

함유소결베어링과 빗살무늬 유체베어링의 마찰 특성 및 레이저 스캐너 모터에서의 전기적 특성

이영제 · 정광섭 · 정성훈
성균관대학교 기계공학부

Oil-impregnated Sintered-metal Bearing and Herringbone-grooved Fluid Bearing for High-speed Scanner Motors

Y.Z. Lee, K.S. Jeong and S.H. Jeong

School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

Abstract—The electrical and frictional properties of oil-impregnated sintered-metal bearing (OSB) and herringbone-grooved fluid bearing (HFB) with varying loads and speeds were measured. OSB shows very good performance up to 20,000 rpm and 0.05 N, and HFB successfully works up to 35,000 rpm and 0.05 N. From the endurance tests on start-stop and continuous operation, it was confirmed that those bearings could be mass-produced for use on scanner motor in a laser scanner unit.

Key word—oil-impregnated sintered-metal bearing, herringbone-grooved fluid bearing, laser scanner motor.

1. 서 론

날로 가속화되어 가는 정보화시대의 고속화에 힘입어 컴퓨터 및 그 주변기기들에 사용되는 스피들 모터도 점차 고속화와 이에 상응하는 고정도화로 발전하는 과정 중에 있다.

CD-ROM 스피들 모터 및 DVD 스피들 모터의 고베속화개발은 디스크 정보의 입·출력시간의 단축을 꾀하며, 레이저 스캐너 모터의 고속화 개발은 하드디스크 정보의 입·출력 속도뿐만 아니라 디스크의 기록밀도를 높임으로써 동일 하드디스크의 고용량 화를 이루는 것에 많은 영향을 줄 것이다[1-3].

이러한 경향에 부합하는 방법 중의 하나는 회전체를 지지하는 베어링의 개선인데, 기존에 사용하고 있는 볼베어링은 몇 개의 볼에 의해 작동하기에 회전이 불균일하며 진동과 소음이 크다. 이는 고속에서 신호를 처리하는데 한계를 갖는 주된 원인이 되고 있다. 또한 그리스의 손실로 인한 수명의 단축이나, 유출된 그리스로 인한 손상은 제품의 내구성에 치명적인 결과를 초래한다. 더욱이 국내의 소형 정밀 베어링 즉, 볼 베어링은 현재 전량 수

입에 의존하고 있다. 국제적인 추세는 회전체를 지지하는 베어링은 유체동압을 이용하는 베어링을 개발하는 것에 초점이 맞추어져 있다[4-6].

본 연구에서는 볼베어링으로 대표되는 윤활 방식에서 탈피하여 한 차원 높은 자기윤활 상태에서 회전체를 지지하는 베어링을 설계하고 시편을 이용하여 레이저 스캐너 모터에 사용될 형태의 베어링을 제작하여 마찰 특성을 관찰하고자 한다.

2. 스캐너 모터용 유체베어링

2-1. 함유소결베어링(OSB)

함유금속베어링은 외부로부터 윤활유의 공급이 없는 곳에 사용하도록 고안된 것으로 다공성의 조직을 가지고 있으며, 기공 내에 오일이 함유되어 있다. 이러한 함유소결 베어링은 진동과 소음이 적고 가격이 저렴하며 구조가 간단하고, 급유 기구를 필요로 하지 않는 자기윤활(self-lubrication)특성과 대량생산(mass-product)등 많은 장점을 가지고 그 사용범위가 점차 광범위하게 넓어지고 있다[7-8]. 이 베어링은 축이 회전함에 따라 베어링의 기공 내에

있던 오일이 유출되어 저어널 틈새에서 윤활작용을 하다가 축이 정지하면 틈새에 있던 오일이 모세관력에 따라 베어링의 기공 속으로 들어간다. 따라서 구조가 간단하며 소형베어링에 매우 적합한 형태이다[9].

본 연구에서는 Fe 38%, Cu 60%, 그리고 Sn의 분말 재료를 사용해서 가압 성형한 후 Cu의 용융점보다 낮은 온도에서 가열하는 분말야금법을 이용하여 베어링 내부에 축 방향 홈을 가진 소결베어링에 점도가 25 cSt(40°C)인 오일을 18% 이상 함유시킨 후 최종 교정하여 베어링을 제조하였다. 축 방향 홈은 step groove 형상인데, 이는 오일을 펌핑하는 역할과 접촉 면적을 줄이는 효과를 갖는다[8].

2.2. 빗살무늬 유체베어링(HFB)

축 주위를 따라 형성된 빗살무늬 홈이 유체의 동압력을 발생하여 하중을 지지하는 베어링으로서 유체윤활을 이용한 유체베어링은 미끄럼 베어링의 일종이며, 유체동압을 발생시키도록 축이나 슬리브 표면에 홈을 가지고 있다[10].

홈을 이용한 베어링에는 원판형, 원통형, 구형, 원추형 등이 있다. 이중 구형과 원추형은 축 방향과 반경방향의 하중을 모두 지지할 수 있으나, 가공에 어려움이 있다. 원판형이나 원통형은 일반적으로 한 방향 하중만 지지할 수 있으나 다른 것에 비해 가공이 용이하다. 이중에 직선 그루브 베어링은 형상이 단순하고 가공이 용이하며 저렴하게 대량생산이 쉽다는 장점이 있으나, 압력발생이나 안정성이 빗살무늬에 비해 좋지 않다. 빗살무늬 베어링은 유압발생이 매우 용이하며 기름의 손실이 매우 적은 특성을 갖는다. 단, 가공에 어려움이 있어서 베어링에 홈을 만드는 것보다 축에 홈을 만드는 것이 가공비가 저렴하고 생산이 용이하다. 이와 같이 홈을 이용한 베어링의 특징은 축의 홈을 따라 형성된 유체가 충분한 압

력을 가지고 반경방향하중을 지지하도록 구성되어 있다는 것이다[11-13].

본 연구에서는 질화처리된 축에 대량생산을 고려하여 전조에 의해 홈을 가공하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 합유소결베어링과 빗살무늬 유체베어링의 설계치수이다.

3. 실험 장치 및 방법

3-1. 베어링의 마찰력 및 접촉전압 측정

본 연구에서 사용한 시험기는 Fig. 1과 같이 일반 고속형 저어널 베어링 시험기를 자체 제작하여 사용하였다. 시험기는 제어기를 이용하여 축이 50,000 rpm까지 회전이 가능하다. 양쪽을 지지하거나 한쪽을 지지하고, 베어링의 마찰력을 측정하기 위하여 베어링에 홀더를 부착하여 축에 결합한다. 하중은 베어링의 위에서 수직하중을 줄 수 있도록 하였으며, 마찰력은 홀더에 접촉되어 있는 로드셀을 통해서 컴퓨터에 저장하며, 베어링과 축의 접촉 정도를 파악하기 위해서 회로를 구성하여 접촉전압을 측정하였다. 전원공급장치를 통해서 6 V의 전압을 인가하여 완전한 분리가 이루어지면 3 V의 전압이 측정되며, 접촉이 이루어지면 0 V의 전압을 볼 수 있다. 또한 외부환경에 대한 변수를 최대한 줄이기 위하여 실험중의 온도와 습도의 환경조건이 거의 일정하게 유지될 수 있

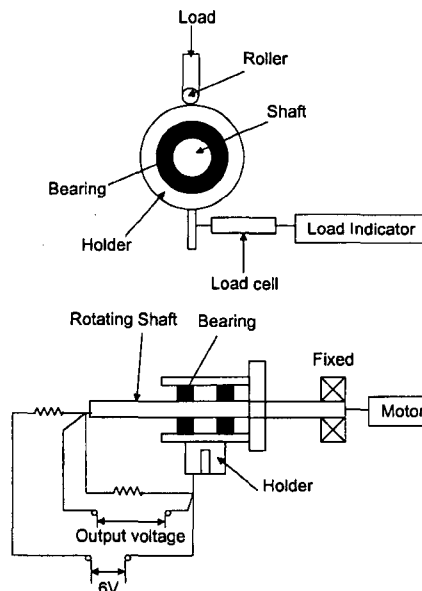


Fig. 1. Schematic diagram of bearing tester.

Table 1. Bearing parameters

Bearing Parameters	Oil-impregnated sintered-metal bearing	Herringbone-grooved fluid bearing
Number of groove	8	12
Radial Clearance	3.5 μm	4 μm, 8 μm
Groove Depth	4 μm	6 μm
Groove/ridge Ratio	6 : 4	1 : 1
Groove Angle	90° (axial)	25°
Shaft Diameter	φ 4	φ 3
Oil viscosity at 40°C	25 cSt	8.29, 25 cSt

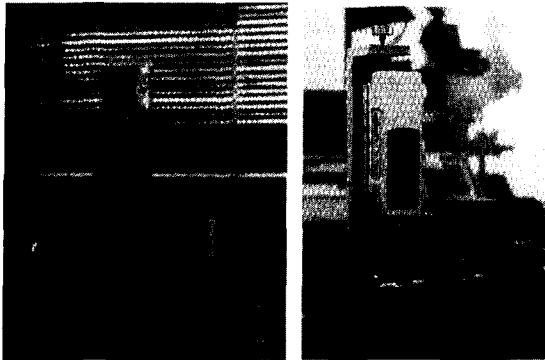


Fig. 2. Configuration of bearing tester.

도록 밀봉케이스를 설치하였다. Fig. 2는 시험기의 전체적인 모습이다.

3-1-1. 함유소결베어링(OSB)

함유소결베어링은 상대적으로 저속영역, 즉 1,000 rpm부터 9,000 rpm까지에서 0.2 N의 하중에서 속도를 단계적으로 2,000 rpm씩 증가시키면서 실험을 수행하여 마찰특성과 접촉정도를 측정하였다. 고속영역, 즉 11,000 rpm부터 35,000 rpm까지는 0.05 N의 하중에서 속도를 단계별로 증가시키면서 실험을 수행하여 마찰특성과 접촉정도를 측정하였다.

일정한 속도에서 하중변화에 따른 베어링 성능을 측정하기 위해 14,000 rpm과 20,000 rpm에서 각기 하중을 0.05, 0.2, 1.0, 2.5 N까지 하중을 증가시키며 실험을 수행하였다.

3-1-2. 빗살무늬 유체베어링(HFB)

빗살무늬 유체베어링은 함유소결베어링보다 고속에서 사용할 목적으로 11,000 rpm부터 35,000 rpm까지 0.05 N의 하중에서 속도를 단계별로 증가시키면서 실험을 수행하여 마찰특성과 접촉정도를 측정하였다. 각기 다른 반경 틈새, 4 μm 와 8 μm 에 대하여, 두 가지 윤활유(8.29, 25 cSt)를 사용하여 실험을 하였다. 그리고, 일정한 속도(28,000 rpm)에서 0.05, 0.25, 0.5 N 그리고 1.0 N의 하중 변화를 주어 실험을 수행하였다.

3-2. 스캐너 모터의 전기적 특성 및 내구성 실험

함유소결베어링과 빗살무늬 유체베어링을 각기 스캐너 모터에 조립하여 모터의 성능을 측정하였다. 모터는 소결베어링을 사용하여 11,240 rpm과 17,000 rpm으로 제작하였고, 빗살무늬 유체베어링은 28,300 rpm의 회전수를

갖는 모터에 사용되었다. 사용 회전수가 각기 다른 것은 앞으로 생산예정인 제품에 맞추어 연구를 수행하였기 때문이다. 모터의 전기적 특성으로는 정상전류, 기동시간, 지터[8]를 측정하였다. 정상전류는 모터가 정격회전수로 회전할 때의 전류 값이고, 기동시간은 모터에 전원을 인가한 후 정격회전수에 도달할 때까지의 소요시간을 의미한다. 회전안정성을 나타내는 지터(Jitter)는 정격으로 회전시킨 폴리곤 미러(polygon mirror)에 레이저광을 입사하고, 반사되는 빛이 2개의 센서를 통과하는 시간간격에서 구한다[8]. 모터의 정상전류, 기동시간, 지터는 작은 값이 우수한 품질을 의미한다.

내구성과 신뢰성을 검증하기 위해 연속동작과 출발-정지 시험을 수행하였다. 연속동작은 3,000시간 동안 수행하였고, 매 500시간마다 모터의 특성을 측정하였다. 출발-정지 시험은 20초 ON과 40초 OFF를 한 사이클로 100,000회를 실시하였다. 또한 다양한 환경에서의 신뢰성을 검증하기 위해 고온에서 24시간 방치한 후 시험하는 고온 보존시험, 저온 보존, 고온고습 보존, 고온에서 72시간 연속 동작시키는 고온 동작시험, 저온 동작, 고온고습 동작시험을 수행하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 함유소결베어링(OSB)

1,000 rpm에서 35,000 rpm 까지 속도를 단계적으로 증가시키면서 마찰력을 측정하였고 또한 각 속도에서 접촉전압을 측정하여 고속에서의 함유소결베어링의 특성을 관찰하였다. Table 2는 0.2 N의 하중으로 9,000 rpm까지 마찰력의 평균값을 나타낸 것이고, Table 3은 0.05 N의 하중으로 11,000 rpm부터 35,000 rpm까지 각 속도별 마찰력의 평균값을 나타낸 것이다. 유체윤활영역에서 속도증가에 따라 유체의 전단에 대한 저항력이 증가하여 마찰력이 증가하였다.

Fig. 3과 Fig. 4의 접촉전압 결과에서 보듯이 3,000

Table 2. Average friction forces of oil-impregnated sintered metal bearing (OSB) on speed variation at 1,000~9,000 rpm Load : 0.05 N

rpm	Friction force
1,000	0.137615
3,000	0.153143
5,000	0.15706
7,000	0.166065
9,000	0.170674

Table 3. Average friction forces of oil-impregnated sintered metal bearing (OSB) on speed variation at 11,000~35000 rpm
Load : 0.0

rpm	Friction force
11,000	0.166721
14,000	0.18075
17,000	0.191993
20,000	0.196398
23,000	0.201934
28,000	0.223529
35,000	0.227719

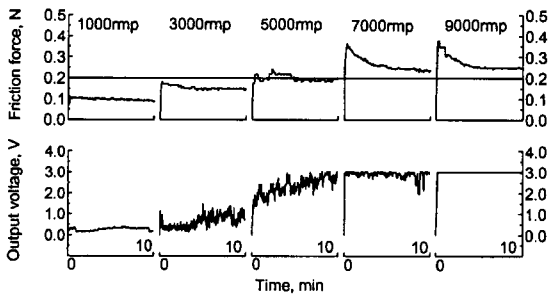


Fig. 3. Output voltage of electric contacts and friction forces of oil-impregnated sintered-metal bearing (OSB) due to speed variation at 1,000~9,000 rpm.

rpm에서 베어링과 축이 분리되기 시작하여, 9,000 rpm에서 베어링과 축이 완전히 분리되는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 분리 현상은 20,000 rpm까지 계속 되는데, 23,000 rpm 이상의 속도에서는 베어링과 축이 부분적으로 접촉이 일어나고 있음을 알 수 있다. 고속으로 갈수록 흡의 영향으로 인해 유체동압의 발생이 용이하다가

어느 정도 이상의 속도가 되면 회전이 불안정한 상태가 된다고 판단된다.

Fig. 5는 각기 14,000 rpm과 20,000 rpm에서 마찰력과 접촉전압을 나타내고 있다. 하중을 0.05 N에서 0.2, 1.0, 2.5 N까지 하중을 증가시키며 실험을 수행하였다. 0.05 N에서는 안정된 마찰과 유막 분리를 보이나, 0.2 N부터는 금속접촉과 불안정한 마찰특성을 보이고 있다. 따라서 고속에서 사용할 경우 회전체의 unbalanced force를 최소화하여야 한다.

4-2. 빗살무늬 유체베어링(HFB)

0.05 N의 하중으로 각기 다른 반경 틈새, 4 μm와 8 μm에 대하여, 두 가지 윤활유(8.29, 25 cSt)를 사용하여 11,000 rpm부터 속도를 35,000 rpm까지 단계적으로 증가시키면서 마찰력과 접촉전압을 측정하고 마찰력을 측정하여 고속에서 빗살무늬 유체베어링의 특성을 관찰하였다. 각 속도에서 마찰력의 평균값이 Table 4에 나타나 있다.

마찰력은 속도가 증가하면서 소결베어링과 마찬가지로 속도의 영향으로 증가하였다. 점도가 큰 윤활유를 사용한 경우 마찰력이 증가하였으며, 틈새가 작은 베어링이 큰 마찰력을 나타내었다. 베어링의 마찰력은 베어링을 모터에 사용할 때 모터의 특성에 영향을 주는데, 마찰력이 증가할수록 모터에 필요한 전류 값이 증가한다. Fig. 6에 각각의 속도에 대한 마찰력과 접촉신호가 나타나 있다. 마찰력은 모든 속도에서 매우 안정적인 특성을 보였다. 접촉신호를 살펴보면 11,000 rpm에서 이미 베어링과 축 간의 완전한 분리가 이루어져서 35,000 rpm의 고속에서도 분리가 잘 이루어지고 있는 것을 관찰할 수

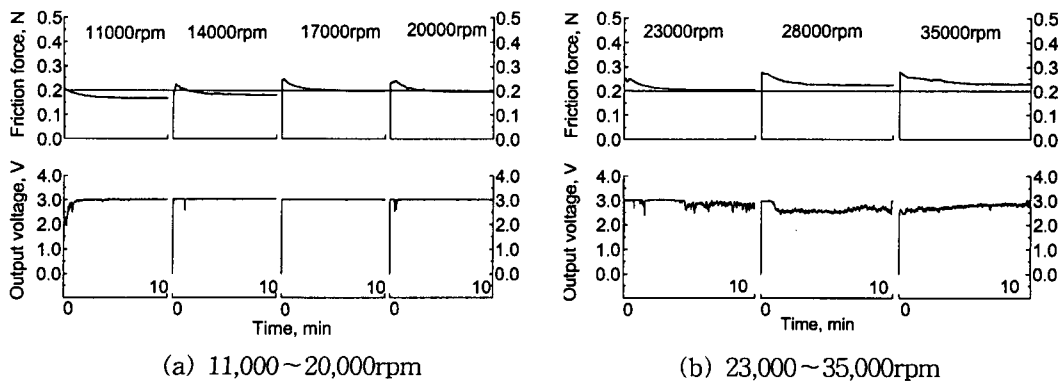


Fig. 4. Output voltage of electric contacts and friction forces of oil-impregnated sintered-metal bearing (OSB) due to speed variation at 11,000~35,000 rpm.

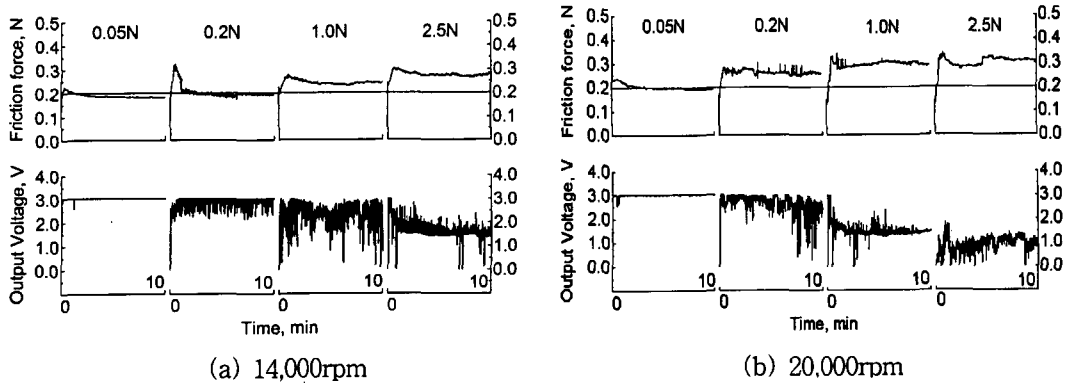


Fig. 5. Output voltage of electric contacts and friction forces of oil-impregnated sintered-metal bearing(OSB) due to load variation at 14,000 rpm and 20,000 rpm.

Table 4. Average friction forces of herring-bone-grooved fluid bearing (HFB) on speed variation at 11,000~35,000 rpm Load : 0.05

Clearance	4 μm		8 μm	
	8.29 cSt	25 cSt	8.29 cSt	25 cSt
rpm	Friction force			
11,000	0.095418	0.128869	0.058559	0.086823
14,000	0.100093	0.141579	0.072007	0.099858
17,000	0.109065	0.155554	0.075229	0.108039
20,000	0.123837	0.157163	0.084789	0.116165
23,000	0.123544	0.158837	0.088662	0.117407
28,000	0.130373	0.167964	0.094652	0.119143
35,000	0.131704	0.170979	0.103088	0.122649

있다. 4 μm 틈새의 경우 두 가지 윤활유 모두 35,000 rpm에서 약간의 접촉이 이루어졌다. 이는 실험 중 발생한 마멸입자의 영향으로 생각되는데, 틈새를 증가시킨 경우 이러한 현상이 사라졌다. 따라서 빗살무늬 유체베어링은 함유소결베어링보다 고속에서 사용이 가능하며, 저 점도 윤활유와 8 μm 틈새의 경우 마찰저항이 상대적으로 작다는 것을 알 수 있다.

하중의 영향을 보기 위해 4 μm 와 8 μm 에 대하여, 8.29 cSt의 윤활유를 사용하여 0.05, 0.25, 0.5 N 그리고 1.0 N의 하중 변화를 주어 실험을 수행하여 Fig. 7에 마찰력과 접촉전압을 나타내었다.

틈새에 따라 마찰력의 차이를 보이고 있으나, 두 경우 모두 0.5 N까지 안정적인 마찰과 유막분리를 나타내고 있다. 1 N에서는 모두 금속접촉과 불안정한 마찰특성을 보이고 있다. 따라서 빗살무늬 유체베어링은 함유소결베어링보다는 고속에서 사용할 경우 상대적으로 큰 하중을 지지할 수 있으나, 함유소결베어링과 마찬가지로 회전체

의 unbalanced force를 최소화하여야 한다.

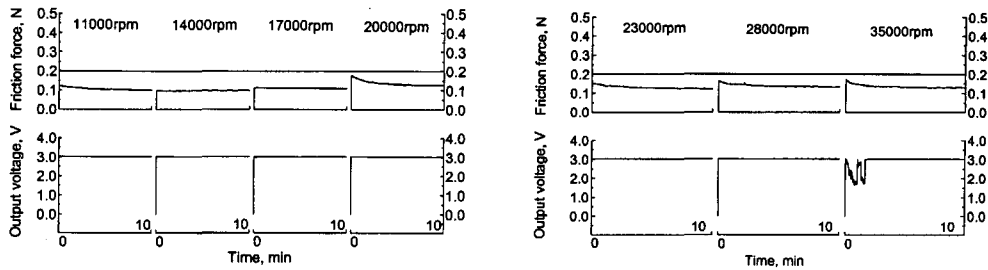
4-3. 스캐너모터에서의 특성

Table 5는 함유소결베어링과 빗살무늬 유체베어링을 각기 폴리곤 미러를 장착한 스캐너 모터에 조립하여 모터의 정격전류(rating current), 기동시간(starting time), 그리고 지터(Jitter)를 측정된 결과이다. 모터는 볼베어링(11,240 rpm), 소결베어링을 사용하여 11,240 rpm과 17,000 rpm으로 제작하였고, 빗살무늬 유체베어링은 28,300 rpm의 회전수를 갖는 모터에 사용되었고, 현재 시판되는 외국제품(11,240 rpm과 23,000 rpm)과 비교하였다. 모터의 회전수가 각기 다른 것은 본 연구에서 사용한 회전수는 앞으로 생산 예정인 제품에 맞추어 모터를 제작했기 때문이다. 함유소결베어링의 경우 볼베어링이나 유사한 형태의 외국제품에 비해 모든 전기적 특성이 우수함을 알 수 있고, 빗살무늬 유체베어링의 경우 외국제품과 사용 속도가 달라 직접적인 비교는 어렵지만, 고속에서 매우 안정된 특성을 나타내었다.

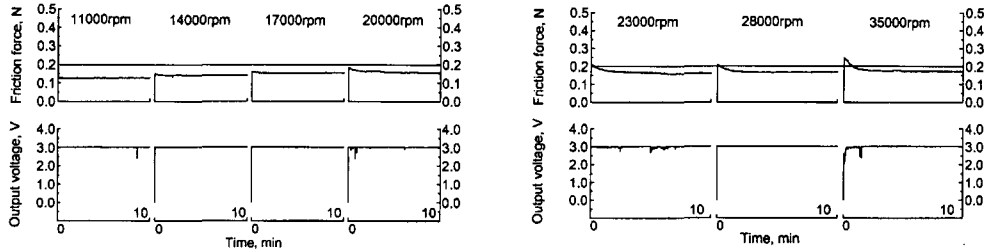
함유소결베어링의 내구성을 검증하기 위해 연속동작과 출발-정지 시험을 수행하였다. 연속동작은 3,000시간 동안 수행하였다. Table 6에서 보듯이 매 500시간마다 모터의 특성을 측정하였는데, 모든 항목이 안정적이었으며 초기 값보다 작았다. 출발-정지 시험으로 20초 ON과 40초 OFF를 한 사이클로 100,000회를 실시하였고, 시험 후 모터의 전기적 특성에서 우려할 만한 변동을 볼 수 없었다.

5. 결 론

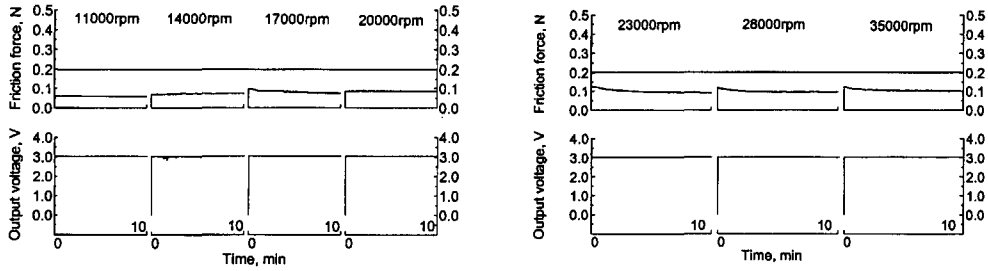
본 연구에서는 함유소결베어링과 빗살무늬 유체베어링



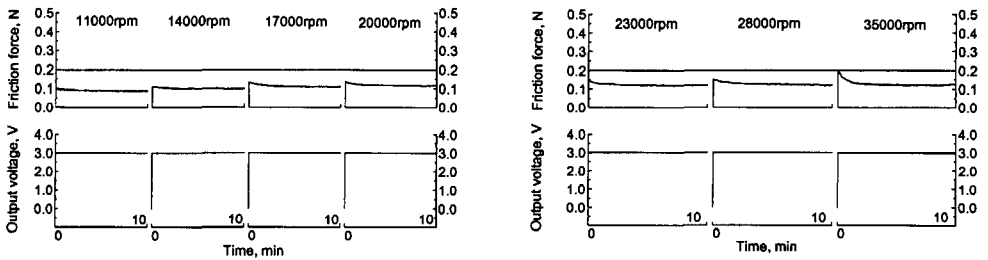
(a) Radial clearance $4\mu\text{m}$, Viscosity 8.29cSt



(b) Radial clearance $4\mu\text{m}$, Viscosity 25cSt



(c) Radial clearance $8\mu\text{m}$, Viscosity 8.29cSt



(d) Radial clearance $8\mu\text{m}$, Viscosity 25cSt

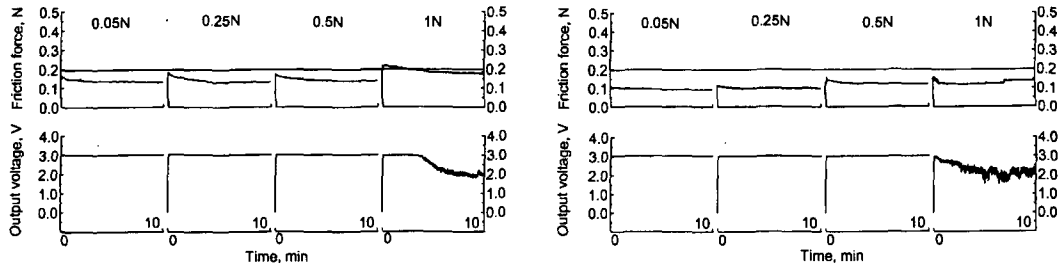
Fig. 6. Output voltage of electric contacts and friction forces of herringbone-grooved fluid bearing(HFB) due to speed variation at 11,000~35,000 rpm.

의 고속에서 마찰특성을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 실험에서 사용한 함유소결베어링은 3,000 rpm에서 베어링과 축이 분리되기 시작하여, 9,000 rpm에서 베어링과 축이 완전히 분리된다. 고속으로 갈수록 흡의 영향으로 인해 유체동압의 발생이 용이하다가 20,000

rpm이상의 속도가 되면 회전이 불안정한 상태가 된다. 저하중에서는 안정된 저마찰과 유막분리를 보이나, 하중이 증가함에 따라 금속접촉과 불안정한 마찰특성을 보이고 있다. 따라서 고속에서는 사용할 경우 unbalanced force를 최소화하여야 한다.

2. 고속에서 빗살무늬 유체베어링의 특성을 관찰한 결



(a) Radial clearance $4\mu\text{m}$, Viscosity 8.29cSt (b) Radial clearance $8\mu\text{m}$, Viscosity 8.29cSt
Fig. 7. Output voltage of electric contacts and friction forces of herringbone-grooved fluid bearing(HFB) due to load variation at 28,000 rpm.

Table 5. Electrical characteristics of scanner motor

Bearing in motor	Motor speed (rpm)	Rating current (mA)	Starting time (sec)	Jitter (%)
Ball bearing	11240	152	3.40	0.0073
OSB	11240	151	3.12	0.0069
OSB*	11240	159	3.22	0.0070
OSB	17000	325	5.10	0.0055
HFB	28300	395	3.69	0.0048
HFB*	23000	372	3.02	0.0078

OSB*, HFB* : foreign products

Table 6. Endurance test of oil-impregnated sintered-metal bearing (OSB) at 17,000 rpm

Time (HR)	Rating current (mA)	Starting time (sec)	Jitter (%)
0	325	5.10	0.0055
500	309	5.10	0.0054
1000	308	5.10	0.0049
1500	301	5.00	0.0046
2000	300	5.00	0.0031
2500	267	4.84	0.0036
3000	266	4.72	0.0048

과 마찰력은 속도가 증가하면서 소결베어링과 마찬가지로 속도의 영향으로 증가하였다. 점도가 클수록 마찰력이 증가하였으며, 틈새가 작을수록 마찰력이 증가하였다. 11,000 rpm에서 이미 베어링과 축 간의 완전한 분리가 이루어져서 35,000 rpm의 고속에서도 분리가 잘 이루어진다. 빗살무늬 유체베어링은 함유소결베어링보다 고속과 고하중에서 사용이 가능하다.

3. 모터 실험 결과 두 베어링 모두 매우 우수한 전기적 특성을 나타내었으며, 내구성에서도 만족할 만한 성능을 확인하였다.

후 기

본 연구는 공업기반기술과제인 “Optical system 구동용 스캐너모터 개발” 연구로 삼성전기(주)의 지원으로 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터에서 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Morgan, V. T. and Cameron, A., “Mechanism of lubrication porous bearings,” Proceedings Conf. On Lubrication and Wear, pp. 151-157, 1957.
- Shikata, H., “Sintered bearing,” Journal of Japan Society of Lubrication Engineers, vol.30, pp. 573-578, 1985.
- Braun, “Porous bearings,” Tribology International, vol. 15, pp.235-242, 1982.
- Saito, S. and Tajima, K., High-speed laser beam printer,” Hitachi Review, pp.183-186, 1984.
- Sato, Y. and Ono, K., The optimum groove geometry for spiral groove viscous pumps,” Journal of Tribology, vol.112, pp. 409-414, 1990.
- Tanaka, K, and Muraki, H, “Performance of air-lubricated hydrodynamic bearing spindles for laser scanners,” Journal. of Tribology, vol.113, pp.609-614, 1991.
- Quan, Y., “Theoretical analysis and experimental investigation of a porous metal bearing,” Tribology, vol. 18, pp.67-73, 1985.
- 정광섭, 김병주, 송무석, 이영제, “그루브를 가진 함유 소결베어링의 마찰 및 전기적 특성,” 한국윤활학회지, vol.13, No.3, pp.108 -114, 1997.
- Morgan, V., “Porous metal bearings,” Tribology International, vol.2, pp.107-115, 1969.
- Kinouchi, K. and Tanaka, K., “Performance characteristics of herringbone grooved journal bearings using

- a finite element method," Proc. Japan Intern. Tribology Conf., Nagoya, Japan, pp.935-940, 1990.
11. Bonneau, D. and Absi, J., "Analysis of aerodynamic journal bearings with small number of herringbone grooves by finite element method," Transaction of the ASME, vol.116, pp.698-704, 1994.
 12. Bootsma, J. and Tielemans, L. P. M., "Conditions of leakage-free operation of herringbone grooved journal bearings," ASME Journal of Lubrication Technology, vol.99, pp.215-223, 1977.
 13. Murata, S., Miyake, Y. and Kawabata, N., "Two-dimensional analysis of herringbone grooved journal bearings," Bulletin of JSME, vol.23, pp.1220-1227, 1980.