

## 산소 분압 조절에 따른 ITO/PVDF 박막 물성 조절 연구

### Physical Properties of ITO/PVDF as a Function of Oxygen Partial Pressure

이상엽<sup>1</sup>, 김지환<sup>1,2</sup>, 박동희<sup>1</sup>, 변동진<sup>2</sup>, 최원국<sup>1,a</sup>

(Sang Yub Je<sup>1</sup>, Ji-Hwan Kim<sup>1,2</sup>, Dong-Hee Park<sup>1</sup>, Dongjin Byun<sup>2</sup>, and Won-Kook Choi<sup>1,a</sup>)

#### Abstract

On the piezoelectric polymer, PVDF (poly vinylidene fluoride), the transparent conducting oxide (TCO) electrode material thin film was deposited by roll to roll sputtering process mentioned as a mass product-friendly process for display application. The deposition method for ITO (Indium Tin Oxides) as our TCO was DC magnetron sputtering optimized for polymer substrate with the low process temperature. As a result, a high transparent and good conductive ITO/PVDF film was prepared. During the process, especially, the gas mixture ratio of Ar and Oxygen was concluded as an important factor for determining the film's physical properties. There were the optimum ranges for process conditions of mixture gas ratio for ITO/PVDF. From these results, the doping mechanism between the oxygen atom and the metal element, Indium or Tin was highly influenced by oxygen partial pressure condition during the deposition process at ambient temperature, which gives the conductivity to oxide electrode, as generally accepted. With our studies, the process windows of TCO for display and other application can be expected.

**Key Words** : Piezoelectric polymer, Poly vinylidene fluoride, Transparent conducting oxide, Vacuum deposition, Gas mixture

#### 1. 서론

전자 산업 분야의 급격한 발전과 더불어 문자, 음성, 및 화상과 같은 인지 정보의 전달이라는 분야에 대한 관심이 커지고, 이와 더불어 정보 표시 장치 (Digital Information Display)에 대한 중요성이 증대되고 있다. 이른바 유비쿼터스 지향적인 정보기기의 경량화 연성화 경향에 따른, 최근 고분자 소재를 전자소자의 기판으로 사용하는 연구가 증가하고 있으며, 고분자 기판에 대응하는 저온 박막 증착, 연속 대량 생산 등에 대한 공정 연구가 주목 받고 있다. 대표적인 예로써, Roll-to-Roll (R2R)

연속 공정이 있으며, R2R 공정을 이용한 공정 속도, 대량 생산, 낮은 생산 단가, 등의 장점이 있어 연성 전자재료 소재의 개발에 중요한 역할을 하는 공정이 될 것이다.

연성 전자 공학에 주로 사용되고 있는 필름으로 PET (Polyethyleneterephthalate), PC (Propylene Carbonate), PES (Polyethersulfone), 등이 있으며 이를 이용하여 연성 회로 기판, 연성 디스플레이로 F-LCD (Flexible Liquid Crystal Display), F-OLED (Flexible Organic Emitting Diodes)의 응용 그리고 유연 박막형 배터리, 유연 투명 전도막 등 매우 활발한 연구가 이루어지고 있다. 이 중에서 가장 활발한 분야는 디스플레이 분야로서 투명 전도성 전극을 증착한 고분자 필름에 대한 연구인데 [1-4], 이를 위한 투명 전도성 전극 (Transparent Conducting Oxide electrode) 으로 가장 널리 사용되고 있는 물질은 ITO (Indium Tin Oxide)이다. ITO박막은 높은 전도성의 특징과 가시 광 영역에서 높은 광투과율을 가지는 등의 이점들을

1. 한국과학기술연구원 재료기술연구본부

(서울시 성북구 하월곡동 39-1)

2. 고려대학교 재료공학과

a. Corresponding Author : wkchoi@kist.re.kr

접수일자 : 2008. 7. 15

1차 심사 : 2008. 9. 19

심사완료 : 2008. 9. 24

갖는 것으로 많이 알려져 있고, 이를 이용하여 디스플레이 소자인 LCD, 유기 EL 및 PDP (Plasma display panel) 등의 기관용으로 많이 사용되고 있다. ITO박막을 균일하게 대면적으로 증착, 양산하는 공정법으로는 진공 상에서 플라즈마를 이용하는 마그네트론 스퍼터링법이 많이 사용된다. 일반적으로 유연 디스플레이 소자 제조에의 응용을 목적으로 많은 연구가 되고 있는 ITO/PET의 경우, 약  $7 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$  정도의 비저항 값을 갖는 것으로 알려져 있다[5].

한편으로, 고분자 필름의 일종인 PVDF (poly vinylidene fluoride) 필름은 탄소, 수소, 불소 등을 구성원소로 하는 유기물이며, 1969년 개발된 압전성 물질로서 각종 음향, 초전도센서, 생의학센서 등의 분야에 응용되었다[6].

산업적인 측면에서는, PVDF의 낮은 용융점으로 인해 이를 기관으로 하는 박막 성장 공정을 수행하려고 할 때에는, 기관의 온도를 낮춰 PVDF의 열손상을 최소화해야 하며, 이 때문에 박막 증착 공정 조건 확보에 어려움이 있고, 형성된 박막은 결정화에 필요한 충분한 에너지 조건을 갖지 못해, 비정질구조를 갖게 된다. 최근 R2R 공정 및 스퍼터 공정에 있어, 이러한 공정상의 한계를 극복하려는 많은 연구 개발이 수행된 결과로, PVDF에 사용되었던 전도성 고분자 계열의 불투명 전극은 박막 스퍼터와 디스플레이의 혼합 전자 소자로의 응용 시 광학적 투명도를 확보하기 위해 ITO와 같은 투명산화 전극으로 대체하려는 시도가 가능하게 되었다[7].

본 연구에서는 대량생산에 용이한 R2R 공정을 이용하면서도, 낮은 용융점을 가지는 PVDF 필름 위에 마그네트론 스퍼터링 방법을 이용하여 ITO/PVDF 박막을 제작하였다. 또한 제작된 박막의 최적 물성 조건을 검색하기 위해서 증착 공정시의 진공도는 일정하게 유지하면서도, 산소/아르곤 가스의 분압 조건을 변화시켜, 그에 따르는 ITO박막의 전기적 특성 변화, 결정학적인 특성 변화, 표면 거칠기 특성 변화, 광 투과도와 두께 변화 등, 전자소자의 전극물질로 적용될 경우, 소자 동작 특성에 영향을 줄 수 있는 물성들의 변화를 살펴보았다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 Roll to roll(R2R) 진공 웹코팅 시스템

그림 1에서 보는 바와 같이, 본 연구에서 사용한 웹코팅 시스템은 실린더 형의 (직경 1230 mm x

길이 640 mm) 메인 롤과 보조 롤 부분, 그리고  $480 \times 150 \text{ mm}^2$ 의 직육면체 마그네트론 스퍼터 음극이 장치된 증착원 부분으로 구성되어 있다.

초기진공 조건은 로타리 펌프와 부스터 펌프를 이용하여 저 진공으로 배기하며, 이후 진공 챔버의 상/하부에 고진공상태로 배기될 수 있게 설치된 터보 펌프를 이용하도록 하였다. 또한 고분자 기관에 존재하는 자연적인 수분을 제거를 위하여, 진공상태에서 적외선 램프히터로 사전 가열하도록 하였고, 스퍼터 음극 부분에 배기 조절 밸브를 사용하여, 공정시의 혼합 가스의 유량이 조절 되도록 제작하였다. 기타 웹코팅 시스템의 세부 사항[7]을 통해 고진공 조건에서 실험이 진행되도록 하였다.

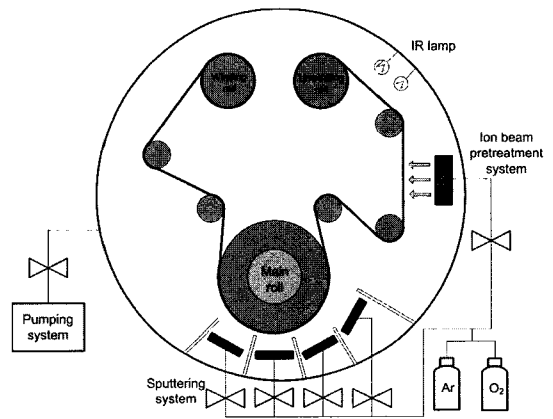


그림 1. Roll to roll 재료용 진공 증착 장비 모식도.  
Fig. 1. Schematic diagram of the vacuum web coater system.

### 2.2 ITO 박막의 증착

ITO박막 증착을 위한 기관은 투명 압전 고분자 필름인 PVDF(Polyvinylidene fluoride, 두께  $80 \mu\text{m}$ ) 필름을 사용하였다. 앞서 언급한 것과 같이, PVDF는 약  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  이상의 온도영역에서 압전성이 크게 감소하는 특성 때문에, 스퍼터링 증착 시에 발생하는 플라즈마에 의한 열손상 및 그에 따른 필름의 기계적 변형을 최소화 하기 위하여, 증착공정 중에 PVDF를 지지하며 감는 역할을 하는 메인 드럼을 냉각시켜, PVDF에 대한 열손상을 감소하도록 하였다. 드럼에 주입되는 냉각수 온도는 약  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 설정하였으며, ITO 타겟과 기관인 PVDF 필름의 거리를  $110 - 170 \text{ mm}$ 내에서 적절하게 조절하였다. 그리고 PVDF가 감겨 있는 각 롤의 회전

속도를 0.24 m/min 정도로 조절하여 증착 두께를 변화시켰다. 본 실험에서 사용된 직류형 마그네트론 스퍼터링 타겟의 크기는 폭 100 mm, 길이 400 mm, 두께 6 mm 이며,  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{SnO}_2=90:10(\text{wt}\%)$ 의 ITO 타겟(Applied Materials사)을 사용하였다. 증착 공정상의 혼합가스인 Ar가스와  $\text{O}_2$ 가스의 혼합비를 정량적으로 조절하기 위하여 2개의 독립된 가스관을 통한 MFC(MassFlowController)를 사용하였다. 각각의 경우, 고순도 Ar (99.99 %)가스 유량만을 조절하는 MFC (MFC-1)와, Ar: $\text{O}_2$ 가 9:1의 비율인 혼합가스에 대해서 유량을 조절하는 MFC (MFC-2)를 각각 사용하였으며, MFC-2의 유량은 MFC-1의 1 %가 되도록 하여, 전체유량에 대해서 공정에 사용된 산소 가스의 비율이 다음과 같이 되도록 조절하였다.

$$\frac{\text{O}_2 : 0.1\%}{\text{Ar} : 99\% + [\text{Ar} : 0.9\% + \text{O}_2 : 0.1\%] : 1\%} = 1 \times 10^{-3}$$

증착 공정 전의 고분자 필름에 대해서 60 °C로 일정하게 유지된 적외선 히터를 이용하여 가열하였으며, 이를 이용하여 고분자 필름의 미세 먼지나 수분 제거를 하였다. PVDF필름 상에 불순물이 적고, 조성비가 균일하게 조절된 ITO 박막 코팅을 하기 위해서는 증착 공정이 이루어지는 진공 챔버의 내부를 고진공 조건이 되도록 해야 한다. 이를 위해서 챔버 상 하부에 연결 되어있는 4개의 터보펌프를 개별 작동시켜 증착 전의 초기 진공 조건을  $2 \times 10^{-5}$  Torr 이하의 고진공 조건이 형성되도록 하였다. 또한 증착 공정을 위한 혼합가스 주입 전, Ar 가스를 주입 시킨 상태에서, ITO 타겟에 있는 오염층과 ITO 타겟 표면의 자연 흡착수를 제거하기 위하여 스퍼터링 (Pre-sputtering) 을 약 10분간 하였다. 증착시의 배기 조절 밸브와 혼합 가스 주입량을 변화시키면서 증착 공정시의 공정 진공도를  $1 \times 10^{-3}$  Torr가 되도록 하였다.

증착 고정 진공도를 일정하게 유지하도록 조절한 상태에서, MFC를 이용하여 0~1 sccm까지  $\text{O}_2$  가스를 0.2 sccm씩 변화하도록 하였으며, 이렇게 유지된 진공-가스 조건하에서 제작된 샘플들은 진공 챔버 내에서 각각 2-4회 반복하여 ITO coating 하였다. 이렇게 하여 만들어진 ITO/PVDF 샘플의 전기저항은 four point probe법 (Model : CMT-SR2000N)을 사용하여 측정하였으며, 각 탐침 간 간격은 30 mm로 균일하게 유지 되도록 하였으며, 그 평균 값을 구하여 비교하였다. 가시광선 영역에

서의 투과도 특성은 UV-Vis 가시선 분광광도계 (PerkinElmer Lamda 35)을 사용하여 300-800 nm 파장 영역에서 측정하였다. XRD (Model: ATX-G)를 이용하여 ITO/PVDF 박막의 결정성을 확인하였다. 단면 미세 구조 및 두께는 전자 주사현미경 (scanning electron microscope: Model Hitachi (FE-SEM S-4700)를 사용하여 분석하였다. 표면의 거칠기는 Atomic Force Microscopy (AFM: Nanoscope IV, DI3100)을 이용하여 tapping mode에서 측정 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

일반적으로 투명산화전극인 ITO 박막은 n형의 반도체이며, 전기적 전도는 전자에 의해 이루어진다. 따라서 ITO박막의 전자의 농도가 증가하면 전기적 전도 특성이 향상되며, 전자 농도의 증가에는 크게 다음의 두 가지 요인에 의해 결정된다[9].

첫번째는 산소 공극 (vacancy)의 생성과 주석 원소 ( $\text{Sn}^{4+}$ )의 In치환( $\text{In}^{3+}$ )에 의한 전자의 생성이다. 그 중, 산소 공극의 생성은 여러 증착 방식에 따라서 다를 수 있지만, 크게 증착시의 기판 온도와 산소 분압에 의존한다. 한편, 주석 원소의 도핑의 경우 5 %내외의 주석 원소의 농도 (atomic concentration)를 가정하면  $1.5 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ 까지의 전자 생성이 가능하지만, 실제 실험적으로는 예상한 정도로 전기적 전도도가 향상된 효과가 나타나지 않는데, 이는 도핑을 목적으로 넣어준 주석 원자의 상당한 부분이 전기적으로 활성화되지 못했기 때문이다. 다음으로 ITO 박막에서의 전기 전도도를 위한 전자 농도를 높이기 위해 가장 많이 쓰이는 방법으로는 후열처리 (Post-anneal process)방법이 있다[10]. 이 방법에서 열처리 온도와 시간 그리고 열처리 시 사용되는 혼합 가스의 종류에 따라 다양한 열처리 효과를 얻을 수 있다. 이렇게 얻어진 열처리 효과에 대해서 여러 가지 설명이 가능하지만, 일반적으로 잉여 산소의 out-diffusion, 비활성화 상태였던 주석 원소의 활성화, 증착 중 발생된 결함(defect)의 제거 등이 전자 농도를 증가시키는 원인으로 설명되고 있다[11].

실험에 사용된 PVDF필름의 Tg온도가 120 °C 미만이기 때문에 일반적인 후 열처리방법은 선택할 수 없었으며, 증착 공정중의 산소 분압에 변화를 주어 ITO박막의 전기 전도도 특성을 변화시키는 방법을 선택하였다.

Four Point Probe 법으로 산소 분압 변화에 따라 제작된 ITO박막의 면 저항의 변화를 측정하였

다. 샘플은 1 mTorr의 공청압력 상태에서 ITO 타겟을 2 kW Pulsed DC로 스퍼터링 하였으며, 이때의 혼합가스 조건을 Ar가스에 대한 O<sub>2</sub>가스의 혼합비율을 0~1 %까지 0.2 % 간격으로 미세하게 변화하도록 하였다. Ar가스만을 주입한 공정을 통해 제작된 ITO/PVDF의 경우, 390 Ω/□의 면저항 (Sheet resistance) 값을 보였으며, 혼합가스에 대해 O<sub>2</sub>가스를 0.2 % 비율로 첨가한 경우, 180 Ω/□로 감소되는 것을 알 수 있었다. 산소 가스의 비율을 0.2~0.8 %까지 증가시키기에 따라, 면저항은 170~200 Ω/□ 정도의 범위를 유지하면서 변화하였으며, 산소 가스 비율을 1%로 증가시키면 면저항은 300 Ω/□으로 크게 증가하는 것을 확인하였다.

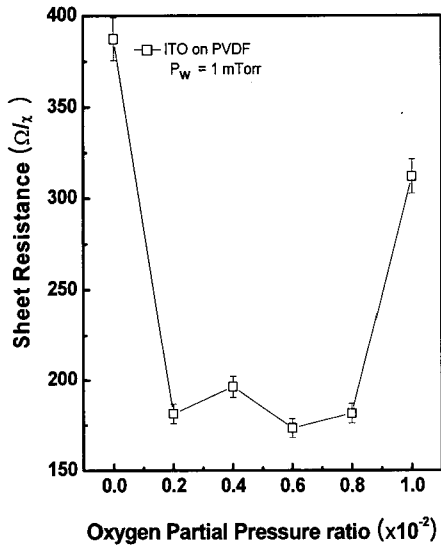
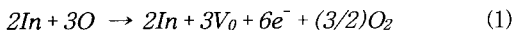


그림 2. 산소 분압 공정 조건에 따른 ITO 박막의 면저항 변화.

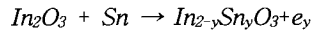
Fig. 2. Electrical Sheet resistance and resistivity of ITO films deposited at different PO<sub>2</sub> with partial pressure.

이와 같은 전도성 박막인 ITO막 내에서의 산소 원소의 상태 변화에 의한 전기적 전도 시스템의 변화는 식 (1)에서와 같이 설명된다[12].



위에서 보는 것과 같이, V<sub>0</sub>은 ITO내 산소 원소의 공극을 나타내며, 최종적으로 발생된 전자는 전

체적인 ITO박막의 전기 전도도에 기여하는 것으로 이해될 수 있다. 이외의 또 다른 전도도 형성에 대한 설명은 다음과 같다. 먼저, ITO박막내의 주석 이온이 인듐 이온과 치환하여 주계(donor)로 작용, n형 반도체와 같은 전도도 형성이 되는 것으로 볼 수 있다[13]. 그러나 반도체의 경우와 비교할 때, 주계로 작용하는 ITO내의 주석의 양이 수십%까지 이르고 있다는 점이 특징이라고 할 수 있다. 아래의 식은 주석이 ITO내에서 주계로 작용할 때의 전도성 형성을 나타낸다[14].



따라서 증착 공정을 통해서 ITO 박막에 전기전도도 형성에 필요한 만큼의 산소 원소가 공급되면 전체적인 박막의 면저항이 감소하게 되지만, 산소 공급 조건이 그러한 최적 공정의 영역 (optimum process window)을 벗어나면 산소 공극이 채워지기 때문에, 면저항이 증가하게 되는 것이다.

ITO박막에 대한 SEM images 결과는 산소 분압비 변화에 따른 ITO/PVDF 각 샘플에 대해서 100만배 배율로 단면과 표면을 측정한 것이다. 이로부터, ITO/PVDF의 ITO는 모두 약100 nm의 두께를 형성하고 있으며, 산소 분압비 변화에 따른 영향은 상당히 적은 것을 알 수 있다. 또한 제작된 ITO 박막은 기판에 대한 가열, 이온빔 처리 등의 추가적인 에너지 주입이 없는 상태에서 증착할 경우에 일반적으로 관찰되는 것과 같이, 결정학적인 비정질 상태임을 평면형 감지기를 이용한 XRD (X-ray diffraction) 측정을 통해서 확인하였다. 한편, 산소 분압비 변화를 1 % 이내의 상대적으로 작은 범위 안에서 조정할 것을 고려할 때, 증착 공정시의 스퍼터링되는 타겟물질의 ITO 타겟에서부터 기판인 PVDF까지의 자유진행거리 (mean free path)의 변화에는 큰 영향을 끼치지 않음을 알 수 있다.

산소 분압비 변화에 따른 ITO 박막의 표면 거칠기 변화를 관찰하기 위해서, 원자 척력 현미경 (AFM: Atomic Force Microscope)를 이용하였다. ITO표면에 대한 AFM 측정은 표면에 대한 손상을 최소화 하는 Tapping mode 측정을 수행하였으며, 1 um와 5 um의 두 스캔 영역에 대해서 표면 상태 (surface morphology)의 변화를 관찰하였다. 증착 전의 기판 재료인 PVDF에 대한 AFM측정 결과, σ<sub>rms</sub>=1.7 nm인 것으로 관찰되었다(그림 4의 g). Ar 가스를 주입한 ITO박막의 표면 거칠기는 σ<sub>rms</sub> =

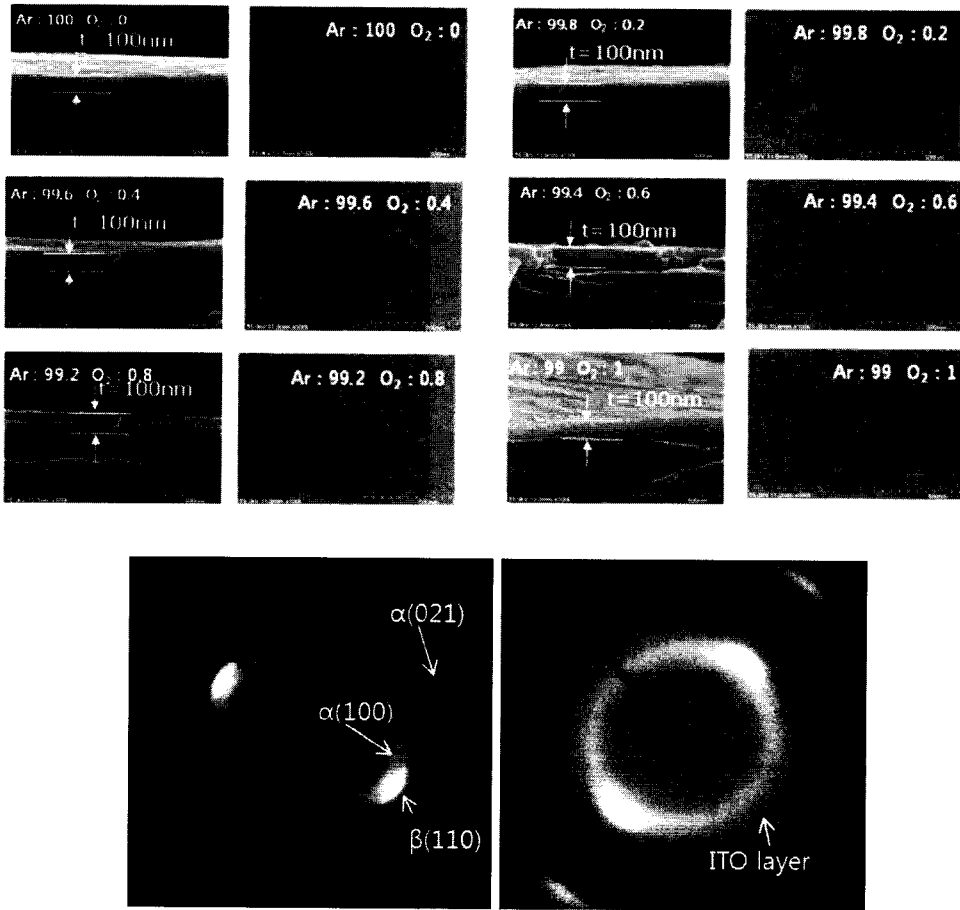


그림 3. 산소 분압 공정 조건에 따른 ITO/PVDF의 단면 SEM 사진(위), 평판형 감지기로 측정된 XRD, PVDF기판(왼쪽 아래), ITO/PVDF(오른쪽 아래).  
 Fig. 3. SEM images of ITO/PVDF deposited at different PO<sub>2</sub>(upper), XRD results with areal detector of PVDF substrate (lower left), ITO/PVDF (lower right).

3 nm 정도였으며, O<sub>2</sub>가스의 분압을 증가시키면 PO<sub>2</sub> = 2 × 10<sup>-6</sup> Torr의 경우, σ<sub>rms</sub> = 5 nm, 이 보다 증가한 PO<sub>2</sub> = 4 × 10<sup>-6</sup> Torr의 경우, σ<sub>rms</sub> = 6.3 nm로 증가하는 변화를 보여주고 있으며, 이 보다 더 높은 산소 분압 하에서 증착된 ITO박막의 표면 거칠기는 σ<sub>rms</sub> = 7.4 nm 정도까지 증가하나 더 이상 증가하지는 않음을 보여주고 있다. 결과적으로 ITO증착 공정 시에 혼합가스에서의 O<sub>2</sub>가스의 비율을 0.2 %씩 증가시키면, 그에 따른 표면 거칠기의 증가가 수반되는 것을 확인하였다. 이는 일반적으로 알려진 산소 분압비 증가에 따른 플라즈마내의 산소 음이온(O<sub>2</sub><sup>-</sup>)의 증가 및 산소 음이온의 기판 쪽으로의 가속에 의해 박막 표면의 거칠기가

증가하게 된다는 것을 보이는 것이며, 이로부터 산소 분압비 변화조건에 따른 위의 결과를 이해할 수 있다.

ITO/PVDF 박막에 대한 가시광선 영역 (약300~800 nm)의 광투과도를 측정하였다. 이때에, 기판인 PVDF의 투과율은 85 %이었으며, 전기적, 표면적 물성이 최적화된 ITO/PVDF 박막에 대한 공정 조건으로 판단된 산소 분압 PO<sub>2</sub>=2 × 10<sup>-6</sup> Torr의 조건 하에서 두께를 40 nm에서 160 nm까지 변화시켜 가면서 제작한 시편에 대해서 광투과도를 측정하였다. 두께가 40 nm 정도인 경우 550 nm 파장에서 약 75 % 정도까지 감소한다. 한편 140 nm까지 ITO의 두께를 증가시키면 ITO박막내 간

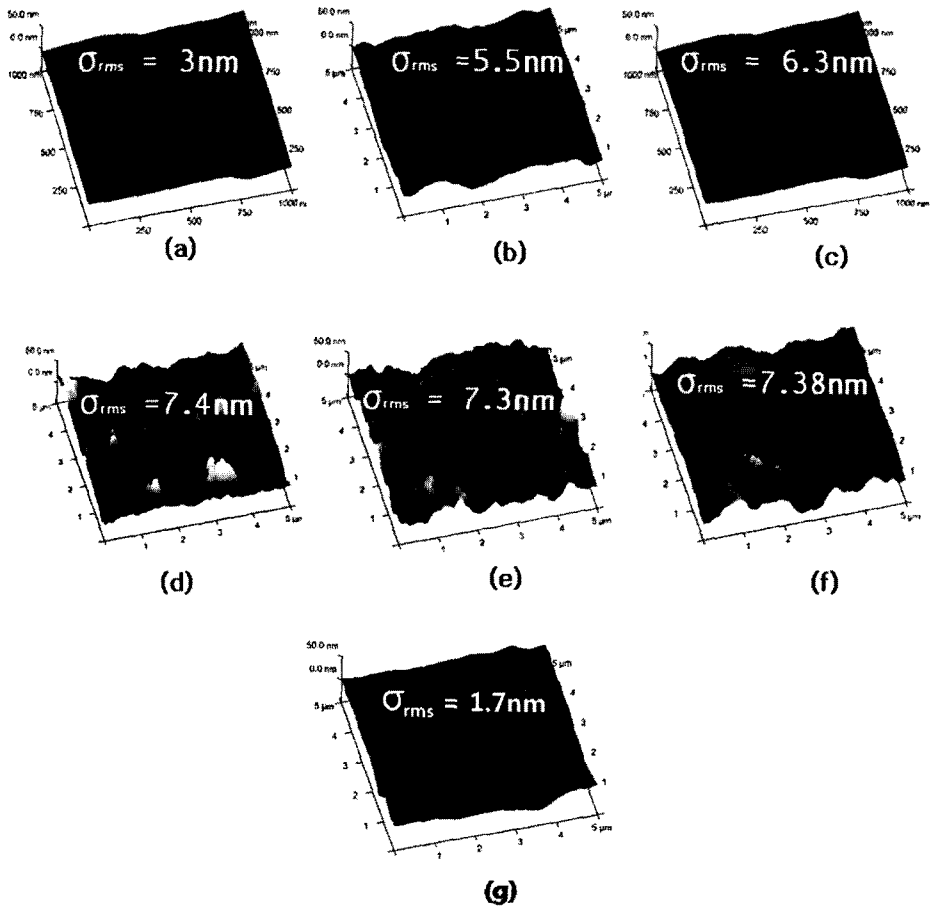


그림 4. 산소 분압 공정 조건에 따른 ITO/PVDF의 표면 AFM 측정 결과.  
 Fig. 4. AFM images of ITO/PVDF deposited at different  $PO_2$ .

섭효과에 의한 투과도의 최대, 최소값을 갖게되는 파장에 대한 주기적인 투과도의 변화 곡선이 관측되기 시작하며, 550 nm의 파장의 빛에 대해서 투과도가 70 %까지 감소하게 되고, ITO두께가 160 nm인 경우에 투과도가 다시 75 %까지 증가하게 되는 경향을 관측하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

이상의 결과로부터, 압전폴리머 PVDF를 기판으로 한 ITO/PVDF의 R2R 스퍼터링 증착 공정시의 Roll의 증착 속도를 0.24 m/min으로 하고, DC 펄스 전력 인가를 20 kW에 고정하도록 하며, Ar+O<sub>2</sub> 혼합가스내의 산소 분압비 조절에 따른 ITO물성의

변화를 살펴보았다. ITO박막의 두께는 약 100 nm로 증착 속도는 8 nm/min로 일정하도록 하였으며, 산소 분압비 조절에 따른 광투과도와 표면 거칠기, 전기전도도등의 박막 물성이 변화하는 것을 관찰하였으며, 특히 ITO/PVDF의 전반적인 전기 전도도 형성에 주요 영향 인자인 산소 원소와 주석/인듐의 금속 원소간의 치환 관계가, 산소 분압비 조절에 따라 영향을 받고 그 결과, ITO박막의 전기저항값의 변화가 특정 산소 분압비  $PO_2=2 \times 10^{-6}$  Torr 조건에서 감소되는 경향을 보이는 것을 알 수 있었고, 표면 거칠기는 7 nm 미만으로 조절 가능하였고, 투명도는 550 nm 파장에서 70 %이상까지 확보할 수 있어서, 이로부터 ITO/PVDF 진공 증착에 있어 최적 공정 조건을 찾는 계기가 된 것으로 평가할 수 있다.

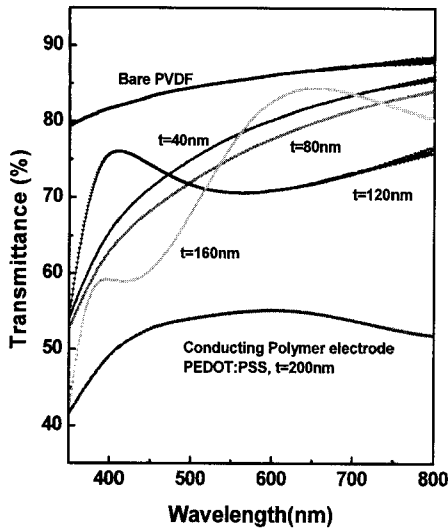


그림 5. 산소 분압 공정 조건에 따른 ITO/PVDF의 광투과도.

Fig. 5. Transmittance of ITO/PVDF with different thickness deposited at  $PO_2=2 \times 10^{-6}$  Torr.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학기술연구원의 미래원천 연구사업(2E20793)과 서울시 산학연 e-cluster 구축사업의 지원 하에 이루어졌음에 감사드립니다.

### 참고 문헌

[1] Y. Leterrier, L. Medico, F. Demarco, J.-A. Manson, U. Betz, M. F. Escola, M. Kharrazi Olsson, and F. Atamny, "Mechanical integrity of transparent conductive oxide films for flexible polymer-based displays", *Thin solid Films*, Vol. 460, p. 156, 2004.

[2] A. Dodabalapur, "Organic and polymer transistors for electronics", *Doda, Materialstoday*, 9(4), p. 24, 2006 ; R. A. Street, W. S. Wong, S. E. Ready, M. L. Chabiny, A. C. Arias, S. Limb, A. Salleo, and R. Lujan, "Jet printing flexible displays", *ibid*, p. 32; J. Jang, "Displays develop a new flexibility", *ibid*, p. 46, 2006.

[3] G. P. Crawford, "Flexible Flat Panel Displays",

G. P. Crawford eds. John Wiley & Sons, New York, 2005.

[4] W. Wu and B. Chiou, "Deposition of indium tin oxide films on polycarbonate substrates by radio-frequency magnetron sputtering", *Thin solid Films*, Vol. 298, p. 221, 1997.

[5] J. H. Kim, D. H. Park, J. H. Kim, D. J. Byun, and W. K. Choi, "Characteristics of large area ITO/PET fabricated by vacuum web coater", *Kor. J. Mater. Res.*, Vol. 17, No. 10, p. 516, 2007.

[6] T. Furukawa, Y. uematsu, K. Asakawa, and Y. Wada, "Piezoelectricity, pyroelectricity, and thermoelectricity of polymer films", *J. Appl. Polymer Science*, Vol. 12, p. 2675, 1968.

[7] S. Y. Ie, D. H. Park, and W. K. Choi, "Audible OLED Device on Flexible PVDF Substrate with Laser Patterned ITO electrode", *SID 08 DIGEST*, p. 1575, 2008

[8] H. W. Choi, D. H. Park, J. H. Kim, W. K. Choi, Y. J. Sohn, B. S. Song, J. Cho, and Y. S. Kim, "300 mm wide vacuum web coater system with surface modification for flexible copper clad laminate", *Kor. Vac. Soc.*, Vol. 16, No. 2, p. 79, 2007.

[9] K. L. Chopra, S. Major, and D. K. Pandya, "Transparent conductors - A status review", *Thin Solid Films*, Vol. 102, No. 1, p. 1, 1983.

[10] S. E. Dyer, P. S. Amons, O. J. Gregory, and A. Bruins Slot, "Preparation and piezoresistive properties of reactively sputtered indium tin oxide thin films", *Thin Solid Films*, Vol. 288, No. 1, p. 279, 1996.

[11] L. Bardos and M. Libra, "Effect of the oxygen absorption on properties of ITO layers", *Vacuum*, Vol. 39, No. 1, p. 33, 1989.

[12] Y. G. Han, "Indium tin oxide thin film deposition by a ion beam sputtering system", *Master Thesis, Korea University*, 2000.

[13] Y. Higuchi, "Low resistivity ITO film prepared by DC magnetron sputtering", *Vol. 43, No. 2*, p. 77, 1992.

[14] J. L. Vossen, "RF sputtered transparent conductors, The system  $In_2O_3-SnO_2$ ", *RCA Review*, Vol. 32, p. 289, 1971.