

## 예압에 따른 고주파 모터 내장형 주축의 열특성 해석

김수태(칭원대)\*, 최대봉(한국기계연구원), 정성훈(칭원대 대학원)

### Analysis on the Thermal Characteristics of the Spindle with High Frequency Motor according to the Preload

S. T. Kim(Mech. Eng. Dept., CNU), D. B. Choi(KIMM), S. H. Jung(Mech. Eng. Dept., CNU)

#### ABSTRACT

Thermal characteristics according to the bearing preload are studied for the four type spindles with high frequency motor. For the analysis, three dimensional models are built considering heat transfer characteristics such as natural and forced convection coefficients. 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. Unsteady-state temperature distributions and thermal displacements according to the bearing preload are analyzed by using the finite element method.

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

#### 1. 서론

지금까지 기계가공에 있어서 중요한 과제는 생산성과 가공정도의 향상이었으며 이러한 요구들로 인해 공구재료의 발달과 더불어 공작기계의 고속화와 고정도화가 꾸준히 추진되어 왔다. 주축의 고속 회전을 위해 채택된 모터내장형 주축은 구조가 간단하고 기어 등의 보조장치가 없어도 속도변화가 가능한 이점이 있는 반면 가동시 내부에서 발생하는 열로 인한 열변형 문제의 개선이 중요한 과제로 부각되고 있으며, 공작기계의 열변형은 공작물의 가공정도 이하의 최대 요인이 되고 있다.

세가지 유형의 주축에 대해, 회전수 45000rpm인 경우에 대하여, 냉각방식에 따른 수치해석을 수행하고, 구조 및 냉각방식에 따른 결과를 비교해 보았고, 본 연구에서는 같은 회전수에서 후만부 베어링의 예압 변화에 따라 어떤 경향이 나타나는지에 대해서 알아보기 위해 네가지 냉각 조건의 고주파 모터 내장형 주축에 대해 3차원 모델링을 행하고 3

차원 비정상 열전달 해석을 통하여 고속 주축의 열특성 해석을 수행하고, 이를 비교 분석한다.

#### 2. 고주파 모터 내장형 주축의 구조

$d_m \cdot n$  값이  $2.2 \times 10^6$ 인 고주파 모터 내장형 주축계로서 전만부와 후만부에의 베어링은 단일 세라믹 앵글러 콘택트 볼베어링으로  $\phi 35$ 와  $\phi 25$ 를 사용하였으며 베어링의 윤활 방식은 오일 에어 윤활 방식을 채택하였다.

고주파 모터 내장형 주축에 대해 예압을 변화시키면서, 베어링과 중공축 냉각 유무에 따른 네가지 유형을 고려하였으며, 첫 번째 주축은 전만부 베어링, 후만부 베어링과 중공축이 모두 냉각되는 구조이며, 두 번째 주축은 첫 번째 주축의 냉각 조건에서 후만부 베어링이 냉각되지 않는 구조이며, 세 번째 주축은 전만부와 후만부 베어링을 모두 냉각하면서 중공축 냉각은 없는 구조이며, 네 번째 주

축은 세 번째 주축의 냉각 조건에서 후반부 베어링이 냉각되지 않는 구조로 되어 있다.

Table 1 The cooling conditions of spindle

	Front Bearing	Rear Bearing	Spindle hole
Type 1	○	○	○
Type 2	○	×	○
Type 3	○	○	×
Type 4	○	×	×

### 3. 주축의 해석

#### 3.1 지배방정식 및 경계조건

3차원 비정상 열전달 방정식 및 경계조건은 다음과 같다. 단, 복사에 의한 열전달은 진도 및 대류 열전달에 비해 영향이 작은 값으로 보고 무시한다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} \quad (1)$$

여기서,  $\rho$  : 밀도,  $c$  : 비열,  
 $T$  : 온도 [T(x,y,z,t)],  $t$  : 시간(time)  
 $k$  : 열전도율,  $\dot{Q}$  : 단위체적당 발열량

#### 3.2 주축의 모델링

예압에 따른 열특성을 해석하기 위하여 주축계의 베어링 발열, 모터 발열, 냉각 특성 및 경계면에서의 발열 특성 및 열전달 특성을 고려하여 모델링을 하였다.

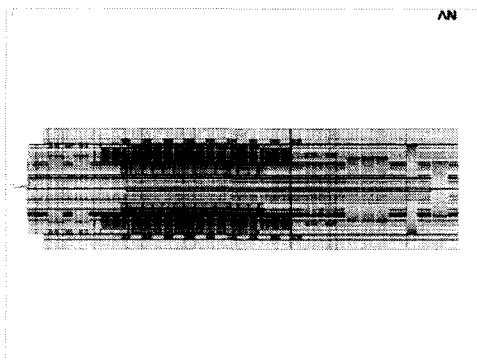


Fig. 1 FEM model of High Speed Spindle

Fig. 1에서는 이상의 근사에 의해서 생성된 네가

지 유형의 주축에 대한 유한요소 모델을 나타내고 있다.

#### 3.3 주축계의 해석을 위한 경계조건

해석모델에 사용된 부품들의 열역학적 물성치는 대기온도를 기준으로 일정한 것으로 하였으며 Table 2에 제시한 값을 해석에 사용하였다.

Table 2 The properties of materials

Property Element	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Specific heat [J/kg·°C]	Thermal conductivity [W/m·°C]
Housing	7769	473	43
Spindle	7769	473	43
Rotor	7817	446	52
Stator	8800	420	52
Air	1.165	1006	0.026

##### 3.3.1 베어링 발열 특성

베어링의 발열은 회전운동의 마찰 손실에 의해서 일어나므로 마찰 모멘트를 구함으로써 베어링의 발열량을 계산할 수 있다.

베어링의 총발열량은 각각의 모멘트의 합에 축의 회전수(rpm)를 곱함으로써 계산하였다.

$$Q_{total} = Q_{ball} + Q_{cylinder} + Q_{roller} \quad [W] \quad (2)$$

Table 3 Heat generation rate of bearing

45000 rpm	Front Bearing	Rear Bearing				
		50	100	200	300	400
$M_g$	32.8	8.7				
$M_l$	10.6	5.3	7.4	12.1	17.3	22.9
$M_v$	50.4	18.6				
$Q_l$ (W)	441.9	154.1	164.1	186.1	210.4	236.7

예압을 50N에서 400N까지 변화할 때 베어링의 발열량은 Table 3과 같다.

##### 3.3.2 모터의 발열 특성

모터 발열량은 모터 제작사에서 제공하는 발열 데이터를 이용하여 적용하였고 회전수에 따른 모터의 회전자와 고정자의 발열은 Table 4와 같이 예측하였다.

Table 1 Heat generation rate of Motor

rpm	Stator (W)	Rotor (W)
45000	1000	500

### 3.3.3 냉각자켓의 냉각능력

관 내부유동에 대한 열전달식을 적용하여 냉각 능력을 계산하였다.

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^n \quad (3)$$

### 3.3.4 주축표면에서의 열전달 특성

축회전시 대기에 노출된 축 표면에서의 열전달 계수는 다음과 같은 식을 사용하여 계산하였다.

(1) 반경방향으로의 열전달

$$Nu_{r,s} = \frac{\bar{h}_s D}{k} = 0.11(0.5Re_{\omega}^2 + Gr_D \cdot Pr)^{0.35} \quad (4)$$

(2) 축방향으로의 열전달

\* 층류영역

$$Nu_{a,s} = \frac{\bar{h}_s D}{k} = 0.36 \left( \frac{\omega D^2}{\nu} \right)^{1/2} \quad \left( \frac{\omega D^2}{\nu} < 10^6 \right) \quad (5)$$

\* 난류영역

$$Nu_{a,s} = \frac{\bar{h}_s r}{k} = 0.0195 \left( \frac{\omega r^2}{\nu} \right)^{0.8} \quad (6)$$

## 4. 결과 및 고찰

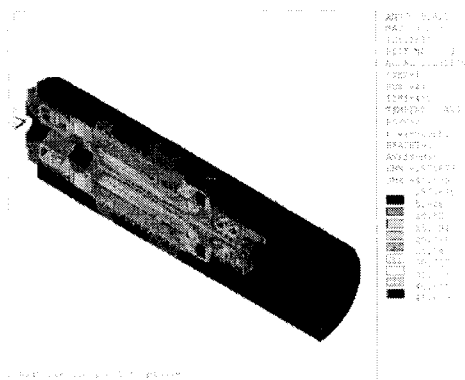


Fig. 2 Temperature distribution of Type 1

Fig. 2, 3는 Type1의 냉각조건인 주축에 100N의 예압을 가한 후, 정상 상태에 도달했을 때 온도분포와 변위를 나타낸 결과이다. 대기온도는 0°C 기준으로 해석되었으며, 후판부 베어링과 밀트인 모터 부위에 최고 온도가 나타난다. 변위는 주축의

가운데 부분을 고정하여 해석하였으며, 주축의 선단부는 z축 방향으로 후단부는 -z축 방향으로 늘어남을 알 수 있다. 나머지 예압 및 냉각 조건에서도 비슷한 경향을 볼 수 있다.

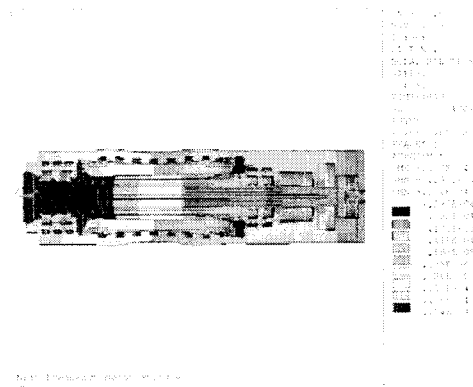


Fig. 3 Thermal displacement of Type 1

Fig. 4에서는 Type1과 2, Type3과 4의 전판부 베어링 온도가 같게 나타났다. 이것은 후판부 베어링의 냉각효과는 전판부 베어링의 온도에 영향을 미치지 못함을 알 수 있으며, Type1,2와 3,4를 비교하면 전판부 베어링에 대한 중공축 냉각 효과는 41°C 정도로 매우 양호하다.

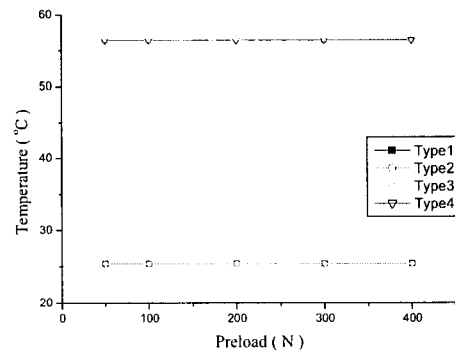


Fig. 4 Temperature of front bearing according to the preload

Fig. 5는 예압의 증가에 따른 후판부 베어링의 온도 상승을 나타내고 있으며, Type1의 경우 예압이 10N 증가할 때마다 후판부 베어링의 온도가 1°C 정도 상승함을 알 수 있다. Type1과 2를 비교할 때 후판부 베어링을 냉각함으로써 약 14°C 정도의 냉각 효과를 얻을 수 있다. Type1과 3을 비교하면 후판부 베어링에 대한 중공축의 냉각효과는 14°C이다.

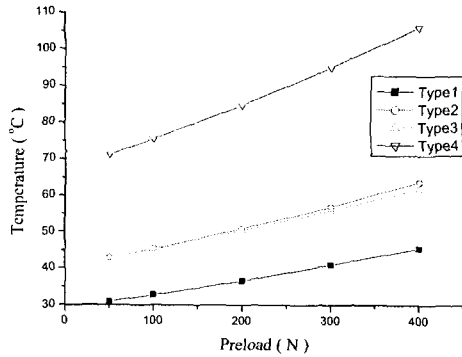


Fig. 5 Temperature of rear bearing according to the preload

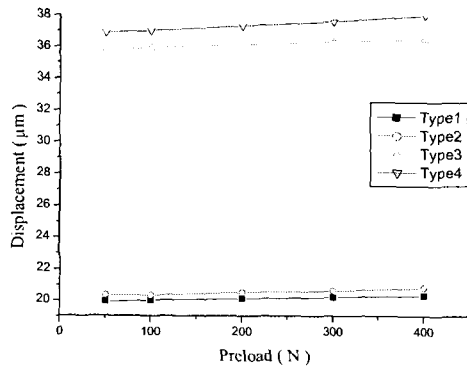


Fig. 6 Displacement of z axis according to the preload

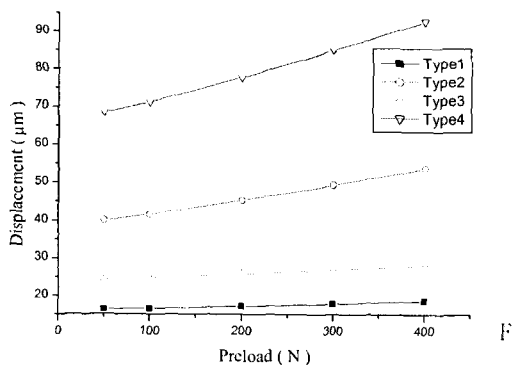


Fig. 7 Displacement of -z axis according to the preload

Fig. 6, 7은 주축의 가운데 부분을 고정시킨 경우 예압에 따른 주축의 선단부와 후단부의 z축 변위를 나타내고 있으며, Fig. 7의 Type4의 경우에

압이 10N 증가할 때마다 주축의 후단부의 변위는 0.7 $\mu$ m 증가됨을 알 수 있다. Fig. 6의 Type1,2과 3,4를 비교하면 선단부의 중공축의 냉각 유무에 따라 z축 변위는 16 $\mu$ m, y축 변위는 4 $\mu$ m 정도의 차이를 보인다. 후단부 베어링의 냉각유무보다 중공축의 냉각이 더 큰 효과를 나타냄을 알 수 있다.

## 5. 결론

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

(1) 예압의 증가에 따라 온도와 변위도 선형적으로 증가함을 확인하였으며, Type4의 경우 예압이 10N 증가할 때마다 후단부 베어링의 온도는 1 $^{\circ}$ C 정도 상승하였고, 변위는 0.7 $\mu$ m 증가하였다.

(2) 후단부 베어링의 냉각 효과는 주축 선단부의 온도와 변위에는 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있었다.

(3) 중공축의 수냉각은 선단부 베어링 온도와 주축 선단부의 변위에 큰 효과를 나타냄을 알 수 있었다.

## 후기

본 연구는 한국과학재단 지경 창원대학교 공작기계기술연구 센터의 지원에 의한 것입니다

## 참고문헌

1. 김수태, 최대봉, "고주파 모터 내장형 주축의 냉각특성 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 Analysis", John Wiley & Sons, Inc, 1984.