

마찰·마멸과 윤활유 분석에 의한 기계상태 진단



안 효 석

KIST Tribology 연구실

●1957년생.
●윤활공학 중에서 열적
효과를 고려한 접촉역학
을 전공하였으며, 마찰,
마멸 표면코팅과 기계상
태 진단기술 개발 및 적
용에 관심을 가지고 있
다.

1. 머리말

20세기에 들어오면서 급속도로 과학 및 기술이 발전함에 따라 산업전반의 기계설비와 자동차, 항공기 등의 작동조건도 고속화, 고하중화되고 있으며 또한 높은 정밀도가 요구되고 있다. 따라서 기계요소의 원활한 작동을 위한 최적설계와 적절한 보수유지를 위해 기계요소의 접촉시에 발생하는 세문제들을 근본적으로 이해하고 해석하는 트라이볼로지(tribology) 학문에 대한 깊은 이해와 연구가 요구되는 시점에 이르게 되었다.

이러한 관점에서 무엇보다도 먼저 고려가 되어야 할 사항은 바로 요소의 마찰(friction)·마멸(wear)현상 및 이것들과 관련하여 발생하는 요소의 파괴현상에 대한 보다 구체적인 이해이다. 마찰과 마멸은 트라이볼로지적 요소간의 동적 접촉시에 반드시 수반되는 현상으로 접촉하는 재료들의 고유성질에 기인되는 것이 아니라 전체 접촉계(overall system)의 특성이라 말할 수 있다. 그러므로 마찰과 마멸은 접촉하고 있는 두 재료(materials)와 주변조건(environmental conditions) 그리고 그들의 작동조건(operational conditions)의 복합적 함수라 말할 수 있다. 즉, 하중, 속도 및 주위 온도와 습도 등의 주변조건의 어떠한 변화에 따라 접촉하고 있는 두 재료 또는 그중 어느 하

나의 마멸률(wear-rate)에 지대한 변화가 초래될 수도 있다.^(1~3)

마찰과 마찰 사이의 관계를 전문가들 모두가 공히 인정할만한 간단하고도 일반적인 관계로 설명한다는 것은 현재의 과학수준으로는 불가능하다. 그 간단한 예로 마찰이 심하다고 해서 반드시 심한 마멸현상이 발생하는 것은 아니며 접촉간에 관측되는 현상 역시 접촉시간의 경과에 따라 변화한다는 사실이다. 근래에 들어 접촉부위의 열화학적 현상^(4,5)에 대한 관심도 증대하고 있으며 마찰과 마멸의 주요인자중의 하나로 현재까지 유클리드기하학에 따른다고 정의하던 재료표면의 형상도 미시적으로 들어가면 분절이론(fractal theory)에 따르게 된다는 이론⁽⁶⁾도 발표되고 있다. 그러나 모든 마멸현상의 공통적인 특징으로, 마멸입자들이 발생되기 위해서는 반드시 파단(fracture)현상이 선행되어야 한다는 것되고 이러한 현상은 궁극적으로 접촉시스템의 파괴(failure)를 초래한다는 점을 지적하지 않을 수 없다.

트라이볼로지적 파괴(tribological failure)는 본질상 재료의 표면 또는 표면부위(subsurface, surface layer)에서 발생된다. 표면층의 성질이 마멸, 부식, 피로 그리고 기타 표면에 관련된 현상에 대한 적응력이 부족하게 될 때에 파괴현상이 시작되게 된다. 따라서 최적의 구조적 성질과 트라이볼로지적으로 우수한 표면특성을 가진 소재의 선택이 요소설계시 선결

되어야 하나 안타깝게도 기존의 소재들 중에서 이러한 조건을 만족시켜 주는 소재를 구하기란 쉽지 않기 때문에 이를 해결하기 위한 수단으로 소재의 표면특성을 변화시키는 표면개질기술(surface modification technique)의 도입이 불가피하다.

이 글에서는 마찰, 마멸과 이의 결과적 산물인 마멸입자에 대해 고찰해 보며 윤활유 내의 마멸입자 분석을 통해 기계상태를 진단하는 기술에 대해 간략히 소개하고자 한다.

2. 접촉운동시의 거동

기어, 볼 및 롤링엘리먼트 베어링, 캠과 태핏 등 기계요소의 운동해석을 위해서는 그림1

에서 보는 바와 같이 복합적 학문에 대한 이해가 필요하다.

즉 기계적, 물리적, 화학적 그리고 열적 요인들에 대한 보다 상세한 정보 없이는 정확한 거동을 예측할 수 없다. 그러나 그림 1에서 지적된 요인들 중에 상당수가 접촉시간의 함수로 작용한다는 사실을 간과해서는 안 된다. 그림 1에서 보는 현상중에서 상대운동을 하며 접촉하고 있는 접촉체의 접촉부위에 발생하는 가장 중요한 것들을 나열해 보면 아래와 같다.

- 마멸입자의 생성
- 표면막(surface film)의 형성 및 파괴
- 접촉면 및 접촉부위의 소성 및 탄성 변형 (표면조도의 변화 등)
- 접촉면 하부층의 금속학적 변화

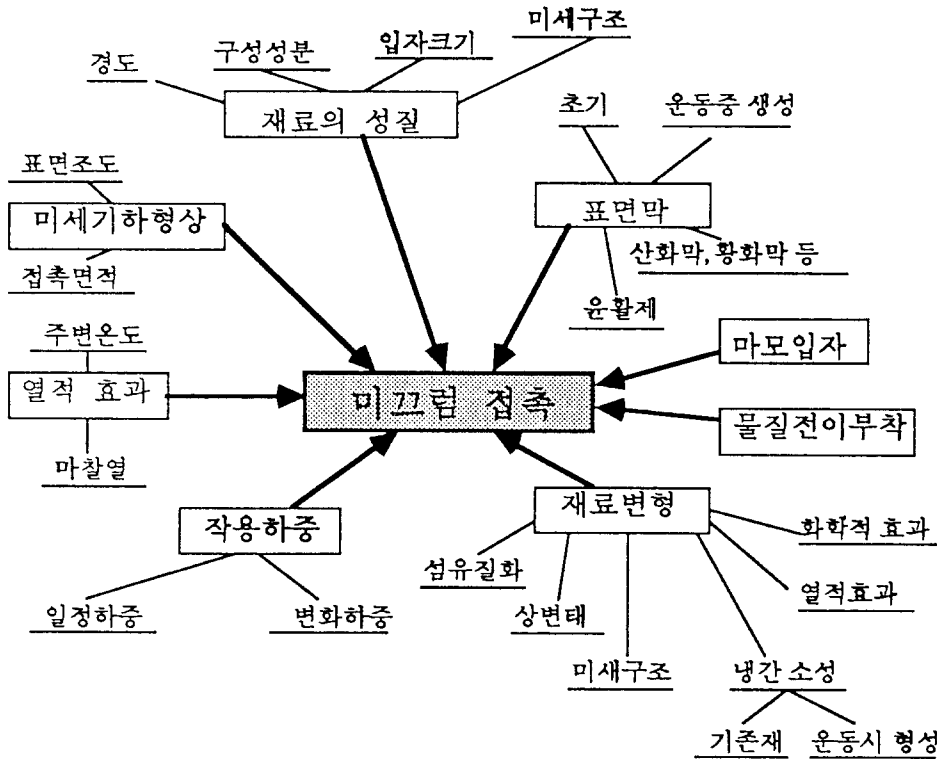


그림 1 미끄럼마찰운동시 고려해야 하는 여러가지 현상들

- 윤활유의 성상변화(열화, decomposition 등)
- 상대표면으로부터의 물질전이부착(material transfer)

3. 마찰과 마멸

트라이볼로지 분야의 중대한 관심중의 하나로 계속 연구가 진행되고 있는 것이 마찰과 마멸에 대한 연구이다. 마찰에 관계하는 주된 인자들은 첫째, 접촉표면의 표면돌기들(surface asperities)이 상대표면의 돌기와 접촉하면서 발생하는 분자단위의 상호인력이 돌기들의 접합점(welded junctions)을 형성하게 되는 응착(adhesion)현상과 둘째, 상대표면돌기 사이의 맞물림(interlocking)현상, 세째로 경도가 높은 쪽 표면돌기가 상대표면을 긁는 연삭(abrasion)현상과 마지막으로 접촉면 표면층의 소성 변형이다. 응착에 의한 접합점(adhesion junction)은 접촉표면의 상태에 크게 좌우되어 깨끗한 표면간의 접촉시 강한 금속간 결합(metal-to-metal bond)이 형성되거나 산화막이나 다른 오염층(contaminant film)이 존재하게 되면 그 세기는 크게 감소한다. 마찰현상을 설명해 주는 가장 널리 알려진 모델은 응착이론(adhesion theory)으로서 이에 의하면 마찰계수 f 는 다음과 같이 정의된다.

$$f = S_m / P_m \quad (1)$$

여기서, S_m 은 임계전단응력, P_m 은 항복응력을 나타낸다.

이를 설명하면 마찰은 분자간 인력에 의해 접촉체간의 응착에 의해 발생한 용접점(welded junctions)들을 이겨내기 위한 힘이다. 이 이론은 접점의 형성, 성장 그리고 접점 부근에서의 전단(shearing)에 대해 설명이 가능하나 접촉면에서 흔히 발생하는 물질전이부착, 접촉표면이 운동방향으로 길게 파지는 현상(ploughing groove), 마멸입자의 형성 또한 표면조도의 변화와 시간과 미끄럼 거리(sliding distance)에 따른 변화 등에 대해 설명할 수 없다.

이러한 문제점을 보충하기 위해서는 표면돌기 사이의 맞물림현상을 마찰에 고려해야 하며 이는 곧 표면돌기의 탄성 및 소성변형과 경한 표면돌기에 의한 소위 '쟁기질(ploughing)' 현상을 고려한다는 것을 의미한다. 따라서 응착이론에 표면돌기 맞물림(asperity interlocking)을 포함한 결과, 마찰의 주된 진행과정을 돌기의 탄성 및 소성변형, 쟁기질, 응착된 용접점들의 전단(shearing of adhesive junction) 그리고 접촉면 사이에 끼어 들어간 가공경화된 마멸입자에 의한 쟁기질로 설명하게 된다. 이 모델은 부분적으로 소성변형항이 포함되어 있으나 그것이 단지 표면돌기의 차원에 국한되어 있어 접촉면 하부에 발생하는 재료의 성질 및 구조의 변화, 소성유동(plastic flow) 등이 고려되지 않았다. 이를 보충하기 위해 최근에 들어 에너지에 관점을 둔 마찰모델⁽⁷⁾이 제창되었는데 이 모델은 미끄럼운동시 발생하는 마찰에 의한 일(frictional work)이 소성변형에 의한 일과 등가하다는 가정하에 성립된 것이다.

마멸은 상대운동하여 접촉하고 있는 요소들의 표면에 발생하는 소재의 손실로 정의되는데 이를 마찰에 비교해 볼 때 그 현상을 규명하는데 애로가 더욱 많다. 이는 미세한 접촉조건 변화에 의해서도 마멸현상에 큰 변화가 초래되는 등 그 과정에 영향을 미치는 인자가 많기 때문이다. 일반적으로 마멸에 영향을 미치는 메커니즘을 들면 아래와 같다.

- 접촉부위에 형성된 용접점의 응착 및 전단
- 접촉부위에서의 물질전이부착 또는 성분의 혼합화(mixing, alloy formation)
- 상대표면으로 전이부착된 입자들의 피로
- 접촉면에서의 산화 또는 부식
- 상대적으로 연한 표면에 발생하는 쟁기질
- 경한 마멸입자에 의한 연삭(abrasion)
- 전기적 자극(electrical attack)
- 판상박리(delamination)
- 열적 활성화(thermal activation)

여기에서 판상박리이론⁽⁸⁾은 미끄럼 운동이 계속 반복될 때 표면에서 아주 가까운 하부층에

서 반복된 압축응력의 영향으로 균열이 시작되며 계속된 미끄럼 운동에 의해 표면에 평행한 방향으로 균열이 확장해 나가 인접한 균열부와 접하게 되고 종국에 가선 얇고 넓은 마멸단편을 형성 “판상박리(delaminate)”한다는 이론이다. 이 이론은 미국 MIT의 서남표 교수팀에 의해 제안된 것으로 접촉면 하부의 응력상태를 기준으로 해석되었으며 일부 박편마모입자의 형성에 대한 설명을 제공하고 있으나 균열이 접촉평면에 평행한 방향으로 전파해 나가는 데 대한 설명이 궁색한 점이 아쉽다 하겠다. 열적활성화이론(thermal activation theory)⁽⁹⁾은 접촉면 하부의 에너지상태를 통해 마멸현상을 설명하는 것으로서 미끄럼마찰운동에 의해 발생된 마찰열(frictional heating) 또는 윤활유가 분해되며(decompose) 발생시키는 활성화에너지(activation energy) 등이 접촉면과 그 하부의 에너지상태에 주된 영향을 미쳐 그 에너지 레벨이 임계치를 넘게되면 스커핑(scuffing)과 같은 심각한 마멸현상을 초래하게 된다

는 이론이다.

그림 2는 일반 기계요소들에 발생하는 마멸 유형과 함께 그것을 유도하는 마멸기구들의 관계를 표시한 것이다.⁽¹⁰⁾

경마멸(mild wear)은 기계요소가 가지고 있는 용도적 특성을 잃지 않는 허용범위 내에서 서서히 진행되는 소재의 결손현상을 말하며 이에 반해 과도마멸(severe wear)은 요소의 특성을 잃게 될 징후를 보여주는 비정상적 크기 및 형태의 마멸입자가 발생하는 단계의 마멸현상을 말한다. 피팅(pitting)은 구름 또는 미끄럼 접촉을 하는 곡면을 형성한 표면에 주로 발생하며 반복되는 전단응력(cyclic shear stress)에 의해 접촉면 하부(subsurface)에 발생한 균열이 접촉면으로 전파되어 마멸입자 덩어리를 발생시키고 접촉면에는 웅덩이와 흡사한 구멍(pit)을 형성하게 된다. 프레팅(fretting)은 볼트, 플렌지 등과 같은 체결부에 발생되며 극히 작은 진폭의 진동운동을 행하는 마찰면이 산화되어 미세한 산화마멸입자를 형성하게 되는 현

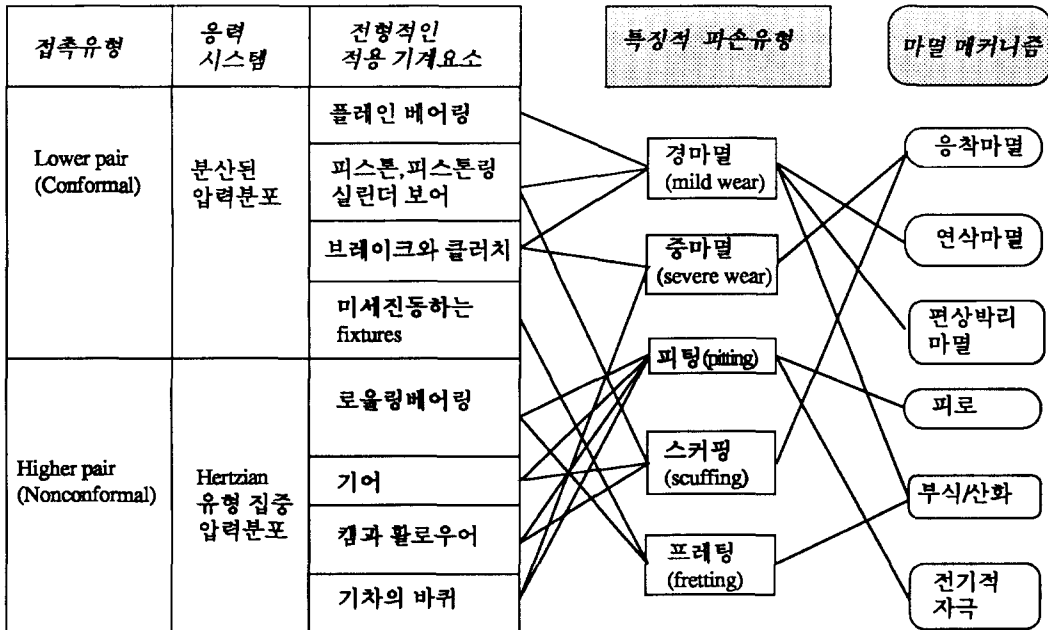


그림 2 대표적인 기계요소들의 파손유형 분류

상이다. 제한된 공간내에 형성된 산화마멸입자의 양이 증가되면 마침내 제한된 공간의 부피를 초과하게 되므로 체결부의 압력이 계속 증가되며 결국에 가선 파괴(seizure)가 일어난다. 프레팅에 의한 손실의 정도는 주변의 화학적 성질에 크게 영향을 받으며 또한 축적되어 가는 마멸입자가 접촉면 사이를 어느 정도 빠져나가느냐에 크게 좌우된다. 한편 발생된 마멸입자들이 상대 표면 사이에서 완충역활(buffer)을 하게 되면 마멸률은 감소될 수도 있다. 따라서 응착마멸형으로 시작되어 연삭마멸형으로 전이되었다가 마멸입자에 의해 상대 표면간의 접촉이 저지되면 마멸률은 저하되고 이 경우 파괴를 유도하는 최종 마멸기구는 피로에 의한 파단(fatigue fracture)과 접촉부위의 응력증가에 의한 균열의 발생으로 귀착될 것이다. 스커핑(scuffing)은 기어와 같이 큰 하중이 작은 접촉부위에 집중적으로 작용하는 접촉조건(non-conformal contact)의 경우에 빈번히 발생하는 파괴유형으로서 접촉표면 사이의 부분적 용접현상(welding)에 기인된 심각한 파손현상으로 정의되나 때로는 단순히 심한 형태의 응착마멸현상으로도 불리우고 있다. 스커핑이 발생한 표면은 아주 거칠어져 있으며 상대표면으로의 물질전이부착현상을 흔히 볼 수 있고 소성유동 및 과도마멸현상도 수반된다. 스커핑의 발생시 다른 마멸 및 파괴유형과는 달리 심한 소음과 함께 온도가 급상승하고 마찰계수 역시 급등한다.

4. 마멸입자^(11~13)

기계시스템에서 발생하는 마멸입자의 종류를 분류하면 표 1과 같다. 마멸입자의 형성은 접촉이 일어나는 부위를 지배하는 마멸메커니즘에 따라 그 형태 및 색깔 등이 변화하게 된다.

정상마멸입자(normal rubbing wear particle)는 그림 3에서 보이는 바와 같이 얇은 박판모양의 부드러운 표면을 형성하며 크기는 대개 $15\mu\text{m}$ 이하로서 정상적인 마멸상태(mild wear

표 1 마멸입자의 분류

형상에 의한 분류	성분에 의한 분류
정상마멸입자	자성 금속입자
연삭마멸입자	비자성 금속입자
충상입자	산화철입자
피로편	윤활제 열화생성물
과도마멸입자	오염입자
구형마멸입자	

또는 normal sliding wear)에 생성되는 전형적인 마멸입자 유형이다.

연삭마멸입자(cutting wear particle)는 그림 4에서 볼 수 있듯이 두께의 변화는 있으나 대개 가늘고 길며 마멸입자 형성시 잔유응력에 의해 구부러지거나 뒤틀린 모습을 하는 것이 보통이다. 그 길이는 대개 $100\mu\text{m}$ 이하이며 연삭마멸에 의해 형성되는 전형적인 마멸입자이다. 충상입자(larminal particle)는 대개 롤링베어링과 같은 구름운동(rolling)이 행해지는 기계요소에서 생성되는 것으로 반복되는 구름운동에 의해 표면하부에서 발생한 균열이 성장하여 마멸입자를 생성하는 것으로 아주 얇고, 정상마멸입자에 비해 비교적 크기가 커서 $50\mu\text{m}$ 에 달하기도 한다. 그림 5는 충상입자의 전형적인 모습이다.

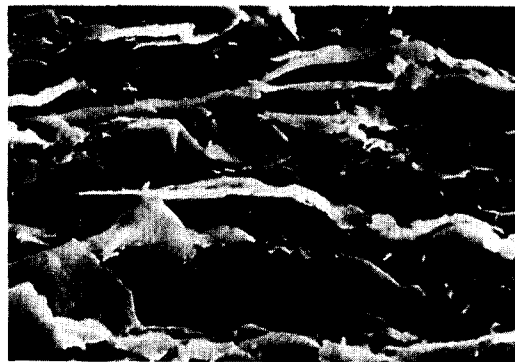


그림 3 정상마멸입자

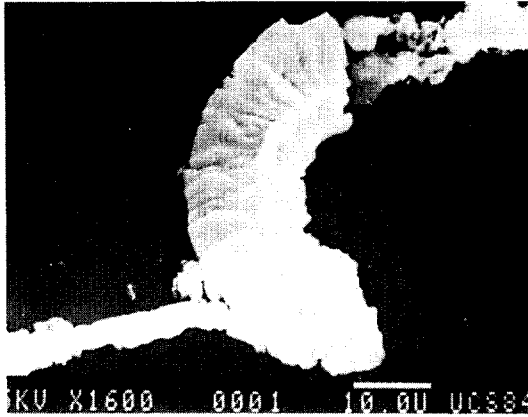


그림 4 연상(철삭)마멸입자

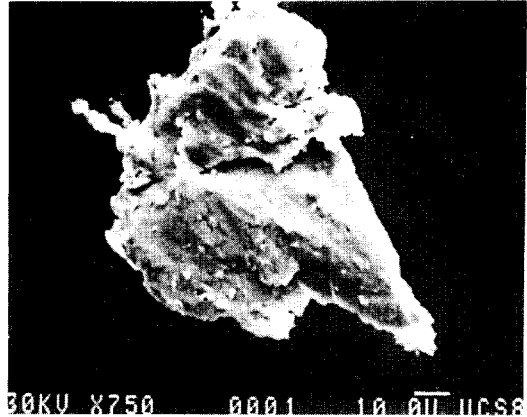


그림 6 피로편

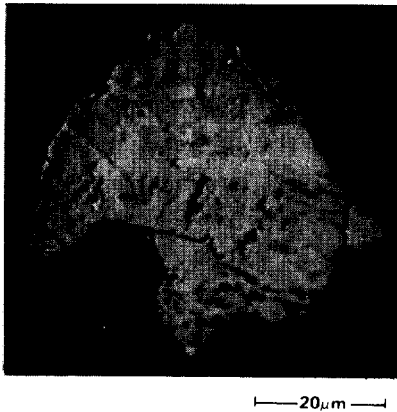


그림 5 충상마멸입자

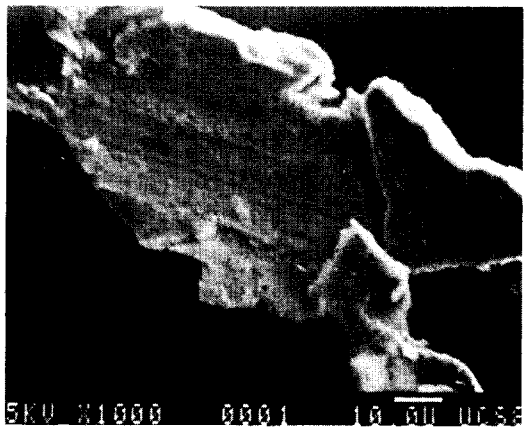


그림 7 과도마멸입자

이에 반하여 그림 6의 피로편 (fatigue chunk)은 역시 피로에 의해 생성되는 하나 접촉부위의 조건이 아주 심각해 재료의 파괴를 예측케하는 마멸입자로서 아주 두껍고 입자의 둘레에 파단(fracture)면이 잘 형성되어 있으며 크기는

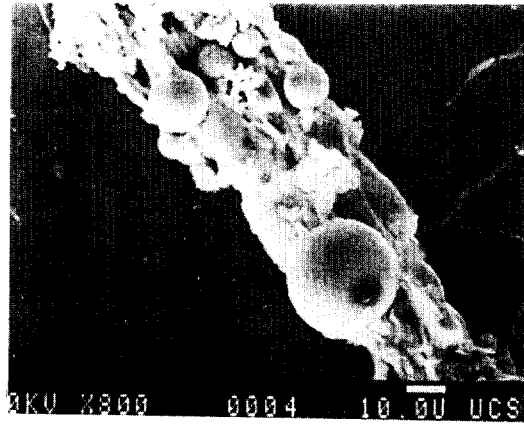
100 μm 에 이르기기도 한다. 마멸입자 중에서 우리가 가장 주목해야 할 것은 과도마멸입자이다. 이는 고하중, 고속 등 작동조건이 심각한 경우 접촉부위의 기계적응력(mechanical stresses)과 열응력(thermal stresses)이 복합되어 재료가 견딜 수 있는 응력상태를 초과한 경우

에 주로 형성되며 따라서 이 현상이 계속되면 접촉부위의 심각한 파괴가 예상된다. 대개 크기는 15 μm 이상이며 피로편보다는 얇으나 비교적 두꺼운 형태를 자주 보인다. 그림 7은 과도마멸입자의 전형적인 모습들로 주목할 것은 입자표면에 형성된 줄 무늬로 이는 접촉면이 받은 심한 미끄럼 운동 조건을 잘 대변해주고 있다.

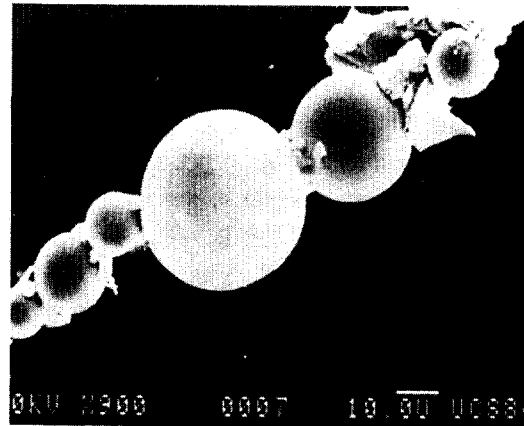
구형입자는 구름피로(rolling fatigue)에 의해 형성되거나, 미끄럼접촉을 하는 접촉부위에 발생하는 마찰열에 의해 용해된 마멸입자들이, 순간적으로 고형화(solidification)하면서 압축

되어 구형을 형성하는 것으로 그림 8(a)와 같이 피로에 의해 생성된 구형 마멸입자는 대개 그 크기가 $10\mu\text{m}$ 이하이나, 용해된 입자가 고형화하며 형성한 구형입자는 그림 8(b)에서 보듯이 그 크기가 대개 $10\mu\text{m}$ 이상이다.^(14,15) 후자의 경우는 그림 8(c)와 같이 속이 비어 있는 구형을 형성하는 경우가 많은데 이는 마멸입자가 고형화하면서 내부에 축적된 압력이 외부로 터져나올 경우에 형성되는 것으로 추측된다. 피로에 의한 구형 마멸입자의 생성은 심각한 현상이 아니나 후자의 경우는 그 수가 많아지면 접촉시 접촉부위에 미치는 열적 효과가 크다는 것을 의미하므로 접촉조건이 개선되지 않는다면 곧 심각한 파손현상이 초래될 수 있다.

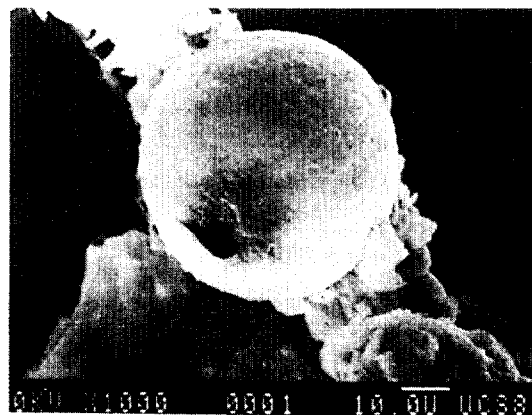
마멸입자의 성분에 의한 분류는 마멸되고 있는 기계요소를 밝히는데 결정적인 역할을 한다. 자성금속입자로는 산화되지 않은 철마멸입자가 대표적인데 이것이 과량 윤활유내에 존재한다면 기어, 축 또는 캠과 같이 철강재료로 된 요소의 마멸이 심함을 의미하며 한편 Cu, Sn, Cr 등 비자성 금속입자의 존재는 각각 Cu-Pb계 베어링, 주석계 배빗메탈 베어링과 피스톤링 등의 크롬도금된 요소의 마멸을 나타낸다. 산화철마모입자는 적색산화철(red oxides of iron), 흑색산화철(black oxides of iron) 등으로 세분되는데 세가지 당량적 화합물(stoichiometric compounds) 즉, FeO, Fe₂O₃와 Fe₃O₄를 형성하며 이들이 조합된 여러가지 결정형을 가지기도 한다. 일반적으로 적색산화철($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$)은 상온에서 철과 산소와 반응의 최종생성물로서 윤활유 내에 수분함유량이 많은 경우에 생성된다. 검은산화철은 윤활작용이 정상적이지 않을 경우 형성되는 심각한 유형으로 FeO, $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ 와 Fe₃O₄가 혼합된 비당량적 화합물이다. 윤활제 열화생성물의 대표적인 것으로 프릭션폴리머(friction polymer)를 들 수 있는데 이것은 아주 작은 금속마멸입자들이 윤활제가 열화되어 생성된 무정형의 매트릭스에 박혀 들어가 윤활유 분자들의 중합작용



(a)



(b)



(c)

그림 8 구형입자

(polymerization)을 촉진시켜 형성된 긴 응집체로 알려지고 있으며 그 양이 많을 경우 윤활유의 점도가 증가하고 이들이 필터를 막음으로써 윤활유를 by-pass시켜 큰 마멸입자가 직접적으로 기계요소의 접촉부위로 유입되어 심각한 마멸을 촉진시킬 수도 있다.

5. 마멸입자 검지를 통한 기계상태진단

인체의 건강상태를 진단하기 위해 기본적으로 혈액검사를 실시하여 혈액내의 백혈구와 적혈구 등의 양과 형태의 변화를 조사하듯이 기계시스템 윤활라인의 윤활유를 분석하여 윤활유 자체의 성상변화와 윤활유에 함유된 마멸입자와 외부로부터 유입된 오염입자들을 정량, 정성적으로 분석하는 윤활유분석(oil analysis/contaminant analysis)기술은 작동중인 기계의 정지나 해체없이 기계의 파손요인을 수시(off-line sampling)로 또는 지속적으로(on-line 또는 in-line sampling) 관측할 수 있다는 장점과 그 발생된 마멸입자들의 정량, 정성적 특징이 기계요소의 마멸현상과 직결되므로 기계의 성능을 잘 대변해 준다는 장점을 가지고 있다.

유체내 입자들을 열외(off-line) 또는 열내(on-line)에서 정량적으로 분석, 진단하는 기기로도 현재 널리 사용되고 있는 것은 아래에 열거된 원리들을 이용하고 있다.

- 가시적인 측정(visual appearance)
- 빛의 차단(light extinction, light blockage)
- 빛의 산란 및 감쇠(light scatter, laser diffraction)
- 전기적 변화(electrical sensing, electrical resistance)
- 필터차단(filter blockage)
- 자력(magnetic attraction)

이중 가시적인 측정을 이용한 기기들은 전자현미경, 상분석기 등과 같이 주로 열외 분석용이며 빛의 간섭, 회절 및 차단을 이용한 기기들은 주로 오일내에 입자들이 존재함으로 인해 발생하는 오일을 투과한 빛의 세기의 감소량을

측정하여 오일내 입자의 농도를 구하는 것으로 열내, 열외 공히 사용되고 있으나 가격, 신뢰성과 정확도에 제약이 많아 필터차단과 자력원리를 이용한 기기들이 더욱 폭넓게 사용되고 있다. 필터차단원리는 오일라인에 규격이 다른 두 개 이상의 필터를 설치, 오일이 필터를 통과할 때 필터규격 이상의 마멸입자들은 통과하지 못하는 점을 이용하여 필터면의 부분적 가림에 의한 오일의 압력강하를 측정하여 마멸입자의 양을 측정하는 것이다. 측정된 마멸입자의 양은 ISO4406 또는 NAS1638 표준규격으로 환산되어 오일의 오염정도를 나타내게 된다. 전기적신호 변화를 이용하는 방법은 자력원리를 이용한 방법과 연결하여 사용되는 것이 일반적이다. 즉, 오일라인에 자석이 들어 있는 감지센서를 설치, 그곳을 지나는 오일내의 자성입자들을 자속에 의해 수집하며 센서부의 전자회로에서 전기저항의 변화를 감지함으로써 수집된 자성입자의 양을 측정한다. 이 글에서는 이들 기기에 대한 상세한 설명은 생략하기로 한다. 정성적인 분석은 오일샘플을 통해 열외에서 행해지며 그 대표적인 장비로 원자흡수 및 원자방사분광기(atomicabsorption/emission spectrometer)와 X-선 분석장치를 갖춘 전자주사현미경(SEM) 등이 사용된다.

그림 9는 기억박스를 통과한 윤활유의 샘플 오일(off-line)분석에 의해 구해진, 철(Fe)성분 마멸입자의 작동기간 경과에 따른 증가추세를 보인 것이다.⁽¹⁶⁾

기어의 마멸상태가 정상적인 경우 비록 샘플에 따라 약간의 변동은 있으나 거시적으로 볼 때 안정수준의 값을 보이고 있으며 기어의 마멸이 심해짐에 따라 철성분 함유량이 현저하게 증가함을 볼 수 있다. 갑자기 마멸입자의 양이 증가하는 현상은 모든 기계요소에서 공통적으로 발생하는 현상이며 특히 피로가 주된 마멸 기구인 경우 그 변화폭이 더욱 커진다. 따라서 마멸입자의 양이 크게 증가하는 것이 오일분석에 의해 감지될 경우에는 보다 빈번한 오일분석을 통해 그림 9와 같이 경계(warning)단계

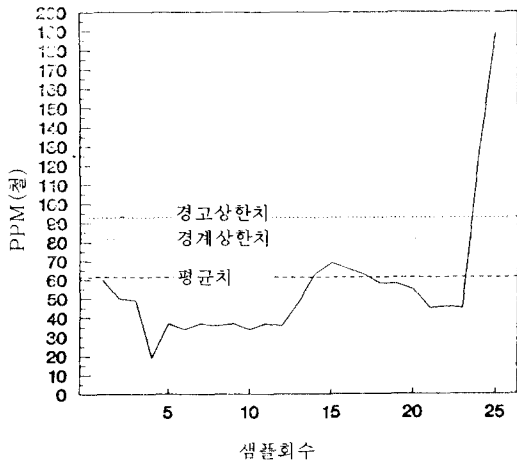


그림 9 기어박스의 철성분 마멸입자 수집경향도

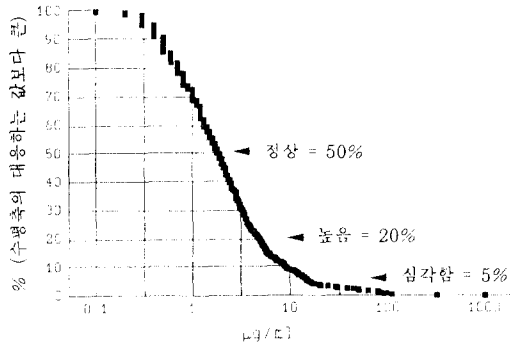


그림 10 승용차 엔진오일내의 철성분 분포도

에 이를 때까지 과다마멸이 발생한 요소를 정밀히 확인하며 이에 따른 보수대책을 세워 경고(alarm) 상한치에 이르면 기계를 정지시킨 후 보수작업을 하는 것이 바람직하다.

그림 10은 최근 미국의 한 연구실에서 자국 및 일제승용차를 포함하여 총 515대의 엔진을 샘플로 하여 각 엔진오일을 분석, 함유된 철입자의 양을 구한 결과이다.⁽¹⁷⁾ 그림에서 수직축의 값은 이에 대응하는 수평축의 철함유량보다 큰 샘플의 퍼센트를 나타낸다.

이 경우 분석결과를 통해 마멸상태의 심각도를 정의했는데 그림 10에서 보는 바와 같이 정상적인 엔진오일에 함유된 철마멸입자는 그양이 오일 1ml당 2~3 μ m 이하이며 심각한 경우

표 2 엔진오일내 함유된 마멸입자 성분 분석

금속	정상	높음	심각함
Fe	28	66	160
Al	7	15	29
Cr	1	3	11
Cu	14	58	154
Pb	21	60	408
Sn	0	3	9
Mo	0	6	25

에는 1ml당 300 μ g 이상으로 정의하였다. 엔진오일을 통해 다른 금속성분들도 검출되는데 이들의 양 역시 그림 10과 같은 정의로 분석하더라도 위의 515대로부터 구한 결과는 표 2와 같다.

철성분 외에도 Cu와 Pb성분이 대량 검출되는데 이것의 근원은 납-청동계나 납-배빗계 메탈베어링일 것이며 일부 유연연료 사용차량의 납성분이 추가되었을 것으로 추정된다.

6. 맺음말

지금까지 트라이볼로지의 핵심분야인 마찰, 마멸에 대해 간단히 살펴보았다. 과학의 급속한 발전에도 불구하고 아직도 이들에 대한 완전한 지식은 아직 요원한 상태이다. 그러나 현재까지 알려진 지식으로도 기계시스템의 최적설계에 크게 도움이 된다는 사실에 대해서는 의심의 여지가 없다. 앞에서 함께 살펴본 마멸입자에 대한 소개는 마찰과 마멸의 복합적인 산물로서 이의 관찰을 통해 분석하고자 하는 기계시스템의 상태를 효과적으로 진단하여 트라이볼로지적 거동을 이해하는 데에 중대한 정보가 된다. 따라서 마찰과 마멸에 대한 궁극적인 연구와 함께 그 산물인 마멸입자에 대한 보다 적극적인 이해와 지식의 축적은 요소(tribo-elements)의 고성능, 고정밀화에 크게 이바지할 것이다.

참고문헌

- (1) Halling, J., (et al.), 1975, Principles of Tribology, MacMillan, London, pp. 72~126.
- (2) Bowden, F.P. and Tabor, D., 1951, Friction and Lubrication of Solids, Vol. 1 Oxford Univ. Press, London, pp. 73~295.
- (3) Blau, P.J., 1980, "The Role of Metallurgical Structure in the Integrity of Sliding Solid Contacts; Solid Contact and Lubrication," AMD, pp. 39~45.
- (4) Singer, I.L., 1991, "A Thermochemical Model for Analyzing Low Wear-Rate Materials," Surface and Coatings Technology, Vol.49, pp. 474~481.
- (5) Singer, I.L., Fayeulle, S. and Ehni, P.D., 1991, "Friction and Wear Behavior of TIN in Air: the Chemistry of Transfer Films and Debris Formation," Wear, Vol.149 pp. 375~394.
- (6) Ling, F.F., 1992, "The Role of Fractals in Tribology," Plenary Speech, Int. Conference on New Materials and Technologies in Tribology, Minsk, Byelorussia.
- (7) Heilmann, P. and Rigney, D.A., 1981, "An Energybased Model of Friction and its Application to Coated System," Wear, Vol. 72, pp. 195~217.
- (8) Suh, N.P., 1979, "The Delamination Theory of Wear," Wear, Vol.44, pp. 1~16.
- (9) Kwon, O.K., 1979. "A Study of the Interaction of Chemical, Thermal and Mechanical Factors in a Lubricating Sliding Contacts," Thermally Activated Wear Theory, Ph. D Thesis, Univ. of Wales.
- (10) Barwell, F.T., 1983, "The Contribution of Particle Analysis to the Study of Wear of Metals," Wear, Vol.90, pp. 167~181.
- (11) Reda, A.A., Bowen E.R. and Wescott, V. C., 1975, "Characteristics of Particles Generated at the Interface between Sliding Steel Surfaces," Wear, Vol.34, pp. 261~273.
- (12) Swansea Tribology Centre, 1987, "A Guide to Wear Particle Recognition-for Use with Rotary Particle Depositor," Univ. College of Swansea, U.K.
- (13) Telus Inc., 1982, Wear Particle Atlas, U. S.A.
- (14) Rabinowicz, E., 1977, "The Formation of Spherical Wear Particles," Vol.42, pp. 149~156.
- (15) Jin, Y. and Wang, C., 1989, "Spherical Particles Generated During the Running-in Period of a Diesel Engine," Wear, Vol.131, pp. 315~328.
- (16) Int. Newsletter, 1991, "The Role of the Lubricant as a Condition Monitoring Tool," Condition Monitor, pp. 4~9.
- (17) Lewis, R.T., "Wear Metals in Automobile Engine Oils," Private Report, TRIBOMETRICS, Inc., Berkely, USA. 