

TiO₂, Carbon black 및 POE로 보강된 열가소성 PETG 복합재료의 특성

Characterization of PETG Thermoplastic Composites Enhanced TiO₂, Carbon Black, and POE

*Corresponding author

Jee-hyun Sim
(enviro1234@dyetec.or.kr)

유성훈, 이종혁, 심지현*

다이텍연구원 구조해석팀

Seong-Hun Yu, Jong-hyuk Lee and Jee-hyun Sim*

Korea Dyeing and Finishing Technology Institute(DYETEC), Daegu, Korea

Received_October 01, 2019

Revised_November 14, 2019

Accepted_November 22, 2019

Abstract In order to apply thermoplastic composites using PETG resin to various industrial fields such as bicycle frames and industrial parts, it is necessary to verify the impact resistance, durability and mechanical properties of the manufactured composite materials. To improve the mechanical properties, durability and impact resistance of PETG resin, an amorphous resin, in this study, compound and injection molding process were carried out using various additives such as TiO₂, carbon black, polyolefin elastomer, and PETG amorphous resin. The thermal and mechanical properties of the thermoplastic composites, and the Charpy impact strength, The analysis was performed to evaluate the characteristics according to the types of additives. DSC and DMA analyzes were performed for thermal properties, and tensile strength, flexural strength, and tensile strength change rate were measured using a universal testing machine to evaluate mechanical properties. Charpy impact strength test was conducted to analyze the impact characteristics, and the fracture section was analyzed after the impact strength test. In the case of POE material-added thermoplastic composites, thermal and mechanical properties tend to decrease, but workability and impact resistance tend to be superior to those of PETG materials.

Textile Coloration and Finishing

TCF 31-4/2019-12/354-362

©2019 The Korean Society of Dyers and Finishers

Keywords PETG, thermoplastic composites, compounding, additive, polyolefin elastomer

1. 서 론

Poly(ethylene terephthalate)(PET)는 우수한 열적 특성과 기계적 특성을 갖는 engineering plastic 중의 하나이다. PET는 결정성이 크고 용융점이 높아 직물, 필름제조, 다양한 형태의 병과 같은 포장재에 전 세계적으로 널리 사용되고 있다. 병으로 사용되는 PET는 고강도, 우수한 투명성, 가스(CO₂)에 대한 저 투과성, 높은 광투과율과 매끄러운 표면을 갖고 있다. 또한 PET가 식품 산업에서 포장재의 생산에 폭 넓게 사용되는 이유는 내약품성, 내용물의 높은 품질 유지성으로 식품의 위생성과 인체에 대한 안정성 등이 인정받고 있

기 때문이다. 이와 같은 장점들로 인하여 PET의 사용량이 증가하게 되었고, 이에 따라 PET 폐기물의 양도 증가하기 때문에 PET 폐기물의 재활용에 대한 관심이 증대되었다. PET의 재활용 방법은 기계적 재활용방법과 화학적 재활용방법으로 분류되는데, 기계적 재활용 방법은 화학적 재활용방법에 비해 기술이 단순하고 비용이 상대적으로 적게 소요된다는 장점이 있다. 기계적 재활용방법으로 생성된 Recycled PET(rPET)는 결정성 수지이며, 충분히 결정화시켜 주어야 최대의 물성을 발현할 수 있다. 하지만 rPET 수지가 충분한 결정화도를 가지고 있다 하더라도, 일반적으로 재활용 플라스틱의 경우 원재료보다 낮은 기계적 특성을 가지고 있어 단

Table 1. Basic material characteristic of PETG

Properties	Unit	Values	Test method
Specific gravity	-	1.27	ASTM D792
Mold shrinkage	%	0.5	ASTM D955
Water absorption	%	0.2	ASTM D570
Rockwell hardness	R-Scale	110	ASTM D785

Table 2. Density, volume fraction, particle size of additive

Additive	Density(g/cm ³)	Volume fraction(%)	Particle size(nm)
TiO ₂	2.65	3.56	22~25
Carbon black	1.85	3.46	14~21
POE	1.27	3.32	20~24

독으로 사용하기에는 문제점이 있다¹⁻³⁾.

rPET수지의 원재료보다 낮은 기계적 특성을 보완하고 고자 공단량체로 CHDM(1,4-cyclohexanedimethanol)을 첨가하여 공중합한 비결정성 수지인 Glycol-modified polyethylene terephthalate(PETG)를 사용하고 자 하는 시도가 산업 전반에 걸쳐서 일어나고 있다. PETG수지는 비결정성 수지로 결정화로 인한 백화현상이 없고, 밝은 색상과 우수한 광택을 지니며 넓은 조건에서 성형가공이 가능하다. 또한 환경호르몬물질을 함유하지 않고, 소각 및 폐기할 때에 유해물질이 발생되지 않는 환경친화성을 지닌 내화학성이 우수한 수지이다^{4,5)}.

PETG 수지를 활용한 열가소성 복합재료를 자전거 프레임, 산업용 부품 등 여러 산업분야에 적용하기 위해서는 제조된 복합재료의 내충격성, 내구성 및 기계적 특성에 대한 검증이 필요하다^{6,7)}.

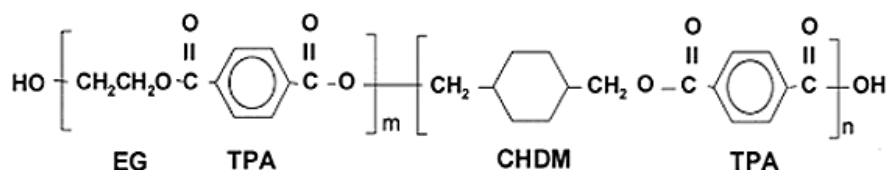
이에 본 연구에서는 비결정성 수지인 PETG 수지의 기계적 특성, 내구성 및 내충격성 향상을 위하여 TiO₂, Carbon black(CB), polyolefin elastomer(POE) 등의 첨가제를 이용하여 열가소성 복합재료를 제조하였

다. 1차적으로 PETG 및 기타 첨가제를 활용한 compound 공정을 진행하였다. 그 후, 제조된 compound pellet을 활용하여 injection moulding 공정으로 시험편을 제조하여 첨가제 종류에 따른 특성 분석을 진행하고자 하였다.

2. 실험

2.1

본 연구에서 compound 및 injection moulding 공정에 사용한 기본 재료인 PETG(SKYGREEN KN100, SK Chemicals Co., LTD, Korea)의 기본 특성 및 구조식을 Table 1, Table 2, Figure 1에 나타내었다. 열가소성 복합재료에 사용되는 첨가제로써 TiO₂(R-2013, HMC, China), Carbon black(CB)(JY-8180P, Hangzhou Juychem.Co., China), POE(EBR, LG Chem., Korea)을 사용하였다. TiO₂, CB, POE등의 첨가제의 밀도, 입자 크기, 입자형태를 고려하였을 때 질량분율은 3wt.%로 고정하는 것이 가장 열적·기계적 특성을 향상시키는 효율적인 방법으로 고려되며, 열

**Figure 1.** Constitutional formulation of PETG.

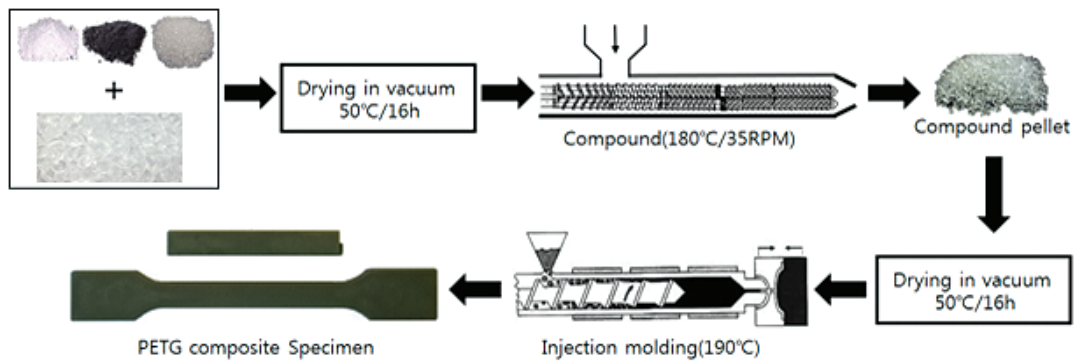


Figure 2. The materials and the route used for manufacturing and processing of PETG composite.

가소성 복합재료를 제조하였고, 각 첨가제는 표준상태 ($25 \pm 5^\circ\text{C}$, $60 \pm 10\%$)에서 3일간 보관한 후에 실험에 이용하였다.

열가소성 복합재료를 제조하기 위하여 lab. scale의 compound 공정으로 Twin screw extruder(HAAKE PolyLab QC, Thermo scientific, Germany)를 이용하였다. Compound pellet 제조에 이용되는 재료인 PETG 및 첨가제는 50°C 의 온도에서 16시간 동안 진공에서 건조시킨 후 compound 공정을 실시하였고, 각 재료의 분자량 및 흐름성과 가공온도를 고려하여 가공 온도 180°C , 가공속도 20mm/s , twin screw RPM은 35로 설정하여 열가소성 복합재료 제조를 진행하였다. 제조된 열가소성 복합재료 compound pellet은 다시 50°C 의 온도에서 16시간 동안 진공에서 건조시킨 후, injection molding공정을 진행하였다. Injection molding 공정은 소형 사출기(HAAKE MINIJET Pro, Thermo scientific, Netherlands)를 이용하여 진행하였다. Injection molding의 공정 조건으로 압력은 300bar, molding 시간은 10s, molding 온도는 190°C 로 각각 설정하여 내충격성, 내구성 및 기계적 특성 분석을 위한 시편 형태로 가공하였다. Compound 공정 및 injection molding 공정의 모식도를 Figure 2에 나타내었다.

2.2

첨가제 종류에 따른 PETG수지의 compound 및 injection molding 공정을 진행함에 있어서 사출 성형성을 측정하는 척도인 용융흐름지수(melt flow index, MFI)를 측정하였다. 각 첨가제 종류에 따라 5개의 시료를 사용하여 ISO 1133에 따라 수지용융흐름지수 측

정기(6MBA, Ray-ran, Korea)에서 MFI측정을 진행하였고, 측정 결과에 따라 열가소성 복합재료의 가공성을 판단하였다. MFI측정은 350°C 의 온도에서 2.16kg의 하중을 주어 진행하였고, 모든 측정 시료는 50°C 의 온도에서 진공 조건 하에 16시간 동안 건조시키고, 수분 재 흡수를 피하기 위하여 밀봉된 PTFE용기를 이용하여 MFI측정기로 운반하였다.

2.3 DMA

제조된 PETG compound pellet의 첨가제 종류에 따른 열적 특성을 분석하기 위해 시차주사열분석기(Differential scanning calorimetry, 2010 DSC, TA instruments, USA)를 이용하였다. 시험 전 시료의 무게는 6~7mg로 설정하였으며, 승온속도는 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 로 설정하여 가열-냉각 과정을 2회에 걸쳐 실시하였다. 승온하기 전에 시료는 30°C 에서 10분 동안의 안정화 과정을 진행하였고, 그 후에 온도 범위는 30°C ~ 300°C , 300°C ~ 30°C 로 설정하여 heat flow를 관찰하였다. 또한 첨가제 종류에 따른 진동 특성을 분석하기 위하여 진동수 및 승온속도를 각각 1Hz, $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 로 설정하여 동적 기계분석(Dynamic mechanical analysis, DMA Q800, TA Instrument, Korea)을 실시하였다. 열가소성 복합재료의 감쇠(damping) 특성을 지닌 재료는 주기적으로 기계적 진동이 발생하는 동안 소재에서의 기계적 진동이 효율적으로 소산되고, 소음을 흡수하여 구조물을 안정화시킬 수 있다.

2.4

제조된 열가소성 복합재료의 첨가제 종류에 따른 인장강도, 인장강성 및 굴곡강도 등의 기계적 특성을 분

Table 3. Conditions of accelerated wethering test

No.	Conditions	Unit	Value
1	Light source	-	6500W Xenon Arc.
2	Irradiance	W/m ²	0.51
3	Saltspray cycle	-	102min Light only & 18min Light and spray
4	Exposure time	h	72
5	Black pannel temperature	°C	50

석하기 위하여 만능재료시험기(AG-250kNX, Shimadzu, Japan)를 이용하였다. 인장시험의 경우 ASTM D 638 규격을 준용하여 cross head speed를 5mm/min로 유지하면서 최대 하중값 및 1000~3000 um/m 구간의 strain 값과 인장강도 값을 측정하여 결과를 분석하였다.

굴곡강도 및 굴곡탄성률은 ASTM D 790 규격에 따라 속도 1.3mm/min, support span의 길이를 16:1의 비율을 적용하여 51.2mm로 설정 후 측정을 진행하였다. 또한 열가소성 복합재료의 촉진내후성시험 조건에 따른 인장강도 변화율을 평가하기 위하여 세부적인 실험조건을 Table 3와 같이 설정하였다.

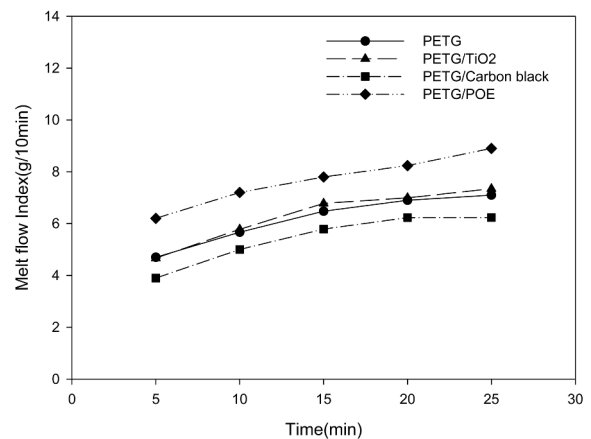
2.5

첨가제 종류에 따른 PETG 열가소성 복합재료의 샤르피 충격강도를 분석하기 위하여 충격강도 시험기(IT504, Tinius Olsen, USA)을 이용하였다. 샤르피 충격시험은 시료에 인장력이 크게 작용하게 되므로, 열가소성 복합재료의 inter-laminar shear 및 bonding force를 측정하는데 사용된다. 시험 시료는 23°C에서 50±10% 상대 습도 조건 하에서 충격시험을 진행하였으며, 낙하높이는 0.5m, 충격속도는 3.46m/s로 설정하여 진행하였다. 샤르피 충격 시험 후에 파단면을 관찰하여 첨가제 종류에 따른 충격거동을 분석하고자 하였다. 파단면 관찰은 광학현미경(SMZ18, NICON, Japan)을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1

Figure 3에 첨가제 종류에 따른 열가소성 복합재료의 용융 흐름지수(MFI)를 측정한 결과를 나타내었다.

**Figure 3.** Result of MFI measurements of PETG composites on additives.

POE를 첨가한 열가소성 복합재료의 경우, 부피분율 및 첨가제의 원재료와의 결합력, 입자의 모양, 크기를 고려하였을 때, 다른 첨가제 소재에 비하여 상대적으로 높은 용융 흐름 지수를 나타내었으며, 이는 compound 및 injection molding 공정에 있어서 가공성이 우수하다고 판단된다. 일반적으로 용융 흐름 지수가 높을수록 사출 가공성이 우수하다고 알려져 있다^{15,16}. Carbon black를 첨가한 PETG 열가소성 복합재료가 가장 낮은 값을 나타내었다.

3.2 DMA

Figure 4은 첨가제 종류에 따른 PETG 열가소성 복합재료의 DSC곡선을 나타낸 그래프이다. 5°C/min의 속도로 승온하면서, PETG 유리전이온도(Tg)는 약 72.5°C로 나타났으며, 첨가제 종류에 따라(c)Carbon black>(b)TiO₂>(d)POE 순으로 유리전이온도가 높게 나타났으며, POE의 첨가에 따라 유리전이온도는 PETG의 유리전이온도보다 소폭 감소하는 경향을 나

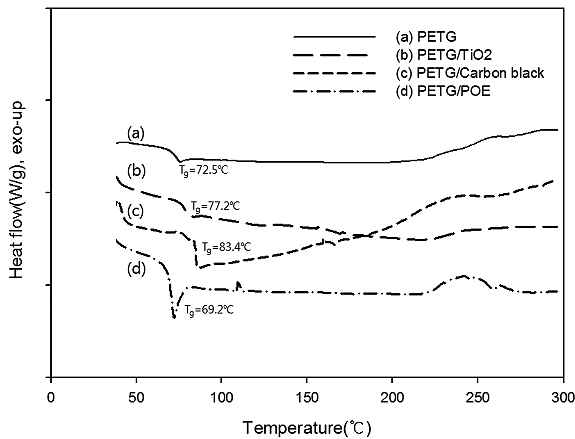


Figure 4. DSC curves of PETG composites on additives.

타내었다. 이는 Carbon black이 가지는 열적 특성으로 인하여 유리전이온도가 소폭 증가한 것으로 보인다^{8,9)}. POE첨가에 따라 유리전이온도가 소폭 감소하게 되는 것은, POE소재 자체가 밀도가 낮고 탄성체로써의 성질을 지니고 있어 rubbery하기 때문에, 비결정성인 PETG가 compound 되었을 때 유리전이온도가 소폭 감소하게 된 것으로 보인다^{10,11)}.

Figure 5 및 Figure 6는 첨가제 종류에 따른 PETG 열가소성 복합재료의 DMA 분석 결과를 나타낸 것이다.

Figure 5은 온도 상승에 따른 저장 탄성률 거동을 보여주고 있다. 시편의 주기적 응력과 함께 가역적 탄성도를 나타내는 저장탄성률은 POE를 첨가한 열가소성 복합재료가 가장 높게 나타났으며, 이는 POE를 첨가한 열가소성 복합재료의 탄성(elasticity)이 가장 높다는 것을 의미한다¹²⁻¹⁴⁾. 시료가 받는 에너지의 손실 정

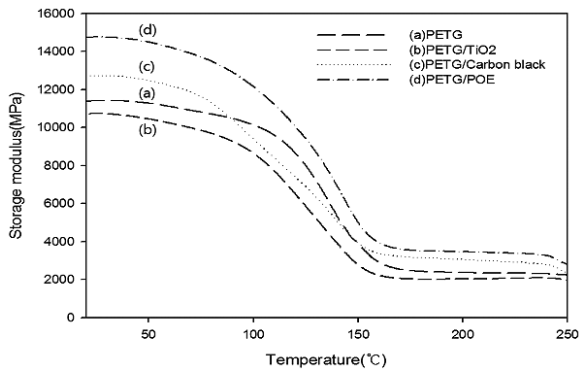


Figure 5. Storage modulus of PETG composites on additives.

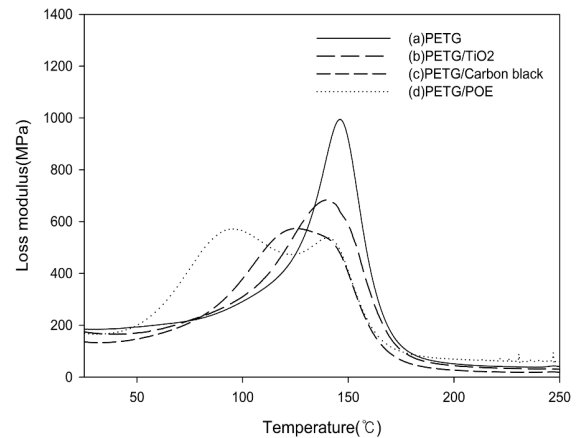


Figure 6. Loss modulus of PETG composites on additives.

도를 나타내는 손실탄성률과 점탄성 특성 분석을 위한 손실팩터(Tan δ)를 분석한 결과를 Figure 6와 Figure 7에 나타내었다.

아래의 그래프와 같이, Tan δ 과 손실탄성률은 PETG/POE 열가소성 복합재료가 피크점의 온도가 가장 낮게 나타났다. 시편의 손실탄성률이 낮다는 것은 복합재료의 점착력(viscosity)이 감소하였다는 것을 의미한다.

3.3

Figure 8에 첨가제 종류에 따른 PETG 열가소성 복합재료의 기계적 특성을 분석한 결과를 나타내었다. 인장강도, 인장탄성률, 굴곡강도 및 굴곡탄성률에서 모두 carbon black을 첨가한 열가소성 복합재료의 결과

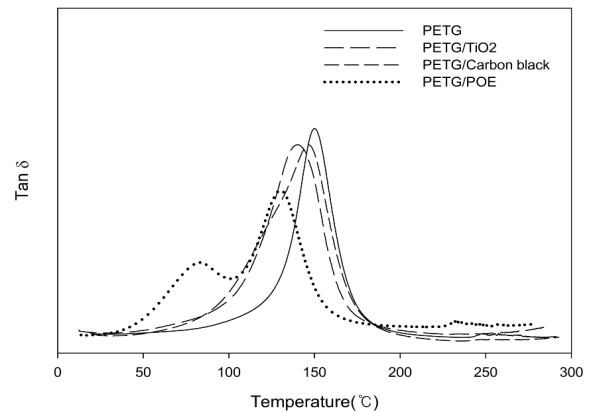


Figure 7. Tan δ of PETG composites on additives.

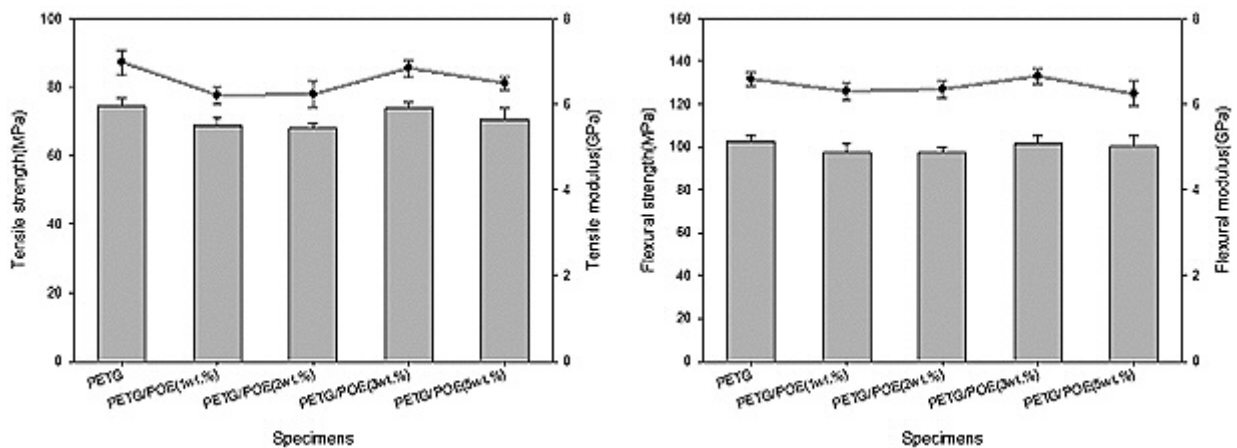


Figure 8. Tensile and flexural properties graph of PETG composites on additives.

값이 가장 높게 나타났으며, POE를 첨가한 경우에는 오히려 인장강도 및 굴곡강도 값이 가장 낮게 측정되는 결과를 나타내었다. 이는 carbon black소재가 가지는 고유의 우수한 기계적 특성 및 3차원 결정 구조로 인하여 기계적 특성이 증가한 것으로 판단되며, POE가 PETG 소재에 첨가될 경우, POE소재가 가지는 탄성 체로써의 특성으로 인해 용융 흐름 지수 결과값처럼, 사출 가공성이 향상될 수 있으나, 인장강도나 굴곡강도와 같은 기계적 특성은 POE고유의 특성으로 인해 오히려 감소하는 경향을 나타내었다. 축진내후성 시험 조건에 따른 인장강도 변화율의 경우, TiO₂를 첨가한 열가소성 복합재료가 변화율은 -1.2%로 가장 적게 나타났다. 이는 TiO₂소재가 가지는 안정성으로 인한 결과로 판단된다. 기계적 특성 분석 결과값을 정리하여 Table 4에 나타내었다.

강도 등 기계적 특성 면에서는 carbon black을 첨가한 열가소성 복합재료가 가장 높은 결과값을 나타내었고 POE를 첨가한 시편이 가장 낮은 결과값을 나타내었으나, 충격강도는 이와는 반대로 POE를 첨가한 시편이 가장 높은 결과값을 나타내었다. 이는 POE소재가 가지

3.4

Figure 9에서는 첨가제 종류에 따른 PETG 열가소성 복합재료의 충격강도를 나타내었다. 인장강도, 굴곡

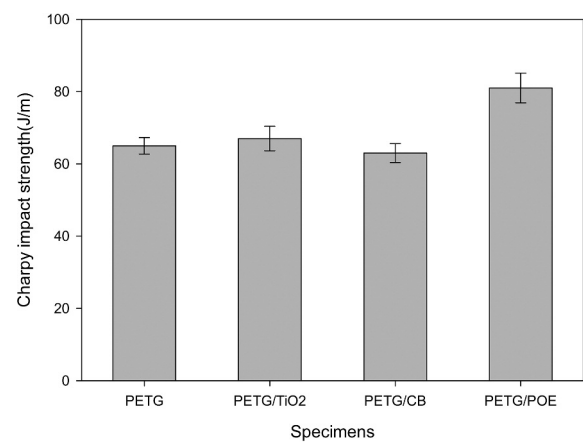


Figure 9. Charpy impact strength of PETG composites on additives.

Table 4. Mechanical properties of PETG composites on additives

Properties	PETG	PETG/TiO ₂	PETG/Carbon black	PETG/POE
Tensile strength(MPa)	72.4(±3.4)	70.6(±2.4)	80.5(±2.5)	70.5(±3.9)
Tensile modulus(GPa)	6.8(±0.2)	6.7(±0.1)	7.2(±0.3)	6.7(±0.3)
Flexural strength(MPa)	103.5(±5.1)	106.1(±4.5)	122.4(±4.3)	101.2(±3.7)
Flexural modulus(GPa)	6.7(±0.3)	6.7(±0.4)	6.9(±0.3)	6.6(±0.3)
Rate of change(%)(tensile strength)	-10.4	-1.2	-14.8	-3.5

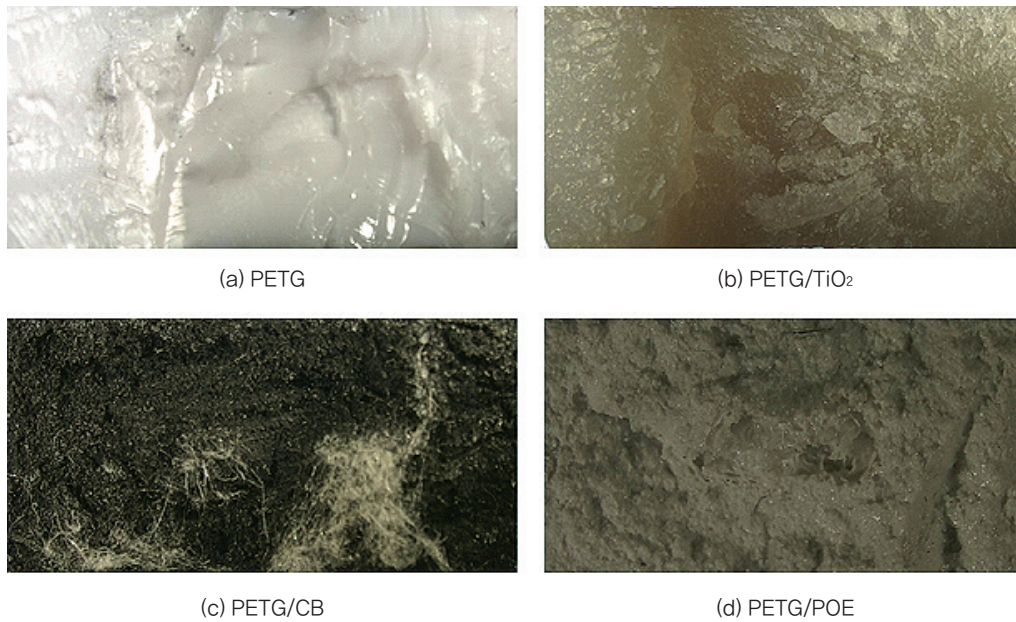


Figure 10. Fracture of Charpy impact test specimens.

는 rubbery한 성질로 인하여 비결정성을 지니고 있는 PETG소재의 내충격성이 향상된 것으로 판단된다. 반면에 carbon black를 첨가한 경우에는 PETG만으로 이루어진 시편보다 낮은 충격강도 값을 나타내었다.

광학현미경을 사용하여 샤르피 충격강도 시험을 진행한 시험편의 파단면을 관찰한 결과를 Figure 10에 나타내었다. PETG소재만으로 이루어진 열가소성 복합재료의 경우, 파괴면에 발생된 균열의 형상이 단조롭고 발생 빈도가 낮음을 확인할 수 있다. 이는 재료가 파단될 때, 발생되는 균열의 정도가 크게 진행됨을 예상할 수 있고, 충격 시 파괴에 대한 안정성이 낮은 상태를 나타낸다. 그에 비해 POE 소재를 첨가한 열가소성 복합재료의 경우 파괴면에 관찰되는 균열의 형상이 매우 거친 것을 확인하였다. 이는 충격시험을 진행할 때, POE 소재의 첨가로 인해 충격파괴 시 받는 에너지를 흡수하여 균열의 발생 빈도가 높아지기 때문에 표면이 거칠게 된 것이라고 판단된다.

TiO₂ 및 carbon black을 첨가한 열가소성 복합재료는 부분적으로 표면이 거칠게 된 형상을 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 TiO₂, carbon black, POE소재를 첨가하여 compound 및 injection molding 공정을 진

행하여 PETG 열가소성 복합재료를 제조하였다. 첨가제 종류에 따라 제조된 PETG 열가소성 복합재료의 열적 특성 및 기계적 특성, 내충격성 등의 평가를 진행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. Compound pellet의 DSC 분석에 따른 유리전이 온도 분석 결과, 첨가제 종류에 따라 유리전이온도가 상이하게 나타났으며, carbon black이 첨가된 시료가 가장 높은 유리전이온도 값을 나타내었고, POE소재가 첨가된 시료가 가장 낮은 결과값을 나타내었다. 또한 DMA 결과를 통한 온도 상승에 따른 열가소성 복합재료의 저장탄성률, 손실탄성률 등 진동 특성을 분석한 결과, POE가 첨가된 시료의 저장탄성률이 가장 높게 나타났으며, 이는 탄성(elasticity)이 가장 높기 때문인 것으로 판단된다. 손실탄성률의 경우에 PETG만으로 이루어진 시료의 피크가 가장 낮은 값을 나타내었으며, 이는 점착력이 증가하였다는 것을 의미한다.
2. 첨가제 종류에 따른 열가소성 복합재료의 용융 흐름 지수(MFI)를 측정된 결과, POE를 첨가한 열가소성 복합재료의 경우, 다른 첨가제 소재에 비하여 상대적으로 높은 용융 흐름 지수를 나타내었으며, carbon black를 첨가한 PETG 열가소성 복합재료가 가장 낮은 값을 나타내었다.

3. 인장강도, 굴곡강도 등 기계적 특성 분석 결과의 경우, 인장강도, 인장탄성률, 굴곡강도 및 굴곡탄성률에서 모두 carbon black을 첨가한 열가소성 복합재료의 결과값이 가장 높게 나타났다. 이는 carbon black소재가 가지는 고유의 우수한 기계적 특성 및 3차원 결정 구조로 인하여 기계적 특성이 증가한 것으로 판단되며, POE가 PETG 소재에 첨가될 경우, POE소재가 가지는 탄성체로써의 특성으로 인해 용융 흐름 지수 결과값처럼, 사출 가공성이 향상될 수 있으나, 인장강도나 굴곡강도와 같은 기계적 특성은 POE고유의 특성으로 인해 오히려 감소하는 경향을 나타내었다. 촉진내후성 시험 조건에 따른 인장강도 변화율의 경우, TiO₂ 및 POE를 첨가한 시료가 인장강도 변화율 -5%이내의 값을 나타내었으며, TiO₂소재의 안정성으로 인하여 변화율은 -1.2%로 가장 적게 나타났다.
4. 샤프피 충격강도의 경우에 POE를 첨가한 시편이 가장 높은 결과값을 나타내었다. 이는 POE소재가 가지는 rubbery한 성질로 인하여 비결정성을 지니고 있는 PETG소재의 내충격성이 향상된 것으로 판단된다. 광학현미경을 사용하여 샤프피 충격강도 시험을 진행한 시험편의 파단면을 관찰한 결과, PETG 소재만으로 이루어진 열가소성 복합재료의 경우, 파괴면에 발생된 균열의 형상이 단조롭고 발생 빈도가 낮음을 확인할 수 있다. POE 소재를 첨가한 열가소성 복합재료의 경우 파괴면에 관찰되는 균열의 형상이 매우 거친 것을 확인하였다. 이는 충격시험을 진행할 때, POE 소재의 첨가로 인해 충격 파괴 시 받는 에너지를 흡수하여 균열의 발생 빈도가 높아지기 때문에 표면이 거칠게 된 것이라고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 차세대디자인핵심기술개발 디자인혁신역량강화사업(10077819)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

, 3@9 .3@9 &) :7@ :7@ 3@6 . (;

35;>7 H3>G3F;A@ A@ " 7F DKEF3>;L3F;A@ :@7F;SE 3@6) :7D?3> %DAB7DF;7E A8 !A I 67@E;FK %A>K7F:K>7@7 ! % '75K5>76 %A>K7F:K>7@7)7D7B:F:3>3F7 '%) >7@6E (9%2')(2(8675-%0 %2(2+2))5-2+ 30<1)5 !)

.3@9 :7@ ! (G " ;3A 3@6 . (; " 7F DKEF3>;L3F;A@ 3@6) :7D?3> %DAB7DF;7E A8 D3B:7@7 %>3F>7FE #%E " A6;8;76 '75K5>76 %A>K7F:K>7@7)7D7B:F:3>3F7 '%) A?BAE;F7E):7 >;7D #7FIAD=@3>KE;E 30<1)5 #)67-2+ ' " " 7D; /;53@E ' " 3=E;?AHE) H3@AH3 3@6 3B;@E >3EF;5;FK 3@6 !A@9 F7D? 7:3H;AD A8 '75K 5>76 %A>K7F:K>7@7)7D7B:F:3>3F7 D%) ?A@F?AD;>>A@;F7 " ") A?BAE;F7E 31436-7)'758'785)6 , !; . /:3; % . ; 3@6 . /:3@9 34D;53F;A@ A8 " ;5DA BKD3 ?;6 DD3KE A@ %) >;?E 4K 'A> FA DA>> AF ?4AEE;@9 -'53)0)'7532-' 2+2))5-2+

% D3@5;EL5L3= %;7EA I;5L 3@6 3>;TR " 3@G 835FGD;@9 3@6 %DAB7DF;7E A8D %) %) ;4D7 A?BAE ;F7 #AH7> BBDA35: 8AD '75K5>;@9 A8 %) %>3EF;5 (5D3B:@FA @9:@77D;@9 A?BAG@6 8AD @<75F;A@ " AG>6 ;@9 31436-7)6 %57 2+2))5-2+

) :7@ 3@6 /:3@9 #A@ ;EAF:7D?3> A>6 DKEF3>;L3 F;A@ :@7F;SE A8 %A>K 7F:K>7@7 9>K5A> 5A 5K5>A:7J3 @76;?7F:3@A> F7D7B:F:3>3F7 %) ABA>K7EF7DE I:F: ;887D7@F A?BAE;F;A@E 30<1)5 #)67-2+

(' " A@FADA " . (; ;@A) DGL " \$;A88; 3@6 , AA I 3>6 >=3; '7E;EF3@57 A8 %A>K 7F:K>7@7 F7D7B:F:3>3F7 %) 3@6 %A>K 7F:K>7@7 9>K5A> 5A 5K5>A:7J3@76;?7F:3@A> F7D7B:F:3>3F7 %) ABA>K7EF7DE):7 'A>7 A8 A?BAE;F;A@ 30< 1)5)+5%(%7-32 %2("7%&-0-7<

/ , /:G & ' /:7@9 / , 3@9 /)3@9 3@6 , :7@ K6DA97@ 6EADBF;A@ A@ D3B:7@7 (:77FE 3@6 #A@BADAGE D3B:;F;L76):7D?3>53D4A@4>35= 3F !A I (GD8357 AH7D397 27)52%7-32%0 3852%0 3* <(53+2)5+<

>A?=>;3@9 ' 37I?3@77 ((3;?A7K 3@6 (@ F3D3KAF:K3 6EADBF;A@ A8 , 3F7D 3@6 " 7F:3@A> A@ ;9>K D3B:;F;L76):7D?3>53D4A@4>35=):7 8875FE A8

G@5F;A@3> DAGB 3@6)7?B7D3FGD7 A@F:7 EAEF7D;5 73F
 3F !A I !A36;@9E %5&32
 D@6F ' DG>) " 35=A % 3D9 3@6
)35J :3D35F7D;L3F;A@ A8 F:7 :7?;53> A?BAE;F;A@
 ;EFD;4GF;A@ A8 %A>KA>78;@ %>3EFA?7DE 7>3EFA?7DE 7F:K>
 7@7 A5F7@7 5ABA>K?7DE 3@6 A?B3D;EA@FA):7AD7F;
 53>%D76;5F;A@E 30<1)5
 - /:3@9 " 3;D3 . 3E:;?AFA) , 363 3@6)
)3@;:=7 (7>75F;H7 !A53;L3F;A@ A8 >G?;@G? \$J;67 3F
 @F7D8357 3@6 ;FE 8875F A@):7D?3> A@6G5F;H;FK ;@
 %A>KBDABK>7@7 BA>KA>78;@ >3EFA?7D >7@6E 31436-7)6
 %57 2+-2))5-2+
)3@3=3 3@6) 3F3K3?3 @<75F;A@ " A>6;@9 A8 >3F
 >3EE ;47D '7;@8AD576):7D?AB>3EF;5E 3()52 ,<6-'6
 %;7DDA !7A@7 /3@5:;@ " 3@7FF; 3@6

7DF;@; %A>KA>78;@):7D?AB>3EF;5 >3EFA?7DE 8DA?
 A5F7@7 ABA>K?7D;L3F;A@ I;F: 6757@7 3@6 K5>AB7@
 F7@7 8534)%2 30<1)5 3852%
 :A@3=63D (383D; 3@6 " # 7E34; " ;E
 5;4;>;FK @3>KE;E +;E5A7>3EF;5 %DAB7DF;7E 3@6 " ADB:A>
 A9K A8 K5>;5 \$>78;@ ABA>K?7D BA>KA>78;@7>3EFA?7D
 \$ %\$ >7@6E 31436-7)6 %57 2+-2))5-2+
 % ! '3?=G?3D " G=3D@; 3@6 + + ' 4:;<;F
 6;FK3 :7DG=G?G6; @H7EF;93F;A@ A8 " 7>F >A I @67J
 3@6 ?B35F (FD7@9F: A8 A3?76 !! % 8AD 'AF3F;A@3>
 " AG>6;@9 %DA57EE 53')(-% %7)5-%06 "'-2')
 . IA@ !;? 3@6 . ((A@9 (;?G>3F;A@ A8 @
 <75F;A@ 5A?BD7EE;A@ " A>6;@9 8AD):;@ 3@6 !3D97 3F7DK
 AGE;@9 855)27 440-)(,<6-'6

Authors

유성훈 다이텍연구원 전임연구원
 이종혁 다이텍연구원 선임연구원
 심지현 다이텍연구원 팀장