

# 45000rpm 초고속 스피들 열적거동 연구

## Study on Thermal Behaviour of 45000rpm High Speed Spindle

\*박수성<sup>1</sup>, #정원지<sup>2</sup>, 정다윤<sup>3</sup>

\*S. S. Park<sup>1</sup>, #W. J. Chung(wjchung@changwon.ac.kr)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 국립창원대학교 기계설계공학과, <sup>2</sup> 국립창원대학교 기계설계공학과, <sup>3</sup> 국립창원대학교 기계공학과

Key words : 45000rpm, Spindle, ANSYS Workbench®, Thermal Behaviour

### 1. 서론

최근의 공작기계는 항공, 자동차 산업등의 첨단산업과 관련한 소재공업의 고도화에 따라 부품가공의 고능률화와 고품위화가 요구되고 있다. 이에 부응하기 위해서는 공작기계의 고속화, 고정도화가 필수적인 요건으로 선진 각국에서 많은 연구가 수행되고 있다.

이러한 공작기계의 핵심 부품인 주축은 회전수가 높고, 강력 절삭과 정밀 절삭 능력 모두가 뛰어나야하며, 정적 및 동적 강성 또한 우수해야한다. 기존의 공작기계용 주축은 모터에서 커플링, 벨트, 기어등을 통하여 주축으로 동력을 전달하였고 이 때문에 고속 가공시 진동 및 소음을 유발하는 원인이 되었다. 이를 해결하고 만족하는 성능의 주축이 되기 위해서는 내장형 모터로 구동되는 형태가 되어야 한다.<sup>1,2,3</sup>

모터 내장형 주축은 구조가 간단하고 벨트, 기어 등이 고속에서 발생시키는 문제점을 해결할 수 있지만 회전 시 내부발열로 인한 열변형 문제가 발생하게 된다. 이 열변형 문제는 정적이나 동적 변형에서 다루어지는 수  $\mu\text{m}$ 와는 달리 그 변형 정도가 수십  $\mu\text{m}$ 에 달하기 때문에 공작기계의 정도 개선에 있어서 우선적으로 다루어야할 문제이다.

이에 본 논문에서는 유한요소해석을 통하여 공작기계용 주축의 열적 거동을 예측해 보고자 한다.

### 2. 주축의 모델

Fig. 1은 유한요소 해석 대상인 고주파 모터 내장형 주축계의 구조로 주축을 지지하는 전반부와 후반부의 베어링은 앵글러 콘택트 볼베어링을 사용하였고 베어링의 윤활은 오일&에어 방식을 적용하고 있다.

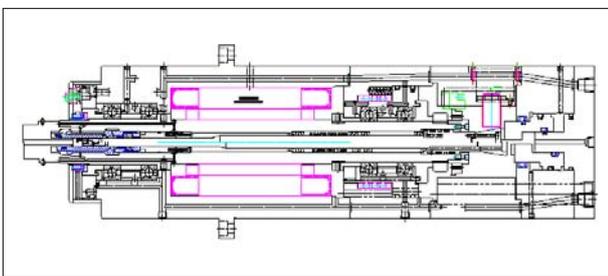


Fig. 1. Schematic diagram of spindle system

Fig. 2에서는 주축계의 유한요소모델을 나타내고 있다. 주축계는 열적, 구조적으로 축대칭이므로 이를 고려하여 1/2만 모델링하였고 해석결과에 영향을 미치지 않는 부분인 조립 부분, 윤활유 및 에어 공급라인등은 근사화 하여 나타냈었다. 내장형 모터의 고정자의 곡면 부분은 직선형태로 단순화 하였고 베어링 부도 모델링을 생략하고 발열에 대한 경계조건을 부여하였다. Element Type은 Thermal Solid90을 사용하였으며 Element number는 39762, Node number 28076 이다.

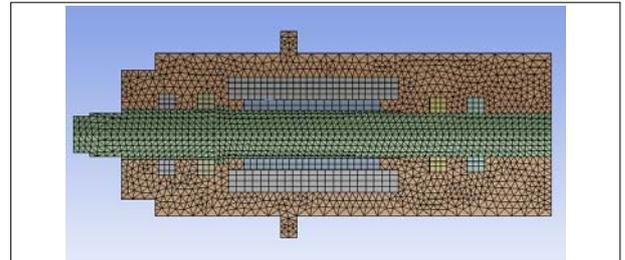


Fig. 2. FEM model of spindle system

### 3. 해석 조건

고속 주축의 열원은 베어링과 내장형 모터로 나누어지며, 베어링과 모터의 발열들은 상호 영향을 주기 때문에 모터의 발열은 베어링의 특성에 큰 영향을 미치게 된다. 일반적으로 모터의 전체 발열량은 모터의 소비 동력을 통해서 추정 가능하다.<sup>4</sup>

#### 3.1 베어링 발열

주축계에 사용된 베어링의 발열은 베어링 내부의 마찰 동력 손실과 비례하는 관계를 갖으며, 베어링의 마찰 동력 손실은 베어링의 미끄럼 모멘트에 의해서 결정된다.<sup>5</sup> 앵글러 콘택트 볼베어링(angular contact ball bearing)의 발열원은 미끄럼에 의한 스피드모멘트(spin moment)와 자이로스코픽 모멘트(gyroscopic moment), 그리고 베어링의 형식, 하중의 크기에 따라 결정되는 하중 동 마찰 모멘트(load friction moment), 윤활유의 점도, 양 및 회전수에 의해 결정되는 점성 동마찰모멘트(viscous friction moment)로 구분된다. 이를 수식으로 나타내면 식(1)과 같다.

$$Q_{total} = Q_{load} + Q_{viscosity} + Q_{gyroscopic} \quad (1)$$

#### 3.2 내장형 모터 발열

모터의 발열량은 모터 제작사에서 제공하는 데이터를 이용하여 무부하 구동시 소비전력을 통해 추정하였다. 회전자와 고정자의 발열 배분은 고정자 부분이 약 2, 회전자 부분이 약 1의 비율로 계산되어 진다. 추정된 발열량은 식(2)를 통해 열 유동량으로 전환하여 해석에 적용하였다.

$$Heatflux = \frac{H}{2 \times \pi \times R \times L} [W/m^2] \quad (2)$$

#### 3.3 냉각자켓의 냉각특성

주축의 주 발열원인 베어링과 내장형 모터를 냉각 시키는 냉각자켓을 따라 흐르는 냉각유는 비원형 사각 직관속을 흐르는 것으로 가정할수 있다. 이를 이용해 수력직경(hydraulic diameter)를 도입하여 냉각능력을 계산한다. 레이놀즈수가 2300이상인 난류유동에 대한 관내부유동의 Nu(Nusselt number)를 구하면 식(3)과 같다.<sup>6</sup>

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

#### 4. 해석 결과

유한요소 해석을 통하여 무부하 상태일 때 각 회전속도에 따른 온도 분포를 해석하였다.

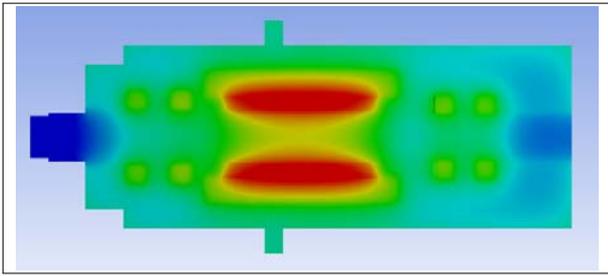


Fig. 3. Temperature distribution of spindle at 10,000rpm

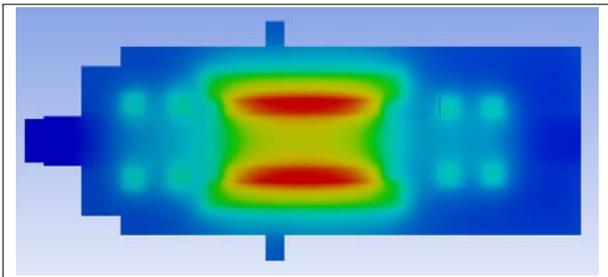


Fig. 4. Temperature distribution of spindle at 20,000rpm

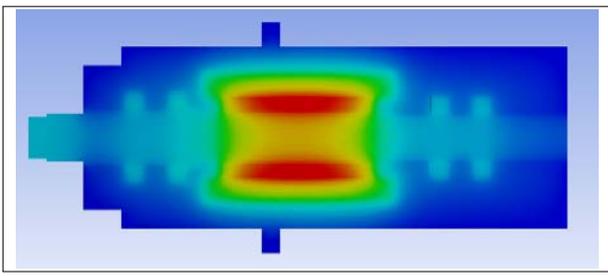


Fig. 5. Temperature distribution of spindle at 30,000rpm

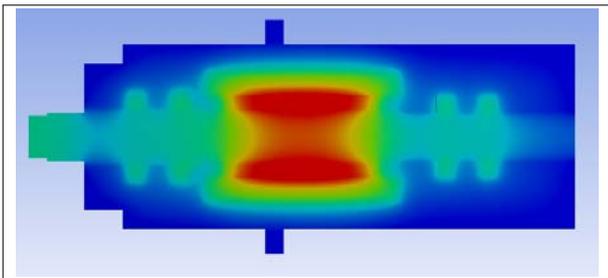


Fig. 6. Temperature distribution of spindle at 40,000rpm

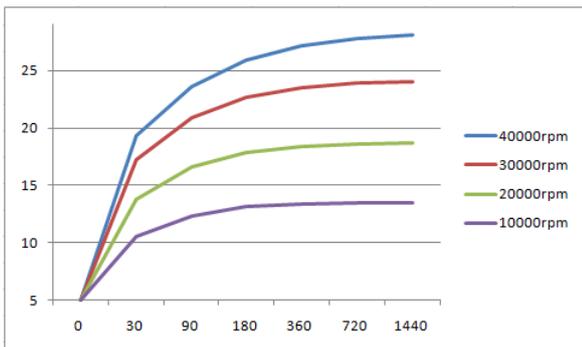


Fig. 7. Temperature increment of the front bearing according to the spindle speed

Fig. 3은 회전속도 10000rpm에서의 온도분포결과이며 Fig. 4는 20000rpm, Fig. 5는 30000rpm, Fig. 6은 40000rpm일 때 해석 결과이다.

이때 Front bearing의 온도 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 회전속도가 빠를수록 전체적인 온도가 높게 나왔으며 40000rpm일 때 중앙 회전축에 큰 영향을 미쳤다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 45000rpm 주축계의 발열 특성을 예측하기 위해 유한요소법을 해석기법으로 하는 프로그램을 이용하여 온도분포 및 열변형을 해석하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) rpm에 따른 주축의 온도분포와 발열 경향을 예상해 볼수 있었다.
- (2) 전반부와 후반부 베어링, 내장형 모터의 발열경향을 파악할 수 있었다.

실제 계측을 통한 실험값과 비교 하여 해석의 타당성을 입증하고자 했으나 측정실험을 실시하지 못하여 비교할수 없었다. 차후 실제 주축계의 발열특성 측정실험을 통해 얻어낸 값과 비교 검토하여 발열특성을 파악하고 이를 바탕으로 주축계의 열변형을 최소화하는 조건을 도출하고자 한다.

#### 후기

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업(RT104-01-03) 지원으로 수행 되었습니다. 이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 「2단계 BK21 사업」의 지원비를 받았습니다.

#### 참고문헌

1. Lim J. S., Yu K. H., Chung W. J., Kim S. T., Lee J. H., Lee C. M., Thermal characteristics Analysis of 30,000rpm high speed spindle, Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 26, No. 7, pp. 120~126
2. Kim S. T., Kim C. S., Choi D. B., Kim J. H., Jeong D. S., The temperature distribution and thermal displacement analysis of the high speed spindle according to the bearing preloads and cooling methods, Engineering Research & Technology Vol. 5, pp. 13~18
3. Lee C. H., Thermal deformation characteristics and compensation of high speed spindle unit, Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 19, No. 5, pp. 7~12
4. Kim S. I., Jo J. W., Lee W. J., Lee Y. H., Static/Dynamic/Thermal Characteristics Analysis of a High-Speed Spindle System with 50,000rpm 한국정공작기계학회 2003 춘계학술대회 논문집, pp.494~499
5. 보고서, Study of the Clearance Control for High Speed Spindle Bearing and Optimization of Spindle Cooling System, 한국기계연구원
6. Kreith, F. and Bohn, M. S., "Heat Transfer Fifth Edition," West Info Access, pp. 315~356, 1993