

대면적 미세가공장비 기술

송 창 규 · 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부, 책임연구원 _e-mail : song@kimm.re.kr
박 천 흥 · 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부, 책임연구원 _e-mail : pch657@kimm.re.kr

이 글에서는 수백 밀리미터의 대면적에 수십 마이크로미터 단위의 미세형상을 가공하는 대면적 미세가공장비의 개발동향에 대해 소개하고자 한다.

대면적 미세형상가공장비는 가공되는 금형의 형상에 따라 평판 금형을 가공하는 대면적 초정밀 가공기와 원통형의 롤(roll) 금형을 가공하는 초정밀 롤 금형 가공기로 크게 분류할 수 있다. 대면적 초정밀 가공기는 다시 홈(groove) 형태의 가공을 주로 수행하는 그루빙(grooving) 가공기와 복잡한 삼차원 형상을 가공하는 밀링 형태의 3D 초정밀 미세 가공기로 나뉜다. 이 글에서는 이러한 세 가지 형태의 대면적 미세가공장비의 세계적인 개발 동향을 살펴봄으로써 최근의 기술발전 추세를 알아보고자 한다.

대면적 미세 그루빙 가공기

대면적 미세 그루빙 가공기는 일반적으로 직선 이송축 X, Y, Z 3개의 축이 있고 추가 사향으로 테이블 회전축이나 공구 회전축이 있어 전체적으로 4개의 축으로 구성되어 있으며, 일반적으로 세로축인 X축은 고속이송이 가능한 구조로 되어 있다. 대면적 미세 가공기는 20~30 μ m 피치의 미세 그루브를 서브미크론(sub micron) 이하의 형상정밀도, 20~40nm Ra 표면조도의 미세피치를 전 면적에 대해 균일

하게 가공할 수 있는 수준이 되어야 한다.

세계의 초정밀 가공 시장은 대부분 일본과 독일이 과점하고 있으며 도광판 가공용 대면적 미세 그루빙 머신 또한 해외 수입에 의존하고 있는 실정이다. 국내의 초정밀 가공기 시장에 나오고 있는 대면적 미세 그루빙 가공기는 현재 일본산이 대부분을 차지하고 있으며, 도시바(TOSHIBA), 나찌-후지코시(NACHI), 나가세(NAGASE-I), 오카모토(OKA-MOTO) 등에서 개발, 생산하고 있다. 현재 대면적 미세 그루빙 가공기는 디스플레이 시장의 변화에 맞추어 대형화에의 대응과

생산의 효율화를 겨냥한 대형화 및 기계의 초정밀화가 급속히 진행되고 있는 추세이며, 이에 따라 도시바 70인치, 나찌-후지코시는 39인치, 나가세는 68인치에 달하는 도광판 금형 가공용 가공기를 개발, 제작 중에 있다.

도시바의 대면적 미세 가공기 시리즈는 다이아몬드 바이트를 이용한 초정밀 가공을 목적으로 LCD의 도광판 금형 가공에 적합하도록 개발하였으며, LCD 사이즈의 대형화에 따라 초정밀 미세 가공기를 대형화하여 48인치 대면적 미세 그루빙 가공기의 개발에 이어 현재 70인치 초대형 도광판 금형 가공용 가공기를 개발하고 있다. 그림 1은 도시바의 대면적 미세 그루빙 가공기와 V-V 롤러 가이드 테이블을 나타낸 것으로서, 직선 이송축은 모두 V-V roller 가이드를 사용하여 수 nm 수준의 높은 정밀도를 나타내며, 회전축은 강성은 다소 약하지만 우수한 회전정밀도를 나타내는 공기 정압 베어링을 적용하였다. 또한 공구가 장착되어 있는 수직축은 회전을 하여 직선이 아닌 커브 형상의 그루브 가공이 가능하다.공구축도 공구 회전축(tool index axis)을 적용하여 공구의 교환이나 마모, 결함의 경우 공구 교환이 쉽도록 하였으며, 0.00001°의 높은 분해능의 스피ن들을 적용하여 공구 회전 교환시 에러를 최소화 하고 있다.고정도의 표면조도를 얻기 위하여 바

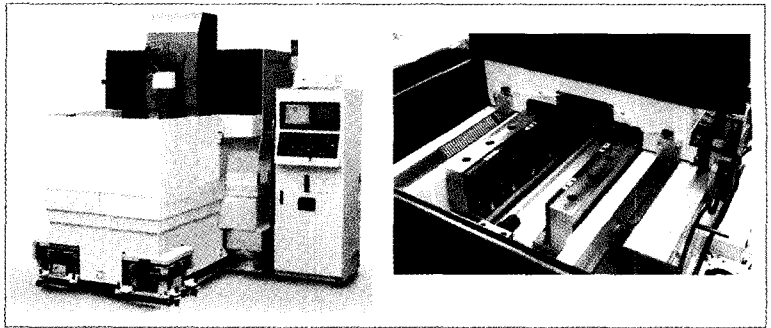


그림 1 도시바의 UMP-160160D 모델과 V-V roller 가이드 테이블

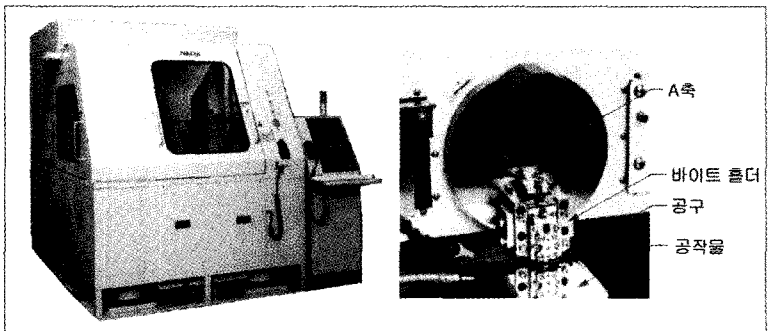


그림 2 나찌의 NANO GROOVER 시리즈 모델

이트 가공축의 이송 속도는 15m/min에 달하고 있으며, 리니어 모터 2개를 하나의 축에 채용하여 대형 공작물이 놓인 테이블을 빠른 속도로 이송이 가능하다.

나찌 후지코시의 NANO GROOVER 모델의 경우 열 변위가 적은 대칭 구조의 문형 가공기 구조를 채용하여 기계의 정밀도를 향상하였으며, 공구축에 스피ن들을 장착하여 플레너 가공 및 플라이컷 가공이 가능한 도광판 금형 가공기를 개발하였다. 고정도의 분해능이 요구되는 수직축에는 유정압 볼스크류를 적용하여 분해능 1nm와 위치결정 정밀도의 향상을 꾀하였으며, 고속이송이 요구되는 테이블은 리니

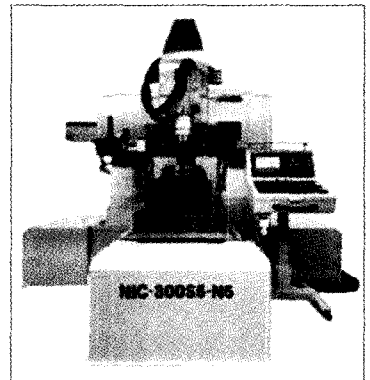


그림 3 나가세(NAGASE) NIC series

어모터를 적용하여 기계적 성능을 향상시켰다.

나가세의 대표적인 미세 가공기는 NIC시리즈로 대표되며 가공기의 크기는 20인치 대응형부터 68인치 대응형까지 4종류의 모델을 개발하였으며, 초정밀 유

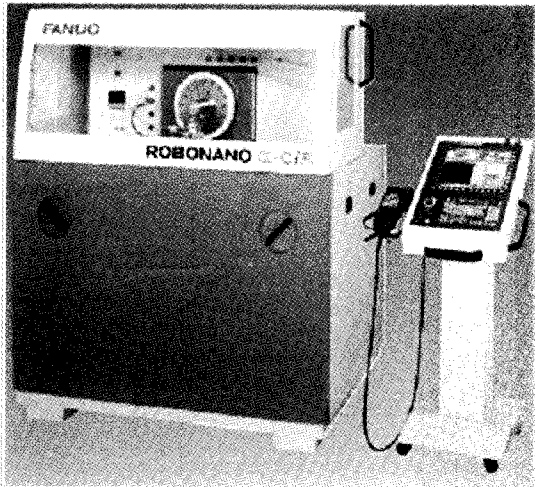
정압 가이드 및 리니어 모터를 적용하여 정밀도와 고속화를 추구 NIC 시리즈는 이송축의 최소 분해능 10nm로 도광판 금형을 비롯하여 비구면 렌즈 가공, 초정밀 프리즘가공 및 광학 부품 가공이 가능하다.

3D 초정밀 미세 가공기

밀링형 3D 초정밀가공기의 개

발동향을 살펴보면, 독일 Kugler사의 MicroMaster와 Micro-Gantry 장비가 대표적이라 하겠다. 이들 장비는 모두 Granite 소재의 베드를 채용하고 있으며, Pneumatic vibration insulation system으로 진동에 대응하였으며, 회전 테이블과 Tilt-swivel unit의 모듈화로 3축에서 5축으로의 확장을 용이하게 하고 있다.

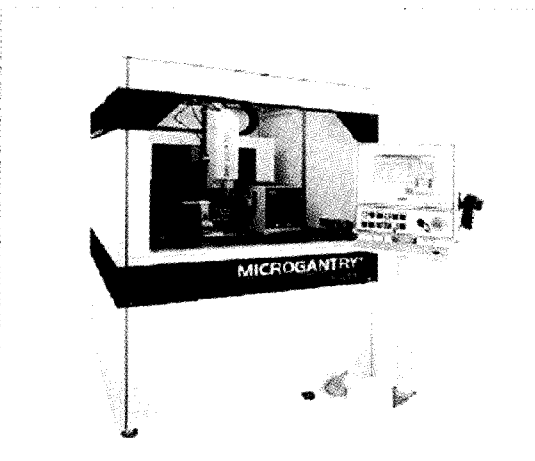
일본의 경우 Fanuc사의 Robonano가 대표적이라 할 수 있는데, 이 가공기는 전형적인 밀링형 초정밀가공기는 아니나, 밀링가공이 가능한 초정밀 가공기로 모든 이송 및 회전축에 공기정압베어링을 사용한 것이 특색이다. 또한 고속가공을 위한 Shuttle unit이라는 특유의 공구이송장치를 개발하여 고속가공에 활용하고 있다. Sodick사의



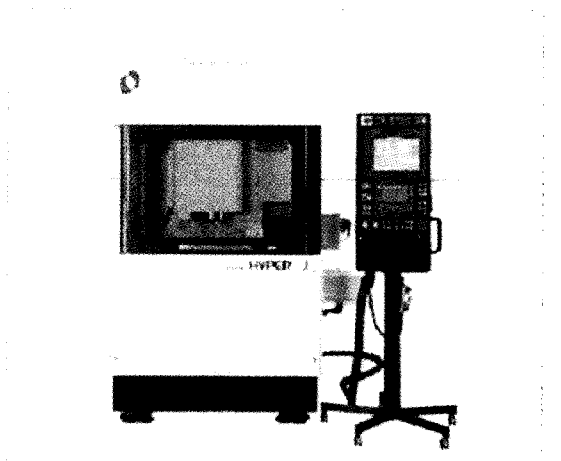
Fanuc ROBONANO



도움 5 sodick AZ 150



Kugler MicroGantry



Makino HYPER 2J

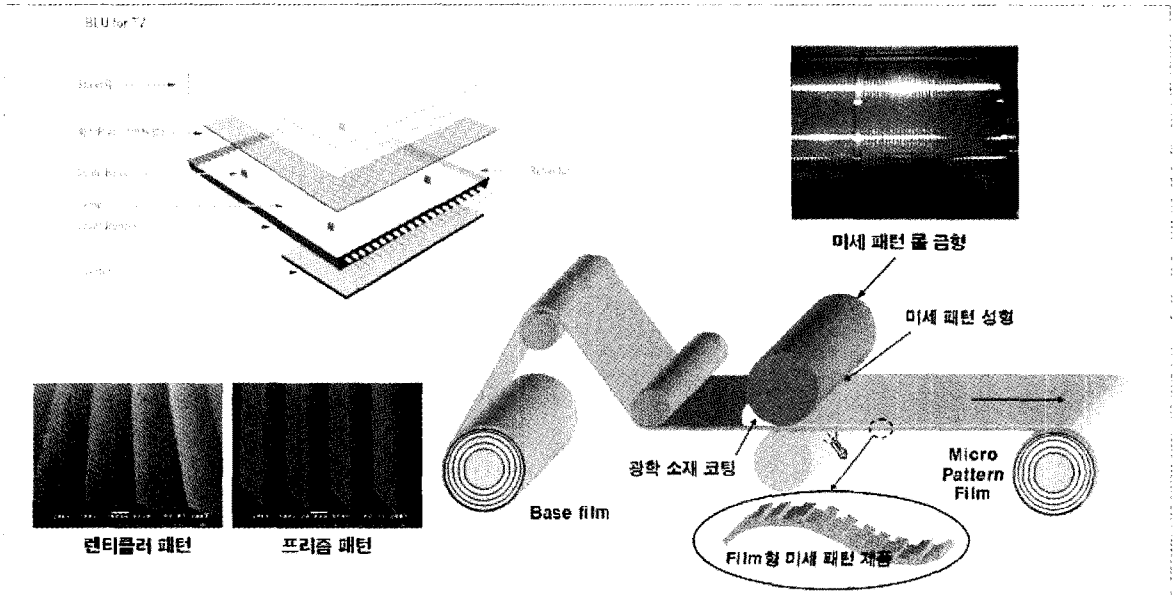


그림 8 BLU의 구성, 광학필름 패턴 형태 및 연속성형 공정의 원리

AZ150 장비의 경우 Sodick사 특유의 세라믹 소재를 활용한 가공기 구조물을 Box 구조로 설계하여 고속, 고가속도운동에 대비한 고강성구조로 가공기를 개발하였다. 또 Makino사의 Hyper 2J 가공기의 경우 의료기기, 바이오테크놀로지, 광통신분야와 액정, 비구면렌즈 등의 광학관련 분야의 연구개발, 시제품의 가공요구에 대응하는 밀링형 초정밀가공기로 저진동, 고강성의 설계 및 Granite 소재의 베드를 사용하여 진동 및 온도변화의 영향을 감소시키고 있다.

이상과 같이 해외 선진업체의 경우 기본적인 원천기술을 확보한 상태에서 진동, 열변형 등 환경을 제어할 수 있는 기술개발에 주력하고 있다는 공통점이 있다.

초정밀 롤 금형 가공기

정보산업과 같은 첨단핵심산업에서의 제품은 성능 및 기능 고급화에 대한 요구와 함께 이와 상반되는 가격 인하에 대한 요구도 높아지고 있다. 정보 산업 분야에서 대표적인 제품군이라 할 수 있는 TV의 경우를 보면 크기는 지속적으로 대형화 되고 있으며, 고화질의 구현을 위해 구현되는 휘도나 명암비, 균일성 등에 관한 제품 사양은 계속해서 향상되고 있다. 이러한 디스플레이 기기 부품이나, 도로 안전 표시판 등은 제품의 광학적 특성 등을 개선하기 위해 미세 패턴 구조를 적용하고 있는 대표적인 제품이라 할 수 있다. 특히 LCD용 프리즘 필름 등의 광학필름 시장에

서는 대형화 및 저가 양산의 목적으로 연속성형 형태의 롤 성형 기술이 주목받고 있으며 이에 따라 대면적의 롤 금형에 미세한 패턴을 정밀하게 가공할 수 있는 초정밀 롤 금형 가공기에 대한 수요가 점점 증가하고 있다.

초정밀 롤 금형 가공기는 일반적으로 롤 금형을 회전시키는 주축(C축), 가공용 공구를 롤 금형의 길이방향으로 정밀하게 위치 결정하기 위한 Z축, 절삭 깊이를 조절하기 위한 X축, 롤 금형의 길이에 맞추어 금형을 가공기 상에서 양단 지지하기 위해 사용되는 십압대(W축) 등으로 구성되어 있으며 공구 회전을 위한 B축을 옵션으로 제공하는 경우가 많다.

현재 초정밀 롤 금형 가공기는 미국의 Moore Tools, Preci-

tech, 일본의 Toshiba, 독일의 Kugler 등이 세계 최고 수준의 기술을 보유하고 있으며 운동정밀도의 초정밀화, 운동분해능의 향상을 통해서 고부가가치를 실현하기 위한 개발을 진행 중이다. 가공이 가능한 롤 금형의 최대 직경은 400~650mm 사이의 값을 가지고 있으며 패턴 길이는 3m 급의 Toshiba사를 제외한 나머지 회사의 경우 2m 이내의 사양을 가지고 있다. Kugler사는 기존의 TDM-1200 모델을 개선하여 직경 600mm에 2m 길이의 롤까지 가공 가능한 TDM-2000 모델을 최근 발표하였으며 Precitech사의 경우에도 DRL 1430 모델 외에 추가로 직경 600mm에 1.6m의 패턴을 가공할 수 있는 모델을 개발할 여지가 있는 것으로 알려지고 있다. 이와 같은 개발 경향과 국내 수요업체의 요구사항을 종합하면 2m급 롤 금형가공기를 개발할 경우 당장의 시장 수요를 충족할 수 있을 것으로 판단되며 향후 3m급의 초정밀 롤 금형 가공기가 필요할 것으로 판단된다.

기술적인 관점에서 볼 때 초정밀 롤 금형 가공기에서는 롤 금형의 대형화, 미세피치화(~20 μ m)에 따라 대면적에서의 가공정밀도 향상이 가장 큰 이슈이며 이에 따라 운동요소로는 평균화 효과에 의한 높은 운동정밀도를 기대할 수 있는 정압 베어링의 적용이 대세를 이루고 있다. 주축의

경우 Toshiba를 제외한 나머지 모든 회사들이 공기정압 또는 유정압 주축을 채택하고 있으며 특히 2m 급 가공기를 개발한 Moore Tools 및 Kugler사의 경우 롤 금형의 무게를 감안해 부하용량 및 강성이 큰 유정압 주축을 채택하는 경향이 두드러지고 있다. 회전속도의 경우 500~1,000rpm 사이로 분포되어 있으며 회전정밀도는 0.2 μ m 이내의 사양들을 보이고 있다. 직선축의 경우에도 Moore Tools 및 Precitech사는 유정압 베어링을 적용하고 있으며 Kugler사의 경우 공기정압베어링을 채택하고 있다. Z축 진척도의 경우 Moore Tools사는 2m 전체 행정에서 2 μ m 이내의 사양을 보이고 있다.

롤 금형 미세패턴의 균일한 가공 및 뛰어난 표면품질을 위해서는 운동정밀도의 초정밀화뿐만 아니라 이송계의 위치결정안정성 및 미소이송분해능이 매우 중요하며 이를 위하여 구동원으로는 대부분의 회사가 제어 상의 비선형성을 제거할 수 있는 리니어 모터 및 직결구동형 회전모터를 적용하고 있다. 리니어 스케일의 분해능은 대부분 0.01 μ m 이하이며 Moore Tools의 최신 제품은 1nm의 분해능을 적용하고 있는 수준이다.

나노미터 수준의 미소이송분해능을 실현하기 위해서는 리니어 모터 및 드라이버, 제어기의 성능뿐만 아니라 바닥진동을 효과적

으로 억제할 수 있는 방안이 필요하며 초정밀 롤 금형 가공기는 기본적으로 바닥진동 대책이 적용된 곳에 설치되어야 한다. 부가적으로 Moore Tools, Precitech, Kugler사의 경우 화강암 베드에 공압식 진동절연장치를 이용하여 바닥 진동을 절연하고 있다. Precitech사의 경우 진동절연의 사양을 공개하고 있는데 진동절연장치의 고유진동수는 6Hz이며 옵션에 따라서는 자동 레벨링 진동절연장치를 사용할 수 있다. 이 시스템은 자동 보상이 되는 레벨링 장치를 사용하여 고유진동수가 1.7Hz 근방이며 3Hz 이상의 진동성분을 차단할 수 있는 특징이 있다.

대면적의 롤 금형에 미세패턴을 가공하는 롤 금형 가공기의 특성상 가공에는 장시간이 소요되며 이에 따라 환경제어 역시 매우 중요하다. 일반적으로 롤 금형 가공기는 최소한 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 이내로 온도제어가 되는 항온항습실에 설치되어야 하며 경우에 따라서는 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 이내의 온도제어가 요구된다. 또한 가공기 내부의 모터 및 안내면에 의한 발열을 제거하기 위하여 수랭 또는 유랭 시스템이 적용되고 있으며 장시간의 공회전을 통해 미리 가공기 내의 온도분포를 안정시키는 방법 역시 동원되고 있다.

광학필름의 경우 기본적인 프리즘이나 피라미드 형태 외에도 광학적인 특성을 개선하기 위해

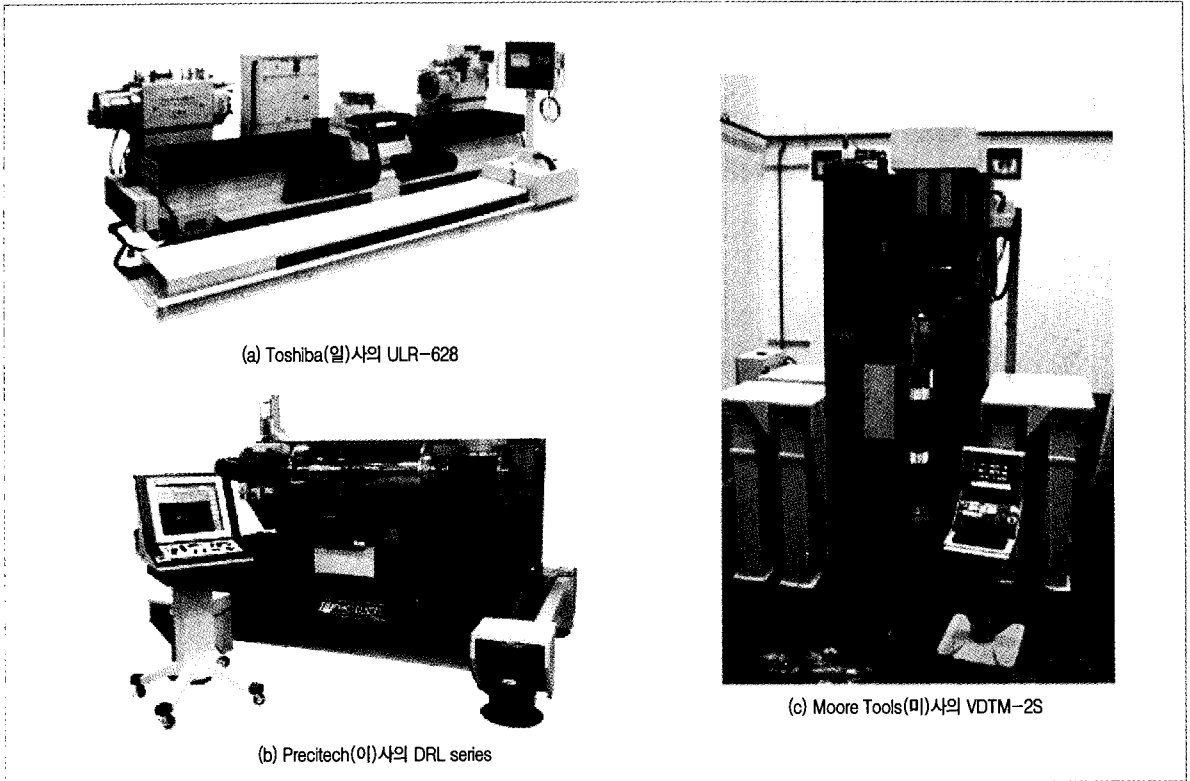


그림 9 주요 초정밀 롤 금형 가공기의 외관

여 최근 복합형상이 필요한 경우가 많아지고 있으며 이를 위해 초정밀 롤 금형 가공기에서 복합형상 가공을 위한 FTS(Fast Tool Servo)에 대한 수요가 증가하고 있다. 이를 위해 Moore Tools의 경우 기본적으로 $400\mu\text{m}$ 의 행정에 600Hz 의 대역폭을 가진 FTS를 옵션으로 제공하고 있으며 필요에 따라 $8\mu\text{m}$ 의 행정에 20kHz 의 대역폭까지도 지원하고 있다. Precitech사의 경우에도 FTSTM 70 모델의 경우 행정은 $70\mu\text{m}$, 대역폭은 700Hz 의 성능을 보이며 FTSTM 500 모델의 경우 보이시 코일 모터와

공기 안내면을 적용하여 행정 $500\mu\text{m}$, 대역폭 1kHz 를 실현하고 있다.

이상에서 세 가지 종류의 대면적 미세가공장비 기술의 개발 동향을 살펴보았다. 동향에서 보듯이 대면적 미세가공장비 기술의 보유국은 미국, 일본, 독일 등의 기술 선진국에 한정되어 있다. 디스플레이 산업을 포함한 IT산업에서 매우 중요한 역할을 담당하고 있는 대면적 미세가공장비의 높은 수입 의존도는 IT산업의 경쟁력을 약화시키는 요인이 될 수도 있으므로 시급하게 개선할 필요가 있다. 다행히 국내 산업계와

연구계에서는 이러한 대면적 미세가공장비 개발의 필요성을 절감하여 2007년 말부터 5년간의 개발기간을 가지고 세 종류의 대면적 미세가공장비의 개발에 나서고 있다. 지식경제부 전략기술사업의 일환으로 대면적 미세가공장비 원천기술 및 실용화 개발이 추진되고 있으며 우선 1단계 3년 동안 400mm 급 3D 미세가공기와 1m 급 대면적 그루빙 가공기의 실용화 개발 및 2m 급 초정밀 롤 금형가공기의 원천기술 확보를 목표로 연구를 수행중이다. 국산 대면적 미세가공장비의 선전을 지원한다.