

자동변속기에서의 롤러 베어링 결함 검출에 관한 연구

A Study on the Fault Detection of Roller Bearings in the Auto-Transmission

박기호 † · 정상진 * · 위혁 * · 이국선 ** · 조성호 **

Ki-ho Park, Sang-jin Jung, Hyuk Wee, Gook-sun Lee, Seong-ho Cho

Key Words : Auto-Transmission(자동변속기), Needle Roller Bearing(니들 롤러 베어링), Fault Detection(결함 검출), Early Fault(조기 결함), Vibration Characteristics(진동특성)

ABSTRACT

The roller bearings play an important role not only sustain radial or axial load of system, but carry out a rotatory movement as a various operating conditions. They happen that incipient faults which were caused by excessive load, manufacturing or assembling process's errors and many other reasons are created. The bearing faults make noise and vibration by a continuous collision of rotatory components, which can lower the quality and stability of auto-transmission. Therefore, it is important to detect the early fault as soon as possible. This paper presents a detecting method for the improvement in quality by developing the program which can be used to analyze and predict the vibrational characteristics caused by roller bearing faults. We completed development of the inspection system of vibration by apping the most efficient detecting methods and verified the system's reliability through experiments.

1. 서론

자동변속기의 주요 기능은 엔진에서 발생된 동력을 차량의 다양한 주행조건에 부응하기 위해서 적절한 회전력과 회전수로 변환시켜서 타이어로 구동력을 전달시켜주는 동력전달 장치이다. 자동변속기 회전 부품은 동력전달과 회전축 지지 등의 역할을 담당하는 기어, 베어링, 회전축 등으로 구성된다. 특히 베어링은 회전축을 일정한 위치에 고정시키고 축의 자중과 축에 걸리는 하중을 지지하면서 회전운동을 하는 기계요소로 구동 조건(operating condition)에 따라 크기 및 재질, 종류, 윤활 조건 등이 다른 다양한 베어링이 존재한다. 여러 종류의 베어링들 중 볼이나 롤러가 내륜과 외륜 사이에서 회전운동을 하는 베어링을 구름 베

어링(rolling bearing)이라 한다. 구름베어링은 그 구조상 외륜과 내륜 사이의 회전 요소들이 서로 접촉하여 하중을 지지하므로 과도한 하중이 작용하거나 이상 운전 조건 등에 의해 베어링을 구성하고 있는 요소들(내륜, 외륜 및 볼/롤러)에서 결함이 발생할 수 있다. 결함을 가진 베어링의 소음/진동 신호는 결함을 지닌 링의 표면과 매끄럽지 않은 표면을 지나는 볼이나 롤러의 연속적인 충돌에 의해 발생하여, 전체시스템의 신뢰성을 저하시키는 중요한 요인이 된다.⁽¹⁾

베어링의 진동 신호의 분석에 의한 결함진단 방법은 신호 처리 기술의 진보에 따라 많은 연구가 진행되어 왔다. 이는 초기의 결함 추적이 가능하며, 구조물의 외부에 센서를 부착하므로 기계를 중단하거나 해체시킬 필요가 없는 이점에 의해 다양한 분야에서 연구되고 있다.^{(2)~(7)}

베어링 결함을 검출하는 방법은 신호 처리 기술에 따라 시간영역, 주파수 영역, 시간-주파수 영역, 웨스트럼(cepstrum)영역에서 분석하는 방법 등으로 나눌 수 있다. 하지만 모든 방법이 조기 결함을 검출하는데 효과적인 것은 아니며 각각의 영역에서의 분석방법은 장단점을 갖고 있다.

본 연구에서는 니들 롤러 베어링(needle roller bearing)을 대상으로 상대 접촉면인 케이스 부에 인위적인 결함을

† 교신저자 ; 정회원, 현대파워텍 기술연구소
E-mail : vibman@hyundai-powertech.co.kr
Tel : (031) 369-5281, Fax : (031) 369-5222

* 현대파워텍 기술연구소

** 현대파워텍 기술연구소

내어 샘플을 제작하였으며, 그때 발생하는 소음/진동 신호를 이론적으로 계산하여, 결합 주파수 성분과 비교 분석하였다. 또한, 소음진동 측정/분석 장비를 이용한 IN-Line 소음검사 시스템(EOL, end of Line)에 적용하여, 베어링의 결합 검출 결과의 신뢰성을 검증하였다.

2. 베어링 결합 주파수 검출

2.1 이론적 고찰

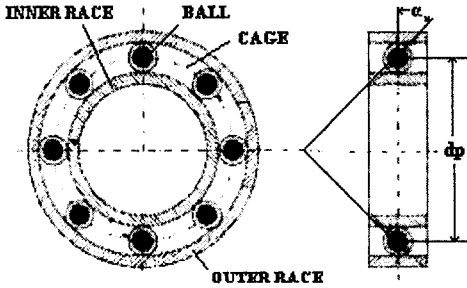


Fig.1 The structure of a rolling ball bearing

일반적인 구름 베어링은 Fig.1과 같이 내륜과 외륜의 2개의 링(ring or race)과 구름요소인 볼이나 롤러가 있으며, 회전 시 롤러의 간격을 유지시켜주는 케이지로 구성

$$f_{ir} = 0.5K \frac{N}{60} \left[1 + \left(\frac{d_r}{d_p} \cos \alpha \right) \right] \quad (1)$$

$$f_{or} = 0.5K \frac{N}{60} \left[1 - \left(\frac{d_r}{d_p} \cos \alpha \right) \right] \quad (2)$$

$$f_{bf} = \frac{N}{60} \frac{d_r}{d_p} \left[1 - \left(\frac{d_r}{d_p} \cos \alpha \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$f_c = 0.5 \frac{N}{60} \left[1 - \left(\frac{d_r}{d_p} \cos \alpha \right) \right] \quad (4)$$

f_{ir} : 내륜 결합의 주파수(Hz)

f_{or} : 외륜 결합의 주파수(Hz)

f_{bf} : 볼러 결합의 주파수(Hz)

f_c : 케이지 결합의 주파수(Hz)

N : 회전축의 속도(rpm)

K : 롤러의 개수

d_r : 롤러의 직경(mm)

d_p : 베어링의 피치 직경(mm)

α : 접촉각(radian)

되어 있다. 베어링 구성요소의 결합은 베어링 회전 시 소음 진동을 유발시키며, 결합 주파수는 결합 요소 및 베어링의 기하학적인 치수에 따라 식(1)~(4)과 같이 유도 할 수 있다

2.2 실험에 사용된 베어링

본 논문에서 실험에 사용된 베어링은 엔진에서 발생한 동력을 차동기어(differential drive gear)에 전달하는 회전축(output shaft)에 사용되며, 회전축을 일정한 위치에 고정시키며 하중을 지지하는 니들롤러 베어링이다. Fig.2와 같이 외륜, 니들롤러와 케이지 어셈블리(assembly), 탈착식 내륜으로 구성되어 있으며 주요 제원(HK 2020)은 Table 1과 같다.

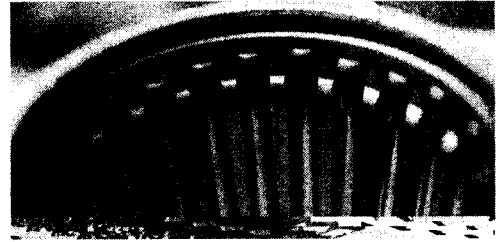


Fig.2 The photograph of test needle roller bearing

Table 1 The specification of test needle roller bearing

Specification	Size
Pitch diameter(mm) : d_p	20
Width(mm)	20
Roller diameter(mm) : d_r	2
Number of balls(e.a) : K	22
Contact angle(degree) : α	0

3. 실험 개요

3.1 결합 위치 선정

실험 대상 니들롤러 베어링은 자동변속기 케이스 부에 열간 압입으로 Fig.3과 같이 조립이 된다. 베어링의 내륜 또는 볼러의 결합이 존재할 때 회전축에 따라 볼러의 주기적인 충격으로 외륜을 가진시킨다. 따라서 니들 롤러 베어링 압입 시 발생할 수 있는 공구와 케이스와의 간섭, 외륜의 스크래치 그리고 치수상의 상이등과 같은 결합의 발생 빈도가 높을 것으로 판단되어 본 논문에서는 베어링의 외륜과 접촉하고 있는 케이스 안쪽 부에 인위적으로 Fig.4와 같이 결합(스크래치)을 주는 방법으로 불량 샘플을 제작하였다.

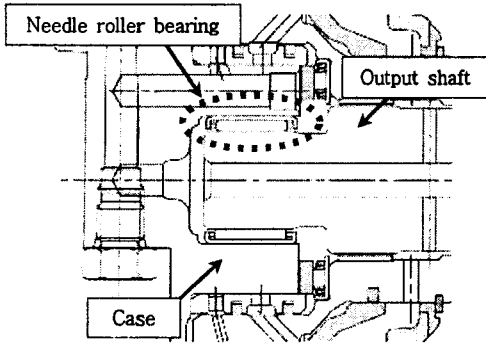


Fig.3 The partial cross section of auto-transmission

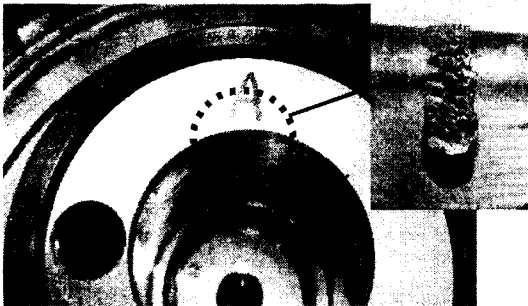


Fig.4 The photograph of scratch defect on case inner part

3.2 베어링 결함 주파수

Table 1에서 제시된 니들롤러 베어링의 제원과 식 (1)~(5)의 결함부위에 따른 특성 주파수 식을 사용하여 결함 주파수 성분을 Table 2와 같이 인풋 회전축의 속도와 동기화된 오더(order) 성분으로 계산하였다.

$$order = \frac{f}{N/60} \quad (5)$$

where f : 결함 주파수(Hz)

Table 2 The characteristic frequencies(order) of test needle roller bearing

	Fault position	Rotating Speed ratio (Output shaft/Input shaft)	Order
4 shift	Outer	0.892	8.8
5 shift	race	1.224	12.1

3.3 실험 장치 및 측정 방법

실험장치는 대상 실내소음 및 진동신호 측정을 위해 간이 시험실과 IN-Line 소음검사 시스템을 구성하였다.

(1) 대상 시험실

흡음률 개선을 위해 벽면을 다공 판으로 제작된 대상 시험실(Fig.5)에서 소음을 측정하였으며, 측정위치는 자동변속기 50cm 상단에서 마이크로폰을 이용하였다. 기어는 4단과 5단에서 가속(1,000~4,000rpm) 조건에서 측정하였다. 입력모터는 토크제어를 출력모터는 속도 제어 방식으로 구성하였다.

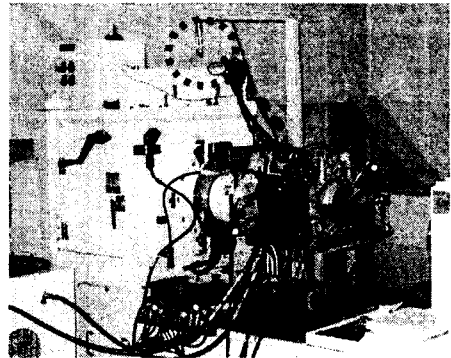


Fig.5 The experimental equipment for bearing noise test of the auto-transmission

(2) IN-Line 소음검사 시스템

Fig.6과 같이 가속계를 Flange에 부착하는 간접 부착 식은 직접 부착하는 방식에 비해 진동 레벨은 낮지만, 케이스 형상 변경 시 진동특성 및 크기 변화에 대한 영향이 적은 장점을 가지고 있다.(Fig.7) IN-Line 소음검사 시스템에서는 자동변속기의 기종, 시험패턴, 시리얼 번호, 회전속도 및 기어 변속 단계에 대한 정보를 PLC(programmable logic controller) 프로그램을 통해 전송 받는다. 또한, 3축가속도 센서를 플랜지에 설치하여 가장 뚜렷하고 건전한 축 방향 신호를 취득하였다. 기어는 5단에서 2500rpm 고정으로 측정하였으며, 입력모터는 속도제어를 출력모터는 토크제어 방식으로 구성하였다.

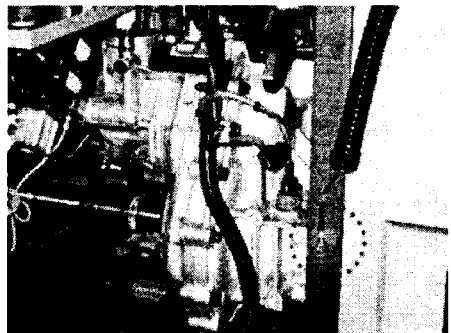
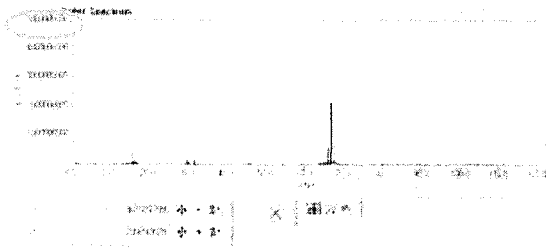
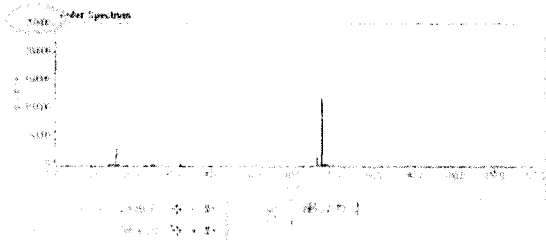


Fig.6 The 3-axial accelerometer for bearing vibration test of in-line system



(a) The direct attachment



(b) The indirect attachment(flange)

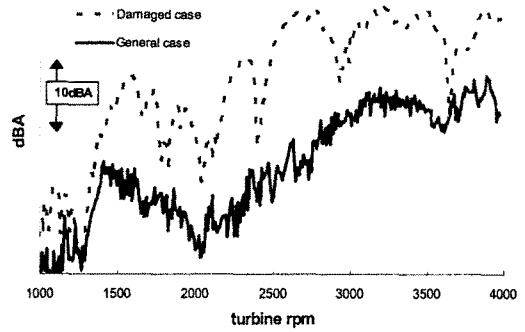
Fig.7 The test result by attachment methods of accelerometer

3.4 실험 결과

실험대상 베어링은 모두 정상상태이며, 인위적으로 케이스결함(스크래치)을 조각하여 불량샘플(A~C)을 제작하였다. 또한, 차량에서의 청감 평가를 통해 소음 발생을 확인하였다.

(1) 대상 시험실

Table 2에서 이론적으로 계산된 베어링 결함위치에 따른 결함 오더 성분을 이용하여 4단(8.8order) 및 5단(12.1order) 케이스결함에 의해 발생한 니들 톨러 베어링 소음 레벨은 Fig.8과 같이 나타낼 수 있다. 일반 양산품과



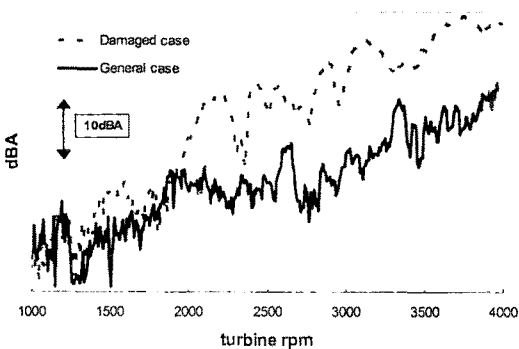
(b) 5shift, the outer race

Fig.8 The test result of the bearing noise by the damaged case('A' sample, acceleration)

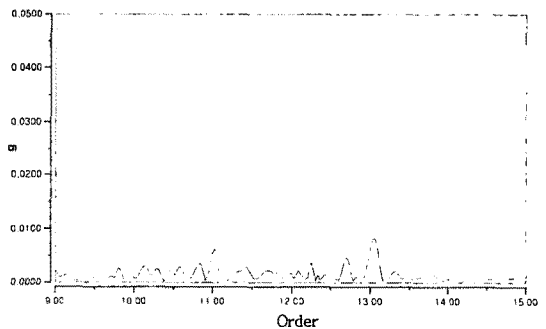
'A' 불량 sample과의 소음 레벨은 전 구간에서 4단에서는 약 10dBA, 5단에서는 약 15dBA 이상 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이것은 외륜과 접촉하고 있는 케이스 안쪽 부의 결함이 톨러 회전속도와 동기화되어 충격진동 및 소음으로 발생한 것으로 판단된다. 따라서 기구학적 조건에 의해 계산된 결함 주파수와 실제 측정된 결과와 거의 일치하고 있음을 대상시험을 통해 검증하였다.

(2) IN-Line 소음검사 시스템

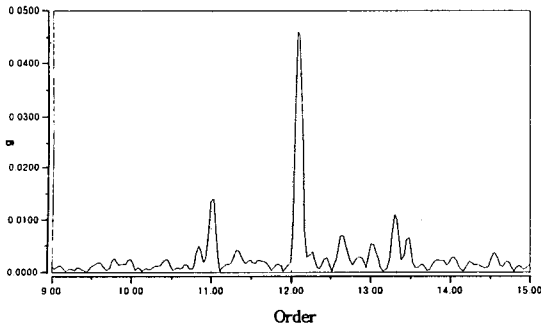
외륜 결함에 의해 발생된 축 방향 진동 주파수 성분을 회전속도와 동기화된 오더 스펙트럼(Order spectrum)으로 나타내면 Fig.9와 같이 5단(12.1order)에서 일반 양산품과 확연하게 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 또한, 동일한 시험 조건에서 일반 양산품 145대를 측정하여 비교 분석한 결과 'A~C' sample의 진동 레벨이 상대적으로 매우 높게 나오는 것을 Fig.10에서 확인할 수 있다. 따라서 IN-Line 소음검사 시스템을 이용하여 검출 결과의 신뢰성을 검증하였으며, 베어링 결함에 대한 출하 전 양호품/불량품 판정이 가능할 것으로 판단된다.



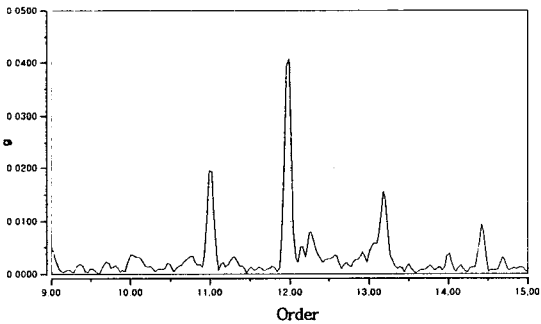
(a) 4shift, the outer race



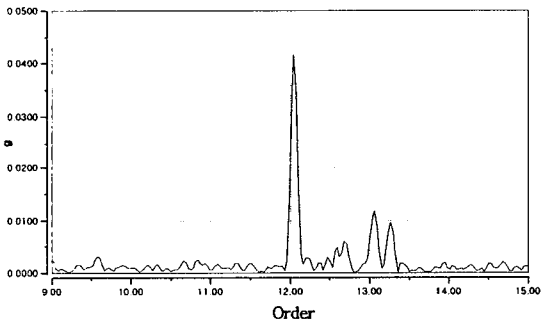
(a) General sample



(b) 'A' sample



(c) 'B' sample



(d) 'C' sample

Fig.9 The test result of the bearing vibration with detected cases(order spectrum)

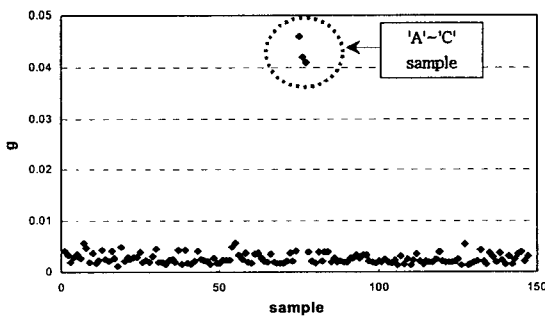


Fig.10 The in-line test result of mass production & 'A'~'C' sample(5shift, 12.2order)

4. 결론

본 연구에서는 자동변속기 니들 롤러 베어링의 결함 검출에 대한 이론적 고찰과 실험적 검증을 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 자동변속기의 니들 롤러 베어링을 대상으로 상대 접촉면인 케이스 부에 인위적인 결함을 내어 샘플을 제작하였으며 그때 발생하는 소음/진동 신호를 이론적으로 계산된 결함 주파수 성분과 비교 분석하였다.

(2) 소음진동 측정/분석 장비를 이용한 IN-Line 소음검사 시스템에 적용하여 베어링의 결함 검출 결과의 신뢰성을 검증하였다.

(3) 따라서, 자동변속기의 베어링에서 발생하는 소음/진동의 결함을 출하 전에 예측하여 검출함으로써 차량의 상품성을 높이고 품질을 향상시키는데 매우 효과적이며, 활용 가치가 높을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- (1) Johannes Brandlein and Paul Eschmann, 1999, "Ball and Roller Bearings", 1999 Wiley, pp.92~97, 421~458
- (2) P. D. McFadden, J. D. Smith, 1984, "Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing, " Journal of Sound and Vibration, vol.96, pp.69~82
- (3) J. I. Taylor, 1980, "Identification of bearing Defects by spectral Analysis, "Journal of Mechanical Design, April, Vol.102, pp.199~204
- (4) Park, C. S, Choi, Y. C, Kim, Y. H and Ko, E. S, 2002, "Bearing ultra-fine fault detection method and application", Proceedings of the KSNVE Autumn Annual Conference, pp. 1093~1096
- (5) Yoo, J. H, Yoon, J. H, Kim, S. K and Lee, J. M, 1995, "Automatic Diagnosis of Defects in Roller Element Bearings", Transaction of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering , Vol. 5, No. 3, pp. 353~360
- (6) Kim, H. S, Lee, S. K, 2002, "Bearing Fault Diagnostics in a Gearbox", Proceedings of the KSNVE Autumn Annual Conference, pp.611~616
- (7) Park, K. H, Jung, S. J, Wee, H, Kim, J. S, Han, K. S and Kim, M. H, 2008, "A study on the Fault Detection of Auto-transmission according to Gear Damage", Transaction of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering , Vol. 18, No. 1, pp. 47~56