特輯 한국정밀공학회지 제10권 제1호 1993.3
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 10, No.1 Mar. 1993.

超精密 加工 시스템

이 후 상*

1. 서 론

非球面의 鏡面 加工으로 대표되는 超精密 加工 技術은 '90年代에 와서는 이미 일반화 되어가고 있으며, 量産化 時代를 맞이하고 있다고 보아야 할 것이다.

최근의 超精密 加工 技術은 레이저 가공기를 비롯하여 일상용품으로 많이 사용되는 카메라, 컴팩트 디스크, 콘택트렌즈, 컴퓨터 디스크 등에 활용됨은 물론 大口徑天體望遠鏡, 宇宙 및 軍事用의 레이저, X-線을 중심으로한 光技術에 점점 그 용도가 확대되어 가고 있다. 현재 超精密 加工機가 응용되고 있는 部品의 例를 들어보면 表 1과 같다.

우리나라의 超精密 加工시스템 기술은 선진국에 비하여 아직은 한단계 낮은 수준으로 평가되나, 최근 電子, 컴퓨터 산업의 발전과 더불어, 그 수요가 증가되고 있어 최근에는 그 應用기술, 加工시스템에 관한 硏究, 開發이 産·學·硏 여러 곳에서 활발해 지고 있다.

本 稿에서는 超精密 切削·硏削 加工시스템을 중심으로 加工機와 要素技術의 개발동향에 관하여 살펴 보고자 한다.

2. 超精密 加工技術의 變遷

「超精密」이란 그 시대 가공기술의 최고 수준의 정밀도를 말하며, 그 시대기술의 종합으로 그 최고 도달 정도가 결정된다. 超精密 切削·硏削技術의 최고 가공 정도는 년대에 따라 表 2에 보이는 바와같이 변천되어 왔다.

表 2. 超精密 加工 機械의 年代別 最高精度

1775년	윌킨슨의 보링기	0.8mm
1820년	휫치의 타렛트 선반	0.1mm
1930년	SIP의 선반	0.01mm
1960년	스튜더의 원통연삭기	1μm
1970년	정밀 다이아몬드 선반	0.1μm
1980년	초정밀 선반	0.01μm Rmax
1990년	초정밀 연삭기	1nm Rmax

1775년 윌킨슨의 보링기가 완성되어 1,270mm의 시린더를 가공, 1mm의 오차내로 가공할 수 있었음은 그

表 1. 超精密 加工部品의 例(1), (2)

	形 態	精度表示	要求精度	備 考
磁氣 디스크	356φ	表面粗度 μm	0.018 Ra	컴퓨터기기
	1.9(t)	平面度 μm	0.2	
多面鏡	外經 50	表面粗度 μm	0.01 Rmax	Laser 프린터
	8, 12面	平面度 μm	入/10	
抛物面·雙曲面鏡		表面粗度 μm	0.01 Rmax	X-線 현미경
非球面 렌즈 및	φ5~φ50	形狀精度 μm	0.1	카메라 렌즈
렌즈용 金型		表面粗度 μm	0.01~0.02 Rmax	CD픽업렌즈
磁氣 헷드		形狀精度 μm	0.5~1	VTR, HDD
		表面粗度 μm	0.02~0.05 Rmax	

* 한국기계연구원

당시로서는 확기적인 정도향상이었으며, 그 결과로서 제임스 왓트의 증기기관을 1776년에 완성, 그 결과가 영국의 산업혁명으로 이어졌음은 널리 알려진 일이다. 이후로도 가공정도의 향상은 꾸준히 이루어져 현재의 초정밀의 가공정도는 形狀加工精度 0.1μm Rmax가 실용화되고 있다.

특히 1960년대 이후 컴퓨터, 전자, 광산업의 발전과 더불어 초정밀 가공기술의 수요는 급속히 팽창되고 이에 따라 기술의 발전도 10년에 1단위의 향상이라는 급속한 발전을 실현하여 왔다. 그 중요한 연구 개발 사례를 살펴보면 表 3과 같다.

도 0.005μm rms로 가공할 수 있는 기계로 이에 포함된 각종의 기초기술은 초정밀 기술에서의 중요한 里程標로서 주목을 받았다.

상품용의 초정밀 가공기 개발로는 Rank Pneumo Precision사가 유명하여 1990년에 발표한 NANOFORM 600은 주축에는 공기정압베어링을, 안내면에는 유정압방식을 사용하여 위치결정정도 0.25μm/300mm, 분해능 1.25nm로, 직경 75mm의 비구면 가공 실험결과 형상정도 0.1μm 이내, 표면조도 0.01μm Rmax 이내를 실현함으로써 1990년대 초정밀 시장을 목표로 한 우수한 성과로 평가되고 있다. [6]

表 3. 최근의 주요 초정밀 가공기 개발 사례[4], [5]

년 도	모 델 명	국 명	제 작 사	가 공 성 능
1966년	Du Pont 1	미 국	Union Carbide사	면조도 0.025μm
1972년	Du Pont 3	미 국	Union Carbide사	형상정도 0.63μm
1978년	Omega-X	미 국	Battelle P. N.	형상정도 75μm
1978년	COLATH	네델란드	Phillips	형상정도 0.5μm 이하
1982년	POMA	미 국	Union Carbide사	ϕ500mm, 형상정도 0.1μm이하
1982년	AHN 30×25	일 본	豊田工機	面粗度 0.04μm Rmax
1988년	MSG 2,500	미 국	Pneumo Precision	
1990년	NANFORM 600	미 국	Pneumo Precision	형상정도 0.1μm, 면조도 0.01μm Rmax

초정밀 가공기술에 대한 연구에 관한 각국에 있어서의 특징과 개발 과정을 살펴보기로 한다.

• 美國-미국의 초정밀 가공기의 개발대상은 宇宙, 軍事, 基礎科學분야에 그 특징이 있으며 그 기초기술력에 있어서는 아직도 세계를 리드하고 있다고 평가된다. 1960년대부터 시작된 미국의 초정밀 다이아몬드 절삭의 연구는 POMA(Point One Micrometer Accuracy) 계획과 LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)의 LODTM(Large Optics Diamond Turining Machine)이 획기적 성과로 꼽히고 있다.

POMA 계획은 1977년부터 Union Carbide사가 미국 공군 병기 연구소와 공동으로 800mm의 非球面 光學部品을 0.1μm라는 획기적인 정밀도로 가공하고자 하는 계획으로 그 결과가 1982년 SME에 발표되었다. LODTM은 미국 국방부 연구기획국이 1,300,萬$을 투자하여 SDI 및 핵융합로의 고출력 레이저의 대형 광학부품(최대경 ϕ1,625mm)을 형상정도 0.03μm, 표면조

미국은 현재에 있어서도 宇宙, 軍事분야에서 宇宙望遠鏡(可視·X-線, 紫外線用)의 각종 大型 曲面 反射鏡, 大出力 레이저用 曲面鏡의 超精密 切削·研削·폴리싱 또는 그 組合에 관한 연구가 진행되고 있으며, NIST(美標準局)를 중심으로 한 Molecular Measuring Machine, Stanford-NASA-Lockheed의 공동계획인 Gravity Porbe B 계획등 基礎科學分野를 대상으로한 초정밀 기술개발에 있어서 단연 세계를 앞서가고 있다.[7]

◦ 유럽-유럽에서는 Phillips(네델란드)와 CUPE(영국)가 잘 알려져 있다.

CUPE(Cranfield Unit for Engineering)에서는 1978년경 대형 X-선 천체망원경에 사용될 비구면 반사경(최대경 1,400mm, 최대길이 600mm의 원추경)을 가공하기 위한 초정밀 가공기를 발표하였으며, 1989년경에는 2.5×2.5m 크기의 대구경 천체망원경용 시그멘트 밀러를 가공할 수 있는 大型 超精密 研削加工機 OAGM 2,500을 완성하였다. [8]

또한 최근에는 상업용 초정밀 가공기 NANOCEN-

TER를 발표하였으며 이 가공기는 ELID(Electrolytic Inprocess Dressing) 硏削장치가 첨가되어 있고, 직경 600의 비구면 형상을 형상정도 ±50mm, 면조도 5nm Ra로 가공할 수 있다고 한다.[9]

• 日本-일본의 초정밀 가공기 개발의 목적은 民生機器用의 렌즈나 反射鏡의 가공으로 그 크기도 직경 100mm 이하의 소형이 대부분이며 개별년도도 1980년대 이후이다. 현재는 많은 기술관련업체에서 전용가공기가 제작될 정도로 그 기술이 보편화 되고 있으며 연구기관이나 연구자 수에 있어서는 세계 어느라라에 못지 않다고 자부하고 있다.

일본은 최근 가공기술의 중요성을 인식 科技廳 소관의 신기술사업단의 「吉田나노 機構 프로젝트」, 通産省 大型 프로젝트 「超精密 加工시스템 開發」 「MICRO MACHINE 開發」 등 國家規模의 超精密 技術 관련 硏究事業을 遂行 기술개발에 국가적 노력을 기울이고 있다.

3. 超精密 加工機의 要素技術

3.1 超精密 加工機의 構成

그림 2는 초정밀 가공기의 대표적인 구성 예를 보인 것이다. 대체로 공구측이 좌우이동(X축), 스핀들축이 전후(Z축) 이동하는 T字 구조형태가 많으며, 비구면 가공을 위하여 X축 테이블상에 공구회전용의 B축을 설치 3축 동시제어를 행하는 구조도 있다. 제어시스템은 일반적으로 레이저 피이드 백에 의한 CNC 제어에 의해 가공을 행한다.

최근에는 다이아몬드 공구에 의한 非鐵金屬의 절삭만이 아니라 유리나 세라믹과 같은 취성재료의 가공 필요성에 따라 연삭공구가 첨부되는 추세이며 鏡面硏削을 위하여 粒度 4,000번 이상의 숫돌을 인프로세스 드레싱(ELID)하며 연삭하는 기술이 활용되고 있다.

초정밀 가공기의 각 構成要素는 그 기능에 상응하는 정밀도를 갖추어야 하며 POMA 계획에서는 그 誤差限界를 표 5와 배분하고 있다.

表 4. 일본의 초정밀 가공기 개발 사례[10~13]

제 작 사	년 도	모 델 명	용 도	정 도
豊田工機	1982	AHN 30	비구면 가공	
	1989	AHN 10	비구면 가공	형상정도 0.06μm/φ5mm
理硏製鋼	1986	UPL 1	비구면 가공	
西部電機	1988	SUP 200	비구면 가공	면조도 0.03μm Rmax
不 移 越	1988	ASP-L15	비구면 가공	면조도 0.01μm Rms

表 5. POMA 계획에서의 목표정도

오 차 요 인		현상추정오차('70년대)	도달목표오차
안내면	위치측정	0.1μm	0.01μm
	위치제어	0.5	0.05
	pitching, yawing, rolling	1.0	0.02
	직 선 성	0.25	0.02
주 축	회전정도	0.1	0.05
	열 팽 창	0.25	0.05
	구 동	0.05	0.05
열 변 형		0.5	0.05
가공물지지		0.5	0.05
계		~1.5	~0.1

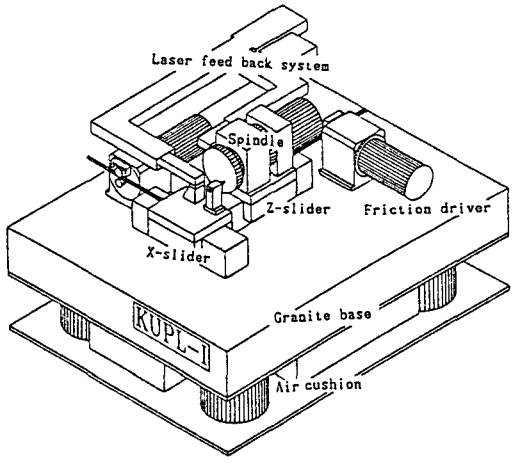

그림. 1 초정밀 가공기의 구조(14)

3.2 本體構造

초정밀 가공기의 본체 구조재로는 花崗岩(그라나이트) 定盤이 많이 사용되고 있다.

이것은 ①경년 변화가 적고 ②열전도율과 열팽창 계수가 낮고 ③강성이 높고 ④무겁고 ⑤형상정도를 내기 쉽다는 재료의 특성 때문으로 보인다.

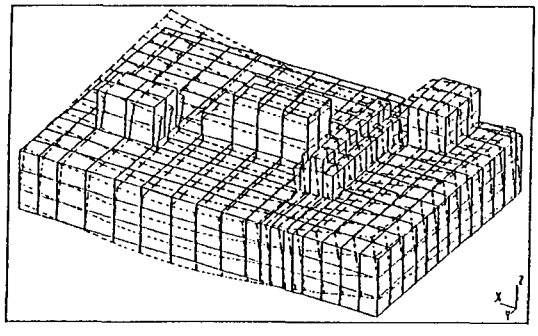

그림. 2 초정밀 가공기의 진동해석

구조의 설계에 있어서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 진동해석(16), 열변형해석(15), 온도 분포해석 등이 활용되고 있다.

한편 외부로부터의 진동차단을 위하여서는 에어 댐퍼(Air Damper)가 일반적으로 사용되고 있다.

3.3 스핀들(主軸)

초정밀 가공기의 주축에 요구되는 성능으로는 무엇보다도 回轉超精密度를 높일 수 있어서야 되며 그외에도 강성, 진동특성, 열특성이 우수하여야 하며, 실용화를 위하여는 보수관리의 용이성 및 저렴한 제작비가 요구된다.

이와같은 조건에서 현재 초정밀 가공기의 주축으로는 空氣靜壓베어링이 가장 많이 사용되고 있으며, 비교적 저속회전에 있어서는 油靜壓베어링도 사용되고 있다. 두 베어링의 성능을 비교하면 유정압베어링의 경우 고강성, 고감쇠성 등의 장점이 있으나 기름의 점성에 의한 마찰손실에 의한 발열 및 가압펌프의 맥동에 의한 진동, 베어링 형상의 단차 등에 따른 정도 저하의 우려가 상대적인 단점으로 나타나고 있다.

공기정압베어링은 강성 및 부하용량의 약한 것이 단점이나 초정밀 가공기의 경우 일반적으로 절삭 저항이 매우 적으므로 정도의 신뢰성 면에서 많이 사용되고 있다.

표 6은 현재의 베어링 형식별 回轉精度를 정리한 것이며, 초정밀 가공기의 경우 회전정도 10nm가 당면한 개발의 목표가 되고 있다. 이를 달성하기 위하여는 부품정도의 향상에는 한도가 있어 앞으로는 制御技術에 의한 回轉精度의 補正方式에 관해서도 연구할 필요가 있다.(17) 또한 강성증가를 위하여는 變位의 自動補正機構나 制御形 補償要素(18) 등도 연구되고 있다. 또한

表 6. 베어링 형식별 회전정도(20)

형 식	구 름	유 동 압	유 정 압	공기정압	자 기
일반적인 회전정도	1μm	0.5~1.0μm	0.1~0.3μm	0.05~0.1μm	10μm
현재최고 회전강도	0.3μm ①	0.15μm ②	0.05μm ③	0.02μm ④	5μm ⑤

① 江黑鐵工所제 NC선반 NUCPAL-10
② 서독 Boley사제 선반
③ 豊田工機 TOYODA STAT BEARING
④ Union Carbide사 POMA계획
⑤ 不二越제 MAGO1

축의 열변위를 억제하기 위하여 수퍼 인바 재료의 사용 또는 세라믹 재료의 사용(19)도 연구되고 있다.

주축 구동용 모터와의 연결 등 주축 구성에 있어서는 과거에는 보조주축의 사용이나 벨트구동 등 진동·열의 차단을 고려한 구성이 많았으나 최근에는 빌트 인(Built in) 타입이나 모터직결방식이 많이 활용되는 경향이다.

3.4 案內面

超精密 加工機의 案內面으로는 역시 空氣靜壓案內와 油靜壓案內方式이 많이 쓰이고 있으며, 안내면에서는 유정압베어링의 약점인 발열의 문제가 크게 나타나지 않으며 높은 강성은 감쇠성을 얻을 수 있다는 점에서 油靜壓案內面의 사용이 늘어나는 경향이다.

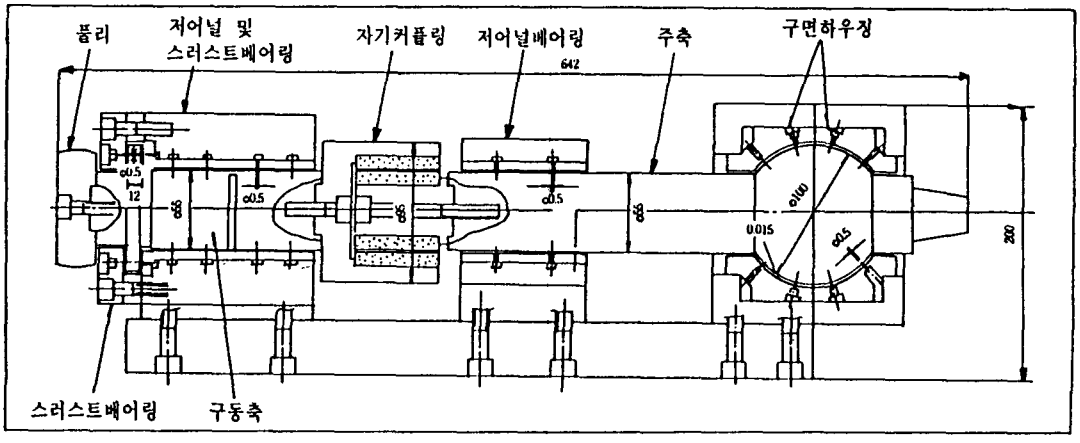

그림. 3 구면정압공기주축의 구조(東芝機械)

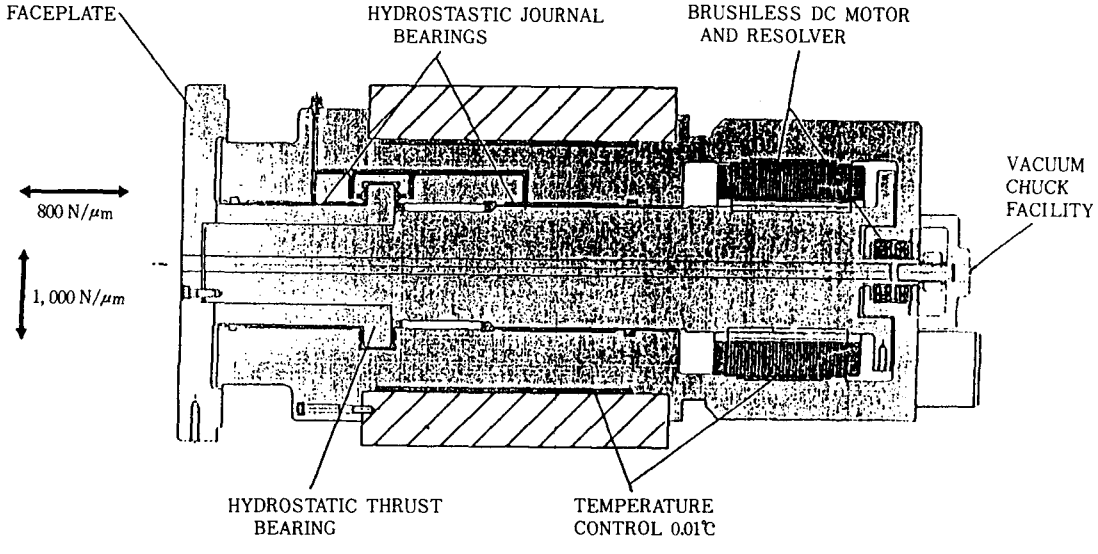

그림. 4 油靜壓 主軸 構造(Built-in Motor 구조 : CUPE) (9)

表 7. 초정밀 가공기에서의 안내면 형식

제작사 · 기관	모 델 명	안내면 형식	기 종
Union Carbide	Du Pont 2호	공기정압	구면가공기
LLNL	LODTM	유정압(X), 공기정압(Z)	수직형 · 대형
東芝機械	UDT-130B	공기정압	디스크 가공기
豊田工機	AHN-10	유 정 압	비구면 가공기
Pneumo Precision	NANOFORM 600	유 정 압	비구면 가공기
CUPE	Nano Center 600	유 정 압	비구면 가공기

정압안내면은 直進精度 0.1~0.5μm/100mm의 제품이 유닛트로 시판되고 있으며, 초정밀 가공기에서는 0.030 μm/200mm의 고정도가 실현되고 있다.[22] 直進精度를 높이기 위하여는 역시 制御, 補正 기술에 대한 연구[18]가 이루어지고 있다.

3.5 移送 機構

超精密 移送 機構로서는

①리드 스크류방식 ②유정압/공기정압 스크류방식 ③마찰 구동방식 ④볼 스크류방식 ⑤리니어 모터방식이 사용되고 있다.

①리드 스크류방식[22]-연삭후 래핑 가공된 고정도의 것이 사용된다. 초정밀용으로는 핏치오차 1μm 이하가 요구되며, 넛트의 취부방법에 있어서도 리드 스크류의 정도오차나 취부오차가 테이블의 직진성을 떨어뜨리지 않도록 배려되어야 한다.

②유정압/공기정압 스크류방식[23]-유정압 스크류방식은 日本의 不二越에서 실용화하고 있으며, 성능은 우수한 것으로 평가되나 제작은 매우 어려워 널리 실용화되고 있지 못하다. 공기정압 스크류는 최근 개발사례가 보고되고 있으나 실용화는 역시 가공기술이 문제가 된다.

③마찰 구동방식[24],[25]-LLNL의 LODTM에 사용된 후 많은 실용화 사례가 보고되고 있으며 FOX社, CUPE 등에서 상품화 되고 있다. 고속이송과 미소이송을 겸할 수 있고, 진동이 극히 적다는 장점이 있어 歐美에서 초정밀 이송기구로 많이 활용되고 있다.

④볼 스크류방식-볼 스크류는 일반적으로 볼에 의한 진동 등의 문제로 초정밀 이송 기구로는 한계가 있는 것으로 간주되어 왔으나 최근 테이블과의 연결기구 등의 개선으로 초정밀 기구에 사용한 연구가 발표되고 있어[21],[18],[26] 주목되고 있다.

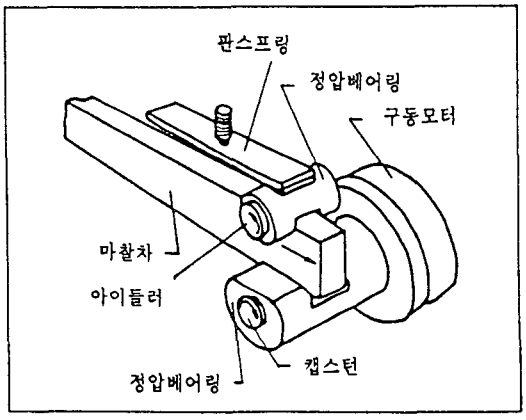

그림. 5 마찰구동기구

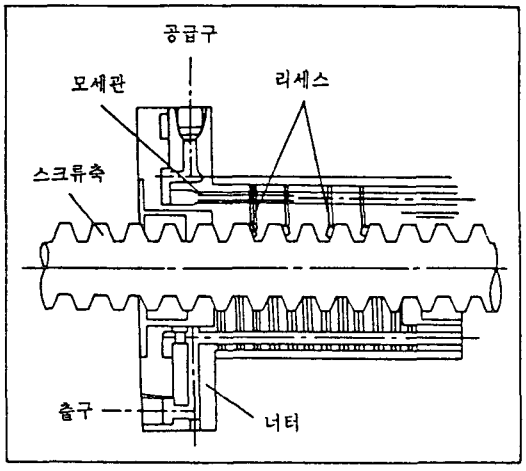

그림. 6 정압스크류

⑤리니어 모터방식-최근 전자제어 기술의 발전으로 공기정압안내면과 함께 구성하여 분해능 10nm에서 위치편차 ±10~20nm를 실현한 사례가 보고되어[27] 앞으로의 실용화가 기대되고 있다.

위치제어를 위한 피이드 백 기구로는 거의가 He-Ne 레이저 간섭계가 사용되고 있으며, 그 분해능도 10nm 에서 최근에는 자이고(Zygo)사의 1.25nm로 높여지고 있다.

초정밀 가공기에는 壓電素子를 이용한 微小移送기구가 사용되기도 하며 그 분해능은 1nm에 이르고 있다.[28]

3.6 工具

超精密 切削에 사용되는 工具材料로는 單結晶 天然 다이아몬드가 가장 적합한 것으로 알려지고 있다. 이 공구는 탕그스텐이나 鐵系 金屬을 제외한 대부분의 實用金屬, 플라스틱, 그외 많은 非金屬材料의 초정밀 가공에 사용될 수 있다.

절삭조건은 主軸回轉數 1,000rpm 前後, 切削速度 2~5m/s(또는 10m/s), 최종 절삭깊이 5~50μm, 移送 1~40μm/rev가 많이 사용되며 切削油는 사용하지 않기도 하며 알미늄의 절삭에서는 白燈油를 噴霧狀으로 사용한다.

3.7 環境 및 溫度制御

초정밀 가공기는 일반적으로 恒溫室에 설치되고 있으며 실내의 온도는 20℃ ±1℃ 이하로 제어되고 있다.

空氣는 열전도율이 낮고 열팽창율이 높아 溫度管理는 오일(油)보다 어렵고 같은 실내에서도 場所나 高低에 따라 差가 생기기 쉽다. 油精壓이나 기계의 冷却油의 경우도 0.01° 단위로 콘트롤 되고 있다.

또한 機械의 溫度管理를 목적으로 기계 전체를 오일 샤워(Oil Shower) 방식으로 제어하는 방법도 사용된다. LLNL의 초정밀 다이아몬드 절삭 가공기에서 채용된 오일 샤워방식에서는 油溫을 ±0.006℃로 제어, 이때의 스핀들 先端과 工具사이의 變位가 0.019μm 이내였다고 보고하였다.[29]

4. 맺음말

지금까지 超精密 加工機와 그 構成要素의 개발동향에 관하여 고찰해 보았다.

'80년대에서부터 光學機器部品, 컴퓨터 機器部品을 중심으로 需要가 늘기 시작한 超精密 鏡面加工技術은 '90年代 들어와 이미 보편화 되고 있는 느낌이며, 그 수요는 앞으로 더욱 증가될 전망이다.

우리나라의 超精密 技術은 아직은 선진국에 비하여 한 단계 늦은 것으로 평가되고 있으며, 국내 산업의 국제 경쟁력 확보를 위해서도 超精密 加工機는 물론 加工技術, 測定技術을 포함한 綜合的 超精密 技術에 관한 技術開發이 속히 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. 박천홍 외;초정밀 절삭가공기의 연구동향, 機械와 材料, Vol.2, No.3, 1990, p.30~47
2. 田中克敏;最新の超精密加工技術, 日本機械學會東海支部講演論文集, 1992, 3, p.9~12
3. ジョイテック編輯部;超精密加工技術の展望, ジョイテック, 1991. 8, p.19
4. 小林 昭;歐美 における超精密加工機械開發の歷史と現狀, 工作機械 '84, 1984, p.101~108
5. Ikawa, Donaldson, etc;Ultra-precision Metal Cutting-The Past, the Present and the Future, Annals of CIRP, Vol.40, 2, 1991, p.587~594
6. 小川委樹;第2世代に移行する90年代の超精密加工機, 應用機械工學, 1990. 1, .109~113
7. 井川直哉;超精密加工の國際的動向, Koyo Engineering Journal No.137, 1990, p.1~5
8. Timothy, J. Wilson;New technologies fabricate large aspheres, Laser Focus World, 1990. 9, p.111~123
9. CUPE;Nanocenter brochure
10. 伊庭剛二;超精密鏡面加工機の動向と要素技術, 應用機械工學, 1990. 7, p.100~106
11. 坪井 暉;CNC 超精密加工機, マシニスト, 1990. 1, .65~69
12. 小池正夫;超精密旋盤による非球面の鏡面加工, 機械技術, Vol.37, No.3, 1989, p.22~31
13. 大圍和美;超精密CNC旋盤による非球面加工, 機械技術, Vol.37, No.3, 1989, p.32~39
14. 이후상 외;초정밀비구면가공기 개발(Ⅰ), (Ⅱ), 과기처 특정연구 보고서, 1991, 1992
15. 森脇俊道 外;次世代超精密工作機械のための變形シミュレーシと制御, 研究報告書, 1991
16. 박종권 외;초정밀가공기 구조물의 설계기술 연구, 과기처 특정연구보고서(Ⅰ), 1991

17. O. Horikawa 外;ジャーナル型アクテインリング, 精密工學會誌, 55, 11, 1989, p. 2063
18. 田中 守 外;制御絞り型空氣軸受を用いたスピンドガイの高剛性化, 日機構論, 920, 17, 1992. 4, p. 501～503
19. 提正臣;オプトメカトロニクス時代の超精密切削기술 -機械構造-, 光技術コンタクト, Vol. 26, No. 9, 1988, p. 663～672
20. 박천홍 외;초정밀가공기용 주축/안내면 기술, 기계와 재료, 2권 3호, 1990. 7, . 61～74
21. 坪井 暉;高品位工を實現する超精密非球面加工機, 機械と工具, 1992, 6, p. 38～43
22. 伊庭剛二;超精密位置決ぬ技術の現狀と今後, Mechatronics, 1990. 11, p. 14～19
23. 伊庭剛二;靜壓ねじの構造とその應用, 設計・製圖, Vol. 25, No. 11, 1990. 11, p. 1～6
24. 大塚二郎;摩擦驅動の特性と精密位置決めへの適用, 應用機械工學, 1992. 3, p. 68～75
25. 根山 昭;超精密位置決ぬ技術, 機械と工具, 1991. 11, p. 95～100
26. 伊東 誼 外;超精密加工機におけるテーブウオと驅動系の連結機構, 日機講論, No. 920～17, 1992, p. 510～512
27. 谷本智昭 外;リニアモータによる超精密位置決ぬ技術, 安川電機技報, 通卷205號, 1989, p. 339～344
28. 森脇俊道 外;壓電素子を用いた超精密微小工具位置決ぬ裝置の開發, Proceedings of the Second Intelligent FA Symposium, 1989. 7, p. 93～96
29. 小林 昭;超精密加工入門, 1986, p. 136