

유압 피스톤 모터의 윤활 마찰면 상태 해석

배효준*, 강인혁, 박정록(동아대원)

박홍식, 전태옥 (동아대)

Morphological Analysis of Oil-Lubricated Surface for Hydraulic Piston Motor

Hyo-Jun Bae*, In-Hyuk Kang, Jung-Log Park,
Heung Sik Park, Tae-Ok Jun

Abstract

The surface morphology of oil-lubricated surface for hydraulic piston motor is believed to be extremely effective in contact mechanics, adhesion, friction and wear. In order to describe morphology of various rubbed surface on driving condition, the wear test was carried out under different experimental conditions in oil-lubricated system. 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

일반적으로 고장력 황동 및 청동 주물재료는 내마멸성이 우수하여 유압피스톤 모터의 piston ball과 Slipper-pad의 슬립재료로 널리 사용되고 있다. 따라서 이러한 유압 구동재료를 사용한 구동부의 손상 정도 및 상태 진단을 하기 위해서는 황동 및 청동주물과 같은 구동재료에 대한 마찰 및 마멸 특성을 반드시 연구할 필요가 있다. 특히 이러한 기계구동부의 마찰면에 대한 마찰 및 마멸상태의 해석을 위하여 현재 일반적으로 탐침(stylus profiling)에 의한 표면조도계, 전자현미경(electron microscope)과 광학적(optical) 방법 등을 이용하여 마찰면의 거친정도 및 변화를 측

정할 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.⁽¹⁻³⁾

그리고, CCD 카메라를 이용하는 광학적 방법에 있어서는 마찰면의 영상으로부터 마찰 및 마멸상태를 해석하기 위하여 복잡

하고 다양한 형태를 갖는 마찰면의 형상에 대한 객관적인 정보를 획득하는 알고리즘이 확립되어 있지 않고, 단지 획득한 영상 정보의 저장에만 활용되고 있는 실정이다. 따라서 마찰면의 영상정보로부터 그 형상 특징을 해석하기 위한 방법이 구축되어지면 보다 효율적인 마찰 및 마멸 상태의 해석이 가능하리라고 생각된다.

이를 위하여 본 연구에서는 자연계의 구조적 불규칙성, 즉, 해안선이나 산의 형상과 같은 비선형적인 형상특징을 묘사하기 위하여 만델브로트(Mandelbrot)⁽⁴⁾가 처음 제시한 개념인 프랙탈(Fractal) 차원을 적용하여 유압피스톤 모터의 piston ball과 Slipper-pad의 구동재료로 사용되는 HBsC3의 마찰면의 형상적 특징을 정량적인 데이터로 수치화하여 마찰면의 영상정보로부터 면의 형상해석을 하기 위한 방법을 구축하고, 마찰조건에 따른 마찰면의 형상 특징을 프랙탈 차원으로 해석하고자 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 마찰·마멸 실험

본 연구에서는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 pin on disk형의 윤활마찰시험장치를 이용하여 마찰·마멸 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 핀 시험편은 직경 5.0mm의 베어링 강구인 STB2(760Hv)를 사용하였고 디스크 시험편은 유압 피스톤 모터의 Slipper-pad의 구동재료로 사용되는 HBsC3(160Hv)와 LBC3(85Hv)를 사용하였으며, 이의 형상은 직경 50mm, 두께 10mm이다. 마찰 실험을 위하여 시험편은 emery paper #1200으로 정밀 연마하여 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 설정하여 실험을 행하였다.

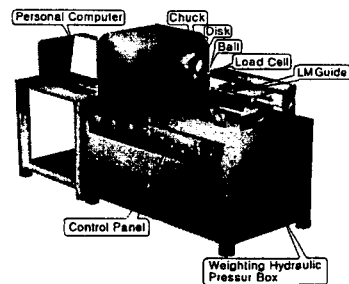


Fig. 1 Schematic diagram of pin on disk type tester

그리고 윤활장치부에는 시험편 접촉점 하부에 oil bath를 설치하고 윤활유 공급은 순환펌프로써 silicon tube를 통하여 시험편 접촉점에 공급하였으며, 핀 시험편은 사하중을 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.

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

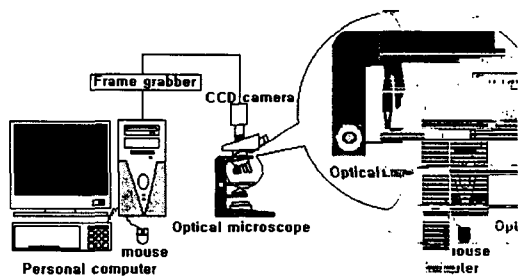


Fig. 2 Schematic diagram of image processing system

오차를 최소화하기 위하여 단색에 근접한 적색 LED를 사용하였다.

그리고 각 실험조건의 시험편에 대하여 모두 대물렌즈 10배, 대안렌즈 10배로서 임의의 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 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.⁽¹⁾ 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 경계내

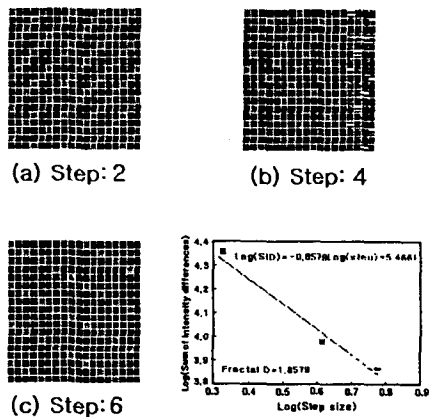


Fig. 3 Determination method of surface fractal dimension

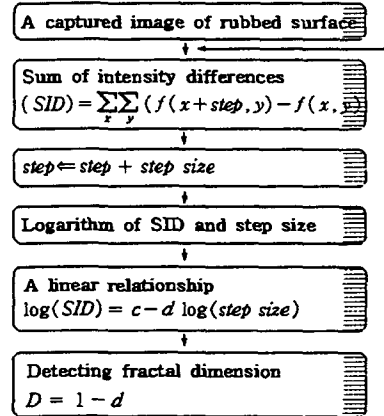


Fig. 4 Flow chart of algorithm for fractal dimension

에 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 구하였다. 이 직선의 기울기는 $1-D$ 값으로 정의되어지며, 이것으로부터 프랙탈 차원 D 를 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

Fig. 5는 미끄럼 거리 624m에서 HBsC3와 LBC3의 작용하중의 증가에 대한 표면조도

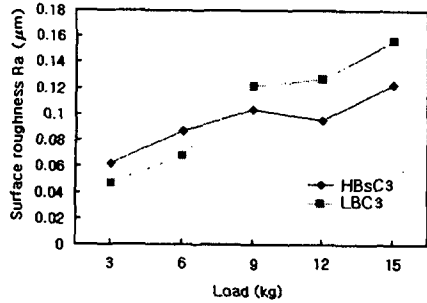


Fig. 5 Relation between surface roughness and load

Ra값의 변화를 나타낸 것으로 작용하중 증가함에 따라서 표면조도 Ra가 증가함을 알 수 있다. 이는 작용하중이 증가함에 따라 마찰면의 온도 상승과 접촉압력의 증가로 인하여 마멸입자의 탈락, abrasive 마멸 및 응착 마멸이 보다 많이 발생한 결과라고 생각되어진다. 그리고 작용하중 9kg 이하에서는 LBC3의 표면조도가 HBS C3보다 낮게 나타나지만 9kg 이상에서는 LBC3의 표면조도가 오히려 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 윤활성 향상을 위하여 LBC3에 첨가된 Pb의 영향으로 비교적 저하중인 9kg 이하에서는 마찰면의 상태가 좋게 나타나지만 작용하중 9kg 이상에서는 접촉압력의 증가로 인해 상대적으로 경도가 높은 HBS C3보다 abrasive 마멸 및 응착 마멸이 많이 생성된 결과라고 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 시험편 HBS C3, 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.

3.3 작용하중의 변화에 따른 프랙탈 차원

Fig. 7은 화소간격의 크기가 2화소, 미끄럼거리 234m 및 624m에서 작용하중의 변화에 따른 HBS C3의 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 234m에서 작용하중에 따른 HBS C3의 마찰면의 영상을 나타낸 것이다. 작용하중이 증가함에 따라 마찰트랙의 폭이 증가하며, 또한 abrasive 마멸도 보다 넓게 형성되어 있다.

그리고 Fig. 9는 Fig. 8의 작용하중에 따른 마찰면의 형상을 3차원 모델링하여 나타낸 것으로서, 작용하중의 증가에 따른

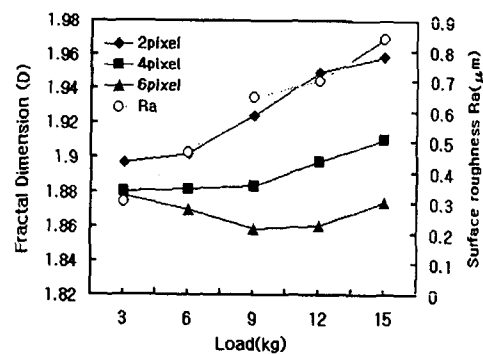


Fig. 6 Relation between fractal dimension, surface roughness and load

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 크게 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.

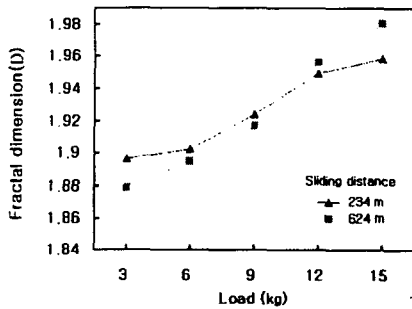


Fig. 7 Effect of load on fractal dimension

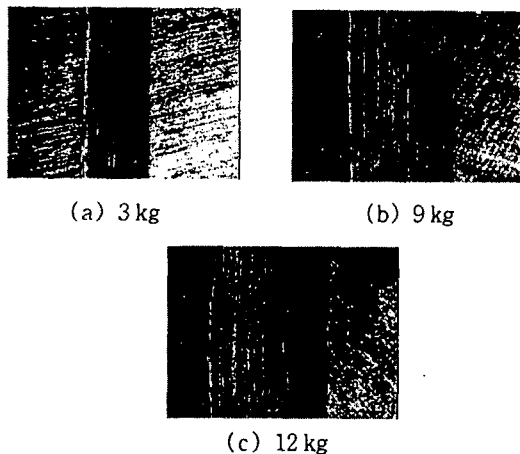


Fig. 8 Image of rubbed surface on load, sliding distance : 234 m

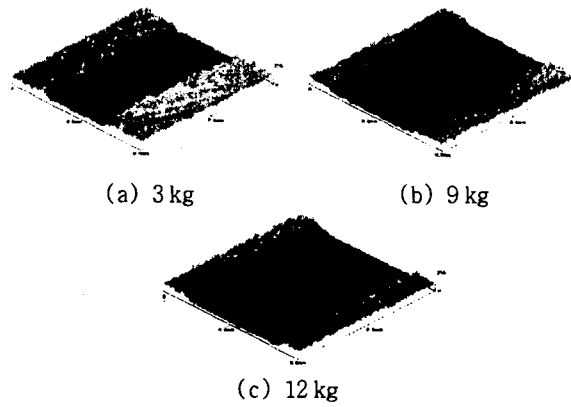


Fig. 9 3D model of rubbed surface on load, sliding distance : 234 m

Fig. 10은 구동재료 HBsC3와 LBC3, 미끄럼 거리 624m에서 작용하중에 따른 프랙탈 차원값의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 Fig. 5의 표면조도와 유사하게 작용하중 9kg 이하에서는 LBC3의 프랙탈 차원값이 HBsC3보다 작으며 9kg 이상에서는 그 값이 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과에서 프랙탈 차원은 마찰면의 Ra 값을 대신하여 표면의 거칠기 특성을 잘 나타낸다고 볼 수 있으며 작동조건에 따라 복잡하고 다양한 형태를 갖는 마찰면의 형상특징을 표현하는데 매우 유용한 수단이 된다고 생각된다.

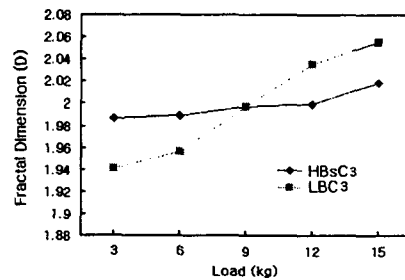


Fig. 10 Effect of load on fractal dimension

4. 결론

유압피스톤 모터의 Slipper-pad의 구동

재료로 사용되는 HBsC3의 시험편을 사용하여 각각의 작동조건에서 pin on disk 형 마찰·마멸시험기를 이용하여 마찰실험을 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 마찰면의 온도상승과 접촉압력의 증가로 인하여 표면조도 Ra 는 증가한다.
2. 작용하중이 증가함에 따라 표면조도와 유사하게 프랙탈 차원값은 뚜렷하게 증가한다.
3. 구동재료 HBsC3, 작용하중 9kg 이하에서는 미끄럼거리가 긴 경우가 짧은 경우에 비하여 프랙탈 차원값이 작으며, 12kg 이상에서는 오히려 값이 크게 나타난다.
4. 미끄럼거리 624m일 때, 작용하중 9kg 이하에서는 LBC3의 프랙탈 차원값이 HBsC3보다 작으며 9 kg 이상에서는 그 값이 크게 나타난다.

참고문헌

- (1) S. Vandenberg, C. F and Osborne. "Digital Image Processing Techniques. Fractal Dimensionality and Scale-space applied to Surface Roughness". Wear, 159, pp.17~30. 1992.
- (2) 塚田忠夫, "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巻, 第7号, pp.533 ~538. 1995.
- (3) 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.
- (4) Heinz-Otto Peitgen and Dietmar Saupe. "The Science of Fractal Images". SpringerVerlag, pp.21~70. 1988.
- (5) A. Majumdar and B. Bhushan. "Role of

Fractal Geometry in Roughness Characterization and Mechanics of Surfaces". ASME, Vol.112, pp.205 ~216. 1990.

- (6) 오동석, 조연상, 서영백, 박홍식, "마멸입자 형태해석을 위한 Fractal차원의 적용", 한국윤활학회학술대회집, 제28회, pp. 115~123.1998.
- (7) 八木伸行, 井上誠喜, 林正樹, "C言語で学ぶ 実戦画像処理", オム社, pp.2~10. 1992.