

Fractal 차원에 의한 레이저 개질강의 마찰면 형상해석

오 동 석*, 조 연 상 (동아대원), 옥 철 호 (동아대 생산기술연구소)
진 동 규 (부산정보대), 박 홍 식 (동아대), 이 광 영 (경상대)

Topographical Analysis of Frictional Surface of Laser Modified Steel by Fractal Dimension

D. S. Oh*, Y. S. Cho, C. H. Ok, D. K. Jin, H. S. Park, K. Y. Lee

Abstract - The determination of surface topography is believed to be extremely important in the areas of contact mechanics, adhesion and friction. In order to describe topography of various frictional surface, the wear test was carried out under different experimental conditions in dry friction. And fractal descriptors was applied to frictional surface of laser modified steel 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. Topography of frictional surface can be effectively obtained by fractal dimensions.

Key-Words ; Frictional Surface, Topography, Image Processing, Fractal Dimension, Intensity Difference

1. 서 론

일반적으로 두 고체면 사이에서의 마찰과 마멸은 고체면의 불연속적인 접촉점의 접촉에 의한 것으로 이러한 접촉은 윤활조건하에 있더라도 발생되며, 이때 마찰면의 상태는 접촉부의 응착 및 마찰과 마멸에 매우 중요하게 작용한다. 따라서 상호접촉운동을 하는 마찰면에 대한 해석은 마찰 및 마멸상태를 설명하기 위하여 오래 전부터 유용한 수단으로 사용되어 왔다.⁽¹⁾

이러한 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.^(2~3)

또한, 최근들어 광학기기의 기술적인 발달과 더불어 디지털 영상처리 기술이 급속도로 발전함에 따라 낮은 설비비용과 간편한 조작으로 광학 현미경을 통하여 얻은 마찰면의 영상정보의 고속처리가 가능해짐으로써 광학적 방법에 의한 마찰면의 해석이 활발히 진행되고 있다. 그러나 국내에서는 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 마찰면의 영상정보로부터 그 형상 특징을 해석하기 위한 방법이 구축되어지면 보다 효율적인 마찰 및 마멸 상태의 해석이 가능해지리라 생각되어진다.

이에 대한 알고리즘을 확립하기 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 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.⁽⁵⁻⁷⁾

따라서 본 연구에서는 이와 같은 프랙탈 차원의 특성을 이용하여 레이저 개질강의 마찰면의 형상적 특징을 정량적인 데이터로 수치화하여 마찰면의 영상정보로부터 면의 형상해석을 하기 위한 방법을 구축하고, 마찰조건에 따른 마찰면의 형상과 프랙탈 특징간의 관계를 규명함으로써 마찰 및 마멸 상태를 해석하고자 하였다.

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 이를 인버터(Inverter)로 0.1~0.7 m/s까지 무단구동하였다. 실험재료는 펄스 Nd-YAG레이저⁽⁸⁾로 표면

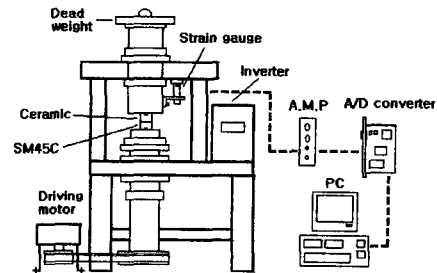


Fig. 1 Schematic diagram of experimental unit

개질한 SM45C를 사용하였고, 마멸실험을 위한 상대 재료로는 소결한 순도 95%의 알루미늄 세라믹스(Al_2O_3 ceramics)를 사용하였다.

Fig. 2에는 마멸실험을 위한 SM45C와 세라믹스의 시험편 형상으로 마찰면은 페루프인 링(ring)모양으로 하였으며, (a)는 세라믹의 마찰면으로 외경 22mm, 내경 15mm로

하였고, (b)는 SM45C로써 표면이 세라믹스의 표면에 완전한 마찰이 되도록 하기 위하여 마찰면의 폭을 세라믹스보다 1.5mm정도 작게 하였다.

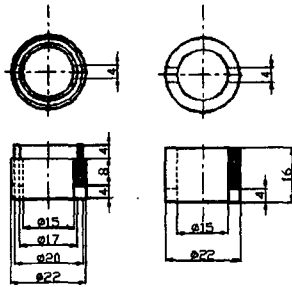


Fig. 2 Shape and dimensions of specimens

Table 1. Experimental condition for SM45C

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

그리고 작동조건으로는 Table 1에서 보는 바와 같이 작용하중을 5kg 와 10kg로 설정하여 미끄럼 거리와 미끄럼 속도에 대하여 각각 마찰실험을 행하였다. 미끄럼거리는 0~3km까지로 이를 분할하여, 0.2km, 0.6km, 1km, 2km, 및 3km의 5부분으로 세분화하였으며, 미끄럼 속도는 0.1~0.7m/s까지 0.2m/s씩 일정한 간격으로 증가시켜 4단계로 구분하여 마찰 실험을 하였으며, 이 때 얻어진 SM45C의 마찰면에 대하여 영상처리를 하여 프랙탈 차원을 계산하였다.

2.2 영상처리에 의한 마찰면 추출

실험조건 별로 생성된 마찰면의 영상정보를 얻기 위하여 영상처리 시스템⁽⁷⁾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.

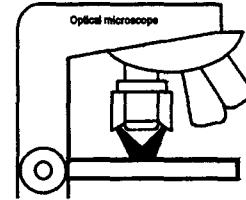


Fig. 3 Schematic diagram of image processing system

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 실험조건 of 시험편에 대하여 모두 대물렌즈 10배, 대안렌즈 10배로서 임의의 위치에 있는 마찰면의 영상을 5개씩 추출하였으며, 각각의 마찰면 영상에 대하여 적색 필터링(filtering)의 영상처리⁽⁹⁾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.⁽⁴⁾ 이와 같은 프랙

탈 차원의 개념을 본 연구에서는 마찰면에 적용하여 해석하였다. Fig. 4는 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 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 정의되어지며, 이것으로부터 프랙탈 차원 D를 계산하였다.

여기서 화소간격의 크기가 적을수록 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 설정하고 있다.

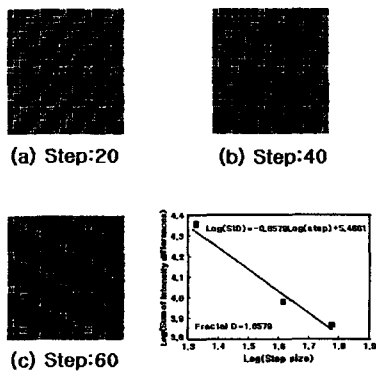


Fig. 4 Determination method of surface fractal dimension

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.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미끄럼 거리에 따른 프랙탈 차원과 표면 거칠기

Fig. 5는 미끄럼 속도 0.1m/sec, 작용하중 10kg에서의 미끄럼 거리에 대한 마찰면 영상의 3차원 모델링 형상으로 마찰면 영상에서 각 화소의 농도 값을 이용하여 3차원 표면을 생성하였다.

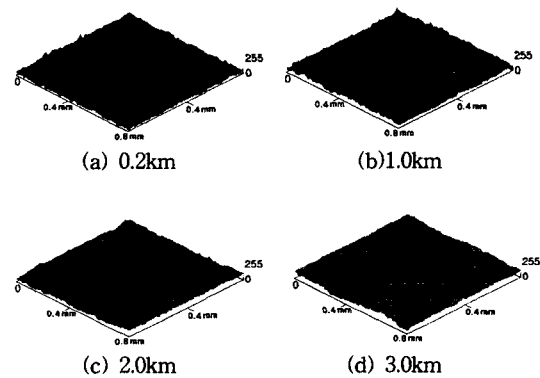


Fig. 5 Simulation of frictional surface by image processing ; applied load : 10kg, sliding speed : 0.1m/s

미끄럼 거리 0.2km에서의 마찰면의 형상을 보면 면의 굴곡이 심하게 나타나고 있으며 미끄럼 거리가 증가함에 따라 그 굴곡이 완만해지고 있음을 알 수 있다. 이는 미끄럼 거리가 짧은 경우 양 시험편의 실제 접촉부의 응착에 의한 소성변형이 진행되는 초기 마멸상태로 응착마멸이 진행되고 있는 결과라고 생각되어지며, 미끄럼 거리의 증가에 따라 실제 접촉부의 온도상승으로 레이저 개질강의 표면에 산화물에 의한 보호막이

형성되어 마찰면의 굴곡이 완만한 형태를 나타낸다고 생각된다.

Fig. 6은 미끄럼 속도 0.1m/sec, 작용하중 10kg, 화소 간격의 크기 2화소와 20화소에서 미끄럼거리에 대한 마찰면의 프랙탈 차원의 변화를 나타낸 것이다.

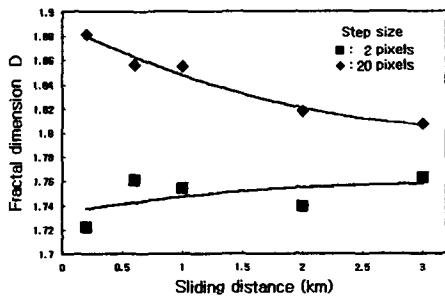


Fig. 6 Fractal dimension of frictional surface for sliding distance ; applied load : 10kg, sliding speed : 0.1m/s

여기서 화소간격의 크기를 2화소씩 증가시켰을 경우 미끄럼 거리가 증가함에 따라 프랙탈 차원의 값이 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 화소간격의 크기를 20화소씩 증가시켰을 경우에는 프랙탈 차원의 값이 감소하고 있음을 알 수 있다. 프랙탈 차원값은 그 값이 클수록 면의 형상적 특징이 매우 불규칙적이고 복잡하며 면의 굴곡의 변화가 심하다는 것을 나타내는 것으로서 화소간격의 크기를 20화소씩 증가시켰을 경우 Fig. 5에서 나타낸 바와 같이 미끄럼 거리가 증가할수록 마찰면의 굴곡변화가 복잡한 형상에서 점차 완만해지고 있음을 나타낸다고 생각된다. 그리고 마찰면의 미세적인 형상변화를 살펴보기 위하여 화소간격의 크기를 2화소씩 증가시킨 경우는 미끄럼 거리가 증가함에 따라 미세한 마멸입자 또는 산화물 입자의 생성이 증가하고 마찰면에 고르게 개재됨으로써 미세적으로 복잡한 굴곡변화

를 나타내어 프랙탈 차원값이 오히려 증가한다고 생각한다.

Fig. 6과 동일조건 하에 미끄럼 거리에 대한 마찰면의 표면거칠기 Ra값을 Fig. 7에 나타내었다.

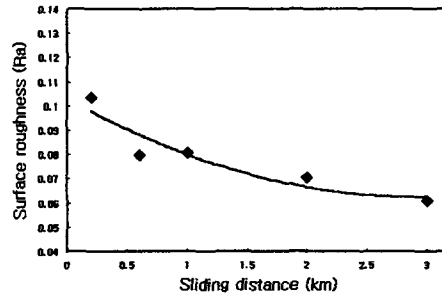


Fig. 7 Surface roughness of frictional surface for sliding distance ; applied load : 10kg sliding speed : 0.1m/s

미끄럼 거리에 따른 Ra값의 변화는 Fig. 6에서 화소간격의 크기가 20화소일 때의 프랙탈 차원값의 변화와 거의 유사한 경향을 나타내고 있다. 이는 전술한 바와 같이 화소간격의 크기를 크게한 경우의 프랙탈 차원은 마찰면의 Ra값을 대신하여 표면의 거칠기 특성을 잘 나타낸다고 볼 수 있다. 그리고 Fig. 6과 Fig. 7의 결과에서 프랙탈 차원은 복잡하고 다양한 형태를 갖는 마찰면의 형상 특징을 표현하는데에 매우 유용한 수단이 된다고 생각된다.

3.2 미끄럼 속도에 따른 마찰면의 프랙탈차원

Fig. 8은 작용하중 10kg, 미끄럼 거리 1km에서 미끄럼 속도에 따른 마찰면의 3차원 모델링 형상을 나타낸 것으로 미끄럼 속도가 증가함에 따라 마찰면의 형상이 복잡해짐을 알 수 있다. 그리고 Fig. 9는 미끄럼 거리 1km, 작용하중 5kg과 10kg에서 미끄럼 속도에 따른 마찰면의 프랙탈 차원값

을 보여주고 있다.

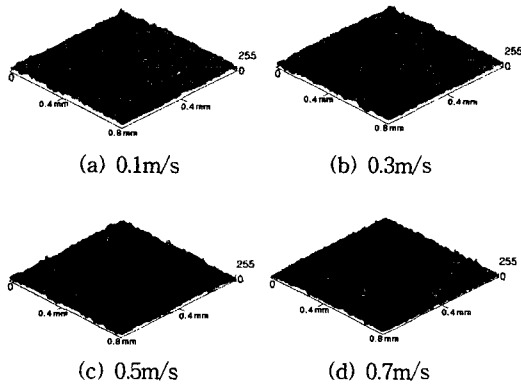


Fig. 8 Simulation of frictional surface by image processing ; applied load : 10kg, sliding distance : 1.0km

작용하중 5kg과 10kg 모두 미끄럼 속도가 증가할수록 프랙탈 차원값은 증가하는 경향을 나타내고 있으며 하중이 증가할수록 프랙탈 차원의 값이 크다는 것을 알 수 있다. 이는 미끄럼 속도가 증가함에 따라 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 마찰면의 형상이 미끄럼 속도의 증가에 따라 굴곡변화가 복잡하다는 것을 나타내고 있으며, 높은 하중에서 마찰면의 굴곡변화가 복잡하다는 것을 보여준다고 생각한다.

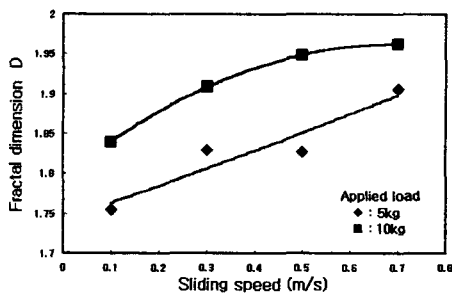


Fig. 9 Fractal dimension of frictional surface for sliding speed; sliding distance : 1.0km

4. 결론

마찰조건에 따른 레이저 개질강의 마찰면의 형상 특징을 해석하기 위하여 건조마찰을 통한 개질강의 마찰면을 영상처리하여 마찰면의 영상정보를 추출하고, 이 영상정보로부터 3차원 형상 및 프랙탈 차원값을 구하여 마찰면 형상의 특징을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 프랙탈차원에 의한 마찰면의 미시적 형상해석은 화소간격 2 화소, 거시적 형상해석은 20화소를 이용하는 것이 편리하다.
- (2) 프랙탈 차원이 높으면 면의 거칠기가 복잡하며, 이 값이 낮으면 완만하다.
- (3) 면의 3차원 형상과 거시적 프랙탈 해석에서 미끄럼 거리 초기는 초기마멸상태로 프랙탈차원이 높고, 미끄럼거리가 증가함에 따라 이 값은 감소한다.
- (4) 미끄럼 속도와 작용하중이 크게 되면 프랙탈 차원이 증가하며, 미끄럼 거리에 따른 Ra값의 변화는 화소간격 20 화소의 경우의 프랙탈 차원과 거의 유사하다.
- (5) 프랙탈 차원을 통하여 마찰면의 미시적 형상해석도 가능하였다.

참고 문헌

1. L. He, J. Zhu, "The fractal character of processed metal surfaces", *Wear*, 208, pp.17~24, 1997.
2. S. Vandenberg, C. F. Osborne, "Digital image processing techniques, fractal dimensionality and scale-space applied to surface roughness", *Wear*, 159, pp.17~30, 1992.
3. 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卷, 第7号, pp. 533~538, 1995.

4. Heinz-Otto Peitgen, Dietmar Saupe, "The Science of Fractal Images", SpringerVerlag, pp.21~70, 1988.
5. P. R. Stupak, J. H. Kang, J. A. Donovan, "Fractal characteristics of rubber wear surfaces as a function of load and velocity", Wear, 141, pp.73~84, 1990.
6. A. Majumdar, B. Bhushan, "Role of Fractal Geometry in Roughness Characterization and Mechanics of Surfaces", ASME, Vol. 112, pp.205~216, 1990.
7. 오동석, 조연상, 서영백, 박홍식, 전태욱, "마멸입자 형태해석을 위한 Fractal차원의 적용", 한국윤활학회논문집, 제28회, pp.115~123, 1998.
8. 精密工學會表面改質に関する調査研究分科會, "表面改質技術", 日刊工學新聞社, pp.124~130, 1988.
9. 八木伸行, 井上誠喜, 林正樹, "C言語で學ぶ實戰畫像處理", オム社, pp.2~10, 1992.