



Effects of Filler Types and Content on Shrinkage Behavior of Polypropylene Composites

Chun-Sik Jung^{*,**} and Seok-Ho Hwang^{*,†}

^{*}Materials Chemistry and Engineering Laboratory, Department of Polymer Science and Engineering, Dankook University, 152 Jukjeon-Ro, Suji-Gu, Yongin, Gyeonggi-Do 16890, Republic of Korea

^{**}Sales Department, HDC Hyundai EP Co., Ltd., 239 Jeongjail-Ro, Bundang-Gu, Seongman, Gyeonggi-Do 13556, Republic of Korea

(Received September 12, 2022, Revised September 19, 2022, Accepted September 21, 2022)

Abstract: The effects of fillers [talc, calcium carbonate, glass fiber, and EBR (ethylene-butene rubber)] on the shrinkage and mechanical properties of injection-molded polypropylene composites were investigated. The shrinkage correlated with the shape of the filler particles: at the same amount added, glass fibers with a large aspect ratio had the greatest effect on the shrinkage of polypropylene composites, followed by flake-shaped talc and granular calcium carbonate. It was confirmed that the addition of EBR rubber as an impact strength modifier reduced shrinkage proportionally to the added content. In addition, the addition of glass fiber resulted in the greatest increases in tensile and flexural strengths.

Keywords: polypropylene composite, shrinkage, filler, injection molded, mechanical properties

Introduction

최근 세계 각국이 추진하고 있는 에너지 효율성 제고와 관련하여 친환경 에너지 정책들이 확대되고 환경관련 규제를 강화하고 있으며 특히, 자동차산업 분야에는 내연기관 자동차에서 전기 자동차로의 전환과 탄소 배출 규제 속에서 차량의 경량화는 전기 자동차의 전비향상을 유도할 수 있는 가장 핵심적인 전략들 중 하나이며 이에 관련된 연구를 활발하게 진행하고 있다.^{1,4} 따라서 차량 부품의 경량화를 이루기 위한 가장 대표적인 방법은 기존 금속소재 기반의 부품을 상대적으로 밀도가 낮은 고분자 소재를 적용하는 것이며, 다양한 합성 고분자 중에서도 가장 널리 사용되는 고분자 소재가 폴리프로필렌(Polypropylene, PP) 이다.

PP는 밀도가 약 0.90 g/cm³ 정도로 낮고, 우수한 가공성과 타 고분자 소재 대비 낮은 생산가격으로 인하여 자동차 산업에서 다양한 내·외장 부품용 소재로 많이 사용되고 있다.^{2,5-7} 또한, PP는 다양한 산업에서 요구되는 물성을 충족시키기 위해 여러가지 유·무기 충전제(Filler)를 첨가하여 적절한 물성을 구현할 수 있다. 일반적으로 PP 복합재에 많이 사용되는 충전제는 기계적 강도 향상을 위한 탈크(Talc),^{8,9} 탄산칼슘(Calcium carbonate, CaCO₃),^{7,10,11} 유리섬유(Glass fiber)^{12,13}와 충격강도 보강을 위한 고무소재(Rubber)^{14,16} 등을 들 수 있다.

이러한 고분자 복합재의 매트릭스(Matrix)를 구성하는 PP는 반결정성 고분자로서, 용융 성형 후 상온으로 냉각 시 PP 고분자내 일부분에 형성되는 결정영역으로 인해 수축이 자연스럽게 발생하게 된다.¹⁷ 특히, 자동차용 부품은 거의 대부분 사출성형 공법으로 제조되며 사출성형 시, 금속 금형내에 높은 온도와 압력으로 용융된 고분자를 충전하고 일정시간이 경과한 후에 금형이 열리면서 대기압 상태로 성형품이 취출되는 공정이 일반적이며 이때, 큰 폭의 온도와 압력강하가 발생하고 사출 성형품의 체적이 변하게 된다.¹⁸⁻²⁰ PP에 각종 충전제가 첨가된 복합재의 경우에도 충전제 종류 및 함량에 따라 매트릭스인 PP와 상호작용을 하여 수축의 정도가 각각 다르게 되고 이로 인해 PP복합재의 사출성형 최종 부품의 치수가 달라진다. 따라서 금형 제작 시 사용될 복합재를 정확히 선정하고 이에 따른 수축률을 예측하여 반영하는 것이 중요하다. 만일 금형 제작 후 소재가 변경되거나 최초 금형 설계 시 잘못된 소재 수축률을 반영한다면 원하는 크기의 부품을 생산할 수 없으며, 이에 따라 금형 수정이 불가피하게 된다.

따라서 본 연구에서는 PP 복합재에 가장 널리 사용되는 4가지 충전제인 탈크, 탄산칼슘, 유리섬유 및 충격보강제인 EBR(Ethylene-butene rubber) 고무 첨가 함량에 따른 수축률 거동 및 물성거동을 평가하여 확인하였다.

[†]Corresponding author E-mail: bach@dankook.ac.kr

Experimental

1. 재료

본 실험에 사용된 PP는 폴리미래(Seoul, Korea)사 Moplen HP600R [Homo-PP, MFR=25 g/10 min (230°C/2.16 kg), 밀도=0.9 g/cm³] 제품과 Moplen EP641P [Impact PP; Block copolymer with ethylene comonomer, MFI=20 g/10 min (230°C/2.16 kg), 밀도=0.9 g/cm³] 제품이였다. 탈크와 탄산칼슘은 (주)코츠(Seocheon, Korea)사 KCNAP-400 (평균입자=11±2 μm) 제품과 CMS-8000 (평균입자=3 μm) 제품을 각각 사용하였다. 유리섬유는 오웬스코닝(Toledo, OH, USA)사 CS04-147A filament (길이=4 mm, 지름=10 μm) 제품을 사용하였다. 충격보강용 EBR 고무는 The Dow Chemical (Midland, MI, USA)사 ENR7447 [밀도=0.865 g/cm³, MFI=5 g/10 min (190°C/2.16 kg)] 제품을 사용하였다. 산화방지제는 미원상사(Anyang, Korea) ANOX BB021 제품을 정제없이 그대로 사용하였다.

2. PP 복합재 제조

무기 충전제와 충격보강제 함량에 따른 수축률과 물성변화 거동을 확인하기 위해 2종의 서로 다른 PP에 각 소재별로 충전제의 함량을 10, 20, 30 wt.%로 구분하여 첨가하였다. 산화방지제는 모든 조성에서 0.2 phr (part per hundred resin)로 일정하게 첨가하였다. PP에 충전제가 첨가된 복합재를 제조하기 위하여 이축압출기는 한국EM (Pyeongtak, Korea)사 STS40 series (스크류 직경=40 mm, L/D=52)를 사용하였다. 가공온도는 1번 실린더를 170°C로 설정하고 순차적으로 상승시켜 12번 실린더 및 다이(Die) 부분을 220°C로 설정하여 가공하였으며, 압출 가공조건은 300 rpm의 스크류 회전 속도하에서 시간당 65 kg의 압출량을 유지하였다. 압출된 스트랜드(Strand)는 30°C로 고정된 수조에서 냉각시킨 후 펠릿(Pellet) 형태로 제조하였다. 사출시편은 LS엠트론(Anyang, Korea)사 LGE110 (형체력=110 ton) 사출기를 이용하여 사출온도는 200-215°C하에서 300-400 kg/cm² 사출압력과 100-120% 사출속도로 제조하였다. 이때 사용한 보압은 200 kg/cm²이었으며 배압은 80 kg/cm² 조건으로 수행하였다.

3. 특성분석

수축률 측정을 위한 시편은 Figure 1과 같이 사각형(Plaque type)을 사용하였고, 성형품의 치수 측정은 PP의 결정화가 완료되어 더 이상 수축이 진행되지 않는 3일 경과한 후에 수행하였다. 측정 방법은 수축이 완료 후 시편에 표시된 표점 사이의 길이를 디지털 계측이 가능한 니콘(Nikon)사 MEASURESCOPE

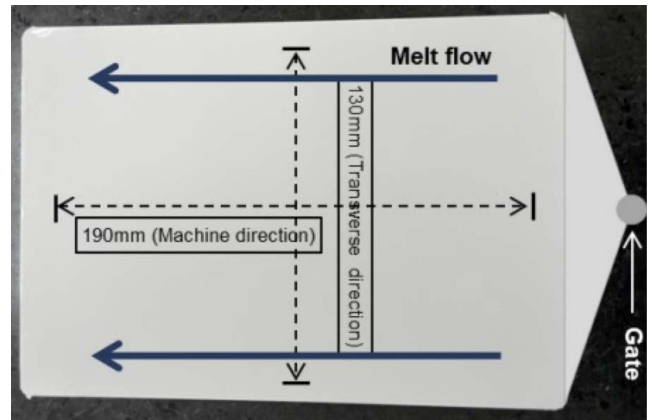


Figure 1. Shrinkage measurement positions of the test specimen.

MM-22 전자현미경으로 측정하여 최초 길이 대비 변화율(%)로 표기하였다. 제조된 PP 복합재의 유동성 확인을 위해 Melt Flow Indexer (model: MP600 Extrusion Plastometer, Tinius Olsen Testing Machine Com., Horsham, PA, USA)를 이용하였으며, ASTM D1238법에 따라 230°C, 2.16 kg 조건하에서 측정하였다. 또한 충전제 함량에 따른 단위 부피당 중량 변화를 확인하기 위해 ASTM D792법에 따라 시편 밀도를 각각 측정하였다. 인장강도 및 신율은 ASTM D638에 따라 아령형태(dumbbell type)의 시편을 제작한 후 만능시험기(model: H50KT, Tinius Olsen Testing Machine Com., Horsham, PA, USA)를 이용하였으며 이때의 인장 속도는 50 mm/min로 측정하였다. 굴곡강도 및 굴곡탄성률은 ASTM D790법에 따라 만능시험기를 사용하였으며, 이때의 span distance는 102 mm이고 30 mm/min의 crosshead speed로 시편을 측정하였다. 충격강도는 ASTM D256법에 따라 IZOD 충격시험기(model: IMPACT104, Tinius Olsen Testing Machine Com., Horsham, PA, USA)를 이용하여 상온에서 측정하였다. 결과의 편차를 보정하기 위해 모든 물성시험 결과값은 5회 측정값의 평균값을 사용하였다.

Results and Discussion

1. 수축률 거동

고분자 사출성형 제품은 성형조건 뿐만 아니라 사용된 소재의 특성 및 제품 형상 등 다양한 요인으로 성형결함이 발생한다.²¹ 성형 수축률은 압출기에서 금형내부로 충전되는 고분자 수지의 흐름방향(MD; Machine direction)과 흐름직각 방향(TD; Transverse direction)에 따라 다르기 때문에 본 연구에서는 두 방향 모두에서 성형 수축률을 측정하였다.²² 각 샘플들의 수축률 측정 결과를 매트릭스 수지로 사용한 PP 종류와 수지 흐름방향에 따라 구분하여 Figure 2에 나타내었다. 순수한 Homo-PP의 수축률인 경우, MD 방향은 1.43% 이었으며 TD 방향은 1.69%로 측정되었다. 반면에 Homo-PP 기반의 복

합재는 충전제의 함량이 증가할수록 MD 방향과 TD 방향 모두에서 감소하는 경향을 보여주었다[Figure 2(a) & (b)]. 탈크 충전제의 함량이 증가할수록 PP 복합재에 대한 MD 방향 수축률이 1.06% 까지 선형으로 감소되지만, TD 방향은 수축률이 1.23% 까지 감소하였으며, TD 방향 수축률이 상대적으로 큰 경향을 보였다. 탄산칼슘 충전제의 함량이 증가할수록 PP 복합재는 MD 방향의 수축률 변화 경향이 탈크 충전제와 비슷하였고 1.29% 까지 감소하였다. 또한 TD 방향 수축률도 1.36% 까지 감소하였다. 탄산칼슘 충전제는 탈크와 유사하게 동일 함량에서 TD 방향 수축률이 MD 방향 수축률보다 큰 것을 확인하였으며, 탈크가 탄산칼슘보다 수축률이 상대적으로 낮은 것을 확인할 수 있었다. 분말 충전제와 달리 침상형 충전제인 유리섬유는 함량이 증가함에 따라 MD 방향 수축률이 0.27% 까지 감소되었고 TD 방향 수축률은 0.85%로 약간 높게 측정되었다. PP 복합재의 충전제로 유리섬유를 사용할 때 동일 충전제 함량하에서 PP 복합재의 수축률이 탈크나 탄산칼슘 충전제 대비 작은 것을 확인하였다. 또한, MD 방향의 경우 유리섬유 함량이 증가함에 따라 수축률이 급격히 작아지는 것도 함께 확인하였다. 하지만, TD 방향인 경우는 유리섬유 함량이 증가함에 따라 수축률 변화가 크지 않았다. 충격보강제로 사용되는 EBR 고무도 다른 무기 충전제와 유사하게 EBR 고무의 함량이 증가함에 따라 MD 방향 및 TD 방향 모두에서 수축률이 작아지는 것을 확인하였다. 또한, 10% 수축률은 탈크나 탄산칼슘과 유사하지만 함량이 증가될수록 MD,

TD 모두 수축률의 감소폭이 확연히 커지는 것을 확인하였다. Block-copolymer인 Impact-PP의 경우, Homo-PP와 마찬가지로 충전제의 함량이 증가함에 따라 PP 복합재의 수축률이 작아지는 것을 확인하였으나, 유리섬유 충전제를 포함하는 PP 복합재의 TD 방향 수축률은 충전제의 함량이 20에서 30%로 증가할 때 수축률의 증가하는 것을 확인하였다. 또한, 순수한 Impact-PP 자체의 수축률은 Homo-PP보다 컸으나 PP 복합재의 MD 방향의 수축률은 탄산칼슘 함량이 20 wt.%와 30 wt.%를 제외하고 동일한 충전제 함량에서 수축률이 오히려 낮은 값을 나타내었다.

상기 결과로부터 PP 복합재내에 매트릭스역할을 하는 PP의 결정화에 의한 수축에 큰 영향을 주는 충전제는 유리섬유 > EBR > 탈크 > 탄산칼슘 충전제 순서였다. 충격보강제로 사용된 EBR 고무는 낮은 결정화도를 가지며, 압출 가공 시 미세한 크기로 PP 매트릭스에 분산되어 PP의 결정화를 저해하는 역할을 한 것으로 사료된다. TD/MD 수축률 변화량은 PP 복합재에 적용한 무기 충전제의 형상이 PP의 수축과 상관관계가 있는 것을 유추할 수 있다. 유리섬유 충전제가 TD/MD 수축률 변화량이 제일 크고 탄산칼슘이 가장 낮은 것을 확인할 수 있다. Figure 3에서 보는 바와 같이 유리섬유는 침상형의 소재로 길이를 두께로 나눈 종횡비(Aspect ratio)가 20 이상이다. 이로 인해 사출 시 수지 흐름 방향으로 배향되어 PP의 결정화 진행 시 수축을 가장 많이 저해한 것으로 사료된다. 탈크는 판상형의 구조를 갖는 물질로서 종횡비가 5-20 정도로

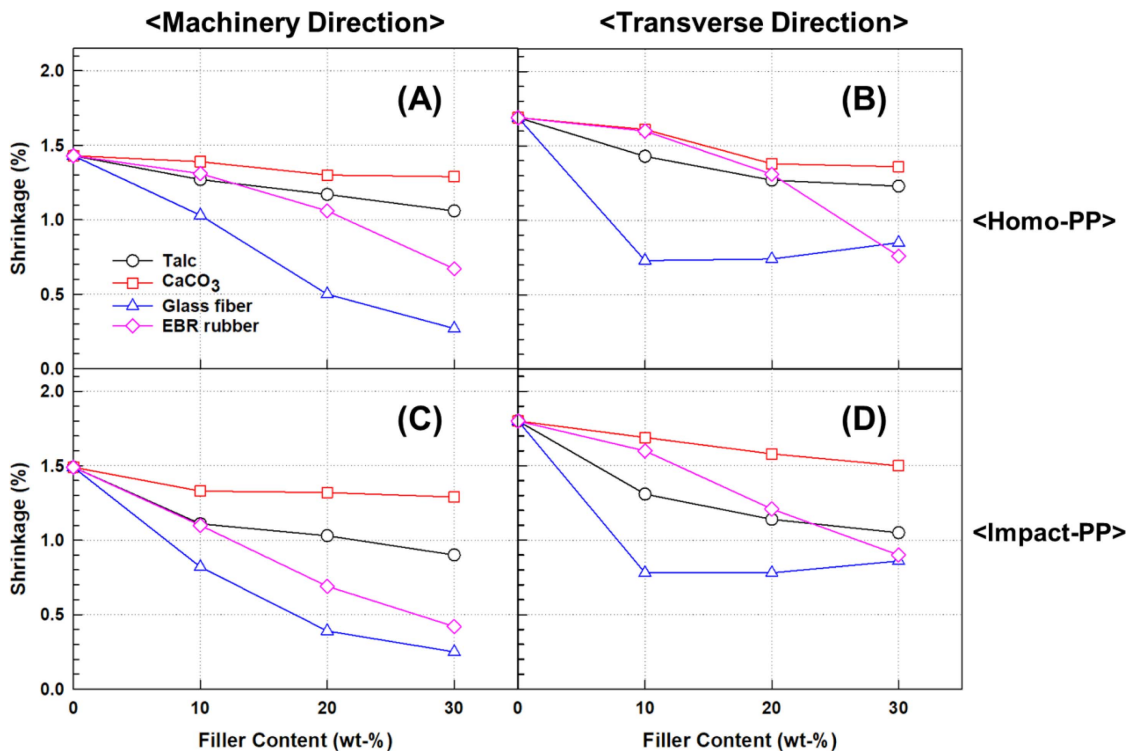


Figure 2. Shrinkage of PP composites in the machinery and transverse direction: Homo-PP based composites [(A) and (B)] and Impact-PP based composites [(C) and (D)].

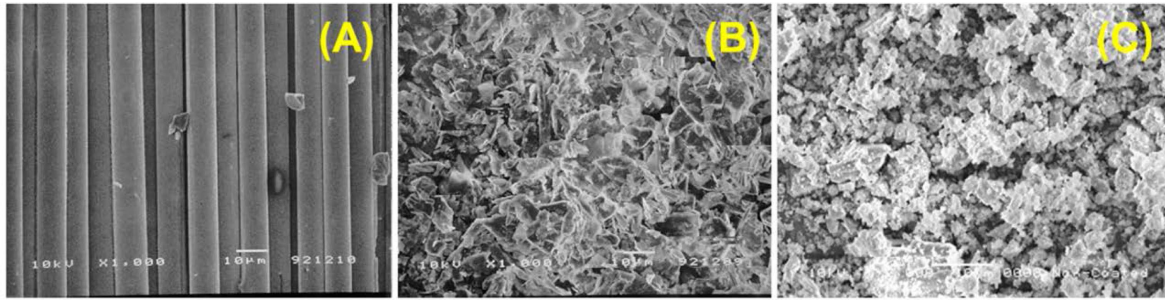


Figure 3. SEM images of glass fiber (A), talc (B), and calcium carbonate (C).

유리섬유 대비 낮아 PP의 결정화 진행 시 수축 저해 효과가 유리섬유 대비 작은 것으로 예측되며, 마지막으로 탄산칼슘은 과립형(Granule)의 구조를 갖으며 중형비가 약 1 정도이다. 이로 인해 PP의 수축에 가장 적은 영향을 주는 것으로 사료된다.

2. PP 복합재 물성

PP 복합재의 용융 흐름성(MFI, Melt flow index)과 밀도를 측정하여 Table 1에 나타내었다. 탄산칼슘/PP 복합재는 탄산칼슘의 함량이 증가함에 따른 변화는 미미하였다. 탈크가 첨가된 경우 Impact-PP 사용시에만 함량 증가에 따른 저하 경향이 확인되었다. 유리섬유/PP 복합재는 MFI 측정이 불가능하였고, EBR/PP 복합재는 EBR 고무 자체의 MFI 값이 사용한 PP 대비 낮아서 함량이 증가할수록 MFI 값이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. PP 복합재의 밀도는 무기 충전제인 탈크, 탄산칼슘, 유리섬유의 경우 자체 밀도가 PP 대비 높기 때문에 함량 증가 시 일정하게 증가하였고, EBR 고무는 자체 밀도가 낮아 PP 복합재내 함유량이 증가할수록 감소하는 것을 확인하였다.

PP 고분자 매트릭스내 여러가지 무기 충전제를 적용한 PP 복합재의 기계적 특성변화에 대한 실험적 연구와 이를 수식적으로 모델링화 하는 연구도 많이 진행되어 오고 있다.²³⁻²⁸ 본 연구에서는 Figure 4과 Figure 5에 각각의 충전제 함량에 따른 2가지 PP 복합재의 기계적 물성을 나타내었다. 항복점에서의 인장강도의 경우, Homo-PP 및 Impact-PP 기반의 유리섬유/PP 복합재 모두에서 함량 증가에 따른 강화 효과를 나타냈으며, 나머지 무기 충전제와 EBR 고무가 첨가된 PP 복합재의 경우 강화효과가 없었다. 이러한 유리섬유의 강화효과는 이전의 연구에서 지적된 바와 일치한다.^{24,25,29} 또한, 탈크와 탄산칼슘 같은 무기 충전제를 사용함으로써 PP 복합재의 강도가 증가하지 않는 이유는 무기 충전제가 PP의 결정화도를 감소시키며,^{29,30} PP 매트릭스와 무기 충전제간 계면접착력이 약하기 때문으로 사료된다.

굴곡 탄성률 및 강도의 경우, Homo-PP 또는 Impact-PP 기반 복합재에 대해 유리섬유>탈크>탄산칼슘 순으로 보강효과가 나타났으며, EBR/PP 복합재의 경우, EBR 고무 함량이 증가할수록 저하되는 것을 확인하였다. 굴곡 탄성률과 강도 물성은 첨가된 충전제의 종류와 함량과 상관관계가 있으나, 매트릭스로 사용한 PP의 종류에 따른 영향은 미미하였다.

Table 1. Melt Flow Indexes and Densities of PP Composites Depending on the Filler Type and Content

Filler name	Filler Content (wt.%)	Homo-PP based		Impact-PP based	
		MFI (g/10 min)	Density (g/cm ³)	MFI (g/10 min)	Density (g/cm ³)
None	0	23.8	0.90	19.5	0.90
Talc	10	22.8	0.97	17.5	0.95
	20	23.3	1.04	16.7	1.04
	30	22.2	1.12	15.8	1.12
	CaCO ₃	10	23.1	0.97	18.6
CaCO ₃	20	22.3	1.01	17.5	1.02
	30	22.9	1.10	17.6	1.10
	Glass fiber	10	-	0.96	-
20		-	1.03	-	1.03
30		-	1.12	-	1.12
EBR	10	21.6	0.90	15.1	0.90
	20	20.5	0.90	13.3	0.89
	30	18.6	0.89	13.2	0.89

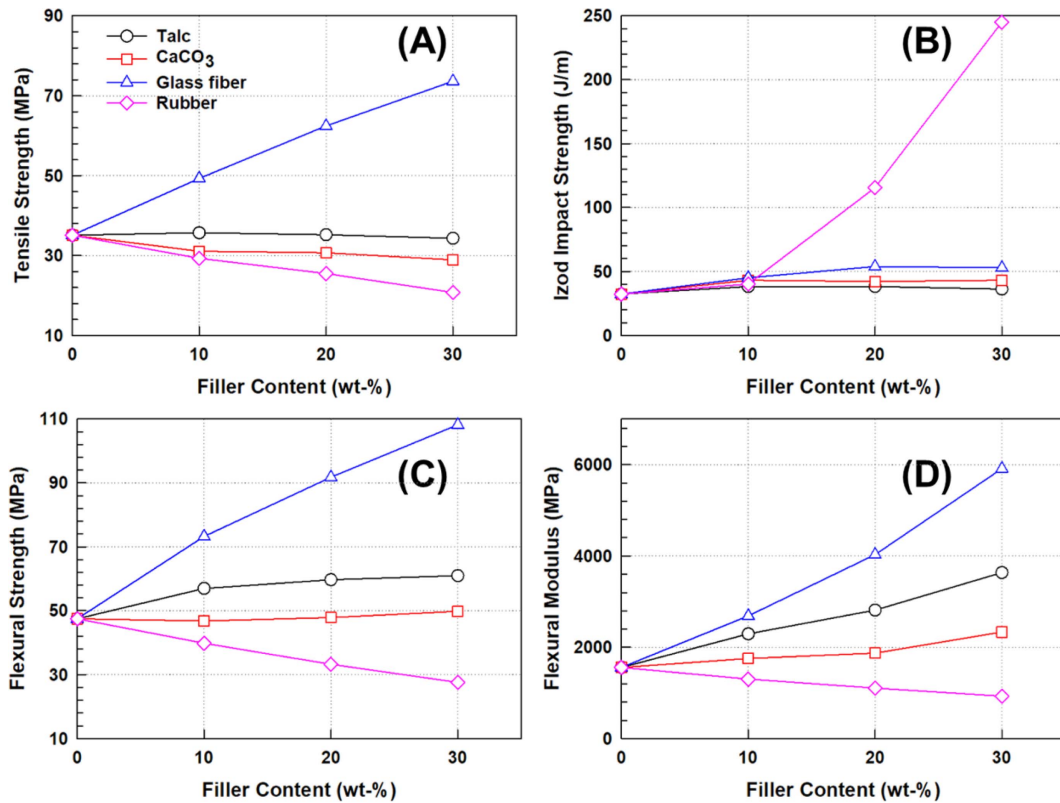


Figure 4. The results of mechanical characterizations for Homo-PP based composites depending on filler types and content: tensile strength (A), izod impact strength (B), flexural strength (C), and flexural modulus (D).

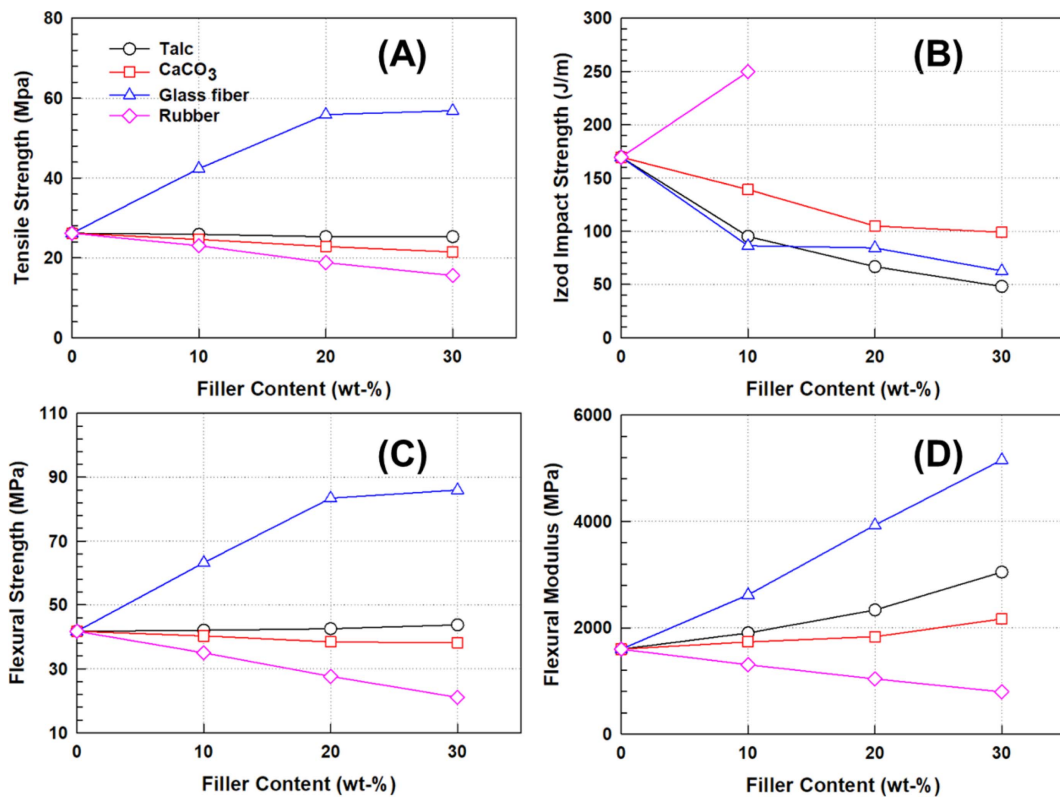


Figure 5. The results of mechanical characterizations for Impact-PP based composites depending on filler types and content: tensile strength (A), izod impact strength (B), flexural strength (C), and flexural modulus (D).

PP 복합재의 충격강도도 매트릭스로 사용한 PP 종류와 상관없이 EBR 고무가 첨가되었을 때만 보강 효과가 확연하게 나타났으며, Figure 5에서 보는 바와 같이 블록 공중합체로 구성된 Impact-PP는 PP 자체의 충격강도값이 높고, EBR 고무가 20 wt.% 이상일 경우 PP 복합재 자체가 고무특성을 나타내어 충격강도 측정에서 파단되지 않았다. 그리고, 다른 무기 충전제를 첨가했을 때 Homo-PP 기반의 PP 복합재의 충격강도값은 충전제 함량과 무관하게 일정하였으나, Impact-PP 기반의 PP 복합재의 충격강도값은 감소하였다. 하지만, Impact-PP의 높은 충격강도값으로 인해 무기 충전제의 동일 함량하에서 충격강도값은 Impact-PP 기반의 PP 복합재가 Homo-PP 기반 대비 높은 것을 확인하였다.

Conclusions

자동차 내·외장 플라스틱 부품용으로 가장 널리 사용되는 PP 복합재의 충전제에 따른 수축률 변화 확인 결과, 충전제 종류에 관계없이 함량이 증가할수록 수축률이 감소하는 것을 확인하였다. 무기 충전제 중에서는 유리섬유>탈크>탄산칼슘 순으로 PP 복합재의 수축을 저해하였고, 이는 충전제의 형상과 연관된 효과로 특히, 종횡비가 큰 유리섬유 충전제의 수축률 저해 효과가 가장 크게 나타났다. 충격강도 보강재로 사용되는 EBR 고무는 첨가 함량에 비례하여 일정한 변화율로 수축률이 작아지는 경향을 확인하였다. 방향성에 의한 수축의 경향을 확인한 결과 일반적으로 수직 흐름 방향인 MD 방향 대비 직각 방향인 TD 방향에서 수축률이 큰 것을 확인하였다.

충전제 함량에 따른 물성 변화 경향을 확인한 결과, 인장강도는 유리섬유 첨가 시에만 강화 효과를 확인하였다. 굴곡탄성률 및 굴곡강도는 유리섬유>탈크>탄산칼슘 순으로 강화 효과를 확인하였다. 충격강도의 경우는 ERB 고무 첨가 시에만 향상됨을 확인하였다. 이러한 결과는 향후 PP 복합재의 충전제 선정에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgements

본 연구는 산업통상자원부의 “소재부품기술개발사업”(태양광 모듈용 고무과 열가소성 탄성소재, 과제번호: 20012770)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

이해상충: 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

References

1. B. H. Lee, D. S. Jeong, C. W. Kim, S. H. Park, and Y. C. Kim, “Influence of the Chemical Treatment of Bamboo Fiber (BF) on Physical Properties of BF and PP/BF Composites”, *Appl. Chem. Eng.*, **29**, 168 (2018).
2. D. Kang, S. Oh, and H. I. Kim, “Improvement of Physical Properties of Polypropylene Chemical Foam by Glass Fiber Reinforcement”, *Polym. Korea*, **43**, 589 (2019).
3. J. I. Lee, J. W. Bae, S. L. Kim, J. E. Hong, and B. U. Nam, “Study on Impact Resistance, Wear Resistance and Crystallization Kinetics of Polypropylene Modified by Complex Crosslinkers”, *Polym. Korea*, **44**, 603 (2020).
4. Y. J. Ju, Y. C. Kwon, and H. S. Choi, “Study on the Suitability of Composite Materials for Enhancement of Automotive Fuel Economy”, *Compos. Res.*, **32**, 284 (2019).
5. M. A. Ali, A. Abdullah, S. Dahaman, A. Amin, and S. Mansor, “Review the Mechanical Properties of Reinforcing Agents in Polypropylene Matrix of Car Bumper”, *ARN J. Eng. Appl. Sci.*, **12**, 4209 (2017).
6. Y. S. Kim, S. G. Ku, D. W. Kim, K. S. Kim, and Y. C. Kim, “Effect of the Felt Fabrication Direction on the Physical Properties of Polypropylene-Poly(ethylene terephthalate)/Kenaf Felt Composites”, *Polym. Korea*, **42**, 695 (2018).
7. K. Palanikumar, R. Ashok Gandhi, B. K. Raghunath, and V. Jayaseelan, “Role of Calcium Carbonate(CaCO₃) in Improving Wear Resistance of Polypropylene(PP) Components Used in Automobiles”, *Mater. Today: Proc.*, **16**, 1363 (2019).
8. J. Zhao, Y. Qiao, G. Wang, C. Wang, and C. B. Park, “Light-weight and Tough PP/talc Composite Foam with Bimodal Nanoporous Structure Achieved by Microcellular Injection Molding”, *Mater. Des.*, **195**, 109051 (2020).
9. A. Layachi, A. Makhlof, D. Frihi, H. Satha, A. Belaadi, and R. Seguela, “Non-isothermal Crystallization Kinetics and Nucleation Behavior of Isotactic Polypropylene Composites with Micro-talc”, *J. Therm. Anal. Calorim.*, **138**, 1081 (2019).
10. J. Ding, W. Ma, F. Song, and Q. Zhong, “Effect of Nano-Calcium Carbonate on Microcellular Foaming of Polypropylene”, *J. Mater. Sci.*, **48**, 2504 (2013).
11. K. A. Lyer, and J. M. Torkelson, “Green Composites of Polypropylene and Eggshell: Effective Biofiller Size Reduction and Dispersion by Single-Step Processing with Solid-state Shear Pulverization”, *Compos. Sci. Technol.*, **102**, 152 (2014).
12. Y. Wang, L. Cheng, X. Cui, and W. Guo, “Crystallization Behavior and Properties of Glass Fiber Reinforced Polypropylene Composites”, *Polymers*, **11**, 1198 (2019).
13. Q. T. H. Shubhra, A. K. M. M. Alam, and M. A. Quaiyyum, “Mechanical Properties of Polypropylene Composites: A Review”, *J. Thermplat. Compos. Mater.*, **26**, 362 (2011).
14. A. M. Elhousari, M. Rashad, A. H. Elsheikh, and M. Dewidar, “The Effect of Rubber Powder Additives on Mechanical Properties of Polypropylene Glass-fiber-reinforced Composite”, *Mech. Sci.*, **12**, 461 (2021).
15. L.-F. Ma, R.-Y. Bao, R. Dou, S.-D. Zheng, Z.-Y. Liu, R.-Y.

- Zhang, M.-B. Yang, and W. Yang, "Conductive Thermoplastic Vulcanizates (TPVs) based on Polypropylene (PP)/ethylene-propylene-diene Rubber (EPDM) Blend: From Strain Sensor to Highly Stretchable Conductor", *Compos. Sci. Technol.*, **128**, 176 (2016).
16. A. R. Kakroodi, and D. Rodrigue, "Impact Modification of Polypropylene-based Composites using Surface-coated Waste Rubber Crumb", *Polym. Compos.*, **35**, 2280 (2014).
 17. M.-Y. Lyu, J.-H. Mo, and W.-J. Jeong, "Shrinkage in Injection Molded Part for Operational Conditions and Resins", *Elast. Compos.*, **38**, 295 (2003).
 18. S. Han, and K. K. Wang, "Shrinkage Prediction for Slowly-crystallizing Thermoplastic Polymer in Injection Moulding", *Int. Polym. Proc.*, **12**, 228 (1997).
 19. R. Pantani, and G. Titomanlio, "Analysis of Shrinkage Development of Injection Moulded PS Samples", *Int. Polym. Proc.*, **16**, 183 (1999).
 20. R. Pantani, J. M. B. Jansen, and G. Titomanlio, "In-moulded Shrinkage Measurements of PS Samples with Strain Gages", *Int. Polym. Proc.*, **12**, 396 (1997).
 21. F. W. Billmeyer, Jr., "Textbook of Polymer Science", p. 457, John Wiley & Sons, New York, 1984.
 22. H. Park, H. Sim, H.-K. Oh, G.-H. Lee, M.-A. Kang, and M.-Y. Lyu, "Experimental and Computational Study on the Mold Shrinkage of PPS Resin in Injection Molded Specimen", *Elast. Compos.*, **55**, 120 (2020).
 23. Y. Zhou, and P. K. Mallic, "Effects of Temperature and Strain Rate on the Tensile Behavior of Unfilled and Talc-filled Polypropylene, Part1", *Polym. Eng. Sci.*, **42**, 2449 (2002).
 24. J. L. Thomason, and M. A. Vlugg, "Influence of Fibre Length and Concentration on the Properties of Glass Fibre-reinforced Polypropylene, 1. Tensile and Flexural Modulus", *Compos. Part A*, **27A**, 477 (1996).
 25. S. Fu, B. Lauke, E. Mader, C. Yue, X. Hu, and Y. Mai, "Hybrid Effects on Tensile Properties of Hybrid Short-glass-fiber- and Short-carbon-fiber-reinforced Polypropylene Composites", *J. Mater. Sci.*, **36**, 1243 (2001).
 26. C. Zweben, "Tensile Strength of Hybrid Composites", *J. Mater. Sci.*, **12**, 1325 (1977).
 27. H. Fukuda, "An Advanced Theory of the Strength of Hybrid Composites", *J. Mater. Sci.*, **19**, 974 (1983).
 28. S. Y. Kim, H. M. Kim, D. J. Lee, J. R. Youn, and S. H. Lee, "Fiber Orientation and Warpage of Film Insert Molded Parts with Glass Fiber Reinforced Substrate", *J. Korea Soc. Compos. Mater.*, **25**, 117 (2012).
 29. S. Kim, D. Son, D. Choi, I. Jeong, Y.-B. Park, and S. Y. Kim, "Development of a Prediction Model for the Mechanical Properties of Polypropylene Composites Reinforced by Talc and Short Glass Fibers", *Compos. Res.*, **26**, 245 (2013).
 30. S. N. Maiti and K. K. Sharma, "Studies on Polypropylene Composites Filled with Talc Particles, Part 1: Mechanical Properties", *J. Mater. Sci.*, **27**, 4605 (1992).

출판자 공지사항: 한국고무학회는 게재된 논문 및 기관 소속의 관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.