

<論 文>

다공질 정압공기 베어링을 이용한 직진 테이블에 있어 주위환경이 움직임 정밀·정확도에 미치는 영향

한 응 교* · 허 석 환** · 노 병 옥**

(1988년 2월 27일 접수)

Influence of the Environments on the Movement Precision of the Guide Table Using Externally Pressurized Porous Air Bearing

Eung Kyo Han, Seok Han Hur and Byung Ok Rho

Key Words : Straight-Guide Table (직진 안내테이블), Pressurized Air Bearing (정압공기 베어링), High-Precision-Straight Movement (고정도 직진운동), Heat Generation (발열), Super-Precision-Measurement (초정밀 측정)

Abstract

Recently, the precision required by precision manufacturing and machinery related to electronics is within the domain of submicron that it is difficult to evaluate them by traditional measuring equipments and methods. Accordingly, precision of sub $0.1\mu\text{m}$ super precise position-decision-apparatus and straight-guide air bearing have been researched and they are almost ready to be used. In utilizing straight-guide-table for super-precision-measurement which used externally pressurized porous air bearing as a way of externally pressurized air bearing, the high-precision-straight movement is the most crucial. In this study, the researcher conducted the experimental study with trial manufacture to see how the surrounding temperature and support condition influenced the selection and allocation of the machine composing element which is important to the high-precision-straight movement. The researcher finding showed that when the property of the rail part and support part of the semi-closed slider form is different, the heat generation of the working motor and surrounding temperature influence the high-precision-straight movement significantrly and the researcher showed the influence of the condition of central load and eccentric load to the straight movement precision when the support stand of the straight-table was supported by numerical values.

1. 서 론

정압 공기 베어링에 대한 연구는 1960년대에 이르러 이론적 발전과 더불어 급속히 진전⁽¹⁻³⁾ 되었

* 정회원, 한양대학교 공과대학 정밀기계공학과

** 정회원, 한양대학교 대학원

으며 1980년대에 와서는 최적설계로⁽⁴⁻⁶⁾ 인한 실용화에도 성공을 거두고 있다. 특히 다공질소결체를 베어링에 사용한 다공질 정압공기베어링은 단일급 기공에 의한 방식보다 성능이 우수하고 안정성이 뛰어나 주목을^(4,10,11) 받고 있다. 그러나공기베어링을 채용한 직진안내 테이블의 우수한 정적, 동적 특성 이외에 실용상의 문제점으로 $0.1\mu\text{m}$ 이하의

고정도 직진운동을 실현하는데 있어서는 주위조건, 사용조건 등이 움직임정밀·정확도에 다소간 영향을 미치고 있어 이에 대한 체계적인 측정 연구가 필요하다.

즉 직진테이블의 형식에 있어 반구속형(semi closed type)은 전면구속형(close type)에 비해 슬라이더의 단면이 T자형으로 되어 있어 강성이 저하되고 급기압에 의해 슬라이더의 측면에 미소변형이 생기는 단점은 있으나 직진정밀·정확도에 크게 영향을 미치는 레일의 탄성변형을 어느정도 막을 수 있도록 레일과 지지부 사이에 지주를 바쳐 이를 보강하고 있으므로 실용상 이를 많이 쓰고 있다. 그러나 이 형식도 열팽창계수가 다른부품(Rail: SUS 420J2, support: SS41)으로 구성되어 있어 슬라이더를 이동시키는 구동모타의 발열 및 주위사용 온도가 슬라이더의 움직임정밀·정확도에 무시할 수 없는 영향을 미칠 것으로 본다. 레일은 그 조건으로부터 부식을 방지하여야 하고 부하에 의한 레일자체의 탄성변형을 막아야 하며 표면가공처리가 중요시되어 현재로서는 스테인레스 강을 많이 쓰고 있다.

그러나 지지부를 스테인레스강으로 사용할 경우 이송장치 및 구동장치의 복잡한 구조로 인해 가공이 어려운 뿐 아니라 가격이 높은 등 비경제적인 실정이다.

또 정밀계측기의 위치 결정기 및 안내기구의 목적으로 제작된 직진 테이블은 받침지지점이 3지점 방식으로 비교적 이동에 안정한 상태로 되어 있으나, 슬라이더가 레일을 이동하게 될때 레일자체의 탄성 변형뿐 아니라 지지점과 지지점 받침대 간의 미소변형이 일어나게 되고 편심하중을 받고 이동할 때 3지지점 간의 불균형으로 인한 슬라이더 움직임정밀·정확도의 변화가 예상된다.

따라서 본 연구에서는 직진테이블 시작품을 통해 주위환경에 의한 영향 중 주위온도에 따른 움직임정밀 정확도의 변화 및 지지조건이 움직임정밀·정확도에 미치는 영향에 대해 실험 연구하였다.

2. 실험방법

2.1 직진 안내테이블 시작품의 성능

Table 1은 본 실험에서 사용한 가이드테이블의 성능 및 제원을 나타낸 것이다.

(1) 슬라이더에 부착되어 있는 다공질재료는 브론즈

Table 1 The performance of guide table

Element	Capacity	
Supply pressure	0.6 Mpa(5kg/cm ² G)	
Flow rate	30Nl/min	
Maximum stiffness	12.9 kgf/ μ m	
Load capacitance	600N(61kgf)	
Stroke	200mm	
Move velocity	2mm/sec	
Body mass	35kg	
Bearing clearance	Horizontal	11 μ m
	Vertical	9 μ m

(Bronze)계 소결체(Sn 10%, Cu 90%)로서 공칭 공경 2 μ m, $\phi 20 \pm 1$ mm, $t=10$ mm이며 슬라이더 상하, 좌우 6개의 패드(pad)에 각각 4개씩 배치되어 있다.

(2) 레일부의 가공정밀·정확도(이하 정밀정확도를 정도라고 표기함)는 수직면이 평행도 1 μ m, 평면도 0.1 μ m, 직각도 0.5 μ m이고 수평면이 평행도 1 μ m, 평면도 0.1 μ m이다.

(3) 레일부와 지지부의 볼트체결력은 15.68N.m로서 사용볼트의 사양에 준하였으며 이는 완전한 체결이라 본다.

(4) 슬라이더와 레일 간의 수직·수평방향 베어링 간격은 설계상의 값과 거의 일치하도록 조정되어 있다.

2.2 온도조건과 움직임 정밀·정확도

(1) 온도영향 실험에 있어서의 항온장치

직진안내테이블의 부품인 레일과 지지부간의 볼트접합부에서의 온도변화에 의한 탄성변형 관계를 측정하기 위하여 (본 실험에서는 일반측정기 사용 온도 20 $^{\circ}$ C를 기준으로 하여 가변온도 1 $^{\circ}$ C~2 $^{\circ}$ C를 목표로 하였음) 항온장치를 제작하였다.

목표온도를 얻기 위해 항온실내에 두께 60mm의 발포수지로 대형 항온막(1300 \times 1800 \times 1300mm)를 설치하고 대류에 의한 공기유동을 막기 위해 정반 위에 투명아크릴(970 \times 840 \times 970mm)를 설치, 박스내의 각위치에 따른 온도차를 $\pm 0.4^{\circ}$ C로 하였다.

또 직진테이블의 레일부와 지지부의 표면온도와 내부온도를 일치시키기 위해 서모커플(ther-

mocouple, No. EXSK(CA) $\phi 0.65$, 분해능 0.1°C , 사용온도 $-200^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$, Okazaki)를 각 요소에 접촉시켰으며 온도검출은 13 채널 온도기록계를 사용하여 1분 간격으로 온도변화를 자동입력 기록시켰다.

(2) 레일 및 지지부의 조립전후의 직진도 측정

슬라이더(sl原因)의 직진정도는 레일의 형상정도에 좌우된다. 레일부와 지지부의 초가가공정도가 우수하다고 하더라도 조립하였을 경우 보울트의 체결로 인해 레일부의 형상정도가 변화될 우려가 있다. 따라서 보울트의 체결에 있어서 부품의 가공정도가 변화되지 않도록 보울트 체결력에 세심한 주의가 필요하다. 직진도 측정은 만능표면 형상측정기(EC-10A(주) Kosaka 연구소)를 사용하였다.

(3) 슬라이더의 이동에 따른 움직임 정밀·정확도 측정방법

(i) 수평방향, 수직방향 직진정밀·정확도

각 직진정도는 온도범위 $18^{\circ}\text{C} \sim 28^{\circ}\text{C}$ 의 구간에서 레일 및 지지부의 보울트 체결온도를 기준으로 하여 측정하였다. 수직·수평방향 직진정도의 검출에 사용된 축침식 픽업(pick-up)은 표면거칠기 측정용으로서 검출 데이터는 straight-edge의 표면거칠기가 포함되지 않도록 측정기 내장 high-pass 필터를

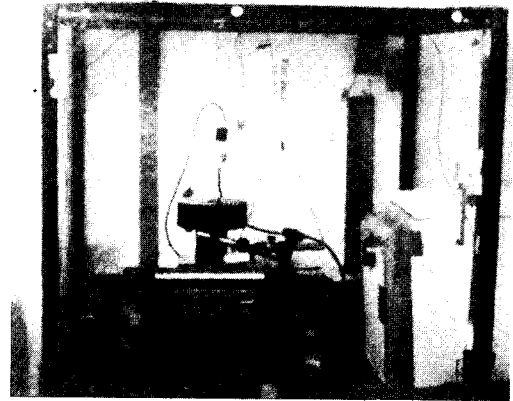


Fig. 1 Isothermal apparatus

사용함으로써 고른 파형을 관찰할 수 있었다. 또한 수직정도의 기준이 되는 straight-edge는 알루미늄이나 세라믹(alumina ceramic)제를 사용함으로써 주위 온도 변화에 대한 변형은 거의 무시할 수 있다.

Fig. 3은 수평방향, 수직방향 직진정도의 측정방법을 표시한다. 수직방향 직진정도 측정에서 슬라이더가 200mm stroke를 완료하였을 때 픽업을 통

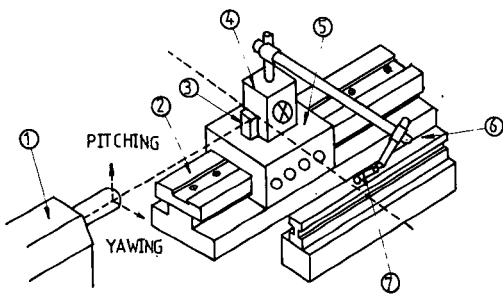
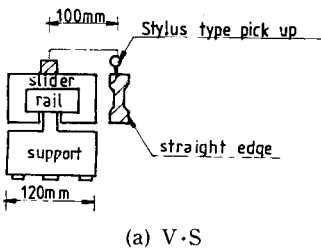
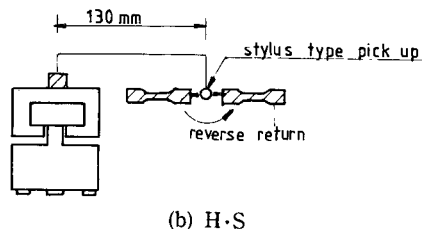


Fig. 2 Measuring apparatus

NO.	Element
1	Autocollimator
2	Rail
3	Mirror (flatness $0.01\mu\text{m}$)
4	Magnetic stand
5	Slider
6	Straight edge (ceramics)
7	Stylus type pick-up ($R: 800\mu\text{m}$, $P: 4\text{mN}$)



(a) V·S



(b) H·S

Fig. 3 Measurement of vertical and horizontal straightness with stylus type pick-up.

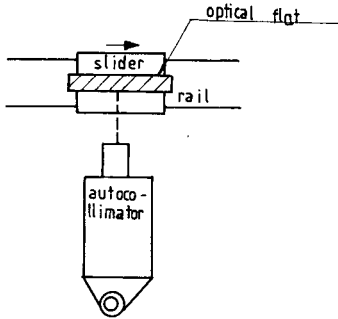


Fig. 4 Measurement method of rolling angle

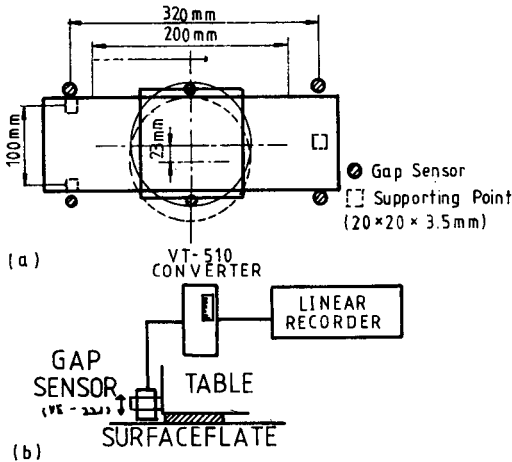


Fig. 5 Sensor position(a) and measuring method(b) for displacement detecting

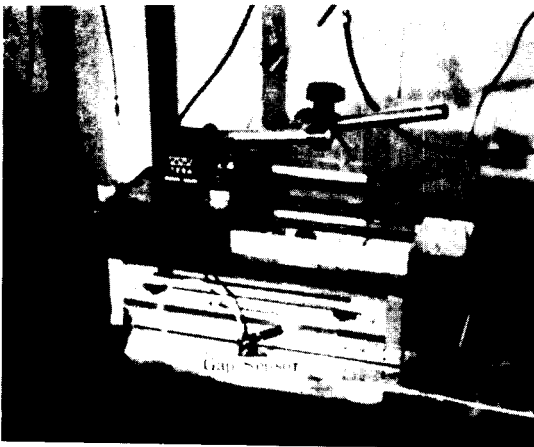


Fig. 6 Measuring apparatus

해 검출된 파형은 straight-edge의 직진형상과 슬라이더의 직진형상이 포함된 데이터이므로 우선 수평방향 직진정도 실험을 하여 straight-edge를 반전시켜 얻는 2개의 데이터를 통해 각각의 직진형상을 분리시켜 얻는다.

(ii) 회전성분 자세정밀·정확도

슬라이더의 이동시 패드부의 표면거칠기, 레일부의 불균질한 형상 등에 의해 발생하는 회전력에 기인한 직진정도로써 요잉(yawing), 피칭(pitching), 롤링(rolling) 성분이 있으며 이들 측정에 있어서는 테이블 전체의 자세변화도 함께 측정할 수 있다. 측정방법으로 피칭과 요잉의 각 변화는 Fig. 2와 같이 autocollimator를 이용 X, Y방향으로 측정한다. 또 롤링각을 측정하기 위해서는 Fig. 4에서와 같이 autocollimator를 슬라이더 측면에 놓고 optical flate(160×85×20mm, flatness 0.05μm, Nikon)를 슬라이더 위에 수평으로 세운 후 3점으로 나누어 결과를 얻는다.

이때 autocollimator의 출력은 직선기록계에 접속하여 애널로그양으로 출력했다.

2.3 하중 및 3지지점간의 불균형 조건에서의 움직임 정밀·정확도

지지부의 3지점의 중심하중 및 편심하중(슬라이더상의 부하에 의한 하중)조건에서 슬라이더가 전스트로크(stroke)를 이동하게 될 때 직진테이블의 균형관계를 측정하고 3지지점간의 불균형에 의한 움직임 직진정도의 변화를 측정한다. 이때 직진 테이블의 받침대로 평면도 0.5μm 이하로 최종 래핑가공된 주철제정반을 사용하였으며 또한 지지점의 평면도는 0.2μm이하이다.

변위 검출을 위해 Fig. 5와 같이 갭 센서(ONO SOKKI VE-221)를 배치하였으며 이때의 변위량은 직선기록계로써 애널로그양으로 검출했다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 레일부와 서포트부의 형상정밀·정확도

다공질 패드부가 맞닿게 되는 레일(rail)부의 각부분 형상직진도를 조립전후로 나누어 측정된 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 조립후 레일부의 수평방향 직진도보다는 수직방향 직진도가 다소 약화됨을 알 수 있다.

3.2 온도조건에 따른 움직임 정밀·정확도 변화

Fig. 8과 같이 온도변화에 따른 수직방향 직진정도는 조립온도를 기준으로 하여 정도변화율이 거의 같음을 알 수 있다. 이 때 정도 변화율은 $0.04 \sim 0.05 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ 이다.

이 결과는 레일과 지지부의 열팽창계수(rail: SUS420J2 $11.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, support: SS41 $9.9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)가 다름에 따라 발생하는 바이메탈 현상에 기인함을 알 수 있다. Fig. 9에서는 회전성분 자세 정도인 피칭 정도변화를 나타내고 있다. 이 또한 조립온도를 중심으로 하여 변화하고 있음을 알 수 있다.

이때 피칭의 정도 변화율은 약 $0.5''/^\circ\text{C}$ 이며 수직방향 직진정도의 변화를 인식할 수 있다. Fig. 10은 온도에 따른 수직방향 직진정도를 나타낸 것으

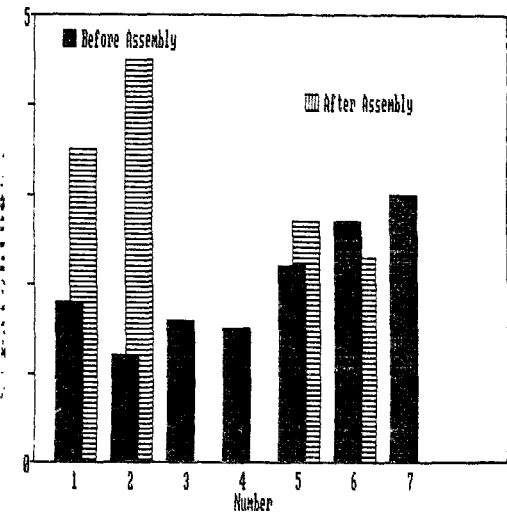
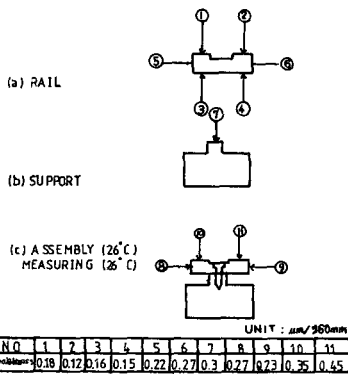


Fig. 7 Measuring accuracy of part and assembly

로서 20°C 의 볼트 체결조건과 같은 조건에서의 수직방향 직진정도는 200mm 스트로그에서 $0.14 \mu\text{m}$ 로 나타나는데 실제의 슬라이더 직진정도보다 다소 악화된 정도를 나타내고 있다.

이는 실험상의 문제점으로서 직진도데이터 검출

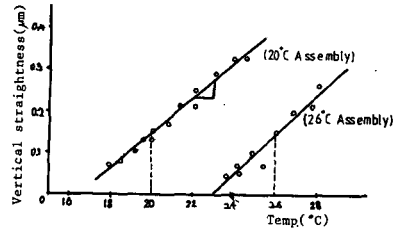


Fig. 8 Variation of vertical straightness for temperature

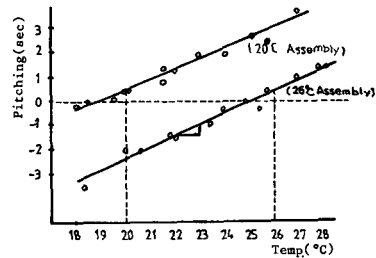


Fig. 9 Variation of pitching angle for temperature

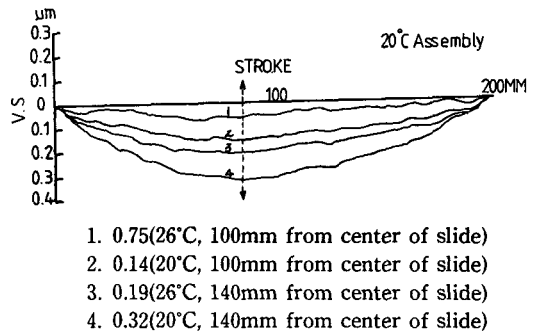


Fig. 10 Inclination of vertical straightness for temperature

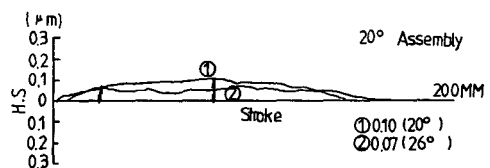


Fig. 11 Inclination of horizontal straightness for temperature

1 SEC=1/3600 degree

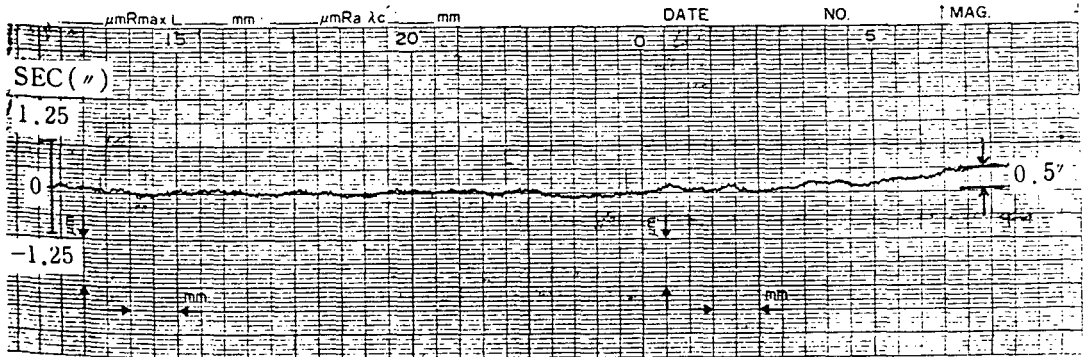


Fig. 12 Detecting form of yawing angle (assembly 20°C)

이 슬라이더 중심에서 100mm 위치에서 straight edge를 통해 검출된 것이므로 사실상 롤링의 영향이 거리쪽에 대해 크게 작용한다. 가령 straight edge의 위치를 슬라이더 중심으로 140mm 떨어진 위치에서의 같은 조건 실험 결과 좌우측 모두 0.19μm/200mm로 검출되어 롤링의 영향이 큼을 확인할 수 있다. 실험에 이상적이라 생각되는 슬라이더 바로 상단에서의 측정은 설치에 있어서의 난점으로 사실상 곤란하다.

한편 수평방향 직진정도는 Fig. 11에서와 같이 20°C 체결조건에서 20°C 측정시 0.1μm/200mm, 26°C 측정시 0.07μm/200mm로서 온도변화에 민감하지 않았으며 이때 직진정도의 반복성은 없었다. 또한 롤링정도 및 요잉정도 변화율도 일정온도 변화(20°C~26°C)에 따라 그 값이 일정치 않았으나 그 차이는 모두 0.5"/200mm 이하였다.

20°C 조립, 20°C 측정시 롤링 정도 0.9"/200mm
요잉 정도 0.5"/200mm

Fig. 12, 13은 요잉과 롤링의 검출데이터이다.

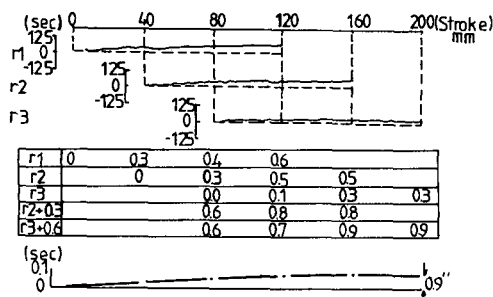
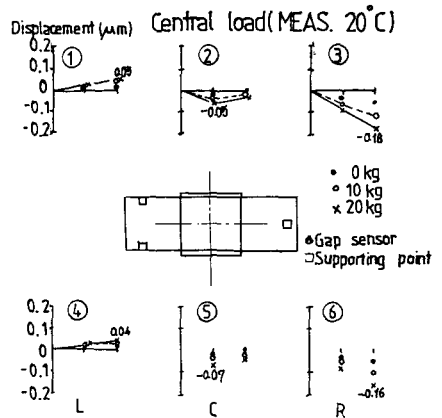


Fig. 13 Detecting form of rolling angle (assembly 20°C)

3.3 하중조건에 따른 지지부의 불균형이 움직임 정밀·정확도에 미치는 영향
슬라이더가 이동함에 따라 3지점에 의해 발생하

With Sn Liner



Without Sn Liner

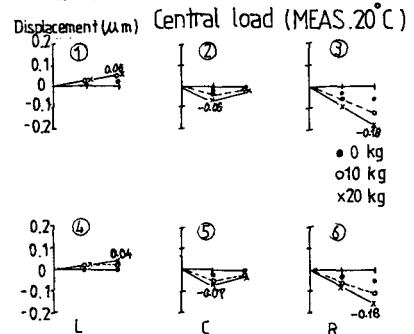


Fig. 14(a) The balance relation of each sensor position on a three supporting point (20°C assembly)

는 직진방향과 좌우방향의 불균형을 측정한 결과를 Fig. 14(a~d)에 나타냈다. 여기서 지지점과 정반 상호간의 마찰 및 표면 거칠기 등에 의해 발생하는 미소변형을 유화시키기 위해 상온에서 신률(伸率)이 우수하여 많이 사용되고 있는 두께 $40\mu\text{m}$ 석반 라이너(liner) ($40\times 40\text{mm}$)를 경계면에 끼움으로서 사용하지 않을때와의 비교를, 중심하중 편심하중으로 나누어 시행하였으며 조립온도에서의 측정과 온도변화에 의해 레일, 지지부간의 변형이 생긴 후의 균형 관계도 측정하였다.

이때 하중조건은 중심하중은 최대 20kg, 편심하중 최대 10kg으로 하였으며 시작한 직진테이블의 최대부하능력은 설계치로써 약 60kgf이다.

3.4 고 찰

(1) 하중을 받고 있을 때의 각 지지부의 불균형은 3지지점의 압축변형보다는 지지부를 받치고 있는 정반의 변형으로 생긴 것으로 보인다. 또한 $40\mu\text{m}$ 석반 liner를 지지점으로 끼웠을 때 진행방향측과 좌측방향측의 균형은 라이너를 사용하지 않았을 때

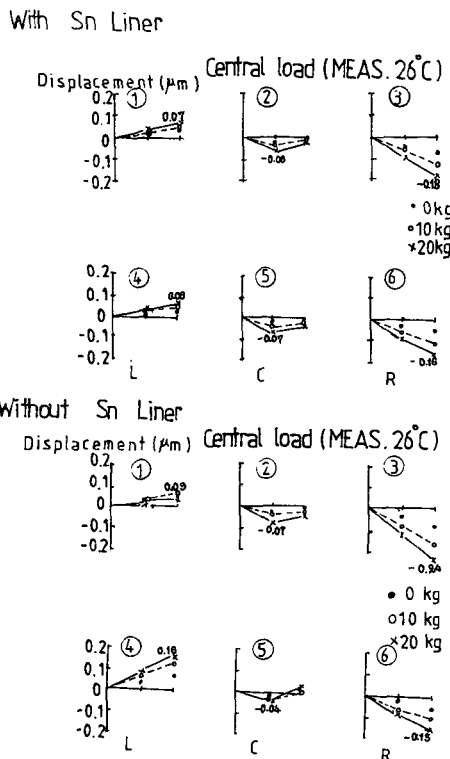


Fig. 14(b) The balance relation of each sensor position on a three supporting point (20°C assembly)

보다 비교적 유화된 균형상태를 보이고 있다.

(2) Fig. 14(a~d)에서와 같이 조립온도 측정하에서 중심하중을 받고 슬라이더가 이동완료하였을 때의 1지지점측의 변위와 2지지점측의 변위는 무게에 비례한 기울기를 나타내고 있으며 좌우방향의 불균형은 거의 나타나지 않는다.

그러나, 온도의 영향을 받아 지지부의 변형이 생겼을 때 중심하중을 받아 이동하더라도 좌우방향의 불균형이 발생한다.

무게에 따른 직진정도의 변화에 있어서 직진방향의 기울기 변화는 측정 데이터(Fig. 15(a))의 shift 각으로도 확인되나 실제로 직진테이블의 불균형에 의한 직진정도의 변화는 명확히 나타나지 않고 다만 하중자체에 의한 슬라이더의 처짐량(추정계산치 $0.01\mu\text{m}/10\text{kg}$)과 비교적 일치한 정도를 보이고 있다(Fig. 15(b)).

(3) 중심으로부터 23mm 떨어진 10kg의 편심하중 조건에서의 수직방향 직진정도는 Fig. 16(a~d)에

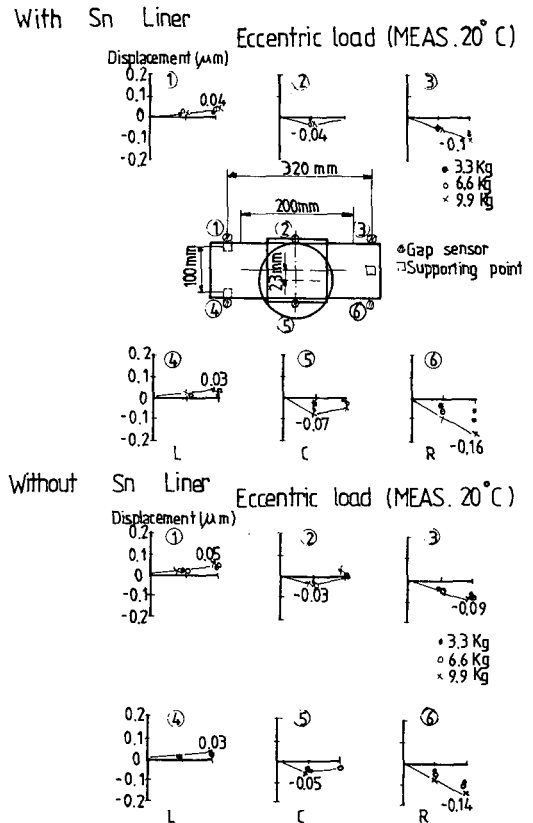
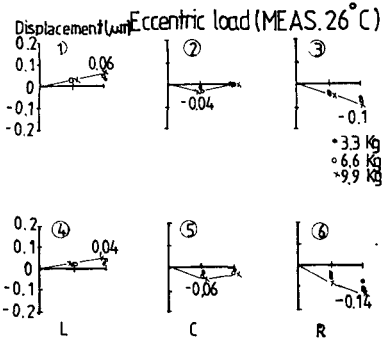


Fig. 14(c) The balance relation of each sensor position on a three supporting point (20°C assembly)

With Sn Liner



Without Sn Liner

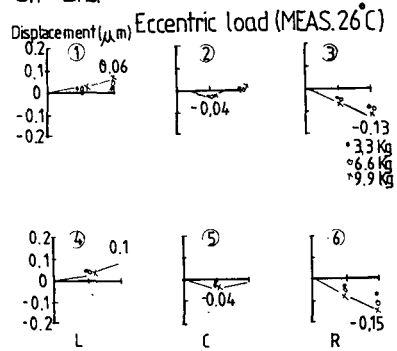


Fig. 14(d) The balance relation of each sensor position on a three supporting point (20°C assembly)

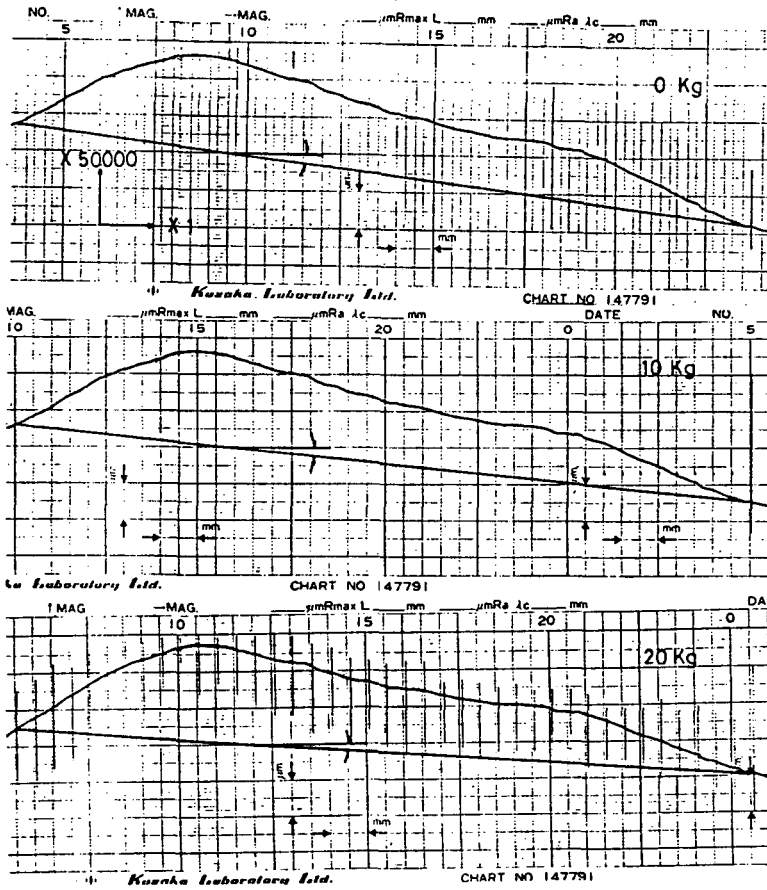


Fig. 15(a) Measuring data

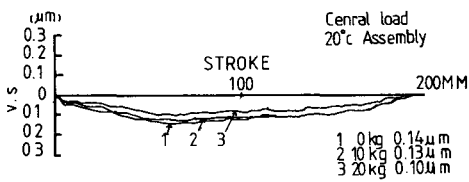


Fig. 15(b) Vertical straightness for load variation

서와 같이 중심하중치와 비교해 볼 때 그 차이는 0.04~0.06 μ m 정도이다.

그 원인으로는 편심하중에 의한 레일부의 비틀림에 의한 것보다는 지지부의 좌우방향 불균형에 의한 원인이 큰 것으로 사료된다.

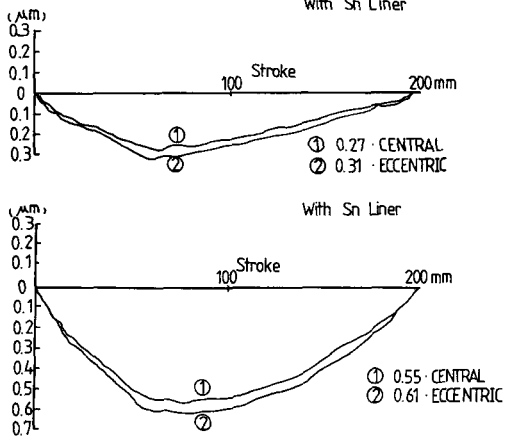


Fig. 16(a) Comparison of straightness for load condition

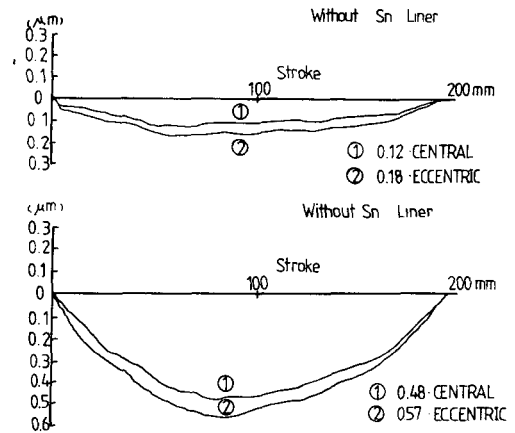


Fig. 16(b) Comparison of straightness for load condition

또한 석반라이너를 사용하였을 경우 직진정도 0.02~0.03 μm 감소가 나타났다.

4. 결 론

(1) 직진테이블에 있어 레일과 지지부의 열팽창계수가 다름에 따라 온도조건에 가장 영향을 많이 받는 움직임 정밀·정확도 인자는 수직방향 직진정밀·정확도와 피칭자세정밀·정확도였다.

이는 온도의 영향에 거의 선형적으로 변화하며 본 시작품에 있어서는 그 값이 각각 0.05 $\mu\text{m}/\text{C}$, 0.5"/ C 로 나타났다. 따라서 직진정밀·정확도 0.1 μm 이하의 고정도를 유지하기 위해서는 구성요소의 선정 및 사용온도의 제한 등 적절한 배려가 필요하다.

(2) (i) 하중조건에서 중심하중을 받을 경우 테이블의 설계부 하용량에 비교적 만족한 수직방향 직진 정밀·정확도를 얻을 수 있었으나 자세정밀·정확도는 3지점으로 생기는 진행 방향축의 자세변화로 인해 약화되고 있다.

(ii) 편심하중 조건의 경우 수직방향 직진정밀·정확도의 변화는 본 시작품에 대해 10kg 하중시 중심하중보다 약 0.04~0.06 μm 증가하고 피칭자세정밀·정확도는 약 0.9~1"의 증가를 보인다.

(iii) 지지점에 Sn 라이너를 사용했을 경우 하중조건 10kg에 대해 0.02~0.03 μm 의 수직방향 직진정밀·정확도 감소가 나타났으며 피칭정밀·정확도는 0.1~0.3"의 감소가 나타났다. (i), (ii), (iii)의 결과로서 3지점의 경우 정밀허용차를 고려한 편심 및 중심하중의 제한 및 지지점의 합리적인 설정이 중요시 된다.

참 고 문 헌

- (1) B. C. Manumdar, 1976, "Gas Lubricated Porous Bearing: A Bibliography", *Wear*, 36, pp. 269~273.
- (2) B. C. Majumdar, Jan 1976, "Dynamic Characteristics of Externally Pressurized Rectangular Porous Thrust Bearings", *Journal of Lubrication Tech.* ASME, pp. 181~186.
- (3) B. C. Majumdar and J. Schmidt, 1975, "Design of Externally Pressurized Rectangular Porous Thrust Bearing", *Wear*, 32, pp. 1~8.
- (4) K. C. Singh and N. S. Rao, 1982, "Static Characteristics of Merostatic Porous Rectangular Thrust Bearing", *Wear*, 77, pp. 229~236.
- (5) Essam Salem and Methat Shawky, 1978, "An Experimental Investigation into the Performance of Externally Pressurized Rectangular Air Bearing", *Wear*, 50, pp. 237~257.
- (6) 十合, 普一著, 1984. 12, "氣體軸受設計から製作まで", 共立出版社.
- (7) Nikkei Mechanical, 1983. 4, "量産體制が整つた氣體軸受高剛性・高速・低コスト化進む", *Nikkei Mechanical*, 25, pp. 116~120.
- (8) 正橋善幸, 井上陽一, "高精度位置決め機構の開発", *日本機械學會*, 第926回, 講演論文集, No. 840-8, pp. 19~21.
- (9) 伊庭剛二, "氣體軸受とその應用研究について", (株)不二越(技術資料 AB 02-1), pp. 1~26.
- (10) 伊庭剛二, 1983, "空氣軸受平面内(エアースライド)", *NACHI*, Vol. 39, No. 1, pp. 33~45.
- (11) 韓應教, 朴天弘, 1984, "多孔質 靜壓 트리스空氣・베어링을 이용한 直進테이블의 性能測定", *大韓精密工學會*, 1984年度 秋秀學術大會 抄錄集.
- (12) 水兼正博, 1982, "空氣半浮上案内面の開發とその特性", *潤滑*, 第27卷, 第7號, pp. 481~486.
- (13) 里見忠篤, 1981, "空氣式靜壓案内に關する研究(靜剛性および安定性に關する理論と實驗)", *日本精密機械學會*, 第47卷, 第10號, pp. 1216~1222.