

<論 文>

단섬유 보강 복합재료의 트라이볼로지 특성

윤 재 룬*

(1988년 8월 25일 접수)

Tribological Characteristics of Short Fiber Reinforced Composites

Jae R. Youn

Key Words : Adhesion(합착), Asperity(에스페리티), Counterface(상대면), Debonding(분리), Friction(마찰), Friction Coefficient(마찰계수)

Abstract

Friction and wear characteristics of short fiber reinforced and particulate filled composites were investigated experimentally. Two kinds of fiber composites, chopped graphite fiber reinforced PAI(polyamide-imide) and glass fiber reinforced PAI, and a particulate composite, TiO₂ powder filled PAI, were selected for the friction and wear test since these are important engineering materials based on a new high temperature engineering plastic. All the specimens were cut into proper size for cylinder-on-plate type wear test. Frictional forces were measured by employing a load transducer and wear rates were calculated by measuring weight loss during wear test. The experimental results are reported in this paper and carefully discussed to explain the friction and wear behavior qualitatively. The frictional behavior is interpreted by considering four basic friction components which are believed to be the genesis of friction and the wear behavior is explained by applying delamination theory of wear.

1. 서 론

순수고분자재료나 고분자를 모재(matrix)로 한 복합재료는 공업용재료로서 그 응용이 점차 확대되고 있으며, 특히 베어링(bearing)재료나 치차(gear) 등 각종 기계요소의 제작에 금속재료를 대체할 수 있는 신소재이다. 특히 복합재료는 충전제(filler)나 보강제(reinforcement)를 첨가하여 강도와 마멸(wear) 및 마찰(friction) 특성을 개선하여 베어링으로 많이 사용된다⁽¹⁻¹³⁾. 섬유가 보강된 복합재료의 마찰 및 마멸특성에 대한 연구는 지난 20여년간 활발하게 발표되었으며 여러 가지 조건에

따라 다양한 결과가 보고되었다. 섬유보강복합재료(fiber reinforced composite)의 마멸특성에 대한 실험적 및 이론적 연구는 그 마멸조건에 따라 미끄럼마멸(sliding wear)에 대한 연구⁽¹⁴⁻³⁴⁾, 연삭마멸(abrasive wear)에 대한 연구^(35,36), 침식마멸(erosive wear)에 대한 연구^(37,38)와 프레팅(fretting)에 대한 연구⁽³⁹⁾ 등으로 분류할 수 있다. 이중 대부분이 장섬유(continuous fiber) 보강 복합재료에 대한 연구이며 섬유 배열방향에 따른 마찰 및 마멸특성의 변화에 대한 연구가 가장 활발하게 진행되어 왔다.

마멸실험시 미끄럼방향에 대한 섬유배열방향은 보통 세가지 경우를 선택한다. 길이(longitudinal) 방향은 미끄럼방향이 섬유배열방향과 평행일 경우이고, 가로(transverse) 방향은 섬유를 가로질러

* 정회원, 한국과학기술원 생산공학과

미끄러질 경우이고, 수직(normal) 방향은 섬유축에 수직이 되는 평면위를 미끄러질 경우이다. 마찰계수(friction coefficient)나 마멸율(wear rate)은 섬유배열방향, 섬유의 종류, 모재의 종류, 미끄럼 속도 및 압력에 따라 변한다. 특히 섬유배열방향과 복합재료에 첨가된 섬유의 종류가 가장 중요한 변수이다. 탄소섬유가 보강된 복합재료의 경우 일반적으로 수직방향일 때 마멸율이 최소가 되는 것으로 나타났고 마멸이 최대가 되는 경우는 탄소섬유의 종류에 따라 다르게 나타났다. 고탄성 탄소섬유(high modulus carbon fiber)는 Type I 섬유라고 알려져 있으며, 이 섬유가 함유되어 있을 경우에는 길이 방향으로 섬유가 배열되었을 때 마멸이 최대가 되었으며 Type II인 고강도탄소섬유(high strength carbon fiber)가 보강된 경우에는 가로방향일 때 최대마멸을 얻었다^(22,23,30).

단섬유가 보강된 복합재료(short fiber reinforced composite)의 마멸에 대한 연구도 몇 가지 종류의 복합재료에 대하여 보고되었다^(15,16,23-25,28,31,32,34). 장섬유 보강 복합재료보다 단섬유 보강 복합재료가 성형이 간편하여 기계 요소생산에 편리하며, 최근에는 베어링이나 치차외에 자동차나 선박용 엔진의 제조에도 단섬유 복합재료가 응용되고 있다⁽⁴⁰⁾. 대부분의 경우 단섬유복합재료는 섬유가 마구잡이(random)로 배열되어 있으나, 단섬유가 배열되어 있는 경우에는 수직방향시에 최소마멸, 길이방향이나 가로방향시에는 거의 비슷한 마멸율을 나타낸다. 단섬유 복합재료의 마멸메카니즘은 균열의 발생과 진행이 주 원인이며⁽³¹⁾ 이러한 균열은 전자현미경으로도 관찰되었다⁽²⁴⁾. 이러한 균열의 발생과 진행은 반복적으로 가해지는 응력에 의해 발생한다고 믿어지며, 에스페리티(asperity) 접촉부 아래의

응력분포도 표면의 기계적 성질에 따라 다르게 나타난다⁽⁴¹⁾.

본 논문에서는 단섬유가 첨가된 복합재료의 마찰 및 마멸특성에 대하여 보고하고자 하며, 최근 공업용 고분자(engineering plastic)로 중요시되고 있는 PAI를 모재로 하여 탄소섬유(graphite fiber), 유리섬유(glass fiber), TiO₂ 등이 첨가된 복합재료의 트라이볼로지(tribology) 특성에 대하여 고찰하고자 한다. 본 연구에서 사용된 복합재료에 포함된 단섬유들은 일정한 배열방향이 없이 마구잡이로 분포되어 있으며, 섬유특성에 따라 마멸메카니즘에 큰 차이가 있음을 본 연구 결과를 통하여 알 수 있다.

2. 마찰 및 마멸실험

탄소섬유, 유리섬유, TiO₂가 각각 포함되고 약 간량의 PTFE(polytetrafluoroethylene)분말이 첨가된 PAI복합재료를 시편으로 사용하였다. 시편 I은 약 30%의 탄소섬유와 1%의 PTFE가 함유되어 있고, 시편 II는 약 30%의 유리섬유와 1%의 PTFE, 시편 III은 약 3%의 TiO₂와 0.5%의 PTFE가 함유된 복합재료로서 AMOCO회사의 제품이다. 이 시편들은 복합재료의 형태로 압출 가공을 통하여 일정한 직사각형의 단면을 갖는 막대로 성형된 후에 약 3일 동안의 후경화(post-curing) 과정을 거쳐서 완성된다. 세가지 시편들은 일정한 크기(1.2cm×0.5cm×4.5cm)로 잘라서 실험에 사용되었다. 각 시편의 성분구성과 대표적인 물리적 기계적 성질은 Table 1에 보여준 바와 같다. 각 시편의 표면은 불순물이나 오일들을 제거하기 위하여 아세톤으로 처리한 다음 증류수로 세척하여 진공오

Table 1 Composition and some properties of PAI composites

	Specimen I	Specimen II	Specimen III
Composition	30% Graphite fiber 1% PTFE	30% Glass fiber 1% PTFE	3% TiO ₂ 1/2% PTFE
Tensile strength(MPa)	205.5	195.1	185.5
Tensile elongation(%)	6	5	12
Flexural strength(MPa)	316.5	317.9	211.7
Flexural modulus(MPa)	25.9	16.1	6.6
Deflection temperature(°F)	531	525	525
Specific gravity	1.42	1.57	1.40

본에서 건조시킨 후 기온과 습도가 일정하게 유지되는 실험실에 24시간 방치하였다. 접촉면은 특별히 연삭(grinding)이나 연마(polishing)를 하지 않고 압출된 표면을 그대로 사용하였으며, 실험이 끝난 후에 마멸표면은 붓(brush)으로 가볍게 털어낸

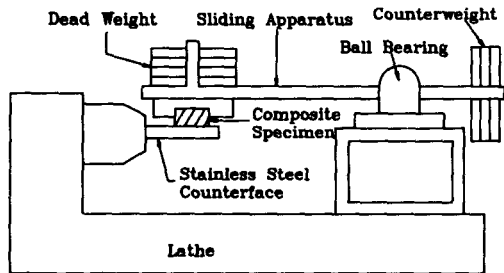


Fig. 1 Schematic diagram of friction and wear test set-up

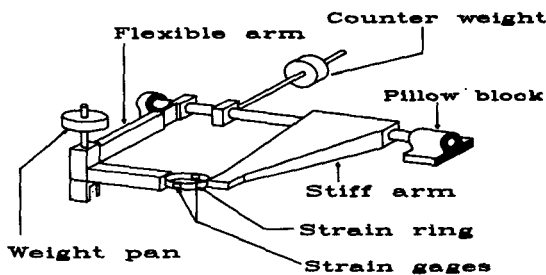


Fig. 2 Sliding apparatus

후에 현미경으로 관찰하였다.

마찰 및 마멸시험기는 Fig. 1에서와 같이 cylinder-on-plate 형태로 제작되었으며, 마찰력(frictional force)을 측정하기 위한 장치는 Fig. 2에서와 같이 로드셀(load cell)을 부착시켜 사용하였다. 시편의 상대면(counterface)으로는 52100 베어링강을 사용하였으며, 실린더인 상대면이 회전하고 시편은 정지상태로 고정되었다. 이때 마찰력은 실험이 시작될 때부터 계속하여 측정하였고 마멸에 의한 무게감소는 0.01mg까지 측정할 수 있는 저울을 사용하여 실험전후에 무게를 측정하여 결정하였다. 마멸시험에 가해지는 수직력(normal load)은 4.9N과 9.8N이었고 활주속도(sliding speed)는 30 cm/s와 50cm/s를 사용하였다. 4.9N의 수직력일 때의 활주속도는 30cm/s로 고정하였고 9.8N의 경우는 50cm/s의 활주속도로 실험을 하였다. 실험조건은 Table 2에 설명되었으며 특기할 사항은 모든 실험은 일정한 습도와 온도를 갖는 공기중에서 윤활유나 물이 없는 상태로 실험하였다는 점이다. 고분자나 고분자 복합재료로 제작된 치차나 베어링 또는 캠(cam) 등은 윤활이 된 상태에서 사용할 경우도 있으나, 윤활이 불가능하거나 윤활유의 사용이 바람직하지 않은 경우에 많이 사용되며, 특히 본 연구에서 사용된 시편은 고체윤활제(solid lubricant)인 PTFE가 포함되어 있으므로 건조한 상태에서 마멸실험을 하였다. 실험이 끝난 후에는 붓으로 마멸표면을 닦아낸 후에 무게를 측정하고 광학현미경으로 관찰하였다.

Table 2 Experimental conditions

Geometry	Cylinder-on-plate
Counter-face	AISI 52100 bearing steel
Normal load	9.8N, 4.9N
Sliding speed	50cm/s, 30cm/s
Temperature	22°C
Relative humidity	65%
Atmosphere	Air
Test time	5 hours, 24 hours

3. 결과 및 고찰

각 시편을 4.9N의 수직력과 30cm/s의 미끄럼속도로 5시간 동안 실험한 결과가 Table 3에 주어졌다. 마찰계수는 유리섬유가 포함된 시편Ⅱ가 가장 크나 마멸율은 TiO₂가 함유된 시편Ⅲ이 가장 큼을 알 수 있으며, 탄소섬유가 포함된 시편Ⅰ이 최소의

Table 3 Friction and wear data of PAI composites after the test of 5 hours with the normal load of 4.9N and the sliding speed of 30cm/s.

	Specimen I	Specimen II	Specimen III
Friction coefficient	0.44	0.58	0.5
Wear rate (cm ³ /cm)	2.869×10 ⁻¹⁰	3.539×10 ⁻¹⁰	5.026×10 ⁻¹⁰
Wear factor (cm ³ /kg. cm)	5.738×10 ⁻¹⁰	7.078×10 ⁻¹⁰	10.052×10 ⁻¹⁰

마찰과 마멸을 나타내었다. 같은 수직력과 미끄럼 속도 하에서 24시간 동안 실험하였을 경우에도 Table 4에서 주어진 바와 같이 시편간에는 비슷한 관계를 보였으나, 전반적으로 마찰계수는 증가하고 마멸율은 감소하였음을 알 수 있다. 마멸조건을 강화시켜 9.8N의 수직력과 50cm/s의 속도로 24시간 실험한 결과가 Table 5에 주어졌다. 특기할 점은 시편 I의 경우 마찰계수가 0.9로 급등하였으나 마멸율은 최저를 유지하고 있다는 점과 최대마멸을 가진 시편이 유리섬유를 함유한 시편 II라는 점이다. 마멸조건에 따라 복합재료들의 마찰 및 마멸특성이 변하는 것을 알 수 있다.

시편 I 과 시편 II의 마멸표면을 광학현미경으로 관찰하면 분명한 차이가 있다. Fig. 3에서는 24시간 동안 마멸실험을 끝낸 시편 I 과 II의 마멸표면의 현미경사진을 보여준다. 탄소섬유 복합재료의 경우에는 그림에서와 같이 연마된 탄소섬유가 표면에 노출된 상태로 보존되어 있으며, 유리섬유복합재료 경우에는 대부분의 섬유가 마멸 중에 표면에서 분실되어 유리섬유가 있던 부분이 어둡게 나타나 있는 것을 알 수 있다. 이는 탄소섬유복합재료인 시편 I 과 유리섬유복합재료인 시편 II의 마멸메카니즘에 뚜렷한 차이가 있음을 의미한다.

복합재료의 마찰거동은 보강재의 영향으로 순수 고분자재료나 금속재료보다 복잡할 것은 자명하나 그 기본 메카니즘은 같을 것으로 믿어진다. Suh와 Sin⁽⁴²⁾이 규명한 바에 의하면 마찰력은 표면의 에스페리티 변형에 의하여 초래되는 성분과 마멸파편이나 단단한 상대면의 에스페리티의 쟁기질(plow-



(a) Graphite fiber composites



(b) Glass fiber composites

Fig. 3 Micrographs of the worn surface

ing)에 의하여 유발되는 성분, 그리고 각 활주면의 평평한 평면사이의 합착(adhesion)에 의한 마찰성

Table 4 Friction and wear data of PAI composites after the test of 24 hours with the normal load of 4.9N and sliding speed of 30cm/s.

	Specimen I	Specimen II	Specimen III
Friction coefficient	0.45	0.64	0.6
Wear rate (cm ³ /cm)	2.174 × 10 ⁻¹⁰	2.261 × 10 ⁻¹⁰	2.894 × 10 ⁻¹⁰
Wear factor (cm ³ /kg. cm)	4.348 × 10 ⁻¹⁰	4.522 × 10 ⁻¹⁰	5.788 × 10 ⁻¹⁰

Table 5 Friction and wear data of PAI composites after the test of 24 hours with the normal load of 9.8N and the sliding speed of 30cm/s.

	Specimen I	Specimen II	Specimen III
Friction coefficient	0.9	0.56	0.56
Wear rate (cm ³ /cm)	3.407 × 10 ⁻¹⁰	4.599 × 10 ⁻¹⁰	3.836 × 10 ⁻¹⁰
Wear factor (cm ³ /kg. cm)	3.407 × 10 ⁻¹⁰	4.599 × 10 ⁻¹⁰	3.836 × 10 ⁻¹⁰

분 등의 세가지 주요성분으로 이루어져 있다. 첫번째 성분인 거칠은 표면의 변형에 의한 마찰계수(μ_d)는 0.1부터 0.2정도까지 변할 수 있으며, 두번째 성분인 쟁기질에 의한 마찰계수(μ_p)는 0부터 1.0까지, 세번째 성분인 합착에 의한 마찰계수(μ_a)는 0부터 0.4정도까지 변화할 수 있는 것으로 보고되었다. 각 성분의 전체 마찰계수에 대한 상대적인 기여는 미끄러진 전체의 거리(total distance slid), 주위환경(environmental conditions), 표면조도(surface roughness), 재료의 성질과 구성(material properties and components) 등에 따라 변화한다. 이 중 μ_d 는 표면조도의 영향을 크게 받으나 다른 조건에는 거의 무관하므로 세가지 시편들에서 μ_d 의 크기는 거의 균일할 것으로 사료된다.

μ_p 와 μ_a 는 전체활주 거리나 주위환경, 재료의 구성요소 등에 의하여 큰 영향을 받을 것이다. 예를 들면 탄소섬유 복합재료의 경우는 유리섬유 복합재료의 마찰시보다 합착에 의한 성분인 μ_a 가 작을 것이고, 같은 시편의 경우라도 활주거리의 증가에 따라 접촉면이 증가하므로 μ_a 가 증가할 것이고 또한 마멸파편이 증가하면 이에 의한 쟁기질이 증가하여 μ_p 가 증가할 확률도 크다. 또한 주위환경이 마멸파편이 마멸트랙(wear track)에 존속하는 것을 허락하지 않는다면 μ_p 의 마찰시간에 따른 증가는 발생할 수 없다.

본 연구에서 관찰한 대부분의 마찰현상은 위의 이론으로 설명될 수 있으나 시편 I의 경우 비정상적으로 높은 마찰계수인 0.9의 설명을 위하여서는 새로운 성분의 도입이 필요하다. 이 특이한 현상을 제외하면 다른 마찰계수의 상대적 관계는 명확히 알 수 있다. 앞에서 거론한 바와 같이 탄소섬유복합재료의 μ_a 는 유리섬유복합재료보다 작을 것이고, 유리의 경도(hardness)가 탄소의 경도보다 약 15배 정도 크므로 마멸파편에 의한 μ_p 성분도 탄소섬유복합재료의 경우가 작을 것이다. 또한 분말형태의 TiO_2 보다 유리섬유파편의 μ_p 성분이 클 것이므로 유리섬유 복합재료의 마찰계수가 최대가 되고 탄소섬유 복합재료의 마찰계수가 최소가 될 것이다. 또한 Table 4에서 나타난 바와 같이 마찰거리가 증가함에 따라 μ_a 또는 μ_p 가 소량증가하여 마찰계수가 증가함을 볼 수 있다. 수직력과 미끄럼속도가 클 경우에 나타난 시편 I의 마찰계수인 0.9를 설명하기 위하여서는 위에서 언급한 대로 새로

운 네번째 성분을 고려하여야 한다. 이것은 마멸필름(wear film)의 형성과 이 필름이 마멸트랙에 존속할 경우에 일어나는 점소성유동(viscoplastic flow)에 의한 미찰력의 증가이다. 이 네번째 성분(μ_v)은 μ_p 와는 근본적으로 다르다. μ_p 는 마멸파편이 두 표면 사이에 존속할 때 그 파편의 경도가 마찰면의 경도보다 높거나 같아서 쟁기질에 의하여 새로운 마멸파편을 형성시키고 마찰과 마멸을 증가시키는 성분인데 반하여 μ_v 는 경도가 낮은 마멸필름이 두 상대면 사이에서 점성 또는 소성변형하여 마찰력을 증가시키거나 새로운 마멸은 억제하는 성분이다. Fig. 3에서 보여준 바와 같이 유리섬유는 마찰표면에서 파괴되어 제거된 반면, 탄소섬유는 연마되어 있으므로 마찰시 미세한 분말이 생성되었을 것이 분명하다. 이 탄소의 분말은 모재인 고분자와 혼합되어 일종의 고체윤활필름을 형성하며 두 상대면 사이에서 점소성 유동을 통하여 많은 에너지(energy)를 소비할 것이다.

0.45에서 0.9로 증가한 시편 I의 마찰계수를 이상의 네가지 성분으로 정확히 설명할수는 없으나 μ_v 성분의 급격한 증가가 주요원인으로 예상된다. 그러나 더욱 명확하고 근거있는 설명을 위하여서는 임계실험과 이론적 해석을 통한 μ_v 에 대한 많은 연구가 요구된다.

Tsukizoe와 Ohmae^(22,30)는 탄소섬유가 마찰면에 수직으로 배열되었을 경우에 마찰력이 시간에 따라 급격히 증가하여 Seizure가 발생하였다고 보고하였으나 그 원인에 대한 고찰은 결여되어 있는데, 역시 μ_v 성분에 의한 결과라고 사료된다.

마찰계수의 실험결과와 비교하여 볼 때 마멸결과 는 상당히 일관성있게 나타났다. 탄소섬유복합재료인 시편 I이 어떤 조건하에서도 최소의 마멸을 나타내었고, 약한 마멸조건에서는 시편 III이, 심한 마멸조건에서는 시편 II가 최대 마멸을 보였다. Sung과 Suh⁽²³⁾ 또는 Lhymn^(31,35)에 따르면, 상대면의 애스페리티에 의하여 가해지는 응력에 따라서 접촉면의 하부표면(subsurface)에 응력분포가 결정되며, 반복적으로 가해지는 응력에 의하여 야기되어 나타나는 모재로부터의 섬유분리(debonding), 균열의 발생과 진행, 섬유와 모재의 파괴 등이 중요한 마멸 메카니즘이다. 유리섬유가 보강된 나일론의 경우에 균열의 발생과 진행되는 형태를 전자현미경(SEM)으로 관찰한 연구⁽²⁴⁾도 있다. 이러한 복합재료의 마멸이론은 그 근거를 delamination마

떨어트려 두고 있다.

시편Ⅲ의 경우와 같이 미세분말이 함유된 복합재료의 경우에는 delamination이론에서 제시한 마멸메카니즘이 지배적이다. 즉 반복하중에 의한 미세공간(microvoid)이나 미세균열(microcrack)의 발생, 접촉면에 평행한 균열의 진행, 균열의 충분한 진행에 따른 판모양의 마멸파편 형성 등이 그것이다. 섬유가 포함된 복합재료의 경우는 반복적으로 가해지는 수직 및 전단응력에 의하여 섬유가 모재로부터 분리되며, 표면에 노출된 섬유가 상대면과의 상호작용(interaction)에 의하여 부러지거나, 뽑히거나 또는 연마될 것이다. 동시에 하부표면 부분의 모재에도 미세균열이 발생하여 궁극적으로 마멸파편으로 이탈될 것이나, 대부분의 하중이 섬유에 의하여 지지될 것이므로, 섬유강화복합재료의 중요한 마모메카니즘은 섬유의 분리 및 파괴형태에 따라 결정된다. Fig. 4는 표면에 평행한 방향으로 노출된 섬유가 경험할 수 있는 네가지 상황을 간단히 나타낸 것이다. 탄소섬유복합재료인 시편Ⅰ의 경우에는 섬유가 연삭이나 연마에 의하여 얇아져서(thinning) 더 이상 수직응력을 지탱하지 못할 때 Fig. 4에 보여진 3가지 메카니즘(peeling, buckling, pulling)에 의하여 표면에서 분리되어 나갈 것으로 믿어진다. 유리섬유 복합재료의 경우에는 유리섬유와 상대면사이의 마찰에 의한 응력(traction)이 탄소섬유의 경우보다 크므로 표면에 노출된 유리섬유는 즉시 표면에서 제거되어 마멸파편을 형성하여 쟁기질에 기여할 것이다. 시편Ⅱ의 마멸율이 Table 5에서 보여준 바와 같이 최대가 되는 것과 Fig. 3에서 나타난 두 시편 표면의 차이점은 위에서 제시한 마멸메카니즘을 잘 뒷받침하고 있다.

4. 결 론

PAI를 모재로 하여 단섬유를 마구잡이로 배열시킨 복합재료의 경우 탄소섬유가 보강된 복합재료가 마멸조건에 관계없이 가장 최소의 마멸율을 보였다. 4.9N의 수직력과 30cm/s의 미끄럼속도하에서는 TiO₂가 보강된 복합재료가 최대마멸을 나타내었으나 마멸조건을 강화시켜 9.8N과 50cm/s를 사용하면 유리섬유 복합재료가 최대마멸을 나타내었다.

마찰계수의 경우에는 4.9N과 30cm/s의 조건하에서 탄소섬유복합재료가 최소의 마찰계수를 가지

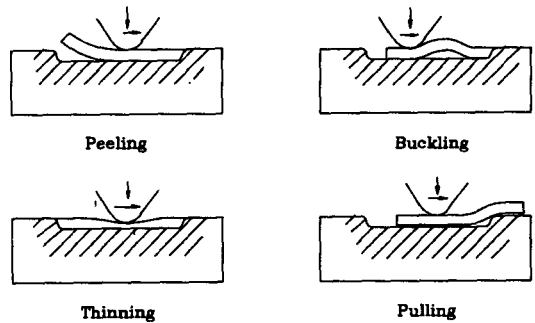


Fig. 4 Four possible modes the fibers experience during interaction with counterface asperity

나 9.8N과 50cm/s의 경우에는 0.9로 최대치를 가진다. 유리섬유 복합재료나 TiO₂가 충전된 미립자 복합재료(particulate composite)는 마찰계수가 거의 비슷하나 유리섬유복합재료가 약간 큰 것으로 나타났다.

마찰계수의 기원은 Suh와 Sin이 주장한 세 성분(μ_a, μ_p, μ_s)으로 설명될 수 있으나, 탄소입자가 포함된 고분자마멸필름에 의한 마찰력은 새로운 성분인 점소성성분(μ_v)을 고려하여야 한다. 이 네번째 성분의 마찰계수에 대한 기여도는 더욱 조직적인 연구를 필요로 한다.

섬유가 보강된 복합재료의 마멸율과 주요 마멸메카니즘은 표면에 노출되거나 하부표면에 존재하는 섬유의 거동에 따라 결정된다. 특히 마멸표면에 존재하는 섬유가 경험하는 네 가지 상황의 예를 들었으며, 섬유의 모재로부터의 분리, 마멸표면으로부터의 이탈현상 등이 마멸율을 결정하는 중요한 요인이다.

참 고 문 헌

- (1) Ricklin, S., 1954, "Filled Teflon for Dry Bearing", Materials and Methods, pp. 112~114.
- (2) Cheney, A.J., Happoldt, W.B., and Swayne, E.G., 1956, "Zytel and Teflon Resins as Bearing Materials-Part II", Plastics Technology, pp. 314~323.
- (3) Mitchell, D.C. and Pratt, G., 1957, "Friction, Wear, and Physical Properties of Some Filled PTFE Bearing Materials", Proceedings of Conference of Lubrication and Wear, Inst. of Mech. Engrs., pp. 416~423.
- (4) White, H.S., 1957, "Materials for Small, Oil-free Bearings", Materials and Methods, pp. 135~139.
- (5) Allan, A.J.G., 1958, "Plastics as Solid Lubricants

- and Bearings", *Lubrication Engineering*, pp. 211~215.
- (6) Pinchbeck, P.H., 1962, "A Review of Plastics Bearings", *Wear*, Vol. 5, pp. 85~113.
- (7) Holligan, P.T., 1968, "Plastics Bearing Materials", *Tribology*, Vol. 1, pp. 168~172.
- (8) Lancaster, J.K., 1972, "Polymer-based Bearing Materials, the Role of Fillers and Fiber Reinforcement", *Tribology*, Vol. 5, pp. 249~254.
- (9) Giltrow, J.P., 1973, "Friction and Wear of Self-Lubricating Composite Materials", *Composites*, pp. 55~64.
- (10) Pascoe, M.W., 1973, "Plain and Filled Plastics Materials in Bearings: A Review", *Tribology*, Vol. 6, pp. 184~190.
- (11) Ohmae, N., Nakai, T., and Tsukizoe, T., 1976, "MoS₂ ion-plated Carbon-Fiber-Reinforced Epoxy Resin as an Advanced Self-Lubricating Composite", *Wear*, Vol. 38, pp. 181~183.
- (12) Rymuza, Z., 1985, "The Role of Interfacial Energy in the Wear of Polymeric Journal Bearings", *Wear*, Vol. 104, pp. 65~76.
- (13) Birkett, A. and Lancaster, J.K., 1986, "Counterface Effects on the Wear of a Composite Dry-Bearing Liner", *Wear*, Vol. 110, pp. 345~347.
- (14) Speerschneider, L.J., and Li, C.H., 1962, "The Role of Filler Geometric Shape in Wear and Friction of Filled PTFE", *Wear*, Vol. 5, pp. 392~399.
- (15) Lancaster, J.K., 1968, "The Effect of Carbon Fiber Reinforcement on the Friction and Wear of Polymers", *Brit. J. Appl. Phys. (J. Phys. D.)*, Ser. 2, Vol. 1, pp. 549~559.
- (16) Giltrow, J.P., and Lancaster, J.K., 1970, "The Role of the Counterface in the Friction and Wear of Carbon Fiber Reinforced Thermosetting Resins", *Wear*, Vol. 6, pp. 359~374.
- (17) Briscoe, B.J., Pogolian, A.K., and Tabor D., 1974, "The Friction and Wear of High Density Polythene; The Action of Lead Oxide and Copper Oxide Fillers", *Wear*, Vol. 37, pp. 19~34.
- (18) Tsukizoe, T. and Ohmae, N., 1975, "Wear Performance of Unidirectionally Oriented Carbon-Fiber Reinforced Plastics", *Tribol. Int.*, Vol. 8, pp. 171~175.
- (19) Bondfield, W., Edwards, B.C., Markham, A.J., and White, J.R., 1976, "Wear Transfer Films Formed by Carbon Fiber Reinforced Epoxy Resin Sliding on Stainless Steel", *Wear*, Vol. 37, pp. 113~121.
- (20) Briscoe, B.J. and Steward, M.D., 1977, "The Effect of Carbon Aspect Ratio on the Friction and Wear of PTFE", *Wear*, Vol. 42, pp. 99~107.
- (21) Tanaka, K., 1977, "Friction and Wear of Glass and Carbon Fiber-Filled Thermoplastic Polymers", *ASME J. Lubr. Tech.*, pp. 408~414.
- (22) Tsukizoe, T. and Ohmae, N., 1977, "Wear Mechanism of Unidirectionally Oriented Fiber-Reinforced Plastics", *Wear of Materials*, Rhee, S.K., et al., ed., ASME, pp. 518~525.
- (23) Sung, N. and Suh, N.P., 1979, "Effect of Fiber Orientation on Friction and Wear of Fiber Reinforced Polymeric Composites", *Wear*, Vol. 53, pp. 129~141.
- (24) Clerico, M. and Patierno, V., 1979, "Sliding Wear of Polymeric Composites", *Wear*, Vol. 53, pp. 279~301.
- (25) Tanaka, K. and Kawakami, S., 1982, "Effect of Various Fillers on the Friction and Wear of Polytetrafluoroethylene Based Composites", *Wear*, Vol. 79, pp. 221~234.
- (26) Roberts, J.C., Ling, F.F., and Jones, W.R., 1982, "Fabrication and Wear Test of a Continuous Fiber/Particulate Composite Total Surface Hip Replacement", *ASLE Transactions*, Vol. 26, No. 3, pp. 367~375.
- (27) Roberts, J.C. and Griffin, O.H., 1982, "Analytical/Experimental Heat Transfer in Dry Sliding of Polymeric Composites", *ASLE Transactions*, Vol. 26, No. 4, pp. 493~500.
- (28) Jain, V.K., 1983, "Investigation of the Wear Mechanism of Carbon-Fiber-Reinforced Acetal", *Wear*, Vol. 92, pp. 279~292.
- (29) Ramesh, R., Kishore, R., and Rao, R.M.V.G.K., 1983, "Dry Wear Studies on Glass-Fiber-Reinforced Epoxy Composites", *Wear*, Vol. 89, pp. 131~136.
- (30) Tsukizoe, T., and Ohmae, N. 1983, "Friction and Wear of Advanced Composite Materials", *Fiber Sci. Tech.*, Vol. 18, pp. 265~286.
- (31) Lhymn, C., 1986, "Tribological Properties of Poly(butylene terephthalate)-Glass Composites: Adhesive Wear", *Materials Sci. Eng.*, Vol. 80, pp. 93~100.
- (32) Lhymn, C., 1986, "Microscopic Study of the Frictional Wear of Polytetrafluoroethylene", *Wear*, Vol. 107, pp. 95~105.
- (33) Eleiche, A.M., 1986, "The Effect of Unidirectional Cotton Fiber Reinforcement on the Friction and Wear Characteristics of Polyester", *Wear*, Vol. 112, pp. 67~78.

- (34) Lhymn, C., 1987, "Effect of Normal Load on the Specific Wear Rate of Fibrous Composites", *Wear*, Vol. 120, pp. 1~27.
- (35) Lhymn, C., 1986, "Tribological Properties of poly(butylene terephthalate)-Glass Composites : Abrasive Wear", *Materials Sci. Eng.*, Vol. 79, pp. 233~237.
- (36) Lamy, B. and Remond, Y., 1987, "Abrasive Processes of Composite Materials", *Sixth International Conference on Composite Materials*, Vol. 5, pp. 5.356~5.361.
- (37) Williams, J.H. and Lau, E.K., 1974, "Solid Particle Erosion of Graphite-Epoxy Composites", *Wear*, Vol. 29, pp. 219~230.
- (38) Pool, K.V., Dharan, C.K., and Finnie, I., 1986, "Erosive Wear of Composite Materials", *Wear*, Vol. 107, pp. 1~12.
- (39) Ohmae, N., Kobayashi, K., and Tsukizoe, T., 1974, "Characteristics of Fretting of Carbon Fiber Reinforced Plastics", *Wear*, Vol. 29, pp. 345~353.
- (40) Bennett, B.A., 1985, "Carbon-Fiber Composites : A Light-weight Alternative", *Mechanical Engineering*, pp. 34~40.
- (41) Su, C. and Youn, J.R., 1988, "An Elastic-plastic Stress Analysis of a Polymeric Subsurface with a Thin Layer under Normal and Tangential Loading", *Wear*, Vol. 123, pp. 355~367.
- (42) Suh, N.P. and Sin, H-C., 1981, "The Genesis of Friction", *Wear*, Vol. 69, pp. 91~114.