

진동 및 제어 부문 특별세션

## 각접촉 볼베어링으로 지지된 스피ndl의 정렬오차에 의한 동특성 변화 해석

배규현<sup>a</sup>, 홍성욱<sup>a\*</sup>, 윤영석<sup>b</sup>**Dynamic Analysis of Spindle with Angular Contact Ball Bearings Subjected to Angular Misalignment**Gyu-Hyun Bae<sup>a</sup>, Seong-Wook Hong<sup>a\*</sup>, Young-Seok Yoon<sup>b</sup><sup>a</sup> Kumoh National Institute of Technology, Department of Mechatronics, 61 Daehak-ro, Gumi, Gyeongbuk 730-701, Republic of Korea<sup>b</sup> Samsung Thales, 259, Gongdan-Dong, Gumi, Gyeongbuk 730-904, Republic of Korea**ARTICLE INFO***Article history:*

Received 17 July 2014

Accepted 27 July 2014

*Keywords:*

Spindle

Angular contact ball bearing

Misalignment

Natural frequency

Anisotropy

**ABSTRACT**

This paper presents the dynamic modeling and analysis results for a spindle supported by angular contact ball bearings (ACBBs) subjected to angular misalignment. Although ACBBs are widely used in spindle systems, their characteristics in regard to angular misalignment have rarely been investigated. A simulation program was developed to calculate the dynamic characteristics of a simple spindle model that is supported by angular contact ball bearings subjected to angular misalignment. Angular misalignment is shown to introduce anisotropy into the angular contact ball bearings and then split the natural frequencies in spindles. Simulations were also performed to show the possibility of evaluating bearing misalignment using natural frequency measurements.

**1. 서론**

고속 스피ndl은 공작기계의 성능을 결정하는 중요한 요소이다<sup>[1]</sup>. 스피ndl에 발생하는 진동은 공작기계를 이용하여 가공한 기계부품의 표면에 무늬를 만들어 제품의 미관성과 완성도에 문제를 발생시킨다. 이러한 문제를 사전에 차단하기 위해 공작기계의 설계과정에서 스피ndl의 동특성을 분석하여 발생 가능한 진동을 회피하는 과정이 반드시 필요하다.

스피ndl의 진동은 회전중심과 무게중심간의 편심에 의한 불균형, 축 정렬불량, 부품들의 조립불량, 베어링의 불량, 동력 전달 장치 가진 등이 대표적인 요인이 되며, 스피ndl의 회전에 동기 또는 비동기 성분의 가진력을 발생시켜 스피ndl의 성능에 영향을 미치게 된

다. 이러한 요인들 중에 축의 정렬불량은 스피ndl 제작과정 중에 가공이나 조립오차 등에 의하여 발생하게 되는데 각어긋남(Angular misalignment)과 축간어긋남(Offset misalignment)으로 분류할 수 있으며 일반적으로는 이 두 가지의 조합으로 나타나게 된다.

본 연구에서는 축과 베어링 중심과의 각어긋남이 있을 경우에 대한 스피ndl 특성에 대해 검토하였다. 베어링에 미치는 각어긋남에 의한 효과는 베어링에 모멘트 하중이 작용하는 경우와 유사한 효과를 보이게 된다. 각접촉 볼베어링은 복합하중을 지지하는 것이 가능한 동시에 고속, 정밀성을 가지고 있어 고속 스피ndl에 널리 사용된다. 각접촉 볼베어링은 인가되는 예압, 회전속도, 하중 등에 따라 그 특성이 변화하고 이로 인하여 스피ndl의 동특성에 영향을 준다는 것이 잘 알려져 있다<sup>[1-7]</sup>. 그러나, 각접촉 볼베어링의 각어긋남으로

\* Corresponding author. Tel.: +82-54-478-7344

Fax: +82-54-478-7319

E-mail address: swhong@kumoh.ac.kr (Seong-Wook Hong).

인하여 강성 등의 특성이 변화되는 점에 대해서는 많이 연구되지 않았다. 특히, 각어긋남은 베어링에 주기적인 변동을 주어 베어링에 의한 가진력에 영향을 줄 뿐만 아니라 볼이나 내외륜의 마모를 발생시켜 베어링의 수명을 단축하는 요인이 되므로 베어링의 정확한 정렬은 스핀들에 있어 그 성능을 유지하는데 매우 중요하다<sup>8~11)</sup>.

본 논문에서는 축 정렬오차에 의해 발생하는 각접촉 볼베어링의 각어긋남이 스핀들 계의 동특성 변화에 미치는 영향을 살펴보았다. 이를 위해 5자유도를 고려한 베어링 강성 모델을 도입하여 각접촉 볼베어링의 각어긋남에 따른 강성의 변화를 계산하였다. 특히, 각어긋남 효과에 관해 전형적인 2가지 예압방법에 따른 차이를 살펴 보았다. 이와 더불어 베어링 내부특성 변화 검토를 통하여 각어긋남이 강성의 변화에 영향을 미치게 되는 원인을 분석하였다. 베어링에 발생된 비등방성은 스핀들 계의 동특성에 직접적인 영향을 미치게 되므로 각어긋남에 따른 동특성 변화를 평가함으로써 스핀들 계에 있을 수 있는 각어긋남에 대한 추정 가능성에 대해서도 검토하였다.

## 2. 축 정렬불량과 베어링

스핀들의 축 정렬불량은 축과 베어링의 억지끼움 조립과정, 축의 가공오차, 하우징의 가공불량, 조립 후 외력에 의한 변형 등 다양한 원인에 의해 발생하게 된다. 축 정렬불량은 축 계의 특성에 직접적인 영향을 미칠 뿐만 아니라 베어링의 특성에 영향을 주어 스핀들의 동특성을 변화시키는 중요한 요인이 된다.

이미 앞서 언급한 바와 같이 축의 정렬불량은 축의 회전중심이 수평 또는 수직방향으로 어긋나 있는 경우인 축간어긋남과, Fig. 1과 같이 축이 각도를 가지며 설치된 경우인 각어긋남으로 구분된다. 일반적으로 두 가지의 경우가 함께 존재하는 경우가 많으나, 본 논문에서는 스핀들 계에서 발생 가능성이 높은 각어긋남이 발생했을 때의 특성에 대해 논의하였다. 스핀들은 비교적 축이 짧고, 베어링 간 간격이 길지 않아 축간어긋남의 발생이 작은 반면에 베어링 설치 시 일정 수준의 각변위를 허용하게 되어 베어링에 각어긋남이 발생하게 된다.

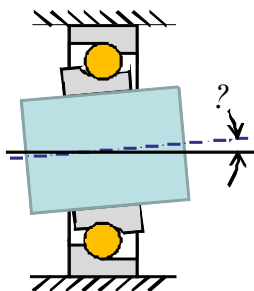


Fig. 1 Angular misalignment

각접촉 볼베어링 강성은 각접촉 볼베어링의 강성은 힘과 변위의 상관관계에 의하여 정의되는데, 인가되는 예압, 회전속도, 외력 등에 의하여 그 특성이 크게 변화한다. 베어링에 각어긋남이 있는 경우, 접촉각의 변화 및 이로 인한 강성의 변화가 발생하게 되며, 이는 베어링에 모멘트 하중이 인가된 효과와 유사한 특성을 보인다. 다음에는 각접촉 볼베어링에 발생된 각어긋남을 고려한 강성 변화에 대해 검토하였다.

## 3. 각어긋남에 의한 베어링 특성 변화

Fig. 2와 같이 베어링의 2가지 예압방법에 따른 베어링의 각어긋남의 강성 변화 효과를 살펴보았다. 계산에 사용한 베어링은 7008C으로서, 내경이 40 mm이고 초기접촉각이 15°이다.

### 3.1 정압예압 조건에서의 특성

Fig. 3은 대상 베어링에 정압예압을 300 N 인가했을 때, 각도 변화에 따른 강성의 변화를 계산한 결과이다. 축방향 강성의 경우 각어긋남에 대해 변화가 크지 않은 것을 볼 수 있다. 반면, 경방향

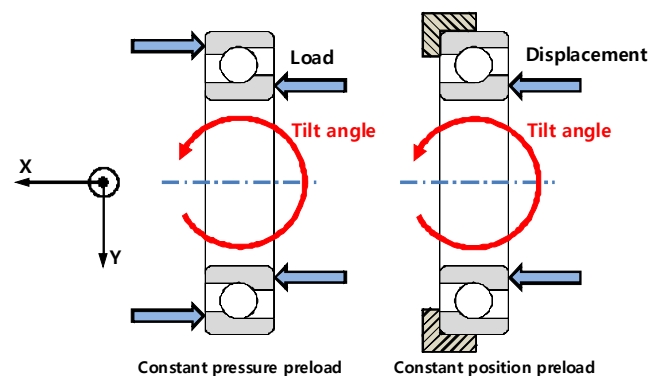


Fig. 2 Bearing preload condition with tilt angle

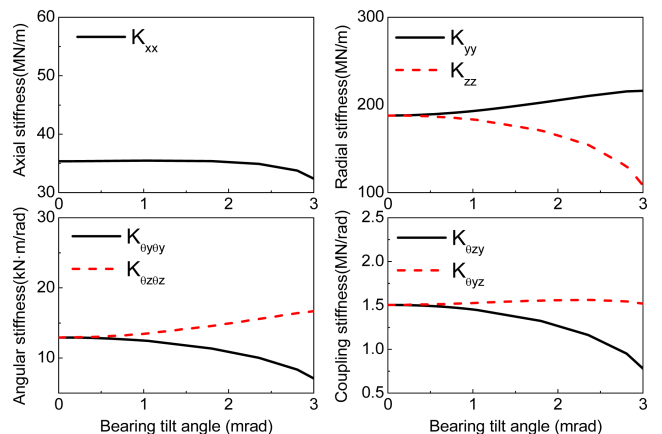


Fig. 3 Stiffness of angular contact ball bearing in constant pressure preload condition as a function of tilt angle

강성은 각어긋남에 의하여 두 방향 강성이 서로 다른 크기를 가지는 비등방성을 보인다. 각변위 강성과 커플링 강성의 경우도 경방향 강성과 마찬가지로 비등방 특성을 보이고 있다.

각어긋남에 의한 베어링 강성 변화의 원인을 분석하기 위하여 베어링 내부 특성을 검토하였다. 먼저, Fig. 4은 z 축의 각어긋남에 따른 베어링의 변위와 반력을 나타낸 결과이다. 각도가 증가하면 축방향 변위가 감소하게 되고 y축 경방향 변위가 증가하며 베어링에 모멘트 하중이 작용한다. Fig. 5는 z축 각어긋남이 인가된 경우에 베어링 볼과 내외륜 사이의 수직력을 나타낸 결과이다. 각어긋남에 의한 모멘트가 가해지는 축에 대해 수직인 방향의 베어링 볼에 수직력이 크게 작용하는 것을 볼 수 있다. Fig. 6은 각어긋남에 따른 볼들의 접촉각을 계산한 결과이다. 접촉각 역시 위치에 따라 변화하고 있으며 초기각도의 직접적인 영향을 받는 수직 축 상의 볼들에서 접촉각의 변화가 크게 변화하는 것을 볼 수 있다.

이상의 내부 특성 변화를 살펴보면 초기각도가 인가된 축 상의 볼은 접촉각의 변화가 작으며 수직력이 감소하고 있다. 따라서 초

기각도가 인가된 축방향으로의 강성은 감소하게 된다. 반대방향의 경우에는 접촉각 및 수직력이 모두 크게 변화하게 되며 이것이 강성의 증가를 유발하게 된다.

### 3.2 정위치방법

여기서는 정위치예압이 인가된 경우에 대해 각어긋남에 따른 강성 변화 특성을 검토하였다. 예압을 위한 축변위는 14.1  $\mu\text{m}$ 를 적용하였다. Fig. 7은 각어긋남 변화에 따른 강성변화를 계산한 결과이다. 경방향 강성이 비등방 특성을 보이는 등 정압예압과 유사한 변화 양상이나 각어긋남이 증가함에 따라 모든 강성이 증가하는 점에서 차이점을 볼 수 있다. 이는 각어긋남이 베어링의 축변위에 영향을 주어 예압이 증가하는 효과로 나타나게 되어 결과적으로 강성이 증가하는 형상을 보이는 것으로 파악된다. 따라서 같은 크기의 어긋남 각을 인가한 경우에 정압예압에 비하여 정위치예압이 비등방 효과가 상대적인 적게 나타난다.

정위치예압에서 각어긋남에 의한 내부특성의 검토를 위해 변위,

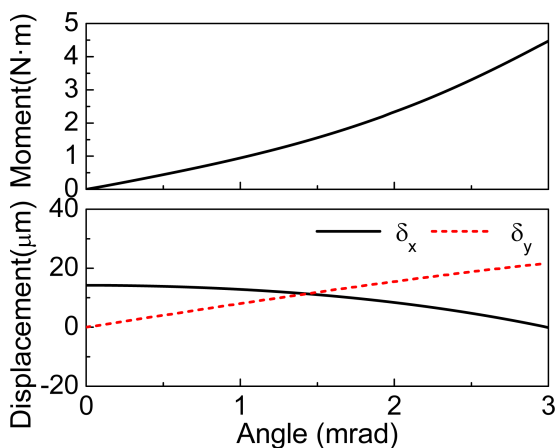


Fig. 4 Bearing displacements as a function of tilt angle

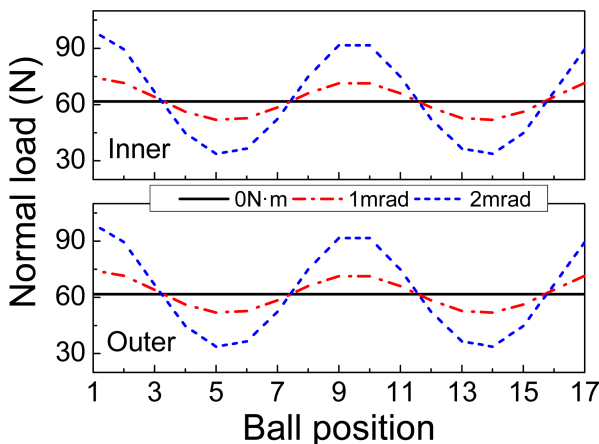


Fig. 5 Distribution of bearing normal load under constant pressure preload condition

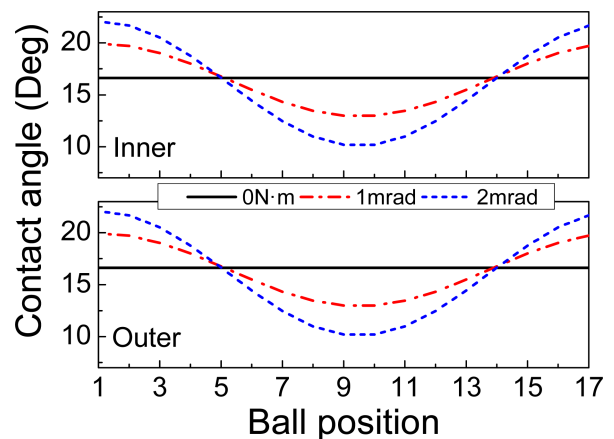


Fig. 6 Distribution of bearing contact angle under constant pressure preload condition

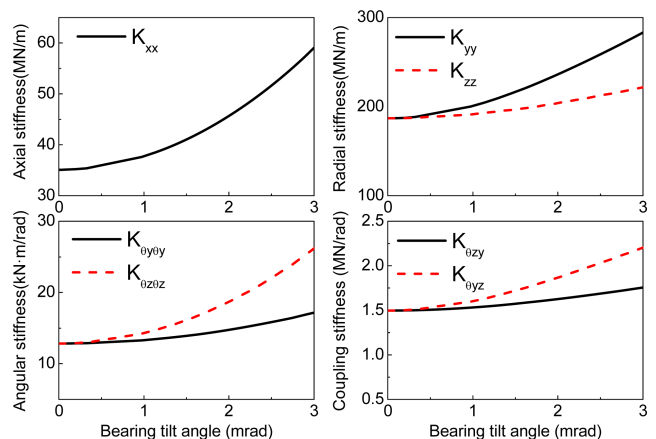


Fig. 7 Stiffness of angular contact ball bearing under constant position preload as a function of tilt angle

볼수직력 및 접촉각의 변화를 계산하였다. 정압예압과 달리 정위치 예압의 경우에는 베어링의 이동이 제한되어 특성에 큰 차이를 보인다. Fig. 8은 각어긋남에 따른 베어링의 변위와 힘을 나타낸 것이다. 각도가 증가함에 따라 베어링에 축방향과 각도 방향 모멘트하중이 증가한다. 인가되는 각도로 인하여 축방향으로 이동이 발생하나 정위치예압에서는 축방향 변위가 제한되어 축방향의 하중을 증가시키는 요인이 된다.

Fig. 9는 각어긋남에 따른 베어링의 수직력을 계산한 결과이다. 앞에서의 정압예압의 경우와 추세적으로 유사한 특성을 보이나 각도가 증가함에 따라 수직력이 상대적으로 더 큰 폭으로 증가한다. 이는 축방향으로 하중이 증가하여 각각의 볼들에 평균적으로 작용하는 하중이 증가하는 경향 때문이다. Fig. 10은 각어긋남에 따른 베어링 볼의 접촉각을 도시한 것이다. 동일한 크기의 초기각도를 정압예압에서 계산한 결과와 거의 동일한 양상의 결과를 얻을 수 있다.

이상의 결과를 종합하여 각어긋남이 베어링의 특성에 미치는 영향을 살펴보면 베어링에 각어긋남이 인가된 경우에 예압종류에 상

관없이 볼들의 접촉각이 유사한 경향을 보이고 있으며, 볼의 위치에 따른 수직력의 변화가 베어링의 강성이 비등방성을 가지도록 만드는 주요한 요인이 되고 특히, 정위치예압의 경우에는 각도변화에 의한 예하중 변화가 강성 변화에 추가적인 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

### 3.3 회전속도

각접촉 볼베어링에 일정한 크기의 각어긋남이 작용하는 경우에 대해 회전속도에 따른 강성을 검토하였다. Fig. 11은 회전속도에 따른 강성 변화를 계산한 결과이다. 축방향 강성과 경방향 강성을 나타낸 결과이며 예압방법에 따른 결과를 비교하였다. 회전속도 증가에 따라 볼의 원심력으로 인한 강성의 감소 효과를 볼 수 있으며, 예압 방법에 상관없이 각어긋남이 있는 경우에 경방향 강성이 비등방 특성을 보인다. 회전속도가 증가하여도 그 차이가 비교적 일정하게 유지되고 있으며 각변위 강성과 커플링 강성도 유사한 특성을 보인다.

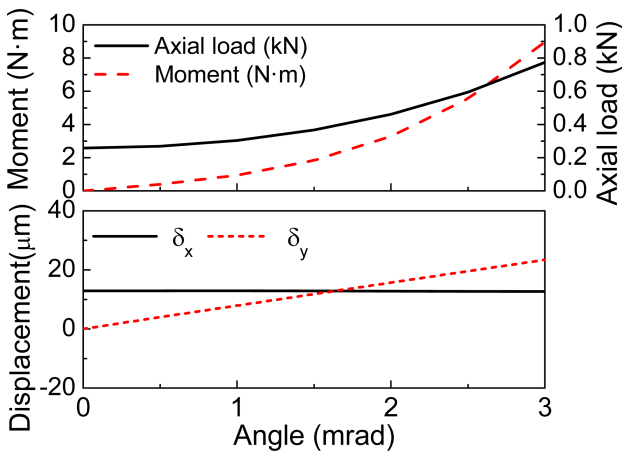


Fig. 8 Bearing displacement and equivalent moment under constant position preload condition as a function of tilt angle

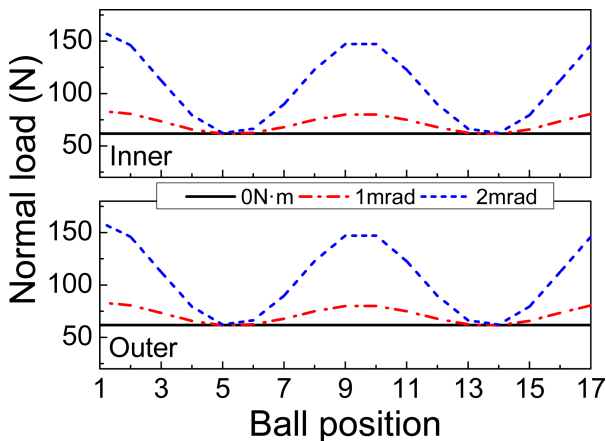


Fig. 9 Distribution of bearing normal load under constant position preload condition

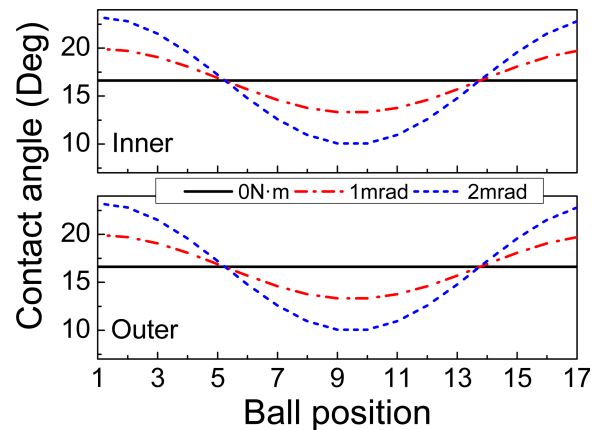


Fig. 10 Distribution of bearing contact angle under constant position preload condition

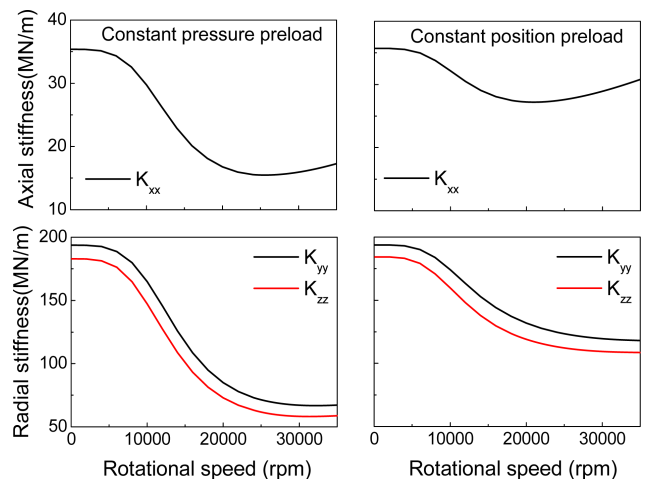


Fig. 11 Stiffness of angular contact ball bearing as a function of tilt angle and rotational speed

## 4. 각어긋남에 의한 스피들 동특성 변화

### 4.1 각어긋남에 의한 스피들 고유진동수

각어긋남에 의한 스피들의 동특성 변화를 검토하기 위하여 간단한 스피들 모델을 고려하였다. Fig. 12는 대칭형 축의 양단에 베어링(7008C)이 지지되는 모델이며 베어링의 위치에 정렬불량에 의한 각도가 인가되는 상황을 가정하였다. 스피들의 동특성 계산은 Bearinx-online을 이용하였다. Bearinx-online 프로그램은 상용베

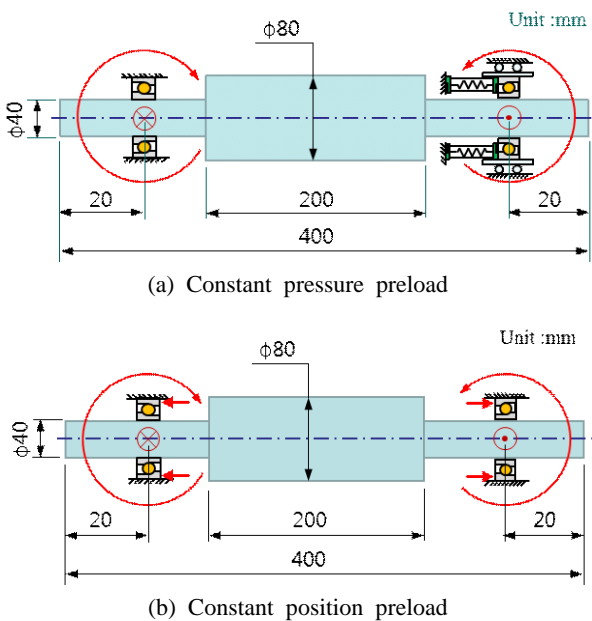


Fig. 12 Simulation model of spindle

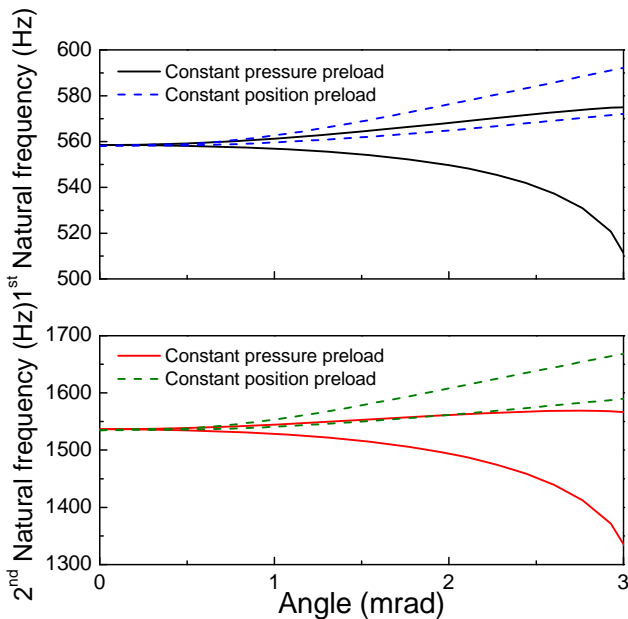


Fig. 13 Comparison of spindle natural frequencies under two preload conditions as a function of misaligned angle

어링 제작사에서 제공하는 프로그램으로 회전체와 베어링의 특성을 고려하여 해석이 가능한 프로그램이다. Fig. 13은 베어링에 정압과 정위치 예압을 인가한 경우에 각어긋남에 따른 스피들의 고유진동수 변화를 비교한 그림이다. 하중으로 환산했을 때 동일한 크기의 예압이 베어링에 작용하도록 정압예압은 300 N, 정위치예압은 14.1  $\mu\text{m}$ 를 적용하였다. 각어긋남에 의한 강성의 변화와 동일하게 예압 방법에 따라 서로 다른 고유진동수 변화 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 각어긋남이 증가함에 따라 수평과 수직 방향의 고유진동수 변화 차이를 살펴보면, 각도가 증가함에 따라 정압예압에서 더 큰 차이를 보이고 있다.

### 4.2 스피들 동특성을 이용한 각어긋남 평가

각접촉 볼베어링의 허용 가능한 각어긋남의 크기는 베어링의 크기, 내부 형상, 운용 중 변화하는 내부 틈새, 외부 하중에 따라 달라지므로 절대 기준값을 제시하는 것은 쉽지 않다. 베어링 제작사에서는 허용 각변위 값으로 0.5~1.2 mrad 정도를 제시하고 있다<sup>12)</sup>. 그러나 앞서 검토한 바와 같이 제작사에서 제안하는 정도의 변화량도 시스템의 고유진동수의 변화에 영향을 미치고 있어 엄밀한 각도의 관리가 필요할 것으로 생각된다.

각어긋남에 따른 스피들 고유진동수의 차이를 Table 1에 나타내었다. 비교적 적은 각어긋남에 의해서도 비교적 큰 고유진동수 차이를 볼 수 있다. 따라서, 실제 스피들에서도 고유진동수 측정을 통하여 각어긋남의 심각성을 파악하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 실제적으로는 베어링에 발생된 각어긋남의 방향을 특정할 수 없으므로 임의의 방향으로 가정하는 것이 타당하며, 특정 방향으로 측정된 주파수응답에 비등방성에 의해 분리된 고유진동수 쌍들이 나타날 것으로 예상된다. 그러나 실용적으로는 수평과 수직방향의 주파수응답을 모두 측정하여 고유진동수 쌍의 존재 여부를 확인하는 것이 바람직하다. 이론적으로 각어긋남 발생 방향도 추정할 수

Table 1 Natural frequencies of spindle with angular misalignment under two different preload conditions: constant pressure preload and constant position preload

Angular misalignment (mrad)	1 <sup>st</sup> natural frequency difference (Hz)		2 <sup>nd</sup> natural frequency difference (Hz)	
	Constant pressure preload	Constant position preload	Constant pressure preload	Constant position preload
0.5	1.1(0.2%)	1.2(0.2%)	4.1(0.3%)	4.7(0.3%)
1	4.45(0.8%)	4.2(0.75%)	16.4(1.0%)	17.3(1.1%)
1.5	10(1.8%)	8.4(1.5%)	36.9(2.4%)	34.3(2.2%)
2	18.54(3.3%)	12.9(2.2%)	67.6(4.3%)	52.1(3.2%)
2.5	31.81(5.6%)	17.4(3.0%)	115.7(7.4%)	68.9(4.2%)
3	63.65(11%)	21.7(3.6%)	231.1(14.8%)	83.7(5.0%)

있는데, 각어긋남이 있는 방향에서 측정된 고유진동수가 낮아지게 되므로 각을 옮겨가며 주파수응답을 측정하고 고유진동수 변화를 분석함으로써 가능하다.

## 5. 결 론

본 논문은 각접촉 볼베어링으로 지지된 스피들에서의 각어긋남에 의한 특성 변화를 검토하였다. 이를 위해 각어긋남이 있을 때의 각접촉 볼베어링의 특성에 대해 정압예압과 정위치예압 조건에 대해 검토하였다. 각접촉 볼베어링에 각어긋남이 인가되는 경우 강성이 비등방 특성을 보이며 어긋남의 크기가 증가할수록 더욱 증가한다. 비등방성은 어긋남에 의하여 각 볼의 위치별 수직력과 접촉각 변화가 그 원인이며, 정압예압이 정위치예압 보다 어긋남에 의한 강성 비등방성의 차이가 크게 발생한다. 정위치예압의 경우 각어긋남에 의하여 축방향 하중이 증가하여 강성이 전체적으로 증가하는 추세를 보인다.

스피들에 각어긋남이 있는 경우 비등방성에 의해 고유진동수가 두 개로 갈라지며 각어긋남이 증가할수록 그 차이는 증가한다. 이러한 고유진동수의 차이를 이용하여 스피들 계에 존재하는 각어긋남의 심각성을 파악하거나 보정하는데 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

## 후 기

본 연구는 기계장비 정밀도 시뮬레이션 플랫폼 기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

- [1] Abele, E., Altintas, Y., Brecher, C., 2007, Machine Tool Spindle Units, CIRP Annals: Manufacturing Technology 59:2 781-802.
- [2] Hagi, G.D., Gafitanu, M. D., 1997, Dynamic Characteristics of High Speed Angular Contact Ball Bearings, Wear 211 22-29.
- [3] de Mul, J. M., Vree, J. M., Maas, D. A., 1989, Equilibrium and Associated Load Distribution in Ball and Roller Bearings Loaded in Five Degrees of Freedom While Neglecting Friction-Part I: General Theory and Application to Ball Bearings, ASME Journal of Tribology 111:1 142-148.
- [4] Harris, T. A., Kotzalas, M. N., 2007, Rolling Bearing Analysis, CRC Press, USA.
- [5] Guo, Yi, Parker, G., Robert, 2012, Stiffness Matrix Calculation of Rolling Element Bearings Using a Finite Element/contact Mechanics Model. Mechanism and machine theory 51 32-45.
- [6] Jorgensen, B. R., 1995, Dynamic Analysis of Spindle Bearing System, Doctorate Thesis, Purdue University, USA.
- [7] Hong, S. W., Kang, J. O., Shin, Y. C., 2002, Dynamic Analysis of Rotor Systems with Angular Contact Ball Bearings Subject to Axial and Radial Loads, Int. J. of the Korean Society of Precision Engineering 3:2 61-71.
- [8] Yoon, Y. S., Bae, G. H., Hwang, J. H., Hong, S. W., 2013, A Study on Characteristics of Angular Contact Ball Bearing Subjected to Moment Load, Proceedings of the KSMTE 38-38.
- [9] Bae, G. H., Yoon, Y. S., Hong, S. W., 2013, Study on Spindle-bearing Systems Subjected to Moment Loads at Bearings, Proceedings of International Journal of Manufacturing Technology Engineers 23-23.
- [10] Bae, G. H., Yoon, Y. S., Hwang, J. H., Hong, S. W., 2013, Effect of Shaft Alignment on the Rotor-bearing System Dynamics Proceedings of the KSPE 79-80.
- [11] Liao, N. T., Lin, J. F., 2004, An Analysis of Misaligned Single-Row Angular-Contact Ball Bearing, Journal of Mechanical Design 126:2 370-374.
- [12] SKF 2012, Angular Contact Ball Bearings Brochure, <<http://www.skf.com/binary/12-121108/Angular-contact-ball-bearings.pdf>>.