

항균 및 원-적외선 방사 물성을 가지는 폴리프로필렌의 나노 복합 섬유 공정 최적화

Chung-Feng Jeffrey Kuo, chih-Chia Fan, Te-Li Su, Shih-Hsiung Chen and Wei Lun Lan

초 록

본 연구는 원-적외선 방사 물성과 미생물 저항성을 가지는 다기능 폴리프로필렌(PP) 섬유를 개발하는 것을 목표로 한다. 분말 비율, 이축 혼합과 용융 방사를 비롯한 공정 변수는 다구찌 기법, 회색 관계 이론 및 유사성에 의한 우선순위 기법을 사용하여 설계되었다. 방사 시험 결과는 복합 섬유의 원-적외선 방사 값이 85%이고, 이는 순수한 PP의 2.3배라는 것을 나타내었다. 원-적외선 방사 온도 상승 시험에 따라, 복합 섬유 온도는 8.6°C 상승하였고, 이는 순수한 PP의 온도가 6°C 상승한 것에 비해 43% 더 높다. 항균 시험은 복합 섬유가 황색포도상구균과 폐렴간균에 항균 효과를 가진다는 것을 보여주었다. 게다가, 나노 이산화규소와 산화아연을 포함하는 PP 복합 섬유는 원-적외선 방사 물성 FTTS-FA 010과 질적 항균 JIS L-1902 기준을 만족하였다.

키워드

폴리프로필렌, 나노 이산화규소, 나노 산화 아연, 원-적외선 방사 물성, 항균성, 이축 혼합, 용융 방사, 다구찌 기법, 회색 관계 이론, 유사성에 의한 우선순위 기법

폴리프로필렌(PP)은 우수한 내마모성, 경량성과 높은 보온기능, 방축성을 나타낸다. 그러나 취약한 열적, 기계적 물성으로 인하여 낮은 연화점과 탄성이라는 단점을 가져 응용이 제한된다. 나노 분말을 첨가하여 PP의 결정화 온도와 결정화도를 증가시킴으로써 연화점을 상승시키는 것이 현재 해결책이다. 첨가되는 분말은 고강도를 가지기 때문에, PP의 기계적 물성과 탄성력을 향상시킬 수 있다. PP 복합 섬유의 열적, 기계적 물성을 향상시키기 위하여, Srisawat 등은 PP와 0.25-1wt% 나노 실리카를 균일하게 혼합하기 위하여 일축 혼합을 사용하였고, 용융 방사를 통하여 복합 섬유를 제조하였다. 그 결과, 실리카 입자가 섬유 표면에 분산되어 인장 강도가 증가하였다. 이는 복합 섬유가 높은 결정화도를 가지기 때문에 실리카 비율이 증가함에 따라 열적 물성이 증가하였다. PP의 결정화도와 기계적 물성을 향상시키기 위하여, Bikiaris 등은 이축 혼합 후 사출 성형을 위한 상용화제로서 1-15wt% 나노-SiO₂와 무수 말레인산 그래프트 PP를 사용하였다. 분말 분산효과는 향상되었다. 나노-분말 함량에 따라 탄성계수는 증가하였고, 이는 PP의 탄성계수보다 1.6배 높았다. 이 결과는 나노-분말의 첨가가 물질의 기계적 물성을 향상시킬 수 있다는 것을 증명한다.

섬유 제품은 주로 직물에 사용되어, 인체 피부에 황색포도상구균과 대장균이 높은 함량으로 노출시키므로 유해하다. 이 문제를 해결하기 위하여, 섬유 제품으로부터 박테리아 위험을 방지하기 위하여 항균 섬유가 개발되고 있다. 가장 일반적인 두 가지 방법은 코팅과 블렌딩이다. Shateri-Khaliabad와 Yazdanshenas는 면직물 표면에 나노-ZnO를 코팅하였고, 주사 전자 현미경 (SEM)을 통하여 표면을 관찰하였다. 관찰 결과, 직물이 황색포도상구균과 자외선(UV)에 견디도록 나노-ZnO가 구형으로 단일하게 분산되어 있음을 나타내었다. Hwang 등은 전기방사 기술을 사용하여 ZnO/TiO₂ 나노-분말과 폴리메틸 메타크릴레이트 (PMMA)를 블렌드하였고, 대장균과 황색포도상구균에 대한 저항 효과를 검사하였다. 실험 결과, ZnO/PMMA는 암흑에서 항균

성을 나타내며, TiO_2/PMMA 는 UV 조사에서 우수한 박테리아 반발성을 가진다는 것을 보여주었다. $\text{ZnO}/\text{TiO}_2/\text{PMMA}$ 복합 분말은 암흑에서 박테리아 반발성이 좋고, UV 빛 하에서는 더욱 항균성이 높다.

원-적외선 섬유는 섬유에 포함된 원-적외선 물질에 흡수된 에너지가 전환되어 원-적외선으로 방출되기 때문에 열 유지에 효과적이다. Lin 등은 PVA에 다양한 비율의 나노-대나무 숯 물질을 블렌드하기 위하여 이축 혼합기를 사용하였고, 섬유 제조를 위하여 용융 방사기를 사용하였다. 섬유의 원-적외선 방사 물성 검사 후, 복합 섬유의 원-적외선 방사 값은 분말 비율에 따라 증가한다는 것을 알아내었다. 또한, 원-적외선 온도 상승 측정 결과, 복합 섬유의 온도 상승이 순수한 폴리비닐 알코올(PVA)보다 0.7°C 높았으며, 이는 원-적외선 특성을 가지는 직물에 대한 기준을 만족한다. Bahng과 Lee는 섬유를 제조하기 위하여 세라믹 분말과 폴리에스터, 미생물을 결합하였고, 섬유의 원-적외선 온도 상승 특성을 검토하였다. 순수한 폴리에스터와 온도 차이는 $2\text{--}3^\circ\text{C}$ 이며, 여러 번 세정이 반복되어도 기능이 저하되지 않는다는 것을 알아내었다.

다구찌 방법은 실험 과정을 설계하는데 광범위하게 사용되어, 실험 횟수와 간접 요인을 줄인다. 그러나 이 방법은 단일 품질 최적화에 제한되어, 다중 품질 문제에는 적용할 수 없다. Mehata와 Kamaruddin은 사출 성형의 최적화 요소를 결정하기 위하여 다구찌 방법을 사용하였고, 재생 PP의 기계적 성능을 검토하였다. 다구찌 실험 디자인에 기초하여, 실험에 대한 제어가능 인자는 용융 온도, 보압, 사출 시간과 보압 시간을 포함하였다. 각 요소는 세 가지 수준을 가졌다. 재생 PP로 만들어진 제품은 매개변수 최적화 방법을 통하여 향상될 수 있다는 결과를 보여주었다. Kuo 등은 SiO_xN_y 를 합성하기 위한 멤브레인 재료를 결정할 뿐만 아니라 공정 변수와 코팅 균일성, 코팅 두께, 수증기 투과성 사이 상관관계를 위하여 다구찌 방법 및 회색 관계 이론(GRA)과 유사성에 의한 우선순위 기법(TOPSIS)을 결합하였다. TOPSIS는 다양한 품질 특성의 최적 조합을 결정하고 예측 시스템을 구축하는데 사용되었다. 결국, 다중결정 문제 분석 과정은 다구찌 방법과 TOPSIS에서 비객관적 가중치 문제를 해결할 수 있는 신뢰 구간을 사용하여 설정되었다.

본 연구는 PP에 나노-실리카와 나노-ZnO를 혼합하였고, 분말을 균일하게 분산시키기 위하여 이축 혼합을 사용하였다. 그리고 섬유를 제조하기 위하여 용융 방사가 사용되었다. 실험 과정에서 여러 수준의 요소를 고려하기 어렵기 때문에, 다양한 품질 특성의 최적화 매개변수 해법을 고려할 수 없다. 그러므로 이 연구에서는 실험 설계를 위하여 다구찌 방법을 적용하였고, 단일 품질 특성의 최적화 변수가 결정되었다. 각 품질의 객관적 가중치는 GRA에 의해서 얻어졌다. 마지막으로, TOPSIS는 변수 최적화 섬유 개발을 위한 다중-품질 최적 매개변수 해법을 결정하기 위하여 사용되었다. 섬유 공정 효과 증가뿐 아니라 PP의 열적·기계적 물성과 원-적외선 방사, 항균 물성의 향상이 더해졌고, 적용가능성이 확대되었다.

실험 과정

이 연구에서는 PP를 기질로 사용하였으며, 열적·기계적 물성 강화를 위하여 나노-분말을 사용하였다. 섬유 공정 변수에 대한 영향이 논의되었다. 다구찌 직교 배열 L_{18} 은 분산제와 나노-실리카, 나노-ZnO의 첨가 수준과 이축 속도 계획을 위하여 사용되었다. 물질 작업성과 열적 물성을 평가하기 위하여 물질은 이축 혼합을 통하여 균일하게 분산되었다. 용융 방사기를 사용한 섬유 제조를 위하여 적절한 다이 온도, 방사속도, 드래프트 회전 속도가 직교 배열에 입력하였다. 또한, 섬유의 인장 강도, 신장, 섬도가 측정되었다. 실험 데이터는 다중 품질 가중치를 결정하기 위하여 GRA에 사용하였고, 다중 품질 변수 솔루션을 얻기 위해 TOPSIS와 결합되었다. 최적화된 섬유가 제조되었고, 이에 대한 원-적외선 방사 물성과 박테리아 반발성이 논의되었다. 실험 과정은 그림 1에 나타내고 있다.

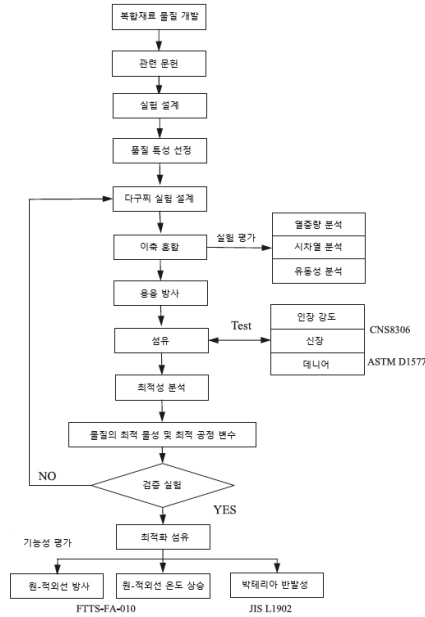


그림 1. 실험 과정

실험 장비

이축 혼합 압출기는 230℃의 혼합 온도를 가지며, 다구찌 방법에 따라 다양한 스크류 속도가 설정되었다. 다양한 비율의 PP와 나노-실리카, 나노-ZnO, 분산제는 균일하게 혼합되었다. 섬유 제조를 위하여 용융 방사기에서 스크류 압출 혼합 온도는 200℃로 설정되었고, 다양한 다이 온도와 방사속도, 드래프트 회전 속도는 다구찌 실험에 의해 설정되었다. 방사구는 20 오리피스를 포함하며, 각 오리피스는 0.5mm의 직경을 가진다. 유동성 시험기의 경우, 복합재료 물질의 유동성은 ASTM D1238 사양에 따라 측정되었다. 열중량 분석기에서 승온 속도는 10℃/min이며, 25℃부터 500℃까지 가열시켰다. 이를 통하여 복합재료 물질의 열분해 온도가 얻어졌다. 시차열 분석기에서 승온/냉각 속도는 10℃/min이며, 용융 온도와 결정화 온도 관찰을 위해 일반적인 가열-유지-냉각-유지-가열 사이클이 사용되었다. SEM의 경우, 섬유 형태학과 구조, 분말 집합체를 관찰하기 위해 HITACHI TM3000을 사용하였다. 와인딩 장치에서, 섬유의 직경은 ASTM D1577 사양에 따라 측정되었다. 만능시험기에서, 섬유의 인장 강도와 신장은 CNS8306 사양에 따라 측정되었다. 본 연구에서 채택된 원-적외선 방사 물성은 대만 표준 원-적외선 방사의 80% 이상이었다. 원-적외선 방사 온도 상승과 대조군 사이의 차이는 JIS L-1902 사양에 따라 측정되었다.

연구 방법

원-적외선 특성

1. 방사

섬유 내의 SiO₂가 가열되거나 조사될 때, 에너지는 전자 여기를 생성하고, 전자는 궤도 K에서 궤도 I로 여기되고, 그 후 전자는 궤도 I에서 궤도 K로 이동하며 안정화된다. 이 주기에서, 원-적외선은 그림 2와 같이 방사선에 의한 전자파에서 열에너지를 전달한다. 이 전자파는 가온을 위해 인체에 흡수되기 쉽다.

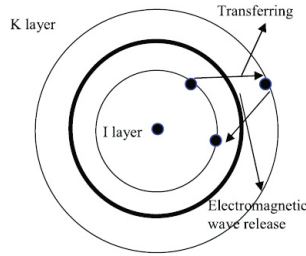


그림 2. 전자 전달 및 방출

2. 온도 상승

a. 외부 에너지 공급과 인체 보온 상태

에너지는 원-적외선 대상에 전자파로 방출되고, 직물에 흡수되며 인체에 전자파로 방출된다. 인체는 이 전자파를 흡수하고, 물 분자가 공명하여 혈액 순환을 촉진시켜 인체를 따뜻하게 유지한다.

b. 외부 에너지 공급과 인체 보온이 없는 상태

인체는 에너지를 방출하며, 이 에너지는 직물에 흡수되고 원-적외선이 인체로 다시 방출된다. 이 과정이 반복되어 인체를 따뜻하게 유지한다.

항균성

섬유에 포함된 무기 분말 항균제는 주로 ZnO 나노-분말이며, 항균 메커니즘은 자유 라디칼 반응이다. 태양에 의해 조사 될 때, 특정 에너지를 지닌 광자가 분말에 주입된다. 전자는 VB에서 CB로 여기 되어 구멍을 남긴다. 여기된 CB 전자는 열과 에너지 제거를 위하여 구멍과 결합된다. 구멍은 여기 동안 주위의 수산화 전자를 강한 산화제인 자유 라디칼로 변화시킨다. 그것이 박테리아와 만나게 되면, 그림 3에 나타난 것처럼 박테리아의 세포벽과 세포 멤브레인을 손상시키고, 살균을 위해 박테리아를 붕괴시킨다.

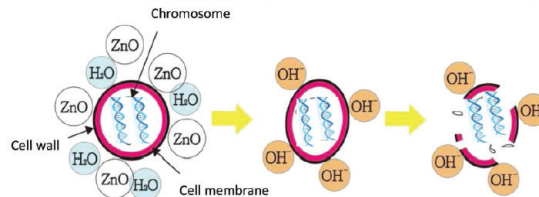
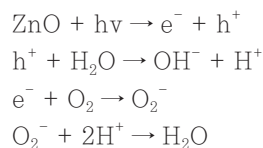


그림 3. 박테리아 붕괴 메커니즘

항균 메커니즘 반응 :



항균 메커니즘 분말 분산 메커니즘 :

분산제 : 비스-(트리에톡시 실프로필);

화학식 : $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_3\text{SiCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$;

상태 : 하얀 유성 액체.

v분산 메커니즘에서, 실리카와 ZnO가 나노 크기의 분말이기 때문에 표면에 하이드록실이 형성된다. 분산제와 나노-분말의 작용기는 수소 결합을 형성하고, 균일한 혼합을 위하여 뭉쳐진 분말을 분산시킨다.

본 연구는 복합 섬유 개발을 위하여 PP에 나노-실리카와 나노-ZnO를 결합하였다. 이축 혼합 공정 후 물질이 균일하게 분산되었다. 물질의 열적 물성과 유동성이 분석되었고, 섬유는 용융 방사기에 의해 만들어졌다. 이 실험은 섬유의 인장 강도, 신장, 테니어에 대한 공정 변수(예; 물질 혼합비, 이축 속도, 용융 방사 다이 온도, 방사속도, 드래프트 속도)를 논의하기 위해 다구찌 방법에 의해 고안되었다. GRA와 TOPSIS는 품질 분석을 착안하며 최적화 섬유를 제작하고 방적사의 기능성을 논의하기 위하여 사용되었다.

결과와 논의

물질 열적 분석

3가지 주요 분말 비율은 PP/SiO₂(0.5wt%함량)/ZnO(0.5wt%함량)와 PP/SiO₂(1wt%함량)/ZnO(1wt%함량), PP/SiO₂(1.5wt%함량)/ZnO(1.5wt%함량)가 실험 분석을 위해 선정되었다.

열중량 분석

우선, 7.5mg의 시료가 백금 트레이에 놓여 젖으며, 20ml/min의 공기 흐름과 10°C/min의 승온 속도로 20°C부터 500°C까지 가열되었다. 실험 과정은 그림 4에 나타내었다. 순수한 PP의 열분해 온도는 328°C이었다. 나노-분말이 PP 고분자 사슬에 분산되어, 고분자 사슬에 입체 장애를 형성하고 분자 운동을 제한하게 된다. 그 결과, 열분해 온도는 360°C까지 증가한다. 0.5wt% (SiO₂와 ZnO)를 가지는 복합재료 물질의 면에서는, 너무 많은 분말은 응집을 초래하였다. 1.0과 1.5wt%(SiO₂와 ZnO)를 포함하는 복합재료 물질의 경우, 열분해 온도가 불안정하였으며, 각각 열분해 온도가 344°C와 338°C로 감소하였다. 3wt% 이하 분말이 첨가되었을 때, 열분해 온도가 증가하였다.

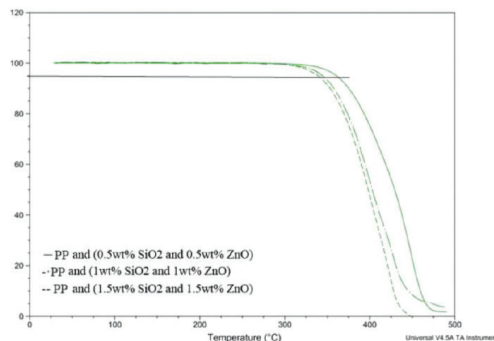


그림 4. 열중량 분석 그래프

시차 열 분석

시차 열 분석기는 작동 조건과 관련하여 물질 공정 전과 후 물성을 시뮬레이션하였다. 첫 단계는 25°C부터 200°C까지 가열하였고, 두 번째 단계는 200°C부터 30°C까지 냉각, 세 번째 단계에서 25°C부터 300°C까지 가열하였다. 가열/냉각 속도는 10°C/min이며, 1단계에서는 2단계와 3단계에서의 시차 열 분석을 위하여 열 이력을 제거하였다. 실험 결과는 PP가 나노-분말과 혼합된 후부터 결정화 온도와 결정화도가 증가한다는 것을 나타내었다. 이는 파우더가 기핵제 역할을 하며 PP와 혼합되었다는 것을 뜻한다. 이 재료는 내열성을 향상시키기 위해 고온에서 결정화 될 수 있다. 복합 섬유의 평균 용점은 166°C이었으며, 결정화 용융 온도는 130°C이었다.

섬유 공정 변수 최적화

섬유 공정의 주요 목적은 이축 공정 변수와 용융 방사기의 공정 변수가 품질 특성에 미치는 영향과 관계를 결정하는 것이다. 본 연구에서는 품질 특성의 관계를 짜기 위해 다구짜 직교 배열 $L_{18}(2^1 \times 3^6)$ 을 사용하였다. 분산제, 나노-실리카 파우더, 나노-ZnO 파우더의 다양한 중량 퍼센트 농도와 이축 기계의 스크류 속도, 용융 방사기의 다이 온도와 방사노즐 회전 속도, 드래프트 속도의 실험 인자들이 섬유 공정에 영향을 끼친다. 그러므로 최적의 섬유를 만들기 위해서는 적절한 수준 사용이 요구되었다. 제어가능 요소는 표 1에 나와 있다.

표 1. 제어 가능 인자와 그 수준

Controllable factor	Level		
	1	2	3
A Dispersant (wt%)	0.1	0.05	
B Nano-silica powder (wt%)	0.5	1	1.5
C Nano-ZnO powder (wt%)	0.5	1	1.5
D Screw speed of twin screw (rpm)	200	300	400
E Die temperature (°C)	210	220	230
F Spinneret rotation speed (Hz)	10	12	14
G Drafting speed (Hz)	4.5	5.5	6.5

위의 제어가능 인자는 $L_{18}(2^1 \times 3^6)$ 직교 배열로 대체되었다. 본 연구에서 선정된 섬유 품질 특성은 인장 강도와 신장, 데니어이다. 실험을 위한 변수는 18 그룹이었으며, 각 그룹은 5번 시험되었다. 회색 관계 데이터는 측정된 데이터로부터 도출되었고, 품질 특성의 회색 관계 등급이 계산되었다. 회색 관계 등급은 품질 특성의 중량으로 전환되었다. TOPSIS는 다-품질 최적 요소를 결정하기 위해 사용되었다.

1. GRA

인장 강도는 클수록 좋았다. 실험에서 측정된 최대값을 목표로, 극한 인장 강도는 3.686N이었다. 신장 또한 클수록 좋았다. 실험에서 신장의 최소값을 목표로, 최대 신장률은 8.497%이었다. 데니어는 작을수록 좋았다. 최소 데니어는 2.494g이었다. 표 2에 나타난 것처럼, 3개의 목표치는 기준 수열 X_0 로 사용된 반면에, 다른 18개의 수열은 비교 수열로 사용되었다.

표 2. 실험 데이터

No.	Strength (N)	Elongation (%)	Denier (g)
X_0	3.686	8.497	2.494
1	2.656	7.324	3.455
2	3.162	4.849	4.151
3	2.433	3.704	3.685
4	2.299	6.862	3.550
5	2.308	7.379	4.980
6	1.528	2.442	2.961
7	2.051	4.632	4.561
8	1.378	6.704	2.729
9	0.950	2.744	5.403
10	3.686	6.874	3.849
11	3.596	6.723	3.427
12	1.219	2.765	3.475
13	1.303	5.437	2.494
14	2.372	8.497	4.219
15	1.805	2.892	4.267
16	3.275	5.206	4.393
17	0.806	3.447	2.861
18	1.738	5.616	3.428
Max	3.686	8.497	5.403
Min	0.806	2.442	2.494

2. 회색 관계 수열 생성

회색 관계 수열은 식 (1)과 (2)에 따라 확립되었다. 품질 특성 인장 강도와 신장은 망대 방정식으로 대체된다. 데니어는 망소 방정식으로 대체되며, 회색 관계 수열이 계산된다. 데이터는 최대(xi)에서 뺀 값으로서 반드시 0-1이어야 한다. 그 결과는 표 3에 나타내었다. 식(3)이 사용되었고, 인식 계수 ζ 는 0.5이다. 그 결과는 표 4가 보여준다.

$$x_i(k) = \frac{\min x_i(k) - x_i(k)}{\max x_i(k) - \min x_i(k)} \quad (1)$$

$$x_i(k) = \frac{x_i(k) - \min x_i(k)}{\max x_i(k) - \min x_i(k)} \quad (2)$$

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta \min + \xi \Delta \max}{\Delta oi(k) + \xi \Delta \max} \quad (3)$$

표 3. 회색 관계 수열

No.	Strength	Elongation	Denier
1	0.358	0.194	0.330
2	0.182	0.602	0.569
3	0.435	0.792	0.409
4	0.482	0.270	0.363
5	0.478	0.185	0.855
6	0.749	1.000	0.160
7	0.568	0.638	0.711
8	0.801	0.296	0.081
9	0.950	0.950	1.000
10	0.000	0.268	0.466
11	0.031	0.293	0.321
12	0.857	0.947	0.337
13	0.827	0.505	0.000
14	0.456	0.000	0.593
15	0.653	0.926	0.610
16	0.143	0.543	0.653
17	1.000	0.834	0.126
18	0.676	0.476	0.321

표 4. 회색 관계 계수

No.	Strength	Elongation	Denier
1	0.583	0.721	0.602
2	0.733	0.454	0.468
3	0.535	0.387	0.550
4	0.509	0.649	0.579
5	0.511	0.730	0.369
6	0.400	0.333	0.757
7	0.468	0.439	0.413
8	0.384	0.628	0.861
9	0.345	0.345	0.333
10	1.000	0.651	0.518
11	0.941	0.630	0.609
12	0.369	0.346	0.597
13	0.377	0.497	1.000
14	0.523	1.000	0.458
15	0.434	0.351	0.451
16	0.778	0.479	0.434
17	0.333	0.375	0.799
18	0.425	0.512	0.609

3. 정규화 결정 행렬

정규화 결정 행렬은 식(4)를 사용하여 확립되고, 가중 행렬은 회색 관계 계수를 사용하여 식(5)에 따라서 확립된다. 이는 표 5에 나타내었다.

$$r_{ij} = x_{ij} \div \sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2} \quad (4)$$

$$v = w \cdot r = \begin{bmatrix} v_{11} & \dots & v_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & \dots & v_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & \dots & w_n r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 r_{m1} & \dots & w_n r_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

양과 음의 이상적인 해는 각각 식 (6)과 식(7)을 사용하여 배열되었다. 표 6에 나타내었듯이, 양의 이상적인 해 I_1^* 와 음의 이상적인 해 I_1^- 가 얻어진다.

$$I^* = \left\{ \begin{array}{l} (\max v_{ij} | j \in B), \\ (\min v_{ij} | j \in C) \quad | i = 1, 2, 3 \dots, m \end{array} \right\} \quad (6)$$

$$= \{v_1^*, v_1^*, \dots, v_n^*\}$$

$$I^- = \left\{ \begin{array}{l} (\min v_{ij} | j \in B), \\ (\max v_{ij} | j \in C) \quad | i = 1, 2, 3 \dots, m \end{array} \right\} \quad (7)$$

$$= \{v_1^-, v_1^-, \dots, v_n^-\}$$

표 5. 가중 행렬

No.	Strength	Elongation	Denier
1	0.089	0.101	0.074
2	0.106	0.067	0.089
3	0.081	0.051	0.079
4	0.077	0.094	0.076
5	0.077	0.101	0.107
6	0.051	0.034	0.064
7	0.068	0.064	0.098
8	0.046	0.092	0.059
9	0.032	0.038	0.116
10	0.123	0.094	0.083
11	0.120	0.092	0.074
12	0.041	0.038	0.075
13	0.044	0.075	0.054
14	0.079	0.117	0.091
15	0.060	0.040	0.092
16	0.109	0.072	0.094
17	0.027	0.047	0.061
18	0.058	0.077	0.074

표 6. 양과 음의 이상적인 해

	Strength	Elongation	Denier
Positive ideal solution	0.123	0.117	0.116
Negative ideal solution	0.027	0.034	0.054

4. 구간 척도 S_i^* 와 S_i^- 는 식 (8)과 식(9)를 통하여 계산되고, 근사치 상대차수가 계산되며, 이는 표 7에 나타내었다.

양의 이상적인 해 거리는

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

음의 이상적인 해 거리는

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

근사치 상대차수 C_i^+ :

$$C_i^+ = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*} \quad (10)$$

5. 반응 그래프 도식을 위한 다구찌 방법 사용

그림 5는 A1, B1, C1, D3, E1, F2, G3의 최적 섬유 수준을 보여준다. 분산계 비율은 0.1wt% 이고, SiO2는 0.5wt%, ZnO 비율은 0.5wt%, 스크류 속도는 400 rpm, 방사구 온도는 210℃, 방사 회전 속도는 12 Hz, 드래프트 회전 속도는 6.5 Hz이다.

1) 다중 품질 최적 변수로부터 제조된 섬유와 오리지널 PP 성능과 비교했다. 섬유 공정 물성의 비교는 표 8에 나타내었고, 섬유의 기능성 비교는 표 9에 나타내었다. 섬유의 항균성 시험은 그림 6이 보여준다. 보이는 것처럼, 황색포도상구균 배리어 스트립은 1,8 mm이며 폐렴간균 배리어 스트립은 1.6 mm이다.

표 7. 근사치 상대차수

No.	C_i^+
1	0.733
2	0.707
3	0.344
4	0.613
5	0.804
6	0.044
7	0.429
8	0.280
9	0.212
10	0.896
11	0.839
12	0.043
13	0.141
14	0.811
15	0.199
16	0.785
17	0.015
18	0.301

표 8. 섬유 공정 물성

	Strength (g)	Elongation (%)	Denier (g)
PP	204.61	632.62	29.7
Optimal fiber	243.58	728.24	33.5

PP: polypropylene.

표 9. 섬유의 기능성

	Far-infrared ray emission rate	Far-infrared ray emission temperature rise	Antibacterial
PP	42%	6°C	No
Optimal fiber	85%	8.6°C	Yes

PP: polypropylene.

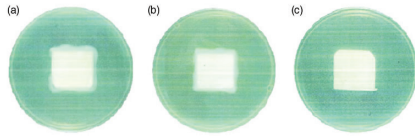


그림 6. 항균성 시험. (a) 황색포도상구균 (b) 폐렴간균 (c) 폴리프로필렌

SEM 관찰

본 연구에서는 파우더 첨가 후 섬유 분산을 관찰하기 위해 SEM을 사용하였다. 다양한 분말 비율이 촬영되었다. 500배 확대된 섬유 표면에서, 높은 분말 첨가 수준으로 인하여, 투사와 응집이 분명하고, 분말이 섬유 표면에 분산되었다. 3000배 확대된 섬유의 경우에서, 높은 파우더 함량으로, 섬유 표면이 더 불규칙한 것으로 나타나며, 응집체가 확실히 증가하였다. 하지만, 응집체가 60µm보다 작았으므로 분말 응집은 용융 방사에서 스테어를 유발하지 않았으며 0.1wt% 분산제의 첨가가 큰 응집체를 초래하지 않았다. 그림 7은 1.5wt% SiO₂와 1.5wt% ZnO의 SEM 사진을 보여준다. A와 B의 분산제는 각각 0.1wt%와 1.5wt%이다. 그림 8의 SEM 사진에서, A는 PP 섬유이며 B는 0.5wt% SiO₂와 ZnO를 포함하는 PP 섬유, C는 1.0wt% SiO₂와 ZnO를 포함하는 PP 섬유이다. 그림 9에서 A 및 B, C는 500배 주사 전자 현미경 사진이다; A는 0.5wt% SiO₂와 0.5wt% ZnO를 포함; B는 1wt% SiO₂와 1wt% ZnO 포함; C는 1.5wt% SiO₂와 1.5wt% ZnO를 포함한다. D와 E, F는 3000배 주사 전자 현미경 사진이다; D는 0.5wt% SiO₂와 0.5wt% ZnO를 포함; E는 1wt% SiO₂와 1wt% ZnO 포함; F는 1.5wt% SiO₂와 1.5wt% ZnO를 포함한다.

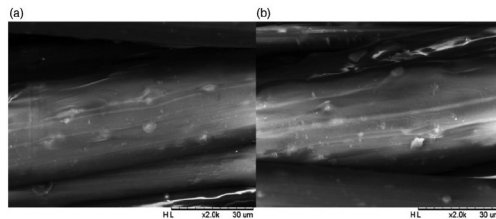


그림 7. 주사 전자 현미경 사진 (2000×).

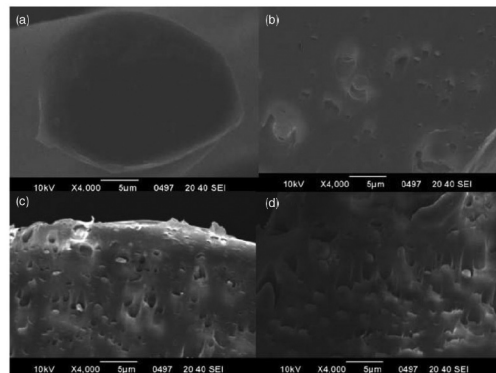


그림 8. 주사 전자 현미경 사진 단면 (4000×).

결론

열 중량 분석기의 결과는 분말 비율이 증가함에 따라 열분해 온도가 증가하며, 재료의 내열성이 향상된다는 것을 보여주었다. 시차 열 분석은 PP의 용융 온도가 169℃이고, 결정화 온도가 117℃라는 것을 나타내었다. 나노-파우더의 첨가로 인하여, 복합 섬유의 결정화도는 130℃로 증가하였고, PP결정화 온도와 결정화도 모두 증가하였다. 기핵제로서 나노-분말을 첨가하면 복합 섬유의 결정성이 좋아져, 내열에 대한 결정성이 증가한다.

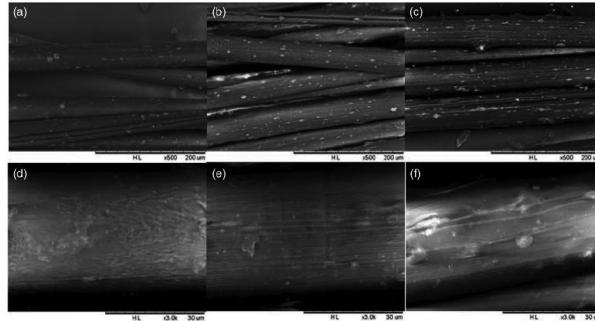


그림 9. 다양함 분말 비

섬유 표면은 SEM을 통하여 관찰되었다. 분말 비율이 증가할수록 복합 섬유 표면의 분말이 증가하고 거칠어졌지만, 분말 응집체는 60μm이하이므로 섬유 방사 공정에 영향을 미치지 않는다.

다중 품질 최적화 복합 섬유 시험에서 순수 PP의 인장 강도는 2.005N, 복합 섬유는 2.387N, 물성 증가는 19%이며, 신장은 6.32%, 복합 섬유는 7.26%, 물성 증가는 14%이다.

최적 섬유의 기능성에 따라, 원-적외선 방사 온도 상승 표준 시험 10분 후, 온도 상승은 8.6℃로 PP보다 1.43배 높으며, 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET)보다 1.53배, 나일론보다 1.75배 높다. 본 연구의 섬유와 표준 샘플의 온도 차는 원-적외선 온도 상승 특성의 기준을 만족하는 0.5℃ 이상이었다. 최적화 섬유의 원-적외선 방사 속도는 85%로 PP 방사 값의 2.02배 증가된 값이며, 삼엽계에서 방사율의 80% 이상이다. 항균성 측정은 본 연구에서 제조된 섬유가 황색포도상구균과 폐렴간균 저항 효과에 효과적이라는 것을 보여주었다.