

초고분자량 폴리프로필렌 컴파운드 소재 특성 연구

정도연[†] · 차승환 · 이현욱*

비지에프에코머티리얼즈, *한국자동차연구원

(2024년 10월 28일 접수, 2024년 12월 6일 수정, 2025년 1월 2일 채택)

Study on Ultra-High Molecular Weight Polypropylene Compound Material Properties

Doyeon Jeong[†], Seunghwan Cha, and Hyunwook Lee*

(Received October 28, 2024; Revised December 6, 2024; Accepted January 2, 2025)

초록: 폴리프로필렌은 각종 산업용 기계 및 장치의 부품 소재로 널리 사용되며, 열가소성 고분자 소재는 결정성 고분자로 마찰계수가 낮고 특성이 강하여 기어, 배관부품, 자동차 부품, 장난감 등의 소재로 사용된다. Ultra-high molecular weight polypropylene(UHMWPP)는 분자량 100만 이상의 폴리프로필렌으로 일반 폴리프로필렌에 비해 충격강도가 높은 고강성, 고충격 소재로 내마모성이 뛰어나 자동차 내장재뿐만 아니라 고무 대체가 가능하다. 본 연구에서는 UHMWPP의 유리섬유 및 무기충전제 복합재료의 물성 및 내마찰특성을 폴리프로필렌과 비교 확인하고, 왕복마찰 시험장치를 이용하여 연구를 진행하였다.

Abstract: Polypropylene is widely used as a component material for various industrial machines and devices. Thermoplastic polymer materials are crystalline polymers that have a low friction coefficient and strong characteristics, so they are used as materials for gears, plumbing parts, automobile parts, and toys. Ultra-high molecular weight polypropylene (UHMWPP), a polypropylene with a molecular weight of over 1 million, is a high-stiffness, high-impact resistant material that has higher impact strength than general PP and is currently friction resistance, which is used not only for interior materials but also for rubber materials. Research is underway to apply it to sealing products.

Keywords: ultra-high molecular weight polypropylene, high strength, low density, polymer composite.

서 론

폴리프로필렌 수지는 성형성, 내충격성, 내약품성 등이 뛰어나고 저비중, 저가라는 큰 장점을 가지고 있어서, 안전성 및 기능성을 모두 요구하는 부품인 범퍼, 카울크로스바, 도어 이너판넬 및 내장 트림류 등의 자동차 내외장재에 폭넓게 사용되고 있다.¹ 특히, 자동차 카울크로스멤버에 사용되는 소재는 상온 및 저온에서의 우수한 충격강도와 높은 내열성, 고강성을 요구하며 우수한 충격강도를 만족하기 위해서 높은 함량의 고무상이 첨가되어야 하고 고강성을 확보하기 위하여 일정 함량 이상의 충전제를 첨가하여 사용해 왔다.²

또한, 단독 중합된 호모폴리프로필렌은 충격강도가 낮기 때문에 중합 시 알파올레핀, 예를 들어 에틸렌과 함께 공중합함으로써 충격강도를 보완하는 기술이 이용되고 있다.³⁻¹⁰ 하

지만 에틸렌-프로필렌 블록 공중합체는 결정성 에틸렌/프로필렌 공중합체와의 혼련성이 좋지 않은 단점이 있으며 이를 개선하기 위한 다양한 방법이 있지만 현재까지 만족할 만한 조성물이 제공되지 않고 있다. 일반적으로 압출 및 사출용 폴리프로필렌수지라 함은 크기가 2 내지 3 mm 정도 되는 균질성 소재를 말하며 원소재가 갖고 있는 물성의 한계를 극복하고 다기능 및 고성능의 시너지 효과를 얻기 위해서 서로 다른 소재를 물리적/화학적 방법으로 혼성화한 소재이다.

일정한 온도와 압력 하에서 펠렛이 완전히 녹으며, 스크류 힘에 의해서 토출되며 노즐을 통해 나온다. 그러나 평균직경이 0.1 내지 200 μm 인 폴리프로필렌 수지의 입자는 작고, 펠렛형태를 갖지 않아 실린더 내에서 용융온도 상에서 용융물이 흐름 상태에서 들어가지 않고 고무와 같은 상태로 유지가 되어 실린더 내에 수지의 블록형태를 나타내 노즐을 통한 흐름속도가 저하되어 실린더 내의 압력이 올라가며 수지가 받는 열적 스트레스가 더해져 고분자 연결고리가 깨져 수지의 물성을 잃게 된다. 이러한 분자량이 높은 폴리프로필렌의 수지는 물리적 기계강도가 높아 수지 본래의 특성을 살려 가공하면

[†]To whom correspondence should be addressed.
dyjeong@bgfeco.com, ORCID[®]0009-0004-0600-1984
©2025 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

우수한 물성을 가진 폴리프로필렌을 베이스 소재로 활용하여 복합소재에 활용할 수 있다. 본 연구는 100만 이상의 초고분자량 폴리프로필렌을 베이스로 고무류의 내충격체를 사용하지 않고 기본적인 물성 및 충격특성을 높이며 내마찰특성을 지닌 소재를 연구하였다.

실 험

실험재료. 본 연구에서 사용된 재료로는 초고분자량 폴리프로필렌(UPH15, 대한유화, 한국), 폴리프로필렌(PP, 롯데케미칼, 한국) 유리섬유(E-Glass, TAISAN, 중국)를 사용하였다.

실험장비. 본 연구에서 사용된 장비는 SM PLATEK(한국)사의 L/D 38 mm 트윈스크류 압출기를 사용하였으며 UHMWPP와 유리섬유의 함침성을 관찰하기 위해 HITACHI(일본)사의 S-3400N 모델의 SEM기기이며 내스크래치평가를 위하여 네오플러스(한국)사의 FRW-160 모델의 장비를 사용하였다.

실험방법. 초고분자량 폴리프로필렌은 분자량 100만 이상이며 백색의 평균지름 10 μm 인 유리섬유를 이축 압출기에 투입하여 일련의 용융 및 혼련 공정을 실시함으로써, 폴리프로필렌 수지 조성물을 제조하였고, 이는 Figure 1을 통해 확인하였다. 이때, 용융온도는 180-230 $^{\circ}\text{C}$ 였으며 혼련 속도는 300 rpm으로 전자주사 현미경(SEM)을 통해 유리섬유가 초고분자량 폴리프로필렌에 잘 함침되어 있는 것을 확인하고, 섬유의 입경과 길이를 측정하였다. 물성 평가를 위해서는 비중은 ASTM D792, 인장강도 ASTM D638, 굴곡강도 ASTM D790, 충격강도 D256, 열변형온도 ASTM D648 규격으로 평가하였다. 초고분자량 폴리프로필렌 일반 폴리프로필렌의 유리섬유와 무기충전제의 복합소재의 내스크래치성을 평가하기 위하여 ASTM D7027 규격으로 평가하였다.

마찰 특성 평가. 초고분자량 폴리프로필렌을 압출공정 횟수에 따른 열적인 영향으로 인해 분자구조가 깨지고 물성에 영향을 미치는 정도를 파악하기 위하여 압출횟수에 따른 영향성 평가를 진행하였다.

결과 및 토론

유리섬유 복합소재의 물성. Table 1을 보면, 초고분자량 폴리프로필렌은 유리섬유를 포함함에 따라 인장강도 및 굴곡강도가 우수하게 나타났으며 유리섬유를 포함하지 않은 실험 2에서는 폴리프로필렌 수지 조성물은 현격히 물성이 떨어지는 것을 확인하였다. 산무수물을 포함하지 않은 실험 3과, 반응성 상용화제를 포함하지 않은 실험 4에서는 인장강도, 굴곡강도, 및 굴곡탄성률이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

압출온도 조건에 따른 물성평가. 용융 압출온도가 220 $^{\circ}\text{C}$ 이상의 고온인 경우 고분자 사슬이 파괴되어 기계적 물성이 저하되는 것을 확인할 수 있었다. 구체적으로, 용융 압출온도

Table 1. Properties of UHMWPP Composite

	1	2	3	4
Specific gravity	1.37	1.37	1.37	1.37
Tensile strength (MPa)	142	45	135	78
Bending strength (MPa)	186	48	175	120
Flexural modulus (MPa)	9870	1703	9187	3185
Impact strength (kJ/m ²)	33	18	30	19
HDT ($^{\circ}\text{C}$)	161	100	161	102

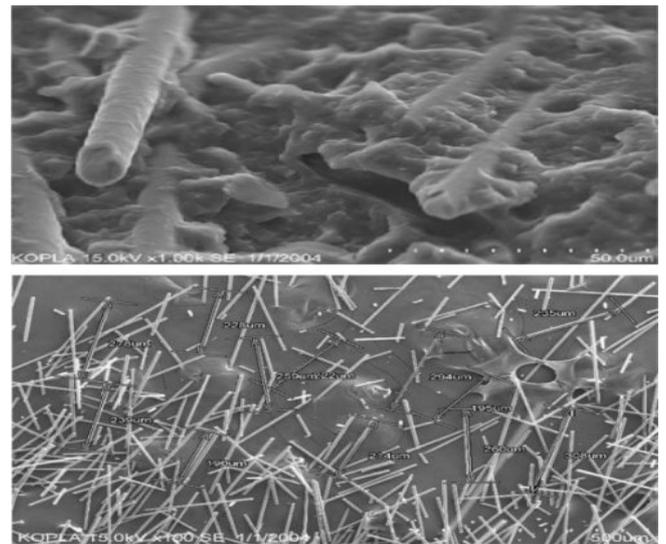


Figure 1. Impregnation of UHMWPP and glass fiber.



Figure 2. Dynamic friction coefficient measurement equipment.

가 220 $^{\circ}\text{C}$ 이상일 때, 폴리프로필렌 수지의 인장강도, 신율 및 굴곡탄성률이 저하되는 것을 확인할 수 있었으며, 특히, 230 $^{\circ}\text{C}$ 이상일 때, 수지의 인장강도, 신율 및 굴곡탄성률이 저하되는 것을 확인할 수 있었으며, 특히 230 $^{\circ}\text{C}$ 가 되면 충

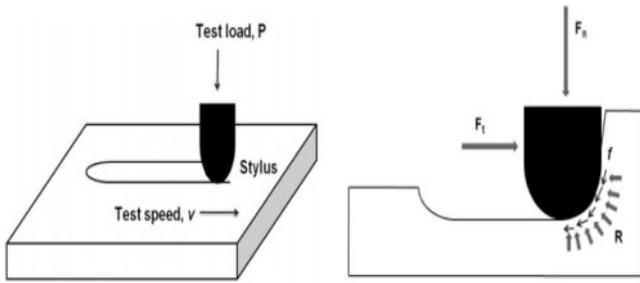


Figure 3. Friction schematic diagram; P is the normal applied load. v is the scratching velocity.

격강도가 현격이 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. Table 2 결과로부터, 용융 압출온도가 220 °C 이상의 고온인 경우 폴리프로필렌수지의 인장강도, 신율 및 굴곡탄성률이 저하되는 것을 확인할 수 있었으며, 특히 230 °C가 되면서 충격강도가 현저히 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

Figure 2에서 마찰로 인하여 발생하는 스크래치는 소재 표면에 압입자에 의해 외력에 가해지게 될 때 나타나는 현상과 더불어 Figure 3의 동적인 현상(소재 표면의 손상)을 의미하

며 수직하중(F_n)과 접선하중(F_t)로 나뉘어 진다. 압입자에 작용하는 힘과 소재 표면에 작용하는 힘의 관계를 보면 압입자의 수직하중과 접선하중에 대응하여 소재 표면에 반력 r 과 마찰력 f 가 발생한다.

실험속도를 일정하게 유지한 상태로 수직하중을 선형적으로 증가시키거나 또는 일정하게 부여하여 고분자 소재에 표면 손상을 발생하였으며 하중변화 4, 7, 10 kgf의 변수와 마찰속도 0.5, 2.0 Hz(왕복/분)으로 구분을 주어 마찰길이 20 mm로 마찰계수를 측정하였다. 즉, 실험속도를 일정하게 유지한 상태로 수직하중을 선형적으로 증가시켜 소재 표면에 손상을 발생 하였으며, 하중변화에 대한 스크래치 특성을 조사하여 거동을 관찰 하였다. Table 3은 마찰길이, 마찰속도, 하중에 따른 재질 별 마찰계수를 측정한 자료이며, Figure 4는 재질에 따른 마찰을 주었을 때 소재의 스크래치의 전자주사 현미경으로 관찰한 사진이다.

UHMWPP 소재는 내마찰 및 스크래치 특성에 일반 PP 보다 유리함을 확인하였으며 하중이 높아질수록 고분자 표면의 입는 마찰 및 마모는 크나 모든 조건에서 유리하였으며, 마찰속도를 증가 시 소재 표면에 입는 반력 및 마찰력이 적음을

Table 2. Properties According to Melt Extrusion Temperature

	Compounding temperature (°C)					
	180	190	200	210	220	230
Specific gravity	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37
Tensile strength (MPa)	141	142	142	142	142	135
Elongation (%)	2.9	3	2.9	2.9	2.9	1.9
Flexural modulus (MPa)	9912	9924	9974	9936	9904	8983
Impact strength (kJ/m ²)	34	33	34	32	33	24

Table 3 Friction Coefficient Under Various Conditions

Friction length (mm)	Friction velocity (Hz(repeat/min))	Load (kgf)	Friction coefficient (μ)			
			UHMWPP	PP	UHMWPP-GF20	PP-GF20
20	0.5	4	0.1125	0.1385	0.1203	0.1644
			0.1005	0.1342	0.1204	0.1786
			0.1224	0.1288	0.1201	0.1830
		7	0.0904	0.1313	0.1171	0.1299
			0.0740	0.1164	0.1197	0.1223
			0.0740	0.1234	0.1120	0.1272
	2.0	4	0.0844	0.0998	0.1029	0.1325
			0.0891	0.1023	0.1108	0.1300
			0.0880	0.1025	0.1095	0.0842
		7	0.0439	0.0440	0.0422	0.0859
			0.0489	0.0455	0.0440	0.0821
			0.0415	0.0475	0.0473	0.0864

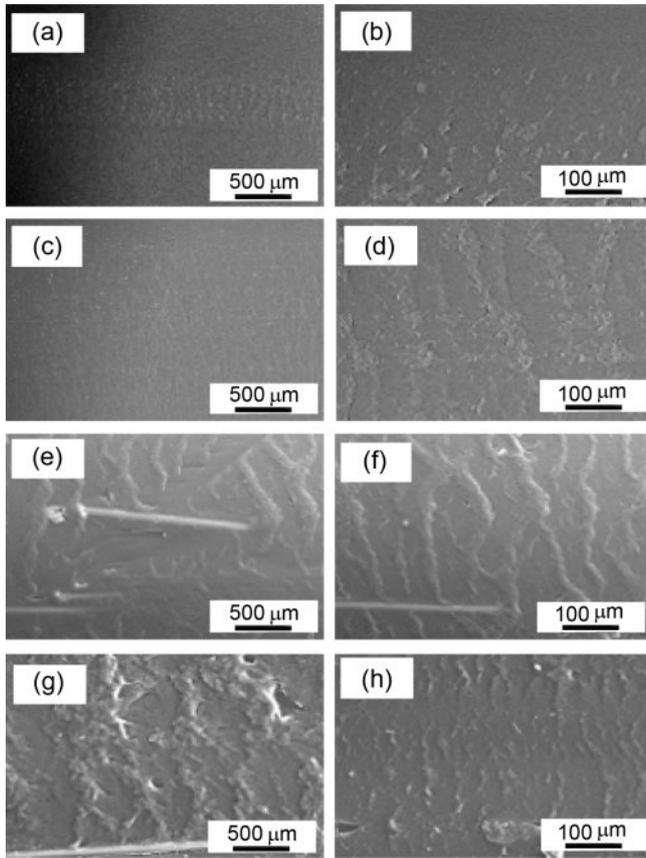


Figure 4. Optical microscope images ((a), (b): UHMWPP ($\times 100$, $\times 500$); (c), (d) UHMWPP-GF20 ($\times 100$, $\times 500$); (e), (f) PP ($\times 100$, $\times 500$); (g), (h) PP-GF20 ($\times 100$, $\times 500$)).

확인하였다. 또한 이는 복합소재에서 역시 비슷한 결과를 확인하였다.

압출공정 횟수에 따른 결정성 변화. 압출공정 횟수에 따른 결정성 변화는 재활용횟수에 따라 UHMWPP 및 UHMWPP/GF 물성에 영향을 미치며 이때 재활용 횟수에 따른 결정성 변화가 발생하게 된다. 이에 본 실험에서는 결정성 변화를 보기 위하여 DSC(Q20, TA社)를 활용하였다. $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 속도로 승온하여 $30\text{--}200\text{ }^\circ\text{C}$ 의 조건으로 2회 반복하여 온도변화에 따라 발생하는 재료의 melting enthalpy를 분석하여 결정성을 평가하였다. 결정성을 평가하는 식은 다음과 같다.

$$\chi_c = \frac{\Delta H_m}{W_p \Delta H_m^0} \quad (1)$$

χ_c : 복합재료의 결정성

ΔH_m : 복합 재료의 melting enthalpy

ΔH_m^0 : PP 고분자의 melting enthalpy

W_p : 복합재료 총 무게의 고분자무게 비율

χ_c 는 섬유강화 복합재료의 결정성을 의미한다.

ΔH_m 는 복합재료에 대한 melting enthalpy를 의미하며, ΔH_m^0

Table 4. Change in Physical Properties of UHMWPP Depending on the Number of Extrusion Processes

	1st	2nd	3rd
Specific gravity	0.90	0.90	0.90
Tensile strength (MPa)	45.0	34.7	34.9
Bending strength (MPa)	38.4	100	100
Flexural modulus (MPa)	1529	1277	1253
Impact strength (kJ/m ²)	32.0	16.0	5.3

Table 5. Change in Physical Properties of UHMWPP-GF50 Depending on the Number of Extrusion Processes

	1st	2nd	3rd
Specific gravity	1.34	1.34	1.34
Tensile strength (MPa)	143	135	133
Bending strength (MPa)	182	170	167
Flexural modulus (MPa)	9821	9500	9334
Impact strength (kJ/m ²)	52	25	13

Table 6. Crystallinity of UHMWPP Depending on the Number of Extrusion Processes

	1st	2nd	3rd
UHMWPP χ_c	0.157	0.309	0.306
UHMWPP-GF50 χ_c	0.257	0.563	0.344

는 PP고분자에 대한 melting enthalpy(209 J/g)를 나타낸다. W_p 고분자 복합재료 전체에 대해 고분자가 차지하고 있는 무게 비율을 의미한다.

Table 4는 UHMWPP의 압출공정 횟수에 따른 물성 변화이다. 또한 UHMWPP 소재에 GF 50% 컴파운딩하여 압출횟수에 따른 물성 변화를 측정하여 Table 5에 나타내었다.

본 연구를 통하여 압출공정 횟수에 따른 복합재료에 대한 기계적 물성 변화를 관찰하였고, melting enthalpy를 통하여 결정성 변화를 관찰하였으며 본 실험을 통해 얻는 결정성은 Table 6에 나타내었다.

본 실험을 통하여 압출횟수 증가에 따른 결정성이 상승하는 경향성을 확인하였다.

결론

본 연구에서는 초고분자량폴리프로필렌의 복합소재의 특성을 연구하여 소재의 물성, 압출온도 조건에 따른 물성, 마찰특성 평가 그리고 압출공정 횟수에 따른 결정성 변화를 연구하였다.

(1) 초고분자량 폴리프로필렌은 압출온도조건에 따른 분자구조의 영향을 미쳐 복합소재의 최종물성 인자에 영향을 확인하였다.

(2) 초고분자량 폴리프로필렌은 내마찰 및 스크래치 특성에 일반 PP보다 유리함을 확인하였으며 모든 조건에서 반력 및 마찰력이 적게 작용하는 것을 확인하였다.

(3) 압출공정횟수에 따른 기계적 물성이 변화를 관찰하였으며 이를 통해 초고분자량 폴리프로필렌의 결정성이 상승하는 결과를 확인하였다.

(4) 본 연구에서 초고분자량 폴리프로필렌을 압출조건에 따른 복합화하여 물성 및 소재의 특성의 미치는 영향을 확인하였으며 높은 충격강도와 내마찰, 내스크래치성에 큰 효과를 보여 자동차 내장소재 및 우수한 성질을 요하는 부품 적용에 큰 효과를 보여 줄 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글: 이 연구는 산업통상자원부 소재부품기술개발사업(과제번호20011130)의 지원으로 수행된 연구결과입니다.

이해상충: 저자(들)는 이해상충이 없음을 선언합니다.

참 고 문 헌

- Jiang, X.; Bin, Y.; Kikuyotani, N.; Matsuo, M. Thermal, Electrical and Mechanical Properties of Ultra-high Molecular Weight Polypropylene and Carbon Filler Composites. *Polym. J.* **2006**, 38, 419-443.
- James, M.; Sophie, C. C.; Ed, C.; Sam, C.; Stewart, A.; Jon, L.; Stuart, R. C.; Benjamin, M. W.; Kerry, K. Recycled Carbon Fibre for High Performance Energy Absorption, *Compos. Sci. Technol.* **2012**, 72, 688-695.
- Akonda, M. H.; Lawence, C. A.; Weager, B. M. Recycled Carbon Fibre-Reinforced Polypropylene Thermoplastic Composites. *Composites: Part A*, **2012**, 43, 79-86.
- Beak, K.-W.; Lee, S.-G.; Lee, J. H.; Choo, K.-Y. Quantitative Evaluation of Scratch Behavior for Polymeric Materials. *Polym. Korea*, **2009**, 33, 273-283.
- Kim, B.-C.; Kim, H.-J.; Choi, B.-H.; Lee, H.-S. An Experimental Study of the Scratch Properties of Poly(methyl methacrylate) as a Function of the Concentration of Added Slip Agent. *Tribology International*. **2011**, 2035-2041.
- Akonda, M. H.; Lawence, C. A.; Weager, B. M. Recycled Carbon Fibre-Reinforced Polypropylene Thermoplastic Composites. *Compos. Part A*, **2012**, 43, 79-86.
- Sim, K.; Lee, J.; Lee, H.; Youn, H. J. Flocculation Behavior of Cellulose Nanofibrils Under Different Salt Conditions and its Impact on Network Strength and Dewatering Ability. *Cellulose* **2015**, 22, 3689-3700.
- Kim, T.; Shim, S.; Kim, S.; Kang, B. A Study on Wheelchair Occupant Injury in Wheelchair Accessible Vehicle by the Sled Test. *Trans. KSAE*. **2017**, 25, 140-148.
- Yi, S.; Lee, S.; Lee, S.; Lee, J. H.; Han, I. S.; Yoon, M. J. Study on the Surface form of Damaged Soft Skin and Test Method. *Polym. Korea*, **2022**, 46, 198-207.
- Doh, J. H.; Lee, J. S.; Ahn, H. S.; Kim, S. W.; Kim, S. H. Reliability Based Design of the Automotive Components Considering Degradation Properties of Polymeric Materials. *Trans. KSAE*, **2016**, 24, 596-604.

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