

윤활유 첨가제에 따른 마멸분 화상해석

서영백* · 이충엽** · 박홍식*** · 전태욱***

* 동아대학교 생산기술연구소

** 동의공업대학 기계설계과

*** 동아대학교 기계공학과

ABSTRACT

This paper was undertaken to do shape analysis of wear debris on oiliness agent and extreme pressure agent. The lubricating wear test was performed under different experimental conditions using the wear test device was made in our laboratory and wear specimens of the pin on disk type was rubbed in paraffine series base oil by materials, varying applied load, sliding distance, oil additives such as stearine acid, DBDS, TCP. The four shape parameters (50% volumetric diameter, aspect, roundness and reflectivity) on a kind of the additives are different on applied load and sliding distance and Its are affected by absorbed film and reaction film. DBDS and TCP have a role of extreme pressure agent but a role of absorbed film of stearic acid decrease in high load. The maximum wear volume on applied load be in existence in three kinds of the specimens because of reaction characteristics of the additives.

Key Words—shape parameter, wear debris, morphological analysis, oiliness agent, extreme pressure agent.

1. 서론

최근 기계시스템과 각종 기관이 고속화, 대출력화 됨으로써 그 윤활조건도 점차 고온 및 고하중화의 가혹한 분위기에서 작동되고 있고, 이에 따라 윤활유도 그 작동조건에 따라 내압성, 산화안정성, 내마멸성 및 내식성 등의 요구가 갈수록 증대하고 있는 실정에 있다. 이에따라 윤활유의 사용목적에 따라 적당한 첨가제를 가하여 사용한 것이 일반적이고, 이러한 첨가제는

석유계 윤활유 또는 합성윤활유의 그 어느 것에 있어서도 윤활운동부의 다기능을 부여하기 위해서 필연적으로 첨가되고 있다.

윤활유 첨가제는 탄화수소 중합물을 제외하고 대부분의 화합물은 극성화합물로 되어 있지만 작용기구의 견지에서 보면 계면화학적 작용에 의하여 그 목적을 달성하는 것과 윤활유의 벌크(bulk) 성상으로 작용하는 것으로 나눌 수 있다. 전자는 내하중 첨가제, 유성제, 내마멸제, 극압제, 표면불활성제, 부식방지제, 청정분산제, 유동점강하제 및 거품제거제 등이 있고, 후자는

산화방지제, 점도지수 향상제 등이 있다[1]. 이처럼 윤활유 첨가제는 많은 종류가 있고, 이들은 기능별로 분류되는 것이 많다. 이 중에서 마찰특성과 고착방지를 개선할 목적으로 사용되는 첨가제는 일반적으로 유성제와 극압제로 대별할 수 있다. 유성제는 분자의 한단에 금속면과 강하게 결합하는 극성기를 갖고 또한 긴 탄소쇄로 결합되어 있는 극성화합물로서 금속면에 강한 흡착막을 형성하여 경계막의 파단을 감소시켜 마찰·마멸을 감소시킨다, 그리고 극압제는 마찰면에서 금속면과의 화학반응으로 철화합물에 의한 연질인 전단막을 형성함으로써 마멸을 감소시키고 고착을 방지하게 한다[2] 따라서 최근 유성제 및 극압제 첨가제의 화학구조와 이들의 작용기구에 대해서는 많은 연구가 진행되어 왔지만[3-6], 이들 연구는 대부분 마찰상황에 대한 정성적 해석과 마찰면의 분석을 통한 첨가제의 역할과 마멸기구에 주로 중점을 두어 왔다.

그러나 작동중에 있는 윤활구동부를 직접 눈으로 볼 수 없는 마찰상황을 정확히 알기 위하여는 첨가제의 종류에 따라 다양한 형태로 발생하는 마멸분의 관찰과 정량적인 해석이 이루어져야 하며, 이것이 가능하게 되면 그 윤활운동면의 손상감지와 상태진단과 마멸기구 해명에도 막대한 정보를 제공해 줄 수 있는 극히 유효한 수단이라 생각된다. 그럼에도 불구하고 현재까지 윤활유 첨가제에 따른 마멸분의 형태해석에 대하여는 아직 정성적인 범위를 벗어나지 못하고 있고, 또한 그 정보가 유효하게 활용되는 일은 적다. 이처럼 윤활운동면에서 발생하는 다양한 마멸분 데이터의 유효이용을 방해하고 있는 요인은 형태와 크기가 천차만별한 입자의 특징을 정리하

는 기술적인 방법이 아직 확립되어 있지 않기 때문이라고 생각된다.

이를 위하여 최근 컴퓨터의 메모리의 확장에 따라 발전하고 있는 화상처리 기술과 컴퓨터의 이용에 의하여 마멸분의 형태특징과 크기에 대한 정량적인 데이터를 용이하게 얻고자 하는 연구가 진행되고 있지만 [7-10], 그 데이터를 사용하는 방법에 대해서는 아직 정성적인 범위에 지나지 않는 경우가 많다. 또한 이들 연구는 마멸분의 형태정보 분석에만 국한되어 이용되고 있을 뿐이고, 마멸입자 형태의 분류 및 평가를 위하여 분석자료로 부터 마멸분의 형태 파라미터(parameter)를 통하여 마멸분 해석에 적용하는 방법에 관한 연구는 그다지 진행되고 있지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 pin-on-disc 형의 윤활마찰·마멸실험으로 부터 유성제인 스테아린산(Stearine acid)과 극압제인 DBDS와 TCP의 첨가에 따라 발생하는 마멸분을 채취한 뒤, 마멸분 발생시의 작동조건과 이들 첨가제의 변화에 따른 마멸분 형태특징에 대한 수치정보로 부터 마멸분 형태 파라미터(50%체적경, 장단도, 복잡도 및 광택도)를 분류, 평가하고 이를 통하여 윤활유 첨가제에 따른 마멸분의 정량적인 형태정보를 통하여 마멸기구 해석에 적용하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험방법

2.1 윤활마찰실험

본 연구에 사용한 실험재료로서 핀(pin) 시험편은 직경 5.0mm의 베어링 강구인 STB2을, 디스크(disk) 시험편으로 기계요소 재료로 널리 사용되는 3종류의 강, SM45C(200Hv), STS304(190Hv) 및 STB2

(780Hv)를 사용하였다. 디스크의 형상은 직경 50mm, 두께 10mm이고, 이를 연삭한 후 emery paper #1200으로 정밀연마하여 그 표면조도를 $0.2\mu\text{m}R_{\text{max}}$ 로 일정하게 하였다. 그리고 실험에 사용한 윤활유는 무첨가 파라핀(paraffine)계 광유(8.2cSt @40°C) 및 첨가제를 함유한 유성제인 스테아린산($(\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$, 첨가량(0.1wt.%), 유황계 극압제인 DBDS(dibenzyl disulfide, 첨가량 0.5wt.%), 인계 극압제인 TCP(tricresol phosphate, 첨가량 1.0wt.%)를 사용하였다.

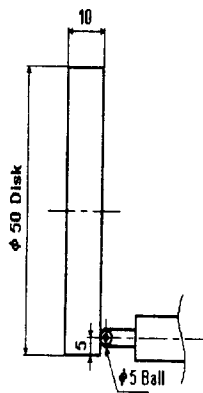


Fig. 1 Shape and dimensions of specimen

실험장치는 pin-on-disk형 마찰·마멸시험기[11]에 의하여 윤활마찰 실험하였으며, 이것은 회전하는 디스크 시험편에 베어링장구를 압착시켜 마찰하는 것으로 이의 접촉부를 Fig. 1에 나타내었다. 그리고 윤활장치부에는 시험편 접촉점 하부에 oil bath를 설치하고 윤활유 공급은 순환펌프로서 silicon tube를 통하여 시험편 접촉점에 적하시켰으며, 핀 시험편은 하중을 걸어 디스크에 가압하였다. 그리고 마멸분은 oil bath내의 윤활유로 부터 공경 $0.45\mu\text{m}$ 의

membrane filter가 부착된 마멸입자 채취기구를 통하여 마멸분을 채취하였다.

Table 1에는 실험조건을 나타내었으며, 여기서 미끄럼거리는 하나의 시험편의 마찰시간(총 9시간)에서 3시간씩의 미끄럼거리를 세분화하여 0~78m, 78~156m 및 156~234m를 미끄럼거리 초기, 중기 및 말기로 구분하여 실험하였다.

Table 1 Experimental conditions for the frictional test

Conditions / Additives	Specimens	Applied load(kg)	Sliding speed(mm/s)	Sliding distance(m)
No additive	SM45C, STS304 STB2	1, 3, 5, 7, 9	6.28	0~78
Stearine acid (0.1wt.%)				78~156
				156~234
				0~78
DBDS (0.5wt.%)				78~156
				156~234
				0~78
TCP (1.0wt.%)				78~156
				156~234
				0~78

2.2 화상처리 시스템

실험조건과 윤활유 첨가제를 달리하여 채취한 윤활유중의 마멸분은 마멸분 채취여과기에 의하여 membrane filter(공경 $0.45\mu\text{m}$)상에서 채취하였다. 따라서 본 연구에서는 $0.45\mu\text{m}$ 이상의 크기를 가지는 마멸분을 대상으로 하였고, 마멸분을 해석하기 위한 화상처리 시스템[6]을 사용하였다. 광학현미경은 반사조명 및 투과조명의 2가지 할로겐 램프를 가지며 관측된 화상은 상부에 부착된 CCD 카메라에 의하여 PC의 frame grabber에 저장된다.

본 연구에 사용한 화상입력을 위한 frame grabber는 화소수 640x480, 화소(pixel)당 분해능은 R(Red), G(Green), B(Blue) 각 8 bit(256 gray level)이고, 정방향 1 화소의 길이는 $0.426\mu\text{m}$ 이다. 이것은 마멸분 채취부분의 filter 직경이 35mm인

것을 고려하면 모니터 1 화면의 면적은 filter의 17,302분의 1이 된다. 그리고 화상 처리 시스템의 frame grabber의 제어 및 이의 program 처리는 모두 C 언어(일부는 기계어)로써 행하였다.

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

2.3 화상처리 및 화상해석

마멸분은 발생조건에 따라 다양한 형태를 가지기 때문에 그 형태의 분류 및 평가를 위하여 본 연구에서 이용한 마멸입자의 형태정보를 Fig. 2의 하나의 마멸입자 대하여 다음과 같이 정의하였다[11]. 실험조건에 따른 마멸분 입자의 형태정보를 분류하여 화상처리하고, 이것을 이용하여 Fig. 2에 나타난 바와 같이 50%체적경, 장단도, 복잡도 및 광택도의 4가지의 형태 파라미터(parameter)를 화상해석하였으며[11], 이의 정의는 다음과 같다.

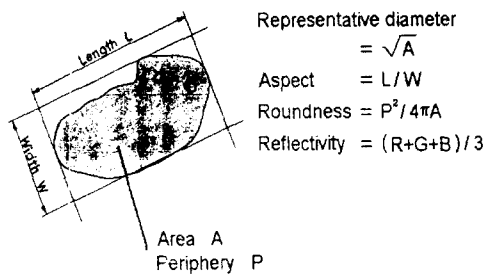


Fig. 2 Shape parameter of wear debris

(a)장단도(Aspect) : 각 마멸분에서 가장 긴 직경을 장경, 그것과 수직으로 교차하는 직경의 가장 긴 것을 단경이라고 하였을 때 단경에 대한 장경의 비율.

(b)복잡도(Roundness) : 마멸분이 원형에 가까운 정도를 나타내 주며, 즉, 마멸분이 원형일때 가장 최소(약 4π)가 되고, 원형이 복잡하게 될 수록 Ψ 값이 크다.

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

(c)광택도(Reflectivity) : 마멸분으로 부터 렌즈계로 향하여 정반사되는 빛의 백색 기준면의 gray level(200)에 대한 마멸분의 3색 gray level R, G, B의 gray level과의 비율로서, 광택도는 이렇게 구한 R, G, B 값의 평균치이다.

(d)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.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 형태 파라미터에 의한 마멸분 형태분류

Table 2에는 SM45C의 경우 작용하중 5kg에서 무첨가제 윤활유와 첨가제를 달리한 3종류, 스테아린 산, DBDS 및 TCP를 첨가한 윤활유의 형태 파라미터의 평균치를 나타낸 것이고, 그리고 Fig. 3은 작용하중 5kg에서 무첨가제와 3종류의 첨가제를 첨가한 윤활유의 형태 파라미터인 50%체

Table 2 Average values of shape parameter; specimen : SM45C, load : 5kg

Additives	No additive		Stearine acid		DBDS		TCP	
	0~78m	156~234m	0~78m	156~234m	0~78m	156~234m	0~78m	156~234m
50%evol. dia.	3.685	3.553	3.443	3.407	3.886	3.994	3.895	4.301
Roundness	1.395	1.356	1.432	1.315	1.365	1.348	1.384	1.355
Aspect	1.967	1.824	1.956	1.821	1.814	1.757	1.808	1.787
Reflectivity	0.393	0.375	0.372	0.366	0.365	0.355	0.448	0.442

적경, 복잡도, 장단도 및 광택도의 대소를 (a) 미끄럼거리 초기 0~78m와 (b) 말기인 156~234m로 구분하여 마멸분 전체의 평균치를 간략화하여 나타낸 선도이다

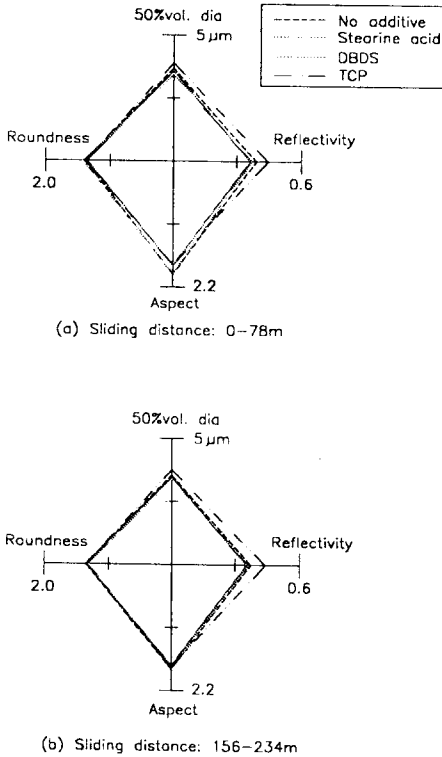


Fig. 3 Diagram of shape parameter for additives ; specimen : SM45C, load : 5kg

그림에서 스테아린 산을 첨가제로 한 윤활유의 경우가 미끄럼 거리 초기 및 말기 모두 50%체적경이 가장 적고, DBDS와 TCP를 첨가한 윤활유가 대체로 크게 나타나 있다. 그리고 미끄럼 거리 초기 및 말기 모두 복잡도와 장단도에서는 3 종류의 첨가제의 윤활유와 무첨가제 윤활유는 첨가제 종류의 변화에 관계없이 대체로 단순한 경향을 가지지 않는다는 것을 볼 수 있다. 그러나 광택도의 경우에는 TCP를 첨

가한 경우가 무첨가 및 다른 두 첨가제를 첨가한 윤활유 보다 큰 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 이것은 스테아린산의 경우는 마찰면에 흡착막을 형성[3]하므로 마찰저감 효과는 크다는 것을 나타내 주고 있다고 생각된다. 그러나 TCP의 첨가제는 마찰면에 생성된 인산철의 영향[4,5]으로 미끄럼거리 초기 및 말기 모두 광택도가 가장 크게 나타난다고 생각된다. 또한 미끄럼거리의 증가에 따른 형태 파라미터의 변화에서 50%체적경을 제외하고 미끄럼거리가 증가할수록 3 가지 형태 파라미터 값이 대체로 감소하는 것은 마찰시간의 증가와 함께 산화 반응속도가 증가하기 때문이라고 생각된다.

Fig. 4는 SM45C의 미끄럼거리 말기 156~234m에서 무첨가제 윤활유 및 3 종류의 첨가제를 첨가한 윤활유의 작용하중 변화에 따른 4 가지 형태 파라미터를 나타낸 것으로써, 이것은 각 시료에서 PC에 저장한 50화면의 전 마멸분에 대한 평균치를 구하여 표시한 것이다. (a)에서 50%체적경은 윤활유 종류에 관계없이 작용하중의 증가와 함께 대체로 미소하게 증가하고 있고, 작용하중 7kg과 9kg에서의 50%체적경은 극압첨가제인 DBDS와 TCP를 첨가한 윤활유의 경우가 유성제인 스테아린산을 첨가한 윤활유 보다 다소 크게 나타나 있다. 그러나 (b)의 복잡도와 (c)의 장단도는 작용하중에 관계없이 단순한 경향을 나타내지 않고 분산되어 있는 것을 알 수 있다. 그리고 (d)에서 광택도의 경우는 TCP를 첨가한 윤활유가 각 작용하중에서 다른 윤활유보다 다소 큰 값을 가지는 것은 진술한 바와 같이 인산철의 반응막의 형성에 의한 영향으로 생각된다.

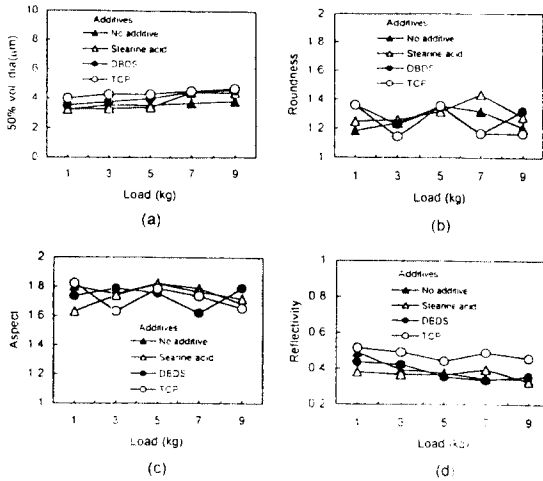


Fig. 4 Effect of applied load on the shape parameter; sliding distance : 156~234m

3.2 윤활유 첨가제의 형태 파라미터 특징분포

윤활유 첨가제에 따른 마멸분 입자 형태 파라미터 사이의 특징 분포를 알기 위하여 Fig. 5에는 SM45C의 작용하중 9kg의 경우 무첨가제와 3 종류의 첨가제를 첨가한 윤활유의 미끄럼 거리 초기 0~78m에서, 그리고 Fig. 6에는 미끄럼 거리 말기 156~234m에서의 (a) 50%체적경과 광택도, (b) 복잡도와 장단도와의 관계를 마멸입자 총수에서 입자 수 200개 마다의 작은 집단으로 나눈 평균치를 표시한 것이다. 여기서 마멸입자 수 200개 마다의 작은 집단의 평균치로 나타낸 것은 마멸분 입자 하나하나의 형태 파라미터 값 또는 적당한 개수의 작은 집단, 예를 들면 50, 100 및 150개의 형태 파라미터 값의 평균치 분포는 너무 분산되어 있어 그 형태 특징을 식별하기 곤란[11]하였기 때문에 본 연구에서는 마멸분 입자 200개 마다의 평균치를 이용하여 구하였다.

Fig. 5의 미끄럼 거리 초기에서는 반응막

을 형성하는 극압첨가제인 DBDS 및 TCP을 첨가한 윤활유의 경우가 (a) 50%체적경과 광택도에서 50%체적경이 작고, 광택도는 TCP를 첨가한 윤활유가 대체로 크게 나타나 있으며, 또한 마찰면 표층에 흡착막을 형성하는 스테아린산의 경우가 50%체적경이 대체로 크다는 것을 볼 수 있다. 그리고 (b) 복잡도와 장단도의 경우, 장단도는 무첨가제 및 스테아린산을 첨가한 윤활유의 경우가 극압 첨가제를 첨가한 윤활유보다 큰 값을 가지고 있다. 또한 복잡도는 스테아린산의 경우가 다소 크게 나타나 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 작용하중이 9kg의 고하중의 경우에는 극압 첨가제인 DBDS와 TCP의 영향으로 고하중에서 안정적인 전단강도가 적은 연질막이 생성된 결과이며[12], 흡착막을 형성하는 유성제인 스테아린산은 고하중이 되면 흡착막의 역할이 감소에 기인된 것이라고 생각된다.

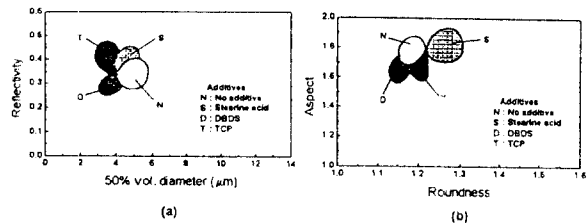


Fig. 5 Average value of shape parameters in every 200 wear debris for SM45C ; load : 9kg, sliding distance : 0~78m

그리고 Fig. 6의 미끄럼 거리 말기의 경우 (a) 50%체적경과 광택도에서 DBDS와 TCP를 첨가한 윤활유는 Fig. 5의 미끄럼 거리 초기와 유사한 형태를 가지지만 미끄럼 거리가 증가한 결과로 인하여 그 분포 범위가 다소 크게 나타나 있는 것을 볼 수

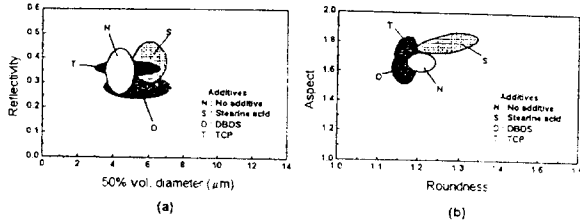


Fig. 6 Average value of shape parameters in every 200 wear debris for STB2 ; load : 9kg, sliding distance : 156~234m

있다. 또한 (b)복잡도와 장단도와의 경우는 DBDS와 TCP를 첨가한 윤활유가 무첨가 윤활유보다 장단도는 다소 크게 분포하고 있지만 복잡도는 대체로 작은 값을 가진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 스테아린산을 첨가한 윤활유의 경우 작용하중 5kg, 미끄럼거리 말기인 156~234m에서 3 종류 시험편 SM45C, STS304 및 STB2의 형태 파라미터인 (a) 50%체적경과 광택도와 (b) 복잡도와 장단도와의 관계를 역시 마멸입자 총수에서 입자 수 200개 마다의 작은 집단으로 나눈 평균치를 나타낸 것이다. 여기서 STB2의 형태 파라미터의 분포범위가 좁게 나타나 있는 것은 유성제인 스테아린산을 첨가하게 되면 경도가 높은 STB2의 총 마멸입자 수가 적어 200개 마다의 결과로서 나타낸 평균치가 적었기 때문이었다. 그림에서처럼 마멸입자의 형태 파라미터인 (a) 50%체적경과 (b) 복잡도와 장단도는 STS304가 대체로 크게 나타나 있고, 다음으로 SM45C, STB2 순으로 작아지고 있지만, (a) 광택도의 경우에는 STS304, STB2, SM45C 순으로 그 값이 작아지고 있다는 것을 볼 수 있다. 스테아린산을 첨가한 윤활유는 장단도의 경우 매우 넓은 범위로

분포되어 있는 것은 스테아린산에 의한 흡착막의 영향으로 경계윤활에서 일어나는 양 금속접촉부의 실접촉에서 응착마멸에 의한 큰 괴상의 입자와 실접촉부외의 부분에서 흡착막의 상호이탈이 빈번하게 일어난 결과라고 생각된다. 그리고 광택도의 경우 STB2가 SM45C보다 보다 큰 값을 가지는 것은 STB2에 함유되어 있는 특수 원소인 Cr (1.52%)의 영향으로 SM45C 보다 산화반응이 지연된 결과라고 생각된다.

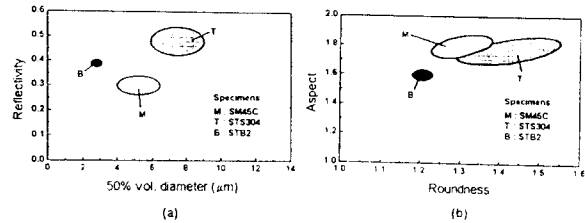


Fig. 7 Average value of shape parameters in every 200 wear debris for specimens ; load : 5kg, sliding distance : 156~234m

Fig. 8은 인산계 극압 첨가제인 TCP를 첨가한 윤활유의 경우 STS304의 미끄럼 말기인 156~234m에서 작용하중의 증가에 따른 마멸분 형태 파라미터인 (a) 50%체적경과 광택도, 그리고 (b) 복잡도와 장단도와의 관계를 나타낸 것이다. 4 가지 형태 파라미터는 작용하중이 7kg 까지는 전체 마멸분 입자의 총 수의 증가에 따라 그 분포범위가 넓어지고 있지만, 작용하중이 9kg의 경우에는 감소하고 있다는 것을 볼 수 있다. 이것은 극압 첨가제인 TCP는 양 금속과 반응하여 인산철의 반응막이 고하중인 9kg에서 그 영향이 나타난다는 것을 나타내 주고 있다고 생각된다. 즉, 인산계 첨가제에 의한 반응막은 저하중에서는 그 영향이 적고, 고하중에서는 접촉면의 온도

상승에 의한 강한 반응성을 나타내기 때문이라고 생각된다.

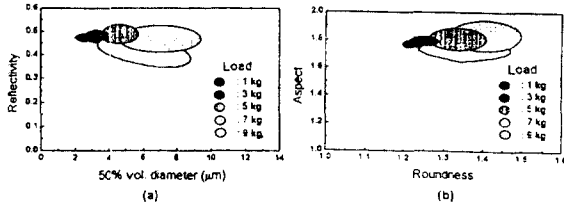


Fig. 8 Average value of shape parameters in every 200 wear debris for STS304 ; additive : TCP, sliding distance : 156~234m

3.3 윤활유 첨가제에 따른 추정 마멸체적의 계산
 마멸분 형태정보를 이용하여 미끄럼 거리 0~234m (실험시간 총 9 시간)까지의 3 종류 시험편 재료인 SM45C, STS304 및 STB2의 작용하중과 무첨가제 윤활유, 3 종류의 첨가제인 스테아린산, DBDS 및 TCP를 첨가한 윤활유에 따른 작동조건에 따른 총 마멸체적의 추정치를 구하였다. 여기서 추정 마멸체적의 계산은 마멸입자의 두께를 Fig. 2의 대표경과 대등하다고 가정하고, 마멸입자 면적에 이 대표경을 곱하여 총 마멸체적을 추정하였다. 즉, 마멸분이 분포되어 있는 1 화면내의 하나의 마멸입자 체적을 V_{ij} 라하고, 1 화면내의 입자갯수를 n 으로 두었을때 50화면 전체의 총마멸체적 V_i 를 식 (2)로부터 구하였다.

$$V_i = \left(\sum_{j=1}^{50} \sum_{i=1}^n V_{ij} \right) \quad (2)$$

Table 3에는 SM45C의 각 작용하중과 무첨가제와 3 종류의 첨가제 윤활유의 변화에 따른 추정 총 마멸체적 V_i 를, 그리고 Fig. 9에는 Table 3의 V_i 를 나타낸 것으로

Table 3 Presumed wear loss for additives and load ; specimen : SM45C

Load (kg)	Additives			
	None	Stearine acid	DBDS	TCP
1	0.02814	0.00523	0.05643	0.08914
3	0.12356	0.05831	0.09865	0.09923
5	0.12712	0.09246	0.11713	0.12652
7	0.14859	0.18912	0.27423	0.24321
9	0.29254	0.28685	0.23787	0.22365

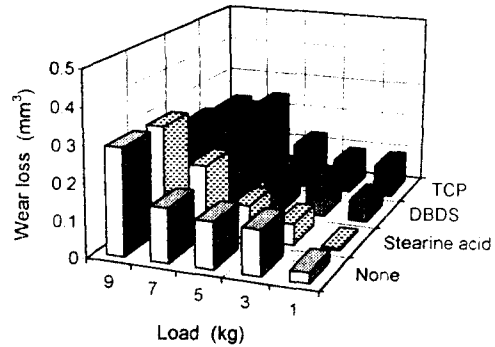


Fig. 9 Presumed wear loss for additives and load ; specimen : SM45C

서 총마멸체적 V_i 는 무첨가제 윤활유와 유성제인 스테아린산을 첨가한 윤활유의 경우에는 작용하중의 상승과 함께 증가하지만, 그 증가량은 스테아린산의 첨가제를 첨가한 윤활유가 무첨가제 윤활유의 V_i 보다 작용하중이 5kg 이하에서는 훨씬 적다는 것을 볼 수 있고, 그 이상의 작용하중에서는 오히려 증가한다는 것을 알 수 있다. 그리고 극압 첨가제인 DBDS와 TCP를 첨가한 윤활유의 경우에는 작용하중 7kg까지는 무첨가 윤활제와 유사한 V_i 를 보이지만 작용하중이 9kg의 경우에는 무첨가제와 스테아린산을 첨가한 윤활유보다 적은 값을 나타낸다는 것을 알 수 있다.

총마멸체적 V_i 가 무첨가제 윤활유보다

유성제인 스테아린산을 첨가한 윤활유의 경우에 작용하중이 5kg 이하에서 적게 나타나는 것은 스테아린산의 흡착막의 영향이 지배적으로 작용한 결과로서 스테아린산은 극성기의 작용으로 양 금속면에 물리흡착으로 배열하여 이것에 의하여 양 금속간의 직접접촉을 방지하기 때문이라고 생각된다. 그러나 7kg 이상의 작용하중에서는 V_f 가 오히려 증가하는 것은 스테아린산에 의한 양 금속에서 생성되는 흡착막은 마찰면의 온도가 상승하게 되면 그 효과가 감소[12]하게 되므로 접촉압력의 증가로 인한 접촉계면의 온도 상승에 의한 흡착분자가 탈리하기 때문이라고 생각된다.

또한 극압첨가제인 DBDS와 TCP를 첨가한 윤활유의 경우 작용하중 7kg까지는 무첨가 윤활제와 유사한 V_f 를 보이는 것은 이 하중까지에서의 극압첨가제의 역할은 하지 못하고, 작용하중이 9kg의 경우에는 무첨가제와 스테아린산을 첨가한 윤활유보다 적은 값을 나타내는 것은 극압첨가제의 전형적인 작용의 결과라고 생각된다. 즉 극압첨가제인 DBDS와 TCP는 반응막을 생성시키지 못하지만 작용하중이 9kg 이상에서는 접촉계면의 온도상승으로 인하여 금속표면과 반응하여 철화합물에 의하여 무기화합물의 반응막을 형성하여 양 금속간의 결합을 억제하기 때문이라고 생각된다.

Table 4에는 DBDS를 첨가한 윤활유에서의 작용하중의 변화에 따른 3종류 시험편 재료인 SM45C, STS304 및 STB2의 총 마멸체적의 추정치 V_f 를 나타낸 것이고, Fig. 10에는 Table 4의 V_f 를 나타낸 것이다. Fig. 10에서 처럼 극압 첨가제인 DBDS를 첨가하게 되면 작용하중의 증가에 따라 V_f 가 SM45C의 경우 작용하중

Table 4 Presumed wear loss for specimens and applied load ; additive : DBDS

Specimens	SM45C	STS304	STB2
Load (kg)			
1	0.05643	0.11183	0.04374
3	0.09865	0.17034	0.07265
5	0.11713	0.50312	0.10213
7	0.27423	0.43387	0.07423
9	0.23787	0.30125	0.05621

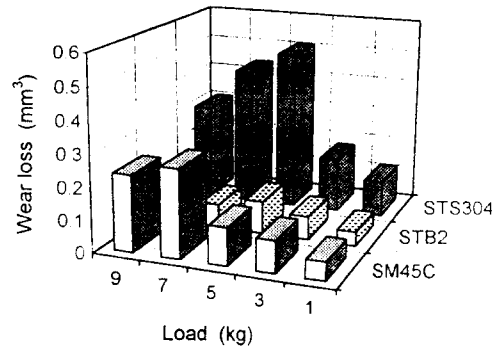


Fig. 10 Presumed wear loss for specimens and applied load ; additive : DBDS

7kg까지는 증가하지만 9kg에서는 다시 감소하는 것을 알 수 있고, STS304와 STB2의 경우에는 5kg까지는 V_f 가 증가하지만 7kg에서 부터는 다시 감소한다는 것을 볼 수 있다. 이것은 전술한 바와 같이 극압 첨가제가 전형적으로 작용한 결과라고 생각된다. 즉 극압제인 DBDS는 금속표면과 반응하여 첨가제 중의 유황은 철화합물에 의하여 무기화합물의 반응막을 생성시키게 되며, 그 반응의 구동력은 마찰열에 의한 온도상승과 마멸에 따라 생성되는 신생면의 활성화에 있다고 생각된다. 즉 작용하중이 증가하면 접촉압력이 증가하고 이로 인한 유막두께가 감소된 부분에 신생

금속면의 노출이 증가하여 이 부분에서 반응성이 증가하게 된다고 생각된다. 이처럼 반응막은 무기막으로서 유기분자 막의 흡착막보다 높은 고하중과 높은 온도에도 안정되므로 각 시험편 재료에 따라 V_f 가 최대값을 나타내는 작용하중이 존재한다는 것을 나타내 주고 있다고 생각된다.

4. 결론

윤활구동계의 윤활유 첨가제에 따른 마멸분 해석을 위하여 pin-on-disk형의 윤활마찰 실험장치를 통하여 마멸분 생성시의 작동조건인 기계요소 재료, 작용하중, 미끄럼거리 및 윤활유 첨가제 등의 변화에 따른 마멸분을 채취한 뒤 이를 화상처리하여 마멸분을 분류, 평가하고 해석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 첨가제 종류에 따라 마멸분의 4가지 형태 파라미터의 분포범위는 작용하중과 미끄럼거리의 변화에 따라 다르며 스테아린산은 흡착막에, DBDS 및 TCP는 반응막에 영향을 받는다.

2. 극압 첨가제인 TCP는 인산철의 반응막의 영향으로 작용하중에 관계없이 스테아린산 및 DBDS를 첨가한 것 보다 광택도가 가장 높다.

3. 작용하중이 9kg인 고하중에서 DBDS 및 TCP의 경우 극압제의 영향이 나타나지만, 스테아린산의 경우에는 흡착막의 역할이 감소된다.

4. 3 종류의 시험편 재료의 최대 마멸체적을 나타내는 작용하중이 존재하며, 이는 윤활유 첨가제의 반응특성에 의존한다.

참고문헌

(1) 櫻井俊男, “潤滑の物理化學”, 幸書房,

pp.242~244, 1978

(2) 日本潤滑學會編, “潤滑用語集”, 養賢堂, pp.162~163, 1992

(3) A.G.Papay, “Friction, Friction Modifiers and Applications”, JAST, Vol. 40, No.4, pp.274~279, 1995

(4) P.V.Kotvis, W.T.Tysoe and M.N. James, “An Investigation of Film Removal in Extreme Pressure Lubrication using Chlorinated Hydro-carbon Additive s”, Wear, 153, pp.305~314, 1992

(5) T.Akagaki and K.Kato, “Effect of Additives on Wear Mode and Morphology Wear Debris Generated in the Lubricated Sliding of Steel”, Wear, 143, pp.119~135, 1991.

(6) R.J.Hartley and A.G.Papay, “Antiwear and Extreme Pressure Additives”, JAST, Vol. 40, No.4, pp.326~331, 1995.

(7) 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, pp. 717~722, 1995.

(8) A.D.H.Thomas, T.Davies and A.R. Luxmoore, “Computer image Analysis for Identification of Wear Particles”, Wear, 142, pp.213~226, 1991.

(9) B.J.Roylance and S.Raadnui, “The Morphological Attributes of Wear Particles—Their Role in Identifying Wear Mechanisms”, Wear, 175, pp.115~121, 1994.

(10) W.Uedelhoven, M.Franzl and J. Guttenberger, “The Use of Automated Image Analysis for the Study of Wear Particles in Oil-Lubricated Tribological Systems”, Wear, 142, pp.107~113, 1991.

(11) 박홍식, 전태욱, 서영백, 김형자, “화상 처리에 의한 기계윤활 운동면의 마멸분 형태해석”, 한국윤활학회지, 제12권, 제3호, pp.72~78, 1996.

(12) 이우조, 이진열, “윤활공학”, 설운출판사, pp.52~55, 1996.