

탄소 섬유 보강 폴리에테르에테르케톤의 마찰 및 마모 거동에 관한 연구

류 성 국[†] · 김 경 웅^{*}

(2000년 2월 22일 접수, 2001년 4월 3일 심사완료)

A Study on Friction and Wear Behavior of Carbon Fiber Reinforced Polyetheretherketone

Sung-Kuk Ryoo and Kyung-Woong Kim

Key Words : PEEK(폴리에테르에테르케톤), Carbon(탄소 섬유), Friction(마찰), Wear(마모)

Abstract

The friction and wear behavior of short carbon fiber reinforced polyetheretherketone was studied experimentally under dry sliding conditions against SCM440(AISI 4140) disks with different surface roughness and hardness at the low sliding speeds and the high pressures on a pin-on-disk apparatus. Under the low disk surface roughness value the earsplitting noise and stick-slip were occurred. The increased adhesion friction and wear factor with stick-slip made the friction and wear behavior worse. Under the high disk surface hardness the break and falling-off of carbon fibers were accelerated. The carbon fibers fallen off from the matrix were ground into powder between two wear surfaces and this phenomenon caused abrasive friction and wear factor to increase. So the friction and wear behavior became worse. With the transfer film made of wear particles formed on a disk, the carbon powder film formed on a pin lowered a friction coefficient.

1. 서 론

공업용 재료는 크게 금속 재료, 세라믹 재료, 플라스틱 재료로 대표된다. 특히 플라스틱과 섬유 보강 고분자 복합 재료들은 산업에의 이용에 있어 지난 수 십년간 엄청난 성장을 보였다.

트라이볼로지 재료로서 순수 플라스틱 및 플라스틱 복합 재료를 기어, 캠, 베어링과 같이 미끄럼 접촉을 하는 기계 요소에 사용할 경우, 성형의 용이성, 경제성과 함께 진동 흡수, 무게 감소, 내충격성 및 내부식성 향상과 같은 장점이 있으므로 많은 분야에서 금속 재료를 대체하고 있으며, 특히 윤활유의 공급이 힘들거나 저속 운행이나 잦은 기동이 필요해 경계 윤활 상태가 되기 쉬운 경우와 같이 유체 윤활 상태의 유지가 어려운 곳에는

고분자 베어링의 사용이 증가되고 있다.⁽¹⁾

탄소 섬유 보강 폴리에테르에테르케톤(CF/PEEK)의 경우, 재료 자체에 대한 성능 측면에서는 많은 실험이 행해져서 우수한 기계적, 열적, 화학적 특성이 인정되고 있으나,⁽¹⁻³⁾ 상대 마찰면과 관계한 트라이볼로지 특성은 상대 마찰면의 재질 및 표면 상태, 그리고 주위 분위기에 따라서 많이 좌우되므로 트라이볼로지 부품으로서의 정확한 성능 예측을 위해서는 아직도 많은 데이터가 필요하다. 특히, 고분자 복합 재료가 베어링과 같은 부품에 사용되는 경우는 저속, 고하중이나 잦은 기동이 필요하여 유체 윤활이 어려운 경우이므로, 본 연구에서는 저속 영역에서 건조 마찰 상태로 실험하려고 한다.

따라서, 본 연구에서는 단탄소 섬유 보강 폴리에테르에테르케톤(CF/PEEK)을 건조 마찰 상태에서 측류, 아암류, 기어류에 많이 사용되는 SCM440(Cr-Mo 鋼, AISI 4140)과 미끄럼 마찰시켰을 때의 마찰 및 마모 거동을 실험을 통해서 알아봄으로써 베어링과 같이, 두 표면이 직접 닿아

[†] 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : ryoosk@lge.com

TEL : (02)818-3586 FAX : (02)856-0313

* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

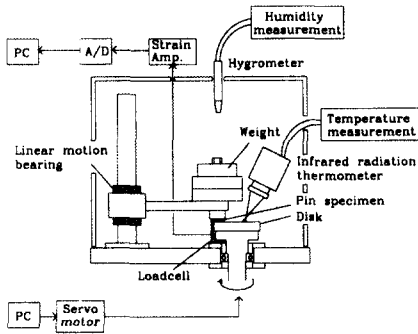


Fig. 1 Schematic view of test apparatus

서로 상대 운동을 하는 부품의 설계에 필요한 마찰 및 마모의 기초 자료를 제시함을 목적으로 한다.

2. 실험

2.1 실험 장치

Fig. 1 은 마찰 및 마모 실험용으로 제작된 핀-온-디스크 형 실험 장치의 개략도이다. 회전축 구동용 모터로서는 마찰력의 변화에 의한 영향을 받지 않으면서 미끄럼 속도를 정확히 제어하기 위해 2kW 의 DC 서보 모터를 사용하였으며, 서보 모터의 속도는 PC-D/A 변환기-서보 모터 컨트롤러로 구성되는 속도 제어부에 의해 제어된다. 서보 모터에 의해 3 개의 회전축이 동시에 회전하게 되며, 각 회전축 위에 부착되는 디스크 시편이 토크 암의 시편 홀더에 고정된 정지 상태의 CF/PEEK 핀 시편과 미끄럼 접촉하며 회전하게 된다. CF/PEEK 핀 시편은 토크 암의 끝 부분에 만들어진 시편 홀더에 고정되며, 토크 암의 반대쪽 끝에는 연직 방향과 회전 방향 운동이 자유로운 직선 운동 베어링이 부착되어 직선 운동 베어링 안내축에 끼워져 있다. 따라서 두 마찰면 사이에서 발생하는 마찰력은 직선 운동 베어링 안내축을 중심으로하여 토크암을 회전시키는 토크로 작용하게 된다. 마찰력은 토크에 의한 운동을 로드셀로 구속함으로써 측정할 수 있다. 이 때 직선 운동 베어링부에서 발생하는 마찰 토크는 무시하였으며, 로드셀에서 나온 전기 신호는 스트레인 앰프에 의해 증폭되고 A/D 변환기를 통해 PC 로 입력된다.

토크 암 위에 올려진 추의 무게와 토크 암 무게의 합이 마찰면에 가해지는 수직 하중이 되고, 측정된 마찰력을 수직 하중값으로 나누어서 마찰 계수를 산출했다. CF/PEEK 핀 시편의 마모량을 구하

Table 1 The chemical component of SCM440

종류	기호	화합성분(%)							
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Cr-Mo	SCM440	0.38~0.43	0.15~0.35	0.60~0.85	0.030 이하	0.030 이하	0.25 이하	0.90~1.20	0.15~0.30

기 위해 분해능 0.01 mg 의 디지털 전자 저울을 사용하였으며, 실험 전후 각각 3 회씩 측정하여 그 평균값을 CF/PEEK 핀 시편의 무게로 취했다. 그렇게 측정된 CF/PEEK 핀 시편의 무게 변화량을 핀 시편의 밀도로 나누어 마모 체적을 구했다.

실험하는 핀 시편이 고분자 재료의 특성이 급격하게 변화하는 유리화 및 용융 온도에 이르지 않는지 알아보기 위해서 디스크 마찰 트랙 주위의 온도를 측정하였으며, 마찰 전후 CF/PEEK 시편 및 SCM440(AISI 4140) 디스크의 표면을 광학 금속 현미경과 SEM(scanning electron microscope, 전자 주사 현미경)을 이용하여 관찰하였다.

2.2 시편 및 상대마찰면

실험에 사용된 핀 시편은 탄소 섬유 강화 폴리에테르에테르케톤(carbon fiber reinforced polyetheretherketone, CF/PEEK)이다. 핀 시편은 분말 상태의 PEEK 와 PAN 계열의 짧은 탄소 섬유를 하중비로 30% 혼합하여 압축 성형 공정(compression molding process)으로 판재형으로 제작한 뒤 3 mm x 4 mm 의 마찰면을 가진 길이 12 mm 의 직육면체 형상으로 절단되었다. 이렇게 제작된 재료의 평균 밀도는 1.44 g/cm³ 이고 23°C 에서 인장 강도는 224 MPa, 굽힘 강도는 355 MPa, 로크웰 경도는 R 스케일로 124 이다. 핀 시편의 표면은 제작 후 절단 가공 흔적을 없애기 위해서 1000 메쉬 SiC 연마지로 건식 연마하였다. 실험에 사용된 디스크 시편은 내경 70 mm, 외경 114 mm 의 링 모양이며, 재질은 SCM440(AISI 4140)이다.

SCM440 의 화학적 조성은 Table 1 과 같으며, 이 재질은 축류, 아암류, 기어류 등에 주로 사용된다. 본 연구에서는 상대 마찰면인 SCM440(AISI 4140) 의 표면 상태가 다음과 같은 세 가지 경우에 대해서 실험을 수행하였다.

Case 1. 표면 조도(peak-to-peak; R_{max}) 1.5 μm ~ 3.5 μm , 경도(HRC) 31~34

Case 2. 표면 조도(peak-to-peak; R_{max}) 0.3 μm ~ 0.8 μm , 경도(HRC) 32~34

Case 3. 표면 조도(peak-to-peak; R_{max}) 1.2 μm ~ 3.0 μm , 경도(HRC) 61~63

표면 조도는 하나의 디스크에 대해서 네 번씩

측정되었으며, 하나의 디스크 내에서는 그 편차가 1 μm 이내였다. 각 Case 의 표면 상태는 다음과 같은 과정으로 만들어졌다. Case 1 은 디스크 시편을 선삭한 후, 600 메쉬 연마지로 건식 연마를 하였고, Case 2 는 디스크 시편을 연삭한 후 600 메쉬에서 1200 메쉬까지의 순서로 건식 연마를 하였다. 그리고 Case 3 은 열처리 후 선삭 가공을 하고 600 메쉬 연마지로 건식 연마를 하였다. 따라서 Case 2 는 Case 1 에 비해서 표면의 거칠기가 낮아졌으며, Case 3 은 Case 1 에 비해서 표면 경도가 높아진 것이다. Case 1 과 Case 3 의 표면은 가공 흔적이 마찰 방향에 나란한 원주 방향으로 나 있고 그 위에 건식 연마 흔적이 방향성 없이 남아있으며, Case 2 는 건식 연마 흔적만이 방향성 없이 디스크 표면에 남아 있었다.

디스크의 표면 조도는 SURFTEST 301(Mitutoyo) 로 측정하였고, 경도는 Akashi Hardness Tester 로 로크웰 경도를 측정하였다. 편 및 디스크 시편은 표면의 불순물을 제거하기 위해서 알코올로 닦고 대기중에서 한 시간 이상 건조 시킨 후에 실험을 하였다.

2.3 실험 조건

고분자 복합 재료가 트라이볼로지 부품으로 사용되는 경우는 저속, 고하중이나 잦은 기동이 필요하여 유체 윤활이 어려운 경우이므로, 이번 실험에서는 유막 형성이 어렵다고 판단되는 속도 및 압력을 주었다. 미끄럼 속도의 경우, 저속 영역인 0.5 m/s, 1.0 m/s, 1.5 m/s 의 세 가지로 주었으며, 마찰면에 작용하는 평균 면압은 1.44 MPa, 3.07 MPa, 4.05 MPa, 4.87 MPa, 5.53 MPa 로서 비교적 높은 영역에서 다섯 가지로 주었다. 따라서 각 상대 디스크 표면 상태에 대해서 한 가지 속도와 한 가지 압력을 하나의 경우로 하여 총 열 다섯 가지 경우에 대해서 실험을 행하였으며, 각 경우에 대해서는 동시에 세 번의 실험을 행하였다. 각 실험에서 편이 움직인 거리는 43.2 km 로 일정하게 주었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 마찰 및 마모 거동

각 실험 조건에 따른 마찰 계수를 비교하기 위하여 각 경우마다 평균 마찰 계수(μ_a)와 최종 마찰 계수(μ_f)를 구하였다. 평균 마찰 계수는 실험 전 구간에서의 마찰 계수를 평균한 값이며, 최종 마찰 계수는 마찰 거리가 40 km 를 넘어서는 곳에서부터 실험이 끝나는 곳까지의 마찰 계수의 평균

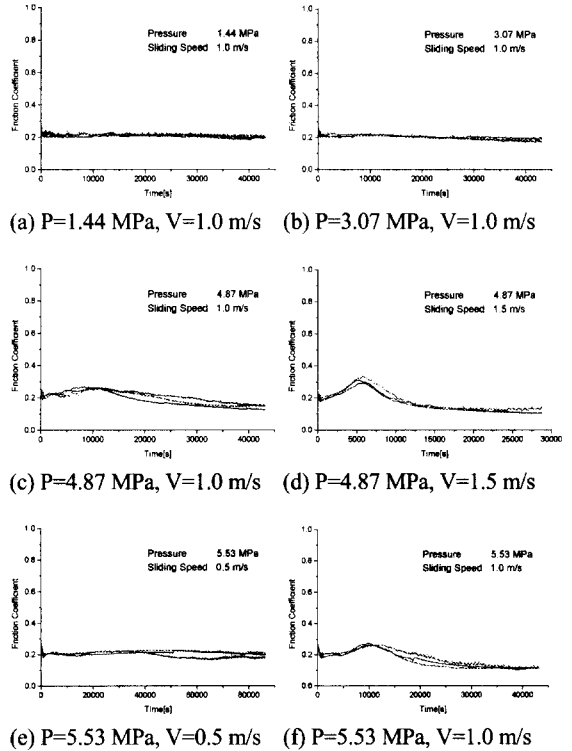


Fig. 2 Variation of friction coefficient with the time in Case 1 (R_{max}; 1.5 μm~3.5 μm, HRC; 31~34)

값이다. 따라서 최종 마찰 계수는 마찰 초기의 과도 응답 상태를 지나고 마찰 특성이 어느 정도 정상 상태에 접어들었을 때의 마찰 계수 값이다.

또한 모든 실험에서의 비마모량을 mm³/Nm 단위의 비마모율(또는 마모 지수, wear factor)로 나타내었다. 여기서 비마모율 K 는

$$K = \frac{V}{WL}$$

여기서 V : 마모 체적 [mm³]

W : 수직 하중 [N]

L : 미끄럼 거리 [m]

로 정의되며 본 논문에서는 비마모율로 마모율을 표시했다.

3.1.1 Case 1(R_{max}; 1.5 μm~3.5 μm, HRC; 31~34)

에서의 마찰 및 마모 거동

Fig. 2 의 (a), (b)에서 볼 수 있는 것과 같이 낮은 압력과 낮은 운전 속도에서는 마모 거리가 증가함에 따라 마찰 계수가 큰 변화없이 어느 정도 일정한 값을 유지한다. 그렇지만 Fig. 2 의 (c), (d), (f)

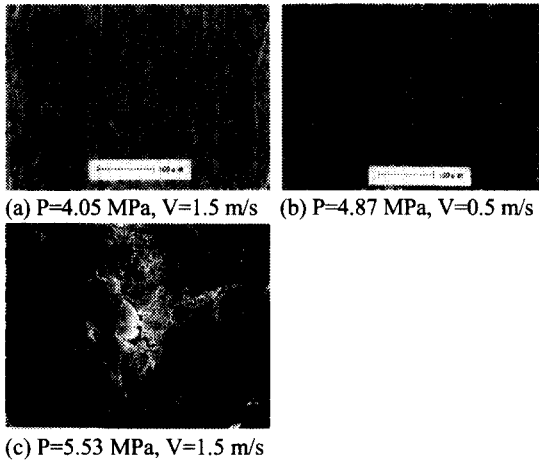


Fig. 3 Pin surfaces after experiment in Case 1

에서 보는 바와 같이 압력과 운전 속도가 증가하면서 마찰 계수가 증가했다가 다시 감소해서 정상 상태에 이르는 현상을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 2의 (e)처럼 압력이 높더라도 운전 속도가 낮은 경우에는 이러한 현상이 일어나지 않았다. 따라서 마찰 계수가 증가했다가 감소해서 정상 상태에 이르는 현상은 마찰면에 작용하는 압력 뿐만 아니라 속도에도 관계가 있음을 알 수 있다. 이러한 마찰 계수의 변화는 마모 거동과 관련하여 설명할 수 있다. 압력이 증가하면 디스크의 돌기들에 의해 눌러진 매트릭스 부분은 연삭 마모에 의해서 떨어져 나가고 반복 하중을 받는 섬유는 매트릭스와의 결합이 약해질 것이다.

Fig. 3의 (c)의 SEM 사진에서는 매트릭스 부분에 작은 균열들이 발생하고 섬유와 매트릭스의 결합이 떨어지는 현상을 볼 수 있다. 이 상태에서 속도가 커지게 되면 섬유는 단위 시간당 더 많은 반복 하중을 받게 되고, 마찰면에서는 많은 마찰 열까지 발생하게 되므로 재료의 열화에 의해서 섬유는 깨어지고 탈락되는 현상이 발생하게 된다. 탈락된 섬유는 두 마찰면 사이에서 부서지게 되는데, 부서진 마모 입자는 핀의 매트릭스 부분을 긁고 지나가고, 이는 결과적으로 연삭 마찰 성분으로 인한 마찰력의 증가로 나타나게 된다. 따라서 마찰 계수는 증가하게 된다. 이렇게 해서 잘게 부서진 탄소 입자들은 핀의 매트릭스 부분에 박히거나 연삭 흔적들 사이에 끼이게 되어 점차로 두터운 탄소막을 형성하게 될 것이다. 핀과 디스크 표면은 윤활 특성이 좋은 탄소막을 사이에 두고 서로 상대 운동을 하게 되므로 결과적으로 마찰 계수는 낮아지게 된다. Fig. 3의 (a), (b)는 광학 현미경으로 찍은 사진이다. Fig. 3의 (a)는 마찰 계

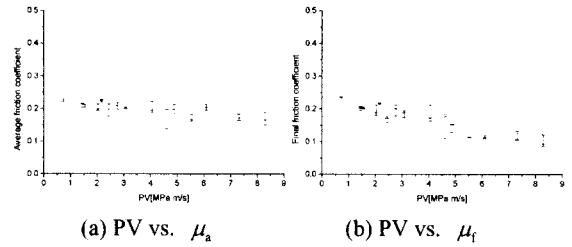


Fig. 4 PV vs. friction coefficient

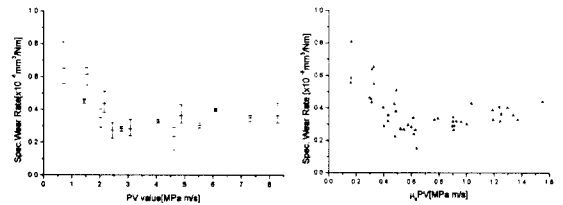


Fig. 5 Specific wear rate in case of Case 1

수가 증가했다가 감소하여 정상 상태에 이르는 경우의 핀 표면이며 핀 표면에 넓게 고운 가루같은 입자들이 밝은 회색으로 보인다. 이것들은 탄소 섬유들이 부서져서 가루가 된 것들이며 사진 왼쪽의 약간 어두운 회색 부분은 PEEK 표면이다. 물론 Fig. 3의 (b)와 같이 마찰 계수가 일정한 경향을 보이는 낮은 속도 혹은/그리고 낮은 압력에서도 균대균대 밝은 회색의 탄소막이 보이긴 하지만 전체의 일부에 지나지 않고 어두운 회색의 PEEK 표면이 많이 드러나 있음을 볼 수 있다. 흰색의 길다란 막대 모양이나 둥근 모양으로 보이는 것이 탄소 섬유이다.

Fig. 4는 PV 값에 따른 평균 마찰 계수와 최종 마찰 계수의 그래프이다. 여기서 PV 값은 압력과 속도의 곱으로 운전 조건을 나타낸다. 최종 마찰 계수는 PV 값이 증가함에 따라 조금씩 감소하는 경향을 띠는데, 이는 핀 표면에 형성되는 탄소막과 관계가 있다. 낮은 PV 값에서는 탄소막이 핀 표면의 일부에 지나지 않으나, PV 값이 증가하면서 아주 두터운 탄소막이 형성되는데, 이러한 탄소막과 마모 입자들에 의해 디스크에 형성된 전이막이 핀과 디스크의 직접 접촉을 막고 있으므로 마찰 계수가 감소하게 된다. 또한 탄소가 지니고 있는 자체 윤활 특성으로 인해 핀 표면에 두터운 탄소막이 형성되는 큰 PV 값에서 더욱 낮은 최종 마찰 계수 값을 나타내게 된다.

Fig. 5의 (a), (b)는 각각 PV 값에 따른 비마모율,

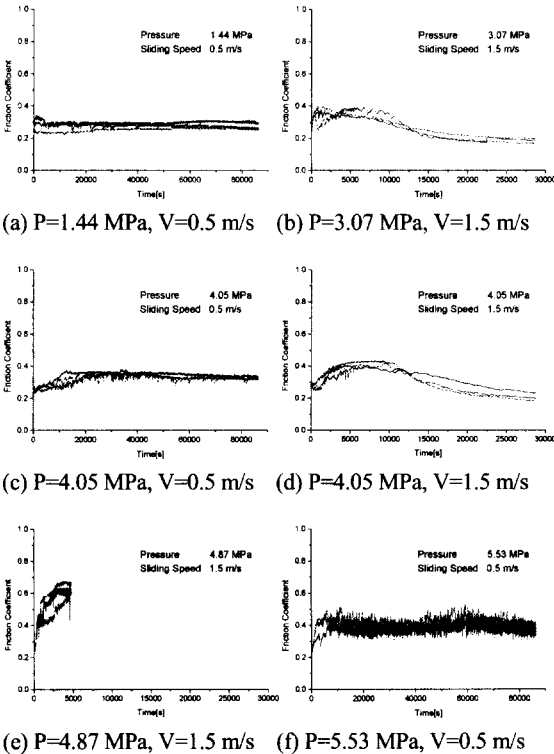


Fig. 6 Variation of friction coefficient with the time in Case 2 (R_{max} ; $0.3 \mu\text{m} \sim 0.8 \mu\text{m}$, HRC; 32~34)

$\mu_s PV$ 값에 따른 비마모율을 나타낸 그래프이다. 여기서, $\mu_s PV$ 값은 두 마찰면 사이에서 발생하는 열량에 비례하는 값이다. PV , $\mu_s PV$ 값이 커짐에 따라서 비마모율은 처음에는 감소하다가 나중에 서서히 증가하는 것을 볼 수 있다. PV , $\mu_s PV$ 값이 낮을 때는 실험 후 핀 표면에 연삭 흔적이 작은 걸로 보아 응착에 의한 마모가 우세한 것으로 판단되며, PV , $\mu_s PV$ 값이 증가함에 따라 심한 연삭 흔적을 나타내므로 연삭 마모가 우세한 걸로 판단되는데, 연삭에 의한 마모 증가율이 응착에 의한 마모 감소율보다 크지 않으므로 그래프의 왼쪽에서는 비마모율이 급격히 감소하는 부분이 나타나고, 오른쪽에서는 서서히 증가하는 부분이 나타나는 것으로 생각된다.

3.1.2 Case 2 (R_{max} ; $0.3 \mu\text{m} \sim 0.8 \mu\text{m}$, HRC; 32~34)에서의 마찰 및 마모 거동

Case 1에 비해서 표면 조도가 줄어든 Case 2의 실험에서는 디스크가 핀의 표면 돌기들을 긁고 지나가는 초기 연삭 상태가 어느 정도 진행되고

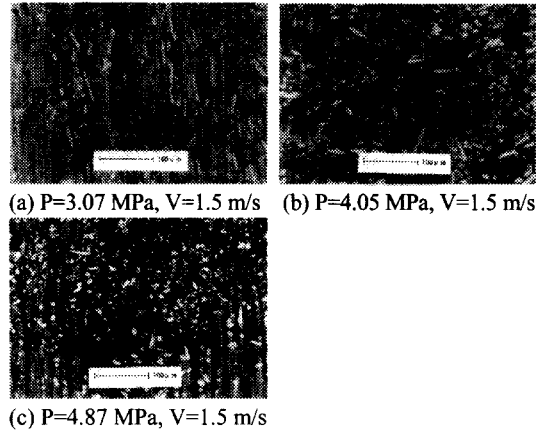


Fig. 7 Pin surfaces after experiment in Case 2

나면 핀과 디스크의 진실 접촉 면적은 Case 1보다 커질 것이다. 따라서 연삭 마찰 성분과 함께 응착 마찰 성분이 아주 커지게 될 것이고, 이로 인해 Case 1보다 큰 마찰 계수값을 나타내게 될 것이다. 또한 모든 속도 및 압력 조건에서 심한 소음과 함께 스틱 슬립(Stick-slip)현상이 일어났다. 속도 및 압력이 낮은 경우에는 심한 소음만이 발생했을 뿐 핀이 떨리는 현상은 없었으나, 속도 및 압력 조건이 커지면서 심한 진동이 발생했다. 특히 속도가 1.5 m/s에서 압력이 4.87 MPa, 5.53 MPa인 경우에는 진동이 심해서 실험을 계속할 수 없었다. Fig. 6의 (e)는 진동이 심해서 중간에 실험을 중단한 경우의 시간에 따른 마찰 계수의 변화를 나타낸 그래프로 마찰 계수의 크기가 0.6을 넘을 정도로 아주 높은 마찰 계수를 나타내었다. 이러한 스틱 슬립의 발생 또한 평균 마찰 계수 및 최종 마찰 계수가 커지는데 기여를 한 것으로 생각된다.

Fig. 6의 (b), (d)와 같이 마찰 계수가 증가했다가 떨어지는 경향을 보이는 경우에는 역시 Fig. 7의 (a), (b)에서 볼 수 있는 것과 같이 핀 표면에 탄소막이 형성되어 있거나 연삭 마모 흔적이 조금밖에 없는 아주 깨끗한 상태였다. Fig. 6의 (c)와 같이 진동이 심해서 실험을 중단한 경우의 핀 표면은 Fig. 7의 (c)처럼 탄소 함유가 아주 심하게 부서지고 매트릭스 부분에 심한 연삭 마모 흔적이 남아 있는 것을 볼 수 있다.

Case 2의 실험에서는 Fig. 6의 (f)와 같이 마찰 계수가 큰 폭을 가지고 심하게 변화하는 경우도 있었는데, 이런 경우에는 핀 뿐만 아니라 상대 마찰면인 디스크쪽에도 심한 마모 현상이 일어났고 핀의 표면에도 심각한 연삭 마모 흔적이 남아 있었다. 이러한 활발한 마모 현상 때문에 마찰 계수

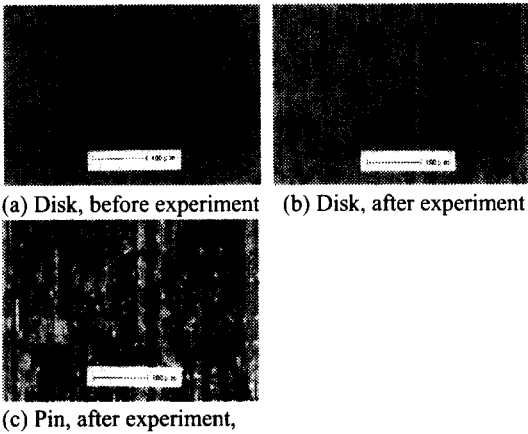


Fig. 8 Pin and disk surfaces when the severe abrasive wear occurred on the disk(P=5.53 MPa, V=0.5 m/s)

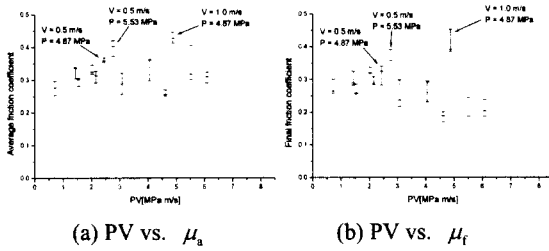


Fig. 9 PV vs. friction coefficient in Case 2

의 변화가 심한 것으로 판단된다.

Fig. 8의 (b)와 (c)는 이런 경우의 디스크 표면과 핀 표면의 광학 현미경 사진이다. Fig. 8의 (a)는 마모시키기 전의 디스크 표면으로서 표면에 건식 연마한 흔적이 방향성없이 나 있으나, 마모 실험 후의 디스크 표면에는 전이막의 형성도 거의 되지 않았고 표면에 있던 건식 연마 흔적이 없어지고 마찰 방향에 나란한 마모 흔적이 남아있는 사실에서부터 디스크 표면에서도 심각한 마모 현상이 일어났음을 알 수 있다. 핀 표면의 심한 연삭 마모 흔적에서는 다량의 철 마모 입자가 관찰되었다.

Fig. 9의 (a), (b)는 PV 값에 따른 평균 마찰 계수와 최종 마찰 계수의 그래프이다. 최종 마찰 계수는 PV 값이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이고 있으며, Fig. 9의 (a), (b)에서 화살표가 가르키는 부분은 Fig. 6의 (f)와 같이 마찰 계수가 심하게 변화하면서 디스크 및 핀의 표면에 Fig. 8의 (b), (c)처럼 심한 연삭 흔적을 남기는 경우들이며, 이때에는 평균 마찰 계수 및 최종 마찰 계수도 크게 나타났다.

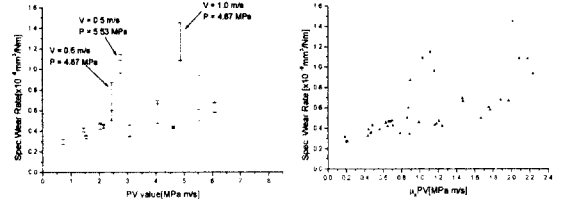
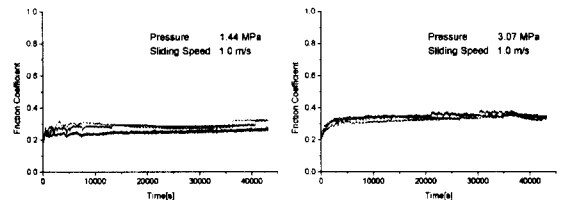
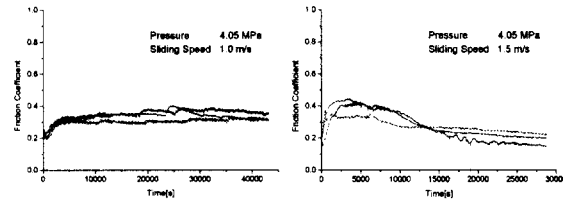


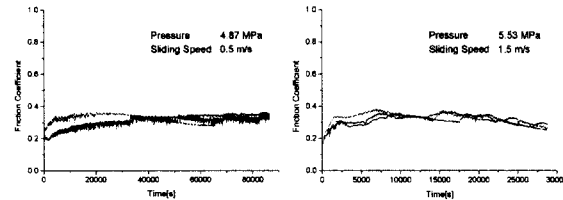
Fig. 10 Specific wear rate in Case 2



(a) P=1.44 MPa, V=1.0 m/s (b) P=3.07 MPa, V=1.0 m/s



(c) P=4.05 MPa, V=1.0 m/s (d) P=4.05 MPa, V=1.5 m/s



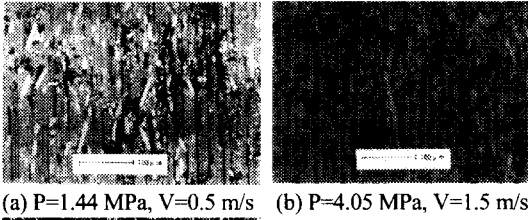
(e) P=4.87 MPa, V=0.5 m/s (f) P=5.53 MPa, V=1.5 m/s

Fig. 11 Variation of friction coefficient with the time in Case 3(R_{max} ; 1.2 μm~3.0 μm, HRC; 61~63)

Fig. 10의 (a), (b)는 각각 PV 값에 따른 비마모율, μ_a PV 값에 따른 비마모율을 나타낸 그래프이다. Fig. 10의 (a)에서 화살표가 가르키는 부분은 디스크 쪽에도 심한 마모 현상이 일어나는 것들의 비마모율이며, 다른 것들에 비해서 상당히 높은 비마모율을 보이고 있다.

3.1.3 Case 3(R_{max} ; 1.2 μm~3.0 μm, HRC; 61~63)에서의 마찰 및 마모 거동

Fig. 11은 시간에 따른 마찰 계수의 변화를 나타

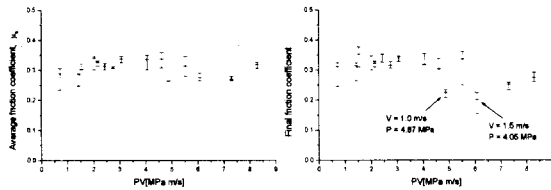


(a) P=1.44 MPa, V=0.5 m/s (b) P=4.05 MPa, V=1.5 m/s



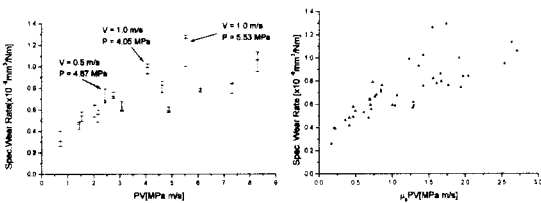
(c) P=5.53 MPa, V=1.5 m/s

Fig. 12 Pin surfaces after experiment in Case 3



(a) PV vs. μ_a (b) PV vs. μ_f

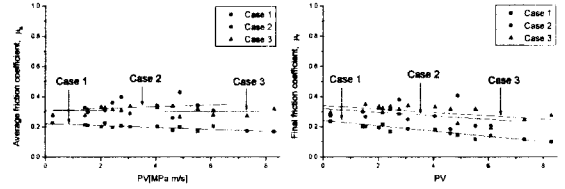
Fig. 13 PV vs friction coefficient in Case 3



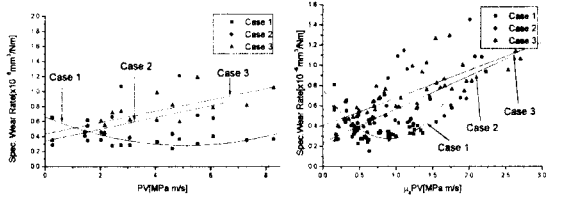
(a) PV vs. specific wear rate (b) μ_a PV vs. specific wear rate

Fig. 14 Specific wear rate in Case 3

낸 그래프인데, Case 1에 비해서 그 값이 높은 것을 알 수 있다. 이는 표면 경도가 높아짐에 따라서 탄소 섬유들의 균열과 탈락이 심해지고 그로 인한 연삭 마찰 및 마모 현상의 증가로 설명할 수 있다. Case 1에 비해서 경도가 증가한 Case 3에서는 낮은 PV 값에서도 탄소 섬유들의 심한 균열과 파괴가 일어났으며, 탈락된 탄소 섬유들은 핀 표면에 심한 연삭 마모 흔적을 남겼다. Case 1과 Case 2에서의 낮은 PV 값에서는 섬유들이 제 형태를 갖추고 있는데 반해서 Fig. 12의 (a)에서 볼 수 있는 것처럼 Case 3에서는 가장 낮은 PV 값에서도 섬유들이 잘게 부서지고 모재에서 떨어져 나와 PEEK 표면에 깊은 연삭 마모 흔적을 남겼음을 볼



(a) PV vs. μ_a (b) PV vs. μ_f



(c) PV vs. specific wear rate (d) μ_a PV vs. specific wear rate

Fig. 15 Comparison of the results of Case 1, Case 2 and Case 3

수 있다. 물론 Fig. 12의 (c)와 같이 PV 값이 증가하면 섬유의 파괴와 탈락, 연삭 마모 흔적은 더 심해진다. 이러한 상황에서는 핀 표면에 일부 탄소막이 형성되더라도 마모 입자에 의한 연삭 작용에 의해서 탄소막이 제거되게 될 것이다. 따라서 전체적으로 Case 1의 경우보다 높은 마찰 계수와 비마모율을 나타내게 된다.

그렇지만, Fig. 12의 (b)에서 보는 것처럼 어떤 경우에는 탄소막이 형성되어 있는 경우도 있었는데, 이 경우에는 Fig. 11의 (d)와 같이 비교적 낮은 최종 마찰 계수를 나타내었다. PV 값에 따른 최종 마찰 계수를 나타낸 그래프 Fig. 13의 (b)에서 화살표로 가르키는 부분이 핀 표면에 탄소막이 형성되는 경우인데 다른 경우보다 낮은 최종 마찰 계수를 나타내고 있는 것을 볼 수 있다.

Case 3에서도 디스크 면의 마모 트랙 일부에 전이막이 형성되지 않고 디스크 면이 마모된 경우가 있었다. PV 값에 따른 비마모율을 나타낸 그래프인 Fig. 14의 (a)에 화살표로 나타낸 곳들이 그런 경우인데, 비마모율이 다른 경우보다 다소 높게 나타났음을 볼 수 있다. PV, μ_a PV 값이 증가함에 따라 비마모율은 증가하는 경향을 보인다.

3.2 Case1, Case 2, Case 3의 비교

Fig. 15의 (a), (b), (c), (d)는 각각 PV 값에 따른 평균 마찰 계수, PV 값에 따른 최종 마찰 계수, PV 값에 따른 비마모율 그리고 μ_a PV 값에 따른 비마

모습을 나타낸 그래프이다. Fig. 15의 (a), (b), (c)는 각 실험 조건에서의 세 값을 평균하여 하나의 점으로 나타내고, 그 점들에 대해서 1 차 혹은 2 차 보간한 직선 혹은 곡선을 같이 나타내었다. Fig. 15의 (d)는 같은 실험 조건이라도 평균 마찰 계수가 다르므로 실험한 모든 점들을 그래프 상에 점으로 나타내고 직선 혹은 2 차 곡선으로 보간하여 같이 나타내었다. 그래프에서 볼 수 있듯이 Case 2 와 Case 3 의 경우에 평균 마찰 계수, 최종 마찰 계수 및 비마모율이 Case 1 보다 높게 나타났는데, 이는 Case 2 의 경우에는 진실 접촉 면적의 증가로 인한 응착 마찰 및 응착 마모 성분의 증가와 스틱 슬립 현상 때문인 것으로 생각되며, Case 3 의 경우에는 높은 상대 마찰면의 경도 때문에 발생하는 탄소 섬유에 빠른 균열과 탈락, 탈락된 탄소 섬유에 의한 심한 연삭 마찰 및 연삭 마모 때문인 것으로 생각된다.

4. 결론

탄소 섬유 보강 폴리에테르에테르케톤의 마찰 및 마모 거동을 알아보기 위해서 상대 마찰면인 SCM440(AISI 4140)디스크의 표면 조도 및 표면 경도를 변화시켜가며 핀-온-디스크형 실험 장치로 마모 실험을 수행하였다. 실험 조건 및 상대 디스크면의 상태는 전술한 바와 같으며 SCM440(AISI 4140)디스크의 표면 조건은 다음과 같이 세가지로 주었다. I. $R_{max} : 1.5 \mu\text{m} \sim 3.5 \mu\text{m}$, HRC:31 ~ 34, II. $R_{max} : 0.3 \mu\text{m} \sim 0.8 \mu\text{m}$, HRC:32 ~ 34, III. $R_{max} : 1.2 \mu\text{m} \sim 3.0 \mu\text{m}$, HRC:61 ~ 63. 각각의 디스크 표면 조건에서 마찰면에 작용하는 압력을 1.44 MPa, 3.07 MPa, 4.05 MPa, 4.87 MPa, 5.53 MPa 로, 각 압력에 대하여 미끄럼 속도를 0.5 m/s, 1.0 m/s, 1.5 m/s 로 변화시켜가며 43.2 km 를 마찰시켰을 때의 마찰 계수와 마모량을 측정하고 표면 상태를 관찰함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 최종 마찰 계수의 크기는 상대 디스크 마찰면의 표면 조건이 I 인 경우에는 0.1 ~ 0.24, II 인 경우에는 0.19 ~ 0.41, III 인 경우에는 0.19 ~ 0.35 였으며, I 인 경우보다 II, III 의 경우가 그 값이 높았는데, 이는 낮은 표면 조도의 디스크에서는 응착 마찰 성분의 증가와 스틱 슬립의 발생이, 높은 경도의 디스크에서는 빠른 탄소 섬유의 파괴와 탈락 그리고 그 입자에 의한 연삭 마찰 성분의 증가가 그 원인으로 생각된다.

(2) 비마모율의 크기는 $0.15 \times 10^{-6} \sim 1.45 \times 10^{-6}$ [mm^3/Nm] 정도였으며, 세 경우의 실험에서, PV 값이 증가함에 따라(I의 경우에는 어느 PV 값을 넘어선 후) CF/PEEK 핀의 비마모율은 증가하며, 그로 인해 핀의 표면에 형성된 탄소막의 영향으로 PV 값이 증가함에 따라 최종 마찰 계수는 감소한다.

(3) 상대 디스크 마찰면의 표면 조건이 II 인 경우에는 모든 하중 및 속도 조건에서 스틱 슬립과 함께 심한 소음이 발생했으며 마찰 및 마모 특성이 I 의 경우보다 좋지 않았다. 특히 높은 PV 에서는 심한 떨림 현상도 발생했는데, 실제 부품에의 응용에 있어서도 상대 마찰면의 표면 조도가 너무 작은 경우는 피해야 할 것으로 생각된다.

(4) 상대 디스크 마찰면의 표면 조건이 III 인 경우에는 탄소 섬유의 빠른 균열과 파괴 및 탈락이 일어났으며, 탈락한 섬유들로 인한 심한 연삭 마모 현상 때문에 마찰 및 마모 특성이 I 의 경우보다 나쁘게 나타났다. 이러한 사실에서부터 상대 마찰면 재료의 표면 경도가 탄소 섬유의 파괴에 영향을 미치고, CF/PEEK 재료 전체의 마찰 및 마모 특성에도 크게 영향을 미친다고 유추할 수 있다.

(5) 상대 디스크 마찰면의 마찰 트랙에 전이막이 형성되지 않은 경우도 있었는데, 이 경우에는 핀 뿐만 아니라 디스크 표면에도 심한 연삭 흔적이 남아있었으며 핀의 비마모율도 높고 마찰 계수도 심하게 진동했다. 따라서 디스크 표면에 형성된 전이막은 마찰 계수 및 비마모율을 낮추는 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 또한 핀 표면에 탄소막이 형성되었을 때는 그렇지 않은 경우보다 마찰 계수가 낮았는데, 이로부터 핀 표면에 형성된 탄소막은 마찰 계수를 낮추는 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

참고문헌

- (1) 藤重昇永, 1989, "엔지니어링 플라스틱," 兼知社.
- (2) 中野一, 1992, "플라스틱 원재료 입문," 弘益齋 (1992).
- (3) H. Dominghaus, 1988, "Plastics for engineers: Materials, Properties, Applications," Hanser.
- (4) 심현해, 1991, "일방향 고탄성 탄소 섬유 보강 에폭시 복합 재료의 마찰 및 마모 메커니즘," 한국과학기술원 박사학위논문.