

차원해석에 의한 기계습동재료의 마멸분 형상특징 분석

원 두 원*, 전 성 재, 조 연 상(동아대원)
김 동 호(문경대), 박 흥 식(동아대)

Morphological Analysis of Wear Particles by Fractal Dimension

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

Abstract - Fractal dimension is the method to measure the roughness and the irregularity of something that cannot be defined obviously by Euclidean dimension. And the analysis method of this dimension don't need perfect, accurate boundary and color like analysis for diameter, perimeter, aspect or reflectivity of wear particles or surface. If we arranged the morphological characteristic of various wear particle by using the characteristic of fractal dimension, it might be very efficient to the diagnosis of driving condition. 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 boundary fractal dimension and surface fractal dimension.

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

1. 서 론

자연의 불규칙한 현상을 정량화 할 수 있는 프랙탈 차원의 특징을 이용하여 다종다양한 마멸입자부터 그 형태적 특징을 정리하면 매우 효과적으로 기계구동계의 작동상태 진단에 활용할 수 있음에도 불구하고 아직까지 프랙탈 차원의 개념에 대한 지식, 자료 및 인지도의 부족으로 인하여 마멸입자의 형상 및 형태 특징에 대한 프랙탈 파라미터를 정립하지 못하고 있는 실정에 있다.^(1~4)

이를 위하여 필자는 앞의 연구를 통해 마멸입자의 형상 및 형태 특징에 대한 프랙탈 차원을 구하기 위한 방법을 구축하였으며, 이로부터 마멸입자에 대한 프랙탈 파라미터를 조사하여 정립함으로써 마멸입자의 형태

적 특징을 정리할 수 있는 새로운 방법을 제시한 바 있다.

본 연구에서는 이러한 프랙탈 파라미터를 실질적으로 적용하기 위하여 현재 유압피스톤 모터의 slipper-pad의 윤활 구동부재로 사용되는 황동 및 청동 주물재료를 사용하여 pin on disk 윤활마찰 실험장치를 이용하여 윤활마찰·마멸 실험을 하였다. 그리고 윤활유 중의 마멸분은 membran filter로 채취한 후 디지털 영상처리 기술을 이용하여 작동조건에 따라 채취한 마멸입자의 경계 및 입자 면에 대한 프랙탈 파라미터를 구하였다. 다양한 마멸입자의 형상 및 형태적 특징의 분석에 이 프랙탈 파라미터의 적용 가능성을 제시함으로써 보다 효과적으로 기계습동재료의 손상상태 및 작동상태를 예지할 수 있는 실용적인 기술을 확립하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 마찰 및 마멸실험

마멸입자를 채취하기 위하여 pin-on-disk 형 마찰·마멸시험기로 윤활 마찰·마멸실험을 하였으며, Fig.1에 이의 개요도를 나타내었다. 윤활실험에 사용된 핀 시험편은 직경 5.0mm의 베어링 강구 STB2(780Hv)를 사용하였고, 디스크 시험편은 기계습동부재로 사용되는 황동주물 HBsC3(160Hv)과 청동주물 LBC3를 사용하였다. 그리고 실험에 사용한 윤활유는 무첨가 파라핀계 광유(8.2cSt @40℃)를 사용하였다. 하중조건으로는 접촉하중은 3kg, 6kg, 9kg, 12kg 및 15kg으로 행하였으며, 미끄럼거리는 0~234m까지 설정하여 실험을 행하였다.

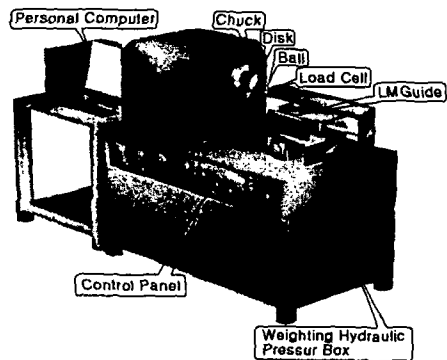


Fig. 1 Schematic diagram of pin on disk type wear tester

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

2.2 영상처리 및 경계선 추출

채취한 마멸분으로부터 프랙탈 정보를 얻

기 위한 영상처리 알고리즘을 Fig. 2에 나타내었다. 투과 및 낙사조명의 두 가지 할로겐 램프를 가진 광학현미경을 통하여 상부의 컬러 CCD카메라에 의해 관측된 투과 및 낙사영상을 화소수 640 \times 480, 화소당 분해능은 RGB 각 8bit (256 grey level)인 컴퓨터의 프레임그래버(frame grabber)를 이용하여 저장한 후, 투과영상은 히스토그램으로부터 역치값을 선정하여 2원화 영상으로 변환하였다. 그리고 변환된 2원화 영상과 낙사영상을 합성하여 마멸입자에 대한 경계와 표면의 명확한 형상을 추출하였다. Fig. 3는 영상처리를 위한 소프트웨어를 나타낸 것으로 C++ 언어를 이용하여 자체 개발하였다.

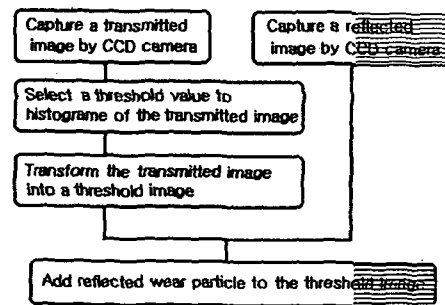


Fig. 2 Image processing algorithm

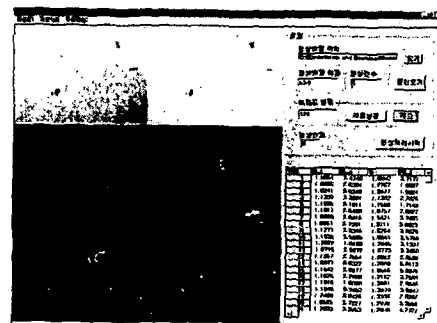


Fig. 3 Image processing monitor

이와 같이 기본 영상처리를 통해 마멸입자의 형상을 명확히 구분 지은 후, 마멸입자의 경계와 면에 대한 프랙탈 차원을 구하기

위하여 입자의 경계를 추출하였다. 입자의 경계 추출법은 명확한 경계를 구분하기 위해 입자의 경계점을 차례로 추적하여 그 입자의 모양을 코드화 하는 것으로 입자의 형상해석에 중요한 역할을 하는 알고리즘이다.^(5, 6)

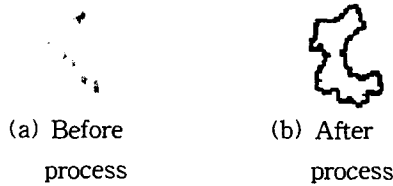


Fig. 4 Result of searching process for the boundary

Fig. 4 는 작용하중 3 kg에서의 마멸입자에 대하여 경계선추출을 한 영상으로 마멸입자의 둘레에 대한 정보를 명확히 추출하고 있음을 알 수 있으며 이 정보를 통하여 마멸입자의 경계에 대한 프랙탈 파라미터를 구하였다.

2.3 프랙탈 파라미터

2.3.1 입자경계의 프랙탈 차원

본 연구에서는 해안선과 같이 불규칙적인 형상의 특징해석을 위하여 Mandelbrot 와 R.F.Voss^(7, 8) 등이 제시하였던 프랙탈 차원을 이용하여 마멸분의 경계형상과 면의 특

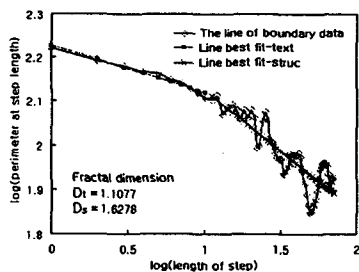


Fig. 5 Fractal descriptors of boundary of wear particle(h) from Fig. 2

$$\text{Log(perimeter)}_1 = -0.1077 \text{ Log(stepsize)}_1 + 2.2289 \quad (1)$$

$$d_1 = -0.1077, \quad \text{Texture fractal } (D_1) = 1 - d_1 = 1.1077$$

$$\text{Log(perimeter)}_2 = -0.6278 \text{ Log(stepsize)}_2 + 2.9297 \quad (2)$$

$$d_2 = -0.6278, \quad \text{Structure fractal } (D_2) = 1 - d_2 = 1.6278$$

징을 해석하였다. Fig. 5는 Fig. 4의 마멸입자를 영상처리 한 후 생성된 경계 데이터로부터 프랙탈 파라미터를 구하는 방법을 나타낸 것으로 이것은 영상처리를 통하여 얻어진 마멸입자의 경계에서 화소 간격과 그때의 둘레에 각각 로그를 취하여 대수의 값으로 변환하여 최소자승법에 의한 두 파라미터(parameter)의 선형관계를 표시하였다

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.^(7, 8) 그리고 그림에서 보면 두 종류의 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.⁽⁸⁾ 따라서 본 연구에서는 화소간격이 작은 영역에서의 프랙탈 차원을 질감 프랙탈 차원(D_1)으로 정의하고 큰 영역에서의 프랙탈 차원을 구조 프랙탈 차원(D_2)이라고 정의하여 입자경계의 형태적 특징을 수치화 하였다. 식(1)과 식(2)는 최소자승법에 의해 구한 선형관계식으로 여기서 각 직선의 기울기는 -0.1077 과 -0.6278 로 이로부터 구한 질감 프랙탈 차원은 1.1077 , 구조 프랙탈 차원 값은 1.6278 이다. 그리고 전체의 경계 데이터에 대한 선형관계식으로부터 입자 경계의 전체 프랙탈 차원(D)을 정의하여 구하였다.

2.3.2 입자 면의 프랙탈 차원

입자의 형태 특징을 명확히 해석하기 위해서는 입자경계의 형태적 특징뿐만 아니라 화소의 농도 차에 의한 입자 면의 형태적 특징을 나타낼 필요가 있다.

Fig. 6은 입자의 면에 대한 데이터를 그래프로 나타낸 것으로 화소간격의 대수 값에 대한 화소 간격에 따른 명암 차의 총합의 대수 값의 변화와 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 입자 면의 미세한 질감 프랙탈 차원(D_i')으로 정의하고 간격이 비교적 큰 10화소 이상의 영역에서는 면의 구조적인 특징, 즉 면의 굴곡 특징을 나타내는 구조 프랙탈 차원(D_s')이라고 정의하여 입자 면의 형태적 특징을 수치화하였다.

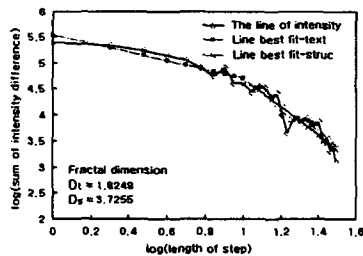


Fig. 6 Fractal descriptors of surface of wear particle

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

$$d_i' = -0.8249, \text{ Texture fractal } (D_i') = 1 - d_i' = 1.8249$$

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

$$d_s' = -2.7255, \text{ Structure fractal } (D_s') = 1 - d_s' = 3.7255$$

(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 차원은 1.8249, 구조 프랙탈 차원값은 3.7255 이다. 또한 전체의 면 데이터에 대한 선형관계식으로부터 입자 면의 전체 프랙탈 차원(D')을 정의하여 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 마멸입자 경계의 형태 특징

Fig. 7은 HBsC3와 LBC3의 작용하중에 따른 질감 프랙탈 차원값을 나타낸 것으로 작용하중이 증가함에 따라 큰 차이 없이 유사한 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 이는 컴퓨터에 미리 정해져 있는 해상도의 한계 때문이라고 생각되어진다. 그리고 HBsC3가 LBC3보다 질감 프랙탈 차원 값이 대체로 약간 높게 나타나고 있다는 것은 HBsC3의 마멸 입자의 경계가 다소 거칠다는 것을 나타낸다.

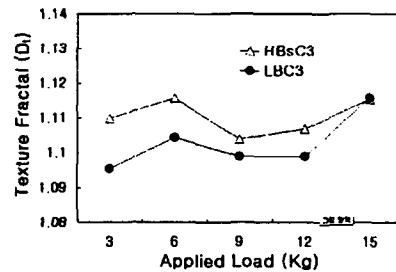


Fig. 7 Effect of applied load on texture fractal dimension of boundary

Fig. 8은 작용하중에 따른 구조 프랙탈 차원값을 나타낸 것으로 HBsC3가 LBC3 보다 구조 프랙탈 차원값이 매우 높게 나타나고 있으며, LBC3의 경우에는 작용하중이 증가함에 따라 구조 프랙탈 차원은 감소함을 알 수가 있다. 이는 HBsC3의 마멸 입자가 LBC3 보다 피상의 형상을 가지고 있다는 것을 나타내고 있으며 LBC3의 경우에는 대부분의 마멸 입자가 저하중에서 보다 복잡하고 피상이라는 것을 나타낸다.

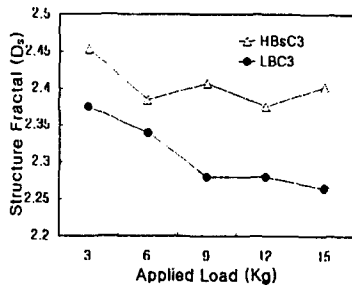


Fig. 8 Effect of applied load on structure fractal dimension of boundary

본 연구에서는 질감적인 측면과 구조적인 측면의 형상 특징을 종합하여 작동조건에 따른 입자의 형상 특징을 해석하기 위해 입자경계의 전체 데이터를 이용하여 경계에 대한 전체 프랙탈 차원을 구하였다. Fig. 9는 작용하중에 따른 전체 프랙탈 차원 값의 변화를 나타낸 것으로 재료에 관계없이 작용하중이 증가함에 따라 전체 프랙탈 차원 값은 감소하고 있다. 이는 저하중일수록 마

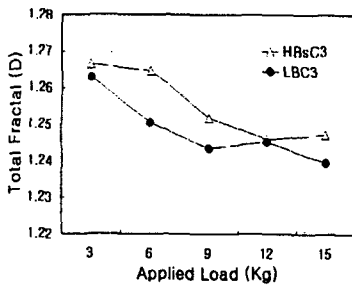


Fig. 9 Effect of applied load on total fractal dimension of boundary

멸입자의 형상이 복잡하고 괴상의 형태를 가진다는 것을 나타내 주고 있다.

이와 같은 결과로 볼 때, 구조 프랙탈 차원은 재료에 따른 마멸 입자의 형상 특징을 잘 나타내 주고 있었으며 작용하중에 따른 마멸 입자의 특징은 전체 프랙탈 차원을 이용하는 것이 효과적이라고 생각되어진다.

3.2 마멸입자 면의 형태 특징

Fig. 10은 작용하중에 따른 황동 HBsC3와

청동 LBC3의 마멸입자 면의 질감 프랙탈 차원 값을 나타낸 것으로 작용하중이 증가함에 따라 차원 값이 증가하고 있으며, 고하중에서 HBsC3의 질감 프랙탈 차원 값이 LBC3 보다 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 작용하중이 증가함에 따라 마멸입자 면의 질감이 거칠어지고 고하중에서의 LBC3의 입자 면이 HBsC3보다 훨씬 부드럽다는 것을 나타낸다.

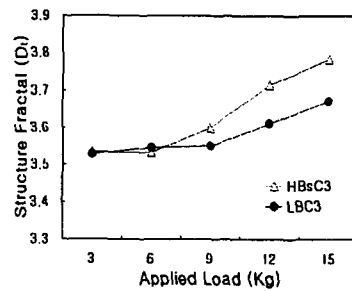


Fig. 10 Effect of applied load on texture fractal dimension of surface

Fig. 11은 작용하중에 따른 마멸 입자의 면에 대한 구조 프랙탈 차원 값을 나타낸 것으로 작동조건에 따른 면의 구조적인 형태 특징, 즉 면의 굴곡 정도를 보여준다. 그림에서 보면 작용하중에 관계없이 LBC3가 HBsC3 보다 구조 프랙탈 차원 값이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 LBC3의 마멸입자 면의 굴곡이 HBsC3보다 크고 복잡하다는 것을 나타낸다.

Fig. 10과 Fig.11에서 입자면의 전체적인

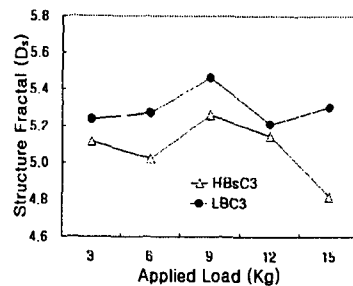


Fig. 11 Effect of applied load on structure fractal dimension of surface

특징에서 HBsC3는 비교적 굴곡이 완만하면서 거친 특징을 가진다는 것을 알 수 있으며 LBC3는 비교적 굴곡이 크지만 부드러운 특징을 가진다고 생각한다.

Fig. 12는 입자 면에 대한 전체 프랙탈 차원 값을 나타낸 것으로 질감적인 측면과 구조적인 측면을 종합하여 나타낸 것이다. 그림에서 보면 전체 프랙탈은 재료 및 하중 조건에 대하여 큰 차이 없이 유사한 값을 가지고 있다. 이는 입자 면의 전체적인 형상 특징은 작동조건에 관계없이 대체로 유사한 형태를 하고 있음을 알 수 있으며 이러한 결과로 볼 때, 작동조건에 따른 입자 면의 해석을 위해서는 질감 프랙탈 차원과 구조 프랙탈 차원을 이용하는 것이 효과적이라고 생각된다.

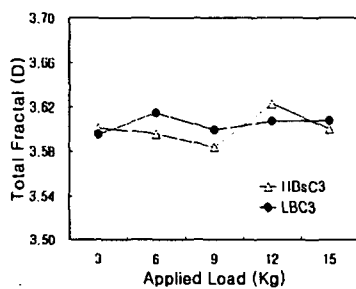


Fig. 12 Effect of applied load on total fractal dimension of surface

4. 결론

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

(1) 마멸입자의 경계에 대한 구조 프랙탈 차원을 살펴보았을 때, HBsC3의 마멸입자가 LBC3 보다 괴상의 형상을 가지고 있으며, LBC3의 경우에는 대부분의 마멸입자가 저하중에서 보다 복잡하고 괴상의 형태를 가진다.

(2) 작용하중에 따른 입자 경계의 전체 프랙탈 차원 값을 통해 저하중일수록 마멸입자의 형상이 복잡하고 괴상의 형태를 가진다.

(3) 입자 면의 질감 프랙탈 차원과 구조 프랙탈 차원을 통해 입자 면의 형태 특징에서 HBsC3는 비교적 굴곡이 완만하면서 거친 특징을 가지며, LBC3는 비교적 굴곡이 크지만 부드러운 형상을 나타낸다.

참고문헌

- (1) W. W. Seifert and V. C. Westcott, "A Method for the Study of Wear Particles in Lubricating Oil wear, 21, pp. 27~42, 1972.
- (2) Masaaki Shibata, "Tribological Characteristics and Diagnosis of Deteriorated Lubricating Oil" JJST, Vol. 39, No. 7, pp. 559~565, 1994.
- (3) B. J. Roylance and S. Raadnu, "The Morphological Attributes of Wear Particles - Their Role in Identifying Wear Mechanisms", Wear, 175, pp. 115~121, 1994.
- (4) T. B. Kirr, 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.
- (5) 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.
- (6) 서영백, 박홍식, 전태욱, "기계윤활운동면의 작동상태 진단을 위한 마멸분 해석", 대한기계학회논문집(A), 제21권, 제5호, pp. 835~841, 1997.
- (7) Heinz-Otto Peitgen, Dietmar Saupe, "The Science of Fractal Images", SpringerVerlag, pp. 21~70, 1988
- (8) 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.