트라이볼로지 개론

정문수/플랜트학회 부회장
chungms@kosep.co.kr

한양대학교 기계공학과 학사
한양대학교 산업경영대학원 산업기계 석사
(전) 한국남동발전 발전처장

1. 서론

트라이볼로지는 상대접촉 마찰운동을 하는 두 개 이상의 물체표면 사이에서 발생하는 물리 화학적 상호작용을 연구하는 과학 기술이다. 즉, 모든 물체의 상대접촉 운동표면에서 발생하는 마찰(friction), 마멸(wear) 및 윤활(lubrication)에 관련된 실용적 과학기술을 총칭하여 트라이볼로지라 한다. 1966년에 영국에서 처음 사용하기 시작한 트라이볼로지라는 용어는 "문지르다"라는 의미를 갖는 그리스어 "tribos"에서 유래한 것으로, 트라이볼로지의 물리적 의미는 상대접촉 마찰운동으로 인해 발생하는 마찰현상에 관한 실용적 학문이라는 것이다. 트라이볼로지는 기계가 개발되어 기계장치의 성능과 수명, 효율성, 내구성 등을 적극적으로 검토해야 하는 시스템이 갖추어지기 전까지는 사람들의 주목을 받지 못하였다. 그러나 운송기술과 총포를 중시하는 전쟁산업에서 기계장치의 획기적인 발달과 대규모의 소요량 발생, 특히 제2차 세계대전을 계기로 대량의 무기와 공산제품의 생산은 프로세스 기계산업을 발전시켰다. 이러한 산업적 수요가 트라이볼로지 기술에 대한 체계적인 적용연구와 제품생산에 연계된 기반 산업으로 발전하면서 기술자들은 이것에 큰 관심을 갖게 되었다.

실제의 기계장치에서 트라이볼로지 기술은 여러 가지 분야와 복합적으로 연계되어 작용하는 것으로 알려져 있다. 트라이볼로지는 기계부품이나 시스템에서 마찰과 마멸을 예측하기 위해 매크로 시험을 하거나, 마찰 및 마멸을 취소로 유지하기 위해 새로운 윤활제의 개발에 관련된 복합학문으로 기계공학, 재료공학, 화학공학 분야의 엔지니어들로부터 크게 주목을 받아왔다. 전통적인 제조업체의 산업설비는 매크로 트라이볼로지 기술에 의해 해결할 수 있는 일반기술에 해당한다. 그러나 정밀기계의 폭넓은 사용과 극한기계장치의 개발, 반도체 기술의 혁신적인 진보는 기존의 매크로 트라이볼로지 기술 분야로부터 진전된 새로운 마이크로 트라이볼로지 기술을 필요로 한다. 최근에 마이크로/나노 트라이볼로지 분야의 획기적 발전은 원자크기의 마찰 및 마멸과정을 근본적으로 이해하는 데 큰 공헌을 하였고, 이 기술은 자연스럽게 물리학자나 화학자의 관심을 크게 불러일으켰다. 마이크로/나노기술에 관련된 산업체의 신기술 개발 요구는 접촉계면의 물리적 현상을 다루는 트라이볼로지 분야에서 특히 초미세 기술에 대한 활성화에 큰 기여를 하게 되었다. 마이크로/나노 트라이볼로지 분야의 급격한 발전으로

새로운 전문가 사회가 조직되면서 마이크로/나노 트라이볼로지 기술이 새로운 트라이볼로지 기술의 일원으로 자리를 잡게 되었다.

2. 트라이볼로지 기술과 산업발전

영국의 피터 조스트는 마찰, 마멸, 윤활을 총칭하여 그동안 널리 사용하던 윤활이라는 용어 대신에 문지르다라는 의미를 갖는 트라이볼로지를 1966년에 처음 사용하기 시작하면서 트라이볼로지 학문은 이론적 체계화를 구축하였다. 특히 운송기계의 발전은 트라이볼로지 기술의 급속한 발전을 제공하였다. 앞에서 언급한 것처럼 트라이볼로지 학문은 생산제품의 치수 정밀도와 윤활조건에 따라 초기의 매크로 트라이볼로지 산업에서 마이크로 트라이볼로지 산업, 그리고 나노 트라이볼로지 산업으로 급속한 발전을 거듭하고 있다.

2.1 매크로 트라이볼로지 사업

매크로 트라이볼로지 산업은 저속과 저하중으로 지칭되는 마찰, 윤활, 마멸 등에 관련된 기본산업으로, 최근에 대두된 마이크로/나노 트라이볼로지 산업과 구별하기 위해 굳이 명칭을 붙인 것이다. 매크로 산업은 대체적으로 mm 정도의 정밀도 범위를 갖는 제품을 생산하는 모든 기술을 포함한다. 따라서 매크로 트라이볼로지 기술에 속하는 제품은 가공 정밀도가 높지 않고, 기계장치의 속도나 하중이 크지 않은 작동조건을 갖는 범용기술 수준으로 윤활유 공급을 원활하게 유지하면 기계의 성능이나 생산선 등에서 별다른 문제점이 발생되지 않는 일반기술로 제품생산이나 유지보수가 어렵지 않은 트라이볼로지 기술이다. 결국 제품생산에 기술적 노하우가 많지 않고 손재주나 보통의 공작기계에 의해 생산하는 형태이기 때문에 특히 저렴한 가격에 경쟁력을 두고 있다. 따라서 매크로 트라이볼로지 기술로 생산한 제품은 범용 공작기계의 절삭가공 기술에 의해 가공 정밀도를 완성하는 수준으로 제작비와 생산성은 상대적으로 낮고, 마이크로/나노 트라이볼로지 기술제품보다는 부가가치가 떨어지며, 대부분의 제품을 복제하기가 쉽다는 특징을 갖고 있다. 이러한 제품은 부가가치가 떨어지기 때문에 이미 선진국에서 개발도상국으로 생산기술을 이전하였다. 매크로 트라이볼로지 기술로 생산한 OEM 제품은 저가로 선진국에 수출하는 유통망을 갖고 있다. 우리나라도 이러한 매크로 트라이볼로지 기술제품의 국제 경쟁력은 중국을 비롯한 동남아시아 국가들에게 뒤지기 때문에 대부분 이들 국가로부터 제품을 OEM으로 수입하거나 기술이전을 완료한 상태이다.

2.2 마이크로/나노 트라이볼로지 산업

기존의 매크로 트라이볼로지 제품에 비하여 기술 정도가 높으며, 특별한 기술개발 노하우가 축적된 제품이 대부분이다. 또한 마이크로/나노기술에 의한 제품은 유지관리도 비교적 까다롭기 때문에 특히 윤활관리와 마멸량 발생을 적극적으로 제어하는 설비 윤활기술이 필요한 첨단기술로 부가가치가 높다.

마이크로/나노 트라이볼로지 기술은 생산제품의 가공 정밀도가 μ m ~ mm 단위 부근에 있는 트라이볼로지 가공기술로 정밀/초정밀 기계장치를 생산하는 데 필요한 첨단기술 분야이다. 따라서 제품을 가공하기 위해서 보통은 연삭가공, 연마가공, 호닝작업 등의 정밀/초정밀 절삭 가공을 해야 이러한 정밀도를 얻을 수 있는 고급가공 기술분야이다. 초정밀 기술제품을 사용하는 분야는 반도체 제품, 초정밀 기계, 로봇, HDD와 같은 저장매체, 초정밀 금형, 초정밀 기계부품, 광학제품 등으로 소요분야가 다양하게 개발되고 있으며, 향후 이러한 초정밀 산업의 수요는 크게 증가할 것으로 예상된다. 마이크로/나노 트라이볼로지에 대한 기술적 수요는 첨단제품이 소형화되면서 대용량, 고속, 고하중의 상태에서 고장 없이 작동하

도록 요구하기 때문에 초정밀 제품생산에 필요한 기술로 자리를 잡게 되었다.

마이크로/나노 트라이볼로지 제품은 가공 정밀도가 크게 향상되어 있으므로, 접촉면적이 획기적으로 증가하여 하중지지 능력이 우수하지만, 상대접촉 마찰계면의 간극은 μm ~ mm 단위로 극히 줄어든다. 따라서 이러한 마찰계면에 윤활유 선정이 부적절하든지, 또는 윤활유의 공급량이 불충분하면 마찰이나 마멸이 크게 증가하여 기계장치 시스템의 고장은 더 쉽게 발생하므로 윤활설계 및 윤활관리에 보다 많은 신경을 써야 한다. 마이크로/나노 기술제품에서 마찰에 의한 저항성이 높으면 문제가 많이 발생하므로 마찰 접촉표면의 정밀가공과 얇은 유막두께를 항상 유지하여 고속성과 높은 하중지지 특성을 유지해야 작동성에 대한 신뢰성을 확보할 수 있다.

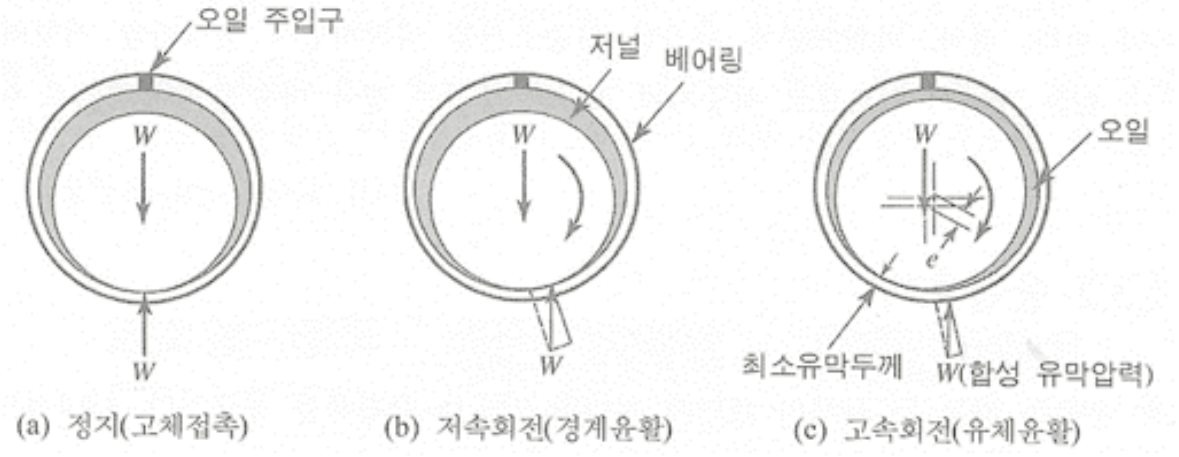
3. 윤활

3.1 윤활개론

상대접촉 마찰운동을 하는 두 물체의 접촉표면 사이에 윤활제(액체, 기체, 고체 등)를 적절하게 공급하여 마찰력과 마멸입자 발생량을 줄이려는 모든 작업은 결국 두 물체 사이의 원활한 작동을 안정적으로 보장하여 수명을 연장하고, 마찰손실 에너지를 완화하려는 노력이다. 즉, 마찰접촉 운동부의 기계적 마찰저감 작용을 총칭하여 윤활(lubrication)이라고 한다. 마찰접촉 운동면에 윤활제를 공급한 상태에서 미끄럼마찰이나 구름 마찰운동을 하게 되면, 운동부에 공급한 윤활제는 미세간극에 작은 유막을 형성하여 하중을 지지하든지, 동시에 위에서 기술한 각종 윤활작용을 원활하게 수행하여 기계장치의 안전한 작동성을 보장한다. 두 물체 사이의 마찰간극에 형성된 유막의 두께가 어느 정도인가에 따라서 마찰면의 윤활상태를 유체윤활, 경계윤활, 극압윤활, 혼합윤활 등으로 분류할 수 있다.

(1) 유체윤활의 기본개념

그림 1은 정지상태에서 부하를 받고 있는 평면 베어링의 정지마찰 조건을 보여주고 있다. 원래는 베어링의 간극에 윤활유가 채워져 있으나, 축에 가해지는 외부 하중 W에 의하여 축의 바로 아래 부분에 있던 오일은 위로 또는 밖으로 밀려나면서 윤활유는 자연스럽게 이동을 한다. 정지하고 있던 베어링은 그림에서 보여준 것처럼 축을 시



[그림 1] 유체윤활의 형성 과정

계 방향으로 느리게 회전운동을 하면 회전축은 베어링의 내면을 타고 오른쪽으로 천천히 이동하려는 현상이 발생한다. 축이 계속하여 느리게 시계 방향으로 회전하게 되면, 회전축은 베어링의 표면을 따라서 위로 기어오르려는 현상, 마찰력이 발생하면서 윤활 박막이 대단히 엷어지는 경계윤활 조건이 시작된다. 그러나 축의 회전 속도가 단계적으로 증가하면, 저널의 미끄럼마찰 표면에 붙어서 함께 회전운동을 하던 오일은 마찰접촉 운동면에서 외부로 빠져 나가려고 한다. 결국, 이러한 작동 현상은 마찰접촉 지역에서 회전축을 어느 정도 띄울 수 있는 충분한 압력이 형성될 때까지 계속하여 진행한다. 그 후에는 회전속도, 자중량, 원심력, 점성력 등 모든 하중조건의 평형상태가 유지되면서 저널과 베어링은 박막에 의해 마찰 접촉면을 완전히 분리한 유체윤활 작동조건을 유지하고, 이러한 평형상태에서 관성력과 점성력은 균형을 잡으면서 하중을 지지한다. 이때 베어링과 회전축 사이에는 최소 유막두께가 안쪽으로 형성되어 베어링의 하중지지 성능을 안정적으로 확보한다.

(2) 윤활유 점도 및 작동조건

1) 점도

윤활유의 점도가 높을수록 주어진 하중조건에서 유체윤활을 형성하기 위한 회전 속도는 낮아진다. 유체윤활 작동조건을 만들기 위해 필요한 점도보다 높은 점도는 축이 회전하는 과정에서 오일 박막을 접선방향으로 전단하는 데 필요한 힘을 증가시키면 유체 마찰력이 따라서 높아지므로 마찰에 의한 손실 에너지가 증가하는 문제점이 발생한다. 따라서 상대접촉 마찰면에 공급하는 윤활유의 점도는 사용조건에 가장 적합해야 하중지지를 위한 유막형성이 유리하고 마찰손실을 줄일 수 있다.

2) 작동조건

축의 회전속도가 빠를수록 유체윤활 조건을 형성하기 위해 필요한 윤활유의 점도는 낮아진다. 그러나 일단 유체윤활 마찰조건이 형성되면 회전속도의 증가는 축의 회전에 따른 오일 박막을 전단하는데 필요한 접선방향의 마찰손실 에너지도 따라서 증가하므로 유체 마찰력은 증가한다. 단위면적당 베어링에 작용하는 하중이 작으면, 마찰운동면에 유체윤활을 형성하기 위해 필요한 회전속도와 점도는 낮아진다. 그러나 오일 박막을 전단하는데는 점성에 의한 유체마찰 저항력을 극복해야 하는데, 이를 극복하기 위해 필요한 힘을 마찰력이라 한다. 결국, 마찰표면에 증가한 하중조건을 극복하면서 점성마찰 저항력을 낮게 유지할 수 있는 방법이 없으므로 하중지지 조건의 증가는 결국 마찰계수의 증가로 이어진다.

(3) 윤활효과

마찰접촉 운동계면에 공급한 윤활제로 인해 기계장치의 성능이나 내구성 측면에서 얻을 수 있는 대표적인 윤활효과를 요약하면 다음과 같다.

① 마찰접촉 운동부에서 발생하는 마찰력을 줄여주는 감마작용 효과는 마찰 에너지 손실을 감소시키는 윤활제의 핵심적 역할로 대단히 중요하다.

② 물체의 마찰표면에서 흔히 발생하는 마멸작용, 특히 응착마멸, 스커핑, 시져와 같은 마멸은 마찰계면에 유막을 형성시켜 마멸발생을 방지하는 윤활효과를 기대할 수 있다.

③ 마찰접촉 운동을 하는 표면에 적절한 점도를 갖는 윤활 유막에 의해 금속간의 직접접촉을 차단하고, 유체막에 의해 접촉응력 분산작용을 하는 하중지지 윤활작용 효과를 기대할 수 있다.

④ 두 물체 사이의 마찰계면에는 마멸입자, 먼지, 퇴적물, 수분 등과 같은 각종 유해물질이 존재하는데, 이들 이물질을 마찰부로부터 제거하기 위해 유동성이 우수한 윤활유를 사용하여 세정작용을 한다.

(4) 윤활작용의 형태

1) 유체윤활

유체윤활은 **그림 2**에서 보여준 윤활작용 모델처럼 두 물체의 마찰 접촉면이 윤활제에 의해 완전히 분리된 경우를 말한다. 유체윤활을 하는 마찰 접촉 표면에 걸리는 하중은 접촉면의 상대운동에 의해 발생하는 유막압에 의해 모두 지지된다. 따라서 마찰 접촉 표면에서 발생하는 마멸량은 이론적으로 볼 때 없어야 하고, 마찰 손실도 윤활막 상호간의 유체마찰에 의한 것으로 대단히 작게 나타난다.

2) 혼합윤활

혼합윤활은 **그림 3**에서 보여준 것처럼, 마찰접촉 계면운동을 하는 두 물체 간극에서 표면에 가공된 돌기들의 간헐적인 접촉과 부분적인 유체윤활이 혼합되어 있는 중간적 성격의 윤활작용 상태를 말한다. 혼합윤활 조건의 마찰계수는 0.004~0.1 정도의 범위로 유체윤활의 경우에 비하여 크게 증가한 수치이고, 마멸이 발생하지 않는 유체윤활 조건과는 다르게 마찰접촉 표면에서 약간의 마멸량은 불가피하게 발생한다.

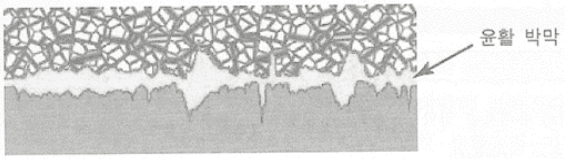
3) 경계윤활

경계윤활은 분자 크기의 작은 유막에 의해 가공표면이 서로 분리된 상태에서 상대접촉 윤활작용을 하는 경우를 말한다. 경계윤활 조건에서 측정한 마찰계수는 보통 0.05~0.2 범위로 비교적 높게 나타난다. 경계윤활 상태의 유막은 분자단위 크기로 대단히 작기 때문에 외부의 마찰력 변화나 하중조건의 급격한 차이는 유막을 쉽게 파괴하고, 유체 박막에 의해 분리된 두 물체의 표면은 부분적인 고체마찰 접촉조건으로 순간 바뀌면서 마찰력은 빠르게 증가한다.

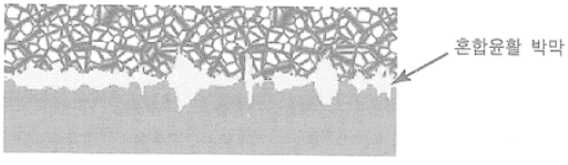
(5) 윤활제의 종류

윤활제는 크게 액체 윤활제, 반고체 윤활제, 고체 윤활제 그리고 기체 윤활제로 나눌 수 있다. 마찰저감을 위해 사용하는 윤활제는 적용위치와 공급하는 방법, 마찰의 종류 등에 따라 가장 적합한 것을 선정한다. 결국, 마찰접촉 운동을 하는 두 물체의 계면에 어떤 종류의 윤활제를 공급할 것인가는 마찰소재, 작동조건 등에 의해 그 때마다 다르게 결정된다. 액체 윤활제는 석유산업의 발달로 원유에서 양질의 윤활유를 제조하고 있다. 오늘날 기계장치에서 사용하는 윤활유는 대부분은 광유를 정제한 것으로 작동조건을 만족하는 경우가 많다. 특히, 광물성 윤활유는 대량으로 생산하기가 용이하므로 가격이 저렴하고, 운반성도 양호하면서 특수한 경우를 제외하고는 기계장치에서 요구하는 윤활 조건의 대부분을 만족한다.

반고체 윤활제는 주로 그리스를 말하는 것으로 유동성이 우수한 윤활유와 고체 윤활제의 중간적 성질을 갖는다. 고체 윤활제는 액체 윤활유나 그리스에 의해 윤활하기가 곤란한 고온지역에서 윤활작용을 지속적으로 유지해야 하는 경우에 사용한다. 고체 윤활제는 보통 내열성이 대단히 우수한 고체 파우더를 사용한다. 기체 윤활제는 액체 윤활제에 비하여 점도가 대단히 낮으므로 회전체의 고속운전에 따른 마찰 저항력이 크게 줄어들



[그림 2] 유체윤활의 마찰 윤활막 접촉모델



[그림 3] 혼합윤활의 마찰 윤활막 접촉모델

고, 이에 따른 마찰열 발생이 작으므로 저하중의 고속회전에 적합한 윤활제이다.

4. 마찰

4.1 마찰개론

접촉을 하고 있는 두 물체가 상대접촉 마찰운동을 하려고 할 때는 그 운동에 대한 반대 방향으로 저항이 발생하는데 이러한 현상을 마찰이라 하고, 이때의 저항력을 마찰력이라 한다. 상대접촉 마찰운동을 하는 과정에서 발생한 마찰 에너지의 일정 부분은 손실 에너지의 형태로 소비하고, 마찰면의 마멸현상에 의해 기계의 수명을 단축시키는 역할에 기여한다는 것을 생각할 때 설계의 최적화, 재질 또는 적유 선정을 통해 마찰을 줄이려는 노력을 많이 기울여야 한다. 결국 기계장치에서 필요한 동력 에너지를 증대하고, 소비되는 마찰손실 에너지를 줄이기 위해 트라이볼로지 기술은 첨단기계에서 가장 중요하게 다루어야 하는 기술이라 할 수 있다. 마찰을 공학적 개념으로 접근하게 되면, 다음의 4가지로 분류할 수 있다. 즉,

① 마찰접촉 운동표면을 갖는 모든 물체의 구동에서 불필요한 마찰이 있을 때는 이를 완화시켜 마찰에 의한 에너지 손실을 줄인다. 대표적인 기계부품으로 베어링과 치차를 사례로 들 수 있다.

② 마찰을 필요로 하는 상대접촉 운동표면에는 충분한 마찰특성을 유지하여 최대한 마찰력을 증대시킨다. 대표적인 기계부품으로 완벽한 정지나 온도제어를 필요로 하는 브레이크를 사례로 들 수 있다.

③ 상대접촉 운동면에서 마찰로 인한 진동을 제거하거나 적절한 수준 이하로 유지하는 기술이다. 마찰로 인한 진동은 기계 부품간의 접촉부분에서 발생하는 마찰력의 부조화로 끽끽거리는 마찰음을 유발하기도 한다. 경우에 따라서는 마찰 진동을 필요로 하는 경우도 있는데, 진동에 의하여 조화된 소리를 내는 바이올린이나 기타와 같은 경우가 이의 좋은 사례라 할 수 있다

4.2 마찰효과

마찰은 오랜 경험으로부터 관찰한 것을 표현한 일종의 자연 발생적 에너지 발산 현상이다. 정지하고 있는 물체나, 움직이고 있는 물체 모두는 마찰이라는 자연의 현상을 경험하고 있다. 상대접촉 운동계면을 따라서 발생하는 마찰현상은 특히 마찰력 증가로 인한 에너지 손실 문제를 해결하기 위해 마찰계면에 윤활유를 공급하여 감마작용에 의한 에너지 절감효과를 추구한다. 마찰력 감소에 의한 에너지 절감효과를 기대하는 것이 기계장치에서 가장 중요한 설계 포인트로 제시하는 효과적인 마찰력 저감기술이다. 일상생활에서 경험하거나, 기계장치를 설계하는 과정에서 고려해야 하는 마찰효과를 기술하면 다음과 같다.

① 책상에 올려져 있는 물체나 경사면에 정지하고 있는 물체는 모두 정지 마찰력에 의해 계속 정지하려는 경향이 있다.

② 걸어가는 사람은 마찰력을 적절히 조절하여 천천히 또는 빠르게 이동할 수 있다. 사람의 마찰력 조절을 적극적으로 도와주기 위해 다양한 신발이 개발되었다.

③ 프라이팬의 마찰력을 줄이기 위해 바닥면에 열에 간한 테프론 코팅을 하거나, 식용 기름을 공급하여 마찰력을 줄여줌으로써 음식물이 프라이팬의 바닥면에 눌어붙는 현상을 방지한다.

④ 자동차에서 발생하는 각종 마찰력을 줄여서 궁극적으로 연비향상을 위한 트라이볼로지 기술개발을 적극적으로 진행하지만, 또 다른 한편에서는 마찰력 증가에 의한 제동력 확보를 위해 제동력 증가 기술개발을 추진하고 있다.

4.3 응착이론

마찰은 실제로 접촉하는 운동면적의 크기에 의

존하고, 이것은 접촉표면에 가해지는 하중의 크기에 비례하여 커질 수 있으나, 외관상의 접촉면적 크기와는 무관하게 일어난다는 것이 응착가정이다. 응착 가정에 기반을 둔 마찰력은 실제접촉면적에 의존하는 것으로 기존의 외관접촉면적과 실제접촉면적 사이에는 큰 차이가 있다는 것을 설명한다. 즉, 마찰현상은 가공 표면에 형성된 한 개 한 개의 정점(asperity)들의 직접접촉에 의해 마찰력 특성이 결정된다는 것이다.

응착 가설에 기반을 둔 마찰 이론에 의하면, 실제접촉면적에서 발생한 마찰계수는 두 물체의 접촉 소재에서 상대적으로 연한 소재의 전단력과 압축으로 인해 발생하는 소성변형에 대한 저항력의 비로 나타낸다. 이들 마찰 전단력과 소성 저항력은 임의의 마찰소재에 대해 유사하게 변하는 값이므로 마찰계수는 다양한 종류의 소재간에도 유사한 값으로 나타난다. 이 때 마찰접촉 계면에 공급된 윤활 물질에 의한 어떠한 윤활 작용도 고려한 것이 아니다. 결국 접촉하는 두 개의 마찰표면에는 윤활유에 의해 분리하는 것이 아니라 반드시 소재간의 직접 접촉에 의해 마찰작용이 진행되어야 응착가설을 성립한다.

5. 마멸

5.1 마멸개론

상대접촉 마찰운동을 하는 어떤 물체가 유용한 가치를 상실하는 데는 크게 세 가지로 나누어 설명할 수 있다. 첫 번째는 사용하는 물건이 시대에 뒤떨어져 자연적으로 퇴화하는 것, 두 번째는 물체를 사용함에 따라 그 물체가 파괴되는 것, 세 번째는 그 물체를 사용함에 따라 점진적으로 마멸이 진행되어 접촉표면의 가능성이 상실되면서 더 이상 사용할 수 없는 것이다.

마모(wear)라고도 널리 알려진 마멸은 상대접촉 또는 마찰운동을 하는 두 물체 이상에서 접촉표면의 물질 일부가 물체로부터 이탈하는 현상으로 정의할 수 있다. 이러한 마멸이 어떠한 메커니즘에 의해 발생하는가에 대한 연구는 많이 진행되었지만, 아직도 마멸이 왜 발생하는지를 모르는 경우가 더 많다. 그러나 우리들이 경험하는 마멸은 물체의 표면에서 발생하는 자연적인 현상으로 받아들이고 있으며, 상대접촉 마찰 운동표면에서 마멸이 발생되지 않은 사례는 없다. 이러한 마멸은 마찰소재의 기능적 수명이나 내구성을 결정하는 중요한 단서가 된다. 문제는 기계에서 발생하는 마멸의 특성을 파악하여 가능한 줄이거나 마멸 진행속도를 예측하려는 기술개발이 대부분이지, 마멸 발생을 완벽하게 방지할 수 있는 기술을 개발하려는 노력은 아직 없다는 것이다. 만약 마멸이나 윤활관리 측면에서 이상이 예측되면, 관련 부품이나 시스템은 전체적인 정밀진단을 받아서 적절한 조치가 완료되어야 재가동이 가능하다. 그만큼 핵심부품의 마멸에 대한 진단기술은 시스템 전체에 영향을 미칠 뿐만 아니라 제품의 생산성과 품질, 안전성에 직접적으로 관계가 있기 때문에 중요하게 다루어진다.

5.2 마멸효과

상대접촉 마찰운동을 하는 물체의 표면으로부터 소재가 떨어져 나가는 현상에 의해 발생할 수 있는 마멸문제를 기술하면 다음과 같다.

① 물체의 표면에서 소재가 떨어져 나가면 치수정밀도가 달라지기 때문에 상대접촉 계면의 간극(clearance)이 변하고, 그 결과로 밀봉효과, 조립공차 등이 조립할 당시와는 차이가 발생하므로 기계장치의 성능에 큰 영향을 미친다.

② 마멸입자의 발생으로 작동유체의 유동성을 나쁘게 하고, 열화의 원인으로 작용하며, 경우에 따라서는 마멸입자가 노즐이나 미세한 간극을 막아 버리는 심각한 장애를 일으킬 수 있다.

③ 금형이나 절삭공구와 같은 기계 부품은 마찰표면에서 발생하는 크고 작은 마멸입자로 인해 생산제품의 품질에 영향을 미치는 경우가

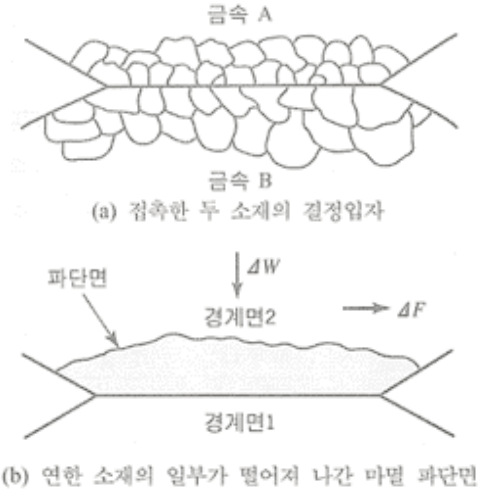
종종 있다.

④ 마찰표면에서 발생한 작은 마멸은 기계장치에서 불가피하게 발생하는 자연적 현상이지만, 빠르게 진행되는 마멸이나 예상치 못한 마멸은 기계장치의 수명을 크게 단축하거나 생산제품의 불량률을 높이는 지름길이기 때문에 반드시 내마멸성 소재를 사용하든지 또는 열처리에 의해 표면의 경도를 높이는 표면개질 가공작업을 필요로 한다.

5.3 마멸의 분류

(1) 응착 마멸

상대접촉 마찰운동을 하는 두 물체의 마찰 표면, 즉 마찰계면에서 유막이나 오염된 각종 이물질을 모두 배제한다면, 마찰운동을 하는 두 표면의 원자들 상호간에는 서로 잡아당기려는 인력이 작용하게 된다. 이러한 미끄럼 마찰작용 과정에서 발생하는 인력이 접촉 마찰소재의 전단강도보다 높으면, 상대적으로 약한 소재의 접촉점에서는 마멸입자가 떨어져 나오는데 이러한 현상을 응착마멸이라 하며 응착 마멸의 발생 메커니즘을 **그림 4**에 나타내었다.



[그림 4] 응착 마멸의 발생 메커니즘

(2) 연삭마멸

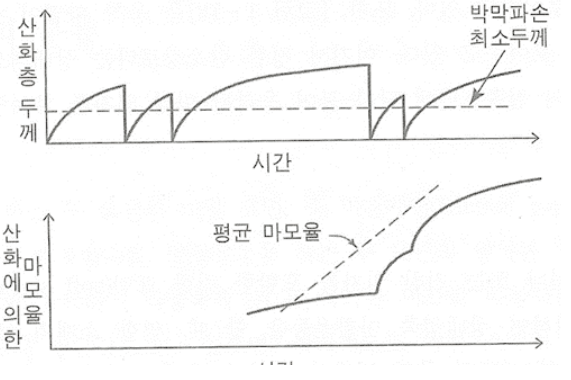
거칠고 단단한 표면이나 거친 입자를 포함한 연한 표면이 상대적으로 연한 소재의 표면에 대하여 상대접촉 마찰운동을 할 때, 연한 소재의 표면은 고형체에 의한 연삭 작용에 의해 연한 표면의 물질 일부가 떨어져 나가는 현상이 발생하는데, 이것을 연삭 마멸이라 한다. 연삭 마멸은 마찰접촉 운동을 하는 두 물체 사이에 단단한 입자들이 마찰표면 내부로 침투함으로써 일어나기도 한다.

(3) 부식마모

상대접촉 운동을 하는 표면의 마찰 작용이 부식환경에서 일어날 때, 접촉표면을 둘러싸고 있는 주변의 환경과 접촉 표면과의 화학적 작용으로 생긴 화합물이 물체의 표면으로부터 서서히 떨어져 나가는 것을 부식마모라 한다. 마찰 접촉면의 물체가 공기 중의 산소에 의해 산화막이 생성되어 두꺼워지다가 어느 두께에 도달하면 떨어져 나가는 과정을 반복하는 부식층의 생성과 탈락이라는 부식 마모의 진행도를 **그림 5**에 나타내었다.

(4) 표면피로 마멸

물체의 상대접촉 마찰표면에 반복하중을 가하면, 표면은 피로 현상을 일으키면서 소재의 일부가 떨어져 나가는 것을 표면피로 마멸이라 한다. 반복하



[그림 5] 산화작용에 의한 부식마모의 진행과정

중에 의해 발생하는 표면의 피로마멸은 일정한 궤도를 따라 반복적인 상대운동을 할 때에 접촉표면 또는 표면 바로 아래층에는 결함 또는 크랙을 형성하는데, 결과적으로 이러한 균열이 접촉표면의 마멸을 발생시키는 원인으로 작용한다. 구름 마찰운동을 하는 표면에서 반복하중에 의한 표면의 피로파괴가 진행되는 표면 또는 표면접촉 바로 아래층의 파손 개념도를 **그림 6**에 나타내었다.

(5) 프레팅 마멸

상대접촉 마찰운동을 하는 두 물체 사이의 표면에 작은 진폭의 진동하중을 가하면, 표면 소재의 일부가 떨어져 나가는 현상이 발생하는데, 이것을 프레팅 마멸이라고 하며 이를 **그림 7**에 나타내었다. 프레팅 마멸은 특히 접촉표면에 작은 진폭의 진동을 받을 경우에 특징적으로 일어나는 현상으로, 접촉표면으로부터 대단히 작은 마멸입자가 발생한다. 이러한 마멸입자들은 곧바로 산화되어 단단한 산화 물질로 변질되고, 이탈한 산화 물질들이 또 다른 연삭마멸을 일으키는 원인으로 작용한다. 집중하중을 반복적으로 받는 치차의 미끄럼 마찰면에서 많이 발생한다.

6. 트라이볼로지 기술의 적용산업

6.1 적용기술 산업분야

트라이볼로지 기술은 우리들이 매일 사용하고 있는 단순한 가전제품에서 첨단기술을 응용한 특수제품에 이르기까지 폭넓고 다양한 산업분야에서 활용되고 있다. 이렇게 다양한 분야에서 트라이볼로지 학문을 활용하고 있는 이유는 기계시스템의 연계생산과 원가절감을 추구하면서 개별 요소부품이나 유닛의 고성능화 및 고기능화를 추구하는 데 반드시 해결되어야 하는 기술 분야이기 때문이다. 상대접촉 마찰계면에서 일어나는 마찰과 마멸 그리고 윤활 문제는 총체적인 자원 및 에너지 절약, 비용 절감 및 환경 보전 등에 연계되어 있고, 특히 첨단화와 생산성, 내구성을 확보해 나가는 길목에 트라이볼로지 기술이 자리를 잡고 있기 때문에 중요하게 다루고 있다.

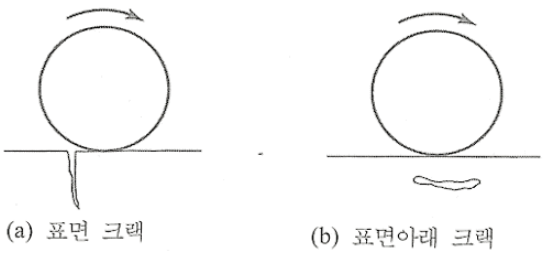
(1) 운송기계 분야

① 자동차 트라이볼로지

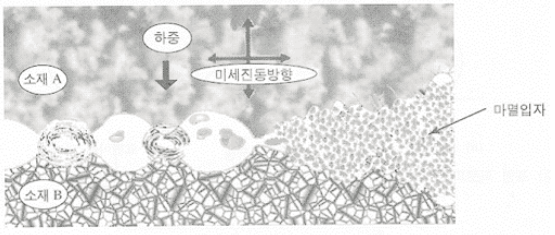
- 엔진의 고출력과 내구성 향상, 연비향상
- 엔진의 마찰손실 저감화 실험
- 변속기의 조작성과 운전성 향상, 연비절감
- 클러치의 동력전달 고효율화와 수명연장, 연비절감
- 브레이크의 제동성 향상과 브레이크 마찰음 및 진동 방지
- 타이어의 제동성과 승차감 향상, 수명연장
- 마찰에 연계된 진동과 마찰소음의 완화

② 철도 트라이볼로지

- 회전축의 베어링이나 레일-휠의 고속화, 유지보수비 절감
- 집진기의 저 마찰 및 내마멸성 향상, 수명연장



[그림 6] 표면 피로파괴의 모양



[그림 7] 프레팅 마멸의 발생 메커니즘

• 브레이크의 제동성 향상과 브레이크 마찰음 및 진동방지

③ 항공기 트라이볼로지

• 제트엔진의 성능과 신뢰성 향상
• 유압 계통의 신뢰성 향상
• 고속・고속용 브레이크의 제동성 향상과 브레이크 마찰음 및 진동 방지

④ 승강기 트라이볼로지

• 승강기의 고속화와 마찰 에너지 손실
• 로프/쉬브 사이의 마찰, 마멸성 제어에 의한 쾌적성, 안전성 향상

(2) 정보 및 정밀기계

① 정보기기 트라이볼로지

• HDD의 스핀들 및 헤드 액추에이터 기구의 고속화와 고정밀도 향상
• 헤드와 디스크 인터페이스의 보호 윤활막, 거칠기, 미소굴곡의 관리, 유해물질에 대한 오염원 제어기술

② 반도체 제조 트라이볼로지

• 고집적화 관련 웨이퍼의 초정밀 연마기술
• 반도체 생산라인의 무진 반송기술

(3) 산업 및 화학기계

• 건설기계의 운전특성 향상과 환경 대응기술
• 생산 공장의 반송기구 관련 고속화, 신뢰성, 유지보수 기술 향상
• 냉동기의 에너지 절약 및 지구 환경보존-생태계 및 오존층 보호
• 화학 플랜트의 가동률 향상과 기계정지 트러블 방지
• 제철소의 고속, 고정밀 압연과 환경오염 대응 기술

(4) 생산기술

• 공작기계의 주축 회전속도 향상과 공작물 이송의 고속화에 의한 고효율 가공기술
• 절삭공구의 재료 및 코팅의 내마멸성과 내융착성 기술향상
• 절삭 및 연삭유의 환경오염 대응 기술-무염소 사용량의 절감기술 등

(5) 우주환경 기술

• 인공위성의 대기 및 우주환경에 대한 내구성, 안전성 관련 기술

(6) 의료・복지기술

• 인공관절의 반복 내구성과 인체에 대한 무해성 기술
• 병원 의료장비 및 침대의 동력 성능 및 쾌적성 향상 기술

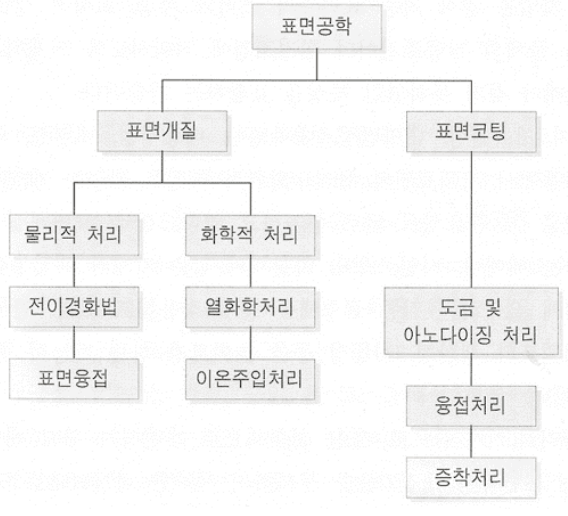
6.2 트라이볼로지의 요소・부품산업

트라이볼로지 적용기술의 대부분은 특히 기계장치의 핵심요소・부품에 밀접하게 관련되어 있으며, 기계장치의 작동과정에서 불가피하게 수반하는 마찰, 마멸의 제반 현상을 연계한 주제를 포괄적으로 다루고 있다. 따라서 산업현장의 기술자는 마찰, 마멸, 윤활 문제가 일상적으로 늘 일어나는 현상이기 때문에 중대하게 느끼지 못할지라도 실제로는 트라이볼로지 관련 문제를 항상 접하고 있으며, 기계장치의 문제가 항상 여기로부터 기인하고 이로 인해 발생하는 문제점을 해결하기 위해 고심하고 있다. 트라이볼로지 기술에서 중요한 또 다른 분야는 프로세스 기계시스템에 대한 상태 모니터링 및 진단 기술이다. 이 기술은 기계 부품이나 장치 시스템의 동작 기능을 지속적 또는 주기적으로 관찰 기록하여 시스템의 운전이나 작동에 결정으로 영향을 미치는 파손을 미연에 조치함으로써 생산량 손실을 줄이고 보수 유지비를 절감하며, 장비의 가동률을 높이는 트라이볼로지 응용기술로 기계장치의 자동화, 무인화 추세와 맞물려 급격한 발전을 이루고 있다. 트라이볼로지 기술의 궁극적인 목표는 기계장치의 모든 요소들

이 마찰, 마멸 및 윤활 측면의 최적의 상태에서 안정적으로 운전하도록 설계, 제작, 유지 보수하는 기술을 확보하여 장치 시스템의 효율성, 생산성, 안전성을 보장하는 것이다.

7. 표면특성 향상기술

다양한 기계적 또는 화학적 방법으로 고체의 표면특성을 바꾸기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 기계의 부품이나 시스템을 설계할 때 완벽한 특성을 갖는 소재를 선정하기 어렵다는 사실을 경험하면서 새로운 가공기술, 설계기술, 소재기술 등을 개발하기 위해 노력하고 있다. 상대접촉 마찰운동을 하는 고체의 표면특성을 마찰운동 부품이 사용되는 실제 조건에 적합하도록 바꾸는 기술을 총칭하여 표면특성 향상기술이라 한다. 특히, 트라이볼로지 핵심부품으로 널리 사용되는 베어링, 기어, 시일을 비롯하여 HDD, 초정밀 기계부품에 이르기까지 사용되는 고체 마찰표면의 온도와 하중 그리고 접촉운동 계면의 사용조건이 가혹해지는 환경에 적절히 대처하기 위해 표면의 특성을 향상시킬 수 있는 표면개질 신기술에 대한 관심은 나날이 증가하고 있다.



[그림 8] 표면특성 향상기술 분류

고체의 마찰표면 특성을 사용조건에 적합하도록 바꾸고자 개발한 표면기술에는 크게 표면개질 기술과 코팅 기술의 두 가지로 분류할 수 있다. 고체 마찰표면의 기능적 특성을 향상하기 위해 사용하는 표면개질 기술과 코팅기술을 요약하면 **그림 8**과 같다. 물체의 표면특성을 개질하기 위해서는 소재의 표면조직 크기와 배열을 바꾸어 기계적 특성을 향상하는 표면개질기술과 소재표면의 분자간 배열이나 별도의 특수성분을 강제로 압입시키는 화학적 결합변화의 개질기술로 크게 나뉜다. 또한, 이들의 기능성 향상기술과는 다르게 특수물질을 모재의 표면에 붙여서 박막층을 만드는 코팅기술이 있다.

7.1 표면개질

고체표면의 물리 화학적 특성을 변화시켜 상대접촉 운동표면의 마찰, 마멸, 윤활, 부식 등의 기능성을 개량하는 모든 작업을 총칭하여 표면개질이라고 한다. 표면의 마찰특성을 바꾸는 작업은 결국 가공 표면층의 조직과 형상, 화학적 성분조절, 접촉운동 계면의 환경적 특성을 물체의 작동조건이나 환경조건에 적합하도록 기계적, 화학적으로 그 특성을 개질하여 원소재가 갖지 못하였던 특성을 보완하는 기술이다. 표면개질을 통하여 저마찰성, 내마멸성, 내피로성, 내충격성, 내열성, 내부식성 등 기능적 향상을 요구하는 부품에서 고체표면의 물리 화학적 특성을 바꾸는 개질방법은 소재를 가공한 이후의 처리기술로 그 중요성이 날로 증가하고 있다. 결국, 표면개질 기술은 트라이볼로지적 특성을 요구하는 베어링, 시일, 기어, 마찰재와 같은 기계의 핵심부품, 내구성과 수명연장, 품질 등을 동시에 요구하는 각종 금형제품 등에 적용하고 있다. 결국, 표면개질 기술은 생산제품의 치수 정밀도와 생산성, 작동성 등을 높이고자 하는 기능적 주요부품이나 시스템에 많이 응용되고 있다. 표면의 특성을 물리적으로 또는

화학적으로 개량하기 위해 개발한 기술은 열처리라는 표면특성 개질기술을 구사하기 시작한 철기시대로부터 코팅기술을 적용하여 마이크로/나노기술 초정밀 제품을 생산하는 반도체 시대에 이르기까지 다양한 제품 생산기술로 지속적인 발전을 계속하고 있다. 표면개질이라는 표현은 일단 고체의 표면을 기계적으로 가공한 다음에 접촉표면의 가능성을 더 잘 확보할 수 있도록 기계적 또는 화학적으로 추가적인 가공을 추진하는 다양한 기술을 의미한다. 고체의 접촉표면 특성을 향상시키기 위해 사용하고 있는 대표적인 표면기술을 나열하면 다음과 같다.

- 열처리 기술
- 표면 경화법
- 단조, 압연, 인발과 같은 다양한 기계적 처리법
- 카본분사 표면개질 기술
- 물리적 증착법
- 화학적 증착법
- 플라즈마 질화법
- 플라즈마 주입법
- 이온 주입법
- 레이저 표면가공 기술
- 스퍼터링 기술
- 부식가공 기술

7.2 코팅

고체의 마찰 접촉표면에 동종 또는 이종소재를 물리적, 화학적으로 얇게 붙이거나 증착하는 기술을 총칭하여 코팅이라 한다. 코팅기술은 고체의 표면에 소재를 박막으로 붙이는 기술로 일종의 표면특성을 바꾸는 기술이다. 표면개질 기술과는 제조공법이 서로 다르기는 하지만 기능적으로 추구하는 활용 목적은 같다. 기계장치를 설계할 때 하중, 온도, 화학적 환경조건을 모두 만족하고, 여기에 가격도 저렴하다면 더 이상의 최적설계 노하우는 없다. 그러나 대부분의 소재는 기계적 특성, 화학적 특성, 내구성, 기능성, 가격, 구입 용이도 등에서 항상 상충되는 경우가 많아 설계자는 새로운 대안을 찾고자 한다. 최적소재를 선정하는 과정에서 물리적 특성과 화학적 특성이 제품의 사용조건에 모두 만족할 수 있도록 개발된 소재를 찾기가 어렵기 때문에 윤활성, 내마멸성, 내화학성, 내열성, 극압성, 저마찰성 등과 같은 표면의 기능성 향상을 위해 코팅기술을 많이 활용하고 있다. 최근에는 반도체 제품이나 초정밀 기계부품, 특히 기판의 대량생산으로 물리적 증착법, 화학적 증착법, 이온 주입법, 스퍼터링 등 다양한 코팅기술이 개발되었다. KIPEC