

<학술논문>

잉크에 부분적으로 잠긴 회전하는 롤 주위의 액막 유동 해석

유승환* · 이관수† · 엄석기**

(2007년 8월 20일 접수, 2007년 10월 26일 심사완료)

Analysis of Film Flow Around Rotating Roller Partially Immersed in Ink

Seung-hwan Yu, Kwan-Soo Lee and Sukkee Um

Key Words : RFID(전파인식), Gravure Printing(그라비아 인쇄), Film Flow Around Rotating Roller (회전롤러 위의 액막 유동), Volume of Fluid Method(VOF 법)

Abstract

This study is intended to analyze the effect of thin ink-film thickness around rotating printing roll on the printing quality in the gravure printing process which is used for making electronics circuit like a RFID tag with a conductive ink. The present work numerically estimates the film thickness around rotating roller partially immersed in ink, for which the volume of fluid (VOF) method was adopted to figure out the film formation process around rotating roller. Parameter studies were performed to compare the effect of ink properties (viscosity, surface tension), operating condition (roller rotating speed, initial immersed angle) on the film thickness. The result indicates that the film thickness has a strong dependency on the rotating speed, while the surface tension has negligible effect.

기호설명

- Ca : Capillary number [$\mu U / \sigma$]
- F : 힘 [N]
- g : 중력 [9.8 m/s^2]
- H : 액막 위치 [cm]
- h : 액막 두께 [cm]
- \mathbf{n} : 법선 벡터
- P : 압력 [N/m^2]
- r : 롤러 반지름 [m]
- \mathbf{t} : 접선 벡터
- We : Weber number [$\rho r U^2 / \sigma$]
- V : 속도 [m/s]

그리스문자

- α : 체적비
- ρ : 밀도 [kg/m^3]
- θ : 위치 각 [$^\circ$]
- μ : 점성 [$\text{N}\cdot\text{s/m}^2$]
- σ : 표면장력 계수 [N/m]
- κ : 곡률 [m^{-1}]
- ω : 각 속도 [rad/s]

하첨자

- k : k 번째 상
- w : 벽 접촉
- i : 잠김

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : ksleehy@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0426 FAX : (02)2294-9021

* 한양대학교 대학원 기계공학과

** 한양대학교 기계공학부

1. 서론

최근 물류/유통 산업에서 사용되는 시간과 비용을 최소화하기 위하여 기존의 바코드 시스템을 대

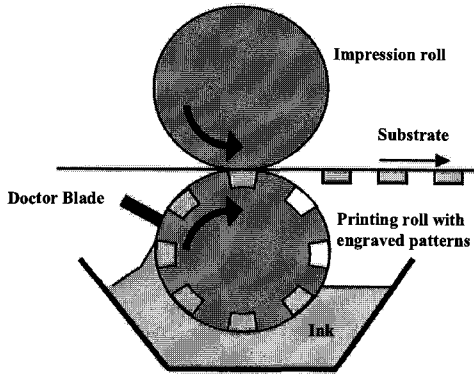


Fig. 1 Schematic diagram of gravure printing

체할 수 있는 전파 인식(Radio frequency identification, RFID)이라는 새로운 시스템이 주목 받고 있다. 전파인식 태그(tag)는 생산 단가를 낮추기 위해서 기존의 에칭(etching) 방식을 사용하지 않고, 전도성 잉크(conductive ink)로 직접 인쇄하는 방식을 이용하는 추세이다. 대량생산에 적합한 전도성 잉크 인쇄기법 중에서 그라비아 인쇄 방식이 가장 빠르고 안정적인 대량 생산이 가능하기 때문에 최근 각광을 받고 있다.

그라비아 인쇄는 음각(陰角, engraving)판 인쇄 방식으로, 개략도는 Fig. 1 과 같다. 인쇄 과정은 잉크가 음각 안으로 공급되고, 여분의 잉크는 닥터 블레이드(doctor blade)로 긁어 낸 후에, 음각 안에 작용하는 힘을 이용하여 음각 내에 있는 잉크를 가압 롤(impression roll)과 프린팅 롤(printing roll) 사이에 지나가는 소재(substrate)에 전달하는 방식이다. 여분의 잉크를 제거할 때, 잉크의 두께가 두꺼울 경우에는 잉크 제거가 완벽하게 안되고, 음각 외의 부분에 잉크가 남아있어 정확한 모양의 인쇄를 하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 무리하게 잉크 제거를 하게 되면, 닥터와 롤러 표면의 마모로 인하여 기계의 수명이 단축된다. 그리고 잉크의 두께가 얇을 때에는 음각에 들어가는 잉크의 양이 균일하지 않아 균일한 두께와 너비의 인쇄가 어렵다. 따라서 여분의 잉크를 제거하기 전, 최적의 잉크 두께 제어가 그라비아 인쇄에서 균일한 품질과 인쇄 장비의 내구성을 유지하는데 매우 중요하다.

회전하는 롤러 위에서 유체의 액막(liquid film) 두께에 대한 기존 연구들을 살펴보면, Spiers. et al.⁽¹⁾이 유체에 부분적으로 잠겨 있고 수직으로 움직이는 평판위에서, Tharmalingam and Wilkinson⁽²⁾이 회전하는 롤 위에서 뉴턴 유체일 때 액막의 두

께를 정적 초승달(dynamic meniscus region) 영역, 동적 초승달 영역(static meniscus region), 두께가 일정해 지는 영역(film thickness constant region)으로 나누어 해석 모델을 제시하고, 그 결과를 실험과 비교를 통하여 검증하였다. Tharmalingam and Wilkinson⁽²⁾은 Spiers. et al.⁽¹⁾의 모델에 접촉각의 영향력과 롤의 위치에 대한 조건을 추가하여 회전하는 원형 롤에 적용할 수 있는 세 가지 모델을 제시하였다. 그러나 위 연구들은 회전속도가 느린 롤러 주위의 액막 유동을 1 차원적으로 해석을 하였고, 회전 속도가 느리기 때문에 관성력과 중력의 효과가 크게 나타나지 않았다. Hansen and Kelmanson⁽³⁾은 유체에 잠겨 있지 않고 액막으로 둘러 쌓여 회전하는 실린더 위의 필름 두께를 Stokes approximation 을 이용하여 필름의 두께와 속도 분포를 연구하였지만, 빠른 속도에서는 액막 두께가 불안정하기 때문에 회전속도가 느린 구간에서만 해석을 하였다. Campanella and Cerro⁽⁴⁾은 롤러의 지름, 회전속도와 잠김각의 변화가 액막 두께에 주는 영향을 rapid-flow approximation 모델⁽⁵⁾을 이용하여 조사하였다. 그러나 실제로 대량생산에 적합한 고속 인쇄속도로 회전하는 롤러 위의 액막 유동은 상대적으로 커진 관성력의 영향으로 액막의 두께가 두꺼워 지고, 액막에 작용하는 중력이 커지기 때문에 롤러의 회전방향과 다른 중력의 방향으로 떨어지는 유동이 발생한다. 따라서 1 차원적인 가정으로는 액막 유동 해석을 하기에는 한계가 있다. 또한 회로를 인쇄하는 전도성 잉크의 특징은 용매제(solvent)를 섞어 사용하는데, 용매제의 함유량에 따라 잉크의 물성치가 크게 바뀌게 되어 물성치의 변화도 액막 두께에 미치는 영향도 고려되어야 한다.

본 연구에서는 전도성 잉크를 사용한 그라비아 인쇄에서 균일한 인쇄품질을 갖기 위하여 중요한 프린팅 롤러 위의 액막 두께를 제어 목적으로 잉크에 부분적으로 잠겨 회전하는 롤러 위에서 액막 유동 특성을 분석하고자 한다. 그리고 액막 두께에 영향을 주는 인자들을 전도성 잉크의 용매제 함유량에 따라 변하는 점성(viscosity)과 표면장력(surface tension)으로 구성된 물성인자와, 생산량을 결정하는 롤러의 회전속도(angular velocity), 잉크의 공급량과 관련된 초기 잠김 각(initial immersion angle)으로 구성된 운전인자로 각각 구분하고, 이러한 인자들의 변화가 액막 두께에 미치는 영향력을 조사한다.

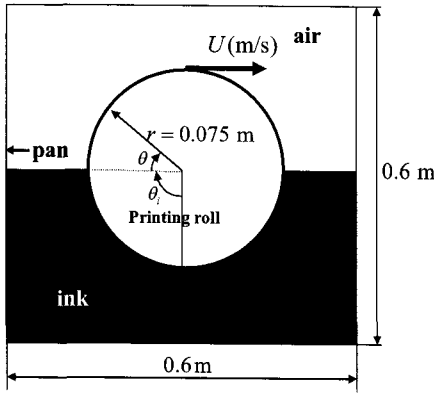


Fig. 2 Computational domain of gravure printing

2. 이론

본 연구의 해석 대상은 Fig. 2 와 같으며, 계산 영역은 액막 유동의 안정성을 고려하여 가로 0.6 m, 세로 0.6 m 로 하였고, 롤의 지름은 0.15 m 이며, 초기 잠김 각(θ_i)은 90° , 회전속도는 20 rad/s 일 때를 기준 조건으로 설정하였다. 유체의 아래 부분은 잉크, 위에 부분은 공기이며, 해석모델 내의 유동 특성을 수치적으로 조사하기 위하여 도입한 가정은 다음과 같다.

- (1) 유체는 층류, 비압축성, 2 차원 유동이다.
- (2) 유체의 물성치는 온도와 무관하다.
- (3) 두 유체 (공기와 잉크)는 서로 섞이지 않으며 자유표면이 존재한다.
- (4) 잉크와 롤러 사이의 접촉 각(contact angle)은 90° 이다.

2.1 지배방정식

유동을 해석하기 위하여 VOF 방법(volume of fluid method)⁽⁶⁾을 선택하였고, 경계면(interface)은 PLIC 방법(piecewise linear interface calculations)으로 계산하였다.

각 상(phase)마다 질량 및 운동량 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{V}\mathbf{V}) = -\frac{1}{\rho} [\nabla P - \mu \nabla^2 \mathbf{V}] + \mathbf{g} + \frac{1}{\rho} F_{SF} \quad (2)$$

여기서 F_{SF} 는 표면장력이고, 밀도는 다음 식과 같이 계산한다.

$$\rho = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 \quad (3)$$

여기서 α_k 는 계산영역에서 $k(=1, 2)$ 번째 유체의 체적 비(volume fraction)이고, $0 \leq \alpha_k \leq 1$ 의 값을 가진

다. $\alpha_k = 0$ 일 때는 계산 영역에서 k 번째 유체가 존재하지 않고, $\alpha_k = 1$ 일 때는 k 번째 유체만 존재한다. 그리고 점성(μ)은 다음과 같이 계산한다.

$$\mu = \frac{\alpha_1 \rho_1 \mu_1 + \alpha_2 \rho_2 \mu_2}{\alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2} \quad (4)$$

두 번째 상(α_2 , ink)의 체적비는 아래의 체적비 방정식(volume fraction equation)으로 구하고,

$$\frac{\partial \alpha_2}{\partial t} + \mathbf{V}_2 \cdot \nabla \alpha_2 = 0 \quad (5)$$

첫 번째 상(α_1 , air)은 다음과 같은 식을 통하여 계산한다.

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1 \quad (6)$$

표면 장력(F_{SF})은 Brackbill et al.⁽⁷⁾ 이 제안한 CSF(continuum surface force) model 을 사용한다.

$$F_{SF} = \sigma \kappa \mathbf{n} \left[\frac{\alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2}{1/2(\rho_1 + \rho_2)} \right] \quad (7)$$

$$\mathbf{n} = \nabla \alpha_2 \quad (8)$$

$$\kappa = -(\nabla \cdot \hat{\mathbf{n}}) = \frac{1}{|\mathbf{n}|} \left[\left(\frac{\mathbf{n}}{|\mathbf{n}|} \cdot \nabla \right) |\mathbf{n}| - (\nabla \cdot \mathbf{n}) \right] \quad (9)$$

여기서 \mathbf{n} 은 표면의 수직벡터이고, κ 는 곡률이며, 잉크와 롤러 사이의 점착 조건 (wall adhesion)은 다음과 같이 정의한다.

$$\hat{\mathbf{n}} = \hat{\mathbf{n}}_w \cos \theta_w + \hat{\mathbf{i}}_w \sin \theta_w \quad (10)$$

여기서 θ_w 는 유체와 벽사이의 접촉 각이고, $\hat{\mathbf{n}}_w$ 와 $\hat{\mathbf{i}}_w$ 는 각각 접선 및 법선 벡터이다.

2.2 경계조건 및 초기조건

제시한 모델을 수치 해석하기 위하여 적용한 경계 조건은 다음과 같다.

유체와 롤러와의 경계면

$$\mathbf{V}_{roller, outer} = \mathbf{V}_{fluid, contact} = r\omega \quad (11)$$

유체와 벽과의 경계면

$$\mathbf{V}_{ink, wall} = 0 \quad (12)$$

$$\mathbf{V}_{air, wall} = \text{pressure outlet condition} \quad (13)$$

초기 조건으로 해석 영역에서 체적 비는 다음과 같다.

$$\text{공기로 가득 찬 부분} \quad \alpha_1 = 1 \quad (14)$$

$$\text{잉크로 가득 찬 부분} \quad \alpha_2 = 1 \quad (15)$$

$$\text{경계면} \quad \alpha_1 = \alpha_2 = 0.5 \quad (16)$$

2.3 각각의 힘 정의

회전하는 롤러 위의 액막에 작용하는 점성력, 관성력, 표면장력과 중력의 크기는 순서적으로 다음과 같이 각각 정의한다.⁽⁸⁾

Table 1 Properties of each phases

Phase	ρ (kg/m ³)	μ (N/m ² s)	σ (N/m)
Air	1.225	1.789×10^{-5}	-
Ink	876.4	0.136	0.035

Table 2 Comparison of the film thickness at $\theta = 30^\circ$ with results in Tharmalingam and Wilkinson⁽²⁾

Ca	h (cm, ⁽²⁾)	h (cm, this study)	error (%)
3	0.2274	0.2339	2.89
4	0.2625	0.2759	5.09
5	0.2935	0.3005	2.39

$$F_{viscosity} = \left(\mu \frac{r\omega}{h} \right) h^2 \quad (16)$$

$$F_{inertia} = \left(\rho (r\omega)^2 \right) h^2 \quad (17)$$

$$F_{surface\ tension} = \sigma h \quad (18)$$

$$F_{gravity} = -(\rho g \cos \theta) h^3 \quad (19)$$

2.4 수치해석 방법

본 연구에서 압력과 속도를 결합하여 유동장을 풀기 위해 PISO(Pressure implicit with splitting of operator) 알고리즘을, 질량, 운동량 방정식은 공간에 대해서는 그 정확도를 높이기 위하여 2 계 상류도식(2-order upwind difference scheme)을, 시간에 대해서는 1 계 암시적 방법(first-order implicit method)을, 압력 보간(pressure interpolation)은 밀도 차이가 큰 유체의 VOF 계산시 정확한 체력 가중도식(body force-weighted scheme)을 선택한다. 시간 간격은 10^{-4} 을 기본으로 하였고, 매 시간 간격마다 반복 계산 시 종속 변수들의 수렴 정도는 종속 변수 상대오차가 10^{-5} 이하 일 때 수렴된 것으로 판정하였다. 계산 영역의 격자는 계산의 정확도를 높이기 위해 경계면 부근의 격자를 조밀하게 하였고, 14400 개의 사각 격자계로 계산을 하였으며, 각 상(phase)마다 물성치는 Table 1 을 기준으로 한다.

3. 결과 및 고찰

VOF 방법을 이용하여 잉크에 부분적으로 잠긴 롤러가 실제 인쇄 속도로 회전을 할 때 잉크의 액막이 형성되는 과정과 롤러 위의 액막 두께를 해석하였다. 액막에 작용하는 점성력, 관성력, 중력, 표면장력의 상대적인 크기를 비교하였고, 이를 바

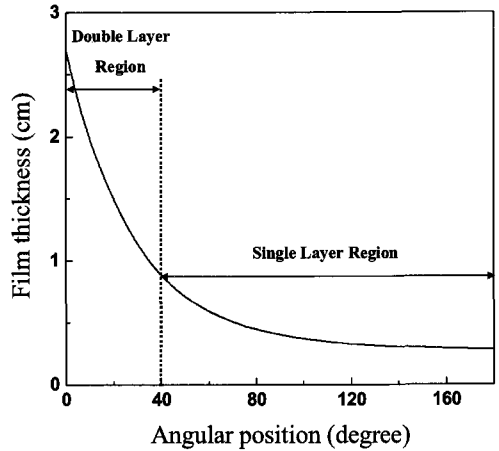


Fig. 3 Profile of film thickness with angular position

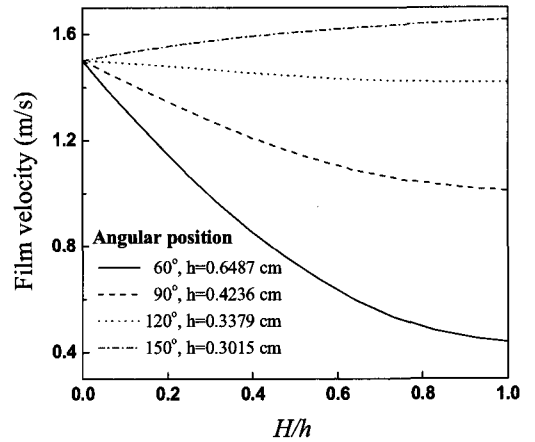


Fig. 4 Film velocity as a function of non-dimensional film position

탕으로 액막 두께에 영향을 주는 인자들을 물성인자(점성, 표면장력)와 운전인자(롤러의 회전속도, 초기 잠김 각)로 선택하고 이러한 인자들의 변화가 액막 두께에 미치는 영향력을 분석하였다.

수치모델의 타당성을 검증하기 위하여 기존 실험 논문의 결과와 비교하였다. 이 때 Tharmalingam and Wilkinson⁽²⁾의 연구 조건에 본 논문의 모델을 적용하여 계산을 수행하였으며, $\theta = 30^\circ$ 일 때 액막 두께를 비교하여 검증을 수행하였고, Table 2 에서 볼 수 있듯이 최대 5%의 오차를 나타내는 것으로 조사되었다. 이는 본 논문의 수치 모델이 회전하는 롤러 위의 액막 유동 해석에 잘 적용될 수 있음을 보여준다.

3.1 위치에 따른 액막 두께 영역

롤러의 위치에 따른 액막 두께를 살펴보면, Fig. 3 에서 $0^\circ \sim 39^\circ$ 구간에서는 액막의 흐름이 롤러

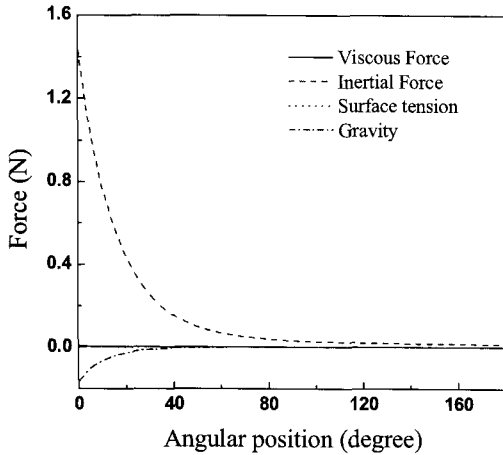


Fig. 5 Profile of relative forces with angular position

의 회전방향과 그 반대 방향으로 떨어지는 유동흐름이 동시에 존재하는 구간으로 복합층 영역(double layer region)이고, 그 이후 구간은 롤러의 회전방향과 같은 유동만 존재하는 단일층 영역(single layer region)이다. 복합층 영역에서는 롤러의 회전에 의한 점성력과 관성력으로 액막이 두꺼워지고, 동시에 중력의 크기도 같이 증가하게 된다. 결국 액막 유동의 운동량이 중력의 크기를 극복하지 못하고, 롤러에서 멀리 떨어진, 즉 점성력이 작아지는 액막에서부터 회전방향과 반대로 흐르는 유동, 역유동(reverse flow)이 생기게 된다. 역유동은 중력의 크기가 가장 큰 $\theta = 0^\circ$ 에서 가장 두껍고, 이후에 중력의 크기가 작아지면서 역방향 유동도 줄어들며, $\theta = 39^\circ$ 이후에는 점성력이 지배적으로 작용을 하여 역방향 유동이 존재하지 않는다. 정방향 유동은 일종의 발달 영역(developing region)으로 속도가 계속 증가하면서 액막 두께는 감소한다. 따라서 복합층 영역에서는 역유동과 정방향 유동 두께의 변화가 크기 때문에 총 액막 두께는 지속적으로 감소한다. 단일층 영역에서는 액막 유동의 운동량이 역방향 유동의 원인인 중력의 크기보다 커서 역방향 유동이 존재하지 않고, $\theta > 90^\circ$ 이면 중력의 크기가 유동방향과 같아지기 때문에 액막 속도가 증가하게 된다. 속도의 증가에 따라 액막 두께의 변화는 Fig. 4 에 도시하였으며, 약 $\theta = 120^\circ$ 이상인 구간에서는 롤의 회전속도보다 액막 속도가 더 빨라지는 것을 확인할 수 있다. 위치가 증가할수록 속도 구배의 차이는 점점 작아지고 있고, 액막 유동이 완전 발달하였다고 할 수 있으며, 그 결과 액막 두께의 변화가 미비하게 나타나고 있다. 액막 두께는 연속방정식을 만족하기 위해서 점점 얇아지지만, 그 변화의 폭은 정방향

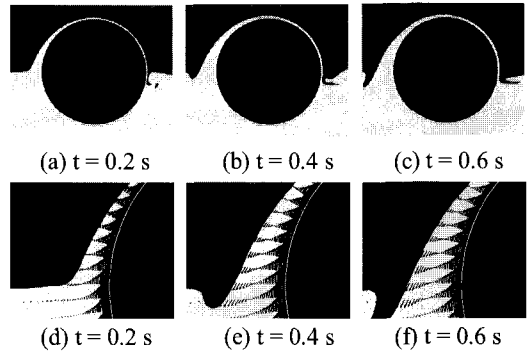


Fig. 6 Contour of phases and velocity vector with time

유동만 있고 완전 발달 영역에 도달하여 속도의 변화가 작아지기 때문에 복합층 영역에서의 액막 두께 감소 폭 보다 작게 나타난다.

3.2 액막에 작용하는 각각의 힘 분석

위치에 따른 액막 유동에 작용하는 힘을 앞에서 정의한 값으로 나타내면 Fig. 5 와 같다. 롤러가 상대적으로 빠른 속도로 회전하기 때문에 모든 영역에서 관성력이 가장 크며, 그 다음으로는 복합층 영역에서는 중력이, 단일층 영역에서는 점성력이 지배적이고, 표면장력의 크기는 미비하다. 따라서 관성력의 영향은 전 구간에서 크기 때문에 복합층 영역에서 액막 두께 감소에 영향을 주는 지배적인 인자는 중력이, 단일층 영역에서는 중력의 영향보다 점성력이 액막 두께에 미치는 영향이 크다고 할 수 있다. 각각의 힘은 약 $\theta = 100^\circ$ 이후에는 변화가 크지 않는 이유는 유동이 거의 완전 발달하였기 때문에 액막 두께의 변화가 미비하다는 것을 의미한다. 이 결과로부터 롤러의 회전 속도, 초기 잠김 각(중력)의 변화와 잉크의 점성계수의 변화가 액막 두께에 미치는 영향력이 크다고 예측할 수 있다.

3.3 액막 유동 과정

Fig. 6 은 시간에 따른 복합층 영역에서의 액막 형태와 속도장을 도시하였다. 시간이 증가함에 따라 액막 두께는 두꺼워지며, 단일층 영역에서의 두께 변화보다 복합층 영역에서의 변화가 크게 나타난다. 이는 정방향 유동은 크게 증가하지 않는 반면, 중력에 의한 역방향 유동이 증가하기 때문이다. 이후 액막 유동의 두께의 변화는 시간이 지남에 따라 작아지면서 준 평형상태를 이룬다. 초기 0.2 s 일 때, 역방향 유동은 작게 나타나고, 대부분의 액막 유동은 정방향 유동이며, 롤러의 왼쪽 표면에서 표면장력이 지배적인 초승달 영역(meniscus region)이 나타난다.

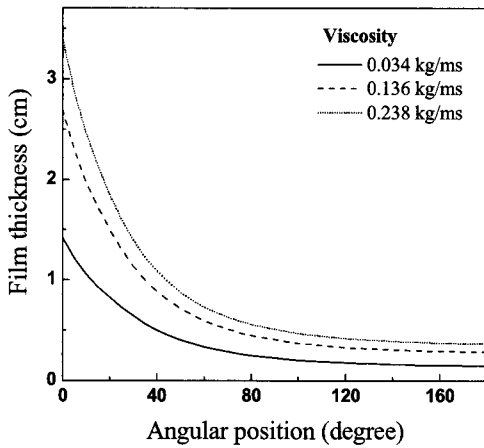


Fig. 7 The effect of viscosity on the film thickness

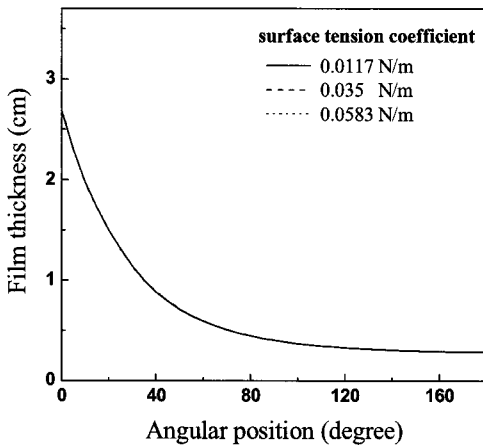


Fig. 8 The effect of surface tension on the film thickness

그러나 0.4 s 일 때 액막의 두께가 두꺼워져 중력의 영향으로 역방향 유동이 증가하게 되고, 이는 왼쪽 수면에 일종의 골을 형성하며, 결국 초승달 영역이 없어지게 된다. 0.6 s 이후 복합층 영역의 크기 증가는 미비하게 나타나고, 그 이상의 위치에서는 중력의 크기가 작기 때문에 역방향 유동은 더 이상 위로 증가하지 않고, 액막 유동은 준 평형상태에 도달한다.

3.4 인자 영향도 분석

본 연구에서 액막 두께에 영향을 주는 인자를 실제 전도성 잉크는 용매제의 함유량에 따라 물성치가 크게 바뀌기 때문에 잉크의 점성, 표면장력, 그리고 운전조건인 롤의 회전 속도, 잠김 각으로 선택하였다. 잉크의 점성 0.136 N·s/m², 표면장력 0.035 σ /m, 회전속도 20 rad/s, 초기 잠김각 90° 를 기준으로 하여 액막 두께에 미치는 영향을 조사하였다.

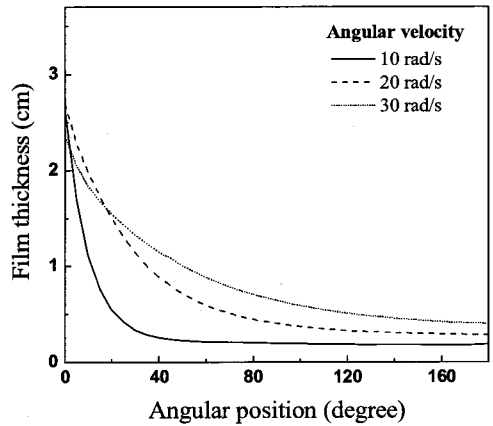


Fig. 9 The effect of angular velocity on the film thickness

물성인자인 잉크의 점성과 표면장력을 인자로 하여 액막 두께의 변화를 Fig. 7 과 Fig. 8 에 나타내었다. 점성이 증가하면 롤러의 회전으로부터 얻는 운동량 확산이 커지기 때문에 모든 영역에서 액막 두께는 두꺼워진다. 점성이 증가할수록 액막 두께 증가 폭은 감소하게 되는데, 그 이유는 정방향 유동의 증가와 이로 인하여 액막에 작용하는 중력의 크기도 커져 역방향 유동의 증가로 정방향 유동의 증가가 감소되기 때문이다. 힘의 관점에서 살펴보면, 대부분의 액막 두께는 복합층 영역에서 결정이 되며, 이 영역에서는 중력이 점성력보다 크게 나타나기 때문에 점성력의 영향력이 커지더라도 중력의 영향보다는 작아서 결국 액막 두께의 증가 폭은 감소하게 된다.

Fig. 8 에서 고속 회전하는 롤 위의 액막 두께는 두껍기 때문에 역방향 유동의 증가로 인하여 골의 생성으로 표면장력의 영향이 지배적인 초승달 영역이 존재하지 않는다. 본 연구에서 표면장력과 점성력의 비인 Ca 는 $2.3 < Ca < 11.6$ 이고, 표면장력과 관성력의 비인 We 는 $2817 < We < 16900$ 이기 때문에 다른 힘 보다 작은 표면장력이 액막 두께에 미치는 영향은 미비하다.

Fig. 9 는 운전조건인 롤러의 회전속도에 따른 액막 두께 변화를 도시하였다. 회전속도가 증가할수록 액막 두께는 두꺼워지며, 복합층 영역의 크기는 커지고, 역방향 유동의 두께는 작아진다. 회전속도의 증가는 관성력의 증가를 의미하고, 관성력은 모든 영역에서 지배적이기 때문에 관성력에 의해서 액막 두께는 증가해도 중력의 영향은 상대적으로 관성력에 비하여 작기 때문에 역유동은 작아지게 된다. 따라서 정방향 유동의 증가는 단일층영역에서의 액막 두께를 증가하는 요인으로

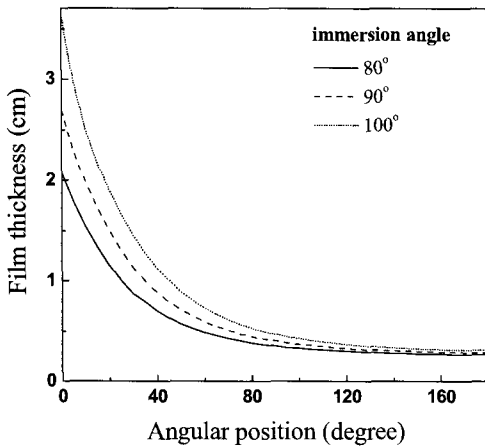


Fig. 10 The effect of initial immersion angle on the film thickness

작용하고, 본 연구의 회전 속도 범위에서는 속도 증가량에 따라 액막 두께의 증가는 비례한다.

초기 잠김각이 액막에 미치는 영향은 Fig. 10에 나타내었다. 초기 잠김각의 증가는 중력의 크기를 작게 하여 초기 액막 두께는 두꺼워 진다. 그러나 운동량의 증가로 인하여 액막의 두께가 두꺼워진 것이 아니라 단지 액막 유동 저항으로 작용하는 초기 중력의 크기가 작아진 것이기 때문에 두꺼워진 액막은 결국 커진 중력의 영향으로 초기 중력 감소의 효과는 상쇄되어 역방향 유동은 증가하게 되어, 단일층 영역에서의 액막 두께의 증가는 미비하다. 결국 잠김각의 증가는 역방향 유동의 두께와 복합층 영역의 크기를 증가시킨다.

단일층 영역의 액막 두께를 기준으로 액막 두께에 영향을 주는 인자는 물의 회전속도, 점성력, 잠김각, 표면장력 순이며, 이는 액막 두께의 변화가 큰 복합층에서 힘 크기의 비교 결과와 일치하고 있다.

4. 결 론

전도성 잉크를 사용한 그라비아 인쇄에서 균일한 인쇄품질을 갖기 위하여 중요한 프린팅 롤러 위의 액막 두께 제어를 목적으로 잉크에 부분적으로 잠겨 회전하는 롤러 위에서 액막 유동 특성을 분석하였고, 액막 두께에 관한 물성인자 (잉크의 점성, 표면장력), 운전인자 (롤러의 회전속도, 잉크의 초기 잠김각)에 대한 영향력에 관한 연구 수업을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 롤러 위의 액막 두께는 위치가 증가할수록 지수적으로 감소하며, 액막 영역은 복합층 영역과 단일층 영역으로 나뉜다. 복합층 영역에서는 롤러

의 회전방향과 같은 정방향 유동과 중력에 의하여 반대로 떨어지는 역방향 유동으로, 단일층 영역에서는 정방향 유동으로 구성된다.

(2) 시간이 흐름에 따라 역방향 유동과 복합층 영역의 크기는 증가하였으며, 0.6 s 이후에는 복합층 영역 크기 증가는 감소한다. 이후 복합층 영역의 크기는 일정한 값을 가지며 액막 유동은 준 평형 상태를 유지한다.

(3) 액막에 작용하는 힘의 크기는 복합층 영역에서는 관성력, 중력, 점성력, 표면장력 순이고, 단일층 영역에서는 관성력, 점성력, 중력, 표면장력 순이다

(4) 잉크의 점성, 회전속도, 잠김각이 증가할수록 액막 두께는 증가하고, 액막 두께에 대한 영향력은 회전속도, 잉크의 점성, 잠김각 순서이며, 표면장력의 영향은 미비하다.

후 기

이 연구는 서울시 산학연 협력사업(Seoul R&BD Program)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Spiers, R.P., Subbaraman, C.V. and Wilkinson, W.L., 1974, "Free Coating of a Newtonian Liquid onto a Vertical Surface," *Chemical Engineering Science*, Vol. 29, pp. 389~396.
- (2) Tharmalingam, S. and Wilkinson, W.L., 1978, "The Coating of Newtonian Liquids onto a Rotating Roll," *Chemical Engineering Science*, Vol. 33, pp. 1481~1487.
- (3) Hansen, E.B. and Kelmanson, M.A., 1994, "Steady, Viscous, Free-surface Flow on Rotating Cylinder," *Journal of Fluid mechanics*, Vol. 272, pp. 91~107.
- (4) Campanella, O.H. and Cerro, R.L., 1984, "Viscous Flow on the Outside of a Horizontal Rotating Cylinder : the Roll Coating Regime with a Single Fluid," *Chemical Engineering Science*, Vol. 39, pp. 1443~1449.
- (5) Cerro, R.L. and Scriven, L.E., 1980, "Rapid Free Surface Film Flows. An Integral Approach," *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, Vol. 19, pp. 40~50.
- (6) Hirt, C.W. and Nichols, B.D., 1981, "Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries," *Journal of computational physics*, Vol. 39, pp. 201~25.
- (7) Brackbill, J.U., Kothe, D.B. and Zemach, C., 1992, "A Continuum Method for Modeling Surface Tension," *Journal of computational physics*, Vol. 100, pp. 335~354.
- (8) Rebouillat, S., Steffenino, B. and Salvador, B., 2002, "Hydrodynamics of High-speed Fibre Impregnation : the Fluid Layer Formation From the Meniscus Region," *Chemical Engineering Science*, Vol 57, pp. 2953~3966.