Journal of the KSTLE Vol. 22, No. 5, October 2006, pp. 276~281
The Korean Society of Tribologists & Lubrication Engineers

윤활유 중의 마멸입자의 프랙탈 형상특징 추출 방법

우규성 · 조연상* · 김동호* · 예규현 · 박흥식*†**

부산정보대 메카트로닉스과, *동아대학교 기계공학부, **창원전문대학 자동차기계학부

Extraction of Fractal Shape Characteristics of Wear Particles in Lubricant

Kyusung Woo, Yonsang Cho*, Dongho Kim*, Gyooheon Ye and Heungsik Park*†**

Mechatronics, Busan Info-tech College
**Dept. of Mechanical Engineering, DongA University*
***Dept. of Automotive & Mechanical Engineering, Changwon College*

Abstract – The fractal dimension is quantitatively to define the irregular characteristic of the shape in natural. It can be useful in describing morphological characteristics of various wear particles. This paper was undertaken to diagnose failure condition for sliding members in lubrication by fractal dimension. It will be possible to diagnose wear mechanism, friction and damage state of machines through analysis of shape characteristics for wear particle on driving condition by fractal parameters. In this study, the calculating and analyzing methods of fractal dimensions were constructed for the condition monitoring and wear particle analysis in lubricant condition. So, we carried out the Friction and wear test with the ball on disk type tester, and the fractal parameters of wear particle in lubricated conditions were calculated. Fractal parameters were defined as texture fractal dimension (D_t), structure fractal dimension (D_s) and total fractal dimension (D).

Key words – wear particle, shape characteristics, fractal dimension.

1. 서 론

마멸입자의 형태는 입자가 발생된 구동부의 손상과 직접적인 관계가 있다[1]. 따라서 윤활유 중의 마멸입자를 관찰하는 것은 기계의 손상을 판단하는데 매우 효과적인 방법으로 이러한 마멸입자를 분석하기 위하여 많은 연구자들이 영상처리와 프랙탈 차원을 제안하였다[2-5]. 프랙탈 차원[6,7]은 자연의 불규칙한 현상을 정량화 할 수 있는 것으로 다종다양한 마멸입자부터 그 형태적 특징을 매우 효과적으로 나타낼 수 있다. 그러나 아직까지 작동조건에서 발생된 전체 마멸입자의 형상 및 형태 특징에 대한 프랙탈 파라미터를 구하기 위한 방법은 정립하지 못하고 있는 실정에 있다. 따라서 프랙탈 차원을 마멸입자에 적용하여 작동조건에 따른 마멸 상태진단에 이용하기 위해서는 조건에 따라 발생되는 다양한 마멸입자로부터 프랙탈 차원을 구하는 방법과 이를 이용하는 방법을 구축할 필요가 있다.

본 연구에서는 프랙탈 파라미터를 이용하여 윤활 구동 부재에 대한 마멸입자 분석 및 손상상태 진단을 위하여 ball on disk형 마멸 시험기를 이용하여 실험을 행하였다. 그리고 작동조건에 따라 발생된 마멸입자를 채취하여 컴퓨터 영상처리를 통해 프랙탈 파라미터를 구하였다. 프랙탈 파라미터는 질감 프랙탈 차원(D_t), 구조 프랙탈 차원(D_s) 및 총 프랙탈 차원(D)로 정의하여 마멸입자의 형상 특징을 수치화하여 나타내었으며, 이를 이용하여 작동조건에 따른 마멸입자의 형태 특징을 분석하고자 하였다.

†주저자 · 책임저자 : parkhs@daunet.donga.ac.kr

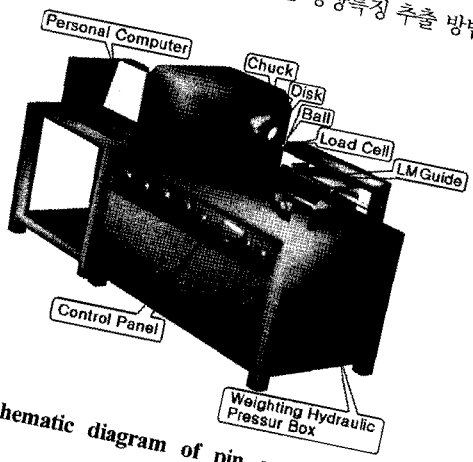


Fig. 1. Schematic diagram of pin on disk type wear tester.

2. 실험 방법

2-1. 마찰 및 마멸 실험

마멸입자를 채취하기 위하여 ball-on-disk형 시험기로 윤활 마찰마멸실험을 하였으며, Fig. 1에 이의 개요도를 나타내었다. 윤활실험에 사용된 핀 시험편은 직경 5.0 mm의 알루미나 세라믹스를 사용하였고, 디스크 시험편은 자동차 및 기계부품으로 많이 사용되는 기계구조용 탄소강 SM45C, 스테인리스강 STS304 및 청동주물 LBC3를 사용하였다.

시험편 접촉점 하부에 oil bath를 설치하고 윤활유 공급은 순환펌프로서 실리콘 관을 통하여 시험편 접촉점에 분사시켰으며, 실험에 사용한 윤활유는 무첨가 파라핀계 광유(8.2cSt @40℃)를 사용하였다. 접촉하중은 3 kg으로행하였으며, 미끄럼속도는 2.83 m/min로 설정하였다. 그리고 미끄럼거리는 0~510 m까지 설정하여 실험하였으며, 170 m, 340 m 및 510 m에서 윤활유를 교환하였다. 각 실험조건에 따른 마멸분은 oil bath내의 윤활유를 노말헥산과 1:1로 혼합하여 공경 0.45 μm의 membrane filter가 부착된 윤활유 채취기구를 통하여 마멸분을 채취하였다. 마찰계수는 ball 시험편 홀더에 부착된 로드셀로부터의 마찰력 신호를 컴퓨터로 저장하여 측정하였다.

2-2. 영상처리 및 경계선 추출

채취한 마멸분으로부터 프랙탈 정보를 얻기 위한 영처리 알고리듬을 Fig. 2에 나타내었다. 채취한 마멸은 투과조명의 할로겐램프를 가진 광학현미경 상부 디지털카메라를 이용하여 컴퓨터에 저장하였다. 디

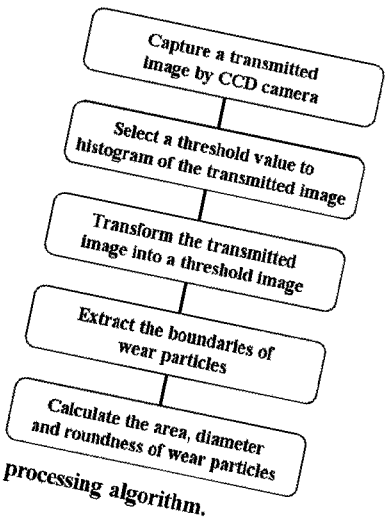
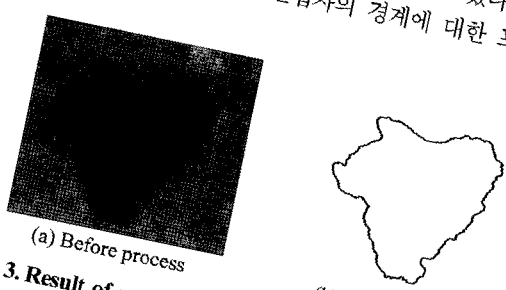


Fig. 2. Image processing algorithm.

지털카메라는 400백만 화소로 화소수 2272×1704, 화소당 분해능은 RGB 각 8 bit(256 grey level)를 가지고 있으며, 저장된 마멸분 투과영상은 히스토그램으로부터 역치값을 선정하여 2원화 영상으로 변환하여 마멸분에 대한 명확한 형상을 추출하였다. 그리고 마멸분의 영상처리는 비주얼 C++로 자체 개발한 소프트웨어를 이용하였다.

이와 같이 기본 영상처리를 통해 마멸분의 형상을 명확히 구분 지은 후, 마멸분의 형상 대한 프랙탈 차원을 구하기 위하여 입자의 경계를 추출하고 기본 정보인 면적, 직경 및 복잡도를 구하였다. 입자의 경계 추출법은 명확한 경계를 구분하기 위해 입자의 경계점을 차례로 추적하여 그 입자의 모양을 코드화 하는 것으로 입자의 형상해석에 중요한 역할을 하는 알고리즘이다[3,4].

Fig. 3은 작용하중 3 kg에서 마멸입자에 대하여 경계선을 추출하여 나타낸 것이다. 마멸입자의 둘레에 대한 정보를 명확히 추출하고 있음을 알 수 있다. 그리고 이 정보를 통하여 마멸입자의 경계에 대한 프랙탈



(a) Before process (b) After process

Fig. 3. Result of searching process for the boundary.

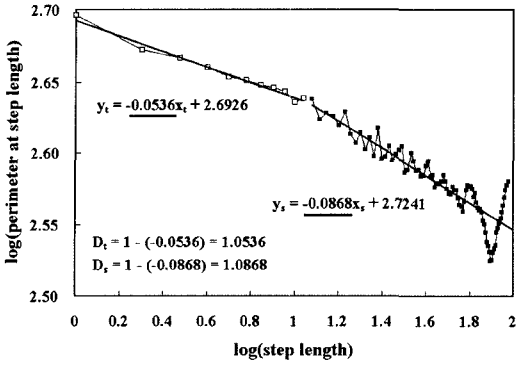


Fig. 4. A log plot of step length vs. perimeter at step length of a wear particle displayed in Fig. 4 for fractal parameter of boundary.

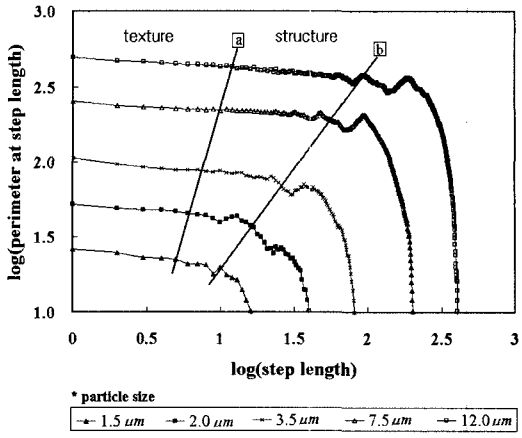


Fig. 5. A log plot of step length vs. perimeter at step length of various wear particles broken at SM45C.

파라미터를 구하였다.

2-3. 프랙탈 파라미터

본 연구에서는 해안선과 같이 불규칙적인 형상의 특징해석에 이용되는 프랙탈 차원으로 마멸분의 경계형상의 특징을 해석하였다. Fig. 4는 Fig. 3의 마멸입자를 영상처리 한 후 생성된 경계 데이터로부터 프랙탈 파라미터를 구하는 방법을 나타낸 것으로 영상처리를 통하여 얻어진 마멸입자의 경계에서 화소 간격과 그때의 둘레에 각각 로그를 취하여 대수 값으로 변환하고 최소자승법으로 두 파라미터(parameter)의 선형관계를 구한다.

프랙탈 차원은 이러한 선형관계를 나타내는 직선의 기울기를 1-D와 같다고 정의하여 구하였다. 여기서 D는 프랙탈 차원을 의미하는 것으로 마멸입자의 형상이 거칠고 괴상의 형태일수록 프랙탈 차원 값은 큰 값을 가지게 된다. 그리고 그림에서 보면 두 종류의 프랙탈 특징이 나타나고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 화소의 간격이 비교적 적은 영역에서 구한 프랙탈 차원은 입자경계의 질감, 즉 미세하게 나타나는 경계의 거칠고 부드러운 정도를 나타내고, 간격이 비교적 큰 영역에서는 경계의 구조적인 특징, 즉 형상 특징을 나타낸다[8]. 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 수치화 하였다.

그러나 작동조건에 따라 채취한 마멸입자의 수가 많고 크기가 다양하기 때문에 각 마멸입자의 질감 프랙탈과 구조 프랙탈을 구분하기 위한 영역을 설정할 필요가 있다. 이를 설정하기 위하여 크기가 다양한 마멸입자의 둘레와 화소 간격에 대한 로그 그래프를 Fig. 5에 나타내었다.

이와 같이 본 연구에서는 질감과 구조 영역을 설정하기 위하여 전체 마멸입자에 대하여 로그 그래프로 나타내어 질감과 구조의 선형관계를 나타낼 수 있는 영역의 구분선 a와 b를 구하였고, 그 관계식을 식 (1)과 식 (2)에 나타내었다. 여기서 구분선 b의 좌측 데이터는 디지털처리에 의한 오차와 마멸입자가 모든 해상도에서 완전하게 자기유사적이지 않기 때문에 발생하는 오차로 선형관계가 유지되지 않는다[2]. 따라서 질감과 구조 프랙탈 차원은 선형관계를 유지하는 구분선 b의 우측 데이터를 사용하여 구하였다. 그리고 총 프랙탈 차원(D)는 질감 및 구조 영역의 모든 데이터를 이용하여 구하였다.

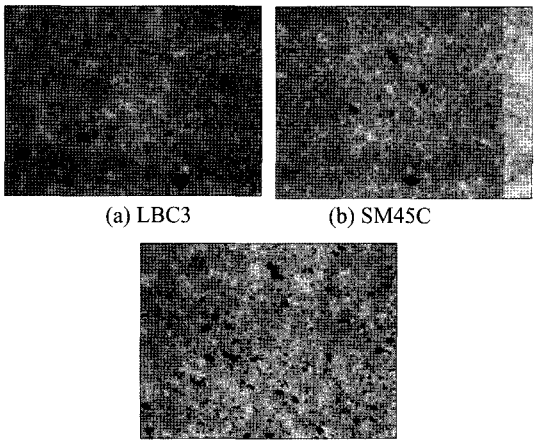
$$a=5+0.013(n-20) \qquad (1)$$
$$b=10+0.237(n-20)$$

a: texture data number
b: structure data number
n : total number of data

3. 결과 및 고찰

3-1. 마멸입자의 형태 특징

Fig. 6은 미끄럼거리 340 m에서 각 재료에 대한 마멸분의 투과 영상을 나타낸 것으로 (a) LBC3의 경우



(a) LBC3 (b) SM45C

(c) STS304

Fig. 6. Transmitted images of wear particles, sliding distance : 340 m.

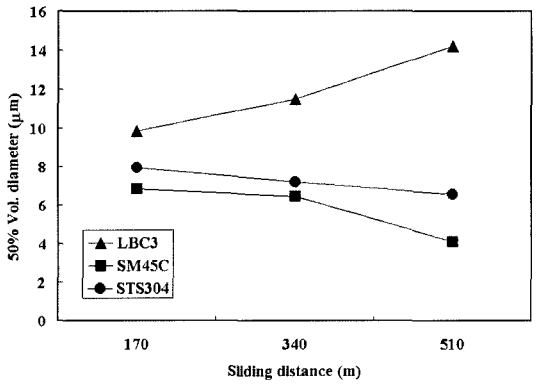
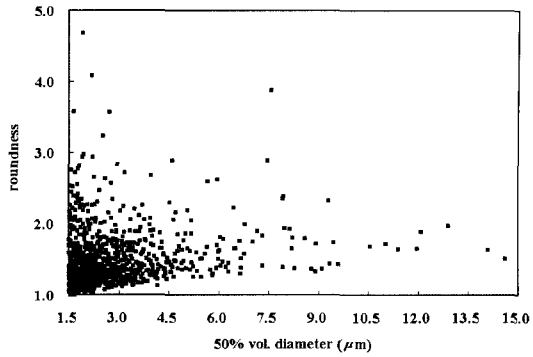


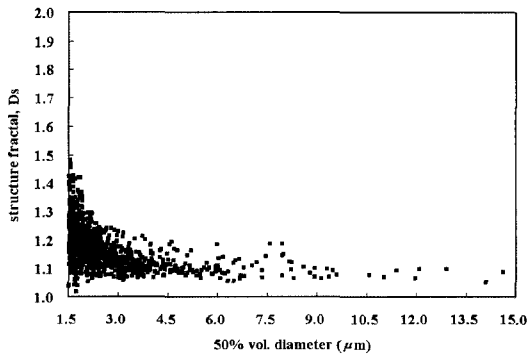
Fig. 7. 50% Vol. diameter of wear particles for materials.

응착마멸과 연삭마멸에 의한 비교적 큰 마멸입자가 주로 생성되어진 것을 볼 수 있다. (b) SM45C의 경우는 주로 비교적 작은 크기의 응착마멸에 의한 입자가 생성된 것을 볼 수 있으며 큰 입자는 적다. 그리고 (c) STS304는 비교적 큰 입자 및 경한 연삭입자에 의한 cutting wear 입자가 많이 생성된 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 미끄럼거리에 따른 각 재료의 마멸분의 50% 체적경을 나타낸 것이다. 50% 체적경은 마멸분의 직경 데이터를 작은 크기부터 정렬하여 그 체적 합이 전체마멸체적의 50%가 되는 지점의 마멸분 직경을 나타내는 것으로 주어진 조건에서 발생된 마멸분을 대표하는 크기이다. 그림에서 미끄럼거리가 증가함에 따라 LBC3의 마멸분은 그 크기가 커지고 있으며, SM45C와 STS304는 크기가 작아지고 있다. 이는 Fig. 6의 사진



(a) Roundness vs. diameter



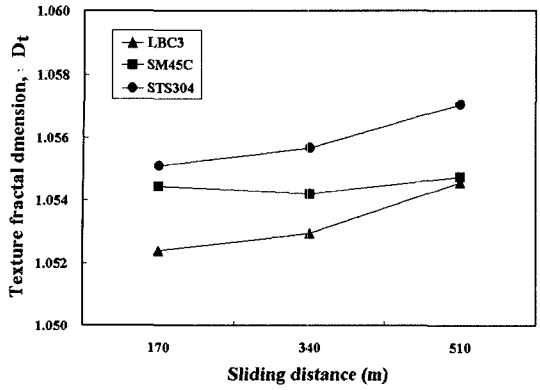
(b) Structure fractal dimension, D_s vs. diameter

Fig. 8. Distribution chart of shape parameter of wear particles (SM45C, 3 kg, 170 m).

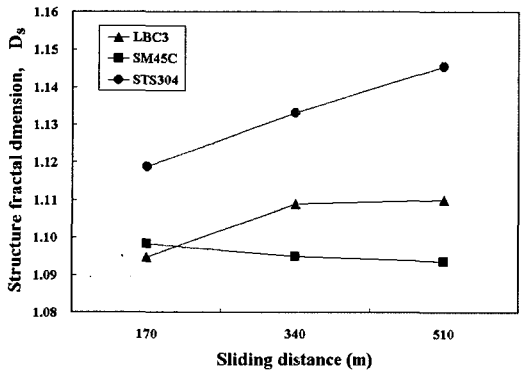
에서 볼 수 있는 각 재료마다의 마멸입자의 크기 변화를 잘 나타낸다고 생각된다.

일반적으로 마멸분의 형상특징을 나타내기 위하여 입자 면적에 해당하는 원 둘레에 대한 입자의 둘레 비를 나타내는 복잡도를 많이 사용하고 있다[4]. 그러나 Fig. 8의 (a) 입자의 크기와 복잡도의 분포에서 볼 수 있듯이 입자의 크기가 작아질수록 복잡도의 값이 1에 가깝게 나타난다. 그리고 분포범위도 매우 넓게 퍼져 있음을 알 수 있다. 이는 마멸입자를 디지털 영상으로 표현하기 때문에 입자를 표현할 수 있는 해상도의 한계로 인한 오차로 알려져 있다

그러나 Fig. 8의 (b)와 같이 구조 프랙탈 차원으로 표현하였을 때는 입자가 작아질수록 (a)의 복잡도와는 달리 고르게 분포되고 값의 변화 범위도 복잡도처럼 넓게 나타나지 않는다. 이러한 결과로 볼 때 프랙탈 차원을 이용하는 것이 복잡도를 이용하는 것보다 발생된 전체 마멸입자의 평균적인 형상 특징을 보다 잘 나타낼 수 있다고 생각된다. 그리고 본 연구에서는 해상



(a) Texture fractal



(b) Structure fractal

Fig. 9. Average of fractal parameters of wear particles.

도의 한계에 의한 오차를 최소화하기 위해 입자 크기에 따른 분포 범위도 비교적 안정화 되어 있는 3 μm 이상의 마멸입자에 대하여 프랙탈 파라미터의 평균을 구하였다.

3-2. 마멸분의 프랙탈 파라미터

Fig. 9는 미끄럼거리에 따른 각 재료의마멸입자의 (a) 질감 프랙탈과 (b) 구조 프랙탈 차원값을 나타낸 것이다. 여기서 (a) 질감 프랙탈 차원은 미 세한 경계의 변화정도로 거칠고 부드러운 정도를 표현한다. 그림에서 STS304는 다른 두 재료에 비해 마멸입자의 경계가 거친 질감을 나타내고 있으며, 미끄럼거리가 증가함에 따라 경계가 거친 마멸입자가 발생한다는 것을 알 수 있다. 그리고 LBC3의 마멸입자는 미끄럼거리의 증가에 따라 거칠어지고 있지만 전체적으로 경계의 질감이 부드러운 형상 특징을 가진다는 것을 알 수 있다. (b) 구조 프랙탈 차원은 복잡도 또는 장단도와 같은 경계의 큰 형상 특징을 표현한다. STS304의 마멸분은 다른 두 재료에 비해 미끄럼거리 증가에 따라 복잡한 형상의 마멸분이 발생되고 있다는 것을 보여준다. 그리고 SM45C의 경우는 다른 두 재료에 비해 형상이 단순하고 미끄럼 거리 증가에 따라 크게 변화가 없다는 것을 알 수 있다.

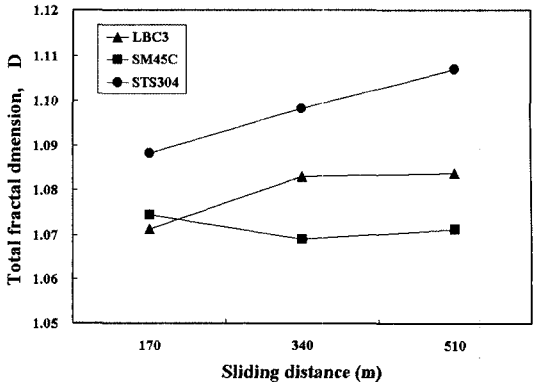


Fig. 10. Average of total fractal dimension of wear particles.

Fig. 10은 미끄럼거리에 따른 각 재료의 총프랙탈 차원의 변화를 나타낸 것으로 마멸분의 전반적인 형상 특징을 표현한다. 여기서 총프랙탈 차원은 질감 영역 및 구조 영역을 구분하지 않고 선형관계를 유지하는 전체 데이터를 사용하여 차원 값을 구한 것이다. 그림에서 총프랙탈 차원은 구조 프랙탈에 비해 낮은 값을 보이지만 조건에 따른 경향성은 구조 프랙탈과 거의 유사하다는 것을 알 수 있다.

이는 총프랙탈 차원만 이용해도 작동조건에 따라서 변화하는 입자 형상의 복잡하고 불규칙한 경향을 표현할 수 있다는 것을 나타낸다. 즉, Fig. 5의 로그 그래프로부터 질감과 구조 영역을 명확히 구분하기 힘든 경우에는 선형관계가 명확히 보이는 영역의 전체 데이터로 구한 총 프랙탈 차원을 이용하여 작동조건에 따른 마멸 입자의 형상 특징을 표현할 수 있다고 생각한다.

이와 같이 프랙탈 파라미터를 이용하게 되면 Fig. 6의 마멸입자의 현미경 영상에서 볼 수 있는 형상 특징을 정량적으로 수치화 하여 나타낼 수 있으며, 질감 및 구조 프랙탈 차원으로 입자의 형상 특징을 세부적으로 표현할 수 있다고 생각된다.

4. 결 론

윤활 마찰마멸 실험을 통해 채취한 마멸입자의 형태

적 특징 추출을 위하여 컴퓨터에 의한 디지털 영상처리 기술과 프랙탈 파리미터를 이용하여 작동조건에 따른 마멸입자의 형상 및 형태적 특징을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 마멸입자 크기에 대한 복잡도와 구조 프랙탈 차원의 분포도에서 프랙탈 차원을 이용하는 것이 복잡도를 이용하는 것 보다 발생된 전체 마멸입자의 평균적인 형상 특징을 보다 잘 나타낼 수 있다.

(2) 미끄럼거리 증가에 따라 STS304의 마멸입자는 거칠고 괴상의 형태를 가진다는 것을 알 수 있으며, 다른 두 재료에 비해 그 형상 특징이 불규칙적이고 거칠며 복잡함을 알 수가 있다. 그러나 SM45C의 경우는 다른 두 재료에 비해 형상이 단순하고 미끄럼 거리 증가에 따라 크게 변화가 없다는 것을 알 수 있다.

(3) 총프랙탈 차원은 구조 프랙탈에 비해 낮은 값을 보이지만 조건에 따른 경향성은 구조 프랙탈과 거의 유사한 경향으로 나타나고 있다. 이는 총프랙탈 차원만 이용해도 작동조건에 따라서 변화하는 입자 형상의 복잡하고 불규칙한 경향을 잘 표현할 수 있다는 것을 나타낸다.

참고 문헌

1. W.W. Sefert and V. C. Westcott, "A Method for the Study of Wear Particles in Lubricating Oil," *Wear*, **21**, pp.27-42, 1972.
2. 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.
3. B. J. Roylance and S. Raadnui, "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. Y. B. Seo, H. S. Park and T. O. Jun, "Analysis of Wear Debris for Machine Condition Diagnosis of the Lubricated Moving Surface," *KSME(A)*, Vol. 21, No. 5, pp.835-841, 1997.
6. Heinz-Otto Peitgen and Dietmar Saupe, "The Science of Fractal Images," SpringerVerlag, pp. 21-70, 1988
7. Y.S. Cho, M.R. Lyu, D.H. Kim and H.S. Park, "Application of Fractal Parameter for Morphological Analysis of Wear Particle," *KSTLE*, Vol. 18, No. 2, pp. 147-152, 2002.