

나일론과 폴리아세탈의 마찰마멸특성에 관한 고찰

김충현* · 안효석* · 정태형**

Reciprocating sliding wear of nylon and polyacetal against steel

Choong Hyun Kim*, Hyo-Sok Ahn*, and Tae-Hyong Chong**

*Tribology Research Center, Korea Institute of Science and Technology**
*Department of Mechanical Design and Engineering, Hanyang University***

Abstract

Friction and wear test have been performed on nylon, polyacetal, and PTFE(polytetrafluoroethylene), in reciprocating dry sliding conditions against a steel disc. According to the results, polyacetal show lowest wear rates and PTFE was found to exhibit lowest friction coefficient. The prominent wear mechanism found were adhesion and abrasion.

Key Words : Friction, Wear, Reciprocating sliding, Nylon, Polycetal, PTFE

1. 서 론

나일론, 폴리아세탈, 그리고 PTFE 등의 공업용 플라스틱(engineering plastics)은 각종 산업용 기계 및 장치의 부품 소재로서 널리 사용된다.

열가소성 고분자재료인 나일론과 폴리아세탈은 구형결정구조(spherulitic structure)를 갖는 결정성 고분자로서, 마찰계수가 낮고 강인한 특성을 보유하고 있으므로 기어, 배관용 부품, 자동차 부품, 그리고 완구류 등의 재료로 사용된다.⁽¹⁾

불소원자를 포함하는 PTFE⁽²⁾는 부분적으로 결정성 구조를 갖는 저장도 소재이며 고온특성 및 내화학성이 우수할 뿐만 아니

라 마찰계수가 현저히 낮으므로 가정용 프 라이팬의 코팅재, 각종 이화학기기의 가공 재료로 사용된다.

이들 공업용 플라스틱의 광범위한 용도에 부응하여 해당재질의 마찰마멸특성에 대한 연구는 지속적으로 다양한 분야에 걸쳐서 이루어지고 있다.^(2,6)

본 연구에서는 기어(gear), 캠(cam) 등의 동력전달용 부품소재로서 널리 사용되는 나일론, 폴리아세탈의 마찰마멸특성을 파악하고, 이를 PTFE와 비교평가하기 위하여 왕복동 마찰마멸 실험장치를 이용한 실험 연구를 수행하였다.

2. 실험연구

2.1 실험장치

본 연구에서는 Fig. 1에 보인 것과 같은 영국의 Plint & Partners사에서 제작한 왕복마찰마멸 실험장치(모델명 TE77)을 사용하여 실험을 수행하였다. 이 실험장치는 플레이트와 디스크로 구성되는 한 쌍의 시편 중 상부의 디스크시편에 원추형 홈을 파고 여기에 지지대를 연결하여 부하를 작용시킨 후 이 지지대와 연결된 편심축을 회전시킴으로써 시편 사이에 상대운동을 일으키게 한 것이다. 시편 사이의 상대운동 속도(이하 진동수)는 DC모터의 회전속도를 제어함으로써 임의로 조절할 수 있다.

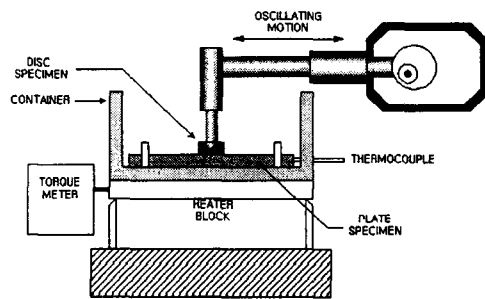


Fig. 1 Schematic view of the test rig

2.2 시편제작

플레이트와 디스크로 구성되는 시편쌍 중에서 플레이트 재료로는 나일론, 폴리아세탈, 그리고 PTFE의 세 가지, 디스크는 SM45C를 각각 사용하여 제작하였다. 플레이트 재료의 물성을 Table 1에 나타내었다.

가공한 시편의 마찰면 조건을 일정하게 하기 위하여 플레이트시편과 디스크시편 모두 사포(#320)를 사용하여 연마하였다. 연마 후 표면거칠기(R_a)를 측정해 본 결과 플레이트 시편의 경우 나일론은 $1.02\mu\text{m}$, 폴리아세탈은 $1.08\mu\text{m}$, PTFE는 $0.73\mu\text{m}$, 디스크시편(SM45C)은 $0.10\mu\text{m}$ 정도의 평균값을 보였다. 표면연마를 거친 후 플레이트시편은

에틸알코올, 디스크시편은 아세톤에 각각 담가 초음파세척기를 이용하여 세척하고 건조기에서 40°C 로 24시간동안 건조시킨 후 실험에 사용하였다.

Table 1 Properties of the polymers

Properties	Nylon	Polyacetal	PTFE
Specific weight	1.15	1.41	2.15
Yield strength, N/mm^2	55	73	20
Elongation, %	130	60	300

각 시편의 제원은 Fig. 2에 나타내었다.

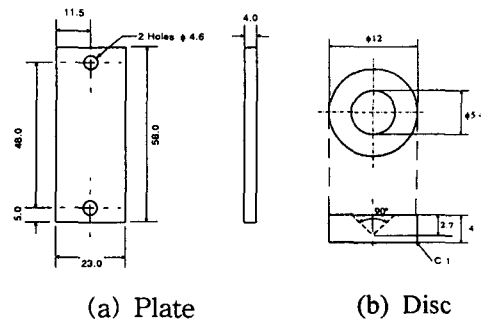


Fig. 2 Test specimens

2.3 마찰마멸실험

실험조건은 상온에서 하중 85N, 진동수 10Hz, 1사이클의 미끄럼거리(왕복 스트로크)는 15mm로 고정하였다. 실험은 플레이트 재질과 미끄럼거리를 변화시키면서 수행하였다. 즉, 플레이트 재질을 3종류, 미끄럼거리는 200, 400, 600, 800, 그리고, 1000m의 5종류로 구분하여 총 15세트의 실험을 구성하였다.

온도의 영향을 크게 받는 고분자재료의 특성을 고려하여 각각의 실험세트는 매번 새로운 시편을 사용하였고 각 세트마다 3

차례에 걸쳐서 동일한 실험을 반복하였다.

컴퓨터를 이용한 실험자료취득장치(data acquisition system)을 구성하여 실험이 수행되는 동안 마찰계수의 변화를 관찰, 기록하며 변화추이를 살펴보았다.

2.4 마찰특성 및 마멸기구 평가

실험이 진행되는 동안 마찰면의 변화과정, 마찰계수의 변화를 동시에 관찰하였다.

실험 직후 플레이트시편의 중량을 측정하여 마멸량을 계측하였고, SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용하여 마찰면을 관찰하였으며 마찰계수값 등을 바탕으로 하여 나일론, 폴리아세탈, 그리고 PTFE의 마찰특성을 비교하고 그 마멸기구를 파악하고자 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 마찰계수의 변화

실험을 통하여 얻은 마찰계수값의 변화를 Fig. 3에 도시하였다.

나일론의 경우, 실험 시작 후 2분 이내에 마찰면이 거울면(mirror surface)을 형성하는 것을 관찰할 수 있었고 초반 길들이기 과정 이후에도 마찰계수의 변화가 폴리아세탈이나 PTFE에 비하여 크게 나타났으며 전체 실험시간을 통하여 다른 재료보다 상대적으로 높은 마찰계수를 나타내었다. 이것은 나일론의 내열성이 폴리아세탈이나 PTFE보다 상대적으로 낮은 것에서 기인하는 것으로 판단되며,⁽¹⁾ 실험시간이 경과됨에 따라 나일론의 마찰면은 마찰열로 인하여 흑갈색으로 변화하였고, 실험도중 마찰계수가 순간적으로 0.7정도까지 증가하는 불연속적 급상승현상을 관찰할 수 있었다.

이러한 마찰계수의 급격한 상승은 마

찰열에 의한 것으로서 마찰면의 온도가 나일론의 용융온도에 가까워졌기 때문이다. 즉, 고온에 노출된 나일론재료가 순간적으로 용융되어 고분자구조가 와해, 이탈하여 상대면에 순간적으로 점착되면서 마찰계수는 급상승하고 뒤이어 작용하는 마찰력에 의하여 떨어져 나가는 stick-slip 현상이 발생한 것으로 판단된다.^(2, 3) 실험 후 상대면인 디스크 표면을 관찰해보면 플레이트의 나일론재질이 디스크표면에 전이되어 있는 점이 이를 뒷받침하고 있다.

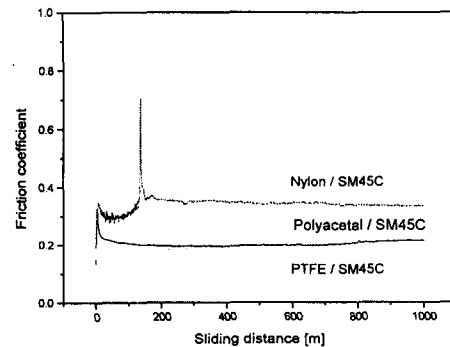


Fig. 3 Variation of the friction coefficients with sliding distance

폴리아세탈은 실험시작 후 미끄럼거리가 200m에 이르기 전에 비교적 많은 양의 마멸입자를 생성하는 것을 육안으로 관찰할 수 있었으며, 초반 길들이기 과정을 거친 이후에 마찰계수가 점차 낮아진 후 미끄럼 거리가 700m 부근에 다다르면 다시 마찰계수가 변화를 일으키면서 완만하게 증가하였다. 폴리아세탈의 경우 마찰계수값은 초기과정을 제외하면 0.2~0.25의 범위에 걸쳐서 분포하였다.

PTFE는 실험 전 과정에 걸쳐서 거의 일정한 마찰계수를 나타내었으며 마찰계수값도 0.2이하로서 나일론이나 폴리아세탈보다 훨씬 낮은 값을 보였다. 실험이 진행됨

에 따라 마찰면에서는 두께가 매우 얇고 지름이 10mm 정도에 이르는 박막형태의 마멸입자가 생성되는 것을 볼 수 있었다. PTFE는 분자구조상 방향성이 있는 재료이기 때문에^(2,3) 전단력에 약한 특성을 가지고 있어서 마찰력이 작용하면 마찰부위의 재료가 박막형태로서 쉽게 분리되고, 이로 인하여 마찰계수가 낮게 나타나는 것으로 판단된다.

3.2 마멸량의 변화

실험을 통하여 얻은 플레이트 재질별 마멸량의 변화를 Fig. 4에 도시하였다.

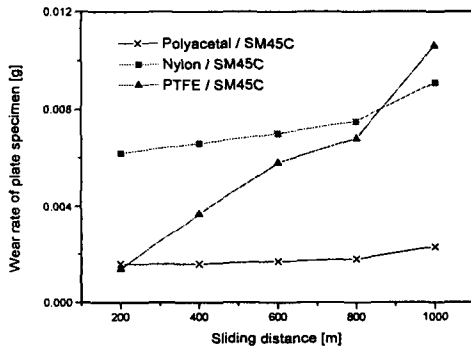


Fig. 4 Variation of the wear rates with sliding distance

나일론의 경우, 폴리아세탈과 PTFE에 비하여 플레이트 시편의 초기마멸현상이 두드러지게 나타났다. 이것은 Fig. 3의 마찰계수값의 변화에서 고찰한 바와 같이 미끄럼거리가 200m에 도달하기 전에 마찰열로 인하여 고분자구조가 와해되면서 마멸되기 때문인 것으로 판단된다. 이후로 마멸량은 완만한 증가를 나타내다가 800m를 넘어서면 더욱 크게 증가하였다.

폴리아세탈은 세 가지 재료 중에서 가장 적은 마멸량을 나타내었다. 실험시작 후

미끄럼거리가 200m에 이르기 전에 짧고 굵은 막대모양의 마멸입자가 다량으로 발생하였으며 이후로는 거의 마멸량이 증가하지 않다가 미끄럼거리가 800m를 넘으면서 다시 마멸량이 약간 증가하였다.

PTFE는 실험 전 과정에 걸쳐서 지속적으로 마멸이 이루어지는 것으로 나타났으며, 마찰면의 재질이 박막형태로 계속하여 이탈되면서 Fig. 3의 마찰계수값의 변화에서 확인된 바와 같이 마찰계수값이 거의 일정하게 유지된 것으로 판단된다. 미끄럼거리가 800m인 경우의 마멸량은 실험상 오차 때문인 것으로 사료된다.

3.3 SEM을 이용한 마찰면의 관찰

실험을 거친 플레이트 시편을 SEM으로 관찰한 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5의 (a), (b), (c), (d)는 나일론, (e), (f)는 폴리아세탈, 그리고 (g), (h)는 PTFE 재질의 플레이트 시편에 대하여 실험을 수행한 후 마찰면을 관찰한 것이다.

각 재료의 대표적인 마찰면을 비교해보면, 우선 Fig. 5의 (a)의 경우 모재로부터 이탈된 나일론 마멸입자를 보여주고 있으며, (e), (g)와 비교하여 볼 때 모재로부터 이탈된 마멸입자의 양이 상대적으로 많을 뿐 아니라 마멸입자의 길이가 상대적으로 길게 꼬여 있는 특징을 볼 수 있다. 이에 비하여 Fig. 5 (e)의 폴리아세탈 마찰면은 나일론에 비하여 마찰면이 비교적 매끄러운 것을 알 수 있으며, Fig. 5 (g)의 PTFE표면은 마찰의 흔적이 매우 적고 눌러진 듯한 매끈한 표면을 나타내고 있다. 이러한 마찰면들을 비교해 볼 때 나일론은 폴리아세탈에 비하여 상대적으로 강도가 낮은 연약한 재료로서 마찰력에 의하여 쉽게 재질이 모재로부터 이탈되고 있다는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 5 (g)의 PTFE는 다른 재질에 비하여 마찰계수가 낮은 상태

에 놓여 있는 것으로 판단할 수 있다.

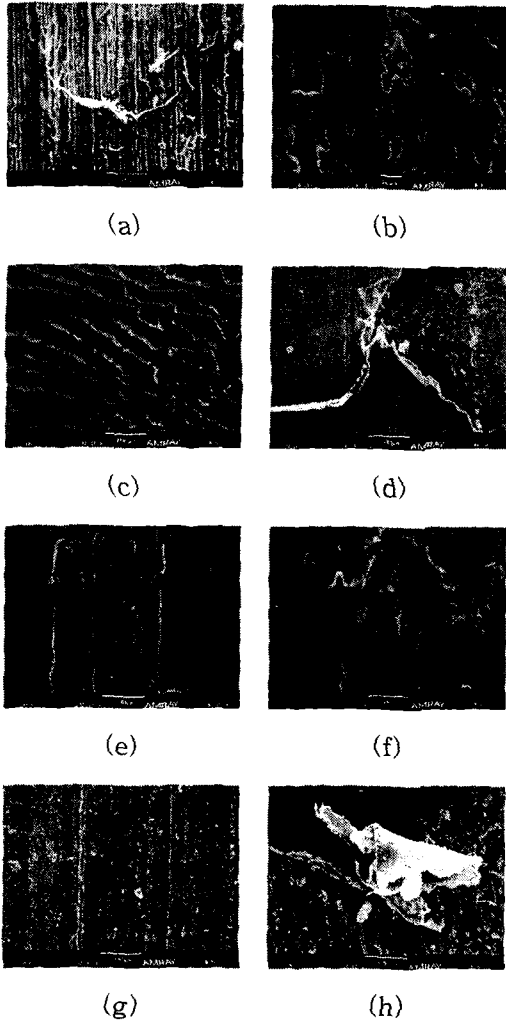


Fig. 5 SEM images of the tested plate specimens ; (a),(b),(c),(d) - Nylon, (e),(f) - Polyacetal, (g),(h) - PTFE

Fig. 5 (b), (c)는 나일론의 마찰면을 확대한 것으로서 (b)는 나일론이 마찰열에 의하여 용융, 냉각된 후 계속되는 마찰작용에 의하여 각여나간 평탄한 마찰면을 볼 수 있다. 또한, 일정한 방향으로 마찰의 흔적이 보이는 데 이것은 열화된 나일론표면과 디스크 사이에 외부로부터 유입된 경도가 큰 물질이나 경화된 마멸입자의 마찰작용

에 의하여 급히 흔적으로 판단된다. Fig. 5 (c)의 나일론 표면은 마찰열에 의하여 용융되어 유동성이 발생한 나일론 표면이 마찰력의 영향을 받아 물결무늬를 이루며 밀려나간 후 계속되는 마찰작용으로 인하여 돌출부가 연삭된 것으로 추측된다. Fig. 5 (d)는 나일론의 마찰면에 균열이 발생한 것을 보여 주는 데 이는 나일론이 용융, 냉각되면서 내구성이 급격하게 감소된 후 마찰력 등의 작용에 의하여 균열이 형성된 것으로 보여진다. 이들 그림을 통하여 나일론이 마찰열에 의하여 고온에 노출될 경우 열화되면서 기계적 특성이 감소함으로써 마멸이 비교적 빠른 시간 내에 이루어지는 것으로 판단된다.

Fig. 5 (f)의 폴리아세탈 마찰면을 살펴보면 짧게 잘려나간 폴리아세탈 재질이 뭉쳐져 있는 것을 볼 수 있으며, 이로부터 폴리아세탈은 취성이 비교적 큰 재료일 것으로 판단된다. Table 1에 나타난 것처럼 폴리아세탈이 나일론에 비하여 상대적으로 내열성이 우수하고 강도가 크기 때문에 동일한 실험조건하에서 나일론처럼 용융되기 보다는 잘게 부서어질 가능성을 엿볼 수 있다. 폴리아세탈과 짝을 이루는 디스크표면들을 관찰해 보면 마찰방향으로 길게 패인 흠을 볼 수 있었다. 폴리아세탈 플레이트를 이용한 실험의 경우 이러한 디스크표면의 흠집이 매 실험마다 관찰되는 것으로 볼 때 외부로부터의 이물질 개입에 의한 것이 아니라 마찰면에서 이탈된 폴리아세탈입자가 경화된 후 마찰면과 디스크 사이에 끼여들면서 디스크 표면이 연삭되는 것으로 판단된다. 디스크재질인 SM45C는 경도값이 $H_B = 163 \sim 269$ 로서⁽⁷⁾ 기계구조용 탄소강재 중에서 비교적 경도가 높다는 점을 감안하면 경화된 폴리아세탈 마멸입자의 경도는 매우 클 것으로 추측된다.

또한, Fig. 5 (h)의 PTFE 마찰면의 경계부분에서 얇게 박리된 재질이 말려 올라

간 상태로 붙어 있는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 현상은 전술한 바와 같이 전단력에 약한 PTFE재질이 마찰면에서 박막형태로 이탈되기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

SM45C재질의 디스크시편과 나일론, 폴리아세탈, 그리고 PTFE 재질의 플레이트시편을 이용한 왕복동 마찰마모실험을 통하여 전술한 실험조건 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 마찰계수는 나일론>폴리아세탈>PTFE의 순으로 작게 나타났다. 나일론은 마찰열에 의한 재질의 stick-slip현상으로 인하여 마찰계수가 크게 나타난 것으로 판단되며, 전단력에 약한 PTFE는 마찰에 의하여 표면재질이 쉽게 박리되면서 마찰계수가 가장 작게 나타나는 것으로 사료된다.
- (2) 마멸량은 폴리아세탈이 가장 작았다. 총미끄럼거리가 1000m인 경우 나일론과 PTFE의 전체 마멸량은 비슷하였으나, 나일론의 경우 초기에 대부분의 마멸이 이루어지는 것으로 나타났으며 PTFE는 실험 전구간에 걸쳐서 일정하게 마멸이 이루어지는 것을 알 수 있었다. 마찰계수가 낮은 PTFE가 폴리아세탈보다 더 큰 마멸량을 보이는 원인은 방향성을 가지는 분자구조로 인하여 전단력에 약한 PTFE의 경우 마찰면에서 재질이 박막형태로 쉽게 이탈되기 때문인 것으로 사료된다.
- (3) SEM을 이용한 마찰면의 관찰 결과 나일론은 마찰열에 의하여 용융, 냉각과정을 거치면서 열화되어 기계적 강도가 감소함으로써 마멸이 쉽게 진행되는 것으로 판단된다. 따라서, 나일론의 경우 폴리아세탈이나 PTFE에 비하여

내열성이 뒤떨어지는 것으로 보여진다.

참고문헌

- (1) 이기만, 정동천, 플라스틱 해설과 물성집, 한국플라스틱기술정보, 1992
- (2) Schönherr, H. and Vancso, G. J., "The mechanism of PTFE and PE friction deposition", Polymer, Vol.39, No. 23, pp5705~5709, 1998
- (3) Tanaka K., Uchiyama, Y., and Toyooka, S., "The mechanism of wear of polytetrafluoroethylene", Wear, Vol.23, pp153, 1973
- (4) Clerico, M., "Tribological behaviour of polyacetals", Wear, Vol 64, pp259, 1980
- (5) Kang, T. et al, "Effects of amorphous nylon on the properties of nylon", Polymer testing, Vol 16, pp391
- (6) Bai, M. et al, "Reciprocal sliding wear of SiC particle-reinforced Al-Cu aluminium matrix composites against stainless steel, high speed tool steel and ceramics II. Wear mechanisms", Wear, Vol. 194, pp126, 1996
- (7) 小栗達男, 기계설계도표편람, 대광서림, 1990