Journal of the Korea Convergence Society
Vol. 8. No. 5, pp. 179-184, 2017 https://doi.org/10.15207/JKCS.2017.8.5.179

# 테이퍼 롤러 베어링 케이지의 동특성 해석

박장우[1*], 허준영[2]
[1]아주네트웍스(주) 서비스본부, [2]호서대학교 자동차공학과

# Analysis of Dynamic Characteristics for a Tapered Roller Bearing Cage

Jang-Woo Park[1*], Jun-Young Heo[2]
[1]Service Division, Aju Networks Co., Ltd, Korea
[2]Department of Automotive Engineering, Hoseo University, Korea

**요 약** 테이퍼 롤러 베어링은 중량이 큰 승합차, 화물차, 열차에 사용되며, 큰 부하하중에서도 안정적으로 차량을 지지할 수 있다. 테이퍼 롤러 베어링 부품 중 케이지는 롤러 간 간격을 유지해 주며, 이를 통해서 마찰 방지 및 마모, 발열의 억제 등의 역할을 한다. 공진으로 인해 케이지가 심하게 변형되면 롤러가 구름을 하지 못하거나, 케이지를 이탈하는 경우가 발생하게 된다. 케이지는 경량화 추세에 따라 금속소재에서 플라스틱소재로 변화하고 있다. 본 논문에서는 **「화물열차와 고속열차에 사용되는 테이퍼 롤러 베어링의 부품 중 하나인 케이지를 대상으로 연구하였으며」** 케이지 재료에 따른 동특성 해석과 열차가 최고속도로 주행한다는 가정 하에, 최고속도에 해당하는 주파수의 고조파를 계산하고 공진범위를 피하기 위해 케이지의 설계 변수 중 가변이 쉬운 두께를 다르게 하여, 최적의 두께를 선정하고자 비교해석을 진행하였다. 재료에 따른 동특성 해석과 비교해석은 Abaqus 6.16을 사용하였다.

• 주제어 : 테이퍼 롤러 베어링, 테이퍼 롤러 베어링 케이지, 고유진동수, 공진, 고조파(Harmonics)

**Abstract** The cage of a tapered roller bearing keeps the gap between the rollers, which prevents friction, wear and suppresses heating. The material of the cage is changing from metal to plastic for lightening the weight. If the cage is severely deformed due to resonance, the roller may not be able to roll and even get off the cage. In this paper, the dynamic characteristics of the cage is analyzed according to the cage material. Under the assumption that a train runs at the highest speed, frequency harmonics of that speed is calculated, and the comparative analysis is carried out in order to select the optimum thickness of the cage, which is easy to change among the cage design variables for avoiding the resonance.

• Key Words : Tapered roller bearing, Cage of a bearing, Natural frequency, Resonance, Harmonics

## 1. 서론

구름 베어링은 1900년대부터 사용되기 시작한 이후 공작기계, 자동차, 컴퓨터 하드디스크(HDD) 등 많은 산업분야에 걸쳐 사용되기 시작하였다. 이는 미끄럼 베어링보다 구름 베어링이 마찰저항이 작고 유지가 편리하기 때문이다. 구름 베어링의 주요 구성요소는 외륜, 내륜, 볼

*Corresponding Author : 박장우(jw.park@aju.co.kr)
Received March 27, 2017 Revised May 1, 2017
Accepted May 20, 2017 Published May 28, 2017

또는 롤러, 그리고 케이지로 구성되어 있다. 구름 베어링의 주요 구성요소 중 하나인 케이지는 전동체(롤러)간 간격을 유지해 주며, 이를 통해 마찰 방지 및 마모, 발열의 억제 등의 역할을 하고 윤활제를 사용하여 윤활 시 윤활을 위한 공간을 제공해주는 역할을 한다.

과거에 금속소재를 사용하던 베어링 케이지는 차량의 연비 개선 및 전기, 하이브리드 차량 등의 개발에 따라 경량화 추세에 있으며, 강도 및 내열성 등이 향상된 플라스틱이 이를 대체 하고 있다. 또한, 첨단 산업의 발달로 인해 가속도계 센서를 갖고 고유진동수를 측정하던 방식에서 컴퓨터와 컴퓨터 프로그램들의 기술 향상으로 인해 정확한 해석이 가능해져 컴퓨터를 사용하여 고유진동수를 측정하고 모드형상을 관찰할 수 있게 되었다. 케이지에 대한 동특성 해석의 중요성은 열차 운행 간 베어링에서 발생하는 주파수와 케이지의 고유진동수가 만나 공진을 형성해 케이지의 형태가 일그러져 전동체가 제대로 회전운동을 하지 못하거나, 전동체가 케이지를 이탈하여 자칫 화물 및 승객의 안전에 위협이 될 수 있는 상황을 사전 시뮬레이션을 통해 숙지하고 사고를 피할 수 있다는데 의미가 있다[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15].

본 연구에서는 화물열차와 고속열차에 사용되는 테이퍼 롤러 베어링의 부품 중 하나인 케이지를 고유진동수 해석을 통해 동특성을 파악하고, 케이지 재료에 따른 동특성 해석과 각 열차가 최고속도로 주행한다는 가정 하에 최고속도에 해당하는 주파수의 고조파(Harmonics)를 계산하여 케이지에 공진현상이 발생하는지 살펴보았다.

동특성 해석에 관한 케이지의 여러 모델에 대하여 HyperWorks 14를 이용해 모델링하였고, ABAQUS 6.16을 이용해 모드해석을 수행하였다.

## 2. 동특성 해석

### 2.1 해석모델

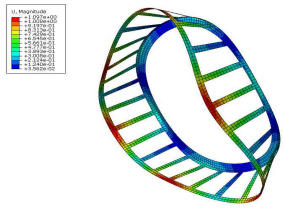
동특성 해석에 사용된 화물열차와 고속열차 테이퍼 롤러 베어링 케이지의 종류는 기존 Steel케이지와 경량화 된 Plastic케이지가 있고, [Fig.1]과 [Fig.2]는 각 케이지의 형상을 나타낸다.

[Fig. 1] Steel Cage

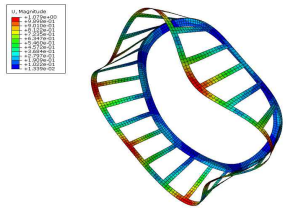
[Fig. 2] Plastic Cage

### 2.2 해석결과

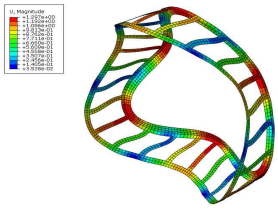
케이지의 동특성 해석을 하여 고유진동수를 낮은 주파스부터 20개를 구하였고, 그 중 모드 형상이 3방향, 혹은 4방향으로 일그러져 각 롤러들이 균일하게 정렬되어 일관된 회전 운동을 하지 못하고 서로 상대적인 운동을 하게 되어 베어링의 내구수명에 악영향을 미치는 모드형상을 파악하였다[1]. 화물열차 Steel Cage와 Plastic Cage에선 11, 13, 19mode에서 형상이 출력되고, 고속열차 Steel Cage와 Plastic Cage에선 11, 17, 19mode에서 형상이 출력되는 것을 볼 수 있다. 내구수명에 영향을 주는 모드형상은 각 항목 순서대로 [Fig.3,4,5]와 같다[2,3,4,5].



[Fig. 3] 11th mode shape that affects fatigue life-1. ($f_{11}$ = 855 Hz)



[Fig. 4] 13th mode shape that affects fatigue life-2. ($f_{13}$ = 1485 Hz)



[Fig. 5] 19th mode shape that affects fatigue life-3. ($f_{19}$ = 2151 Hz)

# 3. 베어링주파수

## 3.1 베어링 주파수 관련 이론식

베어링에 결함이 존재하는 경우 결함 부위의 주기적인 접촉으로 인해 충격력과 가진 주파수가 발생한다. 식 (1)은 베어링 주파수를 계산하기 위해 선행되어야하는 rpm에 관한 식이고, 식 (2)는 내륜 회전 주파수로 회전하는 베어링에서 여러 주파수의 기본이 되는 이론식이다. 식 (3)은 케이지 주파수, 식 (4)는 내륜 통과 주파수, 식 (5)는 외륜 통과 주파수, 식 (6)은 롤러자전 주파수를 구하는 이론식에 해당된다[6].

$$rpm = \frac{V}{D_w \pi} \text{ [rev/min]} \tag{1}$$

$$F_r = \frac{N}{60} \text{ [Hz]} \tag{2}$$

$$FTF = \frac{F_r}{2}\left(1-\left(\frac{d\cos\alpha}{D}\right)\right) \text{ [Hz]} \tag{3}$$

$$RPFI = \frac{F_r}{2} Z\left(1+\left(\frac{d\cos\alpha}{D}\right)\right) \text{ [Hz]} \tag{4}$$

$$RPFO = \frac{F_r}{2} Z\left(1-\left(\frac{d\cos\alpha}{D}\right)\right) \text{ [Hz]} \tag{5}$$

$$RSF = \frac{D}{2d} F_r\left(1-\left(\frac{d\cos\alpha}{D}\right)^2\right) \text{ [Hz]} \tag{6}$$

Where,

$V$ : Velocity (mm/s)
$D_w$ : Wheel diameter (mm)
$N$ : rpm (rev/min)
$d$ : Roller diameter (mm)
$D$ : Pitch diameter (mm)
$Z$ : Number of roller
$\alpha$ : Contact angle (deg)

## 3.2 베어링 주파수 계산

화물열차의 차륜경($D_w$)은 860 (mm)이고, 고속열차의 차륜경($D_w$)은 850 (mm)이며, 화물열차의 베어링 제원은 <Table 1>, 고속열차의 베어링 제원은 <Table 2>와 같다. 열차 종류에 따른 주파수는 거론된 이론식에 의해 계산되며 베어링에서 발생하는 여러 주파수 중 가운데 연구에서 관찰할 주파수는 *RPFI*와 *RPFO*로 <Table 3>과 같다.

<Table 1> Freight train bearing specification

| Tapered roller bearing | |
|---|---|
| Roller diameter [mm] | 19.2 |
| Pitch diameter [mm] | 180 |
| Number of roller [mm] | 24 |
| Contact angle [deg] | 20 |

<Table 2> High-speed train bearing specification

| Tapered roller bearing | |
|---|---|
| Roller diameter [mm] | 25.6 |
| Pitch diameter [mm] | 199 |
| Number of roller [mm] | 20 |
| Contact angle [deg] | 10 |

<Table 3> Frequency about train type

| Type | max. velocity, [km/h] | Frequency [Hz] | |
|---|---|---|---|
| Freight train | 120 | *RPFI* | 164.81 |
| | | *RPFO* | 134.78 |
| Hihg-speed train | 300 | *RPFI* | 349.79 |
| | | *RPFO* | 274.34 |

## 3.3 주파수 Harmonics

충격함수는 사각파와 파형이 비슷하며 주파수의 관점에서 보면 정수배로 주파수가 커질 경우 가진 주파수 보다는 크기가 작지만, 가진 주파수와 유사한 특성을 갖게 되는 것을 고조파(Harmonics)라고 한다[7].

<Table 4,5,6,7>은 최고속도로 정속주행 할 때 발생하는 주파수의 고조파(Harmonics)를 계산해 ±10%의 범위로 오차범위를 지정하여 나타낸 표이며, 화물열차의 경우 줄여 F.t, 고속열차의 경우 줄여 H.s.t로 표기하였다.

<Table 4> *RPFI* frequency range of F.t

| | -10% | *RPFI* [Hz[ | +10% |
|---|---|---|---|
| Fundamental | 148.33 | 164.81 | 181.29 |
| ×2 | 296.65 | 329.61 | 362.58 |
| ×3 | 444.8 | 494.42 | 543.86 |
| ×4 | 593.31 | 659.23 | 725.15 |

<Table 5> *RPFO* frequency range of F.t

| | -10% | *RPFO* [Hz[ | +10% |
|---|---|---|---|
| Fundamental | 121.30 | 134.78 | 148.26 |
| ×2 | 242.60 | 296.56 | 296.51 |
| ×3 | 363.90 | 404.34 | 444.77 |
| ×4 | 485.20 | 539.11 | 593.03 |

<Table 6> *RPFI* frequency range of H.s.t

| | -10% | *FPRI* [Hz[ | +10% |
|---|---|---|---|
| Fundamental | 314.81 | 349.79 | 384.77 |
| ×2 | 629.63 | 699.59 | 769.54 |
| ×3 | 944.44 | 1049.38 | 1154.32 |
| ×4 | 1259.25 | 1399.17 | 1539.09 |

<Table 7> *RPFO* frequency range of H.s.t

| | -10% | *FPRI* [Hz[ | +10% |
|---|---|---|---|
| Fundamental | 246.91 | 274.34 | 301.78 |
| ×2 | 493.82 | 548.69 | 603.56 |
| ×3 | 740.73 | 823.03 | 905.34 |
| ×4 | 987.64 | 1097.38 | 1207.11 |

# 4. 공진 현상 분석

## 4.1 공진 영향분석 목적

공진은 구조물에 발생하게 되면 위험한 결과를 초래하는 주의해야 할 요소 중 하나이며, 구조물의 공진이 예상되면 가진 주파수를 변경하거나 구조물의 고유진동수를 변경하여 공진현상을 회피할 필요가 있다.

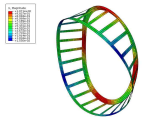
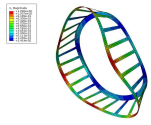
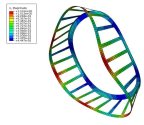
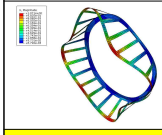
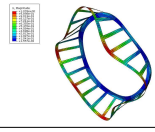
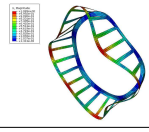
열차가 최고속도로 정속주행 한다는 가정하고, 변수들 중 현실적으로 치수변경이 쉬운 두께에 ±1t의 변화를 줘서 두께에 따른 케이지의 고유진동수를 측정하고 모드형상을 관찰하여 공진범위(±10%)를 피하기 위해 얼마큼의 두께를 선정하면 적당한지 파악하는 것을 연구목적으로 한다.

## 4.2 두께에 따른 영향분석

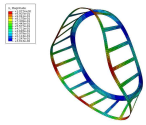
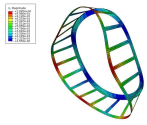
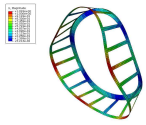
각 표에 음영처리 된 것은 <Table 4-7>에 나타난 공진범위를 벗어난 것으로, 화물열차 Steel케이지의 경우 공진범위 안에 내구수명에 악영향을 주는 모드형상이 관찰되지 않았고, <Table 8>은 화물열차 Plastic케이지의 영향분석 결과이며 11mode에서 3t로 설계할 경우 공진범위를 벗어나는 것을 관찰할 수 있고, 13mode에서는 3t에서 공진범위를 벗어나는 것을 관찰할 수 있다.

<Table 9>는 고속열차 Steel케이지의 영향분석 결과이며 11mode에서 내구수명에 악영향을 주는 모드가 관찰되었고, 5t로 설계할 경우 공진범위를 벗어나는 것을 볼 수 있다. <Table 10>은 고속열차 Plastic케이지의 영향분석 결과로 11, 17mode가 공진범위에 해당하고 11mode에서는 5t로, 17mode의 5t는 공진범위를 벗어나진 못했지만 모드형상이 내구수명에 악영향을 주지 않는 형상으로 변화한 것을 볼 수 있다. 표에 나타내어진 19mode는 영향분석 결과 공진범위를 벗어나지 못했고, 그에 따라 좀 더 세분화된 연구가 필요하다고 사료된다.

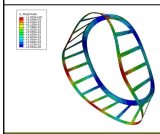
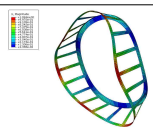
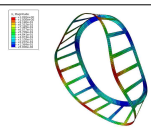
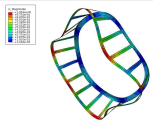
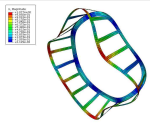
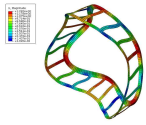
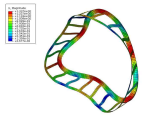
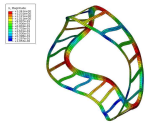
<Table 8> Plastic cage impact analysis of F.t

| 3t | 4t | 5t |
|---|---|---|
| 11mode | | |
|  |  |  |
| 258.30 [Hz] | 299.46 [Hz] | 350.13 [Hz] |
| 13mode | | |
|  |  |  |
| 412.89 [Hz] | 521.43 [Hz] | 619.75 [Hz] |

<Table 9> Steel cage impact analysis of H.s.t

| 5t | 6t | 7t |
|---|---|---|
| 11mode | | |
|  |  |  |
| 834.50 [Hz] | 944.54 [Hz] | 1047.1 [Hz] |

<Table 10> Plastic cage impact analysis of H.s.t

| 5t | 6t | 7t |
|---|---|---|
| 11mode | | |
|  |  |  |
| 292.64 [Hz] | 331.71 [Hz] | 368.18 [Hz] |
| 17mode | | |
| |  |  |
| 579.85 [Hz] | 589.80 [Hz] | 661.68 [Hz] |
| 19mode | | |
|  |  |  |
| 672.99 [Hz] | 683.29 [Hz] | 693.99 [Hz] |

## 5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 화물열차와 고속열차에 장착되는 테이퍼 롤러 베어링 케이지를 컴퓨터시뮬레이션을 이용해 고유진동수 해석을 통한 케이지의 동특성에 관한 연구를 진행하였다.

동특성 해석 결과, 베어링을 선정 할 때 가장 중요시 되는 내구수명에 악영향을 주는 모드형상을 관찰할 수 있었고, 열차가 최고속도로 정속주행 한다는 가정 하에 가진 주파수의 성분을 계산하고 다른 설계변수보다 비교적 가변이 쉬운 두께를 변화시키며 고유진동수의 특성을 관찰하였다.

영향분석 결과, 화물열차 Plastic cage의 경우 종합적으로 3t와 5t에서 공진범위를 벗어났고, 제품이 경량화 추세에 따라 Steel cage에서 Plastic cage로 변하고 있으므로 3t로 설계하는 것이 효율적이라 판단된다. 고속열차 Steel cage의 경우 5t에서 공진범위를 벗어난 것을 영향분석 결과로 알 수 있고, 고속열차 Plastic cage의 경우 11, 17mode를 종합하면 5t와 7t에서 공진범위를 벗어나며 화물열차 Plastic cage와 동일하게 경량화 추세에 따라 5t로 설계하는 것이 효율적이다. 내구수명에 악영향을 주는 형상에 속하는 19mode는 영향분석 결과 공진범위를 벗어나지 못했고 그에 따라 좀 더 세분화된 연구가 필요하다고 판단된다.

## REFERENCES


[1] 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, Vol. 40, No. 6, pp. 595-602, 2016.

[2] V. C. Tong, "Characteristics of Tapered Roller Bearing Subjected to Combined Radial and Moments Loads", Int. J. of Precision Engineering and Manufacturing -Green Technology, Vol. 1, No. 4, pp. 323-328, 2014.

[3] B. Warda, "Fatigue Life Prediction of the Radial Roller Bearing with the Correction of Roller Generators", Int. J. of Mechanical Sciences, Vol. 89, pp. 299-310, 2014.

[4] A. Selvaraj, "Experimental Analysis of Factors Influencing the Cage Slip in Cylindrical Roller Bearing", Int. J. of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 53, pp. 635-644, 2011.

[5] R. H. Jeong, "Study on Detection Technique for Outer-race Fault of the Ball Bearing in Rotary Machinery." Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 24, No.3, pp. 1-6, 2010.

[6] I. Bercea, "Analysis of Double-Row Tapered Roller Bearings", Tribology Transactions, Vol. 46, No. 2, pp. 228-239, 2003.

[7] J. Ferreira, "An Investigation of Rail Bearing Reliability under Real Conditions of Use", Engineering Failure Analysis, Vol. 10, pp. 745-758, 2003.

[8] S. Cretu, “A Dynamic Analysis of Tapered Roller Bearing under Fully Flooded Conditions”, Wear, Vol. 188, pp. 1-18, 1995.
[9] ABAQUS Analysis User’s Manual, Volume Ⅱ : Analysis, Ver.6.8(2008).
[10] ABAQUS Analysis User’s Manual, Volume Ⅳ : Element , Ver.6.8(2008).
[11] ABAQUS Example Problems Manual, Volume Ⅰ : Static and Dynamic Analyses, Version 6.8(2008).
[12] L. Meirovitch, Elements of Vibration Analysis, McGraw-Hill, Inc., 1986.
[13] S. Rao, Mechanical Vibration (fourth edition), Pearson Education Inc., 2005.
[14] T. A. Harris, Rolling Bearing Analysis, John Wiley & Sons, 1991.
[15] http://www.rfdh.com/bas_rf/begin/harmonic.htm

## 저자소개

허 준 영(Jun-Young Heo) [정회원]

- 2015년 2월 : 호서대학교 공과대학 자동차공학과 (자동차공학학사)
- 2017년 2월 : 호서대학교 일반대학원 기계공학과 (자동차공학석사)

<관심분야> : 롤러 베어링, 기계결함, 동특성 해석, 소음·진동

박 장 우(Jang-Woo Park) [정회원]

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

<관심분야> : 자동차구조해석, 자동차소음진동, 자동차서비스