

윤활운동면의 작동조건에 따른 마멸분 화상해석

서 영 백*, 박 흥 식**, 전 태 옥**, 이 광 영***

Image Analysis of Wear Debris on Operating Condition of the Lubricated Moving Surface

Y. B. Seo*, H. S. Park**, T. O. Jun**, K. Y. Lee***

ABSTRACT

This paper was undertaken to do image analysis of wear debris on operating condition of the lubricated moving surfaces. The lubricating wear test was performed 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 materials, varying applied load, sliding distance.

The four shape parameters (50% volumetric diameter, aspect, roundness and reflectivity) to describe 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 for machine condition monitoring, thus to overcome many of the difficulties with current methods and facilitating wider use of wear particle analysis in machine condition monitoring.

Key Words : Wear Debris(마멸분), Image Analysis(화상해석), 50% Volumetric Diameter(50%체적경), Aspect(장단도), Roundness (복잡도), Reflectivity(광택도)

1. 서론

각종 기계구동계의 윤활운동면에서 발생하는 고장을 지배하는 요인은 대부분의 경우 그 윤활운동면에서 발생하는 마멸분에 기인하고 있으며, 이 마멸분의 형상은 그 구동계의 손상에 직접적인 관계를 가지고 있다.⁽¹⁾ 만약 이러한 마멸분의 관찰과 해석이 가능하게 되면 마찰면의 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.

* 동아대학교 대학원
 ** 동아대학교 기계공학과
 *** 경상대학교 선박기계공학과

최근 컴퓨터의 memory의 확장에 따라 발전하고 있는 화상처리 기술은 패턴검사 및 문자판독에 널리 이용되고 있고⁽⁵⁻⁷⁾, 또한 기계운행 운동면의 작동상태 monitoring 과 손상감지 및 상태진단에도 활용하려는 시도가 진행되고 있다.⁽⁸⁻⁹⁾ 그러나 현재까지의 화상처리의 이용은 마멸분의 형태 및 특징 분석에만 국한되어 이용되고 있을 뿐이고, 이 분석 data로 마멸분의 형태 parameter를 구하고 이를 통하여 작동조건에 따른 마멸분 해석을 통하여 그 유회운동면의 작동상태의 이상여부를 판정하고자 하는 시도는 아직 이루어지지 않고 있다. 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 지나지 않고 있다.

한편 응용기술로서 실용화하고 있는 ferrography에 있어서도 분석 결과로부터 작동상태의 이상유무를 판정하기 위해서는 대상으로 하는 기계운행 구동계를 숙지한 담당자의 풍부한 경험과 느낌이 더욱 절실히 요구되고 있다.⁽¹⁰⁾

이처럼 유회운동면에서 발생하는 마멸분의 정량적인 형태정보와 이에 대한 해석을 기계구동계의 작동상태 판정에 이용하기 위해서는 전술한 바와같이 유회운동면에서 발생하는 마멸분 형태의 분류 뿐만 아니라 마멸분 data 정보를 상세히 조사하기 위하여 새로운 화상해석 기법을 도입할 필요성이 있다고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 기계구동계의 유회운동면에서 발생하는 마멸분을 정량적으로 해석하기 위하여 우선 기계 유회운동면을 모의한 pin on disc 유회실험으로부터 발생하는 마멸분을 채취할 수 있는 방법을 구축한 뒤, 이 마멸분의 해석을 위하여 컴퓨터 화상처리 기법을 이용하여 마멸분 생성시의 작동조건으로부터 마멸분 형태 parameter(50%체적경, 장단도, 복잡도 및 광택도)를 분류, 평가할 수 있는 program으로 마멸분 해석을 행하고자 하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험방법

2.1 유회마찰실험

본 연구에 사용한 실험재료로서 pin 시험편은 직경 5.0mm의 베어링鋼球 STB2(780 Hv)를, disk 시험편으로 경도가 다른 3 종류의 강, SM45C (200 Hv), STS304(190 Hv) 및 SKD11(720 Hv)을 사용하였다.

disk의 형상은 직경 50mm, 두께 10mm이고, 이를 emery paper #1200으로 정밀 연마하여 그 표면조도를 0.2 μ mRmax로 일정하게 하였다. 그리고 실험에 사용한 유회유는 무침가 파라핀(paraffine)계 광유(8.2cSt @40 $^{\circ}$ C)를 사용하였다.

실험장치는 pin on disk형 마찰·마멸시험기에 의하여 유회마찰 실험하였으며, 이것은 회전하는 disk 시험편에 베어링 강구를 압착시켜 마찰하는 것으로 이의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

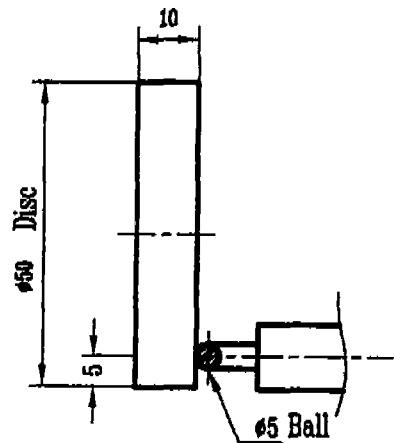


Fig. 1 Schematic diagram of pin on disk specimen

마찰·마멸시험기의 모터는 무점점 속도제어 모터로서 여기에 감속기어를 부착시켜 그 미끄럼속도를 6.28 mm/sec로 일정하게 하였고, 접촉하중은 Table 1에서 보는 바와같이 1kg에서 부터 5kg까지 3단계로 설정하였다. 또한 미끄럼거리는 3종류 시험편 모두 0~234m까지로 일정하게 하고, 이를 세분화하여 0~78m, 78~156m 및 156~234m를 미끄럼거리 초기, 중기 및 말기로 구분하여 이들의 마멸분을 채취하였다. 그리고 유회장치부에는 시험편 접촉점 하부에 oil bath를 설치하고 유회유 공급은 순환펌프로써 silicon tube를 통하여 시험편 접촉점에 滴下시켰으며, pin 시험편은 piano선을 이용하

Table 1. Experimental condition

Disk	Load (kg)	Sliding distance (m)
SM45C	1, 3, 5	78, 156, 234
STS304	1, 3, 5	78, 156, 234
SKD11	1, 3, 5	78, 156, 234

여 사하중을 걸어 disk에 가압하였다. 그리고 마멸분은 oil bath내의 윤활유로 부터 孔径 0.45 μ m의 membrane filter가 부착된 윤활유 채취기구를 통하여 마멸분을 채취 하였다.

2.2 화상처리시스템

실험조건 별로 채취한 마멸분을 해석하기 위한 화상처리 시스템의 개략도를 Fig.2에 나타내었다.

광학현미경은 투과조명 및 낙사조명의 2가지 할로겐램프를 가지며 관측된 화상은 상부의 color CCD카메라에 의하여 PC의 frame grabber에 저장된다.

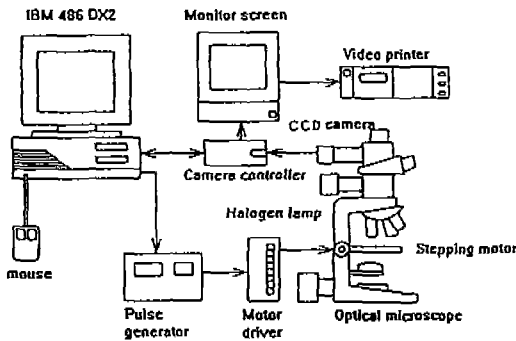


Fig. 2 Schematic diagram of image processing system

본 연구에 사용한 frame grabber는 畫素數 640 x480, 화소당 분해능은 RGB 각 8 bit (256 grey level)이고, 정방향 1 화소(pixel)의 길이는 0.426 μ m이다. 이것은 마멸분 채취부분의 filter 직경이 35mm인 것을 고려하면 모니터 1 화면의 면적은 filter의 17,302분의 1이 된다. 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 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 화상처리 한다. 이것은 Fig.3에 나타낸 바와 같이 50%體積徑, 長短度, 複雜度 및 光澤度의 4가지이며, 이의 정의는 다음과 같다.

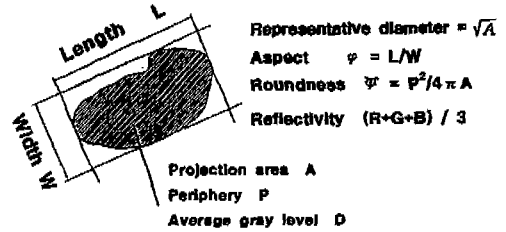


Fig. 3 Shape parameter of wear debris

a) 대표경(Representative diameter) : 마멸분의 형상에 관계없이 그 면적의 평방근을 취한 것

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

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

d) 광택도(Reflectivity) : 마멸분으로 부터 렌즈계로 향하여 정반사되는 빛의 백색 기준면의 grey level(200)에 대한 마멸분의 3色 grey level R(red), G(green), B(blue) grey level과의 평균값이다.

e) 50%체적경(50% Volumetric diameter) : 여기서 50%체적경은 마멸분의 대표경의 분포로부터 구하였으며, 이것은 그 직경 이하의 徑을 가진 마멸분의 체적의 합계가 총마멸체적의 정확히 50%가 되는 직경.

이상의 각 실험조건은 모두 대물렌즈 40배로서 filter 내의 50 화면에 포함되는 대표경 1.345 μ m(10화소 이상) 되는 마멸분 전체에 대하여 이들의 parameter를 계산하였다.

3.2 마찰조건에 따른 형태 parameter의 특징

Fig.4는 작용하중이 5kg, 미끄럼거리를 초기인 (a)0~98m, 말기인 (b)156~234m에서의 3종류 시험편 재료의 마멸분 전체의 평균치를 4 가지 형태 parameter 즉, 50%체적경, 복잡도, 장단도 및 광택도의 대소를 간략화하여 나타낸 선도이다. 이 그림에서 사각형의 형태가 재료와 미끄럼거리에 따라 각각 다르기 때문에 작동조건에 따른 마멸분 data의 특징을 확실히 구별할 수 있다고 생각된다. 즉 재료에 따른 특징에서 미끄럼거리 초기인

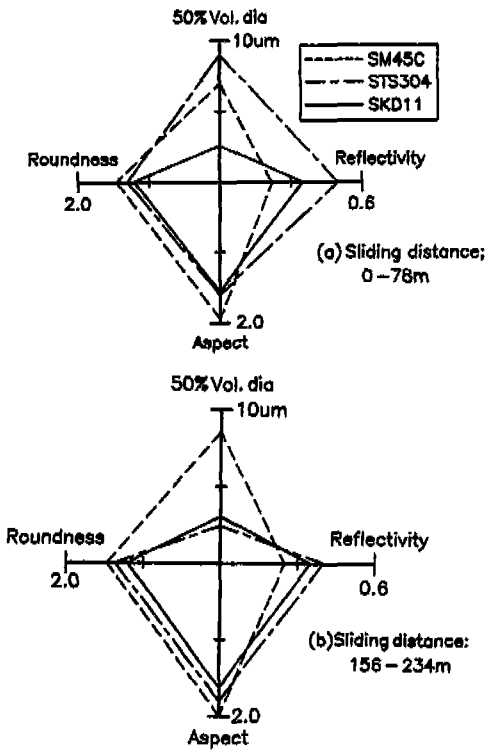


Fig. 4 Diagram of shape parameter, Load : 5Kg

(a)에서는 STS304의 경우가 마멸입자의 크기를 나타내는 50%체적경이 가장 크고 다음으로 SM45C가 크며, 복잡도와 장단도에서 SM45C가 다른 2종류의 재료보다 큰 값을 가진다는 것에서 보면 마멸분 형상이 가늘고 긴 특징을 가진다는 것을 알 수 있다. 그러나 SKD11은 광택도를 제외한 3가지의 형태 parameter에서 다른 두 재료 보다 작기 때문에 입자 크기가 현저하게 작고 둥근다는 것을 나타내 주고 있다고 생각된다. 그리고 미끄럼거리 말기인 (b)에서 SM45C의 경우는 마멸분 크기가 미끄럼거리 초기인 (a)와 대체로 유사한 값을 가지지만, STS304의 경우는 미끄럼거리의 증가에 따라 특히 마멸분의 크기가 현저히 작아지고 있다는 것을 볼 수 있다. 이것은 STS304의 현미경조직이 오스테나이트이기 때문에 미끄럼거리의 증가에 따른 소성변형에 의한 가공경화가 진행된 결과라고 생각된다. 그리고 광택도의 경우에서 보면 미끄럼거리 초기와 말기 모두 SM45C가 가장 낮고, STS304가 가장 큰 값을 가진다는 것에서 SM45C의 산화반응 속도가 가장 크다는 것을 나타내 주고 있으며, STS304의 경우는 STS304에 함유되어 있는 내식성 원소인 Cr의 영향이 지배적으로 작용

하기 때문이라고 생각된다.

따라서 본 연구를 통하여 채취한 마멸분의 수가 그 集團의 특성을 대표하는데 충분한 수였다고 가정하면 Fig.4의 마멸분 패턴의 차이에 의한 특징을 충분히 식별할 수 있다고 생각된다.

Fig. 5에는 실험조건으로 접촉하중 5kg, 미끄럼거리 말기인 156~234m 구간에서 3종류의 시험편의 마멸분 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 큰입자와 좁고 긴 curl 모양의 연삭(abrasive) 마멸분도 볼 수 있다. 그리고 STS304의 경우는 다른 두 재료에 비하여 금속광택을 가진 마멸분을 볼 수 있다. 한편 SKD11의 마멸분은 그 수가 적고 크기도 전반적으로 작으며 가장 큰 마멸분도 수 μ m 정도이고, 그 표면의 색은 갈색 또는 옅은 흑색을 가지고 있었다.

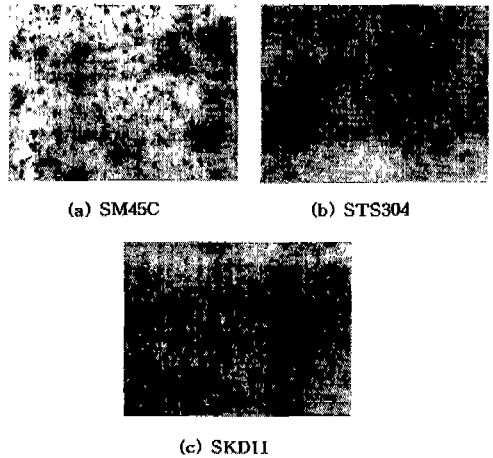


Fig. 5 Photo. of wear debris for specimen, Load: 5Kg, Sliding distance: 156~234m

Fig. 6에는 SKD11의 각 미끄럼거리에서의 작용하중 변화에 따른 4 가지 형태 parameter를 나타낸 것으로써 이것은 각 sample에서 50화면의 전 마멸분의 평균치를 구하여 표시한 것이다. 그림에서 각 미끄럼거리에 따른 하중의 변화는 단순하지는 않지만 작용하중의 증가와 함께 각 parameter 모두 대체로 감소하는 경향을 가진다는 것을 알 수 있다.

그러나 장단도의 경우는 그 변화가 크지 않는 것에서

보면 SKD11의 경우에는 마멸입자의 형태가 다른 두 재료와는 달리 원형에 가까운 형상을 가진다는 것을 알 수 있다. 특히 50%체적경과 광택도가 미끄럼거리에 따라 현저히 감소하는 것은 마찰면의 변형과 산화의 진행을 나타내 주고 있다고 생각되고, 또한 본 연구에 사용한 윤활유인 무침가 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.

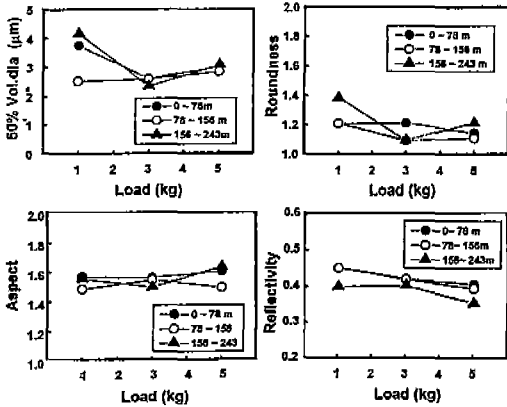


Fig. 6 Average value of shape parameter of total wear debris for SKD11

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 50%체적경과 광택도와와의 관계를 마멸입자 총수에서 입자수 50개, 100개 및 200개 마다의 작은 집단으로 나눈 평균치를 나타내었다. 여기서 각 형태 parameter의 값에서 마멸입자 50개와 100개 마다의 평균치 값은 마멸입자 200개 마다의 평균치 값 보다 형태 parameter의 값이 너무 분산되어 각 작동조건에 따른 마멸분의 특징을 정확히 알기 어렵기 때문에 본 연구에서는 마멸분 입자수 200개 마다의 평균치로 나타내는 것이 가장 그 특징을 잘 표현할 수 있다고 생각된다. 그러나 윤활운동면의 작동조건에 따른 마멸분의 해석에 이를 적용하기 위해서는 실제 기계구동계의 작동조건에 따른 총 마멸입자를 구하여 이에 적합한 작은 집단으로 나누어 그 형태 parameter의 특징을 구하는 것이 필요하다고 생각된다.

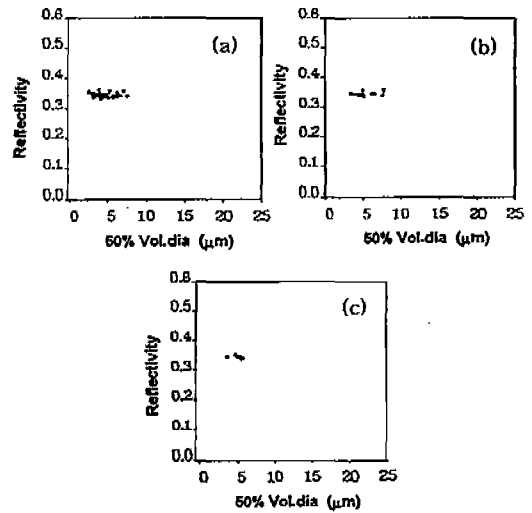


Fig. 7 Average value of shape parameter for STS304 in every (a) 50, (b) 100 and (c) 200 wear debris, Load : 1kg, Sliding distance : 156~234m

Fig. 8에는 작용하중 5kg, 미끄럼거리 말기인 156~234m에서의 3종류 시험편의 형태 parameter인 광택도와 50%체적경, 그리고 장단도와 복잡도 사이의 관계를 마멸입자 200개 마다의 평균치를 나타낸 것이다. 그림에서 (a) SM45C의 50%체적경이 4~13μm 정도로 (b) STS304와 (c) SKD11 보다 훨씬 크고 그 분산정도가 넓게 나타나 있으며, (c) SKD11의 경우는 약 4μm 이하의 체적경을 가진다는 것을 볼 수 있다. 또한 복잡도와 장단도도 대체로 50%체적경과 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나 광택도의 경우에는 (b) 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 분산정도가 넓게 나타나는 것은 SM45C가 다른 두 재료 보다 상대적으로 결렬한 소성변형이 더 심하게 진행되었기 때문이며, 이와같은 현상은 복잡도와 장단도에서도 역시 동일한 경향을 가진다고 생각된다. 그러나 광택도의 경우에는 역으로 STS304가 SM45C와 SKD11보다 더 큰 값을 나타내고 있는 것은 STS304가 SM45C와 SKD11보다 미끄럼거리에 따른 산화방응 속도가 늦어 산화되기 어려운 금속광택을 가진 마멸분이 주로 생성되기 때문이라고 생각된다.

이상에서 SM45C의 마멸분과 같이 입자 크기가 크고 또한 마멸분의 형상이 복잡해질수록 광택도는 낮다는 사

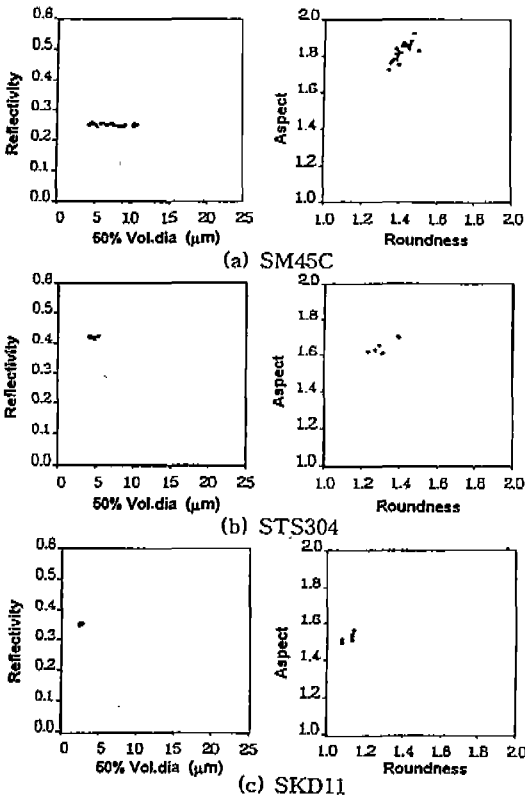


Fig. 8 Average value of shape parameter in every 200 wear debris, Load : 5kg, sliding distance : 156~234m

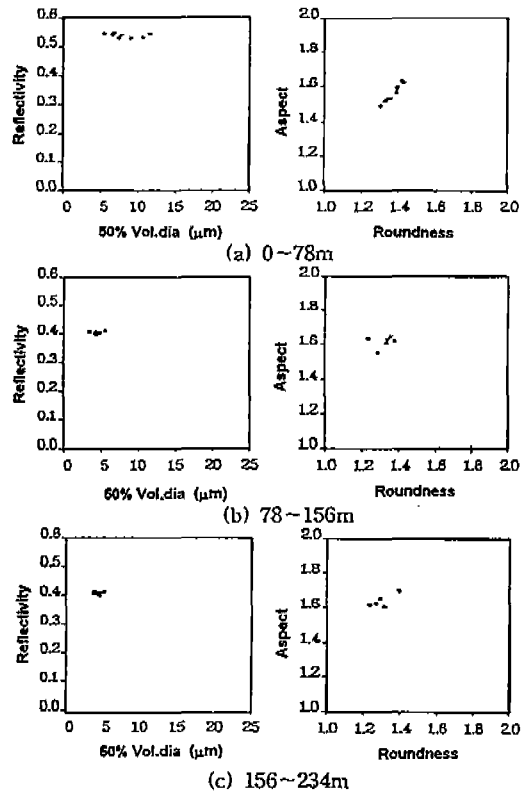


Fig. 9 Average value of shape parameter in every 200 wear debris for STS304, Load : 5kg

실에서 어두운 색상을 띤 마멸분이 산화된 것이라고 생각할 때 마멸입자가 클 수록 산화되기 쉽고⁽¹¹⁾, 또한 광택도가 높다는 것은 마멸분이 적은 박편상의 미세한 크기를 가진 금속광택을 띤 것이라는 사실을 나타내 주고 있다고 생각된다. 따라서 본 연구의 program으로 계산한 형태 parameter의 값을 이용하게 되면 실제 운환운동면을 구성하는 기계요소 부품의 작동조건에 따라 발생하는 마멸분 형태특징의 구별이 가능하리라 생각된다.

Fig. 9는 STS304에서 작용하중 5Kg의 미끄럼거리 초기, 중기 및 말기에서 미끄럼거리의 증가에 따른 형태 parameter의 관계를 나타낸 것이다. 미끄럼거리의 증가에 따라 4가지 형태 parameter는 대체로 감소하는 경향을 가지지만 특히 50%체적경과 광택도는 그 감소 경향이 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 전술한 바와같이 STS304의 현미경조직이 오스테나이트이기 때문에 미끄

럼거리의 증가에 따른 소성변형에 의한 가공경화가 진행된 결과라고 생각된다.

Fig.10에는 마멸분 형태정보에서 본 연구의 program으로 계산한 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 대응하다고 가정하고, 마멸분 면적에 이 대표경을 곱하여 총 마멸체적을 추정하였다. 마멸체적은 SKD11이 가장 적고, STS304는 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 바와같

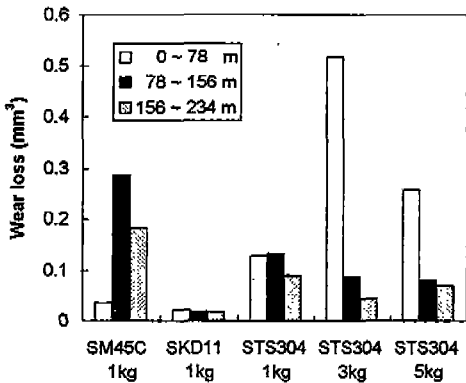


Fig. 10 Presumed wear loss

이 STS304는 마찰시간의 증가와 함께 가공경화의 영향이 현저하게 작용한 결과라고 생각된다.

여기서 마멸체적의 추정치에 대한 계산값을 중량으로 환산한 후 실험 완료시의 disk시험편을 감도 0.1mg으로 실제 측정된 마멸중량과 비교해 보았을 때 실험조건마다 다르지만 약간의 오차가 나타났다. 이러한 오차는 본 연구에서 가정된 마멸입자의 두께를 2차원적인 대표경으로 계산한 결과이고, 또한 실험 전후의 마멸중량에 대한 측정치에 다른 오차도 삽입되었을 것으로 생각되지만 대체로 본 연구에서의 마멸량의 계산결과는 충분한 타당성을 가질 수 있다고 생각된다. 그러나 본 연구에 있어 작용하중과 미끄럼거리에 따른 실험 및 결과를 더욱 다양한 마찰조건과 여러가지의 마찰재료에 대하여 계속적으로 연구를 진행하여 보다 다양한 마멸분 data의 축적이 필요하며 이를 통하여 기계구동계의 작동상태 진단에 활용하고 싶다.

4 결론

화상해석에 의한 윤활운동면의 작동조건에 따른 마멸분 해석을 위하여 pin on disk형 윤활마찰·마멸실험장치를 통하여 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. 윤활운동면의 작동중의 윤활유로부터 마멸입자를 채취할 수 있는 마멸분 채취방법의 실용화가 가능하였다.
2. 마멸분의 정확한 형태 parameter의 식별을 위해서 마멸입자 200개 마다의 작은 집단으로 나누어 그 평균치

를 이용하는 것이 식별능력이 향상된다.

3. 3종류의 시험편 모두 미끄럼거리의 증가에 따라 마찰면의 산화의 진행으로 광택도의 감소가 현저하다.

4. 윤활운동면의 작동조건에 따른 마멸분 형태 parameter에 의하여 마멸분의 특징을 비교 및 평가하고 또한 마멸체적의 추정치를 계산할 수 있는 program을 구축하였다.

참고 문헌

1. B. J. Roylance and S. Raadnu, "The Morphological Attributes of Wear Particles-Their Role in Identifying Wear Mechanisms", *Wear*, 175, pp. 115~121, 1994.
2. A. D. H. Thomas, T. Davies and A. R. Luxmoore, "Computer Image Analysis for Identification of Wear Particles", *Wear*, 142, pp. 213~226, 1991.
3. W. W. Siefert and V. C. Westcott, "A Method for the Study of Wear Particles in Lubricating Oil", *Wear*, 21, pp. 27~43, 1972.
4. Masaaki Shibata, "Tribological Characteristics and Diagnosis of Deteriorated Lubricating Oil", *JJST*, Vol.39, No.7, pp.559~565, 1994.
5. 八木伸行, 井上誠喜, 林正樹 "C言語 で學ぶ實戰畫上處理", オム社, pp. 2~10, 1992.
6. 李忠雄, "畫像工學", 集文堂, pp.9~20, 1988.
7. 이양범, 강경일, 이용중, "화상처리 응용 기술", 枝文社, pp. 15~36, 1995.
8. T. B. Kirt, D. Panzera, R.V. Anamalay and Z. L. Xu, "Computer Image Analysis of Wear Debris for Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis", *Wear*, 181, pp. 717~722, 1995.
9. B. J. Roylance, I. A. Albidewi, M. S. Laghari, "Computer-Aided Vision Engineering (CAVE)-Quantification of Wear Particle Morphology", *Lubr. Eng*, 50, pp. 111~116, 1993.
10. 木村好次 "メンテナンス・トライボロジーの現状と問題", *トライボロジスト*, 第39巻, 第7號, pp.553~558, 1994.
11. 朴興植, 杉村丈一, 梅田彰彦, 山本雄二, "ニコラネットワークによる 摩耗粉の解析-異種摩擦材料へのネットワークの適用-", *JAST*, pp.393~396, 1994.10.