



Wear Characteristics and Thermal Stability of PA66/silane treated MoS₂ Composites

Ki-dong Nam, Bo-ram Gu,[†] and Sung-hun Ryu

Department of Chemical Engineering, Kyung Hee University, 1732, Deogyong-daero, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea

(Received December 1, 2020, Revised December 15, 2020, Accepted December 17, 2020)

Abstract: We functionalized a wear-resistant carbon-based MoS₂ filler to solve its limited wear condition problem. The filler exhibits excellent lubricative properties. The surface modification of MoS₂ was carried out using a (3-glycidyloxypropyl)trimethoxysilane (GPTMS) silane coupling agent to improve the low compatibility and dispersibility of the filler that generally degrade the performance of composites. A silane coupling agent was employed for the functionalization of MoS₂, and its effect on the wear resistance of MoS₂/Polyamide-6,6 was investigated. The silanization of MoS₂ was identified by contact angle analysis and Fourier-transform infrared, energy dispersive X-ray, and X-ray photoelectron spectroscopies. The wear resistance of the composite was found to be improved significantly by the surface functionalization of MoS₂.

Keywords: Surface functionalization, Silane coupling agent, Polyamide 66, Molybdenum disulfide, Wear property

Introduction

자동차용 내·외장 제품은 소재의 고급화, 친환경 및 경량화를 통한 연비향상을 지향하며 신소재 개발이 진행되고 있다. 플라스틱은 금속보다 단단하게 만들 수 있고, 울(Wool) 보다 부드럽게 만들 수도 있으며, 투명하게 만들 수도 있는 등 여러가지 장점으로 인해서 플라스틱 소재로 대체하는 분야가 점차 증가하고 있다.^{1,2} 특히 금속을 플라스틱으로 대체함으로써 경량화 소재를 적용하려는 연구가 다양한 부품에 대하여 진행되고 있다.³ 자동차용 각종 기어나 캠 부싱류 부품에 사용되는 플라스틱 소재는 다른 부품에 적용되는 경량소재보다 높은 내열성 및 내마모성이 요구되므로 플라스틱(통상 매트릭스라고함)에 Graphite, Graphene, Glass fiber, Carbon fiber, MoS₂, WS₂ 등 다양한 충전제를 첨가하여 소재의 기계적특성, 내열특성, 그리고 내마모성을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{4,7} 필러(fillers)로 충전된 고분자 복합체는 매트릭스-필러 계면에서의 응력전달, 탄성변형, 그리고 마찰 접촉 특성의 향상을 기대할 수 있으며, 특히 기어, 캠, 부싱류 부품 등에 적용가능한 고내열, 내마모성을 갖는 고분자 복합 소재를 개발하기 위하여 표면장력이 낮은 실리콘 및 윤활제를 이용하는 연구가 보고되어왔다.^{8,9}

그러나 이러한 윤활유들은 플라스틱 소재와 친화성이 떨어지고 마찰 손실로 인한 가공상의 문제 발생이 가능하다. 뿐만

아니라 열분해로 인한 열안정성 저해, 탄화 또는 분해 물질의 영향은 극한 구동 조건 하에서 윤활작용이 저하되어 마찰 및 마모 특성이 감소를 야기시켜 해결해야 할 과제로 보고되고 있다.¹⁰

MoS₂, WS₂는 graphite와 같이 층상 구조를 가지고 있어 shear에 의한 slip 현상이 발생하여 마찰/마모 성능 부여할 수 있으며 transfer film 형성으로 건조한 환경에서도 마찰/마모 성능이 저하되지 않는 특성이 우수하다. 이러한 우수한 마찰 계수 및 내열성 특성으로 인하여 graphite와 비교하여도 압력의 변화에 대한 마찰계수 증가가 없고, 높은 작동 온도 및 산화에 대한 내구성이 우수하여 자동차 부품용으로 적용이 가능하다.¹¹⁻¹⁵

본 연구는 내마모성 탄소기반 필러의 제한적인 마모 문제를 해결하기 위하여 윤활 효과가 우수한 MoS₂를 복합소재로 적용하여 내마모 특성을 향상을 목표로 진행되었다. 또한 고분자복합체의 성능저하 원인이 되는 낮은 상용성 및 분산성을 개선하고자 GPTMS(3-Glycidyloxypropyl)trimethoxy-Silane) 실란 커플링제를 이용하여 MoS₂ 표면을 개질하였고, 개질된 필러를 플라스틱에 적용함으로써 경량화를 실현시킬 수 있는 고기능성 고분자복합소재 개발하였다.

Experimental

1. Material

[†]Corresponding author E-mail: shryu@khu.ac.kr

고분자 매트릭스는 고점도의 Polyamide 6,6 (Vydyne® 67R, Ascend Performance Materials)를 사용하였다. Molybdenum disulfide (MoS_2 -40, Diameter-4 μm)이 사용되었으며, 98% (3-Glycidyloxypropyl)trimethoxy-Silane (GPTMS)는 Shin-Etsu Chemical Co., Ltd (KBM-403)에서 구입하여 사용하였다.

2. Silane treatment of MoS_2

톨루엔 500 ml에 MoS_2 30 g을 60°C 에서 충분히 교반시킨 후 일정량의 GPTMS (1.5 g/mol)를 첨가하고 질소 조건 하에서 1시간 동안 반응을 진행시켰다. 반응 완료 후 아세톤으로 4-5회 세척하고 60°C 에서 진공건조하여 개질 된 MoS_2 필러 (G- MoS_2)를 얻었다.

3. Preparation of composites

고분자의 가공은 co-rotating twin screw extruder (BAUTEK, BA-19, Diameter-19 Φ , L/D-40)를 이용하여 시편을 압출하였다. 가공 온도 profile은 $260\sim 300^\circ\text{C}$ 이며 MoS_2 함량은 0, 5, 10, 15 wt%로 설정하였다. 이후 사출 공정(LG전선, LGH200N)을 통해 ASTM규격의 PA66/ MoS_2 복합체 시편을 제조하였다.

4. Characterizations

표면 처리 여부를 확인하기 위하여 FTIR-ATR (Perkin Elmer, Spectrum one system)를 사용하였고, FE-SEM/EDS (Carl Zeiss, MERLIN), XPS (Thermo Electron, K-Alpha)를 이용하여 모폴로지 및 성분 분석이 실행되었다. 접촉각은 MoS_2 powder를 프레스 기기로 샘플링하여 static contact angle (PCHM 575-4)를 이용해서 deionized water-sessile drop법으로 측정하였다. 복합체의 열 분해 거동은 질소 조건 하에서

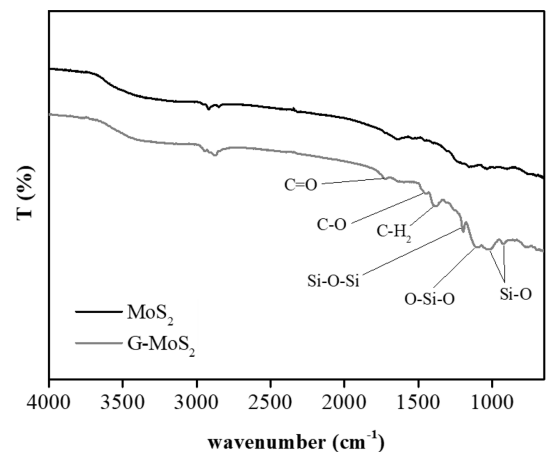


Figure 1. FTIR spectra of MoS_2 and G- MoS_2 .

TGA (Perkin Elmer, TGA7)를 이용하여 $30\sim 800^\circ\text{C}$ 까지 $20^\circ\text{C}/\text{min}$ 의 속도로 승온하며 측정되었다. UTM (SHIMADZU, AG-X, crosshead speed -5 mm/min)을 이용하여 사출된 시편의 인장강도(ASTM D638) 측정을 진행하였다. Wear test (Genuine, 5135 ABRASER)는 양쪽에 각각 1 kg으로 마모륜 CS-17을 사용하여 3000 cycle 진행하여 측정하였다. 마모표면의 조도차는 AFM (Park System, XE 7) 분석기기를 이용하여 측정하였다.

Results and Discussion

1. Structure of silane treated MoS_2

GPTMS를 이용하여 표면 개질 된 MoS_2 의 개질 여부 및 구조 분석을 위하여 FTIR분석을 실시하여 Fig. 1에 나타내었다. MoS_2 필러의 FTIR분석 결과, 표면 개질 후 실란반응으로 인한 MoS_2 의 구조변화를 확인하였다. $920\sim 1024$, 1106 cm^{-1} 부

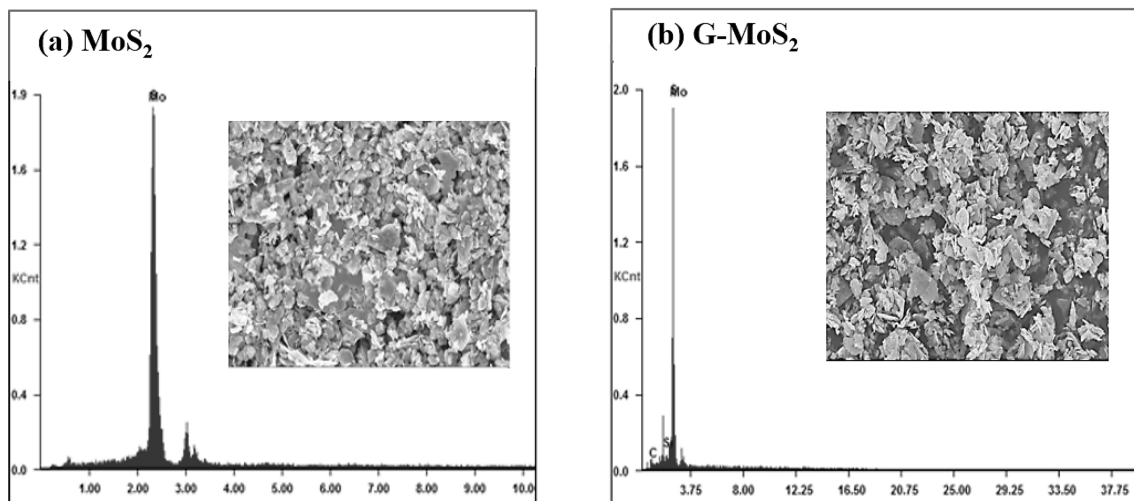


Figure 2. EDS elemental analysis of MoS_2 and G- MoS_2 .

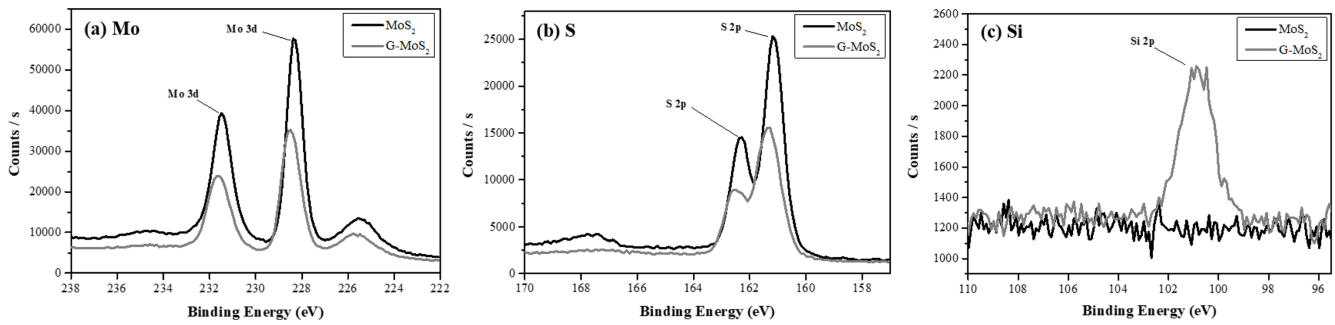


Figure 3. XPS spectra of MoS₂ and G-MoS₂.

근에서, 개질 전 필리에서는 발견되지 않았던 Si-O 및 SiO₂ peak가 개질 된 필리에서는 나타남을 확인하였다. 이는 실란 coupling 반응으로 필리 표면에 Si-OR group이 가수분해되어 Silanol 그룹으로 불리는 -Si-OH로 바뀌며 충전제인 MoS₂ 필러와 반응하고 결합하여 나타난 결과이다. 또한 개질 후 1196 cm⁻¹에서 C-O-C peak가 발견되었고, 1387~1440 cm⁻¹ 사이에서 -CH₂ or C-O, 그리고 1729 cm⁻¹에서 C=O peak가 나타났다. 이는 개질 전 순수한 필리에서는 존재하지 않는 피크로, 실란에 존재하는 성분들이 필리 표면에 결합하여 생성된 새로운 결합구조이다.¹⁶

표면 개질 된 MoS₂의 성분 변화율을 분석하여 실란커플링 반응의 결과를 확인하기 위해 EDS 및 XPS 분석을 진행하여 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. EDS분석결과(Fig. 2(a)-(b)) MoS₂의 구성 성분은 Mo와 S로 각각 37.38% (atom), 62.62% (atom) 이다. 반면에 개질 된 필리의 EDS 성분 분석을 진행한 결과 실란 커플링제 구성 원소 성분들인 Si, C, O 원소가 측정되었다. 입자 표면에 존재하는 성분 분포 및 비율을 더욱 명확하게 확인하기 위하여 XPS 분석을 진행한 결과를 Fig. 3 (a)-(c)와 Table 1에 나타내었다. EDS 결과와 동일하게 필리의 표면 개질함으로써 원소비의 변화를 보였다. 표면 개질 된 G-MoS₂ 샘플에서 반응에 사용된 실란 커플링제인 GPTMS의 구성원소들의 존재를 확인할 수 있었으며, 이를 통해 성공적인 표면 개질 여부를 확인하였다.

Table 1. XPS Analysis : Constituent Element

At. %	Mo	S	Si	C	O
MoS ₂	16.12	39.12	-	23.75	21.01
G-MoS ₂	13.52	24.71	3.67	41.39	16.71

2. Wettability of silane treated MoS₂

프레스 기기를 이용하여 MoS₂ 필러를 필름 형태로 제조하여 GPTMS 반응으로 인한 접촉각의 변화를 측정하고, 표면 개질을 통해 변화된 친수화 거동의 특성 변화를 확인하였다 (Fig. 4). 개질 전 MoS₂의 접촉각은 90.87° (±6)로 hydrophobic한 성질을 보였으나 개질 후 접촉각은 30.64° (±5)로 친수화 표면 개질 효과를 확인하였다(Fig. 4(a-b)). 이 결과는 GPTMS와의 반응하여 증가한 친수성 C-O-C 및 SiO₂기의 증가 때문이다.¹⁷

3. Tensile properties of composite

본 연구에서는 인장강도 그리고 인장 특성에 관한 실험을 시행하여 복합체의 기계적 특성을 파악하였다. 실란으로 개질 한 MoS₂ 필러를 0, 5, 10, 15 wt%로 첨가한 시편의 인장강도와 신장률 특성을 측정하여 필러의 첨가량에 따른 지지체의 물리적 및 기계적 강도 특성을 관찰한 결과(Fig. 5) MoS₂ 필러 대비 개질 한 MoS₂ 필러를 첨가하였을 때, 5, 10

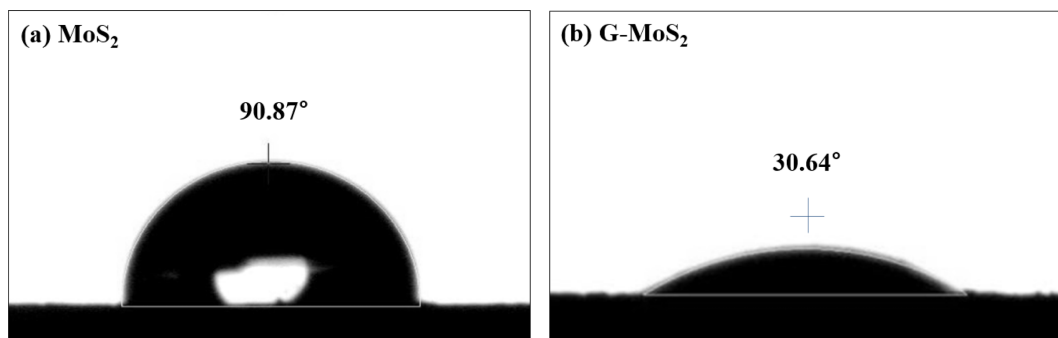


Figure 4. Contact angle of MoS₂ and G-MoS₂.

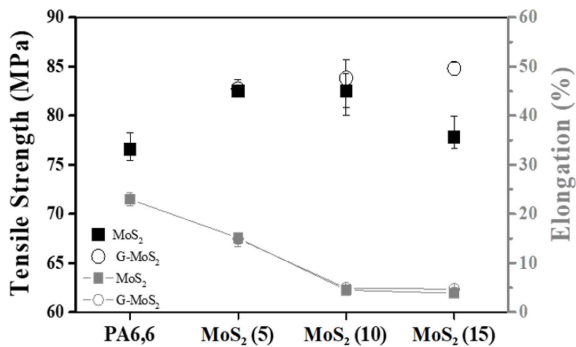


Figure 5. Tensile strength and Elongation of PA66/MoS₂ composite.

wt% 함량 첨가 시에는 비슷한 수준을 나타내었고, 15 wt%를 첨가하였을 때 약 7 MPa의 인장강도 증가를 확인하였으며 이 결과는 층상 구조 존재로 인해 MoS₂ 구조체가 가지고 있는 우수한 intrinsic band 특성과 개질 효과로 인해 얻어진 필러의 우수한 분산성, 그리고 필러-플라스틱 지지체 계면의 접착력의 증대 때문이다. 그러나 elongation 값은 순수한 PA66 지지체에 비하여 감소하는 결과를 나타내었는데, 이는 일반적으로 brittle한 성질을 갖는 여타 무기 재료와 마찬가지로 MoS₂의 구조적 특성 때문일 것이다.¹⁸

4. Wear characteristic

테이버 마모테스트를 통해 마모량 측정을 진행하였고, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그 결과 pristine PA66 대비 필러 첨가에 의한 마모량의 감소 경향을 확인하였다. 또한 MoS₂ 함량 증가에 비례한 마모량 감소를 나타내었고, 모든 함량에서 개질 전 대비 개질 후 높은 내마모성을 보였다. 이 결과는 내마모성 필러로서 MoS₂의 우수한 성능은 물론 필러가 첨가

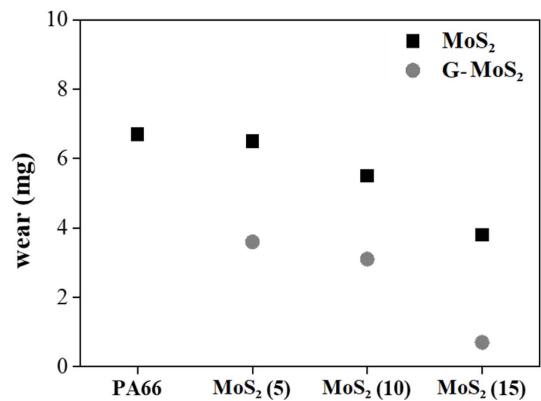


Figure 6. Taber wear test : wear loss of PA66/MoS₂ and PA66/G-MoS₂.

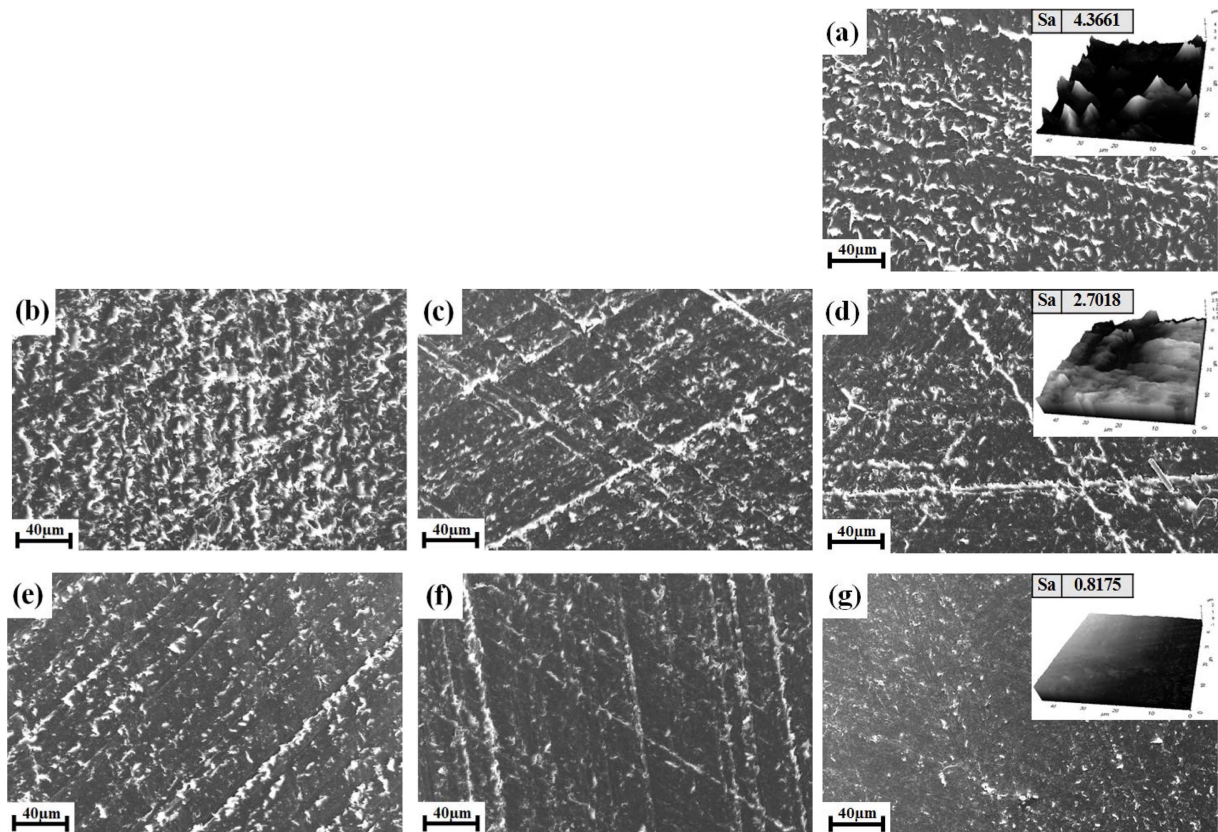


Figure 7. Wear surface SEM image and AFM 3D image of PA66/MoS₂ composite : (a) PA66, (b) PA66/MoS₂ (5 wt%), (c) PA66/MoS₂ (10 wt%), (d) PA66/MoS₂ (15 wt%), (e) PA66/G-MoS₂ (5 wt%), (f) PA66/G-MoS₂ (10 wt%), (g) PA66/G-MoS₂ (15 wt%). (Table: Surface roughness difference).

된 고분자 나노 복합체의 우수한 내마모 특성을 보여준다. 특히 개질된 필러를 15 wt% 첨가한 경우 마모량이 0.7 mg으로 급격히 줄어든 결과를 확인함으로써 pristine PA66 (6.7 mg)와 비교하여 실란 개질된 MoS₂ 필러의 우수한 내마모 특성을 확인하였다. 이 결과는 개질을 통해 필러와 매트릭스 사이의 표면에너지 차이를 감소시킴으로써, 두 물질사이의 계면 접착력이 향상되고 분산성이 증대되므로 우수한 내마모 특성을 발휘한 결과이다.

또한, 테이버 마모테스트를 진행한 샘플의 마모 및 스크래치 특성을 알아보기 위해 FE-SEM과 AFM 이미지를 통해 (Fig. 7) 표면 거칠기를 분석하였다. Pristine PA66와 개질하지 않은 MoS₂ filler를 첨가한 시편의 마모표면을 비교하면, pristine PA66 시편은 표면 전반에 걸쳐 매우 거친 형상을 보였으며, 스크래치 및 깊은 마모 깊이에 의해 수직의 거친 들뜸 현상이 많음을 확인할 수 있었다. 친수화 개질된 MoS₂가 첨가된 복합체에서는 표면 거칠기가 크게 줄어들었다. pristine PA66 (Fig. 7(a))의 경우 표면조도차는 평균 4.3661 μm 를 보였으며, MoS₂ 필러 15 wt% 첨가한 시편 (Fig. 7(d))의 스크래치 표면 조도는 1.365 μm 로 필러 첨가로 인한 조도 차의 감소 경향을 보였다. 그리고 실란 개질된 친수화 필러를 15 wt% 첨가한 시편 (Fig. 7(g))의 표면 스크래치의 거칠기는 0.8175 μm 로 pristine PA66 시편과 비교하여 약 81% 가량 감소하였고 동일한 함량의 개질 전 필러가 첨가된 시편과 비교하여도 매우 큰 폭으로(약 70%) 감소하였음을 확인하였다.

복합체의 마모표면 분석 결과 고분자 매트릭스에 충전된 필러 함량의 증가에 비례하게 스크래치 발생이 적게 나타났

고, PA66/G-MoS₂ 복합체가 pristine PA66 및 PA66/MoS₂ 복합체보다 낮은 표면 조도 차이를 보이며 이 결과는 내마모 측정 결과와 같은 경향을 나타낸다. 해당 결과를 바탕으로 내마모성 필러로서 MoS₂는 우수한 성능을 발휘함을 확인할 수 있으며, 필러의 표면 개질로 인한 복합체의 내마모 성능 향상 효과를 명확하게 확인할 수 있었다.

5. Dispersibility of filler

초기 투입했던 필러의 함침 및 균일한 혼합이 이루어졌음을 확인하기 위해 압·사출 공정을 통해 제조 시편의 EDS Mapping을 진행하여 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8은 PA66 매트릭스 내에 MoS₂와, G-MoS₂가 각각 5, 10, 15 wt%의 함량으로 첨가된 PA66복합체의 Mo 원소에 대한 Mapping 이미지이다. MoS₂가 첨가된 (a)-(c)에서는 필러 간 응집으로 인하여 부분적으로 덩어리 상태로 함침되어있는 형상을 발견할 수 있다. 특히 개질 하지 않은 경우 필러의 함량이 증가할수록 매트릭스 내에서 국부적인 필러 밀집과 응집으로 인한 덩어리 형태의 필러가 두드러지게 나타났다. 반면 (d)-(f)에서는 개질로 인해 응집이 적고 필러 자체의 사이즈를 유지하며 필러가 비교적 균일하게 충전되어있는 모습을 확인할 수 있다. 즉, 필러의 표면개질 결과 매트릭스 내에서 국부적인 필러 밀집 현상이 덜 발견되며, 필러 입자간의 응집이 저하되어 개질 전 보다 균일한 분산도를 가짐을 확인할 수 있었다. 또한 첨가된 필러의 함량이 높을수록 개선 정도가 높게 나타나는 결과를 보여, 15 wt% 첨가시 필러의 개질로 인

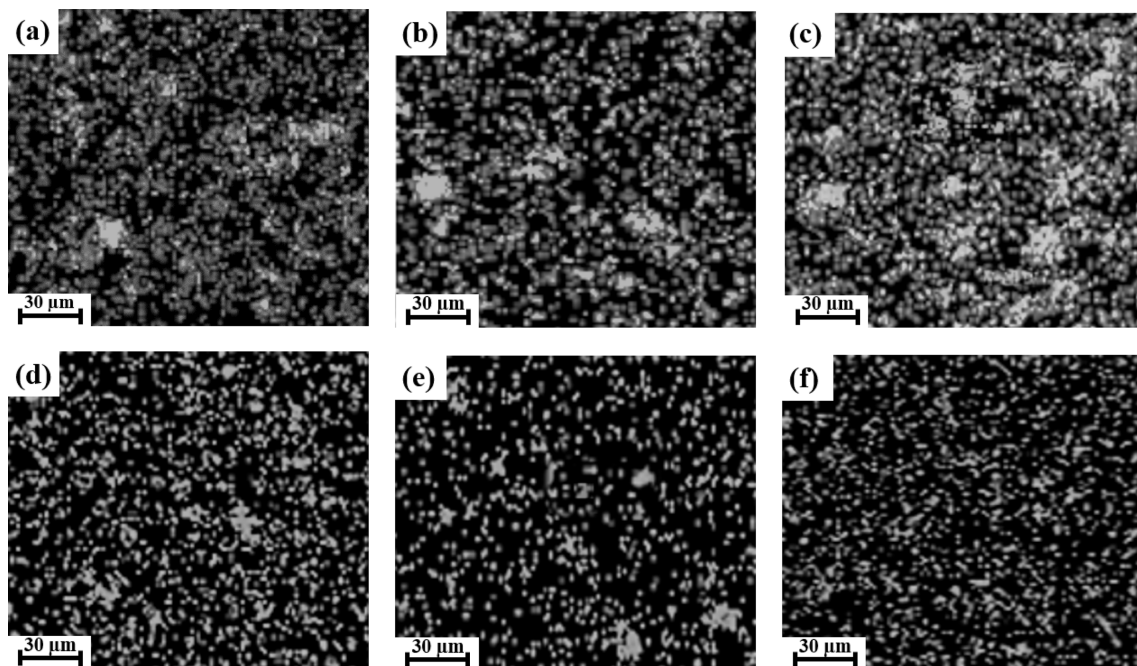


Figure 8. EDS mapping of PA66/MoS₂ composite to Mo elements : (a) PA66/MoS₂ (5 wt%), (b) PA66/MoS₂ (10 wt%), (c) PA66/MoS₂ (15 wt%), (d) PA66/G-MoS₂ (5 wt%), (e) PA66/G-MoS₂ (10 wt%), (f) PA66/G-MoS₂ (15 wt%).

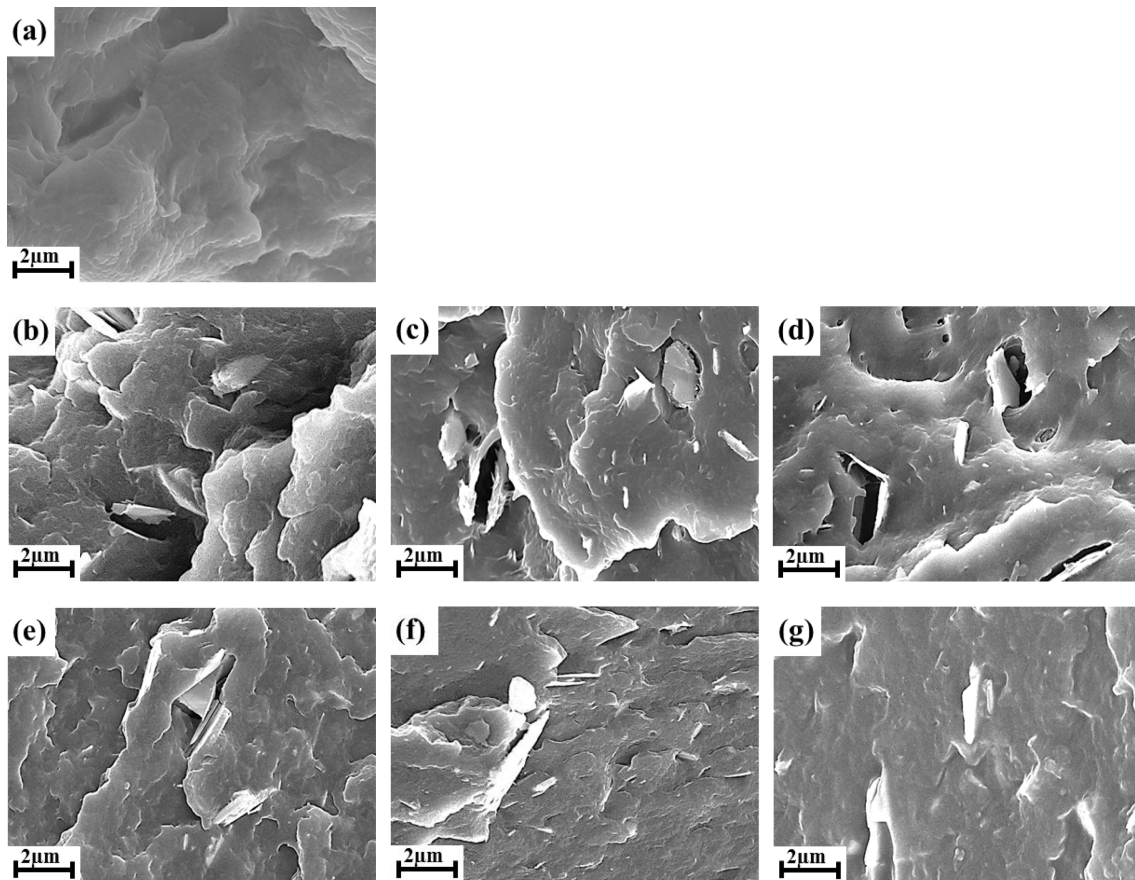


Figure 9. SEM image of PA66/MoS₂ composite : (a) PA66, (b) PA66/MoS₂ (5 wt%), (c) PA66/MoS₂ (10 wt%), (d) PA66/MoS₂ (15 wt%), (e) PA66/G-MoS₂ (5 wt%), (f) PA66/G-MoS₂ (10 wt%), (g) PA66/G-MoS₂ (15 wt%).

한 응집 억제 및 분산성의 향상이 가장 두드러지게 나타났다. 이를 통해 필러의 개질로 인하여 응집저하 및 분산성의 향상을 기대할 수 있다.

6. Fracture surface analysis

SEM을 통해 인장 시편의 파단면(Fracture surface)을 잘라 분석한 결과, 복합체 내 MoS₂ 필러의 계면 상태를 확인할 수 있었다(Fig. 9).

MoS₂와 G-MoS₂를 각각 5, 10, 15 wt%로 충전시킨 샘플의 SEM 이미지를 Fig. 9(a)-(g)에 나타내었다. Fig. 9에서 개질 처리된 MoS₂가 첨가된 경우와 비교하여 Pristine MoS₂가 첨가된 이미지에서는 필러와 매트릭스 사이에서의 들뜸, 깨짐 등 fail현상이 명확하게 보이며, 이탈 및 홀이 비교적 많고, 응집된 채로 충전되어있다가 빠져나간 필러들로 인해 비교적 큰 size의 홀들을 쉽게 발견할 수 있다. 반면 G-MoS₂가 첨가된 복합체의 경우에서도 필러의 깨짐, 작은 홀 등의 fail현상은 발견되나 그 갯수나 size가 작게 나타났다. 즉 매트릭스 내에서의 필러의 젖음성이 개선되고 계면접착력이 비교적 우수함을 확인하였다. 특히 가장 높은 함량의 필러가 첨가된 15 wt%

의 경우 필러의 개질로 인한 응집저하 및 젖음성 향상이 가장 명확하게 나타났다. 이 결과는 MoS₂ 필러의 표면 개질을 통해 고분자 매트릭스와 무기필러 사이의 상용성의 향상을 기대할 수 있다는 해석이 가능하다.

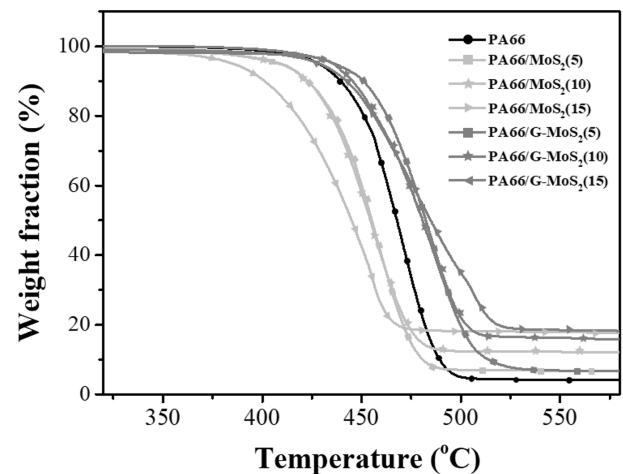


Figure 10. TGA analysis : Thermal properties of PA66, PA66/MoS₂ and PA66/G-MoS₂.

7. Thermal Properties

MoS₂의 첨가에 따른 PA66 복합소재의 열 안정성을 확인하기 위해 압·사출공정을 통해 제조된 시험편을 이용하여 TGA 분석으로 열분해 거동을 관찰하였다(Fig. 10). 전체적으로 무기 필러 소재인 MoS₂의 함량에 비례하여 ashes 잔류량이 증가하는 경향이 관찰되었고, 그 값은 5, 10, 15%로 첨가된 필러의 양에 부합하게 나타나 필러가 매트릭스 내에 균일하게 혼합되었음을 확인하였다.

Pristine PA66의 경우 약 390°C 부근에서 분해가 시작되어 468°C 부근에서 급격한 무게 감소를 보였고, 개질하지 않은 순수한 필러를 첨가했을 때는 모든 함량에서 pristine PA66보다도 낮은 분해 온도를 나타냈다. 이는 복합체 내에서 고분자 매트릭스와 필러간의 낮은 상용성의 영향으로 해석될 수 있으며, 개질 된 필러 첨가시에 개질 전 동일 함량의 필러가 첨가된 복합체 및 pristine PA66와 비교하여 모든 함량에서 내열성의 향상을 확인하였다. 이를 통해 필러 표면개질처리가 매트릭스와 필러 계면사이의 접착력을 증대시켜 MoS₂필러가 가진 우수한 내열특성이 PA66와 컴파운드 된 복합체의 열적 특성 향상을 가능하게한다고 판단할 수 있다.¹⁸⁻²⁰

Moreover, MoS₂ (15 wt%)가 첨가된 PA66/MoS₂(15)샘플의 초기 열분해 온도는 365°C 이나, 실란 개질 한 G-MoS₂ (15 wt%)가 첨가된 PA66/G-MoS₂(15)복합체의 초기 열분해 온도는 414°C 이다. 또한, PA66/MoS₂(15)의 50 wt% 열분해 온도는 445°C 이나, GPTMS 반응으로 개질된 PA66/G-MoS₂(15)복합체의 50 wt% 열분해 온도는 485°C로 필러의 개질로 인해 복합체의 50 wt% 열분해 온도는 약 40°C 증가하였다. 이 결과는 표면개질을 통해 매트릭스와 필러간의 계면접착력 및 상용성 증대로 유추할 수 있으며, 고분자 수지 내에서 무기 필러의 분산성이 증가하여 PA66/MoS₂ 복합체의 열분해 억제 및 내열성 향상 때문이다.

Conclusion

본 연구는 PA66/MoS₂ 고분자 복합재료의 마모 특성 향상을 목적으로 진행되었다.

PA66 고분자 매트릭스 내에서 MoS₂ 필러의 균일한 분산 및 계면 접착력 향상을 위해, 에폭시기가 달린 실란 커플링제를 이용하여 MoS₂필러의 표면을 개질하였고, 복합체의 특성분석을 진행하였다.

필러의 표면처리는 고분자 매트릭스와 필러간의 상용성을 개선시킬 수 있었다. 실란 커플링제의 영향으로 매트릭스 내에서 필러의 분산성 및 계면접착성이 향상되었다. 그 결과 고분자 복합체의 열특성이 향상되었으며, MoS₂ 필러의 첨가 및 실란커플링제의 영향으로 복합체의 내마모성이 증대되었음을 확인하였다.

Acknowledgements

이 논문은 2020년도 한국고무학회 신양장학금 지원에 의하여 작성되었기에 감사 드립니다.

References

1. Seok Han Yoon, “자동차용 화학소재 : 자동차용 섬유화학소재 개발 동향”, 공업화학전망 16권6호 (2013).
2. M.Y. Lyu, “Application Trend of Plastics: Manufacturing Technology of Plastics for Lightweight Automobile”, 소성가공 443-450 (2015).
3. S.G Lee, “자동차용 복합재료”, 기계저널 39권2호, (1997).
4. H.Unal, “Abrasive wear behaviour of polymeric materials”, Materials & Design vol 26 705-710 (2005).
5. B. N. Ravi Kumar, “Effect of Abrasives on Three-Body Abrasive Wear Behaviour of Particulate-Filled Polyamide66/Polypropylene Nanocomposites”, Composite Interfaces vol 17 (2010).
6. S. M. Lee, “Effect of carbon-nanotube length on friction and wear of polyamide 6,6 nanocomposites”, Wear (2014).
7. Riadh Autay, “Effect of hygrothermal aging on mechanical and tribological behaviors of short glass-fiberreinforced PA66”, Thermoplastic Composite Materials (2019).
8. Y. Xing, “Study on the Friction and Wear Behaviors of Modified PA66 Composites”, Polymer-Plastics Technology and Engineering (2009).
9. H. Hunke, “Plasma modified Polytetrafluoroethylene (PTFE) lubrication of α -olefin-copolymer impact-modified Polyamide66”, Wear (2015).
10. Seung-Soo Kim, “Pyrolysis Characteristics of the Mixture of Waste Fishing Net and Waste Ship Lubricating Oil”, Industrial and Engineering Chemistry (2008).
11. S. C. Kang, “The Friction and Wear of the Plastic (Polymer) Bearing Materials in Lubricated Condition”, 한국과학기술부 (1991).
12. E. Basavaraj, “A Study on Mechanical, Thermal, and Wear Characteristics of Nylon 66/Molybdenum Disulfide Composites Reinforced With Glass Fibers”, Polymer composites (2012).
13. T. Kubart, “Temperature dependence of tribological properties of MoS₂ and MoSe₂ coatings, Surface and Coatings Technology (2005).
14. Paula Ussa Aldana, “WS₂ nanoparticles anti-wear and friction reducing properties on rough surfaces in the presence of ZDDP additive”, Tribology International (2016).
15. J. Korzekwa, “Wear Mechanism of Al₂O₃/WS₂ With PEEK/BG Plastic”, Tribology (2014).
16. YR Liang, “Mechanical and tribological properties of nitrile

- rubber filled with modified molybdenum disulphide”, *Plastics, Rubber and Composites* (2016).
17. M. Khodaei, “Superhydrophobicity on aluminum through reactive-etching and TEOS/GPTMS/nano- Al_2O_3 silane-based nanocomposite coating”, *Surface and Coatings Technology* (2019).
 18. Kaline Pagnan Furlan, “Self-lubricating composites containing MoS_2 : A review”, *Tribology International* (2018).
 19. Stanislav Presolski, “Covalent functionalization of MoS_2 ”, *Materials today* (2016).
 20. Ning Kong, “Advantages of using self-lubricating, hard, wear-resistant MoS_2 -based coatings”, *RSC Advances* (2020).