

◆ 總說 ◆

트라이볼로지(Tribology) 관점에서 考察한 表面關聯 技術의 最近動向

權 五 寬
韓國科學技術院 機械潤滑研究室長

1. 서 론

트라이볼로지는 상대운동을 하면서 서로 영향을 미치는 표면 및 이와 관련된 제반 문제와 실제 응용에 관한 과학과 기술로 정의되고 있다. 이를 산업계에서 익히 사용하고 있는 용어로 풀이하면 마모, 마찰 및 윤활을 기본 주제로 하는 공학이라고 설명되며, 그 결과는 기계 및 장치의 보수유지비 절감, 생산손실 감소, 에너지 소비 절감등의 직접적인 경제적 효과로 나타난다.

기술문명이 급속히 발달함에 따라 재료 소비량 절감 및 에너지 절감은 중요한 과제로 부각되었으며, 특히 산업계에 있어서는 생산단가와 직결되기 때문에 트라이볼로지 기술은 각 나라에서 필수적인 연구과제로 기술개발에 박차를 가하고 있다. 트라이볼로지의 대상이되는 상대운동을 하는 부분에서는 여러가지 복합적인 현상이 발생하기 때문에 물리, 금속, 화학, 기계 등의 공동 다분야 연구를 필요로 하게 된다.

여기서는 상대운동 부위에서 나타나는 물리적 현상을 개괄적으로 살펴보고, 이 중 마모방지 대책을 위한 표면처리 기술에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 운동표면의 제반현상

기계요소는 운동형태에 따라 그림 1과 같이 lower pairs와 higher pairs로 나누어 지며, 이 구분은 트라이볼로지 관점에서는 매우 중요한 의미를 지니고 있다. lower pairs에서는 접촉 부위가 넓어 응력이 분산되며, 미끄럼 운동만 나타나게 된다. 이 요소의 대표적인 예로는 미끄

럼 베어링, 피스톤링, 브레이크 등이 있으며, 윤활이 목적인 경우는 유체윤활 상태를 설계 기준으로 한다. higher pairs는 국부적인 접촉부위에 하중이 집중되어 표면의 탄성변형이 발생하고 굴림운동과 미끄럼운동이 동시에 나타나며 기어, 굴림요소 베어링, 캠등이 대표적인 예이다. 하중의 분산 및 집중 여부에 따라서 상대 표면의 재질특성설계와 윤활제 선정이 결정되고, 발생하는 마모특성도 달라지게 된다. 일반적으로 윤활조건은 higher pairs의 경우가 취약하며 복잡한 특성을 띄게 된다. higher pairs의 접촉을 모식도로 나타낸 것이 그림 2에 주어져 있으며, 여기서 나타나는 현상을 살펴보면 다음과 같다.

접촉부위는 하중에 의하여 탄성변형이 발생되며, 표면의 상대운동으로 인하여 운동을 저항하려는 방향으로 마찰력이 생기고, 이 결과 열이 발생하게 된다. 윤활제의 기능은 표면을 유막으로 분리시켜 마찰력과 마찰열의 생성을 감소시키며, 대류에 의하여 냉각효과를 가져온다. 재료에는 반복응력이 작용하게 되고, 마찰에 의하여 온도가 상승하게 되며, 재료 내부의 기공이나 결함부위에 윤활제가 침투하여 화학적 작용이 생기고 재료의 조직이 변하게 된다. 또한 운동표면은 표면간의 미소 돌출부(asperity)의 접촉, 마모입자와의 접촉으로 인하여 표면입자가 이탈되고 소성변형이 생기며, 표면의 마이크로적인 형상이 변화하게 된다.

운동표면의 설계에 있어서는 유막의 두께, 마찰열에 의한 온도상승 예측 및 최대 hertzian 응력등의 유효한 자료가 되며, 이를 기준으로 운동표면의 형상 설계, 재료의 기계가공 방법 선정, 금속학 측면에서의 재료특성 및 표면특성, 화

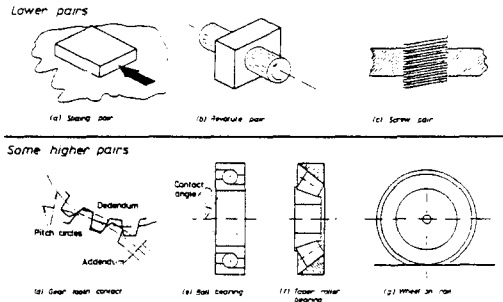


Fig. 1. Classification of machine elements into higher and lower pairs.

학적 측면에서 윤활제와 첨가제의 조성 및 특성을 고려하여야 한다. 표면이 운동을 하게 되면 재료의 표면상태와 구조가 변화하고, 윤활제와 표면의 조건이 화학적으로 저하된다. 이러한 상태의 감지에 있어서는 윤활제에 함유된 마모입자의 분석이 유효한 수단으로 사용되고 있다.

트라이볼로지에서는 이와 같이 여러 분야의 전문기술을 필요로 하는 현상들이 복합적으로 나타나기 때문에 공동분야의 연구를 필요로 하게 된다.

운동표면에 대해서 주로 적용되고 있는 기술은 첫째 윤활에 의한 표면 마찰 감소, 둘째 질화법, 침탄법등의 표면처리에 의한 마모 감소, 셋째 표면 코우팅에 의한 마모감소 및 윤활 특성 개선과, 넷째 최적 재료의 조합에 의한 마찰 최소화 및 늘어붙음을 방지하는 것 등이 있다. 이러한 응용기술을 확실하게 이해하고 실제 문제되는 기계요소제 적용하기 위해서는 표면에서 발생하는 제반 현상들에 대한 충분한 이해가 필요하며, 여기서는 마모의 감소에 관해서 현재까지 규명되어 있는 사항들을 살펴 보기로 한다.

가. 표면마찰의 감소-상대운동 표면에 작용하는 하중을 감소시키면 마모율이 줄어든다. 따라서 표면의 마찰력을 경감시키는 모든 기술은 마모의 발생도 감소시킨다.

나. 표면 및 표면하층에서의 소성변형방지 - 소성변형은 크랙의 형성 및 확산에 영향을 미친다. 이를 방지하기 위해서는 가능한한 표면 경도

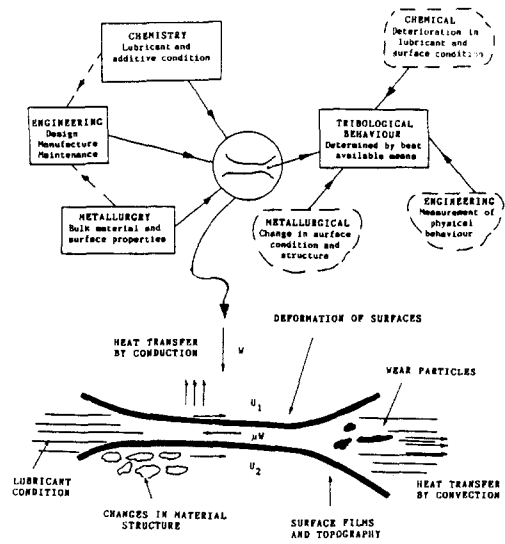


Fig. 2. Interacting surfaces in relative motion the inter-disciplinary implications.

가 큰 재질을 사용하는 것이 좋으며, 다른 방법으로는 표면의 윤활과 연성의 층(soft layer)을 삽입하여 변형을 받게함으로써 표면하중의 변형을 방지하는 방법이 있다.

다. 크랙 생성점의 제거-재질내의 상이 다른 입자나 불순물은 크랙의 생성점이 될 요인을 가지고 있다. 단단하고 유연성이 있으며 조직내에 상이 다른 입자가 존재하지 않는 재질이 트라이볼로지 측면에서 가장 바람직한 재료이다.

라. 크랙 확산율의 감소-탄소성 재료에서 크랙의 확산은 크랙 선단부의 변위에 기인하기 때문에 이를 억제하기 위해서는 연한 재질보다 단단한 재질이 좋다. 또한 크랙을 자체에서 제거해 버리는 즉, 크랙부분이 재용용되는 특성을 지닌 재료가 바람직하다. 강한 화이버를 사용한 복합 재료에서는 화이버의 방향에 따라 크랙 확산을 방지할 수 있다.

마. 재료의 화학적 안정성 향상-온도가 높은 부위에서 자주 볼 수 있는 고착마모(adhesion wear)와 용해마모(solution wear)는 한쪽 재료를 화학적 안정성이 높은 재질을 사용하여 화학적 반응 및 용해의 발생을 방지함으로써 제거할 수 있다.

3. 표면의 특성

3-1. 실제의 표면

일반적인 주위환경 상태의 금속을 주위 조건을 진공으로 하거나 가열을 하면 표면에서 수분을 방출하게 되고, 재료가 기계부품으로 사용되었던 것이라면 탄화수소(hydrocarbon)가 검출된다. 따라서 금속표면의 최외곽은 수분과 가스가 흡수된 층을 형성하게 되며, 그 두께는 약 3 \AA (10^{-8} m) 정도가 된다. 수분과 가스 흡수층 밑에는 주위환경과 금속의 산화 기구에 의해서 산화층(oxide layer)이 형성된다. 재질이 철일 경우 Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , 또는 FeO 의 산화층이 나타나며, 합금일 경우에는 합금성분의 표면집중도, 산소에 대한 친화력, 표면에 조성된 합금의 편석(segregation) 등에 영향을 받아서 산화층이 형성된다. 합금의 집중도에 대한 예를 들면, 니켈과 크롬이 함유된 스테인레스강일 경우 표면을 효과적으로 보호할 수 있는 니켈과 크롬 산화층을 형성하기 위해서는 어느 정도 이상의 함량을 포함하고 있어야 한다. 1.5% 정도로 소량의 크롬이 함유된 강 표면 산화층에서는 크롬성분이 전혀 나타나지 않는다. 주위환경도 산화층의 조성을 변경시키게 되는데 예를 들면, 400°C 의 베어링강을 500°C 로 가열하면 산화층에서 모든 합금 요소들을 볼 수 있으나, 온도를 600°C 로 상승시키면 기타 성분은 제거되고 크롬 산화피막만 존재하게 된다.

산화층 밑에는 약 10^4 \AA 크기의 가공경화층이

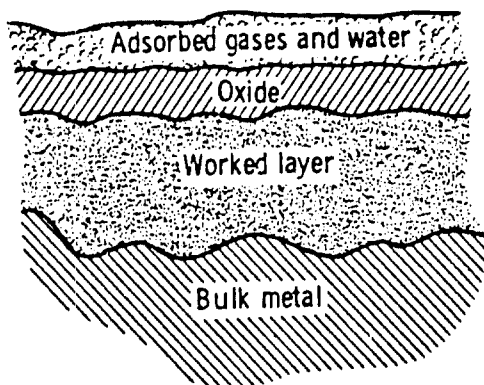


Fig. 3. Schematic representation of a metal surface.

나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 기계가공, 그라인딩, 소성가공시 재료 표면에 침투한 에너지에 의하여 응력경화, 재결정 및 금속 조직상의 변화가 일어나기 때문이다.

3-2. 표면과 윤활제의 화학적 작용

상태운동하는 표면에는 마찰과 마모를 경감시키기 위하여 대부분 윤활제를 사용하고 있다. 윤활제의 역할은 윤활영역에 따라 크게 두가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째, 탄성유체윤활과유체윤활 영역에서는 유동압의 생성으로 표면을 분리시켜 금속끼리의 접촉을 방지하며, 둘째, 경계윤활 영역에서는 표면과 윤활제의 화학적 작용으로 표면에 새로운 화합물을 형성시켜 금속끼리의 접촉을 최소화시킨다.

표면과 윤활제의 화학적 작용은 크게 세가지 부류가 있다.

(i) 물리적 흡착막(physical adsorption)

윤활제의 분자가 Van der Waals력에 의하여 표면에 약하게 고착된 막으로, 고착된 분자간의 응착력(cohesion)으로 미세한 돌출부들(asperities)의 직접 접촉을 방지한다. 그러나 열에 의해서 고착된 분자가 이탈하고, 막이 응해되기 때문에 물리적 흡착막에 의존하는 경계윤활에서는 저하중, 저속의 운동조건으로 마찰열의 발생을 극력 피해야 한다.

(ii) 화학적 흡착막(chemical adsorption)

윤활제의 분자가 표면의 분자와 화학적으로 결합되어 있는 상태를 말하며, 물리적 흡착막보다 약 5~10배 정도의 에너지로 강하게 고착되어 있다. 화학적 흡착막의 대표적인 예로는 스테아린산과 산화철의 결합을 들 수 있으며, 중위의 하중, 온도 및 속도에 견딜 수 있다. 작동 조건이 심한 경우에는 분자결합의 이탈 또는 막이 약해지고 녹아버려서 파손된다.

(iii) 화학적 반응막(chemical reaction)

화학적 반응막은 윤활제와 표면간에 원자를 교환하여 새로운 화합물을 형성하게 되며, 물리적 및 화학적 흡착막과 달리 막의 두께에 제한이 없고 큰 에너지로 결합되어 있어 분리가 불가능하다. 대부분의 화학적 반응 윤활제에는 S, Cl, P를 함유하고 있고, 이 원자들은

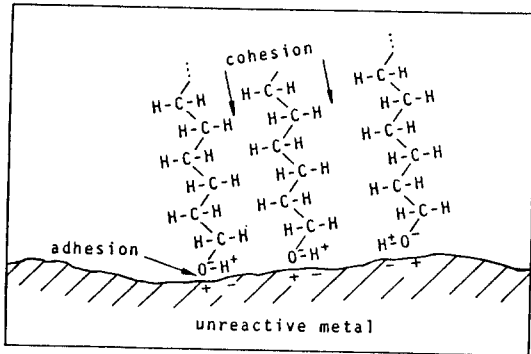


Fig. 4. Schematic representation of physisorption.

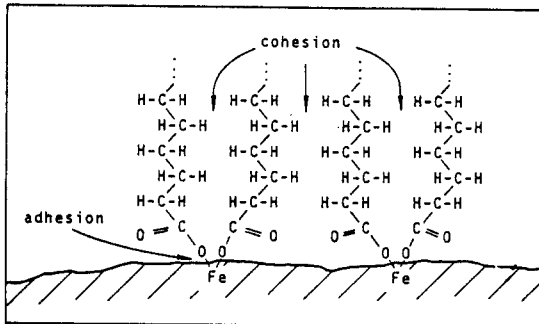


Fig. 5. Schematic representation of chemisorption.

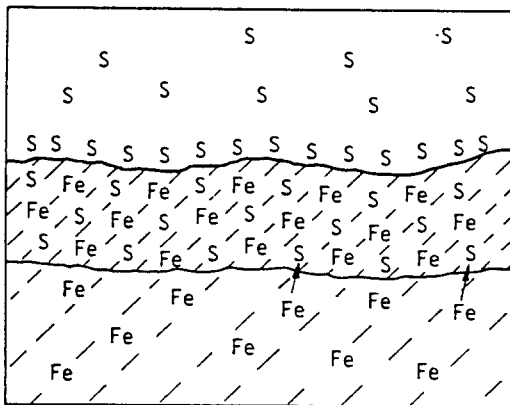


Fig. 6. Schematic representation of a boundary film formed by chemical reaction.

전단응력이 낮고 용융점이 높아 metal - salt막을 형성하는데 기여한다고 여겨지고 있다. 화학적 반응막은 안정한 성격을 가지고 있으며, 경계윤활 영역에서 고하중, 고온, 고속의 운동조건 부위에 적합하다.

3 - 3. 표면의 기계적 특성

표면의 기계적 특성중 가장 흥미있는 대상의 하나는, 균일한 축방향 변형 상태에서 표면 층이 원재료와 비교할 때 어떤 상태로 변화하는가 하는 것이다. 실험적으로 원재료보다 단단해지는 경우와 연해지는 경우 둘다 뒷받침이 되고 있다. 상반되는 두 경우는 전위(dislocation)의 생성, 증가 및 전위 밀도의 변화등을 다루는 전위 역학(dislocation dynamics)에 의해서 설명된다.

전위는 도식적으로 결정구조 연결선(crystalline)이 끊어지는 현상을 말하며, 표면부근에서 발생한다. 산화층이 완전하게 형성되어 있지 않은 표면, 예를 들면 가공을 바로 마친 표면이 변형을 받으며, 작용력이 전위마찰력보다 클 경우 표면방향 쪽의 전위는 표면에 장벽 작용을 하는 층이 형성되어 있지 않기 때문에 소멸해 버린다. 즉, 표면 바로 밑의 전위는 표면층에 축적되지 않는다. 그러나 표면영역 아래 부분의 전위는 내부를 가공경화 시키기 때문에 표면층은 재료내부보다 연해진다. 표면에 산화층이 형성되어 있는 경우는, 표면층에 전위가 축적되며 재료내부보다 전위 밀도가 높기 때문에 재료보다 단단한 표면층이 생기게 된다.

4. 표면코우팅에 의한 내마모성 향상

4 - 1. 표면코우팅의 개요

상대운동 부위에서 재료는 두가지 주요 기능을 충족할 수 있어야 한다. 첫번째는 재료의 구조적 특성이 하중을 충분히 담당할 수 있어야 하고, 두번째는 상대운동시 마찰이 적고 마모발생을 최소로 억제할 수 있는 표면특성이 있어야 한다. 이 두가지 요구를 만족시키기 위하여 재료의 표면처리와 코우팅 기술이 주로 사용되고 있다.

마모문제에 있어서 윤활이나 재료 선택만으

로는 설계에 있어서 획기적인 개선을 기대할 수 없다. 그러나 표면처리 및 코우팅을 통해서 효과적으로 내마모성 향상과 마찰특성을 향상시킬 수 있다. 또한 표면처리와 코우팅은 경제적 측면에서도 상당한 우위성을 가지고 있다. 예로서 내마모성이 강한 재료를 원재료로 사용할 때 가공이 어렵기 때문에 정확한 형상으로 가공하기가 어려우며, 가공비용이 매우 비싸지게 되므로 연삭재를 사용하여 형상을 가공하고 내마모 표면처리를 하는 것이 경제적이고 일반적으로 응용되는 방법이다.

재료의 표면 코우팅 기술은 표1에 제시되어 있는 바와 같이 여러가지 종류가 있다. 각 용도에 적합한 코우팅 기술을 선정하기 위해서는 다음의 사항을 충분히 검토해야 한다.

- (i) 시스템의 기능 및 하중, 속도, 온도 등의 작동조건
 - (ii) 상대운동을 하는 요소의 작동기구 및 예상되는 마모기구의 종류
 - (iii) 코우팅비용에 대한 경제적 타당성
- 코우팅 부분의 설계는 마모기구와 밀접한 관계를 갖고 있으며, 이를 도시한 것이 그림 7에 나타나 있다.

마찰시스템의 요소에서 고착마모기구 (adhesive wear mechanism)가 지배적으로 발생 될 우려가 있는 표면은 cold welding 경향이 적으며, 전단 강도가 적은 재료로 코우팅을 해야 함으로 육각 결정구조를 가진 연성의 재료가 적당하다. abrasive 마모가 지배적일 때는 TiC, TiN 등의

Table 1. Surface treatments for tribo-engineering applications.

TREATMENT	CONSTITUENTS
DEPOSITED COATINGS	
Electroplating	Cr, Rh, Ni, Sn-Ni, Ag
Electrochemical Co-deposition	Co/Cr ₂ C ₃ , Pb/PTFE
Chemical Vapour Deposition (CVD)	TiC, TiN, WC
Arc Deposition	Co-Cr-Ni Alloys
Powder/Wire Spraying	
Plasma Spraying	Ceramics, Cermets
Detonation Gun	
Spraying/Brushing	MoS ₂ - Resin Bonded
Sputtering	MoS ₂ Films
Porous Sintered Layers	Bronze/PTFE, Co/PTFE
Porous Anodic Films	Ti/PTFE, Al/PTFE
CHEMICAL CONVERSION COATINGS	
Phosphate	Ferrous Alloys
Anodize	Titanium & Al-Alloys
Oxalate	Copper Alloys
Dichromate	Magnesium Alloys
DIFFUSION COATINGS	
Carburizing	C
Nitriding	N, C
Sulfonitriding	N, S
Siliconizing	Si
Boriding	B, Fe ₂ B
Chromizing	Cr
Berylliding	Be in Titanium

단단한 재질로 코우팅을 하여야 마모율을 경감시킬 수 있다. 여러가지 마모기구가 복합적으로 발생될 것이 예상될 때에는 다층으로 표면 코우팅을 하여 사용하는 것이 유리하다.

실제 기계요소들의 코우팅은 그림7의 하단부에 도시한 바와 같이 행하는 것이 바람직 하다. 여기서 각 층의 기능은 다음과 같다.

- (i) 최외곽의 얇은 코우팅 층은 cold welding 을 방지하여 고착마모를 경감시킨다.
- (ii) 중간층은 충분한 유연성이 있는 단단한 층으로 hertzian 접촉응력을 담당하며, 이 층의 기계적 강도는 가운데 부분이 증가하도록 해야 한다.
- (iii) 중간층을 지나면서 기계적 강도는 점진적으로 감소하여 모재의 강도에 이르게 한다.

4 - 2. 소프트 메탈 코우팅 (Soft - metal coating)

앞에서 설명한 바와 같이 산화층이 형성되어

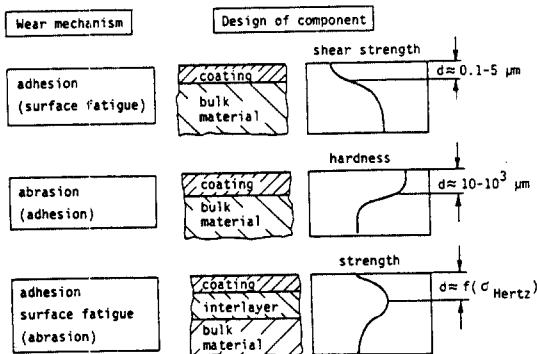


Fig. 7. Suitable composition of surface coatings.

있지 않을 때 표면층에는 전위밀도가 낮은 영역이 항상 존재하게 된다. 이 경우 표면층은 가공경화나 깨짐이 없이 연속적인 변형을 한다. 따라서 강판재료에 연성의 층을 코우팅 함으로써 원재료의 마모 및 크랙 생성을 억제 시킬수 있다. 코우팅 재료로는 Cd, Ag, Au, Ni등이 사용되며 최적두께(보통 $1 < \mu\text{m}$)보다 두껍게 코우팅을 하면, 즉 저 전위밀도 영역을 넘어서면 전단응력에 의한 마모가 생성되고 표면의 소성변형을 조장한다. 그림 8은 Cd 코우팅의 두께에 따른 마모율의 변화를 나타내고 있다. 연성 재질의 코우팅 개념은 표면에 산화층이 형성되지 않는 것을 전제로 하기 때문에 주위 환경에 직접적인 영향을 받게된다. 그림 8에 나타난 바와 같이 Cd코우팅은 공기중에서는 효과가 없으며, 불활성 분위기 하에서는 상당한 마모량을 감소시킬 수 있다. Ag, Ni 코우팅 경우도 공기중에서는 효과가 없으나 Au 코우팅은 불활성 분위기나 대기 분위기 조건에서 효과가 있는 것으로 알려져 있다.

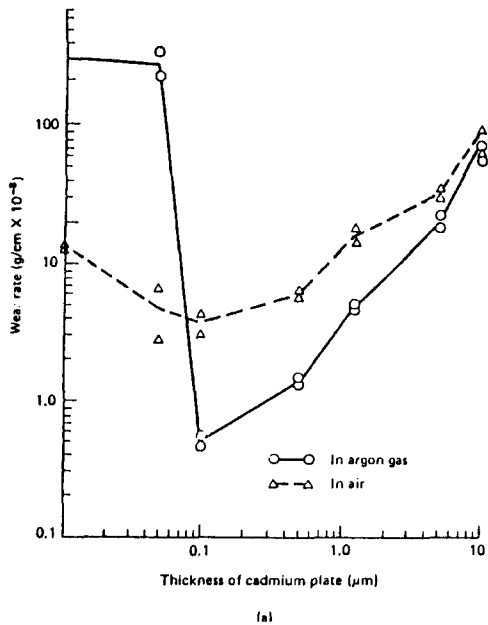


Fig. 8. Effect of cadmium plate thickness on the wear rate of Cd-plated AISI 1018 steel.

4 - 3. 하드 코우팅(Hard coating)

이상적인 내마모성 재료는 경성과 인성이 있으며 화학적으로 안정되어 있는 재료이다. 그러나 기계요소 부품으로 사용하고 있는 대부분의 재료는 경도를 증가시키면 인성이 저하하게 된다. 따라서 인성이 있는 재료를 경질의 층으로 코우팅하는 것은 경성과 인성을 동시에 얻을 수 있는 유효한 방법으로 사용되고 있다. 경질의 층은 마찰력을 감소시키고 표면의 굽힘을 방지하는 역할을 하여, 특히 abrasive마모방지에 효과가 있다. 코우팅 재료로는 TiC, TiN, Al_2O_3 등의 재료가 사용되고 있으며, 코우팅 방법의 선택은 금속재료와 코우팅 재료의 화학적, 기계적 결합력을 고려하여 결정한다.

코우팅 기술은 크게 고온에서의 수소환원 또는 열분해를 이용하는 CVD (chemical vapor deposition)와 진공 plating, sputtering, 이온화 plating 등의 물리적 방법에 의한 PVD (physical vapor deposition)가 있다. 코우팅 재료에 따라 일반적으로 사용되고 있는 기술은 다음의 표 2에 제시되어 있다. CVD 방법은 표면에서 화학적 작용을 발생시키기 위해서 표면을 가열해야 하므로 카바이드 공구에의 적용은 제한이 있다. sputtering은 표면의 가열없이 코우팅재를 응착시키는데 사용되나 표면을 가열해서 코우팅하였을 경우보다 결합의 질은 떨어진다.

Table. 2. Coating Techniques and Materials

Type of Coating	Coating Technique	References
TiC	CVD	Ekmar (1970), Richman and Lee (1974), Schintmeister et al. (1975)
TiC	Activated reactive evaporation	Nakamura and Inagawa (1975), Bunshah and Raghuram (1972)
TiN	CVD	Schintmeister et al. (1975), Kieffer et al. (1970)
TiO_2C_y	Sputtering	Carson et al. (1976)
Al_2O_3	CVD	Funk et al. (1975), Hale (1971), Lindstromand and Johannesson (1975)
TiC-TiN double coating	CVD	Hauser (1975)

하드 코우팅은 시체의 부품에서 절삭공구에 이르기까지 널리 응용되고 있다. TiN 코우팅은 공구의 수명을 향상시키고 TiC와 TiN 코우팅은 카바이드 공구의 화학적 안정성을 증가시키는데 많이 사용하고 있다.

4 - 4. 이온이식 (Ion implantation)

이온 이식 방법은 가장 최근에 개발된 방법으로 강한 전자장내에서 이온화된 요소를 표면에 충돌시킴으로써 표면의 미세조직과 화학적 특성을 변경시켜 주는 것이다. 이온의 침투 깊이는 약 0.5 μ m 정도로 트라이볼로지 측면에서의 적용은 윤택상태가 비교적 양호한 경우로 제한된다.

이온 이식에 영향을 미치는 주요인자는 표 3에 제시되어 있으며, 이온이식은 다른 표면처리 방법에 비하여 다음과 같은 장점이 있다.

(i) 표면의 제원이나 다른 특성을 변화시키지 않기 때문에 기존의 기계요소에 대하여 설계나 가공의 변경없이 바로 응용할 수 있다.

(ii) 이온 입자가 표면 조직에 침투되기 때문에 코우팅시 가장 문제가 되는 코우팅 재와 표면간의 결합력을 고려할 필요가 없다.

(iii) 재료의 특성은 변하지 않는다.

(iv) 코우팅 재의 용해성이나 확산계수에 대한 제한이 없다.

5. 결 론

트라이볼로지 측면에서의 표면특성과 내마모성을 향상시키기 위한 표면처리 기술을 기본 개념적 입장에서 고찰해 보았다. 각종 공구 및 기어, 베어링, 피스톤 링등의 기계요소 수명을 증대하고 마찰력을 감소시키는데 있어서 윤택 조건의 변화나 재질 선택만으로는 한계가 있기 때문에 이를 극복하기 위해서 표면 코우팅 기술이 널리 연구되고 있으며 기계요소의 응용사례가 증가되고 있다.

이 분야와 관련된 미국에서의 연구사례를 간략하게 소개하면, ECUT (Energy Conversion & Utilization Technologies) Tribology Project (1986~1990)로 Argonne National Laboratory 주관으로 7개의 대학, 11개의 연구기관 및 산업체가 참가하여 중장기 연구를 수행하고 있다. 코우팅 기술은 7개의 대형과제 중 하나의 과제로 연구되고 있으며, ANL, Borg-Warner Corp., George Washington U., UCLA, Lawrence Livermore Lab.의 기관이 프로젝트를 수행하고 있다. 주요 연구내용은 TiHfN, Ti/Al/C, Ti/Al/N 코우팅의 하드 코우팅에 대한 최적 코우팅 기술, 이온 이식과 이온 빔 믹싱 기술을 사용한 저마찰, 고내마모성 표면의 생성과, 절삭공구 및 기계요소에 대한 응용기술에 초점을 두고 있다.

표면 코우팅 기술은 트라이볼로지의 큰 주류를 이루고 있는 기술이며, 공구 및 기계요소의 수명향상에 획기적인 개선을 도모할 수 있는 기술이므로 국내에서도 코우팅 기술에 대한 개발과 응용연구에 관심을 갖고 많은 연구가 행해져야 할 것이다.

Table 3. The effect produced by ion implantation depends on a number of factors or parameters.

Implanted elements	Virtually any element from hydrogen to uranium can be implanted.
Ion energies	Normally 2 to 200 keV. Energies up to 5 MeV may be obtained with the Van de graaff accelerator
Ion ranges	Vary with ion energy. Ion species and most material ranges normally 0.01 μ m to 1.0 μ m.
Range distribution	Approximately gaussian. Choice of energies allow tailored depth distribution profiles.
Concentration	From trace amounts up to 50% or more.
Host material	Any solid material can be implanted
Special effects	Sputtering, radiation damage, radiation enhanced diffusion.