

Ferrography에 의한 표면개질층의 마모분 정량분석

오성모 · 이봉구*

원광대학교 대학원 기계공학과
*원광대학교 기계공학과

Quantitative Analysis of Wear Debris for Surface Modification Layer by Ferrography

Seong-Mo Oh and Bong-Goo Rhee*

Graduate School Wonkwang University
*Department of Mechanical Engineering, Wonkwang University

Abstract – Wherever there are rotating equipment and contact 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. This information may be deduced from particle shape, composition, size distribution, and concentration. Therefore, This paper was undertaken to 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) and wear severity Index (I_s), size distribution in normal and abnormal wear have come out all the higher value by increases sliding friction time. Wear shape is observed on the Ferrogram it was discovered a thin leaf wear debris as well as ball and plate type wear particles. This kind of large wear shape have an important effect not only metals damage, but also seizure phenomenon.

Key words – wear debris, wear particle concentration (WPC), wear severity index (I_s), normal wear mode, abnormal wear mode.

1. 서 론

상대적으로 움직이고 있는 기계윤활면은 재질, 접촉형태, 마모입자 등에 따라 매우 다양한 여러 마모 문제를 필연적으로 수반하게 되는 데, 이 마모현상은 극히 복잡하여 기계 윤활면의 손상에 직접적인 관계를 가지고 있다. 이러한 이유로 기계의 어느 부분이 고장이 나면 그 부분에서 발열이 있고, 음향이나 진동 등의 이상이 생긴다. 또 그 고장에서 발생한 마모분이나 열화생성분은 윤활유나 배출 슬러지(Sludge)로 나타나게 되고 이러한 수치를 검사해서 기계의 고장을 발견하는 것은 기계의 상태 진단이나 보수유지를 위한 필요불가분한 테마이다. 물론 그 원인이야 여러 가지로 해석되겠지만 신기술이 발달하여 여러 수치를

모니터링하여 신기술을 적용하여도 올바르게 판단하게 위해서는 기초분야가 필요한 것처럼 기계 윤활면의 윤활진단에 있어서도 윤활기구나 손상에 대해서 기초적 이해가 중요하다. 따라서 윤활제만을 생각한다면 고장원인은 여러 각도에서 파악하게 되는데 일반적으로는 윤활유의 동점도, 전산가, 수분, 오염물 등의 분석으로 윤활기구 손상의 기초적 이해를 지금까지 유도해 왔고, 마모입자의 관찰과 해석은 마찰면의 손상감지와 상태진단, 그리고 마모기구의 해석에 있어서 많은 정보를 제공해준다는 것을 충분히 인식하고 있음에도 불구하고 마모입자에 대한 취급은 아직도 그 한계를 벗어나지 못하고 있으며 또한 유효하게 활용되는 일은 적다[1-4]. 현재까지 기계 윤활면에서 발생하는 마모 입자의 해석은 강력한 자기를 이

용하여 윤활유 중 고형이물의 크기, 형태, 색을 비롯한 재질등을 측정하는 Ferrography 법과 마모입자의 금속원소 분석으로부터 판단하는 SOAP(Spec-trometric Oil Analysis Program)법이 대표적으로 이용되고 있으며[5-10], 본 연구에서 사용한 Ferrography법은 강, 주철 등의 강자성체는 물론 동 등의 비자성체 마모입자, 모래, 조각 등의 이물까지 결론을 얻을 수 있는 방법이다. 따라서 본 연구논문에서는 표면개질층의 기계 윤활면에서 발생하는 마모분을 정량적으로 분석하기 위하여 핀 온 V-블록 윤활마찰 실험으로부터 발생된 마모분을 시간별로 채취한 뒤 Ferrography 시스템을 이용하여 마모분 생성시의 작동조건 즉, 작용하중, 미끄럼시간 등의 변화에 따른 마모입자의 크기, 형태 및 전마모입자량(WPC: Wear Particle Concentration) 등을 양과 질로써 분석하고자 한다.

2. 실험방법 및 조건

2-1. 윤활 마찰 마모 실험

본 연구에 사용한 실험장치는 핀 온 V-블록 펠렉스 마찰·마모시험기에 의하여 윤활 마찰 실험하였으며, 시험부의 확대도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험 재료로서 핀 시험편은 직경 6.35 mm의 AISI 3135 스틸을, V-블록 시험편은 AISI 4130 스틸을 사용하였고, 여기에 Ti(C, N)을 PVD 방법으로 증착시켰으며, 이에 대한 성상들은 Table 1에 나타내었다. 그리고 본 실험에 사용한 윤활유는 시판용 디젤 엔진유(SAE#30)를 사용하였으며, 그 성상과 열화관리 기준치를 Table 2와 3에 나타내었다.

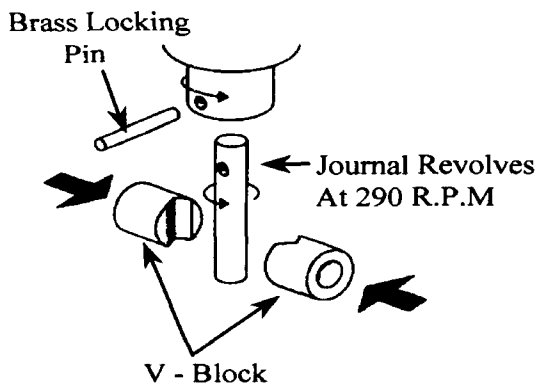


Fig. 1. Exploded view of V-blocks and journal arrangement.

실험조건으로는 미끄럼속도와 작용하중을 9.5 mm/s과 3.3 kN(750lb)로 일정하게 하였고, 미끄럼 시간에 따른 시료채취는 1일 20시간 사용기준으로 분석하였다.

2-2. Ferrography 시스템

Ferrography 분석에 있어서는 크게 나누어 2가지 방법이 있는데 그 하나는 고형이물의 양을 측정하는 Direct Reading(DR) Ferrography와 또 하나는 형태종류를 판정하는 FM III(Ferrogram Maker III) 방법으로 하고 있다. 이에 따른 전체적인 Ferrography 시스템을 Fig. 2에 나타내었다.

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 ste 1 (dry condition)	0.55
Reaction material	CH ₄ , N ₂
Thermal expansion coefficient (10 ⁻⁶ /°C)	9.82

Table 2. Diesel engine oil of standard

Item	Lubricant	SAE #30
Flash point (°C)		200
Kinematic viscosity (100°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

Table 3. Thermal control reference of engine oil

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

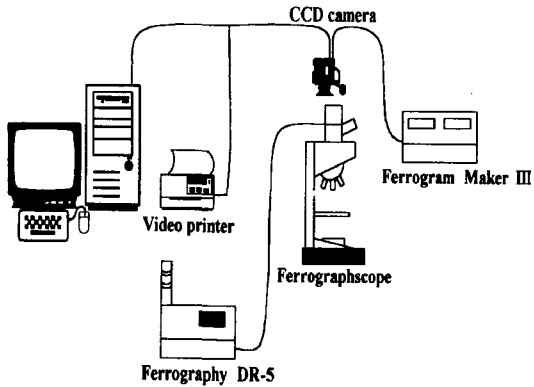


Fig. 2. Schematic diagram of Ferrograph analysis system.

여기서 DR Ferrography는 마모량에 주안점을 둠으로서 금속분석의 철분 등과 함께 같게 되지만 커다란 입자가 섞여 있어도 문제되지 않아야 하는 등의 입자대소 배합에 의해 마모이상까지도 판정할 수 있는 것이 특징이다. 즉 DR-Ferrography의 실험 방법으로는 Fig. 3의 원리도에 의하여 $5\ \mu\text{m}$ 이상의 커다란 입자와 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 인 작은 입자의 광학밀도 D_L , D_S 를 측정하게 된다.

여기서 D_L+D_S 는 마모량전체, D_L-D_S 는 마모의 이상 정도를 나타내고, I_s 는 이상의 량과 질을 합한 척도가 되어 소위 마모 가혹도 지수(Wear Severity Index)로서 판정에 이용된다. 이러한 분석은 비교적 합리적인 지표로 생각된다고 보며 분석 Ferrography(FM III Ferrogram)도 원리는 같지만 Fig. 4에서 보는 바와 같이 별도의 장치를 사용하여 유리판상에 $10\ \mu\text{m}$ 이상의 크기를 가진 비철금속 마모분의 크기를 자성에

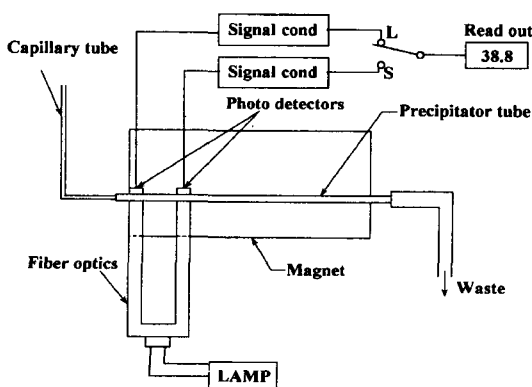


Fig. 3. Schematic of DR Ferrograph.

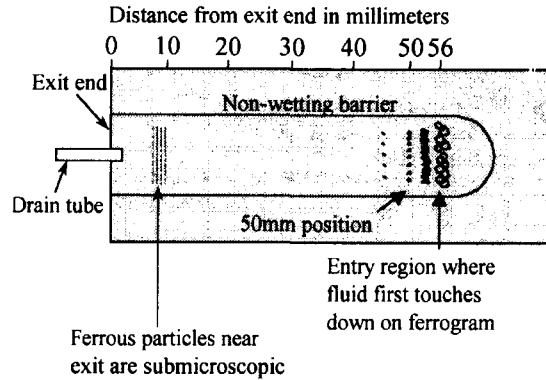


Fig. 4. Deposition pattern on a Ferrogram.

따라 배열하는 Ferrogram을 만든다. 이의 Ferrogram을 광학현미경을 사용하여 반사, 관찰하여 형, 색, 재질 등으로부터 정상마모입자인지 또는 이상마모입자인지를 판정한다. 그리고, 그 대표적인 마모 입자형태는 6가지로 참고문헌[5-10]에 의한다.

3. 실험 결과 및 고찰

3-1. 정상 마모 모드에서의 마모분 분석

전혀 이상이 없는 길들여진 상태(Running in condition) 즉, 정상마모 모드에서 정기적으로 채취한 시료를 DR Ferrography로 전마모분량(WPC)을 측정된 결과를 Fig. 5에 나타내었고, 시운전 때의 초기 마모(Break in Wear)를 제외하고는 미끄럼 시간의 증가와 더불어 마모분량이 증가하는 것을 알았다. 그리고 FM III의 50 mm 위치에서 Ferrogram으로 관찰된

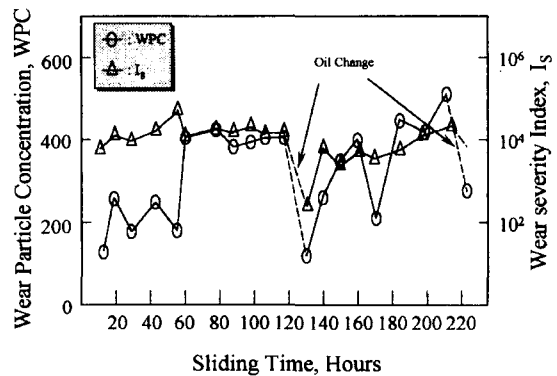


Fig. 5. Relation of wear particle concentration and wear severity index in normal wear.

10 μm상의 크기를 가진 비철금속의 입자수와 마모분의 형태를 Fig. 6, 7에 나타내었다.

여기에서 사용된 정량 Ferrography의 기준은 전 마모분량(WPC), 마모가혹도 지수(I_s)의 양 값과, 비철금속의 마모입자수(시험유 1 ml당의 측정에서 Ferrogram 상에 관찰되어진 10 μm 이상의 크기의 비철금속 마모입자 수)로 하였고,

$$WPC = n(D_L + D_S) \tag{1}$$

$$I_s = n^2(D_L + D_S)(D_L - D_S) \tag{2}$$

여기서, n: 채취 윤활 시험유에 따른 희석배율, D_L: DR FeG상의 큰 마모입자량의 광학 밀도, D_S: DR FeG상의 소 마모입자량의 광학 밀도이다.

Fig. 5에서 WPC 값과 I_s 값을 오일교환 직후에는 200과 10² 정도로 낮은 값을 나타내지만, 사용 미끄럼이 시간이 증가함에 따라 윤활유의 열화에 의해

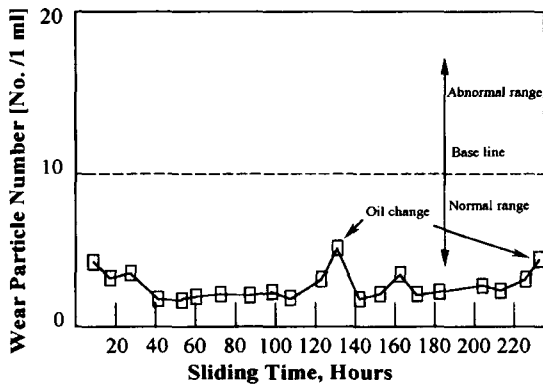


Fig. 6. Relation of wear particle number for sliding time (for a 10 μm over in nonferrous metals).

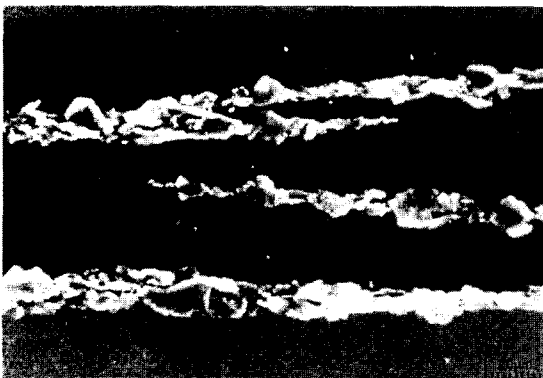


Fig. 7. Photo. of wear debris in Ferrogram.

WPC 값은 400~500 정도, I_s 값은 10⁴~10⁶ 정도로 2 배 이상 증가하는 것을 보였다. 따라서 WPC의 증가는 곧, 마모가혹도지수 I_s에 선행한다는 것을 알수 있었으며, 이에 따른 기준은 Ferrography만이 갖는 시운전부터 정상마모에 이르기까지의 마모분 크기를 아주 작은 입자에서 가장 큰 입자 크기까지를 고려한 입자 평형 농도가 방정식 (3), (4)에 의해 동적 평형을 유지함으로써 일관되어지고, 오일 교환시 Fig. 5에 나타나듯 지수함수적으로 접근된 것으로 판단된다. 즉, 평형입자 농도는 물질적 균형에 근거를 둔 다음의 방정식에 의해 성립된다.

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{P_i K C_i}{V} \tag{3}$$

여기서, C_i: 어떤 크기 I(mg/l)의 입자의 농도, P_i: 어떤 크기 I(mg/l)의 입자의 산출율, K: 일정한 이동율 (Removal rate)(l/h), V: 오일의 체적(l), t: 시간(h).

만일 (3)의 방정식이 초기시간과 농도를 일정하게 하면

$$C_i = \frac{P_i}{K}(1 - e^{-kt/v}) \tag{4}$$

로써 평형농도는 마모율에 정비례하고 이동율에 반비례함을 알 수 있다.

Fig. 6은 기계상태진단(machine condition monitoring)에 있어서 이상유무를 판정하는 기준으로 Ferrogram상의 비철계 입자가 10 μm 이상의 입자크기의 수에 따라 윤활유의 교환시기를 예지하고 고장발생을 미연에 방지하여 준다.

여기에서 윤활유의 교환시기는 10 μm 크기의 입자수가 5/1 ml개 일 때 기준[5,6]으로 하여 윤활유의 교환시기를 적용하였으며, 10개 이상일 경우는 고장 발생시점으로 한다[5,6]. 따라서 Ferrogram상의 관찰 결과 10 μm 초기 이상의 입자수가 WPC 값이나 I_s 값과는 다른 5개이하로써 일정하였고, 이때의 마모분의 형태를 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 8은 정상상태모드에서, Ferroscope로 촬영한 미끄럼 표면에서 마모분 사진으로써 마모분 크기는 대체로 2~3 μm 크기이고, 마모분 형태는 박편상의 정상마모입자와 구상마모입자가 동시에 나타났으며, 색상은 표면개질층으로부터 떨어져 나온 티타늄 입자의 본래의 황동색에서부터 암갈색까지 혼재 되어있었다. 이것은 미끄럼 마찰의 초기단계와 시간의 경

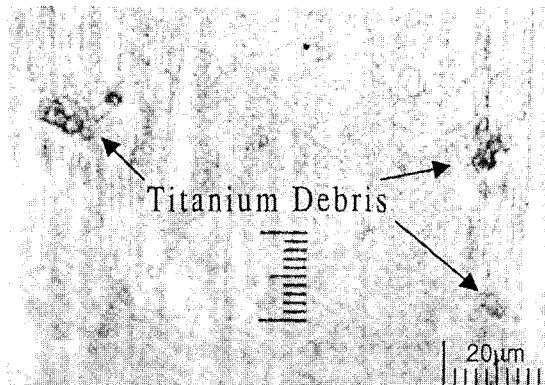


Fig. 8. Photo. of wear debris in surface friction(normal wear mode range).

과에 따라 마찰의 증가와 더불어 박리되어 용융되면서 암갈색을 띠고, 초기단계에서 길들여지는 과정까지는 본래의 티타늄 표면개질층이 본래의 색을 띠는 것으로 나타났다. 이상으로부터 정상 마모 모드에서 발생된 메탈손상은 이상 징후 초기의 단계에서 메탈의 표층을 구성하는 티타늄 층이 손상되어 용융됨으로써 메탈손상에 영향을 주는 것으로 나타났다.

3-2. 비정상 마모 모드에서의 마모분 분석

Ferrography는 기계의 시운전부터 정상, 비정상상태의 마모까지의 과정을 보여주는데 마모분 분석에 의한 기계상태진단의 근본적인 전제는 비정상상태의 마모 모드에서 사전에 성립된 기준선(Base line)(Fig. 6, Fig. 12)위에서 마모분의 크기 분포와 농도의 증가가 원인이 된다고 많은 연구자들도 한결 같은 결론에 도달하였다[1-5].

따라서, 윤활유를 교환하지 않은 상태에서 윤활유의 열화 및 소부(seizure) 등의 트러블로 인한 이상상태가 발생하여 WPC나 I_s 값이 증가하고, 마모분이 현저히 증가하는 시점에서 정량 Ferrography의 측정결과를 Fig. 9에 나타내었고, 소부 발생직후의 미끄럼 표면을 Fig. 10에 나타내었다. 미끄럼 시간 120~140시간에서 WPC와 I_s 는 Ferrography 기준과 함께 급증하게 되어 이상징후 및 고장발생에 대응할 수 있지만, Fig. 11에 나타난것처럼 미끄럼시간 80시간의 소부 발생전 미끄럼 표면에서 Ti(C, N) 표면개질층과 암갈색의 철 마모분이 발생하여, 이 시점에서는 고장의 징후를 예측할 수가 없다.

왜냐하면, WPC나 I_s 값은 주로 철계 마모분을 기

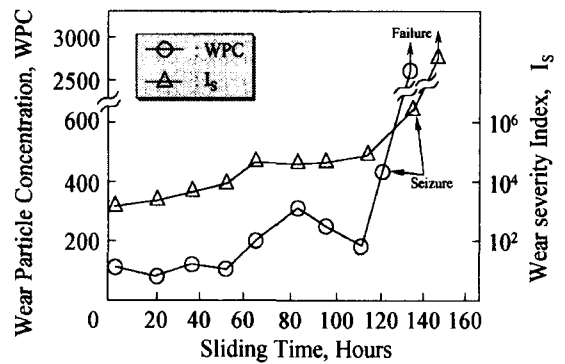


Fig. 9. Relation of wear particle concentration and wear severity index in abnormal state wear.

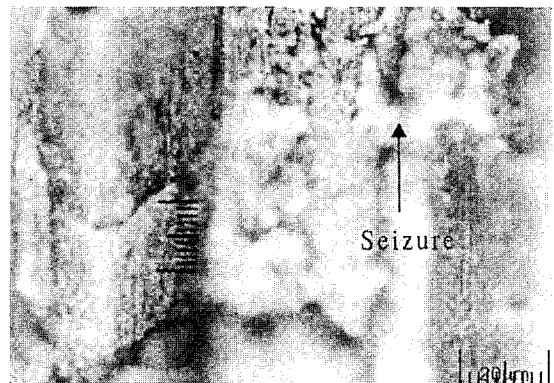


Fig. 10. Photo. of seizure occurred in surface friction.

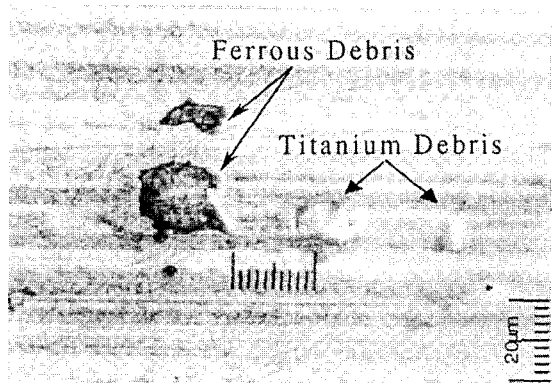


Fig. 11. Photo. of wear debris in surface friction (abnormal wear mode range).

준으로 하기 때문에 Fig. 5의 결과가 일반적인 범위 내에 있으므로 윤활교환만이 필요하였다. 그러나 Ferrogram상에서 마모분을 관찰한 결과, Fig. 12에 나

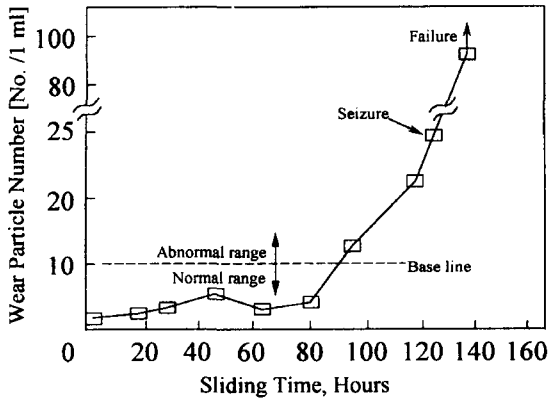


Fig. 12. Relation of wear particle number for sliding time (for a 10 μm over in nonferrous metals).

타난것처럼 소부 발생직후(Fig. 10)는 물론 소부 발생전(Fig. 11)에서 10 μm 이상의 비철금속 입자가 다량으로(10개 이상) 존재함을 알수 있었다.

이때의 마모분 크기는 5-20 μm까지 다양하게 나타났고, 마모분의 형태는 박편상 정상 마모 입자(Fig. 7)로부터 평판상마모입자까지 검출되었으며, 이에 따른 마모분의 형상을 Fig. 13과 Fig. 14에 나타내었다. 색에 대한 정보 또한 표면개질층의 소손으로 인한 메탈 손상까지 정상 마모 모드와 동일하였다. 소부가 일어나기 직전에서는 표면개질층인 10 μm 이상 크기의 티타늄 입자수가 점차 증가되어 메탈 손상에 따른 이상 징후인 소부 발생에 직접적인 영향을 주었다. 그리고 소부 발생 시점을 이상으로부터 기계 윤회면에서 메탈 소손의 경우는 이상유무와 그 정도를 추정하는 기준으로써 시험유 1 ml당 측정에서 10 μm 이상의 크기를 가진 비철금속 마모입자가 10개

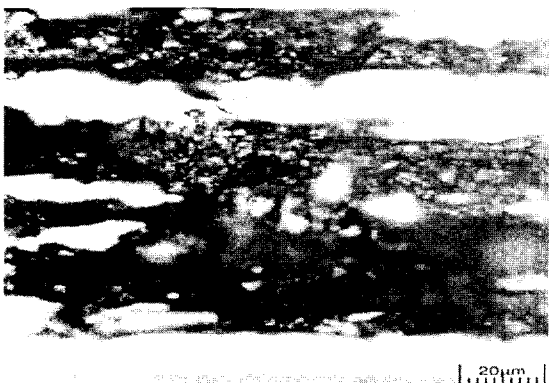


Fig. 13. Photo. of thin leaf wear debris.



Fig. 14. Photo. of a plate type wear debris.

이상 Ferrogram상에 관찰되어진 경우를 손상의 징후로 판정한다(Fig. 6과 Fig. 12).

더욱이 메탈의 손상은 이상징후 초기단계에서 메탈의 표층을 구성하고 있는 티타늄 층이 손상되어 용융된 입자나 10 μm 이상의 입자로 마모될 때 치명적인 소부 손상이 된다.

4. 결 론

1. 초기단계에서 주로 표면개질층의 티타늄 입자가 나타났고, 시험기간의 경과에 따라 WPC와 I₁ 값도 2 배 이상 증가를 보이며 10 μm 이상의 크기를 가진 메탈입자가 나타나 소부 발생의 원인 되었다.
2. 마모형태는 초기단계에서는 박편상 정상 마모 입자와 구상 마모 입자가 혼재되어 있었으나 소부현상의 발생 전후로 평판상 마모 입자까지 검출되었다.
3. 마모 입자의 색의 정보는 초기단계에서 티타늄 입자의 황동색이 주류를 이루었으나 시험시간의 증가를 따라 암갈색으로 변화하였으며, 소부현상 이후 흑색의 마모입자로 검출되었다.
4. 미끄럼 마찰 시험기간의 경과에 따라 윤활유의 열화 등에 의해 WPC나 I₁의 증가의 원인이 되었고, 마모형태의 크기 증가 및 색상의 변화에 따라 기계 상태의 이상 징후를 예견 할 수 있었으나 결과에 따른 검증 재현의 곤란성이 있었다.

참 고 문 헌

1. Thomas, A. D. H., Davies, T. and Luxmoore, A. R., "Computer Image Analysis for Identification of Wear

- Particles," *Wear*, 142, pp.213-226, 1991.
2. 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*, 183, pp.717-722, 1995.
 3. Sefect, W. W. and Westcott, V. C., "A Method for the Study of Wear Particles in Lubrication Oil," *Wear*, 21, pp.27-42, 1972.
 4. Roylance, B. J. and Raadnui, S., "The Morphological Attributes of Wear Particles-Their Role in Identifying Wear Mechanisms," *Wear*, 175, pp.115-121, 1994.
 5. Moore, R. C. and Perkins, M. D., etc. "Wear Particle Atlas," Manual, Predict Co., pp.50-153, 1995.
 6. 田正明, "Tribological Characteristics and Diagnosis of Deteriorated Lubricating Oil.," *トライボロジスト*, Vol.39, No.7, pp.559-565, 1994.
 7. 倉橋基文, 澤雅明, "Tribology Management and Life Estimation of Steel Making Plants," *トライボロジスト*, Vol.39, No.7, pp.598-599, 1994.
 8. 이봉구 외 17인, "윤활공학", 정문출판사, pp.491-493, 1991.
 9. 김주향, "기계고장 예지를 위한 Ferrography와 SOAP의 응용," *윤활관리*, Vol.16, No.2, 한국유화시험검사소, pp.16-19, 1989.
 10. 안효석, "기계상태 진단 및 보수유지 기술," *윤활관리*, Vol.16, No.4, 한국유화시험검사소, pp.24-36, 1989.