

◆ 특집 ◆ 직선·회전모터 구동 이송·회전체 연구 IV

고무압을 이용한 가변예압장치 개발을 위한 기초 연구

A Fundamental Study on the Development of Variable Preload Device Using Rubber Force

최치혁¹, 김동현², 이춘만^{2,✉}

Chi Hyuk Choi¹, Dong Hyeon Kim² and Choon Man Lee^{2,✉}

¹ 창원대학교 R&D 클러스터사업단 (R&D Cluster, Changwon National Univ.)

² 창원대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design & Manufacturing Engineering, Changwon National Univ.)

✉ Corresponding author: cmlee@changwon.ac.kr, Tel: 055-213-3622

Manuscript received: 2011.2.7 / Accepted: 2011.2.27

Recently there has been increase in need for high precision and high speed machining due to economic and environmental reasons. It is a very important issue that determines the optimal preload that is to be applied to bearings in order to satisfy the performance required in bearings according to its operation conditions. This study introduces a variable preload device that can automatically adjust the preload applied in a machine tool spindle using centrifugal force as opposed in existing rubber instrument. In this study, the deformation of the rubber device by the centrifugal force is analyzed and it is discussed that the proposed device can be worked properly through changes of the collar density.

Key Words: Preload (예압), Variable Preload (가변예압), Rubber Force (고무압), Machine Tools (공작기계), Spindle (스핀들), Bearing (베어링)

1. 서론

최근 공작기계의 성능 향상과 관련하여 시장의 확대와 보다 다양한 종류의 제품을 가공하기 위한 연구개발 및 상품화를 목표로 많은 노력이 이루어지고 있다. 이를 실현하기 위한 요소로서 공작기계 스�핀들의 베어링 예압과 관련된 연구가 많이 이루어지고 있다. 스�핀들 베어링에 예압을 주는 가장 큰 목적은 저속 가공에서 증절삭의 강성 확보와 고속가공에서 발열을 저하시키고 고속회전이 가능하도록 하는데 있다. 하지만, 각 속도 영역을 목적으로 제작된 공작기계보다는 일반적으로 현대의 장비로 각 속도 영역의 가공을 동시에 실현할 수 있는 능력을 가진 장비가 요구되고 있다. 이를

실현하기 위해 가변예압의 적용이 시급하다. 가변예압에 대한 연구는 대표적으로 스�핀들 회전수에 따른 최적 예압량 연구¹와 제한조건을 통한 베어링 허용 예압량 범위산출 방법 연구,² 스�핀들 속도와 회전 정도의 실험을 통한 예압 향상 방법 연구,³ 원심력, 전자석을 이용한 가변예압 방법 연구,^{4,6} 스�핀들의 최적화 연구⁷⁻¹² 등의 지금까지 많은 연구가 이루어지고 있다. 하지만, 기구학적이거나 비용적 문제로 실질적으로 실용화가 이루어지지 않고 있는 실정이다. 이를 해결하기 위해 고무의 특성을 고려하여 가변예압 기술에 적용하기 위한 방법을 제안하고자 한다. 일반적으로 고무 기계부품은 자동차, 철도차량 및 오링 등 여러 산업분야에 널리 활용되고 있다. 고무 기계부품의 특징은

저진동, 저소음화, 작동감 향상 등의 목적으로 이용되고 있으며 고도의 해석 및 설계기술 연구가 이루어지고 있다.¹³⁻¹⁵ 하지만, 고무부품의 변형 거동 해석 및 초탄성(hyperelastic) 비선형 대변형 특성 때문에 근사해를 풀기 어렵고 실험적으로 접근이 어려운 특성으로 적용이 어려운 실정이다.

본 연구에서는 가변 예압 기술의 실용화를 위해 기구학적, 비용적 문제를 해결하고자 고무압을 이용한 가변예압 기술의 가능성을 확인하고자 한다.

2. 고무압을 이용한 예압장치의 적용

2.1 예압장치의 개념

공작기계 스핀들 베어링에 적용되는 가변예압 방법은 일반적인 스핀들의 예압 방법과 차이를 보인다. 일반적인 베어링 예압 방법으로는 정위치예압, 정압예압, 변환예압 등이 있다. 방법별 적용범위와 장점은 있지만, 근래의 공작기계 스핀들의 고속화와 고정도화에 적용하는데는 다소 문제가 있는 실정이다. 이에 가변예압 방법의 필요성이 더욱 요구되고 있다. Fig. 1 은 대표적인 가변예압 방법의 원리를 보여주고 있다.⁴⁻⁶

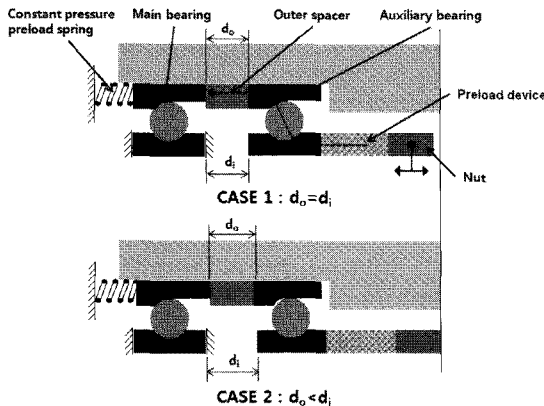


Fig. 1 Adjustment principle of the initial preload

베어링 예압을 주는 원리는 Fig. 1 과 같이 스프링과 너트의 체결량을 통해 결정할 수 있다. Case 1의 경우는 너트의 체결량을 조절하여 초기 주 베어링과 보조 베어링 내륜 사이의 거리를 외륜 간좌의 거리와 동일하게 둔 상태로 스프링에 의해 예압을 가하면 주 베어링과 보조 베어링에 각각 절반씩의 동일한 예압을 가할 수 있다. Case 2의 경우는 너트의 체결량을 풀어 외륜 간좌의 거리보

다 내륜 사이의 거리를 크게 하여 스프링에 의한 예압이 주 베어링과 보조 베어링에 분배된다. 주 베어링에 가해지는 예압량을 너트의 체결량 조절을 통한 주 베어링과 보조 베어링의 내·외륜 사이의 거리 조절을 통해 조절할 수 있다.

2.2 고무소재 특성

일반적으로 고무소재의 물성을 나타내는 재료상수는 고무 부품 특성해석에 필수적 물성 데이터로 특성해석에 큰 영향을 미치는 매우 중요한 요소이다. 일반적인 탄성재료는 하중을 가했다가 제거하면 하중-변형률 특성이 선형적인 변형 후 원상태로 돌아오는 탄성거동을 나타내지만, 고무소재는 하중-변형률 특성이 비선형 관계를 보이는 대변형 범위내에서 탄성거동 특성을 나타내는 초탄성 특성을 가진다. 이러한 특성은 고무소재의 거동을 나타내는 변형률 에너지함수(strain energy function, W)의 계수로 일반적으로 표현된다. 그 중 고무재료와 같은 초탄성 재료에 주로 사용되는 식 (1)의 Rivlin 함수와 식 (2)의 Ogden 함수로 표현된다.¹³

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (1)$$

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) \quad (2)$$

여기서, C_{ij} , μ_n , α_n 는 재료상수, I_1 , I_2 , I_3 는 주연신률에 대한 불변량, λ_1 , λ_2 , λ_3 는 주 연신률을 나타낸다.

고무재료의 특성 연구에서는 재질의 단축인장, 이축인장 및 전단 시험을 통하여 얻어진 응력-변형률 결과와 에너지함수로부터 구해진 관계식을 통하여 비선형 재료상수를 결정하는 것이 매우 중요하나, 본 연구에서는 고무재질을 이용한 예압장치의 구동 메커니즘에 중점을 두어 일반 해석틀에서 제공하는 고무재질을 통하여 결과를 나타내곤 하였다.

2.3 구상설계

공작기계 스핀들 베어링용 가변예압 장치 개발을 위하여 고무의 초탄성 대변형을 이용하여 고무압을 이용한 기본 구상을 Fig. 2 에 간략화 하였다. 고무의 구조는 고무의 가공 정도와 제품의 단가,

설치의 용이성 및 작동성의 원활함을 고려하기 위하여 단면이 사각 타입의 형상을 구상하였다. 기본 구조는 고무체의 설치를 위한 하우징과 고무압의 변형에 의한 베어링 예압을 주기 위한 구동부로 이루어져 있다.

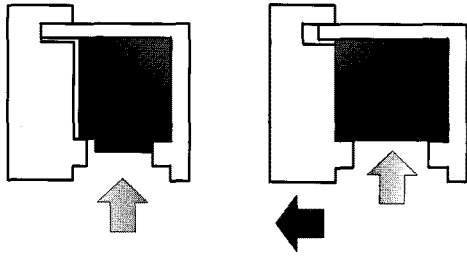


Fig. 2 Schematic of the variable preload device using rubber force

2.4 모델링

2.2 절에서의 구상설계를 기본구조로 실제 스핀들에 장착할 수 있는 방법으로 모델링을 실시하였다. 기본 구조에서 스핀들의 회전을 고려하여 실제 적용이 가능한 구조로 변경하여 상세 모델링을 실시하였다. 스핀들 회전력을 고무에 전달하기 위하여 마찰의 문제를 고려하여 직접 전달 방법은 현실적으로 어려운 실정이다. 따라서 칼라(collar)의 부품을 통하여 회전력을 고무에 전달하고 고무의 변형을 통하여 플랜지(flange)가 축방향으로 이동하는 형태로 상세 설계를 하였다. 하우징(housing)은 고무를 보호하고 스핀들과 구조체의 직접적인 연결체로 구성되어있다. Fig. 3 에서는 적용된 3D CAD

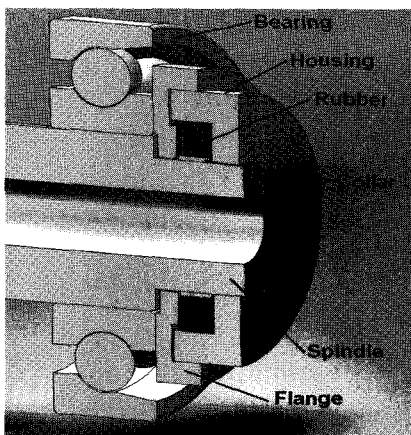


Fig. 3 Modeling of the variable preload device using rubber force

모델링을 보여주고 있다. 또한 원심력의 발생 정도를 고려하여야 한다. 식 (3)은 스핀들을 통하여 칼라가 받는 회전력의 크기를 보여주고 있다. 모델링파일은 구조해석을 위한 기본적인 사항으로 실제 회전의 조건으로 간섭체크 및 어셈블리를 실시하였다.

$$F = mr\omega^2 \quad (3)$$

여기서, m 은 질량, r 은 반지름, ω 는 각속도를 나타낸다.

3. 고무압을 이용한 예압장치의 특성해석

3.1 유한요소 모델링

2 장에서 구상된 형상을 상세 모델링을 바탕으로 유한요소해석을 실시하였다. 유한요소해석은 ANSYS Workbench 를 이용하여 실시하였다.

제안된 구조체에서 고무압에 의한 영향력만을 확인하기 위하여 스핀들의 영향력을 제외하였다. 유한요소해석에서 대칭모델 해석이 가능하나, 형상이 간단하고 스핀들 회전수에 따른 요소변화를 고려하기 위하여 전체 모델링에 대한 유한요소해석을 실시하였다. 요소망(mesh)은 전체 형상이 균일한 점을 고려하여 Hex Dominant 방법을 사용하였으며 요소 수는 5,738 개, 절점수는 22,341 개로 구성하였다. Fig. 4 는 유한요소 모델링에 요소망 생성 결과를 보여주고 있다.

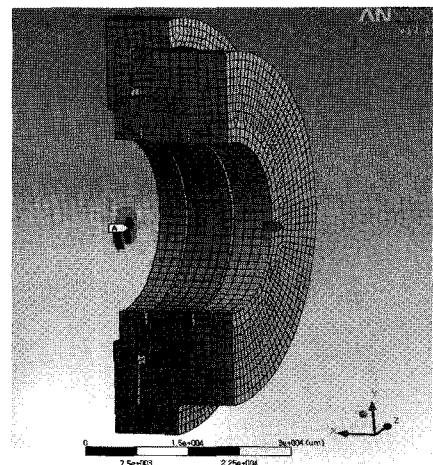


Fig. 4 Finite element analysis model

3.2 유한요소 특성해석

3.1 절에서 준비된 요소망을 기준으로 얻고자 하는 결과값을 위해 하중조건 및 경계조건을 선정하였다. 조건 선정은 스핀들의 회전에 따른 가변예압을 설정하기 위해서 먼저 베어링에 주어지는 힘의 변화를 확인하여야 한다. 본 연구에서는 제안된 고무재질의 스핀들 회전에 따른 원심력을 이용하였다. 힘의 변화에 따른 변형량 발생을 확인하여 제안된 방법의 가능성을 확인하고자 하였다. 하중조건으로 칼라부에 회전력을 9,000rpm을 주었으며, 하우징부는 구조상 잠금너트에 의한 고정부위로 고정 구속조건을 주었다. 또한, 플랜지 부위는 하우징에 대하여 부쉬의 마찰 특성과 유사하게 미끄럼마찰 특성을 주어 원심력에 의해 발생된 고무압으로 베어링에 하중을 가할 수 있도록 움직임이 수 있게 조건을 선정하였다. 고무와 하우징, 칼라의 접촉조건은 하우징 방향으로 구속조건을 주었으며, 칼라부위는 일반 접촉조건을 주었다. 본 연구에서는 먼저 스핀들의 회전에 의한 원심력의 발생을 가정하여 식 (3)을 이용하여 가장 쉽게 적용할 수 있도록 칼라 재질의 질량을 변경하여 해석을 실시하였다. 질량 변경을 위해 재질에서 임의의 조건으로 밀도(density)를 변경하여 해석 결과를 확인하였다. 또한 고무재질에 대한 특성은 초탄성 대변형 비선형 해석으로 유한요소해석 상용 프로그램에서 대변형조건(large deflection)을 선정하여 해석을 실시하였다. Fig. 5 는 경계조건 및 하중조건을 통하여 유한요소해석의 결과를 보여주

고 있다.

본 연구의 해석 결과 조건별 변형량 발생을 비교할 수 있었다. 이는, 가변예압 장치의 개발에 고무재질을 이용한 방법의 적용 가능성을 확인할 수 있다.

Fig. 6 은 변형량 분포 특성을 확인하기 위하여 고무재질 부위를 상세 확대한 결과이다. 칼라의 원심력에 의한 레이디얼 하중에 의하여 고무재질의 변형이 일어나지만 하우징의 고정으로 인하여 고무재질의 변형이 플랜지 방향으로 제한되고 있다. 따라서, 플랜지는 예압을 줄 수 있는 조건으로 축방향 하중의 발생에 의하여 베어링 설치 방향으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 변형량의 분포도 고정된 하우징부 근처보다는 플랜지에 인접한 부위에 크게 작용함을 확인할 수 있다.

가변예압의 상용화를 위해서는 여러가지 다양한 조건들이 있지만 본 연구에서는 우선 원심력의 발생 정도에 따른 고무재질의 변형을 확인하기 위해서 스핀들의 원심력이 전달되는 칼라 부위의 재질 변경을 통하여 본 연구에서 제안된 방법에 대한 가능성을 검증하였다. 재질 변경을 위해서 일반적인 해석 모듈에서 가장 간단한 방법으로 밀도의 변경을 통하여 칼라 재질의 질량을 3 가지 조건으로 해석을 실시하여 변형량을 검증하였다. 칼라의 질량을 14g, 21g, 28g 으로 선택하여 유한요소 해석을 한 결과 각 질량에 대하여 최대 0.28 μm , 0.43 μm , 0.57 μm 의 변형량을 확인하였다. Fig. 7 은 각 조건별 변형량을 그래프화 하여 보여주고 있다.

이는 원심체 질량에 따른 특성 곡선을 확인할 수 있음을 검증하였으며, 실용화를 위해서 가변예압 장치를 설치할 수 있는 좁은 공간에서 고무압

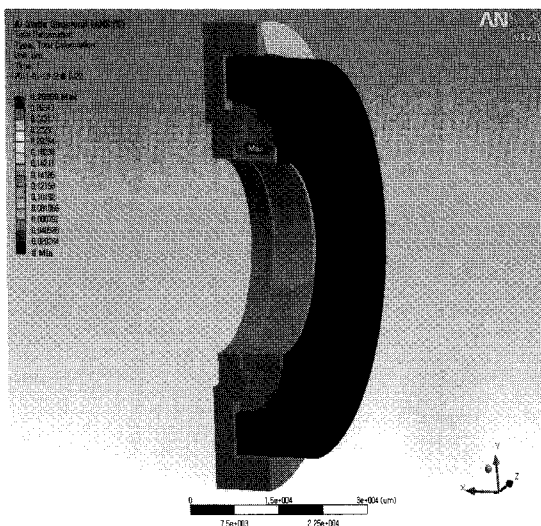


Fig. 5 Analysis result by FEM

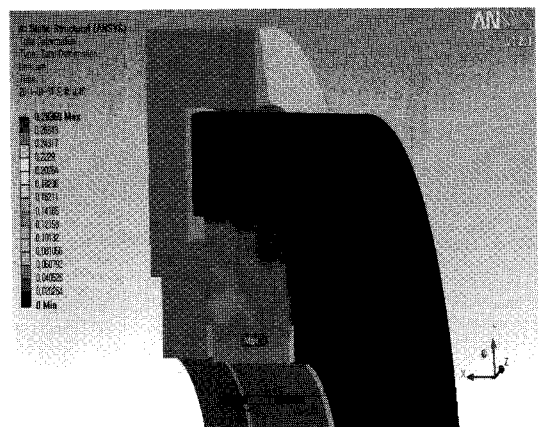


Fig. 6 Detailed distribution of deformation

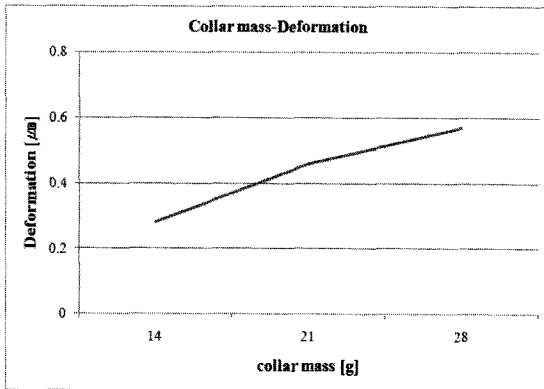


Fig. 7 Displacement related to collar mass

을 발생시킬 수 있는 최적의 재질을 선택하는 것이 중요함을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 최근 공작기계의 고속·고정밀화의 핵심요소의 하나인 가변예압 장치의 상용화를 목적으로 하고 있다. 이를 위해 일반적으로 설치면적 및 조건이 양호하고 가격적으로 이점을 가지는 고무재질을 이용한 방법을 제안하였다. 가변예압의 설치조건을 고려하여 고무압을 이용한 방법을 제안하고, 설계, 모델링, 유한요소해석을 통하여 가능성을 검증하였다. 고무압을 이용한 가변예압의 조건으로 원심력 발생을 통하여 고무재질의 변형량 14g, 21g, 28g에 대하여 최대 0.28 μm , 0.43 μm , 0.57 μm 의 변형량을 확인하였으며 이를 통한 구조체를 통한 베어링 예압량을 확인할 수 있었다. 이는 현재 연구된 가변예압 방법에 비해 비용절감 및 설치의 용이성에서 큰 이점을 가질 수 있을 것으로 판단되며, 고무재질의 특성으로 진동감소도 가능할 것으로 예측된다. 하지만, 접촉 부위의 마찰에 의한 마모문제는 큰 단점으로 작용할 것이다.

하지만, 현재 연구는 가능성만을 확인하기 위한 기초 연구로서 대변형 초탄성 비선형 변형을 가지는 고무재질의 실제 실용화와 사용 가능한 재질 선정 및 특성 분석, 원심력 발생과 고무압의 최적화에 대한 지속적인 연구가 필요할 것이다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의

재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0024723).

참고문헌

1. Jiang, S. and Mao, H., "Investigation of variable optimum preload for a machine tool spindle," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 50, No. 1, pp. 19-28, 2010.
2. Kim, C. H. and Choi, D. H., "A study on the determination of the optimal preload about the miniature ball bearing for the VHS VTR head drum assembly," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 15, No. 2, pp. 703-710, 1991.
3. Song, C. K. and Shin, Y. J., "Effect of preload on running accuracy of high speed spindle," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 11, No. 2, pp. 65-70, 2002.
4. Hwang, Y. K. and Lee, C. M., "Development of automatic variable preload device for spindle bearing by using centrifugal force," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 49, No. 10, pp. 781-787, 2009.
5. Hwang, Y. K. and Lee, C. M., "Development of a newly structured variable preload control device for a spindle rolling bearing by using an electromagnet," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 50, No. 3, pp. 253-259, 2010.
6. Hwang, Y. K. and Lee, C. M., "A Review on the Preload Technology of the Rolling Bearing for the Spindle of Machine Tools," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 11, No. 3, pp. 491-498, 2010.
7. Research Report of the Korea Institute of Machinery and Materials, "Study of the Clearance Control for High Speed Spindle Bearing and Optimization of Spindle Cooling System," *Research Report of the Korea*, M6-0105-00-0049, pp. 15-17, 2004.
8. Harris, T. A., "Rolling Bearing Analysis," Taylor & Francis, 2007.
9. Harnoy, A., "Bearing Design in Machinery," Marcel Dekker, pp. 418-436, 2002.
10. SKF, "Catalogue-high precision bearings," 2005.
11. NSK, "Catalogue-super precision bearing," 2006.

12. Zverev, I. A., Eun, I. U., Hwang, Y. K., Chung, W. J. and Lee, C. M., "An elastic deformation model of high speed spindle units," *Internal Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 7, No. 3, pp. 39-46, 2006.
13. Brown, R. P., "Physical Testing of Rubber, 3rd Ed.," Chapman & Hall, 1996.
14. Woo, C. S., Kim, W. D., Choi, B. I., Park, H. S. and Kim, K. S., "Finite Element Analysis and Evaluation of Rubber Spring for Railway Vehicle," *Transaction of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 33, No. 8, pp. 773-778, 2009.
15. Youn, S. W. and Lee, S.-C., "Development of Shear Type Rubber Isolator," *Proc. of Korean Society for Precision Engineering Autumn Conference*, pp. 782-787, 1997.