

# 기계적인 마이크로 절삭가공기술

이 글에서는 디스플레이·바이오·전자·자동차 산업 등에서 광범위하게 사용되고 있는 기계적인 마이크로 절삭가공기술(mechanical micro machining technology)에 대하여 소개하고자 한다.

**평**판형 디스플레이·초소형 이동기기·가전·항공·자동차·바이오산업 등에서 핵심부품들의 저전력, 고효도, 저가격화를 위하여 초정밀 미세부품들에 대한 수요가 폭발적으로 증가하고 있으며 이를 생산하기 위한 기술도 눈부시게 발전하고 있다. 기존 미세 부품을 대량생산하기 위한 가공기술은 실리콘 기반의 화학적 식각공정인 반도체 공정에 기반을 두고 있으며 실리콘 소재의 2차원 구조 부품에만 제한적으로 적용되었다. 그러나 첨단 IT제품에는 기능성소재의 3차원 구조의 부품을 요구하고 있으며 이는 기존의 반도체 공정에

로써는 불가능하여 보다 실용적이고 고 생산성인 기계적인 미세 절삭가공기술과 미세사출성형기술에 대한 연구가 진행 중에 있다. 최근에는 나노급 미세가공시스템과 미세공구 제작기술 등의 눈부신 발전으로 인하여 금속, 복합재료, 폴리머 소재 등의 실용적인 초정밀 미세부품들을 만들 수 있으며 미세 사출성형을 위한 3차원 자유형상 미세금형 제작기술에 대한 연구가 활발히 개발되고 있다.

## 나노급 미세 가공시스템 및 미세공구

디스플레이·바이오·IT전자 산업 등을 중심으로 마이크로 가공기술을 기반으로 한 관련 제품 개발에 기업과 정부의 관심이 매우 높아지고 있다. 차세대 디스플레이 시장에 있어서는 중소형 장치의 경우 휴대 특성이 뛰어난 고분자 필름기판을 채택한 TFT-LCD와 유기EL이 시장을 주도할 것으로 예상되며 화면의 대면적화와 입체형상을 지원하는 3차원 디스플레이 기술의 급속한 발전이 전망된다. IT 및 가전산업에서는 대용량의 정보를 전달하고 기록하는 광통신 핵심부품과 광학 부품의 수요가 확대될 것으로 기대되며 이들 핵심부품들을 제작

최 두 선/ 한국기계연구원, 책임연구원  
제 태 진/ 한국기계연구원, 선임연구원  
유 영 은/ 한국기계연구원, 선임연구원  
이 응 속/ 한국기계연구원, 책임연구원

\_e-mail : choids@kimm.re.kr  
\_e-mail : jtj@kimm.re.kr  
\_e-mail : yeyoo@kimm.re.kr  
\_e-mail : les648@kimm.re.kr

하기 위한 기계요소부품의 초정밀 형상가공과 표면가공기술 및 이에 따른 양산설비기술 확보가 시장 경쟁력을 주도하게 될 것으로 예상된다. 현재 각종 형태의 비구면을 0.1 $\mu$ m의 형상정밀도로 가공할 수 있는 비구면 가공기가 상용화되었으며 기존 반도체 공정으로 제작되는 각종 광 핵심부품들에 적용하여 제품 응용분야에 급격히 확산되고 있으며 향후 10년 후에는 형상정밀도를 10nm까지 낮출 수 있는 시스템이 출시될 전망이다. 마이크로 패턴형상에 따라 크기나 조도는 달라지나 비철금속재료를 이용한 회전격자 어레이의 경우 5 $\mu$ m의 형상 크기 및 5nm 이내의 표면 조도를 기계적인 절삭가공으로 제작할 수 있으며 디스플레이, 바이오산업 및 정보통신용으로 5~20 $\mu$ m 마이크로 패턴 제품을 기계적인 미세 절삭가공 기술로 고속 양산이 가능하다. 마이크로 미세부품의 크기와 정밀도, 표면 거칠기, 형상치수 재현성 등은 미

세가공시스템의 정밀도, 동적성능 및 미세공구의 특성에 따라 결정된다. 미세 가공시스템은 스피들과 초정밀 스테이지 및 이를 제어하는 통합 컨트롤러 구성되어 있으며 미세 회전공구를 사용하는 밀링공정에 적용되는 스피들의 경우 회전공구의 직경이 매우 작기 때문에 칩 제거율을 높이기 위하여 고속회전을 요구되고 있으며 이러한 고속회전 스피들은 절삭가공에 요구되는 가공 토크에 따라 결정되며 에어 베어링을 채택한 스피들의 경우 최대 200,000rpm의 상용화된 제품이 출시되고 있다. 정밀 스테이지의 경우 볼 스크류나 리니어모터로 구동되며 현재 나노급 정밀도를 가지는 제품이 가공면적의 크기에 따라 제품으로 나오고 있다. 현재 상용화된 미세 가공시스템들은 대부분 높은 강성과 정밀한 센서 및 액추에이터를 이용하여 나노급 정밀도로 가공이 가능하나 가공면적을 대면적화하거나 가공환경을 안정화시키는 데 기

술적 노하우가 요구된다.

마이크로 구조물은 크기가 매우 작기 때문에 많은 연구소와 대학에서는 사용 에너지와 공간 및 유지비용을 줄이기 위하여 마이크로 부품을 제작하는 미세 가공시스템의 크기를 줄이는 연구를 진행해 오고 있다. 마이크로 시스템의 특징은 기존 대형 가공시스템에 비하여 높은 고유진동수를 가지고 채터에 의한 불안정성이 없으며 부하에 대한 진동이 낮아 스피들의 속도범위를 다양하게 할 수 있다. 이러한 마이크로 시스템을 개발하기 위해서는 정확한 센서와 액추에이터가 초소형으로 개발되어야 하며 기계구조적인 강성을 유지하기 위한 구조로 제작되어야 한다. 또한 외부주위 환경에 민감하지 않도록 방진 설비가 갖추어져야 하며 여러 가지 마이크로 시스템들을 통합 제어하는 기술이 개발되어야 한다.

초정밀 미세절삭공구의 크기는 미세구조물 형상의 크기와 정밀도 한계를 결정하며 상대적으로

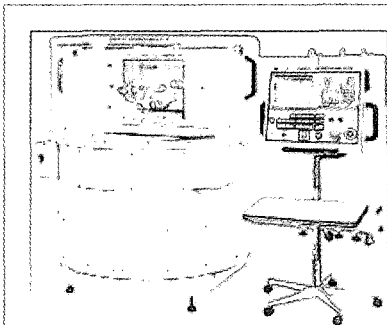


그림 1 FANUC, Japan

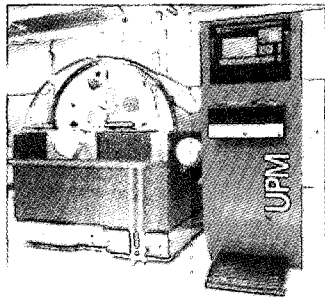


그림 2 IPT, Germany

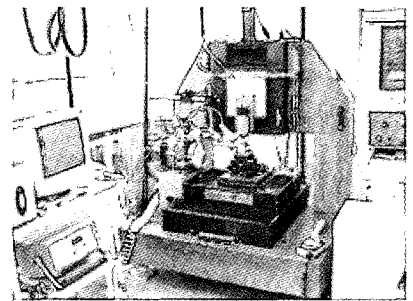


그림 3 KIMM, Korea

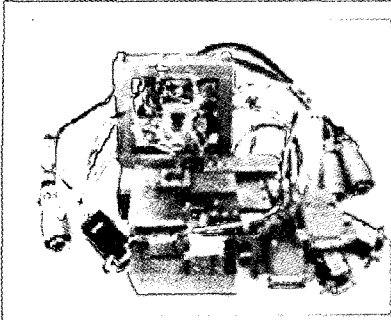


그림 4 KMico Press, Norethwestern

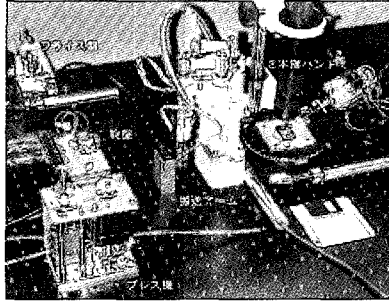


그림 5 Micro Factory, AIST

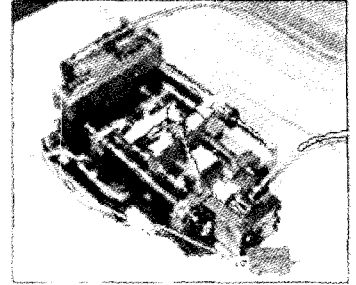


그림 6 Micro Forming, Japan

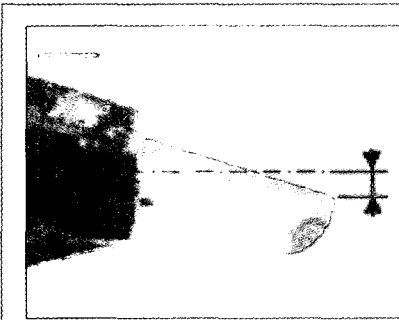


그림 7 R150 $\mu$ m Diamond Tool

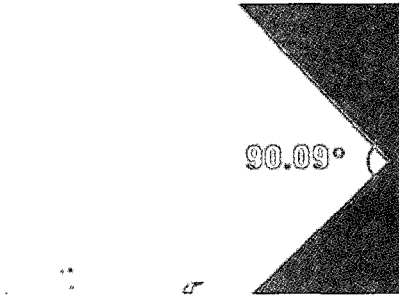


그림 8 90° Diamond Too

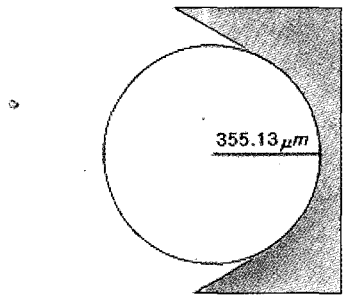


그림 9 R355 $\mu$ m Diamond Tool

줄어든 열팽창과 정적강성, 높은 고유진동수에 따른 동적 안정성을 가지고 있다. 미세절삭공구의 재료로는 천연 다이아몬드와 텅스텐 카바이드가 주로 사용되는데 철 종류를 가공하는 데에는 높은 화학적 친화력 때문에 다이아몬드 대신 고온에서 높은 강도와 경도를 가지는 텅스텐 카바이드가 사용되고 비철금속 가공엔 다이아몬드공구가 사용된다. 현재 미세공구 제작기술이 더욱 발전하여 마이크로 공구의 지름이 더 작아지게 되면 리소그래피에 의해 제작된 마이크로 부품과 경쟁력을 가질 수 있으며 가공성을

높이기 위하여 더 높은 마멸저항 특성과 더 견고함을 가진 공구들이 개발되어야 한다. 대부분의 직경 50 $\mu$ m 이하의 미세공구들은 고가장비로 제작이 가능한데 저렴하고 양질의 마이크로 공구를 제작하기 위해서는 새로운 제작 방법이 개발되어야 한다.

### 기계적인 마이크로 절삭가공기술

- 미세 평삭가공기술  
공구 또는 공작물의 왕복운동으로 이루어지는 세이핑머신이나 플레이너에 의한 평삭가공기술은

19세기 초반에 개발되어 오늘날까지 공작물의 평면가공에 광범위하게 적용되고 있다. 그러나 초기의 평삭가공기는 정밀도면에서 낙후되어 광학적인 미세 구조물을 필요로 하는 분광용 그레이팅과 같은 광학부품을 가공하기 어려웠다. 이에 따라 이러한 미세패턴 그레이팅의 가공을 위해 19세기 후반에 다이아몬드 공구와 롤링엔진이라는 특수한 가공장치가 개발되어 오늘날까지 사용되고 있다. 그러나 이 롤링엔진을 이용한 가공법은 다이아몬드 공구를 공작물 표면에 문지르는 가공방식으로서 일종의 소성가공이며,

미세절삭가공은 아니다. 실질적인 미세 평삭가공기술은 근년에 발달된 공작기계기술의 발전과 더불어 발전하였으며, 그레이팅의 대량생산을 위한 금형의 가공, 엔코더용 미세 패턴가공, 야광 반사시트용 금형의 가공 등을 거치며 수십  $\mu\text{m}$  사이즈의 미세 패턴을 가공하는 수준으로 발전하였다. 특히 최근의 PDP, LCD와 같은 디스플레이 산업의 발전과 더불어 여기에 필요한 도광판 가공기술, 프리즘시트, 반사시트, 렌티큘러 필름 등 미세패턴을 가진 광학필름의 생산을 위한 금형가공기술에서 평삭가공기술은 최적의 제조기술로서 각광 받으며 급속적인 발전을 거듭하고 있다.

최근의 평삭가공기술은 광학부품의 고성능 고기능화와 생산성향상에 맞물려 패턴의 다양화, 미세화, 대면적화의 형태로 발전하고 있다. 패턴의 형상은 프리즘시트나 반사시트와 같이 V 그루브를 기본으로 하는 프리즘 구조, 피라미드 구조, 삼각피라미드 구조 등을 요구하고 있는 것과, 3차원형상구현을 위한 렌티큘러 렌즈와 같이 단면이 구면인 것, 또 분광 및 홀로그램용의 사각채널 등이 기본으로 요구되고 있으며, 최근에는 이들 구조체가 복합적으로 배열되거나 상하좌우 등의 3차원형상으로 이루어지는 것이 많다. 패턴의 크기는  $100\mu\text{m}$ 의 형상 사이즈에서 점차 미세화되어 최근에는  $50\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$  정

도의 패턴에 대한 요구가 많으며, 극단적으로는  $100\text{nm}$  정도의 미세패턴을 요구하고 있다. 가공 면적의 확대는 제품의 생산성을 높이기 위한 것으로서 기존에는 2인치 급의 휴대폰용 도광판에서

지금은 17인치 급의 노트북용 도광판을 가공하고 있으며, 향후에는 40인치 급의 대형 TV 금형 등을 가공하는 것이 요구되고 있다. 따라서 이와 같은 미세 평삭가공기술은 디스플레이산업의 핵

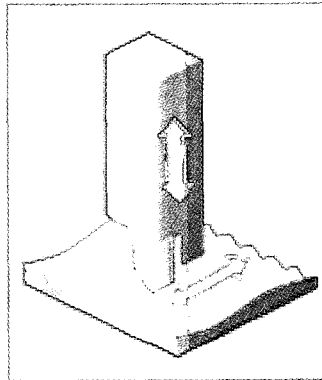


그림 10 세이핑 가공법

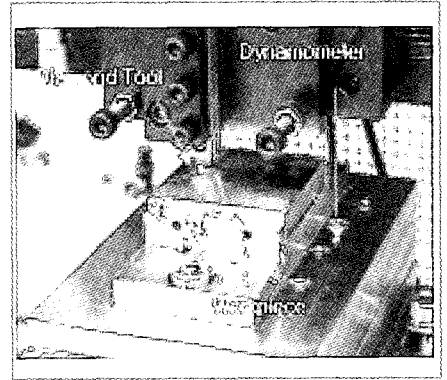


그림 11 가공시스템 및 공구

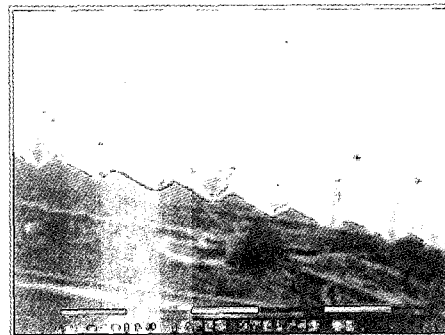


그림 12 도광판 금형가공 예

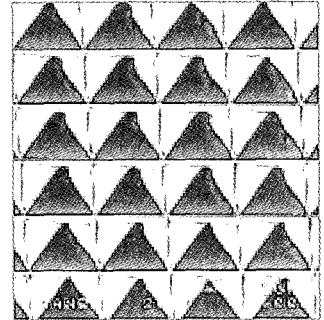


그림 13 미세 사각 프리즘 구조물 가공 예

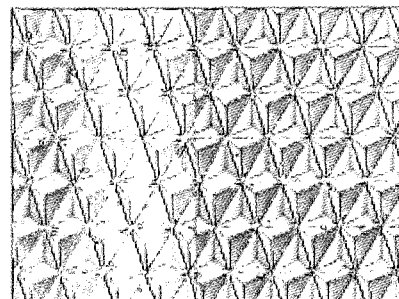


그림 14 미세 삼각프리즘 구조물 가공 예

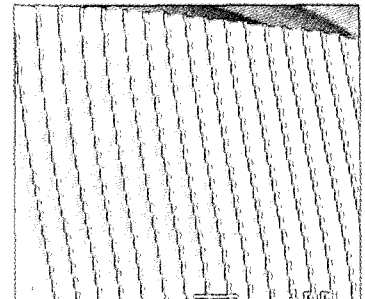


그림 15 렌티큘러 금형가공 예

심기반기술로서 지속적으로 그 수요에 대응하는 첨단가공기술 개발이 필요하다.

**- 미세 선삭가공기술**

18세기 후반 산업혁명의 원동력이 된 증기기관의 성공적인 개발은 1775년에 월킨슨이 개발한 보링머신으로 직경 72인치의 실린더 내경을 1mm 정도의 주화 두께로 가공한 것이 결정적 역할을 하였다. 그로부터 200여년이 지난 현재 나노메타 정밀도를 갖는 첨단공작기계의 개발로 서브미크론 수준의 형상 정밀도와 서브나노 수준의 표면 거칠기로 가공할 수 있는 초정밀 선삭가공기술이 개발되고 있다. 1966년 미국의 Union Carbide 사에 의해 다이아몬드공구를 이용한 초정밀 경면 절삭가공기의 개발을 시초로, 현재는 수 나노메타의 운동정밀도를 갖는 초정밀 공작기계가 개발되었고, 서브나노메타의 인선을 갖는 천연 단결정 다이아몬드공구의 개발로 각종 특수 반사경, 렌즈, 마이크로 부품 등의 가공에 적용하고 있다. 초정밀 선삭가공기술의 발전은 기본적으로 초정밀 광학 부품의 수요에 의해서 발전되어 왔다고도 볼 수 있다. 먼 옛날의

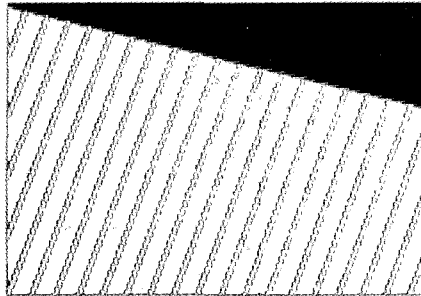


그림 16 마이크로 채널금형가공 예

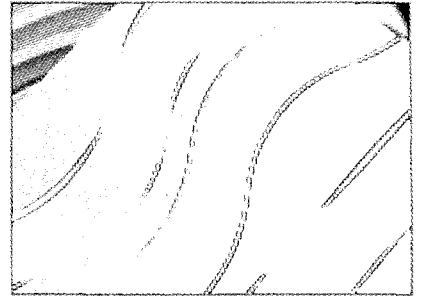


그림 17 3차원 커브 미세패턴 가공 예

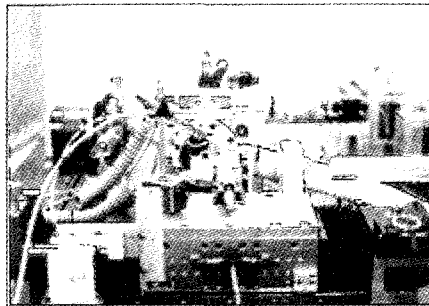


그림 18 초정밀 선삭가공기를 이용한 디스크 경면가공

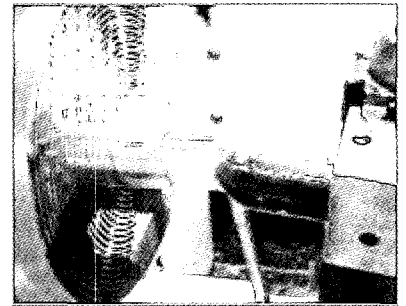


그림 19 초정밀 선반에 의한 마이크로 픽업렌즈 금형가공

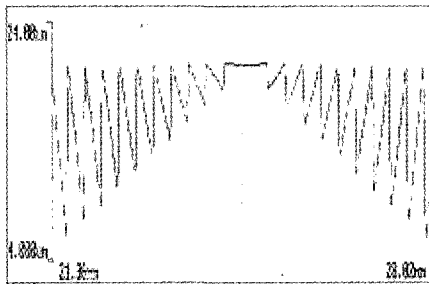


그림 20 마이크로 프레넬렌즈 선삭가공 표면형상측정 예

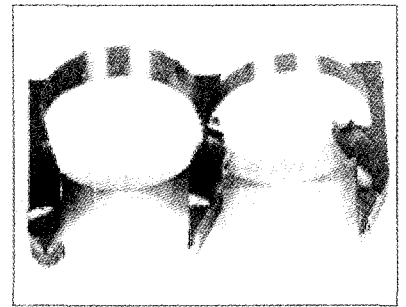


그림 21 레이저반사경 가공 예

외통 망원경으로부터 오늘날의 우주 관측용 대형 망원경에 이용되는 망원렌즈 및 반사경, 현미경 및 카메라용 렌즈, 정보저장기기의 발달 및 IT 산업에 요구되는 픽업렌즈, 레이저산업 등에 요구되는 반사경 및 포커싱 렌즈, 인간을 위한 콘택트 렌즈에 이르기까지 수많은 광학제품을 선삭으

로 가공하고 있다. 특히 최근의 미세선삭가공 기술은 픽업용 마이크로 비구면 대물렌즈, 프레넬 또는 홀로그램용 렌즈와 같이 비구면에 마이크로 사이즈의 패턴을 가진 하이브리드 구조의 렌즈, 한 평면에 복수개의 마이크로 렌즈가 배열된 마이크로 렌즈어레이 등의 기술개발에 활발히 적용

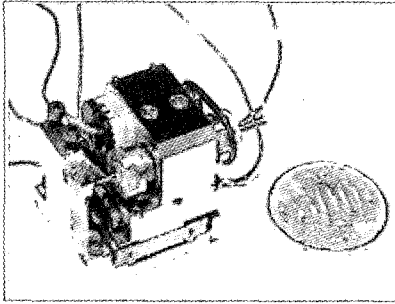


그림 22 Micro-lathe

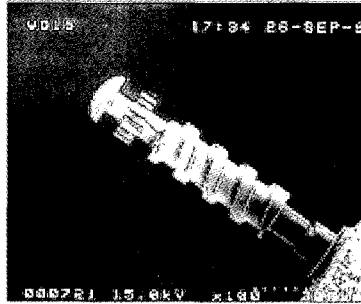


그림 23 마이크로 모터용 미세축 가공 예

되고 있다.

한편, 이러한 미세선삭가공 기술은 초정밀 마이크로 기계요소 부품 분야에서도 활발히 적용되어 마이크로 팩토링용의 마이크로 선반이 개발되고 있고, 마이크로 모터 및 액추에이터용의 미세형상부품에 대한 선삭가공기술 등이 개발되고 있다. 이와 같은 선삭가공기술은 현재 수 nm 영역에서의 절삭가공이 실용화되어 있고, 실험실적으로는 절입 1nm에서의 절삭가공과 함께 미세한 절삭력도 측정되고 있다. 이러한 정밀도의 실현은 현 수준에서 절삭가공의 한계에까지 도달한 것으로 평가되고 있고, 향후의 가공한계는 공작기계의 운동정도와 공구인선의 전사정도, 무결점 재료, 가공프로세스의 발전 등에 따라 진전될 것으로 전망된다.

**-롤투롤(Roll-to-Roll) 가공기술**

향후 인류 생활에 큰 변혁을 가지고 올 것으로 예상되고 활발한 연구가 진행되고 있는 유비쿼터스 제품이나 플렉서블 디스플레이, 전자종이 혹은 이에 필요한

다양한 소자들은 공통적으로 변형이 비교적 자유롭다는 공통적인 특성을 가지고 있다. 이와 같이 변형이 비교적 자유로운 유연성이나 적용성 등이 매우 우수한 플렉서블 디바이스(flexible device)는 디스플레이 분야, 통신 분야, 바이오 분야, 의학 분야 및 스포츠 용품 분야 등 다양한 부분에서 개발이 더욱 활성화 될 것으로 예상된다. 현재 이러한 플렉서블 디바이스는 많은 경우 아직 디바이스의 개발을 위한 연구실 안의 단계에 머무르고 있어, 아직 양산을 고려한 제작이나 생산 공정의 개발은 본격적으로 이루어지지 않고 있는 실정으로 대부분 기존의 리소그래피 공정이나 MEMS 공정 등의 배치 작업에 의존하여 시험 제작되고 있으나, 향후 제품의 양산 및 조기의 시장 진입을 위해선 플렉서블 디바이스의 특성을 고려한 고생산성 공정 개발이 병행되어야 할 것으로 판단된다. 플렉서블 디바이스의 경우 제품 및 사용 소재의 특성으로 인해 제품 제조 공정에서 소재, 취급성, 치수 안정

성, 균일성, 정밀도 등 몇 가지 문제점을 내포하고 있지만, 제품의 유연한 특성을 적절히 이용하는 경우 생산성을 획기적으로 향상시킬 수 있는 연속 공정의 적용이 가능할 것으로 판단된다. 최근의 기능성 광학 필름 등은 미세 패턴 롤 금형을 이용하여 미세 패턴 구조물을 필름의 표면에 전사시키는 롤 포밍 공정을 통해 생산되고 있다. 그러나 플렉서블 디바이스의 경우 이러한 광학적 기능성 필름과는 달리 공정에서 단순한 구조물의 전사 이외에 패터닝, 적층, 코팅, 포밍, 에칭, 및 솔더링 등 필요한 다양한 요소공정이 인라인으로 구현되어 디바이스 혹은 디바이스 부품의 제작이 가능한 연속 생산 공정의 개발이 필요하며 특히 생산기술의 핵심인 롤 가공기술은 반드시 개발하여야 할 핵심기술이다.

**대면적 미세 금형가공 기술 동향과 전망**

첨단 핵심 산업분야에서의 기술개발력 확보와 관련 신제품의 조기 실용화를 통한 경쟁력 확보는 대량 생산 기술 기반이 없는 불가능하다. 향후 IT 산업과 같은 첨단 핵심 산업 부분에서의 제품은 고성능 및 고기능화를 통한 고부가가치화를 위해 대면적화, 구조의 미세화, 고정밀화의 경향을 보이고 있다. 이와 더불어 많은 응용 제품이 좋은 광학적인 특성을 필요로 하거나 이용하고

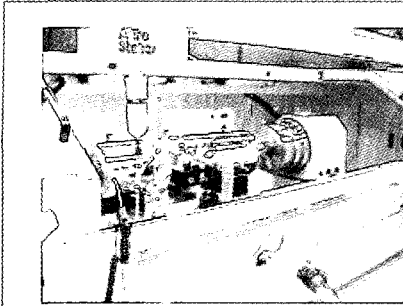


그림 24 Riken Seiko, Japan

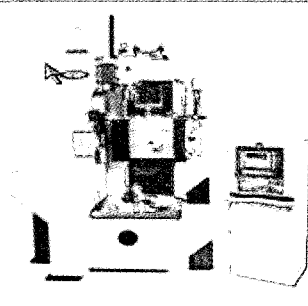


그림 25 Moore Tool, USA

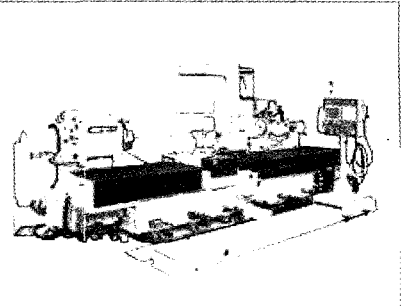


그림 26 Toshiba, Japan

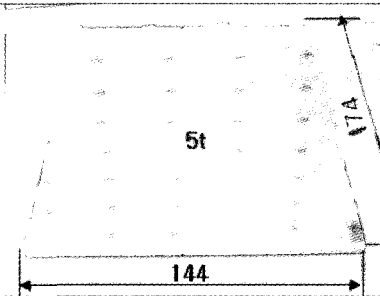
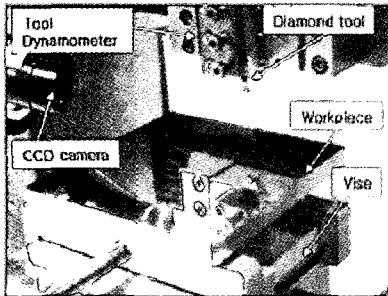


그림 27 대면적 평삭가공시스템 및 경면 미세 패턴 가공시제품 예-KIMM

있어 유리나 플라스틱 소재 적용에 대한 요구가 커지고 있다. 이 중 특히 플라스틱 소재의 경우 대량 생산에 매우 적합하고 경량화에 유리하여 플라스틱 소재를 적용한 제품이나 공정이 크게 증가하고 있으며, 이는 첨단 플라스틱 소재의 지속적인 개발과 병행하여 향후 그 적용 범위의 확대가 가속화될 것으로 판단된다. 이러한 플라스틱 소재를 적용한 제품생산의 대표적인 공정인 사출성형과 이를 위한 미세금형 가공 기술은 대표적인 공정 중의 하나이다. 더 나아가서 수십 마이크로급의 미세 패턴이 표면에 다량으로 형성되어 있는 대면적 제품을 성형하기 위한 미세금형 기술이나 성형 기술은 세계적으로도 그

기술의 정립도가 매우 낮아 첨단 고기능 제품의 설계 및 생산에 큰 제약 요인이 되고 있어, 이에 대한 핵심 기술의 확보가 매우 시급한 실정이다. 또한 최근 이러한 미세 패턴의 크기는 제품의 기능 향상을 목적으로 더욱 작아지는 경향을 보이고 있으며 그 형상도 기존의 단순한 형태에서 벗어나 비대칭면, 곡면 등을 가지는 복잡한 형태를 보이고 있다. 이러한 제품 설계 경향의 변화로 인해 기존의 반도체 공정을 응용한 에칭 등의 공정을 이용한 정밀 미세 형상의 구현이 매우 어려운 실정이다. 따라서 원하는 형상을 자유롭게 직접 기계 가공할 수 있는 초미세 절삭가공 기술과 더불어 가공 대상 면적이 커짐에

따라 다량의 미세 패턴을 빠르고 정확하게 가공할 수 있는 절삭가공 고속화의 필요성이 매우 크다. 이와 같은 사출성형용 대면적 미세 금형가공 기술은 차세대 고기능 LCD 도광판, 경량 디스플레이, flexible 디스플레이 등의 신제품 개발이 진행되고 있는 IT 관련 산업에서의 수요가 클 것으로 예상되며, 이외에도 향후 BT나 NT 분야에서의 수요가 증대될 것으로 판단된다. 특히 2001년 LCD 세계시장에서 삼성전자가 노트북 PC용에서 세계 1위(23.4%), LG Philips LCD가 모니터용에서 세계 1위(18.8%)를 차지(자료 : 디스플레이 서치)하는 등 국제적인 경쟁력을 보유한 IT 관련 산업에서의 차별화되고 확고한 경쟁력을 갖추기 위해서는 대량생산을 위한 대면적 미세 형상 금형 가공의 핵심 기술을 개발하여 제품의 조기 실용화 및 정밀도 향상과 생산성 증대를 통한 품질 및 가격 경쟁력을 확보하는 것이 반드시 필요하다.