

Ferrography에 의한 마멸분 정량분석

오 성 모* · 이 봉 구**

(1999년 10월 13일 접수)

Quantitative Analysis of Wear Debris by Ferrography

Seong-Mo Oh and Bong-Goo Rhee

Key Words: Wear Debris(마멸분), Wear Particle Concentration (WPC)(전마멸량), Wear Severity Index (I_S)(마멸가혹도지수), Normal Wear Mode(정상마멸모드), Abnormal Wear Mode(비정상마멸모드).

Abstract

In contacting between surface, there is wear and the generation of wear particles. The particles contained in the lubricating oil carry detailed and important information about the condition monitoring of the machine. Therefore, This paper was undertaken for Ferrography system of wear debris generated from lubricated moving machine surface. The lubricating wear test was performed under different experimental conditions using the Falex wear test of Pin and V-Block type by Ti(C,N) coated. It was shown from the test results that wear particle concentration(WPC) ; wear severity Index(I_S) and size distribution have come out all the higher value by increases sliding friction time. By the Ferrogram a thin leaf wear debris as well as ball and plate type wear particles was observed.

1. 서 론

기계윤활면의 상호작용에 의하여 발생하는 마멸 분은 필연적으로 발생하게 되며 이 마멸 분의 형상은 윤활면과 손상에 직접적인 관계를 가지고 있다. 즉, 이러한 기계윤활면은 재질, 접촉형태, 마멸입자 등에 따라 매우 다양한 여러 마멸 문제를 수반하게 되는 데, 이 마멸현상은 극히 복잡하여 기계 윤활면의 손상과 직접적인 관계를 가지고 있다. 이러한 이유로 기계의 어느 부분이 고장이 나면 그 부분에서는 발열이 있고, 음향이나 진동 등의 이상이 생긴다.

또 그 고장에서 발생된 마멸분이나 열화생성분은 윤활유나 배출 슬러지(Sludge)로 나타나게 되고 이러한 수치를 검사해서 기계의 고장을 발견하는 것은 기계의 상태진단이나 보수유지를 위한 중요한 테마이다. 물론 그 원인이야 여러 가지로 해석되겠지만 신기술이 발달하여 여러 수치를 모니터링하며 신기술을 적용하여도 올바르게 판단하게 위해서는 기초분야가 필요한 것처럼 기계 윤활면의 윤활진단에 있어서도 윤활기구나 손상에 대해서 기초적 이해가 중요하다. 따라서 윤활제만 고려하면 고장원인을 여러 각도에서 파악하게 되는데 일반적으로는 윤활유의 동점도, 전산가, 수분, 오염물 등의 분석으로 윤활기구 손상의 기초적 이해를 지금까지 유도해 왔고, 마멸입자의 관찰과 해석이 마찰 면의 손상감지와 상태진단, 그리고 마멸기구의 해석에 있어서 많은 정보를 제공해준다는 것을 충분히 인식하고 있음에도 불

* 회원, 원광대학교 부설 공업기술개발연구소

** 회원, 원광대학교 기계공학부

E-mail : bgrhee@wonkwang.ac.kr

TEL : (063)850-6688 FAX : (063)850-6691

구하고 마멸입자에 대한 취급은 아직도 그 한계를 벗어나지 못하고 있으며, 또한 유효하게 활용되는 일은 적다.^(1~4) 현재까지 기계 윤활면에서 발생하는 마멸 입자의 해석은 강력한 자기를 이용하여 윤활유 중 고형이물의 크기, 형태, 색을 비롯한 재질 등을 측정하는 페로그래피(Ferrography)법과 마멸입자의 금속원소 분석으로부터 판단하는 SOAP(Spectrometric Oil Analysis Program)법이 대표적으로 이용되고 있다.^(5,6) 본 연구에서 사용한 페로그래피법은 강, 주철 등의 강자성체는 물론 모래, 슬러지, 구리 등의 비자성체 마멸입자까지 판별할 수 있는 방법으로써 표면개질층의 기계윤활면에서 발생하는 마멸 분을 정량·정성적으로 해석하기 위하여 핀 온 V블록 윤활 마찰실험으로 부터 발생하는 마멸 분을 시간대별로 채취한 뒤 페로그래피시스템(Computerized Ferrography System)을 이용하여 마멸분 생성시의 작동조건 즉, 작용하중, 미끄럼시간 등의 변화에 따른 마멸입자의 크기, 형태 및 전마멸입자량(WPC : Wear Particle Concentration) 등을 양과 질로써 분석하고자 한다.

2. 실험방법 및 조건

본 연구에 사용한 실험장치는 핀 온 V-블록 타입의 펠렉스 마찰·마멸 시험기에 의하여 윤활 마찰 실험하였으며, 시험부의 확대도를 Fig. 1에 나타내었다.

핀 시험편은 직경 6.35mm의 AISI 3135 강을, V-블록 시험편은 AISI 4130 강을 사용하였고, 여기에 Ti(C,N)으로 증착시켰으며, 이에 대한 실험조건이나 성상들은 Table 1에 나타내었다. 그리고 본 실험에 사용한 윤활유는 시판용 디젤 엔진유 SAE #30을 사용하였으며, 이에 대한 물성치와 열화기준 값을 Table 2와 Table 3에 나타내었다.

Fig. 2는 채취한 마멸분의 형태정보(형상, 크기 분포, 입자수)를 얻기 위한 페로그래피 시스템의 개략도를 나타내었으며, 이 페로그래피 시스템을 이용하여 정상마멸입자인지 또는 이상마멸입자인지를 판정하고, 이러한 대표적인 마멸 입자형태는 6가지로 참고문헌(5)~(10)에 의한다. 본 논문에서는 마멸분 생성시의 작동조건, 즉 작용하중, 미끄럼거리 등의 변화에 따른 마멸분의 크기, 형상 등의 수치 정보로부터 마멸분 형태 파라미터

를 분류, 평가하여 기계 윤활면의 마멸 분을 정량 및 정성적으로 해석하고자 하였으며, 실험조

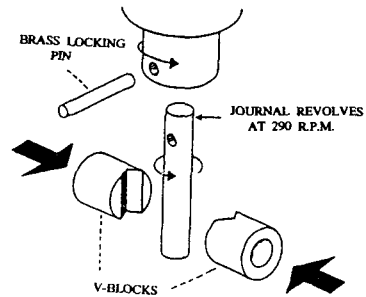


Fig. 1 Exploded view of V-blocks and journal arrangement

Table 1 Micro-structural and mechanical properties of Ti(C,N)

Properties	Ti(C,N)
Melting point, [°C]	3300
Density, [g/mm ³]	5.78
Hardness Hv, [kgf/mm ²]	4000
Friction coefficient with steel(dry condition)	0.55
Reaction material	CH ₄ , N ₂
Thermal expansion coefficient(10 ⁻⁶ /°C)	9.82

Table 2 Diesel engine oil of properties

Item	Lubricant	
	SAE #30	
Flash point (°C)	200	
Kinematic viscosity (1000°C), cSt	9.3~12.5	
Viscosity index	90	
Pour point (°C)	-22.5	
Total base number (mgKHO/g)	4	
Sulfated ash content (%)	1.6	

건은 다음과 같다. 미끄럼 속도는 9.5mm/s로 일정하게 하였고, 작용하중은 3.3kN과 5.5kN으로 변화시켰으며, 시험유는 시판용 디젤 엔진유 SAE #30로써 유육식을 채택하였다. 미끄럼 시간에 따른 시험유 채취는 1일 20시간 사용한 것을 기준으로 채택하였고, 또 서로 다른 비율로 희석시킨 3.3kN하중에서 4개의 오일샘플과 5.5kN하중에서 6개의 오일 샘플을 준비하여 샘플에 희석제(Diluent)를 사용하였다. 정량(Quantimet)분석에서 측정의 반복은 사용된 검출(Detectionlevel)에서 매우 민감하였으나 최적조건의 조정상태 하에서 3% 이내에 있었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 희석제(Dilution)에 의한 정량분석

정량분석에 의해 얻어진 결과들은 Table 4의 도표와 Fig. 3에 나타내었다.

Table 4는 희석제의 영향 즉, 희석비율에 대한 0.5 μ m이상크기의 입자수의 총합과 면적(Area), 절편(Intercept), 주변길이(Perimeter)의 초기측정값을 나타내었다.

이들 변수들은 높은 하중(5.5kN)에서 2~3배 정도 높았으나 절편인 경우는 5배까지 증가하였다. 반면 희석비율을 증가시켰을 경우 이들 변수들은 모두 반비례적으로 감소함을 보였다. 이에 대한 기준으로 Fig. 3에 샘플 희석과 입자의 총수의 변화를 나타내었다.

Table 3 Thermal control reference of engine oil

Item	Basic Number
Rate of viscosity increment	+50 ~ -30
Solvent insolubility	5 under
Wear metal (Fe, %)	0.2 over
Moisture (%)	0.2 under
Total base number (mgKOH/g)	1 over
Flash point (°C)	170 over

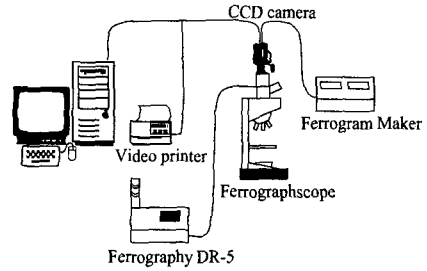


Fig. 2 Schematic diagram of Ferrography analysis system

Table 4 Initial measurements evaluation for a dilution effect

Sample dilution	Total No. of particles, (>0.5 μ m)	Area covered (A) (μ m ²)	Intercept (I) (μ m)	Perimeter (P) (μ m)
3.3 [kN]	5	368	2,327	674
	10	172	1,418	278
	15	120	855	220
	20	52	278	96
5.5 [kN]	0	1047	5,423	2,256
	5	528	4,878	1,645
	10	346	1,423	1,002
	15	260	1,146	896
	20	203	1,087	821
	30	111	696	449

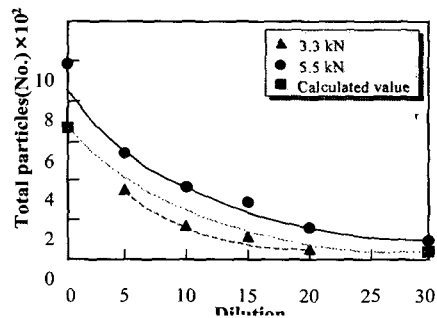


Fig. 3 Total particle count vs dilution oil samples from Falex test machine(SAE #30)

이때의 총 입자 수는 입자수의 총합 $\leq 1pp$ 와 입자수의 총합 $>1pp$ 일 때를 나타내었다.

Fig. 3에서 특이한 입자크기 대역폭(bandwidth) 내에 각각의 입자크기 분포는 회석제 샘플의 증가와 함께 지수 함수적으로 감소한다. 이러한 입자크기 분포의 변화는 마멸상태에 따라 결정되는 결과의 해석에 영향을 주는 경향이 있다. 면적에 대한 회석제의 영향에 대하여 3.3kN과 5.5kN의 하중조건에서 절편과 주변길이는 Table 4로 나타내었다. 회석 샘플에 관한 일반적인 함수를 정함에 있어서 Fig. 3의 결과에 따라 아래 식과 같이 Hyper exponential 함수의 형태로 표현할 수 있다. 방정식 (1)의 표현은 아래와 같이 대수의 변형에 의해 선형화 될 수 있다.

$$y = a \exp(-bx) \quad (1)$$

y = 입자수, 특정변수

(면적, 절편, 주변길이)

x = 회석 샘플의 등급.

a, b = 실험측정으로부터 계산된 상수

$$\ln y = -bx + \ln a \quad (2)$$

b = 함수의 기울기

$a = x$ 회석에 의한 어느 위치에서의 입자 값

방정식 (2)에 있어서 그 결과는 Fig. 3에 나타내듯이 선형화 되었고, 최소제곱법에 의해 최적의 직선을 결정하여 Fig. 4에 나타내었으며, 이에 따른 계산결과 우수한 상관계수로 나타내고 있다. 이 결과로부터 앞에서의 상관계수(Fig. 4)에 주목할 만한 감소가 있을지라도 그 기울기 값은 3.3kN의 하중에서 얻어진 값이 5.5kN 하중에서 얻어진 값보다 아주 작은 차이를 보였고, 그 같은 점에서 같은 하중에 다른 크기 범위에 대한 기울기의 변화는 매우 작다. 그리고 이것은 회석 샘플의 농도변화가 입자 분포에 현저한 영향을 끼치지 않는다는 것을 나타낸다. Fig. 4에서 더 큰 입자 분포의 기울기 값의 변화(i.e. 3-5 μm , >5 μm)는 회석이 증가됨에 따라 더 큰 범위에서 침전된 입자가 상대적으로 있기 때문에 얻어진 결과 일지 모른다.

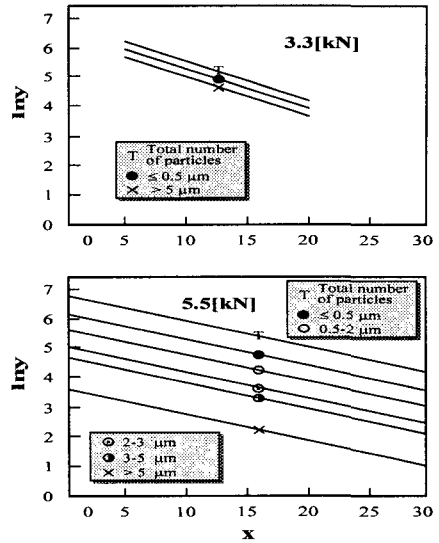


Fig. 4 Exponential plots vs dilution(x) at 3.3kN and 5.5kN

더욱이 페로그래프에 사용된 정량분석의 재료측정에서 침전된 매우 적은 입자의 분포를 사실적으로 표현해서 보여줄 수 있는 범위의 선택은 매우 어렵다. 따라서, 윤회된 시스템에서 마멸 입자의 분석방법들은 윤회유의 운반 상태에 의존되며 또한 입자 의존적이라고 할 수 있다. 때문에 입자 개체수내의 입자 크기 변화는 샘플에서 얻어질 수 있는 정보(Fig. A.2)로부터 시스템(Fig. (A.2))에 대한 마멸형태를 확립하는 것이 우선적으로 고려되어야 한다.

3.2 정상 마멸 모드에서의 마멸분 분석

길들여진 상태 즉, 정상마멸 모드에서 정기적으로 채취한 시료를 DR5 페로그래피로 전마멸분량(WPC)을 측정된 결과를 Fig. 5에 나타내었고, 시운전 때의 초기 마멸(Break in Wear)를 제외하고는 미끄럼 시간의 증가와 더불어 마멸분량이 증가하는 것을 알았다. 그리고 FM III의 50mm위치에서 페로그래프로 관찰된 10 μm 이상의 크기를 가진 비철금속의 입자수를 Fig. 6에 나타내었다. 여기에서 사용된 정량 페로그래피의 기준은 전 마멸분량(WPC), 마멸가속도 지수(I_S)의 양 값과, 비철금속의 마멸입자수(시험유 1ml당의 측정에서 페로그래프 상에 관찰되어진 10 μm 이상의 크

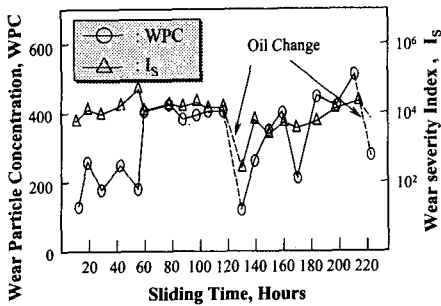


Fig. 5 Relation of wear particle concentration and wear severity index in normal wear

기의 비철금속 마멸입자 수)로 하였고, Fig. 5에서 WPC값과 I_s 값은 오일교환 직후에는 200과 10^2 정도로 낮은 값을 나타내지만, 사용 미끄럼이 시간이 증가함에 따라 윤활유의 열화에 의해 WPC값은 400~500정도, I_s 값은 $10^4 \sim 10^6$ 정도로 증가하는 것을 보였다.

따라서 WPC의 증가는 곧, 마멸가혹도지수 I_s 에 선행한다는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 기계상태진단(machine condition monitoring)에 있어서 이상유무를 판정하는 기준으로 페로그래프 상의 비철계 입자가 $10\mu\text{m}$ 이상의 입자크기의 수에 따라 윤활유의 교환시기를 예지하고 고장발생을 미연에 방지하여 준다. 여기에서 윤활유의 교환시기는 $10\mu\text{m}$ 크기의 입자수가 5/1ml개 일 때를 기준으로 하여 윤활유의 교환시기를 적용하였으며, 입자수가 10개 이상일 경우를 고장발생 시점으로 정한다.^(5,6) 따라서 페로그래프 상의 관찰 결과 $10\mu\text{m}$ 초기 이상의 입자수가 WPC값이나 I_s 값과는 다른 5개 이하로써 일정하였다.

Fig. 7은 광학현미경으로 촬영한 미끄럼 표면의 마멸분 사진으로서 마멸분 크기는 대체로 2~3 μm 크기이고, 마멸분 형태는 박편상의 정상마멸입자와 구상마멸입자가 동시에 나타났으며, 색상은 표면개질층으로부터 떨어져 나온 티타늄 입자의 본래의 백색에서부터 암갈색까지 혼재 되어있었다. 이것은 미끄럼 마찰의 초기단계와 시간의 경과에 따라 마찰의 증가와 더불어 박리되어 용융되면서 암갈색을 띠고, 초기단계에서 길들여지는 과정까지는 본래의 티타늄 표면개질층이 본래의

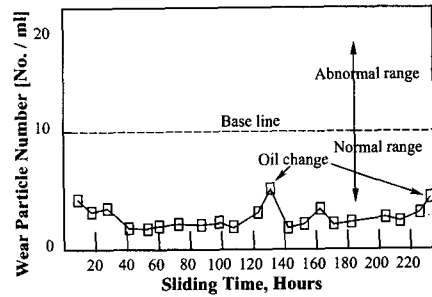


Fig. 6 Wear particle number for sliding time in the normal wear(for a $10\mu\text{m}$ over in nonferrous metals)

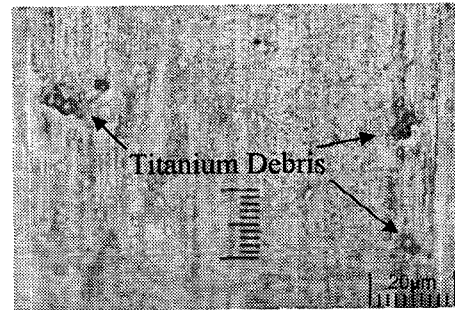


Fig. 7 Photograph of wear debris in friction surface (normal wear mode range)

색을 띠는 것으로 나타났다.

이상으로부터 정상 마멸 모드에서 발생된 메탈손상은 이상 징후 초기의 단계에서 메탈의 표층을 구성하는 티타늄 층이 손상되어 용융됨으로써 메탈손상에 영향을 주는 것으로 나타났다.

3.3 비정상 마멸 모드에서의 마멸분 분석

페로그래피는 기계의 시운전부터 정상, 비정상 상태의 마멸까지의 과정을 보여주는데 마멸분 분석에 의한 기계상태진단의 근본적인 전제는 비정상 상태의 마멸 모드는 마멸분의 크기 분포와 농도에서 사전에 성립된 기준선(Base line)(Fig. 6, Fig. 11)이상의 증가가 원인이 된다고 많은 연구자들도 한결 같은 결론에 도달하였다.⁽¹⁻⁵⁾

따라서, 윤활유를 교환하지 않은 상태에서 윤활

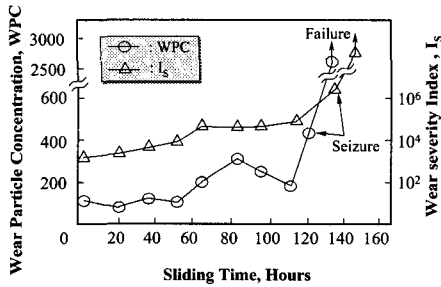


Fig. 8 Relation of wear particle concentration and wear severity index in abnormal state wear

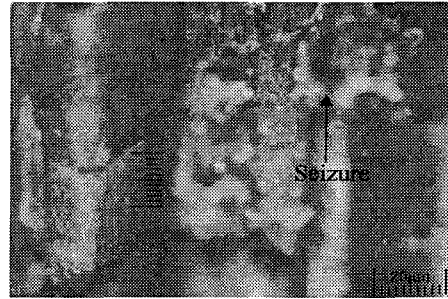


Fig. 9 Photograph of seizure occurred in friction surface

유의 열화 및 소부(seizure) 등의 트러블로 인한 이상상태가 발생하여 WPC나 I_5 값이 증가하고, 마멸분이 현저히 증가하는 시점에서 정량 페로그래피의 측정결과를 Fig. 8에 나타내었고, 소부 발생직후의 미끄럼 표면을 Fig. 9에 나타내었다. 미끄럼 시간 120~140시간에서 WPC와 I_5 는 페로그래피 기준과 함께 급증하게 되어 이상징후 및 고장발생에 대응할 수 있지만, Fig. 10에 나타난 것처럼 미끄럼시간 80시간의 소부 발생전 미끄럼 표면에서 Ti(C, N) 표면개질층과 암갈색의 철 마멸분이 발생하여, 이 시점에서는 고장의 징후를 예측할 수가 없다. 왜냐하면, WPC나 I_5 값은 주로 철계 마멸분을 기준으로 하기 때문에 Fig. 5의 결과가 일반적인 범위내에 있으므로 윤활유 교환만이 필요하였다. 그러나 페로그램 상에서 마멸분을 관찰한 결과, Fig. 11에 나타난 것처럼 소부 발생직후(Fig. 9)는 물론 소부 발생전 (Fig. 10)에서 $10\mu\text{m}$ 이상의 비철금속 입자가 다량으로 (10개 이상) 존재함을 알수 있었다. 이때의 마멸분 크기는 $5\sim 20\mu\text{m}$ 까지 다양하게 나타났고, 마멸분의 형태는 박편상 정상 마멸 입자로부터 평판상마멸입자까지 검출되었으며, 색에 대한 정보 또한 표면개질층의 손상으로 인한 메탈 손상까지는 정상 마멸 모드와 동일하였다. 소부가 일어나기 직전에서는 표면개질층인 $10\mu\text{m}$ 이상 크기의 티타늄 입자수가 점차 증가되어 메탈 손상에 따른 이상징후인 소부 발생에 직접적인 영향을 주었다. 그리고 소부 발생 시점으로부터 기계유회면에서 메탈 손상의 경우는 이상유무와 그 정도를 추정하는 기준으로써 시험유 1ml 당 측정에서 $10\mu\text{m}$ 이상의 크기를 가진 비철금속의 마멸입자가 10개

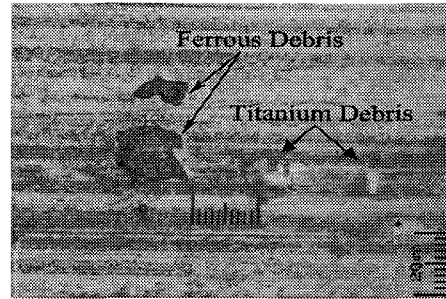


Fig. 10 Photograph of wear debris in friction surface (abnormal wear mode range)

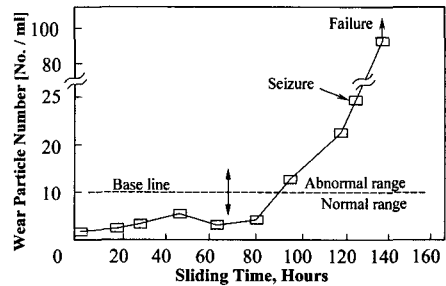


Fig. 11 Wear particle number for sliding time in the abnormal wear(for a $10\mu\text{m}$ over in non-ferrous metals)

이상 페로그램상에 관찰되어진 경우를 손상의 징후로 판정한다 (Fig. 6과 Fig. 11). 더욱이 메탈의 손상은 이상징후 초기단계에서 메탈의 표층을 구성하고 있는 티타늄 층이 손상되어 용융된 입자나 $10\mu\text{m}$ 이상의 입자로 마멸될 때 치명적인 소부 손상이 된다.

4. 결론

(1) 정량분석 입자측정은 마멸입자들이 한곳에 500개 이상이 침전되었을 때 25%정도의 참값을 보이는데 이것은 빛의 산란 영향이다.

(2) 초기단계에서 주로 표면개질층의 티타늄 입자가 나타났고, 미끄럼의 증가에 따라 WPC와 I_S 값도 2배 이상 증가를 보이며 $10\mu\text{m}$ 이상의 크기를 가진 메탈입자가 나타나 소부 발생의 원인이 되었다

(3) 마멸형태는 초기단계에서는 박편상 정상 마멸 입자와 구상 마멸 입자가 혼재되어 있었으나, 소부현상의 발생 전후로 평판상 마멸 입자까지 검출되었고, 마멸 입자의 색의 정보는 마찰시간의 증가에 따라 암갈색 및 흑색으로 나타났다.

(4) 미끄럼 마찰시간 증가에 따른 윤활유의 열화등은 WPC와 I_S 의 증가의 원인이 되었고, 큰 마멸입자일수록 산화되기 쉬우며, 마멸형태의 크기 증가 및 색상의 변화에 따라 기계상태의 이상 징후를 예견 할 수 있었으나 결과에 따른 검증 재현의 곤란성이 있었다.

참고문헌

(1) Thomas, A.D.H., Davies, T and Luxmoore. A.R., 1991, "Computer Image Analysis for Identification of Wear Particles," *Wear*, 142., pp. 213~226.
 (2) 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.
 (3) Sefect, W.W, and Westcott, V.C., 1972, "A Method for the Study of Wear Particles in Lubricating Oil," *Wear*, 21, pp.27~42.
 (4) 조용후, 오성모, 이봉구, 1998, "PVD방법에 의한 세라믹 코팅의 마멸특성 연구," 대한기계학회논문집 A권, 제22권, 제7호, pp. 1229~1236.
 (5) Moore, R.C & Perkins, Michael.D., etc, 1995, "Wear Particle Atlas," Manual, Predict co, pp. 50~153.
 (6) 田正明, 1994, "Tribological Characteristics and Diagnosis of Deteriorated Lubricating Oil," *トライボロジスト*, Vol. 39, No. 7 pp. 559~565.

(7) 倉橋基文, 澤雅明, 1994, "Tribology Management and Life Estimation of Steel Making Plants" *トライボロジスト*, Vol. 39, No. 7, pp. 598~599.
 (8) 김주향, 1987, "기계고장 예지를 위한 Ferrography와 SOAP의 응용," *윤활관리*, Vol. 16, No.2, 한국유화시험검사소, pp. 16~19.
 (9) 안효석, 1989, "기계상태 진단 및 보수유지 기술" *윤활관리*, Vol. 16, No. 4, 한국유화시험검사소, pp. 24~36.
 (10) 이봉구의 17인, 1991, "윤활공학" 정문출판사, pp. 491~493.

부록

Fig. A1은 디지털 측정기의 단위의 조건을 나타내며 10~190 단위의 범위를 가지고 L 기록 또는 S 기록을 선택하도록 되어있는 페로그래피 DR5(Ferrography Direct Reading 5)이다. 정상적인 마멸과정 즉, 정상마멸 모드의 길들여진 상태일 때는 약 $15\mu\text{m}$ 의 최대 직경의 입자를 발생시키는데 대다수가 $2\mu\text{m}$ 또는 그보다 작은 크기가 많고,

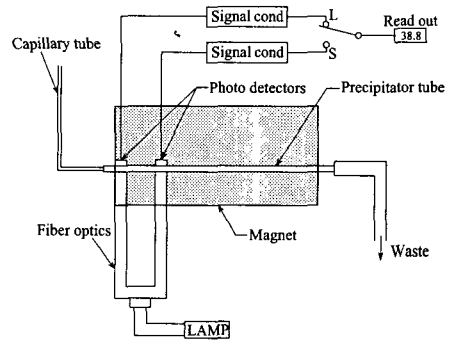


Fig. A1 Schematic of DR Ferrograph

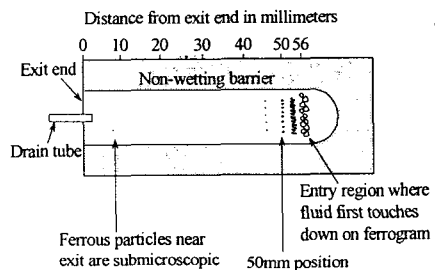


Fig. A2 Deposition pattern on Ferrogram

실질적인 최대크기는 마멸 모드에 달려 있다. 정량분석 정보는 변화하는 마멸상황의 페로그래피에 의해 얻어진 기록들을 선택된 페로그램 위치에서 입자에 퍼센트(%)범위로 나타나는 분석적 페로그램 FMIII(Ferrogram Maker III)으로부터 얻어진다.^(5,7) 이러한 상황을 잘 나타내어 주고있는 것이 Fig. A2로 페로그램 내에서의 침전 양상을 보인다.

Fig. A2에서 보듯이 출구로부터 거리 56mm에서 큰 입자가 위치하고 출구 쪽에 작은 입자들이 침전된다. 이때 페로그래픽 현미경을 통하여 50mm와 56mm위치에서 마멸분의 크기 및 형상을 측정 촬영한다.

이상과 같은 실험방법에 의거, $D_L + D_S$ 는 마멸량전체, $D_L - D_S$ 는 마멸의 이상정도를 나타내고, I_S 는 이상의 량과 질을 합한 척도가 되어 소위 마멸 가혹도 지수(Wear Severity Index)로서 판정에 이용된다.⁽⁵⁻⁹⁾ 전마멸분량 WPC(Wear

Particle Concentration)과 I_S 는 다음과 같다.

$$WPC = n (D_L + D_S) \quad (A1)$$

$$I_S = n^2 (D_L + D_S) (D_L - D_S) \quad (A2)$$

여기서

n : 채취 운할 시험유에 따른 희석배율

D_L : 페로그래피 DR5상의 큰 마멸입자량의 광학 밀도

D_S : 페로그래피 DR5상의 작은 마멸입자량의 광학 밀도

이러한 분석은 비교적 합리적인 지표로 보며 분석 페로그래피(FM III)도 원리는 같지만 Fig. A2에서 보는 바와 같이 별도의 장치를 사용하여 유리관상에 $10\mu\text{m}$ 이상의 크기를 가진 비철금속 마멸분의 크기를 자성에 따라 배열하는 페로그램을 만든다.