

論文

첨가제에 의한 PTFE 복합재료의 마찰마모 특성에
관한 연구

김용직* · 김윤해**

**A Study on the Effects of Additives on the Friction and Wear
Properties of PTFE Composite**

Yong-Zig Kim* and Yun-Hae Kim**

Abstract

This study is mainly concerned with friction and wear properties for the piston ring of non-lubricating air compressor which made of PTFE-polyimide composites. At the PTFE and polyimide alone mixture specimens, PTFE80%-polyimide20%, which shows the lowest mean friction coefficient and specific wear rate at 0.94m/s sliding speed. In case of the specific wear rate, copper30% specimen shows the lowest value of 2.537-5(mm³/Nm) in all specimens. It considered that the friction coefficient is affected by generating speed and quantity of wear film. In case specific wear rate, it is attributed to the fact that the surface hardness of wear film is proportioned to specific wear rate.

초 록

본 연구는 공기압축기에 적용되는 피스톤링의 재료에 자기윤활성 재료를 이용할 경우 어떠한 마찰마모 특성을 나타내는가를 비교평가 함으로써 실제 적용여부의 가능성을 확인하였으며, 주요 결과로는 동을 중량비 30% 함유한 시험편이 평균마찰계수 및 비마모량이 가장 적었다. 이는 마찰계수에 직접적인 영향을 주는 마모유동막이 초기에 다량 생성될 경우 낮은 마찰계수와 함께 안정화 효과에 큰 영향을 주며 비마모량은 발생된 마모유동막의 경도와 비례하고 용융마모에 의해 덩어리 형태로 탈락되는 마모분이 가장 적기 때문이라고 생각된다.

1. 서 론

오늘날 의료, 전기, 전자, 식품업체 등 다양한 산업분야에서는 청정한 압축공기를 필요로 하고 있다. 그러나, 기존의 왕복동식 공기압축기에서는 대부분 주철을 소재로 한 피스톤링을 이용하므로 윤활유의 사용이 필

연적이다. 따라서, 앞에서 언급한 분야에서의 사용은 곤란한 실정이지만 자기 윤활성 재료를 공기압축기에 사용할 경우에는 압축공기 중에 함유되는 유분 및 수분을 제거하기 위한 고효율의 필터를 장착해야 하는 비용이 절감될 뿐만 아니라 청정도가 높은 압축공기를 얻을 수 있어 다양한 산업분야에서의 사용이 가능하다.

* 한국해양대학교 대학원

** 한국해양대학교 기계소재공학부

최근 들어 자기 윤활성 재료로 많은 각광을 받고 있는 PTFE(polytetrafluoroethylene), 폴리이미드(Polyimide), 카본(Carbon)과 같은 복합재료는 내부 식성, 고강도 및 낮은 마찰계수를 가지는 특징이 있다. 사용온도에서 보면 PTFE의 경우 융점이 327℃로 높고¹⁾ 폴리이미드는 연속 사용온도가 300℃, 최대 순간 사용온도는 482℃까지이므로²⁾ 공기압축기용 무윤활 피스톤링으로서 그 사용가치가 충분하다고 생각된다. 그러나, PTFE는 마찰계수가 상당히 낮아 마찰재료로서의 성질은 우수하나 강도가 낮아서 자체만으로 사용하기가 곤란하다.

폴리이미드의 경우에는 복합재료 중에서 비교적 높은 강도를 나타내지만 소재의 가격이 상당히 고가이므로 상업성을 가지기가 어렵다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 복합재료와 함께 비철 금속재료인 동(copper), CuO(oxide copper)를 적절한 비율로 충전하여 경제성을 가짐과 동시에 양호한 마찰마모특성을 만족시키는 재료를 찾기 위하여 미끄럼속도와 충전율이 마찰계수와 비마모량의 변화에 어떠한 영향을 주는지 기초 실험을 통하여 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1 실험장치 및 시험편의 제작

본 실험에 사용된 시험기는 Pin on disc형의 마찰·마모 시험기이며 Fig.1에 나타내었다.

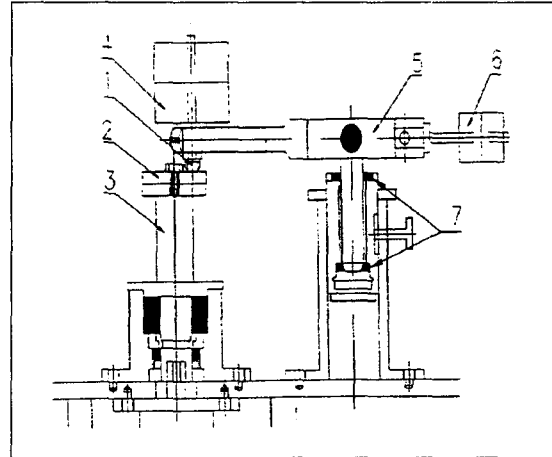
시험에 사용된 핀(pin)은 공기압축기의 실린더 재료로 사용되는 회주철(FC250)(3)을 이용하였으며 기계적 성질은 Table 1과 같다.

2.2 실험조건 및 방법

상대 마모재인 핀(pin)과 시험편의 면압은 공기압축기와 내연기관의 피스톤링이 받는 일반적인 면압인 0.05~0.22MPa(5) 보다 더 가혹한 마찰마모조건을 주기 위하여 0.39MPa를 적용하였으며 이때 시험편에는 7.69N의 일정한 가압하중을 가해 주었다.

Table 1. Mechanical properties of pin

Mechanical properties	Tensile strength (MPa)	Hardness (HB)
Materials		
Gray cast iron (FC250)	275	188



- 1. Pin
- 2. Disc specimen
- 3. Axis of rotation
- 4. Applied weight
- 5. Balance bar
- 6. Balance weight
- 7. Ball bearing

Fig. 1. Schematic illustration of friction and wear test apparatus

미끄럼속도는 공기압축기에서 일반적으로 사용하는 회전수에서의 특성변화를 파악하기 위하여 0.94 m/s (600rpm), 1.88 m/s (900rpm), 2.83 m/s (1200rpm)를 적용하였다.

핀과 시험편의 마찰면에서 발생되는 마찰력 및 마찰계수는 시험편과 핀의 마찰에 의해 발생된 미끄럼 마찰력(마찰면과 반대방향의 전단력)이 밸런스 바를 통해 로드셀(load cell)에 전달된 뒤, 증폭기(amplifier)를 통해 증폭이 되고 이 힘이 펜레코더(pen recorder)에 기록됨으로써 측정이 된다.

시험편의 마모량은 측정도 0.1 mg의 정밀천칭(Sartorius社製 YDK01)을 이용하여 시험전의 중량과 마찰거리 1km 간격으로 시험중인 시험편의 중량을 측정하였다.

마찰·마모 시험편은 PTFE, 폴리이미드, 카본, 동 및 CuO의 충전율을 각각 달리한 다음의 조성(wt%)으로 시험편을 제작하였다.

PTFE100%,PTFE80%-polyimide20%, PTFE20%-polyimide80%, Polyimide100%를 충전한 시험편과 PTFE80%-polyimide20%에 카본, 동, CuO를 각각 10%, 20%, 30% 충전한 13종류로, 시험편은 먼저 환봉으로 제작한 뒤 디스크(disc) 타입으로 기계 가공하였다.

기계가공 후 시험편과 핀의 마찰면은 금속제 피스톤

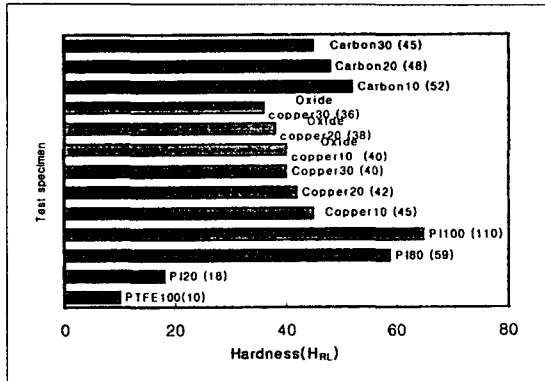


Fig. 2. Effects of additives contents on hardness

링과 공기압축기용 실린더의 표면조도와 동일하게 하기 위하여 각각 입도 번호 2000번의 연마지를 이용하여 연마하였으며 표면조도는 시험편과 편 모두 Ra4) = 1.6 μ m로 동일하게 적용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 첨가제의 충전율에 따른 경도변화

첨가제의 충전율에 따른 경도 값을 Fig.2에 나타내었다. 시험에 사용된 경도기는 로크웰경도기이며 L scale(가압하중 588N)을 이용하였다.

경도 값은 폴리이미드의 충전율이 많을수록 높은 경향을 보였으며 PTFE80%-polyimide20%의 시험편에 동, CuO, 카본을 충전한 시험편의 경우 함유량이 많을수록 경도 값이 조금씩 낮아짐을 알 수 있었다.

특히 카본의 경우에는 다른 시험편보다 함유량이 많아질수록 경도 값이 비교적 많이 낮아짐을 알 수 있었는데 이는 카본량이 많을수록 소결시 기공의 함유율이 높아져 경도저하를 초래⁶⁾한다고 이미 보고된 바 있다.

3.2 미끄럼속도에 따른 마찰계수의 변화

미끄럼속도를 0.94m/s, 1.88m/s, 2.83m/s로 변화시켰을 때 폴리이미드의 함유율에 따른 마찰계수의 변화를 Figs. 3~5에 나타내었다.

순수PTFE(PTFE100)의 경우, 마찰계수의 값은 저속과 중속에서는 변화가 거의 없는 경향을 보였는데, 이는 PTFE의 분자들간에 응착력과 전단저항이 낮은 특성(7) 때문인 것으로 생각된다.

한편, 고속에서는 평균마찰계수 값이 0.145로 감소

하는 경향을 나타내었다.

이는 미끄럼속도가 가장 높은 저속과 중속에 비해 마찰열이 상대적으로 높기 때문에 표면의 전단응력이 감소하며 점차 용융마모로 이행되기 때문이라고 생각된다.

Fig.9에서 용융마모에 의해 마찰 표면이 평탄하게 나타난 것으로서 확인 할 수 있다.

폴리이미드20%(PI20)를 첨가한 경우에는 마찰계수 값이 비교적 저속, 중속, 고속의 순서로 낮아지는 경향을 나타내고 있다.

아울러, 시험시간이 증가할수록 마찰계수의 값은 뚜렷하게 구분됨을 알 수 있었다. 특히, 고속에서는 평균 마찰계수 값이 가장 낮은 0.119를 보이고 있는데, 마찰열의 상승으로 인해 플레이크형(flake type)의 마모 유동막이 비교적 단시간에 다량 생성되기 때문에 마찰계수의 조기 안정화와 함께 낮은 마찰계수의 값을 나타낸다고 생각된다. 한편, Fig.10에 고속에서 시험한 표면을 주사형 전자 현미경(SEM)으로 촬영한 사진을 나타내었다.

사진에서와 같이 플레이크(flake)모양의 마모유동막이 뚜렷하게 나타남을 알 수 있으며, 동일시험편을 EDS 분석한 결과를 Fig.13에 나타내었다.

유동의 끝 부분인 흰 곳에서 탄소(C)와 불소(F)성분이 마찰면의 표층부로 두드러지게 나타나는 것으로 보아 PTFE가 소성유동에 의해 마찰면의 표층부로 밀려 응착마찰력을 감소시키기 때문에 마찰계수가 가장 적어진 것으로 생각된다.

폴리이미드80%(PI80)시험편은 PTFE의 함유량이 비교적 낮으므로 PTFE가 마찰표면에서의 응착마찰력을 낮추는 역할을 충분히 하지 못하고 연삭마모도 병행하는 형태가 되기 때문에 마찰계수 값이 비교적 높게 나타나는 것으로 생각된다.

Fig.14에서와 같이 PI80의 시험편에서도 플레이크 모양의 마모유동막을 확인 할 수 있었으나 Fig.11에 나타난 것처럼 고속에서의 표면은 PI20 시험편과는 대조적으로 플레이크 형태의 유동막이 비교적 적게 일어났고 응착마모와 연삭마모가 함께 일어난 것을 알 수 있다.

순수 폴리이미드(PI100) 시험편은 비교적 다른 재료들보다 표면경도가 높기 때문에 마찰계수가 안정화되기 전까지는 마모막의 형성이 충분하지 않아 폴리이미드의 진실접촉면의 압력이 높아져 소성유동에 의해 외부 표층 막의 파괴가 일어나고 편과의 직접적인 접촉

이 발생하게 되므로 응착마찰력이 커지기 때문에 Fig.12와 같이 전형적인 응착마모(8)가 일어나서 마찰계수가 높은 것으로 생각된다.

한편, 미끄럼속도가 증가할수록 마찰계수 값이 뚜렷이 낮아지는 이유는 표면 마찰열이 점차 상승하여 고온이 되므로 응착마찰력이 다소 감소하게 되고 소성유동이 일어나 마모막이 점차 쌓이면서 응착마모된 공간을 메우기 때문이며, 이와 함께 표면 마찰온도가 높을수록 건조 마찰시에는 시험편 표면의 마모막이 탄화됨으로써(9) 이것이 표면을 보호하기 때문에 정상마모로의 진행이 이루어지고 마찰계수도 차츰 감소하여 안정화되기 때문이라고 생각된다.

한편, PTFE80%-PI20%에 동, CuO, 카본을 각각 10%, 20%, 30%씩 첨가한 시험편의 마찰계수의 변화를 Figs.6~8에 나타내었다.

저속에서 동10%의 평균마찰계수가 가장 낮은 0.087을 나타내고 있으며, 중속에서도 동10%가 평균마찰계수 값이 0.096으로 가장 낮았다. 마찰거리에 따른 마찰계수의 안정화도 가장 우수한 것으로 나타났다.

이는 동이 산화 마모입자의 생성이 쉬워 마모유동막의 초기 생성량이 많아져 마찰계수 값이 가장 낮아진 것이며 마찰면의 보호역할이 초기에 일어나 마찰계수의 안정화가 일찍 일어난 것이라 생각된다. 아울러 동 10%의 첨가량이 저속과 중속의 마찰속도에서는 온도 안정성을 위한 열발산 역할을 충분히 하고 있는 것으로 여겨진다. 한편 카본10%첨가 시편의 경우 저속과 중속에서 평균마찰계수 값이 가장 높은 것으로 나타났으며 마찰계수의 안정화 경향은 비교적 늦게 약 7km 부근에서 일어났다.

이는 표면탄화에 의한 마모막의 생성이 비교적 적어 마찰면의 보호역할을 충분히 하지 못했기 때문이며 안정화가 늦어진 것도 초기 생성량이 적어 마찰거리가 증가됨에 따라 탄화막의 탈락 속도보다는 표면을 메우는 속도가 빨라서 마찰계수 값이 낮아지면서 안정화된 것으로 생각된다. 동30% 함유 시험편의 경우에는 저속, 중속과는 달리 마찰계수 값이 다소 높아졌는데 이는 고속에서 동의 함유량이 마찰면의 온도를 발산하기에는 다소 부족하기 때문인 것으로 판단되며 기계적인 연삭마모도 병행되었기 때문인 것으로 생각된다. 고속에서는 저속 및 중속과는 달리 카본 30%를 함유한 시험편의 평균 마찰계수 값이 0.092로 가장 낮은 경향을 보이고 있다.

이는 카본이 상대마모재의 표면 온도를 상승시키는

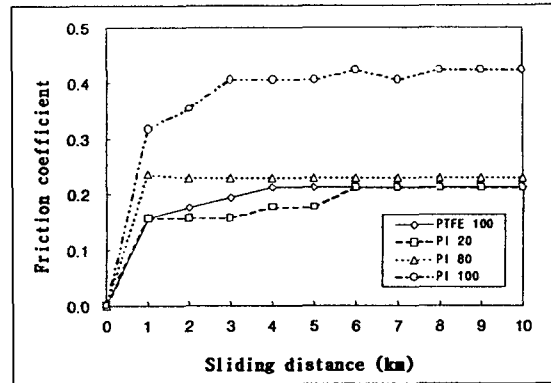


Fig. 3. Relationship between friction coefficient and sliding distance according to the rate of filling of polyimide for sliding speed at 0.94m/s

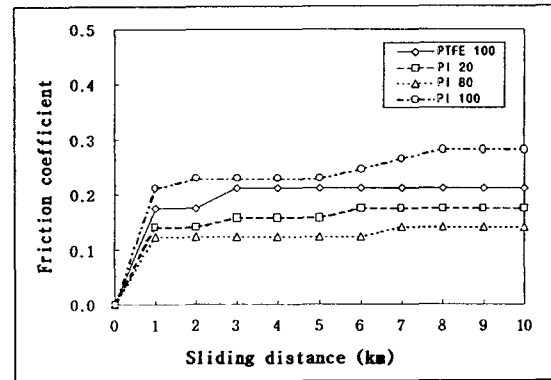


Fig. 4. Relationship between friction coefficient and sliding distance according to the rate of filling of polyimide for sliding speed at 1.88m/s

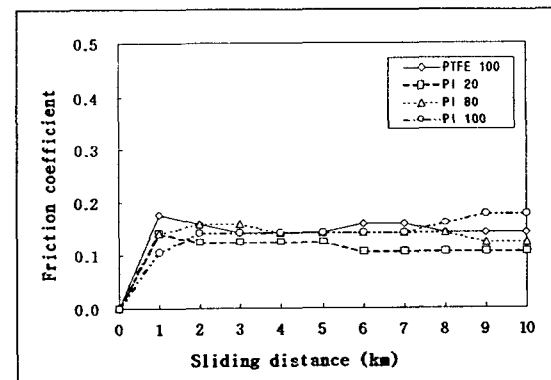


Fig. 5. Relationship between friction coefficient and sliding distance according to the rate of filling of polyimide for sliding speed at 2.83m/s

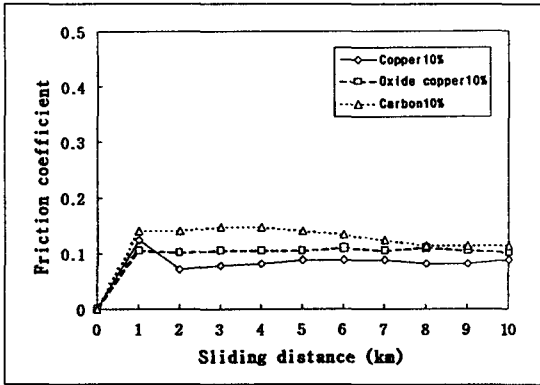


Fig. 6. Relationship between friction coefficient and sliding distance with the addition of copper, CuO and carbon for sliding speed at 0.94 m/s

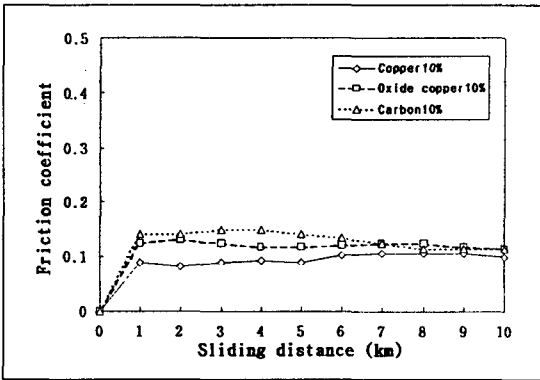


Fig. 7. Relationship between friction coefficient and sliding distance with the addition of copper, CuO and carbon for sliding speed at 1.88 m/s

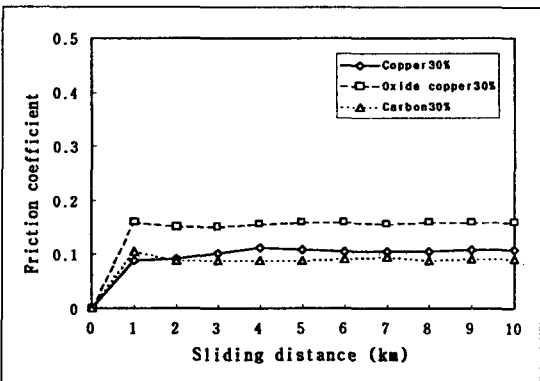


Fig. 8. Relationship between friction coefficient and sliding distance with the addition of copper, CuO and carbon for sliding speed at 2.83 m/s

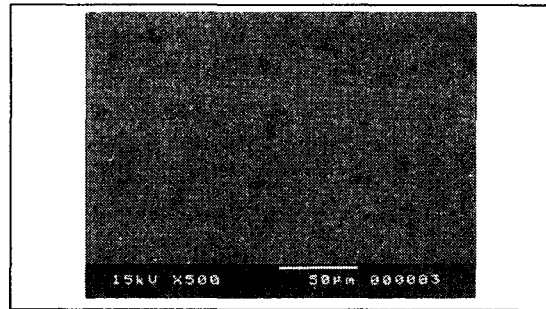


Fig. 9. SEM micrographs of the worn surface of PTFE100%

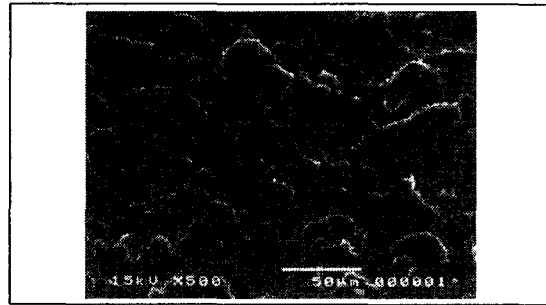


Fig. 10. SEM micrographs of the worn surface of PTFE80%-PI20%

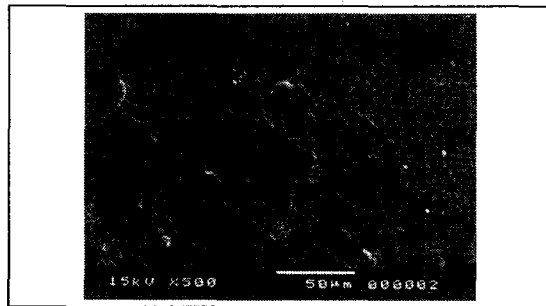


Fig. 11. SEM micrographs of the worn surface of PTFE20%-PI80%

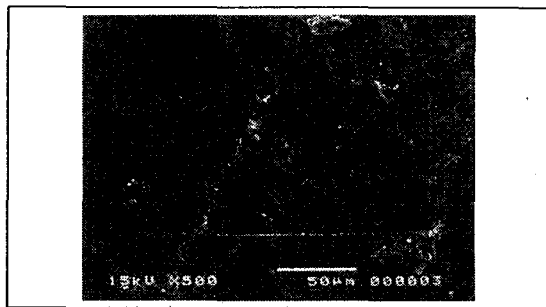


Fig. 12. SEM micrographs of the worn surface of PI100%

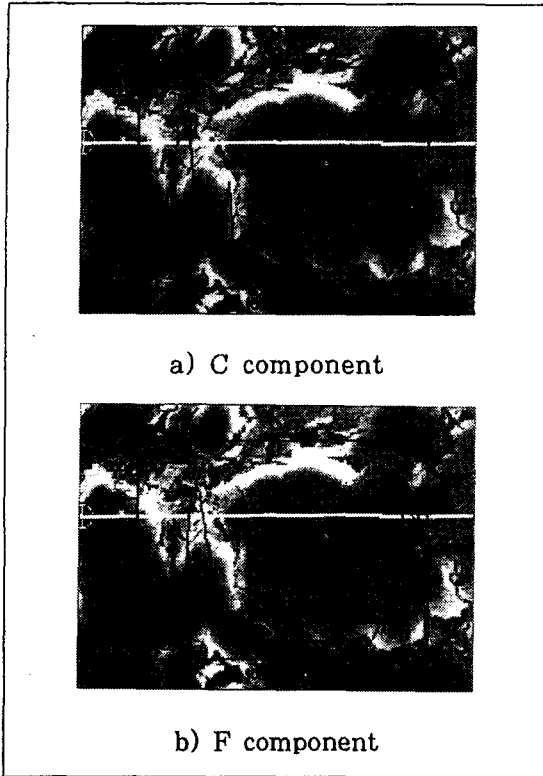


Fig. 13. EDS micrographs of the worn surface of PTFE80%-PI20%

작용(11)을 하므로 다른 시험편보다 카본의 함유량이 많고 고속인 조건이었으므로 표면 탄화가 일어나기에 우수한 조건이었으며 그 생성량도 저속 및 중속에서의 양보다 많아져서 표면보호역할을 하는 코팅층이 두껍기 때문이라고 생각된다.

3.3 미끄럼속도에 따른 비마모량의 변화

비마모량은 각 시험마다 마찰거리 10km동안 마모된 총 체적을 마찰일로 나눈 값이며 Fig.15와 Table 2에 비마모량의 변화를 나타내었다.

PTFE100%의 경우 비마모량이 다른 시험편들에 비해 전반적으로 많은데 이는 PTFE의 경도가 비교적 낮아 소성유동압력이 작으므로 얇은 필름(film)형태의 마모입자가 생성되는 연삭마모가 주로 일어나기 때문인 것으로 생각된다.

폴리이미드100% 시험편의 경우 저속에서는 응착마모에 의한 마모입자의 탈락이 많다가 고속에서는 표면의 탄화로 인해 마찰표면을 보호하는 형태가 되므로

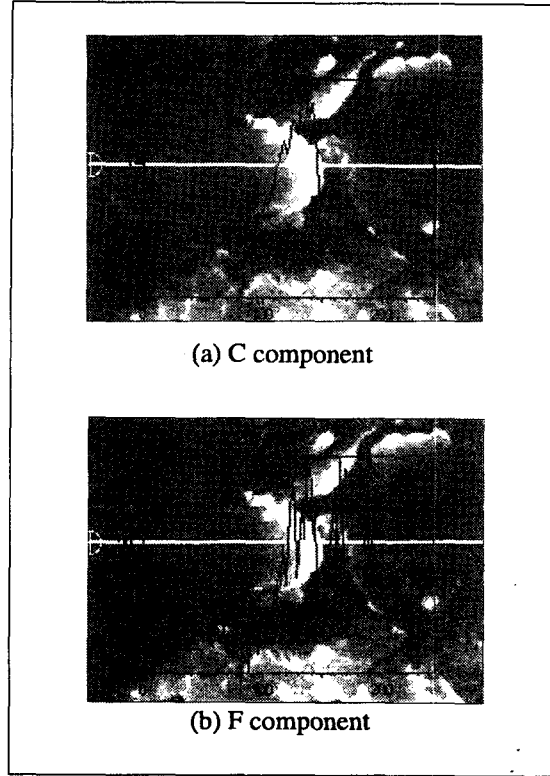


Fig. 14. EDS micrographs of the worn surface of PTFE20%-PI80%

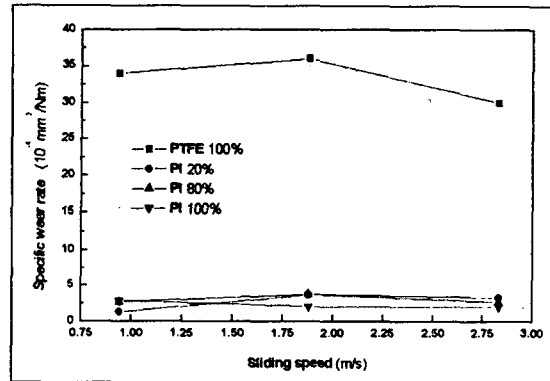


Fig. 15. Effects of sliding speed on specific wear rate for different polyimide contents

비마모량이 감소되는 것으로 생각된다.

Table 2에는 PTFE80%-polyimide20%에 동, CuO, 카본을 충전한 시험편의 비마모량을 나타내었다. 저속에서 동 30% 함유한 시험편의 비마모량이

Table 2. Effects of sliding speed on specific wear rate for additives

(unit : $10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm}$)

Specimen	0.98m/s	1.88ms	2.83m/s
Copper10	11.730	8.548	6.922
Copper20	6.817	3.906	5.228
Copper30	2.537	4.437	4.478
CuO 10	8.662	5.423	6.094
CuO 20	3.011	7.881	9.528
CuO 30	8.157	7.777	9.044
Carbon10	4.394	3.888	9.269
Carbon20	8.880	4.633	5.961
Carbon30	13.090	4.680	5.501

2.537E-05(mm^3/Nm)로 가장 적게 나왔으며 이는 PI와 PTFE만의 충전으로 이루어진 시험편에서 가장 적은 1.3E-04 (mm^3/Nm)보다 약 5배정도 낮은 비마모량을 보임을 알 수 있었다.

이는 PTFE의 소성유동막과 동이 조합된 마모막의 경도가 가장 높기 때문이라 생각된다. 아울러 동30%의 경우에는 동성분의 열발산율이 가장 높아 용융마모에 의해 플레이크 모양의 마모막의 탈락이 가장 적어진 것이며 마찰면의 경도(소성유동압력)와 비마모량이 비례한다(12)는 일반적인 해석보다는 진실 접촉부의 마모유동막의 경도와 더욱 밀접한 관계가 있을 것이라 생각된다.

4. 결 론

PTFE에 다양한 첨가제를 충전한 시험편을 이용하여 마찰·마모 시험을 행한 결과 미끄럼속도와 충진율이 마찰계수와 비마모량에 어떠한 영향을 주는지 실험을 통해 고찰하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. PTFE와 폴리이미드 만의 충전 시험편에서는 조성 PTFE80%-polyimide20%의 시험편이 저속에서 마찰계수와 비마모량이 가장 낮았다. 이는 PTFE의 주성분이 소성유동에 의해 마찰면으로 밀려나와 응착마찰력을 저감시키기 때문이며 PTFE의 함량이 적을수록 마모유동막의 생성량이 적고 연삭마모도 병행하기 때문에 그 효과가 적음을 알 수 있었다.

2. PTFE80%-polyimide20%의 조성에 동, 카본,

CuO를 첨가한 경우, 저속과 중속에서는 동10% 첨가 시험편의 마찰계수값이 가장 낮은 특성을 나타내는데 이는 동이 산화 마모입자를 생성하기 쉬워 마모유동막의 생성이 조기에 다량 일어나 표면보호역할을 하기 때문임을 알 수 있었다. 고속에서는 카본30%함유 시험편의 마찰계수가 가장 적었는데 이는 카본의 특성중 하나인 상대마모재의 표면 온도 상승작용으로 인해 표면 탄화에 의한 탄화막 형성조건이 비교적 다른 시험편보다 우수하기 때문인 것을 알 수 있었다. 이와 같이 마찰계수에 직접적인 영향을 주는 마모유동막은 조기에 다량 생성될 경우 낮은 마찰계수와 함께 안정화 효과에 큰영향을 주는 것으로 생각된다.

3. 비마모량은 저속에서 PI20%-PTFE80% 시험편에 동 30% 함유한 시험편의 비마모량이 가장 적었으며 전속도 영역에서 비교적 고르게 낮은 비마모량을 나타내고 있다. 이는 비마모량과 관계있는 표면의 경도가 발생된 마모유동막의 경도와 직접적인 관계가 있으며 용융마모에 의해 덩어리 형태로 탈락되는 마모분이 가장 적기 때문이라고 생각된다.

4. 이상의 기초실험에서 무급유 공기압축기의 피스톤링으로서 가장 적합하다고 생각되는 재료의 충진율은 PTFE80%-PI20%를 기본으로 하는 재료에 동을 30% 첨가한 재료가 전속도 영역에서 가장 낮은 비마모량을 나타내었으며, 중속에서는 카본을 10% 첨가한 시험편이 가장 양호한 특성을 나타냄을 알 수 있었지만 실제 고온, 고압 하에서 마찰계수와 비마모량의 거동이 어떻게 변화하는가에 대해서는 충분한 실험이 필요한 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 日本潤滑學會, 新材料のトライボロジー, 養賢堂, 1991, pp.63.
2. 關口 勇, 野呂瀨進, 似内昭夫, トライボマテリアル活用ノート, 工業調査會, 1994, pp.80.
3. 日本工業規格, ねずみ鑄鐵品, JIS G 5501, 1994.
4. 日本工業規格, 表面粗さ一定議及び表示, JIS B 0601, 1994.
5. 全孝重, 內燃機關講義, 曉星出版社, 1997, pp.300.

6. Boguslaw Kubick, Sintered Machine Elements, Prentice hall, 1995.
7. G. Walker, Stirling Engines, Claredon press, 1980.
8. J. T. Burwell, Jr., Wear, 1.(2), 1954, pp.119.
9. 심현해, 권오관, 이규환, 김병환, PTFE-폴리이미드 복합재료의 마찰과 마모에 대한 성분비와 온도의 영향, 한국윤활학회지, 제12권 제3호, 1996. pp.58.
10. 久門 輝正, 順田 博, 河岸 誠, 鈴木 宏知, トライボロジスト, 第40卷, 第9號号, 1995, pp.776~783.
11. Bharat Bhushan, Principles and Applications of Tribology, John wiley & Sons, 1999, pp.395~412.
12. 岡本 純三, 中山 景次, 佐藤 昌夫, トライボロジ-入門, 辛書房, 1994, pp.16~26.