

기포 제거 공정을 통한 유연한 디스플레이 합착 면의 투과율 및 접착력 향상

김정수, 장경수, Cam Phu, 박희준, 신동기, 이운정, 이준신^a

성균관대학교 정보통신대학 전자전기컴퓨터공학부

Enhancement of Transmittance and Adhesion of Flexible Display Adhesion Surface by Bubble Removing Process

Jungsoo Kim, Kyungsoo Jang, Cam Phu, Heejun Park, Donggi Shin, Younjung Lee, and Junsin Yi^a

Department of Electronic and Electrical and Computer Engineering, College of Information and Communication Engineering,
 Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

(Received January 4, 2018; Revised March 13, 2018; Accepted April 10, 2018)

Abstract: With the development of the Internet of Things, the use of flexible displays has become widespread. In particular, the use of curved, bendable, and rollable displays is increasing. Flexible display production processes include various important components such as lamination material, flexible substrates, and adhesives. Among them, improvement of the lamination process comprises a large proportion of efforts for further development. In this paper, we attempt to improve the transmittance of the display substrate by performing a bubble removal process after adhesion. The transmittance of the glass substrate with the bubble removal process was 5~12% higher than that of the substrate without the bubble removal process. The fill-strength after the bubble removal process was improved by 21.4%, and the shear-strength was improved by 43.9%.

Keywords: Flexible display, Adhesive, Roll-to-roll process, Lamination, OCA, OCR, Removing bubble

1. 서론

작고 다양한 디자인의 제품에 대한 관심이 커지면서 얇고 유연한 디스플레이의 수요가 증가하고 있다 [1]. 플렉서블 디스플레이는 용도 및 기능으로는 깨지지 않는(rugged) 디스플레이, 굽혀지는(bending) 디스플레이, 두루마리가 가능한(rollable) 디스플레이로 구별할 수 있다 [5]. 단기적으로는 가볍고 견고하며 구부림이 가

능한 디스플레이는 DMB, Wibro, PDA 등 휴대화되고 있는 고품위 모바일용으로 적용될 수 있으며 장기적으로는 두루마리형 디스플레이가 사용화될 전망이다 [5]. 그림 1과 같은 디스플레이 기술의 진화단계를 거쳐 왔으며 [6], 최근에는 굽혀지는 디스플레이 및 두루마리가 가능한 액티브 매트릭스 유기 발광 다이오드를 달성하는 데 상당한 진전이 있었다 [2-4]. 특히 이러한 연구는 LCD (liquid crystal display)에서 OLED (organic light emitting diode)로 비중이 커지고 있다. 이는 OLED는 자발광형의 표시소자로 시야각과 대조비가 우수하고 저소비전력과 빠른 응답속도, 저렴한 제조비용과 사용 환경이 넓은 장점을 가지고 있으며, 단일가판상에 제조 가능하여 유연성이 있는 소자로 쉽게 만들

a. Corresponding author; junsin@skku.edu

Copyright ©2018 KIEEME. All rights reserved.
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

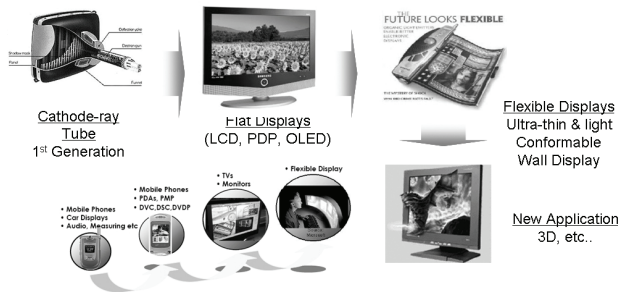


Fig. 1. Evolution and new paradigm of display technology.

수 있는 장점이 있기 때문이다 [5]. 이러한 유연 디스플레이를 만들기 위해서는 몇 가지 기술이 요구되고 있다. 유연한 소재로 된 기판과 접착제 그리고 합착 공정 기술이다. 특히 유연한 디스플레이의 경우 합착 공정 과정에서 높은 수율을 얻는 데 어려움을 겪고 있어, roll-to-roll과 같은 유연한 디스플레이를 위한 합착 공정 기술이 개발되어야 한다.

합착 공정 후 수율을 높이기 위한 방법 중 기포 제거 공정이 있다. 본 논문에서는 autoclave 장비를 활용하여 기포 제거 공정을 진행하였다. 기포 제거 공정이 합착 면의 투과율과 접착력에 어떠한 영향을 미치는지 확인할 수 있었다.

2. 실험 방법

2.1 유연성 기판

유연한 디바이스의 구현을 위해서는 다양한 공정에 부합하는 유연 기판들이 가장 최우선적으로 필요한데, 특히 기판은 완성된 디바이스의 공정기술, 성능, 신뢰성, 제품의 가격을 결정하는 가장 중요한 부분으로서 최근 들어 산업적인 주목을 받고 있다. 플라스틱은 플렉시블 기판 중 가공의 용이성, 무게 절감, 반도체 연속공정에 적합하여 광범위하게 검토되고 있지만 디바이스 장착을 위한 기판으로서 많은 문제점을 안고 있다. 이를 해결하기 위해 플라스틱 기판의 열적·화학적 특성을 향상시키거나, 반도체 공정에 적합할 수 있도록 저온 형성 유/무기 소재 및 공정 개발이 많이 진행되고 있다. 이미 디바이스에 휘어지는 성질을 부가할 수 있는 대표적인 기판으로 PI (polyimide), PET (polyethylene terephthalate), PEN (polyethylene naphthalate)과 같은 플라스틱이 활용되고 있으며 신축성을 부여하기 위

해 고무소재로 알려진 PDMS (polydimethylsiloxane) 등을 이용하는 연구가 꾸준히 보고되고 있다 [7-9]. 위 모든 기판들은 모두 투명한 물질이다. PET의 경우 Tg (glass transition temperature) 값이 낮기 때문에, 유연성이 좋다는 장점과 함께 열에 쉽게 데미지를 받는다는 단점을 가진다. Tg 값이 낮지만, roll-to-roll 공정에 사용되기에는 충분하다. OLED가 100°C 이하에 증발 공정되기 때문이다 [12,18-20].

투명 플라스틱 필름은 플렉시블 기판으로 개발이 예상되는 물질이다. 이미 범용 투명 플라스틱 필름을 개량한 다양한 소재가 개발 진행 중이긴 하지만, 열처리에 따른 기판의 수축과 팽창에 따른 변화를 극복하지 못하여 이를 보완하기 위해 코팅 등의 기술이 요구되고 있다 [7].

2.2 디스플레이 접착제

접착제는 용제 또는 열이 필요 없이, 지압 정도의 매우 작은 압력으로 다른 표면에 붙일 수 있으며, 다시 떼어 낼 때 피착 면을 오염 안 시키고 쉽게 떼어 낼 수 있는 접착제라고 정의한다 [10,11]. 접착제가 영구적으로 두 물체를 강하게 접합시키는 것에 비해 점착제는 일시적으로도 사용이 가능하다는 점이 특징적이다. 또 다른 점착제의 특징은 끈적거리는 반고체 상태로 존재하고 표면에 잘 젖어 들어가는 점이다.

접착제는 여러 분야에 다양하고 유용하게 쓰이고 있지만 그중에서도 디스플레이 산업의 발전에 따라 광학용 접착제가 각광을 받고 있다. 디스플레이용 광학용 접착제는 터치 패널에 직접 붙일 수 있고(direct bonding), 광 투과성이 우수하다는 장점이 있다 [10].

최근 들어 디스플레이 장치를 접합시키기 위해 사용하는 광학용 접착제는 크게 OCA (optically clear adhesive)와 OCR (optically clear resin) 두 가지가 있다. OCA는 기능성 접착 필름 형태로 제공되며 작업성이 우수한 편이다. OCA 시트(sheet)는 코팅 액이 저점도이기 때문에 롤 공정에 유용하다. 하지만 단점이 있다면 고온다습한 환경 때문에 기포가 발생할 수 있고 lamination 공정 시 가장자리(edge) 부분이 벗겨질 수 있는 문제점을 가지고 있다. 그림 2를 보면 OCA를 코팅 과정을 그림으로 나타내었다.

액체 형태로 제공되는 OCR은 대면적화나 접합하는 재료의 특성에 덜 영향을 받는 장점이 있다. 그리고 OCA처럼 별개로 재료를 공급하는 것이 아니므로 공정의 단순화를 기대할 수 있다. 그러나 부분적 경화로 인

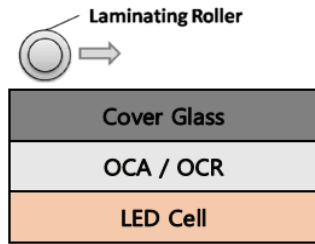


Fig. 2. Lamination roll process of OCA/OCR.

한 얼룩의 생성 및 미경화될 수 있는 부분을 고려해야 하는 문제점들이 있다. OCR 코팅은 위에서 아래로 덮는 방법(face bonding)을 사용하고 있다. 따라서 OCA와는 달리 패턴 안에 접착 물질을 채우는 공정이 가능하다.

2.3 Sheet to sheet 공정

OLED 소자는 다양한 공정과정에 의해 제조될 수 있다. 그중 솔루션 공정과 진공 공정 이렇게 두 유형이 있다. 솔루션 공정은 고분자 재료를 기반으로 OLED 소자를 간단하게 제작할 수 있다 [12-15]. 이 방식은 넓게 코팅이 가능하며, 효율적인 재료 사용을 통해 비용을 절감할 수 있는 장점이 있지만 [16] 재료가 안정적이지 않기에 아직 프로토타입 단계에 머물고 있다 [12].

때문에, 일반적으로는 상용화된 OLED 패널이 고진공 하에서 진공 프로세스를 통해 제조된다. 대면적 및 대량생산을 위해 상용화된 OLED 장치는 인라인형 증발기를 사용한다. 이 과정에서 OLED 소자를 제조하기 위해 많은 유기 물질이 기판 위에 증착되며 유기물질은 이동하는 기판 상에 챔버별로 연속적으로 증착될 수 있다. 진공 공정을 통해 스마트폰, 태블릿 및 스마트 시계 등이 제작되고 있으며, 인라인 시스템은 시트형 기판이 챔버에서 챔버로 이동하도록 요구하며, 때문에 시트형 기판을 다음 챔버로 이동시키는 데 시간 지연이 있다. 지연 시간문제에도 불구하고, 인라인 시스템에서 널리 사용되어 지금까지 최고의 대량생산 프로세스로 인정받고 있다.

2.4 Roll-to-roll 공정

IDTechEx는 OLED 시장이 2020년까지 180억 달러까지 증가할 것으로 예측하였다. 사전에 시장 점유율을 장악하기 위해서는 제 조공정의 대량생산 능력을 개발해야 하며, roll-to-roll 제조 기술은 이를 위한 유망한

후보 중 하나이다.

Roll-to-roll 시스템은 롤 형태의 기판을 사용하며, 시작부터 끝까지 지속적으로 이동한다. 기판이 이동하는 동안, 유기 물질은 기판 상에 하나씩 증발되며, roll-to-roll 공정은 높은 생산을 및 생산량, 효율적인 재료 소비의 장점을 가지고 있다. 이 기술은 제조비용을 줄이는데 도움이 될 수 있으며, 대량생산이 가능하다. Roll-to-roll OLED 제조공정을 통해 유연한 OLED는 플라스틱 기판에서 마더 유리를 분리하는 것과 같이 추가적인 공정 없이 한 공정으로 제조될 수 있다.

몇몇 연구 그룹은 roll-to-roll 공정에 맞춘 OLED 시스템을 발표했으며, roll-to-roll 장비를 개발하기 위해서는 몇 가지 고려 사항이 있다.

먼저, roll-to-roll 공정 중에 유기물이 증착되는 필름에는 흠집이 생기지 않아야 하며, 롤은 롤러에 의해 설치된 방식을 따른다. 따라서 잘못된 위치로 인해 주름, 오정령 및 늘어짐이 발생할 수 있으므로 설치된 롤러 위치를 조심스럽게 제어해야 한다.

유연한 roll-to-roll OLED 제조는 최첨단 공정이다. 따라서 기존과는 다른 많은 고려사항이 있다.

첫째, 기판의 조건에 따라 다른 공정 요소들이 정해지므로 기판 선택이 매우 중요하다. 기판은 유연성, 인장 내구성, 내열성, 매끄러운 표면 및 습기 차단 특성을 가져야 한다. 선택된 기판과 함께, 균일한 표면과 높은 전도성을 가진 유연하고 투명하며, 평평한 내열성 전극이 선택되어야 한다 [17].

기판의 경우 수분 및 산소가 플라스틱 필름에 침투하는 것을 방지하기 위해 유기-무기 다층 수분 장벽을 쉽게 형성하도록 플라스틱을 기판으로 선택하는 것이 좋다. 투명전극의 경우 양극 재를 배리어 처리된 플라스틱 기판 롤로 코팅해야 하며, 광 패턴을 만들기 위해 절연 재료가 전극 상에 형성되어야 하고, 낮은 누설 전류 레벨로 측정되어야 한다.

또한, 준비된 기판은 설계된 roll-to-roll 증발기를 통해 모든 유기 및 음극 증발된 물질을 수용한다. 사전 캡슐화를 위한 재료는 어떠한 손상 없이 캡슐화되기 전에 OLED 장치를 보호하도록 증착된다. 마지막으로 습기 차단 처리된 플라스틱 필름을 롤 대 롤 캡슐화하여 유연한 OLED 장치 상에 적층시켜야 한다 [18-20].

2.5 실험 방법

이번 실험에서 합착 면의 특성 중 transmittance 및 합착 면 사이의 힘인 shear strength, fill strength에

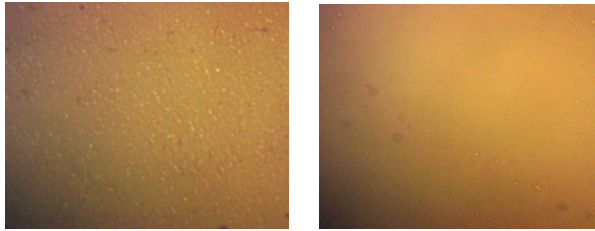


Fig. 3. Comparison bubble-free glass vs. unremoved glass.

대해 측정하였다.

먼저 transmittance는 디스플레이의 선명도와 색감에 중요한 영향을 미치는 parameter이다. Shear strength는 물체의 변형을 일으키는 힘이며, fill strength는 충전강도이다. 위의 세 특성을 향상시키기 위해 합착 면 사이에 존재하는 기포를 제거하였다. 기포 제거 장치인 autoclave를 활용하였으며, 450°C의 환경에서 15분간 3번 진행하였다. 그림 3에 기포 제거 전의 glass의 표면과 기포 제거 후의 glass 표면을 비교하였다.

Autoclave를 활용하여 기포 제거한 합착 면의 transmittance 및 접착력은 모두 증가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 합착 표면 측정

기포 제거 공정 후 다른 특성을 확인 전 합착 면 표면에 있는 기포들이 실제로 얼마나 제거되었는지를 확인하기 위해 OM (optical microscope)으로 표면을 측정하였다. OM으로 측정된 표면은 그림 3과 같이 비교되었다. 기포 제거 공정을 거치지 않은 glass의 합착 면에는 그림 3의 왼쪽과 같이 수많은 기포가 남아 있었지만, 250°C의 온도에서 10분씩 기포 제거 공정을 3번 한 후의 합착 면은 그림 3의 오른쪽과 같이 많은 기포가 제거됨을 확인할 수 있었다.

3.2 Transmittance 특성

Glass의 합착 면의 특성 중 가장 중요한 것 중 하나가 바로 transmittance이다. 디스플레이의 선명함과 색감도에 중대한 영향을 미치는 parameter이다. 또한 합착은 완료되었으나, 합착 후 glass의 transmittance 값이 낮으면, 디스플레이의 부품으로 사용될 수 없기 때문에 transmittance는 매우 중요한 특성임을 알 수 있다.

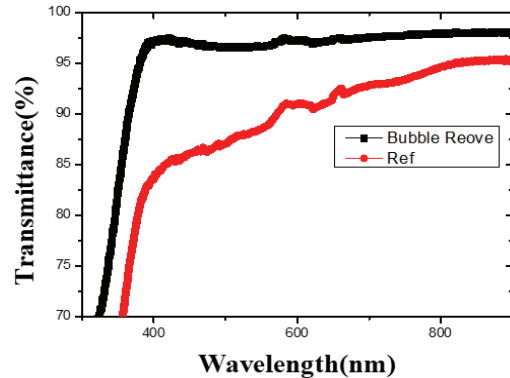


Fig. 4. Transmittance of glass.

Table 1. Strength data of removing bubble glass.

Bubble presence	Fill-strength (gf)	Shear-strength (kgf)
Unremoved	1,938.00	15.8514
Bubble-free	2,352.61	22.8028

기포를 제거하기 전의 glass와 제거한 glass의 기포수의 변화가 매우 큼을 OM 측정으로 확인하였다. 그리고 이 두 조건의 glass의 transmittance를 측정할 결과 380 nm 이상의 파장에서의 transmittance 값은 기포 제거 전 83.4% 기포 제거 후 97.5%임을 확인하였다. 380 nm 이상의 파장에서 최대 14.1%만큼의 transmittance 값 차이가 남을 알 수 있었다. 그림 4를 통해 기포 제거 전 glass와 기포 제거 후 glass의 파장에 따른 transmittance 값을 비교하였다.

4. 결론

본 연구에서는 디스플레이 공정의 수율을 높이기 위해 합착공정에 대하여 서술하였다. 그중 합착 공정이 진행된 후 합착 면 사이에 존재하는 수많은 기포를 제거하기 위해 기포 제거 공정을 진행하였다. 공정 후 transmittance와 fill-strength, shear-strength 모두 향상되었다. 기포 제거는 autoclave를 활용하였으며, 450°C의 조건에서 15분간 3 set 진행하였다. 그 결과 transmittance는 96.3%, fill-strength는 2352.61 (gf), shear-strength는 22.8028 (kgf)의 향상된 값을 얻을 수 있었다. 또한 optical microscope로 표면을 확인한 결과 기포 제거 공정 후의 합착면의 기포들이 95% 이상 제거되었다.

이 결과 디스플레이 합착 공정 내에 기포 제거 공정을 추가하여 진행된다면 transmittance와 합착력을 향상시켜 디스플레이 합착 수율을 향상시킬 수 있을 것이다. 특히 shear-strength의 향상은 커브드 및 플렉서블 디스플레이의 굽어진 부분의 내구성을 향상시킬 것이다.

감사의 글

본 연구(No.20153030012590)는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

REFERENCES

- [1] S. Kim, W. Choi, W. Rim, Y. Chun, H. Shim, H. Kwon, J. Kim, I. Kee, S. Kim, S. Lee, and J. Park, *IEEE Trans. Electron Devices*, **58**, 3609 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TED.2011.2162844>]
- [2] D. U. Jin, T. W. Kim, H. W. Koo, D. Stryakhilev, H. S. Kim, S. J. Seo, M. J. Kim, H. K. Min, H. K. Chung, and S. S. Kim, *Soc. Inf. Disp.*, **47**, 703 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1889/1.3500565>]
- [3] S. An, J. Lee, Y. Kim, T. Kim, D. Jin, H. Min, H. Chung, and S. S. Kim, *Soc. Inf. Disp.*, **47**, 706 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1889/1.3500566>]
- [4] S. Kim, H. J. Kwon, S. Lee, H. Shim, Y. Chun, W. Choi, J. Kwack, D. Han, M. Song, S. Kim, S. Mohammadi, I. S. Kee, and S. Y. Lee, *Adv. Mater.*, **23**, 3475 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201190120>]
- [5] J. Kwak, *2014 - Yearbook of display technology*, 69 (2013).
- [6] I. Kim and B. Jin, *Korean Industrial Chemistry News*, **10**, 9 (2007).
- [7] S. H. Kang and S. W. Hong, *J. Weld. Joining*, **32**, 34 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.5781/JWJ.2014.32.3.34>]
- [8] D. H. Kim, N. Lu, R. Ma, Y. S. Kim, R. H. Kim, S. Wang, J. Wu, S. M. Won, H. Tao, A. Islam, K. J. Yu, T. I. Kim, R. Chowdhury, M. Ying, L. Xu, M. Li, H. J. Chung, H. Keum, M. McCormick, P. Liu, Y. W. Zhang, F. G. Omenetto, Y. Huang, T. Coleman, and J. A. Rogers, *Science*, **333**, 838 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1206157>]
- [9] D. J. Lipomi, M. Vosgueritchian, B.C.K. Tee, S. L. Hellstrom, J. A. Lee, C. H. Fox, and Z. Bao, *Nat. Nanotechnol.*, **6**, 788 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1038/nnano.2011.184>]
- [10] T. Kim and H. Kang, Ph.D. Thesis, p. 53, Dankuk University, Yongin (2016).
- [11] I. Benedek, *Pressure-Sensitive Adhesives and Application* (Marcel Dekker, Inc., New York, 2004) p. 198-234.
- [12] E. Jung, Ph.D. Thesis, p. 69, Sungkyunkwan University, Suwon (2017).
- [13] C. Zhong, C. Duan, F. Huang, H. Wu, and Y. Cao, *Chem. Mater.*, **23**, 326 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1021/cml01937p>]
- [14] T. Earmme, E. Ahmed, and S. A. Jenekhe, *Adv. Mater.*, **22**, 4744 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201001585>]
- [15] N. Aizawa, Y. J. Pu, M. Watanabe, T. Chiba, K. Ideta, N. Toyota, M. Igarashi, Y. Suzuri, H. Sasabe, and J. Kido, *Nat. Commun.*, **5**, 5756 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms6756>]
- [16] A. C. Arias, J. D. MacKenzie, I. McCulloch, J. Rivnay, and A. Salleo, *Chem. Rev.*, **110**, 3 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1021/cr900150b>]
- [17] C. Guillaume, G. Khasha, and Z. Harry, *OLED Display Forecasts 2016-2026*, <https://www.idtechex.com/research/reports/oled-display-forecasts-2016-2026-the-rise-of-plastic-and-flexible-displays-000477.asp> (2015).
- [18] A. Sugimoto, H. Ochi, S. Fujimura, A. Yoshida, T. Miyadera, and M. Tsuchida, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **10**, 107 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2004.824112>]
- [19] J. S. Park, T. W. Kim, D. Stryakhilev, J. S. Lee, S. G. An, Y. S. Pyo, D. B. Lee, Y. G. Mo, D. U. Jin, and H. K. Chung, *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 013503 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3159832>]
- [20] D. Huang, F. Liaob, S. Molesab, D. Redingerb, and V. Subramanian, *J. Electrochem. Soc.*, **150**, G412 (2003). [DOI: <https://doi.org/10.1149/1.1582466>]