

버진 및 리사이클 PET 제품의 화학적 · 열적 특성 비교시험에 관한 연구

김경필¹, 서경진², 박수용³, 정일두^{3*}
¹국방기술품질원, ²한국의류시험연구원, ³부산대학교

A study on the comparative test of chemical and thermal properties of virgin and recycled PET products

Kyoung Pil Kim¹, Seo Kyung Jin², Soo-Yong Park³, Ildoo Chung^{3*}

¹Defense Agency for Technology and Quality

²Korea Apparel Testing & Research Institute

³Department of Polymer Science & Engineering, Pusan National University

요약 세계적으로 리사이클 원사 분야의 관심과 수요가 급격히 높아짐에 따라, 국내 기업들 또한 리사이클 원사에 대한 연구 개발 및 사업을 촉진 중이다. 국내 리사이클 폴리에스터 원사 사업을 주도하고 있는 A사와 B사의 버진 PET와 리사이클 PET 시료 4종을 적외선 분광기 (FT-IR)를 통해 화학적 특성을 확인 하였으며, 시차주사열량계 (DSC)를 통해 열적 특성을 확인하였다. 두 업체의 버진 PET와 리사이클 PET를 비교한 결과, FT-IR에서 두 회사의 제품 모두 PET의 전형적인 스펙트럼을 보여줌과 동시에, 872 cm^{-1} 에서 스펙트럼의 차이를 보여주었고, DSC를 통해 리사이클 PET의 용점 및 결정화 온도가 버진 PET에 비해 더 낮은 것을 확인할 수 있었다. 이 결과는 리사이클 PET에 소량 존재하는 오염물질이 PET 원사의 열적 특성에 영향을 주는 중요한 매개 변수임을 보여준다. 총 7회의 가열 및 냉각 과정을 거친 DSC 결과에서, 4개의 샘플 모두 사이클 횟수가 늘어날수록 낮은 용점 및 결정화 온도를 낮은 열유속 세기와 함께 보여주며, 용융 및 결정화 엔탈피의 결과 또한 비슷한 양상을 보여주었다.

Abstract As the interest and demand in the recycled yarn field has increased rapidly worldwide, domestic companies are also promoting research and development and business on recycled yarn. The chemical and thermal properties of four types of virgin and recycled PET samples from A and B company, which are the leading domestic companies in the recycled polyester yarn business, were confirmed through infrared (FT-IR) spectroscopy and differential scanning calorimetry (DSC). Virgin and recycled PET from two companies were compared. FT-IR spectroscopy revealed the typical spectra of PET for both companies and a different peak at 872 cm^{-1} . DSC confirmed that the melting point and crystallization temperature of recycled PET were lower than those of virgin PET. These results indicate that small amounts of contaminants are an important parameter affecting the thermal properties of recycled PET. In the DSC results after seven repeats of the heating and cooling processes, all four samples showed that a lower melting point, crystallization temperature, and low heat flow intensity increased with increasing number of cycles. The results of melting and crystallization enthalpy also showed similar patterns.

Keywords : Virgin PET, Recycled PET, FT-IR, DSC, Melting Point, Crystallization Temperature

이 성과는 2020년도 부산시의 재원으로 부산산업과학혁신원의 지원을 받아 수행된 연구임
(사업명: 지역특화기술개발-확산개방형연구실운영사업)

*Corresponding Author : Ildoo Chung(Pusan National Univ.)

email: idchung@pusan.ac.kr

Received October 12, 2020

Accepted February 5, 2021

Revised November 6, 2020

Published February 28, 2021

1. 서론

최근 수십년 전부터 현재까지 환경보호에 대한 소비자와 기업의 인식이 바뀌고 있으며, 그에 따라 소비자로부터 주도되는 환경 친화적인 재생 섬유산업에도 녹색 가치의 창출을 위한 움직임이 등장하였다. 국내에도 환경 친화적 고기능성 섬유의 연구개발 및 생산이 이루어지고 있으며, 회수율이 약 75 %로 높은 폐플라스틱을 용융하여 제조하는 방식이 주로 사용되고 있다. 그 중 일반적으로 많이 사용되는 폴리에스터는 고성능 저비용이며 용이한 재활용성으로 높은 시장 점유율을 가지고 있으나, 이로 인하여 높은 소비율과 폐기 때문에 환경오염의 주범 중 하나로 항상 거론되어 왔다[1-3].

1980년대 까지 폴리에틸렌테레프탈레이트 (PET) 주지는 주로 섬유 제조에 사용되었으나, 이 후부터 물, 주스, 청량음료 등 음료용 플라스틱 병을 제조하기 위한 PET 가공이 증가하였다. 이 PET 병은 수명이 짧고 낮은 생분해 성능과 높은 수요로 인하여 폐기물 시스템으로 빠르고, 많이 버려져 환경에 심각한 위협을 초래하고 있다. 따라서 PET 소비 후 리사이클은 환경오염을 줄이기 위해 필수적이며, 리사이클된 재료의 잠재적인 수익 창출 및 일자리 창출과 같은 가치를 포함하고 있다. 최근 들어 의류 산업에서 다시 널리 사용되고 있으며, 여러 의류 기업들 또한 높은 수요에 따른 공급을 맞추기 위해 리사이클 원사에 많은 투자를 하고 있는 실정이다[4-8].

결정성이 큰 반결정성이며, 용융점이 높은 열가소성 폴리에스터인 PET를 재활용하는 방법에는 물리적 재활용과 화학적 재활용 두 가지의 방법이 있다. 물리적 재활용은 깨끗한 상태의 PET 폐기물을 재활용을 통해 플레이크 또는 펠렛으로 제조하는 방법이며, 이 방법으로는 오염 또는 이물질의 함유되어 있거나 이미 심각한 오염 상태이거나 물성이 낮아진 폐 PET는 재활용이 불가능하다. 상대적으로 더욱 환경 친화적이며 경제성이 있는 화학적 재활용 방법은 화학반응을 통해 PET로부터 폴리에스터 원료를 추출하는 것이다. 이러한 화학적 재활용 방법에서 PET는 해중합 반응에 의해 단량체로 분리되며, 분리된 단량체는 기존 단량체와 동등한 성질을 가지고 있어 PET의 재제조에 사용이 가능하다. 이러한 방법을 통해 리사이클 PET는 지속적으로 합성 및 유통된다[9-14].

PET 폐기물의 리사이클을 위해 많은 기업과 연구자들은 환경과 잠재적인 녹색 가치를 위하여 폐기물의 재사용에 대한 연구를 지속적으로 진행 중이다. 이러한 폐

PET의 재활용에 대한 관심의 증가에 따라 리사이클 PET에 관한 기업과 소비자의 관심이 증폭되고 있으며, 리사이클 PET를 사용한 제품을 마케팅에 적극 활용하고 있기 때문에 국내 리사이클 PET 원사를 주도하는 A와 B사의 버진 PET와 리사이클 PET를 포함한 제품의 화학적 특성과 다양한 열적 특성의 비교를 본 연구에서 진행하였다.

2. 실험

2.1 적외선 분광기에 의한 분석

FT-IR 분석은 Fig. 1(a)의 Thermo Fisher Scientific사의 Nicolet 6700 모델과 적합한 ATR 악세서리를 이용하여 32회의 스캔으로 측정 하였으며, A와 B사의 버진 및 리사이클 PET 원사 모두 전처리하는 하지 않았다.

2.2 시차 주사 열량계에 의한 열적 거동 평가

DSC 분석은 A와 B사의 버진 및 리사이클 PET 4종을 6~7 mg 채취하여 Fig. 1(b)의 TA Instruments사의 Discovery DSC 25에 모델을 통해 20 °C/min의 가열 및 냉각속도로 측정하였다.



Fig. 1. (a) FT-IR and (b) DSC instruments model images.

3. 결과 및 고찰

3.1 화학적 특성 분석

버진 및 리사이클 PET의 화학적 특성 분석 및 비교를 위해 FT-IR을 선택하였다. 일반적으로 버진 PET와 리사이클 PET 사이에서 일반적인 물성의 차이는 없지만 리사이클 과정에서 불순물로 인한 화학적 특성의 변화가 일어날 수 있기 때문에 각 PET 샘플에 대한 FT-IR 분석을 진행하였다.

3.1.1 FT-IR 분석 결과 (4000 - 650 cm^{-1})

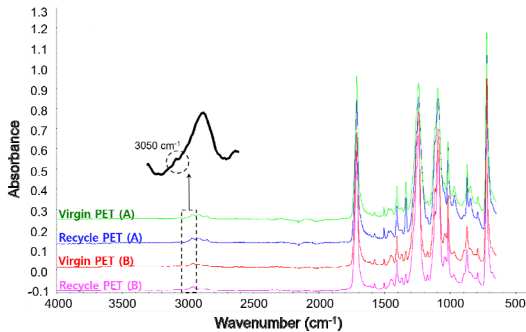


Fig. 2. FT-IR result of vergin and recycled PET from A and B company.

A과 B사의 버진 PET와 리사이클 PET의 FT-IR 분석 결과, Fig. 2에서 보여주는 바와 같이, 3050, 2970, 2910 cm^{-1} 에서 CH의 symmetrical stretch 피크, 1730 cm^{-1} 에서 카복실기의 C=O stretching 피크, 1580 cm^{-1} 과 1505 cm^{-1} 에서 C=C stretching과 함께 방향족 고리의 진동 피크, 1340 cm^{-1} 에서 ethylene glycol segment의 bending 및 wagging 진동 피크, 1240, 1125 cm^{-1} 에서 terephthalate 그룹, 1095, 1050 cm^{-1} 에서 메틸렌 그룹과 에스테르에서 기인한 C-O bond의 진동 피크, 710 cm^{-1} 에서 에스테르 그룹과 벤젠 고리의 interaction으로부터 기인한 피크를 확인할 수 있었다. 위의 결과는 전형적인 PET의 FT-IR 결과로 A과 B사의 버진 PET와 리사이클 PET 모두 PET의 화학적 특성을 가지고 있다는 것을 확인하였다. 그러나 970, 872, 848 cm^{-1} 에서 피크가 확인되었는데 이중 970 및 848 cm^{-1} 의 피크는 트랜스 형태의 ethylene glycol 부분의 진동으로부터 기인한 피크이며, 872 cm^{-1} 의 피크

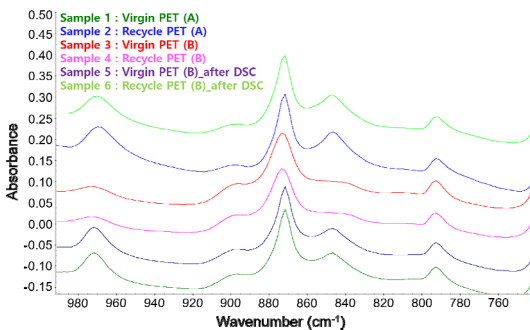


Fig. 3. FT-IR results (980 - 750 cm^{-1}) of vergin and recycled PET from A and B company after 7 repeating heating and cooling processes.

는 방향족 고리의 굽힘진동으로 나타난다. 따라서 이들 피크는 결정성을 나타내는 피크이다. A와 B사의 PET 피크 차이는 872 cm^{-1} 에서 나타났고 다음과 같이 해당 wavenumber (cm^{-1})를 확대하여 비교분석을 진행하였다. 동시에 B의 버진 및 리사이클 PET를 상온에서 300 $^{\circ}\text{C}$ 까지 가열 속도 20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 으로 가열 및 냉각 과정을 7회 반복하며 DSC 분석을 진행한 후의 FT-IR을 분석하여 비교하였다.

Table 1. Melting temperature ($^{\circ}\text{C}$) results of virgin and recycled PET

cycles	Virgin PET (A)	Recycle PET (A)	Virgin PET (B)	Recycle PET (B)
1	252.44	250.58	254.15	249.99
2	251.76	248.60	253.58	250.07
3	251.46	248.00	253.27	249.45
4	250.84	247.70	252.96	249.14
5	250.53	247.40	252.97	248.84
6	250.22	247.10	252.65	248.84
7	250.22	247.12	252.65	248.54

Table 2. Crystallization temperature ($^{\circ}\text{C}$) results of virgin and recycled PET

cycles	Virgin PET (A)	Recycle PET (A)	Virgin PET (B)	Recycle PET (B)
1	199.66	199.80	198.01	193.32
2	198.38	198.99	197.69	192.67
3	197.10	198.92	197.38	192.03
4	195.83	198.03	197.07	191.40
5	194.55	197.40	196.76	190.77
6	193.60	196.76	196.77	190.46
7	192.98	196.44	196.78	190.15

3.1.2 FT-IR 분석 결과 (980 - 750 cm^{-1})

Fig. 3과 같이 가열 및 냉각과정을 거치지 않은 A과 B사의 버진 및 리사이클 PET FT-IR을 확대 비교시, 약 872 cm^{-1} 에서 B사의 PET 피크가 확연한 차이로 매우 약하게 존재한다. 그러나 300 $^{\circ}\text{C}$ 까지 가열 속도 20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 으로 7회의 가열 및 냉각 과정을 거친 B사의 버진 PET와 리사이클 PET는 A사의 버진 및 리사이클 PET와 같이 전형적인 PET가 가지는 방향족 고리의 피크를 872 cm^{-1} 부근에서 보여주는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과는 B사의 버진 PET와 리사이클 PET 모두 가열 및 냉각 과정을 거침에 따라, PET의 결정이 재배열되어 방향족 고리의 굽힘 진동에서 기인한 872 cm^{-1} 에서의 피크가 나타나는 것으로 보인다.

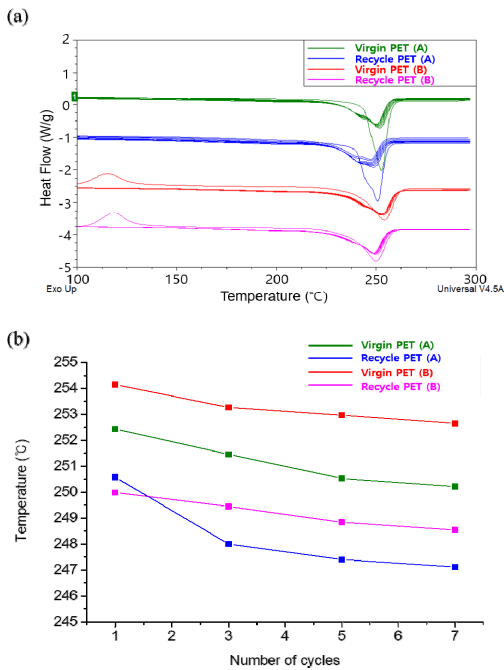


Fig. 4. (a) DSC (melting temperature) results of virgin and recycled PET and (b) melting points graphs according to the number of cycles of 4 species of PET.

3.2 열적 특성 분석

3.2.1 용융 및 결정화 온도 비교분석

DSC를 이용하여 4종의 PET 원사를 6~7 mg 채취하여 상온 및 질소기류하에서 300 °C 까지 가열 속도 20 °C/min으로 가열 및 냉각 과정을 7회 반복하여 측정하였다. 그 결과를 Table 1과 2와 같이 나타내었으며, 4종의 시료 모두 가열 및 냉각의 반복과정이 지속될수록 용점 및 결정화 온도가 감소 하는 양상을 보여주었다.

Fig. 4와 Fig. 5에서 보는 바와 같이, 동일 제조사의 버진 PET와 리사이클 PET를 각각 비교했을 경우, 리사이클 PET의 용점 및 결정화 온도가 버진 PET에 비해 약 2~3 °C 더 낮게 측정이 된 것을 확인할 수 있었다. 용융 및 결정화도 DSC 그래프에서 보는바와 같이 첫 번째 피크에서 가열 및 냉각 횟수가 진행됨에 따라 왼쪽으로 이동하는 것을 보여주며, 그 결과로 용융 및 결정화도 온도 결과 그래프에서 눈에 띄게 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 분자량과 결정성의 변화에 의해 발생된 것으로 판단되며 소량 포함된 오염 물질이 리사이클 PET에 열적거동에 충분히 영향을 줄 수 있는 중요한 매개 변수임을 보여준다[15].

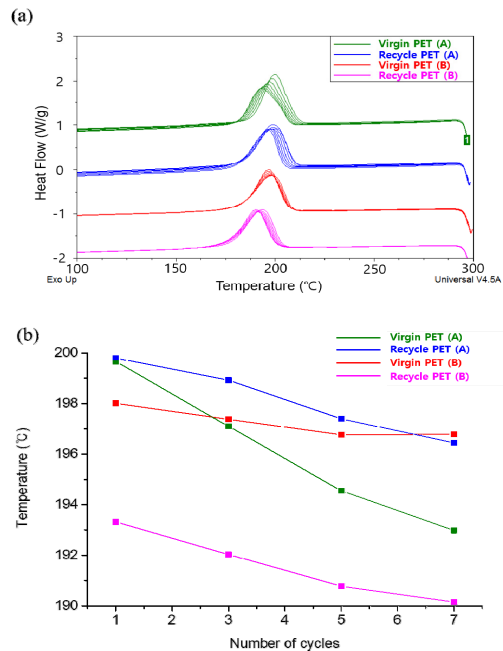


Fig. 5. (a) DSC (crystallization temperature) results of virgin and recycled PET and (b) crystallization point graphs according to the number of cycles of 4 species of PET.

3.2.2 용융 및 결정화 엔탈피 결과

용융 및 결정화 온도에서의 엔탈피 변화를 DSC를 이용하여 측정하였다. Table 3과 4와 같이 측정된 각 엔탈피의 결과는 앞선 결과인 용융 및 결정화 온도의 결과와 비슷한 양상을 보여준다. 가열 및 냉각 과정의 횟수가 높아질수록 용융 및 결정화 온도에서의 엔탈피 값이 감소하는 것을 확인하였다. 무정형 고분자는 반결정성 고분자에 비해 용융시 흡수되는 에너지가 작기 때문에 반복되는 가열 및 냉각 과정을 통해 버진 PET와 리사이클 PET 모두 결정화도가 감소하는 것을 의미한다.

Table 3. Melting enthalpy (J/g) results of virgin and recycled PET from A and B company

cycles	Virgin PET (A)	Recycle PET (A)	Virgin PET (B)	Recycle PET (B)
1	58.78	56.86	45.10	44.43
2	39.70	38.36	37.83	37.20
3	39.30	38.01	37.51	36.98
4	39.07	37.44	37.23	36.73
5	38.43	36.94	37.07	36.43
6	38.15	36.98	37.21	36.27
7	37.80	36.74	37.01	36.17

Table 4. Crystallization enthalpy (J/g) results of virgin and recycled PET from A and B company

cycles	Virgin PET (A)	Recycle PET (A)	Virgin PET (B)	Recycle PET (B)
1	50.71	49.51	46.46	45.51
2	48.55	49.17	45.68	44.56
3	47.15	48.05	45.33	43.88
4	46.24	46.65	45.17	43.43
5	45.83	46.96	45.11	43.08
6	45.83	44.47	45.28	43.03
7	45.29	43.12	45.49	43.05

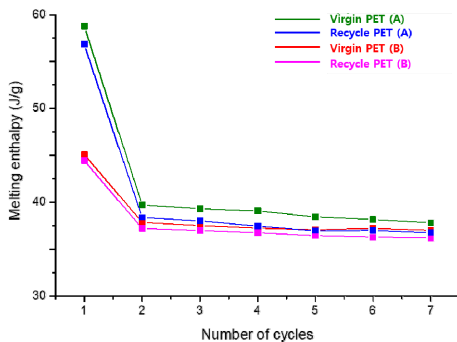


Fig. 6. Melting enthalpy value graph of virgin and recycled PET from A and B company.

Fig. 6에서 보는 바와 같이, 용융 엔탈피는 동일 제조사의 버진 PET와 리사이클 PET가 거의 같은 감소비율을 보여주며, 두 번째 사이클까지 A사의 PET가 더욱 높은 용융 엔탈피를 보여주다가 세 번째 사이클부터 비슷한 결과 값을 보여주었다. 또한 A사의 버진PET와 리사이클 PET는 첫 번째와 일곱 번째 사이클 후의 용융 엔탈피의 차이 값이 각각 20.98, 20.12 J/g인 반면, B사의 버진 PET와 리사이클 PET는 첫 번째와 일곱 번째 사이클 후의 용융 엔탈피 차이 값이 8.09, 8.26 J/g으로 A사에 비해 매우 작은 차이 값을 보여준다. 이러한 엔탈피의 변화량은 결정의 균일성 (결정화도)과 관련이 있으며, 결정화도가 작을수록 엔탈피 변화량 값은 작아진다. 따라서 B사의 두 가지 PET 원사가 A사의 두 가지 PET 원사 보다 더욱 균일한 결정성을 가지는 것으로 유추할 수 있다. 또한 앞서 측정하였던 FT-IR의 결과도 이러한 이유와 관련하여 DSC 측정 전 B사의 버진 및 리사이클 PET의 결정화도가 낮아 약 872 cm^{-1} 에서 방향족 고리로부터 기인한 피크가 나타나지 않았던 것으로 설명할 수 있다. Fig. 7에서 보는 바와 같이, 결정화 엔탈피 결과 또한 용

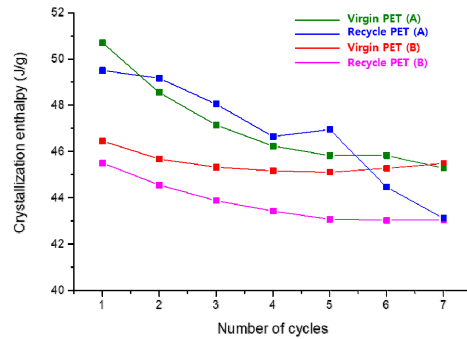


Fig. 7. Crystallization enthalpy value graph of virgin and recycled PET from A and B company

융 엔탈피와 비슷한 양상을 보여준다. A사의 버진 PET와 리사이클 PET는 사이클이 진행될수록 엔탈피가 급격히 감소하는 반면, B사의 버진 PET와 리사이클 PET는 첫 번째와 일곱 번째의 차이가 A사에 비해 매우 작은 것을 확인할 수 있었다. A사의 경우 버진 PET와 리사이클 PET는 첫 번째와 일곱 번째 사이클 후의 결정화 엔탈피의 차이 값이 각각 5.42, 6.39 J/g이며, B사의 버진 PET와 리사이클 PET의 차이 값은 각각 0.97, 2.46 J/g이다.

결정화 엔탈피 결과 또한 결정성의 균일성과 관련이 있으며 용융 엔탈피의 결과와 마찬가지로 B사의 결정성이 더욱 균일하다는 것을 보여준다. 또한 용융 엔탈피 및 결정화 엔탈피의 결과 값은 두 회사의 버진 PET가 리사이클 PET보다 상대적으로 높은 값을 가지는 것을 확인할 수 있으며, 이는 리사이클 PET에 소량 존재하는 불순물로 인한 결과로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 국내 리사이클 PET 원사 사업을 주도하는 A와 B사의 버진 PET 원사와 리사이클 PET 원사 제품, 총 4종을 화학적 그리고 열적 분석을 통해 비교하는 것이 목적이므로 FT-IR을 통해 화학적 특성을 비교 분석하였으며, DSC를 이용하여 용융 온도, 결정화 온도, 용융 엔탈피 및 결정화 엔탈피를 포함한 열적 특성 또한 비교 분석하였다.

화학적 특성 분석 결과, 4종 모두 일반적인 PET의 FT-IR 스펙트라를 보여주었지만 B사의 버진 PET와 리사이클 PET가 약 872 cm^{-1} 에서 아주 약한 피크를 보여줌으로써 두 회사 제품에 결정성의 차이가 있다는 것을 확인함과 동시에 B사의 제품을 가열 및 냉각 과정을 받

복한 결과 결정성의 재배열이 일어나 872 cm^{-1} 에서 A사의 제품과 마찬가지로 방향족 고리에서 기인한 피크가 나타나는 것을 확인하였다.

열적 특성 분석결과, A와 B사의 리사이클 PET의 용융 및 결정화 온도가 버진 PET에 비해 약 $2\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 더 낮은 것을 확인할 수 있었으며, 가열 및 냉각 사이클 히트수가 높아질수록 감소하였다. 또한 용융 및 결정화 엔탈피도 측정되었는데, 모든 엔탈피 결과 값도 가열 및 냉각 사이클 히트수가 높아질수록 낮아졌으며, 특이한 점은 B사의 버진 및 리사이클 PET 원사의 사이클 히트수에 따른 엔탈피 차이 값이 A사에 비해 매우 낮았다. 이 결과는 B사의 PET 원사가 A사의 PET 원사보다 더욱 균일한 결정성을 가지고 있다는 것을 보여준다.

본 연구는 두 회사의 PET 원사 제품의 화학적 특성 및 열적 거동을 분석 및 비교하였고, 이 결과를 기반으로 두 회사의 PET 원사의 제품에 대한 정보를 제공하는데에 목적이 있다.

References

- [1] S. H. Kim, W. G. Ham, S. Y. Park, S. H. Yun, G. S. Lee, H. J. Gu, "Development of Environmentally Friendly Recycled Textiles", *Fiber Technology and Industry*, Vol.14, No.2, pp.61-70, Jun 2010.
- [2] A. Ghanbari, M. C. Heuzey, P. J. Carreau, M. T. Ton-That, "A novel approach to control thermal degradation of PET/organoclay nanocomposites and improve clay exfoliation", *Polymer*, Vol.54, No.4, pp. 1361-1369, Feb. 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2012.12.066>
- [3] K. Park, H. Lee, A study on the Development of Functional Textiles for Sportswear, a collection of scientific papers, Institute of Living Improvement and Practical Science, Keimyung University, Korea, pp.101-116.
- [4] R. F. Adhemar, S. C. Priscila, "PET recycled and processed from flakes with different amount of water uptake: characterization by DSC, TG, and FTIR-ATR", *Journal of Materials Science*, Vol.43, pp.1406-1420, Dec. 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-007-2282-6>
- [5] S. Y. Lee, J. S. Won, J. J. Yoo, W. G. Hahm, S. G. Lee, "Physical Properties of Recycled Polyester Yarns According to Recycling Methods", *Textile Coloration and Finishing*, Vol.24, No.1, pp.91-96, March 2012.
DOI: <https://doi.org/10.5764/TCF.2012.24.1.91>
- [6] L. Shen, E. Worrell, M. K. Patel, "Open-loop recycling: A LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol.55, No.1, pp.34-52, Nov. 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.06.014>
- [7] H. Han, B. M. Cho, "Analysis of Development Trend in Sustainable Fashion Product Using Recycled Plastic", *Korea Society of Basic Design & Art*, Korea, No.2, pp.459-462, Nov. 2019.
- [8] I. Muhammad, B. K. Kim, M. Han, B. G. Cho, D. H. Kim, "Sub- and supercritical glycolysis of polyethylene terephthalate (PET) into the monomer bis(2-hydroxyethyl) terephthalate (BHET)", *Polymer Degradation and Stability*, Vol.95, No.9, pp.1686-1693, Sep. 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.05.026>
- [9] S. Jo, G. Kim, M. Cho, M. Han, K. Kang, "Feedstock Recycling Technology from Polyester Wastes", *Korean Chemical Engineering Research*, Vol.52, No.1, pp.17-25, Feb. 2014.
DOI: <https://doi.org/10.9713/kcer.2014.52.1.17>
- [10] M. Han, K. Kang, J. Song, "Chemical Recycling Technology from Polyester Wastes", *Elastomers and Composites*, Vol.47, No.2, pp.96-103, June 2012.
DOI: <https://doi.org/10.7473/EC.2012.47.2.96>
- [11] S. H. Park, S. H. Kim, "Poly (ethylene terephthalate) recycling for high value added textiles", *Fashioning and Textiles*, Vol.1, No.1, July 2014.
DOI : <https://doi.org/10.1186/s40691-014-0001-x>
- [12] P. Daniel, S. Tadeusz, "Chemical Recycling of Poly(ethylene terephthalate)", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol.36, No.4, pp.1373-1383, April 1997.
DOI: <https://doi.org/10.1021/ie960563c>
- [13] V. Sinha, M. R. Patel, J. V. Patel, "Pet Waste Management by Chemical Recycling: A review", *Journal of Polymers and the Environment*, Vol.18, pp.8-25, Sep. 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-008-0106-7>
- [14] D. S. Achilias, G. P. Karayannidis, "The Chemical Recycling of PET in the Framework of Sustainable Development", *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, Vol.4, pp.385-396, Oct. 2004.
DOI: <https://doi.org/10.1023/B:WAF0.0000044812.47185.0f>
- [15] P. Salminen, *Using recycled polyethylene terephthalate (PET) in the production of bottle trays*, Master's thesis, Arcada, Finland, pp.28-29, 2013.

김 경 필(Kyoung Pil Kim)

[정회원]



- 2004년 2월 : 부산대학교 대학원 섬유고분자공학 (공학석사)
- 2007년 3월 : 現 도레이첨단소재 (웅진케미칼) 섬유개발실
- 2007년 7월 ~ 현재 : 국방기술품 질원 선임연구원

〈관심분야〉

국방품질경영, 전력지원체계, 화생방

정 일 두(Ildoo Chung)

[정회원]



- 2005년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 고분자공학과 교수

〈관심분야〉

기능성고분자, 생체재료, 고분자 합성

서 경 진(Seo Kyung Jin)

[정회원]



- 2011년 2월 : 부산대학교 유기소 재시스템공학과 (공학사)
- 2010년 12월 ~ 현재 : 한국의류시험연구원 주임연구원

〈관심분야〉

섬유공학

박 수 용(Soo-Yong Park)

[정회원]



- 2017년 2월 : 부산대학교 고분자 공학과 (공학석사)
- 2017년 9월 ~ 현재 : 부산대학교 고분자공학과 박사과정

〈관심분야〉

기능성고분자, 생체재료, 고분자 합성