

# 오일에어 윤활 고속모터주축의 베어링 및 자켓냉각 조건에 따른 열특성 해석

## An Analysis on the Thermal Characteristics according to the Oil-Air Lubricated Bearing and the Cooling Jacket of High Speed Spindle

\*권희돈<sup>1</sup>, #김수태<sup>2</sup>, 최대봉<sup>3</sup>, 김창용<sup>4</sup>

\*H. D. Kwon(khd1022@changwon.ac.kr)<sup>1</sup>, #S. T. Kim(stkim@changwon.ac.kr)<sup>2</sup>, D. B. Choi(dbchoi@kimm.re.kr)<sup>3</sup>, C. Y. KIM(kcy@hwacheon.co.kr)<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 창원대학교 기계공학과 대학원, <sup>2</sup> 창원대학교 기계공학과, <sup>3</sup> 한국기계연구원, <sup>4</sup> 화천기공(주)

Key words : Thermal characteristics, Motor spindle, Oil air lubrication, Cooling jacket

### 1. 서론

공작기계의 발전경향을 보면 제품의 고속화, 고정도화, 고강성화에 초점을 두고 있으며 공작기계 시스템에 있어서 주축계의 고속화는 공작기계의 성능을 좌우하는 필수적인 핵심 구성 요소라 할 수 있다.<sup>(1,2,3)</sup>

한편, 공작기계의 고속화가 이루어짐에 따라서 주축계의 발열과 열변형이 중요한 문제로 부각되었고, 이러한 주축계의 발열과 열변형은 공작물의 가공 정도 저하의 최대 요인이 되고 있다. 구동시 내부 발열로 인한 열변형 문제의 해결하기 위해 공작기계의 주축의 열특성을 정확히 예측하는 것이 중요하고 또한 베어링 예압의 방법과 조건을 설정하는 연구가 필요하다.

본 연구에서는 수치해석 방법을 이용하여 여러 가지 열전달 현상을 고려한 주축계의 발열특성을 베어링 및 자켓냉각의 조건에 따른 열특성을 해석하여, 열변형을 예측하고 최소화할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

### 2. 고주파 모터 내장형 주축계의 구조

#### 2.1 주축계의 구조

내장형 모터, 전반부 베어링(φ50 3EA), 후반부 베어링(φ45 2EA)를 사용하였으며, 주축의 하우징을 냉각시키기 위해서 전반부 베어링 상단, 로터 상단, 후반부 베어링 상단에 냉각 자켓을 설치하였다. Fig. 1에 주축의 단면도를 제시하였다.

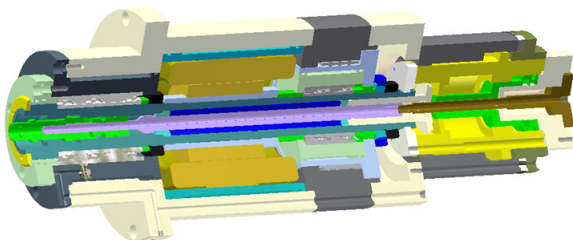


Fig. 1 Schematic diagram of high speed spindle

#### 2.2 해석조건

본 연구에서 점도가 2cSt, 냉각 자켓의 유량이 15l/min, 회전수 10,000, 20,000, 30,000, 40,000rpm에 대하여 전반부 세 번째 베어링의 유무와 후반부 베어링 상단의 냉각 자켓 설치 유무에 따른 영향을 고려하여 주축의 열특성을 해석을 수행하였다.

### 3. 수치해석

#### 3.1 주축계의 모델링

주축계는 열적, 구조적으로 대칭이기 때문에 1/2 모델링을 수행하여 해석시간을 단축하였으며, 주축의 공기공급라인, 부

품의 조립 부분을 생략하거나 단순화하는 작업을 하였으며, 내장형 모터의 회전자와 고정자 사이는 공기의 열전달 특성에 의해서 열유동이 일어나며, 반경 방향 공기 간극과 접하는 고정자와 회전자의 단면에 열유동 경계조건을 부여하였다.

Fig. 2는 고속모터주축의 모델을 나타내고 있다. 분할요소는 Thermal-Solid70의 3차원요소를 사용하였고, 요소수는 12,095이고 절점수는 5,472이다.

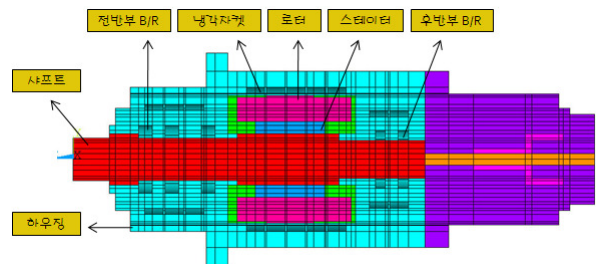


Fig. 2 FEM model of the high speed spindle

#### 3.2 베어링의 발열<sup>(4)</sup>

베어링의 발열은 회전운동의 마찰 손실에 의해서 일어나므로 마찰 모멘트를 구함으로써 베어링의 발열량을 계산할 수 있다. 회전운동을 하면서 주축을 지지하는 베어링의 발열원은 미끄럼에 의한 자이로스코픽모멘트, 베어링형식 및 하중의 크기에 따라 결정되는 하중 동마찰 모멘트, 윤활유의 점도, 양 및 회전수에 의해 결정되는 점성 동마찰계수로 구분되며, 베어링의 총 발열량은 각각의 모멘트의 합에 축의 회전수를 곱함으로써 계산하였다.

#### 3.3 냉각자켓의 냉각특성

주축의 냉각조건은 냉각 자켓을 흐르는 냉각유의 유량 및 점도에 따른 Nu(Nusselt number)를 구하고 이를 관 내부 유동에 대한 열전달식을 적용하여 계산된 냉각자켓의 대류 열전달계수를 적용하여 해석하였다.

### 4. 주축계의 열특성

Fig. 3, 4는 주축의 회전수 40,000rpm에서의 전반부 세 번째 베어링 유무와 후반부 베어링의 냉각 유무에 따른 온도분포와 열변위 해석 결과이다. 회전자와 고정자 부분에서 가장 높은 온도가 나타나고 있으며, 전체적으로 냉각자켓의 영향으로 하우징의 온도가 전체적으로 낮게 나타남을 알 수 있다. 점도 2cSt, 냉각유량이 15l/min, 회전수 40,000rpm일 때의 베어링 온도의 온도변화를 살펴보면 다음과 같다. 전반부와 후반부 베어링을 냉각 시 전반부 베어링 20℃, 후반부 베어링 18.6℃ 정도 상승하고, 전반부와 후반부 베어링을 냉각하지 않는 경우에 전반부 베어링 20.1℃, 후반부 베어링 38.8℃ 정도 상승하였다. 전반부

세번째 베어링을 제외하고 후반부 베어링 냉각시 전반부 베어링 17.6℃, 후반부 베어링 18.6℃ 정도 상승하고, 전반부 세번째 베어링과 후반부 베어링을 냉각시키지 않는 경우 전반부 베어링 17.6℃, 후반부 베어링 38.7℃ 상승하였다.

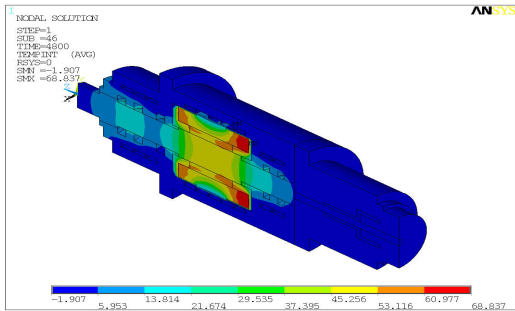


Fig. 3 Temperature distribution (40,000rpm, rear cooling jacket)

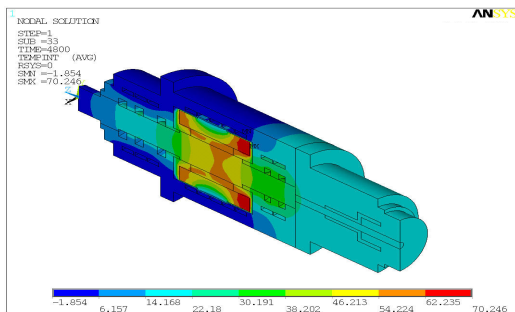


Fig. 4 Temperature distribution (40,000rpm, no rear bearing cooling)

Fig. 5, 6은 고속 주축의 전반부 베어링과 후반부 베어링 냉각에 따른 열변위를 제시하였다.

회전수 40,000rpm에서 전반부 세 번째 베어링을 제외하고 후반부 베어링 냉각 자켓 실행시 z방향의 열변위는 22μm 변화였다. 전반부 베어링을 모두 냉각하고, 후반부 베어링을 냉각시키지 않는 경우 z방향의 열변위는 26μm로 4μm 차이가 난 것으로 보아 후반부 베어링부의 냉각유무가 z축 열변위에 중요한 영향을 미친다.

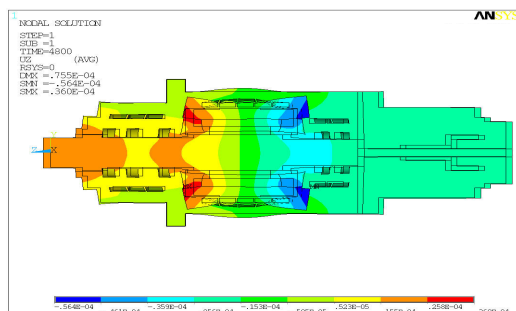


Fig. 5 Temperature distribution (40,000rpm, rear bearing cooling)

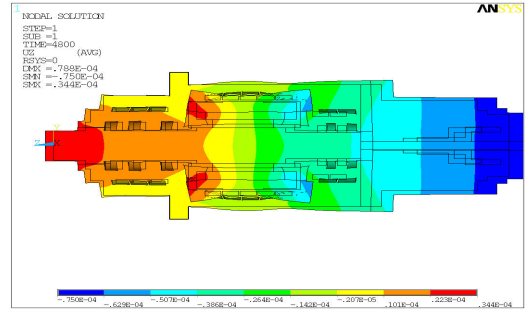


Fig. 6 Temperature distribution (40,000rpm, no rear bearing cooling)

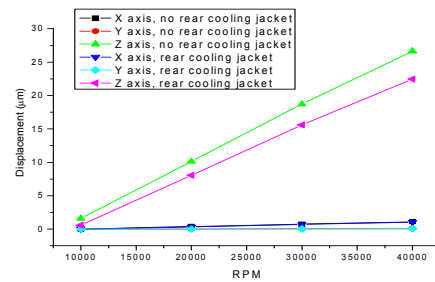


Fig. 7 Thermal displacement

Fig. 7은 세 번째 베어링을 제외한 주축의 z축 열변위 결과로 후반부 베어링을 냉각 유무에 따라 20,000rpm에서 3μm, 30,000rpm 에서 3.5μm, 40,000rpm 일 때 4μm 변화였다.

후반부 베어링부의 냉각유무가 z축 열변위에 중요한 영향을 미친다

### 5. 결론

본 연구에서는 고속주축의 모터에서 주축의 회전수, 전반부 세 번째 베어링의 냉각유무에 따른 영향과 후반부 베어링의 냉각유무에 따른 열특성을 해석하였고 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

회전수 40,000rpm에서 세 번째 베어링을 제외했을 때 전반부 베어링과 후반부 베어링을 냉각한 경우와 전반부 베어링 만을 냉각하고 후반부 베어링은 냉각하지 않은 경우에 비해 온도분포를 확인한 결과, 전반부 베어링 2.5℃, 후반부 베어링인 경우 20.2℃의 큰 차이를 확인할 수 있었다. 열변위 결과에서도 온도 분포의 결과와 유사하게 z방향 변위가 4μm 정도 차이가 나타나고 있었다. 그러므로 전반부의 베어링의 수와 후반부 베어링의 냉각유무가 주축에 미치는 영향이 매우 크다.

### 참고문헌

1. S. Nakamura, 1991, "High Performed Machine Tool Spindles", J. of JSPE., Vol. 04. No. 57., pp.605-609, 1991.
2. A. Muramatsu, Nakamura, H. Yoneyama, O. Iwasaki, 1994, "Heat Conduction Analysis for Motor Integrated Spindle", NSK Technical Journal, No.658, pp.32~39.
3. Bossmanns, BerndTu, 2001, 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.
4. 김수태, 최대봉 : 고주파 모터 내장형 주축의 냉각특성 해석에 관한 연구, 한국공장기계학회 춘계학술대회 논문집, p278-283, 2002