

마멸입자 형상분석을 위한 프랙탈 파라미터의 적용

원 두 원*, 전 성 재, 조 연 상 (동아대원)
박 흥 식, 전 태 옥 (동아대)

Application of Fractal Parameter for Morphological Analysis of Wear Particle

D. W. Won*, S. J. Jun, Y. S. Cho, H. S. Park, T. O. Jun

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 system. These descriptors to analyze shape and surface wear particle are shape fractal dimension and surface fractal dimension. The boundry 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 dimensions.

Key words - Wear Particle, Morphology, Image Processing, Boundry Fractal Dimension, Surface Fractal Dimension

1. 서 론

최근 입자나 면의 형태적인 특징해석에 있어서 해안선이나 산의 형상과 같은 자연물의 특징을 묘사하기 위하여 Mandelbrot가 처음 프랙탈 차원이 많이 이용되어지고 있다. 프랙탈 차원은 자연계에 존재하는 불규칙적인 물체들에 대하여 그 불규칙성을 정의하여 표현하는 것으로 유클리드 차원에서 표현하고 있는 정수 차원의 개념이 아닌 소수 차원의 개념으로 유클리드 차원으로는 명확히 정의할 수 없는 성질인 어떤 물체의 거칠거칠한 정도, 부서진 정도 그리고 불규칙한 정도 등을 측정하는 방법이다. 또한 프랙탈 차원에 의한 해석 방법은 입자나 면의 크기, 형상 또는 색상 등에 의한 해석과 같이 입자의 완벽하고 정확한 경계와 색상을

필요로하지 않으며 경계구역에 대하여 쉽게 적용할 수 있기 때문에 보다 간편하고 빠르게 해석할 수 있다는 장점이 있다.^(1,2)

이러한 프랙탈 차원의 특징을 이용하여 다종다양한 마멸입자부터 그 형태적 특징을 정리하면 기계구동계의 작동상태 진단에 활용하는 방법으로 매우 효과적이라고 생각되어진다.⁽³⁻⁶⁾ 그러나 이를 위하여 국내외에서 활발히 연구가 진행되어지고 있지만 아직까지 프랙탈 차원의 개념에 대한 지식, 자료 및 인지도의 부족으로 인하여 마멸입자의 형상 및 형태 특징에 대한 프랙탈 파라미터를 정립하지 못하고 있는 실정에 있다.

따라서 본 연구에서는 마찰·마멸 실험을 통해 채취한 마멸입자의 형상 및 형태 특징의 분석을 위하여 컴퓨터에 의한 디지털 영상처리 기술과 프랙탈 차원의 개념으로부터 마멸입자의 프랙탈 차원을 구하기 위한 방

법을 구축하고 마멸입자에 대한 프랙탈 파라미터를 정립하여 마멸입자의 형태적 특징을 정리할 수 있는 새로운 방법을 제시함으로써 보다 효과적인 기계습동부의 손상상태 및 작동상태 진단을 위한 데이터 처리 기술을 확립하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 마찰 및 마멸실험

마멸입자를 채취하기 위하여 pin-on-disk 형 마찰·마멸시험기로 윤활마찰실험을 하였다. 실험에 사용된 핀시험편은 직경 5.0mm의 베어링강구(鋼球) STB2(780Hv)를 사용하였고, 디스크 시험편은 기계습동부재로 사용되는 황동주물 HBsC3(160Hv)를 사용하였다. 그리고 실험에 사용한 윤활유는 무첨가 파라핀계 광유(8.2cSt@40°C)를 사용하였다. 그리고 작동조건으로는 접촉하중은 3kg으로 설정하였으며, 미끄럼거리는 0~234m까지 설정하여 실험을 행하였다.

그리고 윤활장치부에는 시험편 접촉점 하부에 oil bath를 설치하고 윤활유 공급은 순환펌프로써 실리콘 관을 통하여 시험편 접촉점에 분사시켰으며, 각 실험조건에 따른 마멸분은 oil bath내의 윤활유를 각반한 후 공경 0.45 μ m의 membrane filter가 부착된 윤활유 채취기구를 통하여 마멸분을 채취하였다.

2.2 영상처리 및 경계선 추출

채취한 마멸분으로부터 프랙탈 정보를 얻기 위한 영상처리 알고리즘을 Fig. 1에 나타내었다. 투과 및 낙사조명의 두가지 할로겐 램프를 가진 광학현미경을 통하여 상부의 컬러 CCD카메라에 의해 관측된 투과 및 낙사영상을 화소수 640x480, 화소당 분해능은 RGB 각 8bit (256 grey level)인 컴퓨터의 프레임그래버 (frame grabber)를 이용하여

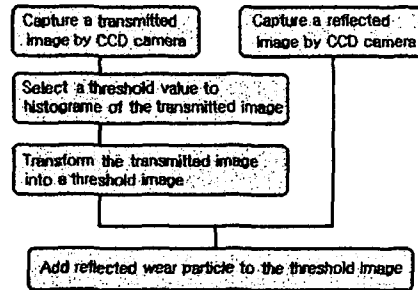


Fig. 1 Image processing algorithm

저장한 후, 투과영상은 히스토그램으로부터 역치값을 선정하여 2원화 영상으로 변환하였다. 그리고 변환된 2원화 영상과 낙사영상을 합성하여 마멸입자에 대한 경계와 표면의 명확한 형상을 추출하였으며, 영상처리한 마멸분의 예를 Fig.2의 (a)~(h)에 나타내었다. 마멸분은 화소수 84x84를 넘지 않는 범위에서 단순한 형태에서 피상의 형태까지 다양하게 추출하였다.

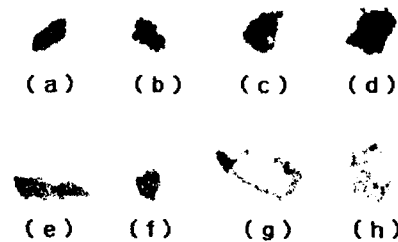


Fig. 2 Result of image processing for wear particle in lubricant

이와 같이 기본 영상처리를 통해 마멸입자의 형상을 명확히 구분지은 후, 마멸입자의 경계와 면에 대한 프랙탈 차원을 구하기 위하여 입자의 경계를 추출하였다. 입자의 경계추출법은 명확한 경계를 구분하기 위해 입자의 경계점을 차례로 추적하여 그 입자의 모양을 코드화하는 것으로 입자의 형상해석에 중요한 역할을 하는 알고리즘이다.^(7~9)

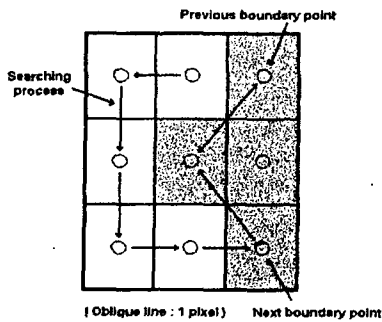


Fig. 3 Searching process of the next boundary point on border following

Fig. 3은 경계선 추출에서의 다음 경계점을 추적하는 방법을 나타낸 것으로서 현재 경계점의 8근방에서 왼쪽에 인접한 배경화소로부터 시작하여 반시계방향으로 차례로 화소의 값을 조사해 나간다. 이때 최초로 만난 입자화소를 다음의 경계화소로서 추적을 진행하며, 최초의 경계점에 도달하면 경계추적을 완료한다.⁽⁹⁾ Fig. 4는 Fig.2의 (h) 마멸입자에 대하여 경계선추출을 한 영상으

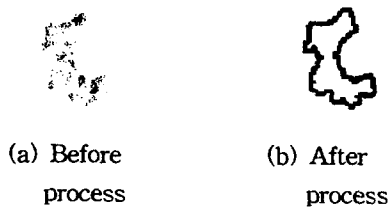


Fig. 4 Result of Searching process for the boundary

로 마멸입자의 둘레에 대한 정보를 명확히 추출하고 있음을 알 수 있으며 이 정보를 통하여 마멸입자의 경계에 대한 질감 및 구조적 프랙탈 차원을 구하였고 경계내의 화소의 농도를 이용하여 마멸입자의 면에 대한 질감 및 구조적 프랙탈 차원을 구하였다.

2.3 프랙탈 차원

2.3.1 입자경계의 프랙탈 차원

본 연구에서는 해안선과 같이 불규칙적인 형상의 특징해석을 위하여 Mandelbrot와 R.F.Voss^(1,2) 등이 제시하였던 프랙탈 차원을 이용하여 마멸입자의 경계형상과 면의 특징을 해석하였다. Table 1은 입자의 경계에 대한 프랙탈 차원을 구하기 위하여 Fig. 2의 (h) 마멸입자를 영상처리한 후 생성된 경계 데이터를 나타낸 것으로서, 이것은 영상처리를 통하여 얻어진 마멸입자의 경계에서 일정한 화소 간격만큼 떨어진 점을 연결하여 그 둘레를 계산하고, 다시 화소 간격의 길이를 달리하여 둘레를 계산한다. 이러한 과정을 여러 번 반복하여 각 화소 간격과 그때의 둘레에 각각 로그를 취하여 대수의 값으

Table 1 Boundry data of wear particle(h) from 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
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

로 변환시켰다. Fig. 5는 Table 1의 입자의 경계에 대한 데이터를 그래프로 나타낸 것으로 화소간격의 대수 값에 대한 간격에 따른 둘레의 대수 값의 변화와 최소자승법에 의한 두 파라미터(parameter)의 선형관계를 표시하였다

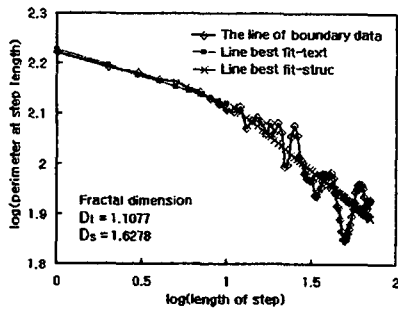


Fig. 5 Fratal descriptors of bounry of wear particle(h) from Fig. 2

$$\text{Log(perimeter)}_t = -0.1077 \text{Log(stepsize)}_t + 2.2289 \quad (1)$$

$d_t = -0.1077$, Texture fractal (D_t) = $1 - d_t = 1.1077$

$$\text{Log(perimeter)}_s = -0.6278 \text{Log(stepsize)}_s + 2.9291 \quad (2)$$

$d_s = -0.6278$, Structure fractal (D_s) = $1 - d_s = 1.6278$

프랙탈 차원은 이러한 선형관계를 나타내는 직선의 기울기를 $1-D$ 와 같다고 정의하여 구하였다. 여기서 D 는 프랙탈 차원을 의미하는 것으로 마멸입자의 형상이 거칠고 피상의 형태일수록 프랙탈 차원 값은 큰 값을 가지게 된다.^(1,2) 그리고 그림에서 보면 두종류의 프랙탈 특징이 나타나고 있음을 알 수 있으며, 일반적으로 화소의 간격이 비교적 적은 10화소 이하의 영역에서 구한 프랙탈 차원은 입자경계의 질감, 즉 미세하게 나타나는 경계의 거칠고 부드러운 정도를 나타내고 간격이 비교적 큰 10화소 이상의 영역에서는 경계의 구조적인 특징, 즉 복잡도 또는 장단도의 형상 특징을 나타낸다.⁽²⁾ 따라서 본 연구에서는 화소간격이 작은 영역에서의 프랙탈 차원을 질감 프랙탈 차원(D_t)으로 정의하고 큰 영역에서의 프랙탈 차원을 구조 프랙탈 차원(D_s)이라고 정의하여 입자경계의 형태적 특징을 수치화하였다. 식(1)과 식(2)는 최소자승법에 의해 구한 선형관계식으로 여기서 각 직선의 기울기는 -0.1077 과 -0.6278 로 이로부터 구한 질감 프랙탈 차원(D_t)은 1.1077, 구조 프랙

탈 차원값은 1.6278 이다.

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 2 Surface data of wear particle(h) form 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	0.4771	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
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

Table 2는 입자의 면에 대한 특징을 수치화 한 프랙탈 차원을 구하기 위하여 Fig. 2의 (h) 마멸입자를 영상처리한 후 생성된 면의 데이터를 나타낸 것으로서, 이것은 영상처리를 통하여 얻어진 마멸입자의 경계 내에 있는 화소들에 대하여 행 또는 열의 방향으로 일정한 간격만큼 떨어진 점과의 명암의 차이를 모두 합하고, 형상의 프랙탈

차원을 구할 때와 같은 방법으로 화소의 간격을 달리하여 명암 차의 총합을 구한 후 대수의 값으로 변환하여 직선의 기울기를 구하고 프랙탈 차원 D를 계산한다. Fig. 6은 Table 2의 입자의 면에 대한 데이터를 그래프로 나타낸 것으로 화소간격의 대수 값에 대한 화소 간격에 따른 명암 차의 총합의 대수 값의 변화와 두 파라미터(parameter)의 선형관계를 나타내었다. 그림에서 보면 입자의 면에서도 입자경계와 마찬가지로 두종류의 프랙탈 특징이 나타나고 있음을 알 수 있다. 화소의 간격이 비교적 작은 10화소 이하의 영역에서 구한 프랙탈 차원은 입자면의 미세한 질감 프랙탈 차원(Dt')으로 정의하고 간격이 비교적 큰 10화소 이상의 영역에서는 면의 구조적인 특징, 즉 면의 굴곡 특징을 나타내는 구조 프랙탈 차원(Ds')이라고 정의하여 입자면의 형태적 특징을 수치화 하였다.

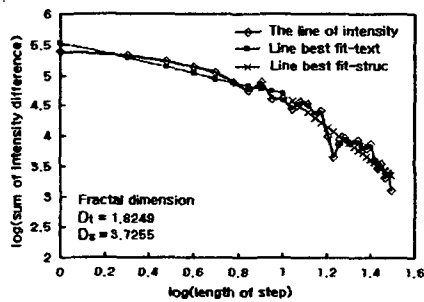


Fig. 6 Fratal descriptors of surface of wear particle(h) from Fig. 2

$$\text{Log}(\text{SID})_t = -0.8249 \text{Log}(\text{stepsize})_t + 5.5374 \quad (3)$$

$$d'_t = -0.8249, \quad \text{Texture fractal } (D'_t) = 1 - d'_t = 1.8249$$

$$\text{Log}(\text{SID})_s = -2.7255 \text{Log}(\text{stepsize})_s + 7.4249 \quad (4)$$

$$d'_s = -2.7255, \quad \text{Structure fractal } (D'_s) = 1 - d'_s = 3.7255$$

(SID : Sum of Indensity Difference)

식(3)과 식(4)는 최소자승법에 의해 구한 선형관계식으로 여기서 각 직선의 기울기는 -0.8249과 -2.7255로 이로부터 구한 마멸입

자의 면에 대한 질감 프랙탈 차원(Dt)은 1.8249, 구조 프랙탈 차원값은 3.7255 이다.

3. 결과 및 고찰

Table 3은 Fig. 2의 (a)~(h) 마멸입자에 대하여 경계와 면의 질감 및 구조 프랙탈 차원을 구하여 나타낸 것으로 입자경계에 대한 질감 프랙탈 차원은 큰 차이 없이 유사한 경향을 나타내고 있지만 복잡도나 장단도와 같은 형상의 특징을 나타내는 입자 경계의 구조 프랙탈 차원은 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 괴상의 형상을 가질수록 큰 값을 나타내고 있다. 여기서 경계의 질감 특징이 입자마다 크게 차이 나지 않는 것은 컴퓨터에 미리 정해져 있는 해상도의 한계 때문이라고 생각되어지며 이에 대한 특징을 명확히 하기 위해서는 CCD 카메라와 프레임그레버의 해상도를 높이거나 현미경의 배율을 높여 마멸입자를 크게 추출할 필요가 있다. 그러나 이러한 방법은 광학 시스템의 한계성과 비용면에서의 문제점 때문에 효율적이지 못하다고 생각되어진다. 따라서 영상처리에 의한 마멸입자의 형상 특징은 비교적 큰 화소간격을 이용하는 구조 프랙탈 차원으로 분석할 수 있으며 이 때의 구조 프랙탈 차원을 입자의 경계 프랙탈 차원 또는 형상 프랙탈 차원으로 정의할 수 있다.

Table 3 Boundry and surface fractal dimensions

Wear particle	Boundry		Surface	
	Texture (Dt)	Structure (Ds)	Texture (Dt')	Structure (Ds')
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

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 입자 면의 그레이레벨(grey level)값을 이용하여 마멸입자의 면에 대한 프랙탈 특징을 해석하므로써 마멸입자를 명백히 구분할 수가 있다. 입자면의 질감 프랙탈 차원(Dt')이 낮은 (d), (f) 및 (g) 마멸입자는 그 면의 특징이 (a), (b), (e) 및 (h) 마멸입자에 비해 완만하고 부드럽게 이루어져 있음을 나타내고 있다. 그리고 (b)와 (c) 마멸입자의 입자면의 프랙탈 특징을 살펴보면 질감면에서는 (c) 마멸입자가 낮은 질감 프랙탈 차원(Dt')을 가지고 있지만 구조 프랙탈 차원(Ds')은 높게 나타나고 있다. 이는 (c) 마멸입자가 (b) 마멸입자 보다 부드러운 면의 형태를 하고 있지만 굴곡이 높다는 것을 의미한다.

이와같이 마멸입자의 형상 프랙탈 차원과 면의 질감 및 구조 프랙탈 차원은 입자의 형태 특징을 매우 잘 나타내 주는 프랙탈 파라미터로 마멸입자의 형상 분석에 매우 유용한 파라미터라고 생각되어진다.

4. 결론

마찰·마멸 실험을 통해 채취한 마멸입자의 형태적 특징 추출을 위해 컴퓨터에 의한 디지털 영상처리 기술과 프랙탈 파라미터를 이용하여 마멸입자의 형상 및 형태적 특징을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 화소간격이 작은 10화소 이하의 영역에서의 프랙탈 차원을 입자경계의 질감 프랙탈 차원(Dt)과 10화소 이상의 영역에서 프랙탈 차원을 입자경계의 구조 프랙탈 차원(Ds)을 이용하여 마멸입자 경계의 형상적 특징을 수치화 할 수 있다.
- (2) 화소의 간격이 비교적 적은 10화소 이하의 영역에서 구한 프랙탈 차원은 입자면의 미세한 질감 프랙탈 차원(Dt')과 10화소 이상의 영역에서는 면의 구조적인 특징, 즉

면의 굴곡 특징을 나타내는 구조 프랙탈 차원(Ds')를 이용하여 마멸입자면의 형태적 특징을 수치화 할 수 있다.

- (3) 마멸입자의 형상 프랙탈 차원과 면의 질감 및 구조 프랙탈 차원은 입자의 형태 특징을 매우 잘 나타내 주는 프랙탈 파라미터로 마멸입자의 형상 분석에 매우 유용한 파라미터임을 알 수 있다.

참고문헌

- (1) Heinz-Otto Peitgen, Dietmar Saupe, "The Science of Fractal Images", SpringerVerlag, pp. 21~70, 1988
- (2) T. B. Kirk, G. W. Stachowiak, A. W. Batchelor, "Fractal parameters and computer image analysis applied to wear particles isolated by ferrography", Wear, 145, pp.347~365, 1991.
- (3) W. W. Siefert and V. C. Westcott, "A Method for the Study of Wear Particles in Lubricating Oil wear, 21, pp. 27~42, 1972.
- (4) Masaaki Shibata, "Tribological Characteristics and Diagnosis of Deteriorated Lubricating Oil" JJST, Vol. 39, No. 7, pp. 559~565, 1994.
- (5) B. J. Roylance and S. Raadnu, "The Morphological Attributes of Wear Particles -Their Role in Identifying Wear Mechanisms", Wear, 175, pp. 115~121, 1994.
- (6) T. B. Kirk, D. Panzera, 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.
- (7) 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", トライボロジー-會議予稿集, pp. 195~197, 1996-5.
- (8) 서영백, 박홍식, 전태욱, "기계윤활운동면의 작동상태 진단을 위한 마멸분 해석", 대한기계학회논문집(A), 제21권, 제5호, pp. 835~841, 1997.
- (9) 八木伸行, 井上誠喜, 林正樹, "C言語で学ぶ 實戦画像處理", オム社, pp. 2~10, 1992.