

언밸런스 질량을 고려한 주축계의 베어링 발열

Unbalance Mass of Spindle and Heat generation for the Angular Contact Ball Bearing

*임정숙¹, 정원지², #이춘만²

*J. S. Lim¹, W. J. Chung², #C. M. Lee(cmlee@changwon.ac.kr)²

¹ 한국기계연구원 부설 재료연구소, ²창원대학교 메카트로닉스공학부

Key words : Spindle, Unbalance Mass, Angular Contact Ball Bearing, Heat generation, Thermal Analysis

1. 서론

공작기계가 고속·고정도를 추구하고 고강성화, 복합가공화 방향으로 발전되어감에 따라 주축계의 고속화는 필연적이다. 이러한 주축이 고속화 되어감에 따라 주축의 고속회전에 의해 야기되는 발열로 인한 열변형을 동반하며, 따라서 이러한 열변형은 주축의 정도를 저하시키고 동시에 주축 베어링의 수명을 단축시키는 상호관계를 가지고 있다. 고속 주축과 같이 회전기계류의 경우 베어링과 같은 요소부품의 성능이 곧 전체 시스템의 성능을 좌우하므로 실제 운전상황에 맞는 베어링의 거동해석 및 이를 바탕으로 한 베어링의 피로수명예측이 필요하다.

고속주축에서 베어링의 역할이 상당히 중요하므로 고속 주축에서 베어링에 관한 많은 연구들이 수행되어져 왔다. 김인찬³ 등은 축이 회전함에 따라 볼 베어링의 볼은 스핀모멘트와 자이로모멘트를 받으며 레이스(race)와 미끄러지면서 열이 발생하며, 또한 작용하중과 사용 기름의 점성에 의해서도 작은 양이지만 발열이 일어난다고 분석하였으며, 이에 따른 베어링의 총발열량을 계산하는 식을 수립하였다. 고태조⁵ 등은 이러한 베어링의 발열이 공작기계용 주축의 열적거동에 미치는 영향은 유한요소 해석을 이용하여 분석하였다. 베어링을 이용한 분석에서는 주축 설계에 영향을 미치는 주요인자들 가운데 베어링의 재질, 윤활방식, 예압량에 따른 성능 파악을 주로 목적으로 하였으나, 본 연구에서는 언밸런싱질량을 포함하는 주축을 고려함으로 고속 주축에서 베어링과 언밸런싱 질량이 주축계에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 열변형 해석 및 베어링의 발열특성

본 연구에서 사용된 고속 주축은 기존 연구⁴를 통하여 개발된 30,000rpm(1.455×10⁶ DmN)을 목표로 개발되어진 제품의 주축계와 베어링만을 고려하여 해석하였다. 이 주축은 자동공구교환을 위하여 드로우바가 장착되는 형태이며, 이 드로우바 때문에 주축은 중공의 형태로 되어 있다. 주축의 소재는 질화강인 SACM645를 사용하였다. 전반부와 후반부의 베어링은 세라믹 볼 베어링으로 GMN사의 HYSM6007C TA P4 UL을 사용하였다. 베어링의 윤활방식은 오일-에어를 적용한 타입이며, 본 연구에서는 윤활대신 외부환경과의 대류열전달이 되는것으로 해석하였다.

실제된 고속 주축계에서 주축이 고속으로 회전할 때 베어링의 발열이 주축의 변형에 어느 정도 영향을 미치는지 분석하기 위하여 Fig. 1과 같이 열전달에 영향을 미치지 않는 범위 내에서 최대한 간소화하여 모델링 하였다. 베어링 부분은 모델링을 생략하고 발열에 대한 경계조건을 부여하고 해석을 수행하였다. 해석 툴은 상용 프로그램인 ANSYS[®]를 사용하였다.

본 연구에서 사용된 고속 주축은 최고 속도 30,000rpm을 목표로 개발되어진 제품이다. 고속 주축의 모든 회전 영역에서의 주축의 특성을 분석하기에는 상당한 시간이 소요가 되므로 관심의 대상이 되는 고속에서 10,000rpm 단위로 속도를 증가시키면서 30,000rpm 까지의 속도에 따른 열변형 해석을 수행하였다. 열변형 해석에 대한 조건은 아래의 Table 1과 같다. 여기에서 베어링의 예압은 실제 베어링 조립 시 사용된 예압을 적용하였다.

베어링의 발열은 회전운동의 마찰손실에 의해서 일어나므로 마찰 모멘트를 구함으로써 베어링의 발열량을 계산할 수 있다⁵. 앵글러 콘택트 볼 베어링(angular contact ball bearing)의 발열원은 미끄럼에 의한 스핀모멘트(spin moment)와 자이로스코픽

(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^{7,8}. 본 연구에서는 스핀모멘트에 의한 발열은 전체 베어링의 발열에 큰 영향을 미치지 못한다고 보고 무시하였으며, 베어링의 총 발열량을 각각의 모멘트의 합에 주축의 회전수(rpm)를 곱함으로써 계산하였다. 사용된 식은 다음의 식 (1)과 같다. Table 2에 고속 주축의 회전속도에 따른 베어링의 총 발열량을 계산하여 나타내었다.

$$Q_{total} = [M_g + M_l + M_v] \times \frac{2\pi \times n}{60} \times 10^{-3} [W] \dots (1)$$

- 여기에서, Q_{total} : 베어링의 총 발열량
- M_g : 자이로스코픽 모멘트
- M_l : 하중 동마찰모멘트
- M_v : 점성 동마찰모멘트
- n : 주축의 회전수

이다.

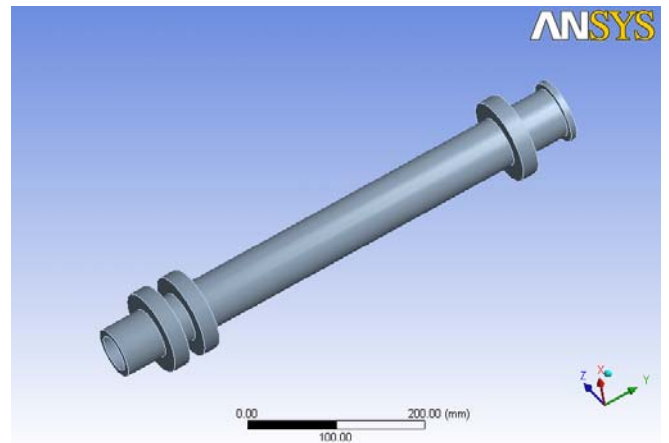


Fig. 1 3D model of 30,000rpm spindle and bearings for thermal displacement analysis

Table 1 Thermal displacement analysis conditions

| Spindle speed [rpm] | Bearing preload [kgf] | Cooling rate [l/min] | Cooler temp. [°C] |
|---------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| 10,000 | 5 | 3.9 | 5 |
| 20,000 | | | |
| 3,0000 | | | |

Table 2 Heat generation of angular contact ball bearing

| Spindle Speed[rpm] | 10,000 | 20,000 | 30,000 | |
|-------------------------------|------------------------|---------|---------|----------|
| gyroscopic moment[N.mm] | 2.29 | 8.82 | 19.84 | |
| Viscous friction moment[N.mm] | 30.05 | 42.89 | 51.0 | |
| Load friction moment[N.mm] | 7.81 | 7.81 | 7.81 | |
| Q_{total} [W] | 42.02 | 124.60 | 246.96 | |
| Heat flux | In[W/m ²] | 30999.5 | 33961.7 | 37355.2 |
| | Out[W/m ²] | 26278.5 | 28757.9 | 31631.49 |

3. 언밸런스 질량과 베어링 발열

관심의 대상이 되는 고속주축의 유한요소모델을 Fig. 1과 같이 모델링하고, Table 1과 2의 조건으로 각각 해석하였다. Fig. 2에서 5까지는 Table 1의 회전수에 따른 베어링의 발열과 주축에 전달되는 온도를 해석하여 각 결과를 나타내었다. 그 결과 회전수가 높아질수록 베어링에서 발열되는 온도가 높으며, 그에 따라 주축에 전달되는 온도 또한 높은 것을 확인할 수 있다. 열전달 해석을 수행한 뒤의 온도분포데이터로 열변형 해석을 수행하였다. 열변형 해석에 대한 예시를 Fig. 5에 나타내었으며, 주축에 추가한 언밸런싱 질량과 속도에 따른 주축의 열변형의 정도를 Table 3에 나타내었다.

| mass | | Speed | | |
|-----------------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Unbalanced mass | 0g/cm ³ | 10,000rpm | 20,000rpm | 30,000rpm |
| | 7.817 g/cm ³ | 1.0628e-5 | 1.8415e-5 | 5.2789e-5 |

4. 결론

본 연구에서는 공작기계용 30,000rpm급 고속주축의 회전수에 따른 주축 내부의 발열로 인한 축방향 길이 변화를 해석하였으며, 주축의 후단에 언밸런싱 질량을 첨가하여, 이 언밸런싱 질량이 주축의 열변형에 미치는 영향을 검토하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고속 주축의 축방향 길이는 주축의 회전속도가 증가함에 따라 비선형적으로 증가함을 알 수 있다.
2. 주축의 후단에 언밸런싱 질량을 첨가한 경우 주축의 회전속도가 증가함에 따른 증가는 있지만, 질량이 첨가되기 전과 비교하였을 경우와 그 양상이 크게 차이가 나지 않음을 확인하였다.

후기

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업[RTI04-01-03] 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 나희형, 임윤철, "앵글라 콘택트 볼 베어링의 윤활 및 발열연구," Journal of the Engineering Research Institute, 26, 185-194, 1994.
2. 한강근, 여은구, 이용신, "주축 설계에 영향을 미치는 베어링 파라미터에 관한 연구," 한국공작기계학회 2007년도 추계학술대회 논문집, 94-100, 1997.
3. 김인찬, 이찬홍, 정운교, "고속 주축 베어링의 조립공차에 관한 연구," 한국 정밀공학회 1994년도 추계학술대회 논문집, 177-180, 1994.
4. 임정숙, 유기한, 정원지, 김수태, 이정환, 이춘만, "30,000rpm 고속 주축의 열특성 분석," 한국정밀공학회지, 26, 120-126, 2009.
5. 고태조, 김희술, "공작기계용 주축계에 관한 열적거동 해석," 한국 정밀공학회지, 5, 90-97, 1996.
6. 임정숙, 정원지, 이춘만, "언밸런싱량을 이용한 주축의 에러보정," 한국공작기계학회 2009년도 추계학술대회 논문집, 331-334, 2009.
7. Tedric A. Harris, "Rolling Bearing Analysis," John Wiley & Sons, Inc., 2001.
8. GMN High Precision Ball Bearings Catalogue, Paul Müller Industire GmbH & Co, KG, 52, 2008.

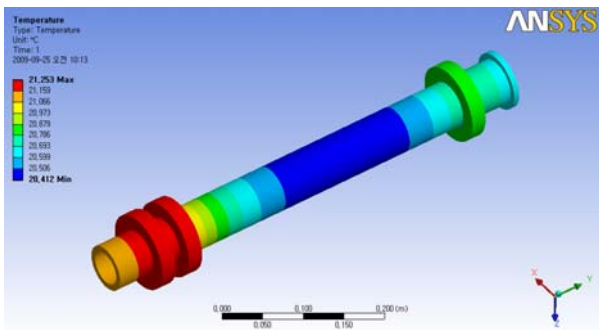


Fig. 2 Temperature variation of spindle at 10,000rpm

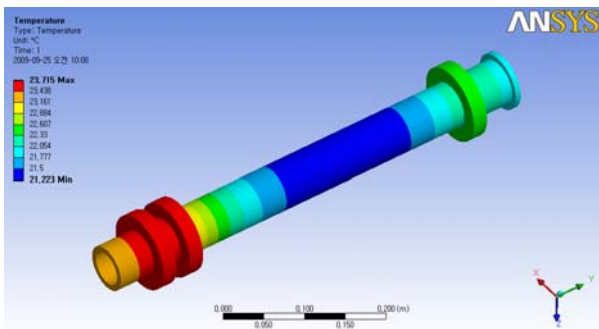


Fig. 3 Temperature variation of spindle at 20,000rpm

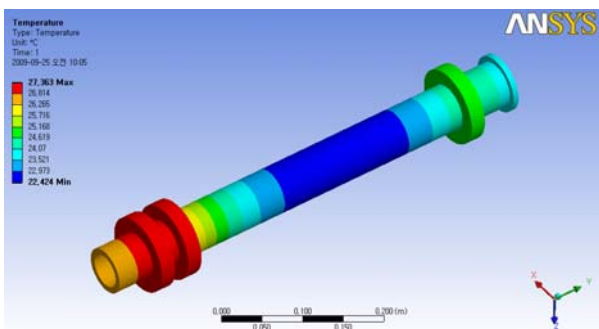


Fig. 4 Temperature variation of spindle at 30,000rpm

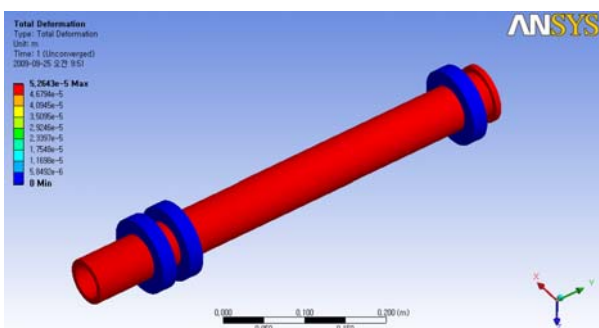


Fig. 5 Result of FEM analysis for thermal displacement analysis
Table 3 Comparison of thermal displacement according to unbalanced