

# 이송속도 변화에 따른 다공질 공기 베어링의 거동에 관한 연구

A study on the dynamic characteristics of the porous air bearing with moving velocity change.

여태환†·정순철\*·이재응\*\*·최형길\*\*\*·지홍규\*\*\*·김혁\*\*\*

Tae Hwan You, Soon Chul Jung, Jae Eung Lee, Hyoung Gil Choi, Hong Kyu Ji  
and Hyuk kim

**Key Words** : Porous air bearing(다공질 공기 베어링), Dynamic stiffness(동강성), Natural frequency(고유진동수), dampig ratio(감쇠비)

## ABSTRACT

A lot of researches have been done in order to investigate the dynamic characteristics of the aerostatic porous bearing, most of them used analytical approaches and only a few used experimental approaches. However the experimental condition used in the previous experimental approaches was not realistic, where the porous bearing has been fixed and only the mass supported by the bearing was allowed to move vertically. The dynamic stiffness obtained by those experimental setups may be different with the real case where the mass and the bearing move together in horizontal direction.

In this paper, the dynamic characteristics of the horizontally moving aerostatic circular porous air bearings are investigated by the experimental approach. The experimental apparatus was designed to realize its real operating condition used in most industrial applications. The experimental results were compared with the previous experimental ones.

## 1. 서론

각종 산업기계는 높은 생산성이 요구되면서 장비의 고속화가 현장에서 관심 주제로 부상되고 있다. 본 논문의 관심대상인 에어 베어링을 장착한 반도체 관련 제조 장비 역시 고속화문제가 필두로 제시되고 있다.

에어 베어링은 직접 접촉을 하지 않아 운행 중에 마찰과 마모가 적으며, 높은 강성과 감쇠를 갖는 장점을 가진다. 또한 에어 베어링의 주입압력과 간극에 따라 강성이 변화하는 특성을 가지고 있다. 실제 현장에서 사용하는 에어 베어링의 경우 이러한 특성과 조립과정상의 어

려움으로 인해 정확한 간극을 알 수 없는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제는 운행 중 베어링과 가이드 면의 접촉을 야기하고 그로 인해 생기는 분진이 에어 베어링의 표면을 막는 현상을 유발시킨다. 그로 인해 작동 불능 상태를 야기하고 잦은 교체로 인해 제품의 단가는 올라가게 된다.

에어 베어링의 제작사에서는 특정 공급압력에 해당하는 간극의 강성 값만 제공하고 있다. 하지만 실제 현장에서는 특정 압력이 아닌 다른 압력으로 구동을 하기 때문에 그 특성을 파악하는데 어려움이 많다. 이에 따라 다공질 공기 베어링의 강성 특성에 대한 실험적 연구가 많이 이루어졌으나[1,2,3,4] 실제 시스템의 구동환경과는 다른 조건에서 실험이 이루어져 실제 시스템에서의 강성특성과 실험값과는 다르게 나타날 수 있다.

이러한 어려움 때문에 에어 베어링의 정확한 강성을 규명하여 실제 현장에서 적용하려는 노력이 필요하다. 본 논문은 에어 베어링의 실제 현장과 유사한 조건을 구현하여 에어 베어링의 정확한 강성을 규명하는데 그 목적이 있다.

† 중앙대학교 기계공학부

E-mail : duxoghks@hanmail.net

Tel : (02)820-5284, Fax : (02) 814-9476

\* 한국 철도 기술 연구원

\*\* 중앙대학교 기계공학부

\*\*\* 삼성전자(주) 메카트로닉스 연구소

## 2. 실험장비



Fig. 1 The experimental setup

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험 장치이다. 이 실험 장치는 크게 가이드 빔과 캐리지로 구성되어 있다. 가이드 빔은 그라나이트(granite)로 제작하고 길이를 약 2500mm로 하여 캐리지 이송 시 가속, 등속, 감속구간이 충분히 확보될 수 있도록 설계, 제작 하였다. 캐리지의 재질은 알루미늄으로 제작하였으며 무게는 30kg (type1)으로 제작되었고 하중 30kg(type2)을 추가 할 수 있도록 제작되었다. 캐리지에는 크기가 40mm인 에어베어링이 Fig. 2에서 보는 바와 같이 밑면에 4개를 부착하여 캐리지를 부상시키며 수평방향으로 각각의 측면에 2개씩 4개의 에어베어링이 부착되었다. 에어 베어링 간극의 측정을 위해 레이저 변위 센서를 캐리지 좌우측 가운데에 각각 1개씩 총 2개를 사용하였다. 레이저 반사면으로 가이드 윗면의 중심부에 금속레일을 설치 하였다. 캐리지의 이송은 리니어 모터로 움직이며 캐리지 이송을 위한 리니어 모터의 제어는 PMDI사의 Motion control & data acquisition system을 사용하였다.

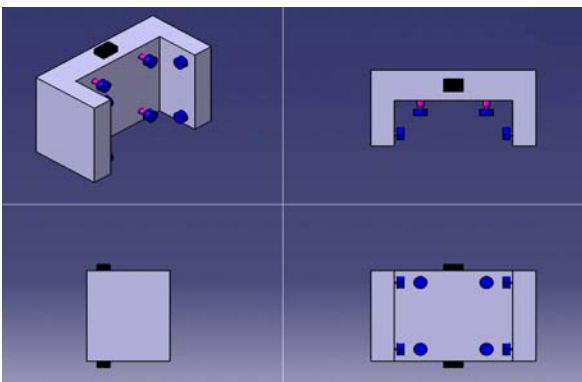


Fig. 2 Carriage system design

## 3.1 베어링 이송 속도에 따른 간극 변화

### (1)레이저 센서의 기준면 측정

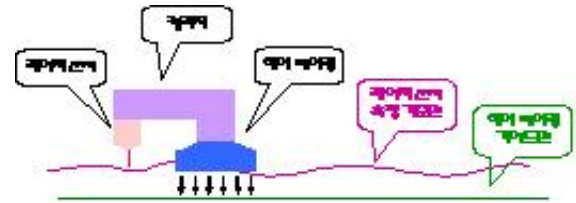


Fig. 3 Laser sensor calibration

Fig.3에서 알 수 있듯이 본 연구에서 제작된 실험 장치는 에어베어링 가이드 면과 레이저 센서 측정 기준면이 다르기 때문에 간극의 변화와 레이저 센서 측정 결과가 다르게 나올 수 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 캐리지 부상전의 레이저 센서 측정값, 즉 레이저 센서 측정 기준면의 표면조도 및 편평도와 캐리지 부상 후 정적 상태에서의 레이저 센서 측정값을 이용하여 간극의 변화를 측정하였다. 이러한 레이저 센서의 측정값의 보정은 레이저 센서 측정면의 표면조도 및 편평도 측정값을 이용해야 하나 캐리지가 한번 부상하여 이동 후 완전히 가라 앉는 동작에는 많은 시간이 소요 되므로 레이저 센서 측정면 일부를 측정하여 이를 비교하는 실험을 수행하였다. 그 결과 표면조도와 정적인 상태의 측정값의 Cross correlation 계수가 Fig.4에서 보듯이 0.9597로 매우 유사성이 크므로 정적인 상태의 측정값으로 표면조도를 대신하여 기준면으로 사용하여도 무방하다 할 수 있다. 따라서 기준면의 보정을 위하여 전구간을 1mm씩 이동하면서 정적인 상태의 데이터를 측정하여 기준면으로 삼았다.

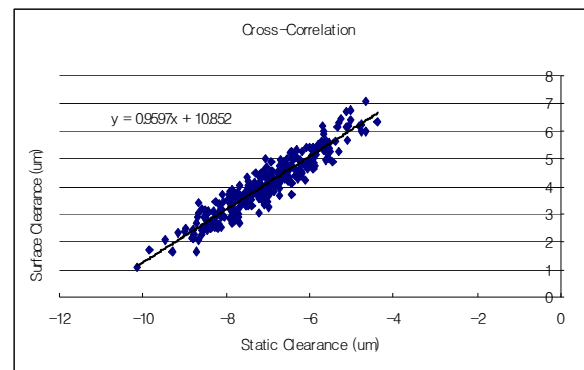


Fig. 4 Static clearance & surface roughness - Cross correlation

## (2) Type1 캐리지의 베어링 이송 속도에 따른 간극 측정

캐리지의 이송 속도는 50mm/s에서 400mm/s 까지 50mm/s의 간격의 변화를 주어 측정을 하였다. 전체 구간에서 속도의 변화에 따른 등속으로 이송하는 구간의 간극의 변화를 측정하여 결과를 Fig.5와 같이 나타내었다.

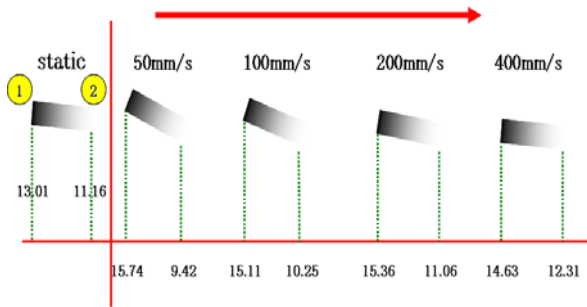


Fig. 5 Carriage motion w.r.t velocity change(Type1)

그림에서 볼 수 있듯이 정적인 상태에서 캐리지가 약간 기울어져 있는 것을 알 수 있다. 또한 정적인 상태가 깨지고 움직이기 시작할 때 그 기울기는 더욱 증가하고 속도가 증가하면 다시 수평을 유지하는 것을 볼 수 있다. 캐리지의 진행 방향을 반대로 하여 간극의 측정하였고 그 결과가 Fig. 6에 나와 있다.

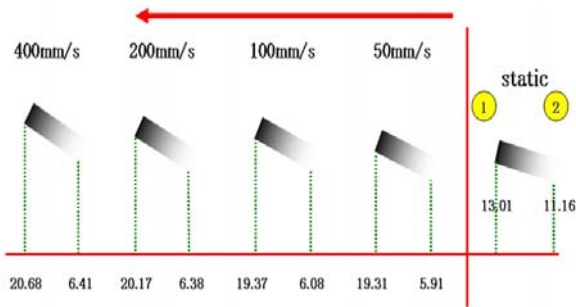


Fig. 6 Carriage motion w.r.t velocity change(type1\_reverse)

역방향의 경우 속도가 증가 할수록 평행을 유지하는 것이 아니라 시계방향으로 기울어지려는 경향을 보인다. 또한 그러한 현상으로 인해 간극차이가 점차 커지는 경향도 나타난다. 초기 정적인 상태에서의 기울어짐은 캐리지에 부착된 각종 케이블의 영향에 의해 기울어진다고 판단된다. 등속구간에 속도를 유지하기 위해 리니어모터의 가해지 힘이 모멘트를 발생시켜 기

울어짐에 영향을 주는 것이라 판단된다. 이러한 문제점의 개선방법으로 캐리지의 질량을 증가시키는 방법이 있다. 질량이 증가가 되면 자중에 의한 모멘트가 커지므로 리니어 모터의 힘에 의한 모멘트의 영향을 줄일 수 있다. 그리고 에어 베어링에 적절한 하중을 가하게 되어 강성을 증가 시키고 또한 실제 구동 조건과 유사하게 되어 이상적인 하중에서 에어베어링을 구동시킬 수 있다.

## (3) Type2 캐리지의 베어링 이송 속도에 따른 간극 측정

Type1 캐리지에 질량 30kg을 추가한 type2 캐리지의 속도별 간극 측정 실험을 등속 구간에서 수행하였다.

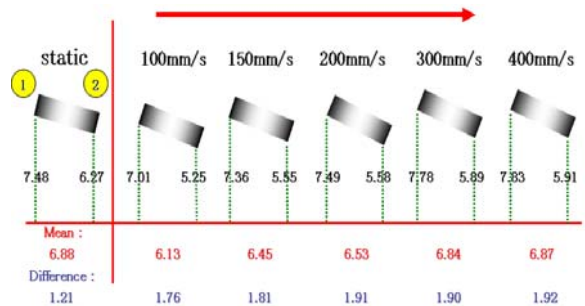


Fig. 7 Carriage motion w.r.t velocity change(type2)

질량의 증가에 따라 정적인 상태에서의 간극은 6.88  $\mu\text{m}$ 이며 정적인 상태에서 여전히 기울어짐이 존재한다. 속도가 증가함에 따라 간극이 증가하게 되고 type1속도에 변화에 따른 기울어짐도 작아 졌다. 역방향의 경우는 Fig.8에서 나타내었다.

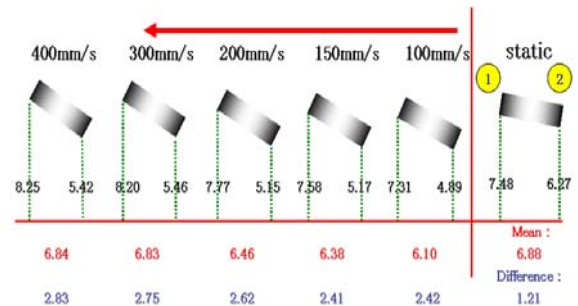


Fig. 8 Carriage motion w.r.t velocity change(type2\_reverse)

역방향의 기울어짐 또한 type1보다는 크게 감소하였

다. 속도에 따라 간극이 증가하는 경향은 type1과 type2에서 모두 같은 경향을 보인다.

속도의 증가에 따라서 간극이 증가하는 원인을 규명하기 위해 에어베어링에 걸리는 하중을 측정하여 비교해 보았다.

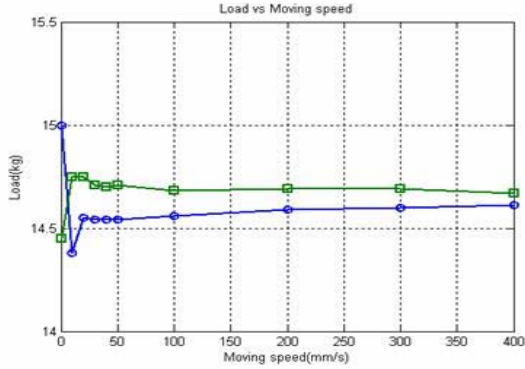


Fig. 9 Load w.r.t moving velocity change

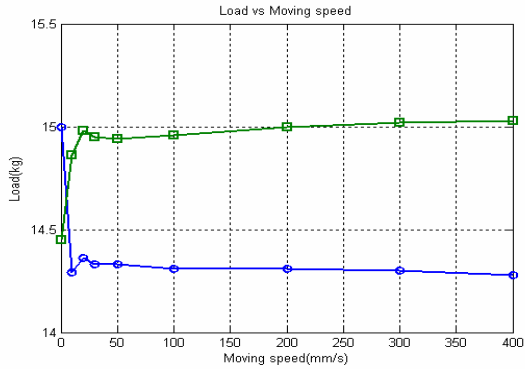


Fig. 10 Load w.r.t moving velocity change(reverse)

Fig.9와 Fig.10을 보면 속도증가에 따라 로드셀에서 측정된 하중의 변화는 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 따라서 하중의 크기는 등속구간에서 속도에 관계없이 거의 일정함을 알 수 있다. 이러한 현상을 규명하기 위하여 간극에 따른 하중 능력 곡선과 이송 속도에 따른 간극의 크기를 비교하였다.

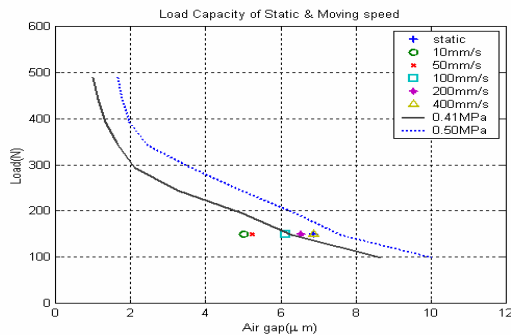


Fig.11 Load capacity and clearance w.r.t moving velocity

Fig.11을 보면 다른 이송속도 구간에서 하중의 변화 없이 간극의 감소는 하중 지지 능력이 감소하는 현상이라고 하기 보다는 공급 압력이 감소하여 간극이 감소한 효과로 보는 것이 더 타당하다. 이에 따라 이송 속도 증가에 따른 등가 공급 압력을 계산하여 보았다.

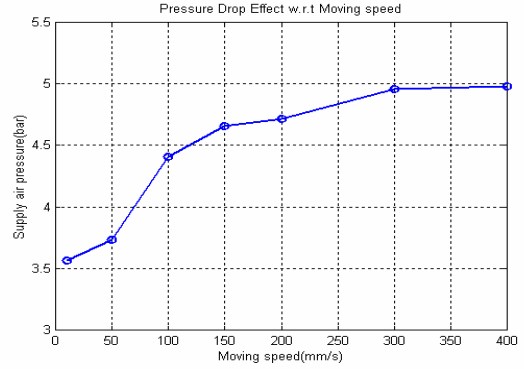


Fig. 12 Equivalent air supply pressure

캐리지 이송속도가 증가할수록 앞서 제시한 실험결과와 같이 하중이 변하지 않으면서 간극이 증가하기 위해서는 공급압력이 높아져야만 하는데 이 현상은 캐리지의 이송 속도 증가에 따라 베어링 출구 주변의 압력이 낮아지면 공급압력의 공기가 큰 저항 없이 출구 쪽으로 나오고 따라서 간극 내에서의 압력이 상승되어 위로 밀어 올리는 힘이 증가 하게 되기 때문인 것으로 판단된다.

### (3) 베어링 이송속도에 따른 동강성 변화

베어링 이송 속도에 따른 동강성의 변화를 측정하기 위하여 각 이송 속도별로 등속 구간에서의 동강성을 측정하였다. 동강성은 가속도계 센서와 가진 해머를 이용하여 캐리지 시스템의 주파수 응답 함수를 측정하였으며 이를 모드 해석 프로그램인 star modal을 이용하여 시스템의 고유진동수 및 감쇠계수를 구하였다.

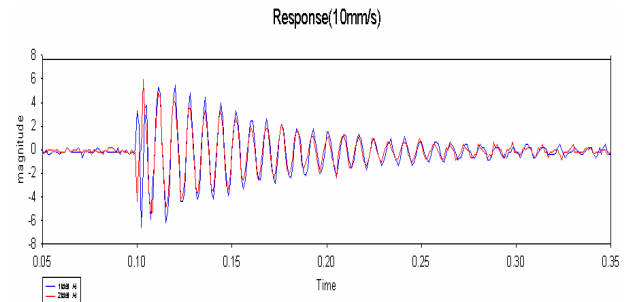


Fig. 13 Vibration signal of the carriage

Fig. 13은 가진 후 발생하는 각 측정위치에서의 가속도 신호를 비교한 그래프이다. 위의 결과를 보면 캐리지 가진 직후 양쪽 끝단에서 발생하는 가속도 신호의 위상은 반대로 발생하나 바로 곧 같은 위상으로 진동하는 것을 알 수 있다. 이는 캐리지의 한쪽 끝단을 가진 시켜 캐리지의 피칭 모드를 발생 시켜도 피칭 모드는 발생하지 않고 1자유도의 진동 형태로 강체모드가 나타남을 의미한다.

또한 실험에서 측정한 주파수 응답함수 데이터를 star modal 을 이용하여 시스템의 고유진동수와 감쇠비를 구하면 table.1과 같다.

	고유진동수(Hz)	감쇠비
50mm/s	126.2037	0.01021
100mm/s	126.7610	0.00727
200mm/s	126.7522	0.00848
300mm/s	126.5564	0.00813
400mm/s	126.2160	0.00901
정지시	124.1223	0.01290

Table. 1 Natural frequency and damping ratio

#### 4. 결론

본 연구에서는 이송하는 캐리지 시스템에 장착된 에어 베어링의 이송 속도 변화에 따른 간극 변화 및 동적 특성을 실험적으로 규명하였다. 우선 베어링의 이송속도와 베어링의 간극의 관계는 이송속도가 증가할수록 간극이 증가하게 되는데 이는 속도가 증가하

게 되면 베어링 하단부 주위의 압력이 감소하여 공급 압력이 큰 저항 없이 출구로 빠져나와 간극내의 압력이 상승하여 위로 밀어 올리는 힘이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- (1) A. Andrisano, A. Maggiore and V. Parenti Castelli, 1981, "Experimental Analysis of the dynamic behaviour of externally pressurized porous thrust bearing", 8th International GAS BEARING SYMPOSIUM, pp.311~322.
- (2) H.S.Chang, Z.S.Wang and D.C.Sun, 1983, "An experimental investigation of the stability of externally pressurized gas-lubricated porous thrust bearings", Journal of Lubrication Technology, Vol. 105, pp. 630~637.
- (3) Changzhi Cui and Kyosuke Ono, 1997, "Theoretical and experimental investigation of an externally pressurized porous annular thrust gas bearing and its optimal design", Journal of Tribology, Vol. 119, pp. 486~492.
- (4) S.Yoshimoto and K.Kohno, 2001, "Static and dynamic characteristics of aerostatic circular porous thrust bearings(Effect of the shape of the air supply area), Journal of Tribology, Vol. 123, pp. 501~508.