

# 유체동압 메카니즘을 이용한 고RPM용 소결합유베어링의 개발

최윤철 · 신창진 · 박동규  
한국분말야금(주) 연구소

## Development of Sintered Oilless Bearing using Fluid-Dynamic Mechanism For High-RPM Application

Yun-Cheol Choi, Chang-Jin Shin and Dong-Kyu Park  
R&D Dept. of Korea Powder Metallurgy Co., Ltd.(KPM), Incheon 403-080  
(Received October 31, 1997)

**ABSTRACT** Sintered oilless bearing using fluid-dynamic mechanism for high revolution of over 10,000 rpm was developed by powder metallurgy process. Developed bearing was composed of Fe-40-60%Cu of which inner face consisted of six-regular-prominence-and-depression. Inner face has controlled pore size and amount according to application. Jitter and friction properties were tested under assembled conditions with housing and motor. Bearing-own properties and precision were also tested because of demanding for assembled properties. Measurement-skill as well as mould-production-skill were investigated for the precision of bearing. Final precision reached 2  $\mu$ m in inner diameter tolerance and 5  $\mu$ m in coaxiality under assembled conditions.

### 1. 서 론

베어링은 수압형태별로 분류할 때 수압방향과 수압부의 방향이 직각이고 수압부의 움직임이 직선적으로 이동하는 형태를 슬라이더(Slider), 수압(축)이 수압부(베어링)과 평행하고 수압부가 회전하는 형태를 트러스트(Thrust), 수압부가 축과 직각이고 수압부가 회전하는 저어널(Journal)형태로 대별되는데 분말야금공법으로 제조되는 소결합유베어링은 주로 저어널에 해당한다. 형태별로 보면 구름베어링인 볼베어링과는 달리 미끄럼 베어링에 해당한다. 이러한 소결베어링은 볼 베어링에 비하여 주유(注油)의 필요가 없고, 소음이 적고 다량생산이 가능하며 상대적으로 가격이 저렴하여 널리 사용되고 있다. 그러나 허용하중이 작아 고하중에 부적절하고 고회전, 특히 10,000 RPM 이상의 고속에서는 성능만큼이 불가능하여 지금까지 볼베어링이 사용되어 왔다.

고속용으로 사용되고 있던 볼 베어링은 고회전의 조건하에서 사용은 가능하나 소결베어링에 비하여 상대적으로 가격이 비쌌 뿐만 아니라 수 개의 볼에 의해 작동하기 때문에 회전이 불균일하여 소음과 진

동이 크다. 또 그리스를 윤활유로 사용하기 때문에 이의 손실로 인하여 수명이 단축되거나 유출된 그리스로 인하여 치명적인 손상을 입게되는 제품의 경우에는 사용에 제한이 있어 왔다.

한편 유체동압베어링은 볼베어링을 대체하여 고속에서 사용될 수 있도록 개발된 소결합유베어링의 일종으로서 기존의 소결합유베어링과 같이 경제적이고 다량생산에 유리할 뿐만 아니라 치수정밀도가 우수한 특성을 갖고 있다. 기존의 소결합유베어링이 수평축으로 주로 사용되는데 반하여 유체동압베어링은

Table 1. Various types of bearing

Bearing Type	Relative Motion Between Sliding Members	Relation Between Load and Relation Motion
Slider	Translation	
Thrust (Axial Load)	Rotation	
Journal (Radial Load)	Rotation	

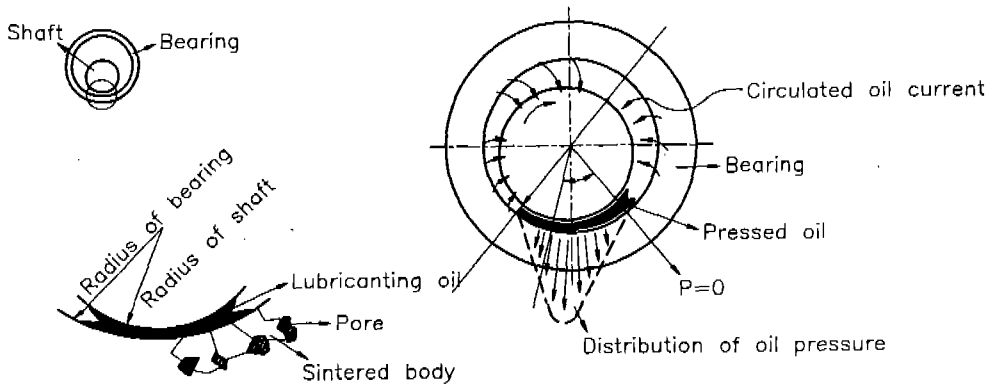


Fig. 1. Principal of sintered oilless bearing.

수직축에 사용되고 내경의 형상이 원통형이 아닌 요철 원통형으로 되어 있다.

작동원리로 볼 때, 소결합유베어링은 Fig. 1과 같이 일정한 간극으로 인하여 축이 베어링 내경의 저부(底部)와 접촉한 상태로 있으며 축이 회전함에 따라 발생하는 열(마찰열)과 간극간의 압력차이에 의해서 다공질인 베어링내의 기공속에 존재하고 있던 기름이 새어나와 윤활역활을 수행한다. 윤활역활을 수행하던 기름은 축이 회전을 멈추면 모세관력에 의해 다시 원래의 기공속으로 스며들어 다음 사용할 때까지 기공속에 보관되는 원리로 되어 있다. 반면에 유체동압을 이용한 베어링은 Fig. 2와 같이 철(凸)형태의 돌기와 최소 틈새만을 갖는 위치에 축이 존재하며 축이 회전함에 따라 요(凹)부분에 있던 기름이 압력차이에 의해 凸부분으로 이동하여 동압을 발생시키므로서 축과 베어링 사이의 마찰력을 감소시키는 구조로 되어 있다. 철(凸)형태의 내경은 축과의 접촉면적을 줄여 마찰력과 소음을 줄여준다.

또, 유체동압베어링도 다른 분말야금제품과 마찬가지로

가지로 내외경 모두가 금형에 의해 균일하게 형성되므로 볼에 의해 작동되는 볼베어링과는 달리 볼의 정밀도 차이에 의해서 생기는 요동이나 진동, 소음이 크게 줄어들 수 있다. 그러나 지금까지는 유체동압을 형성시키는 정밀한 요철부의 형성을 위한 금형 및 공정 제어방법상의 어려움과 조립시의 상하 2개의 베어링간의 최소간극유지의 어려움 등으로 개발이 어려워 볼 베어링으로 사용되어 왔었다. 따라서 본 개발에서 이의 개발과 개발된 제품의 특성평가 결과를 기술하고자 하였다.

## 2. 본 론

### 2.1. 개발방법

Fig. 3에 본 개발대상품의 개략도를 나타내었다. 내경은  $\phi 4$ 의 크기에 내경공차는  $\pm 1 \mu\text{m}$ 이며  $4 \pm 2 \mu\text{m}$ 의 정밀도를 갖는 돌기와 홈이 각각 6개씩 존재하는 형태이다. 조립되었을 경우의 상하 베어링간의 동축도는  $5 \mu\text{m}$ 이내(T.I.R.)이며 하우징 재질은 알루미늄이다.

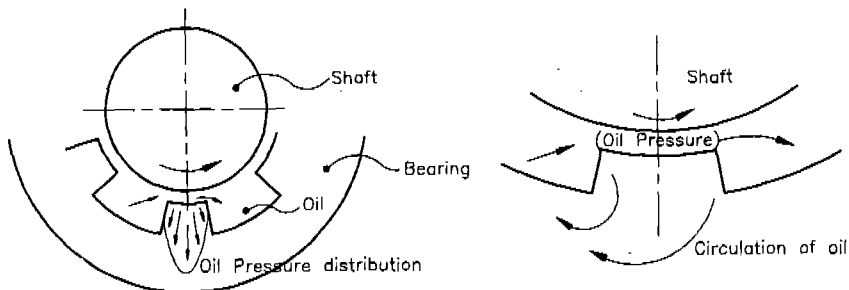


Fig. 2. Principal of hydro-dynamic bearing.

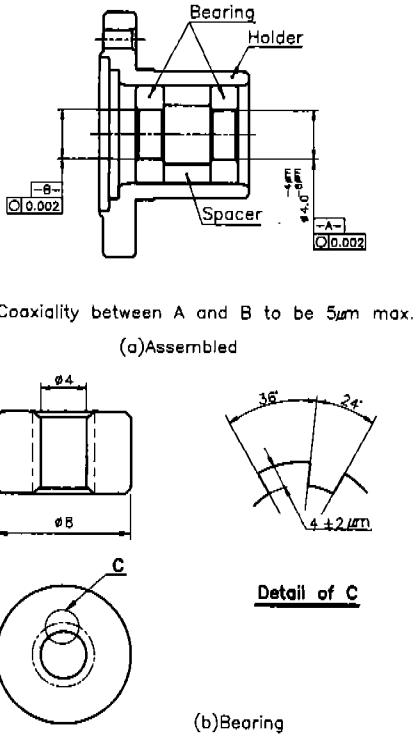


Fig. 3. Drawing.

Table 2. Process of sintered bearing

Mixing	*Double-cone mixer/ Non-segregation # AD, FR
Compacting	*3 t/cm <sup>2</sup> Compacting Pressure # Dimension, Density
Sintering	*1090 $^{\circ}$ C, DA Atmosphere # Dimension, Strength
Sizing	*2 t/cm <sup>2</sup> Pressure # Size, Porosity, Shape
Cleaning	*Ultrasonic Cleaing # Impurity Control
Oil Impregnation	*Vaccum Impregnator
Assembling	# Oil Content # Dimension, shape
Packing	# Final Inspection

개발시 몇차례의 수정에 의해 최종적으로 확정된 공정은 Table 2에 나타내었다.

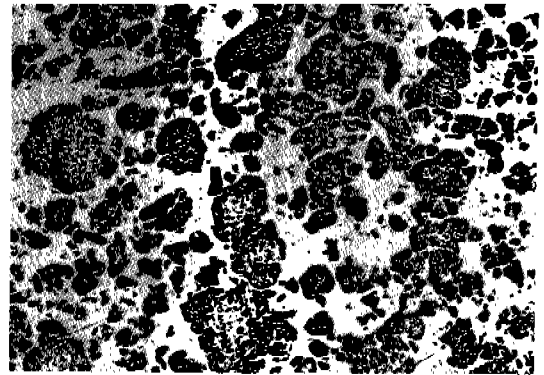
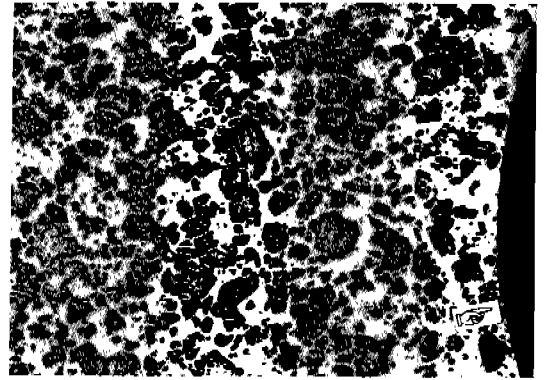


Fig. 4. Cross section of bearing. White phase shown copper-rich area, grey and dark phase shown ferrous or pore area. And hand-mark shown step of inner diameter.

원재료는 철(凸)형태의 내경을 유지하고 내마모성을 유지하기 위해서는 내하중성이 우수한 철계와 같은 특성이 필요하고, 축과의 친화성이 크고, 축에 대한 공격성이 작아야 하며 고속에서의 사용시의 소음 특성을 고려 할 때는 청동나 동합금계의 재료를 사용해야 하나 본 개발에 있어서는 그 두가지 재료의 특성을 골고루 갖도록 하기 위하여 철계의 기지에 다량의 구리성분을 함유하여 거의 철계와 같은 특성을 갖는 동-철계 재료, 즉 Fe-40~60%Cu합금을 사용하여 개발하였다.(Fig. 4참조)

성형시는 기계식 프레스를 사용하여 밀도 6.0 g/cm<sup>2</sup>로 성형한 후 메쉬벨트식 연속로에서 분해 암모니아 분위기중 900 $^{\circ}$ C로 20분간 소결하였다. 소결한 후 역시 기계식 프레스에서 교정하여 내측의 형상과 원하는 기공도를 형성시킨 후 오물이나 교정유(油) 등의

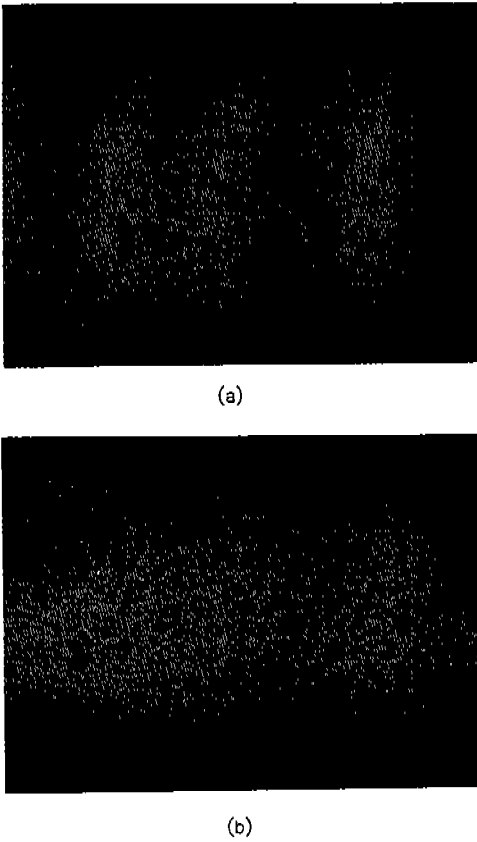


Fig. 5. Porosity of inner diameter (a) shown pore of prominence area (b) shown pore of depression.

제거를 위하여 초음파 세척을 실시한 후에 점도 55cst(20℃)인 오일로 진공함유기에서 20분간 함유처리를 하였다.

교정후에는 Fig. 5에 나타난 것처럼 돌기부분(凸부분)은 기공이 작도록 하고(A~B=RANK), 홈부분(凹부분)은 기공이 크도록 조절(D~E RANK)하였다. 이와 같은 기공의 관리는 돌기부분에서 기공이 클 때 발생된 동압이 잘 유지되지 않아 특성이 급격하게 저하됨을 방지하기 위함과 홈부분에서는 개방된 기공을 통하여 기름이 잘 순환될 수 있도록 배려하기 위함이다.

제조된 시료는 공정별로 밀도와 경도, 압축강도 등 일반적 특성치의 평가와 함께 내경의 형상, 진원도 등의 단체(單體)특성과 하우징에 조립된 상태로의 동축도, 동심도, 그리고 모터조립후의 지터(Jitter)특성과 윤활특성등이 측정되었으나 본 고에서는 일반적인 내용인 단체의 특성은 생략하였다.

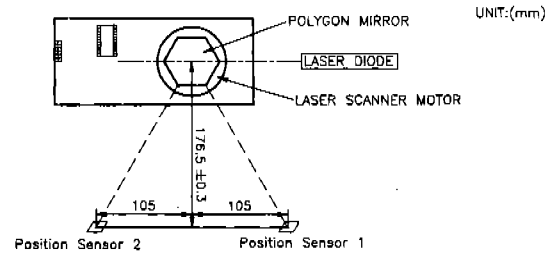


Fig. 6. Schematic diagram of Jitter testing.

측정된 특성중 모터조립후의 특성인 지터(Jitter)특성의 측정은 Fig. 6에서와 같이 정격의 회전수로 회전시킨 다각형 반사거울(Polygon Mirror)에 레이저광을 입사하고 그 반사주사 빔이 2개의 센서를 통과하는 시간간격에서 구한다. 2개의 센서를 통과하는 시간간격을  $T_1, T_2, T_3, \dots, T_{2400}$ 이라고 하면 2점간 지터(LF) 및 고주파 지터(RF)를 이하와 같이 정의한다.

$$LF = \frac{MAX(T_1 \sim T_{2400}) - MIN(T_1 \sim T_{2400})}{MEAN(T_1 \sim T_{2400})} \times 100(\%)$$

$$RF = \frac{MAX(T_{6n-5} \sim T_{6n}) - MIN(T_{6n-5} \sim T_{6n})}{MEAN(T_{6n-5} \sim T_{6n})} \times 100(\%)$$

$n=1, 2, 3, \dots, 2400$

역시 조립후의 특성인 윤활특성은 Fig. 7과 같이 저어널 베어링 시험기를 사용하였으며 콘트롤러가 부착되어 있는 DC모터에 축을 연결해서 양쪽을 지지하고, 마찰력을 측정하기 위해 베어링에 홀더를 부착하고 축에 결합하였다. 하중은 베어링의 위에서 수직으로 주었으며 마찰력은 홀더에 접촉되어 있는 로드셀을 통해서 인디케이터로 측정하였다. 또한 외부환경에 대한 변수를 최대한 줄이기 위하여 밀봉케이스를 제작하여 실험중의 온도와 습도의 환경조건이 거의 일정하게 유지될 수 있도록 하였다. 실험은 속도와 하중을 각각 1000, 3000, 5000, 7000, 8000 rpm과 0.3 N, 4.9 N, 9.8 N, 19.6 N으로 변경하였으며, 비교를 위하여 외국산 유체동압베어링(J1)과 내경이 원통형으로 되어있는 일반 소결함유베어링(J2)을 동시에 실험하였다. 실험장치의 개략도는 Fig. 7에 나타내었다.

## 2.2. 개발결과

### 1) 기공도 및 내경형상

내경측의 기공도는 Fig. 5와 같이 돌기부분과 홈부

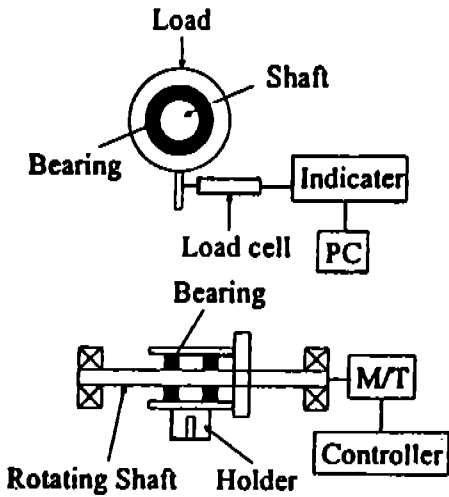


Fig. 7. Schematic diagram of friction test.

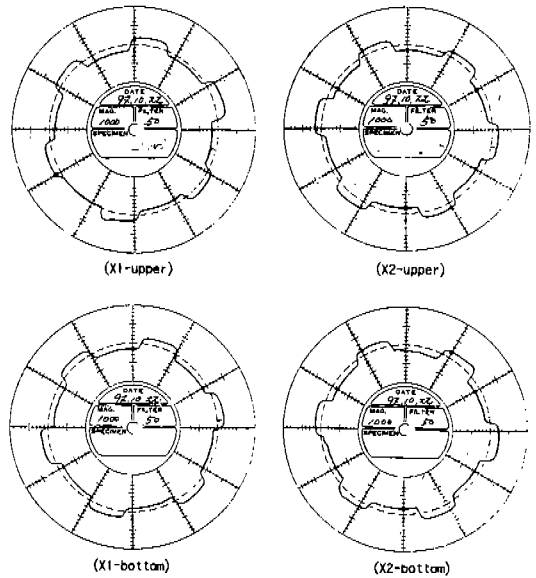


Fig. 9. Shapes of inner diameter in final stage of hydrodynamic bearing.

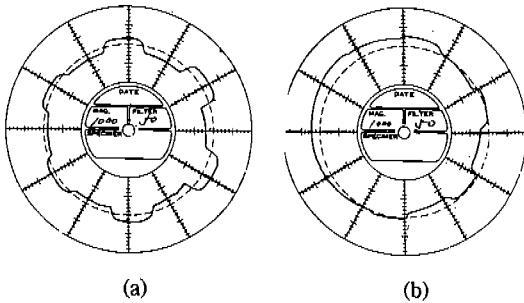


Fig. 8. Unfavorable inner diameter of initial stage (a) shown defectiveness shape, (b) shown harshed face (out of ceter axis)

분이 별도로 관리하여 교정시에 형성되도록 하였다.  
내경축의 형상은 초기에는 금형간의 틈새로 인하

Table 3. Tool Improvement

		Die		Punches		Core	
		Inner Dia	Outer Dia	Inner Dia	Outer Dia	Inner Dia	Outer Dia
Roundness	Conventional	5 $\mu$ m	3 $\mu$ m	5 $\mu$ m	3 $\mu$ m	5 $\mu$ m	3 $\mu$ m
	Improved	<2 $\mu$ m	<2 $\mu$ m	<2 $\mu$ m	<2 $\mu$ m	<2 $\mu$ m	<1 $\mu$ m
Cylindricity	Conventional	20 $\mu$ m	5 $\mu$ m	25 $\mu$ m	10 $\mu$ m		
	Improved	<3 $\mu$ m	<3 $\mu$ m	<3 $\mu$ m	<2 $\mu$ m		
Clearance							
		Between Die & Punches		Between Punches & Core		Total	
Conventional		20 $\mu$ m	25 $\mu$ m			45 $\mu$ m	
Improved		<8 $\mu$ m	<8 $\mu$ m	(5-8)		<15 $\mu$ m	

여 쏠림현상이나 뜨김현상이 발생하였으나(Fig. 8), 금형의 제작방법과 금형간의 조립공차를 Table 3과 같이 개선하여 최종적으로는 Fig. 9와 같은 균일한 형상을 만들 수 있었다.

2) 특성치

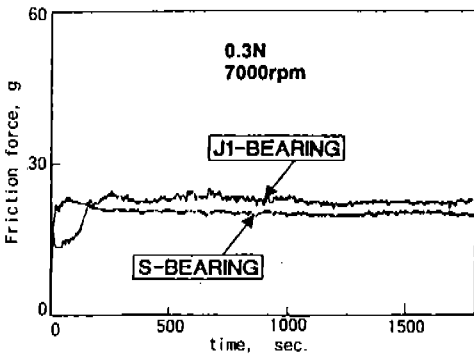
모터를 작동시켜 일정한 회전수에 도달하는 기동 시간과, 정상 회전수에서의 전류치 그리고 LF 및 RF 지터치는 Table 4에 나타내었다. Table 4에서 알 수 있는 것과 같이 모든 조건을 만족시켜 볼 베어링에 조금도 손색이 없을 뿐만 아니라 일부특성에서는 우수한 특성을 발휘하여 대체가 가능함을 나타내고 있다.

3) 마찰특성

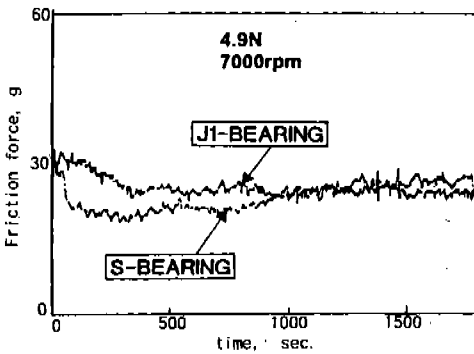
Fig. 10은 일정한 속도(7000 rpm)에서 하중이 0.3 N에서 4.9 N으로 증가되었을 경우의 마찰력을 수입

Table 4. Electrical properties of sintered bearing in assembled state

Characteristics	Starting Time	Rating Current	RF Jitter	LF Jitter
Unit	sec	mA	%	%
Upper Spec.	6.0	300	0.015	0.035
Lower Spec.	0	0	0	0
X	3.12	150.8	0.0063	0.0069
$\sigma$	0.0431	4.195	0.0007	0.0008
CP	22.27	11.86	4.14	11.71



( a ) 0.3N, 7000rpm



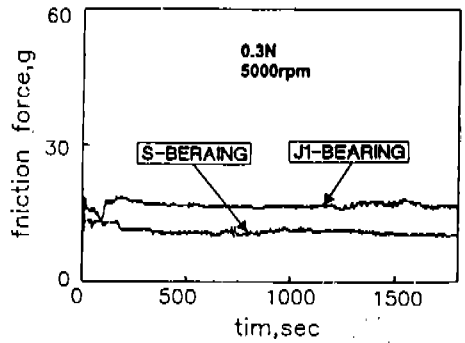
( b ) 4.9N, 7000rpm

Fig. 10. Friction of S-bearing and J1-bearing with load.

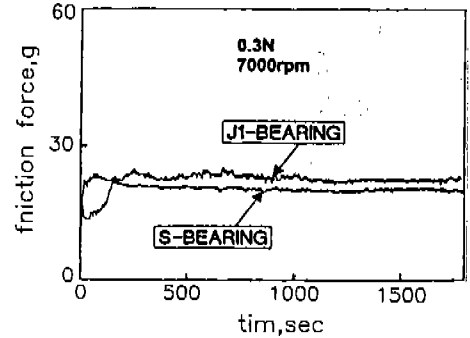
베어링에서 측정된 결과와 같이 나타내었다. 어느 하중에서나 금번 개발품이 성능이 유사하거나 우수한 마찰 특성을 나타내고 있다.

Fig. 11은 같은 하중(0.3 N)에서 rpm을 각각 5000, 7000, 8000으로 증가시켰을 때의 결과를 나타내고 있다. 속도변화에 대해서도 개발된 베어링이 수입된 베어링의 경우보다 마찰력이 작은 것을 알 수가 있다. 특히 8000 rpm에서 큰 차이가 생기는 것을 알 수가 있는데 이는 내경 형상의 균일도에 기인한 것으로 유체동압현상에 의한 효과가 균일하게 나타난 것으로 판단된다.

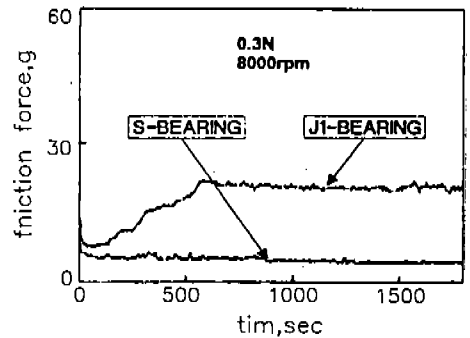
Fig. 12는 일반 소결합유베어링과 유체동압베어링의 7000 rpm에서의 하중별 마찰특성을 나타낸다. 비교적 낮은 하중인 0.3 N에서는 오히려 유체동압베어링보다 합유베어링이 다소 우수한 마찰특성을 보이고 있으나 4.9 N이나 9.8 N의 하중에서는 현격한 차이를 보이며 유체동압베어링이 우수함을 알 수가 있다. 이것은 유압의 발생이 용이한 유체동압베어링의



( a ) 0.3N, 5000rpm



( b ) 0.3N, 7000rpm

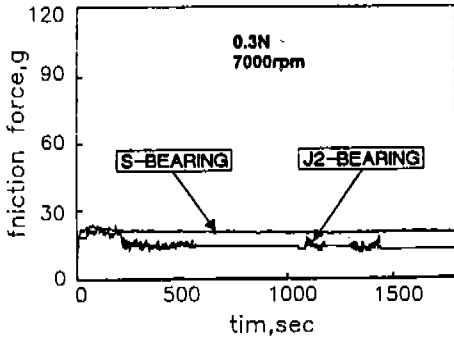


( c ) 0.3N, 8000rpm

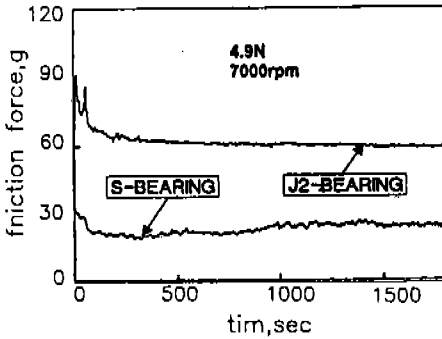
Fig. 11. Friction of S-bearing and J1-bearing with speed variation.

경우는 하중이 어느 정도 증가하더라도 발생된 유압에 의해 축의 지지가 가능하지만 내경이 진원형인 일반 합유베어링의 경우는 가해진 하중을 펌프작용에 의해 발생된 유압의 피막강도가 견디지 못하고 파괴되어 발생된 것으로 판단된다.

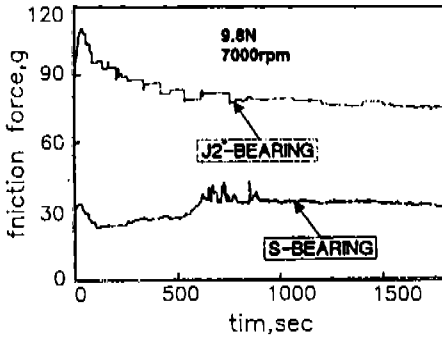
Fig. 13은 개발된 베어링을 동일조건에서 볼베어링, 수입베어링, 원통형 베어링과 같이 비교하였다.



(a) 0.3N, 7000rpm



(b) 4.9N, 7000rpm



(c) 9.8N, 7000rpm

Fig. 12. Friction of S-bearing and J2-bearing with load variation.

볼베어링과 금번에 개발된 유체동압베어링의 마찰 특성은 유사하거나 유체동압베어링이 다소 우수하여 충분히 대체가 가능할 것으로 판단된다.

### 3. 결 론

본 소결합유체동압베어링의 개발을 통하여 얻어진

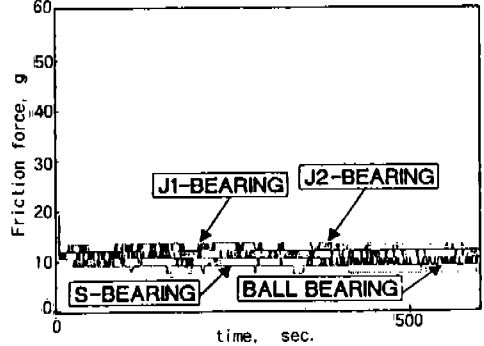


Fig. 13. Friction of bearing in high speed motor.

결론은 다음과 같았다.

1. 철계에 가까운 강도와 동계에 가까운 마찰특성을 갖는 동-철계 재료를 개발하였다.
2. 내경의 형상을 요철(凹凸)원통형으로 균일하게 형성시키면서도 동심도등 형상공차를 만족시켜 유체동압이 형성되는 소결 베어링을 개발할 수 있었다.
3. 용도에 따라 기공을 제어할 수 있는 교정방법을 개발하였다.
4. 유체동압이 발생할 수 있도록 최소틈새와 조립 후에 동축도를 만족시킬수 있는 정밀제조공정과 금형제작방법을 개발하였다.
5. 내경을 2 $\mu$ m 이내로 측정, 관리할 수 있는 측정 기술을 개발하였다.

### 4. 향후과제

본 개발을 통하여 10,000 rpm이상에서 사용이 가능한 유체동압 베어링의 개발에는 성공하였으나 실험결과에 의하면 17,000 rpm이상의 고속에서는 사용이 곤란한 것으로 나타났다. 그러나 향후 사용조건이 한층 가혹해질 것으로 예상되어 차기 목표를 20,000 rpm이상에서도 사용이 가능한 베어링의 개발에 목표를 두었다.

또, 본 개발을 통하여 개발된 베어링의 경우도 아직 조립후의 동축도에 있어서는 규격 5 $\mu$ m를 겨우 만족하고 있는 수준으로 공정이 안정되었다는 할 수는 없는 수준이다. 이를 규격 이내로 공정을 안정화 하고 원가절감을 이룩하기 위하여 동일 특성을 유지 하면서도 경제적인 재료나 기름의 대체 시험 등이 계속되어야 할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 한국분말야금(주): 분말야금의 응용과 실제, 1983.
2. V. T. Morgan and Cameron: *Mechanism of Lubrication in Porous Metal Bearings*, Proceedings Conf. on Lubrication and Wear, (1957) p.151.
3. H. Shikata: *Sintered Bearing*, Journal of Japan Society of Lubrication Engineers, **30** (1985) 573.
4. W. A. Glaeser: *Materials for Tribology*, Elsevier, (1992) p.55.
5. R. Gorla: *Wear*, **94** (1984) 157.