



## Performances of Plastic Pulley with High Mechanical Properties and Low Friction

Namil Kim<sup>†</sup>, Jung-Seok Lee<sup>\*</sup>, Byung-Kook Hwang<sup>\*\*</sup>, Seokhu Bae, Jeong-Hwan Yoon, and Juho Yun

*Environmental Materials R&D Center, Korea Automotive Technology Institute, 303 Pungse-ro, Pungse-myeon, Chungnam 31214, Republic of Korea*

*\*Research and Development Center, ENA Industry, 144 Mojeon 1-gil, Seobuk-gu, Chungnam 31045, Republic of Korea*

*\*\*Technical Center, Gates Korea, 523 Nongong-ro, Dalsung-gun, Daegu 42982, Republic of Korea*

(Received May 16, 2019, Revised May 27, 2019, Accepted June 4, 2019)

**Abstract:** Polyphenylene sulfide (PPS) was filled with glass fiber (GF), aramid fiber (AF), and solid lubricants to improve the mechanical properties and wear resistance. The addition of GF effectively enhanced the tensile strength, flexural modulus, and impact strength of PPS, while solid lubricants such as polytetrafluoroethylene (PTFE), molybdenum disulfide (MoS<sub>2</sub>), and tungsten disulfide (WS<sub>2</sub>) lowered the friction coefficients of the composites to below 0.3. The ball nut and motor pulley of the electric power steering (EPS) were manufactured using the PPS composites, and feasibility was ascertained thereafter by conducting the durability test. The composites filled with GF and AF showed high mechanical strength, but slip occurred at the interface between the pulley and belt while testing above 50°C. When small amounts of lubricants were added, the slip was no longer detected because of the suppression of friction heat. It is realized that the low friction as well as high mechanical properties is important to ensure the reliability of plastic pulleys.

**Keywords:** composites, friction coefficient, polyphenylene sulfide, pulley, solid lubricants

### Introduction

자동차 산업에서 연비규제에 대응하기 위하여 다양한 방안이 제시되어 왔으며 엔진 및 구동계 부품의 효율성 향상은 성숙된 기술로 인식되면서 최근에는 구조변경, 경량화 재료 개발, 부품 합리화를 통하여 대응책을 마련하고 있다. 완성차 업체에서는 금속 위주의 개발 경향에서 탈피하여 여러 경량 소재를 혼용하는 다중소재 기술이 적용되고 있는데 외장부품뿐만 아니라 내장부품, 엔진부품 등 자동차 거의 모든 분야에서 경량화가 진행되고 있다.<sup>1-4</sup> 고분자 소재는 가볍고 가공성이 우수하며 다양한 특성을 쉽게 구현할 수 있는 장점으로 인해 적용 비중이 점차 증가하고 있다. 적용 분야가 넓어짐에 따라 금속 소재에 상응하는 성능을 발휘하기 위하여 고내열 고강성 엔지니어링 플라스틱을 활용한 복합소재의 개발 필요성이 더욱 제기되고 있다. Polyphenylene sulfide (PPS)는 내열성과 강도, 내약품성이 우수하고 성형 후 치수변화가 거의 없어 슈퍼엔지니어링 소비 시장에서 빠르게 성장하고 있는 소재이다.<sup>5-8</sup> 물성보강용 보강제로는 비교적 가공이 용이하고 다양한 열적 기계적 성능을 만족시킬 수 있는 섬유계 필러가 자동차

주요 부품에 적용되고 있다. 원가대비 성능이 우수한 유리섬유가 복합재료 시장의 약 90% 정도를 차지하고 있으며 탄소 섬유와 유기계 섬유를 이용한 복합재료 개발 역시 꾸준히 진행되고 있다.<sup>9-12</sup>

자동차 조향장치는 크게 전자식(Electric power steering, EPS)과 유압식(Hydraulic power steering, HPS)으로 분류될 수 있는데 조립 시간이 짧고 높은 안전성과 편의성으로 인해 EPS 시스템 적용이 점차 확대되고 있는 추세이다.<sup>13-15</sup> EPS 시스템은 전자제어장치에 연계되는 정보에 따라 조향각, 조향 각속도, 각 차륜의 속도 및 가속도를 포함한 조향 동작을 위한 보타력(assist force)을 효과적으로 제어할 수 있다. 모듈을 구성하는 기어부 부품은 높은 치형 정밀도 구현의 어려움으로 인해 현재 스틸(steel) 소재가 적용되고 있으나 무겁고 부식이 쉽게 발생하며 생산성이 떨어지는 단점으로 인해 복합소재로의 대체 필요성이 꾸준히 제기되고 있다. 본 연구에서는 PPS를 매트릭스 수지로 선정하였고 유리섬유와 아라미드 섬유로 보강시킴으로써 열적 기계적 특성을 향상시키고자 시도하였다. 고체윤활제를 추가로 첨가하여 윤활특성을 부여함으로써 폴리와 벨트 구동 시 계면에서 발생하는 마찰열에 의한 플라스틱의 열화를 억제시키고자 시도하였다. 매트릭스 필러 조성비에 따른 복합소재의 기계적 특성과 마찰마모 특성

<sup>†</sup>Corresponding author E-mail: [nikim@katech.re.kr](mailto:nikim@katech.re.kr)

변화에 대해 알아본 후 최적의 복합소재를 선정하여 EPS용 풀리를 제조하였다. 플라스틱 풀리를 벨트를 내구시험기에 장착한 상태에서 연속적으로 작동시켰을 때 내구성능에 대해 알아보았다.

## Experimental

기어 부품에서 요구되는 열적, 기계적 특성 및 치수안정성 등을 고려하여 polyphenylene sulfide (HNU사, 중국)를 매트릭스 소재로 선정하였고 직경이 약 12  $\mu\text{m}$ 이고 길이가 각각 4 mm, 3 mm로 잘려진 형태의 유리섬유(910-13P, Owens corning)와 아라미드섬유(Twaron, Teijin)로 보강시켜 복합소재를 제조하였다. 고체윤활제로는 PTFE, graphite,  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$  4종을 선정하였다. 유기물기반 PTFE는 다른 무기 필러와 달리 가공시 열에 의해 분해가 발생할 수 있으므로 내열성이 우수한 분말형태의 제품을 사용하였다. 전단이 발생하기 쉬운 육각 층상형 구조를 갖는 graphite ( $\sim 100 \mu\text{m}$ )와  $\text{MoS}_2$  ( $\sim 4.3 \mu\text{m}$ ), 고온 윤활특성이 우수한  $\text{WS}_2$  ( $\sim 7 \mu\text{m}$ )을 각각 첨가하였다.<sup>16-20</sup> 우선 유리섬유와 아라미드섬유 첨가에 따른 복합소재의 기계적 특성변화에 대해 살펴본 후 고체윤활제를 추가로 첨가했을 때 마찰마모 특성 변화에 대해 알아보았다.

이축압출기(twin screw extruder, Bautek)를 이용하여 290~320°C 범위에서 수지와 필러를 균일하게 혼합시킨 후 사출공정(PRO-80MC, 동신유압(주))을 통하여 물성 측정용 시험편을 제조하였다. 가공하는 동안 유리섬유의 깨짐 현상을 최소화하기 위하여 main feeder로부터 약 70 cm 떨어진 지점에 위치한 side feeder를 통해 정량 주입하였다. 필러 보강에 따른 복합재료의 기계적 물성 변화는 인장강도, 굴곡탄성률, 충격강도 측정을 통해 알아보았고 마찰마모 특성은 왕복식 마모시험기(TE77, 한미산업)를 이용하여 확인하였다. 동일한 소재로 제조된 직사각형 모양의 하판(가로 58 mm  $\times$  세로 38 mm  $\times$  두께 4 mm)과 원통형 모양의 상판(직경 8 mm  $\times$  높이 5 mm)을 접촉시킨 후 30N의 하중을 가한 상태에서 10 Hz의 속도로 상판을 연속적으로 왕복운동시켰을 때 마찰계수를 측정하였다(Figure 1a). PPS 복합소재를 이용하여 제조된 볼넛풀리

(ball nut pulley)와 모터풀리(motor pulley)를 벨트와 함께 내구시험기(Multi cycle rig, MCR)에 장착한 후  $-40^\circ\text{C}$ ~ $110^\circ\text{C}$ 의

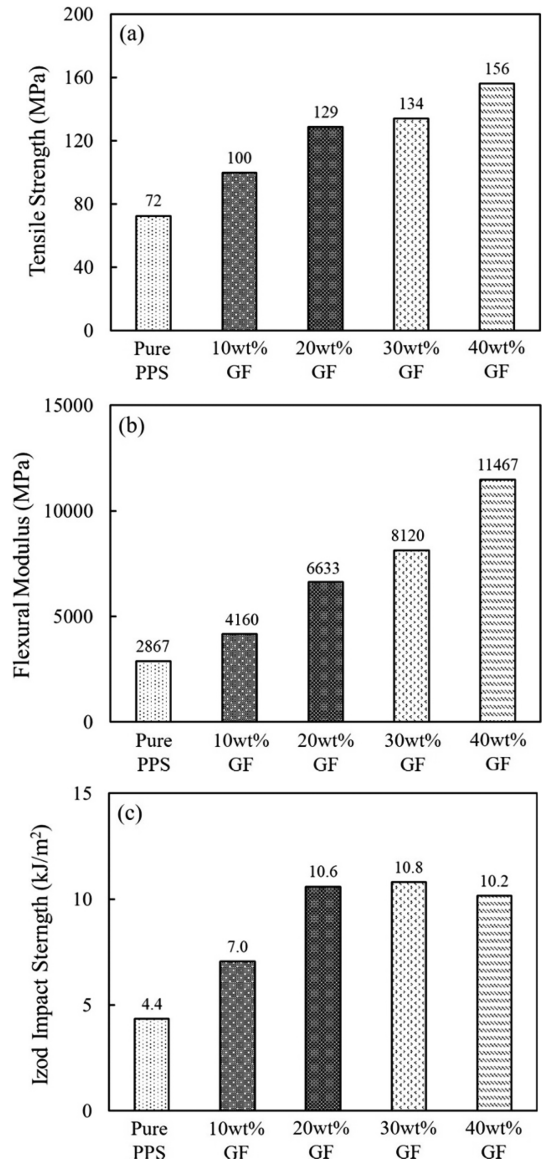


Figure 2. The effect of glass fiber content on (a) tensile strength, (b) flexural modulus, and (c) izod impact strength of PPS.

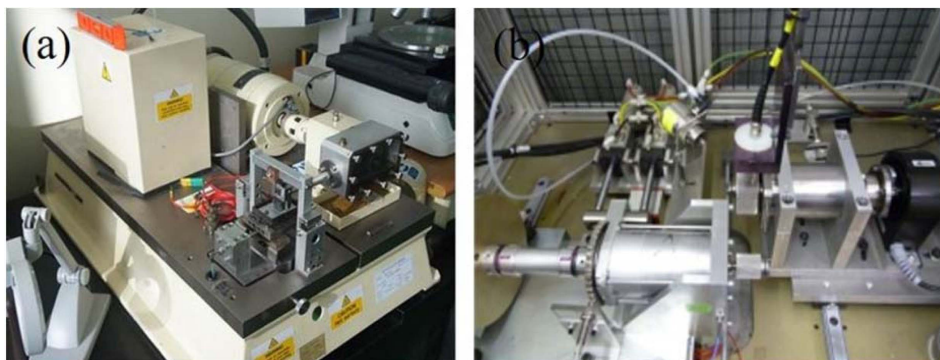


Figure 1. The equipment used for (a) friction test of composites and (b) durability test of the motor and ball nut pulley.

온도범위에서 변경하면서 정방향 15회전, 역방향 15회전으로 연속적으로 구동시켜 성능을 시험해 보았다(Figure 1b). 내구 시험동안 구동력이 가해지는 모터풀리에는 900 rpm, 3 Nm의 토크가 적용되었다.

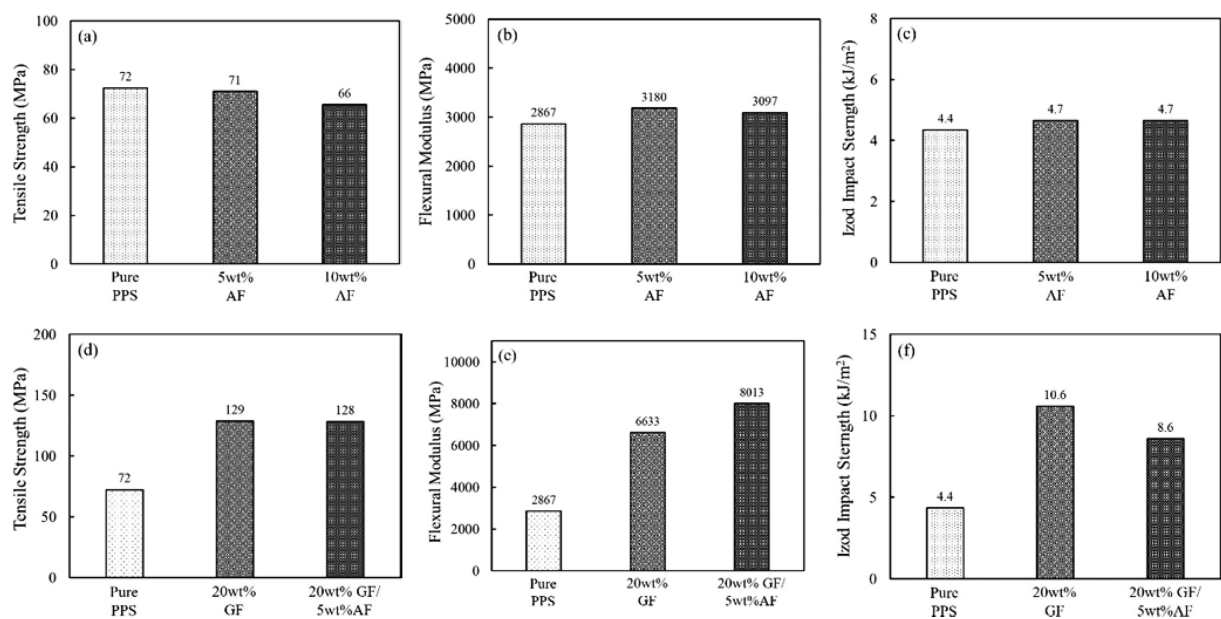
## Results and Discussion

Figure 2는 유리섬유 함량에 따른 PPS 복합체의 인장강도, 굴곡탄성률, 충격강도 변화를 보여준다. 유리섬유 함량에 비례하여 기계적 물성이 크게 향상됨을 알 수 있으며 40 wt% 일때 인장강도는 순수 수지 대비 100% 이상 향상되었고 굴곡탄성률은 400% 정도 높은 수치를 보였다. 이는 외부에서 하중이 가해질 때 매트릭스에 의해 둘러싸여 있는 유리섬유가 대부분의 하중을 분산시켰기 때문으로 사료된다. 기어부품은 조업 특성상 벨트와의 접촉을 통해 힘을 전달하기 때문에 강도뿐만 아니라 탄성률 역시 중요한 지표로 생각된다. 유리섬유 함량이 10~40 wt%인 범위에서 충격강도는 각각 7.0, 10.6, 10.8, 10.2 kJ/m<sup>2</sup>를 보였으며 20 wt% 첨가해도 순수 PPS에 비해 2배 이상 증가했음을 알 수 있다(Figure 2c). 매트릭스 내에서 섬유의 길이가 길수록, 수지와 필러간 상용성이 높을수록 충격강도가 향상되는 것으로 알려져 있다. 인장강도와 마찬가지로 충격강도 역시 유리섬유 함량에 비례하여 선형적인 증가를 보이지 않았는데 이는 유리섬유 함량이 증가함에 따라 섬유-섬유간, 섬유-장비표면간 접촉이 늘어나면서 매트릭스 내 섬유 길이가 짧아지는 결과를 초래하여 보강효과가 감소되었기 때문이다. 섬유함량에 따른 섬유길이 및 이에 따른 복합소재의 인장 및 충격강도 변화는 문헌에서 확인할 수

있다.<sup>21,22</sup>

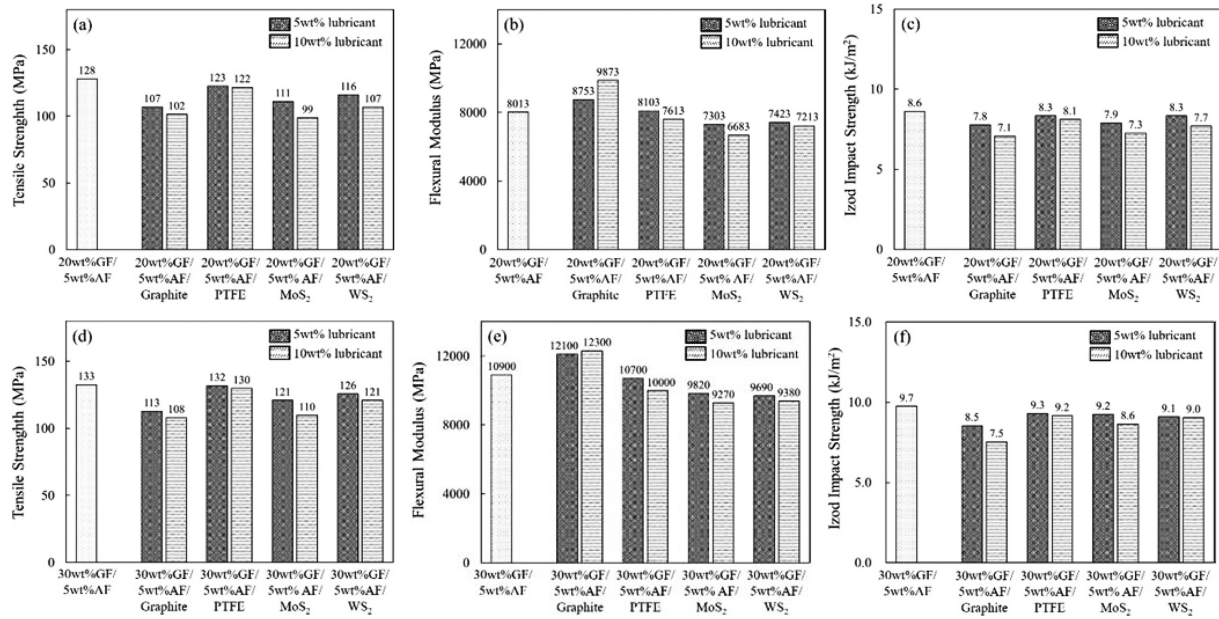
아라미드섬유는 유리섬유에 비해 무게가 가볍고 고탄성, 내마모 특성을 가지고 있기 때문에 기어부품의 경량화와 내구성 향상에 효과적일 것으로 사료된다. Figure 3a-c는 아라미드섬유 첨가에 따른 PPS 복합소재의 물성변화를 보여준다. 아라미드섬유 함량이 5 wt%일때 인장강도는 순수 수지와 비슷한 71 MPa 수준을 보였으며 굴곡강도와 충격강도는 각각 3180 MPa, 4.7 kJ/m<sup>2</sup>으로 약간 상승하였다. 함량을 10 wt%까지 높일 경우 기계적 물성이 오히려 저하되는 것으로 나타났다. 유리섬유와 달리 아라미드섬유 첨가에 따른 기계적 물성 향상 효과는 거의 관찰되지 않았는데 이는 사슬 내 극성 작용기가 적어 화학적으로 불활성이고 표면 거칠기가 낮아 매트릭스와의 젖음성이 떨어지기 때문으로 사료된다. 따라서 아라미드 섬유 함량은 5 wt%로 고정하였다. 유리섬유 함량이 20 wt%인 복합소재에 아라미드섬유를 5 wt% 첨가했을 때 기계적 물성 변화를 살펴보았다. 인장강도는 128 MPa를 보여 유리섬유 단독으로 보강된 복합소재와 거의 유사한 값을 보인 반면 굴곡탄성률은 1,380 MPa으로 상승하였고 충격강도는 2.0 kJ/m<sup>2</sup> 감소하였다(Figure 3d-f).

Figure 4a-c는 유리섬유와 아라미드섬유 함량을 각각 20 wt%, 5 wt%로 고정한 상태에서 고체윤활제 4종(graphite, PTFE, MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>)을 5 wt%, 10 wt% 첨가했을 때 기계적 강도 변화를 보여준다. 고체윤활제 종류에 따라 차이는 있지만 고체윤활제 첨가에 따라 전반적으로 기계적 특성은 감소하였다. 예를 들어, 유리섬유와 아라미드섬유로 보강된 시험편의 인장강도는 128 MPa를 보였으나 graphite, PTFE, MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>를 5 wt% 첨가할 경우 각각 107 MPa, 123 MPa, 111 MPa, 116



**Figure 3.** Effect of aramid fiber content on (a) tensile strength, (b) flexural modulus, (c) izod impact strength of PPS, and (d) tensile strength, (e) flexural modulus, (f) izod impact strength of PPS/20 wt% glass fiber composites.



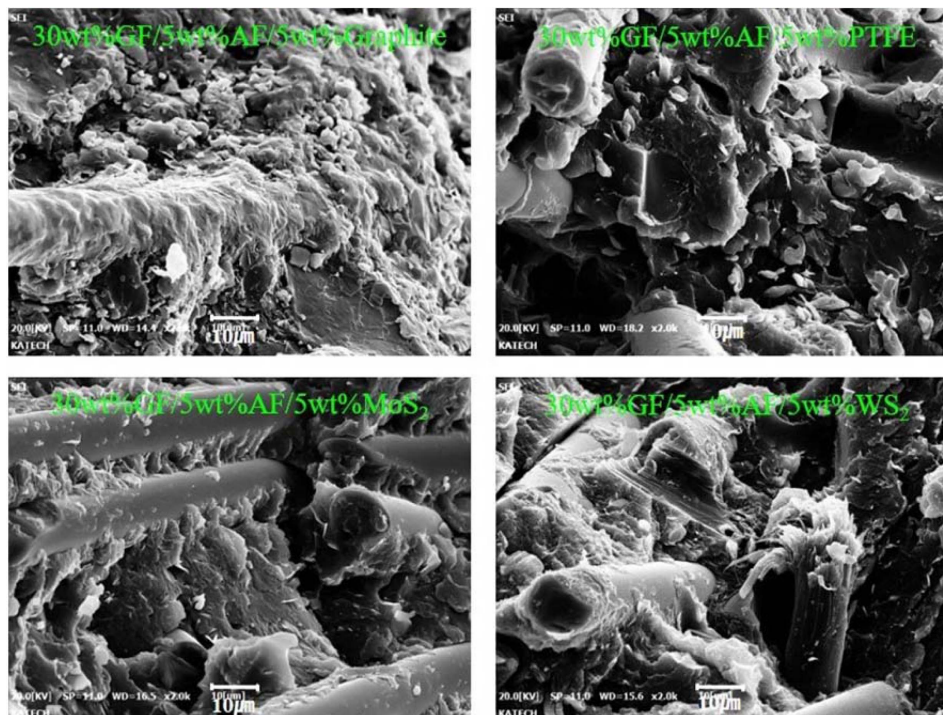


**Figure 4.** Comparison of (a) tensile strength, (b) flexural modulus, (c) izod impact strength of PPS composites containing 20 wt% glass fiber/5 wt% aramid fiber, and (d) tensile strength, (e) flexural modulus, (f) izod impact strength of PPS composites containing 30 wt% glass fiber/5 wt% aramid fiber by addition of 5 wt% and 10 wt% graphite, PTFE, MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>.

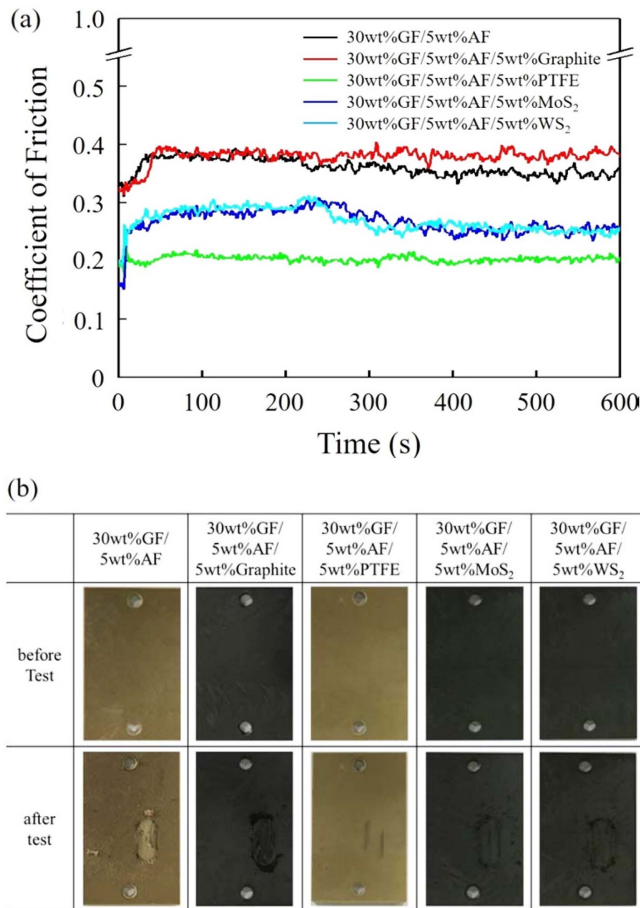
MPa를 보였고 10 wt%에서는 102 MPa, 122 MPa, 99 MPa, 107 MPa까지 감소하였다. 높은 비표면적을 지닌 graphite는 시험편의 굴곡탄성률을 향상시키는데 효과적이었으나 복합소재가 쉽게 부스러지고 파괴가 일어나는 변형이 줄어들었기 때문에 인장강도와 충격강도는 상대적으로 낮아졌다. 유리섬

유 함량을 30 wt%까지 높여 복합소재의 기계적 물성을 증진시킨 후 고체윤활제 첨가에 따른 변화를 살펴보면 20 wt%과 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다(Figure 4d-f).

Figure 5는 충격시험 시험편의 파단면을 2,000배로 확대하여 관찰한 전자현미경(SEM) 사진이다. 아라미드섬유와 고체윤



**Figure 5.** SEM images of the fractured surface of PPS/glass fiber/aramid fiber/solid lubricant composites.



**Figure 6.** (a) Representative friction evolution curve of PPS/glass fiber/aramid fiber/solid lubricant composites as a function of sliding time and (b) the comparative picture of each specimen before and after friction test.

활제는 함량이 적어 유리섬유 위주로 관찰하였다. 유리섬유 표면에 매트릭스 수지가 충분히 젖은 상태로 부착되어 있었으며 섬유가 빠져나간 흔적도 거의 발견되지 않아 우수한 계면접착력을 보유하고 있음을 확인할 수 있다. 본 연구에서 사용된 유리섬유는 PPS 수지에 대한 상용성을 증진시키기 위하여 유기물로 표면 처리된 제품을 사용하였다. 또한 압출, 사출 성형 후에도 일정 길이 이상을 유지하고 있는 것으로 보아 높은 중형비에 의한 보강효과가 극대화 되었을 것으로 예상된다.

유리섬유와 아라미드섬유 함량을 각각 30 wt%, 5 wt%로 고정한 상태에서 고체윤활제 첨가에 따른 마찰마모 특성 변화에 대해 알아보았다. Figure 6(a)에서 실험 초기 50초까지의 불안정한 영역을 제외하고 이후 안정된 구간에서의 마찰계수 평균을 구하였다. 유리섬유와 아라미드섬유로 보강된 PPS 복합소재는 약 0.36를 보였고 graphite가 5 wt% 첨가된 복합소재는 0.38 수준인 것으로 조사되었다. PTFE, MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>이 각각 5 wt% 첨가된 복합소재의 경우 0.21, 0.27, 0.27을 보여 윤활특성이 향상되었음을 알 수 있다. Graphite는 외부 전단 발생 시 층과 층사이의 slip이 발생함으로써 윤활특성이 구현되는 것으로 알려져 있지만 상대적으로 습도가 높은 상온에서 우수한 윤활효과를 보이는 것으로 알려져 있다. 판상형 결정형태인 MoS<sub>2</sub>와 WS<sub>2</sub> 역시 전단 하에서 층과 층사이의 slip에 의해 윤활특성이 부여된다는 점에서는 graphite와 유사하지만 건조한 환경에서도 마찰특성이 우수하고 높은 작동온도와 산화에 대한 내구성이 뛰어난 것으로 알려져 있다. 사출 가공 후 수평방향으로 분포된 고체윤활제는 외부 전단응력 시 층간 결합이 쉽게 분해되어 윤활제의 역할을 수행한 것으로 보인다.



**Figure 7.** The comparative picture of motor and ball nut pulley after durability test. Each pulley was manufactured using the PPS composites containing different solid lubricant.



낮은 표면에너지로 갖으면서도 구조상 쉽게 미끄러지는 구조를 지닌 PTFE는 융점이 높아 압출 및 사출 가공에도 녹지 않고 매트릭스 내에 고르게 분산되어 우수한 윤활특성을 보인 것으로 사료된다. Figure 6(b)는 마찰시험 후 하판의 표면을 보여주는 사진인데 PTFE, MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>가 첨가된 복합소재는 주로 표면 부근에서 마모가 일어난 반면 높은 마찰계수를 갖는 유리섬유/아마리드섬유, 유리섬유/아라미드섬유/graphite로 보강된 복합소재는 더욱 심하게 마모가 발생하여 깊숙한 마모흔이 관찰되었다. 또한, MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub> 입자는 유리섬유 사이에 충전되어 경도상승을 유도함으로써 마모성능을 더욱 향상시켰을 것으로 예상된다.

제조된 복합소재를 이용하여 EPS용 모터폴리(motor pulley)와 볼넛폴리(ball nut pulley)를 각각 제조한 후 내구성 평가를 진행하였다. 기계적 강도가 우수한 유리섬유와 아라미드섬유로 보강된 복합소재의 경우 상온에서는 문제가 없었으나 50°C 이상으로 승온 시 벨트의 일부분이 녹아 폴리에 들어붙는 현상이 발생하였다(Figure 7). 폴리와 벨트 구동 시 마찰열에 의하여 치형의 변형이 발생하였고 궁극적으로 치산넘김(stick-slip) 현상을 초래한 것으로 보인다. 고체윤활제(PTFE, MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>)가 첨가된 저마찰 복합소재를 사용할 경우 작동 온도 범위(-40°C~110°C)에서 아무런 문제가 발생하지 않았고 900만회 내구시험 후 표면을 살펴본 결과 폴리, 벨트 초기 상태를 유지하고 있음을 확인하였다.

## Conclusions

본 연구에서는 유리섬유와 아라미드섬유로 보강된 PPS 복합소재에 고체윤활제(graphite, PTFE, MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>)를 추가로 첨가하여 고강성, 저마찰 복합소재를 제조하였다. 유리섬유 함량에 따라 복합소재의 인장강도, 굴곡탄성률, 충격강도는 크게 증가하였고 PTFE, MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>를 첨가함으로써 복합소재의 마찰계수를 0.3이하로 낮출 수 있음을 확인하였다. 기존 전장식 조향장치용 스틸폴리를 대체하기 위하여 유리섬유의 함량을 늘림으로써 복합소재의 강성을 높이는 것이 유리할 것으로 예상되었지만 부품 내구성 시험 결과 폴리와 벨트 사이에서 마찰열에 의한 치산넘김 현상이 발생하여 제대로 작동되지 않았다. 고체윤활제를 추가로 첨가하여 제조된 고강성 저마찰 복합소재를 적용할 경우 완성차에서 요구하는 내구성 규격을 만족하였으며 이를 통해 계면에서의 윤활특성이 기어 부품의 내구성을 확보하는데 중요한 요인인 것으로 파악되었다.

## Acknowledgements

이 조사 연구는 산업핵심기술개발사업(Grant No; 10080641)의 연구지원으로 수행되었기에 감사 드립니다.

## References

1. M. Y. Lyu and T. G. Choi, "Research Trends in Polymer Materials for Use in Lightweight Vehicles", *Int. J. Pr. Eng. Man-GT*, **16**, 213 (2015).
2. K. Friedrich and A. A. Almajid, "Manufacturing Aspects of Advanced Polymer Composites for Automotive Applications", *Appl. Compos. Mater.*, **20**, 107 (2013).
3. J. Hirsch, "Aluminum in Innovative Light-Weight Car Design", *Mater. Trans.*, **52**, 818 (2011).
4. G. S. Cole and A. M. Sherman, "Lightweight Materials for Automotive Applications", *Mater. Charact.*, **35**, 3 (1995).
5. J. Gu, J. Du, J. Dang, W. Geng, S. Hu, and Q. Zhang, "Thermal Conductivities, Mechanical and Thermal Properties of Graphite Nanoplatelets/Polphenylene Sulfide Composites", *RSC Adv.*, **4**, 22101 (2014).
6. A. S. Rahate, K. R. Nemade, and S. A. Waghuley, "Polyphenylene Sulfide (PPS): State of the Art and Applications", *Rev. Chem. Eng.*, **29**, 471 (2013).
7. H. W. Hill and D. G. Brady, "Properties, Environmental Stability, and Molding Characteristics of Polyphenylene Sulfide", *Polym. Eng. Sci.*, **16**, 831 (1976).
8. J. P. Jog and V. M. Nadkarni, "Crystallization Kinetics of Polyphenylene Sulfide", *J. Appl. Polym. Sci.*, **30**, 997 (1985).
9. A. Jacob, "BMW Counts on Carbon Fibre for its Megacity Vehicle", *Reinf. Plast.*, **54**, 38 (2010).
10. C. Alves, P. M. C. Ferrão, A. J. Silva, L. G. Reis, M. Freitas, L. B. Rodrigues, and D. E. Alves, "Ecodesign of Automotive Components Making Use of Natural Jute Fiber Composites", *J. Clean. Prod.*, **18**, 313 (2010).
11. J. Holbery and D. Houston, "Natural-Fiber-Reinforced Polymer Composites in Automotive Applications", *JOM*, **58**, 80 (2006).
12. P. Feraboli and A. Masini, "Development of Carbon/Epoxy Structural Components for a High Performance Vehicle", *Compos. Part B*, **35**, 323 (2004).
13. J. H. Kim and J. B. Song, "Control Logic for and Electric Power Steering System Using Assist Motor", *Mechatronics*, **12**, 447 (2002).
14. R. McCann, "Variable Effort Steering for Vehicle Stability Enhancement Using an Electric Power Steering System", *SAE Paper*, 2000-01-0817 (2000).
15. J. S. Chen, "Control of Electric Power Steering", *SAE Transactions*, **107**, 1702 (1998).
16. V. Rodriguez, J. Sukumaran, A. K. Schlarb, and P. D. Baets, "Influence of Solid Lubricants on Tribological Properties of Polyetheretherketone (PEEK)", *Tribol. Int.*, **103**, 45 (2016).
17. M. Kalin, M. Zalaznik, and S. Novak, "Wear and Friction Behaviour of Poly-Ether-Ether-Ketone (PEEK) Filled with

- Graphene, WS<sub>2</sub>, and CNT Nanoparticles”, *Wear*, **332-333**, 855 (2015).
18. X. R. Zhang, X. Q. Pei, and Q. H. Wang, “Friction and Wear Studies of Polyimide Composites Filled with Short Carbon Fibers and Graphite and Micro SiO<sub>2</sub>”, *Mater. Des.*, **30**, 4414 (2009).
19. M. H. Cho, S. Bahadur, and A. K. Pogolian, “Friction and Wear Studies Using Taguchi Method on Polyphenylene Sulfide Filled with a Complex Mixture of MoS<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and Other Compounds”, *Wear*, **258**, 1825 (2005).
20. N. L. McCook, D. L. Burris, P. L. Dickrell, and W. G. Sawyer, “Cryogenic Friction Behavior of PTFE Based Solid Lubricant Composites”, *Tribol. Lett.*, **20**, 109 (2005).
21. J. L. Thomason, “Micromechanical Parameters from Macro-mechanical Measurements on Glass Reinforced Polyamide 6,6”, *Compos. Sci. Technol.*, **61**, 2007 (2001).
22. J. L. Thomason, “The Influence of Fibre Length and Concentration on the Properties of Glass Fibre Reinforced Polypropylene: 5. Injection Moulded Long and Short Fibre PP”, *Composites: Part A*, **33**, 1641 (2002).