

초음파와 니들펀칭 공정을 이용한 소수성 ITO 나노입자의 PET 직물 담지

최정욱^{1,2} · 이소현¹ · 황혜인^{1,3} · 장준혁^{4,5} · 조승민¹ · 이웅규¹ · 김병호^{1,2†}

¹숭실대학교 신소재공학과, ²숭실대학교 친환경화학소재융합학과, ³숭실대학교 에너지정책기술융합학과,

⁴숭실대학교 스마트웨어블공학과, ⁵(주)원에이티

Impregnation of Hydrophobic ITO Nanoparticles onto PET Fabrics Using Ultrasonication and Needle-Punching Processes

Jungwook Choi^{1,2}, Sohyeon Lee¹, Hyein Hwang^{1,3}, Junhyeok Jang^{4,5}, Seungmin Jo¹, Woongkyu Lee¹, 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

³Department of Convergence of Energy Policy and Technology, Soongsil University, Seoul 06978, Korea

⁴Department of Smart Wearable Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, Korea

⁵One Eighty Co., Ltd, Seoul 02584, Korea

Abstract: Incorporation of long-chain capped nanoparticles on polyester textiles such as polyethylene terephthalate (PET) is challenging due to the low surface energy and chemical inertness of PET. We present a binder-free, ultrasonication method to immobilize indium tin oxide (ITO) nanoparticles on PET textiles while preserving the native fiber structure. Oleic acid-capped colloidal ITO nanoparticles were successfully incorporated to the PET textiles at 40 °C, which is confirmed by X-ray diffraction (XRD). The nanoparticle-incorporated PET textiles show high stability in washing condition even in the presence of detergent. The plasmonic property of ITO nanoparticles endows photothermal effect. Under a xenon solar simulator, ITO-loaded textiles exhibited high heating rates. This simple process enables durable, NIR-responsive PET textiles without plasma treatment or polymer binders.

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

Received November 21, 2025

Revised December 9, 2025

Accepted December 15, 2025

© 2025 The Korean Fiber Society

Keywords: PET fiber, indium tin oxide (ITO), ultrasonication deposition, nanoparticle, nanoparticle textile coating

1. 서 론

Polyethylene terephthalate(PET)는 우수한 기계적 강도와 내화학성, 낮은 밀도, 안정적인 생산 공정 등 여러 장점을 바탕으로 의류용 직물, 산업용 부직포, 의료용 소재까지 폭 넓게 활용되는 대표적 합성직물이다[1]. 전 세계 직물 생산량의 상당 부분을 PET 기반 소재가 차지할 만큼 그 산업적 비중은 매우 크다[2]. 그러나 PET는 무극성 구조와 낮은 표면 에너지라는 고유한 특성을 지니고 있어, 다양한 기능을 부여하기 위한 무기계 나노입자의 부착 및 고정이 쉽지 않다는 근본적인 한계를 갖는다[3]. PET 표면은 화학적

으로 비교적 안정하고, 기질과 입자 간 상호작용을 일으킬 만한 활성기 도입이 어려워, 입자의 흡착 및 유지력이 떨어지는 문제가 반복적으로 제기되어 왔다[3,4].

이러한 계면적 한계는 전도성, 자성, 광학적 특성 등 나노입자 기반 기능을 직물에 부여하는 과정에서 가장 큰 장애 요소로 작용하며, 특히 세탁·마찰과 같은 실제 사용 조건에서 입자가 탈락하거나 성능이 저하되는 문제가 지속적으로 보고되고 있다[5,6]. 또한 PET 직물의 상대적으로 적은 기공과 매끄러운 표면 특성은 나노입자 분산액이 직물 내부로 침투하거나 직물 다발 사이에 균일하게 분포하는 것을 방해한다[6]. 단순 침지나 패딩 공정은 직물 외곽에

한정된 코팅 형태를 만들기 쉬우며, 표면에 국소적으로만 입자가 쌓여 균일성 확보가 어렵고, 장기적으로는 부착력 저하로 이어지는 경향이 있다.

이를 개선하기 위해 많은 연구에서 UV-ozone 처리, 플라즈마 처리, 화학적 산화 처리 등 다양한 표면개질 기술이 활용되어 왔다[7,8]. 이러한 공정은 PET 표면에 산소계 관능기를 도입하거나 표면 에너지를 인위적으로 증가시켜 나노입자의 흡착을 유도하는 방식으로 성능 향상을 기대할 수 있다[7]. 그러나 이들 공정은 고가의 장비와 공정 조건 제어가 필요하고, 표면에 도입된 기능기가 시간이 지나면서 소수성으로 되돌아가는 비가역적 현상이 빈번히 관찰된다. 특히 플라즈마 기반 처리의 경우 활성 라디칼에 의한 고분자 사슬 절단과 표면 열화가 발생하기 쉬워 직물의 기계적 강도를 저하시킬 수 있으며, 이는 실제 직물 제품화 과정에서 중요한 제약 요인이 된다[8].

한편, 고분자 바인더를 이용하여 나노입자를 직물 표면에 고정하는 방식도 널리 사용되어 왔다[9,10]. 그러나 바인더는 시간이 지나면 열습도 변화와 반복 세탁에 취약하여 쉽게 탈락하고, 바인더층이 두꺼워질수록 광학적 투명도가 감소하거나 전기적·자기적 기능이 약화되는 단점이 나타난다[9,10]. 바인더 자체가 입자를 감싸버리는 구조가 되기 때문에 나노입자의 고유한 성능을 충분히 발현하기 어렵다는 구조적 한계도 존재한다. 이와 함께 나노입자의 표면을 유기물로 개질하여 직물과의 친화성을 높이는 전략도 제시되었으나[11], 표면 개질된 입자가 직물 내부까지 침투하고 구조적으로 고정되기 위해서는 추가적인 에너지 공급이나 보조 공정이 필요하다[11]. PET처럼 표면이 비활성적이고 내부 구조가 치밀한 직물에서는 단순 분산 안정성만으로 충분한 부착 효과를 얻기 어렵다[3]. 기존 연구는 대부분 친수성 직물에 집중되어 있어 PET 직물에 적용했을 때 안정적인 담지 구조를 확보하기 위한 공정 설계는 여전히 부족한 실정이다[7,11]. 특히 oleate와 같은 장쇄 리간드로 둘러싸여 소수성 특성을 가지는 나노입자의 경우 수계에서 이루어지는 기존 공정에 적용하기 어렵다.

이와 같은 배경에서, PET 직물의 고유한 물성을 손상시키지 않으면서도 나노입자를 표면과 내부까지 안정적으로 도입할 수 있는 새로운 공정 기술의 필요성이 꾸준히 제기되고 있다. 특히 화학적 처리나 바인더 사용을 최소화하면서도 입자의 침투, 계면 결합, 기계적 고정이 동시에 이루어질 수 있는 방식은 기능성 직물 개발의 핵심적인 방향으로 여겨진다.

본 연구에서 담지하려는 ITO 나노입자의 특징은, 적외선 영역의 빛을 흡수해서 열을 담지하는 효과가 있다. 이에 ITO를 겨울 의류 소재에 담지할 시 보온 효과를 기대할 수 있다[12]. 한편, ITO의 주 소재인 인듐과 주석은 인체에 해롭지 않은 것으로 알려져 있어 인체 안정성이 확보되어 있

다. 예를 들면 디스플레이 등에서 사용되는 투명전극은 대부분 ITO로 되어 있다. 이러한 특성에 더해 ITO가 가지는 장점은 무색이다. 대부분 나노입자는 색을 가지고 있어 직물에 담지시 염료의 색상과 합쳐져 원하는 색이 나오지 않게 되는 경우가 많다. 그러나 ITO는 NIR 영역에서의 흡수를 보이므로 직물에 담지시 투명하다.

본 연구는 바인더-플라즈마 등 고가 공정을 최소화하면서 초음파 기반 물리 담지만으로 PET 직물에 ITO 나노입자를 균일·안정하게 도입하는 공정을 제안한다[13]. Oleate로 표면 안정화된 ITO의 소수성 리간드-PET 간 친화성과 초음파에 의한 미세 침투/기계적 고정을 결합하여, 직물 고유물성을 훼손하지 않고 나노입자를 직물 내에 고정시키는 것이 핵심이다. 우리는 XRD를 통해 PET 고유 피크와 ITO 표지 피크의 동시 검출로 담지 여부를 확인하고, 표면 및 조성 균일성을 보조 검증하며, 세탁 전·후 XRD 비교로 세탁 견뢰성을 평가하였다. 더불어 솔라 시뮬레이터 기반 광열 보온 성능을 비교함으로써, 실제 의류 응용에서 기대되는 보온 기능의 유효성을 보여준다[13]. 이러한 결과는 PET과 같은 저표면에너지 합성직물에 대해, 장쇄 리간드로 둘러싸인 나노입자 기능화 경로를 제시한다는 점에서 학술적·실용적 의의가 있다.

2. 실험

2.1. 재료

바이오매스 유래 PET 직물(휴비스社 에코엔)를 1.5 cm×1.5 cm 크기로 절단하여 사용하였다. 니들 펀치는 lift66사의 마이크로 사이즈 제품을 사용하였다. Indium tin oxide (ITO) 나노입자를 합성하기 위한 indium acetyl acetate, tin bis (acetylacetate)dichloride, 2-ethyl hexanoic acid, dioctyl ether, oleic acid, oleylamine, toluene, ethanol은 Sigma Aldrich에서 구매하였다. 사용한 세탁 세제로는 가정에서 흔히 사용되는 액스 퍼펙트 실내건조 일반용 3.2 L 제품(피죤)을 사용하였다.

2.2. Indium tin oxide(ITO) 나노입자 합성

3구 플라스크에 Indium acetyl acetate 0.3147 g, tin bis (acetyl acetate) dichloride 0.0267 g, 2-ethylhexanoic acid 0.5192 g, oleylamine 2.6749 g, dioctyl ether 5 mL를 차례로 투입하였다. 300 rpm으로 교반하며 온도 컨트롤러로 25 °C에서 80 °C, 80 °C에서 1시간 degassing 후 150 °C까지 상승 후에 Ar으로 분위기를 바꿔준다. 이후 250 °C까지 온도를 올리고 5시간 동안 유지하였다. 반응 종료 후 oleic acid/oleylamine을 첨가하여 표면 안정화를 마치고, 냉각 후 반응액을 회수하였다. 세척은 toluene과 ethanol을 4000 rpm, 5분 조건으로 3회 원심분리로 하여 입자를 수득하였다. 수

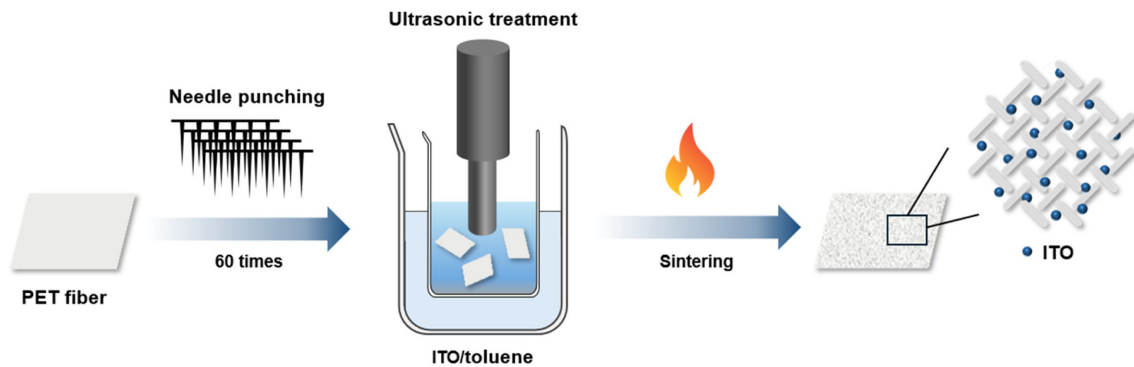


Figure 1. Schematic illustration of the experiments.

득한 입자는 toluene에 분산 후 보관하였다.

2.3. PET 직물 전처리 및 ITO 담지

1.5 cm×1.5 cm 크기로 절단된 PET 직물을 마이크로니들 (0.25 mm)로 60회 구멍을 뚫어서 needle punch된 PET 직물을 만들었다. Needle punch된 직물을 toluene에 10 mg/ml의 농도로 toluene에 분산된 ITO 용액에 담구고 40 °C에서 5초 구동과 5초 휴식을 반복하며 5분동안 초음파 처리를 진행한다. 초음파 세기는 20 kHz로 진행하였다. 이후 퍼니스에서 130 °C에서 1시간동안 열처리를 진행하였다(Figure 1).

2.4. ITO 담지 PET 직물 세탁

20 ml 바이알에 물 세탁용은 1차 증류수 10 ml, 세제 세탁용은 동일한 증류수에 4 g·l⁻¹ 농도로 세제를 용해하여 준비하였다. ITO 담지 PET 직물을 시료당 한 조각씩 각각의 용액에 넣고, 40 °C로 설정한 핫플레이트 상에서 30분 동안 교반하였다. 세탁 후 시료는 집게로 꺼내어 상온 1차 증류수로 신속히 행굼 세척을 실시하였으며, 이어 70 °C 머플 퍼니스에서 1시간 건조하였다. 동일 조건으로 시료별 세탁을 반복하여 후속 XRD·XRF 분석에 사용하였다.

2.5. 결과 분석

TEM, HR-TEM 이미지, EDS 분포는 Thermo Fisher Scientific Talos F200S(가속 전압 200 kV)를 사용하여 분석하였다. 나노입자의 결정구조 확인을 위한 XRD 패턴은 Bruker D2 Phaser(반사 모드, Cu-Kα 복사선, λ=0.1524 nm)를 사용하여 측정하였다. ITO 나노입자 담지를 위해 울트라소니케이션(SONOSMASHER, ULH700S) 사용하였다. 솔라 시뮬레이터(Solar simulator, xenon, 500 W)를 사용한 발열평가는 500 W 제논광원 솔라 시뮬레이터(출력 파장 350–1100 nm, 색온도 5,500 K, 가시광 출력 15,000 lm, 점등 전압 30 kV, 챔버 300×180×180 mm)를 사용하였다. ITO 담지량은 XRF 장비(Nayur NDA-200)의 thickness 모드를 사용하여 정량하였다. 관전압 50 kV, 관전류 500 μA, 측정시간 100 s 조

건에서 형광 X-ray 스펙트럼의 In Kα (24.137 keV) 피크를 정량 신호로 사용하였다. ITO가 담지된 PET 직물을 시료당 한 조각씩 측정 위치에 안착하여 3회 반복 측정 후 평균값으로 막두께를 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 나노입자 분석

본 연구에서 ITO 나노입자를 합성하는 과정은 액체질소 트랩을 구비한 진공 라인으로 충분한 degassing을 수행하여 용존 산소·수분을 제거하였다. 이는 초기 핵생성 단계에서의 산화·가수분해 부반응을 억제하고, 입도 분포의 재현성을 확보하기 위함이다. 이후 교반 상태에서 단계 가열을 통해 150 °C까지 승온한 시점에 반응계를 Ar 분위기로 전환함으로써 환원·성장 환경을 안정화하였으며, 250 °C에서 5 h 유지하여 결정성 및 도핑 균일성을 확보하였다. 반응 종료 시 oleic acid/oleylamine을 추가하여 표면 리간드를 oleic acid로 교체하였다. 급속냉각을 진행하여 후반부 부반응을 최소화하였다.

합성 원액은 저분자 성분을 제거하기 위해 무극성, 극성 용매의 상분리 세척을 적용하였다. 먼저 toluene으로 분산시켜 입자 간 응집을 방지한 후, ethanol을 1:3 (v/v) 비율로 가하여 3 min 초음파 처리하였다. 이어 4000 rpm, 5 min의 원심분리로 침전된 ITO를 재분산하는 과정을 3회 반복하여 표면 세척을 완료하였다. 이후 toluene에 10 mg/ml의 농도로 분산시켜 보관하였다.

이렇게 합성된 나노입자를 본 연구에서는 PET 직물 표면에 Indium tin oxide(ITO) 나노입자를 담지하기 위한 기반 단계로서, 합성된 ITO 나노입자의 구조적·조성적·광학적 특성을 종합적으로 평가하였다. TEM 분석 결과, ITO 나노입자는 균일한 구형 형태를 유지하며 응집 없이 분산된 상태로 관찰되었으며(Figure 2(a)), 평균 직경은 약 15.36 nm로 측정되었다(Figure 2(b)). 또한 합성된 ITO의 국소 표면 플라즈몬 공명(LSPR) 피크가 근적외선(NIR) 영역,

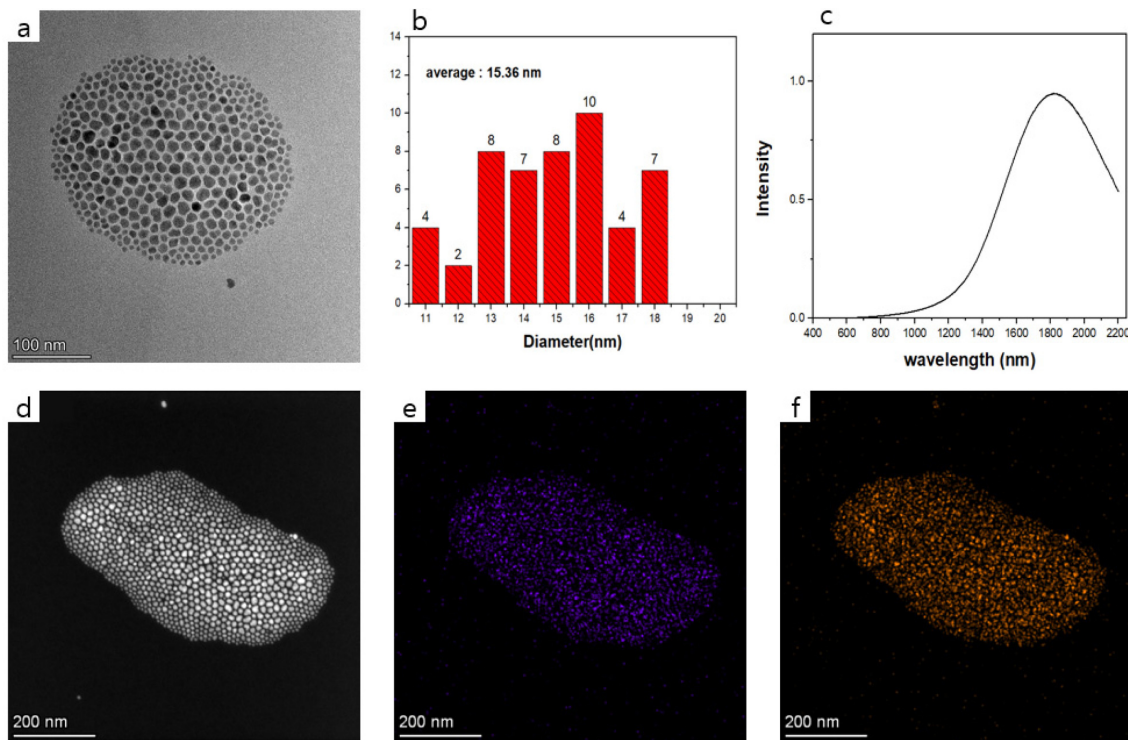


Figure 2. Morphology, size, optical response, and elemental distribution of ITO nanoparticles; (a) TEM image of ITO nanoparticles, (b) size histogram, average size is 15.36 nm, (c) UV-Vis-NIR extinction showing an NIR LSPR band, (d) HAADF-STEM image of ITO nanoparticles, and (e, f) corresponding EDS maps for In and Sn. Indium and tin atoms are uniformly distributed.

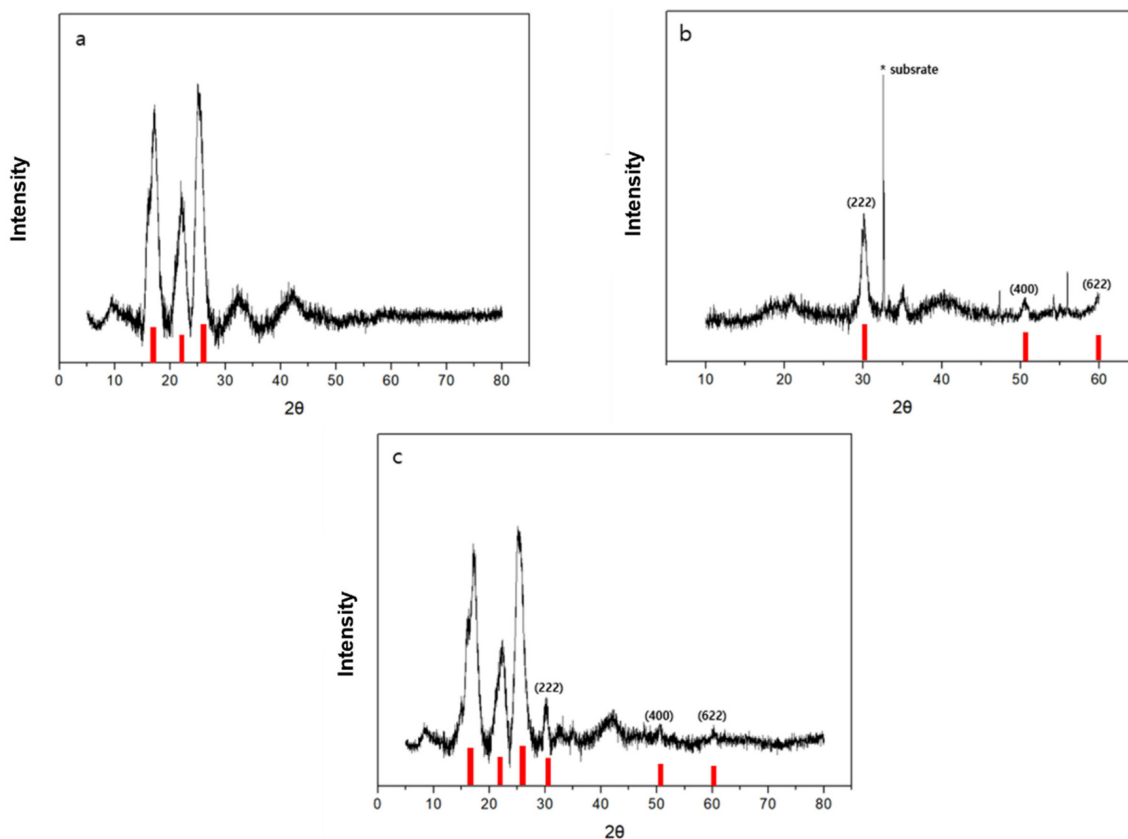


Figure 3. XRD patterns of (a) PET textile, (b) ITO nanoparticles, and (c) ITO-loaded PET textiles (Reference peaks shown as red bars).

1600에서 2000 nm 근처에서 명확하게 확인되었으며(Figure 3(c)), 이는 전도성 산화물 나노입자로서 기대되는 자유전자 기반 광학 응답이 충분히 발현되고 있음을 의미한다. 더불어 EDS 매핑 결과를 통해 In 및 Sn 성분이 입자 전체에 균일하게 분포하는 것이 확인되어(Figure 3(d-f)), 합성된 ITO 나노입자가 조성적으로 안정적임을 확인하였다.

또한 oleic acid가 리간드로 부착된 ITO 입자는 PET의 소수성 표면과 잘 결합할 것으로 예측되며 초음파 기반 물리적 충격에 의한 분산 안정성이 우수하여, 직물 기공 내부 및 표면 구조로의 침투가 용이할 것으로 기대된다. 따라서 본 연구에서 확보한 고품질 ITO 나노입자 특성은 이후 PET 직물 기반복합소재 제조의 핵심 전단계로서 충분한 적합성을 갖는 것으로 확인하였다.

3.2. PET 직물에 ITO 나노입자 담지확인

PET 직물을 1.5 cm×1.5 cm로 절단한 뒤 마이크로니들을 이용해 시편당 총 60회의 펀치를 균일 분포로 가하여 needle punch 처리된 시편을 준비하였다. ITO 나노입자는 톨루엔에 10 mg mL⁻¹로 분산하여 사용 직전에 가볍게 예비 초음파 분산하였다. 준비된 시편을 20 ml 바이알에 담긴 ITO 분산액에 완전히 침지하고, 공칭 20 kHz의 초음파 기기를 이용해 5초 구동과 5초 휴식 모드로 총 5분간 처리하였다. 처리 동안 프로브는 시편 및 용기 벽과 접촉하지 않도록 용액 상부에 고정하였고, 용액은 실온에서 유지하였다. 초음파 처리 직후 시편을 꺼내어 과잉 용액을 제거하고, 후속 세척/건조 과정을 수행하였다.

Figure 3(a)는 기준 시료인 순수 PET 직물의 XRD 패턴으로, 16–18°, 22–24°, 25–27° 부근의 2θ peak이 뚜렷하게 관찰된다. 이는 문헌상의 α-상 PET (010)/(100), (110), (010/110)면에 대응한다. 본 패턴은 이후 복합체의 결정구조 보존 여부를 판단하기 위한 기준선으로 사용하였다. Figure 3(b)는 합성된 ITO 나노입자의 레퍼런스 패턴으로, 30.5°의 (222)면이 주피크로 관찰되고, 고각부에 (400), (622)면에 해당하는 피크가 나타난다. 이는 In₂O₃의 bixbyite 격자

를 갖는 결정성 ITO가 형성되었음을 확인할 수 있다.

이러한 순수 PET 직물과 순수 ITO 나노입자의 XRD 피크 해석을 바탕으로 ITO가 담지된 나노입자의 XRD 패턴을 분석해보았다. Figure 3(c)에서는, 초음파 담지 공정을 거친 ITO 담지 PET 복합직물에서 PET 고유 피크(2θ=16–18°, 22–24°, 25–27°)의 위치가 변하지 않은 채 ITO의 표지 피크인 (222), (400), (622)이 동시에 검출된다. 피크 위치가 변하지 않았다는 것은 담지 과정에서 PET 결정격자에 구조적 변형이나 상전이가 일어나지 않았음을 의미한다. 또한 ITO 고유 피크의 검출은 ITO 결정상이 직물 시편 내에 실제로 존재함을 직접적으로 입증한다. PET 피크의 위치 보존과 ITO 표지 피크의 동시 검출은 바인더나 플라즈마 처리 없이도 초음파 담지 만으로도 PET 직물에 ITO 나노입자가 담지된 구조가 형성되었음을 나타낸다.

3.3. 담지 전 후의 PET 직물표면

광학현미경 관찰을 통해, 니들펀칭 및 초음파 담지 공정은 나노입자가 침투할 수 있을 정도의 국소적인 기공과 간극을 형성하지만, 직물 다발의 전체 미세구조에는 뚜렷한 손상을 야기하지 않는 것을 확인할 수 있었다(Figure 4). 먼저, 원래의 PET 직물(Figure 4(a))과 니들펀칭만 수행한 시편(Figure 4(b))을 비교하면, 다발 간 패킹 상태는 거의 동일하게 유지되면서, 일부 교차 지점 필라멘트 사이에만 미세한 틈과 관통공이 관찰된다. 이러한 구조적 변화는 ITO 나노입자의 침투·고정을 돕기 위한 최소한의 통로를 제공할 뿐, 벌크 직물조직을 약화시키는 수준의 손상은 아닌 것으로 판단된다. 초음파를 이용해 ITO를 담지한 시편(Figure 4(c))에서도 필라멘트 다발의 윤곽과 배열은 전·후 공정에 걸쳐 큰 차이가 없으며, 직물 표면에 미세한 점상 명암 변화가 나타날 뿐 직물 단면의 찢김이나 과도한 풀림 현상은 관찰되지 않는다. 즉, 실험 조건에서 니들펀칭과 초음파 담지는 PET 직물의 원래 직조·편성 구조를 유지하면서, 나노입자 침투에 필요한 국소 기공만을 선택적으로 부여하는 과정으로 볼 수 있다.

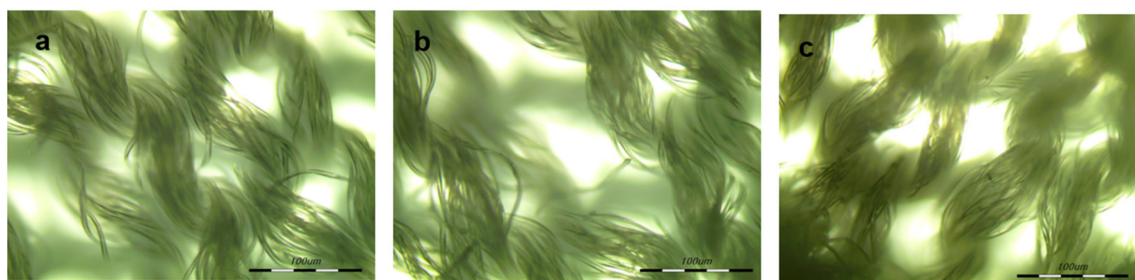


Figure 4. Optical micrography images of PET textiles under different treatments; (a) original PET, (b) needle-punched PET, (c) ITO nanoparticle-incorporated PET through needle punching and ultrasonication.

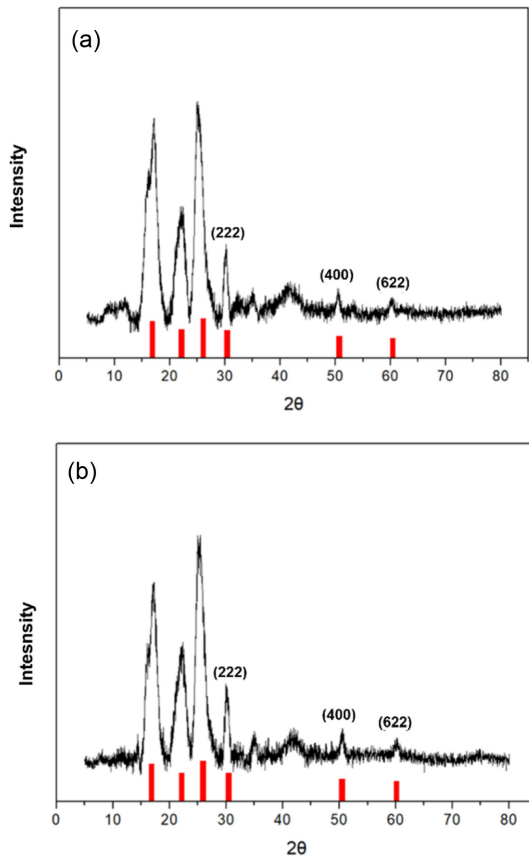


Figure 5. XRD patterns of ITO-loaded PET textiles after washing with (a) pure water and (b) detergent. Reference peaks are shown as red bars.

3.4. 세탁 견뢰도

세탁 견뢰도는 세탁 전후 모두에서 ITO 결정상의 표지 피크가 PET 피크와 함께 같은 위치에 존재하는지로 판단하였다. 우선 PET의 고유 반사는 이차원 회절각 $16\sim 18^\circ$, $22\sim 24^\circ$, $25\sim 27^\circ$ 영역에 나타난다. 세탁 후에도 이 세 구간의 피크 위치가 변하지 않으면 PET 결정격자가 보존된 것으로 본다. 동시에 ITO의 표지 피크는 30.5° 부근의 (222) 반사와 (400), (622) 반사로 확인한다. 세탁 후에도 이 피크들이 남아 있으면 ITO 결정상이 시편에 잔존하는 것으로 해석하였다.

세탁 후 상 보존 결과, 물 세탁 시편과 세제 세탁 시편 모두에서 PET의 세 구간 피크는 동일한 위치에 유지되었다. 이는 세탁 과정이 PET의 결정 구조를 변형하지 않았음을 뜻한다. 두 시편 모두에서 ITO의 (222) 피크가 뚜렷하게 관찰되었고, (400)과 (622) 피크도 고각 영역에서 확인되었다(Figure 5(a,b)). 따라서 세탁 후에도 ITO 결정상이 실제로 존재한다고 판단하였다.

세제 세탁 시편은 물 세탁 시편에 비해 ITO (222) 피크의 상대 강도가 약간 낮아지는 경향이 있었다. 그러나 피크의 존재와 선폭은 유지되었다. 이는 세탁 과정에서 느슨

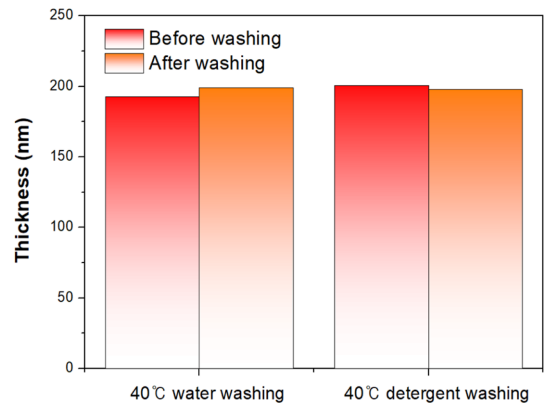


Figure 6. Indium thicknesses change obtained by X-ray fluorescence (XRF) of ITO nanoparticle-incorporated PET textiles before and after washing at 40°C (left) with pure water and (right) detergent solution.

하게 부착된 미세 응집체가 일부 제거되어 상대 강도만 소폭 감소한 것으로 볼 수 있다. 반면, 견고하게 고정된 영역의 ITO는 잔존하여 피크가 계속 검출된다. 세탁 전후 비교에서 PET 고유 피크 위치의 보존과 ITO 표지 피크의 동시 검출이 반복적으로 확인되었으므로, XRD만으로도 ITO 담지층이 세탁 후에도 유지된다는 것을 알 수 있다.

세탁 후에도 ITO 나노입자가 잔존함을 정밀하게 분석하기 위해 X-ray fluorescence (XRF) 분석을 진행하였다. XRF는 시료 내부의 원소를 파악할 수 있는 방법으로 시료에 조사된 특정 형광 X선의 세기 정보를 통해 원소의 존재와 농도를 알 수 있는 방법이다. 이 실험을 위해 측정된 XRF는 인듐의 평균 두께를 제공한다. 즉 세척 후 인듐의 두께가 얇아진다면 세척 과정에서 ITO 나노입자가 씻겨나가는 것으로 세척할 수 있다.

물 세탁의 경우 XRF로 얻은 인듐의 검출 두께가 세탁 전 약 190 nm 수준에서 세탁 후 약 $195\sim 200\text{ nm}$ 범위로 크게 달라지지 않음을 확인할 수 있다(Figure 6). 미세한 두께의 증가는 측정 위치가 달라짐에 따른 오차로 생각되어진다. 세제 세탁의 경우에도 세탁 전·후가 모두 200 nm 전후에서 유지되어, 두 조건 모두에서 ITO 층이 세탁 과정 동안 대량으로 제거되지는 않았음을 시사한다. 즉, 세탁 후에도 형광 X선으로 감지되는 평균 막 두께가 유지된다는 점에서, ITO가 전면적으로 박리되거나 완전히 탈락하는 현상은 발생하지 않았다고 볼 수 있다.

다만, XRF 두께 모드는 평탄하고 균질한 연속 박막을 가정한 모델에 기반하고 있어, 거칠고 다공성인 직물 기질에서 세탁견뢰도를 정밀하게 평가하는 데에는 근본적인 한계가 있다[14]. 따라서 Figure 6의 결과는 세탁 후에도 ITO가 거시적으로는 유지된다는 정성적 근거를 제공할 뿐, 나노스케일 박리나 국부적인 손상 여부를 단독으로 판별하기에는 부족하며, 반드시 XRD 피크 강도 변화, 표면·단면 관찰

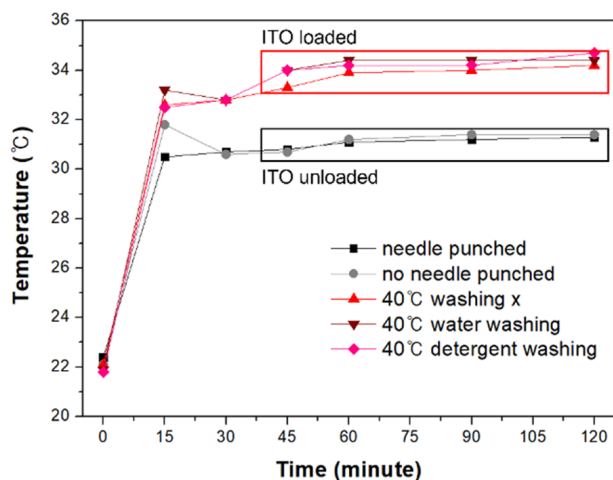


Figure 7. Time-temperature profiles under xenon irradiation (500 W) for PET textiles. Curves show surface temperature and time: (black) original PET textile (gray) needle punched PET textile (red) ITO loaded PET textile, (wine) ITO-loaded PET textile water-washed, (pink) ITO-loaded PET textile detergent-washed.

등의 다른 세탁견뢰도 지표와 함께 종합적으로 해석할 필요가 있다[15].

3.5. ITO 나노입자가 담지된 PET织물의 보온특성

ITO 나노입자가 담지된 PET织물을 500 W 제논 솔라 시뮬레이터(350–1100 nm) 조사 하에서 시간에 따른 직물 표면 온도 변화를 추적하여 광열 성능을 비교하였다. 비교군은 ITO 미담지 상태에서 니들펀칭 처리 유무에 따라 두 가지로 구성하였고, 실험군은 40 °C에서 초음파로 ITO를 담지한 후 무세탁, 물 세탁, 세제 세탁의 세 조건으로 구성하였다. 모든 시험은 초기 온도 약 22 °C 부근에서 시작하여 120분까지 기록하였다.

Figure 7에서 ITO 미담지 두 대조군은 120분 시점에 31.3–31.4 °C로 수렴하였으며 초기 15분 동안 구간의 초기 가열 속도는 각각 22.4 °C에서 30.5 °C, 22.1 °C에서 31.8 °C로 환산 시 약 0.54–0.65 °C·min⁻¹ 범위를 보였다.

ITO 담지 시험은 모든 경우에서 초기 가열 속도와 정상 상태 온도 상승이 뚜렷하게 증가하였다. 무세탁 시험은 초기 15분 동안 22.1 °C에서 32.6 °C로 상승하여 약 0.70 °C·min⁻¹의 초기 가열 속도를 보였고, 120분에는 34.2 °C에 도달하였다. 물 세탁 시험은 21.9 °C에서 33.2 °C 초기 15분에서 약 0.75 °C·min⁻¹의 더 빠른 속도를 보였으며 최종 온도는 34.4 °C였다. 세제 세탁 시험은 초기 15분 동안 21.8 °C에서 32.5 °C로 약 0.71 °C·min⁻¹의 속도를 나타내고 34.7 °C까지 상승하였다.

초기값을 기준으로 한 120분 시점의 온도 상승량은 대조군이 8.9–9.3 °C인 반면, ITO 담지군은 무세탁 +12.1 °C, 물 세탁 +12.5 °C, 세제 세탁 +12.9 °C로 약 3 °C 내외의 추가

상승을 보였다. 이러한 결과는 ITO가 근적외선 영역에서 나타내는 국소 표면 플라즈몬 공명(LSPR)에 의해 조사광이 효율적으로 열로 전환되기 때문이며, 세탁 후에도 광열 기능이 유지됨을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 바이오유래 PET织물에 마이크로 니들 펀칭과 초음파 담지를 결합한 단순 공정을 통해, 별도의 플라즈마 처리나 고분자 바인더 없이도 ITO 나노입자를 직물 내부와 표면에 균일하게 고정할 수 있음을 확인하였다. 합성된 ITO 나노입자의 특성을 TEM을 통해 확인하였고, LSPR 특성을 나타냈으며, XRD 분석에서 PET 고유 피크와 ITO 특이 피크가 동시에 유지됨을 통해 담지 공정이 PET 결정구조를 손상시키지 않은 채 상 공존 구조를 형성함을 확인하였다. 또한 세탁 전·후 비교에서 물 및 세제 세탁 후에도 ITO 피크가 유지되고, 솔라 시뮬레이터 하에서 ITO 담지 시험의 초기 가열 속도 및 정상 상태 온도가 대조군 대비 약 3 °C 향상됨을 통해, ITO 기반 광열 기능이 실세탁 조건에서도 유지되는 내세탁성을 가짐을 확인하였다. 이러한 결과는 NIR 흡수 나노입자를 이용한 self-heating 직물 연구 흐름과 맞물려, PET织물에서 내세탁성·보온성을 동시에 확보할 수 있는 실용적 기능성 직물 제조 방법을 제시한다는 점에서 의의가 있다[16].

감사의 글: 이 논문은 2025년도 교육부 및 서울특별시의 재원으로 서울RISE센터의 지원을 받아 수행된 서울시 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과물입니다(2025-RISE-01-020-04). 또한 이 연구는 대한민국 정부의 재원으로 한국산업기술평가원(RS-2025-02263144) 및 한국에너지기술평가원(RS-2024-00398166)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

1. S.-H. Park and S.-H. Kim, “Poly(ethylene terephthalate) Recycling for High Value Added Textiles”, *Fashion and Textiles*, 2014, **1**, 1.
2. T. M. Joseph, S. Azat, Z. Ahmadi, O. M. Jazani, A. Esmaeili, E. Kianfar, J. Haponiuk, and S. Thomas, “Polyethylene Terephthalate (PET) Recycling: A Review”, *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2024, **9**, 100673.
3. C. Riccardi, R. Barni, E. Selli, G. Mazzone, M. R. Massafra, B. Marcandalli, and G. Poletti, “Surface Modification of Poly(ethylene terephthalate) Fibers Induced by Radio Frequency Air Plasma Treatment”, *Applied Surface Science*, 2003, **211**, 386–397.
4. T. Kasahara, S. Shoji, and J. Mizuno, “Surface Modification of Polyethylene Terephthalate (PET) by 172-nm Excimer Lamp”,

- Transactions of the Japan Institute of Electronics Packaging*, 2012, **5**, 47–54.
5. A. Ojstršek and D. Fakin, “Washing Durability and Photostability of nanoTiO₂-SiO₂ Coatings Exhausted onto Cotton and Cotton/Polyester Fabrics”, *Coatings*, 2019, **9**, 545.
 6. Z. Li, Y. Dong, B. Li, P. Wang, Z. Chen, and L. Bian, “Creation of Self-cleaning Polyester Fabric with TiO₂ Nanoparticles via a Simple Exhaustion Process: Conditions Optimization and Stain Decomposition Pathway”, *Mater. Des.*, 2018, **140**, 366–375.
 7. D. Essa, “Recent Techniques of Surface Modification for Textile Fabrics”, *J. Measurement Science and Applications*, 2024, **4**, 66–87.
 8. M. Drobotă, C. M. Damian, L. Marin, and M. Butnaru, “Surface Modification of Polyethylene Terephthalate Films in Air Plasma: Wettability, Aging and Morphology”, *Applied Surface Science*, 2019, **487**, 1237–1246.
 9. R. Agarwal, M. Jassal, and A. K. Agrawal, “Durable Functionalization of Polyethylene Terephthalate Fabrics Using Metal Oxides Nanoparticles”, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, **615**, 126223.
 10. S. Farooq, S. Ahmad, A. Hussain, and M. Hussain, “Durable Multifunction Finishing on Polyester Knitted Fabric by Applying Zinc Oxide Nanoparticles”, *Pigment & Resin Technology*, 2025, **54**, 1006–1015.
 11. J. Feng, Z. Zhang, Y. Zhang, and H. Wang, “Clean Preparation of Washable Antibacterial Polyester Fiber by High-Temperature and High-pressure Hydrothermal Self-assembly of Ag Nanoparticles”, *Nanotechnol. Rev.*, 2021, **10**, 1740–1751.
 12. A. Mazzotta, A. Gabbani, M. Carlotti, M. Ruggeri, E. Fantechi, A. Ottomaniello, F. Pineider, A. Pucci, and V. Mattoli, “Invisible Thermoplasmonic Indium Tin Oxide Nanoparticle Ink for Anti-counterfeiting Applications”, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, **14**, 35276–35286.
 13. Y.-E. Woo and K. W. Oh, “Fabrication of Polyester Fabrics with Tungsten Bronze Nanorods and a Silane Coupling Agent for Improved Thermal Storage and Washing Durability”, *Fashion and Textiles*, 2023, **10**, 1.
 14. C. Vogt and R. Dargel, “Determination of Layer Thickness with μ XRF”, *Applied Surface Science*, 2005, **252**, 53–56.
 15. J. Ran, M. He, W. Li, D. Cheng, and X. Wang, “Growing ZnO Nanoparticles on Polydopamine-Templated Cotton Fabrics for Durable Antimicrobial Activity and UV Protection”, *Polymers*, 2018, **10**, 495.
 16. L. A. Wijenayaka, R. N. Wijesena, N. D. Tissera, W. R. L. Nisansala Bandara, G. J. Amaratunga, and K. M. N. De Silva, “Infrared Absorbing Nanoparticle Impregnated Self-heating Fabrics for Significantly Improved Moisture Management under Ambient Conditions”, *R. Soc. Open Sci.*, 2021, **8**, 202222.