

# 그리스윤활 고속주축의 예압과 냉각조건에 따른 열특성의 실험적 고찰

최대봉\*, 김수태+, 정성훈++, 김용기+++

Experimental study on the thermal characteristics according to the pre-load and cooling condition for the high speed spindle with grease lubrication

D. B. Choi\*, S. T. Kim+, S. H. Jung++, Y. K. Kim+++

## Abstract

The important problem in high speed spindles is to reduce and minimize the thermal effect by motor and ball bearings. Thermal characteristics according to the bearing pre-load and cooling condition are studied for the test spindle with grease lubrication and high frequency motor. Bearing and motor are main heat generation, and heat generation by ball bearings as a function of load, viscosity and gyroscopic moment effect are considered. Temperature distribution and thermal displacement according to the speed of spindle are measured by thermocouple and gap sensor. The results show that the fitting pre-load and cooling temperature are very effective to minimize the thermal effect by motor and ball bearings.

**Key Words :** High Frequency Motor(고주파 모터), High Speed Spindle(고속 주축), Bearing Pre-load(베어링예압), Temperature Distribution(온도 분포), Thermal Displacement(열변위)

## 1. 서 론

최근 소형 정밀 제품의 가공을 위하여 조각기, 내경연기, 전용가공기, 소형금형 가공기 등의 소형 가공기에 주파 모터를 내장한 고속주축의 활용이 증대되고 있다. 이러한 모터 내장형 주축은 구조가 간단하고 벨트, 기어의 고속에서의 문제점을 해결하고 속도변화가 가능한 것이 있는 반면 가동시 내부에서 발생하는 열로 인한 열변위 문제의 개선이 중요한 과제로 부각되고 있다.

본 연구에서는 오일 에어, 오일미스트 윤활장치가 없 그리스 윤활에 의한 고속주축의 예압 변화와 냉각온도 변화에 따른 주축 각부의 온도상승 및 열변위의 경향을 실험적으로 알아보았다. 이를 위해 실제 제작된 주축의 실험을 통하여 그리스윤활 고속 주축의 각 부위의 온도 포와 주축 선단부의 변위를 측정하여 주축 회전수, 베어링 예압, 냉각수 온도에 따른 고속주축의 열특성을 비 분석하여 설계 및 사용에 활용하고자 한다.

\* 주저자, 한국기계연구원 공작기계그룹 (dochoi@kimm.re.kr)  
주소: 305-343 대전시 유성구 장동 171  
+ 창원대 기계공학과  
++ 창원대 대학원 기계공학과  
+++ 코스핀(주)

## 2. 실험

본 연구에서 사용된 가변예압 주축의 구동방식은 빌트인 모터를 사용하며, 베어링의 윤활은 그리스 윤활방식을 채택한 주축이다. 최대 주축회전수는 18,000rpm이며, 압축공기를 이용한 가변예압 방식이다. 본 실험에 사용된 장비 및 실험조건은 Table 1과 같다.

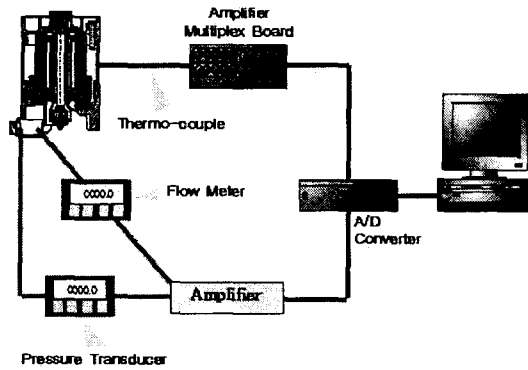


Fig. 1 Schematic diagram of test



Fig. 2 Photograph of the experimental setup

Fig. 1은 실험 장치 구성의 개략도이다. 주축에 부착된 열전대와 변위 센서의 신호는 앰프를 거쳐 A/D 변환기를 통해서 PC에 저장된다. 실험에 사용된 주축은 코스핀(주)에서 제작된 가변예압 주축이며 전반부와 후반부의 베어링은 단열 앵글러 콘택트 스틸 볼베어링으로  $\phi 35$ 와  $\phi 25$ 를 사용하였고, 냉각수의 온도를 실온과 실온-3°C의 두가지 조건에 대해 압축공기를 사용하여 베어링 예압을  $32 \text{ kgf/cm}^2$ 까지 주면서 실험을 실시하였다.

고속주축의 베어링 온도와 냉각수의 온도가 열변형에 가

장 큰 영향을 주는 인자이기 때문에 베어링 예압, 주축 회전수, 냉각수 온도를 변수로 하여 열특성을 비교 분석하였다.

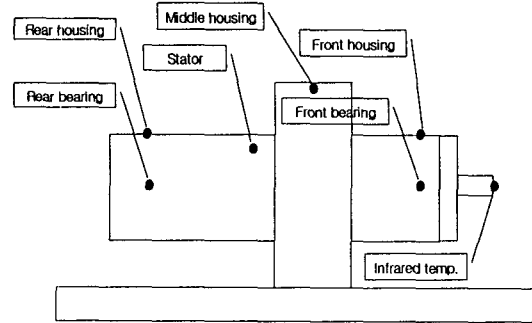


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup

Table 1 Specification of experimental equipment and cooling condition

Item	Specification
Spindle	가변예압주축 (KOSPIN CO., Ltd)
Spindle dimension	diameter : 107mm length : 350mm
Spindle speed	max 18,000rpm
Bearing	7007, 7005
Bearing lubrication	Grease
Pre-load	8, 16, 24, 32 kgf/cm <sup>2</sup>
Cooler temperature	실온, 실온-3°C
Thermocouple	T type
Displacement sensor	gap sensor
Data acquisition device	Hp/Agilent 34970A
Oil cooler	KD-55K
Inverter	OD-22040-KR
Compressor	S20-40-2hp

열전대를 전반부 베어링에 두개, 코일에 두개, 후반부 베어링에 한개, 총 다섯 개의 열전대를 주축 하우징 속에 설치하였고 오일쿨러의 입구, 출구와 하우징 표면에 다섯 개의 열전대를 부착하였다. 주축 선단부의 온도는 비접촉 적외선 온도계를 사용하였다. 변위 센서는 주축의 z, y축과 하우징의 z축 변위를 측정하고, 베어링 예압은 압축기와 레귤레이터를 통해 일정하게 유지하였고, 오일쿨러의 냉각수 유량은  $4.7 \text{ l/min}$ 였다. 이러한 모든 신호는 데이터 획득 장치에서 수집·저장하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

주축의 냉각 및 열변위 특성이 우수한 조건을 확인하기 위하여 네가지 예압과 두가지 냉각수 온도에 대해 주축의 회전수에 따른 온도와 열변위의 변화를 측정하였다.

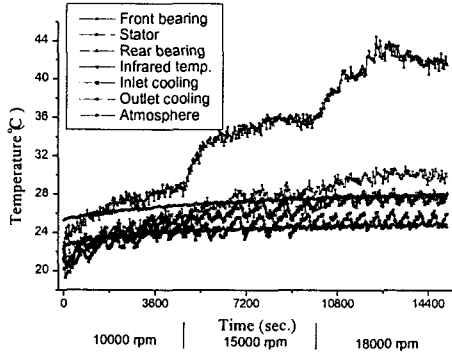


Fig. 4 Temperature distribution (pre-load : 8 kgf/cm<sup>2</sup>, cooler : 실온)

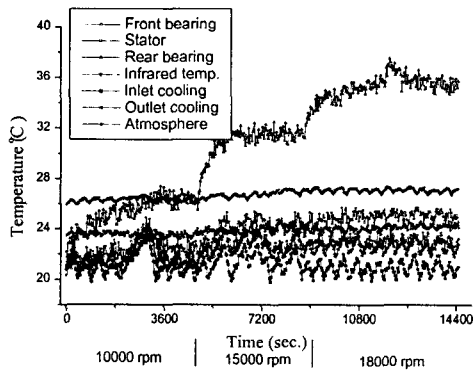


Fig. 5 Temperature distribution (pre-load : 8 kgf/cm<sup>2</sup>, cooler : 실온-3°C)

Fig. 4, 5는 베어링 예압이 8 kgf/cm<sup>2</sup>일때 냉각수의 온도와 주축의 회전수에 따른 전후반부 베어링과 모터 stator의 온도 변화를 나타내고 있다. 전반부 베어링과 모터 부위에는 냉각자켓이 설치되어 있어 상대적으로 후반부 베어링의 온도가 훨씬 높다. 주축의 회전수가 증가하면 베어링 온도도 증가하고 일정시간 경과 후 일정한 온도를 유지한다. 전반부 베어링의 온도는 냉각자켓의 냉각효과 때문에 회전수에 따른 온도 상승을 확인하기 어렵지만, 후반부 베어링에

서는 명확하게 볼 수 있다. 냉각수 온도의 영향은 후반부 베어링보다 전반부 베어링에서 크게 나타나고 있으며 실온보다 낮은 냉각수 온도만큼 전반부 베어링과 stator 온도도 내려간다. 나머지 예압 조건과 냉각수 온도에서도 Fig. 4, 5와 같은 경향을 보인다. 냉각수 온도를 -3°C 낮추면 전반부 베어링 온도는 4.8°C, 후반부 베어링 온도는 6.2°C가 낮아졌으며, 주축의 변위는 Fig. 6, 7에서 3.5μm 작아짐을 확인할 수 있다.

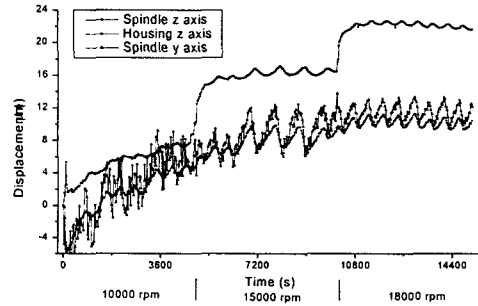


Fig. 6 Displacement of the spindle (pre-load : 8 kgf/cm<sup>2</sup>, cooler : 실온)

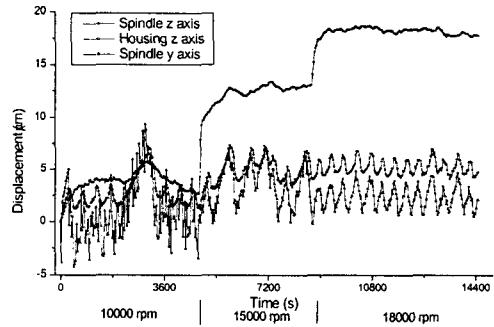


Fig. 7 Displacement of the spindle (pre-load : 8 kgf/cm<sup>2</sup>, cooler : 실온-3°C)

Fig. 6, 7는 베어링 예압이 8 kgf/cm<sup>2</sup>일때 냉각수의 온도와 주축의 회전수에 따른 주축 선단부의 z축과 y축 방향의 변위의 변화를 나타내고 있다. 주축 회전수에 따라 z축 변위도 베어링 온도와 같은 형태의 그래프를 나타낸다. 예압이 8kgf/cm<sup>2</sup> 일때 변위를 비교해보면 냉각수 온도의 영향은 10000rpm에서 4.5μm, 15000rpm에서 3.8μm, 18000 rpm에서 3.5μm정도 감소 효과를 나타낸다.

주축의 y축과 하우징의 z축의 변위는 회전수의 영향은

거의 받지 않고 오일쿨러 냉각수 입력 온도의 변화에 상당히 민감하다.

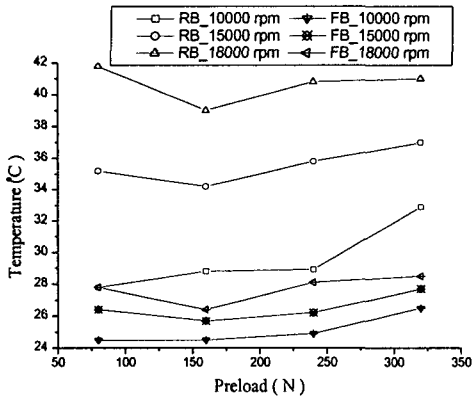


Fig. 8 Temperature of Bearing according to the speed (cooler : Atmosphere)

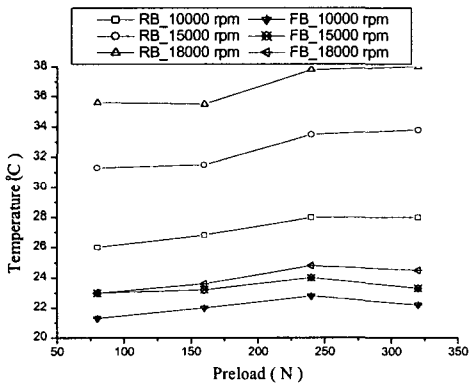


Fig. 9 Temperature of Bearing according to the speed (cooler : Atmosphere-3°C)

Fig. 8, 9는 주축 회전수와 예압의 변화에 따른 후반부 베어링의 온도를 나타낸다. 예압에 의한 베어링 온도의 상승보다는 회전수의 증가에 의한 온도 상승이 훨씬 높다. 냉각수의 온도를 실온보다 -3°C를 낮추면 베어링 온도는 10000rpm에서 2.5°C, 15000rpm에서 3°C, 18000rpm에서 4°C정도 낮아진다. 냉각수 온도의 영향은 높은 회전수에서 더 큰 영향을 끼친다. 전반부 베어링도 비슷한 경향을 보이고 있으며 냉각자켓의 영향으로 후반부 베어링보다 전체적으로 낮은 온도를 유지한다.

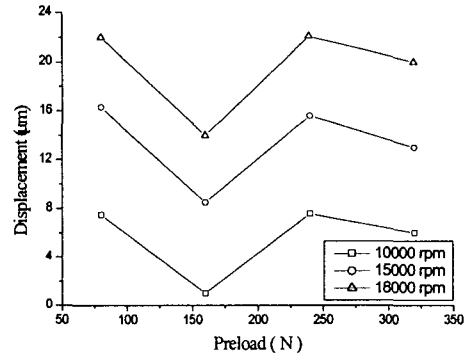


Fig. 10 Displacement of z axis according to the speed (cooler : Atmosphere)

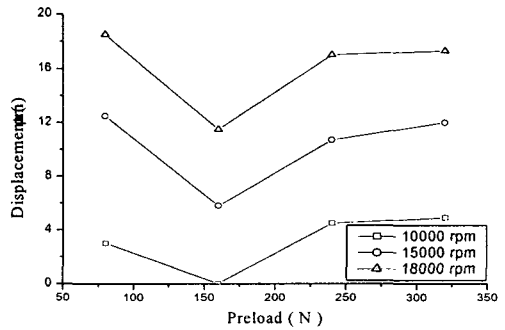


Fig. 11 Displacement of z axis according to the speed (cooler : Atmosphere-3°C)

Fig. 10, 11를 보면 주축 회전수에 의한 변형의 증가를 명확히 확인할 수 있다. 냉각수 온도를 실온보다 -3°C를 낮춘 효과는 10000rpm에서 2 $\mu$ m, 15000rpm에서 3 $\mu$ m, 18000rpm에서 4 $\mu$ m정도 변형 감소시키는 영향이 있다. 모든 회전수에서 예압이 160N일때 최소의 주축 변형을 나타내고 있으며, 예압 증가에 의한 선형적인 변위의 증가를 확인할 수 없는데 이것은 냉각자켓에 의한 주축 전반부의 냉각이 충분히 되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12, 13를 보면 예압이 증가할 때 베어링의 온도도 상승하며, 변위는 160N의 예압을 받을 때 최소의 변형을 나타내는데 이것은 주축 베어링의 온도상승에 큰 변화가 없이 변형을 최소화할 수 있는 예압이 존재함을 알 수 있다. 주축 회전수 18000rpm에서 냉각수 온도를 -3°C설정 한 후 비교해보면 평균적으로 전반부 베어링 온도는 3.5°C, 후반

부 베어링 온도는 4℃, z축 변위는 4μm가 작아지는 효과를 나타내고 있다. 예압 변화의 효과는 베어링 온도보다 열변위에 큰 영향을 끼친다.

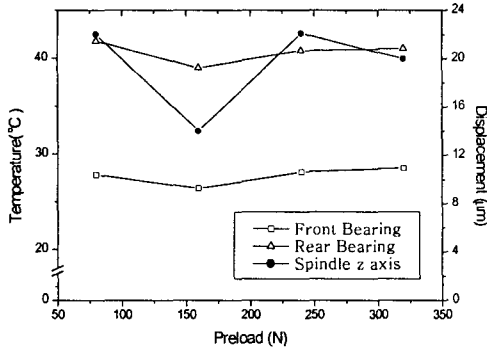


Fig. 12 Comparison of temperature and displacement according to the pre-load (cooler : Atmosphere, 18000 rpm)

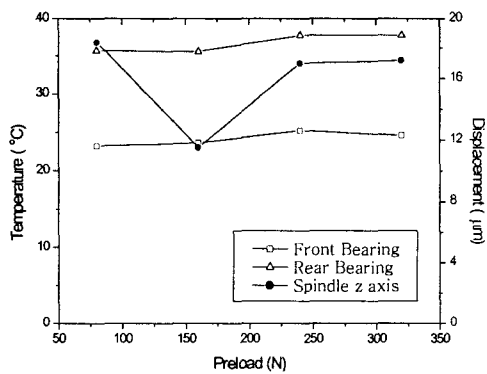


Fig. 13 Comparison of temperature and displacement according to the pre-load (cooler : Atmosphere-3°C, 18000 rpm)

Fig. 14는 주축의 강성 실험 결과이다. 예압이 증가할수록 강성도 증가함을 확인할 수 있으며, 예압이 24 kgf/cm<sup>2</sup>에서 강성이 최대를 나타내었다. 따라서 160에서 240N 사이에서 높은 강성과 적은 변형을 얻을 수 있는 예압을 결정할 수 있다.

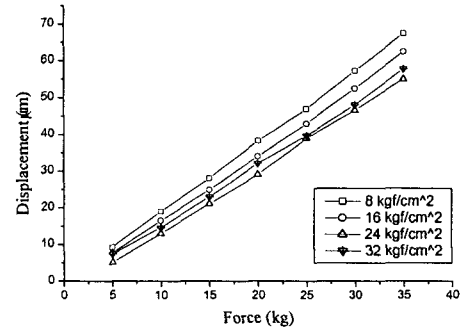


Fig. 14 Stiffness of the spindle according to the pre-load

#### 4. 결 론

본 연구에서 두가지 냉각 조건의 주축을 네가지 베어링의 예압에 대하여 열특성 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 주축 회전수 18000rpm에서 냉각수 온도를 -3℃ 설정시 전반부 베어링 온도 3.5℃, 후반부 베어링 온도 4℃, z축 변위는 4μm가 작아지는 효과가 있다.

(2) 예압의 증가와 주축 회전수에 따라 베어링 온도의 증가보다는 주축의 변위에 큰 영향을 주는 것을 확인하였다.

(3) 주축 베어링의 온도상승에 큰 변화가 없이 변형을 최소화할 수 있고 주축의 강성을 증가시킬 수 있는 적정한 예압이 존재함을 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술 연구 센터의 지원에 의한 것입니다

#### 참 고 문 헌

1. 김수태, 최대봉, “ 고주파 모터 내장형 주축의 냉각 특성 해석에 관한 연구”, 한국공작기계학회 춘계학술대회 논문집, pp.278-283, 2002
2. N. Mishima, K. Mizuhara, Y. Okazaki, “ Thermal Properties of a Hydrostatic Air

Spindle-analysis and Control of Thermal Deformation” , Trans. of JSPE, Vol. 59, No. 3, pp.129 ~ 134, 1993.

3. Frank Kreith, Mark S. Bohn, "Principles of Heat Transfer", West Info Access.

4. Bossmanns, BerndTu, Jay F., “ A Power Flow Model for High Speed Motorized Spindles - Heat Generation Characterization” , ASME J. of manufacturing science and engineering, Vol. 123, No. 3, pp. 494 ~ 505, 2001.

5. T. A. HARRIS, "Rolling Bearing Analsis", John Wiley & Sons, Inc, 2001.