

공작기계용 볼 베어링의 열박을 공정에 관한 연구

A study on Shrink fit for ball bearing of machine tool.

*김 용¹, #이훈만², 이론제³, 박성진⁴

*W. Kim¹, #C. M. Lee(cmlee@changwon.ac.kr)², M. J. Lee³, S. J. Park⁴

¹ 창원대학교 기계설계공학과, ² 창원대학교 메카트로닉스 공학부, ^{3,4} 창원대학교 기계설계공학과,

Key words : Bearing internal clearance, High speed spindle, Shrink fit

1. 서론

제목 공작기계의 최근 추세는 고속화, 고정도화, 고강성화, 무인자동화의 방향으로 개발되어가고 있다. 그 중에서도 주축 속도의 고속화는 생산성 향상이라는 측면에서 급속한 발전이 이루어지고 있으며 이와 동시에 제품의 품위 향상을 위해서 시스템의 고강성화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 공작기계의 회전 정도는 가공 후 공작물의 가공정밀도와 직결되는 중요한 요소이고 이 회전 정도에 영향을 미치는 원인 중의 하나로 주축을 지지하는 베어링의 운동오차를 들 수 있다.

공작기계의 주축으로 가장 많이 채용되고 있는 구름베어링은 내륜 및 외륜을 주축 또는 하우징에 고정하여 하중을 받았을 때, 궤도륜과 축 또는 하우징의 끼워맞춤면에서 반경방향, 축방향 및 회전방향에 상대적인 작용이 발생하지 않게 하기 위해 끼워맞춤면에 간섭을 주어 억지끼워맞춤을 실시한다. 즉 초기에 베어링의 전동체와 궤도륜면 사이의 접촉결합부를 음으로 함으로서 축계의 강성과 회전정밀도를 향상시키고, 베어링의 과도한 내부틈새를 방지하고자 하는 것이다. 또한 베어링은 전동체와 궤도륜 사이의 내부틈새를 가지고 있다. 베어링이 가지고 있던 내부틈새는 일반적으로 억지끼워맞춤에 의해 감소되고, 사용중 내륜과 외륜의 온도차에 의한 열팽창으로 감소된다. 베어링 내부틈새가 지정된 내부틈새보다 작으면 과도한 접촉응력에 의한 유막의 파괴와 늘어붙음의 발생을 초래하여 베어링의 수명을 단축 시키고 클 경우는 축 떨림, 진동 및 소음의 원인이 되고 있다. 이에 축계의 강성을 높이고 진동을 억제하여 회전정밀도 등을 향상시킬 목적으로 초기 예압 하중을 가하고 있다. 이와 같이 공작기계 베어링 측면에서 내부틈새 및 끼워맞춤, 적용 예압의 선정은 매우 중요하다. 하지만 주축 운전시 발생하는 온도 및 회전속도와 상호 연관성을 가지기 때문에 구체적인 초기값의 선정이 쉽지 않다. 특히 주축이 고속화 될수록 열변형, 원심력 등의 영향이 커져 이론보다 경험에 의존하여 선정하는 경우가 많다.

이에 본 논문에서는 열박을 공정에 대하여 ANSYS Workbench 를 이용하여 억지끼워맞춤량을 적용한 유한요소 모델을 구축하고 열팽창과 원심팽창에 의한 영향을 해석적 방법을 통해 규명함으로써 베어링의 수명 및 주축 성능과 직결되는 베어링의 끼워맞춤 및 내부틈새변화의 거동을 파악하는데 그 목적이 있다.

2. 억지끼워맞춤을 적용한 유한요소모델 구축

본 연구에서는 실제 40,000rpm 고속 주축의 열박을 공정을 재현하여 억지끼워맞춤량을 적용한 유한요소모델을 구축하였다. ANSYS Workbench 에서 열박을 공정을 고려하기 위해 서로가 간섭하는 양만큼을 실제로 모델링 후 상호간의 접촉조건은 샤프트의 외부면과 베어링의 내부면으로 잡

고 일반적인 금속간의 마찰계수인 0.14 로 적용하여 유한요소 모델을 구축하였다. Fig. 1 과 같이 샤프트, 전륜·후륜 베어링과 스페이스로 구성되어있고 전륜 베어링의 억지끼워맞춤량은 8 μ m, 후륜 베어링은 16 μ m 을 적용하였다.

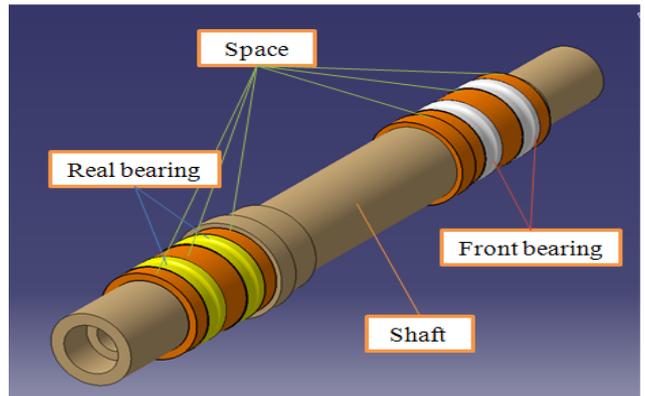


Fig. 1 Fe-model of a high speed spindle

위의 유한요소모델을 대하여 아무런 하중조건 없이 샤프트 실린더 내부에 반지름 방향은 완전 고정이고 축방향과 탄젠트 방향에 대해서는 자유로운 구속조건을 주고 정해석을 실시하였다. 해석 결과 억지끼워맞춤 16 μ m 을 주었을 때 베어링 변형량은 13.62 μ m, 샤프트 변형량은 2.04 μ m 으로 Fig. 2 와 같이 나타났다. 이들의 합이 약 16 μ m 베어링과 샤프트의 경계면 사이에서 억지끼워맞춤에 의한 힘의 평형점이 발생하였음을 알 수 있다.

따라서 베어링과 샤프트의 경계면 사이에서 억지끼워맞춤에 의한 힘의 평형점이 발생하였다고 판단된다.

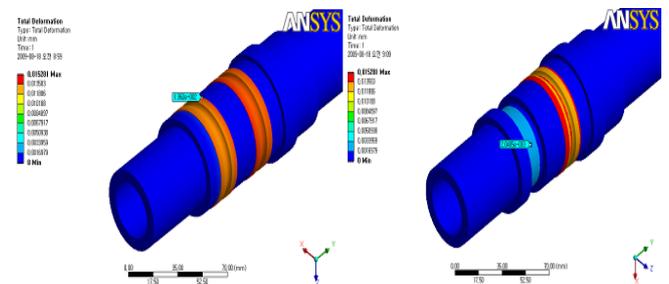


Fig. 2 Analysis result of shrink fit

구축된 유한요소모델의 타당성을 검증하기 위하여 유한요소 해석결과와 Eq. (1)의 Lamé Eq. 과 비교하였다. Fig. 3 은 δ_i , δ_o , r_o , r_i , R_o 를 나타낸 것으로 δ_i 와 δ_o 는 각각 안쪽 샤프트 및 바깥 베어링의 반경 변화이고, r_o 는 베어링의 바깥 반경, r_i 는 샤프트의 안쪽 반경, R_o 는 공칭천이반경 (Transition radius)이다.

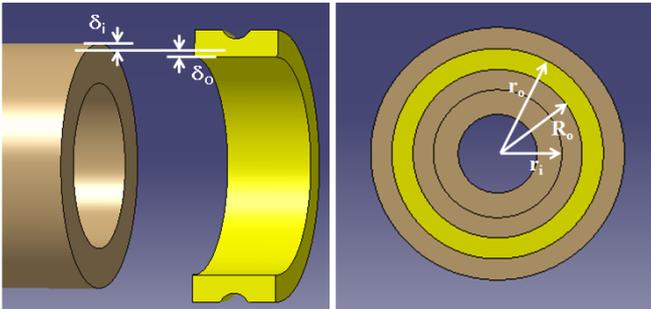


Fig. 3 Symbol explanation of shrink fit

$$P = \frac{E\delta}{R} \left[\frac{(r_o^2 - R^2)(R^2 - r_i^2)}{2R^2(r_o^2 - r_i^2)} \right] \quad (1)$$

본 논문에서 구축한 억지끼워맞춤을 적용한 유한요소모델에서 δ_i 와 δ_o 의 합은 16 μ m, r_o 는 9.33mm, r_i 는 27.505mm, R_o 는 22.498mm으로 나타났다. 유한요소해석을 통한 응력은 20.262Mpa 이었고, Lamé' Eq. 을 통하여 계산된 압력은 22.572Mpa 으로서 오차율은 10.23%로 나타나 구축된 유한요소모델의 타당함을 알 수 있다.

3. 열-구조 연성해석

타당성 검증된 유한요소모델에 대하여 주축에 고정되어 있는 베어링 내륜의 외주면상에 유입되는 열이 주축과의 접촉결합부에 미치는 열적 영향을 고려하고자 하였다.

스핀들 운전중에 발생하는 열은 베어링의 회전에 따라 내륜을 통해 샤프트로 전달된다. 축에 전달된다. 열변형 해석은 이러한 유입열량과 접촉 열전달계수, 베어링의 냉각에 따른 강제대류를 고려하였다. 이를 통해 베어링 내륜-샤프트 시스템의 온도분포를 구하고 이 온도분포를 부하조건으로 하여 구조해석을 수행하였다. Table 1은 샤프트와 베어링 내륜으로 사용한 SCM415와 SUJ2의 물성치를 나타낸다.

Table 1 Material properties

Property	Spindle (SCM415)	Inner Ring (SUJ 2)
Modulus(GPa)	205	210
Poisson's ratio	0.29	0.3
Density(g/cc)	7.85	7.81
Thermal Conductivity(W/m-K)	44.5	45.6
Specific Heat(J/g-°C)	0.475	0.475

베어링의 발열량은 발열이론을 적용하여 계산하였고, 베어링 발열부는 내륜과 볼 접촉부로 가정하여 열유동(heat flow)을 베어링 내륜에 적용하였다. 그리고 베어링의 발열은 내륜과 외륜으로 각각 50%씩 분산된다고 가정하여 내륜의 발열량을 전체 발열량의 1/2로 입력하였다. 베어링의 냉각은 에어·오일 윤활방식으로써 유한요소모델에서 베어링에는 강제대류로 열전달율은 283.0 W/m-K으로 하여 적용하였다. 주축 회전속도에 따른 열팽창을 고려하기 위해 각 회전속도에 따른 베어링의 발열량을 계산하여 40,000rpm까지 0~7200초 동안 스핀들 모델에 대하여 해석을 실시하였다. Fig. 4는 7,200초의 과도 열전달 해석 결과와 열-구조 연성해석 결과를 나타낸다. 열전달 해석결과 최고 온도는 내륜의 안내면에서 83.5° C 가장 크게 나타났

으며 최저온도는 후륜부 스핀들 끝단에서 66.8° C로 나타났다. 이를 통해 스핀들이 구동되면 베어링이 회전함에 따라 마찰손실에 의해 대량의 열이 발생하므로, 주축계에 급격한 온도상승이 일어난 것임을 알 수 있다. 과도 열전달 해석 결과를 구조해석으로 가져와 회전속도 40,000rpm을 적용한 베어링-스핀들 시스템의 열변위를 확인한 결과 29 μ m로 나타났다. Fig. 5는 시간에 따른 온도 그래프를 나타낸 것으로써 약 1시간 경과 후에 온도가 정상상태에 도달함을 알 수 있다.

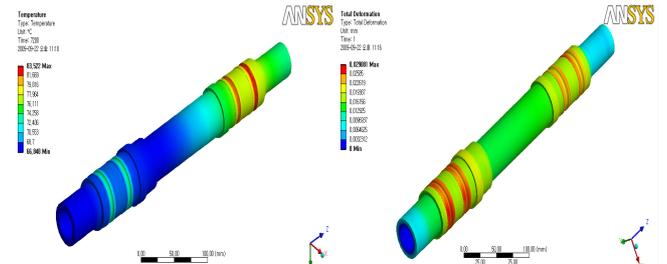


Fig. 4 Result of thermal-structure coupled analysis

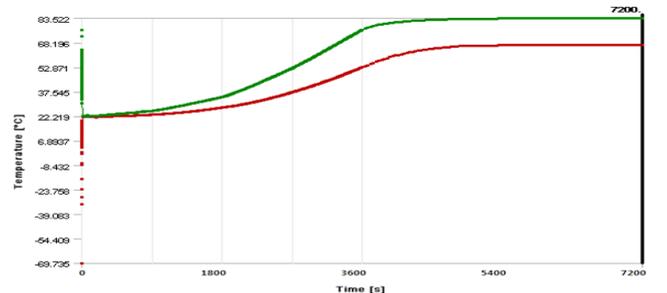


Fig. 5 Temperature variation with time

4. 결론

본 논문에서는 열박음 공정에 대하여 ANSYS Workbench를 이용하여 억지끼워맞춤량을 적용한 유한요소모델을 구축하였고 40,000rpm의 고속 스핀들에 대한 열-구조 연성해석을 통하여 열팽창과 원심팽창에 의한 영향을 해석적 방법을 통해 규명함으로써 베어링의 수명 및 주축 성과적 결되는 베어링의 끼워맞춤의 거동을 파악하였다.

후기

본 연구는 지식경제부 지방기술 혁신 사업(RTI04-01-03)의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. C. K. Song, Y. J. Shin, "Effect of Preload Accuracy of High speed Spindle", Transactions of the KSME, 2002, pp 65-70
2. Y. H. Hwang, C. M. Lee and W, J. Chung, "A Study on the Tight Fit and Clearance Variation of Ball Bearing using FEM", KSPE conference, 2006, pp 245-246
3. Michael M. Khonsati, E. Richeard Booser, "Bearing Design and Lubrication," JOHN WILEY & SONS, pp. 385-414