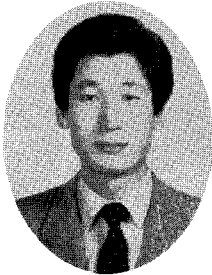


潤滑技術

TRIBOLOGY와 CONDITION MONITORING 技術



韓國科學技術院
機械潤滑研究室
金錫賢(工博)

1. 序論

Tribology라는用語는 1960年代 中盤까지만 하더라도 아무도 사용하지 않던 생소한 造語中의 하나지만 사실상 人類가 歷史를 기록한 이래로 이 分野 技術이 잘 定義되지 않은 채 文明生活의 方便으로 기여해 온 바 크다는 것은 갖가지 史料로서도 알려지고 있다. 1960年頃 英國의 Cambridge 大學校의 D. Tabor가 當時 각 분야의 技術자 및 과학자들이 當面하고 있던 dilemma를 해결하기 위한 대담중에 半 농담조의 tribology(그리스 단어 tribus 즉 미끄러진다는 意味에 큰 거를 둔 것)라는 용어를 사용한 것이 이 技術分野의 체계정립에 基點이 되어 60年代 中반에는 英國정부의 公式보고서에서 이 낱말이 사용되었으며 “물리학, 素材學, 化學, 기계공학, 수학等等을 포괄하는 interdisciplinary 學問分野”로 소개되고 있다. 미국의 機械학회(ASME)에서도 과거 수십년의 歷史를 가졌던 潤滑分科(Lubrica-

tion Division)을 최근 Tribology分科로 改稱하고 이분야 活動범위를 再定義하려 시도하고 있다. 한편 뿌리를 찾는 努力도 엿보여 英國 Leeds 大學校의 D. Dowson은 그의 발표를 통해서 고대 이집트로부터 컬럼부스에 이르는 기간의 이 분야 技術 발전상을 소개하고 있다.

表 1은 최근 美國기계학회의 tribology分科에서 소속회원들에 배포한 設問紙中 일부로써 이 표 위에 各者の 흥미과제들을 表示토록한 것인데 이러한 많은 技術배경을 가진 전문가들이 協同하여 하나의 共通分野를 形成해 나아가고 있다. 한편 미국의 科學財團(NSF)에서도 최근 tribology분야의 중점 연구개발 과제들을 제시하고 있는데 그中 하나가 所謂 tribo- 시스템의 診斷 技術이다. tribo- element나 tribo- system 이라하면 技術집약적인 機械要素와 그것이 구성하는 기계시스템을 칭하는 것으로써 이것에 對해 신뢰도가 높고 비용이 저렴한 on-line方法의 감시와 비파괴 評價를 함으로써 機계의 운전도중에

표 1. 미국기계학회에서 정리한 tribology 분야의 범위

AREAS OF CURRENT INTEREST :

- | | | | | |
|--|---|--|---|---|
| <input type="checkbox"/> Friction | <input type="checkbox"/> Bushings | <input type="checkbox"/> Seals | <input type="checkbox"/> Materials | <input type="checkbox"/> Surface Temperatures |
| <input type="checkbox"/> Lubrication | <input type="checkbox"/> Splines | <input type="checkbox"/> Gears | <input type="checkbox"/> Lubricants | <input type="checkbox"/> Lube Film Thickness |
| <input type="checkbox"/> Wear | <input type="checkbox"/> Couplings | <input type="checkbox"/> Brakes | <input type="checkbox"/> Hydraulic Fluids | <input type="checkbox"/> Load Capacity |
| <input type="checkbox"/> Fretting | <input type="checkbox"/> Clutches | <input type="checkbox"/> Brushes | <input type="checkbox"/> Wear Resistant Ctg | <input type="checkbox"/> Life Prediction |
| <input type="checkbox"/> Erosion | <input type="checkbox"/> Valves | <input type="checkbox"/> Tires | <input type="checkbox"/> Hard Surfacing | <input type="checkbox"/> Inspection |
| <input type="checkbox"/> Adhesion | <input type="checkbox"/> Fasteners | <input type="checkbox"/> Rings | <input type="checkbox"/> Solid Lubricants | <input type="checkbox"/> Failure Analysis |
| <input type="checkbox"/> Filtration | <input type="checkbox"/> Tools | <input type="checkbox"/> Cams | <input type="checkbox"/> Greases | <input type="checkbox"/> Diagnostics |
| <input type="checkbox"/> Metal Cutting | <input type="checkbox"/> Cables | <input type="checkbox"/> Dies | <input type="checkbox"/> Additives | <input type="checkbox"/> Fluid Mechanics |
| <input type="checkbox"/> Abrasion | <input type="checkbox"/> Rolling Bearings | <input type="checkbox"/> O-Rings | <input type="checkbox"/> Packings | <input type="checkbox"/> EHD Lubrication |
| <input type="checkbox"/> Fatigue | <input type="checkbox"/> Engines | <input type="checkbox"/> Transmissions | <input type="checkbox"/> Gaskets | <input type="checkbox"/> Traction |
| Other _____ | | | | <input type="checkbox"/> Oil Analysis |

발생하는 우발적과피로 인한 직업정지를 미연에 방지하고 기계 시스템(또는 공정장치)의 신뢰성과 생산성을 향상시키려는 기술을 말한다. 이것은 흔히 machine health monitoring 또는 condition monitoring (狀態. 감시: 以後 原語 그대로 使用키로 함)이라고 칭하기도 한다.

2. condition Monitoring

이분야의 기술이 要請되는 이론적근거는 간단히 기술하면 조금도 問題點이 없이 완벽한 가동이 되고 있는 기계를 定期補修라는 名目으로 停止, 分解할 必要性이 있는가? 라는 것이다. 최근 英國의 Departemnt of Industry (상공부에 해당)의 發表에 따르면 적합한 方式의 conbition monitoring기술의 도입으로 1-2%에 該當하는 부가가치의 원가절감이 가능하다고 分析되고 있으며 더 現實的인 例로는 美國의 한 거대한 精油會社가 직접 이러한 기술도입으로 장치유지보수비용의 20% 절감이 되었다는 보고가 있다. 또한 캐나다의 Ontario에 있는 한 제지공장에서 1982년도에 정기보수방식의 운전상태에서 月 1160分이던 downtime을 condition monitoring의 기술채택에 힘입어 月 226분으로 격감시키고 수십만달러의 원가절감을 이룩했다고 밝히고 있다. 이러한 實例는 수없이 많으며 모두 적은 경비의 기술투자로서 生産者와 소비자 양측에 모두 큰 實益을 주는 전형적인 응용기술 이

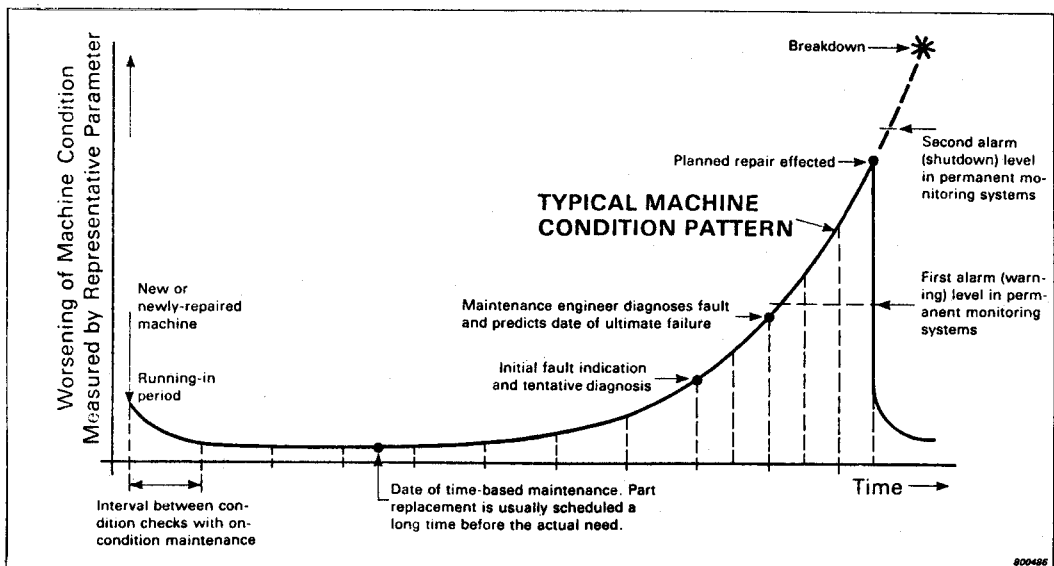
라 하겠다. 이제 기술의 발전에 따라 변천되어 온 효과적 기계경영 (machinery management)의 경향을 살펴본다.

代用機械 (back-up machinery)使用 가장 낡은 방법은 예기치 못한 기계요소 또는 시스템의 파괴에 대비하기 위해 똑같은 기계를 複數個로 설치하는 것으로써 파손이 일어나면 준비된 代用기계를 대신 가동시키며 그동안 부분품을 주문한다든지 보수하는 作業을 하게 되는데 이 경우 연속생산에 두드러진 차질은 없겠으나 투자비용이나 시설의 점유면적등의 관점에서 경제적이 되지 못한다.

週期的인 정기보수 근래의 一般的인 기계유지 방법은 주기적인 定期預防補修에 依存하고 있다. 即, 경험과 통계 그리고 마모가 심한 부분품의 예상수명등에 근거를 두고 주기적으로 分解修理 (overhaul)을 하는 것이다. 이러한 작업의 덕택으로 큰 사고가 발생할 소지를 상당히 감소시켜 주고는 있지만 분해수리 기간사이의 정상 가동중에 일어날지도 모르는 불의의 파손을 막아 주지는 못한다. 요약하면 이 방법은 다음과 같은 몇가지 중요한 결점을 가지고 있다.

- (1) 정기보수에도 불구하고 기계요소의 예상외의 파손에 의한 생산라인의 정지가 일어날 수 있다.

그림 1. 시간에 따른 기계상태의 변화



- (2) 평시에는 그다지 필요 없는 숙련기사나 교체 부분품등이 정기보수를 위하여 준비 되어야 한다.
- (3) 주기가 돌아오면 기계에는 아무런 異常이 없더라도 기계를 정지시키고 분해수리등의 作業을 하게 된다.

사실상 우리는 경험에 依하여 원활한 작동을 하고 있는 기계는 그대로 가동시켜줌이 가장 좋다는 것을 알고 있다. 기계를 잘못 건드리거나 새로운 부분품을 교체해 줌으로써 도리어 없었던 문제점을 발생시키거나 상태를 나쁘게 할 가능성이 커진다는 것이 그림 1에 나타나 있다.

Condition Monitoring Condition Monitoring은 두가지 大別된 方法으로 分類說明된다. 하나는 on-condition maintenance(臨機補修) 또는 preventive maintenance(예방보수)의 方法이고 다른 하나는 permanent monitoring(永久감시)의 方法이다. 자동차를 예로 들어 說明해 보면 현재 우리나라에서 施行되고 있는 정기점검이나 정기검사 제도와 같이 法令으로 정해진 시기에 車를 入庫시켜 주요부분을 역시 規定에 의해 교체하거나 수리하는 方式이 앞서 언급되었던 주기적인 정기보수인데 비해 자동차에 설치된 각종 경고등을 통해 배터리의 충전상태라든지 윤활유의 압력상태 등의 적정여부를 감시하는 方法이 permanent monitoring이다. 한편 유능한 운전자들은 자동차의 운전감촉이라든지 異常소음등을 통해 엔진이라든지 기어박스등의 異常이 發生한 곳을 쉽사리 찾아내고 수리할 수도 있는데 이러한 方式을 on-condition monitoring이라 한다. 다시 말하면 permanent monitoring은 기계상태가 미리 指定된 위험상태에 도달 했을때 감지되어 큰 피해를 막아주는 反面 on-condition monitoring은 상태악화의 초기단계에서 이를 檢出, 상태진전을 예측하며 대책을 세울 수 있다는 것이다.

後者에서는 초기의 이상검출단계로부터 상태 점검의 주기를 점차 줄여 나가게되며 더이상 放置될 때 생산력감소 또는 파괴등의 위험성이 현저해 질것으로 판단되는 단계에서 수리나 부품 교환을 수행하게 된다. 이과정은 다음과 같은 세 단계로 구분된다.

- (1) 異常作動의 초기검출
 - (2) 원인분석과 교환부품의 확보
 - (3) 이상작동의 경향해석 및 보수시기 결정
- 한편 on-condition monitoring의 특징을 요약해 보면
- (1) 정기 분해수리의 간격을 크게 해 줄 수 있다.

- (2) 정기수리 사이의 예상밖의 파손을 줄여 주며 신뢰성을 向上시킨다.
- (3) 아주 良好한 상태의 기계부품이 이유없이 교환되는 것을 피한다.
- (4) 필요없이 많은 종류의 교환부품이 비축되는 것을 막아준다.
- (5) 필요한 수리 부분을 미리 예측함으로써 정기수리의 시간을 단축해 준다.

Condition monitoring의 方式 채택은 個別的 상황에 대한 고려와 함께 이분야 기술자의 판단에 달려있으나 대체로

- (1) 기계자체의 가격이 크고 이의 손실이 경제적 으로 큰 비중을 차지한다면 permanent monitoring을
- (2) 기계정지로 인한 生産品의 손실에 의한 경제적 타격이 매우 중요한 경우 on-condition monitoring의 方法이 채택된다. 또한 두 方式은 흔히 並行해서 도입되기도 한다.

3. 予防檢出方式 (Failure Detection Method)

모든 예방검출의 方法들은 파손이 일어나면서 變하는 物理的的特性值 (physical characteristics)를 감시하는 것이며 어떤 기계부품의 성능에 상당한 영향을 미칠만한 변화가 그 특성치들에 의해 나타나는 것을 검출하게 된다. 특성치의 종류에 근거하여 方法들을 大別하여 보면

- (1) 진동(Vibration)이나 소음(noise)로 부터 측정
- (2) 溫度에 의한 검출方法
- (3) 變位 (proximity)의 측정
- (4) 마모파편 (wear debris)에 의한것 등으로 나눌 수 있다.

진동및 소음 감시 모든 기계들은 多少간의 진동문제를 가지게 되며 지나친 진동은 흔히 기계의 異常작동에 신뢰할 만한 표시가 된다. 기계적 진동센서 (vibration transducer)들을 측정코자 하는 기계에 부착하여 여기에 미리 지정된 레벨 이상의 진동신호가 가해지면 경보가 울리든지 기록을 남기게 되며 기계의 파괴방지에 기본적으로 기여하게 된다. 최신 전자회로를 적용함으로써 감시체계의 탄력성은 더욱 다양해 지게 되며 매우 폭넓은 진동레벨과 거의 모든 주파수 영역을 포괄하게 된다. 진동변위의 측정은 언밸런스 또는 축의 misalignment등과 같은 低週波현상에 적용되며 진동가속도는 rolling bearing의 상태등과 같은 고주파현상의 측정에 사용된다. 그러나 모니터에 표시되는 값들은 흔히 진동속도의 최고치 평균치 또는 rms평균치 등인데 이

는 진동속도가 주파수특성이 양호하기 때문이다. 진동센서로는 압전형의 가속도계 (piezoelectric accelerometer)를 흔히 쓰며 動的 주파수 영역이 넓어서 신호가 진동속도 또는 변위로 무난히 변환되어 사용된다.

한편 마모등의 異常상태가 진행됨에 따라 特性소음이 나타나는 일이 많은데 가까운 예로써 구름마찰의 베어링에서 방출되는 소음은 부품들의 정교성과 밀접한 관계가 있으며 이러한 제품의 출고에는 소음테스트가 흔히 先行되는 것을 본다. 기계류의 지나친 소음은 작동상태가 불량해진 초기 경보로 간주되며 여기에 사용되는 장비는 진동감시의 경우와 비슷하나 진동센서 대신에 기계가까이에 마이크로폰장치를 하는 것이 다르다. 비정상작동의 한계를 소음의

크기로서 정확히 지정해 주는 것은 같은 종류의 요소라하더라도 설치상황에 따라 달라지므로 한가지로 정리하기가 어렵다. 표 2는 소음판단의 개괄적 기준을 주고 있으며 표 3에는 진동및 소음측정의 판단기준을 정리한 것이다.

표 2. 소음에 의한 기계상태 판단기준
(케이싱으로부터 30cm 위치에서의 소음레벨, dBA)

기 계 요 소	양호	적합	불량
로울러 / 볼베어링	75	85	90
spur 치차	95	105	110
single helical 치차	85	100	105
double helical 치차	80	95	100
epicyclic 치차	75	90	95

표 3. 진동 및 소음에 의한 기계상태 감시

Type of noise/vibration	Method identification
Oil whirl	Major component of the vibration is at approximately $\frac{1}{2}$ shaft speed
Excessive gear whine	Tooth contact frequency predominates
Bearing defect	Major components at ball/roller speeds
Misalignment	Largest component of the vibration is at $2 \times$ shaft speed
Out of balance	Major component of the vibration is at shaft speed
Bearing instability	Bursts of vibration/noise with a frequency equal to shaft speed
Random shaking of pump delivery pipework	Cavitation in pump : vibration disappears as pump flow is reduced
Vibration of reciprocating compressor pipework due to pressure pulsation	Vibration at harmonics of speed corresponding to flow pulsation frequency : e.g. $2 \times$ speed for double-acting cylinder
Excessive fan whine	Blade passage frequency predominates
Friction-induced whirl	Major component at shaft critical speed and not at $1 \times$ shaft speed or harmonics
Very large out of balance	Components at $\frac{1}{2}, \frac{3}{4}, 1\frac{1}{4}$ and $1\frac{3}{4}$ of shaft speed are present along with a large shaft speed component

溫度에 依한 方法 (Heat Detection) 또한가지 가장 적합한 감시방법중 하나는 열전대 (thermocouple) 등을 사용하여 각 중요품이나 윤활유의 온도를 측정하는 것이다. 윤활유의 공급측과 토출측의 온도를 측정, 과대한 온도상승폭을 판단기준으로 삼는 수도 있으나 흔히 접촉부(베어링 등의)의 표면온도를 사용한다. 센서는 측정코자 하는 표면에 가까이 접근되어야 하며 접촉부가 잘 밀착되어야 한다. 또한 이러한 온도상승은 負荷에 따라 큰 폭으로 변하므로 경우에

따른 여러가지 고려가 요청된다. 근래 實用化가 되고 있는 thermography는 高温部로부터 방출 복사되는 적외선을 검출하여 사진으로 인화하는 것으로서 多方面의 응용이 예측된다.

分光分析장치 (Spectrographic Oil Analysis) SOA P라고도 칭하는 이 技法은 흔히 동력기관의 condition monitoring에 적용되며 크랭크케이스에서 윤활유의 샘플을 채취하여 그것에 포함되어 있는 각종 마모粒子들의 成分 및 含量을 분석하는 것이다. 어떤 특정 성분의 마모입자 함량이 상

대적으로 커지는 것은 그 成分을 포함하는 요소의 마모가 심하게 일어난다는 것을 의미 한다. 이 장치는 주로 다음과 같은 두가지 原理에 근거를 둔다.

- (1) atomic absorption : ground state의 原子는 특수한 波長을 가진 빛 (에너지)를 흡수하여 excited state로 변하게 되며 이때 흡수된 에너지의 量을 측정함으로써 未知의 粒子농도를 얻게 된다.
- (2) atomic emission : (1)項과는 반대로 원자또는 이온으로부터 方出되는 特殊한 파장의 빛을 측정함으로써 샘플중에 포함된 마모입자의 성분 및 함량을 求하는 方法이다.

최근에는 atomic absorption方法의 결점 (우라늄, 稀土類元素 등의 검출, 化學的 또는 이온화에 따른 간섭 등)과 成能보완을 위한 신기술들이 개발되고 있는데 ICP (Inductively Coupled Plasma)法 등이 例가 되겠다.

Ferrography(재래식 형태) 기계요소들은 어떤 형태로든 상호 접촉하여 상대운동을 하게되며 이때 마모의 현상을 동반하게 된다. 마모를 통해 生成된 마모입자들은 기계의 작동상태에 관한 매우 많은 유익한 情報들을 가지고 있으며 이를 分析하는 한가지 方法 (atomic spectroscopy)가 앞서 說明되었다. 한편 마모입자들을 적절히 추출하여 재질및 定量分析은 勿論 크기의 分布라든지 마모된 形態 등을 分析함으로써 기계의 各要素의 상태를 감시하는 기술을 ferrograph方法이라고 하며 1972년 W. W. Seifert와 V. C. Westcott에 依해 제안되었다. 그림 2는 상품화된 ferrography의 실물사진이며 그림 3에 그 重要部分이 도시되어 있다.

채취된 시료 윤활유는 유동성을 증가시키기 위해 특수용매에 희석되어 펌프로 噴출되며 ferrogram슬라이드상에 천천히 正常상태로 注入된다. 이 슬라이드는 강력한 자석위에 일정한 下向경사를 가지고 고정되어 있어서 주입된 시료가 重力의 영향으로 슬라이드 상을 유동해 내려오는 동안 시료속에 浮遊해 있는 마모입자들은 磁化되어 슬라이드 표면쪽으로 이동하게 된다. 即 유체유동에 의한 對流이동과 磁場의 영향에 의한 強制확산효과가 조합되어 粒子들은 슬라이드상에 크기별로 분류되어 적절한 형태로 固着된다. 여기서 잔류 윤활유를 세척해내게 되면 그림 4와 같은 'ferrogram'을 얻는다. 가운

그림 2. Ferrograph의 외관

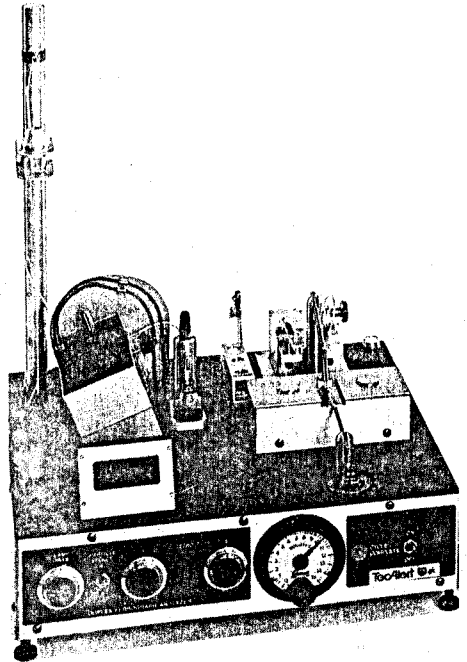
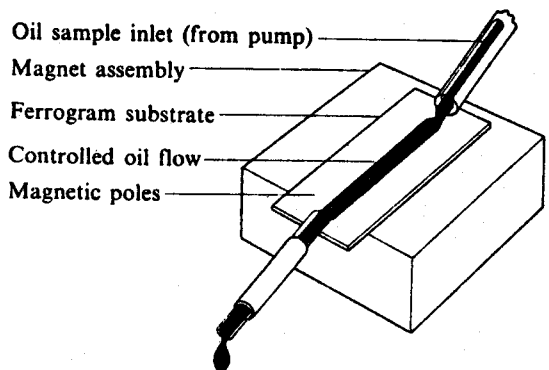


그림 3. Ferrography의 주요부

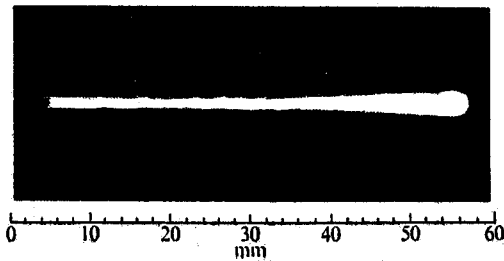


테의 검은 띠가 마모입자들의 부착상태이다. 입자들의 密度와 크기분포는 光學的 方法으로 簡易하게 측정할 수 있으며 현미경을 통한 정밀검사에서 많은 다른 중요한 정보들을 얻을 수 있다. 사실상 마모의 양상과 마모입자의 형태를 연관 짓는 研究는 아직은 초보단계이지만 입자형태

표 4. 마모입자의 크기등에 따른 마모형태추측

Region of Severity	Nature of particle	Description of wear type
1	Free metal particles > 5 μm	Hydrodynamic lubrication with negligible wear rate
2	Free metal particles > 15 μm	Mild-wear type, low wear rate
3	Free metal particles > 150 μm	Mild-wear type, high wear rate
4	Red oxide $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, individual or clustered	Surface oxidized and grooved
5	Black oxide $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, Fe_3O_4 , and FeO	Heavy wear, surface oxidized and deeply grooved
6	Large metal particles (up to 1mm)	Severe wear, catastrophic smearing and ploughing of surfaces

그림 4. Ferrogram의 例



가 球形이라든지 코일형이라든지 하는 것에 따라 판이한 마모현상이 예측될 수도 있다. 표 4에서 마모입자들의 크기 등에 따른 마모현상 예측을 일부 소개한다.

Rotary Particle Depositor (RPD) 上記의 재래식 ferrography가 condition monitoring의 도구로써 매우 有用히 사용되어 왔지만 다음과 같은 몇가지 문제점들로 인하여 정성 및 정량분석의 정확성과 일관성에 영향을 크게 줄 수 있다는 것이 지적되었다. 즉

- (1) 시료펌프를 통과할 때 치차사이에서 큰 마모입자들이 다시 분쇄되는 경향이 있어 원래의 형태보존이 힘들다는 點
- (2) 시료의 회석과 유리슬라이드상에 도장된 도료의 문제
- (3) 마모입자의 고착상태가 시료주입구에 대량

으로 중복되는 點 등이다.

최근에 개발되어 보급되고 있는 RPD는 이러한 결점을 보완한 형태로써 그림 5에 보인 것은 상품화된 기구의 실물이다. 그림 6에는 그주요

그림 5. RPD의 외관

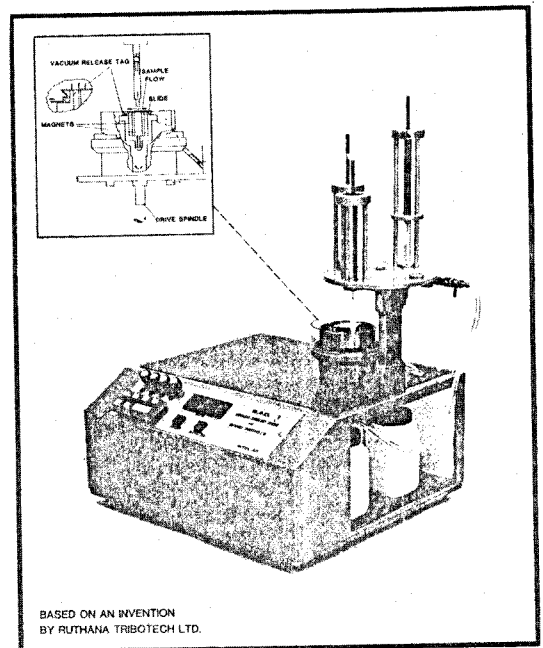


그림 6. RPD의 주요부

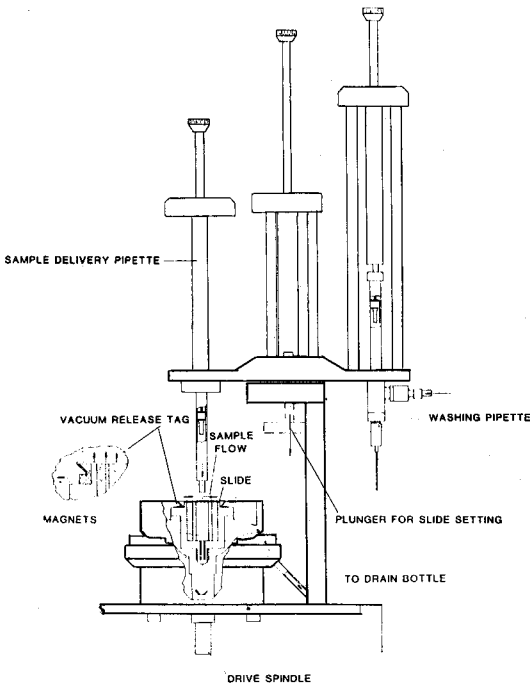


그림 7. RPD에서 마모입자의 운동경로

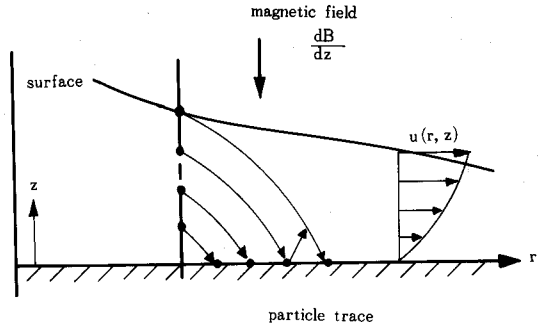
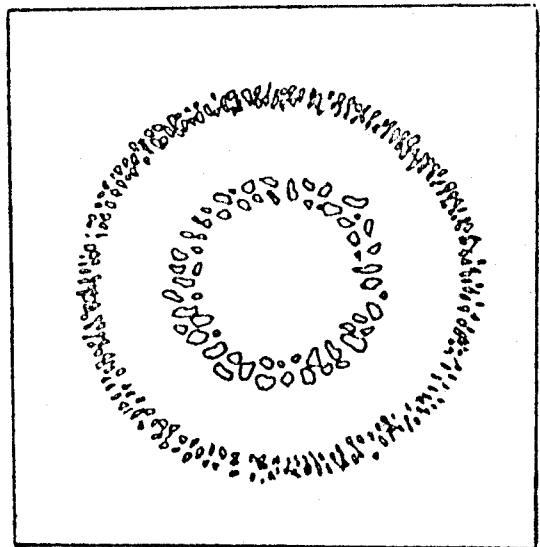


그림 8. RPD Ferrogram의 예



부분이 도시되어 있는데 1cc전후의 회석된 시료는 피펫을 통해 약 70rpm으로 회전하는 슬라이드 위에 정상상태로 주입되며 시료내의 浮遊 粒子들은 원심력과 유체의 점성력 그리고 슬라이드下部에 장착된 자석의 영향으로 적절한 형태로 이동, 슬라이드 위에 固着한다. 그림 7은 슬라이드상에서의 시료의 유동상태를 확대한 것이다. 잔류 윤활유의 세척 및 얻어진 ferrogram의 利用은 앞서 記述한 바와 같다. 그림 8은 RPD에서 얻어진 ferrogram의 一例를 보인다.

이외에도 여러가지의 condition monitoring 기술들이 속속 제안되고 있으며 얻어진 정보를 분석하는 이론적 뒷받침이 끊임없는 研究를 통하여 제공되고 있어 이분야 발전에 밝은 전망을 보여준다. 우리나라에도 근래 이러한 condition monit-

oring을 포함한 tribology學問에 관심을 기울이는 전문가나 연구그룹이 상당히 많이 형성되고 있으며 자발적으로 技術立國의 일익을 담당해나가고 있는 현실은 매우 바람직하다 하겠다.