

마멸입자분석에 의한 기계의 예방정비에 관하여

강 석 춘

공군사관학교 기계공학과 교수

1. 머리말

기계를 사용할 때는 보통 손상 될때까지 작동시키고 손상이 발견되면 수리하여 다시 사용한다. 그러나 이러한 기계 취급방법은 생산성을 감소시키고 주변 기계를 파괴시키며 인명손상을 초래하는등 값 비싼 운영방법이다. 따라서 대단위 공장이나 복잡하고 고가 장비를 관리하는데 예방 정비기술을 도입하는 것은 매우 경제적이고 바람직하다.

윤활제통의 기계 관리에 가장 효과적으로 개발 이용되고 있는 마멸 입자 분석에 의한 예방 정비기술에 관해 알아보고 앞으로 국내 기계 공업의 발전에 적용 가능성을 제시하고자 한다.

먼저 예방정비에서 오일 분석 방법이 갖는 잇점을 열거하면 다음과 같다.

- (1) 인명 손상이 예측되는 경우 위험 상황을 예방
- (2) 생산에 차질을 초래하는 예기치 못한 기계가동 정지 현상을 예방
- (3) 심한 부품의 손상에 의한 다른 부품의 파손을 방지
- (4) 대 수리의 경우 요구 수리 부품의 축소
- (5) 손상부품의 추적에 의한 정비 시간단축과 손상 원인 파악이 가능

2. 마멸의 일반

마멸은 기계의 상호 운동을 하는 부분에서 마

찰에 의해 일어난다. 이때 마찰과 마멸을 감소시키기 위하여 윤활제를 이용하고 있으나 마찰 및 마멸을 완전히 제거할 수는 없다. 따라서 마멸되는 입자들은 윤활제(윤활유가 주로 사용)속에 녹거나 섞이면서 윤활 기관에 계속 존재한다. 그러므로 윤활유를 정량, 정성적으로 분석하여 마멸물 함유량(농도)에 의해 정상, 비정상을 구분하고, 성분비나 주요 성분을 조사하여 비정상 마멸부위나 부품을 추적하는 것이 가능하다.

만약 정상적으로 작용하는 경우에 금속의 마멸량은 일정한 비율로 생성된다. 따라서 윤활유 소모가 없는 경우에 시간에 대한 마멸물 함유량은 이론적으로 그림 1과 같이 변한다.

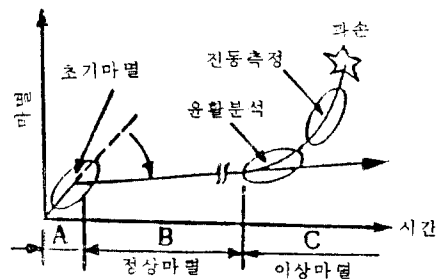


그림 1 작동시간에 대한 마멸금속 함유량

비정상 상태의 마멸은 일반적으로 마멸율이 가속되고(그림 1의 C) 마멸입자의 크기와 양이 그림 2와 같이 증가된다.

만약 상태가 계속되면 부품은 완전손상을 초래하고 2차 파손인 다른 부품에도 손상을 입히

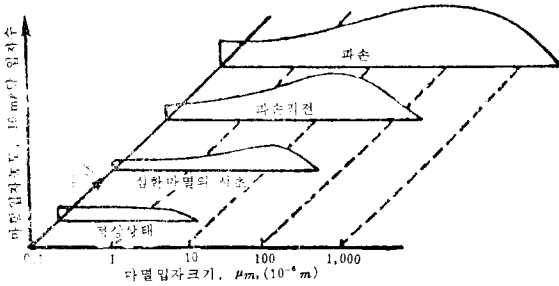


그림 2 마멸입자 크기와 마멸입자 농도와의 관계

게 된다. 그림 1에서 A구역의 경우는 초기 길들이기 (break-in, running-in)의 과정으로써 마멸 증가율이 증대되나 계속되지 않는한 큰 문제를 일으키지는 않는다.

마멸입자에 의한 예방정비는 구역 B와 C의 경계를 찾아내는 방법이고 진동이나 소음에 의한 손상 탐지는 C의 구역에서 완전손상 직전이나 발견될 수 있어 효과적인 탐지 기술이 되지 못한다.

마멸입자 분석 방법은 분광식 분석방법 (spectrometric oil analysis)과 페로그래피 (ferrography) 방법이 있다.

3. 분광식 오일분석 방법

이 방법은 1947년 미국의 철도회사가 디젤 기관차의 엔진 마멸율을 측정하기 위하여 윤활유를 화학 분석하기 시작함으로써 시작 되었다. 다음 해인 1948년에는 미 해군이 터어빈이나 왕복엔진의 오일 분석을 위해 실험실을 설치 운영 하였고 곧 이어 미 공군에서도 같은 계획을 추진하기 시작하였다. 그 후 이 방법에 의해 수많은 함정과 항공기엔진 손상의 점검 및 예방정비를 가능케 해줌으로써 인명 손실 예방등 놀랄 만한 성과를 보았고 현재 전 세계 항공기 정비에 필수적인 장비가 되었다. 이 방법의 가장 큰 잇점은 윤활유 여과기 (oil filter)에 의해 여과되지 않는 마멸입자 및 용해된 성분을 0.1 ppm까지 정확히 정량, 정성적으로 분석이 가능하여 복잡한 윤활 계통의 종합 진단이 가능하고 각 성분의 증가율 비교에 의한 손상부위를 쉽게 추적

할 수 있다는 점이다. 또 분석 가능한 원소는 이론적으로 전부 가능하고 주로 분석 대상이 되는 원소로는 Ag, Al, Cr, Fe, Mg, Ni, Pb, Si, Sn, Ti, Zn 등이며 이 분석으로 알 수 있는 마찰성분과 마멸부품과의 관계를 예로 들면 표 1과 같다.

표 1 분광법에 의해 탐지된 마멸 성분과 마멸부품

알루미늄	: 피스톤, 베어링, 터어보과급 케이스
구 리	: 베어링
크 롬	: 피스톤 링, 실러너 라이너
철	: 실러너 라이너, 그랭크 축, 피스톤 링, 캠
납	: 베어링
주 석	: 베어링
실 티 콘	: 모래, 오염물질

3.1 원자방출 (Atomic Emission) 식 분광방법
이 방법은 윤활유 내에 있는 마멸물 함량을 전기적 방전에 의해 정량, 정성적으로 분석하며 그림 3과 같은 구성을 가지고 측정 원리는 다음과 같다.

- (가) 분석하려는 윤활유 샘플을 병 뚜껑에 넣고 탄소 전극 원판 A를 회전시키면서 물혀준다.
- (나) 정확히 조절된 고전압에 의한 방전불꽃이 수직 전극 B와 회전원판 A사이에서 윤활유를 태워준다.

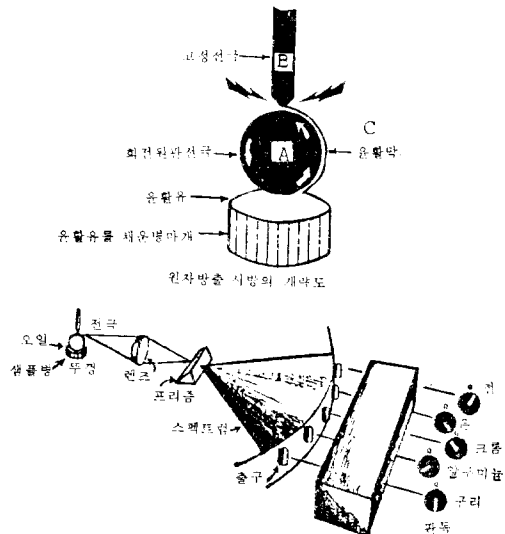


그림 3 원자방출 시방의 분석방법

(다) 타고 있는 윤활유로부터 발생하는 빛은 탐지하고자 하는 금속에 해당되는 파장에 위치한 구멍으로 통과시킨다.

(라) 빛이 구멍을 통과함에 따라 광전관들은 빛 파장을 전자적인 에너지로 변환시키고 에너지 양에 따라 ppm으로 환산된다. 이때 농도(ppm)를 기록하거나 읽으면 된다.

3.2 원자흡착(Atomic Adsorption) 분석 방법

이 방법 역시 윤활유 내에 있는 마멸물을 정량, 정성적으로 측정하는 장비로써 분석원리로 그림 4와 같이 윤활유 샘플을 불꽃속에 집어넣어 타도록 하여 높은 온도로 가열시킨다. 이때 고온에서 금속들은 분자사이의 화학 결합이 깨지고 각 원자들은 샘플주위를 자유로이 부유할 수 있다. 이 조건에서 원자들은 자외선이나 가시광선을 흡수한다. 각 원소들이 흡수하는 파장의 폭은 원소마다 서로 다르고 또 함유량에 따라 흡수되는 빛 에너지가 다르므로 원소의 성분과 농도를 측정할 수 있다.

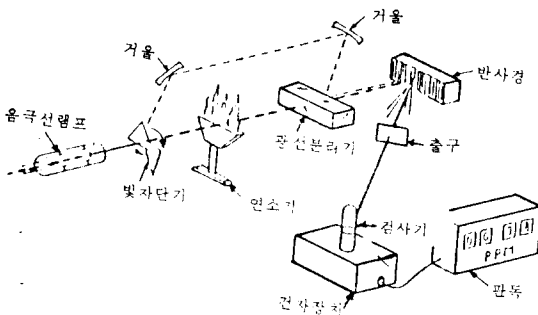


그림 4 원자흡착 시방의 구성 및 배열

3.3 분광식 측정방법의 특성

분광식 유체 분석 방법은 윤활 유체내의 마멸물 함유량이 비정상적으로 증가하는 경우의 손상을 탐지 하는데만 매우 효과적이다. 따라서 이 방법의 특징은 아래와 같다.

(1) 탐지가 용이한 경우

가. 심하게 마멸되고 있는 피스톤 링, 밸브스프링 및 밸브가이드 등

나. 손상되는 베어링이나 리테이너

다. 마멸이 심하게 되고 있는 기어나 저널 베어링

라. 잘못 조립 혹은 배열된 경우나 윤활이 불충분한 경우의 마멸현상

마. 마멸입자가 액체에 용해됐거나 아주 작은 경우($1\mu\text{m}$ 보다 적은 경우)

(2) 탐지가 힘든 경우

가. 마멸입자의 크기가 $10\mu\text{m}$ 이상인 경우

나. 갑작스런 파괴에 의한 손상

다. 윤활유의 공급이 차단되어 건조 마찰이 되는 경우

라. 마멸물을 생성시키지 않는 피로 파괴의 경우

마. 마멸입자가 비금속인 경우

3.4 마멸입자 분석에서 고려할 사항

윤활유 샘플은 채취방법과 취급에 주의가 필요하다. 샘플이 오염되었던지 샘플용기의 불결 등은 불확실한 결과를 초래할 수 있다.

또 새 윤활유에 대한 분석으로 기준치를 설정하는 것이 첨가제의 영향을 분리하는데 도움이 된다. 부식에 의한 마멸이나 모래 및 불순물의 주입은 현미경 조사등의 보조분석이 요구된다.

마멸 금속의 농도 관계는 두개의 변수를 갖는다.

첫째는 윤활유 소모와 보충이고 다음은 마찰에 의한 마멸금속의 생성이다. 그림 5는 윤활유 손실이 계속 보충된다는 가정의 경우이나 실재는 그림 6과 같은 톱니 모양으로 주기적인 윤활유 보충과 교환의 영향을 받는다. 그림 7은 비정상적인 경우 오일교환에 의한 영향을 나타낸다. 그림 8은 실제적인 오일 분석의 예이다.

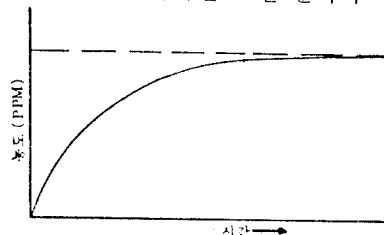


그림 5 계속 윤활유가 보충된 경우의 마멸물 함유량 관계

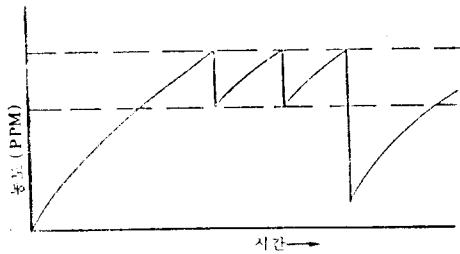


그림 6 주기적인 윤활유 보충과 교환의 영향

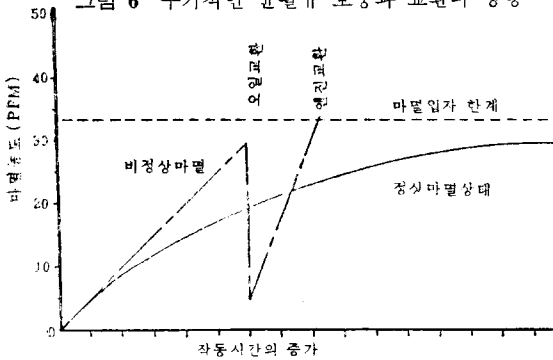


그림 7 정상적인 경우와 비정상적인 경우의 마멸 함유율을 관계

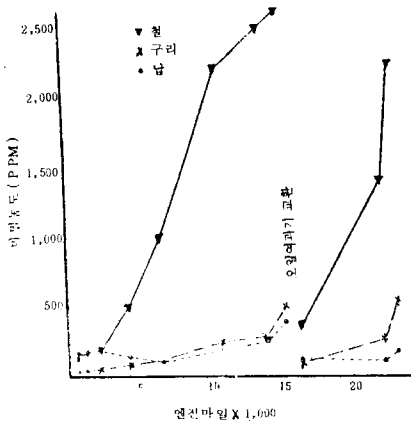


그림 8 분광식 오일분석의 예 (자동차의 엔진)

4. 페로그래피 (Ferrogaphy)에 의한 윤활유 분석법

이 방법은 종래 사용되오던 분광식 마멸입자 분석 방법이 마멸입자가 10 μm 이상 되는것을 분석할 수 없고 마멸원인에 관한 마멸 메카니즘의 자료도 제시할 수 없다는 단점을 해결하기 위해 1970년대 후반에 개발한 것이 페로그래피

윤활 분석방법이다. 이 이름은 미국 Foxboro 사가 개발한 상품명이고 의미는 iron writing 으로써 윤활유나 유압유 또는 그리스에 포함된 마멸입자의 분석이 가능하다. 분석 가능한 입자의 크기는 1 μm 에서 250 μm 사이가 되고 100 μm 이상의 경우는 칩 검출기 (chip detector)의 사용이 가능하다.

페로그래피는 정량 페로그래피 (direct reading)와 분석 페로그래피 (analytical ferrogaphy)의 2가지 방법이 있다.

4.1 분석 페로그래피

분석 페로그래피는 그림 9에 표시한 바와 같은 원리로 윤활유에서 마멸입자를 분리한다. 먼저 윤활유를 용매로 고온 (70~80°C)에서 용해 회석시켜 맑게한 다음 중력에 의해 경사진 페로그래프 슬라이드 (얇은 유리에 접착제를 붙인 것)위로 흘려 보낸다. 유리판 아래에 있는 자석의 자장은 윤활유가 흐르는 상류쪽이 강하고 하류쪽으로 갈수록 약해진다. 따라서 유리판 위로 흐르는 윤활유 샘플 중 큰 마멸입자는 상부에 흡착되고 하부로 갈수록 작은 입자가 중력과 자력에

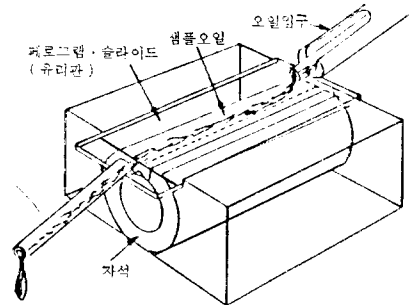


그림 9 페로그래피 원리

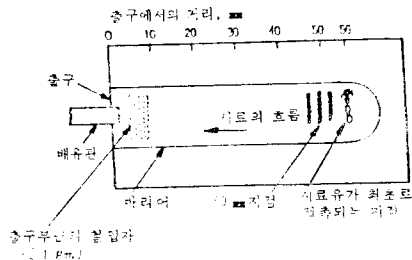


그림 10 페로그래프 슬라이드

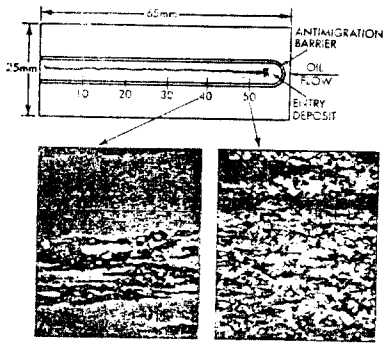


그림 11 배열된 마멸입자의 예

1 正常磨滅粒子	2 剪削型磨滅粒子
<ul style="list-style-type: none"> ●薄片狀 ●表面平滑 ●0.5~5μ 	<ul style="list-style-type: none"> ●가늘고 긴 ●鋒利稜角 ●25~100μ
3 浮遊磨滅粒子	4 平板狀磨滅粒子
<ul style="list-style-type: none"> ●豆扁狀 ●細孔(凹痕)多 ●1~5μ 	<ul style="list-style-type: none"> ●表面, 粗糙 ●배이런(稜角)多 ●20μ以上
5 磨蝕磨滅粒子	6 其他粒子
<ul style="list-style-type: none"> ●薄片狀 여러 ●스트라이프(條痕) ●20μ以上 	<ul style="list-style-type: none"> ●砂 ●물리다 ●屑

그림 12 대표적 마멸입자 형태

의해서 배열된다.

유리판 위에 배열된 마멸입자는 그대로 유리 표면에 부착되고 윤활유를 씻은 뒤에 보관되며 그림 10과 같은 페로그래프 슬라이드를 페로스코

프라는 2색 원광 현미경에 의해 관찰된다(그림 11). 페로스코프에 의해 농도를 상대적으로 알 수 있고 철 및 다른 금속의 정성분석은 산(HCl, NaOH)에 의한 용해 여부와 가열상태에서 색변화를 살펴 봄으로써 Al, Ag, Cr, Cd, Mg, Mo, Tz, Zn 등을 구분할 수 있다. 또 마멸입자 형태는 전자현미경(SEM)등을 페로스코프와 같이 이용하면 그림 12와 같이 구분할 수 있다.

4.2 정량 페로그래피법

정량 페로그래피는 그림 13과 같은 구조를 갖고 있다. 1~3m³의 적은 양의 윤활유가 흡입 방법에 의해 유리관에 흐를때 관 아래에 있는 자력에 의해 마멸입자가 크기에 따라 모이게 된다. 이때 5μm보다 큰 입자는 관 입구에 모이고 1~2μm 정도의 입자는 몇 mm 뒷쪽으로 크기에 따라 모이게 된다. 이때 분석은 강도가 알려진 빛을 두지점에서 관에 수직으로 비출때 입자들에 의해 약해진 빛이 통과하며 통과된 빛의 강도를 광전 소자에 의해 감지하고 밀도 비교치를 숫자화 해서 자료를 얻는 방법이다.

만약 기계가 정상적으로 작동하면 큰입자와 작은 입자의 비는 비교적 작은 값이 될 것이다. 또 작동 시간에 따라 크게 변하지 않고 평형을 이룬다. 이 평형상태는 여과기나 침전에 의해 또는 작동중에 분쇄되어 유지되지만 윤활계에서 비

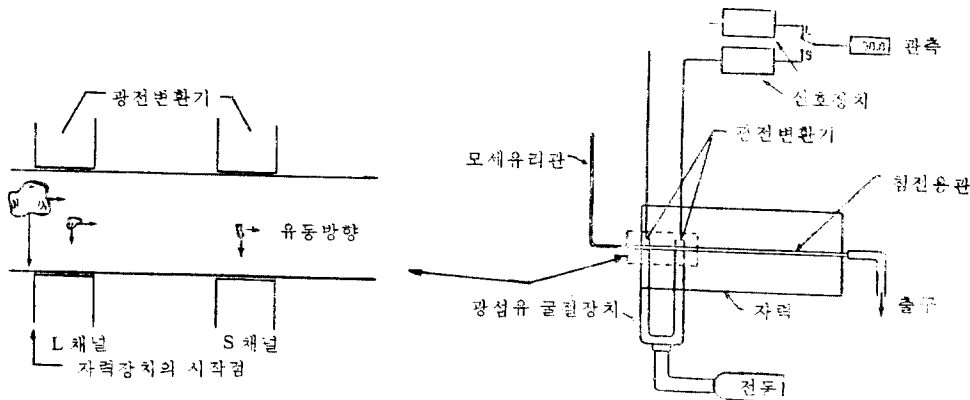


그림 13 정량 페로그래피 개략도

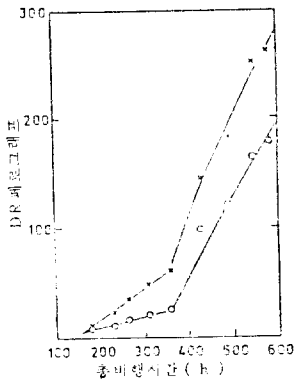


그림 14 정량 페로그래피의 분석 예 (항공기엔진)

정상 또는 심한 마멸이 생기면 큰 입자의 생성율은 증가되기 시작하고 작은 입자와의 비가 달라지기 시작한다. 입자의 전체양과 큰 입자의 농도 변화가 동시에 일어나면 심한 마멸이 시작된 것을 의미한다.

정량 페로그래피에 의한 실험 분석 실풀가 그림 14에 제시되어 있다.

4.3 페로그래피 (Ferrography) 분석의 특징
이 방법은 다음과 같은 이유로 비정상 마멸상태를 탐지하고 진단하는데 정확하게 이용된다.

(1) 페로그래픽 분석방법은 1~250 μm의 크기분포를 가진 마멸입자 분석에 매우 효과적이다.

(2) 페로그램은 자동적으로 입자의 마멸기구를 알 수 있도록 크기에 따라 분포된다. 따라서 현미경 조사에 의해 다른 방법으로는 탐지할 수 없는 기계의 손상 원인을 파악할 수 있는 자료를 얻을 수 있다.

(3) 페로그래픽 조사는(분광식 방법이 단지 원소만을 정의함) 철 및 비철의 합금도 정의하는 것을 가능케 한다.

(4) 페로그래픽 방법은 여러 마멸 모우드를 결정짓는 것과 마멸이 비정상적인 부분을 찾아내는 것이 모두 가능하다.

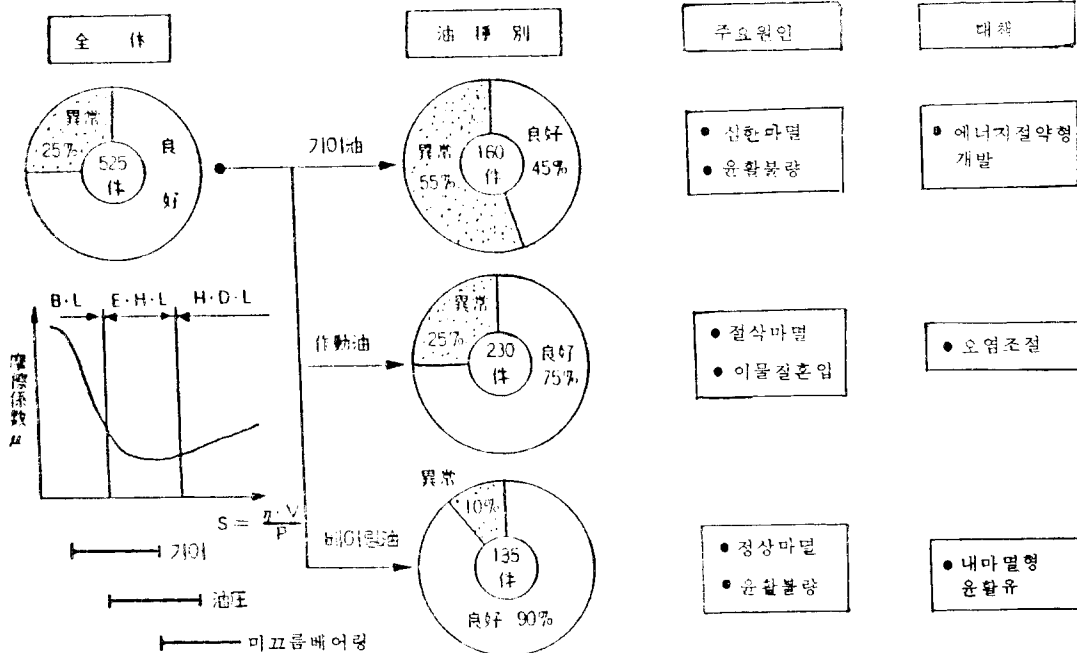


그림 15 제철설비의 페로그래피에 의한 진단 예

4.4 페로그래피에 의한 분석

마멸 입자의 형태는 그림 12와 같이 구분될 수 있으며 이 자료를 관찰하여 기계부품과의 상관관계를 알아내고 또 운전상태를 진단 할 수 있다.

실제로 윤활유 중에 존재하는 마멸입자는 매우 다양하므로 윤활과 마멸에 대한 지식 및 기계설비 구조에 대한 이해와 경험을 필요로한다.

그림 15는 제철설비의 진단결과이다. 이것은 설비에 따라 큰 차이가 있다. 즉, 경계윤활에 가까운 기어계통에 이상이 많고 유체 윤활상태에 있는 미끄럼 베어링이 가장 적으며 유압계통은 중간상태에 있다.

윤활유 제조분야에서는 마멸의 각종 현상 즉 마멸량, 마멸입자의 분포, 화학조성 및 마멸입자형상, 마멸양상등이 결정되므로 페로그래피 방법은 매우 유의한 것으로 인정된다. 또 이때 얻는 각종 정보자료로 그림 16과 같은 윤활계의 마멸관리가 가능하다.

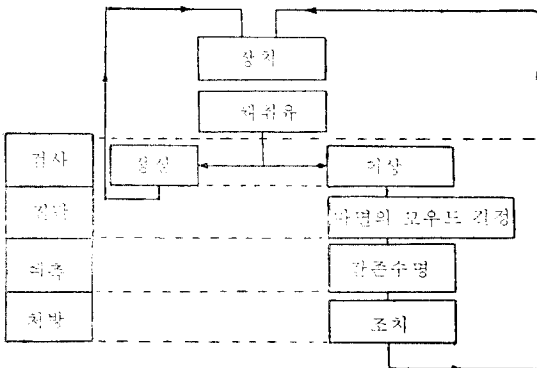


그림 16 윤활 마멸입자 조사에 의한 윤활계통 예방 정비 및 대책

5. 맺음 말

공업화가 가속되고 기계설비가 대단위화 되며 장비의 가격 및 생산성이 크게 증가함에 따라 기계의 운영 및 관리 문제의 중요성이 점점되고 있다. 따라서 대기업 혹은 같은 분야의 중소기업끼리 장비들의 관리방법을 개선시키고 보다 효율적으로 운영하기 위한 꾸준한 노력이 필요하다. 그중 윤활유에 대한 마멸입자 분석은 가장 효과적이고 선진국에서 이미 상당히 보급되어 이용되고 있어 몇가지 방법을 소개하므로써 장차 국내에서도 많은 관심 및 응용이 필요할 것으로 확신한다.

참고 문헌

- (1) 강석춘, 1984, "분광식 오일분석을 이용한 기관 예방점검에 관하여", 윤활유험회보, 제 7 호, pp. 4~7.
- (2) E.R. Bowen, D. Scott, W.W. Seifert and V.C. Westcott, 1976, "Ferrography", Tribology International, Vol. 9, No. 3, pp. 109~115.
- (3) D. Scott, 1983, "The Application of Ferrography to the Condition Monitoring of Gas Turbine", Wear, Vol. 90, pp. 21~29.
- (4) P.M. Ricca and P.M. Bradshaw, 1984, "Advanced Features Mark Trans-Alaska Pipeline", Oil and Gas Journal, PennWell Publishing Co.
- (5) "페로그래피 분석법과 기계의 고장진단", 윤활관리, Vol.13, No. 3, 1986.