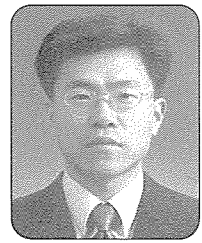


# 제품의 고부가가치 창출등 산업 전반에 걸쳐 파급효과 증대

## 국내외 광학부품 가공장비 시장 동향 및 전망

21세기 들어 BT, IT, NT, ST 관련 첨단산업이 우리나라의 미래를 선도할 산업으로 새롭게 부각되고 있다. 이들 산업의 핵심 부품 가공에 다이아몬드 선반을 이용한 초정밀 가공 기술은 계속해서 활용폭이 커질 뿐만 아니라 현재보다 한 단계 더 높은 가공정도, 즉 마이크로 이하 나노단위의 초정밀 가공기술이 요구될 것이다. 따라서 우리나라의 초정밀 가공 기술 분야에서 국가적인 기술요구에 부응하고 선진국에 대한 기술경쟁력을 확보하기 위해서는 다이아몬드 공구 및 연삭 휠을 이용한 초정밀 가공의 기초 기술에 대한 보다 많은 연구가 필요하다.



글/한국기초과학지원연구원 김건희 박사

### 1. 산업의 고도화에 따라 중요성이 높아져 가는 초정밀 가공기술

얼마 전까지만 해도 현대산업에서 기계가공시 고정도 가공 정밀도를 요구하는 대상은 블록 게이지를 비롯한 정밀 측정기기 등이 전부라 할 수 있었다. 그러나 최근 정밀기계, 전기, 전자, 반도체, 광학 관련 기기를 비롯한 영상, 정보 및 항공 우주 산업 등의 급속한 발달과 함께 그와 관련한 부품들의 고정도 가공에 대한 필요성이 증대되고 있다.

예전에는 고정도 부품에 요구되는 형상 정밀도 및 표면 거칠기를 얻기 위하여 연삭(grinding)과 래핑(lapping), 폴리싱(polishing) 등의 공정을 순차적으로 적용했다. 그러나 이 방법들은 재현성이 부족하고 가공 형상의 한계가 있으며, 가공 시간이 오래 걸리므로 생산 단가 면에서 불리함을 가지고 있다. 따라서 이러한 방법으로 제품이 요구하는 형상 정밀도와 표면 거칠기를 동시에 향상시킨다는 것은 어려운 실정이다. 근래에는 전자빔(beam) 가공, 전기 화학적 가공(electro chemical machining)법 등이 이용되고 있다. 그러나 이러한 가공법 역시 가공 능률이 떨어지고, 치수 정밀도·형상 정밀도·가공면 거칠기를 동시에 향상시키기 어렵다는 문제점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위한 방법으로 초정밀 가공시스템에 의한 가공이 요구되고 있다. 초정밀 고속가공을 실현하기 위해서는 고정도·고강성의 공작기계와 우수한 절삭공구, 측정과 제어기술, 절삭 방법 등에 대한 고도의 기술이 필요하다.

초정밀 가공에 관한 연구는 미국, 일본, 독일 등의 선진국에서 활발하게 이루어지고 있으며, 1960년대에 기계의 주축에 공기베어링을

한국 광학부품 산업의 현재와 미래

사용하기 시작하여, 1970년대에 측정 및 제어 전반의 기반기술이 축적되기 시작했다. 또한 1980년대와 1990년대에는 초정밀 공작기계의 CNC화 및 비구면 가공을 위한 공작기계 개발이 주를 이루어 왔다. 국내에서는 연구소를 중심으로 일부 연구가 이루어지고 있으나 아직 선진국에 비하여 극히 미약한 수준에 머무르고 있는 실정이다.

한편, 초정밀 가공부품의 재료로서는 전자 산업과 정보 산업의 발달로 인하여 고정밀도가 필요하게 된 알루미늄·구리·무전해 니켈 등의 금속 및 플라스틱·실리콘·게르마늄 등의 비금속 등 대부분 연질재료가 사용되고 있는데, 이런 재료들은 연삭 가공으로는 높은 정도를 내기가 어렵다.<sup>9)</sup> 이와 같은 단점들을 해소하기 위해 최근에는 고정도·고강성을 지닌 초정밀 가공기와 내마모성이 큰 천연 다이아몬드 공구를 이용한 초정밀 절삭 가공기술이 급속히 발전하고 있다.

## 2. 초정밀 가공장비 개발의 역사

초정밀 절삭가공이란, 광학, 기계, 전자 등의 부품을 수백 나노미터의 형상정밀도와 수 십 나노미터의 표면 거칠기로 생산할 수 있는 가공방법으로 정의할 수 있다. 초정밀 절삭가공은 다이아몬드 공구의 기하학적인 형상(profile)을 공작물의 표면에 정확하게 전사시키는 것이다. 다이아몬드 공구인선의 예리함과 공작기계 회전축의 회전정밀도 및 테이블의 이송정밀도가 서브 마이크로미터(sub-micrometer)의 정밀도를 유지하는 것이 반드시 필요하다. 초정밀 가공의 용도와 요구정도는 표 1과 같다.

초정밀 가공기 개발 및 초정밀 절삭가공의 역사는 1960년대부터 시작되어 1970년대에 이르러 실용화되었다. 중요한 연구개발 사례로는, 필립스사 중앙연구소에서 비구면 렌즈의 다이아몬드 절삭을 목적으로 하는 Colath를 개발했으며, 1977년 Union Carbide사가 직경 800mm의 비구면 광학부품을 0.1 $\mu$ m의 정밀도로

가공했으며, 라우렌브 리브드모어 국립실험소(LLNL: Lawrence Livermore National Laboratory)의 대형광학 다이아몬드 터닝머신(LODRM : Large Optics Diamond Turning Machine)에서는 1625mm직경의 레이저 반사경을 25nm의 형상정도, 4.2nm Rmax의 표면 거칠기를 달성한 것으로 보고 되었다<sup>2)</sup>. 라우렌브 리브드모어 국립실험소(LLNL)은 공공기관이었으므로 LLNL에서 개발된 LODTM, PERL(Precision Engineering Research Lath) 등은 그 특성에 관한 여러 가지 자료들이 발표되어 각국의 초정밀 가공기 개발에 많은 기초가 되었다. 1990년대 초반에는 미국 프리시텍사에서 개발한 초정밀 비구면 가공기(Nanofom 600)로 형상정밀도 0.1 $\mu$ m, 표면거칠기 0.01 $\mu$ m Rmax를 실현했으며, Moore Nanotechnology사와 일본의 NACHI, 도시바, 도요다 등의 초정밀 가공장비 개발업체에서 다양한 종류의 비구면 및 자유곡면 가공장비를 개발하여 판매 중에 있다<sup>3~4)</sup>.

## 3. 주요국들의 초정밀 가공기 기술 동향

북미지역 특히 미국의 경우, 자유곡면을 국가기반산업으로 인식하여 산학연을 통한 연구개발이 다른 어떤 국가보다도 활발하게 진행되고 있다. 특히 Los Alamos National Lab과 Lawrence Livermore National Lab은 한국기초과학지원연구소(KBSI)와 같은 국가 출연 연구소로 관련기술개발에 절대적인 역할을 담당하고 있다. 미국에는 Precitech과 Moore Nanotechnology System사가 초정밀 가공기 및 자유곡면 가공기를 제작하고 있으며, 특히 Moore Nanotechnology System사의 경우, 세계 최초의 초정밀 비구면 가공기를 필드로 미국 우주항공산업역사에 지대한 영향을 미쳤던 회사로 1997년 Moore사로부터 독립하여 미국 국방성 산하기관인 DARPA와 공동으로 초정밀 자유곡면가공기인 500FG를 개발하여 Deterministic Grinding공법 역사의 장을 열었다. 유럽지역은 프랑스, 독일, 영국에서 비구면 및 자유곡면 가공기술과 자유곡면 가공장비 연구에 박차를 가하고 있다. 독일의 Fraunhofer Institute나 University of Bremen, 영국의 University of Durham, Cranfield University 등이 관련기술 개발에 관여하고 있다. 주목할 만한 생산업체로는 영국에 위치하고 있는 Thales Optics

표 1. Application of precision diamond cutting and required accuracy

Name	Working Method	Work Materials	Working Precision(μm)	Purpose
Magnetic disc	Turning	AL alloy	Roughness 0.006~0.01 Ra Hard disk	
Polygon mirror	Flying cut	AL alloy	Roughness : 0.01~0.02 Rmax Flatness $\lambda/6$ more Adjacent surface slope 3" more	Laser printer Bar code reader
Flatness spherical mirror	Flying cut	Oxygen-free copper	Roughness 0.02 ~ 0.05 Rmax	Laser machine
Optical sensor drum	Turning		Roughness 0.05 Rmax	Copier
Aspherical mirror	Turning		Roughness : 0.02~0.02 Rmax Form precision 0.3~1.0	Laser machine Space observation equipment
Spherical & Aspherical lens	Turning		Roughness 0.2 Rmax Form deviation 0.1~1.0	Camera VTR camera Contact lens,

로 국방관련 광학제품을 생산하고 있고, 삼성과 협력하여 설립한 삼성 탈레스에도 제품을 공급하고 있다. 가공기의 경우, 영국 Cransfield 대학에서 미국장비의 벤치마크를 통해 개발중에 있으나 아직 상업적으로 판매가 되지 않고 있는 상황이다.

일본의 경우, 유리를 사용한 핸드폰 카메라용 소형 비구면 렌즈나 카메라용 렌즈 생산 및 디스플레이 시장관련 광학 제품기술에서 세계적인 우위를 가지고 있으며, 자유곡면에 대한 기술 개발에도 박차를 가하고 있으나 다른 지역에 비해 낙후되어 있다. 또한 일본의 초정밀 가공기의 경우, Nachi를 비롯하여 Toshiba, Toyoda 등에서 생산하고 있으나 주로 소형 렌즈에 중점을 두고 제작되었기 때문에 대구경의 광학제품을 생산하기에는 적합하지 않다. 이송속도, 스핀들 속도 등이 미국제품에 비해 열세이나 최근 급격한 기술개발을 통하여 고속초정밀 가공장비를 개발하고 있다.

#### 가. 미국, 캐나다

미국에서는 1960년대부터 시작되었는데 POMA(Point One Micrometer Accuracy) 계획과 LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)의 LODTM(Large Optics Diamond Turning Machine)이 획기적인 성과를 이루었다. 1990년에 발표한 NANOFORM 600은 위치 결정정도 0.25μm/300mm, 분해능 1.25nm, 직경 75mm의 비구면 가공 실험결과 형상정도 0.1μm 이내, 표면조도 Rmax 0.01μm 이내를 실현했다.

#### 나. 일본

일본에서는 1970년대부터 사무용품 및 컴퓨터 기기를 중심으로 고정도의 초정밀 가공기술이 발달해 왔다. 일본의 초정밀 가공기는 주로 민생기기용의 렌즈나 반사경 가공을 위해 개발되어 직경이 100mm 이하인 소형이 대부분이며, 개발도 1980년대 이후부터 이루어졌다. Toyota, Toshiba, Hitachi 등의 여러 업체가 이 분야에 관심을 가지고 다양한 종류의 초정밀 가공장비를 개발, 상용화하고 있다.

#### 다. EU

유럽에서는 Philips사에서 1959년 고정밀도 정압베어링과 다이아몬드 공구를 이용한 선반을 개발하여 1969년에 발표했으며<sup>[4]</sup>, 1978년경 CUPE(Cranfield Unit for Engineering)에서는 비구면 반사경을 가공하기 위한 선반이 개발되었다. 최근에는 상업용 초정밀 가공기 NANOCENTER를 발표했으며, 이 가공기는 직경 600mm의 비구면을 형상정도 ±50nm, 표면조도 Ra 5nm로 가공할 수 있다고 한다.

### 4. 초정밀 가공장비 주요 제작사 및 장비 특징

미국이나 유럽의 초정밀 가공장비는 대형이면서 정밀한 제품 개발에 적합한 특징을 갖고 있으며, 일본은 캠코더, 디지털 카메라, 휴대폰 카메라 렌즈 금형을 위한 소형 초정밀 가공장비가 주류를 이루고 있다. 표2는 국내에 수입

한국 광학부품 산업의 현재와 미래

표 2. 초정밀 가공장비 현황

생산국	제조사	모델명	특징(규격)	주용도	축구성					비고	
					X	Z	C	Y	B		
일본	NACHI	ASP01	Turning: $\phi$ 100, Grinding: $\phi$ 30	소형 축대칭 비구면 광학부품 및 금형	●	●			●	일본,한국,대만 등 최대공급	
		ASP01X	Fly Cutting:W150x H50	자유곡면 렌즈 및 금형, 소형 도광판	●	●	●	●	●		
		ASP30	Fly Cutting:W200x H150	자유곡면 렌즈 및 금형, 소형 도광판	●	●	●	●			
		ASP01A	ASP01과 동일 이송: 1,500mm/min, 분해능:0.035nm 이하	자유곡면 렌즈 및 금형, 소형 도광판	●	●	●	●	●		신제품
		AMG62P	750 × 600 × 100(mm) 이송: 20m/min Z축분해능:0.035nm 이하	도광판 가공(15")	●	●	●		●		
	Toshiba	ULC100	300 × 150	글라스 연삭	●	●			●		
		ULG100D	300 × 150 × 75	자유곡면 렌즈 및 금형, 소형 도광판	●	●	●	●			
		LG100B	125 × 85 × 20	황삭가공용	●	●	●				
	Toyoda	AHN 05	최대가공경 $\phi$ 50mm	자유곡면 렌즈 및 금형, 초소형 도광판	●	●		●	●		
	미국	Precitech	Nanoform 200	150 × 200	소형 축대칭 비구면 광학부품 및 금형	●	●			●	
Nanoform 250			200 × 200	소형 축대칭 비구면 광학부품 및 금형	●	●	●		●		
Nanoform 350			350 × 300	대형 축대칭 비구면 광학부품 및 금형	●	●	●		●		
Nanoform 600			300 × 300	대형 축대칭 비구면 광학부품 및 금형	●	●			●		
Nanoform 700			350 × 300 × 150	대형 자유곡면 광학부품 및 금형, 도광판	●	●	●	●	●		
Moore Nanotechnology		250 UPL	200 × 200	소형 축대칭 비구면 광학부품 및 금형	●	●			●		
		450 UPL	350 × 300	대형 축대칭 비구면 광학부품 및 금형	●	●	●		●		
		350 FG	350 × 300 × 150	대형 자유곡면 광학부품 및 금형, 도광판	●	●	●	●	●		

되어 광학부품 제작 및 금형가공에 활용되고 있는 장비 현황을 나타낸다.

제작사에 따른 대표적인 장비의 특징을 소개하면 다음과 같다.

일본 Nachi사의 ASP01은 X,Z,B 3축으로 구성된 장비로서 초정밀 선삭은 직경  $\phi$ 100 mm, 초정밀 연삭은 수직방향으로 직경  $\phi$ 30 mm, 수평방향으로 직경  $\phi$ 10 mm까지 가능하며, 일본·한국·대만 등에 현재 가장 많이 납품되어 활용성이 가장 좋은 장비이다. 축대칭 비구면의 선삭, 연삭에 사용되며, 각종 Lens (Camera Phone, Digital Camera, Pick up, Projection, 광통신용, LED용) 등의 금형가공과 게르마늄, Silicon, Plastic, Aluminum 등의 직접 가공이 가능한 초정밀 가공장비이다.

Natchi사 초정밀 가공기의 공통사항으로 모든 장비의 이동구조는 Slide 및 Screw에 Nachi의 특허등록으로 모두 유정압으로 구성되어 있으며, 모든 기종에 기상계측장치를 탑재하고 있다. 제어부인 NC는 Nachi에서 독자 개발한 사용성이 편리한 PNC-RT를 사용하고 있다.

기타 Pattern가공기-도광판 및 Prism Sheet가공기로는 AMG41P(17inch), AMG62P(24inch), AMG71P(32inch) 등이 있으며, X,Y,X,B,C,A 6축으로서, X,Y축은 Linear Moter를 Z축은 유정압으로 구성되어 있으며, 각종 도광판, 프리즘 시트, 각종 Pattern, 일부 자유곡면 Mirror 등의 가공이 가능하다. 그리고 광도파로의 V홈가공 및 광통신 부품의 정밀 Slicing, Dicing이 가능한 AMG15AP와, 광통신 부품의 초정밀 연삭 및 Lapping이 동시에 가능한 Nano Facer, Ferrule 등 미세 Hole의 연마에 사용되는 Jet Finisher 등의 광통신관련 초정밀 가공장비가 있다.

미국 Moore Nanotechnology사는 미국 뉴햄프셔 주에 소재하고 광학산업을 주 시장으로 하여 3종류의 대표적인 초정밀 가공기를 개발하고 있다. 기본 2축(X, Z) 선반형식

의 250UPL, 450UPL과 종축(Y축)까지 장착된 350FG가 있다. 모든 장비는 10,000 rpm의 에어 베어링 워크 스피들이 장착되어 있다.

대표적인 장비로써 250UPL은 Nanotech 장비의 Compect type의 초정밀 가공기로 광학렌즈, 반사경, 금형코어 등의 대량생산에 적합하다. 구면, 비구면 표면의 나노단위 표면조도와 서브미크론의 형상정밀도로 가공이 가능하며, X축과 Z축의 이동구간은 200 mm로 최대 직경 250 mm의 제품까지 초정밀 가공이 가능한 장비이다. 장비는 화강암 베드위에 진동흡수 장치가 기본구성이며, 이송은 리니어 모터구동의 유정압 방식이다. 제어장치는 PC Base의 Delta TAU PMAC2 모션컨트롤러로 윈도우 2000으로 제어되며, 피드백제어로서 0.034 nm의 분해능을 갖고, 1,500 mm/min의 고속 이송이 가능하며, 부가적으로 스피들 C축, Rotary table B축 및 Y축의 추가가 가능한 장비이다.

미국 Precitech사 역시 미국 뉴햄프셔 주에 소재하고 광학산업을 주 시장으로 하여 다양한 종류의 초정밀 가공기를 개발하고 있다. 기본 2축(X, Z) 선반형식의 Nanoform 200, Nanoform 250, Nanoform 350, Nanoform 600 과 종축(Y축)까지 장착된 Freeform 700 등의 장비가 개발되어 시판되고 있다. 모든 장비의 핵심부품인 주축스핀들과 이송장치 및 제어장치를 자체에서 개발하여 사용하고 있다.

대표적인 장비로써 Freeform 700은 X축 350 mm, Z축 300 mm, Y축 150 mm, B축, C축으로 구성되어 5축 동시 제어를 통한 자유곡면 형상의 초정밀 가공이 가능하며, 급속 이송장치(FTS:Fast Tool Sevor)를 이용하여 광통신 및 광원으로 사용되는 렌즈 어레이 및 그리드 가공이 가능하다. 그리고 B축상에 110,000 rpm Air Bearing Micro Milling & Micro Grinding을 설치하여 5축 제어머신과 같은 자유곡면 형상의 초정밀 정면가공이 가능하다. 본 장비는 5축 자동제어가 가능한 초정밀 자유곡면 가공기로써 구면, 비구면, 평면가공 이외에 원통면, 원뿔면, 회전면, 타원형 형상을 가공하는데 사용된다.

## 5. 국내시장의 초정밀 가공장비 개발 동향

우리나라의 경우에는 전자, 컴퓨터 및 항공우주분야 산업의 급속한 발전에 따라 1990년 초부터 초정밀 가공 기술 분야에 관심을 갖기 시작하여 가공기술과 가공시스템에 대한 연구가 이루어지고 있고<sup>5-6)</sup>, 현재에는 캠코더(cam-corder)의 비구면 렌즈, CDP detect 렌즈, 프로젝션(projection) TV렌즈, 액정 P/J TV 프레즈넬(fresnel)렌즈 등의 전자부품의 금형 가공 및 생산에 직접 이용되고 있다. 세계적인 연구결과에 비하여 상대적으로 짧은 연구역사로 인하여 국내에서의 초정밀 절삭가공 연구의 초기 단계는 벗어났으나, 초정밀 가공장비 개발 측면에서는 대부분의 핵심부품을 수입하여 조립하는 초기단계로서 많은 기술개발이 필요한 상태이다.

초정밀 가공장비를 구성하는 핵심 요소기술로서 주축의 회전 정밀도와 이송 테이블의 위치결정 정밀도 및 제어기술이 초정밀 가공기의 성능에 가장 중요한 인자로 작용한다. 일본의 초정밀 가공장비 개발업체들은 대부분 핵심부품을 자체개발하고 있으며, 미국의 업체들도 마찬가지로 자체개발로 가격경쟁의 우위를 장악하고 있다. 그러나 위치결정 정밀도를 제어 할 수 있는 스케일바는 대부분의 업체에서 소니 스케일바를 적용하여 장비의 정밀도를 유지하고 있다. 현재 국내 일반 공작기계의 개발은 세계 10위권 이내로써 초정밀 가공장비의 개발은 업체의 수요확대에 따라 성장이 가능하리라 판단된다.

주축 스피들 등 초정밀 가공장비의 핵심요소 기술개발을 통한 초정밀 가공장비 및 PCB용 레이저 가공장비 핵심부



지난 11월 1일부터 8일까지 일본 동경 빅사이트 전시장에서 개최된 일본공작기기전시회(JIMTOF 2006) 관람에 앞서 (사진 오른쪽이 필자). 'JIMTOF'는 세계 3대 공작기계 전시회로 손꼽힌다.

한국 광학부품 산업의 현재와 미래

품의 국산화를 실현하고 이를 통한 수요확대로 국내 초정밀 가공장비 시장이 확대 된다면 초정밀 가공장비의 국산화가 한층 앞당겨질 것으로 전망된다.

[참고문헌]

- [1] 이후상, 외, "초정밀 절삭가공기술", 기계와 재료, 2권 3호, pp.82~94, 1990
- [2] Donaldson, D.D.Thompson, "Design and Performance of Small Precision CNC Turning Machine", ann. CIRP, Vol. 35, pp. 373~376, 1986
- [3] N. Ikawa, S. Shimada, "Recent trends in diamond tool technology", Proceedings of the international congress for ultra precision technology, Aachen, Frg., pp. 126~142, 1988
- [4] Ikawa, "Ultraprecision Metal Cutting - The Past, the Present and the Future", ann. CIRP, Vol.40, pp.587~594, 1991
- [5] 김정두, "천연 다이아몬드 인선형태에 의한 Si 합금의 경면절삭에 관한 연구." 大韓機械學會論文集, 제14卷, 제6號, PP.1515-1522, 1990
- [6] 이경호, 윤영식, 이상조, "다결정 다이아몬드 공구를 사용한 Al-Si합금의 선삭과정에서 절삭 특성에 미치는 Si함량의 영향." 韓國精密工學會誌, 제12卷, 제6號, pp. 20-26, 1995
- [7] Moriwakint, T., and Shamoto, E., "Ultraprecision Diamond Turning of Stainless Steel by Applying Ultra Sonic Vibration", Annals of the CIRP, Vol. 40, pp.559-562, 1991.
- [8] Tlustý, J., Smith, S., and Zamudia, C., "Operation Planning Based on Cutting Process Model", Annals of the CIRP, Vol. 39, pp. 517-521, 1990.
- [9] Geon-Hee Kim, Kwon-Hee Hong, Sang-Suk Kim, Jong-Ho Won, "Nano-turning Technology Using Ultraprecision Machining System", Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 19, No. 1, January pp. 2002.
- [10] Sugano, T., and K. Takeuchi, "Diamond Turning of an Alluminum Alloy for Mirror" Annals CIRP, Vol.35, pp.17-20, 1987.
- [11] <http://www.nachi-fujikoshi.co.jp/eng/sei/index.html>
- [12] <http://www.toshiba-machine.co.jp/preci/contents/asphere.html>
- [13] [http://www.jtekt.co.jp/products/cut\\_pages/ahn05.html](http://www.jtekt.co.jp/products/cut_pages/ahn05.html)
- [14] [http://www.precitech.com/Precitech\\_nano700\\_features.html](http://www.precitech.com/Precitech_nano700_features.html)
- [15] <http://www.nanotechsys.com/>