

투명 폴리이미드 기판에 코팅된 PEDOT계 전도성 박막의 특성분석

장재우* · 임진형*[†] · 고영수**[†]

*공주대학교 공과대학 신소재공학부, **공주대학교 공과대학 화학공학부
(2017년 6월 30일 접수, 2017년 8월 4일 수정, 2017년 8월 5일 채택)

Characterizations of PEDOT Based Conductive Thin Films Coated on Transparent Polyimide Substrate

Jae-Woo Jang*, Jin-Heong Yim*[†], and Young Soo Ko**[†]

*Division of Advanced Materials Engineering, Kongju National University, 1223-34 Cheonan way, Cheonan 31080, Korea

**Division of Chemical Engineering, Kongju National University, 1223-34 Cheonan way, Cheonan 31080, Korea

(Received June 30, 2017; Revised August 4, 2017; Accepted August 5, 2017)

초록: 본 연구에서는 기존의 사용되었던 glass, polyethylene terephthalate(PET) 기판과 함께 CPI[®]를 피착체로 활용하여 기상중합(vapor phase polymerization; VPP) 방법으로 PEDOT계 전도성 박막을 제조하여, 박막의 광·전기적 특성과 물리화학적 특성을 비교 분석하였다. CPI[®] 위에 성막된 PEDOT계 전도성 박막의 전기전도도와 광투과도는 glass, PET 기판을 사용한 경우와 유사하였다. 반면에, CPI[®]를 기판으로 활용한 경우의 전도성 박막의 물리화학적 특성은 다른 기판들에 비하여 상대적으로 우수하였다. 이는 PEDOT 박막과 CPI[®] 기판의 계면에서 균일한 산화제의 도포에 따른 밀착성의 향상에 기인한 것이라 판단된다. 특히, 공-증발 VPP로 PEDOT와 SiO₂를 하이브리드한 전도성 박막의 물리화학적 특성은 박막 내에 Si-O-Si 가교구조의 도입으로 크게 향상되었다.

Abstract: In this study, PEDOT based conductive thin films were fabricated using vapor phase polymerization (VPP) with CPI[®] as a substrate and compared with the conductive thin film prepared on the glass and polyethylene terephthalate (PET) substrate. The conductivity and optical transparency of PEDOT based conductive thin films fabricated on CPI[®] were similar to those of the conductive thin films on glass and PET. Physicochemical properties of conductive films on CPI[®] were superior to those of the conductive thin films on glass and PET. It might be due to the improvement of adhesion property from uniformly coated oxidant at the interface between PEDOT and CPI[®]. Especially, physicochemical characteristics of PEDOT-SiO₂ hybrid conductive film that prepared by co-vaporization VPP were drastically enhanced because of introducing Si-O-Si crosslink network structure. The electromechanical stability of conducting layer in electronic device is important in the terms of reliability.

Keywords: transparent polyimide, PEDOT, physicochemical property, electromechanical stability.

서 론

폴리이미드(Polyimide, PI)는 대부분 비결정성 구조를 갖는 고분자로서, 투명하고 강직한 사슬구조에 의해 뛰어난 내열성과 내화학성, 우수한 기계적 물성, 전기적 특성 및 치수안정성을 가지고 있는 고분자 재료이다.¹⁻⁶ 이러한 특성 때문에 자동차 관련 부품, 유연성 회로기판, LCD용 액정 배향막, 반도체 층간절연막 등의 소재로 다양하게 사용되고 있다.^{7,8} 상

로 인해 투명 유연성 회로기판과 디스플레이 분야에는 제한적으로 사용되고 있다. 최근 이러한 단점을 보완하기 위하여 기존 PI 주사술에 굽은 구조를 도입하거나, CF₃-기처럼 입체 장애를 주면서 전자를 끌어당기는 구조를 조합하여 높은 투과율을 보이는 투명 폴리이미드(transparent polyimide; CPI[®]) 소재가 보고되고 있다.⁹⁻¹³

1977년 전도성 고분자 polyacetylene의 발견¹⁴ 이후 전도성 고분자의 연구는 지속적으로 연구되어 왔다. 상업적으로 널리 사용되고 있는 전도성 고분자 중 thiophene 구조에 ethylenedioxythiophene 그룹을 ring 형태로 지니고 있는 3,4-ethylenedioxythiophene(EDOT)이라는 전도성 고분자 단량체는 “합성 금속” 연구를 견인해 왔다. EDOT 단량체를 중합하여 제조한 poly(3,4-ethylenedioxythiophene)(PEDOT)은 상업적으로

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: jhyim@kongju.ac.kr, ysko@kongju.ac.kr
©2018 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

널리 사용되고 있는 전도성 고분자로 우수한 전기전도도, 열안정성 및 화학적 안정성과 함께 대략 1.6 eV의 낮은 광학적 밴드갭을 지니고 있다고 보고된 바 있다.¹⁵ 일반적으로 PEDOT의 중합에 사용되는 산화제는 FeCl_3 , acid, sulfonate 계열이 사용이 되고 있다. Sulfonate group 계열의 산화제는 친핵성이 낮아 도핑특성이 우수하여, 높은 전도도를 가지는 PEDOT 제조에 유용하게 사용되고 있다. 이러한 이유로 sulfonate group 3개가 iron 3가 금속에 배위되어 있는 구조인 iron(III) tosylate가 많이 사용되어 왔다. 그러나 PEDOT는 불용, 불용이라는 단점 때문에 가공방법이 제한적이며, 주로 코팅법이 사용되어 필름 형태로 제조된다. 또한 취약한 물리화학적 특성 때문에 다양한 적용에 많은 제한을 받아왔다. 이러한 PEDOT의 단점을 극복하기 위해서 본 연구진은 분자수준의 유-무기 하이브리드 접근법으로 공-증발 기상중합법(vapor phase polymerization; VPP)을 보고하여 PEDOT의 물리화학적 단점을 개선한 바 있다.¹⁶⁻¹⁹ 실리콘계 무기 재료인 실리카(SiO_2)는 높은 내열성, 내화학적, 접착성, 광학적 투명성을 지니고 있기 때문에 VPP 기반 PEDOT와의 SiO_2 하이브리드법은 PEDOT의 본질적인 장점을 유지하고 동시에 단점을 극복할 수 있었다. 한편, 높은 전도도를 가지는 PEDOT의 중합 방법으로는 직접적인 산화중합 방법으로 중합 시 이미다졸 같은 약염기를 첨가하여 전도도를 증가시켰다. Ha 등은 산화제와 약염기의 함량, 용매의 종류, 농도 등의 변수를 조절하여 최적의 조건을 제시하였다.²⁰ 본 연구진은 VPP 방법으로도 약염기의 적용이 전기전도도를 향상시킨다는 보고를 한 바 있다.²¹

본 연구에서는 VPP 법으로 PEDOT계 전도성 고분자 박막을 코팅할 세가지 종류의 기판인 glass, polyethylene terephthalate (PET), CPI®를 사용하였다. 각 기판에 코팅된 PEDOT 박막의 전도도, 투과도와 같은 광·전기적 특성과 연필경도, 내스크래치성, 내용제성, 밀착력과 같은 물리화학적 특성을 비교 분석하였다. 또한 플렉시블 디바이스의 신뢰성을 판단할 수 있는 전기-기계적 안정성을 PET 및 CPI®를 기판으로 사용하여 제조된 PEDOT계 박막의 인장응력 하의 bending 시 전기저항의 변화를 관찰하였다.

실 험

시약 & 재료. 본 연구에서는 단량체로 사용된 전도성 고분자인 4-ethylenedioxythiophene(EDOT, Aldrich)과 산화제와 도판트 역할을 하는 iron(III) *p*-toluenesulfonate(FTS, Aldrich), 약염기인 imidazole, 중합용매인 1-butanol(Junsei)를 정제 없이 사용하였다. Tetraethylorthosilicate(TEOS, Samchun)는 PEDOT와의 하이브리드화를 위한 전구체로 사용하였다. 본 연구에 사용된 기판으로 PET 필름(0.1 mm, Dongseo), slide glass(1 mm, Marienfeld)가 사용되었고, CPI® 필름은 코오롱

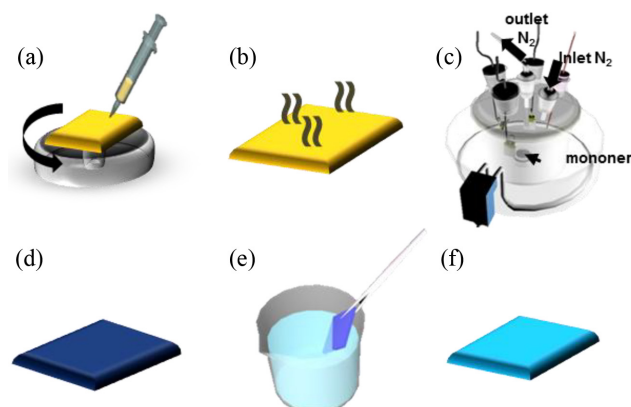


Figure 1. Experimental procedures of VPP process. (a) oxidant deposition by spin coating; (b) drying; (c) VPP; (d) take out the film from VPP chamber; (e) washing; (f) drying & store at room temperature.

인더스트리사에서 생산된 C_50 및 C_80(0.05, 0.08 mm)가 사용되었다.

기상중합을 통한 PEDOT계 박막 제조. 전도성필름 중합 시에 약염기를 사용하면 제조되는 박막의 전기 전도도가 증가한다는 이전의 연구결과에 따라서 본 연구에서는 모든 박막 제조에 있어서 약염기인 imidazole을 산화제인 FTS와 1:1 몰 비율로 첨가하여 실험하였다.²¹ 용매인 1-butanol이 있는 비이커에서 FTS와 1:1 몰 비율의 imidazole을 20분간 교반하여 산화제 용액을 제조하였다. 세척된 기판 위에 산화제 용액을 Figure 1과 같이 스핀코팅을 두 단계(1 step: 10 s/300 rpm, 2 step: 20 s/500 rpm)로 진행하고 60 °C의 대류오븐에서 10분간 건조하여 산화제 박막을 제조(Figure 1(b))하였다. Figure 1(c)의 기상중합 반응기 내부에 단량체를 담을 수 있는 페트리디쉬를 장착시켰다. 반응기 하나에 2개의 시편을 만들 수 있도록 제작하였고 온도센서를 장치한 oil bath에 넣어 주어 반응온도를 제어할 수 있도록 하여, 반응 온도가 60 °C를 유지하도록 하였다. 기상중합은 질소 분위기(N_2 flow rate: 6 mL/s)에서 진행하였다. 반응기 내 페트리디쉬에 EDOT 단량체를 산화제가 코팅된 기판을 넣기 5분 전에 투입하였다. PEDOT- SiO_2 하이브리드 전도성 박막을 제조할 때에는 TEOS가 25 wt% 포함된 EDOT 단량체를 사용하였다. 기상중합을 통한 유-무기하이브리드 박막 제조과정은 본 연구진에서 보고한 기존의 문헌의 절차에 의거하여 진행하였다.¹⁶⁻¹⁹ 기상중합은 시편을 넣어주고 30분간 진행하고, 시편을 꺼내어 상온에서 30분간 건조시켰다. 시편에 존재하는 미반응 산화제를 증류수에 3회 세척하여 제거하고 제조된 박막을 상온에서 건조하였다.

전도성 박막 특성분석. 전도성 고분자 필름의 표면저항 측정은 4-point probe meter(CMT-SR 1000N, AIT)를 사용하였고, 박막의 두께 측정은 HR-SEM(MIRA LMH, Tescan)을 이

용해 가속 전압 20 kV에서 10만 배로 관찰하였다. 박막의 투과도는 UV-Vis spectroscopy(Optizen 2120 UV Plus, Mecasys)를 사용하여 400~800 nm 범위에서 측정하였다. 내스크래치성(elcometer, 3092 sclerometer Hardness Tester), 내용제성(박막 박리까지의 isopropanol이 적혀진 면봉 rubbing 횟수) 및 연필경도(ASTM D3363:05)를 측정하였다. 기판에 중합된 전도성 박막의 밀착력은 시험규격 ASTM D3359, cross-hatch cutter(YCC-230/1, Yoshimitsu)를 사용하였다. 전도성 박막의 유연성 기판에 적용을 위한 전기·기계적 안정성 시험은 연구실에서 제작한 다목적 필름 전기측정 장치(Figure 9)에 LCR meter(LCR-6100, Gwinstek)를 연결하여 수행하였다.

결과 및 토론

전도성 박막의 광·전기적 특성분석. Glass, PET, CPI® 기판에 VPP를 이용하여 PEDOT 박막을 제조하였다. FE-SEM으로 10만배의 배율로 CPI® 기판에 코팅된 PEDOT 전도성 필름의 단면을 촬영한 사진을 Figure 2에서 보여주고 있다. 예상한 대로 산화제인 FTS의 함량이 증가할수록 PEDOT 층의 두께가 두꺼워졌다. Glass, PET 기판을 사용하였을 경우에도 산화제의 함량이 증가할수록 성막된 박막의 두께가 증가하였다. 전도성 층의 두께를 측정하고, 4-point probe meter로 표면저항 값을 측정하여 박막의 전기전도도(σ)는 식 (1)을 통하여 계산하였다.

$$\sigma = 1/(SR \times t),$$

$$SR: \text{표면저항}(\Omega \cdot \text{sq}^{-1}), t: \text{두께}(\text{cm}) \quad (1)$$

PEDOT-SiO₂ 박막의 표면 모폴로지는 PEDOT 박막에 비하여 표면이 매우 평탄하다는 것이 이전의 연구에서 보고된 바 있다.¹⁷ 원자력 현미경(AFM)을 이용한 PEDOT-SiO₂ 박막

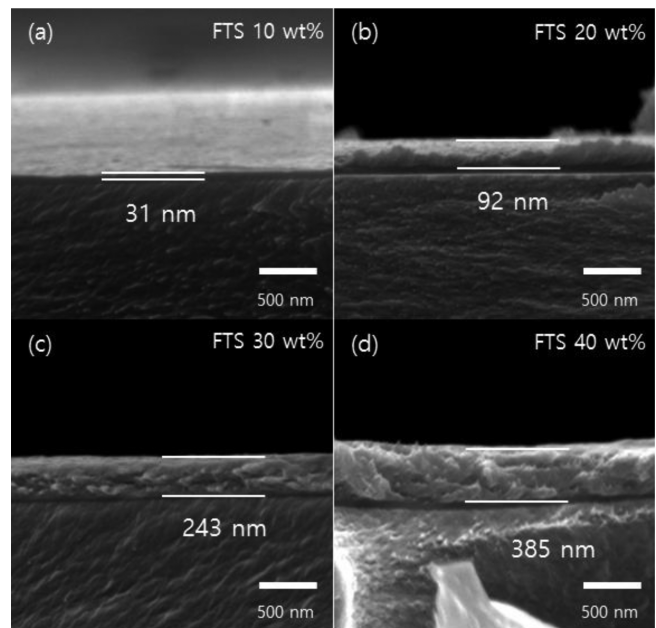


Figure 2. FE-SEM cross section images of PEDOT thin films on CPI® substrate.

의 제곱 평균 제곱근 거칠기(RMS roughness)는 5 nm 이내였다.¹⁷

Figure 3은 glass, PET, CPI®를 기판으로 사용하였을 때, 산화제의 함량에 따른 전기전도도의 변화와 기판의 종류에 따른 광투과도 변화를 보여주었다. 기판의 종류 및 산화제 함량 변화에 따라 전도도는 뚜렷한 경향을 보여주지 않았다. 200~600 S/cm 범위의 값을 나타내었다. 기존 연구에 따르면 전기전도도는 PEDOT 입자의 크기가 작아지면 입자간 전기전도 계면면적이 넓어져 전기전도도가 증가한다고 알려져 있다.²⁰ 일반적으로 산화제의 양이 많아지면 PEDOT 중합이 빨

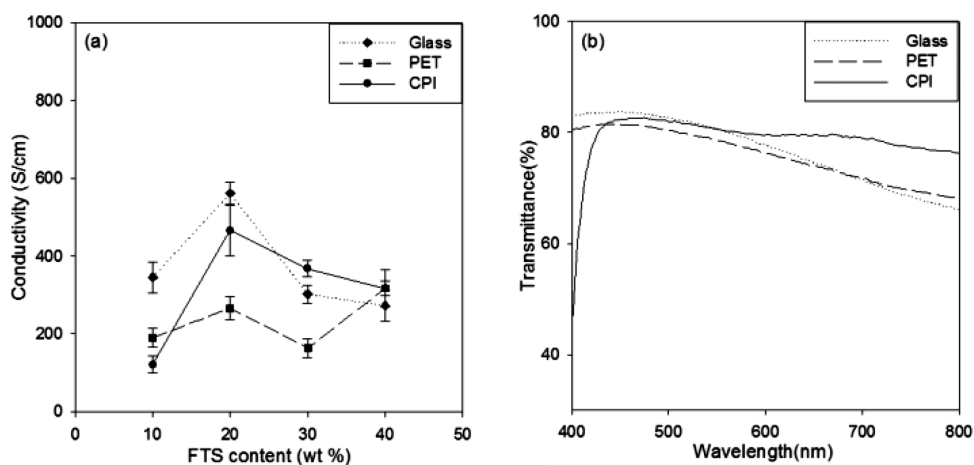


Figure 3. The variations of opto-electronic properties as a function of oxidant concentration and type of substrate. (a) conductivity; (b) transmittance of PEDOT prepared with FTS 10 wt%.

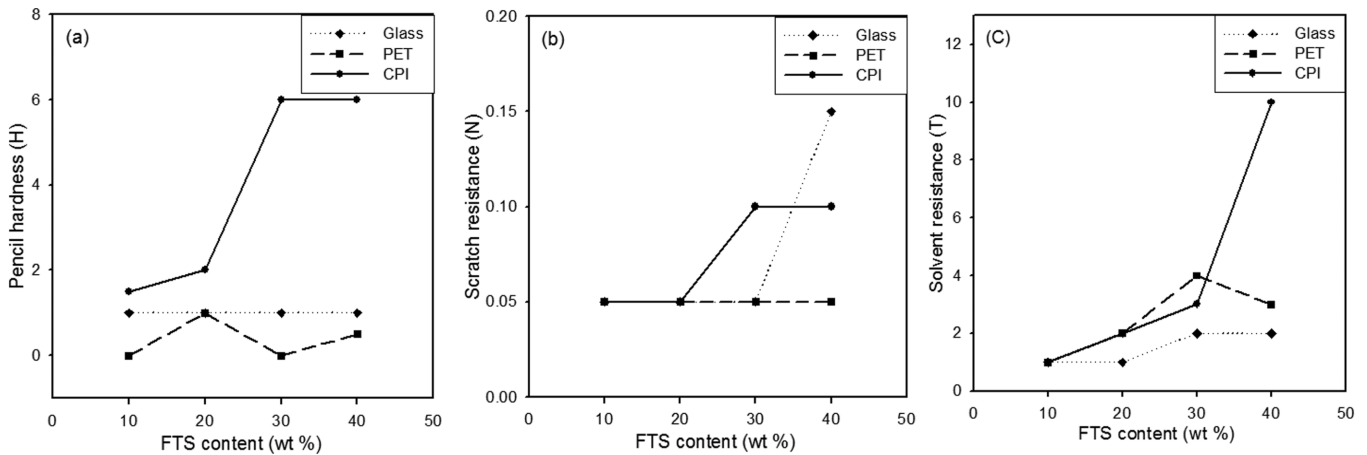


Figure 4. Comparison of PEDOT system's properties according to substrate. (a) pencil hardness; (b) scratch resistance; (c) solvent resistance.

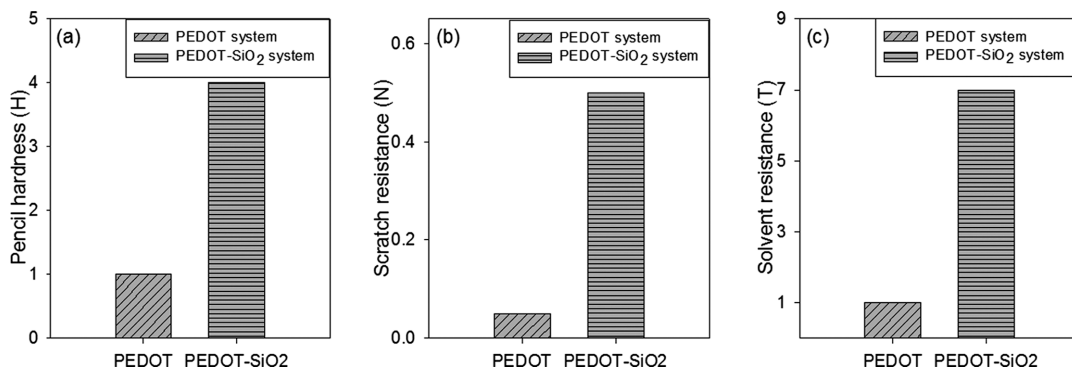


Figure 5. Comparisons of conductive PEDOT based film's properties. (a) pencil hardness; (b) scratch resistance; (c) solvent resistance.

리 일어나 큰 입자가 생성되는 경향이 있고, 반면에 산화제의 양이 너무 작으면 PEDOT 박막의 두께가 너무 얇아서 안정적인 전기전도 박막을 형성하기 어렵다. CPI[®]를 기판으로 하였을 때, PEDOT 기상중합 조건에서는 전기전도에 관한 최적 산화제 함량이 약 20 wt%이었다. 가시광선 영역인 400~600 nm 범위에서 UV 광투과도 또한 기판의 종류에 상관없이 비슷한 수치를 보여주었으나, 600~800 nm의 적색영역은 CPI[®]에 코팅된 PEDOT의 투과도가 우수했다.

기판에 따른 전도성 박막의 물리화학적 특성 비교. Figure 4에서 기판의 종류별로 VPP로 성막된 PEDOT 박막의 연필경도, 내스크래치성, 내용제성을 보여주었다. CPI[®]를 기판으로 하는 PEDOT 박막의 연필경도가 산화제 함량이 30, 40 wt% 일 때 6 H의 값을 보여 다른 기판에 성막된 전도성 박막보다 매우 우수한 물성을 보여주었다. CPI[®]에 코팅한 전도성 고분자 박막은 산화제의 함량이 증가할수록 연필경도도 증가하였다. 산화제 함량에 따른 내스크래치성(Figure 4(b))과 내용제성 변화도(Figure 4(c)) 같은 경향을 보여주었다. 산화제의 함량이 40 wt% 일 때, CPI[®] 기판에 성막된 PEDOT 박막의 물성은 연필경도 6 H, 내스크래치성 0.10 N, 내용제

성 10 T로써, PET, glass에 성막된 전도성 박막에 비하여 비교적 우수한 물성을 나타내었다. 본 연구진은 전도성 고분자 박막의 물리화학적 특성을 공-증발 VPP를 통한 유-무기 하이브리드화를 통하여 크게 향상시킬 수 있다는 결과를 보고한 바 있다.¹⁶⁻¹⁹ 이전의 VPP 기반 유-무기 하이브리드 연구는 주로 PET 기판에서 수행하였다. SiO₂가 PEDOT 박막의 물리적 특성을 개선한다는 이전 연구에서 TEOS가 포함된 EDOT와의 공-증발 VPP에서 우수한 물성증대 효과를 보여주었다.^{17,19} 본 연구에서는 CPI[®]를 기판으로 사용하였을 때, EDOT와 TEOS의 공-증발 VPP로 제조된 PEDOT-SiO₂ 하이브리드 박막의 물성 향상을 Figure 5에서 보여주었다. CPI[®] 기판에 코팅된 PEDOT-SiO₂ 하이브리드 박막은 PEDOT 박막에 비해서 연필경도가 4배, 내스크래치성은 10배, 내용제성은 7배 증가하였다. 이것은 PET 기판에서 성막된 PEDOT-SiO₂ 하이브리드 박막의 물성 향상을 크게 상회하는 결과이다. PET 기판에 코팅된 PEDOT-SiO₂ 하이브리드 박막은 PEDOT 박막에 비해서 연필경도가 2~3배, 내스크래치성은 2~3배, 내용제성은 2~7배 증가한 결과를 보여준 바 있다.^{17,19}

전도성 박막과 기판과의 밀착력 특성 분석. 앞에서 CPI[®]

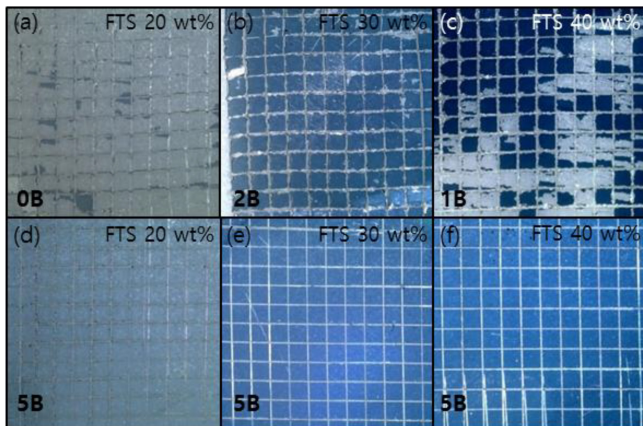


Figure 6. Cross-cut adhesion test of PEDOT thin film on the (a)-(c) PET substrate; (d)-(f) CPI® substrate.

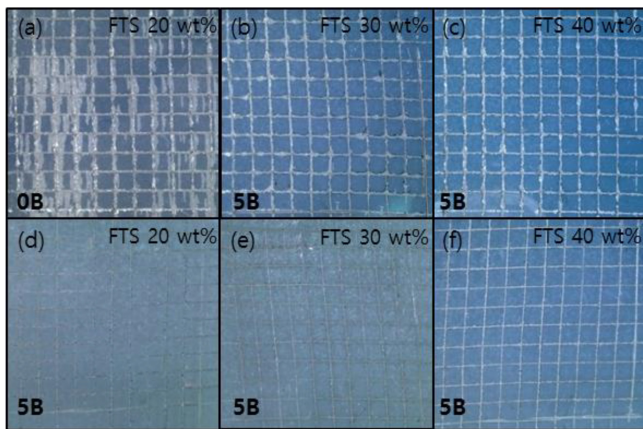


Figure 7. Cross-cut adhesion test of PEDOT-SiO₂ thin film on the (a)-(c) PET substrate; (d)-(f) CPI® substrate.

기판에에서의 전도성 박막의 물리화학적 물성 향상이 기판과의 밀착력의 향상에 기인한 것이라 판단되어 밀착력 정량분석을 시험규격 ASTM D3359, cross-cut adhesion 시험을 비교 플렉시블 기판인 PET와 함께 진행하였다. 총 blade가 11개인 cross hatch cutter를 사용하여 격자 크기가 1 mm인 가로, 세로 교차된 선을 긋는다.

선을 그은 후 접착 테이프를 사용하여 붙였다 떼어 박리된 격자의 수를 세어 분류한다. 상온에서 cross-cut adhesion 시험을 진행하였을 때, 박리된 구역의 수를 세어 정량적으로 0~5 B까지 분류할 수 있다. Figure 6은 PET와 CPI®에 산화제 20~40 wt%로 변화시켜 코팅하고 VPP 중합으로 PEDOT을 성막 후, cross-cut test를 진행한 사진이다. PET 기판에 코팅된 PEDOT 격자는 20 wt%의 산화제를 사용한 경우 대부분 떨어지거나 흠집이 생겼다. 산화제를 증가하면 박막의 밀착력은 1~2 B 수준으로 상승하였다. 반면에, CPI® 기판에 코팅된 PEDOT의 격자는 사용한 산화제 영역에서 모두 붙어있

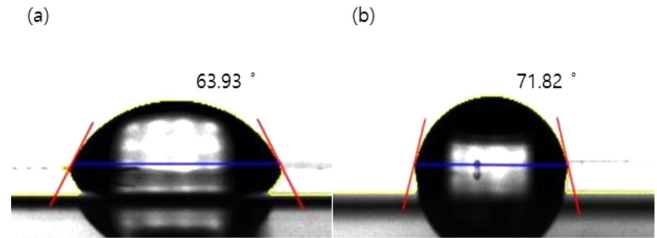


Figure 8. Contact angle photographs of two kinds of substrates to investigate hydrophilicity. (a) CPI®; (b) PET.

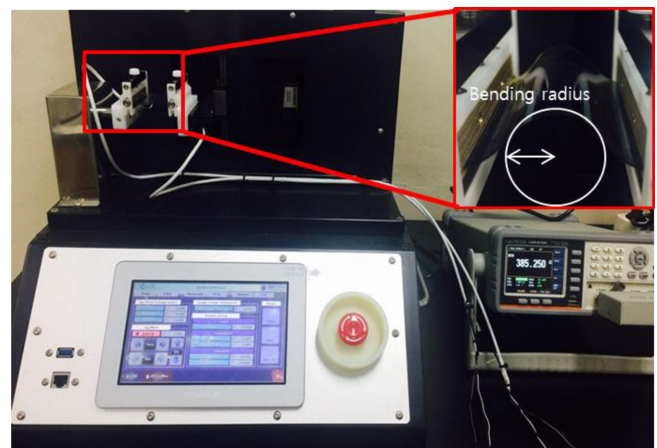


Figure 9. Photograph of bending tester for electrical property measurement of flexible device, and definition of bending radius.

었으며, 밀착력이 5 B로 상대적으로 우수하였다.

이는 CPI® 기판 위에서 PEDOT 박막이 안정되고 균일하게 잘 피착되어 있음을 의미한다. Figure 7은 PET와 CPI®에 PEDOT-SiO₂를 코팅 후 cross-cut test를 진행한 사진이다. PET에 산화제 20 wt%를 사용한 것을 제외하고 30, 40 wt%의 PEDOT-SiO₂ 격자는 밀착력이 5B 수준으로 대부분 붙어 있었다. 이는 유-무기 하이브리드화를 통하여 밀착력이 크게 개선되었고, 밀착력이 물리화학적 특성 향상과 밀접한 관련이 있다는 것을 보여준다. CPI® 기판에 코팅된 PEDOT-SiO₂의 격자는 예상한 대로 5B 수준을 보여주었다. PET와 CPI® 기판에 대한 전도성 박막의 밀착력의 변화의 이유를 알아보기 위하여 기판의 접촉각 분석을 통하여 친수/소수성 정도를 살펴보았다. Figure 8은 기판에 따른 접촉각 사진이다. 떨어뜨린 물방울의 기판과의 접촉각은 각각 CPI® 63.93°, PET 71.82°였다. CPI® 기판의 표면이 좀 더 친수성이었다. VPP 공정에서 산화제 도포에 사용된 용매와 산화제가 친수성이라는 점에서 산화제의 분산 및 피착이 CPI®가 PET 보다 유리하여 VPP 공정 후에 성막된 전도성 고분자 박막의 밀착력이 크게 상승하였다고 판단된다. 또한 앞에서 기술한 CPI 기판을 사용하였을 때, 연필 경도의 향상은 상기 밀착력 특성 개선과 함께 CPI 자체의 우수한 경도에 기인한 기판 효과(substrate

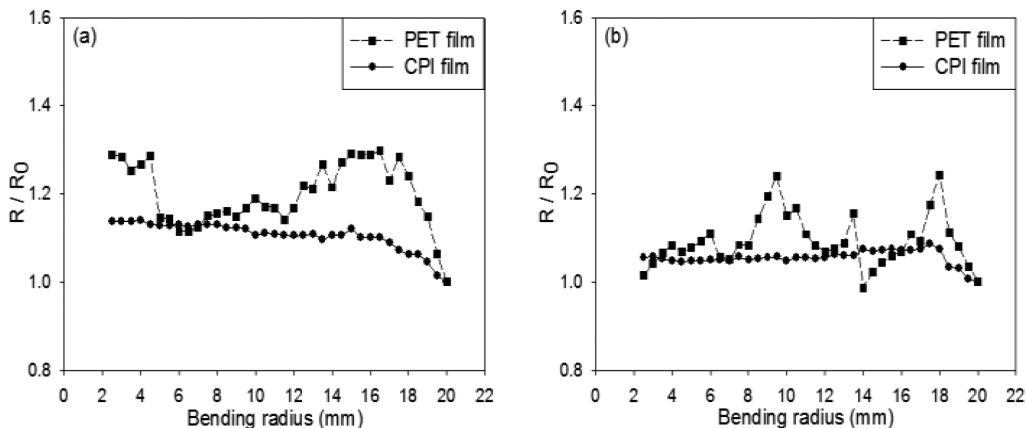


Figure 10. Comparison of relative electrical resistivity variation as a function of bending radius. (a) PEDOT system; (b) PEDOT-SiO₂ system.

effect)도 영향을 줄 수 있다고 생각된다.

전도성 박막의 전기·기계적 안정성 특성분석. 플렉서블 디스플레이 분야에서 가장 중요한 요소는 휘어져도 안정하게 전기전도성을 유지하는 전기·기계적 안정성을 가지는 것이다. PEDOT 박막과 PEDOT-SiO₂ 박막이 코팅된 PET와 CPI®를 상온에서 bending radius를 최소 2.5 mm까지 줄이면서 1 mm당 직류저항의 변화를 측정했다. Figure 9는 자체 제작한 bending test 실험 장비의 사진이며 전도성 박막의 스트레스를 극대화할 수 있는 인장응력(tensile stress) 하에서 전기저항 변화를 측정하였다.²²

Figure 10은 PET와 CPI® 기판 위에 40 wt%의 산화제를 사용하여 성막된 PEDOT과 PEDOT-SiO₂ 박막의 인장응력 하의 전기저항 값의 변화를 비교하였다. PET에 코팅된 PEDOT 박막은 bending radius가 17 mm일 때 초기저항보다 약 1.3배 증가한 후 감소하는 경향을 보이고, bending radius가 4 mm 부근에서 갑자기 다시 초기저항보다 1.3배 증가하는 불안정한 거동을 보였다. 하지만, CPI® 기판을 사용한 경우에는 bending radius가 2 mm가 될 때까지 최대 약 1.1배 증가로 거의 변화가 미미하여 전기기계적 안정성이 상대적으로 우수하였다. 유-무기 하이브리드 PEDOT-SiO₂ system의 경우에서도 PET보다 CPI®를 기판으로 사용한 경우의 전기저항 값의 변화가 적었다. CPI® 기판에 코팅된 PEDOT-SiO₂ 박막은 bending radius가 2 mm까지 전기저항의 변화가 거의 없었다. 이는 CPI® 기판 위에 전도성 고분자가 더욱 안정되게 분산이 되고 강하게 밀착이 되어있어 전기·기계적 특성이 우수한 결과를 보인다고 판단된다.

결 론

본 연구에서는 glass, PET 기판과 함께 CPI®를 피착체로 활용하여 VPP 방법으로 PEDOT계 전도성 고분자를 코팅하고, 박막의 광·전기적 특성과 물리화학적 특성을 비교하였다.

CPI® 위에 성막된 PEDOT계 전도성 박막의 연필경도, 내스크래치성, 내용제성, 밀착력과 같은 물리화학적 특성이 PET를 기판으로 사용한 경우보다 상대적으로 우수하였다. 이는 CPI® 기판의 표면이 PET에 비해서 친수성 특성이 높아 VPP 공정에서 사용되는 산화제의 균일한 도포 및 강한 밀착성을 유도하고, 이로 인해 성막된 PEDOT 계면과의 강한 피착구조를 형성한 것으로 판단된다. 특히, 공-중발 VPP로 PEDOT와 SiO₂를 하이브리드한 전도성 박막의 물리화학적 특성은 박막 내에 Si-O-Si 가교구조의 도입으로 크게 향상되었다(연필경도가 4배, 내스크래치성은 10배, 내용제성은 7배 증가). 또한 CPI®에 코팅된 PEDOT계 전도성 박막은 PET에 코팅된 박막에 비하여 인장응력 하의 전기저항 변화가 적어, 플렉서블 디바이스의 신뢰성을 판단할 수 있는 전기·기계적 안정성이 우수하였다.

감사의 글: 이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2016R1D1A 3B03931831). 투명 폴리이미드 기판을 무상으로 제공해 준 코오롱 중앙기술원 미래기술연구그룹의 홍기일 책임연구원에게도 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. C. P. Yang and W. T. Chen, *Macromolecules*, **26**, 4865 (1993).
2. J. H. Chang, K. M. Park, S. M. Lee, and J. B. Oh, *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.*, **38**, 2537 (2000).
3. X. Fang, Z. W. Yang, L. Gao, Q. Li, and M. Ding, *Polymer*, **44**, 2614 (2003).
4. M. B. Saeed and M. S. Zhan, *Eur. Polym. J.*, **42**, 1844 (2006).
5. F. Yang, J. Z. Y. Li, S. Zhang, Y. Shao, H. Shao, T. Ma, and C. Gong, *Eur. Polym. J.*, **45**, 2053 (2009).
6. J. He, K. Horie, R. Yokota, and F. He, *Polymer*, **42**, 4063 (2001).
7. Y. N. Sazanov, *Russian J. Appl. Chem.*, **74**, 1253 (2001).

8. G. Maier, *Prog. Polym. Sci.*, **26**, 3 (2001).
9. C. P. Yang and F. Z. Hsiao, *J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem.*, **42**, 2272 (2004).
10. J. G. Liu, X. J. Zhao, H. S. Li. Fan, and S. Y. Yang, *High Perform. Polym.*, **18**, 851 (2006).
11. H. S. Jin, J.-C. Kim, and J. H. Chang, *Macromol. Res.*, **16**, 503 (2008).
12. J. S. Park and J. H. Chang, *Polym. Korea*, **32**, 580 (2008).
13. U. K. Min and J. H. Chang, *Polym. Korea*, **34**, 495 (2010).
14. C. K. Ching, C. R. Fincher, Y. W. Park, A. J. Heeger, H. Shirakawa, E. J. Louis, S. C. Gau, and A. G. MacDiarmid, *Phys. Rev. Lett.*, **39**, 1098 (1977).
15. K. E. Aasmundtveit, E. J. Samuelsen, L. A. A. Pettersson, O. Inganas, T. Johansson, and R. Feidenhan'l, *Synth. Met.*, **101**, 561 (1999).
16. Y.-H. Han, J. Travas-Sejdic, B. Wright, and J.-H. Yim, *Macromol. Chem. Phys.*, **212**, 521 (2011).
17. J. H. Yim, *Compos. Sci. Technol.*, **86**, 45 (2013).
18. Y. S. Ko, Y.-H. Han, and J.-H. Yim, *Polym. Korea*, **38**, 525 (2014).
19. R. Khadka and J.-H. Yim, *Macromol. Res.*, **23**, 559 (2015).
20. Y. N. Ha, N. Nikolov, S. K. Pollack, J. Mastrangelo, B. D. Martin, and R. Shashidhar, *Adv. Funct. Mater.*, **14**, 615 (2004).
21. J. S. Choi, K. Y. Cho, and J.-H. Yim, *Eur. Polym. J.*, **46**, 389 (2010).
22. Y. S. Ko and J.-H. Yim, *Polymer*, **93**, 167 (2016).