

기계윤활면의 작동상태 평가를 위한 마멸분 해석

Analysis of Wear Debris for Operating Condition Evaluation of Lubricated Machine Surface

서 영 백*(동아대 대학원) · 박 홍 식 · 전 태 옥(동아대) · 이 광 영(경상대)
Y. B. Seo · H. S. Park, T. O. Jun(Dong-A Univ.), · K. Y. Lee(KyungSang Univ.)

ABSTRACT

This paper was undertaken to analyze the morphology of wear debris for operating condition evaluation of lubricated machine surfaces. 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 was rubbed in paraffine series base oil, by varying specimen, applied load, sliding distance. The four shape parameters (50% volumetric diameter, aspect, roundness and reflectivity) to describe morphology of wear debris 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

Key Words : Wear Debris(마멸입자), Operating Condition(작동상태), Shape Parameters(형태파라미터) 50% volumetric diameter(50%체적경), Aspect(장단도), Roundness(복잡도), Reflectivity(광택도)

1. 서 론

각종 기계윤활면에서 발생하는 고장을 지배하는 요인은 대부분의 경우 그 윤활면내에서 발생하는 마멸분 때문에 기인하고 있으며, 이 마멸분의 형상은 기계구동계의 손상에 직접적인 관계를 가지고 있다.⁽¹⁾ 만약 이러한 마멸분의 관찰과 해석이 가능하게 되면 다찰면의 손상감지와 상태진단 그리고 나아가 그 윤활면의 마멸기구 해명에도 막대한 정보를 제공해 준다는 것은 충분히 인식되고 있다. 그럼에도 불구하고 현재까지 마멸분에 대한 취급은 아직 정성적인 범위를 벗어나지 못하고 있고, 또한 그 정보가 유효하게 활용되는 일은 적다.⁽²⁻⁴⁾ 이처럼 기계윤활면에서 발생하는 마멸분 data의 유효이용을 방해하고 있는 요인은 형태와 크기가 천차만별한 입자의 특징을 정리하는 기술적인 방법이 아직 확립되어 있지 않기 때문이라고 생각된다.

최근 컴퓨터의 memory의 확장에 따라 발전하고 있는 화상처리 기술은 패턴검사 및 문자판독에 널리 이용되고 있고⁽⁵⁻⁷⁾, 또한 기계윤활면의 작동상태 monitoring과 손상감지 및 상태진단에도 활용하려는 시도가 진행되고 있다.⁽⁸⁻⁹⁾ Roylance⁽¹⁾는 마멸분 화상해석의 자동화와 그것에 기초한 작동상태 진단에 관한 연구를 진행하였지만, 정상마멸, severe 마멸, abrasive 마멸 등의 마멸형태의 범주로서 마멸분의 화상 parameter의 값 범위를 나타내는데 지나기 않고 있다. 이처럼 기계윤활면에서 발생하는 마멸분의 형태정보와 이에 대한 해석을 기계의 작동상태 평가기술로 발전시키기 위해서는 전술한 바와같이 윤활면에서 발생하는 마멸분 형태의 분류 뿐만 아니라 윤활면 마멸의 진행상황과 표면생성물 등 마멸분 data정보를 상세히 조사하여 기계의 작동상태의 이상여부에 대한 감지가 우선되어야 한다고 생각

된다.

따라서 본 연구에서는 기계윤활면에서 발생하는 마멸분을 정량적으로 해석하기 위하여 우선 기계윤활면을 모의한 pin on disc 윤활마찰,마멸실험으로 부터 발생하는 마멸분을 채취할 수 있는 방법을 구축한 뒤, 컴퓨터 화상처리 시스템을 이용하여 마멸분의 형태를 해석하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험방법

2.1 윤활마찰실험

본 연구에 사용한 실험재료로서 pin 시험편은 직경 5.0mm의 베어링鋼球 STB2 (780Hv)을, disk 시험편으로 경도가 다른 3종류의 강, SM45C (200Hv), STS304(190Hv) 및 SKD11(720Hv)을 사용하였다. disk의 형상은 직경 50mm, 두께 10mm이고, 이를 emery paper #1200으로 정밀 연마하여 그 표면조

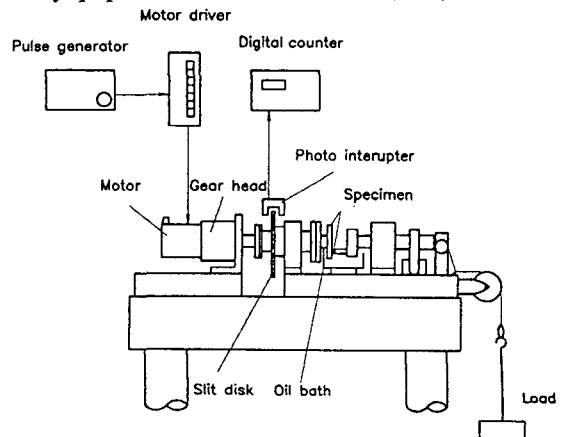


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

도를 $0.2\mu\text{m}R_{\text{max}}$ 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 윤활마찰 실험하였으며, 이것은 회전하는 disk 시험편에 베어링 강구를 압착시켜 마찰하는 것으로 이의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 처럼 모터는 무접점 속도제어 모터로서 여기에 감속기어를 부착시켜 그 미끄럼속도를 6.28mm/sec로 일정하게 하였고, 접촉하중은 1kg, 3kg 및 5kg으로 그리고 미끄럼거리는 이를 세분화하여 0~78m, 78~156m 및 156~234m를 미끄럼거리 초기, 중기 및 말기로 구분하여 이들의 마멸분을 채취하였다. 그리고 윤활장치부에는 시험편 접촉점 하부에 oil bath를 설치하고 윤활유 공급은 순환펌프로써 silicon tube를 통하여 시험편 접촉점에 滴下시켰으며, pin 시험편은 piano선을이용하여 사하중을 걸어 disk에 가압하였다. 그리고 마멸분은 oil bath내의 윤활유로부터 孔徑 $0.45\mu\text{m}$ 의 membrane filter가 부착된 윤활유채취기구를 통하여 마멸분을 채취하였다.

2.2 화상처리시스템

실험조건 별로 채취한 마멸분을 해석하기 위한 화상처리 시스템의 개략도를 Fig.2에 나타내었다. 광학현미경은 투과조명 및 낙사조명의 2가지 할로겐램

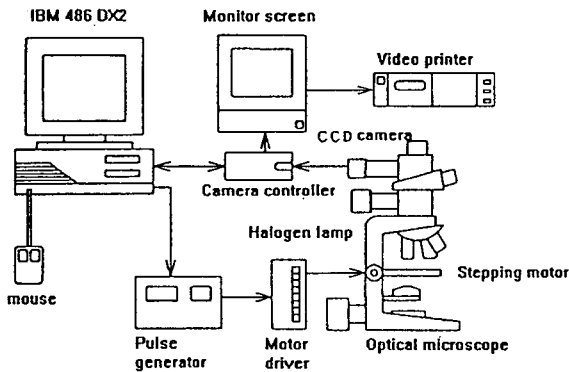


Fig. 2 Schematic diagram of image processing system.

프를 가지며 관측된 화상은 상부의 color CCD카메라에 의하여 PC의 frame grabber에 저장된다. 본 연구에 사용한 frame grabber는 畫素數 640x480, 화소당 분해능은 RGB 각 8 bit (256 grey level)이고, 정방형 1 화소(pixel)의 길이는 $0.426\mu\text{m}$ 이다. 그리고 화상처리 시스템의 운용 program을 통하여 채취한 마멸분의 형태정보(둘레, 면적, 형상, 크기분포, 입자수 및 색정보)을 얻었으며, frame grabber의 제어 및 이의 program처리는 모두 自作의 C 언어(일부는 기계어)로써 행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 마멸분 형태 parameter

마멸분 화상에서 마멸분의 형태정보(형상, 크기분포, 입자수 및 색정보)를 실험조건에 따라 화상처리한다. 이것은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 50%體積徑, 長短度, 複雜度 및 光澤度の 4가지이며, 이의 정의는 다음과 같다.

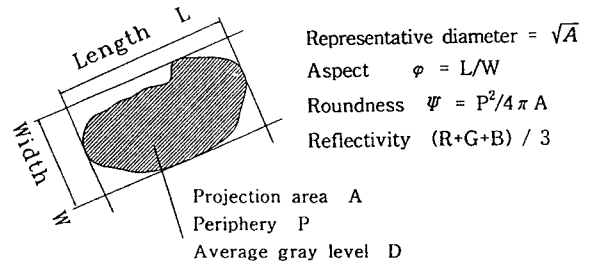


Fig. 3 Shape parameter of wear debris.

- a) 代表徑(Representative diameter) : 마멸분의 형상에 관계없이 그 면적의 평방근을 취한 것
- b) 長短度(Aspect) : 각 마멸분에서 가장 긴 직경을 長徑, 그것과 수직으로 교차하는 직경의 가장 긴 것을 短徑이라고 하였을 때 단경에 대한 장경의 비율.

- c) 複雜度(Roundness) : 마멸분이 원형에 가까운 정도를 나타내 주며, 이것은 식 (1)과 같이 정의한다. 즉, 마멸분이 원형일때 가장 최소(약 4π)가 되고, 원형이 복잡하게 될 수록 ψ 값이 크게 된다.

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

- d) 光澤度(Reflectivity) : 마멸분으로부터 렌즈계로 향하여 정반사되는 빛의 백색 기준면의 grey level(200)에 대한 마멸분의 3色 grey level R (red), G(green), B(blue)의 평균값이다.

- e) 50%體積徑(50% Volumetric diameter) : 마멸분의 대표경의 분포로부터 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 $1.345\mu\text{m}$ (10 화소이상)되는 마멸분 전체에 대하여 이들의 parameter를 계산하였다.

3.2 마찰조건에 따른 형태 parameter의 특징

Table 2에는 본 연구를 통하여 계산한 3종류의 시험편 재료의 형태 parameter 즉, 50%체적경, 복잡도, 장단도 및 광택도의 마멸분 전체의 평균치를 표시한 것으로써 실험조건은 작용하중 5kg, 미끄럼거리 말기인 156~234m이다. 그리고 Fig. 4는 이들 값의 대소를 간략화하여 나타낸 선도이다. 이 그림

에서 사각형의 형태가 재료에 따라 각각 다르기 때문에 각 data의 특징을 확실히 구별할 수 있다. 즉 SM45C의 경우는 마멸입자가 크고, 가늘고 긴 형상을, SKD11은 3가지의 형태 parameter 모두가 다

Table 2. Average values of shape parameter
Load ; 5kg, Sliding distance; 156~234m

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

른 두 재료보다 작다는 것에서 보면 입자 크기가 현저하게 작고 둥근다는 것을 알 수 있다. 그리고 특히 광택도의 경우에는 STS304가 SM45C와 SKD 11 보다 더 큰 값을 가진다는 것을 볼 수 있다. 이것은 STS304에 함유되어 있는 내식성 원소인 Cr의 영향이 지배적으로 작용하기 때문이라고 생각된다.

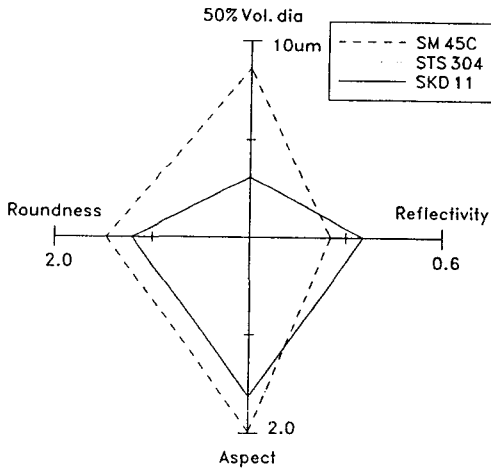


Fig. 4 Diagram of shape parameter.

Fig. 5에는 실험조건으로 접촉하중 5kg, 미끄럼거리 초기인 0~78m 구간에서의 3종류의 시험편의 마멸분의 사진을 나타낸 것이다. 그림에서 마멸분의 크기는 (a) SM45C가 가장 크고, 경도가 큰 (c) SKD11이 극단적으로 작다. SM45C와 STS304의 마멸분은 그 형상이 대부분 塊狀 또는 薄片狀이고, 그 색도 산화된 흑색이 대부분을 차지하고 있다. 특히 SM45C의 마멸분은 10 μ m 이상의 큰 입자와 좁고 긴 curl 모양의 연삭(abrasive) 마멸분도 볼 수 있다. 그리고 STS304의 경우는 다른 두 재료에 비하여 금속광택을 가진 마멸분을 볼 수 있다.

Fig. 6에는 SKD11의 각 미끄럼거리에서의 작용하중의 변화에 따른 4가지 형태 parameter를 나타낸 것으로써 이것은 각 sample에서 50화면의 전 마멸분의 평균치를 구하여 표시한 것이다. 그림에서 각

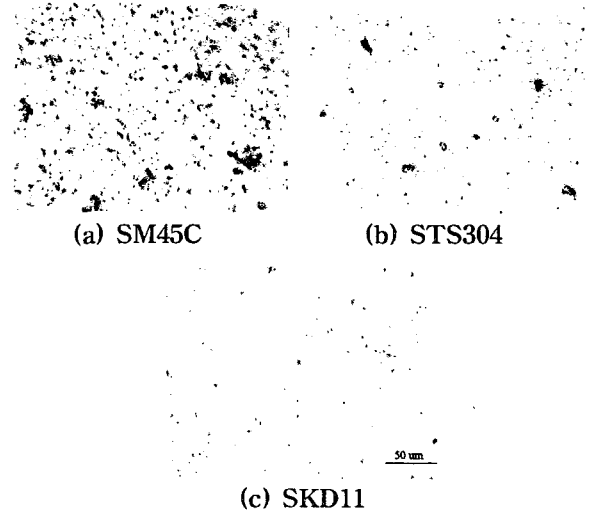


Fig. 5 Photo. of wear debris for specimen,
Load: 5kg, Sliding distance: 0~78m.

미끄럼거리에 따른 하중의 변화는 단순하지는 않지만 작용하중의 증가와 함께 각 parameter 모두 대체로 감소하는 경향을 가진다는 것을 알 수 있다. 그리고 50%체적경과 광택도가 미끄럼거리에 따라 현저히 감소하는 것은 마찰면의 변형과 산화의 진행을 나타내 주고 있다고 생각되고, 또한 본 연구에 사용한 윤활유인 무첨가 파라핀계 基油는 탄화수소의 혼합물⁽⁵⁾로서 시간이 증가할 수록 서서히 열화 변질되어 초기의 윤활성능은 감소되고 마찰시간의 증가와 함께 산화반응이 조속히 진행되기 쉽다고 생각된다.

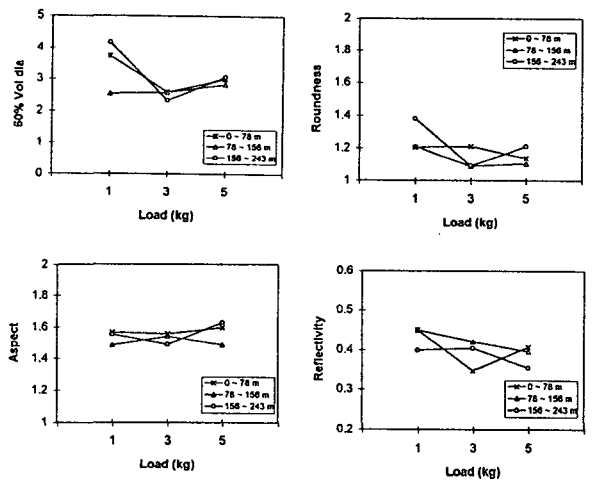


Fig. 6 Average value of shape parameter of total wear debris for SKD11

3.3 마멸분 형태 parameter 사이의 관계

Fig. 7에는 마멸분 입자의 형태 parameter 사이의 특징을 알기 위하여 작용하중 1kg, 미끄럼거리 말기인 156~234m의 경우 STS304 시험편의 장단도와 복잡도와의 관계를 마멸입자 총수에서 입자수 50개, 100개 및 200개 마다의 작은 집단으로 나눈 평균치를 나타내었다. 여기서 각 형태 parameter의 값에서 마멸분입자 50개와 100개 마다의 평균치 값은 마멸분 입자 200개 마다의 평균치값 보다 형태 parameter의 값이 너무 분산되어 각 작동조건에 따른

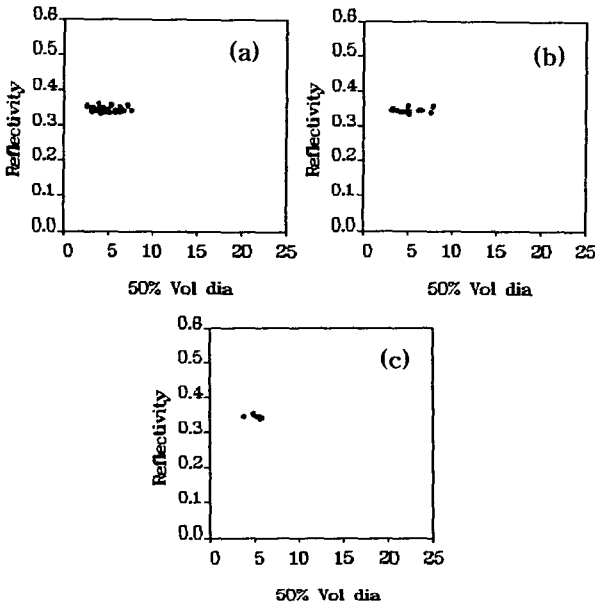


Fig. 7 Average value of shape parameter for STS304 in every (a)50 (b)100 and (c)200 wear debris, sliding distance: 156~234m.

마멸분의 특징을 정확히 알기 어렵기 때문에 본 연구에서는 마멸분 입자수 200개 마다의 평균치로 나타내는 것이 가장 그 특징을 잘 표현할 수 있다고 생각된다.

Fig. 8에는 작용하중 5kg, 미끄럼거리 말기인 156~234m에서의 3종류 시험편의 형태 parameter인 광택도와 50%체적경, 그리고 장단도와 복잡도 사이의 관계를 마멸분 입자 200개 마다의 평균치를 나타낸 것이다. 그림에서 (a)SM45C의 50%체적경이 4~14 μ m 정도로 (b)STS304와 (c) SKD11보다 훨씬 크고, 그 분산정도가 넓게 나타나 있으며 특히 (c) SKD11의 경우는 약 4 μ m이하의 체적경을 가진다는 것을 볼 수 있다. 또한 복잡도와 장단도도 대체로 50% 체적경과 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나 광택도의 경우에는 (b)인 STS304가 0.4 이상으로 SM45C와 SKD11 보다 더 큰 값을 가지고 있다는 것을 알 수 있다.

마멸분의 크기를 나타내는 50% 체적경이 SM45C의 경우가 다른 두 재료 보다 더 크고, 그 분산정도

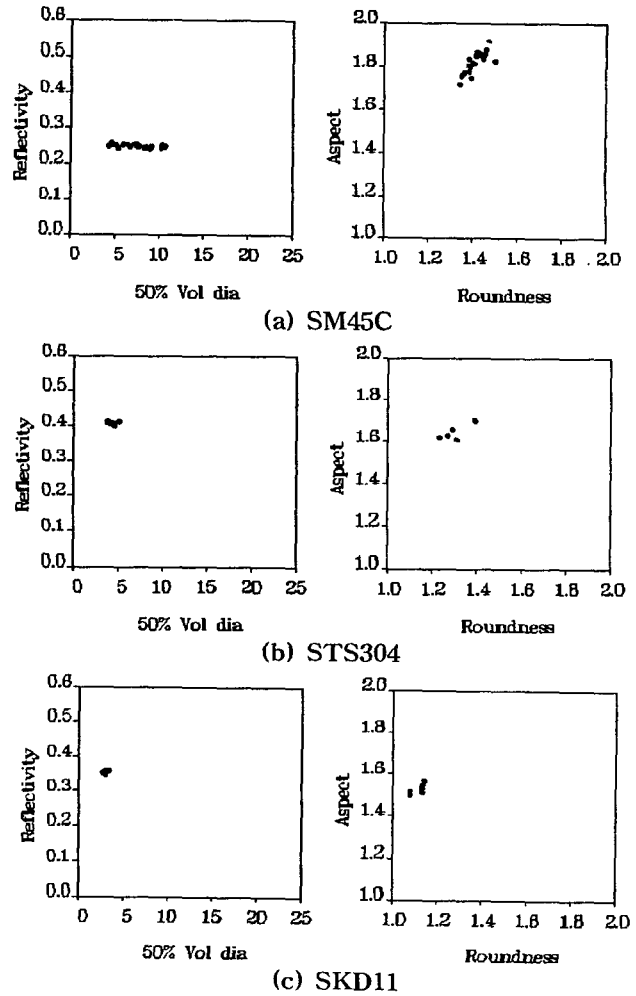
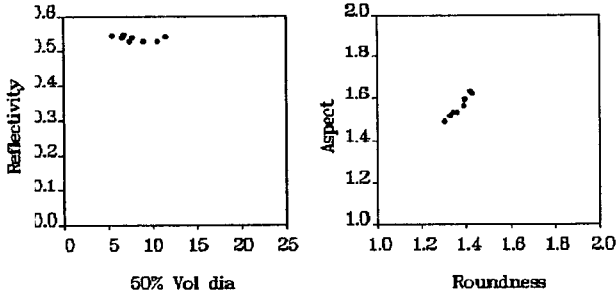


Fig. 8 Average value of shape parameter in every 200 wear debris, sliding distance : 156~234m.

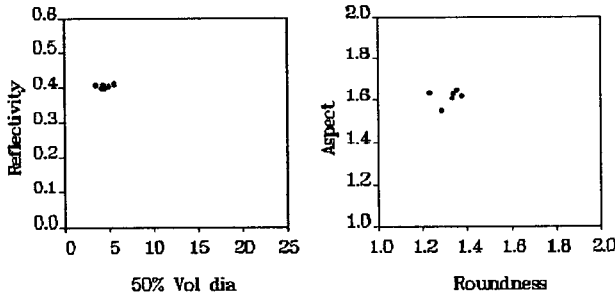
가 넓게 나타나는 것은 SM45C가 다른 두 재료 보다 상대적으로 격렬한 소성변형이 더 심하게 진행되었기 때문이며, 이와같은 현상은 복잡도와 장단도에 서로 역시 동일한 경향을 가진다고 생각된다. 그러나 광택도의 경우에는 역으로 STS304가 SM45C와 SKD11 보다 더 큰 값을 나타내고 있는 것은 STS304가 SM45C와 SKD11보다 미끄럼거리에 따른 산화반응 속도가 늦어 산화되기 어려운 금속광택을 가진 마멸분이 주로 생성되기 때문이라고 생각된다. 이상에서 SM45C의 마멸분과 같이 입자 크기가 크고 또한 마멸분의 형상이 복잡해질수록 광택도는 낮다는 사실에서 어두운 색상을 띤 마멸분이 산화된 것이라고 생각할 때 마멸입자가 클수록 산화되기 쉽고⁽¹⁰⁾, 또한 광택도가 높다는 것은 마멸분이 얇은 박편상의 미세한 크기를 가진 금속광택을 띤 것이라는 사실을 나타내 주고 있다고 생각된다.

Fig.9는 STS304에서 작용하중 5kg의 미끄럼거리 초기, 중기 및 말기에서 미끄럼거리의 증가에 따른 형태 parameter의 관계를 나타낸 것이다. 미끄럼거

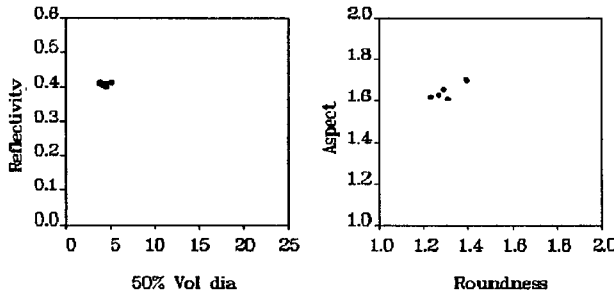
리의 증가에 따라서 4가지 형태 parameter 는 대체로 감소하는 경향을 가지지만 특히 50%체적경과 광택도는 그 감소경향이 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 STS304의 현미경조직이 오스테나이트이기 때문에 미끄럼거리의 증가에 따른 소성변형에 의한 가공경화가 진행된 결과라고 생각된다.



(a) 0~78m



(b) 78~156m



(c) 156~234m

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

Fig. 10에는 마멸분 형태정보에서 각 시험편 재료의 작용하중과 미끄럼거리에 따른 마멸체적의 추정치를 나타낸 것으로서 3종류 시험편에서 작용하중 1kg의 경우와 STS304는 작용하중 1kg외에 3kg과 5kg에서의 각 미끄럼거리 초기, 중기 및 말기의 것이다. 여기서 추정 마멸체적의 계산은 마멸분의 두께를 Fig. 3의 폭 대표경과 대등하다고 가정하고, 마멸분 면적에 이 대표경을 곱하여 총마멸체적을 추정하였다. 마멸체적은 SKD11이 가장 적고, STS 304는 SM45C 보다 다소 적다는 것을 알 수 있다. 그리고 특히 STS304는 작용하중이 3kg과 5kg에서

미끄럼거리의 증가와 함께 마멸체적은 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 전술한 바와같이 STS 304는 마찰시간의 증가와 함께 가공경화의 영향이 현저하게 작용한 결과라고 생각된다.

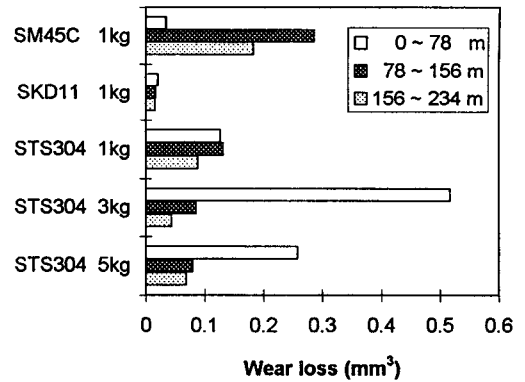


Fig. 10 Presumed wear loss.

4. 결 론

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

1. 기계윤활면의 작동중의 윤활유로부터 마멸입자를 채취할 수 있는 마멸분 채취 방법의 실용화가 가능하였다.
2. 마멸분의 정확한 형태 parameter의 식별을 위해서 마멸분 입자 200개 마다의 작은 집단으로 나누어 그 평균치를 이용하는 것이 식별능력이 향상된다.
3. 3종류의 시험편 모두 미끄럼거리의 증가에 따라 마찰면의 산화의 진행으로 광택도가 감소가 현저하다.
4. 윤활운동면의 작동조건에 따른 마멸분 형태 parameter를 정의하고 이의 특징을 비교 및 평가하고 또한 마멸체적의 추정치를 계산할 수 있는 program을 구축하였다.

참고문헌

- (1) B.J. Roylance and S. Raadnu, 1994, "The Morphological Attributes of Wear Particles-Their Role in Identifying Wear Mechanisms", *Wear*, 175, pp. 115~121.
- (2) A.D.H. Thomas, T.Davies and A. R. Luxmoore, 1991, "Computer Image Analysis for Identification of Wear Particles", *Wear*, 142, pp. 213~226.
- (3) W. W. Seferit and V. C. Westcott, 1972, "A Method for the Study of Wear Particles in Lubricating Oil", *Wear*, 21, pp. 27~42.
- (4) 변이하 생각