Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 20, No. 4 pp. 464-469, 2019

https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.4.464
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

테이퍼 롤러 베어링 케이지의 불완전성이 동특성에 미치는 영향

안태길[1], 박장우[2*]
[1]호서대학교 기계공학부, [2]아주네트웍스(주) 서비스본부

The Effects of Geometrical Imperfections on the Dynamic Characteristics of a Tapered Roller Bearing Cage

Tae-Kil Ahn[1], Jang-Woo Park[2*]
[1]Division of Mechanical Engineering, Hoseo University
[2]Service Division, Aju Networks Co., Ltd.

요 약 테이퍼 롤러 베어링은 큰 부하 하중이 가해져도 안정적으로 차량을 지지할 수 있어서 승합차, 화물차, 열차 등에 핵심적인 구동 부품으로 광범위하게 사용된다. 테이퍼 롤러 베어링 부품 중에서 케이지는 롤러들 사이의 간격을 유지해 주며. 이를 통해서 마찰 방지 및 마모, 발열을 억제하고 윤활을 위한 공간을 제공해주는 등의 역할을 한다. 차량이 주행 중에 공진으로 인해 케이지가 심하게 변형되면 롤러가 원활한 구름 운동을 하지 못하거나, 케이지를 이탈하는 경우가 발생하게 된다. 따라서 베어링의 안정적인 내구성능을 확보하기 위해서는 케이지의 공진주파수를 파악하는 것이 매우 중요하다. 베어링 케이지는 구조적으로 동일한 형상이 반복되는 주기적 구조물로 볼 수 있는데, 이러한 구조물은 제작과정에서 설계 시 의도한 완벽한 기하학적 형상과는 어느 정도의 오차를 가진 형상으로 제작되게 된다. 본 연구에서는 이러한 케이지의 기하학적 불완전성이 동특성에 미치는 영향을 파악하고자 한다. 그 결과 기하학적인 불완전성에 의하여 이상적인 케이지의 고유진동수 부근에서 고유진동수 분리가 발생하며, 그 간격은 기하학적 오차의 크기에 비례하고 모드의 차수가 증가할수록 그 간격도 넓어진다고 판단된다.

Abstract Tapered roller bearings are used widely in vans, trucks, and trains because they can support the vehicle in a stable manner even under a heavy load. The cage of a tapered roller bearing maintains the gap between the rollers, which prevents friction wear and suppresses heating. If the cage is severely deformed due to resonance, the roller may not be able to roll smoothly and even leave the cage. Consequently, it is very important to analyze the dynamic characteristics of the cage for reliable performance of a bearing. The cage essentially has geometrical tolerance in the manufacturing process. In this paper, the effects of those geometrical imperfections on the dynamic characteristics of the cage were investigated. As a result, natural frequency separation occurred near the natural frequency of the ideal cage due to geometrical imperfections. In addition, the interval was proportional to the magnitude of the geometric error, and the interval increased with increasing mode number.

Keywords : Dynamic Characteristics, Geometrical Imperfections, Periodic Structure, Resonance, Tapered Roller Bearing Cage

1. 서론

차량용 차축 베어링은 차량을 지지하고 차륜의 구동을 가능하게 하며, 차량의 주행에 의하여 연속적이고 반복적인 부하를 받는 핵심 구동 부품이다. 화물차나 철도 차량과 같이 부하하중이 큰 경우에 차축 베어링으로 테

*Corresponding Author : Jang-Woo Park(Aju Networks)
Tel: +82-2-2038-4700 email: jw.park@aju.co.kr
Received December 17, 2018 Revised January 29, 2019
Accepted April 5, 2019 Published April 30, 2019

이퍼 롤러 베어링이 광범위하게 사용된다. 테이퍼 롤러 베어링의 주요 구성 요소는 외륜, 내륜, 롤러, 케이지로 구성되어 있다. 테이퍼 롤러 베어링의 주요 구성요소 중 하나인 케이지는 롤러사이의 간격을 유지해 주며, 이를 통해 마찰 방지 및 마모, 발열의 억제 등의 역할을 하고 윤활제를 사용하여 윤활 시 윤활을 위한 공간을 제공해 주는 역할을 한다. 열차 운행 중 베어링에서 발생하는 가진 주파수와 케이지의 고유진동수가 만나 공진이 발생하면 케이지의 형태가 일그러져 전동체가 제대로 회전운동을 하지 못하거나, 전동체가 케이지를 이탈하여 자칫 화물 및 승객의 안전에 위협이 될 수 있는 상황이 발생할 수 있다. 따라서 케이지에 대한 동특성 해석을 통해 차량의 운행 중에 이러한 공진현상이 발생하지 않도록 케이지를 설계하는 것이 매우 중요하다. 베어링의 내구성능과 관련된 기존 연구로는 운전 중의 가진 주파수에 의한 케이지의 공진 가능성을 분석하였으며[1], 부하 하중에 의한 베어링의 내부 하중분포와 내구 수명을 이론적으로 예측하려는 연구가 수행되었다[2-12].

케이지는 구조적으로 일정한 형상이 반복되는 주기적 구조물(periodic structure)의 형태를 갖는다. 주기적 구조물을 구성하고 있는 각 부구조물(substructure)들은 현실적으로 가공오차에 의하여 완벽한 기하학적 형상으로부터 일반적으로 미세하게 벗어난 형상을 가지게 된다. 그런데 반복되는 각 부구조물들의 미세한 특성 차이로도 전체 구조물의 동적 거동은 커다란 차이를 보일 수 있다. 이에 대한 연구로는 비교적 단순한 모델을 이용하여 물성치나 강성의 불균일이 동적 반응에서 큰 차이를 야기할 수 있음을 보였고[13,14], 이러한 불균일에 의하여 발생하는 구조물의 국부적인 진동응답 현상(mode localization)에 대한 연구가 진행되어 왔다[15-17].

본 연구에서는 케이지의 기하학적 불완전성이 케이지의 동특성에 미치는 영향을 파악하고자 한다. 케이지는 HyperWorks 14를 이용하여 모델링 하였고, Abaqus 6.16을 이용하여 모드해석을 수행하였다.

2. 동특성 해석

2.1 이상적인 케이지의 동특성

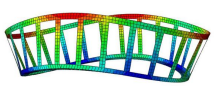
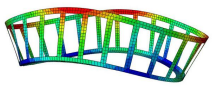
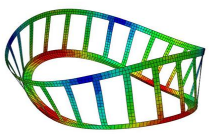
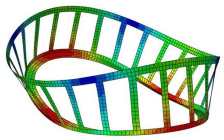
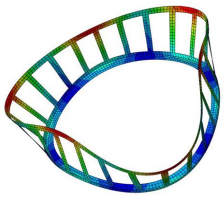
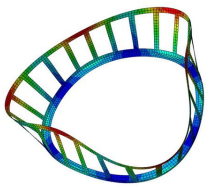
본 연구에서 사용된 화물열차용 테이퍼 롤러 베어링 케이지의 형상은 Fig. 1과 같고 물성치는 Table 1에 나타나 있다. 유한요소 해석프로그램을 이용하여 고정 부위가 없는 자유 경계조건으로 고유진동수를 낮은 주파수부터 20개를 구하였고, 계산된 케이지의 고유진동수와 모드 형상은 Table 2에 나타나 있다.

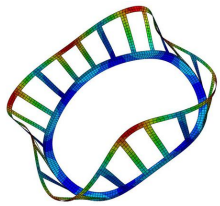
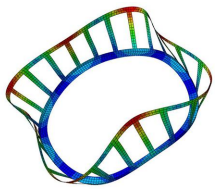
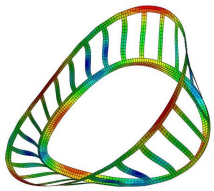
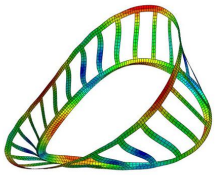
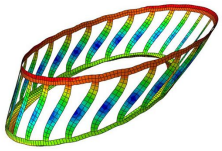
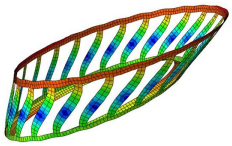
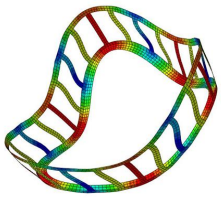
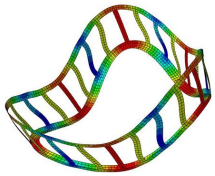
Fig. 1. Tapered roller bearing cage

Table 1. Material properties of the cage

Mass Density	7750 kg/m^3
Young's Modulus	2.2×10^{11} N/m^2
Poisson's Ratio	0.27

Table 2. Natural frequencies and mode shapes

7th mode (354.8 Hz)	8th mode (355.0 Hz)
	
9th mode (774.7 Hz)	10th mode (774.9 Hz)
	
11th mode (885.4 Hz)	12th mode (885.7 Hz)
	

13th mode (1529.2 Hz)	14th mode (1529.6 Hz)
	
15th mode (1784.7 Hz)	16th mode (1786.2 Hz)
	
17th mode (1883.2 Hz)	18th mode (1886.1 Hz)
	
19th mode (2116.9 Hz)	20th mode (2118.2 Hz)
	

1-6 번째까지의 고유진동수는 강체운동을 나타내는 값으로 0 Hz 에 가깝기 때문에 무시하였다. 7번째와 8번째 고유진동수와 모드 형상을 살펴보면 고유진동수 값과 모드 형상이 거의 동일한 것을 알 수 있다. 케이지의 형상이 완벽하게 대칭이라면 이론적으로는 동일한 값이어야 하는데 미세한 수치오차에 의하여 마치 다른 모드처럼 계산이 된 것이다. 9, 10 모드부터 19, 20 모드까지의 경우도 동일한 상황이다.

2.2 기하학적 불완전성이 있는 케이지의 동특성

케이지의 제작과정에서 발생할 수 있는 기하학적 불완전성은 매우 다양하고 복합적으로 발생할 수 있으며, 그러한 경우들을 모두 예측해 보는 것은 거의 불가능에 가깝다. 본 연구에서는 우선적으로 단순하고 간단한 기하학적 오차가 전체 케이지의 동특성에 미치는 영향을 살펴보고자 오차 인자들을 Table 3 과 같이 가정하였다. 즉, 케이지의 창살들 중 하나의 두께가 다른 것들과 다른 경우, 창들 중 하나의 폭이 다른 것들과 다른 경우, 창들 중 하나의 높이가 다른 것들과 다른 경우이다(Fig. 2). 오차 인자들은 케이지 중앙에서의 측정값들이고, 각각의 경우에 대하여 기준값의 ±10 % 오차를 가정하였다.

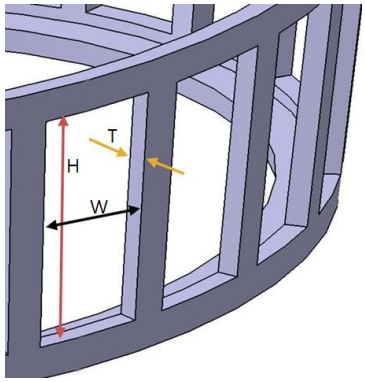


Fig. 2. Geometrical parameters of the cage

Table 3. Tolerance range of geometrical parameters

	Base	-10 %	+10 %
T (mm)	4.0	3.6	4.4
W (mm)	19.2	17.3	21.1
H (mm)	42.0	37.8	46.2

각 경우에 대하여 계산된 고유진동수는 Table 4-6 에 나타나 있다. 또한 전반적으로 각각의 모드 형상을 살펴보면, 주기적인 구조물에서 기하학적 불완전성에 의하여 발생할 수 있는 국부적인 진동응답 현상은 인자의 변화폭이 작은 경우(0.4 mm)에는 관찰되지 않았으며 이상적인 케이지의 모드 형상(Table 2)과 유사하였다.

Table 4. Natural frequencies for the thickness variation

Mode No.	Base (Hz)	-10 % (Hz)	+10 % (Hz)
7	354.8	354.4	354.5
8	355.0	355.1	355.6
9	774.7	774.1	774.1
10	774.9	775.5	775.5
11	885.4	884.0	884.7
12	885.7	886.2	887.1
13	1529.2	1527.1	1528.0
14	1529.6	1530.6	1531.9
15	1784.7	1781.6	1783.9
16	1786.2	1785.5	1789.8
17	1883.2	1881.8	1884.2
18	1886.1	1888.5	1890.6
19	2116.9	2114.4	2114.8
20	2118.2	2120.3	2120.5

Table 5. Natural frequencies for the width variation

Mode No.	Base (Hz)	-10 % (Hz)	+10 % (Hz)
7	354.8	346.1	344.8
8	355.0	349.3	348.8
9	774.7	783.0	781.5
10	774.9	787.4	787.8
11	885.4	868.7	865.6
12	885.7	876.4	875.5
13	1529.2	1504.9	1500.4
14	1529.6	1516.2	1516.6
15	1784.7	1989.2	1885.6
16	1786.2	2023.8	1999.3
17	1883.2	2158.2	2105.0
18	1886.1	2215.8	2163.6
19	2116.9	2249.9	2244.9
20	2118.2	2257.7	2259.6

두께 인자 T의 경우를 살펴보면, 전체적으로 변화량(0.4 mm)이 작아서 고유진동수 변화량도 최대 4 Hz 미만인 것을 알 수 있다. 그러나 두께 인자의 작은 변화량에 의해서 기하학적 불완전성이 발생함에 따라 인접했던 고유진동수의 분리가 발생하였으며 모드 차수가 증가할수록 분리 폭은 최대 7 Hz 까지 증가하였다. 두께 인자의 기준값에 대한 증가와 감소에 따른 고유진동수 변화의 증감 방향성은 뚜렷하게 나타나지 않았으며, 그 이유는 질량이 증가하면 강성도 증가하고, 질량이 감소하면 강성도 감소하여 폭 인자의 증감 방향과 고유진동수의 변화 방향이 일관성 있게 일치하지 않기 때문인 것으로 판단된다.

Table 6. Natural frequencies for the height variation

Mode No.	Base (Hz)	-10 % (Hz)	+10 % (Hz)
7	354.8	346.6	344.3
8	355.0	349.7	347.3
9	774.7	786.4	778.5
10	774.9	787.7	779.4
11	885.4	872.5	865.0
12	885.7	876.8	869.8
13	1529.2	1514.8	1498.3
14	1529.6	1516.7	1503.2
15	1784.7	1985.0	1894.2
16	1786.2	2019.3	2007.2
17	1883.2	2150.6	2112.7
18	1886.1	2195.6	2173.7
19	2116.9	2265.3	2239.1
20	2118.2	2268.2	2241.1

케이지 창의 폭 인자 W를 살펴보면, 두께 인자의 경우보다는 고유진동수의 변화량이 더 큰 것을 알 수 있으며, 그것은 폭 인자의 변화량(1.9 mm)이 두께 인자의 변화량보다 크기 때문인 것으로 보인다. 폭 인자의 경우에도 불완전성이 발생하면 인접한 두 고유진동수들이 분리되어 그 간격이 벌어지며 모드 번호가 증가할수록 간격의 폭이 증가하는 것을 알 수 있다. 그런데 15번째 모드부터 고유진동수의 변화량(100 Hz 이상)이 매우 커서 케이지의 동특성에 변화가 있는 것으로 보이며, 이것은 폭 인자의 변화량이 비교적 커서 고차 모드의 특성에 변화가 생긴 것으로 모드형상으로부터 국부적 진동응답이 발생한 것을 알 수 있다(Fig. 3).

케이지 창의 높이 인자 H를 살펴보면, 인자의 변화에 따른 고유진동수의 변화가 전체적으로는 폭 인자의 경우와 비슷한 경향을 보인다. 높이 인자의 변화량에 의하여

불완전성이 발생하면 앞의 경우와 마찬가지로 인접한 두 고유진동수가 분리되어 그 간격이 벌어지며 모드 번호가 증가할수록 간격의 폭이 증가한다. 폭 인자의 경우와 마찬가지로 15번째 모드부터 모드의 특성에 변화가 생겨서, 고유진동수의 변화량이 매우 커지며 국부적 진동응답이 발생한 것을 알 수 있다.

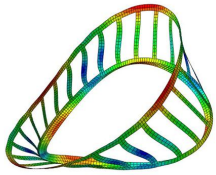
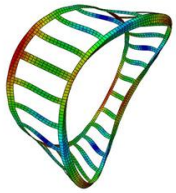
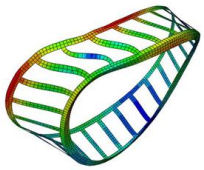
Parameter	15th mode shape
base	
-10 %	
+10 %	

Fig. 3. 15th mode shapes for the width variation

3. 결론

화물열차용 테이퍼 롤러 베어링 케이지에 대하여 제작 오차에 따른 기하학적 불완전성이 케이지의 동특성에 미치는 영향을 살펴보았다. 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 케이지의 고유진동수와 모드 형상을 관찰하였다. 해석 결과를 살펴보면, 기하학적 오차에 의해 케이지의 대칭성이 깨지면 인접해 있던 고유진동수의 분리가 발생하고 분리되는 고유진동수 사이의 간격은 고차 모드로 갈수록 증가하는 것을 알 수 있었다. 그리고 오차 인자의 변화량이 큰 경우(1.9 mm 이상)에는 고차모드(15번째 이상)에서 국부적인 진동응답 현상이 발생하여 이상적인 케이지의 동특성과는 현저히 다른 특성을 나타냈다.

결론적으로 케이지를 이상적인 형상으로 제작하기는 현실적으로 불가능하므로 케이지의 제작과정에서 발생할 수 있는 기하학적인 불완전성에 의하여 이상적인 케이지의 고유진동수 부근에서 고유진동수 분리가 발생할 수 있으며, 그 간격은 기하학적 오차의 크기에 비례하고 모드의 차수가 증가할수록 그 간격도 넓어진다고 판단된다. 또한 오차가 클 경우에는 고차모드에서 국부적 진동응답 현상이 발생하여 이상적인 케이지의 동특성과 현저히 다른 거동을 나타낼 수 있다. 따라서 케이지의 실제적인 동특성을 예측하고자 할 때, 기하학적 불완전성의 오차범위를 산정하여 그에 따른 케이지 고유진동수의 변동범위를 고려하여 동특성을 예측하여야 한다.

References

[1] J. W. Park, J. Y. Heo, “Analysis of Dynamic Characteristics for a Tapered Roller Bearing Cage”, Journal of The Korea Convergence Society, 8(5), pp.179-184, 2017.
DOI: https://doi.org/10.15207/JKCS.2017.8.5.179

[2] S. P. Lee, “Bearing Life Evaluation of Automotive Wheel Bearing Considering Operation Loading and Rotation Speed”, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-A, 40(6), pp.595-602, 2016.
DOI: http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.6.595

[3] V. Tong, S. Hong, “Characteristics of Tapered Roller Bearing Subjected to Combined Radial and Moments Loads”, Int. J. of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 1(4), pp.323-328, 2014.
DOI: https://doi.org/10.1007/s40684-014-0040-1

[4] B. Warda, A. Chudzik, “Fatigue Life Prediction of the Radial Roller Bearing with the Correction of Roller Generators”, Int. J. of Mechanical Sciences, 89, pp.299-310, 2014.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2014.09.015

[5] A. Selvaraj, R. Marappan, “Experimental Analysis of Factors Influencing the Cage Slip in Cylindrical Roller Bearing”, Int. J. of Advanced Manufacturing Technology, 53(5), pp.635-644, 2011.
DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-010-2854-5

[6] R. Jeong, B. Lee, D. Lee, “Study on Detection Technique for Outer-race Fault of the Ball Bearing in Rotary Machinery”, Journal of the Korean Society of Safety, 25(3), pp.1-6, 2010.
UCI: G704-000647.2010.25.3.014

[7] I. Bercea, S. Cretu, D. Nelias, “Analysis of Double-Row Tapered Roller Bearings”, Tribology Transactions, 46(2),

pp.228-239, 2003.
DOI: http://dx.doi.org/10.1080/10402000308982622

[8] J. Ferreira, J. Balthazar, A. Araujo, “An Investigation of Rail Bearing Reliability under Real Conditions of Use”, Engineering Failure Analysis, 10(6), pp.745-758, 2003.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S1350-6307(02)00052-3

[9] S. Creju, I. Bercea, N. Mitu, “A Dynamic Analysis of Tapered Roller Bearing under Fully Flooded Conditions”, Wear, 188(1), pp.1-10, 1995.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(94)06551-9

[10] T. Ahn, S. Lee, “Endurance Life Estimation of Taper Bearing Units”, Transactions of KSAE, 15(5), pp.160-164, 2007.
UCI: G704-000300.2007.15.5.002

[11] S. Lee, K. Moon, Y. Cho, “Contact Fatigue Life Prediction of Automotive Wheel Bearing”, Transactions of KSAE, 16(3), pp.137-143, 2008.
UCI: G704-000300.2008.16.3.003

[12] T. A. Harris, Rolling Bearing Analysis, John Wiley & Sons, 1991.

[13] T. Ahn, A. Shkel, “The Effects of the Stiffness Mistuning on the Dynamic Response of Periodic Structures under a Harmonic Force”, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 15(12), pp.1355-1360, 2005.
DOI: http://dx.doi.org/10.5050/KSNVN.2005.15.12.1355

[14] S. Wei, C. Pierre, “Localization Phenomena in Mistuned Assemblies with Cyclic Symmetry Part I: Free Vibrations”, Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, 110(4), pp.429-438, 1988.
DOI: http://dx.doi.org/10.1115/1.3269547

[15] S. Mester, H. Benaroya, “A Review of Periodic and Near-Periodic Structures”, Shock and Vibration, 2(1), pp.69-95, 1995.
DOI: https://doi.org/10.1155/1995/392839

[16] S. Mester, H. Benaroya, “A Parameter Study of Localization”, Shock and Vibration, 3(1), 1-10, 1996.
DOI: http://dx.doi.org/10.3233/SAV-1996-3102

[17] H. Yoo, J. Kim, D. Inman, “Vibration Localization of Simplified Mistuned Cyclic Structures undertaking External Harmonic Force”, Journal of Sound and Vibration, 261(5), 859-870, 2003.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0022-460X(02)00997-5

안 태 길(Tae-Kil Ahn) [정회원]

- 1987년 2월 : KAIST 생산공학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : KAIST 기계공학과 (공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1990년 2월 : 한화 베어링 연구원
- 1996년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 기계공학부 교수

<관심분야>
구름베어링, 진동

박 장 우(Jang-Woo Park) [정회원]

- 2015년 8월 : 서울과학기술대학교 산업대학원 자동차공학과(공학석사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 일반대학원 기계공학과(박사과정)
- 2007년 3월 ~ 현재 : 두원공과대학교 자동차과 겸임교수
- 2015년 10월 ~ 현재 : 아주네트웍스(주) 서비스본부 본부장

<관심분야>
소음·진동, 자동차구조해석, 자동차서비스