도달목표 오차( $\mu$ m)
안 내 면	위치측정	0.1	0.01
	위치제어	0.5	0.05
	Pitching yawing rolling	1.0	0.02
	직선성	0.25	0.02
주 축	회전정도	0.1	0.02
	열팽창	0.25	0.05
	구동	0.05	0.01
열변형		0.5	0.05
가공물지지		0.5	0.05
계		~ 1.5	~ 0.1



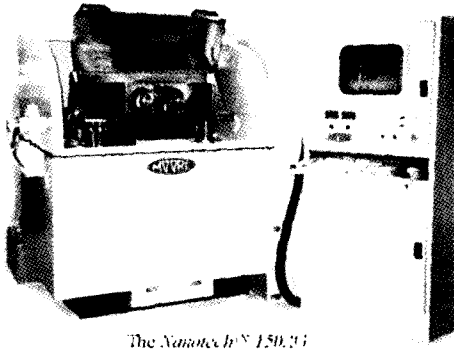


그림 15. Micro Turning M/C (모델명 : D75/150)

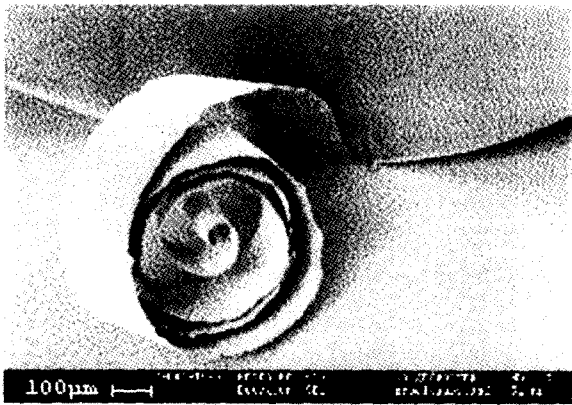


그림 16. 마이크로 샤프트 가공

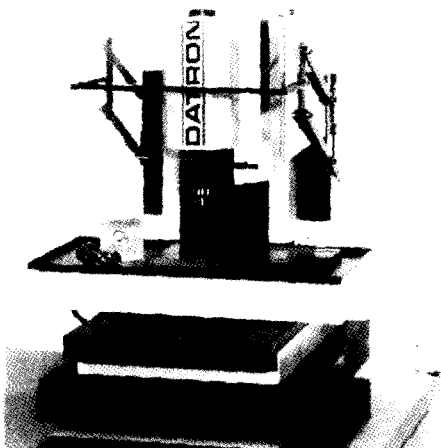


그림 17. 3축 CNC마이크로 머신닝 센터

등의 엔진 관련 분야 및 컴퓨터 관련 기기 산업 분야 등이 그 적용 대상군이라고 할 수 있다.

독일 KUGLER사에서는 그림 15과 같은 Micro Turning M/C(모델명 : D75/150)을 개발하여 시판하고 있다. 에어 베어링을 채택하여 평면, 구면 및 원추형상과 비구면 형상을 모두 가공할 수 있으며 로터리 테이블을 위한 C축(에어 베어링 채택)을 추가할 수 있다. X축 이동 거리가 150mm로써 직경 50mm의 공작물까지 가공할 수 있고 5nm(Ra)급의 가공면 거칠기를 생성할 수 있으며, 대표적인 예로 콘택트 렌즈, 마이크로 사출 성형용 금형 등을 가공할 수 있다. 독일의 Fraunhofer 연구소에서는 미세 절삭과 밀링 가공을 적용하여 마이크로 구조 요소 부품을 가공 제작하였으며, 초미세 선반을 이용하여 그림 16과 같은 마이크로 샤프트를 가공하였다. 그림에서 큰 직경은 50µm, 작은 직경은 8µm이며 가공면 거칠기는 약 10nm(Ra)로 매우 양호하다. 독일의 DATRON Electronics사에서는 초정밀 고품위 가공을 수행하기 위하여 그림 17와 같은 최대 스피들 회전 속도 70,000rpm의 3축 CNC 마이크로 머시닝 센터를 개발하여 마이크로 드릴링 및 밀링과 관련한 연구를 수행하고 있다.

스위스의 ISR연구소에서는 복잡한 소형 구조물 내에서 쉽게 적용할 수 있는 마이크로 Stick&Slip 액츄에이터를 개발하여 관련 응용 연구를 수행하고 있다.

#### 4) 초정밀 절삭 가공기술의 국내기술과 국외기술 비교

Milli Structure나 Micro machine의 개발은 선진국들을 중심으로 핵심 주요 요소 기술로서 차지하는 중요성이 매우 커지고 있다.

초정밀 절삭 가공기술의 현재 국내의 기술들과 국외 기술을 비교해 볼 때 선진국에 비해 국내의 기술들은 상당히 낙후된 실정이다. 국내의 한국기계 연구원이나 삼성전자, 기초과학 기술연구소 등에서 각종 초정밀 부품 및 금형 가공기술들을 개발하고 있으나 국내의 기술개발은 대부분 외국의 장비와 기술에 의존하고 있다.

세계에서 일본은 마이크로 절삭가공 기술 분야에서 가장 활발하게 연구를 수행하고 있고, 그 밖에 미국의 Rank Pneumo Precision사나 Cranfield Unit for Precision

Engineering(CUPE)사 등에서도 초정밀 선반을 개발하고, 유럽 국가들에서도 미래 기술 경쟁력 강화를 위해 마이크로 시스템 관련 기술의 확보를 목표로 연구를 수행 중에 있다.

이처럼 절삭 가공기술이 21세기를 주도할 Micro Machine용 부품들을 생산할 수 있는 중요한 기술로서 자리 잡고 있는 현재에 우리 기술이 미약한 만큼 미세 절삭가공기술개발에 더욱 노력해야 할 것이다.

## 2.2 초정밀 연삭가공기술

### 2.2.1 미세연삭가공기술의 개념

초정밀 가공이라는 기술용어가 사용되기 시작한 것은 1960년대 전반이다. 초정밀가공은 가공에서 최첨단 기술에 위치하기 때문에 처음에는 최고의 데이터로 적용되었다. 그리고 마침내는 생산 활동에 응용되어 재현성을 높이

고 동시에 보편화의 길을 걷기에 이르렀으며 현재는 첨단 산업을 떠받치는 중요한 생산의 하나가 되었다.

특히 본 기획 사업의 내용인 각종 제품 및 부품의 Milli-Structure는 수mm의 크기와 수 $\mu$ m의 정밀도를 갖는 기계 요소 또는 그 것들의 조립체를 지칭하며, MEMS 기술에 의한 Sub-mm크기의 Micro-structure에 대응되는 개념이다.

현재 국내외적으로 기계적 방법에 의한 초정밀, 초소형 가공기술과 반도체 제조 공정을 이용한 Micro-machining 연구가 활발히 진행되고 있으며 산업체 응용 측면에서 Milli-structure에 대한 중요성이 매우 커지고 있기에 이 분야에 대한 집중적인 연구 투자가 이루어지기 시작하고 있다.

그림 18은 고기능성 Milli-Structure 가공을 위해 구비 되어야 할 Micro-Grinding 가공시스템의 구성요소와 그 가공 특성에 대한 전체적인 개념도를 나타낸다.

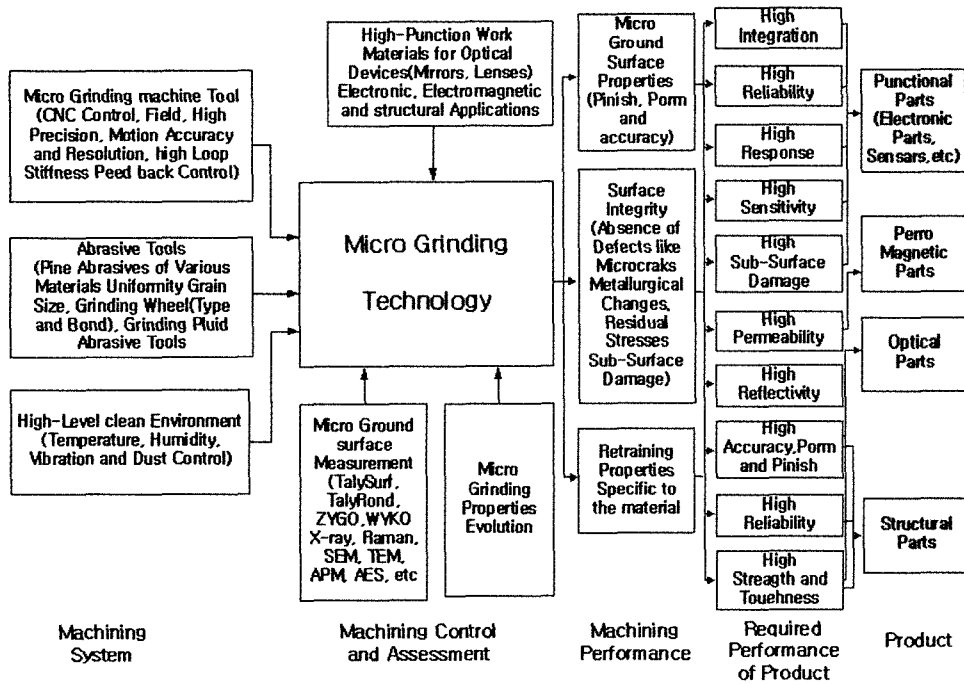


그림 18. Schematic Diagram of Micro Grinding

## 2.2.2 Micro-Grinding의 연구분야

일반적으로 Micro-Grinding 가공을 통하여 연고자 하는 것은 미세홈 가공과 경면 가공이다. 정밀기기산업 등에 사용되고 있는 정밀 소형 부품 및 소형 금형의 가공에서는 가공정도와 가공능률이 동시에 달성되는 것에 대한 요구가 많지만, 기존의 연마방법은 가공정도와 가공능률에 한계가 있다. 또한 최근에는 연삭가공으로 연마가공에 필적하는 가공면 품질을 얻고자한다. 작업환경의 개선뿐만 아니라 유리지립에서 고정지립으로의 전환을 추구함으로써 생산성을 향상시키고 연마공정의 관리를 쉽게 하는데 목적이 있다. 이를 위해 금속결합체의 미세지립 슷들을 안정적으로 사용할 수 있게 하는 새로운 가공원리가 개발되어 보다 고품위의 고능률 가공이 가능한 초정밀 경면연삭기술로 발전이 기대되고 있다.

즉, 전해 인프로세스드레싱(Electrolytic In-Process Dressing : ELID)이 개발되어 고강도 메탈본드 슷들을 이용하여 가공 중 드레싱이 가능함에 따라 매우 고운입자의 슷들을 이용한 여러 경취재료의 경면연삭(표면 거칠기가 수nm이하)이 가능하다. 또한 금속결합체의 결합강도가 매우 높기 때문에 특히 경한 재료의 가공에 큰 장점을 가지고 있어 초경합금, 세라믹 재료등의 경취성재료를 고품위 가공하는데 적용을 할 수 있다.

또한 슷들의 결합강도가 매우 높아서 슷들의 형상유지가 다른 슷들에 비해 상대적으로 매우 양호하다. 따라서 아주 얇은 두께를 가진 휠로 장시간 가공을 행하여도 형상정밀도가 우수해서, 특히 미세 홈 가공시 매우 양호한 가공정도를 얻을 수 있다.

예로 일본에서는 ELID를 이용한 Micro-Grinding 기술로 1mm의 간격 안에 1200개(개당 홈 간격 : 약 0.83 $\mu$ m)의 미세홈을 가공한 경우를 볼 수 있다. 이러한 가공기술을 여러 가지의 기능성소재의 가공에 적용을 시켜서 미세 현미경이나 카메라 등의 광학렌즈(직경 : 수백 $\mu$ m)나 소재가 페라이트인 VTR 헤드 등 난삭 재료의 고정밀, 경면 가공에 적용을 할 수 있다.

Micro-Grinding의 주요 연구분야는 아래와 같다.

- Desk-top형 마이크로 연삭기 개발
- 극소형 연삭 슷들 개발

- 형상유지를 위한 연삭스들의 발란싱, 트루잉, 드레싱 기술개발
- 미세 가공물의 고정기구 개발
- 형상오차 보상기술의 개발
- 가공중 계측 및 평가기술 개발
- 제품 적응형 생산기술의 개발
- 치핑, 형상변화, 크랙, 가공변질층, 잔류응력 해석 평가기술

## 2.2.3 Micro-Grinding 기술의 특성

일반적으로 연삭이 절삭가공에 비해 가공능률 및 운동의 자유도는 떨어지나 고품위(고정도, 경면가공)의 가공을 달성할 수 있으며 연마가공에 비해서 품위는 떨어지나 고능률로 가공을 할 수 있는 장점이 있다는 것은 많이 알고 있다. 다인(多刃)공구의 휠을 사용하는 연삭의 초정밀화는 절삭을 대신하는 가공기술로서 상당한 비약이 있어왔고 앞으로도 있을 것으로 전망되고 있다. 연삭기의 발전과 더불어 초정밀 제어가 가능해 지고 초미립의 연삭입자(Diamond, CBN)의 개발로 경취성 재료에 대해서도 크랙을 유발하지 않고 휠의 작용 흔적이 남지 않는 등 가공물 표면에 Damage를 주지 않는 고도의 경면가공을 기대 할 수 있다.

이에 메탈 본드 슷들의 개발과 함께 ELID라는 전해 인프로세스 드레싱 기법이 개발되면서 각종 경취성 재료의 한층 더 나은 고품위가공이 가능하게 되었다. 이와 같은 연삭에 있어서의 진보적인 발전은 연삭 저항 및 가공능률, 가공형상에 제약이 있으며 슷들의 형상 및 공작물의 크기에 대한 검토가 요구되어지고 있음에도 불구하고 각종 주요 기능성 부품의 가공에 적용되어 왔고 앞으로도 그 활용에 대한 무한한 가능성이 기대되고 있다.

일반적으로 마이크로머신의 생산기술은 당초 반도체 제조기술을 원용한 것이다. 반도체를 만들 때 먼저 실리콘제의 기판을 높은 열로 태워 표면에 유리막을 만든다. 그 위에 감광제를 바르고 회로를 그린 원화를 축소하여 인화한 뒤 다른 실리콘 부분은 노광등의 방법에 의해 제거한다. 마이크로머신을 만들 때도 처음에는 기판 위에 여러 층의 막을 입히고 기어나 클립의 모양을 인화한 뒤 그 부분만 남겨 두고 나머지는 제거한다. 기판에서 떨어져 나가는 부분과

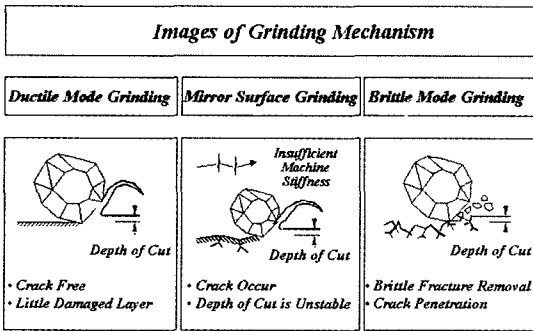


그림 19. Images of Grinding Mechanism

남게 되는 부분을 잘 조합하면 마이크로머신이 완성된다.

이른바 MEMS라는 이 신기술은 전자회로와 작동하는 기계를 한 개의 작은 실리콘 패키지 속에서 조합한 것이다. 초보적인 MEMS 시스템은 미국, 일본, 독일을 비롯한 여러 나라에서 널리 사용되고 있고 그 중의 하나가 수백만대의 승용차에 설치된 머리카락 굵기의 센서-액추에이터이다. 이러한 초정밀가공 기법을 이용하여 마이크로 부품들을 제작할 수 있지만 기존의 Silicon Process에서 많이 쓰이는 전기 화학적인 방법들은 그 가공특성이 2차원적이라는 한계점과 가공재료의 제한 등으로 인하여 Micro 부품과 같은 3차원적인 형상가공과 다양한 재료에의 적용에 있어서는 많은 제약이 있어서 적용이 어렵거나 아예 적용이 불가능한 경우도 있다. 또한 가공과정 중에 발생하는 언더컷과 재료의 방향성 때문에 발생하는 재료의 선택적 제거 등의 문제점들 때문에 이러한 미소 부품을 가공하기 위해 Micro-Grinding 기법을 많이 적용하고 있으며, 최근 Micro 부품 및 금형을 가공하기 위해 각종 Micro-Grinding 기술과 장비의 개발이 요구되고 있다.

그림 19는 초정밀 가공에서 중요한 표면의 크랙이나 균열 등과 밀접한 관련이 있는 가공의 메카니즘에 관한 내용이다. 고정도, 고품위의 면을 얻기 위해서는 취성이 아닌 연성 모드에서의 가공이 중요하다. 이는 특히 취성재료의 가공시 절입 깊이에 상당히 민감하며 다음의 그림들은 그에 대한 도식적인 설명들이다. 이에 대한 내용들에서 볼 수 있듯이 절입 깊이가 깊을수록 연성모드로의 가공에 유리하다.

## 2.2.4. 초정밀 연삭가공의 국내동향

국내의 고속절삭분야에서는 공작기계 제조업체 및 절삭 공구업체를 중심으로 기술개발을 서두르기 시작했으며, 학계에서는 KAIST, 연세대, 서울대, 부산대 등에 의해 현재 공구개발, 절삭메카니즘 및 고속절삭 가공기 등을 중심으로 연구개발하고 있다. 그리고 우리나라는 1996년 초에 초소형 정밀기계분야의 기술개발을 국가가 지원하는 선도기술개발사업(G7프로젝트)으로 지정하고 산, 학, 연, 관 공동사업으로 추진하기 시작하는 한편 정부의 4억4천만 원의 지원을 받은 <주>메디슨은 초소형 내시경을 개발하고 있다.

연삭기술에 대해서는 한화기계에서 그라인딩센터를 개발하고, 연삭수들 제조업체에서는 경면가공용 연삭수들의 제조에 관심을 가지고 있으나 상품화에는 미치지 못하고 있으며, 학연계에서는 한국생산기술연구원, 한국기계연구원 및 부산대 등에 의해 경면연삭, 드레싱 기술 및 가공표면해석에 관해 연구를 하고 있지만 아직 선진국의 수준에는 미치지 못하고 있는 실정이다. Micro-Grinding 가공에서 또 다른 측면인 미세가공의 기술의 분야에서도 일본의 경우 1 $\mu$ m 이내의 크기를 가지는 미세홀을 가공할 수 있는 것에 반해 아직 국내의 현실은 미치지 못하고 있는 실정이다. 이러한 가공기술과 공구 및 공작기계발전의 미흡으로 인하여 설비뿐만 아니라 여러 가지의 정밀부품들이 외국, 특히 일본으로부터 대부분을 수입해 쓰고 있는 실정이다.

실제로 국내의 D전자사의 경우에는 기능성 부품 연삭 공정에 사용되는 장비를 일본의 히타치社로부터 전적으로 수입해 쓰고 있으며 일부라인에 문제가 생겼을 때 그 문제를 해결하는 데에 상당한 어려움을 겪고 있다. 또한 공작기계의 자동화에서 이송정밀도에 가장 중요한 영향을 미치는 Ball Screw의 경우를 본다면 현재 전세계적으로 Ball Screw의 총생산량을 집계한다는 것은 불가능하나, 전체 공작기계매출액의 5%를 Ball Screw의 매출액으로 추정한다면 92년도 기준으로, 약 1조4천억원정도 된다고 볼 수 있다. 그러나 Ball Screw가 공작기계뿐만 아니라, 자동차의 파워스티어링, 로봇 이송축, 측정기기의 이송부 등 공작기계외에 사용되는 경우와 A/S로 소요되는 Ball Screw까지 합한다면 전세계적으로 Ball Screw의 매출액은 그 이상이 된다고 볼 수 있다. 이러한 규모로 인하여 Ball Screw

시장을 겨냥하여 많은 국가에서 제작을 하고 있으며 국내에서는 대성정밀공업(주)에서 자체적으로 생산을 하고 있으며, 제작상의 어려움 들로 인하여 다른 업체에서는 아직 제대로 생산을 하지 못하고 있는 실정이다. 하지만 이마저도 국내공급의 단 2%정도만 공급하고 있으며 나머지는 외국(일본, 대만 등지)에서 수입하여 쓰고 있는 실정이다. 이는 국산의 Ball Screw가 Co급을 생산하고 있는 일본에는 품질면에서 밀리고, 대만제품에는 가격면에서 밀리기 때문이다. Ball Screw의 주된 불량은 구동시의 소음문제와 이송 정밀도의 차이 및 구동면과 Ball의 접점문제 등이 있는데 이는 소재문제, 열처리문제 등도 중요하지만 무엇보다도 정밀한 가공기술의 부재에서 오는 결과라고 볼 수 있다.

예를 들면 에어컨의 효율향상을 위해 중요부품인 내면 나선동관(Inner-Grooved Copper Tube)을 사용하고 있으며 내면나선동관 제조 과정에서 가장 중요한 인발공구(Plug)는 전량수입에 의존하고 있기 때문에 국산화를 위해 부산대에서 미세 형상 가공 기술을 개발하고 있으며 치핑, 형상 보정, 마이크로크랙에 대하여 지속적인 연구를 진행하고 있다.

이러한 예들에서 볼 수 있듯이 장비나 가공기술에 대해서 하루빨리 국산화가 이루어 져야 만이 가격경쟁력을 확보할 수 있게 되고 나아가서 국가경쟁력을 확보할 수 있을 것이다.

### 2.2.5 초정밀 연삭가공의 국외동향

Micro-Grinding과 관련하여 국외에서 연구되고 있는 초정밀 연삭/연마 가공에 대한 진행내용 및 연구동향은 다음과 같다.

1. 연성모드(Ductile Mode)에 의한 경면연삭
  - 절삭개념으로부터 유도
  - 연성모드 연삭의 개념도입
  - 고강성 연삭기의 필요성
  - 경면연삭법 개발
2. 전해 인프로세스 드레싱에 의한 경면연삭
  - 주철본드 스톨개발
  - 전해 연삭
3. 초미립 스톨에 의한 경면연삭

- 미립스톨(CBN/Diamond)에 의한 경면연삭
- 전기동영상을 이용한 초미립 스톨의 개발과 경면연삭
- 초미립 스톨의 개발과 실리콘 웨이퍼의 경면연삭

### 4. 초정밀 연마가공 기술

- Chemo-Mechanical Polishing
- Mechano-Chemical Polishing
- Float Polishing
- Magnetic Field Assisted Finishing
- Electrolytic Abrasive Mirror Finishing
- Elastic Emission Machining

그림 20과 21는 Micro-Machining을 이용하여 가공한 대표적인 예를 보여주고 있다. 그림 20은 미세홈 및 마이크로 부품에 대한 미세가공에 대한 예들이고, 그림 21는 ELID(Electrolytic In-process Dressing)에 의한 난삭재의 경면가공에 대한 예들이다.

### 2.2.6 초정밀 연삭가공의 국내기술과 국외기술비교

현재 우리나라는 연삭 기술에 대해서 한화기계, 한국생산기술연구원, 한국기계연구원 등에서 연구를 하고 있지만 선진국의 수준에는 상당히 뒤쳐져 있다. 가공기술과 공구 및 공작기계발전의 미흡으로 인해 여러 가지의 정밀부품들을 선진국으로부터 수입해 쓰고 있다.

미국, 일본, 독일 등의 선진국들은 이미 80년대부터 이러한 기술분야에 대한 연구들을 국가적인 차원에서 대형 연구과제로 수행해오고 있어 미케노케미컬 연마가공, 플로우트 폴리싱가공, EEM 폴리싱 가공, 자기 연마 가공, 자기 영동 연마 가공 등 다양한 초정밀 기술들이 개발되고 있다. 이러한 신가공 기술들은 일본의 기계기술 연구소 및 동경대, 영국의 맨체스터 대학 등에서 개발한 전해연마, 연삭 가공 기술에 국한되어 있는 실정에 우리나라의 기술은 상당히 뒤쳐져 있는 실정으로 이러한 기술들에 대해 많은 노력과 연구 인력 양성 등에 투자해야 할 것이다.

## 2.3 미세방전가공기술

### 2.3.1 미세 전극 가공의 특성

0.1mm 이하 직경의 미세 구멍을 가공하기 위해서는 작

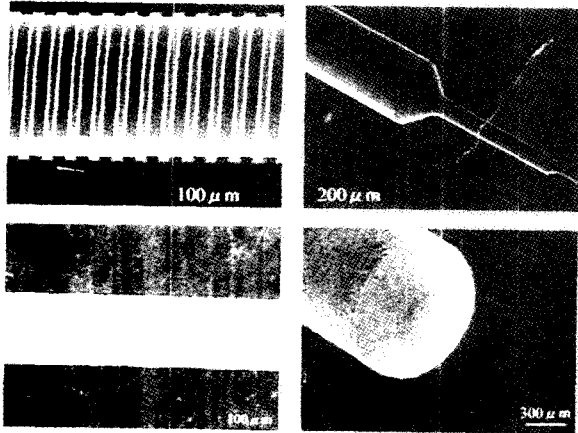


그림 20. 미세홀 및 마이크로 부품에 대한 미세가공

은 직경의 미세전극을 제작하여야 하는데, 전원의 극성을 구멍 가공과 반대로 설정하고 미세전극 가공용 전극을 따로 사용함으로써 미세 전극을 가공할 수 있다. 종래의 미세 전극 가공법으로는 그림 22과 같이 블록 전극을 이용한 방법을 들 수 있다. 이 방법은 블록 전극을 가공면의 수직방향으로 이송시키면서 미세 구멍용 전극을 가공하는 형태를 취한다. 그러나 고정도를 요구하는 경우에는 다음의 문제점이 있다.

- 블록전극이 소모되면서 가공된 미세 전극의 직경이 목표치보다 커지게 된다. 이러한 블록전극의 소모량은 가공물 치수와 가공시간 등에 따라 달라지므로 그 보정이 용이하지 않다.
- 가공면의 형상은 블록전극의 면이 전사되어 형성되므로 블록전극 면의 형상정밀도가 높아야 한다.
- 평면전극의 설치 정밀도가 가공된 미세 전극의 진직도에 직접적인 영향을 미친다.
- 미세 전극의 이송거리에 따라 매우 긴 미세 전극의 가공이 가능하다.
- 블록 전극법에 비해 가공력이 작기 때문에 매우 가는 미세 전극의 가공이 가능하다.
- 와이어 전극의 선단부에서 가공이 이루어지므로 와이어 가이드의 위치를 제어하면 계단, 테이퍼 등의 각종 형상을 가공할 수 있다.
- 피가공물의 회전각을 제어하면 다각형 단면 및 복잡한

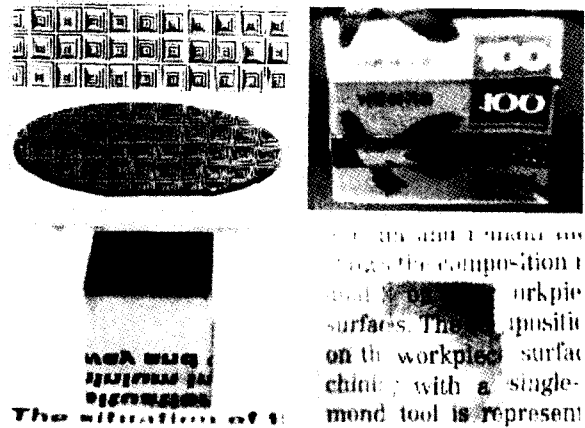


그림 21. Mirror Surface Grinding Samples with ELID

3차원 형상을 가공할 수 있다.

이러한 문제점을 극복하기 위하여 제안된 가공방법이 와이어 방전연삭(WEDG, wire electro discharge grinding)이다. 그림 23은 와이어 방전연삭의 가공원리를 보이고 있다. 와이어 전극이 고정된 와이어 가이드를 따라 일정한 속도로 주행하고, 이 와이어 전극이 미세 전극을 방전 가공한다. 미세 전극을 회전하면서 축 방향으로 이송함으로써 고정도의 진직도를 얻을 수 있게 된다. 이 방법은 다음과 같은 특징을 가지게 된다.

가공된 미세 전극은 미세 구멍의 방전가공용 전극으로 다시 사용하여 직경 100 $\mu$ m 이하의 미세 구멍가공에 사용될 수 있으며, 혹은 직접 핀 게이지 등의 미소 축 가공으로 응용될 수 있다. 미소 축은 주로 와이어 방전 연삭으로 가공하고 있다. 그림 24에 보인 미소축은 와이어 방전 연삭으로 50 $\mu$ m에서 4 $\mu$ m까지 미소 축 직경을 변화시키면서 계단형상으로 가공한 예이다. 가공 가능한 미소축의 최소직경은 4 $\mu$ m 정도이다. 또한, 미세 축의 회전각을 제어하면 다양한 3차원 형상을 가공할 수 있다. 예를 들면, 우선 원하는 직경으로 축 가공을 한 후에 축의 이송거리에 따라 축의 회전각을 제어하면서 가공하면 앤드밀, 드릴 등의 미세 공구를 제작할 수 있다.

### 2.3.2 미세 구멍 가공의 특성

와이어 방전 연삭 가공(WEDG)으로 제작한 미세 전극을

이용하여 원, 사각, 삼각형 모양의 단면 형상을 가진 미세 구멍을 쉽게 가공할 수 있다. 원형구멍은 직경 5 $\mu\text{m}$ 정도까

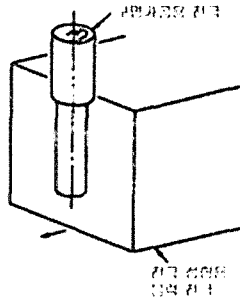


그림 22. 블라인드전극 이용방법

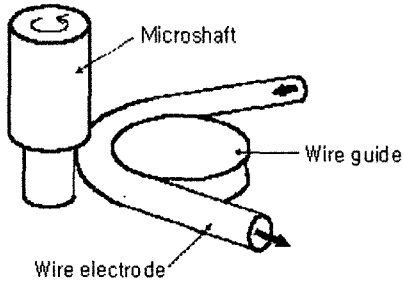


그림 23. 와이어 방전연삭의 가공원리

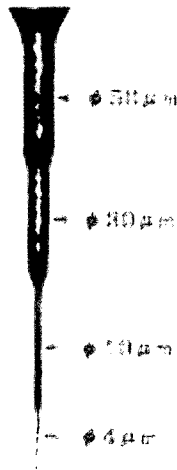


그림 24. 미소축 가공에

지, 다른 형태의 구멍은 한 변 길이가 10 $\mu\text{m}$ 까지의 가공이 현재 실용 범위이다. 재료는 금속, 합금, 전도성 세라믹이 이용되고 있다. 깊이는 극 미세 구멍에서는 지름의 2배정도, 직경 50 $\mu\text{m}$ 이상인 경우는 약 5배 정도까지 비교적 쉽게 가공이 가능하다. 전도율 1 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 이상의 순수한 물을 가공액으로 사용한 경우 재료에 따라서는 직경의 10배부터 20배까지도 가공이 가능하다.

### 2.3.3 차원 미세 가공의 특성

방전가공은 기존의 금형 가공에 최대로 적용할 수 있다. 앞서 말한 미세 전극으로 X-Y-Z 방향으로 방전가공을 함으로서 3차원 금형 가공이 가능하다. 방전가공으로 3차원 형상을 가공하기 위하여 여러 가지 방법이 제안되어 왔다. 이를 전극형상에 따라 분류하면 총형전극법, 와이어 프레임법, 단순형상전극법등이 있다. 형조 방전가공은 통상 가공되는 형상과 동일한 전극을 이용하여 전극의 형상을 피가공물에 찍어 낸 듯이 가공하는 것이다. 그러나, 형조방전가공의 경우 전극소모가 있기 때문에 황가공에서 마무리가공까지 여러 개의 총형 전극을 준비하여 전극의 마모가 심해지면 이를 교체해 주어야 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 전극은 단순형상전극을 사용하면서 이를 컴퓨터로 제어하여 3차원가공을 실현하는 방법이 제안되었다.

총형 전극을 사용하는 경우가 가공스피드는 빠르지만, 단순형상전극은 총형 전극과 비교하여 이점이 많다. 단순형상 전극을 사용하는 경우 총형 전극을 제작하는 데 드는 비용 및 시간이 절약될 수 있으며 가공시에 생기는 찌꺼기를 가공 층에서 배출하기 용이하다. 그러므로 집중방전의 가능성도 훨씬 줄어든다. 전극의 소모과정을 총형 전극의 경우와 비교하여 살펴보면, 총형 전극을 사용하여 미세 방전가공을 할 경우 전극의 마모에 따라 나타나는 형상의 차이가 크다. 따라서 미세 3차원 형상을 가공할 때는 단순형상의 전극을 사용하는 것이 효과적이라고 할 수 있다. 그러나 단순전극을 사용한 3차원 형상 가공인 경우에 보다 정밀하게 형상을 가공하기 위해서는 전극 선단부의 형상을 유지하는 것과 적절한 보정을 행하는 것이 필요하다.

정밀한 가공을 행하기 위한 방법으로, 전극 선단부의 형상을 유지하기 위해서는 균일 전극 소모법을 사용한다. 또,

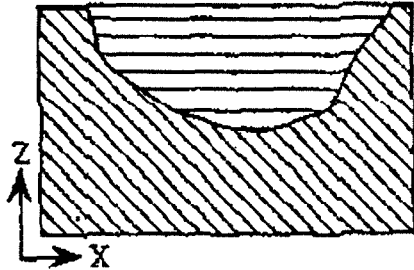


그림 25. 균일 전극소모법

적절한 보정을 위해 절입 깊이와 전극 소모길이, 가공깊이의 기본한계에서부터 미세 방전가공에서의 보정식을 얻어서 이용한다.

균일 전극 소모법은 미세 방전가공에서는 전극소모가 크다는 점을 이용하여 균일한 전극 끝난 후에 전극 저부형상을 저면을 소모하고 한 층의 가공이 회복하는 수법이다. 따라서 공작물과 전극의 형상, 가공파라미터(전극소모율과 절입깊이 등)의 선택, 가공경로 설계에 주의하지 않으면 안된다. 이러한 것들을 적절히 고려하여 가공하면 전극 선단부의 형상을 유지하는 것이 가능하다.

미세 3차원 형상을 가공할 때 형상을 한꺼번에 가공하지 않고 가공 형상을 여러 개의 층으로 나누어 한 층씩 가공한다. 왜냐하면 절입깊이가 너무 크면 전극이 충분하게 소모되지 않아서 소모로 인하여 전극이 지나치게 변형되므로 이를 회복할 수 없게 된다.

가공이 시작되면 전극이 소모되면서 약간씩 짧아지므로 일층 가공이 끝나면 가공된 평면은 경로의 개시점부터 종점까지 기울어져 있다. 왕복 스캐닝 가공은, 전극으로 가공 개시점에서 공작물을 일정량만큼 절입하고 어떤 경로를 따라 가공하여 종점에 도착한 후에 같은 절입량으로 같은 경로를 따라 역방향으로 되돌아가는 가공을 하는 것이다. 이런 방식으로 1회 왕복 스캐닝 가공이 완성된다. 주경로가 횡방향이므로 종방향으로 변환하여 다시 가공한다. 결국 그림 26에 보이는 모양에서처럼 A-B의 조합과 C-D의 조합을 번갈아 가며 되풀이하여 원하는 깊이까지 가공을 행

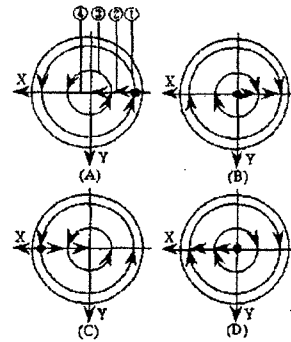


그림 26. 균일 전극소모법 가공경로

한 것이다.

### 2.3.4 미세방전가공기술의 국내 기술 동향

현재까지 산업계 및 연구실 등에서 수행되고 있는 미세 가공의 대표적인 형상 가공 기술 수준은 표 2와 같다. 그리고 표 3과 같이 미세 가공 기술에 효과적으로 적용할 수 있는 여러 가지의 가공 방법이 제안되고 있으나 현재 이러한 기술의 한계가 분명하지 않아 가공 방법에 대한 기본적인 연구가 진행되고 있는 실정이다. 표 4에는 대표적인 미소 가공 방식들의 특징을 비교하여 나타내었다.

### 2.3.5 미세방전가공기술의 국외 기술 동향

초정밀 가공 기술의 세계적인 현황 및 Milli structure와 밀접한 관계를 지닌 마이크로 시스템 관련 응용 분야와 시장 규모에 대한 조사 데이터를 다음의 표 5와 그림들에 각각 참고로 나타내었다.

## 3. 기계산업에서의 나노기술 전망

### 3.1 초정밀 미세가공의 전망

최근 고생산성을 위한 초정밀 고속 가공기술의 필요성과 함께 가공조건 및 가공현상의 규명에도 많은 기술적 발전이 있었다. 특히 실용화 가능한 초정밀 부품 가공 분야에서



표 2. 초정밀 가공 기술의 국내 현황

대표적 형상	가공방법	응용분야	현 산업계 수준	산업계 목표	연구실 수준
구멍	드릴링	PCB	∅ 100~150 $\mu$ m	∅ 25~50 $\mu$ m	∅ 20 $\mu$ m, 깊이 60~80 $\mu$ m
	방전 가공	다젤 연료 분사기	∅ 150 $\mu$ m/ 0.1sec (공차 10~20 $\mu$ m)	∅ 100 $\mu$ m	
	엑사이머 레이저 가공	잉크젯 노즐	∅ 50~125 $\mu$ m		∅ 6 $\mu$ m Aspect Ratio : 10
홈(슬롯)	밀링	간섭계	폭 : 125 $\mu$ m		폭 : 20 $\mu$ m
원통	선삭	샤프트, 핀	∅ 250~500 $\mu$ m 1.5 $\mu$ m Ra		∅ 100 $\mu$ m 0.2 $\mu$ m Ra
가공면 품질	CMP	웨이퍼 연마	∅ 300mm 1 nm Ra		∅ 300mm 0.5 nm Ra

표 3. 초정밀 가공 기술의 적용분야

1. ultrasonic  $\mu$ -machining
2. abrasive  $\mu$ -machining
3. laser  $\mu$ -machining
4.  $\mu$ -electrical discharge machining
5.  $\mu$ -electrical chemical machining
6.  $\mu$ -milling
7.  $\mu$ -drilling
8.  $\mu$ -turning
9.  $\mu$ -grinding
10. fluid jet  $\mu$ -machining
11. focused ion beam machining

는 커다란 기술적 변화가 일어나고 있다. 초정밀 경면가공 기술을 이용한 비구면, 비축대칭 반사경, 마이크로 렌즈, 등 초정밀 고성능 광학부품의 개발과 밀리머신 마이크로머신 등 초소형 미세 형상 부품의 수요에 대응한 초정밀 미세 가공 기술의 발전이 이루어지고 있다. 이들은 급변하는 기술환경의 변화와 더불어 사회적, 산업적, 경제적 파급효과가 크고 미래 21세기 사회의 기계산업에 커다란 핵심 기술로 자리 잡고 있다.

그 밖에 나노기술은 나노기술 연구기반 구축을 위하여 과학기술부와 산업자원부가 중심이 되어 나노입자 제어기술, 초미세표면과학연구, 극미세구조기술 개발, 분자과학 연구, 테라급 나노소자 개발, 소재(분석) 환경 공정 생체과학 소자/시스템, 고기능 나노 복합체 개발 등에 중점을 두고 있으며 정부가 지원하는 나노기술 관련 연구과제들은 기초기술 개발로부터 응용단계에 걸쳐 있는 반면, 응용 단계에 가까운 개발 연구 이후의 과제들에는 산업체들이 부분적으로 참여하고 있다. 나노기술은 전자소자를 중심으로 국내에서도 빠른 속도로 산업화되고 있는 추세이다.

### 3.2 국내 기계산업분야의 나노기술 정책 방향

이런 나노기술이 21세기 핵심기술로 중요시되는 기술임에 대해 현재 국내의 정책 방향은 다음과 같이 추진되어야 한다.

표 4. 대표적인 미소 가공 기술의 특징 비교

Technology / feature Geometry	Minimum feature Feature size / tolerance	Feature positional tolerance	Materials removal rate	Material
Focused Ion Beam / 2D&3D	200nm / 20nm	100nm	0.5 cubic $\mu$ m/sec	Any
Micro Milling or micro turning / 2D or 3D	25 $\mu$ m 2 $\mu$ m	3 $\mu$ m	10,400 cubic $\mu$ m/sec	PMMA, Aluminum, Brass, mild steel
Excimer laser / 2D or 3D	6 $\mu$ m / submicron	submicron	40,000 cubic $\mu$ m/sec	Polymers, ceramics and metals to a lesser degree
Ferro-second laser / 2D or 3D	1 $\mu$ m / submicron	submicron	13,000 cubic $\mu$ m/sec	Any
Micro-EDM(Sinker or Wire)/ 2D or 3D	25 $\mu$ m / 3 microns	3 $\mu$ m	25 million cubic $\mu$ m / sec	Conductive materials
LIGA / 2D	submicron/0.02 $\mu$ m~0.5 $\mu$ m	~0.3 $\mu$ m nom across 3"	N/A	Electroformable : copper, nickel, Permalloy(see note)

- 국내외 중장기적인 유망분야를 겨냥한 나노 기술개발의 지원
- 나노기술에 의한 신규분야와 함께 기존산업과 연계할 수 있는 분야의 기술분야를 선정 · 지원.
- 연구개발 대상기술 관련을 중심으로 인력 및 시설장비 구축.

#### 4. 결론

세계적으로 나노 산업은 태동기에 있으며, 아직까지 기술 개발이 시작된 단계이며, 일부분야에서만, 기존산업과 연계하여 산업화를 이루고 있는 실정이다. 국내의 기술력을 바탕으로 선진국과의 상대기술력을 평가해 보면 우리의 기술력은 선진국에 비해 약 25%정도의 수준이고, 논문 및

특허등록 수에서는 선진국에 대하여 절대적 열세에 있다.

1972~3년경 구미의 초정밀관계자들은 1980년대에 있어서의 초정밀 다이아몬드 절삭기술의 활성화를 확신했었고 뿐만 아니라 초정밀 측정기술, 제어기술, 연삭기술 등의 기계산업에서의 나노테크놀러지의 활성화에 대한 중요성을 느끼고 있었다. 뒤늦게 깨달은 일본이 그 대열의 후미에 자리잡고 있고, 그들은 다시 1990년대 초정밀기술의 만개를 예언하고 있고 우리도 늦었지만 그 필요성을 깨닫기 시작하고 있다.

이에 따라 우리도 나노기술의 전략적 필요성, 실현가능성 등을 고려하여 단계적으로 기존 연구인력을 나노 연구분야로 전환하기 위한 교육지원과, 중장기적으로 대학을 중심으로 한 양성교육, 나노기술에 의한 신규분야와 함께 기존산업과 연계할 수 있는 분야의 기술분야를 선정 · 지원하고, 또한 한정된 재원으로 여러 연구주체가 공동활용 가

표 5. 초정밀 가공 기술의 세계 현황

공 정	대상재	Ra(nm)	Rmax(nm)	비 고
Fine Grinding ELID with micro grain cast iron bonded wheels	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 단결정실리콘 BK7	8 0.33~2.0 4		Ohmori(1990) Bandyopadhyay(1996) Ohmori(1995)
ELID with Chemo-mechanical grinder	단결정실리콘		4	H.D.Jeong(1996)
Ultra precision grinder w/glass-ceramic spindle	광학글라스 Mn-Zn Ferrite	< 0.2 2.7		Namba(1993) Namba(1992)
Grinding w/metal bonded wheel + diamond abrasives	SiC	4		Suzuki(1995)
Cast iron fiber bonded diamond wheels	SiC	2.5		Zhong(1992)
Fine grain diamond wheels(1~2μm)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Mn-Zn Ferrite Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>		30 20 4~9	Matsuo(1997) Ichida(1993)
3~6μm diamond wheels	실리콘	11		Puttick(1994)
Grinding w/electrophoretically deposited abrasive pellets	실리콘 사파이어		< 8 22	Ikono(1990)
Double-sided lapping w/resin bond stone	고순도 Al합금	20		Tomita(1996)
Coated abrasive tapes texturing	Al합금	14~17		Yanagi(1992)
Grinding w/directionally aligned SiC wheel	경화처리강	4		Yamoguchi(1995)
Superfinishing w/CBN	경화처리강	< 30		Onchi(1995)
Superfinishing w/fused alumina	경화처리강	60		Puthangady(1995)

능한 장비활용 시설을 구축하여야 할 실정이다.

급격한 기술발전이 이루어진 모든 가공기술에서와 같이 21세기를 주도할 핵심기술로서 자리잡고 그 중요성이 커지고 있는 나노테크놀러지의 정밀화, 고속화, 지능화가 강조되고 있는 시점에서 앞으로의 나노테크놀러지의 기술이 어떤 방향으로 나아가야 할지 그리고 해결해야 할지를 살펴 보아야 한다.

### 참고 문헌

- (1) 이응숙, 강재훈, 신영재, 1999, "초정밀 연삭가공기술의 현황과 전망" 기계와 재료 11권 4호
- (2) 박천홍, 이득우, 이후상, 1999, "초정밀 절삭 가공기의 연구 동향" 기계와 재료 2권 3호
- (3) 한재호, 2002, "평면 X-Y 스테이지의 초정밀위치결정을 위한 최적설계 및 제어시스템 개발" 조선대학교, 박사학위 논문
- (4) 곽이구, 2001, "A Study on the Simulation and Control Performance Estimation of Ultra Precision Position Apparatus" 조선대학교, 석사학위 논문
- (5) Taniguchi, N., 1983, Current Status in and Future trends of Ultraprecision machining and Ultrafine materials Processing, Annals of CIRP, 32/2, pp.573~582.
- (6) Nogawa, H., 1988, Ceramics Processing-State of the Art of R&D in Japan, ASM Int., Metals park, OH
- (7) Komandri, R., et al, 1997, Technological Advances in Fine Abasive Processes, Annals of CIRP 46/2, pp.545~596.
- (8) Tomoda, Y., Eda, H., 1996, A Study of Ultra Precision Grinding Process on a Magnetic Disk Substrate - Development of New Bonding Materials for Fixed Abrasives of Grinding Stone, Wear, 195, pp.74~80.
- (9) Yanagi, K., et al, 1992, Surface Topography Assessment of High-Precision Coated Abrasive Tape and Estimation of its Machining Performance, Annals of CIRP, 41/1, pp.377~380.
- (10) Yamaguchi, K., Horaguchi, I., 1995, Development of Directionally Aligned SiC Whisker Wheel, precision Engineering, 17, pp.5~9.
- (11) S. T. Smith and D. G. Chetwynd, "Foundation of Ultra Precision Mechanism Design", Gordon and Breach Science Publishers, 1992, pp.95~128.
- (12) Franchi, Claudio G, "General Formulation in Rigid Multibody Dynamics", June 1995, Int. J. for Numerical Methods in Eng., Vol. 38, No. 12, pp. 1985~2016
- (13) H. Ohmori, 1993, Electrolytic In-Process Dressing(ELID)Grinding Technique for Ultra precision Mirror Surface Machining, JSPE 59/09, pp.1451~1457.
- (14) Benjamin C. Kuo 1994, "Automatic Control Systems" Prentice Hall, Englewood Cliffs. N. J 07632, pp. 689~699
- (15) Kaiji Sato, 1997, "Performance Evaluation Lead screw Positioning System with Five Kinds of Control Methods(2nd Report)", JSPE Vol. 63. No. 12, pp. 1759~1763
- (16) H. Nakazawa, 1994, "Principles of Precision Engineering", Gordon and Breach Science Publishers, pp. 75~82, pp. 140~167