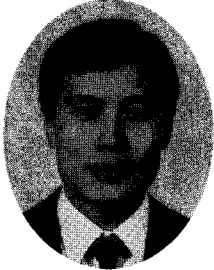


특 활 연 구



마찰, 마모 및 마모입자에 대한 소고

한국과학기술연구원
Tribology 연구실
공학박사 선임연구원 안 효 석

1. 서론

20세기에 들어오면서 급속도로 과학 및 기술이 발전함에 따라 인류의 번영을 위해 발전을 거듭해 온 산업전반의 諸기계설비와 자동차, 항공기등의 작동조건으로 고속, 고하중 그리고 높은 정밀도가 요구되며 특히 최근에 들어 생산공정자동화 및 무인화작업이 구체적으로 진행되어가는 고도산업사회로 접어들었다. 따라서 기계요소의 원활한 작동을 위한 최적설계 및 보수유지를 위해 접촉간에 발생하는 제문제들을 근본적으로 이해하고 해석하는 tribology에 대한 깊은 연구가 요구되는 시점에 이르게 되었다.

이러한 관점에서 무엇보다도 먼저 설계시 고려가 되어야 할 사항은 바로 요소의 마찰(friction), 마모(wear)현상 및 이것들과 관련하여 발생하는 요소의 파괴현상에 대한 보다 구체적인 이해이다.

마찰과 마모는 tribology적 요소간의 동적 접촉시에 반드시 수반되는 현상으로 해당 재료들의 고유성질에 기인되는 것이 아니라 전체접촉계(overall system)의 특성이라 말할 수 있다. 그러므로 마찰과 마모는 접촉하고 있는 두 재료(materials)와 주변조건(environmental conditions) 그리고 그들의 작동조건(operational conditions)의 복합적 함수라 말할 수 있다. 즉, 하중, 속도 또는 주위온도나 습도등의 주변조건이 어떠한 변화에 따라 접촉하고 있는 두 재료 또는 그중 어느 하나의 마모

(wear-rate)에 지대한 변화가 초래될 수도 있다.

마모와 마찰사이의 관계를 과학자들간에 공히 인정될만한 간단하고도 일반적인 관계로 설명한다는 것은 현재의 과학수준으로는 불가능하다. 그 간단한 예로 마찰이 심하다고 해서 반드시 심한 마모현상이 발생하는 것은 아니며 접촉간에 관측되는 현상 역시 접촉시간의 경과에 따라 변화한다는 사실이다. 그러나 모든 마모현상의 공통적인 특징으로, 마모입자들이 발생되기 위해서는 반드시 파단(fracture)현상이 선행되어야 한다는 것이고 이러한 현상은 궁극적으로 접촉시스템의 파괴(failure)를 초래한다는 점을 지적하지 않을 수 없다.

트라이 볼로지적 파괴(tribological failure)는 본질상 재료의 표면 또는 표면층에서 발생된다. 표면층의 성질이 마모, 부식, 피로 그리고 기타 표면에 관련된 현상에 대한 적응력이 부족하게 될 때에 파괴현상이 시작되게 된다. 따라서 최적의 구조적 성질과 surface tribo-properties를 가진 소재의 선택이 요소설계시 선택되어야 하나 안타깝게도 기존의 소재들중에서 이러한 조건을 만족시켜 주는 소재는 존재치 않으며 이를 해결하기 위한 수단으로 소재의 표면특성을 변화시키는 표면처리기술(surface modification technique)의 도입이 불가피하다.

본고에서는 마찰과 마모에 관련된 tribology에 대해 고찰해 보고자 한다.

2. 접촉운동시의 거동

기어, 볼 밀 로울링엘리먼트 베어링, 캠과 태핏등의 tribo-elements의 운동해석을 위해서는 Fig.1에서 보는 바와 같이 복잡한 inter-disciplinary phenomena에 대한 이해가 필요하다. 즉 기계적, 물리적, 화학적 그리고 열적 요인들에 대한 보다 상세한 정보없이는 비교적 정확한 거동을 예측할 수 없다. 그러나 Fig.1에서 지적된 요인들중에 상당수가 접촉시간의 함수로 작용한다는 사실을 간과해서는 안된다. 접촉시스템의 접촉부위에 발생하는 현상들을 가시화하면 Fig.2와 같이 표현할 수 있을 것이다.

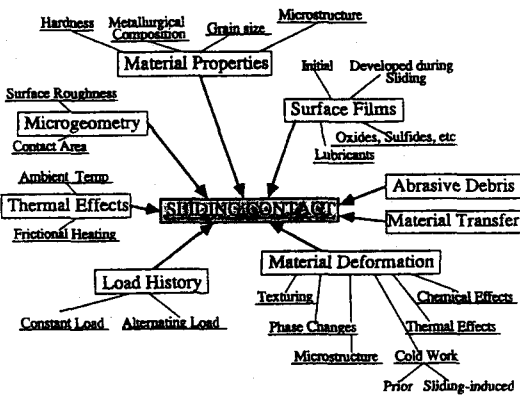


Fig. 1. Some of the Many Simultaneous Contributions to Sliding Behaviour.

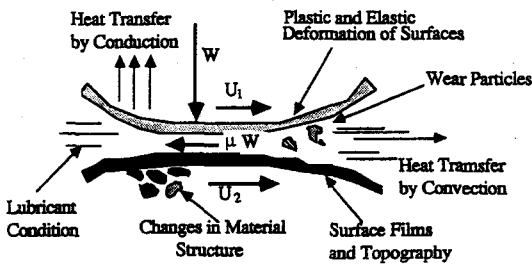


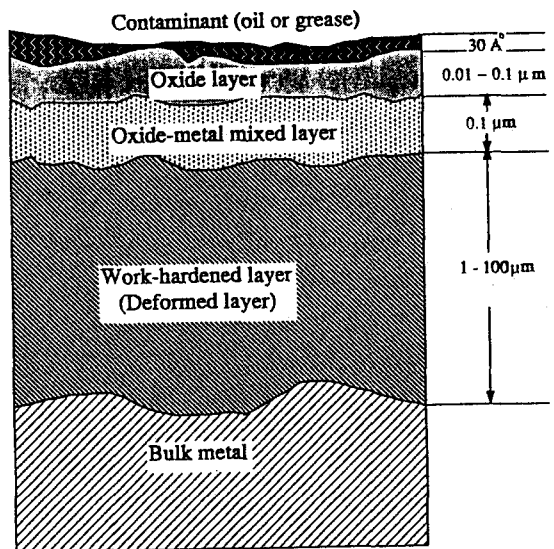
Fig. 2. Interacting Surfaces in Relative Motion

그림에서 보는 바와 같이 상대운동을 하며 접촉하고 있는 접촉체의 접촉부위에서 발생하는 현상을 나열해 보면 아래와 같다.

- 마모입자의 생성
- 표면막(surface film)의 형성 및 파괴

- 접촉면 및 접촉부위의 소성 및 탄성 변형(표면조도의 변화등)
- 접촉면 하부층의 금속학적 변화
- 윤활유의 성상변화(열화, decomposition등)
- 상대표면으로부터의 물질전달(material transfer)

이제 접촉체의 한 표면에 관심을 기울여 보면 위에서 지적한 일반적인 표면막외에도 Fig.3에서 보는 바와 같이 분류를 세분화할 수 있다.



T Fig. 3. Typical Surface Layers

산화층 (예를 들면 FeO, F₂O₃와 Fe₃O₄)은 운동조건, 주변환경에 따라 복합적으로 조성된다. 산화층을 포함하여 변형층(deformed layer)의 상부까지는 일반적으로 HDL(Highly deformed layer)로 정의되고 변형층의 나머지 부분은 MSL(Moderately Strained Layer)또는 단순히 소성변형층(plastically deformed layer)으로 일컬어지기도 한다. HDL은 접촉운동의 영향을 크게 받아 상변화, 격자구조의 변이동을 통해 아주 미세한 입자구조를 가지게 되는 것이 보통이다. HDL과 MSL의 두께는 접촉체의 재료의 특성에 따라 크게 좌우되며 특히 재료의 연성(ductility)과 가공경화성질에 민감하게 의존한다. 때로는 상재표면으로부터

의 물질전달, 쌍방으로의 물질전달(mutual transfer)등의 복잡한 메커니즘에 의해 형성된 전이층(transfer layer)이 HDL의 주요 역할을 차지하기도 한다.

3. 마찰과 마모(Friction and Wear)

Triboogy분야의 중대한 관심중의 하나로 계속 연구가 진행되고 있는 것이 마찰과 마모에 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 둘째로, 상대표면돌기 사이의 interlocking현상, 마지막으로 접촉면 밀표면층의 소성변형이다. Adhesive junction은 접촉표면의 상태에 크게 좌우되어 깨끗한 표면간의 접촉시 강한 metal-to-metal bond가 형성되나 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 정의 된다.

$$f = S_m / P_m \quad S_m : \text{임계전단응력} \\ P_m : \text{항복응력}$$

이를 설명하면 마찰은 분자간 인력에 의해 접촉체간에 응착에 의해 발생한 용접점(welded junctions)들을 이겨내기 위한 힘이다. 이 이론은 junction의 형성, 성장 그리고 junction부근에서의 전단(shearing)에 대해 설명이 가능하나 접촉면에서 흔히 발생하는 물질전달(material transfer), 접촉표면에 형성되는 ploughing groove, 마모입자의 형성 또한 표면 조도의 변화와 시간과 미끄럼거리(sliding distance)에 따른 마찰력의 변화등에 대해 설명할 수 없다.

상기한 문제점을 보충하기 위해서는 표면돌기만의 interlocking현상을 마찰에 고려해야 하며 이는 곧 표면돌기의 탄성 및 소성변형과 경한 표면돌기에 의한 ploughing을 고려한다는 것을, 의미한다. 따라서 응착이론에 asperity

interlocking을 복합한 결과, 마찰의 주된 진행 과정을 돌기의 탄성 및 소성변형, ploughing, 응착된 용접점들의 전단(shearing of adhesive junction) 그리고 접촉면 사이에 끼어 들어간 가공경화된 마모입자에 의한 ploughing으로 설명하게 된다. 상기의 모델은 부분적으로 소성 변형향이 포함되어 있으나 그것이 단지 표면돌기의 차원에 극한되어 있어 접촉면 하부에 발생하는 재료의 성질 및 구조의 변화, 소성유동(plastic flow)등이 고려가 되지 않았다. 이를 보상하기 위해 최근에 들어 에너지에 관점을 둔 energy-based friction model이 제창되고 있는데 이 model은 미끄럼운동시 발생하는 마찰에 의한 일(frictional work)이 소성변형에 의한 일과 등가하다는 가정하에 성립된 것이다.

마모는 상대운동하여 접촉하고 있는 요소들의 표면에 발생하는 소재의 손실로 정의되는데 마찰에 비교해 볼 때 더욱 그 현상을 규명하는데 애로가 많다. 이는 미세한 접촉조건의 변화에 의해서도 마모현상에 큰 변화가 초래되는 등 그 과정에 영향을 미치는 인자가 많기 때문이다.

일반적으로 마모에 영향을 미치는 메커니즘을 들면 아래와 같다.

- 접촉부위에 형성된 용접점(junction)의 응착(adhesion) 및 전단(shearing)
- 접촉부위에서의 물질전달(material transfer) 또는 alloy formation
- 상대표면으로 물질전달된 입자들의 재료(fatigue)
- 접촉면에서의 산화 또는 부식
- 상대적으로 연한 표면에 발생하는 ploughing
- 경한 마모입자에 의한 절삭(abrasion)
- 전기자극(electrical attack)
- delamination
- 열적활성화(thermal activation)

여기에서 delamination이론은 미끄럼운동이 계속 반복될때 표면에서 아주 가까운 하부층에서 반복된 압축응력의 영향으로 균열이 시작되며 계속된 미끄럼운동에 의해 표면에 평행한

방향으로 균열이 확장해 나가 인접한 균열부와 접성하게 되고 종극에 가선 얇고 긴 마모단편을 형성 “delaminate”한다는 이론이다. 이 이론은 미국 MIT의 서남표박사팀에 의해 제안된 것으로 접촉면하부의 응력상태를 기준으로 해석되었으며 균열이 접촉평면에 평행한 방향으로 전파해 나가는데 대한 설명이 궁색한 점이 아쉽다 하겠다. 이에 반하여 열적활성화이론(thermal activation theory)은 접촉면 하부의 에너지상태를 통해 마모현상을 설명하는 것으로서 미끄럼운동에 의해 형성된 마찰열(frictional heating) 또는 윤활유가 분해되며(decompose) 발생시키는 활성화에너지(activation energy)등이 접촉면과 그 하부의 에너지 상태에 주된 영향을 미쳐 그 에너지

(subsurface)에 발생한 균열이 접촉면으로 전파되어 마모입자당어리를 발생시키고 접촉면에는 응동기와 흡사한 pit를 형성하게 된다.

Fretting은 기계의 볼트등과 같은 체결부에 발생되며 극히 적은 진폭의 진동운동을 행하는 마찰면이 산화되어 미세한 산화마모입자들 형성하게 되는 현상이다. 제한된 공간내에 형성된 산화마모입자의 양이 증가되면 마찰내 제한된 공간의 부패를 초과하게 됨으로 체결부의 압력이 계속 증가되며 결국에 가선 파괴(seizure)가 일어난다. Fretting에 의한 손실의 정도는 주변의 화학적 성질에 크게 영향을 받으며 또한 축적되어 가는 마모입자가 접촉면 사이를 어느정도 빠져나가느냐에 크게 좌우된다. 한편 발생된 마모입자들이 상대표면사이에서 완충역활(buffer)을 하게되면 마모율은 감소할 수도 있다. 따라서 응착마모형으로 시작되어 절삭마모형으로 전이되었다가 마모입자에 의해 상대표면간의 접촉이 저지되면 마모율은 저하되고 이경우 파괴를 유도하는 최종 마모기구는 피로에 의한 파단(fatigue fracture)과 접촉부위의 응력증가에 의한 균열의 발생으로 귀착될 것이다.

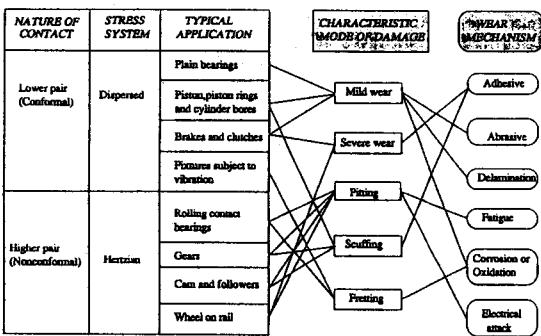


Fig. 4. Classification of Mode of Damage of Common Machine Elements

벨이 임계치를 넘게되면 scuffing과 같은 심각한 마모현상을 초래하게 된다는 이론이다.

Fig. 4은 일반기계요소들에 발생하는 마모유형과 함께 그것을 유도하는 마모기구들의 관계를 표시한 것이다.

Mild wear는 기계요소가 가지고 있는 용도적 특성을 잃지않는 허용범위내에서 서서히 진행되는 소재의 결손현상을 말하며 이에 반해 severe wear(重마모)는 요소의 특성을 잃게될 징후를 보여주는 비정상적 크기 및 형태의 마모입자가 발생하는 단계의 마모현상을 말한다. Pitting은 구름 또는 미끄럼접촉을 하는 곡면을 형성한 표면에 주로 발생하며 반복되는 전단응력(cyclic shear stress)에 의해 접촉면하부

Scuffing은 기어와 같이 큰 하중이 작용하는 non-conformal contact의 경우에 빈번히 발생하는 파괴유형으로서 접촉표면사이의 부분적 용접현상(welding)에 기인된 심각한 파손현상으로 정의되나 때로는 단순히 심한형태의 응착마모현상으로도 불리우고 있다. Scuffing이 발생한 표면은 아주 거칠어져 있으며 상대표면으로의 물질전달현상을 흔히 볼 수 있고 소성유동 및 과다마모현상도 수반된다. Scuffing의 발생시 다른 마모 및 파괴유형과는 달리 심한 소음과 온도가 급상승하고 마찰계수 역시 급등한다.

4. 마모입자

기계시스템에서 발생하는 마모입자의 종류를 분류하면 Table. 1과 같다.

마모입자의 형성은 접촉이 일어나는 부위를 지배하는 마모메커니즘에 따라 그 형태 및 색깔등이 변화하게 된다.

Table 1. Classification of Wear Debris

According to the shape	According to the properties
Normal rubbing wear particle	Ferrous metal particle
Cutting wear particle	Nonferrous metal particle
Laminar particle	Ferrous oxide
Fatigue chunk	Lubrication degradation products
Granular	Contamination particle
Fracture particle	
Severe wear particle	
Spherical particle	

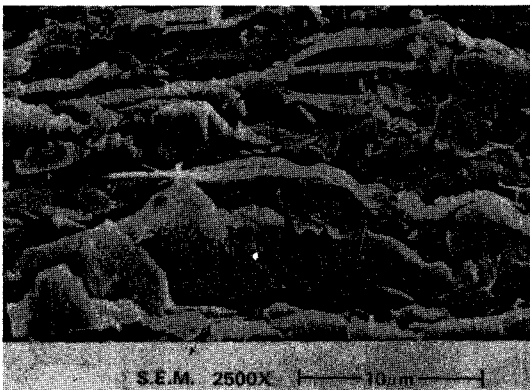


Fig. 5. Normal rubbing wear particles

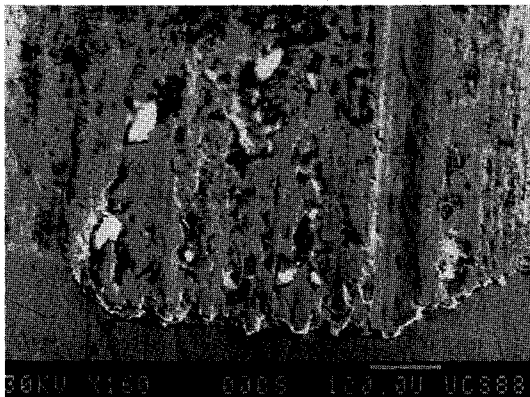


Fig. 6. Typical worn surface of the roller specimen in roller-on-disc test

Normal rubbing wear particle은 Fig.5에서 보이는 바와 같이 얇은 박판모양의 부드러운 표면을 형성하며 크기는 대개 15µm이하로서 정상적인 마모상태(mild wear 또는 normal

sliding wear)에 생성되는 전형적인 마모입자 유형이다.

Fig.6은 roller-on-disc마모시험시, 로울러의 접촉부위 경계부분에 대한 SEM사진으로 미끄럼운동시 발생한 표면층의 소성변형에 의해 표면층이 박판형으로 밀리어 경계부분에 집적되어 있는 것이 보인다. 이 박판층이 떨어져 나가면 정상적인 미끄럼운동시에는 normal rubbing wear를 형성하며 운동조건이 심각한

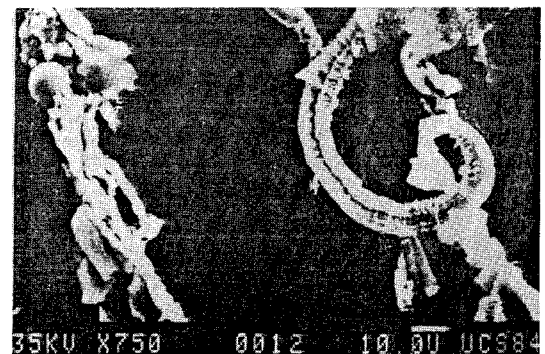
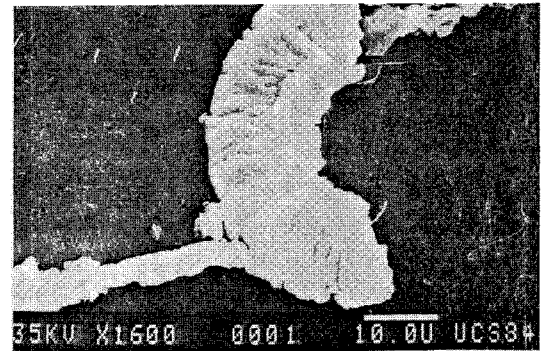


Fig. 7. Typical cutting wear particles

경우에는 입자의 크기가 큰 severe wear 마모입자를 형성한다.

Cutting wear 마모입자는 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 두께의 변화는 있으나 대개 가늘고 길며 마모입자 형성시 잔유응력에 의해 구부러지거나 튀틀린 모습을 하는 것이 보통이다. 그 길이는 대개 $100\mu\text{m}$ 이하이며 절삭마모(abrasive wear)에 의해 형성되는 전형적인 마모입자이다. Laminar particle은 대개 로울링베어링과 같은 구름운동(rolling)이 행해지는 기계요소에서 생성되는 것으로 반복되는 구름운동에 의해 표면하부에서 발생한 균열이 성장하여 마모입자를 생성하는 것으로 아주 얇고, normal rubbing wear 입자에 비해 비교적 크기가 커서 $50\mu\text{m}$ 에 달하기도 한다.

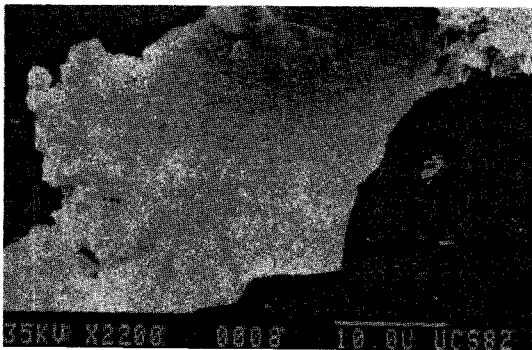
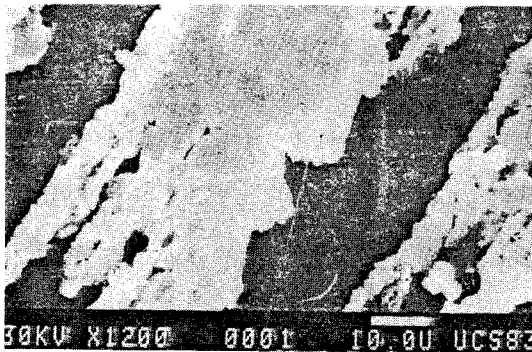


Fig. 8. Typical laminar particles

Fig. 8은 laminar particles의 전형적인 모습이다. 이에 반하여 fatigue chunk 역시 피로에 의해 생성되기는 하나 접촉부위의 조건이 아주 심각해 재료의 파괴를 예측케 하는 마모입자로

서 아주 두껍고 입자의 둘레에 파단(fracture)면이 잘 형성되어 있으며 크기는 $100\mu\text{m}$ 에 이르기도 한다. Granular 마모입자는 글자그대로 아주 미세한, 불규칙한 형태의 마모입자로서 fretting이나 microspalling에 의해 형성된다.

마모입자중에서 우리가 가장 주목해야 할 것은 severe wear 마모입자이다. 이는 고하중, 고속 등 작동조건이 심각한 경우 접촉부위의 기계적응력(mechanical stresses)과 열응력(thermal stresses)이 복합되어 재료가 결탈 수 있는 응력상태를 초과한 경우에 주로 형성되며 따라서 severe wear가 계속되면 접촉부위의 심각한 파괴가 예상된다. 대개 크기는 $15\mu\text{m}$ 이상이며 fatigue chunk보다는 얇으나 비교적 두꺼운 형태를 자주 보인다.

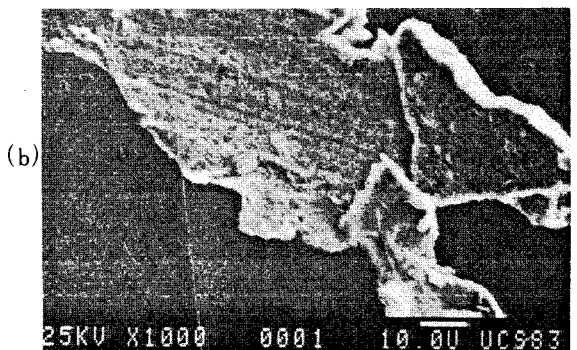
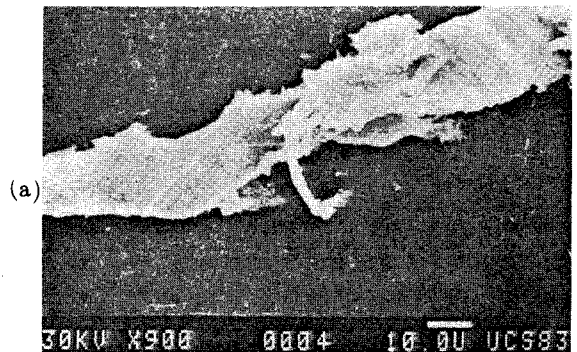


Fig. 9. Typical severe wear particles

Fig. 9는 severe wear 마모입자의 전형적인 모습들로서 주목할 것은 입자 표면에 형성된 줄무늬로서 이는 접촉면이 받은 심한 미끄럼운동조건을 잘 대변해주고 있다. Spherical parti-

cle은 구름피로(rolling fatigue)에 의해 형성되거나, 미끄럼접촉을 하는 접촉부위에 발생하는 마찰열에 의해 용해된 마찰면이나 마모입자들이, 순간적으로 고형화(solidification)하면서 압축되어 구형을 형성하는 것으로 Fig. 10과 같이 피로에 의해 생성된 구형마모입자는 대개 그 크기가 $5\mu\text{m}$ 이하이나, 용해된 입자가 고형화하며 형성한 구형입자는 Fig. 11에서 보듯이

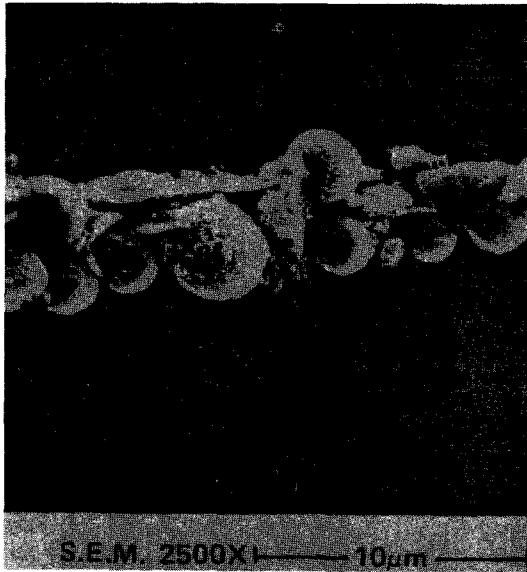


Fig. 10. Spherical particles famed due to rolling fatigue.

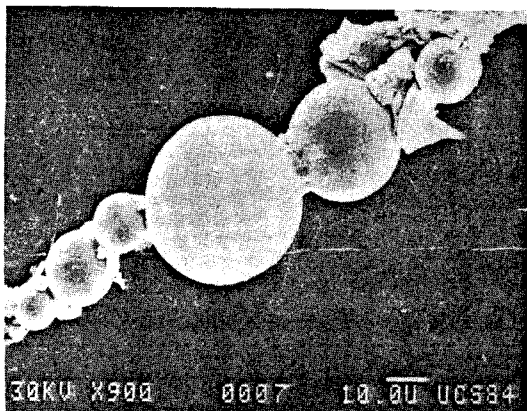


Fig. 11. Spherical particles formed due to solidification of molten particles.

그 크기가 대개 $10\mu\text{m}$ 이상이다. 후자의 경우는 Fig. 12와 같이 속이 비어있는 구형을 형성하는 경우가 많은데 이는 마모입자가 고형화하면서 내부에 축적된 압력이 외부로 터져나올때 형성되는 것으로 알려져 있다. 피로에 의한 구형마모입자의 생성은 심각한 현상이 아니나 후자의 경우는 그 수가 많아지면 접촉시 접촉부위에 미치는 열적효과가 크다는 것을 의미하므로 접촉조건이 개선되지 않는다면 곧 심각한 파괴현상이 초래될 수 있다.



Fig. 12. Hollow sphere exhibiting a surface shrinkage hole

5. 결론

지금까지 tribology의 핵심분야인 마찰, 마모에 대해 간단히 살펴보았다. 과학의 급속도발전에도 불구하고 아직도 이들에 대한 상세한 지식은 아직 요원한 상대이다. 그러나 현재까지 알려진 지식으로도 기계시스템의 최적설계 및 보수유지등에 크게 도움이 된다는 사실에 대해서는 의심의 여지가 없다. 앞에서 함께 살펴본 마모입자에 대한 소개는 마찰과 마모의 복합적인 산물로서 이의 관찰은 분석하고자 하는 기계접촉시스템의 tribology적 거동을 이해하는 데에 중대한 정보가 된다. 따라서 마찰과 마모에 대한 궁극적인 연구와 함께 그 산물인 마모입자에 대한 보다 적극적인 이해와 지식의 축적은 tribo-elements의 고성능, 고정밀화에 크게 이바지 할 것이다.

參 考 文 獻

1. J. Halling(ed) Principles of Tribology, MacMillan, London, 1975.
2. M.H. Jones(ed)Industrial Tribology, 1983. Elsevier.
3. N.P. Sub and coworkers, The Delamination theory of Wear, Wear, Vol.44, 1977.
4. P. Heilmann and D.A. Rigney, 'An energy-based model of Friction and its application to coated system', Wear, 72 (1981) 195-217.
5. P. J. Blau, 'The role of metallurgical structure in the integrity of sliding solid contacts; Solid Contact and Lubrication, AMD (1980) 39-45.
6. F. P. Bowden and D. Tabor, Friction and Lubrication of Solids, Vol. 1 Oxford Univ. Press, London, 1951.
7. H. Czichos, Tribology-A systems approach to the science and technology of friction, lubrication and wear, Elsevier Sci., 1978.