

Antireflective Film Design to Improve the Optical Efficiency of Organic Light-emitting Diode Displays

Kimman Kim¹, Young Jin Lim², Le Van Doan³, Gi-Dong Lee^{3†}, and Seung Hee Lee^{1,2†}

¹Department of Advanced Organic Materials Engineering, Chonbuk National University, 567, Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju 54896, Korea

²Applied Materials Institute for BIN Convergence, Department of BIN Convergence Technology and Department of Polymer-Nano Science and Technology, Chonbuk National University, 567, Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju 54896, Korea

³Department of Electronics Engineering, Dong-A University, 37, Nakdong-daero 550beon-gil, Saha-gu, Busan 49315, Korea

(Received September 7, 2018; Revised October 15, 2018; Accepted October 15, 2018)

In this paper, we designed a new antireflective film to improve the optical efficiency of organic light-emitting diode displays (OLEDs). The reflection characteristics in the normal and side viewing directions of OLEDs with the antireflective film were calculated, depending on the degree of polarization and transmittance of the currently used polarizer when used in the antireflective film of an OLED. The results showed that when the polarization degree of the commercial polarizer (99.990~99.995%) is lowered to 99.900%, the average reflectance of the antireflective film is increased by about 0.1% (2.5% in terms of rate of increase) which is difficult to notice with the human eye, while the transmittance is increased by 1.63~3.34% (4.2~8.2% in terms of rate of increase). This study provides an optimal design for high-light-efficiency OLEDs with good antireflection properties.

Keywords: Organic light-emitting-diode display, Antireflection, Optical efficiency, Polarizer, Degree of polarization
OCIS codes: (230.2090) Electro-optical devices; (230.3670) Light-emitting diodes

유기발광다이오드 디스플레이의 광효율 향상을 위한 반사방지필름 설계

김기만¹ · 임영진² · 레 반 도안³ · 이기동^{3†} · 이승희^{1,2†}

¹전북대학교 유기신물질공학과
☎ 54896 전북 전주시 덕진구 백제대로 567

²전북대학교 BIN융합공학과 및 고분자나노공학과, 미래형BIN융합응용소재사업단
☎ 54896 전북 전주시 덕진구 백제대로 567

³동아대학교 전자공학과
☎ 49315 부산광역시 사하구 낙동대로 550번길 37

(2018년 9월 7일 받음, 2018년 10월 15일 수정본 받음, 2018년 10월 15일 게재 확정)

본 논문에서는 유기발광다이오드 디스플레이(OLED)의 광 효율을 향상시키기 위해 반사방지필름을 새롭게 디자인하였다. 현재 상용화되고 있는 편광판의 편광도와 투과율을 변화시켜 OLED 반사방지필름에 사용하였을 경우 정면과 측면방향의 반사특성을 계산하였다. 그 결과 편광도가 99.995%나 99.990%인 상용화된 편광판의 편광도를 99.9% 수준으로 떨어뜨릴 경우, 반사방지필름의 평균 시감반사율은 사람의 눈으로 알아차리기 힘든 약 0.1% (증가율 환산 2.5%) 상승한 반면, 투과율은 기존보다 약 1.63~3.34% (증가율 환산 4.2~8.2%) 상승하였다. 이 결과는 기존 OLED에서 저반사율을 유지하면서 광효율을 상승시킬 수 있는 광학설계 조건을 제시하였다.

Keywords: 유기발광다이오드 디스플레이, 반사방지, 광효율, 편광판, 편광도
OCIS codes: (230.2090) Electro-optical devices; (230.3670) Light-emitting diodes

†E-mail: gdllee@dau.ac.kr, ORCID: 0000-0002-4402-1570
E-mail: lsh1@chonbuk.ac.kr, ORCID: 0000-0001-5943-9788

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

I. 서 론

약 10년 전부터 유기발광다이오드 디스플레이(organic light-emitting-diode display, OLED)가 모바일 제품에 장착되어 출시되기 시작하면서, 액정디스플레이(liquid crystal display, LCD)가 주류였던 평판디스플레이 시장의 지각변동이 시작되었다. OLED는 생생한 컬러의 자체 발광 디스플레이이며 얇고 가볍고 유연한 디스플레이 형태로 유리한 특성을 지니고 있기 때문에 스마트폰 및 TV의 유망한 기술로 떠오르고 있다^[1-6]. 그럼에도 불구하고, OLED의 발광 효율은 여전히 극대화되지 않아, 높은 반사율을 갖는 금속 전극을 양극으로 사용하는 상부 방출 방법을 갖는 OLED가 방출 효율을 증가시키는데 사용된다^[7-11]. 하지만 이러한 접근법은 외부에서 들어오는 강한 빛을 금속전극이 반사하기 때문에 디스플레이의 명암대비율(contrast ratio)을 급격히 떨어뜨린다. 따라서 디스플레이의 반사율을 감소시키기 위한 해결책으로서, 반사된 광을 방지하기 위해 편광판과 $\lambda/4$ 위상지연필름으로 구성된 원편광판이 사용되고 있다^[12,13]. 그러나 정파장 분산성을 갖는 기존의 $\lambda/4$ 위상지연필름은 모든 가시광선파장대에서 원편광으로 바뀌지 않고, 시야각 방향에서는 $\lambda/4$ 의 위상차보다 높기 때문에 시야각 방향뿐만 아니라 정면에서도 빛샘을 일으켰다. 이를 해결하기 위해, 역파장분산성을 갖는 $\lambda/4$ 위상지연필름을 사용하거나^[14,15], 광대역 $\lambda/4$ 위상지연필름^[16-18]이 연구되었다. 하지만 여러 연구팀에서 제안한 반사방지막 필름들은 외부반사율을 감소시키는데 초점을 두었고 광효율 향상은 고려하지 않았다. 하지만 OLED는 재료의 효율 한계로 인해서 소비 전력 면에서 LCD 대비 불리하며, 서브 픽셀(sub pixel)인 빨강, 녹색, 파랑의 각 유기 재료 수명이 달라 시간이 지날수록 심각한 화질 저하 문제를 야기하기 때문에, OLED에 있어서 광효율은 항상 중요한 이슈이다.

따라서 본 연구에서는 OLED의 소비전력 저감 및 수명연장을 위해, OLED 반사방지필름에 사용되는 상용화되고 있는 편광판의 편광도와 투과율을 조절하는 방법을 통해 OLED의 광효율을 향상시킬 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

II. OLED 반사방지필름의 원리와 구조

그림 1은 LCD와 OLED의 편광판의 적용위치 및 편광원리를 나타내었다. LCD는 그림 1(a)에서 보여주는 것과 같이 액정 셀(cell) 양측에 선편광판이 서로 직교한 상태로 위치하며, LCD에 적용된 선편광판은 그림 1(b)에 나타난 것과 같이 전기장 성분이 모든 방향으로 진동하는 자연광을 한 쪽 방향으로 진동하게 만드는 역할을 한다. 이 때 빛이 선편광판을 통과한 후 한쪽 방향으로 진동하는 성분이 많을수록 좋은 편광판이라고 할 수 있다. 이러한 성능은 LCD의 명암대비율(contrast ratio)을 결정짓는 중요한 요소이다. OLED의 경우 전극자체의 반사율이 높기 때문에 특히 야외와 같은 밝은 환경에서는 명암대비율이 심각하게 떨어지며, 이에 대한 해결책으로 그림 1(c)에서와 같이 원편광판(circular polarizer)

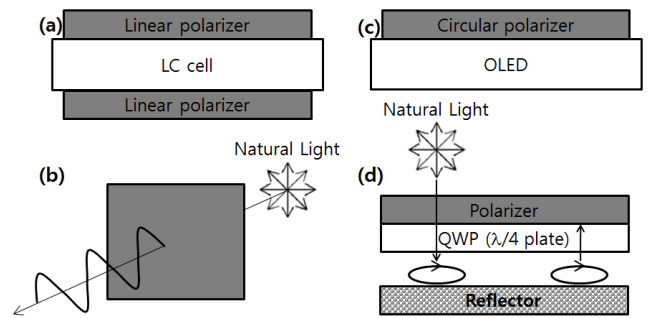


Fig. 1. (a), (c) Position and (b), (d) role of polarizer in LCD and OLED, respectively.

을 OLED 패널(panel) 전면에 붙인다. OLED에 적용되는 원편광판의 구조는 그림 1(d)에 나타난 바와 같이 편광자의 일면에 $\lambda/4$ 위상지연필름(quarter wave plate, QWP)을 45° 각도로 붙여 만들 수 있다. 외부에서 자연광이 편광자를 통과하면 선편광이 되고, 이 선편광된 빛이 QWP를 통과하게 되면 원편광이 되며, 이 원편광이 반사율이 높은 OLED 패널에 반사되게 되면 원편광의 회전방향이 반대가 되어, 결과적으로 QWP를 통과한 입사광과 OLED 패널에서 반사된 반사광의 원편광 상태는 서로 정반대 방향이 된다. 즉, 입사광이 QWP를 통과했을 때 우원편광이라면, OLED 패널에 반사될 경우 좌원편광으로 변하며, 반대경우인 입사광 편광방향이 좌원편광이라면, OLED에 반사된 경우 우원편광으로 변한다. 그리고 QWP를 다시 통과하게 되면 편광자의 흡수축과 편광면이 일치하게 되어 정면에서 볼 때 거의 대부분의 빛이 흡수된다.

III. 시뮬레이션 조건 및 새로운 OLED 반사방지막필름 설계

현재 OLED 반사방지필름으로 채용되는 구조는 그림 2에 나타내었듯이 $\lambda/4$ 의 위상차를 갖는 cyclo-olefin copolymer (COP) 1매형, COP 대신에 역파장 분산필름을 사용하는 1매형, $\lambda/4$ 와 $\lambda/2$ 의 위상차를 갖는 필름을 동시에 사용하는 COP 2매형이 일반적이다. 실제 반사방지필름을 설계하기 위해 OLED의 층간 구조까지 모두 모델링하여 시뮬레이션하기

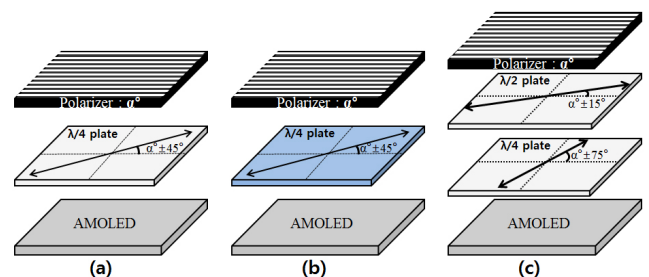


Fig. 2. Optical structure of three commonly used antireflection films: (a) Normal $\lambda/4$ film using COP, (b) reverse $\lambda/4$ film using WRS, and (c) Wideband $\lambda/4$ film using COP.

는 어렵고, 본 연구에서는 방사방지필름의 특성만이 주요 관심사이므로, 모델링의 단순화를 위해 OLED는 전 파장에서 반사율 100%인 완전반사체로 가정하며, 반사를 일으키는 외부광은 C광원으로 가정하여 시뮬레이션을 진행하였다.

반사방지필름에 사용되는 위상지연필름은 그 사용하는 재료에 따라 정파장 분산과 역파장 분산특성을 가진 위상지연 필름으로 분류할 수 있으며, 본 연구에서는 상용화되어 디스플레이 용도로 일반적으로 쓰이는 정파장 분산특성의 COP 필름(ZEON사)과 역파장 분산특성의 WRS 필름(Tejin사)의 파장에 따른 위상차 데이터를 사용하였다. 시뮬레이션에 사용한 위상지연필름 3종의 파장에 따른 위상지연특성(in-plane retardation, R_0 과 out-of-plane retardation, R_{th})은 그림 3에 나타내었다.

편광판은 제조공정 중 용액의 농도, 침지시간, 연신율, 전처리, 후처리 여부 등에 의해 편광도(degree of polarization, DOP)와 투과율이 크게 변화하지만, 일반적으로 편광도와 투과율은 반비례하는 경향이 있다. 일반적으로 편광판의 투과율은 단체투과율(single transmittance, 자연광을 편광판 한장에 입사시켰을 때의 투과율)을 의미하며, 이러한 편광도와 단체투과율은 다음 식과 같이 편광판의 transverse direction (TD)와 machine direction (MD) 방향에서 측정된 투과율을 가지고 계산된다.

$$\text{단체투과율}(T_s) = (T_{MD} + T_{TD}) / 2 \tag{1}$$

$$\text{편광도}(DOP) = (T_{MD} - T_{TD}) / (T_{MD} + T_{TD}) \tag{2}$$

그림 4는 단체 투과율과 편광도 수치가 각각 다르게 제작된 5가지 편광판 샘플의 TD와 MD 방향에서 측정된 투과율을 보여주고 있다. 그림 4에서 샘플 #1와 #2의 경우 각각 상용화되고 있는 고 CR용 VA (vertical alignment)모드 편광판과 IPS (in-plane switching)모드 편광판의 측정 결과값이며, 샘플 #3, #4, #5는 본 연구를 위해 설계된 편광판으로 제조공정 중 polyvinyl alcohol (PVA)필름의 침지시간을 단축하고 연신율을 떨어뜨려, 편광도를 낮추면서 단체 투과율은 증가시킨 편광판 샘플의 측정 결과값이다. 이러한 측정 결과값은 시뮬레이션의 데이터 베이스(data base)로 활용하였다.

편광판과 위상지연필름을 이용한 OLEDs 방사방지필름의 설계에 있어서 편광상태의 표현이 필요하며, extended Jones matrix 방법을 사용하여 설계에 필요한 계산을 효율적으로 할 수 있다^{19,20}. 하지만 extended Jones matrix 방법은 OLED 방사방지특성을 계산함에 있어서, 외부광이 공기층에서 방사방지필름의 최외각층인 보호필름층(예, TAC 또는 COP 등)에 최초 입사할 경우의 반사율이 고려되어 계산되지 않는 문제가 있으므로, i) 우선 extended Jones matrix 방법을 사용할 수 있는 범용 LCD 설계 툴인 Techwiz (사나이시스템)를 사용하여 최외각층을 제외한 부분의 편광특성을 해석한 후, ii) 최외각층의 영향을 고려하기 위해 외부광이 OLED로 입사할 경우의 반사율은 굴절률 1.5인 필름이 있다고 가정하여 프레

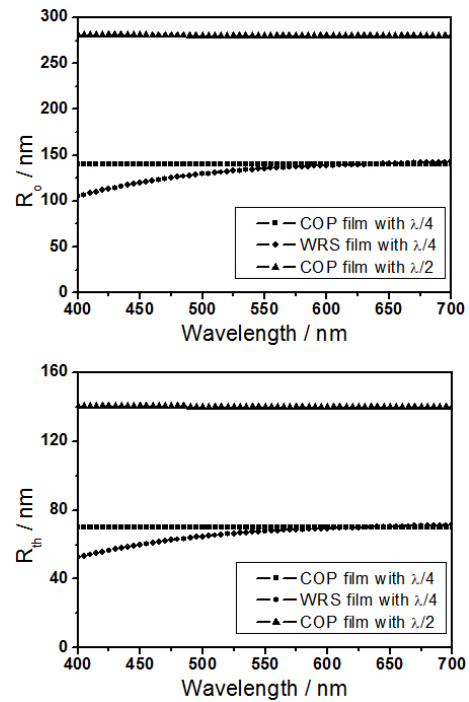


Fig. 3. R_0 and R_{th} characteristics of three commonly used retardation films according to the wavelength.

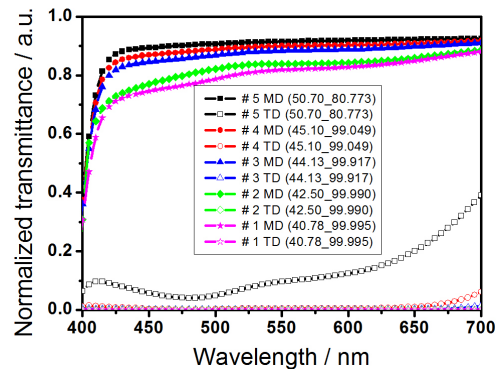


Fig. 4. Measured spectral transmission curves of five types of polarizers with different T_s and DOP values in MD and TD directions (xx.xx_xx.xxx means T_s and DOP values, respectively).

넬 방정식을 이용해 계산한 후 i)과 ii)의 두 값을 더하여 최종적인 OLED 반사율을 구하였다.

IV. 시뮬레이션 결과

4.1. 3가지 OLED 방사방지필름 구조의 광학특성 비교

3가지 구조에 따른 OLED 방사방지필름의 특성 차이를 조사하기 위해, 편광판은 #1샘플인 편광도 99.995%, 단체 투과율 40.78%인 상용 편광판을 사용한다 가정하여 파장에 따른 반사율을 계산하였다. 그림 5의 그래프는 3가지 구조의 파장에 따른 정면(시야각 0도) 반사율 계산 결과인데, COP를 사용한 정파장분산 $\lambda/4$ 필름보다 WRS를 사용한 역파장분산 $\lambda/4$

필름을 쓸 경우, 특히 단파장쪽 반사율이 확연히 줄어든 것을 확인할 수 있다. COP를 사용한 광대역 $\lambda/4$ 필름을 쓸 경우 단파장쪽은 WRS를 사용한 역파장분산 $\lambda/4$ 필름보다 반사방지 특성이 떨어지나, 장파장쪽은 더욱 우수한 반사방지 특성을 보였다. 그림 5의 파장에 따른 반사율 결과값에 사람이 파장에 따라 빛의 밝기가 다르게 느끼는 정도를 반영하는 시감도 곡선값(luminosity curve)을 곱하여 전파장에 대해 적분하면, 사람이 최종적으로 실제 느끼는 평균시감 반사율값(average luminous reflectance)을 구할 수 있는데, COP를 사용한 정파장분산 $\lambda/4$ 필름의 경우 4.44%, WRS를 사용한 역파장분산 $\lambda/4$ 필름의 경우 4.22%, COP를 사용한 광대역 $\lambda/4$ 필름의 경우 4.02%가 된다. 즉 반사방지 특성은 COP를 사용한 광대역 $\lambda/4$ 필름, WRS를 사용한 역파장분산 $\lambda/4$ 필름, COP를 사용한 정파장분산 $\lambda/4$ 필름의 순서로 우수하다고 할 수 있다.

3가지 OLED 반사방지 구조에서 측면방향에 해당하는 경우의 반사특성도 구할 수 있는데, 시야각 5° 에서 45° 까지 5° 간격으로 최종적인 평균시감 반사율을 그림 6에 나타내었다.

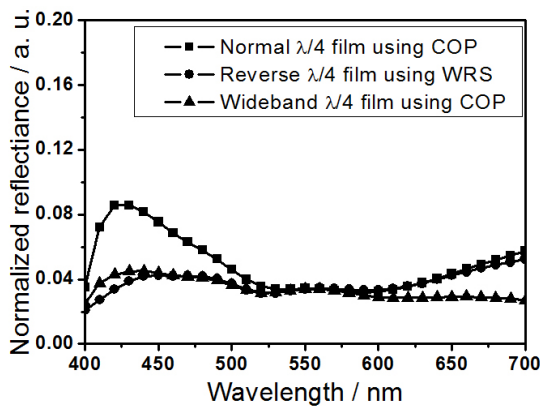


Fig. 5. Spectral reflectance of three commonly used antireflection films.

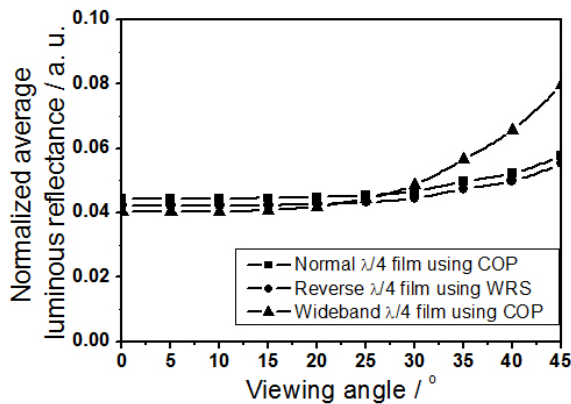


Fig. 6. Normalized average luminous reflectance of three commonly used antireflection films according to the viewing angle.

즉, 정면 방향(시야각 0°)의 경우 COP를 사용한 광대역 $\lambda/4$ 필름, WRS를 사용한 역파장분산 $\lambda/4$ 필름, COP를 사용한 정파장분산 $\lambda/4$ 필름의 순서로 반사특성이 우수하였으나, 시야각이 커질수록 광대역 $\lambda/4$ 필름의 평균시감 반사율값이 급격히 커지는데, 이는 COP 위상지연필름의 위상차값과 접합각도 등과 관련되는 문제로, 이 값들을 적당히 조절하면 시야각이 커질 경우의 평균시감 반사율값을 낮출 수 있으므로 절대적인 순서를 의미하지는 않는다.

4.2. 편광판 특성에 따른 3가지 OLED 반사방지구조의 광학특성 비교

일반적으로 편광판의 편광도와 투과율은 반비례하는 경향이 있다. 이러한 편광판의 편광도와 투과율에 따른 OLED용 반사방지필름의 반사특성을 조사하기 위해, 편광도(DOP, degree of polarization)와 단체투과율(single transmittance)이 다른 5종 편광판의 광학특성 데이터를 이용하여 반사방지특성을 시뮬레이션한 후, 최종적으로 3종류의 반사방지필름에 적용하여 계산된 정면 방향(시야각 0°) 평균시감 반사율 값은 그림 7과 같은데, 3종류의 반사방지필름 모두 5가지 샘플에 대해 각각 거의 같은 평균시감 반사율값을 보여주고 있다. 하지만 편광도와 단체투과율이 서로 다른 5종 편광판의 관점에서 보면, 편광도가 99.995%나 99.990%인 상용 편광판에서 편광도를 편광판샘플 #3의 99.9% 수준으로 떨어뜨릴 경우 평균시감 반사율은 약 0.1% (증가율환산 2.5%) 상승한다. 반면 편광판샘플 #3의 편광판 투과율은 44.13%로 편광판샘플 #1의 40.79%에 비해 약 3.34% (증가율환산 8.2%) 상승하고 있고, 편광판샘플 #2의 42.50%에 비해서도 1.63% (증가율환산 4.2%) 상승하고 있다. 여기서, 평균시감 반사율 0.1%의 상승은 사람 눈으로는 거의 알아차리기 힘든 차이인 반면, 편광판 투과율 4~8% 상승은 OLED의 소비전력 저감 및 수명연장을 위해서 상당한 의미를 가지는 값이라고 할 수 있다. 편광판샘플 #4의 경우에도 편광판샘플 #1과 #2와 비교

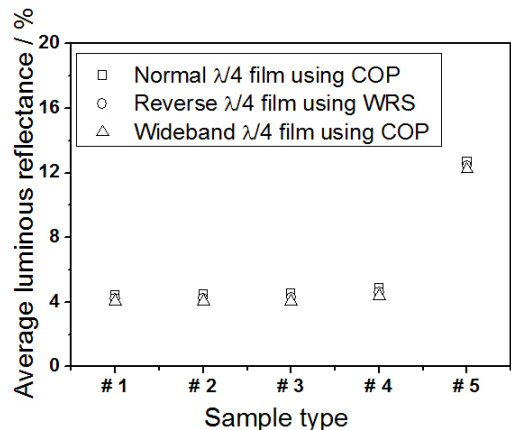


Fig. 7. Average luminous reflectance of five types with different T_v and DOP values according to three commonly used antireflection films in normal direction.

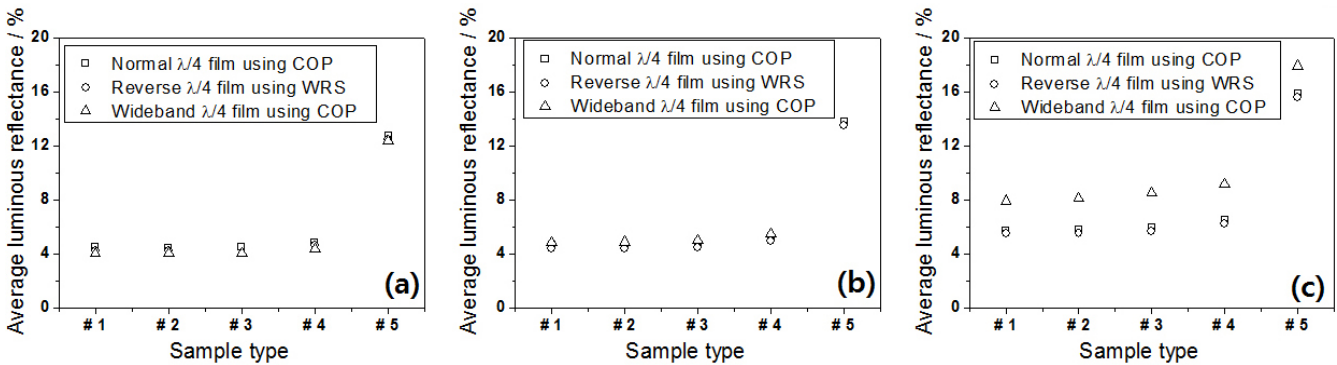


Fig. 8. Average luminous reflectance of five types with different T_s and DOP values according to three commonly used antireflection films in (a) 15°, (b) 30°, and 45° viewing angle directions.

해 평균시각 반사율은 0.4% 정도 상승하지만, 편광판의 투과율은 편광판 샘플 #1과 #2와 비교해서 2.6~4.4%에 해당하는 값이 상승하고 있다.

그림 8은 3종류의 반사방지필름에 5가지 편광판 특성을 적용할 경우 시야각 방향(15°, 30°, 45°)에서의 평균시각 반사율값을 보여주고 있다. 그림 8(a)와 그림 8(b)는 각각 15°와 30°의 시야각 방향에서의 평균시각 반사율값으로 3종류의 반사방지필름 모두 정면반사특성과 수치가 거의 같음을 확인할 수 있고, 단지 그림 8(b)의 편광판 샘플 #5에서만 약 1% 정도 평균시각 반사율 값이 증가하였음을 보여주고 있다. 그림 8(c)는 45°의 시야각 방향에서의 평균시각 반사율값으로 COP를 사용한 정파장분산 $\lambda/4$ 필름과 WRS를 사용한 역파장분산 $\lambda/4$ 필름은 편광판 샘플 #1~#4에 있어서 정면대비 약 1.3% 정도 증가한 반면 COP를 사용한 광대역 $\lambda/4$ 필름은 약 4%로 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. 편광판 샘플 #5 또한 COP를 사용한 정파장분산 $\lambda/4$ 필름과 WRS를 사용한 역파장분산 $\lambda/4$ 필름은 약 3% 증가한 반면 COP를 사용한 광대역 $\lambda/4$ 필름은 약 6%로 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. 하지만 편광판 샘플 #5를 제외하고는 정면과 유사하게 시야각 방향에서도 3종류의 반사방지막 필름 모두 편광판 샘플 #1과 #2에서 편광판 샘플 #3과 #4로 편광도를 떨어뜨렸을 때 반사율 변화는 작은 반면, 편광판의 투과율은 단채투과율의 변화분만큼 증가하므로, 편광도를 적당선 떨어뜨린 편광판을 사용하는 것은 OLED의 소비전력 저감 및 수명연장을 위해서 상당히 좋은 방안을 다시 한 번 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 기존 OLED에서 저반사율을 유지하면서 광효율을 상승시키는 반사방지필름을 설계하고 실제 편광판의 제조공정 중 PVA 필름의 침지시간을 단축하고 연신율을 떨어뜨려 편광도의 감소는 적으면서 단채투과율이 증가한 필름을 제작하였다. 제작된 필름의 특성을 OLED 반사방지필름에 적용하여 정면과 측면방향의 반사특성을 계산한 결과 편광도가 99.995%나 99.990%인 상용화되고 있는 편광판의

편광도를 99.9% 수준으로 떨어뜨릴 경우, 반사방지필름의 평균시각 반사율은 사람의 눈으로 알아차리기 힘든 0.1% 정도(증가율 환산 2.5%) 상승한 반면, 투과율은 기존보다 1.63~3.34% (증가율환산 4.2~8.2%) 정도 상승하였다. 이는 곧 동일 밝기를 유지할 경우 OLED에서 소모되는 전력을 4.2~8.2% 줄일 수 있는 것을 뜻하며, 이러한 광효율 향상은 유기 재료 수명 연장을 통한 화질 저하 문제 해결에 있어서 뿐 아니라, OLED를 채용하는 모바일 기기에 있어서도 작동 시간의 증가를 의미하므로 상당한 의미를 가진다고 할 수 있다.

감사의 글

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (2016R1A6A3A11930056).

References

1. C. W. Tang and S. A. Vanslyke, "Organic electroluminescent diodes," *Appl. Phys. Lett.* **51**, 913-915 (1987).
2. J. Shi and C. W. Tang, "Doped organic electroluminescent devices with improved stability," *Appl. Phys. Lett.* **70**, 1665-1667 (1997).
3. G. Rajeswaran, M. Itoh, M. Boroson, S. Barry, T. K. Hatwar, K. B. Kahen, K. Yoneda, R. Yokoyama, T. Yamada, N. Komiya, H. Kanno, and H. Takahashi, "Active matrix low temperature poly-si TFT/OLED full color displays: Development status," *SID Symposium Digest of Technical Papers* **31**, 947-977 (2000).
4. Y. Wang, N. Herron, V. V. Grushin, D. LeCloux, and V. Petrov, "Highly efficient electroluminescent materials base on fluorinated organometallic iridium compounds," *Appl. Phys. Lett.* **79**, 449-451 (2001).
5. L. S. Hung, C. W. Tang, M. G. Mason, P. Raychaudhuri, and J. Madathil, "Application of an ultrathin LiF/Al bilayer

- in organic surface-emitting diodes,” *Appl. Phys. Lett.* **78**, 544-546 (2001).
6. K. Mameno, R. Nishikawa, K. Suzuki, S. Matsumoto, T. Yamaguchi, K. Yoneda, Y. Hamada, H. Kanno, Y. Nishio, H. Matsuoka, Y. Saito, S. Oima, N. Mori, G. Rajeswaran, S. Mizukoshi, and T. K. Hatwar, “Development of 2.2-inch full color AM-OLED display for mobile applications,” in *Proc. 9th International Display Workshop* (Society for Information Display, 2002), pp. 235-238.
 7. V. Bulovic, G. Gu, P. E. Burrows, S. R. Forrest, and M. E. Thompson, “Transparent light-emitting devices,” *Nature* **380**, 29 (1996).
 8. G. Parthasarathy, P. E. Burrows, V. Khalfin, V. G. Kozlov, and S. R. Forrest, “A metal-free cathode for organic semiconductor devices,” *Appl. Phys. Lett.* **72**, 2138-2140 (1998).
 9. T. Sasaoka, M. Sekiya, A. Yumoto, J. Yamada, T. Hirano, Y. Iwase, T. Yamada, T. Ishibashi, T. Mori, M. Asano, S. Tamura, and T. Urabe, “A 13.0-inch AM-OLED display with top emitting structure and adaptive current mode programmed pixel circuit (TAC),” *SID Symposium Digest of Technical Papers* **32**, 384-387 (2001).
 10. M.-H. Lu, M. S. Weaver, T. X. Zhou, M. Rothman, R. C. Kwong, M. Hack, and J. J. Brown, “High-efficiency top-emitting organic light-emitting devices,” *Appl. Phys. Lett.* **81**, 3921-3923 (2002).
 11. C.-J. Yang, C.-L. Lin, C.-C. Wu, Y.-H. Yeh, C.-C. Cheng, Y.-H. Kuo, and T.-H. Chen, “High-contrast top-emitting organic light-emitting devices for active-matrix displays,” *Appl. Phys. Lett.* **87**, 143507 (2005).
 12. Q. Li, *Self-Organized Organic Semiconductors: From Materials to Device Application* (John Wiley & Sons, 2011).
 13. Q. Li, *Liquid Crystals Beyond Displays: Chemistry, Physics, and Applications* (John Wiley & Sons, 2012).
 14. A. Uchiyama and T. Yatabe, “Wide-band retardation films with reverse wavelength dispersion,” in *Proc. 7th International Display Workshop* (Society for Information Display, 2000), pp. 407-410.
 15. A. Uchiyama and T. Yatabe, “Characteristics and application of new wide-band retardation films,” *SID Symposium Digest of Technical Papers* **32**, 566-569 (2001).
 16. M. Okamoto, K. Minoura, and S. Mitsui, “Optical design of the LC layer on reflective LCDs with a single polarizer,” in *Proc. 6th International Display Workshop* (Society for Information Display, 1999), 49-52.
 17. T.-H. Yoon, G.-D. Lee, and J. C. Kim, “Nontwist quarter-wave liquid-crystal cell for a high-contrast reflective display,” *Opt. Lett.* **25**, 1547-1549 (2000).
 18. B. C. Kim, Y. J. Lim, J. H. Song, J. H. Lee, K.-U. Jeong, J. H. Lee, G.-D. Lee, and S. H. Lee, “Wideband antireflective circular polarizer exhibiting a perfect dark state in organic light-emitting-diode display,” *Opt. Express* **22**, A1725-A1730 (2014).
 19. P. Yeh and C. Gu, *Optics of Liquid Crystal Displays* (Wiley, Hoboken, NJ, USA, 2010).
 20. S. S. Kim, H. J. Kim, and S. D. Lee, *Display Engineering 1* (Cheongbeom Publishing Company, Korea, 2005).