

볼 베어링의 강성평가에 관한 연구

조영천*, 길병래(부경대 대학원), 양보석(부경대 기계공학과)

1. 서론

일반적으로 구름요소베어링이라 불리우는 볼베어링은 하중지지요소로서 사용되며, 전동기, 가스터빈, 펌프등의 여러 회전기계에 널리 사용되고 있다. 이는 기동 및 운전시의 낮은 마모, 저속시 하중의 지지능력, 윤활의 용이, 한 개의 베어링으로 반경 및 축방향의 하중을 동시에 지지할 수 있는 능력등의 잇점이 있기 때문이다.

최근 구름요소베어링으로 지지된 회전기계는 고속, 고풍력화 하는 경향이고, 이러한 회전축계의 진동해석에는 지지요소의 강성특성을 고려하지 않으면 안된다. 그러나 베어링 강성평가에 대한 수치적인 정보는 베어링 제작회사의 카탈로그나 핸드북에 명시되어 있지 않다. 따라서 베어링의 강성평가는 기존에 제시된 이론식을 이용하여야 한다. 베어링 강성 평가식으로는 Harris¹⁾, Soda²⁾등이 제시한 평가식이 있으며, 이들 식에 의해 강성을 검토한 결과 각각의 강성값들이 간과할 수 없는 차이를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 볼베어링 중 62 및 63계열을 이용하여 실험적으로 강성을 평가하고, 종래의 이론평가식과 그 결과를 비교·검토하여 문제점을 파악한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 실험에서는 베이스 위에 고정지그를 설치하여 축에 설치된 베어링을 고정하였고, 정적만능재료시험기(Universal Testing Machine)를 사용하여 베어링에 반경하중을 가하였다. 그리고 실험에 사용된 베어링은 62계열 11종류(6200~6210)와 63계열 11종류(6300~6310)가 사용되었다. 실험에 사용된 각 베어링의 기본 치수는 Table 1

과 같다.

2.2 실험 방법

실험에는 국내제품(KBC), 일본제(NTN) 및 러시아제 등의 62계열과 63계열에 대해, 각 치수별로 5개의 베어링을 이용하여 반복실험을 수행하였다. 그리고 각각의 베어링은 하중기구가 볼의 위에서 하중을 가하는 LOB(Load On Ball)상태에서 2번, 하중 기구가 볼과 볼 사이에서 하중을 가하는 LBB(Load Between Ball)상태에서 2번을 측정하였다. Fig. 2에서 (a)는 LOB상태의 하중 부하조건을 보이고, (b)에 LBB상태의 부하조건을 나타내고 있다.

Table 1 사용된 베어링의 기본 치수
단위(mm)

호칭번호	내경	외경	볼 수	볼 직경
6200	10	30	8	4.763
6201	12	32	7	5.953
6202	15	35	8	5.953
6203	17	40	8	6.747
6204	20	47	8	7.938
6205	25	52	9	7.938
6206	30	62	9	9.525
6207	35	72	9	11.113
6208	40	80	9	11.906
6209	45	85	9	12.7
6210	50	90	10	12.7
6300	10	35	6	7.144
6301	12	37	6	7.938
6302	15	42	7	7.938
6303	17	47	7	8.731
6304	20	52	7	9.525
6305	25	62	7	10.319
6306	30	72	8	11.906
6307	35	80	8	13.494
6308	40	90	8	15.081
6309	45	100	8	17.4625
6310	50	110	8	19.05

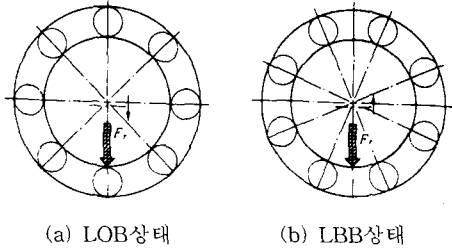


Fig. 2 베어링의 하중상태에 따른 분류

즉, 1개의 베어링으로 4번의 반복실험을 실시했다. 따라서 취득된 데이터는 1종류에 5개의 베어링으로 LOB상태에 10회, LBB상태에 10회이고, 이 값들을 평균해서 나타내었다.

100N의 초기하중을 작용시킨 후 U.T.M의 작용하중의 속도는 0.07mm/s로 일정하게 하였다. 각 베어링의 최대하중크기는 제작회사카탈로그에 나와 있는 정격하중 이내로 하였다. 베어링 호칭번호에 따라 정격하중이 다르므로, 각 베어링의 최대하중은 다르게 설정되었다. 그리고 초기상태 하중에 대한 변위를 면밀하게 측정하기 위해 100N에서 1000N까지의 하중에 대해서 하중증가량을 100N으로 일정하게 증가시켰다. 하중에 대한 변위값은 레이저 변위센서를 이용하여 측정하고 센서출력전압(V)을 변위값으로 환산하였다. 측정감도는 1mm당 0.4V이다.

센서의 설치 위치는 베어링부에 설치하는 것이 원칙이나 설치가 용이하지 않아서, U.T.M이 부하를 가하면서 내려오는 가압기구의 아래 부분에 대해서 가압할 때 변위를 측정하였다. 여기서 보다 정확한 데이터를 측정하기 위해 센서의 레이저가 반사되는 부위에 흰색 테이프를 부착하여 가압기구면의 미소한 요철부분으로 인한 변위의 차이가 없도록 하였다.

일제 NTN 및 러시아제 베어링도 몇 종류 실험을 실시해 본 결과 국산제품의 측정값이 그다지 차이가 없으므로 데이터정리에서는 제외시켰다.

3. 이론평가식의 검토

본 실험치와 결과를 비교하기 위하여 우선 이론식으로 제안되어 있는 Harris 및 Soda의 식을 설명한다.

볼 베어링의 강성(stiffness)은 다음과 같이 정

의된다.

$$k = \frac{dF_r}{d\delta} \quad (1)$$

3.1 Harris 식⁽¹⁾

아주 작은 틈새(clearance)를 가진 단열 볼 베어링의 경우

$$Q_{\max} = \frac{5 F_r}{Z \cos \alpha} \quad (2)$$

따라서 하중 Q_{\max} 에 대한 반경변위 δ_r 은

$$\delta_r = \left(\frac{4.62 \times 10^{-5} (2.205461 F_r)^{2/3}}{Z^{2/3} (0.03937 D)^{1/3} \cos^{5/3} \alpha} \right) \times 25.4 \text{ (mm)} \quad (3)$$

따라서 베어링의 강성은

$$k = 4.77 \times 10^9 Z (0.03937 D)^{1/2} \cos^{5/2} \alpha \times (0.03937 \delta_r)^{1/2} \times \frac{4.4461}{25.4} \text{ (N/m)} \quad (4)$$

여기서 F_r : 전하중, Z : 볼 수, δ_r : 변위, D : 볼 직경, α : 접촉각이다.

식(4)로부터 볼베어링의 강성은 비선형적인 관계인 것이 명백하다. 왜냐하면 볼베어링의 강성은 반경변형의 제곱근에 종속하기 때문이다. 이 점에서 볼베어링은 하중과 관계없이 선형적인 변형을 하는 스프링과는 다르다.

식(4)에서 강성은 하중에 대해 볼수(Z)와 접촉각(α) 그리고 볼의 직경(D)에 의해 결정된다. 본 실험의 대상인 62와 63계열은 접촉각이 0° 이다. 이렇게 해서 얻은 하중과 변위로 그래프를 그리면 곡선의 기울기가 강성이 된다.

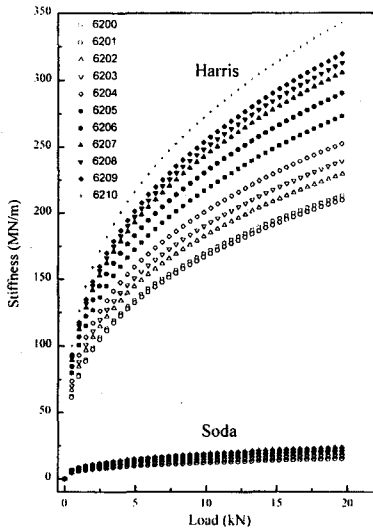
3.2 Soda 식⁽²⁾

Soda는 그의 저서⁽²⁾에서 다음과 같은 베어링에 관한 식을 제안하고 있다. 여기서 변위 δ 의 값은 다음식과 같다.

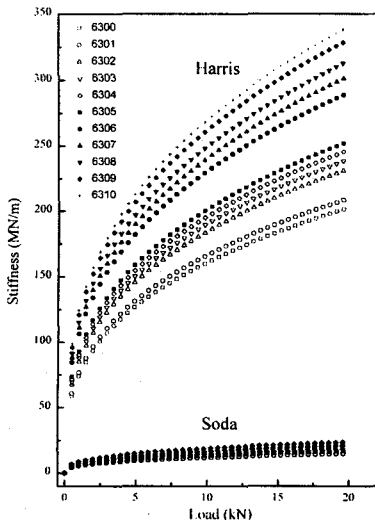
$$\delta_r = 250 \times 10^{-6} \times \sqrt[3]{\frac{F_r^2}{Z^2 D}} \text{ (cm)} \quad (5)$$

식(5)에서 구해진 변위값을 식(1)에 대입하여 강성식으로 나타내면, 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$k = \frac{F_r}{10 \delta_r} \quad (6)$$



(a) 62계열



(b) 63계열

Fig. 3 베어링강성의 계산결과

3.3 이론치의 비교

각 이론식에 의해 구한 베어링의 강성값을 Fig. 3에 62계열과 63계열에 대해 각각 비교하여 나타내었다.

이론식에 의해 구한 강성선도를 보면 베어링의 호칭번호가 커질수록 강성이 증가하는 경향을 보이고 있다. Harris의 이론식에 의한 강성값이 Soda의 식에 의한 강성값보다 훨씬 크게 나타나고 있다. 이론식에서 나타나듯이 강성값은 볼수가

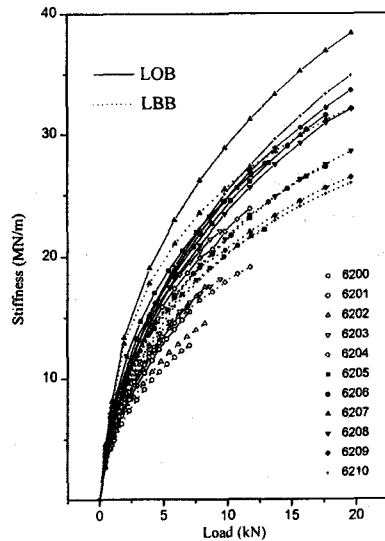
많을수록, 볼직경이 커질수록 큰 값을 나타내고 있다. 6200과 6201의 값에서 보면 6200이 6201보다 조금 더 큰 강성값을 보이는데 이것은 6200이 6201에 비해 볼의 직경은 작지만 볼수가 한 개 더 많기 때문이다. 63계열의 그래프에서 6306의 선도가 6305에 비해 조금 큰 차이를 보이는 이유도 이러한 이유에서이다.

4. 실험결과와 이론치의 비교

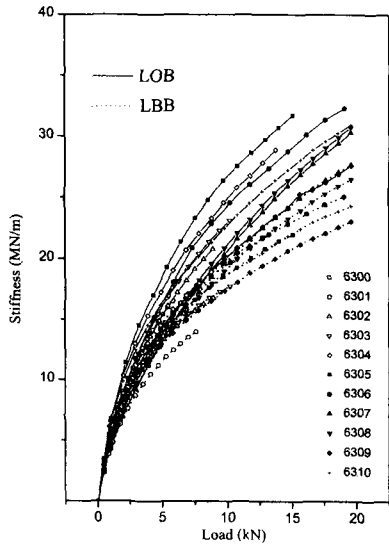
실험결과로 얻어진 변위 δ 와 하중 F ,를 식(1)에 적용하여 강성 데이터를 얻었다. 여기서 각 베어링 호칭번호마다 수회에 걸친 실험의 평균값을 구하고 이론식에서와 같이 강성-하중 선도로 나타내면, Fig. 4와 같다.

Fig. 4(a)에서는 62계열에 대한 실험결과를 나타내고 있다. 이론식에 의한 그래프와는 다소 차이를 나타내고 있지만, 비슷한 경향을 보이고 있다. 그리고 실험치는 각 베어링에 따라 정격하중 이내에 실험을 실시했으므로 호칭번호가 작은 것은 높은 하중을 가하지 않았다.

앞서 살펴본 이론식의 유도과정에서는 LOB상태와 LBB상태에 대한 강성평가에 대해서는 언급하고 있지 않지만, 본 연구에서는 두 상태에 대해서 실험을 실시했고, 그래프에서도 알 수 있듯이 LOB상태에서의 강성값이 LBB상태의 강성값보다 큰 값을 나타내고 있다.



(a) 62계열



(b) 63계열

Fig. 4 베어링강성의 실험결과

이러한 값들의 차이가 이론치와 본 실험에서의 차이를 나타내는 이유중의 하나이다.

Fig. 4(b)는 63계열의 실험에 의한 강성값을 나타내고 있는데 62계열과 비슷한 경향을 보이고 있다. 실제 실험에서는 호칭번호가 큰 것이 꼭 강성이 크게 나타나지는 않았다.

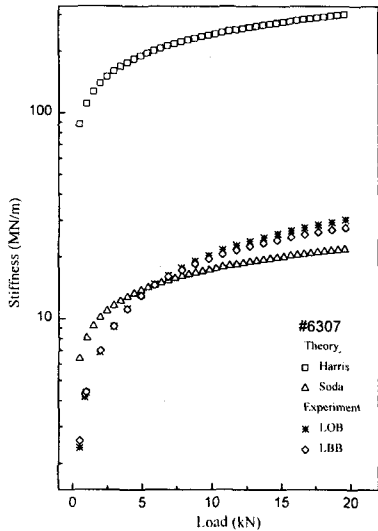


Fig. 5 이론치와 실험치의 비교 (#6307)

Fig. 5는 한 예로 호칭번호 6307에 대해 이론치와 실험치를 비교한 강성선도이다. 비교의 편의를

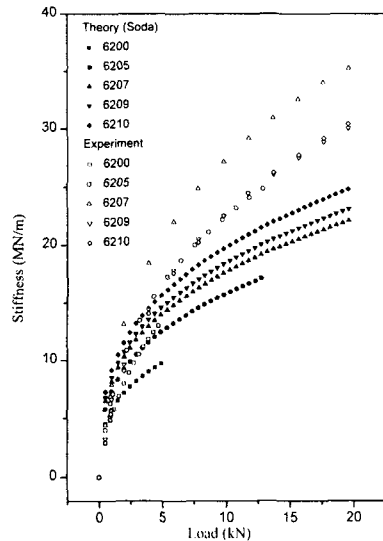
위해 log scale로 나타내었다. 이 선도에서 실험치와 Soda의 이론값은 비슷한 크기를 나타내나, Harris의 이론결과값은 큰 차이를 보이고 있다. 그리고 LBB상태에 비해 LOB상태의 값이 더 큰 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 하중부하조건이 점점축이었으므로 LOB상태의 강성값이 크게 나타났고, 하중부하에 따른 축변위의 값이 미소해서 고려하지 않았기 때문에 이론치와 실험치의 강성값에 약간의 오차가 발생하였다.

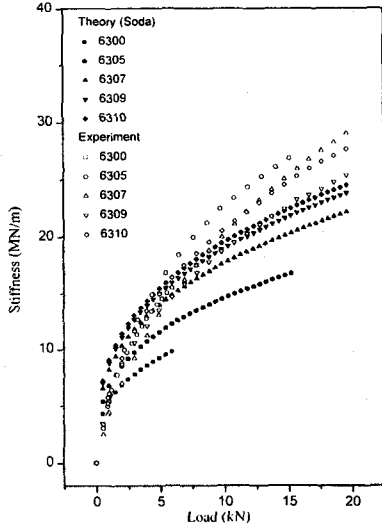
또한 본 연구에서는 베어링의 틈새(clearance)에 대해서는 그 값을 고려하지 않았지만, Harris의 이론식은 미소한 틈새가 있을 때의 강성식이고 Soda의 이론식은 틈새를 0으로 가정하였을 때의 강성값을 나타낸다.

베어링틈새와 강성의 관계는 틈새가 크면 반경변위가 증가하게 되고, 따라서 강성값의 저하를 가져온다. 따라서 Soda의 이론식에 의한 강성값은 실제로는 조금더 낮은 강성값을 나타낼 것이다. 물론 Harris의 식에서도 단지 미소한 틈새만을 고려하고 있으므로 약간의 오차는 가지고 있다.

이와 같은 결과를 토대로 실험치와 가장 유사한 강성값을 나타내고 있는 Soda의 이론식에 의한 강성값과 이론식에서 언급되지 않았던 LOB상태와 LBB상태의 강성값을 평균하여 Fig. 6에 비교하였다.



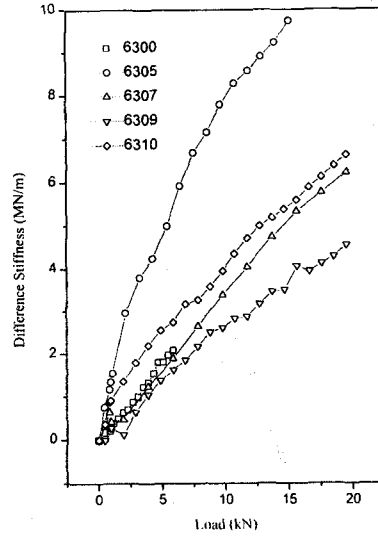
(a) 62계열



(b) 63계열

Fig. 6 이론결과와 실험평균강성값의 비교

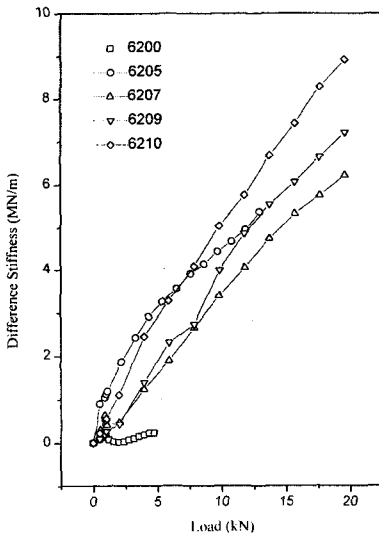
두 선도는 약간의 차이는 있지만 실험치와 Soda의 이론치는 비슷한 강성값을 나타내고 있고, 실험치가 각각의 계열에서 다소 높은 강성값을 보이고 있다. 실험치는 이론치에 비해 저하중에서는 큰 차이를 보이고 있지는 않지만, 고하중으로 갈수록 강성값의 차가 현저해지고 있다. 62계열에서는 6207이 큰 강성값을 보이고 나머지 계열은 미소한 차이지만 호칭번호가 큰 것일수록 큰 강성값을 나타내고 있다. 그러나 63계열에서는 62계열에 비해 호칭번호에 따른 강성값의 크기가 잘 맞지 않고 있음을 알 수 있다.



(b) 63계열

Fig. 7 LOB와 LBB의 강성차

Fig. 7은 LOB와 LBB상태에서의 강성값의 차를 하중에 대해 나타내고 있다. 위의 선도에서 기울기는 하중에 따라 두 상태의 값의 차가 얼마나 큰가를 보이고 있다. 62계열에서 6200의 기울기가 완만한 것은 실험베어링 층에서 불과 불사이의 간격이 가장 좁아서 두 상태의 강성값의 차가 작기 때문이다. 불 사이의 간격이 커질수록 강성값의 차는 크게 나타날 것이다. 이 강성차이는 불베어링으로 지지된 회전체의 회전에 따른 지지강성의 주기적인 변화를 야기시키고, 경우에 따라서는 축계의 동특성에 영향을 미칠 것이다.



(a) 62계열

5. 결론

본 연구에서는 실제 실험을 통해서 베어링의 반경하중과 그에 따른 변위를 측정하여 산출한 강성값을 이론식에 의한 값과 비교하여 그 차이점을 분석하였다. 또한 베어링 강성에 대한 자료 부족과 필요성에 의하여 이용할 수 있는 Data의 습득을 목적으로 하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) LOB와 LBB상태중에서 LOB상태의 강성값이 크다.
- 2) LOB와 LBB상태중에서 LOB상태에서 더 신뢰성이 있는 Data를 얻을 수 있었다.

- 3) 이론식에서는 베어링 번호가 큰 것일수록 강성이 크게 나타났지만, 실제 실험치에서는 그렇지 않았다.
- 4) 이론식과 실험에서 강성값의 크기는 다음과 같다.

Harris > 실험치 > Soda

- 5) 실험치와 Soda의 식에 의한 강성값이 가장 유사하게 나타났다.
- 6) 베어링의 강성은 볼수가 많을수록, 볼직경이 클수록 강성이 증가한다.

향후연구는 본 연구의 결과를 토대로 진동해석에 이용될 수 있도록 각 호칭번호 또는 계열에 따른 실험식이 제안되어야 하며, 기타 구름요소베어링에 대한 실험 data가 구축되어야 할 필요가 있다. 이러한 자료는 회전축계의 진동해석과 설계에 유익한 참고자료로 이용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Tedric A. Harris, "Rolling Bearing Analysis", Second Edition, John Wiley & Sons, 1984
2. Soda, N., 軸受, 岩波書店, 1981.
3. Y. C. Shin, "Bearing Nonlinearity and Stability Analysis in High Speed Maching", Trans. ASME, J. of Eng. for Ind, Vol.114, 1992
4. J. Datta.. K. Farhang, "A Nonlinear Model for Structural Vibrations in Rolling Element Bearings : Part 1 - Derivation of Governing Equations", Trans. ASME, J. of Tribology, Vol. 119, pp. 126~131, 1997.
5. Daniel J. Inman, "Engineering Vibration", Prentice Hall, 1995.
6. 鄭善謀, 韓東哲, "표준 기계 설계학", 동명사, 1994.
7. 양보석 감수, "진동법에 의한 설비진단의 실제", 부경대학교 기계역학연구실, 1996
8. H. R. El-Sayed, "Stiffness of Deep-Groove Ball Bearing", Wear, 63(1980)89-94
9. NSK Nippon Seiko, "Motion & Control Technology", 日本精工株式會社.