

# 투명 전도막의 산업화를 위한 공정 최적화

남현빈\*, 최요석\*\*, 김인수\*\*, 김경준\*\*, 박성수\*\*, 이자현\*\*\*  
순천향대학교 전자재료소자장비융합공학과\*, (주)한엘 연구소\*\*, 순천향대학교 융합바이오화학공학과\*\*\*

## Process Optimization for the Industrialization of Transparent Conducting Film

Nam, Hyeon-bin\*, Choi, Yo-seok\*\*, Kim, In-su\*\*, Kim, Gyung-jun\*\*,  
Park, Seong-su\*\*, Lee, Ja Hyun\*\*\*

Dept. of Electronic Materials, Devices, and Equipment Engineering, Soonchunhyang University\*,  
R&D Team, Hanel Co., Ltd.\*\*,  
Dept. of Convergence Bio-Chemical Engineering, Soonchunhyang University\*\*\*

**요약** 급변하는 정보화 사회에서는 스마트폰과 태블릿을 비롯한 다양한 전자기기가 더욱 디지털화되고 플렉시블 디스플레이와 같은 고성능을 갖추며 발전하고 있다. 본 연구에서는 경제적 절감을 위한 플렉시블 디스플레이의 고가 소재를 대체하는 전도성 고분자인 PEDOT과 투명 기판인 PET를 적용한 TCF의 제조 공정 최적화를 진행하였다. PEDOT 코팅을 이용한 TCF 생산 공정에서 주요 변수인 생산 속도 (m/min), 코팅 최고 온도 (°C), PEDOT 공급 속도 (rpm)에 따른 표면 저항률 ( $\Omega/\square$ )을 반응표면분석법을 사용하여 최적화하였다. 결과적으로, 생산 속도 22.16 m/min, 코팅 최고 온도 125.28 °C, PEDOT 공급 속도 522.79 rpm으로 최적 조건을 도출했다. F 값은 18.37, P-값은 < 0.0001, 결정계수( $R^2$ )는 0.9430으로 결과의 신뢰성이 높음을 확인했다. 최적 조건에서의 예측값은 145.75  $\Omega/\square$ 이며, 실험값은 142.97  $\Omega/\square$ 이었다. 이 연구 결과를 기반으로 대량 생산 공정에 적용하면 기존의 생산 수율 보다 높은 수율을 달성하고 불량 발생률을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

**주제어** 플렉시블 디스플레이, 폴리에틸렌 디옥시티오펜, 폴리에틸렌 테레프탈레이트, 투명 전도막, 공정 최적화

**Abstract** In the rapidly advancing information society, electronic devices, including smartphones and tablets, are increasingly digitized and equipped with high-performance features such as flexible displays. This study focused on optimizing the manufacturing process for Transparent Conductive Films (TCF) by using the cost-effective conductive polymer PEDOT and transparent substrate PET as alternatives to expensive materials in flexible display technology. The variables considered are production speed (m/min), coating maximum temperature (°C), and PEDOT supply speed (rpm), with surface resistivity ( $\Omega/\square$ ) as the response parameter, using Response Surface Methodology (RSM). Optimization results indicate the ideal conditions for production: a speed of 22.16 m/min, coating temperature of 125.28°C, and PEDOT supply at 522.79 rpm. Statistical analysis validates the reliability of the results (F value: 18.37, P-value: < 0.0001,  $R^2$ : 0.9430). Under optimal conditions, the predicted surface resistivity is 145.75  $\Omega/\square$ , closely aligned with the experimental value of 142.97  $\Omega/\square$ . Applying these findings to mass production processes is expected to enhance production yields and decrease defect rates compared to current practices. This research provides valuable insights for the advancement of flexible display manufacturing.

**Key Words** Flexible displays, Polyethylene dioxythiophene (PEDOT), Polyethylene terephthalate (PET), Transparent conductive films (TCF), Process optimization

본 연구는 조기취업형 계약학과 선도대학 육성사업과 순천향대학교 학술연구비 지원을 받아 수행하였음

Received 12 Jan 2024, Revised 19 Jan 2024

Accepted 23 Jan 2024

Corresponding Author: Ja Hyun Lee  
(Soonchunhyang University)

Email: jhlee84@sch.ac.kr

ISSN: 2466-1139(Print)

ISSN: 2714-013X(Online)

© Industrial Promotion Institute. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

급변하는 정보화 사회에서 컴퓨터와 다양한 가전기기 및 통신장치가 더욱 디지털화되고 고성능을 갖추며 발전하고 있다[1,2]. 이로 인해 대화면 및 휴대용 디스플레이의 구현이 더욱 절실히 요구되고 있다[3]. 이미 LCD(liquid crystal digital), PDP(plasma display panel) 등을 비롯한 첨단 디스플레이 기술은 20세기에 주류를 이루었던 CRT(cathode-ray tube) 모니터, TV 등의 기존 시장을 대체하는 데에 성공하면서 동시에 노트북, 스마트폰, 태블릿 등의 혁신적인 제품을 새롭게 선보이며 시장을 더욱 확장하고 있다[4,5]. 뿐만 아니라, 미래 사회에서는 디지털 네트워크를 통해 언제 어디서든 대규모의 다양한 정보를 시간과 공간에 제약받지 않고 서버나 네트워크에 접속하여 이용하는 시대가 도래할 것으로 전망된다. 이로써 정보화 기기의 개인화 및 네트워크화가 더욱 가속화되어 다양한 형태의 혁신적인 기술과 서비스가 등장할 것으로 예상된다.

특히, 휴대용 디스플레이, 차세대 두루마리 디스플레이, 광고판, 홍보물 등의 일회용 디스플레이가 요구되는 응용분야에서는 기존의 디스플레이와는 다른 혁신적인 차세대 디스플레이의 출현이 필수적이다. 이러한 새로운 흐름 가운데, 이동통신 분야에서는 가볍고 휴대성이 뛰어나면서도 대화면이고 고효율 성능을 갖춘 플렉시블 디스플레이가 주목받고 있다[6]. 다양한 기업과 연구소에서 플렉시블 디스플레이에 관한 연구와 개발을 진행하고 있으며, 시장에서도 플렉시블 디스플레이를 적용한 제품들이 상용화되고 있다. 다만, 플렉시블 디스플레이가 대중적으로 보급되기 위해서는 생산 공정의 안정성과 원가 문제 등 여러 과제들이 여전히 존재하고 있다[7-10].

최근 플렉시블한 디스플레이는 물론, 신체에 Motion을 감지하는 센서와 같이 웨어러블한 디바이스에 적용하기 위해 투명 전도막(Transparent Conducting Film), 즉 TCF에 대한 연구가 진행되고 있다. 이러한 TCF기반의 디바이스는 휘거나 구부릴 수 있을 뿐 아니라, 신축성을 가지고 있어 외부 충격에 강하다는 장점을 가지면서도 기존의 투명전극필름이 요구하는 전기적, 광학적 특성을 만족한다[11]. 플렉시블 투명 전극은 기계적으로 유연하면서도 고전도율(표면저항  $100 \Omega/\text{sq}$ . 이하), 우수한 광투과율(투과율 85% 이상), 고밀착성, 고내열성, 표면 평활

성 및 가공성 등의 특성을 가져야 한다[12]. 이에 인듐 주석 산화물(Indium Tin Oxide, ITO)은 90% 이상의 광 투과율에서  $30 \Omega/\text{sq}$ . 이하의 낮은 면 저항을 가지며, 상온에서 안정한 산화물로 존재한다는 장점을 가지고 있어 매트릭스 구동방식의 평판 디스플레이의 소재로 주로 사용되었다[13]. 하지만, ITO는 희귀금속이기 때문에 시장 가격이 불안정하고, 고온, 고 진공의 스퍼터증착 과정을 거치기 때문에 생산 단가가 높다. 무엇보다도 스트레처 불한 기관에서의 접착력이 떨어지고, 취성을 가지고 있어 쉽게 깨진다는 특성은 스트레처블 디바이스의 투명전극소재로 사용하기에 치명적인 단점으로 작용할 수 밖에 없다[14].

현재 전도성 고분자인 폴리피롤(Polythiophene), 폴리아닐린(Polyaniline), 폴리티오펜(Polythiophene), 폴리에틸렌디옥시티오펜(Poly(3,4-ethylenedioxythiophene), PEDOT)과 같은 대체 소재를 중점적으로 다루고 있다. 이러한 전도성 고분자들은 뛰어난 전기 전도도와 열적 안정성으로 주목받아왔다[15]. 이러한 고분자들은 다양한 응용 분야에서의 활용을 목표로 많은 연구가 진행되고 있으며, 주요 응용 목표로는 배터리, 콘덴서, 전기 변색 디스플레이, 생화학 센서 등이 있다. 전도성 고분자의 물성을 개선하기 위해 다양한 유도체의 합성 연구가 진행되고 있다. 이 중에서도 PEDOT은 높은 화학적 안정성과 전기 화학적 특성으로 인해 많은 연구가 이루어지고 있다. PEDOT은 전기 화학적으로 합성될 때 약  $2.0 \text{ eV}$ 의 band gap을 가진다. 이로 인해 PEDOT은 거의 투명한 상태이며, 도핑된 상태에서는 가시광 영역에서 우수한 전기 광학 특성을 나타낸다. 또한, 도핑된 PEDOT의 전도도는 약  $200 \text{ s/cm}$ 로 매우 뛰어나며, 온도와 빛에 대한 안정성 또한 우수하다[16]. 그러나 PEDOT의 합성 수율이 낮고 가공성이 떨어진다는 단점이 있다.

플렉시블한 디스플레이 고분자 기관은 디스플레이 패널에 사용되는 유연하고 휘어질 수 있는 기관 소재를 의미한다. 이러한 플렉시블한 기관은 디스플레이 장치의 구부러짐, 굽힘, 접힘 등과 같은 형태 변화에 적응하여 다양한 형태의 디스플레이를 제작하는 데 사용된다. 이 기술은 주로 고분자 소재를 기반으로 하며, 주로 사용되는 플라스틱 소재로는 폴리에틸렌테레프탈레이트(Polyethylene terephthalate, PET), 폴리우레탄(Polyurethane), 폴리아미드(Polyamide) 등이 있다. 특히, PET는

유연하면서도 투명하며 가벼운 특성을 가진 고분자 소재로, 디스플레이 산업에서 널리 사용된다[17].

본 연구의 플렉시블한 디스플레이의 성공적인 산업화를 위해서는 TCF의 안정적인 생산이 중요한 과제로 부각되고 있다. 현재의 TCF 소재로는 ITO이 주로 사용되어 왔지만, 회귀금속인 ITO의 시장가격 불안정성과 생산과정의 높은 비용, 스트레처블한 기판에서의 적합성 등으로 인해 여전히 제약사항이 존재한다. 새로운 대안으로써 전도성 고분자인 PEDOT과 같은 소재가 주목받고 있다[18]. PEDOT은 높은 화학적 안정성과 우수한 전기화학적 특성을 가지고 있어 유망한 대체 소재로 평가되고 있다. 그러나 PEDOT의 단점 중 합성 수율이 낮고 가공성이 떨어진다는 점이다. 또한, 플렉시블한 기판으로 널리 사용되는 PET와 같은 고분자 소재를 기반으로 한 플렉시블한 디스플레이의 기판을 사용함으로써 생산 및 가격 문제를 해결할 수 있다[19]. 이와 같은 대체 소재의 도입과 플렉시블한 기판의 선택은 TCF 생산의 안정성과 원가 문제를 해결하는데 기여할 것으로 기대된다[20]. 다만 가공성의 단점이었던 PEDOT이 PET 기판에 증착되기 위한 조건들을 최적화하고, 연구결과를 산업화 공정에 적용한다면 TCF 생산 기술의 보다 안정적인 발전과 상용화가 가능해질 것으로 기대된다.

## 2. 실험방법

### 2.1 재료 및 장비

PEDOT(poly(3,4-ethylenedioxythiophene))(SKC), PET(polyethylene terephthalate) 필름, 교반기, 건조 오븐, 자동코터기((주)기베이엔티, KP-3000), Bar Coater (RDS#22, 1/2"), 표면 저항 측정기(MCP-T370, Mitsubishi), 헤이즈 미터기(COH 5500, Nippon Denshoku).

### 2.2 전도성 코팅액 제조

TCF 전도성 코팅액 제조를 위해 PEDOT 소재의 코팅 재료인 주제 A-pack과 첨가제 B-pack을 온도 상온, 교반속도 600 rpm, 배합 비율 1:1 그리고 교반 시간 30 min 조건에서 교반을 진행한다.

### 2.3 코팅 및 건조

기반으로 사용되는 PET 필름은 자동 코터기 상판의 사이즈와 동일하게 재단하여 준비하고, 재단된 필름을 자동 코터기에 올린다. 바코터 고정부에 무게추를 달아 단단히 고정시키고, 교반이 완료된 코팅제를 바코터 앞쪽 필름 위에 도포한다. 코팅 속도는 30 mm/s로 설정하여 코팅을 진행하고, 코팅이 완료되면 온도 120 °C/1.5 min 조건의 건조 오븐에서 건조한다.

### 2.4 분석

코팅이 완료된 TCF는 상온에서 24 h동안 안정화를 진행하고, 표면저항 측정기를 이용하여 표면 저항률을 분석한다. 프로브 타입은 ASP 프로브를 사용하고, 측정단위는  $\Omega/\square$  ( $\Omega/\text{sq.}$ ) 단위로 설정하여 측정한다. 투과율(%)은 헤이즈 미터기를 이용하여 분석한다.

### 2.5 최적화 조건

PEDOT으로부터 TCF 최적 코팅 조건을 결정하기 위해 반응표면분석법(Response surface methodology, RSM)의 D-optimal design을 사용하였다. PET에 PEDOT 코팅에 영향을 미치는 독립 변수로 생산 속도 ( $x_1$ ), 코팅 최고 온도 ( $x_2$ ), PEDOT 공급 속도 ( $x_3$ )가 선택되었으며(Table 1), Response는 표면저항률 ( $\Omega/\square$ )이다. Response에 영향을 주는 변수 간의 관계를 다음 2차 방정식을 이용하여 추정하였다.

여기서 Y는 종속 변수,  $x_i$ 와  $x_j$ 는 독립 변수,  $\beta_0$ 는 오프셋 항,  $\beta_1$ 는 1차 모델 계수,  $\beta_{ii}$ 는 변수 i에 대한 2차 모델 계수,  $\beta_{ij}$ 는 변수 i와 j 사이의 상호작용에 대한 선형 모델 계수이다. 실험 설계, 회귀 방정식 계수의 추정 및 데이터의 회귀 분석은 Design-Expert 7 소프트웨어를 사용하여 수행되었다[21].

<Table 1> 반응표면분석법(RSM)의 추출 factor와 level

Factor	Units	Symbol	Low level	High level
생산 속도	m/min	$x_1$	10	30
코팅 최고 온도	°C	$x_2$	110	130
PEDOT 공급 속도	rpm	$x_3$	500	600

### 3. 연구의 결과

#### 3.1 TCF의 생산 주요 변수

TCF 생산 공정에 있어 PEDOT 코팅 배합 조건인 생산 속도, 코팅 최고 온도, PEDOT 공급 속도 등이 영향을 미친다. 생산 속도 (m/min), 코팅 최고 온도 (°C), PEDOT 공급 속도 (rpm)를 유의미한 변수로 선정하였고, 각 조건에서 형성된 TCF의 표면저항률에 미치는 영향을 조사하였다. 연속 생산 공정에 있어 필름의 이물 불량, 헤드부 기포 발생, PEDOT particle 검출, telescope 현상 등이 발생하여 TCF의 생산 수율 저하에 영향을 미친다[22,23]. 따라서 설정한 독립 변수의 최적화는 수율 증대를 위한 주요 변수로 적용된다.

RSM에서 변수의 범위를 유의미하게 설정하기 위해 기초 실험을 수행하였다. 변수는 생산 속도 (10, 20, 30 m/min), 코팅 최고 온도 (110, 120, 130 °C), 그리고 PEDOT 공급 속도 (500, 550, 600 rpm)로, 이에 따른 표면저항률에 대한 기초 실험을 Table 2에 나타냈다.

생산 속도는 PEDOT의 도포에 따른 TCF의 두께에 큰 영향을 미쳤다. 공통 조건으로는 코팅 최고온도 120 °C, PEDOT 공급 속도는 550 rpm 그리고 bar coater No.#22에서 이루어졌다. 10 m/min의 생산 속도는 PEDOT 도포 양이 증가하여 TFC의 두께가 두꺼워져 표면 저항률과 투과율이 감소하였고, 30 m/min은 반대의 결과를 보였다. 하지만 표면 저항률은 낮을수록 우수한 전기적 특성을 보유하나, 투과율에서 손실이 발생되어 TCF로 사용하기 위해서는 표면 저항률과 투과율의 정도가 160 Ω/□ 이하, 84 % 이상이 되어야한다[22]. 기초 실험 결과 토대로 20 m/min에서 표면 저항률 139 Ω/□, 투과율 84.21 % 결과를 보였다.

코팅 최고 온도는 Table의 생산 공정의 챔버 구간 별 온도 및 급기량 값에 따라 다르지만 TCF를 형성하는데 있어 코팅 최고 온도는 주름, 일정한 두께 형성에 영향을 미쳤다[23]. 공통 조건으로는 생산 속도 20 m/min, PEDOT 공급 속도는 550 rpm 그리고 bar coater No.#22에서 이루어졌다. 최고 온도는 110~130 °C에서 조사되었고, 120 °C에서 표면 저항률 140 Ω/□, 투과율 84.46 % 결과를 보였다.

PEDOT 공급 속도는 생산 속도와 TCF의 두께에 큰 영향을 미치며, 500 rpm에서 높은 표면 저항률과 투과율,

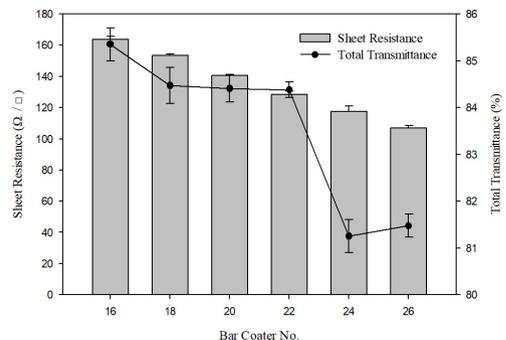
600 rpm에서는 낮은 표면 저항률과 투과율을 보였다[24]. 공통 조건으로는 코팅 최고온도 120 °C, 생산 속도는 20 m/min 그리고 bar coater No.#22에서 이루어졌다. TCF의 성능에 대한 평가를 보았을 때는 건조 두께에 따른 표면 저항률과 투과율도 중요하기 때문에 모든 조건을 만족시킬 수 있는 조건은 550 rpm이었다. 3가지 변수의 기초 실험을 토대로 결과를 분석해보면 변수에 따른 표면 저항률은 차이를 보이지만 투과율은 큰 차이가 없어 최적화 변수에 대한 response는 표면 저항률로 선정하였다.

<Table 2> 유의미한 세 변수에 대한 기초실험

	생산 속도 (m/min)			코팅 최고 온도 (°C)			PEDOT 공급 속도 (rpm)		
	10	20	30	110	120	130	500	550	600
표면 저항률 (Ω/□)	133	139	125	134	140	139	135	141	140
투과율(%)	83.61	84.21	82.99	83.97	84.46	84.25	83.99	84.59	84.34

#### 3.2 Bar coater No. 변수

Fig. 1과 같이 bar coater No. 변수에 따른 코팅을 진행하여 각각 다른 두께로 코팅되는 TCF를 상온에서 24h 방치 및 안정화한 후, 표면 저항률과 투과율을 분석하였다. Fig. 1을 보면 bar coater No.#16으로 코팅하면 두께가 두꺼워 표면 저항률과 투과율이 높지만 표면 저항률은 낮을수록 우수한 전기적 특성을 보이기 때문에 적절한 표면 저항률과 투과율이 필요하다. 일반적으로 TCF의 표면 저항률과 투과율의 정도가 160 Ω/□ 이하, 84 % 이상이 되어야한다. bar coater에 의한 두께를 고려한다면 bar coater No.#22가 가장 적절한 것을 알 수 있다.



[Fig. 1] Bar coater No.에 따른 표면 저항률과 투과율

### 3.3 RSM을 이용한 PEDOT 코팅액을 이용한

#### TCF 생산 공정 조건 최적화

PEDOT 코팅액을 이용한 TCF 생산 공정 조건을 최적화하기 위해 반응표면분석법(RSM)에서 D-optimal designs을 사용하였다[25].

RSM은 여러 변수 간의 상호작용 및 반응에 미치는 신뢰성 있는 데이터 분석을 위한 통계적 수학적 도구이다. 그 중 D-optimal designs은 효율적이며, 다른 RSM과 비교하여 필요한 테스트 실행 횟수를 줄여준다[26]. 세 가지 독립 변수( $x_1$ =생산 속도,  $x_2$ =코팅 최고 온도,  $x_3$ =PEDOT 공급 속도)의 효과를 연구하기 위해 총 20개의 실험이 설계되었다.

실험 데이터(Table 3)를 기반으로 회귀 분석을 적용하여 다음과 같은 예측 모델의 2차 다항식을 도출하였다.

$$Y = 147.25 - 2.37 x_1 + 1.78 x_2 - 3.05 x_3 + 0.90 x_1x_2 + 2.11 x_1x_3 - 4.94 x_2x_3 - 11.29 x_1^2 - 10.38 x_2^2 - 4.86 x_3^2$$

여기서 인자는 표면 저항률 (Y)에 미치는 영향과 관련하여 조사되었다.

Table 4는 반응 표면 2차 모델에 대한 ANOVA 결과를 보여준다. Model과 model terms이 유의하다는 것을 18.37의 높은 F value와 < 0.0001의 낮은 P-value로 확인하였다. 결정계수( $R^2$ )는 0.9430로 유의한 값인 0.9를 웃도는 수준으로 매우 높은 적합도가 나타났다[27]. 변동계수(CV)는 2.92 %로 10 % 임계값보다 훨씬 낮았으며, 이는 모델이 정확하고 신뢰할 수 있음을 나타낸다. Adequate precision은 13.238로 바람직한 값인 4보다 훨씬 높았으며, 이는 모델이 설계 매개변수를 효율적으로 탐색하는데 사용될 수 있음을 보여준다[28].

<Table 3> RSM을 이용한 파라미터에 따른 표면 저항률

Run	Parameters			표면 저항률 [ $\Omega/\square$ ]
	$x_1$ : 생산 속도 [m/min]	$x_2$ : 코팅 최고 온도 [°C]	$x_3$ : PEDOT 공급 속도 [rpm]	
1	10	120	598	136
2	30	130	600	116
3	10	130	500	135
4	10	110	600	121
5	30	123	563	130
6	22	130	540	141

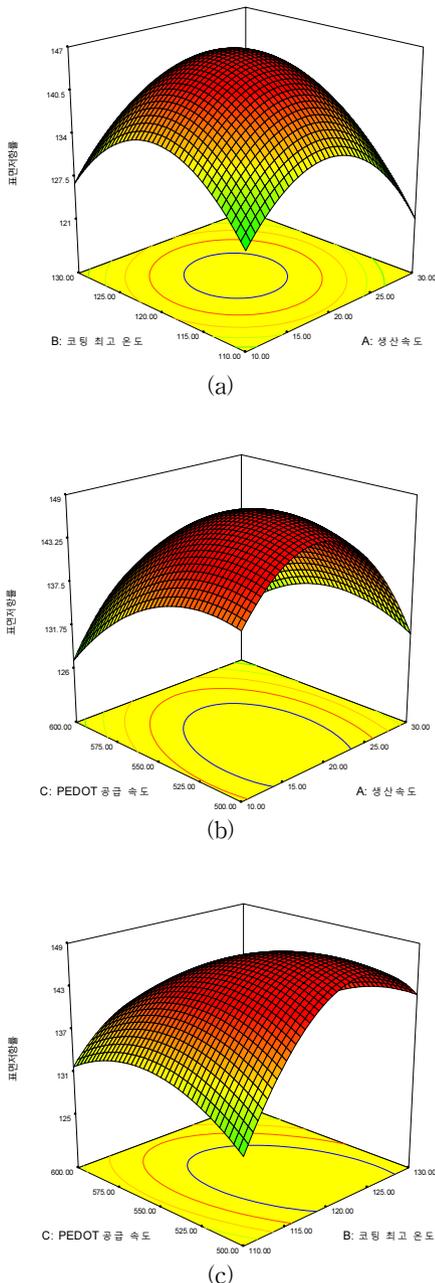
7	10	130	500	135
8	10	130	600	112
9	22	130	540	142
10	10	118	540	139
11	22	118	600	141
12	30	110	500	115
13	10	110	600	120
14	10	130	600	110
15	18	123	500	142
16	30	123	500	130
17	30	110	565	120
18	17	110	500	129
19	23	118	538	143
20	30	130	600	115

<Table 4> Analysis of Variance(ANOVA) for the Response Surface Model

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F value	P-value Prob > F
Model	2337.41	9	259.71	18.37	< 0.0001
$x_1$	50.82	1	50.82	3.59	0.0872
$x_2$	31.30	1	31.30	2.21	0.1676
$x_3$	83.73	1	83.73	5.92	0.0352
$x_1x_2$	5.78	1	5.78	0.41	0.5369
$x_1x_3$	34.42	1	34.42	2.43	0.1497
$x_2x_3$	174.81	1	174.81	12.36	0.0056
$x_1^2$	374.10	1	374.10	26.46	0.0004
$x_2^2$	389.99	1	389.99	27.58	0.0004
$x_3^2$	68.42	1	68.42	4.84	0.0525
Residual	141.39	10	14.14		
Lack of Fit	137.89	5	27.58	39.40	0.0005
Pure Error	3.50	5	0.70		
Cor Total	2478.80	19			

독립 변수 간의 상호 작용과 그 영향을 시각화하기 위해 3차원 반응 표면 플롯을 Fig 2에 나타냈다. Fig 2 (a)는 생산 속도와 코팅 최고 온도의 상호작용을 보여준다. 생산 속도와 코팅 최고 온도는 각각의 관계에 대한 중심 포인트에서 표면 저항률이 증가하였다. 특히, 약 20 m/min, 120 °C의 조건에서 표면 저항률이 증가하였다. Fig 2 (b)는 생산 속도와 PEDOT 공급 속도의 상호작용을 보여준다. 생산 속도의 변화보다는 PEDOT 공급 속도에 따른 표면 저항률의 수치 변화가 있다는 것을 확인하였다. 따라서 PEDOT 공급 속도의 변수가 중요한 요인으로 작용하였다. Fig 2 (c)는 코팅 최고 온도와 PEDOT 공급 속도의 상호작용을 보여준다. 코팅 최고 온도는 115 °C 이상 되어야 표면 저항률이 증가하였으며, Fig 2 (b)에서 PEDOT 공급 속도가 중요한 요인으로 작용한 것과 같이 Fig 2 (c)에서도 표면 저항률에 대한 중

요한 변수로 작용하였다.



[Fig. 2] 3D distribution of the response as extraction efficiency conditions. (a) 생산 속도와 코팅 최고 온도, (b) 생산 속도와 PEDOT 공급 속도, (c) 코팅 최고 온도와 PEDOT 공급 속도

PEDOT 코팅액을 이용한 TCF 생산 공정 조건 최적화를 통한 최고 표면 저항률을 얻기 위한 최적 조건은 생산 속도 22.16 m/min, 코팅 최고 온도 125.28 °C, PEDOT 공급 속도 522.79 rpm인 것으로 나타났다. 이러한 최적 조건에서 모델은 145.75  $\Omega/\square$ 의 표면 저항률을 예측했으며, 이는 142.97  $\Omega/\square$ 의 실험적인 수율에 의해 타당성이 높게 입증되었다(Table 5).

<Table 5> 최적 조건에서의 예측 값과 실험 값

Factor	Actual level	
생산 속도 ( $x_1$ )	22.16 m/min	
코팅 최고 온도 ( $x_2$ )	125.28 °C	
PEDOT 공급 속도 ( $x_3$ )	522.79 rpm	
Response	Predicted	Experimental
	145.75 $\Omega/\square$	142.97 $\Omega/\square$

#### 4. 결론

본 연구에서는 전도성 고분자인 PEDOT와 투명전극 기관인 PET를 이용한 TCF 생산 공정에 있어 최적의 조건을 확인하였다. 통계학적 분석을 통해 확립된 이상적 조건은 생산 속도 22.16 m/min, 코팅 최고 온도 125.28 °C, PEDOT 공급 속도 522.79 rpm 이었다. 최적의 조건에서의 예측 값은 145.75  $\Omega/\square$ 였고, 실험 값은 142.97  $\Omega/\square$ 로 0.01 % 오차로 유의성을 보였다. 이번 연구 결과는 TCF 대량 생산 공정에 적용하여 제품 생산 수율을 향상시킬 수 있는 기반이 될 수 있다. 향후 효율적인 전도도 유지를 위한 내구성 평가, 대량 생산 시 생산 비용 절감을 위한 공정 시뮬레이션 적용으로 경제적 평가를 실시하면 생산 효율성 및 안정성을 개선하는 방안에 대해 추가적인 연구를 진행할 수 있다.

#### References

- [1] Saha, H N, Mandal, A, & Sinha, A (2017, January). Recent trends in the Internet of Things. In 2017 IEEE 7th annual computing and communication workshop and conference (CCWC) (pp 1-4). IEEE
- [2] Attaran, M. (2023). The impact of 5G on the evolution of intelligent automation and industry digitization. Journal of ambient intelligence and humanized computing, 14(5), 5977-5993.

- [3] Ni, T., Schmidt, G. S., Stadt, O. G., Livingston, M. A., Ball, R., & May, R. (2006, March). A survey of large high-resolution display technologies, techniques, and applications. In *IEEE Virtual Reality Conference (VR 2006)* (pp. 223–236). IEEE.
- [4] Wang, C. H., & Liu, C. C. (2022). Market competition, technology substitution, and collaborative forecasting for smartphone panels and supplier revenues. *Computers & Industrial Engineering*, 169, 108295.
- [5] Rosato, D. V. (2011). *Plastics end use applications*. Springer Science & Business Media.
- [6] Wang, X., Lu, X., Liu, B., Chen, D., Tong, Y., & Shen, G. (2014). Flexible energy storage devices: design consideration and recent progress. *Advanced materials*, 26(28), 4763–4782.
- [7] Koo, J. H., Kim, D. C., Shim, H. J., Kim, T. H., & Kim, D. H. (2018). Flexible and stretchable smart display: materials, fabrication, device design, and system integration. *Advanced Functional Materials*, 28(35), 1801834.
- [8] Zhu, H., Shin, E. S., Liu, A., Ji, D., Xu, Y., & Noh, Y. Y. (2020). Printable semiconductors for backplane TFTs of flexible OLED displays. *Advanced Functional Materials*, 30(20), 1904588.
- [9] Wang, T., Lu, K., Xu, Z., Lin, Z., Ning, H., Qiu, T., ... & Peng, J. (2021). Recent developments in flexible transparent electrode. *Crystals*, 11(5), 511.
- [10] Hao, B., Mu, L., Ma, Q., Yang, S., & Ma, P. C. (2018). Stretchable and compressible strain sensor based on carbon nanotube foam/polymer nanocomposites with three-dimensional networks. *Composites Science and Technology*, 163, 162–170.
- [11] Teo, M. Y., Kim, N., Kee, S., Kim, B. S., Kim, G., Hong, S., ... & Lee, K. (2017). Highly stretchable and highly conductive PEDOT: PSS/ionic liquid composite transparent electrodes for solution-processed stretchable electronics. *ACS applied materials & interfaces*, 9(1), 819–826.
- [12] Naghdi, S., Rhee, K. Y., Hui, D., & Park, S. J. (2018). A review of conductive metal nanomaterials as conductive, transparent, and flexible coatings, thin films, and conductive fillers: Different deposition methods and applications. *Coatings*, 8(8), 278.
- [13] Betz, U., Olsson, M. K., Marthy, J., Escolá, M. F., & Atamny, F. (2006). Thin films engineering of indium tin oxide: Large area flat panel displays application. *Surface and Coatings Technology*, 200(20–21), 5751–5759.
- [14] Yang, S., Ng, E., & Lu, N. (2015). Indium Tin Oxide (ITO) serpentine ribbons on soft substrates stretched beyond 100%. *Extreme Mechanics Letters*, 2, 37–45.
- [15] Cho, S. I., & Lee, S. B. (2008). Fast electrochemistry of conductive polymer nanotubes: synthesis, mechanism, and application. *Accounts of chemical research*, 41(6), 699–707.
- [16] Castagnola, V., Bayon, C., Descamps, E., & Bergaud, C. (2014). Morphology and conductivity of PEDOT layers produced by different electrochemical routes. *Synthetic metals*, 189, 7–16.
- [17] Choi, M. C., Kim, Y., & Ha, C. S. (2008). Polymers for flexible displays: From material selection to device applications. *Progress in polymer science*, 33(6), 581–630.
- [18] Moon, J. S., Park, J. H., Lee, T. Y., Kim, Y. W., Yoo, J. B., Park, C. Y., ... & Jin, K. W. (2005). Transparent conductive film based on carbon nanotubes and PEDOT composites. *Diamond and Related Materials*, 14(11–12), 1882–1887.
- [19] Yan, H., Yumoto, T., Cheng, W. Z., Zhang, P., Mei, Y. A., Zhang, K., & Okuzaki, H. (2013). Thin films of PEDOT/PSS bar-coated on transparent plastic substrates. *Chemistry Letters*, 42(11), 1352–1354.
- [20] Elschner, A., & Lövenich, W. (2011). Solution-deposited PEDOT for transparent conductive applications. *MRS bulletin*, 36(10), 794–798.
- [21] Lee, J. H., Lee, D. Y., Lee, S. K., Kim, H. R., Chun, Y., Yoo, H. Y., ... & Kim, S. W. (2021). Development of 2, 3-Butanediol Production Process from *Klebsiella aerogenes* ATCC 29007

Using Extracted Sugars of *Chlorella pyrenoidosa* and Biodiesel-Derived Crude Glycerol. Processes, 9(3), 517.

- [22] Fraser, I. S., Motta, M. S., Schmidt, R. K., & Windle, A. H. (2010). Continuous production of flexible carbon nanotube-based transparent conductive films. *Science and Technology of Advanced Materials*.
- [23] Li, J., Zhao, X. L., & Yan, H. (2016, May). Highly Conductive and Transparent PEDOT/PSS Thin Films with Large Area Prepared by Bar-Coating Method. In *Materials Science Forum* (Vol. 852, pp. 1123-1131). Trans Tech Publications Ltd.
- [24] Dijk, G., Ruigrok, H. J., & O'Connor, R. P. (2020). Influence of PEDOT: PSS coating thickness on the performance of stimulation electrodes. *Advanced Materials Interfaces*, 7(16), 2000675.
- [25] Costa, E. L., Soares, F. B., Lourenco, S. A., Muniz, E. C., & Cava, C. E. (2021). Design experiment (parameters) applied to PEDOT: PSS/AgNW composite doped with EG for transparent conductive films. *Journal of Molecular Liquids*, 329, 115516.
- [26] Nguyen, N. K., & Miller, A. J. (1992). A review of some exchange algorithms for constructing discrete D-optimal designs. *Computational Statistics & Data Analysis*, 14(4), 489-498.
- [27] Mohammed, A., Bissoon, R., Bajnath, E., Mohammed, K., Lee, T., Bissram, M., ... & Ward, K. (2018). Multistage extraction and purification of waste *Sargassum natans* to produce sodium alginate: An optimization approach. *Carbohydrate polymers*, 198, 109-118.
- [28] Liudvinaviciute, D., Rutkaite, R., Bendoraitiene, J., Klimaviciute, R., & Dagys, L. (2020). Formation and characteristics of alginate and anthocyanin complexes. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 726-734.

### 남 현 빈 (Nam, Hyeon-bin)



- 2022년 2월~현재 : 순천향대학교 전자재료소자장비융합공학과(석사과정)
- 2018년 3월~2022년 2월 : 순천향대학교 나노화학공학과(공학사)
- 관심분야 : 추출, 최적화, 슈퍼커패시터
- E-Mail : nhb3335@naver.com

### 최 요 석 (Choi, Yo-seok)



- 2022년 11월~현재 : 한엘 재직
- 2020년 9월~현재 : 충북대학교 화학공학과 석박통합과정중
- 2018년 3월~2021년 12월 : 서울대학교 농업생명과학연구원 재직
- 관심분야 : 점착소재 등 고분자 소재
- E-Mail : yschoi79@hanelkorea.com

### 김 인 수 (Kim, In-su)



- 2021년 2월~현재 : 한엘 재직
- 2019년 9월~2021년 2월 : ㈜에니원 재직
- 2011년 3월~2019년 2월 : 가천대학교 화공생명공학과(공학사)
- 관심분야 : 점착소재 등 고분자 소재
- E-Mail : iskim7444@hanelkorea.com

### 김 경 준 (Kim, Gyung-jun)



- 2022년 1월~현재 : 한엘 재직
- 2021년 3월~현재 : 순천향대학교 융합바이오화학공학과 학사과정
- 관심분야 : 점착소재 등 고분자 소재
- E-Mail : gjkim@hanelkorea.com

**박 성 수 (Park, Seong-su)**



- 2023년 2월~현재 : 한엘 재직
- 2022년 3월~현재 : 순천향대학교  
융합바이오화학공학과 학사과정
- 관심분야 : 점착소재 등 고분자 소재
- E-Mail : sspark@hanelkorea.com

**이 자 현 (Lee, Ja Hyun)**



- 2022년 3월~현재 : 순천향대학교  
융합바이오화학공학과 조교수
- 2019년 3월~2022년 2월 : 동양미  
래대학교 식품공학과 조교수
- 2010년 3월~2018년 8월 : 고려대  
학교 화공생명공학과 석박통합과  
정(공학박사)
- 관심분야 : 에너지 소재, 바이오
- E-Mail : jhlee84@sch.ac.kr