

# 자동차 변속기용 구름베어링의 파손현상 고찰(II) - 차동장치용 테이퍼 로울러 베어링

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

## A Study on the Rolling Bearing Failure Mode of Automotive Transaxle(II)

- Tapered Roller Bearing for Differential Unit

J.S. Hyun\*(FAG Hanwha Bearing) and T.J. Park(Gyeongsang Nat. Univ., ReCAPT)

### Abstract

This paper shows the failure(wear) phenomena of differential bearings in the transaxle of passenger cars and investigate their characteristics. It was found that the wear mechanism was mild abrasive wear caused by the presence of particles in the gear box. The sides of the outer raceway was more weared than center of it, so it is showed as if the crowning of outer raceway are increased. With close examination of the failed bearing, various countermeasures could be suggested.

**Keywords :** Transaxle(변속기), Gear box(기어박스), Tapered roller bearing(테이퍼 로울러 베어링), Bearing failure(베어링 파손), Particle(이물질), Crowning(크라우닝), Roughness(거칠기)

### 1. 서론

자동차의 차동장치(Differential unit)는 변속기를 통해 엔진의 출력을 바퀴로 전달하여 자동차를 구동시키는 동력전달시스템의 중요한 장치중의 하나로 자동차가 좌우로 회전할 경우에 엔진출력을 양쪽 바퀴에 적절하게 전달시킨다. 일반적으로 전방엔진 전륜구동(Front engine front drive) 차량에서는 변속기(Transaxle)의 하부에, 후륜구동(Front engine rear drive)인 경우에는 후륜 차축의 중간에 각각 차동장치를 위치시

키고 있다.

Fig.1은 전륜구동 차량인 경우에 사용되는 차동장치를 나타낸 것으로 원으로 표시한 부분과 같이 4개의 기어가 서로 맞물려진 형태의 차동장치 유니트와 링기어 및 피니언 등으로 구성되어 있으며, 이들은 기어박스(Gear box)에 연결되어 있다. 그림에서, 화살표로 표시된 부분은 트랜스 액슬의 맨 아래에 있는 차동장치를 지지하는 베어링이고, 링기어는 변속기의 출력을 받아들이는 부분이며 차동 유니트는 좌우의 차축이 차동회전하게 한다. 이러한 차동장치는

기어박스 내에 있으므로 변속기용의 기어 오일로 윤활된다.

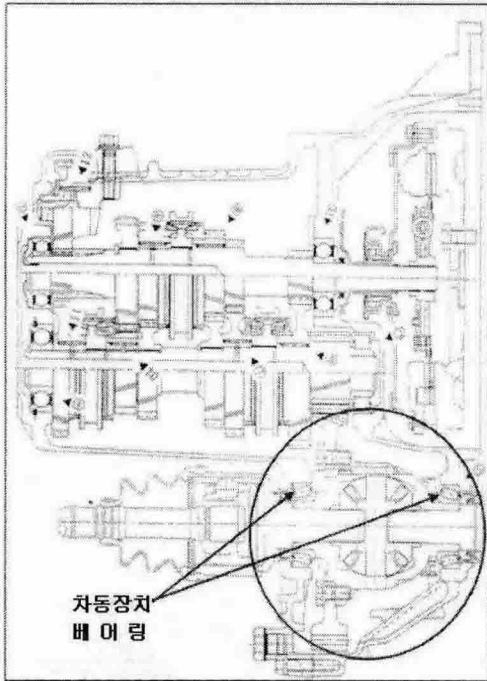


Fig. 1. 전륜구동 변속기와 차동장치 구조도.

한편, 변속기와 차동장치에서 사용되는 윤활유는 접촉응력이 가장 높은 기어에 적합하도록 개발되기 때문에 일반적인 윤활유에 비하여 점도가 상대적으로 높다. 특히, 기어에 의하여 동력이 전달되므로 치면에는 큰 힘이 작용하게 되고 이로 인하여 접촉 마멸입자(Wear debris), 세척 잔류입자 등의 이물질이 발생하게 된다. 또한, 기어박스에는 기어장치가 복잡하게 조합되어 있는 관계로 내부구조가 복잡하여 완벽한 세척이 어려운 실정이다. 따라서, 기어오일에 포함된 이물질의 제거를 위하여 여러 가지 장치를 설치하지만 완전하게 제거하기란 현실적으로 불가능한 실정이다. 이러한 원인에 기인하여 차동장치용 구름 베어링의 실제수명이 이론수명보다 짧으므로

이를 향상시키는 것은 실질적으로 해결해야 될 중요한 연구과제 중의 하나이다.

본 논문에서는 국산차량의 차동장치에 사용되었던 베어링을 수거하여 파손현상을 정밀분석함으로써 이에 관련된 마멸기구를 조사하고자 한다. 이러한 결과는 향후에 개발될 차동장치와 이에 사용되는 구름베어링의 신뢰성 향상뿐만 아니라 관련베어링의 개발, 설계 및 성능시험에도 기여할 것으로 기대된다.

## 2. 조사베어링 및 사용조건

본 논문에서는 승용차의 차동장치에 사용된 테이퍼 로울러 베어링(Tapered roller bearings for differential unit)에 대하여 조사하였으며 Fig.2에는 이의 개략적인 형상을 나타내었다.

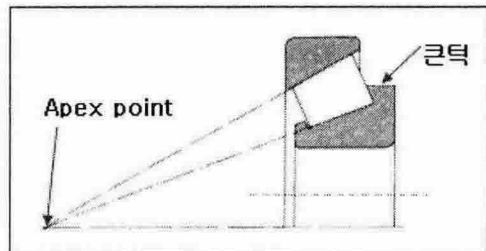


Fig. 2. 테이퍼 로울러 베어링.

조사한 베어링은 자동차의 보증수리 기간 내에 문제가 발생하여 정비업체에서 무상으로 교체된 것이며, 정비이력 이외의 자료는 확보하지 못하였다. 수집한 베어링은 모두 27개로서 사용기간은 6개월에서 3년 사이이고 주행거리는 7,000km에서 35,000km까지이다. 베어링은 외륜과 로울러가 변색된 경우가 각각 25개, 내륜이 변색된 것이 10개이며, 이물질에 강한 특수 열처리 사양이 10개인 반면에 일반 열처리 사양은 17개이다. Table 1.에는 본 논문에서 조사

한 베어링의 파손형태를 나타내었다. 한편, 정비기술자가 파손이 발생하였다고 판단한 원인은 소음으로 16개중에서 14개로 절대 대다수를 차지하였다. 또한, 조사된 베어링 중에서 사용이력이 확보된 10개의 베어링에 대한 평균주행거리를 분석한 결과, 특수 열처리한 그룹은 22,900km인 반면에 일반 열처리한 그룹은 20,260km으로 약간의 차이를 나타내었다. 하지만 매우 한정된 숫자의 샘플에 대한 결과이기 때문에 이러한 차이가 열처리 방법에 따른 결과라고 단정하기가 어려운 실정이다.

Table 1. 조사한 베어링의 파손형태.

	외륜	내륜	로울러	케이지
변색(개)	25	10	25	-
파손(개)	8	8	7	1
마멸량( $\mu\text{m}$ )	10	10	5	-

Fig. 3에는 차동장치부를 보다 상세하게 나타낸 그림으로 엔진에서 발생한 동력은 변속기의 출력축과 링기어를 통해서 차동장치에 전달되면 차동장치 전체가 회전하여 바퀴를 회전시키게 된다. 따라서, 차동장치 베어링은 그림에서와 같이 내륜이 회전하게 되며, 일반 승용차는 차동장치에서 휠까지의 차축에 변속 유니트가 없으므로 베어링의 회전수는 휠의 회전수와 일치한다. 이때, 차동장치 베어링에 작용하는 하중은 링기어에서 전달되는 힘을 축방향과 반경방향으로 분해한 후 이에 대한 힘과 모멘트의 평형조건식에서 구할 수 있다. 이 결과, 베어링에는 반경방향하중의 50% 정도가 축방향하중으로 작용하고 있다.

본 논문에서 연구대상인 차동장치는 동일한 베어링이 양측에서 지지하는 구조이다. 이때, 차동장치의 측면지지 베어링은

차륜의 구동에 대한 부하를 축방향으로 지지하며 출력축과 링기어 사이의 반력 및 접선력이 반경방향하중으로 작용하는 비교적 저속용이다. 이러한 베어링의 부하형태는 휠 베어링에서와 같이 주로 반경방향하중과 모멘트가 작용하는 경우와는 매우 다른 거동을 나타낼 것으로 예상된다. 또한, 베어링은 오일에 항상 잠긴 상태로 운전되며 회전수도 휠 베어링과 동일하므로 휠 베어링이나 피니언 샤프트 베어링에 비하여 운전조건은 비교적 안정적이다.

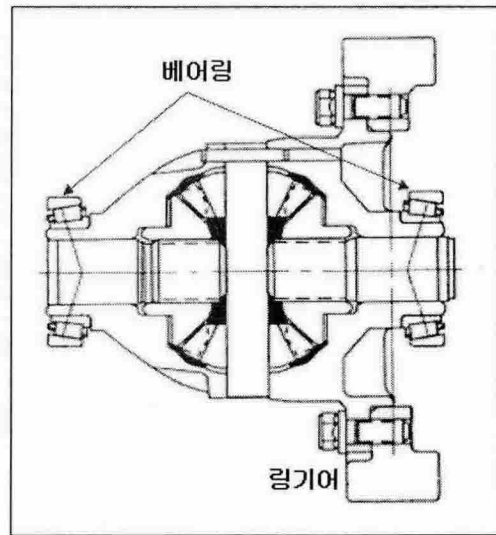


Fig. 3. 차동장치와 지지베어링.

### 3. 외관관찰

Fig.4에는 차동장치에서 사용된 베어링의 파손형태를 나타내었다. 수거된 베어링은 여러 가지의 파손양상을 나타내고 있지만 공통점을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 파손된 베어링은 내륜과 외륜의 궤도에 변색을 수반하며 궤도부에는 이물질로 인한 눌린 흔적이 발견된다. 이것은 변속기용 베어링 모두에서 발견되는 연삭마멸(Abrasive wear)의 대표적인 형태이다.

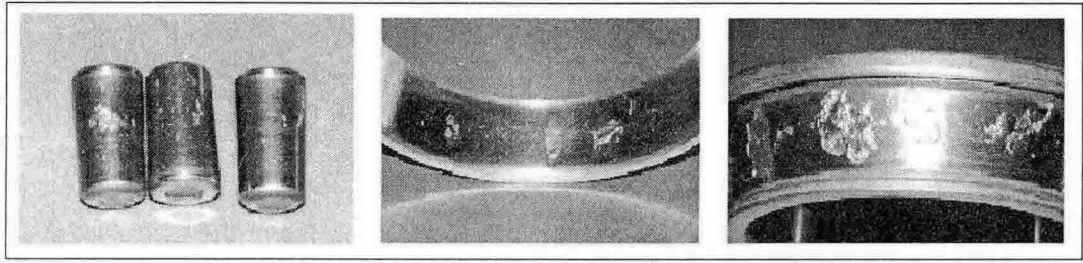


Fig. 4. 차동장치 베어링에서의 파손형태.

둘째, 파손부의 진전과는 크게 관계없이 베어링의 외관은 상당히 양호하였다. 로울러와 궤도륜 사이에서 미끄럼이 발생하는 내륜의 턱면과 로울러의 대단면에서 뿐만 아니라 플레이킹(Flaking)이 발생한 궤도에서도 광택을 유지하고 있다. 즉, Fig.4에서 로울러 대단면에서 반사되는 빛을 관찰할 수 있으며 외륜과 내륜에서도 궤도에서의 변색과는 무관하게 광택을 확인할 수 있다.

셋째, 베어링의 파손이 상당한 경우일지라도 베어링의 총체적인 파손으로는 진전되지 않고 플레이킹의 진전 형태를 나타낸다. Fig.4의 경우, 매우 진전된 플레이킹에도 불구하고 타붙음이나 고열이 발생한 흔적은 없었다.

넷째, 파손된 베어링에서 많이 나타나는 고정륜과 전동체와의 운전궤적의 차가 관찰되지 않았다. 일반 베어링의 경우에는 파손된 베어링의 30% 이상에서 운전궤적의 차가 발견되며, 이는 베어링의 설치와 작동시의 미스얼라인먼트(Misalignment)에 의한 것으로 확인되고 있다. 그러나 본 논문의 경우에는 분명한 미스얼라인먼트 흔적이 나타나지 않았다. 파손된 베어링을 모두 확인한 결과, 외륜(Cup)에 로울러 접촉흔적이 거의 일정한 것이 전체 27개중에서 22개이고 나머지 5개에서는 확인이 어려웠다. 한편, 다른 베어링에서 발견되는 윤활유 부족에 의한 파손, 수분의 침투 등에 의한 녹 발생 및 고정륜의 크리프 흔적 등이 없는 등

파손베어링의 외관이 비교적 양호한 상태였다.

이상에 나타낸 이러한 특징은 테이퍼 베어링이 많이 사용되는 휠 베어링의 파손 양상과는 매우 대조적이다. 참고로 Fig.5에는 휠 베어링의 대표적인 파손 양상을 나타낸 사진이다. 우선 휠 베어링은 고정륜(그림에서는 내륜)의 부하영역에서 껍질 벗겨짐(Peeling) 형태를 나타낸다. 또한, 수분 등이 침입흔적을 많이 발견할 수 있으며 베어링의 외관은 차동장치 베어링에 비하여 대체로 좋지 않다. 이러한 결과는 베어링에 대한 운전조건인 윤활형태, 하중 조건 및 부하 형태가 달라짐에 따른 차이로 추정된다.

Table 2. 베어링의 적용조건과 외관특징.

	차동장치	휠베어링
윤활제	기어오일	그리이스
파손형태	플레이킹	필링
궤도외관	변색/광택	변색/무광
로울러외관	변색/광택	변색/무광

Table 2에는 차동장치 베어링과 휠베어링의 적용조건과 파손된 베어링의 외관 특징에 대한 비교결과를 나타내었다. 차동장치 베어링은 기어박스 내에서 기어 오일과 함께 작동하여 주변의 영향을 받기 어려워

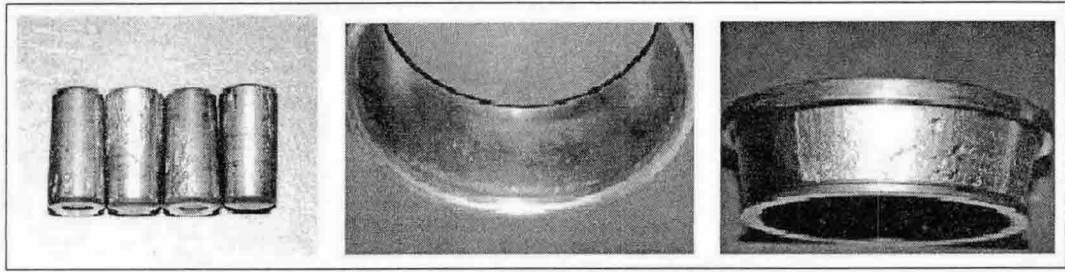


Fig. 5. 휠 베어링에서의 파손형태.

외관의 손상이 적을 뿐만 아니라 기어박스 (Transaxle) 하부에 장착되기 때문에 윤활도 매우 충분한 상태이다. 또한, 기어오일은 극압첨가제가 많이 첨가된 오일이므로 베어링의 타블음을 방지할 수 있으며 특히 미끄럼 접촉부를 광택이 있게 만든다.

하중해석결과에 의하면 차동장치 베어링에서는 대략 반경방향하중의 50% 정도가 축방향하중으로 작용한다. 이는 다른 적용 조건에 비해서 축방향하중이 많은 상태이므로 반경방향하중의 편향에 의한 구름체적의 운전접촉 계적의 차를 발생하기 어려운 조건이다. 또한, 접촉면에서 이물질에 의한 눌림 흔적은 기어오일의 오염과 직접적인 관련이 있는 것으로 추정된다. 본 논문에서 다루는 차동장치는 전방엔진 전륜구동 차량의 차동장치로 기어박스의 하단에 차동장치가 위치하여 기어오일의 오염과 직접적으로 관련되어 있기 때문으로 판단된다. 이와 같이 차동장치의 외관 특징은 차동장치의 적용조건과 하중조건으로 현상을 추론할 수 있었다.

#### 4. 정밀치수조사

베어링의 운전특성을 조사하기 위하여 파손된 베어링을 정밀하게 측정하고 분석하였다. 치수조사는 파손이 경미하여 정밀 측정이 가능한 베어링 위주로 실시하였다. 외륜과 내륜의 궤도경 치수, 진원도 및 형

상(Crowning shape)과 궤도의 경사각도와 내륜 턱면의 형상을 조사하였고 로울러의 치수, 진원, 상호차 및 접촉점 치수를 측정하였다. 치수 조사에는 Taylor Hobson사의 진원도 측정기, Kosaka사의 거칠기 및 형상 측정기 등의 측정장비와 함께 기준기를 이용한 비교측정방법을 사용하였다. 본 논문에서 조사한 베어링에 대한 초기 치수 자료를 확보하지 못하였기 베어링 제작규격과 시료간의 상대비교에 의하여 도출한 결과는 다음과 같다.

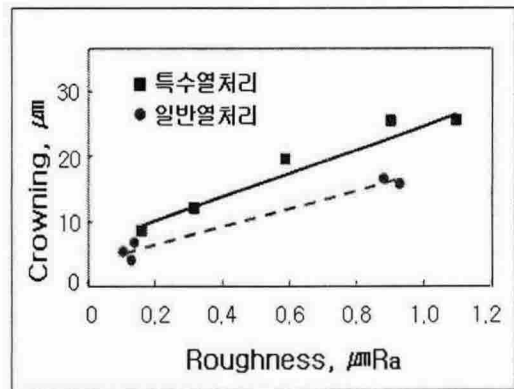


Fig. 6. 열처리조건에 따른 외륜 크라우닝 량에 대한 거칠기.

베어링의 외륜(Cup)에서 특이한 점은 초기에  $5\mu\text{m}$ 이하인 크라우닝량이 사용된 경우에는 최대  $30\mu\text{m}$ 정도로 크게 증가하였다. 또한 외륜의 궤도 크라우닝 량과 궤도 거

칠기와의 관계를 확인한 결과 크라우닝 량이 많을수록 거칠기가 크게 나타났으며, 이러한 관계는 열처리 조건에 관계없이 거의 동일하였다. 즉, Fig. 6은 이러한 결과를 나타낸 그림으로 열처리조건과 외륜 크라우닝 량에 대한 거칠기 값은 동일한 경향을 나타내었다.

베어링의 외륜은 테이퍼도와 진원도 등 일반 품질특성치는 양호한 값을 갖고 있는 것으로 조사되었다. 이와는 다르게 베어링의 내륜의 경우 크라우닝 량은 초기 크라우닝 량과 큰 차이를 보이지 않았으며 로울러의 경우 역시 크라우닝 량이 초기값과 거의 같은  $10\mu\text{m}$  내외를 보였다. 내륜의 큰턱과 로울러의 대단면 사이의 접촉을 살펴보면 이 두면은 매우 양호한 경면을 나타내고 있으며 형상측정결과 내륜의 턱면이  $5\mu\text{m}$  정도로 마멸된 흔적을 확인할 수 있었다. 기준치수 보다 로울러 대단면의 R값이 대략 10% 정도 크게 측정된 것은 베어링의 내륜과 로울러 사이의 접촉점 높이가 낮은 것을 의미한다.

## 5. 결과의 검토

자동차에서 엔진출력이 바뀌까지 전달될 때, 차동장치 베어링에 작용하는 하중은 엔진의 출력과 기어의 형상에 따라서 결정된다. 즉, 엔진이 정지된 경우의 베어링에 작용하는 하중은 자중을 제외하면 "0"이다. 그러므로 엔진 출력으로 구동되는 경우와 바뀌로 구동되어 엔진브레이크가 작동되는 경우의 부하상태는 서로 다르게 된다. 또한, 앞에서 언급한 바와 같이 베어링에 작용하는 축방향 하중은 매우 크기 때문에 미스얼라인먼트가 없이 잘 정합된 상태로 운전될 것이며, 반경방향 하중은 크게 변화할 것으로 추정된다. 따라서, 엔진으로 구동될 경우에는 미스얼라인먼트 조건이지만

엔진 브레이크가 작동하면 이와는 반대인 상태가 발생한다.

Fig.7은 미스얼라인먼트 상태인 경우, 베어링에서 응력집중이 발생하는 위치를 나타내는 그림이다. 내륜이 회전하고 외륜은 고정된 계라고 생각하면 미스얼라인먼트 상태에서 한쪽(하부) 외륜의 대단경 측과 다른쪽(상부) 웨도륜의 소단경 측이 응력집중이 발생하는 부분이다. 이러한 상태가 오랫동안 지속되면 고정륜인 외륜의 한쪽 대단부와 반대쪽 소단부에서 마멸이 발생할 것으로 쉽게 예측할 수 있다. 만일, 하중 조건이 반대로 바뀌면 미스얼라인먼트 조건도 되므로 마멸발생위치도 반대로 될 것으로 생각된다. 이러한 경우가 반복되면 외륜의 크라우닝이 커지는 현상을 설명할 수 있으리라 생각된다. 한편, 내륜과 로울러 사이에는 외륜과 로울러 사이에서와 같은 현상이 일어나지 않는 것은 내륜의 턱면과 로울러의 접촉 때문이다. 이 때문에 외륜(Cup)과 구별해서 로울러, 내륜 및 리테이너를 합쳐 내륜조립체 (Cone Assembly)라고 한다.

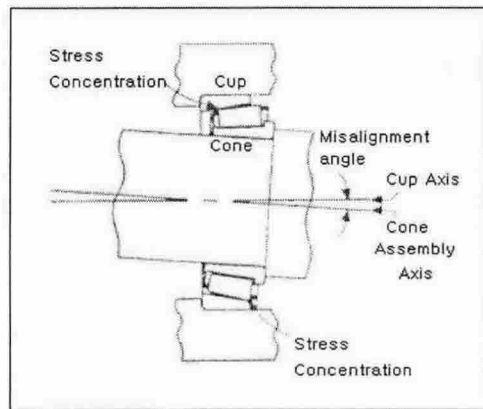


Fig. 7. 미스얼라인먼트 상태인 로울러 베어링의 응력집중 발생위치.

## 6. 결 론

이상과 같은 내용과 차동장치의 운전특성을 연관하여 보면 차동장치용 베어링은 우선 큰 축방향 하중을 지지하기 위한 큰 접촉각과 내륜의 큰턱지지 면을 크게 하고 접촉점을 낮게 유지하기 위한 특수형상의 큰턱 가공이 각각 요구된다. 또한, 외륜의 크라우닝량이 큰 베어링이 요구되며 거칠기 및 정밀도의 향상 등이 요구된다. 베어링 이외의 관점에서 보면 수명을 향상하기 위한 이물질이 없는 청정한 작동조건이 요구될 것이다. 본 논문에서는 무작위적인 고장부품에 대한분석이므로 보다 많은 수량의 관련 고장부품에 대한 파손형상의 조사 내용을 보완할 계획이며 금속조직학적인 연구를 병행하여 연구를 계속할 예정이다. 특히, 열처리 조건의 차이에 따른 고장부품의 거동은 매우 흥미로운 결과중의 하나이다.

## 참 고 문 헌

1. SAE, Design Practices; Passenger Car Automatic Transmissions, SAE, pp.361-386, 1994.
2. 은정표 외, 자동차 구조학, 동신출판사, pp.25-122, 2002.
3. Bhushan, B. and Gupta, B. K., Hand-book of Tribology, McGraw-Hill, 1991.
4. 赤岡純, 軸受の損耗と對策, 日刊工業新聞社.
5. 小川喜代一, 金屬の潤滑磨耗とその對策, 養賢堂.
6. 현준수, 문호근, 박태조, 자동차 변속기용 구름베어링의 파손현상 고찰(I), 한국윤활학회 춘계학술대회논문집, pp.406-411, 2001.