

적외선 건조 및 열풍 건조에 대한 전도성 잉크의 건조 특성에 관한 연구

정길용*, 이재효†, 홍승찬
건국대학교 기계공학과

A study on the drying characteristics of conductive ink
by infrared drying system and the hot-air drying system

Gil-Yong Jung*, Jai-Hyo Lee†, Seung-Chan Hong

Department of Mechanical Engineering, Konkuk University, Hwayang-dong, Seoul 143-70, Korea

ABSTRACT: RFID method is a non-contact automatic identification technology, which attaches microchips and antennas to an object in a tag form, to send and process information sent to the network using wireless frequency. Drying and curing process is extremely important which minimizes the resistivity of RFID antennas. This research is about the drying characteristic of conductivity ink, and analyzes and compares the hot-air drying process and infrared drying process. Also, the research was done for the improvement in drying performance by using combined process of hot-air and infrared mechanism. The experiment result shows that the hot-air or infrared drying system used alone cannot meet the required performance in drying printing method using conductivity ink. The combined drying system of hot-air and infrared ray showed resistance low enough in short drying and curing time, and this mechanism makes drying and curing process for mass and continuous production possible on-line.

Key words: Conductive ink, infrared, Hot-air, curing, resistivity

———— 기 호 설 명 ————

D_{AB} : 종(species) 확산계수
 $E_b(T)$: 흑체에서의 복사에너지 총량 [W·Cm]
 $E_{b\lambda}(\lambda, T)$: 파장 흑체 방사도 [W/m²·μm]
 K : 절대온도 [K]
 Re : Reynolds 수, $\frac{uL}{\nu}$

S_h : Sherwood 수, $\frac{vL}{D_{AB}}$
 Sc : Schmidt 수, $\frac{\mu}{\rho D_{AB}} = \frac{\nu}{D_{AB}}$

그 리 스 문 자

ν : 동점성 계수
 μ : 점성 계수
 ρ : 유체 밀도
 λ : 파장

† Corresponding author
E-mail address: estjung@konkuk.ac.kr

1. 서론

RFID 방식은 비접촉형 자동식별 기술로써 사물에 초소형 칩(chip)과 안테나를 태그 형태로 부착하여, 정보를 무선 주파수로 네트워크에 전송하여 처리하는 기술이다. 최근 RFID 방식의 전자회로 패턴을 인쇄하는 기술이 정보화 시대를 실현시키는 핵심 기술로 중요성이 증가하고 있다. 핵심 소재인 전도성 잉크는 대부분 실버 나노 잉크가 사용되고 있다. 전도성은 일반적으로 비저항으로 표시되는데 은의 경우 $1.62 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$ 의 비저항을 갖는다.

이러한 전자회로 패턴을 값싸게 대량생산하기 위해서 연구되는 것은 안테나의 저항을 최소화 하는 건조 및 curing 공정이 매우 중요하다. 현재 대부분의 RFID Tag용 건조장치와 건조 및 curing 시간이 5분~30분 정도로 길기 때문에 다른 공정에서 이루어지거나 같은 공정에서는 매우 저속으로 진행되고 있다. 대량생산과 연속적인 생산을 위해서는 on-line 상에서 건조 및 curing 과정이 일어나야 한다. 하지만 현재 사용되고 있는 전통적인 hot-air를 이용한 열풍 건조 방식만으로는 전도성 잉크를 사용하는 인쇄 방식에서 건조 성능을 만족시키지 못하고 있다.

열풍 건조 방식의 실험에 사용된 충돌 제트노즐(Impinging jets nozzle)에 대한 기존의 논문⁽¹⁻⁹⁾을 검토해 보면 지금까지 대부분의 연구가 paper 건조의 열전달계수 향상에 집중되어 있었다. 그리고 RFID 방식의 전자회로 패턴과 같은 전도성 잉크의 건조 특성에 관한 연구 자료가 거의 없었다.

적외선 건조방식의 경우 빛의 복사에너지를 이용한 복사열전달로 인해 열 손실 없이 85% 이상의 에너지를 모체에 전달할 수 있다. 건조 및 curing에 사용되는 근적외선(Near Infrared Radiation)의 파장 영역은 $0.8 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 이다. 근 적외선은 다른 영역의 적외선보다 파장이 짧기 때문에 열 침투력이 높아 건조효과를 극대화할 수 있는 건조방식이다. 또한 30분 정도의 예열시간을 필요로 하는 열풍건조방식과 달리 적외선의 예열 시간은 1분 이내이며 모체를 가열하여 건조되는 형식인 열풍건조방식이 아닌 모체에 직접 열을 침투하여 건조하는 적외선은 예열에 필요한 에너지 소비와 건조 속도 면에서 장점을 보인다. 특히 적외선의 경우 열풍 건조방식보다 낮은 온도에서 건조 작업을 할 수 있으므로 에너지

소비 측면에서 경제적이며 장치의 크기를 줄이고 소음을 적게 하며 조작성이 간편하여 에너지 효율을 높일 수 있다.⁽¹⁰⁾

적외선 건조방식에 관한 기존의 논문⁽¹¹⁻¹⁴⁾을 검토해보면 지금까지 적외선 건조성능 향상을 위한 다양한 연구가 이루어졌으나 대부분의 연구가 농산물 건조에 관한 연구이다. 수분 건조와 같은 전통적인 건조와 다른 특성을 보이는 전도성 금속 잉크의 건조 특성에 관한 연구 자료는 거의 없었다.

현재 일반적으로 사용되고 있는 oven형 건조 및 curing 장치를 conveyer형으로 바꾸기 위해서는 열풍 건조 장치를 비롯하여 적외선 건조 장치 등 다양한 건조 장치들의 전도성 잉크 건조 특성에 관한 연구가 필요하며 이와 함께 여러 건조 장치들을 병용 하였을 때의 건조 특성에 관한 연구 또한 진행하여 전도성 잉크의 건조 성능을 만족시키는 최적의 건조 조건을 찾는 연구가 필요하다.

본 연구는 RFID 인쇄용 on-line 건조장치 제작 및 성능향상을 위해 전도성 잉크의 건조특성에 관한 연구로써 열풍 건조 방식과 적외선 건조방식을 비교 분석하고 열풍과 적외선을 병용한 건조 방식을 통하여 하나의 라인 안에서 건조 및 curing 시간을 줄여 대량생산과 연속적인 생산을 할 수 있는 건조 성능향상을 위해 연구하였다.

실험에 관한 변수들은 가장 기본인 건조 방식의 변화에 따른 저항의 차이와 건조 온도, 건조 시간, 패턴의 line/cm 차이로 변수를 설정하여 실험하였다. 실험 매체는 RFID 안테나와 같은 전자회로 패턴 인쇄에 사용되는 전도성 잉크를 이용하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 건조 실험 요소

열풍 건조 방식은 에너지 전달 방식이 대류열 전달 방식으로 Pohlhausen equation에 의하면

$$Sh = 0.664Re^{\frac{1}{2}}Sc^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

$$Re = \frac{uL}{\nu}, Sc = \frac{\nu}{D_{AB}} \quad (2)$$

물질전달은 속도 u 와 거리 L 의 함수로 볼 수 있다. 또한 물질전달이 열전달의 메카니즘과 유사하므로 물질전달의 driving force인 Δc (농도 차)는 열전달의 ΔT (온도차)에 해당한다. 따라서 물질전달에 의한 건조량은 $F(Q, \Delta T)$ 의 함수라고 가정할 수 있다. (Q =풍량, ΔT =온도 차) 적외선 건조방식은 에너지 전달방식이 복사열 전달방식으로 Planck equation에 의하면 흑체가 절대온도 $T(K)$, 파장 λ 에서 단위시간당, 단위면적당 방사하는 복사인 파장 흑체 방사도는 다음과 같다.

$$E_{\lambda\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} \quad (3)$$

상수 $C_1 = 2\pi hc_0^2 = 3.742 \times 10^8 W \cdot \mu m^4 / m^2$, $C_2 = hc_0/k = 1.439 \times 10^4 \mu m \cdot K$ 이다.

최대 $E_{\lambda\lambda}$ 를 나타내는 파장 λ_{max} 와 온도 T 의 관계는 Wien의 전이법칙으로 알려져 있으며 다음과 같다.

$$\lambda_{max} = C/T \quad (4)$$

위 식에서 상수 $C = 2898 \mu m \cdot K$ 이다. Stefan-Boltzman equation에 의하면

$$E_b(T) = \sigma T^4 \quad (5)$$

이상적인 흑체에서 전체 복사에너지는 절대온도의 4승에 비례한다. 위 식에서 상수인 $\sigma = 5.67 \times 10^{-13} W \cdot Cm \cdot K^{-4}$ 이다.

Q , ΔT 을 변경하면서 다음과 같은 열풍 실험 장치를 이용하여 실험 하였으며 ΔT 을 변경하면서 다음과 같은 적외선 실험 장치를 이용하여 실험 하였다.

2.2 실험 장치

2.2.1 실험 방법

실험은 프린팅 장비를 이용하여 전도성 잉크를 PET 필름에 인쇄하고 이 필름을 컨베이어형 열풍 및 적외선 병용 건조 장치에서 열풍 건조 장치와 적외선 건조 장치를 단독으로 작동시킬 때와 같이 병용해서 작동시킬 때에 건조 및 curing 온도 변화는 열풍 건조 장치에서는 120°C, 135°C, 150°C로 하였고 적외선 건조 장치에서는 80°C, 100°C, 120°C, 150°C로 하였다. 열풍 및 적외선 병용 건조 장치에서는 기본 열풍 장치 온도 120°C, 135°C, 150°C에서 적외선 장치에 가해지는 전력량을 각각 1160W(80°C), 3250W(100°C), 3760W(120°C), 3946W(150°C)로 적용하였다. 건조 시간 변화 8초, 13초, 26초, 52초, 130초, 180초에 따른 PET 필름의 저항 변화를 측정한다.



Fig. 1 Entire of drying device.

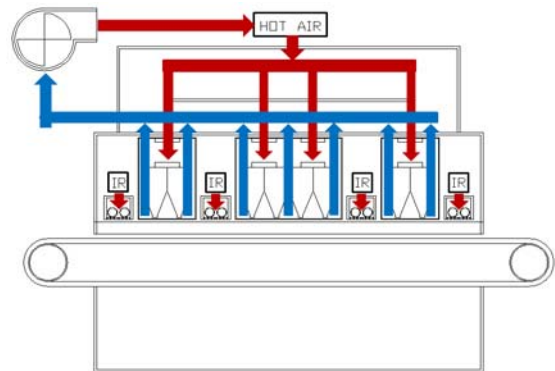


Fig. 2 Schematic diagram of the drying system

본 실험에 사용된 전도성 잉크는 Parelec 사의 Parmod VLT ink를 사용하였고 사용된 모재는 SKC의 SH34P 100 μm PET 필름이 사용되었다. 프린팅 장비로는 IGT Testing Systems사의 IGT

Printability Tester F1 장비를 사용하였다.

또한, 정밀한 저항 측정을 위해 AIT 사의 측정 범위가 1 mΩ/sq ~ 2 MΩ/sq인 4-point probe 저항 측정 장비인 CMT-100MP 제품을 사용하였다.

Table 1은 실험에 사용한 전도성 잉크의 물성치 정보이다.

Table 1. Parelec : Parmod VLT

Pigment	silver
solvent	N-protein acetyl
Solid Content	~83 weight %
Viscosity	30 ~ 50 KcP
Specific gravity	~3.2 g/ml

2.2 실험데이터

건조 장치 변화에 따른 비교 실험에 앞서 패턴의 선수에 따른 저항의 변화를 측정하여 최적의 선수를 찾아 인쇄 상태의 품질과 저항과의 차이를 분석하였다. 선수(line/cm)란 인쇄 상태의 품질을 나타내는데 전도성 잉크의 경우 표면 상태와 저항과의 연관성에 대한 기존 자료가 없어 전도성 잉크의 건조 성능을 만족시키면서 표면 상태의 품질 또한 만족시키기 위한 선수에 대한 연구를 병행하였다.

다음(Fig. 3)은 적외선 건조 장치에서 cm 당 line수의 변화에 따른 건조 및 curing 온도가 80℃ 일 때 건조 시간 변화에 따른 저항 변화를 그래프로 나타내었다.

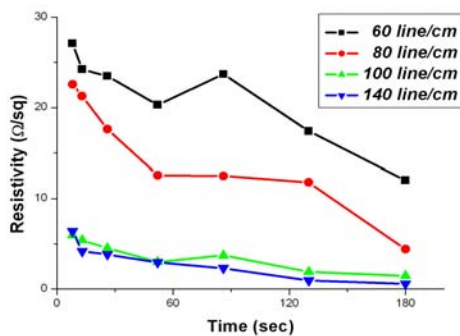
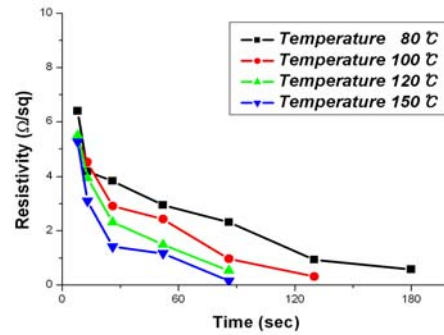


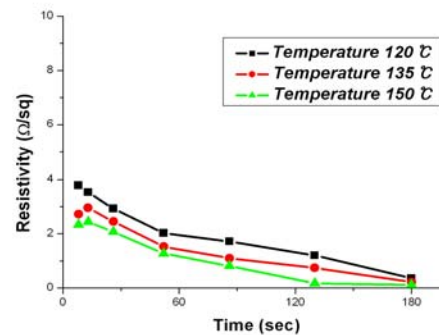
Fig. 3 Experiment data is changing line/cm

실험 결과 cm 당 line 수가 100 이하의 경우 모재의 프린팅 상태도 좋지 않았으며 저항도 높게 측정되었다. line 수가 100 line/cm 이상에서는 저항이 낮게 측정되었으며 인쇄 프린팅 상태도 양호하였다. 이를 근거로 열풍 건조 장치와 적외선 건조장치, 열풍 및 적외선 병용 건조 장치의 건조성능 비교 실험을 실시하였다.

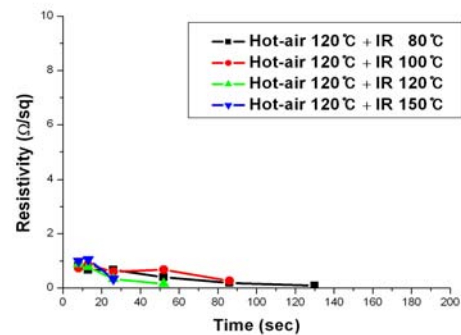
다음(Fig. 4)은 건조 장치의 변화에 따른 시간 변화에 대한 저항의 변화를 같은 온도의 변화에 따라 같은 line 수(140 line/cm)에서 실험한 결과를 나타내었다.



(a) IR , 140 line/cm



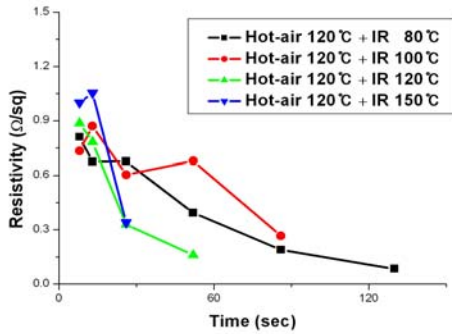
(b) hot-air , 140 line/cm



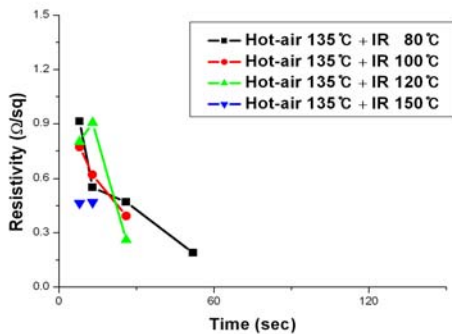
(c) hot-air + IR , 140 line/cm

Fig. 4 Experiment data is changing temperature.

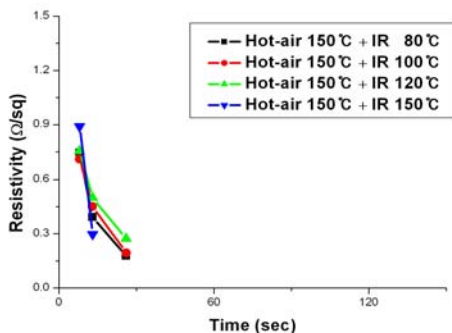
Fig.5 는 열풍 및 적외선 병용 건조 장치에서 열풍 장치의 온도 변화, 적외선 온도변화에 대한 저항의 변화상태를 같은 line 수(140 line/cm)에서 실험한 결과를 나타내었다.



(a) hot-air 120°C + IR , 140 line/cm



(b) hot-air 135°C + IR , 140 line/cm



(c) hot-air 150°C + IR , 140 line/cm

Fig. 5 Experiment data is changing IR temperature.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 장치변화에 따른 실험 결과 (140 line/cm)

Fig. 4를 살펴보면 패턴의 선수가 140 line/cm 일 때 열풍 건조 장치와 적외선 건조 장치에서 모두 건조 및 curing 시간이 증가할수록 저항이 낮게 측정되었다. 열풍 건조 장치가 적외선 건조 장치에 비하여 건조 및 curing 시간이 짧을 경우 저항이 낮게 측정되었지만 건조 및 curing 시간이 증가할수록 적외선 건조 장치에서 저항이 낮게 측정되었다. 하지만 적외선 건조 장치의 경우 건조 및 curing 시간이 증가할수록 PET 필름의 상태가 불량해져서 사용이 불가능해지는 문제가 발생하였다. 열풍 및 적외선 병용 건조 장치의 경우 열풍 건조 장치와 적외선 건조 장치 각각 단독으로 작동시키는 것에 비하여 짧은 건조 및 curing 시간에서도 낮은 저항을 나타내었다.

3.2 열풍 및 적외선 건조 장치에서의 실험 결과

Fig. 5를 열풍 및 적외선 병용 건조 장치의 경우 적외선 건조 장치에 비하여 PET 필름의 상태가 불량해지는 시간이 짧으므로 건조 및 curing을 열풍 건조 장치와 같은 온도에서는 2분 이상 사용이 어렵다. 하지만 짧은 건조 및 curing 시간에서도 충분히 낮은 저항이 측정되었다.

4. 결론

일반적으로 사용되고 있는 oven형 curing 장치를 컨베이어형으로 바꾸기 위해 열풍 건조 장치와 적외선 건조 장치, 그리고 열풍 및 적외선 병용 건조 장치를 사용하여 전도성 잉크에 대한 건조특성을 실험한 결과는 다음과 같다.

(1) 전도성 잉크에서 인쇄 상태의 품질을 나타내는 패턴의 선수가 표면 상태와 저항과의 연관성에서 cm 당 line 수가 100 이하의 경우 모재의 프린팅 상태도 좋지 않았으며 저항도 높게 측정되었다. line 수가 100 line/cm 이상에서는 저항이 낮게 측정되었으며 인쇄 프린팅 상태도 양호하였다. 이를 통하여 선수가 100 line/cm 이상에서 프린팅 상태가 양호하며 전도성 잉크를 사용하는 인쇄방식에서의 건조 성능을 만족한다는 것을 알 수 있다.

(2) 열풍 건조 장치가 짧은 건조 및 curing 시간에서는 적외선 건조 장치에 비하여 건조 성능이 좋았으나 건조 및 curing 시간이 증가할

수록 적외선 건조 장치의 성능이 좋아진다는 것을 알 수 있다. 하지만 건조 및 curing 시간이 증가할수록 PET 필름의 상태가 불량해지므로 적외선 건조 장치는 짧은 시간의 건조 및 curing 시간에서만 사용하여야 한다. 이를 통하여 열풍 건조 방식 및 적외선 건조 방식 단독으로 사용할 경우에는 전도성 잉크를 사용하는 인쇄방식에서의 건조 성능을 만족 시킬 수 없다.

(3) 열풍 및 적외선 병용 건조 장치의 경우 적외선 건조 장치 단독으로 사용하는 것에 비하여 PET 필름의 상태가 불량해지는 건조 및 curing 시간이 짧았다. 하지만 짧은 건조 및 curing 시간에서도 충분히 낮은 저항이 나타내었으며 이를 통하여 열풍 및 적외선 병용 건조 장치를 이용할 경우 전도성 잉크를 사용하는 인쇄방식의 건조 성능을 만족시키면서 건조 및 curing 시간을 단축 할 수 있으므로 대량생산과 연속적인 생산을 위한 on-line 상에서 건조 및 curing 과정이 가능해진다.

on-line 상에서 열풍 건조 장치와 적외선 건조 장치를 병용하여 건조 curing을 하면 현재 일반적으로 사용되고 있는 oven형 curing 장치를 컨베이어형으로 바꾸는 것이 가능하다. 전자회로 패턴을 값싸게 대량 생산하기 위한 가장 최적의 건조 장치 병용 조건을 찾는 경제적 측면과 공간적 측면을 고려한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보이며 이와 같은 연구들을 통하여 RFID 기술에서 세계적으로 앞서 나갈 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 서울시 산학연 협력사업(10848) 지원을 받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Friedman, S. J., and muller, A. C., 1951, Heat transfer to flat surfaces, Instn, Mech.engr. and ASME, proc. of General Discussion on Heat Transfer, pp. 138-142.
2. R.G. Nevins, and H.D. Ball, 1962, Heat transfer between a flat plate and a pulsating impinging jet, Proceedings of the

- National Heat Transfer Conference,
3. Korger, M. and Krizek ,F., 1966, Mass transfer coefficient in impinging flow from slotted nozzles, Int. J. Heat mass Transfer, Vol. 9, pp. 337-344.
4. Rubel, A., 1980, Computations of Jet Impingement on a Flat Surface, AIAA Journal 0001-1452 Vol. 18, No. 2, pp. 168-175.
5. Seyed-Yagoobi, J., 1996, Enhancement of heat and mass transfer with innovative impinging jets, Aug 01-Drying Technology, Vol. 14, No. 5 pp. 1173-1196.
6. Alam, S.A., Seyed-Yagoobi, V. Narayanan and R.H.Page, 1998, Drying Characteristics of slot Jet Reattachment Nozzle and Comparison with a Slot Jet Nozzle, Drying Technology, Vol. 16, No. 8, pp. 1585-1607.
7. Heikkila, P and N. Milosavljevic., 2002 Investigation of Impingement Heat transfer coefficient at high temperatures, Drying Technology Vol. 20, No. 1, pp. 211-222.
8. Kokko, T., 2003, Advaced Control Strategy for Impingement Drying, vol. 21, No. 10, pp. 1969-1990.
9. Edgar, B. gutoff., 1996, Modeling Solvent Drying of Coated webs including the initial transient Drying Technology Vol.14, No. 7&8, pp. 1673-1693.
10. Jang, Y. S., 2003, A study on the Dry Characteristics using NIR, Journal of the KSMT, Vol. 2003, No. 1, pp. 7-12.
11. C, ELVIDGE, 1988, Thermal infrared reflectance of dry plant materials-2.5-20.0 microns, Remote Sensing of Enviroment, Vol. 26, pp. 265-285.
12. KG, HAGEN, 1989, Using infrared radiation to dry coatings, Tappi journal, Vol. 72, No. 5, pp. 77-83.
13. Kim, Y. H, 1996, Development of far Infrared Ray Dryer for Agricultural Products, pp. 937-946.
14. Yim, C. S., 1994, A study on drying of coated films utilizing infrared ray, ,Vol. 14, No. 1, pp. 7-15.