特 輯

초정밀 절삭 가공기의 연구 동향

박 천 홍
(공작기계실 선임연구원)

'83. 2 한양대학교 정밀기계과 졸업(학사)
'85. 2 한양대학교 정밀기계과 졸업(석사)
'85. 3-현재 한국기계연구소 선임연구원

이 득 우
(공작기계실 Post-doc. 연구원)

'82. 2 부산대학교 기계공학과 졸업(학사)
'85. 2 한국과학기술원 생산공학과 졸업(석사)
'90. 2 한국과학기술원 생산공학과 졸업(박사)
'90. 2-현재 한국기계연구소 Post-doc. 연구원

이 후 상
(공작기계실장)

'67. 2 서울대학교 기계공학과 졸업
'70. 9-'74. 5 한국기계공업(주) 계장
'74. 5-'83. 7 한국과학기술원 책임연구원
'83. 7-현재 한국기계연구소 책임연구원

1. 머리말

최근 정밀기계, 전자, 반도체, 광학, 영상·정보 및 항공·우주산업 등 소위 하이테크(HI-TECH) 산업의 급속한 발전과 더불어 그 구성부품의 고정도가공에 대한 요구가 급증하고 있다.

이들 부품의 가공정도를 정도비(가공정도/가공물크기)면에서 보면 10^{-5}~10^{-6}정도로 현재까지의 고정밀의 개념을 1~2단계 넘어서는 수준이 요구되고 있다.

이러한 고정도부품의 가공을 래핑(lapping) 또는 폴리싱(polishing)과 같은 종래의 가공공정에 의존하는 경우 그림 1의 자기디스크 가공공정의 비교예로 부터 알 수 있듯이 초정밀기계가공에 비해 수작업에 의존함에 따른 생산성의 저하가 두드러지며 정밀도에 대한 재현성 결여 및 가공형상의 제한 등의 단점도 극복하기 어렵다.

한편 이들 부품의 재료로써는 알루미늄, 동, 금, 은, 무전해니켈 등의 금속 및 ZnS, ZnSe, KCL, 실리콘, 게르마늄, 플라스틱 등의 비금속 등 대부분 연질재가 사용되고 있어 연삭등의 숫돌가공으로는 그 정도를 내기 어려우므로 최근에는 천연다이아몬드 공구를 이용, 절삭에 의한 초정밀가공이 많이 보급되고 있는 추세이다.

초정밀절삭가공기에서는 지금까지의 선반과는 달리 sub-micron대의 운동오차, 미소열변형 등도 간과할 수 없으므로 이에 따른 신요소기술, 소재기술은 물론 환경관리기술까지도 고려해야 하는 등 그 설계·제작에 있어 많은 신기술의 도입을 필요로 하고 있다.

따라서 본고에서는 다이아몬드 공구에 의한 초정밀절삭가공기(초정밀선반)에 초점을 맞추어

그 구성기술, 연구개발 동향 및 앞으로의 연구과제등에 대해 살펴보고자 한다.

2. 초정밀가공의 정의 및 용도

2.1. 초정밀가공이란

한 시대의 최첨단기술은 그 시대 가공기술의 최고레벨을 요구하게 되며 이것을 흔히 '초정밀'이라고 표현한다. 이를 좀더 용어적으로 정확히 정의하면 초정밀이란 그 시대의 일반적인 수단으로는 용이하게 도달하기 어려운 최고수준의 정밀도를 말하며 "초"라는 단어가 암시하듯이 정도의 한계(치수정도, 형상정도, 표면조도 등)라는 벽의 돌파를 추구하게 되므로 운동, 가공, 측정 등으로 표시되는 그 결과는 시대의 기술의 종합으로 나타나는 특성을 지니고 있다.

그러면 현시점에서의 초정밀이란 어느 정도의 기술수준을 의미하는 것일까? 현재 가장 상업적으로 보편화되어 있는 컴퓨터용 자기디스크 가공을 예로 들면 그림 2의 비교에서와 같이 초정밀가공에 의한 자기디스크의 사용상태는 점보젯트기가 지상 8mm 상공을 수평비행하는 것과 같은 수준을 의미한다.

초정밀을 수치적으로 나타내기 위해 시대의 변화에 따른 표면가공정도의 발전추세를 도표상에 정리해 보면 그림 3과 같으며 그림으로부터 현재의 한계는 0.005μm~0.01μm 정도임을 알 수 있다. 단절대칫수에 대한 정밀도를 나타내는 형상가공정도의 경우에는 이보다 한 단계 위인 0.05μm~0.1μm가 그 한계라고 생각할 수 있다.

또한 1μm→0.1μm→0.01μm로 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

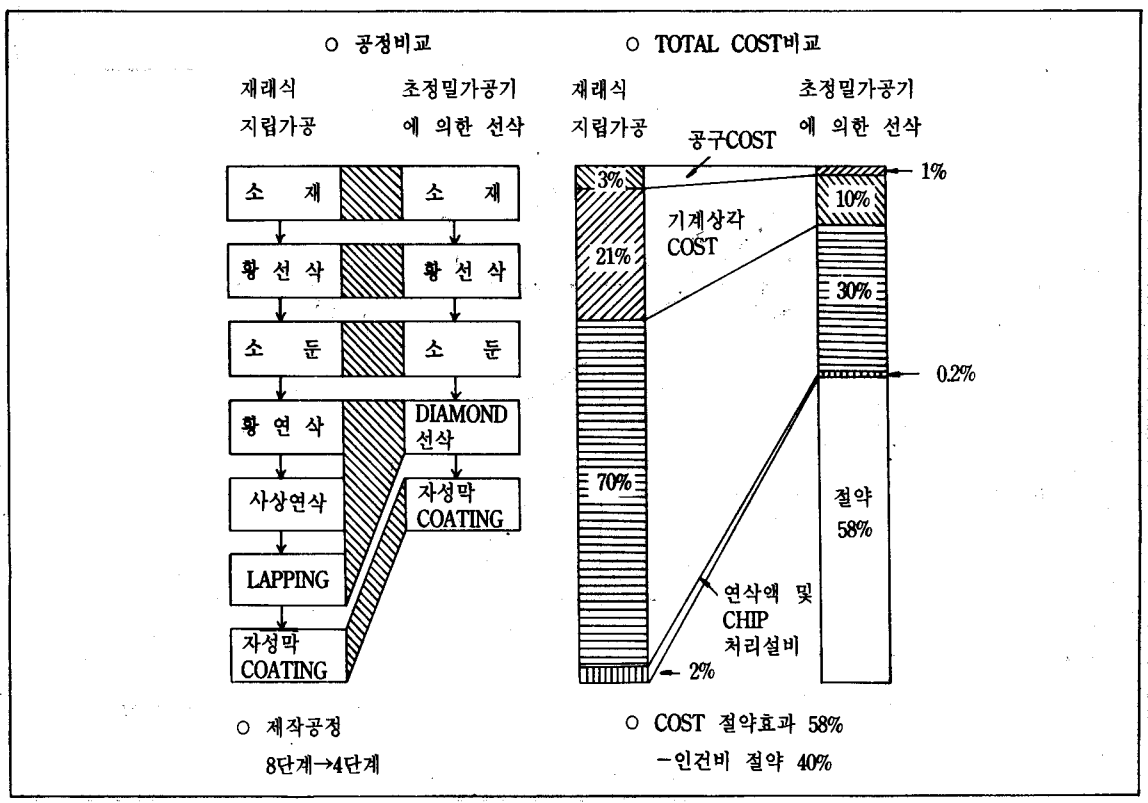


그림1) 자기 디스크 가공의 생산성 비교

분자의 배열까지를 고려한 새로운 방식의 가공 기술이 추구되어야 할 것으로 예측되어 진다.

2.2. 초정밀가공의 용도

현재 초정밀가공은 그림 4에서와 같이 전자, 정밀기계, 산업기계 등 민생용 기기의 부품으로부터 항공·우주, 방위산업 등 국가전략산업용 부품에 까지 폭넓게 응용되고 있다. 따라서 요구되는 형상도 점차로 다양화되어 원통, 디스크 등 비교적 단순한 형상으로 부터 방물면, 액시컨(axicon) 등의 복잡한 비구면 형상에 까지 이르고 있는데 이들 형상 및 용도를 정리하면 표1과 같으며 그 중 대표적인 응용 예를 소개하면 다음과 같다.

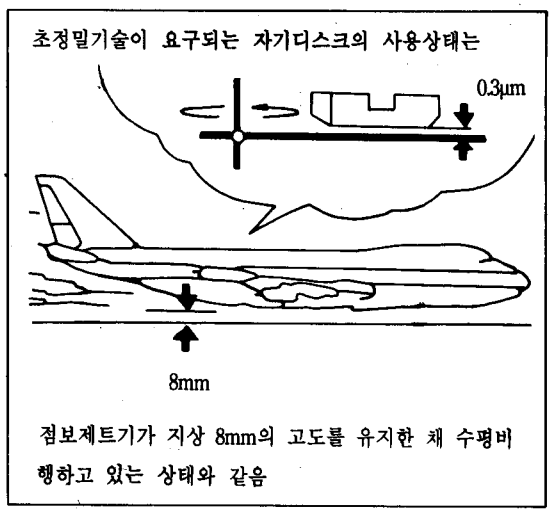


그림2) 초정밀가공의 비교수준

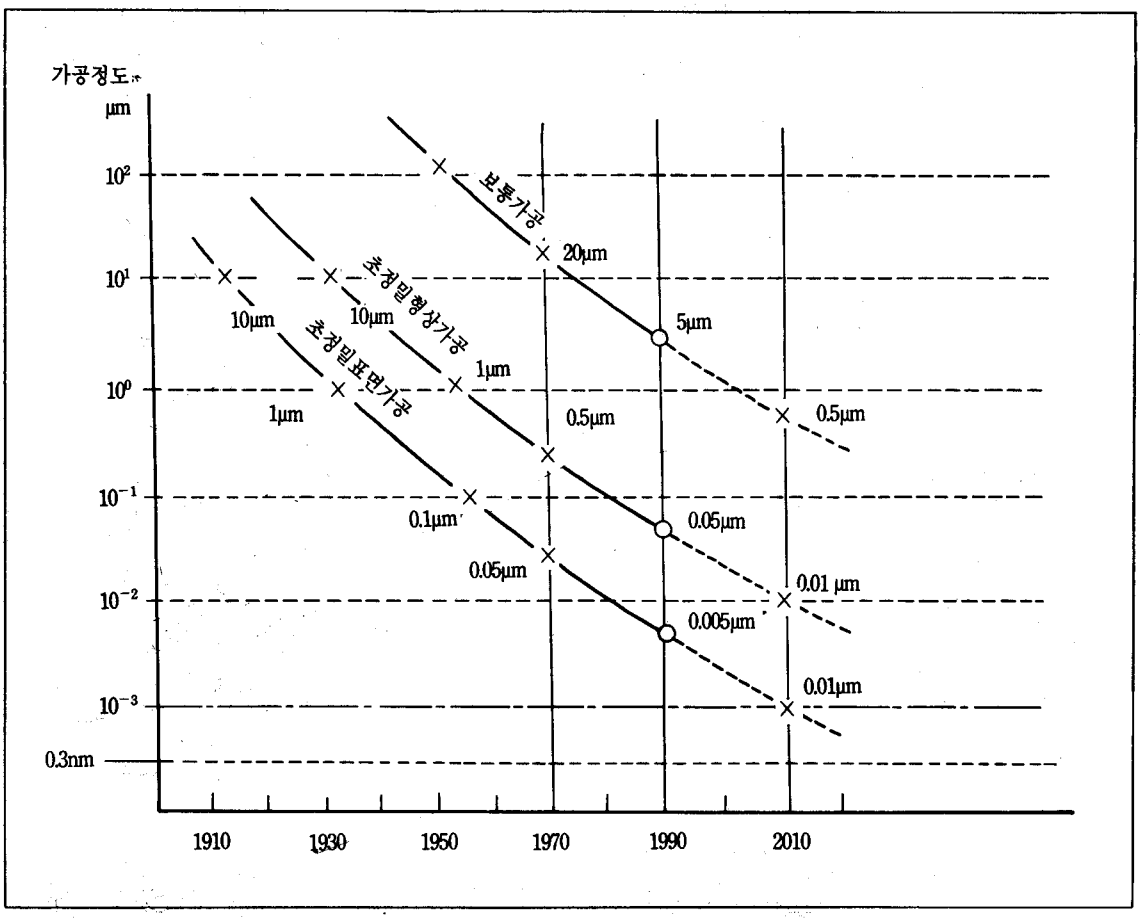


그림3) 초정밀가공의 발전추세

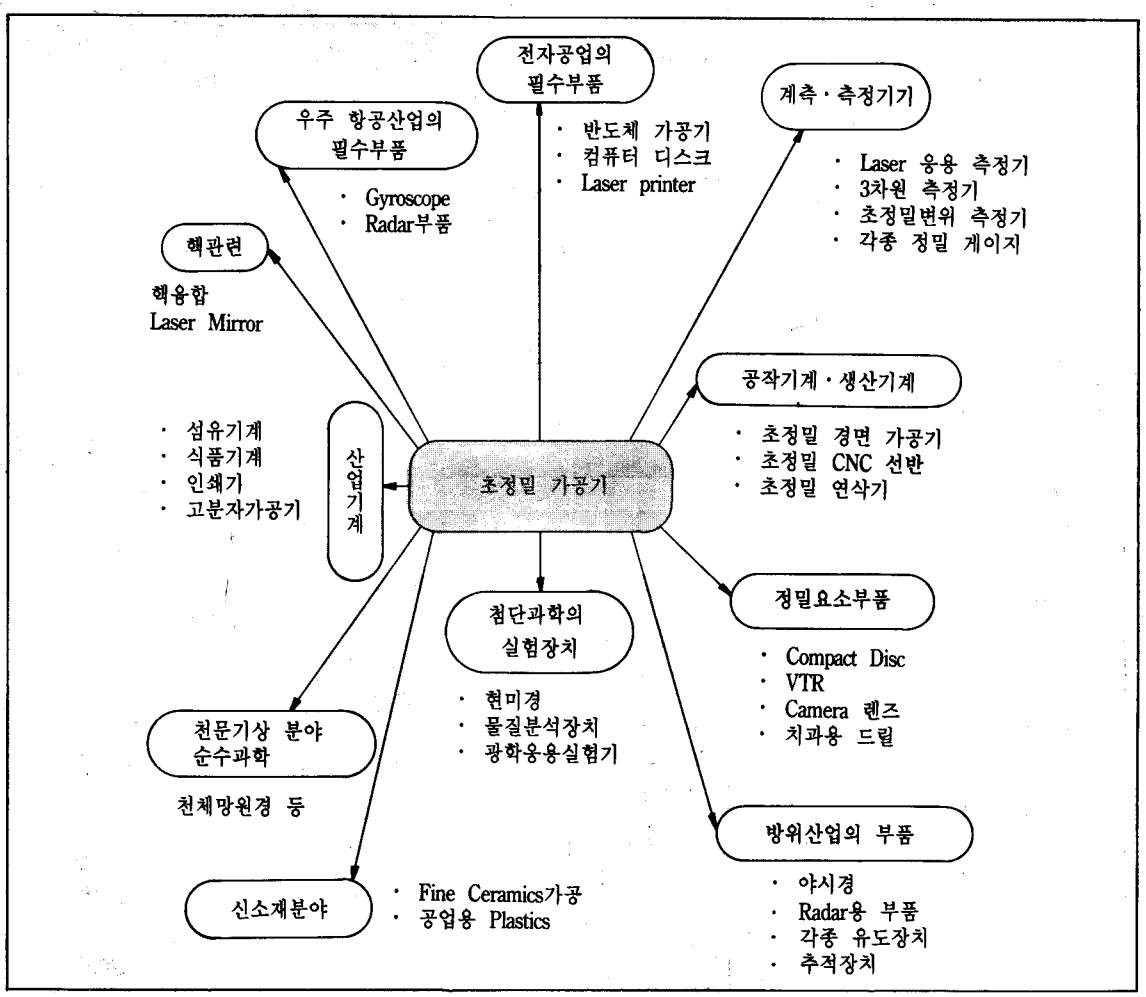


그림4) 초정밀가공의 응용분야

2.2.1. 컴퓨터 자기디스크 장치

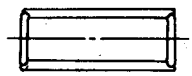
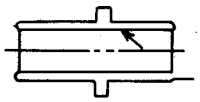
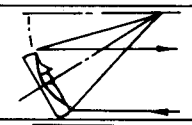
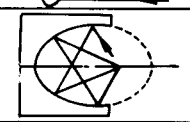
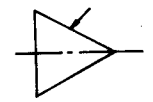
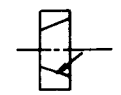
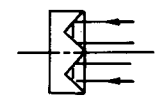
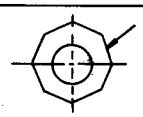
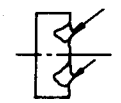
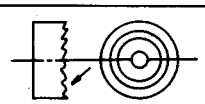
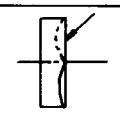
자기디스크 장치는 컴퓨터 기억장치의 핵심적인 역할을 수행하는 부분이며 최근 고밀도화가 급격히 진전되고 있다. 특히 고밀도화에 따라 자기디스크와 자기헤드간의 부상 높이는 점점 작아지고 있어 미소한 부상 높이를 보증하기 위해서는 자기디스크 표면의 사상정도를 나타낸 것으로 0.018μm R_a의 표면조도가 요구되고 있다.

2.2.2. 레이저프린터

레이저프린터는 레이저광을 회전다면경에 주사하여 32×32 matrix로 한 문자를 인쇄하며 그 속도는 약 15,000행/min에 달하고 있다. 그 원리를 상세히 보면 레이저 발진기로 부터 생성된 레이저광은 초음파광변조기로 들어가며 변조기는 제어장치로 부터 전송된 문자상을 dot로 분해한 데이터에 따라 레이저광을 분해, 투과한다. dot의 광선으로 변화된 레이저광은 등속회전하는 다면경에 반사되어 감광드럼의 감광체 표면에 주사되어가며 문자상을 묘사하게 된다.

다면경이 기계적 오차를 갖는 경우 레이저광은 수평주사시간, 주사경피치, 초점, 반사광의 산란, 휘도 등에 있어 오차를 나타내게 되므로 이를 감안한 고정도의 각도, 칫수, 면 등의 정도를 갖춘

표1) 초정밀가공부품의 대표적 형상 및 용도

명 칭	형 상	용 도	명 칭	형 상	용 도
드 럼		복 사 기	방물 면경		집 광 계
내 면 경		도 파 관	비축 대칭 방물 면경		광학기기 레이저핵 융합
디 스 크		자기디스크 VTR 디스크	타 원 경		집광계
평 면 경		광 학 기 기	외면액시컨		레 이 저 가 공 기
凹구 면경		광 학 기 기 레 이 저 공 진 기	내면액시컨		레 이 저 가 공 기
凸구 면경		광 학 기 기 레 이 저 공 진 기	복합액시컨		레 이 저 가 공 기 계 측 기
다 면 경		스 캐 너	가 우 스 액 시 컨		광학기기
플래넬렌즈		투 영 기 집 광 기	트 릭 스		광학기기

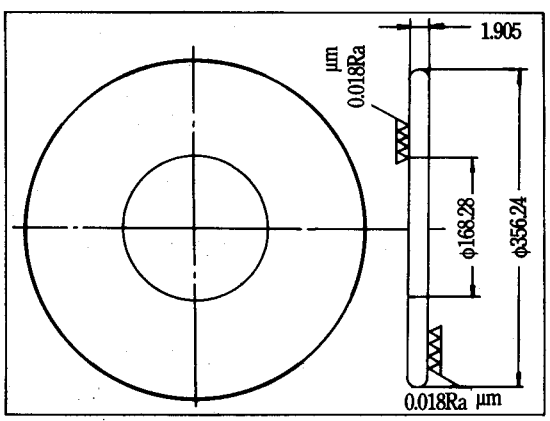


그림5) 자기디스크의 요구정도

다면경이 요구되며 현 단계에서 요구되는 가공 목표 및 주요제원은 그림6과 같다.

한편 다면경의 고정도화에 따라 이와 상호작용을 하는 감광드럼 역시 표면조도, 진원도, 원통도 등에 있어 높은 가공정도가 요구되고 있으며 현재 알루미늄합금 재료의 초정밀선삭에 의해 다량생산되고 있다.

2.2.3. 레이저발진기

레이저발진기는 레이저 또는 방전전류에서 여기된 광에 대해 증폭작용을 나타내는 레이저물질과 그 양측에 배치된 한 쌍의 반사경으로 구

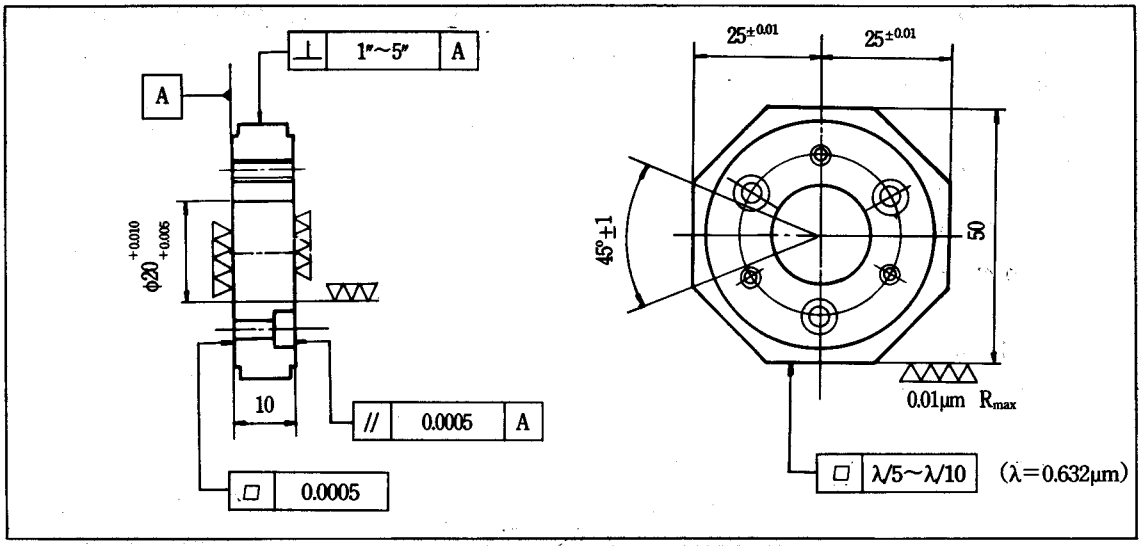


그림6) 다면경의 요구정도

성되어 있다. 반사경으로는 구면금속경이 이용되고 있으며 레이저발생기로 부터 출력된 광은 3매의 평면경인 beam bender에 의해 굴절되는데 이 bender에는 높은 파워 밀도의 광이 조사되므로 평면도 뿐만 아니라 높은 반사율 즉 표면조도가 요구되며 반사율이 낮은 부분은 레이저광에 의해 손상을 입게 된다. 다이아몬드 절삭에 의한 반사경면은 폴리싱면, 스파터면, 증착면에 비해 반사율이 높고 레이저에 의한 손상이 적다는 장점이 있다.

2.2.4. 레이저 핵융합로

핵융합로는 석유대체에너지 개발의 일환으로 가장 기대되는 시스템이며 그 중 대표적인 것으로는 레이저 핵융합로가 있어 중수소와 삼중수소를 반응시키기 위해 강력한 레이저의 에너지를 이용하고 있다. 로중의 타겟에 레이저를 집광하기 위한 반사경은 평면경뿐 아니라 비축대칭형 비구면까지 이용되며 매우 대형이다. 따라서 이를 가공하기 위한 특수한 제원의 가공기들이 개발되고 있으며 후에 소개될 Lawrence Livermore 연구소의 LODTM은 그 대표적인 예라 할 수 있다.

2.2.5. VTR

VTR에 있어서도 소형화, 장시간기록화등의 추

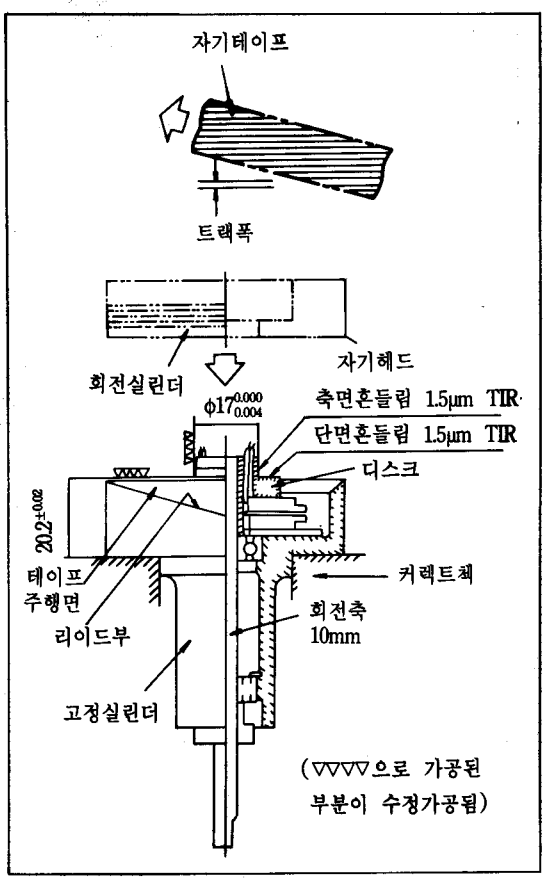


그림7) VTR용 실린더의 조립상태

세에 따라 요구되는 부품의 가공정도가 점차로 고정도화되어가고 있다.

그림 7은 VTR용 실린더를 나타낸 것으로 고속회전하는 자기헤드에 의해 자기테이프를 헬리칼 스캐닝(helical scanning)하여 기록·재생하는 방식으로 되어 있다. 자기테이프를 고정도로 주행시키기 위한 리이드의 가공은 가장 핵심적인 기술이며 캡식 선반에 의한 가공이 보편화되어 있으나 최근들어 다이아몬드 선반에 의한 가공방식이 점차로 증가하는 추세에 있다.

2.2.6. 비구면렌즈용 금형

각종 렌즈형상의 형성에 직접 관여하는 금형은 고정도의 형상정도 및 표면조도를 동시에 만족

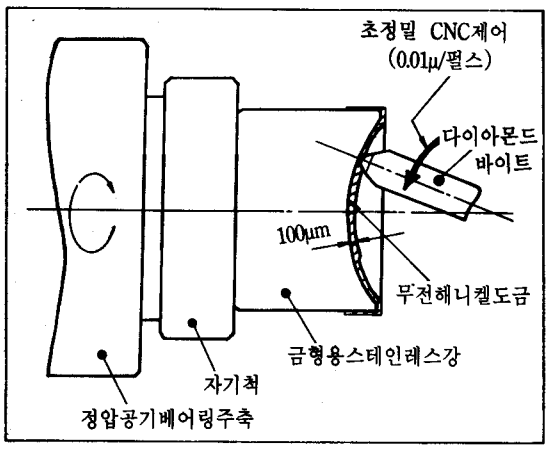


그림8) 초정밀CNC선반에 의한 금형의 가공상황

시켜야 하는 초정밀부품이다. 특히 최근에는 수차제거, 화질향상, 렌즈구성계의 단순화 등의 이점을 지닌 비구면렌즈의 이용이 활발해지면서 가공시간, 가공정도 등에서 유리한 다이아몬드 가공 방식에 의한 렌즈금형의 제작이 증가하고 있다.

표2는 각종 렌즈에 요구되는 정밀도를 분류한 것이며 그림 8은 초정밀 CNC 선반에 의한 금형의 가공상황을 나타낸 것이다.

3. 초정밀가공기의 구성기술

3.1. 초정밀가공의 요인분석

초정밀가공에 관한 제요인을 가공의 흐름을 중심으로 하여 나타내면 그림 9와 같다. 운동기구에 의해 주어진 상대운동에 따라 공구와 공작물이 접촉하며 여기에 공구, 구조물, 베어링등의 요소를 포함하는 역학적인 폐회로가 구성된다. 절삭조건, 기계특성, 환경조건 등에 따라 이 회로에 정적 또는 동적인 힘이 작용하여 공구 공작물간의 상대 운동정도를 저하시키며 이 운동궤적은 최종적으로 공작물에 전사되어 진다.

이들 요인의 내용을 분석해 보면 다음과 같은 항목들을 열거할 수 있다.

① 소재 : 불순물 제거, 결정균질화

② 공구 : 재질, 결정구조와 바이트형상의 관계,

표2) 각종 렌즈의 정도에 따른 분류

정도	형상정도	재 질	용 도
초정밀급	0.1μm 이내	GLASS	광디스크용 대물렌즈, 비디오디스크용 렌즈, 광디스크 메모리 기록용 대물렌즈
	0.1−0.2μm	PLASTIC	광디스크 재생용 대물렌즈, CD용 렌즈
고정밀급	1μm이내	GLASS	슈미트렌즈, 디스크용 카메라 렌즈, 렌즈셔터용 카메라렌즈, 비디오카메라용 렌즈
	1−2μm	PLASTIC	카메라용 파인더, 오토포커스용 렌즈
정밀급	2μm이내	GLASS	쌍안경용 대물렌즈, 접안렌즈, TV투사용 렌즈
	2−5μm	PLASTIC	TV투사용 보조렌즈, 일회용 카메라 렌즈

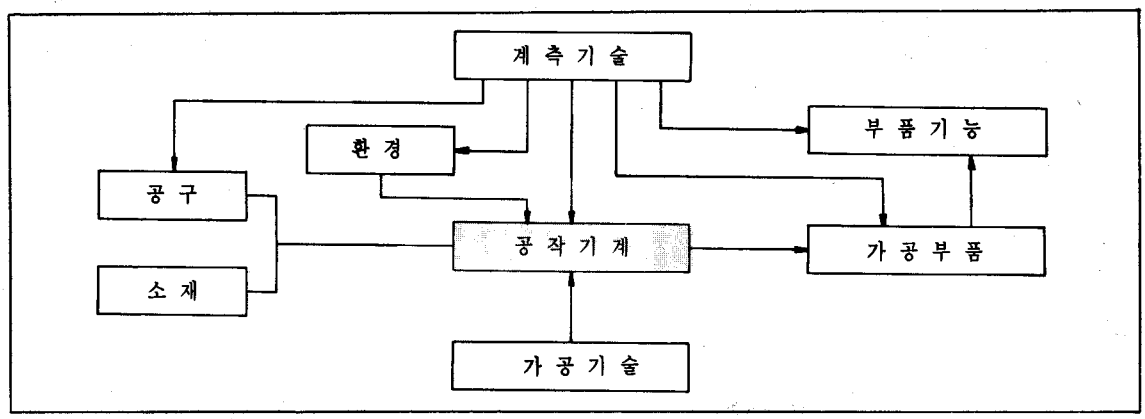


그림9) 초정밀가공에 관한 요인

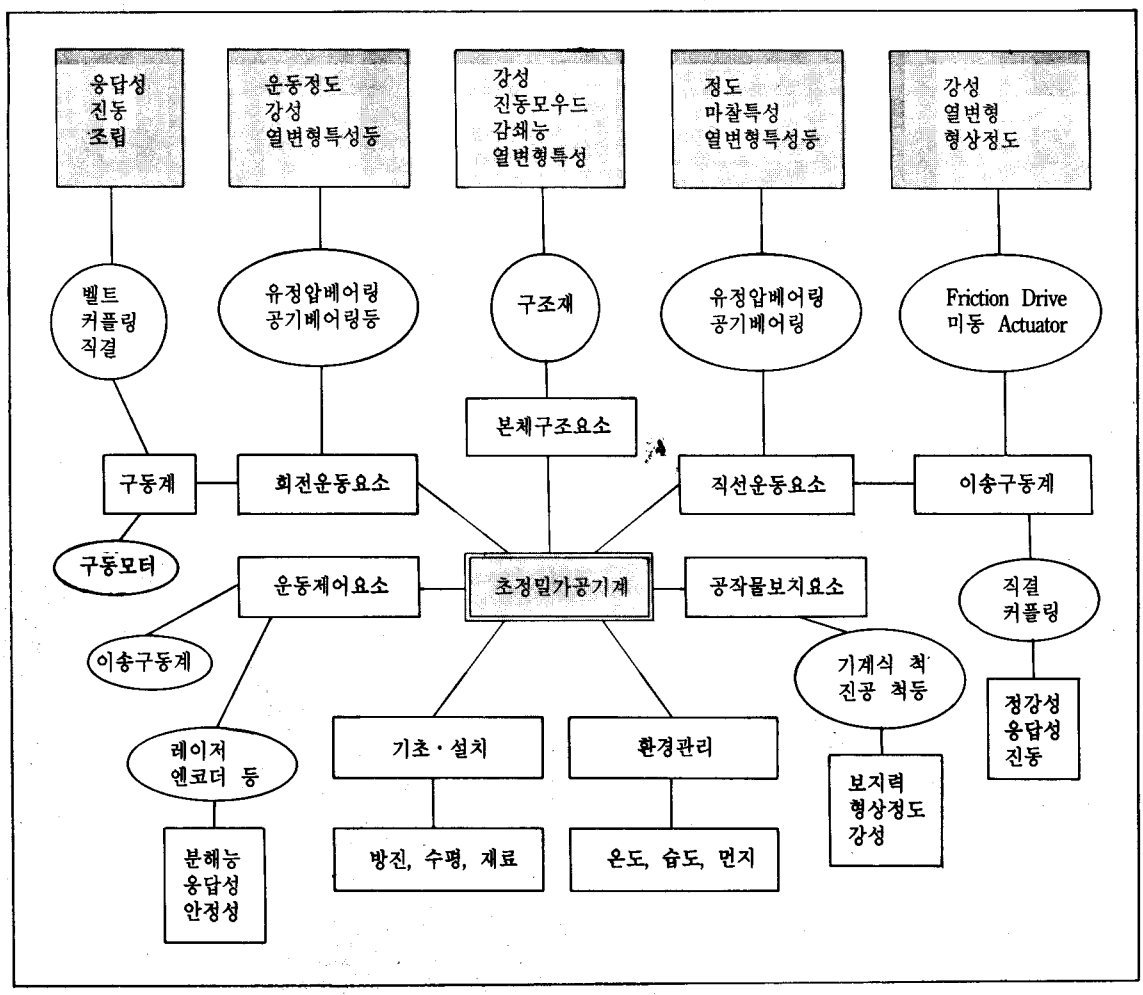


그림10) 초정밀가공기의 구성요소 및 요구성능

공구형상, 인선롱반경

③ 환경 : 온도, 기압, 습도, 진동, 소음

④ 가공기술 : 가공조건, 공구 및 가공물 부착, 공구수명, 절삭제

⑤ 공작기계 : 기계요소기술, 회전부 베어링, 직진부 베어링, 동력전달계, 냉각계, 정강성, 동강성, 열강성, 구조재, 운동제어, 구조설계

⑥ 계측기술 : 공작기계 및 주축의 운동정도, 위치결정, 회전정도, 직진정도, 정적변위, 열변위, 진동

⑦ 가공부품 : 평면도, 원통도, 진원도, 구면도, 비구면도, 표면조도, 분할각도, 반사율, 직각도

⑧ 부품기능 : 제품조립시의 정도, 제품의 운동. 정도

3.2. 초정밀가공기 요소기술

초절밀가공기의 구성요소를 크게 분류해 보면 주축, 안내면등의 운동요소, 마찰구동기구, 미동 엑츄에이터, 모터, 커플링 등의 이송구동계, 베드, 컬럼 등의 구조물, 엔코더, 컨트롤러 등의 제어장치, 방진, 항온, 防濕 등의 기초·환경 및 보지요소 등으로 나눌 수 있으며 이를 요구되는 성능을 포함하여 정리하면 그림10과 같다.

3.2.1. 기계구조 및 구조재

초정밀가공, 특히 비구면의 가공을 위한 기계 구성으로는 두 가지 방식을 대표적으로 들 수 있다. 그림11(a)는 X, Z축의 동시제어에 의한 가공방식으로 기계구성이 단순하며 비용면에서도 유리하나 절삭점이 변하므로 절삭날의 R정도가 가공형상 정도에 직접 영향을 주어 정밀도를 저하시킬 우려가 있다. 그림11(b)는 X, Z, B축의 3축 동시제어에 의한 방식으로 절삭점이 일정하므로 절삭날의 형상오차에 의한 영향은 없으나 절삭점이 B축상의 정위치에 정확히 설정되지 않는 경우 역시 가공오차를 갖게 되는 단점이 있다. 한편 X, Z축의 배치방법에 있어서도 안내면의 위치에 따라 T형과 +형의 두 가지로 분류될 수 있다. T형의 경우 안내면 각각의 정도를 극대화할 수 있다는 이점이 있으나 Z축 안내면상에 주축 및 주축구동계가 모두 설치되어 구동되어야 하므로 이에 따른 설계상의 번잡함이 있으며 +형의 경우 이러한 단점은 해소할 수 있으나 동적으로 불안정하며 X, Z축의 직진정도가 복합되어 나타나기 쉬운 단점을 지니고 있다.

그림 12는 T형 구조를 갖춘 초정밀절삭가공기의 구조 예를 나타낸 것이다.

가공기베드는 구동요소간의 상대위치를 정적, 동적으로 규정해주는 중요한 기본구조물로써 고강성, 고감쇠성, 열적 안정성, 경년변화에 대한 치수의 안정성 등의 성능이 요구되며 따라서 공간적인 형상설계 및 적절한 구조재의 선택이 필

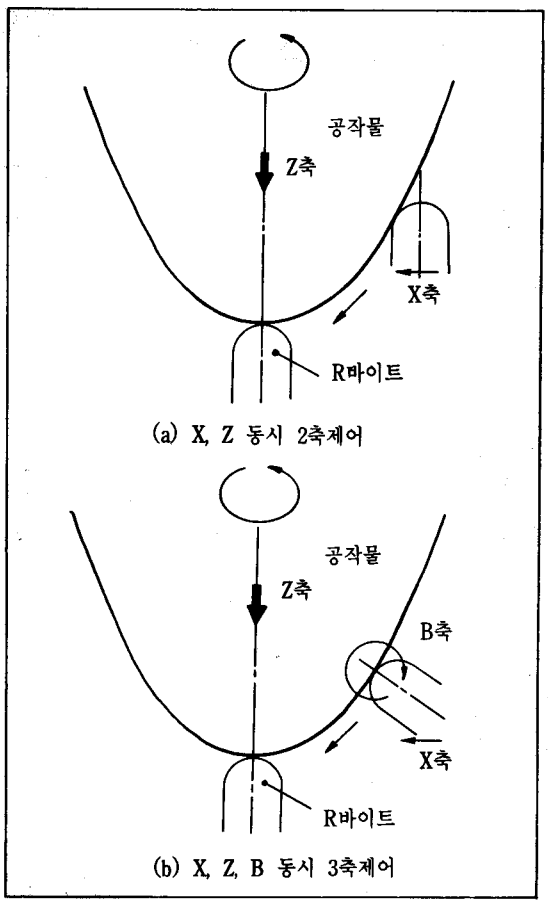


그림11) 초정밀비구면가공기의 절삭구조

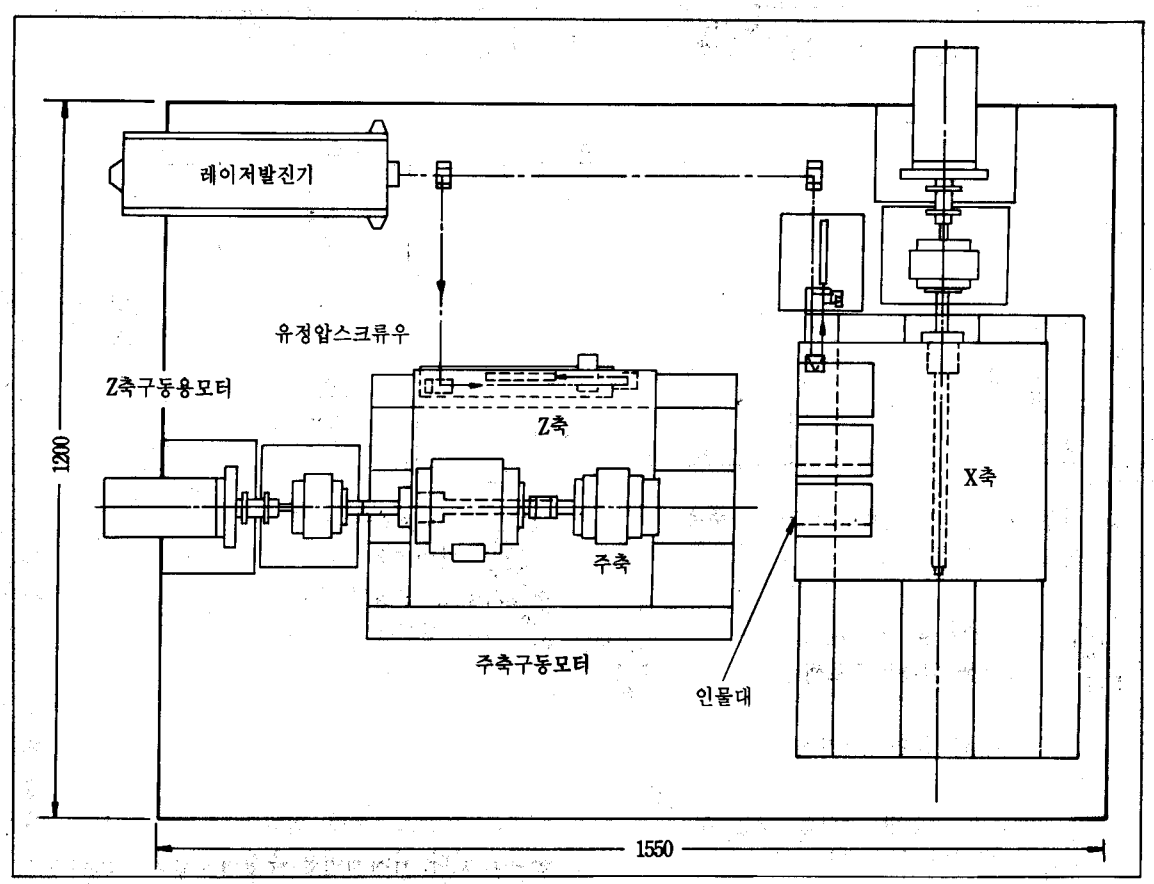


그림12) T형 구조를 갖춘 초정밀절삭가공기의 구조 예

요하다. 현재 구조재로는 감쇠능, 열적 안정성, 칫수안정성 등에서 우수한 granite가 많이 이용되고 있으나 내부진동의 감쇄효과를 향상시키기 위해 레진 콘크리트(resin concrete)등의 신재료의 적용도 점차로 증가하고 있다.

3.2.2. 주축

주축의 특성은 그 지지베어링의 형식에 의해 거의 결정된다. 표3은 베어링형식에 따른 성능비교를 나타낸 것으로 정도를 최우선으로 하는 초정밀주축으로는 정압유체(축, 공기)베어링이 가장 적합함을 알 수 있다.

유정압베어링은 고강성, 고감쇠성등의 장점을 지니고 있으나 펌프맥동에 의한 진동, 발열등에 의한 성능저하의 우려가 있으며 윤활유의 실링(sealing) 및 유입자에 의한 환경오염 또한 실용상의 문제점이다. 공기정압베어링은 고속회전성 및 운동정도 면에서 가장 유리한 형식으로 절삭저항이 비교적 작은 초정밀가공의 경우 상대적으로 취약한 부하용량, 강성 등의 약점도 커버될 수 있어 널리 사용되고 있으며 현재 0.05~0.1μm까지의 회전정도를 갖춘 베어링유닛트가 시판되고 있다.

한편 주축의 회전정도는 그 구동방식에 의해 크게 영향을 받으므로 설계 구조 및 상황에 따라 적절한 구동방식을 선택할 필요가 있다. 현재까지 사용되고 있는 대표적인 구동방식으로는

① 벨트직접구동(주축+풀리+모터)

② 벨트간접구동(주축+커플링+보조축+풀리+모터)

표3) 베어링형식에 따른 성능비교

◎ 우수 ○ 보통 △ 열세

요구성능	ROLLING	HYDROSTATIC	HYDRODYNAMIC	AEROSTATIC	MAGNETIC
회전정도	△	○	△	◎	△
강 성	◎	◎	△	○	○
부하용량	◎	◎	△	○	○
자려진동	△	○	○	◎	◎
감 쇠 성	○	◎	○	△	△
발 열	○	○	△	◎	○
보수관리	○	△	○	○	△
제 작 비	◎	○	△	△	△

③ 직접구동(주축+커플링+모터, 주축+내장형(built-in) 모터) 등이 있다.

3.2.3. 안내면 및 구동계

초정밀가공기용 안내면으로써 필요한 조건으로는

① stick-slip등의 불연속동작이 없을 것
② 직진정도(평행 및 회전성분)가 좋을 것
③ 실용조건에 적합한 강성을 갖을 것
④ 진동의 발생이 없을 것
⑤ 위치결정 및 반복정도를 정확히 얻을 수 있을 것 등이 있으며 이용가능한 방식으로는 미끄럼안내(경계마찰 또는 동압), 구름안내(볼, 로울러 등), 정압안내(유, 공기) 방식이 있다. 그림13은 현재 가장 널리 사용되고 있는 정압안내의 구조를 나타낸 것으로 0.2~0.5μm/100mm의 진직도를 갖춘 안내면이 유닛트로 시판되고 있다.

한편 안내면의 위치결정을 위해서는 모터와 이송기구로 구성된 구동계가 필요하며 보다 정확한 위치결정을 위해서는 위치측정에 의한 피이드백(feed back)제어 방식의 삽입도 필요하다.

구동계로써는 서어보모터와 볼스크류 또는 대형리이드스크류를 결합한 방식, 마찰구동기구에 의한 방식등이 사용되고 있으며 특히 일본의 경우에는 정압스크류에 의한 구동방식도 많이 사용되고 있다. 위치제어용 측정시스템으로는 레이저 간섭계의 이용이 주류를 이루고 있으며 대부분 H.P.社의 모델 5501 또는 5517을 사용하고 있다. 그림 14는 마찰구동장치, 그림 15는 레이저 간섭계에 의한 피이드백제어의 개략도를 나타낸 것이며 이러한 요소들의 결합으로 현재 0.01μm 정도의 이송분해능을 갖는 초정밀가공기가 개발,

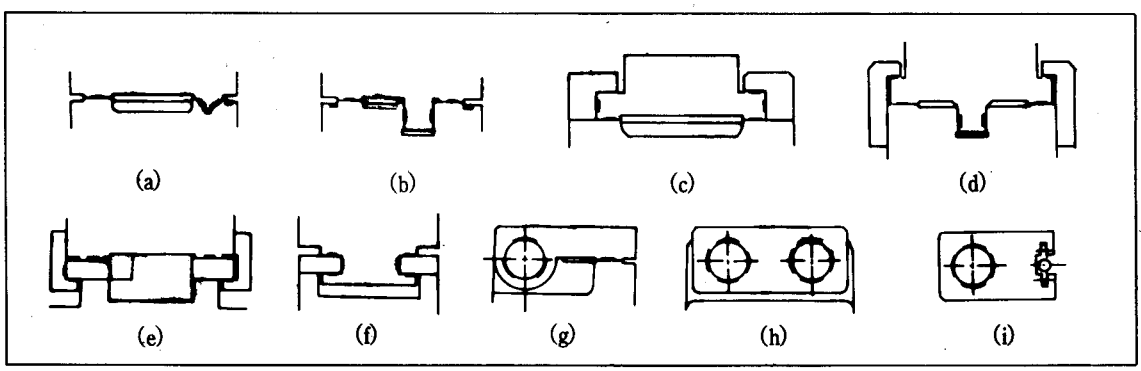


그림13) 정압안내면의 구조 예

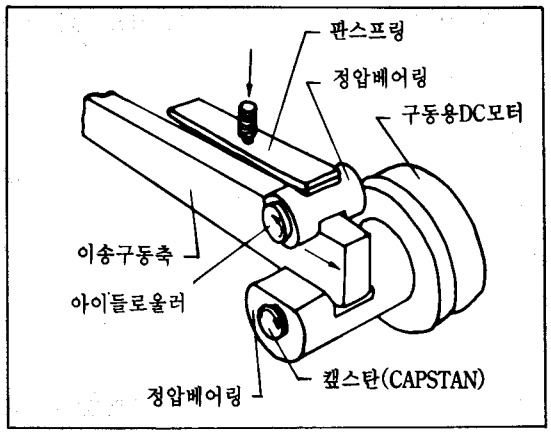


그림14) CAPSTAN 구동장치의 구조

시판되고 있다.

3.2.4. 가공물 보지요소

초정밀가공부품의 절삭에 있어서 공작물 착탈시의 국부적인 보지력의 변화에 의한 형상오차는 목표정도에 비해 무시할 수 없는 정도저하의 요인이 된다.

현재 초정밀선반의 경우 대부분 보지요소로는 진공척을 사용하고 있는 데 사용시 문제점 및 주의사항을 정리하면 다음과 같다.

① 먼지, 잔류칩 등의 눌림에 의해 상흔이 생기지 않도록 가공물소재에 비해 연질의 재료를 사용할 것

② 척의 상면을 동일 선반상에서 수정할 수 있도록 절삭성이 우수한 재료일 것

③ 진공흡인시의 부하 및 절삭유의 분무 등에 의해 형상변화가 생기기 않을 것

④ 절삭력이 작용해도 공작물을 단단히 보지할 수 있을 정도의 마찰계수를 갖을 것

진공척의 재료로는 마찰계수가 우수한 우레탄 수지가 많이 사용되고 있으나 최근에는 흡인력의 균질한 작용면에서 유리한 나일론수지, 불소수지 등의 다공질 소결체의 사용이 검토되고 있다. 그림 16은 자기디스크 기판의 가공에 사용되는 진공척의 구조를 나타낸 것이다.

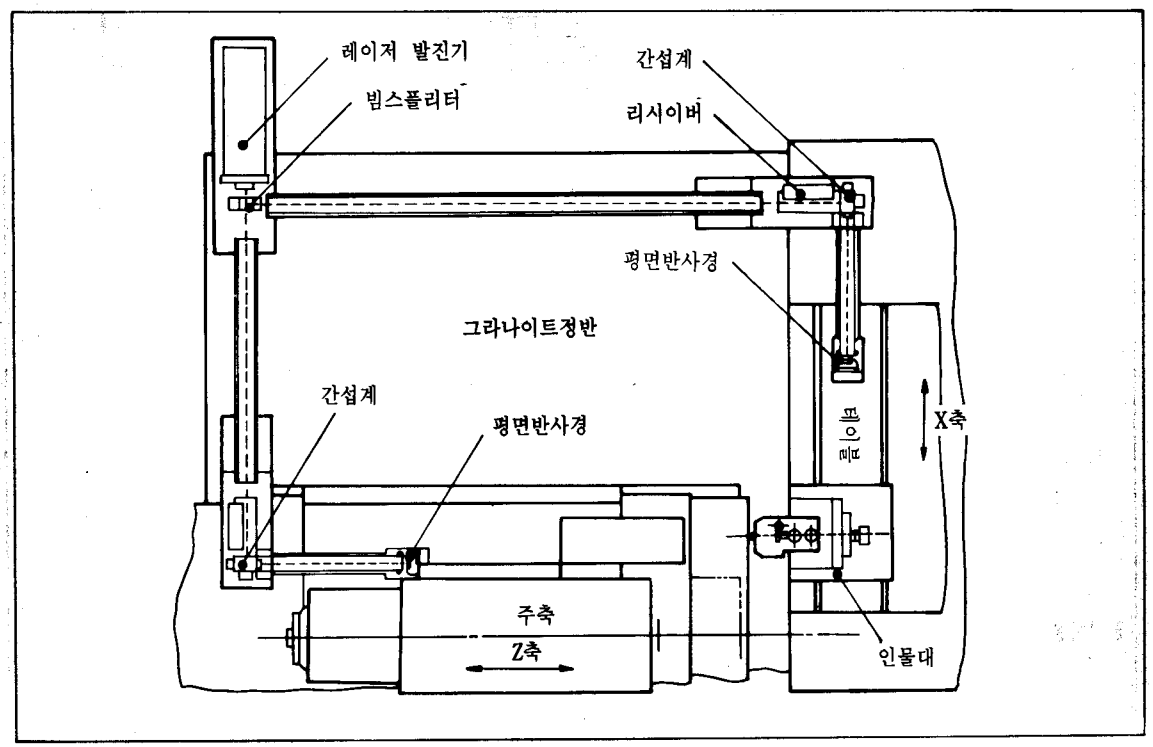


그림15) 레이저 간섭계를 이용한 위치제어 시스템

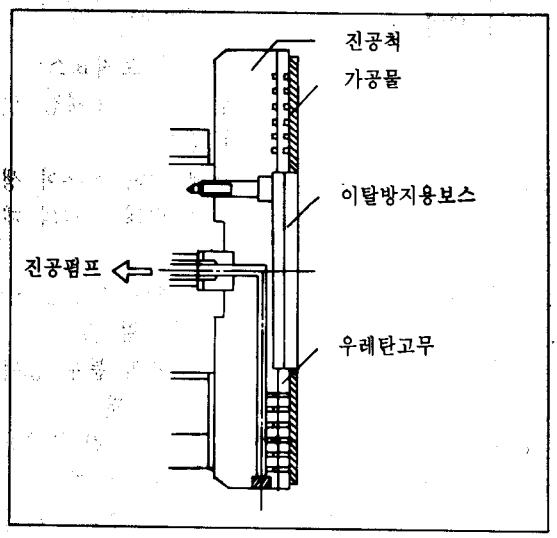


그림16) 자기디스크 기판가공용 진공척

3.2.5. 열·온도제어

초정밀가공기에 있어 구동모터, 운동요소등의 발열 및 주위온도변화에 의한 열변형은 공작물에 요구되는 가공정도를 감안할 때 정도저하의 큰 요인으로 작용하게 된다. 열변형을 제거하기 위한 일반적인 방법으로는

① 가공부품과 동일한 재료로 기계를 구성하여 불균일한 열팽창을 막는 방법
② 열전달율이 낮은 재질을 구조물에 사용하여 미소한 온도변화의 영향을 막는 방법
③ 열의 영향을 일체 받지 않는 극저선팽창계수의 재료를 사용하는 방법

등이 있다. ①은 가장 일반적인 방법으로 주위온도변화의 주기가 짧은 환경에는 적용이 곤란하며 ②에 의한 대표적인 설계로는 그라나이트, 에폭시콘크리트, 세멘트콘크리트를 이용한 베드를 들 수 있다. ③의 방법으로는 인바(invar)계 재료의 사용을 들 수 있으나 경년변화에 따른 문제가 있어 최근에는 이러한 약점이 보완된 glass계 재료(셀빗, 제로듈, ULE등)가 각광을 받고 있다.

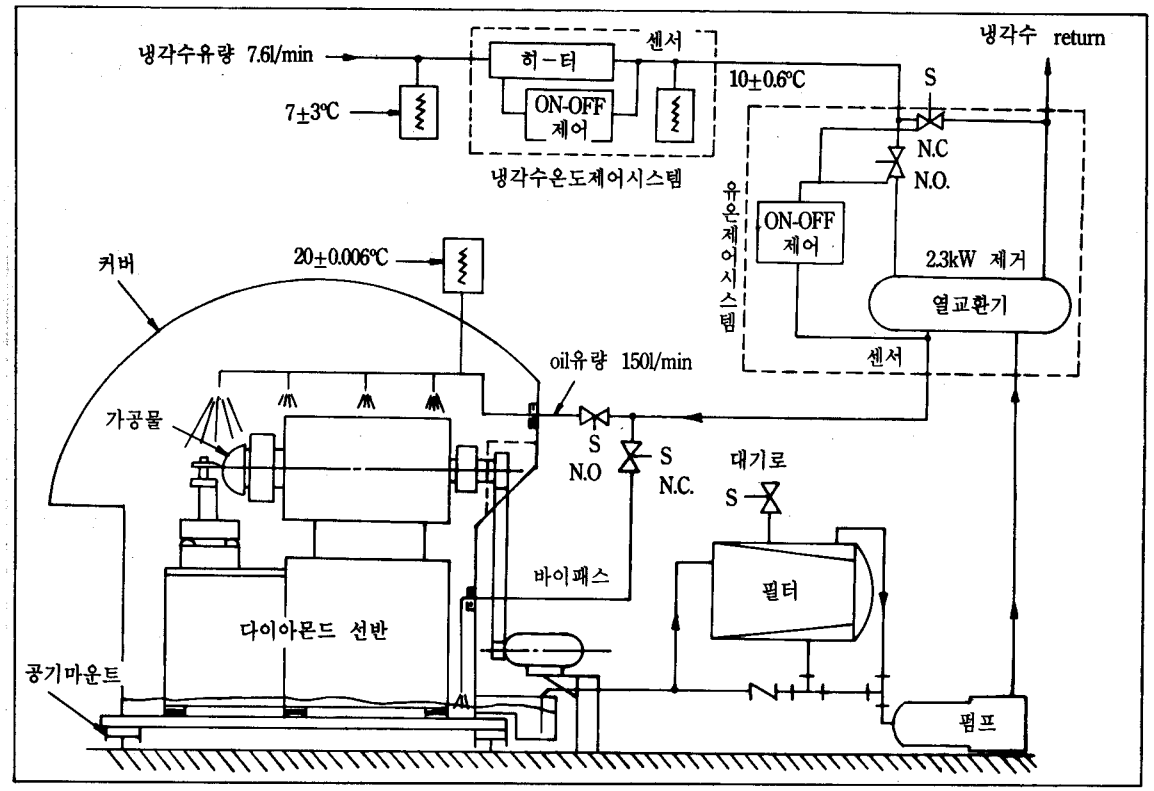


그림17) LODTM의 온도제어시스템 개념도

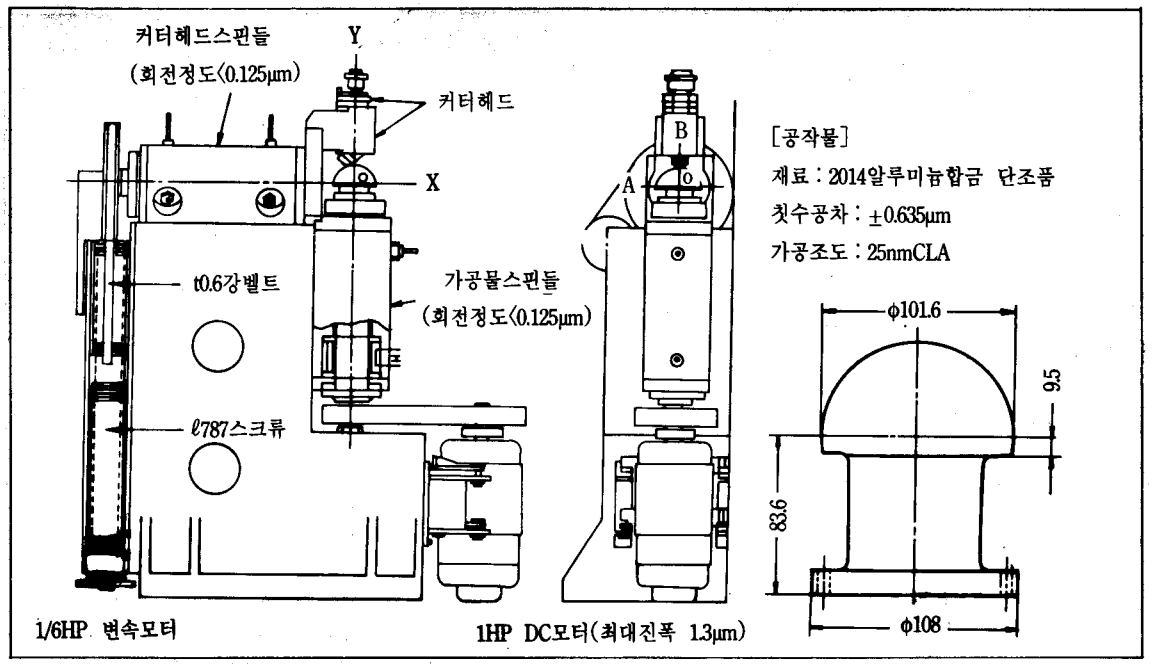


그림18) du Pont I호기(Hemisphere Turning Machine)의 구조

한편 보다 종합적인 방법으로는 냉각에 의한 온도제어방식이 있는데 가공부의 냉각에 의한 온도제어 및 기계전체의 냉각에 의한 온도제어 방식 등이 사용되고 있다. 그림17은 미국 LLL에 의해 개발된 액체샤워방식의 개념도로써 150l/min의 광물유를 기계 전체에 분사·순환시킴으로써 기계의 온도를 20±0.006℃로 제어하는 데 성공하였다.

4. 초정밀가공기의 개발 현황

1966년 미국 Union Carbide社에 의해 다이아몬드 공구를 이용한 경면절삭가공기가 발표된 이래 LLL, CUPE등의 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. 여기에서는 기술선진국들의 연구결과를 중심으로 초정밀선반의 개발현황에 대해 소개하고자 한다.

4.1. Union Carbide사

그림18은 du Pont사와의 계약에 의해 개발된 최초의 다이아몬드 선반 du Pont 1호기(Hemisphere Turning Machine)의 구조로써 주축에 다공질소결 graphite제 공기베어링을 이용하여 직경 4″의 반구면을 표면조도 0.025μm CLA이내로 가공할 수 있는 성능을 갖추고 있다. 1966년에는 φ150mm이하의 구를 칫수공차 0.51μm이내로 가공할 수 있는 du Pont 2호기(Hemishell Turning Machine)가 제작되었으며 1972년에 제작된 du Pont 3호기(R−θ Lathe)는 2개의 공기베어링 주축을 사용, φ50~400mm의 내·외구면 및 방물면의 가공이 가능하도록 제작되었다. 한편 1977년부터는 미국공군병기연구소와 공동으로 직경 800mm의 비구면광학부품을 0.1μm정도로 가공할 수 있는 POMA(Point One Micrometer Accuracy)프로젝트를 수행하였으며 그 목표정도를 정리하면 표4와 같다.

표4) POMA 계획에서의 목표정도

오 차 요 인		현상추정오차	도달목표오차
안 내 면	위치측정	0.1 μm	0.01μm
	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
	구 동	0.05	0.01
열 변 형		0.5	0.05
가 공 물 지 지		0.5	0.05
계		~1.5	~0.1

4.2. Lawrence Livermore National Laboratory(LLNL)

그림 19는 미국 국방부연구기획국이 1,300만불을 투자하여 3년간의 연구끝에 개발된 SDI 및 Fusion반응로의 고출력레이저용 대형광학부품가공기 LODTM의 전경으로 φ1,625×500mm, 중량 1,360 kg의 비구면 금속반사경을 형상정도 0.03μm, 표면조도 0.005μm rms이내로 가공할 수 있도록 하였으며 표5는 그 제원을 요약한 것이다.

4.3. Rank Pneumo Precision사

초정밀선반 전문제작업체인 Pneumo사에서는 1970년대 말부터 직경 300mm까지의 비구면가공용 2축제어 CNC선반인 MSG-325, polygon mirror가공기 MSG-500, 14″까지의 자기디스크가공용 정면선반인 MSG-700 등을 상품화하고 있으며 1988년에는 초정밀선반에 연삭기능을 첨가한 비구면가공기 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, 안내면에는 유정압방식을 사용하여 위치결정정도 0.25μm//300mm, 분해능 1.25nm의 성능을 보이고 있으며 φ600×300mm까지의 공작물을 가공 가능하도록 되어있다. 직경 75mm의 OFHC동에 대한 비구면가공실험결과 형상정도 0.1 μm이내, 표면조도 0.01nm Rmax이내의 가공정도를 보이고 있다.

4.4. Cranfield Unit for Precision Engineering(CUPE)

CUPE에서는 대형 X선 천체망원경에 사용될 비구면 반사경(최대경 1,400mm, 최대길이 600 mm의 원추경)을 가공하기 위한 초정밀선반을 발표하였다.

이 기계는 British Science and Engineering Research Council과의 계약에 의해 X선 망원경에 사용될 내측회전방물면과 외측회전쌍곡면을 가공하기 위한 것으로 베드 재료로는 인조granite를 사용하였으며 X방향 이동정도는 0.5 arc sec/1,100 mm, rotary table은 공기베어링을 사용하여 회전정도 0.1μm, 반경방향 강성 876N/μm, 축방향 강성 2,630N/μm을 보이고 있다. 원추형 부품의 가공실험결과는 300mm의 길이에 대해 진직도 0.2μm, 진원도 0.4μm이내의 가공정도를 나타내었다.

표6은 이 밖의 구미 여러 연구기관 또는 기업에 의한 주요 개발 예를 모은 것이다.

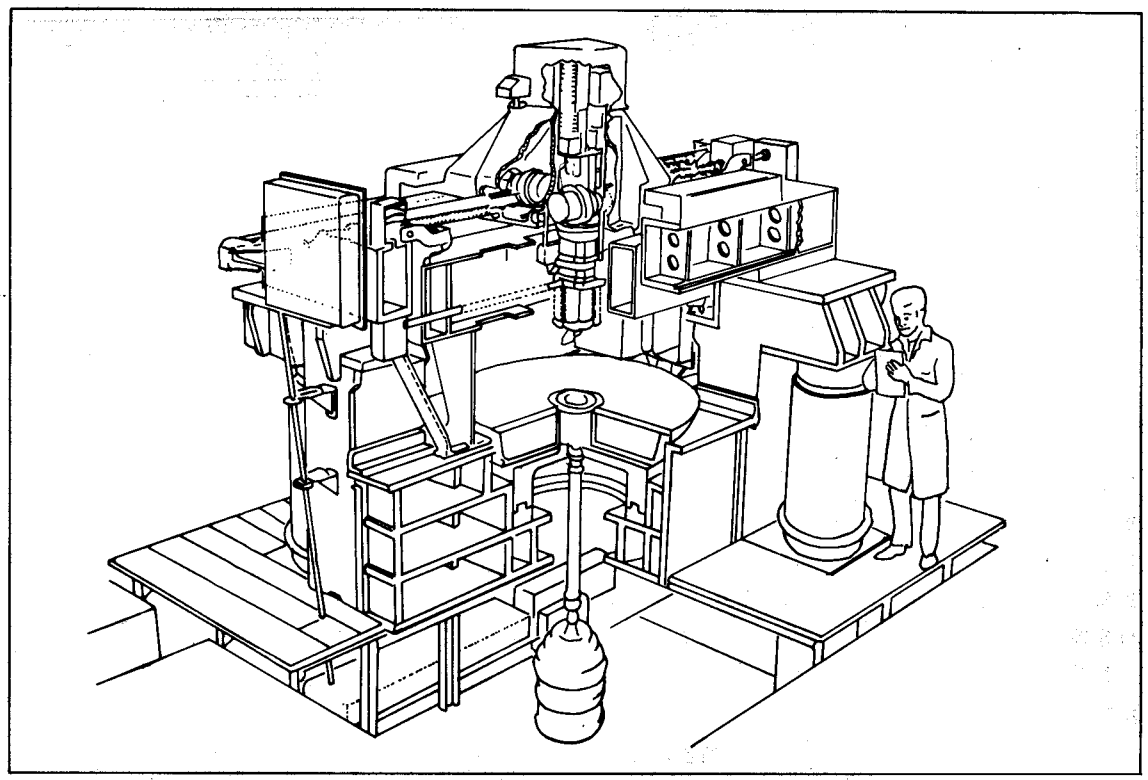


그림19) LODTM의 전경

표5) LODTM의 주요 제원 및 성능

요 소 명		제 원 및 성 능
주 축	회전ROTOR	φ1625mm 높이 300mm의 super invar제 rotor
	베어링	유정압저어널베어링, 공기정압스러스트베어링
	구동MOTOR	variable AC induction motor
안 내 기 구	STROKE	1000(X)×500(Z) mm
	안내방식	V-평 정압안내(X), 공기정압안내(Z)
	구동기구	capstan마찰구동, 최고이송속도 2.5mm/s
	위치측정	He-Ne 레이저 간섭계, 분해능 2.5nm
공구미소변위	구동기구	PZT압전소자, 구동범위 2.5μm
	측정센서	용량형센서, 분해능 0.625nm
온 도 제 어	유체온도	유량 22.7ℓ/s에서 20±0.0006℃
	공기온도	유량 9.3m³/s에서 20±0.005℃

4.5. 일본의 개발 예

1972년 豊田工機의 원통가공용 초정밀선반 AHP 30-90을 최초로 한 일본에서는 1978년 日立精工에 의해 개발된 자기디스크가공기 DPL400에 의해 비로소 초정밀가공기의 상품화가 본격화되기 시

표6) 구미에서의 주요 연구개발 예

명 국	제작사·기관명	년도	모 델 명	구 조 및 용 도
미 국	Battelle P.N.Lab.	1978	Omega-X Nanometer	X, Z, Ω 3축방식, 구면가공
	Moore	1980	M−18AG	X, Z, B 3축방식, 비구면가공
	Polaroid	1978	Bonnie	비구면가공
	Kollmorgen	1982	623	fly cutting방식, 평면가공
영 국	R. Tayler Hobson	1972		fly cutting방식, 다면경가공
	Culham Lab.	1976		fly cutting방식, 구면경가공
	Bryant Symons	1982	525/2	자기디스크가공
네덜란드	Philips	1978	COLATH	비구면가공

작했으며 컴퓨터, 가전, 반도체등의 잇따른 호황과 함께 현재는 대부분의 기술관련 업체에서 전용 가공기가 제작될 정도로 그 기술이 점차로 보편화되어 가고 있다. 표7은 대표적인 제작사의 개발 사례를 나타낸 것이다.

한편 기술의 안정화와 함께 그 적용대상 범위를 넓히기 위한 시도로 기계기술연구소 주관하의 초첨단가공시스템 개발이라는 대형프로젝트가 130억엔의 예산으로 1986년부터 8년간의 연구기간으로 수행중에 있으며 그 연구내용을 보면

① 단파장, 고반복 대출력 Excimer Laser기술 및 대전류, 광역 고에너지, 복합이온빔에 의한 고밀도이온빔 기술 그리고 형상정도 0.1μ/m이내, 표면절삭조도 0.1μm rms 및 표면연삭조도 0.005μm rms가 가능한 초정밀 기계가공기술 등으로 이루어진 초첨단가공장치, ② 초첨단 가공기술, ③ 초정밀 측정검사 지원기술, ④ 초첨단가공 종합 시스템의 개발 등으로 이루어져 있다.

표7) 일본에서의 주요 연구개발 예

제작사	년도	모델명	용 도
豊田工機	1972	AHP30−90	원통가공
〃	1982	AHP30×25	비구면렌즈가공
日立精工	1978	DPL400	자기디스크가공
東芝機械	1982	DPG200	다면경가공
不 二 越	1983	NUP−FL150	다면경가공
西部電機		SUP−200L	비구면렌즈가공
理研製鋼		UPL−1	비구면렌즈가공

5. 앞으로의 연구과제

금후, 초정밀관련기술의 응용분야를 대별하면 반도체제조장치의 개발 및 제작, 광디바이스의 개발 및 제작, 초정밀기기의 개발 및 제작, 신소재가공 등의 분야를 들 수 있으며 보다 구체적으로 연구과제를 정리해보면 다음과 같다.

① 계측
- a) 초정밀계측(10nm−0.1nm의 분해능)
- b) 초정밀 INPROCESS계측
- c) 초정밀 평면계측(nm오더의 비접촉 고속측정)
- d) 비접촉 초정밀3차원 형상측정기(초고정도 비구면측정기)
- e) X선 간섭기술(X선 홀로그래피 및 X선 광학소자제조시스템 등)
- f) X선반사경 및 X선현미경
- g) nm측정용 광FIBER간섭계 시스템

② 구동기술
- a) 초정밀위치결정기술(10nm−0.1nm의 분해능)
- b) 초정밀액츄에이터(10nm−0.1nm의 분해능)
- c) 초정밀 직선 및 원호운동의 기준 개발
- d) BIOLOGICAL 액츄에이터

③ 가공기술

a) 초정밀 비구면가공기시스템(대형금속반사경 등)
b) 초예리절삭공구의 개발
c) 초정밀 평면연마기 개발
d) 초정밀 복합재료 가공기술
e) 3차원 미세가공기술

④ 전자기술관련
a) 미세가공시스템
X선노광, 초소형SOR, 엑시머레이저 축소투영, 초고속이온빔 축소투영
b) VLSI측정검사시스템

⑤ 기타
a) nm로보트의 개발
b) 초정밀 온도제어시스템
c) 초정밀, 고안정 방진대의 개발

6. 맺음말

파장 10.6μm의 CO_2레이저를 이용한 레이저 핵융합용의 연질금속재 고정도 비구면반사경을 제작하기 위해 초정밀다이아몬드 절삭가공기 및 가공기술이 급격히 발전되어 왔으며 이 기술은 다시 파장 1.06μm를 중심으로한 적외선 영역에 있어서 각종 광학부품 및 계측시스템에 이용되는 부품가공으로 전개되고 있다. 또한 0.63μm의 파장을 대상으로 하는 가시광영역에 사용되는 부품제작으로도 진행되고 있다. 이는 레이저프린터, OCR스캐너, photo copier, 레이저 기록계 등 수요확대가 한층 기대되는 분야이며 다면경을 중심으로 하는 민수분야에서의 응용은 점차 확대되어 갈 것이다. 컴퓨터용 자기드럼, 자기디스크, 레이저메모리용 디스크, 복사기드럼 등에의 응용분야도 또한 확대되어 갈 것이다.

최근 다시 주목받기 시작한 분야로는 단파장의 X선 영역에 있어서 부품가공의 초정밀 절삭의 이용이다. 미국의 LLNL도, 영국의 CUPE도 X선 천체망원경용 부품가공을 겨냥하고 있다.

1972~3년경 구미의 초정밀관계자들은 1980년대에 있어서의 초정밀 다이아몬드 절삭기술의 활성화를 확신했었고 뒤늦게 깨달은 일본이 그 대열에 후미에 자리잡고 있다. 그들이 다시 1990년대 초정밀기술의 만개를 예언하고 있고 우리도 뒤늦었지만 그 필요성을 깨닫기 시작하고 있다.

참 고 문 헌

[1] 超精密加工入門, 小林 昭, 總合技術センター, 1986
[2] 超精密加工ハンドブック, 機械技術 35-9 臨時增刊號, 1987
[3] 超精密加工用 工作機械 その1, 堤 正臣, マツニスト, 28-10, 1984
[4] 超精密加工技術 實用 マニアル, 新技術開發 センター
[5] Design and Construction of A Large, Vertical Axis Diamond Turning Machine, R.R.Donaldson, S.R. Patterson, SPIE's 27th Int. Tech. Symp., August 21-26, 1983
[6] 光學部品の超精密加工, 上田 勝宣, 住谷 充夫, 機械の研究, 40-10, 1988