

마찰면과 마멸분 형상해석을 위한 프랙탈 차원의 적용

박홍식⁺ · 조연상

동아대학교 공과대학 기계공학부

1. 서론

기계구동계에서 트라이볼로지적 요인에 의하여 발생되는 마멸은 윤활유내에 포함되어 오염물질과 요소부품의 운전에 의하여 분위기 중의 분진이나 경질입자들이 윤활운동면내로 침입하여 이들이 마찰면을 마멸시켜 마멸분을 발생시키게 된다. 마멸분이 마찰면에 미치는 영향[1-3]에는 마멸분이 유막중에 침입하여 직접 손상을 주는 경우와 윤활유의 유로를 폐쇄시켜 오일부족 현상을 일으켜 간접적으로 마찰면에 손상을 주는 경우가 있다. 이처럼 마찰면에서 발생하는 손상은 구동부위의 누유증대, 소음과 진동 발생 또는 소착상태를 유발하여 트라이볼로지 시스템의 각종 고장의 요인이 되고 있다[4,5].

근래 컴퓨터의 급속한 발전과 함께 활발히 전개되고 있는 영상처리 기술을 사용하여 마멸분과 마찰면의 형태적 특징을 추출하여 수치화로 나타내는 방법은 다종 다양한 마멸분과 마찰면으로부터 그 특징을 정리하여 트라이볼로지 시스템의 손상상태 진단에 활용하는 방법으로 매우 효과적인 것으로 알려져 있어 많은 연구가 진행되고 있다[6-11].

그러나 현재 행하여지고 있는 영상처리 기술은 마멸분의 특징으로부터 총합적으로 인간이 마찰·마멸상태의 진단을 하고 있는 단계이며 앞으로 마멸분 채집에서 진단영상을 얻기까지의 하드웨어의 부분과 함께 진단기술의 소프트웨어의 부분도 컴퓨터가 담당할 것이다. 이 경우 필요로 하는 것이 마멸분 특유의 형상·크기·색 등의 특징을 식별하고 또한 대량으로 발생하는 마멸분의 통계적 성질을 구하는 수학이 필요하게 된다. 이러한 마멸분과 마찰면의 형상특징 해석을 위한 방법으로 해안선이나 산의 형상과 같은 비선형적인 물체의 형상

특징을 묘사하기 위하여 Mandelbrot[12]가 처음 제시한 개념인 프랙탈(Fractal) 차원을 이용하는 방법이 있다.

프랙탈 차원은 자연계에 존재하는 물체들에 대하여 그 불규칙성을 정의하여 자연물의 특징을 수치화하여 표현한 것으로, 유클리드 기하학에서 표현하고 있는 정수차원의 개념이 아닌 소수차원의 개념으로 명확히 정의할 수 없는 성질인 어떤 물체의 거칠거칠한 정도, 부서진 정도 및 불규칙한 정도를 나타내어 주는 값이다. 또한 프랙탈 차원에 의한 해석 방법은 대상물체의 크기, 형상 또는 색상정보 등에 대하여 완벽하고 정확한 정보를 필요로 하지 않으며 다양하고 불규칙적인 마찰면 및 마멸분에 대하여 쉽게 적용할 수 있기 때문에 보다 간편하고 빠르게 해석할 수 있다는 장점이 있다[13-16]. 그러나 프랙탈 차원의 특징을 이용하여 다양한 절삭면에 대하여 프랙탈 차원을 적용한 예는 많지만 트라이볼로지 시스템의 마찰면과 마멸분의 형상특징 해석에 프랙탈 차원을 적용한 예는 거의 없는 실정이다.

따라서 보다 정량적으로 마찰면과 마멸분의 형태특징을 나타낼 수 있는 프랙탈 차원을 이용할 수 있게 된다면 마찰과정의 결과로 나타나는 트라이볼로지 시스템의 손상상태 진단을 위한 모니터링에도 적용이 가능할 수 있으리라 생각된다.

여기에서는 마찰면과 마멸분에 대한 정보를 트라이볼로지 시스템의 작동상태 진단 기술에 효과적으로 적용하기 위하여 다양한 작동조건하에서 채취한 마멸분으로부터 영상처리를 통해 마멸분의 경계를 추출하고 추출된 경계로부터 구한 마멸분의 경계, 입자면 및 마찰면에 대한 프랙탈 파라미터의 적용 가능성에 대하여 기술하고자 한다.

2. 영상처리에 의한 경계선 추적

컴퓨터에서 영상을 해석하기 위해서는 CCD 카메라

hspark@donga.ac.kr

를 통한 아날로그 영상신호를 A/D 변환기를 사용하여 공간적인 격자상에서의 표본화와 그레이 레벨(gray level)의 양자화를 행함으로써 컴퓨터로 영상을 표현할 수 있는 디지털신호로 변환하여야 한다. 여기서 표본화된 점을 화소(pixel)라고 하며, 디지털 영상은 농도값의 2차원 배열로서 $f(x, y)$ 로 나타낼 때, $f(i, j)$ 는 영상 f 의 (i, j) 인 화소이고, 그 점의 농도값을 나타내며 농도값은 0~255 레벨의 값을 가진다. 이렇게 디지털화된 영상의 화소들은 다양한 농도값을 가지게 되며, 특히 물체와 배경의 경계부분에서 그 분포가 다양하여 영상처리에 있어 가장 기본이 되는 경계추적을 행하기가 상당히 곤란하다. 따라서 디지털화된 영상에서 입자의 특징을 해석하기 위해서는 입자와 배경을 분해한 2치화 영상(binary image)으로 변환하여 입자의 윤곽을 뚜렷하게 나타낼 필요가 있다.

$$f_i(i, j) = \begin{cases} 255; & f_i(i, j) \geq t \\ 0; & f_i(i, j) < t \end{cases} \quad (1)$$

여기서 t 는 역치(threshold)이다. 이러한 변환처리를 2원화 또는 역치처리라고 하고, 식 (1)에 의해 변환할 수 있다[17,18]. 즉, 영상내의 농도값의 분포(히스토그램)로부터 입자가 가장 명확히 표시될 수 있는 지점을 역치 t 로 선정하여 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.

이와같이 2치화 농도로 구성된 2치화 영상에서 입자와 배경의 경계부분을 추적한다. 경계선추적(border following)법[17]은 Fig. 1에서와 같이 도형의 경계점을 차례로 추적하여 그 입자의 모양을 코드화 하는 것으로 입자의 형상해석에 중요한 역할을 하는 알고리즘이며, 영상의 정보를 완전하게 유지하기 위하여 데이터의 형상을 2차원에서 1차원으로 변환하는 것 가운데 가장 중요한 기법의 하나이다.

Fig. 2는 경계선 추적에서의 다음 경계점을 추출하는 방법을 나타낸 것으로서 현재경계점의 8근방에서 왼쪽에 인접한 배경화소에서 시작하여 반시계 방향으로 차례로 화소의 값을 조사해 나간다. 이때 최초로 만난 입자화소를 다음의 경계화소로서 추적을 진행하며, 최초의 경계점에 도달하면 경계추적을 완료한다 [18,19].

Fig. 3은 채취한 하나의 마멸입자에 대한 영상으로

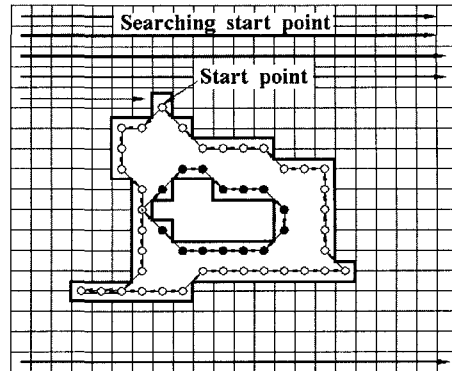


Fig. 1. A method of border following.

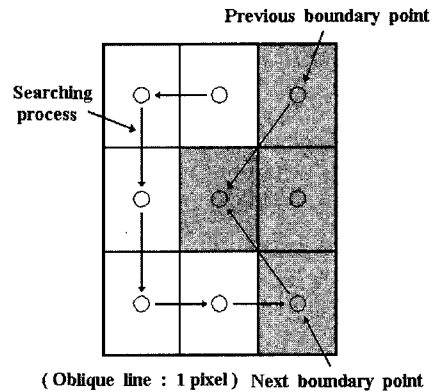


Fig. 2. Searching process of the next boundary point on border following.

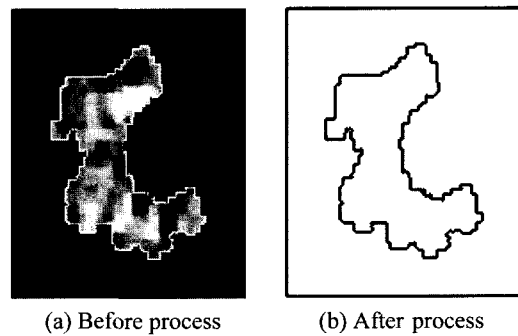
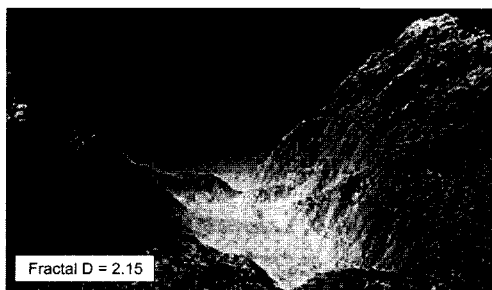


Fig. 3. Result of searching process in boundary for a wear debris.

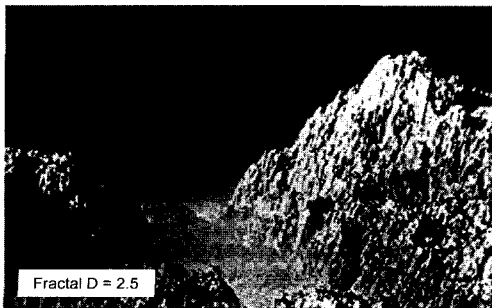
입자의 둘레에 대한 정보를 명확히 추출하고 있음을 알 수 있으며, 이 정보를 통하여 마멸입자의 경계에 대한 프랙탈 파라미터인 texture 및 structure 프랙탈 차원을 계산한다.

3. 프랙탈 차원이란

Mandelbrot는 1975년에 위상적 차원의 한계성을 극복하기 위하여 프랙탈 차원을 제안하였다. 프랙탈이라는 용어는 그가 fractus라고 하는 라틴어(물건이 깨어져 흩어져 있는 상태를 의미한다)로부터 만들어진 언어이다. 프랙탈 기하학은 곡선의 접선을 정의할 수 없는 즉, 미분할 수 없는 형태를 취급하며 이러한 형태는 다른 스케일(scale)에서도 자기 유사성(self-similarity)을 가지고 있다. 이러한 자기 유사성을 확대시켜 정수 차원의 유클리드 기하학으로 표현하기 힘든 불규칙적이고 추상적인 자연물의 형태 특징을 정량적인 소수 차원으로 표시한 양이 프랙탈 차원이다. 예를 들어 Fig. 4의 산의 형상에 대한 프랙탈 차원 D를 보면, 전체적으로는 그 형상이 비슷하지만 (b)와 같이 보다 거칠고 복잡한 표면을 갖는 산의 형상에 대한 프랙탈 차원 값이 높게 나타난다. 이는 어떠한 산의 형세를 보고 ‘완만하다’ 또는 ‘거칠고 험하다’라고 추상적으로 표현하는 특징을 수치화 하여 나타낸 것으로서 자연계에 존재하는 물체들에 대한 형태적 특징을 적절하게 표현할 수 있다는 장점이 있다.



(a) Soft surface



(b) rough surface

Fig. 4. Fractal dimension of mountain.

프랙탈에 관한 연구가 활발하게 진행된 것은 1980년대부터지만 고도의 수학을 필요로 하지 않는 것도 이 이유중의 하나이다. 프랙탈 차원은 많은 분야의 연구자가 참여하여 연구[20-23]를 진행하여 왔고, 천연과 인공에 관계없이 대부분의 고체 표면의 요철이 수 10 Å 정도의 스케일(scale)의 영역에는 프랙탈 차원에 의하여 그 특징을 잘 나타낼 수 있다는 기본적인 발견도 그 무렵이다. 육안으로는 매끄럽게 보이는 물질도 순수한 결정이 아닌 한 원자레벨에서는 랜덤(random)한 요철을 가지고 있는 경우가 많고, 그 요철의 모양이 어느 스케일의 범위에서는 예를 들면 지형과 같이 확대 축소하여도 동일하게 보이는 성질을 가지고 있다.

Fig. 5는 인공적 프랙탈 곡선중의 하나인 Koch 곡선[24,25]이 어떻게 만들어지는 가를 나타낸 것이다. 그림에서 생성자(initiator)는 길이 1인 초기의 기하학적 형태를 나타낸 것이고, 발생자(generator)는 생성자의 형태를 변화시키는 도구이다. Koch 곡선의 발생자는 먼저 생성자를 3등분하여 가운데 부분을 제거한 뒤 각

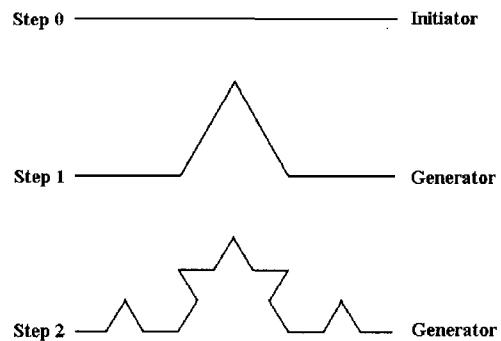


Fig. 5. Generation stage of the triadic Koch curve.

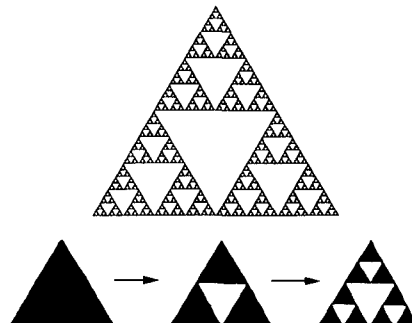


Fig. 6. Triangle except core.

각의 생성자 내측 끝점에서 처음 생성자의 중간 상측 까지 길이 1/3이 되는 직선을 그음으로서 만들 수 있다. 이상의 발생자를 무한히 반복시키게 되면 인공적인 프랙탈 곡선을 얻을 수 있다.

Fig. 6은 처음에 주어진 정삼각형의 각 변의 중점을 연결하면 생성되는 상하 역방향의 정삼각형을 뺀아내는 조작을 남아있는 정삼각형에도 순차적으로 반복한다. 그렇게 되면 크고 작은 모양의 구멍이 무수하게 나있는 매우 복잡한 도형이 되지만 만드는 방법에서도 명확한 바와 같이 아무리 작은 부분도 전체와 유사한 구조로 되고 단위 부분을 보아도 전체와 동일한 복잡함을 가지고 있다. 이와 같이 부분과 전체를 상사로 되어 있는 성질을 자기 유사형이라고 한다. 이처럼 자기 유사성을 확대시켜 정량적으로 표시한 양이 프랙탈 차원이다. 프랙탈 기하학에서 임의의 형태에 대한 차원은 다음 식 (2)로 정의할 수 있다.

$$N_k = S_k^D = \left(\frac{1}{r}\right)^D = r^{-D} \quad (2)$$

여기서 N_k 은 각 단계에서의 subpart 수이고, S_k 는 척도계수(scaling factor)로서 전체 곡선을 투영하였을 때의 길이를 1로 가정하여 그 곡선을 길이 r 로 나누었을 때의 역수이다. 식 (2)의 양변에 대수를 취하면 프랙탈 차원 D 는 식 (3)과 같다.

$$D = \frac{\ln N_k}{\ln S_k} \quad (3)$$

Fig. 5의 Koch 곡선의 프랙탈 차원 D 는 $N=2$ 단계에서 $S_k=9$ 이고, $N_k=16$ 이므로 식 (3)에 의하여 계산하면 식 (4)와 같다.

$$D = \frac{\ln 16}{\ln 9} = 1.2619 \quad (4)$$

따라서 Koch 곡선의 프랙탈 차원은 N 가 아무리 많이 반복하여도 1.2619의 차원을 가지게 된다. 여기서 프랙탈 차원이 크면 클수록 물체의 형상은 복잡하게 된다.

이러한 프랙탈에 관한 기초 이론으로부터 어떠한 대상물체에 대한 프랙탈 차원을 구하는 방법은 완전히 정립되어 있지 않기 때문에 마멸입자의 형상 특징을 프랙탈로 해석하기 위해서는 현재까지 제시된 여러 가지 방법 중에서 적합한 방법을 설정할 필요가 있다. 트라이볼로지 시스템에서는 해석대상으로 하는 마멸입

자의 경계와 같은 형상은 Richardson과 Mandelbrot가 프랙탈 차원을 위해 제시한 해안선 모델과 유사한 형태를 가지고 있다. 따라서 해안선 모델을 위해 제안된 컴퍼스법(compass method)을 사용하여 마멸입자의 형상에 대한 프랙탈 차원값을 측정하는 것이 가장 효과적이라고 생각된다.

Fig. 7은 컴퍼스법을 도식화하여 나타낸 것으로 그림에서 (a)는 해안선과 같이 불규칙적인 곡선의 형태를 (b)는 스케일 길이 r 선분의 집합으로 나타낸 것이다. 그림 (b)에서 곡선의 왼쪽 끝 부분을 시점으로 잡고 그것을 중심으로 반지름 r 의 원을 그리고 그 원과 곡선이 최초로 교차된 점과 시점을 직선으로 연결한다.

이 교점을 새로운 시점이라 정의하여 상술의 과정을 반복한다. 이와 같이 스케일 길이 r 에 의하여 불규칙적인 곡선을 근사화 시킬 때 필요한 전체 선분 개수를 N_r 를 구할 수 있다.

Fig. 8은 이것을 양 대수좌표축에 표시한 모식도를

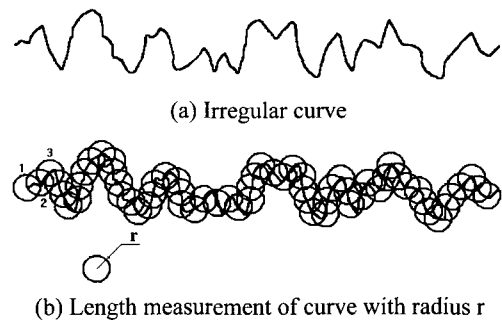


Fig. 7. Measuring length of a curve.

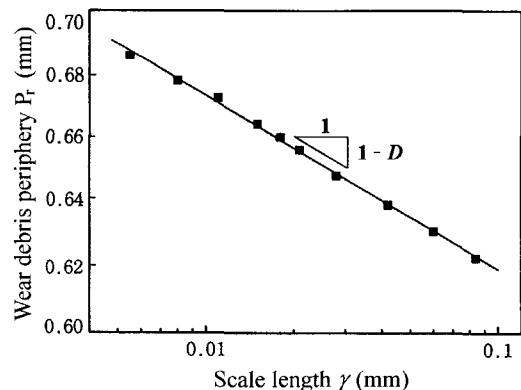


Fig. 8. Relation between wear debris periphery and scale length.

나타낸 것으로 Richardson[26]은 복잡한 해안선을 프랙탈로 차원화 시킨 결과 스케일 길이 r 과 전체 선분 개수 N_c 사이에 식 (5)와 같은 관계식이 성립한다고 주장하였다.

$$N_c = A \cdot r^{-D} \tag{5}$$

본 연구의 경우 A 는 고려하는 프랙탈 도형 즉, 마멸입자 둘레의 곡선 형태에 의하여 결정되는 상수이고 D 는 컴퍼스법으로 구한 프랙탈 차원이다. 전체 둘레의 길이 L_c 는 스케일 길이 r 로 근사화 하면 식 (6)으로 표현할 수 있다.

$$L_c = N_c \cdot r = A \cdot r^{1-D} \tag{6}$$

식 (6)의 양변을 대수로 취하면 식 (7)과 같다.

$$\ln L_c = \ln(A) + (1-D) \ln r \tag{7}$$

이는 Fig. 8에서 대수좌표 그래프의 직선 기울기가 $1-D$ 이므로 프랙탈 차원을 간접적으로 구할 수 있다. 그림 중의 직선 기울기는 반드시 음의 값을 가지므로 프랙탈 차원 D 는 항상 1보다 크다. 이와 같이 L_c 에 대한 스케일 길이 r 의 효과를 Richardson 효과라 부른다. 그러나 이러한 Richardson 효과를 정확히 만족시키기 위해서는 종점이 반드시 스케일 원의 반지름 내부로 들어와야만 한다.

4. 트라이볼로지 시스템에 프랙탈 차원 적용

4-1. 마멸입자 경계 및 면의 프랙탈 차원

해안선과 같이 불규칙적인 형상을 가지는 대상물의 특징해석에 이용되는 프랙탈 차원을 이용하여 마멸분의 경계형상 특징의 해석을 위하여 유효실험을 통하여 채취한 하나의 마멸입자에 대하여 경계선 추출을 하고, 이 정보를 통하여 마멸입자의 경계에 대한 프랙탈 파라미터인 texture 및 structure 프랙탈 차원을 계산한다. 여기서 texture 프랙탈은 미세부분에 대한 변화 상태를, 그리고 structure 프랙탈은 웨이브니스(waveness)의 형상변화 상태를 나타낸다.

Table 1은 Fig. 3의 화소 간격에 따른 입자에 대한 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

Table 1. Boundary data of wear debris for Fig. 3

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
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

과정을 여러 번 반복하여 각 화소 간격과 그때의 둘레에 각각 로그를 취하여 대수의 값으로 변환시킨다. 여기서 컴퍼스법을 이용하여 프랙탈 차원을 구할 경우 실제로는 스케일 거리를 일정 반지름 r 만큼 주어야 한다. 그러나 디지털 영상처리를 이용할 경우에는 정해진 해상도 내에서 화소 단위로 나타내는 영상의 특성 때문에 일정거리의 교차점을 명확하게 찾기 힘들다. 따라서 디지털 영상에서 프랙탈 차원을 구하기 위하여 컴퍼스법을 이용할 경우 스케일거리는 화소 간격의 길이를 사용하는 것이 보다 효과적이다.

Fig. 9는 Table 1의 입자의 경계에 대한 데이터를 그래프로 나타낸 것으로 화소 간격의 대수 값에 대한 간격에 따른 둘레의 대수 값의 변화와 최소자승법에 의한 두 파라미터의 선형관계를 표시한다. 프랙탈 차원은 이러한 선형관계를 나타내는 직선의 기울기를 $1-D$ 와 같다고 정의하여 구하였다. 여기서 D 는 프랙탈 차원을 의미하는 것으로 마멸입자의 형상이 거칠고 괴상의 형태일수록 프랙탈 차원 값은 큰 값을 가지게 된다 [12,13]. 그림에서 보면 두 종류의 프랙탈 특징이 나타나고 있음을 알 수 있으며, 일반적으로 화소의 간격이 비교적 적은 10화소 이하의 영역에서 구한 프랙탈 차원은 texture 프랙탈 차원(D)으로 정의한 것으로 입자 경계의 texture, 즉 미세하게 나타나는 경계의 거칠고

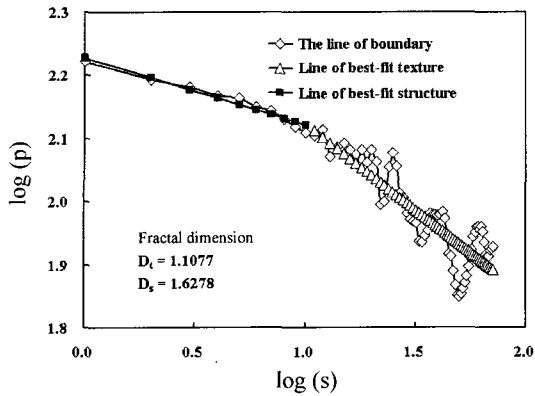


Fig. 9. Fractal descriptors of boundary for a wear debris.

부드러운 정도를 나타내고 간격이 비교적 큰 10화소 이상의 영역에서는 structure 프랙탈 차원(D_s)이라고 정의하여 경계의 구조적인 특징, 즉 복잡도 또는 장단도의 형상 특징을 나타낸다[13].

마멸입자의 형태 특징을 명확히 해석하기 위해서는 입자경계의 형태적 특징뿐만 아니라 화소의 농도 차에 의한 입자 면의 형태적 특징을 나타낼 필요가 있다. 경계내의 화소의 농도값을 이용하여 마멸입자의 면에 대한 texture 및 structure 프랙탈 차원을 계산하였다. 마멸 structure 프랙탈 차원은 마멸입자 면의 미세입자의 면에서도 입자 경계와 마찬가지로 두 종류의 프랙탈 특징이 나타나며, 화소의 간격이 비교적 적은 10화소 이하의 영역에서 구한 한 texture 프랙탈 차원(D_t)으로 정의하고 면간격이 비교적 큰 10화소 이상의 영역에서는 의 구조적인 특징, 즉 면의 굴곡 특징을 나타내는 structure 프랙탈 차원(D_s)이라고 정의하여 마멸입자 면의 형태적 특징을 수치화 한다.

4.2. 마찰면의 프랙탈 차원

마찰면의 프랙탈 차원은 마멸 입자면의 프랙탈 차원을 계산하는 것과 같이 마찰면의 영상을 이루는 화소들의 농도 값의 차이를 이용하는 것으로 영상처리를 통하여 얻어진마찰면에서 일정 영역을 정하여 그 경계내에 있는 화소들에 대하여 행 또는 열의 방향으로 일정한 간격(step)만큼 떨어진 화소와의 명암의 차이를 모두 합하고, 다시 화소의 간격을 달리하여 명암 차의 합을 구한 후 이를 대수의 값으로 변환하여 직선의 기울기를 구한다. 이 직선의 기울기는 $1-D$ 값으로 정의되어지며, 이것으로부터 프랙탈 차원 D 를 계산하며,

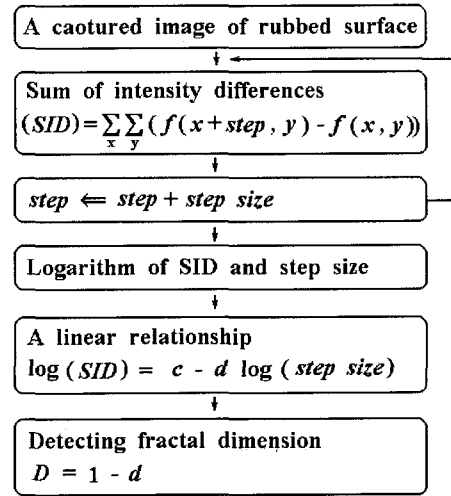


Fig. 10. Flow chart of algorithm for fractal dimension.

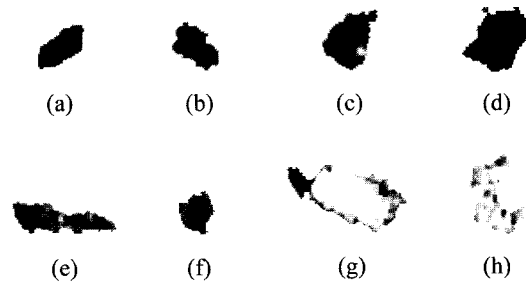


Fig. 11. Result of image processing for HBsC3 wear debris in lubricant.

Fig. 10에 프랙탈 차원을 구하기 위한 알고리즘에 대한 흐름도를 나타내었다.

4.3. 다양한 마멸분에 대한 프랙탈 차원

Fig. 11의 (a)~(h)에는 영상처리한 유압 피스톤 모터의 slipper-pad로 사용되는 황동 HBsC3를 사용하여 윤활실험을 완료한 후 추출한 마멸분 예를 나타내었다. 그리고 Table 2는 Fig. 11의 (a)~(h)의 다양한 마멸입자에 대하여 경계와 면의 texture 및 structure 프랙탈 차원을 구하여 나타낸 것으로 입자경계에 대한 texture 프랙탈 차원은 큰 차이 없이 유사한 경향을 나타내고 있지만 복잡도나 장단도와 같은 형상의 특징을 나타내는 입자경계의 structure 프랙탈 차원은 Fig. 11에서 처럼 괴상의 형상을 가질수록 큰 값을 나타내고 있다. 여기서 경계의 texture 프랙탈 차원은 Fig. 11에서 볼 수 있듯이 괴상의 형상을 가질수록 큰 값을 나타내고

Table 2. Boundary and surface fractal dimensions for Fig. 11

Wear debris	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

있다. texture 특징이 입자마다 크게 차이 나지 않는 것은 컴퓨터에 미리 정해져 있는 해상도의 한계 때문이라고 생각되어지며 이에 대한 특징을 명확히 하기 위해서는 CCD 카메라와 프레임 그래버의 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 structure 프랙탈 차원으로 분석할 수 있으며 이 때의 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. 11과 Table 2에서 나타낸 바와 같이 입자의 면에 있어서는 매우 다른 형태를 가지고 있다. 이와 같이 입자 면의 농도값을 이용하여 마멸입자의 면에 대한 프랙탈 특징을 해석함으로써 마멸입자를 명백히 구분할 수가 있다. 입자 면의 texture 프랙탈 차원이 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 texture 면에서는 (c) 마멸입자가 낮은 texture 프랙탈 차원을 가지고 있지만 structure 프랙탈 차원은 높게 나타나고 있다. 이는 (c) 마멸입자가 (b) 마멸입자 보다 부드러운 면의 형태를 하고 있지만 굴곡이 높다는 것을 의미한다.

이와같이 마멸입자의 형상 프랙탈 차원과 면의

texture 및 structure 프랙탈 차원은 입자의 형태 특징을 매우 잘 나타내 주는 프랙탈 파라미터로 마멸 입자의 형상 분석에 매우 유용한 파라미터라고 생각된다.

5. 맺음말

기계구동계의 운동부에 대한 윤활특성과 손상상태를 예지 및 진단하기 위해서는 마찰면 및 마멸분의 형태특징 해석에 의한 구동부재의 마멸 데이터의 정리와 해석이 필요하다.

이를 위하여 마찰면 및 마멸분에 대한 여러 가지 형태적 특징의 정보를 추출하는 방법이 연구되고 있다. 특히 디지털 영상처리와 프랙탈 차원에 의한 마찰면 및 마멸분의 여러 가지 프랙탈 파라미터는 그 형태적 특징의 모호성을 정량적으로 수치화 할 수 있다는 점에서 형상 분석에 매우 활용도가 높다. 그러나 디지털 영상의 해상도의 한계성과 마찰면 및 마멸분이 생성되는 분위기가 완전히 카오스적이지 않기 때문에 실질적으로 자기 상사성을 갖지 못한다. 따라서 특정조건하에 발생하는 마멸분 및 마찰면의 프랙탈 차원 값은 다양하게 측정되지만 어떠한 범위 내에 존재하기 마련이다. 이를 통계적 자기 상사성이라고 하며 다양한 조건하에 운전 중인 트라이볼로지 시스템에서 발생하는 마멸분 및 마찰면의 형태적 특징을 프랙탈 파라미터를 이용하여 분석하는데 매우 중요한 특성이 라고 할 수 있다. 그러나 아직까지 다양한 작동조건에 대한 마찰면 및 마멸분 의 프랙탈 파라미터와의 상관 관계가 명확하게 정립되어 있지 않기 때문에 이에 대한 연구가 더욱 필요하며 이를 트라이볼로지 시스템에 어떻게 적용할 것인가는 연구자 각자의 생각에 달려 있다.

참고문헌

1. M. Shibata, "Tribological Characteristics and Diagnosis of Deteriorated Lubricating Oil," JAST, Vol.39, No.7, pp. 559-565, 1994.
2. Y. Kimura, "The Current State and Future Tasks of Maintenance Tribology," JAST, Vol. 39, No.7, pp. 553-558, 1994.
3. 서영백, 박홍식, 전태욱, "기계윤활 운동면의 작동상태 진단을 위한 마멸분 해석," 대한기계학회논문집(A), 제21권, 제5호, pp. 835-841, 1997.
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*, 181-183, pp. 717-722, 1995.
5. T. Kazana and A. Yamaguchi, "Optimum Design of Bearing/Seal Pairs for Hydraulic Equipment," *油壓と空気圧* 23-6, 1992.
 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. 加藤和彦, 五百井俊宏, 宋永正久, 井口信明, "畫像處理を用いた知的鏡面評價システムの開發," *精密工學會誌*, 第63卷, 第2號, pp. 208-212, 1997.
 8. 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.
 9. 管泰雄, 兒島幸一郎, 富永哲郎, "畫像處理によるX線検査フィルム中の銼接欠陥の認識とその畫像表示," *日本機械學會論文集(C編)*, 第60卷, 第576號, pp. 395-400, 1994.
 10. 加藤 章, 吉田 孝, "畫像處理によるピッカース硬さの自動測定," *日本機械學會論文集(A編)*, 第61卷, 第588號, pp. 163-169, 1995.
 11. E. Hoglund, "EHL and the Use of Image Analysis," *Wear*, 179, pp. 49-56, 1994.
 12. B. B. Mandelbrot, "The Fractal Geometry of Nature," Freeman, New York, 1982.
 13. H. O. Peitgen and D. Saupe, "The Science of Fractal Images," Springer-Verlag, pp. 21-70, 1988.
 14. P. R. Stupak, J. H. Kang and J. A. Donovan, "Fractal Characteristics of Rubber Wear Surfaces as a Function of Load and Velocity," *Wear*, 141, pp. 73-84, 1990.
 15. A. Majumdar and B. Bhushan, "Role of Fractal Geometry in Roughness Characterization and Mechanics of Surfaces," *ASME*, Vol.112, pp. 205-216, 1990.
 16. 高安秀樹, "フラクタル," 朝倉書店, 1986.
 17. 日本工業技術センター, "コンピュータ畫像處理入門," 總研出版, pp. 83-85, 1985.
 18. 김희승, "영상인식," 생능출판사, pp. 16-18, 1994.
 19. 박홍식, 전태옥, 서영백, 김형자, "화상처리에 의한 기계윤활 운동면의 마멸분 형태해석," *한국윤활학회지*, 제12권, 제3호, pp. 72-78, 1996.
 20. K. Hiratsuka, "Fractal Characteristics of Wear Particles," *JAST*, Vol.40, No.7, pp. 73-84, 1990.
 21. P. R. Stupak, J. H. Kang and J. A. Donovan, "Fractal Characteristics of Rubber Wear Surface as a Function of Load and Velocity," *Wear*, 141, pp. 73-84, 1990.
 22. G. Galante and A. Lombardo, "Characterizing Machined Surfacing using Fractal Analysis," *Inst. Eng. Aust. Fifth Int. Conference on Manufacturing Engineering*, Wollongong, July 11-13, pp. 134-137, 1990.
 23. M. Hasegawa, J. Liu, K. Okuda and M. Nunobiki, "Calculation of the Fractal Dimension of Machined Surfacing Profiles," *Wear*, 192, pp. 40-45, 1996.
 24. M. Mandelbrot, "Fractal; Form, Chance and Dimension," Freeman, New York, 1977.
 25. M. V. Berry and Z. V. Lewis, "On the Weierstrass-Mandelbrot Fractal Function," *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 370, 1980.
 26. R. C. D. Richardson, "The Wear of Metals by Relatively Soft Abrasives," *Wear*, 11, pp. 245-275, 1968.