

섬유강화복합재의 Tribological 특성에 관한 연구

성인하 · 여인완 · 김대은*

연세대학교 기계공학과 대학원
*연세대학교 기계공학과

Tribological Characteristics of Fiber-Reinforced Plastics (FRP)

In-Ha Sung · In-Wan Yeo · Dae-Eun Kim*

Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Yonsei University
*Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

Abstract—Experimental investigation on the tribological behavior of fiber-reinforced plastics(FRP) has been studied. It is shown that the frictional behavior of carbon FRP depends on the fiber-orientation while glass FRP does not. The friction coefficient values for carbon FRP were about 0.8, 0.3, and 0.2 for normal, 45° and 0° sliding directions respectively. Also, the applied load was found to affect the friction coefficient. In the case of this work, 50 gf resulted in the highest value while 200 gf resulted in the lowest value. The friction coefficients for higher loads fell in between the two extreme values.

1. 서 론

근래에는 여러가지 재료를 조합하여 각 소재의 특성을 살리면서 필요한 용도에 요구되는 특성을 가지도록 하는 복합재료에 크게 의존하게 되었다. 이러한 복합재료 중에서, 신소재로서 새로운 강화재료와 모재(matrix)가 개발되어 가고 있는 섬유강화복합재료(Fiber Reinforced Plastics, FRP)의 분야는 차세대 첨단 공업재료로서 점점 더 주목받고 있다.

FRP의 중요한 특성으로는 경량성(동일체적의 철강 재료 비중의 1/4), 성형성, 내식성, 내충격성, 내열성, 높은 비강도 및 피로강도, 작은 선팽창률, 전기절연성, 이방성 등을 들 수 있다. 또한, 강화섬유와 수지의 조합에 따라 종류가 다양하며, 우주항공분야, 통신분야, 선박, 자동차, 스포츠용품, 전자제품, 건축·토목 분야 등 그 응용분야가 폭넓고 다양하다[1-4].

섬유강화 복합재의 기계적인 특성 및 마찰, 마멸 특성에 대한 여러 연구결과에서는 그 특성들이 강화섬유의 재질, 구성, 함유량, 섬유방향(fiber orientation) 및 수지의 종류, 환경조건, 표면거칠기, 윤활여부, 미

끄럼속도, 미끄럼거리 등 여러 복잡한 인자들에 좌우됨을 보이고 있다[2-5].

일반적으로 알려진 탄소섬유강화복합재(CFRP)의 마찰계수는 약 0.16~0.21로 비교적 낮은 편이며, 섬유 함유량이 증가함에 따라 마찰계수가 오히려 감소하고 마모선도도 비교적 안정되어 있는데 반해, 유리섬유 강화복합재(GFRP)는 섬유분율이 증가함에 따라 마멸률이 급격히 증가하며, 마모선도도 상당히 불안정하다고 알려져 있다. 또한, 마멸 메카니즘에서 보면, CFRP는 활주마멸(sliding wear)이 일어남으로서 대체적으로 안정된 형태의 마멸표면을 관찰할 수 있고, 마멸량도 다른 섬유강화복합재보다 적은 반면, GFRP는 연삭마멸(abrasive wear)이 일어나 다량의 섬유의 절단 현상과 이탈현상이 일어난다[6-8].

섬유방향이 마찰 및 마멸에 미치는 영향에 대한 연구에서는, 마찰특성이 섬유의 상대마찰면으로의 침투성, 마찰면에 잔존하는 마멸입자들의 수, 모재의 기계적 특성에 좌우된다는 결과를 얻었다[9]. 그리고, Suh는 고분자재료들(polymeric materials)의 마찰계수는 수직 하중(normal load)과 미끄럼속도(sliding velocity)의

합수로서, 하중이 증가하면 열가소성(thermoplastic), 열경화성(thermosetting)에 관계없이 대부분 낮은 미끄럼 속도에서도 낮은 마찰계수를 나타내고, 속도가 증가하면 마찰계수가 증가하며 어느 값 이상의 매우 큰 속도에서는 마찰계수가 속도증가와 함께 감소한다고 하였다. 또한, 연속섬유(continuous fiber)로 이루어진 복합재의 마멸특성은 주로 섬유의 마멸률에 좌우된다는 연구결과와 함께, 이러한 복합재의 마찰거동은 일반적인 금속의 경우와 같이 표면갈림(plowing), 응착(adhesion), 돌기변형(asperity deformation)으로 설명할 수 있다고 밝혔다[9].

지금까지의 이러한 연구결과들은 대부분 FRP전반의 특성보다는 재료 각각의 특성에 대한 것으로, 특히 실제 제품화하여 사용시에 중요한 문제가 되는 마찰·마멸특성에 대해서 많은 연구가 진행중이다. 따라서 본 연구에서는 경제적인 측면에서뿐 아니라 FRP

의 특성향상에도 중요성을 지니는 FRP의 마찰·마멸 특성의 결정인자를 강화섬유(재질,구성) 및 수지의 종류, 섬유방향, 하중으로 설정하고, 실험을 통하여 각 인자들이 FRP의 마찰·마멸에 미치는 일반적인 영향을 고찰하였다.

2. 실험 및 고찰

2-1. 실험시편

실험에 사용한 복합재료시편은, 각 FRP종류에 따른 마찰·마멸특성을 고찰하기 위하여 대표성을 띠도록 5종류를 취하였다. 시편은 섬유는 연속섬유이고, 모두 적층재(laminate)로 이루어진 single-layer composites이다.

Gr/EP는 열경화성 탄소섬유강화 복합재이며, AS4/PEEK (Thermoplastic APC-2)는 고인성 탄소섬유강화

Table 1. Specifications and mechanical properties of FRP specimen (subscript: 1-0° (L) direction, 2-90° (T) direction)

Material	Density (g/cm ³)	Fiber volume content V _f (%)	Elastic properties			
			E ₁ (GPa)	E ₂ (GPa)	G ₁₂ (GPa)	v ₁₂
GF/GP (E-Glass fiber/Epoxy) woven fabric type	1.80	45	38.6	8.27	4.14	0.26
Gr/EP(Graphite/Epoxy) unidirectional type	1.61	60	135.4	11.0	4.82	0.34
APC-2(AS4/PEEK) unidirectional type	1.60	62	134.0	8.9	5.10	0.31
GF/PH (Glass fiber/Phenolic)	<ul style="list-style-type: none"> ● Glass fiber Tensile Strength : 3400 MPa (350 kg/mm²) Density : 2.6 g/cm³ Dimeter : 10 μm Fabric : 4-HS(Harness Satin) Specific strength : 13.4×10⁴(m) ● Phenolic resin (KRD-HM2) Carbon yield : Max. 69% Solid content : 60% Density : 1.05-1.1 g/cm³ Resol type 					
ACELAN IZ-40/PH (Carbon fiber/Phenolic)	<ul style="list-style-type: none"> ● Carbon fiber (Acelan IZ-40) Tensile strength : 3900 MPa (400 Kg/mm²) Density : 1.8 g/cm³ Diameter : 5.4 μm Fabric : 8-HS (Harness Satin) Specific strength : 22.2×10⁴(m) No. of filament : 12,000(12K) ● Phenolic resin (KRD-HM2)-GF/PH의 PH와 동일재료 					

복합재의 일종으로, AS4는 PAN계열 고강도형 탄소 섬유이고, 반결정(semi-crystalline)인 열가소성수지 PEEK를 모재로 한 것이다.

Acelan[IZ-40]/PH는 CFRC(Carbon Fiber Reinforced Carbon Composites)로 강화재와 모재가 모두 탄소물질로 되어있는 독특한 재료로서, Acelan[IZ-40]은 PAN계열 고강도형 탄소섬유이다.

본 실험에 사용한 각 복합재시편의 물리적, 기계적 특성은 Table 1과 같다.

복합재의 상대마찰재로는 SUJ-2(고탄소 크롬 베어링강)로 제작된 볼베어링용 steel-ball로 선정하였으며, 그 이유는 steel-ball의 경도가 HRC 63으로 FRP보다 매우높아 마멸량이 작기때문에 상대마찰재로 적합하기 때문이다.

Steel-ball은 직경이 약 6.35 mm이고, 표면거칠기는 약 0.08 μm 이다.

2-2. 실험방법 및 장치

2-2-1. 실험장치

본 연구에서는 실험장치로 Fig. 1의 Pin-on-Flat Tribotester (reciprocating)를 이용하였다. 위의 고정시편(Pin부)이 steel-ball이고, 아래 plate(왕복운동부)의 시편은 복합재이다. 마찰력의 측정은 strain ring에 부착한 full-bridge회로로 구성된 strain gage에 의해 검출된 strain량이 전압으로 변환되고 AMP로 증폭되어 A/D board를 통해 PC에 저장됨으로써 이루어진다. 적용하중은 50~500 gf로서 그림에서 보는바와 같이 pin부 위쪽에 직접 하중을 가하며, balance weight를 두어 plate부의 시편표면과 평행을 유지하여 수직하중이 되도록 함과 동시에 실험장치의 자중은 제외되도록 하

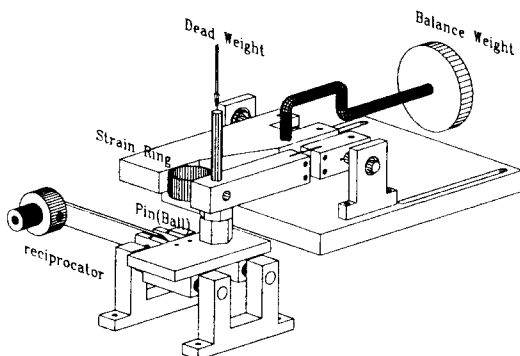


Fig. 1. Pin-on-Flat Tribotester (reciprocating).

였다. 또한 외부환경과 실험장치를 차단시키는 밀폐된 케이스를 제작하여 실험중의 온도 및 습도의 환경조건이 일정하게 유지되도록 하였다.

2-2-2. 실험방법

각 복합재시편의 종류 및 섬유방향에 따라 하중조건을 바꾸어 실험하였으며, 실험은 건조상태에서 행하였다. 하중은 50, 200, 400, 500(gf)로, 미끄럼선속도는 6 cm/sec로 하였다. 환경조건은 온도 26~34°C, 습도 30~45% 내에서 유지하였다.

실험시 미끄럼(sliding)방향은 일방향(unidirection) 시편인 Gr/EP, AS4/PEEK에 대해서는 Fig. 2에 나타나 있는 것과 같으며, woven fabric으로 되어있는 GF/EP, GF/PH, Acelan/PH는 Fig. 3와 같이 실험하였다. 'L 0'는 Longitudinal 0°를, 'N'은 Normal을, 'T'는 Transverse (90°)를 뜻한다.

실험시간은 실험장치 plate부의 1회 왕복운동을 1 cycle로 취하여 60000 cycle을 기준으로 설정하였는데, 위 실험시간의 선정근거는 각 복합재의 예비실험결과, 60000 cycle 이후에서 마찰계수의 변화양상이 변동없이 일정한 정상상태(steady-state)를 유지하였기 때문이다.

이와같이 섬유방향 및 하중의 변화에 대한 실험을 통하여 마찰 및 마멸특성을 도출해낸다. 마찰특성은 마찰계수를 측정함으로써 나타내었다. 한편, 복합재

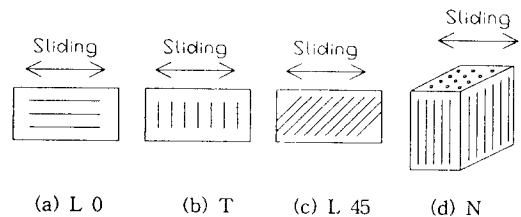


Fig. 2. Sliding direction-Gr/EP, AS4/PEEK.

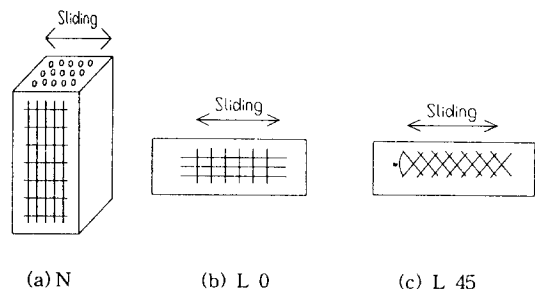


Fig. 3. Sliding direction-GF/EP, GF/PH, Acelan/PH.

료의 마멸특성은 복합재료의 경도가 압입시간 (indentation time)의 함수이므로, 경도와 관련있는 마멸계수로 나타낼 수 없다[9]. 따라서, 본 실험에서는 마멸계수 대신 미끄럼 접촉 실험후 시편의 표면 및 표면조도를 관찰하여 마멸경향을 분석하였다. 표면의 관찰에는 광학현미경을 이용하고, 표면특성의 측정을 위해서는 surface profiler를 이용하였다.

2-3. 실험결과 및 고찰

2-3-1. 동일한 하중조건하에서의 마찰,마멸특성

GF의 경우는 Fig. 4 에서 나타나는 것과 같이 수직 및 섬유방향에 관계없이 거의 같은 마찰계수값을 보인다. 이것은 시편이 woven fabric으로 구성되어 섬유 방향이 마찰특성에 큰 영향을 미치지 않기 때문인 것으로 생각된다. 또한 GF/EP에서는 섬유방향 변화나 하중조건 변화에 관계없이, 급격히 마찰계수가 증가하는 변화점이 있는 것이 일반적인 양상이었다. 이

러한 양상은 본 실험에서 사용한 시편이 GF/PH는 표면에서부터 섬유가 노출되어 있는데 반해 GF/EP표면

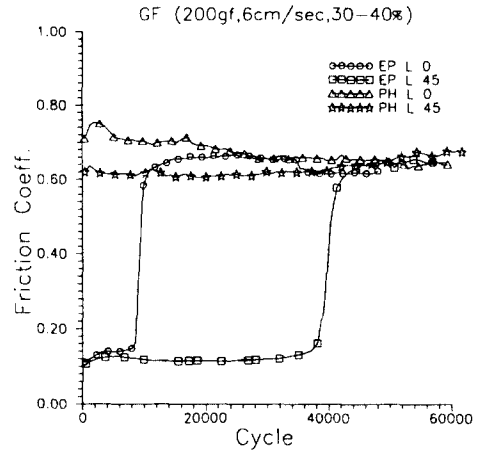


Fig. 4. Friction coeff. of GF/(EP, PH).

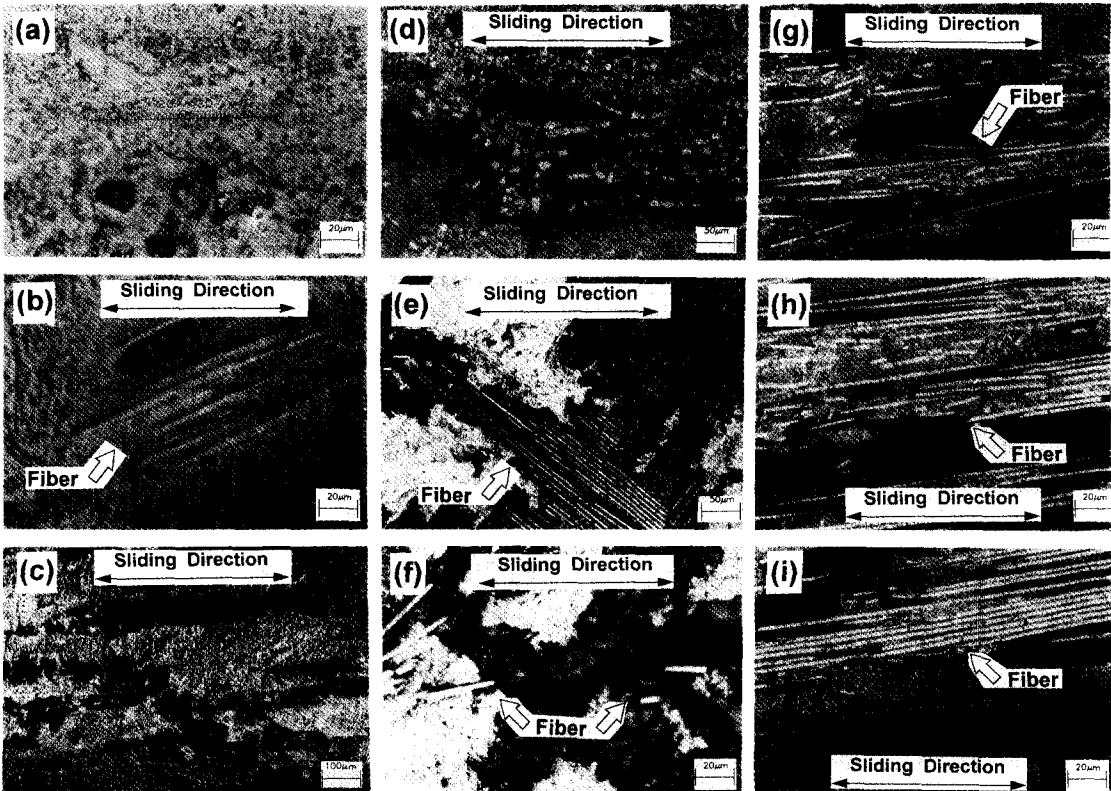


Fig. 5. (a), (b), (c) Surface photograph; GF/EP L 45 (400 gf, 6 cm/sec) ((a): before experiment, (b), (c): Worn surface) (d) Worn surface; GF/PH L 45 (200 gf, 6 cm/sec) (e), (f) Worn surface; Acelan/PH L 45 (200 gf, 6 cm/sec) (g), (h), (i) Worn surface; AS4/PEEK L 0 (500 gf, 6 cm/sec) ((g), (h): Wear track, (i): wear track boundary).

은 Epoxy수지로 덮여있어 섬유가 드러나있지 않기 때문에 처음엔 낮은 값을 보이다가, 마찰시작이후 섬유가 표면에 드러나서 마찰을 일으키기 시작하게 되면 급격히 큰값으로 상승하기 때문이라고 생각된다. Fig. 5-(a)와 Fig. 5-(b),(c)는 이를 잘 설명해 준다. Fig. 5-(a)는 GF/EP L 45 (400gf, 6cm/sec)의 실험전 표면사진이고, Fig. 5-(b),(c)는 GF/EP L 45 (400gf, 6cm/sec)의 실험후의 마멸트랙 사진이다. 실험전 사진에서는 표면에 섬유가 보이지 않지만, 실험후에는 마멸트랙 표면에 섬유가 드러나 있는 것이 보인다. Fig. 5-(c)에서는 중간에 가로방향으로 넓게 분포한 밝은 부분들이 섬유의 마멸입자들이며, 곳곳에 파단된 섬유들이 보인다. 짙은 부분은 Epoxy부분이다. 왼쪽하단엔 45도 방향으로 뻗쳐있는 섬유들이 드러나 보인다.

Fig. 5-(d)는 GF/PH L45 (200gf, 6cm/sec)의 마멸트랙의 표면사진으로 파단된 섬유들과 마멸입자들이 보인다.

한편, Fig. 6은 동일한 PH수지에 대한 GF,CF의 섬유방향변화에 따른 마찰특성을 보여준다. PH수지에 대해서는 모든 방향에 대해 GF가 CF보다 마찰계수가 더 크고, GF의 경우는 섬유방향에 관계없이 마찰계수가 거의 비슷하나, CF의 경우 마찰계수 크기가 Normal > L 45 > L 0의 순으로 나타남을 알 수 있다. 또한, Fig. 7-(a),(b)에서 보이는 바와 같이, AS4/PEEK와 Gr/EP에서도 같은 결과가 나타난다. 이것은 normal방향에서 섬유의 이탈이나 절단현상이 일어나기가 가장 어렵기 때문이다. 이러한 경향을 마찰거동의

3가지성분, 즉 표면갈림(plowing), 응착(adhesion) 및 돌기변형(asperity deformation)의 측면에서 고찰해보면, 돌기변형은 실험초기에는 중요한 요인이거나 마찰계수가 정상상태(steady-state)에 이를 경우는 영향을 미치지 않으므로 본 실험의 경우 중요한 성분이 되지 않는다고 생각된다. 응착 역시 본 실험과 같이, 대기중에서인 환경조건과 시편표면에 산화막 등이 존재하는 경우에서는 금속의 경우를 보더라도 매우 작으므로 무시할 수 있다고 본다. 따라서, 이 경우 plowing이 섬유방향에 따른 마찰계수 변화양상을 좌우하는 가장 주요한 성분으로 보이나, 이에대한 보다 자세한 해석을 위해서는 추가연구가 필요하다고 생각된다. 한편,

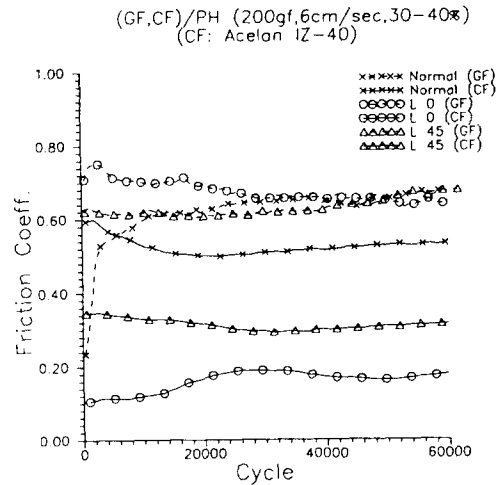


Fig. 6. Friction coeff. of (GF, CF)/PH.

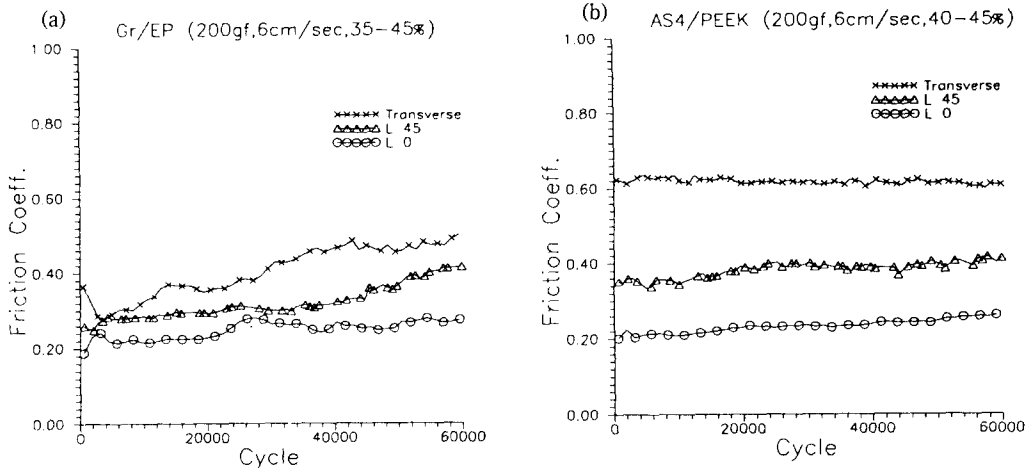


Fig. 7. Friction coeff. of Gr/EP, AS4/PEEK.

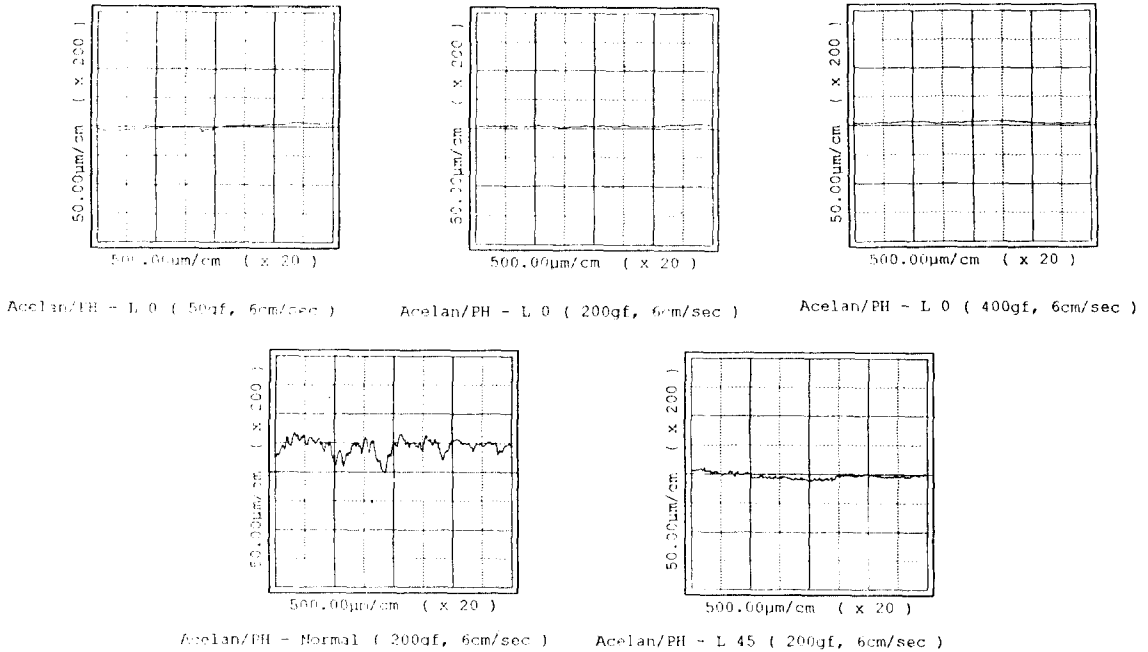


Fig. 8. Wear profiles under varying conditions; CF(Acelan)/PH.

CF의 경우 GF와 달리 섬유방향에 따른 경향이 뚜렷이 나타나는 이유는 Table 1.에서 보듯이 동일한 수지에 대해서 GF에 비해 섬유의 비강도가 크고, fabric방식이 GF는 4-HS인데 비해 CF/PH시편은 8-HS이므로 섬유방향에 따른 영향이 더 커져 섬유의 이탈이나 절단이 수월하지 않기 때문에 방향성이 잘 나타나는 것으로 보인다. 또한 Fig. 8의 profile에서는 마찰계수 크기순으로 마멸량이 나타나고 있음을 보이고 있다. 다른 연구결과들을 보면, 일반적으로 일방향강화재의 마찰계수는 normal방향이 가장 크나, 마멸량은 normal방향에서 가장 작게 나타나는 경향을 보이는데[5], 본 실험의 마멸경향이 이러한 경향과 다르게 나타나는 것은 시편이 일방향강화재가 아닌 woven fabric 시편이므로 방향성이 복합적으로 나타나기 때문이라고 본다. 한편, normal방향으로 실험한 경우 L 0, L 45방향에서는 거의 일어나지 않는 steel-ball의 마멸이 현저하게 일어났으며, 볼 표면을 관찰한 결과, 미끄럼방향에 수직으로 놓인 섬유에 의해 미끄럼방향으로 그루브자국이 있는 것이 보였다.

Fig. 9은 GF의 마멸트랙의 profile로써, PH수지의 경우, 표면이 EP보다 섬유의 표면노출로 인해 더 거친 것을 볼 수 있으며, 마멸트랙부분도 더 거친 것을

볼 수 있다. 또한, Fig 8과 Fig. 9를 비교해보면 CF가 GF보다 마멸량이 훨씬 적은데, 이것은 탄소섬유가 고강도형으로 강도가 큰 데 반해 유리섬유는 일반용인 E-glass이므로, 동일한 steel-ball과의 마찰시 탄소섬유가 마멸량이 더 적고 상대적으로 볼의 마멸이 유리섬유복합재보다 많이 일어난다고 볼 수 있다.

2-3-2. 하중변화에 따른 마찰,마멸특성

Fig. 10은 하중변화에 따른 각 재료의 마찰특성을 나타낸 것으로, 모두 200 gf일때 보다 400 gf, 500 gf 일때 마찰계수가 더 큼을 보이고 있다. 이것은 하중이 증가할수록 표면의 파괴정도가 향상되어 plowing효과가 증가하고, 또한 섬유/모재의 결합의 약화와 섬유의 파괴의 증가로 인한 것이라고 볼 수 있다. 표면 profile Fig. 8, 9, 11을 보면 유리섬유강화재의 경우 마멸량은 마찰계수의 크기순으로 나타나지만, 탄소섬유의 경우 유리섬유에 비해 마멸량이 매우 적어 그러한 경향성이 두드러지게 나타나지는 않는다.

한편, 가장 작은 하중인 50 gf에서 마찰계수가 1.0을 넘으면서 상대적으로 가장 큰 값을 나타내는 경향을 보인다. 이러한 경향은 일반적으로 고분자재료가 금속과 달리 점탄성(viscoelastic)재료가므로, 미끄럼속도에 따라 특정한 하중조건에서 마찰계수가 최대값을

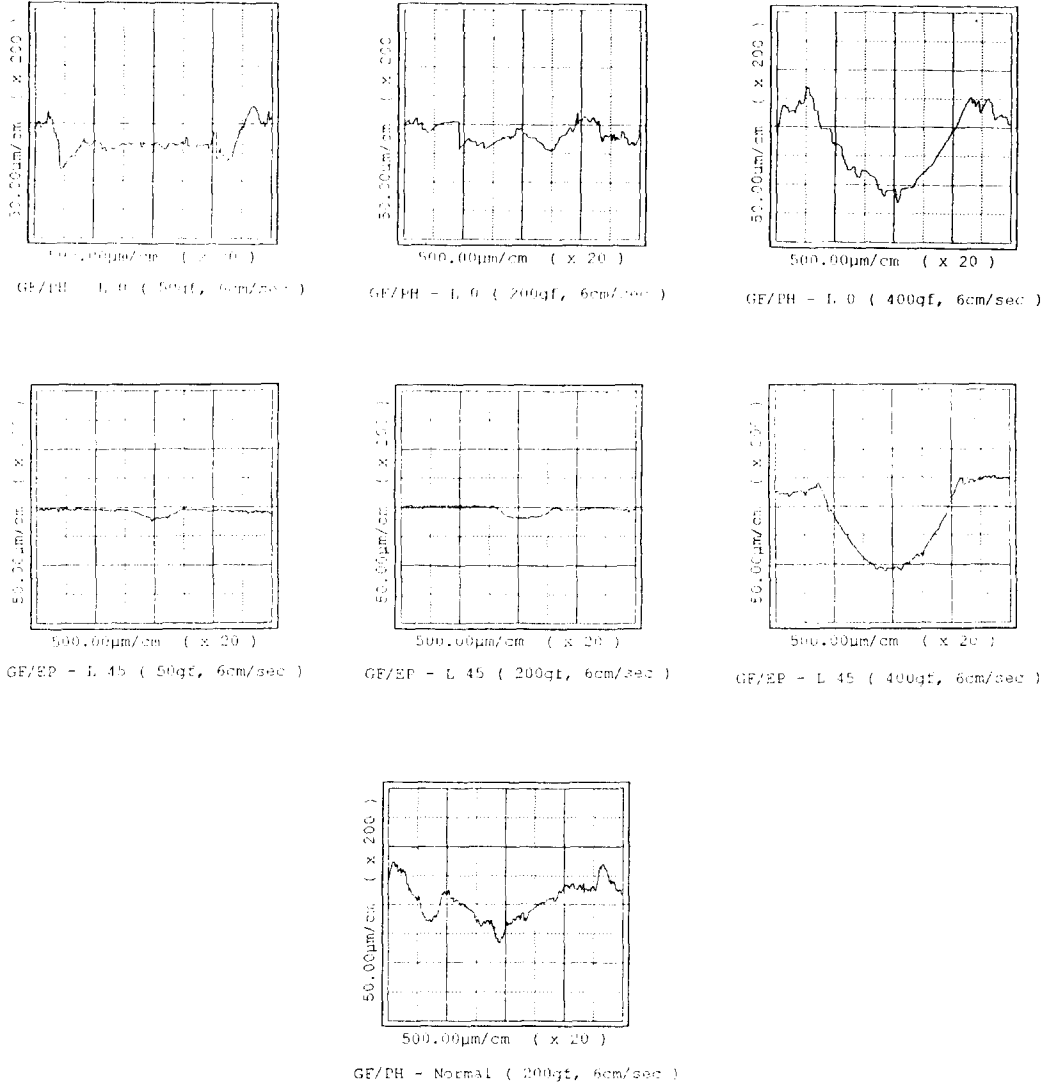


Fig. 9. Wear profiles under varying conditions; GF/(EP, PH).

나타내는 특성을 보이는 연구결과에 부합되는 것으로 생각된다[9-10]. 마찰계수가 50 gf에서 처음에 급격히 증가해서 1.0이 넘는 이러한 양상은 다른 복합재시편에서도 나타난다.

Fig. 5-(e)는 Acelan/PH L 45 (200 gf, 6 cm/sec)의 마멸트랙사진으로, 밝게 보이는 것이 섬유들의 마멸입자들이 뭉쳐져 있는 것이다. 짙은 색으로 보이는 것은 PH수지이다. Fig. 5-(f)에서는 파단된 탄소섬유들과 마멸트랙에 존재하는 마멸입자들을 관찰할 수 있다. Fig. 5-(g),(h),(i)는 AS4/PEEK L 0 (500 gf, 6 cm/

sec)의 마멸트랙 사진들이다. 사진에서 섬유의 파단이 뚜렷이 보이고, 짙게 나타나는 부분이 PEEK에 해당한다.

3. 결 론

이상의 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 유리섬유의 경우, 섬유방향과 수지의 재질에 관계없이 마찰특성이 거의 동일하다고 판단할 수 있

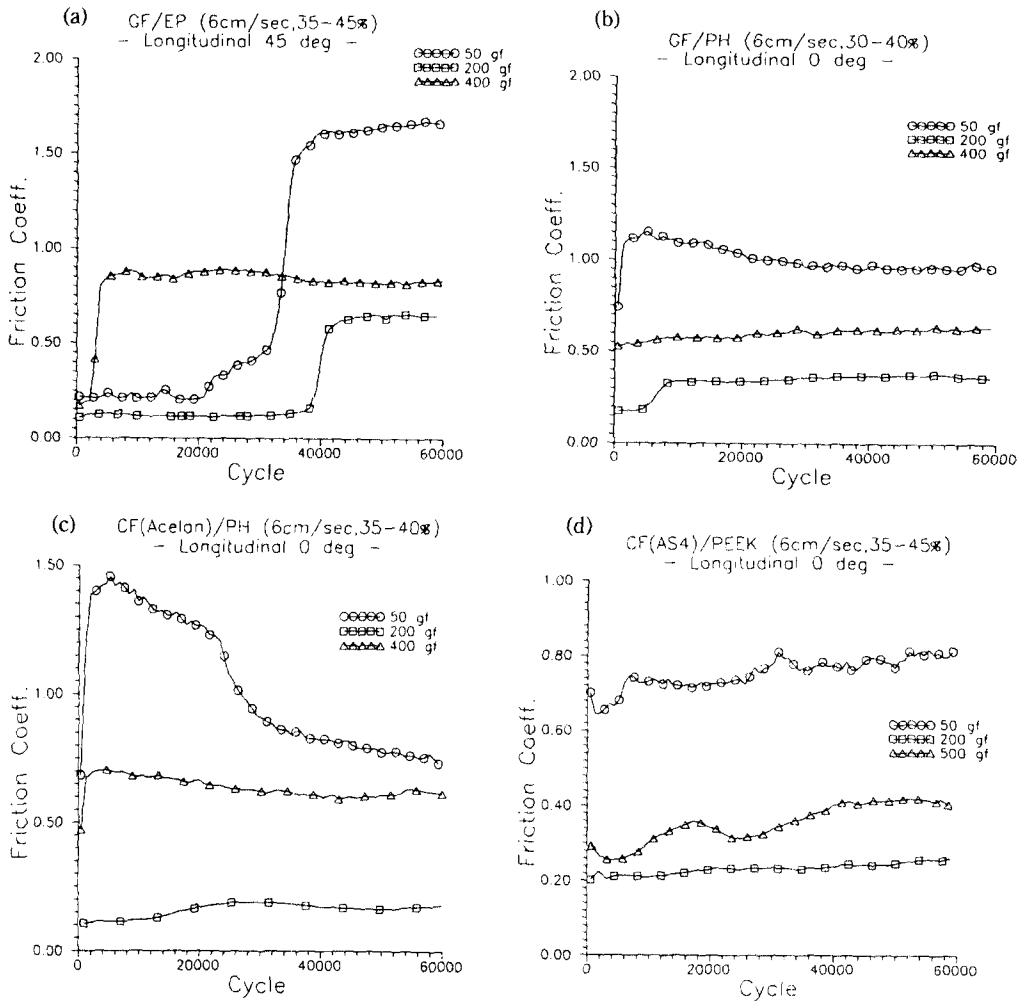


Fig. 10. Effect of applied load on friction coefficient (a) GF/EP (b) GF/PH (c) CF(Acelan)/PH (d) CF(AS4)/PEEK.

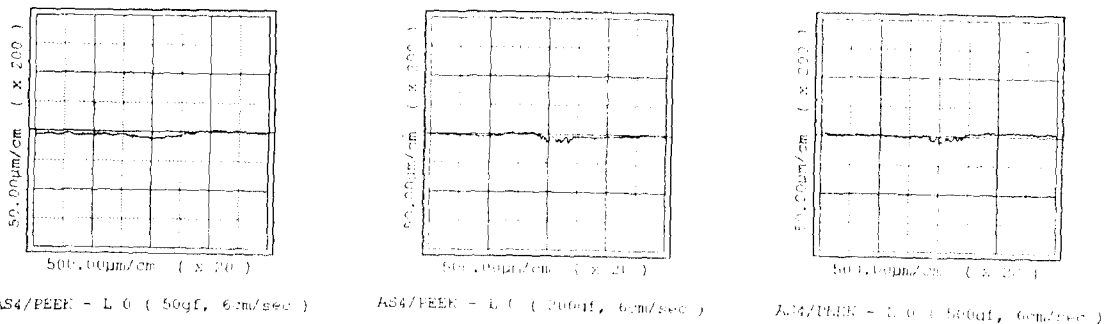


Fig. 11. Wear profiles under different loads ; AS4/PEEK.

나, 탄소섬유의 경우에는 미끄럼방향에 대해 섬유방향이 Normal, L 45, L 0의 크기 순으로, 0.1-0.2정도

마찰계수의 차이가 있는 것으로 나타났다. 또한, 동일 수지에 대해서 유리섬유가 탄소섬유보다 더 큰 마찰

계수값을 보였다. 또한, 마멸특성에 있어서도 탄소섬유는 유리섬유에 비해 훨씬 마멸량이 적은 것으로 나타났다.

2) 복합재료의 마찰특성과 하중의 관계는 비례하지 않으며, 특정한 하중에서 매우 큰 값을 가질 수 있다는 것을 실험으로 확인하였다. 따라서 하중에 따라 저마찰특성을 얻기 위해서는 복합재료의 성분 및 섬유방향 등을 최적화할 필요가 있다.

3) 볼의 마멸은 유리섬유강화 복합재의 경우 거의 없었으나, 탄소섬유강화 복합재에서는 normal방향과 transverse방향에 대해서는 현저하게 나타났다.

참 고 문 헌

1. Bhagwan D. Agarwal *et al.*, Analysis and Performance of Fiber composites, pp. 1-35, 436-439, John Wiley & Sons, INC., 1990.
2. Tsu-Wei Chou, Microstructural design of Fiber Composites, pp. 1~28, 368-373, Cambridge University Press, Great Britain, 1992.
3. S. K. Bhatia, Metal-filled Polymers, pp. 1~26, 66~74, 335~347, Marcel Dekker INC., NewYork, 1986.
4. Karl-Heinz Zum Gahr, Microstructure and Wear of Materials, pp. 318-328, 461-477, Elsevier science publishers B.V., Amsterdam, 1987.
5. Klaus Friedrich, Friction and Wear of Polymer Composites, pp. 205-221, 241-253, 329-349, Elsevier science publishers B.V., Amsterdam, 1986.
6. 주혁중 외 3명, "섬유보강 복합재의 마찰 및 마모특성," 한국재료학회지, Vol.4, No.7, pp. 733-740, 1994.
7. 하현승 외 4명, "탄소/탄소 복합재료의 마모특성에 대한 탄소섬유 길이의 영향," 한국재료학회지, Vol.3, No.3, pp. 292-299, 1993.
8. Zygmunt Rymuza, Tribology of Miniature Systems, pp. 28-32, 83-109, Elsevier science publishers B.V., Amsterdam, 1989.
9. N. P. Suh, Tribophysics, pp. 4, 223-257, Prentice-Hall, INC., 1986.
10. A.D. Sarkar, Friction and wear, pp. 244-253, Academic Press., London, 1980.