

◆ 특집 ◆ IT 융합 생산/가공기계 지능화 기술

정밀가공을 위한 20,000rpm 중절삭 스피들 해석에 관한 연구

A Study on the Analysis of 20,000rpm Heavy-Cutting Spindle for Precision Machining

오남석¹, 김동현¹, 이춘만^{1,✉}
Nam-Seok Oh¹, Dong-Hyeon Kim¹, and Choon-Man Lee^{1,✉}

¹ 창원대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Changwon National University)
✉ Corresponding author: cmlee@changwon.ac.kr, Tel: +82-55-213-3622

Manuscript received: 2014.11.3 / Accepted: 2014.12.3

A spindle unit is very important in machine tools. It has a direct effect on machining accuracy. The static and dynamic characteristics of the spindle unit should be considered in the initial design stage for manufacturing of precision product. This study describes an investigation for deriving design stability of a 20,000rpm heavy-cutting spindle for precision machining. Static and dynamic characteristics of the spindle, such as deformation, stress, natural frequency and mode shapes are analyzed using finite element analysis. The 20,000rpm heavy-cutting spindle is confirmed that it is successfully designed through finite element analysis.

Key Words: Finite element analysis (유한요소해석), Heavy-cutting spindle (중절삭 스피들), structural analysis (구조해석), Dynamic analysis (동적해석)

1. 서론

최근 기계산업이 고도로 발달함에 따라 기계가 공품의 생산성 및 품질향상에 대한 수요가 증가하고 있고 고정밀, 고능률, 고속가공에 대한 요구가 급증하고 있다.¹ 가공정밀도의 개선은 제품의 부가가치를 높여주고 생산성의 개선은 가공경비를 줄임으로서 경쟁력을 향상시킨다.² 특히 스피들(spindle)은 공작기계에서 가장 중요한 부분이라 할 수 있으며 회전 유닛(unit)으로 대표되는 구성요소로서 하나의 스피들에서 저속에서 이루어지는 황삭가공부터 고속에서 이루어지는 정삭가공 등의 작업등이 가능해야 하고 정속운동 또는 회전 위치

결정의 기능을 수행하므로 설계 시에 고려해야 할 사항들이 많다.

스피들의 설계 시 고려해야 할 사항으로 표준화된 스피들 설계 방법, 절삭 방식, 채터 안정성 및 동적 특성 등이 있으며, 설계단계에서부터 스피들의 정·동적 특성에 대한 신뢰성을 충분히 확보하여 정밀도를 향상시켜야 한다.³⁻⁵

스피들의 구동 시 필연적으로 발생하는 진동 문제는 가공물의 가공 정밀도에 직접적인 영향을 주며 베어링 수명과 안정성에 문제를 야기시킬 수 있다. 설계자는 스피들의 선단부의 변위를 최소화 하는 방안과 고유진동수를 높이는 방법으로 주어진 스피들의 요소 부품을 적절히 조합하여 목

적을 달성해야 한다.^{6,7} 스피ndl의 정·동특성을 개선하기 위해 취약한 부위를 스피ndl 자체로 한정하여 스피ndl 자체의 굽힘 곡선을 가지고 분석하여 스피ndl의 지름을 국부적으로 증대시켜 정·동적 특성을 개선할 수도 있다.⁸

스피ndl의 정강성과 동강성을 확보하기 위해서는 스피ndl의 길이, 베어링의 위치, 로터의 위치 등의 결정도 중요하다. 특히 베어링의 위치에 따라 스피ndl의 진동수가 크게 변하기 때문에 베어링의 위치선정은 매우 중요한 요소 중 하나이다. 특히 중절삭 가공 시 한번(1 cycle)에 많은 양을 절삭하므로 떨림이 심하게 되며 가공정도 저하의 초대 요인으로 작용하게 된다. 따라서 절삭성능이 우수한 스피ndl을 설계하기 위해서는 스피ndl의 정·동적 특성에 영향을 미치는 인자들을 고려하여 고속화 및 고정밀도를 가지게 하는 최적설계기술이 확보되어야 한다.

스피ndl의 구동에 의해 발생하는 열은 스피ndl 자체에 열적 변형을 일으키고 가공정밀도에 영향을 준다. Ko⁹ 등은 수직형 머시닝 센터의 스피ndl의 열적 특성을 분석하고 열 굽힘을 최소화 하는 방법에 관한 연구를 하였다. Li¹⁰ 등은 열 변형으로부터 생기는 오차를 가공 전에 미리 보상 받을 수 있게 함으로 가공정밀도를 향상시키는 연구를 하였다. Creighton¹¹ 등은 유한요소법을 이용하여 베어링과 모터로부터 생긴 열로 인해 스피ndl의 구조변형이 일어남을 확인하고, 스피ndl의 속도 변화에 따라 스피ndl의 변위를 예측 및 실험을 하고 결과를 공식화 하였다.

본 연구에서는 20,000rpm 중절삭 스피ndl의 설계안정성을 검증하기 위해 정·동적 해석을 수행하였다.

2. 20,000rpm 중절삭 스피ndl

본 연구의 해석 대상인 20,000rpm 중절삭 스피ndl의 구조를 Fig. 1에 도식화 하였다. 그리고 Table 1에 세부 사양을 나타내었다. 전륜부(front)와 후륜부(rear)에 각각 2개씩 설치한 각접촉 볼 베어링(angular contact ball bearing)에 의해 스피ndl이 지지되고 모터 내장형(built-in motor) 구조로 설계되어 있다. 또한 베어링의 윤활 방법으로는 Oil-jet을 채용하였다.

3. 유한요소해석

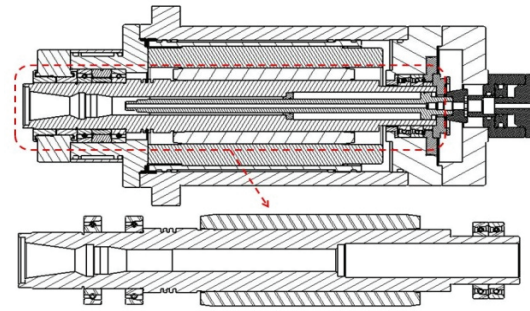


Fig. 1 The schematic of the 20,000rpm spindle system

Table 1 Specification of the spindle system

Item	Specification
Max. speed	20,000rpm
Bearing	Super-precision angular contact ball bearing
Preload	Constant pressure preload
Lubrication	Oil-jet
Shaft interface	BBT 40

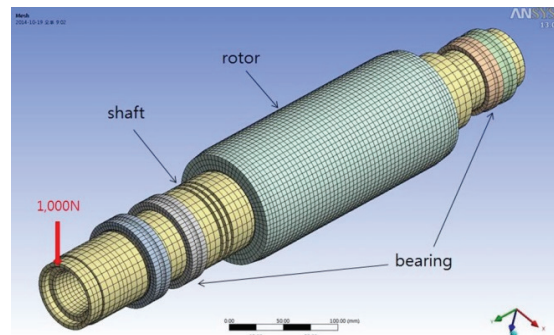


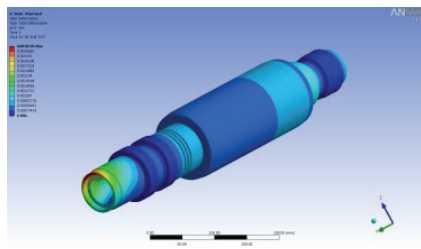
Fig. 2 Finite element model of the spindle system

Table 2 Material properties of the spindle unit

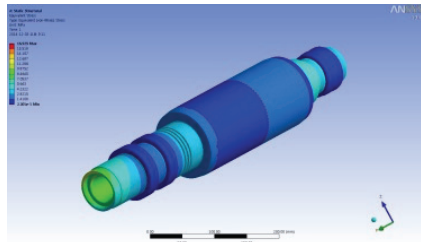
Part	Young's modulus [GPa]	Density [kg/m ³]	Poisson's ratio
Shaft	205	7,850	0.29
Rotor	203	6,250	0.30
Bearing	205.8	7,860	0.30

3.1 정적 해석

해석 프로그램인 ANSYS Workbench를 이용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 재료 물성치는 Table 2과 같고 스피ndl의 수학적 모델을 Fig. 2에 나타내었다. 회전체에 일정한 mesh를 얻기 위해 sweep mesh 기법을 이용하여 스피ndl에 적용하였다. 유한요소모델은 224,540개의 노드(node)

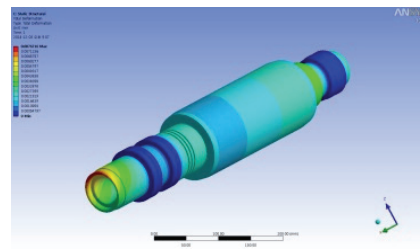


(a) Maximum deformation

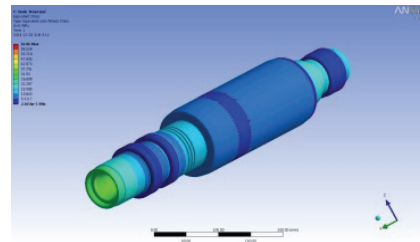


(b) Maximum stress

Fig. 3 Analysis result of 10,000 rpm

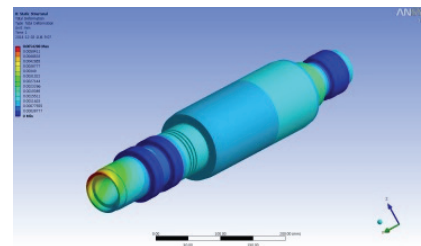


(a) Maximum deformation

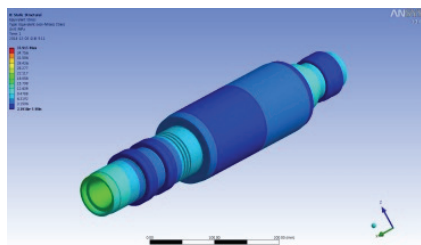


(b) Maximum stress

Fig. 5 Analysis result of 20,000 rpm



(a) Maximum deformation



(b) Maximum stress

Fig. 4 Analysis result of 15,000 rpm

Table 3 The results of the spindle analysis

rpm	Maximum Deformation[μm]	Maximum Stress[MPa]
10,000	3.84	16.93
15,000	5.43	37.92
20,000	7.68	65.95

Table 3는 스피들의 각 rpm당 최대변형과 최대 응력을 정리한 결과 이다. 20,000rpm 구동 시 최대 변형과 최 대 응력이 나타났고, 선단부 끝 지점에서 최대변형이 7.68 μm 로 변형이 일어났으며 최대 응력은 65.95 Mpa 로 나타났다.

3.2 동적 해석

진동은 절삭작업 시 절삭공구와 공작물 사이의 충격 및 마찰력에 의해 발생된 힘들이 가진하여 발생하며 질량 중심과 회전 중심의 불일치에 의해 편심으로 발생하는 조화 가진으로 인해 발생한다. 스피들을 구동시키는 모터의 회전 진동수와 스피들의 회전 진동수 같은 범위 안에 있으면 구동 시 공진현상에 의하여 큰 진동을 일으킨다. 이 진동으로 인해 스피들의 내구성과 공작물의 가공정도에 심각한 영향을 미치고 작은 간극을 이루고 있는 베어링의 파괴까지 유발시킬 수도 있다. 대표적인 가진 주파수는 가공 시 스피들의 회전에 의한 것이기 때문에 동적 해석을 통해 모드별 고유 주파수와 회전수를 파악하고 일치하지 않도록 스

와 57,715개의 요소(element)로 구성되고 스피들의 자중을 고려하였으며 반지름 방향은 완전 고정하고 축 방향으로 회전하도록 조건을 두었다.

구축된 유한요소모델의 선단부 지점에 반경방향으로 1000N의 절삭력을 부여하고, 축 방향으로 각 10,000 rpm, 15,000rpm, 20,000rpm 으로 회전을 하여 해석을 수행하였고 결과는 각각 Fig. 3과 Fig. 4 그리고 Fig. 5와 같이 나타났다.

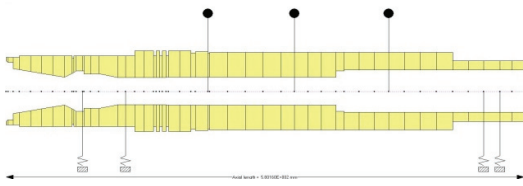


Fig. 6 FE model for the rotor-shaft-bearing

Table 4 The results of the spindle frequency analysis

Mode	Frequency[Hz]
1	497.87
2	849.32
3	67,905

Table 5 The result of the spindle mode shape

Mode	mode shape
1	
2	
3	

핀들의 회전수를 제한하도록 회피 설계를 하여야 한다.^{12,13}

동적 해석을 위해 상용 회전체 해석 소프트웨어인 ARMD를 사용하였다. Fig. 6는 고속 회전체인 스피ndl의 단순화된 FE 모델로서 로터는 등가 질량과 관성으로 볼 베어링은 스프링요소로 등가 치환된 FE모형을 생성하였다.

스핀들의 총 길이는 580mm이고 로터의 무게는 8.76kg이며 베어링의 강성은 164 N/um로 적용하였다.

해석을 통해 스피ndl의 1차, 2차 그리고 3차모드에서의 굽힘 고유진동수를 파악하였다. 해석조건으로 감쇠는 고려하지 않았으며, 온도에 따른 스

핀들 축의 탄성계수 변화와 베어링 지지부의 영향을 무시하고 해석을 수행하였다. 해석 결과 고유진동수는 Table 4와 같이 발생하였고 Table 5는 각 모드에 따른 굽힘을 나타낸다. 1차모드 고유진동수는 497.87Hz로 나타났다. 해석모델의 최대 회전속도는 20,000rpm 으로 공진주파수는 약 335Hz이다. 분리여유 30%를 고려하여도 공진 가능성을 충분히 회피한 것으로 나타났다.

4. 결론

우수한 스피ndl 설계를 위해서는 정·동적 특성의 파악이 중요하다. 본 연구에서는 정밀가공을 위한 20,000rpm 중절삭 스피ndl 개발을 위한 정·동적 해석을 수행하였다.

1) 정적해석을 수행한 결과 주축 회전에 따른 최대 변위는 7.68μm 이고 최대 응력은 65.95 MPa으로 나타났다.

2) 모드해석 결과 1-3차까지 497.87, 849.32, 67,905 Hz로 나타났다. 최대 회전속도 20,000rpm 스피ndl의 최대운전주파수는 335Hz 이다. 분리여유 30%를 고려하여도 공진 가능성을 충분히 회피하였으므로 설계된 주축은 안정하다고 판단된다.

본 연구에서는 정밀가공을 위한 20,000rpm 중절삭 스피ndl에 대해 유한요소해석을 수행한 결과 설계 안정성을 확인 할 수 있었다. 최대구동 조건에서 정·동적으로 안정적인 결과를 얻을 수 있었다. 향후 본 연구의 해석대상인 20,000rpm 중절삭 스피ndl에 대한 최적설계를 수행하고자 한다. 본 연구의 결과는 후속 연구 진행 시 기초데이터로 활용할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 산업기술혁신사업의 일환으로 수행하였음(No. 10049075)

REFERENCES

1. Lee, Y. W. and Seong, H. G., "Dynamic Compliance Analysis and Optimization of Machine Structure," Proc. of the KSPE spring conference, pp. 63-66, 2001.
2. Hwang, Y. K. and Lee, C. M., "A Study on the Determination of Shaft Size using the Extreme Vertices Design," Trans. Korean Soc. Machine Tool

- Engineers, Vol. 18, No. 2, pp. 214-220, 2009.
3. Maeda, O., Cao, Y., and Altintas, Y., "Expert Spindle Design System," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, No. 4, pp. 537-548, 2005.
 4. Lin, C.-W. and Tu, J. F., "Model-based Design of Motorized Spindle Systems to Improve Dynamic Performance at High Speeds," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 9, No. 2, pp. 94-108, 2007.
 5. Abele, E., Altintas, Y., and Brecher, C., "Machine Tool Spindle Units," *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol. 59, No. 2, pp. 781-802, 2010.
 6. Kim, D. H., Choi, H. J., and Lee, C. M., "Static and Dynamic Analysis and Optimization Design of 40,000-rpm High-Speed Spindle for Machine Tools," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 1, pp. 105-111, 2013.
 7. Park, S. J., Kim, D. H., and Lee, C. M., "A Study on the Determination of Optimal Shaft Size and Bearing Span Length of 45,000rpm Spindle," *Proc. of the KSPE spring conference*, pp. 481-482, 2010.
 8. Lee, C. H., Park, C. H., and Lee, H. S., "The Contribution of Spindle Parts to Static, Dynamic Stiffness and Design Improvement," *Proc. of the KSPE Autumn conference*, pp. 985-988, 2002.
 9. Ko, T. J., Gim, T. W., and Ha, J. Y., "Particular Behavior of Spindle Thermal Deformation by Thermal Bending," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, No. 1, pp. 17-23, 2003.
 10. Li, S., Zhang, Y., and Zhang, G., "A study of Pre-Compensation for Thermal Errors of NC Machine Tools," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 37, No. 12, pp. 1715-1719, 1997.
 11. Cerighton, E., Honegger, A., Tulsian, A., and Mukhopadhyay, D., "Analysis of Thermal Errors in a High-Speed Micro-Milling Spindle," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 50, No. 4, pp. 386-393, 2010.
 12. Park, S. J., Lee, C. M., Kim, W., and Byun, S. S., "A Study on the Evaluation of Design Stability for Vertical Machining Center Spindle by Static and Dynamic Analysis," *Proc. of the KSPE spring conference*, pp. 409-410, 2009.
 13. Lim, J. S., Hwang, Y. G., Lee, W. C., Chung, W. J., and Lee, C. M., "Selecting Position of Bearings to Improve Dynamic Characteristics of a High-Speed Milling Spindle," *J. Korean. Soc. Precis. Eng.*, Vol. 18, No. 2, pp. 871-874, 2005.