

레이저 프린터에 사용되는 빗살무늬 유체동압 베어링과 스캐너 모터의 특성

정성훈* · 이영제** · 정대현***

(1999년 5월 25일 접수)

Characteristics of Herringbone-Grooved Hydrodynamic Bearing and Scanner Motor for Laser Beam Printer

Seong-Hoon Jeong, Young-Ze Lee and Dae-Hyun Jeong

Key Words: Herringbone-Grooved Hydrodynamic Bearing(HHB, 빗살무늬 유체동압 베어링), Scanner Motor(스캐너 모터), Laser Beam Printer(레이저 프린터)

Abstract

Frictions and electrical contact voltages of the herringbone-grooved hydrodynamic bearing(HHB) were measured to use in a laser scanner motor. This bearing with varying loads, speeds, oil viscosity, and radial clearances successfully operated up to 28,000rpm and 0.5N. Experimental results under various environments confirmed that this bearing had excellent performance with low friction force, and operated without contact between shaft and sleeve.

1. 서론

빗살무늬 유체동압 베어링은 O/A기기에 사용되는 소형 모터에서 볼베어링이나 진원형의 미끄럼 베어링을 대체하는 유용한 부품으로 그 사용이 점점 확대되는 추세에 있다.⁽¹⁾ 이 베어링은 축 외경이나 슬리브 내경에 홈이 있는 표면을 만들어, 회전 중 유체동압을 발생시켜 지지 강성을 발생시키고 동적 안정성을 크게 향상시킨다. 이러한 장점은 빗살무늬가 진원형의 미끄럼 베어링에 일반적인 휠(whirl) 불안정성을 제거하기 때문이며 축과 슬리브 사이의 환형 공간 내에 있는 저널의 동심 회전을 위해서 가장 중요한 것이다.⁽¹⁾ 빗살무늬 유체동압 베어링의 활용 범위는 레이저 프린터 스캐너, 레이저 복사기, 하드디스크, CD-ROM에 이르기까지 매우 넓으며 그것을

적용하기 위한 연구가 세계적으로 활발히 진행 중에 있다. 그 중에서 레이저 프린터의 스캐너 모터는 고속화되는 속도가 가장 빠르며, 정밀도와 내구성을 가지도록 요구된다.⁽²⁾ 따라서 그것에 쓰이는 베어링 또한 고성능이 요구된다. 여기에서는 레이저 스캐너를 위한 빗살무늬 유체동압 베어링의 마찰 및 전기적 특성을 실험적으로 평가해 보고, 베어링을 스캐너 모터에 조립하여 모터의 전기적 특성 및 다양한 환경 하에서 내구성을 검증하고자 한다.

2. 빗살무늬 유체동압 베어링

빗살무늬 유체동압 베어링은 미끄럼베어링의 한 종류로 유체동압을 발생시키도록 축이나 슬리브 표면에 빗살모양의 홈을 가지고 있다. 회전축이 회전함에 따라 홈의 펌핑 작용으로 생긴 압력으로 하중을 지지한다.⁽³⁾ 또 빗살무늬 유체동압 베어링은 홈이 윤활 유체를 홈 안쪽으로 가압 함으로써 오일의 누설이 매우 적은 특성을 가지고 있다.⁽⁴⁾

* 성균관대학교 기계설계학과

** 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : yzlee@yurim.skku.ac.kr

TEL : (0331)290-7444 FAX : (0331)290-5276

*** 삼성전기 정밀 사업부

홈을 이용한 베어링에는 원판형, 원통형, 구형, 원추형 등이 있으며 이중 구형과 원추형은 축 방향과 반경 방향의 하중을 모두 지지할 수 있으나, 가공과 조립에 어려움이 있다. 원판형이나 원통형은 일반적으로 한 방향 하중만 지지할 수 있으나 다른 것에 비해 가공이 용이하다.⁽²⁾ 이중에 축 방향 직선 홈 베어링은 형상이 단순하고 가공이 용이하며, 가격이 저렴하여 대량생산이 쉽다는 장점이 있으나, 압력발생과 안정성이 빗살무늬에 비해 좋지 않다.⁽³⁾ 빗살무늬 유체동압 베어링은 가공에 어려움이 있어서 슬리브에 홈을 만드는 것보다 축에 홈을 만드는 것이 가공비가 저렴하고 생산이 용이하며, 홈을 가진 요소가 회전하는 것이 홈을 가지지 않은 것이 회전하는 것보다 압력 발생이 용이하나 강성에 있어서는 홈을 가지지 않은 것이 회전하는 것이 더 좋다.⁽⁵⁾

실험에 사용된 베어링은 Fig. 1에서 보듯이 축의 홈을 따라 형성된 유체가 충분한 압력을 가지고 반경 방향 하중을 지지하도록 구성되어 있고, 축 방향 하중은 축과 내마모성이 좋은 나일론 계열 폴리머의 접촉으로 지지하도록 되어있다. 축에는 전조가공에 의해 홈을 가공하였다. 또한 축에 홈을 가지고 그 축이 회전하는 경우와 슬리브 내경에 선반작업에 의해 가공된 홈을 가지고 그 축이 회전하는 두 가지 경우에 대하여 속도변화에 따른 마찰력과 접촉신호의 특성을 살펴볼 것이다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 베어링의 마찰력 및 접촉 전압 측정 방법

본 연구에서 사용한 시험기는 Fig. 2와 같이 구성되어 있으며 자체 제작한 일반 고속형 저어널 베어링 시험기로 50,000rpm까지 회전 가능한 서보 모터를 장착하고 있다. 축과 베어링 사이의 마찰력을 측정하기 위하여 베어링에 홀더를 부착하고 로드셀에 장착된 편을 홀더에 접촉시킨다. 이 때 측정되는 마찰력은 회전 속도에서의 축과 슬리브 사이에 있는 윤활 유체의 점성 마찰력이다. 하중은 베어링의 위에서 수직으로 주었다. 로드셀을 통해서 측정된 마찰력은 A/D보드를 통해 컴퓨터에 저장되며, 베어링과 축의 접촉정도

Table 1 Bearing parameters

Bearing Parameters	Herringbone-grooved hydrodynamic bearing
Number of groove	12
Radial Clearance	4 μ m, 8 μ m
Groove Depth	6 μ m (a)
Groove/ridge Ratio	1:1 (b: c)
Groove Angle	25° (d)
Shaft Diameter	3mm
Oil viscosity at 40°C	8.29cSt, 25cSt

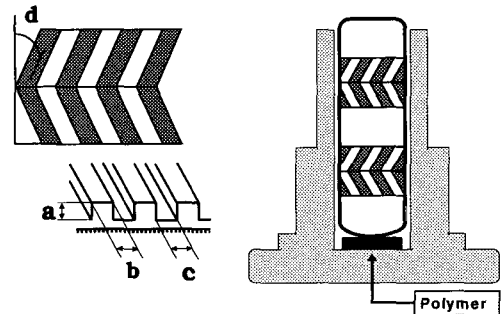


Fig. 1 Geometry of herringbone-grooved hydrodynamic bearing

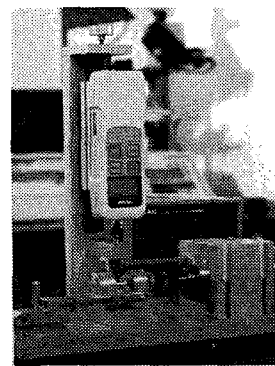


Fig. 2 Configuration of bearing tester

를 나타내는 접촉전압도 전기회로를 통하여 측정되고 저장된다. 진원공급장치를 통해서 6V의 전압을 인가하고 축과 베어링이 금속접촉이 없는 완전한 유막을 형성하면 3V의 전압이 측정되고, 유막 형성 없이 금속접촉을 하였다면 0V의 전압이 측정

된다. 또한 외부환경에 대한 변수를 최대한 줄이기 위하여 실험중의 온도와 습도의 환경조건이 거의 일정하게 유지될 수 있도록 밀봉케이스를 설치하였다.

3.2 회전속도 · 하중 변화 시 마찰 특성 실험

빗살무늬 유체동압 베어링의 기하학적 형상은 Table 1과 같으며, 이와 같은 수치는 자체 개발한 프로그램을 가지고 구한 수치이다.⁽⁶⁾ 축에 홈이 있고 그 축이 회전하는 베어링의 실험에서 회전 속도 변화는 0.05N의 일정하중에서 11,000rpm ~ 35,000rpm으로 하였으며 반경방향 틈새를 4 μ m와 8 μ m 두 가지로 하였으며, 또 오일의 점도도 8.29cSt와 25cSt의 두 가지로 사용하였다.

하중의 변화는 28,000rpm의 일정 회전 속도에서 0.05N ~ 1N이며 반경방향 틈새를 4 μ m와 8 μ m로 변화를 주었고 점도는 8.29cSt이다. 세 번째 실험은 슬리브에 홈을 가지고 있으며 홈이 없는 축이 회전하는 실험이다. 하중은 0.05N의 일정 하중으로 11,000 ~ 35,000rpm의 회전 속도 변화시의 마찰력과 접촉신호를 측정하였으며 오일의 점도는 8.29cSt이며 반경방향 틈새는 8 μ m이다.

3.3 스캐너모터의 전기적 특성 및 내구성 실험

빗살무늬 유체동압 베어링을 실제로 스캐너 모터에 조립하여 모터의 성능을 측정하였다. 모터는 양산 계획에 따라 28,300rpm의 회전 속도를 가지도록 제작되었다. 스캐너 모터의 전기적 특성으로 정상전류(rating current), 기동시간(starting time), 지터(jitter)를 측정하였다. 정상전류는 모터가 정격회전수로 회전할 때의 전류 값이고, 기동시간은 모터에 전원을 인가한 후 정격회전수에 도달할 때까지의 소요시간을 의미한다. 회전안정성을 나타내는 지터는 정격으로 회전시킨 폴리곤 미러(polygon mirror)에 레이저광을 입사하고, 반사되는 빔이 2개의 센서를 통과하는 시간간격에서 구한다.⁽⁷⁾ 결과는 볼베어링을 사용하는 모터(11,240rpm에서 작동)와 현재 수입되는 일본 제품(23,000rpm에서 작동)과 성능을 비교하였다.

또한 다양한 환경에서의 신뢰성을 검증하기 위해 고온, 저온 그리고 고온고습 환경에서 72시간 방치한 후 시험하는 고온보존시험, 저온보존, 고온고습보존시험을 수행하였고, 위에 언급한 환

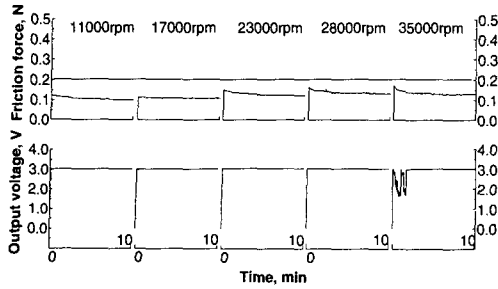
Table 2 Average friction forces of herringbone-grooved hydrodynamic bearing (HHB) on speed variation at 11,000 ~ 35,000rpm

Clearance	4 μ m		8 μ m	
	8.29cSt	25cSt	8.29cSt	25cSt
rpm	Friction force[N]			
11,000	0.095	0.129	0.059	0.087
17,000	0.109	0.156	0.075	0.108
23,000	0.125	0.159	0.089	0.117
28,000	0.130	0.168	0.095	0.119
35,000	0.132	0.171	0.103	0.123

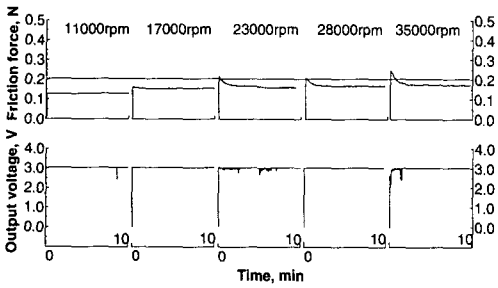
경에서 240시간 연속 동작시키는 고온동작시험 및 저온동작, 고온고습동작시험을 수행하였다.

4. 실험결과

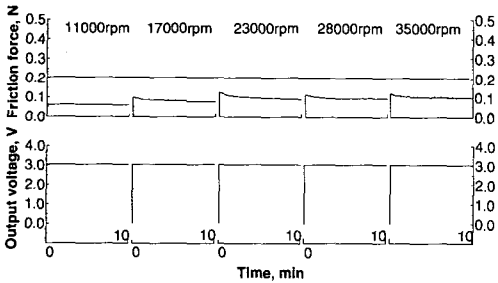
11,000rpm부터 35,000rpm까지 단계별 속도변화시의 평균마찰력을 Table 2에 마찰력과 접촉점도의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 마찰력은 속도가 증가하면서 점성력의 영향으로 점차 증가하는 경향을 보여주며 점도가 클수록(8.29cSt보다 25cSt), 틈새가 작을수록(8 μ m보다 4 μ m) 마찰력이 증가하였다. 베어링의 마찰력은 베어링을 모터에 사용할 때 모터의 구동 전류에 영향을 주는데, 마찰력이 증가할수록 모터에 필요한 전류 값이 증가한다. 이는 모터에 불필요한 전력의 공급을 초래하여 경제적이지 못하다. 마찰력은 모든 속도범위에서 매우 작고 안정적인 특성을 보였으며, 시간이 지날수록 일정한 마찰력을 유지하였다. 접촉신호를 살펴보면 홈의 영향으로 인해 11,000rpm에서 베어링과 축 간의 완전한 분리가 이루어지고 있으며, 23,000rpm 이상의 고속에서도 분리가 잘 이루어지고 있는 것을 관찰할 수 있다. 4 μ m 틈새 베어링(Fig. 3(a)와 Fig. 3(b))의 경우 35,000 rpm에서 초기에 몇 십 초간의 금속접촉이 이루어지고 있으나, 나중에는 유막의 형성으로 인한 베어링과 축의 분리로 3V의 신호가 계속해서 나왔다. 이는 4 μ m 틈새의 경우 윤활유 점도에 관계없이 미세한 유막에서 마모입자나 이물질로 인해 금속 접촉이 발생하는 것으로 추측된다.



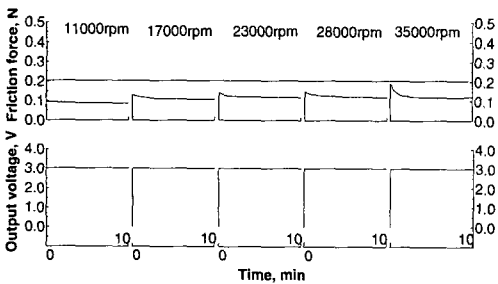
(a) Radial clearance 4 μ m, Viscosity 8.29cSt



(b) Radial clearance 4 μ m, Viscosity 25cSt



(c) Radial clearance 8 μ m, Viscosity 8.29cSt

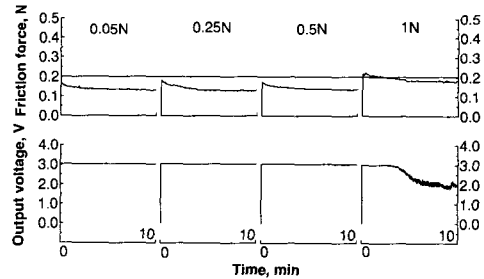


(d) Radial clearance 8 μ m, Viscosity 25cSt

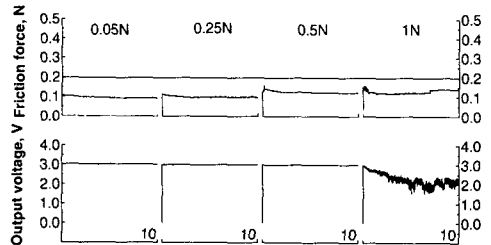
Fig. 3 Friction force and output voltage of electric contacts of herringbone-grooved hydrodynamic bearing(HHB) due to speed variation at 11,000rpm~35,000rpm

8 μ m 틈새를 사용한 베어링(Fig. 3(c)와 Fig. 3(d))의 경우가 4 μ m의 경우보다 더 낮은 마찰력과 더 분명한 3V 접촉 신호를 나타냈다. 반경방향틈새가 빗살무늬 베어링의 마찰특성에 커다란 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

하중의 영향을 보기 위해 28,000rpm의 속도에서 4 μ m와 8 μ m 틈새 베어링에 대하여, 8.29cSt의 윤활유를 사용하여 0.05N, 0.25N, 0.5N 그리고 1.0N의 하중 변화를 주어 실험을 수행하였고, 그 결과가 Fig. 4에 나타나있다. 여기에서도 반경방향틈새에 따라 커다란 마찰력의 차이를 보이고 있으나, Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)의 두 경우 모두 0.5N 까지 안정적인 마찰력과 유막 분리를 나타내고 있으며 1N에서는 모두 금속접촉을 하여 불안정한 마찰특성을 보이고 있다. 하중의 증가로 인해 유막이 제대로 형성되지 못한 것으로 추정된다. 따라서 베어링 사용 시 회전체의 unbalanced force를 최소화하는 것이 바람직하다. Fig. 5에는 슬리브 내경에 홈을 가지고 있는 베어링의 회전 속도 변화시의 마찰력과 접촉신호의 실험결과가 나타



(a) Radial clearance 4 μ m, Viscosity 8.29cSt



(b) Radial clearance 8 μ m, Viscosity 8.29cSt

Fig. 4 Friction force and output voltage of electric contacts of herringbone-grooved hydrodynamic bearing(HHB) due to load variation at 28,000rpm

나 있다. 홈 가공상의 문제로 축에 홈을 가지고 있는 경우의 실험결과와 직접적으로 비교할 수 없으나 마찰력과 접촉신호가 11,000rpm에서 35,000rpm 까지 매우 안정적으로 나타났다. 단지, 슬리브 형상 및 질량의 차이로 마찰신호에 약간 흔들림이 발생하였다. 슬리브(고정) 내경에 홈을 가공한 베어링이 축(회전)에 가공한 베어링 보다 휠 발생이 적기 때문에⁽⁵⁾ 내경 홈이 바람직 하나, 가공이 매우 어렵고 양산을 하는 경우 품질을 유지하기 어려운 단점이 예상된다. Table 3은 빗살무늬 유체동압 베어링과 볼베어링을 각기 폴리곤 미러를 장착한 스캐너 모터에 조립하여 모터의 정격전류, 기동시간, 그리고 지터를 측정한 결과이다. 모터시험 시 볼베어링은 11,240rpm용으로 빗살무늬 유체동압 베어링(HHB)은 20,500rpm과 28,350rpm용으로 제작되었으며, 현재 시판되는 외국제품(23,000rpm에서 작동)과도 비교하였다. 각기 회전수가 달라 직접적인 비교는 어렵지만, 빗살무늬 유체동압 베어링의 경우 위의 두 베어링과 비교 시 정격전류, 기동시간, 회전 안정성(Jitter)이 월등한 것으로 나타났다. 정격전류와 기동시간은 rpm이 빠른 관계로 다소 크게 나왔지만, 속도를 고려할 때 우수한 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

다양한 환경에서의 신뢰성을 검증하기 위해 Table 4에서 보듯이 고온, 저온 그리고 고온고습 환경에서 72시간 방치한 후 시험하는 고온보존시험(Test 1), 저온보존시험(Test 2), 고온고습보존시험(Test 3), 고온과 저온에 각기 20분씩 방치한

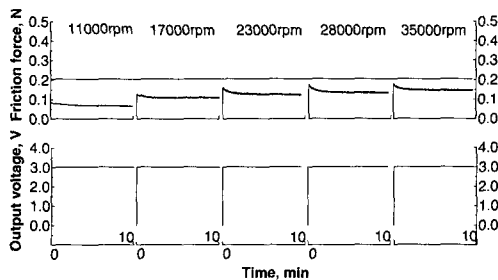


Fig. 5 Friction force and output voltage of electric contacts of herringbone-grooved hydrodynamic bearing(HHB) having grooves within sleeve due to speed variation at 11,000 rpm~35,000rpm

후 시험하는 고온저온보존시험(Test 4) 또한 고온, 저온, 고온고습 환경에서 240시간 연속 동작시키는 고온동작시험(Test 5), 그리고 저온동작시험(Test 6), 고온고습동작시험(Test 7)을 수행하였다.

Table 3 Electrical characteristics of herringbone-grooved hydrodynamic bearing(HHB) in scanner motor * foreign product

Bearing in motor	Motor speed (rpm)	Rating current (mA)	Starting time (sec)	Jitter (%)
Ball bearing	11240	152	3.40	0.008
HHB1	20500	260	2.40	0.006
HHB	23000	372	3.02	0.008
HHB2	28350	400	3.40	0.008

Table 4 Test condition (HHB2)

Test number	Test condition
Test 1	60°C, 72Hr
Test 2	-10°C, 72Hr
Test 3	65°C, 95%, 72Hr
Test 4	60°C ↔ -20°C, 2Hr, 6cycles
Test 5	65°C, 240Hr
Test 6	-10°C, 240Hr
Test 7	65°C, 95%, 240Hr

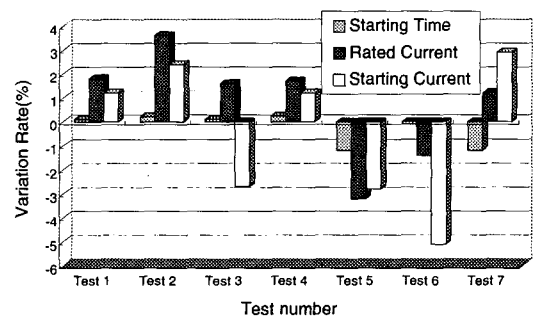


Fig. 6 Endurance test of herringbone-grooved hydrodynamic bearing in scanner motor (HHB2)

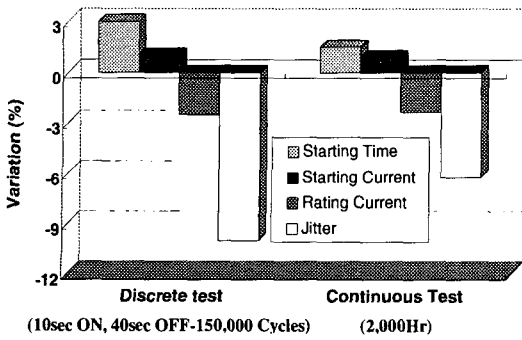


Fig. 7 Life tests of herringbone-grooved hydrodynamic bearing(HHB2)

Fig. 6에 그 결과가 나타나 있으며 기동전류, 기동시간, 정격전류에서의 변동률이 5% 이내에서 매우 안정적이었다. 음수 값은 성능이 향상됨을 나타낸다. Fig. 7과 같이 상온에서 2,000시간 연속 동작 시험, 그리고 10초-ON과 40초-OFF를 한 주기로 15만회를 반복하는 단속시험에서도 매우 우수한 특성을 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 레이저 프린터의 핵심 부품인 스캐너 모터용 빗살무늬 유체동압 베어링의 마찰 및 접촉 특성을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 베어링의 마찰력은 속도가 증가하면서 점성력의 영향으로 증가하였으며, 점도가 높고, 틈새가 작은 경우 평균 마찰력이 증가하였다. 이 실험에 사용된 빗살무늬 유체동압 베어링은 틈새에 따라 11,000rpm~35,000rpm 사이의 넓은 속도 범위에서 슬리브와 축 간의 유막 형성이 우수하고 0.5N이하의 하중에서 뛰어난 안정성을 가지고 있는 것으로 나타났다.

(2) 슬리브의 내경에 흠을 가공한 경우에도 35,000rpm까지 금속 접촉이 없이 유막이 형성되었다.

(3) 빗살무늬 유체동압 베어링을 사용한 스캐너 모터의 정격전류, 기동시간, 그리고 지터를 측정 한 결과, 본 베어링은 볼베어링과 현재 시판되는 동일한 형태의 외국제품과 비교하여 회전 안정성(Jitter)이 월등한 것으로 나타났다. 정격전류와 기동시간은 속도를 고려할 때 우수한 특성을

가지고 있음을 알 수 있었다.

(4) 스캐너 모터를 레이저 프린터에 장착하고 내구성과 다양한 환경에 대한 성능을 실험한 결과, 모터의 기동전류, 기동시간, 정격전류에서의 변동률이 5% 이내에서 매우 안정적이었다.

후 기

본 연구는 공업기반기술과제인 “광학시스템 구동용 스캐너 모터 개발” 연구로 삼성전기(주)의 지원으로 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터(SAFE)에서 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Zirkelback, N. and San Andres, L., 1998, "Finite Element Analysis of Herringbone Groove Journal Bearings: A Parametric Study," *Journal of Tribology*, Vol. 120, pp. 234~240.
- (2) Tanaka, K. and Muraki, H., 1991, "Performance of Air-lubricated Hydrodynamic Bearing Spindles for Laser Scanners," *Journal of Tribology*, Vol. 113, pp. 609~614.
- (3) Kinouchi K. and Tanaka, K., 1990, "Performance Characteristics of Herringbone-grooved Journal Bearings Using a Finite Element Method," *Proc. Japan International Tribology Conference*, Nagoya, Japan, pp. 935~940.
- (4) Bootsma, J. and Tielemans, L. P. M., 1977, "Conditions of Leakage-free Operation of Herringbone-grooved Journal Bearings," *Journal of Lubrication Technology*, Vol. 99, pp. 215~223.
- (5) Bonneau, D. and Absi, J., 1994, "Analysis of Aerodynamic Journal Bearings with Small Number of Herringbone Grooves by Finite Element Method," *Journal of Tribology*, Vol. 116, pp. 698~704.
- (6) Song, M. S., Jang, D. S. and Lee, Y. Z., 1996, "A Design of Self-Acting Air Lubricated Spindle," *Journal of KSTLE*, Vol. 12, pp. 41~47.
- (7) 정광섭, 김병주, 송무석, 이영제, 1997, "그루브를 가진 합유소결베어링의 마찰 및 전기적특성," *한국윤활학회지*, Vol. 13, No. 3, pp. 108~114.