

# 화상해석에 의한 윤활운동면의 마멸분 형태 분석

서 영백\*, 김 형자\*\*, 박 흥식\*\*\*, 전 태욱\*\*\*

\* 동아대학교 기계공학과 대학원

\*\* 부산공업대학교 기계설계학과

\*\*\* 동아대학교 기계공학과

## ABSTRACT

This paper was undertaken to analyze the morphology of wear debris generating from moving lubricated machine surfaces by image processing. The lubricating wear test was carried out under different experimental conditions using the wear test device was made in our laboratory and wear testing specimen of the pin on disk type wear rubbed in paraffine series base oil, by varying applied load, sliding distance. The four parameters(50% volumetric diameter, aspect, roundness and reflectivity) to describe the morphology have been developed and are outlined in the paper. A system using such techniques promises to obviate the need for subjective, human interpretation of particle morphology in machine condition monitoring, thus overcoming many of the difficulties with current methods and facilitating wider use of wear particle analysis in machine condition monitoring.

## 1. 서 론

기계윤활면의 상호작용에 의하여 발생하는 마멸분은 필연적으로 발생하게 되며 이 마멸분의 형상은 윤활면의 손상에 직접적인 관계를 가지고 있다. 즉 마멸입자의 관찰과 해석이 마찰면의 손상감지와 상태진단 그리고 마멸기구의 해명에 있어서 막대한 정보를 제공해 준다는 것은 충분히 인식되어 있음에도 불구하고 마멸분에 대한 취급은 아직 정성적인 범위를 벗어나지 못하고 있고, 또한 그 정보가 유효하게 활용되는 일은 적다<sup>2-3)</sup>. 이처럼 윤활면에서 발생하는 마멸분의 유효이용을 방해하고 있는 요인은 형태와 크기가 천차만별한 입자의 특징을 정리하는 기술적인 방법이 아직 확립되어 있지 않기 때문이라고 생각된다.

현재까지 기계윤활면에서 발생하는 마멸입자의 해석은 강력한 자장을 이용하여 윤활유중의 금속 마멸입자의 크기, 형태 등을 측정하는 Ferrography법과 마멸분의 금속원소 분석으로 부터 판단하는 SOAP (Spectrometric Oil Analysis Program)법이 대표적으로 이용되고 있다<sup>4-5)</sup>. 그러나 이들 방법은 작동상태의 monitoring에는 적

합하지만 마멸기구의 해명을 위한 마멸분의 상세한 data는 제공해 주지 못하고 있다. 또한 현미경 관찰에 의한 방법도 오랜 경험과 숙련이 필요하고 시간적인 소모와 관찰자에 따라서 해석결과가 좌우되기 때문에 항상 효과적인 방법이 되지 못하고 있다<sup>2)</sup>.

최근 컴퓨터의 memory의 확장에 따라 발전하고 있는 화상처리 기술은 패턴검사 및 문자판독에 널리 이용되고 있고<sup>6-8)</sup>, 또한 기계 구동계의 작동상태 monitoring과 손상감지 및 상태진단에도 활용하려는 시도가 진행되고 있다<sup>9)</sup>. 그러나 현재까지의 화상처리의 이용은 기계윤활면에서 발생하는 마멸분의 형태정보 분석에만 국한되어 이용되고 있을 뿐이고, 이 분석 data를 통하여 마멸분의 형태 parameter를 구하여 이를 통한 마멸분의 해석에 적용하는 방법은 아직 진행되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 기계윤활면에서 발생하는 마멸분을 정량적으로 해석하기 위하여 기계윤활면을 모의한 pin on disc 윤활실험으로 부터 발생하는 마멸분을 채취한 뒤 PC, CCD 카메라,

광학현미경으로 구성되는 화상처리 시스템을 이용한다.今回は 마멸분 생성시의 작동조건 즉, 작용하중, 미끄럼거리 등의 변화에 따른 마멸분의 크기, 색정보 및 형상 등의 수치정보로부터 마멸분 형태 parameter (50%체적경, 장단도, 복잡도 및 광택도)를 분류, 평가하여 이를 통하여 기계윤활면의 마멸분을 해석하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 윤활마찰 실험

본 연구에 사용한 실험재료로서 pin시험편은 직경 5.0mm의 베어링鋼球 STB2 (HV780)을, disk시험편은 기계구조용 탄소강 SM45C(HV200)을 사용하였다. disk의 형상은 직경 50mm, 두께 10mm이고, emery paper #1200으로 정밀 연마하여 그 표면조도를  $0.2\mu\text{m} R_{\text{max}}$ 로 일정하게 하였다. 그리고 실험에 사용한 윤활유는 무침가 파라핀(paraffine)계 광유(8.2cSt@40°C)를 사용하였다.

실험장치는 pin on disk형 마찰시험기에 의하여 윤활마찰 실험하였으며, 이것은 회전하는 disk 시험편에 베어링 강구를 압착시켜 마찰하는 것으로 이의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 처럼 모터는 무접점 speed control motor로서 여기에 감속 gear를 부착시켜 그 미끄럼속도를 7.23mm/sec로 일정하게 하였다. 윤활장치부에는 시험편 접촉점 하부에 oil bath를 설치하고 윤활유의 공급은 순환펌프로써 silicon tube를 통하여 시험편 접촉점에 滴下시켰으며, pin 시험편은 piano선을 이용하여 사하중을 걸어 disk에 가압

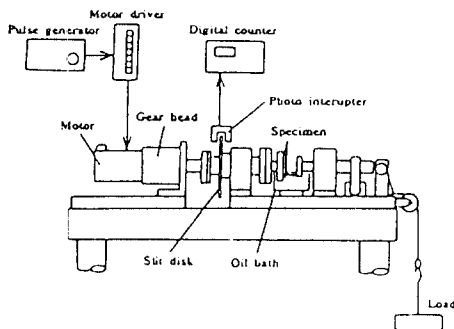


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

하였다. 그리고 실험조건은 작용하중은 1 kgf, 3 kgf 및 5 kgf의 3단계로 하였으며, 미끄럼거리는 78m, 156m 및 234m로 변화시켰다.

실험방법으로는 먼저 disk 시험편 및 베어링 강구를 hexan과 acetone으로 초음파 세척하고 양 시험편을 각각 시험편 장착부에 부착한 후, 접촉점이 윤활유에 잠기도록 하여 실험을 수행하였다. 실험종료 후에는 시험편에 부착된 마멸분을 다시 초음파 세척하여 마찰면을 관찰하였다.

### 2.2 화상해석 시스템

실험 후 oil bath내의 마멸분은 윤활유로부터 孔径  $0.45\mu\text{m}$ 의 membrane filter를 부착한 마멸분 채취기구를 이용하여 실험조건 별로 마멸분을 채취하여 화상처리를 행하였다. Fig. 2에는 채취한

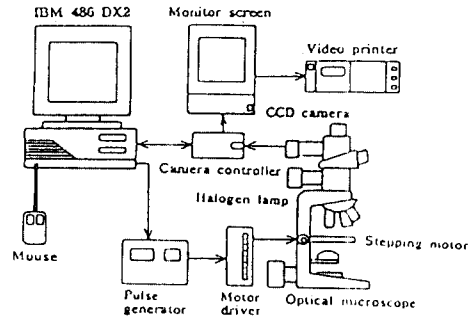


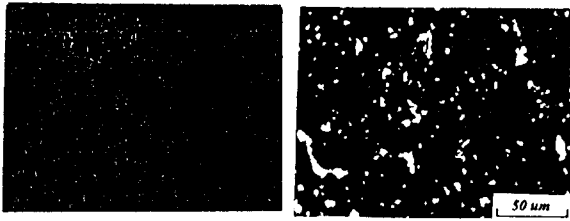
Fig. 2 Schematic diagram of image processing analysis system

마멸분의 형태정보(형상, 크기분포, 입자수 및 색 정보)을 얻기 위한 화상해석 시스템의 개략도를 나타내었다. 광학현미경은 투과조명 및 낙사조명의 2 가지 할로겐램프를 가지며 관측된 화상은 상부의 color CCD카메라에 의하여 PC의 frame grabber에 저장된다. frame grabber는 畫素數  $640 \times 480$ , 화소당 분해능은 RGB 각 8 bit (256階調)이고, 정방형 1 화소(pixel)의 길이는  $0.426\mu\text{m}$ 이다. 이것은 마멸분 채취부분의 filter 직경이 35mm인 것을 고려하면 모니터 1 화면의 면적은 filter의 17302분의 1이 된다. 그리고 본 연구에서 frame grabber의 제어 및 data의 처리는 모두 自作의 C 言語(일부는 기계어)에 하여 행하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 마멸분 형태 parameter

본 연구에서 모니터에 투영된 마멸분을 카운터를 하는데 단지 형태 parameter만 측정한다면 2值化의 과정을 통하여 카운터를 하면 된다. 하지만 본 실험에서는 형태 parameter 뿐만 아니라 색정보도 측정하여야 하므로 원 화상에서 바로 카운터 및 측정을 할 필요가 있다. 원 화상에서 카운터를 하기 위해 화상내의 모든 색정보를 입력한 후 그 중에서 배경에 해당되는 색을 제외시킨다. 이렇게 하면 입자에 관한 색정보들만 남게 되며, 그 색정보를 가지고 입자를 카운터 하면서 입자에 해당되는 부분은 흰색으로 마크를 하며, 카운터 후에 미리 지정해 놓은 area범위 밖에 있는 것들은 카운터에서 제외시킨다. 이렇게 처리한 화상을 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 (a)는 카운터 하기전의 원 화상이고, (b)는 카운터 후의 화상이다.



(a) image before counter (b) image after counter

Fig. 3 Photo. of wear debris image

Fig. 3의 마멸분 화상에서 마멸분의 형태정보 (형상, 크기분포, 입자수 및 색정보)를 실험조건에 따라 화상처리하여 data file을 작성하고, 이를 이용하여 마멸분의 형태 parameter를 구하였다. 이것은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 50%體積徑, 長短度, 複雜度 및 光澤度의 4가지이며, 이의 정의는 다음과 같다.

- a) 代表徑(diameter) : 마멸분의 형상에 관계 없이 그 면적의 평방근.
- b) 長短度(aspect) : 각 마멸분에서 가장 긴 직경을 長徑, 그것과 수직으로 교차하는 직경의 가장 긴 것을 短徑이라고 하였을 때 그 비율.

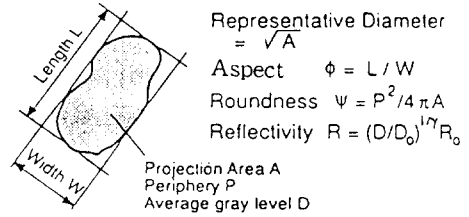


Fig. 4 Shape parameter of wear debris

- c) 複雜度(roundness) : 마멸분이 원형에 가까운 정도를 나타내며, 이것은 식 (1)과 같이 정의한다. 즉 마멸분이 원형일때 가장 최소(약  $4\pi$ )가 되고,

$$\psi = P^2 / 4\pi A \quad (1)$$

원형이 복잡하게 될 수록  $\psi$ 가 크게 된다.

- d) 光澤度(reflectivity) : 마멸분으로 부터 렌즈계로 향하여 정 반사되는 빛의 백색 기준면의 gray level(200)에 대한 마멸분의 3色刺激值 R(red), G(green), B(blue) gray level 과의 비율로서 CCD 카메라의 출력신호 D는 일반적으로 카메라에 입력하는 光量 E에 비례하지 않는다. 이것을  $\gamma$  특성이라 하며, C 와  $\gamma$ 를 상수로 하면  $D = C \cdot E^\gamma$ 의 관계를 가진다. 본 연구에서 사용한 CCD 카메라의  $\gamma$ 는 0.57 이다. 여기서 색도를 정확히 구하기 위하여 3 원색의 출력치  $D_r, D_g, D_b$ 로 부터 각 화소의 3 色刺激值를 식 (2)로 부터 구하였다.

$$\begin{aligned} R &= (D_r / D_{r0})^{1/\gamma} R_0 \\ G &= (D_g / D_{g0})^{1/\gamma} G_0 \\ B &= (D_b / D_{b0})^{1/\gamma} B_0 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $D_{r0}, D_{g0}, D_{b0}$ 는 백색 기준면 ( $R_0=G_0=B_0$ )에 대한 출력치이다.

- e) 50%體積徑(50% volumetric diameter) : 여기서 50%체적경은 마멸분의 代表徑의 분포로 부터 구하였으며, 이것은 그 직경 이하의 徑을 가진 마멸분의 체적의 합계가 全마멸체적의 정확히 50%가 되는 직경 이상의 각 실험조건은 모두 대물렌즈 40배로서 filter내의 50 화면에 포함되는 대표경

1.345 $\mu$ m(10화소 이상) 되는 마멸분 전체에 대하여 이들의 parameter를 계산하였다.

### 3.2 마찰조건에 따른 형태 parameter

Fig. 5는 각 미끄럼거리에서의 작용하중 변화에 따른 마멸분의 50%체적경과 형태 parameter인 장단도, 복잡도 및 광택도를 나타낸 것으로서, 이것은 각 sample 50화면의 총마멸분의 평균치를 구하여 표시한 것이다.

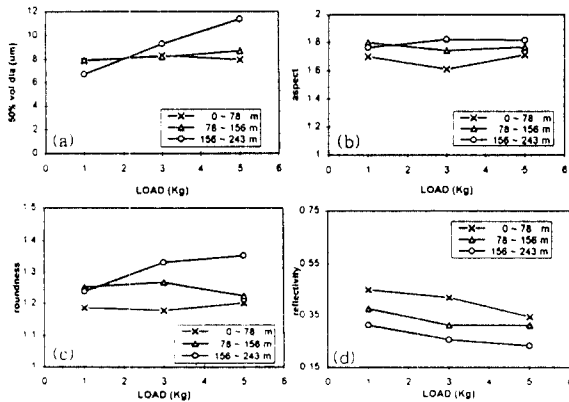


Fig. 5 Average value of shape parameter in total wear debris

그림에서 마멸분의 50%체적경은 미끄럼거리 초기 0~78m 및 중기 78~156m에서는 하중의 증가에 관계없이 대체로 약 8 $\mu$ m 정도의 크기를 가지지만, 미끄럼거리 말기인 154~234m의 경우는 하중의 증가와 함께 거의 비례적으로 마멸분의 크기가 증가하고 있다는 것을 볼 수 있다. 그리고 장단도에서는 각 작용하중에서 미끄럼거리의 변화에 관계없이 대체로 하중의 증가와 함께 상승하고 있고, 이러한 경향은 복잡도에서도 동일한 관계를 나타내고 있다. 그러나 광택도의 경우에는 작용하중과 미끄럼거리의 증가와 함께 감소해 가고 있다는 것을 알 수 있다.

미끄럼거리 말기에서 하중의 증가와 함께 마멸분의 크기가 증가하는 것은 마찰시간의 증가와 함께 disk시험편의 전단강도 저하에 따른 격렬한 소성변형의 결과이며, 이와같은 현상은 장단도와 복잡도에서도 동일한 경향을 나타내고 있다고 생각된다. 그러나 광택도의 경우에는 각 미끄

럼거리에서 하중의 증가와 함께 광택도가 감소하는 것은 마찰시간의 증가와 더불어 마찰면의 산화의 진행을 나타낸다고 생각된다. 이것은 본 연구에 사용한 윤활유인 무침가 파라핀계 基油는 탄화수소의 혼합물<sup>4)</sup>로서 장시간이 증가할 수록 서서히 열화 변질되어 초기의 윤활성은 감소되고 마찰시간의 증가와 함께 산화반응이 조속히 진행되기 쉽다고 생각된다. 그리고 실험 후의 각 작용하중과 미끄럼거리의 증가에 따른 시험편의 마찰면에는 적갈색 및 흑색의 산화막의 형성된 것에서도 마멸분의 광택도의 차이를 반영한다고 생각된다.

Fig. 6은 작용하중 1 kgf, 미끄럼거리 0~234m에서의 마찰면을 나타낸 것으로 (a)부분은 금속 광택을 가진 abrasive 마멸된 부분이며, (b)는 산화되어 얇은 산화막이 형성되어 있는것을 볼 수 있다.

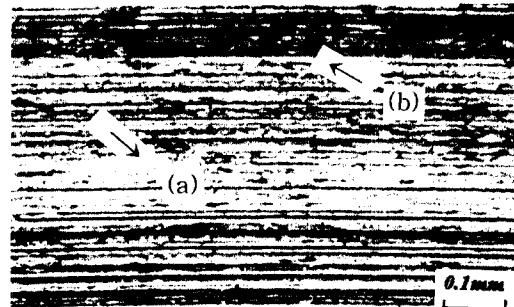


Fig. 6 Photo. of the rubbed surface ; load :1kgf, sliding distance : 0~234m

Fig. 7에는 각 작용하중에서 미끄럼거리 말기인 154~234m에서의 마멸분의 형상으로서 (a) 1 kgf (b) 3 kgf 및 (c) 5 kgf를 나타내었다. 전반적으로 작용하중이 증가할 수록 발생는 마멸분의 總數도 급격히 증가하며 또한 그 형상도 복잡해 지고 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 작용하중 (a) 1 kgf의 마멸분의 형상은 미세한 산화물과 얇은 박편상의 마멸분 입자를 볼 수 있지만, (b) 3 kgf와 (c) 5 kgf에서의 마멸분은 abrasive 마멸분으로 생각되는 curl 모양의 형상을 한 것과 산화물 입자 및 미세한 금속광택을 가진 입자를 볼 수 있고, 특히 (c)의 5kgf 인

경우에는 약  $40\mu\text{m}$  정도의 크기를 가진 큰 괴상의 마멸분 입자도 볼 수 있다. 이러한 괴상의 마멸분은 하중의 증가에 따른 격렬한 소성변형한 입자라고 생각된다.

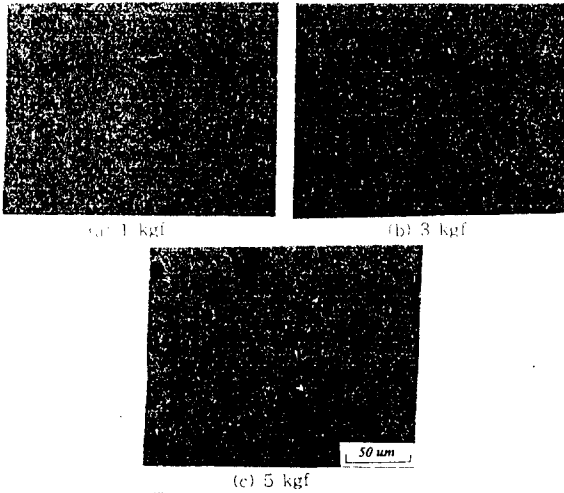


Fig. 7 Photo. of wear debris, sliding distance : 156~234m

### 3.3 형태 parameter 사이의 관계

Table 1에는 각 실험조건에 따른 sample에서 채취한 정량적인 마멸분의 총수를 나타낸 것으로서 미끄럼거리의 증가에 따라 마멸분 수도 크게 증가하고 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 8에는 각 실험조건에 따른 형상 parameter와의 관계를 알기 위하여 미끄럼거리 말기인 156~234m에서의 장단도와 복잡도, 그리고 광택도와 50%체적경 사이의 형태 parameter와의 관계를 나타내었다. 이것은 Table 1에 나타낸 하나의 시험편 sample에서 채취한 쏠마멸분의 입자의 총수에서 입자 200개 마다의 평균치를 취해서 나타낸 것이다.

Table 1. Total numbers of wear debris

	0 ~ 78 m	78 ~ 156 m	156 ~ 234 m
1 kg	2501	3984	8078
3 kg	6470	10673	14123
5 kg	5787	8965	15437

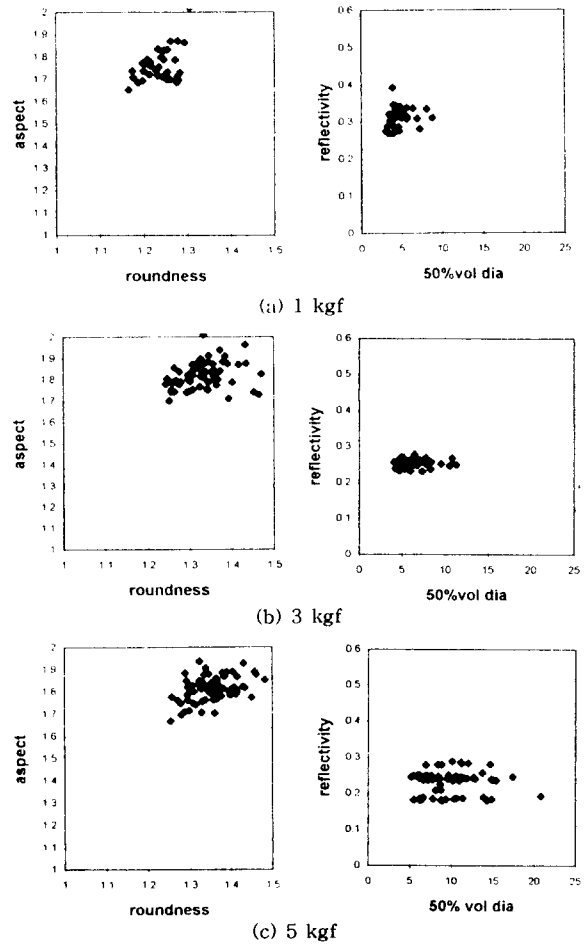


Fig. 8 Average value of shape parameter in every 200 wear debris, sliding distance : 156~234m

그림에서 작용하중의 변화에 관계없이 장단도는 1.7~1.9 정도에서 형성되어 있고, 복잡도에서는 하중 1 kgf는 1.2~1.3 정도의 값을 가지지만, 하중이 3 kgf와 5 kgf의 경우에는 1.25~1.45 정도로 복잡도가 크게 나타나 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 50%체적경과 광택도와와의 관계에서는 50%체적경의 평균치는 커지지만, 광택도는 역으로 감소하고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 작용하중 5 kgf에서의 미끄럼거리 초기, 중기 및 말기에서 미끄럼거리의 증가에 따른 형상 parameter와의 관계를 나타낸 것이다. 미끄럼거리의 증가와 더불어 Fig. 8에서와 같이 마멸분 수는 증가하며, 장단도와 복잡도도 함께 증

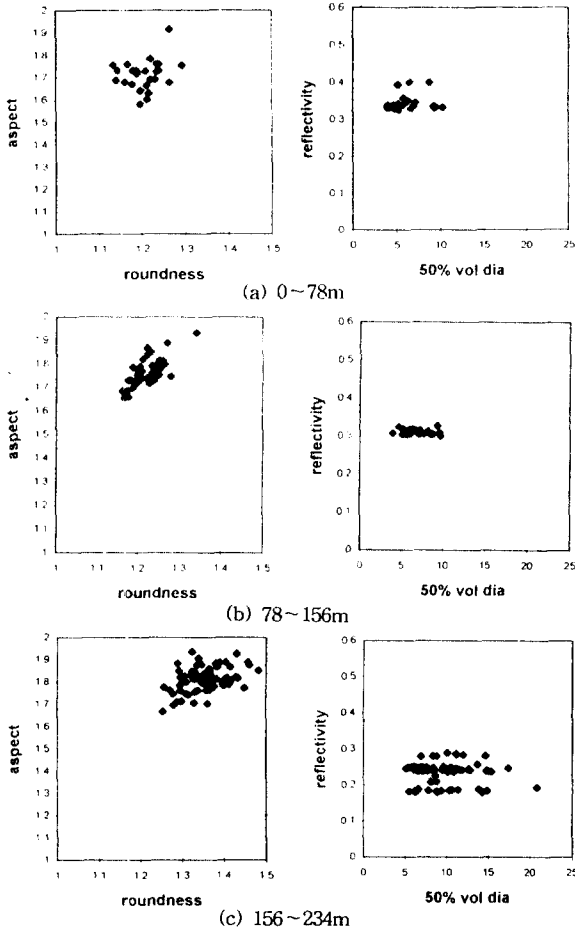


Fig. 9 Average value of shape parameter in every 200 wear debris, load : 5 kgf

가하지만, 50%체적경은 초기 미끄럼거리의 경우가 마멸분 입자수가 적음에도 불구하고 그 분산 정도가 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 초기 미끄럼거리에서는 pin과 disk 시험편 사이에서 초기마찰 상태로서 불안정하게 마찰이 진행된 결과로서 마멸분의 형태도 금속광택을 가진 것이 많기 때문이라고 생각된다. 그러나 마찰시간의 증가와 함께 광택도가 감소해 가는 것은 Fig. 8의 작용하중의 증가와 동일한 경향을 나타내고 있다.

이상의 결과에서 작용하중과 미끄럼거리가 증가 할 수록 대체로 마멸분의 크기가 크고 또한 마멸분의 형상은 복잡해 지지만, 광택도는 감소하여 간다는 것을 알 수 있다. 이것은 큰 마멸입

자 일수록 광택도가 낮다는 사실에서 어두운 색상을 띤 마멸분이 산화된 것이라고 생각할 때 마멸입자가 클 수록 산화되기 쉽고 또한, 광택도가 높다는 것은 마멸분이 얇은 박편상의 미세한 크기를 가진 금속광택을 띤 것이라는 사실을 나타내 주고 있다고 생각된다.

Fig. 10은 마멸분 형태정보에서 각 실험조건에 따른 마멸분의 總數를 계산하여 각 작용하중과 미끄럼거리에 따른 마멸량의 추정치를 나타낸 것이다. 여기서 마멸분 입자의 하나의 체적계산은 입자의 면적에 Fig. 3의 대표경을 곱한 것으로 하였다. 그림에서 처럼 마멸량은 작용하중과 미끄럼거리의 증가와 함께 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다.

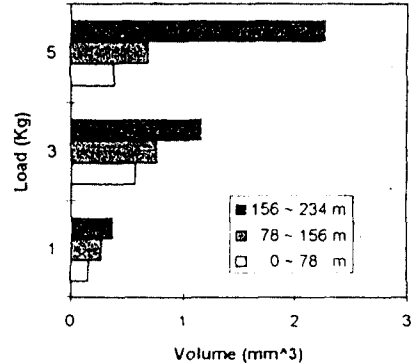


Fig. 10 Presumed wear loss

본 연구에서의 마멸량의 계산결과를 중량으로 환산 한 후 실험 완료시의 disk 시험편을 감도 0.1 mg의 디지털 천칭으로 실제 측정된 마멸중량과 비교해 보았을 때 그 오차가 15~20% 정도로 나타났다. 이러한 오차는 본 연구에서 채취한 마멸분의 크기는 전술한 바와 같이 10 화소 이상의 마멸분에 대한 것에 대해서만 계산하였고, 마멸입자의 두께도 2차원적인 대표경으로 계산한 결과이고, 또한 실험 후의 마멸중량 측정치에 따른 오차도 삽입 되었을 것으로 생각되지만 대체로 본 연구에서의 마멸량의 계산결과는 충분한 타당성을 가질 수 있다고 생각된다. 또한 일반적으로 볼 때 정상마멸 상태에서는 마멸량이 마찰시간의 증가와 함께 대체로 일정하게 진행된다고

알려져 있지만 본 연구에서는 마찰시간의 증가와 함께 마멸량이 계속 증가한다는 사실에서 실험조건으로 선택한 미끄럼거리는 윤활운동면의 마멸기구를 해석하기 위해서는 아직 짧은 거리라고 생각된다. 그러나 금후 계속하여 좀더 다양한 마찰조건과 여러가지의 마찰재료에 대하여 계속적으로 연구를 진행하여 다양한 마멸분 data의 축적으로 정량적인 작동상태의 진단에도 활용하고 싶다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 기계윤활 운동면에서 발생하는 마멸분을 해석하기 위하여 pin on disk 윤활실험장치를 통하여 마멸분 생성시의 작동조건 즉, 작용하중, 미끄럼거리 등의 변화에 따른 마멸분을 채취한 뒤 이를 화상처리 하여 마멸분의 크기, 색정보 및 형상 등의 수치정보로부터 마멸분 형태 parameter(50%체적경, 장단도, 복잡도 및 광택도)를 분류, 평가하고 해석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 마멸분 형태 parameter를 계산하고 이를 비교, 평가할 수 있는 program을 구축하였다.
2. 각 작용하중과 미끄럼거리의 증가와 함께 50%체적경, 장단도 및 복잡도는 상승하지만 광택도는 마찰면의 산화반응의 활성화로 역으로 감소한다.
3. 초기 미끄럼거리에서는 금속광택을 가진 미세한 마멸분이 주로 생성되지만 마찰시간의 증가와 함께 산화된 입도가 큰 마멸분이 형성되고, 큰 마멸입자 일수록 산화되기 쉽다.
4. 본 연구를 통하여 윤활운동면을 구성하는 기계요소의 마멸체적 추정치의 계산이 가능하였다.
5. 금후 다양한 마멸분의 data 측정으로 보다 정량적인 작동상태의 진단에 활용하고 쉽다.

#### 5. 참고문헌

- (1) Philip M.Gerhart, Richard J. Gross and John I. Hochstein, "Fundamentals of Fluid Mechanics", Addison-Wesley Publishing Co., (1992) pp.349~354
- (2) T.B.Kirr, D.Panzer, R.V.Anamalay and Z.L.Xu, "Computer Image Analysis of Wear Debris for Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis", Wear, 181~183, (1995) pp.717~722
- (3) W.W. Siefert and V.C. Westcott, "A Method for the Study of Wear Particles in Lubricating Oil", Wear, 21, (1972) pp. 27~42
- (4) Masaaki Shibata, "Tribological Characteristics and Diagnosis of Deteriorated Lubricating Oil", JSLE, Vol.39, No.7, (1994) pp.559~565
- (5) Masaharu Suzuki, "Tribology Management and Failure Diagnosis on Diesel Engines for Railroad Cars", JSLE, Vol.39, No.7, (1994) pp.584~589
- (6) 八木伸行, 井上誠喜, 林正樹, "C言語で学ぶ實戰畫像處理", オム社, (1992) PP.2~10
- (7) 李忠雄, "畫像工學", 集文堂, (1988) PP.9~20
- (8) 이양범, 강경일, 이용중, "화상처리 응용기술", 技文社, (1995) pp.15~36
- (9) B.J.Roylance, I.A.Albidewi, M.S.Laghari, "Computer-Aided Vision Engineering (CAVE)-Quantification of Wear Particle Morphology", Lubr., Eng., 50 (1993) pp.111~116