

# 롤투롤 인쇄 기술을 이용한 전자소자 개발

신 기 현 | 건국대학교 기계공학부, 교수 | e-mail : khsjin@konkuk.ac.kr

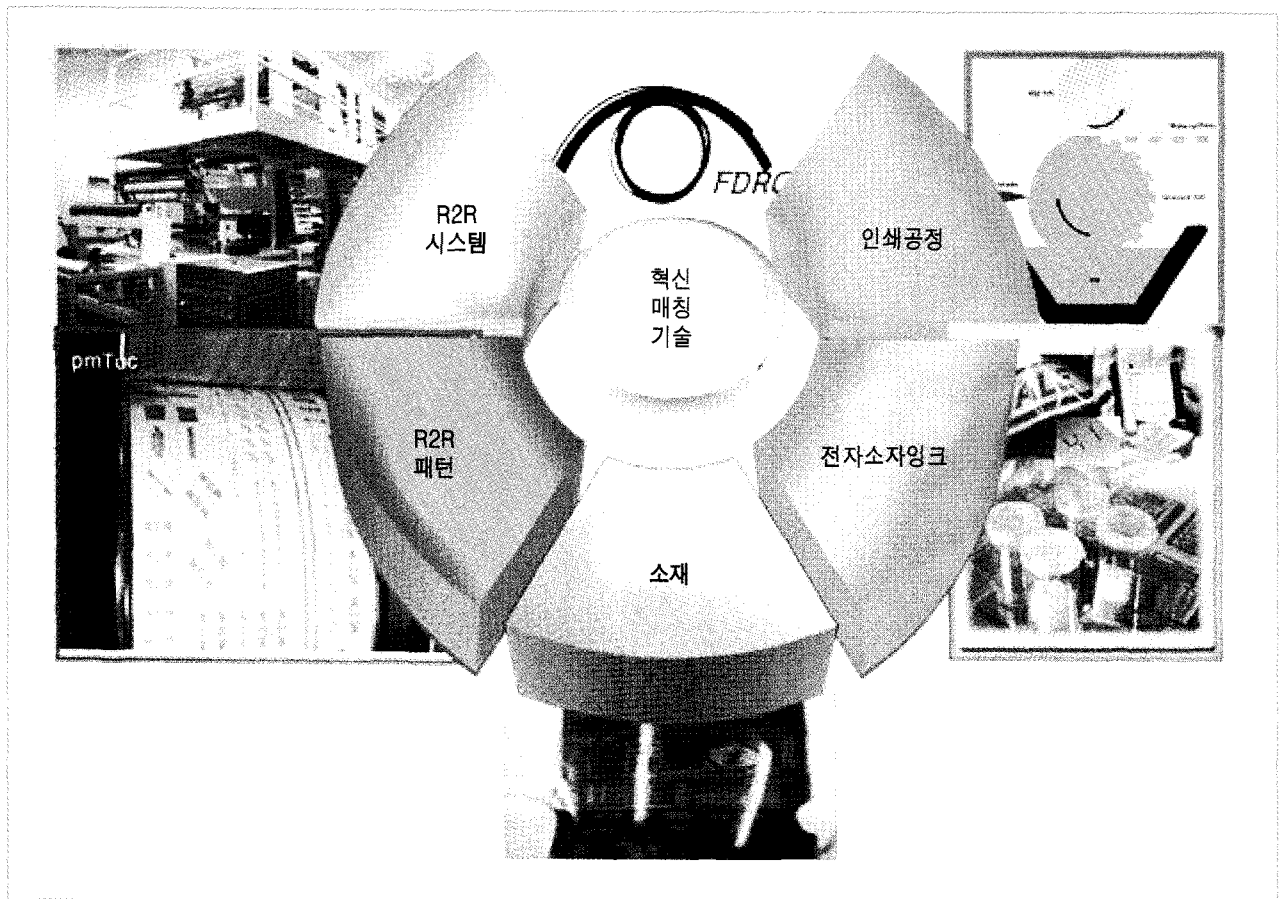
이 창 우 | 건국대학교 롤투롤유연디스플레이연속공정연구센터, 연구교수 | e-mail : leewoo1220@konkuk.ac.kr

강 현 규 | 건국대학교 기계설계학과, 박사과정 | e-mail : hyunkyoo@konkuk.ac.kr

이 글에서는 전자소자 인쇄를 잉크 등의 재료와 언와인더(unwinder), 인피더(infeeder), 프린팅(printing), 아웃피딩(outfeeding), 리와인딩(rewinding) 등의 롤투롤 공정에 대해 살펴본다. 또한 잉크, 소재, 공정 등의 서로 다른 분야의 기술간에 필요한 매칭기술에 대해 알아본다.

**롤** 투롤(R2R; Roll-to-Roll) 인쇄 기술을 이용한 전자소자의 대량 생산 기술은, 최근 인쇄전자, 디스플레이, 태양전지, e-Book 등의 분야에서 크게 주목 받고 있다. 전자소자를 롤투롤 방식으로 제작하기 위해서는 기존의 그래픽 인쇄 기술뿐 아니라 롤투롤 시스템, 메탈 잉크, 소재, 기판, 롤 패턴링(patterning), 인쇄 공정 등

에 대한 기술개발이 요구된다. 이와 같이 개발된 서로 다른 분야의 기술은 상호간에 매칭(matching)이 이루어져야 하며, 서로 다른 분야의 기술간에 필요한 매칭기술은 R2R 인쇄 전자 소자의 기능성 보장을 위한 핵심기술이다.<sup>(1)</sup> 그림 1은 R2R 시스템, 패턴, 소재, 잉크, 인쇄전자 공정간의 매칭의 필요성을 도식적으로 나타내고 있다.



롤투롤 전자소자 인쇄를 위한 매칭기술(FDRC; Flexible Display Roll-to-Roll Research Center)

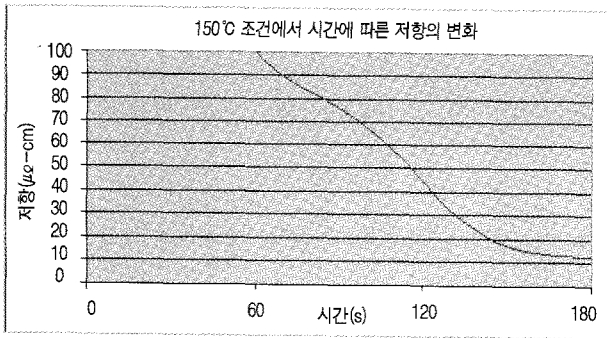


그림 2 Nano silver ink의 경화시간과 저항(Parelec)<sup>(3)</sup>

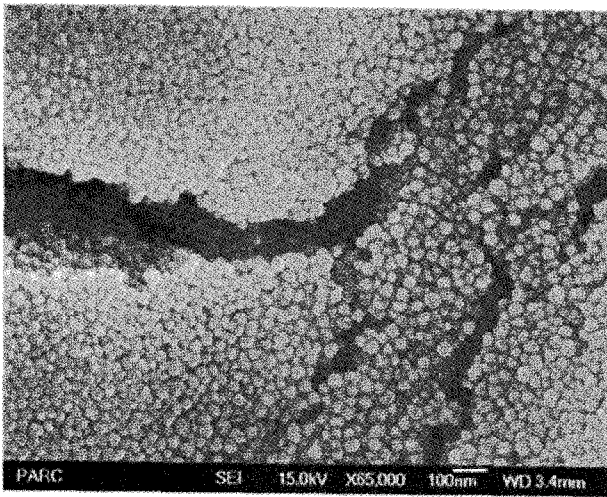


그림 3 120°C, 3시간 경화 후, 나노실버잉크의 이미지<sup>(4)</sup>

## R2R 인쇄전자를 위한 기판 소재

롤투를 인쇄에서는 플렉서블한 소재를 사용하여 롤을 통과시키며 인쇄를 수행하며, 주로 고분자 필름을 사용하는데, PET(Polyethylene Terephthalate), PEN(Polyethylene Naphthalate) 등을 사용하고 있다.<sup>(2)</sup> 필름을 사용할 경우 열적 안정성이 유리보다 낮기 때문에 고온(약 200°C 이상)에서의 작업이 어렵게 된다. 또한 기판 소재로 고분자 필름을 사용할 경우, 배리어(barrier)로서의 기능이 약하게 되어 수분 및 산소의 투과로 인한 소자의 수명 단축이 가장 큰 문제이다. 그럼에도 불구하고 플렉서블 디스플레이, 솔라셀, 사이니지(singage) 등을 제작하기 위해서는 롤투를 공정이 반드시 필요하기 때문에, 수분 및 산소 침투의 약점을 보강한 소재 개발이 활발히 이뤄지고 있다.

PET는 경제적인 장점과 시장 접근성이 좋은 특징으로 인

해 현재 가장 많이 사용되는 기판 재료이다. 국내외의 많은 회사들이 롤투를 공정을 위한 PET를 생산하고 있으며 열적 안정성 등의 기능이 확보되어 있다. 하지만 롤투를 공정 중에 소재에 발생하는 장력과 고온으로 인한 열팽창이 동시에 발생할 경우 소재의 과도한 인장으로 인한 손상이 발생할 수 있다. 그러므로 140°C 이상의 고온 건조 및 경화 조건이 필요한 공정에서는 PET보다 PEN을 선호하고 있으나, PET보다 매우 높은 가격과 시장 접근성이 좋지 않은 단점이 있다.

## R2R 인쇄전자를 위한 잉크

인쇄전자를 위한 전도성 잉크는 대표적으로 유기소재를 사용한 잉크와 나노 크기의 금속 입자를 포함하는 잉크가 존재한다. 용매에 희석되어 있는 전도성 입자들은 인쇄 공정 후에 건조 및 경화 공정을 거치면서 용매는 증발하고, 남아있는 입자들이 결합하여 전도성 패턴을 형성하게 된다. 이때에 잉크의 종류와 특성, 인쇄 두께 및 요구되는 전도도 특성에 따라서 건조 온도, 경화온도 및 시간이 결정된다. 경화시간이 증가할수록 전도성 입자들간의 결합이 커지므로 전도도가 높아지게 된다. 경화온도가 증가할수록 용매 증발 시간이 감소하게 되므로 경화시간을 단축할 수 있으나, 너무 높은 경화온도는 인쇄패턴 내부에 존재하는 용매가 증발하기 이전에 인쇄 패턴 표면의 용매가 모두 증발하고 내부 입자들간의 결합이 시작될 수 있다. 이로 인해 인쇄패턴 내부에 공극이 발생하기 때문에 높은 증발 속도에서는 그림 3과 같은 다공성(porous) 표면이 형성되어 높은 저항이 발생할 수 있다.

## 인쇄전자를 위한 R2R 시스템 공정

인쇄전자를 위한 롤투를 공정은 일반적으로 언와인더(unwinder), 인피더(feeder), 프린팅(printing), 아웃피딩(outfeeding), 리와인딩(rewinding) 순으로 구성된다.

언와인더 구간은 롤 형태로 만들어진 소재를 일정한 장력을 유지하면서 풀어주는 역할을 한다. 이때, 소재의 풀림에 따라 반경이 감소하므로 운전속도는 점차 증가하게

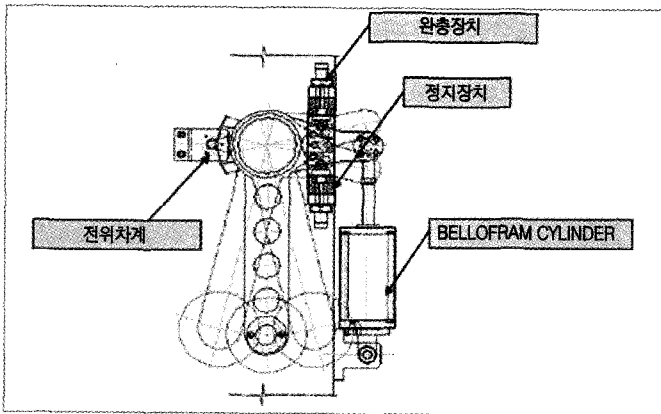


그림 4 덴서 시스템

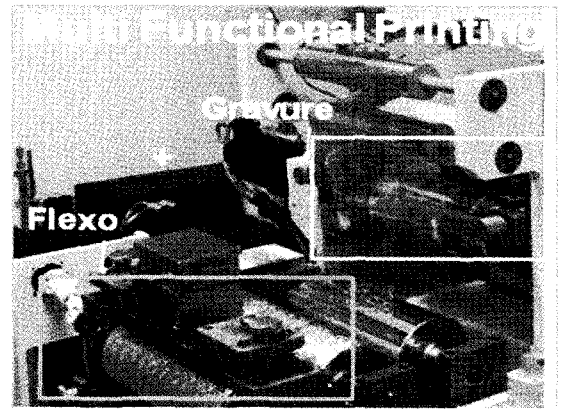


그림 6 다기능 인쇄

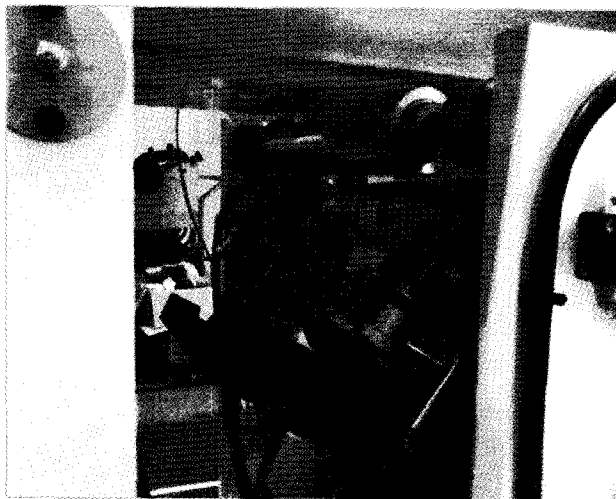


그림 5 로드셀 시스템(FDRC)

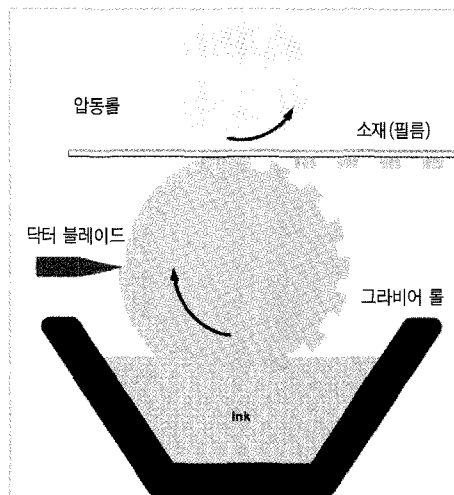


그림 7 그래비어 인쇄 개념도(FDRC)

(polymer)를 포함한 잉크를 기판 소재에 전이시키게 된다. 이때, 인쇄공정은 그래비어, 플렉소, 오프셋, 그래비어-오프셋 등 다양한 방법을 사용하게 되는데, 이는 인쇄하는 소재의 두께,

되며, 롤의 관성은 감소하게 된다. 이러한 변화를 극복하며 운전장력을 유지하기 위해서는 로드셀(loadcell) 혹은 덴서(dancer) 시스템을 장착하여 운전장력을 목표값으로 제어하게 된다. 덴서란 그림 4와 같이 인쇄를 위한 소재가 통과하게 되는 아이들롤의 움직임을 통하여 소재에 발생하는 장력외란을 제어한다.<sup>6)</sup> 이때, 일반적으로 공압실린더를 통하여 구동 장력을 결정하며, 외란발생 시에 덴서를 외란을 줄이는 방향으로 이동하게 된다. 또한 인피더 구간은 언와인더에서 완벽하게 제어하지 못한 장력외란을 정밀하게 제어하는 역할을 하게 되며, 언와인더 구간과 동일하게 로드셀(그림 5) 혹은 덴서 시스템을 사용한다.

프린팅 구간에서는 전자소자 인쇄를 위한 나노 크기의 전도성 금속 입자를 포함한 잉크 혹은 전도성 폴리머

표면 거칠기 정도, 사용하는 잉크의 특성, 인쇄속도 등에 따라 결정된다. 아래의 그림 6은 FDRC의 그래비어 및 플렉소 인쇄를 포함하는 프린팅 구간을 나타낸다.<sup>6)</sup>

인쇄를 마친 소재는 건조구간을 지나게 된다. 전도성 잉크는 각 인쇄 방법에 따른 요구 점도 조건을 맞추기 위하여 여러 가지 용매와 첨가제를 전도성 입자와 함께 섞게 된다. 이렇게 만들어진 잉크는 건조기 내부에서 용매 및 첨가제가 먼저 증발하게 된다. 그 후 전도성 입자는 경화 공정을 거치게 되는데, 경화 온도를 녹는점 이상으로 설정하여 입자간의 결합이 이루어지게 하며, 이를 통해 전기 전도도가 향상된다. 이러한 경화공정의 건조방법은 열풍, 자외선(UV), 적외선(IR) 등을 사용하고 있으며, 사용하는 잉크 및 용매의 특성에 따라 적절한 건조 방법을 결정하게 된다.

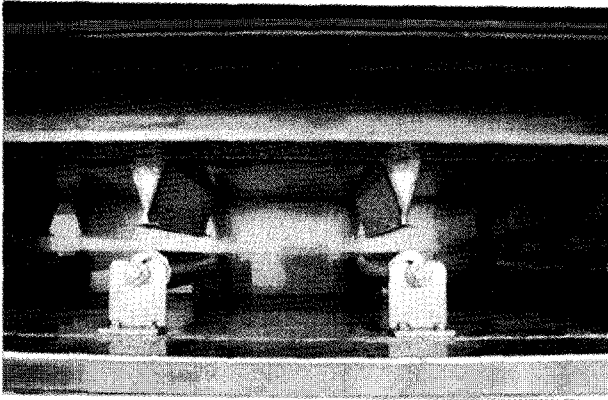


그림 9 건조기 내부 노즐(FDRC)

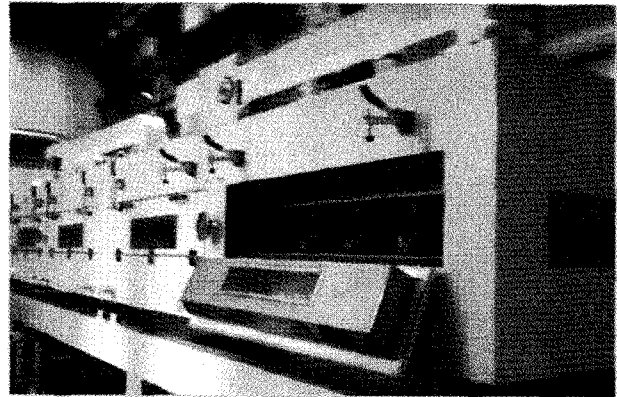


그림 8 건조기 외형(FDRC)

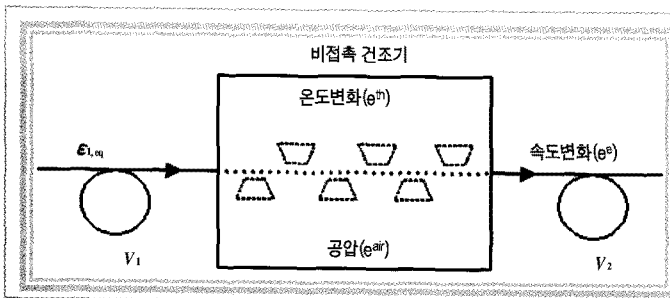


그림 10 비접촉 이송을 위한 건조기 및 에어 노즐(FDRC)

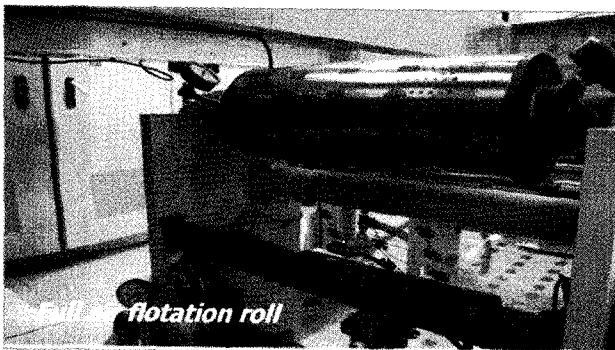
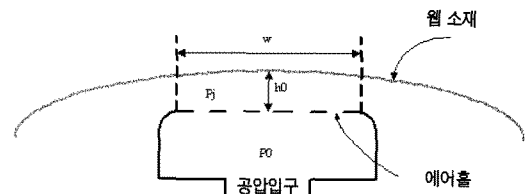


그림 11 공기부양롤(FDRC; Air flotation roll)

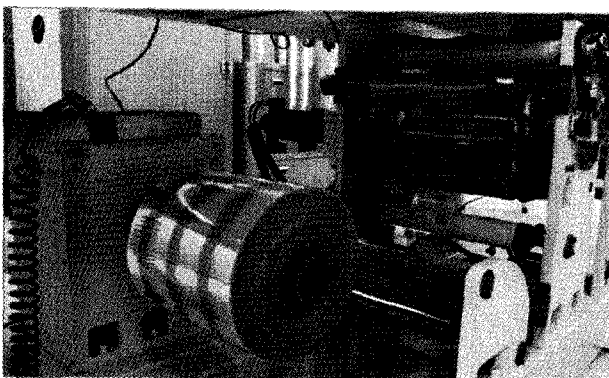


그림 12 감김롤(rewinder)

그림 8, 9는 열풍을 사용하는 건조기를 나타낸다.

또한 인쇄된 패턴이 직접 롤에 접촉하게 될 경우 패턴 표면에 스크래치 혹은 크랙이 발생하여, 생산된 전자소자 결함의 원인이 될 수 있으므로 이를 방지하기 위한 방법으로 소재의 비접촉 이송 및 장력제어 기법을 사용한다. 다음의 그림 10에서는 건조기 내부에서 소재의 상하에 에어 노즐을 설치하여 소재의 비접촉 이송을 구현하고 있다.<sup>(1)</sup>

또한 건조기 내부뿐 아니라 외부에서도 소재 이송에 따른 인쇄패턴 보호를 위한 전면 공기부양 롤(full flotation

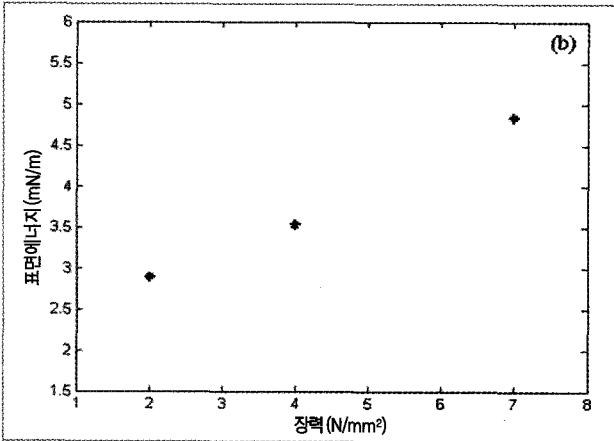


그림 13 소재의 표면에너지와 운전장력 간의 관계

roll) 혹은 부분 공기부양 롤(partial flotation roll)을 설치하여 소재의 비접촉 이송을 구현할 수 있다. (그림 11 참조)

인쇄 및 건조 공정을 마친 소재는 그림 12와 같은 리와 인더 공정을 통해 롤 형태로 되감게 된다. 이때 감기는 소재의 장력은 일정한 값으로 작아지게 되며, 이는 롤러 내부의 소재를 더 단단하게 감게 하고, 외부로 갈수록 느슨하게 감게 하여 감김롤의 형태 변형 방지 및 내부 잔류 응력의 영향을 최소화 하기 위함이다.<sup>(7)</sup>

### R2R 인쇄전자를 위한 매칭 기술

앞에서 서술된 바와 같이, 롤투롤 인쇄를 통한 전자소자 생산을 위해서는 사용되는 전도성 잉크, 소재, 그리고 롤투롤 시스템을 구성하는 각 요소들의 최적화가 매우 중요하다. 또한, 잉크(화학적 특성), 소재(기계적 특성), 그리고 롤투롤 시스템(동적 특성) 간의 매칭을 통한 최종 제품의 최적화가 요구된다.

유연한 전자소자 생산을 위하여 사용되는 열경화성 필름소재들은 인가되는 장력에 따라서 서로 다른 변형률을 지니게 된다. 이러한 소재의 신장 또는 수축은 소재 표면 상태를 변화시키게 되고, 인쇄공정에서의 잉크 전달량에 영향을 미치는 표면에너지 값을 변화시키게 된다(그림 13 참조). 롤투롤 인쇄전자 시스템은 소재를 연속적으로 이송시키기 때문에, 이송되는 소재는 늘 일정한 장력하에 존재하게 된다. 보고된 결과에 따르면, 운전장력이 증가할수록 소재의 표면에너지 값이 증가하게 됨을 알 수 있다. 그 결

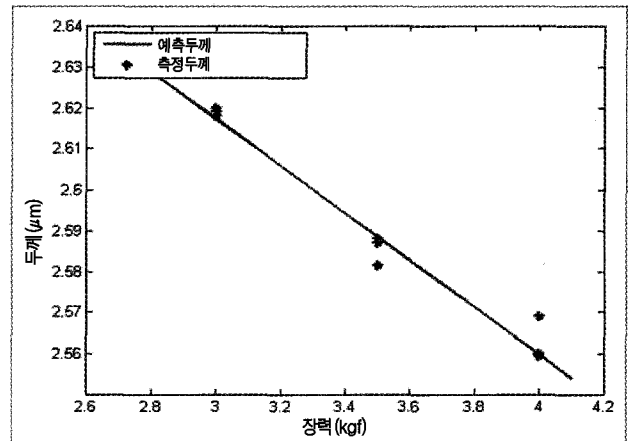


그림 14 운전장력과 인쇄된 전자소자두께 간의 관계

과, 동일한 전도성 잉크, 소재, 인쇄방식이 적용되더라도 설정된 롤투롤 인쇄전자 시스템의 운전장력에 따라서 인쇄된 패턴의 두께가 변화하게 되는 것이다(그림 14 참조). 이러한 인쇄된 패턴의 형상변화는 결국 인쇄된 전자소자의 저항과 같은 품질에 영향을 주게 된다. 그러므로 각 주요 요소들에 대한 최적화뿐만 아니라, 주요 요소들간의 매칭을 고려한 최종제품의 최적화가 필수적이다.<sup>(8)</sup>

### 참고문헌

- (1) K.H. Shin, 1st international conference on R2R Printed Electronics, 2008.
- (2) [http://www.sk.co.kr/mag/mag0207/contents/03\\_plaza/03text\\_04.html](http://www.sk.co.kr/mag/mag0207/contents/03_plaza/03text_04.html).
- (3) <http://www.parelec.com/>.
- (4) J. R. Greer, R. A. Street, J. of app. phy. 2007, 101, 103529.
- (5) H.K.Kang, K.H.Shin, J. of KSPE, 2009, vol. 26,no. 6, 81-89.
- (6) H.K. Kang, J.M.Lee, C.W.Lee, K.H.Shin, LOPE-C, 2009.
- (7) C.W.Lee, K.H.Shin, 42nd IAS Annual Meeting IEEE, 2007, 398-403.
- (8) C.W Lee, H.J.Kim, H. A. Nguyen, H.K. Kang, K.H. Shin, LOPE-C, 2009.