

Beeswax 및 목분을 첨가한 친환경 폴리프로필렌 복합재료의 자외선 산화 저항성

정은아* · 박진원** · 안기태*** · 이현용**** · 이승구****† · 구준모****†

Resistance to UV-induced Oxidation of Eco-friendly Polypropylene Composites with Beeswax and Woodflour Additives

Eun-A Jeong*, Jin-Won Park**, Ki-Tae An***, Hyun-Yong Lee***, Seung-Goo Lee****†, Jun-Mo Koo****†

ABSTRACT: Polypropylene (PP) is a versatile thermoplastic polymer with excellent physical properties and economic feasibility, making it a material used in many industrial fields. During application, PP resin is typically blended with various additives, including heat stabilizers, antioxidants, and inorganic fillers, to enhance its physical properties, processability, and functionality. Recently, in an effort to use eco-friendly additives, PP composites using natural additives are being studied. PP composites containing natural wax are bee-friendly materials and have improved UV blocking properties, so research is underway to apply them to PP. However, when beeswax, a natural antioxidant, is added to PP, mechanical properties such as tensile strength and modulus decrease, and thus improvement is required. Therefore, a filler such as talc with high rigidity was used to supplement the properties. In this study, composites were manufactured by mixing beeswax, wood powder (WPC), and talc with PP in various compositions, and the changes in the physical properties of the PP composites according to their contents were investigated. In addition, the antioxidant effect was confirmed using FT-IR and oxidation induction time. The UV resistance of the beeswax composite was evaluated through a tensile test after UV exposure.

초 록: 폴리프로필렌(PP)은 범용 열가소성 고분자로서 양호한 물성과 경제성으로 인하여 많은 산업 분야에서 응용되고 있는 소재이다. PP수지는 응용과정에서 물성이나 가공성, 기능성을 향상시키기 위하여 일반적으로 열안정제, 항산화제, 무기충진제 등의 여러 가지 첨가제를 복합하여 사용한다. 최근 친환경성 첨가제를 사용하려는 노력으로 목분(WPC)이나 천연첨가제를 적용한 PP 복합재가 연구되고 있는데, 천연 beeswax를 함유한 PP복합재는 벌친화성 소재로서 양봉제품에 적용가능하고 자외선 차단성도 향상되어 이를 개발하려는 연구가 진행 중이다. 그러나 PP에 천연 항산화제인 beeswax를 첨가하면 인장강도와 탄성계수 등 기계적 물성이 감소하는 문제가 있어서 그 개선이 요구되고 있으므로, 강성이 높은 talc와 같은 충진제를 사용하여 물성을 보완하고자 하였다. 본 연구에서는 PP에 beeswax, 목분(WPC), talc를 다양한 조성으로 혼합해 복합재를 제조하고, beeswax와 목분 및 talc의 함량에 따른 PP복합재의 물성 변화를 고찰하였다. 또한, 항산화효과를 FT-IR과 산화유도지수로 확인했으며, 자외선 노출 후 인장시험을 통해 beeswax 복합 시의 자외선 저항성을 평가하였다.

Key Words: 폴리프로필렌 복합재(Polypropylene composite), 첨가제 함량(Additive content), 밀랍(Beeswax), 자외선 조사(UV irradiation)

Received 1 January 2026, received in revised form 4 March 2026, accepted 13 March 2026

*Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

**Department of Applied Organic Materials Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

***Department of Organic Materials Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

†Corresponding authors (lsgoo@cnu.ac.kr (Seung-Goo Lee), junmokoo@cnu.ac.kr (Jun-Mo Koo))

동안 산화를 진행하였다.

2.2 분석 방법

2.2.1 기계적물성 분석

PP 복합재료의 기계적 물성은 만능인장시험기(Universal Tensile Machine, UTM, ARG-X STD, Instron)를 사용해 인장강도, 인장탄성률, 굽힘강도와 굴곡탄성률을 측정하였다. 각 시험은 ASTM D638 및 ASTM D790에 의거하여 진행하였고 시험조건은 Load cell 250kN, 속도는 50 mm/min의 조건으로 실시하였다.

2.2.2 산화유도시간 분석

PP 복합재료의 첨가제 함량별 자외선조사가 열적 산화에 미치는 영향을 확인하기 위해 DSC 분석을 통하여 산화유도시간(Oxidation induction time, OIT)을 분석하였다. 이를 위해 시료가 240°C에 이르기까지 20°C/min 속도로 승온시킨 후 등온상태에서 산화반응에 도달하는 시간을 측정하였다.

2.2.3 표면산화 분석

자외선 조사시간 및 첨가제 조성에 따른 산화도 변화를 확인하기 위해 푸리에변환 적외선분광기(Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR, ALPHA-P, Bruker, Optics Inc., USA)를 통해 4000-400 cm⁻¹의 범위에서 감쇠전반사(Attenuated total reflectance, ATR) 기법으로 표면산화를 측정하고, 자외선에 의한 산화반응은 카보닐지수(Carbonyl index, CI)를 사용하여 분석하였다. CI는 FT-IR 스펙트럼에서 카보닐기 특유의 흡수피크(1810-1650 cm⁻¹ 부근) 면적 또는 흡광도를 기준피크(1375 cm⁻¹의 -CH₃ bending 또는 1455 cm⁻¹의 -CH₂ scissoring)와 비교하여 식 (1)과 같이 산출된다.

$$\text{Carbonyl index (CI)} = A_{\text{C=O}} / A_{\text{ref}} \quad (1)$$

$A_{\text{C=O}}$: Area under band from 1650-1850 cm⁻¹

A_{ref} : Area under band from 1420-1500 cm⁻¹

3. 결과 및 고찰

3.1 기계적 물성

PP 복합재료에 대한 인장 및 굽힘시험의 결과를 Fig. 1과 Fig. 2에 나타냈다. Beeswax 함량이 증가할수록 인장강도는 감소하는 경향을 보인다. 이는 유연성을 갖는 성분인 beeswax가 PP 매트릭스에 혼입되면 전체적인 강도를 낮출 수 있기 때문으로 생각된다. Beeswax는 PP 매트릭스보다 탄성률이 낮은 저분자 물질로, PP 매트릭스에 첨가시 연화제처럼 작용하여 beeswax 함량이 증가할수록 인장탄성률도 감소하

는 경향을 보인다. 굽힘물성에서도 동일한 사유로 Beeswax의 함량이 증가할수록 강도와 탄성계수가 대체적으로 감소하는 경향을 보인다.

반면에, talc를 충전할 경우, 함량이 증가할수록 인장강도가 증가하는 경향을 보이는데, 이는 talc를 첨가할수록 재료의 강성이 증가하면서 하중지능력이 향상되어 인장강도가 증가하는 것으로 해석된다. Talc는 강성이 높은 무기물 충전제로, 함량이 증가할수록 복합재의 인장탄성률도 증가하는 경향을 보인다. 역시 굽힘강도 및 굽힘탄성률에서도 같은 경향을 나타내었다.

WPC의 함량에 따른 인장강도와 인장탄성률은 뚜렷한 경향성을 확인할 수 없었다. 또한 굽힘강도와 굽힘탄성률에서도 WPC의 함량에 따른 경향성은 나타나지 않았다. 이는 beeswax와 같이 유연하지도 않고 talc와 같이 매우 단단하지도 않은 WPC 혼입에 의한 복합재의 물성 변화는 크지 않다는 것을 의미한다.

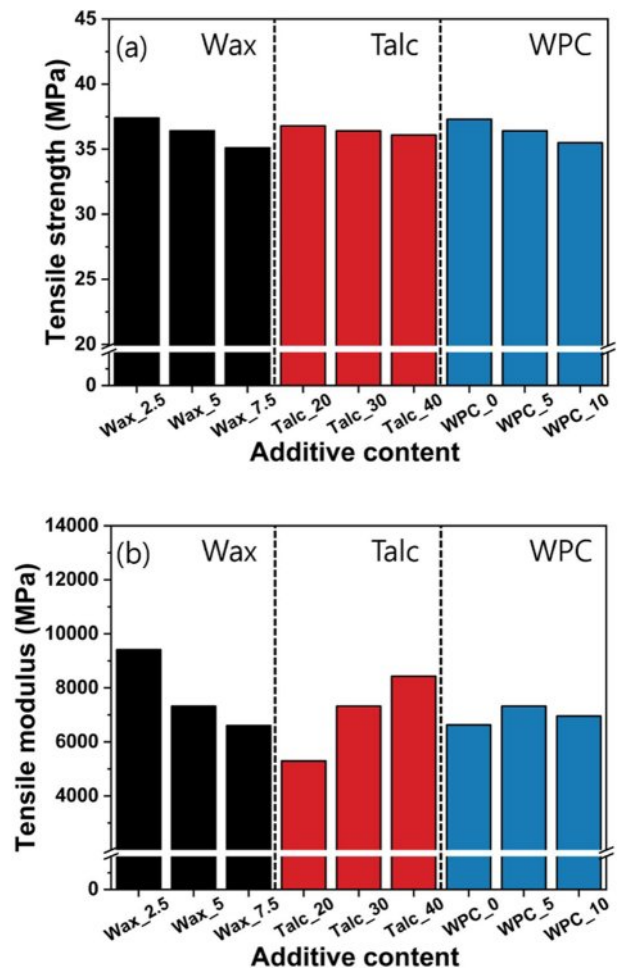


Fig. 1. (a) Tensile strength and (b) Tensile modulus of PP composite materials with various contents of additives (beeswax, talc and WPC)

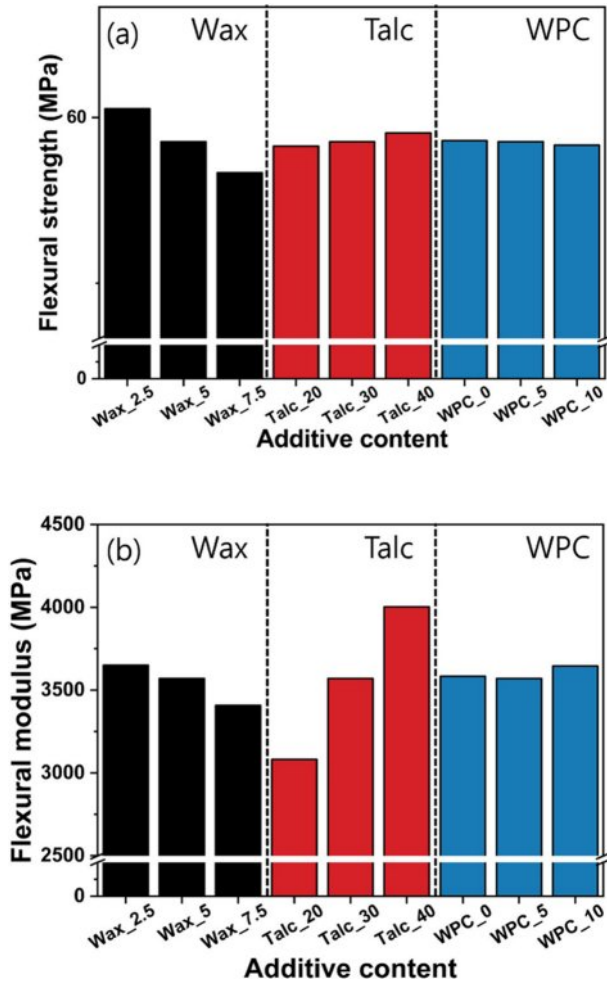


Fig. 2. (a) Flexural strength and (b) Flexural modulus of PP composite materials with various contents of additives (beeswax, talc and WPC)

3.2 자외선 산화

3.2.1 산화유도시간

PP 복합재료의 자외선 산화 후 산화된 시편의 열산화 안정성 변화를 조사하고자 DSC 분석을 통해 산화유도시간(OIT)을 측정하였다. OIT 값은 시료가 열산화반응을 개시하기까지 소요되는 시간을 의미하며, 열흐름 (Heat flow) 곡선상에서 산화 반응으로 인한 발열이 시작되는 시점을 기준으로 산정하였다. 이때 기준선과 발열구간의 접선이 교차하는 지점을 발열 개시점으로 정의하였으며, OIT 값이 높을수록 열산화 개시가 지연되어 보다 우수한 산화 안정성을 나타내는 것으로 해석된다.

Fig. 3에서는 beeswax 함량이 2.5, 5.0 및 7.5 phr인 PP 복합재료를 대상으로, 자외선 산화 노출시간(0, 6, 10일)에 따른 240°C의 등온상태에서 산화반응에 도달하는 시간을 측정된 결과를 나타내었다. 모든 시편에서 자외선 산화시간이 증가함에 따라 산화유도시간이 감소하는 경향이 전반적으

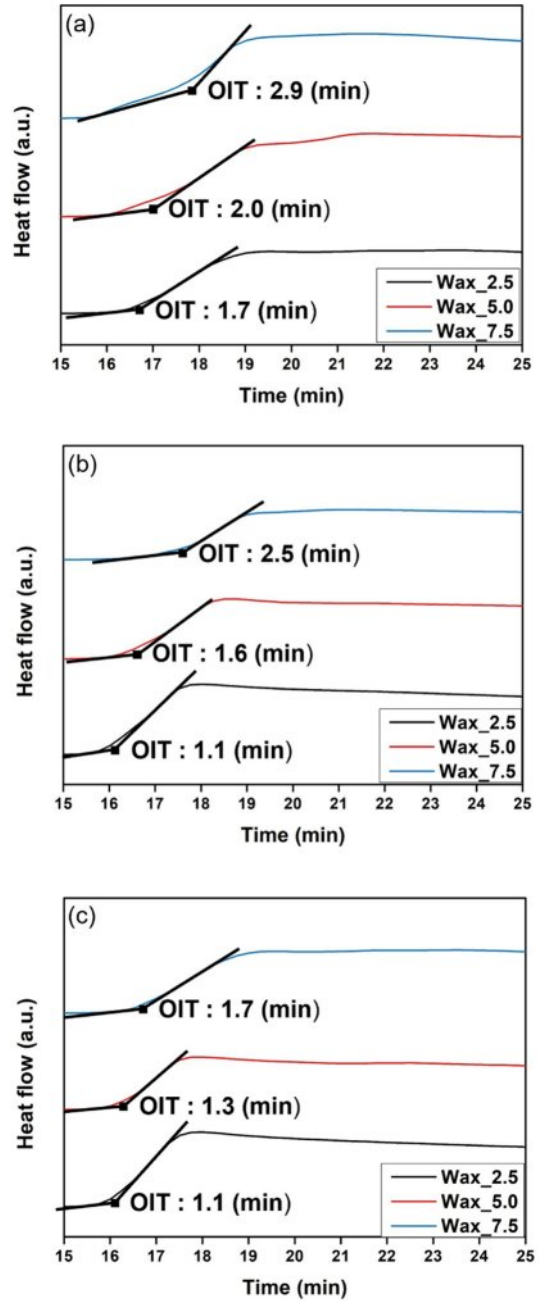


Fig. 3. (a) Day 0, (b) Day 6 and (c) Day 10 OIT analysis graphs of PP composite materials with different beeswax contents at several UV oxidation times

로 나타났다.

각 시편별 산화시간에 따른 산화유도시간 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 시료의 beeswax 함량이 높을수록 더 긴 산화유도시간(OIT)을 나타내는 것이 확인되었다. 이는 beeswax가 PP 매트릭스 내에서 산화반응을 억제하여 열산화 안정성을 향상시킨 효과에 기인한 것으로 판단된다.

자외선 산화시간이 증가함에 따라 모든 시료에서 OIT가 감소하는 경향을 보이며, 역시 beeswax 함량이 높을수록 전

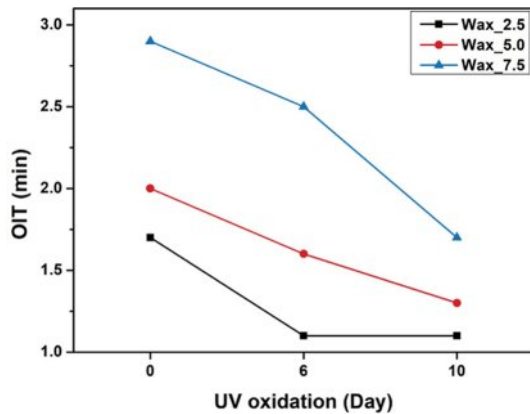


Fig. 4. OIT values of PP composite materials with different beeswax contents

구간에서 상대적으로 높은 OIT 값을 유지하였다. 이는 beeswax 함량이 높을수록 자외선 조사에 의해 재료가 열산화에 쉽게 노출되거나 손상되는 현상이 억제된 것에 기인한 것으로 판단된다.

3.2.2 카보닐지수

고분자재료는 자외선, 고온, 산소 등의 외부환경에 노출시 사슬절단 및 자유라디칼 반응을 통해 산소함유 관능기, 특히 카보닐기($-C=O$)를 생성하게 되므로, 카보닐지수(Carbonyl Index, CI)는 고분자재료의 산화열화 정도를 정량적으로 평가하기 위한 지표로서 폴리올레핀계 열가소성수지의 광산화 및 열산화 과정에서 널리 활용된다. CI 값은 $1600\text{--}1800\text{ cm}^{-1}$ 범위에서 beeswax를 구성하는 palmitic acid 등의 ester 결합피크인 카보닐기($-C=O$)의 신축진동운동 피크와 $1420\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$ 범위에서 관찰되는 메틸기($-CH_3$) 피크를 기반으로 하여 산출되었다.

Fig. 5에는 beeswax 함량별 PP 복합재의 산화시간에 따른 FT-IR 그래프를 나타내었다. 자외선 산화시간이 증가함에 따라 모든 시편에서 전반적으로 카보닐기 흡수 피크의 증가가 관찰되었으며, 이는 자외선 조사에 의해 유도된 산화반응의 진행을 의미한다.

Fig. 6은 자외선 산화시간에 따른 beeswax 함량별 CI 값을 나타낸 것이다. 초기에는 CI 값이 유사하다가 자외선 조사 시간 10일 경과에서는 beeswax 함량에 따른 차이가 명확하게 나타났다. 특히 beeswax 함량이 증가할수록 CI 증가율이 완만해지는 경향을 보였으며, 동일한 조사 기간에서 beeswax 함량이 높을수록 전반적으로 더 낮은 CI 값을 유지하였다.

이는 장시간의 자외선 조사조건에서 beeswax 첨가가 산화생성물의 축적을 억제하거나 산화반응의 진행을 지연시키는 효과를 갖는다는 것을 의미한다. 따라서 CI의 시간에 따른 변화를 종합적으로 고려할 때, beeswax 함량 증가는 PP 복합재료의 장기 자외선 산화저항성을 향상시키는 데 기

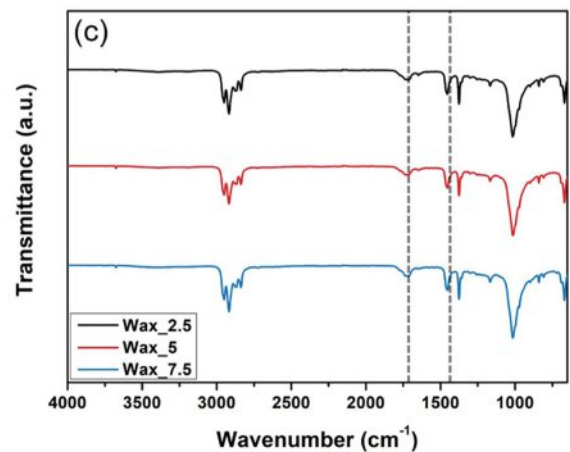
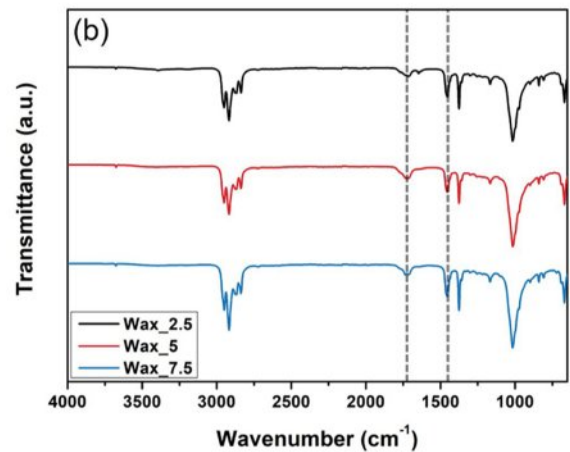
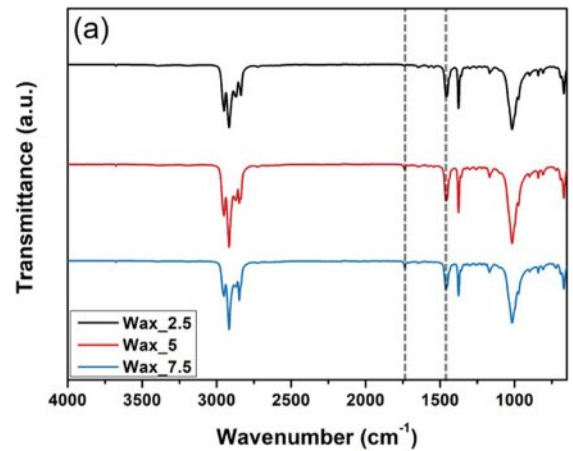


Fig. 5. (a) Day 0, (b) Day 6 and (c) Day 10 FT-IR spectrum of PP composite materials at different UV oxidation times by beeswax

여함을 확인할 수 있다

3.3 자외선 산화에 따른 강도 변화

Fig. 7은 첨가제 종류 및 함량에 따른 PP 복합재료의 자외선 산화 시간에 따른 인장강도유지율 변화를 나타낸 것이

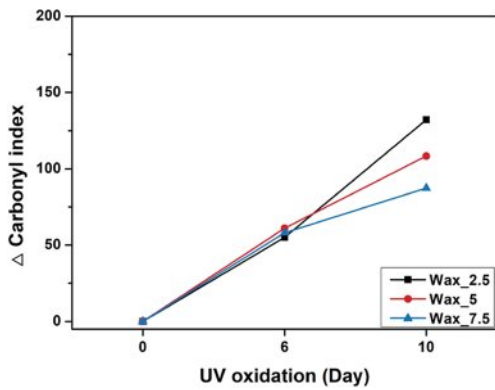


Fig. 6. Δ CI value of PP composite material through UV oxidation of beeswax content

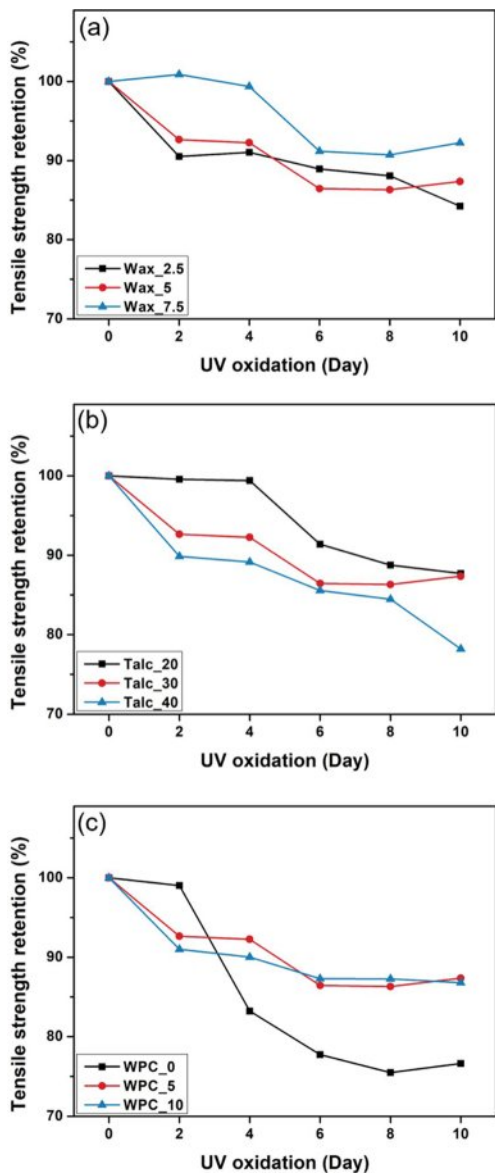


Fig. 7. Tensile strength retention of PP composite materials with varying contents of (a) beeswax, (b) talc and (c) WPC and different UV oxidation times

다. Beeswax가 첨가된 시편의 경우(Fig. 7(a)), Wax_7.5 시편이 전반적으로 가장 높은 인장강도유지율을 나타내었으며, beeswax 첨가량 증가에 따라 인장강도유지율이 향상되는 경향성이 나타났다.

특히 장기간 자외선조사(10일)에서 이러한 경향이 더욱 명확하게 나타났으며, beeswax 함량 증가에 따라 인장강도유지율이 증가하는 거동을 보여서, beeswax 첨가량이 가장 높은 Wax_7.5 시편이 가장 높은 인장강도유지율을 나타내었다. 이는 앞서 CI 분석결과와 같이, 산화저항성을 갖는 beeswax의 첨가가 자외선 조사에 따른 기계적 열화를 효과적으로 억제한 결과로 사료된다.

반면, talc가 첨가된 PP 복합재료의 경우(Fig. 7(b)), 첨가제 함량 변화에 따라 자외선 산화시간에 따른 인장강도유지율의 일관된 경향성이 관찰되지 않았다. 이는 talc의 함량 변화가 PP 복합재료의 자외선 산화저항성에 유의미한 영향을 미치지 않음을 시사한다. WPC 시편 또한 (Fig. 7(c)), WPC_5과 WPC_10 시편의 비교에서 알 수 있듯이 첨가제 함량에 따른 인장강도유지율의 뚜렷한 변화는 확인되지 않았다.

이러한 결과를 종합하면, talc 및 WPC는 자외선 저항성 향상에 큰 영향을 미치지 않았다. 반면 beeswax는 첨가량 증가에 따라 산화저항성이 향상되어 높은 인장강도유지율을 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 beeswax, talc 및 WPC를 첨가한 PP 복합재료를 제조하여, 첨가제 종류 및 함량에 따른 기계적 물성 변화와 자외선 노출에 따른 산화거동을 비교·분석하였다. 각 첨가제가 PP 복합재료의 초기 기계적 물성에 미치는 영향을 평가하였고, 자외선 조사 후 인장물성유지 거동을 통해 자외선 저항성을 종합적으로 검토하였다.

인장 및 굽힘시험 평가 결과, talc는 첨가량 증가에 따라 강도와 강성이 향상되는 경향을 보였으나, 자외선 조사 후 인장강도유지율에서는 첨가량에 따른 유의미한 차이를 나타내지 않았다. WPC의 경우 첨가량 변화에 따른 인장과 굽힘 물성 및 자외선 조사 후 인장강도유지율에서 뚜렷한 경향성을 보이지 않았다. 반면, beeswax가 첨가된 PP 복합재료는 초기 인장강도가 다소 감소하지만, 자외선 조사 후 인장강도유지율이 상대적으로 높은 수준에서 유지되는 특성을 나타냈다. 특히 beeswax 함량이 증가할수록 장기 자외선 조사 조건에서 인장특성유지율이 향상되는 경향이 확인되었다.

열산화 안정성 및 Carbonyl index 분석 결과에서도, beeswax를 첨가한 PP 복합재료는 자외선 조사에 따른 산화진행이 효과적으로 억제되었으며, beeswax 함량 증가에 따라 산화저항성이 점진적으로 향상되는 경향을 보였다. 반면, talc 및 WPC는 자외선 산화저항성 측면에서 뚜렷한 개선효과를 나타내지 않았다.

종합적으로 보면, 친환경성 PP 복합재를 제조할 때 talc의 복합은 기계적 물성을 향상시키는데 기여하게 되고, beeswax는 물성의 일부 감소에도 불구하고 자외선 조사 후 인장특성유지율과 산화저항성을 동시에 향상시키는 기능성 첨가제로서의 가능성을 확인하였다. WPC의 경우 친환경성 충전제로서 복합재 물성은 크게 건드리지 않으면서 친환경성을 높이는 역할을 할 수 있다. 이러한 친환경 PP 복합재는 양봉용 소재에서 요구되는 친환경성과 산화저항성을 가지며, 나아가 beeswax의 복합으로 양봉 벌집용 소재로서 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구결과는 PP 복합재료에서 기계적 물성과 자외선 저항성 간의 균형 설계를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 향후 beeswax- PP 복합재를 양봉용 벌집에 적용하여 벌 친화성을 연구하는데 기초자료로 사용될 수 있다.

후 기

본 연구는 농촌진흥청 농업정책지원기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다 (과제번호 RS-2021-RD010194).

REFERENCES

- Saito, N., Shigemori, Y., Noda, M., and Itou, J.-I., "Olefinic Thermoplastic Elastomer Composition," U.S. Patent No. 5449711, 1993.
- Diyana, Z.N., and Jumaidin, R., "Thermoplastic Starch/Beeswax Blend: Characterization on Thermal, Mechanical, and Moisture Absorption Properties," *International Journal of Biological Macromolecules*, Vol. 190, No. 1, 2021, pp. 224-232.
- Bolgar, M., Hubball, J., Groeger, J., and Meronek, S., *Handbook for the Chemical Analysis of Plastic and Polymer Additives*, 2nd Edition, CRC Press, New York, 2015.
- Moritomi, S., Watanabe, T., and Kanzaki, S., "Polypropylene Compounds for Automotive Applications," *Sumitomo Kagaku*, No. 1, 2010.
- Han, Z., and Fina, A., "Thermal Conductivity of Carbon Nanotubes and Their Polymer Nanocomposites: A Review," *Progress in Polymer Science*, Vol. 36, 2011, pp. 914-944.
- Zhou, Y., Liu, F., and Wang, H., "Novel Organic-Inorganic Composites with High Thermal Conductivity for Electronic Packaging Applications: A Key Issue Review," *Polymer Composites*, Vol. 38, 2017, pp. 803-813.
- Mallick, P.K., *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*, 3rd Edition, Taylor & Francis, 2007, pp. 1-70.
- Kang, J., He, J., Chen, Z., et al., "Investigation on the Crystallization Behavior and Polymorphic Composition of Isotactic Polypropylene/Multi-walled Carbon Nanotube Composites Nucleated with β -Nucleating Agent," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 119, 2015, pp. 1769-1780.
- Ayrilmis, N., Jarusombuti, S., Fueangviavt, V., Bauchongkol, P., and White, R.H., "Coir Fiber Reinforced Polypropylene Composite Panel for Automotive Interior Applications," *Fibers and Polymers*, Vol. 11, No. 9, 2011, pp. 919.
- Spatafore, R., and Pearson, L.T., "Migration and Blooming of Stabilizing Antioxidants in Polypropylene," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 31, 1991, pp. 1610-1617.
- Wang, H., Zhang, J., Fu, H., Wang, W., and Wang, Q., "Effect of an Antioxidant on the Life Cycle of Wood Flour/Polypropylene Composites," *Journal of Forestry Research*, Vol. 31, 2020, pp. 1435-1443.
- F. Giampieri, Gasparri, M., Forbes-Hernández, T.Y., Manna, P.P., Zhang, J., et al., "Beeswax By-products Efficiently Counteract the Oxidative Damage Induced by an Oxidant Agent in Human Dermal Fibroblasts," *International Journal of Molecular Sciences*, Vol. 19, No. 9, 2018, p. 2842.
- Pospíšil, J., Habicher, W.D., Pilař, J., Nešpůrek, S., Kuthan, J., Piringer, G.O., and Zweifel, H., "Discoloration of Polymers by Phenolic Antioxidants," *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 77, 2002, pp. 531-538.
- Liu, X.Y., Timar, M.C., and Varodi, A.M., "A Comparative Study on the Artificial UV and Natural Ageing of Beeswax and Chinese Wax and Influence of Wax Finishing on the Ageing of Chinese Ash (*Fraxinus mandshurica*) Wood Surfaces," *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, Vol. 201, 2019.
- Cizova, K., Vizarova, K., Haz, A., Vykydalova, Z., Cibulkova, P., and Simon, P., "Study of the Degradation of Beeswax Taken from a Real Artifact," *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 37, 2019, pp. 103-112.
- Choi, K.W., Kang, Y.S., and Cho, B.U., "Comparison of Aging Characteristics of the Duplicated Beeswax-treated and Non-treated Paper Books During Artificial Thermal Aging," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 41, 2016, pp. 68-74.
- Maddah, H.A., "Polypropylene as a Promising Plastic: A Review," *American Journal of Polymer Science*, Vol. 6, 2016, pp. 1-11.
- Lee, S.G., Lim, A., Hwang, T.S., Kim, D., Kim, S.B., Lee, M.Y., and Kim, J.H., "Polypropylene Compounding Compositions for Fabrication of Plastic Honeycomb Foundation," *Journal of Apiculture*, Vol. 37, No. 2, 2022, pp. 143-149.