

아세트산 아연 촉매를 이용한 폴리에스터/면 혼방섬유의 선택적 글리콜 분해

성유진¹ · 김용준^{1,2} · 강지원¹ · 김병호^{1,2†}

¹승실대학교 신소재공학과, ²승실대학교 친환경화학소재융합학과

Selective Glycolysis of Polyester/Cotton Blended Fibers Using Zinc Acetate Catalysts

Yujin Sung¹, Yongjoon Kim^{1,2}, Chiwon Kang¹, and Byung Hyo Kim^{1,2†}

¹Department of Materials Science and Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, Korea

²Department of Green Chemistry and Materials Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, Korea

†Corresponding Author: Byung Hyo Kim
E-mail: byunghyokim@ssu.ac.kr

Received January 15, 2025
Revised February 17, 2025
Accepted February 18, 2025

© 2025 The Korean Fiber Society

Abstract: The textile market continues to grow worldwide, which leads to rapid increase in textile wastes. In particular, polyester/cotton blended fibers, which are widely used, have limitations in that they are difficult to process with existing recycling method. This study suggests a glycolysis-based chemical recycling method for the polyester/cotton blended fibers with selective manner. Herein, we use zinc acetate salts as cost-effective catalysts for selective glycolysis of polyester. The glycolysis reaction using the catalysts results in the successful degradation of polyester fibers to bis(2-hydroxyethyl) terephthalate monomers while preserving cotton fibers. This study is expected to contribute to the establishment of a sustainable resource circulation model in the textile industry.

Keywords: glycolysis, polyester/cotton blended fibers, zinc acetate, depolymerization, chemical recycling

1. 서 론

전 세계 섬유 시장은 지속적인 성장세를 보이고 있으며, 이에 따라 섬유 산업은 우리 일상생활뿐만 아니라 다양한 산업 분야에서 핵심적인 역할을 담당하고 있다. 최근 패스트 패션으로 인한 대량 생산과 소비, 짧은 수명 주기로 인해 매년 발생하는 막대한 양의 섬유 폐기물은 환경오염의 원인으로 지목되고 있다[1-3]. 발생한 섬유폐기물의 대부분은 매립 또는 소각을 통해 처리되고 있어 매립지 부족, 유해 가스 발생, 탄소 배출 증가 등의 부정적 결과를 초래하고 있다. 전 세계적으로 85%의 섬유 제품이 고체 폐기물 형태로 매립되거나 소각되는 것을 고려하면, 현재의 섬유 재활용 방식을 재검토하고, 자원 순환을 극대화할 수 있는 효율적인 재활용 기술 개발이 필요하다[4].

특별히, 이종 섬유의 물성이 보완되어 널리 사용되나, 재활용이 쉽지 않은 혼방 섬유의 재활용 기술 개발이 시급하

다. 대표적인 혼방섬유는 폴리에스터/면 혼방섬유로써 폴리에스터의 높은 강도, 내마모성, 내세탁성과 면의 높은 흡습성 및 통기성이 상호 보완되어 다양한 용도로 널리 사용되고 있다[5]. 그런데, 이러한 혼방 섬유의 폐기물을 재활용하는 공정은 아직 상용화되지 못한 상태이다. 세척, 용융 후 재사출하는 물리적 재활용 방법으로 재활용할 수 있는 단일 소재와 달리, 미세공정으로 합사된 혼방 섬유는 물리적 재활용이 쉽지 않기 때문이다. 따라서 이러한 폴리에스터/면 혼방 섬유를 물리적 방법이 아닌 화학적 방법으로 재활용하는 방법론의 개발이 요구되고 있다.

섬유제품을 포함한 고분자 물질의 화학적 재활용은 고분자를 단량체로 분해하는 해중합 후 단량체를 정제하고 재중합하는 방법으로 이루어진다. 혼방 섬유의 경우 용매를 이용해 두 섬유를 미리 분리하고 해중합하여 화학적으로 재활용하는 방법이 일반적으로 연구되었으나, 위 방법은 낮은 원사 분리효율과 공정 비용의 증가를 가져오게 된다[6].

따라서, 면과 폴리에스터로 이루어진 혼방 섬유 중 폴리에스터만을 선택적으로 단량체로 분해하는 선택적 해중합이 이루어진다면 별도의 원사 분리 공정없이 낮은 공정비용으로 혼방섬유의 화학적 재활용이 가능하게 된다. 폴리에스터와 면이 합사된 혼방섬유에 선택적 해중합 방법을 도입한다면 고품질의 면 섬유와 용해된 폴리에스터 단량체로 분리할 수 있다. 이렇게 분리된 폴리에스터 단량체는 재중합하여 신재(virgin polymer)와 동일한 품질의 재생 섬유를 제조할 수 있다[7,8]. 폴리에스터/면 혼방섬유의 선택적 재중합 방법으로써, 글리콜 분해(glycolysis)와 가수분해(hydrolysis)가 있다. 이 중 에틸렌 글리콜을 용매로 하여 bis(2-hydroxyethyl) terephthalate (BHET) 단량체를 생산하는 글리콜 분해는 고염기를 사용하지 않는 상대적으로 온화한 조건에서 반응이 이루어져 가장 산업적으로 유망한 방법으로 고려되어진다[9].

폴리에스터의 글리콜 분해에는 촉매가 필수적으로 사용된다. 반응온도를 에틸렌 글리콜의 끓는점보다 낮추어 상압 반응을 달성하기 위해서이다[10]. 최근 면/폴리에스터 혼방섬유의 재활용을 위해 심공용 혼합용매(deep eutectic solvent) 촉매[11], 탄산수소암모늄[9] 등이 보고되었다. 심공용 혼합용매(deep eutectic solvent, DES)는 수소결합 수용체와 수소결합 공여체의 조합으로 구성되어 있으며 이를 통해 화학적 특성을 조절하여 해중합 효율을 늘릴 수 있다. Betaine을 기반으로 한 심공용 혼합용매를 통해 혼방 직물에서 면을 보존하고 PET만 분해하여 분해시간을 단축하였다[11]. 그러나 이 방법은 심공용 혼합용매의 높은 가격 및 난분리성의 한계가 있다. 한편 탄산수소암모늄이 고온에서 암모니아와 이산화탄소로 분해되는 점에 착안하여 분리 공정이 필요하지 않은 폴리에스터/면 혼방 섬유의 선택적 해중합 방법이 보고되었다[9]. 그러나 이 방법 또한 촉매의 높은 가격 및 암모니아에 의한 아민 분해(aminolysis)의 문제가 있어 산업 적용에 한계가 있다. 이에 따라 실제 공정에 쉽게 적용이 가능하도록 저렴한 촉매를 이용한 혼방 섬유의 선택적 해중합에 관한 연구가 제시될 필요가 존재한다.

본 연구에서는 가장 효율적이면서 저렴한 PET 글리콜 분해 해중합 촉매로 알려진 아세트산아연 금속염을 사용하여 폴리에스터/면 혼방섬유의 선택적 분해에 대해 살펴보았다. 특별히 반응온도가 해중합 반응에 미치는 영향을 알아보고 자 온도에 차이를 두어 폴리에스터/면 혼방섬유의 분해를

진행하였다. 여기서 온도는 170–200 °C로 10 °C씩 차이를 두었다.

2. 실험

2.1. 재료

폴리에스터와 면이 65/35 비율을 이루고 있는 실험복을 중성세제로 세척하고 건조한 뒤에 1 cm×1 cm 크기로 레이저 커팅기를 이용해 절단했다. 에틸렌 글리콜(ethylene glycol)과 아세트산아연(zinc acetate)은 Sigma Aldrich에서 구매하였다.

2.2. 글리콜 분해

혼방섬유 3 g, 에틸렌 글리콜 32.5 mL, 아세트산아연 0.01wt%를 3구 플라스크에 넣고 컨테서를 연결한다. 온도 조절기(temperature controller)로 조건을 설정한 뒤 반응을 진행한다. 진공 상태에서 70 °C까지 10분 승온 후 70 °C에서 한시간 유지하여 탈기(degassing)를 진행한다. 이후 아르곤 분위기에서 반응온도(170, 180, 190, 200 °C)까지 30분동안 승온하고 두 시간 동안 유지한다. 반응이 끝나면 상온까지 식힌 뒤 끓는 물을 이용해 잔여 섬유에 남아 있는 잔여 BHET를 용해시킨다. 주로 면으로 이루어진 잔여 섬유는 별도로 수거한다.

남은 용액을 반나절동안 냉장고에 넣어 4 °C 환경에서 결정화시킨다. 결정화된 BHET를 수득하기 위하여 감압 플라스크에 거름종이를 넣고 수공식 진공펌프를 이용해 수분을 제거한 뒤 핫플레이트에서 건조를 진행하여 최종적으로 백색 결정의 BHET를 수득하였다. 실험과정을 Figure 1 및 Table 1에 제시하였다.

2.3. 결과 분석

글리콜 분해 후 생성물의 화학구조는 JEOL사의 500 MHz 핵자기 공명 분광기(nuclei magnetic resonance; NMR)을 이용해 분석하였다. (모델명: ECZ 500R) NMR 샘플은 dimethyl sulfoxide(DMSO)-D6를 용매로 하여 3 mg/mL의 농도로 제조한 뒤 NMR tube에 넣어 ¹H NMR과 ¹³C NMR을 측정하였다. 반응 전 섬유와 반응 후 잔여 섬유의 화학성분을 Bruker사의 푸리에 변환 적외선 분광기(Fourier transformed

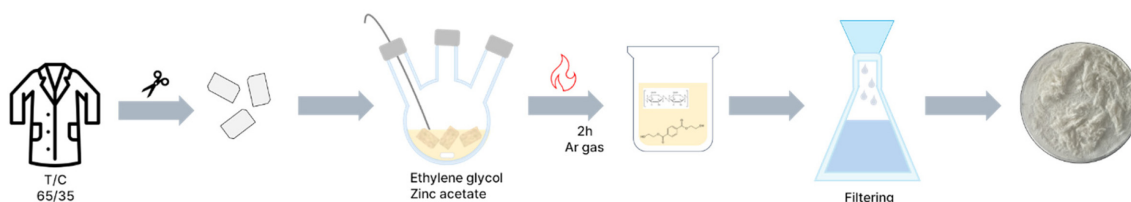


Figure 1. Schematic illustration of the experiments.

Table 1. Reaction condition and results of the experiments

	Resource	Amount of solvent	Catalyst ratio	Reaction temperature	Reaction time	Textile conversion
Experiment 1	T/C65/35 3 g	32.5 ml	0.01% Zn(Ac)2	170 °C	2 hr	11%
Experiment 2	T/C65/35 3 g	32.5 ml	0.01% Zn(Ac)2	180 °C	2 hr	61%
Experiment 3	T/C65/35 3 g	32.5 ml	0.01% Zn(Ac)2	190 °C	2 hr	65%
Experiment 4	T/C65/35 3 g	32.5 ml	0.01% Zn(Ac)2	200 °C	2 hr	78%

infrared spectroscopy; FT-IR)를 이용해 분석하였다(모델명: VERTEX70). FT-IR 분석은 400–4000 cm^{-1} 범위에서 ATR(attenuated total internal reflection) 모드로 총 32회 측정 후 평균을 얻었다. 반응 전 섬유와 반응 후 잔여 섬유의 거시적인 구조는 Olympus사의 광학현미경(모델명: BX53MTRF-S)으로 측정하였다. 또한 반응 전/후 섬유의 미시적인 구조는 Carl Zeiss사의 주사전자현미경(scanning electron microscopy; SEM)을 통해 분석하였다. (모델명: GeminiSEM 300) NMR 및 SEM의 사용은 숭실대학교 공동기기센터의 도움을 받았다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 폴리에스터/면 혼방 섬유의 해중합

폴리에스터가 65%, 면이 35%가 원사 단위로 혼방되어 있는 백색 실험복을 반응물로 하여 폴리에스터/면 혼방섬유의 선택적 해중합 반응을 진행하였다. 에틸렌 글리콜을 용매로 하고, 아세트산아연을 촉매로 하여 170 °C, 180 °C, 190 °C, 200 °C에서 글리콜 분해를 수행하고 질량 변화를 확인하였다. 반응 후 잔여 섬유의 질량 감소를 통해 혼방 섬유가 해중합됨을 확인할 수 있었다. 반응 전과 반응 후 혼방섬유의 폴리에스터의 분해 정도를 전환율(textile

conversion)을 통해 알 수 있다(Figure 2). 전환율 계산 공식은 아래와 같다.

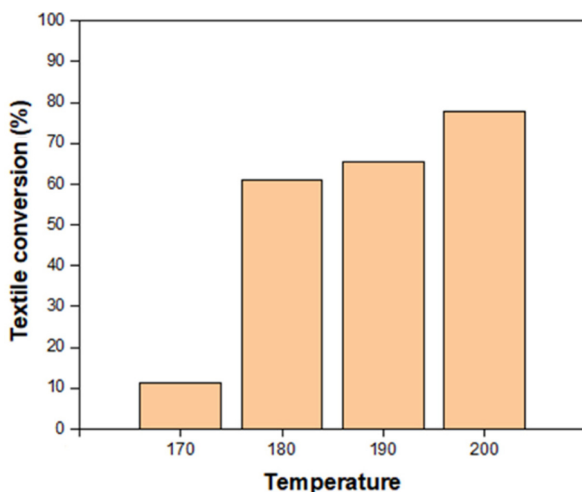
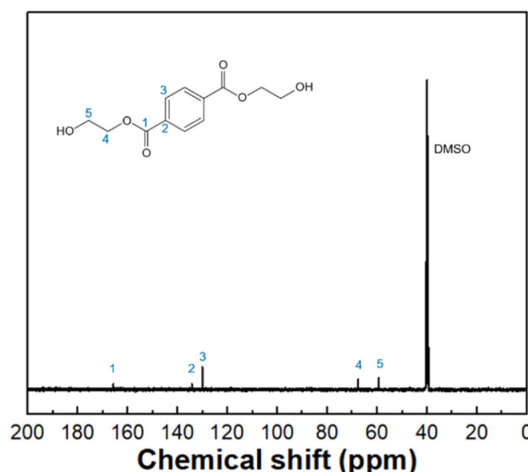
$$\text{전환율}(\%) = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100(\%)$$

여기서 m_i 는 반응 전 혼방 섬유 중 폴리에스터에 해당하는 무게로, 섬유전체의 무게에 폴리에스터의 비율인 0.65를 곱한 값이다. m_f 는 반응 후 잔여 섬유 중 폴리에스터에 해당하는 무게로 잔여 섬유 무게에서 면에 해당하는 무게를 뺀 값이다. 이렇게 구한 전환율은 180 °C에서 61.1%, 190 °C에서 65.4%, 그리고 200 °C에서 77.9%였다(Figure 2). 이는 상압 조건에서 높은 비율의 섬유가 해중합되었음을 나타낸다. 한편 170 °C에서는 11.3%의 전환율로, 폴리에스터의 분해가 거의 이루어지지 않았다. 즉, PET 혼방섬유의 글리콜 분해에 필요한 충분한 열에너지의 공급을 위해 180 °C 이상의 온도가 필요함을 알 수 있다.

3.2. 해중합 분해 용액의 성분 분석

폴리에스터/면 혼방 섬유의 글리콜 분해 반응 후 분해된 용액과 잔여 섬유를 고온의 물을 이용하여 분리하였다. 이후 4 °C의 저온의 물로 분해된 용액에 포함된 잔여 촉매를 제거한 후 결정화하여 백색 결정을 수득하였다.

글리콜 분해 생성물인 백색 결정의 분자구조를 핵자기

**Figure 2.** Conversion of T/C textiles after glycolysis with different reaction temperature in the presence of zinc acetate catalysts.**Figure 3.** ^{13}C NMR of the products.

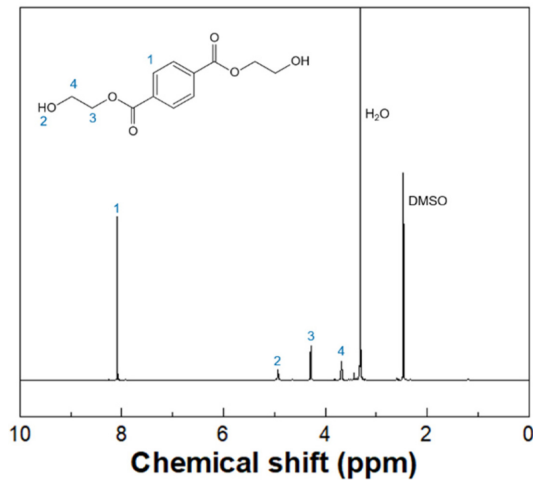


Figure 4. ^1H NMR of products that can be assigned as BHET.

공명(nuclei magnetic resonance; NMR)으로 분석하였다. ^{13}C NMR 측정 결과 59 ppm, 68 ppm, 130 ppm, 135 ppm, 167 ppm에서 피크가 관측되었다(Figure 3). 이는 각각 OH에 근접한 $-\text{CH}_2-$ 탄소, ester에 근접한 $-\text{CH}_2-$ 탄소, 다른 위치의 방향족(aromatic) 탄소, carbonyl 탄소에서 기인한 피크로써, 폴리에스터의 글리콜 분해의 생성물인 BHET의 피크와 일치한다[12]. 한편 면이 분해될 때 생성되는 포도당 혹은 셀룰로스(cellulose) 피크는 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다.

폴리에스터/면 혼방소재의 글리콜 분해로 폴리에스터의 분해산물인 BHET가 수득되고 면은 분해되지 않는 것을 ^1H NMR을 통해서도 확인하였다. Figure 4는 글리콜 분해 생성물의 ^1H NMR 데이터이다. 방향족 수소는 전자의 비편재화에 의한 가려짐 효과가 커서 화학적 이동(chemical shift)이 큰 8.1 ppm에서 강한 피크가 나타났다. 또한 hydroxy ethyl group의 수소에서 기인한 세개의 피크가 3–5 ppm 영역에서 나타났다[12]. 한편 셀룰로스 올리고머(oligomer)에서 기인한 피크는 나타나지 않았다[13]. NMR 분석 결과를 통해 아세트산아연 촉매를 폴리에스터/면 혼방소재의 글리콜 분해에 적용했을 시, 폴리에스터가 단량체로 성공적으로 분해되면서 면의 분해산물이 나타나지 않는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 아세트산아연 촉매의 선택적 분해는 에스터 교환 반응 메커니즘으로 설명할 수 있다. 폴리에스터의 주성분인 PET의 글리콜 분해는 친핵체(nucleophile)인 에틸렌 글리콜의 친핵성 에스터 교환반응(esterification)으로 일어난다. 여기서 아세트산아연 촉매는 루이스 산-염기 반응을 일으켜 반응 온도를 낮추고, 반응 시간을 단축시키는데 기여한다. Zn(II) 이온은 루이스 산으로 작용하여 carbonyl 탄소의 친전자성을 강화시키며, 아세트산 이온은 루이스 염기로 작용하여 에틸렌 글리콜의 친핵성을 강화시키기 때문이다

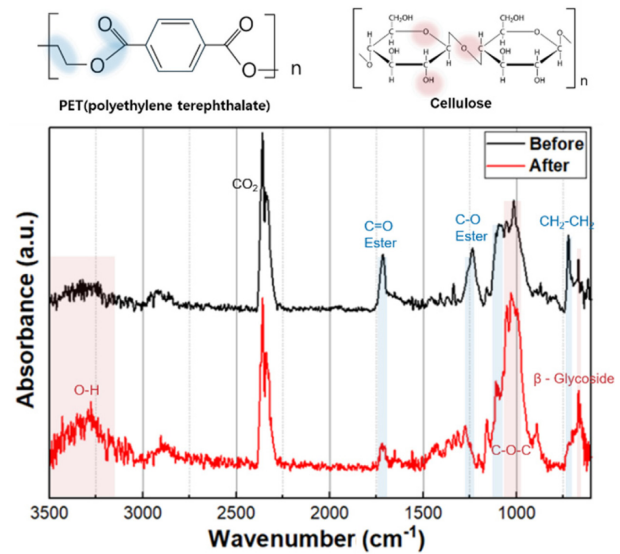


Figure 5. FT-IR spectra of the textiles before and after the reaction.

다[10]. 한편 아세트산아연은 면의 glucoside 결합 분해에 참여하지 않으므로 면의 분해 산물은 용액에서 검출되지 않았다.

3.3. 반응 후 잔여 섬유 분석

폴리에스터/면 혼방 섬유의 글리콜 분해 반응 후 잔여 섬유의 화학적 성분을 분석하여 폴리에스터의 효과적 제거 및 면의 잔존 여부를 확인하였다. 분석은 FT-IR을 통해 이루어졌으며 이를 Figure 5에 도시하였다. PET의 특징적 peak는 파란색으로, 면(cellulose)의 특징적 peak는 붉은색으로 표시하였다.

반응 전의 폴리에스터/면 섬유는 ester의 $\text{C}=\text{O}$ 신축(stretching) 진동에 의한 1730 cm^{-1} 피크와 $\text{C}-\text{O}$ 신축 진동에 의한 1250 cm^{-1} 피크가 강하게 나타났다. 글리콜 분해 후 잔존 섬유에는 위의 ester peak이 현저하게 줄어들었다[14]. 이는 폴리에스터가 분해되어 섬유 내의 ester의 함량이 줄어들었기 때문이다. 한편, 반응 전 섬유에 비해 잔존 섬유에는 hydroxyl 기에서 기인한 3300 cm^{-1} 의 넓은 피크의 강도가 커졌으며, $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ ether peak인 1000 cm^{-1} 피크의 강도도 증가하였다. 이는 면의 주성분인 셀룰로스에서 기인한 피크로써, 해중합 이후의 섬유 내의 면의 상대적 함량 증가를 보여준다[15]. 즉, 섬유 내의 폴리에스터가 분해됨에 따라 섬유 내의 면의 비율이 증가하게 되는 것이다. 이러한 면 성분의 함량 증가는 셀룰로스의 특징적인 피크인 glucoside 결합에서 나타나는 610 cm^{-1} 피크의 증가를 통해서도 확인할 수 있다.

아세트산 아연 촉매를 사용하여 선택적 글리콜 분해반응이 성공적으로 일어났음을 확인하기 위해 잔여 섬유를 광학현미경으로 확대하여 관측하였다. 단섬유가 꼬인 형태로

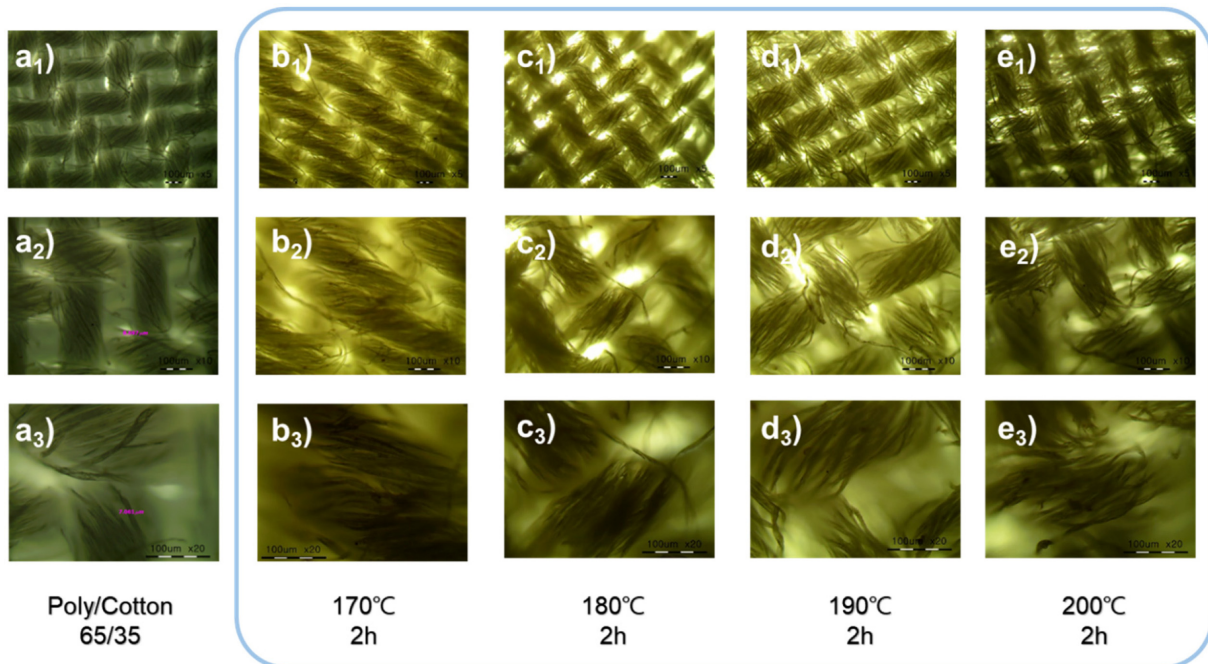


Figure 6. Optical microscopy image of the (a) intact polyester/cotton blend textile, (b-e) the residual textiles after the glycolysis reaction at (b) 170 °C, (c) 180 °C, (d) 190 °C, (e) 200 °C for 2 h. Images of each textile were taken three times with different magnifications.

되어있는 방적사의 밀도 변화를 통해 혼방 섬유의 해중합 정도를 추적할 수 있다. 글리콜 반응 온도에 따른 변화를 확인하기 위해 170 °C, 180 °C, 190 °C, 200 °C의 다른 온도에서 반응한 후의 섬유의 표면을 3가지의 다른 배율로 확대하여 Figure 6에 나타내었다. 170 °C에서는 방적사의 단섬유의 밀도의 변화가 거의 없었다. 그런데 180 °C, 190 °C, 200 °C로 반응 온도가 증가할수록 방적사 내의 단섬유의 밀도는 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. Figure 2의 전환율 값을 통해 밀도 변화 정도를 유추할 수 있다. 폴리에스터의 단량체 전환율이 170 °C에서는 11.3%, 180 °C에서는 61.1%, 190 °C에서는 65.4%, 그리고 200 °C에서는 77.9%였다. 폴리에스터와 면의 혼방비율이 65:35인 점을 고려할 시, 전환율을 방적사 전체에서의 섬유의 제거율로 전환하면 각각 170 °C에서는 7.3%, 180 °C에서는 39.7%, 190 °C에서는 42.5%, 그리고 200 °C에서는 50.6%의 섬유가 해중합을 통해 단량체로 분해된 것으로 보인다. 제거율에 해당하는 정도의 섬유 밀도의 변화가 나타나 고온에서 해중합한 섬유 제품의 경우 상당량의 단섬유가 제거되어 매우 영성된 구조의 방적사의 형태를 띠게 된다. 특히, 200 °C에서 해중합한 섬유의 경우 단섬유의 절반 이상이 제거되어 연사된 형태의 방적사의 꼬임이 무너지는 것을 볼 수 있다.

폴리에스터/면 섬유의 글리콜 분해 전후의 섬유의 미세 구조를 SEM 이미지를 통해 분석하였다. 반응 전후 두께 분포의 변화를 확인하기 위해 SEM 이미지를 통해 두께를 측정하고 그 평균을 계산하고 히스토그램으로 표현해보았다.

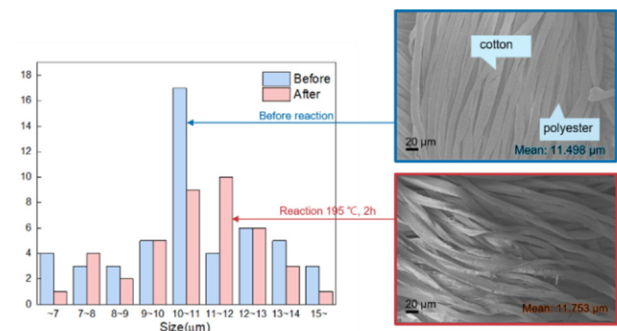


Figure 7. Histogram of staple fiber of the polyester/cotton blended textile and residual textile after the glycolysis reaction at 195 °C for 2 h.

반응 전의 혼방섬유에는 10–11 μm 사이의 두께를 가지는 섬유의 비율이 현저하게 높았으며, 12–13 μm 사이의 두께를 가지고 있는 섬유의 비율도 높은 이중 봉우리(bimodal) 분포를 보였다(Figure 7). 이는 이중 섬유의 두께 및 단면 모양 차이에서 기인한 것으로 여겨진다. 폴리에스터의 단면은 원형 구조로써, SEM image에서 10 μm 근방의 일정한 두께를 가진다. 한편 면의 단면은 콩모양으로써 바라보는 방향에 따라 12 μm 크기의 두께로 보이고, 두께가 일정하지 않아 보인다. 즉, 이중 봉우리 분포는 얇은 두께로 관측되는 폴리에스터와 두꺼운 두께로 관측되는 면에 의해서 나타나는 것이다. 65:35의 비율로 혼방된 폴리에스터와 면의 비율에 따라 10–11 μm 두께의 섬유의 비율이 12–13 μm

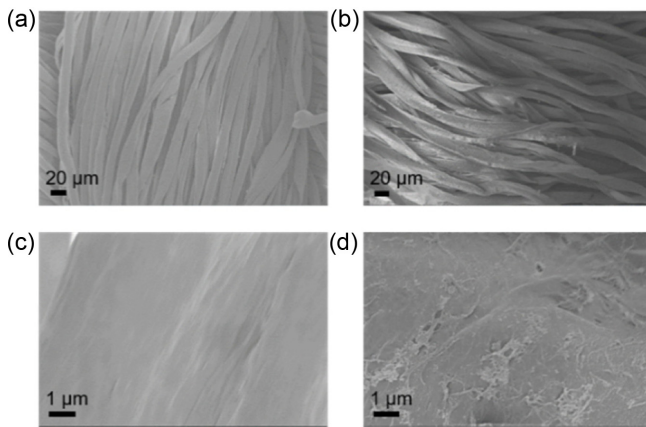


Figure 8. (a, b) Low magnification and c,d) high magnification SEM images of (a, c) intact polyester/cotton blend textiles and (b, d) the residual textiles after the glycolysis reaction at 195 °C for 2 h.

두께의 섬유의 비율보다 두배 이상 많은 것을 알 수 있다.

글리콜 분해 반응 후 섬유의 평균 두께는 11.5 μm 에서 11.8 μm 로 미세하게 증가했다(Figure 7). 또한 이중 봉우리 분포에서 단일 봉우리 분포로 두께 분포가 변했다. 이는 10 μm 두께의 폴리에스터가 단량체로 분해되어 사라지고, 12 μm 근방의 두께를 가지는 면이 잔존하였기 때문이다. 잔존하는 섬유의 SEM 이미지를 면밀히 관찰하면 두께 및 형상이 불규칙적인 것을 볼 수 있으며 이는 콩 모양의 단면 구조를 가지는 면의 전형적인 특징이다. 잔존 섬유의 구성성분이 대부분 면으로 이루어진 것은 FT-IR 분석을 통해 화학적으로 증명하였고, SEM 분석을 통해 시각적으로 확인할 수 있었다. 반응 전에 밀도 높게 배열된 폴리에스터 섬유와 면의 단섬유가 글리콜 분해 반응 후 폴리에스터 섬유의 분해로 인해 밀도가 낮아졌던 광학현미경 분석 결과(Figure 6) 또한 SEM 이미지 분석을 통해 재확인 되었다(Figure 8(a, b)).

고해상도 SEM을 통해 글리콜 분해 반응으로 인한 섬유 원사의 손상여부를 확인하였다(Figure 8(c, d)). 반응 전 섬유는 매끈한 표면 구조를 가지고 있었던 반면, 반응 후에 섬유의 표면이 거칠어짐을 확인할 수 있었다. 즉 아세트산 아연 촉매를 통한 글리콜 분해가 면 섬유와 약하게 반응하여 표면을 손상시킨 것으로 보인다. 아세트산아연 촉매는 면을 단량체로 분해할 정도로 면에 대한 반응성이 충분하지는 않으나, 면의 표면을 불규칙하게 할 정도의 약한 반응성은 가지고 있기 때문으로 추측된다. 추후 면을 전혀 손상시키지 않는 촉매 및 해중합 방법론의 개발이 필요할 것으로 전망된다.

4. 결 론

우리는 본 연구를 통해 저렴하고 범용적인 해중합 촉매

인 아세트산아연을 촉매로 하여 폴리에스터/면 혼방섬유의 선택적 글리콜 분해 해중합 반응을 탐구하였다. 혼방섬유에 포함된 폴리에스터를 원료인 BHET로 분해하면서 면을 보존하여 분리하였다. 본연구에서는 전처리 과정을 거치지 않고 다양한 반응온도에서 폴리에스터/면 혼방섬유를 분해하였으며 분해 산물은 NMR로, 잔존 섬유는 FT-IR 측정과 SEM 이미지, 광학현미경을 통해 분석하였다. 이러한 분석을 통해 폴리에스터가 높은 전환율로 분해되면서 면이 분해되지 않고 단섬유 형태로 남아있음을 확인하였다. 그러나, 아세트산아연 촉매를 통한 선택적 해중합 과정에서 면 표면의 손상이 있어, 이를 최소화하는 방법론 및 정량 분석법의 확립이 필요하다. 또한 본 연구를 통해 보고하는 폴리에스터의 선택적 해중합의 전환율은 약 80% 정도로서, 촉매 개발, 공정 조건 최적화 등의 연구 개발을 통한 전환율의 추가적 향상이 요구된다. 이러한 한계에도 불구하고, 본 연구는 혼방 섬유 폐기물의 화학적 재활용에 있어서 금속염 촉매의 활용 가능성을 보여주며, 지속 가능한 환경 관리 및 경제적 가치 창출에 기여할 수 있을 것으로 기대된다[16].

감사의 글: 이 논문은 대한민국 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음(NRF-2021R1C1C1014339).

References

1. S. Kasavan, S. Yusoff, N. C. Guan, N. S. K. Zaman, and M. F. R. Fakri, "Global Trend of Textile Waste Research from 2005 to 2020 Using Bibliometric Analysis", *Environ. Sci. Pollution. Res.*, 2021, **28**, 44780–44794.
2. E. Barnard, J. J. Rubio Arias, and W. Thielemans, "Chemolytic Depolymerisation of PET: A Review", *Green Chem.*, 2021, **23**, 3765.
3. S. Conroy and X. Zhang, "Theoretical Insights into Chemical Recycling of Polyethylene Terephthalate (PET)", *Polym. Degrad. Stab.*, 2024, **223**, 110729.
4. I. Wojnowska-Baryła, K. Bernat, M. Zaborowska, and D. Kulikowska, "The Growing Problem of Textile Waste Generation —The Current State of Textile Waste Management", *Energies*, 2024, **17**, 528.
5. Y. Zou, N. Reddy, and Y. Yang, "Reusing Polyester/cotton Blend Fabrics for Composites", *Compos. Part B: Eng.*, 2011, **42**, 763–770.
6. S.-L. Loo, E. Yu, and X. Hu, "Tackling Critical Challenges in Textile Circularity: A Review on Strategies for Recycling Cellulose and Polyester from Blended Fabrics", *J. Environ. Chem. Eng.*, 2023, **11**, 110482.
7. Y. Wu, Y. Che, X. Wei, Q. Hu, J. Xu, B. Guo, and Z. Niu, "Nondestructive Recovery of Cotton from Waste Polycotton Textiles by Catalytic Hydrolysis", *ACS Sustain. Chem. Eng.*, 2024, **12**, 10446–10454.

8. E. Andini, P. Bhalode, E. Gantert, S. Sadula, and D. G. Vlachos, "Chemical Recycling of Mixed Textile Waste", *Sci. Adv.*, 2024, **10**, eado6827.
9. Y. Yang, S. Sharma, C. D. Bernardo, E. Rossi, R. Lima, F. S. Kamounah, M. Poderyte, K. Enemark-Rasmussen, G. Cianceleoni, and J.-W. Lee, "Catalytic Fabric Recycling: Glycolysis of Blended PET with Carbon Dioxide and Ammonia", *ACS Sustain. Chem. Eng.*, 2023, **11**, 11294–11304.
10. Y. Kim, T. Jang, H. Hwang, Y. Sung, and B. H. Kim, "Development of Glycolysis Catalysts for PET Wastes Including Polyester Textiles", *Fiber. Polym.*, 2025, **26**, 1–17.
11. L. Liu, H. Yao, Q. Zhou, X. Yao, D. Yan, J. Xu, and X. Lu, "Recycling of Full Components of Polyester/cotton Blends Catalyzed by Betaine-based Deep Eutectic Solvents", *J. Environ. Chem. Eng.*, 2023, **10**, 107512.
12. M. Imran, B.-K. Kim, M. Han, B. G. Cho, and D. H. Kim, "Sub- and Supercritical Glycolysis of Polyethylene Terephthalate (PET) into the Monomer bis(2-hydroxyethyl) Terephthalate (BHET)", *Polym. Degrad. Stab.*, 2010, **95**, 1689–1693.
13. A. Sasaki, T. Konishi, K. Kobayashi, M. Wada, and R. Kusumi, "Complete ^1H and ^{13}C NMR Assignment of Cellulose Oligomer in LiCl/DMSO", *Cellulose*, 2024, **31**, 7895–7904.
14. C. Sammon, J. Yarwood, and N. Everall, "An FT-IR Study of the Effect of Hydrolytic Degradation on the Structure of Thin PET Films", *Polym. Degrad. Stab.*, 2000, **67**, 149–158.
15. S. Y. Oh, D. I. Yoo, Y. Shin, and G. Seo, "FTIR Analysis of Cellulose Treated with Sodium Hydroxide and Carbon Dioxide", *Carbohydrate Res.*, 2004, **340**, 417–428.
16. K. Choudhury, M. Tsianou, and P. Alexandridis, "Recycling of Blended Fabrics for a Circular Economy of Textiles: Separation of Cotton, Polyester, and Elastane Fibers", *Sustainability*, 2024, **16**, 6206.