

인쇄전자 기술을 이용한 기능성 플렉서블 소자와 공정 시스템

□ 김정수, 배성우* / (주)팜스, *한밭대학교

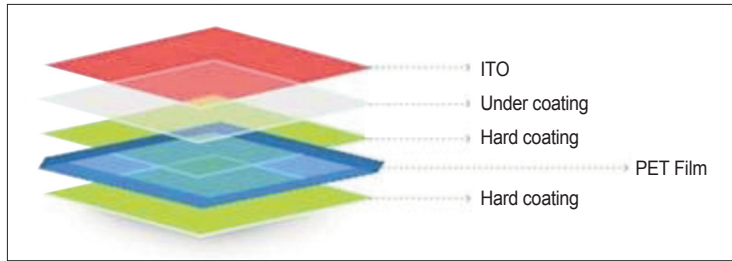
요약

최근 다양한 유연 소재 기반의 전자 기기들이 개발 혹은 판매되고 있으며 이러한 전자 기기들에게 유연 소자 및 이를 구현하기 위한 공정 시스템은 필수적이라 할 수 있다. 본 논문에서는 인쇄전자 기술을 이용한 다양한 공정 기술과 이를 이용한 공정 시스템에 대해 논의한다. 인쇄전자 기술 중의 대표적인 코팅 기술로 마이크로 그라비아, 슬롯다이, 바 코팅 등의 기술이 있으며, 인쇄 기술로는 그라비아 오프셋, 열형 롤 임프린팅 기술 등이 있다. 최종적으로 이러한 각각의 공정 특성을 통합한 복합 멀티 롤투롤 공정 코팅 기술을 이용하여 다양한 유연 소자에 대응하는 소재의 생산이 가능하다.

1. 서론

최근 급속도로 발전해 가는 나노기술, 정보기술 및 디스플레이 기술로 인하여 언제 어디서나 정보를 접할 수 있는 유비쿼터스 시대로 접어들

고 있으며 이에 따라 휴대가 간편하고 이동성을 가진 모바일 정보전자 기기의 필요성이 증가되고 있다. 이러한 유비쿼터스 시대를 실현하는 정보화 기기로서 변형이 자유로우며 가볍고 휴대가 간편한 Flexible 정보 전자기기의 필요성이 점점 커지고 있다. 유연 디스플레이, 트랜지스터, 터치패널, 그리고 태양전지 등의 정보전자 에너지 기기는 가장 대표적으로 ITO(인듐주석산화물)를 사용한 유연 투명 전극을 기반으로 제작된다. 유연 ITO 투명전극이란 PET(폴리에틸렌테레프탈레이트), PC(폴리카보네이트), PEN(폴리에틸렌나프탈레이트), PI(폴리이미드)와 같은 유연한 기판 위에 ITO 물질을 성막시킨 것으로 높은 전도도와 가시광 영역의 높은 투과도를 가지는 전극 물질로 모든 소자의 전극으로 응용이 가능하다. <그림 1>에 ITO 필름의 구조를 나타내었다.



〈그림 1〉 ITO 필름의 구조

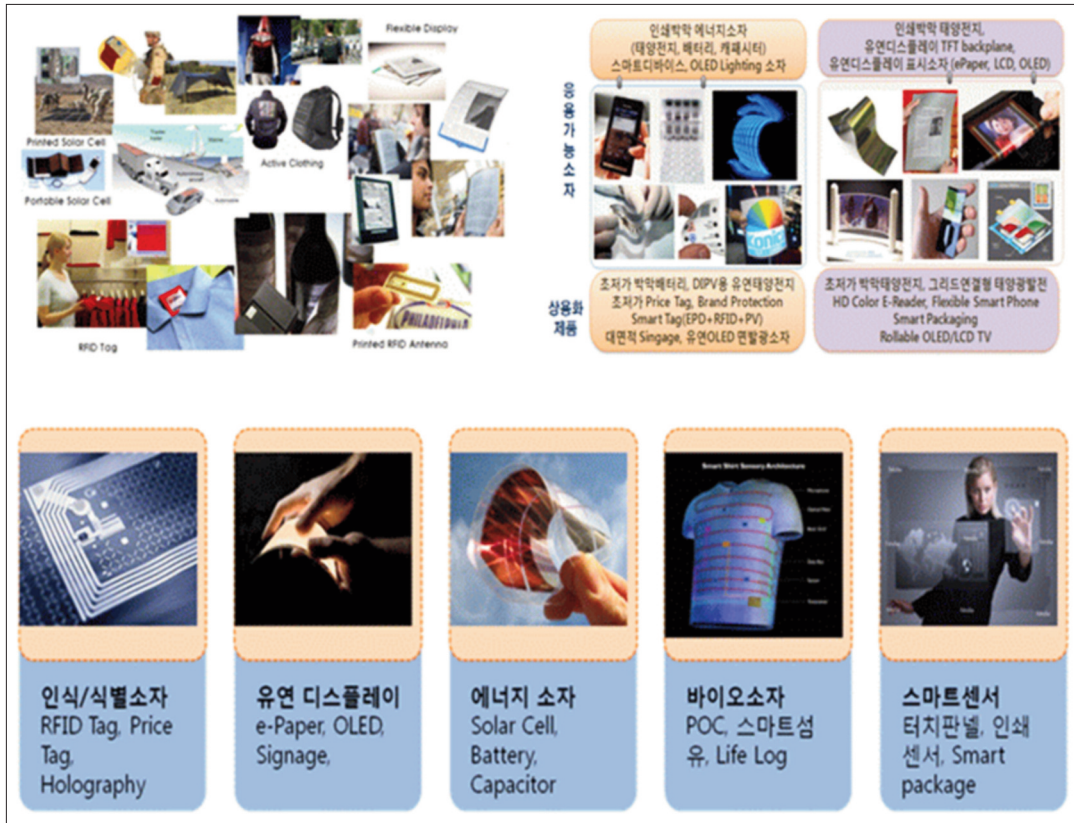
하지만, 이러한 ITO 필름이 2012년 공급 부족이 부각되면서, 이를 대체하고자 하는 움직임이 활발히 진행되고 있으며, 특히, ITO 소재 중 인듐의 Flexibility가 낮아 20인치 이상의 Flexible Display 인 중/대형 디스플레이를 구현하는데 한계가 있다 [1]. 또한, 최근 디스플레이 패널의 크기가 대형화됨에 따라 대형 기판에 적용 가능한 장비 및 공정 개발이 박막특성에 큰 영향을 미치게 되므로 디스플레이용 유연 전극의 적용을 위해 박막가공 기술의 확보가 필수적이다. 일반적으로 박막가공기술은 크게 패터닝 형성이 가능한 공정과 그렇지 않은 공정으로 나눌 수 있는데, 대부분의 소자공정에서는 패터닝 형성이 가능한 공정을 요구하고 있으며 패터닝 형성이 가능한 인쇄전자 기술로는 패터닝인쇄 및 롤투롤 공정, 스크린 프린팅, 잉크젯 프린팅, 임프린팅 공정 등이 있다. 인쇄전자 연속시스템은 종이나 필름과 같은 유연 기판에 마치 신문을 인쇄하듯 차세대 전자, 에너지 소자를 연속적으로 대량 생산하는 자동화된 융복합 공정 및 장비 기술을 의미한다. 인쇄전자의 가장 큰 장점은 유연성, 초정량, 저가격, 대면적 대량생산이다. 이것은 반도체 공정을 대체할 신유망산업공의 제조 특성에 잘 맞으며, 전면코팅, 현상, 식각공정을 대체하여 폐수를 95%로, 또한 획기적으로 유해가스를 99% 이상 줄일 수 있으며, 대면

적 고속생산 및 재료비 절감을 통해 소자제작 공정을 30단계 이상 줄일 수 있으며, 기존 반도체 공정 대비 1/1000의 초저가 전자부품의 제작이 가능한 기술이다[2]. 이것은 공정 속도가 느리며 대면적화에 한계가 있는 기존의 스프인코팅, 화학 및 물리적 증착 장비를 대체 할 수 있다. 또한 롤 기반의 패터닝 기술은 잉크화가 어려운 재료의 패터닝 또는 프린팅 공정의 정밀도 한계를 넘어서는 미세 선폭의 패터닝에 적용하기 위한 기술로서 롤투롤 연속 공정에 접합하도록 기존의 고온, 진공 및 마스크 공정 장비를 대체하는 공정 장비 기술이다.

II. 기능성 유연 필름 코팅 기술

최근 이슈가 되고 있는 나노 기술 등의 융복합 기술을 접목하여 기계적, 전기적, 광학적, 열적 물성이 뛰어난 기능성 필름이 제품에 적용되고 있고, 기능성 필름의 제품별 시장의 주요 분야로는 평판디스플레이(FPD), 반도체·기판, 에너지, 기타로 분류된다.

이러한 차세대 소자에 적용 가능한 기능성 유연 필름을 제조하기 위한 인쇄전자 장비는 크게 접촉식(그라비아, 그라비아 오프셋, 플렉소 등) 인쇄방식



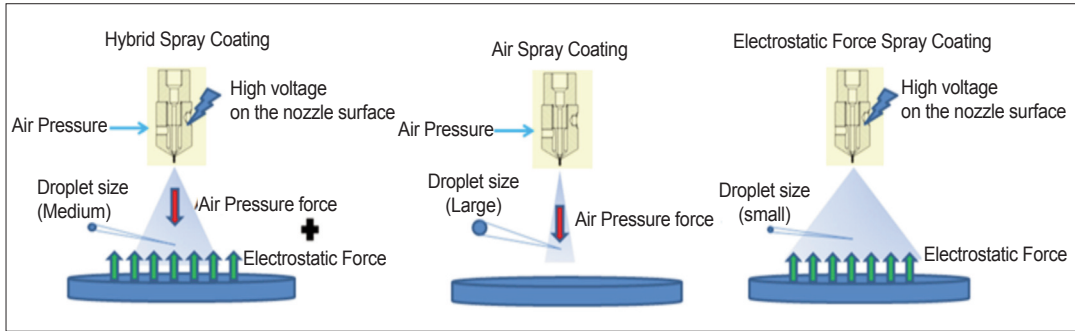
〈그림 2〉 유연한 투명 전극을 기반으로 한 다양한 인쇄전자 소자

과 비접촉식 (잉크젯, 에어스프레이, 정전기분사증착, 슬롯 다이 등) 인쇄방식으로 나눌 수 있으며, 대표적으로 하이브리드 스프레이, 마이크로 그라비아, 그라비아 오프셋, 슬롯 다이, 바코더, 열형롤 임프린터와 같은 다양한 인쇄전자 장비들이 활용될 수 있다.

1. 하이브리드 스프레이 코팅 기술

스프레이 코팅 기술은 크게 공압을 이용한 에어스프레이 방식, 정전기력을 이용한 정전분사 증착 방식(ESD : Electro-Static Deposition), 그리고

이러한 공압과 정전기력을 하이브리드 형태로 분사시키는 하이브리드 스프레이 코팅 방식으로 구분될 수 있다[3]. 에어 스프레이 방식은 매우 빠른 코팅 속도와 대면적에서 도포가 가능하며 원료물질의 선택이 다양한 장점을 갖는 코팅방법이다. 그러나 큰 액적으로 인한 코팅된 박막이 두껍고 매우 높은 표면 거칠기와 낮은 밀도를 갖는 단점이 있다. 한편 정전기력을 이용한 정전분사 증착 방법은 매우 낮은 표면 거칠기를 가지고 있으며 매우 조밀하게 얇은 박막 코팅이 가능하다. 그러나 공정시간이 길고 낮은 유량계수로 인해 제한된 작은 영역에서만 코팅이 가능한 단점을 가지고 있다. 하이브리드 스프



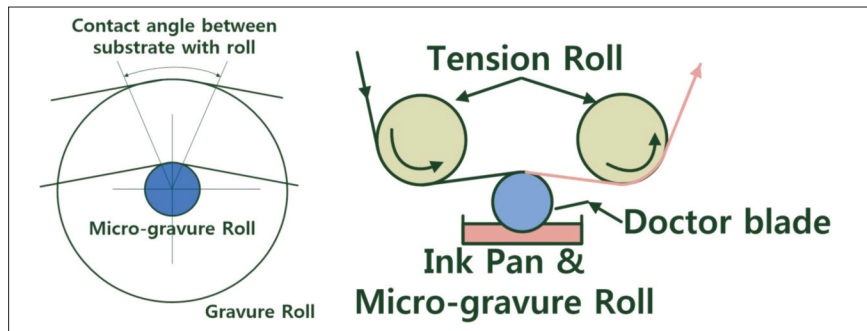
〈그림 3〉 하이브리드 스프레이, 에어 스프레이, 정전분사 증착 방식을 이용한 코팅 기술 개념도

레이 방식은 매우 빠른 증착 속도와 대면적 도포가 가능하고 수십 나노미터 수준의 박막 두께의 조절이 가능하다. 〈그림 3〉은 하이브리드 스프레이, 에어 스프레이, 정전분사 증착 방식을 보여주고 있다.

2) 마이크로 그라비어 코팅 기술

마이크로 그라비어 코팅이란 리버스 롤 키스 코팅법을 말한다. 마이크로 그라비어란 용어는 키스 코팅 작업 시 유연기판과 코팅 롤의 반경을 소형화하여 롤 표면과 유연기판의 도료 및 잉크 소용돌이(vortex)를 극소화함으로써 박막의 도료 및 잉크를 균일하게 도포하는 간단한 정밀 코팅 방법이다. 마

이크로 그라비어 코팅 방식은 님플이 없기 때문에 극박의 기재에 대하여 안정된 박막코팅 조작성이 가능하며 도료 및 잉크의 응집이 없다는 장점을 가지고 있다. 또한 롤의 리버스 회전에 따른 매끄러운 효과도 기대할 수 있으며 공정의 특성상 롤투를 장비에 적용이 쉬워 저가격의 대량생산으로 손쉽고 균일한 박막코팅이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 마이크로 그라비어 코팅기술은 웹을 지지하는 두 개의 롤러를 이용하여 마이크로 그라비어 패턴 롤에 웹을 미세하게 접촉시킴으로 인해서 미세 박막을 코팅하는 기법이기 때문에 현재의 접촉식 박막 코팅 기술 중 가장 미세한 박막의 형성이 가능한



〈그림 4〉 마이크로 그라비어 코팅 원리 및 방법



〈그림 5〉 롤투롤 베이스 마이크로 그라비어 코팅 시스템

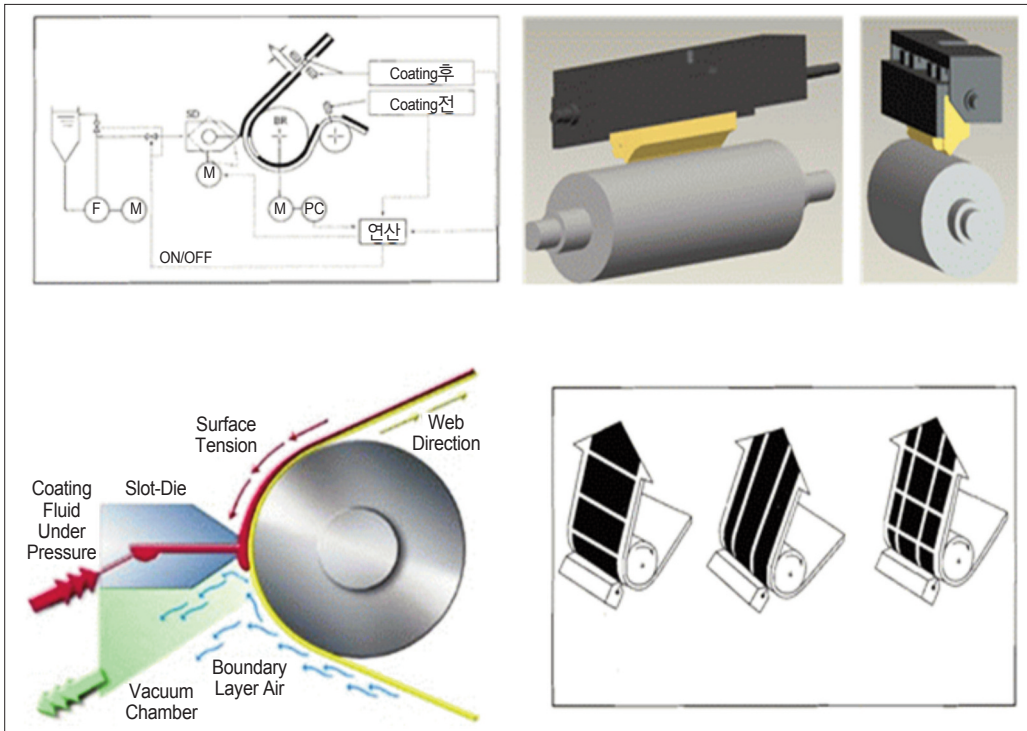
기술이다. 또한 30 m/min의 레퍼런스 속도를 가지고 있기 때문에 고속 대량 및 패터닝 박막 형성에 큰 장점을 가지고 있다. 〈그림 4〉에 마이크로 그라비어 코팅의 원리 및 〈그림 5〉에 실제 코팅 유닛과 롤투롤 마이크로 그라비어 인쇄장비를 보여주고 있다[4].

마이크로 그라비어 코팅장비는 크게 웹텐션제어 서보기구, 코팅유닛, 잉크주입장치, 시스템 텐션제어 인피더, 하이브리드 건조장치로 구성되어 있다. 이 시스템의 특징은 장력을 정밀하게 조절하기 위해 변화하는 정보를 줄이는 아이들 롤러의 개수를 최소화로 적용되었으며, 필름의 인피딩 전후의 장력을 분리시킬 수 있는 기능을 갖도록 제작되어 있다[5]. 또한 값비싼 잉크를 적절히 공급하기 위해 디스펜서와 서보리니어 기구를 부착한 잉크 공급장치가 장착되어 있다. 코팅된 박막을 건조하기 위한 건조장치에서는 UV, NIR, thermal 등의 건조가 가능하며 시스템 제어는 PC 기반의 다이렉트 컨트롤이 가능하며 운전상태나 에러 등을 직관적으로 볼 수 있도록 설계되어 있다. 마이크로 그라비어는 박막의 두께를 수십 나노미터 수준으로 제어가 가능

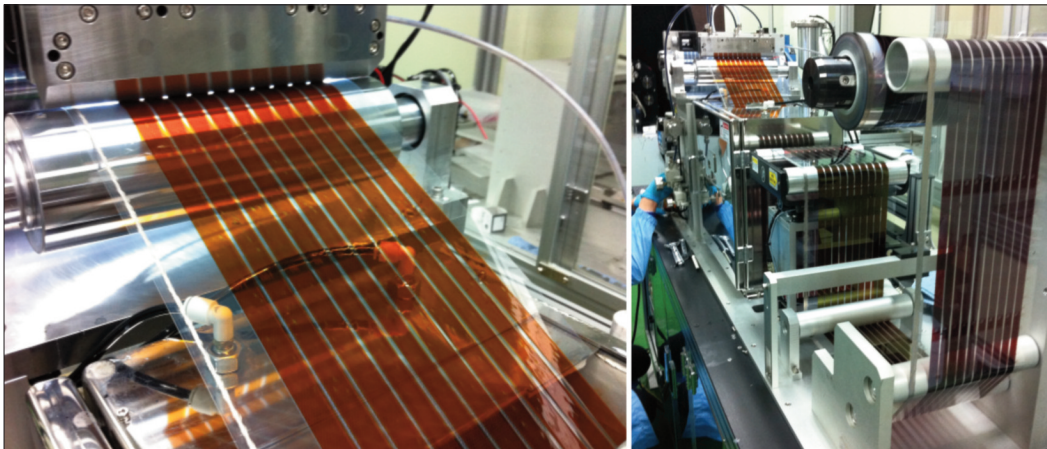
한 인쇄장비이다.

3. 슬롯다이 코팅 기술

슬롯 다이 코팅은 잉크를 유리나 유연 필름 위에 일정한 두께로 도포하기 위한 장치로서, 슬롯 다이 유닛은 웹 시트 진행방향의 폭 방향으로 유동 분포가 균일하도록 설계된 다이의 금형 사이로 토출된 잉크를 기관 위에 일정량을 균일하게 도포하는 코팅 장치이다[6]. 베이스 롤과 슬롯 다이 갭 조절을 통하여 원하는 두께를 조절하며, 일반적으로 1 μ m 정밀도를 유지하기 위해 구성 유닛의 정밀도, 베어링 공차, 부품의 정밀도가 매우 중요하다. 정밀도 조절을 위해 위치 서보 및 갭 센서, 컨트롤러 등이 구성된다. 또한, 코팅된 물질의 평탄도를 높이기 위한 진공 석션을 제어하기 위해 진공 챔버 유닛이 필요하며 석션 챔버, 진공 센서, 진공 펌프, 인벤터에 의하여 내부 압력을 조절한다. 슬롯 다이 코팅의 장점으로 코팅 액체의 조성, 점도, 온도를 유지하며 코팅이 가능하고 코팅 작업 중 오염이 적고 안정성 및 재현성이 우수하다. 또한 스트라이프 코팅 및 패턴 코팅과 다



〈그림 6〉 슬롯다이 코팅 개념 및 원리



〈그림 7〉 슬롯다이 코팅 시스템

층 코팅 작업이 가능하여 유기 광 및 에너지 소자 제작에도 유용하다. 핵심요소 기술로는 노즐 유량 및

압력의 균일화 기술, 다이의 초정밀 가공 기술 등이며 국산화가 필요한 코팅 장비에 해당된다.

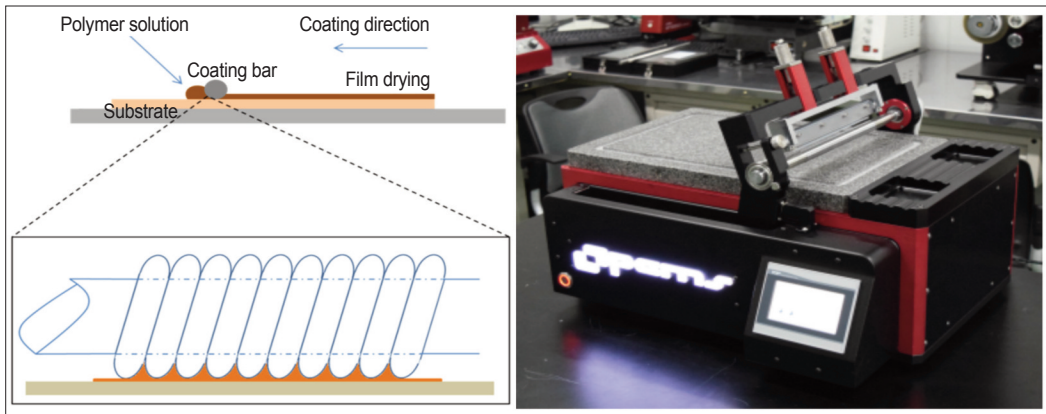
4. 바(Bar) 코팅 기술

기존의 와이어 바 타입과 유사한 공정 기술을 와이어리스 바에서 구현하였다. 바 코팅 기술은 기재의 용액을 바가 끌고 가면서 얇은 박막을 구현할 수 있는 시스템으로 필름, 유리 등의 기재에 낮은 점도의 고분자 용액을 쉽고 빠르게 박막 코팅이 가능하다. 와이어리스 바의 장점은 와이어 바에서 발생할 수 있는 와이어 사이에 이물질이 낄 수 있는 문제점이 없으며 1D 스트라이프 타입의 패턴이 가능하다. 또한 코팅 후 바 세척이 매우 간단하다는 장점을 갖는다[7].

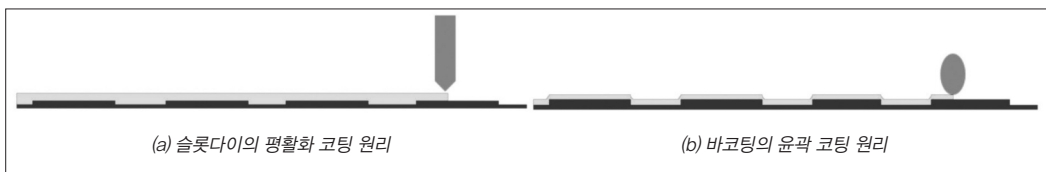
기존의 바코팅 공정 기술에서 바의 회전성을 부가하고 동시에 블레이딩 시스템이 장착되어 바코팅 시 잉크를 기재에 묻히지 않고 바로 코팅이 가능한

코팅 기술로 바의 회전 시 전방 또는 후방으로 회전이 가능하여 다양한 재료의 점도, 건조 특성에 유연하게 대응이 가능하며 회전속도를 조절하여 단일 바에서 다양한 박막의 두께를 형성시킬 수 있다. <그림 8>은 바코팅 시스템과 코팅 공정을 보여준다.

슬롯다이와 바 코팅은 코팅 방식에 대해서도 차이가 존재한다. <그림 9>와 같이 슬롯 다이 코팅 기술은 평활화 기술로써 기판의 요철에 상관없이 코팅 표면을 일정하게 유지 할 수 있는 특성을 가지고 있다. 이러한 경우 우수한 표면 평활화를 요구하는 전자 소자 및 박막 구성에 활용 될 수 있는 요소 기술이다. 바 코팅 기술은 요철을 따라서 코팅하는 윤곽 코팅 기술로써 요철에 상관없이 일정한 박막 두께를 유지할 수 있는 장점이 있다. 이러한 경우는



<그림 8> 바코팅 공정원리 및 바코팅 시스템



<그림 9> 슬롯다이와 바코팅 기법의 비교

인쇄 전자 소자에서 전기적 특성이나 박막에 따른 저항 변화에 민감한 소자에 적용이 가능한 요소 기술이다.

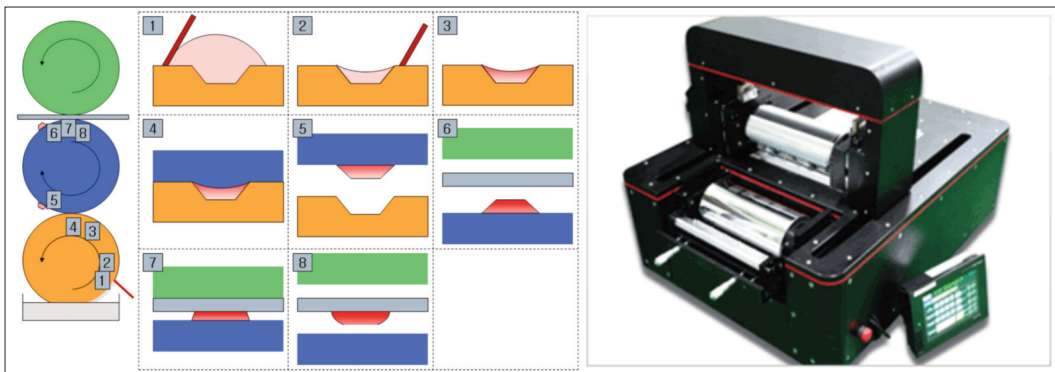
5. 그라비아 오프셋 프린팅 기술

그라비아 오프셋 프린팅 인쇄는 플레이트 실린더에서 블랭크 실린더로, 그리고 블랭크 실린더에서 기관으로 두 번의 잉크 전이가 일어나면서 잉크가 기관에 인쇄하게 된다. 그라비아 오프셋 프린팅 인쇄공정은 닥터링 공정, 오프 공정, 셋 공정과 같이 3가지로 나누어 볼 수 있다. <그림 10>에서 1-3 공정이 닥터링 공정으로써 이 공정은 그라비아 셀 안에 잉크를 가능한 가득 채우고 셀 이외의 영역에는 잉크가 남아있지 않는다. 4-5 공정은 오프 공정으로써 가능한 많은 잉크를 오프하는 것이 좋으나 일반적으로 잉크의 일부만 오프하게 된다. <그림 10>에서 6-8 공정은 셋 공정으로써 모든 잉크를 기관 위에 전이시켜야 한다. 오프셋 블랑켓에 잉크가 남아 있다면 다음 번 프린팅에 영향을 주게 되어 불량이 된다. 일반적으로 잉크가 블랑켓에 흡수되는 양이 발수하는 양보다 많으므로 블랑켓의 성질이 계속해서

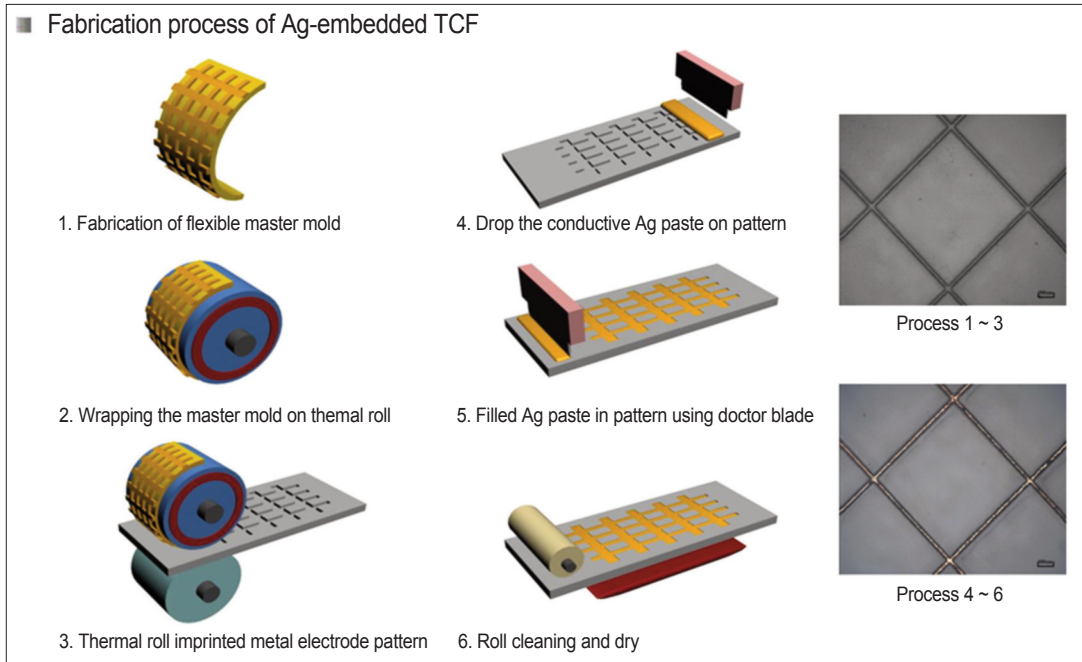
변하게 되며 블랑켓에 솔벤트 함유량이 점점 높아져 최종적으로 블랑켓의 수명이 다하게 된다. 블랑켓에 솔벤트의 함유량이 늘어나게 되면, 최종 인쇄된 형상에서 인쇄 선폭이 늘어나는 것을 관찰할 수 있게 되며, 따라서 인쇄 횟수 대비 선폭 증가량이 그라비아 오프셋 프린팅의 신뢰성 요인 중에 하나가 된다[8]. 현재 그라비아 오프셋 프린팅 방법으로 롤 프린터를 이용하여 7 μ m의 선폭으로 구현이 가능하며 이것은 세계 최고 수준의 매우 우수한 인쇄 기술이다 [9]. <그림 10>은 그라비아 오프셋 프린팅 공정 실험을 위해 컴팩트하게 제작된 실제 장비 사진이다.

6. 열형 롤 임프린팅 패터닝 기술

현재 인쇄기술 기반의 Ag 그리드 메쉬 형성 기술은 기존의 접촉식 인쇄 (그라비아, 그라비아 오프셋, 플렉소, 잉크젯 등)를 이용한 포지티브 타입의 그리드 형성 기술과 열형롤을 이용하여 필름을 그리드 형태로 각인시키고 그 내부에 Ag를 채우는 방식의 네거티브 타입의 그리드 형성 기술이 있다. 이 두 가지 방식 중 초기에는 포지티브 타입에 대한 연구가 진행되었으나 패턴의 높이가 1 μ m 수



<그림 10> 그라비아 오프셋 프린팅기술과 시스템



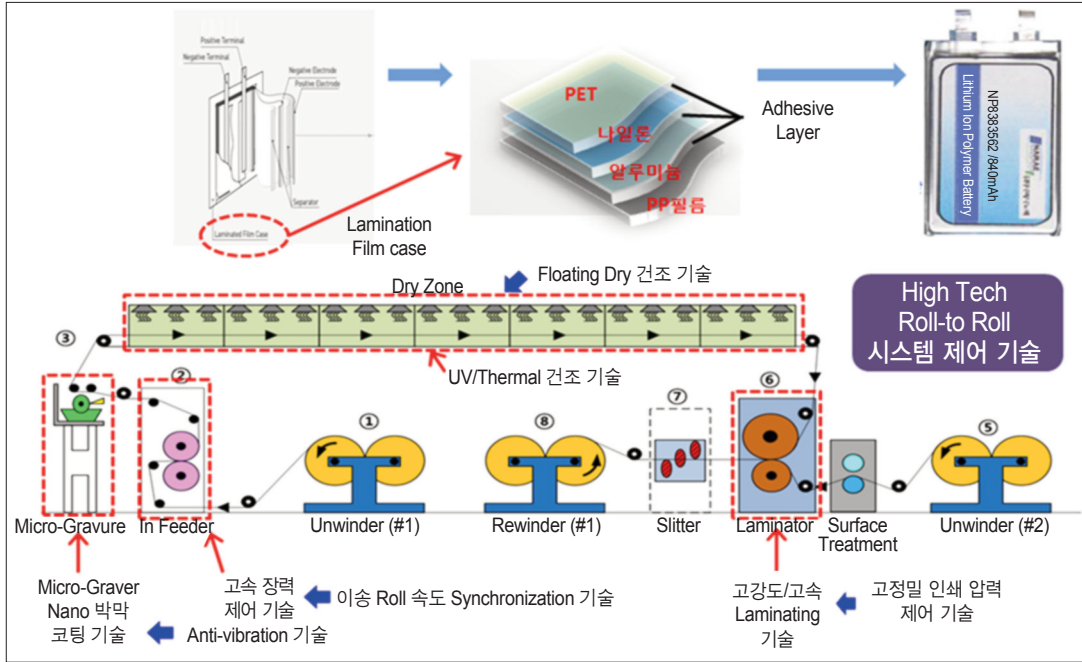
〈그림 11〉 열형 롤 임프린팅 방법을 이용한 Ag 그리드 메쉬 제작 공정

준이상으로 형성됨으로 인해 유기소자의 코팅 공정에 적용성이 떨어지는 문제점이 있었다. 현재 네거티브 타입은 필름 표면의 플랫성을 보장하고 전극의 산화방지와 높은 유연성을 가지는 측면에서 많은 연구가 진행되고 있다. 가열롤 임프린팅 기술은 기존의 핫 엠보싱 기반에서 히팅 플레이트를 열형롤로 대체하여 연속적인 생산이 가능하도록 구현한 기술이다. 〈그림 11〉은 열형롤 임프린팅 방법을 통한 Ag 그리드 메쉬 제작과정을 보여준다[10].

열형롤로 제작된 Ag 그리드 메쉬 PET 필름은 그리드 선폭이 10 μ m이고, 선 간격이 500 μ m에서 약 87%의 투과도를 나타냈고, 면저항은 10 Ω /□ 이하로 높은 수준의 투명전극으로 활용할 수 있는 가능성이 매우 높다.

7. 멀티 코터 응용 기술

유연 디스플레이의 최대 장점인 경량화와 휴대편이성 및 유연성 그리고 외부 충격에 내구성을 갖는 고정도의 블루라이트 컷 필름이나 유연 디스플레이에 다양하게 사용되는 투명전극 필름 등을 저가, 대면적 상용화 실현이 가능한 나노박막 코팅 롤 투롤 인쇄 및 접착 공정 기술을 개발하는 것이 매우 중요하며, 이러한 저가의 대면적 필름 상용화를 위한 나노패터닝, 스프레이, 코팅 공정 기술이 집적된 롤투롤 멀티코팅 공정 시스템을 구성할 수 있다. 또한 리튬이차전지와 같은 높은 경제성과 산업 경쟁력 관점에서 에너지 문제를 해결할 수 있는 핵심 부품으로서 현재 전기차, ESS 및 IT용 리튬이차전지에 외장재로 사용되는 고분자 복합 필름 형태인 파



〈그림 12〉 이차전지용 파우치 멀티 필름 및 몰투를 기반의 파우치 멀티 필름 제조 생산 장비 개념도

우치 멀티 필름의 제조 공정 최적화 및 몰투를 연속 생산 방식으로 〈그림 12〉와 같이 구성할 수 있다.

III. 결론

기능성 필름 시장은 국가의 신기술 제품이 요구되는 항목으로 중소기업 통합 기술 로드맵의 첨단 융합분야의 한 분야로써 국가의 신성장 동력으로 선정된 바 있어 산업의 수요가 높을 것으로 기대한다. 기능성 유연 필름은 일반적으로 투명한 플라스틱 고분자 기판을 기반으로 전기 전자, 에너지, 자

동차, 포장, 의료 등 다양한 분야에서 폭넓게 활용되고 있다.

우리나라는 현재 반도체 제품군 및 디스플레이 제품군에서 세계 시장을 리드하고 있으며, 전세계 기능성 필름 시장에서 국내시장이 차지하는 비율이 매우 높다. 그러나 기능성 필름 분야에 선도적 기술의 상당 부분을 일본이 보유하고 있다. 수요가 높은 유연한 기능성 필름 제조를 위해 대량으로 쉽고 빠르게 인쇄할 수 있는 장점을 가진 인쇄전자 기술을 적용할 경우 고부가가치를 얻을 수 있는 기대효과와 기능성 필름 시장에 수요를 견인할 수 있을 것으로 전망한다.

참고 문헌

- [1] 이정 외 2인, 디스플레이 필름시장의 새로운 기회, 유진투자증권, 2013.
- [2] 김동수, 인쇄전자용 롤투를 프린팅 공정 및 장비, 인쇄전자 신기술/기술과제 및 응용사례/신산업 세미나, 2010.
- [3] 김정수, 정전기력과 공압을 이용한 하이브리드 스프레이 코팅 기반의 박막 형성 기술, 부산대학교 박사 학위 논문, 2012.
- [4] www.yasui.com/2004/MicroGravure.pdf.
- [5] J.K. Hwang et al, A development and evaluation of micro-gravure coater for printed electronics, Japanese Journal of Applied Physics 53, 05HC12, 2014.
- [6] 최영만 외 2인, 플렉시블 디스플레이용 박막 도포를 위한 초정밀 슬롯다이 코팅 장비, 한국정밀공학회지 제 31권 6호, pp. 491-495, 2014.
- [7] 유세민 외 3인, 유기 태양전지 제작이 가능한 와이어리스 바코더 개발, 한국정밀공학회지 제 30권 6호, pp.584-588, 2013.
- [8] 이택민, 그라비아 오프셋 프린팅 신뢰성에 대한 연구, R2R 복합 인쇄공정 요소기술 시험평가 기반구축 제2회 기술교육 세미나, 2009.
- [9] <http://news.mk.co.kr/newsRead.php?year=2011&no=461571>
- [10] (주)팜스, 열형 롤 임프린팅 기반 다목적 투명전극 필름 생산 시스템 개발, 연구개발특구 육성사업 보고서, 2013.

필자 소개



김정수

- 2003년 : 한국해양대학교 제어계측공학과 공학사
- 2005년 : 부산대학교 계측제어 공학 석사
- 2012년 : 부산대학교 계측제어 공학 박사
- 2004년 ~ 2012년 : 한국기계연구원 인쇄전자연구실 연구원
- 2012년 ~ 현재 : (주) 팜스 연구소장



배성우

- 2001년 : 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학과 공학사
- 2005년 : 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학 공학석사
- 2012년 : 충남대학교 대학원 기계/기계설계/메카트로닉스공학 공학박사
- 2006년 ~ 2012년 : 한국기계연구원 인쇄전자연구실, 나노융합산업협력기구 선임연구원
- 2013년 ~ 현재 : 한밭대학교 산학협력단, 산학협력중점교수