

자동차 변속기용 구름베어링의 파손현상 고찰(I)

현준수*, 문호근(FAG한화베어링), 박태조(경상대, 항공기부품기술연구센터)

A Study on the Rolling Bearing Failure Mode of Automotive Transmission(I)

J.S. Hyun*, H.K. Moon(FAG Hanwha Bearing), T.J. Park(Gyeongsang Nat. Univ.)

Abstract

This paper shows the failure(wear) phenomena of automotive transmission bearings and investigate their characteristics. It was found that the wear mechanism was mainly abrasive wear by the presence of particles in the gear box and the balls was weared more severely than the other tribological contacting parts. The wear of balls alter the bearing contact angle and load ratings, and finally it cause the bearing failure. With close examination of the failed bearing, various countermeasures could be suggested.

Keywords : Transmission(변속기), Gear box(기어박스), Ball bearing(볼 베어링), Bearing failure(베어링 파손), Particle(이물질), Abrasive wear(연삭마멸)

1. 서론

자동차의 변속기(Transmission)는 엔진의 출력을 바퀴로 전달시켜 자동차를 움직이게 하는 기능은 물론 자동차가 엔진의 출력에 맞게 운행될 수 있게 하여 정속한 주행을 위한 필수적인 장치이다. 따라서, 자동차의 발달과 더불어 변속기도 지속적으로 발전을 거듭하고 있다. 변속기는 수동(Manual) 변속기와 자동(Automatic) 변속기로 나누어지며, 보통 수동인 경우보다 자동 변속기의 구조가 복잡하고 부품의 수도 많다. 자동차의 변속기는 Fig.1에 나타난 것과 같이 많은 종류의 기어(Gear), 축(Shaft)과 함께 이들을 지지하고 원활한 상

대운동이 되게 하는 베어링(Bearing) 등으로 구성되어 있다.

이와 같이 변속기에 사용되는 많은 수의 상대운동을 하는 부품의 윤활을 위하여 윤활유(기어오일)가 기어박스(Gear box)에 채워져 있다. 한편, 변속기에서 사용되는 윤활유는 점착응력이 가장 높은 기어에 적합하도록 개발되기 때문에 일반 윤활유에 비하여 상대적으로 점도가 높다. 특히, 기어 박스는 내부구조가 복잡하여 완벽한 세척이 어려울 뿐만 아니라 보통 구성부품으로부터의 마멸분(Wear debris) 등으로 인하여 기어오일에는 많은 이물질이 함유된다. 자동차용 기어박스에는 이물질의 제거를 위하여 여러 가지 장치를 설치하지만 완전히

제거하기란 사실상 불가능하다. 이러한 원인에 기인하여 기어박스에 설치된 구름 베어링의 수명이 이론수명보다 훨씬 짧으므로 이의 수명을 향상시키는 것은 실질적으로 중요한 연구과제 중의 하나이다.

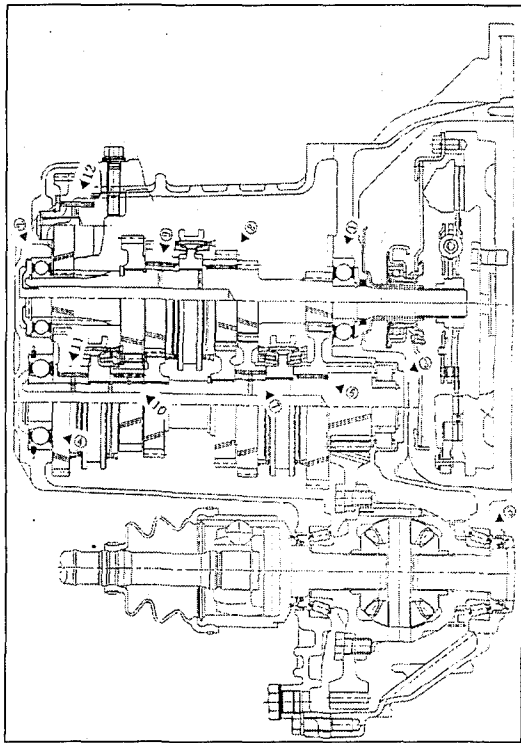


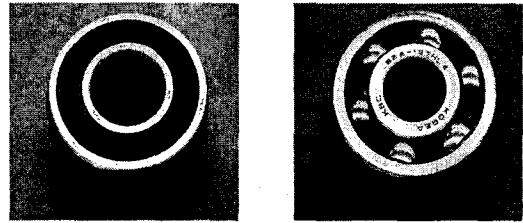
Fig. 1. 자동차용 수동 변속기의 개략도.

본 논문에서는 국산차량의 수동변속기에 사용되었던 베어링을 수거하여 분석하고 이의 마멸기구를 조사하고자 한다. 이러한 결과는 향후에 개발되는 변속기 및 이에 사용되는 베어링의 신뢰성 향상과 함께 베어링의 개발, 설계 및 성능시험에 크게 기여할 것으로 기대된다.

2. 변속기용 베어링의 파손형태

본 논문에서 조사할 베어링은 승용차 및 소형트럭의 변속기에 사용된 깊은 홈 볼

베어링(Deep grooved ball bearing)으로 Fig.2 (a), (b)에 각각 나타낸 것과 같이 고무시일(Rubber seal)이 장착된 것과 고무시일이 없는 것의 2가지 종류이다. 조사에 사용된 베어링은 이물질에 강한 특수 열처리 사양으로 개발된 5개의 고무시일 장착형과 27개의 오픈형으로 일정기간동안 사용된 후 교체된 제품이다.



(a) 고무시일장착형 (b) 오픈형

Fig. 2. 변속기에 사용되는 볼 베어링.

Fig.3은 변속기에 사용된 베어링에서 내륜부가 파손된 형태를 나타낸 그림으로 국부적인 플레이킹(Flaking) 단계를 지나 전체적으로 플레이킹되었음을 알 수 있다. 특히, 파손이 궤도면의 한쪽으로 집중된 것은 편축하중이 작용하는 사용조건으로 판단된다. 실제로 이 베어링은 운전중에 한쪽방향의 힘을 계속 받게되는 Fig.1의 ① 위치에 설치되어 있었다. 또한, (가)면에 비하여 아래의 (나)면이 얇아져 있으며 이는 베어링의 작동과 관련되어 발생한 마멸차이로 생각된다. 한편, 베어링의 외륜과 볼의 파손형태는 Fig.4와 Fig.5에 각각 나타내었다. 외륜에서는 내륜에서와 동일하게 초기 플레이킹 파손 형태를 보이고 있다. 이와는 달리 볼에서는 전형적인 표면 굽힘 파손 형태이다. 즉, 볼의 파손은 많은 미끄럼 흔적(Skid mark)과 입자에 의한 전형적인 연삭마멸(Abrasive wear) 형태를 나타내고 있다.



Fig. 3. 파손된 베어링의 내륜.

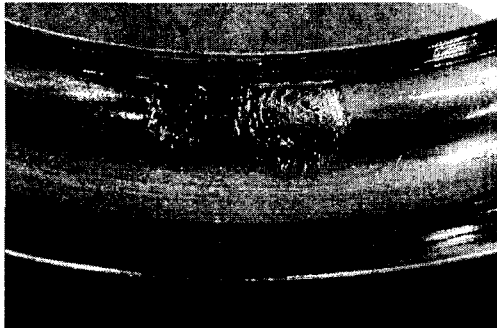


Fig. 4. 파손된 베어링의 외륜.



Fig. 5. 파손된 베어링의 볼.

베어링 구성부품의 마멸정도를 확인하기 위해서 Table 1에 치수변화와 마멸량을 측정된 결과를 나타내었다. 반경방향의 치수 변화는 무시할 정도이지만 내륜은 143 μm , 볼은 221 μm 로 아주 크게 변화하였으며, 축방향으로는 외륜이 117 μm 인 반면에 내륜은

518 μm 으로 내륜의 치수가 보다 많이 변화하였다. 총마멸량을 평가하기 위하여 질량 감소를 측정된 결과 외륜은 0.54g, 내륜은 1.1g, 볼은 3.2g 정도씩 각각 감소하였다. 이상의 결과에서 치수변화는 내륜의 축방향으로 가장 크게 되며, 마멸량은 볼 > 내륜 > 외륜의 순서임을 알 수 있다.

Table 1. 부품별 마멸정도.

측정 부품	치수변화(μm)		마멸량(mg)
	반경방향	축방향	
외 륜	4	117	544
내 륜	-143	518	1112
볼	-221	-221	3228

3. 베어링의 마멸과 접촉각

이물질에 의한 베어링의 마멸은 볼과 궤도륜 사이에 이것이 끼워진 상태에서 시작 된다고 생각할 수 있다. 즉, 이 상태에서 볼이 운동하면 볼은 이물질을 타고 넘어가 게 되고, 이 과정동안 이물질과의 접촉에 의하여 궤도륜과 볼에는 국부적으로 큰 응 력이 작용하게 된다. 이때, 궤도륜에서 보 다 볼에 큰 응력이 일반적으로 작용하는 것은 Fig.6에 나타낸 것과 같이 볼의 접촉 점 주위를 둘러싸는 재료의 량이 궤도륜에 서 보다 작기 때문이다. 이 결과, 이러한 접촉상태에서 궤도륜보다 볼에서의 입자탈 락이 빠르게 되므로 마멸량이 많게 된다.

한편, 베어링의 접촉상태는 볼과 궤도륜 의 치수와 형상에 의해서 결정된다. 즉, Fig.7에 나타낸 것과 같이 볼 베어링에서의 접촉각(Contact angle) α 는 반경방향 틈새 P_d 와 다음과 같은 관계가 있다.

$$\alpha = \cos^{-1}\left(1 - \frac{P_d}{2A}\right) \quad (1)$$

여기서,

$$P_d = d_o - d_i - 2D \quad (2)$$

$$A = r_o - r_i - D \quad (3)$$

여기서, D 는 볼의 직경이다.

일반적으로 A 값은 P_d 보다 수배이상 크다. 즉, 볼의 크기변화가 접촉각에 미치는 효과는 궤도륜의 반경방향 치수변화에 의한 접촉각의 변화보다 매우 크며 대략 2배에 가깝다.

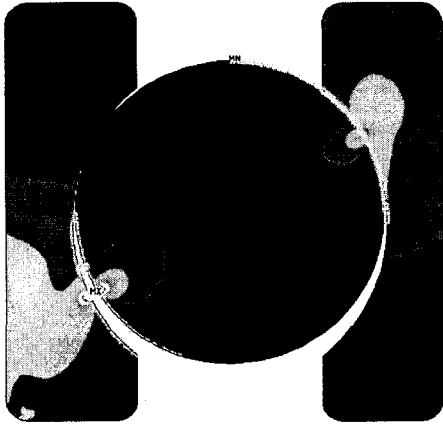


Fig. 6. 전동체와 궤도륜 사이의 이물질에 의한 응력발생

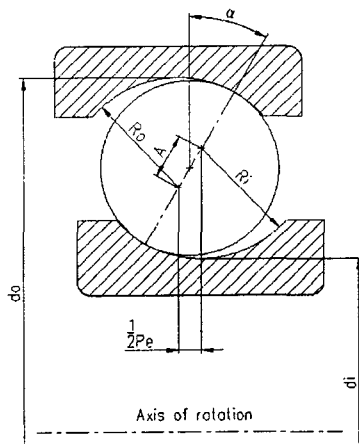


Fig. 7. 볼 베어링의 접촉각.

4. 변속기용 베어링의 마멸 기구

이물질에 의하여 베어링에서 마멸이 발생하면 접촉하는 부품의 치수감소가 일어나며 볼 > 내륜 > 외륜의 순서로 그 정도가 변한다. 이후 베어링의 접촉각은 증가하므로 내륜과 외륜의 축방향 응력을 받는 한쪽 부분에는 계속적으로 마멸이 발생하며 이때 볼의 마멸도 계속된다. 이런 과정이 지속되면 베어링은 파손이 일어나고 더욱 심화되면 축방향으로 상당량 움직여 하중방향이 바뀌면서 소음과 유격 등이 발생한다. 또한, 베어링의 턱면을 손상시켜 베어링의 축방향 부하능력을 작게 만들어 총체적으로는 베어링이 파손되는 과정을 촉진시킨다.

이물질에 의해서 발생하는 굽힘 마멸로 베어링이 손상되는 현상은 Fig.6에 나타난 것과 같이 볼과 궤도륜 사이에 이물질이 끼이게 되고 볼이 이를 타고 넘어가기 때문이다. 볼이 이물질을 타고 넘어갈 때 이물질을 사이에 두고 볼과 궤도륜에는 응력상태가 매우 높게 되며, 최대전단응력 보다도 크게 되면 표면이 굽히거나 떨어져나가는 현상이 발생한다. 이런 것이 이물질에 의한 굽힘 마멸이며, 이 현상은 그림에 나타난 것과 같이 동일 조건에서 궤도륜보다 볼에 큰 응력이 걸리므로 볼의 파손이 다른 부품에 비해 많은 것이 당연하다.

본 논문에서 조사된 베어링 중에는 초기 0.02mm정도였던 반경방향 틈새가 0.5mm로, 축방향 이동량은 무려 1.8mm인 제품이 확인되었다. 베어링이 이 정도로 마멸되면 위치결정능력을 상실하게되어 심한 흔들림이 발생함과 아울러 베어링에 의해서 위치가 결정되는 주변의 시일, 기어 등에서의 이상작동이 일어나기 때문에 결과적으로는 베어링과 관련된 모든 시스템이 완전하게 파손되게 된다.

5. 베어링의 수명에측

본 논문과 같은 내용을 수명의 관점에서 분석하면 다음과 같다. 임의의 하중과 회전 조건에 대한 베어링의 이론수명은 다음 식으로부터 결정된다.

$$L = \left(\frac{C}{P} \right)^3 \quad (4)$$

여기서, C 는 베어링의 기본 동정격하중이고, P 는 외부에서 주어지는 하중으로 계산되는 동가하중이다. 한편, 기본 동정격하중은 다음의 식(5)에 따라서 계산한다.

$$C = f_c (i \cos \alpha)^{0.7} Z^{\frac{1}{3}} D^{1.6} \quad (5)$$

위의 식에 나타낸 것과 같이 정격하중은 접촉각 α , 볼의 수 Z , 볼의 직경 D 에 큰 관련이 있다. 이중 우리가 관심이 있는 것은 접촉각과 볼 직경이며 여기서 접촉각도 볼 직경과 관계가 되므로 대략 정격하중은 볼 직경에 크게 의존한다.

6. 변속기용 베어링의 개선방안

이상의 결과를 종합하면 변속기용 베어링은 특히 이물질에 강해야 하므로 이를 위해서는 다음과 같은 특성이 요구된다.

첫째, 변속기의 기어박스에 사용되는 베어링은 고점도 기어오일의 사용에 의하여 초기 구동시에 마멸분이 오일 중에 분산되는 특징이 있다. 본 논문에서 관찰된 베어링에서도 이 마멸분에 의한 것으로 추정되는 매우 심한 연삭마멸현상이 관찰되었다. 그러므로 이물질이 베어링내로 침입되는 것을 방지하는 구조가 요구되며, 이미 선진 메이커에서는 고무시일이 장착된 베어링을

사용하고 있다.

둘째, 본 논문에서 관찰한 손상된 베어링은 모두 내·외륜에서 보다 볼에서의 마멸 정도가 심하였다. 따라서, 베어링의 수명향상을 위해서는 내마멸 강도를 높인 볼을 사용하는 것이 바람직하다. 이러한 적용조건에서는 내륜이나 외륜의 강도를 향상시키는 것이 일반적이지만 볼의 강도를 향상시키는 것이 더욱 효과적일 것으로 판단된다.

셋째, 변속기용 베어링에서의 주된 마멸 원인은 볼과 궤도를 사이에 이물질이 존재하기 때문이다. 따라서, 볼과 궤도 사이에 이물질이 끼이기 어렵고 쉽게 배출되는 베어링의 내부구조가 요구된다. 본 논문에서 조사된 이물질은 그 크기가 수~수십 μm 정도로 추정되므로 이들이 끼일 확률을 줄이는 방법은 볼과 궤도면 사이의 공간을 크게 하는 즉, 궤도반경이 큰 베어링이 효과적일 것으로 추정된다.

넷째, 이 베어링은 항상 축방향의 하중이 작용되는 조건에서 사용되므로 궤도의 턱 높이가 높은 베어링 설계가 요구된다.

다섯째, 베어링의 구동시에 초기설계효과가 충분히 발휘되기 위해서는 높은 제작정밀도가 요구된다. 제작 정밀도의 향상은 베어링의 진동과 소음 특성과 아울러 부하 특성에도 직접적인 영향을 미칠뿐만 아니라 이차적으로는 밀봉효과, 발열효과 등에도 영향을 주기 때문에 베어링 수명과 성능 향상에 필수적인 요소이다.

7. 결론

본 논문에서는 자동차의 변속기에 장착되는 깊은 홈 볼 베어링의 파손현상에 대한 고찰결과를 근거로 하여 베어링의 성능 개선방향을 제시하였다. 이러한 결과는 변속기용 베어링의 개발, 설계 및 성능시험에

크게 기여할 것으로 기대된다. 향후에는 보다 다양한 조건에 대한 상세한 조사와 관련 시험을 통하여 본 논문에서 제안된 여러 방안에 대한 타당성을 검증할 예정이다.

참 고 문 헌

1. Tallian, T. E., Failure Atlas for Hertz Contact Machine Elements, *ASME Press*, pp.93-113, 1992.
2. Neale, M. J., Tribology Handbook, 2nd ed., Butterworth-Heinemann Linacre House, A20, D3. 1997.
3. Harris, T. A., Rolling Bearing Analysis, 3rd ed., John Wiley & Sons, pp.121-135, 1991.
4. Hamrock, B. J., Fundamentals of Fluid Film Lubrication, McGraw-Hill, 1994.
5. Bhushan, B. and Gupta, B. K., Handbook of Tribology, McGraw-Hill, 1991.
6. Bayer, R. G., Mechanical Wear Prediction and Prevention, Marcel Dekker, 1994.
7. 赤岡純, 軸受の損耗と對策, 日刊工業新聞社.
8. 小川喜代一, 金屬の潤滑磨耗とその對策, 養賢堂.
9. 한국종합기계, 구름베어링공학, 1987.