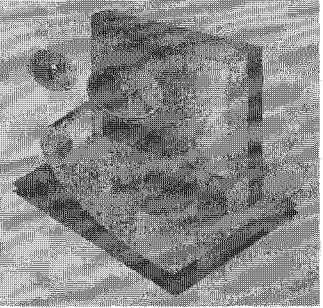


합학적 도핑을 이용한

탄소나노튜브 투명 전극 전도도 개선



김기강 Post Doctor (Massachusetts Institute of Technology)

탄소나노튜브 투명 전극은 탄소나노튜브를 박막 형태로 제작한 것을 말하며, 투명하면서 구부러진 상태에서도 전기가 흐를 수 있어, ITO 대체 물질로 각광을 받고 소재이다. 투명 전극의 전기전도도는 탄소나노튜브의 종류, 박막을 준비하는 방법, 그리고 탄소나노튜브의 도핑 정도에 따라서 크게 영향을 받는다. 본고에서는 위의 3가지 중에서 탄소나노튜브 투명 전극의 전기 전도도를 크게 향상시킬 수 있는 도핑에 대해서 기술하였다.

1. 서론

탄소나노튜브는 흑연 한 층 혹은 여러 층이 원통형으로 말린 형태로 존재하며, 층의 수에 따라서 단일층 혹은 다중층 탄소나노튜브라 불린다. 또한 단일층 탄소나노튜브는 흑연 한 층의 말린 방향에 따라서 반도체성 혹은 금속체성 특성을 갖는다 [1]. 탄소나노튜브는 높은 전기 전도도 및 기계적인 특성, 물리 및 화학적 안정성을 갖고 있어 여러 분야에 응용이 가능하다 [2,3]. 그 중에서 탄소나노튜브 투명 전극은 상용화에 가까이 근접해 있다 [4]. 탄소나노튜브 투명 전극은 투명하면서도 전기를 흐를 수 있는 투명 필름을 말하며, Indium Thin Oxide (ITO) 대체 물질로 각광을 받고 있는 소재이다. 또한 ITO에 비해 Flexibility가 높아 Flexible 투명 전극에 응용할 수 있어 많은 연구가 진행되어 왔다 (그림 1). 투명 전극을 제작하는 방법은 Spraying 방법, Filtering 방법,

Dip coating 방법, Bar coating 방법, Inkjet printing 방법 등등이 있으나, 산업적으로 응용 가능성이 가장 큰 방법은 Spraying 방법이다 [4-8]. 그림 2는 Spraying 방법으로 탄소나노튜브 투명 전극 제작 순서를 개략적으로 나타낸 것이다. Sonication을 이용하여 탄소나노튜브를 분산 (Dispersion) 후 분산이 되지 않는 탄소나노튜브 다발을 제거하기 위해 원심분리 (Centrifugation) 수행한다. 다발이 제거된 탄소나노튜브 용액을 이용하여 Spraying 방법으로 투명 전극을 제작한다. 가시 광선 영역(550 nm)에서의 투과도 및 면저항이 투명 전극의 특성 평가에 기준이 된다. Van der Pauw method를 이용하여 면저항 (단위: Ω/sq)을 측정하며, 투과도 (단위: %)는 UV-Vis-

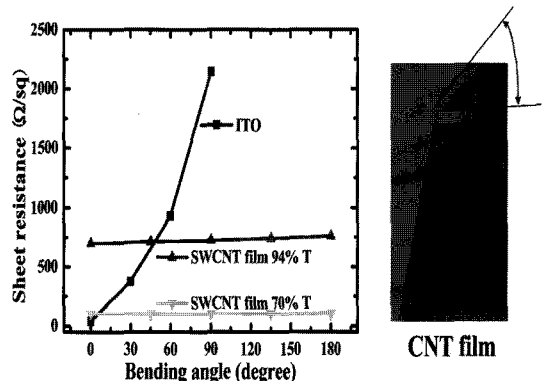


그림 1. 탄소나노튜브 (CNT) 투명 전극과 ITO와 Bending 특성 비교. ITO는 Bending 시 Crack 때문에 면저항이 급격히 증가함.

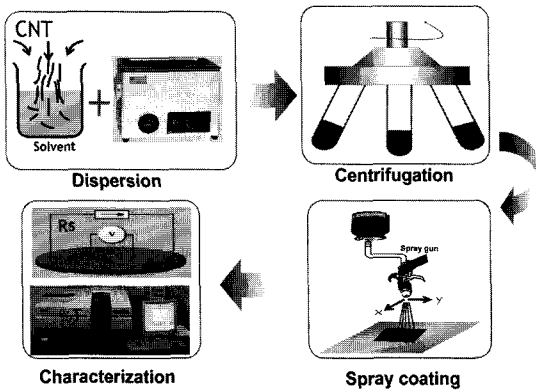


그림 2. 탄소나노튜브 투명 전극 제작 과정.

NIR 흡수 스펙트럼을 이용해서 얻는다. 투명 전극의 특성은 탄소나노튜브의 종류 및 그것의 결정성, 박막 준비 방법, 그리고 도핑 정도에 따라서 달라진다. 본고에서는 탄소나노튜브 투명 전극의 성능을 쉽게 개선할 수 있는 도핑 방법에 대해서 기술한다.

2. 탄소나노튜브 도핑 개념

탄소나노튜브의 도핑은 도펀트를 이용하여 탄소나노튜브의 전자 구조 및 Carrier의 농도를 조절하는 것을 말하며, 이를 통해 그것의 전기 전도도를 제어할 수 있다. 일반적으로 실리콘 반도체에서 널리 알려져 있는 도핑은 물리적으로 실리콘을 Boron이나 Nitrogen 대체하여 도핑을 수행한다 (그림 3(a)). 탄소나노튜브의 도핑도 위와 같은 방법으로 할 수 있지

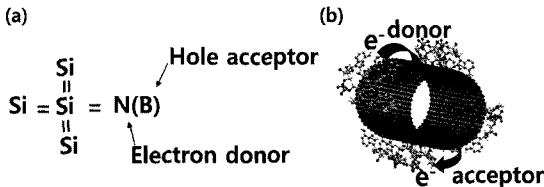


그림 3. (a) 실리콘 반도체에서 Nitrogen 혹은 Boron 도핑, (b) 화학물질에 의한 탄소나노튜브 도핑.

만, 도핑 후 carbon의 sp^2 bond가 sp^3 bond로 변하게 되어 전기 전도도가 크게 감소하는 문제가 있다. 또 다른 도핑 방법은 화학 물질을 이용하여 도핑 하는 것이다. sp^2 bond를 갖는 탄소나노튜브는 그림 3(b)와 같이 외부에 기능화 그룹을 갖는 화학 물질이 다가오면 쉽게 반응을 하며 charge transfer가 발생하여 도핑이 된다. 또한, bulk 물질과 달리, 나노 크기를 갖는 탄소나노튜브는 도핑에 의해 Fermi level이 쉽게 움직이게 된다. 따라서 일반적으로 탄소나노튜브는 대기 중에서 수분 혹은 산소에 의한 영향 때문에 항

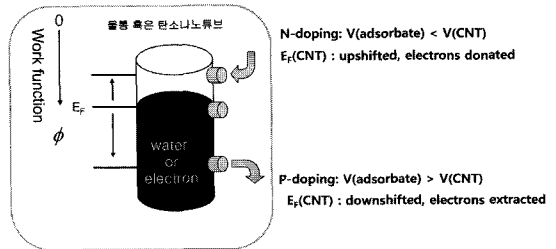


그림 4. 탄소나노튜브 도핑에 대한 개념도 (탄소나노튜브의 Fermi level을 수면의 높이로 생각하여, 물의 주입과 불출을 탄소나노튜브의 n-type 도핑과 p-type 도핑으로 여김).

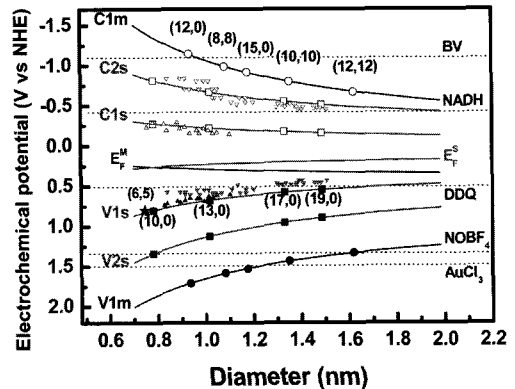


그림 5. 탄소나노튜브의 직경 및 Chirality에 따른 Electrochemical potential $C(V)_{im(s)}$ ($i=1,2$)에서 $C(V)$ 는 탄소나노튜브의 Conduction band와 Valence band를 말하며, $i=1,2$ 는 각각의 Band에 있는 van Hove singularity를 나타내며, $m(s)$ 는 금속성 탄소나노튜브와 반도체성 탄소나노튜브를 의미한다).

상 약간의 p-type 도핑이 된 상태로 존재하게 된다. 탄소나노튜브의 도핑 양을 조절하기 위해서 그림 4와 같은 개념을 도입할 수 있다. 물통에 물을 채울게 되면 물의 양이 증가하여 수면이 위로 올라가는 것과 물통 바닥에 구멍을 뚫어서 물을 흘려보내면, 수면이 아래로 내려가게 된다. 이때, 물이 차고 내리는 축을 work function, 수면의 높이를 Fermi level, 물을 채우는 위치와 물을 흘려보내는 구멍의 위치를 도펀트 각각의 work function으로 간주하면, Fermi level (수면의 높이)은 도펀트의 work function에 의해서 조절이 가능하다는 결론을 얻는다. 도펀트의 work function을 쉽게 알 수 없으나, electrochemical potential은 잘 알려져 있기 때문에 탄소나노튜브의 electrochemical potential을 구할 필요가 있다.

$$\begin{aligned} \text{Electrochemical potential (V)} \\ = (\text{work function (eV)} - 4.44 \text{ eV})/e \end{aligned} \quad (1)$$

탄소나노튜브의 Electrochemical potential은 Work function을 통해 식(1)을 이용하여 구하거나, 전기 화학적인 방법으로 구할 수 있다 [9]. 그림 5는 탄소나노튜브의 직경 및 Chirality에 따른 Electrochemical potential을 나타낸 것이다. $C(V)_{lim(s)}$ ($i=1,2$)에서 $C(V)$ 는 탄소나노튜브의 Conduction band와 Valence band를 말하며, $i=1,2$ 는 각각의 Band에 있는 van Hove singularity를 나타내며, $m(s)$

표 1. Ions들의 Reduction potential.

Half-reaction	E° (V vs. NHE)	Half-reaction	E° (V vs. NHE)
$Li^+(aq) + e^- \rightarrow Li(s)$	-3.05	$Au^{3+}(aq) + 3e^- \rightarrow Au(s)$	+1.52
$Rb^+(aq) + e^- \rightarrow Rb(s)$	-2.98	$NiO_2(s) + 4H^+ + 2e^- \rightarrow Ni^{2+}(aq)$	+1.59
$K^+(aq) + e^- \rightarrow K(s)$	-2.93	$2HClO(aq) + 2H^+ + 2e^- \rightarrow Cl_2(g) + 2H_2O$	+1.63
$Cs^+(aq) + e^- \rightarrow Cs(s)$	-2.92	$Ag_2O_3(s) + 6H^+ + 4e^- \rightarrow 2Ag^+(aq) + 3H_2O$	+1.67
$Ba^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Ba(s)$	-2.91	$HClO_2(aq) + 2H^+ + 2e^- \rightarrow HClO(aq) + H_2O$	+1.67
$Sr^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Sr(s)$	-2.89	$Pb^{4+}(aq) + 2e^- \rightarrow Pb^{2+}(aq)$	+1.69
$Ra^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Ra(s)$	-2.8	$MnO_4^-(aq) + 4H^+ + 3e^- \rightarrow MnO_2(s) + 2H_2O$	+1.70
$Ca^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Ca(s)$	-2.76	$H_2O_2(aq) + 2H^+ + 2e^- \rightarrow 2H_2O$	+1.76
$Na^+(aq) + e^- \rightarrow Na(s)$	-2.71	$AgO(s) + 2H^+ + e^- \rightarrow Ag^+(aq) + H_2O$	+1.77
$Mg^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Mg(s)$	-2.38	$Au^+(aq) + e^- \rightarrow Au(s)$	+1.83
$H_2(g) + 2e^- \rightarrow 2H^-$	-2.25	$BeO_3^-(aq) + 2H^+ + 2e^- \rightarrow BrO_3^-(aq) + H_2O$	+1.85
$Ac^{3+}(aq) + 3e^- \rightarrow Ac(s)$	-2.20		
$Be^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Be(s)$	-1.85		

는 금속성 탄소나노튜브와 반도체성 탄소나노튜브를 말한다. 탄소나노튜브는 1차원 구조를 갖기 때문에 Density of state에 van Hove singularity가 존재한다 [1]. Solid line은 이론적 계산으로부터 얻은 Work function을 식(1)을 이용해서 Electrochemical potential을 나타낸 것이고, 삼각형 및 역삼각형은 전기 화학적 방법으로 구한 값이다. 이론값과 실험값이 일치하는 것을 알 수 있다. 표 1과 2는 일반적으로 알려진 화학 물질의 Reduction potential을 나타낸 것이다. 이를 탄소나노튜브의 $E_F^{M(S)}$ 과 비교하여 p-type 도핑 혹은 n-type 도핑을 제어할 수 있다. 예를 들어 Potassium의 경우 탄소나노튜브를 n-doping시킬 수 있는 물질로 알려져 있는데, 그것의 Reduction potential이 -2.93 V이기 때문이다. 하지만, 대부분의 n-type 도핑 물질은 대기 중에서 불안정해서 실제 사용할 수 있는 물질은 제한적이다. 따라서 면저항을 감소시키기 위해서 도핑을 하는 경우 주로 대기 중에서 안정한 p-type 도펀트를 사용하여 도핑을 수행한다.

3. 도핑에 의한 면저항 감소 원인

탄소나노튜브 투명 전극은 탄소나노튜브의 Random network 형태로 존재한다. 따라서 그것의 면저항은 Random network에서 일어나는 Carrier transport에 관련이 있다. 면저항에 영향을 주는 요소는 그림 6과 같이 5가지로 요소로 나눌 수 있다. 이는 (탄소나노튜브(금속성(M) 혹은 반도체성(S))의 자체 저항) + (금속성(S)-금속성(S) 탄소나노튜브 접촉 저항) + (반도체성(S)-반도체성(S) 탄소나노튜브 접촉 저항) + (금속성(M)-반도체성(S) 탄소나노튜브 접촉 저항)이다. 이때, 반도체성 탄소

표 2. 바이오 물질의 Reduction potential.

Redox Couple	E ⁰ (mV vs. NHE, pH=7.0)	Redox Couple	E ⁰ (mV vs. NHE, pH=7.0)
Succinate+CO ₂ / a-KG	-670	Glucose oxidase (<i>P. notatum</i>)	-63
Acetate / Acetaldehyde	-600	Rubredoxin	-60
S ₂ O ₄ ²⁻ / HSO ₃ ⁻	-520 (-527)	Cytochrome b	+70 (35)
CO ₂ / CO	-520	Dehydroascorbate / Ascorbate	+80 (58)
CODH (<i>C. thermoaceticum</i>)	-530, -500, -440	Stellacyanin (<i>Rhus vernicifera</i>)	+184
MV ²⁺ / MV ⁺	-440	Cytochrome c	+220 (230) (254)
Ferredoxin (Spinach)	-440	O ₂ / H ₂ O ₂	+281
Gluconate / Glucose	-440	Cytochrome a	+290
CO ₂ / formate	-430	p-Phenylenediamine (PPD)	+356
Ferredoxin (Clostridium)	-420	Plastocyanin (Spinach)	+370
2H ⁺ / H ₂	-414	L-DOPA	+380
Xanthine / hypoxanthine	-371	Syringaldazine (SGZ)	+406
Cystine / Cysteine	-340	Ferricyanide / Ferrocyanide	+430
NADP ⁺ / NADPH	-320 (-324)	Laccase (<i>tree, Rhus vernicifera</i>)	+440
NAD ⁺ / NADH	-320	Laccase (<i>fungal, Myceliophora thermophila</i>)	+480
CO ₂ / acetate	-290	Ceruloplasmin (human)	+580, +490
Xanthine Oxidase	-270	ABTS (-N=N-)	+677
CO ₂ / CH ₄	-240	Laccase (<i>fungal, p. pinsitus</i>)	+760
FAD / FADH ₂	-220	Laccase (<i>fungal, p. versicola</i>)	+780
Pyruvate / Lactate	-190	O ₂ / H ₂ O	+820
FMN / FMNH ₂	-190		

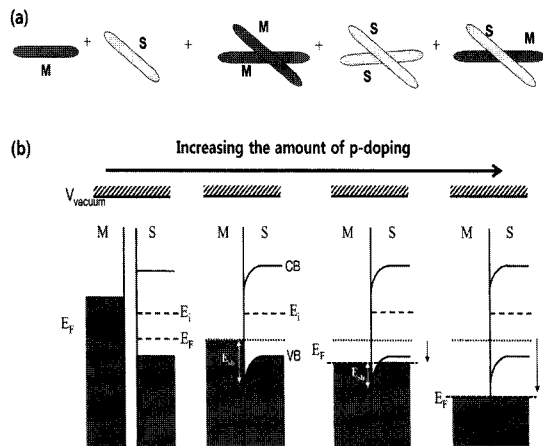


그림 6. (a) 탄소나노튜브 투명 전극에서 면저항에 영향을 주는 5가지 요소. M(S)은 금속성 (반도체성) 탄소나노튜브 자체 저항, M-M은 금속성 탄소나노튜브-금속성 탄소나노튜브의 접촉저항을 나타냄, (b) p-type 도핑량의 증가함에 따라 금속성 탄소나노튜브(M)와 반도체성 탄소나노튜브(S) 사이에서 생기는 schottky barrier가 감소함을 나타냄.

나노튜브의 경우에는 단일층 탄소나노튜브 Random network에만 해당이 되며, 금속성-반도체성 탄소나노튜브 접촉 저항 (Schottky Barrier의 발생으로 생김)이 다른 접촉 저항에 비해 대략 1,000배 이상 크다. 도핑에 의해 면저항을 감소시킬 수 있는 이유는 2가지로 볼 수 있다. 첫 번째는 Drude model에 의해 Electron 혹은 Hole 양의 증가로 인한 저항 감소이다. 이는 금속성 및 반도체성 탄소나노튜브 자체 저항이 감소함을 말한다. 두 번째는 반도체성 탄소나노튜브와 금속성 탄소나노튜브 사이에서 생기는 Schottky

barrier의 Height가 감소하기 때문이다. 그림 6(b)에서와 같이 p-doping에 금속성 탄소나노튜브와 반도체성 탄소나노튜브의 Fermi level이 아래로 내려가게 되어 도핑이 많이 되었을 때에는 Schottky barrier가 없어짐을 볼 수 있다. 이로 인해 단일층 탄소나노튜브 Random network의 경우 면저항 감소율이 다층층 탄소나노튜브 (금속성) Random network에 비해 도핑 후 면저항 감소율이 항상 높음을 알 수 있다.

4. 기능화 그룹에 의한 도핑

표 3은 Hydrogen에 비해 Electron withdrawing 능력이 있는 기능화 그룹과 Electron donating 능력이 있는 기능화 그룹을 나타낸 것이다. 탄소나노튜브 주위에 이러한 기능화 그룹을 갖는 화학 물질이 다가오면 탄소나노튜브는 반응을 하게 된다. 예를 들면, 용매에 의해 탄소나노튜브의 도핑이 됨을 확

표 3. 기능화 그룹의 Electron withdrawing (donating) ability.

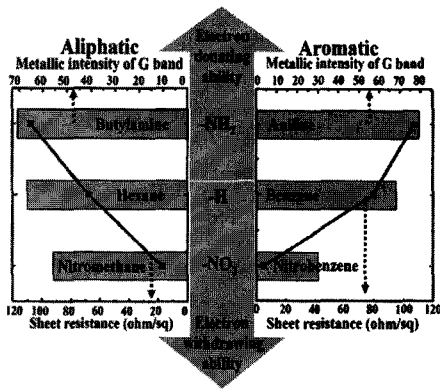
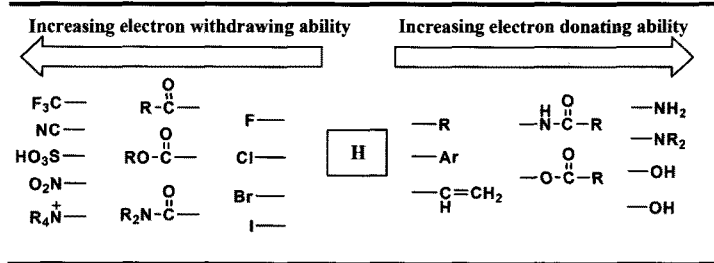


그림 7. 다양한 용매에 의한 탄소나노튜브의 면저항 변화.

인할 수 있는데, 그림 7에서와 같이 Aliphatic hexane 과 Aromatic benzene을 기준으로 $-NH_2$ 를 갖는 Butylamine 혹은 Aniline으로 도핑을 했을 시, 각각의 용매는 탄소나노튜브에 전자를 공급한다 [10]. 대기 중에서 수분 및 산소에 의해 약간 p-type 도핑이 된 탄소나노튜브는 n-type이 도핑에 의해 정공 (Hole) Carrier의 양이 줄어들면서 면저항을 약간 높아짐을 확인할 수 있다. 이에 반해, $-NO_2$ 를 갖는 Nitromethane 혹은 Nitrobenzene의 경우 탄소나노튜브로부터 Hole을 공급하여 좀 더 p-type 도핑을 하게 되어 Hole carrier 증가로 인해 면저항이 감소함을 확인할 수 있다. $SOCl_2$ 혹은 HNO_3 에 의한 도핑, $HN(CF_3SO_2)_2$, F4TCNQ (Tetrafluorotetracyano-p-quinodimethane), NHFA (NO_2SbF_6) 등등이 여기에 해당한다고 볼 수 있다 [5,11-14].

5. Reduction potential을 이용한 탄소나노튜브 도핑 정도 제어

탄소나노튜브의 Electrochemical potential은 그림 5와 같다. p-type 도핑의 경우, Reduction potential 값이 $E_F^{M(S)}$ 을 기준으로 아래에 위치한 화학물질을 이용하여 도핑을 할 수 있다. 앞서 언급한 물통에서 물을

빼는 것과 같은 이치로 $AuCl_3 > NOBF_4 > DDQ$ 순서로 도핑이 잘 됨을 실험적으로 확인하였다 [15,16]. 예를 들면, 표 4와 같이 탄소나노튜브 투명 전극의 면저항이 $AuCl_3$ 의 경우 93% 감소함을 알 수 있다. $NOBF_4$ 의 경우에도 92.2% 면저항이 감소함을 볼 수 있는데, 이는 93%가 면저항 감소의 한계이기 때문이다. 반면, n-type 도핑의 경우, $E_F^{M(S)}$ 에 비해 높게 위치한 $BV > NADH$ 의 순서로 도핑이 잘 됨을 실험을 통해 확인되었다 [17,18].

6. 탄소나노튜브 투명 전극 성능

Touch Panel (TS)을 응용하기 위해서는 투과도 85%에 면저항 $500 \Omega/sq$ 이 요구되며, Flat Panel Display (FPD)의 경우에는 투과도 80%에 면저항 $100 \Omega/sq$ 요구 된다. 2004년 Rinzler 그룹이 Science 지에 Filtering 방법으로 탄소나노튜브의 투명 전극 제작 및 응용 가능성에 대해서 보고한 이후로 지금까지 많은 연구가 진행 되어왔다. 2007년 Lee 그룹은 spray 방법으로 투명 전극을 제작 후 HNO_3 로 도핑을 하여 투과도 80%에 면저항 $70 \Omega/sq$ 을 얻어 투명 전극의 성능을 크게 개선함을 보였다 [5]. 비슷한 시기에 Manish 그룹은 $SOCl_2$ 로 투명 전극에 도핑을 하여 투과도 80%에 면저항 $200 \Omega/sq$ 을 얻었다 [19]. 그 후에도 많은 그룹에서 성능 개선하려고 노력을 많이 하였다. 2010년 Lee 그룹은 $AuCl_3$ 도핑을 이용하여 투과도 90%에 면저항 $100 \Omega/sq$ 을 얻게 되었다



표 4. DDQ, NOBF₄, AuCl₃로 도핑 후 탄소나노튜브의 면저항 감소율 (%).

	1 mM	10 mM	20 mM	60 mM	Remark
DDQ	63.9	65.8	65.3	66.5	
NOBF ₄	79.4	89.4	90.3	92.2 ^a	
AuCl ₃	56.3	60.0	73.0	93.0	

^aNOBF₄는 nitromethane에 20 mM 이상 녹지 않아, 20 mM 용액으로 도핑을 2번함.

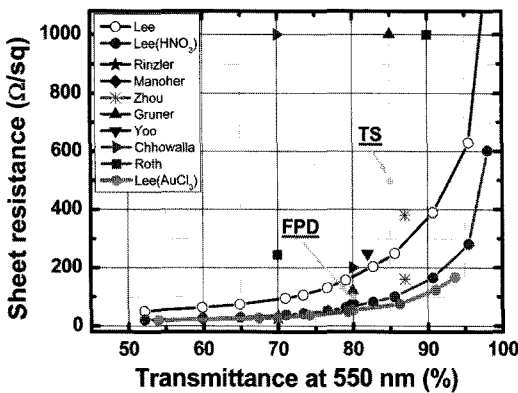


그림 8. 다양한 그룹에서 보고한 탄소나노튜브 투명 전극의 성능 비교.

[16]. 이러한 결과를 바탕으로 탄소나노튜브 투명 전극은 TS 및 FPD에 응용 가능성에 한발 다가섰다.

7. 결론 및 향후 연구 방향

화학적 도핑 기술을 이용하여 탄소나노튜브 투명 전극의 초기 면저항 대비 90 % 정도 감소함을 확인할 수 있었고, 이를 통해 투명 전극의 투과도 90%에 면저항 100 Ω/sq을 가능하게 만들었다. 이러한 기술로 TS 및 FPD 응용이 가능해 졌다. 하지만, 향후 연구 해야할 부분이 몇 가지 남아있다. 현재 사용하고 있는 탄소나노튜브는 가격이 비싼 단일층 탄소나노튜브이다. 이는 제품의 단가를 높이는 요인으로 작용하여 탄소나노튜브 투명 전극 시장에 형성에 장애를 주고 있다. 이에 가격이 싼 탄소나노튜브의 투명 전극 성능을 좀 더 개선할 필요가 있다. 또한 도

핑 후 도핑 안정성에 대한 연구가 좀 더 필요하다. HNO₃ 혹은 SOCl₂로 도핑을 하였을 경우 열적 안정성이 확보되지 않기 때문에 열적/대기 중 안정한 도펀트 개발이 필요하다.

감사의 글

본고를 집필 할 수 있게 도움을 주신 성균관대학교 이영희 교수님께 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] K. H. An and Y. H. Lee, "Electronic-structure engineering of carbon nanotubes," *Nano*, Vol. 1, pp. 115-138, 2006.
- [2] S. Iijima, "HELICAL MICROTUBULES OF GRAPHITIC CARBON," *Nature*, Vol. 354, pp. 56-58, 1991.
- [3] A. Thess, R. Lee, P. Nikolaev, H. J. Dai, P. Petit, J. Robert, C. H. Xu, Y. H. Lee, S. G. Kim, A. G. Rinzler, D. T. Colbert, G. E. Scuseria, D. Tomanek, J. E. Fischer, and R. E. Smalley, "Crystalline ropes of metallic carbon nanotubes," *Science*, Vol. 273, pp. 483-487, 1996.
- [4] Z. C. Wu, Z. H. Chen, X. Du, J. M. Logan, J. Sippel, M. Nikolou, K. Kamaras, J. R. Reynolds, D. B. Tanner, A. F. Hebard, and A. G. Rinzler, "Transparent, conductive carbon nanotube films," *Science*, Vol. 305, pp. 1273-1276, 2004.
- [5] H. Z. Geng, K. K. Kim, K. P. So, Y. S. Lee, Y. Chang, and Y. H. Lee, "Effect of acid treatment on carbon nanotube-based flexible transparent conducting films," *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 129, pp. 7758+, 2007.
- [6] Y. I. Song, G. Y. Kim, H. K. Choi, H. J. Jeong, K. K. Kim, C. M. Yang, S. C. Lim, K. H. An, K. T. Jung, and Y. H. Lee, "Fabrication of carbon nanotube field emitters using a dip-coating method," *Chemical Vapor Deposition*, Vol. 12, pp. 375-379, 2006.
- [7] T. Kitano, Y. Maeda, and T. Akasaka, "Preparation of transparent and conductive thin films of carbon nanotubes using a spreading/coating technique,"

- Carbon*, Vol. 47, pp. 3559-3565, 2009.
- [8] W. R. Small and M. I. H. Panhuis, "Inkjet printing of transparent, electrically conducting single-walled carbon-nanotube composites," *Small*, Vol. 3, pp. 1500-1503, 2007.
- [9] S. Trasatti, "THE ABSOLUTE ELECTRODE POTENTIAL - AN EXPLANATORY NOTE (RECOMMENDATIONS 1986)," *Pure and Applied Chemistry*, Vol. 58, pp. 955-966, 1986.
- [10] H. J. Shin, S. M. Kim, S. M. Yoon, A. Benayad, K. K. Kim, S. J. Kim, H. K. Park, J. Y. Choi, and Y. H. Lee, "Tailoring electronic structures of carbon nanotubes by solvent with electron-donating and -withdrawing groups," *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 130, pp. 2062-2066, 2008.
- [11] S. M. Kim, Y. W. Jo, K. K. Kim, D. L. Duong, H. J. Shin, J. H. Han, J. Y. Choi, J. Kong, and Y. H. Lee, "Transparent Organic P-Dopant in Carbon Nanotubes: Bis(trifluoromethanesulfonyl)imide," *Acs Nano*, Vol. 4, pp. 6998-7004, 2010.
- [12] U. Dettlaff-Weglikowska, V. Skakalova, R. Graupner, S. H. Jhang, B. H. Kim, H. J. Lee, L. Ley, Y. W. Park, S. Berber, D. Tomanek, and S. Roth, "Effect of SOCl₂ treatment on electrical and mechanical properties of single-wall carbon nanotube networks," *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 127, pp. 5125-5131, 2005.
- [13] Y. Noshu, Y. Ohno, S. Kishimoto, and T. Mizutani, "The effects of chemical doping with F(4)TCNQ in carbon nanotube field-effect transistors studied by the transmission-line-model technique," *Nanotechnology*, Vol. 18, p. 4, Oct 2007.
- [14] K. K. Kim, J. J. Bae, S. M. Kim, H. K. Park, K. H. An, and Y. H. Lee, "Control of p-doping on single-walled carbon nanotubes with nitronium hexafluoroantimonate in liquid phase," *Physica Status Solidi B-Basic Solid State Physics*, Vol. 246, pp. 2419-2422, 2009.
- [15] K. K. Kim, J. J. Bae, H. K. Park, S. M. Kim, H. Z. Geng, K. A. Park, H. J. Shin, S. M. Yoon, A. Benayad, J. Y. Choi, and Y. H. Lee, "Fermi level engineering of single-walled carbon nanotubes by AuCl₃ doping," *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 130, pp. 12757-12761, 2008.
- [16] K. K. Kim, S. M. Yoon, H. K. Park, H. J. Shin, S. M. Kim, J. J. Bae, Y. Cui, J. M. Kim, J. Y. Choi, and Y. H. Lee, "Doping strategy of carbon nanotubes with redox chemistry," *New Journal of Chemistry*, Vol. 34, pp. 2183-2188, 2010.
- [17] S. M. Kim, J. H. Jang, K. K. Kim, H. K. Park, J. J. Bae, W. J. Yu, I. H. Lee, G. Kim, D. D. Loc, U. J. Kim, E. H. Lee, H. J. Shin, J. Y. Choi, and Y. H. Lee, "Reduction-Controlled Viologen in Bisolvent as an Environmentally Stable n-Type Dopant for Carbon Nanotubes," *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 131, pp. 327-331, 2009.
- [18] B. R. Kang, W. J. Yu, K. K. Kim, H. K. Park, S. M. Kim, Y. Park, G. Kim, H. J. Shin, U. J. Kim, E. H. Lee, J. Y. Choi, and Y. H. Lee, "Restorable Type Conversion of Carbon Nanotube Transistor Using Pyrolytically Controlled Antioxidizing Photosynthesis Coenzyme," *Advanced Functional Materials*, Vol. 19, pp. 2553-2559, 2009.
- [19] B. B. Parekh, G. Fanchini, G. Eda, and M. Chhowalla, "Improved conductivity of transparent single-wall carbon nanotube thin films via stable postdeposition functionalization," *Applied Physics Letters*, Vol. 90, 2007.

저|자|약|력|



성 명 : 김기강

◆ 학 력

- 2004년
성균관대학교 물리학과 이학사
- 2008년
성균관대학교 대학원 물리학과
이학박사

◆ 경 력

- 2008년 - 2009년
· 2009년 - 현재
- 성균관대학교 Post Doctor
Post Doctor,
Massachusetts Institute of
Technology.