

# ITO를 대체할 전자 소자용 투명 전극 소재에 대한 연구 동향 및 향후 전망

이종필

중원대학교 전기전자공학과 교수

## Research Trends and Future Prospects of Transparent Electrode Materials for Electronic Devices to Replace ITO

Jongpil Lee

Professor, Department of Electrical and Electronic Engineering, Jungwon University

**요약** 투명 전극은 태양전지, 디스플레이 등 전자 기기에 적용되는 소재로 현재는 ITO가 상용화되어 있으나, 제한된 자원과 비용 상승 문제로 인해 지속적으로 사용할 수 있는 소재로는 적합하지 않다. 따라서, 이러한 한계를 지닌 ITO(Indium Tin Oxide)를 대체할 신개념의 투명 전극 소재가 필요하며 다양한 연구가 이루어지고 있다. 대표적으로 AZO(Aluminium-doped Zinc Oxide), 은 나노와이어, 그래핀, 탄소나노튜브, PEDOT:PSS 등이다. 최근에는 플렉서블 디스플레이와 웨어러블 기술의 발전으로 새로운 대체 소재와 공정법을 요구하고 있고, 금속나노와이어, CNT, 그래핀이 검토되고 있으며, 롤투롤 방법과 같은 대면적, 저가 생산이 가능한 공정 기술의 개발이 이루어지고 있다. 현재 세계적인 반도체 기술을 주도하고 있는 우리나라에서 이러한 분야에 집중적인 투자 및 선도 연구는 미래에도 반도체 분야에서 지속적으로 선두를 유지할 수 있는 밑거름이 될 것이다.

**주제어** : 투명 전극, ITO, 투명 전극 대체 소재, 플렉서블 전자소자, 롤투롤 공정

**Abstract** Transparent electrodes are materials applied to electronic devices such as solar cells and displays. Currently, ITO (Indium Tin Oxide) is commercially used; however, due to its limited resources and rising costs, it is not suitable as a sustainable material. Therefore, there is a need for novel transparent electrode materials to replace ITO. Representative alternatives include AZO (Aluminum-doped Zinc Oxide), silver nanowires, graphene, carbon nanotubes, and PEDOT:PSS. Recently, with advancements in flexible displays and wearable technologies, there is a growing demand for new alternative materials and processing methods. Candidates such as metal nanowires, CNTs, and graphene are being considered, along with the development of large-area, cost-effective manufacturing techniques like roll-to-roll processes. In a country like South Korea, which currently leads the global semiconductor technology landscape, intensive investment and pioneering research in these areas will serve as a solid foundation for maintaining leadership in the semiconductor field in the future.

**Key Words** : Transparent electrode, ITO (Indium Tin Oxide), Alternative materials for transparent electrodes, Flexible electronic devices, Roll-to-roll process

\*Corresponding Author : Jongpil Lee(leejp@jwu.ac.kr)

Received December 1, 2024  
Accepted January 20, 2025

Revised January 8, 2025  
Published January 30, 2025

## 1. 서론

투명 전극은 광전소자에서 핵심적인 역할을 수행하는 소재로, 전기 전도성과 광 투과성을 동시에 갖추어야 하는 독특한 특성을 지닌다. 이러한 특성 덕분에 투명 전극은 디스플레이, 태양전지, 유기 발광 다이오드(OLED), 센서 및 스마트 윈도우 등 다양한 응용 분야에서 필수적인 소재로 사용되고 있다 [1-3]. 기존의 투명 전극 소재 중 가장 널리 사용되는 것은 Fig. 1에서 보여주는 ITO(Indium Tin Oxide) 재료로, 높은 광 투과율과 우수한 전기적 특성을 통해 오랜 기간 상용화되어 왔다 [4, 5]. 그러나 ITO는 몇 가지 중요한 한계를 가진다. 첫째, 인듐은 희소 금속으로 분류되며, 자원의 제한성과 비용 상승 문제로 인해 지속 가능한 소재로 보기 어렵다. 둘째, ITO는 취성(brittleness)이 높아 유연 전자 기기에 적합하지 않다. 이러한 한계는 ITO를 대체할 새로운 투명 전극 소재의 필요성을 증가시키고 있으며, 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

최근 연구는 대체 투명 전극 소재 개발에 초점을 맞추고 있다. 주목받는 대체 소재로는 그래핀, 은 나노와이어, 금속 메쉬, 도전성 고분자, 그리고 투명 산화물 반도체 등이 있다 [6-9]. 그래핀은 뛰어난 전기 전도도와 기계적 유연성을 제공하며, 단일 원자 두께의 구조로 인해 높은 광 투과율을 갖는다 [6]. 은 나노와이어는 나노미터 크기의 은 섬유가 형성하는 네트워크 구조를 통해 높은 전도성과 우수한 투과율을 동시에 구현할 수 있다 [7]. 금속 메쉬는 미세한 금속 패턴을 활용하여 전기적 성능을 향상시키는 한편, 광 투과성을 유지할 수 있는 기술로 발전 중이다. 도전성 고분자는 폴리아닐린이나 PEDOT:PSS와 같은 소재가 대표적이며, 비용 효율성과 환경 친화적인 특성으로 인해 관심을 받고 있다. 이외에도 투명 산화물 반도체는 ITO와 유사한 광학적 특성을 보이면서도 재료 비용과 가공 공정에서 장점을 제공할 수 있다 [9].

이와 함께, 차세대 투명 전극 소재 개발에는 기술적 과제도 존재한다. 대체 소재는 기존 ITO에 필적하는 전기적 성능과 투과율을 제공해야 하며, 동시에 대량 생산 가능성과 가격 경쟁력을 확보해야 한다. 또한, 유연 전자 소자와 같은 신규 응용 분야에서 요구되는 기계적 특성, 내구성 및 안정성도 중요한 평가 요소로 작용한다. 이러한 요구를 충족하기 위해 다기능적 투명 전극 구조 설계 및 복합 소재 활용 전략이 연구되고 있

다. 예를 들어, 그래핀과 은 나노와이어를 혼합한 하이브리드 구조는 각각의 소재가 지닌 장점을 결합하여 성능을 최적화할 수 있는 가능성을 보여주고 있다.

본 논문은 투명 전극 기술의 발전 동향과 주요 도전 과제를 심층적으로 분석하고, 다양한 대체 소재의 특성과 응용 가능성을 검토한다. 특히, 차세대 투명 전극이 나아가야 할 방향과 이를 실현하기 위한 기술적 전략에 대해 논의함으로써, 관련 연구자들에게 중요한 시사점을 제공하고자 한다. 투명 전극은 디스플레이와 같은 전통적인 광전 소자뿐만 아니라, 플렉시블 디스플레이, 웨어러블 디바이스, 투명 태양전지 등 신형 기술 분야에서도 지속적으로 수요가 증가할 것으로 예상되므로, 투명 전극의 발전은 현대 광전자 기술의 핵심 과제로 자리 잡을 것이며, 이러한 기술적 편승에 기여하고자 한다. 또한, 투명 전극 분야는 반도체 기술 발전과 연관되어 있어, 정책적으로도 집중적인 지원이 필요한 분야라 할 수 있다.

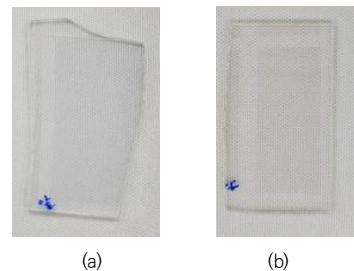


Fig. 1. Microscopic images of ITO-based transparent conductive films deposited on glass substrates using electron beam equipment with thicknesses of (a) 110 nm and (b) 320 nm (Ref 4: 공동 연구를 진행하고 있는 강남대학교 연구팀의 사용 승인 받음).

## 2. 본론

### 2.1 투명전극의 정의 및 지속 개발 필요성

#### 2.1.1 투명전극 정의

높은 광학적 투과율과 우수한 전기 전도성을 동시에 제공하는 재료로 Fig. 2에서와 같이 일반적으로 투명 전극은 가시광선 영역에서 투과율이 80% 이상, 표면 저항이  $100 \Omega/\square$  이하인 특성이 필요하다. 이 같은 성능은 광학적 효율과 전기적 연결성을 최적화하는 데 필수적이다.

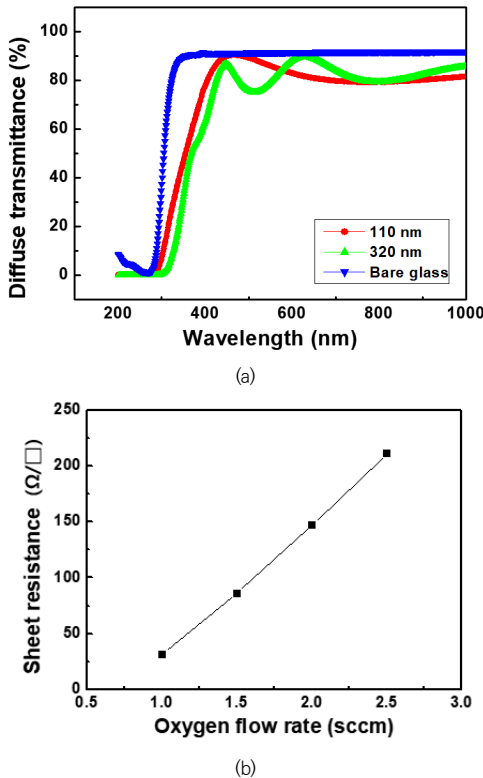


Fig. 2. (a) Diffused reflectance of glass and ITO-coated glass with thicknesses of 110 nm and 320 nm and (b) Surface resistance with varying oxygen concentration during deposition of a 110 nm thick ITO transparent thin film  
(Ref 4: 공동 연구를 진행하고 있는 강남대학교 연구팀 사용 승인 받음).

하지만, ITO 소재도 증착 및 두께에 따라 Fig. 2(a)에서와 같이 가시광 영역에서 투명도가 80% 미만인 막이 형성될 수 있으며, Fig. 2(b)에서와 같이 증착시 챔버 분위기에 의하여 표면 저항이  $100 \Omega/\square$  이상인 막이 제작될 수 있다. 따라서, 적용 분야 및 용도에 따라 최적 공정 조건을 확립할 필요가 있다.

### 2.1.2 기술적인 필요성 관점

ITO는 현재 상용 투명 전극의 표준으로 자리 잡고 있지만, 고정된 평면 구조에서만 효과적으로 작동하며, 곡면 디스플레이나 신축성 기판에서 기계적 특성이 제한적이다. 특히 웨어러블 기기와 접히거나 휘어지는 디스플레이와 같은 차세대 전자 기기에서 유연성 부족으

로 인한 성능 저하가 발생한다. 이를 극복하기 위해 높은 전도성과 유연성을 동시에 제공하는 금속 나노와이어, 기계적으로 강한 그래핀, 신축성이 우수한 전도성 고분자와 같은 새로운 소재 개발이 요구된다.

또한, 투명 전극은 단순히 전기적 연결성을 제공하는 역할에서 벗어나, 디스플레이의 색 재현성 개선, 태양전지의 전력 변환 효율 증가, 신축성 센서의 민감도 향상 등 새로운 응용 기술의 핵심 요소로 자리 잡고 있다. 특히 투명 전극의 고효율화와 대면적 제조 가능성은 스마트 윈도우와 같은 에너지 절약형 장치와 유기 발광 다이오드(OLED) 디스플레이에서 중요한 역할을 한다 [10].

추가적으로, 태양전지와 같은 에너지 장치에서 투명 전극의 성능은 장치 효율성을 좌우하는 핵심 요소이다. 예를 들어, 태양전지의 경우 전극이 높은 광 투과율과 낮은 저항을 유지할수록 더 많은 빛을 흡수하고, 전기적 손실을 줄여 전력 변환 효율을 극대화할 수 있다. 따라서, 태양광 발전 및 OLED 조명 기술에서 더욱 효율적인 투명 전극 개발이 필요하다.

### 2.1.3 경제적 필요성 관점

ITO의 핵심 구성 요소인 인듐은 세계적으로 희소 자원으로 분류되며, 공급망의 불안정성과 가격 변동성 문제가 심각하다. 인듐 자원의 고갈 가능성과 비용 상승은 대규모 생산과 기술 상용화를 저해할 수 있다. 이에 따라, 저비용이면서도 성능이 우수한 대체 소재 개발이 경제적으로 중요하다. 금속 나노와이어, 그래핀, 전도성 고분자 등의 대체 재료는 원료 비용 절감과 함께, 제조 공정의 단순화 및 효율성을 높이는 데 기여할 수 있다.

현대 전자 산업에서는 대규모 제조 공정의 경제성과 효율성이 제품의 상용화 가능성을 결정짓는 중요한 요소이다. 기존 ITO 제조 공정은 고가의 진공 증착 장비와 복잡한 공정이 요구되며, 대량 생산에서 비용 효율성이 낮다. 따라서 롤투롤(Roll-to-Roll) 코팅 기술이나 잉크젯 프린팅과 같은 저비용 대규모 제조 공정의 개발이 필요하다 [11,12]. 이러한 기술은 생산성을 향상시키고, 시장 경쟁력을 확보하는 데 크게 이바지할 것이다.

### 2.1.4 환경적 필요성

전통적인 투명 전극 제조 공정은 고온 공정과 유독성 화학 물질의 사용으로 인해 환경에 부정적인 영향을

미친다. 따라서 환경 친화적인 소재와 공정 개발이 필요하다. 그래핀, 전도성 고분자, 나노셀룰로오스 기반 전극 등은 기존 ITO에 비해 제조 과정에서 에너지 소비를 줄이고 환경적 부담을 최소화할 수 있는 대안으로 주목받고 있다.

뿐만 아니라, 투명 전극은 전자 기기의 주요 구성 요소로, 전자 폐기물 문제의 해결에 중요한 영향을 미칠 수 있다. 특히, 재활용이 어려운 소재나 복잡한 구조는 전자 폐기물 증가의 주요 원인 중 하나이다. 나노와이어, 그래핀, 전도성 고분자 등 재활용 가능성이 높은 재료를 이용한 투명 전극 개발은 전자 폐기물 문제를 완화하고 지속 가능한 자원 관리를 가능하게 한다.

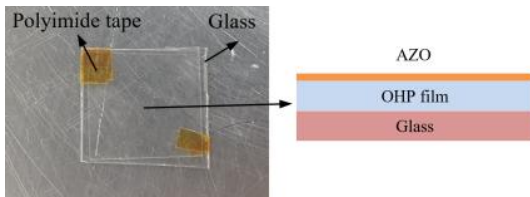


Fig. 3. AZO thin layer on OHP film/Glass (Ref. 1).

## 2.2 투명 전극의 종류 및 특성

### 2.2.1 알루미늄 도핑된 아연 산화물(AZO)

Fig. 3은 OHP/Glass 구조상에 AZO가 100nm 증착되어 있는 구조로 AZO는 인들의 높은 비용과 희소성을 극복하기 위해 개발된 대체 재료로, ITO와 유사한 광학적 및 전기적 성능을 제공하면서도 비용 효율성과 풍부한 자원으로 인해 저비용 디스플레이와 에너지 장치에 적합하기 때문에 투명 전극의 대안으로 떠오르고 있다. 하지만, 광학 및 전기적인 특성의 향상에 대한 연구가 필요하다.

### 2.2.2 불소 도핑된 주석 산화물(FTO)

FTO는 화학적 안정성이 뛰어나며 높은 내구성을 제공하여, 고온 및 부식성 환경에서도 안정적으로 작동할 수 있어 태양전지, 특히 염료감응형 태양전지와 같은 특수 응용 분야에서 사용된다.

### 2.2.3 금속 나노와이어(AgNW)

Fig. 4(b)는 Ag 나노와이어가 용액 기반으로 있는 Fig. 4(a)를 글라스 상에 코팅하였을 때의 표면 이미지로 AgNW는 높은 전도성과 유연성을 제공하며, 투명성과 기계적 내구성이 요구되는 플렉서블 디스플레이, 웨어

러블 기기, 신축성 센서 등 차세대 전자 기기에 적합한 소재로, 대규모 제조에도 적합한 공정 가능성을 보인다.

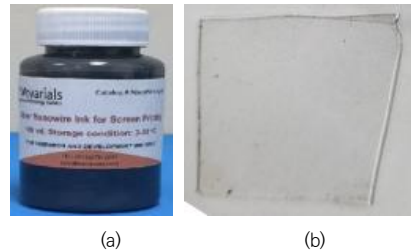


Fig. 4. (a) Ag nanowire solution used in the experiment and (b) Image of the glass surface when the Ag nanowire solution was coated (Ref. 3).

## 2.2.4 그래핀

그래핀은 단원자 두께의 2차원 탄소 구조로 이루어져 있으며, 탁월한 전기 전도성과 높은 투명도를 제공함과 동시에 유연한 구조로 인해 플렉서블 디스플레이와 웨어러블 디바이스, 태양전지와 같은 차세대 응용 분야에서 강력한 대안으로 주목받고 있다. 최근에는 이러한 소재의 대면적 공정 기술이 개발되어 실용화가 가까워지고 있는 상황이다.

## 2.2.5 탄소 나노튜브(CNT)

Fig. 5(a)와 같은 CNT가 포함된 용액을 글라스 상에 코팅하였을 때의 표면 이미지는 Fig. 5(b)와 같다. CNT는 높은 전기 전도성과 기계적 안정성을 제공하며, 가벼운 특성과 신축성이 결합되어 신축 가능한 디스플레이, 전자섬유, 웨어러블 센서와 같은 혁신적인 기기에 적합하다.

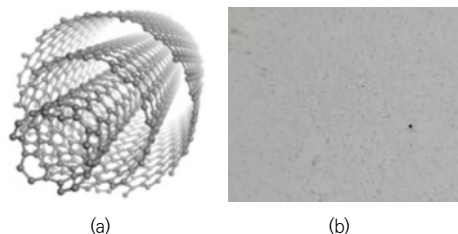


Fig. 5. (a) Images showing the structure of single-wall carbon nanotube and (b) Surface morphology when CNTs were processed by spin coating (Ref. 13).

### 2.2.6 PEDOT:PSS

PEDOT:PSS는 용액 공정을 통해 제조 가능한 전도성 고분자로, 우수한 유연성과 광학적 투과율을 제공하며, 저가형 전자 기기 및 플렉서블 디바이스에서 경제적이고 유연한 대안으로 활용된다.

### 2.2.7 복합 소재

복합 소재는 금속 나노와이어와 그래핀 또는 전도성 고분자와 같은 두 가지 이상의 재료를 결합하여 각 소재의 단점을 보완하고 장점을 극대화하며, 차세대 플렉서블 전자 기기와 고성능 디스플레이에서 뛰어난 성능을 발휘한다 [14].

### 2.2.8 롤투롤 코팅 기반 전극

플렉서블이 가능한 소재를 이용하여 롤투롤 코팅용 기반 전극 형성은 대면적 제조가 가능한 공정 방법을 통해 고효율성과 저비용 생산성을 동시에 제공하도록 하여, 투명 전극의 상용화를 가속화하는 중요한 제조 기술로 평가받고 있다.

## 2.3 투명 전극 시장 동향 및 전망

플렉서블 디스플레이와 웨어러블 기술의 확산은 투명 전극 시장에 큰 변화를 가져오고 있다. 특히 스마트폰, 태블릿, TV와 같은 소비자 전자 제품에서 플렉서블 OLED 디스플레이의 채택이 증가하고 있다. 이러한 기술은 ITO의 한계를 넘어서기 위해 새로운 소재와 제조 기술을 요구한다. 이에 따라 롤투롤(Roll-to-Roll) 공정을 활용한 대량 생산 기술이 주목받고 있으며, 이는 플렉서블 전극의 제조 비용을 낮추고 생산 효율성을 높이는 데 기여하고 있다.

태양광 산업 역시 투명 전극의 주요 응용 분야 중 하나로, 특히 유기 태양전지(OPV)와 페로브스카이트 태양전지에서 중요하게 사용된다. OPV와 같은 차세대 태양광 기술은 경량화와 유연성을 요구하며, 투명 전극은 이러한 요구를 충족시키는 핵심 구성 요소로 작용한다. 더 나아가, 이 기술들은 건물 창문이나 자동차 유리와 같은 투명한 표면에서 에너지를 수확하는 빌딩 통합 태양광(BIPV) 시스템에도 적용될 수 있다.

투명 전극 시장의 지역적 동향을 살펴보면, 아시아 지역이 생산의 중심지로 자리 잡고 있다. 한국, 일본, 중국은 디스플레이 제조 및 소재 개발에서 주도적인 역

할을 하고 있으며, 특히 한국과 일본은 OLED 디스플레이 기술에서 강력한 경쟁력을 보유하고 있다. 북미 지역은 그래핀, CNT, 나노와이어와 같은 신소재 개발과 기술 혁신의 중심지로 자리 잡고 있다. 유럽은 지속 가능한 친환경 기술과 제조 공정 개발에 초점을 맞추고 있다. 이는 유럽 연합의 강력한 환경 규제와 지속 가능성 정책에 부합하는 방향이다.

주요 기업들은 투명 전극의 새로운 시장 기회를 활용하기 위해 연구 개발을 강화하고 있다. LG화학, 삼성 SDI, AGC, Cambrios, Canatu 등은 디스플레이 및 플렉서블 전자기기용 고성능 투명 전극 소재를 개발하고 있다. 특히, 롤투롤 공정을 활용한 대규모 생산 기술이 상용화되고 있으며, 이는 제품의 경제성을 개선하고 시장 점유율을 확대하는 데 기여하고 있다.

투명 전극 시장은 친환경 기술 개발과 소재 혁신에 의해 점점 더 다변화되고 있다. 기존 ITO 기반 기술은 고성능 애플리케이션에서 여전히 중요한 위치를 차지하고 있지만, 플렉서블 디스플레이와 웨어러블 기술의 급속한 발전은 새로운 대체 소재와 제조 공정을 요구하고 있다. 이에 따라 금속 나노와이어, 그래핀, CNT와 같은 대체 소재의 상용화는 시장의 판도를 바꾸는 중요한 요인이 되고 있다.

결론적으로, 투명 전극 시장은 기존 전극 소재의 한계를 극복하고 새로운 응용 분야를 개척하며 지속적으로 성장하고 있다. 특히, 고유연성, 고투명성, 고효율성을 요구하는 응용 분야의 확대에 의해 새로운 소재와 제조 기술의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 이는 투명 전극이 미래 첨단 기술 발전의 핵심 요소로 자리 잡을 가능성을 보여주며, 지속적인 연구 개발과 상용화를 통해 시장이 더욱 확장될 것으로 전망된다.

## 2.4 기술적 도전과 미래 연구 방향

투명 전극 소재의 기술적인 도전 문제와 향후 미래 지향적 연구 방향을 소개하면 다음과 같이 4가지로 표현할 수 있다.

첫 번째로 높은 빛의 투과와 낮은 전기적인 저항을 특성을 나타내는 소재의 최적화를 하는 것이 중요하다. 그 이유는 고투과도 조건은 높은 전기저항을 구현하기 쉬우며, 반대로 초저저항 공정은 낮은 투과도를 구현하도록 하기 때문이다. 양산성을 위해서는 대면적에 균일한 특성을 나타내는 소재 및 기술을 개발하도록 해야

한다.

두 번째로는 최근 전자소자는 접거나 말수 있는 분야까지 가능하기 때문에 이러한 분야에 대응하기 위하여 반복적인 외부 힘에 의한 변형이 가능한 내구성이 우수한 소재여야 한다. 뿐만 아니라, 고온 고습 환경에서도 견뎌낼 수 있는 특성도 보유하여야 한다.

세 번째로는 양산을 위해서는 저비용으로 제조가 가능해야 하며, 롤투롤 장비를 이용하면 높은 생산성과 낮은 비용 제조가 가능하다. 추가적으로 스프레이 코팅 기술과 같은 신개념의 코팅 연구가 필요하다.

마지막으로, 최근 전세계적으로 환경 친화적인 소재 개발 및 관련 반도체 공정에 대한 연구 개발이 진행되고 있으며, 투명 산화막도 이러한 분위기에 편승해야 할 것이다.

상기의 기조로 연구가 진행되어 ITO 대체 소재 및 공정 개발은 반도체 기술로 세계를 주도하고 있는 한국에서 지속적으로 선도하는 기반이 될 것이다.

### 3. 결론

투명 전극은 태양전지, 디스플레이 등 전자 기기에 적용되는 소재로 현재는 ITO가 상용화되어 있으나, 제한된 자원과 비용 상승 문제로 인해 지속적으로 사용할 수 있는 소재로는 적합하지 않다. 따라서, 이러한 한계를 지닌 ITO를 대체할 신개념의 투명 전극 소재가 필요하며 다양한 연구가 이루어지고 있으며, 그 성과가 나타나고 있다. 대표적으로 AZO, FTO, Ag 나노와이어, 그래핀, 탄소나노튜브, PEDOT:PSS 등이며, 이러한 소재들의 장점들을 결합한 복합소재도 연구 진행 중이다.

최근에는 플렉서블 디스플레이와 웨어러블 기술의 발전으로 새로운 대체 소재와 공정법을 요구하고 있으며, 금속나노와이어, CNT, 그래핀이 검토되고 있으며, 롤투롤 방법과 같은 대면적, 저가 생산이 가능한 공정 기술의 개발이 이루어지고 있다.

본 논문에서는 이러한 소재들의 투명 전극으로의 가능성에 국한되어 언급하였지만, CNT, 그래핀은 반도체로의 물성을 지니고 있다. 따라서, 투명 전극용으로의 기술 개발과 함께 반도체 물질로의 연구를 통해 이러한 물질로만, 전자소자를 제작하여 보다 간단하고, 저가형 전자소자 연구 분야는 새로운 지평을 열 것으로 판단된다. 현재 세계적인 반도체 기술을 주도하고 있는 우리나라에서 이러한 분야에 집중적인 투자 및 선도 연구는

미래에도 반도체 분야에서 지속적으로 선두를 유지할 수 있는 밑거름이 될 것이다.

### REFERENCES

- [1] K. B. Kim, J. P. Lee & M. J. Kim (2020). Optical and electrical properties of AZO thin films deposited on OHP films. *Journal of Convergence for Information Technology*, 10(9), 28-34. DOI : 10.22156/CS4SMB.2020.10.09.028
- [2] M. J. Kim Kim (2022). Fabrication of an Oxide-based Optical Sensor on a Stretchable Substrate. *Journal of Industrial Convergence*, 20(12), 79-85. DOI : 10.22678/JIC.2022.20.12.079
- [3] K. B. Kim (2023). Effects of Brush Coating of Ag Nanowire Solution and Annealing using Plasma Process for Flexible Electronic Devices. *Journal of Industrial Convergence*, 21(3), 189-194. DOI : 10.22678/JIC.2023.21.3.189
- [4] K. B. Kim, G. K. Jung, S. W. Kim & M. J. Kim (2024). Optical and Electrical Properties of ITO Transparent Conductive Film Deposited on thin Glass and Thick Plastic Substrates using Sputtering Process. *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 73(2), 453-460. DOI : 10.5370/KIEE.2024.73.2.453
- [5] N. Ren, J. Zhu & S. Ban (2017). Electrical Properties of ITO/Ag/ITO Conducting Transparent Thin Films. *AIP ADVANCES*, 7(5), 055009-1-055009-7. DOI : 10.1063/1.4982919
- [6] A. K. Geim & K. S. Novoslov (2007). The rise of graphene. *Nature materials*, 6, 183-191. DOI : 10.1038/nmat1849
- [7] K. B. Kim (2023). Effects of Brush Coating of Ag Nanowire Solution and Annealing using Plasma Process for Flexible Electronic Devices. *Journal of Industrial Convergence*, 21(3), 189-194.
- [8] M. Stanipar, S. H. Kim, Khoiruddin, F. Iskandar & I G. Wenten (2017). Functionalized carbon nanotube (CNT) membrane: progress and challenges. *RSC Advances*, 7, 51175-51198. DOI : 10.1039/C7RA08570B
- [9] G. H. Jin, J. H. Cho, W. P. Lee, Y. G. Mo, H. D. Kim, S. S. Kim, M. J. Kim & J. H. Song (2011). Simple Fabrication of a Three-Dimensional CMOS Inverter Using p-Type Poly-Si and n-Type Amorphous Ga-In-Zn-O Thin-Film Transistors.

- IEEE Electron Device Letters*, 32(9), 1236-1238.  
DOI : 10.1109/LED.2011.2161258
- [10] M. J. Kim & G. H. Jin (2009). ITO/AlN<sub>d</sub>N/Al contact process for active matrix OLED displays. *Electronics Letters*, 45(8), 421-423.  
DOI : 10.1049/el.2009.0037
- [11] J. S. Ha, Y. J. Kim & S. H. Lee (2024). Understanding and trends of roll-to-roll processes. *Journal of Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*, 37(1), 36-42.  
DOI: 10.4313/JKEM.2024.37.1.4
- [12] B. H. Kwon & C. W. Joo (2023). Trends in display technology development applying inkjet printing principles. *Electronics and Telecommunications Trends*, 38(1), 26-35.  
DOI: 10.22648/ETRI.2023.J.380104
- [13] K. B. Kim, J. P. Lee & M. J. Kim (2022). Development of CNT Coating Process using Argon Atmospheric Plasma. *Journal of Industrial Convergence*, 20(10), 33-38.  
DOI : 10.22678/JIC.2022.20.10.033
- [14] M. J. Kim Kim (2023). Development of Solution-based Carbon Nanotube and Silver Nanowire Coating Technology using Silk Printing Technique. *Journal of Industrial Convergence*, 21(9), 33-39.  
DOI : 10.22678/JIC.2023.21.9.033

이종필(Lee, Jongpil)

[정회원]



- 1999년 8월 : 광운대학교 전기공학  
학과 (공학석사)
- 2004년 8월 : 광운대학교 전기공학  
학과(공학박사)
- 1991년 2월 ~ 2015년 5월 : 한국  
전기학원(Director)

- 2015년 6월 ~ 현재 : 중원대학교 전기전자공학과 교수
- 관심분야 : Solar Heat, Electric Car, Microgrid,  
Power System
- E-Mail : leejp@jwu.ac.kr