

초정밀가공기용 주축/안내면 기술



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



박 천 홍
(공작기계실 선임연구원)

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

1. 머리말

반도체, 컴퓨터, 광, 영상·정보, 항공·우주산업과 같은 고도기술산업에 있어서의 제품기술의 진보는 매우 급속히 진행되고 있으며 이를 뒷받침하기 위해서는 중요 기능부품의 치수, 형상, 운동정도의 초정밀화가 요구되고 있어 이러한 초정밀부품의 가공을 위한 초정밀가공기의 역할은 나날이 그 중요성을 더해가고 있다.

그 대표적인 예로는 초정밀다이아몬드선반을 들

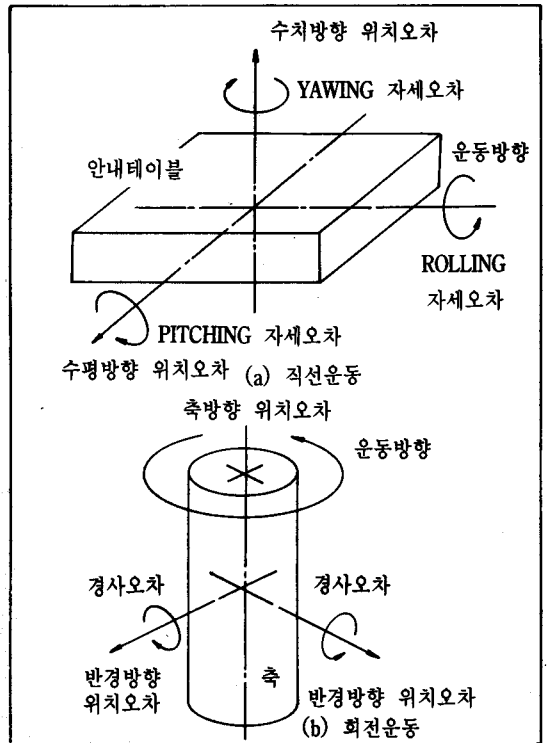


그림 1) 운동요소의 자유도

수 있으며 공구와 공작물의 상대운동에 의해 공작물을 광학적 정도까지 창출하고자 하는 다이아몬드절삭에 있어서 그 운동의 정확도가 매우 중요하므로 공구 및 공작물의 운동을 지지하는 베어링부의 초정밀화가 필수적이다.

베어링은 그림 1에서와 같이 회전운동 또는 직선운동을 위해 6자유도 가운데 최소한 3자유도(구면베어링의 경우)를 구속하기 위한 요소로 대표적인 형식으로 로울링베어링, 동압베어링, 정압베어링 등을 들 수 있으며 하중을 지지하기 위한 기구, 윤활방법등에 의해 제각기 다른 특성을 지니고 있어 사용목적에 알맞는 형식을 선택할 필요가 있다.

본고에서는 초정밀가공기용 운동요소의 견지에서 가장 중요한 역할을 수행하는 주축(회전운동) 및 안내면(직선운동)을 대상으로 그 기본적인 특성, 기술동향 및 연구개발 현황등에 대해 알아보고자 한다.

2. 초정밀가공기용 주축

2.1. 주축의 요구성능

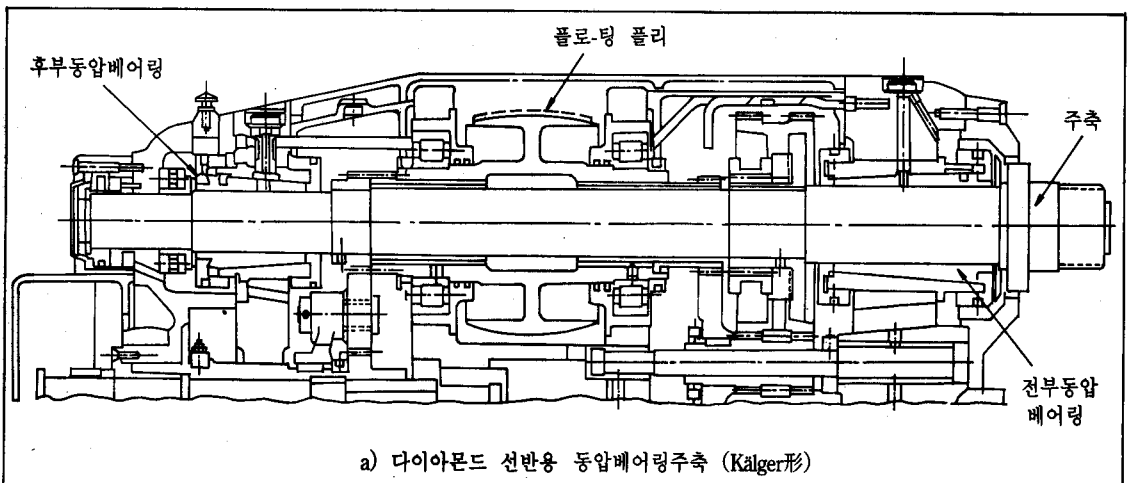
주축은 6자유도 가운데 5자유도를 강력히 구속하고 회전방향 1자유도만을 정확히 운동시키고자 하는 기계요소로써 당연히 구속력을 제공하는 베어링의 성능에 의해 대부분의 특성이 좌우된다.

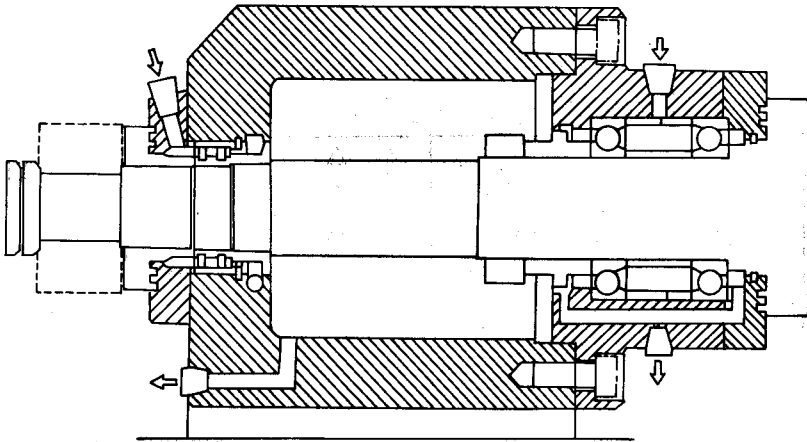
일반적으로 주축에 요구되는 성능으로는 부하용량, 강성 등의 정적 성능, 자려진동, 감쇠성 등의 동적 성능 및 발열에 따르는 열특성등이 있으며 실용화를 위해서는 보수관리의 용이성 및 저렴한 제작비등의 특성이 뒤따라야 한다.

현재까지 주축용 베어링으로 이용되고 있는 방식을 정리하면 볼, 로울러등의 진동체를 개재하여 운동을 전달하는 구름베어링, 축회전에 의한 쉐기효과를 이용하여 부하를 지지하는 동압베어링, 윤활제에 의한 경계윤활조건을 이용하는 미끄럼베어링(윤활제가 유체일 경우 동압베어링과 동일하므로 이하 동압베어링으로 대표), 외부가압된 윤활막(유, 공기등)에 의해 부하를 지지하는 정압베어링, 그리고 자장형성에 의해 부하를 지지하는 자기베어링등이 있으며 이들 베어링형식에 따른 성능을 비교하면 표1과 같다.

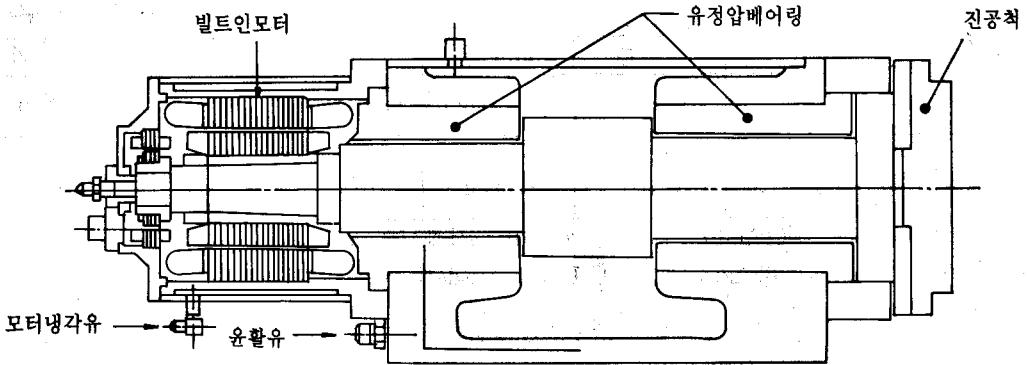
그림 2는 각 베어링형식을 이용한 공작기계 주축의 예를 나타낸 것으로 초정밀 공작기계의 주축의 경우에는 이상의 요구성능 가운데 무엇보다도 공작물에 그 영향이 직접 전사되어 가공정도를 크게 좌우하게 되는 운동정도가 좋은 주축의 선택이 요구된다.

구름베어링은 내륜, 외륜, 복수의 진동체등 많은 운동기준부품으로 구성되어 있으며 이들의 형상오차가 복잡하게 간섭되어 회전오차성분을 구성하게 되므로 sub-micron의 운동정도를 얻기 위해서는 구성부품의 누적오차가 목표정도이하가 되

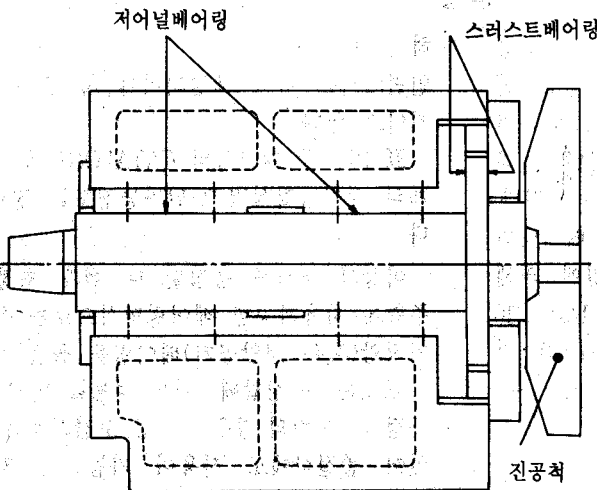




b) 구름베어링을 이용한 주축의 구조



c) 초정밀선반용 유정압주축(豊田工機)



d) 초정밀선반용 공기정압주축(日立精工)

그림 2) 각종 베어링을 이용한 주축의 구조 예

표 1) 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	◎	○	△	△	△

표 2) 베어링형식별 회전정도

형 식	구 립	유동압	유정압	공기정압	자 기
일반적인 회전정도	1 μ m	0.5~1.0 μ m	0.1~0.3 μ m	0.05~0.1 μ m	10 μ m
현재최고 회전정도	0.3 μ m ①	0.15 μ m ②	0.05 μ m ③	0.02 μ m ④	5 μ m ⑤

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

어야 하는 단점이 있다.

동압베어링(유 또는 공기)의 경우 조립초기의 운동정도는 우수하여 sub-micron의 운동이 가능하나 구성재료의 마모, 또는 발열등의 정도저하요인을 지니고 있어 정도의 수명이 짧으며 특히 고주파의 오차성분을 지니고 있어 경면가공과 같은 초정밀가공에의 적용에는 다소 무리가 있다.

정압베어링(유 또는 공기)의 경우 축과 베어링의 2개의 운동기준부품이 있으나 외부가압에 의해 구성된 유체막이 형상에 의한 오차를 1/5~1/10 정도로 평균화시켜주는 비접촉운동구속기구의 역할을 해주므로 높은 운동정도를 기대할 수 있다.

자기베어링은 원리적으로 제어에 의해 운동을 보상하므로 높은 운동정도를 기대할 수 있으나 초정밀에 요구되는 운동정도를 갖추기 위해서는 이에 필요한 사용센서의 분해능(resolution) 및 각

회전성분의 보상에 따르는 응답속도의 고속화등이 현재의 기술수준으로는 문제가 되며 이를 해결하기 위해서는 막대한 비용이 예상되는 등 실용적인면에서는 아직 해결되어야 할 많은 문제점을 지니고 있다.

표 2는 각 제작사의 CATALOG등을 참조로 현재의 베어링형식별 도달가능정도를 정리한 것이다

이상의 결과를 종합할 때 현재 초정밀가공기주축에 사용가능한 베어링형식으로는 유정압, 공기정압(혹은 정압공기)베어링을 꼽을 수 있다.

표 3은 두 정압베어링의 성능을 비교한 것으로 유정압베어링의 경우 고강성, 고감쇠성등의 장점이 있어 중절삭에도 사용이 가능하며 저주파에서 고주파에 걸쳐 우수한 동강성을 보이므로 고S/N비의 운동구속이 가능하나 유의 점성계수가 공

기에 비해 매우 높으므로 마찰손실에 의한 발열로 고속회전성이 좋지 못하며 가압펌프의 맥동에 의한 진동 및 베어링형상에 따른 단차등의 영향에 의한 정도저하의 우려가 상대적인 단점으로 나타나고 있다. 특히 0.1 μ m이하의 고정도를 요구하는 가공기의 경우에는 일반적으로 절삭저항이 매우 작아 공기정압베어링의 부하용량 및 강성으로도 주축의 특성을 만족할 수 있으므로 정도의 신뢰성면에서 유리한 공기정압 베어링주축(이하 정압 공기주축)이 대부분 사용되고 있는 실정이다.

표 3) 정압베어링의 성능 비교

항 목		조건A	조건B
축 경	저 어 널	1.0	1.33
	스 러 스트	1.0	1.65
부하용량	저 어 널	0.21	0.36
	스 러 스트	0.21	0.55
강 성	저 어 널	0.21	0.36
	스 러 스트	0.21	0.55
감쇠계수	저 어 널	0.033	0.10
	스 러 스트	0.033	0.20

특성값=공기정압의 성능/유정압의 성능

조건A : 공기, 유베어링의 칫수가 동일할 경우

조건B : 공기, 유베어링의 스러스트강성비가

0.55 : 1의 경우

2.2. 정압공기주축

2.2.1. 정압공기베어링의 종류

그림 3은 정압공기베어링을 분류한 것으로 각 방식의 특성을 살펴보면 다음과 같다.

오리피스 보상형은 급기공내에 오리피스를 설치하여 저항을 주는 방식으로 구조가 비교적 단순하다는 장점을 지니고 있으나 0.1~0.3mm정도인 미소급기공의 가공이 어렵다는 단점을 지니고 있으며 자성보상형은 급기공출구와 베어링 간극으로 형성되는 원환상의 부분에 의해 저항을 주는 방식으로 가공이 용이하고 동적 안정성이 우수하여 가장 보편적으로 사용되는 방식이나 강성이 상대적으로 낮아 적용에 제한이 있다는 단점을 지니고 있다.

슬롯(slot)보상형은 급기공 또는 베어링면에 슬롯을 가공하고 슬롯부에서의 공기의 점성저항을 이용하는 방식으로 오리피스, 자성보상형등의 점상 급기형태에 비해 높은 강성을 얻을 수 있다는 장점을 지니고 있으나 아직 설계, 제작면에서 기술보급이 불충분한 상태에 있다. 표면보상형은 베어링표면에 방사상의 얇은 슬롯을 다수 설치하고 슬롯내에 급기공을 설치하여 급기공으로부터 가압공기를 유도, 단차효과에 의해 저항을 주는 방식으로 간극 및 슬롯의 깊이를 상대적으로 작게 가공해야 한다는 단점이 있으나 감쇠성, 성능의 안정성등에서 장점이 있어 최근 이용이 급격히 증가하고 있다.

다공질보상형은 보상요소로써 다공질재료를 부분적으로 또는 베어링면 전체에 이용하는 방식으로 다공질내의 저항은 수많은 오리피스의 집합으로 볼 수 있어 부하특성상의 큰 잇점을 지니고 있으며 고정저항방식중 가장 이상적인 방식이라고 할 수 있다. 표 4는 이상의 보상방식들의 주요 특성을 비교한 것이다.

이 외에도 고강성을 목표로 하는 가변보상형은 대향되는 급기공부위의 압력상태를 하드웨어적으

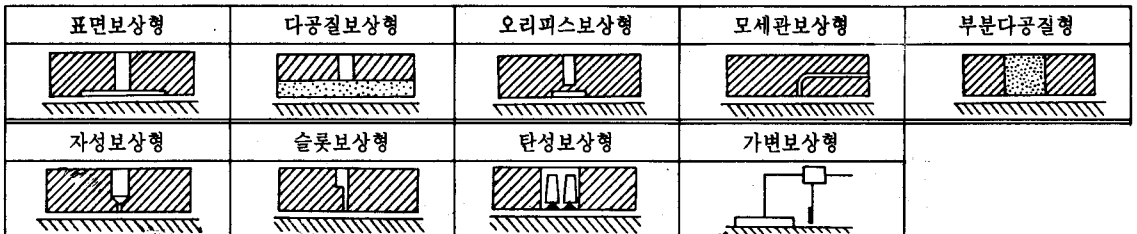


그림 3) 공기정압베어링의 보상형식에 의한 분류

표 4) 보상방식에 따른 주요 특성의 비교

보상방식	제작의 용이성	동적안정성*	무차원강성	보급 현황
자성보상	◎	◎	0.3	◎
오리피스	△	○	0.45	○
표면보상	○	△	0.2**	◎
슬롯보상	○	◎	0.6	△
다공질	○	△	0.7	○

* : pneumatic hammer에 대한 안정성
 ** : 적절한 형상설계에 의해 0.4까지 가능

로 검출, 보상해주는 방식과 간극의 변위를 소프트웨어적으로 검출, 보상해주는 방식이 있는 데 원리상 강성을 거의 무한대로 할 수 있다는 장점이 있으나 공기의 압축성에 의한 동적 불안정성 및 보상회로의 불안정성등의 문제가 있어 아직 실용화되지는 못하고 있다.

2.2.2. 정압공기주축의 개발 현황

현재까지 개발된 대표적 초정밀가공기의 주축 베어링형식을 살펴보면 Lawrence Livermore Lab., Philips등에서의 유정압베어링의 사용 예를 제외하고는 거의 정압공기베어링이 채택되고 있다. 그 중 대표적인 제작 예를 들면 다음과 같다.

1) Union Carbide社

1960년대 중반, Union Carbide社에서는 초정밀 반구면가공기(du Pont 1호기)의 개발을 위해 회전정도 0.1 μ m이내의 성능을 보일 수 있는 주축의

설계방안이 검토되었으며 그 결과 그림 4와 같이 그 때까지 공작기계 주축에서는 볼 수 없었던 새로운 형태의 정압공기주축을 개발하였다.

베어링 보상요소로는 Graphitar G-2(미국 Graphite사제 소결다공질graphite재)를 이용한 다공질 보상형을 채택하였으며 반경방향의 강성을 증가시키기 위해 양 측단에 각각 3개씩의 패드를 설치하고 베어링간극은 조립후에 2.5~5.0 μ m가 되도록 조정하였다.

스러스트방향에도 다공질패드를 설치하였으며 탄성링에 의해 결합시켰다. 탄성링은 예부하시 0.15 mm의 처짐이 생기도록 조정되어 공기가 공급될 경우 강성을 줄 수 있도록 하였으며 예부하와 공기압의 평형시의 간극은 약 5 μ m가 된다. 주축의 구동에는 1 HP의 변속직류모터를 이용하였으며 모터에 의한 13 μ m정도의 진폭을 감소시키기 위해 진동절연마운트를 설치함으로써 진폭을 0.06 μ m가

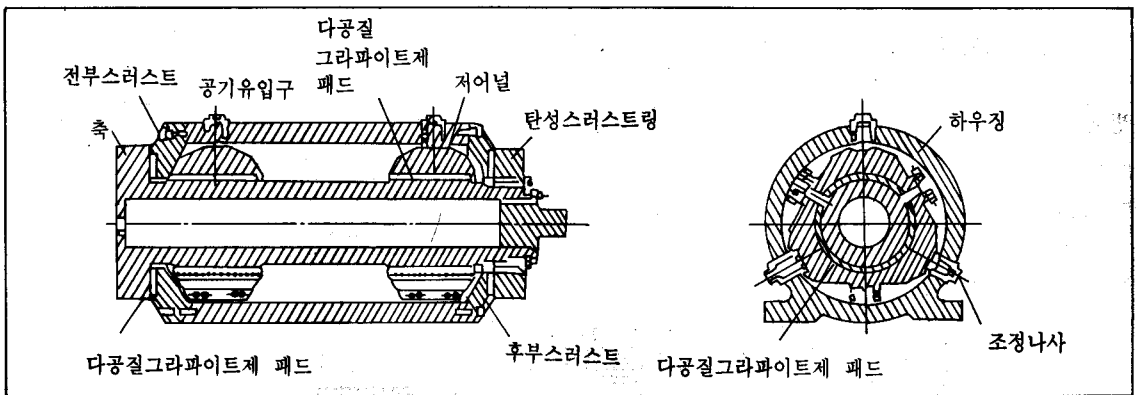


그림 4) 다공질GRAPHITE제 정압공기주축의 구조 (Union Carbide社)

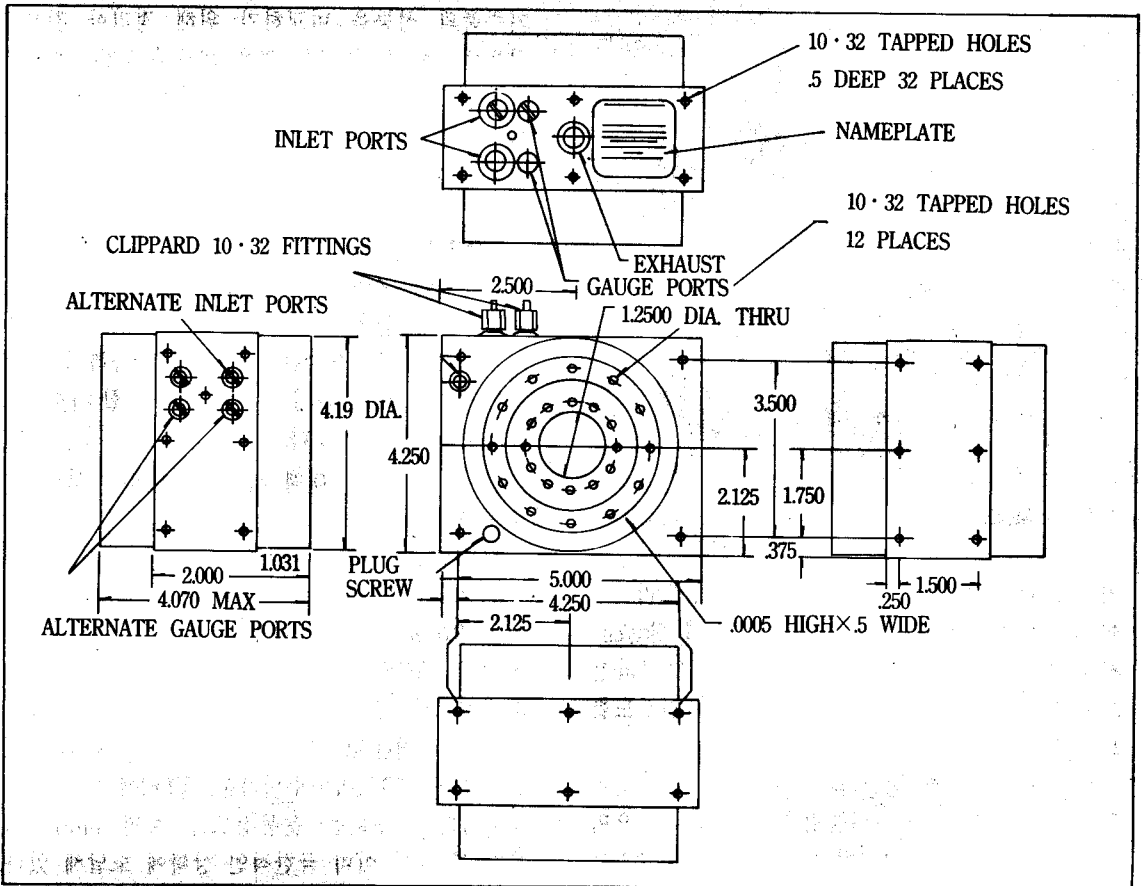


그림 5) Professional Instruments사제 정압공기주축의 외 형도 (MODEL 4B)

지 감소시켰다.

2) Professional Instruments社

그림 5 및 그림 6은 Professional Instruments社에 의해 개발된 모델 4B의 외형도 및 사진으로써 현재 초정밀가공기용 주축유닛으로는 가장 많은 판매량을 보이고 있는 모델이다.

고강성화를 위해 로터(rotor)의 길이는 가능한 짧게, 스러스트플레이트는 가능한한 두껍게 하였으며 그 결과 로터길이 51mm, 스러스트플레이트의 두께 26mm, 외형치수 127(B)×108(H)×103(L)mm의 컴팩트한 상태의 제작이 가능하였다. 이 같은 소형화는 내부부품의 가공정도향상을 가능하게 하여 전체 운동정도를 향상시킬 수 있는 요인이 되며 가공기에 탑재시에는 안내면의 칫수를 줄일 수 있는 효과도 주게 되어 결과적으로

가공기 전체의 정도를 향상시켜주는 역할을 하게 된다.

베어링보상방식은 특수형상의 표면보상형을 채택하여 공급압력 10kg/cm²시의 반경방향항성 12 kg/μm, 축방향항성 36kg/μm를 보이고 있으며 구동시의 진동절연을 위해 자체제작한 퍼커션포인트커플링을 장착하도록 되어 있다.

3) 東芝機械

인공위성 자세제어시플레이터용 구면가공등에 일찍부터 관심을 보여왔던 東芝생산기술연구소에서는 고정도가공에 있어서는 원통보다 구면의 가공이 더 용이하며 공기베어링에 이를 적용할 경우 스러스트와 레디얼화중을 동시에 받을 수 있다는 점에 착안하여 1975년부터 수 년의 연구기간을 거쳐 그림 7과 같은 독특한 형태의 구면

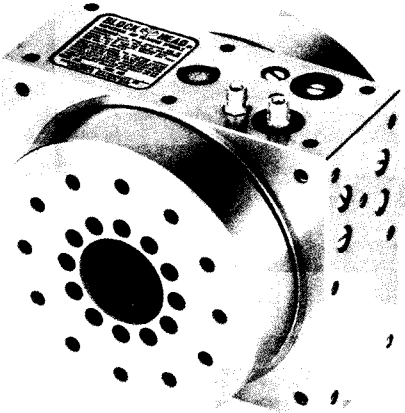


그림 6) MODEL 4B의 사진(Professional Instruments사제)

정압공기주축을 개발하는데 성공하였다. 오리피스에 의한 급기방식을 이용하여 공급압력 5kg/cm² 시의 반경방향강성 5kg/μm, 축방향강성 6kg/μm를 보이고 있으며 0.05μm이내의 탁월한 회전정도를 보이고 있다.

구동시의 벨트의 장력 및 외부진동을 차단하기 위해 보조주축 및 자기커플링을 사용하고 있으며 10,000rpm의 회전이 가능하나 이 경우 발열방지를 위한 별도의 대책이 필요하므로 상용회전수는 5,000rpm 정도로 하고 있다.

표 5는 현재 시판되고 있는 대표적인 정압공

기주축의 성능을 비교하기 위해 정리한 것으로 구동에 충분히 주의할 경우 대부분 0.05μm까지의 운동정도를 보이고 있으며 반경방향강성은 공급압력 5kg/cm²을 기준으로 3~5kg/μm정도가 일반적임을 알 수 있다.

2.2.3. 정압공기주축의 최근연구동향

최근들어 각종 첨단제품용 부품에 요구되는 가공정도가 급속히 향상되어감에 따라 공기베어링주축에 요구되어지는 운동 및 성능특성도 엄격해져 가고 있어 다시 고려해 보아야 할 사항들이 점차로 증가하고 있다.

그 특성 및 그 대책들을 간략하게 정리해보면 다음과 같다.

1) 고정도화

고정도로 가공된 공기베어링의 목표정도는 현재 0.02~0.03μm(비주기성 회전성분 기준)정도이며 베어링 부품의 가공정도를 향상시켜 이 이상의 회전정도를 얻는다는 것은 다소 무리가 있다. 그러나 엑시머(EXCIMER)레이저의 광학소자(반사경) 가공, STM장치주변기술, VLSI제조공정등에 있어서의 요구되는 운동정도를 보면 nm수준에 까지 와 있어 이미 극한적인 상황에 도달해 있다.

이를 해결하기 위한 대책으로는 앞서 언급한 가변보상형 공기베어링의 원리를 응용하여 회전요차를 보정해주는 방식을 들 수 있으나 공기의

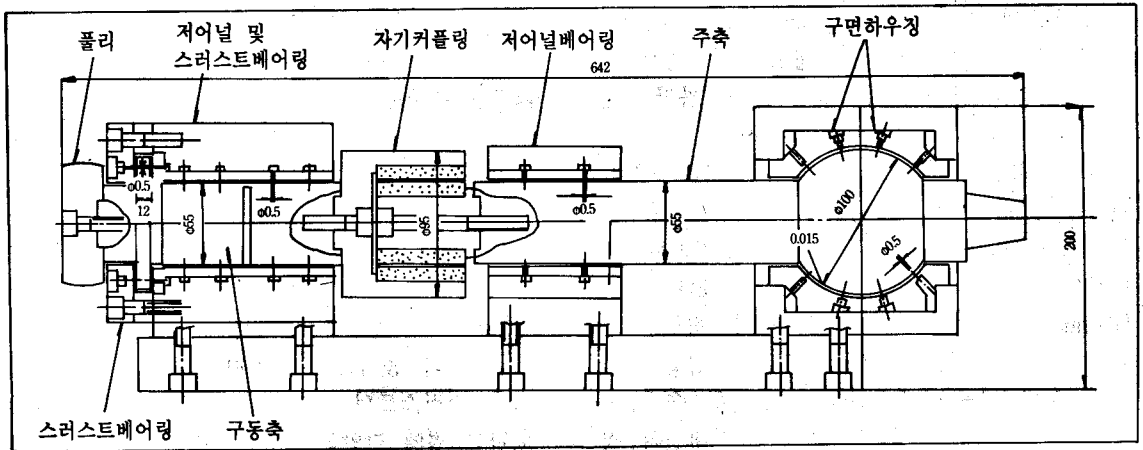


그림 7)구면정압공기주축의 구조(東芝機械)

표 5) 시판되고 있는 정압공기주축유닛의 성능

제 작 사	국명	MODEL명	공급압력 bar	강 성 kg/μm	RA	부 하 용 량 kg	RA	회전정도 μm	보상요소
					AX		AX		
CANON	일본	AB-100R	5	5	10	10	80	0.05	다공질
				40	80				
PROFESSIONAL INSTRUMENTS	미국	4B	10	12	23	23	91	0.05	표면보상
				36	91				
NSK	일본	GBS100	4	1.5	10	10	40	0.05	다공질
				5	40				
東芝機械	일본	ABS-10	6	5	30	30	36	0.05	오리피스
				6	36				
不二越	일본	ARA1037	6	3	18	18	18	0.3	표면보상
				3	18				
PNEUMO PRECISION	미국	MS-300	5.5	8.9	68	68	68	0.1	다공질
				14.3	68				

RA : radial방향, AX : axial방향

압축성 및 응답속도등을 고려한 컨트롤러의 개발이 현재로는 매우 어려운 상황이다.

2) 열적 안정화

주축의 열변형은 공작물의 치수정도에 큰 영향을 주게 되므로 초정밀가공에서의 열강성의 향상은 매우 중요하다. 이제까지 이러한 열관리는 목적하는 물체의 온도상승을 방지하여 열변형을

최소화하는 입장에서 진행되어 왔으나 최근에는 주축 재질의 열팽창계수를 0으로 함으로써 열변형을 없애고자 하는 견지에서 최저 열팽창재의 응용이 시도되고 있다.

그림 8은 슈퍼인바(Super Invar, 열팽창계수 $0.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)재를 이용한 정압공기주축의 열팽창을 측정한 예로 20,000rpm에서 $3.1\mu\text{m}$ 정도 축단이 신

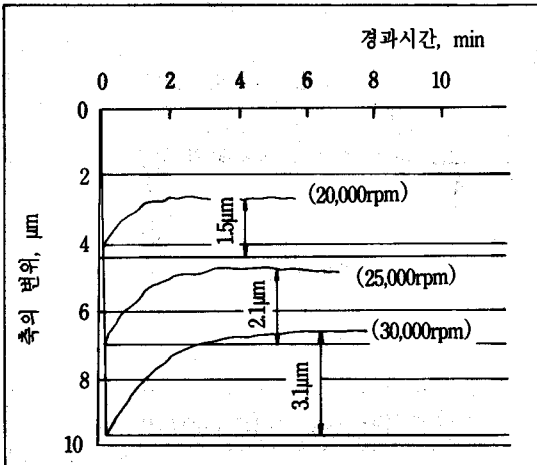


그림8) Super Invar재 공기주축의 열변형

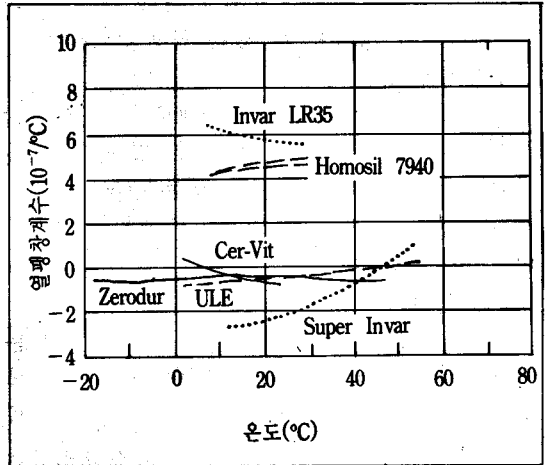


그림9) 저열팽창계수 재료의 온도특성

장됨을 보이고 있다. 한편 같은 주축에 SUS 420 (열팽창계수 $11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)을 이용했을 경우 축의 신장은 30,000rpm에서 35 μm 로 수퍼인바재에 비해 10배 정도의 열팽창을 갖는다.

이 밖에도 저열팽창재로는 그림 9에서와 같이 인바(Invar), 호모실(Homosil)등이 있으며 보다 적극적으로 열팽창계수 0을 갖는 셀빋, 제로돌, ULE등의 글래스세라믹계 재료를 이용한 예도 있다.

3) 고강성화

운동오차를 보정하는 가변보상형 공기베어링의 사용은 고정도화는 물론 고강성화에도 장점을 지니고 있으나 앞서 언급한 바와 같이 아직 실용화의 가능성은 적다.

현재 가장 적극적인 대책으로는 표4에서 알 수 있듯이 높은 무차원강성을 갖는 슬롯보상형 및 다공질보상형 공기베어링의 효과적인 이용을 들 수 있다. 특히 세라믹계 다공질공기베어링의 경우 pneumatic hammer에 의한 불안정진동이 최대의 문제이나 표면도금에 의한 방법등이 최근 시도 되고 있어 실용화가 가장 기대되고 있다.

2.3. 주축구동방식

초정밀주축의 회전정도는 그 구동방법에 의해서도 크게 영향을 받으므로 구동방식의 선택은 정도유지면에서 중요한 문제가 된다.

일반적으로 생각할 수 있는 구동방식으로는

- ① 벨트에 의한 직접구동
- ② 주축+커플링+구동축의 벨트간접구동
- ③ 주축+커플링+모터의 모터직접구동
- ④ 빌트인(built-in) 모터에 의한 구동

등이 있는데 ①에 의한 방식은 구조는 간단하나 벨트장력 및 벨트의 진동이 직접 축에 전달되어 정도에 영향을 미치기 쉽다.

②, ③의 방식은 벨트, 모터등에 의한 진동 또는 발열이 주축에 직접 전달되지 않는다는 장점이 있으나 커플링자체가 진동 또는 unbalance의 원인이 되기 쉽다. 따라서 이 방식의 효과적인 사용을 위해서는 커플링의 질량을 극소화하고 내·외축

간의 동축도를 고정도화 해야 하는데 0.1 μm 이내 정도의 회전정도를 위해서는 최대 5 μm 이내의 동축도가 필요하다는 실험결과도 보고되어 있다.

④의 방식은 모터와 인버터의 특성이 직접 주축의 회전성능에 영향을 미치며 로터의 발열이 축에 직접 전달되는 단점이 있으나 축간의 벨런스를 잘 잡을 경우 조립시, 사용시 등에 재조정해야 할 필요성이 없으며 보수가 용이하고 외형구조 또한 단순해지므로 초정밀주축에 사용하기에는 매우 실용적인 방식이다. 특히 구동계를 포함한 주축의 외형길이가 대폭 단축될 수 있으므로 이에 따른 Z축 안내테이블의 칫수도 짧아지게 되어 기계전체의 칫수 및 정도향상에도 잇점이 있다.

이 외에도 ②, ③의 방식에서의 진동, 발열의 전달을 차단하기 위한 방법으로 커플링과 구동축 사이에 보조축(sub-spindle)을 삽입하는 방식도 사용되고 있으며 그림 7의 주축구조는 그 대표적 예라고 할 수 있다.

3. 초정밀가공기용 안내면

3.1. 안내면의 요구성능

직진운동을 위한 안내면은 회전운동을 위한 주축과 함께 공작기계의 운동정도를 좌우하는 중요한 기계요소이다.

초정밀가공기에 있어서 안내면에 요구되어지는 특성으로는

- ① 스틱슬립(stick-slip) 등의 불연속한 작동이 없을 것
- ② pitching, rolling, yawing 등의 직진정도가 좋을 것
- ③ 실용상의 조건에 충분한 강성을 갖을 것
- ④ 진동의 발생이 없을 것
- ⑤ 위치결정정도 및 재현성이 좋을 것 등을 들 수 있다.

현재 일반적으로 사용되어지는 안내면의 종류로는 주축에서와 마찬가지로 동압(미끄럼), 구름, 유정압, 공기정압, 자기안내면 등이 있으며 강성이 낮아 아직 공작기계로의 응용이 곤란한 자기안

표 6) 안내형식에 따른 특성 비교

항 목	동압안내면	구름안내면	공기정압안내면	유정압안내면
운동정도	안정성이 결여 (틈새, 유막등에 의한 부상)	불규칙오차있음 (전동체의 영향)	정도가 높음 (평균화효과)	정도가 높음 (평균화효과)
부하용량	정밀한 용도에서 면압 0.5kg/cm ² 이하	hydrodynamic보 다 높으나 수명 제한이 있음	공급압력에 의해 제한있음	부하용량 큼 (공급압력, 침수 등을 조절하)
정강성	일정방향 하중에 대해 높음	일반적으로 높음	매우 낮음 (공기의 압축성)	매우 높음
동강성	마찰에 의한 감 쇠력이 강함	감쇠력은 작으나 강성으로 cover	감쇠력이 작고 동적하중에 약함	유점성에 의해 감쇠력이 크고 동강성이 우수
마찰력	경계윤활상태로 매우 큼	마찰계수 0.01 의 order	공기이므로 매우 적음	비교적 작음 (유점도에 의존)
위치제어	submicron까지는 어려움 저속시stickslip	submicron위치 결정 용이 (전동체 순환식 제외)	submicron제어 용이 구동계 성능이 중요	submicron제어 용이 구동계 성능이 중요

표 7) 정밀, 초정밀가공기에서의 안내면형식

제 작 사·기 관	모 델 명	안 내 면 형 식	기 중
Union Carbide	du Pont 2호기	공기정압	경면가공기
LLNL	LODTM	유정압(X), 공기정압(Z)	
Moore	M-18AG	구름안내(V-V형)	
Pneumo Precision	MSG-325	유정압(X,Z)	
豊田工機	AHP 30×25	유정압(X,Z)	
東芝機械	UFG-200P	공기정압(X), 동압(Z)	
西部電機	UPL-1	유정압(X,Z)	디스크가공기
不二越	NUP-FS	유정압(X,Z)	
豊田工機	AHP 50×32	유정압	
日立精工	DPL-400	공기정압	지그보어링
東芝機械	UDT-130B	공기정압	
SIP	Hydroptic6A	동압	지그연삭기
Moore	G-18NCCP-4	구름안내	평면연삭기
B & S	818A ₂	동압	원통연삭기
Studer	S30	동압	

내면을 제외한 안내형식들의 특성을 정리하면 표6과 같다.

표7은 대표적인 정밀, 초정밀가공기에 있어서의 안내면형식들을 조사한 것으로 초정밀가공기의 경우 대부분 유정압 또는 공기정압안내면을 채택하고 있으며 정밀연삭기에 있어서는 동압안내면이 많이 채택되어 있음을 볼 수 있다.

동압, 유정압, 공기정압안내면의 특성들을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

3.2. 동압안내면

동압안내면은 런던과학박물관에서 소장중인 레오나르도 다빈치의 나사절삭용 선반의 모형에서도 볼 수 있을 정도로 오랜 기간 사용되어온 안내형식으로 구조가 간단, 컴팩트하며, 강성이 높고, 정지시의 안정성 및 열적 안정성이 높으며, 가격이 낮다는 장점이 있다. 단점으로는 정, 동마찰계수간의 차가 크고 스틱슬립에 의해 위치결정정도의 한계가 있으며 저속시의 운동이 상대적으로 원활하지 못한 점등을 들 수 있다.

안내면의 재질로써는 경년변화, 강성, 가공성면

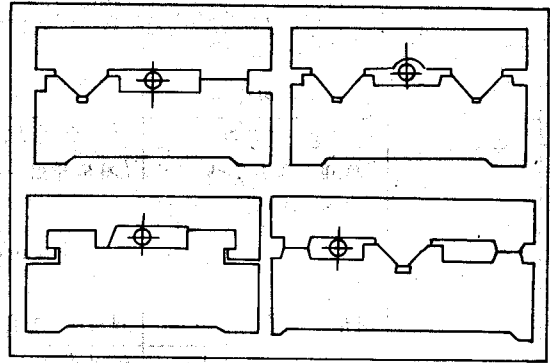


그림10) 동압안내면의 대표적 구조

에서 주철이 많이 이용되고 있다. 테이블(이동면)의 경우 베드(고정면)에 접하는 부분만큼은 마찰계수를 줄이기 위해 동합금, 페놀수지, 테프론계수지 등을 사용하는 경우도 있으나 고정도를 유지하기 위해서는 베드와 같은 주철을 사용하는 것이 좋다.

구조적인 면에서는 테이블의 단면에 대해 안내면의 미끄럼저항이 대칭인 형상으로 하는 것이 이동시 yawing에 의한 오차를 없애주는 이상적인 구조이며 미끄럼저항의 중심에 구동력의 작용점을

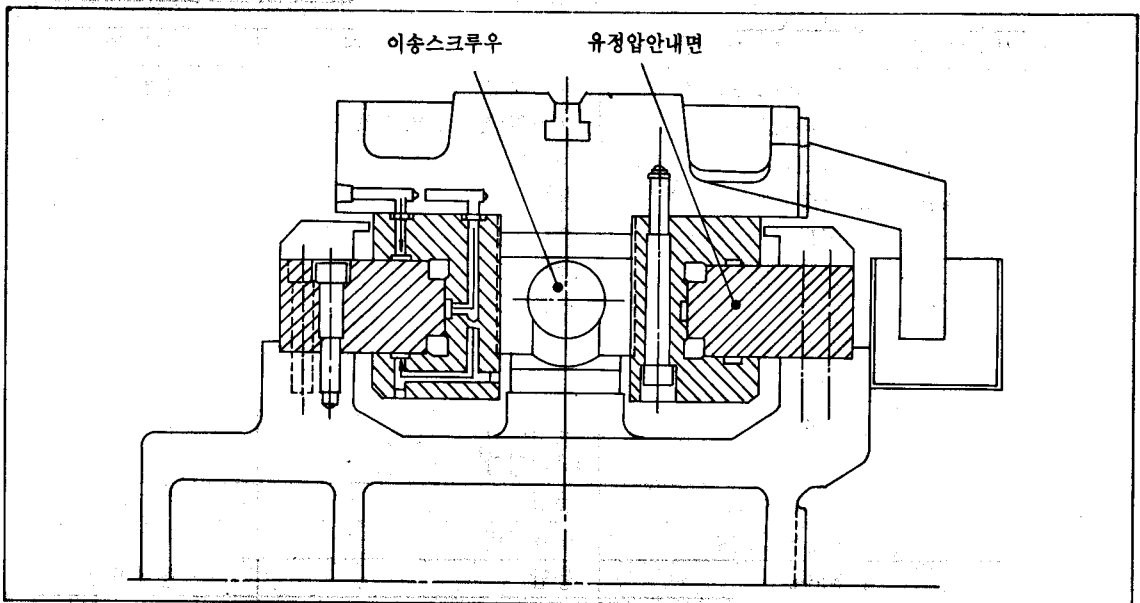


그림11) 유정압안내면의 대표적 구조 예

일치시키는 것도 중요하다. 그림10은 대표적인 동압안내면의 구조를 나타낸 것이다.

3.3. 유정압안내면

외부로 부터 가압된 윤활유를 이용하는 유정압안내면은 높은 부하용량, 강성, 감쇠성을 가지고 있어 큰 변동하중 및 고하중의 조건에서도 고정도를 유지할 수 있는 장점이 있다. 비교적 큰 간극에 의한 제작도 가능하므로 가공이 공기정압안내면에 비해 상대적으로 유리하며 윤활유의 경계윤활성능에 의해 비상시에도 손상이 적은 잇점도 지니고 있다. 단점으로는 윤활유공급 및 회수장치에 대한 제작비가 많이 들고 윤활유 온도상승에 의한 성능변화의 우려가 있으며 사용 온도 범위폭이 작다는 점을 들 수 있다. 특히 가공액과 윤활유를 완전히 분리할 필요가 있으며 이를 위해서는 복잡한 구조와 많은 별도의 제작 경비를 필요로 한다.

그림11은 유정압안내면의 대표적인 구조 예를 나타낸 것이다.

3.4. 공기정압안내면

공기정압안내면은 저장성, 저감쇠성 및 고정도 부품가공등의 단점에도 불구하고 공기막의 평균 화효과에 의해 고정도가 가능하고 스틱슬립 및 진동이 발생하기 어려우며 열적 안정성이 좋고 배기회로의 구성이나 주위오염의 염려가 없다는 등의 장점에 의해 초정밀가공기에 많이 이용되고 있다.

그림 12는 대표적인 구조의 예로써 a)의 평면구속형은 역학적 강도 및 강성이 크나 테이블의 이동에 의한 변형이 단점이며 b)의 반구속형은 역학적 강도는 처지나 변형이 적어 정도면에서 유리하다. c)의 원통구속형은 부품수가 적고 구조가 간단한 잇점은 있으나 부품정도가 기계가공에 의해 정해져 래핑등에 의한 정도향상이 어려우며 자중 및 테이블중량에 의한 변형도 크므로 큰 이동량이나 고정도의 안내면으로 사용하기는

어렵다. d)의 중량밸런스형은 테이블중량과 공기정압의 밸런스에 의해 베어링간극을 일정하게 유지시키는 방식으로 구조가 간단하고 부품의 고정도가공도 가능하나 강성, 부하용량이 작다는 단점이 있다.

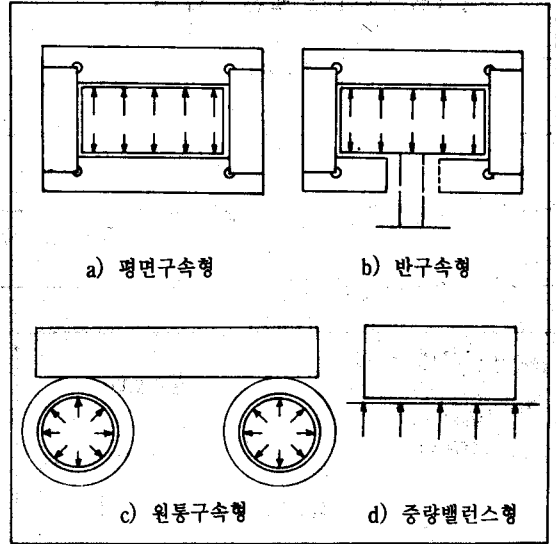


그림12) 공기정압안내면의 대표적 구조

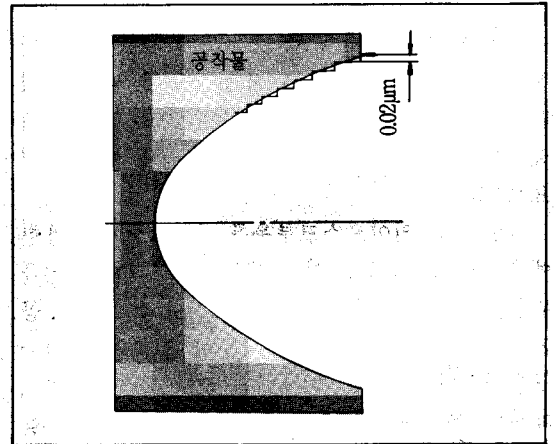


그림13) 비구면NC 가공에서의 인선의 궤적

3.5. 안내면 구동방식

그림 13은 비구면 NC가공에 있어서의 바이트날의 궤적을 나타낸 것으로 현재 이러한 경면의

표 8) 시판되는 공기안내면의 성능

제 작 사	국명	MODEL명	강성	V	진직도	V	부하용량 (kg)	TABLE SIZE (B×L)
			(kg/μm)	H	(μm/mm)	H		
CANON	일본	AS-	20		0.1/100		100	
			8		0.1/100			
NSK	일본	GLS300 B180	19		0.5/100		65	160×180
			12		0.5/100			
東芝機械	일본	LAB-230 /600I	11		0.18/600		40	190×230
			7		0.13/600			
不二越	일본	ASM200	15		0.5/100		100	180×A2/230
			15		0.5/100			

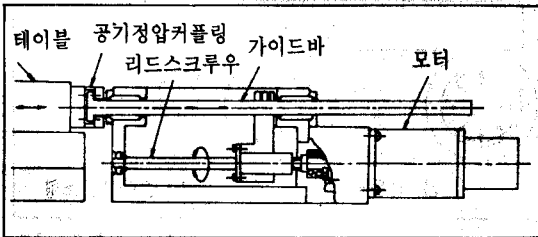


그림14) 초정밀위치결정을 위한 구동기구 예

비구면을 가공하기 위해 요구되어지는 위치제어 시스템의 최소분해능은 0.01μm/pulse에 달하고 있다. 이같은 정도를 위해서는 우선 안내면을 분해능이상으로 구동시켜 줄수 있는 구동기구를 필요로 한다.

그림 14는 리드스크루우를 구동기구로 사용한 예를 나타낸 것으로 이 외에도 초정밀위치결정을 위한 구동기구로는 볼스크루우, 정압스크루우, 공기스크루우 및 마찰구동기구등이 있으며 적절한 구동기구의 선택을 위해서는 기계의 요구정도, 제작의 용이성 및 cost등의 면이 고려되어야 할 것이다.

4. 맺음말

이상으로 초정밀가공기용 회전, 직선운동요소에 필요한 기술들에 대해 간략하게 살펴보았다. 현재까지의 기술수준을 종합해 볼 때 시판제품을

기준으로 주축은 0.05μm, 안내면은 0.03μm/100mm가 최고의 운동정도라고 할 수 있으며 미국 Union Carbide사의 POMA계획에 의하면 곧 그 정도는 주축 0.02μm, 안내면은 0.02μm/100mm에 까지 도달할 것이다. 이러한 운동정도는 정압베어링방식을 이용한 운동요소에 의해 주로 이루어진 것이며 아직까지 정압베어링 성능에 대한 개선에 여지가 남아 있다는 전문가들의 견해를 볼 때 운동정도의 나노미터(nanometer) 시대도 멀지 않다는 감이 있다.

참 고 문 헌

- [1] 超精密工作機械の構造・要素設計のポイント, 伊庭 剛二, 工作機械關聯技術者會議, SESSION A-1, 1986
- [2] 主軸構造と回傳精度の測定, 垣野 義昭, 工作機械 84-超精密加工, 大河出版, 1984
- [3] 機體軸受の諸問題と最新技術(1), 伊精 剛二, 機械の研究, 41-6, 1989
- [4] 機體軸受の諸問題と最新技術(2), 伊精 剛二, 機械の研究, 41-7, 1989
- [5] 超精密加工技術實用マニュアル, 小林 昭, 新技術開發センタ, 1985
- [6] 超精密加工マニュアル, 別冊應用機械工學, 大河出版, 1989