

# 고속 주축계의 정·동강성 평가를 위한 해석모델에 관한 기초연구

## A Basic Study on the Analysis Model for Static and Dynamic Stiffness Evaluation of a High Speed Spindle System

\*황영국<sup>1</sup>, #이춘만<sup>2</sup>, 김보근<sup>3</sup>

\*Y. K. Hwang<sup>1</sup>, #C. M. Lee(cmlee@changwon.ac.kr)<sup>2</sup>, B. K. Kim<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 창원대학교 기계설계공학과 대학원, <sup>2</sup> 창원대학교 기계설계공학과, <sup>3</sup> 위아(주)

Key words : Machine tool, Spindle, Static stiffness

### 1. 서론

공작기계의 구성요소 중 주축계는 공작기계의 정밀도와 생산성을 결정짓는 가장 중요한 요소 중 하나이다. 주축의 설계에 있어서는 일반적으로 높은 회전 정밀도와 고속 회전 성능, 큰 강성이 요구된다. 이러한 요구들을 모두 최고 수준으로 맞추어 설계하는 것은 어려운 일이므로 설계시에는 주축의 설계 목적에서 가장 주안점으로 선정한 방향의 요구조건을 주된 설계 인자로 삼고 그 외의 것들은 주요 인자의 충족 범위 안에서 최적화하여야 한다.

현재까지 공작기계용 주축의 설계는 설계자의 경험이나 베어링 회사 등의 설계 데이터를 참고하여 어느 정도 안정화되어 있는 범위 안에서 부분적인 설계변경을 하는 경우가 대부분인 것으로 알고 있다. 이는 설계과정의 체계화와 설계된 주축계를 검증할 수 있는 설계 도구의 부족에 있다. 주축 시스템의 설계가 경험에 의존하고 검증된 설계의 설계변경 단계를 극복하기 위해서는 설계된 주축계의 거동을 정밀하게 예측할 수 있는 해석적 모델에 대한 개발이 필요하다. 정밀한 주축계 모델링을 통한 해석결과를 바탕으로 개발하고자 하는 주축계의 운전 중 특성을 사전에 파악하여 설계를 개선하고 최적화하는 것은 공작기계의 개발비용과 시간을 줄이고 성능을 향상시킬 수 있는 기본단계이다. 그러므로 공작기계의 거동 특성을 정확하게, 또는 아주 비슷하게 나타낼 수 있는 정밀한 해석 모델을 개발하는 것은 대단히 중요하다. 특히 최근의 공작기계 주축계의 개발은 고속화 고정밀화 방향으로 나아가고 있다. 따라서 공작기계 주축계에서의 정적, 동적 및 열적 영향은 점점 복잡해지고 있어 운전 중 주축계의 거동 특성을 정밀하게 예측할 수 있는 해석 모델을 개발하는 것은 점점 더 복잡해지고 어려워지고 있다.

본 연구에서는 공작기계용 주축의 설계에 있어서 주축의 치수 결정 검토에 중요한 주축의 강성, 위험 속도 등을 예측할 수 있는 고속 주축계의 정, 동강성 평가를 위한 해석모델을 개발하고자 한다. 본 논문은 이에 대한 기초연구로서 베어링의 조합방법과 고속 회전 시 원심력에 의한 베어링의 접촉각 변화에 의한 주축계의 정, 동강성 변화의 영향을 분석하고자 한다.

### 2. 주축계의 강성 변화

새로운 주축의 설계를 위해서는 주축의 목적에 대한 검토, 주축 구성에 대한 검토, 주축 치수에 대한 검토, 베어링 성능 검토 등의 과정이 필요하다. 이중 주축의 구성과 치수 검토과정에서 결정되는 베어링의 배열방식, 주축의 축경과 길이, 베어링간 길이 등은 주축계의 강성과 회전 성능 등에 복합적으로 영향을 미치므로 설계단계에서 신중히 검토하여 정동적 부하에서 주축 선단의 변위가 최소화 되도록 설계해야 한다.

설계자가 주축의 정동적 특성을 제어하기 위해서 사용할 수 있는 설계조건은 주축의 지름과 축방향 치수, 전후부 베어링의 강성크기와 설치위치 등이 있다. 이 중 베어링의 관점에서는 강성크기와 설치위치 뿐만 아니라 배열방식과 접촉각의 영향도 고려해야 한다. Fig. 1은 베어링 배열 방식에 따른 반경방향 하중에 대한 변위량 차이를 나타내고 있다.<sup>1</sup> 그림과 같이 동일한 치수의 주축에서 동일한 베어링의 조합위치에서 조합방법만을 바꿀 경우 주축계의 정강성이 크게 달라지는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 2에 나타난 유효 작용점 거리가 배면조합이

정면조합보다 크기 때문이다. 즉 베어링의 강성과 설치위치뿐만 아니라 베어링의 유효 작용점 거리가 주축계의 강성변화에 영향을 미침을 알 수 있다.

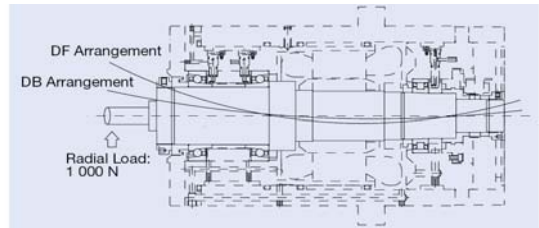


Fig. 1 Spindle displacement curve

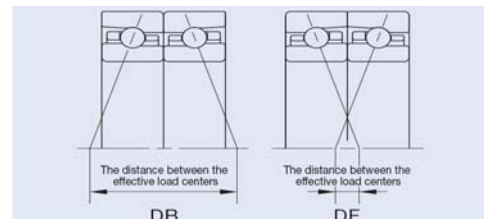


Fig. 2 The distance between the effective load centers of DB and DF arrangements

베어링의 유효 작용점 거리는 베어링의 배열 방법과 주축의 직경, 접촉각으로 결정된다. 최근과 같은 주축의 고속화 추세에서는 Fig. 3과 같이 원심력에 의한 접촉각의 변화가 심하다. 따라서 접촉각의 변화에 의한 작용점 거리가 변하고 또한 하중 부하 능력이 Fig. 4와 같이 달라지므로<sup>1</sup> 접촉각 또한 주축계의 강성 변화에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

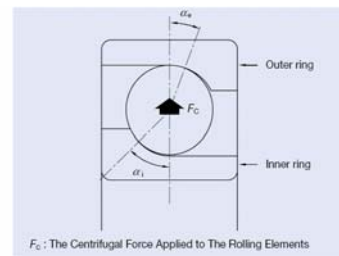


Fig. 3 Change in contact angle due to centrifugal force

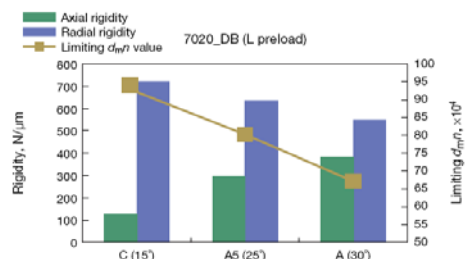


Fig. 4 Effects of contact angle

이상에서 살펴본 바와 같이 주축계의 강성에는 주축의 치수, 베어링의 강성크기와 설치위치, 배열방법에 따른 효과와 접촉각 효과 등 많은 요인이 영향을 미친다. 주축계의 해석모델에서는 이런 설계조건들의 변화에 대한 효과를 잘 반영할 수 있어야 한다.

### 3. 유한요소해석

지금까지 주축계의 정·동강성을 평가하기 위한 모델링에서 베어링 해석모델의 부착위치는 Fig. 5와 같이 대부분 베어링 조립위치를 기준으로 한 것으로 조사 되었으며,<sup>3</sup> 앞서 언급한 베어링의 조합 방법의 차이에 대한 효과나 접촉각의 변화에 대한 효과는 고려하지 않는 것으로 나타났다. 최근과 같은 주축의 고속화 추세에서는 이전에 무시할 수 있었던 효과들을 무시할 수 없게 되고 더욱 정밀한 해석 모델이 요구되어지므로 주축계의 정·동강성을 평가하기 위한 해석모델에 이에 대한 효과의 반영이 필요할 것으로 판단된다.

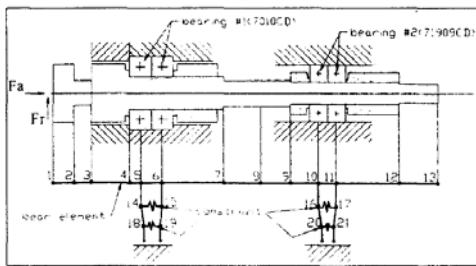


Fig. 5 Modeling of the spindle-bearing system

본 연구에서는 베어링 조합 방법과 접촉각 변화에 따른 영향의 정도를 파악하기 위해 Fig. 6과 같이 주축계의 해석모델 구성에서 베어링 해석모델의 부착위치를 고려해 보았다. 베어링 해석모델은 강성효과만을 고려하였으며 부착위치를 베어링의 조립위치와 작용점 거리 위치의 두 가지 경우로 하여 정적 처짐 해석을 수행하였다. 그 결과를 베어링 제조회사로부터 수령한 결과와 비교 검토하였다.

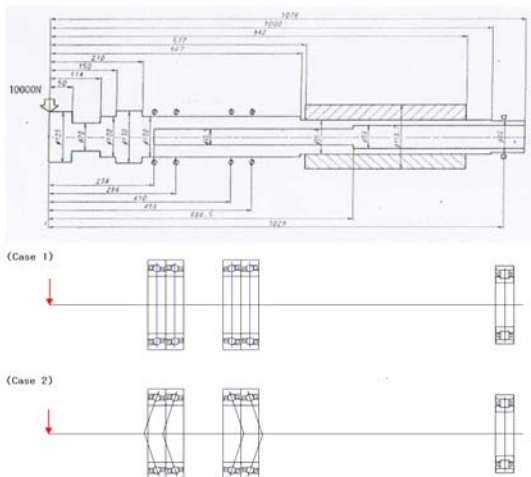


Fig. 6 Modeling of the spindle-bearing system

해석은 상용소프트웨어인 ANSYS를 이용하였으며 축의 모델링에는 Structural solid요소를 사용하였으며 베어링의 모델링에는 ANSYS에서 지원하는 Spring-damper 요소를 사용하여 모델링하였다. 구축된 모델은 이론해가 알려진 단순지지보와 양단고정보의 두 경우에 대해 해석을 수행하여 검증하였다.

Fig. 7은 베어링 조립위치에 베어링 해석모델을 연결하고 스프링들의 끝단에 10,000N의 하중을 가한 경우 정적 처짐 해석 결과이다. 해석결과 최대 처짐이 -0.236mm로 베어링 제조회사의 결과

-0.209mm와 12.9%의 차이를 보였다.

Fig. 8은 베어링의 작용점 거리에 베어링 해석모델을 연결한 경우의 정적 처짐 해석 결과이다. 해석결과 최대 처짐이 -0.209mm로 베어링 제조회사의 결과와 정확히 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 이상의 결과로부터 주축계의 모델링에서 베어링 해석모델의 부착위치는 베어링의 조립위치보다는 베어링의 유효 작용점 거리를 고려하여 부착하는 것이 더 타당한 것으로 사료된다. 본 논문에서는 하나의 주축에 대해서만 베어링 제조회사의 결과와 고려된 해석모델의 결과를 비교해 보았다. 향후 좀 더 많은 비교해석 및 실험을 통해 이에 대한 타당성을 검증하는 작업이 필요할 것으로 판단된다.

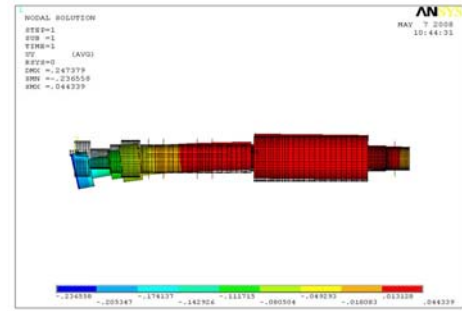


Fig. 7 Deformation results for case 1

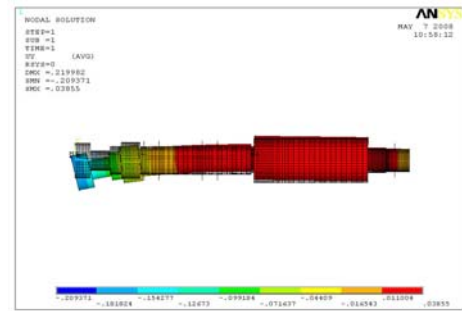


Fig. 8 Deformation results for case 2

### 4. 결론

본 연구에서는 베어링의 조합방법과 접촉각 변화에 의한 작용점 거리를 기준으로 주축계의 정강성을 평가해 보았다. 해석결과 베어링 해석모델 부착위치의 기준을 어디로 두느냐에 따라 결과에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 베어링의 유효 작용점 거리를 기준으로 베어링 해석모델을 부착하는 것이 더 타당한 것으로 검토되었다. 주축이 고속화 될수록 이에 대한 고려가 더욱 중요할 것으로 판단된다. 향후 주축의 운전 중 강성을 평가할 수 있는 실험 장비를 구축하여 실험 데이터와의 검증을 통해 해석모델에 대한 검증 및 보완을 수행할 예정이다.

### 후기

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. NSK, "Catalogue\_Super Precision Bearing," NSK, 2006
2. M. Zeljkovic, R. Gatalo, "Experimental and Computer Aided Analysis of High-Speed Spindle Assembly Behaviour," Annals of the CIRP, Vol. 48, No. 1, pp. 325-328, 1999.
3. 한강근, 여은구, 이용신, "주축 설계에 영향을 미치는 베어링 파라미터에 관한 연구," 한국공작기계학회 추계학술대회 논문집, 94-100, 1997.