

# 오일미스트윤활 고속주축의 예압과 냉각에 따른 열특성의 실험적 고찰

김수태\*, 최대봉<sup>+</sup>, 정성훈<sup>++</sup>, 김용기<sup>+++</sup>

Experimental study on the thermal characteristics according to the preload and cooling for the high speed spindle with oil mist lubrication

D. B. Choi\*, S. T. Kim<sup>+</sup>, S. H. Jung<sup>++</sup>, Y. K. Kim<sup>+++</sup>

## Abstract

The important problem in the high speed spindles is to reduce and minimize the thermal effect by the motor and ball bearings. Thermal characteristics according to the bearing preload and hollow shaft cooling are studied for the test spindle with the oil mist lubrication and high frequency motor. Bearings 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 preload and hollow shaft cooling are very effective to minimize the thermal effect by the motor and ball bearings.

**Key Words :** High Frequency Motor(고주파 모터), High Speed Spindle(고속 주축), Bearing Preload(베어링예압), Temperature Distribution(온도 분포), Thermal Displacement(열변위), Hollow shaft(중공축)

## 1. 서 론

최근 소형 정밀 제품의 가공을 위하여 조각기, 내경연삭기, 전용가공기, 소형금형 가공기 등의 소형 가공기에 고주파 모터를 내장한 고속주축의 활용이 증대되고 있다. 이러한 모터 내장형 주축은 구조가 간단하고 벨트, 기어 등의 고속에서의 문제점을 해결하고 속도변화가 가능한 이점이 있는 반면 가동시 내부에서 발생하는 열로 인한 열변형 문제의 개선이 중요한 과제로 부각되고 있다.<sup>(1)(2)</sup>

본 연구에서는 오일미스트 윤활장치와 중공축 냉각장치가 장착된 고속주축의 베어링 예압 변화와 중공축 냉각유무에 따른 주축 각부의 온도상승 및 열변위의 경향을 실제 실험적으로 알아보았다.<sup>(3)</sup> 이를 위해 실제 제작된 주축의 실험을 통하여 오일미스트윤활 고속 주축의 각 부위의 온도분포와 주축 선단부의 변위를 측정하여 주축 회전수, 베어링 예압, 중공축 냉각유무에 따른 고속주축의 열특성을 비교 분석하여 설계 및 사용에 활용하고자 한다.

\* 주저자, 창원대학교 기계공학과 (stkim@changwon.ac.kr)

주소: 641-773 경남 창원시 사림동 9번지

+ 한국기계연구원 공작기계그룹

++ 창원대 대학원 기계공학과

+++ 코스핀(주)

## 2. 실험

본 연구에서 사용된 가변예압 주축의 구동방식은 빌트인 모터를 사용하며, 베어링의 윤활은 오일에어 윤활방식을 채택한 주축이다. 최대 주축회전수는 18,000rpm이며, 압축공기를 이용한 가변예압 방식이다. 본 실험에 사용된 장비 및 실험조건은 Table 1, 2과 같다.

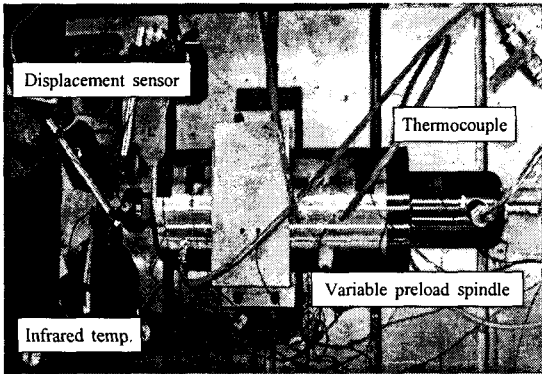


Fig. 1 Photograph of the experimental setup

Fig. 1은 실험 장치 구성의 실물사진이며, 주축에 부착된 열전대와 변위 센서의 신호는 앰프를 거쳐 데이터 획득 장치를 통해서 PC에 저장된다. 실험에 사용된 주축은 코스핀(주)에서 제작된 가변예압 주축이며 전반부와 후반부의 베어링은 단일 앵글러 콘택트 세라믹 볼베어링으로  $\phi 55$ 와  $\phi 35$ 를 사용하였고, 중공축 냉각유무에 따라서 압축공기를 사용하여 베어링 예압을 290 ~ 950N까지 가하면서 실험을 실시하였다.

고속주축의 베어링 온도와 냉각수의 온도가 열변형에 가장 큰 영향을 주는 인자이기 때문에 베어링 예압, 주축 회전수, 중공축 냉각을 변수로 하여 열특성을 비교 분석하였다.

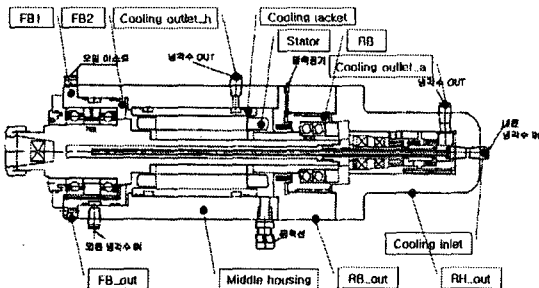


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

Table 1 Specification of experimental equipment

Item	Specification
Spindle	variable preload spindle (KOSPIN CO., Ltd)
Spindle dimension	diameter : 138mm length : 515mm
Spindle speed	max 18,000rpm
Bearing	7011, 7007
Bearing lubrication	Oil mist
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

Table 2 The test conditions

Spindle speed (rpm)	10000, 15000, 18000
Preload (N)	290, 510, 730, 950
Hollow shaft cooling	yes, no
Cooler temp. (°C)	Atmosphere-2

Fig. 2를 보면 열전대를 전반부 베어링에 두개, 스테이터 코일에 한개, 모터 냉각자켓에 두개, 후반부 베어링에 한개, 총 여섯 개의 열전대를 주축 하우징 속에 설치하였고 오일 쿨러의 입구, 출구와 하우징 표면에 다섯 개의 열전대를 부착하였고, 주축 선단부의 온도는 비접촉 적외선 온도계로 측정하였다. 변위 센서는 주축의 z, y축과 하우징의 z축 변위를 측정하고, 베어링 예압은 압축기와 레귤레이터를 통해 일정하게 유지하였고, 냉각자켓의 냉각수 유량은 3.1 l/min, 중공축의 냉각수 유량은 0.7 l/min였다. 이러한 모든 신호는 데이터 획득 장치에서 수집·저장하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

주축의 냉각 및 열변위 특성이 우수한 조건을 확인하기 위하여 네가지 예압과 중공축 냉각유무에 대하여 주축 회전수에 따른 온도와 열변위의 변화를 측정하였다.

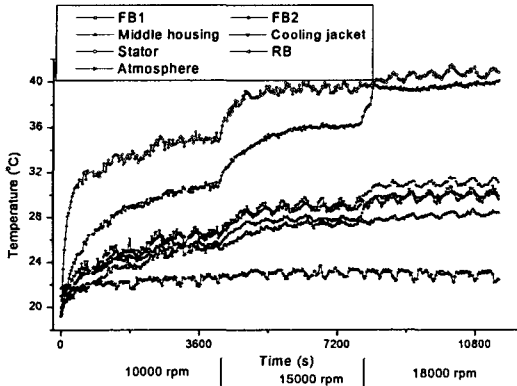


Fig. 4 Temperature distribution  
(Preload : 290N, Hollow shaft cooling)

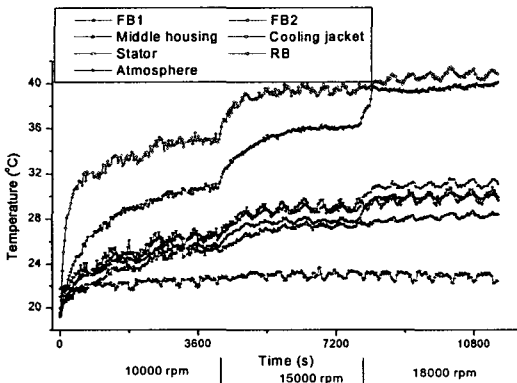


Fig. 5 Temperature distribution  
(Preload : 290N, Hollow shaft no-cooling)

Fig. 4, 5는 베어링 예압이 290N 일때 중공축 냉각유무와 주축의 회전수에 따른 전·후반부 베어링과 고정자의 온도 변화를 나타내고 있다. 전반부 베어링과 모터 부위에는 냉각자켓이 설치되어 있어 상대적으로 후반부 베어링의 온도가 전반부 베어링보다 훨씬 높다. 주축의 회전수가 증가하면 베어링 온도도 증가하고 일정시간 경과 후 일정한 온도를 유지한다. Fig. 4에서 냉각자켓의 냉각효과 때문에 전반부 베어링의 온도는 고정자와 후반부 베어링 온도와 비교하여 전체적으로 10°C 낮음을 알 수 있다. 중공축을 냉각함으로써 스테이터의 온도는 4°C, 전반부 베어링 온도는 2°C, 후반부 베어링 온도는 8°C 정도의 냉각효과를 나타낸다. 나머지 예압과 중공축 냉각 조건에서도 Fig. 4, 5와 같은 경

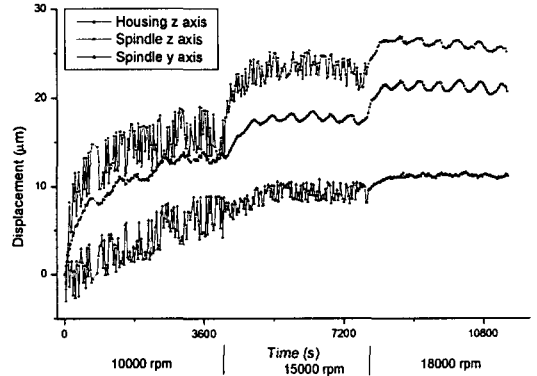


Fig. 6 Displacement of the spindle  
(Preload : 290N, Hollow shaft cooling)

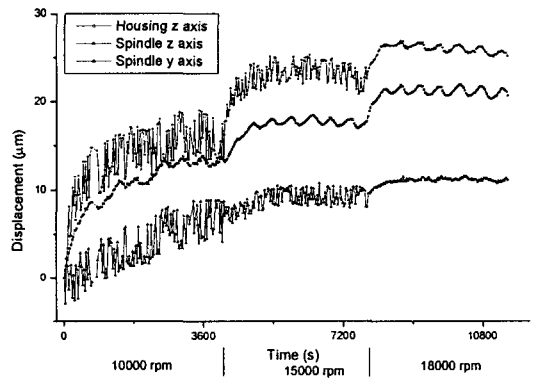


Fig. 7 Displacement of the spindle  
(Preload : 290N, Hollow shaft no-cooling)

향을 보인다.

Fig. 6, 7는 베어링 예압이 290N 일때 중공축 냉각유무와 주축의 회전수에 따른 주축 선단부의 z축과 y축 방향의 변위와 주축 하우징의 z축 변위의 변화를 나타내고 있다. 주축 회전수에 따라 z축 변위도 베어링 온도와 같은 형태의 그래프를 나타낸다. 주축 선단부의 z축 변위를 비교해보면 중공축 냉각의 영향은 10000rpm에서 2.5 $\mu$ m, 15000rpm에서 3 $\mu$ m, 18000rpm에서 4.5 $\mu$ m정도 감소 효과를 나타낸다. 주축 선단부의 y축 방향과 주축 하우징의 z축 방향의 변위도 주축 선단부의 z축 방향의 변위와 유사하다.

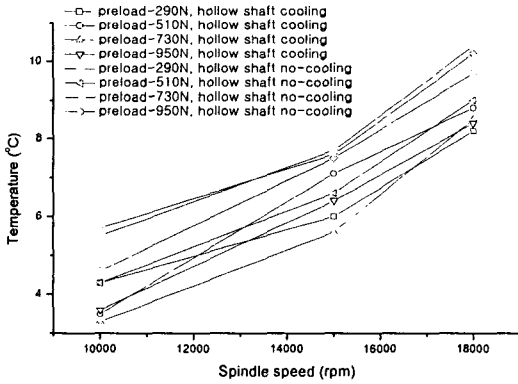


Fig. 8 Temperature of the Front Bearing according to the spindle speed and preload

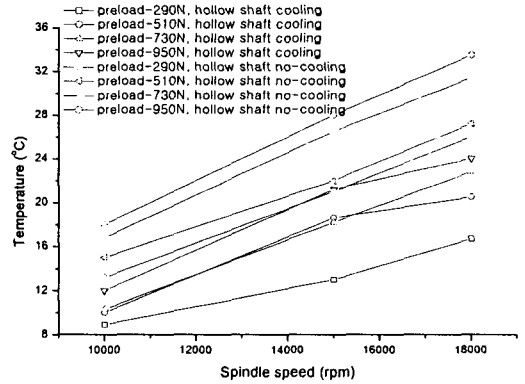


Fig. 10 Temperature of the Rear Bearing according to the spindle speed and preload

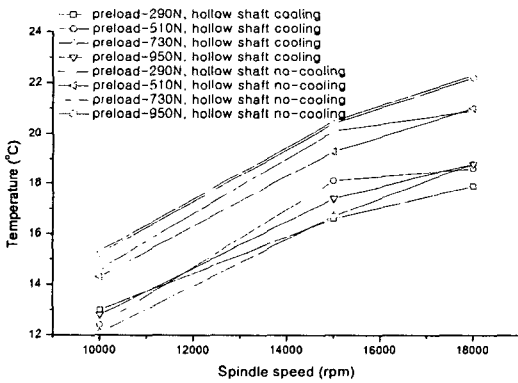


Fig. 9 Temperature of the stator according to the spindle speed and preload

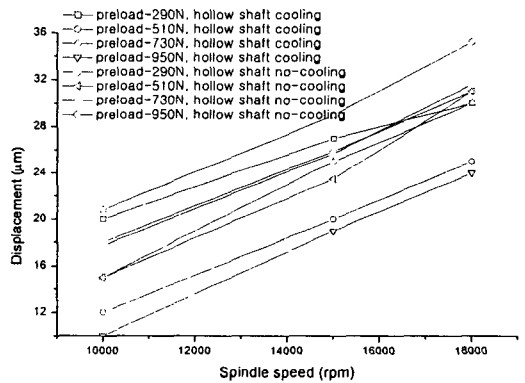


Fig. 11 Displacement of z axis according to the spindle speed and preload

Fig. 8, 9, 10은 주축 회전, 베어링 예압과 중공축 냉각에 따른 전·후반부 베어링의 온도와 고정자의 온도를 나타낸다. 예압에 의한 베어링 온도의 상승보다는 회전수의 증가와 중공축 무냉각에 의한 온도 상승이 훨씬 높다. 중공축을 냉각시키면 평균적으로 고정자의 온도는 10000rpm에서 2.5℃, 15000rpm에서 3℃, 18000rpm에서 4℃ 정도 낮아지고 높은 회전수에서 더 큰 효과를 나타낸다. 전·후반부 베어링도 비슷한 경향을 보이고 있으며 냉각자켓의 영향으로 전반부 베어링의 온도가 후반부 베어링보다 전체적으로 낮은 온도를 유지한다.

Fig. 11를 보면 주축 회전수에 의한 주축 선단부의 z축 방향 변위의 증가를 명확히 확인할 수 있다. 중공축 냉각 효과는 각 회전수에서 평균적으로 6μm 정도 변위를 감소시키는 효과가 있다. 중공축 냉각시와 무냉각할 때 비교하면 모든 회전수에서 예압이 510N 일때 최소의 주축 변위를 나타낸다.

Fig. 12, 13를 보면 주축 회전수가 18000rpm 일때 예압이 증가할 때 냉각자켓이 설치된 전반부 베어링의 온도는 거의 변화가 없으나 베어링 예압의 효과 때문에 후반부 베어링의 온도는 상승한다. 주축 회전수 18000rpm에서 중공축을 냉각함으로써 평균적으로 전반부 베어링 온도는 1.5℃, 후반부 베어링 온도는 8.5℃, z축 변위는 4.5μm가 작

아지는 효과를 나타내고 있다. 중공축 냉각 효과가 우수함을 알 수 있다. Fig. 12에서 z축 변위를 비교하면 510N의 예압일때  $5\mu\text{m}$  감소하였는데, 이것은 베어링의 적정한 예압이 존재함을 알 수 있다.

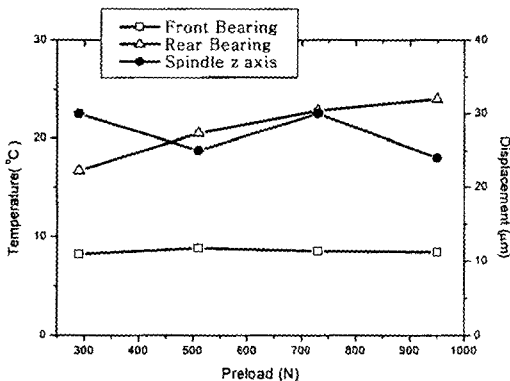


Fig. 12 Comparison of temperature and displacement according to the preload (Hollow shaft cooling, 18000 rpm)

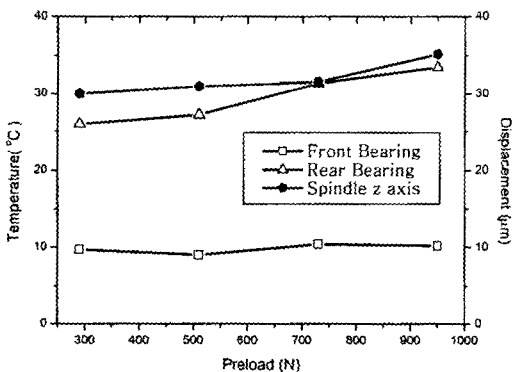


Fig. 13 Comparison of temperature and displacement according to the preload (Hollow shaft no-cooling, 18000 rpm)

#### 4. 결 론

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

(1) 베어링 예압이 290N인 경우에 냉각자켓이 설치된

전반부 베어링의 온도는 고정자와 후반부 베어링 온도와 비교하여 전체적으로  $10^{\circ}\text{C}$  정도 낮고, 중공축을 냉각함으로써 고정자의 온도는  $4^{\circ}\text{C}$ , 전반부 베어링 온도는  $2^{\circ}\text{C}$ , 후반부 베어링 온도는  $8^{\circ}\text{C}$  정도의 냉각효과를 얻었다.

(2) 주축 선단부의 z축 변위를 비교해보면 중공축 냉각 시 10000rpm에서  $2.5\mu\text{m}$ , 15000rpm에서  $3\mu\text{m}$ , 18000rpm에서  $4.5\mu\text{m}$  정도의 감소 효과를 나타낸다.

(3) 예압에 의한 베어링 온도의 상승보다는 회전수의 증가와 중공축 무냉각에 의한 온도 상승이 훨씬 높다. 중공축을 냉각시키면 평균적으로 고정자의 온도는 10000rpm에서  $2.5^{\circ}\text{C}$ , 15000rpm에서  $3^{\circ}\text{C}$ , 18000rpm에서  $4^{\circ}\text{C}$  정도 낮아지며, 중공축 냉각 효과는 높은 회전수에서 더 큰 영향을 끼친다.

(4) 주축 회전수 18000rpm에서 중공축을 냉각함으로써 평균적으로 전반부 베어링 온도는  $1.5^{\circ}\text{C}$ , 후반부 베어링 온도는  $8.5^{\circ}\text{C}$ , z축 변위는  $4.5\mu\text{m}$ 가 작아지는 효과를 얻었다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술 연구 센터의 지원에 의한 것입니다

#### 참 고 문 헌

(1) 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.

(2) 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.

(3) DaeBong CHOI, SooTae KIM, SungHun JUNG, YongKee KIM, "Thermal Characteristics of the High Speed Motor Spindle by the Variation of Bearing Preload and Cooling Conditions", *Machine Engineering*, Vol. 4, No. 1-2, 2004