

반구형 공기동압 베어링의 실험적 평가

김영일 · 우기명 · 이창우

삼성전자(주) 기술총괄 기반기술센터

Estimation of Hemispherical Aerodynamic Bearing using Experimental Method

Y.I. Kim · G.M. Woo · C.W. Lee

Abstract—Recently, the high speed rotation and accuracy is needed in the field of electro-optic devices. But it is difficult for ball bearing to satisfy such conditions. So, we have developed the hemispherical type aerodynamic bearing for LSU(Laser Scanning Unit) motor. The hemispherical type aerodynamic bearing is able to support radial and axial load simultaneously. In this research, We have developed mass production method and tested the performance of aerodynamic bearing in comparison with ball bearing at the speed of 23,000rpm. In the result, we proved that the properties of aerodynamic bearing is better than ball bearing's.

Keywords : High Speed, Aerodynamic Bearing, Scanner, Grooved, Hemispherical

1. 서론

최근 전자, 광학기기의 고속·고정도화, 저소비 전력화의 요구에 부응하여 기존 볼 베어링을 대체할 수 있는 베어링의 개발이 추진되고 있다. 특히 레이저 프린터의 경우 고해상도, 고속인쇄에 따라 고속·고정도, 정음화의 스캐닝이 요구되며 이에 따른 베어링의 개발도 요구되고 있다.

이러한 요구에 대응하기 위한 베어링으로서 고려되고 있는 것이 유체동압 베어링이나 공기동압 베어링이다.

유체동압 베어링의 경우 기존 볼 베어링에 상응하는 강성을 가지며 높은 정도를 발휘할 수 있다는 점에서 많은 분야에 적용되고 있다. 하지만 고속회전시 유체의 온도상승으로 인한 강성저하, 실링등의 문제가 발생하기 때문에 30,000rpm이상의 회전수에서는 적합하지 못하다. 따라서 이에 대한 연

구가 진행되고 있다.

공기베어링의 경우 강성에 있어서는 볼베어링이나, 유체베어링에 비하여 떨어지지만 고속회전시 온도상승이나 실링문제를 배제할 수 있으며 비접촉 회전으로 회전정밀도 특성이 우수하기 때문에 고속회전이 요구되며 저장성의 소형 회전체에 많이 응용되고 있다.

따라서 본 연구에서는 고속·고정도, 정음화가 요구되는 레이저 프린터의 중속기 스캐닝 모터(20,000~60,000rpm)에 적용할 수 있는 공기동압 베어링을 개발하였다. 공기베어링의 단점인 가격문제를 해결하기 위해 저비용의 제작공정을 개발하였으며, 공기동압 베어링과 볼 베어링의 특성을 비교 평가하여 이론해석을 검증하고, 고속회전에서의 공기동압 베어링의 사용 가능성을 검토 하였다.

2. 설 계

2.1 스캐닝 모터 어셈블리의 구조

레이저 프린터용 스캐닝 모터는 광신호를 감광드럼에 주사시키는 폴리곤 미러, 이를 지지하여 고속으로 회전하는 베어링부와 회전력을 발생시키는 모터 구동부로 나누어져 있으며, 베어링의 회전정도에 따라 인쇄화질이 좌우된다. Fig.1은 본 연구에서 개발된 반구형 공기동압 베어링을 사용한 스캐닝 모터로서, 고속회전시의 관성 모우멘트를 감소시키기 위해 내륜 회전형으로 설계 하였으며, 회전수는 23,000rpm이다.

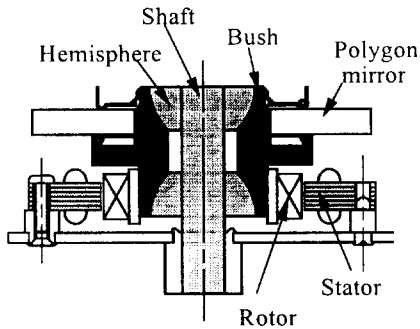


Fig.1 공기동압 베어링을 사용한 Scanning Motor Ass'y

2.2 공기 동압 베어링 설계

Fig.2는 반구형 베어링의 작동원리를 나타낸 그림으로 반구형 베어링은 다음의 두 가지 유동에 의해 부하를 지지한다. 첫째는 서로 상대 운동하는 두 구면의 원주 방향으로 좁아지는 틈새에 따른 원형 유동에 의한 것이고, 둘째는 그루브의 펌핑 작용에 의해 원주로부터 중심으로 향하는 자오선 방향의 유동에 의해 축 방향 부하를 지지한다. 또한 자오선 방향의 유동은 원주방향의 유동

과 중첩되어 반경방향의 부하를 지지한다.

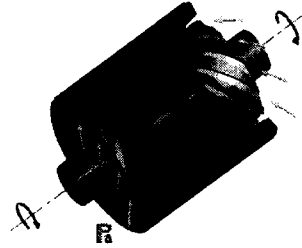


Fig.2 반구형 베어링의 작동 원리

요구되는 스캐닝 모터의 부하용량과 강성으로부터 이론적인 해석을 통해 얻은 설계 데이터는 Table 1과 같다.

Table 1 공기 동압 베어링의 설계 Data

항 목	Spec.
Radius of hemisphere(R)	6.2 mm
Clearance(C)	$3.5 \pm 0.5 \mu\text{m}$
Depth of groove(d)	$7 \pm 1 \mu\text{m}$
Inclined angle of groove (α)	30°
Number of groove	10
Relative width of groove	0.5
Axial force	130gr
Radial force	260gr

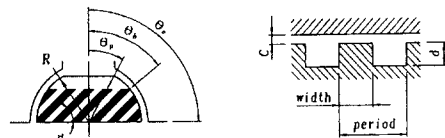


Fig. 3 공기 동압 베어링 설계 인자

3. 저 비용 제조공법 개발

제조공정에서 공기 동압 베어링의 회전 정밀도에 가장 크게 영향을 미치는 공정은 가공과 조립공정이다. 특히 가공 공정은 제조원가와 상관 관계가 있기 때문에 공기 동압 베어링의 단점인 원가 상승을 해결 하기 위해서는 매우 중요한 공정이라 할 수 있다. 따라서 베어링의 성능을 만족하는 저 비용의 제조공법을 개발하였다. Fig. 4에 반구와 부시의 가공 공정을 표시하였다.

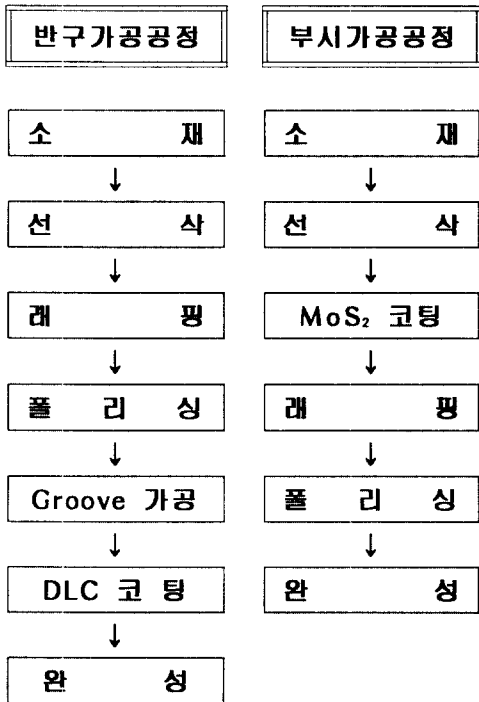


Fig. 4 공기 동압 베어링 제조 공정

3.1 재질 및 기계가공

공기 동압 베어링에 사용되는 재질은

내식성이 있는 재질이어야 하며 가공성 및 코팅을 고려하여 반구의 경우 SUS, 부시의 경우 Al6061을 사용 하였다.

Fig.4에서 보듯이 반구와 부시는 선삭 가공을 통하여 황삭가공을 행한다. 반구의 경우 황삭가공후 래핑과 폴리싱가공 후 반구면상의 홈 가공을 실시한다. 반구면상의 홈은 공기 압력을 발생시켜 축 방향 및 반경방향의 하중을 지지하게 하는 부분으로서 가공의 정밀도가 베어링의 강성에 영향을 미칠 수 있다. 본 개발에서는 반도체 공정에서 일반적으로 사용되고 있는 사진식각 식판기술(Lithography)을 이용하여 그루브 패턴을 인쇄하고, 저 비용 제작이 가능한 습식 에칭(Wet Etching)으로 가공을 하였다.

3.2 코팅

공기동압 베어링은 정상 회전시는 반구(내륜)와 부시(외륜)가 비접촉 회전을 하지만 베어링의 회전과 정지시에 반구와 부시가 접촉회전을 하게된다.

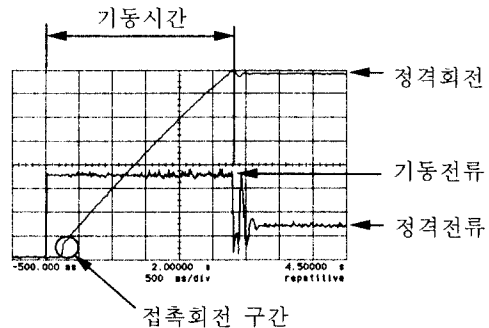


Fig.5 공기동압베어링의 Start 특성

Fig.5에서와 같이 베어링 회전이 정상 상태에 도달할 때까지 반구와 부시는 접

측되어 회전되는 구간이 발생한다. 특히, 레이저프린터의 경우 36만회의 단속수명시험에 견디어야 하므로 반구와 부시의 접촉면에 내마모성과 윤활성을 갖는 코팅막이 있어야 한다.

재료가 SUS인 반구의 표면에는 내마모성과 윤활성이 우수한 DLC(Diamond Like Carbon) 코팅을 실시하였으며 약 3000Å 정도 두께의 코팅막을 적층시켰다. 또한, 알루미늄소재의 부시표면에는 천연적으로 화강암내에 박편의 층상구조를 이루고 있는 MoS₂코팅을 실시하였다. MoS₂코팅은 층상구조를 이루고 있기 때문에 수직방향으로는 내하중성이 강하고 표면과 접선 방향으로는 윤활성이 우수한 장점을 가지고 있다.

4. 실험방법 및 결과

4.1 회전 정밀도(Run-out)

회전 정밀도는 부시의 측면(90°, 2개)과 윗면(120°, 3개)에 각각 배치한 정전 용량형 변위센서(측정범위: ±50μm / ±10V)를 이용하여 변위를 검출한다.

Run-out으로 표시되는 회전 정밀도는 Fig. 6에 나타난 것과 같이 주기적 흔들림(RRO; Repetitive Run-out)과 비주기적 흔들림(NRRO; Non Repetitive Run-out)등 2종류가 있으며, 공기 동압 베어링의 경우 공기 갭(Air Gap)에 의하여 회전이 되기 때문에 볼 접촉에 의해 회전하는 볼 베어링에 비하여 RRO는 크지만 NRRO는 크게 향상된다. 특히 NRRO 특성은 기록장치의 경우에 회전체의 성능을 크게 좌우한다.

Table 2에 공기동압 베어링과 볼베어링의 회전정밀도를 비교하였다. 주기적 흔들림은 큰차이가 없지만, 비주기적 회전정밀도의 경우 상당한 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 6과 Fig. 7은 공기동압 베어링과 볼베어링의 회전 중심의 궤적을 표현하고 있다.

Table 2 공기동압/볼 베어링의 회전정도

구 분	ADB	BB	ADB/BB
Axial RRO(μm)	1.69	1.42	19% ↑
Axial NRRO(μm)	0.06	0.08	25% ↓
Radial RRO(μm)	2.18	1.95	12% ↑
Radial NRRO(μm)	0.09	0.14	35% ↓

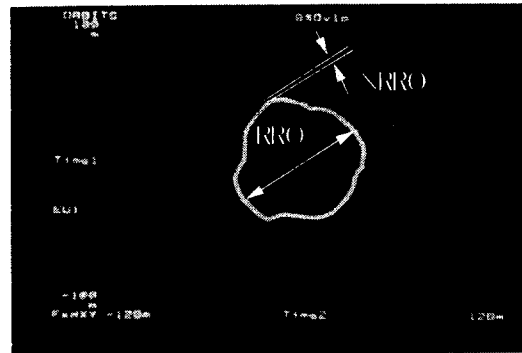


Fig. 6 공기동압 베어링의 중심 궤적

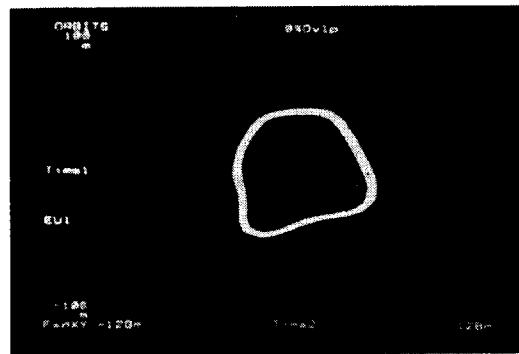


Fig. 7 볼 베어링의 중심 궤적

4.2 부하용량(Load capacity)

부하용량은 전자석을 이용하여 비접촉 외력을 가하고 로드셀로부터 외력의 크기를 측정하며, 정전용량형 변위 센서에 의해 회전중심의 변위를 측정한다.

Fig. 8과 Fig. 9에 축방향과 반경방향 변위와 힘의 관계를 표시한 그래프이다. Fig. 8을 보면 이심율이 증가함에 따라 부하용량이 급격히 증가함을 보인다. 이는 반구와 부시의 간극이 감소함에 따라 강성이 증가하기 때문이며, 이론해석과 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 9는 반경방향에 대한 그래프로써, 역시 이심율의 증가에 따라 부하는 급격히 증가한다. 이론치와 다소 차이를 보이는 것은 측정시 베어링의 무게중심에서 정확히 외력을 가해야 하지만, 실제 실험에 있어서는 외력이 가해지는 지점이 무게중심보다 윗쪽에 치우쳐져있기 때문에 이러한 결과를 초래하였다고 생각한다.

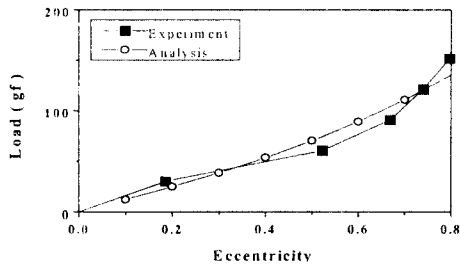


Fig. 8 축방향 부하용량

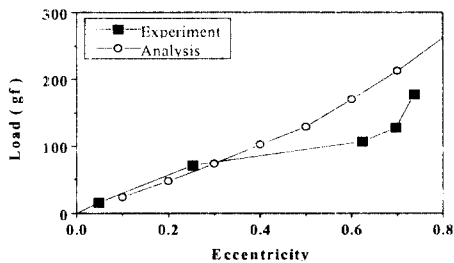


Fig. 9 반경방향 부하용량

4.4 정격 전류(Running Current)

공기동압 베어링은 기동시와 정지시 일부 구간을 제외하면 항상 비접촉인 상태에서 반구와 부시가 회전하기 때문에 회전 마찰력이 작다. 따라서 소비전류(정격전류)가 작고 에너지를 절약할 수 있다.

측정방법은 모터의 전원 입력단에 단자를 연결하여 검출한 신호를 앰프로 증폭하여 오실로스코프로 측정하였다. 측정결과 공기동압 베어링의 경우 볼 베어링에 비하여 30mA인 약 13%가 감소함을 확인할 수 있었다.

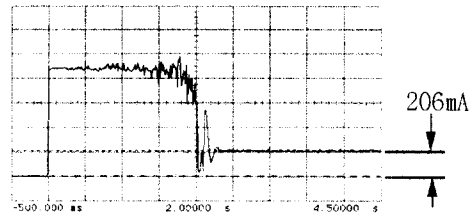


Fig. 10 공기동압 베어링의 정격전류

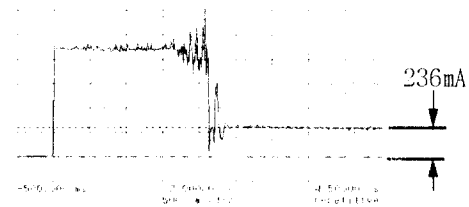


Fig. 11 볼 베어링의 정격전류

4.5 진동(Vibration) 특성

반구와 부시가 비접촉으로 회전하기 때문에 볼 베어링과 비교해서 진동특성이 매우 우수하다. 측정 방법은 모터 어셈블리에서 베어링의 축을 고정시키는 홀더에 가속도 센서를 부착하여 FFT

Analyzer로 신호를 받아 측정 하였다. 측정결 Fig. 12와 Fig. 13에서 보듯이 공기동압 베어링이 볼 베어링에 비하여 약 31dB가 감소함을 알 수 있다.

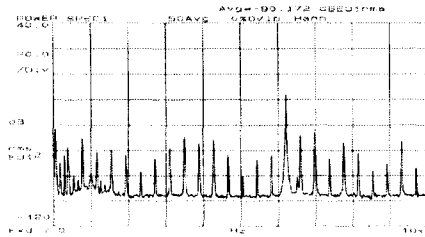


Fig. 12 공기동압 베어링의 진동특성

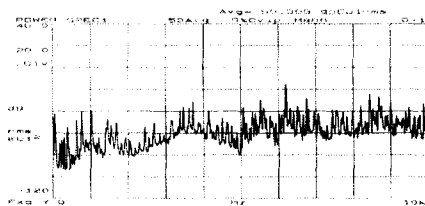


Fig. 13 볼 베어링의 진동 특성

6. 결론

반구형 공기동압 베어링을 중속 LBP 용(A4, 16ppm) 스캐닝 모터(23,000rpm)에 적용하여 성능을 검증하고 신뢰성도 확보 하였으며, 볼베어링을 사용한 스캐닝 모터와 비교실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) MoS₂ 및 DLC 코팅등의 고체윤활 피막 기술을 이용하여 베어링의 내구성을 확보하였다.

(2) 반구형 공기동압 베어링은 볼베어링에 비교하여 NRRO, 진동, 소비전류 특성이 우수함을 확인 할 수 있었다.

(3) 사진석판식각기술을 이용한 그루브 가공기술등 저 비용의 양산 제조 기술을 확보하였다.

7. 참고문헌

[1] Vohr, Chow, "Characteristics of Herringbone-Groove Gas Lubricated Journal Bearing," J. of Basic Eng., Trans. ASME, Series D, Vol.87, Sep.19 65, pp568-578.

[2] Cunningham, Fleming, Anderson, "Experimental Stability Studies of the Herringbone Grooved Gas Lubricated Journal Bearing," J. of Lub.Tech., Vol.91,Jan.1969, pp52-59.

[3] Burgdorfer. A., "The Influence of the Molecular Mean Free Path on the Performance of Hydrodynamic Gas-Lubricated Bearings," J. of Basic Eng., Trans. ASME, Series D, Vol. 80, 1 959, pp94-100.

[4] Hising, F. G., Trans. ASME, Series F, 94-1(1972-1), 81.

[5] Mujiderman, E. A., Spiral Groove Bearings,(1966), 116, Philips Technical Library.

[6] R. Donaldson, "A Simple Method for separating Spindle Error from Test Ball Roundness Error", CIRP Annals, vol. 21/1, p.125, 1972.