

## 기계의 상태 모니터링을 위한 최적의 마멸분 영상 획득 방법에 관한 연구

조연상<sup>†</sup> · 박흥식<sup>‡</sup>

동아대학교 기계공학부

### A Study on the Optimum Image Capture of Wear Particle for Condition Monitoring of Machine

Yonsang Cho<sup>†</sup> and Heungsik Park<sup>‡</sup>

Dept. of Mechanical Engineering, DongA University

**Abstract** – The wear particle analysis has been known as very effective method to foreknow and decide a moving situation and a damage of machine parts by using the digital computer image processing. But it was not laid down and trusted to calculate shape parameters of wear particle and wear volume. In order to apply image processing method in the foreknowledge and decision of lubricated condition, it needs to verify the reliability of the calculated data by the image processing and to lay down the number of images and the amount of wear particle in one image. In this study, the lubricated friction experiment was carried out in order to establish the optimum image capture with the SM45C specimen under experiment condition. The wear particle data were calculated differently according to the number of image and the amount of wear particle in one image.

**Key words** – wear particle, shape parameter, image processing, condition monitoring.

#### 1. 서 론

최근 컴퓨터의 기술 발달과 더불어 컴퓨터 영상처리 기술[1]이 급속도로 발전하고 있다. 이를 이용하여 유압구동계, 변속기 및 감속기 내에서 발생하는 마멸분의 형태적 특징을 정량적으로 수치화된 형태정보로 추출할 수 있으며, 이를 분석하여 작동상태 예지 및 판정에 효과적으로 적용할 수 있다[2-7].

그러나 지금까지는 영상처리를 이용하여 마멸분을 분석함으로써 이들 기계시스템의 작동상태 예지 및 판정에서의 적용 가능성만 보여주고 있는 실정이다[5-8]. 그리고 마멸분 데이터를 구하기 위한 영상처리 방법의 기준이 마련되어 있지 않기 때문에 여러 조건 상황에서 영상처리에 의하여 구한 마멸분의 형태정보에 대한 통

계치나 마멸량 등의 신뢰도를 파악하기 힘들다는 문제점을 가지고 있었다. 이처럼 유압구동계, 변속기 및 감속기와 같은 기계시스템의 상태 진단 및 수명 예측 분야에서 이를 활용하기 위해서는 영상해석을 통해 구한 데이터의 신뢰성을 검증할 필요가 있으며, 신뢰할 수 있는 데이터를 구하기 위한 마멸분 영상 획득 수 및 마멸분 채취량 등의 기준을 마련할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 기준을 마련하기 위하여 기계부품으로 많이 이용되는 기계구조용탄소강인 SM45C를 사용하여 윤활마찰 실험을 하였다. 그리고 이때 발생된 SM45C의 마멸분의 채취량과 마멸분 영상의 획득 수를 달리하여 영상처리를 행하였으며, 이를 통해 구한 SM45C의 마멸분의 형태정보를 평가함으로써 데이터의 신뢰가 높은 마멸분 채취량과 마멸분 영상의 획득 수의 기준을 정의하고자 하였다.

<sup>†</sup>주저자 · 책임저자 : bluecys@nate.com

<sup>‡</sup>교신저자 : parkhs@dau.ac.kr

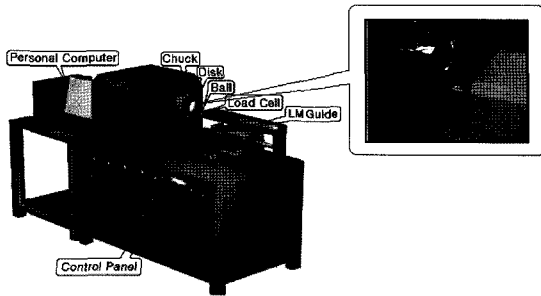


Fig. 1. Schematic diagram of ball on disk type wear tester.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2-1. 윤활 마찰실험

다종다양하게 발생하는 마멸입자를 채취하기 위하여 볼 온 디스크(ball on disk)형 윤활 마찰 마멸 시험기를 이용하여 실험을 하였으며, 실험장치의 개요도를 Fig. 1에 나타내었다. 윤활장치부에는 시험편 접촉점 하부에 오일 배스(oil bath)를 설치하고 윤활유 공급은 순환펌프로써 실리콘 튜브(silicon tube)를 통하여 시험편 접촉점에 적하시켰다. 윤활실험에 사용된 상대재료인 볼 시험편은 지름 5.0 mm인 순도 99.7%의 알루미늄 나 세라믹스( $Al_2O_3$ )를 사용하였고, 디스크 시험편은 자동차 및 기계부품으로 많이 사용되는 기계구조용 탄소강 SM45C를 사용하였다. 그리고 디스크의 형상은 지름 50 mm, 두께 10 mm이며, 이를 연삭한 후 에머리 페이퍼(emery paper) #1200으로 정밀 연마하여 그 표면조도를  $R_{max} 0.2 \mu m$ 로 일정하게 하였다. 실험에 사용한 윤활유는 쉘 토나 오일(Tonna Oil) T68을 사용하였고, 실험조건으로는 접촉하중은 3 kgf, 미끄럼속도는 2.83 m/min으로 설정하였다. 그리고 미끄럼거리는 170 m로 설정하여 실험하였다.

마찰실험에서 발생된 마멸입자는 오일 배스(oil bath) 내의 윤활유를 노말핵산과 1:1로 혼합하여 공경  $0.45 \mu m$ 의 얇은 막 필터(membrane filter)를 통하여 채취하였으며, 채취한 마멸분은 영상처리 시스템을 이용하여 마멸분의 형태적 특징을 구하였다. 여기서 영상 획득 수와 한 영상내의 마멸분 수에 따른 마멸분의 형태적 특징 및 마멸체적을 추정하기 위하여 마멸분 영상 획득 조건은 Table 1에 나타낸 바와 같이 한 영상내의 마멸분의 개수가 평균적으로 25, 100, 140 및 160개가 되도록 혼합액의 양을 조절하였고, 랜덤하게 선정한 5, 10, 20, 40, 60 및 100개의 영상을 획득하

Table 1. Condition for wear particle image capture

Image capture condition	
Number of wear particle	25, 100, 140 and 160
Number of images	5, 10, 20, 40, 60 and 100

여 영상처리 하였다.

### 2-2. 컴퓨터 영상처리

Fig. 2는 디지털 컴퓨터 영상처리 시스템의 개략도를 나타낸 것으로 광학현미경은 투과조명의 할로겐 램프(halogen lamp)를 가지고 있으며, 광학현미경 상부에 부착된 디지털 카메라로 40배의 대물렌즈로부터 관측된 마멸분의 영상을 촬영하여 컴퓨터에 저장하였다.

본 연구에 사용한 디지털 카메라는 400백만 화소로 화소수  $2272 \times 1704$ 이고 화소당 분해능은  $R$ (red),  $G$ (green),  $B$ (blue) 각 8비트(bit, 256 gray level)이며, 정방형 1 화소(pixel)의 길이는  $0.0205 \mu m$ 이다. 그리고 영상처리 시스템의 운용 프로그램을 통하여 채취한 마멸분의 형태정보(둘레, 면적, 형상, 크기분포 및 입자 수)등을 얻었으며, 이들의 계산을 위한 컴퓨터의 프로

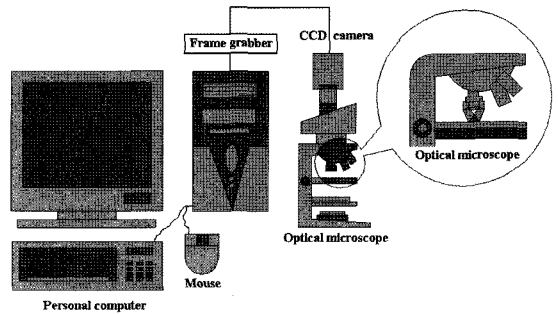
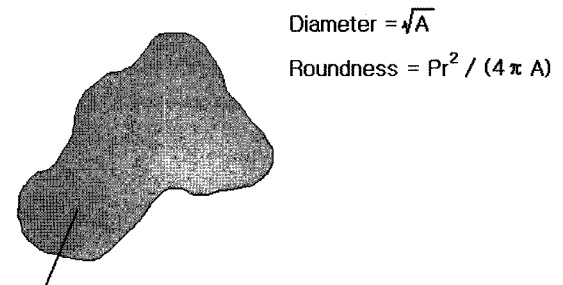


Fig. 2. Schematic diagram of image processing system.



Area (A) : Number of pixels x area of 1 pixel

Periphery (Pr) : Number of pixels x length of 1 pixel

Fig. 3. Shape parameters of a wear debris.

그램의 처리는 비주얼 C++ 언어를 사용하여 실험실에서 직접 제작한 프로그램으로 행하였다.

마멸분은 발생조건에 따라 다양한 형태를 가지기 때문에 그 형태의 분류 및 평가를 위하여 본 연구에서 이용한 마멸분의 형태정보를 Fig. 3과 같이 정의하였다. 이것을 이용하여 대표경과 복잡도의 형태정보를 영상해석 하였고, 전체 마멸체적을 구하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3-1. 마멸분 형태정보

##### 3-1-1. 마멸분의 대표경

Fig. 4는 하나의 영상에 차지하는 마멸분의 수가 평균 140개 일 때 마멸분 영상 획득 수에 대한 마멸분 대표경의 평균값의 변화를 나타낸 것으로 전반적으로 마멸분 영상을 40장 이상 획득하여 마멸분의 대표경을 구하였을 때 가장 신뢰할 수 있는 대표경의 평균값을

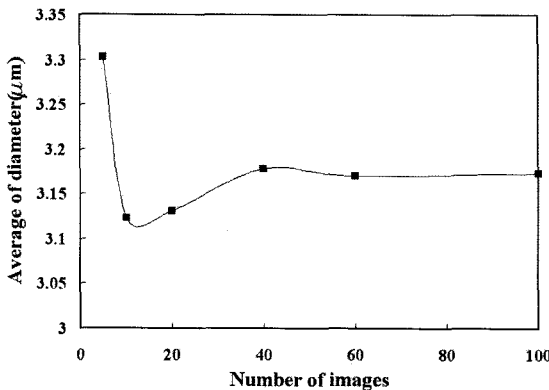


Fig. 4. Variation of average value of diameter on number of images.

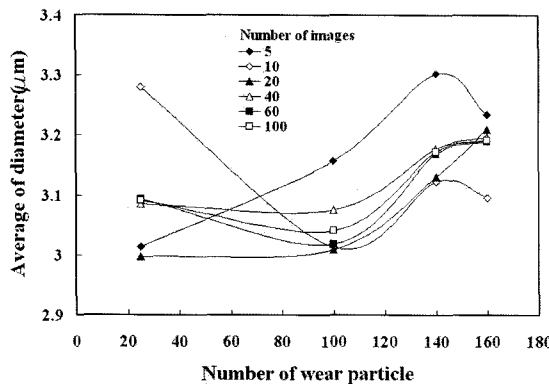


Fig. 5. Variation of average value of diameter on number of wear particle.

얻을 수 있다. 따라서 마멸분의 크기를 분석하기 위해서는 적어도 40장 이상의 마멸분 영상을 획득할 필요가 있다고 생각된다.

Fig. 5는 한 영상내의 마멸분의 평균 개수에 대한 마멸분의 평균 대표경의 변화를 나타낸 것으로 획득한 영상의 수가 20장 이하일 경우는 마멸분의 수에 따라서 대표경의 평균값을 결정하지 못할 정도로 평균값의 변화가 크게 나타난다. 그러나 획득한 영상의 수가 40장 이상일 경우에는 마멸분의 수에 따른 대표경의 평균값의 변화가 대체로 유사한 경향을 보여주고 있다. 그리고 마멸분의 수가 약 140개 이상일 경우에는 40장 이상의 마멸분 영상을 이용하였을 때 거의 비슷한 대표경의 평균값을 나타내고 있다.

이러한 결과로 볼 때, 신뢰성 있는 마멸분의 대표경의 평균값을 구하기 위해서는 하나의 마멸분 영상 당 마멸분의 수가 약 140개 이상이 되도록 윤활유를 채취할 필요가 있으며, 영상처리를 위한 마멸분 영상은 최소 40장 이상을 이용할 필요가 있다고 생각한다.

##### 3-1-2. 마멸분의 복잡도

복잡도는 입자의 둥근 정도를 나타내는 것으로 1에 가까울수록 원형에 근접하고 그 형태가 괴상의 형태일수록 그 값은 커진다. Fig. 6은 마멸분 영상 획득 수에 따른 복잡도의 평균값의 변화를 나타낸 것으로 20장 이상의 영상을 이용하여 복잡도의 평균을 구하였을 경우라도 한 영상내의 마멸분의 수에 따라 복잡도의 평균값이 수렴하지 못하고 그 변화가 비교적 크게 나타난다. 이는 디지털 영상처리를 이용하기 때문에 영상획득 장치의 정밀도의 한계와 디지털에 의한 둘레 계산 및 면적 계산에서 발생하는 복잡도의 계산 오차의 영향이라고 생각되고 작은 입자일수록 오차가 크게

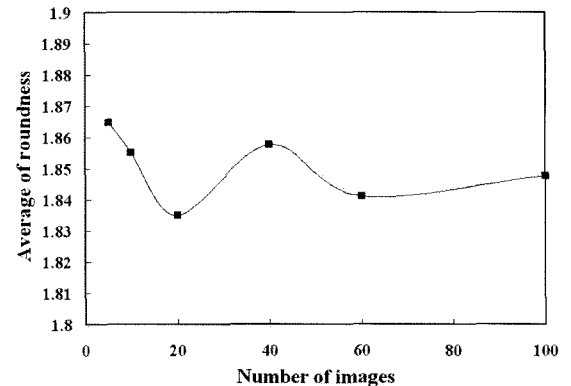


Fig. 6. Variation of average roundness of wear particles on number of images.

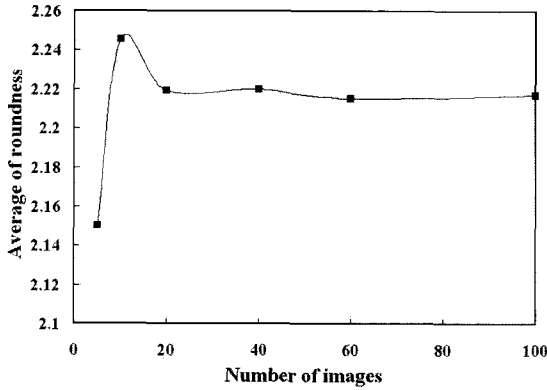


Fig. 7. Variation of average roundness of wear particles over 3  $\mu\text{m}$  on number of images.

발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서 복잡도가 안정적이라고 할 수 있는 비교적 큰 마멸분을 대상으로 복잡도의 평균을 구할 필요가 있다.

Fig. 7은 3  $\mu\text{m}$  이상의 마멸분에 대하여 영상 획득 수에 따른 복잡도의 평균값 변화를 나타낸 것으로 Fig. 6의 전체 마멸분에 대한 복잡도의 평균값 변화와는 달리 전반적으로 20장 이상에서 복잡도의 평균값이 수렴되고 있다. 따라서 마멸분의 복잡도를 분석하기 위해서는 적어도 20장 이상의 마멸분 영상을 획득할 필요가 있고 비교적 큰 입자를 대상으로 복잡도의 특징을 분석하는 것이 효과적이라고 생각한다.

Fig. 8과 Fig. 9는 한 영상내의 마멸분의 평균 개수에 대한 마멸분의 평균 복잡도의 변화를 나타낸 것으로 Fig. 8은 전체 마멸분에 대하여 복잡도의 평균을 구하였고 Fig. 9는 3  $\mu\text{m}$  이상인 마멸분에 대하여 평균을 구한 것이다. Fig. 8의 전체 마멸분에 대한 복잡

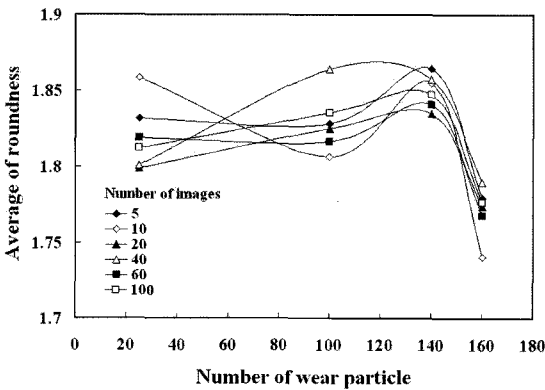


Fig. 8. Variation of average roundness of wear particles on number of wear particle in one image.

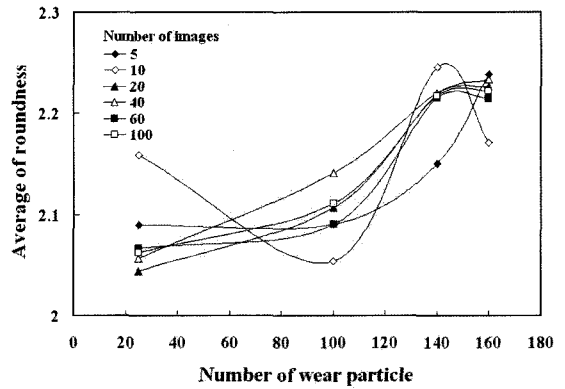


Fig. 9. Variation of average roundness of wear particles over 3  $\mu\text{m}$  on number of wear particle in one image.

도의 평균값의 변화를 보면 전반적으로 복잡도의 평균의 변화가 크고 수렴하지 못하고 있다. 특히 마멸분 수가 약 160개 정도로 많아지면 복잡도의 평균값이 크게 떨어지는 것을 볼 수가 있다. 이는 전술한 바와 같이 디지털 영상처리를 이용하기 때문에 영상획득 장치의 정밀도의 한계로 인하여 작은 입자일수록 복잡도의 계산 오차가 크고 입자 수가 많을수록 작은 입자가 많이 분포되어 나타난 결과라고 생각된다. 따라서 Fig. 9의 3  $\mu\text{m}$  이상인 마멸분에 대한 복잡도의 평균값의 변화를 보면 마멸분 영상이 20장 이상일 때의 평균값 변화가 유사하게 나타나고 있으며, 한 영상내의 마멸분 수가 140개 이상 일 때 거의 비슷한 복잡도 평균값을 가지고 있다.

따라서 어떤 조건에서 채취한 마멸분의 신뢰할 수 있는 복잡도 평균값을 구하고자 할 경우에는 비교적 큰 입자의 복잡도를 이용할 필요가 있으며 한 영상내의 마멸분 수가 140개 이상이 되도록 윤활유를 채취하여 20장 이상의 마멸분 영상을 획득하여 영상처리를 행할 필요가 있다고 생각한다.

### 3-2. 마멸체적의 추정값

Fig. 10은 한 영상 내의 마멸분의 평균 개수에 따른 마멸분 영상획득 수에 대한 마멸체적의 변화를 나타낸 것으로 한 영상내의 마멸분 수와 관계없이 대체로 40장 이상의 마멸분 영상을 이용하여 마멸체적을 추정하였을 때 추정값이 수렴하는 것을 볼 수 있다. 그러나 마멸분의 수가 100개 이하로 적을 경우에는 획득한 영상의 수에 따라서 마멸체적의 변화가 비교적 크게 나타나고 있으며, 마멸분의 수가 25개로 적을 때는 추정

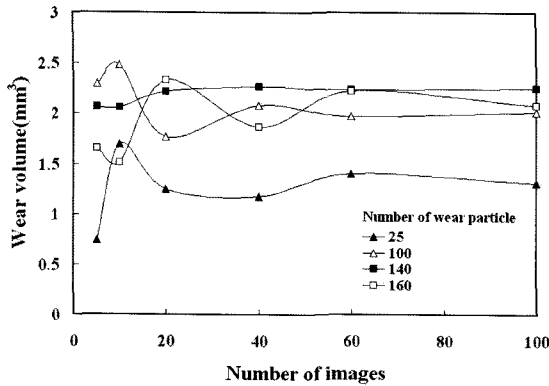


Fig. 10. Variation of wear volume.

값이 전체적으로 낮게 나타난다. 이는 한 영상내의 마멸분의 수가 너무 적으면 윤활유내의 다종다양한 마멸분을 충분히 채취하지 못하여 마멸체적의 추정값을 신뢰하기 힘들다는 것을 보여준다고 생각한다. 마멸분의 수가 140개 이상일 때는 20장 이상의 마멸분 영상을 이용하여도 마멸체적은 거의 비슷한 추정값을 가지고 있다. 따라서 마멸분을 채취하여 영상처리에 의해 마멸체적 또는 마멸량을 추정할 때 한 영상내에 마멸분의 수가 평균적으로 약 140개 정도가 되도록 윤활유를 채취하였을 경우에는 최소한 20장 이상의 영상을 획득하여 영상처리를 할 필요가 있으며, 마멸분의 수가 약 100개 정도가 되도록 윤활유를 채취하였을 경우에는 최소한 40장 이상의 영상을 획득하여 영상처리를 할 필요가 있다고 생각한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 마멸분을 영상처리하기 위한 기준을 마련하기 위하여 기계구조용강 SM45C를 사용하여 윤활마찰 실험을 행하였다. 이 때 발생된 마멸분의 채취량과 마멸분 영상의 획득 수를 달리하여 영상처리를 행하여, 마멸분의 형태정보를 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 신뢰성 있는 마멸분의 대표경의 평균값을 구하기 위해서는 하나의 영상 당 마멸분의 수가 약 140개 이상이 되도록 하고, 마멸분 영상은 최소 40장 이상이 필요하다.
2. 마멸분의 신뢰할 수 있는 복잡도 평균값을 구하고자 할 경우에는 한 영상내의 마멸분 수가 140개 이상이 되도록 하여 20장 이상의 마멸분 영상을 획득하

고, 비교적 큰 입자의 복잡도를 이용할 필요하다.

3. 마멸체적의 추정값에서 하나의 영상내에 마멸분의 수가 약 140개 정도일 경우에 20장 이상의 영상을, 그리고 마멸분의 수가 약 100개 정도일 경우에 40장 이상의 영상이 필요하다.

4. 하나의 영상 당 마멸분의 수가 약 140개 이상이고 마멸분 영상이 최소 40장 이상일 경우에 마멸분 형태정보 및 마멸체적의 데이터를 모두 신뢰할 수 있다고 생각한다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 지정 지역혁신센터사업(RIC) 신소형재가공청정공정개발연구센터 지원으로 수행되었음.

#### 참고 문헌

1. W. Uedelhoven and M. Franzl, "The Use of Automated Image Analysis for the Study of Wear Particles in Oil-Lubricated Tribological System," *Wear*, Vol. 142, pp. 107-113, 1991.
2. B. J. Roylance, I. A. Albidewi and M. S. Laghari, "Computer-Aided Vision Engineering (CAVE)-Quantification of Wear Particle Morphology," *Lubr. Eng.*, Vol. 50, pp. 111-116, 1993.
3. B. J. Roylance and S. Raadnu, "The Morphological Attributes of Wear Particles-Their Role in Identifying Wear Mechanisms," *Wear*, Vol. 175, pp. 115-121, 1994.
4. T. Sato, O. Ikeda, T. Hatsuzawa and M. Linzer, "Real Time Evaluation of Wear Particle using Electro Forced Rotation and Laser Scattering," *Wear*, Vol. 15, pp. 273-285, 1987.
5. T. Hunt, "Condition Monitoring of Mechanical and Plant," Chapman & Hall, pp. 48-53, 1995.
6. M. Shibata, "Tribological Characteristics and Diagnosis of Deteriorated Lubricating Oil," *JAST*, Vol. 39, No. 7, pp. 559-565, 1994.
7. H. S. Park, Y. S. Cho, H. J. Bae and S. J. Lee, "Estimation of Damage Condition for the Automobile Transmission Gear by Morphological Analysis of Wear Debris," *J. the KSTLE*, Vol. 17, No. 1, pp. 16-21, 2001.
8. Y. S. Cho, M. R. Lyu, D. H. Kim, and H.S. Park, "Application of Fractal Parameter for Morphological Analysis of Wear Particle," *J. the KSTLE*, Vol. 18, No. 2, pp. 147-152, 2002.