

# 탄소나노튜브/바인더 하이브리드 투명전도성 필름 기술

한중탁 선임연구원, 정희진 선임연구원, 정승열 선임연구원, 이건웅 센터장 (한국전기연구원 혁신소재연구센터 나노카본소재연구그룹)

## 1. 서론

탄소나노튜브 (CNT)를 기반으로 하는 투명전도성 필름은 기존 디스플레이, 태양전지, 터치패널 등에 사용되는 투명전극인 인듐 틴 옥사이드 (Indium tin oxide, ITO)를 대체할 수 있을 뿐만 아니라 대전 방지, 전자파차폐용으로 활용이 가능하여 그동안 많은 연구가 진행되어져 왔다. 특히, 단일벽 CNT (SWCNT) 필름의 경우 SWCNT의 유연성과 높은 전기전도도 그리고 용액공정에 의해 상온상업에서 플라스틱 기판에 적용할 수 있다는 장점으로 인해 많은 관심을 받고 있다 [1-9]. 이러한 SWCNT 기반 투명전도성 필름의 특성은 기본적으로 CNT의 순도, 직경, Chirality, 결합정도, 금속성정도, 도핑레벨 등의 CNT 자체의 특성에 좌우된다 [10-13]. 그러나 상기한 응용 분야에 적용하기 위해서는 물리적 특성과 내열, 고온고습 등의 환경신뢰성 및 기재와의 접착 특성이 확보되어야 한다. 이를 위해서는 경화형 고분자, 세라믹 줄, 산화금속 줄 등과 같은 바인더 물질과 하이브리드를 하거나 탑코팅을 하여야 한다 [14-15]. 이때 SWCNT/바인더 하이브리드 박막 필름의 광전기적 특성은 CNT 주변의 화학적 상태, 기질과의 계면특성, 그리고 바인더와 CNT 간의 화학적 상호작용력 등에 영향을 받게 된다. 그 이유는 CNT 필름이 네트워크로 이루어져 많은 접합점이 존재하므로 이러한 접합점에서의 접합저항, 접촉저항 등이 주변 환경에 영향을 받게 된다.

따라서 본 총설에서는 CNT와 바인더를 혼합한 일액형 용액을 이용해 투명전도성 필름을 제조할 때 고려해야하는 물질들 간의 계면 상호 작용력에 대해 연구한 일련의 연구내용을 소개하고자 한다.

## 2. 본론

CNT/바인더 하이브리드 박막 필름을 스프레이 코팅이나 스핀코팅으로 제조하기 위해서는, 우선적으로 CNT가 용매에 잘 분산되어 있어야 하고 바인더 물질 및 기타 첨가제를 첨가하더라도 분산성이 저하되지 말아야 한다. 그리고 코팅공정에서 사용되는 기판에 대한 용액의 젖음성이 박막의 특성에 영

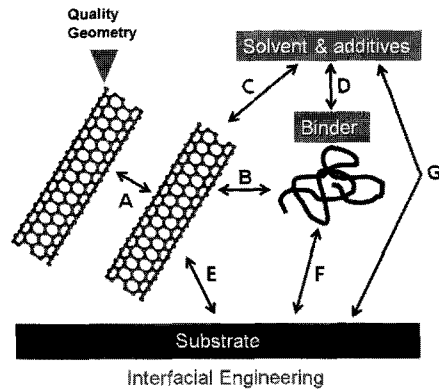


그림 1. Interfacial engineering in high performance transparent conductive/binder hybrid films.

향을 미치게 된다. 이러한 공정에서 그림 1에서처럼 각각의 재료들, 즉, CNT, 용매, 첨가제, 바인더 그리고 기재, 간의 계면에서의 상호작용을 잘 이해하고 활용할 때 그 특성과 성능을 향상시킬 수 있다.

CNT 네트워크 필름의 전도도는 아래 식과 같이 접합점의 개수 밀도  $N_j$ 와 fill-factor,  $V_f$ , 번들의 직경  $\langle D \rangle$ , 접합저항  $\langle R_j \rangle$  등에 영향을 받는다.

$$\sigma_{DC} = \frac{K}{\langle R_j \rangle} \frac{V_f^2}{\langle D \rangle^3}$$

여기서, K는 번들길이와 관련된 비례상수이다. 그러므로 바인더와의 하이브리드 과정에서 발생하는 fill-factor와 접합 저항의 변화는 CNT와 바인더간의 친화도에 밀접한 관계가 있게 된다. 따라서 CNT와 바인더 물질의 표면장력을 고려해야한다. CNT의 표면장력은 40-80 mN/m인데, 바인더 물질이 임계 표면장력 범위를 넘어서면 CNT와 매우 친하게 되어 CNT 접합사이로 침투하게 된다. 일반적으로 소수성기를 지니는 고분자의 경우 표면장력이 30-50 mN/m로 유사하여 네트워크 내로의 침투가 용이하다. 그러나 이러한 표면장력을 조절함으로써 CNT/바인더 하이브리드 필름에서의 전도도를 제어할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구실에서는 졸-겔 화학을 이용해 다양한 표면장력을 지니는 실란졸이나 금속산화물을 제조하고 이러한 계면상호작용력이 투명전도성 박막의 특성 및 성능에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 따라서 본론에서는 계면공학을 이용해 CNT/바인더 하이브리드 필름의 특성을 제어할 수 있는 여러 가지 인자에 대해 논의하고자 한다.

## 2.1 임계바인더 함량

CNT/바인더 하이브리드 필름의 투과도와 면저항은 기본적으로 도포되는 CNT/바인더의 양과 CNT대비 바인더의 함량에 의해 결정된다. 그림 2에서 보는 바와 같이 바인더 함량이 증가할수록 면저항이 증가하게 되고 특정 함량에서 급격히 증가하게 된다. 이때의 바인더 함량을 임계바인더 함량으로 정의한다. 그림 2의 표면 모폴로지에서도 볼 수 있듯이

임계바인더 함량이하이면 CNT가 바인더로 대부분 감싸여져 면저항이 급격히 증가한다는 것을 알 수 있다. 따라서 바인더 첨가에 따른 면저항의 증가를 최소화하기 위해서는 임계바인더 함량 이하로 바인더를 첨가하여야 한다. 그리고 중요하게 고려해야 할 사항은 앞서 언급한 바와 같이 바인더와 CNT의 표면장력차이에 따라 CNT 접합부로의 바인더 침투를 제어할 수 있으므로 임계바인더 함량은 CNT와 바인더가 친화도가 좋을수록 더 작아지게 된다.

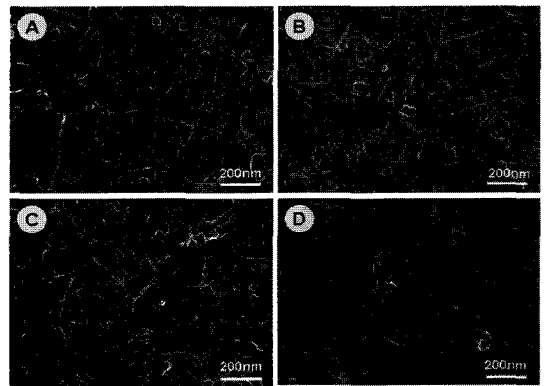
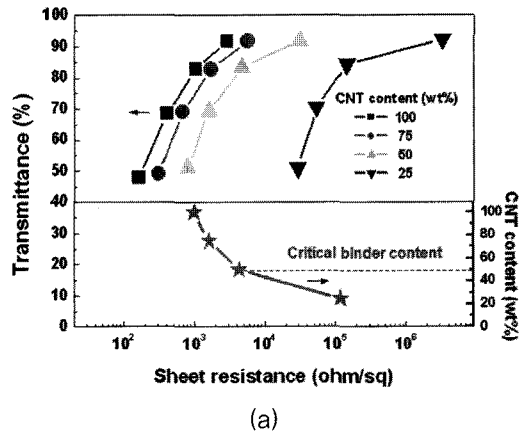


그림 2. Transmittance vs sheet resistance for SWCNT/MTMS hybrid films containing various amounts of MTMS binder. FE-SEM images of SWCNT/MTMS hybrid films containing various amounts of CNTs: (A) 100, (B) 75, (C) 50, and (D) 25 wt% [14].

### 2.2 CNT와 바인더간 상호작용력이 박막 특성에 미치는 영향

바인더 물질이 CNT를 좋아할 경우 바인더는 CNT 네트워크 속으로 침투하여 접합저항을 증가시키는 원인이 된다. 이러한 계면 상호작용력의 영향을 연구하기 위해서 다양한 관능기를 지니는 실란졸을 활용해 체계적인 연구가 가능하다. Tetraethoxysilane (TEOS), Methyltrimethoxysilane (MTMS), Vinyltrimethoxysilane (VTMS), 그리고 Phenyltrimethoxysilane (PTMS)를 모델바인더로 활용하면 소수성 CNT와 바인더의 상호작용력을 이해하는데 매우 유용하다(그림 3).

TEOS졸은 실라놀기로만 이루어져 매우 높은 표면장력 (170 mN/m)을 지니고 있어 소수성인 CNT와 친화력이 매우 약한 반면, 메틸기를 지닌 MTMS, 비닐기를 지닌 VTMS, 그리고 CNT와  $\pi$ - $\pi$  상호작용을 할 수 있는 PTMS는 CNT와 유사한 표면장력 (30 mN/m)을 지니고 있어 MTMS, VTMS, PTMS 순으로 CNT와 친화력이 좋을 것으로 예상할 수 있으며, 먼저항 또한 이러한 순서로 높아질 것으로 예상할 수 있다. 그러나 PTMS와 같이 CNT와 강력한  $\pi$ - $\pi$  상호작용을 하는 경우에는 바인더 물질이 CNT 표면을 완전히 덮고 있더라도 그림4에서와 같이 PTMS가 CNT의 브릿지(Bridge)역할을 하여 바인더가 첨가되더라도 접합저항을 크게 증가시키지 않아 먼저항이 크게 증가하지 않는 것으로 보고하고 있다. 이러한 CNT/바인더 하이브리드 필름에서의 접합부

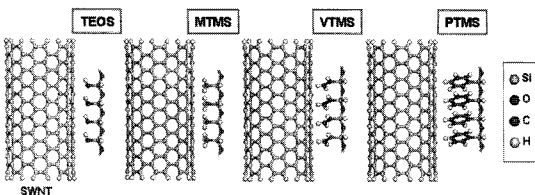


그림 3. A schematic diagram of the intermolecular interactions between SWCNTs and model binder materials; tetraorthosilicate (TEOS), methyltrimethoxysilane (MTMS), vinyltrimethoxysilane (VTMS), phenyltrimethoxysilane (PTMS) [14].

에서의 구조를 간접적으로 확인하기 위해서는 라만 분광분석법을 활용할 수 있다. 심하게 응집된 상태, 즉, 바인더가 혼합되지 않은 CNT 네트워크 필름에서는 번들간 또는 번들 내부에서의 반테르발스힘이 강하게 작용한다. 이에 반해 CNT/바인더 하이브리드 필름에서는 CNT와 바인더 물질간의 화학적 상호작용이 라만특성에 영향을 미칠 수 있다. 특히, 니트로 (Nitro), 아민 (Amine), 염소 (Chlorine)기 등 전자를 당기거나 밀어내는 성질을 지닌 관능기가 바인

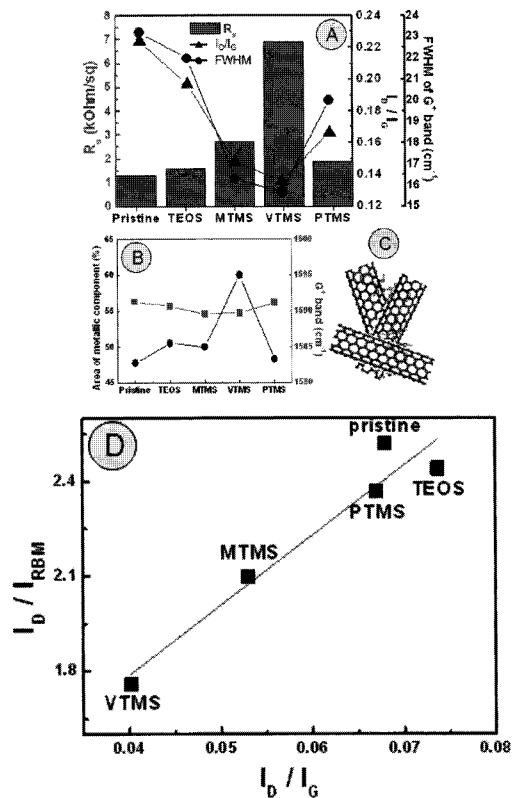


그림 4. (a) The correlation of the Raman spectra at 1.96 eV (D/G ratio, FWHM of G+ band) with the  $R_s$  (with an optical transmittance of 85%) of pristine SWNT and SWNT/silane films. (b) Metallic components extracted from the G-band and G band shift at 1.96eV. (c) shows the possible interactions between SWNTs and PTMS. (d) Correlation between the ratios  $I_D/I_{RBM}$  vs  $I_D/I_G$  at 2.41 eV [14].

더에 포함될 경우 도핑효과에 의해 G 모드의 피크가 움직이게 된다. 그러나 이러한 효과를 배제할 수 있는 바인더를 활용하게 되면 D 밴드와 Breathing 모드 피크비 ( $I_D/I_{RBM}$ )와 G 모드와 D모드 밴드의 강도비 ( $I_D/I_G$ )의 상관관계로부터 박막 내에서 CNT의 응집정도를 확인할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이  $I_D/I_{RBM}$ 와  $I_D/I_G$  값이 클수록 CNT간 거리가 가깝다는 것을 나타낸다. 또한  $I_D/I_G$ 와 G 모드 밴드의 반폭 (Full width half maximum)의 분석을 통해서도 확인이 가능하다. 이러한 분석결과와 면저항 수치가 일치하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 CNT와 바인더의 상호작용력을 적절히 조절할 경우 용도에 맞는 면저항값을 조절할 수 있으며, 또한 이러한 분자수준의 상호작용 조절을 통해 카본나노소재의 기초연구에 도움이 될 수 있다.

### 2.3 투명 전도성 초발수 코팅기술

탄소나노튜브 필름은 기본적으로 전도성을 지니고 있어 면저항이 높더라도 대전방지 기능을 충분히 부여할 수 있다. 이러한 코팅막에 물이 묻지 않는 초발수성이나 물이 순식간에 퍼지는 초친수 특성을 부여한다면, 대전방지에 의해 먼지가 묻지 않으면서 초발수성에 의해 물에 의해 쉽게 먼지가 제거되는 자가 세정 능력을 부여할 수 있게 된다. 자연에서, 많은 식물의 잎들은 물이 묻지 않는 초발수성을 지니고 있어 비가 오면 자신의 표면을 깨끗하게 만드는 자가 세정 능력을 지니고 있다. 이러한 초발수성은 표면의 마이크로 또는 나노구조와 표면의 화학물질의 젖음특성에 의존하게 된다. 따라서 CNT와 같은 나노구조물질을 활용하고 실란졸과 같이 다양한 관능기를 도입하여 젖음성을 제어할 수 있는 바인더 물질을 활용한다면 투명하면서 전도성을 지니고 초발수성에 의해 자가 세정 능력이 있는 코팅막을 형성시킬 수 있다. 최근에 한국전기연구원에서는 실란졸과 상호작용력이 좋게 하기 위해 CNT를 과산화수소로 처리하여 히드록시기를 도입하고 표면에너지를 조절할 수 있는 불소화실란을 바인더로 사용하여 기재에 코팅함으로써 상기 특성을 지니는 코팅기술을 소개하였다. 또한 실리카 나노입자를 도입하여 초발수 특성을 극대화하였다(그림 5).

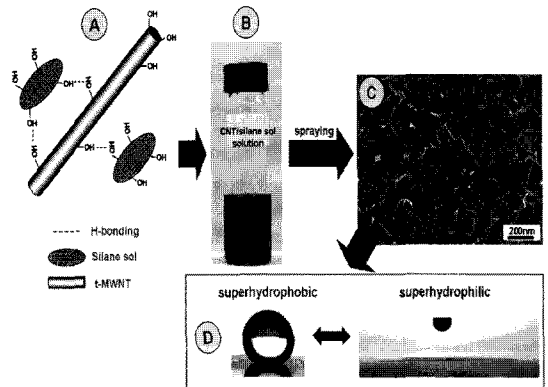


그림 5. ① Scheme of the hydrogen-bond-driven stabilization of a CNT solution. ② Image of a stabilized CNT/silane sol solution. ③ FE-SEM image of a spray-coated CNT/silane hybrid film. ④ Water droplets on this film [16].

### 2.4 CNT/금속산화물 하이브리드 박막기술

CNT와 산화금속을 혼합하여 박막을 형성시키기 위해서는 우선적으로 산화금속전구체를 CNT 용액에 혼합 시 분산성이 유지되어야 한다. 특히, 카르복실기를 지니는 CNT의 경우 이온화도 및 용액의 pH에 영향을 많이 받게 된다. pH가 3.0 이하에서는 카르복실레이트 (Carboxylate)가 카르복실산 (Carboxylic acid)로 변하면서 이들 간 수소결합에 의해 CNT가 응집되게 된다. 또한 사용되는 금속산화물 전구체에 수소결합을 유도할 수 있는 아민 등의 관능기를 지니고 있을 경우 마찬가지로 수소결합에 의해 CNT가 응집되게 된다. 실제로 아민기를 지니는 산화아연 졸을 CNT 용액에 첨가하게 되면 CNT가 팽윤된 상태로 침전된다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 CNT에 도입된 관능기에 보호막을 형성시켜 수소결합이 일어나는 현상을 배제시키는 연구가 진행되었다. 티타니아 졸을 활용하면 그림 6에서와 같이 카르복실기를 지니는 부분을 선택적으로 코팅하여 산화아연 졸을 첨가하더라도 분산성이 유지된 코팅액을 제조할 수 있다.

아울러, CNT 투명전도성 필름을 투명전극으로 사용하는 경우 고온 고습에서 면저항이 유지되어야 한다. 이러한 특성을 부여하기 위한 노력으로 다양

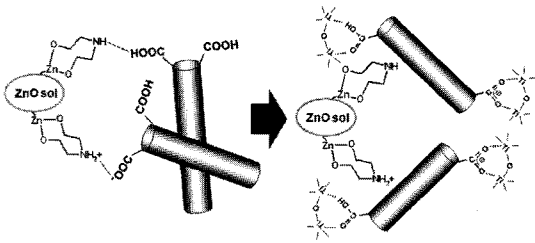


그림 6. Proposed mechanism for the improved stability of dispersion of carboxylated SWCNTs in ZnO sol achieved by capping of carboxyl groups with a TiO<sub>2</sub> sol.

한 바인더 물질을 사용할 수 있다. 그중에 티타니아는 산소와 수분을 차단하는 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 티타니아를 CNT 표면에 코팅하여 박막을 형성시킬 경우 고온 고습을 향상시킬 수 있는데, CNT를 산화시켜 티타니아와 결합력을 증가시키는 방법은 CNT의 산화에 의한 전도성 감소가 문제가 될 수 있어 비공유결합에 의한 코팅방법이 고안되었다. 그림 7에서 보는 바와 같이 아세틸아세톤을 티타니아 졸의 안정화제로 사용하는 경우 아세틸아세톤이 티타니아 졸과 반응하면서 소수성기가 CNT와 소수성 결합을 할 수 있어 그림 8과 같이 CNT 표면에 티타니아층을 균일하게 코팅할 수 있다. 이러한 코팅층을 형성시킬 경우 그렇지 않은 경우보다 300도 이상의 고온에서 열적 안정성을 확보할 수 있으며, 또한 고온고습에 노출 시 발생하는 먼저항의 상승을 감소시킬 수 있다.

### 2.5 박막특성 향상을 위한 기재 젖음성 제어

스프레이 코팅방법은 대면적에 CNT 코팅막을 형성할 수 있어 기타 진공여과법이나 디핑 (Dipping) 법 등에 비해 CNT 투명전도성 코팅방법으로 많이 활용되고 있다. 이때 코팅용액과 기재와의 젖음성 정도는 투명전도성 박막의 특성을 크게 변화시킬 수 있다. 최근에 한국전기연구원에서는 유리기판의 표면에너지를 실란커플링제로 표면 처리하여 제어함으로써 코팅액의 기재위 젖음성이 CNT/바인더 하이브리드 필름의 광전기적 특성에 미치는 연구를 발

표하였다 (그림 9). 코팅액의 젖음성이 증가할수록 먼저항과 투과도가 동시에 감소하는 경향을 보였다. 극성유기용매와 친수성기를 지니는 바인더 등으로 이루어진 코팅용액을 코팅할 경우 표면이 소수성으로 변화할수록 Dewetting되는 부분이 발생하면서 매크로 스케일에서는 CNT가 서로 연결되어 전도성을 지니지만 CNT가 상대적으로 적은 부분은 빛을

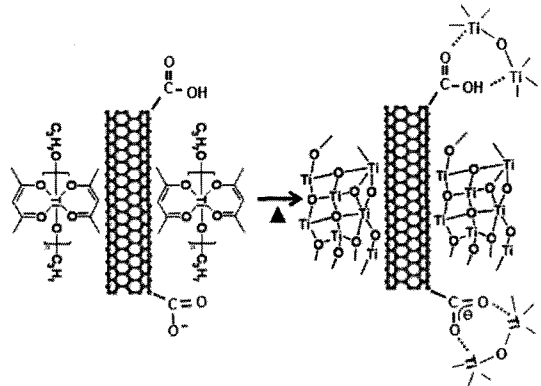


그림 7. Mechanism for the noncovalent coating of SWCNTs with a TIP-acac layer, followed by removal of acetylaceton molecules by thermal treatment [17].

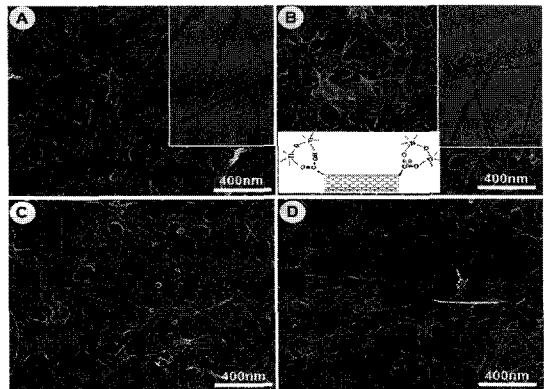


그림 8. SEM images of (A), (C) SWCNT/titania sol with acac and (B), (D) SWCNT/titania sol without acac containing 50wt% titania sol; (A), (B) cured at 150°C and (C), (D) baked at 350°C for 1h. Right inset images in (A) and (B) show TEM images. Left bottom images in (B) show the chemical environment on the nanotube surface without acetylaceton [17].

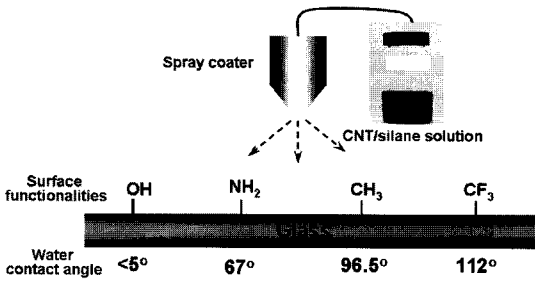


그림 9. Schematic representation of the spray coating of FWCNT/silane solutions on surface-modified model substrates [18].

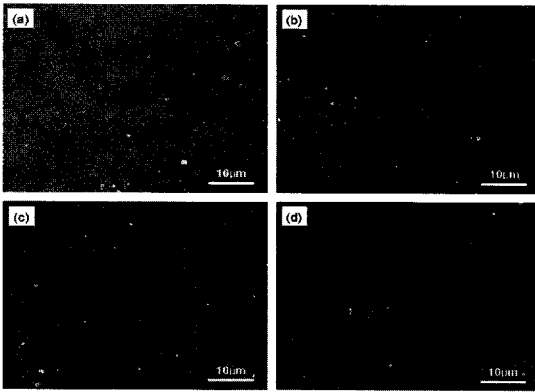


그림 10. Scanning electron microscopy images of CNT/MTMS thin films on various substrates; the surface functionalities are: (a) OH, (b) NH<sub>2</sub>, (c) CH<sub>3</sub>, and (d) CF<sub>3</sub> [18].

잘 투과하여 투과도를 높이는 효과가 있다(그림 10). 특히, 대전방지 용으로 사용하고자 할 경우 면저항은 크게 변화시키지 않으면서 투과도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한 코팅용액에 다양한 바인더와 첨가제가 함유될 수 있고 기판도 유리기판 이외에 다양한 플라스틱 기판을 사용할 수 있어 이러한 젖음성 제어를 통해 용도에 맞는 최적화된 코팅액과 기재를 선정할 수 있을 것이다.

### 3. 결론

본 총설에서는 최근 3년여 간 CNT/바인더 하이

브리드 필름에 대한 연구결과에 대해 소개하였다. CNT와 바인더가 혼합된 박막을 성형함에 있어서 코팅액 제조단계에서 각 재료들 간의 상호작용에 대한 이해가 필요하며, 박막 형성기술에서도 기질과 코팅액의 각 성분간의 젖음성 문제 등이 고려가 되어야 최적의 특성을 나타내는 전도성 박막을 형성시킬 수 있다. 특히, 바인더 혼합에 의한 면저항의 상승을 최소화하기 위해서는 CNT와 바인더간 계면장력을 크게 할수록 유리하며, 필요에 따라 계면에서의 상호작용을 최대화 하여 비공유결합에 의해 금속산화물을 코팅할 수 있다. 또한 CNT의 나노구조와 코팅막의 표면에너지 조절을 통해 전도성을 지니면서 초발수 특성이 있는 기능성 코팅막을 형성시킬 수 있다. 이와 같이 CNT를 기반으로 하는 투명전도성 필름 형성에 있어 각 재료간의 계면을 적절히 조절함으로써 응용 분야에 적합한 최적의 코팅막을 형성시킬 수 있으며, 향후 투명전도성 필름의 다양한 응용 분야에 적용을 위한 지속적인 연구가 필요하다.

### 참고 문헌

- [1] Wu, Z. C.; Chen, Z.; Du, X.; Logan, J. M.; Sippel, J.; Nikolou, M.; Kamaras, K.; Reynolds, J. R.; Tanner, D. B.; Hebard, A. F.; Rinzler, A. G. *Science* **2004**, *305*, 1273.
- [2] Zhang, M.; Fang, S.; Zakhidov, A. A.; Lee, S. B.; Aliev, A. E.; Williams, C. D.; Atkinson, K. R.; Baughman, R. H. *Science* **2005**, *309*, 1215.
- [3] Hu, L.; Hecht, D. S.; Grüner, G. *NanoLett.* **2004**, *4*, 2513.
- [4] Kaempgen, M.; Duesberg, G. S.; Roth, S. *Appl. Surf. Sci.* **2005**, *252*, 425.
- [5] Parekh, B. B.; Fanchini, G.; Eda, G.; Chhowalla, M. *Appl. Phys. Lett.* **2007**, *90*, 121913/1.
- [6] Zhou, Y.; Hu, L.; Grüner, G. *Appl. Phys. Lett.* **2006**, *88*, 123109/1.
- [7] Ma, W.; Song, L.; Yang, R.; Zhang, T.; Zhao, Y.; Sun, L.; Ren, Y.; Liu, D.; Liu, L.; Shen, J. *NanoLett.* **2007**, *7*, 2307.
- [8] Dan, B.; Irvin, G. C.; Pasquali, M. *ACS Nano* **2009**, *3*, 835.
- [9] Tenent, R. C.; Barnes, T. M.; Bergeson, J. D.;



Ferguson, A. J.; To, B.; Gedvilas, L. M.; Heben, M. J.; Blackburn, J. L. *Adv. Mater.* **2009**, 21, 3210.

[10] Wang, Y.; Di, C.; Liu, Y.; Kajjura, H.; Ye, S.; Cao, L.; Wei, D.; Zhang, H.; Li, Y.; Noda, K. *Adv. Mater.* **2008**, 20, 4442.

[11] Geng, H. Z.; Kim, K. K.; Lee, K.; Kim, G. Y.; Choi, H. K.; Lee, S. D.; An, K. Y.; Lee, Y. H. *NANO* **2007**, 2, 157

[12] Blackburn, J. L.; barnes, T. M.; Beard, M. C.; Kim, Y. -H.; Tenent, R. C.; McDonald, T. J.; To, B.; Coutts, T. J.; Heben, M. J. *Acs Nano* **2008**, 2, 1266.

[13] Geng, J.; Kong, B. -S.; Yang, S. B.; Youn, S. C.; Park, S.; Joo, T.; Jung, H. -T. *Adv. Func. Mater.* **2008**, 18, 2659.

[14] Han, J. T.; Kim, S. Y.; Jeong, H. J.; Jeong, S. Y.; Lee, G. -W. *J. Phys. Chem. C* **2009**, 113, 16915.

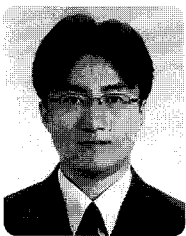
[15] Han, J. T.; Kim, J. S.; Jeong, H. D.; Jeong, H. J.; Jeong, S. Y.; Lee, G. -W. *ACS Nano*, **2010**, 4, 4551.

[16] Han, J. T.; Kim, S. Y.; Woo, J. S.; Lee, G. -W. *Adv. Mater.* **2008**, 20, 3724.

[17] Han, J. T.; Kim, J. S.; Jeong, H. D.; Jeong, H. J.; Jeong, S. Y.; Lee, G. -W. *J. Mater. Chem.* **2010**, 20, 8557.

[18] Han, J. T.; Kim, S. Y.; Jeong, H. J.; Lee, G. -W. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2009**, 48, 6303.

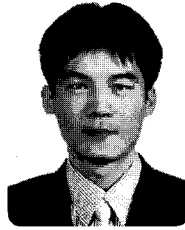
저|자|약|력|



성 명 : 한중탁

◆ 학 력  
 · 2000년 단국대학교 고분자공학과 공학사  
 · 2002년 포스텍 화학공학과 공학석사  
 · 2005년 포스텍 화학공학과 공학박사

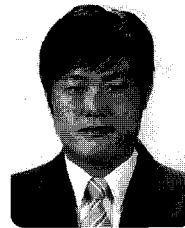
◆ 경 력  
 · 2005년 한국전기연구원 혁신소재연구센터 나노카본소재연구그룹 선임연구원  
 · 2006년 포스텍 화학공학과 박사후 연구원 미표준연구소(NIST) Guest researcher  
 · 2007년 - 현재 한국전기연구원 혁신소재연구센터 나노카본소재연구그룹 선임연구원



성 명 : 정희진

◆ 학 력  
 · 2001년 전북대학교 물리학과 이학사  
 · 2003년 성균관대학교 물성물리학과 이학석사  
 · 2006년 성균관대학교 물성물리학과 이학박사

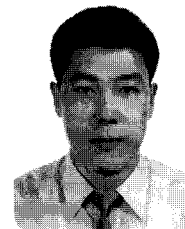
◆ 경 력  
 · 2006년 - 2008년 프랑스 에콜폴리테크닉 박사후 연구원  
 · 2008년 - 현재 한국전기연구원 혁신소재연구센터 나노카본소재연구그룹 선임연구원



성 명 : 정승열

◆ 학 력  
 · 2001년 전북대학교 공과대학 재료공학과 공학사  
 · 2003년 성균관대학교 물리학과 이학석사  
 · 2006년 성균관대학교 물리학과 이학박사

◆ 경 력  
 · 2006년 - 2007년 성균관대학교 기초과학연구소 박사후 연구원  
 · 2007년 - 2008년 미-러커스대학교(Rutgers Univ.) 재료공학과 박사후 연구원  
 · 2009년 - 현재 한국전기연구원 혁신소재연구센터 나노카본소재연구그룹 선임연구원



성 명 : 이건웅

◆ 학 력  
 · 1992년 전남대학교 공과대학 고분자공학과 공학사  
 · 1994년 서울대학교 화학공학과 공학석사  
 · 1999년 서울대학교 화학공학과 공학박사

◆ 경 력  
 · 2000년 - 2003년 한국과학기술연구원 (KIST) 연구원 Research Scientist, GeorgiaInstituteofTechnology  
 · 2003년 - 2005년 한국전기연구원 CNT전문연구랩 랩장  
 · 2005년 - 2009년 한국전기연구원 혁신소재연구센터 센터장  
 · 2010년 - 현재 한국전기연구원 혁신소재연구센터 센터장