

〈논 문〉

기계윤활 운동면의 작동상태 진단을 위한 마멸분 해석

서영백* · 박흥식** · 전태욱**

(1996년 11월 25일 접수)

Analysis of Wear Debris for Machine Condition Diagnosis of the Lubricated Moving Surface

Y. B. Seo, H. S. Park and T. O. Jun

Key Words : Wear Debris(마멸분), Machine Condition Diagnosis(기계상태 진단), Image Processing(화상처리), Image Analysis(화상해석), 50% Volumetric Diameter (50% 체적경), Aspect(장단도), Roundness (복잡도), Reflectivity(광택도)

Abstract

Microscopic examination of the morphology of wear debris is an accepted method for machine condition and fault diagnosis. However wear particle analysis has not been widely accepted in industry because it is dependent on expert interpretation of particle morphology and subjective assessment criteria. This paper was undertaken to analyze the morphology of wear debris for machine condition diagnosis of the lubricated moving surfaces by image processing and analysis. The lubricating wear test was performed under different sliding conditions using a wear test device made in our laboratory and wear testing specimen of the pin-on-disk-type was rubbed in paraffine series base oil. In order to describe characteristics of debris of various shape and size, four shape parameters (50% volumetric diameter, aspect, roundness and reflectivity) have been developed and 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 to overcome many of the difficulties in current methods and to facilitate wider use of wear particle analysis in machine condition monitoring.

1. 서 론

각종 기계구동계의 윤활운동면에서 발생하는 고장을 지배하는 요인은 대부분의 경우 그 윤활면내에서 발생하는 마멸분에 기인하고 있으며, 이 마멸분의 형상과 특징은 그 구동계의 손상에 직접적인 관계를 가지고 있다.⁽¹⁾ 만약 기계윤활 운동면에서 발생하는 마멸분의 관찰과 해석이 가능하게 되면

윤활면의 손상감지와 상태진단 그리고 나아가 마멸기구 해명에도 막대한 정보를 제공해 준다는 것은 충분히 인식되어 있다. 그럼에도 불구하고 현재까지 마멸분에 대한 취급은 아직 정성적인 범위를 벗어나지 못하고 있고, 또한 그 정보가 유효하게 활용되는 일은 적다.^(2~4) 이처럼 기계윤활 운동면에서 발생하는 마멸분 data의 유효이용을 방해하고 있는 요인은 형태와 크기가 다종다양한 입자의 특징을 정리하는 기술적인 방법이 아직 확립되어 있지 않기 때문^(5,6)이라고 생각된다.

최근 컴퓨터의 memory의 확장에 따라 발전하고

*회원, 동아대학교 대학원 기계공학과

**회원, 동아대학교 기계공학과

있는 화상처리기술은 패턴검사 및 문자판독에 널리 이용되고 있고, (7,8) 또한 기계윤활 운동면의 작동상태 monitoring과 손상감지 및 상태진단에도 활용하려는 시도가 진행되고 있다. (9~11) Roylance 등(1)은 마멸분 화상해석의 자동화와 그것에 기초한 작동상태 진단에 관한 연구를 진행하여 정상마멸, severe 마멸, abrasive 마멸 등의 마멸형태를 분류하였고, Thomas 등(2)은 마멸입자의 형태정보를 의하여 컴퓨터의 화상처리기술을 이용하고 있는 등 마멸분의 특징추출을 위하여 화상처리기술이 널리 이용되고 있다. 이처럼 현재까지 화상처리 기술에 대한 이용은 기계윤활 운동면에서 발생하는 마멸분의 형태정보 분석에만 국한되어 이용되고 있을 뿐이고, 마멸분형태의 분류뿐만 아니라 마멸의 진행상황과 표면생성물 등 마멸분 data정보를 상세히 조사하여 분석 data로부터 마멸분의 형태 파라미터(parameter)를 통하여 마멸분 해석에 적용하는 방법에 관한 연구는 아직 진행되고 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 기계윤활 운동면을 모사한 pin-on-disc 윤활마찰·마멸실험으로부터 발생하는 마멸분을 membrane filter(공경 $0.45\ \mu\text{m}$)가 부착한 마멸입자 채취기구를 사용하여 마멸분을 채취한 뒤, (5) 이의 해석을 위하여 화상처리 및 화상해석으로 마멸분 발생시의 작동조건, 즉 기계요소 재료, 작용하중 및 미끄럼거리 등의 변화에 따른 마멸분형상의 수치정보로부터 마멸분형태 파라미터(50% 체적경, 장단도, 복잡도 및 광택도)를 분류, 평가하고 이를 통하여 기계윤활 운동면의 작동상태 진단에 적용하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 윤활마찰실험

본 연구에 사용한 실험재료로서 pin 시험편은 직경 5.0 mm의 베어링 강구 STB2(780 Hv)을, disk 시험편으로 기계요소 재료로 널리 사용되는 3종류의 강, SM45C(200 Hv), STS304(190 Hv) 및 SKD11(720 Hv)을 사용하였다. Disk의 형상은 직경 50 mm, 두께 10 mm이고, 이를 emery paper #1200으로 정밀 연마하여 그 표면조도를 $0.2\ \mu\text{m}$ (R_{max})로 일정하게 하였다. 그리고 실험에 사용한 윤활유는 무첨가 파라핀(paraffine)계 광유(8.2cSt @40°C)를 사용하였다.

실험장치는 pin-on-disk형 마찰·마멸시험기에 의하여 윤활마찰실험하였으며, 이것은 회전하는 disk 시험편에 베어링강구를 압착시켜 마찰하는 것으로 이의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. (5) 실험조건으로는 미끄럼속도를 6.28 mm/sec로 일정하게 하였고, 접촉하중은 1 kg, 3 kg 및 5 kg으로 하였다. 그리고 미끄럼거리는 하나의 시험편의 마찰시간(총 9시간)에서 3시간씩의 미끄럼거리를 세분화하여 0~78 m, 78~156 m 및 156~234 m를 미끄럼거리 초기, 중기 및 말기로 구분하여 이들의 마멸분을 채취하였다. 윤활장치부에는 시험편 접촉점 하부에 oil bath를 설치하고, 윤활유 공급은 순환 펌프의 silicon tube를 통하여 시험편 접촉점에 적하시켰으며, pin 시험편은 piano선을 이용하여 사하중을 걸어 disk에 가압하였다. 그리고 마멸분은 oil bath내의 윤활유로 부터 공경 $0.45\ \mu\text{m}$ 의 membrane filter가 부착된 마멸입자 채취기구(5)를 통하여 마멸분을 채취하였다.

2.2 화상처리 시스템

실험조건별로 채취한 마멸분을 해석하기 위한 화상처리 시스템의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. (5) 광학현미경은 투과조명 및 낙사조명의 2가지 할로겐 램프를 가지며, 관측된 화상은 상부에 부착된 CCD카메라에 의하여 PC의 frame grabber에 저장된다.

본 연구에 사용한 frame grabber는 화소수 640×480; 화소(pixel)당 분해능은 R(Red), G(Green), B(Blue) 각 8 bit(256 gray level)이고, 정방형 1 화소의 길이는 $0.426\ \mu\text{m}$ 이다. 이것은 마

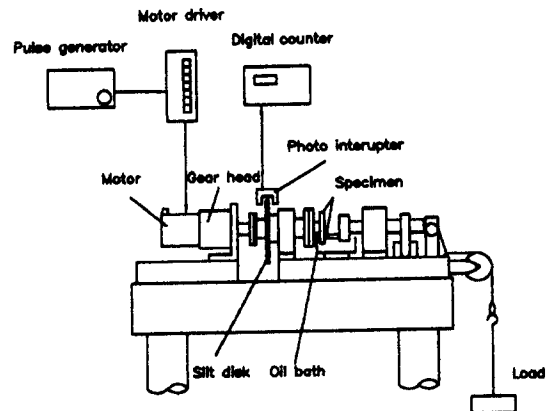


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

멸분 채취부분의 filter 직경이 35 mm인 것을 고려하면 모니터 1화면의 면적은 filter의 17,302분의 1이 된다. 그리고 Fig. 2의 화상해석을 통하여 채취한 마멸분의 형태정보(둘레, 면적, 형상, 크기분포, 입자수 및 색정보)을 얻었으며, 화상처리 시스템의 frame grabber의 제어 및 이의 program 처리는 모두 C 언어(일부는 기계어)로서 행하였다.

2.3 마멸분형태 파라미터의 정의

마멸분 화상에서 마멸분의 형태정보(형상, 크기분포, 입자수 및 색정보)를 실험조건에 따라 화상 처리한다. 이것은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 50% 체적경, 장단도, 복잡도 및 광택도의 4가지이며, 이의 정의는 다음과 같다.

첫째, 대표경(representative diameter) : 마멸분의 형상에 관계없이 그 면적의 평방근을 취한 것.

둘째, 장단도(aspect) : 각 마멸분에서 가장 긴 직경을 장경, 그것과 수직으로 교차하는 직경의 가장 긴것을 단경이라고 하였을 때 단경에 대한 장경의 비율.

셋째, 복잡도(roundness) : 마멸분이 원형에 가까운 정도를 나타내 주며, 이것은 식 (1)과 같이 정의 한다. 즉, 마멸분이 원형일때 가장 최소(약

4π)가 되고, 원형이 복잡하게 될수록 ψ값이 크다.

$$\psi = P^2 / 4\pi A \tag{1}$$

넷째, 광택도(reflectivity) : 마멸분으로부터 렌즈계로 향하여 정반사되는 빛의 백색 기준면의 gray level(200)에 대한 마멸분의 3색 gray level R, G, B의 gray level과의 비율로서, CCD카메라의 출력신호 D는 일반적으로 카메라에 입력하는 광량 E에 비례하지 않는다. 이것을 γ특성이라 하며, C와 γ를 상수로 하면 D=C·E^γ의 관계를 가진다. 본 연구에서 사용한 CCD 카메라의 γ는 0.57이다. 여기서, 명도를 정확히 구하기 위하여 3원색의 출력치 Dr, Dg, Db로부터 각 화소의 3색 gray level를 식 (2)로부터 구하였다.

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

여기서, Dro, Dgo, Dbo는 백색 기준면 (Ro=Go=Bo)에 대한 출력치이다. 광택도는 이렇게 구한 R, G, B 값의 평균치이다.

다섯째, 50% 체적경(50% Volumetric diameter) : 마멸분의 대표경의 분포로부터 구하였으며, 이것은 그 직경 이하의 직경을 가진 마멸분의 체적의 합계가 전체 마멸체적의 정확히 50%가 되는 직경.

이상의 각 실험조건은 모두 대물렌즈 40배로서 filter내의 50 화면에 포함되는 대표경 1.345 μm (10화소 이상)되는 마멸분 전체에 대하여 이들의 파라미터를 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 마찰조건에 따른 형태 파라미터의 특징

Table 1에는 본 연구를 통하여 계산한 3종류의 시험편 재료의 형태 파라미터, 즉 50% 체적경, 복잡도, 장단도 및 광택도의 마멸분 전체의 평균치를 표시한 것으로서 실험조건은 작용하중 5 kg, 미끄럼거리 말기인 156~234 m이다.

그리고 Fig. 4는 이들 값의 대소를 간략화하여 나타낸 선도이다. 이 그림에서 사각형의 형태가 재료에 따라 각각 다르기 때문에 각 data의 특징을 확실히 구별할 수 있다. 즉 SM45C의 경우는 마멸

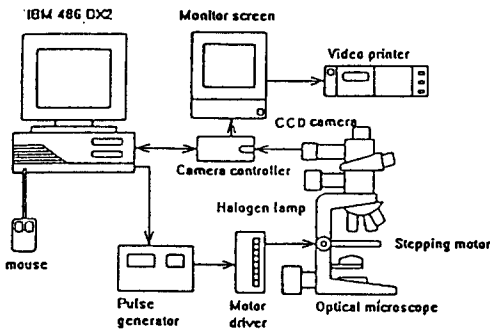


Fig. 2 Schematic diagram of image processing system

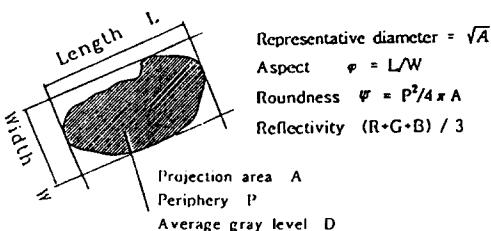


Fig. 3 Shape parameter of wear debris

Table 1 Average values of shape parameter Load ; 5 kg, Sliding distance ; 156 ~ 234 m

Material	SM45C	STS304	SKD11
50% Vol. dia	8.585	4.438	3.061
Roundness	1.474	1.359	1.210
Aspect	1.992	1.802	1.629
Reflectivity	0.251	0.406	0.354

입자가 크기를 나타내는 50% 체적경이 약 8.6 μm 정도이고, 복잡도와 장단도도 가장 큰 값을 가지는 것에서 마멸입자의 형상이 가늘고, 긴 형상을 나타내 주고, SKD11은 광택도를 제외한 3가지의 형태 파라미터 모두가 다른 두 재료보다 작다는 것에서 보면 입자크기가 현저하게 작고 둥근다는 것을 알 수 있다. 3가지 재료에서 SM45C의 마멸입자 크기가 가장 크게 나타나 있는 것은 이 재료의 조성변

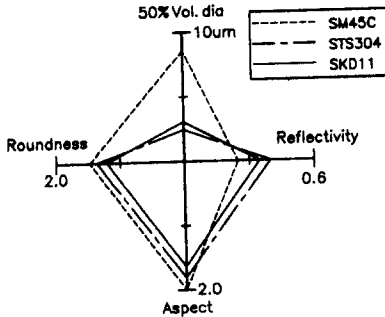


Fig. 4 Diagram of shape parameter

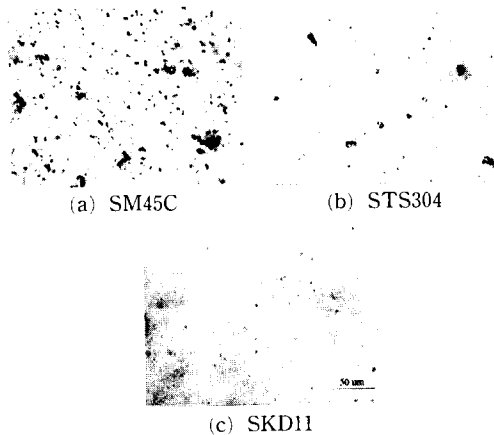


Fig. 5 Photo. of wear debris for specimen, Load:5 kg, Sliding distance : 156 ~ 234 m

형 정도가 가장 크다는 것을 보여 주고 있다고 생각된다. 그리고 특히 광택도의 경우, STS304가 가장 큰 값을 가지는 것은 두 시험편 재료에 비하여 STS304에 함유되어 있는 내식성 원소인 Cr (18%)으로 인하여 disk 시험편 표면의 산화 및 마찰시간의 증가에 따른 윤활유 자체의 산화열화로 인하여 발생하는 마멸분의 산화정도가 적기 때문이라고 생각된다.

Fig. 5에는 실험조건으로 접촉하중 5 kg, 미끄럼 거리 말기인 156 ~ 234 m 구간에서의 3종류의 시험편의 마멸분 형태의 사진을 나타낸 것이다. 그림에서 마멸분의 크기는 (a) SM45C가 가장 크고, 경도가 큰 (c) SKD11이 극단적으로 작다. 그리고 SM45C와 STS304의 마멸분은 그 형상이 대부분 괴상 또는 박편상이고, 그 색도 산화된 흑색이 대부분을 차지하고 있다. 또한 총 마멸입자 개수는 SM45C, STS304, SKD11 순으로 감소하며, 특히 SM45C의 마멸분은 20 μm 이상의 큰 입자와 좁고 긴 curl 모양의 연삭(abrasive) 마멸분도 볼 수 있다. 그리고 STS304의 경우는 다른 두 재료보다도 부분적으로 금속광택을 가진 마멸분도 부분적으로 볼 수 있고, SKD11의 경우는 가장 큰 마멸분도 수 μm 정도이고, 그 표면의 색은 갈색 또는 옅은 흑색을 가지고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에는 3가지의 재료 중에서 마멸분 수와 그 크기가 가장 작은 SKD11의 각 미끄럼거리에서의 작용하중의 변화에 따른 4가지 형태 파라미터를 나타낸 것으로서 이것은 각 sample에서 50화면의 전체 마멸분의 평균치를 구하여 표시한 것이다. 그림에서 각 미끄럼거리에 따른 하중의 변화는 단순하

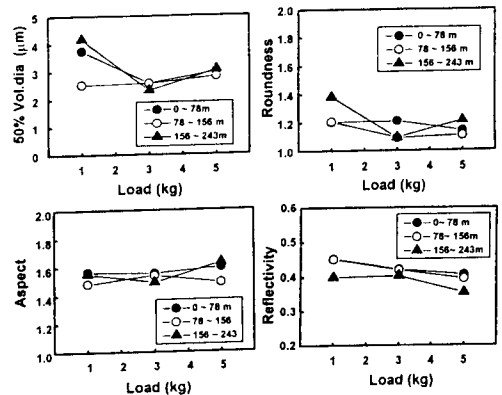


Fig. 6 Average value of shape parameter of total wear debris for SKD11

지는 않지만 작용하중의 증가와 함께 각 파라미터 모두 대체로 감소하는 경향을 가진다는 것을 알 수 있다. 그러나 장단도의 경우에는 그 변화가 크지 않는 것에서 보면 전술한 바와 같이 마멸입자의 형태가 다른 두 재료와 달리 원형에 가까운 형상을 가진다는 것을 나타내 주고 있다고 생각된다. 특히 50% 체적경과 광택도의 경우 각 미끄럼거리의 변화에 따라 대체로 감소하는 것은 마찰면의 변형과 산화의 진행을 나타내 주고 있다고 생각되고, 또한 본 연구에 사용한 윤활유인 무첨가 파라핀계 기유는 탄화수소의 혼합물⁽¹²⁾로서 마찰시간이 증가할수록 서서히 열화변질되어 초기의 윤활성능은 감소되고 마찰시간의 증가와 함께 산화반응이 조속히 진행되기 쉽다고 생각된다.

3.2 마멸분형태 파라미터 사이의 관계

마멸분입자의 형태 파라미터 사이의 특징을 보다 정량적으로 알기 위하여 작용하중 1 kg, 미끄럼거리 말기인 156~234 m의 경우 STS304 시험편의 50% 체적경과 광택도와의 관계를 마멸입자 총수에서 입자수 50개, 100개 및 200개 마다의 작은 집단으로 나눈 평균치를 Fig. 7에 나타내었다. 여기서 각 형태 파라미터의 값에서 마멸입자 50개와 100개 마다의 평균치의 갯수가 200개 마다의 평균치의 갯수 보다 너무 넓게 분포되어 각 작동조건에 따른 마멸분의 특징을 정확히 알기 어렵기 때문에 본 연

구에서는 마멸분 입자수 200개 마다의 평균치로 나타내는 것이 가장 그 특징을 잘 표현할 수 있다고 생각된다. 따라서 실제 기계윤활 운동면의 작동상태 진단에 이를 적용하기 위해서는 총 마멸입자를 구하여 이에 적합한 소집단으로 나누어 그 형태 파라미터의 특징을 구하는 것이 필요하다고 생각된다.

Fig. 8에는 작용하중 5 kg, 미끄럼거리 말기인 156~234 m에서의 3종류 시험편의 형태 파라미터인 광택도와 50% 체적경, 그리고 장단도와 복잡도 사이의 관계를 마멸분 입자 200개 마다의 평균치를 나타낸 것이다. 그림에서 (a) SM45C의 50% 체적경이 4~12 μm 정도로 (b) STS304와 (c) SKD11 보다 훨씬 크고, 그 분포범위가 넓게 나타나 있으며, 특히 (c) SKD11의 경우는 약 5 μm 이하의 체적경을 가진다는 것을 볼 수 있다. 또한 복잡도와 장단도도 대체로 50% 체적경과 유사한 경향을 나

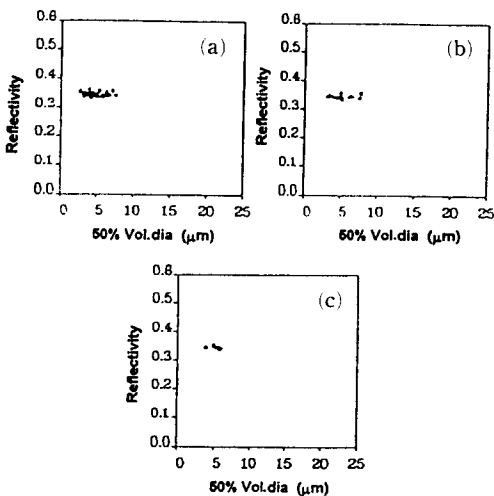


Fig. 7 Average value of shape parameter for STS304 in every (a) 100 and (c) 200 wear debris, sliding distance : 156~234 m

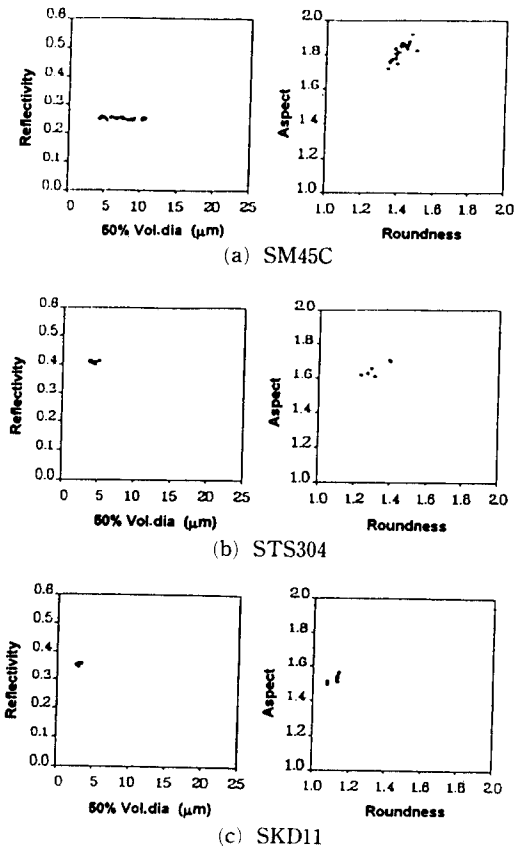


Fig. 8 Average value of shape parameter in every 200 wear debris, sliding distance : 156~234 m

타내고 있다. 그러나 광택도의 경우에는 (b) STS304가 0.4이상으로 SM45C와 SKD11 보다 더 큰 값을 가지고 있다는 것을 알 수 있다.

마멸분의 크기를 나타내는 50% 체적경이 SM45C의 경우가 다른 두 재료보다 더 크고, 그 분포범위가 넓게 나타나는 것은 SM45C가 다른 두 재료 보다 상대적으로 격렬한 소성변형이 더 심하게 진행되었기 때문이며, 이와같은 현상은 복잡도와 장단도에서도 역시 동일한 경향을 가진다고 생각된다. 그러나 광택도의 경우에는 역으로 STS304가 SM45C와 SKD11 보다 더 큰 값을 나타내고 있는 것은 STS304가 SM45C와 SKD11보다 미끄럼거리에 따른 산화반응속도가 늦어 산화되기 어려운 금속광택을 가진 마멸분이 부분적으로 생성되기 때문이라고 생각된다. 이상에서 SM45C의 마멸분과 같이 입자크기가 크고 또한 마멸분의 형상이 복잡해 질수록 광택도는 낮다는 사실에서 어두운 색상을 띤 마멸분이 산화된 것이라고 생각할 때 마멸입자가 클 수록 산화되기 쉽고, (5) 또한 광택도가 높다는 것은 마멸분이 얇은 박편상의 미세한 크기를 가진 금속광택을 띤 것이라는 사실을 나타내주고 있다고 생각된다.

Fig. 9는 STS304에서 작용하중 5 kg의 미끄럼거리 초기, 중기 및 말기에서 미끄럼거리의 증가에 따른 형태 파라미터의 관계를 나타낸 것이다. 미끄럼거리의 증가에 따라서 4가지 형태 파라미터는 대체로 감소하는 경향을 가지지만 특히 50% 체적경과 광택도는 그 감소경향이 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 STS304의 현미경조직이 상온에서 불안정한 오스테나이트(austenite) 조직이기 때문에 미끄럼거리의 증가함에 따라 반복되는 소성변형에 의한 가공경화가 진행^(13,14)된 결과라고 생각된다.

3.3 작동조건에 따른 추정 마멸체적

마멸분 형태정보에서 각 재료의 작용하중과 미끄럼거리에 따른 마멸체적의 추정치를 Fig. 10에 나타낸 것으로서 3종류 재료에서 작용하중 1 kg의 경우와 STS304는 작용하중 1 kg외에 3 kg과 5 kg에서의 각 미끄럼거리 초기, 중기 및 말기의 것이다. 여기서 추정 마멸체적의 계산은 마멸입자의 두께를 Fig. 3의 대표경과 대등하다고 가정하고, 마멸입자 면적에 이 대표경을 곱하여 총마멸체적을 추정하였다. 즉, 마멸분이 분포되어 있는 1화면내의 하나의 마멸입자 체적을 V_{ij} 라 하고, 1화면내의 입자갯수

를 n 으로 두었을때 50화면 전체의 총마멸체적 V_t 를 식 (3)으로 구했다.

$$V_t = \left(\sum_{i=1}^{50} \sum_{j=1}^n V_{ij} \right) \tag{3}$$

V_t 는 SKD11이 가장 적고, STS304는 SM45C

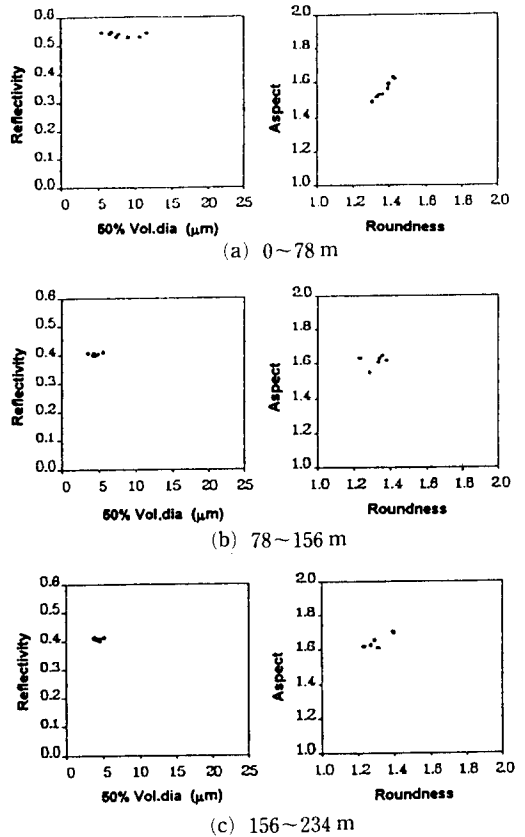


Fig. 9 Average value of shape parameter in every 200 wear debris for STS304, Load ; 5 kg

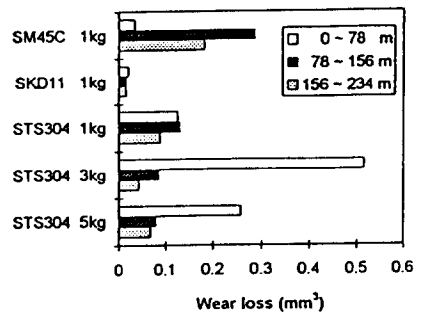


Fig. 10 Presumed wear loss

보다 다소 적다는 것을 알 수 있다. 그리고 미끄럼 거리가 증가함에 따라 SM45C와 SKD11에서는 V_L 가 대체로 증가하지만, 반대로 STS304는 작용하중이 3 kg과 5 kg에서 미끄럼거리의 증가와 함께 V_L 는 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 특히 작용하중이 3 kg 이상에서는 마멸률이 시간의 증가와 함께 중마멸(severe wear)에서 경마멸(mild wear)로 천이하는 마멸과정을 볼 수 있다. 이것은 전술한 바와같이 STS304는 마찰시간의 증가와 함께 가공경화의 영향이 현저하게 작용한 결과라고 생각된다.

본 실험에서 마멸체적의 추정치의 계산은 실험 완료 후의 disk 시험편을 감도 0.1 mg의 천칭으로 실험 전후의 중량감소량으로 측정하여 비교해 보았을 때 작동조건에 따라서 약간의 오차가 나타났지만 본 연구의 마멸량의 계산결과는 충분한 타당성을 가진다고 생각된다. 그러나 앞으로 다양한 작동조건과 기계요소 재료에 대하여 계속적으로 연구를 진행하여 다종다양한 마멸분 data의 축적으로 기계윤활 운동면의 작동상태 진단에 활용하고 싶다.

4. 결 론

기계윤활 운동면의 작동상태의 진단을 위하여 pin-on-disk형 윤활마찰 실험장치를 통한 마멸분 생성시의 작동조건, 즉 기계요소 재료, 작용하중 및 미끄럼거리의 변화에 따른 마멸분을 채취한 뒤 이를 화상처리하여 마멸분을 분류, 평가하고 해석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 기계윤활 운동면의 작동조건에 따른 마멸입자를 채취하고, 4가지 형태 파라미터를 이용하게 되면 이들 마멸분의 형태 특징의 식별이 가능하다.
- (2) 마멸분의 정확한 형태 파라미터의 식별을 위해 전체의 마멸분 중에서 마멸입자 200개 마다의 작은 집단으로 나누어 그 평균치를 이용하는 것이 해석능력이 향상된다.
- (3) 마멸입자의 50% 체적경은 SM45C, STS304, STD11의 순으로 작으며, 3종류 재료 모두 미끄럼거리의 증가에 따라 윤활면의 산화의 진행으로 광택도가 감소한다.
- (4) 화상해석을 통하여 실시간으로 기계윤활 운동면의 작동상태 진단이 가능하고, 윤활운동면을 구성하는 기계요소 재료의 마멸체적의 추정치 계산이 가능하였다.

참고문헌

- (1) Roylance, B. J. and Raadnu, S., 1994, "The Morphological Attributes of Wear Particles -their Role in Identifying Wear Mechanisms," *Wear*, 175, pp. 115~121.
- (2) Thomas, A. D. H., Davies, T. and Luxmoore, A. R., 1991, "Computer Image Analysis for Identification of Wear Particles," *Wear*, 142, pp. 213~226.
- (3) Sefert, W. W. and Westcott, V. C., 1972, "A Method for the Study of Wear Particles in Lubricating Oil," *Wear*, 21, pp. 27~42.
- (4) Shibata, M., 1994, "Tribological Characteristics and Diagnosis of Deteriorated Lubricating Oil," *JJST*, Vol. 39, No. 7, pp. 559~565.
- (5) 박홍식, 전태욱, 서영백, 김형자, 1996, "화상처리에 의한 기계윤활 운동면의 마멸분형태 해석," 한국윤활학회지, 제12권, 제3호, pp. 72~78.
- (6) 서영백, 박홍식, 전태욱, 1996, "기계윤활 운동면의 작동상태 진단을 위한 마멸분형태 해석" 대한기계학회 추계학술대회 논문집(A), pp. 1143~1148.
- (7) 八木伸行, 井上誠喜, 林正樹, 1992, C言語で學ぶ實戰画像處理, オム社, pp. 2~10.
- (8) 李忠雄, 1988, 画像工学, 集文堂, pp. 9~20.
- (9) 이양범, 강경일, 이용중, 1995, 화상처리 응용기술, 技文社, pp. 15~36.
- (10) Kirr, T. B., Panzera, D., Anamalay, R. V. and Xu, Z. L., 1995, "Computer Image Analysis of Wear Debris for Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis," *Wear*, 181, pp. 717~722.
- (11) Roylance, B. J., Albidewi, I. A. and Laghari, M. S., 1993, "Computer-aided Vision Engineering (CAVE)-Quantification of Wear Particle Morphology," *Lubr., Eng.*, 50, pp. 111~116.
- (12) Kimura, Y., 1994, "The Current State and Future Tasks of Maintenance Tribology," *JJST*, Vol. 39, No. 7, pp. 553~558.
- (13) 小川喜代一, 1981, 金屬の潤滑摩耗とその對策, 養賢堂, pp. 37~46.
- (14) Magee, J. H., 1995, "Wear of Stainless Steels," *ASM Handbook*, Vol. 18, pp. 710~724.