

마멸입자 형상분석을 위한 프랙탈 파라미터의 적용

조연상[†] · 류미라 · 김동호* · 박흥식**[‡]

동아대학교 대학원 기계공학과, *문경대학 컴퓨터응용기계계열
**동아대학교 기계산업시스템공학부

Application of Fractal Parameter for Morphological Analysis of Wear Particle

Yon-Sang Cho[†], Mi-Ra Lyu, Dong-Ho Kim* and Heung-Sik Park**[‡]

Graduate school, Dong-A University

*Computer Aided Mechanical Engineering, Munkyeong College

**Faculty of Mechanical & Industrial System Engineering, Dong-A University

Abstract – The morphological analysis of wear particle is a very effective means for machine condition monitoring and fault diagnosis. In order to describe morphology of various wear particle, the wear test was carried out under friction experimental conditions. And fractal descriptors was applied to boundary and surface of wear particle with image processing. These descriptors to analyze shape and surface of wear particle are shape fractal dimension and surface fractal dimension. The boundary fractal dimension can be derived from the boundary profile and surface fractal dimension can be determined by sum of intensity difference of surface pixel. The morphology of wear particles can be effectively obtained by two fractal parameter.

Key words – wear particle, morphology, fractal parameter, image processing, boundary fractal dimension, surface fractal dimension.

1. 서 론

최근 대상으로 하는 입자나 면의 형태적인 특징해석에 있어서 해안선이나 산의 형상과 같은 자연물의 특징을 묘사하기 위하여 Mandelbrot[1]가 처음 제시한 프랙탈 차원이 많이 이용되어지고 있다.

프랙탈 차원은 자연계에 존재하는 불규칙적인 물체들에 대하여 그 불규칙성을 정의하여 나타낸 것이다. 이것은 유클리드 차원에서 표현하고 있는 정수 차원의 개념이 아닌 소수 차원의 개념으로, 유클리드 차원으로는 명확히 정의할 수 없는 성질인 어떤 물체의 거칠기 정도, 부서진 정도 그리고 불규칙한 정도 등을 측정하는 방법이다. 또한 프랙탈 차원에 의한 해석 방법

은 입자나 면의 크기, 형상 또는 색상 등에 의한 해석과 같이 입자의 완벽하고 정확한 경계와 색상을 필요로 하지 않으며 대상으로 하는 물체의 경계영역에 대하여 쉽게 적용할 수 있기 때문에 보다 간편하고 빠르게 적용할 수 있다는 장점을 가지고 있다[2,3].

이러한 프랙탈 차원의 특징을 이용하여 기계윤활 접촉면에서 발생하는 다종다양한 마멸입자부터 그 형태적 특징을 정리하면 기계구동계의 손상상태 진단에 활용하는 방법으로 매우 효과적인 방법으로 알려져 있다[4-7].

이를 위하여 국외에서는 이에 대한 연구가 활발히 진행되어지고 있지만 아직까지 프랙탈 차원의 개념에 대한 지식 및 자료의 부족으로 인하여 국내에서는 마멸입자의 형상 및 형태특징 분석에 프랙탈 차원이 이용되지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 윤활마찰·마멸 실험을 통해 채취한 다양한 마멸입자의 형상 및 형태특징의 분석을

[†]주저자 : bluecys@smail.donga.ac.kr

[‡]책임저자 : parkhs@mail.donga.ac.kr

위하여 컴퓨터에 의한 디지털 영상처리 기술과 프랙탈 차원을 이용하고자 하였다. 이 연구를 통하여 마멸입자에 대한 프랙탈 파라미터를 정립하여 마멸입자의 형태적 특징을 프랙탈 차원으로 정리할 수 있는 새로운 방법을 제시함으로써 보다 효과적으로 기계윤활 운동부의 손상상태 및 작동상태 진단을 위한 데이터 처리 기술을 확립하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험방법

2-1. 마찰 및 마멸실험

마멸입자를 채취하기 위하여 pin-on-disk형 마찰·마멸시험기로 윤활마찰실험을 행하였다. 실험에 사용된 시험편으로는 편시험편은 직경 5.0 mm의 고탄소 크롬베어링 강구(鋼球)인 STB2(780 Hv)를 사용하였고, 디스크 시험편은 유압 피스톤 모터의 Slipper-pad로 사용되는 황동주물 HBsC3(160 Hv)를 사용하였다. 실험에 사용한 윤활유는 무첨가 파라핀계 광유(8.2cSt@40°C)를 사용하였으며, 작동조건으로는 접촉하중은 3 kg으로 설정하였고, 디스크의 미끄럼속도는 7.23 mm/s로 일정하게 하였으며, 미끄럼거리는 0~234 m까지 설정하여 실험을 행하였다.

그리고 윤활장치부에는 시험편 접촉점 하부에 oil bath를 설치하고 윤활유 공급은 순환펌프로써 실리콘관을 통하여 시험편 접촉점에 분사시켰다. 한편 각 실험조건에 따른 마멸입자는 oil bath내의 윤활유를 각반한 후 공경 0.45 μm의 membrane filter가 부착된 윤활유 채취기구를 통하여 채취하였다.

2-2. 경계선 추출

채취한 마멸입자로 프랙탈 차원 정보를 얻기 위한

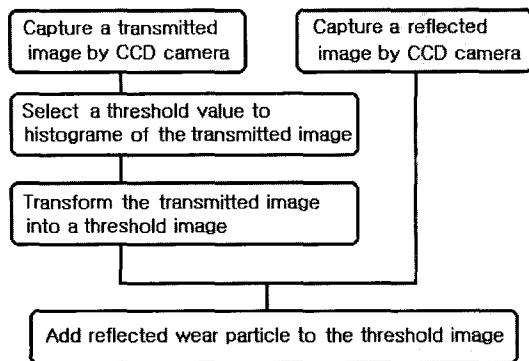


Fig. 1. Image processing algorithm.

영상처리 알고리즘을 Fig. 1에 나타내었다. 투과 및 낙사조명의 두가지 할로겐램프를 가진 광학현미경을 통하여 상부의 컬러 CCD카메라에 의해 관측된 투과 및 낙사영상을 화소수 640×480, 화소당 분해능은 RGB 각 8 bit (256 grey level)인 컴퓨터의 프레임그레버(frame grabber)를 이용하여 저장한 후, 투과영상은 히스토그램으로부터 역치값(threshold value)을 선정하여 2원화 영상으로 변환하였다.

그리고 변환된 2원화 영상과 낙사영상을 합성하여 마멸입자에 대한 경계와 표면의 명확한 형상을 추출하였으며, 영상처리한 마멸입자를 Fig. 2의 (a)~(h)에 나타내었다. 마멸입자는 화소수 84×84를 넘지 않는 범위에서 단순한 형태에서 복잡한 괴상의 형태를 가지는 입자들을 다양하게 추출하였다.

이와 같이 기본 영상처리를 통해 마멸입자의 형상을 명확히 구분한 후, 마멸입자의 경계와 면에 대한 프랙탈 차원을 구하기 위하여 입자의 경계를 추출하였다.

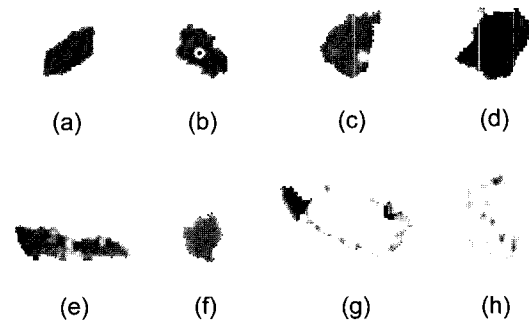


Fig. 2. Result of image processing for wear particle.

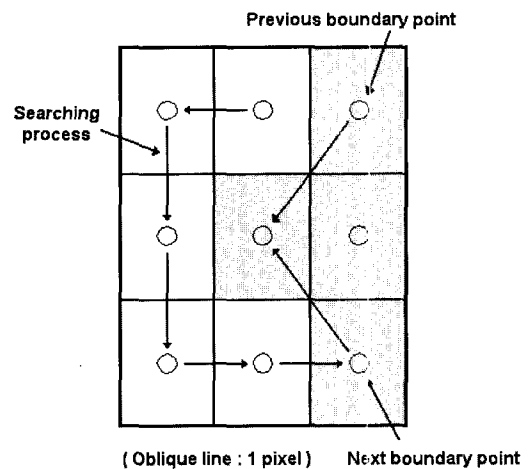


Fig. 3. Searching process of the next boundary point.

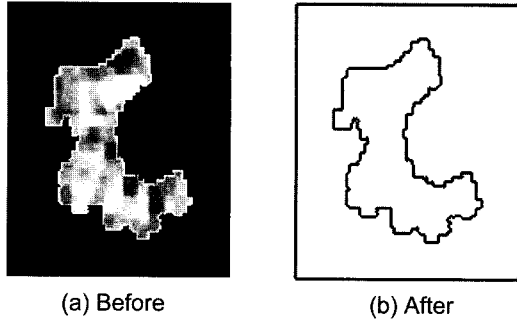


Fig. 4. Result of searching process for the boundary.

마멸입자의 경계추출법은 명확한 경계를 구분하기 위하여 입자의 경계점을 차례로 추적하여 그 입자의 모양을 코드화하는 것으로 입자의 형상해석에 중요한 역할을 하는 알고리즘이다[8,9]

Fig. 3은 경계선 추출에서의 다음 경계점 추적하는 방법을 나타낸 것으로서 현재 경계점의 8근방에서 왼쪽에 인접한 배경화소로부터 시작하여 반시계 방향으로 차례로 화소의 값을 조사해 나간다. 이때 최초로 만난 입자화소를 다음의 경계화소로서 추적을 진행하며, 최초의 경계점에 도달하면 경계추적을 완료한다 [10].

Fig. 4는 Fig. 2의 (h)마멸입자에 대하여 경계선 추출을 한 영상으로 마멸입자의 둘레에 대한 정보를 명확히 추출하고 있음을 알 수 있으며, 이 정보를 통하여 마멸입자의 경계에 대한 texture 및 structure 프랙탈 차원을 구하였고 경계내의 화소의 농도를 이용하여 마멸입자의 면에 대한 texture 및 structure 프랙탈 차원을 구하였다.

2.3. 프랙탈 차원

2-3-1. 마멸입자 경계의 프랙탈 차원

본 연구에서는 해안선과 같이 불규칙적인 형상을 가진 입자의 형상특징 해석에 프랙탈 차원을 이용하여 마멸입자의 경계형상과 면의 특징을 해석하였다.

Table 1은 마멸입자의 경계에 대한 프랙탈 차원을 구하기 위하여 Fig. 2의 (h)마멸입자를 영상처리한 후 생성된 경계 데이터를 나타낸 것이다. 이것은 영상처리를 통하여 얻어진 마멸입자의 경계에서 일정한 화소 간격만큼 떨어진 점을 연결하여 그 둘레를 계산하고, 다시 화소 간격의 길이를 달리하여 둘레를 계산한다. 이러한 과정을 반복하여 각 화소 간격과 그때의 둘레에 각각 로그를 취하여 대수의 값으로 변환시켜 구하

Table 1. Boundary data of wear particle(h) of Fig. 2

Step size	Perimeter	Log(s)	Log(p)
1	166.8528	0	2.2223
2	156.0188	0.301	2.1932
3	152.1487	0.4771	2.1823
4	147.1573	0.6021	2.1678
5	145.8841	0.699	2.164
6	141.2213	0.7782	2.1499
7	139.5247	0.8451	2.1447
8	135.067	0.9031	2.1305
9	131.4494	0.9542	2.1188
10	128.4654	1	2.1088
11	127.1408	1.0414	2.1043
12	130.067	1.0792	2.1142
13	117.9396	1.1139	2.0717
14	122.0049	1.1461	2.0864
15	123.8511	1.1761	2.0929
16	120.7142	1.2041	2.0818
17	114.6777	1.2304	2.0595
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

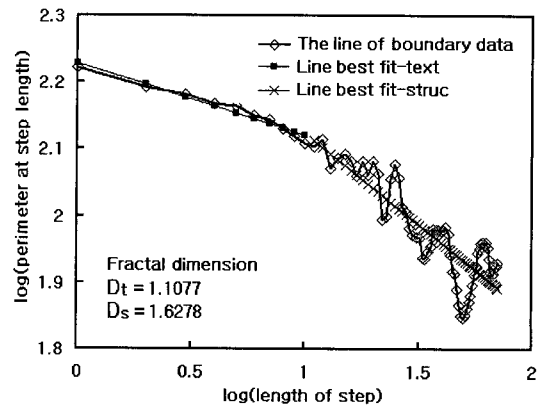


Fig. 5. Fractal descriptors of boundary for wear particle(h) of Fig. 2.

였다.

Fig. 5는 Table 1의 입자의 경계에 대한 데이터를 그림으로 나타낸 것으로, 화소간격의 대수 값의 간격에 따른 둘레의 대수 값의 변화를 최소자승법에 의하여 두 파라미터의 선형관계를 표시하였다. 프랙탈 차원은 이러한 선형관계를 나타내는 직선의 기울기를 1-D와 같다고 정의하여 구하였다. 여기서 D는 프랙탈 차원[1]을 의미하는 것으로 마멸입자의 형상이 거칠고 피상의 복잡한 형태일수록 프랙탈 차원 값은 큰 값을 가

지게 된다[2,3].

그림에서 보면 두 종류의 프랙탈 특징이 확연하게 구별되어 있다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 화소의 간격이 비교적 적은 10화소 이하의 영역에서 구한 프랙탈 차원은 입자경계의 texture, 즉 미세하게 나타나는

경계의 거칠고 부드러운 정도를 나타내고 간격이 비교적 큰 10화소 이상의 영역에서는 경계의 structure 특징, 즉 복잡도 또는 장단도의 형상 특징을 나타낸다 [2]. 따라서 본 연구에서는 화소 간격이 작은 영역에서의 프랙탈 차원을 texture 프랙탈 차원(D_t)으로 정의하고, 화소 간격이 큰 영역에서의 프랙탈 차원을 structure 프랙탈 차원(D_s)이라고 정의하여 입자경계의 형태적 특징을 수치화 하였다.

$$\begin{aligned} \text{Log}(p)_t &= -0.1077 \text{Log}(s)_t + 2.2289 & (1) \\ d_t &= -0.1077, D_t = 1 - d_t = 1.1077 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Log}(p)_s &= -0.6278 \text{Log}(s)_s + 2.9297 & (2) \\ d_s &= -0.6278, D_s = 1 - d_s = 1.6278 \end{aligned}$$

여기서, $\text{Log}(p)$ 와 $\text{Log}(s)$ 는 10화소 이하의 입자둘레와 화소간격의 대수값이고, $\text{Log}(p)_s$ 와 $\text{Log}(s)_s$ 는 10화소 이상의 입자둘레와 화소간격의 대수값이다.

식 (1)과 식 (2)는 Fig. 5의 최소자승법에 의하여 구한 선형관계식을 나타낸 것이다. 각 직선의 기울기는 -0.1077 과 -0.6278 로 나타나며, 이로부터 구한 texture 프랙탈 차원 D_t 는 1.1077, structure 프랙탈 차원 D_s 는 1.6278로서 이것을 그림에 표시하였다.

2-3-2. 입자면의 프랙탈 해석

Fig. 2의 (c)와 (d)마멸입자와 같이 입자의 형상적 특징의 차이는 크게 느낄 수 없다 하더라도 입자의 면에 나타나는 화소의 농도 분포는 분명한 차이를 가지고 있다.

따라서 입자의 형태 특징을 명확히 해석하기 위해서는 입자경계의 형태적 특징뿐만 아니라 화소의 농도차에 의한 입자면의 형태적 특징을 나타낼 필요가 있다.

Table 2는 입자의 면에 대한 특징을 수치화한 프랙탈 차원을 구하기 위하여 Fig. 2의 (h)마멸입자를 영상처리한 후 생성된 면의 데이터를 나타낸 것이다. 이것은 먼저 영상처리를 통하여 얻어진 마멸입자의 경계내에 있는 화소들에 대하여 행 또는 열의 방향으로 일정한 간격만큼 떨어진 점과의 명암의 차이를 모두 합한다. 그리고 다음으로 형상의 프랙탈 차원을 구할 때와 같은 방법으로 화소의 간격을 달리하여 명암 차의

Table 2. Surface data of wear particle(h) of Fig. 2

Step size	Sum of intensity difference	Log(s)	Log(p)
1	245210	0	5.3895
2	213843	0.301	5.3301
3	174784	0.477	5.2425
4	142572	0.6021	5.154
5	114571	0.699	5.0591
6	80835	0.7782	4.9076
7	55871	0.8451	4.7472
8	80653	0.9031	4.9066
9	40704	0.9542	4.6096
10	41325	1	4.6162
11	27127	1.0414	4.4334
12	37358	1.0792	4.5724
13	33355	1.1139	4.5232
14	22426	1.1461	4.3508
15	25962	1.1761	4.4143
16	10136	1.2041	4.0059
17	4516	1.2304	3.6548
18	7431	1.2553	3.871
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

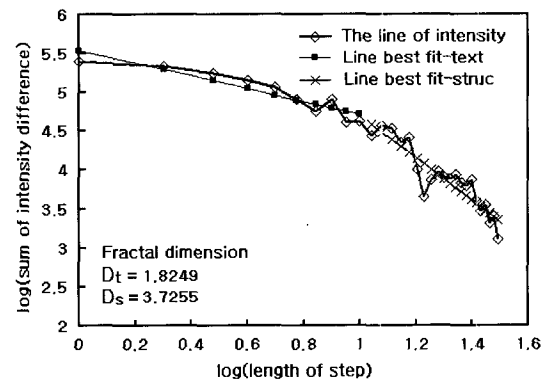


Fig. 6. Fractal descriptors of surface for wear particle(h) of Fig. 2.

총합을 구한 후 대수 값으로 변환하여 직선의 기울기를 구하고 프랙탈 차원 D 를 계산하여 구한 것이다.

Fig. 6은 Table 2의 입자의 면에 대한 데이터를 그림으로 나타낸 것으로, 이것은 화소 간격의 대수 값에 대한 화소 간격에 따른 명암 차의 총합의 대수 값의 변화를 최소자승법에 의하여 두 파라미터의 선형관계를 나타내었다. 그림에서 보면 입자의 면에서도 입자경계와 마찬가지로 두 종류의 프랙탈 특징이 나타나고

있음을 알 수 있다. 화소의 간격이 비교적 적은 10화소 이하의 영역에서 구한 프랙탈 차원은 입자면의 미세한 texture 프랙탈 차원(D_t')으로 정의하고, 간격이 비교적 큰 10화소 이상의 영역에서는 면의 structure 특징, 즉 면의 굴곡 특징을 structure 프랙탈 차원(D_s')이라고 정의하여 입자면의 형태적 특징을 수치화 하였다.

$$\begin{aligned} \text{Log}(SID)_t &= -0.8249 \text{Log}(s)_t + 5.5374 & (3) \\ d_t' &= -0.8249, D_t' = 1 - d_t' = 1.8249 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Log}(SID)_s &= -2.7255 \text{Log}(s)_s + 7.4249 & (4) \\ d_s' &= -2.7255, D_s' = 1 - d_s' = 3.7255 \end{aligned}$$

(SID : Sum of Intensity Difference)

여기서, $\text{Log}(SID)_t$ 는 10화소 이하의 입자 명암차의 총합이고, $\text{Log}(SID)_s$ 는 10화소 이상의 명암차의 총합에 대한 대수값이다.

식 (3)과 식 (4)는 최소자승법에 의해 구한 선형관계식으로, 여기서 각 직선의 기울기는 -0.8249 과 -2.7255 로 이로부터 구한 마멸입자의 면에 대한 texture 프랙탈 차원 D_t' 는 1.8249, structure 프랙탈 차원 D_s' 는 3.7255로서 이것을 그림에 표시하였다.

3. 결과 및 고찰

Table 3은 Fig. 2의 (a)~(h) 마멸입자에 대하여 경계와 면의 texture 및 structure 프랙탈 차원을 구하여 나타낸 것이다. 입자경계에 대한 texture 프랙탈 차원은 큰 차이 없이 유사한 경향을 나타내고 있지만 복잡도나 장단도와 같은 형상의 특징을 나타내는 입자경계의 structure 프랙탈 차원은 Fig. 2에서 보는 바와 같

Table 3. Boundary and surface fractal dimensions

Wear particle	Boundary		Surface	
	Texture (D_t)	Structure (D_s)	Texture (D_t')	Structure (D_s')
a	1.047	1.1492	1.7388	1.7456
b	1.0992	1.2032	1.7678	1.7058
c	1.0936	1.2738	1.6546	2.324
d	1.1058	1.2781	1.5962	2.0079
e	1.0781	1.2883	1.7047	2.6995
f	1.0877	1.3115	1.5814	1.51
g	1.085	1.4123	1.4365	2.8031
h	1.1077	1.6278	1.8249	3.7255

이 괴상의 복잡한 형상을 가질수록 큰 값을 나타내고 있다.

여기서 경계의 texture 특징이 입자마다 크게 차이 나지 않는 것은 컴퓨터에 선정되어 있는 해상도의 한계 때문이라고 생각되며, 이에 대한 특징을 명확히 하기 위해서는 CCD 카메라와 프레임그레버의 해상도를 높이거나 현미경의 배율을 높여 마멸입자를 크게 추출할 필요가 있다. 그러나 이러한 방법은 광학시스템의 한계성과 비용면에서의 문제점 때문에 효율적이지 못하다고 생각된다.

따라서 영상처리에 의한 마멸입자의 형상 특징은 비교적 큰 화소 간격을 이용하는 structure 프랙탈 차원으로 분석할 수 있으며 이때의 structure 프랙탈 차원을 입자의 경계 프랙탈 차원 또는 형상 프랙탈 차원으로 정의할 수 있다.

그리고 (c)와 (d)마멸입자의 형상 프랙탈 차원은 1.2738과 1.2781로 유사하지만, Fig. 2와 Table 3에서 나타낸 바와 같이 입자의 면에 있어서는 매우 다른 형태를 가지고 있다. 이와 같이 입자면의 그레이레벨 (grey level)값을 이용하여 마멸입자의 면에 대한 프랙탈 특징을 해석함으로써 마멸입자를 명백히 구분할 수가 있다. 입자면의 D_t' 가 낮은 (d), (f) 및 (g) 마멸입자는 그 면의 특징이 (a), (b), (e) 및 (h)마멸입자에 비하여 완만하고 부드러운 형상을 가진다는 것을 나타내 주고 있다. 그리고 (b)와 (c)마멸입자의 입자면의 프랙탈 특징에서 texture 면에서는 (c)마멸입자가 낮은 texture 프랙탈 차원 D_t' 을 가지고 있지만, structure 프랙탈 차원 D_s' 는 높게 나타나 있다. 이것은 (c)마멸입자가 (b)마멸입자 보다 부드러운 면의 형태를 가지고 있지만 굴곡이 크다는 것을 나타내 주고 있다.

이와 같이 마멸입자의 형상 프랙탈 차원과 면의 texture 및 structure 프랙탈은 입자의 형태 특징을 매우 잘 나타내 주는 프랙탈 파라미터로, 이 결과를 이용하면 기계구동면의 손상상태를 직접적으로 대변해주는 마멸입자의 형상분석에 유용한 자료로 활용할 수 있으리라 생각된다.

4. 결 론

윤활마찰 실험을 통해 채취한 유압흡동 부재의 마멸입자를 프랙탈 파라미터를 이용하여 마멸입자의 형상 및 형태적 특징을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 10화소 이하의 영역에서의 입자경계의 texture 프랙탈 차원과 10화소 이상의 영역에서 structure 프랙탈 차원을 이용하면 입자 경계와 면의 수치화를 통하여 형상분석이 가능하다.

(2) 입자경계를 명확하게 하기 위해서는 비교적 큰 화소 간격을 이용하는 structure 프랙탈 차원을 이용하는 것이 편리하다.

(3) 입자면에서 texture 프랙탈 차원값이 낮은 것은 입자의 형태가 완만하고 부드러우며, structure 프랙탈 차원값이 높다는 것은 입자의 골곡이 크다.

(4) 프랙탈 파라미터는 마멸입자의 형상분석에 매우 유용하게 사용할 수 있다.

참고문헌

1. B.B. Mandelbrot, "The Fractal Geometry of Nature," Freeman, New York, 1982.
2. H. Peitgen and D.Saupe, "The Science of Fractal Images," SpringerVerlag, pp. 21-70, 1988.
3. T.B. Kirk, G.W. Stachowiak and A.W. Batchelor, "Fractal Parameters and Computer Image Analysis applied to Wear Particles isolated by Ferrography," Wear, 145, pp.347-365, 1991.
4. W.W. Siefert and V.C. Westcott, "A Method for the Study of Wear Particles in Lubricating Oil," Wear, 21, pp. 27-42, 1972
5. M. Shibata, "Tribological Characteristics and Diagnosis of Deteriorated Lubricating Oil," JAST, Vol.39, No.7, pp.559-565, 1994.
6. B.J. Roylance and S. Raadnui, "The Morphological Attributes of Wear Particles-Their Role in Identifying Wear Mechanisms," Wear, 175, pp. 115-121, 1994.
7. T.B. Kirk, D. Panzera and R.V. Anamalay and Z.L. Xu, "Computer Image Analysis of Wear Debris for Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis," Wear, 181, pp.717-722, 1995.
8. 山本雄二, 杉村丈一, 梅田彰彦, "摩耗粉形態の特徴と記述方法," 트라이ボ로지-會議予稿集, pp.195-197, 1996.
9. 八木伸行, 井上誠喜, 林正樹, "C言語で學ぶ實戰畫像處理," オム社, pp.2-10, 1992.
10. 長谷川純一, 輿水大和, 中山 晶, 横井茂樹, "畫像處理の基本技法," 技術評論社, pp.70-73, 1986.