

세라믹스의 마모, 마찰 및 응용



한 병 동

(KIMM 재료기술연구부)

- '90 - '94 고려대학교 재료공학과(학사)
- '94 - '96 고려대학교 재료공학과(석사)
- '96 - 현재 한국기계연구원 연구원



박 동 수

(KIMM 재료기술연구부)

- '78 - '82 연세대학교 금속공학과(학사)
- '84 - '86 미국 U.I.C 재료공학과(석사)
- '87 - '90 미국 U.I.C 재료공학과(박사)
- '90 - 현재 한국기계연구원 선임연구원

1. 서 론

물체의 마찰(friction), 마모(wear)에 관한 문제는 초기문명의 발현시기부터 많은 관심이 기울어져 왔으며, 알게 모르게 실제 생활에서 이를 응용해 왔다. 고대의 구조물을 건축할 때 무거운 자재들을 바닥에 둔 채로 이동시키지 않고, 연속적으로 배열된 통나무 위에 올려두고 이동했던 사실을 그 하나의 예로 들 수 있다. 그러나 이러한 문제들을 체계적으로 연구하여 트라이볼리지(tribology)라는 학문으로 발전시킨 것은 불과 수십년전에 불과하며, 따라서 여러 가지 측면에서 이론적인 정립과 실험적 검증이 부족한 것이 사실이다.

트라이볼리지는 문지르다 또는 미끄러지다를 뜻하는 그리스어 'tribos'로부터 유래된 용어로서, 접촉상태에서 상대적으로 운동하고 있는 두 물체의 마찰(friction), 마모(wear), 윤활(lubrication) 및 이와 관련된 문제를 다루는 학문이며, 산업적인 측면에서의 주요 기능은 적절한 공정변수, 윤활제 등을 사용함으로써 베어링(bearing), 기어(gear), 씰(seal) 등의 기본기계요소들과 부품들의 마찰, 마모를 감소시켜 파괴를 막고, 수명과 신뢰성을 높이는 데 있다. 또한 최근 들어서는 절삭공구, 항공우주부품이나 자기디스크 등의 자성재료에까지 그 응용대상이 광범위해져 가고 있으며, 특히 급속히 발달하고 있는 현대 산업에서의 신기능 신소재에 대한 많은 요구들이 트라이볼리지의 실제 산업에의 응용을 가속화시키고 있다.

요업재료는 과거 수십년동안 트라이볼리지적 재료로서 아주 적합한 것으로 알려져 왔으며, 특

히 최근의 알루미나(alumina : Al_2O_3), 지르코니아(zirconia : ZrO_2), 질화규소(silicon nitride: Si_3N_4), 사이알론(sialon), 질화티타늄(titanium nitride: TiN), 탄화티타늄(titanium carbide: TiC)등의 첨단요업재료(advanced ceramics)들은 금속이나 고분자재료에 비해 우수한 고온강도, 고경도, 화학적 안정성 등으로 인해 극한 환경에서의 내마모성재료로서 많은 연구가 이루어지고 있다.^{[1],[2],[3]}

그러나, 요업재료가 실제 고온, 고압, 화학적 환경 하에서의 첨단응용(advanced application)을 위해서는 극복해야 할 문제점들을 가지고 있다. 이는 요업재료 특유의 취성에 의해 급격한 파괴가 일어나기 쉽다는 문제와 더불어 마모, 마찰에 대한 체계화된 이론의 부족으로 인해, 어떤 재료가 실제 기계부품 등과 같은 산업분야에 응용될 때, 어느 정도의 마찰, 마모율(wear rate)이 가장 바람직한지 결정하기가 힘들다는 점이다. 그래서 많은 연구자들이 이에 대한 유용한 수치를 얻기 위해 노력을 기울이고 있지만, 단순히 실험실

서 얻어진 결과로부터 실제상황을 적용하기란 쉬운 일이 아니다, 특히 실제로 제품이 사용되는 고온에서의 마찰과 마모에 대한 이해는 제품의 실용화와 직결되는 문제이므로 이에 대한 많은 연구들이 시급한 실정이다.

본 고에서는 요업재료의 마모실험방법, 마모기구, 여러 가지 요업재료의 마모 응용 분야 등을 기술하여 트라이블러지에 대한 기본 이해를 돕고자 한다.

2. 마찰과 마모

일반적으로 대부분의 재료의 표면은 그림 1에서 나타낸 것과 같이 불규칙하고 거친 형태의 미세돌출부(asperity)들로 구성되어 있는데, 이들은 요업재료뿐만 아니라 금속이나 고분자재료 등에서도 살펴볼 수 있다. 그림 1.(a)는 표면의 미세돌출부(asperity)를 확대하여 나타낸 것이다. 요업재료의 경우에는 미세돌출부 외에도 표면의 가장

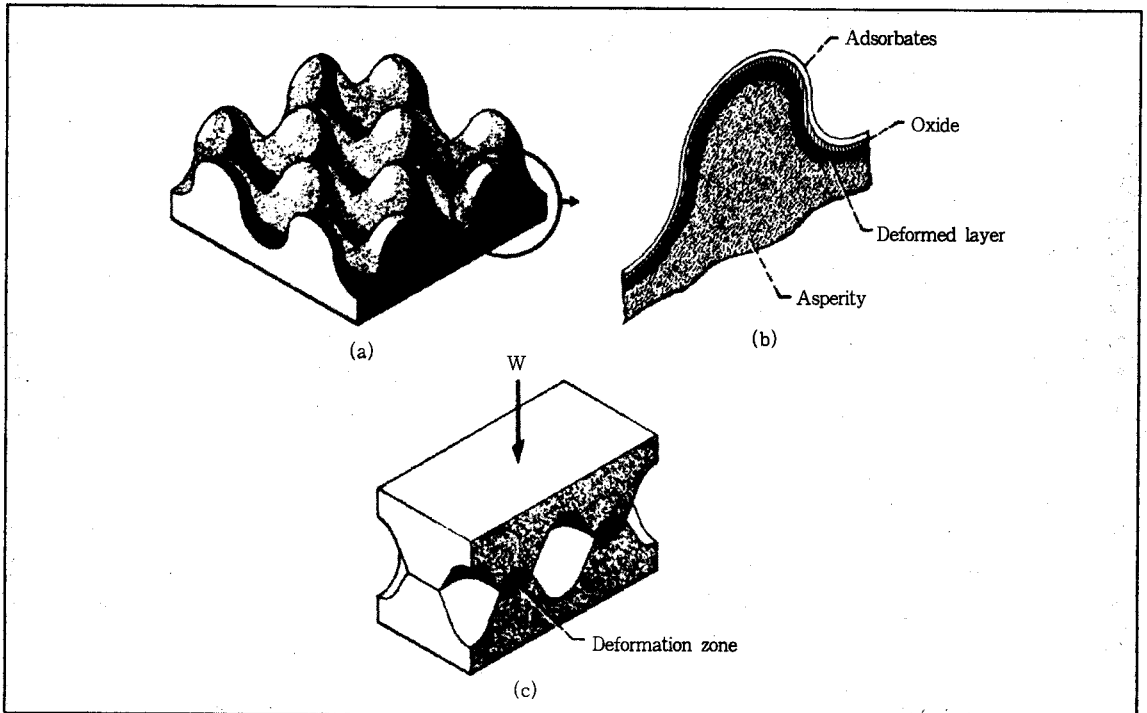


그림 1. 재료의 표면형상과 접촉

바깥쪽에는 분위기로부터 형성된 수증기나 탄화수소(hydrocarbon)등의 흡착물(adsorbate)들과 산화물층이 존재하게 된다.(그림 1.(b)) 또한 이 흡착물층 밑에는 표면이 형성되는 과정(연마, 경면가공)에서 생겨난 변형층(deformed layer)이 존재한다. 이 변형층은 재료자체와는 다른 물성을 나타내기 때문에 재료전체 물성에 중요한 영향을 미치게 되며, 변형층의 분율이나 표면의 연마과정에서 생겨난 표면의 미세균열들에 의해 재료의 물성이 결정된다. 재료의 두 표면이 서로 접촉할 때는 그림 1.(c)와 같이 미세돌출부의 끝부분들이 만나게 되고, 하중이 가해짐에 따라 표면이 탄성적(elastic)에서 소성적(plastic)으로 변형되어 변형이 진행됨에 따라 접촉면적이 증가하며, 재료의 변형과 동시에 표면의 흡착층이나 산화물층, 변형층들이 제거되어 평평하고 깨끗한 표면이 형성된다. 이 순간부터 재료 자체의 물성은 재료의 마찰(friction), 마모(wear)특성에 의해 좌우된다.

2.1 마찰(friction)

마찰은 "서로 접촉하는 두 개의 물체가 외력

을 받는 상태에서 상대물체의 표면을 따라 상대운동을 하려고 할 때, 접촉면에서 그 운동을 방해하려는 방향으로 저항하는 힘(마찰력)이 발생하는 현상"으로 정의된다. 하중 W가 가해졌을 때, 미끄럼운동을 하면 이에 저항하는 마찰력 F가 그 접촉면에서 운동방향의 반대방향으로 발생하는데, 이때 쿨롬(coulomb)의 법칙에 의해 마찰계수값이 정의된다.

$$F = \mu W (\mu : \text{마찰계수}, W : \text{하중}, F : \text{마찰력})$$

브레이크(brake)나 클러치(clutch)와 같은 경우를 제외하고는, 거의 대부분의 경우에 마찰이 적은 것이 바람직하며, 베어링(bearing)이나 다른 기계부품들이 마찰을 극복하기 위해 행해지는 일은 열의 형태로 나타내게 되며, 이를 줄임으로써 효율을 높일 수 있다. 표 1.은 핀(pin)과 디스크(disk)형태의 요업체간의 무윤활 미끄럼마찰에 의해 계산된 마찰계수(coefficient of friction)값을 나타낸 것이다.^[4] 공기분위기에서 측정된 마찰계수값은 다이아몬드를 제외하고 0.44~0.90을 나타내었는데, 이는 공기분위기에서 산화된 금속의 마찰계수 수치와 비슷하다. 그러나 고진공상태에서 측정된 마찰계수값은 금속의 경우에는 10이상

표 1. 실험에 의해 측정된 요업재료의 마찰계수^[4]

Ceramics	마찰계수(μ) (Vacuum)	마찰계수(μ) (Air)	V(속도), P(압력), W(하중), R(pin 반경)
Diamond (pin)	0.3-0.5	0.05-0.15	V=8400mm/s, R=0.05mm, W=5N
Sapphire	0.5-0.7	0.15-0.26	V=0.13mm/s, R=3/16in., W=2.5~15N
Si ₃ N ₄			
(a) HIP	0.85	0.75	V=1mm/s, R=3mm, W=10N, P=0.6GPa
(b) HIP	0.68	0.44	V=150mm/s, Flat, W=10N, P=3.1MPa
SiC			
(a)	0.84		V=300mm/s, R=6.4mm W=9N
(b)		0.80	V=20mm/s, Flat, W=40N, P=0.1MPa
Al ₂ O ₃			
(a)	0.98	0.7	V=300mm/s, R=6.4mm W=9N
(b)		0.5	V=400mm/s, R=4mm, W=10N, P=0.8MPa
PSZ			
(a)		0.9	V=20mm/s, Flat, W=40N, P=0.1MPa
(b)		0.6	V=400mm/s, R=4mm, W=10N, P=0.8MPa

의 수치를 보이는 반면에^[5] 요업재료의 경우에는 1부근의 수치를 보인다. 이는 요업재료와는 달리 금속의 경우에는 마찰이 진행되면서 소성변형에 의해 접촉면이 성장하는 현상(gross junction growth)이 일어나기 때문이며, 취성을 가지고 있어 gross junction growth가 없는 요업재료는 더 우수한 마찰특성을 나타낸다.

2.2 마모(wear)

마모는 “두개의 고체사이의 상대적 미끄럼운동의 결과 고체의 표면으로부터 그 물체의 일부가 떨어져 나간 것”으로 정의된다. 대부분의 경우에 마모는 재료의 손실이 일어나며, 부품의 정밀도를 떨어뜨려 결과적으로 외부에서 가해지는 하중을 증가시켜서 더욱 급속한 마모를 가져오게 된다. 그림 2.는 마찰에 의해 접촉영역 주위에서 발생될 수 있는 다양한 형태의 균열들을 도식화한 것으로, 반복된 마찰에 의해 이들 균열들과 표면연마과정에서 발생된 미세균열들이 성장함으로써 마모가 일어나게 된다. 표 2.는 마찰 유형에 따른 마모의 종류를 나타낸 것으로, 마모 실험을 위해서는 실제 상황에 가장 가까운 유형의 마찰유형을 선택하여 재현성 있는 결과를 얻는 것이 중요하다.

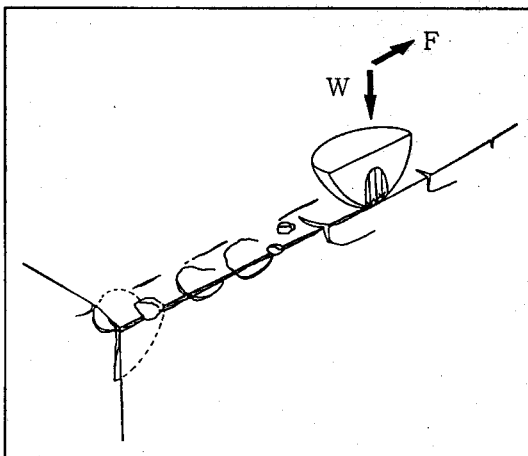


그림 2. 마찰에 의해 생성되는 여러가지 형태의 균열

표 2. 마찰유형에 따른 마모의 종류

Interacting elements	Wear mechanisms Type of relative motion	mainly stress inter-actions	
		surface fatigue abrasion	stress + material inter-actions adhesion surface fatigue
solid/ solid without or with lubricants	sliding	sliding wear	
	rolling	rolling wear	
	impact	impact wear	
	oscillation	fretting wear	
solid/ liquid	flow	cavitation wear	
solid/fluid +particles	flow	fluid erosion	

2.3 윤활(lubrication)

대부분의 재료의 마찰계수는 0.5이상의 높은 값을 보이기 때문에 실제 산업분야에서 사용될 때 큰 마찰력을 일으키며, 많은 에너지 손실을 가져온다. 따라서 이러한 재료들이 실제로 응용되기 위해서는 접촉면사이의 마찰력을 감소시키기 위해 윤활제의 사용이 필수적이며, 윤활에 대한 연구 또한 마찰, 마모에 대한 연구에 못지 않게 중요한 일이다. 윤활효과는 접촉표면보다 낮은 전단강도를 가지는 물질로 이루어진 재료를 미끄럼운동을 하는 물질의 표면들 사이에 투입함으로써 얻어진다.

3. 마모실험

재료의 마모는 여러 가지 많은 변수에 의해서 결정되어지기 때문에, 단정적으로 이를 이해하

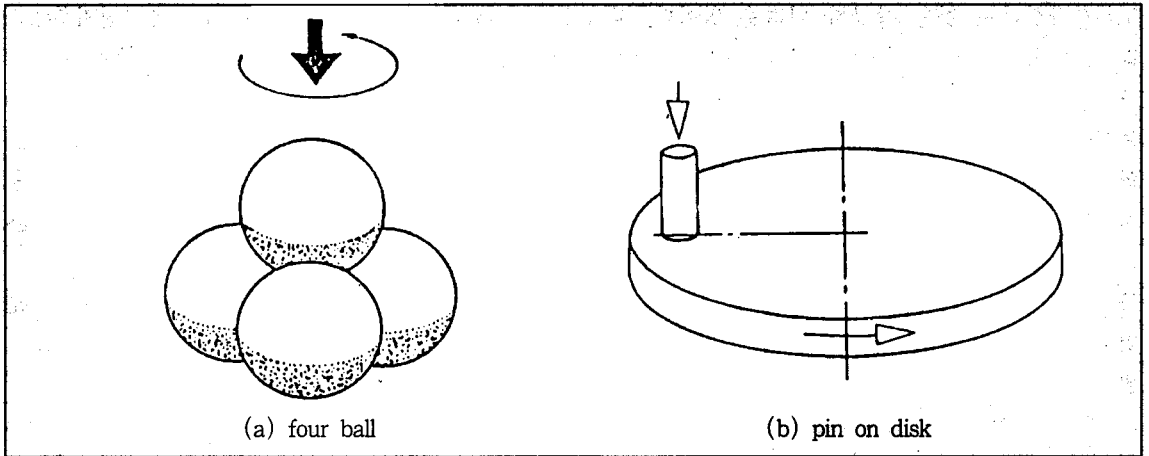


그림 3. 요업재료의 마모실험법의 예^[6]

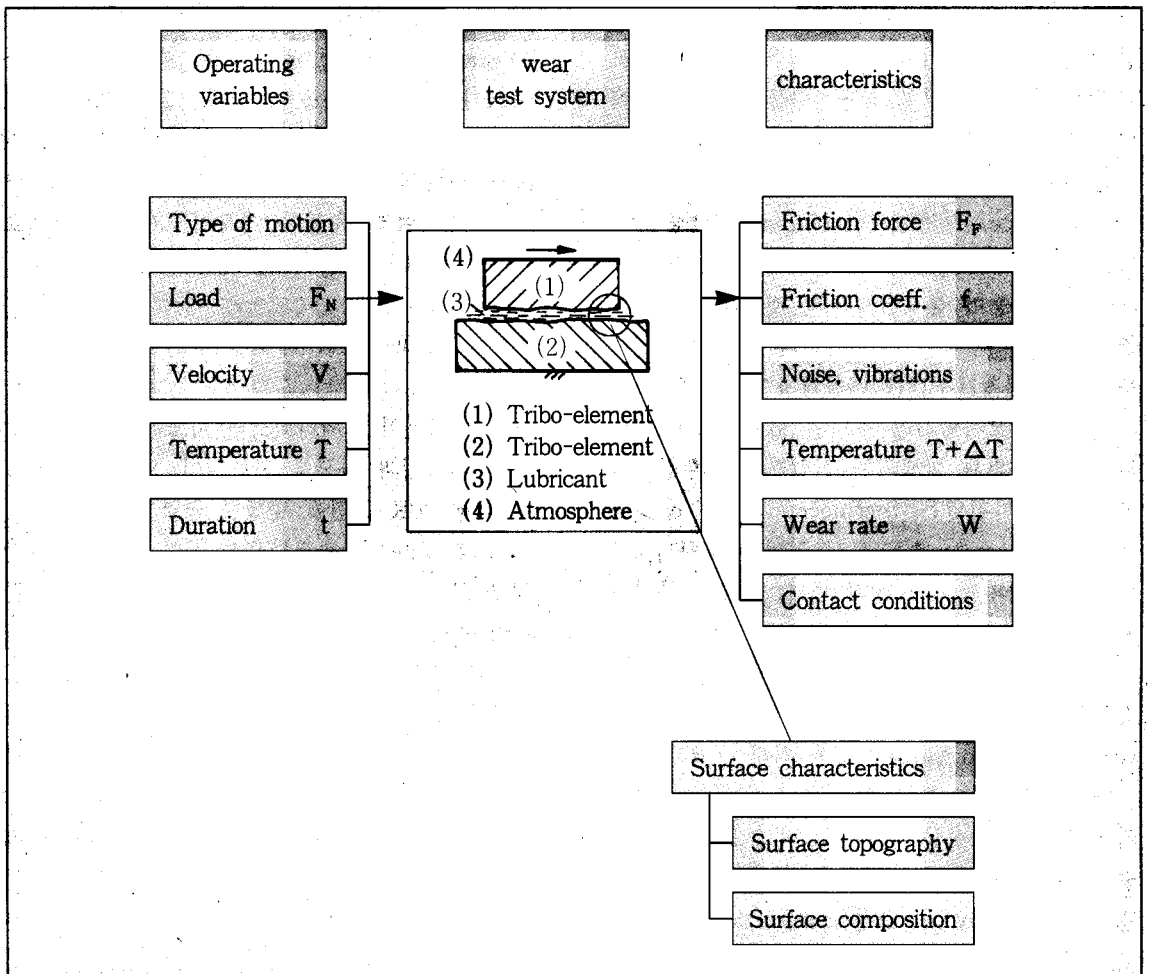


그림 4. 마모실험시스템과 작동변수 및 결과 분석

고, 평가한다는 것은 상당히 어려운 일이다. 따라서, 마모실험방법은 매우 다양할 뿐만 아니라 그 결과를 해석하고, 이것을 실제분야에 응용하는데는 큰 주의가 필요하다. 요업재료의 대표적인 마모시험법에 대해서 그림 3에 나타내었다.^[6] 시험방법에 따라 여러 가지 형태의 마모시편이 가능하며, 요업재료의 가공은 어렵고, 고비용이 들기 때문에 시편의 적절한 선택이 중요하다. 그림 4에는 마모실험과 그 이후의 평가와 관련된 변수들에 대해 나타내었다. 보통 마모실험시스템은 그림의 중앙에 나타난 것과 같이 두 개의 실험에 사용될 재료와 윤활유(lubricant), 실험분위기(atmosphere)로 구성되는데, 이를 그림 왼쪽에 나타난 운동의 종류, 하중, 속도, 실험시간, 온도 등의 작동변수에 따라 마모실험을 행한다. 마모 실험의 결과는 이러한 작동변수들의 상호작용에 의해 복합적으로 나타나는 것이 보통이다. 마모 실험 중 혹은 그 이후의 평가에 의해 마찰력(friction force), 마찰계수(coefficient of friction), 마찰열(friction-induced temperature), 마모율(wear rate) 등이 측정되어지며, 재료의 손상정도를 알아보기 위해 마모된 시편의 표면조사가 이루어진다. 마찰계수값은 마찰력에 의해 발생하는 torque가 마모시험기에 부착된 load cell에 전달되고, 이에 의해 발생하는 전압변화가 환산되어 구해지며, 마찰열은 thermocouple이나 optical infrared pyrometer에 의해 측정이 가능하다. 마모율은 시편의 geometry의 변화, 시편의 무게의 변화, 마모량의 측정 등의 직접 측정법과 마모-시간 비(ratio), 마모-마모거리 비(ratio) 등의 간접 측정법, 마모계수(wear coefficient $K = \text{wear volume} / (\text{load} \times \text{distance})$) 등에 의해 구해진다.

마찰과 마모는 주로 재료의 표면에서 일어나기 때문에 마모실험에 있어 표면의 조사는 아주 중요하며, 완벽한 표면분석을 위해서는 표면의 형상(topography)과 조성(composition) 모두가 고려되어야 한다. 표면의 정성분석을 위해서는 광학현미경(optical microscopy), 주사전자현미경

(scanning electron microscopy), 투과전자현미경(transmission electron microscopy) 등이 이용되며, profilometer를 이용하여 마모의 깊이, 표면의 roughness 등의 측정이 가능하다. 이외에도 EPMA(electron probe microanalyzer), AES(auger electron spectroscopy), XPS(x-ray photoemission spectroscopy) 등이 표면의 미세구조, 마모손상흔적(wear scar), 마모입자(wear debris) 분석에 사용된다.

4. 요업재료의 마모기구(wear mechanism)

요업재료의 마모, 마찰 특성은 하중, 마찰속도, 시간, 온도 등의 변수와 인성, 경도, 영율(Young's modulus) 등의 재료 자체의 물성, 입자크기, 기공, 잔류응력, 미세균열 등의 재료의 미세구조와 결합 등에 의해 결정되며, 어떤 조건에서 하나의 마모기구에 의해서 마모가 일어나기보다는 여러 유형의 마모기구가 복합적으로 작용하여 마모가 일어나는 경우가 대부분이다.

4.1 취성파괴(brittle fracture)

가장 기본적인 세라믹스의 마모기구로서, 재료의 파괴특성과 마모를 관련지어, 압자(indentor)에 의해 재료 표면에 발생한 균열들로부터 마모율(wear rate)을 추정하고자 하는 것이다. 일반적으로 indentor의 충격에 의해 압흔(indentation)의 모서리방향으로는 radial crack이, 표면에 평행한 방향으로는 lateral crack이 발생하게 되는데, Evans와 Wilshaw^[7]는 취성재료에서 indentor에 의해 발생한 radial, lateral crack의 상호작용에 의해 마모가 일어남을 보였다.

또한 Evans와 Marshall은 그림 5와 같이 indentor에 의해 표면 아래의 소성영역(plastic zone)에서 발생한 lateral crack이 성장함으로써 마모가 일어남을 제안하였다.^[8] 이 모델은 마모가 순수하게 취성파괴에 의해서만 일어남을 가

정 하에 설정되었으며, 다음과 같은 식으로 표현 된다.

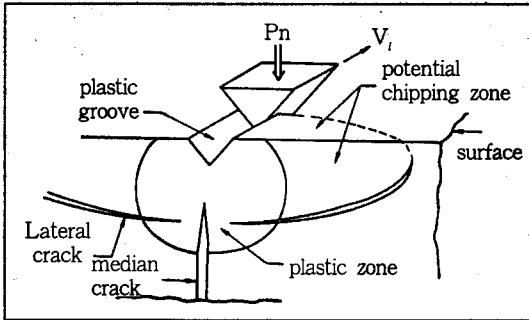


그림 5. lateral crack의 성장에 의한 마모기구^[8]

$$V = \alpha \frac{W^{9/8}}{K^{1/2} \cdot H^{5/8}} (E/H)^{4/5} \cdot l$$

- V : 마모체적(wear volume)
- α : 재료와 무관한 상수
- W : 하중(load)
- K : 인성(toughness)
- H : 경도(hardness)
- E : 영률(Young's modulus)
- l : 마모거리(sliding distance)

이 식은 재료의 마모특성과 물성간의 상관관계를 나타낸 것으로 여러 가지 세라믹스에서 잘 적용됨을 보여주었지만, lateral crack에 의해 flake 형태의 마모입자가 생성되는 특수한 상황에서만 적용이 가능하며, 모든 마모조건에서 적용하기에는 무리가 따른다.

4.2 소성변형(plastic deformation)

요업재료는 공유결합이나 이온결합구조로 이루어져 있기 때문에 특유의 취성(brittle)을 가지고 있으나, X-선 회절분석에 의한 plastic strain의 발견^[9], 투과전자현미경을 통한 Si_3N_4 , SiC 마모면에서의 전위(dislocation), 쌍정(twin)의 관찰^{[10],[11]} 등으로 세라믹스에서도 마모에 의해서 소

성변형이 일어날 수 있음이 확인되었다. 상온, 고온에서의 이러한 전위, 쌍정 등에 의한 변형은 crack 생성에 영향을 주게 되고, 이에 따라 마모 거동에도 영향을 주게 된다.

4.3 화학적 상호작용(tribo-chemical)

일반적으로 요업재료는 우수한 내식성, 화학적 안정성 등의 특성을 가져 안정한 재료로 알려져 있으나, 분위기나 윤활유 등의 화학적 환경에 의해 마모특성이 달라진다. 마찰열의 영향을 줄이기 위해 낮은 미끄럼 속도로 마모된 Si_3N_4 의 마모율은 수분분위기에서 상당히 낮은 값을 보이는데^[12], 이는 물의 흡착으로 인해 표면에 생성된 SiO_2 에 의한 것이며, 습한 Ar 분위기에서의 마모 시에도 매끈한 마모흔적을 가지며, 마모입자도 SiO_2 로 추정되는 비정질물질을 포함한다. SiC 또한 수분분위기에서의 마모량이 건조분위기보다 세배나 증가한다.

그림 6은 여러 가지 분위기에서 마모된 Al_2O_3 , Si_3N_4 의 마찰계수, 마모율을 나타낸 것으로서, 이것으로부터 화학적 상호작용에 의한 마모의 명확한 메커니즘을 알 수는 없으나 분위기 변화에 따라 마찰과 마모가 항상 같은 경향성을 가짐을 알 수 있다.

5. Ceramic wear maps

요업재료의 마모특성은 하중, 마찰속도, 온도, 시간, 접촉현상, 표면거칠기 등의 많은 변수에 따라 달라지기 때문에 요업재료를 실제 트라이볼러지적 응용분야에 이용하기 위해서는 우수한 내마모성을 충족시키는 필수조건을 정의하여 재현성 있는 마모실험결과를 얻는 것이 중요하다. 세라믹 wear map은 이러한 목적으로 마모를 정성 또는 정량적으로 이해하고, 마모를 예측하기 위해 제안되었다.^[14]

세라믹 wear map을 구성하는 변수는 크게 두

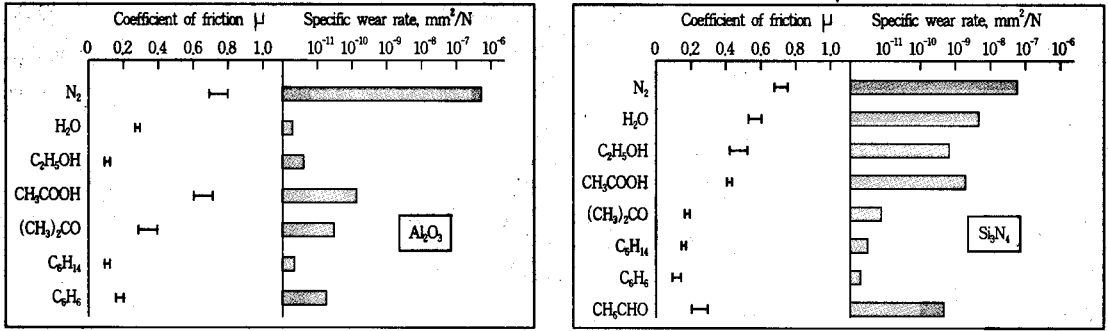


그림 6. 여러가지 화학적 분위기에서 마모된 Al₂O₃, Si₃N₄의 마찰계수와 마모율^[13]

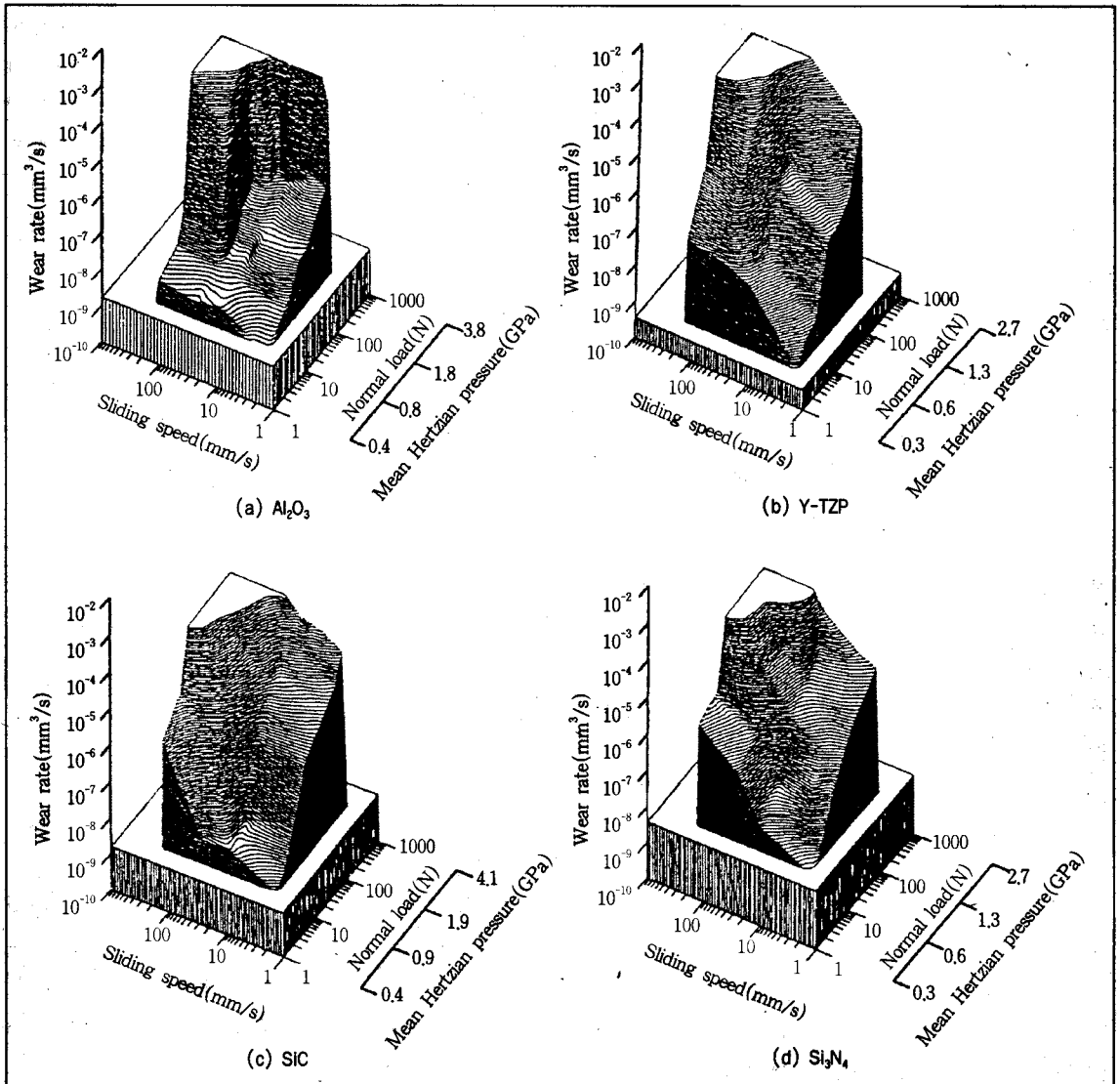


그림 7. 무윤활 미끄럼 마찰에 대한 wear maps^[15]

가지의 범주로 나눌 수 있는데, 재료의 마모의 척도인 마모율(wear rate) 등과 같은 종속변수와 마찰속도, 하중, 온도, 시간과 같은 독립변수이다. 이러한 변수들로부터 5가지 종류의 3차원 wear map(마모-속도-하중, 마모-속도-온도, 마모-속도-시간, 마모-하중-온도, 마모-하중-시간)의 완성이 가능하며, 이로부터 각각의 재료에 대한 마모거동을 설명할 수 있다. 그림 7은 알루미늄(Al_2O_3), 지르코니아(Y-TZP), 탄화규소(SiC), 질화규소(Si_3N_4) 등 네 종류의 요업재료의 무윤활 미끄럼 마찰에 대한 wear map이다.^[15] 모든 재료들이 낮은 미끄럼 속도와 낮은 하중에서 낮은 마모량을 보였고, 속도 또는 하중이 증가함에 따라 마모량이 증가하였다. 또한 각각의 재료의 마모특성에 따라 마모량 증가의 기울기나 기울기가 변하는 마모전이지역(wear transition zone)이 다름을 알 수 있다. 이와 같이 wear map은 주어진 마찰조건과 윤활조건에서 재료의 마모거동을 이해하는데 유용하며, 일단 wear map이 완성되면, 이로부터 마모기구, 마모전이도(wear transition diagram), 마모기구도(wear mechanism diagram) 등의 연구를 통해 실제에 가까운 마모 모델링이 가능하다.

6. 첨단요업재료(advanced ceramics)의 마모 응용 분야

알루미늄(Al_2O_3), 지르코니아(ZrO_2), 질화규소(Si_3N_4), 탄화규소(SiC) 등의 첨단요업재료들은 트라이블러지적 응용에 적합한, 우수한 열적, 기계적 성질과 화학적 안정성을 가지고 있어 많은 분야에 응용이 이루어지고 있으며, 최근 들어서는 이들 단상요업재료(monolithic ceramics)의 단점을 보완할 목적으로 휘스커(whisker), 화이버(fiber), 제2상 입자 등을 보강재료 첨가한 세라믹복합재료에 대한 연구, 개발도 점차로 증가하는 추세에 있다.^[16]

요업재료가 마모, 마찰 관련 분야에 적절하게

응용되기 위해서는 다양한 물성이 요구되어지는데, 이들 물성과 이를 잘 만족하는 요업재료의 응용분야에 대해 기술하고자 한다.

6.1 내마모성

요업재료의 내마모성은 재료의 경도와 직접적인 연관성을 가진다. 따라서 우수한 내마모성을 얻기 위해서는 경도가 높은 재료를 선택하거나 재료의 표면을 고경도물질로 코팅하여야 한다. 고경도의 부분안정화지르코니아(PSZ)는 방직공정에서의 스레드 가이드(thread guide)나 칼 등에 이용되어지며, 탄화규소(SiC)는 로켓 노즐, 스프레이드라이 노즐, 샌드블라스트 노즐 등에 사용된다. 또한 열기관의 터빈 블레이드에는 크롬카바이드(Cr_2C_3), 텅스텐카바이드(WC)코팅이 이용되어지며, 탄화규소(SiC), 사이알론(sialon)은 슬러리나 입자처리장치에서 셸(seal), 베어링(bearing)등에 쓰인다.

6.2 내식성

요업재료는 금속재료에 비해 화학반응에 강해서 화학적인 공정산업에 널리 이용된다. 따라서 PSZ, SiC, Si_3N_4 등과 같은 첨단재료는 화학적인 부식이 많이 일어나는 공정산업에서의 펌프 슬리브(pump sleeve), 밸브, 셸 등에 많이 사용되며, 특히 PSZ는 종이에 의해 마모가 잘 일어나고, 잉크에 의해 부식이 일어나기 쉬운 볼펜의 끝부분 볼의 재료로 사용되기도 한다. 이와 같이 내식성이 요구되는 많은 분야들은 우수한 내마모성을 동시에 요구하는 경우가 많다.

6.3 고온 내마모성

첨단 요업재료의 주된 응용분야 중의 하나는 금속의 성형과 절삭공구분야이며, 특히 절삭시 그 접촉면은 $1000^{\circ}C$ 까지 온도가 상승하기 때문

에 상온뿐만 아니라 고온에서도 고경도, 고인성, 우수한 내마모성이 요구된다. 사이알론(sialon), TiB₂, PSZ, Si₃N₄, 탄화규소취스커강화 알루미늄

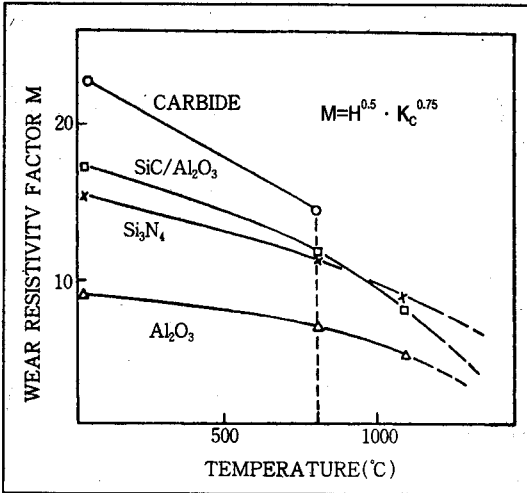


그림 8. 온도에 따른 세라믹 절삭공구의 내마모성^[16]
($M = H^{0.5} \cdot K_c^{0.75}$; 내마모성인자)

복합체(Al₂O₃/SiC_w), Al₂O₃/B₄C, Al₂O₃/TiC 등이 절삭공구팁(tip)에 이용되어지며, sialon, Si₃N₄, PSZ 등이 압출, 인발 등의 금속성형공정에 쓰인다. 그림 8.은 고온에서의 절삭공구로 사용되는 재료들의 온도에 따른 내마모성을 나타낸 것으로, Al₂O₃/SiC_w 복합재료와 Si₃N₄가 단상 Al₂O₃보다 우수한 내마모성을 나타냈으며, 고속, 고온에서는 질화규소계 재료가 보다 적합함을 보여준다.^[16]

첨단요업재료는 또한 열엔진과 같이 고온에서 작동되는 동체 부품의 이상적인 재료로 많은 주목을 받고 있으며, Si₃N₄, PSZ, SiC, 세라믹복합재료 등이 터보차저로터(turbocharger rotor), 실린더 라이너, 피스톤 등으로 응용된다. 표 3.은 여러 가지 열기관부품들이 가져야 할 바람직한 특성들과 각각의 부품의 특성들에 적합한 요업재료에 대해 요약한 것이다.^[16]

표 3. 열기관 부품에 사용되는 세라믹스에 요구되는 특성^[16]

Adiabatic components	Desired characteristics							High-technology ceramics*
	Low friction	Light weight	Insulation	Wear resistance	Heat resistance	Corrosion resistance	Expansion coefficient	
Piston		●	●		●	●	●	Si ₃ N ₄ , PSZ TTA
Piston ring				●	●			SSN, PSZ, Coating
Cylinder liner	●			●	●	●	●	Si ₃ N ₄ , PSZ, Coating
Prechamber			●		●	●		PSZ, Si ₃ N ₄
Valve		●	●	●	●	●		SSN, PSZ, Composite
Valve seat insert			●	●	●	●		PSZ, SSN
Valve guides	●		●		●	●		PSZ, SSN, SiC
Exhaust/intake ports			●		●	●		ZrO ₂ , Si ₃ N ₄ , TiO ₂ , Al ₂ O ₃
Manifolds			●		●	●		ZrO ₂ , Si ₃ N ₄ , TiO ₂ , Al ₂ O ₃
Tappets		●		●		●		PSZ, SiC, Si ₃ N ₄
Mechanical seals	●			●		●		SiC, Si ₃ N ₄ , PSZ
Turbocharger								
Turbine rotor		●	●		●	●	●	Si ₃ N ₄ , SiC
Turbine housing			●		●	●	●	LAS
Heat shield			●		●	●	●	ZrO ₂ , LAS
Ceramic bearings	●	●		●	●	●	●	SSN

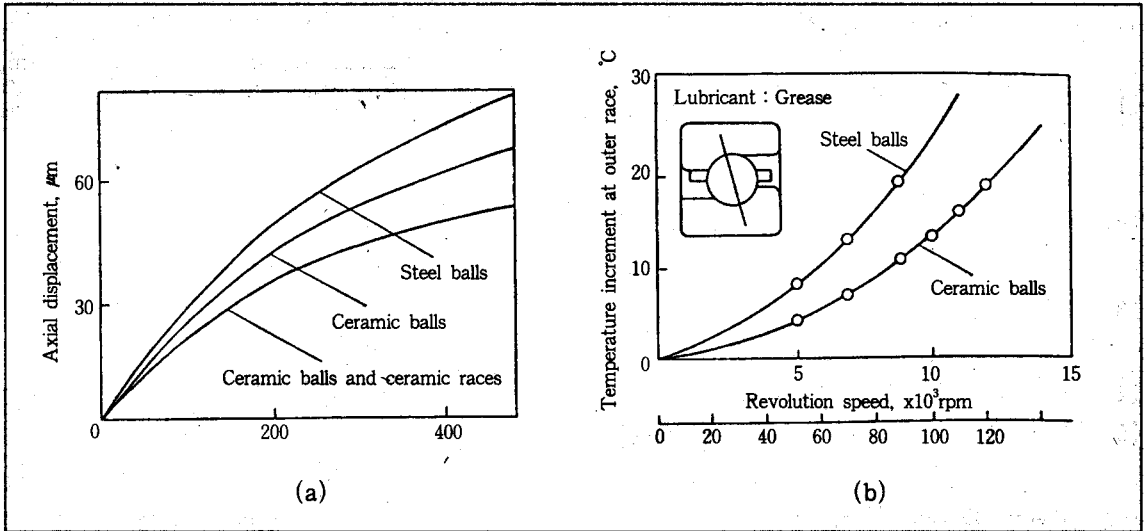


그림 9. 금속계 베어링과 세라믹 베어링의 비교^[17]

6.4 경량성

강도, 내마모성, 내식성이 우수해 열기관에 사용되는 세라믹 로터, 베어링 등은 금속계에 비해 무게가 가볍기 때문에 고속운전시 원심력과 미끄럼현상(skidding)을 감소시킬 수 있다. 이 결과 동일한 동력하에서 더 빠른 속도로 반응하여 효율을 높일 수 있다. 현재 실용화되어 있는 세라믹 베어링은 질화규소계 재료이며, 가볍고, 강도가 높을 뿐만 아니라 열팽창계수가 낮아 오랜 사용후에도 변형이 거의 일어나지 않고, 기존의 베어링보다 수명이 더 길다.(그림 9.)

7. 결론

과거 트라이블로지(tribology)라는 학문에 대한 관심은 주로 금속재료에 치중되어 있었으나 최근 열기관, 기계부품 등과 같은 분야에 세라믹스의 사용이 선호되면서 세라믹스의 물리, 화학적 특성과 마모특성을 결부지어 이를 개선하고자 하는 노력이 가속화되고 있다. 이에 본 고에서는 세라믹스의 마모, 마찰특성에 대한 이해를 돕고자 전반적인 마모, 마찰이론, 마모실험방법, 실제

산업에서의 응용분야에 대해 기술하였다.

현재 세라믹스는 베어링, 피스톤 링, 기어, 쉘 등과 같이 내마모성이 요구되는 기계부품과 절삭공구 등에는 이미 응용되고 있으나 아직까지는 열기관과 같이 고온에서 마모, 마찰이 일어나는 분야에의 응용을 위해서는 더 많은 연구가 필요한 것이 사실이다. 고온과 극한 환경에서의 세라믹스의 사용은 미세구조의 제어, 보강재를 첨가한 복합화기술 등에 의해 세라믹스 자체의 기계적 특성 및 내마모성을 증진시키는 동시에, 고온에서 효과적인 윤활제를 개발함으로써 가능할 것으로 생각되며, 이를 위해서는 세라믹스의 고온에서의 마모거동에 대한 연구, 특히 실제 응용분야에 근접하고 재현성 있는 마모실험결과를 얻는 것이 중요하다. 또한 앞으로의 세라믹스의 응용분야는 더욱 범위가 넓어질 뿐만 아니라 점차로 극심한 작동조건과 더 좋은 효율을 요구할 것으로 예상되며, 이에 따라 다각적인 트라이블로지 연구개발을 지속적으로 수행하여 기계, 장치 분야에서의 응용에 신뢰성을 높이고, 에너지 절감을 통해 고부가가치 부품을 개발하며, 극한 환경에서의 적용을 위한 첨단 기술을 확립하여야 하겠다.

참 고 문 헌

- [1] S. Jahanmir, Friction and wear of ceramics, pp.3-12, Edited by S. Jahanmir, Marcel Dekker, New York, 1993.
- [2] M. Woydt and K. -H. Habig, Tribol. Int., 22(2), pp.75-88, 1989.
- [3] B. Rigaut, Y. M. Chen, J. S. Chely, Lubri. Engng., 50(6), pp.485-489, 1994.
- [4] K. Kato, Wear, 136, pp 117-133, 1990.
- [5] T. Kayaba and K. Kato, Wear, 47, pp.93-105, 1978.
- [6] 임대순, 요업재료의 과학과 기술, 제4권 제 1, 2호, pp.23-28, 1989.
- [7] A. G. Evans and R. Wilshaw, J. Mater. Sci., 12, p.97, 1976.
- [8] A. G. Evans and D. B. Marshall, Fundamentals of friction and wear of materials, ASM, pp.439-452, 1980.
- [9] R. L. Agham and R. McPherson, J. Am. Ceram. Soc., 56, pp.46-47, 1973.
- [10] I. A. Cutter and R. McPherson, J. Am. Ceram. Soc., 56, pp.266-269, 1973.
- [11] O. O. Adewoye and T. F. Page, Wear, 70, pp.37-51, 1981.
- [12] T. E. Fischer and H. Tomizawa, Proc. Int. Conf. on Wear of Materials, American Society of Mechanical Engineers, p.22, 1985.
- [13] S. Sasaki, Proc. 32nd JSLE Conf., pp.333-336, 1987.
- [14] S. M. Hsu, Y. S. Wang and R. G. Munro, Wear, 134, pp.1-11, 1989.
- [15] S. M. Hsu, M. C. Shen, Wear, 200, pp.154-175, 1996.
- [16] B. Prakash, Advances in composite tribology, pp.405-449, 1993.
- [17] K. Rokkaku, H. Takebayashi and K. Nishida, Koyo Eng. J., 133, pp.63-71, 1988.