

# 연속공정기반 저온 상압 원자층 증착 시스템을 이용한 유무기 멀티레이어 배리어 박막에 관한 연구

이재욱\*, 김현범\*, 최경현\*<sup>#</sup>

\*제주대학교 메카트로닉스공학과

## A Study on the Organic-Inorganic Multilayer Barrier Thin Films Using R2R Low-Temperature Atmospheric-Pressure Atomic Layer Deposition System

Jae-Wook Lee\*, Hyun-Bum Kim\*, Kyung-Hyun Choi\*<sup>#</sup>

\*Department of Mechatronics Engineering, Jeju National University.

(Received 6 April 2018; received in revised form 20 April 2018; accepted 25 April 2018)

### ABSTRACT

In this paper, the organic material Poly(methyl methacrylate) PMMA is used with inorganic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> to fabricate organic-inorganic multilayer barrier thin films. The organic thin films are developed using a roll-to-roll electrohydrodynamic atomization system, whereas the inorganic are grown using a roll-to-roll low-temperature atmospheric pressure atomic layer deposition system. For the first time, these two technologies are used together to develop organic-inorganic multilayer barrier thin films in atmospheric condition. The films are grown under optimized parameters and classified into three classes based on the layer structures, when the total thickness of the barrier is maintained at ~ 160 nm. All classes of barriers show good morphological, optical and chemical properties. The Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films with a low average arithmetic roughness of 1.58 nm conceal the non-uniformity and irregularities in PMMA thin films with a roughness of 5.20 nm. All classes of barriers show a notably good optical transmission of ~ 85 %. The hybrid organic-inorganic barriers show water vapor and oxygen permeation in the range of ~  $3.2 \times 10^{-2} g/m^2/day$  and  $0.015 cc/m^2/day$  at 23°C and 100% relative humidity. It has been confirmed that it can be mass-produced and used as a low-cost barrier thin film in various printing electronic devices.

**Key Words** : Roll to Roll Spatial Atmospheric Atomic Layer Deposition(롤투롤 공간 분할형 상압 원자층 증착), Roll to Roll Electrohydrodynamic Atomization(롤투롤 전기수력학 미립화), Multilayer Barrier Thin Film(다층 배리어 박막)

## 1. 서 론

박막 제조 기술은 진공 증착이나 스퍼터링 등을 이용하여 절연된 유리, 세라믹 또는 반도체 등의 기판 상에 형성된 아주 얇은 피막 또는 그 피막을 만드는 기술을 가리킨다<sup>[1]</sup>. 박막 제조 기술은 수 나

# Corresponding Author : khchoi@jeju.ac.kr

Tel: +82-64-754-3713, Fax: +82-64-752-3174

노미터에서 수 마이크로미터까지 얇은 물질의 단일 층 혹은 다층을 코팅하는 것으로 정의되며 재료의 성질과 제조 조건에 따라 다양한 명칭으로 구분된다. 종래 박막 제조 기술은 대표적으로 화학기상 증착법(Chemical Vapor Deposition), 물리기상 증착법(Physics Vapor Deposition), 원자층증착법(Atomic Layer Deposition)이 있으며 그중 원자층 증착법(ALD)은 Å(angstrom)단위의 매우 얇은 막을 증착시킬 수 있다는 장점을 기반으로 1980년도 이후부터 현재까지 개발되어 지고 있다.

원자층 증착법은 1960년도 소련에서 “molecular layering”라는 이름으로 불렸으며 1970년 핀란드에서 “atomic layer epitaxy(ALE)”라는 이름으로 알려져 있었다. 처음에는 ALD를 전기 발광 디스플레이 패널 제작을 위한 고품질 다결정 ZnS 박막이 연구되었으나 점차 기술이 발전하면서 ALD의 재료 선택의 폭이 넓어져 응용분야가 확대되었다<sup>[2-3]</sup>.

종래의 원자층 증착기술은 기판이 고정되고 시간에 따라 전구체(precursor)를 분리하는 시간 분할형으로, 시간에 따라 불활성기체를 주입시켜 전구체를 제거하는 방식이다. 박막 증착을 위한 화학반응 시간이 챔버 크기 및 전구체 노출시간에 의해 결정이 되어 비교적 많은 시간이 소요된다. 이러한 한계를 보완하기 위해 개발된 기술이 공간 분할형 원자층 증착기술(Spatial Atomic Layer Deposition)이다.

공간 분할형 원자층 증착기술은 공간에 따라 전구체를 분리하는 방식으로 기판이 유동적이며 공간에 따라 퍼지가스가 전구체를 분리시킨다. 롤투롤과 상압 공정에 적용이 가능하여 생산성 및 대면적 생산에 이점이 있다. 또한 저온공정으로 인해 유연 기판에 적용이 가능하게 됨으로써 유연 유기 디바이스의 제조가 가능하다<sup>[4]</sup>.

유연 유기 디바이스는 현재의 산업 분야에 유망한 기술 중 하나이지만 유연 유기 디바이스를 제조하는 데는 몇 가지 어려움이 있다. 첫 번째로 유연 기판과 유기물은 높은 온도에서 물리적, 화학적 변형이 발생한다. 두 번째로 대기 상태에서 유기 디바이스의 작동은 물과 산소의 침투에 의해 산화 또는 부식과 같은 손상을 초래한다. 손상된 디바이스는 전자 장치로서 성능이 저하되고 소자들의 오작동을 야기한다. 따라서 이러한 어려움을 극복하

고 유연 유기 디바이스를 제작하기 위해서는 낮은 온도에서 제작이 가능한 배리어 박막이 필요로 된다.

본 논문에서는 연속공정기반 저온, 상압 환경에서 공정이 가능한 롤투롤 원자층 증착 기술과 전기수력학 미립화 기술을 이용하여 총 4개의 층을 쌓아 유기 멀티레이어 배리어 박막을 제조하였다. 이를 통하여 각 박막의 표면 형상, 박막 조성, 광학 특성, 배리어 특성을 분석하여 배리어 박막으로서 사용 가능성에 대하여 확인할 수 있었다.

## 2. 실험

### 2.1 연속공정기반 저온 상압 원자층 증착 시스템

연속공정기반의 저온 상압 원자층 증착 공정 기술은 기존의 시간 분할형 원자층 증착 기술의 한계를 극복하고 나노급 박막 증착을 할 수 있는 신개념의 공정기술로 롤투롤 인쇄공정 기반의 공간 분할형 원자층 증착(R2R spatial ALD)을 통해 단차 피복성(step coverage), 고 종횡비(high aspect ratio), 고정밀, 등각(conformal)의 박막을 성장시키는 기술이다<sup>[5]</sup>. 기존의 원자층 증착 기술은 고온, 진공환경에서 공정이 진행되어 유연 유기 디바이스에 적용이 어려웠으나 현재 증착 방식의 발전으로 인해 저온, 상압 환경에서 공정이 가능하게 되었다.

공간 분할형 원자층 증착은 Fig. 1과 같은 원리로 4개의 step으로 구성되어 있으며 기판 위에서 전구체들은 화학 흡착 및 탈착을 반복하며 증착이 이루어진다. 각 전구체들은 화학반응을 마치면 기판 위에서 더 이상 반응을 하지 않고 배기 슬릿에 의해 외부로 제거가 된다.

본 연구에서는 연속공정기반 저온 상압 원자층 증착 시스템을 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막 증착을 위해서 사용하였으며 롤투롤 유연 기판 위에 다중 슬릿 헤드를 설치하였다. Fig. 2는 무기박막 증착을 위한 R2R ALD의 구성을 간단하게 도식화하였다. 다중 슬릿 헤드의 수직 높이가 조절은 마이크로미터를 사용하여 조절할 수 있으며 헤드와 유연 기판 사이는 500um 이하의 간격을 두고 공정을 진행하였다. 무기박막

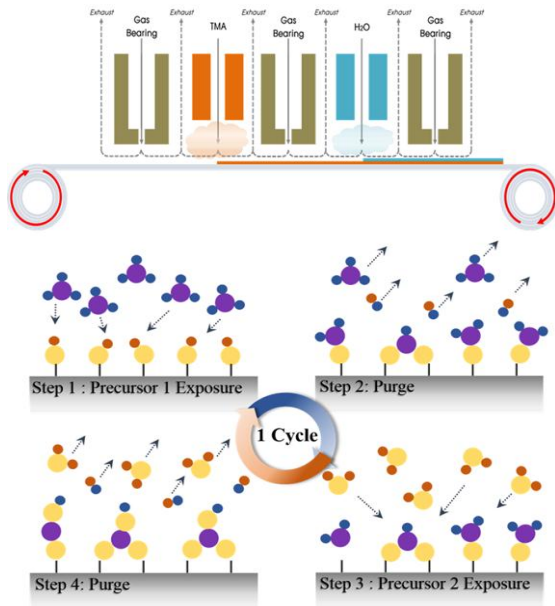


Fig. 1 Principle of R2R spatial ALD process

Table 1 Experimental parameters of R2R spatial atomic layer deposition

R2R spatial atomic layer deposition		
Temperature	TMA pipe	120 °C
	H <sub>2</sub> O pipe	120 °C
	N <sub>2</sub> pipe	120 °C
	Head	120 °C
	TMA canister	40 °C
	H <sub>2</sub> O canister	40 °C
MFC	Substrate	120 °C
	TMA line	100sccm
	H <sub>2</sub> O line	100sccm
	N <sub>2</sub> line	1200sccm
Exhaust setting		730torr
Web speed		20mm/s
Tension		10kgf

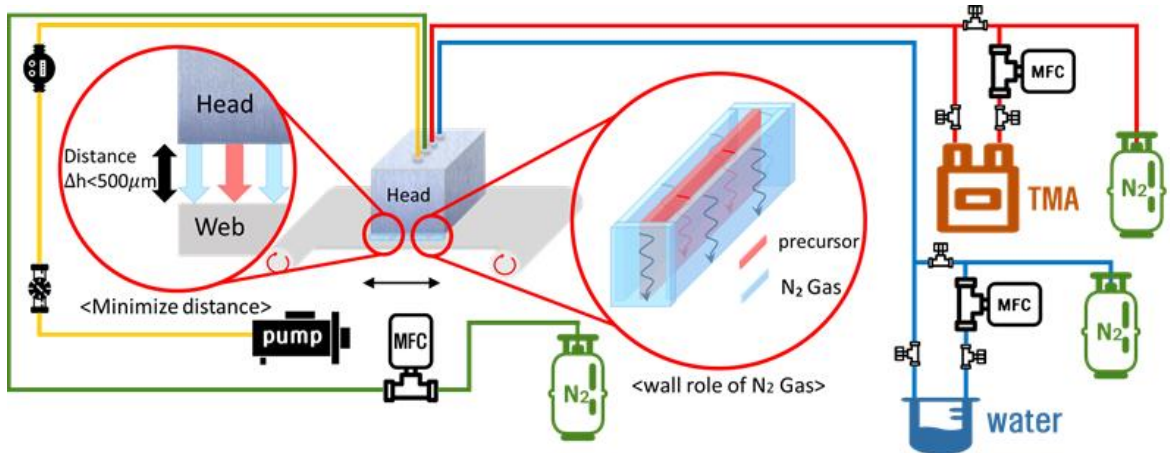


Fig. 2 Schematic of R2R spatial ALD process

인 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 증착을 위한 전구체로는 TMA(Al(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>, Trimethyl Aluminum)와 H<sub>2</sub>O를 사용하였고 N<sub>2</sub>가스는 전구체 이송용, 에어 커튼용, 전구체 분리용으로 사용하였다. 모든 전구체 및 불활성가스는 ALD 헤드와 연결되어 있다.

Table 1은 원자층 증착 공정 조건 표이다. 전구체

가 ALD 헤드로 이동 중의 상태변화를 막기 위해서 모든 배관과 멀티 슬릿 헤드는 120°C를 유지하게 하였다. 또한 TMA 캐니스터와 H<sub>2</sub>O 캐니스터에서 배기되는 전구체의 버블링을 원활하게 진행하기 위하여 각각의 온도를 40°C로 유지하였다. MFC(Mass Flow Controller)는 채널을 통한 가스의 유량을 제어

하는데 사용하였으며 TMA와 H<sub>2</sub>O 전구체는 각각 100sccm의 유량으로 N<sub>2</sub>가스에 의해 ALD 헤드로 이동된다. 에어 커튼용 N<sub>2</sub>가스와 전구체 분리용 N<sub>2</sub>가스는 전구체의 혼합과 외부 파티클의 유입을 효과적으로 방지하기 위하여 1200sccm을 유지하였다. 위에 각각의 공정 조건은 공간 분할형 헤드 슬릿 개수에서 도출해낸 값이다. 헤드에서 분사되는 물질들인 N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, TMA를 지속적으로 배기하기 위해서 회전식 Pump를 사용하였으며 모든 분사 물질을 충분히 배기하기 위하여 설정값을 730torr로 설정하여 공정을 진행하였다.

유연기판은 125um 두께의 PET(Teonex, Q65HA)을 이용하였고 기판의 이송 속도는 20mm/sec로 유지하였으며 기판과 헤드의 이격 거리에 영향을 미치는 요소인 장력은 충분히 10kgf으로 인가하였다. 원자층 증착 헤드의 온도 유지를 위해서 카트리지 히터(Misumi, MCHL6-140-V200-W100-B1000-N)를 헤드 내부에 설치하여 120°C를 유지하였으며 유연기판의 온도는 기판 하단에 IR 히터를 설치하여 120°C를 유지하였다.

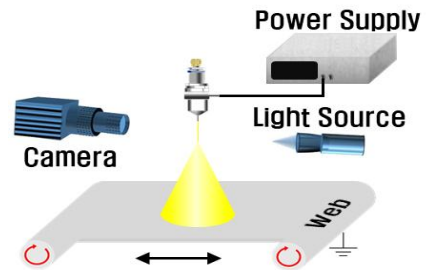
## 2.2 연속공정기반 전기수력학 미립화 시스템

전기수력학 미립화(EHDA; electrohydrodynamic atomization) 기술은 전기장과 용액 내에 유도된 전하와의 상호 작용으로 용액이 미립화되어 토출되는 기술이다<sup>[6-7]</sup>. 전기적인 힘을 받은 용액의 표면은 전하의 포화상태가 되고 계속해서 전기적인 힘을 가하면 전하에 의해 용액 표면에서 용액이 분리된다. 이 기술은 1990년대부터 마이크로/나노 물질을 제조, 생산하는데 많은 주목을 받기 시작하였다<sup>[8-9]</sup>.

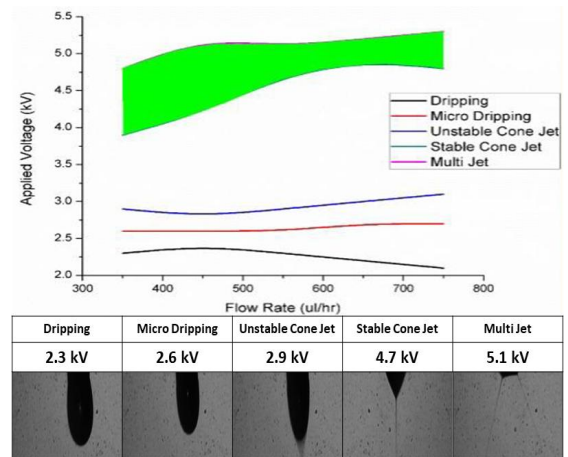
Fig. 3은 유기박막인 PMMA를 코팅하기 위해 사용된 EHDA의 구성을 간단하게 도식화하였다. 잉크의 필요한 유속을 유지하기 위해서 실린지 펌프(Harvard Apparatus, PHD 2000 Infusion)를 사용하였으며 내경이 210um인 금속 캐필러리, 테프론 튜브와 연결된 실린지를 사용하였다. 이송 스테이지는 X축, Z 축 방향으로 움직일 수 있으며 노즐 홀더는 Y축 방향으로 움직일 수 있다, 균일한 잉크 토출을 위하여 노즐과 기판 사이의 간격을 정밀하게

**Table 2 Experimental parameters of R2R electrohydrodynamic atomization**

Parameters	Value
Applied voltage	4.7kV
PMMA flow rate	500ul/hr
Nozzle to substrate distance	15mm
Stage speed	1mm/s
Nozzle size	10um



**Fig. 3 Schematic of EHDA process**



**Fig. 4 PMMA stable cone jet**

조정할 수 있게 이루어져 있으며 고속 CCD 카메라를 이용하여 잉크의 토출 형상을 관찰하였다.

공정 조건으로는 Table 2와 같이 15mm의 이격 거리로 증착공정을 진행하였으며 PMMA의 실린지 유량은 500ul/hr을 가하였다. Fig. 4는 유량과 인가 전압에 따른 PMMA 잉크의 토출 모드 변화 그래프

이며 두 파라메타에 따른 메니스커스(meniscus)의 변화를 확인하였다. 따라서 PMMA 잉크는 인가접압이 4.7kV 일 때 노즐에서 안정적인 콘젯모드(cone-jet mode)를 형성할 수 있었다.

### 2.3 유기물 멀티레이어 배리어 박막 제조

롤투를 공간 분할형 원자층 증착 시스템과 롤투를 전기수력학 미립화 시스템에 이용하여 Fig. 5와 같이 총 3개의 샘플인 무기, 유기, 유기물 멀티레이어 배리어 박막을 제조하였다. 다음 샘플을 class 1, class 2, class 3으로 구분하였고 두께는 각각 30nm, 50nm, 160nm로 제작하였다. class1은 롤투를 공간 분할형 원자층 증착 시스템에 의하여 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 단일막을 증착하였고 class 2는 롤투를 전기수력학 미립화 시스템에 의하여 PMMA 단일 막을 증착하였고 class3은 PMMA / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / PMMA / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 다층막을 증착하였다.

유기막 PMMA의 두께는 기관의 왕복 횟수에 의해 조절되었으며 평균 10nm/pass의 성장 속도로 증착이 된다. 무기막 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 두께는 ALD 공정에서 중요한 매개변수로 정의되는 GPC(Growth rate Per Cycle)에 의해 제어가 되며 웹 왕복 횟수에 따라 결정된다. 롤투를 공간 분할형 원자층 증착 시스템의 GPC는 0.1nm/cycle을 갖으며 높은 두께의 박막을 쌓기 위하여 기관을 왕복하여 반복 공정으로 진행하였다.

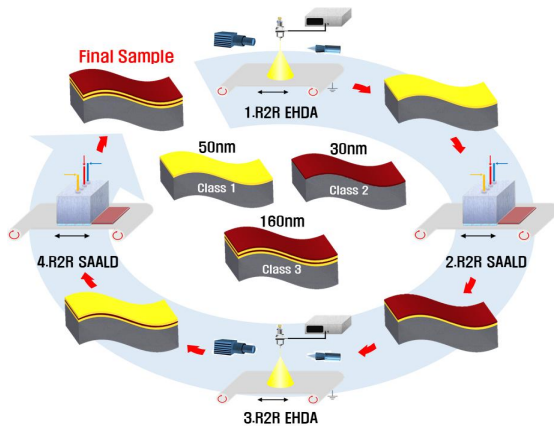


Fig. 5 Schematic of hybrid multi-layer samples preparation

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 표면 형상 분석

증착된 샘플들의 표면 형상 분석은 FE-SEM(Field Emission Scanning Electron Microscopy; JSM-6700F) 과 3D nano surface profiler를 이용하여 롤투를 전기수력학 미립화 시스템에 의해 증착된 PMMA와 롤투를 공간분할형 원자층 증착 시스템에 의해 증착된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 표면을 분석하였다. Fig. 6은 PMMA층과 PMMA위에 증착된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>층의 FE-SEM이미지, 2D 표면 형상 이미지, 접촉각 이미지를 보여준다. Fig.6(a),(b)를 통해서 여러 개의 원형 형상이 관찰되었으며 PMMA층의 제곱 평균 제곱근 거칠기(Rq), 거칠기 프로파일의 총높이(Rt), 거칠기 프로파일의 최대 높이(Rz)는 각각 6.52nm, 50.52nm, 37.99nm로 비교적 균일하지 않은 표면 형상을 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 6(c)를 통해 90°의 접촉각으로 표면이 소수화 되었음을 확인할 수 있다.

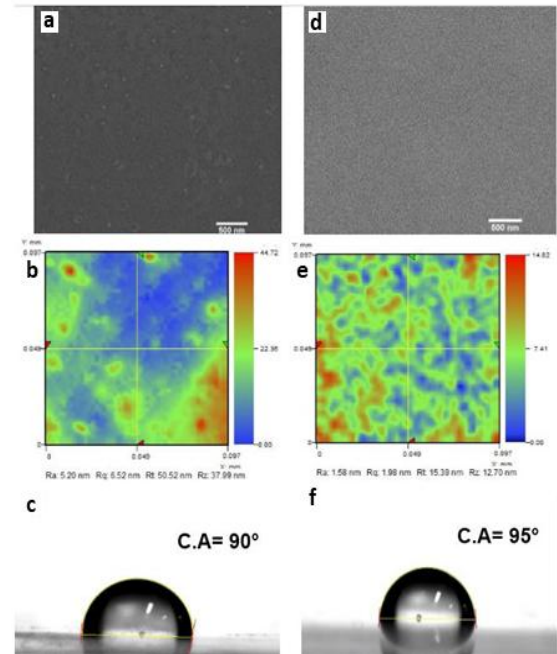


Fig. 6 FESEM, 2D surface profile, Contact angles images of deposited PMMA(a,b,c) by EHDA, deposited Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(d,e,f) on PMMA



Fig. 6(d),(e)를 통해 PMMA층위에서 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>층은 규칙적이고 반복적인 형상을 확인할 수 있으며 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>층의 제곱 평균 제곱근 거칠기(Rq), 거칠기 프로파일의 총높이(Rt), 거칠기 프로파일의 최대 높이(Rz)는 각각 1.98nm, 15.39nm, 12.70nm로 PMMA층에 비해 균일하며 안정적인 표면 형상이 관찰되었다. 산술 평균 거칠기는 1.58nm로 매우 낮은 값으로 변했음을 확인하였다. 또한 Fig. 6(f)를 통해 95°의 접촉각으로 PMMA층과 같이 소수화 되었음을 확인할 수 있다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>층은 PMMA층과 비교하여 좋은 표면 거칠기를 보이며 투습도에 악영향을 끼치는 핀홀(pin-hole)을 확인할 수 없다. 모든 층의 접촉각은 90~95°로 큰 소수성 특성을 가졌다. 또한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>층은 PMMA층의 표면 결함을 개선시켰고 투습막으로써의 성질을 더 강화시켰다.

무기 배리어 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막의 핀홀은 수분 및 산소 투과율에서 중요한 역할을 한다. 멀티레이어 배리어에서 유기 배리어 박막을 구현하는 기본적인 이유 중 하나는 침투 경로를 변경하여 수분 및 산소의 투과 속도를 감소시키기 위함이다. 무기물 박막과 달리 유기 박막에서는 수분의 투과를 방해하고 다음 핀홀로 전달되는 것을 방해한다<sup>[10]</sup>. 따라서 멀티레이어 배리어는 디바이스를 보호하고 디바이스의 수명을 크게 연장시킬 수 있다.

### 3.2 박막 조성 분석

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 배리어 박막의 화학적 조성은 X선 광전자 분광법(XPS; X-ray Photoelectron Spectroscopy)를 이용하여 분석하였다. X선 광전자 분광법의 분석 목적은 박막의 확실한 증착 여부 및 이를 통해 효율적인 생산 여부를 확인하는 것이다.

Fig. 7(a)~(c)는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막의 XPS 스펙트럼을 보여준다. 알루미늄(Al)원소 Al2p와 Al2s의 결합에너지는 각각 74eV, 119eV이며 탄소(C)원소 C1s의 결합에너지는 285eV, 산소(O)원소 O1s의 결합에너지는 532eV로 관찰된다. Al2p, Al2s, O1s 피크 값은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막 성장의 유무를 나타내기 때문에 중요한 요소로 간주된다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막임을 확인하기 위해서는 Al2p피크와 O1s피크 사이의 에너지 분리가 457eV 이상이 되어야 한다고 제안한다<sup>[11-12]</sup>. XPS 결

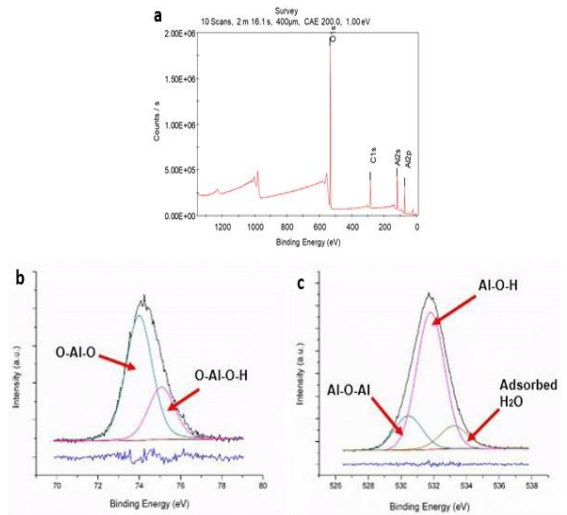


Fig. 7 XPS spectrum of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin film by R2R-SAALD

과는 Al2p (74eV)와 O1s (532eV)의 피크 사이의 458eV 결합에너지로 제안되어진 결과를 만족시킨다. 또한 샘플이 대기에 짧은 시간 노출이 되어도 샘플 표면에 C1s의 피크치가 증가할 수 있다.

### 3.3 광학 특성 분석

배리어 박막의 광학 특성은 주로 태양전지 및 OLED 등과 같은 장치의 보호용도에 사용되기 때문에 높은 광학 특성은 갖는 박막이 필요로 되며 수분 및 산소 투과성이 우수하지만 광투과율이 낮은 차단 필름은 태양전지나 OLED 장치에 적합하지 않다.

제작된 박막들은 UV-vis spectroscopy를 통해 분석이 되었으며 Fig.8과 같이 우수한 광학 특성을 보여 주었다. Fig. 8(a)는 제작된 박막들의 광투과율 스펙트럼을 도시하였으며 Fig. 8(b)는 제작된 박막들의 흡광도를 도시하였다. 비교 파라메타인 기본 PET 기판의 광 투과율은 가시광선 영역에서 93%로 측정되었으며 모든 배리어 층에서의 광투과율은 85%이상으로 추정되었다. 또한 모든 배리어 층에서 매우 낮은 흡광도를 보여주며 기본 PET의 흡광도와 유사한 값이 측정되었다. 따라서 멀티레이어 배리어 박막의 제작 과정은 광 투과율과 흡광도에 큰 영향을 미치지 않았다.

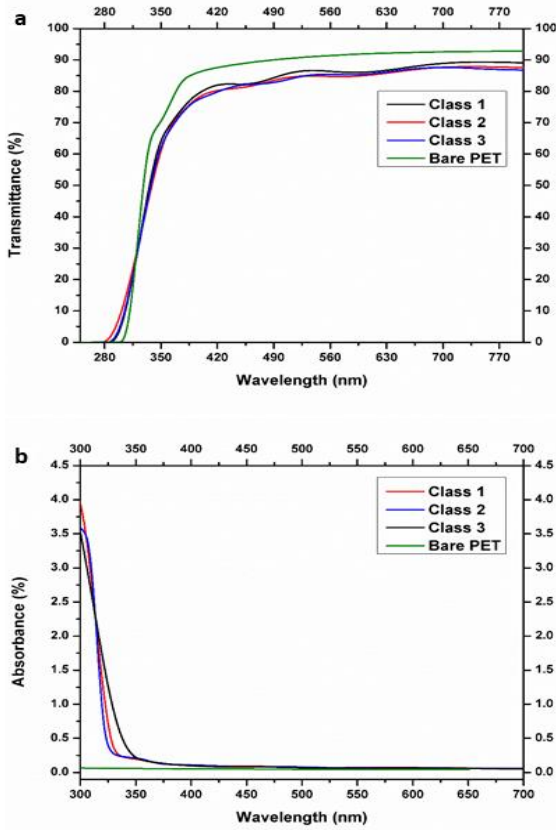


Fig. 8 Optical properties of different classes of fabricated barrier thin film, optical transmittance (a) and absorbance spectra (b)

### 3.4 배리어 특성 분석

WVTR (Water Vapor Transmission Rate) 측정과 OTR (Oxygen Transmission Rate) 측정은 MOCON (AQUATRAN model 1)을 통해 8cm×8cm의 샘플을 사용하여 상대 습도 100%에서 측정이 되었다. 롤투를 공간 분할형 원자층 증착 시스템에 의해 증착된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 단일 막 class1은 6.5×10<sup>-1</sup>g/m<sup>2</sup>/day의 WVTR 값과 0.22cc/m<sup>2</sup>/day의 OTR 값을 얻었다. 롤투를 전기수력학 미립화 시스템에 의해 제작된 PMMA 단일 막 class2는 6.2g/m<sup>2</sup>/day의 WVTR 값과 0.35cc/m<sup>2</sup>/day의 OTR 값을 얻었다, 유무기 멀티레이어 배리어 PMMA / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / PMMA / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 다층막 class3의 WVTR 값은 3.2×10<sup>-2</sup>g/m<sup>2</sup>/day,

OTR 값은 0.015cc/m<sup>2</sup>/day로 향상되었다. 이를 통해, 롤투를 공간 분할형 원자층 증착 시스템과 롤투를 전기수력학 미립화 시스템을 이용하여 제작된 유무기 멀티레이어 박막을 태양 전지, 유기 발광다이오드, 유기 박막 트랜지스터 소자, 멤리스터와 같은 인쇄 전자 디바이스에 배리어 박막으로 사용될 가능성을 확인하였다.

## 4. 결론

롤투를 공간 분할형 원자층 증착 시스템과 롤투를 전기수력학 미립화 시스템을 동시에 사용하여 PMMA와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 유무기 멀티레이어 박막을 제작하여 각 층에 대한 표면 형상, 박막 조성, 광학 특성, 배리어 특성 분석을 진행하였고 우수한 표면 형상, 화학적, 광학적 특성을 확인하였다. 1.58nm의 매우 낮은 산술 평균 거칠기를 갖는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막은 PMMA막의 불규칙한 표면형상을 개선시켰다. 또한 박막 조성 분석을 통해 증착된 박막들의 존재 유무를 확인하였고 멀티레이어 배리어 박막은 가시영역에서 85% 이상의 광 투과율을 갖는다. 유무기 멀티레이어 배리어 박막의 WVTR 값과 OTR 값은 3.2×10<sup>-2</sup>g/m<sup>2</sup>/day와 0.015cc/m<sup>2</sup>/day로, 다양한 인쇄전자 디바이스에서 배리어 박막으로 사용될 가능성을 확인하였다.

## 후 기

"본 연구는 산업통상자원부의 산업핵심기술개발사업인 "스마트 박막소자 제조를 위한 롤투를 연속공정 기반 저온·상압 패턴 증착 장비 개발, (10063277)" 과제의 지원으로 수행되었음."

## REFERENCES

1. Martin, P. M., "Handbook of deposition technologies for films and coatings: science, applications and technology", Elsevier, pp. 135-139, 2009.
2. Dameron, A. A., Davidson, S. D., Burton, B. B.,

- Carcia, P. F., McLean, R. S., George, S. M., "Gas Diffusion Barriers on Polymers Using Multilayers Fabricated by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Rapid SiO<sub>2</sub> Atomic Layer Deposition", The Journal of Physical Chemistry C, Vol. 112, No. 12, pp. 4573-4580, 2008.
3. Puurunen, R. L., "A short history of atomic layer deposition: Tuomo Suntola's atomic layer epitaxy", Chemical Vapor Deposition, Vol. 20, No. 10-12, pp. 332-344, 2014.
  4. Muñoz-Rojas, D., Nguyen, V. H., de la Huerta, C. M., Aghazadehchors, S., Jiménez, C., Bellet, D., "Spatial Atomic Layer Deposition (SALD), an emerging tool for energy materials. Application to new-generation photovoltaic devices and transparent conductive materials", Comptes Rendus Physique, Vol. 18, No. 7-8, pp. 391-400, 2017.
  5. Lee, J. S., Lee, J. H., Nam, S. B., Cho, Y. S., Go, M. S., Lee, S. J., Oh, D. K., Kim, J. D., Lee, J. H., Ok, J. G., "Development of a Compact Desktop-sized Roll-to-roll Nanoimprinting System for Continuous Nanopatterning," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No.1, pp. 96-101, 2017.
  6. Kim, H. B., Kim, K. H., Ghayas, S., Lim, J. H., Yang, H. C., Chio, K. H., "A Study on Organic/Inorganic Materials Deposition Using SAW-ED System", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 5, pp. 100-108, 2016.
  7. Choi, J., Lee, S., Kim, Y. J., Son, S. U., An, K. C., "High Aspect Ratio EHD Printing with High Viscosity Ink Ejection." Nanotech, Vol. 2, pp. 267-270, 2012.
  8. Ko, J. B., Kim, H. C., Yang, Y. J., Kim, H. B., Yang, S. W., Oh, S. H., Doh, Y. H., Choi, K. H., "Implementation of Biosensor Pattern Using Micro Patterning Technique", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 6, pp. 122-128, 2016.
  9. Xie, J., Jiang, J., Davoodi, P., Srinivasan, M. P., Wang, C. H., "Electrohydrodynamic atomization: A two-decade effort to produce and process micro-/nanoparticulate materials", Chemical engineering science, Vol. 125, pp. 32-57, 2015.
  10. Xiao, W., Hui, D. Y., Zheng, C., Yu, D., Qiang, Y. Y., Ping, C., Xiang, C. L., Yi, Z., "A Flexible Transparent Gas Barrier Film Employing the Method of Mixing ALD/MLD-Grown Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Alucone Layers", Nanoscale research letters, Vol. 10, No. 1, pp. 130, 2015.
  11. Zhang, F., Yang, W., Pang, A., Wu, Z., Qi, H., Yao, J., Fan, Z., Shao, J., "Annealing effects on the optical and structural properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> films as UV antireflection coatings on 4H-SiC substrates", Applied Surface Science, Vol. 254, No. 20, pp. 6410-6415, 2008.
  12. Koo, J., Kim, S., Jeon, S., Jeon, H., Won, Y., Kim, Y., "Characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films deposited using dimethylaluminum isopropoxide and trimethylaluminum precursors by the plasma-enhanced atomic-layer deposition method.", Journal of the Korean Physical Society, Vol. 48, No. 1, pp. 131-136, 2006.