

## 마멸입자 형태분석에 의한 자동차 트랜스미션 기어의 손상상태 평가

박홍식<sup>†</sup> · 조연상\* · 배효준\* · 이상재\*

동아대학교 기계 · 산업시스템공학부, \*동아대학교 대학원

### Estimation of Damage Condition for the Automobile Transmission Gear by Morphological Analysis of Wear Debris

Heung-Sik Park<sup>†</sup>, Yon-Sang Cho\*, Hyo-Jun Bae\* and Sang-Jae Lee\*

Department of Mechanical Engineering, Donga University \*Graduate School, Donga. University

**Abstract** – The wear particles is released from the moving surfaces in gear systems of transmission and its morphology is directly related to the damage and failure to gear system from which the particles originated. It is the effective method for damage condition estimation of automobile transmission gear to observe wear debris in gear oil. We tested with new transmission and took out gear oil according to driving distance. To be applied to damage condition of gear system in transmission of automobile, 4 shape parameters of wear particles in gear oil were calculated and wear volume were presumed with the image processing system.

**Key words** – Transmission, gear, image processing, wear particle, shape parameter, wear volume, pitting, spalling.

#### 1. 서 론

자동차의 트랜스미션은 여러가지 기어와 싱크로(synchro)의 조합으로 이루어진 복잡한 기어시스템으로 설계, 제작, 재료, 열처리, 조립 및 윤활 등이 적절할 경우에 손상없이 장기간 동안 사용할 수 있다. 그러나 이들 중 어느 한 부분이라도 결함이 존재하게 되면 기어에 피팅(pitting) 및 이상마멸이 발생되고, 이때 발생된 피팅 및 이상마멸은 기어시스템을 구성하는 기어의 손상과 파괴에 치명적인 영향을 줄뿐만 아니라 트랜스미션의 수명단축과 고장의 원인이 되고 있다[1,2].

따라서 트랜스미션의 내구성 평가를 통하여 장기간 동안 최적의 상태를 유지할 수 있는 치형, 재료, 열처리방법 및 윤활방법 등을 결정함으로써 트랜스미션의 설계, 제작 및 조립 등의 지침자료를 마련할 필요가 있다.

이를 위하여 실제 현장에서는 트랜스미션의 작동중

소음 및 이상마멸 상태를 진단하기 위하여 진동측정과 이때의 동력전달효율을 구하기 위한 입력축과 출력축 사이의 토크 측정을 행함으로써 시험시간 동안에 기어의 파손과정을 정성적으로 관찰하고, 또한 시험시간 완료 후에는 트랜스미션을 분해하여 직접 기어들을 조사함으로써 피팅의 진행 및 기어의 파손 정도를 파악하고 있는 실정에 있다.

그러나 이러한 방법들은 기어의 손상상태 평가에 많은 비용이 소요되고, 또한 측정 및 관찰된 데이터를 분석하기 위하여 숙련된 기술자나 전문가의 지식을 필요로 할 뿐만 아니라 이러한 데이터들은 정성적인 데이터의 범위에 지나지 않기 때문에 명확한 분석을 위한 자료의 정립이 매우 곤란하여 보다 새로운 기어의 손상상태 평가 기법이 요구되고 있다.

최근 컴퓨터의 기술 발달과 더불어 급속도로 발전하고 있는 컴퓨터 영상처리기술[3-5]을 적용하게 되면 매우 빠르고 간편하고 또한 직접 눈으로 관찰하는 것이 곤란한 작동중인 기어의 손상과정을 해석적으로 평가할 수 있으리라 생각된다. 영상처리 기술에 의하여 트랜스

<sup>†</sup>주저자 · 책임저자 : 박홍식

E-mail : parkhs@mail.donga.ac.kr

마선의 작동시간 별로 윤활유를 채취하여 오일 중의 마멸입자를 조사함으로써 기어들의 작동상태를 주행시간에 따른 손상과정을 정량적으로 해석 및 평가가 가능해지면 트랜스미션의 설계, 제작, 조립 및 윤활 등의 다양한 부분에 있어서 나타날 수 있는 결함을 보다 쉽게 분석 및 평가하기 위한 기술축적이 이루어 지리라 생각된다.

이를 위하여 본 연구에서는 트랜스미션 시험을 통하여 주행거리별로 윤활유를 소량으로 채취하고, 윤활유 내의 마멸입자에 대하여 영상처리를 하였다. 이를 통하여 각각 주행거리에 따른 마멸입자의 형태적 특징을 관찰하고 마멸량을 추정계산하여 의의 결과를 분석함으로써 트랜스미션의 손상상태를 평가할 수 있는 방법을 제시하고자 하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 실험방법

### 2-1. 트랜스미션의 시험

본 실험에 사용된 트랜스미션은 경차용 수동 5단 미션으로 그 내부구조를 Fig. 1에 나타내었다. 이의 내부구조는 구동축과 종동축에는 1단에서부터 5단까지 각각의 단에 해당하는 헬리컬 기어와 역회전을 위한 후진 평기어, 그리고 변속을 위한 싱크로들로 조합되어져 있고 최종적으로 출력축에는 변속후의 출력을 전달하는 출력기어로 구성되어져 있다. 각단의 기어는 크롬(Cr)강인 SCr420이며, 열처리 방법과 열처리 후의

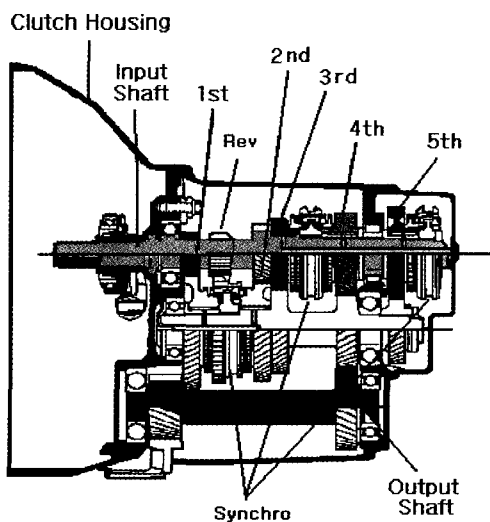


Fig. 1. Schematic diagram of transmission structure.

Table 1. Specifications of test gears

	1st	2nd	3rd	4th	5th
Gear ratio	3.416	1.894	1.280	0.914	0.757
Heat treatment	Carburizing, Quenching & Tempering				
Hardness	HRC 62				
Material	KS SCr 420				

Table 2. Characteristics of gear oil

Characteristics	Shell T/M (SEA 75W/85)	
Specific gravity 15/4°C	0.8769	
Viscosity	40°C cST	61.36
	100°C cST	12.12
Sulfur content (%)	0.864	
Phosphorous content (%)	0.0468	

표면경도의 값을 Table 1에 나타내었다. 실험을 위하여 신포 트랜스미션을 사용하였고, 실험에 사용된 윤활유는 SHELL SAE75W/85로써 그 물성치는 Table 2와 같다.

Fig. 2는 트랜스미션을 시험하기 위한 실험장치를 나타낸 것으로서 미션의 입력축에는 4,000 rpm에서 최대 토크 12 kgf·m까지 회전시키는 구동모터를 설치하였고, 출력축에는 출력토크를 측정하기 위한 토크미터와 실제 차량에 장착하여 주행할 경우에 발생하는 주행저항 및 가속저항을 인위적으로 부가하기 위하여 플라이휠(fly wheel)을 설치하였다. 또한 트랜스미션의 시험은 길들이기 운전을 행한 후, 윤활유는 깨끗한 신유로 교체하여 실험을 하였다.

그리고 Table 3에서 나타낸 바와 같이 총 주행거리

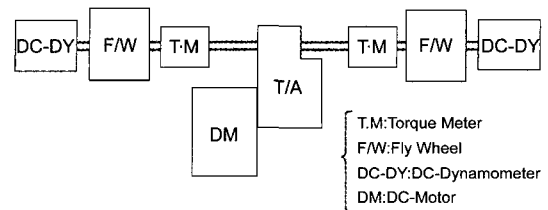


Fig. 2. Construction of transmission test.

Table 3. experimental condition

Max torque (kgf/RPM)	12.0 / 4000
Driving distance (km)	14000, 16900, 21390, 25000
Oil (l)	2.1

는 주어진 최대 토크조건으로 여러번의 시험과정을 통하여 규정지어 놓은 트랜스미션의 기어가 파손직전에 이르는 지점인 25,000 km까지로 설정하였으며 이러한 조건으로 주행 중에 14,000 km, 16,900 km, 21,390 km 및 25,000 km 지점에서 윤활유를 각각 10 ml씩 채취하여 공경 0.45 μm인 멤브레인 필터(membrane filter)가 부착된 마멸입자 채취기구를 통하여 윤활유 내의 마멸입자를 채취하고 이를 영상처리 하였다.

2-2. 컴퓨터 영상처리

본 연구에서 윤활유중의 마멸입자의 형태를 해석하기 위한 컴퓨터 영상처리는 CCD 카메라를 통한 아날로그 영상신호를 A/D 변환기를 사용하여 공간적인 격자상에서의 표본화와 농담(濃淡) 레벨의 양자화를 행함으로써 디지털 신호로 변환하게 된다.

디지털 영상은 농도값의 2차원 배열로서  $f(i, j)$ 로 나타낼 때,  $f(i, j)$ 는 영상  $f$ 의  $(i, j)$ 인 화소이고, 그 점의 농도값은 0~255 레벨의 값을 가진다. 이렇게 디지털화된 영상의 화소들은 다양한 농도값을 가지게 되므로 특히 물체와 배경의 경계부분에서 그 분포가 다양하여 영상처리에 있어 가장 기본이 되는 경계추적을 행하기가 상당히 곤란하다.

이처럼 디지털화된 영상에서 대상으로 하는 입자의 특징을 해석하기 위해서는 입자와 배경을 분해한 2원화 영상(binary image)으로 변환하여 입자의 윤곽을 뚜렷하게 나타낼 필요가 있고, 이것은 식 (1)에 의하여 변환할 수 있다.

$$f(i, j) = \begin{cases} 255 ; f(i, j) \geq t \text{일 때} \\ 0 ; f(i, j) < t \text{일 때} \end{cases} \quad (1)$$

여기서  $t$ 는 역치(threshold)로서 이것은 영상내의 농도값의 분포(히스토그램)로부터 입자가 가장 명확히 표시될 수 있는 농도값을 역치  $t$ 로 선정한다. 이 역치보다 작은 농도값을 가지는 화소에 대하여는 그 농도값을 모두 0(완전 흑색)으로 변환을 하고, 역치보다 큰 값을 가지고 있는 화소는 그 농도값을 255(완전 백색)로 변환하여 입자의 윤곽이 배경과 뚜렷하게 구분되도록 한다.

본 연구에서는 하나의 시료 샘플에서 20개의 영상을 입력하고 이들 중에서 대표적인 3가지의 영상을 추출하여 이를 만족하는 역치를 입력하여 3가지 영상 모두 만족하는 역치를 구하였다. 이렇게 처리한 2원화 영상에서 입자와 배경의 경계부분을 추적한다.

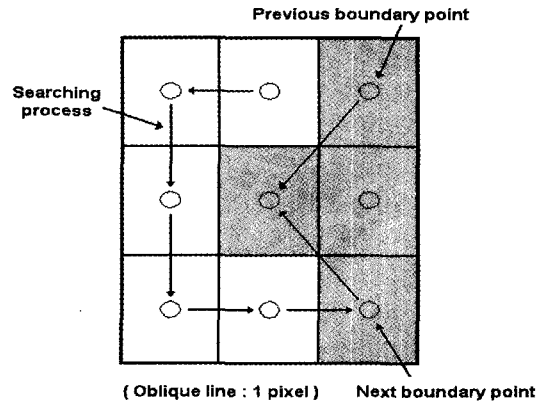


Fig. 3. A method of border following.

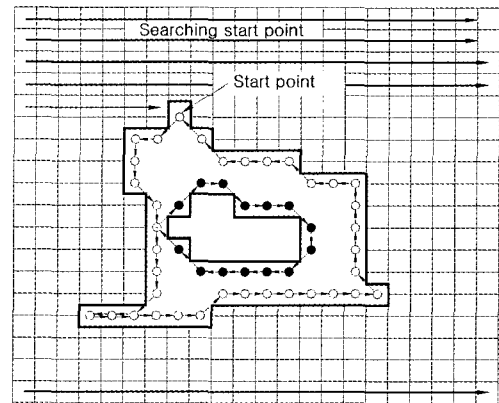


Fig. 4. Searching process of the next boundary point on border following.

경계선 추적(border following)법은 Fig. 3에서 처럼 도형의 경계점을 차례로 추적하여 그 입자의 모양을 코드화하였다. 경계선 추적의 방법에는 정방격자상에 표현되는 디지털 영상이 상하좌우 4점만을 최근방으로 생각하는 4근방과 상하좌우 4점과 대각방향의 4점 모두를 최근방이라고 생각하는 8근방의 두 가지의 경우가 흔히 사용[6]되고 있으나 본 연구에서는 8근방을 사용하여 경계선 추적을 행하였다.

Fig. 4는 경계선 추적에서 다음 경계점을 추출하는 방법을 나타낸 것으로서 현재 경계점의 8근방에서 왼쪽에 인접한 배경화소에서 시작하여 반시계방향으로 차례차례로 화소의 농도값을 조사해 나간다. 이때 최초로 만난 입자화소를 다음의 경계화소로서 추적을 진행하며, 최초의 경계점에 도달하면 경계추적을 완료한다. 위와 같이 처리한 경계선 추적을 통하여 대상으로 하는 윤활유내의 마멸입자 형태특징을 구하였다.

2-3. 마멸분의 영상해석

주행거리 별로 채취한 마멸입자의 데이터 정보를 얻기 위하여 영상처리 시스템[7]을 사용하였다. 영상처리 시스템의 광학현미경은 투과조명 및 낙사조명의 2가지 할로겐 램프를 가지며 관측된 영상은 상부의 color CCD 카메라에 의하여 PC의 프레임 그레버(frame grabber)에 저장된다.

본 연구에 사용한 프레임 그레버는 화소수 640×480, 화소당 분해능은 RGB 각 8 bit(256 grey level) 이고, 정방향 1화소의 길이는 0.426 μm이다. 이것은 마멸입자 채취부분의 filter 직경이 35 mm인 것을 고려하면 모니터 1 화면의 면적은 필터의 17,302분의 1 이 된다. 각 실험조건은 모두 대물렌즈 40배, 대안렌즈 10배로서 필터내의 랜덤한 위치 20화면에 포함된 마멸분에 대하여 이들의 파라미터를 계산하였다. 그리고 프레임 그레버의 제어 및 데이터의 처리는 모두 C 프로그램(일부는 기계어)에 의하여 행하였다.

마멸분은 발생조건에 따라 다양한 형태를 가지기 때문에 그 형태의 분류 및 평가를 위하여 본 연구에서 이용한 마멸입자의 형태정보를 각각의 마멸입자 대하여 Fig. 5와 같이 정의하였다[7-8]. 이것을 이용하여 50% 체적경, 장단도, 복잡도 및 광택도의 4가지의 형태 파라미터를 영상해석하였다. 여기서 50% 체적경은 전체의 마멸분 체적의 50%가 되는 직경을 의미한다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 마멸분의 형태적 특징

Fig. 6은 주행거리에 따른 트랜스미션의 오일 내의 마멸분을 나타낸 것으로 (a) 14,000 km, (b) 16,900 km, (c) 21,390 km 및 (d) 25,000 km이다. 주 행거리가 증가함에 따라 산화된 마멸입자의 수가 증가하는 것을 볼 수가 있으며, 주행거리 (c) 21,390 km에서는

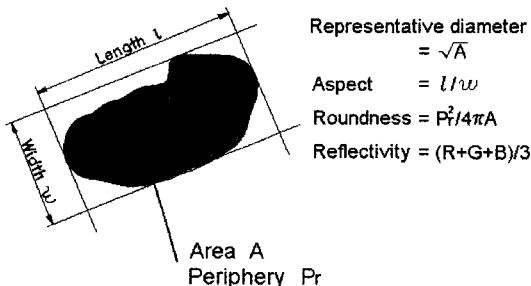


Fig. 5. Shape parameters of a wear particle.

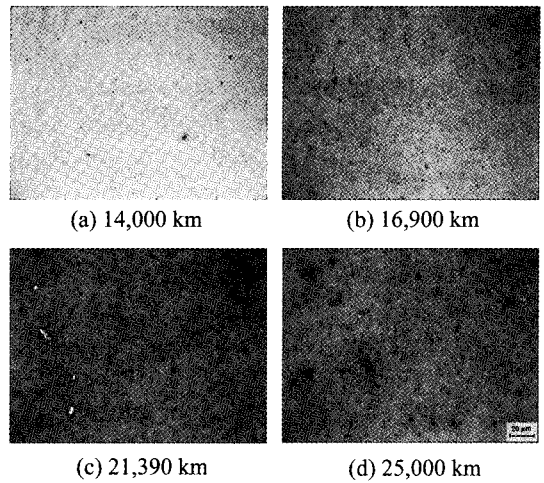


Fig. 6. Photos. of wear particles for driving distance.

(a) 14,000 km와 (b) 16,900 km에서 볼 수 있는 산화된 미세한 마멸분 외에 피팅(pitting)에 의하여 탈락된 밝은 금속광택을 가지는 큰 괴상의 금속입자가 나타나 있음을 알 수가 있다. 그리고 (d) 25,000 km에서는 (c) 21,390 km의 주행거리에서 형성된 금속광택의 입자가 산화되어 있고, 생성된 마멸분은 주행시간의 증가에 따라 대체로 모든 입자들은 산화가 된 것을 볼 수 있다.

그리고 Fig. 6의 마멸입자를 영상처리하여 각 주행거리에서 20화면에 포함된 마멸분의 대표경에 대한 입자의 개수를 히스토그램으로 표시하여 Fig. 7에 나타내었다.

그림에서 주행거리에 관계없이 마멸분의 대표경 대

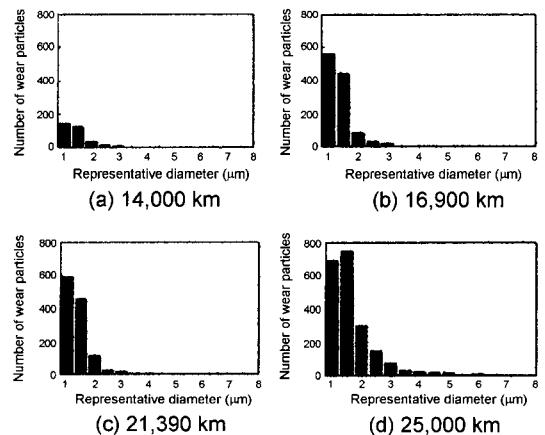


Fig. 7. Histogram for representative diameter of wear particle.

체로 1~3 μm에 가장 많이 분포되어 있고, 주행거리가 증가함에 따라 Fig. 6에서 처럼 마멸분의 수가 전체적으로 증가하며, (d) 25,000 km에서는 3 μm 이상의 크기를 갖는 비교적 큰 크기의 마멸입자가 많이 존재하고 있다는 것을 알 수가 있다.

여기서 각 주행거리에 따라 발생하는 마멸입자 한개 한개마다의 크기와 그 개수로부터는 그주행조건에서 전체 마멸분의 분포상태는 쉽게 판단할 있지만, 전체적인 형태특징을 직접적으로 판단하기 힘들다. 따라서 각 주행거리에 따른 마멸분의 형태특징을 명확히 식별하기 위해서는 집단으로서의 성질, 예를들면 전체 마멸분 입자의 평균치 등을 이용할 필요가 있다.

Fig. 8은 각 주행조건에서의 트랜스미션 기어로부터 탈락된 전체 마멸입자의 형태적 특징을 명확히 하기 위하여 컴퓨터 영상처리를 이용하여 주행거리에 따른 4가지 형태파라미터의 평균치를 도식화하여 나타낸 것이다. 그림에서 주행거리가 25,000 km에서는 짧은 주행거리의 마멸입자에비하여 50% 체적경, 복잡도 및 장단도가 크게 나타나 있는 것은 그 크기가 크고 길며, 또한 피상의 형태를 가진다는 것을 알 수가 있다. 그리고 주행거리가 증가함에 따라 광택도의 값이 감소하는 것은 기어면의 온도상승과 오일의 열화변질로 인한 산화진행 결과[9]라고 생각된다.

3-2. 주행거리에 따른 손상과정

본 연구에서는 주행거리에 따른 트랜스미션 기어의 손상과정을 알기 위하여 마멸입자 형태정보로부터 마멸체적의 추정치를 계산으로 구하였다. 이것은 눈으로 직접 관찰 것이 곤란한 트랜스미션 각 기어들의 주행

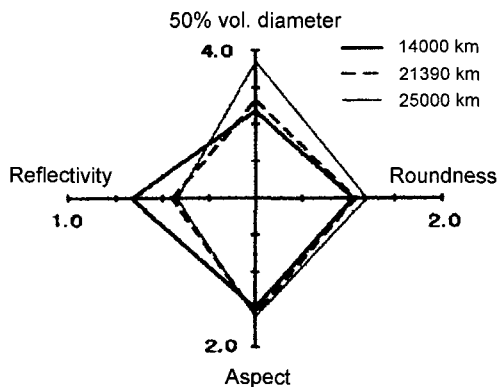


Fig. 8. Average values of shape parameters for driving distance.

거리에 따른 손상과정을 평가하는데 극히 유효한 수단이라고 생각된다. 여기서 추정 마멸체적의 계산은 마멸입자의 두께를 Fig. 5의 대표경과 대등하다고 가정하고, 이의 면적에 대표경을 곱하여 입자 하나 하나의 마멸체적을 구하여 전체의 마멸분의 체적을 구하였다. 즉, 마멸분이 분포되어 있는 1 화면내의 하나의 마멸입자 체적을  $V_{ij}$ 라 하고, 1 화면내의 입자개수를  $n$ 으로 두었을 때 20화면 전체의 총 마멸체적  $V_t$ 는 식 (2)로부터 구하였다.

$$V_t = \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n V_{ij} \right) \tag{2}$$

Fig. 9는 각 주행거리에 대하여 오일 2.1리터에 포함되어 있는 총 마멸분의 마멸량을 나타낸 것이다. 주행거리 21,390 km까지는 마멸량이 주행거리에 거의 비례하여 증가하지만 주행완료 거리인 25,000 km에서 급격히 증가한 것을 볼 수가 있다. 이것은 설정한 토크조건하에서 21,390 km까지의 주행거리에서는 주행거리에 비례하여 기어들의 손상이 진행된다. 그러나 이 이후의 주행거리에서는 오일의 열화와 산화의 진행 및 장시간 동안 반복충격하중이 작용함으로써 피로마멸에 의한 피팅과 스폴링(spalling)[10]이 급격히 진행된 결과라고 생각된다.

Fig. 10은 주행완료 거리인 25,000 km에서 트랜스미션을 직접 분해하여 기어의 손상상태를 나타낸 것이다. 그림에서 처럼 (a)의 2단 구동기어에서는 마멸에 의한 기어의 손상을 관찰할 수 있으며, (b)와 (c)의 1단 구동기어에서는 피팅 및 스폴링이 심하게 발생하였음을 알 수가 있다.

이는 Fig. 9의 영상처리에 의한 추정 마멸량과 비교

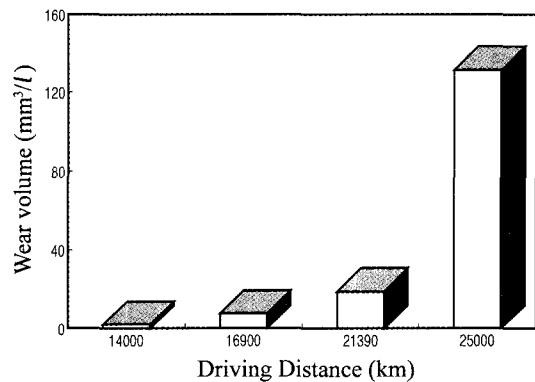


Fig. 9. Wear volume for driving distance.

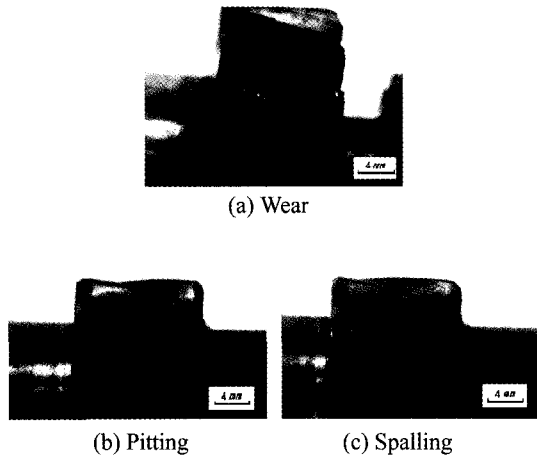


Fig. 10. Failure shapes of gear.

하였을 때, 트랜스미션을 직접 분해하지 않더라도 본 연구에서와 같이 영상처리를 이용하여 트랜스미션의 기어에서 발생한 마멸량을 추정하여 분석함으로써 그 손상상태를 바로 평가할 수 있다고 생각된다.

#### 4. 결 론

트랜스미션 기어의 손상상태를 평가하기 위하여 컴퓨터 영상처리의 기법으로부터 마멸입자의 4가지 형태 파라미터를 구하여 마멸분의 분포상태와 형태적 특징을 해석하고 마멸체적을 추정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 트랜스미션 기어에서 발생하는 마멸입자의 대표경은 대체로 1~3  $\mu\text{m}$ 에 가장 많이 분포되어 있고, 25,000 km에서는 3  $\mu\text{m}$  이상의 크기를 갖는 비교적 큰 크기의 마멸분이 많이 존재하고 있었다.
2. 주행거리가 증가함에 따라 마찰면의 온도상승과

윤활유의 열화변질에 의한 산화의 진행으로 광택도의 값이 감소하였다.

3. 주행거리 21,390 km까지는 주행거리에 비례하여 마멸량이 증가하지만 25,000 km에서는 마멸량이 급격히 증가하였다.

4. 마멸입자의 형태분석을 통하여 주행거리에 따른 트랜스미션 기어의 손상상태의 평가방법을 구축하였다.

#### 참고문헌

1. 박순철, "기어의 손상과 대책," 월간기계 설계, pp.44~54, 1990.
2. Y. Ko et al, "Measurements of Power Losses in Automobile Drive Train," SAE Paper, 840054.
3. W.W.Sefert and V.C.Westcott, "A Method for the Study of Wear Particles in Lubricating Oil," *Wear*, **21**, pp.27~42, 1972.
4. A.D.H.Thomas, T.Gavies, and A.R.Luxmoore, "Computer Image Analysis for Identification of Wear Particles" *Wear*, **142**, pp.213~226, 1991.
5. W.Uedelhoven, M.Franzl and J.Guttenberger "The Use of Automated Image Analysis for the Study of Wear Particles in Oil Lubricated Tribological Systems," *Wear*, **142**, pp.107~113, 1991.
6. 長谷川純, 興水大和, 中山 晶, "晝像處理의 基本技法" 技術評論社, pp.70~72, 1986
7. 박홍식, 전태옥, 서영백, 김형자, "화상처리에 의한 기계윤활 운동면의 마멸분 형태해석," 한국윤활학회지, 제12권, 제3호, pp.72~78, 1996.
8. B.J.Roylance and S.Raadnui, "The Morphological Attributes of Wear Particles-Their Role in Identifying Wear Mechanisms," *Wear*, **175**, pp.115~121, 1994.
9. M.Shibata, "Tribological Characteristics and Diagnosis of Deteriorated Lubricating Oil," JAST, Vol. 39, No. 7, pp.559~565, 1994.
10. A.Kubo, "Lubrication of Gear," JAST, Vol. 43, No.2, pp.88~93, 1998.