

요인 실험계획법을 이용한 진공유리 지지대 배치용 스크린 인쇄 주요공정변수 설정

김재경 · 전의식[†]

[†]공주대학교 기계공학과

The Determination of Screen Printing Main Factors for Array of Vacuum Glazing Pillar by using Factorial Design of Experiments

Jae Kyung Kim and Euy Sik Jeon[†]

[†]Graduate School of Mechanical Engineering, Kongju National University

ABSTRACT

The screen printing is a process that is widely used in manufacturing process of various fields such as flexible devices, portable multimedia devices, OLED, and the solar cell. The screen printing method has been studied as a method for forming the high precision micro-pattern, making the low-cost manufacturing process and reducing cost through improvement of productivity. It is applicable to deposit and forming the pillars which are one of the core element for comprising vacuum glazing. In this paper, by using the paste of the glass frit base, the screen printing was performed. We analyzed the effect for the printing process to deposit pillar paste on the screen printing parameters by the factorial experimental design. The polynomial predicting the volume of the printed supporting pillars was drawn by using screen printing.

Key Words : Support pillar, Screen printing, Factorial design, Design of experiments

1. 서 론

진공유리용 지지대는 두 장의 유리 사이에 형성된 진공 분위기에서 진공력에 의하여 상판과 하판의 유리면이 서로 접촉하는 것을 방지하기 위해 필수적으로 배치된다. 기존의 지지대 배치 방법으로는 디스펜서(Dispenser)를 이용한 방법이 있으나 디스펜서(Dispenser)를 사용할 경우 디스펜서(Dispenser)와 마이크로 단위의 지지대간에 정전기 및 마찰력으로 인해 손실이 발생하는 문제점을 갖고 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 스크린 인쇄를 이용한 지지대 인쇄에 대해 연구가 이루어 지고 있으며 스크린 인쇄공법은 고정밀 미세 패턴의 형성, 저가의 제조 장비 제작 및 대량 생산성 향상을 통한 생산 원가 절감을 위한 방법으로 많은 연구가 진행 중에 있다[1-2]. 스크린 인쇄

(Screen printing)는 각종 휴대용 멀티미디어 기기, OLED, 태양전지 및 플렉시블 소자 등 다양한 분야의 제조 과정에서 널리 활용되는 공정이다[3-5].

스크린 인쇄 공정은 인쇄 재료로 사용되는 페이스트(Paste)와 이를 도포하는데 이용되는 스퀴지(Squeegee), 그리고 설계된 패턴이 각인되어 있는 금속마스크 등의 공정 도구를 이용하여 이루어지는 공정으로써 페이스트 재료, 인쇄 조건, 패턴 설계 및 환경 변수 등 다양한 공정 요인들이 복합적으로 작용하여 인쇄 성능을 결정한다.

본 논문에서는 스크린 인쇄공정변수가 진공유리 지지대용 페이스트 인쇄 시 미치는 영향도를 분석하였으며 요인실험계획법을 이용하여 스크린 인쇄 공정변수 중 지지대 인쇄에 영향을 미치는 주요 공정 조건에 대하여 개구부 통과량을 향상시키기 위한 최적공정조건 및 지지대의 부피에 대해 예측 가능한 다항식을 도출하였다.

[†]E-mail : osjun@kongju.ac.kr

2. 실험장치 및 실험방법

2.1. 지지대 인쇄 실험

본 연구에 사용한 페이스트(Paste)의 기본조성은 글라스 프리트(Glass frit)과 장석, 붕산(Boric acid)을 사용하였다. Table 1은 지지대 페이스트(Paste)의 화학조성을 나타낸다.

진공유리 지지대 배치를 위해 사용된 인쇄장치는 라인 시스템사의 LSP-5040 고정밀 반자동 인쇄기를 사용하였다. 또한 개구부 사이즈가 지름 400 μm , 두께 150 μm 를 갖는 메탈마스크를 사용하였으며 개구부의 간격은 23 mm의 정사각형 패턴을 적용하였다[6]. 배치된 지지대의 형상 및 부피계측은 키엔스사의 Vk-9700을 사용하였다. Fig. 1은 지지대 페이스트 인쇄 및 계측에 사용된 인쇄장치와 3차원 계측기를 나타내며 Table 2는 3차원 계측기의 사양을 나타낸다.

2.2. 요인 실험계획법을 이용한 공정변수 설정

요인 실험계획법이란 두 개 이상의 인자에 대한 실험에서 동시에 분석하는 실험방법으로 본 연구에서 다루



Fig. 1. Device used to deposit and measure pillars.

Table 1. Paste components of support pillars

| Chemical compositions (wt.%) | |
|------------------------------|-------|
| Glass Frit | 80~90 |
| Feldspar | 5~15 |
| Boric Acid | 5~10 |

Table 2. Specification of Vk-9700

| Item | | Specifications |
|--------------------|--------------------|---------------------|
| Measuring range | Horizontal | 1350 μm |
| | Vertical | 1012 μm |
| Height measurement | Measuring range | 7 mm |
| | Display resolution | 0.001 μm |
| | Repeatability | 0.014 μm |
| Width measurement | Display resolution | 0.001 μm |
| | Repeatability | 0.02 μm |

고자 하는 특성들에 대해 실험적으로 분석하고 실험목적의 달성에 가장 효율적인 분석법으로 알려져 있다[7].

본 연구에서는 지지대 페이스트(Paste) 인쇄를 위해 기초실험을 실시하였으며 그 결과 지지대 인쇄에 영향을 주로 미치는 공정변수를 스퀴지(Squeegee)압력, 유리 와 금속마스크간의 거리, 스퀴지(Squeegee)속도, 스퀴지(Squeegee)각도로 설정하였다. 전체 실험은 4인자 2수준으로 실험횟수는 8회씩 2회 반복을 실행하였다. Fig. 2는 지지대 페이스트(Paste) 인쇄를 위한 공정변수를 나타내며 각 인자에 대한 수준은 Table 3와 같이 설정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 공정변수에 따른 지지대 부피 분석

본 논문에서는 Table 4에서 나타낸 것과 같이 부분 요인실험계획을 적용하여 실험계획을 수립하였으며 총 16회 실시한 지지대 페이스트 인쇄에 대하여 3차원 계측을 실시 하였다. Fig. 3는 인쇄 된 지지대의 부피에 대해 계측한 결과를 나타내고 있다.

Fig. 4는 배치된 지지대의 부피를 요인실험분석을 이용하여 구한 주 효과 그래프이며 Fig. 5는 각 공정조건에 대해 95% 이상의 유의한 수준을 보이는 공정변수를 나타내고 있다.

Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 각 인자의 수준을 효과

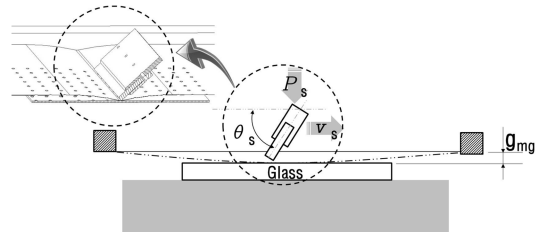


Fig. 2. Schematic diagram and parameters of the screen printing.

Table 3. Screen printing parameters and ranges

| Group | Factors | Level | |
|-------|------------------------------------|-------|-----|
| | | 1 | 2 |
| A | p_s (Force (kgf)) | 10 | 15 |
| B | g_{mg} (Snap-off height (mm)) | 1 | 2 |
| C | θ_s (Squeegee angle (°)) | 50 | 55 |
| D | v_s (Squeegee velocity (mm/sec)) | 150 | 200 |

Table 4. Experimental results

| No. | A | B | C | D | Volume(mm ³) |
|-----|---|---|---|---|--------------------------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.00954 |
| 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 0.01057 |
| 3 | 1 | 2 | 1 | 2 | 0.01211 |
| 4 | 2 | 2 | 1 | 1 | 0.01217 |
| 5 | 1 | 1 | 2 | 2 | 0.00885 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 1 | 0.00650 |
| 7 | 1 | 2 | 2 | 1 | 0.01224 |
| 8 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0.00669 |
| 9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.01127 |
| 10 | 2 | 1 | 1 | 2 | 0.00838 |
| 11 | 1 | 2 | 1 | 2 | 0.00951 |
| 12 | 2 | 2 | 1 | 1 | 0.01457 |
| 13 | 1 | 1 | 2 | 2 | 0.00647 |
| 14 | 2 | 1 | 2 | 1 | 0.00841 |
| 15 | 1 | 2 | 2 | 1 | 0.01106 |
| 16 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0.01035 |

적으로 파악할 수 있다. 지지대의 부피가 최대인 경우 각 파라미터를 분석해보면 스퀴지(Squeegee) 압력 10 kgf, 금속마스크와 유리와의 간격 2 mm, 스퀴지(Squeegee) 각도 50°, 스퀴지(Squeegee) 이송속도 150 mm/sec 일 때 이 공정조건이 지지대의 부피를 최대로 할 수 있는 최적공정조건임을 알 수 있다.

교호작용은 2인자 이상의 특정한 인자수준의 조합에서 일어나는 효과를 말하며 선이 평행하지 않으면 교호작용이 일어난다고 볼 수 있다. 이러한 교호 작용 분석은 복합적인 파라미터의 영향을 고려한 인자끼리의 수식표현을 위해서 실시하였다. Fig. 6의 그래프를 살펴보면 스퀴지(Squeegee)의 힘과 스퀴지(Squeegee)의 각도에 대한 교호작용이 큰 것으로 나타났으나 요인분석 결과 스퀴지(Squeegee) 힘은 95% 이하의 유의수준이 나타남에 따라 스퀴지(Squeegee)의 힘은 지지대 인쇄 공정에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이 항을 제거하지 않으면 다른 인자에 대한 유의성이 감소되기 때문에 이 항을 오차항으로 풀링(pooling)하였다. 다음으로 크게 나타나는 교호작용은 금속마스크와 유리와의 간격이 스퀴지(Squeegee) 이송속도에서 나타났으며 이 항을 본 논문에서 도출하고자 하는 다항식에 적용하였다. Fig. 6는 지지대의 부피에 대해 스크린 인쇄 공정간에 발생하는 교호작용 그래프이다.

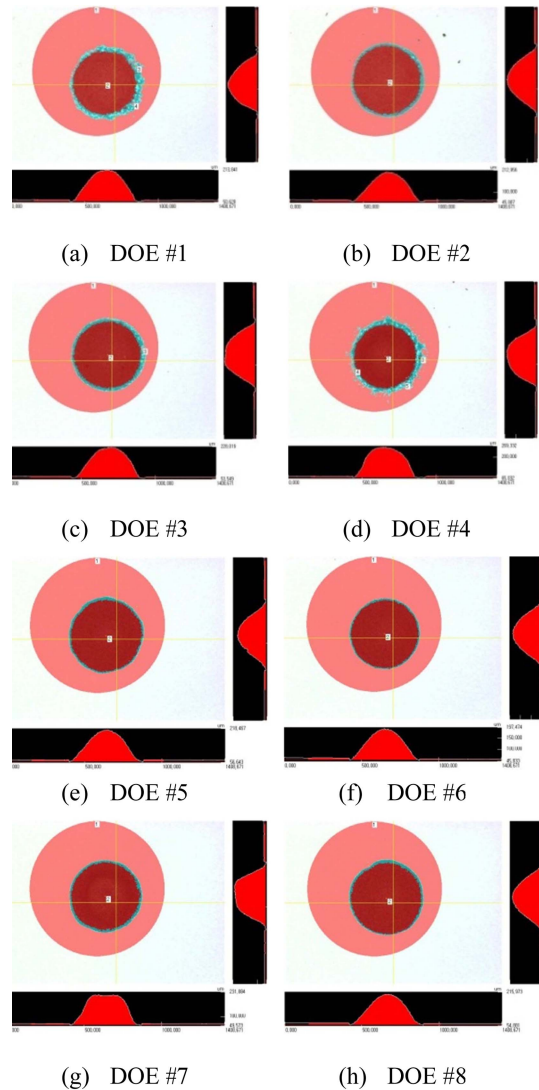


Fig. 3. The measurement results of pillars.

스크린 인쇄 실험 결과 값에 대하여 첫 번째 요인분석을 실시한 결과 R-sq값과 유의확률(P값)이 유의하지 않게 나타났다. 이에 따라 각 항에 대한 유의확률(P값) 및 R-sq값을 향상시키기 위하여 유의확률(P값)을 확인하고 가장 유의확률(P값)이 낮은 것부터 한번에 하나씩 풀링(Pooling)시켜 모형을 적합 시켰다. 모형 적합 후, R-sq 값이 65%이상의 적합도를 만족 시킬 때까지 풀링(Pooling)을 반복하였으며 유의하지 않은 것으로 나타난 Force, Snap-off height*Angle, Angle*Speed를 풀링(Pooling)시킨 결과 최종 R-sq의 값이 71.35%로 나타났다. 이때 각 공정조건에 대한 유의확률(P값)은

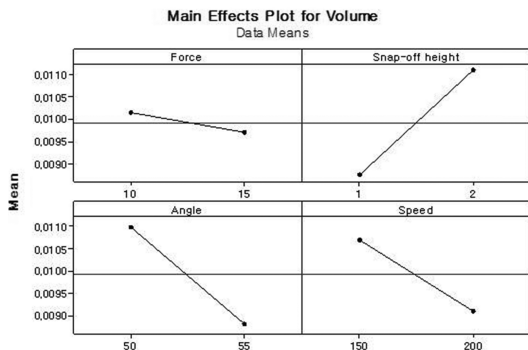


Fig. 4. Main effect of factors for pillar volume.

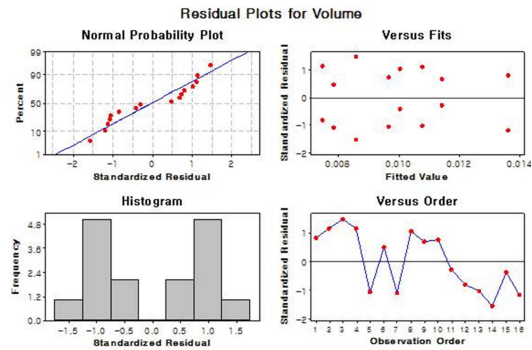


Fig. 7. Residual model diagnostics for pillar volume.

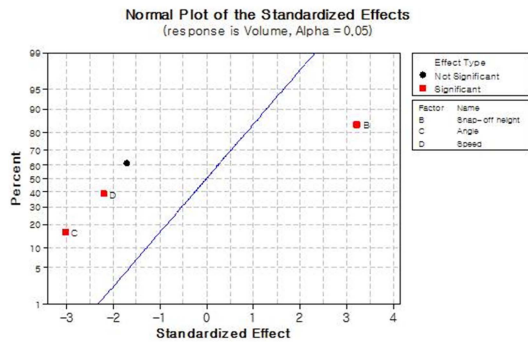


Fig. 5. The standardized effects of printing parameters.

Table 5. Final model of factorial design regression

| Factors | Coef | SE Coef | T | P |
|-----------|-----------|----------|------------|-------|
| Constant | 0.009918 | 0.000362 | 27.37 | 0.000 |
| B | 0.001170 | 0.000362 | 3.23 | 0.008 |
| C | -0.001097 | 0.000362 | -3.03 | 0.012 |
| D | -0.000801 | 0.000362 | -2.21 | 0.049 |
| B*D | -0.000620 | 0.000362 | -1.71 | 0.115 |
| R-sq | 71.35% | S | 0.00144941 | |
| R-Sq(adj) | 60.93% | | | |

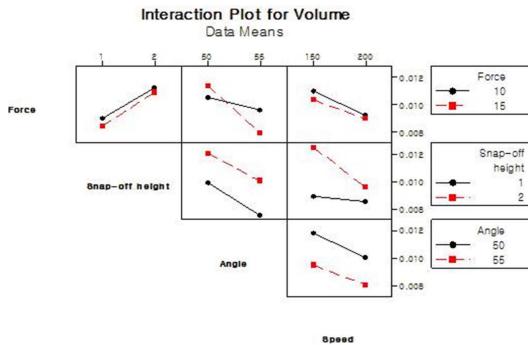


Fig. 6. Interaction effect of factors for volume.

0.05이하의 값을 가짐으로써 유의한 것으로 나타났다.

잔차에 대한 분석은 정규성 검증 $P = 0.781$ 로 정규 분포하며 등분산성은 각각의 값이 랜덤 하게 분포하고 있다. 또한 관측치 순서에 따른 어떠한 경향을 보이고 있지 않다고 판단됨으로 분석결과 모형은 타당하다고 볼 수 있다. 이상의 결과를 바탕으로 금속 마스크와 유리와의 간격, 스퀴지(Squeegee) 각도, 스퀴지(Squeegee) 속도에 따른 지지대의 부피 정도를 나타내는 2차 다항식을 구하면 다음 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$V = 0.022031 + 0.011019*B - 0.00044*C + 4.23682E-05*D - 4.96003E-05*B*D \quad (1)$$

where,

V = Volume of pillar

B = Snap-off height

C = Squeegee angle

D = Squeegee velocity이다.

Table 5는 최종모델에 대한 요인배치분석결과를 나타내며 Fig. 7는 실험 결과에 대한 잔차분석 그래프를 나타낸다. 실험 결과에 대한 분산분석결과 요인분석과 동일하게 각 항목별 P 값이 0.05 이하로 유의하게 나타났으며 적합도결여검정(Lack of fit) 값이 0.949로 나타남으로써 유의하지 않는 공정조건에 대해 풀링(Pooling)한 사항이 잘 이루어진 것으로 나타났다. Table 6는 분산분석 결과를 나타낸다.

본 연구에서 풀링(Pooling)한 변수 스퀴지(Squeegee) 힘은 선행 실시된 공정조건 최적화 및 지지대 단면형상 기술기 분석에서도 크게 영향을 미치지 않았으며 이에 따라 스크린 인쇄를 이용한 진공유리용 지지대를 배치하는데 있어 공정변수로 설정하지 않아도 될 것으

Table 6. Analysis of variance (ANOVA).

| Factors | DF | SS | MS | F | P |
|-------------|----|----------|----------|-------|-------|
| B | 1 | 2.19E-05 | 2.19E-05 | 10.42 | 0.008 |
| C | 1 | 1.93E-05 | 2.19E-05 | 9.16 | 0.012 |
| D | 1 | 1.03E-05 | 1.93E-05 | 4.88 | 0.049 |
| B*D | 1 | 6.15E-05 | 1.93E-05 | 2.93 | 0.115 |
| Lack of Fit | 3 | 9.5E-07 | 3.2E-07 | 0.11 | 0.949 |
| Pure Error | 8 | 2.22E-05 | 2.77E-06 | | |
| Total | 15 | 8.07E-05 | | | |

로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 스크린 인쇄 공정 변수가 인쇄된 지지대의 부피에 미치는 영향을 분석하였다. 공정변수로 스퀴지(Squeegee) 힘, 금속 마스크와 유리간 거리, 스퀴지(Squeegee) 각도, 스퀴지(Squeegee) 이송속도를 선정하였으며 글라스 프릿(glass frit) 기반의 지지대 페이스트를 스크린 인쇄법을 적용하여 배치 실험을 수행하였다. 실험 결과에 대해 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 유리 위 인쇄되는 지지대 페이스트의 부피에 영향을 미치는 공정 변수로는 금속 마스크와 유리간의 거리, 스퀴지(Squeegee) 각도, 스퀴지(Squeegee) 속도로 나타났으며 스퀴지(Squeegee)의 힘은 진공유리용 지지대를 배치하는데 있어 그 영향이 미비함에 따라 고려하지 않아도 될 것으로 사료된다.

둘째, 진공유리 제조용 스크린 인쇄 공정변수에 대해 요인실험계획법을 적용 및 분석한 결과 인쇄 된 필러 페이스트의 부피와 스크린 인쇄 주요공정변수간의 관계의 다항식을 도출하였다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업과 사업화연계기술개발사업을 통해 연구된 개발 결과임.

참고문헌

1. D.-H. Lee, J.S. Choi, H. Chae, C.-H. Chung and S.M. Cho, "Highly efficient phosphorescent polymer OLEDs fabricated by screen printing", *Journal of Displays*, 29, pp. 436-439, 2008.
2. Yu, Tang Yen, Te-Hua Fang and Yu-Cheng Lin, "Optimization of screen-printing parameters of SN9000 ink for pinholes using Taguchi method in chip on film packaging", *Journal of Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27, pp. 531-537, 2011.
3. Crawford, G. P., *Flexible flat panel display*, John Wiley & Sons, New York, 2005.
4. K. Y. Lee, H. J. Lee, J. B. Kim and K. Park "Deformation Analysis of a Metal Mask for the Screen Printing of Micro Bumps", *Journal of the KSMTE*, Vol. 21, No. 3 pp. 408-414, 2012.
5. Krebs, F. C., Fyenbo, J. and Jorgensen, M., 2010, "Product Integration of Compact Roll-to-roll Processed Polymer Solar Cell Modules: Methods and Manufacture using Flexographic Printing", *J. Mater. Chem.*, Vol. 20, No. 41, pp. 8994-9001, 2010.
6. J. K. Kim and E. S. Jeon, "Analysis of Cross-Section Shape Slope of Pillar for Vacuum Glazing according to the Screen Printing Parameters", *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, Vol. 11, No. 4, pp. 43-48, 2012.
7. S. H. Park, "Modern Design of Experiments", 2011.
8. Pyo Lim, Sang Yoon Park, Gyun Eui Yang, "A Study on tool life in the high speed machining of small-size end mill by factorial design of experiments and regression model", *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 23, No. 2, pp. 73-80, 2006.
9. Jae Min Kim, Won Ji Chung and O Chul Shin, "Application of Response Surface Method for Optimal Transfer Conditions of MLCC Alignment System", *Journal of the KSMTE*, Vol. 19, No. 4, pp. 582-588, 2006.

접수일: 2013년 2월 28일, 심사일: 2013년 3월 8일,
2차심사일: 2013년 3월 14일, 게재확정일: 2013년 3월 18일