

PTFE-폴리이미드 복합 재료의 마찰과 마모에 대한 성분비와 온도의 영향

심현해 · 권오관 · 이규한 · 김병환

한국과학기술연구원

Effects of Composition Ratio and Temperature on Friction and Wear of PTFE-Polyimide Composites

Hyun-Hae Shim, Oh-Kwan Kwon, Kyoo-Han Lee and Byung-Hwan Kim

Korea Institute of Science and Technology

Abstract—Present study was undertaken to investigate the effects of composition ratio and temperature on the friction and wear of PTFE-polyimide composites under the atmosphere of nitrogen gas. The load range was 0.62-3.46 MPa, and the temperature range was room temperature and 200°C. To mention some of the notable results, friction coefficient of PTFE 100% varied relatively little within the given load and temperature ranges. Polyimide 100% showed the lowest friction coefficient of 0.06 at 200°C among all the experiments. PTFE 80%-polyimide 20% showed the lowest wear factors on the whole. Friction coefficient of PTFE 20%-polyimide 80% varied from the highest 0.35 to the lowest 0.09 among all the materials at room temperature, and showed almost the same lowest values with polyimide 100% at 200°C. Suggestion of friction and wear mechanisms of the materials was tried to explain the observed phenomena including above mentioned results.

Key words—Polymer Composites, PTFE Composites, Polyimide, Oilless Bearing, Self-Lubricating Composites, Sliding Friction, Friction Temperature, Wear, Friction Coefficient.

1. 서 론

본 연구는 VM(Vuilleumier) 열펌프[1]-[2]의 씰링 시스템[3]-[4]과 관련하여 시행된 것이다. VM 열펌프는 보편적인 냉동 냉방 사이클에서 사용되는 CFC 또는 그의 대체 냉매와는 달리 헬륨과 같은 가벼운 기체를 작동 유체로 사용하며 작동 메커니즘 상 두 개의 피스톤이 왕복 운동하는 구조를 갖고 있다. 이 피스톤들과 실린더들과의 틈새를 통한 가스 누설을 저감하기 위하여 피스톤 링들이 필요한데 이들의 윤활을 위하여 오일을 사용하면 내부가 오염되어 효율이 급격히 떨어지므로 링 재료에는 자체 윤활 고체 베어링 재료를 사용하여야 한다. 이 재료는 저마찰과 내마모성이 동시에 요구된다. 본 논문은 이와 같은

배경하에서 다양한 자체 윤활 베어링 재료들 중 PTFE(polytetrafluoroethylene)-폴리이미드(polyimide) 복합 재료를 선정하여 이 재료의 마찰과 마모 특성을 좀더 집중적으로 실험 연구한 결과의 주요 내용이다.

PTFE는 마찰 계수가 낮지만 강도가 낮아 마모율이 높다. 이 재료에 강도가 높은 세라믹스, 금속 등의 재료를 충전하면 내마모성이 상승할 수 있다[5]-[6]. 충전 재료의 강도가 세라믹스, 금속 등과 같이 높으면 상대 마찰면을 손상시킬 위험성이 높아지므로, 비교적 강도가 낮은 고분자 재료이지만 고분자 중에서는 강도와 내열성이 높은 폴리이미드를 충전재로 사용함으로써 상대 마찰면을 포함한 양 마찰면의 마모율을 낮출 수 있는 것이 PTFE-폴리이미드 복합 재료의 장점이 될 수 있다[7].

PTFE-폴리이미드 복합 재료에서 가장 기본적인 변수의 하나는 성분비일 것이다. 강도와 내열성이 높기 때문에 강도 유지와 하중 지지 작용을 하여 내마모성을 높여 주는 폴리이미드 성분은 어느 정도의 비율이 필요할 것인지, 낮고 안정적인 마찰 계수를 위하여 필요한 것으로 알려진 PTFE의 비율은 어느 정도가 필요하지 등이 커다란 관심의 대상이라 할 수 있다. 또한, 모든 성분이 고분자 재료이므로 마찰면의 온도가 마찰과 마모에 커다란 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 PTFE-폴리이미드의 성분비와 마찰면의 온도가 마찰과 마모에 미치는 영향을 실험을 통하여 조사하고 고찰하였다.

VM 열펌프의 내부는 불활성 기체 하에서 작동되므로 본 연구의 마찰 실험은 질소 가스 분위기에서 시행되었다.

2. 실험

2-1. 실험 장치

본 연구의 실험에서는 버튼-온-플레이트 타입의 왕복동 시험기를 사용하였다. Fig. 1은 주요부의 모형도이다. 플레이트 시편은 플레이트 시편 홀더에 고정되며, 버튼 시편은 왕복 운동을 하는 로드와 한 쪽 끝에 고정되어 플레이트 시편 위에서 왕복 운동한다. 하중은, 왕복동 로드와 버튼 시편 고정부 상부에서 수직 하중을 주는데, 그 접촉부에는 롤러 베어링을 씌워서 하중부는 왕복 운동하지 않으면서 하중이 시편에 가해지도록 되어 있다.

마찰 실험은 박스 형태의 용기 내에서 시행되었다. 이 용기는 완전히 밀폐되어 있지는 않지만 가스 주입구를 통하여 특정 가스를 대기압보다 약간 높은 압력(0.005 기압 정도)으로 주입시키면 용기 내부의 가스가 용기의 미소한 틈새로 새어나가게 되며 용기 내부는 그 특정 가스로 항상 채워진 상태가 되므로 특정 가스 분위기에서의 마찰 실험을 행할 수 있다.

마찰 온도 제어를 위하여는, 니크롬선 전기 저항열로 가열되는 플레이트 시편 홀더 위에 놓인 플레이트 시편의 온도를 피드 백 함으로써, 플레이트 시편의 온도를 일정하게 유지하였다.

2-2. 시편

본 연구에서 사용된 버튼 시편의 재료는 PTFE

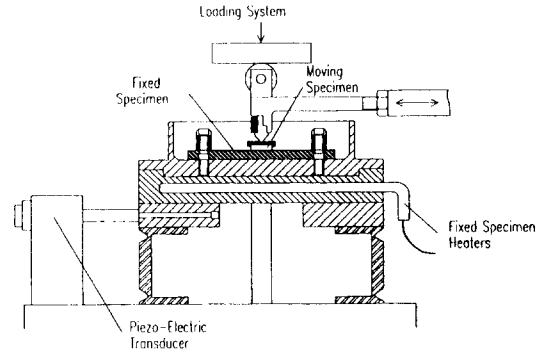


Fig. 1. Schematic diagram of the high temperature reciprocating friction and wear test.

100%, PTFE 80%-폴리이미드 20%, PTFE 20%-폴리이미드 80%, 폴리이미드 100%의 네 가지이었다. 이 재료들은 국내의 제조 업체에서 구입하였는데, 이들의 제조 방법은 각 성분의 분말을 무게 함량 비율에 따라 고르게 섞어서 다이에 넣고 가압 가열하는 것으로 알려져 있다. 가압 압력과 가열 온도는 성분 비율에 따라 약간씩 다른데, 가압 압력은 250-800 기압 정도, 가열 온도는 340-370°C 정도이다. 폴리이미드 분말의 크기는 1250 메쉬로서 10 μm 이하이다.

버튼 시편은 원판형으로서 직경은 9 mm, 두께는 3 mm이었다. 플레이트 시편의 재료는 스테인레스 강인 SUS 304이었으며, 크기는 마찰 방향 길이 58 mm, 그 직각 방향 길이 38 mm, 두께 4 mm이었다. 마찰면들은 샌드 페이퍼에 의하여 습식 연마하였고, 최종 연마는 800 그릿으로 하였으며, 연마 후의 플레이트 시편의 표면 조도는 Ra 값이 0.05 μm 정도이었다. 실험 전 시편들은 헥세인으로 기름기를 제거하였다.

2-3. 실험 조건

플레이트 시편의 온도는 상온과 200°C로 하였다. 상온에서는 온도 조절을 하지 않았으므로 마찰열에 의하여 온도가 자연 증가하였다.

수직 하중은 40, 80, 160, 220 N을 가하였으며, 이에 따라 버튼 시편에 작용하는 평균 면압은 각각 0.62, 1.26, 2.52, 3.46 MPa이었다.

본 연구는 작동 분위기 가스가 불활성 가스인 곳에 의 적용과 연계되어 있었으므로 마찰 실험 분위기는 불활성 가스인 질소를 사용하였다.

본 실험에서는 왕복 운동의 주기를 10 Hz로 하였다. 왕복 운동의 행정은 15 mm이므로 마찰 속도는 행

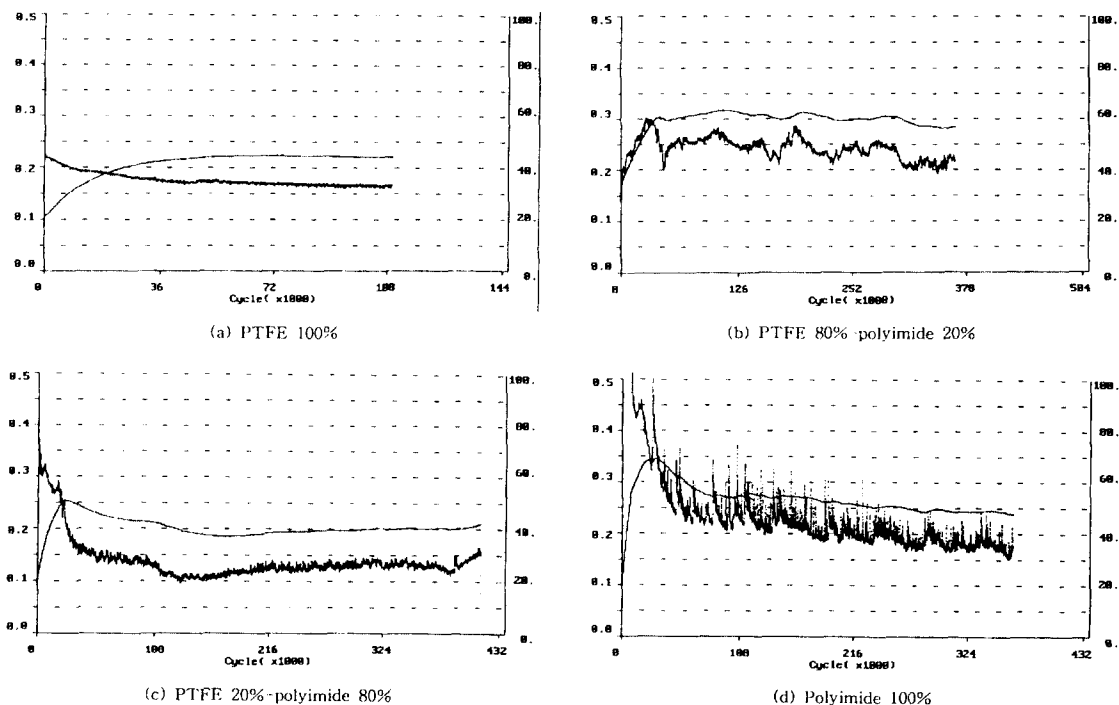


Fig. 2. Transient change of friction coefficients of the test materials at load=160 N with no heating.

정의 양단에서는 0이고 중심을 지날 때의 최대 속도는 0.47 m/sec 정도이었다.

2-4. 측정 인자

마찰 실험시 실시간에 측정된 사항들은 마찰력과 플레이트의 온도이었다. 마모량은 실험 전후의 버튼 시편의 무게를 0.0001 g의 정밀도를 갖는 전자 저울로 측정하여 산출하였다. 마모 지수는 마모된 부피를 마찰 거리와 수직 하중으로 나누어 산출하였다.

실험 후에는 버튼과 플레이트 시편들의 마찰면과 마찰면 주위에 흩어진 마모 입자들을 광학 현미경을 사용하여 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 2 (a), (b), (c), (d)는 상온 160 N 수직 하중의 실험에서 각각 PTFE 100%, PTFE 80%-폴리이미드 20%, PTFE 20%-폴리이미드 80%, 폴리이미드 100%의 마찰 시간에 따르는 마찰 계수와 플레이트의 온도 변화를 나타내고 있다.



Fig. 3. Micrograph of the wear surface of stainless steel plate slid against the polyimide 100% with normal load 80 N and no heating (horizontal width represents about 250 μ m). rotational speed.

폴리이미드 100%는 초기 길들이기가 상당히 오래 걸렸으며, 이 기간에는 스틱-슬립과 함께 마찰 계수도 매우 높아 0.7 이상으로 증가하기도 하였다. 상당히 오랜 마찰 후에 마찰 계수가 낮아지기 시작하여 정상 상태의 낮은 마찰 계수를 얻을 수 있었다. 또한, Fig.

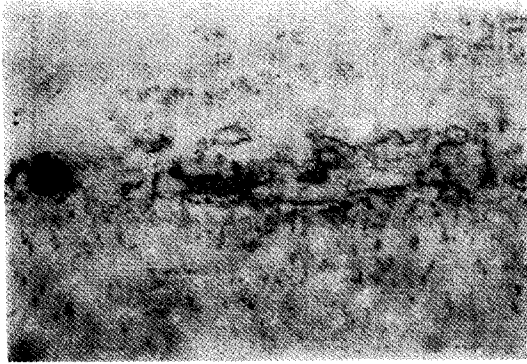


Fig. 4. Micrograph of the transfer film of polyimide 100% button specimen with normal load 80 N and no heating (horizontal width represents about 250 μm).

3에 나타난 바와 같이 플레이트 마찰면의 마찰 실험 전의 무방향성 연마 흔적이 사라지고 부분적으로 마찰 방향으로 홈들이 파였는데 이는 금속 마찰면이 마모되었음을 나타낸다. 깊은 홈들은 그 깊이가 $2\mu\text{m}$ 정도이었다. 버튼 시편 마찰면은, 육안 관찰에 의하면, 매끄럽고 윤이 났으며 마찰 방향으로 다수의 얇은 홈들이 남아 있었다. 이 마찰면을 현미경으로 관찰하면 Fig. 4에 나타난 바와 같이 마모막으로 덮여 있었는데 대부분은 그림의 상하부와 같이 균일했으며 그림의 중심부와 같이 불균일한 곳도 있었다.

Fig. 5는 왕복동 마찰 실험에서 왕복 사이클중 발생하는 마찰력의 예이다. 그림에서 실선은 폴리이미드 100%, 점선은 PTFE 100%의 경우로서 마찰 초기에 잡아낸 데이터이다. 폴리이미드의 경우는 행정의 양단의 속도 제로점에서 속도를 갖기 시작할 때에 마찰력이 순간적으로 높은 피크를 갖는다. 이와 같은 스틱-슬립이 일어나는 과정을 설명하면, 정지 상태에서 응착력이 큰 재료가 마찰 운동이 시작되면 실접촉점에서 순간 마찰 온도[8]의 상승 등으로 인하여 재료의 전단 응력이 낮아져서 마찰 계수가 낮아지는 것이라고 볼 수 있겠다.

폴리이미드 100%가 초기에 스틱-슬립과 함께 마찰 계수가 높고 오랜 마찰 후에 마찰 계수가 낮아져 정상 상태에 이르는 과정은 다음과 같이 설명할 수 있다. 초기의 마찰에서 버튼 시편의 마찰면에 마모막이 충분히 형성되지 않아 있을 때에 폴리이미드 입자가 상대 시편인 스테인레스강과 직접적으로 접촉하면 Fig. 3에 나타난 바와 같이 스테인레스 강 마찰면에 마

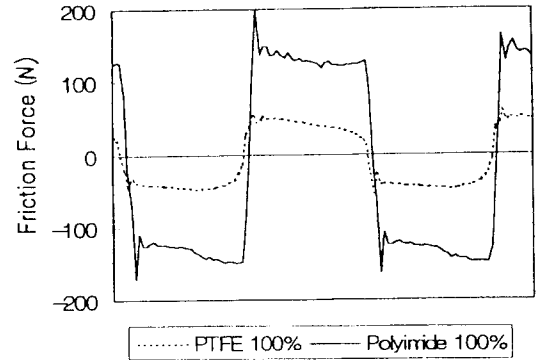


Fig. 5. Friction force change of PTFE 100% and polyimide 100% during the reciprocating cycle.

모 또는 소성 변형을 일으킬 정도로 폴리이미드 입자가 경한 것으로 보이며, 플레이트 금속면 또는 금속면 위에 형성되기 시작한 마모 이착막도 연삭 마모되기 쉬우므로 마찰 계수 중에 쟁기질(ploughing) 마찰 성분이 포함되어 있을 것이고, 또한, 마모막이 충분히 형성되지 않아서 폴리이미드와 상대마찰면과의 응착 마찰력이 크기 때문에 초기의 마찰 계수가 크게 나타날 것으로 보인다. 마모막이 형성되는 과정을 보면, 폴리이미드는 강성이 높기 때문에 실접촉면에서의 압력이 높아서 높은 마찰열과 함께 순간 마찰 온도 상승이 높을 것이고, 이에 따라 실접촉부의 폴리이미드의 전단 응력이 낮아질 것이고 전단 유동에 의하여 마모 이착막이 생성될 것이며 실접촉점은 다른 곳으로 이동할 것이다. 새로운 실접촉점의 초기에는 순간 마찰 온도가 아직 상승하지 않은 상태이어서 전단 저항이 상승할 것이지만 앞의 과정을 반복할 것이다. 실접촉점들이 이동하면, 한 번 실접촉하였던 부분도 수 차에 걸쳐 반복하여 실접촉하면서 입자들의 모서리들이 무디어지고, 폴리이미드가 변형 또는 유동되어 입자와 입자 사이를 메우고, 나아가서 마찰면 표면에 전반적으로 마모막이 형성되고 점점 두꺼워질 것이다. 이와 병행하여 상대마찰면에도 마모이착막이 형성될 것이다. 마모막이 형성된 후 마찰이 계속되면 높은 마찰 온도에 계속 노출되어 실접촉되는 마모막의 폴리이미드가 탄화됨으로써 응착 마찰 성분이 낮아져 마찰 계수가 낮아지는 것으로 보인다. 탄화된 마모막은 반복되는 마찰에 의하여 피로 파단되어 Fig. 6과 같은 마모 입자로 떨어져나올 것이다. 폴리이미드를 공기 중에서 마찰 실험한 예에 따르면 마찰 계수와 마모 지수



Fig. 6. Micrograph of the wear debris from the polyimide 100% test with normal load 220 N and no heating (horizontal width represents about 250 μ m).

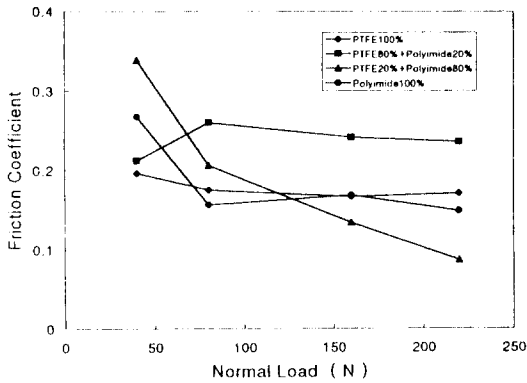


Fig. 7. Steady state friction coefficients at different normal loads with no heating.

가 수 배 가까이 높게 나타났는데 그 이유는 마모막이 고온의 순간 마찰 온도 하에서 공기 중의 산소에 의하여 산화함으로써 쉽게 분해 또는 열화되기 때문인 것으로 사료된다.

PTFE 성분이 있는 재료들은, Fig. 2 (a), (b), (c)에 나타난 바와 같이, Fig. 2 (d)의 폴리이미드 100%에 비하여 마찰 계수의 변동이 심하지 않았다. PTFE 성분이 많은 재료일수록 버튼과 플레이트 시편의 마찰 표면에 마모이착막이 수월하게 생성되고 상대면에 손상을 주거나 스틱-슬립이 일어나지 않으며 마찰 초기에 커다란 변동이 없이 정상 상태에 이르는 것으로 보여진다.

Fig. 7과 8은 각각 상온과 200°C에서 수직 하중의 변화에 따른 각 재료들의 정상 상태의 마찰 계수들을 나타내고 있다. 그리고, Fig. 9는 PTFE 100%의 상온과

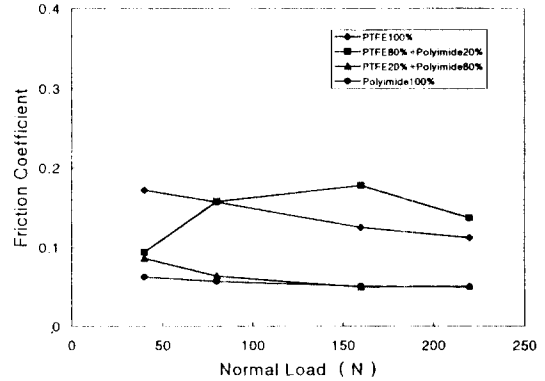


Fig. 8. Steady state friction coefficients at different normal loads with 200°C heating.

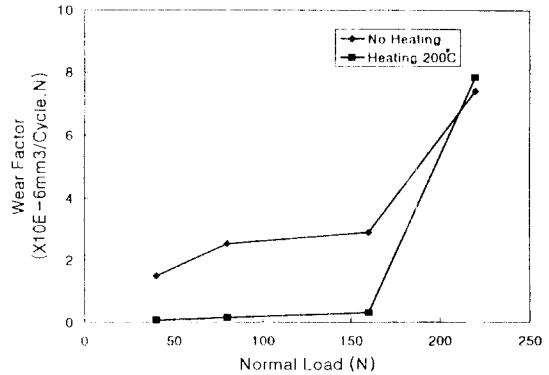


Fig. 9. Wear factors of PTFE 100% at different normal loads.

200°C, Fig. 10과 11은 각각 그 밖의 재료들의 상온과 200°C에서의 수직 하중의 변화에 따른 마모 지수들을 나타내고 있다. PTFE는 다른 재료들에 비하여 마모 지수가 높은 편이므로 별도의 그래프로 나타내었다.

PTFE 100%의 마찰 계수를 보면, 상온과 200°C의 각 온도에서 하중이 증가함에 따라 크기가 조금씩 감소하는데, 상온에서는 평균적으로 0.18 정도이고 200°C에서는 0.14 정도로서 온도 증가에 따라 마찰 계수가 조금 낮아졌다. 또한, PTFE 100%의 마모 지수의 특징을 보면, 우선, 220 N 정도에서는 상온과 200°C 공히 마모 지수가 급격히 증가하였으며, 둘째, 180 N 이하에서는 200°C의 마모 지수가 상온의 경우보다 낮았다. PTFE가 폴리이미드에 비하여 온도의 변화에 따른 마찰 계수의 변화가 크지 않고 전반적인 조건들에서 고르게 낮은 이유는, 알려져 있다시피,

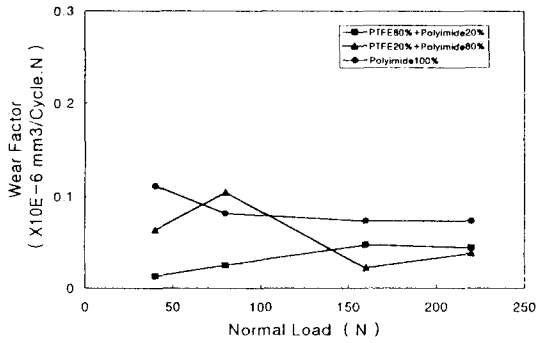


Fig. 10. Wear factors of polyimide containing materials at different normal loads with no heating.

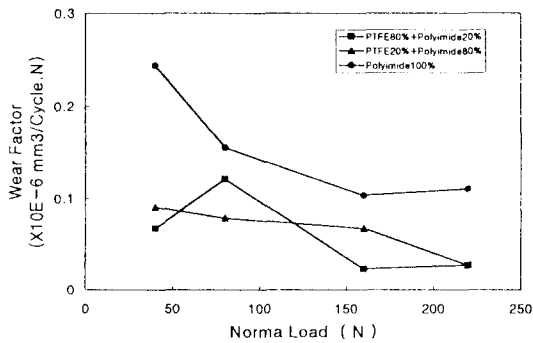


Fig. 11. Wear factors of polyimide containing materials at different normal loads with 200°C heating.

PTFE의 분자들 간에 응착력과 전단 저항이 낮은 고유 특성에 기인하는 것으로 보인다[1]. 한편, 마찰 트랙 밖으로 떨어져 나온 마모물의 형상은 Fig. 12와 같이 얇은 막과 같은 형상인데, 그 생성 거동을 설명하여 보면, PTFE는 강성이 낮아서 실접촉 면적이 넓고, 본 실험의 경우는 왕복동 마찰을 하므로 행정의 중간에는 속도가 높아 순간 마찰 온도도 높으므로 일단 넓은 면적의 표면이 유동되어 느슨해 진 후 행정의 양단에서 정지할 때는 정지 마찰로서 마찰력이 가장 순간적이고 양 마찰 표면은 서로 응착하므로 표면보다 조금 더 깊은 곳이 전단 항복되어 얇은 막으로 떨어져 나오는 것으로 보인다. 200°C의 180 N 이하의 경우는 마찰면의 온도가 높아서 마찰 표면에서의 전단 응력이 낮아 마찰 계수도 낮고 표면 또는 표면 가까이에서 전단이 일어나기 때문에 마모 지수가 낮은 것으로 보인다. 220 N에서는 상온과 200°C 모두 마모 지수가 급증하는데 이유는 접촉 압축 응력이 PTFE의 냉간

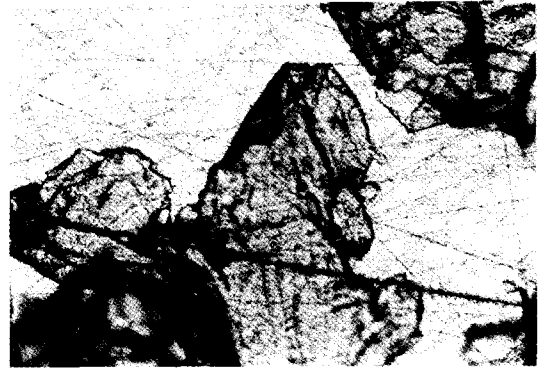


Fig. 12. Micrograph of the wear debris from PTFE 100% with normal load 220 N and no heating (horizontal width represents about 2 mm).

유동 응력에 달하기 때문에 마찰 표면의 마찰열을 받아 가속화되어 대규모로 유동되는 것이 마모가 급증의 주된 원인으로 보인다.

폴리이미드 100%의 정상 상태의 마찰 계수를 보면, 상온에서는 저하중인 40 N에서 0.27 정도로 비교적 큰 편이고 80 N 이상에서는 0.16 정도로서 큰 변화가 없었으며, 200°C에서는 모든 재료들 중 가장 낮은 값인 0.06 정도로서 하중에 따르는 변화도 거의 없었다. 고온에서는 폴리이미드가 PTFE에 비하여 마찰 계수가 더 낮은 점은 주목할 일이다. 마모 지수는 PTFE 100%를 제외한 다른 두 복합 재료들에 비해 두 세 배 정도 높은 편이었다. 폴리이미드 100%의 마찰 계수를 보면, 상온에서 하중 80 N 이상과 200°C의 전체 하중 범위에서는 낮았으며 하중에 따라서도 거의 변화가 없었는데, 그 이유를 생각해 보자. 정상 상태에 이르러 마모막이 충분히 두껍게 형성되어 있을지라도 강성이 높아서 실접촉 면적이 적어 실접촉 압력이 평균 마찰면 온도에 해당하는 소성 유동 압력 정도를 가질 것이고 실접촉 면적도 하중에 비례할 것이다. 실접촉 점에서의 순간 마찰 온도가 높아지면 유동 전단 응력이 낮아져 그 접촉점은 하중 지지 능력을 상실하여 다른 곳으로 실접촉점이 이동할 것이다. 결국 주어진 평균 마찰면 온도의 유동 전단 응력과 하중에 비례한 마찰력이 발생하기 때문에 마찰 계수가 거의 일정하게 유지되는 것으로 보인다. 또한, 앞에서도 언급하였듯이, 폴리이미드는 응착 마찰이 크므로 실접촉점들이 높은 순간 마찰 온도에 계속 노출되어 마모막의 폴리이미드가 탄화됨으로써 마찰 특성이 변하여 마찰 계

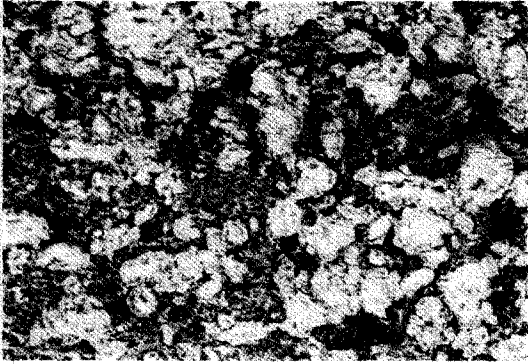


Fig. 13. Micrograph of the wear surface of PTFE 80%-polyimide 20% button specimen with normal load 80 N and no heating (horizontal width represents about 250 μ m).

수가 낮아지는 것으로 보인다. 상온의 40 N 하중에서 마찰 계수가 높았는데, 현미경 관찰에 의하면 다른 조건의 경우들과 다른 점은 상대 마찰면에 마모이착막이 매우 얇게 형성되어 있었으며 부분적으로 마모막이 마찰에 의하여 제거되어 금속면이 노출된 상태를 보였는데 이는 이 마찰 조건에서는 하중이 낮고 따라서 마찰 온도가 낮아 폴리이미드의 강도가 높고 유동성이 비교적 낮기 때문으로 보인다.

PTFE 80%-폴리이미드 20%를 보면 대체로 마찰 계수는 다른 재료에 비하여 높은 편이었고, 마모 지수는 낮은 편이었다. Fig. 13은 상온 220 N 하중의 마찰 실험 후의 버튼 시편 마찰면의 현미경 사진을 나타내는데, 흰 입자들이 폴리이미드 입자들로서 이들이 하중을 지지하는 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 이 복합 재료가 PTFE 100% 보다 전반적으로 마찰 계수가 높은 이유는, 폴리이미드 입자들이 마모막의 유동에 저항을 주고, 마모이착막에 섞여 있는 폴리이미드의 작은 마모 입자들이 순수 PTFE의 경우 보다 마모막의 전단 흐름을 방해하기 때문인 것으로 사료된다. 마모 지수가 가장 낮은 편인 것으로 보아 낮은 성분 비율의 폴리이미드로도 충분히 하중 지지 역할을 하고 있으며 PTFE가 주 성분인 마모이착막이 폴리이미드와 상대마찰면과의 직접적인 접촉을 방지하고 있음을 알 수 있다.

PTFE 20%-폴리이미드 80%의 마찰 계수를 보면, 상온에서는 40 N의 하중에서 다른 재료들에 비하여 가장 높은 0.34이고 220 N에서 가장 낮은 0.09로써 하중의 증가에 따라 커다란 감소를 나타내었다. 반면,

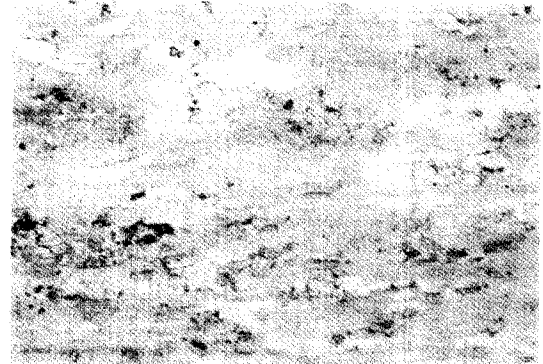


Fig. 14. Micrograph of the wear surface of PTFE 20%-polyimide 80% button specimen with normal load 80 N and no heating (horizontal width represents about 250 μ m).

200°C에서는 폴리이미드 100%와 거의 같게 매우 낮은 값을 나타냈으며 하중에 따른 변화도 거의 없었다. 마모 지수는 하중에 따른 변동이 있는 편이었는데 대체로 폴리이미드 100% 보다는 낮고 PTFE 80%-폴리이미드 20%와 비슷한 수준이었다. 마찰 계수에 있어서, 상온에서는 PTFE가 영향을 미친 것 같으며 200°C에서는 PTFE가 영향을 비교적 적게 미친 것으로 보인다. Fig. 14는 버튼 시편의 마찰면의 예를 보이고 있다. 상온의 경우를 보면, 40 N에서는 PTFE가 마모막을 형성하여 마찰을 낮추기에는 양적으로 부족한 것으로 보이는 한편, 상온에서 응착 마찰이 높은 순수한 폴리이미드가 순간 마찰 온도가 높게 나타날 수 있는 여지를 일종의 불순물로 섞여 있는 PTFE가 방해함으로써 순간 마찰 온도의 상승이 이루어지지 않아 전단 유동 저항이 낮게 되는 작용이 일어나지 않으므로써 마찰 계수가 높게 나타난 것으로 사료된다. 하중이 증가함에 따라 마찰열과 순간 마찰 온도가 증가하여 폴리이미드가 전단 유동 저항이 낮아져 마찰 계수가 낮아지고 220 N의 하중과 200°C의 고온에서는 마찰면 평균 온도와 순간 마찰 온도가 충분히 높고 PTFE와 폴리이미드 성분들이 주어진 실험촉부의 마찰 상황에서 각각 마찰을 낮추는 역할을 함으로써 마찰 계수가 가장 낮게 된 것으로 보여진다.

4. 결 론

PTFE-폴리이미드 복합 재료에서 성분비와 마찰면

의 온도가 마찰과 마모에 미치는 영향을 알아보기 위하여 왕복동 마찰시험기로 질소 분위기하에서 실험을 행하고 그 결과를 토대로 마찰과 마모 메커니즘을 고찰하였으며 다음과 같은 결론을 내렸다.

(1) PTFE 100%의 경우, 정상 상태의 마찰 계수가 상온에서는 평균적으로 0.18 정도이고 200°C에서는 0.14 정도로서 온도와 하중의 증가에 따라 마찰 계수의 변화가 비교적 크지 않았다. 이는 PTFE의 분자들 간에 응착력과 전단 저항이 낮은 고유 특성에 기인하는 것으로 보인다. 180 N 이하에서는 200°C의 마모 지수가 상온의 경우 보다 낮았던 이유는 막형의 마모 입자 또는 마찰면 주위의 부착물의 두께가 얇게 되는 것과 관련지어 설명할 수 있는데, 실접촉부의 온도가 높을수록 재료의 전단 응력이 국부적으로 낮아져 표면 가까이의 부분만 얇게 전단이 일어나기 때문인 것으로 보인다. 220 N에서 상온과 200°C 모두 마모 지수가 급증한 이유는 접촉 압축 응력이 PTFE의 냉간 유동 응력에 달하기 때문에 마찰 표면의 마찰열을 받아 가속화되어 대규모로 유동되는 것이 마모 급증의 주된 원인으로 보인다.

(2) 폴리이미드 100%의 정상 상태 마찰 계수가 200°C에서는 모든 재료들 중 가장 낮은 값인 0.06 정도를 나타낸 이유는, 폴리이미드가 강도가 커서 실접촉점의 압력이 크므로 실접촉점들이 높은 순간 마찰 온도에 노출되어 전단 응력이 낮아지고 마모막의 폴리이미드가 탄화됨으로써 마찰 특성이 변하여 마찰 계수가 낮아지는 것으로 보인다.

(3) PTFE 80%-폴리이미드 20%를 보면 대체로 마찰 계수는 다른 재료에 비하여 높은 편이었고, 마모 지수는 낮은 편이었다. 폴리이미드 입자들이 하중을 지지하는 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 마찰 계수가 높은 이유는, 마모이착막에 섞여 있는 폴리이미드의 작은 마모 입자들이 순수 PTFE의 경우 보다 마모막의 전단 흐름을 방해하기 때문인 것으로 사료된다.

(4) PTFE 20%-폴리이미드 80%의 마모 지수는 PTFE 80%-폴리이미드 20%와 비슷한 수준이었다. 상온의 40 N에서 마찰 계수가 높은 이유는 PTFE가 마모막을

형성하여 마찰을 낮추기에는 양적으로 부족할 뿐만 아니라 상온에서 응착 마찰이 높은 순수한 폴리이미드가 PTFE의 방해를 받음으로써 순간 마찰 온도의 상승에 의한 전단 유동 저항 저하가 일어나지 않음으로써 마찰 계수가 높게 나타난 것으로 사료된다. 하중과 마찰면 온도가 증가하여 마찰면 평균 온도와 순간 마찰 온도가 높아짐에 따라 PTFE와 폴리이미드 성분들의 전단 응력이 낮아져 주어진 실접촉부의 마찰 상황에서 각각 마찰을 낮추는 역할을 함으로써 마찰 계수가 가장 낮게 된 것으로 보여진다.

후 기

이 논문은 과학기술처에서 시행한 특정연구개발사업의 연구 결과의 일부이며 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. G. Walker, Stirling Engines, 1980, Claredon press.
2. C. M. Hargreaves, The Phillips Stirling Engine, 1991, Elsevier.
3. A. Tanaka, "Wear of Piston Ring Under Unlubricated Conditions," Japanese J. of Tribology, V. 37, No. 3, 1992.
4. N. Hiraoka *et al.*, "Development of piston ring system for NS03T stirling engine," The 4th International Conference on Stirling Engines, pp.277-282.
5. K. Tanaka, "Effects of Various Fillers on the Friction and Wear of PTFE-Based Composites," in K. Friedrich (Ed.), Friction and Wear of Polymeric Composites, pp. 137-174, Esvier, 1986.
6. J.K. Lancaster, "The Effect of Carbon Fiber Reinforcement on the Friction and Wear of Polymers," J. Phys. D. vol. 1, pp. 549-559, 1968.
7. 심현해, 권오관, "PTFE-폴리이미드 복합 재료의 마찰과 마모," 한국윤활학회지, vol. 11, no. 4, pp. 28-34, 1995.
8. N. P. Suh, Tribophysics, Prentice-Hall, 1986.