

프랙탈 차원을 이용한 유압구동 습동면의 형상해석

전성재*, 배효준(동아대원), 김동호(문경대),
서영백, 박홍식(동아대)

Morphological Analysis of Hydraulic Driving Surface using Fractal Dimension

Sung-Jae Jun, Hyo-Jun Bae, Dong-Ho Kim,
Young-Bak Seo, Heung Sik Park

Abstract

The determination of surface morphology is believed to be extremely important in the areas of contact mechanics, adhesion and friction. In order to describe morphology of various rubbed surface, the wear test was carried out under different experimental conditions in lubricating wear. And fractal descriptors was applied to rubbed surface of hydraulic driving material with image processing system. These descriptors to analyze surface structure are fractal dimension. Surface fractal dimension can be determined by sum of intensity difference of surface pixel. Morphology of rubbed surface can be effectively obtained by fractal dimensions.

Key Words: Rubbed Surface, Morphology, Image Processing, Fractal Dimension, Intensity Difference

1. 서론

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 골사이의 높이 상태를 측정하여 표면거칠기와 마찰면의 형상을 해석하기 위한 가장 보편적인 방법이지만 측정하고자 하는 면의 위치에 대한 의존도가 매우 높고 세밀한 부분의 정밀측정시에는 탐침의 접촉반경에 의한 영향이 크며, 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⁾ 그리고, 광학적 방법에 있어서는 마찰면의 영상으로부터 마찰 및 마멸상태를 해석하기 위하여 복잡하고 다양한 형태를 갖는 마찰면의 형상에 대

한 객관적인 정보를 획득하는 알고리즘이 확립되어 있지 않고, 단지 획득한 영상정보의 저장에만 활용되고 있는 실정이다. 따라서 마찰면의 영상정보로부터 그 형상 특징을 해석하기 위한 방법이 구축되어지면 보다 효율적인 마찰 및 마멸 상태의 해석이 가능해지리라고 생각되어진다.

이를 위하여 본 연구에서는 자연계의 구조적 불규칙성, 즉, 해안선이나 산의 형상과 같은 비선형적인 형상특징을 묘사하기 위하여 만델브로트(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(Euclid) 기하학에서 표현하고 있는 정수차원의 개념이 아닌 소수 차원의 개념으로 명확히 정의할 수 없는 성질인 어떤 물체의 거칠거칠한 정도, 부서진 정도, 그리고 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 이와 같은 프랙탈 차원을 이용하여 유압피스톤 모터의 piston ball과 Slipper-pad의 습동재료로 사용되는 HBsC3의 마찰면의 형상적 특징을 정량적인 데이터로 수치화하여 마찰면의 영상정보로부터 면의 형상해석을 하기 위한 방법을 구축하고, 마찰조건에 따른 마찰면의 형상특징을 프랙탈 차원으로 해석하고자 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 마찰·마멸 실험

본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 pin on disk형의 윤활마찰시험장치를 이용하여 마찰·마멸 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 핀 시험편은 직경 5.0 mm의 베어링 강구인 STB2 (760Hv)를 사용하였고 디스크 시험편은 유압피스톤 모터의 piston ball과 Slipper-pad의 습동재료로 사용되는 HBsC3(160Hv)를 사용하였으며, 이의 형상은 직경 50 mm, 두께 10 mm이다. 마찰 실험을 위하여 시험편은 emery paper #1200으로 정밀 연마를 하여 표면조도를 $0.2/\mu\text{m}R_{\text{max}}$ 로 일정하게 하였으며, 윤활유는 무첨가 파라핀(paraffine)계 광유(8.2cSt@ 40°C)를 사용하였다. 또한 작동조건으로 접촉하중은 3kg, 6kg, 9kg, 12kg 및 15kg의 5단계로 설정하였고 미끄럼거리는 234m 및 624m로 설

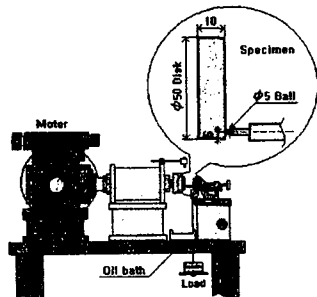


Fig. 1 Schematic diagram of pin on disk type tester

정하여 각각 실험을 행하였다.

그리고 윤활장치부에는 시험편 접촉점 하부에 oil bath를 설치하고 윤활유 공급은 순환펌프로써 silicon tube를 통하여 시험편 접촉점에 공급하였으며, 핀 시험편은 하중을 걸어 7.23 mm/s로 일정하게 회전하는 디스크 시험편에 가압하였다.

2.2 영상처리에 의한 마찰면 추출

실험조건 별로 생성된 마찰면의 영상정보를 얻기 위하여 영상처리 시스템⁽⁶⁾을 사용하였다. 광학 현미경 상부의 컬러 CCD카메라에 의해 관측된 영상은 화소수 640× 480, 화소당 분해능은 RGB 각 8비트 (256 grey level)로써 컴퓨터의 프레임그래버(frame grabber)를 통하여 저장된다.

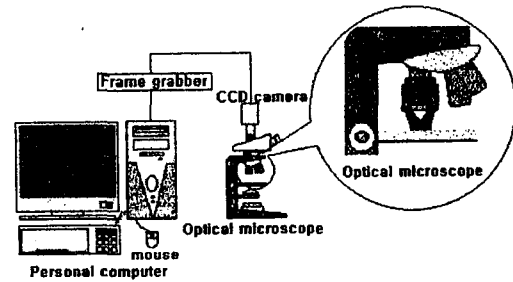


Fig. 2 Schematic diagram of image processing system

광원은 Fig.3에 나타난 바와 같이 빛에 의해 생기는 그림자영역을 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 대한 시험편에 대하여 모두 대물렌즈 10배, 대안렌즈 10배로서 입자의 위치에 있는 마찰면의 영상을 10개씩 추출하였으며, 각각의 마찰면 영상에 대하여 적색 필터링(filtering)의 영상처리⁽⁷⁾를 통해 마찰면의 명암에 의한 굴곡을 명확히 하였다. 이렇게 영상처리에 의해 추출되어진 마찰면의 명암 굴곡으로부터 마찰면의 형상 프랙탈 특징을 구하였으며, 마찰면 영상의 명암 차이를 이용하여 3차원 영상 모델링을 행하였다.

2.3 마찰면의 프랙탈 차원

프랙탈 차원은 대상으로 하는 물체의 불규칙성에 대하여 수치화하는 것으로 해안선이나 산과 같은 자연현상을 보고 “복잡하다” 혹은 “완만하다” 라고 하는 분명 어떤 주관적 기준에 의하여 정하여 지는 판단을 객관적인 기준에 의한 판단으로 표현할 수 있는 장점을 가지고 있다.⁽³⁾ 이와 같은 프랙탈 차원의 개념을 본 연구에서는 마찰면에 적용하여 해석하였다. Fig. 3은 마찰면의 프랙탈 차원의 계산방법을 나타낸 것으로서, 영상처리를 통하여 얻어진 마찰면에서 일정 영역을 정하여 그 경계내에 있는 화소들에 대하여 행 또는 열의 방향으로 일정한 간격(step)만큼 떨어진

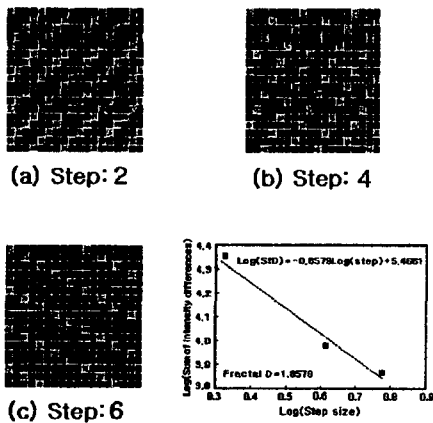


Fig. 3 Determination method of surface fractal dimension

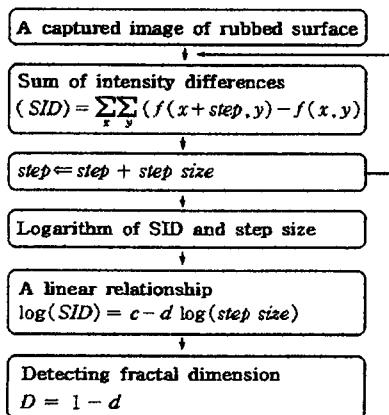


Fig. 4 Flow chart of algorithm for fractal dimension

화소와의 명암의 차이를 모두 합하고, 다시 화소의 간격을 달리하여 명암 차의 합을 구한 후 이를 대수의 값으로 변환하여 직선의 기울기를 구하였다. 이 직선의 기울기는 1-D값으로 정의되며, 이것으로부터 프랙탈 차원 D를 계산하였으며, Fig. 4에 프랙탈 차원을 구하기 위한 알고리즘에 대한 흐름도를 나타내었다.

본 연구에서는 각각의 마찰면 영상에 대하여 화소간격의 크기를 2화소씩 증가한 2, 4, 6의 3단계, 4화소씩 증가한 4, 8, 12로 하였을 때와 6화소씩 증가한 6, 12, 18의 3단계로 설정하였을 때의 마찰면의 프랙탈 차원을 구하였다. 그리고 표면조도계를 이용하여 각 작동조건에서의 마찰면의 표면조도 Ra값을 측정하여 프랙탈 차원과 비교하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 마찰면의 표면조도 Ra와 프랙탈 차원

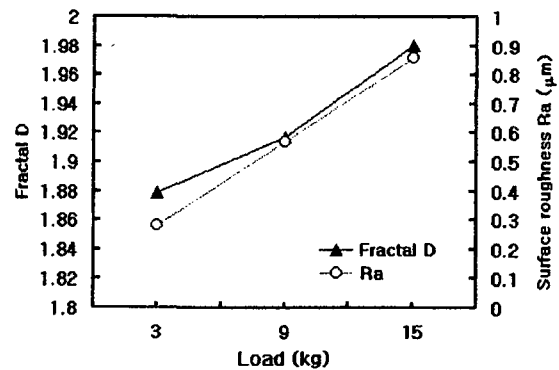


Fig. 5 A comparison between surface roughness and fractal dimension

Fig. 5는 화소간격의 크기가 2화소, 미끄럼 거리 624m에서 작용하중의 증가에 대한 프랙탈 차원의 변화와 표면조도 Ra값을 비교하여 나타낸 것으로 작용하중 증가함에 따라서 프랙탈 차원의 값과 표면조도 Ra의 변화가 유사하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 여기서 프랙탈 차원은 불규칙성의 정도를 나타내는 것으로 그 값이 클수록 마찰면의 굴곡변화가 심하고 불규칙하다는 것을 나타낸다. 따라서 Fig. 5의 결과에서 프랙탈

차원은 마찰면의 Ra값을 대신하여 표면의 거칠기 특성을 잘 나타낸다고 볼 수 있으며 복잡하고 다양한 형태를 갖는 마찰면의 형상특징을 표현하는데 매우 유용한 수단이 된다고 생각된다.

3.2 화소간격의 크기와 프랙탈 차원

프랙탈 차원을 계산하기 위하여 전술한 바와 같이 일정한 간격만큼 떨어진 화소의 명암의 차이를 구할 필요가 있다. 이때 적당한 간격의 크기를 설정하기 위해 화소간격의 크기를 달리하여 각 조건에 대한 프랙탈 차원의 값을 구하였다.

Fig. 6는 미끄럼 거리 234m에서 화소간격의 크기가 2, 4 및 6 화소일 때, 작용하중에 따른 프랙탈 차원의 변화를 나타낸 것으로 화소간격의 크기가 4화소보다 작은 2화소에서는 표면조도 Ra의 변화와 유사하게 작용하중의 증가에 따라 프랙탈 차원의 값이 증가하는 경향을 보여주고 있지만 4화소보다 큰 6화소에서는 그 경향을 뚜렷하게 알 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 프랙탈 차원을 이용하여 작동조건에 따른 마찰면의 표면 거칠기의 특성을 조사하기 위하여 화소간격의 크기를 4화소보다 작은 크기인 2화소로 설정하였다.

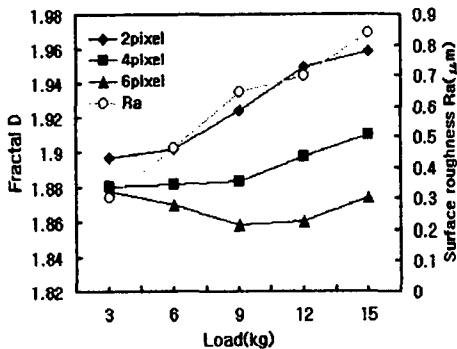


Fig. 6 Effect of step size on fractal dimension

3.3 작용하중의 변화에 따른 프랙탈 차원

Fig. 7은 화소간격의 크기가 2화소, 미끄럼거리 234m 및 624m에서 작용하중의 변화에 따른 프랙탈 차원값의 변화를 나타낸 것으로 작용하중이 증가함에 따라 미끄럼 거리와 관계없이 프랙탈 차원은 증가하고 있는 것을 볼 수 있다. 이는

작용하중이 증가함에 따라 마찰면의 상태가 거칠고 복잡하다는 것을 나타내주고 있다.

Fig. 8은 미끄럼 거리 234m에서의 작용하중에 따른 마찰면의 영상을 나타낸 것이다. 작용하중이 증가함에 따라 마찰트랙의 폭이 증가하며, 또한 abrasive wear도 보다 넓게 형성되어 있다. 그리고 Fig. 9는 Fig. 8의 작용하중에 따른 마찰면의 형상을 3차원 모델링하여 나타낸 것으로서, 작용하중의 증가에 따른 마찰면의 미세형상도 복잡해지고, 온도상승에 따른 산화반응의 결과로 인한 산화물이 마찰방향으로 진전되어 있다는 것을 볼 수 있다.

그러나 Fig. 7에서 작용하중 9kg 이하에서는 미끄럼 거리가 긴 경우가 짧은 경우에 비하여 프랙탈 차원값이 작으며, 12kg 이상에서는 오히려 값이 높게 나타나고 있다. 이것은 작용하중이 9kg 이하에서는 미끄럼 거리가 긴 경우에서 마찰면 온도의 상승으로 산화물이 보다 많이 형성된 결과이며, 12kg 이상에서는 미끄럼 거리의 증가에 따라 접촉압력이 크고 또한 탈락한 마멸입자에 의하여 트랙방향으로 abrasive 마멸이 보다 많이 생성된 결과라고 생각된다.

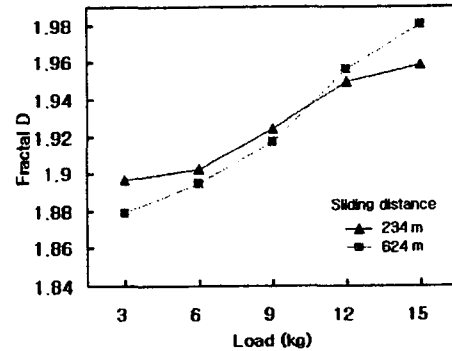


Fig. 7 Effect of applied load on fractal dimension

Fig. 10은 작용하중 3kg, 9kg 및 15kg에서 미끄럼 거리가 234m와 624m에서의 프랙탈 차원값을 나타낸 것이다. 그림에서 미끄럼 거리의 증가에 따른 프랙탈 차원값은 각 작용하중에서 미소하게 변화를 나타내지만 이것은 미끄럼 거리의 증가에 따른 마찰면의 형상은 작용하중의 변화보다는 뚜렷한 특징을 나타내지 않는다는 것을 보여주고 있다.

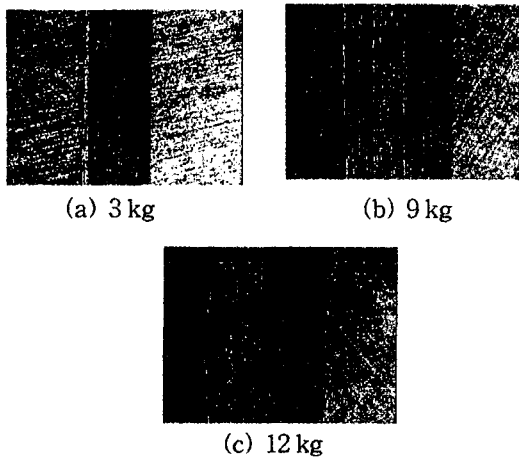


Fig. 8 Image of rubbed surface on applied load, sliding distance : 234 m

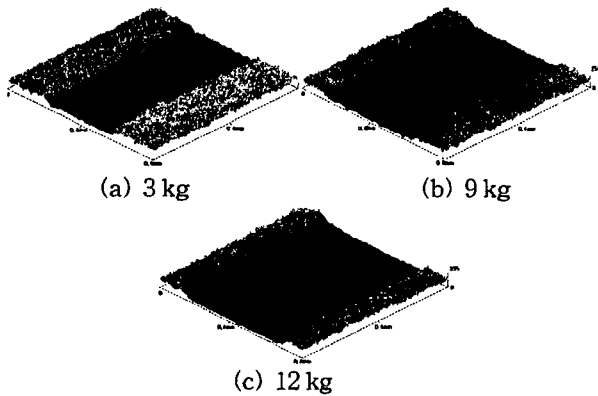


Fig. 9 3D model of rubbed surface on applied load, sliding distance : 234 m

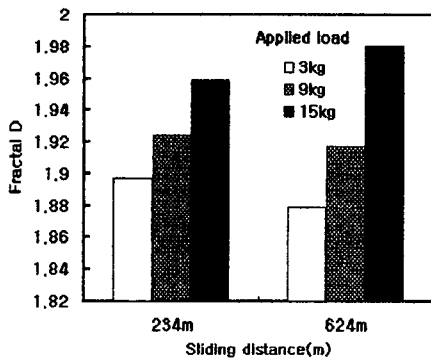


Fig. 10 Fractal dimension vs sliding distance and applied load

Fig. 11은 작용하중 15kg에서 미끄럼 거리의 증가에 따른 마찰면 형상을 3차원 모델링하여 나타낸 것이다. 그림에서 미끄럼 거리의 증가에 따른 마찰트랙의 폭이 미소하게 증가하고 있고 또한 마찰면에는 마멸분의 응착과 산화물의 생성으로 다소 복잡한 형상을 가지지만 명확한 구별은 어렵다는 것을 알 수 있다

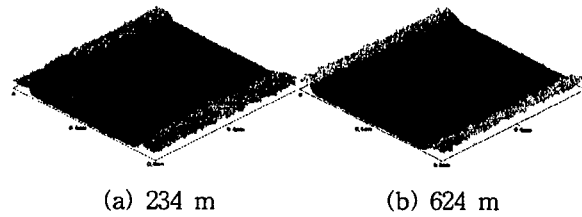


Fig. 11 3D model of rubbed surface on sliding distance, applied load : 15 kg

4. 결론

유압피스톤 모터의 piston ball과 Slipper-pad의 습동재료로 사용되는 HBsC3의 시험편을 사용하여 각각의 작동조건에서 pin on disk 형 마찰·마멸시험기를 이용하여 마찰·마멸시험을 행한 후, CCD 카메라로 획득한 각 시편의 마찰면의 영상으로부터 영상처리를 하여 프랙탈 차원을 구하고 마찰면의 형상 특징을 프랙탈 차원으로 해석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 작용하중 증가함에 따라서 프랙탈 차원의 값과 표면조도 Ra의 변화가 유사한 형태로 증가한다.
2. 프랙탈 차원을 구하기 위한 화소간격의 크기는 2화소로 한 경우가 표면조도 Ra와 가장 유사한 경향을 가진다.
3. 작용하중이 증가함에 따라 프랙탈 차원값은 뚜렷하게 증가하지만 미끄럼 거리의 증가에 따라서는 그 변화의 폭은 적다.
4. 마찰면의 형상해석에 표면조도값 대신에 프랙탈 차원값의 적용이 가능하다.

참고문헌

- (1) S. Vandenberg, C. F. Osborne, 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) Heinz-Otto Peitgen, Dietmar Saupe, 1988, "The Science of Fractal Images", SpringerVerlag, pp.21~70.
- (4) P. R. Stupak, J. H. Kang, J. A. Donovan, 1990, "Fractal characteristics of rubber wear surfaces as a function of load and velocity", *Wear*, 141, pp.73~84.
- (5) A. Majumdar, B. Bhushan, 1990, "Role of Fractal Geometry in Roughness Characterization and Mechanics of Surfaces", *ASME*, Vol. 112, pp.205~216.
- (6) 오동석, 조연상, 서영백, 박홍식, 전태욱, 1998, "마멸입자 형태해석을 위한 Fractal차원의 적용", *한국윤활학회논문집*, 제28회, pp. 115~123.
- (7) 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.