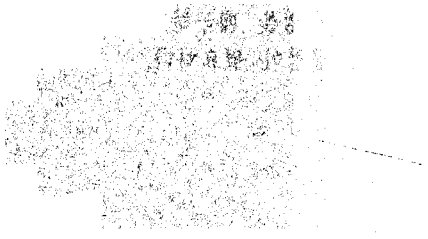
구조용 재료의 Tribology

박 동 수 (열처리 공학실 선임연구원)

'82.2 연세대학교 공과대학 금속공학과 졸업(학사)
'86.12 미국 Illinois 주립대학 금속공학과 졸업(석사)
'90.2 미국 Illinois 주립대학 금속공학과 졸업(박사)
'90.3-현재 한국기계연구소 선임연구원



1. 서 론

지난 한세기 동안 Tribology(마찰, 마모 및 윤활로 다시 구분될 수 있음)의 연구 개발은 더욱 가혹해지는 기계의 작동조건을 만족시키는데 집중되어 왔다. 십여년 전만해도 기계의 운전 온도는 종래의 금속재료를 개선하으로써 해결될 수 있는 정도에 지나지 않았다.

그러나 현재의 동향은 기존 열기관이 작동하는 온도보다 더 높은 온도에서 작동하는 보다 효율적이며 가벼운 진보된 열기관의 개발을 향하고 있다. 종래의 철계 또는 Nickel계 합금은 이러한 열기관의 재료로써는 적합해 보이지 않는다. 왜냐하면 이러한 금속재료들은 현재 고려되고 있는 정도의 온도에서는 그 강도가 매우 감소하기 때문이다. 더욱이 이제까지의 유기 윤활제들(organic lubricant)은 높은 온도에서 분해되어 제기능을 다하지 못하게 된다.

이러한 고온에서 작동하려면 Bulk의 형태이든 Coating의 형태이든 요업재료를 사용해야 하며 윤활제 역시 무기화합물-예를들면 MoS_2나 Graphite와 같은 고체 윤활제-를 사용해야 한다. 이러한 무기재료의 조합은 열기관뿐 아니라 절삭용, 연마용, 인발용 등의 가공기구에도 사용될 수 있다. 특히 지금과 같이 고속 가공 및 제작공정이 수행되는 시대에는 이러한 요업재료에 더욱 관심이 쏠리고 있다. 그러나 열기관 및 다른 용도에 사용되기 위해서는 아직도 무기재료의 여러가지 성질에 대한 연구과 이해가 필요하다.

요업재료가 마찰 및 마모의 용도에 사용된 것은 이미 오래전 부터의 일이다. 굳이 석기시대까지

거슬러 올라가지 않더라도, 요업재료는 wire drawing, bearing, 직물기계의 guide 등으로 사용되어 왔다. 요업재료의 제조기술이 발전함에 따라 고성능 요업재료들이 출현하게 되었으며, 이에따라 그 재료들에 대한 마찰 및 마모 시험이 있었다. 그러나 그 결과는 상당히 실망적인 것으로써 그들의 고경도에서 기대되었던 바와는 다르게 요업재료의 마찰계수 및 마모율은 상당히 높았다. 또한 그 화학적 안정성에서 기대되었던 바와는 다르게 접촉중인 상대편 재료와 화학적 반응을 한다.

이러한 실망적인 결과를 뒤돌아보면 그 중 많은 실망이 요업재료에 대한 무분별한 사용에서 기인된 것이었음을 알 수 있다. 금속재료와는 다르게, 요업재료의 기계적, 열적, 화학적 성질들이 주어진 조건에 따라 급격히 변화함에도 불구하고 요업재료에 대한 지식은 상당히 제한되어 있다. 그러나 그동안 진보된 바가 없는 것은 아니다. 예를들면 질화규소(Silicon Nirtride)로 제조된 Bearing은 철계합금재료로 사용이 불가능한 조건에서 무난히 작용됨이 밝혀졌다. Alumina는 접촉압력(Contact Pressure)이 낮을 때, 내마모성이 지극히 양호하지만 접촉압력이 높을 때에는 급격히 마모된다. 질화규소로 제조된 물이나 수증기의 Seal은 가히 다른 재료와 비교될 수 없는 성능을 보여준다.

이상으로 볼 때 우리의 당면과제는 우리가 금속재료에 대해 이미 갖고 있는 마찰·마모에 대한 풍부한 지식을 요업재료에 대해서도 갖어야 한다는 것이다.

2. 마모기구

2.1. Adhesive wear

두개의 물체가 하중을 받는 가운데 접촉하게 되면, 사실상 겉보기 접촉면(Apparent Contact Area)보다 훨씬 작은 실 접촉면(Ture Contact Area)에 의해 모든 하중이 지지된다. 따라서 실질적인 접촉압은 매우 높으며 때때로 이러한 실질 접촉면간에는 접합(Adhesion)이 이루어지게 된다. 이제 하중을 받는 가운데 두물체가 하중에 직각되는 방향으로 상대운동을 하게되면 접촉면에 평행한 방향으로 파괴가 일어나면서 물체의 마모가 발생한다.

이렇게 마모가 일어나면 한쪽 물체의 일부가 다른 쪽으로 접합된 채 옮겨지게 된다(Material Transfer). Adhesive wear는 경도가 낮은 재료에서 흔히 발생하며 두물체의 화학적 친화력에 의해 마찰 계수 및 마모율(wear rate)이 큰 영향을 받는다.

그림1은 Rabinowicz에 의해 발표된 서로 다른 금속간의 친화력을 두 금속의 용해도(Solubility)를 근거로 제작된 것이다. Archard는 일찌기 1953년 다음의 마모율에 대한 식을 발표하였다[1]. $W=\frac{K\cdot P}{3H}$ 여기서 P는 수직하중, H는 재료의 경도(Vickers Hardness in N/m^2)이며 K는 한번의 미끄럼 운동에 의해 마모 입자가 만들어질 확율을 나타내는 확율 상수이다. 이 K는 재료의 피로수명(Fatigue Life)와 관계이기도 한다. 많은 Adhesion Wear 이론이 이 식을 바탕으로 세워졌다. 그 가운데 금속재료에 잘 적용되는 Delamination Wear는 전위(dislocation)의 Activity를 기초로 하여 설명된 것이다[2]. 즉 수직하중 및 마찰력에 의해 가해지는 복합적인 응력이 마찰운동에 의해 계속가해 짐에 따라 전위가 복제(multiplication) 되어 전위의 밀도가 지극히 높아진다. 따라서 높은 전위 밀도에 의한 소성균열이 진행되어 마모가 일어난다는 것이다. 여기서 마찰력은 마찰계수를 통해 화학적 친화력에 크게 의존한다. 즉 화학적 친화력일 클수록 Adhesion도 심하게 되며 따라서 마찰력도 높아지게 되어 물체에 높은 전단응력을 가하게 된다. 요업재료의 경우에는 충분한 수의 Slip System이 존재하지 않기 때문에 이와같은 전위의 Activity에 기초를 둔 Delamination 이론을 적용하기는 어렵다. Adhesion Wear는 비단 금속-금속계에서만 발생할 뿐아니라 금속-요업 재료에서도 발생하는데 공구용 요업재료를 개발하는데는 특히 중요한 인자라고 생각된다. Myoshi와 Buckley는 여러가지 금속과 SiC 단결정간의 마찰계수가 금속의 화학적 특성을 나타내는 d-bond character와

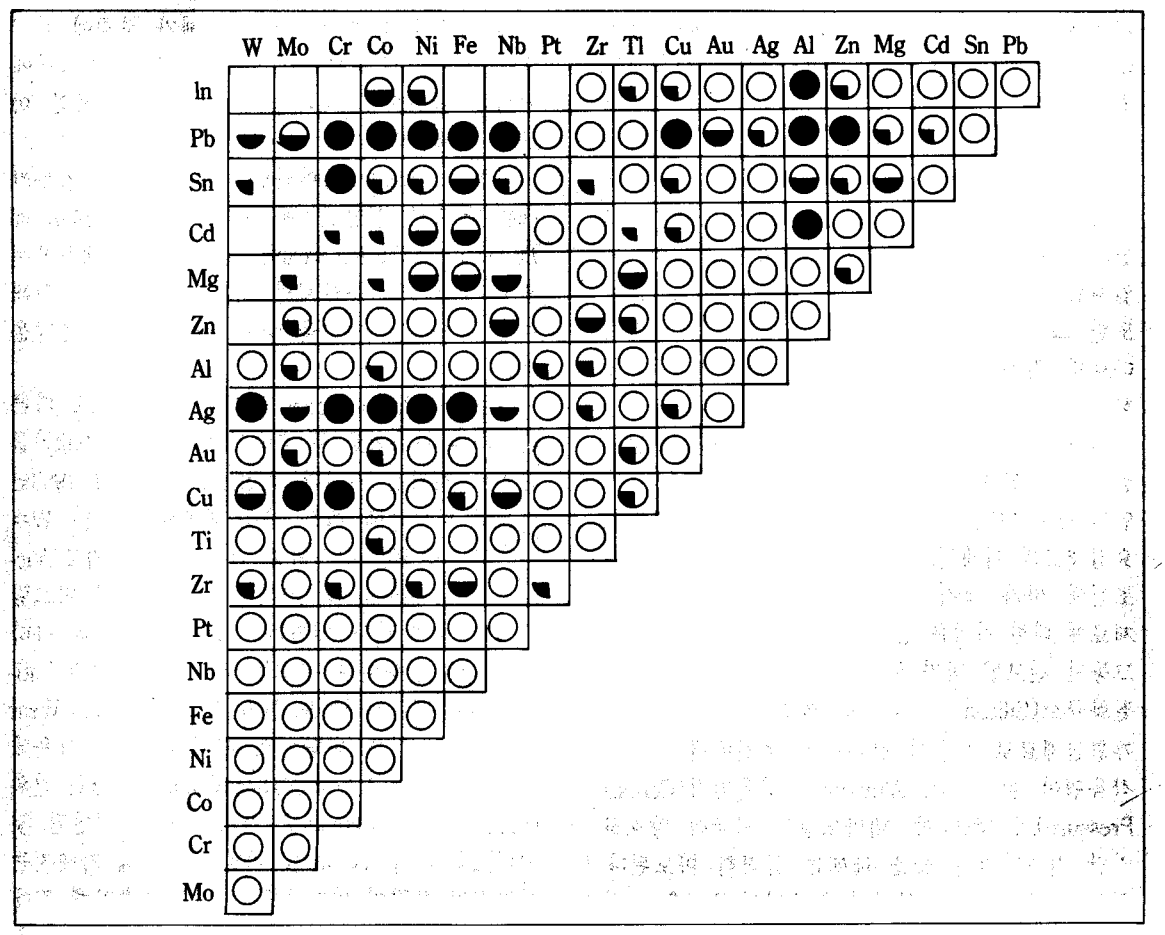


그림 1) Rabinowicz's compatibility chart for various metal elements in terms of preferred antifriction surfaces : ●two liquid phases, solid solution less than 0.1 percent solubility (lowest adhesion) ; ◓ two liquid phases, solid solution less than 0.1 percent solubility (next lowest adhesion) ; and 1 percent solubility (higher adhesion) ; ○ boxes indicate combinations deriver from binary diagrams of the respective liquid phases, solid solution less than 0.1 percent solubility greater than 0.1 percent, or one liquid phase, solid solution ○ one liquid hpase, solid solution between 0.1 percent insufficient information. Reprinted by permission of the American society of Lubrication Engineers.

깊은 관계가 있음을 밝혔다[3]. 그들은 금속의 마모입자가 SiC의 표면에 접합되는 것을 SEM을 통해 관찰하였다. Adhesive Wear는 다시 그 마모양상에 따라 Galling, Scauffing, Tearing, Wiping, Scoring등 여러가지로 표현된다. Adhesive Wear를 줄이기 위해서는 다음의 사항들에 주의해야 한다.

① 윤활제를 사용함으로써 두면의 직접적인 접촉을 막는다.
② 고경도의 재료를 사용함으로써 재료자체의 마모 저항성을 높인다.
③ 서로 다른 재료를 사용함으로써 화학적 친화력을 줄인다.
④ 화학적으로 안정한 표면층을 입힌다.
⑤ 금속의 경우 산화성이 강한 재료를 사용하여 표면에 산화막을 형성함으로써 금속간의 직접적인 접촉을 피한다.

2.2. Abrasive Wear

Abrasive Wear는 경도가 높은 물체가 경도가 낮은 물체를 깎아 나아감으로써 생기는 마모이다. Abrasive Wear는 그 상황에 따라 Two Body 또는 Three Body Abrasive Wear가 된다. 즉 사용중인 두개의 시편중 한쪽이 다른쪽에 비해 월등히 경도가 높아서 두 물체의 운동에 의해 마모가 일어나면 Two Body의 상황이 된다. 마모중 마모입자가 두면 사이에 끼어 그 입자를 통해 수직하중이 전달되는 상황하에서 마모 입자의 경도가 양쪽 시편의 경도보다 높게되면 이러한 입자에 의한 마모가 일어나게 된다. 이것이 Three Body의 상황이다.

Abrasive Wear는 좀 더 구체적으로 Cutting이나 Ploughing 등으로 표현된다. 또 흔히 요업재료의 마모는 이 Abrasive Wear로써 설명되는 데, Evans는 다음의 마모율에 대한 식을 발표한 바 있다[4].

$$W=\frac{0.58\psi}{(\pi\beta)^{7/6}}\cdot\frac{(Pn)^{7/6}}{Kc^{2/3}\cdot H^{1/2}}$$

여기서 Pn은 수직하중, Kc는 Stress Intensity Factor, H는 경도(Vickers Hardness), ψ는 경도측정시 생기는 시편내의 소성변형 지역의 반경, β는 입자(Abrasive partide)의 Shape factor이다. 그러나 이 식은 ψ나 Kc에 의해 표현되는 것처럼, 재료의 취성파괴(Brittle Fracture)에 기초를 두고 있기 때문에 접촉압력이 낮은 경우에는 취약한 요업재료라 할지라도 직접 적용하기가 어렵다. 또 ψ나 β와 같은 상수들을 결정하는 것 또한 명확하지 못한 단점도 있다.

Miyoshi와 Buckley는 SiC 및 Zn-Ferrite단결정을 포함한 몇가지 단결정들을 원추형 Diamond를 이용한 긁힘시험(Scratching Test)을 하였다. 그들은 이들 단결정 표면층에 반추형 균열(Partial Cone Crack)이 발생함을 관찰했는데, 이러한 반추형 균열은, 긁힐 때 표면에 발생되는 높은 인장응력에 의해 생기게 된다[5]. 이 높은 인장응력은 수직하중과 마찰력에 의한 전단응력이 결합되어 접촉원(Contact Circle)중 Diamond가 움직이는 방향의 반대 방향쪽 반원에 따라 형성된다.

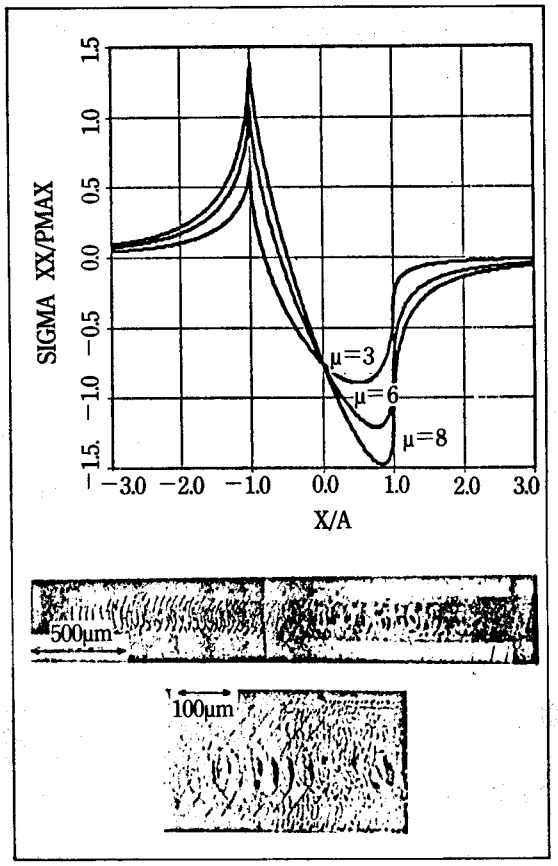


그림 2) Effect of contact stress; (a) normal stress(σ_{xx}) distribution. (b) partial cone cracks in subsurface layer of single crystal Si, (c) possible source of wear debris generation(intersection of the partial cone cracks).

그림2는 이러한 높은 인장응력의 발생과 그 인장응력에 의해 Si단결정의 표피층에 형성된 반추형 균열을 보여주는 것이다. 이 그림에서 보면 두개의 균열이 만나는 곳에서 마모 입자가 발생함을 알 수 있다(그림2(c)). 물론 구조용 요업재료는 다결정체로써 이와같은 단결정에서의 현상이 그대로 일어날 수는 없으나, 단결정의 거동은 하나의 Model로써 이용될 수 있다. 또 접촉압력이 높은 경우 다결정 Si_3N_4에서도 이와같은 반추형

균열이 보고된 바 있다[6]. 이런 점으로 보아 접촉압력이 높아지는 고하중의 경우, 재료의 인성이 요업재료의 마모율에 큰 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

Abrasive Wear를 줄이기 위해서는

1. 표면경도를 높이며
2. 재료의 선택에 있어서 순수한 금속재료의 경우, 경도가 높은 금속을 사용하고
3. 실제 사용되는 금속재료에 있어서는 초기의 경도가 높은 재료보다, 가공 경화성이 높은 재료를 사용하며
4. 윤활제를 사용하고
5. 요업재료의 경우, 경도뿐 아니라 인성이 높은 재료를 사용한다.

이 밖에도 Abrasive Wear를 줄이기 위해 경도를 높이는 경우 사용재료와 경도가 마모를 일으키는 입자의 경도의 1/2이상이 되어야 효과적이며 그 입자의 경도의 1.3배 이상이 되면 더 이상의 효과가 없다는 보고도 있다.

2.3. Fatigue Wear

그림2(a)에서 보는 바와 같이 두 물체가 하중을 받으며 접촉한 상태에서 상대적인 운동을 계속하게 되면 두물체 모두 주기적인 반복응력(cyclic stress)을 받게 된다. 이러한 상황은 피로 시험에서 가해지는 응력과 유사한 것이 된다. Fatigue Wear는 Delamination Theory에서도 설명된 바와 같이[2] -Delamination wear는 비단 Adhesive Wear뿐 아니라 Fatigue Wear 등을 포괄하는 이론이다-다음과 같은 몇단계로 설명된다.

① 윤활된 두 물체가 하중 하에 접촉하게 되면 물체내의 석출물'등이 탄성 압축응력을 받게 된다. 이때 물체의 표면은 압축응력을 받게 되나 피하층은 전단응력도 동시게 받게되어

② 반복되는 응력중에 이러한 전단응력에 의해 석출물이나 기타 자재물의 주위에 미세균열(Microcrack)이 발생하게 된다.

③ 계속되는 반복응력은 이러한 미세균열을 전파시키고 기공등을 연결시키게 된다.

④ 균열의 크기가 임계 크기 이상이 되면 균열이 진행 방향이 표면으로 향하면서 비늘과 같은 마모입자가 형성된다.

위의 마모과정을 다시 살펴보면 Abrasive Wear를 줄이기 위해 많은 석출물을 이용 표면의 가공경화성을 높이게 되면 그것이 곧 심한 Fatigue Wear를 야기할 수 있게 됨을 알 수 있다. Fatigue Wear에서의 균열의 출발은 대개 이러한 석출물과 기지 금속간의 부정합 계면등의 약한 부위에서 시작되므로 정합 석출물이나 고용경화(Solution Hardening) 등으로 경화시키면 다소 문제가 해결될 수 있으리라 생각된다. 윤활제를 사용하는 경우에는 윤활제중에 습기가 존재하면 수소취성을 일으켜서 Fatigue Wear를 심하게 함에 유의하여야 한다.

요업재료의 경우에는 우선 재료내의 기공과 불순한 개재물을 제거함으로써 상기의 약한 부위를 제거하여 마모를 줄일 수 있다. 특히 요업재료의 경우 상온에서 Fatigue 현상을 나타내지 않고 순간적으로 파괴된다고 알려져 있으나 마모시험시에 모든 응력이 표면에만 집중되고 물체내로 들어 갈수록 응력이 급격히 감소한다는 사실을 염두에 두면 마모시험과 Fatigue시험을 동일시 할 수 없음을 알 수 있다.

2.4. Chemical Wear

Chenical Wear의 의미는 부식에서와 같이 재료가 화학적 반응을 통해 소실되는 것만 의미하는 것이 아니다. Chemical Wear는 재료가 마모 시험시 마찰계면상에서 발생하는 Tribochemical 반응에 의해 소실됨을 의미하는데 Tribochemical Wear는 화학적 반응, 확산등의 여러가지 화학적 상황에 의해 마모가 일어나거나 심화되는 경우를 나타낸다. 그 예로는 우선 표면에서의 산화에 의한 마모가 있다. 금속의 경우, 마찰면의 산화는 오히려 마찰계수와 마모율을 낮출 수 있는 경우가 있는데, 규소계 요업재료의 경우에도 산화가 균열에 우선적으로 일어남으로써 균열의 전파를 저지하며

마모율을 낮추는 경우가 있다. 이처럼 화학적 반응에 의한 Chemical Wear는 일반적으로 일종의 희생적 마모를 나타낸다. 즉 화학적 반응 (산소와의 반응 또는 윤활제와의 반응)에 의해 표면에 박막을 형성함으로써 모체를 보호하며 마모가 일어나더라도 그 박막에서 일어나게 함으로써 보다 큰 마모손실을 막는 것이다. Chemical Wear의 한 종류로써 확산에 의해 재료의 강도가 감소하게 되어 마모가 가속화되는 경우도 있다. Carbide Tool (WC-Co Cermet)의 경우, 강을 고속 가공하면 공구의 급속한 마모가 발생하는데, 이것은 텅스텐(W)과 탄소(C)가 강속으로 확산되어 감으로써 공구자체의 강도가 급속히 감소하기 때문이다. 이런 경우 WC와 TiC를 혼합하여 사용함으로써 마모를 다소 줄일 수 있다. 이런 점에서 본다면 현재 관심의 대상이 되고 있는 Diamond박막을 강의 가공용 공구에 사용하는 것도 면밀히 검토해 볼 필요가 있다고 생각한다. 왜냐하면 Diamond 중의 탄소가 가공중에 철계 합금속으로 확산되어 Diamond 자체의 마모가 발생될 수 있기 때문이다.

요업재료의 경우, 분위기 중에 포함된 습도에 따른 질화규소의 마찰 및 마모 거동이 Fisher와 Tomizawa에 의해 연구 되었다[7]. 습기를 포함한 분위기 중에서는 Si_3N_4의 표면에 Tribochemical 반응에 의해 박막이 형성된다. Si_3N_4는 1000°C 이상의 온도에서 산화가 일어나다는 것을 생각하면, 이러한 박막이 단순한 산화피막이 아님을 알 수 있다. Fisher와 Tomizawa에 따르면 이 박막은 윤활제의 역할을 하여 마찰계수를 낮춘다고 한다. 만일 수직하중이 증가하거나 미끄럼 속도가 증가하게 되면 이 박막이 파괴되며 따라서 마찰계수가 증가된다. 그러나 분위기 중에 있는 습기가 윤활 작용에 기여하는 것이 이 형성된 박막때문인지 아니면 박막이 파괴되면서 형성되는 'rolls' (가는 원통형의 마모입자) 때문인지는 다소 의문의 여지가 있다. 왜냐하면 습기중에서 마찰 계수의 거동을 살펴보면, 실험을 시작할 때는 마찰 계수가 매우 높다가 실험이 진행됨에 따라 마찰계수가 급격히 감소하여 결국 얼마후에는 낮은 값을 유지하기 때문이다. 만일 박막에 의해 마찰계수가 낮아진다면 실험을 시작하는 처음부터, 박막은 표면에 존재하기 때문에, 마찰계수는 낮아야만 할 것이다. 반면 'rolls'에 의해 마찰계수가 낮아진다면, 실험을 시작한 후 어느정도의 시간 동안 박막이 파괴되어 'rolls'가 형성되어야 하기 때문에 매우 높았다가 'rolls'의 수가 증가함에 따라 급격히 감소하게 됨을 알 수 있다. 'rolls'의 윤활제로썽의 역할은 역학적인 Model을 생각하면 쉽게 이해될 수 있다. 즉 두개의 물체(시편)사이에 원통형의 'rolls'가 존재하여 두물체의 상대 운동시에 'rolls'가 굴러다니게 됨으로써 마찰력과 마모를 극적으로 줄일 수 있다는 것이다. 이러한 심층의 이유는 접어두고라도 분위기 중의 습기가 윤활제의 역할을 한다는 것은 매우 흥미로운 거싱 아닐 수 없다. 이러한 윤활효과는 심지어 800°~900°C 까지 유지될 수 있기 때문에 지금과 같이 고온 윤활제를 찾고있는 상황에서는 반가운 일이 아닐 수 없다. 또 이 윤활효과는 분위기 중의 습기와 질화규소간의 Tribochemical 반응의 산물로써 얻어지는 것(소위 in-situ lubrication)이기 때문에 만일 이 윤활효과가 성공적인 것으로 판명된다면 굳이 윤활제를 따로 사용할 필요가 없다는 것이다. 하지만 아직도 몇가지 문제가 해결되어야 하는데, 우선은 이러한 윤활효과가 단지 접촉압력이 낮을 때(약2GPa 미만)와 미끄럼 속도가 낮을 때(5cm /sec 이하)에만 얻어진다는 데 있다. 이중 미끄럼 속도의 문제는 표면이 분위기에 노출되는 시간과 연결되기 때문에 미끄럼 운동의 폭을 증가시킴으로써 해결될 수도 있다.

이상의 몇가지 마모기구 외에도 많은 마모기구들이 있으나 열거하지 못했다. 실제 마모현상에서는 몇가지의 기구들이 복합적으로 작용하기 때문에 한가지의 마모기구로써 마모현상을 설명하기는 어렵다. 이밖에도 많은 경우에 있어서, 마찰열에 의한 표면온도의 증가(Flash Temperature)가 재료의 물성에 영향을 줌으로써 마모율을 높이는 경우가 많기 때문에 내마모용 재료를 개발하고 시험하는데 있어서는 이러한 고온에서의 재료의 거동을 염두에 두어야 한다. 예를들면, ZrO_2의 경우와 같이, 상온에서는 매우 높은 강도를

갖고 있으나 온도의 증가에 따라 그 강도가 급격히 감소하는 재료는 마찰열이 많이 발생하는 경우, 마모가 심하게 일어나게 된다. 또 이미 언급된 WC-Co의 Cermet 역시 마찰열이 많이 발생하는 경우에 사용이 불가능하다. 또 한가지 실험된 자료의 분석에 있어서 현재 사용되는 수직하중의 개념은 엄격한 의미에서 보면 큰 의미가 없고 그 대신 접촉압력이 중요한 의미를 갖게된다. 그것은 하중이 일정하다 할 지라도 접촉면적이 증가하면 접촉압력, 즉 압축응력이 감속하게 되어 재료에 감소된 응력을 가하게 된다는 것을 상기하면 명약관화한 것이다. 그러나 운동중인 두 물%의 실제 접촉면적(True Contact Area)를 측정한다는 것은 그리 용이한 것만은 아니다. McCool교수는 1988년 Greenwood-Williamson Model을 이용하여 이러한 실제 접촉면적을 계산하는 Computer program을 개발하였다. 또 마모시험중에는 응력만 주기적을 가해지는 것이 아니라 마찰열의 발생에 의한 온도변화도 주기적으로 발생하기 때문에 재료의 열적 피로현상(Thermal Fatigue)도 중요하다. 냉각수를 사용하는 공구에 응용하기 위해서는 재료가 좋은 내열충격성(Thermal Shock Resistauce)도 갖어야 한다. 또 실험실에서 얻어진 마모수명은 그 재료에 대한 하나의 지표로 사용될 수 있으나 그것이 곧 모든 응용분야에 적용된다고 보기는 어렵다. 그것은 실제 접촉면적 등을 포함한 여러가지 변수에 따라 재료의 마모수명이 영향을 받기 때문이다. 그럼에도 불구하고 실험과 실제가 무관하지 않고 서로 다른 재료의 우열은 비교될 수 있기 때문에 실제와 비슷한 조건하에서의 실험과 그에 따른 현상의 분석은 재료의 개발에 크게 기여하리라 본다.

3. 요업재료의 Tribological 응용

3.1. 절삭공구

최근 진보된 요업재료에 대한 높은 관심은 '필요'와 동시에 '기회'의 표현이라고 볼 수 있다. 즉 자동제어 장치나 Robot가 쉽게 구해질 수 있는 현재의 상황에서는 공정의 자동화가 용이하게 이루어질 수 있다. 이러한 공정 자동화시대와 더불어 이제는 고속가공을 통한 생산성 향상이 더욱 '필요'해 지게 된 것이다. 또 요업재료는 고경도 특히 고온 경도가 높으며 금속계 재료와 비교적 반응성이 낮아서 최근의 요업재료 제조방법의 발전에 따른 진보된 요업재료의 제조는 금속재료의 가공분야에 '기회'를 제공할 수 있게 된 것이다. 공구용 요업재료는 크게 세 부류로 나눌 수 있다. 즉 순수한 산화물계, 산화물계와 질화물 또는 탄화물계의 혼합, 그리고 질화규소를 기초로한 재료이다. 절삭공구재의 요구되는 물성에

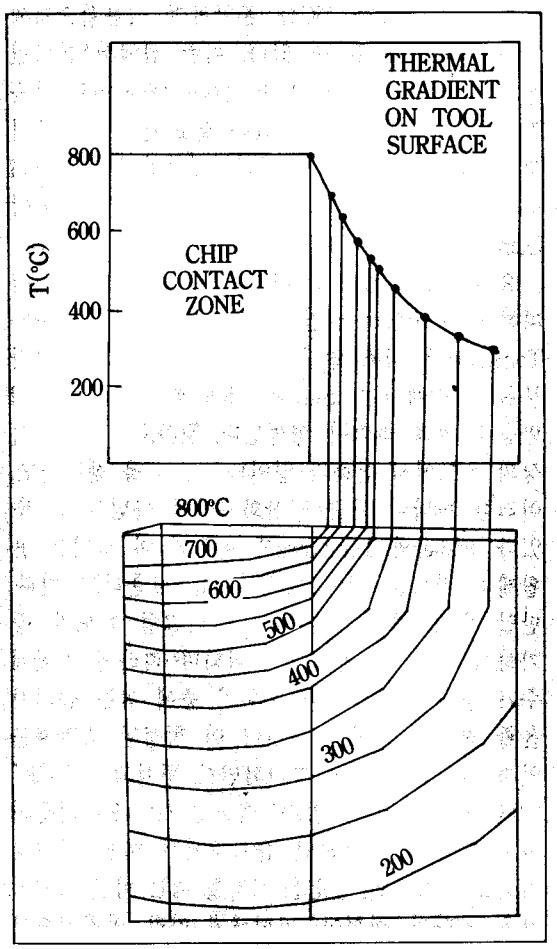


그림 3) Thermal gradients on cutting-tool rake face and steady-state temperature distribution in cutting tool.

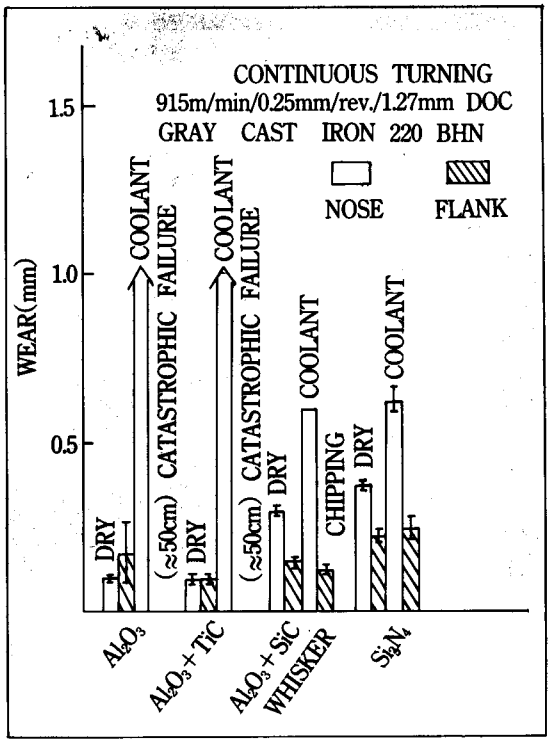


그림 4) Ceramic cutting-tool wear results after 95cm of continuous turning.

대해서는 이미 언급된 여러가지 Tribological 응용에 요구되는 재료의 물성과 대동소이하다. 금속절삭 가공 시에는 냉각수의 사용에도 불구하고 그림3에서 보는 바와 같이 요업제 절삭공구의 일부분에서는 마찰열에 의한 온도가 800°C이상까지 상승되기도 한다. 이 때문에 고온 강도 및 경도, 내열충격성등이 요구된다. 또 고온에서의 피삭재와의 화학적 안정성도 요구된다.

종래의 요업제 절삭공구는 Alumina로 만들어졌다. 순수한 Alumina의 큰 단점은 열전도도가 낮아서 열충격에 악하며 특히 고속절삭이나 절삭깊이 (Depth of Cut)가 변화할 때 공구가 쉽게 파괴된다는 것이다. 이러한 낮은 내열충격성은 TiC나 TiN을 첨가함으로써 개선될 수 있다. 순수한 Alumina을 'White Ceramic', TiN 또는 TiC가 첨가된 것을 'Black Ceramic'이라고 한다. 이렇게 TiC나 TiN을 첨가하게 되면 내열충격성이 향상될 뿐 아니라 고온경도가 향상되는 등 재질이 개선된다. 특히 산화물계 요업재료는 철계합금과 화학적 반응성이 낮아서 침식에 의한 공구의 마모가 적다는 장점을 갖고 있다. 또 Alumina에 SiC 섬유를 첨가하여 Alumina의 취성을 줄여서 시험하기도 하는데 그 결과를 그림 4는 보여주고 있다. 그림5는 절삭공구에 발생하는 마모를 보여주는 그림으로 여러가지 용어를 일목요연하게 나타내 주고 있다. 이상과 같이 종래의 Alumina가 취약한 것을 보완하기 위해 여러가지 연구 개발이 이루어져 왔는데 최근에 주목한 만한 두가지 재질개선이 있었다. 첫번째는 상기의 SiC 섬유강화에 의한 개선으로, SiC 섬유강화 Alumina는 항공산업에서 superalloy 등을 가공하는데 쓰이고 있다. SiC섬유로 강화하는 경우 Alumina의 고경도는 그대로 유지한 채 종래의 것보다 2배가 넘는 인성이 얻어짐으로 매우 유망한 재료가 될 것으로 예보된다. 그러나 철계합금을 가공할 때는 SiC 섬유가 피가공재료와 반응하기 때문에 SiC 섬유강화 Alumina 공구의 사용에 신중을 기해야 한다. 두번째 개선책은 Zirconia(ZrO_2)를 첨가함으로써 인성을 증가시키는 방법으로 흔히 ZTA(Zirconia Tonghened Alumina)라고 일컫는다. 그러나 이 재료는 고온이 됨에 따라 인성의 증가가 둔화되어 SiC 섬유강화에 의한 것보다 각광받지 못하고 있다.

세번째 부류의 요업제 절삭공구로는 Si_3N_4가 기본이 된 것이 있다. Si_3N_4는 열팽창계수가 작아서 내열충격성이 우수하며 고온 강도 및 경도가 높고

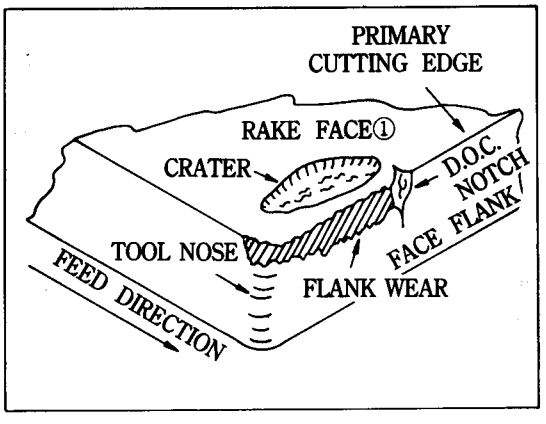


그림 5) Schematic of cutting-tool edge-wear patterns.

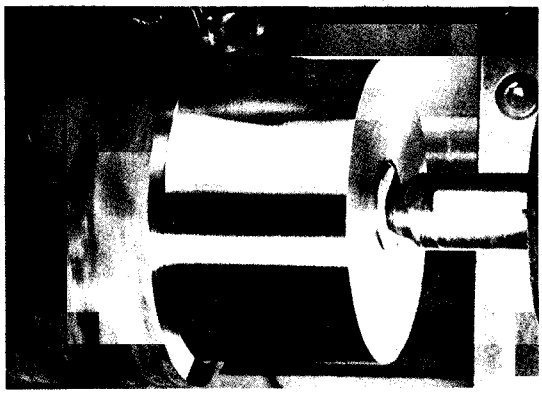


그림 6) Rough turning of carbon steel with aluminum-oxide-based ceramic cutting tool.

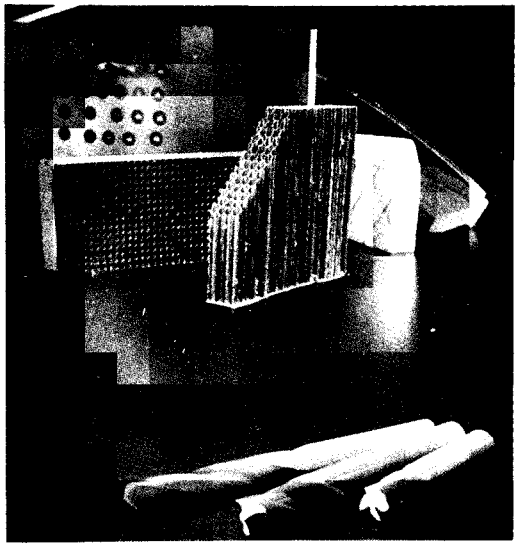


그림 7) Whisker-reinforced ceramic drills have been used to produce holes in composite materials (shown in background) with higher accuracy and much highter productivity than existing cutting tools.

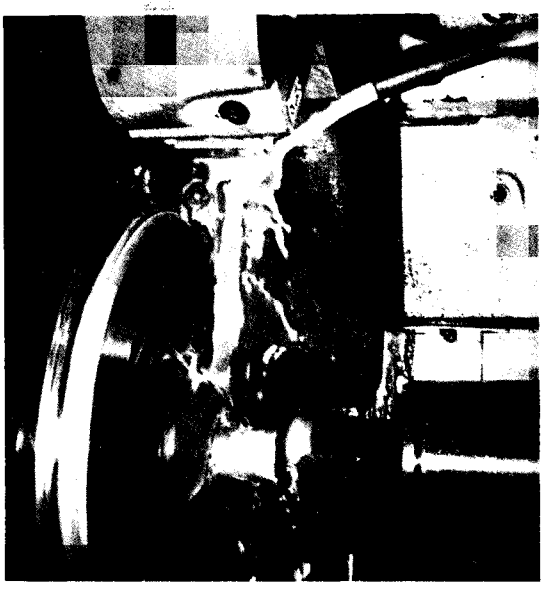


그림 8) Rough turning of a high-temperature alloy with silicon-carbide-whisker-reinforced ceramic cutting tool.

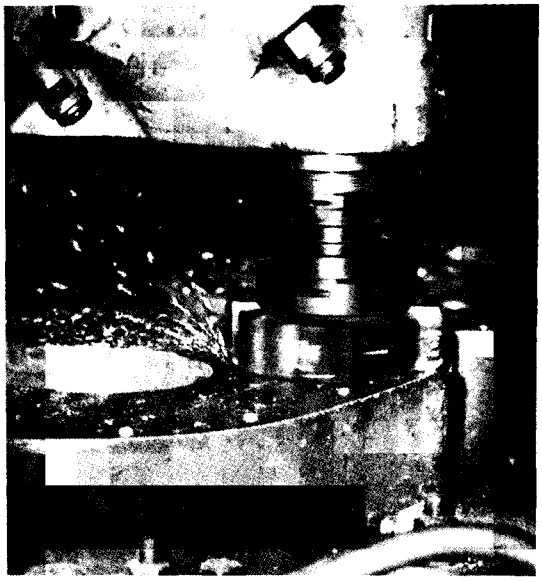


그림 9) Milling of gray castiron with silicon-nitride-based ceramic cutting tool.

또 Alumina에 비하여 인성이 강하여 고속절삭공구재로 유망하게 고려되었다. 그러나 Si_3N_4는 우선 그 제조가 어려워서 종래의 제조방법(즉 Solid State Sintering)의 방법으로는 고밀동의 제품을 만들 수 없는 것으로 알려져 있다. 따라서 액상소결(Liquid Phase Sintering)을 통해 고밀동의 제품이 만들어 질 수 있는데, 이를 위해 첨가물(Additative)이 필요하게 된다. 액상소결의 결과로 Si_3N_4 재료는

두개의 상, 즉 결정상의 Si_3N_4와 비정질 입계상을 갖는다. 첨가물로는 Al_2O_3, Y_2O_3, MgO, CeO등이 이용되는데 이들은 입계상의 조성 및 강도에 큰 영향을 미치며, 고온에서의 Si_3N_4의 성질은 이러한 입계상에 의존하기 때문에, 결국 첨가물의 종류와 양은 재료의 강도에 큰 영향을 주게 된다. Si_3N_4 $-AlN-Al_2O_3$간의 화합물로써 SiAlON도 많이 알려진 공업용 요업재료이다.

이 밖에 다른 공구용 요업재료를 살펴보면 WC공구에 Alumina, TiC, TiN을 비롯하여 여러층의 Coating을 함으로써 화학적 안정성과 동시에 내마모성을 높이는 경우도 있다. 이러한 공구들은 대부분의 강재와 주철의 절삭에 사용하며 현재 절삭공구재 시장의 50%를 점유하고 있다. 그러나 Coated 공구들은 점차 진보된 요업재료로 만들어진 절삭공구로 바뀌고 있다. SiC는 철계 합금과의 화학적 반응성 때문에 강재는 물론 주철을 절삭하는 데도 적합하지 못한 것으로 알려져 있다. TiB_2는 Alumina에 첨가되어 3차원적으로 연속적인 입계상을 형성함으로써 Alumina의 강도를 높힌다. CBN(Cubic Boron Nitride)는 Diamond 다음으로 경도가 높은 재료로써 경화된 강재의 절삭에 쓰인다. CBN으로 절삭하는 경우, 공차가 작고 표면조도가 깨끗하여 연마가 필요없다. 그러나 CBN은 매우 취약하기 때문에 다른 재료와 복합하여 인성을 높여야 한다. 요업재료로 만들어진 절삭공구의 실제응용을 요약하면 주철을 절삭하는 경우, 산화물계 공구는 그 화학적 안정성이 우수하기 때문에 절삭깊이가 비교적 일정한 이미 가공되었던(premachined) 주철의 절삭에 적합하다. 그러나 대부분의 경우처럼 주철의 표면조도가 매우 거칠고 절삭시 절삭깊이가 변화할 때는 취약한 Alumina보다 Si_3N_4같은 비교적 인성이 높은 공구가 더 적합하다. Si_3N_4가 그 화학적 반응성에도 불구하고 주철의 절삭에 쓰일 수 있는 것은 절삭시 이미 절삭된 주철이 조각의 형태로 제거됨으로 공구와 접촉하는 시간이 짧아서 화학적 침식에 의한 마모가 느리게 진행되기 때문이다. 강재를 절삭하는 경우에는 여러가지 다른 요업재료와 혼합된 Alumina를 사용하게 된다. 경화된 강재와 같이 인성이 약한 강재의 절삭에는 Si_3N_4나 SiAlON이 쓰일 수 있다. Heat Resistent Steel, Ni계 또는 Ti계 합금을 가공할 때 특히 문제가 되는 것은 이들 피삭재가 절삭되면서 공구에 매우 짧은 주기의 반복 응력을 가하는데 있다. 이렇게 해서 생기는 공구의 마모를 줄이려면 피삭재와 친화력이 크지않고 또 Microhardness가 좋은 공구재를 사용해야 한다. SiAlON은 산화물계 공구재보다 Flank Wear가 심화기는 하지만 위의 요구되는 성질이 좋기 때문에 Ni계 합금의 가공에 매우 성공적인 효과를 보여줄 수 있다. 특히 Ni계 합금을 가공하는데 있어서 특히 주목할 만안 사실은 α와 β가 혼합된 SiAlON이 β단상만으로 되어있는 SiAlON보다 더 우수하다는 것이다. 이것은 비단 α-β혼합상의 고온강도가 높아서 일뿐 아니라 α-β혼합상이 β단상에 비해 용해마모(Solution Wear)에 대한 저항력이 강하기 때문이다. heat Resistent Steel의 고속가공이 요구되는 곳에는 산화물계와 다른 질화물 및 탄화물의 혼합체인 Mixed Ceramic(이미 언급된 Al_2O_3+TiC or TiN)이 바람직하다. Ti계의 합금을 가공하는데 있어서는 Ti계 합금의 높은 화학적 반응성 때문에 산화물계 또는 질화물계 등의 공구에 Crater Wear가 심하게 일어나므로 이러한 공구의 사용은 적합하지 않다.

요업재료는 고속절삭, 공구수명의 향상 그리고 난삭재의 가공등을 가능하게 할 수 있다. 현재 indexible insert의 시장중 요업재료 insert가 차지하는 비중은 10%미만이지만 가공용 요업재료의 비중은 점차 커질 것임에 틀림없다. 그러나 요업재료의 본질적인 취약성 때문에 요업재료가 현재 사용중인 Cemented Carbide를 완전히 대체하기를 기대하기 보다는 오히려 Cemented Carbide와 병행하여 쓰이면서 요업재료 나름대로의 독특한 분야(예를들면 고속절삭 같은 분야)를 개척하는 것을 기대할 수 있겠다.

3.2. 열기관

지금까지 진보된 요업재료(Advanced ceramics)의 가장 큰 잠재적 응용분야는 자동차의 Engine

시장에서 찾아볼 수 있다. 이러한 사실은 여러 연구기관에서 이미 발표된 요업재료의 시장점유 현황과 예상에 관한 자료에서 쉽게 찾아 볼 수 있다. 그러나 아직도 많은 사람들은 두가지 상반되는 의견으로 나뉘고 있다. 요업재료에 의한 자동차 엔진의 실현이 가능하며 조만간 그런 Engine이 만들어 질 것이라는 의견과 여러가지 설계와 제조상의 문제 때문에 요업재료로 만든 Engine이 상용화되는데 의문점이 많다는 의견이다.

아뭏든 Engine에 요업재료를 사용함으로써 얻어지는 이익은 누구나 부정하지 못하는 것이다. 요업재료는 열에 지극히 강하여 열기관의 운전 온도를 종래의 Engine보다 훨씬 더 높힐 수 있다. 이에 따라 연료의 효율이 높아지게 되어 지금과 같이 연료 시장이 불안정하고 에너지 절약이 강조되는 시기에는 매우 바람직한 Engine의 개발이 될 수 있다. 또 온도의 상승에 따라 환경오염의 문제도 다소 덜어지게 된다. 이외에도 요업재료의 높은 내열성으로 부터 얻어지는 유익한 점은 냉각장치가 필요없다는 것과 열효율의 증가에 따른 Engine 자체의 부피가 작아진다는 것 등이 있다. 특히 Engine의 부피가 작아짐으로써 새롭고 개선된 자동차를 설계할 수 있다. 요업재료의 자원은 전세계적으로 풍부하기 때문에 Co, Cr, Ni등과 같은 전략물자처럼 공급에 걱정하지 않아도 된다. 이런 점에 착안하여 요업재료의 자동차 Engine 시장을 목표로한 연구개발의 활동은 지금도 활발하게 진행되고 있다.

1985년 10월, 일본의 Nissan 자동차회사는 Si_3N_4로 만들어진 Turbo-rotor를 Fairlady Z sports Car에 장착하여 소개하였다. 이 Si_3N_4로 만들어진 rotor는 NGK Spark Plug라는 요업부품 제조회사에서 만들어진 것으로 1986~1988년 동안 약 150,000개가 제조되어 Nissan 자동차 회사에 판매된 것으로 보고되었다. 요업재료로 만들어진 Turbocharge Rotor를 사용하는 승용차는 이 기간동안 전세계 Sport car 시장의 5%를 점유하였다. NGK Spark Plug사의 경우 Gas Pressure Sintering(GPS)에 의해 이 제품을 생산하는데, 그 제조단가에 있어서 종래의 HIP(Hot Isostatic Pressing) 방법보다 경제적이며 보다 순수한 Si_3N_4 제품을 만들 수 있다고 한다. 이 Si_3N_4 rotor의 경우, 종래의 Ni계 합금으로 만든 rotor에 비해 40%가 가볍기 때문에 운전자의 요구에 따른 반응이 매우 빠르다. 이 밖에도 최고온도(Peak Temperature)에서 훨씬 낮은 응력을 받는다는 잇점도 있다. 미국의 경우 Garrett Automotive사에서 Si_3N_4 Rotor를 제작 시운전하였는데 이 Rotor는 190,000RPM 이상의 속도와 1000℃ 이상의 온도에서 견디는 것으로 밝혀졌다. 서독에서는 전세계적인 Sports Car 제조회사인 Porsche사가 Aluminum Titanate Ceramic Port Lining을 944 model에 사용하여 배기 Gas의 열손실을 막음으로써 보다 효율적으로 고온의 배기 Gas 중에 있는 유독성 화합물을 무해한 Gas로 환원시킴으로써 귀금속 촉매제를 절약할 수 있게 되었다. Feldmuble AG라는 회사는 Porsche사에 요업부품을 공급할 뿐 아니라 다른 자동차 회사에 Zirconia Valveguide를 공급한다고 한다. 미국의 GM사에서는 AGT100(Advanced Gas Turbine 100) Engine의 blade, rotor, piston, cylinder liner 등을 SiC를 사용하여 개발하고 있다.

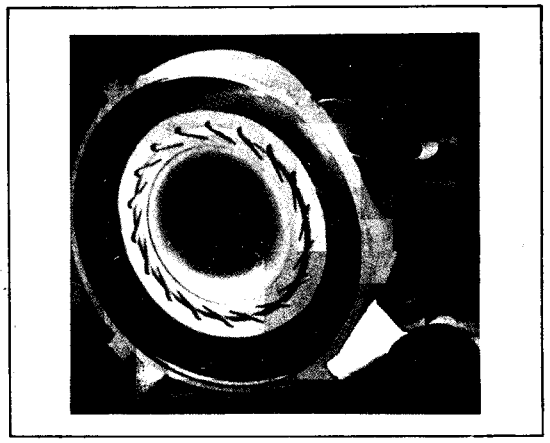


그림 10) Silicon carbide engine component with ultrasonically machined vane cavities.

그러나 Ceramic Turbine의 경우 아직 20년 정도 후에야 가능할 것으로 예상된다. 이밖에도 신뢰성 높은 상용요업 자동차부품이 시판되려면 2000년대가 되어야 할 것으로 예상된다. Cuminins

Engine사에서는 PSZ(Partially Stabilize Zirconia)로 Piston Crown, Cylinder Plate와 liner 등을 Coating하여 Diesel Engine을 개발하고 있으나 1990년대 중반이 되어야 사용될 수 있으리라 생각된다. 일본의 Isuzu사에서는 Kyocera와 공동으로 단열 Engine을 개발하고 있다. 이러한 Engine은 Si_3N_4를 주로 사용하는데 고온의 배기 Gas를 이용 Turbocharger를 통해 부가적인 동력을 얻을 수 있다고 한다. Isuzu측에서는 이러한 단열 Engine이 1990년대 중반쯤에는 대량생산에 적합하게 되리라고 한다.

4. 고온 윤활제

현재 사용중인 액상의 윤활제는 300~350℃ 이상이 되면 산화되거나 분해되어 사용할 수 없게 된다. 따라서 고온에서 작동하는 열기관이나 다른 응용분야에 있어서는 300℃ 이상의 온도에서도 그 기능을 할 수 있는 윤활제가 필요한데 이런 윤활제에는 고체 윤활제가 있다. 고체 윤활제는 흑연(Graphite) 등과 같이 판상격자(Layer Lattice)를 갖는 경우가 많다. 이러한 판상격자들이 모여 비등방성을 갖는 육방정계를 이루는데 각 결정의 Basal plane과 평행한 방향으로 쉽게 전단변형이 발생한다. MoS_2와 같은 경우, 전단강도의 비등방성은 재료의 본질적인 성격이며, Graphite의 경우에는 흡착된 기체나 Basal Plane간에 존재하는 불순물에 의해 비등방성이 더욱 강조된다. MoS_2를 윤활재로 사용할 수 있는 최고의 온도는 약 400℃ 정도로 그 이상의 온도에서는 MoS_2가 산화되어 사용될 수 없다.

그림11은 MoS_2와 WS_2를 윤활제로 사용하여 마찰계수를 측정한 것이다. 여기서 보는 바와 같이 MoS_2의 경우에는 400℃, WS_2의 경우에는 600℃ 이상이 되면 마찰계수가 급상승하는 것을 알 수 있다. 그러나 산소가 존재하지 않는 분위기인 Ar 분위기에서는 800℃까지도 마찰계수가 낮은 것을 알 수 있다. 이러한 산소가 없는 비활성 분위기에서는 이러한 고체윤활제의 사용은 산화에 의해서라기 보다 열분해에 의해 제한되게 된다. MoS_2나 WS_2가 Intrinsic Lubricant이기 때문에 진공을 포함한 비활성 분위기에 적당하다고 하면 Graphite는 순수한 자체만으로 그다지 좋은 윤활제가 되지 못하며 물이나 기타 불순물들이 필요하다. 그림12는 Graphite에 불순물인 CdO를 혼합시켰을 때 마찰계수가 크게 낮아짐을 보여준다. 이 그림에서 보면 CdO를 첨가함으로써 Graphite는 상온에서부터 540℃ 정도까지 윤활제의 역할을 할 수 있으며 Graphite만으로는 상온과 425℃ 이상에서 윤활효과를 얻을 수 있으나 그 사이의 온도에서는 윤활효과를 얻을 수 없음을 알 수 있다. 이러한 순수한 GRaphite의 윤활효과는 다음과 같이 설명될 수 있다. 즉 상온에서는 흡착된 습기에 의해 윤활효과가 나타나지만 그 이상의 온도에서는 흡착되었던 습기가 모두 증발해 버리기 때문에 윤활효과를 얻을 수 없다. 425℃이상에서 얻어지는 윤활효과는 Graphite외 피윤활이 되는 금속의 산화물간의 반응(interaction) 때문이다. Graphite 자체는 400℃ 정되면 산화된다. 그럼에도 불구하고 Graphite는 1100℃ 이상의 고온에서 W나 Mo등의 인발에 있어서 윤활제로 사용될 수 있다고 보고되어 왔다.

Graphite Fluoride(CF_x)는 비교적 새로운 고체

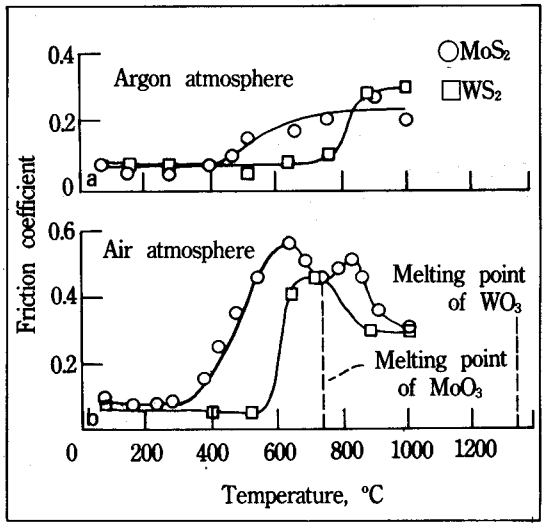


그림 11) Variation of friction coefficient with temperature of MoS_2 and WS_2 in (a) argon and (b) air

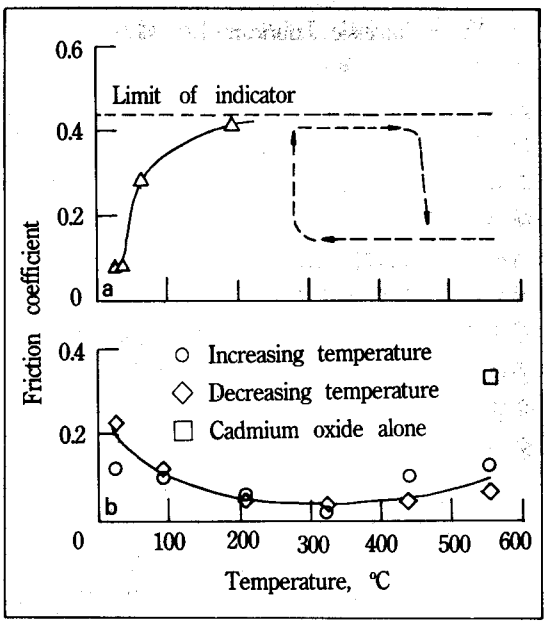


그림 12) Effect of oxide adjuvant on lubrication with graphite. (a) Graphite only and (b) cadmium oxide-graphite mixture

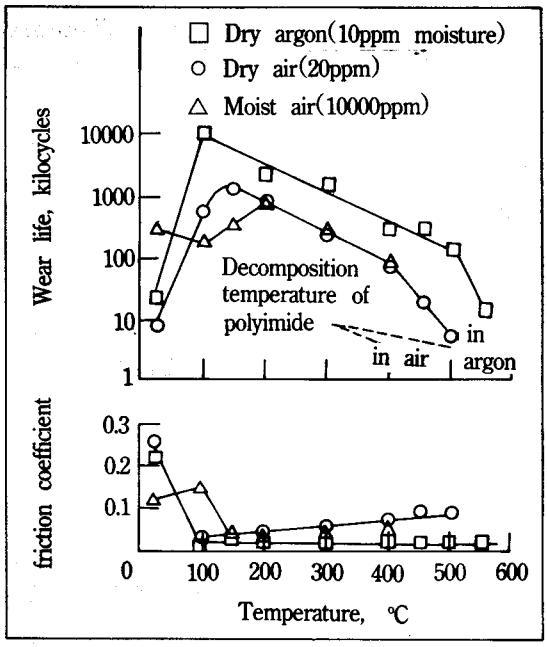


그림 13) Effect of temperature on wear life and friction coefficient of thin films of polyimide run in atmospheres of dry argon, dry air and moist air. Load: 9.8 N;sliding speed:3 ms^{-1}

윤활제로써 Graphite와 F_2 Gas간의 반응에 의해 만들어진다. CFx 역시 Graphite와 같이 육방정계를 갖지만 Basal Plane간의 간격이 Graphite 보다 두 배이상 크다. CFx는 산화되지 않지만 450℃ 이상이 되면 열적으로 분해되어 Carbon Tertrafluoro methane이 된다. 450℃ 이하의 온도에서는 CFx가 MoS_2보다 더 우수한 윤활제로 보고되어 있다. BN(Boron Nitride) 역시 판상격자를 갖으며 손으로 만지면 미끈하기 때문에 한때 고체윤활제로 고려되었으나 실제 실험결과 상당히 높은 마찰계수를 갖는 것으로 보고되었다.

이상과는 다른 종류로 유기 Polymer가 있다. 그 중 대표적인 것이 Polyimide인데 그림13은 Polyimide의 윤활효과를 보여주고 있다. Polyimide는 25℃와 100℃ 사이의 온도에서는 윤활효과를 보이지 않다가 100℃이상에서는 윤활효과를 보이는데 이것은 25℃와 100℃ 사이에서 발생하는 분자간 결합의 2nd order Relaxation에 의한 것으로 알려져 있다. 저온에서의 윤활효과를 얻기 위해서는 Polyimide에 MoS_2나 Graphite Fiber를 첨가하여 사용한다. 특히 MoS_2 분말을 사용하는 경우에는 저온 윤활효과를 얻는 대신 Polyimide 전체 복합재료의 강도가 금속히 감소하나 Graphite 섬유를 사용하는 경우는 강도의 변화없이 윤활효과를 얻을 수 있다는 장점이 있다.

금속과 CaF_2등의 혼합 분말 역시 Coating 방법에 의해서 윤활제로 사용될 수 있다. 이러한 예 중에는 미국 항공우주국(NASA)에서 개발한 PS100나 PS 101등이 있다. 이 윤활제들은 우주선이나 소형 Jet Engine 등의 극한조건에서 성공적으로 이용되어 왔다. PS100는 67Nichrome, 16.5CaF_2, 16.5Glass의 조성을 PS101은 30 Nichrome, 30Ag, 25CaF_2F, 15 Glass의 조성을 갖는다. 이중의 Glass는 Na이 없는 특별한 유리로 그 조성은 58SiO_2, 21BaO, 8CaO, 13K_2O이다. PS101의 경우 함유된 Ag의 효과는 저온에서의 윤활기능을 갖는 데 있다. 이러한 PS 101은 상온에서부터 870℃까지의 온도에서 마찰계수 0.2정도를 갖으며 PS100의 경우에는 약 500℃

이상의 온도에서 효과적인 윤활기능을 갖는다.

5. 결 론

Tribology는 두 물체가 접촉한 상태에서 발생하는 문제를 연구하는 것이다. 따라서 거의 모든 공업분야에 적용될 수 있는 것이지만 체계적으로 연구된 것은 그리 오래전의 일이 아니다. 또 연구대상이 되는 Tribosystem의 복잡성 때문에 쉽게 해결의 실마리를 얻을 수 없는 경우도 많다. 그러나 접촉면에서 발생되는 문제인 만큼, 그 나름대로의 독특한 분야를 형성하며 또 이러한 분야를 계속 연구함으로써 얻어지는 에너지 및 물자상의 절약은 이미 발표된 바와 같이 막대하다[8].

Tribology의 연구분야는 크게 마찰, 마모 및 윤활로 구별되는 데, 여기서는 역학적 또는 설계상의 접근 방법보다 재료, 특히 고온에서 사용될 수 있는 재료의 관점에서 문제에 접근하여 보았다. 요업재료의 마찰 및 마모분야에 대한 응용중에는 열기관과 같이 그 상용화가 다소 요원한 것도 있으나 요업재료를 이용한 기계부품의 제작 및 사용은 이미 시작되었으며 또 그 사용이 더욱 늘어날 것이라는 것은 많은 사람들이 인정하는 것이기 때문에 이에 대한 연구 및 개발이 국내에서도 반드시 수행되어야 한다고 생각한다. 더욱이 일본에서는 이미 Ceramic Engine이 개발되어 시운전된 것으로 알려져 있으며 다만 그 값이 비싸다는 문제가 있다고 한다. 또 사용온도가 높아짐에 따른 고온에서의 마찰 및 마모의 극소화를 위한 윤활제도 아울러 개발되어야 하는데 이에 대한 많은 노력이 있어야 한다고 본다.

참고문헌

[1] Archand, J.F. "Contact and Rubbing of Flat Surfaces", J. Appl, Phys., 24, pp.981-988, 1953.

[2] Suh, N.P. "The Delamination Theory of Wear", Wear, 25, pp.111-124, 1973.

[3] D.H. Buckley and K. Miyoshi, "Furdamental Tribological Properties of Ceramics", Proceedings of the 9th Annual Conference on Composites and Advomced Ceramic Materials, edited by F.D. Gac, pp.919-939, Published by Amerieam Ceremic Society, columbus, OH, 1985.

[4] Evans, A.G., "Abrasive Wear in Ceramics, An Assessment", The Science of Ceramic Machining and Surface Finishing II, ed B.J. Hockey, and R. W. Rice., NBS Special Publication S62, pp.1-14, 1979.

[5] K. Miyoshi and D. H. Buckley, "Ceramic Wear in Indentation and Sliding Contact", ASLE Trans., 28, pp.296-302, 1985.

[6] Wedeven, L.D., Pallini, R.A., and Miller, N.C., "Tribological Examination of Unlubricated and Graphite-Lubricated Silicon Nitride Under Traction Stress", Wear, 122, pp.183-205, 1988.

[7] Tomizawa, H. and Fisher, T.E., "Friction and Wear of Silicon Nitride at 150℃ to 800℃", ASLE Trans., 29, pp.481-488, 1985.

[8] 권오관, "트라이볼로지 기술의 국내현황 및 연구동향", 기계와 재료, 10, pp.29-44, 1989.

[9] Slinery, H.E., "Solid lubricent Materials for High Temperatures-arevies" Tribology International, Oct, pp.303-315, 1982.

[10] Lewis, C.F., "Silicon Nirtide : The Rock-Solid Performer", J. of Mater Engr, May, pp.30-33. 1989.

[11] Jack D.H., "Ceramic Cutting Tool Materials", Mater, Design, 7, pp.267-273, 1986.

[12] Wayne, S.F. and Buljan, S., "The Role of Thermal Shlock on Tool Life of Selected Ceramic Cutting Tool Materials", J. Amer, Ceram, Soc., 72, pp.754-760, 1989.

[13] Tribology of Ceramics, edited by National Materials Advisory Board National Research Council, NMB-435, National Academy Press, 1988.