

전도성 금속잉크의 건조

이 재 호 | 건국대학교, 교수 | e-mail : jaihyole@konkuk.ac.kr
 이 관 수 | 한양대학교, 교수 | e-mail : ksleehy@hanyang.ac.kr
 이 세 현 | 한양대학교, 교수 | e-mail : srhee@hanyang.ac.kr
 문 승 재 | 한양대학교, 교수 | e-mail : smoon@hanyang.ac.kr

전도성 금속잉크 건조의 목적은 용제인 물이나 솔벤트 부분을 증발시켜 다음 작업에 지장이 없도록 하는 단순건조와 더불어 전도성을 증가시키기 위한 큐어링 작업이 포함되는 전자 인쇄회로 작업의 한 공정이다.

일 반 잉크를 이용한 인쇄 공정에서 건조공정은 주요 공정 중 하나로 전체 인쇄기기의 크기를 좌우하며, 인쇄 속도도 이 건조속도에 의존하게 된다. 또한 인쇄기계가 사용하는 총에너지의 70% 정도를 건조공정이 차지하게 된다. 전도성 잉크를 사용하는 전자인쇄(e-printing) 공정에서도 건조공정은 인쇄 속도와 크기를 좌우하게 되며, 총 에너지 소비량의 70% 이상을 사용한다. 특히, 이 건조공정을 통해 모재(substrate)에 인쇄된 전도성 잉크가 전자회로의 역할을 충분히 할 만한 전도성을 갖게 되는 중요한 공정이다.

일반 잉크와 전도성 금속잉크 건조의 다른 점

일반인쇄와 전도성 금속잉크의 건조공정은 잉크 성분 중 용제인 물이나 솔벤트 부분을 증발시켜 인쇄된 잉크를 고형화해서 다음 작업을 수행할 수 있도록 하는 공정이다. 전자인쇄에서는 전도성을 증가시키기 위한 큐어링(curing) 작업이 추가되어야 하므로 공정설계가 복잡하게 된다. 특히 열풍건조에서 공정시간이 10초 이내에 이루어지는 반면 큐어링은 120~180초 정도 사용되어 연속 공정으로 작업하는 경우 건조보다는 큐어링 공정의 고속화 연구가 훨씬 중요하게 된다. 여기서는 큐어링을 포함하여 건조공정이라 칭한다.

큐어링 공정

큐어링이란, 일정 고온에서 전도성 물질을 제외한 유기 용매가 타 없어지고, 입자들을 돌려 쓴 분산제가 사라진 뒤, 금속입자들 사이에 목이 생겨(necking) 전도성 물질이 되는 것을 말한다. 일반적으로 금속은 수백~수천℃에서 녹는점을 가진다. 하지만 금속의 입자가 나노 사이즈로 작아질수록 소성온도가 낮아져, 200℃ 미만에서도 큐어링이

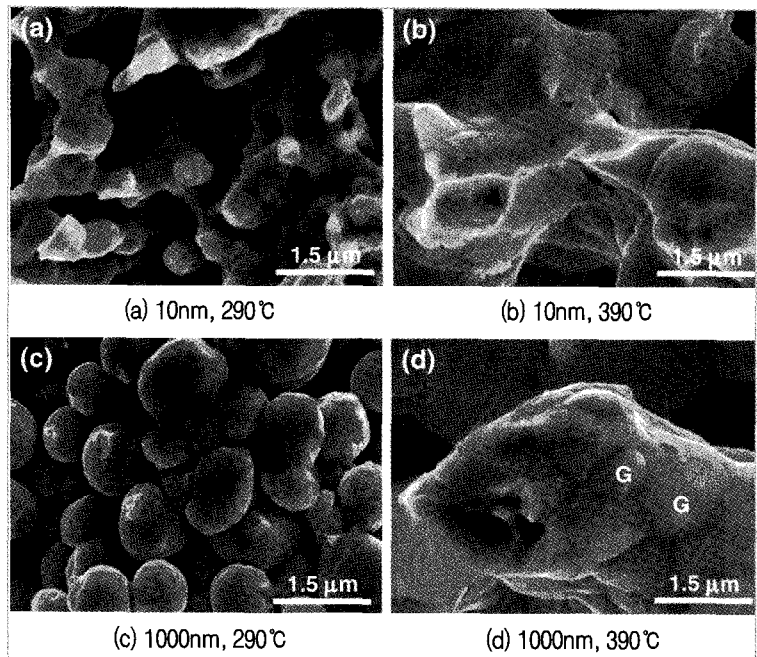


그림 1 입자크기와 큐어링⁽¹⁾

가능해진다. 그림 1을 보면, 입자의 크기가 1,000nm보다 10nm에서 큐어링이 더 잘 일어난다. 이는 입자의 크기가 작으면 작을수록 큐어링이 잘 되어 양호한 전기전도성을 갖게 됨을 의미한다.

이처럼 낮은 온도에서도 전도성을 갖게 됨에 따라 PET와 같이 녹는점이 낮고 저가인 소재가 사용 가능함을 알 수 있다. 또한 전자인쇄가 기존의 에칭공법에서 탈피하여, 고속의 저가 생산이 가능한 프린팅 공정을 다양한 응용분야에 제시할 수 있음을 시사한다.

현재, Parelec, Inktech, Paru, Tokusen, Cabot 등 다양한 국내의 잉크회사들이 공정에 맞는 전도성 잉크를 출시하고 있다. 이들 잉크는 대체로 200℃ 내외에서 큐어링이 가능하며, 온도에 따라 수십 초에서 수 분의 건조시간을 갖는다. Parelec 사의 잉크인 경우, 열풍 건조로 150℃ 이상 200초 정도에서 안정적으로 큐어링이 된다.(그림 2)

큐어링의 가장 큰 목적은 잉크 내에 있는 금속 입자들이 이어져 전기 전도성을 갖게 하려는 데 있다. 전도성저항을 나타내는 데는, 전기 전도율의 역수로 Ω-cm가 사용된다. 그림 3과 같이 큐어링 전의 단순 건조 상태의 경우 입자들이 분산제로 둘러 쌓여있어 모양을 유지한다. 그러나 시간이 지남에 따라, 가열된 온도에 분산제가 사라지고, 입자들 사이에 목이 이어져 소성이 시작되며, 최종적으로는 전체적으로 이어짐을 알 수 있다. 이 때 잉크 중의 금속입자로는 대체로 구하기가 쉽고, 비저항이 낮은 은(Ag)이 사용되는데, 벌크(bulk)인 경우 $1.62 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$ 이고, 전도성 잉크를 경화시킨 경우는 그보다 큰 값을 갖는다.(Parmod® VLT

Silver gravure ink 경우 $12 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$ - Parelec® 제공)

전도성잉크의 건조방식

아직까지 연속공정작업에서 큐어링을 포함한 건조공정을 Lab 형태를 벗어나서 시행하는 경우는 매우 드물며, 실제 작업의 경우에는 오븐(oven)에 넣어 큐어링을 하는 것

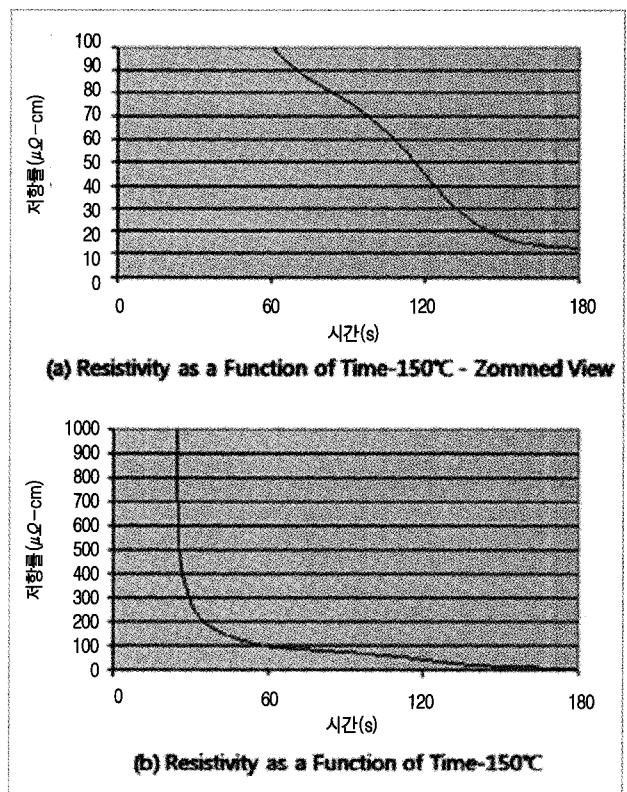


그림 2 큐어링 시간에 따른 저항변화 - Parelec 제공

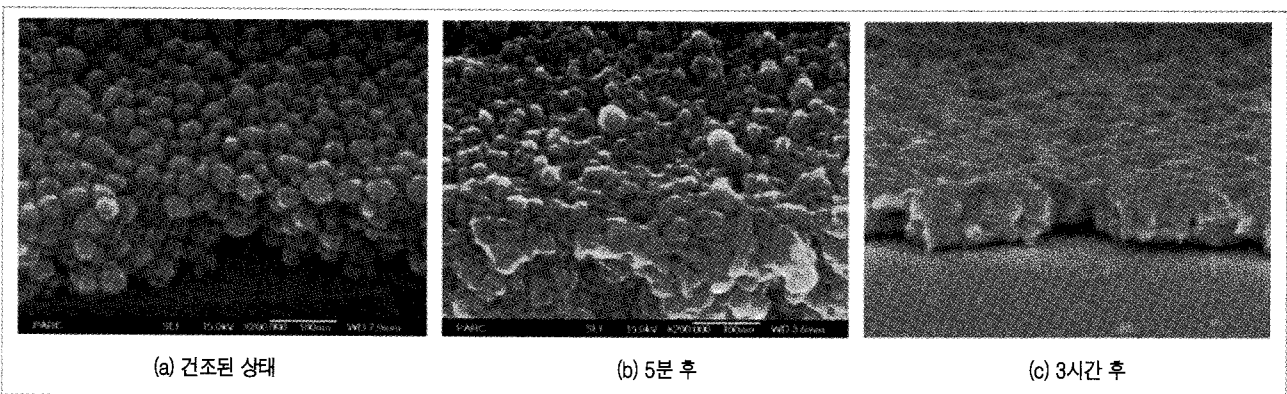


그림 3 일정온도에서의 큐어링 과정⁽²⁾

이 일반적이다. RFID 등이 대량생산용으로까지 시장이 활성화되어 있지 않아 유럽의 전자잉크를 연구하는 대학이나 연구소 등에서도 건조장치에 대해서는 인쇄건조기 제조업체에 의존하고 있는 실정이다. 대부분 일괄 작업으로 오븐에 넣어 오프라인 형태로 작업이 진행되고 있다.

그러나 롤투롤 방식을 사용하는 전자인쇄에서는 인쇄 직후 바로 건조 구간으로 모재가 들어가게 된다. 건조과정의 목표는 인쇄된 모재가 빠른 시간 내에 양호한 전도성을 갖도록 하는 것이다. 이 때, 중요한 변수는 건조 온도와 건조 시간 및 건조 속도 이다. 온도를 높이면 건조 속도가 빨라지지만, PET와 같은 대량생산용 모재를 사용하는 경우, 모재가 버티지 못하게 된다. 또한, 너무 낮은 온도에서는 건

조 시간이 늘어나게 되므로, 공정 구간이 길어져 생산성이 떨어지는 문제가 있다. 따라서 적절한 온도에 적절한 이송 속도를 통하여 양호한 전도성을 얻는 것이 최선이라 하겠다. 잉크사에서 제시한 데이터들은 대체로 오븐에서 얻은 데이터이기에 롤투롤 공정에 맞는 건조조건이 필요하다.

일반적으로 가장 많이 사용하는 형태는 열풍방식(hot-air)으로 건조의 일부처럼 큐어링을 진행하고 있으나 큐어링 속도를 증가하는 데는 실험상으로 한계가 있어 보인다. 적외선(IR)가열 방식을 채택하면 집중적으로 열의 투입이 가능하나 모재에 대한 변형 등을 고려할 때 신중하게 접근할 필요가 있다. 현재로는 '열풍+IR'의 혼합방식이 제일 가능성이 높을 것으로 보이며, 각 잉크의 특성에 따라 신

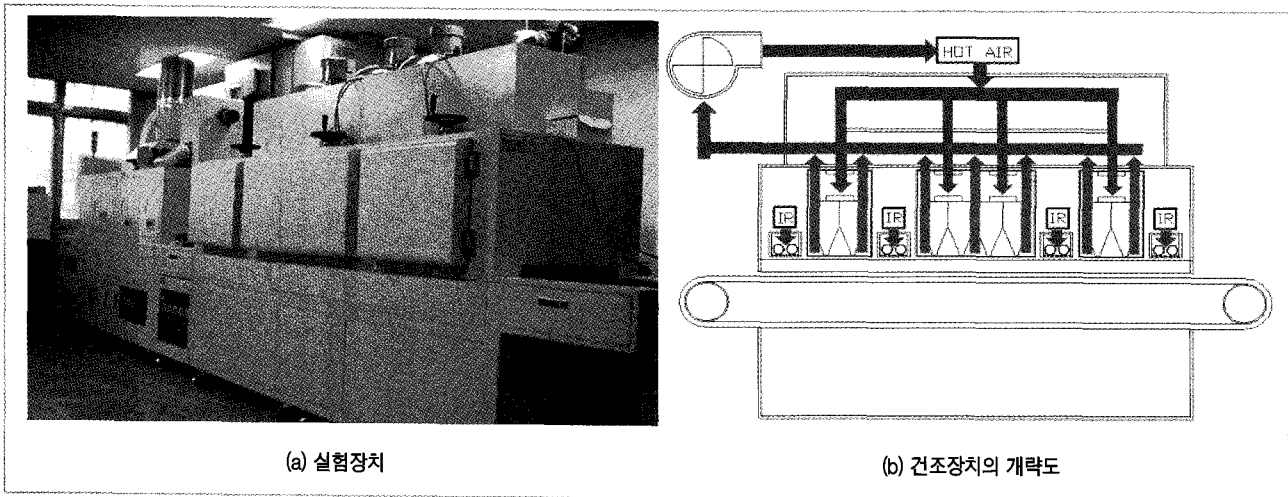


그림 4 열풍 및 IR을 부착한 실험실용 건조장치

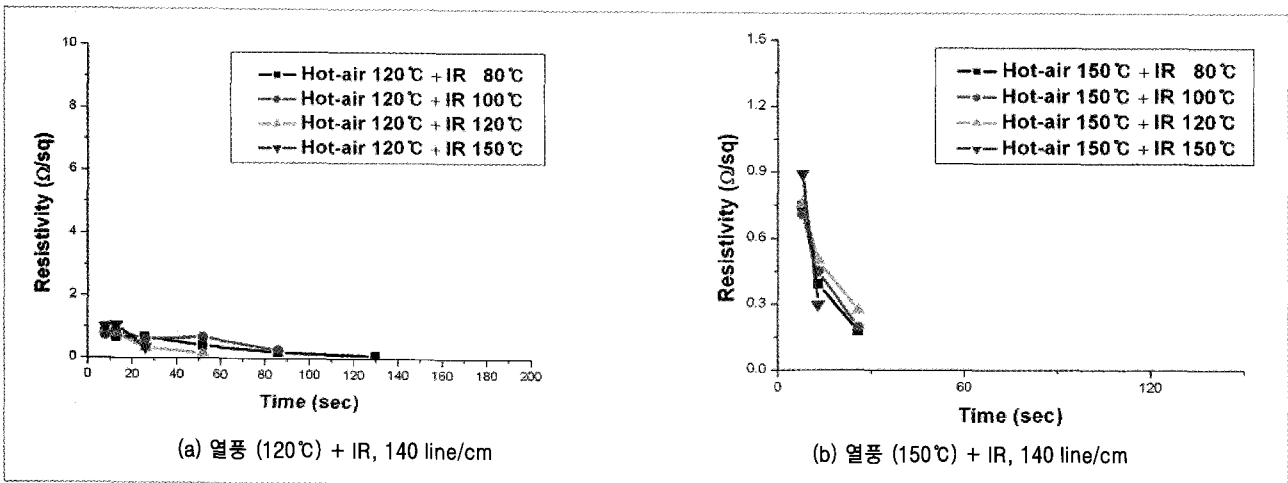


그림 5 '열풍+IR' 장치의 시간에 따른 전도성능 선도

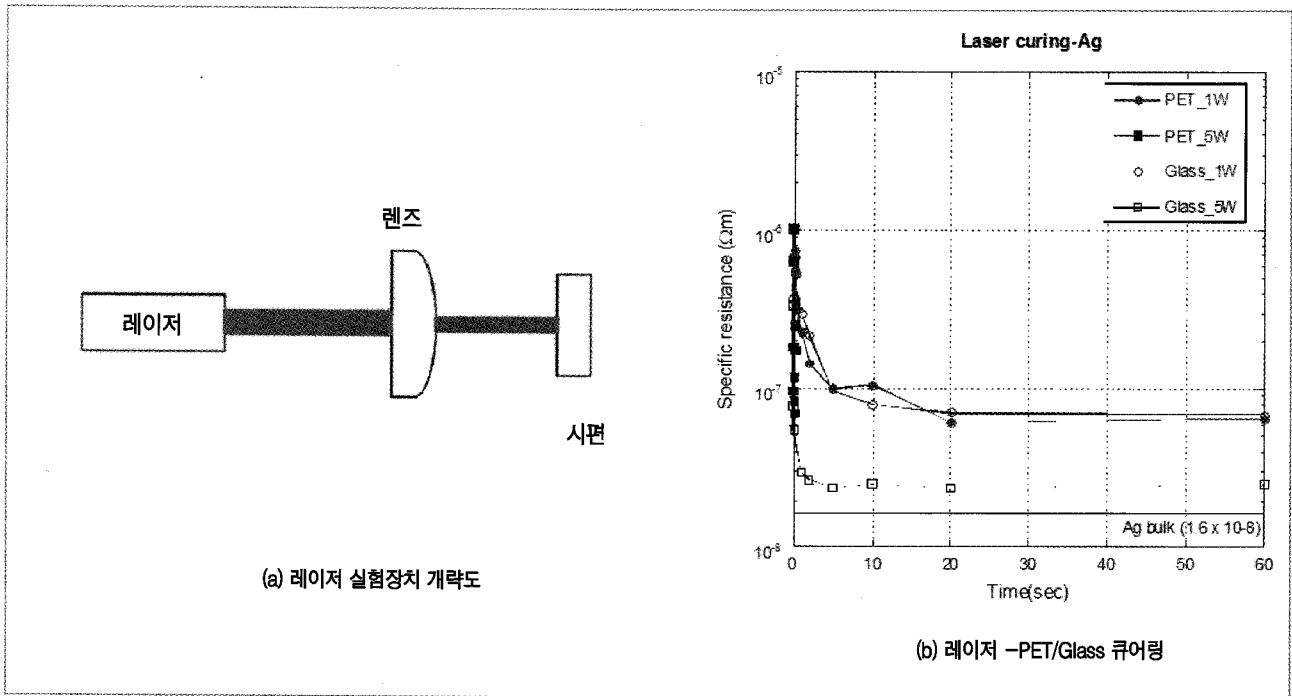


그림 6 레이저 건조장치

중한 접근이 필요하다고 하겠다. 그림 4는 필자들이 실험실에서 만든 '열풍+IR' 건조장치를 보여주고 있다. 그림 5는 이에 대한 실험결과를 보여주고 있으며, 전통적인 열풍방식보다 훨씬 빠른 큐어링 속도를 보여주고 있으며, 잉크 제공업체가 오븐에서 실험하여 제공한 속도보다 빠른 것을 보여주고 있다.

전자 레이저를 이용한 큐어링 실험도 Lab 차원으로 진행되었으며, 이에 대한 실험장치의 개략도와 실험결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 5W의 출력으로 5초간의 큐어링 후 전도성이 $2.38 \times 10^{-8} \Omega m$ 로 매우 짧은 큐어링 시간을 보이고 있다. 그러나 이를 실용화하는 데는 아직 많은 어려움이 있으며, 추후 연구를 계속하여야 할 분야이다.

맺음말

전자인쇄에서의 건조장치 설계는 주요 공정 중의 하나 이면서 아직 연구가 덜 되고 있는 분야이다. 특히 롤투롤 공정으로 온라인 상에서 고속도로 건조와 큐어링을 동시에 하기 위해서는 아직까지 해결하여야 할 장애가 많이 남

아있다. 전자인쇄가 가격 경쟁력을 갖기 위해서는 인쇄 속도가 일반 그래비아 인쇄 속도인 100~200m/min 정도는 되어야 하는데 이에 도달하기 위해서는 건조속도의 증가가 필수적이며 이에 침단 건조방법 등의 도입이 필요할 것이다. 이에 적외선, 자외선, 레이저 등 다양한 방법이 모색되고 있으며, 곧 인쇄 속도에 발맞추어 신속한 건조와 큐어링이 가능해지리라 기대된다.

참고문헌

- (1) Y.-J. An, W.-S. Chung, J. Chang, H. C. Lee and Y.-R. Cho, 2008, "Effect of nano-silver particles in bonding material on field emission properties for carbon nanotube cathodes," Materials Letters, Vol.62, No.27, pp. 4277-4279.
- (2) J. R. Greer and R. A. Street, 2007, "Thermal cure effects on electrical performance of nanoparticle silver inks," Acta Materialia, Vol.55, No.18, pp. 6345-6349.