

# 카본나노튜브 코팅된 투명 테이프의 탈착과 벤딩에 따른 전기 및 광학적인 특성

김경보<sup>1</sup>, 이종필<sup>2</sup>, 김무진<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>인하공업전문대학 재료공학과 교수, <sup>2</sup>중원대학교 전기전자공학과 교수, <sup>3</sup>강남대학교 전자공학전공 교수

## Electrical and Optical Properties According to Detachment and Bending of Carbon Nanotube-coated Transparent Tape

Kyoung-Bo Kim<sup>1</sup>, Jongpil Lee<sup>2</sup>, Moojin Kim<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Professor, Department of Materials Science and Engineering, Inha Technical College

<sup>2</sup>Professor, Department of Electrical and Electronic Engineering, Jungwon University

<sup>3</sup>Professor, Department of Electronic Engineering, Kangnam University

**요약** 최근 전자소자는 플렉서블 기판을 기반으로 힘이 가능한 전자소자가 제품으로 출시되고 있으며, 따라서 본 연구에서는 전도성 있는 투명 테이프의 플렉서블 기판 가능성을 평가하는 것에 목적이 있다. 투명 전극으로 연구진이 개발한 코팅 방법으로 CNT를 형성하였으며, 최대 5번까지 코팅한 샘플까지 제작하였다. 기판의 표면 저항 및 투과도를 측정하였고, CNT 코팅 횟수가 늘어날수록 저항과 투과도는 모두 감소하였다. 테이프를 유리로부터 탈착한 후 표면 저항은 모든 샘플에서 약간 증가하였으며, 투과도는 글라스를 제거한 상태이기 때문에 측정된 모든 파장 영역에서 10% 정도 상승하였다. 특히 3번 코팅한 샘플은 탈착 전후 파장에 따른 투과도 변화정도를 관찰하였으며, 전체적으로 평균값이 높아졌고, 특히 700nm의 파장에서 큰 변화가 확인되었다. 이를 통해 탈착 후 CNT의 전기적 광학적 특성이 미세하게 변화하였다고 판단할 수 있다. 다음으로 2번 CNT 코팅되어 있는 테이프를 곡률 반경 2mm인 조건에서 20,000번 벤딩 테스트를 하였으며, 벤딩 전후 전기적 및 광학적 특성이 변하지 않았으며, 이는 벤딩에 따른 CNT 특성 변화는 없다. 향후 전도성 있는 투명 테이프에 전자소자를 제작하여 플렉서블 전자소자의 특성을 분석할 예정이다.

**키워드** : 카보나노튜브, 투명 테이프, 표면 저항, 투과도, 탈착, 벤딩 테스트

**Abstract** Recently, electronic devices with bendable electronic devices based on flexible substrates are being sold, and therefore, the purpose of this study is to evaluate the possibility of flexible substrates of conductive transparent tapes. As a transparent electrode, carbon nanotube (CNT) was formed by the coating method developed by the research team, and samples coated up to 5 times were fabricated. The surface resistance and transmittance of the substrate were measured, and both resistance and transmittance decreased as the number of CNT coatings increased. After the tape was detached from the glass, the surface resistance slightly increased in all samples, and the transmittance increased by about 10% in all measured wavelength ranges because the glass was removed. Next, the tape coated with CNT twice was used to a bending test 20,000 times under the condition of a radius of curvature of 2 mm. The electrical and optical properties before and after bending did not change, which means that there was no change in CNT properties due to bending.

**Key Words** : Carbon nanotube, Transparent tape, Surface resistance, Transmittance, Detachment, Bending test

This Research was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2021R1F1A1046135) and Semiconductor major track (Materials, Components, Equipment) project supported by the Ministry and Education and the Ministry of Trade, Industry and Energy (No. P0022196).

\*Corresponding Author : Moojin Kim(moojinkim7@kangnam.ac.kr)

Received June 6, 2023

Revised July 28, 2023

Accepted August 20, 2023

Published August 28, 2023

### 1. 서론

반도체는 1800년대에 전지화학적 연구로 시작되었으며, 20세기 초에는 수동 소자인 다이오드와 트랜지스터 등이 개발되었지만 이들은 크기와 소비전력, 가격의 등의 한계를 가졌다. 그러나 1947년에 벨 연구소의 Fig. 1(a)의 존 바딘과 윌리엄 쇼클리, 월터 브래튼이 3단자 소자인 트랜지스터가 Fig. 1(b)에 보여주는 것처럼 세계 최초로 만들어져 전 세계적인 혁명을 일으켰다. 이 소자는 이전의 전자 제품들을 대체하며, 작고 신뢰성이 높아서 컴퓨터, 텔레비전, 라디오, 전자식 계산기 등에 사용되는 전자 부품으로 대중화 되었다. 이후 무어의 법칙에 따라 소자의 크기는 작아졌으며, 집적도는 지속적으로 향상되어 전자 제품은 더욱 작고, 높은 성능을 갖게 되었고, 현재는 인공지능, 자율주행 자동차, 로봇 등 다양한 분야에서 활용되며, 우리의 삶을 변화시키고 있다.

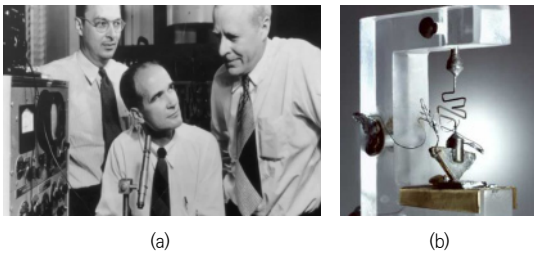


Fig. 1. Images of (a) Bell labs, from left, John Bardeen, William Shockley, and Walter Brattain, and (b) Transistors made by the labs

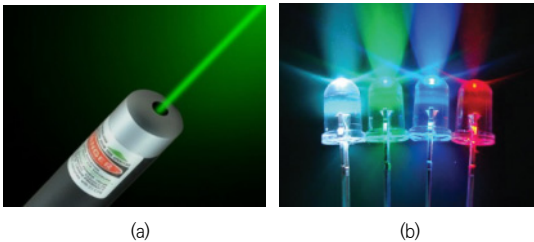


Fig. 2. Images of (a) Green laser and (b) White, green, blue, and red led.

이러한 소자의 대표적인 반도체 소재는 갈륨비소 (GaAs: Gallium Arsenide)와 실리콘(Si: Silicon)이다. 갈륨비소는 전자 운반 능력이 높은 밴드갭이 1.43eV인 직접 밴드갭 반도체로 Fig. 2와 같이 레이저, LED와 같은 빛을 발광하는 분야의 핵심 물질로 사용된다. 하지만, 높은 가격과 독성이 있기 때문에 제조 공정시 안전에 대한

문제가 발생할 수 있다[1, 2]. 실리콘은 간접 밴드갭 물질 특성으로 인해 광효율이 갈륨비소보다 매우 낮기 때문에 빛을 발광하거나 수광하는 소자로의 적용이 불가하지만, 캐리어(전자나 정공)가 움직여 동작하는 전자소자로의 소재로는 적용이 가능하며, 대표적으로 Fig. 3처럼 메모리나 시스템반도체 분야에 주로 사용되고 있다[3, 4].

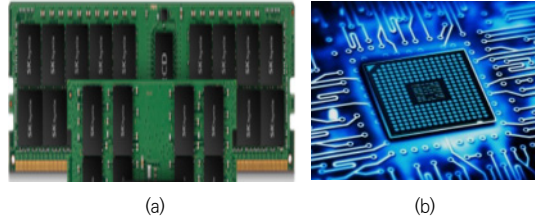


Fig. 3. Images of (a) Memory and (b) Computer's CPU

최근 전자소자는 다양한 분야로의 응용을 위해 휘거나 늘어나는 소재들에 대한 연구가 이루어지고 있다[5-8]. 이러한 플렉서블 기판은 휴대성과 미세화, 전자기기의 안정성에 기여하므로 디바이스의 전체 크기를 줄일 수 있으며 공간 탐사 및 군사 분야에서도 유용하다. 하지만, 다음과 같이 해결해야 할 많은 문제점들이 존재한다. 첫 번째로, 제조 공정이 어려워 생산 단가가 높다. 유연한 소재가 필요하므로 제조 공정이 복잡하다. 두 번째로, 기판을 구부리거나 굽힐 수 있기 때문에 일반적인 기판보다 내구성과 안정성이 낮아진다. 세 번째로는 일반적인 유리 기판은 평면적인 구조를 가지기 때문에 측면 밀봉에 문제가 없지만, 플렉서블 기판은 측면 밀봉이 취약하다. 마지막으로 제조 공정이 복잡하기 때문에 대량생산이 어렵다. 이러한 많은 난제에도 불구하고, 현재 폴리이미드로 구현된 플렉서블 기판은 OLED(Organic Light Emitting Diode), LCD(Liquid Crystal Display) 기판 등의 모바일 기기 뿐만 아니라 노트북, TV, 자동차 디스플레이 등에 사용되고 있다[8, 9].

폴리이미드는 고분자 중 하나로 탄성이 높고 내열성, 내화학성, 내마모성, 전지 절연성이 우수하다[10]. 디스플레이에는 용액 기반의 물질을 글라스 상에 스핀 코팅이나 slot die 장비로 코팅한 후 고온 열처리를 통해 구현된다. 이후 디스플레이 공정 후 글라스와 폴리이미드 사이에 자외선 레이저를 조사하여 폴리이미드를 탈착하면 플렉서블 디스플레이가 완성된다. 이와 같이 제작된 폴리이미드 기판은 공정이 복잡하고, 가격이 높은 단점이 있다.

추가적으로 플렉서블 소재의 기판에 구현하기 위한 투명 전극(Transparent Electrode)에 대한 연구가 이루어지고 있다. 가장 일반적인 소재로는 인듐주석산화물(ITO: Indium Tin Oxide)이 있으며 투명도와 전도도가 높아 터치 패널과 같은 투명한 특성이 필요한 분야에 사용되고 있다[11, 12]. 하지만, 인듐과 주석이 희귀 금속으로 가격이 높고 제조과정에서 환경오염문제가 발생할 수 있다. 따라서, 이를 대체하기 위하여 금속 나노선, 금속산화물, 탄소나노튜브(CNT: Carbon Nano-Tube)들이 연구되고 있다[13-16].

본 연구진은 플렉서블 기판 소재로 투명 테이프를 선택하였으며, 이 소재상에 전도성이 있는 MW-CNT (Multi-wall CNT)를 형성하여 소재의 변형에 따른 CNT 물질의 전기 및 물리적인 특성을 평가하였다. 이를 통해 친환경적이며, 가격이 낮고 표면 저항이 작은 휘 수 있는 기판 소재를 대신하고자 한다.

## 2. 선행연구

### 2.1 플렉서블 소재 및 적용 분야

플렉서블 기판의 대표적인 소재로는 폴리머에 속하는 폴리에스테르(PET: Polyethylene Terephthalate) 필름, 폴리우레탄(PU: Polyurethane) 필름, 폴리카보네이트(PC: Polycarbonate) 등이 있으며, 이러한 소재들의 특성 및 적용 분야는 다음과 같다.

먼저, 폴리에스테르 필름은 투명하면서도 내열성이 높아서 LCD나 OLED 디스플레이에서 배경 조명을 위한 백라이트를 제작하는 데 많이 사용되며, 가격이 저렴하고 유연성이 뛰어나기 때문에 태양전지 패널, 터치스크린 등에 사용된다.

다음으로, 폴리우레탄 필름은 폴리에스테르 필름보다 더욱 유연하고 내구성이 우수하여 굴곡이 많은 부분에 적용되고, 절연성이 높고 내수성, 내약품성이 좋아서 물과 화학물질에도 강하다. 이러한 특성으로 LED 램프, 터치패드, 터치스크린 등에 이용되고 있다.

마지막으로, 폴리카보네이트 필름은 폴리에스테르 필름, 폴리우레탄 필름보다 높은 내열성과 내구성, 내화학성이 뛰어나며, 고온, 고습환경에서도 소재의 특성이 유지된다. 따라서 디스플레이 기판, LED 램프 등의 분야에 적용되고 있다.

새로운 디스플레이 분야에 적용하기 위하여 연구되고

있는 투명한 플렉서블 기판이 있으며, 투명 폴리이미드가 대표적이다. 이 물질의 높은 내열성과 작은 CTE (Coefficient of Thermal Expansion) 때문에 OLED 디스플레이 기판에 적합하다.

최근에 본 연구진은 Fig. 4처럼 실리콘 소재로 투명하고 스트레처블이 가능한 소재를 제작하였다. 이 후 플렉서블 기판으로의 가능성을 평가하기 위하여 광센서 소자를 제작하여 특성을 분석하였다[17].

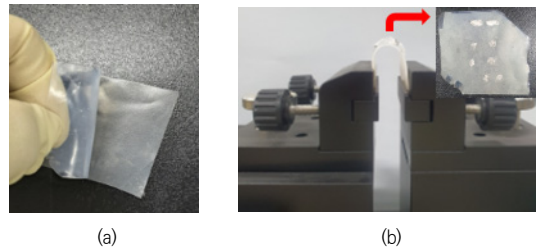


Fig. 4. (a) Transparent stretchable material made of a silicon-based material and (b) Equipment for evaluating device characteristics according to the folding of an optical sensor fabricated on a stretchable substrate.

### 2.2 투명 전극용 소재 연구 동향

투명 전극 소재는 태양광 전지, 전광판, 스마트폰 등 다양한 분야에서 사용되는 중요한 소재다. 최근에는 투명도, 전기 전도도, 기계적 안정성 등 다양한 성질을 가진 소재가 연구되고 있으며, 대표적인 것들은 아래와 같다.

첫 번째로, 금속 나노선 및 나노 메쉬(Nano-Mesh)로 투명도가 높고 전기 전도도가 우수하여 투명 전극 소재로서 매우 유용하며, 이러한 소재는 주로 은, 금, 구리 등의 금속을 이용한다.

두 번째로, 산화물 기반 소재인 이산화인듐( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) 등의 산화물 기반 소재도 투명 전극 소재로서 연구되고 있다. 이러한 소재는 안정성이 높고, 고온 및 고습도 환경에서도 사용이 가능하다.

세 번째로, 탄소 나노튜브와 그래핀으로 전기 전도도가 매우 우수하며, 동시에 높은 투명도를 가지고 있어 투명 전극 소재로 매우 유용하다. 하지만, 생산 비용이 높아 응용 분야가 제한적이라 할 수 있다. 특히 저자들은 용액 기반의 CNT를 다양한 소재(종이, 글라스)위에 상압플라즈마를 이용한 새로운 방법으로 구현하였다

마지막으로, 유기 전극은 전도성 고분자를 이용하여

제작된다. 이러한 소재는 생산 비용이 낮고, 유연성이 좋아 다양한 분야에서 응용이 가능하다.

### 3. 연구방법 및 결과

#### 3.1 투명 플렉서블 기판 제작

투명 플렉서블 기판은 매우 얇은 투명테이프로 구현되기 때문에 이 물질상에 전도성 물질을 코팅하기 위해서는 기판으로 사용될 투명테이프를 고정할 소재가 필요하다. 따라서, 고내열성 유리를 3cm × 3cm 크기로 자른 후 기판에 남아있는 파티클을 제거하기 위하여 수돗물이 담긴 유리 용기 안에 자른 유리를 담고, 이를 초음파 세척기를 이용하여 약 2분간 진행한다. 이후 질소 건으로 표면에 있는 물기를 완전히 제거한 후 Fig. 5(a)와 같이 폭이 1.5cm, 길이는 유리의 한 쪽 변의 길이와 같은 3cm의 투명 테이프를 유리에 붙인다. 이때 테이프와 유리 사이에 공기가 존재하여 후속 공정에 영향을 줄 수 있으므로 유의한다. 이후 다음과 같이 전도성 박막을 증착한다. 테이프 표면에 존재하는 유기물 및 파티클을 제거하기 위하여 산소 상압플라즈마 기술로 테이프 표면을 처리한다. 이 공정 방법은 고에너지의 산소플라즈마를 상압에서 생성하고, 표면을 화학적, 물리적으로 변화시키면서 표면을 개선할 수 있다. 공정 조건은 산소와 아르곤 가스를 공급한 후 13.56MHz의 고주파를 이용하여 산소 플라즈마가 형성되도록 하고, 공급 전력은 80W이다. 이 때 주의해할 것은 80W를 공급하는 상태에서는 플라즈마가 잘 형성되지 않기 때문에 100W 정도에서 서서히 공급 전력을 낮추어서 진행하는데 그 이유는 플렉서블 기판으로 사용되는 테이프는 유기물로 구성되어 있는 소재이기 때문에 높은 전력으로 표면 처리를 한다면 변형이 발생할 수 있기 때문이다. 일반적으로 용액 기반의 물질은 스프인코팅 장비를 이용하여 공정을 진행하지만, 유리 가운데에 테이프가 있기 때문에 균일한 막이 형성되지 않는다. 본 연구진은 매우 얇고 한 면이 매끄러운 유리 소재를 추가로 사용하여 용액 기반의 물질을 쉽고 빠르게 코팅할 수 있는 공정을 개발하였으며, 그 과정을 설명하면 스포이드에 CNT 용액을 담아 2방울을 상압플라즈마 처리된 테이프의 한쪽 끝에 도포한다. 다음으로 추가로 준비된 유리의 면으로 CNT를 밀어서 테이트 전면에 균일하게 형성되도록 하며, 남아있는 용매를 증발시키기 위하여 90도 온도로 셋팅된 핫플레이트 상에서 5분간 열처리를 진행하면, Fig.

5(b)처럼 CNT 막이 형성된다. 글라스 위쪽이 검게 보이는 이유는 글라스 아래에 CNT 용액을 떨어뜨린 후 위쪽으로 밀어올리면서 코팅하기 때문에 도포되지 않은 CNT 용액은 상부에 남기 때문이다. 이 부분에 용액을 남지 않도록 코팅할 수는 있지만, 테이프 전 영역에 CNT가 도포되지 않는 경우도 발생했기 때문에 앞에서도 언급한 것처럼 스포이드로 2방울을 떨어뜨린다. CNT의 코팅 횟수에 따른 박막의 전기적 및 광학적 특성을 관찰하기 위하여 2번, 3번, 4번, 5번 코팅한 샘플들을 추가로 제작하였다. 이후 전기 및 광학적인 특성을 분석하였으며, 또한, 투명 전극 코팅된 기판의 탈착에 의한 영향을 분석하기 위하여 CNT가 형성된 테이프를 탈착한 후 전압에 따른 전류특성을 분석하여 표면 저항 및 투과도를 살펴보았으며 탈착에 따른 영향성을 파악한다. 마지막으로 투명 전도막이 코팅된 투명 기판의 전자소자용 플렉서블 기판으로의 가능성을 bending machine을 이용하여 검증한다.

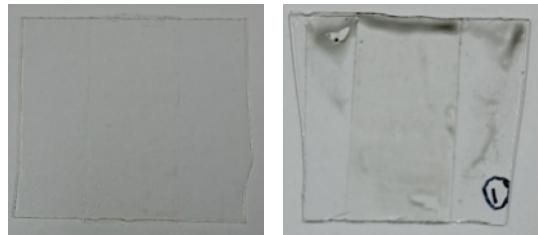


Fig. 5. Images of (a) a sample with transparent tape attached to the glass surface and (b) a sample coated with CNTs

#### 3.2 CNT 형성된 투명 플렉서블 기판 특성

먼저 글라스상에 CNT 코팅된 테이프가 형성되어 있는 기판의 표면 저항 및 투과도를 측정하였다. 표면 저항은 MS-TECH 사의 MST-1000H probe station에 연결된 4 point probe 장비를 이용하였으며, 코팅 횟수에 따른 결과를 Fig. 6(a)에 나타내었다. CNT 물질은 저항이 낮은 전도성 특성이 있기 때문에 코팅 횟수에 증가함에 따라 저항은 감소하며, 그 변화정도는 줄어들어 확인된다. 추가적으로 코팅 횟수 증가에 따른 저항 변화도를 관찰하기 위하여 inset으로 그 결과를 추가하였다. 4번 코팅할 때까지는 선형적으로 저항이 감소하지만 5번에서는 그 감소도가 작아짐을 알 수 있었으며, 이를 통해 코팅 횟수가 증가함에 따라 저항 변화는 점점 더 줄어들 것을 예상할 수 있다.

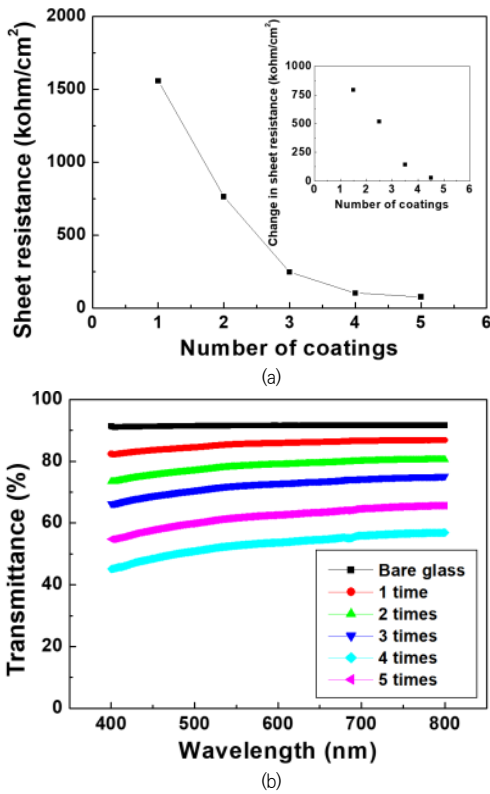


Fig. 6. (a) Surface resistance and (b) Transmittance according to the number of CNT coatings. The inset of Figure (a) shows the change in surface resistance with increasing number of coatings

Table 1. Surface resistance and change before and after detachment of CNT-coated tape on glass

Number of coatings	Sheet resistance (kohm/cm <sup>2</sup> )		Surface resistance change before and after detachment (kohm/cm <sup>2</sup> )
	Before detachment	After detachment	
1	1557	1569	+12
2	763	770	+7
3	247	250	+3
4	103	105	+2
5	77	79	+2

또한, 광특성을 분석할 목적으로 Jasco사의 V-750 장비를 사용하여 투과도를 분석하였고, 측정에 사용된 빛의 파장은 400nm에서 800nm까지의 가시광선 영역이며, CNT의 코팅 횟수가 증가하면서 막이 두꺼워져 점차적으로 불투명해지기 때문에 투과도는 감소한다. 측정된 파장에서 80%를 넘는 코팅은 1번한 샘플이었고, 글라스도 약

90% 정도 투과도를 보이는 것을 관찰하였다. 5번 코팅한 샘플은 400nm의 단파장 근처에서 50%이하의 투과도를 나타내었다.

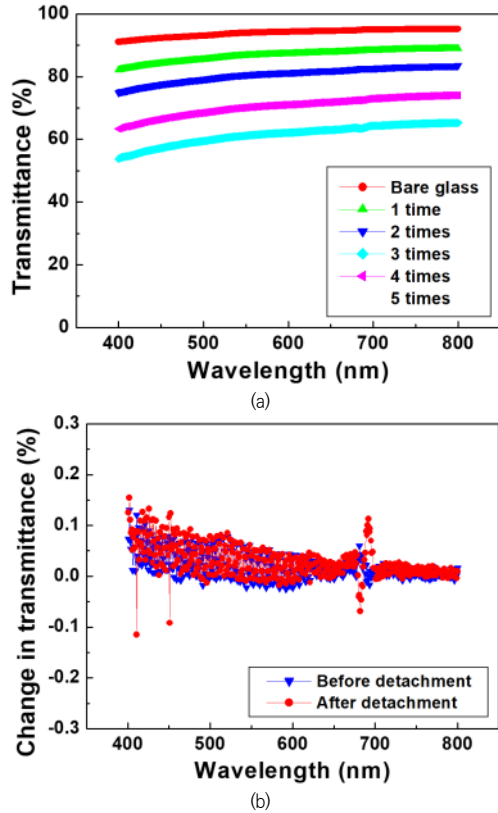


Fig. 7. (a) Transmittance according to the number of coatings after detachment and (b) Transmittance value change according to wavelength before and after detachment of the tape coated with CNT 3 times

CNT 코팅된 테이프의 플렉서블 기관 가능성을 검토하기 위하여 탈착 후 표면 저항을 Table 1에 보였다. 탈착 후에 모든 샘플에서 증가하였지만, 이러한 데이터로는 탈착에 의한 영향성이 있다고 판단하기 어렵다. 투과도도 탈착 후를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 7(a)에 보였다. 탈착 전의 투과도 Fig. 6(b)의 데이터와 비교하면 전체적인 투과도는 증가하였지만, 그 변화 경향성은 비슷함을 알 수 있다. 탈착 후 데이터에는 글라스가 제거되어 글라스 투과도가 반영되지 않기 때문에 투과도는 증가하게 된다.

탈착 전후의 영향성을 정확하게 분석하기 위하여 3번

코팅한 샘플의 파장 증가에 따른 투과도 변화를 계산하여 Fig. 7(b)에 나타내었다. 탈착 후 투과도가 전체적으로 작지만 평균값은 0.0216%로부터 0.0288%로 약 0.0078%로 높아졌으며, 특히 700nm 파장 근처에서 큰 변화가 확인되었다. 이를 통해 탈착에 의해 표면 저항 및 투과도에 영향을 미친다고 판단할 수 있으며, 향후 전자소자를 구현할 때 고려할 필요가 있다.

뿐만 아니라, 투명 전도막 형성된 테이프의 플렉서블 기판으로의 적용성을 확인하기 위하여 2번 코팅한 샘플을 이용하여 벤딩에 의한 표면 저항 및 투과도 변화도를 분석하였다. 벤딩 테스트는 Fig. 4(b)의 장비를 이용하여 곡률 반경 2mm에서 20,000번 진행하였으며, 표면 저항은 벤딩 후  $770\text{kohm/cm}^2$ 로 벤딩 테스트 전의 값(Table 1 참조)과 차이가 없었다. 투과도도 벤딩 전후 파장에 따른 변화를 Fig. 8에 보였으며, 데이터 차이는 나타나지 않았다. 이는 벤딩에 의하여 CNT 막의 영향은 없다고 할 수 있다.

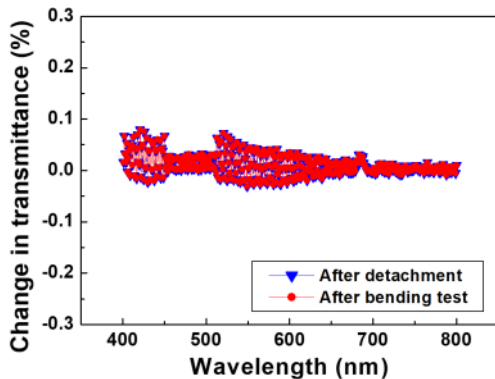


Fig. 8. Transmittance value change according to wavelength before and after bending test of the tape coated with CNT 2 times

#### 4. 결론

투명 테이프에 투명 전극으로 사용될 CNT를 코팅하여 플렉서블 기판 소재로의 적용 가능성을 평가하였다.

이를 위해 먼저 기판 소재인 테이프에 바로 코팅하는 것은 불가능하기 때문에 테이프를 고정시킬 수 있는 소재인 유리표면에 붙였다. 이 때 테이프 아래에 공기가 형성되는 공간이 존재할 수 있기 때문에 주의하여 공정을 진행한다. 이후 상압플라즈마로 테이프 표면의 유기물 및 파티클들을 제거하기 위하여 산소기판의 플라즈마 처리

를 진행한다. 다음으로 테이프 아래쪽에 CNT를 2방울 떨어뜨리고, 끝부분이 부드러운 유리를 이용하여 위로 CNT 용액을 밀고, 열처리를 진행하면 전도성 물질이 테이프에 형성된다. 최대 5번까지 코팅된 샘플을 제작하였다.

기판의 표면 저항 및 투과도를 측정하였고, CNT 코팅 횟수가 늘어날수록 저항과 투과도는 모두 감소하였다. 테이프를 유리로부터 탈착한 후 표면 저항은 모든 샘플에서 약간 증가하였으며, 투과도는 글라스를 제거한 상태이기 때문에 측정된 모든 파장 영역에서 10% 정도 상승하였다. 특히 3번 코팅한 샘플은 탈착 전후 파장에 따른 투과도 변화정도를 관찰하였으며, 전체적으로 평균값이 높아졌고, 특히 700nm의 파장에서 큰 변화가 확인되었다. 이를 통해 탈착 후 CNT의 전기적 광학적 특성이 미세하게 변화하였다고 판단할 수 있다. 향후 전자소자를 제작한 후 탈착시 이러한 특성 변화를 고려해야 한다.

다음으로 2번 CNT 코팅되어 있는 테이프를 곡률 반경 2mm인 조건에서 20,000번 벤딩 테스트를 하였으며, 벤딩 전후 전기적 및 광학적 특성이 변하지 않았으며, 이는 벤딩에 따른 CNT 특성 변화는 없다고 판단된다. 향후 CNT 코팅된 테이프에 광전자소자를 구현하고, 소자의 전기 및 광학적 특성을 평가하여 플렉서블 전자소자로의 적용이 가능하도록 할 것이다.

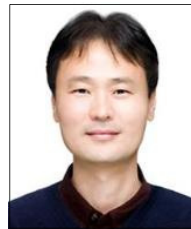
#### REFERENCES

- [1] C. Y. Park & C. W. Nahm (1987). The Effect of AuGe/Ni Thickness to Ohmic Characteristics of (n)GaAs Semiconductor. *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, 36(12), 50-55.
- [2] T. W. Kang, J. J. Lee, S. G. Kim, C. Y. Hong, J. Y. Leem & K. S. Chung (1989). Physical Properties of AuGe Liquid Metal Ion Implanted n-GaAs. *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, 26(6), 860-867.
- [3] A. N. Thiessen, M. Ha, R. W. Hooper, H. Yu, A. O. Oliynyk, J. G. C. Veinot & V. K. Michaelis (2019). Silicon Nanoparticles: Are They Crystalline from the Core to the Surface?. *Chemistry of Materials*, 31(3), 678-688. DOI : 10.1021/acs.chemmater.8b03074
- [4] H. T. Kim (2019). Development of Si(110) CMOS

- process for monolithic integration with GaN power semiconductor. *Institute of Korean Electrical and Electronics Engineers*, 23(1), 326-329. DOI : 10.7471/IKEEE.2019.23.1.326
- [5] 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
- [6] K. B. Kim, J. P. Lee & M. J. Kim (2020). Characteristics by deposition and heat treatment of Cr and Al thin film on stainless steel. *Journal of Convergence for Information Technology*, 11(3), 167-173. DOI : 10.22156/CS4SMB.2021.11.03.167
- [7] H.-L. Shen, H. Zhang, L-F Lu, F. Jiang & C. Yang (2010). Preparation and properties of AZO thin films on different substrates. *Progress in Natural Science: Materials International*, 20, 44-48. DOI : 10.1016/S1002-0071(12)60005-7
- [8] K. B. Kim, J. P. Lee, M. J. Kim & Y. S. Min (2019). Characteristics of Excimer Laser-Annealed Polycrystalline Silicon on Polymer layers. *Journal of Convergence for Information Technology*, 9(3), 75-81. DOI : 10.22156/CS4SMB.2019.9.3.075
- [9] Gao, X., Lin, L., Liu, Y. & Huang, X. (2015). LTPS TFT Process on Polyimide Substrate for Flexible AMOLED. *Journal of Display Technology*, 11(8), 666-669. DOI : 10.1109/JDT.2015.2419656
- [10] Takeuchi, K., Fujino, M., Matsumoto, Y. & Suga, T. (2018). Room temperature bonding and debonding of polyimide film and glass substrate based on surface activate bonding method. *Japanese Journal of Applied Physics*, 57(2S1), 02BB05. DOI : 10.7567/JJAP.57.02BB05
- [11] M. J. Kim & G. H. Jin (2009). ITO/AlNdN/Al contact process for active matrix OLED displays. *Electronics Letters*, 45(8), 421-423. DOI : 10.1049/el.2009.0037
- [12] 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
- [13] M. Sianipar, 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
- [14] H.-L. Shen, H. Zhang, L-F Lu, F. Jiang & C. Yang (2010). Preparation and properties of AZO thin films on different substrates. *Progress in Natural Science: Materials International*, 20, 44-48. DOI : 10.1016/S1002-0071(12)60005-7
- [15] S. C. Dixon, D. O. Scanlon, C. J. Carmalt & I. P. Parkin (2016). n-Type doped transparent conducting binary oxides: an overview. *Journal of Materials Chemistry C*, 4, 6946-6961. DOI : 10.1039/C6TC01881E
- [16] 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
- [17] Moojin 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

김 경 보(Kim, Kyoung-Bo)

[정회원]



- 2000년 8월 : 포항공과대학교 신소재공학과(공학박사)
- 2000년 8월~2001년 5월 : 포항공과대학교 신소재공학과(박사후연구원)
- 2001년 5월~2004년 8월 : 나이넥스(차장)
- 2004년 8월~2008년 12월 : 삼성디스플레이(책임연구원)
- 2009년 1월~2014년 11월 : 포스코(전문연구원)
- 2014년 11월~2016년 2월 : 한국생산기술연구원(전문위원)
- 2016년 3월~현재 : 인하공업전문대학 금속재료과 교수
- 관심분야 : Solar Cell, Display, Metal processing
- E-Mail : kbkim@inhatc.ac.kr

이 종 필(Lee, Jongpil)

[정회원]



- 1999년 8월 : 광운대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2004년 8월 : 광운대학교 전기공학과(공학박사)
- 1991년 2월~2015년 5월 : 한국전기학원(Director)

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

김 무 진(Kim, Moojin)

[정회원]



- 2005년 2월 : 포항공과대학교 전기전자공학과(공학박사)
- 2005년 2월~2012년 8월 : 삼성디스플레이(책임연구원)
- 2012년 8월~2015년 3월 : 포스코(책임연구원)

- 2015년 4월~2020년 2월 : 중원대학교 전기전자공학전공 교수
- 2020년 3월~현재 : 강남대학교 전자공학전공 교수
- 관심분야 : Solar Cell, Display, Semiconductor, Laser
- E-Mail : moojinkim7@kangnam.ac.kr