

마멸입자 형태해석을 위한 Fractal 차원의 적용

오 동 석*, 조 연 상 (동아대원),
서 영 백, 박 홍 식, 전 태 옥 (동아대)

Application of Fractal Dimension for Morphological Analysis of Wear Particle

D. S. Oh*, Y. S. Cho, Y. B. Seo, H. S. Park, T. O. Jun

Abstract - The morphological analysis of wear particle is a very effective means for machine condition monitoring and fault diagnosis. In order to describe morphology of various wear particle, the wear test was carried out under different experimental conditions. And fractal descriptors was applied to boundary and surface of wear particle with image processing system. These descriptors to analyze shape and surface wear particle are shape fractal dimension and surface fractal dimension. The shape fractal dimension can be derived from the boundary profile and surface fractal dimension can be determined by sum of intensity difference of surface pixel. The morphology of wear particles can be effectively obtained by two fractal dimensions.

Key Words ; Wear Particle, Morphology, Image Processing, Shape Fractal Dimension, Surface Fractal Dimension

1. 서 론

기계구동계를 구성하는 각종 기계요소의 유허운동면에서는 필연적으로 마멸분이 발생하기 마련이고 이때 발생되어진 마멸분은 기계구동계의 손상상태에 직접적인 관계가 있다. 따라서 유허운동면에서 발생하는 마멸분의 관찰과 해석이 가능하게 되면 마찰면의 손상감지와 상태진단에 활용할 수 있으며, 나아가 이들의 마멸기구 해명에도 막대한 정보를 제공해 준다는 것은 충분히 인식되고 있다.⁽¹⁻²⁾

이처럼 기계구동계를 구성하는 유허운동면에서 발생하는 마멸입자의 형태적인 특징의 정보와 이에 대한 해석을 작동상태 진단기술에 적용하기 위해서는 유허운동면에서 발생하는 다종다양한 무수한 입자를 가지는 마멸입자의 형태적인 특징과 마찰과 관련되는 이들과의 인과관계를 고려한 마멸분 데이터 정보에 대한 정리방법의 확립이 절실히 필요하고, 또한 이것은 아직 해명되지 않고 있는 마멸분 발생 기구에 대해서도 큰 역할을 담당할 수 있다고 생각된다.

근래 컴퓨터의 급속한 발전과 함께 활발히 전개되고 있는 영상처리 기술을 사용하여 마멸입자의 형태적 특징을 추출하여 수치화하여 나타내는 방법은 다종다양한 마멸입자부터 그 특징을 정리하여 기계구동계의 작동상태 진단에 활용하는 방법으로 매우 효과적인 것으로 알려져 있으며 이를 위하여 많은 연구가 진행되고 있다.⁽³⁻⁵⁾ 필자들^(6,7)도 영상처리 기술과 신경회로망에 의한 마멸입자의 형태특징을 위한 파라미터로서 크기, 형상 및 색상 등을 이용하여 마멸입자 형태해석과 식별을 적용한 바 있지만 마멸분의 영상을 획득하는 데에 오랜 숙련과 경험을 필요로 하고, 모니터에 투영된 마멸입자의 형상이 격자의 형태이기 때문에 입자의 크기에 따라서 그 값의 오차가 존재한다는 문제점을 안고 있었다. 그리고 영상처리를 통한 파라미터의 수치화에 있어서도 많은 시간을 필요로 하므로 고속으로 데이터를 처리하기 위하여 이에 대한 해결방안이 절실히 필요한 실정이다.

최근들어 입자나 면의 형태적인 특징해석에 있어서 해안선이나 산의 형상과 같은 자연물의 특징을 묘사하기 위하여 Mandelbrot가 처음 제시한 자기유사성, 즉 프랙탈 차원이 많이 이용되어지고 있다. 프랙탈 차원은 자연계에 존재하는 불규칙적인 물체들에 대하여 그 불규칙성을 정

의하여 표현하는 것으로 유클리드 차원에서 표현하고 있는 정수 차원의 개념이 아닌 소수 차원의 개념으로 유클리드 차원으로는 명확히 정의할 수 없는 성질인 어떤 물체의 거칠거칠한 정도, 부서진 정도 그리고 불규칙한 정도 등을 측정하는 방법이다. 또한 프랙탈 차원에 의한 해석 방법은 입자나 면의 크기, 형상 또는 색상 등에 의한 해석과 같이 입자의 완벽하고 정확한 경계와 색상을 필요로하지 않으며 경계구역에 대하여 쉽게 적용할 수 있기 때문에 보다 간편하고 빠르게 해석할 수 있다는 장점이 있다.^(8,9)

따라서 본 연구에서는 프랙탈 차원해석을 이용하여 기계구동계에서 발생하는 마멸입자의 형상특징과 면의 특징을 추출하고, 각 작동조건에 대하여 마멸입자의 형상 및 면의 프랙탈 특징의 관계를 규명하므로써 기계구동계의 손상상태 및 작동상태 진단에 활용하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 윤활마찰실험

본 연구에 사용한 실험장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 pin-on-disk형 마찰·마멸시험기로 7.23 mm/s로 일정하게 회전하는 디스크 시험편에 베어링 강구를 압착시켜 윤활마찰하였다. 또한 실험재료로

편시험편은 직경 5.0mm의 베어링鋼球 STB2 (780Hv)를, 디스크 시험편으로 기계요소 재료로 널리 사용되는 기계구조용 강 SM45C(200Hv) 및 스테인레스강 STS304 (190Hv)를 사용하였다. 디스크의 형상은 직경 50mm, 두께 10mm이고, 이를 emery paper #1200으로 정밀연마하여 그 표면조도를 $0.2\mu\text{m}R_{\text{max}}$ 로 일정하게 하였다. 그리고 실험에 사용한 윤활유는 무첨가 파라핀계 광유(8.2cSt@40°C)를 사용하였다. 또한 작동조건으로는 Table 1에서 보는 바와 같

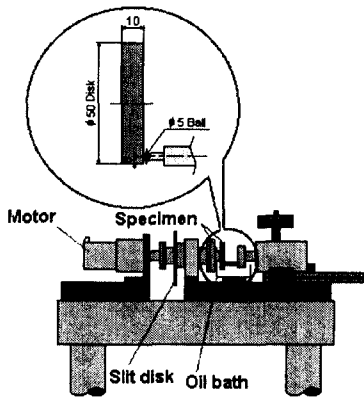


Fig. 1 Schematic diagram of pin-on-disk type tester

Table 1. Experimental condition

Disk	Load (kg)	Sliding distance (m)
SM45C	7,10,14	78,156,234
STS304	7,10,14	78,156,234

이 접촉하중은 7kg, 10kg 및 14kg의 3단

계로 설정하였으며, 미끄럼거리는 2종류 시험편 모두 0~234m까지 일정하게 하고, 이를 세분화하여 0~78m, 78~156m 및 156~234m를 미끄럼거리 초기, 중기 및 말기로 구분하여 실험을 행하였다. 그리고 윤활장치부에는 시험편 접촉점 하부에 oil bath를 설치하고 윤활유 공급은 순환펌프로서 실리콘 관을 통하여 시험편 접촉점에 분사시켰으며, 각 실험조건에 따른 마멸분은 oil bath내의 윤활유를 각반한 후 공경 $0.45\mu\text{m}$ 의 membrane filter가 부착된 윤활유 채취기구를 통하여 마멸분을 채취하여 이를 영상처리 하였다.

2.2 영상처리에 의한 경계추출

실험조건 별로 채취한 마멸분의 데이터 정보를 얻기 위한 영상처리 시스템⁽⁶⁾의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 투과 및 낙사조명의 두가지 할로겐램프를 가진 광학 현미경을 통하여, 상부의 color CCD카메라

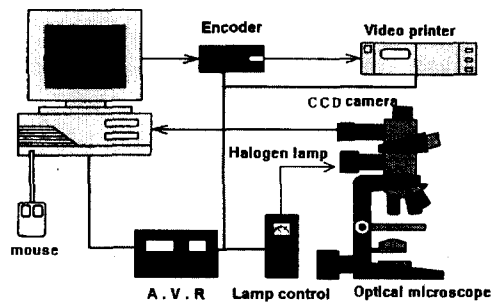


Fig. 2 Schematic diagram of Image processing system

에 의해 관측된 영상은 화소수 640x480, 화소당 분해능은 RGB 각 8bit (256 grey level)인 컴퓨터의 frame grabber를 통하여 저장된다.

각 실험 조건은 모두 대물렌즈 100배, 대안렌즈 10배로서 filter내의 랜덤한 위치 20화면에 포함된 $3\mu\text{m}$ 이상 $20\mu\text{m}$ 이하가 되는 마멸분에 대하여 이들의 경계를 추출하였다. 입자의 경계추출법은 명확한 경계를 구분하기 위해 2원화(또는 역치)처리

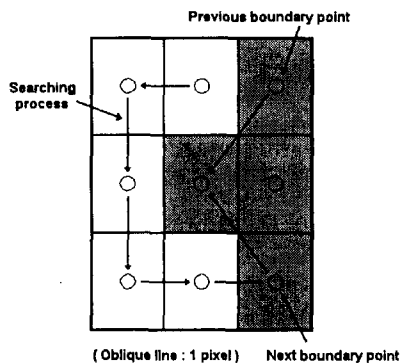


Fig. 3 Searching process of the next boundary point on border following

로 변환을 시킨 입자의 2원화 영상으로부터 입자의 경계점을 차례로 추적하여 그 입자의 모양을 코드화하는 것으로 입자의 형상해석에 중요한 역할을 하는 알고리즘이다. Fig. 3은 경계선 추출에서의 다음 경계점을 추적하는 방법을 나타낸 것으로서 현재 경계점의 8근방에서 왼쪽에 인접한 배경화소로부터 시작하여 반시계방향

으로 차례로 화소의 값을 조사해 나간다. 이때 최초로 만난 입자화소를 다음의 경계화소로서 추적을 진행하며, 최초의 경계점에 도달하면 경계추적을 완료한다.⁽¹⁰⁾

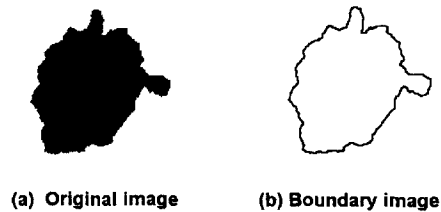


Fig. 4 Shape of wear particle with image processing system ; STS304

Fig. 4는 작용하중 7kg, 미끄럼거리 말기에서의 STS304의 마멸분의 형상과 마멸분의 경계를 추출하여 나타낸 것으로 이렇게 영상처리에 의해 추출되어진 마멸 입자 형상의 경계를 통하여 형상 및 면의 프랙탈 특징을 구하였다.

2.3 마멸분의 프랙탈 차원

본 연구에서는 해안선과 같이 불규칙적인 형상의 특징해석을 위하여 Mandelbrot와 R.F.Voss^(8,9) 등이 제시하였던 프랙탈 차원을 이용하여 마멸분의 경계형상과 면의 특징을 해석하였다. Fig. 5는 형태 프랙탈 차원의 계산방법을 나타낸 것으로서, 이것은 Fig. 2의 영상처리를 통하여 얻어진 마멸입자의 경계에서 일정한 화소 간격만큼 떨어진 점을 연결하여 그 둘레를

계산하고, 다시 화소 간격을 달리하여 둘

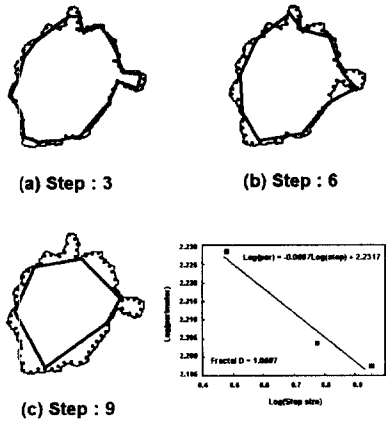


Fig. 5 Determination method of shape fractal dimension

래를 계산한다. 이러한 과정을 여러 번 반복하여 각 화소 간격과 그때의 둘레에 각각 log를 취하여 대수의 값으로 변환시킨 후, 최소자승법을 사용하여 이러한 점들이 이루는 직선을 구한다. 이때 직선의 기울기는 1-D와 같다고 정의하였다. 이것은 2와 3사이의 소수차원 값을 나타내기 위한 것으로, 여기서 D는 형상의 프랙탈 차원 값을 의미하며 마멸입자의 형상이 복잡하고 괴상의 형태일수록 프랙탈 차원 값은 큰 값을 가지게 된다.

그러나 마멸분의 형상의 프랙탈 특징으로 마멸분의 복잡한 정도나 장단도의 정도는 구분할 수 있지만, 마멸분의 발생기가 다르더라도 유사한 형태의 마멸입자에 대하여는 그 특징을 구분하기가 힘들

다. 따라서 이러한 경우 입자 면의 grey level 값을 이용하여 마멸입자의 면에 대한 프랙탈 특징을 해석하므로써 마멸분을 명백히 구분할 수가 있다.

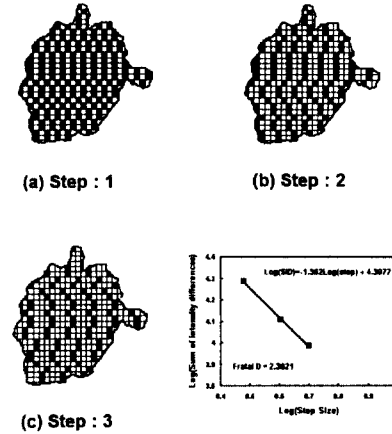


Fig. 6 Determination method of surface fractal dimension

이러한 마멸입자의 면에 대한 프랙탈 특징은 입자면의 굴곡정도를 나타내는 것으로 이는 마멸입자의 영상에서 명암의 차이를 이용하여 그 특징을 나타낸다. 이것은 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 마멸입자의 경계 내에 있는 화소들에 대하여 행 또는 열의 방향으로 일정한 간격만큼 떨어진 점과의 명암의 차이를 모두 합하고, 형상의 프랙탈 차원을 구할 때와 같은 방법으로 화소의 간격을 달리하여 명암 차의 총합을 구한 후 대수의 값으로 변환하여 직선의 기울기를 구하고 프랙탈 차원 D를 계산한다.

따라서 본 연구에서는 마멸분 형상의 프랙탈 특징을 구하기 위하여 화소 간격을 3, 6, 9로 각각 3단계를 설정하여 형상의 프랙탈차원 값을 구하였으며, 면의 프랙탈 특징은 화소 간격을 3, 4, 5로 설정하여 면의 프랙탈차원 값을 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 마멸입자 형상의 프랙탈 특징

Fig. 7은 미끄럼거리 초기와 말기에서 SM45C의 작용하중 7kg, 10kg 및 14kg에 대한 마멸분 형상 프랙탈차원 값을 나타낸 것으로, 작용하중이 증가함에 따라 프랙탈 차원값이 감소하고 있음을 알 수 있으며, 미끄럼거리가 증가함에 따라 프랙탈 차원값이 높게 나타나는 것을 볼 수가 있다. 작용하중이 7kg과 10kg에서 마멸입자

의 형상이 서로 유사하며, 이들의 형상은 대체로 복잡하고 괴상의 형태를 가진다는 것을 나타내고 있다. 그러나 작용하중이 14kg의 경우에는 마멸입자의 형상이 작용하중 7kg과 10kg의 경우보다 상대적으로 부드럽고 둥근 형태로 나타내고 있다는 것을 보여주고 있다. 이것은 본 연구의 시험방식이 pin-on-disk형이므로 작용하중이 크게 되면 마찰면에 대한 핀의 접촉압력이 감소한 결과라고 생각된다. 그리고 미끄럼거리가 증가함에 따라 마멸입자의 형상이 복잡한 형태로 나타나는 것을 알 수가 있으며, 이는 미끄럼거리 증가에 따른 피로 마멸이 진행된 결과라고 생각되어진다.

Fig. 8은 미끄럼거리 초기에서의 각 시험편 재료의 작용하중의 변화에 따른 마멸입자 형상의 프랙탈 차원값을 나타낸 것으로, 각 작용하중에서 SM45C의 프랙탈

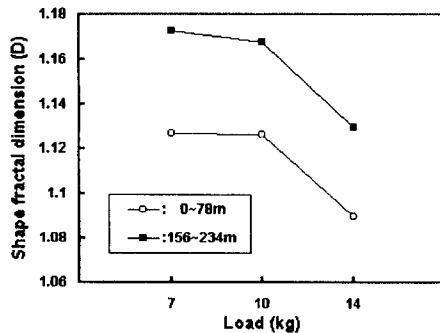


Fig. 7 Shape fractal dimension of wear debris for applied load, specimen : SM45C

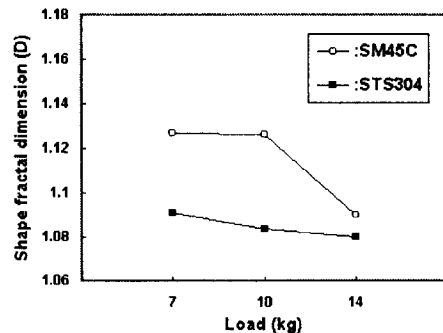


Fig. 8 Shape fractal dimension of wear debris for applied load, sliding distance : 0~78 m

차원값이 높게 나타나는 것을 볼 수가 있다. 이것은 STS304의 마멸입자의 형상은 SM45C의 형상보다 대체로 부드럽고 등글다는 것을 알 수가 있다. 또한 STS304의 경우는 작용하중이 따른 프랙탈 차원값은 거의 변화가 없다는 것을 알 수가 있으며, 이것은 STS304의 마멸분의 형상은 작용하중에 관계없이 대체로 비슷한 형상을 가진다는 것을 나타내 준다고 생각되어진다.

이상의 결과로 볼 때, 마멸입자 형상의 프랙탈 차원값으로 재료와 미끄럼거리에 대하여는 마멸입자의 형태적 특징을 분명히 알 수가 있지만, 작용하중에 대하여는 마멸입자의 형상이 대체로 비슷하여 형상의 프랙탈 차원값만으로는 마멸입자를 명백히 식별하기 어렵다고 생각된다.

3.2 마멸입자 면의 프랙탈 특징

Fig. 9는 미끄럼거리 초기와 말기에서 SM45C의 하중에 대한 마멸입자 면의 프랙탈 차원값을 나타낸 것으로, Fig. 7의 마멸입자 형상의 프랙탈 특징에서와 같이 미끄럼거리가 증가할수록 입자면의 프랙탈 차원의 값이 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 전술한 마멸입자 형상의 프랙탈 특징에서처럼 미끄럼거리가 증가할수록 피로마멸로 인하여 마멸입자 면의 굴곡이 복잡하게 나타난 결과라고 생각된다.

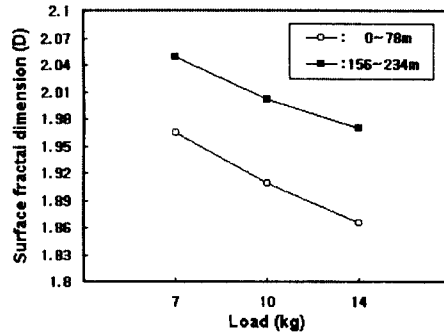


Fig. 9 Surface fractal dimension of wear debris for applied load, specimen : SM45C

그리고 작용하중이 증가함에 따라 형상의 프랙탈 특징에서와는 달리 프랙탈 차원값이 거의 직선적으로 감소하는 것을 볼 수가 있다. 이것은 작용하중이 증가할수록 마멸입자면의 굴곡이 완만하게 진행된다는 것을 보여주고 있다. 이 결과로부터 면의 프랙탈 차원값을 이용하는 것이 형상의 프랙탈 차원값을 이용하는 것 보다 작용하중에 따른 마멸입자의 정확한 형태식별에 유효하다는 것을 나타내 주고 있다.

Fig. 10은 미끄럼거리 초기에서 두 시험편 재료의 작용하중에 따른 마멸입자 면의 프랙탈 차원 값을 나타낸 것으로, Fig. 8의 형상의 프랙탈 차원값에서와 같이 SM45C의 면의 프랙탈 차원값이

STS304보다 높게 나타나는 것을 볼 수 있다고 생각된다.

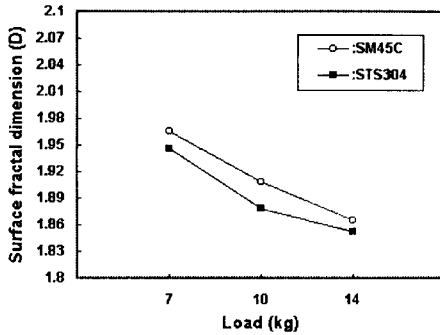


Fig. 10 Surface fractal dimension of wear debris for applied load, sliding distance : 0~78 m

다. 그러나 Fig. 8의 형상의 프랙탈 차원 값에서 STS304의 경우는 작용하중의 증가에 따라 큰 변화를 보이지 않았지만, Fig. 10에서 작용하중의 증가에 따른 STS304의 면의 프랙탈 차원값은 뚜렷하게 감소하고 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 마멸입자의 형상 프랙탈 차원값 보다 면의 프랙탈 차원값을 이용하는 것이 마멸입자의 형상특징을 보다 양호하게 식별할 수 있다는 것을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 마멸입자의 형상 프랙탈 차원과 면의 프랙탈 차원에 의하여 기계구동계의 작동 조건에 대한 마멸입자의 형태특징을 명백히 구분할 수 있고, 이를 이용하여 기계구동계의 손상상태 진단 및 작동상태 판정에 활용할 수 있을 것이

4. 결 론

기계구동계의 손상상태 및 작동상태의 진단을 목적으로 윤활면의 작동상태에 따른 마멸분의 특징을 추출하기 위하여 윤활실험을 통한 마멸입자를 영상처리하여 마멸입자의 경계를 추출하고, 이들의 형상 및 면의 프랙탈 차원 값으로 마멸입자의 형태특징에 대하여 프랙탈 해석을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 프랙탈 차원값은 작용하중이 증가하면 감소하지만, 미끄럼거리가 증가할수록 그 값은 증가한다.
2. 형상 프랙탈 해석을 통하여 미끄럼거리와 재료에 따른 마멸입자의 형상특징의 식별이 가능하다.
3. 작용하중의 변화에 따른 마멸입자의 형태특징은 형상 프랙탈 차원값 보다 면의 프랙탈 차원값을 이용하는 것이 보다 유효하다.

참 고 문 헌

- (1) W. W. Siefert and V. C. Westcott, "A Method for the Study of Wear Particles in Lubricating Oil wear, 21, pp. 27~42, 1972.
- (2) Masaaki Shibata, "Tribological Characteristics and Diagnosis of Deteriorated Lubricating

- Oil” ,JJST, Vol. 39, No. 7, pp. 559~565, 1994.
- (3) E. J. Roylance and S. Raadnui, “The Morphological Attributes of Wear Particles -Their Role in Identifying Wear Mechanisms” , Wear, 175, pp. 115~121, 1994.
- (4) T. B. Kirr, D. Panzera, R. V. Anamalay and Z. L. Xu, “Computer Image Analysis of Wear Debris for Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis” , Wear, 181, pp. 717~722, 1995.
- (5) 山本雄二, 杉村丈一, 梅田彰彦, “摩耗粉形態の特徴と記述方法”, トライボロジ-會議予稿集, pp. 195~197, 1996-5.
- (6) 서영백, 박홍식, 진태욱, “기계윤회운동면의 작동상태 진단을 위한 마멸분 해석”, 대한기계학회논문집(A), 제21권, 제5호, pp. 835~841, 1997.
- (7) 박홍식, “Neural Network에 의한 기계윤회면의 마멸분 해석”, 한국윤회학회지, 제11권, 제3호, pp.24~30, 1995.
- (8) Heinz-Otto Peitgen, Dietmar Saupe, “The Science of Fractal Images”, SpringerVerlag, pp. 21~70, 1988
- (9) T. B. Kirk, G. W. Stachowiak, A. W. Batchelor, “Fractal parameters and computer image analysis applied to wear particles isolated by ferrography”, Wear, 145, pp.347~365, 1991.
- (10) 八木伸行, 井上誠喜, 林正樹, “C言語で学ぶ實戰画像處理” , オム社, pp. 2~10, 1992.