

플라스틱재료의 왕복동마찰마멸거동

김충현*,** · 안효석* · 정태형***

Reciprocating sliding wear behavior of plastics against steel

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

* Tribology Research Center, KIST

** Department of Mechanical Design and Production Engineering, Hanyang University

*** School of Mechanical Engineering, Hanyang University

Abstract - Friction and wear test was performed for nylon, acetal resin, and PTFE(polytetrafluoroethylene) under reciprocating dry sliding conditions against a steel counterpart. Friction coefficient and specific wear rate were analysed as a function of sliding distance and applied load. The worn surfaces of plate and disc specimens were observed using SEM(Scanning Electron Microscopy). The experimental results show that acetal resin exhibited lowest wear rates whereas PTFE possessed lowest friction coefficient. The prominent wear mechanisms found were adhesion and abrasion.

Key Words - Friction, Wear, Reciprocating sliding, Nylon, Acetal resin, PTFE

1. 서 론

나일론, 아세탈수지, 그리고 PTFE 등의 공업용 플라스틱(engineering plastics)은 각종 산업용 기계 및 장치의 부품 소재로서 널리 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, 아세탈수지의 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 왕복동마찰마멸 실험장치(Plint & Partners Ltd.)을 사용하여 실험을 수행하였다.

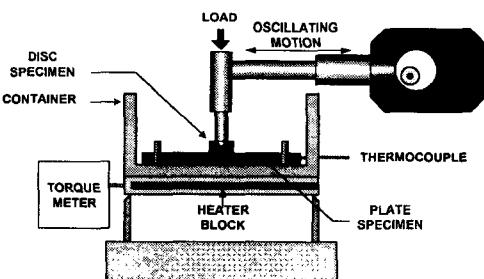


Fig. 1 Schematic view of the test rig

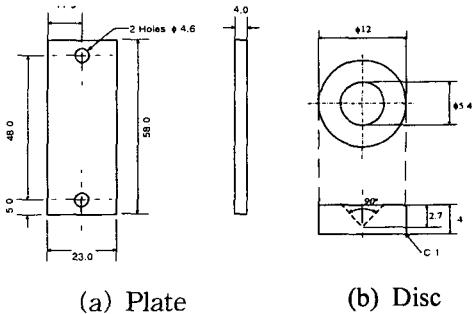


Fig. 2 Test specimens

2.2 시편제작

플레이트 재료로는 나일론, 아세탈수지, 그리고 PTFE의 세 가지, 디스크는 SM45C를 각각 사용하여 제작하였으며, 시편의 제원은 Fig. 2에 나타내었다.

플레이트 시편들의 재질특성은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Properties of plate specimens

Properties \ Materials	Nylon	Acetal resin	PTFE
Specific weight	1.14	1.37	2.11
Tensile strength [MPa]	62.2	65.1	-
Surface roughness, Ra [μm]	1.05	0.86	1.34

Table 2 Test conditions

Applied load	15N(0.125MPa), 29N(0.25MPa), 57N(0.5MPa), 85N(0.75MPa)
Sliding distance [m]	200, 400, 600, 800, 1000
Sliding stroke [mm]	15
Sliding frequency [Hz]	10
Environment	Air
Temperature	Room temperature
Humidity	35 ~ 55%

표면연마를 거친 후 플레이트시편은 에틸알코올, 디스크시편은 아세톤에 각각 담가 초음파세척기를 이용하여 세척하고 건조기에서 40°C로 24시간 동안 건조시킨 후 실험에 사용하였다. 각 재질의 비중은 시편을 건조시킨 후 측정하였다.

2.3 마찰마멸실험

실험조건은 Table 2에 나타내었다.

2.4 마찰특성 및 마멸기구 평가

실험이 진행되는 동안 마찰면의 변화과정, 마찰계수의 변화를 동시에 관찰하였다.

실험 직전과 실험수행 직후에 플레이트시편과 디스크시편의 중량을 측정하여 마멸량을 계측하였고, SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용하여 마찰면을 관찰하였으며 마찰계수값, 비마멸량(specific wear rate) 등을 바탕으로 하여 나일론, 아세탈수지, 그리고 PTFE의 마찰특성을 비교하고 그 마멸기구를 파악하고자 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 마찰계수의 변화

실험을 통하여 얻은 마찰계수값의 변화를 Fig. 3에 도시하였다.

전체적으로 볼 때 작용하중값이 낮을수록 마찰계수값의 크기가 증가하였으며 동시에 마찰계수값의 진폭이 커지는 것을 관찰할 수 있었다. 이것은 플레이트와 디스크 사이의 마찰력과 작용하중 사이의 힘의 불균형에서 기인된 것으로 판단된다.

나일론의 경우, 작용하중 15[N] 이외의 하중값에서는 실험 시작 후 약 1분 이내에 마찰면이 거울면(mirror surface)을 형성하는 것을 관찰할 수 있었고, 초반 길들이기 과정 이후에도 다른 재료보다 마찰계수값의 크기와 마찰계수변화량이 큰 것으로 나타났다.

이것은 나일론의 내열성이 아세탈수지나 PTFE보다 상대적으로 낮은 것에서 기인하는 것으로 판단되며,⁽¹⁾ 실험시간이 경과됨에 따라 나일론의 마찰면은 마찰열로 인하여 흑갈색으로 변하였다.

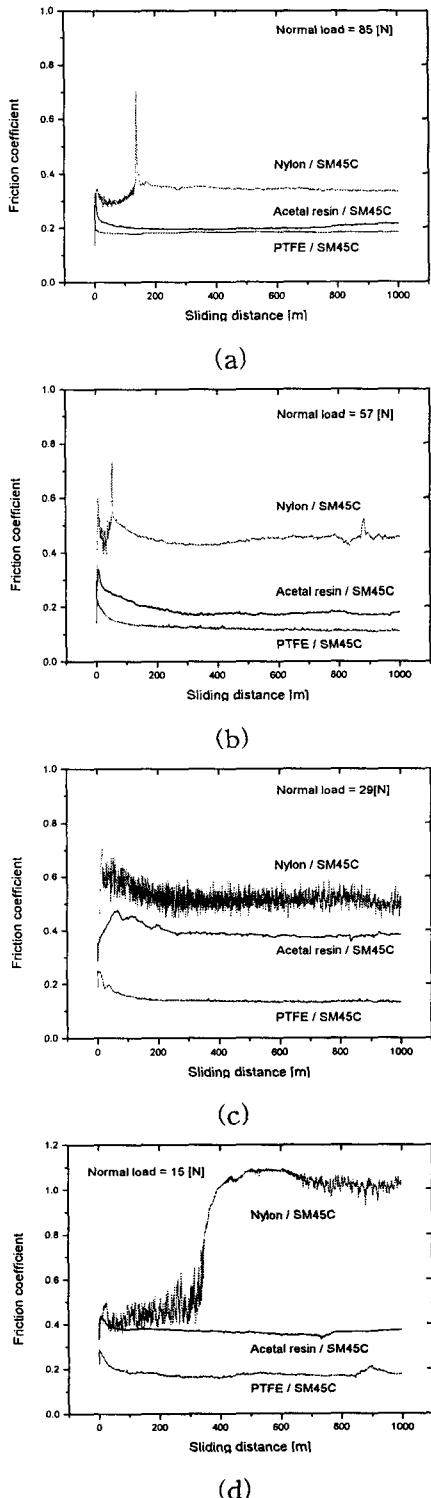


Fig.3 Variation of the friction coefficient with sliding distance and normal load

작용하중이 85[N]과 57[N]인 경우 실험 도중 마찰계수가 순간적으로 0.7~0.8정도까지 불연속적으로 급상승하는 현상을 관찰 할 수 있었다. 이러한 마찰계수의 급격한 상승은 고하중에 의하여 발생한 높은 마찰 열에 노출된 나일론재료가 순간적으로 용융되어 고분자구조가 와해, 이탈하여 상대면인 디스크표면에 순간적으로 점착되면서 마찰계수가 급상승하고 뒤이어 작용하는 하중에 의하여 떨어져 나가는 stick-slip 현상에 의하여 발생한 것으로 판단된다.^(2, 3)

또한, Fig. 3(d)에 나타난 저하중에서의 마찰계수 급상승현상은 나일론 마찰면이 축적된 마찰열로 인하여 열변형온도에 도달하면서 점성이 증가함으로써 상대면인 디스크에 달라붙었다가 떨어지는 과정에서 마찰계수가 상승한 것으로 판단된다.

아세탈수지는 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 대체적으로 일정한 수준을 유지하고 있음을 알 수 있다. 아세탈수지의 경우 마찰계수값은 작용하중이 85[N]과 57[N]인 경우에는 초기과정을 제외하면 0.2~0.25의 범위에 걸쳐서 분포하였으며, 작용하중이 29[N]과 15[N]인 경우에는 0.4 정도로 증가하는 것을 알 수 있었다.

PTFE는 실험 전 과정에 걸쳐서 거의 일정한 마찰계수를 나타내었으며 마찰계수값도 0.2이하로서 나일론이나 아세탈수지보다 훨씬 낮은 값을 보였다. PTFE의 경우 실험이 진행됨에 따라 마찰면에서는 두께가 매우 얇고 지름이 10mm 정도에 이르는 박막형태의 마멸입자가 생성되는 것을 볼 수 있었다. 또한, PTFE의 경우 다른 재질의 플레이트를 이용한 실험과 비교해 볼 때 작용하중의 변동에 따른 마찰계수의 변화 폭이 상대적으로 매우 작았다. 이러한 실험

결과는 PTFE가 분자구조상 방향성이 있는 재료이기 때문에^(2,3) 전단력에 약한 특성을 가지고 있어서 마찰력이 작용하면 마찰부위의 재료가 박막형태로서 쉽게 분리되기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 마멸량의 변화

실험변수의 변화에 따른 비마멸량(specific wear rate)의 변화를 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 도시하였다. 여기에서 비마멸량은 플레이트 체적마멸량(wear volume)을 작용하중과 미끄럼거리로 나누어서 구한 값으로서 단위는 [$\text{mm}^3/\text{N}/\text{m}$]이다.

3.2.1 재질별 비마멸량의 변화

플레이트 재질별 비마멸량의 변화를 Fig. 4에 도시하였다.

나일론과 아세탈수지는 실험초기 단계에서 플레이트 시편의 마멸량이 크게 나타난 이후 지속적으로 감소하였으나 PTFE는 실험구간 전체에 걸쳐서 일정한 마멸이 이루어진다는 것을 알 수 있었다.

한편, 나일론과 PTFE의 경우에는 작용하중이 감소함에 따라서 비마멸량이 증가하는 경향을 보였으나 아세탈수지의 경우에는 반대현상을 나타냈다. 이러한 현상은 나일론이나 PTFE의 경우 저하중에서도 비교적 다량의 마멸입자가 발생하는 반면에 아세탈수지는 마멸량이 하중에 비례하여 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 4 (a)의 나일론의 경우에는 대체적으로 초기마멸현상이 두드러지게 나타났으며 이후 감소하는 추세를 보였다.

Fig. 4 (b)에서처럼 아세탈수지는 세 가지 재료 중에서 가장 적은 비마멸량을 나타내었으며 초기마멸이 상대적으로 많다는 것을 알 수 있었다.

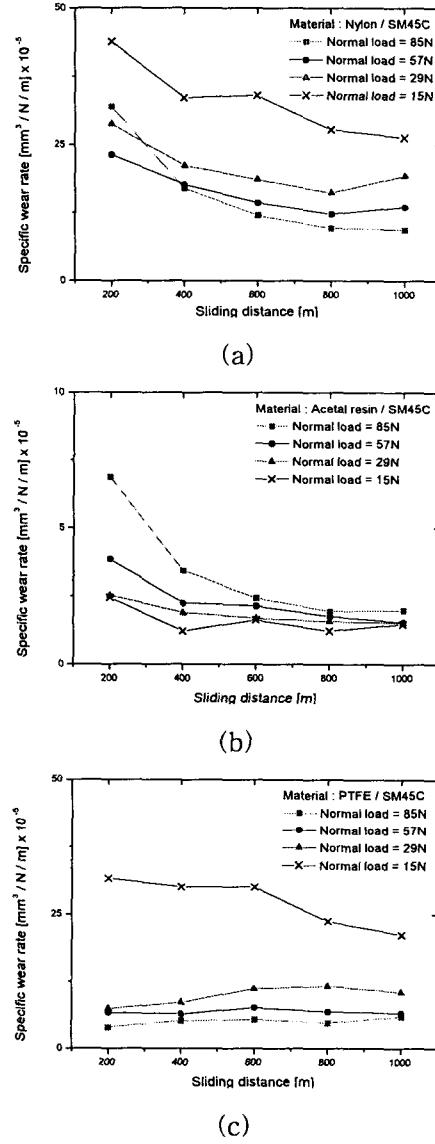


Fig.4 Variation of the specific wear rate with sliding distance and material

Fig. 4 (c)를 보면 PTFE는 실험 전과정에 걸쳐서 지속적으로 마멸이 이루어지는 것으로 나타났으며, 작용하중이 15[N]인 경우를 제외하면 미끄럼거리가 증가할수록 비마멸량은 증가하는 경향을 보였다. 또한, 작용하중의 감소에 따른 비마멸량의 변화율은 다른 재료에 비하여 가장 작았다.

3.2.2 하중별 비마멸량의 변화

실험을 통하여 얻은 하중별 비마멸량의 변화를 Fig. 5에 도시하였다.

Fig. 5를 살펴보면 거의 모든 하중값에 있어서 비마멸량의 크기는 나일론 > PTFE > 아세탈수지의 순서로 나타났다.

또한, 나일론과 PTFE의 경우 작용하중이 감소함에 따라서 비마멸량이 증가하는 특징을 보였으나 아세탈수지는 상대적으로 하중값의 변화에 따른 영향이 매우 작았다.

한편, 나일론은 초기마멸량이 다른 재료에 비하여 3~10배 정도에 달할만큼 크다는 것을 알 수 있는데, 이것은 동일하중이 작용하는 경우 내열특성에서 열세에 있는⁽¹⁾ 나일론의 마멸이 상대적으로 크다는 것을 말해 준다.

3.3 SEM을 이용한 마찰면의 관찰

실험을 거친 플레이트 시편을 SEM으로 관찰한 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

각 재질의 대표적인 마찰면을 비교해 보면, 우선 Fig. 6의 (a)에 보인 나일론 표면에는 마멸입자가 많을 뿐만 아니라 마멸입자가 길게 끄여 있는 특징을 볼 수 있다. 이에 비하여 Fig. 6 (e)의 아세탈수지 마찰면은 마찰면이 비교적 평탄하며, Fig. 6 (g)의 PTFE 표면은 마찰흔적이 매우 적고 매끄러운 표면을 나타내고 있다. 따라서, 나일론은 아세탈수지보다 연약한 재질로서 쉽게 마멸되고 있다는 것을 알 수 있으며 PTFE는 다른 재질에 비하여 마찰계수가 낮을 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 6 (b)는 나일론이 마찰열에 의하여 용융, 냉각된 후 계속되는 마찰작용에 의하여 깍여나간 평탄한 마찰면을 볼 수 있다. 또한, 일정한 방향으로 마찰의 흔적이 보이는 테 이것은 열화된 나일론 표면과 디스크 사이에 외부로부터 유입된 경도가 큰 물질이나 경화된 마멸입자의 마찰작용에 의하여 긁힌 흔적으로 판단된다.

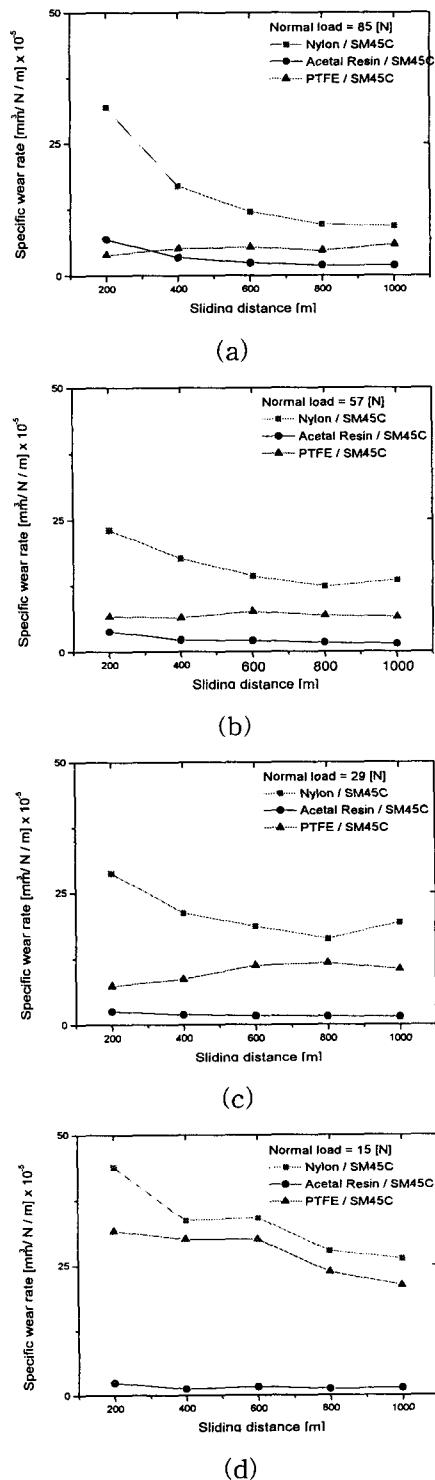


Fig.5 Variation of the specific wear rate with sliding distance and normal load

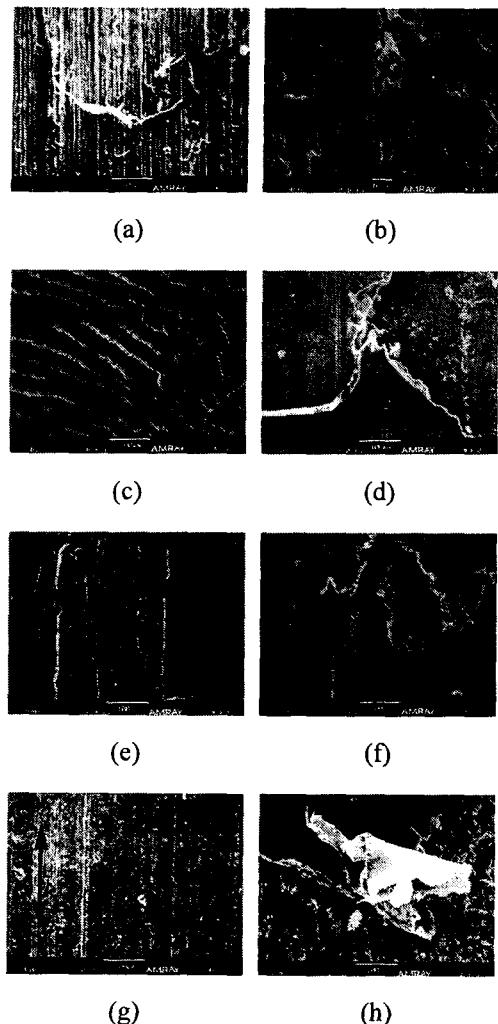


Fig.6 SEM images of the tested plate specimens (a),(b),(c),(d) - Nylon, (e),(f) - Polyacetal, (g),(h) - PTFE : the arrow denotes sliding direction, normal load 85N, sliding distance 1000m.

Fig. 6 (c)의 나일론 표면은 마찰열에 의하여 용융된 나일론 표면이 마찰력의 영향을 받아 물결무늬를 이루며 밀려나간 후 계속되는 마찰작용으로 인하여 돌출부가 연삭된 것으로 추측된다.

Fig. 6 (d)는 나일론의 마찰면에 균열이 발생한 것을 보여 주는 데 이는 나일론이 용융, 냉각되면서 내구성이 급격하게 감소된 후 마찰력등의 작용에 의하여 균열이

형성된 것으로 보여진다. 따라서, 나일론은 고온에 노출될 경우 열화되면서 기계적 특성이 감소함으로써 마열이 비교적 빠른 시간 내에 이루어지는 것으로 판단된다.

Fig. 6 (f)의 아세탈수지 마찰면에서 짧게 잘려나간 마열입자를 볼 때 아세탈수지는 취성이 비교적 큰 재료일 것으로 판단된다. 즉, 아세탈수지가 나일론에 비하여 상대적으로 내열성이 우수하고 강도가 크기 때문에⁽¹⁾ 동일한 실험조건하에서 나일론처럼 용융되기보다는 잘 부수어질 가능성을 엿볼 수 있다.

또한, Fig. 6 (h)의 PTFE 마찰면의 경계 부분에서는 PTFE재질이 마찰면에서 박막 형태로 이탈되면서 말려 올라간 상태로 붙어 있는 것을 관찰할 수 있었다.

Fig. 7은 마찰실험을 거친 디스크시편의 표면을 관찰한 것이다.

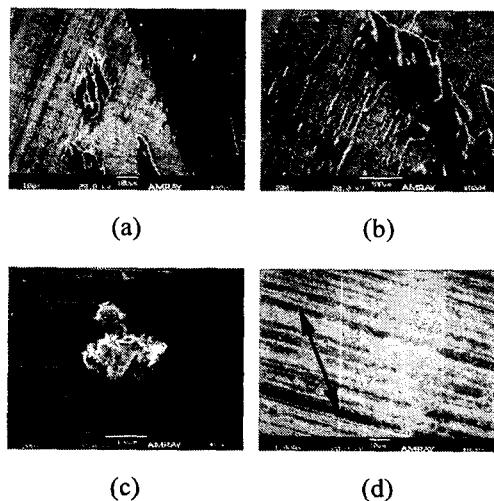


Fig.7 SEM images of the tested disc specimens (a),(b) - Nylon, (c),(d) - Polyacetal : the arrow denotes sliding direction, normal load 85N, sliding distance 1000m.

Fig. 7 (a), (b)에서 검은 색으로 나타난 면이 용융된 후 디스크표면으로 전이된 나일론재질이며 표면에서는 마찰흔과 크래인 관찰되었다.

Fig. 7(c), (d)는 아세탈수지와 쌍을 이루었던 디스크의 마찰면으로서 (c)에서는 디스크로 전이된 아세탈수지 마멸입자를 볼 수 있는 데 플레이트 마찰면에서 관찰된 것처럼 짧게 잘려나간 아세탈수지 재질이 뭉쳐져 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 7(c)를 부분확대한 Fig. 7 (d)에서는 사포로 마무리가공한 디스크표면이 각여나간 흔적을 볼 수 있는데, 아세탈수지와 짹을 이루는 디스크표면들을 육안으로 관찰해 보면 마찰방향으로 길게 패인 흔을 볼 수 있었다. 따라서, 마찰면에서 이탈된 아세탈수지 마멸입자가 경화된 후 마찰면과 디스크 사이에 끼여들면서 디스크 표면이 연삭되는 것으로 판단된다.

4. 결 론

SM45C재질의 디스크시편과 나일론, 아세탈수지, 그리고 PTFE 재질의 플레이트 시편을 이용한 왕복동 마찰마모실험을 통하여 전술한 실험조건 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 마찰계수는 작용하중의 크기와 상관없이 나일론>아세탈수지>PTFE의 순으로 작게 나타났다. 나일론은 마찰열에 의한 재질의 stick-slip^(2,3)현상으로 인하여 마찰계수가 크게 나타난 것으로 판단되며, 전단력에 약한 PTFE는 마찰에 의하여 표면재질이 쉽게 박리되면서 마찰계수가 가장 작게 나타났다.
- (2) 비마멸량은 아세탈수지가 가장 작았다. 아세탈수지의 경우 실험 전 구간에 걸쳐서 비마멸량이 나일론이나 PTFE보다 작았을 뿐만 아니라 초기에 마멸이 이루어진 이후에 마멸량이 감소하는 경향을 보였다.
- (3) SEM을 이용한 마찰면의 관찰 결과 나일론은 마찰열에 의하여 용융, 냉각과

정을 거치면서 열화되어 기계적 강도가 감소함으로써 마멸이 쉽게 진행되는 것으로 판단된다.

- (4) 이상과 같은 실험결과를 종합해 볼 때 아세탈수지는 나일론에 비하여 비마멸량과 하중변화에 따른 비마멸량의 변화가 작을 뿐만 아니라 내열성이 우수하므로 기계요소부품용 소재로 사용하기에 적합한 마찰마멸특성을 보유하고 있는 것으로 판단된다.

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 nylor", 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