

그라비아 인쇄에서 비도피지의 잉크 침투 시뮬레이션에 관한 연구

서예리[†], 윤종태

[†]부경대학교 대학원 인쇄공학과, 부경대학교 공과대학 인쇄정보공학과
(2010년 2월 1일 접수, 2010년 3월 31일 최종 수정본 접수)

A Study on the Simulation of Ink Penetration into the Uncoated Papers in Gravure Printing

Yea-Ri Seo[†], Jong-Tae Youn

[†]Dept. of Graphic Arts Engineering, Graduate School, Pukyong National University,
Dept. of Graphic Arts Information, College of Engineering, Pukyong National University
(Received 1 February 2010, in final from 31 March 2010)

Abstract

Gravure printing and manufacturing of advanced electronic components in a way that is going extra hold position. It is to print the electronic components of the rapid productivity improvements as well as cost-saving and environment-friendly industries such as the transition is a big advantage. However the mechanism of gravure is difficult to study scientifically because of high speed and excessively small size of the cell. To approach the mechanism we experimented using gravure printability. The condition of variables of IGT is pressure and velocity. By using Flow-3D simulation software, we built up the theoretical model under the constant variables. Then, we compared the real test with the simulation results.

Therefore, it is studied the mechanism of gravure scientifically and it can be analysed the effect of the variable conditions.

Keyword : gravure printing, ink penetration, uncoated paper, simulation

1. 서 론

그라비아 인쇄는 이미 자취를 감춘 활판 인쇄나 블록판 인쇄와는 다르게 다양한 분야에 걸쳐 현재에도 이용되고 있다. 현대 인쇄산업에서 그라비아 인쇄는 출판인쇄 뿐만 아니라 연포장(flexible package) 인쇄, 벽지, 건축자재, 장판 등의 공산품에서 각광을 받고 있다. 특히 라면, 과자, 식품, 생활용품 등의 포장 재료에 가장 알맞은 인쇄법으로 알려져 있고 많이 사용되고 있다.¹⁾

그라비아 인쇄기는 화상이 판통(plate cylinder) 위에 음각되어 있고 음각된 잉크 홈(ink cell) 안에 잉크를 채워 넣은 후 피인쇄체에 전이한다. 음각된 셀에 잉크를 담아서 전이하기 때문에 잉크의 전이량에 따라 잉크 피막을 형성한다. 또한 그라비아 인쇄에 사용되는 잉크는 저점도 잉크로 유동성이 풍부하고 건조성이기 때문에 고속 인쇄가 가능하다.²⁾ 블록판 인쇄와 오프셋 인쇄용 잉크에는 끈기(tack)가 필요해서 인쇄 시 용지의 뜯김 현상의 원인이 되므로 뜯김(picking)이 많은 종이에는 인쇄가 불가능하지만 그라비아 인쇄에서는 용제형 잉크를 사용하기 때문에 끈기가 불필요하고 뜯김은 일어나지 않는다.³⁾ 이런 잉크의 특성상 종이는 물론 플라스틱, 금속, 수지, 유리, 각종 옷감 등 대부분의 피인쇄체에 인쇄가 가능하기 때문에 인쇄의 응용 범위가 넓으며, 현재는 태양 전지용 페이스트의 코팅, 인쇄 회로 기판(PCB, Printed Circuit Board), 플라즈마 디스플레이(PDP, Plasma Display Panel) 및 박막 트랜지스터(TFT, Thin Film Transistor) 등 고급 전자 정보 통신용 전자 부품을 제조하는 방식으로 점차 입지를 굳혀가고 있다. 그라비아 인쇄로 전자 부품을 인쇄할 경우 생산성의 급격한 향상은 물론 원가 절감 및 친환경 산업으로 전환되는 등의 큰 장점이 있기 때문이다.

이러한 그라비아 인쇄의 메커니즘을 이해하기 위해서는 그라비아 잉크가 얼마나 또 어떤 방법으로 전이되는지 잉크의 유동 현상에 관해 알아야 한다. 하지만 그라비아 셀의 가장 깊은 부분은 약 30 μ m 정도로 매우 작고, 잉크 전이 또한 순간적으로 일어나는 현상이기 때문에 육안으로 잉크의 유동을 알아보는 것은 거의 불가능하다.⁴⁾ 따라서 잉크의 유동에 대해서는 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 방법으로 연구하는 것이 가장 효율적인 방법이라 생각된다.^{5~8)}

최근 이 분야에 관한 연구로는 주로 뉴턴성(Newtonian) 잉크를 가지고 연구한 것이 대부분이었다.⁹⁾ 그러나 현재 그라비아 잉크는 간단한 유색 및 무색 안료뿐만 아니라 금속 분말(metal powder)이 분산된 도전성 잉크나 고분자 재료 등 특수 안료들이 등장하여 다양한 형태의 비뉴턴성(non-Newtonian) 거동을 하고 있기 때문에 종래의 그라비아 잉크 및 코팅 재료와 현재의 재료는 그 성질이 유동 물성적으로 현저히 다르다.

따라서 본 연구에서는 그라비아 인쇄시 여러 피인쇄체 가운데 비도피지(uncoated

paper)로 침투하여 스며드는 잉크의 유동을 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 규명하고, 실험을 통해 증명하고자 한다.

2. 이 론

2-1. 잉크 침투 깊이의 측정

일반적인 비도피지의 두께는 100 μ 전후를 넘지 않으므로 두께 방향으로 액체가 침투 되는 길이를 정확히 측정하는 것은 대단히 어려운 문제이다. 따라서 투과광의 강약을 가지고 측정하는 방법을 사용한다.

균일한 두께 D인 기름의 피막을 두께 C의 종이 표면에 칠한 순간부터 시간 t가 지났을 때, x 만큼 기름이 침투하였다고 가정한다. 그리고 종이의 표면에 기름의 피막이 두께 D만큼 있다고 보면(Figure 1) 광흡수에 대한 유명한 Lambert의 법칙을 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I = I_0 e^{-\mu_1(C-x) - \mu_2x - \mu_3D} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 I_0 는 입사광이고 I는 투과광이며 μ_1, μ_2, μ_3 은 각각 종이, 종이 중 기름이 흡수된 부분, 그리고 기름의 흡수 계수를 나타낸다. 종이의 모세관 평균 반경 r' 를 생각하면, 기름의 침투깊이 x는 r' 에 의해 결정된다고 볼 수 있다.

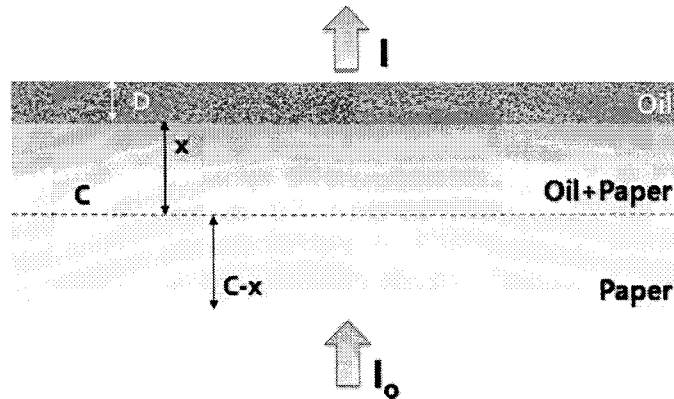


Figure 1. The theory is that the oil penetrated into the paper.

Olsson and Phil의 식에서

$$h = \sqrt{\frac{r^2 p}{4\eta}} \times \sqrt{t} \dots\dots\dots (2)$$

이것을 쉽게 풀이하면,

$$x = K\sqrt{t} \dots\dots\dots (3)$$

이고, 공극률을 W라고 하면, 종이 표면에 있는 기름 피막의 두께 D는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = D_0 - WK\sqrt{t} \dots\dots\dots (4)$$

식 (1)과 식 (3)을 식 (4)에 대입하고 K를 풀어내면 다음과 같다.

$$K \cong C \frac{\left(\frac{d \ln I}{d \sqrt{t}}\right)}{(\ln I'_p - \ln I_p)} \dots\dots\dots (5)$$

여기서 I_p 는 종이에 투과 광량이고 I'_p 는 기름이 흡수된 상태에서 종이의 흡수 광량이다. 또 식 (5)의 분자는 직선의 기울기와 방향 계수이므로 실험적으로 구해진다. 이와 같이 식 (5)에서 K를 구하고 식 (3)을 다시 쓰면

$$K = \sqrt{\frac{\gamma r'}{2\eta}} \dots\dots\dots (6)$$

가 얻어지므로 여기서 모세관의 평균반경 r' 도 구할 수 있다.

2-2. Kubelka-Munk의 이론식

반사율을 가지고 종이 속으로 들어가는 기름의 침투 속도를 측정하는 방법은 x를 잉크피막 내부의 두께라고 하고, 미소 두께 변화는 dx라고 하며, 이 점 위에서 위와 아래의 광산란 속도를 i와 j라고 가정한다. 여기서 dx의 두께는 얇지만 잉크 중 안료 입자의

직경보다는 충분히 크다.

이 층을 통과하는 것 중에서 하향하는 광속 I 가 흡수되는 것은 $Kidx$ 이고, 또 역방향으로 산란되는 것은 $Sidx$ 로 가정한다면 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$-di = -(S+K)idx + Sjdx \dots\dots\dots (7)$$

$$dj = -(S+K)jdx + Sidx \dots\dots\dots (8)$$

이 연립방정식을 풀어서 얻은 식을 Kubelka-Munk의 식이라고 하며, R 을 인쇄물의 반사율, R_∞ 을 잉크 피막의 반사율, R_g 를 피인쇄체의 반사율이라고 한다면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{\frac{1}{R_\infty}(R_g - R_\infty) - (R_g - \frac{1}{R_\infty})\exp Sx(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty)}{(R_g - R_\infty) - (R_g - \frac{1}{R_\infty})\exp Sx(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty)} \dots (9)$$

$$\frac{K}{S} = \frac{(1 - R_\infty)^2}{2R_\infty} \dots\dots\dots (10)$$

여기서 흑색 안료의 흡수 계수가 충분히 인쇄물의 이면에 잉크가 침투하는 영역에 달할 때, 빛은 완전히 흡수된다고 가정한다면 Kubelka-Munk의 식에서 $R_g=0$ 이라고 볼 수 있고, 잉크가 침투하지 않은 부분의 종이 두께를 x 라고 한다면 다음과 같다.

$$R = \frac{1}{a + b \coth Sx} R \dots\dots\dots (11)$$

$$\ast a = \frac{1}{2}(R_\infty - \frac{1}{R_\infty}), b = -\frac{1}{2}(R_\infty - \frac{1}{R_\infty})$$

S 는 종이의 산란 계수이고, R 은 종이의 두꺼운 곳에서의 반사율이다. 이 식에서 흑색의 아랫부분($R_g=0$)에서 종이 1매의 반사율을 측정된 것을 R_0 라고 하고 종이의 두께를 d 라고 한다면 다음과 같이 S 값을 구할 수 있다.

$$S = \frac{1}{bd} \coth^{-1} \left[\frac{1 - aR_0}{bR_0} \right] \dots\dots\dots (12)$$

식 (11)에서 반사율 R에 대한 x를 계산하면 잉크의 침투 깊이 h는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h = d - x \dots\dots\dots (13)$$

3. 실험

본 논문에서는 그라비아 인쇄의 메커니즘 해석에서 실험적인 방법과 이론적인 해석을 일치시키는데 그 목적을 두었다. 실험적인 방법을 위해 사용한 것은 인쇄 적성 모사 시스템 중 그라비아 인쇄 적성 시험기(IGT, model G1-5, The Netherlands)이고, 이론적인 해석을 위해 사용한 시뮬레이션 프로그램은 FlowScience사에서 제공하는 FLOW-3D (version 9.3)이다.

그라비아 인쇄 적성 시험기로 얻은 시편(sample)의 농도를 측정하여 Kubelka-Munk의 식을 통해 잉크 침투 깊이를 구하고, 실험과 동일한 조건을 시뮬레이션 하여 얻은 데이터를 비교·분석하였다.

3-1. 인쇄 적성 실험

인쇄 적성 실험은 Figure 2와 같은 IGT 그라비아 인쇄 적성 시험기를 사용하였다. 이것은 상부 롤러만 존재하며 피인쇄체가 평면적으로 인쇄되는 원압식 인쇄 방식의 형태로 제판방식은 컨벤셔널 제판법으로 셀의 가로와 세로의 길이는 같고 셀의 깊이에 따라 농담을 표현한다.

IGT 그라비아 인쇄 적성 시험기의 독터 블레이드는 60°로 고정되어 있고 인쇄 압력은 19단계(100~1,000N), 인쇄 속도는 5단계(0.2~1.0%)로 조절할 수 있다. 본 실험에서는 Table 1과 같이 속도와 압력의 변화를 주며 실험하였으며, 변화되는 조건에서 동일한 방법으로 실험하였고, 각 조건별의 오차를 줄이기 위해 세 번씩 인쇄한 시편들의 평균값을 사용하였다.

인쇄용지는 중량 100g/m², 두께 0.1mm의 백상지를 사용하였고, 잉크는 점도가 2poise인 그라비아 잉크로 실험하였으며 인쇄실의 환경은 20℃, 습도 60%를 유지하였다.

제작된 시편은 반사 농도계(X-Rite 418, USA)를 이용하여 화선부와 비화선부의 농도

를 측정하여 Kubelka-Munk의 식에 대입한 뒤, Hyperbolic contangen 값을 통해 산란 계수 및 흡수 계수를 구하는 방법으로 잉크 침투 깊이를 계산하였다.

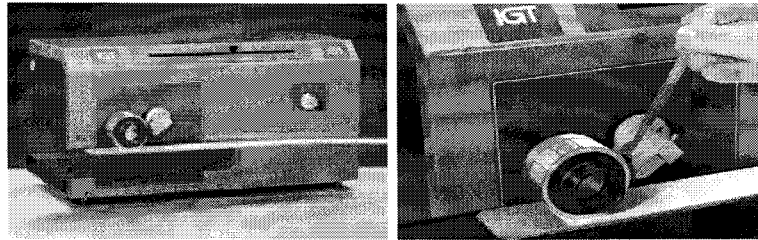


Figure 2. Photograph of IGT printability tester of gravure inks.¹⁰⁾

Table 1. Condition of IGT Printability Tester

Speed(m/s)		Pressure(N)	
S1	0.2	P1	100
S2	0.4	P2	300
S3	0.6	P3	500
S4	0.8	P4	700
S5	1.0	P5	900

3-2. 시뮬레이션

시뮬레이션은 복잡한 문제를 해석하기 위해 모델에 의한 실험을 통해 그 특성을 파악하는 것을 말한다. 잉크 침투에 관한 유동 시뮬레이션을 하기 위해 실제 인쇄 현상에 맞는 물리적 특성을 설정하고 이 후 6면체의 격자(mesh)를 설정하여 각 면에서의 경계 조건(boundary condition)을 주었다. 완성된 입력 값(input data)을 시뮬레이션하기 위한 작업이 이루어지면 계산이 끝난 값을 통해 display mode로 확인하였다.¹¹⁾ Figure 3에서는 시뮬레이션 작업 순서를 간략히 나타내었으며, 잉크는 점탄성 유체라고 볼 수 있으며 주어진 외력에서 주어진 시간 간격으로 응답을 받도록 하였고, 외력과 변형은 시간의 함수로 기록되고 단위는 0.1초 동안 적용된다.

격자수는 프로그램 버전 및 컴퓨터 CPU 환경을 고려하여 총 400개로 제한하여 시뮬레이션 하였으며, Figure 4는 시뮬레이션에 대한 모식도로서, 도공성을 지닌 비도피지에 잉크가 떨어지는 모형을 나타낸 것이다.



Figure 3. Description of FLOW-3D software.

시뮬레이션 프로그램의 이론적인 기반은 연속 물리학(continuum mechanics) 및 유체의 유변학적 거동을 묘사할 수 있는 현상학적 접근법(phenomenological) 또는 키네틱 이론(kinetic theory)적 모델에 의해 만들어진다. 이는 뉴턴성 유체뿐만 아니라 탄성이 없는 비뉴턴성 유체 및 탄성이 있는 비뉴턴성 유체 모두에 있어서의 여러 가지 구성 모델을 제공한다.

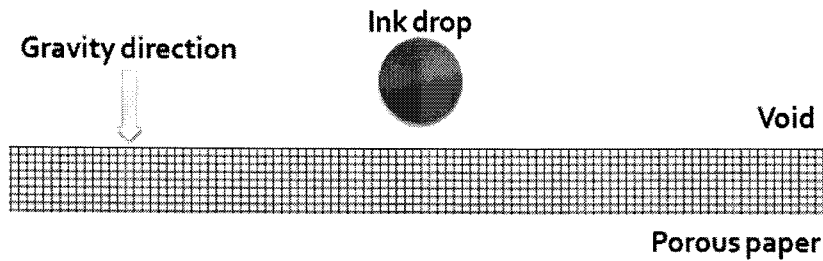


Figure 4. Schematic diagram of ink penetration mechanism.

Figure 5에서는 실제 FLOW-3D를 사용하여 물리적 특성 조건, 경계 조건, 격자 등을 순서대로 나타내었으며 잉크의 물성에 대한 조건은 Table 2와 같다.

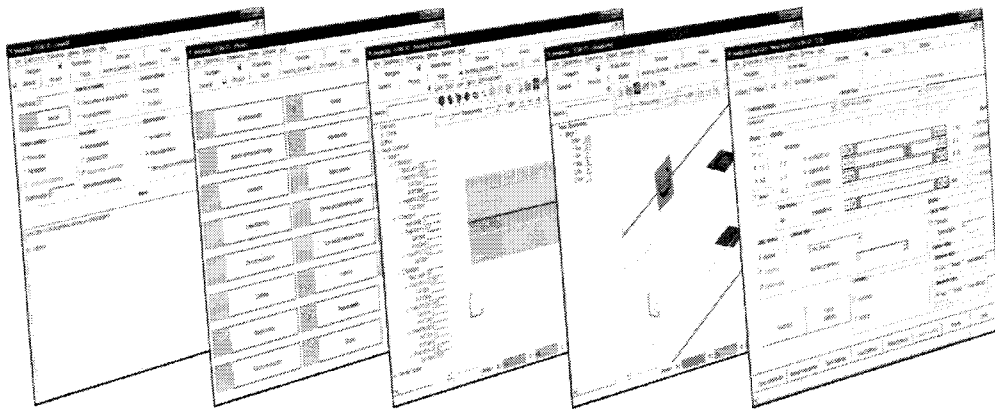


Figure 5. Photograph of simulation courses.

잉크는 셀에서 빠져나와 피인쇄체에 완전히 부착된다고 가정하였고, 관성을 고려해주었으며 초기 시간 0에서 최종 시간에 이르기까지 잉크 거동의 모습을 시뮬레이션 하였다. 정지 상태에서 시작하면 시뮬레이션의 결과로 시간의 함수로서 외력의 변화를 얻을 수가 있다.

Table 2. Physical Properties of Simulation

New-Task	Transient Flow
Sub-Task	Generalized Newtonian, Isothermal Flow
Initial Viscosity	2 poise(g/cm · s)
Cell Depth	30 μ m
Surface Tension	30 dyne/cm
Density	1.0 g/cm ³
Velocity	5 step
Contact Angle	60°

4. 결과 및 고찰

4-1. 인쇄 압력 변화에 따른 잉크 침투 깊이

IGT 인쇄 적성 실험 및 시뮬레이션 결과 Figure 6에서와 같이 압력이 높아질수록 잉크 침투 깊이도 늘어나 인쇄 압력과 잉크 침투 깊이의 관계가 비례함을 알 수 있었다. 시뮬레이션 결과는 여러 가지의 가정, 예를 들면 잉크의 조성이 균일하다는 조건에서부터 실제 인쇄 환경과는 같지 않으나 이러한 환경적 조건과 변수를 고려한다면 인쇄 적성 실험 결과와 시뮬레이션 결과가 거의 일치하다는 것을 알 수 있었다.

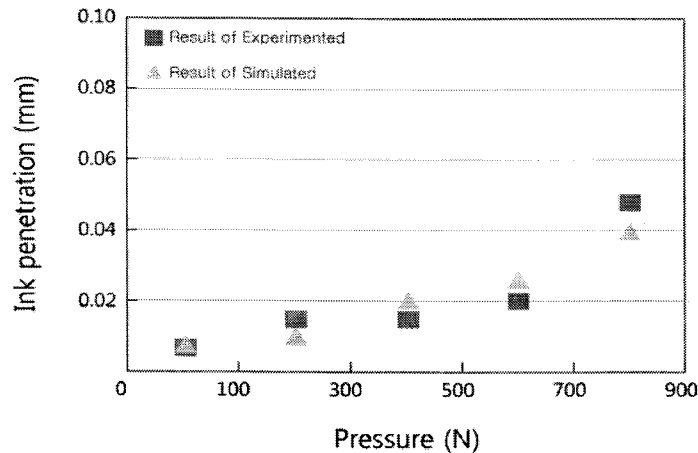


Figure 6. The depth of ink penetration according to printing pressure.

4-2. 인쇄 속도 변화에 따른 잉크 침투 깊이

IGT 인쇄 적성 시험기에서는 속도가 점차 가속되면서 인쇄되기 때문에 한 번의 인쇄로 실험이 끝난다는 장점이 있다. 그러나 인쇄물의 각 부분에 인쇄 속도가 다르기 때문에 잉크의 전이율이 달라지고 인쇄물의 전면에 걸쳐서 잉크 두께가 일정하지 않다는 단점이 있다. 하지만 총 3회에 걸쳐 측정한 결과의 평균값을 시뮬레이션 결과와 비교했을 때, Figure 7에서 나타나는 것과 같이 그 차이는 크지 않음을 확인할 수 있었다.

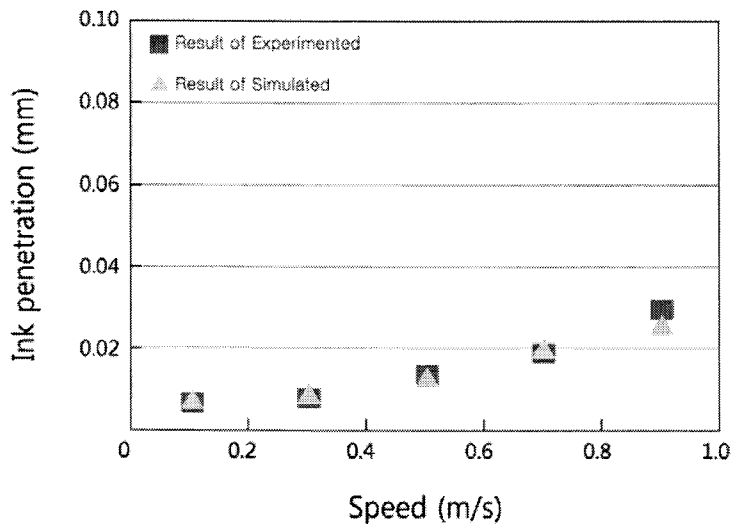


Figure 7. The depth of ink penetration according to printing speed.

4-3. 비도피지의 투기도에 따른 잉크 침투 깊이

잉크가 용지에 인쇄되면 먼저 인쇄 압력에 의해 잉크 중 일부 성분은 급격히 용지 속으로 침투되어 들어가게 된다. 그러나 시간이 경과할수록 잉크의 침투 속도는 완화되고 그 이상의 시간이 경과하면 침투는 더 이상 일어나지 않기 때문에 피인쇄체의 투기도가 높을수록 잉크 침투 속도는 빨라지게 된다. 투기도는 영겨있는 섬유들 사이의 기공도를 말하며 투기도가 높으면 그 만큼 잉크 침투 통로가 많아져 빨라지는 것인데, 비도피지의 경우 투기도가 도피지에 비해 높다.

Figure 8에서는 기공도에 따른 잉크 침투 깊이에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내었으며 투기도에 따른 잉크 침투깊이 또한 인쇄 압력과 속도와 같이 비례함을 알 수 있었다.

Figure 9는 잉크 침투의 유동 현상을 2-D로 나타낸 것이다. 인쇄시 압력을 가장 많이 받는 부분은 붉은 색으로 나타나게 되는데, 아래 그림은 300N의 압력으로 인쇄했을 때의 시뮬레이션 결과이다.

그라비아 인쇄에서 비도피지의 잉크 침투 시뮬레이션에 관한 연구

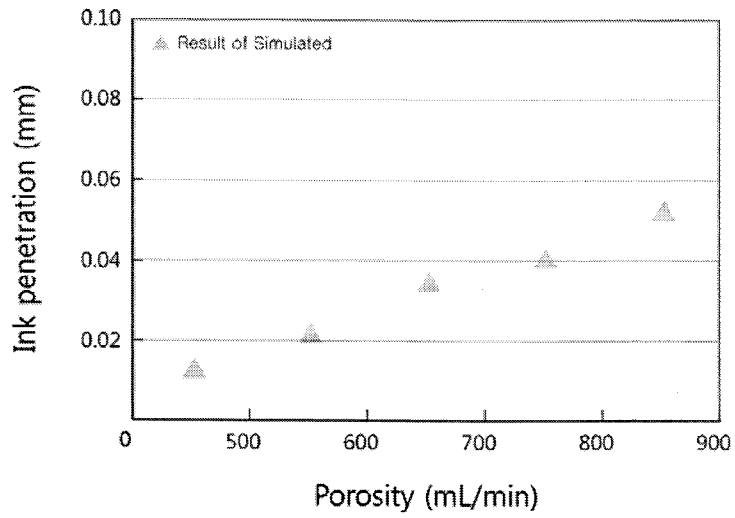
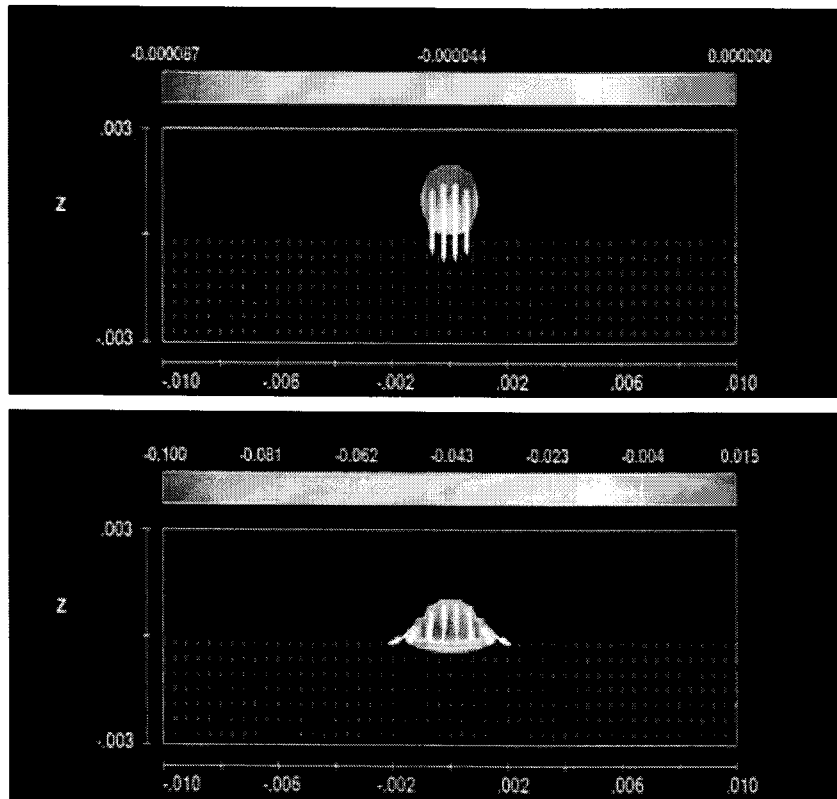


Figure 8. The depth of ink penetration according to porosity.



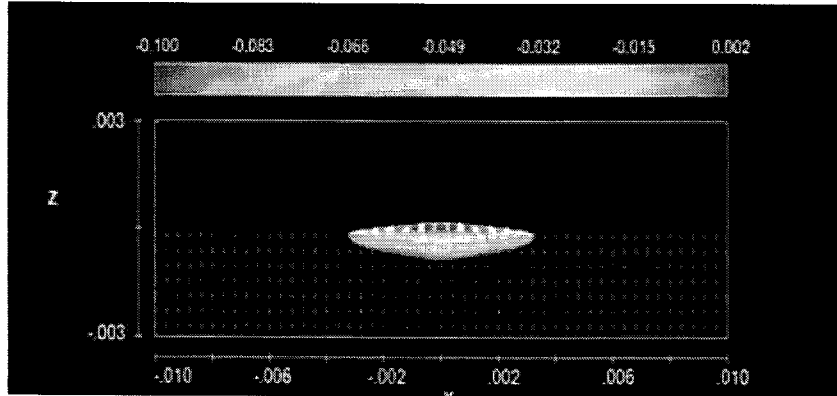


Figure 9. Two dimensional view of penetration processing.

5. 결 론

그라비아 인쇄에서 비도포지 잉크 침투에 관한 현상을 컴퓨터 시뮬레이션 하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 시각적으로 확인할 수 없었던 그라비아 인쇄 잉크의 유동 모습과 흘러내림 현상을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다. 또한 다양한 변수들의 값이 실제로 인쇄 현상에 어떠한 영향들을 주는지에 대해 유추할 수 있었다.
2. 실험적인 방법의 결과와 시뮬레이션의 결과가 인쇄 압력과 속도의 경우 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었으며, 피인쇄체 투기도에 따른 침투 깊이 역시 조건의 차이와 변수를 고려한다면 실험 결과 값이 일치할 것으로 기대하고 있다.
3. 시뮬레이션을 통해 그라비아 인쇄에서 잉크 전이에 대한 해석이 용이함을 알 수 있었다.

그라비아 인쇄 적성 시험기와 시뮬레이션을 이용하여 인쇄의 조건 변화에 따른 인쇄 현상을 과학적인 수치로 나타낼 수 있었으며, 실험적인 방법의 결과와 시뮬레이션의 결과가 거의 동일함을 확인하였다. 또한 육안으로 확인할 수 없는 잉크 전이에 대한 해석이 가능해짐에 따라 잉크 유동에 관한 시뮬레이션은 그라비아 시험 인쇄 등에 이용 가능할 것으로 판단된다.

따라서 앞으로 이와 같은 시뮬레이션 프로그램을 사용하는 연구를 통해 그라비아 인쇄의 발전도 충분히 가능할 것이라고 생각된다.

참고문헌

- 1) 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*, **21(2)**, pp. 21~22 (2003).
- 2) F. G. Shubert, E. T. Funk, and R. W. Bassemir, A. C. Hamilton, Low Shear Viscosity of Publication Gravure Inks and Its Implications, TAGA proceedings, pp. 219~223 (1984).
- 3) Y. Xian, D. W. Bousfied, Influence of Coating Structure on Ink Tack Dynamics, *Journal Pulp and Paper Science*, **26**, pp. 221~227 (2000).
- 4) H. F. George, W. N. Welch, Quantitative Measurement of Gravure Ink Trasfer, TAGA proceedings, pp. 144~150 (1978).
- 5) L. W. Schwartz, Numerical Modeling of Liquid Withdrawal from Gravure Cavities in Coating Operations; the Effect of Cell Pattern, *Journal of Engineering Mathematics*, **42**, pp. 243~253 (2002).
- 6) J. T. Youn, K. H. Kim and B. T. Kim, Computer Simulation for Ink Transfer from Cell onto Paper in the Gravure, *Journal Korea Printing Society*, **21(2)**, pp. 21~29 (2003).
- 7) S. S. Lee and J. T. Youn, Computer Simulation of Ink Flow in the Various type of Gravure Cell, *Journal Korea Printing Society*, **23(2)**, pp. 59~75 (2005).
- 8) M. J. Lee and J. T. Youn, Simulation of Ink Transfer in the Printing Nip, *Journal Korea Printing Society*, **23(2)**, pp. 103~115 (2005).
- 9) M. R. and H. W, Thermal effect on the penetration of an ink droplet onto a porous medium, European Thermal Sciences Conference, 5th, The Netherlands (2008).
- 10) IGT Testing Systems, IGT G1-5 printability tester for gravure inks manual, The Netherlands, pp. 1~3.
- 11) C. L. Boonisz and C. W. Hirt, Unsaturated Flow In Porous Media, Flow Science Inc, TN25R, pp. 7~12 (2005).