

No. DTN07-003

Daekhon Technical Note

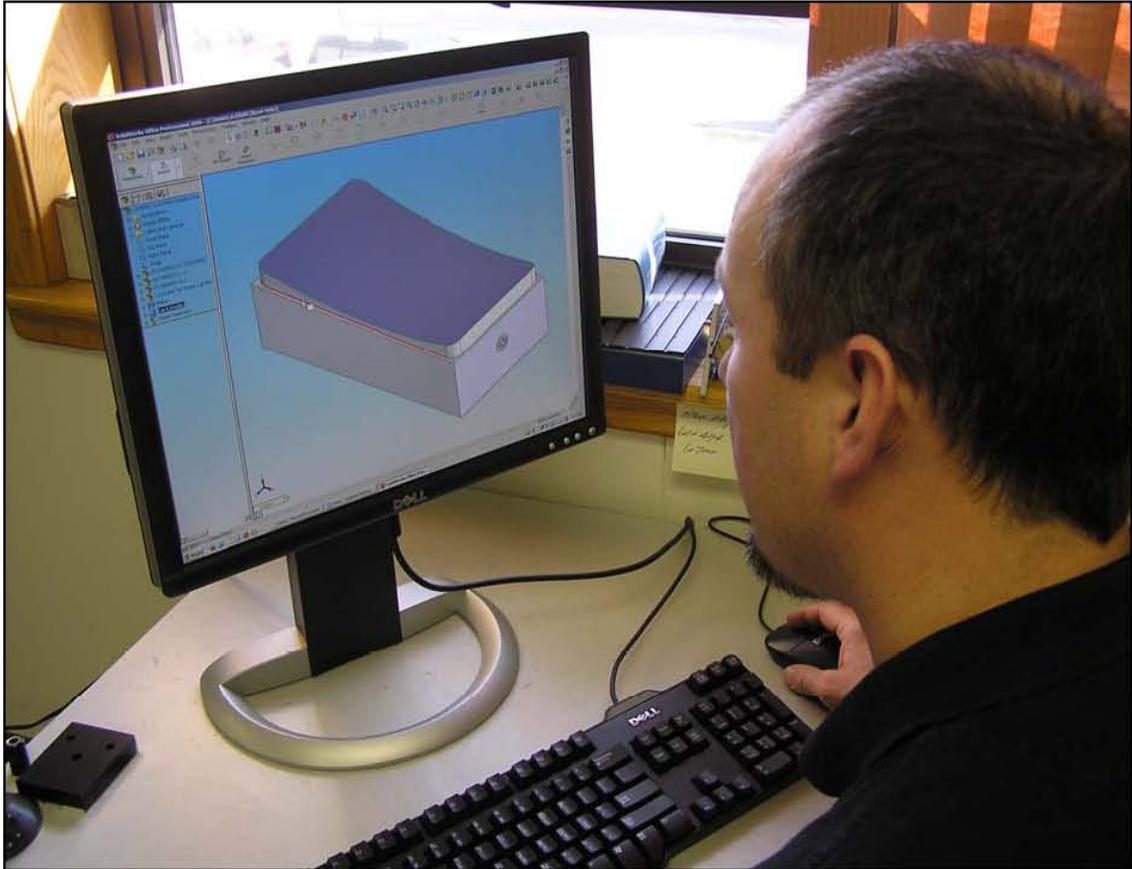
- 에어베어링 응용 및 설계 가이드 번역본 v3.0

목 차

1. 에어베어링의 이해
2. 에어베어링의 선정
3. 에어베어링 설계
4. 에어베어링 셋업 및 사용
5. 추가 정보

Technical Support Team
Daekhon Corporation

에어베어링 응용 및 설계 가이드



개정E판 - 2006년 1월

NEWWAY[®]
air bearings

목 차

제 1 장: 에어베어링의 이해	4
1. 개 요	4
2. 에어베어링이란 무엇인가?	5
3. 왜 에어베어링을 사용하는가?.....	6
마찰	7
마모	8
강성	9
부하용량	10
4. 에어베어링 기술의 종류.....	11
공기 동역학 베어링	11
공기 정역학 베어링	11
오리피스와 다공질 기술.....	12
5. 에어베어링 제품	15
평면베어링(퓌크).....	15
에어부싱	15
진공 예하중 베어링(VPLs).....	15
에어베어링 슬라이드	15
레이디얼 베어링	15
6. 에어베어링 응용분야	16
이미지 셋팅 산업기계.....	16
좌표측정기	16
측정장치	17
고속장치	17
초정밀 공작기계	17
리니어 스테이지	18
OEM	18
고객 프로젝트 및 테스트 지그.....	18
제 2 장: 에어베어링의 선정	19
7. 응용 분야에 대한 올바른 에어베어링 선정	19

제 3 장: 에어베어링 설계.....	21
8. 에어베어링 가이드	21
가이드면에 대한 고려.....	21
표면 처리	21
국부 평탄도	21
가이드 표면의 구멍	22
가이드 면의 이음	22
9. 강성 및 예하중.....	22
10. 에어베어링에 작용하는 하중.....	25
중력	25
적재하중 분포와 모빌리티(mobility).....	26
다른 에어베어링에 의한 예하중.....	26
동적 하중	27
제 4 장: 에어베어링 셋업 및 사용.....	28
11. 평면베어링.....	28
장착 및 조정	28
주 베어링 조정	29
예하중 베어링 조정	30
전형적인 구성	32
12. 진공 예하중 베어링.....	46
진공 예하중 에어베어링 기술.....	46
기구학 및 탄성 평균화.....	48
13. 에어 부상.....	50
에어 부상 설치	50
에어 부상 슬라이드 조립.....	51
전형적인 구성	53
14. 회전테이블.....	57
제 5 장: 추가 정보.....	59
15. 공기 공급	59
16. 유량 측정.....	60
17. 유량	61
18. 배관	61
19. 베어링 갭을 통한 공기 흐름.....	64
20. 공기 공급 조건.....	65

제 1 장: 에어베어링의 이해

1. 개 요

베어링 기술은 기계 기술자에 있어서 오래된 문제중의 하나이다. 지난 세기에 개발된 구름베어링은 전기 모터와 자동차 바퀴와 같은 응용분야에서 한계에 부딪친 평면베어링에 비해 혁명적인 발전이었다. 마찬가지로 오늘날 구름베어링도 반도체 제조, 고정밀 스캐닝, 고속장비와 같은 응용분야에서 기술적인 한계에 부딪치고 있다.

에어베어링(air bearing)은 베어링 설계에 있어 필연적인 다음 단계를 의미한다. 일반적으로 에어베어링은 지난 20 년 동안 좌표측정기에 실제로 사용이 되어왔다. 마찰과 마모가 거의 없고, 고속·고정도 특성 및 오일 윤활이 필요 없는 것과 같은 에어베어링의 많은 기술적인 잇점들이 오늘날 기계설계자에게는 강력한 장점이다. 그러나 제조의 난이성으로 인해 이러한 장점들을 충분히 이용하지 못해왔고 최근까지 상업적으로도 사용되지 못해왔다. 10 년 전에 창립된 뉴웨이정밀은 다공질 기술의 사용을 선도해왔고, 에어베어링을 견실하고, 사용하기 쉽고, 저렴한 기성품으로 이용할 수 있게 했다.

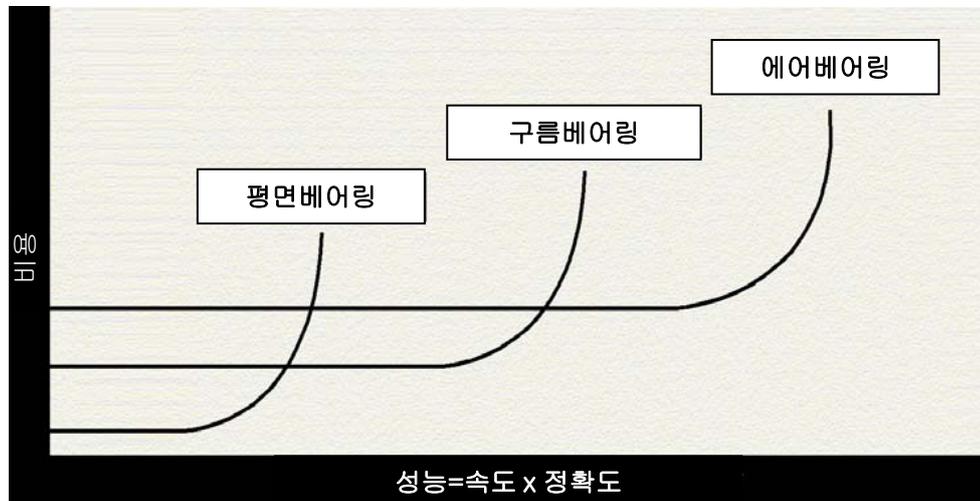


그림 1 - 베어링 성능 대 비용

이 가이드의 목적은 고등 응용 기술의 성공에 도움을 주는 상세한 정보뿐만 아니라 설계자가 처음에 에어베어링을 고려할 때 갖게 되는 공통적인 질문에 답변하는 것이다. 이 가이드는 에어베어링 제품을 상업적으로 이용할 수 있도록, 선정, 장착, 응용과 관련된 정보를 모은 최초의 자료로 생각된다.

2. 에어베어링이란 무엇인가?

접촉하는 구름 베어링과는 다르게, 에어베어링은 얇은 압축 공기막을 이용하여 접촉하고 있을 표면 사이에 ‘무마찰’ 하중베어링 접촉면이 형성되도록 해준다(그림 2). 에어베어링은 접촉하지 않으므로, 전통적으로 베어링과 관계된 마찰, 마모, 윤활처리 문제를 피할 수 있고 정밀 위치와 고속 응용분야에 뚜렷한 장점을 가진다.

에어베어링의 유체막은 베어링 표면에 공기 유량을 공급하여 베어링 갭(gap)을 형성시킴으로써 만들어진다. 유체막은 통상적으로 그림 2에 R_1 으로 표시된 것처럼 공기의 유량을 제한하는 오리피스(orifice)¹ 또는 다공질(porous media)²을 통해 만들어진다. 공기는 베어링 갭을 통해 일정하게 유출되지만, 제한조건(restriction)을 지나는 압축 공기의 유량이 갭을 통해 흐르는 유량과 일치하도록 제한조건을 설계한다. 이것이 베어링 아래 압력을 유지하고 사용하중을 지지하는 갭, 제한조건 R_2 이다. 만일 공기압이 제한조건(R_1) 없이 갭에 가해지면, 상승 높이는 보다 높아지고 공기 소비량이 증가되며, 강성(stiffness)³은 적절한 제한조건으로 만들어진 것보다 낮아진다. 이러한 제한조건을 에어베어링 보상이라고 한다. 이것은 특정한 응용분야에서 상승, 부하, 강성에 대해 베어링을 최적화시키는데 사용되고 차후에 더 자세히 기술될 것이다.

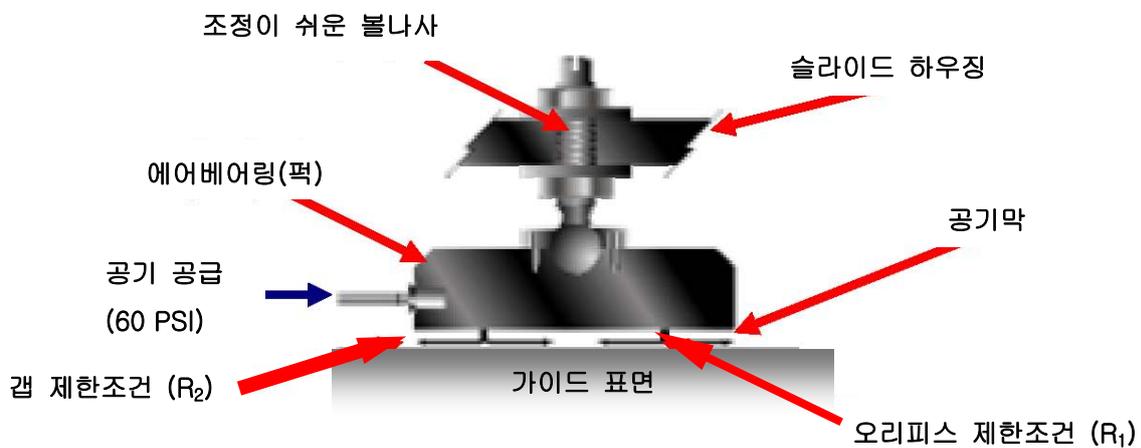


그림 2. - 평면 에어베어링

¹ orifice: 유량의 조절·측정 등에 사용되며, 가공하기 쉽게 보통 원형으로 만듦. 지름 D 인 유관(流管) 도중에 관의 지름 $d(D > d)$ 의 오리피스를 삽입하면, 그 직후에서 유속이 변화하여 압력이 떨어짐(베르누이의 정리). 오리피스의 바로 앞과 직후에서의 유체의 압력차를 검출함으로써 유량을 구할 수 있음.

² porous media: 재료 중에 기공(氣孔)이 많이 포함되어 있는 물질.

³ stiffness: 하중에 대한 변형 저항을 말하는 것으로, 이것은 가로 탄성 계수(또는 횡탄성 계수)와 세로 탄성 계수(또는 종탄성 계수)로 평가. 인장 강도와는 무관.

3. 왜 에어베어링을 사용하는가?

에어베어링은 구름베어링에 비해 장점들이 있으므로 좌표측정기, 정밀 공작기계, 반도체 웨이퍼 가공기, 그 밖에 클린룸(clean room), 고속정밀 위치 환경과 같은 응용분야에 채택되는 것은 당연하다. 에어베어링의 주요 장점들이 아래에 기술되어 있다. 설계 엔지니어의 특정 관심사 중의 몇 가지(마찰, 마모, 강성, 부하용량) 등은 더 자세히 기술된다.

無마찰...

정지 마찰이 없이 때문에 무한 분해능과 매우 높은 반복정밀도가 가능하다.

無마모...

무접촉은 가상적으로 마모가 없다는 것을 의미하며 결과적으로 기계성능이 일정하고 분진 발생이 적다.

직선운동...

구름베어링은 표면처리와 가이드 면의 불규칙성으로 인해 직접적인 영향을 받는다. 비접촉하는 에어베어링은 이 오차를 평균화한다.

조용하고 부드러운 작동...

롤러 또는 볼을 순환시키는 것은 경질 요소가 로딩(loading), 언로딩(unloading)되고 귀환관(return tube)에서 방향이 바뀔 때 노이즈(noise)와 진동을 발생시킨다. 이것은 특히 스캐너의 분해능에 두드러진 영향을 끼친다.

높은 감쇠...

유체막 베어링인 에어베어링은 높은 막감쇠(film damping) 효과를 가지므로 결과적으로 높은 동적 강성 및 뛰어난 제어성(controllability)을 가지게 된다.

오일 제거...

에어베어링은 오일 윤활을 사용하지 않으므로 오일과 관련된 문제들을 없앨 수 있다. 에어베어링은 양의 공기압이 분진을 밀어내기 때문에, 먼지가 많은 환경에서 (건조기의) 경로면을 건조하게 만들고 자동적으로 청정 상태를 유지한다. 반면 오일 윤활은 래핑(lapping)으로 인한 슬러리(slurry)⁴가 생긴다.

고속성...

볼 또는 롤러로 인한 슬립이 없으므로, 고속-고가속도가 가능하다.

⁴ slurry: 고체의 입도가 작고, 또한 고체 농도가 높은 진흙 모양인 물건의 총칭

마찰

특히, 정확하게 출발하고 정지하고자 할 경우에 마찰의 변화는 항상 정밀 위치결정 문제들의 핵심이 되어왔다. 이것은 평면베어링뿐만 아니라 구름베어링에서도 정(靜)마찰계수가 동(動)마찰계수보다 크기 때문이다. 즉, 다시 말해서 운동을 유지하는 것보다 운동을 발생시키는데 더 많은 힘이 필요하다는 것이다. 그래서 모터가 슬라이드를 밀기 위해 스크류(screw)를 돌릴 때 높은 정지 마찰로 인해 스크류는 비틀림 변형되어 에너지가 축적된다. 슬라이드가 움직이기 시작할 때 마찰은 감소되고 스크류는 비틀림 변형이 풀리면서 원하는 위치로 슬라이드를 움직인다. 이런 현상을 ‘부착-미끄럼(stick-slip)⁵’이라 하고 평면 운동 시스템에서 가장 두드러진다. 이것은 구름베어링과 폐루프 되먹임(closed-loop feedback)을 사용하는 기계에서 위치 결정(positioning) 또는 대역폭 (bandwidth)⁶ 문제를 발생시킬 수 있다.

구름베어링의 마찰은 정마찰계수와 동마찰계수의 차이가 평면베어링과 비교하여 10 배까지 감소되므로 오늘날重工작기계 슬라이드는 구름베어링을 사용하여 0.0001" (=0.0025mm) 이내로 위치시킬 수 있다. 그러나 구름베어링도 한계에 부딪치고 있다. 예를 들면, 전자 자본설비 산업의 몇몇 분야에서는 0.00001" (= 0.00025mm) 위치조차도 매우 정밀도가 떨어지는 것으로 간주된다. 구름베어링 제조회사는 ‘캘리포니아 맞춤(California Fit)’으로 알려진 필요조건을 만족시키기 위한 노력으로 (강성을 조정하는) 예하중(preload)을 감소시켜 왔으나, 예하중을 효과적으로 감소시키는 데에는 한계가 있었다.

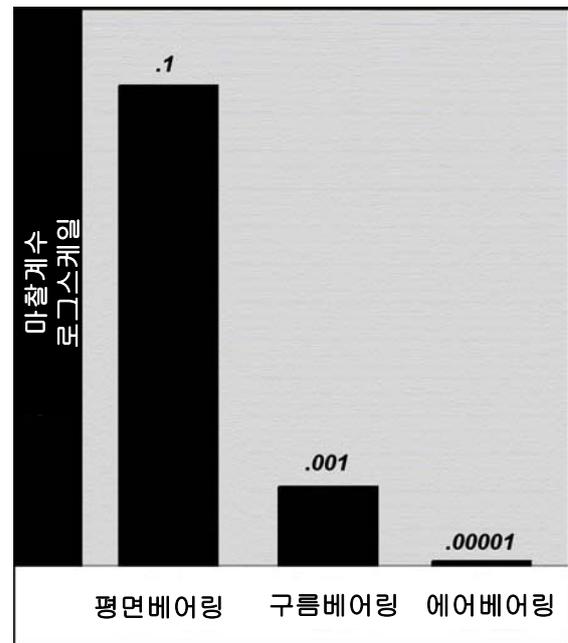


그림 3 - 마찰계수

에어베어링에서는 정지 및 동마찰계수 사이에 차이가 없다. 따라서 부착-미끄럼 문제는 완전히 배제된다. 에어베어링의 마찰은 운동에 기인한 공기

전단력의 함수이므로, 속도가 0 일 때는 이론적으로 운동 분해능이 무한대인 無마찰이 된다.

마찰은 효율성에 직접적인 영향을 미친다. 사실 초기 에어베어링 특허중의 하나는 수직 증기 구동 발생 터빈에 사용되었고 웨스팅하우스(Westinghouse)에 의해 출원된 것이다. 웨스팅하우스는 공

⁵ stick-slip: 두 접촉면을 미끄러지게 할 때 겉보기의 마찰력이 톱날 모양의 변동 특성을 나타낸다. 그 마찰력의 상승 부분에서 양 마찰면이 부착하여 어느 값(정마찰력)에 이른 다음 갑자기 양면이 미끄러지는 진동 특성을 나타내는 현상을 말한다.

⁶ bandwidth: 일반적으로 주파수 특성 곡선상의 최고 이득점으로부터 3dB 만큼 이득이 내려간 두 점 사이의 폭. 대역 필터의 통과 주파수 범위

기의 점성이 오일 점성보다 수 백배가 낮으므로 오일 전단력으로 인한 에너지 손실을 감소시킬 수 있다는 사실을 알고 있었다. 불행하게도 웨스팅하우스는 그 당시(1890년) 에어베어링을 작동하기 위해 필요한 고정밀, 대형 베어링 표면을 가공하기가 대단히 어려웠다. 오늘날 대형 터빈은 여전히 유체역학 베어링에 기초한 오일을 사용하나, 새롭게 시장에 출시된 마이크로 터빈의 상당수가 효율성 향상을 위해 공기역학 베어링 시스템을 채용하고 있다. 마찰은 또한 정밀도에도 영향을 미친다. 오래된 격언을 상기해보자. 정밀기계에서 3가지 중요한 오차의 원인은 무엇인가? 첫째도 열, 둘째도 열, 셋째도 열! 마찰은 열을 발생시키고, 열은 정밀 엔지니어에게는 최대의 적이다. 예를 들면, 스피너들이 가열될 때 축이 늘어난다. 열이 주축(headstock)으로 전도됨에 따라 팽창하게 되고, 회전 중심으로부터 멀어진다. 대부분의 경우, 에어베어링은 구름베어링 또는 평면베어링에 비해, 주어진 응용분야에서는 열을 상당히 적게 발생시킬 것이다. 이것은 에어베어링이 열을 발생시키지 않는다고 말하는 게 아니라, 상당한 열이 축정되기 전에 초당 100ft(≈30m) 이상의 상대 속도로 움직일 수 있다는 것이다

마모

설계 엔지니어에게 기계적인 마모는 또 다른 근심의 원인이다. 고등기계는 보다 빠르고 보다 높은 신뢰성이 요구된다. 사실 현재 시판되는 기계들은 연간 10억 번을 움직이도록 만들어진다. 베어링의 수명을 평가하기 위해 속도, 가속도, 로딩부하 계산을 하도록 엔지니어를 채용하여 기계의 가속 테스트를 수행하는 것은 비실용적이다. 이것은 비접촉 특성으로 가진 에어베어링에서는 피할 수 있는 문제이다. 속도, 가속도, 하중은 마모 요소가 아니며 에어베어링의 수명에 영향을 미치지 못한다.

에어베어링에 있어 마모의 형태는 부식이므로 공기의 청정도가 가장 큰 영향을 준다. 에어베어링은 전통적인 마모의 개념과는 다르므로 연간 10억 사이클을 10년 동안 작동한 후에도 최초의 성능과 똑같은 성능을 정확하게 발휘할 것이다. 이것은 기계 신뢰성에 대한 큰 장점이다. 마모가 제거되었다고 고객에게 말하는 장비업체에 있어 통계적 공정관리에 영향을 미칠 수 있는 변수는 경쟁할 수 있는 장점이 될 것이다. 에어베어링의 비접촉 특성으로 인하여 마모로 인해 발생하는 부스러기가 없고 오일 윤활이 필요하지 않다는 것은 에어베어링이 클린룸, 의학, 조제학, 식품가공환경에 사용하는데 더할 나위 없이 적당하다는 것이다. 또한 에어베어링은 부식성이 강한 소금 또는 설탕 공장과 같이 건조하고 더러운 환경에서 뛰어난 특성을 발휘한다. 이런 환경에서는 오일 윤활은 래핑으로 인한 슬러리가 생긴다. 에어베어링은 일정한 공기가 베어링에서 분출되므로 가볍고 건조한 분진을 날려버리는 자기정화 효과를 가진다.

강성

에어베어링에 대한 일반적인 오해는 정밀 응용분야에서 요구되는 강성을 가지지 못한다는 것이다. 하지만 실제로 60psi(≒400kPa)에서 작동하는 직경 6"(≒150mm) 베어링은 1000lbf(≒450kgf)의 부하를 가진 상태에서 2,000,000 lbf/in(≒2000kgf/m)보다 큰 강성을 가진다. 다시 말하면 파운드 당 50 만 분의 1 인치 보다 적은 변형이 발생한다는 것이다. 어떠한 영역의 부하에서 베어링을 테스트하고 공기 갭에 대한 변화를 측정하여, 그림 4 에서 보여지는 것과 같은 강성선도를 만들 수 있다. 기울기는 선형이 아니며 막이 얇아 짐에 따라 강성이 증가한다는 점에 주목해야 한다. 압력과 표면적은 모두 강성에 비례적으로 영향을 미치나 에어베어링 강성에 있어서 가장 중요한 인자는 보상의 개념과 보상을 사용하는 것이다.

보상은 공기 갭 안의 공기 유량을 제어하는 방식이고 에어베어링 강성에 대한 진정한 해답이다. 보상의 목적은 갭 그 자체를 제한하기에 앞서 공기량을 제한하는 것이다. 압력이 베어링 아래에 남아있지 않으면 공기 갭은 제한되어야 하고 대신 대기압과 평형을 이루어야 한다. 그러나 강성을 주는 공기 갭 안의 공기를 어떻게 제한하여 생성되는 압력을 유지할 수 있는가? 60psi(≒400kPa) 압력으로 오리피스를 통하여 흐르는 유동이 베어링 상에 150lb(≒68 kg) 부하를 가지고 300μin(≒0.08mm) 상승하여 움직이도록 된 갭을 통해 흐르는 유동과 같은 경우를 생각해 보자. 직경 2.5"(≒68.5mm) 베어링은 거의 5in²(≒4000mm²)의 면적을 가지므로 베어링 면 아래의 평균 압력은 30psi(≒200kPa)가 될 것이다. 부하가 200lb(≒1380kPa)로 증가한다고 가정해 보자. 이것은 에어베어링 아래의 평균압력을 증가시키고 공기 갭은 200μin(≒ 0.05mm)로 압축된다. 축소된 갭은 제한조건을 증가시키고 유동이 감소된다. 오리피스에 의해 억제되어 비축된 압력은 에어베어링에 강성을 주는 복원력을 발생시켜 갭에 있는 압력을 증가시키게 된다

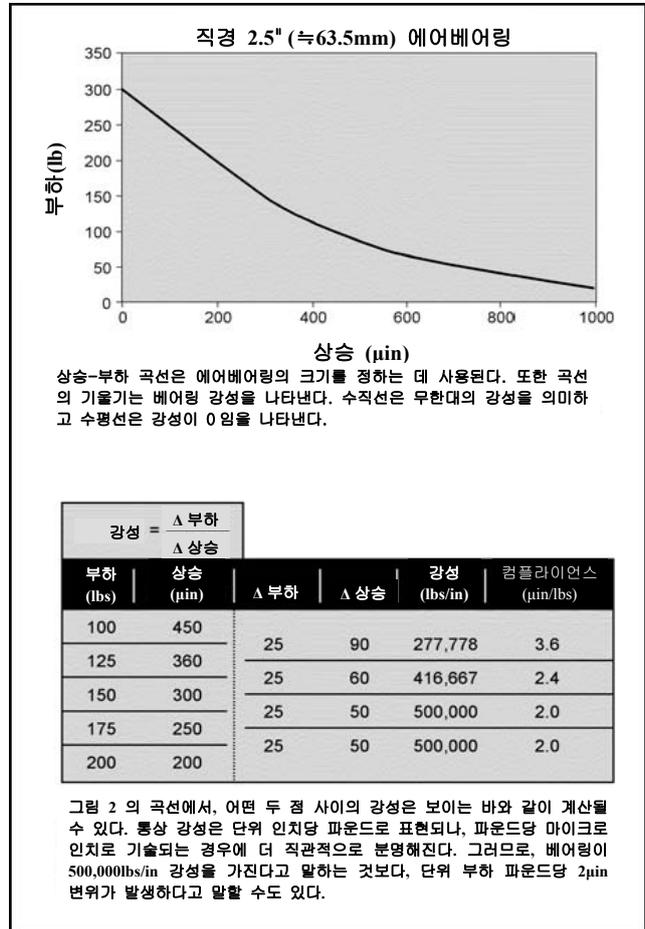


그림 4-에어베어링 강성

부하용량

화강암 표면 위의
60 psi 평면에어베어링

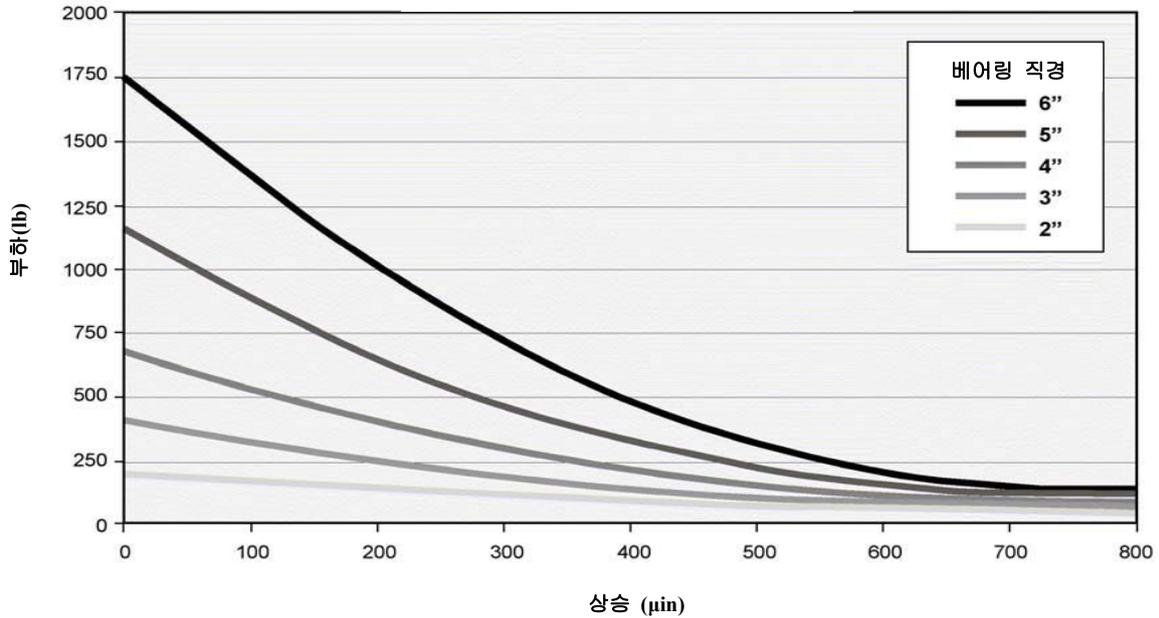


그림 5 -상승-부하 곡선

상기한 것로부터 보상은 강성과 안정성을 위한 부하용량(load capacity)의 절충이라는 것을 알 수 있다. 보상이 없을 경우에 베어링의 이론적 최대부하용량은 표면적과 입력되는 압력의 곱으로 기술될 수 있다. 이 값과 같은 부하는 베어링을 착지시킬 것이다.

에어베어링은 베어링 모서리 주위에 누출이 있기 때문에 전체 표면에 대해 같은 압력을 형성하지 못하고 실제로는 완전히 이론적으로 부하를 움직이지 못한다. 오리피스로부터 분출된 공기는 오리피스로 부터 이동함에 따라 압력 곡선으로 사상(mapping)될 수 있는 갭에서의 압력 구배 (gradient)⁷를 발생시키고 갭을 통해 팽창한다(그림 5). 이 압력 곡선은 오리피스와 홈의 수량과 위치에 의해 영향을 받고 특히 베어링 하부에 가장 일정한 압력분포를 만들어 주는 다공질에 의한 보상과 같이 사용된 보상 타입에 의해 영향을 받는다.

베어링 강성을 증가시키기 위해 보상을 할 때, 베어링 하부의 평균 압력은 보통 공급 압력의 약 50%이므로 에어베어링은 일반적으로 공급 압력에 대해 50%의 효율을 가진 것으로 생각 할 수 있다. 이 경험 법칙은 베어링 모양과 크기에 따라 수정된다. 작고 좁은 베어링과 같이 베어링 모서리 부근의 면적 퍼센트가 많은 베어링은 보다 낮은 효율성을 가질 것이다. 반면 보다 큰 베어링은 보다 높은 효율성을 가질 것이다. 이것이 보다 큰 베어링보다 보다 작은 베어링을 만들기 위해 더

⁷ gradient: 어떤 기준이 되는 선 혹은 면에 대한 기울기를 말한다.

많이 도전하는 이유중의 하나이다.

비록 에어베어링의 부하용량이 구름베어링에 비해 작지만, 공작기계에서 전통적인 평면베어링과 같은 단위 면적당 같은 부하를 움직일 수 있다. 오늘날 고속, 경량 기계 응용분야에 있어서는 이것으로 충분하다.

$$\text{표면적} \times \text{공급 압력} = \text{접지력(grounding force)}$$

$$\text{표면적} \times \text{공급 압력} \times \text{효율} = \text{부하 용량}$$

4. 에어베어링 기술의 종류

정밀 에어베어링은 공기동역학(aerodynamic) 베어링과 공기정역학(aerostatic) 베어링, 2 가지 기본 타입이 있다:

공기 동역학 베어링

공기동역학 베어링은 통상 베어링 표면 사이의 상대운동과 베어링 면 사이 공기를 빨아들이기 위한 몇 가지 형태의 나선형 홈이 있다. 이런 형태의 베어링 동작은 자동차가 고속으로 물 웅덩이를 지날 때 발생하는 하이드로플래닝(hydroplaning)⁸과 매우 유사하다. 저속에서 타이어는 길 위에 있는 물을 잘라낼 수 있다. 바로 이런 방식으로, 공기동역학 베어링은 운동이 없거나 운동이 베어링 표면에 공기막을 발생시킬 정도로 빠르지 않아 접촉하게 될 때, 표면 사이에 상대 운동이 필요하다. 공기동역학 베어링은 종종 포일 베어링 (foil bearing)⁹ 또는 자동 베어링으로 불린다. 이런 타입 베어링의 예로는 회전디스크 위를 떠다니는 읽기/쓰기 헤드(read/write head), 크랭크 샤프트 저널 (crank shaft journal), 캠샤프트 저널(cam shaft journal), 전기 발생 터빈을 위한 스러스트 베어링(thrust bearing)이 있다.

공기 정역학 베어링

공기 정역학 베어링은 외부에서 압축 공기를 제공하는 공급원이 필요하다. 이 공기 압력이 정밀 홈, 홈, 단차, 다공질 보상 기술에 의해 베어링 표면 사이에 공급된다. 공기 정역학 베어링은 압축 공기 공급원을 사용하기 때문에, 베어링 표면 사이에 상대 운동이 없어도 공기 갭을 유지 할 수 있다.

⁸ hydroplaning: 물기 있는 길을 고속으로 달리는 차가 옆으로 미끄러지는 현상

⁹ foil bearing: 초고속 회전용으로 개발된 것으로 장력형(tensioned-foil)과 굽힘형(spirally-foil)이 있다.

오리피스와 다공질 기술

에어베어링은 통상 ‘오리피스’ 또는 ‘다공질’ 베어링으로 분류된다. 오리피스 베어링에서의 압축 공기는 작고 정확한 크기로 가공된 구멍을 통해 베어링 표면으로 공급된다. 이 개념은 공기 하키 테이블 게임과 유사하나 테이블 보다 펙(puck)에 구멍이 있다고 할 수 있다. 다공질 에어베어링은 공기가 베어링 전체 표면을 통해 공급된다는 점에서 매우 다르다(그림 6). 다공질은 표면에 수 백만 개의 구멍을 가진 오리피스 베어링과 같은 방식으로 기류를 제어한다.

넓은 의미에서 말하자면, 에어베어링에서 보상 효과를 달성하기 위한 두 가지 기술이 있다. 오리피스 보상법은 전통적으로 가장 널리 사용되는 방법이나, 다공질 표면 보상법은 많은 장점과 유효성의 증가로 인하여 빠르게 알려지고 있는 보상 방법이다.

전통적인 오리피스 보상법에서는 정확한 크기로 가공된 오리피스가 전략적으로 베어링 상에 위치되고, 때로는 베어링 표면에 압축 공기가 고르게 분포되도록 흡과 결합되기도 한다.

만일 베어링 표면이 흡 또는 오리피스 근처를 가로 질러 굽혀지게 되면, 새어 나오는 공기의 체적은 오리피스가 공급할 수 있는 체적보다 커지게 되고 정상적인 공기 공급 압력에서도 베어링이 충돌을 일으키는 원인이 된다. 다공질 에어베어링은 다공질에 있는 수 백만 개의 구멍을 통해 전체 베어링 표면의 모든 공기량을 제어한다. 이런 이유로 유량 흐름이 방해 받지 않고 심하게 스크래치가 발생한 후에서 여전히 상승할 수 있다.

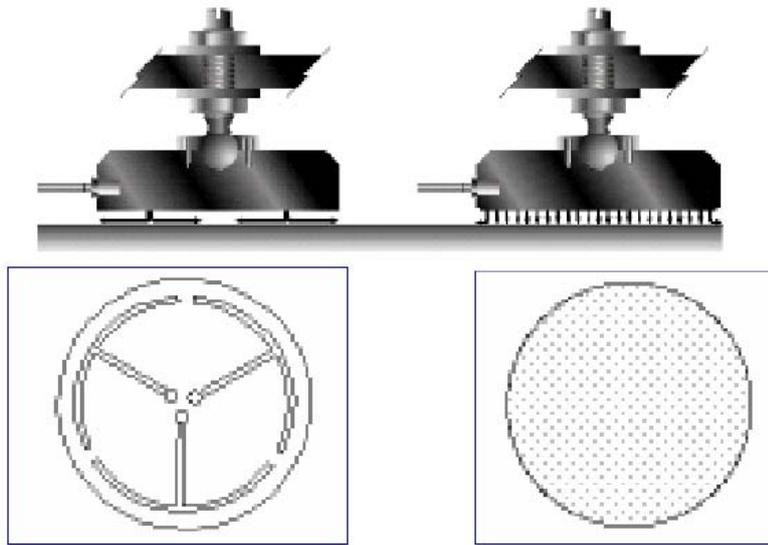


그림 6 - 다공질

정상 동작 상태에서조차, 오리피스 내에 있는 공기는 오리피스 또는 흡에서 팽창할 때 압력이 손실되고 공기 갭에서 압력 구배를 만들어 낸다. 다공질 에어베어링에서는 공기압이 전표면에 거의 균일하게 유지되므로 문제가 되지 않는다(그림 7 을 보시오).

상승과 붕괴

접지될 때, 평면 오리피스 베어링은 단지 초기 상승력을 만들 수 있는 오리피스(와 공기 분포 홈) 면적을 가지므로 오리피스 타입 에어베어링에 예하중을 줄 수 있는 능력은 제한된다. 다공질 에어베어링은 접지될 때도 전면에서 대해 공기압력을 줄 수 있다.



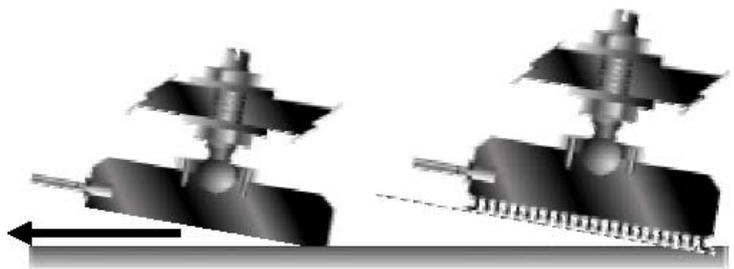
접지될 때, 오리피스와 홈의 면적은 단지 접지될 때, 전체 표면에 있는 수 백만 상승력에 기여한다. 갭은 압력을 분포시 개의 구멍들은 갭 또는 유량이 없이도 키기 위한 유량을 만드는데 필요하다. 전면에 상승력을 준다.

그림 8-오리피스 대 다공질

피치 모멘트 강성

개별 베어링의 피치 모멘트 강성 (pitch stiffness moment)을 비교할 때, 다공질과 오리피스 에어베어링을 어떻게 구별하는가? 오리피스 베어링은 베어링 전체 표면에 흐르는 유량에 의존하므로 갭에서의 각도 변화, 즉; 갭의 한 면이 커지고 다른 면이 작아질 경우, 불안정한 상황이 발생할 것이다. 이것은 유량이 가장 많이 필요한 면적(작은 갭)으로부터 최소 저항(큰 갭)의 통로로 이동하므로 유량이 급격하게 압력을 손실하기 때문이다. 반면 다공질 베어링은 작은 갭 면적으로부터 나오는 압력을 유지한다. 이것이 다공질 베어링에 보다 높은 전복모멘트(tilt moment)¹⁰ 용량 및 강성을 준다.

그림 9- 피치 모멘트 강성



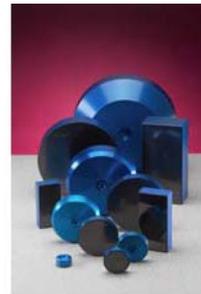
¹⁰ tilt moment: 스크롤 압축기의 전복 모멘트는 가스력과 밀봉력의 벡터합 및 저널 베어링의 반력에 의해 주로 발생하며, 이는 트러스트 베어링 반력에 의해 발생하는 복원 모멘트에 의하여 상쇄된다. 그러나 이 과정에서 마찰저항의 증가, 금속간의 직접 접촉에 의한 마모, 불안정적인 압축을 수행하는 등 여러 불리한 여건이 조성된다.

5. 에어베어링 제품

이용할 수 있는 대부분의 에어베어링은 5 종류이다. 각 에어베어링 제품의 선정, 장착, 구성을 자세히 서술하고 이 제품들의 조작에 대한 응용 안내는 다음 절에서 다룬다.

평면베어링(떡)

평면베어링은 원형 또는 사각형 형태이고 일반적으로 볼나사 (threaded ball screw)를 이용하여 장착된다. 또한 특히 출원된 진공 반복 처리(vacuum replication process)로 적당한 곳에 접착된다.



에어부싱

에어부싱(air bushing)은 에어베어링 기술을 이용한 방법 중에 가장 고가의 방법이다. 에어부싱은 표준 샤프트 크기에 맞추어 설계되고 사용되는 부싱의 직접적인 대체품으로서 사용될 수 있다.



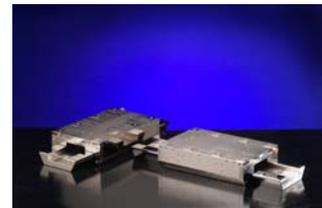
진공 예하중 베어링(VPLs)

진공 예하중 베어링(VPLs)은 평면 에어베어링과 유사하나, 가이드 표면에 대한 베어링의 예하중으로 진공을 이용한다



에어베어링 슬라이드

에어베어링 슬라이드는 평면패드 에어베어링 기술을 이용한 슬라이드 조립품을 에어베어링 슬라이드 팩키지(package)로 컴팩트하게 통합한 제품이다.



레이디얼 베어링

레이디얼 베어링(radial bearing)¹¹은 매우 큰 회전베어링 응용분야에 이상적인 베어링이고 에어베어링의 모든 장점인 무마찰, 무마모, 무윤활, 무소음을 제공한다.



¹¹ radial bearing: 미끄럼 베어링(sliding bearing) 및 구름 베어링(rolling bearing)에 있어서 회전축에 수직으로 하중을 받는 경우에 사용하는 베어링.

6. 에어베어링 응용분야

뉴웨이® 에어베어링은 좌표측정기, 정밀 공작기계, 반도체 웨이퍼 공정, 의료기기, 광학 렌즈 제작기, 디지털 프린터, 식각(Lithography)¹², 정밀측정기, 다이아몬드 선반, 재료시험기, 결정 인상(Crystal pulling)¹³, 스피들, 마찰 테스트 등을 포함하는 여러 가지 응용 분야에 사용된다.

뉴웨이® 에어베어링은 아래에 언급된 여러 가지 산업 및 시장에 뛰어난 장점을 제공한다.

이미지 셋팅 산업기계

제판(prepress) 산업에는 CTP¹⁴(computer to plate) 및 고해상 스캐닝 기계들이 포함된다. 이 기계들은 내부 드럼의 중심을 회전시키는 고속 회전 광학을 채택한 기계들이다. 레이저 빔(beam)은 드럼의 내경을 향하고, 렌즈에 반사된다. 에어베어링은 회전축에 대해 중요하고, 스피들을 가이드의 중심으로 이동시킨다. 피치(pitch) 및 요(yaw) 오차는 아베의 원리(Abbe's principle)¹⁵에 의해 렌즈로부터 내부 드럼까지 증폭된다. 에어베어링은 구부러진 이미지를 만드는 피치 및 요 오차를 최소화하는데 사용된다.

좌표측정기

대부분의 좌표측정기들(CMMs)은 무한 분해능이 필요하기 때문에 에어베어링으로 제작된다. 에어베어링은 실제로 가압막(pressurized film) 위를 떠다니기 때문에 물리적인 접촉이 없다. 이것은 단지 분자의 전단력 만이 마찰을 발생시킨다는 의미이다. 기동 시 마찰의 정지 및 동마찰계수는 동일하고 부착-미끄럼의 영향이 없다. 이것은 프로브(probe)를 트리거(trigger)¹⁶ 할 때 로스트 모션(lost motion)¹⁷ 및 반전 오차(reversal error)를 최소화 한다. 에어베어링은 구름베어링보다 더 반복성이 뛰

¹² Lithography: 일정한 빛에 민감한 재료로 만들어진 필름이나 액체(이를 photoresist 라 부름)를 일종의 mask 를 투과시켜 형상물을 만들어내는 것.

¹³ Crystal pulling: 초크랄스키법(Czochralski Method) 라고 부르며, 용융점이 높고, 정밀산업에 이용되는 고순도 결정을 만들 때 사용되고 양질의 결정을 성장시키는데 유리한 방법.

¹⁴ CTP(computer to plate): 직접 인쇄판을 만들어서 뽑아내는 것. 탁상 출판(DTP)에서는 일반적으로 인쇄용 필름을 뽑아낼 때까지는 하는 것이 통례였으나 CTP 에서는 이러한 필름 작업을 생략하고 직접 인쇄판을 뽑을 수 있음. 오프셋 인쇄에서는 출판물의 원래 크기의 제판 파일을 만들고 감광제를 씌운 알루미늄판에 노광(露光)시켜 인쇄기의 인쇄판을 만든다. 그러나 CTP 에서는 필름을 사용한 노광 공정이 생략되기 때문에 좀 더 정확한 디지털 데이터를 반영할 수 있어서 설비나 보관 장소가 필요 없는 이점이 있음.

¹⁵ Abbe's principle: 「측정기에서 표준자의 눈금면과 측정물을 동일 직선상에 배치한 구조로 하면 측정 오차가 작다」는 원리.

¹⁶ trigger: 펄스 회로를 작동시키기 위하여 가하는 펄스.

¹⁷ lost motion: 위치 결정은 좌우, 상하 어느 쪽에서든지 할 수 있으나 한 쪽을 정의 방향, 다른 쪽을 부의 방향이라 정했을 때, 어떤 위치에서의 정의 방향에서 위치 결정을 했을 경우와 부의 방향에서 위치 결정을 했을 경우에 생기는 양 정지 위치의 차.

어나고 부드럽기 때문에 오차를 보정하는 것이 더 효과적이다. 이것은 기계적으로 무한 운동 분해 능이 가능하게 한다(이것은 제어 엔지니어에게는 어려운 문제이다).

측정장치

많은 인장 및 마찰 측정기는 구름 베어링에서 발생하는 마찰에 인한 영향을 받을 수 있다. 또한 베어링에서 발생하는 마모는 결과적으로 테스트 과정에서 불일치(inconsistency)를 발생시킬 수 있다. 이런 이유로 대부분의 정밀 마찰 측정기는 기계적인 접촉 마찰을 없애기 위해 에어베어링을 사용한다. 많은 측정기계들은 매우 정밀한 힘제어(force control)가 필요하다. 마찰의 제거는 측정기기의 분해능을 엄청나게 증가시킨다. (다른 발진 형태의 측정기인) 피로(fatigue)¹⁸ 측정기는 구름베어링으로 인해 있어서 프레팅(fretting)¹⁹이 발생하게 된다. 비접촉으로 인해, 에어베어링은 짧은 행정 응용 분야에서 고주파에 대한 영향이 적다.

고속장치

오늘날 기계는 구동 요소가 연간 10 억 사이클만큼 순환할 수 있도록 설계된다. 그러한 기계에 대한 가속 수명 시험을 수행하는 것은 합리적이지 못하다. 또 다른 대안은 구름베어링에서 에어베어링으로 베어링 기술 변화에 의해 마모 형태를 전환하는 것이다. 에어베어링에서 베어링 주행 속도 또는 거리는 마모에 영향을 미치지 못한다. 에어베어링에서 마모의 형태는 부식이므로 베어링이 얼마만큼 지속될 것인지 결정하는 요인은 주입되는 공기이다. 상대적으로 더러운 환경에서 사용된다고 하더라도 에어베어링의 계산 수명은 연간 10 억 사이클을 움직이던지, 정지한 상태로 있던지, 관계없이 수세기로 계산된다. 동마찰계수는 속도에 따라 증가하며 초당 20m 이상의 속도에서는 열문제가 영향을 미칠 것이나 회전 응용 분야로 한정된다.

초정밀 공작기계

세계에서 가장 정밀한 공작기계의 대부분은 에어베어링 기술을 채용하고 있다. 정지 마찰계수가 0 인 것은 콘투어링(contouring)²⁰ 응용 분야에서 스테이지가 반전하는 동안 일정하지 못한 성능을

¹⁸ fatigue: 재료는 정하중에서 충분한 강도를 지니고 있더라도 반복 하중이나 교번 하중을 받게 되면 그 하중이 작더라도 마침내 파괴를 일으키게 되는데, 이러한 현상을 피로라 함. 또 시간적으로 변동하는 응력 하에서 생기는 재료의 파괴를 피로 파괴(fatigue fracture)라고 함.

¹⁹ fretting: 2 개의 접촉면에 발생하는 마모현상이며, 기계 및 구조물이 진동과 미소진폭의 떨림을 받는 것이 원인임 일반적으로 강하게 체결된 기계 구조물의 접촉면들이 극히 미소한 진폭의 반복 상대운동을 일으킬 때 발생. 일반 반복하중에 의한 피로에 이러한 상대 슬립에 의한 프레팅이 더해지면 피로강도는 현저하게 저하되는데 이러한 현상을 프레팅 피로라고 함.

²⁰ contouring: 「윤곽, 외형」을 말하며 「콘투어링」이란 자유 곡면을 갖는 부품의 윤곽 형상을 측정하여

나타낼 여지가 있다. 스테이지 운동에서 매우 정밀한 속도제어 및 섭동(Perturbation)²¹의 제거는 앙스트롬(angstrom)²² 레벨로 측정되는 광학적 품질의 표면을 다듬질하는 회전가공이 가능하게 한다. 가공된 부품들의 기하학적 오차는 몇 백만 분의 1 인치이다.

리니어 스테이지

에어베어링의 장점, 특히 다공질 에어베어링 기술은 고성능 리니어 스테이지(linear stage)에 적용된다. 뉴웨이® 에어베어링 모듈은 초정밀, 무마찰 스테이지의 설계가 가능하도록 해주며 저렴하고 사용하기 쉬운 표준 규격품으로 제작된다

OEM

에어베어링은 OEM 정밀기계 응용분야에서도 볼 수 있다. OEM 으로 완비된 리니어 스테이지를 기계 장치에 통합시키거나 모듈화된 에어베어링 제품을 이용하여 스테이지를 만들 수 있다

고객 프로젝트 및 테스트 지그

에어베어링 기술이 과거 주문형 프로젝트의 범위를 넘어섰다고 생각했다면 다시 고려한다. 뉴웨이 만이 당신 회사의 기계, 테스트 장치 또는 주문형 측정 응용 분야에 쉽게 통합될 수 있는 표준화되고 모듈화된 에어베어링 제품을 제공할 수 있는 회사이다. 재고로 확보되어 있는 평면베어링, 에어베어링, 진공 예하중 베어링, 에어베어링 슬라이드의 폭 넓은 선택으로 가장 작은 프로젝트에서도 이용 가능한 것이 다공질 에어베어링의 장점이다. 에어베어링의 무마찰 특성은 보다 정밀한 운동 분해능과 구름베어링에서 필요한 것보다 상당히 적은 힘으로 구동할 수 있다는 것이다.

수치화하는 것을 말함.

²¹ perturbation: 행성의 궤도는 태양의 인력만 생각하면 타원이 되지만, 다른 행성으로부터도 힘을 받고 있으므로 엄밀하게 타원은 아니다. 이렇게 행성의 궤도가 다른 천체의 힘에 의해 정상적인 타원에서 어긋나는 것을 말함.

²² angstrom: 약호 Å 또는 Å. $1 \text{ Å} = 10^{-8} \text{ cm}$ 임. 빛의 파장이나 물질 내의 원자간 거리 등을 나타내는데 쓰임.

제 2 장: 에어베어링의 선택

7. 응용 분야에 대한 올바른 에어베어링 선택

다음 2 페이지의 도표는 적용하는 응용 분야에 최고로 적당한 에어베어링 선택을 위해 사용될 수 있고, 에어베어링 성능에 대한 작동 환경의 영향을 알 수 있다.

에어베어링 제품 선정표

	평면 패드	부싱	VPLs	스테이지
비용	가장 보편적으로 사용되는 에어베어링 스테이지의 형태. 패드와 스테이지 구조물은 가격이 저렴하다. 가이드는 더 비싼 부품이다. 베어링의 수량은 크고 복잡한 응용분야에서는 추가될 수 있다.	최고로 비싼 에어베어링 시스템. 주로 원형 샤프트가 사용된다. 스테이지를 단일 운동축으로 제한하기 위해서는 단지 3개의 부싱이 필요하다.	단일 평면상에 VPLs를 사용하는 것은 저렴한 비용으로 X, Y 운동을 만들 수 있다. 그러나, VPLs는 평면 패드 보다 복잡하고 크므로 비용이 증가한다. VPLs는 비용이 증가될 수 있는 장착 구조이고, 장착 비용을 감소시키기 위해 특허 출원된 공정으로 적당한 위치에 접합될 수 있다.	에어 스테이지는 가이드에 통합되고 맞추어진 에어베어링으로 만들어진다. 이것은 고객을 위해 조립, 물품, 구매품 리스트를 최소화하나, 비용이 증가할 것이다.
조립	부품을 장착하기에 가장 조립이 쉽고 비용이 저렴하다. 나사를 이용하여 조정이 쉽다.	조립이 쉽다. “O”링은 자동으로 조정된다. 장착 부품은 고객에게 쉽게 제공되거나 뉴웨이로부터 구매할 수 있다.	VPL 시스템은 조립에 더 신경을 써야 한다. 대부분의 휨 설계(flexure design)에는 다소 취약하다. 특허된 진공 반복 공정을 채택하여, 견실하고 저렴한 가격으로 장착할 수 있다.	사용자가 조립할 필요가 없음.
정밀도	운동의 직진성은 사용된 가이드의 정밀도에 달려있다. 반대로 위치한 패드에 의해 예하중이 가해지는 경우에 스테이지는 과도하게 구속될 것이다. 어떤 경우에는 가이드의 오차가 평균화된다	원형면 스테이지는 스트로크가 6" 이하로 제한될 때, 특히 높은 정밀도를 낼 수 있다. 대부분의 부싱 스테이지는 부드러운 구동 및 속도 또는 저마찰이 요구되는 곳에 채택된다.	VPLs는 기구학적으로 보상되도록 배치되기 때문에 가장 높은 정밀도를 낼 수 있다. 물론 다른 정밀공학 원리가 높은 정밀도를 만들기 위해 적용될 필요가 있을 것이다.	스테이지는 적재중량과 가이드 사이에 더 많은 에어베어링 면과 보다 짧은 거리를 가지기 때문에, 구동축에서 벗어난 질량에 의해 발생하는 각도 오차가 적고, 보다 높은 강성을 가진다.

	평면 패드	부싱	VPLs	스테이지
강성	예하중 평면 패드는 높은 강성을 가진다. 대부분의 경우에, 구조의 굽힘 및 다이어프램 영향으로 결과적으로 공기막 보다 낮은 구조강성을 나타낸다.	부싱은 끝단 지지 샤프트 상을 움직이므로 보통 샤프트의 굽힘이 시스템 강성의 제한요소이다. 장착된 “O”링은 시스템 강성을 제한할 수 있다. 단순한 제조 과정이 이러한 컴플라이언스를 조정하기는 어렵다. 강성 스테이지는 짧은 스트로크로 제작될 수 있다. 갭이 성능에 미치는 영향에 대한 더 자세한 사항은 부싱 항목을 참조하십시오.	VPLs는 강성을 변화시킬 수 있다. 시스템 강성은 자유로운 장착성에 의해 제한된다. 당사의 표준 VPLs는 정확한 제한 조건이 장점으로 사용되는 경량 부하, 저가속, 초정밀 응용분야에 최적으로 사용된다. 보다 높은 부하 용량 및 강성을 가진 견실 시스템은 대형, 주문형 VPLs 및 반복 공정을 이용하여 제작될 수 있다.	특화된 반복공정으로 제작된 뉴웨이 스테이지는 주어진 공간에서 최고의 강성을 제공한다.
부하용량	평면 베어링은 최고로 높은 부하용량을 가진다. 주문형 베어링은 10000lb (≒ 4500kg)를 운반할 수 있다.	에어베어링은 제한된 부하용량을 가진다. “O”링이 장착되면, 부하용량을 증가시키기 위해 세트로 조합할 수 있다.	자유롭게 장착되는 VPLs 모듈은 매우 한정된 부하용량을 가진다. 보다 크고 접합된 VPLs는 훨씬 높은 부하용량을 가질 수 있다.	스테이지는 높은 부하 용량을 가질 수 있다
배관	배관이 단순하다. 한 개의 공기라인이 각 축의 매니폴드로 공급되고, 매니폴드로부터 그 축의 베어링들에 공급된다.	에어부싱 스테이지는 보다 적은 수의 베어링으로 제작될 수 있으므로, 배관이 더 단순하다.	진공을 위해 2번째 공기 튜브가 필요하다. 진공 공기 튜브는 컨덕턴스(conductance)를 좋게 하기 위해 보다 큰 직경을 사용해야 한다.	에어 스테이지는 배관이 가장 단순하다. 단지 한 개의 공압 라인이 필요하다.

에어베어링 성능에 대한 환경 영향

환경	에어베어링 성능에 대한 영향
먼지	건조한 먼지에 매우 큰 저항이 받는다. 먼지가 많은 표면의 궤도를 깨끗이 해야 한다. 행정의 말단에 먼지가 쌓이거나, 먼지가 틈새(clearance area)를 완전히 막지 않도록 해야 한다. 이런 영향을 줄이기 위해 경사면을 고려한다.
오일	가이드 상에는 오일 방울이 없어야 한다. 오일은 공기갭을 채우고 저항을 발생시킨다. 분해하여 클리닝하고, 가능한 한 베어링을 교체하는 것이 좋다(클리닝 문제 항목을 보시오).
물	가이드 상에는 물방울이 없어야 한다! 물은 갭을 채우고 저항을 발생시킨다. 가이드 면을 건조하게 하고, 베어링에 깨끗하고 건조한 공기를 공급하면 원래 성능이 유지될 것이다. 물로 인한 가이드의 부식 및 침식작용에 주의해야 한다.
온도	표준 에어베어링은 상온에서 동작하도록 설계되었다. 거의 모든 응용분야에서 ±30°F (≒ ±1°C) 내의 변화는 허용된다. 보다 큰 베어링은 온도 차에 더 많은 영향을 받는다. 귀사의 구조물에 대한 열적 영향에 주의를 기울여야 한다.

제 3 장: 에어베어링 설계

8. 에어베어링 가이드

에어베어링은 다른 형태의 가이드 재질에서 동작할 수 있다. 통상적인 가이드 표면은 그래니트 (granite), 경질 도금된 알루미늄, 세라믹, 유리, 스테인레스강, 크롬강이다.

가이드면에 대한 고려

표면처리, 국부 평탄도(local flatness) 문제와 상대면에 있는 구멍도 고려되어야 한다

표면 처리

16rms²³ 보다 좋은 표면 거칠기를 추천한다. 보다 거친 표면이 사용될 수 있다. 작은 갭에 대해 설계할 경우 표면 거칠기의 영향이 보다 커지므로 표면 거칠기는 이 아래로 고려되어야 한다. 또한 동작 중 착지하는 동안 베어링 표면이 손상될 가능성이 커진다.

국부 평탄도

어떤 한 순간의 베어링 하부 평탄도인 국부 평탄도는 설계된 공기갭의 50% 이하이어야 한다. 이것은 최악의 경우이고, 실제로 상대적으로 쉽게 공기갭의 10%보다 적게 유지할 수 있다.

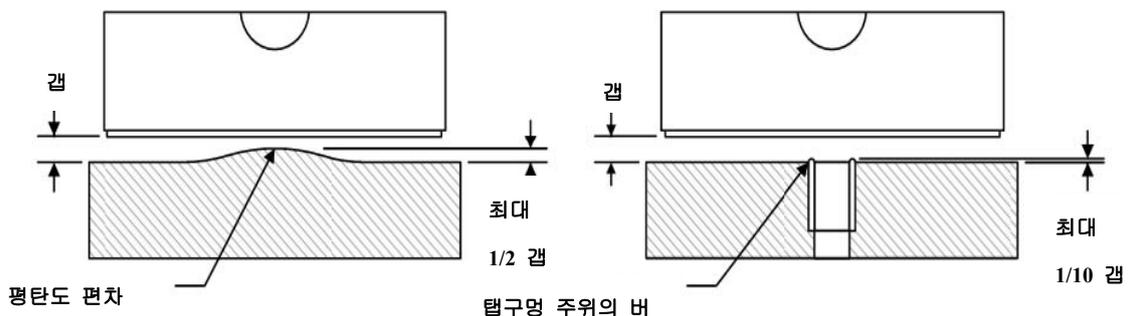


그림 10 - 표면 평탄도

²³ rms(root-mean-square): 제곱평균 거칠기. rms 는 ANSI 규격(μin)이므로 상기한 값을 KS(또는 JIS 규격)으로 환산하면 16rms(≒0.4a(Ra)≒1.6s(Rmax)≒1.6z(Rz))

가이드 표면의 구멍

가이드 표면에 있는 구멍에 대해 오리피스 베어링은 쉽게 구멍 위를 이동하지 못한다는 것을 기억해야 한다. 다공질 베어링이 구멍 난 표면 위를 뛰어 넘을 수 있다는 것은 매우 편리하다. 그러나 주어진 하중에 대해 보다 낮은 상승력을 가진다는 것을 감수해야 한다. 얼마나 낮아지는가? 예를 들면, 직경 1"($\approx 25.4\text{mm}$) 내에 직경 1/4"($\approx 6.35\text{mm}$) 나사 구멍을 20 개 가진 광학 테이블 위를 움직이는 80mm 베어링은 10 μin 에서 정상 부하용량의 약 50%를 가진다. 갭에서의 공기압이 높으면 높을수록 구멍에서의 손실률도 보다 높아진다.

가이드 면의 이음

가이드면을 잇는 것은 피해야 한다. 5 μin ($\approx 127 \mu\text{m}$)의 공기갭을 가진 베어링은 10 μin ($\approx 254 \mu\text{m}$)의 단차를 가진 이음매(seam)에서는 벽에 부딪칠 것이다.



그림 11 - 가이드면의 이음

9. 강성 및 예하중

강성은 베어링 강성이 전체 성능에 중요한 요소인 정밀 운동 시스템을 설계할 경우에 중요한 인자이다. 하중이 가해질 때 강성이 높으면 높을수록 컴플라이언스(compliance)²⁴는 보다 낮아진다.

구름 베어링에서 예하중은 헤르쯔-이안 접촉응력의 법칙(The rules of Hertz-Ian contact stresses)²⁵을 따른다. 일반적으로 볼베어링이 궤도륵에 대해 눌러지면 하중이 무거워짐에 따라 접촉점 또는 접촉선은 커지게 된다. 접촉면이 커지면 강성도 높아진다. 구름베어링에서, 강성을 증가시키려고 하면, 예하중을 가함으로써 발생하는 마찰과 마모가 보다 증가하게 된다.

²⁴ compliance: 스프링 상수의 역수

²⁵ The rule of Hertz-Ian contact stresses: 두 물체가 접촉해서 하중을 받으면 접촉 부분이 변형해서 접촉면을 발생시키는 동시에 그 면내에 접촉 압력이 발생한다. 변형이 연속적이고 또한 접촉 부분이 물체에 대해서 아주 작은 경우를 헤르츠 접촉이라 한다.

에어베어링에서 예하중은 유체동역학의 법칙을 따른다. 에어베어링에 하중이 가해지면 공기갭은 보다 작아지고 공기막의 압력은 상승한다. 공기는 압축성 유체이므로 공기는 스프링율(spring rate) 또는 강성을 가진다. 압력이 높아지는 것은 공기 스프링에 예하중을 가하는 것과 같다. 공기갭을 균일한 스프링율을 가진 기둥으로 생각하면 기둥이 짧아짐에 따라 강성은 분명히 증가할 것이다. 에어베어링에서 강성을 결정하는 인자는 공기갭 내부의 압력, 공기갭의 두께, 베어링의 투상 면적(projected area) 이다.

직관적으로 어떻게 에어베어링이 물리적인 접촉을 하는 구름베어링과 같은 높은 강성을 가질 수 있는 가를 이해하는 것이 어려울 수 있다. 접촉하는 점 또는 선조차도 이론적으로는 면적을 가지지 않는다는 것을 기억해야 한다. 그러한 최소 접촉면은 매우 높은 국부 응력(local stress)을 발생시키므로 변형을 피하기 위해 매우 강한 재료가 필요하다. 에어베어링에서 하중은 구름베어링보다 몇 배나 큰 크기로 투상된 공기갭을 통해 전달된다. 이 넓은 공기갭은 압축된 막감쇠에 중요한 함수이고 정밀 시스템에서 큰 장점이 될 수 있다.

에어베어링은 추가 질량, 자석, 진공을 사용하거나 가이드 레일의 반대면에 에어베어링을 장착함으로써 예하중을 가할 수 있다. 종종 질량을 추가하는 것은 높은 가속도와 빠른 정착시간(settling time)에 대한 요구조건에 반대되는 것이다. 자기 예하중(magnetic preload)을 가하는 것은 각 축 하부의 가이드면이 금속이어야 하므로 그래니트 베이스(granite base)에 금속띠(metal strip)가 삽입되어야 한다. 따라서 구조적으로 복잡해지고 비용이 증가한다. 에어베어링은 종종 그림 12에서 보여지는 바와 같이 에어베어링을 서로 반대로 구성함으로써 예하중을 가하게 된다. 이것은 두 개의 평행면이 필요하므로 상당한 공간이 필요하고 베어링 부품의 전체 질량이 두 배가 된다. 진공 예하중은 훌륭한 해법을 제공하고, 베어링 질량과 높이를 최소화하며, 금속 가이드면 뿐만 아니라 그래니트를 이용할 수 있다.

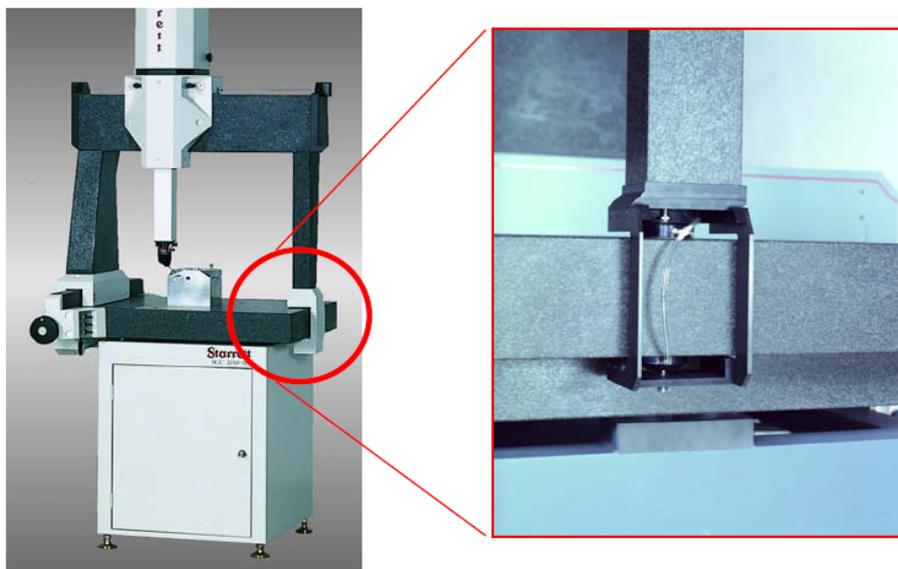


그림 12 - 좌표측정기 상의 뉴웨이® 에어베어링

에어베어링에 예하중을 가하는 방법:

1. 에어베어링에 질량으로 예하중을 가할 수 있다. 예로는 정밀석정반(precision granite surface plate) 또는 광학테이블의 표면에서 큰 물체를 움직일 경우이다. 평면은 통상 3 점으로 만들어지므로 3 개의 베어링을 사용하는 것이 최적이다. 지지되는 질량을 알 경우에 각각의 베어링이 이송하는 부하가 상승-부하 곡선 또는 강성의 바람직한 영역에 공기갭이 위치할 수 있도록 베어링 크기가 정해져야 한다. 예를 들면 부하에 변화가 없는 경우, 강성은 문제가 되지 않는다. 베어링이 평평하지 못한 표면 위를 움직이는 것이 바람직할 수도 있다. 예를 들면 직경 1"(≒25.4mm) 원에 직경 1/4"(≒6.35mm) 의 구멍이 20 개가 있는 알루미늄 광학 테이블의 경우, 솟아오른 점들을 발견할 것이다. 이런 경우에는 보다 상승 높이가 높고 더 나쁜 조건에 견딜 수 있도록, 크기가 큰 베어링을 선택하는 것이 현명하다.
2. 에어베어링에 진공으로 예하중을 가할 수 있다. 베어링 표면과 같은 평면으로 가공된 에어베어링 면 또는 비활성 표면은 진공셀로서 사용될 수 있다. 공기를 압축한 공기갭이 진공을 위한 셀이 될 수 있다는 것은 직관적으로 이해할 수 없으나, 상당히 잘 동작한다. 진공 예하중 베어링이 시간당 5ft³(≒0.1416 m³)의 공기를 소비하고, 그것의 반이 진공실로 들어간다는 것을 알게 되면 이해하기가 더 쉽다. 셀 랜드(land)²⁶와 결합하여 활성 에어베어링 영역 사이에 있는 주변의 압력 홈(groove)²⁷ 은 작은 유동 조차도 진공으로 감소시킬 수 있다. 진공 하중은 진공을 빨아들이는 중심 영역에서 발생된다. 이 영역에 진공을 끌어당김으로써, 실제로 외부 대기는 진공 포켓의 투상 면적에 압력차를 곱한 것과 같은 예하중 힘을 발생시켜 베어링을 누른다. 이 압력차는 쉽게 완전 진공의 2/3 가 된다. 즉 수는 20in(≒508mm) 또는 -10psi(≒-68.95kPa) 가 된다. 진공 예하중의 장점은 질량을 추가하지 않고 베어링에 예하중 힘을 발생시킨다는 것이다. 또한 자기 예하중에서 요구되는 것처럼 가이드 표면에 금속이 없어도 X, Y 평면에 예하중을 주는 것이 가능하다는 것이다. 큰 일체형 진공 예하중 베어링, 예를 들면 12in² 면적에 800lb(≒362.88 kg)의 예하중을 발생시키고, 단지 11lb(≒0.45kg)의 하중으로 2,000,000lb/in(≒35,716,456 kg/m)의 강성을 만들 수 있다. 이러한 기술은 고가속 스테이지에 빠른 정착시간이 요구될 경우에 장점으로 작용한다. 정밀면을 벗어난 X, Y 평면에서 가이드 될 경우, 선형축(linear axis)을 쌓아 올려서 발생하는 아베 오차 및 공차는 운동에 추가적인 평면도가 제공되면 제거된다.
3. 진공과 같이, 자석도 많은 질량을 추가하지 않고 예하중을 발생시킬 수 있다. 가이드 면과 평행한 금속띠가 선형축에 예하중을 가하기 위해 사용될 수 있다. X, Y 평면에 예하중을 가하기 위해서는 가이드 표면 전체가 금속이 되어야 한다. 자석은 금속띠와 자석을 조정할 수 있도록, 일종의 나사가 있는 홀더(holder)가 장착된, 두 개의 에어베어링 사이에 사용된다. 틸새를 조정함으로써 예하중 힘은 최적화될 수 있다.

²⁶ land: ① 드릴이나 리머 등의 홈과 홈 사이의 높은 면. ② 금형에서 양각형의 맞춤면. → metallic mold.

²⁷ groove: ① 미세한 홈. ② 용접에서 접합하는 2 개의 모재에 일정한 각도로 깎아놓은 홈

- 에어베어링에 예하중을 가하는 대부분의 방법은 다른 에어베어링은 사용하는 것이다. 이런 경우에 두 개의 베어링의 강성을 더하는 것처럼 조립체의 강성은 두 배가 될 수 있다. 통상 구조적인 비틀림을 피하기 위해, 베어링을 서로 바로 맞은 편에 위치시켜 예하중을 가하는 것이 최고로 좋다.

10. 에어베어링에 작용하는 하중

중력

구조적인 고려 및 기구학

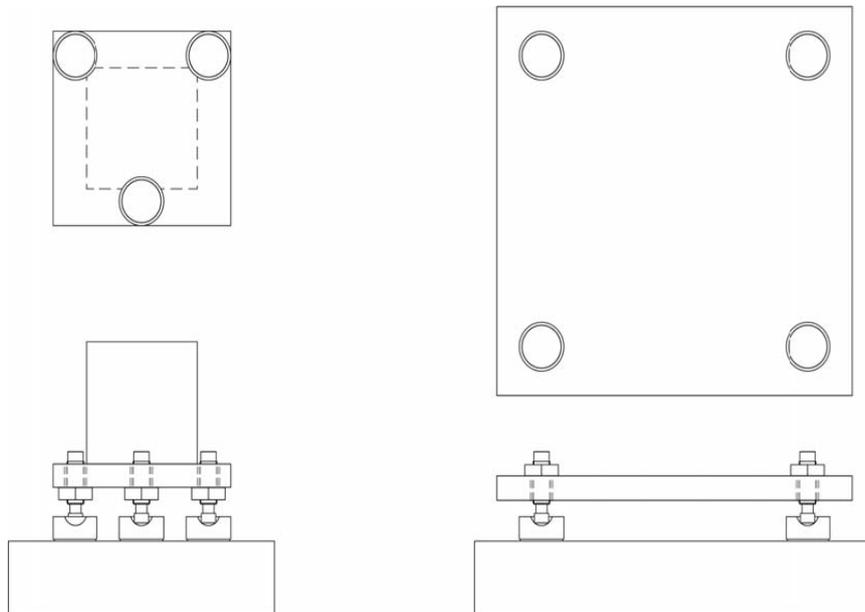


그림 13 - 평판에서의 하중 지지

평면 상에서 단순 부하를 지지할 경우에는 3 점 스탠스를 위해 3 개의 베어링을 사용하는 것이 가장 좋다. 이것이 네 다리 의자의 요동 문제(rocking problem)를 피하는 방법이다. (기구학에 대한 절을 보시오). 만약 지지되고 있는 구조가 (높은 단면 형상을 가져서) 매우 딱딱하거나 지지면이 아주 평평하지 않다면 매우 중요하다. 만약 지지되고 있는 구조(말하자면 넓게 거리를 둔 베어링을 가진 판)가 아주 딱딱하지 않다면 오히려 네 다리 스탠스가 보다 넓은 접지면을 가지므로 더 안정 될 수 있다. 판은 강체라기 보다 탄성체로 생각될 것이다.

적재하중 분포와 모빌리티(mobility)²⁸

하중이 베어링에 고르게 분포된 경우를 고려해 보자. 적재하중에 변화가 있다면? 상부에 또 다른 축을 쌓는다면 하중은 위치를 변화시킬 것인가? 베어링의 최대하중으로 인해 안심할 수 없을 정도로 공기갭이 작게 되지 않도록 베어링의 크기를 정한다(경험적으로 3~5 μm). 이 값을 결정할 수 있도록 각각의 베어링에 대한 상승-부하 선도를 참고한다. 보다 낮은 압력에서 구동하는 큰 베어링은 기류(airflow) 조건을 감소시키고 감쇠 및 강성을 증가시킬 수 있으며 상대적으로 높은 압력에서 성능의 여유를 가지도록 선정된 베어링 보다 훨씬 높은 안전율을 제공한다.

다른 에어베어링에 의한 예하중

다른 에어베어링으로 예하중을 가할 경우, 예하중력을 고려하여 베어링의 크기를 정해야 한다. 다른 에어베어링으로 예하중을 가하는 것은 통상 양방향 하중용량을 제공하거나, 공기막 강성을 증가시키기 위해 채택된다. 예하중력이 하중에서의 어떤 예상되는 변화에 대해 비교적 높을 경우 강성은 높아질 것이다. 사실, 두 개의 마주보는 베어링의 강성은 더해진다. 그러므로 두 개의 베어링이 서로에 대해 예하중을 줄 경우에는 각각 500,000lb/in(≈89,291,157kg/m)의 강성은 결과적으로 1,000,000lb/in(≈178,582,283kg/m)의 강성이 될 것이다. 그러나 예하중력은 베어링 용량으로부터 빠져야 한다.

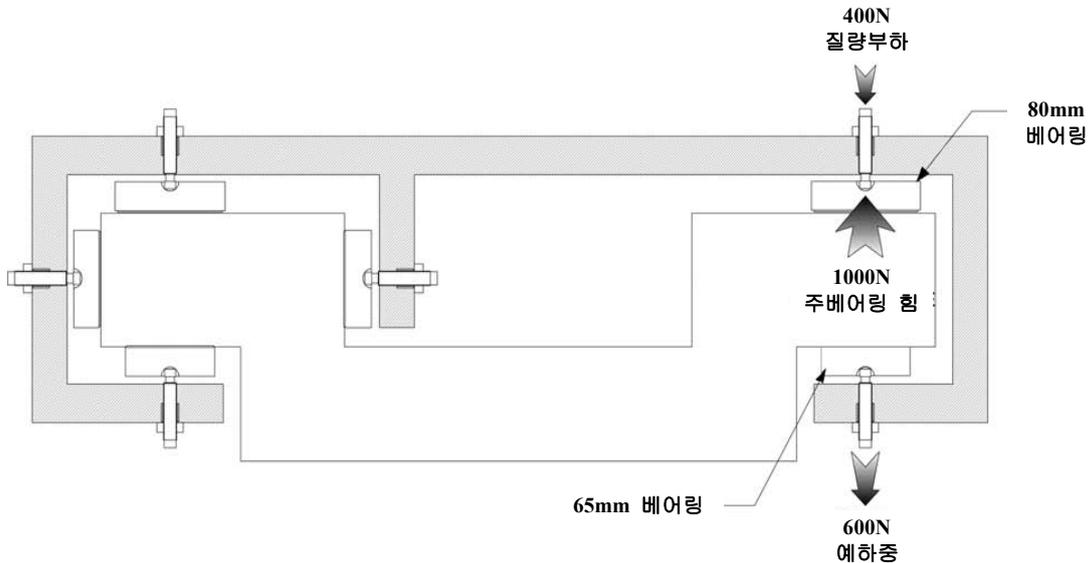


그림 14 - 다른 에어베어링에 의한 예하중

²⁸ mobility: 주파수 응답 함수의 일종이며, 어떤 점의 속도와 그와 같은 점 또는 다른 점의 여자력의 비.

동적 하중

고성능 스테이지(고가속도, 빠른 정착시간)를 설계할 경우, 질량의 중심에서 스테이지를 구동하는 것이 아주 중요하다. 이것은 종종 다른 설계적인 고려로 인하여 불가능할 수 있다. 구동축을 벗어난 어떤 질량은 결과적으로 가·감속 중 에어베어링에 의해 방해될 수 있는 모멘트력이 될 것이다. 그러므로, 이런 동적 하중은 에어베어링의 크기를 정할 때 반드시 고려되어야 한다.

이 모델은 공기막의 강성에는 변화가 없고, 모든 구조물은 무한대의 강성을 가진 것으로 가정한다.

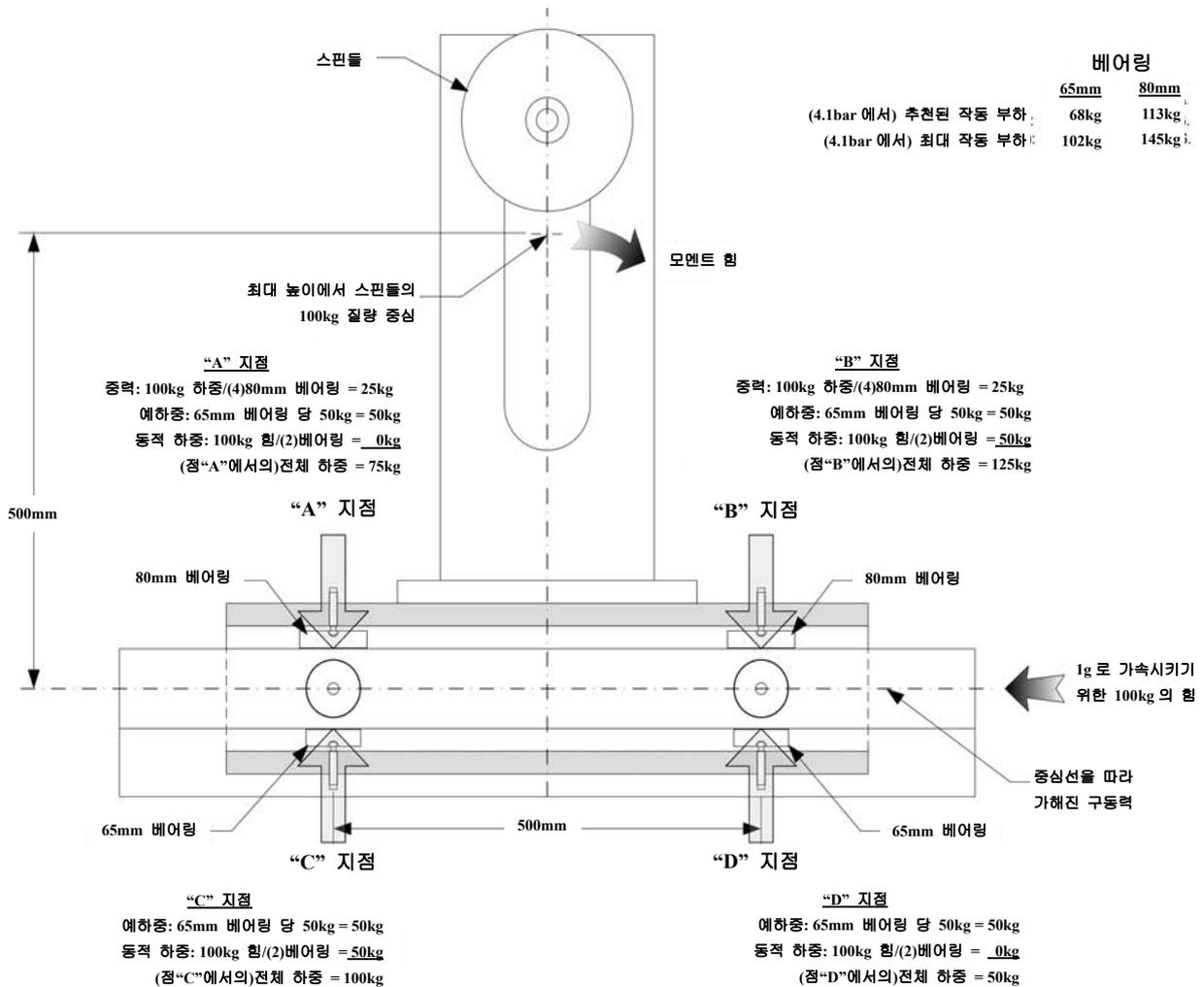


그림 15 – 동적 하중

기계 임피던스의 역수이며 주파수의 복소 함수가 됨. → 임피던스(impedance)

제 4 장: 에어베어링 셋업 및 사용

11. 평면베어링

장착 및 조정

왜 평면 패드 에어베어링을 장착하기 위해 볼 스테드(stud)²⁹를 사용하는 가? 에어베어링을 장착할 때, 베어링 면이 구동되는 가이드 면과 평행하는 것이 매우 중요하다. 평행도가 몇 마이크로만 벗어나도 베어링 성능이 상당히 저하되기 때문에, 베어링을 적당한 곳에, 정밀하게 볼트로 고정하기가 매우 어렵다. 구면 소켓과 볼 스테드는 훨씬 사용하기 쉽고 적소에 베어링을 볼트로 고정하기 위해 필요한 정밀 매칭가공(match machining)보다 비용이 훨씬 저렴하다. 게다가 나사가 가공된 볼 스테드는 베어링의 조정하여 예하중을 쉽게 줄 수 있고, 기계 조립을 빠르게 할 수 있다. 그러한 모듈방식(modularity)에 의해 베어링의 교환 및 대체가 쉽다.



그림 16- 평면 에어베어링의 볼 스테드 옵션

뉴웨이는 두 가지 형태의 볼 스테드를 제공한다.

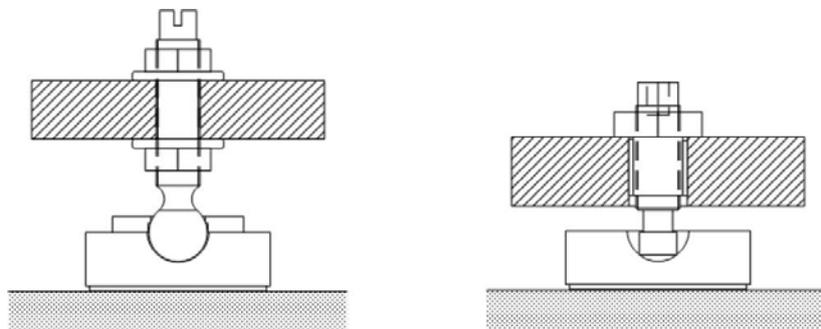


그림 17- 구형과 신형 볼 스테드 디자인

²⁹ stud: 막대의 양단에 나사가 있고 한쪽 나사를 기계의 본체 등에 단단히 박아 넣어서 사용하는 볼트.

뉴웨이 미터 단위식 베어링은 볼 스테드 상에서 베어링을 유지하도록 리테이닝 클립(retaining clip)³⁰ 고정을 위한 3 개의 탭이 있다. 볼 스테드는 중간 피치 또는 가는 피치 나사 모두 이용할 수 있다. 스테드는 구조물에 탭 가공이 필요하지 않도록 두 개의 너트와 와셔(washer)로 구성되어 있다. 뉴웨이는 웹사이트에 드릴, 리머(reamer), 탭 정보 및 베어링 조정이 가장 쉬운 구조물의 추천할 만한 탭 가공 정보를 제공한다. 리테이너 스테드는 지지되는 구조물이 들어올리고 운반하기가 쉬울 경우, 말하자면 다른 테스트 스탠드(test stand)³¹ 또는 베어링이 위로 향하여 장착되거나 일종의 제거할 수 있는 평판이 스테드의 위에 놓여지면 다루기 쉽다. 베어링이 수직 램(ram)³²을 가이드 할 경우, 램이 삽입될 때 적소에 위치하는 것이 바람직하다. 스테드와 리테이너는 조립과 분해시에 방해가 될 수 있다. 볼 직경이 나사 직경보다 크므로 단지 한 방향으로 조여진다. 또한 볼 스테드가 위치되면 리테이너 클립을 조이거나 푸는 것이 불편하거나 불가능하므로 클립과 베어링은 볼 스테드가 구조물에 설치되기 전에 볼 스테드에 대해 조립되어야 한다. 이런 형태의 볼 스테드는 미터 단위식 또는 영국 단위식 베어링 모두 이용할 수 있으나 리테이너 클립을 위한 나사 홀은 단지 미터 단위식 베어링에서만 이용할 수 있다. 스테드, 리테이너 클립, 베어링의 모든 도면은 웹사이트에서 이용할 수 있다. 또한 이런 스테드의 사용으로 베어링 후면과 장착 구조물 사이에 더 많은 틈새가 요구된다.

뉴웨이 인서트 구면 스테드(spherical stud)는 사용하기가 매우 편리하다. 외경을 보통 나사로 가공하여 삽입된 황동이 구조물에 장착된다. 인서트(insert)³³는 예하중과 조정을 위해 가는 나사로 되어 있다. 스테인레스강 스테드는 나사 직경보다 작은 구면 스테드를 가지므로 다른 면에서 스테드를 제거할 수 있다. 구면 말단 바로 위 렌치 면은 베어링 면으로부터의 조정을 고려한 것이다. 청동 인서트는 스테드를 조정 후 고정하기 위해 고정 나사(set screw)³⁴가 있다. 만일 필요한 베어링이 볼 스테드가 쉽게 벗겨지고 베어링이 미끄러져 교환하거나 대체해야 한다면, 구조물과 베어링 유지 공간의 후면 사이에는 최소한의 틈새가 필요하다. 이런 형태의 볼 스테드를 미터 단위식과 영국 단위식 베어링 모두 사용할 수 있다. 모든 도면은 웹사이트 상에서 이용할 수 있다.

뉴웨이로부터 장착 하드웨어를 구입할 필요는 없다. 귀사는 제품 제작에 뉴웨이의 도면을 사용할 수 있다. 또는 완전히 폐사가 설계하고 제작할 수도 있다. 많은 고객들이 스크류 또는 볼트를 수정해왔다. 볼을 스크류에 접촉하거나 볼을 베어링에 접촉하여 수정된 볼트와 접합한다.

주 베어링 조정

주 하중 베어링 패드는 나사 장착 스테드(threaded mounting stud)를 조정함으로써 스테이지의 높이

³⁰ retaining clip: 유지 클립을 말함. 구름 베어링이나 패킹, 다이(die), 펀치 등의 유지용 클립의 총칭.

³¹ test stand: 기계나 장치의 시험 혹은 검사를 하기 위하여 사용되는 시험 장치의 설치대

³² ram: ① 셰이퍼나 슬로터에서 프레임의 안내면을 수평 또는 상하로 왕복 운동하는 부분. 절삭 공구가 장착되고 급속 귀한 운동을 한다. ② 유압기, 유압 탱크 등에서 실린더 속을 왕복하는 플런저 모양의 원통.

³³ insert: 성형품 속에 묻혀진(삽입) 금속이나 그 밖의 재료.

³⁴ set screw: 축에 휠을 고정시키거나 위치를 조정할 때 등 그다지 힘이 걸리지 않는 곳을 고정시키는 데 사용되는 작은 나사.

및 정렬을 셋팅하기 위해 사용된다. 공기압을 끄고 스테이지 높이와 각도를 원하는 만큼 조정한다. 스테이드를 조정할 때 장착 스테이드가 회전하지 않도록 손가락으로 베어링을 잡을 수도 있다. 바로 공기압을 키고 위치와 요 조정을 위해 두 번째 라인의 베어링을 조정한다. 이제 공기압을 켜서 눈에 보이는 틈새를 제거하기 위해 예하중 베어링을 단단하게 만든다.

예하중 베어링 조정

예하중 베어링을 조정하기 위한 몇 가지 방법이 있다. 여기에서는 공기압을 물리적으로 정밀하게 측정하여 체크하는 방법을 포함하여 4 가지 방법을 기술한다.

1. 항력(drag)³⁵에 의한 조정:

압력을 공급하여 항력이 축 운동에서 감지될 때까지 예하중 베어링을 단단하게 만든 후에 항력이 더 이상 검출되지 않을 때까지 약간 압력을 낮춘다. 80 피치 나사에서 조정하기가 어려울 수 있으므로 긴 렌치 핸들이 감도를 높여줄 것이다. 구조물을 더 강하게, 베어링을 더 작게 만들수록 조정 감도는 더 민감해질 것이다.

2. 압력에 의한 조정:

모든 다른 베어링에 작동 압력을 가한 상태로 작동 압력을 2/3 로 조정하여 베어링에 공급한다. 항력이 막 발생하기 시작할 때까지 베어링에 압력을 공급하여 단단하게 만들고 나서 베어링에 압력을 완전히 공급한다. 이 과정을 다른 예하중 베어링에 반복한다.

3. 유량에 의한 조정:

베어링을 조정하기 전에 배관에 유량계(flow meter)를 설치하고 부하를 가하지 않은 상태로 베어링에 흐르는 유량을 측정한다(조정 스크류를 풀러 놓는다). 그 다음에 유량이 원래 흐름의 60%로 감소 될 때까지 베어링을 단단하게 만든다.

상기한 절차 2 와 3 의 경우, 베어링을 조정하기 위해 이용되는 압력과 유량이 탈착이 빠른 피팅을 사용한 스테이지 장착 매니폴드(에어베어링을 배관하기 위한 링크)에 똑같이 공급되도록 배관할 것을 추천한다. 이것이 공정의 속도를 빠르게 만든다.

예하중 베어링을 조정하기 위한 4 번째 방법은 베어링의 실제 상승 높이를 체크하기 위해 인디케이터(indicator)³⁶를 사용하는 것이다(그림 18). 이 절차는 이전 3 가지 방법에 대한 점검으로서 추천되고 최소한 처음에 제작하는 몇 가지 기계들에 대한 조립 과정을 확립하는 데 도움을 준다.

³⁵ drag: 자동차, 배, 비행기 등이 움직일 때 공기나 물이 그 움직임을 방해하는 힘. 공기 저항, 물의 저항이라는 말을 쓰기도 한다.

³⁶ indicator(dial gauge): 기어장치로 미소 변위를 확대하여 길이나 변위를 정밀하게 측정하는 계기. 다이얼의 1 눈금은 1/100 mm, 또 측정범위 2mm 의 것에서는 1 눈금 1/10,000mm 의 것도 있다. 평면의 용철, 공작물 장착의 양부, 축중심의 흔들림, 직각의 흔들림 등 소량의 오차를 검사하는데 사용.

점검하기 위해 베어링의 후면에 인디케이터의 팁을 놓을 수 있도록 인디케이터와 스탠드를 선정한다. 인디케이터는 많이 사용할 수 있도록 최소한 $1\mu\text{in}(\approx 25.4\ \mu\text{m})$ 또는 $50\mu\text{in}(\approx 1.27\text{mm})$ 의 분해능을 가져야 한다. 주로 이 분해능에서는 기계식 인디케이터를 사용할 수 있다. $0.1\mu\text{in}(\approx 2.54\ \mu\text{m})$ 또는 $5\mu\text{in}(\approx 127\ \mu\text{m})$ 분해능을 가진 전자식 인디케이터를 사용할 수 있고, $0.01\mu\text{in}(\approx 0.25\ \mu\text{m})$ 또는 $0.5\mu\text{in}(\approx 12.7\ \mu\text{m})$ 분해능을 가진 정전용량 프로브(capacitance probe)를 사용할 수 있다. 기계식 인디케이터는 상승 높이 및 예하중 조정을 테스트하는데 아주 적당하다. 전자식 인디케이터는 높은 분해능과 원거리 판독력 때문에 선호되나 반드시 필요한 것은 아니다. 정전용량 프로브는 비접촉 특성으로 인해 동적 연구에는 훌륭한 선택이 될 수 있으나 이런 부분에 대해 사용하는 것은 지나친 선택이다.

4. 변위 측정:

예하중 베어링을 단단하게 하고, 인디케이터 팁을 볼 소켓의 모서리로부터 약 $5\text{mm}(0.250\text{in})$ 안쪽으로 베어링 후면 위에 위치시킨다. 인디케이터를 놓은 상태로 공기압을 0으로 만든 후, 공기를 공급하고 인디케이터의 눈금을 읽는다. 다음으로 공기압을 차단하고 인디케이터의 눈금이 0으로 돌아가는지 확인한다. 만

일 0으로 돌아가지 않으면 눈금이 일정해질 때까지 공정을 반복한다. 기술자가 볼 스태드를 소켓에 안착시키기 위해 예하중 베어링을 단단하게 만드는 것이 일반적이다. 이것은 결과적으로 눈금을 더 일정하게 만들고 시스템 강성에 여유 게인(maginal gain)을 제공한다. 최종적으로 상승 높이를 설계하기 위한 변위 측정과 그에 따른 예하중 베어링 조정을 비교한다.

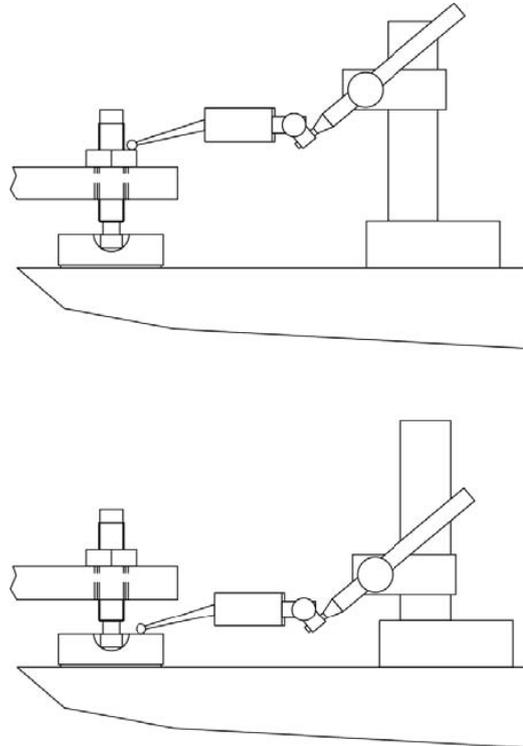
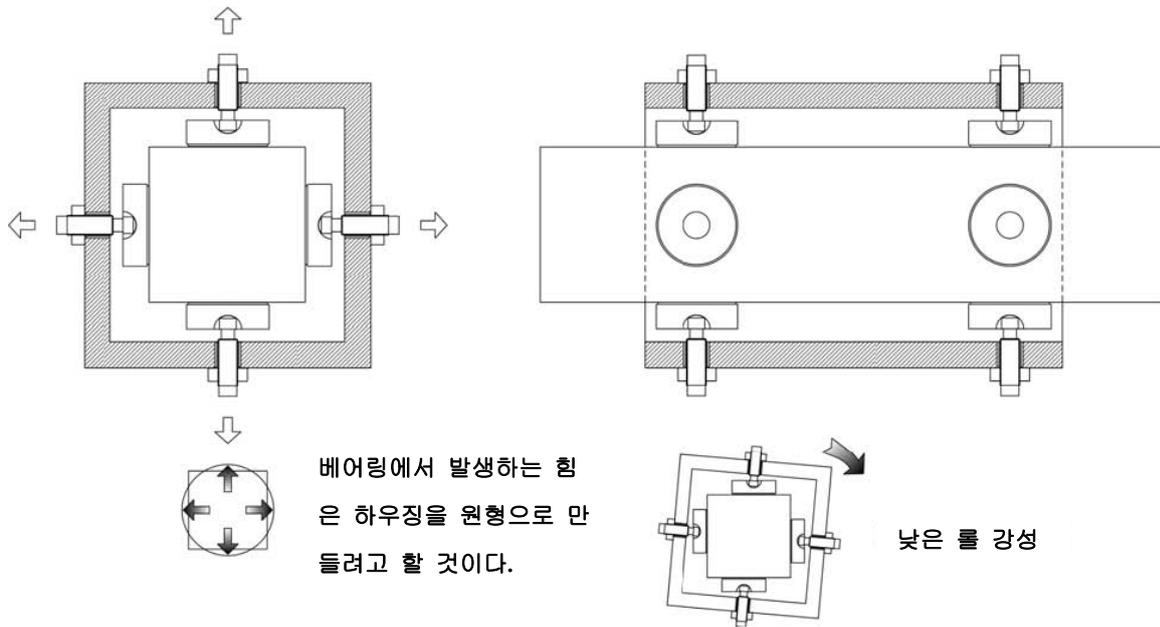


그림 18 - 다이얼 인디케이터를 이용한 조정

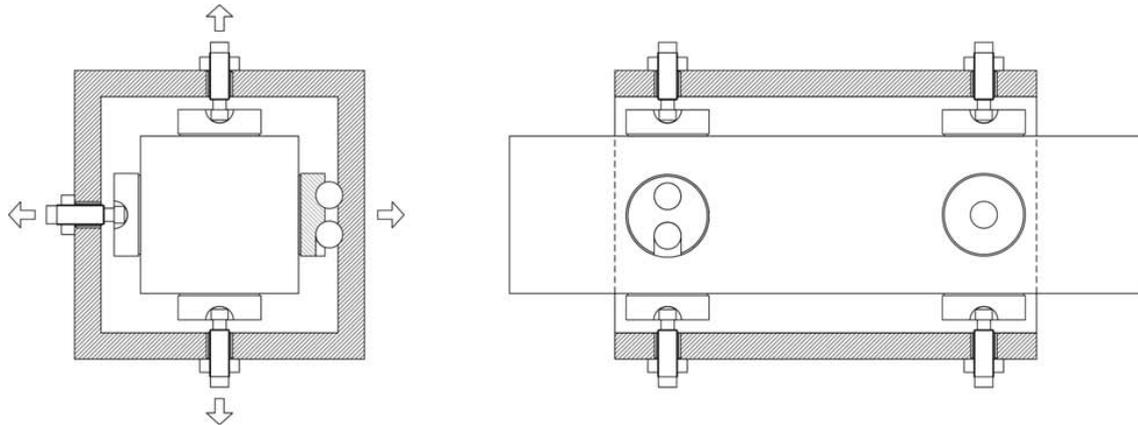
전형적인 구성

다음의 페이지는 간단한 장·단점을 기술하여, 평면 에어베어링의 전형적인 구성을 보여준다.

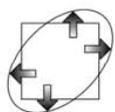
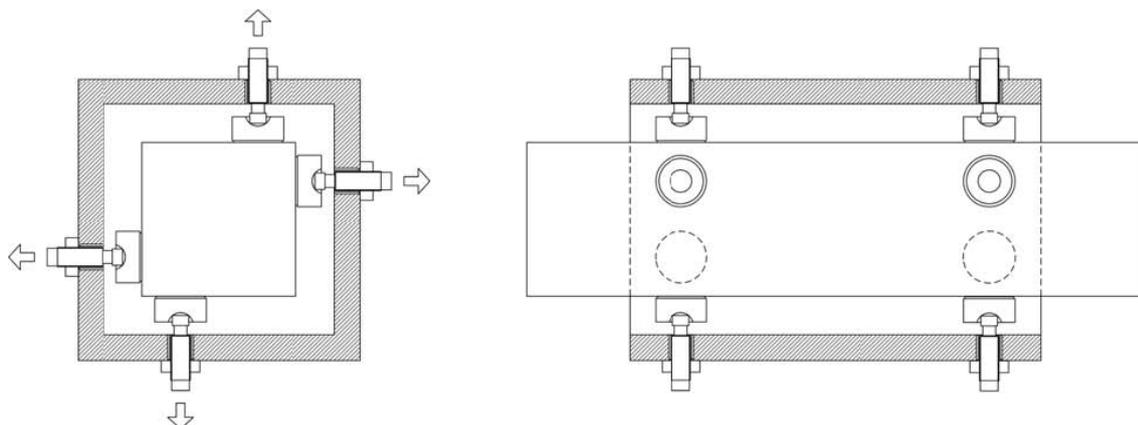


이 디자인은 정렬과 셋업이 쉬운 반면 낮은 롤 강성(roll stiffness)으로 인해 어려움을 겪을 것이다.

베어링 중의 하나에 슬롯이 있는 두 번째 볼을 이용하여 축에 대한 롤을 제한한다. 강성 및 롤용량은 단일 베어링의 피치 강성과 롤 용량에 따라 제한된다.

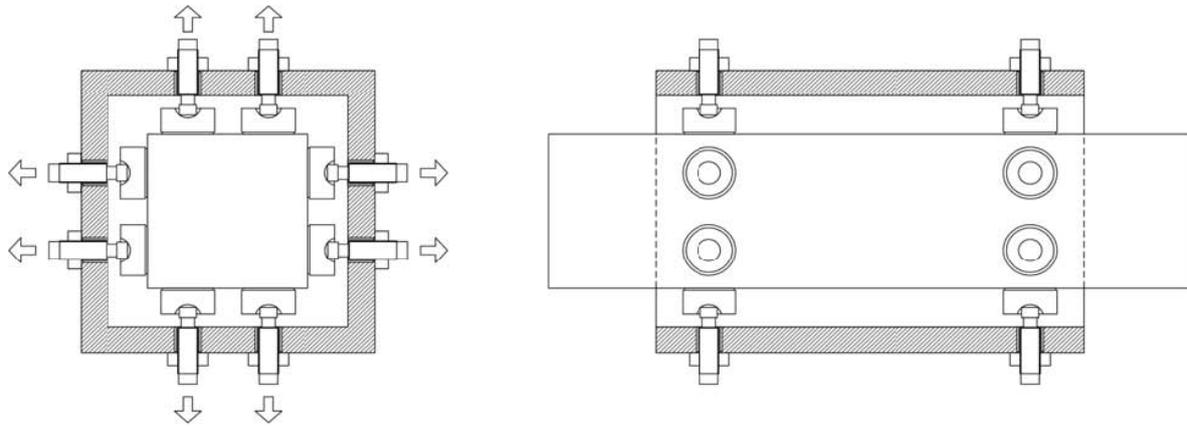


이 디자인은 보다 높은 롤 강성을 가진다. 베어링이 서로에 대해 바로 마주 보지 않으므로, 각 조정과 롤 조정을 분리하는 것이 어렵다.



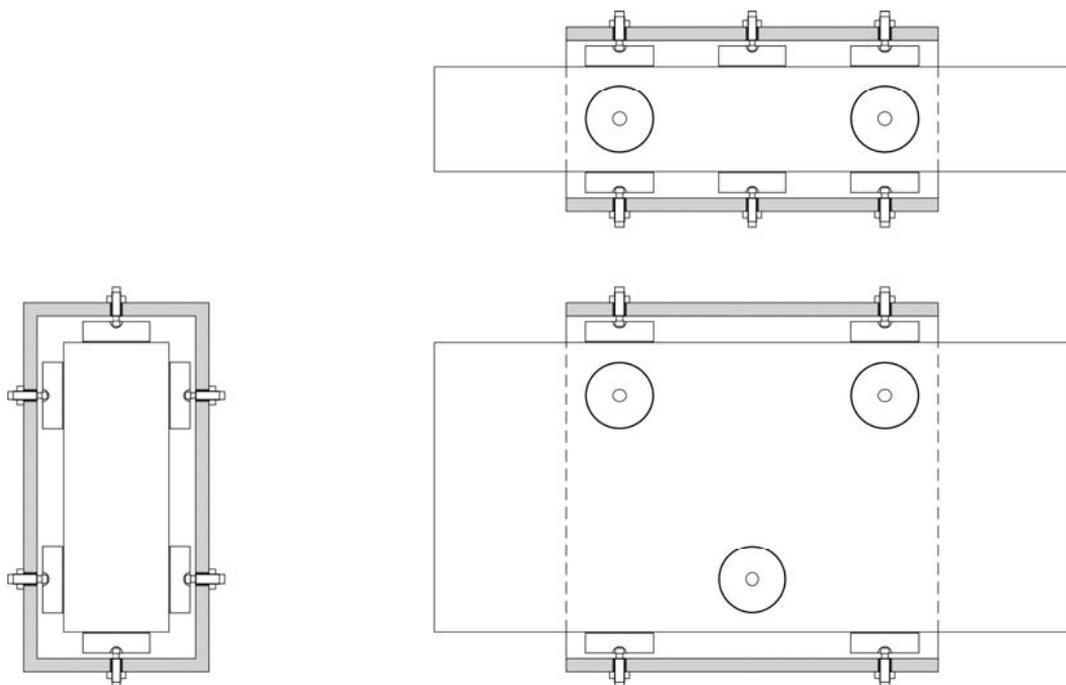
베어링에서 발생하는 힘은 하우징을 타원으로 만들려고 할 것이다.

이 디자인은 2 배의 롤 강성, 피치 강성, 부하 용량을 가진다. 상대적으로 하우징의 강성이 크면, 셋업과 조정이 특히 더 어려워진다. 만일 상대적으로 하우징의 강성이 낮으면, 탄성 변형이 발생할 가능성이 높아진다.

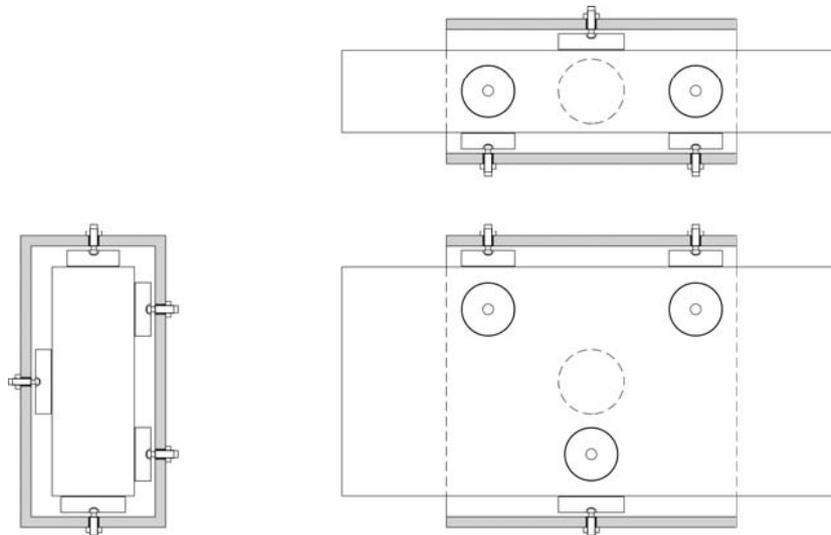


베어링에서 발생하는 힘은 하우징을 원형으로 만듦과 같고 할 것이다.

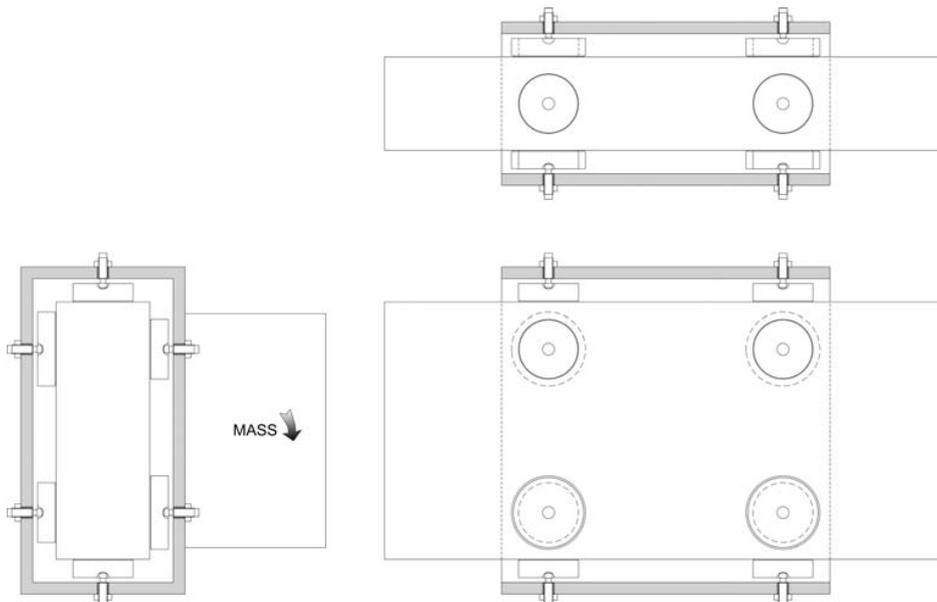
바로 서로 맞은 편에 베어링에 예하중을 가한다. 3 개의 세트는 평면을 만들고 2 개의 세트가 선을 만든다. 10 개의 베어링이 이 배치도에 사용된다.

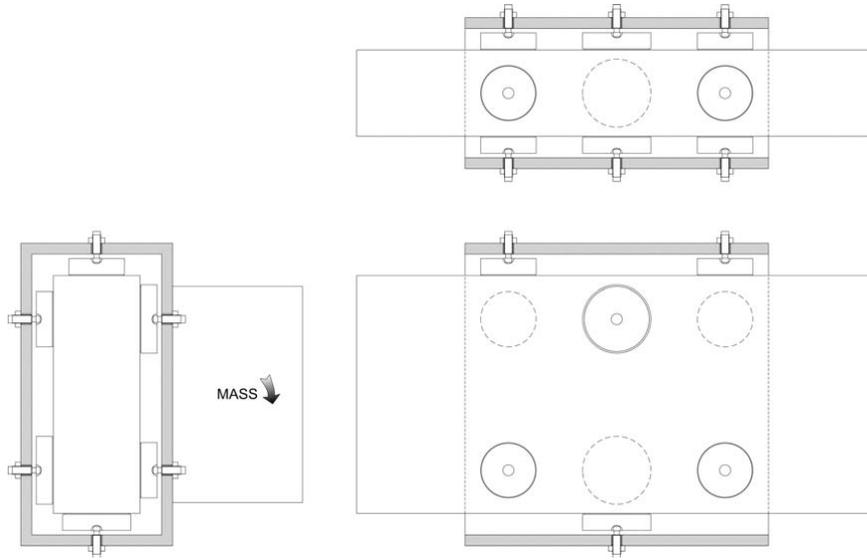


더 확정적(deterministic)인 것은 평면을 만드는 3 개의 베어링과 선을 만드는 2 개의 베어링에 예하중을 가한다. 이 구조는 정렬이 쉽고 더 적게 베어링을 사용하고 낮은 강성을 가진다. 이 배치도에서는 7 개의 베어링이 사용된다.



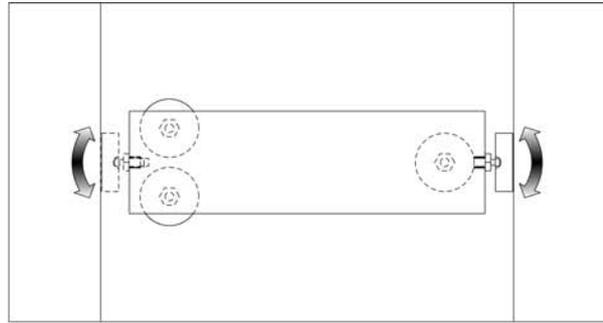
설계 중에 축을 벗어난 질량이 크다면 그 무게를 견딜 수 있는 위치에 보다 크고 더 많은 베어링을 사용할 것을 고려할 수도 있다. 만일 질량이 베어링 또는 크기에서 큰 편차를 발생시킬 정도로 크다면 슬라이드는 질량 없이 동작하지 않을 수 있다.



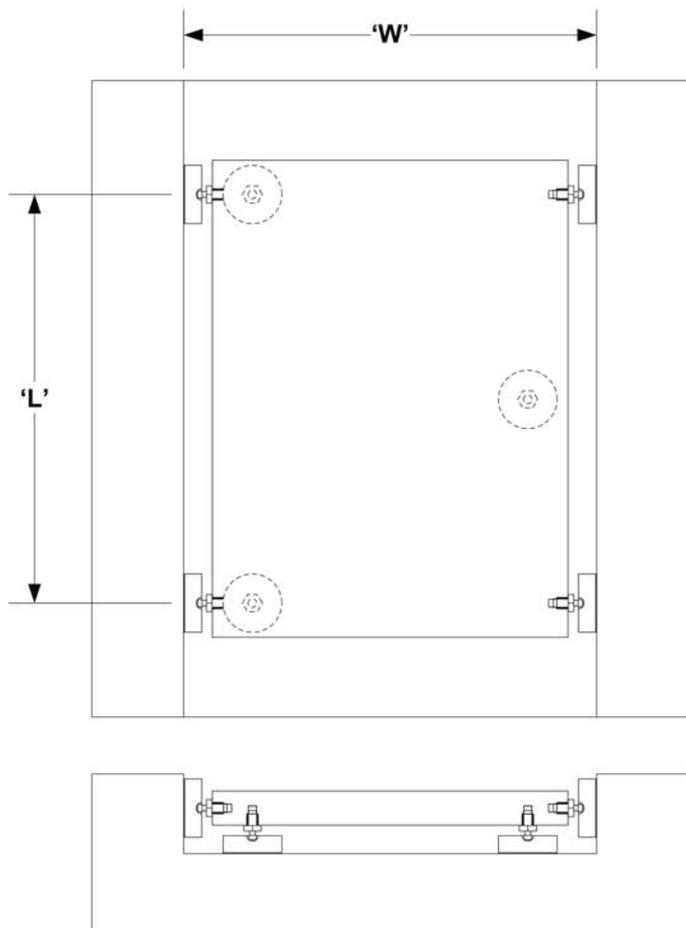


하중의 영향을 없애기 위해 베어링 위치 및 수량을 엇갈리게 배치. 9 개의 베어링을 사용.

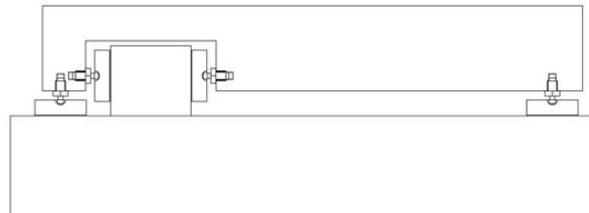
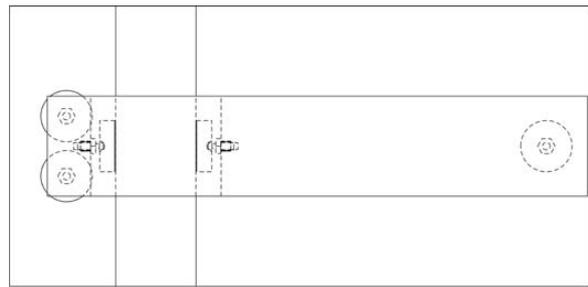
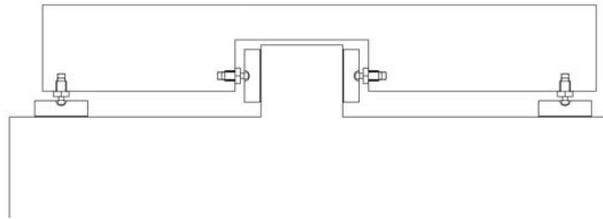
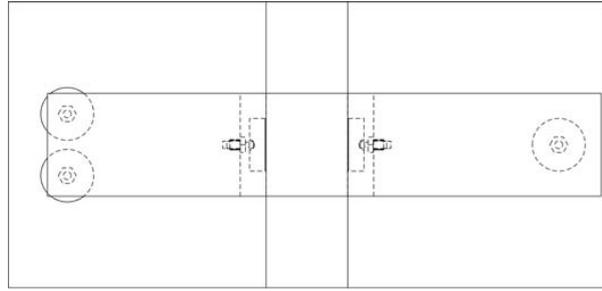
이것은 매우 불안정한 설계이다. 두 슬라이드 사이에 리드-래그(lead-lag) 오차는 요 힘(yaw force)을 발생시킬 것이다. 예하중력을 높이면 높일수록, 요 힘도 높아진다. 비록 이런 배치를 추천하지는 않지만 훌륭한 제어 엔지니어는 양쪽 면에 리니어 모터 및 엔코더를 사용하여 요 힘을 제어할 수 있다.



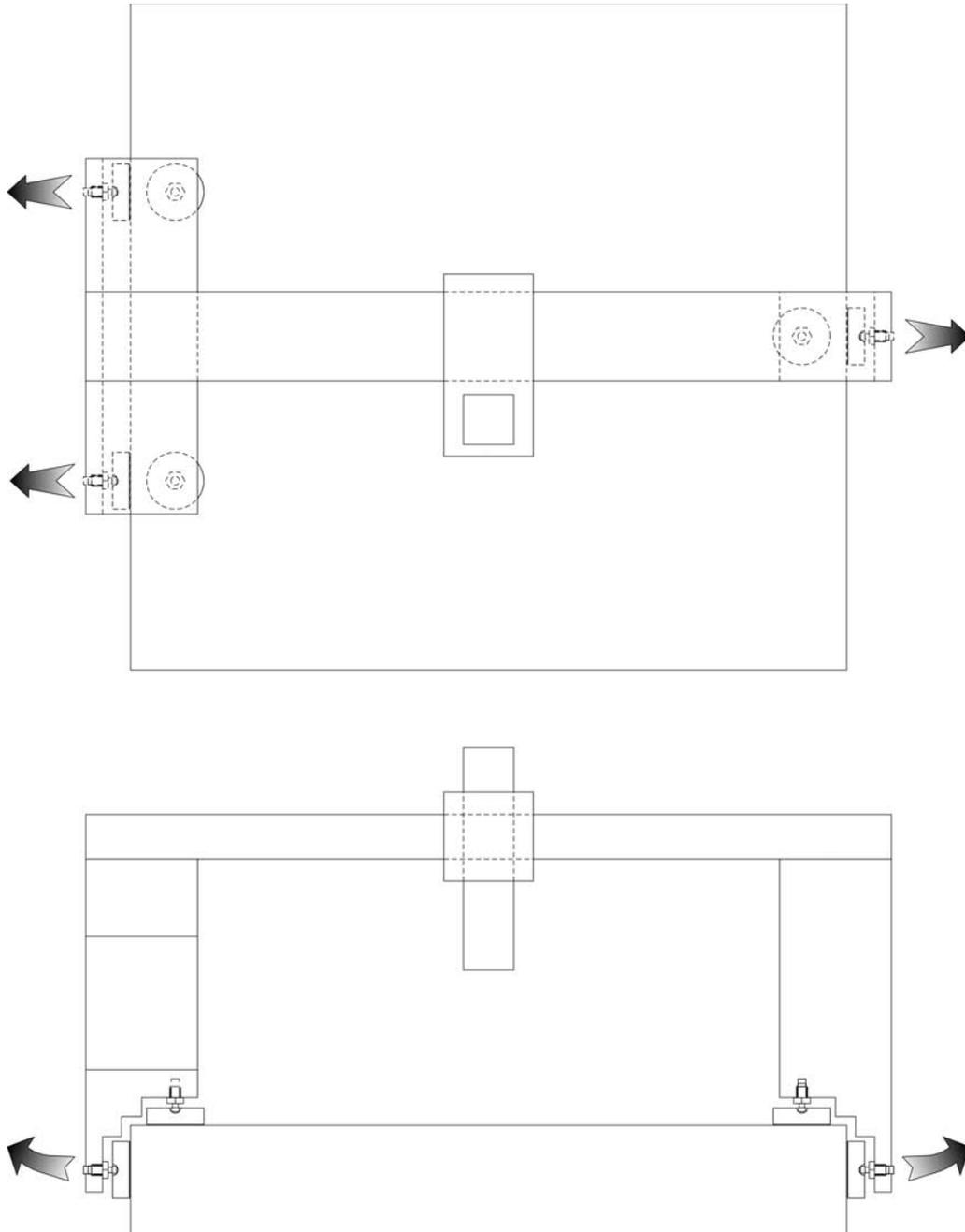
4 개의 베어링을 사용하면, 상황이 훨씬 향상된다. 그러나, L 이 W 와 같거나 초과하면, 시스템이 상대적으로 불안정하게 될 것이다.



이 가이드 시스템은 본래 안정적이다. 두 개의 베어링은 항상 가이드 면을 지나는 가장 짧은 거리를 찾아내려고 할 것이다. 예하 중력이 높아질수록 바로 잡으려는 힘이 높아질 것이다.

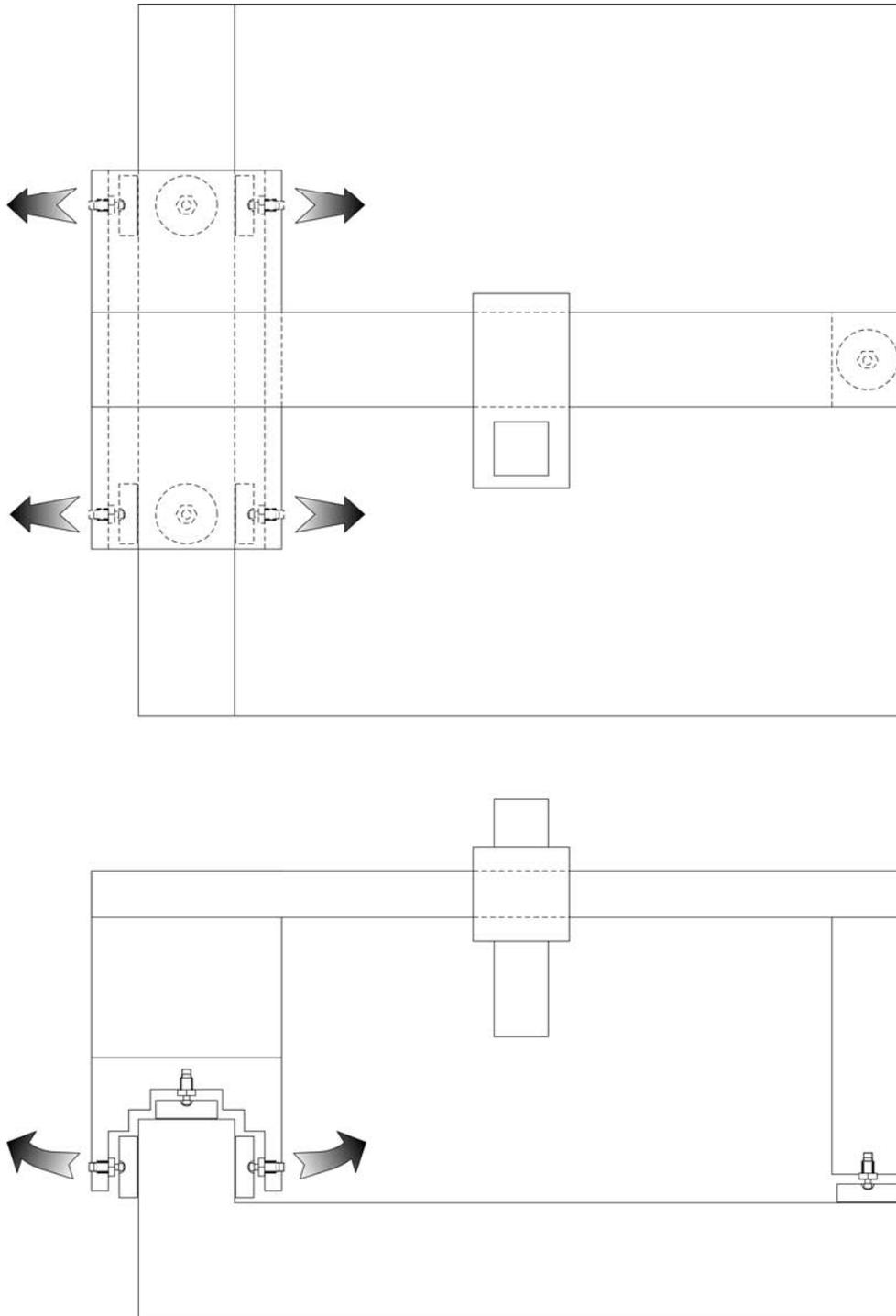


갠트리(gantry)³⁷가 벌어지게 되는 현상이 큰 디자인



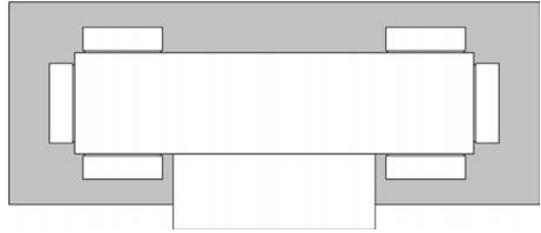
³⁷ gantry: 3 차원 측정기의 구조로, 크레인 형상의 것을 말함. 베타, 델타, 람다가 이 형에 속함.

갠트리 벌어짐 현상이 상당히 적어지는 디자인



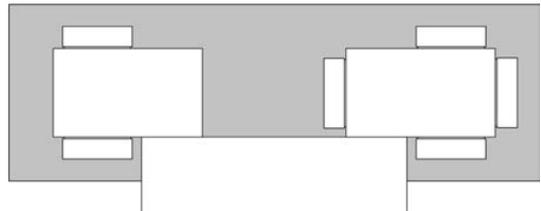
단일 레일 연속 지지

- 장점: 제조 및 조정이 쉽다
- 단점: 직진 가이드 베어링이 상대적으로 떨어져 있다



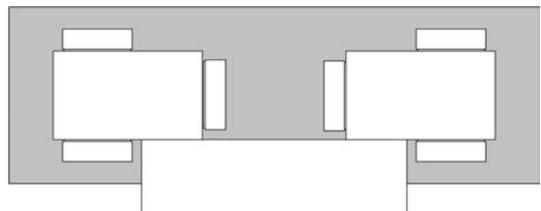
더블 레일 연속 지지 - 단일 레일 가이드

- 장점: 직진 가이드 베어링이 서로 상대적으로 가깝게 있다.
- 단점: 평면도 조정이 더 어려워 진다.



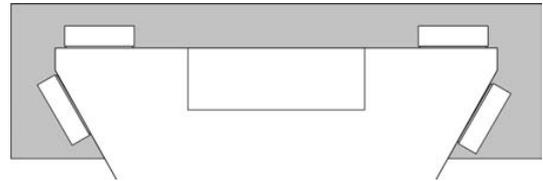
더블 레일 내부 면 가이드

- 장점: 가이드의 중심이 질량 중심이다.
- 단점: 2 개의 레일을 평행하게 조정하기가 어렵다.



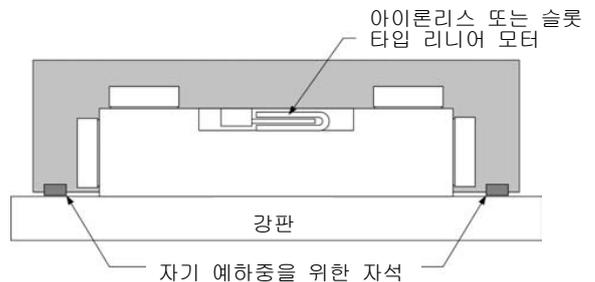
도브테일(dovetail) 연속 지지

- 장점: 필요한 베어링의 수가 적어진다.
- 단점: 같은 예하중을 만들기 위해 하부 베어링이 보다 커져야 한다. 가이드 바의 측정이 어려울 수 있다.



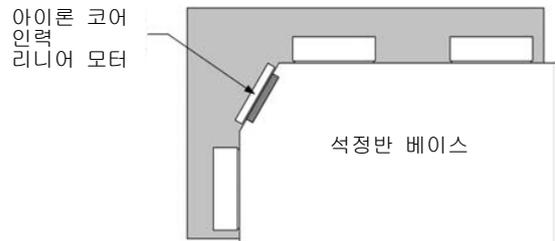
자기 예하중 단일 가이드

- 장점: 정반에 장착될 수가 없다.
- 단점: 종종 2 가지 재료로 가이드가 조립된다.



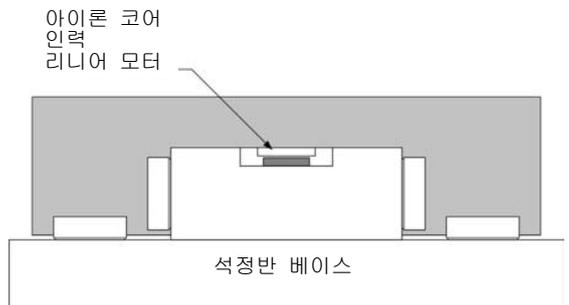
자기 예하중 엑스트루전(axtrusion) 가이드

- 장점: 단지 2 개의 정밀면. 1 개의 리니어 모터 예하중으로부터 발생하는 인력, 평탄도 및 직진도 베어링
- 단점: 사용자 허가가 요구됨



자기 예하중 단일 가이드

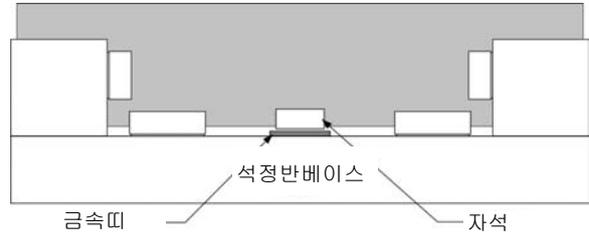
- 장점: 넓게 분포된 하중 운반 베어링. 자기 스트립 (magnetic strip)이 필요없다.
- 단점: 석정반 베이스에 장착될 필요가 있다. 예하중을 위한 아이론 코어 모터의 사용으로 코깅 (cogging)³⁸이 발생된다.



³⁸ cogging: 코깅이란 모터의 회전자와 고정자가 덜거럭거리면서 움직이는 것을 말함. 즉 토크의 변동을 의미함. 이것을 줄이기 위해서 철심의 슬롯 수를 늘리거나, 슬롯수가 작은 경우에는 슬롯에 비틀림 (skew)을 주어 자속분포를 균등하게 만드는 등의 방법이 있지만, 이 경우에는 출력토크가 저하됨. 이것을 완전히 개선한 것이 코어리스 모터(coreless motor).

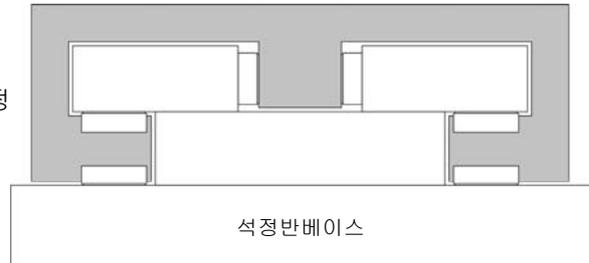
자기 예하중 내부 가이드

장점: 넓게 분포된 하중 운반 베어링
단점: 수직 가이드의 정렬이 어렵다. 직진 가이드 베어링이 떨어져 있다.



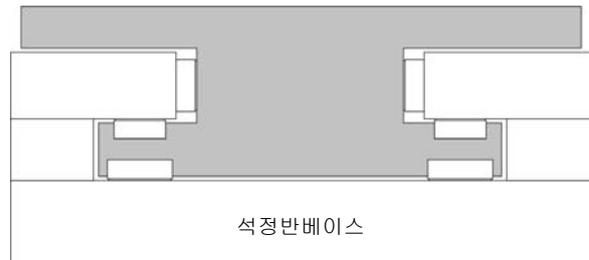
더블 레일 고정구 내부 가이드

장점: 석정반 베이스로부터 평면 가이드
단점: 가이드 레일의 직진도 조절이 어렵다. 고정



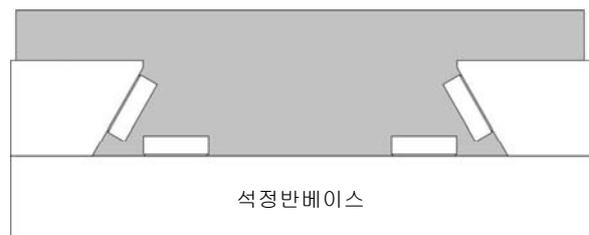
더블 레일 고정구 외부 가이드

장점: 석정반 베이스로부터 평면 가이드, 고정구의 처짐이 적다
단점: 직진 가이드 레일의 정렬이 어렵다.



더블 레일 고정구 내부 도브테일 가이드

장점: 표면의 정밀도가 낮아진다. 넓은 스테이지 구조에 적당하다.
단점: 조절이 2 배로 어렵다! 최소한의 예하중 능력



오목 V 와 평면

장점: 준기구학적(Quasi Kinematic) 설계

단점: 중력에 의한 예하중이 필요. 베이스 일체형 가이드 면



볼록 V 와 평면

장점: 준 기구학적 설계. 제거 가능한 가이드

단점: 중력에 의한 예하중이 필요.



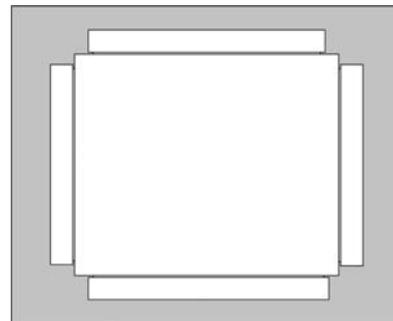
면

정사각형 가이드

전면 베어링

장점: 고하중 용량

단점: 하우징 비틀림 변형

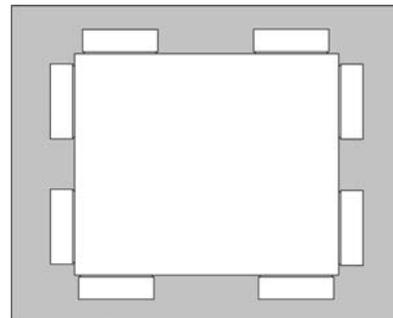


정사각형 가이드

분할 베어링

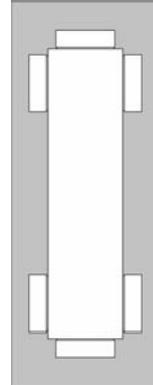
장점: 높은 롤 용량

단점: 더 많은 베어링이 필요



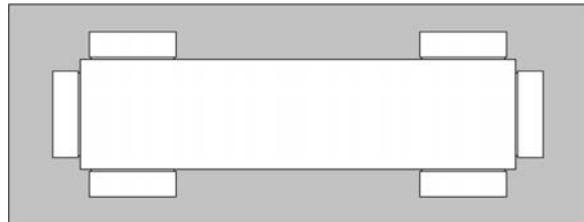
직사각형 가이드

- 장점: 보의 처짐이 작다
- 단점: 더 많은 수직 공간이 필요



단일 레일 끝단 지지

- 장점: 제조 및 정렬이 쉬움
- 단점: 직진 가이드 베어링이 상대적으로 멀리 떨어져 있다



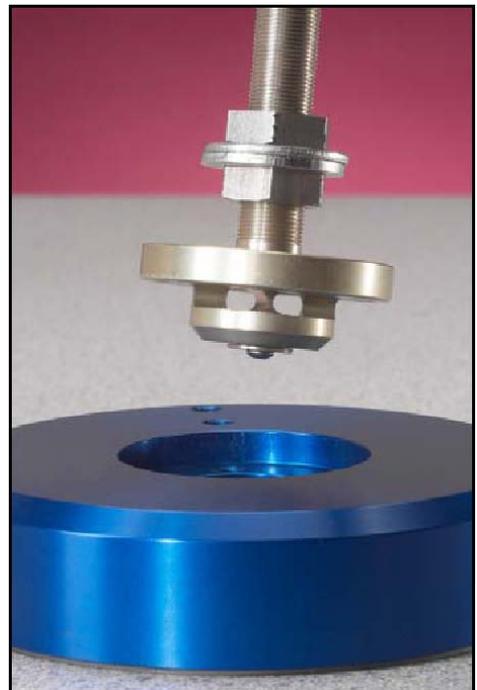
12. 진공 예하중 베어링

진공 예하중 에어베어링 기술

진공 예하중 기술의 기본적인 원리는 베어링이 물리적인 접촉을 하지 않도록 베어링 표면에 압축된 공기를 공급하는 동시에, 베어링에 예하중을 효과적으로 가이드 면에 주기 위해 베어링 하부에 진공을 형성하는 기술이다. 그 기술은 베어링 표면과 동일한 평면상에, 에어베어링 랜드 또는 어떠한 비활성 표면이 진공 씰로서 사용될 수 있도록 만드는 것이다. 공기를 압축하여 만들어지는 공기켓이 진공을 위한 씰로서 사용될 수 있다는 것은 직관적으로 이해하기 어려우나 실제로는 매우 효과적으로 작용한다. 진공 예하중 베어링이 시간당 5ft^3 ($\approx 0.142\text{m}^3$)보다 적게 공기를 소비하고, 단지 그 것의 반이 진공으로 들어간다는 것을 생각하면 이해하기가 보다 쉬워진다. 게다가 진공으로 흘러 들어가는 적은 유량은 활성 에어베어링 면적들 사이에 대기압 흡이 씰 랜드와 결합될 때 상당히 감소된다. 예하중력은 진공이 빨아들이는 중심 영역에서 형성된다. 외부 대기는 예하중력이 진공 포켓의 사상 면적에 압력차를 곱한 값과 같을 때 효과적으로 베어링을 누른다. 거의 완전 진공의 3분의 2 인, 20 인치 수은($-10\text{psi} \approx -68.95\text{kPa}$)의 진공을 형성하는 것은 상대적으로 쉽다. 큰 일체형 진공 예하중 에어베어링, 예를 들면 12in^2 (면적을 가진 정사각형 에어베어링은 단지 1lb ($\approx 0.454\text{kg}$)의 적재 중량으로 800lb ($\approx 362.89\text{kg}$)가 넘는 예하중력과 $2,000,000\text{lb/in}$ ($\approx 35,716,463\text{kg/m}$)가 넘는 강성을 만들어 낸다.

진공 예하중의 장점은 질량을 추가하지 않아도 베어링에 예하중력을 만들어낼 수 있다는 것이다. 이 기술은 고가속 스테이지에 빠른 정착시간이 요구될 경우에 장점이 된다. 정밀 평면을 벗어난 X 축과 Y 축을 가이드함으로써 리니어 축을 싹아 올려 발생하는 아베 오차와 공차는 운동의 평면도가 추가되면 제거된다. 결론적으로 진공 예하중 베어링은 자기 예하중에서 요구되는 것과 같이 전체 가이드면이 금속이 아니어도 X 축과 Y 축 평면에 동시에 예하중을 가할 수 있다.

진공 예하중 에어베어링의 일반적인 디자인은 중심에 에어베어링 랜드, 주위에 진공을 가지는 것이다. 이런 구성의 단점은 진공 청소기가 작동되는 것처럼 베어링 주위 환경으로부터 공기(와 부스러기)를 끌어당기는 것이다.



보다 좋은 진공 예하중 베어링 디자인은 베어링 중심에 진공을 포함하여 씬을 형성하고 베어링의 전둘레에 에어베어링 램드를 가지는 것이다(그림 19). 주변에 에어베어링 램드를 가짐으로써 발생하는 추가적인 장점은 에어베어링으로부터 대기로의 연속적인 공기 흐름이 베어링 표면의 먼지와 오염물을 막는 것이다.

진공 예하중 에어베어링은 오리피스 또는 다공질 기술을 이용하여 설계된다. 그러나 다공질 베어링이 예기치 않은 공기의 손실이 있더라도 가이드 표면에 손상을 가하지 않는다는 점에서 오리피스 베어링보다 상당한 장점을 가진다. 다공질 재질은 그 자체로 평면 베어링 면과 같이 작용한다. 이러한 이유로 다공질 진공 예하중 에어베어링은 오리피스 디자인 보다 사용하기가 쉽고 더 견실하다.

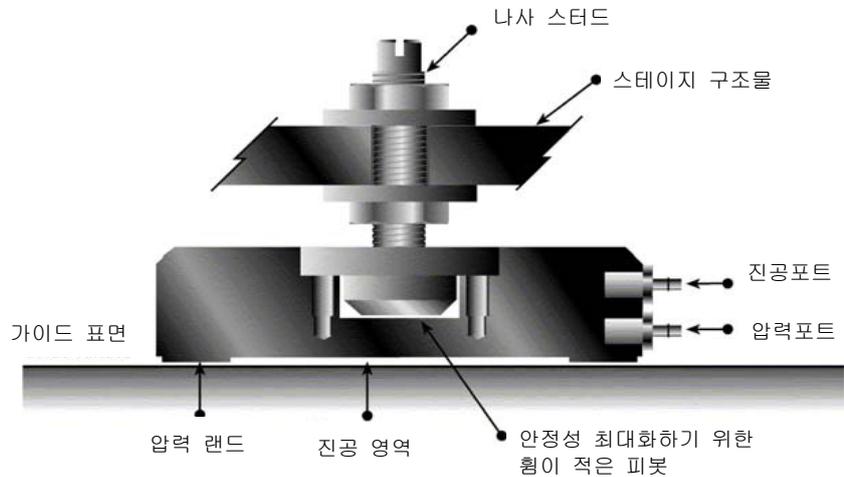


그림 19 - 진공 예하중 에어베어링

다공질 진공 예하중 에어베어링은 규격화되고 모듈화된 제품으로 또는 다른 구조물의 부품에 통합되어 제작될 수 있는(예를 들면 Z 스테이지 하부) 고객 맞춤형 부품으로 이용할 수 있다. 모듈형 진공 예하중 에어베어링은 마찰 또는 히스테리시스(hysteresis)³⁹ 없이도 베어링 면과 높이가 자동 조절되는 굽힘구조물(flexures)에 장착된다. 또한 고객 맞춤형 진공 예하중 베어링은 고가의 정밀 가공을 하지 않고도 정밀 스테이지를 제조하는 뉴웨이에서 특허 출원한 프로세스를 이용하여 적소에 접착될 수 있다. 이 기술이 Electroglas 사의 300mm 웨이퍼 프로버(그림 20)의 X-Y 스테이지에 사용되어 큰 영향을 주었다. 또한 대형, 정사각형 진공 예하중 에어베어링은 석정반 베이스 위를 떠다닐 수 있도록 Z 스테이지 하부에도 사용된다. 진공과 공압을 조절하여 상승 높이 및 강성을 정확하게 최적화할 수 있다. 공기막 두께의 조정성은 20 μ m의 영역에서 초점 맞춤, 직각 형성(squaring), 서브 마이크로 수직 위치결정을 위한 웨이퍼 공정에 사용될 수 있다.



그림 20 - Electroglas 사의 300mm 웨이퍼 프로버에 사용된 고객 맞춤형 진공 예하중 에어베어링

³⁹ hysteresis: 재료에 하중을 가할 때 하중과 재료의 변형과의 관계, 또는 자성재의 자속 밀도와 자화력과의 관계 등은 주기적으로 반복될 때 양자의 관계가 동일 곡선 상을 왕복하지 않으므로 하나의 환선을 그리는 현상.

기구학 및 탄성 평균화

기구학적 설계는 완전 구속조건(exact constraint) 이론에 따른다. 즉, 세 개의 점이 평면을 정의하고 두 점이 선을 정의하고 한 개의 점은 평면과 선에 의해 정의되는 운동축 상의 위치를 기술한다. 기구학적으로 지지되는 구조물에서 강성 및 지지 점을 알면 시스템의 특성을 예측하는데 폐쇄형(closed-ended) 방정식이 사용될 수 있다. 즉, 시스템을 ‘확정적(deterministic)’으로 만들 수 있다. 굽힘구조물에 장착된 모듈형 진공 예하중 에어베어링은 기구학적으로 구조물을 지지하는데 쉽게 이용될 수 있다.

반면, 보의 반대면에 서로에 대해 예하중을 가하는 베어링의 일반적인 통례는 ‘탄성 평균화(elastic averaging)’의 예이다. 이런 경우에 4 개의 베어링 또는 점들이 선을 기술한다. 그러나 보의 두 면이 완벽하게 평행하지 않기 때문에 오차 운동을 예측하거나 정의하기가 더 어렵다. 더욱이, 온도차로 인해 베어링 구조와 보 사이에 크기 변화가 ‘과도 구속조건(over constraint)’의 문제를 두드러지게 한다. 평면상에 장착된 대형, 일체형 진공 예하중 에어베어링은 탄성 평균화의 또 다른 예이다.

알루미늄 공구판 부품에 굽힘 구조로 장착된 3 개의 소형, 진공 예하중 에어베어링은 저가이고 기구학적으로 정확한 스테이지를 만들어 낸다. 그러한 스테이지 제작에는 정밀 가공이 필요하지 않고 제조 및 조립이 간단하다. 압력과 진공력에 의한 비틀림은 베어링 자체로 한정되고 굽힘 구조를 통해 구조물로 전달되지 않는다.

반면, 대형, 일체형 진공 예하중 에어베어링은 훨씬 큰 강성 및 부하 용량을 가진다. 그러나 보다 큰 표면을 평면으로 만들어야 하고 제조 및 조립에 더 많은 숙련도가 요구되며 진공과 압력 부하로 인한 비틀림을 버티기에 충분한 강성을 가진 구조가 되어야 한다. 또한 다른 스테이지 부품과의 통합이 더 복잡해 질 수도 있다. 그리고 마지막으로 서술하지만 결코 가벼이 볼 것이 아닌데, 평면 운동은 확정적으로 되지 않지만 가이드 평면에서의 오차를 평균화하는 경향이 있다.

그럼, 따라야 할 최고의 설계 원리는 어느 것인가? 그것은 귀사의 응용분야와 기계가 확정적이지 않은 것에 대해 불평하는 계측기 제조사와 계측기가 견실하지 않은 것에 대해 불평하는 기계 제조사 사이의 전형적인 논쟁에 대한 귀사의 입장에 달려있다.

기구학:

- 확정적
- 정밀 가공이 필요 없음
- 보다 쉬운 제조
- 한정된 강성 및 용량

탄성 평균화:

- 비확정적
- 정밀 가공이 요구
- 제조가 보다 어려움
- 고강성 및 고용량

13. 에어 부상

에어 부상 설치

필로 블록⁴⁰(pillow block)의 내경에 버⁴¹(burr) 또는 날카로운 모서리가 있는지 검사한다. O-링을 에어 부상 하우징 홈에 적당히 위치시킨다. 부싱을 내경에 삽입하기 전에 O-링과 내경을 알코올로 적신다.

필로우 블록에 40~100psi(≒275.8~689.5kPa) 사이의 청정, 건조, 압축 공기를 공급한다. 깨끗한 천 또는 타월과 알코올로 부싱이 삽입될 핀과 축을 닦는다. 에어를 공급하고 있는 상태로 샤프트⁴²(shaft)를 부싱에 조심스럽게 삽입한다.

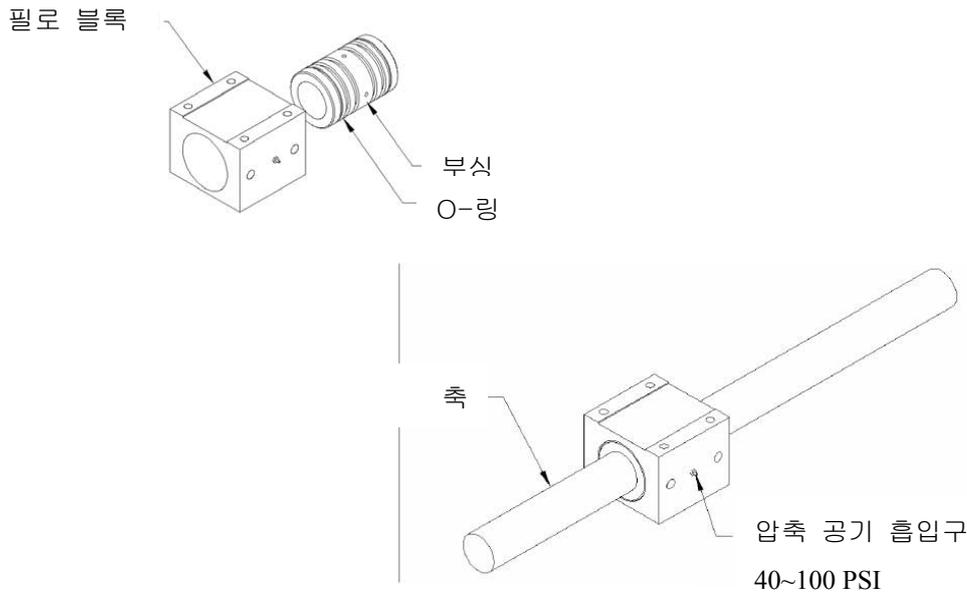


그림 21 - 에어 부상 장착

⁴⁰ pillow block: 필로형 축받이 상자를 사용한 베어링. 일체 케이싱으로서, 외경부는 깊은 홈 볼(ball)의 필로 전용 구면 미끄럼면으로 되어 있고 씰(seal)은 전용품으로 이미 베어링에 끼워져 있음.

⁴¹ burr: 금속 재료를 절단하거나 구멍뚫기하는 경우, 절단면 가장자리에 생기는, 벗겨지거나 갈썩갈썩하게 일어나는 흠집.

⁴² shaft: 축이란 그 중심선의 둘레에 회전하는 환봉이며 보통 강재. 그용도에 따라서 다음의 3 종류로 분류된다. ① 차축(axle): 주로 굽힘모멘트(bending moment)만을 받는 것으로서 기차, 전차의 양 차량을 연결 고정된 차량등. ② 전동축[power]transmission shaft[회전축]: 주로 비틀림 모멘트(twisting moment)를 받아서 오로지 동력을 전하는 것. 기계공장의 전동축에는 주축(main shaft), 선축(line shaft), 공간축(counter shaft, intermediate shaft, ...)의 3 종류가 있음. ③ 주축 main spindle[스핀들축, 스펀들]: 선반의 주축등과 같이 비교적 짧은 축.

에어 부상 슬라이드 조립

부상을 약하게 돌려 샤프트에 압입하면서 샤프트에 말단 고정구(end mount)를 부착한다. 샤프트 사이에 게이지 블록⁴³(gauge block)을 사용하여, 말단 고정구를 베이스에 고정시킨다. 이것으로 샤프트는 평행하게 설치된다. 샤프트 상의 말단 고정구를 고정하고 샤프트의 평행도를 다시 체크한다. 베이스에 말단 고정구를 풀고 다시 조일 수도 있다.

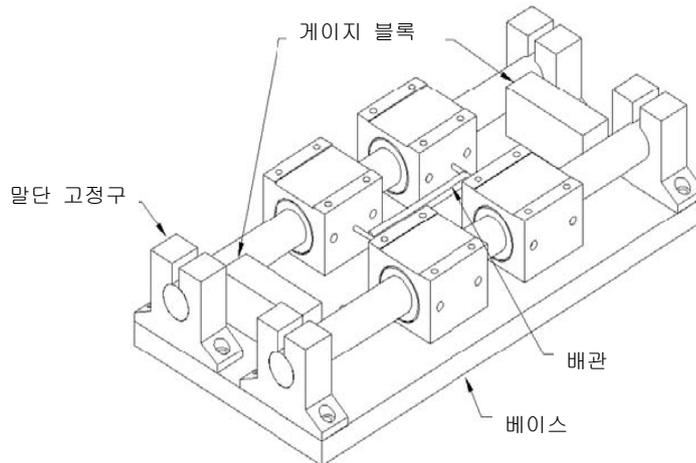


그림 22. 평행도를 맞추기 위한 게이지 블록 사용

공압을 가한 상태로, 상판을 필로 볼력에 맞추고 볼트로 고정한다. 전체 행정에 대해 스테이지가 확실히 자유롭게 떠다니는지 체크한다. O-링은 축의 평행도 또는 상판의 평면도 오차를 보상하기 위해 충분한 컴플라이언스를 제공해야 한다. 이것은 단지 조립 절차의 예제이고 확실히 다른 합리적인 조립 순서가 있다

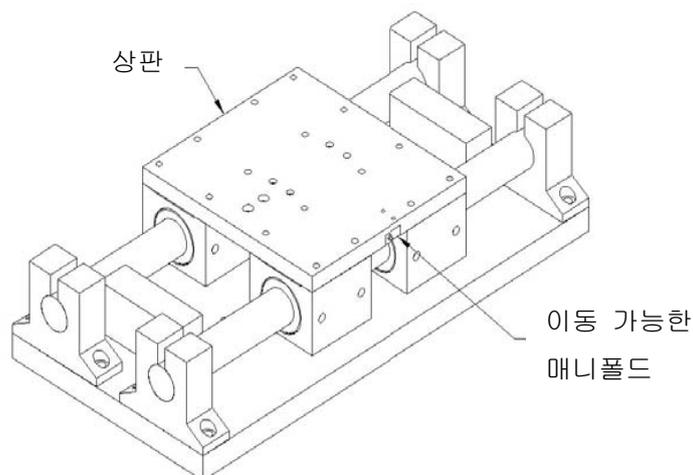


그림 23. 상판 조립

⁴³ gauge block: 블록게이지(block gauge)이라고도 하며, 생산공장의 현장에서 공작용 ·검사용으로도 사용된다. 단면이 직사각형이며, 평행으로 편평한 측정면을 가진 블록으로 되어 있다.

부싱을 필로 블록 하우징에 넣으면 O-링의 컴플라이언스를 제거할 수 있으나 반드시 필요하지는 않다. 필로 블록 하우징은 두 개의 O-링 세트의 중심과 동축으로 정렬되고 180° 떨어져 있는 홀을 가진다. 공기를 공급한 상태로, 반대면으로 에폭시(epoxy)가 나올 때까지 한 쪽 측면에 에폭시를 주입하고 주입구와 배출구를 씰링하기 위해 테이프를 사용한다. 에폭시는 공기를 주입한 상태로 경화되도록 둔다. 이 방법은 고강성이 요구되는 경우에 유용하고 높은 정밀도를 가지도록 레일을 정렬할 수 있다.

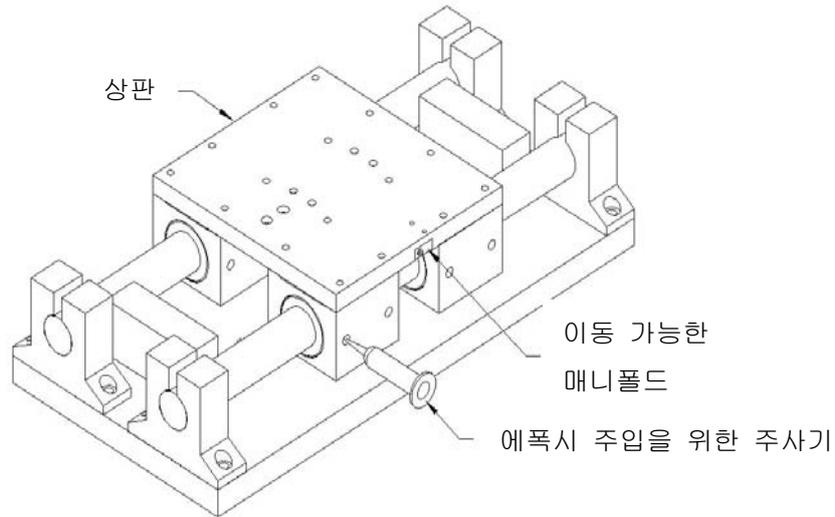
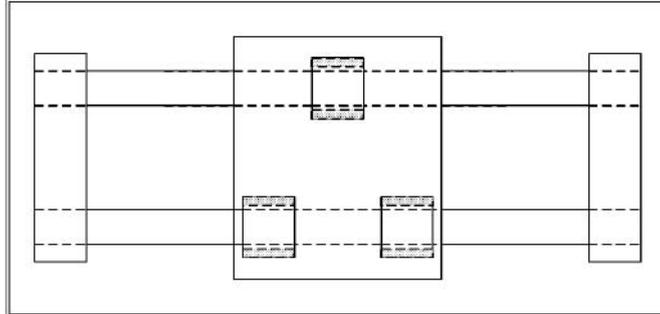
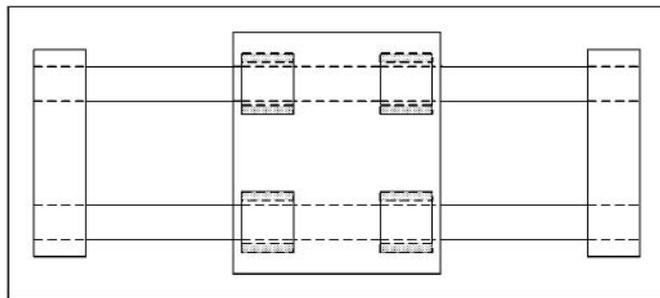


그림 24. 에어 부싱 접착 장소

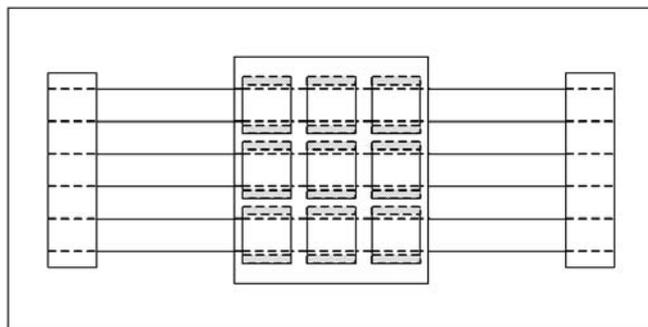
전형적인 구성



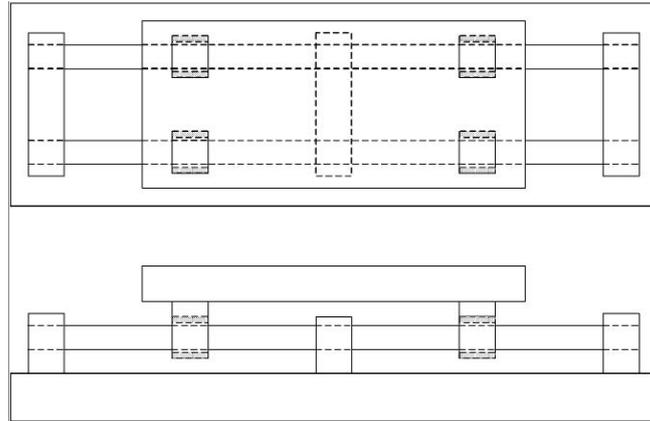
5 축의 운동을 제한하기 위해 모두 3 개의 에어 부싱이 필요하다.



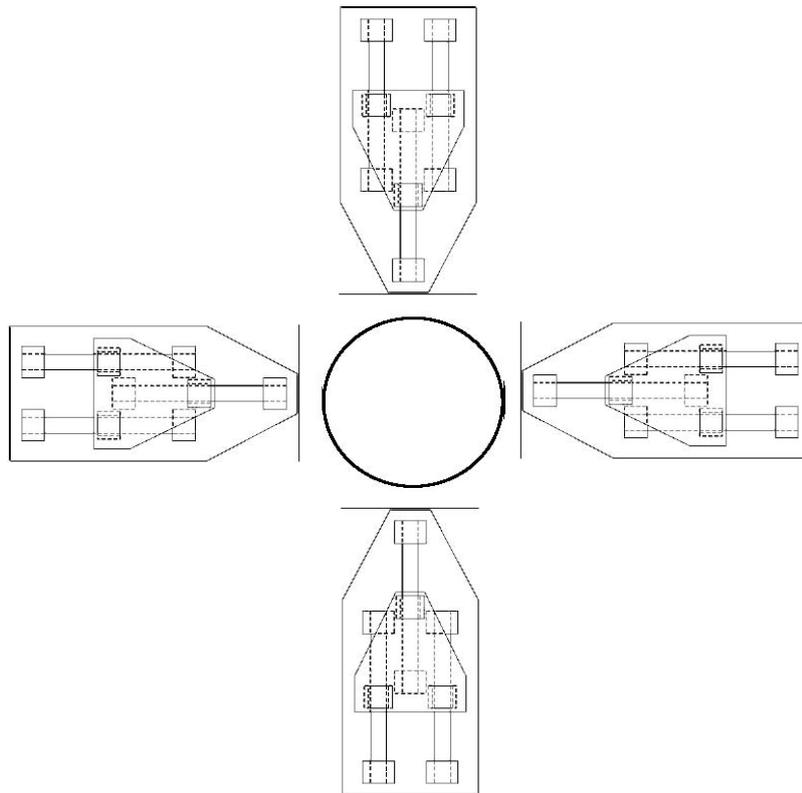
가장 전형적인 구성은 4 개의 에어 부싱으로 리니어 슬라이드를 만드는 것이다.



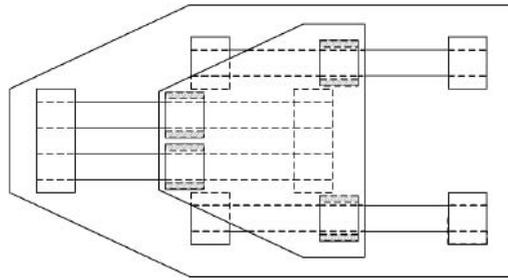
보다 높은 부하 용량이 요구되는 경우에는 부싱을 추가하거나, 샤프트를 추가할 수 있다.



말단 지지 샤프트의 처짐은, 특히 스테이지가 길 경우, 컴플라이언스의 주요 원인이므로, (만일 적용이 가능하다면)중간 지지는 강성을 크게 증가시킨다.

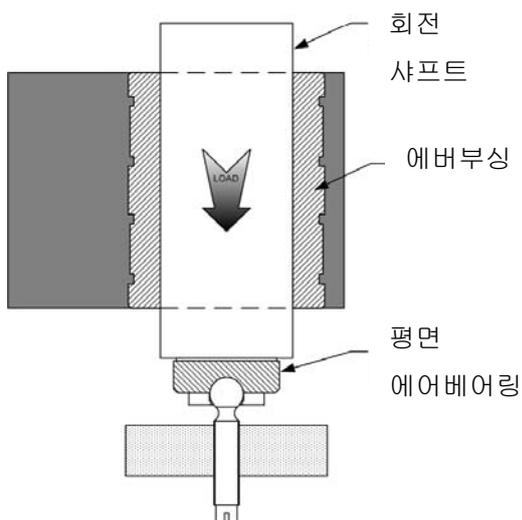
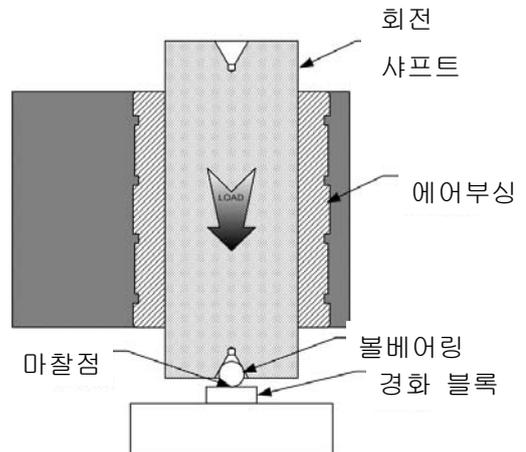


에어 부상 스테이지는 회전테이블 주위에 배열하는데 적합하다.



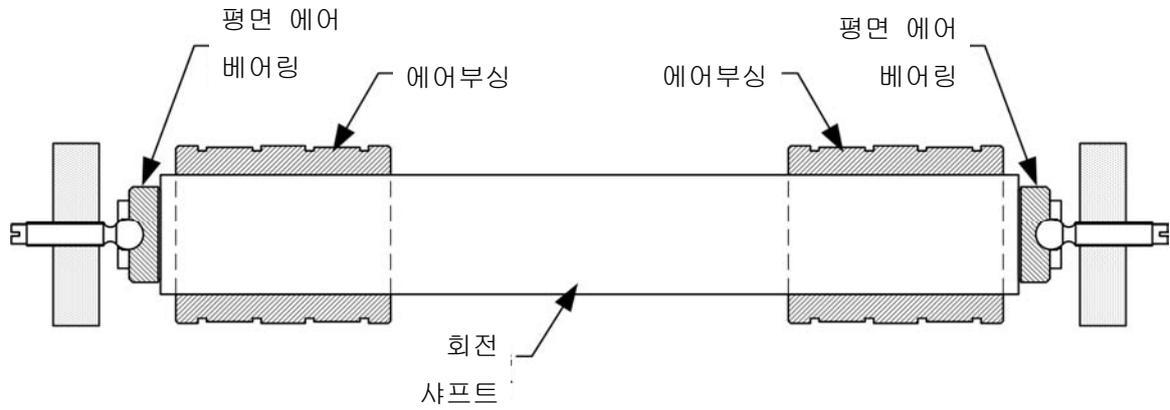
높은 고강성, 단면이 낮은 스테이지는 부싱을 사용하여 구성될 수 있다. 다 수의 베어링과 샤프트로 인해 조립 작업이 어려울 수 있으므로 반복 기술(replication technique)을 이용하여 문제를 최소화할 수 있다.

외경 연삭기(OD grinding machine)에서 지지되는 회전 샤프트의 경우, 샤프트는 정확한 원뿔 중심을 가지려고 할 것이다. 볼 베어링은 이 원뿔 중심에 고착되고 마이크로미터 앤빌⁴⁴(anvil)과 같은 경화 표면에 대해 회전한다. 결과적으로 약간의 쿨롱 마찰(coulomb friction)이 생기나 마찰의 양은 매우 작다.



다른 경우에는 샤프트의 말단을 평면으로 가공하고 정지 에어 베어링으로 샤프트를 지지하는 것이 좋다.

⁴⁴ anvil: 단조나 판금작업에서 공작품을 올려 놓고 작업하는 주철 또는 철강제의 성형대



카운터 밸런스(counter balance) 또는 웨브(web)⁴⁵ 핸들링을 위한 무마찰 풀리(pulley)를 만드는 일반적인 적용

⁴⁵ web: I 형강, H 형강, 그 밖에 이와 유사한 단일재나 조립재에 있어서 양쪽 플랜지의 중간 복부를 말함.

14. 회전테이블

스피닝(spinning)⁴⁶ 또는 스피들 가공품은 최소 가능 오차 운동을 하려고 할 경우에 가장 중요한 부품이다. 초정밀 기계 기술을 추천한다. 다행스럽게, 종래의 정밀 선삭(turning)과 연삭(grinding)은 두개의 임계면(레이디얼과 스러스트)이 한번의 처킹으로 끝나므로 뛰어난 결과를 만들어 낼 수 있다. 처킹력으로 인해 스피들이 변형되지 않도록 주의해야 한다. 뉴웨이는 당사의 에어베어링 고객을 위해 초정밀 다이아몬드 선삭 가공물을 제공한다.

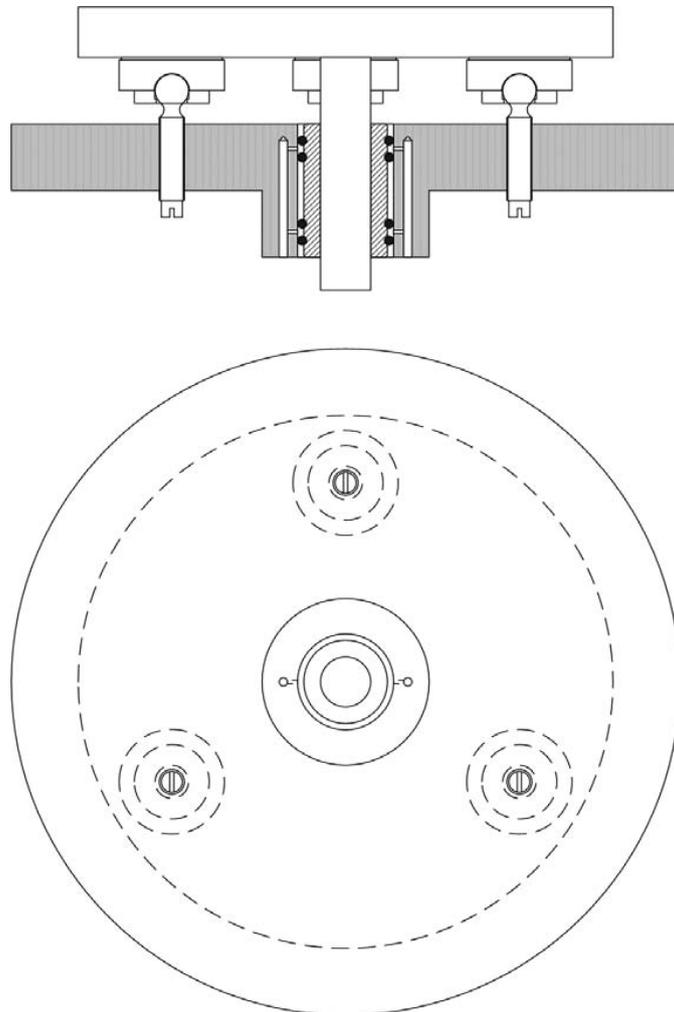


그림 25. 회전 테이블

⁴⁶ spinning: 스피닝 선반에 원형을 장착하고 이것에 금속판을 눌러대어 같이 회전시키면서 판금을 원형에 따라서 훑어내는 가공

전체 높이 및 회전축의 각도를 조정하기 위해 볼 스토퍼를 사용할 수 있다. 일단 셋팅되면, 레이디얼 강성을 증가시키기 위해 부싱이 삽입될 수 있다. O-링은 부싱이 스피들 축을 정렬하도록 해준다. 판 위에 3 개의 원뿔 중심은 조정할 필요가 없는 평면과 높이를 만들 것이다.

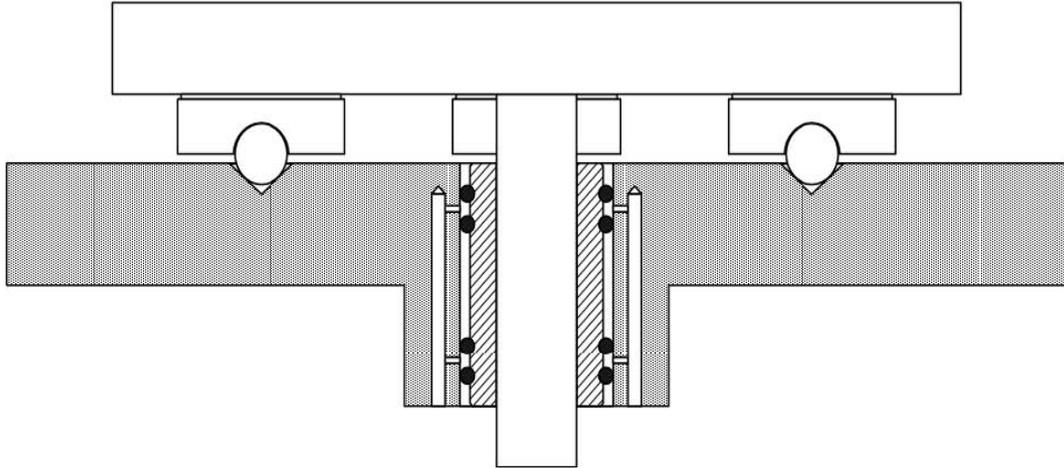


그림 26. 에어베어링 회전 테이블

제 5 장: 추가 정보

15. 공기 공급

에어베어링은 공기 유회로서 대기를 순환을 위한 편리한 탱크로 간주한다. 특히 진공 또는 초청정 환경에서 사용할 경우에는 차등 펌핑 홈(differentially pumped groove) 또는 배기 홈(scavenge groove)이 공기 또는 분진(particulate)을 진공 또는 청정 환경으로 누출되지 않도록 할 수 있다.

에어베어링에는 상대적으로 물과 오일이 없도록 공기를 공급해야 한다. 상대적인 청정도가 어떻게 구성되는 지에 대해서는 ISO 공기 품질 등급표를 참조한다. 뉴웨이는 4 또는 그 이하의 품질 등급을 추천한다.

	품질 등급	분진 (분진크기, μm)	물 이슬점 $> F^{\circ}$ 100psi g 에서(ppm. vol.)	오일 (증기 포함, mg/m^3)
	1	0.1	-94(0.3)	0.01
	2	1	-40(16)	0.1
추천 사양	3	5	-4(128)	1.0
최소 사양	4	15	+37.4(940)	5
	5	40	+44.6(1240)	25
	6	-	+50(1500)	-

다른 형태의 에어베어링은 다른 형태의 오염에 민감하다는 점에 주목한다. 예를 들면, 다공질 베어링은 에어 튜브 피로로 인해 내부에서 발생하는 테프론(teflon) 테이프, 실런트(sealant) 또는 라이너(liner)⁴⁷ 부스러기와 같은 분진에 영향을 받지 않는다. 사실 직접적으로 다공질 베어링 공기 공급부로 다공질 모래를 넣어도 영향을 받지 않으나 오리피스 또는 단차 보상(step compensated) 베어링에 대해서는 치명적이다. 오일로 인한 오염은 다공질 베어링보다 오리피스 베어링에서 제거하기가 더 쉽다. 보통 물 오염은 부품이 산화되지 않도록 깨끗한 건조 공기를 시스템에 공급함으로써 억제될 수 있다.

⁴⁷ liner: 2 개의 부재 관계를 일정하게 유지하고 그 조정을 용이하게 하기 위하여 넣어 두는 얇은 끼움쇠, 예를 들면, 베어링의 캠과 본체 사이에 끼우는 베어링 끼움쇠나 실린더 본체와 피스톤 사이에 끼우는 실린더 라이너 등을 말한다.

16. 유량 측정

공기는 압축성 유체이다. 만일 대기압에서 1 ft³(≈0.03 m³)의 공기를 60psi(≈414kPa)로 압축하면 (대기압의 약 4 배), 부피는 0.5ft³(≈0.014m³)이 될 것이다. 이런 비선형 관계는 벤츄리⁴⁸(venturi) 유량계(flow meter)를 사용할 경우, 압축된 공기의 유량 측정에 적용될 수 있도록 압력에 기초한 수정 계수를 요구한다. 그것은 SCFH⁴⁹라고 말하는 것이 맞다고 할 수 있으나, 단지 유량계의 출구측이 대기압일 경우 관련된다. 질량 유량계는 예외인데, 실제로 분자를 계산하므로 수정을 요구하지 않지만 보통의 유량계 가격의 거의 10 배이다. 질량 유량계는 때로는 값을 보정하기 위해 설치되기도 한다.



그림 28. 질량 유량계



그림 28. 유량계

벤츄리 유량계는 확실히 게이지 상에서 시간당 표준 입방 피트의 체적 유량을 말한다는 점에 유의한다. 이것은 단지 유량계의 출구측이 대기압일 경우이다. 에어베어링 응용분야에서 유량계는 베어링의 공급 라인에 사용되고 게이지로부터의 출구 압력은 대기압의 4~6 배이다. 이런 경우에 측정되는 유량은 단위 시간당 입방 피트의 체적 게이지 유량, 게이지 CFHG 이다. CFHG 가 사용될 경우에는 항상 그것과 관계된 압력이 있어야 하고 대기압 조건에서란 가정하에서 시간당 단위 입방 피트의 체적 유량이다.

⁴⁸ venturi: 직관의 도중 유로를 좁혀 그 대경부와 소경부의 압력차를 측정하여 유량을 측정하는 관을 말함

⁴⁹ SCFH(standard cubic feet per hour): 단위 시간당 입방 피트 체적

17. 유량

$$Q_2 = Q_1 \sqrt{P_2 / P_1}$$

Q_1 = 관측된 유량계 값 (CFHG)

Q_2 = 압력에 대해 수정된 실제 유량 (SCFH)

P_1 = 표준 대기압, 14.7psi (≈101.4kPa)

P_2 = 실제 압력, 14.7psi + 유량계 내부 psi 압력

CFHG = Cubic Feet per Hour Gage

SCFH = Standard Cubic Feet per Hour

SCFM = Standard Cubic Feet per Minute

60psi 상태에서의 SCFH 는 CFHG 에 2.25 를 곱함.

80psi 상태에서의 SCFH 는 CFHG 에 2.53 를 곱함.

120psi 상태에서의 SCFH 는 CFHG 에 3.027 를 곱함.

18. 배관

여러 개의 에어베어링에 공압 배관을 하는 것은 상대적으로 단순하다. 공급 라인은 직렬 또는 개별적으로 연결된다. 축에 있는 각각의 베어링을 직렬 또는 개별적으로 배관하고, 배관된 각 축에는 매니폴드를 가지는 것이 가장 일반적이다. 매니폴드의 공급에는 큰 튜브를 사용하고, 개별 베어링에 분기하는 데는 작은 튜브를 사용한다.

뉴웨이는 고객의 편의를 위해 튜브 및 다양한 형태의 피팅들을 제공한다. 더 많은 정보를 위해 당사 웹사이트 www.newwayairbearings.com 을 방문한다. 만일 귀사가 OEM 및 여러 대의 장비를 만들려고 한다면, 이런 제품을 직접적으로 구입하는 것이 더 저렴할 것이다. 공급자가 될 회사와 제휴하는 것이 귀사에 더 좋다. 품질이 좋은 튜브 및 피팅은 비용과 누출 및 호환성 문제를 다루는데 소비되는 시간을 절약할 수 있다.

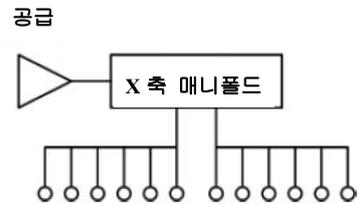
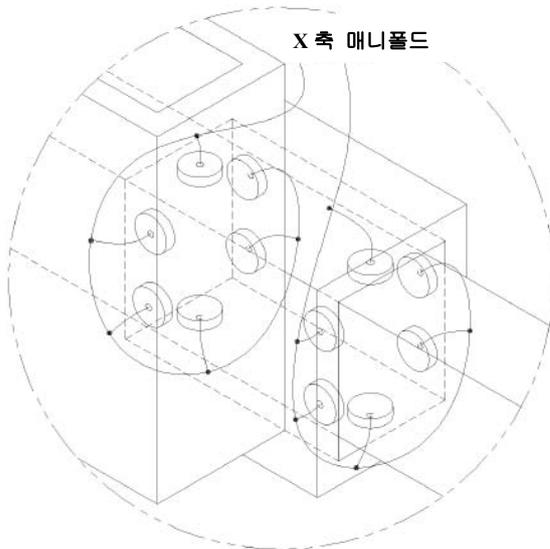
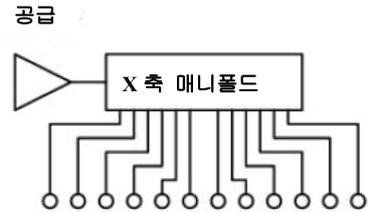
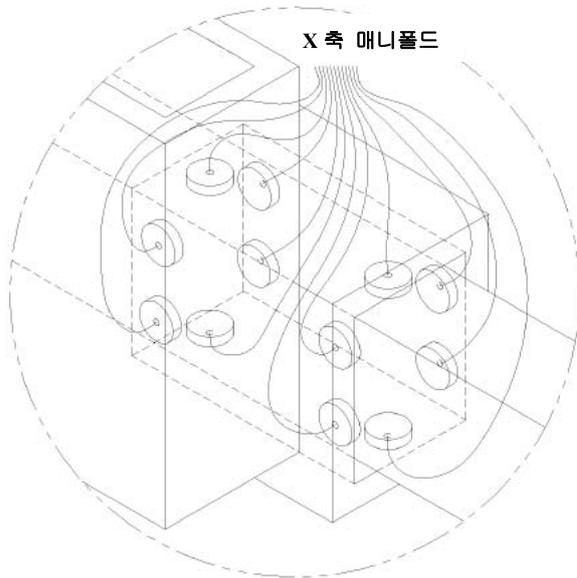


그림 30. 에어베어링에 공기를 공급하기 위한 연결 옵션

19. 베어링 갭을 통한 공기 흐름

베어링 갭을 통한 공기 흐름은 갭에 매우 민감하며 사실 갭의 3차 함수이다. 75lb(≒34kg)의 부하를 가진 직경 2"(≒50.8mm)베어링을 200 μ m 상승시키기 위해서는 4ft³/h(≒0.1m³/h)의 공기를 소비해야 할 것이다. 같은 부하를 가진 베어링을 400 μ m 상승시키기 위해서는 64ft³/h(≒1.8m³/h)의 공기가 필요할 것이다. 작은 갭으로 제한 높이를 유지하는 것이 유량과 동력 조건을 감소시킨다는 것을 쉽게 알 수 있다. 공기 흐름이 적다는 것은 깨끗하고 건조한 상태의 공기가 적게 요구된다는 것이므로 유지 비용을 감소시킬 수 있다.

개별 베어링의 피치 모멘트 강성을 비교할 경우 다공질과 오리피스 에어베어링의 이런 영향이 어떻게 두드러지는지 주목하는 것이 흥미로울 것이다. 오리피스 베어링은 베어링 면에 대한 흐름, 갭의 각도 변화에 의존적이므로 즉 갭의 한쪽이 커지고 다른 쪽이 작아질 경우, 유효한(available) 흐름이 최소 저항 유로(큰 갭)에서 빠르게 압력을 손실하고 가장 필요한 영역(작은 갭)에서 멀어지므로 불안정한 상태가 될 것이다. 반면 다공질 베어링은 작은 갭 영역에서 발생하는 압력을 유지한다. 그렇기 때문에 다공질 베어링이 보다 높은 경사 모멘트 용량 및 강성을 가진다.

보상되지 않은 저널 베어링도 같은 영향으로 인해 동작하지 않는다. 처음에는 환형 홈(annular groove)에 압력을 가함으로써, 공기압은 평균화되고 샤프트를 지지한다고 생각할 수 있다. 사실상 다른 면의 2배 더 큰 갭이 주위 통로보다 더 적은 제한 조건을 형성하므로 샤프트는 그 면의 갭을 완전히 막을 정도로 한 쪽 면을 내리 누를 것이다.

20. 공기 공급 조건

공기 품질

에어베어링에 공급하기 위해 사용되는 압축 공기는 적절하게 청정화되고 건조되어야 한다. 에어베어링의 성능 및 유효 수명은 압축 공기의 품질에 크게 좌우된다. 효율적인 시스템은 압력 손실의 최소화, 물, 오일, 분진, 녹, 다른 외부 물질과 같은 오염물질의 제거를 보장한다. 분진은 뉴웨이 다공질 에어베어링의 성능 및 수명에 영향을 끼치지 못할 것이나 오일과 물은 영향을 끼칠 것이다. 베어링의 명시된 성능과 유효 수명을 보장하기 위해 다음의 최소 환경 기준을 만족할 것을 추천한다.

ISO 8573.1 품질 등급

	품질 등급	분진 (분진크기, μm)	물 100psi g 에서 이슬점 압력 > °F	오일 (증기 포함, mg/m^3)
	1	0.1	-94	0.01
	2	1	-40	0.1
추천 사양	3	5	-4	1.0
최소 사양	4	15	+37	5
	5	40	+45	25
	6	-	+50	-

에어베어링에 대한 압축 공기의 여과 및 건조

범용 필터들은 하향 스트림(downstream)을 얻고 병합 필터(coalescing filter)를 손상시키지 않도록 분진 덩어리를 제거하기 위해 사용된다. 병합 필터는 범용 필터를 지난 모든 분진을 포함하여 오일 및 물(액체)을 제거하기 위해 사용된다. 건조 필터는 물이 응결되기 전에 증기를 제거하기 위해 사용된다.

구성 부품	분진 (분진크기, μm)	100psig 에서 증기 이슬점 $>^{\circ}\text{F}$	오일 및 물 (mg/m^3)
범용 필터	25	N/A	N/A
병합 필터	0.1	N/A	0.5
건조 필터	N/A	-40	N/A

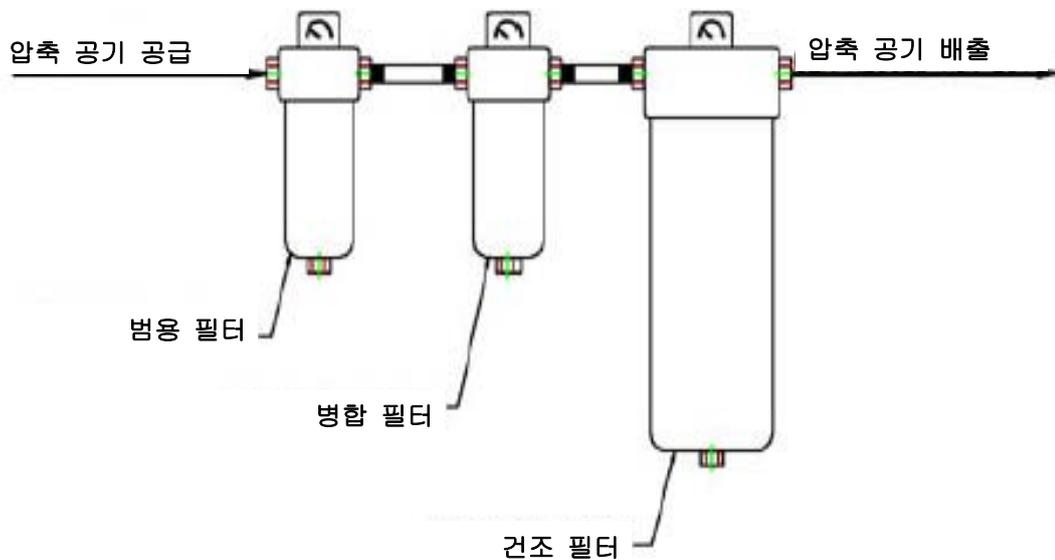


그림 31. 압축 공기 여과 및 건조

유량 단위 환산표

<u>1 Cu. Ft. / Hr</u>		<u>1 Cu. Ft. / Min.</u>	
0.0166	Cu. Ft. / Min.	60	Cu. Ft. / Hr.
0.4719	LPM	28.316	LPM
28.316	LPH	1699	LPH
471.947	CC / Min.	28317	CC / Min.
28317	CC / Hr.	1,699,011	CC / Hr.
0.1247	Gal. / Min.	7.481	Gal. / Min.
7.481	Gal. / Hr	448.831	Gal. / Hr
<u>1 CC / Min.</u>		<u>1 CC / Hr.</u>	
60	CC / Hr.	0.0167	Cu. Ft. / Min.
0.000035	Cu. Ft. / Min.	0.0000005	Cu. Ft. / Min.
0.021	Cu. Ft. / Hr	0.00003	Cu. Ft. / Hr.
0.001	LPM	0.000017	LPM
0.06	LPH	0.001	LPH
0.00026	Gal. / Min.	0.000004	Gal. / Min.
0.0159	Gal. / Hr.	0.00026	Gal. / Hr.
<u>1 LPM</u>		<u>1 LPH</u>	
60	LPH	0.0166	LPM
0.035	Cu. Ft. / Min.	0.00059	Cu. Ft. / Min.
2.1189	Cu. Ft. / Hr.	0.035	Cu. Ft. / Hr.
1000	CC / Min.	16.667	CC / Min.
60,002	CC / Hr.	1000	CC / Hr.
0.264	Gal. / Min.	0.004	Gal. / Min.
15.851	Gal. / Hr.	0.264	Gal. / Hr.
<u>1 Gal. / Min.</u>		<u>1 Gal. / Hr.</u>	
0	Gal. / Hr.	0.0167	Gal. / Min.
0.1337	Cu. Ft. / Min.	0.002	Cu. Ft. / Min.
8.021	Cu. Ft. / Hr.	0.1337	Cu. Ft. / Hr.
3.785	LPM	0.063	LPM
227.118	LPH	3.785	LPH
3,785,415	CC / Min.	63.069	CC / Min.
227,115	CC / Hr.	3785	CC / Hr.



New Way Air Bearings 50 McDonald Blvd. Aston, PA 19014 610.494.6700 www.newwayairbearings.com