

# 전륜구동 수동변속기에 대한 트라이볼로지적 고장사례 연구

김청균 · 이일권\*

홍익대학교 트리보메카 · 에너지기술 연구센터, \*대림대학 자동차과

## Tribological Failure Study of Manual Transmissions in Front Engine and Front Wheel Drive Vehicle

Chung Kyun Kim and Il Kwon Lee\*

Research Center of Tribology, Mechatronics and Energy Technology Center, Hongik University,

\*Department of Automotive Engineering, Daelim College

(Received September 15, 2008; Revised October 25, 2008; Accepted November 1, 2008)

**Abstract** – The purpose of this paper is to present the case study of tribological failure analysis on the gear damages, oil leakage, and sealant sealing in a manual transmission of front engine and front wheel drive vehicle. The manual transmission is to change the speed range and direction of the engines depending on the driving conditions by friction driving forces with input and output gear system. The material property and surface roughness of the gears are strongly related to the gear noise and micro-vibration, oil leakage and wear, which may decrease the real contact area of the gear and the strength of the oil film thickness between the driving gear and driven one. The O-ring damage of speedometer driven gear and bad sealant sealing of oil pan may produce oil leakage through the contact surfaces, which cause the oil shortage and seizure on the sliding surfaces of the transaxle gears. In the failure case study, the proper repair working and good lubrication are very important for the long life of the transaxle without any tribological failures and oil leakage.

**Key words** – manual transaxle(수동 변속기), o-ring(오링), oil leakage(오일누설), noise(소음), gear(기어), synchronizer(싱크로나이저), sealant(밀봉제)

### 1. 서 론

엔진은 동력을 생산하지만, 변속기는 기어의 조합에 의해 동력을 변환하여 전달하는 장치이다. 엔진의 동력을 변속기의 입력축 기어를 통해 출력축 기어의 이수에 따라 저속과 고속으로 회전속도를 제어한다.

저속에서 출력토크는 크지만 회전속도는 작고, 고속에서 토크는 작지만 회전속도는 빨라 고속회전에 적합하다. 또한, 출력을 얻을 때 기어를 하나 더 연결하여 회전방향을 바꾸면 역방향에 발생되어 후진출력을 얻게 된다.

수동변속기 차량을 가진 운전자들은 수동변속기의 품

질 문제[1]로 변속의 어려움과 변속불량을 많이 제기하는 것으로 알려져 있다.

Fig. 1은 프런트 엔진의 앞바퀴 구동방식(front engine and front wheel drive) 승용차에서 사용하는 수동변속기의 구조를 보여준다. 변속기 오일은 기어장치의 마찰손실 동력을 줄여주고, 기어에서 발생한 마찰열을 제거하여 연비 및 내구성 향상에 기여한다. 오일은 작동온도에 따라 점도가 변화하므로 외부의 온도가 낮을 경우는 엔진을 워밍하여 운전하는 것이 변속기의 성능을 최고 상태로 유지할 수 있다.

수동변속기가 구동하면서 기어는 부적절한 윤활작용에 의한 마찰·마멸의 진행과 이에 따른 동력손실, 온도 상승, 소음발생, 점도저하에 의한 변속기 오일의 누설이 발생하기도 하며, 마찰면은 경계윤활이나 건조마찰

\*주저자 · 책임저자 : chungkyunkim@empal.com

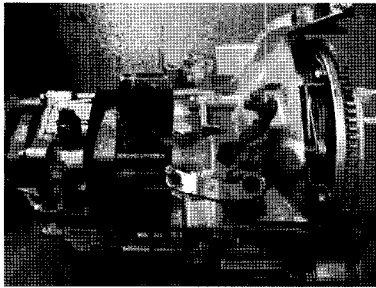


Fig. 1. Typical manual transmission.

로 가면서 치면에서 스커핑이나 소착(seizure)되는 현상으로 진전되기도 한다. 또한, 소재불량으로 인한 기어의 파손은 수동변속기의 동력전달 불가라는 치명상을 입게 된다.

운전자들이 운전을 할 때 연비향상을 위한 몇가지 방법들이 연구된 사례도 있다[2]. 또한 자동차 회사들은 수동변속기의 변속성을 향상시키기 위해 4단과 5단에서 6단과 7단으로 변속단을 높이는 연구도 진행하였다[3].

본 연구에서는 수동변속기 오일의 누설과 기어장치의 마찰과 마멸 측면에서 빈번하게 발생하는 트라이볼로지적 고장사례 실증분석을 통해 변속기 시스템의 안전성과 내구성을 확보하고자 한다.

## 2. 기어오일의 역할

변속기용 기어오일은 밀폐구조에서 사용하므로 엔진 오일처럼 자주 교환하지 않고, 정기적으로 점검하기도 어렵다. 변속기 기어에서 발생하는 마찰손실이 없고 원활한 동력전달을 위해 기어오일은 엔진오일 이상으로 중요한 역할을 하고 있다.

변속기에 사용되는 기어의 높은 내구성, 수명연장과 유막보호 성능을 담보할 수 있는 기어유의 성능은 변속기의 여러 가지 작동요인에 의해 영향을 받는다. 변속기 장치에 영향을 미치는 대표적인 요소는 기어의 재질, 표면경도, 가공정도, 회전속도, 표면코팅, 치면에 가해지는 하중, 오일의 점도 및 품질, 기어의 마찰면 온도, 기어유의 내구온도, 운전조건 등이다.

## 3. 기어유의 규격 및 사용조건

### 3-1. 기어유의 규격

기어오일은 자동차 제작사의 정비 매뉴얼에 편수되

Table 1. Oil exchange intervals and specifications for a engine transmission

|       | 오일규격                 | 교환주기 (km)   | 오일량 (liter) |
|-------|----------------------|-------------|-------------|
| 한국 H사 | API GL-4, SAE 75W-90 | 100,000 무교환 | 2.1         |
| 일본 T사 | API GL-4, SAE 75W-90 | 무교환         | 1.8         |
| 미국 G사 | API L-4, SAE 75W-90  | 80,000 무교환  | 2.87        |
| 유럽 B사 | API L-4 MTF LT 2     | 무교환         | 3.0         |

어 추천오일을 사용하도록 권장하고 있다. SAE 75W-90의 기어오일은 SAE 90 모델과 비교하였을 때 연비가 약 4% 향상된다는 연구사례가 있다[4]. 최근 국내 자동차 수동변속기 오일은 동부식을 줄이기 위해 대부분 API-4를 사용하고 있다[5-7]. 또한 미국, 일본과 유럽의 자동차 회사들도 API-4를 사용하고 있다[8-10]. Table 1은 최근에 널리 사용되는 수동변속기 오일규격을 보여주는 것이다.

수동변속기의 오일교환 주기는 부품의 내구성과 오일의 품질이 좋지 않을 때는 40,000 km를 추천하지만, 최근에는 오일의 품질이 크게 좋아져 80,000~100,000 km, 또는 누유가 발생하지 않고 오일상태가 양호할 경우는 오일을 교환하지 않고 사용할 정도로 크게 높아졌다.

### 3-2. 변속기용 기어오일

API GL-4급 및 API GL-5급 기어오일은 치면에서 강한 미끄럼마찰 접촉운동을 하는 기어에 공급하는 관계로 인(phosphorous)과 유황(sulfur)과 같은 극압첨가제를 함유한다. 극압첨가제는 금속표면과 반응하여 얇은 황화철 및 인화철 피막을 형성하여 금속과 금속의 직접적인 접촉을 최소로 줄여준다. 그러나 황과 인 화합물은 열적 안정성이 좋지 못하여 극압첨가제를 함유한 기어유를 100°C 이상의 고온으로 장시간 사용할 때는 타르(tar)와 같은 검은색의 퇴적물이 생성되어 증가함으로 인해 하중지지와 마찰면 보호기능은 약화되어 트라이볼로지 성능은 크게 떨어진다.

## 4. 고장사례 예시 및 고찰

수동변속기는 기어의 맞물림 조합에 의해 구동축의



Fig. 2. Tribological vibration and noise by wear.

회전력을 피동축에 전달하고 구동한다. 동력을 전달하는 기어의 내구성과 손실동력은 기어의 치면이 마멸되거나 시일부품의 손상으로부터 기인한다. 특히 시일부품의 불량이나 내구성 약화는 오일의 누설로 연결되어 오일부족에 의한 기어 마찰부의 작동불량 및 마멸발생, 이로 인한 마찰열로 인해 기어의 소착현상으로 발전하여 결국에는 변속기능이 중단된다. 기어의 고마찰이나 소착발생은 동력손실에 의해 연비가 나빠지고, 기어의 접촉운동표면에서는 마찰소음과 진동이 발생되므로 우선은 관련 부품을 교체하지만, 여의치 않을 경우는 변속기 전체를 교환해야 한다.

4-1. 변속기의 진동과 소음발생

수동변속기용 기어는 회전하면서 반복하중과 충격하중을 받는다. 변속기의 기어의 소재가 불량하거나 열처리 불량으로 내구성이 떨어지게 되면 맞물리는 기어는 마멸이 되어 회전할 때 미세한 진동과 소음이 발생한다. 이러한 진동과 소음이 반복적으로 증가하게 되면 기어는 파손될 수도 있다. Fig. 2는 치면에서 발생한 과대마멸 사례를 보여주는 것이다.

4-2. 변속기 오일의 누설

4-2-1. O-링에 의한 누유사례

수동변속기의 동력을 바퀴에 전달하는 드라이브 샤프트와 변속기 출력축에는 오일시일, 변속기 스피도미터 중동기어에는 O-링이 각각 설치되어 있다. 오일의 누설을 차단하는 오일시일 또는 O-링이 최적의 접촉면압을 유지하지 못하거나, 특히 열적손상을 받을 경우는 그리스나 오일이 누설되면서 치면에는 고마찰과 마멸에 의한 동력손실과 소착현상을 경험하게 된다. Fig. 3은 O-링의 마찰부가 찢어짐으로 인해 변속기 오일이 누설된 사례를 보여주고 있다.

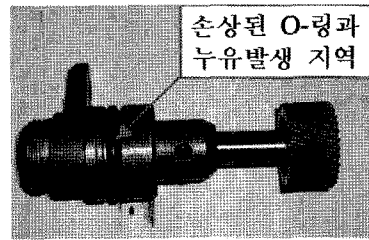


Fig. 3. Damage of O-rings.



Fig. 4. Oil leakage and sealant sealing.

4-2-2. 밀봉제에 의한 누유사례

밀봉제(sealant)는 액상 가스켓의 일종으로 오일팬을 조립할 때 금속과 금속사이의 누유를 방지하기 위해 사용한다. 오일팬과 변속기 조립부의 접촉면에 불량 밀봉제를 사용하거나, 조립표면의 이물질 관리를 엄격하게 하지 못할 때는 오일이 누설되는 경우가 있다. Fig. 4는 밀봉제를 적절하게 사용하지 못해 누유가 발생한 사례를 보여주고 있다.

4-2-3. 변속기 케이스 파손에 의한 누유사례

변속기 케이스의 재질불량 또는 외부충격으로 인해 변속기 케이스가 손상을 받게 되면, 변속기 오일은 누설된다. Fig. 5는 변속기 케이스에 크랙발생으로 인해 오일이 누설된 심각한 사례를 보여주고 있다.

4-3. 싱크로나이저 기어링 치면의 손상사례

싱크로나이저는 변속기용 기어의 동기 치합식을 말

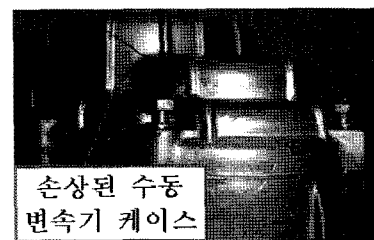


Fig. 5. Oil leakage by transaxle case crack.

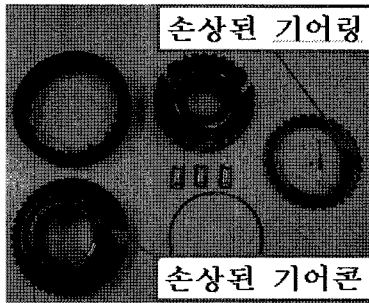


Fig. 6. Wear and seizure of synchronizer gear ring and gear cone.

하는 것이다. 즉, 동기치합은 변속기의 각 요소들과 기어의 변속 레버가 원활하게 기어를 맞물리게 하여 변속될 수 있도록 하는 것이다[11]. 변속기의 주축(main shaft)과 종축(sub shaft)은 엔진에 의해 회전되므로 기어의 물림작용이 갑자기 진행되면 회전속도가 맞지 않으므로 기어에서 소음이 발생하거나 파손되는 경우가 발생한다.

따라서 기어는 처음부터 치면을 맞물려 놓고 싱크로나이저 콘이나 싱크로나이저 링을 클러치로 사용하여 기어의 회전을 거의 일치시킨 상태에서 슬리브에 의해 결합시켜 회전력을 전달하도록 한다. Fig. 6은 싱크로나이저 링과 기어콘의 접촉불량으로 인해 치면이 손상된 고장사례를 보여 주고 있다.

#### 4.4. 오일부족으로 인한 고장사례

변속기 오일이 부족하면 동력전달 주축(main shaft)과 종축(sub shaft) 기어사이에서 원활한 오일작용을 기대할 수 없고, 심한 마찰작용에 의해 발생하는 열을 냉각할 수도 없다. 따라서 기어의 상대접촉 마찰운동면에 정상적인 유막을 형성할 수 없어 소착되는 현상이 발생한다. 기어의 마찰면에 심한 열축적 현상은 소착에 의한 치면손상과 이에 따른 기어의 작동불능으로 이어진다. Fig. 7은 기어의 오일부족으로 인한 소착현



Fig. 7. Wear and seizure of the gear by oil shortage.

상 고장사례를 보여주고 있다.

## 5. 수동변속기의 고장사례 및 고찰

수동변속기는 자동차 새시에 분류되는 트라이볼로지 핵심장치로, 차량의 주행중에 발생한 고장사례에 대한 현상과 원인을 분석하고 그 해결책을 고찰하고자 한다. Table 2는 주행거리에 따른 여러 가지 고장사례에 대한 현상과 원인을 고찰하였다.

### 5-1. 사례 A

사례 A는 23,500 km를 주행한 차량으로 정상적인 변속기어는 소음발생이 없어야 하지만, 상기에서 관찰된 소음은 기어의 소재 또는 가공불량으로 급속한 마멸발생에 기인한 것으로 판단된다.

이 차량을 변속할 때, 40 km 미만의 저속으로 운행할 경우는 변속기 내부에서 소음이 발생하지 않았으나 40 km 이상일 경우는 변속기에서 ‘윙’하는 소음이 발생하였다. 이러한 소음은 차량의 속도가 60 km에 도달하였을 때는 ‘웅~’하는 높은 소음으로 변하였다. 이것은 주축기어와 종축기어가 맞물려 회전할 때 접촉운동을 하는 기어의 마멸로 인해 기어의 맞물림 진동이 발생하여 변속기를 교환한 다음 소음과 진동이 제거되었다.

### 5-2. 사례 B

사례 B는 65,000 km를 주행한 차량으로 스피도미터 종동기어(speedometer driven gear)를 교환하고 O-링을 조립하는 과정에서 손상을 받아 누유된 사례로 Fig. 3에서 보여주고 있다. 따라서 변속기 오일을 교환하는 작업에서 O-링의 재조립 공정을 세심하게 주의해야 한다.

차속을 측정하는 스피도미터 종동기어는 변속기의 최종 출력부인 차동기어의 기어부와 맞물려 회전수를 출력하도록 되어 있다. 여기서 기어를 조립하기 위해서는 O-링을 끼워 변속기의 누유를 방지한다. 그러나 O-링의 내구성이 떨어지거나 O-링이 손상을 받게 되면 변속기의 오일은 누설된다.

### 5-3. 사례 C

사례 C는 86,700 km를 주행한 차량으로 변속기 오일을 교환한 후에 밀봉제(sealant)를 적절히 발라주지 못함으로 인해 오일이 누설된 사례를 Fig. 4에서 잘

**Table 2. 주요 고장사례 현상 및 원인**

| 사례   | 분류   | 주요내용             |
|------|------|------------------|
| A    | 손상부품 | 수동변속기의 기어치면 마멸   |
|      | 주행거리 | 23,500 km        |
|      | 현상   | 주행중에 기어 맞물림 소음   |
|      | 원인   | 기어 가공불량          |
|      | 조치사항 | 변속기 교환           |
|      | 손상부품 | 스피도미터 기어의 O-링 손상 |
| B    | 주행거리 | 65,000 km        |
|      | 현상   | 수동변속기의 오일누설      |
|      | 손상원인 | 기어의 조립불량         |
|      | 조치사항 | 스피도미터 구동기어의 교환   |
|      | 손상부품 | 오일팬              |
|      | 주행거리 | 86,700 km        |
| C    | 현상   | 오일누유             |
|      | 원인   | 오일팬의 밀봉재 실링불량    |
|      | 조치사항 | 오일팬 밀봉제의 재작업     |
|      | 손상부품 | 변속기 케이스          |
|      | 주행거리 | 116,320 km       |
|      | D    | 현상               |
| 원인   |      | 변속기 케이스의 균열      |
| 운영조건 |      | 비포장 도로 운행        |
| 조치사항 |      | 변속기 교환           |
| 손상부품 |      | 싱크로나이저 링         |
| 주행거리 |      | 128,650 km       |
| E    | 현상   | 3단에서 4단변속시 변속불량  |
|      | 원인   | 싱크로나이저 기어손상      |
|      | 조치사항 | 기어세트의 교환         |
|      | 손상부품 | 변속기 기어           |
|      | 주행거리 | 172,950 km       |
|      | F    | 현상               |
| 원인   |      | 오일 미주입으로 기어의 열화  |
| 조치사항 |      | 변속기 교환           |

보여주고 있다.

변속기 오일을 교환하고 조립을 위해 밀봉제를 사용하여 급속 접촉부를 밀봉한 다음 자동차를 저속으로 주행한 경우는 누유가 발생하지 않았으나 고속으로 주행한 경우는 오일팬에 설치한 밀봉제의 접합부를 통해 누유가 발생하였다. 이것은 차량이 고속에서 장시간 운

행하면서 오일의 온도가 높아져 오일의 점도저하와 유동성 증가로 인한 오일의 누설, 또는 밀봉제를 사용하는 과정에서 부적합한 접촉면압 유지 등이 하나의 원인으로 작용할 수 있다.

**5.4. 사례 D**

사례 D는 116,320 km를 주행한 차량으로 변속기 케이스의 파손에 의한 누유사례를 Fig. 5에서 잘 보여 주고 있다.

수동변속기의 기어장치는 변속기 케이스에 의해 보호되어 있다. 차량의 변속기는 엔진에 연결하기 위해 차량의 실외에 어셈블리 형태로 장착된다. 하지만, 차량이 비포장도로를 많이 운행할 경우는 도로에 박힌 돌이나 흙더미 등에 의해 변속기 케이스가 지속적인 충격을 받아 변속기 케이스가 균열되면서 오일이 누설 된다.

사례 D의 경우처럼 변속기 케이스가 균열되면 오일이 급속하게 누유된다. 이렇게 되면, 기어의 마찰면에 공급해야 하는 오일이 갑자기 부족해져 기어의 치면은 마멸에 이은 소착현상이 빠르게 진행되어 변속기는 고장한다.

**5.5. 사례 E**

사례 E는 128,650 km를 주행한 차량으로 싱크로나이저 기어링이 손상되면서 3단에서 4단으로 변속하고자 할 때 변속이 불가하여 기어세트를 교환한 사례이다. Fig. 6은 싱크로나이저 링의 손상사례를 보여주고 있다.

운전자가 기어변속을 위해 변속레일과 연결된 변속 포크에 의해 슬리브를 움직이면 원하는 변속단의 기어와 연결하게 된다. 이 때 슬리브의 허브는 출력기어와 맞물릴 때 이가 서로 일치하지 않으면 기어는 허브의 스플라인(spline) 홈에 정확하게 삽입되지 않는다. 이러한 기어의 불일치 현상을 최소화하기 위해 주행시 변속 입력기어와 변속 출력기어 사이의 맞물림이 원활하게 일어날 수 있도록 싱크로나이저 기어링을 삽입한다. 그러나 변속할 때 클러치를 완전히 밟지 않은 상태에서 변속을 하면 변속기의 입력축이 회전 상태에서 변속을 하게 되어 싱크로나이저 기어링이 손상될 수 있다. 또한, 변속할 때 안내역할을 하는 싱크로나이저 기어링에 대한 열처리 불량으로 조기마멸이 진행되어 기어손상에 의한 변속불가 현상이 발생할 수도 있다. 이러한 경우는 싱크로나이저 기어세트 전체를 교환해야 한다.

### 5-6. 사례 F

사례 F는 172,950 km를 주행한 차량으로 변속기를 교환한 후에 오일을 적정량 공급하지 않아 기어의 원활한 변속이 어려워지고, 소음과 진동, 소착에 의한 마멸의 급속한 진행으로 인해 변속기를 교환한 경우로 Fig. 7에서 보여주고 있다. 오일이 부족하기 때문에 발생하는 열화현상은 타는 냄새에 의해 많이 감지되고 있다.

수동변속기 기어의 미끄럼마찰 접촉표면에서는 유막에 의한 하중지지와 원활한 윤활작용이 진행되어야 하지만, 오일의 공급이 충분하지 못하면 기어의 마찰운동면에서는 유막파괴에 의한 고마찰, 스커핑 및 소착현상이 심각하게 진행되어 기어의 파손이 빠르게 진행된다.

## 6. 결 론

수동변속기에서 기어의 마찰구동에 따른 트라이볼로지적 고장사례 분석을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 동력전달 기어의 소재불량으로 마멸에 의한 소음이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.
- 스피도미터 종동기어를 교환한 후 조립불량으로 인한 O-링의 손상은 누유를 일으키는 원인으로 작용하고 있음을 확인할 수 있었다.
- 오일팬을 교환한 후에 밀봉체 작업불량으로 고속주행을 하였을 때 오일팬의 가스켓 사이로 누유되는 것을 확인할 수 있었다.
- 비포장도로에서 부주의한 운전으로 인해 변속기 케이스 균열이 발생한 경우를 확인할 수 있었다.
- 변속기 오일을 교환하기 위해 오일을 배출한 다음

적정량의 오일을 넣지 않고 주행할 경우 기어마찰면의 열화현상이 발생하는 것을 확인하였다.

- 변속할 때 원활하게 변속을 안내하는 싱크로나이저 기어링이 치면손상을 입은 상태로 변속하게 되면 기어는 걸리지만 변속이 되지 않는 현상을 확인하였다.

## 참고 문헌

1. Alian Bouffet, "Evaluating Tribology of Synchronizer for Today's Manual Transmissions", SAE paper 2004-01-2022.
2. Michael A. Kluger, Joseph J. Greenbaum, and Douglas R. Mairet, "Proposed Efficiency Guideline for Manual Transmissions for the Year 2000", SAE paper, 950892.
3. Kalathur Narasimhan and Eric S. Boreczky, "New Transmission Technologies on Gear Related Requirements for Global Powder Metal Industry", SAE paper 2006-01-0396.
4. Yuji Ikemoto, "Performance Advantages of Multi-grade Manual Transmission Oil", SAE paper, 811207.
5. Maintenance Manual of Hyundai Motors, SONATA ppMT-2~MT-6, 2005.
6. Maintenance Manual of KIA Motors, 2008.
7. Maintenance Manual of GM Daewoo, 2008.
8. Maintenance Manual of Toyota Motors, ppCH-7~CH11, 2006.
9. Maintenance Manual of Ford Motors, 2007.
10. Maintenance Manual of BMW Motors, 2008.
11. Demetrio Vettorazzo Neto, Daniel Gama Florencio, Pedro Rodrigues, and Josevaldo Fernandez, "Manual Transmission Synchronization Main Aspects", SAE paper 2006-01-2519.