



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

인쇄전자부품 제조를 위한 스크린
인쇄에서 잉크 토출 현상의
시뮬레이션에 관한 연구



2018년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

인 쇄 공 학 과

노 민 성

공 학 석 사 학 위 논 문

인쇄전자부품 제조를 위한 스크린
인쇄에서 잉크 토출 현상의
시뮬레이션에 관한 연구

지도교수 윤 종 태

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2018년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

인 쇄 공 학 과

노 민 성

노민성의 공학석사 학위 논문을 인준함.

2018년 2월 23일



위 원 장 공학박사 구 철 회 (인)

위 원 공학박사 최 송 아 (인)

위 원 공학박사 윤 중 태 (인)

목 차

목차	i
List of figures	iii
List of tables	iv
Abstract	v
1. 서 론	1
2. 이 론	3
2-1. 잉크의 전이 이론	3
2-1-1. 오프닝의 구성	3
2-1-2. 판 떨어짐 조작	7
2-2. 전이 방정식	11
3. 실험	16
3-1. 판 분리 전 실험	16
3-1-1. 인쇄 조건	16
3-1-2. 인쇄 잉크	17
3-2. 시뮬레이션	17

4. 결과 및 고찰	21
4-1. 시간에 따른 잉크 유동	21
4-2. 점도에 따른 잉크 유동	28
5. 결 론	33
참고문헌	35



List of figures

Fig. 1. Opening of imagine cross-section.	4
Fig. 2. Opening cross-section.	6
Fig. 3. Valva of squeezy motion.	8
Fig. 4. The falling plate lately.	8
Fig. 5. A falling force of plate and cohesiveness.	9
Fig. 6. Conceptual curve of ink transfer.	14
Fig. 7. Curves of typical ink transfer and fractional ink transfer. ...	15
Fig. 8. Finite element mesh and boundary sets(2D).	18
Fig. 9. Finite element mesh and boundary sets(3D).	19
Fig. 10. Ink flow according to time.	22
Fig. 11. Ink flow according to time(2D).	24
Fig. 12. Ink flow according to time(3D).	26
Fig. 13. Comparison of the experiments and the simulation results. ..	27
Fig. 14. Expansion of ink flow.	30
Fig. 15. Comparative results of ink density for velocity.	31
Fig. 16. Comparative results of the angle for velocity.	32

List of tables

Table 1. Experimental Factors in Screen Printing	16
Table 2. Screen Printing Ink Properties	17
Table 3. Ink Flow According to Viscosity	29



A Study on the Computer Simulation for the Pulling Out of Ink from a Mesh in the Screen Printing for the Manufacturing of Printed Electronics

Min-Seong Noh

Dept. of Graphic Arts Engineering, Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

Screen printing is a printing technique to manufacture the printed electronics whereby a mesh is used to transfer electronic ink onto a substrate. In this paper, the pulling out phenomena and the mechanism from a screen mesh were simulated by Navier-Stokes equation and were investigated the mechanism of transferring ink in the screen printing. Printing ink is forced into the mesh openings by the squeegee and by wetting the substrate, transferred onto the printing surface during the squeegee stroke. We found and demonstrated found that ink transferring phenomena is affected by the factors of opening of the mesh, screen tension, ink rheology, capillary number related to the interfacial tension between ink and screen, squeegee pressure and printing speed.

1. 서 론

스크린 인쇄는 메쉬(mesh)를 통과하는 잉크를 피인쇄체에 전이시키는 인쇄방법으로서, 중국의 송나라(960~1279 AD) 시대부터 내려오는 오래된 인쇄기술이다. 현재는 인쇄 전자 부품을 제조하는 등 인쇄전자 산업의 가장 중요한 공정으로 자리 잡고 있다. 스크린 인쇄의 장점은 신문에서 많이 쓰이는 하프톤(half tone) 인쇄나 잉크층이 두꺼운 선화 인쇄가 가능하고 판면의 유연성으로 인해 여러 가지 곡면의 피인쇄체에 인쇄가 가능하기 때문에 전자제품, 건축 산업, 문구류 등 전반적인 산업에 광범위하게 적용되는 인쇄방식이다.

스크린 인쇄에서 잉크가 토출되는 원리는 판면 위에서 스퀴지가 이동할 때 스퀴지의 접촉면에 대해 수직 방향으로 압력을 받아 잉크가 토출되는 방식이다. 이 때 잉크의 물성과 인쇄압력, 인쇄각도, 인쇄속도, 셀의 간격 등이 잉크의 적절한 토출량을 결정하고 보다 좋은 인쇄의 품질개선과 생산성을 높이는 중요한 요인이 된다.¹⁾ 이러한 스크린 인쇄의 원리는 간단하지만 인쇄잉크의 전이에 영향을 미치는 변수들은 대단히 많다. 그러나 이러한 변수들은 주로 조작자의 기능과 선행자들의 경험을 전수하는 방법으로 발전되어 온 것이 주지의 사실이다. 그러나 현재 정밀한 전자부품의 제조를 위해서는 잉크의 흐름에서 각 공정별 과학적인 규명이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구는 스크린 인쇄에서 잉크의 전이현상 중 가장 중요한 공정의 하나인 잉크가 메쉬로부터 빠짐 현상에 영향을 주는 요인들에 대해서 실험하고 그 결과를 컴퓨터 시뮬레이션하고자 하였다. 실험결과와 시뮬레이션 결과들을 비교하면 스크린 인쇄를 적용한 관련 기구를 과학적으로 규명함으로써 공정의 자동화 및 최적화

를 기할 수 있을 것으로 생각된다.

기존에 PCB를 제조하는 과정에서 스크린 인쇄를 이용한 도전성 페이스트의 비아 접속에 관한 연구가 발표된 바 있다.²⁾ 또한 실험결과의 이론적인 배경을 확립하고 논리적으로 해석하고자 시뮬레이션을 이용하였다. 본 연구는 시간 절약을 위하여 비뉴우톤성 유체의 유동을 Navier-Stokes 식에 의해 해석한 팩케이지형 유동시뮬레이터 Polyflow(workbench release 13.0 버전)와 ANSYS사에서 만든 Fieldview 소프트웨어를 사용하였으며, 스크린 인쇄기는 수동식 상용 인쇄기를 이용하여 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다.



2. 이 론

2-1. 잉크의 전이 이론

인쇄 작업은 잉크를 조정하여 인쇄판이 장착된 곳에 공급하여 피인쇄체를 놓고 스쿼지를 스트로크하여 실시한다. 일반적으로 스쿼지의 작동을 위한 잉크의 공급은 잉크 반복홀개로 한다. 잉크는 스쿼지의 스트로크에 따라 압력이 가해져 판의 오프닝부에 있는 망사의 오프닝을 통과하여 종이로 전이된다. 망사의 실에 의해 오프닝이 구성되어 있다. 망사의 구성 요소는 굵기, 재질, 직조직 등이다. 잉크가 망사를 지나갈 때 실을 적시면서 오프닝을 통과한다.³⁾

2-1-1. 오프닝의 구성

잉크가 통과하는 오프닝의 구성을 살펴볼 때, 일반적으로 사용되고 있는 평직이 망사의 직조직이고, 모노필라멘트의 실을 전제로 한다. 사를 만든 메이커의 카탈로그에는 규격, 품종, 메쉬, 굵기, 실, 오프닝, 오프닝에리어, 중량, 두께, 폭 등이 명시되어 있다. 이러한 규격들은 인쇄판을 제작하기 위한 것일 뿐만 아니라 인쇄 작업에도 반드시 필요한 데이터이다. 망사의 구성요소 중 가장 중요한 실은, 이 실이 서로 엮이며 네모형의 공간을 만드는데 이 공간을 오프닝이라 칭한다. 오프닝의 크기를 표시하는 데에는 한 개의 오프닝 씨실과 씨실 사이의 길이와 날실과 날실 사이의 길이의 곱의 제곱근으로 계산된다. 일반적인 망사에서는 짜여진 씨실과 날실의 수는 같으므로 오프닝은 보통 정사각형이 된다. 이례적으로 날염사의 저신장 메쉬 중에는 직사각형도 있다. 망사를 지칭함에 있어서는 실의 수, 메쉬, 재질, 실의 굵기를 말하면 된다.

그 중에서도 수치로 표시할 수 있는 것은 실의 굵기 D 와 메쉬 수 M 이다. 이 두 가지로 망사의 구성요소가 되는 여러 가지 수치를 유출해 낼 수 있다. 이것을 M 으로 나누면 한 개의 오프닝을 포함하는 실의 중심간의 길이인 L 이 얻어진다. 이 L 과 D 의 차가 오프닝을 표현하는 수치이다.⁴⁾

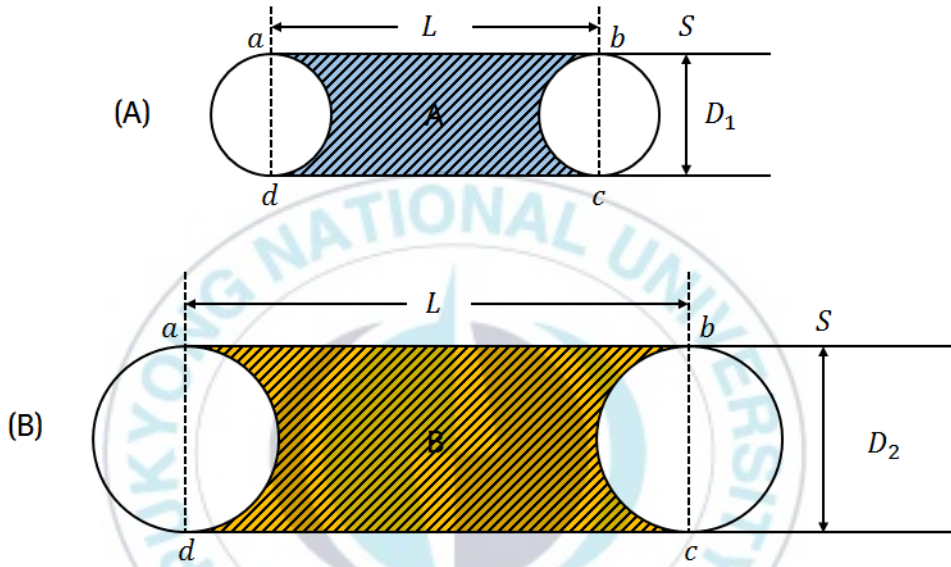


Fig. 1. Opening of imagine cross-section.

Fig. 1은 오프닝의 가상 단면도로써 메쉬 수는 같지만 실의 굵기가 각각 다르다. 실의 단면을 원형이라 가정하고 그 지름을 D_1, D_2 로 하고, 조건은 $D_1 < D_2$ 이다. 빗금을 그은 부분의 면적은 $A < B$ 이고, 경험으로 볼 때 명백하게 A 의 망사보다 B 의 망사가 잉크 전이량이 많고 인쇄할 때 잉크의 피막이 두껍다. 스쿼지가 스트로크할 때 빗금 부분의 잉크가 전이되고, 이때 전부가 전이되지 않고 잉크의 분열에 의해서 일부는 실에 걸려 잔류하게 된다. 망사의 메쉬 수를 M 이라 할 때 실의 지름을 D 라고 한다. 정해져 있는 메쉬 수는 L 이 일정할 때 실의 굵기인 D 의 변함

에 따라 Fig. 1의 빗금 부분의 면적이 어떻게 변하는지 고찰해본다. 선 ab 를 스퀴지가 지나가는 선이라고 가정하여 스퀴지 선이라고 지칭하자. 밑변 dc 는 피인쇄체의 평활한 표면선이다. $D \times L$ 은 $abcd$ 의 면적이고 $(\frac{D}{2} \times 2\pi)$ 는 실의 단면적이다.⁵⁾

여기서

$$DL - (\frac{D}{2} \times 2\pi) = Y \quad \dots\dots\dots (1)$$

라고 하면 Y 는 빗금 영역의 면적이 된다. (1)의 식을 D 에 대해서 미분하면,

$$Y' = L - \frac{DP\pi}{2}$$

Y' 를 0으로 하면

$$L = \frac{D\pi}{2}, 2L = D\pi \quad \dots\dots\dots (2)$$

로 된다.

이는 빗금 영역의 면적이 최대치일 때이고, 실의 굵기 D 가 두 배의 L 의 길이를 원의 지름 값과 같을 때 빗금 영역의 면적은 최대치를 가지게 된다. 이 방정식을 중심으로 오프닝의 공간을 고찰해본다.

Fig. 2는 망사 한 개의 오프닝 단면도이다. 선 ab 는 스퀴지선 S 라 하고, dc 는 종이의 표면이다. 씨실과 날실이 직교하는 점(結節点)의 중심선인 ad 와 bc 를 연결하면 네 개의 면으로 막혀진 공간이 구성되고 이를 망사를 구성하는 또 하나의 단위로 표현할 수 있다.

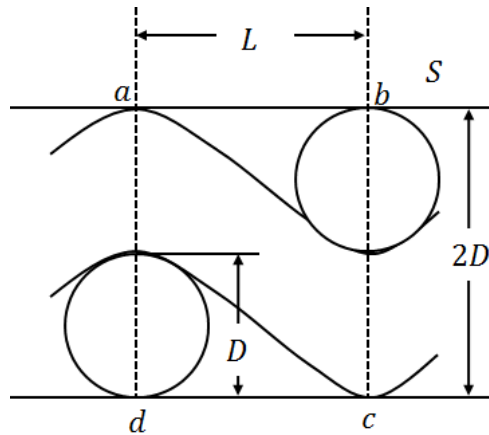


Fig. 2. Opening cross-section.

이 공간들이 연쇄적으로 연결되어 망사를 이루고 있는 것이다. 이 단위는 공간 A에서 실이 차지하는 부피인 B를 제거하면 빈틈이 나오는데 이를 오프닝 공간이라고 정의한다. 이 부피는 실의 지름을 D , 실 사이의 길이를 L , 오프닝 공간을 Y 라 할 때

단위 공간 : $A = 2DL^2$

오프닝 공간 : $Y = 2DL^2 - 2\left(\frac{D}{2}\right)^2\pi L \dots\dots\dots(3)$

(3)식을 D 로 미분하면,

$$Y' = 2L^2 - D\pi L$$

Y' 를 0으로 하면,

$$2L = D\pi \dots\dots\dots(4)$$

(4)식은 (1)식과 같은 결과로서 오프닝의 공간이 최대 수치를 갖는 D 와 L 의 조건에는 변함이 없다. L 을 일정하게 했을 때 D 를 $2L = D\pi$ 에서 $2L < D\pi$ 로 하면 실이 굵어져 오프닝의 공간이 감소된다. $2L > D\pi$ 로 되면 실이 가늘어져 오프닝이 마찬가지로 감소하게 된다.

이것은 전체적인 부피가 감소하기 때문이고, 잉크 토출성의 요소로서 실 표면적과 오프닝 공간과의 관계를 고찰해 보았을 때, (3)식은 오프닝 공간의 용적이다. 실의 표면적은 $2D\pi L$ 이므로 (3)식을 이것으로 나누면

$$\frac{L}{\pi} - \frac{D}{4} \dots\dots\dots (5)$$

(5)가 된다. 이는 D 에 대한 일차식이 되므로 D 가 작아지면 그 값은 커지고, 그 극한은 $\frac{L}{\pi}$ 이 된다. 이는 잉크가 전혀 통과되지 않는다는 것을 의미한다.^{6~7)}

2-1-2. 판 떨어짐 조작

인쇄 작업에 있어서 판을 장착시키는 위치는 피인쇄체에 밀착시키지 않고 일정한 간격을 두어야한다. 피인쇄체와 판막은 스퀴지 선단의 한 선에 접촉해야하고 나머지 부분은 종이와 분리되어야 한다. Fig. 3에서 스퀴지 선단과 접촉하고 있는 P 점이 스퀴지의 스트로크에 따라서 A 에서 B 의 방향으로 이동할 때 P 점을 통과한 후의 AP 면의 판막은 반드시 피인쇄체에서 분리되어야 한다. AP 의 분리가 늦어져 Fig. 4와 같이 Q 까지만 떨어지는 경우는 다음 두 종류가 있다.

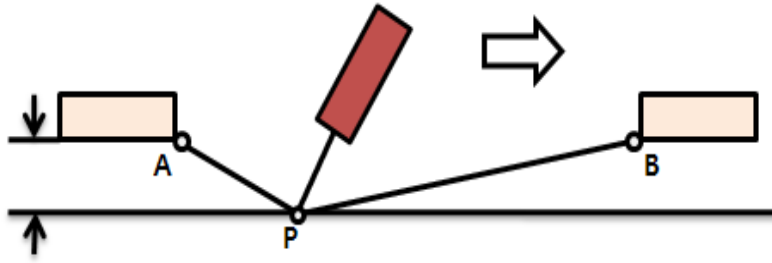


Fig. 3. Valva of squeazy motion.

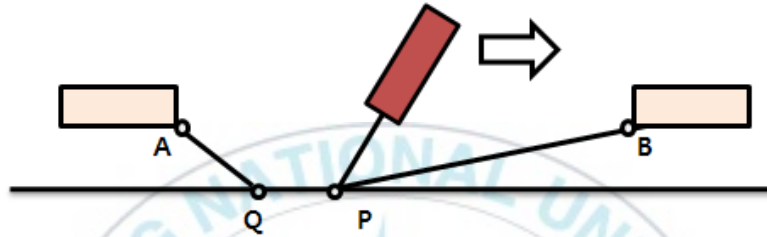


Fig. 4. The falling plate lately.

첫 번째는 P 점의 이동에 따라서 Q 도 떨어지지만 P 점과 일치하지는 않는다. 두 번째는 Q 점이 순간적으로 정지하거나 다시 이동을 개시한 경우이다. 이 거동이 일어난 시점에서 인쇄 잉크의 피막은 경계와 같은 피막 얼룩이 생긴다. 이전의 시점에서 스크린 판의 한 쪽을 약간 올려주면 Q 점은 P 점에 근접하거나 일치된다. 판을 종이와 거리를 조금 두고 장착하는 것은 항상 판막과 피인쇄체가 스퀴지 선단에서 압착된 하나의 선만으로 밀착시키는 조건이 필요하기 때문이다. 판막 AB 라고 하는 길이를 APB 로 늘리는 것은 판막이 본래의 AB 라고 하는 길이로 복원하려는 장력이 P 점에 걸려 이것이 판 떨어짐 작용을 하게 되는 것이다. 피인쇄체로부터 판막을 떨어뜨리는 거리에는 피인쇄체에 P 점이 접촉하고 그 밖에는 분리되어 있다고 하는 것만이 아니라 치수 정밀도의 확보 문제와도 더불어 생각해야 한다. $AP+PB$ 와 AB 의 차가 커지면 판이 지나치게 늘어나 인쇄할 때 인쇄된 무늬와 원고와의 치수오차가 커진다. 이

스퀴지를 장착했을 때의 인쇄 테이블에 대한 압력을 VP 로 하면, 이 압력으로 판막에 대해서 피인쇄체와 밀착된다. 그러나 판 떨어짐의 장착에 의해 판막은 AB 로의 복원력인 VP 로 들어 올려지고,

$VP + VP_1 =$ 스쿼지 선단이 받는 압력

된다. VP_1 의 압력이 강할 때에는 외관상 스퀴지 압을 높게
인쇄체와 판막의 밀착력이 약하고 화상이 깔끔하게 인쇄되
고 스퀴지 고무가 이 압력으로 하드함을 잃어 전방에서 구

Fig. 5의 판 떨어짐 점인 Q 에 있어서 판의 장력에 대해 피인쇄체와 판 사이에서 전이되고 있는 잉크의 응집력이 큰 경우에는 P 점에서 판 떨어짐이 늦거나 정지될 수 있다. 판 떨어짐 점 Q 에서 볼 때 QA 의 방향으로 판막의 복원력이 조금씩 움직이고 있다. 이를 QC 로 하고, 평탄한

피인쇄체와의 각도와 QC 를 a 로 하면 Q 점에 있어서의 잉크의 응집력을 이겨내어 판막을 들어 올리는 힘은 $QC\sin a$ 로 된다. 잉크의 응집력을 QE 라 하면,

$QC\sin a \leq QE$ 일 때 Q 점은 정지

$QC\sin a > QE$ 일 때 Q 점은 P 점과 일치 또는 P 점과 함께 이동

한다. 다색인쇄의 경우에는 앞의 잉크피막 위에 전이된 잉크가 놓이면 급속히 용제가 흡수되어 잉크농도가 상승하므로 점성이 강해진다. 요변성(搖變性, thixotropy) 잉크는 스퀴지가 지나간 즉시 분자의 응집이 시작되고 이것이 흡착 현상과 부합되어 점착력이 증가한다. 다색의 경우, 여러 개의 인쇄 피막이 형성되어 있어 이 피막이 새롭게 전이된 잉크로 인해 팽윤, 용해되어 점착도가 높은 겔상(狀)으로 판막에 급격히 점착하여 무리하게 판막을 떼다면 잉크 피막마다 박리가 일어나게 된다.

이와 같이 피인쇄체인 중합계 플라스틱의 용제 흡수 속도와 잉크 중의 용제에 의한 재용해가 온도에 비례해서 빠르다. 그래서 스퀴지가 통과된 직후에 개시되어야 인쇄판의 판 떨어짐 조건이 만족된다. 판 떨어짐을 증가시키는 힘 $QC\sin a$ 는 각도 a 의 변화에 따라서 변한다. P 점이 $P_1, P_2, \dots$ 로 A 와 떨어짐에 따라 $a_1 > a_2 \dots$ 로 각도가 작아져 $QC\sin a_1 > QC\sin a_2 \dots$ 로 판 떨어짐의 인상력이 작아진다. 따라서 P 점의 이동에 따라 A 점은 $A_1, A_2, \dots$ 로 커져 $QC\sin a > QE$ 를 확보하고 판 떨어짐을 확실하게 하는 것이 필요하다.^{9~10)}

2-2. 전이 방정식

1950년대부터 인쇄적성을 공학적이고 과학적으로 연구하기 시작했으며 가장 먼저 해석하려고 시도한 것은 종이와 잉크의 전이적성이다.

수학적으로 이 문제를 해석하기 위한 첫 단계는 판상의 잉크의 양에 따른 인쇄물의 잉크량을 수치적으로 측정하는 것이다. 이와 같이 종이 위에 전이되는 잉크량과 인쇄판상의 잉크량을 그래프로 나타내면 S곡선이 나타나는 이 것을 전이곡선이라 하며 전이율로 나타낸 결과를 전이율 곡선이라고 한다.

잉크의 전이율은 피인쇄체의 표면 구조나 판 위의 잉크량 및 점도에 따라 달라지며, 일반적으로 표면적이 크고 종이의 표면이 거칠수록 전이율이 높아진다. 비도포지는 잉크가 피인쇄체 속에 침투하는 양이 많으므로 전이율이 더욱 높아지고, 신문인쇄와 같이 낮은 점도의 잉크를 사용할 때는 최대 85% 까지 이르게 된다.

기본적으로 잉크의 전이 거동은 전이 방식과 잉크의 레오로지 특성에 의존하지만, 인쇄기계 상에서 수반되는 잉크의 전단 거동이나 고속 신장으로 인하여 잉크의 전이율에 대한 동적 점탄성나 점도 등의 미시적인 관계를 이론적으로 규명하는 것은 굉장히 어려운 일이다. 따라서 대부분의 잉크 전이 모델에서는 피인쇄체와 인쇄판 사이에서 발생하는 거시적 전이 기구에 의하여 결과에서 나타나는 곡선을 방정식으로 정확하게 표현하는데 초점을 맞추어 왔다.

잉크 전이율은 보통 백분율로 표시되며 잉크를 전달하고자 하는 잉크 수용롤러로 어떤 닙(nip)안에 있는 잉크가 전이되는 비율로 정의된다. 잉크를 종이로 전이시키는 것이 인쇄기의 궁극적인 기능이므로 잉크를 운반하는 실린더나 롤러에서의 잉크 전이율은 대단히 중요한 문제라 할 수 있다. 잉크막 분리에 관한 이러한 특성은 인쇄기계 상에서 직접 측정하기가 매우 곤란하므로 이에 대한 연구는 거의 전적으로 인쇄적성 시험기나 교정 인쇄기에서 이루어져 왔으며, 대부분은 종이에 대한 잉크 전이

연구에 집중되었다.¹¹⁾

Walker와 Fetsko¹²⁾는 처음으로 인쇄판의 중량을 측정하여 전이관계를 수식으로 만들었으며 다음과 같은 세 가지 조건을 가정하였다.

[가정1] 종이와 잉크가 접촉하였을 때 잉크량이 적으면 불완전한 접촉을 하여 잉크 공급의 증가에 따라 빠르게 접촉면이 늘어난다.

[가정2] 종이의 표면에는 공극이 발달하여 있으므로 잉크와 접촉 시 압력이 가해지면 적당량의 잉크를 고정화 한다.

[가정3] 고정화하고 남은 자유잉크는 일정한 비율로 나누어 분열한다.

이 가정 하에 얻어진 식을 Walker-Fetsko식이라고 하고 아래와 같은 세 가지 계수를 얻는다.

k (용지의 피복 면적비) : 종이의 요철부에 채워지는 잉크가 얼마나 빠르게 완전피복에 도달하는가를 의미

b (고정화 잉크량) : 완전 피복점에서 용지가 고정화시킨 잉크의 양

f (자유잉크 분열비) : 완전 피복된 후 잉크의 분열비

잉크량을 증가시키면서 파인쇄체에 전이된 잉크량을 플롯하면 Fig. 6과 같은 곡선을 얻을 수 있다. 여기서 포화점 이후인 잉크량이 많을 때는 1차 함수로 표현할 수 있는데 식 (6)과 같다.

$$y = b + f(x - b) \dots \dots \dots (6)$$

여기서 y 는 종이에 전이된 잉크량, b 는 고정화 잉크량, f 는 자유잉크의 분열비, x 는 인쇄판상의 공급량(잉크량) 이다.

식 (6)을 다시 쓰면 식 (7)과 같으며,

$$y = fx + b(1 - f) \dots\dots\dots(7)$$

식 (6)을 전이율로 표현하면 식 (8)과 같다.

$$\frac{y}{x} = \frac{b}{x} + \frac{f(x-b)}{x} \dots\dots\dots(8)$$

그러나 잉크량이 적을 때는 잉크의 용지가 불완전한 접촉으로 인해 용지의 요철을 효과적으로 채울 수 없다. 따라서 실제 접촉된 영역과 접촉면적비 영역에서 전이된 잉크량의 개념을 도입하면 잉크에 의해 접촉된 피인쇄체의 면적은 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$F = 1 - e^{-kx} \dots\dots\dots(9)$$

또한 실제 접촉된 영역에서 전이된 잉크의 양을 고려하면 식 (10)과 같다.

$$\Phi b = b(1 - e^{-\frac{x}{b}}) \dots\dots\dots(10)$$

이 개념으로 식 (7)을 다시 정리하면 식 (11)과 같이 된다.

$$y = (1 - e^{-kx})[b(1 - e^{-\frac{x}{b}}) + f[x - b(1 - e^{-\frac{x}{b}})]] \dots\dots\dots(11)$$

식 (11)이 Walker와 Fetsko의 전이 방정식이다. 따라서 식 (6)과 식 (8)에서 전이계수 b , k , f 를 얻을 수 있다.

이 식은 잉크와 종이의 관계를 나타낸 것으로 잉크와 종이의 고유한 관계를 얻을 수 있다. 적은 양의 잉크범위에서 f 값을 얻은 것이므로 포화점 이상에서의 잉크필름 영역에서는 사용할 수 없다.^{13~14)}

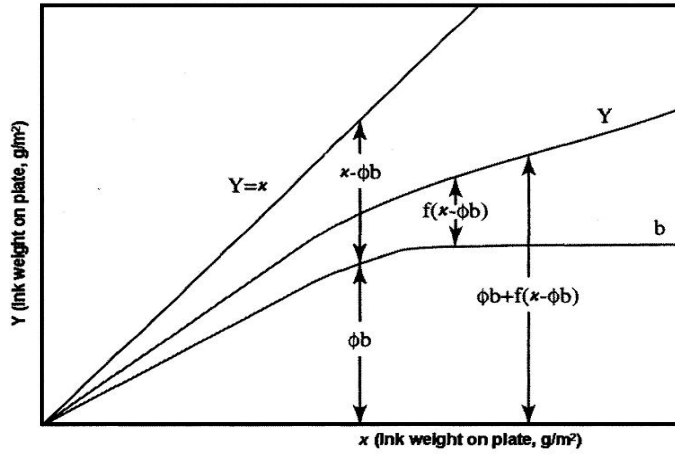


Fig. 6. Conceptual curve of ink transfer.

Fig. 7은 민자 인쇄(solid printing)에서 잉크의 전이 메커니즘을 나타낸 것으로써, 종이와 관련되는 b , k 의 전이 정수의 연관성을 배제하고 자유 잉크량 만을 고려하였다. 따라서 전이 정수는 인쇄 공정상 조건들과 인쇄 재료 따른 인쇄 잉크의 전이를 나타내는 변수로, 인쇄 공정의 상태를 나타내는 중요한 변수로 사용된다.

잉크량이 증가하면서 피인쇄체와 완전한 접촉에 얼마나 빨리 도달되는가를 평활도 상수로 인쇄평활도의 측정이 가능하며 평활도가 좋을수록 높은 k 값이 나타난다. 인쇄압력이 증가하면 종이에 영향을 많이 받고 인쇄평활도도 증가한다. 인쇄속도가 올라가면 k 값은 다소 떨어진다.¹⁵⁾

b 는 전이율 곡선에서 최대 전이율에서의 값이며, 피인쇄체가 인압을 받고 있는 동안 잉크를 수용 혹은 고정화할 수 있는 최대량이다. 이 값은 종이의 평활도와 투기도에 깊은 관련이 있으며 인압이 증가하면 b 도 증가하고, 속도를 감소시키면 증가한다. 또한 잉크의 점도에도 큰 영향이 미친다.

f 는 포화점 이후의 잉크 필름 부분에서의 값을 의미한다. f 값은 고정화되고 남은 잉크의 분열비를 나타내는 것으로 지배인자가 명확히 알려지지 않는 않지만 피인쇄체의 흡수 특성과 관계가 있다고 보고되어 있다.¹⁶⁾

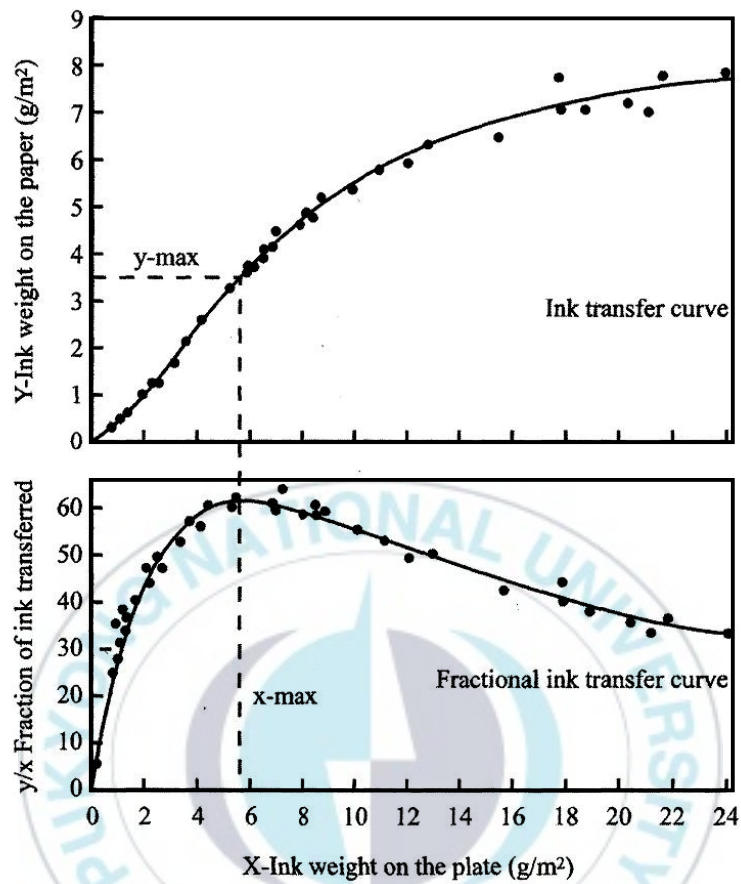


Fig. 7. Curves of typical ink transfer and fractional ink transfer.

3. 실험

3-1. 판 분리 전 실험

본 논문에서는 스크린 인쇄의 판 분리 직전 메커니즘 해석에서 실험적인 방법과 이론적인 해석을 일치시키는데 그 목적을 두었다. 그러므로 여러 가지 조건에 따른 스크린 인쇄실험을 하였으며 이 때 인쇄 잉크의 전이 상태 및 판 분리 전 스크린 메쉬를 통과할 때 잉크의 유동의 촬영은 USB 현미경(Veho VMS 004 deluxe 모델)을 사용하였다.

3-1-1. 인쇄 조건

스크린 망사는 국내 A사에서 시판하고 있는 시판용으로서 재질은 polyester이며, 모노필라멘트 구조로 이루어진 평직이다. 인쇄물이 정밀도를 유지 하면서 일정한 두께를 유지하기 위해 가장 보편적인 200 메쉬를 사용하였다. 인쇄 조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Experimental Factors in Screen Printing

Factors in Printing	
Squeegee angle	80°
Squeegee hardness	75~80°SH
Gap	2mm
Printing speed	6cm/s
Printing pressure	5kgf/cm ²

3-1-2 인쇄 잉크

본 실험에서 사용한 잉크는 삼성 Huetone사에서 제조한 solvent based ink (모델 SH#1000)이다. 이 잉크는 선택한 안료를 혼합 및 분배하여 제조된 PVC 소재용 스크린 인쇄 잉크로 많이 사용된다. 사용된 안료는 비닐 합성수지 및 아크릴 합성수지에 사용되며 현재 가장 널리 사용되는 잉크 중 하나로서, 냄새가 적고 작업성이 좋으며 재료의 광택도가 높은 특징이 있다. 잉크의 물성표는 Table 2와 같다.

Table 2. Screen Printing Ink Properties

Ink properties	
Appearance	Viscous Fluid
Solid(%)	45~70
Viscosity(cPs)	20,000
Specific Gravity	0.9~1.5
Flash Piont	42~46℃
Boiling Point	165~220℃

3-2. 시뮬레이션

판 분리 전 스크린 메시에서 잉크의 유동은 CPU 시간을 절약하고 간단히 하기 위하여 2D(Two Dimension)와 3D(Three Dimension) 방법을 각각 선택하였다.

스크린 잉크의 점도는 170~200poise으로서 평균 점도값을 기준으로 200poise를 선택하였다. 밀도는 1g/cm^3 , 유체의 흐름은 정상상태(steady state)로 가정하였다. 인쇄기에서 잉크의 토출량은 인쇄기의 속도에 의한 영향에 비해 무시될 정도라고 생각하여 중력은 무시하였다. Fig. 8은 도

메인의 초기 모델이며, 초기 모형을 이용하여 기본 도메인을 제작하였다. 스크린 망사와 스크린 판 분리 시 잉크 표면 사이의 각도를 α 라 두고 잉크는 아래 방향으로 토출된다고 가정하였다. 실험에서는 α 의 값을 측정하여 두 가지 실험의 결과 값을 비교하였다. 각 순간의 잉크 거동을 연속적으로 계산결과를 보기 위해 전체적인 작업은 시간 변수에 따라 달라지는 시간 의존형으로 하였다. 이 때 온도 변화는 일정하다고 가정하여 단열조건으로 주고, 전단 속도에 따른 점도의 변화 양상을 알아보기 위해 점탄성 모델 중 일반화된 뉴우토니언 단열 흐름(generalized Newtonian isothermal flow)을 부작업으로 설정하였다.

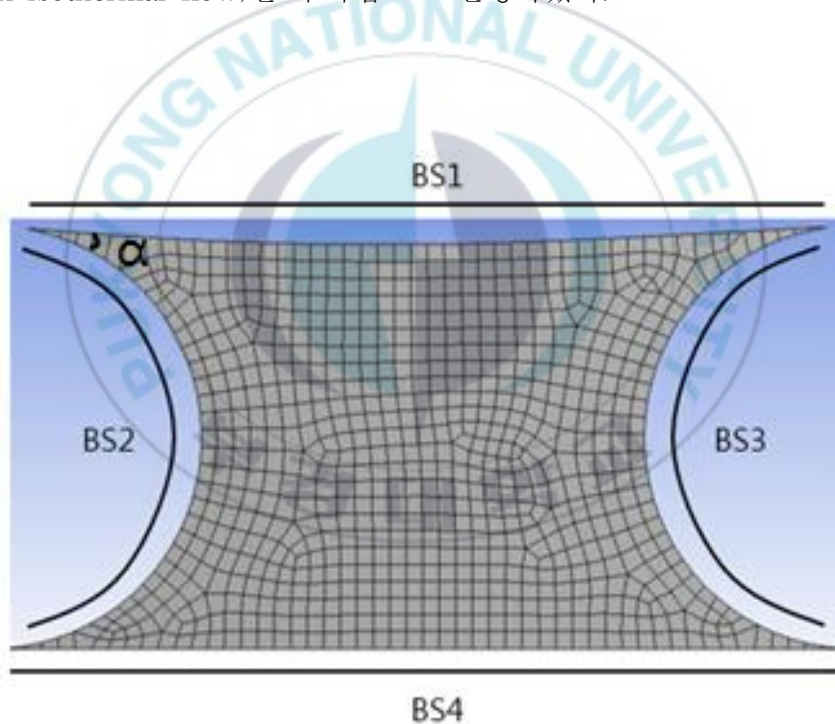


Fig. 8. Finite element mesh and boundary sets(2D).

2D 시뮬레이션 도메인의 각각의 경계조건(boundary condition, BC)은 아래와 같다.

BS 1 : 입력 = $500\text{cm}/\text{sec}^3$

BS 2 : 고정

BS 3 : 고정

BS 4 : 자유계면

Fig. 9는 3D 시뮬레이션 도메인으로 각각의 경계조건(boundary condition, BC)은 아래와 같다.

BS A : 입력 = $500\text{cm}/\text{sec}^3$

BS B : 고정

BS C : 고정

BS D : 고정

BS E : 고정

BS F : 자유계면

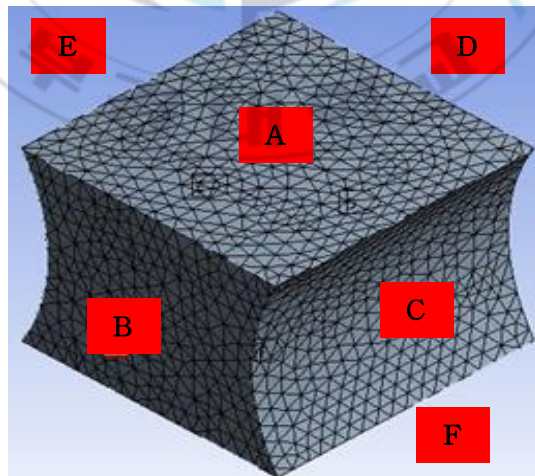


Fig. 9. Finite element mesh and boundary sets(3D).

망사와 잉크가 닿는 부분은 자유계면(free surface)에 해당한다. 즉, 외력에 의해 변화가 일어나는 부분으로 자유계면은 잉크의 표면장력과 점탄성에 의해 자유롭게 만들어지는 표면이다. 이것은 망사에서 아래 방향으로 잉크가 토출될 때 토출압력에 의해 늘어지고 휘어질 것이며 이 때 가장 가는 부분에서 잉크가 끊어져 판과 분리되어 피인쇄체에 잉크가 전달된다고 본다.

실험한 결과와 시뮬레이션에서의 결과가 동일한 결과를 보이는데 대해 확인하였다.

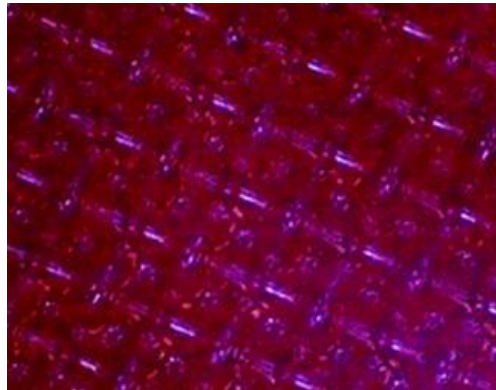


4. 결과 및 고찰

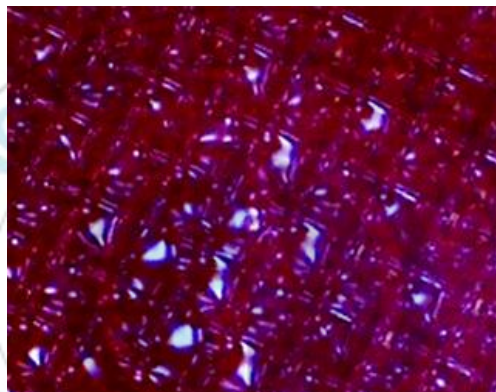
4-1. 시간에 따른 잉크 유동

스크린 인쇄의 세 번째 과정인 스퀴지 이동에 의해 압출된 잉크가 광 유제로 패턴이 형성된 스크린 판의 화선부(개구부)에 충분히 충전되기 직전의 잉크 유동에 대한 실험결과와 시뮬레이션 결과 값을 비교하였다.

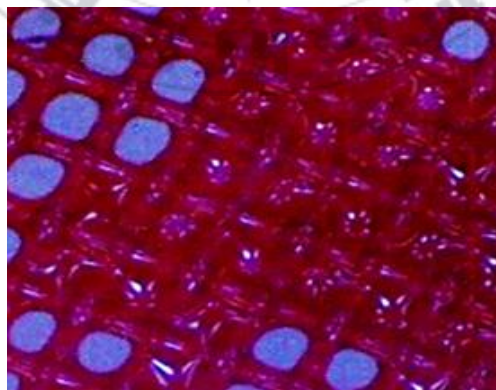
Fig. 10의 결과에서 볼 수 있듯이 스퀴징 후 판이 분리되기 직전에 망사의 가운데 부분부터 서서히 안으로 파이고 수직 아래 방향으로 유동하는 모습을 볼 수 있었다. 특히 실험 결과는 시간이 지남에 따라 잉크의 유동 모습을 관찰한 것으로 Fig. 10의 (a)와 같이 잉크의 공급량을 $500\text{g}/\text{cm}^2$ 으로 주었을 때 $1 \times 10^{-4}\text{sec}$ (잉크가 채워진 직후)에 잉크 표면의 패임이 거의 없고 평평하나 Fig. 10의 (b)처럼 점점 패임이 발생하여 망사의 윤곽이 드러나기 시작하며, Fig. 10의 (c)는 0.2sec(판 분리가 일어나기 직전)가 되었을 때로 패임이 육안으로 확실하게 확인되었다. 이 때 Fig. 10의 (c)에서 패임의 강도가 강한 부분은 망목에 잔류한 잉크를 제외하고 토출이 완료되었고 그 이후인 0.3sec에서는 판 분리가 완전히 이루어져 모든 셀의 잉크가 망사에서 모두 빠져나갔기 때문에 $1 \times 10^{-4}\text{sec}$ 를 잉크가 채워진 직후로 지칭하고 판 분리가 이루어지기 직전을 0.2sec라고 가정하도록 한다.



(a) after 0.0001sec



(b) after 0.1sec



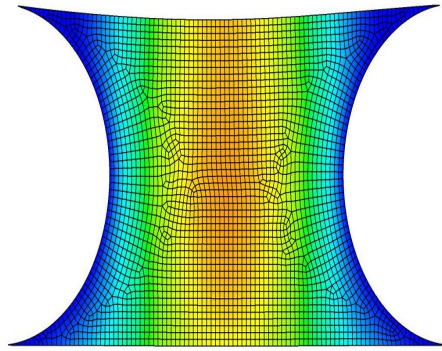
(c) after 0.2sec

Fig. 10. Ink flow according to time.

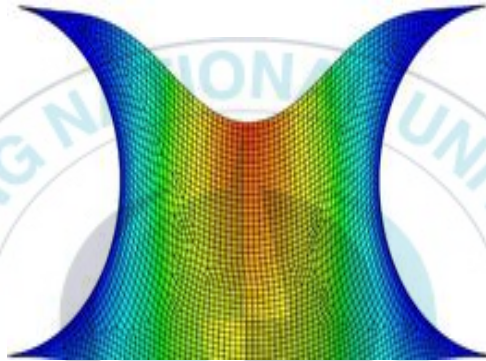
각각의 결과에서 보여주듯 시간이 지남에 따라 잉크가 토출되어 거의 모든 양의 잉크가 피인쇄체로 전이된 것을 볼 수 있었다. 이는 Walker-Fetsko가 제안한 잉크의 전이 정수 k , b , f 값과 전이 이론 모델처럼 거의 1:1의 양으로 잉크가 전이 되는 모습을 확인할 수 있었다. 이것은 이상적인 분열 모습으로 스크린 메쉬를 통과하는 자유 잉크인 f 값과 피인쇄체와 관련된 k , b 값은 동일한 비가 됨을 알 수 있었다. 즉, 스크린 메쉬를 통과하는 잉크 전이율과 피인쇄체의 잉크 전이율이 1:1의 상관관계를 가지는 것을 확인할 수 있었으며, 인쇄 도중에는 잉크와 관련된 문제점이 없다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구는 전이 모델 이론을 과학적으로 규명하고 세 가지의 잉크 전이 정수의 영향과 상관관계를 증명하였다.

Fig. 11은 스크린 메쉬의 셀 한 개당 잉크의 유동을 시간이 지남에 따라 2D 시뮬레이션한 결과이다.

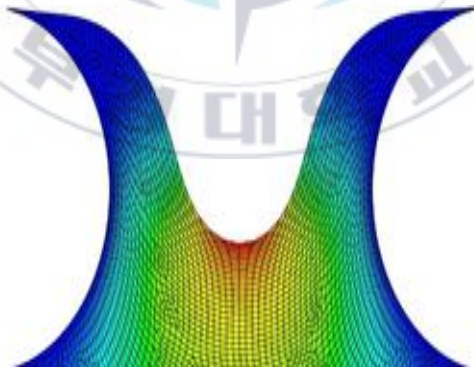
Fig. 11의 (a)는 1×10^{-4} sec로 잉크가 채워진 직후이며 실험한 결과와 같이 패임의 형상이 나타나지 않음을 알 수 있었다. Fig. 11의 (b)는 0.1sec로 시간이 지날수록 패임이 발생하고 스크린 메쉬와 잉크 표면의 각도인 α 값이 작아지는 것을 눈으로 확인할 수 있었다. Fig. 11의 (c)는 0.2sec가 지난 시뮬레이션 결과로 패임의 강도가 확연하게 큰 값으로 변화한 것을 알 수 있으며 α 값이 더 작아져 곧 판 분리가 일어날 것으로 예상된다. 따라서 Fig. 11은 스쿼징 이후부터 판 분리가 일어나기 직전까지 시간이 지남에 따라 속도 분포로 나타낸 것으로 오목하게 파이는 가운데 부분이 속도가 가장 빠르고, 스크린 메쉬와 잉크 표면이 각을 이루는 부분에선 느리다. 이는 판상의 잉크가 스쿼지 어택면으로부터 토출 압력을 받게 되어 가운데 부분의 속도가 빨라지는 것을 알 수 있었다.



(a) after 0.0001sec



(b) after 0.1sec

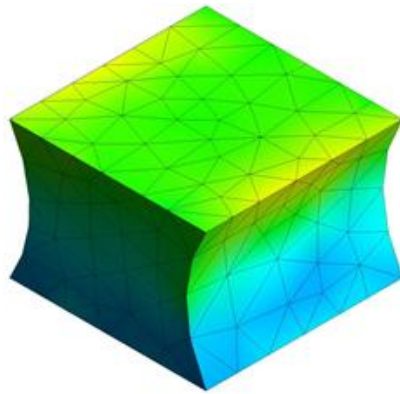


(c) after 0.2sec

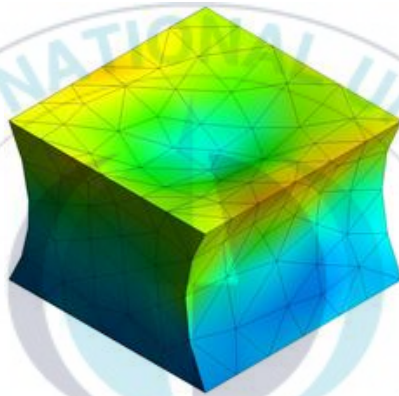
Fig. 11. Ink flow according to time(2D).

따라서 스퀴지의 속도와 각도 등의 요인으로 토출 압력에 영향을 주므로 스퀴지의 속도가 빠르거나 스퀴지의 각도가 클수록 잉크가 마스크 위에서 롤링성이 좋아져 잉크의 토출 속도 역시 빨라져 내림양이 증가할 것으로 사료된다.

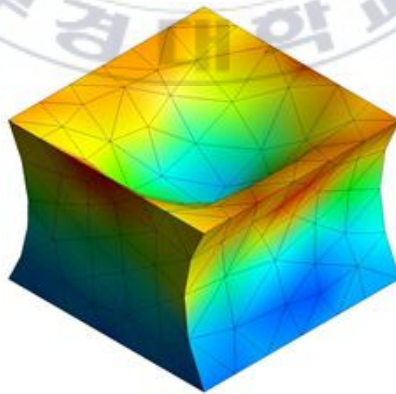
Fig. 12는 3D 시뮬레이션한 결과로 잉크가 채워진 직후인 1×10^{-4} sec일 때부터 0.2sec가 지났을 때를 시뮬레이션하여 압력 분포로 나타내었으며 실험과 거의 일치하였다. Fig. 12의 (a)는 1×10^{-4} sec때로 압력 분포에서 대부분 초록색으로 표현된 것으로 보아 압력의 영향을 받지 않아 잉크의 표면이 완만하다. Fig. 12의 (b)는 0.1sec일 때 스크린 메쉬 부분에 약간의 압력이 가해졌고 약간의 패임을 확인할 수 있었다. 이는 스크린 메쉬가 잉크 토출을 방해하여 중력가속도에 대한 부압력이 걸린 것으로 사료된다. Fig. 12의 (c)는 0.2sec가 지났을 때로 셀 가장자리의 잉크 부분이 눈에 띄게 오목하며 스크린 메쉬 부분의 압력이 더 강하게 걸린 것을 볼 수 있다. 따라서 스크린 메쉬 부분은 스퀴지의 압력 때문에 가운데 부분보다 압력이 더 높아짐을 알 수 있었고 이로 인해 셀 가장자리의 잉크가 0.2sec에서 이미 토출된 잉크 셀의 스크린 메쉬에 잔존한 원인이 된다고 생각된다. 따라서 잉크의 잔존성은 잉크의 점도와 관련이 있으므로 잉크의 점도가 높을수록 잉크 간의 점성이 강해져 스크린 메쉬에 잔존율이 더 높을 것으로 예상된다. 많은 양의 잉크 잔존은 망목의 막힘 현상의 원인이 되며 이로 인해 잉크가 피인쇄체로 제대로 전이되지 못해 인쇄물의 재현성에 상당한 문제를 야기할 수 있다.



(a) after 0.0001sec



(b) after 0.1sec



(c) after 0.2sec

Fig. 12. Ink flow according to time(3D).

Fig. 13은 추가로 진행한 실험과 시뮬레이션의 결과로 패임의 정도를 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 그러나 실험적 측면에서 그 패임의 정도를 정확하게 측정할 수 있는 방법은 지금까지 연구되지 않았다. 따라서 실험 부분에서 Fig. 13과 같이 거시적 방법으로 패임의 정도를 측정해본 결과 가운데를 중심으로 1×10^{-4} sec에서 약 3.49mm, 0.1sec에는 약 68.43mm, 그리고 0.2sec에는 약 89.67mm가 파악되었다. 하지만 시뮬레이션은 패임의 정도를 육안으로 확인할 수 있어 정확한 결과를 확인할 수 있었다. 시뮬레이션 결과는 가운데를 중심으로 1×10^{-4} sec에서 5.37mm, 0.1sec에는 약 75.53mm, 그리고 0.2sec에는 약 99.84mm가 파악되었다.

실험과 시뮬레이션 결과값이 거의 일치하며 실험에서 확인할 수 없는 잉크의 패임 정도를 컴퓨터 시뮬레이션으로 보다 정확하고 효율적으로 확인할 수 있었고, 특히 수치화하여 잉크의 토출량을 예상하여 인쇄의 최적 적성값을 찾는 데 기여할 것으로 기대된다.

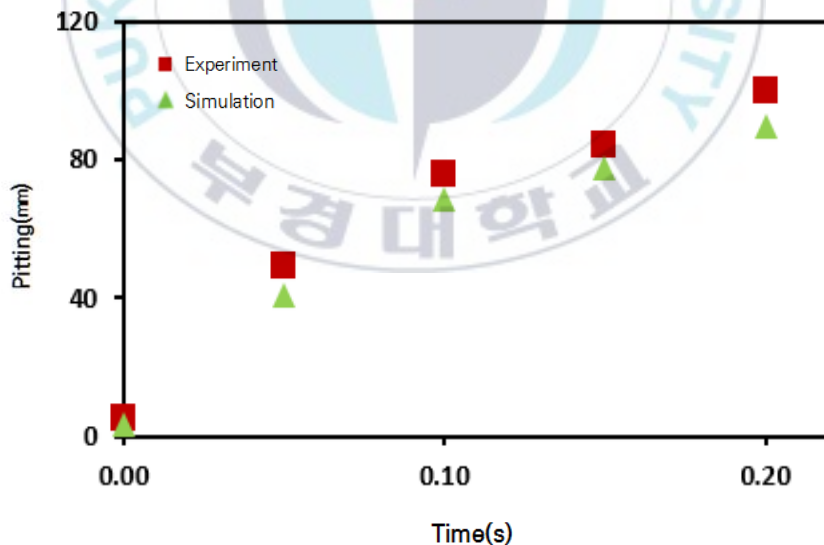


Fig. 13. Comparison of the experiments and the simulation results.

4-2. 점도에 따른 잉크 유동

Table 3은 판이 분리되기 전, 스크린 메쉬의 셀 한 개당 점도 변화에 따른 잉크 유동의 시뮬레이션 결과와 실험결과를 점도별로 비교한 것이다. 실험 결과 잉크의 점도가 100poise일 때 망목에 남은 잉크는 스크린 메쉬의 모양에 따라 각이 진 형태이고 그 직경이 257.41mm이다. 150poise 일 때 스크린 메시의 모양과 상관없이 원의 형태로 직경이 202.54mm이다. 200poise에서 156.72mm, 250poise에서 94.29mm으로 직경이 작아진 것을 확인할 수 있었다.

시뮬레이션에서는 Table 3과 같이 100poise의 가장 낮은 점도에서부터 250poise의 높은 점도로 갈수록 압력과 속도의 분포 등고선의 붉은 부분이 많이 나타나고 패임의 정도는 적어지며 판이 분리되기 직전 망사와 판 사이의 잉크 유동량이 적은 것으로 나타났다.

하지만 실험과 시뮬레이션의 결과 100poise의 점성을 가지고 있는 잉크는 대부분 전이가 되지만 전반적으로 피인쇄체로 퍼짐 현상이 심하여 원하고자 하는 형상을 재현해내기 어려운 문제점이 생길 수 있다. 반대로 250poise의 높은 점도를 주었을 때는 잉크가 오히려 제대로 전이되지 못하는 것을 확인할 수 있었다. 이론으로 알고 있는 바와 같이 이 시뮬레이션의 조건에서는 서로간의 점성이 너무 강해서 잉크가 망목에 잔존해 종이로 전이되지 못하고 인쇄 품질을 저하시키는 문제를 볼 수 있었다.

잉크의 전이가 가장 이상적인 조건은 200poise의 점도를 가진 잉크로 실험과 시뮬레이션 했을 때 인쇄형상의 불안정성과 망목 막힘 현상을 최소화할 수 있었다.

Table 3. Ink Flow According to Viscosity

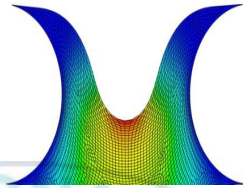
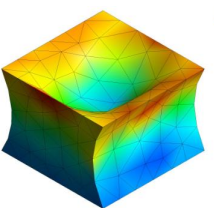
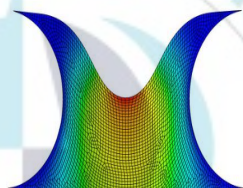
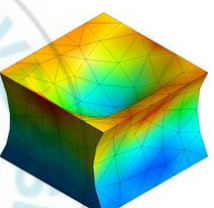
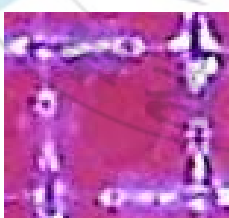
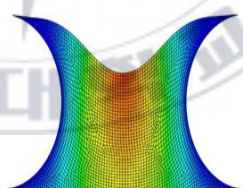
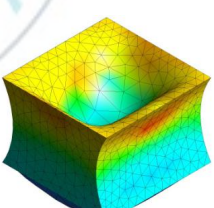
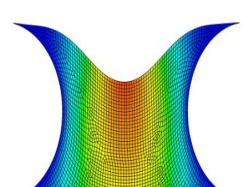
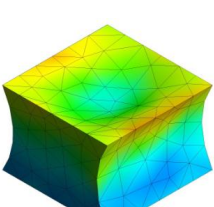
Division Viscosity	Experiment	Simulation (2D)	Simulation (3D)
100 poise			
150 poise			
200 poise			
250 poise			

Fig. 14는 판이 분리되기 직전인 0.2 sec에서 잉크의 공급량이 $500\text{g}/\text{cm}^3$ 이고, 인쇄 속도가 $6\text{cm}/\text{s}$ 일 때 스크린 메쉬와 잉크 표면이 각을 이루는 부분을 확대한 그림이다. Fig. 14의 A는 가장 작은 점도의 100poise이고, B, C, D는 각각 150poise, 200poise, 250poise이다.

이 때 잉크 표면과 스크린 메쉬의 각도인 α 는 각각 10.4° 이고, 점도 순으로 각각 10.4° , 12.9° , 14.8° 그리고 19.4° 이었다. 또한 polyflow의 프로그래밍으로 짜여진 mesh의 vector값을 측정해본 결과 점도가 커질수록 그 값이 작아졌다. vector값이 점도에 따라 반비례하는 것으로 보아 점도가 높아질수록 망목의 잔여 잉크량이 많아지는 것을 확인할 수 있었다.



Fig. 14. Expansion of ink flow.

Fig. 15는 잉크의 토출량의 실험 결과와 시뮬레이션 결과이며, 인쇄된 농도 평균값이 점도 순으로 각각 2.2, 2.0, 1.9 그리고 1.8이었다. 즉, 점도에 따라 농도가 반비례하는 결과를 얻었으며, 이 결과는 점도가 높아질수록 잉크의 토출량이 적어지며, 잉크 전이가 상대적으로 적게 되는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 16은 각도가 점도에 따라 비례하는 그래프로 실험결과와 비교했을 때 그 차이가 거의 나지 않는 것을 확인하였다.

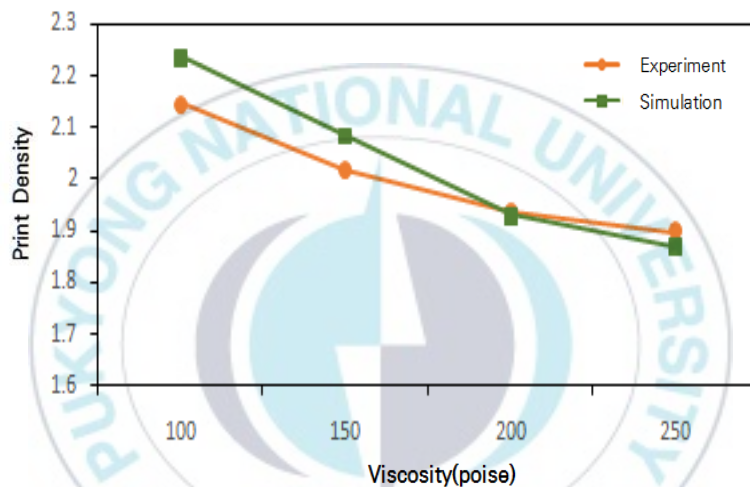


Fig. 15. Comparative results of ink density for velocity.

Fig. 16은 스크린 메쉬와 잉크 표면의 각도인 α 를 점도별로 나타낸 그래프이다. 즉, 점도에 따라 각도가 비례하는 결과를 볼 수 있었으며, 이 결과는 점도가 높아질수록 잉크의 점성에 의해 망목의 잉크 잔여량이 많아짐을 예상할 수 있었다.

따라서 점도가 낮아질수록 잉크 토출량은 많아지고, 점도가 높아질수록 잉크 전이량은 줄어들고 망목으로 붙는 잉크들이 많아짐을 확인할 수 있었다. 또한 인쇄압력, 인쇄속도, 잉크 점도 및 오프닝값 등의 요인 변

화에 대해 그 실험결과와 유사한 경향을 보이기 때문에 본 시뮬레이션은 더 효율적인 방법으로 인쇄 적성값을 찾을 수 있고 그로 인해 전자 제품을 제조하기 위한 정밀 인쇄 공정에서 시간과 비용을 절약할 수 있다.

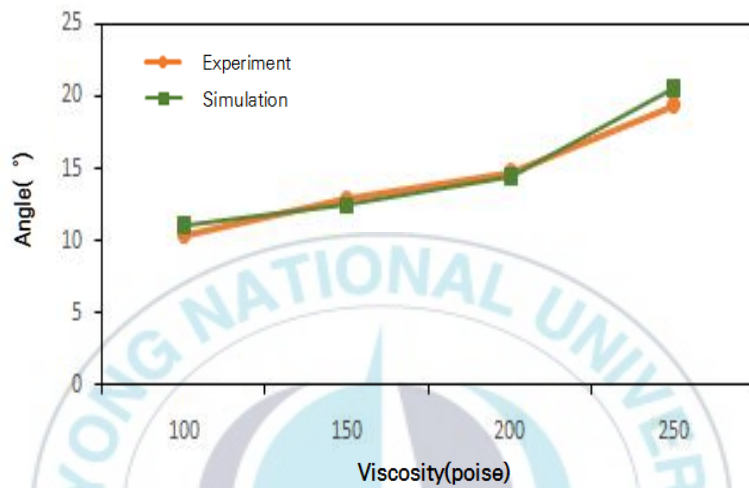


Fig. 16. Comparative results of the angle for velocity.

5. 결 론

본 연구는 인쇄전자 부품을 제조하기 위한 정밀 스크린 인쇄 공정에서 판의 분리 시 잉크의 토출과 전이 상태를 컴퓨터 시뮬레이션 한 것이다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 스크린 인쇄에서 잉크 토출 현상을 실험하고 시뮬레이션한 결과, 스퀴지의 속도가 빠르거나 스퀴지의 각도가 클수록 잉크가 마스크 위에서 롤링성이 좋아져 잉크의 토출 속도 역시 빨라져 내림양이 증가하였다.
- (2) 스크린 인쇄에서 잉크의 전이가 가장 이상적인 조건은 200poise의 점도를 가진 잉크로 실험과 시뮬레이션 했을 때, 다른 점도의 조건보다 인쇄형상의 불안정성과 망목 막힘 현상을 약 85% 최소화할 수 있었다.
- (3) 동일한 조건에서 실험 결과와 시뮬레이션의 형태가 약 90% 이상 일치하였으며, 잉크 잔류량과 시뮬레이션 상의 결과 값도 거의 일치하고 있음을 확인 할 수 있었다.
- (4) 시뮬레이션 결과에 의해 잉크의 유동 형태를 시각적으로 확인할 수 있었다. 따라서 시뮬레이션 상에서 인쇄조건과 상태를 변화시켜봄으로써 최적 인쇄 조건을 찾을 수 있을 것으로 사료된다.

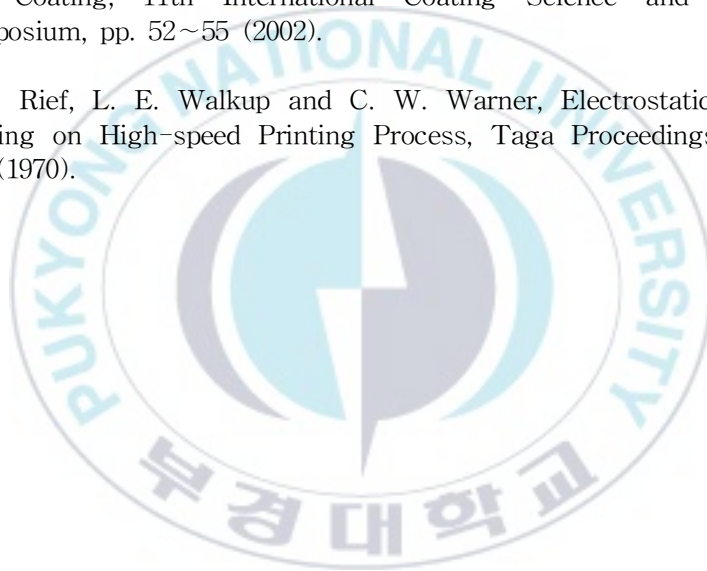
본 시뮬레이션 결과는 스크린 인쇄의 초기안정 시간과 비용을 절약할 수 있다는 장점 뿐 만 아니라 보다 정밀한 스크린 인쇄물의 제작에 기여할 수 있고, 과학적이고 최적화 공정의 연구가 이루어 질 수 있을 것이다. 또한 여러 가지 요인과 조건에 따른 결과를 예측할 수 있음으로써 보다 정밀한 인쇄전자 부품 제조에 이용할 수 있을 것으로 사료된다.



참고문헌

- 1) H. W. Lin, C. P. Chang, W. H. Hwu and M. D. Ger, The rheological behaviors of screen-printing pastes, journal of materials processing technology, pp.284~291 (2008).
- 2) J. S. Mok, A Study on Via Interconnection with Conductive Paste using Screen Printing for PCB Manufacture, pp.27~29 (2010).
- 3) J. T. Youn, K. H. Kim and B. T. Kim, Computer Simulation for Ink Transfer from Cell onto Paper in the Gravure, Journal of the Korean Printing Society, Vol. 21, No. 2, pp. 1~2 (2003).
- 4) J. K. Park, C. Y. Kim, The Effect of the Wettability of Solid Surface on Printing Pattern in Screen Printing, Korean Chem. Eng. Res, vol.48, No.3, June, 2010, pp 397~400 (2010).
- 5) S. C. Youn, J. S. Lim and C. J. Lee, Printed electronic devices: status and prospects of high-resolution printing process technology, Polymer Science and Technology Vol. 18, No. 3, June 2007, pp 238~245 (2007).
- 6) I. J. Fox, T. C. Claypole and D. T. Gethin, An experimental investigation into ink transfer using a roller squeegee in high-speed screen printing, Proc. Instn Mech. Engrs vol. 217 Part E:J.process Mechanical Engineering, pp.307~321 (2003).
- 7) J. S. Park, A Study on the thick stencil making in the screen printing, pp.1~8 (1999).
- 8) R. B. Rief, L. E. Walkup and C. W. Warner, Electrostatic Control of Misting on High-speed Printing Process, Taga Proceedings, pp. 270~291 (1970).
- 9) M. S. Owens, C. W. Macosko and L. E. Scriven, Misting in Forward Roll Coating, 11th International Coating Science and Technology Symposium, pp. 52~53 (2002).
- 10) J. T. Youn, Introduction to Printing Science, Pukyong National University, Chapter 2, pp. 14~28 (2010).

- 11) Y. R. Kang, G. Y. Jung, The Screen Printing using Double Layer Screen Plate, pp. 58~60 (2010).
- 12) P. J. Mangin, M. B. Lyne, D. H. Pageand and J. H. DeGrace, Advances in Printing Sience and Technology, Vol. 16, pp. 180~205 (2001).
- 13) M. I. Kolte and P. Szabo, Capillary Thinning of Polymeric Filaments, The Society of Rheology Inc. pp. 609~625 (1999).
- 14) I. Ichikawa, Science in Paper, Ink and Printing, Insatsukyoku Choyokai, p.150 (1970).
- 15) M. S. Owens, C. W. Macosko and L. E. Scriven, Misting in Forward Roll Coating, 11th International Coating Science and Technology Symposium, pp. 52~55 (2002).
- 16) R. B. Rief, L. E. Walkup and C. W. Warner, Electrostatic Control of Misting on High-speed Printing Process, Taga Proceedings, pp. 279~291 (1970).



감사의 글

근 1년 6개월간의 대학원 생활 끝에 논문의 마지막 페이지를 적고 있는 지금, 많은 생각이 주마등처럼 머릿속을 지나갑니다. 연구와 실험에 있어서 많은 어려움도 있었지만 교수님과 선배님들의 진심어린 충고와 조언으로 많은 것을 배움으로써 얻어진 지식이 더 많은 것 같습니다. 논문을 작성하는 동안 끊임없는 피드백과 도움을 주신 많은 분들에게 몇자 적어보려 합니다.

먼저, 대학원 생활의 길의 척도가 되어주신 윤종태 교수님께 감사하다는 말 전하고 싶습니다. 다양하고 흥미로운 실험을 쾌적한 환경에서 연구할 수 있도록 도와주시고 항상 잘하고 있다고 응원해주시는 말씀이 매번 힘이 되었습니다. 또한 답이 아닌 질문으로 항상 많은 생각을 하게 함으로써 생각의 폭이 그 누구보다 깊어진 것 같습니다. 그리고 바쁘신 가운데 논문 심사를 위해 시간을 내어주시고 세심한 지도 및 심사를 해주신 구철희 교수님과 최송아 박사님께도 너무나도 감사합니다.

그리고 가장 최측근에서 힘든 일, 즐거운 일 함께하면서 2년 반 동안 아무것도 모르는 저에게 하나하나 알려주시고, 응석쟁이였던 저를 내리사랑으로 보듬어주신 만능 박사 지은쌤, 송아쌤 너무 감사합니다. 항상 함께할 순 없었지만 인쇄적성실에서 도움을 준 믿음직했던 병진이, 논문 실험하는 동안에 옆에서 어깨 주물러주던 장섭이, 나의 고민 상담사 세은이에게도 감사의 인사를 전하고 싶습니다. 그리고 4년 내내 내 옆을 묵묵히 지켜주며 응원해준 하나 뿐인 대학 절친 설화 고맙고, 눈만 봐도 서로 알 수 있는 13년 지기 옆집 친구 수현이, 나의 죽마고우 예쁜 혜진이, 몸짱 소민이, 착한 유진이, 논문 마무리하게 도와준 기환 오빠에게도 고맙다는 말 전합니다.

마지막으로 언제나 사랑하는 마음으로 든든하게 응원해주신 우리 부모님께 그 어떤 말로도 표현할 수 없을 만큼 존경하고 사랑하고 감사합니다. 곧 군대 가는 동생 우리 봉이, 덕선이까지 앞으로 이 모든 사랑 잊지 않고 더 발전하며 열심히 살아가겠습니다. 감사합니다.

2018년 1월

노 민 성