

유성제 및 극압 첨가제에 따른 마멸입자 형상해석

이충엽 · 조연상* · 서영백** · 박흥식** · 전태옥**

동의공업대학 기계설계과
*동아대학교 대학원 기계공학과
**동아대학교 기계공학과

Morphological Analysis of Wear Particles in the Lubricating Oil with Additives

Chung-Yup Lee, Yon-Sang Cho*, Young-Baek Seo**, Heung-Sik Park** and Tae-Ok Jun**

Department of Machine Design, DongEui Technical Junior College
**Department of Mechanical Engineering Graduate School, Dong-A University*
***Department of Mechanical Engineering, Dong-A University*

Abstract—Morphological analysis of wear particles in the lubricating oil is a very effective and versatile means of lubricant analysis for machine condition monitoring and fault diagnosis. The prospects for determining quantitative information about wear particle morphology have been considerably enhanced by recent developments reported in the application of image processing and analysis techniques. This study was undertaken to investigate the influence of oiliness agent and extreme pressure agent on the shape of wear particles. The wear test was performed under different experimental conditions with stearic acid, dibenzyl disulfide(DBDS) and tricresol phosphate(TCP) in paraffinic base oil. Wear particles characteristics were described using four shape parameters, namely 50% volumetric diameter, aspect, roundness and reflectivity. The results showed that the four shape parameters of wear particles depend on a kind of the additives. This analysis of wear debris with computer image processing techniques is sufficient to distinguish some types of wear debris. The wear volume of three kinds of the specimens are affected by the additives with boundary films.

Key words—shape parameter, wear particles, morphological analysis, oiliness agent, extreme pressure agent., wear volume.

1. 서 론

최근 기계시스템과 각종 기관이 고속화, 대출력화됨으로써 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. 이에 따라 윤활유의 사용목적에 따라 적당한 첨가제를 가하여 사용한 것이 일반적이고, 이러한 첨가제는 석유계 윤활유 또는 합성윤활유의 그 어느 것에 있어서도 윤활운동부의 다기능을 부여하기 위해서 필연

적으로 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, 표면 불활성제, 부식방지제, 청정분산제, 유동점강하제 및 거품제거제 등이 있고, 후자는 산화방지제, 점도지수 향상제 등이 있다[1]. 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.

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 분석 자료로부터 마멸분의 형태 파라미터(parameter)를 통하여 윤활유 첨가제에 따른 마멸분 해석을 행한 연구는 그다지 진행되고 있지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 볼과 디스크(ball-on-disk)형의 윤활마찰·마멸실험으로부터 현미경조직의 차이에 의하여 마멸발생 기구가 다른 3종류의 시험편 재료를 사용하여 마찰면에 흡착막을 형성하는 유성제인 스테아린산(stearic acid)과 마찰면에 반응막으로 활화철 및 산화철을 형성하는 DBDS(debenzyl disulfide)와 인산철을 형성하는 TCP(tricresol phosphate)의 두 가지 극압제 첨가에 따라 발생하는 마멸분을 채취한 뒤, 마멸분 발생시의 작동조건과 이들 첨가제의 변화에

따른 마멸입자 형태 파라미터를 분류, 평가하고 이를 통하여 윤활유 첨가제에 따른 마멸입자 형상해석을 목적으로 하였다.

2. 실험방법

2-1. 윤활마찰실험

본 연구에 사용한 실험재료로서 볼 시험편은 직경 5.0 mm의 베어링 강구인 STB2을, 디스크 시험편으로 기계요소 재료로 널리 사용되는 3종류의 강, SM45C (200 Hv), STS304(190 Hv) 및 STB2(780 Hv)를 사용하였다. 디스크의 형상은 직경 50 mm, 두께 10 mm이고, 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(8.2 cSt@40°C) 및 광유에 유성제인 스테아린산(첨가량 0.1 wt.%), 유허계 극압제 DBDS(첨가량 0.5 wt.%), 인계 극압제 TCP(첨가량 1.0 wt.%)를 사용하였다.

실험장치는 볼과 디스크형 마찰·마멸시험기에 의하여 윤활마찰 실험하였으며[11], 실험 후의 마멸분은 오일 배스내의 윤활유로부터 $0.45 \mu\text{m}$ 의 공경(孔徑)을 가진 멤브레인 필터(membrane filter)가 부착된 마멸입자 채취기구를 통하여 마멸분을 채취하였다. 실험조건에서 작용하중은 1 kg에서 9 kg까지 2 kg씩 증가하였으며, 미끄럼속도는 7.23 m/sec으로 일정하게 하였다. 그리고 미끄럼거리는 하나의 시험편의 마찰 시간(총 9시간)에서 3시간씩의 미끄럼거리를 세분화하여 0~78 m, 78~156 m 및 156~234 m를 미끄럼거리 초기, 중기 및 말기로 구분하여 실험하였다.

2-2. 마멸입자 영상처리 및 해석

본 연구에서는 실험조건과 윤활유 첨가제를 달리하여 채취한 윤활유중의 마멸분은 멤브레인 필터가 부착된 채취여과기에 의하여 마멸분을 채취하였기 때문에 $0.45 \mu\text{m}$ 이상의 크기를 가지는 마멸분을 대상으로 하였고, 마멸분을 해석하기 위한 화상처리 시스템[6]을 사용하였다. 영상입력을 위한 프레임 그래버는 화소수 640×480 , 1화소(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 마멸분 채취부분의 필터 직경이 35 mm인 것을 고려하면 모니터 1 화면의

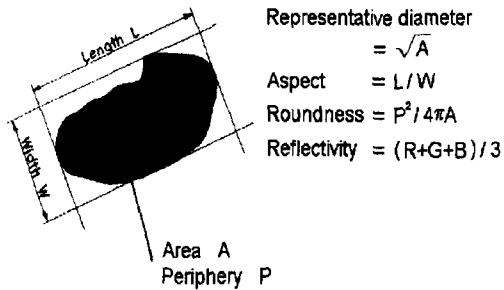


Fig. 1. Shape parameters of wear particle.

면적은 필터의 17,302분의 1이 된다. 그리고 화상처리 시스템의 프레임 그래버의 제어 및 이의 프로그램 처리는 모두 C 언어(일부는 기계어)로써 행하였다. 마멸분은 발생조건에 따라 다양한 형태를 가지기 때문에 그 형태의 분류 및 평가를 위하여 본 연구에서 이용한 마멸입자의 형태정보를 Fig. 1의 하나의 마멸입자 대하여 다음과 같이 정의하였다[11]. 이상의 각 실험조건은 모두 대물렌즈 40배로서 필터내의 50화면에 포함되는 대표경 1.345 μm(10화소 이상)되는 마멸분 전체에 대하여 이들의 파라미터를 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 형태 파라미터에 의한 마멸입자 형태분류

Table 1에는 SM45C의 경우 작용하중 5 kg에서 무첨가제 윤활유와 첨가제를 달리한 3종류, 스테아린산, DBDS 및 TCP를 첨가한 윤활유의 형태 파라미터의 평균치를 나타낸 것이고, 그리고 Fig. 2는 작용하중 5 kg에서 무첨가제와 3종류의 첨가제를 첨가한 윤활유의 형태 파라미터인 50% 체적경, 복잡도, 장단도 및 광택도의 대소를 (a) 미끄럼거리 초기 0~78 m와 (b) 말기인 156~234 m로 구분하여 마멸분 전체의 평균치를 간략화하여 나타낸 선도이다.

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

Table 1. Average values of shape parameter; specimen: SM45C, load: 5 kg

Parameters	No additive		Stearic acid		DBDS		TCP	
	0~78 m	156~234 m	0~78 m	156~234 m	0~78 m	156~234 m	0~78 m	156~234 m
50% vol. 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

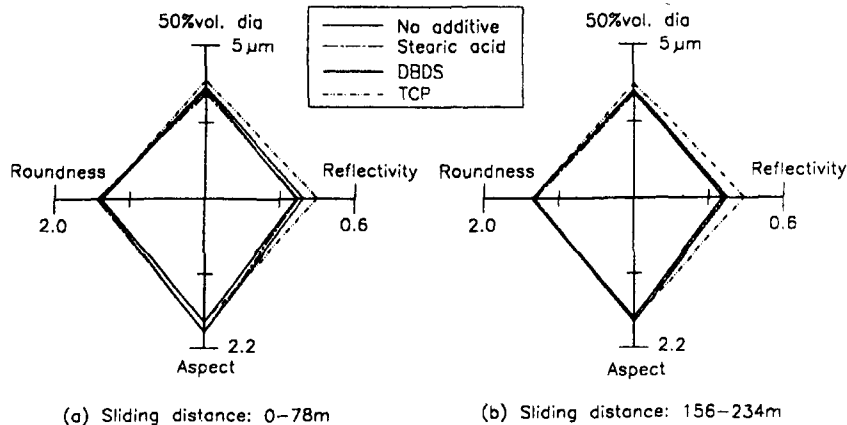


Fig. 2. Diagram of shape parameters for additives; specimen: SM45C, load: 5 kg.

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 미끄럼 거리가 증가할수록 3가지 형태 파라미터 값이 대체로 감소하는 것은 마찰시간의 증가와 함께 산화 반응이 진행된 결과라고 생각된다.

Fig. 3은 SM45C의 미끄럼거리 말기 156~234 m에서 무첨가제 윤활유 및 3종류의 첨가제를 첨가한 윤활유의 작용하중 변화에 따른 4가지 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 7 kg과 9 kg에서의 50% 체적경은 극압첨가제인 DBDS와 TCP를 첨가한 윤활유의 경우가 유성제인 스테아린산을 첨가한 윤활유보다 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 전술한 바와 같이 인산철의 반응막의 형성에 의한 영향으로 생각된다.

3-2. 윤활유 첨가제의 형태 파라미터 특징분포

윤활유 첨가제에 따른 마멸입자 형태 파라미터 사이의 특징 분포를 알기 위하여 Fig. 4에는 SM45C의 작용하중 9 kg의 경우 무첨가제와 3종류의 첨가제를 첨가한 윤활유의 미끄럼거리 초기 0~78 m에서 (a) 50% 체적경과 광택도, (b) 복잡도와 장단도와의 관계를 마멸입자 총수에서 입자 수 200개마다의 작은 집단으로 나눈 평균치를 표시한 것이다. 여기서 마멸입자 수 200개마다의 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 200개마다의 평균치를 이용하여 구하였다.

Fig. 4의 미끄럼거리 초기에서는 반응막을 형성하

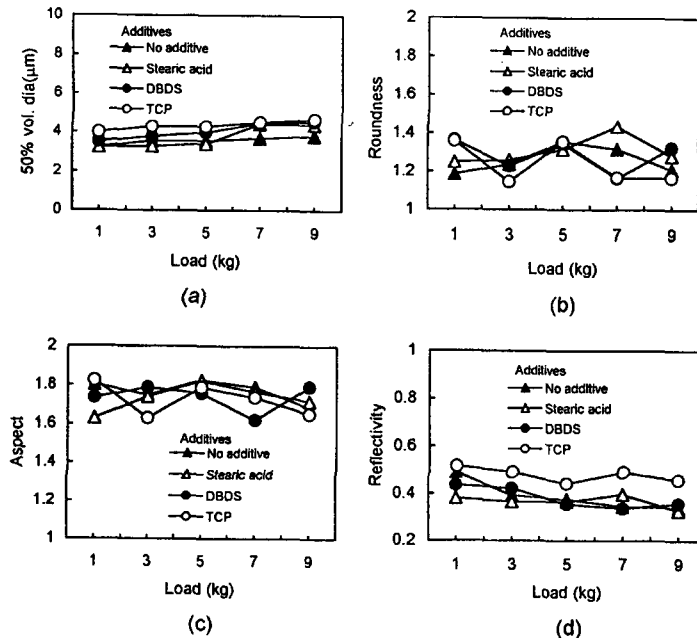


Fig. 3. Effect of applied load on the shape parameters; sliding distance: 156~234 m.

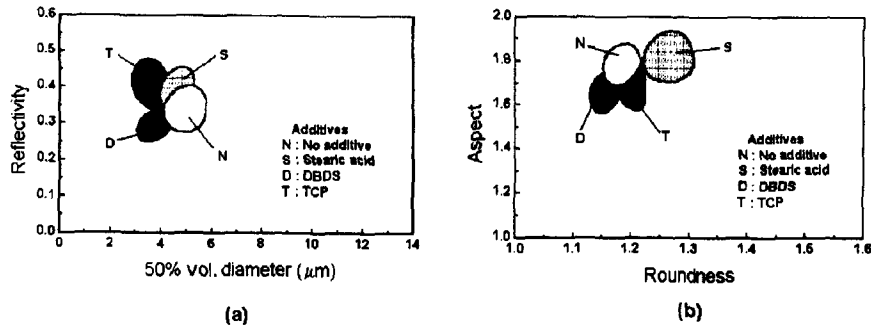


Fig. 4. Average value of shape parameters in every 200 wear debris for SM45C; load: 9 kg, sliding distance: 0~78 m.

는 극압첨가제인 DBDS 및 TCP를 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 9 kg의 고하중의 경우에는 극압 첨가제인 DBDS와 TCP의 영향으로 고하중에서 안정적인 전단 강도가 적은 반응막이 생성[12]된 결과이며, 또한 흡

착막을 형성하는 유성제인 스테아린산은 고하중이 되면 흡착막의 역할이 감소에 기인된 것이라고 생각된다. 마찰면에 형성된 이들 경계 윤활막의 형성 여부를 알기 위하여 Fig. 5에는 SM45C의 작용하중 9 kg 경우 DBDS를 첨가한 윤활유의 경우 (a) 마찰면의 2차 전자상과 마찰면에 형성된 (b) SK α 및 (c) OK α 의 사진을 EPMA를 이용하여 표면분석한 것이다. 그림 (a)의 마찰면에는 상대재인 볼의 트랙(track) 일부분과 트랙 주위에는 응착부분이 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 여기서 (a)의 응착부에는 (b) S 및 (c) O가 공존하고 있는 것에서 마찰면에는 DBDS의 첨가에 의한 유황과 산소와 철로 구성되는 화합물인 반응막이 형성되어 있다는 것을 나타내 주고 있다.

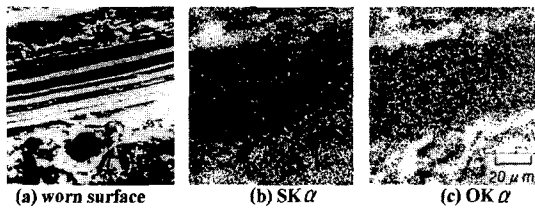


Fig. 5. SEM of worn surface and element analysis.

그리고 Fig. 6의 미끄럼거리 말기 156~234 m에서의 (a) 50% 체적경과 광택도, (b) 복잡도와 장단도와의 관계를 마멸입자 총 수에서 입자 수 200개마다의 작은 집단으로 나눈 평균치를 표시한 것이다. (a) 50% 체적경과 광택도의 경우 DBDS와 TCP를 첨가한 윤활유는 Fig. 4의 미끄럼거리 초기와 유사한 형태를 가지지만 미끄럼거리가 증가한 결과로 인하여 그 분포 범위가 다소 크게 나타나 있는 것을 볼 수 있다. 또한

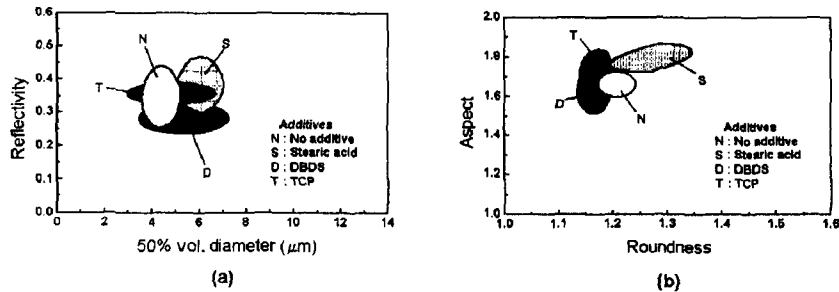


Fig. 6. Average value of shape parameters in every 200 wear debris for STB2; load: 9 kg, sliding distance: 156~234 m.

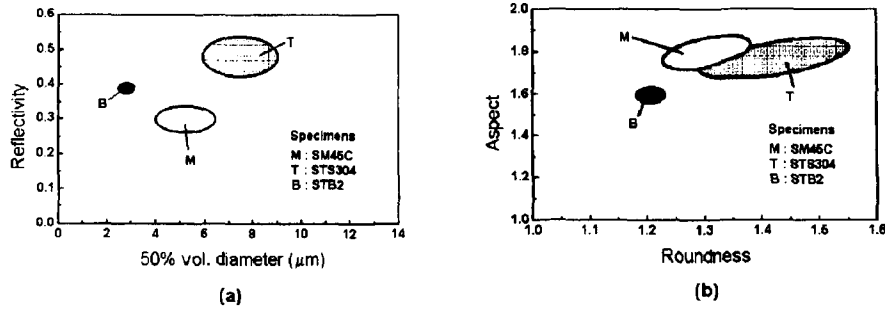


Fig. 7. Average value of shape parameters in every 200 wear debris for specimens; load: 5 kg, sliding distance: 156~234 m.

(b) 복잡도와 장단도와의 경우는 DBDS와 TCP를 첨가한 윤활유가 무첨가 윤활유보다 장단도는 다소 크게 분포하고 있지만 복잡도는 대체로 작은 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 이것은 미끄럼거리의 증가에 따라 전술한 바와 같이 전단강도가 적은 반응막[13]의 형성에 기인한 결과라고 생각된다.

Fig. 7은 스테아린산을 첨가한 윤활유의 경우 작용하중 5 kg, 미끄럼거리 말기인 156~234 m에서 3종류 시험편 SM45C, STS304 및 STB2의 형태 파라미터인 (a) 50% 체적경과 광택도와 (b) 복잡도와 장단도와의 관계를 역시 마멸입자 총 수에서 입자 수 200개마다의 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 200개마다의 결과로서 나타난 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. STS304의 경우 장단도가 매우 넓은 범위로 분포되어 있는 것은 경계윤활에서 일어나는 양 금속 접촉부의 실접촉에서 응착마멸에 의한 금속광택을 가진 큰 피상의 입자와 흑색의 박편상의 피로 마멸입자 및 산화마멸 입자가 실접촉부에서 상호이탈이 다른 두 재료보다 빈번하게 일어난 결과라고 생각된다. 그리고 광택도의 경우 STB2가 SM45C보다 큰 값을 가지는 것은 STB2에 함유되어 있는 특수원소인 Cr(1.52%)의 영향으로 SM45C보다 산화반응이 지연된 결과라고 생각된다.

Fig. 8은 인산계 극압 첨가제인 TCP를 첨가한 윤활유의 경우 STS304의 미끄럼 말기인 156~234 m에서 작용하중의 증가에 따른 마멸분 형태 파라미터인 (a) 50% 체적경과 광택도, 그리고 (b) 복잡도와 장단도와의 관계를 나타낸 것이다. 4가지 형태 파라미터는 작용하중이 7 kg까지는 전체 마멸분 입자의 총 수의 증가에 따라 그 분포범위가 넓어지고 있지만, 작용하중이 9 kg의 경우에는 감소하고 있다는 것을 볼 수 있다. 이것은 극압 첨가제인 TCP는 양 금속과 반응하여

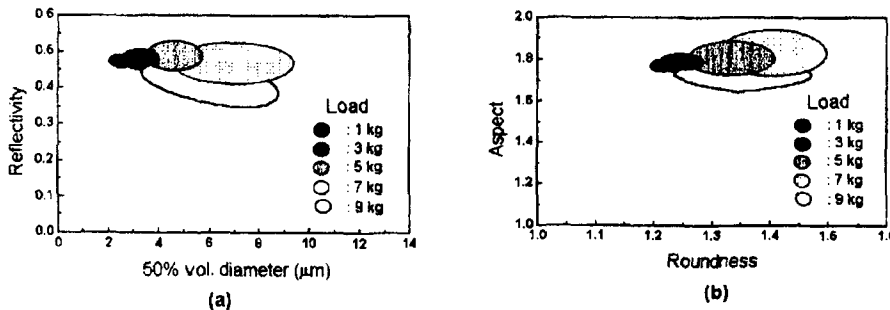


Fig. 8. Average value of shape parameters in every 200 wear debris for STS304; additive: TCP, sliding distance: 156~234 m.

인산철의 반응막이 고하중인 9 kg에서 그 영향이 나타난다는 것을 나타내 주고 있다고 생각된다. 즉, 인산계 첨가제에 의한 반응막은 저하중에서는 그 영향이 적고, 고하중에서는 접촉면의 온도상승에 의한 강한 반응성[14]을 나타내기 때문이라고 생각된다.

3-3. 윤활유 첨가제의 추정 마멸체적 계산

마멸분 형태정보를 이용하여 미끄럼거리 0~234 m (실험시간 총 9시간)까지의 3종류 시험편 재료인 SM 45C, STS304 및 STB2의 작용하중과 무첨가제 윤활유, 3종류의 첨가제인 스테아린산, DBDS 및 TCP를 첨가한 윤활유에 따른 작동조건에 따른 총 마멸체적의 추정치를 구하였다. 여기서 추정 마멸체적의 계산은 마멸입자의 두께를 Fig. 1의 대표경과 대등하다고 가정하고, 마멸입자 면적에 이 대표경을 곱하여 총 마멸체적을 추정하였다. 즉, 마멸분이 분포되어 있는 1 화면내의 하나의 마멸입자 체적을 V_i 라 하고, 1 화면내의 입자갯수를 n 으로 두었을 때 50화면 전체의 총 마멸체적 V_t 를 식 (1)로부터 구하였다.

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

Table 2에는 SM45C의 각 작용하중과 무첨가제와 3종류의 첨가제 윤활유의 변화에 따른 추정 총 마멸체적 V_t 를, 그리고 Fig. 9에는 Table 2의 V_t 를 나타낸 것으로서 총마멸체적 V_t 는 무첨가제 윤활유와 유성제인 스테아린산을 첨가한 윤활유의 경우에는 작용하중의 상승과 함께 증가하지만, 그 증가량은 스테아린산의 첨가제를 첨가한 윤활유가 무첨가제 윤활유의 V_t 보다 작용하중이 5 kg 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

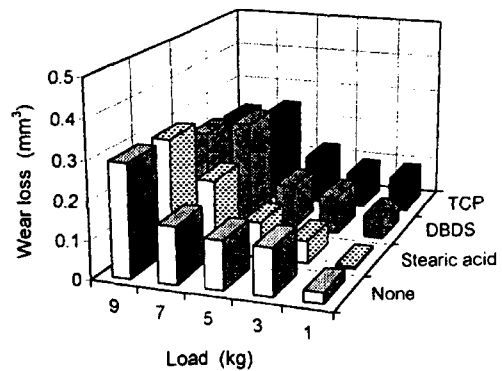


Fig. 9. Presumed wear loss for additives and load; specimen: SM45C.

7 kg까지는 무첨가 윤활제와 유사한 V_t 를 보이지만 작용하중이 9 kg의 경우에는 무첨가제와 스테아린산을 첨가한 윤활유보다 적은 값을 나타낸다는 것을 알 수 있다.

총마멸체적 V_t 가 무첨가제 윤활유보다 유성제인 스테아린산을 첨가한 윤활유의 경우에 작용하중이 5 kg 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 7 kg 이상의 작용하중에서는 V_t 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 7 kg까지는 무첨가 윤활제와 유사한 V_t 를 보이는 것은 이 하중까지에서의 극압첨가제의 역할은 하지 못하고, 작용하중이 9 kg의 경우에는 무첨가제와 스테아린산을 첨가한 윤활유보다 적은 값을 나타내는 것은 극압첨가제의 전형적인 작용의 결과라고 생각된다. 즉 극압첨가제인 DBDS와 TCP는 반응막을 생성시키지 못하지만 작용하중이 9 kg 이상에서는 접촉계면의 온도상승으로 인하여 금속표면과 반응하여 철화합물에 의하여 무기화합물의 반응막을 형성하여 양 금속간의 결합을 억제하기 때문으로 생각된다.

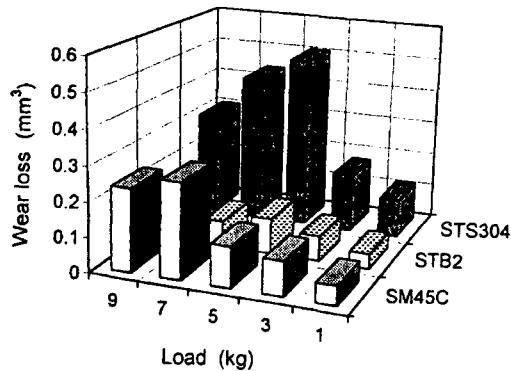
Table 3에는 DBDS를 첨가한 윤활유에서의 작용하

Table 2. Presumed wear loss for additives and load; specimen: SM45C

Load (kg) \ Additive	None	Stearic acid	DBDS	TCP
1	0.02814	0.00523	0.05643	0.08914
3	0.12356	0.05831	0.09865	0.09023
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

Table 3. 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 load; additive: DBDS.**

중의 변화에 따른 3종류 시험편 재료인 SM45C, STS 304 및 STB2의 총 마멸체적의 추정치 V_t 를 나타낸 것이고, Fig. 10에는 Table 3의 V_t 를 나타낸 것이다. 그림에서 처럼 극압 첨가제인 DBDS를 첨가하게 되면 작용하중의 증가에 따라 V_t 가 SM45C의 경우 작용하중 7 kg까지는 증가하지만 9 kg에서는 다시 감소하는 것을 알 수 있고, STS304와 STB2의 경우에는 5 kg까지는 V_t 가 증가하지만 7 kg에서부터는 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 생성 시키게 되며, 그 반응의 구동력은 마찰열에 의한 온도 상승과 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_t 가 최대 값을 나타내는 작용하중이 존재한다는 것을 나타내

주고 있다고 생각된다.

4. 결 론

작동중에 있는 윤활구동계의 윤활유 첨가제에 따른 마멸분 형태 해석을 위하여 불과 디스크형의 윤활마찰 실험장치를 통하여 마멸분 생성시의 유성제인 스테아린 산과 극압첨가제인 DBDS 및 TCP의 첨가제 윤활유의 변화에 따른 마멸분을 채취한 뒤 이를 컴퓨터 영상처리하여 마멸입자를 분류, 평가하고 해석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 윤활유 첨가제의 경계막의 형성에 따라 컴퓨터 영상처리에 의하여 마멸입자의 4가지 형태 파라미터의 서로 다른 특징과 분포범위의 식별이 가능하다.
2. 극압 첨가제인 TCP는 작용하중에 관계없이 스테아린산 및 DBDS를 첨가한 것보다 광택도가 가장 높다.
3. 작용하중이 9 kg인 고하중에서 극압첨가제인 DBDS 및 TCP는 마찰면에 형성되는 반응막의 영향으로 광택도를 제외한 3가지 형태 파라미터의 분포범위가 감소한다.
4. 3종류의 시험편 재료의 최대 마멸체적 추정치를 나타내는 작용하중이 존재하며, 이는 윤활유 첨가제의 반응특성에 의존한다.

참 고 문 헌

1. 樓井俊男, "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. Papay, A.G., "Friction, Friction Modifiers and Applications," JAST, Vol. 40, No. 4, pp. 274-279, 1995.
4. Kotvis, P.V., Tysoe, W.T. and James, M.N., "An Investigation of Film Removal in Extreme Pressure Lubrication using Chlorinated Hydrocarbon Additives," Wear, 153, pp. 305-314, 1992.
5. Akagaki, T. and Kato, K., "Effect of Additives on Wear Mode and Morphology Wear Debris Generated in the Lubricated Sliding of Steel," Wear, 143, pp. 119-135, 1991.
6. Hartley, R.J. and Papay, A.G., "Antiwear and Extreme Pressure Additives," JAST, Vol. 40, No. 4, pp. 326-331, 1995.

7. Kirr, T.B., Panzera, D., Anamalay, R.V. and Xu, Z.L., "Computer Image Analysis of Wear Debris for Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis," *Wear*, 181-183, pp. 717-722, 1995.
8. Thomas, A.D.H., Davies, T. and Luxmoore, A.R., "Computer image Analysis for Identification of Wear Particles," *Wear*, 142, pp. 213-226, 1991.
9. Roylance, B.J. and Raadnui, S., "The Morphological Attributes of Wear Particles-Their Role in Identifying Wear Mechanisms," *Wear*, 175, pp. 115-121, 1994.
10. Uedelhoven, W., Franzl, M. and Guttenberger, J., "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, "화상치리에 의한 기계윤활 운동면의 마멸분 형태해석," *한국윤활학회지*, 제12권, 제3호, pp. 72-78, 1996.
12. 임우조, 이진열, "윤활공학," 설운출판사, pp. 52-55, 1996.
13. 杉村丈一, 梅田彰彦, 鳥居 功, 山本雄二, "ニューラルネットワークによる摩耗粉の解析," *日本トライボロジ-會議豫稿集*, pp. 183-186, 1994.
14. 梅田彰彦, 杉村丈一, 山本雄二, "摩耗粉の形態と摩擦面の特徵", *日本トライボロジ-會議豫稿集*, pp. 374-376, 1996.