

프랙탈 차원을 이용한 마찰면의 형상특징 해석

박흥식[†] · 김영희^{*} · 전태옥^{**} · 조연상^{***} · 문병주^{***}
(2001년 2월 2일 접수, 2001년 8월 24일 심사완료)

Topographical Analysis of the Rubbed Surface using Fractal Dimension

Heung Sik Park, Young Hee Kim, Tae Ok Jun,
Yon Sang Cho and Byung Joo Moon

Key Words: Rubbed Surface(마찰면), Topographical Analysis(형상해석), Image Processing(화상처리)
Intensity Difference(명암차), Fractal Dimension(프랙탈차원)

Abstract

The fractal-based method for describing rubbed surface texture has aroused great interest. The determination of rubbed surface topography is believed to be extremely important in the areas of contact mechanics, adhesion and friction. In order to describe topography of the rubbed surface, the wear test was carried out with annular surfaces of wear testing specimens in dry friction. Furthermore, the relation between the fractal dimensions and the frictional conditions are also investigated and fractal descriptors was applied to rubbed surface with image processing. Fractal dimension can be determined by sum of intensity difference of image surface pixel. Fractal dimension increased according as the applied load and sliding distance increase. Topography of the rubbed surface can be effectively obtained by fractal dimensions.

1. 서 론

기계습동부의 마찰면의 해석에 이용되는 방법은 크게 (1)탐침(stylus profiling)에 의한 방법, (2) 전자현미경(electron microscope)에 의한 방법, (3) 광학적(optical) 방법으로 구분할 수 있다.

여기서 탐침에 의한 측정방법은 탐침의 접촉반경의 함수로써 산과 골 사이의 높이 상태를 측정

하여 표면거칠기와 마찰면의 형상을 해석하기 위한 가장 보편적인 방법이지만 측정하고자 하는 면의 위치에 대한 의존도가 매우 높고 세밀한 부분의 정밀 측정시에는 탐침의 접촉반경에 의한 영향이 클 뿐만 아니라 거칠기의 크기에 대한 규정이 매우 중요하다. 그리고 전자현미경에 의한 방법은 매우 세밀한 부분까지 정밀하게 측정할 수 있다는 장점을 가지고 있지만 장비의 설비비용이 매우 높고 장비운용에 대한 전문적인 지식이 필요하다.^(1,2) 한편 광학적 방법에 있어서는 마찰면의 영상으로부터 마찰 및 마멸상태를 해석하기 위하여 복잡하고 다양한 형태를 갖는 마찰면의 형상에 대한 객관적인 정보를 획득하는 알고리즘이 확립되어 있지 않고, 단지 획득한 영상정보의 저장에만 활용되고 있는 실정이다. 따라서

[†] 책임저자, 회원, 동아대학교 기계산업시스템공학부
E-mail : parkhs@mail.donga.ac.kr

TEL : (051)200-7653 FAX : (051)200-7656

^{*} 동아대학교 재료·금속화학공학부

^{**} 회원, 동아대학교 기계산업시스템공학부

^{***} 동아대학교 대학원 기계공학과

마찰면의 영상정보로부터 그 형상 특징을 해석하기 위한 방법이 구축되어지면 보다 효율적인 마찰 및 마멸 상태의 해석이 가능해지리라고 생각된다.

이를 위하여 본 연구에서는 자연계의 구조적 불규칙성, 즉, 해안선이나 산의 형상과 같은 비선형적인 형상특징을 묘사하기 위하여 Mandelbrot⁽³⁾가 처음 제시한 개념인 프랙탈(Fractal) 차원을 적용하였다.

프랙탈 차원이란 자연계에 존재하는 불규칙적인 물체들에 대하여 그 불규칙성을 정의하여 자연물의 특징을 수치화하여 표현한 것으로, 유클리드 기하학에서 표현하고 있는 정수차원의 개념이 아닌 소수 차원의 개념으로 명확히 정의할 수 없는 성질인 어떤 물체의 거칠거칠한 정도, 부서진 정도 및 불규칙한 정도를 나타내어 주는 값이다. 또한 프랙탈 차원에 의한 해석 방법은 면의 크기, 형상 또는 색상정보 등에 대하여 완벽하고 정확한 정보를 필요로 하지 않으며 다양하고 불규칙적인 마찰면에 대하여 쉽게 적용할 수 있기 때문에 보다 간편하고 빠르게 해석할 수 있다는 장점이 있다.⁽⁴⁻⁶⁾

따라서 본 연구에서는 마찰·마멸시험기를 이용하여 다양한 마찰조건으로 실험한 후 컴퓨터 영상처리에 의한 마찰면의 형상적 특징을 정량적인 데이터로 수치화 하였다. 그리고 마찰면의 영상정보로부터 면의 형상해석을 위한 방법을 구축하고, 마찰조건에 따른 마찰면의 형상특징을 프랙탈 차원으로 해석하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 마찰·마멸 실험

Fig. 1은 본 연구에 사용된 마찰·마멸시험기의 개략도를 나타내는 것으로서, 작용하중은 상부 시험편 지지부에 사하중을 걸어 가압하였고, 미끄럼 속도는 AC모터를 이용하여 V-belt로 구동시켜 이

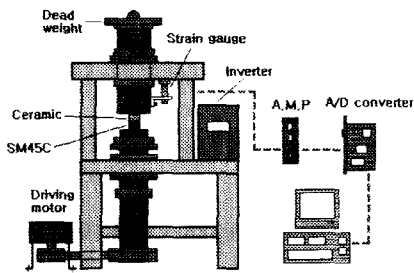


Fig. 1 Schematic diagram of experimental unit

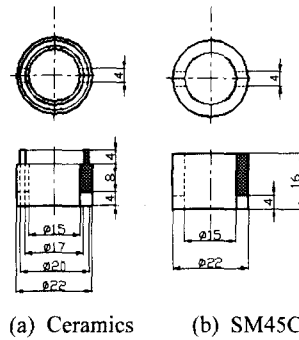


Fig. 2 Shape and dimensions of specimens

Table 1 Experimental condition

Sliding distance (km)	Load (kg)	Sliding speed (m/s)
0.2, 0.6, 1.0, 2.0, 3.0	5, 10	0.1, 0.3, 0.5, 0.7

를 인버터(Inverter)로 0.1~0.7 m/s까지 변화시켰다. 마멸시험편으로 실험재료는 Nd-YAG 레이저⁽⁷⁾로 표면경화한 SM45C를 사용하였고, 상대재료는 순도 95%의 알루미늄나 세라믹스(Al_2O_3 ceramics)를 사용하였다.

Fig. 2에는 마멸실험을 위한 SM45C와 알루미늄나 세라믹스의 시험편 형상을 나타낸 것으로 마찰면은 페루프인 링(ring)모양으로 하였으며, (a)는 세라믹의 마찰면으로 외경 22 mm, 내경 15 mm로 하였고, (b)는 SM45C로써 표면이 세라믹스의 표면에 완전한 마찰이 되도록 하기 위하여 마찰면의 폭을 세라믹스보다 1.5 mm정도 작게 하였다.

그리고 실험조건으로는 Table 1에서 보는 바와 같이 작용하중은 5 kg 과 10 kg 으로 일정하게 하

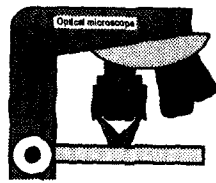


Fig. 3 Schematic diagram of image processing system

고 미끄럼거리는 0~3 km까지로 이를 분할하여 0.2 km, 0.6 km, 1 km, 2 km, 및 3 km의 5 부분으로 세분화하였으며, 미끄럼속도는 0.1~0.7 m/s까지 0.2 m/s 씩 일정하게 증가시켜 마찰실험을 하였으며, 이 때 얻어진 마찰면에 대하여 영상처리를 행하여 프랙탈 차원을 구하였다.

2.2. 마찰면의 영상처리

각 실험조건에 따른 마찰면의 영상정보를 얻기 위하여 영상처리 시스템⁽⁶⁾을 사용하였다. 광학현미경 상부의 컬러 CCD 카메라에 의해 관측된 영상은 화소수 640× 480, 화소당 분해능은 RGB 각 8 bit (256 grey level)로써 컴퓨터의 프레임그래버 (frame grabber)를 통하여 저장된다.

광원은 Fig.3에 나타낸 바와 같이 빛에 의해 생기는 그림자 영역을 제거하고 빛의 농도에 의한 마찰면의 굴곡상태를 얻기 위하여 90°의 4방향에서 입사각 45°로 마찰면에 조사하였으며, 빛의 회절에 의한 오차를 최소화하기 위하여 단색에 근접한 적색 LED를 사용하였다. 그리고 각 실험조건에 대하여 모두 대물렌즈 10배, 대안렌즈 10배로서 임의의 위치에 있는 마찰면의 영상을 5개씩 추출하였으며, 각각의 마찰면 영상에 대하여 적색 필터링(filtering)의 영상처리⁽⁸⁾를 통해 마찰면의 명암에 의한 굴곡을 명확히 하였다. 이렇게 영상처리에 의하여 추출되어진 마찰면의 명암 굴곡으로부터 마찰면의 형상 프랙탈 특징을 구하였으며, 마찰면 영상의 명암 차이를 이용하여 3차원 영상 모델링을 행하였다.

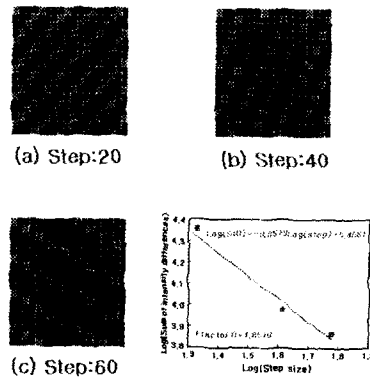


Fig. 4 Determination method of surface fractal dimension

2.3 마찰면의 프랙탈 차원

프랙탈 차원값은 대상으로 하는 물체의 불규칙성에 대하여 수치화 한 것으로 해안선이나 산과 같은 자연형상을 보고 “복잡하다” 혹은 “완만하다” 라고 하는 분명 어떤 주관적 기준에 의하여 정하여 지는 판단을 객관적인 기준에 의한 판단으로 표현할 수 있는 장점을 가지고 있다.⁽⁹⁾ 이와 같은 프랙탈 차원을 본 연구에서는 마찰면에 적용하여 해석하였다.

Fig. 4는 마찰면의 프랙탈 차원값의 계산방법을 나타낸 것으로서, 영상처리를 통하여 얻어진 마찰면에서 일정 영역을 정하여 그 경계 내에 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 대수값으로 변환하여 직선의 기울기를 구하였다. 이 직선의 기울기는 1-D값으로 정의되어지며, 이것으로부터 프랙탈 차원 D를 계산하였다.

여기서 화소간격의 크기가 작을수록 미시적으로 변화하는 형태에 대한 불규칙성을 나타내며, 간격의 크기가 클수록 거시적으로 변화하는 형태에 대한 불규칙성을 표현한다. 일반적으로 면의 거칠거칠한 정도, 부서진 정도와 같이 그 형상적인 특징이 거시적으로 변화하는 면에 대한 프랙탈 해석을 하기 위하여 화소의 간격을 크게 설정

하고 있다.

본 연구에서는 각각의 마찰면 영상에 대하여 미시적으로 변화하는 면의 형상과 거시적으로 변화하는 면의 형상을 살펴보기 위하여 화소간격의 크기를 2화소씩 증가한 2, 4, 6의 3단계로 하였을 때와 20화소씩 증가한 20, 40, 60의 3단계로 설정하였을 때의 마찰면의 프랙탈 차원을 구하였다. 여기서 다양한 화소간격을 미시적 변화는 1, 2, 3 화소씩, 거시적 변화는 10, 20, 30, 40, 50 화소씩 화소수를 달리하여 미끄럼거리와 미끄럼속도별로 프랙탈 차원값의 변화를 조사하였지만 미시적 변화는 2화소씩, 거시적 변화는 20화소씩 증가하여 한 경우가 프랙탈 차원값의 변화를 가장 쉽게 구별할 수 있어 마찰조건에 따른 마찰면의 다양한 형상특징을 가장 잘 나타내었다. 그러나 다른 화소의 경우는 프랙탈 차원값은 이들 화소보다는 뚜렷하게 변화를 나타내지 않았다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미끄럼거리에 따른 프랙탈 차원

Fig. 5는 미끄럼속도 0.1 m/sec, 작용하중 10 kg에 서의 미끄럼거리에 대한 마찰면 영상의 3차원 모델링 형상으로 마찰면 영상에서 각 화소의 농도 값을 이용하여 3차원 표면을 생성하였다. 미끄럼거리 0.2 km에서의 마찰면의 형상은 면의 굴곡이 심하게 나타나고 있으며 미끄럼거리가 증가함에 따라 그 굴곡이 완만해지고 있음을 알 수 있다. 이는 미끄럼거리가 짧은 (a) 0.2 km의 경우 양 시험편의 실제 접촉부의 응착과 연삭에 의한 초기 마멸 상태로 마찰트랙 방향으로 산과 골의 형상이 뚜렷하게 나타나 있다. 그리고 미끄럼거리가 증가하게 되면 마찰면의 실제접촉부의 표면온도의 상승으로 마찰면에서 제거된 미세한 마멸분이 산화되어 이것이 마찰면의 실제 접촉을 방지하는 보호층(산화막)으로 작용하게 된다. 이 결과 미끄럼거리가 짧은 초기 응착과 연삭마멸에 의하여 형성된 마찰면의 산과 골의 굴곡이 완만한 형태로

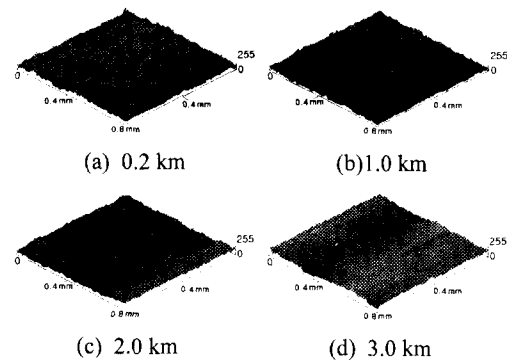


Fig. 5 Image photograph of rubbed surface on sliding speed

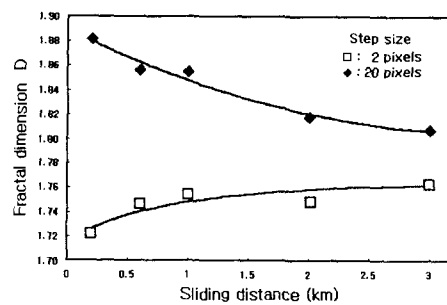


Fig. 6 Effect of sliding distance on the fractal dimension

진행하게 된다.

Fig. 6은 미끄럼속도 0.1 m/sec, 작용하중 10 kg에서의 화소 간격의 크기를 2 화소와 20 화소씩으로 한 경우 미끄럼거리의 변화에 따른 마찰면의 프랙탈 차원을 나타낸 것이다. 여기서 화소 간격의 크기를 2 화소씩 증가시켰을 경우 미끄럼거리가 증가함에 따라 프랙탈 차원값이 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 화소 간격의 크기를 20화소씩 증가시켰을 경우에는 프랙탈 차원값이 감소하고 있음을 알 수 있다.

프랙탈 차원값은 전술한 바와 같이 그 값이 클수록 면의 형상적 특징이 매우 불규칙적이고 복잡하며 면의 굴곡의 변화가 심하다는 것을 나타낸다. Fig. 5에서 미끄럼거리가 (a) 0.2 km의 경우 마찰면의 거시적 변화를 알기 위하여 화소간격의 크기를 20화소씩 증가시켰을 경우 프랙탈 차원값

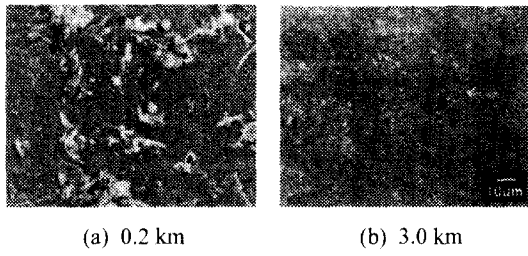


Fig. 7 S.E.M. of rubbed surface

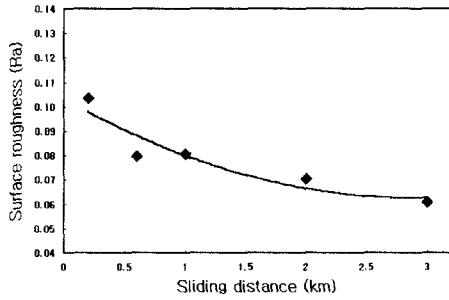


Fig. 8 Variation of surface roughness with sliding distance

은 1.88이지만 미끄럼거리가 증가하여 3.0 km에서는 1.81을 나타내고 있다. 이처럼 미끄럼거리가 증가할수록 이 값은 점차 감소하는 것은 마찰 분위기 조건이 건조 대기 중에서는 미끄럼거리가 증가할수록 마찰초기 응착마멸과 연삭마멸에 의한 마찰면의 복잡한 형상에서 점차 그 굴곡변화가 완만해지고 있음을 반영해 주고 있다. 그리고 마찰면의 미세적인 형상변화를 살펴보기 위하여 화소간격의 크기를 2 화소씩 증가시킨 경우는 미끄럼거리가 증가함에 따라 미세한 마멸입자 또는 산화물 입자의 생성이 증가하고 마찰면에 고르게 개재됨으로써 미세적으로 복잡한 변화⁹⁾를 나타내어 프랙탈 차원값이 오히려 증가한다고 생각한다.

Fig. 7에는 미끄럼거리 (a) 0.2 km, (b) 3.0 km에서의 마찰면의 S.E.M. 사진을 나타낸 것으로, (a) 0.2 km의 경우는 마찰면에 응착에 의한 큰 마멸입자가 부착되어 있지만 미끄럼거리가 증가하여 (b) 3.0 km에서의 마찰면에는 응착된 미세한 산화입자가 형성되어 있는 것을 알 수 있다.

마찰면의 프랙탈 차원값과 탐침에 의한 표면조

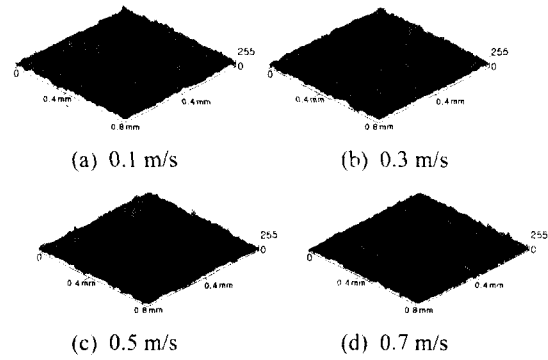


Fig. 9 Image photograph of rubbed surface on sliding speed

조도와와의 비교를 위하여 Fig. 6과 동일조건 하에서 미끄럼거리의 증가에 따른 마찰면의 표면거칠기 Ra값을 Fig. 8에 나타내었다. 미끄럼거리에 따른 Ra값의 변화는 Fig. 6에서 화소간격의 크기가 20화소일 때의 프랙탈 차원값의 변화와 거의 유사한 경향을 나타내고 있다. 이는 전술한 바와 같이 화소간격의 크기를 크게 한 경우의 프랙탈 차원은 마찰면의 Ra값을 대신하여 표면거칠기 특성을 잘 나타낸다고 볼 수 있다.

그리고 Fig. 6과 Fig. 8의 결과에서 프랙탈 차원은 복잡하고 다양한 형태를 갖는 마찰면의 형상특징의 변화를 표면조도값의 측정을 대체하여 표현하는데 매우 유용한 수단이 된다고 생각한다.

3.2 미끄럼속도에 따른 마찰면의 프랙탈차원

Fig. 9는 작용하중 10 kg, 미끄럼거리 1 km에서 미끄럼속도에 따른 마찰면의 3차원 모델링 형상을 나타낸 것으로 저속인 (a) 0.1 km의 경우는 마찰 트랙 방향으로 산화물로 덮혀 있지만 부분적으로는 마찰초기에 형성된 응착마멸과 연삭마멸에 의한 골 부분이 형성되어 있다. 미끄럼속도가 증가함에 따라 골 부분이 점차 증가하여 미끄럼속도가 고속인 (d) 0.7 km의 경우는 이 골 부분에 훨씬 깊게 형성되어 있고 복잡해짐을 알 수 있다.

그리고 Fig. 10은 미끄럼거리 1 km, 작용하중 5 kg과 10 kg에서 미끄럼속도에 따른 마찰면의 프

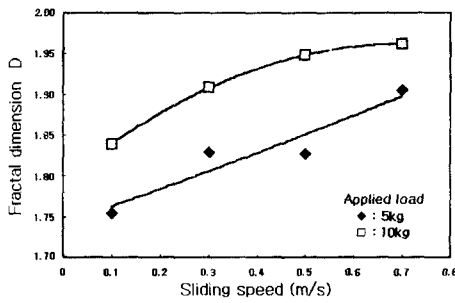


Fig. 10 Variation of fractal dimension with sliding speed

랙탈 차원값을 나타내었다. 작용하중 5 kg과 10 kg 모두 미끄럼속도와 작용하중이 증가할수록 프랙탈 차원값은 증가하는 경향을 나타내고 있다. 미끄럼속도가 증가함에 따라 Fig. 8에서 처럼 마찰면의 형상이 미끄럼속도의 증가에 따라 굴곡변화가 복잡하다는 것을 나타내고 있으며, 작용하중이 클수록 마찰면의 굴곡변화가 복잡하다는 것을 보여준다고 생각된다.

4. 결론

마찰면의 형상특징을 해석하기 위하여 건조마찰 실험을 통한 마찰면의 영상정보를 추출하고, 이로부터 3차원 형상 및 프랙탈 차원값을 구하여 마찰면 형상의 특징을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 마찰면의 미시적 형상해석은 화소간격 2 화소, 거시적 형상해석은 20 화소로 설정하는 것이 프랙탈 차원값을 명확하게 구할 수 있다.

(2) 면의 3차원 형상과 거시적 프랙탈 해석에서 미끄럼거리가 증가함에 따라 이 값은 감소하며, 이것은 Ra값의 변화와 동일한 결과를 가진다.

(3) 미끄럼속도와 작용하중이 크게 되면 프랙탈 차원값이 증가한다.

(4) 프랙탈 차원값을 이용하면 마찰조건에 따른 마찰면의 형상특징 해석에 효과적으로 이용할 수 있다.

후기

이 논문은 2000학년도 동아대학교 학술연구조성비(공모과제)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Vandenberg, S. and Osborne, C.F., 1992, "Digital Image Processing Techniques, Fractal Dimensionality and Scale-space applied to Surface Roughness," *Wear*, 159, pp. 17~30.
- (2) 塚田忠夫, 1995, "表面凹凸のフラクタルシミュレーション," *トライボロジスト*, 第40卷, 第7号, pp. 533~538.
- (3) Mandelbrot, B.B., 1982, "The Fractal Geometry of Nature," *Freman, New York*.
- (4) Stupak, P.R., Kang, J.H. and Donovan, J.A., 1990, "Fractal Characteristics of Rubber Wear Surfaces as a Function of Load and Velocity," *Wear*, 141, pp. 73~84.
- (5) Majumdar, A. and Bhushan, B., 1990, "Role of Fractal Geometry in Roughness Characterization and Mechanics of Surfaces," *ASME*, Vol. 112, pp. 205~216.
- (6) 서영백, 박홍식, 전태옥, 1997, "기계윤활 운동면의 작동상태 진단을 위한 마멸분 해석," *대한기계학회논문집(A)*, 제21권, 제5호, pp. 835~841.
- (7) 精密工學會表面改質に關する調査研究分科會, 1988, "表面改質技術," *日刊工學新聞社*, pp. 124~130.
- (8) 八木伸行, 井上誠喜, 林正樹, 1992, "C言語で學ぶ實戰畫像處理," *オム社*, pp. 2~10.
- (9) Kirk, T.B., Stachowiak, G.W. and Btachelor, A.W., 1991, "Fractal Parameters and Computer Image Analysis applied to Wear Particles isolated by Ferrography," *Wear*, 145, pp. 347~365.