윤활조건에 따른 기계부품용 소재에서 발생된 마멸입자의 분포 특성

조연상† · 전성재* · 김영희** · 박흥식*

Distribution Characteristics of Wear Particles from Material of Machine Elements in Lubricant condition

Cho Yon Sang, Jun Sung Jae, Kim young hee, Park Heung Sik

Key Words : Histogram, Image processing, Shape characteristics, Wear particle

Abstract

It necessarily follows that wear particles are generated through a friction and wear in a mechanical moving system. The wear particles are relative to the failure and the life of machine elements directly. To analyze the wear particle, its shape characteristics were calculated quantitative values such as diameter, roundness and fractal parameters by digital image processing. In this study, the histograms of shape parameters of wear particles were used for the purpose of analyzing the distribution of wear particles in various conditions. We consider that the histogram of shape parameter can be effectively represented to study a wear mechanism.

1. 서 론

기계구동계 내에서 일어나는 마찰 및 마멸현상은 필연적으로 마멸입자를 발생시키고, 이는 작동중에 있는 기계부품의 손상과 수명에 직접적인 관계가 있다(1). 그러나 작동 중에 있는 대부분의 윤활운동부는 눈으로 직접 관찰하기 곤란하여 이들을 구성하는 기계부품의 손상상태의 감지가 매우 어렵다. 따라서 보다 효과적으로 기계의 손상상태를 판단하기 위하여 많은 연구자들이 윤활유 중의 마멸입자를 관찰하는 방법에 대해 제시하여 왔다(2~6). 이는 내과의 혈액검사와 같이 소량의 윤활유를 채취하여 마멸입자를 분석하는 것으로 직접 관찰하기 곤란한 기계부품의 손상상태를 파악하는데 매우 유효한 수단이라고 할 수 있다.

일반적으로 분석 대상이 되는 마멸입자의 형태정보는 지름, 복잡도, 장단도 등과 같은 형태 파라미터와 자연현상의 불규칙한 정도를 나타내는 프랙탈 파라미터가 있다(5,6). 이러한 마멸입자의 형태 정보는 컴퓨터 영상처리 기술을 이용하여 정량적인 값으로 계산하고, 이들의 50% 체적경 또는 전체 평균값이나 모집단의 평균값을 구하여 작동조건에 따른 전반적인 형태적 특징을 규정하고 분석하고 있다. 그러나 이러한 평균값은 각 조건마다 다종다양하게 무수히 많이 발생된 마멸입자들의 대표적인 특징을 표현할 수는 있지만 이를 이용하여 입자의 전반적인 분포 상태나 조건의 변화에 대한 분포특성의 변화를 명확히 파악하기는 힘들다고 생각한다.

이를 위하여 통계자료의 기술 방법 중에 하나인 도수분포(7)를 이용하여 마멸입자 형태정보에 대한 데이터를 정리할 필요가 있다. 도수분포는 통계집단의 분포 구조를 있는 그대로 표현하는 것으로 어떤 일정한 기준에 의하여 전체 데이터의 범위를 구간으로 분할하고, 각 구간에 포함되는 데이터의 수를 산출하여 표현한 것이다. 마멸입자의 형상특징은 이들의 발생기구와 깊은 연관성이 있기 때문에 이들의 도수분포상태는 마멸입자가 발생되는 마멸기구와 마멸현상의 천이 특성을 분석하는데 매우 유용하게 사용될 수 있다고 생각한다.

본 연구에서는 기계부품 소재로 많이 사용되는

† 동아대학교 기계공학부
E-mail : bluecys@nate.com
TEL : (051)200-6995 FAX : (051)200-7656
* 동아대학교 기계공학부
** 동아대학교 신소재공학부

청동주물, 기계구조용강 및 스테인리스강을 사용하여 윤활마찰 실험장치를 통하여 윤활마찰실험을 행하고 미끄럼거리 별로 마멸입자를 채취하여 컴퓨터 영상처리를 통해 발생된 마멸입자의 형태정보를 구하였다. 그리고 이를 이용하여 형태정보의 도수분포를 구하고 각 조건에 따라 발생된 마멸입자의 분포 상황을 분석함으로써 기계구동계의 손상 상태를 효과적으로 진단할 수 있는 마멸입자에 대한 새로운 데이터의 정리 방법을 제시하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험제목

2.1 마찰.마멸실험

마멸입자를 채취하기 위하여 ball-on-disk 형 시험기로 윤활 마찰마멸 시험기를 이용하여 실험을 하였으며, Fig.1 에는 이의 개요도를 나타내었다. 윤활실험에 사용된 핀 시험편은 직경 5.0mm 의 순도 99.5%의 알루미나 세라믹스를 사용하였고, 디스크 시험편은 자동차 및 기계부품으로 많이 사용되는 기계구조용 탄소강 SM45C, 스테인리스강 STS304 및 청동주물 LBC3 를 사용하였다.

그림에서 처럼 시험편 접촉점 하부에 oil bath 를 설치하고 윤활유 공급은 순환펌프로서 실리콘관을 통하여 시험편 접촉점에 분사시켰으며, 실험에 사용한 윤활유는 무첨가 파라핀계 광유(8.2 cSt@40℃)를 사용하였다. 실험조건으로는 접촉하중은 3kg, 미끄럼속도는 2.83m/min 로, 그리고 미끄럼거리는 0 ~ 510m 까지 설정하여 실험하였으며, 170m, 340m 및 510m 에서 윤활유를 교환하였다. 각 실험조건에 따른 마멸입자는 oil bath 내의 윤활유를 노말헥산과 1:1 로 혼합하여 공경 0.45 ㎛의 membrane filter 를 통하여 채취하였다.

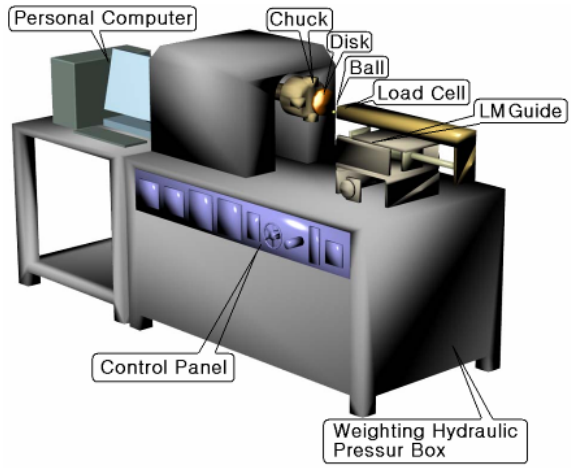


Fig. 1 Schematic diagram of pin on disk type wear tester

2.2 영상처리 및 경계선 추출

채취한 마멸입자로부터 형태정보를 얻기 위한 영상처리 알고리듬을 Fig. 2 에 나타내었다. 채취한 마멸입자는 투과조명의 할로겐램프를 가진 광학현미경 상부의 디지털카메라를 이용하여 컴퓨터에 저장하였다. 디지털카메라는 400 백만 화소로 화소수 2272×1704, 화소당 분해능은 RGB 각 8bit (256 grey level)를 가지고 있으며, 저장된 마멸입자의 투과영상은 히스토그램으로부터 역치값을 선정하여 2 원화 영상으로 변환하여 마멸입자에 대한 명확한 형상을 추출하였다. 그리고 마멸입자의 영상처리는 비주얼 C++로 자체 개발한 소프트웨어를 이용하였다.

이와 같이 기본 영상처리를 통해 마멸입자의 형상을 명확히 구분 지은 후, 형상정보를 구하기 위하여 입자의 경계를 추출하고 기본 정보인 면적, 직경 및 복잡도를 구하였다. 입자의 경계 추출법은 명확한 경계를 구분하기 위해 입자의 경계점을 차례로 추적하여 그 입자의 모양을 코드화하는 것으로 입자의 형상해석에 중요한 역할을 하는 알고리즘이다(3,4).

Fig. 3 은 작용하중 3kg 에서 영상처리 후의 마멸입자에 대하여 경계선을 추출하여 나타낸 것으로, 마멸입자의 둘레에 대한 정보를 명확히 추출하고 있음을 알 수 있다.

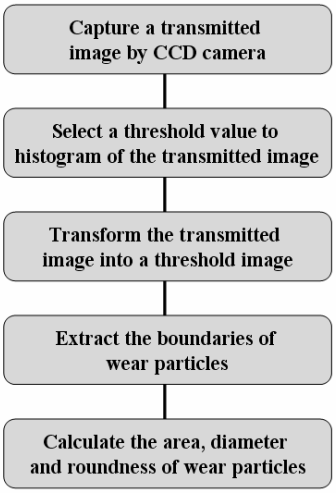
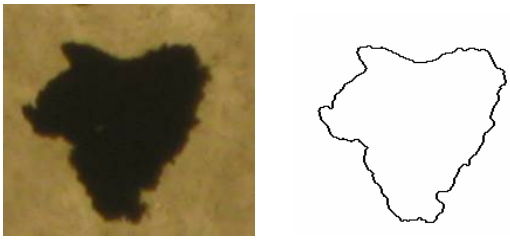


Fig. 2 Image processing algorithm



(a) Before process (b) After process

Fig. 3 Result of searching process for the boundary

Fig. 4 는 마멸입자의 형태정보를 나타낸 것으로 영상처리를 통하여 경계선을 추출한 마멸입자의 면적과 둘레를 구하고 이를 이용하여 입자의 대표 지름과 복잡도를 계산하였다. 여기서 마멸입자의 크기를 나타내는 대표지름은 면적 A 의 제곱근으로 정의하였고, 복잡도는 입자가 원형에 가까운 정도를 나타내는 것으로, 원형일 때 가장 최소인 1 이고 원형이 복잡할수록 그 값이 크다.

이와 같이 영상처리를 이용하여 각 조건에 따라 다양하게 발생된 마멸입자의 형태정보를 구하고, 각 조건마다 발생된 입자의 분포 상태를 파악하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 5 와 같은 형태정보의 도수분포도를 이용하였다. 도수분포도는 측정한 데이터의 분포 특징이 한 눈에 보이도록 나타낸 것으로 가로축에는 형태정보로서 각 구간의 구간 간격을 나타내는 점을 표시하고, 세로축은 구간에 해당하는 입자의 수로 나타낸 것이다. 그리고 상대도수 분포도는 세로축을 전체 입자 수에 대한 비로 나타낸 것이다.

본 연구에서는 1 ~ 10μm 범위의 지름에 대하여 0.5 μm 의 간격으로 총 20 개의 구간을 두어 각 구간에 해당하는 마멸 입자의 수를 구하여 지름의 도수분포를 나타내었고, 복잡도는 1 ~ 3 의 범위에 0.1 의 간격으로 총 20 개의 구간을 두어 복잡도의 도수분포를 나타내었다.

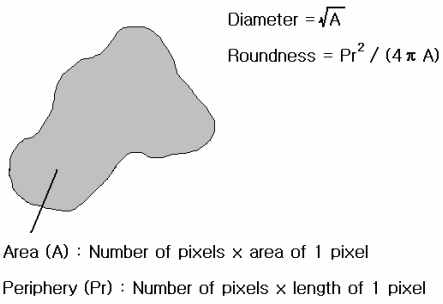


Fig. 4 Shape parameter of a wear particle

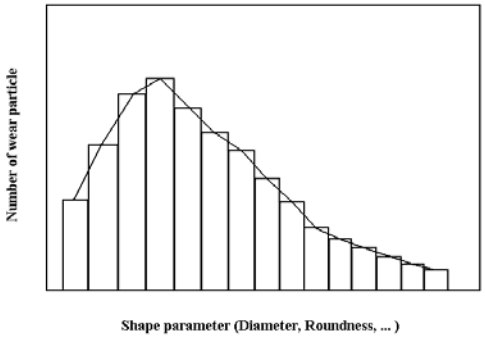


Fig. 5 Histogram of shape parameter

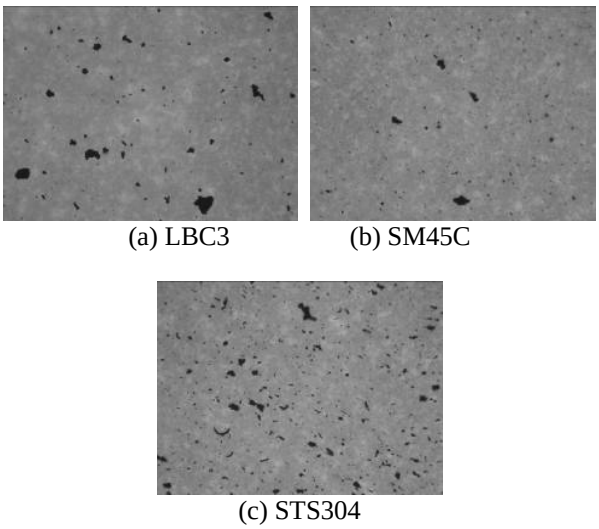
3. 실험결과 및 고찰

3.1 마멸입자의 형태 특징

Fig. 6 은 미끄럼거리 340m 에서 3 가지 각 재료에 대한 마멸분의 현미경 투과영상을 나타낸 것으로, (a)LBC3 의 경우 응착마멸과 연삭마멸에 의한 비교적 큰 마멸입자가 주로 생성되어진 것을 볼 수 있다. (b)SM45C 의 경우는 주로 비교적 작은 크기의 응착마멸에 의한 입자가 생성된 것을 볼 수 있으며 큰 입자는 적다. 그리고 (c)STS304 는 비교적 불규칙한 모양의 큰 입자와 curl 모양의 작은 입자가 생성된 것을 알 수 있다.

3.2 마멸입자 형태의 도수분포

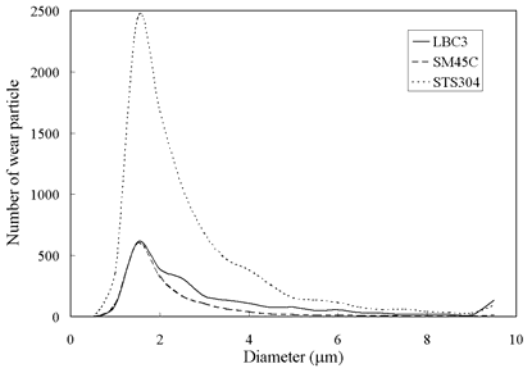
Fig. 7 은 각 재료에서 발생된 모든 마멸입자에 대하여 지름과 복잡도의 도수분포를 나타낸 것이다. (a)지름의 도수분포에서 STS304 는 4μm 이하의 작은 마멸입자가 다른 두 재료에 비하여 매우 많이 발생된 것을 볼 수 있으며, 4 ~ 8 μm 사이의 입자도 많이 발생된 것을 알 수 있다. 그러나 9 μm 이상의 큰 입자는 STS304 보다는 LBC3 에서 더 많이 발생된 것을 보여준다. 그리고 (b)복잡도의 도수분포에서 SM45C 와 LBC3 의 마멸입자는 대체로 2 이하에 분포하여 비교적 둥근 형태의 마멸입자가 많이 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 STS304 의 경우는 2 이상의 값을 가지는 복잡한 형태의 입자도 많이 발생된 것을 알 수 있다. 이와 같은 형태특징의 도수분포도는 Fig. 6 의 마멸입자의 현미경 사진에서 볼 수 있는 각 재료에 대한 마멸입자의 형태 특징의 전체적인 분포를 잘 나타내 주고 있다고 생각한다.



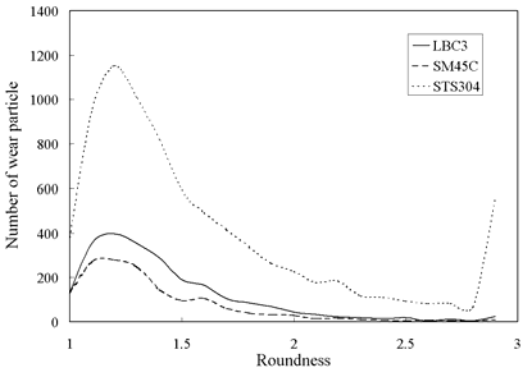
(a) LBC3 (b) SM45C

(c) STS304

Fig. 6 Transmitted images photos.of wear particles.

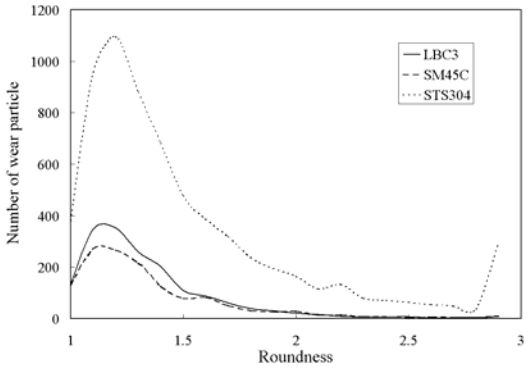


(a) Diameter

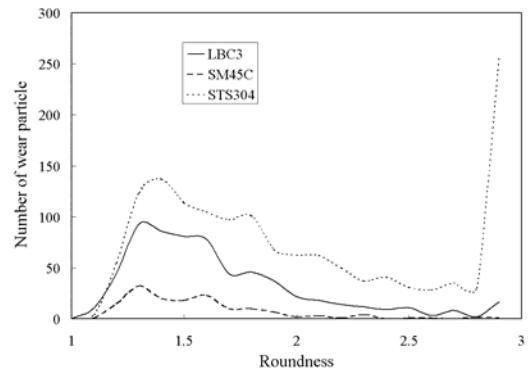


(b) Roundness

Fig. 7 Histogram of diameter and roundness on all wear particle for specimen



(a) Wear particles less than 4 μm



(b) Wear particles more than 4 μm

Fig. 8 Histogram of roundness on all wear particle

Fig. 8 은 (a) 4μm 보다 작은 입자와 (b) 4μm 보다 큰 입자에 대한 복잡도의 도수분포도를 나타낸 것이다. 그림에서 (a) 4μm 보다 작은 입자의 분포 경향은 전체 마멸입자의 분포 경향과 유사하다. 이는 Fig. 7 의 (a)지름 분포도에서 보는 바와 같이 전체 마멸입자 중에 4μm 이하의 작은 입자가 차지하는 비중이 크기 때문이라고 생각한다. 그리고 비교적 큰 입자인 (b) 4μm 보다 큰 입자의 경우는 (a) 4μm 보다 작은 입자에 비해 높은 복잡도 영역에 분포되어 있으며, 1.1~1.3 사이에 가장 많은 입자가 분포되어 있는 전체 마멸 입자의 분포 경향과도 차이가 있다. 이와 같은 분포도로 알 수 있듯이 4μm 보다 큰 입자의 경우는 대체로 1.2~2.0 사이의 복잡도를 가지고 있으며, cutting wear 입자가 많이 보이는 STS304 는 2.8 이상의 높은 복잡도를 가지는 입자도 많이 발생된 것을 알 수 있다. 그러나 형태정보의 도수분포는 재료에 따라서 발생된 전체 입자의 수가 다르기 때문에 각 구간에서의 입자들의 분포비율을 상대적으로 비교하기에는 곤란하다.

따라서 입자의 상대적인 분포 경향을 좀더 자세히 분석하기 위하여 3 가지 각 재료에 따라서 발생된 전체 입자 수에 대한 각 구간에서의 입자 도수의 비로 표현하는 상대도수분포도를 구하였다.

Fig. 9 는 전체 마멸입자에 대하여 지름의 상대도수분포를 나타낸 것으로, SM45C 의 경우는 다른 두 재료에 비해 약 2μm 이하의 매우 작은 입자의 분포 비율이 크다는 것을 알 수 있다. 그리고 STS304 와 LBC3 의 경우는 약 2μm 이상의 입자가 SM45C 에 비해 좀더 많이 분포되어 있는 것을 볼 수 있으며, LBC3 의 경우 9μm 이상인 입자가 차지하는 비율이 5%이상으로 다른 두 재료에 비해 매우 높게 나타난다는 것을 알 수 있다.

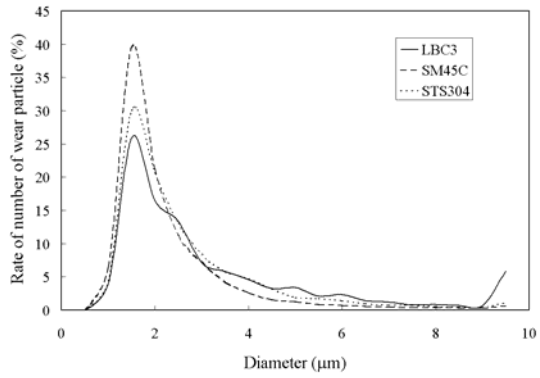
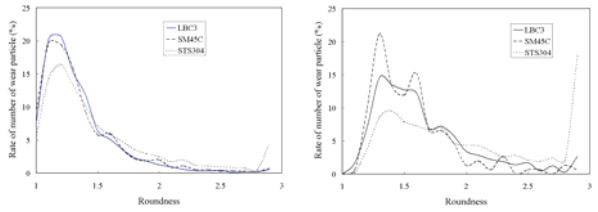


Fig. 9 Relative histogram of diameter on rate of number of wear particle

Fig. 10 은 (a) 4 μm 보다 작은 입자와 (b) 4 μm 보다 큰 입자에 대하여 복잡도의 상대도수분포도를 나타낸 것이다. (a) 4 μm 보다 작은 입자의 분포비율은 LBC3 와 SM45C 의 경우 거의 비슷하게 나타나지만 STS304 는 1.5 이상 복잡도에서 두 재료에 비해 분포비율이 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 4μm 보다 작은 LBC3 와 SM45C 의 마멸입자의 경우 STS304 에 비해 둥근 형태의 입자가 많고 서로 유사한 형태를 가지고 있다는 것을 나타낸다고 생각한다. 그리고 Fig. 10 의 (b) 4 μm 보다 큰 입자의 복잡도 분포 비율에서 보면 2 이상의 복잡도 영역에 LBC3 의 입자 분포 비율이 SM45C 보다 크게 나타나 있다. 그리고 STS304 의 경우는 2.8 이상 높은 복잡도를 가지는 괴상의 형태를 가지는 입자의 비율이 다른 두 재료에 비해 매우 크다는 것을 알 수 있다.

이와 같이 전체 입자 수에 대한 각 구간에서의 입자 수의 비율로써 상대도수분포를 나타내면 현미경 사진에 나타나는 마멸입자의 크기 분포와 형상 특징의 상대적인 분포 상황을 정량적으로 한눈에 알기 쉽게 나타낼 수 있다. 따라서 이를 이용하면 다양한 작동 조건에 따라 발생되는 마멸입자의 분포 변화 및 형태 변화를 보다 효과적으로 분석할 수 있다고 생각된다.



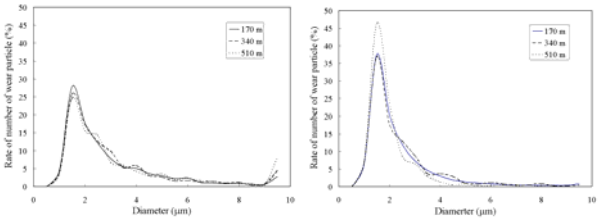
(a) less than 4 μm (b) more than 4 μm

Fig. 10 Relative histogram of roundness on rate of number of wear particle

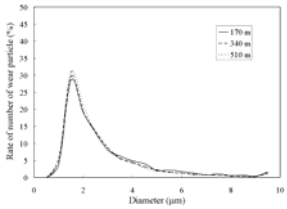
Fig. 11 은 각 재료의 마멸입자에 대하여 미끄럼거리에 따른 지름의 상대도수분포를 나타낸 것으로 (a) LBC3 의 경우는 미끄럼거리가 증가 할수록 작은 입자는 비율이 낮아지고 큰 입자의 비율이 높아진다는 것을 알 수 있다. 그리고 SM45C 의 경우는 미끄럼거리가 증가함에 따라 작은 입자의 비율이 크게 높아지고 있으며, STS304 는 작은 입자의 비율이 다소 높아지고 있지만 전체적인 분포비율은 비슷하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 12 는 각 재료의 마멸입자에 대하여 미끄럼거리에 따른 복잡도의 상대도수분포를 나타낸 것으로 (a) LBC3 와 (c) STS304 의 경우 미끄럼거리의 증가에 따라 복잡도가 큰 입자의 비율이 높아지고 있다. 그러나 (b) SM45C 의 경우는 미끄럼거리가 증가할수록 복잡도가 낮은 입자의 비율이 높아지고 있다. Fig. 11 과 Fig. 12 의 결과에서 미끄럼거리가 증가할수록 LBC3 의 마멸입자는 크고 형태가 복잡한 입자의 비율이 높아지고 있으며, SM45C 는 크기가 작고 둥근 형태의 입자 비율이 높아지고 있다. 그리고 STS304 의 경우는 미끄럼거리의 증가에 따라 입자들의 크기 분포의 차이가 크지는 않지만 작은 입자 분포비율이 조금 높아지면서 복잡한 형태의 입자들이 많아진다는 것을 알 수 있다 .

Fig. 13 은 미끄럼거리에 따른 4μm 이상의 마멸입자의 상대도수분포를 나타낸 것으로 Fig. 12 의 전체 마멸입자에 대한 분포 비율보다는 전체적으로 높은 복잡도 영역에 분포되어 있다. 그리고 4μm 이상의 큰 마멸 입자의 분포도 전체 분포와 같이 미끄럼거리 증가에 따라 (a) LBC3 와 (c) STS304 는 복잡도가 큰 입자의 분포 비율이 증가하고, (b) SM45C 는 복잡도가 2 이하로 낮은 입자의 분포비율이 높다.

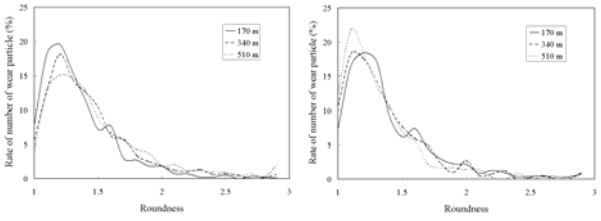


(a) LBC3 (b) SM45C

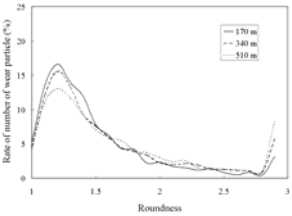


(c) STS304

Fig. 11 Relative histogram of diameter on rate of number of wear particle as increase sliding distance

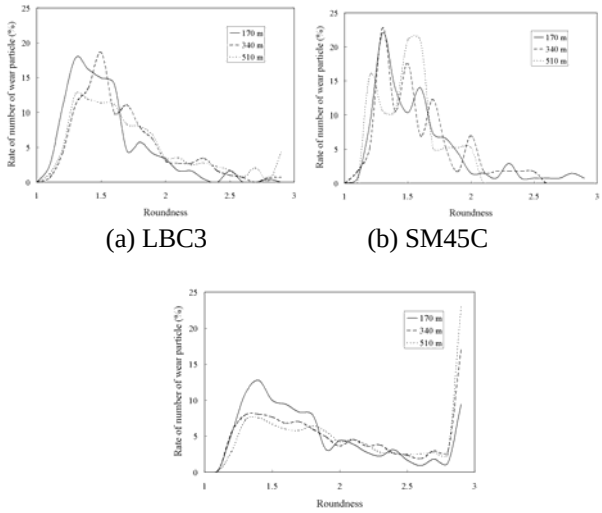


(a) LBC3 (b) SM45C



(c) STS304

Fig. 12 Relative histogram of roundness on rate of number of wear particle as increase sliding distance



(a) LBC3 (b) SM45C

(c) STS304

Fig. 13 Relative histogram of roundness on rate of number of wear particle more than 4 μm as increase sliding distance

이와 같이 다양한 작동조건 하에서 다종다양하게 무수히 발생되는 마멸입자에 대하여 그 형태특징의 도수분포 또는 상대도수분포를 이용하면 입자가 발생되는 조건에 따른 그 분포 상황을 명확히 알 수 있다. 따라서 마멸입자의 형태적 특징에 대한 도수 분포 상황의 연구를 통해서 보다 다양한 조건에서의 마멸입자의 형태 변화를 파악할 수 있다고 생각하며, 이를 통하여 마멸기구와의 상관관계 분석 및 상태 진단 등에 매우 유용하게 활용될 수 있다고 생각한다.

4. 결 론

본 연구에서는 윤활 마찰마멸 실험을 통해 채취한 마멸입자의 크기와 형상적 특징을 컴퓨터 영상처리를 이용하여 구하고 이에 대한 도수분포 및 상대도수분포를 분석하여 각 실험조건 마다의 마멸입자의 분포특징을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 각 재료에 따른 전체 마멸입자에 대한 지름과 복잡도의 도수분포에서 모든 재료는 크기가 4μm 이하인 비교적 둥근 형태의 입자들이 많이 분포되어있다.

(2) 4μm 보다 큰 입자의 경우는 대체로 1.2~2.0 사이의 복잡도를 가지고 있으며, cutting wear 입자가 많이 보이는 STS304 는 2.8 이상의 높은 복잡도를 가진다.

(3) 전체 마멸 입자에 대한 지름의 상대도수분포에서 SM45C 의 경우는 다른 두 재료에 비해 약 2μm 이하의 매우 작은 입자의 분포 비율이 크고, LBC3 의 경우 9μm 이상인 입자가 차지하는 비율이 5%이상으로 다른 두 재료에 비해 매우 높게 나타난다.

(4) 미끄럼거리가 증가할수록 LBC3 의 마멸입자는 크고 형태가 복잡한 입자의 비율이 높아지고 있으며, SM45C 는 크기가 작고 둥근 형태의 입자 비율이 높아지고 있다. 그리고 STS304 는 복잡한 형태의 입자 비율이 높아진다.

(5) 마멸입자 형태특징의 도수분포 또는 상대도수분포의 분석을 통해 마찰조건에 따라 발생된 다종다양한 마멸입자의 분포 상황을 명확히 알 수 있다.

후 기

본 논문은 산업자원부 지역혁신센터사업(CAN SMC)으로 지원된 연구임.

참고문헌

(1) W.W. Sefert and V. C. Westcott, 1972, "A Method for the Study of Wear Particles in Lubricating Oil", *Wear*, 21, pp.27-42.

(2) T. B. Kirk, G. W. Stachowiak, A. W. Batchelor, 1991, "Fractal parameters and computer image analysis applied to wear particles isolated by ferrography"", *Wear*, 145, pp.347-365.

(3) B. J. Roylance and S. Raadnui, 1994, "The Morphological Attributes of Wear Particles-Their Role in Identifying Wear Mechanisms", *Wear*, 175, pp. 115-121.

(4) T. B. Kirr, D. Panzera, R. V. Anamalay and Z. L. Xu, 1995, "Computer Image Analysis of Wear Debris for Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis", *Wear*, 181, pp. 717-722.

(5) Y. B. Seo, H. S. Park, T. O. Jun, 1997, "Analysis of Wear Debris for Machine Condition Diagnosis of the Lubricated Moving Surface", *KSME(A)*, Vol. 21, No. 5, pp.835-841.

(6) Y. S. Cho, M. R. Lyu, D. H. Kim, H.S. Park, 2002, "Application of Fractal Parameter for Morphological Analysis of Wear Particle", *KSTLE*, Vol. 18, No. 2, pp. 147-152.

(7) C.H. Jun, M.K. Jung, H.S. Lee, 2004, "Applied Statistics for Engineers", *Hong Neung Science Pub*., pp.12-16.