

광개시제 종류에 따른 유기 박막의 경화 특성과 플렉서블 디스플레이 봉지 소재로의 적용성 분석

오준기[#] · 김소현[#] · 정인조 · 허 준 · 정현욱[†] · 방준하[†]

고려대학교 화공생명공학과

(2020년 6월 21일 접수, 2020년 7월 1일 수정, 2020년 7월 4일 채택)

Effect of Photo-initiators on the Crosslinking Behavior of Organic Thin Films and Their Applicability to Flexible Display Encapsulation Layer

Junki Oh[#], So Hyun Kim[#], Kevin Injoe Jung, June Huh, Hyun Wook Jung[†], and Joona Bang[†]

Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea

(Received June 21, 2020; Revised July 1, 2020; Accepted July 4, 2020)

초록: 플렉서블 디스플레이에 적용할 수 있는 유기 박막 개발을 위해 광경화성 소재에 대한 특성화를 진행하였다. 광경화에 필수적인 요소인 광개시제는 광 조사 시 분해되며 라디칼을 생성하는 Type-1 개시제와 분해없이 라디칼을 생성하는 Type-2 개시제 유형으로 구분된다. Type-2 개시제는 미반응물에 의한 아웃가스 배출이 거의 없는 특성으로 인해 디스플레이 봉지 유기층 제조에 결정적인 역할을 할 수 있다. 본 연구에서는 봉지층에 사용될 유기 코팅액의 경화물성을 최적화하기 위해 Type-1, Type-2 개시제에 의한 실시간 가교 물성을 비교 분석하였다. 잉크젯 코팅 공정으로의 적용 가능성을 평가하기 위하여 경화 이전 코팅액의 점도와 표면 장력 등과 같은 기본 유동 물성을 측정하였다. 또한 경화된 박막 필름의 투과율, 굴절률 등과 같은 광학적 물성들을 분석하였다. 다양한 실험 결과로부터 아웃가스 저배출 성능이 뛰어난 Type-2 개시제가 유기막의 핵심 성분으로 디스플레이 봉지 기술을 개발하는데 매우 유용함을 확인하였다.

Abstract: In this work, we examined photocurable materials for organic layers that can be used as an encapsulation layer in flexible displays. Photo-initiators, which are essential for UV-crosslinking, can be classified into two categories: Type-1 initiators that produce free radicals through the cleavage reaction caused by UV irradiation and Type-2 initiators that generate free radicals without the cleavage reaction. Type-2 initiators are more desirable for the encapsulation organic layer of the flexible display due to the low outgassing of unreacted components. To optimize the curing properties of organic coatings, the effect of initiator type on the real-time crosslinking behaviors were mainly scrutinized. The flow properties of pre-cured coatings such as shear viscosity and surface tension were also measured to evaluate the applicability in the inkjet coating process, and transmittance and refractive index were analyzed for the optical properties of cured thin films. As a result, it was found that Type-2 initiators, exerting the intrinsic low outgassing performance, are more advantageous in developing the display encapsulation technology as a key component in the organic layer.

Keywords: photo-initiator, organic layer, encapsulation, outgas, flexible display.

서 론

광경화 공정은^{1,2} 다양한 파장대의 빛 에너지를 원동력으로 가교 반응을 일으키는 중합방법으로 열에너지를 이용하는 열경화³ 공정보다 상대적으로 낮은 온도에서 진행되며 경화 속

도가 빠르다는 장점을 지니고 있다. 또한 용매를 사용하지 않는 무용제 기반의 친환경적인 경화방법으로도^{4,5} 주목을 받고 있어 학계 및 산업계에 관련 기술의 연구가 더욱 활발해지고 있다.⁶⁻¹⁰ 광경화에 의한 중합은 양이온을 사용하는 양이온 중합과^{11,12} 자유 라디칼을 사용하는 자유 라디칼 중합법으로^{13,14} 분류된다.

양이온 중합법은 다양한 단량체를 이용하여 합성이 가능하다는 장점이 있지만 자유 라디칼 중합보다 그 반응속도가 떨어지는 단점이 있어 대부분의 산업체에서는 자유 라디칼 중합법을 선호한다. 자유 라디칼 중합 공정에는 단량체, 감광제, 광

[#]These authors contributed equally to this work.

[†]To whom correspondence should be addressed.

hwjung@grtrkr.korea.ac.kr, ORCID[®]0000-0001-8395-2573

joona@korea.ac.kr, ORCID[®]0000-0002-2301-6190

©2020 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

개시제(photo-initiator, PI) 등을 사용한다. 그 중에서도 광개시제는 빛 에너지를 흡수하여 라디칼을 형성하는 필수 성분으로 중합 속도와 경화도에 큰 영향을 미친다. 광개시제는 화학적 구조에 따라 다른 흡수파장과 흡광도를 가지고 있으며 경화 매커니즘에 따라 다음과 같은 두 가지 유형으로 분류된다.¹⁵ 일반적으로 많이 사용되는 Type-1 광개시제는 광 조사 시 α 또는 β 탄소 위치에서 광 분해가 일어나서 라디칼을 형성한다. Type-1 개시제는 주로 벤조인 그룹을 포함하며 가장 잘 알려진 개시제로는 2,2-dimethoxy-2-phenylacetophenone(DMPA)이 대표적이다. 이 유형의 개시제들은 개시 속도가 매우 빠르다는 장점이 있지만, 광 분해를 일으킬 수 있는 높은 에너지의 광원(짧은 파장)이 필수적이라는 단점이 존재한다.

Type-2 개시제는 광 조사 시 고에너지 상태가 되고 주변 환경으로부터 수소를 제공받아(hydrogen-abstraction) 라디칼을 형성한다.¹⁶ 이 유형의 개시제들은 대부분 케톤 그룹을 포함하고 있으며 benzophenone이나 thioxanthone 등이 대표적이다. 이들은 단독으로 사용되기보다 주로 전자 주개 역할을 하는 co-initiator인 3차 아민과 함께 사용될 때 더욱 효과적인 개시가 가능하다고 알려져 있다.¹⁷ Type-2 개시제는, Type-1보다는 반응 속도가 느리나 낮은 에너지 광원(높은 파장)에도 개시가 가능하다는 장점을 지니고 있다. 특히 개시제가 분해되지 않아 가고 후에 유기막 내에 남아있는 미반응 개시제가 가스 형태로 천천히 방출되는 아웃가스 문제가 없기 때문에 차세대 플렉서블 디스플레이에 적용가능한 유용한 소재라 할 수 있다.

플렉서블 디스플레이는 손상없이 휘거나, 구부러지거나 말 수 있는 디스플레이를 지칭하며 차세대 디스플레이로 각광받고 있다.¹⁸ 플렉서블 디스플레이를 구현하기 위한 다양한 소자 중 자유로운 형태로 만들 수 있고 보조 광원이 불필요하며 자체발광 가능한 OLED 소자가 주목받고 있다.¹⁹⁻²³ OLED를 제조하기 위한 여러 기술 중 봉지 기술은 수분과 산소에 취약한 OLED 소자를²⁴⁻²⁷ 보호하여 패널 수율과 그 수명을 결정짓는데 핵심이 된다. 여러 봉지 방법²⁸⁻³⁰ 중 플렉서블 OLED 소자에서는 유기막과 무기막을 층층이 쌓아 형성하는 다층 박막 기술을³¹⁻³⁷ 주목하고 있다. 무기막은 수분과 산소를 차단할 수 있지만 무기막 단독으로는 핀 홀이나 크래킹같은 결함이 존재할 뿐 아니라 두꺼워지면 휘거나 구부릴 때 깨진다는 단점이 있다. 위와 같은 단점을 극복하기 위해 다층 박막 기술에서는 무기막 사이사이에 유기막을 삽입시켜 봉지막의 기계적 물성을 크게 향상시켰다.³⁸ 또한 무기막 사이에 있는 유기막은 무기막의 결합으로 인해 투과되는 산소/수분의 확산 경로를 매우 길게 하여 전체적인 봉지막의 산소/수분 투과율을 현격히 낮추는 역할을 한다.³⁹ 현재 산업체에서 무기막은 LCD 패널 양산을 통해 기술력이 축적된 PECVD(plasma enhanced chemical vapor deposition) 기술을 사용하고 있지만, 유기막 제조 기술은 여전히 개발 중에 있다. 이와 관련하여 최근 잉크젯 코팅 기술이 재료 사용 효율과 대면적화 및

대량생산에 적합하기 때문에 이에 대한 기술 개발이 매우 중요시되고 있다. 즉, 광경화형 수지를 포함하는 코팅액이 잉크젯 코팅 및 광경화 공정을 거쳐 유기막으로 제조된다. 하지만, DMPA와 같은 개시제의 경우에는 광경화 후 막 내부에 남아있는 미반응물이나 부산물 등이 가스형태로 천천히 방출되는 아웃가스 문제가 존재하게 되는데, 이 현상은 유기막의 안정성과 지속성에 악영향을 미치기 때문에 반드시 해결해야 하는 문제이다.

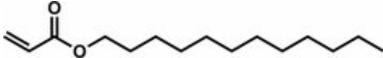
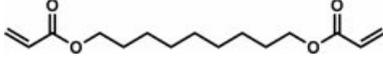
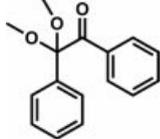
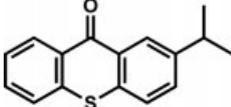
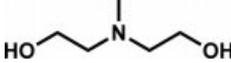
본 연구에서는 아웃가스가 방출되지 않는 플렉서블 디스플레이용 봉지 기술로서 유기막에 적용 가능한 코팅액 소재들을 중점적으로 고찰하였다. 특히 유기막 소재를 앞서 언급한 잉크젯 코팅 공정에 적용가능하도록 설계하였으며, 점도와 표면장력 같은 유동 특성의 측정을 통해 검증하였다. 회전형 레오미터를 활용하여 실시간 광경화 유변 물성을 관찰하였고, 그 과정에서 Type-1과 Type-2의 개시제 종류에 따른 경화 속도와 최종 경화 물성간 상관관계를 도출하였다. 광경화 전후 유기막의 반응 전환율은 Fourier transform infrared(FTIR) 분석을 통해 정성적으로 살폈으며, 디스플레이용 유기막으로의 적용 가능성을 위한 기본적인 평가를 위해 투과율, 굴절률 및 아웃가스에 의한 필름 질량 변화를 측정하였다.

실 험

광경화형 유기 코팅액 제조. 광경화형 유기막 소재로 대표적인 광반응 단량체인 아크릴계 단량체를 사용하였다. 한 쪽 말단에 아크릴계 가고 그룹이 있는 monoacrylate(MA), dodecyl acrylate(분자량, $M_w=240$ g/mol)와 양쪽 말단에 아크릴계 가고 그룹이 있는 diacrylate(DA) 1,9-bis(acryloyloxy)nonane($M_w=268$ g/mol)를 사용하였다. 두 단량체는 모두 미반응하여도 기화하여 아웃가스를 형성하지 않도록 비교적 높은 분자량을 가지며 점도와 표면장력이 잉크젯 공정에 적합하게 낮은 특성을 가지는 소재이다. 광개시제는 Type-1 개시제인 2,2-dimethoxy-2-phenylacetophenone(DMPA)를, Type-2 개시제인 2-isopropyl thioxanthone(2-ITX)를 사용하였으며, Type-2 개시제의 경화 효율을 높이기 위해서 공개시제(co-initiator)로 3차 아민기를 가진 *N*-methyl di-ethanol amine(MDEA)을 활용하였다(Table 1).

모든 코팅액에 투입된 모노아크릴레이트와 디아크릴레이트 간의 조성비는 3:7로 고정한 채, 개시제에 변화를 주어 경화 효과를 고찰하였다. 먼저 Type-2 개시제를 사용할 때, 주개시제와 공개시제의 비율에 따른 경화 거동을 비교하기 위해 2-ITX와 MDEA의 배합비를 0:10, 1:9, 3:7, 5:5, 10:0으로 달리 하여 실험을 진행하였다(이 때 개시제 함량은 전체 코팅액 대비 1 wt%로 고정함). 다음으로, 다양한 유형의 광개시제 양에 따른 경화 차이를 확인하기 위해 2-ITX, MDEA, 2-ITX+MDEA(5:5), DMPA의 함량을 전체 코팅액 대비 0.5, 1.0, 3.0, 5.0 wt%로 변화를 주어 경화 특성을 비교하였다.

Table 1. Chemical Structures of the Resins and Photoinitiators Used in This Study

	Name	Chemical structure
Resin	Dodecyl acrylate	
	1,9-Bis(acryloyloxy) nonane	
Photoinitiator	2,2-dimethoxy-2-phenylacetophenone (DMPA)	
	2-isopropyl thioxanthone (2-ITX)	
	N-methyl di-ethanol amine (MDEA)	

유기 코팅액의 경화 이전 유변 물성 측정. 잉크젯 코팅 공정으로의 적용 가능성을 타진하기 위해 광경화 이전 단계에서 유기 코팅액의 기본적인 유동 특성을 분석하였다. 이를 위해 회전형 레오미터(AR2000, TA Instruments, USA)로 측정된 유변 물성을 확인하였다. 측정에는 40 mm 직경의 2° steel cone을 사용하였으며, 전단 속도가 0.1부터 1000(1/s) 범위에서 측정된 전단 점도 값으로 유동 특성을 고찰하였다. 유기코팅액의 표면 장력은 직사각형 형태의 Wilhelmy plate을 장착한 표면 장력계(DCAT 11, Dataphysics, USA)를 통해 측정하였다.

실시간 광경화 유변 물성 측정. 코팅액의 실시간 광경화 유변 거동은 회전형 레오미터를 사용하여 관찰하였다. 소진 폭 진동 전단(SAOS) 모드 하에서 실시간 탄성 모듈러스(storage modulus, G')를 측정하였으며, 선형 점탄성 영역 내에서 0.5%의 변형과 2 Hz의 주파수 조건 하에서 진행하였다. 측정에는 8 mm parallel plate를 사용하였으며, 상판과 하판 사이에 간격은 300 μm 로 설정하였다. 광경화를 위해서 UV 조사기가 부착된 온도 조절 챔버를 준비하였으며, 하판은 자외선(UV)이 투과할 수 있도록 quartz glass를 이용하였다. 사용된 UV는 365 nm 파장에 2.76 W/cm²의 세기로 총 300초 동안 조사되었다.

FTIR 측정. 광경화 수지의 경화 반응에 의한 전환율은 FTIR(Jasco FT/IR-460 plus, Japan)로 분석하였다. 우선 경화시 영향을 받지 않는 C=O(1720 cm⁻¹) 파장대의 세기를 기준으로 두었으며, 경화 과정에 참여하는 아크릴기의 C=C 이중 결합(1637 cm⁻¹)이 감소하는 정도에 따라 경화도를 정성적으로 예측하였다.

경화 유기막의 굴절률 및 투과율 측정. 광경화 후 생성된 유기막의 디스플레이 적용 가능성을 판단하기 위해 투과율과 굴절률을 측정하였다. 투과율은 유리 위에 경화 필름을 올려 놓고 UV-Vis 분광계(Lambda 265 UV/Vis-spectrometer, Perkin-Elmer)를 이용하여 300-700 nm 범위에서 측정하였다. 또한 굴절률은 Prism Coupler(Metricon, 2010/M)을 활용하여 압축된 공기에 의해 작동되는 coupling head와 프리즘 사이에 경화 필름을 접합시킨 후, 레이저 빛을 프리즘에 투과시켜 분석하였다.

아웃가스 확인을 위한 TGA 측정. 경화된 유기막에서 발생하는 아웃가스를 정량적으로 측정하기 위하여 TGA(Q50, TA Instruments, USA) 분석을 수행하였다. 가열 전후로 생기는 박막의 질량 변화를 토대로 아웃가스 유출 정도를 확인할 수 있다. 실온에서 110 °C로 승온시킨 후 30분간 온도를 일정하게 유지하며 변화하는 질량을 분석하였다.

결과 및 토론

가교 이전 유기 코팅액의 유변 물성 분석. 가교 이전 두 단량체를 다양한 몰비로 혼합한 코팅액들의 전단 점도와 표면장력 등 기초 물성을 확보하였다(Figure 1). 측정된 물성치들은 광경화형 유기 코팅액이 실제 잉크젯 코팅 공정에 적용 가능한지 판단할 수 있는 척도로 활용된다. AR2000 레오미터의 rate-sweep 조건 하에서 다양한 배합으로 제조한 유기 코팅액의 전단 점도를 측정하였다. 0.1-1000(1/s) 범위의 전단 속도에서 점도가 일정한 뉴턴 유체 특성을 보였고, 모두 15 cP 이하의 저점도 물성을 가지고 있어 잉크젯 공정에 적용 가능

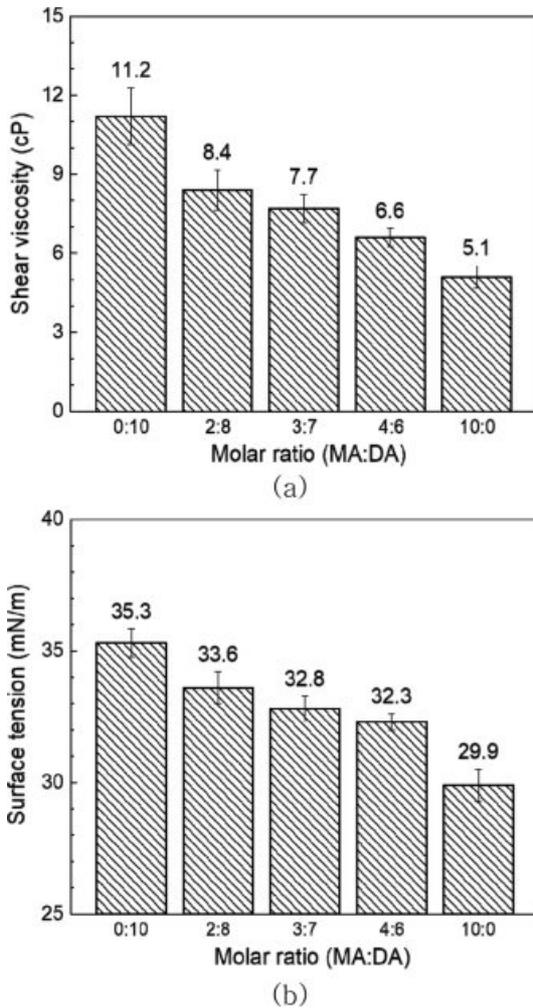


Figure 1. (a) Shear viscosity; (b) surface tension of organic coatings under various molar ratios of monoacrylate and diacrylate.

함을 확인하였다. 특히 아크릴기가 두 개 있는 DA의 함량이 줄어들수록 분자간 인력이 줄어들어 결국 점도가 감소함을 볼 수 있다. DCAT 11를 이용하여 측정된 유기코팅액의 표면장력 결과에서도 분자간 인력이 상대적으로 큰 DA의 함량이 낮아짐에 따라 표면장력도 함께 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

이후 광경화 물성과 다양한 박막 물성은 MA와 DA의 비율이 3:7인 조건에서 진행하였다. MA의 비율이 높다면 박막의 연성은 좋아지지만 기계적 물성이 매우 낮아진다. 반대로 DA의 비율이 높아진다면 박막의 가교 속도와 기계적 물성은 좋아지지만 연성이 떨어진다. 이를 고려하여 연성과 물성을 둘 다 만족시키며 빠른 경화 속도를 가진 3:7 배합비에서 실험을 진행하였다.

유기막의 실시간 경화유변 물성 분석. 먼저 경화에 적절한 Type-2 개시제와 공개시제인 3차 아민과의 최적 물 비율을 알아보기 위하여 2-ITX와 MDEA의 혼합 비율을 달리한

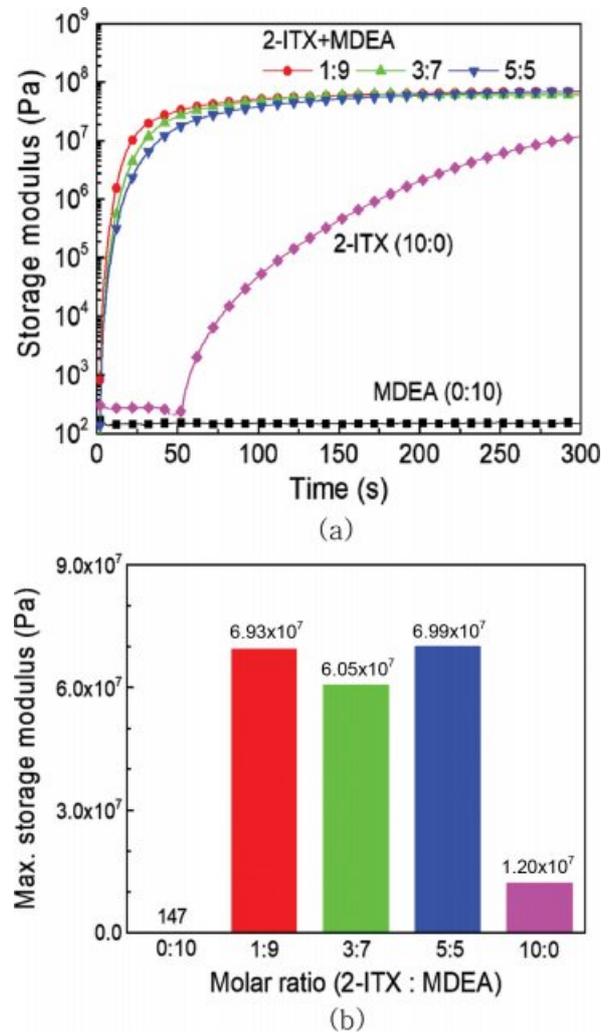


Figure 2. (a) Real-time rheological behaviors during UV curing; (b) maximum storage modulus values of organic coatings under various molar ratios between 2-ITX and MDEA (based on total 1 wt%).

유기막의 실시간 유변 물성을 측정하였다. Figure 2에서 볼 수 있듯이 ITX와 MDEA를 단독 개시제로 사용하였을 경우에는 유기막이 제대로 경화되지 않았다. 반면, 두 개시제를 혼합한 2-ITX:MDEA=1:9, 3:7, 5:5에서는 단독 사용한 경우에 비해 경화가 활발하게 진행되었는데, 가장 높은 modulus를 가진 5:5의 물 비율에서 최적임을 밝혔다. 이후 2-ITX:MDEA 비율을 5:5로 고정하고 Type-1 개시제인 DMPA를 사용했을 때의 유변 물성을 비교하였다.

개시제 종류와 함량별(0.5, 1.0, 3.0, 5.0 wt%)에 따른 유기막의 실시간 유변 물성 결과를 Figure 3에 나타내었다. 두 개시제(DMPA, 2-ITX+MDEA)를 동일한 함량에서 비교하였을 때 모든 함량에서 Type-1 개시제로 경화한 유기막이 Type-2 개시제로 경화한 유기막보다 비교적 빠른 개시 속도와 높은 저장탄성률을 보였다. 이러한 결과는 두 광개시제의 경화 메

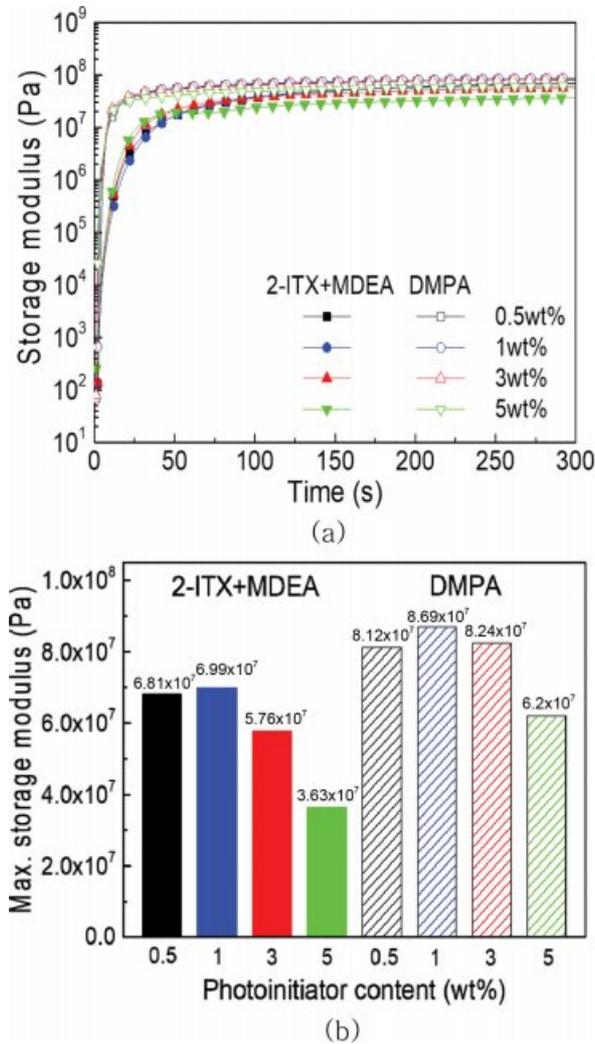


Figure 3. (a) Real-time rheological behaviors of organic coatings with DMPA and 2-ITX+MDEA initiators under the different PI content conditions (0.5, 1.0, 3.0, and 5.0 wt%) during UV curing; (b) their maximum storage modulus values.

커니즘 차이로 설명될 수 있다. Type-2 개시제의 경우 2-ITX와 MDEA의 두 분자 간의 상호작용이 일어나면서 경화가 시작되는 반면, Type-1 개시제는 광 조사 즉시 쪼개지며 반응이 시작되게 된다. 이러한 이유로 Type-2 개시제를 사용했을 때가 Type-1 개시제를 사용했을 때보다 초기 개시 속도는 느리지만 점진적인 경화 반응을 거쳐 후반부에 유사한 경화도를 이끌어냈다.

FTIR 분석. UV가 조사됨에 따라 유기막이 경화되면서 아크릴 그룹의 C=C 결합은 점차 사라지게 된다. 따라서 FTIR을 통해 경화 전후로 변화하는 C=C 결합(1637 cm^{-1}) 피크를 비교하여 박막의 경화 전환율을 정성적으로 예측하였다. 경화 중에 변하지 않는 C=O 결합(1720 cm^{-1}) 피크를 기준하였다. 먼저, Type-2의 단일 개시제와 혼합 개시제의 C=C 결합

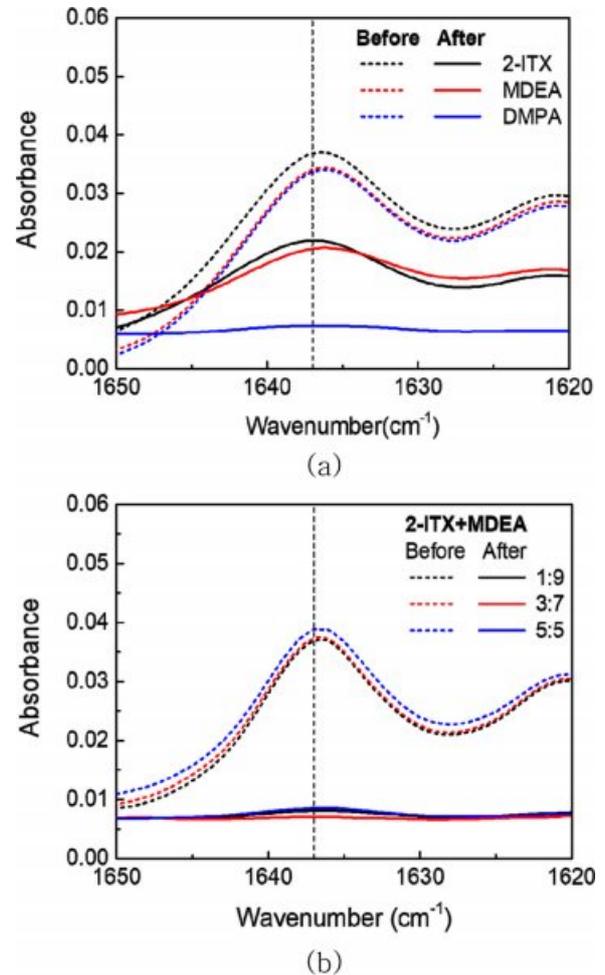


Figure 4. FTIR results: changes in C=C (1637 cm^{-1}) peaks of organic coatings before and after UV curing with (a) single PIs (2-ITX, MDEA, and DMPA) based on total 1 wt%; (b) mixed 2-ITX+MDEA PIs of different molar ratios based on total 1 wt%.

피크를 비교한 Figure 4(a)로부터 2-ITX, MDEA를 단독 사용하였을 때는 유기막 내에 미반응한 아크릴기가 많이 남아 있는 모습을 볼 수 있다. 반면, Figure 4(b)와 같이 혼합 2-ITX+MDEA 개시제를 사용하였을 때와 Figure 4(a)에서 Type-1의 DMPA를 사용했을 때는 대부분의 C=C 피크가 사라진 것을 확인하였다.

광학 물성 분석. 경화된 유기 박막의 광학 특성을 검토하기 위하여 투과율과 굴절률을 측정하였다. Figure 5(a)는 실온에서 유리 기판에 경화된 얇은 필름의 흡광도 스펙트럼 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 두 개시제, 2-ITX+MDEA와 DMPA로 경화한 유기 박막 모두 가시광영역에서 99% 이상의 높은 투과율을 보여준다.

Figure 5(b)는 프리즘 커플러로 측정된 굴절률의 결과를 보여준다. 두 샘플 모두 온전한 bare glass의 굴절률(1.52)과 비

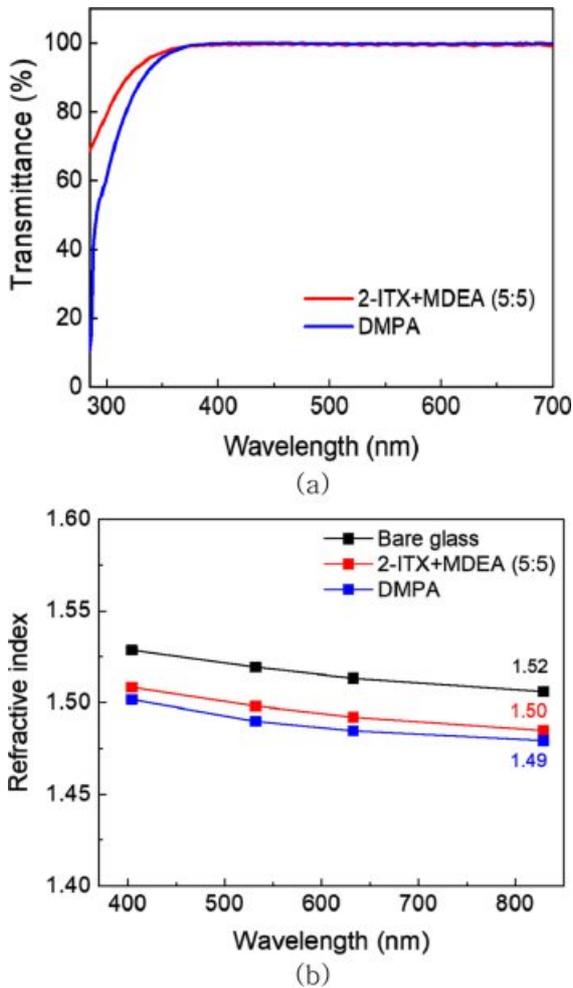


Figure 5. Optical properties of cured thin films with DMPA and 2-ITX+MDEA PIs: (a) Transmittance; (b) refractive index.

슷한 값을 나타냄을 확인하였다. 이를 통해 제조된 유기 박막 모두 유리와 비슷한 정도의 투명성을 보장하고, 적용된 개시제가 박막의 광학 특성을 저하시키지 않음을 확인하였다.

TGA를 통한 아웃가스 분석. Figure 6은 광개시제 유형에 따른 weight loss 분율을 TGA 장비로 분석한 결과를 나타낸다. 유기 박막을 가열하면 박막의 내구성 및 성능을 저하시키는 미반응한 단량체 및 부산물 등이 가스 형태로 방출되는데, 이 때 박막의 질량 변화를 통해 아웃가스 방출량을 정성적으로 유추할 수 있다. 질량 측정 시 온도 조건은 110°C로 승온시킨 후 30분 유지하면서 진행하였다. 2-ITX와 MDEA 두 물질을 5:5 몰비로 혼합하여 사용한 유기막과 Type-1 개시제인 DMPA를 사용한 유기막의 weight loss 분율을 중점적으로 비교하였다. DMPA를 사용한 유기 박막의 경우 0.3 wt%의 질량변화를 보였고 2-ITX+MDEA 혼합개시제를 사용한 유기막의 경우 질량변화가 거의 없음을 확인하였다. 앞서 레오미터와 FTIR 등으로 측정했을 때 가교도나 전환율이 높

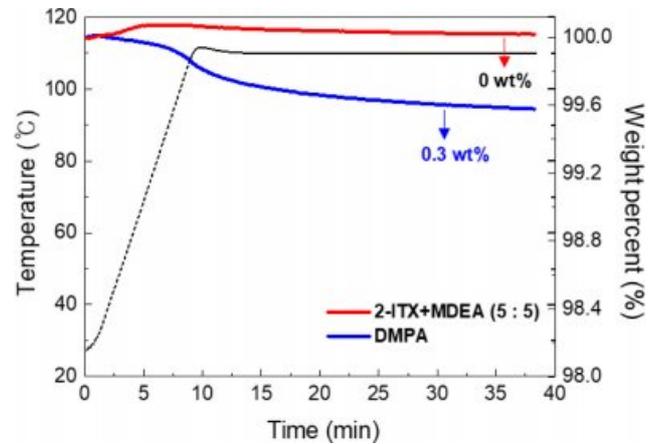


Figure 6. Outgas emission (weight loss percent) of cured thin films with 2-ITX+MDEA and DMPA PIs (based on total 1 wt%).

았던 DMPA보다 2-ITX+MDEA 혼합 개시제에 의한 유기 박막의 질량 변화가 더 적다는 것은 아웃가스 분석 시 개시제의 역할이 매우 중요함을 의미한다.

아웃가스 결과 차이는 개시제들의 다른 경화 메커니즘에서 비롯한다고 사료된다. 서론에서 언급하였듯이 DMPA와 같은 Type-1 개시제는 쪼개지면서 반응하지 않는 부산물을 필름 내부에 형성하게 되고, 이러한 낮은 분자량의 물질은 쉽게 외부로 빠져나갈 수 있다. 하지만, Type-2 개시제들은 Type-1과 같이 쪼개지면서 생기는 부산물이 존재하지 않으므로 아웃가스가 거의 생성되지 않음을 확인할 수 있다.

광개시제를 달리한 유기 코팅액의 경화 유변물성 및 기본적인 유기 박막 특성들의 정보로부터 아웃가스 문제를 획기적으로 제어할 수 있는 OLED 봉지 기술의 기반을 구축할 수 있을 것으로 기대한다.

결론

광개시제의 구조에 따라 달라지는 광경화형 코팅액의 가교 전/중/후 물성들을 비교 분석하였다. 광가교 이전 코팅액의 점도와 표면장력 값을 통해 해당 봉지막 소재가 잉크젯 공정에 활용가능함을 증명하였다. 실시간 광경화 물성 비교 결과 Type-1 개시제를 사용한 경우 빠른 경화 속도와 높은 전환율을 보이고, Type-2 개시제를 사용한 경우는 Type-1보다 경화 속도와 전환율은 약간 낮지만 유기막으로서 적용가능한 물성임을 입증하였다. 특히, TGA 질량 변화 정보로부터 Type-1 개시제에 의한 유기막과 비교하여 Type-2에 의한 유기막에서 아웃가스가 거의 발생되지 않음을 확인하였다. 또한 경화된 유기막의 투과율과 굴절률도 유리와 유사하여 디스플레이 소재 성능을 갖추고 있다. 종합적으로, Type-2 개시제는 지속성과 내구성 등이 중요한 OLED 봉지 소자용 유기막 제조에 매우 유용할 것으로 기대한다.

감사의 글: 이 논문은 정부(산업통상자원부)의 재원으로 산업기술평가관리원의 지원(10079567, 10067706) 및 고려대학교 특별연구비(a Korea University Grant)에 의하여 수행된 연구이며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- J. W. Bae, J. H. Jung, H. S. Wang, S. H. Kim, I. J. Kim, I. J. Kim, and K. Song, *Polym. Korea*, **41**, 361 (2017).
- S. H. Kim, H. S. Chang, S. Park, and K. Song, *Polym. Korea*, **34**, 469 (2010).
- J. R. Lee, G. Y. Heo, and S. J. Park, *Polym. Korea*, **26**, 80 (2002).
- A. Albin and M. Fagnoni, *Green Chem.*, **6**, 1 (2004).
- S. Protti, D. Dondi, M. Fagnoni, and A. Albin, *Pure Appl. Chem.*, **79**, 1929 (2007).
- Y. Yagci, S. Jockusch, and N. J. Turro, *Macromolecules*, **43**, 6245 (2010).
- J.-P. Fouassier, *Photoinitiation, Photopolymerization, and Photocuring: Fundamentals and Applications*, Hanser, Munich, 1995.
- R. S. Davidson, *Exploring the Science, Technology and Applications of UV and EB Curing*, Sita Technology, London, 1999.
- C. G. Roffey, *Photogeneration of Reactive Species for UV Curing*, Wiley, Chichester, 1997.
- J. G. Kloosterboer, *Adv. Polym. Sci.*, **84**, 1 (1988).
- Y. Yagci and W. Schnabel, *Macromol. Symp.*, **13**, 161 (1988).
- Y. Yagci and I. Reetz, *Prog. Polym. Sci.*, **23**, 1485 (1998).
- P. Xiao, J. Zhang, F. Dumur, M. A. Tehfe, F. Morlet-Savary, B. Graff, D. Gigmes, J. P. Fouassier, and J. Lalevee, *Prog. Polym. Sci.*, **41**, 32 (2015).
- J. Z. Shao, Y. Huang, and Q. U. Fan, *Polym. Chem.*, **5**, 4195 (2014).
- G. Laustriat, *Biochimie*, **68**, 771 (1986).
- S. Dadashi-Silab, C. Aydogan, and Y. Yagci, *Polym. Chem.*, **6**, 6595 (2015).
- K. Viswanathan, C. E. Hoyle, E. S. Jonsson, C. Nason, and K. Lindgren, *Macromolecules*, **35**, 7963 (2002).
- G. P. Crawford, *Flexible Flat Panel Display Technology*, Wiley, Chichester, 2005.
- J. H. Burroughes, D. D. Bradley, A. Brown, R. Marks, K. Mackay, R. H. Friend, P. Burns, and A. Holmes, *Nature*, **347**, 539 (1990).
- G. Gu, V. Bulović, P. Burrows, S. Forrest, and M. Thompson, *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 2606 (1996).
- P. E. Burrows, S. R. Forrest, and M. E. Thompson, *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, **2**, 236 (1997).
- A. Kraft, A. C. Grimsdale, and A. B. Holmes, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **37**, 402 (1998).
- S. Kim, H. J. Kwon, S. Lee, H. Shim, Y. Chun, W. Choi, J. Kwack, D. Han, M. Song, and S. Kim, *Adv. Mater.*, **23**, 3511 (2011).
- L. Do, E. Han, Y. Niidome, M. Fujihira, T. Kanno, S. Yoshida, A. Maeda, and A. Ikushima, *J. Appl. Phys.*, **76**, 5118 (1994).
- J. McElvain, H. Antoniadis, M. Hueschen, J. Miller, D. Roitman, J. Sheats, and R. Moon, *J. Appl. Phys.*, **80**, 6002 (1996).
- D. Sutherland, J. Carlisle, P. Elliker, G. Fox, T. Hagler, I. Jimenez, H. Lee, K. Pakbaz, L. Terminello, and S. Williams, *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 2046 (1996).
- H. Aziz, Z. Popovic, C. P. Tripp, N.-X. Hu, A.-M. Hor, and G. Xu, *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 2642 (1998).
- B. S. S. Vetha, E.-M. Kim, P.-S. Oh, S. H. Kim, S. T. Lim, M.-H. Sohn, and H.-J. Jeong, *Macromol. Res.*, **27**, 1179 (2019).
- J. Hong, H.-J. Kwon, N. Kim, H. Ye, Y. Baek, C. E. Park, G. O. Choe, T. K. An, J. Kim, and S. H. Kim, *Macromol. Res.*, **28**, 782 (2020).
- J.-H. Seok, S. H. Kim, S. M. Cho, G.-R. Yi, and J. Y. Lee, *Macromol. Res.*, **26**, 1257 (2018).
- E. Langereis, M. Creatore, S. Heil, M. Van de Sanden, and W. Kessels, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 081915 (2006).
- L. L. Moro, T. A. Krajewski, N. M. Rutherford, O. Philips, R. J. Visser, M. E. Gross, W. D. Bennett, and G. L. Graff, *Organic Light-Emitting Materials and Devices VII*, **5214**, 83 (2004).
- A. A. Dameron, S. D. Davidson, B. B. Burton, P. F. Garcia, R. S. McLean, and S. M. George, *J. Phys. Chem.*, **112**, 4573 (2008).
- S. Park, W. M. Yun, L. H. Kim, S. Park, S. H. Kim, and C. E. Park, *Org. Electron.*, **14**, 3385 (2013).
- W. Xiao, D. Yu, S. F. Bo, Y. Y. Qiang, Y. Dan, C. Ping, D. Y. Hui, and Z. Yi, *RSC Adv.*, **4**, 43850 (2014).
- G. J. Gabriel, A. Som, A. E. Madkour, T. Eren, and G. N. Tew, *Mater. Sci. Eng. R-Rep.*, **57**, 28 (2007).
- J. Wu, F. Fei, C. Wei, X. Chen, S. Nie, D. Zhang, W. Su, and Z. Cui, *RSC Adv.*, **8**, 5721 (2018).
- S. Grego, J. Lewis, E. Vick, and D. Temple, *J. Soc. Inf. Disp.*, **13**, 575 (2005).
- J. D. Affinito, *Surf. Coat. Tech.*, **133**, 528 (2000).