

전도성 고분자가 코팅된 탄소 나노튜브 투명전극의 특성 분석

김부종 · 한상훈 · 박진석[†]

[†]한양대학교(ERICA) 전자시스템공학과

Characterization of Transparent Electrodes using Carbon Nanotubes Coated by Conductive Polymers

Bu-Jong Kim, Sang-Hoon Han and Jin-Seok Park[†]

[†]Dept. of Electronic Systems Engineering, Hanyang University (ERICA)

Abstract

This study demonstrates transparent electrodes with characteristics desirable for touch screen panels using carbon nanotubes (CNTs). This has been accomplished by depositing CNTs on glass substrates via spray coating and then depositing thin conductive polymer films on the CNTs via spin coating. For all of the samples, such as CNTs, conductive polymers, and polymer-coated CNTs, the surface morphologies, sheet resistances, visible transmittances, chromatic properties are characterized as functions of their preparation conditions, such as the spray times for CNTs and the spin speeds for conductive polymers. The experimental results confirm that only the polymer-coated CNTs can satisfy all of the requirements that are required for electrodes of touch screen panels, such as the sheet resistance lower than 100 Ω /sq, the visible transmittance higher than 80 %, and the yellowness smaller than 1.

Key Words : Carbon nanotubes (CNTs), Conductive polymers, Spray coating, Spin coating, Sheet resistance, Transmittance, Yellowness, Transparent electrodes for touch screen panels

1. 서 론

현재, 디스플레이, 태양전지, 터치 스크린 패널 등 다양한 전자소자의 전도성 투명전극 소재로서 가장 널리 사용되고 있는 인듐-주석-산화물 (indium-tin-oxide, 이하 “ITO”) 박막은 향후 많은 응용이 기대되고 있는 플렉서블(flexible) 전자 소자의 투명 전극소재로 활용되기에는 많은 문제점이 있다. 즉, ITO는 유연성(flexibility)이 부족하여 깨지기 쉬우며, 우수한 전기적 특성을 얻기 위해서는 결정성을 유지해야 하기 때문에 높은 공정온도가 필요하다[1,2]. 또한, ITO의 주 원소인 인듐(In)은 희귀 원소로서 매장량이 극히 제한되어 있을 뿐 아니라, 최근 주 생산국인 중국이 그 공급량을 제한함에 따라 관련 부품의 가격상승 문제가 대두되고 있다.[3] 따라서, 이러한 ITO를 대체할 목적으로 메탈

메쉬(metal mesh), 은-나노와이어(Ag-nanowire), 전도성 고분자 (conductive polymer), 그래핀(graphene), 탄소 나노 튜브(carbon nanotubes, 이하 “CNTs”) 등을 이용한 새로운 투명전극 소재 개발에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다[4-8]. 현재, 상기 소재들의 응용이 가장 먼저 가시화되고 있는 것은 터치 스크린 패널의 투명전극 분야인데, 이를 위해서는 전기적 면저항(sheet resistance, R_{sq})이 약 100 Ω /sq 이하이고, 가시광 영역에서의 투과율(visible-light transmittance, T)이 약 80% 이상이 되어야 하며, 이와 동시에 색도(chromaticity) 특성, 특히 yellowness(b^*)가 1 이하의 값을 가져야 하는 것으로 알려져 있다[3].

위에서 거론한 투명전극 소재들 중에서 CNT는 고유의 화학적 안정성 및 기계적 강도를 가지고 있으며, 유연성(flexibility) 측면에서도 장점을 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나, CNT는 튜브 형태의 구조적 물성 때문에 균일한 박막 형성이 어렵고 표면 거칠기

[†]E-mail : jinsp@hanyang.ac.kr

가 비교적 크며, 튜브 사이의 큰 접합저항(junction resistance)으로 인하여 투명전극에 요구되는 전기적 특성을 만족하기에는 아직까지 다소 미흡한 실정이다[9,10]. 이와 관련하여, CNT의 전기적 특성을 향상시키기 위하여 다양한 연구들이 문헌에 보고 되고 있다. 우선, CNT 내에 혼재되어 있는 반도체적 성분과 도전체적 성분을 분리하는 방법이 소개된 바 있는데[11], 이는 CNT의 직경(diameter) 및 대칭성(chirality)을 정밀하게 제어해야 가능한 것으로서 아직까지 완벽한 분리 기술은 구현되지 않고 있으며 그 공정과정 또한 매우 복잡하기 때문에 상용화 기술로 발전하기에는 다소 무리가 있는 상황이다. 또한, CNT에 불순물을 주입하는 도핑 기술이 소개된 바 있는데[12], 아직까지 CNT 내에 존재하는 결함(defect)을 효과적으로 제어할 수 있는 방법이 제시되지 않고 있다. CNT의 전기적 특성 향상을 위한 또 다른 방법으로서, CNT와 다른 물질을 혼합한 하이브리드(hybrid) 형태의 투명전극 제작에 대한 연구들이 시도된 바 있다. 그 중에서 전도성 고분자 물질을 CNT에 혼합한 연구들에서는, 전도성 고분자가 CNT 내 튜브와 튜브 사이의 접합저항을 감소시키는 역할을 하여 CNT의 전기적 특성을 향상시킬 수 있다고 보고하고 있다[13-16]. 그러나, 일반적으로 전도성 고분자 재료는 물질 고유의 성질에 기인하여 파란색을 띠는 것으로 알려져 있는데[17], 이는 터치 스크린 패널의 투명전극으로 적용시 전극의 패턴들이 드러나 보이게 되는 문제를 야기할 수 있다. 이와 관련하여, 전도성 고분자의 혼합에 따른 CNT 투명전극의 색도 특성 변화를 체계적으로 분석한 연구나 효과적인 색도 조절 방법을 제시한 연구들은 아직까지 문헌에 보고 되고 있지 않다.

본 연구에서는 CNT 위에 전도성 고분자 물질의 하나인 PEDOT:PSS(poly(3,4-ethylene-dioxythio-phenylene)sulfonate)를 코팅한 하이브리드 형태의 투명전극을 제작하고, 터치 스크린 패널의 투명전극으로서의 특성 분석 결과를 제시하였다. 특히, CNT 증착에 사용한 스프레이 코팅(spray coating)의 시간 및 PEDOT:PSS 고분자 박막의 스핀 코팅(spin coating) 증착시 회전 속도(spin speed) 등에 변화를 주어 CNT와 PEDOT:PSS가 다양한 두께로 조합된 하이브리드 시료들을 제작하였고, 이에 따른 시료들의 전기적 면저항, 가시광 투과율 및 yellowness를 포함한 색도 특성 등을 체계적으로 분석하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 CNT는 유리 기판 위에 증착하였으며, 스프레이 코팅 증착시 필요한 CNT의 현탁액(suspension) 제작 및 정제(purification), 분산(dispersion) 과정 등은 다음과 같다. 단일벽(single-walled) CNT 파우더(powder)에 포함되어 있는 비정질 탄소, 금속 촉매 등을 제거하기 위하여 2:1 부피 비율의 황산(H_2SO_4)과 질산(HNO_3)의 혼합 용액에 CNT 파우더 10 mg을 넣고 초음파 분산을 통하여 혼합시킨 후, 교반기(agitator)를 사용하여 총 35분 동안 정제를 수행하였다. 정제된 CNT를 진공여과장치(vacuum filtering system)를 사용하여 걸러내고 증류수(deionized water, 50 ml)와 함께 음이온 계면활성제(surfactant)인 SDS(sodium dodecyl sulfate, $NaCl_2H_{25}SO_4$, 40 mg)를 첨가한 후 초음파 발생기 안에서 약 30분 동안 분산 공정을 수행하였다. 여기서, SDS는 수용액 내에서 CNT가 응집(agggregation)되는 현상을 억제하여 CNT가 기판 위에 균일하게 증착될 수 있게 한다.[18] 마지막으로, CNT 용액을 원심분리기(centrifugal separator) 내에서 30분 동안 약 4000 rpm의 속도로 돌린 후 분산이 잘 되어 있는 상층 부분만을 추출하였다. 이 용액을 이용한 CNT의 스프레이 코팅 증착시 분사압력은 0.2 MPa, 분사량은 2 ml/min, 그리고 열판의 온도는 100°C로 각각 고정시키고, 분사시간을 20 ~ 80초의 범위에서 변화시키면서 CNT를 증착하였다. 이후, 증착된 CNT에 질산 처리를 수행하여 CNT 내에 존재하는 SDS를 제거하였다. 증착된 CNT 위에 스핀 코팅 방법을 이용하여 200 ~ 1500 rpm의 범위로 스핀 속도를 변화시키면서 1분 동안 전도성 고분자인 PEDOT:PSS(NURI VISTA, EF-150)를 증착하고, 오븐(oven)에서 5분 동안 건조하였다. 여기서, PEDOT:PSS가 코팅된 CNT 시료(이하 "hybrid-CNT")의 전기적 면저항, 가시광 투과율, 색도 등의 특성을 최적화하기 위하여 CNT의 스프레이 증착시간과 PEDOT:PSS의 스핀코팅 속도를 다양하게 조합하여 많은 시료를 제작하였다.

FESEM(field-emission scanning electron microscope, SIGMA, Carl Zeiss)을 이용하여 유리 기판 위에 증착된 CNT 시료 및 PEDOT:PSS가 코팅된 hybrid-CNT 시료들의 표면을 관찰하였다. 전기적 면저항은 4-Point Probe(Chang Min Tech, CRT-SR-100)를 사용하여 측정하였으며, 가시광 투과율은 UV-Vis Spectroscopy(SCINCO, S-3100)를 이용하여 측정하였다. 또한, Spectrum Colorimeter(Konica Minolta, CM-5)를 사용하여 L^* (brightness)- a^* (green-red)- b^* (blue-yellow)의 3차원 색공간[19]에서 CNT, PEDOT:PSS 고분자 및 hybrid-CNT 시료들의 색도 특성을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 유리 위에 증착한 CNT의 표면 형상, 그리고 CNT 위에 PEDOT:PSS 고분자를 다양한 스피ن 속도로 코팅한 시료들의 표면 형상들을 FESEM으로 관찰한 결과이다. 우선, Fig. 1(a)의 사진을 통하여 스프레이 코팅에 의해 유리 기판 위에 CNT가 비교적 균일하게 증착되었음을 알 수 있다. 이러한 CNT 위에 PEDOT:PSS 고분자를 코팅한 경우, Fig. 1(b)의 사진에 보인 바와 같이 고분자막이 CNT의 튜브들 위에 혹은 튜브와 튜브 사이에 증착되어 있음을 알 수 있다. 또한, 고분자 코팅시 스피ن 속도가 작을수록 더 두꺼운 고분자막이 CNT를 덮기 때문에 Fig. 1의 (c) 및 (d)에 보인 바와 같이 CNT가 표면에서 점점 보이지 않게 된다.

Fig. 2와 Fig. 3은 CNT 및 PEDOT:PSS 시료들의 면저항 및 광투과율 측정 결과들을 CNT의 경우에는 스프레이 시간에 따라, 그리고 PEDOT:PSS의 경우에는 스피ن 속도에 따라 각각 나타낸 것이다. 여기서, 400-700 nm의 가시광선 영역에서 유리 기판의 광투과율은 거의 100%로 나타났고, 각 시료들의 광투과율은 이 파장대역에서 측정된 투과율 값들의 평균을 나타낸 것이다. Fig. 2와 Fig. 3의 결과에서 공통적인 것은, CNT 증착시 스프레이 시간이 증가할수록 혹은 PEDOT:PSS 고분자 증착시 스피ن 속도가 작을수록 면저항과 광투과율이 모두 단조적으로 감소하였다는 것인데, 이는 증착된 CNT 및 PEDOT:PSS 고분자층의 두께가 증가하였

기 때문이다[20,21]. 본 실험에서 CNT 증착시 스프레이 시간 20-80초, PEDOT:PSS 코팅시 스피ن 속도 200-1500 rpm의 증착조건 범위에서 CNT 시료들의 면저항은 약 380-3000 Ω/sq, 광투과율은 약 80.4-91.5 %, PEDOT:PSS 고분자 시료들의 경우 면저항은 약 90-450 Ω/sq, 광투과율은 약 89.2-99.6 % 등의 범위를 가지는 것으로 측정되었다.

Fig. 4는 CNT와 PEDOT:PSS 고분자의 다양한 조합에 따른 hybrid-CNT 시료들("H-n")의 면저항과 광투과율 측정 결과를 나타낸 것이다. 예를 들어, H-3 시료는 스프레이 시간을 50초로 하여 증착한 CNT 위에 스피ن 속도 700 rpm에서 PEDOT:PSS 고분자를 코팅한 것인데, 상기한 각각의 조건에서 개별적으로 증착한

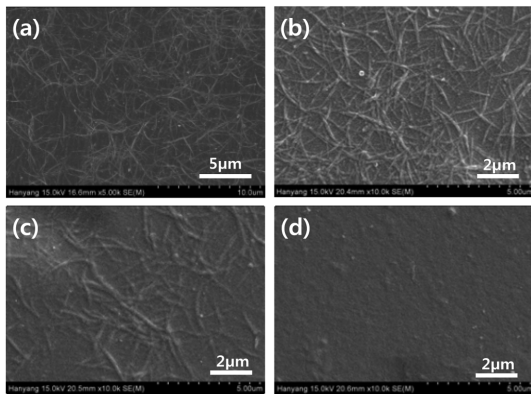


Fig. 1. The FESEM images for the surfaces of various species, such as (a) the CNTs deposited on the glass substrate and (b) - (d) the PEDOT:PSS films coated on the CNTs. For the PEDOT:PSS films, the spin speeds are (b) 1500rpm, (c) 1000 rpm, and (d) 500 rpm.

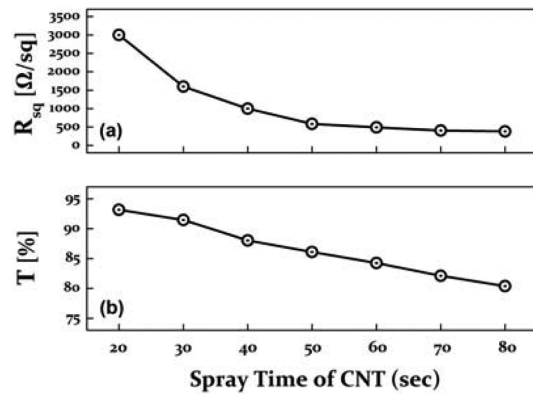


Fig. 2. The variations of sheet resistance (R_{sq}) and average transmittance (T) of CNTs according to the spray time used to deposit the CNTs.

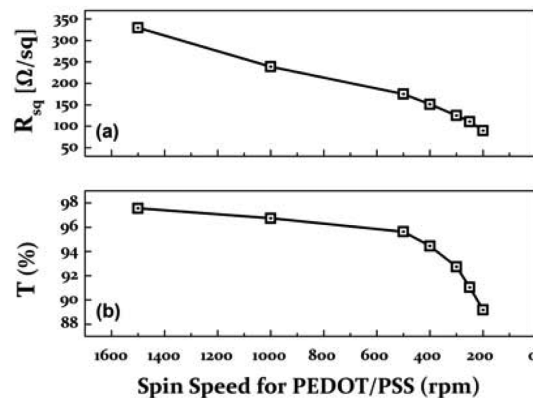


Fig. 3. The variations of sheet resistance (R_{sq}) and optical transmittance (T) of PEDOT:PSS films according to the spin speed used to deposit the PEDOT:PSS.

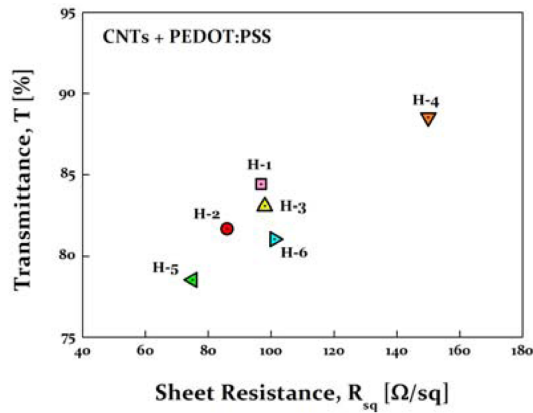


Fig. 4. The sheet resistance (R_{sq}) and optical transmittance (T) for various CNTs-PEDOT:PSS hybrid electrodes. The sample identification of H-n ($n = 1-6$) refers to the combination of each hybrid film, such as H-1: 40 sec (spray time of CNTs) + 600 rpm (spin speed of PEDOT:PSS films), H-2: 50 sec + 600 rpm, H-3: 50 sec + 700 rpm, H-4: 50 sec + 1000 rpm, H-5: 70 sec + 700 rpm, and H-6: 70 sec + 800 rpm.

CNT 및 PEDOT:PSS의 면저항이 각각 약 975 Ω/sq 및 125 Ω/sq 이었던 것과 비교하여 hybrid-CNT H-3 시료의 면저항은 약 89 Ω/sq 로 더 낮은 면저항을 갖는 것으로 나타났으며, 다른 시료의 예에서도 동일한 현상을 관찰할 수 있었다. 즉, hybrid-CNT 시료의 경우 동일한 조건에서 증착한 CNT 및 PEDOT:PSS 시료들과 비교하여 면저항이 더 작다는 사실을 알 수 있었다. 이는 PEDOT:PSS 고분자 입자들이 CNT 내의 나노튜브들 사이에 침투하여 튜브와 튜브 사이의 전자이동을 보다 용이하게 해주는 일종의 전도다리(conduction bridge)를 형성하게 되고, 이는 삼투임계(percolation threshold) 및 튜브-튜브간 접합저항(tube-tube junction resistance)의 감소를 유도하고, 결국 hybrid-CNT의 전도도(conductivity)를 향상시키는 효과를 유발하였기 때문이라 사료된다[22,23]. 단, hybrid-CNT의 경우에는 두 개의 층이 증착되어 만들어진 것이기 때문에 동일한 조건에서 증착한 CNT 및 PEDOT:PSS 고분자 시료들에 비해 광투과율은 다소 감소하였음을 알 수 있다. 그러나, Fig. 4에 나타난 바와 같이, CNT와 PEDOT:PSS의 특정한 조합에 의해 제작된 hybrid-CNT는 터치스크린 패널의 투명전극 재료에 요구되는 면저항($R_{sq} \leq 100 \Omega/sq$) 및 광투과율($T \geq 80\%$) 조건들을 모두 만족할 수 있음을 알 수 있다.

서론에서 기술한 바와 같이, 터치스크린 패널용 투

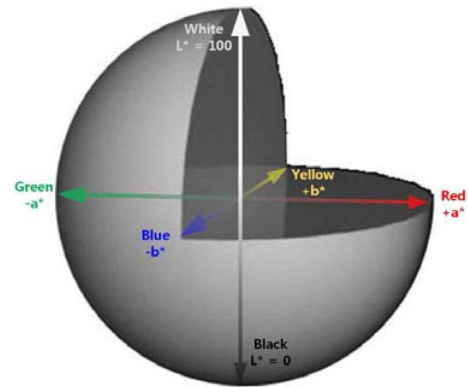


Fig. 5. The 3-dimensional $L^*a^*b^*$ color space.

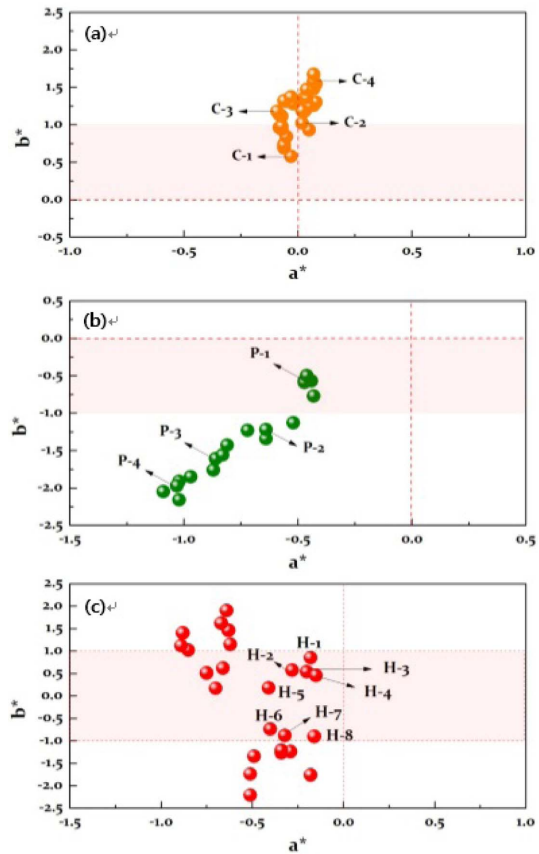


Fig. 6. The chromaticity (a^* and b^*) plots of (a) CNTs, (b) PEDOT:PSS, (c) hybrid (CNTs-PEDOT:PSS) electrodes.

명전극은 전기적 면저항 및 광투과율 특성 뿐 아니라, 색도 특성 요건도 충족하여야 한다. 색도 특성은

Fig. 5에 나타낸 3차원 색공간(color space)에서 각 좌표축의 성분들(즉, L^* , a^* , b^*)을 나타낸 것이다. 여기서, L^* 은 0-100% 사이에서 수치가 높을수록 명도가 높음을 의미하고, a^* 값은 양(+)의 값으로 증가할수록 빨강색에 가깝고, 음(-)의 값으로 증가할수록 녹색에 가까워짐을 의미한다. 또한, b^* 값은 양의 값으로 증가할수록 노랑색을, 음의 값으로 증가할수록 파랑색을 띠게 됨을 나타낸다.

Fig. 6은 본 연구에서 제작한 (a) CNT("C-n"), (b) PEDOT:PSS("P-n"), (c) hybrid-CNT("H-n") 등 세 가지 종류의 시료들에 대한 색도 특성을 측정된 결과이다. CNT의 경우, a^* 는 CNT 증착시의 스프레이 시간에 거의 무관하게 대부분 0에 근접한 값들을 보인 반면에, b^* 값은 스프레이 시간이 증가할수록 약 0.58에서 1.58까지 점차 증가하는 것으로 나타났다.

이에 비하여, PEDOT:PSS 고분자의 경우에는 일반적으로 알려져 있는 바와 같이, a^* 와 b^* 모두 음의 값을 가지는 것으로 나타났으며,[24] 스프인 코팅시 회전 속도를 느리게 할수록 a^* 와 b^* 의 수치들이 모두 음의 방향으로 비교적 큰 폭으로 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, CNT 및 PEDOT:PSS의 면저항을 낮추기 위해서는 각 재료의 두께를 증가시킬 필요가 있으나, Fig. 6(a)와 (b)의 결과는 두께의 증가에 따라 색도 특성이 저하될 수 있음을 의미한다.

또한, Fig. 6(a)와 (b)의 결과로부터 CNT와 PEDOT:PSS의 두께에 따른 b^* 의 색도 특성이 서로 반대 부호(sign)의 방향으로 변화하는 보색(complementary color) 관계가 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 이 결과를 토대로 CNT 위에 PEDOT:PSS 고분자를 코팅한 hybrid 시료의 색도 특성이 상기 두 재료가 가지는 b^* 특성의 보색 관계가 어떤 영향을 미치는 지를 분석하였다. Fig. 6(c)는 CNT의 스프레이 시간 및 PEDOT:PSS 고분자의 스프인 속도 등의 증착조건을 다양하게 조합하여 제작한 hybrid-CNT 시료들의 a^* 및 b^* 특성값의 측정 결과를 나타낸 것이다. 예를 들어, hybrid-CNT 시료 H-2는 CNT 시료 C-2를 증착한 후 PEDOT:PSS 고분자 시료 P-2를 그 위에 코팅하여 제작한 것으로서, CNT(C-2)의 a^* 및 b^* 값은 각각 -0.02 및 1.02이었고, PEDOT:PSS(P-2)의 a^* 및 b^* 의 값은 -0.64 및 -1.22이었는데, 이를 조합한 hybrid-CNT(H-2)의 a^* 및 b^* 값은 -0.28 및 0.57 인 것으로 나타났다. 즉, hybrid-CNT 시료의 a^* 와 b^* 값이 CNT와 PEDOT:PSS가 가지는 특성 값의 중간 범위를 가지는 것으로 나타났는데, 이는 앞에서 예상한 바와 같이, CNT와 PEDOT:PSS가 상호 보색 관계를 형성하고 있기 때문

Table 1. The identifications and preparation conditions of transparent electrodes samples considered in Fig. 6(a), (b), and (c) are shown. The transmittance (T), sheet resistances (R_{sq}), and chromatic properties (a^* and b^*) of all the samples are also summarized. Here, t_{SR} (sec) refers to the spray time used to deposit CNTs and v_{SP} (rpm) indicates the spin speed used to deposit PEDOT:PSS films.

Samples		t_{SR} (sec)	v_{SP} (rpm)	T (%)	R_{sq} (Ω/sq)	b^*
CNTs	C-1	20	-	91.46	3035	0.58
	C-2	40	-	88.72	963	1.02
	C-3	50	-	84.26	534	1.18
	C-4	80	-	80.39	379	1.58
Polymer	P-1	-	400	94.45	151	- 0.77
	P-2	-	300	92.74	125	- 1.22
	P-3	-	250	91.05	110	- 1.56
	P-4	-	200	89.19	90	- 2.05
Hybrid	H-1	50	300	79.73	84	0.85
	H-2	40	300	81.59	88	0.57
	H-3	60	300	78.16	81	0.54
	H-4	70	300	75.81	79	0.46
	H-5	30	300	85.23	92	0.18
	H-6	30	250	84.46	87	- 0.74
	H-7	40	250	80.27	82	- 0.88
	H-8	50	250	77.47	77	- 0.90

에 이를 혼합한 hybrid-CNT에서는 상기 두 재료의 색도 특성이 상호 보완되어 더 향상된 특성이 나타난 것이라고 사료된다. 여기서, L^* 특성은 CNT는 91 ~ 97, PEDOT:PSS 고분자는 95 ~ 99, hybrid-CNT는 88 ~ 95 범위의 값을 가지는 것으로 나타났다.

Table 1은 Fig. 6(a)-(c)에 보인 모든 시료들에 대하여 각각의 제작조건에 따른 광투과율, 면저항, 색도 특성(a^* 및 b^*) 등의 측정 결과들을 정리한 것이다. 종합적인 관점에서 CNT의 경우에는 면저항을 낮추기 위해 두께를 증가시키면 광투과율이 급격히 낮아지는 단점을 보였으며, PEDOT:PSS는 면저항 및 광투과율 특성은 비교적 우수하지만, 면저항을 100 W/sq 이하로 낮추기 위해서는 마찬가지로 두께를 증가시켜야 하는데 이 경우 a^* 와 b^* 등의 색도 특성이 크게 떨어지는 문제점이 있는 것으로 나타났다. 따라서, CNT 혹은 PEDOT:PSS 등의 재료를 투명전극으로 사용하는 경우에는 터치 스크린 패널에서 요구되는 면저항(R_{sq}) \leq

100 Ω /sq), 광투과율($T \geq 80\%$), 색도($b^* \leq 1$) 등의 물성 요건들을 동시에 충족하기 어렵다고 판단된다. 이와 비교하여, CNT와 PEDOT:PSS 고분자를 적절히 혼합한 hybrid-CNT 시료들(H-2, H-5, H-6, H7)은 상기 요건들을 모두 충족할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 터치 스크린 패널용 투명전극의 대상 재료로서, 스프레이 코팅 방법으로 증착한 CNT 및 스프레이 코팅 방법으로 증착한 PEDOT:PSS 고분자, 그리고 CNT 위에 PEDOT:PSS를 코팅한 hybrid-CNT 등의 재료들에 대하여 전기적 면저항, 광투과율 및 색도 특성 등을 비교 분석하였다. PEDOT:PSS 고분자의 경우 면저항과 투과율이 CNT에 비하여 우수한 반면에 색도 특성에서 파랑색을 띠게 되어 터치 스크린 패널에 적용시 시인성에 영향을 미칠 수 있는 것을 확인하였다. CNT의 경우에는 PEDOT:PSS 고분자에 비하여 색도 특성은 다소 양호하였지만, 면저항을 낮추기 위해 두께를 증가시켰을 경우 광투과율이 현저히 떨어지는 문제점을 나타냈다. 그러나, hybrid-CNT의 경우에는 PEDOT:PSS 고분자가 CNT 내에 채워짐으로써, CNT의 튜브-튜브간 접합저항을 감소시켜 높은 광투과율을 유지하면서도 면저항을 효과적으로 감소시킬 수 있는 것을 확인하였다. 또한, 그 동안 문헌에 구체적으로 보고되지 않았던 투명전극의 색도 특성에 대하여 체계적으로 분석한 바, CNT와 PEDOT:PSS 고분자가 상호보색 관계에 있음을 실험 결과로부터 확인하였고, 이러한 이유로 CNT와 PEDOT:PSS가 조합된 hybrid-CNT의 경우에는 더 우수한 색도 특성을 가질 수 있는 것으로 나타났다. 본 연구의 결과는, 전도성 고분자와 CNT가 조합된 하이브리드 형태의 전극재료가 향후 터치 스크린 패널을 비롯한 투명 전자소자의 전극재료로서 널리 활용될 가능성을 나타내는 실험적 근거자료가 될 것이라 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(No. 2012008365)의 지원을 받아 수행된 것임. 본 연구는 교육부가 후원하는 한국연구재단의 BK21플러스사업으로 부터 지원 받아 수행된 것임.

참고문헌

1. J. M. Park, Z. J. Wang, D. J. Kwon, G. Y. Gu, and K. Lawrence DeVries, "Electrical Properties of Transparent CNT and ITO Coatings on PET Substrate Including Nano-structural Aspects", *Solid-State Electronics*, Vol. 79, pp. 147-151, 2013.
2. D. R. Cairns, R. P. Witte, D. K. Sparacin, S. M. Sachman, D. C. Paine, G. P. Crawford, and R. R. Newton, "Strain-dependent Electrical Resistance of Tin-doped Indium Oxide on Polymer Substrates", *Applied Physics Letters*, Vol. 76, pp. 1425, 2000.
3. D. S. Hecht, L. Hu, and G. Lrvin, "Emerging Transparent Electrodes Based on Thin Films of Carbon Nanotubes, Graphene, and Metallic Nanostructures", *Advanced Materials*, Vol. 23, pp. 1482-1513, 2011.
4. J. Y. Lee, S. T. Connor, Y. Cui, and P. Peumans, "Solution-Processed Metal Nanowire Mesh Transparent Electrodes", *Nano Letters*, Vol. 8, pp. 689-692, 2008.
5. J. W. Kim, S. W. Lee, Y. Lee, S. B. Jung, S. J. Hong, and M. G. Kwak, "Synthesis of Ag Nanowires for the Fabrication of Transparent Conductive Electrode", *Journal Of Nanoscience And Nanotechnology*, Vol. 13, pp. 6244-6248, 2013.
6. D. J. Lipomi, J. A. Lee, M. Vosgueritchian, B. C. K. Tee, J. A. Bolander, and Z. Bao, "Electronic Properties of Transparent Conductive Films of PEDOT:PSS on Stretchable Substrates", *Chemistry Of Materials*, Vol. 24, pp. 373-382, 2012.
7. N. K. Cho, Y. U. Jung, K. B. Chung, and S. J. Kang, "Electrical, Electronic and Optical Characterization of Multilayer Graphene Films for Transparent Electrodes", *Current Nanoscience*, Vol. 9, pp. 521-524, 2013.
8. K. Shin, R. K. Park, L. Yu, C. Y. Park, Y. S. Lee, Y. S. Lim, and J. H. Han, "Improvement of Single-Walled Carbon Nanotube Transparent Conductive Films using Substrate Pretreatment", *Synthetic Metals*, Vol. 161, pp. 1596-1599, 2011.
9. M. Vosgeritchian, D. J. Lipomi, and Z. Bao, "Highly Conductive and Transparent PEDOT:PSS Films with a Fluorosurfactant for Stretchable and Flexible Transparent Electrodes", *Advanced Functional Materials*, Vol. 22, pp. 421-428, 2012.
10. E. C. W. Ou, L. Hu, G. C. R. Raymond, O. K. Soo, J. Pan, Z. Zheng, Y. Park, D. Hecht, G. Irvin, P. Drzaic, and G. Gruner, "Surface-Modified Nanotube Anodes for High Performance Organic Light-Emitting Diode", *American Chemical Society Nano*, Vol. 3, pp. 2258-2264, 2009.

11. Y. Feng, Y. Miyata, K. Matsuishi, and H. Kataura, "High-Efficiency Separation of Single-Wall Carbon Nanotubes by Self-Generated Density Gradient Ultracentrifugation", *Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 115, pp. 1752-1756, 2011.
12. B. Chandra, A. Afzali, N. Khare, M. M. El-Ashry, and G. S. Tulevski, "Stable Charge-Transfer Doping of Transparent Single-Walled Carbon Nanotube Films", *Chemistry of Materials*, Vol. 22, pp. 5179-5183, 2010.
13. H. Cheng, Z. Dong, C. Hu, Y. Zhao, Y. Hu, L. Qu, N. Chen and L. Dai, "Textile Electrodes Woven by Carbon Nanotube-Grapheme Hybrid Fibers for Flexible Electrochemical Capacitors", *Nanoscale*, Vol. 5, pp. 3428-3434, 2013.
14. A. Afraz, A. A. Rafati, and A. Hajian, "Analytical Sensing of Hydrogen Peroxide on Ag Nanoparticles-Multiwalled Carbon Nanotube-Modified Glassy Carbon Electrode", *Journal of Solid State Electrochemistry*, Vol. 17, pp. 2017-2025, 2013.
15. A. De Girolamo Del Mauro, G. Nenna, I. A. Grimaldi, F. Villani, and G. Pandolfi, "Conductive Nanocomposite Films Based on Functionalized Double-walled Carbon Nanotubes Dispersed in PEDOT:PSS", *American Institute of Physics*, Vol. 1459, pp. 259-261, 2012.
16. J. Park, A. Leeb, Y. Yimc, and E. Hanb, "Electrical and Thermal Properties of PEDOT:PSS Films Doped with Carbon Nanotubes", *Synthetic Metals*, Vol. 161, pp. 523-527, 2011.
17. J. Zhang, L. Gao, J. Sun, Y. Liu, Y. Wang, and J. Wang, "Incorporation of Single-walled Carbon Nanotubes with PEDOT/PSS in DMSO for the Production of Transparent Conducting Films", *Diamond and Related Materials*, Vol. 22, pp. 82-87, 2012.
18. R. Rastogi, R. Kaushal, S.K. Tripathi, A. L. Sharma, I. Kaur, L. M. Bharadwaj, "Comparative Study of Carbon Nanotube Dispersion using Surfactants", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 328, pp. 421-428, 2008.
19. M. Li, F. Liu, M. Juusola, and S. Tang, "Perceptual Color Map in Macaque Visual Area V4", *The Journal of Neuroscience*, Vol. 34, pp. 202-217, 2014.
20. L. Hu, D. S. Hecht, and G. Gru'ner, "Carbon Nanotube Thin Films: Fabrication, Properties, and Applications", *Chemical Reviews*, Vol. 110, pp. 5790-5844, 2010.
21. V. Skákalová, A. B. Kaiser, Y. S. Woo, and S. Roth, "Electronic Transport in Carbon Nanotubes: From Individual Nanotubes to Thin and Thick Networks", *Physical Review B*, Vol. 74, pp. 085403, 2006.
22. B. Hu, D. Li, P. Manandharm, Q. Fan, D. Kasilingam, and P. Calvert, "CNT/Conducting Polymer Composite Conductors Impart High Flexibility to Textile Electroluminescent Devices", *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 22, pp. 1598-1605, 2012.
23. G. Xiao, Y. Tao, J. Lu, and Z. Zhang, "Highly Conductive and Transparent Carbon Nanotube Composite Thin Films Deposited on Polyethylene Terephthalate Solution Dipping", *Thin Solid Films*, Vol. 518, pp. 2822-2824, 2010.
24. D. S. Hecht, D. Thomas, L. Hu, C. Ladous, T. Lam, Y. Park, and P. Drzaic, "Carbon-nanotube Film on Plastic as Transparent Electrode for Resistive Touch Screens" *Journal of the Society for Information Display*, Vol. 17, pp. 941-946, 2009.

접수일: 2014년 2월 10일, 심사일: 2014년 2월 24일,
게재확정일: 2014년 2월 28일