

유압구동 습동재의 마찰면 형상특징 해석에 관한 연구

전성재*, 조연상*, 김동호**, 박흥식***

A Study on Morphological Analysis of the Rubbed Surface for Hydraulic Driving Material

Sung-Jae Jun*, Yon-Sang Cho*, Dong-Ho Kim**, Heung-Sik Park***

Abstract

It is known that fractal theory has recently been used as a useful in the characterization of surface texture and the understanding of tribological phenomena such as friction, wear and lubrication. The fractal-based method for describing the rubbed surface texture has aroused great interest. In this paper, the fractal descriptors was applied to rubbed surface of hydraulic driving material with image processing system in order to describe morphology of the rubbed surface. The results showed that the fractal dimension can be determined by sum of intensity difference of surface pixel. The two step size to get fractal dimension is similar to surface roughness Ra. Fractal dimensions of the rubbed surfaces increase with an increase of applied load. Morphology of the rubbed surface driving in lubricant can be effectively obtained by fractal dimensions.

Key Words : Fractal Dimension(프랙탈 차원), Rubbed Surface(마찰면), Morphology(형상특징), Surface texture(표면구조), Intensity Difference(명암차이)

1. 서론

기계구동 시스템을 구성하는 두 마찰 습동면 사이에서 발생하는 마찰과 마멸은 두 면의 실제 접촉점에서 그들의 접촉에 의하여 발생하는 현상이다. 이러한 접촉에 의하여 생성되는 마찰면의 형상 해석을 위하여 일반적으로 가장 많이

사용하는 방법이 탐침을 이용한 표면거칠기를 조사하는 것이다. 이 방법은 보다 미세한 부분의 측정시에는 탐침의 접촉반경의 영향이 크게 좌우될 뿐만 아니라 거칠기의 크기에 대한 규정이 매우 중요하다⁽¹⁻⁴⁾. 이러한 탐침을 사용한 정밀 측정방법의 문제점을 보완하기 위해서는 보다 새로운 측정방법의 도입이 필요하다.

* 동아대학교 기계공학과 대학원
** 문경대학교 기계설계학과
*** 동아대학교 기계산업시스템 공학부
(박흥식 parkhs@mail.donga.ac.kr)

기계구동 시스템에서 윤활운동을 하는 마찰면을 광학현미경 또는 전자현미경 등으로 관찰해 보면 현미경의 배율을 올려보아도 마찰면은 동일한 형상을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 실제로 마찰면의 경우 생물의 세포와 같이 기본적인 단위는 존재하고 있지 않기 때문에 오히려 현미경의 배율을 올려도 동일한 구조를 나타낸다는 상사성이 마찰면의 본질이다⁽⁵⁾. 이와 같은 상사성을 나타내기 위해서 도입된 것이 프랙탈(Fractal) 이론이다.

프랙탈 이론은 Mandelbrot⁽⁶⁾가 처음 제시한 것으로서, 자연계의 구조적 불규칙성, 즉, 해안선이나 산의 형상과 같은 비선형적인 대상물체의 형상특징을 정의하여 수치화하여 표현한 것이다. 이것은 유클리드(Euclid) 기하학에서 표현하고 있는 정수 차원의 개념이 아닌 소수 차원의 개념으로 명확히 정의할 수 없는 성질인 어떤 물체의 지칠지칠한 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⁽⁷⁻⁹⁾.

이처럼 마찰면과 같이 기본적인 구조가 존재하지 않는 분야에도 프랙탈적인 특징을 이용하면 마찰면의 형상특징을 표현할 수 있다^(1,8,9). 이것이 가능하면 기계구동 시스템의 마찰면에 대한 마멸상태의 해석과 나아가 기계구동 시스템의 손상상태의 분석에도 적용이 가능⁽¹⁰⁾하리라 생각된다.

본 연구에서는 프랙탈 차원을 이용하여 유압모터용 Slipper-pad의 습동재료로 사용되는 황동주물(HBsC3)의 마찰면의 형상적 특징을 정량적인 데이터로 수치화하여 마찰면의 영상정보로부터 면의 형상해석을 하기 위한 방법을 구하였다. 그리고 마찰조건에 따른 마찰면의 형상특징을 프랙탈 차원으로 해석하여 기계구동 시스템의 손상상태에 이를 적용하고자 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 마찰·마멸 실험

본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 pin on disk형의 실험장치를 이용하여 윤활마찰·마멸 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 핀 시험편은 직경 5.0mm 베어링 강구인 STB2(760Hv)를 사용하였고, 디스크 시험편은 유압피스톤용 모터의 Slipper-pad의 습동재료로 사용되는 HBsC3(160

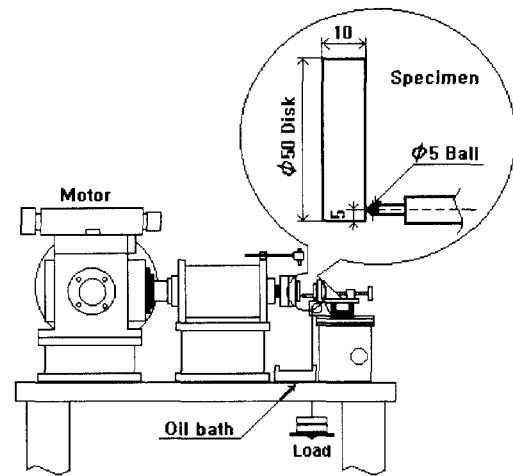


Fig. 1 Schematic diagram of pin on disk type tester

Hv)를 사용하였으며, 이것의 형상은 직경 5mm, 두께 10mm이다. 윤활 마찰실험을 위하여 마찰 시험편은 emery paper #1200으로 정밀 연마하여 표면조도를 $0.2\mu\text{mRmax}$ 로 일정하게 하였으며, 윤활유는 무침가 파라핀(paraffin)계 광유(8.2 cSt@40°C)를 사용하였다.

작동조건으로 접촉하중은 3kgf, 6kgf, 9kgf, 12kgf 및 15kgf의 5단계로 변화시켰고, 미끄럼거리는 234m 및 624m로 설정하여 실험을 행하였다.

그리고 윤활장치부에는 시험편 접촉점 하부에 oil bath를 설치하고 윤활유 공급은 순환펌프로서 silicon tube를 통하여 시험편 접촉점에 공급하였다. 핀 시험편은 하중을 걸어 미끄럼속도 7.23mm/s로 일정하게 회전하는 디스크 시험편에 가압하였다. 실험 후에는 마찰면을 헥산으로 5분간 초음파 세척한 후 컴퓨터 영상처리를 행하여 마찰면의 영상정보를 추출하였다.

2.2 영상처리에 의한 마찰면 추출

실험조건 별로 생성된 마찰면의 영상정보를 얻기 위하여 영상처리 시스템⁽¹⁰⁾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.

영상처리를 위한 광원은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 빛에 의해 생기는 그림자 영역을 제거하고 빛의 농도에 의한 마찰면의 굴곡상태를 얻기 위하여 90°의 4방향에서 입사각

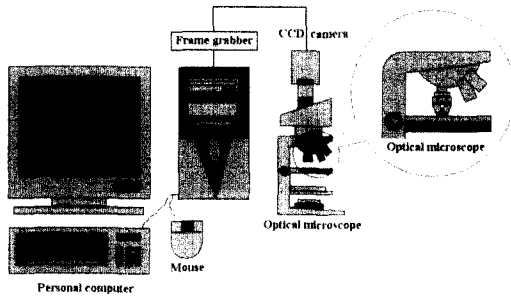


Fig. 2 Schematic diagram of image processing system

45°로 마찰면에 조사하였으며, 빛의 회절에 의한 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 영상처리를 통해 마찰면의 명암에 의한 굴곡을 명확히 하였다.

이렇게 하여 추출되어진 마찰면의 명암 굴곡으로부터 마찰면의 형상 프랙탈 특징을 구하였으며, 또한 마찰면 영상의 명암 차이를 이용하여 3차원 영상 모델링을 행하였다.

2.3 마찰면의 프랙탈 차원

프랙탈 차원은 대상으로 하는 물체의 불규칙성에 대하여 수치화한 것으로 해안선이나 산과 같은 자연형상을 보고 “복잡하다” 혹은 “완만하다” 라고 하는 분명한 어떤 주관적 기준에 의하여 정해지는 판단을 객관적인 기준에 의한 판단으로 표현할 수 있는 장점을 가지고 있다^(2,3). 이와 같은 프랙탈 차원의 개념을 본 연구에서는 유압구동 부재의 마찰면에 적용하여 프랙탈 차원을 계산하였다.

Fig. 3은 마찰면의 프랙탈 차원을 구하기 위하여 각 화소 간격을 달리한 영상을 나타낸 것으로서, 이것은 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 합하여 이를 대수값으로 표현한다.

Fig. 4는 화소간격과 명암 차의 합을 각각 대수값으로 변환하여 이를 최소자승법으로 나타낸 것이다. 이 직선의 선형관계는 Richardson이 프랙탈 차원을 구하기 위해 제시한 것⁽⁶⁾으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 직선의 기울기

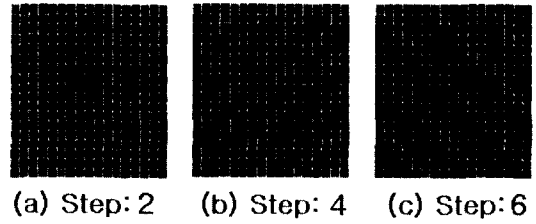


Fig. 3 Step size for surface fractal dimension

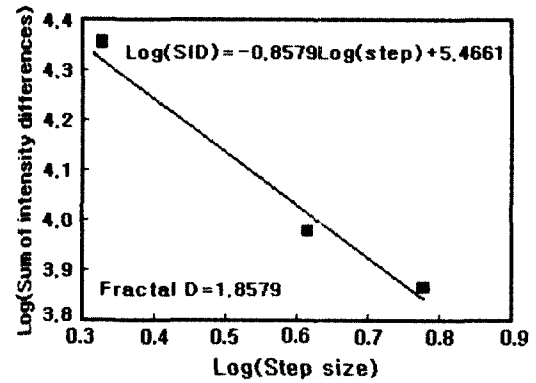


Fig. 4 Relation between log(s) and log(SID)

$$\log(\text{SID}) = -0.8579 \log(s) + 5.4661 \quad (1)$$

$$d = -0.8579, \quad D = 1 - d = 1.8579$$

(SID : Sum of Intensity Difference,
s : Step size, d : slope of line)

는 -0.8579로 이는 1-D로 정의되며⁽⁴⁾, 이로부터 구한 마찰면의 프랙탈 차원 D는 1.8579가 된다. 이상과 같이 프랙탈 차원을 구하기 위한 알고리즘의 흐름도를 Fig. 5에 나타내었다.

본 연구에서는 각각의 윤활실험을 완료한 후의 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 경우 마찰면의 프랙탈 차원을 구하였다. 그리고 표면조도계를 이용하여 각 작동조건에서의 마찰면의 표면조도 Ra값을 측정하여 이를 프랙탈 차원과 비교하였다.

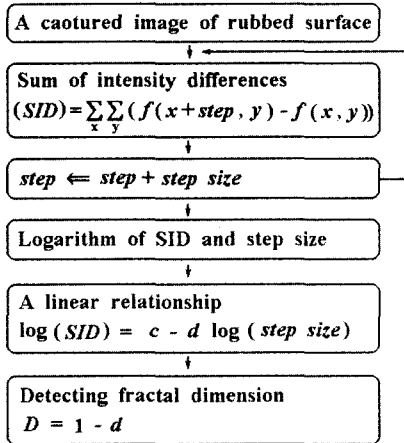


Fig. 5 Flow chart of algorithm for fractal dimension

3. 실험결과 및 고찰

3.1 표면조도 Ra와 프랙탈 차원

마찰면의 표면조도와 프랙탈 차원값의 관계를 알기 위하여 Fig. 6은 화소간격의 크기가 2화소, 미끄럼거리 624m에서 작용하중의 증가에 따른 프랙탈 차원값과 표면조도 Ra를 비교하여 나타낸 것이다.

그림에서, 작용하중이 증가함에 따라서 프랙탈 차원값과 표면조도 Ra의 변화가 유사한 경향을 가지며 증가하는 것을 볼 수 있다. 여기서 프랙탈 차원값은 전술한 바와 같이 대상으로 하는 물체의 비선형적인 불규칙 정도를 나타내 주는 것으로 그 값이 크게 될수록 대상으로 하는 물체의 굴곡

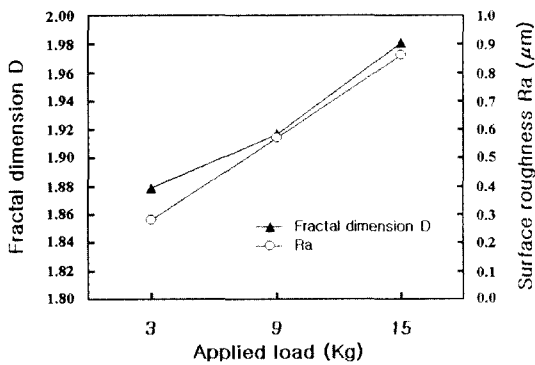


Fig. 6 Comparison of fractal dimension with surface roughness on applied load

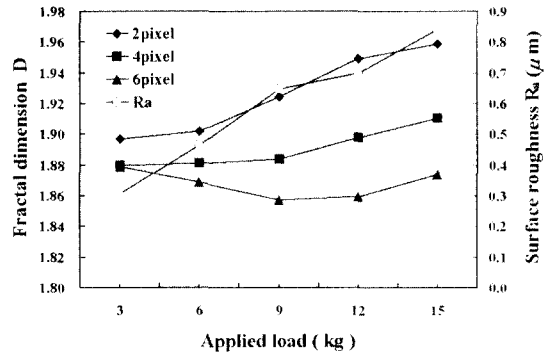


Fig. 7 Effect of step size on fractal dimension

변화가 심하고 불규칙하다⁽¹¹⁾는 것을 의미한다.

따라서 Fig. 6의 결과에서 마찰면의 프랙탈 차원값은 표면조도 Ra를 대신하여 표면의 거칠기 특성을 잘 나타낸다고 볼 수 있으며, 복잡하고 다양한 형태의 표면 요철을 갖는 마찰면의 형상특징을 표현하는데 매우 유용한 수단이 된다는 것을 알 수 있다.

3.2 화소간격에 따른 프랙탈 차원

프랙탈 차원을 구하기 위하여 진술한 바와 같이 일정한 간격만큼 떨어진 화소의 명암 차이를 구할 필요가 있다. 이때 적당한 간격의 크기를 설정하기 위하여 화소간격의 크기를 달리하여 각 조건에 대한 프랙탈 차원값을 구하였다. 이것은 화소간격의 크기에 따라 마찰면의 명암 차의 합이 각각 다르기 때문이다.

Fig. 7은 미끄럼거리 234m에서 화소 간격의 크기가 2, 4 및 6 화소일 때, 작용하중에 따른 프랙탈 차원값의 변화를 나타낸 것이다. 작용하중의 증가에 따라 각 화소 간격의 프랙탈 차원은 각각 다른 값을 나타내는 것을 알 수 있다.

화소 간격의 크기가 작은 2화소의 경우가 작용하중의 증가에 따라 표면조도 Ra의 변화와 유사하게 프랙탈 차원의 값이 증가하는 경향을 보여주고 있지만, 4화소와 6화소의 경우에는 Ra의 변화와는 다른 경향을 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서는 프랙탈 차원을 이용하여 작동조건에 따른 마찰면의 표면거칠기의 특성을 조사하기 위하여 화소 간격의 크기를 2화소로 설정하여 프랙탈 차원값을 구하였다.

3.3 작동조건에 따른 프랙탈 차원

Fig. 8은 화소 간격의 크기가 2화소, 미끄럼거리 234m 및 624m에서 작용하중의 변화에 따른 프랙탈 차원값의 변

화를 나타낸 것으로, 작용하중이 증가함에 따라 미끄럼거리와 관계없이 프랙탈 차원값은 증가하고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 작용하중이 증가함에 따라 마찰면이 거칠고 굴곡 상태가 복잡하다는 것을 나타내주고 있다.

Fig. 9는 미끄럼거리 234m에서의 작용하중에 따른 마찰면의 영상을 나타낸 것이다. 작용하중이 증가함에 따라 마찰트랙의 폭이 점점 증가하며, 또한 마찰면에는 대기중의 높은 활성을 가진 산소와 윤활유의 화학반응으로 인한 산화막이 형성되며⁽¹²⁾, 작용압력에 의한 abrasive 마멸에 의한 홈도 보다 넓게 형성되어 있다. 그러나 작용하중이 9kgf 이상이 되면 마찰트랙의 폭은 그다지 큰 변화를 보이지 않고 있다.

그리고 Fig. 10은 Fig. 9의 작용하중에 따른 마찰면의 형상을 3차원 모델링하여 나타낸 것으로서, 작용하중의 증가

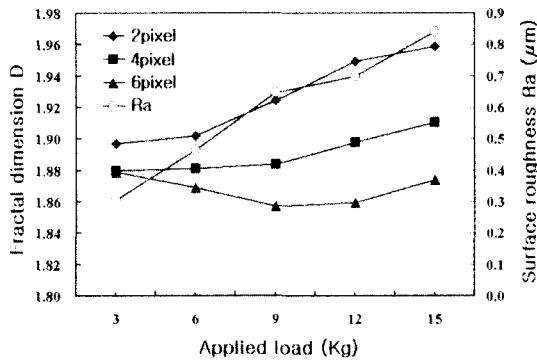


Fig. 8 Effect of applied load on fractal dimension

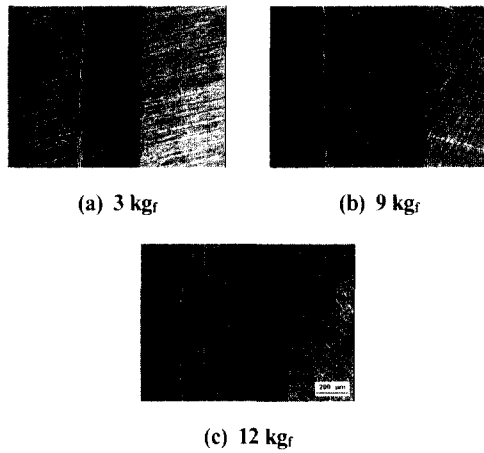


Fig. 9 Image of rubbed surface on applied load sliding distance : 234m

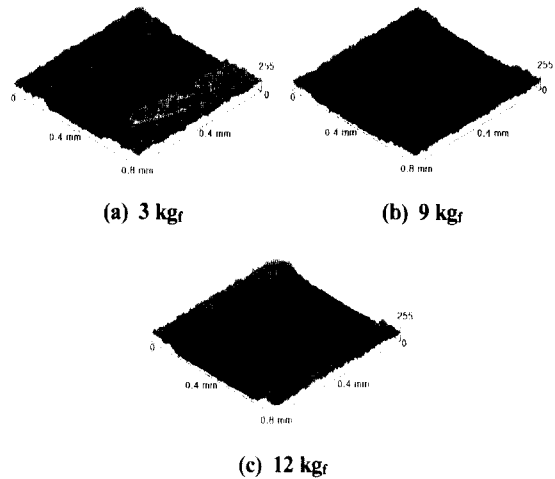


Fig. 10 3D model of rubbed surface on applied load, sliding distance : 234 m

에 따른 마찰면의 미세형상도 복잡해지고, 마찰면의 온도상승에 따른 산화반응의 결과⁽¹³⁾로 인한 산화물이 부분적으로 두껍게 형성되어 있고, 또한 abrasive 마멸에 의한 홈도 깊게 나타나 있다는 것을 볼 수 있다.

그러나 Fig. 8에서 작용하중 9kgf이하에서는 미끄럼거리가 긴 경우가 짧은 경우에 비하여 프랙탈 차원이 낮은 값을 가지며, 12kgf이상에서는 오히려 값이 높게 나타나고 있다. 이것은 작용하중이 9kgf이하에서는 동일 작용하중에서 미끄럼거리가 긴 경우가 짧은 경우보다 마찰면의 산화반응이 지속적으로 진행되어 표면에 생성된 산화물의 영향으로 표면에 형성된 미세한 굴곡의 영향이 적다. 그러나 작용하중이 12kgf이상에서는 작용하중과 미끄럼거리의 증가에 따라 접촉압력에 의하여 트랙방향으로 형성된 산화막의 파단이 일어나 abrasive 마멸이 보다 많이 생성되어 복잡한 표면형상을 나타낸다고 생각된다.

Fig. 11은 작용하중 15kgf에서 미끄럼거리의 증가에 따른 마찰면 형상을 3차원 모델링하여 나타낸 것이다. 그림에서 미끄럼거리가 길게 되면 마찰트랙의 폭이 미소하게 넓어지며 또한 마찰면에는 산화물로 형성된 표면에 abrasive 마멸에 의한 미세한 좁은 홈이 마찰방향을 따라 진전되어 있다. 그리고 이러한 현상은 미끄럼거리가 증가하게 되면 그 경향이 더욱 뚜렷하게 생각되며, 이로 인하여 마찰면에는 미세한 굴곡으로 인하여 복잡한 형상⁽⁵⁾을 가진다.

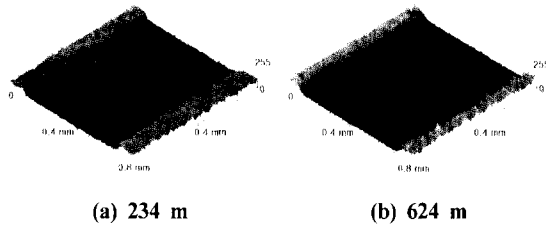


Fig. 11 3D model of rubbed surface on sliding distance, applied load : 15 kgf

4. 결 론

유압피스톤 모터용 Slipper-pad의 슬립재료로 사용되는 HBsC3의 시험편을 사용하여 각각의 작동조건에서 pin on disk 형 윤활마찰·마멸시험기를 이용하여 실험을 행한 후, 각 시험편의 마찰면을 영상처리 하여 이의 형상특징을 프랙탈 차원으로 해석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 프랙탈 차원을 구하기 위한 화소간격의 크기를 2화소로 한 경우가 표면조도 Ra와 유사한 경향을 나타낸다.
- (2) 작용하중이 증가함에 따라 프랙탈 차원값은 크게 되며, abrasive 마멸이 증가한다.
- (3) 작용하중 9kg이하에서는 미끄럼거리가 긴 경우가 프랙탈 차원값이 작지만, 12kg이상에는 큰 값을 가진다.
- (4) 프랙탈 차원은 마찰면의 형상특징 해석에 효과적인 수단이다.

참 고 문 헌

- (1) S. Vandenberg and C. F. Osborne, "Digital Image Processing Techniques, Fractal dimensionality and Scale-Space applied to Surface Roughness", Wear, 159, pp. 17~30. 1992.
- (2) T. B. Kirk, G. W. Stachowiak and A. W. Batchelor, "Fractal Parameters and Computer Image Analysis applied to Wear Particles isolated by Ferrography", Wear, 145, pp. 347~365, 1991.
- (3) 塚田忠夫, "表面凹凸のフラクタルシミュレーション", 트라이보로지스트, 第40卷, 第7号, pp. 533~538. 1995.
- (4) L. He and J. Zhu, "The Fractal Character of Processed Metal Surface", Wear, 208, pp. 17~24,

- 1996.
- (5) T. Nakano, "Toward the Coherent Development of Tribology and Mathematical Science", JAST, Vol. 40, No. 7, pp. 521~526, 1995.
- (6) B. B. Mandelbrot, "The Fractal Geometry of Nature", Freeman, New York. 1982.
- (7) H. O. Peitgen and D. Saupe, "The Science of Fractal Images", SpringerVerlag, pp. 21~70. 1988.
- (8) 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.
- (9) A. Majumdar and B. Bhushan, "Role of Fractal Geometry in Roughness Characterization and Mechanics of Surfaces", ASME, Vol. 112, pp. 205~216. 1990.
- (10) 문병주, 조연상, 박홍식, 전태옥, "마멸입자 형태해석을 위한 유압피스톤 모터의 상태감시", 한국공작기계학회지, 제9권, 제6호, pp. 127~132. 2000.
- (11) H. Takayasu, "The Fractal Geometry and Fractal Statistics", JAST, Vol. 40, No. 7, pp. 527~532, 1995.
- (12) 임우조, 이진열, "윤활공학", 형설출판사, pp. 150~161, 1984.
- (13) N. Yabumoto, "Analysis of Moisture Ad-sorbed on Surface", JAST, Vol. 40, No. 6, pp. 476~481, 1995.