

잉크에 부분적으로 잠겨 회전하는 롤 주위의 액막 유동 해석

유승환* · 강수진* · 이관수†

The analysis of film flow around rotating roller partially immersed in ink

Seung-hwan Yu*, Soojin Kang* and Kwan-soo Lee†

Key Words : Film thickness around rotating roller(회전하는 롤러주위의 액막 두께), Free surface (자유 표면), Volume of fluid(VOF) method

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 viscosity, surface tension, roller rotating speed, immersed angle on the film thickness. The result indicates that the film thickness has a strong dependency on the fluid viscosity, while the surface tension has negligible effect.

기호설명

Ca	: Capillary number ($\mu U/\sigma$)
F_{SF}	: 생성항
p	: 압력(N/m ²)
\mathbf{n}	: 수직 벡터
r	: 롤 반지름(m)
U	: 접선 방향 속도(m/s)
\mathbf{V}	: 속도 벡터(m/s)

그리스 문자

α	: 체적비
ρ	: 밀도(kg/m ³)
θ_i	: 잠김 각(°)
θ	: 위치 각(°)
μ	: 점성(N/m ² s)
σ	: 표면장력계수(N/m)
κ	: 곡률(m ⁻¹)
ω	: 각속도(rad/s)

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : ksleehy@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0426 FAX : (02)2294-9021

* 한양대학교 대학원 기계공학과

1. 서론

최근 급속히 발전하는 물류/유통 산업에서 경쟁력을 갖추기 위해서 소용되는 시간과 비용을 최소화하는 것이 요구되고 있다. 현재 물류/유통 산업에서 널리 사용되고 있는 바코드 시스템은 정확하고 편리하지만 많은 시간을 소비하는 단점이 있기 때문에 이러한 바코드 시스템을 대체하기 위해서 RFID 라는 새로운 시스템이 주목 받고 있다. RFID (Radio frequency identification)란 전파신호를 통해 비접촉 방식으로 사물에 부착된 얇은 평면 형태의 태그를 식별하여 정보를 처리하는 시스템이다. RFID tag 는 기존의 바코드 와 같이 물건의 정보를 가지고 있으면서 하나의 리더기로 동시에 여러 RFID tag 를 읽을 수 있기 때문에 물류/유통 산업에 획기적인 변화를 가져다 주고 있다. RFID tag 는 생산 단가를 낮추기 위해서 기존의 에칭 (etching) 방식을 사용하지 않고 있으며, 전도성 잉크 (conductive ink)로 직접 인쇄하는 방식을 이

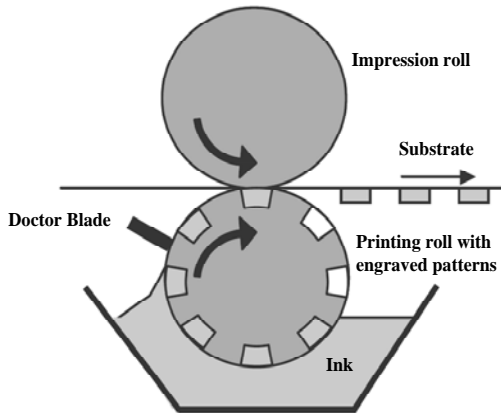


Fig. 1 Schematic diagram of gravure printing

용하는 추세이다. 대량생산에 적합한 전도성 잉크 인쇄기법으로는 플렉소(flexo), 오프셋(offset), 그라비아 인쇄(gravure printing)등이 있다. 그 중에서 그라비아 인쇄 방식이 가장 빠르고 안정적인 대량생산이 가능하기 때문에 최근 각광을 받고 있다.

그라비아 인쇄는 음각(陰角, engraving)판 인쇄 방식으로, 개략도는 Fig. 1 과 같다. 인쇄 과정은 잉크가 음각으로 새겨진 셀 안으로 공급되고, 여분의 잉크는 doctor blade 로 긁어 낸 후에, 셀 안에 작용하는 힘을 이용하여 셀 내부의 잉크를 가압 롤(impression roll)과 프린팅 롤(printing roll) 사이에 지나가는 소재(substrate)에 전달하는 방식이다. 인쇄물의 품질은 크게 인쇄 과정⁽¹⁾과 인쇄 후 열처리 과정(curing)⁽²⁾에 의해서 결정된다. 인쇄 과정은 인쇄된 잉크의 너비와 두께가 전자소재의 품질 즉, 전기적 성능의 척도가 되고, 품질의 균일함을 유지하기 위해서는 우선적으로 음각에 들어가는 잉크의 양이 정확히 제어되어야 한다. 열처리 과정은 전도성 잉크가 전기적 성능을 얻기 위해서 빠른 시간에 높은 온도로 열처리가 필요하고, 열처리 시간과 온도에 따라 전기적 성능이 크게 좌우된다. 인쇄 과정에서 잉크의 양을 제어하는 요소 중에 하나가 doctoring 할 때 회전하는 롤에 따라 올라오는 잉크의 두께이다. 잉크의 두께가 두꺼울 경우에는 doctoring 이 완벽하게 안되고, 음각 외의 부분에 잉크가 남아있어 정확한 모양의 인쇄를 하기 어렵다, 이를 해결하기 위해 무리한 doctoring 을 하게 되면, doctor

blade 와 롤러 표면의 마모로 인하여 기계의 수명이 단축된다. 그리고 잉크의 두께가 얇을 때에는 음각에 들어가는 잉크의 양이 균일하지 않아 균일한 두께와 너비의 인쇄가 어렵다. 따라서 doctoring 하기 전에 잉크의 두께 제어가 그라비아 인쇄에서 균일한 품질과 인쇄 장비의 내구성을 유지하는데 매우 중요하다.

회전하는 롤러 위에서 유체의 액막(liquid film) 두께에 대한 기존 연구들을 살펴보면, 유체에 부분적으로 잠겨 있고 수직으로 움직이는 평판 위에서 Spiers. 등⁽³⁾이, 회전하는 롤 위에서 Tharmalingam and Wilkinson⁽⁴⁾ 이 뉴턴 유체일 때 액막의 두께를 정적 초승달(dynamic meniscus region) 영역, 동적 초승달 영역(static meniscus region), 두께가 일정해 지는 부분으로 나눠 해석 모델을 제시하고, 그 결과를 실험과 비교를 통하여 검증하였다. Tharmalingam 은 Spiers. 등의 모델에 접촉각의 영향력과 롤의 위치에 대한 조건을 추가하여 회전하는 원형 롤에 적용할 수 있는 세 가지 모델을 제시하였다. 그러나 위 연구 들은 대부분 비선형 항인 관성력을 무시하기 때문에 실제 인쇄속도로 회전하는 롤러에 적용하기에는 한계가 있다. Hansen and Kelmanson ⁽⁵⁾은 회전하는 실린더 위의 필름 두께를 Navier-Stokes 방정식의 Stokes approximation 을 이용하여 필름의 두께와 속도 분포를 연구하였지만, 빠른 속도 에서는 필름의 두께가 불안정하기 때문에 회전 속도가 느린 구간에서만 해석을 하였다. Campanella and Cerro⁽⁶⁾은 롤러의 지름, 접촉 각, 회전속도 가 필름 두께에 끼치는 영향을 표면 장력을 고려 하지 않는 rapid-flow approximation 모델⁽⁷⁾을 이용하여 분석하였지만, 물성치의 변화가 필름 두께에 미치는 영향에 대한 연구는 조사하지 않았다.

본 연구에서는 잉크에 부분적으로 잠긴 롤러가 실제 인쇄 속도로 회전을 할 때 잉크의 액막이 형성되는 과정과, 롤러 위의 액막 두께를 해석하고자 한다. 그리고 액막 두께에 영향을 주는 인자들을 점성(viscosity), 표면장력 (surface tension), 롤러의 회전속도, 초기 잉크의 높이로 설정하고 인자들에 대한 영향력을 조사하고자 한다.

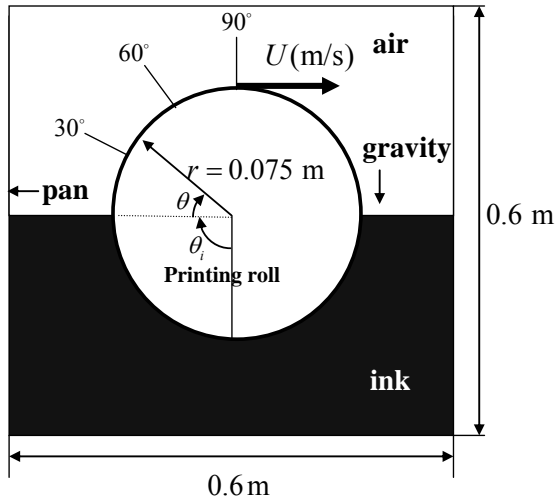


Fig. 2 Computational domain of gravure printing

2. 이론적 연구

2.1 해석대상 및 기본 가정

본 연구의 해석 대상은 Fig. 2 와 같다. 해석 영역은 가로 0.6 m, 세로 0.6 m 이고, 롤의 지름은 0.15 m 이다. Fig. 2 에서 잉크의 높이는 잠김 각 (θ_i)이 90° 일 때를 나타낸 것이고, 유체의 아래 부분은 잉크, 위에 부분은 공기이다.

해석모델 내의 유동 특성을 수치적으로 조사하기 위하여 도입한 가정은 다음과 같다.

- (1) 유체는 비정상, 층류, 비압축성, 2 차원 유동이다.
- (2) 유체의 물성치는 온도와 무관하다.
- (3) 두 유체 (공기와 잉크)는 서로 섞이지 않으며 자유표면이 존재한다.

2.2 지배방정식

유체 영역은 두 가지 유체(잉크, 공기)가 같이 존재하고, 유체 사이에는 자유표면이 존재한다. 이를 해석하기 고정 격자 계에서 혼합할 수 없는 유체들이 자유 표면을 이루고 있을 때 사용하는 VOF 방법(volume of fluid method) 를 사용한다⁽⁸⁾. 경계면(interface)을 계산하는 방법은 PLIC(piece wise linear interface calculations)을 선택 하였다.

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 계산하여 사용한다.

$$\rho = \sum \alpha_k \rho_k \quad (3)$$

여기서 α_k 는 계산영역에서 k 번째 유체의 체적비(volume fraction)이고, 다른 물성치(ϕ)들은 다음과 같이 계산한다.

$$\phi = \frac{\sum \alpha_k \rho_k \phi_k}{\sum \alpha_k \rho_k} \quad (4)$$

두 번째 상의 체적비는 체적비 방정식(volume fraction equation) 의하여 계산되고, 첫 번째 상(α_1 , gas)은 다음과 같은 식을 사용한다.

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

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

표면 장력은 Brackbill 등이 제안한 CSF(continuum surface force) model 을 사용한다⁽⁹⁾.

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

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

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

여기서 \mathbf{n} 은 표면의 수직벡터이고, κ 는 곡률이며, F_{SF} 는 운동량 방정식에서 생성항으로 계산한다.

2.3 경계 조건 및 초기 조건

제시한 모델을 수치 해석하기 위하여 적용한 경계 조건은 다음과 같다.

유체와 롤러와의 경계면

$$\mathbf{V}_{roller, outer} = r\omega \quad (10)$$

유체와 벽과의 경계면

$$\mathbf{V}_{wall} = 0 \quad (11)$$

초기 조건으로 해석 영역에서 체적 비는 다음과 같다.

$$\text{공기로 가득 찬 부분 } \alpha_1 = 1 \quad (12)$$

$$\text{잉크로 가득 찬 부분 } \alpha_2 = 1 \quad (13)$$

$$\text{경계면 } \alpha_1 = \alpha_2 = 0.5 \quad (14)$$

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 계상류도식(2-order upwind difference scheme)을, 시간

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

에 대해서는 1 계 암시적 방법(first-order implicit method)을, 압력 보간은(pressure interpolation)은 밀도 차이가 큰 유체들의 VOF 계산 시 정확한 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 상대오차의 최대 값이 연속, 운동량 방정식의 오차는 10^{-5} 이하 일 때 수렴된 것으로 판정한다. 각 상(phase)마다 물성치는 Table 1 을 기준으로 한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시간에 따른 액막 형성 과정

잉크에 부분적으로 잠긴 롤러가 일정한 속도로 회전하면 잉크의 점성력으로 회전하는 롤러 위에 액막을 형성하게 되고, 그 과정을 Fig. 3 에 나타내었다. 시간이 지남에 따라 왼쪽 잉크의 수면과 접한 롤 부분의 액막 두께는 점성력과 관성력, 표면장력 때문에 점점 두꺼워 지고, θ 가 커질수록 액막의 두께는 중력의 영향으로 점점 감소하다가 거의 일정한 값을 가지게 된다. 잉크의 수면의 변화를 살펴보면, 롤러의 좌측 쪽의 수면은 높이의 변화가 거의 없지만, 우측은 그 변화를 Fig. 3 에서 확인할 수 있다. 롤러의 회전에 의해

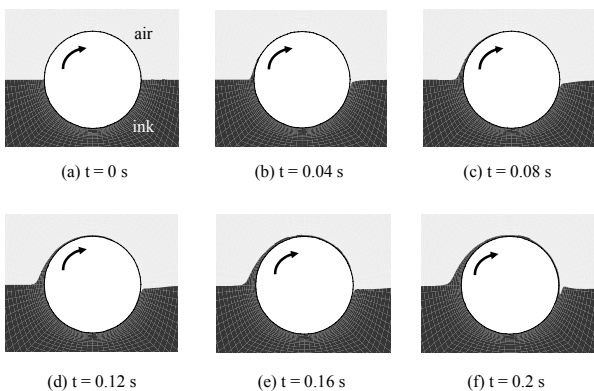


Fig. 4 Contour of phases around rotating roll with time (at $\omega = 20$ rad/s, $\theta_i = 0^\circ$)

잉크가 롤의 벽에 부딪히면서 잉크의 수면의 높이에 변화가 생기고, 시간이 지남에 따라 이 현상은 롤의 왼쪽 표면에도 확산이 되어 결국 롤러 위의 액막 두께가 고르지 않게 하는 요소로 작용한다. 이 현상은 롤의 크기가 작으면 작을수록 크게 나타나는데, 이를 최소화 하기 위해서 롤의 크기를 롤의 크기의 4 배 이상으로 하여야 한다.

3.2 위치에 따른 액막 두께 영역

롤러의 위치에 따른 액막 두께를 살펴보면, Fig. 4 에서 $0^\circ \sim 60^\circ$ 구간에서는 두께가 급격히 줄어들고, 그 이후 구간에서는 천천히 두께가 감소하는 것을 볼 수 있다. Tharmalingam and Wilkinson⁽⁶⁾은 액막의 영역을 정적 초승달 영역 (static meniscus region), 동적 초승달 영역(dynamic meniscus region), 액막 두께가 일정해 지는 영역으로 나눴다. 정적 초승달 영역은 관성력, 점성력을 무시하고 오직 표면장력만 고려하기 때문에 $Ca > 1$ 인 본 연구에서는 관성력을 무시하는 정적 초승달 영역은 제외하였다. 동적 초승달 영역에서 관성력, 점성력과 표면장력이, 필름 두께가 일정한 구간에서는 표면장력을 제외한 관성력과 점성력이 필름의 두께에 영향력을 미친다.

Fig. 4 는 롤러의 θ 에 대하여 액막 두께를 도시한 것으로, θ 가 증가할수록 잉크의 두께가 얇아지는 것을 확인할 수 있다. $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 영역에서는 점성력, 관성력, 표면장력으로 많은 잉크가 롤 회전에 따라 올라오고, 잉크의 상대적으로 큰

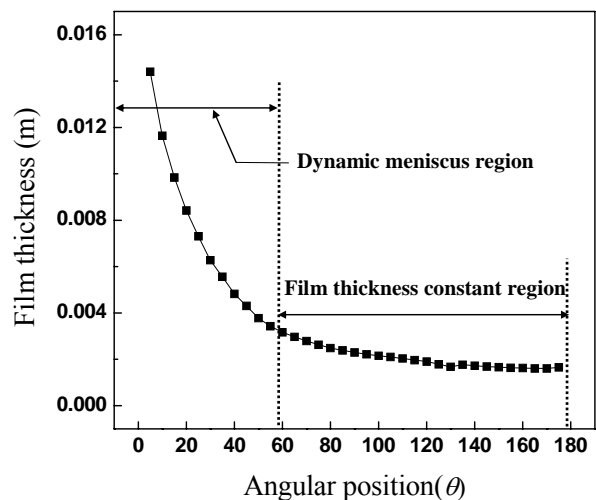


Fig. 3 Profiles of film thickness with angular position (at $\omega = 20$ rad/s, $\theta_i = 0$)

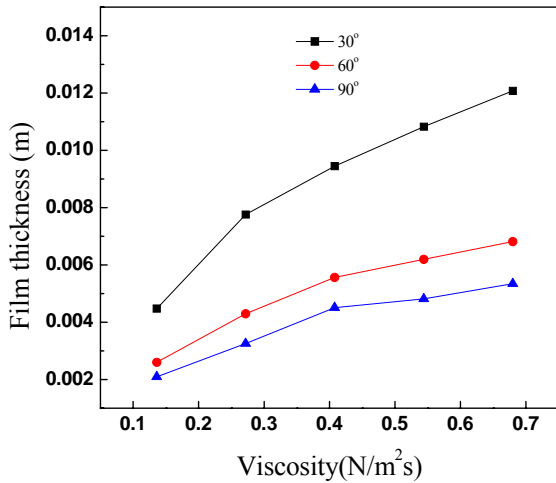


Fig. 5 The effect of viscosity on the film thickness

점성 때문에 잉크로 운동량이 빠르게 확산되어 속도 구배가 적어져 두께가 유지되어야 한다. 그러나 액막이 두꺼울수록 중력의 영향이 크기 때문에 물러 표면에서 멀어질수록 운동량이 감소되어 중력을 이기지 못하고, 그 결과 액막의 두께는 얇아지게 된다. $\theta=90^\circ$ 이후에서는 중력이 유동과 같은 방향으로 작용하지만, 액막의 두께가 얇아서 중력의 영향이 작아 액막의 두께는 거의 일정한 값을 갖는다.

3.3 인자 영향도 분석

본 연구에서 액막 두께에 영향을 주는 인자는 물의 회전 속도, 잠김 각, 잉크의 점성, 표면장력이다. 액막의 두께는 30° , 60° , 90° 에서 측정하였고, 회전속도 20 rad/s, 잉크의 점성

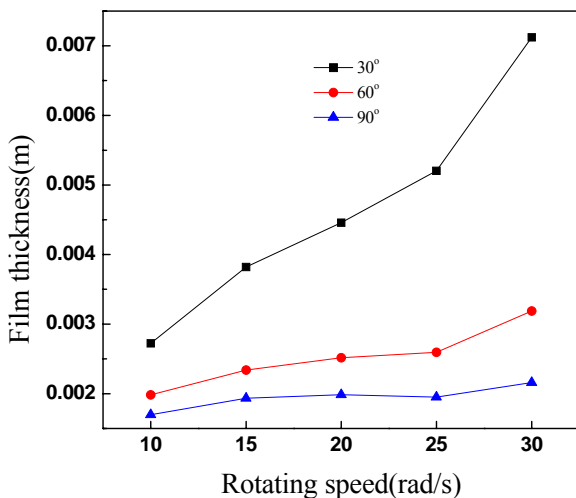


Fig. 7 The effect of rotating speed on the film thickness

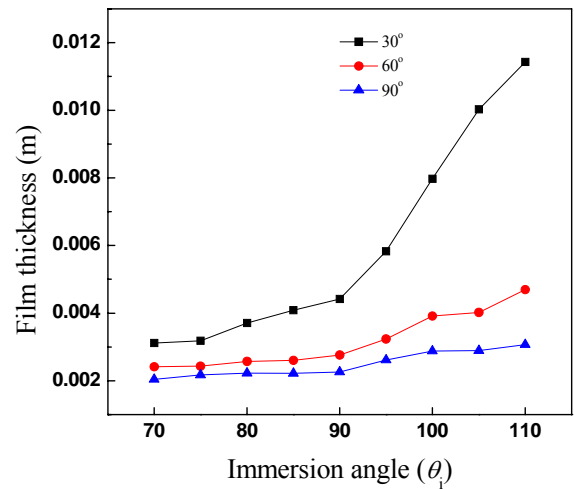


Fig. 6 The effect of immersion angle on the film thickness

$0.136 \text{ N/m}^2 \cdot \text{s}$, 잠김각 0° , 표면장력 0.136 N/m 을 기준으로 하여 인자들에 대한 영향력을 조사하였다.

실제 전도성 잉크는 용매(solvent) 함유량에 따라 점성 등 물성치의 변화가 크기 때문에 점성의 변화를 인자로 고려하였고, 그 결과는 Fig. 5 에 도시하였다. 점성이 증가할수록 액막의 두께는 두꺼워 지고, 특히 $\theta=30^\circ$ 에서 증가 폭이 가장 크다. 이는 점성력의 영향으로 동적 초승달 영역이 발달하였기 때문이다.

물의 회전속도에 따른 액막 두께의 변화를 살펴보면, 회전속도가 증가할수록 액막 두께는 두꺼워지는 것을 Fig. 6 에서 확인할 수 있다. 회전속도의 증가는 관성력이 커진다는 것을 의미 하고, 관성력이 커지면 잉크에 많은 운동량이 전달 되고 물의 표면으로 올라갈 때 유동저항이 상대적으로 작아지기 때문에 액막은 두꺼워 진다. 회전속도가 증가하면 동적 초승달 영역이 발달 하고 그 결과 $\theta=30^\circ$ 에서의 액막 두께의 변화가 가장 컸다.

잠김 각에 따른 액막 두께의 변화는 Fig. 7 에 나타내었다. 잠김 각이 클수록 중력의 크기가 액막의 유동방향인 접선 방향으로 작아져 잉크가 물 표면으로 올라가는 유동 저항이 줄어들었기 때문에 결국 동적 초승달 영역이 크게 확장되어 액막 두께가 두꺼워 진다.

표면장력의 변화에 대한 액막의 두께를 Fig. 8 에서 살펴보면, 표면 장력이 액막의 두께의 영향력은 미비하다는 것을 확인할 수 있다. 잉크의 유동이 $2.3 < Ca < 11.6$ 범위에 있기 때문에 표면장

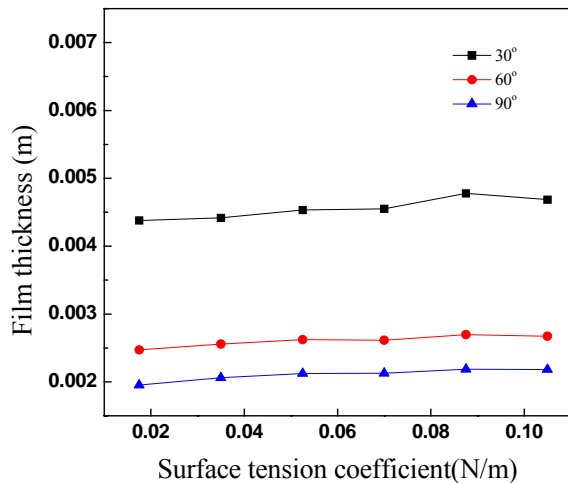


Fig. 8 The effect of surface tension coefficient on the film thickness

력보다는 관성력이 지배적이어서 표면장력의 영향은 거의 없다.

액막 두께의 최대값에서 최소값을 뺀 차이를 기준으로 인자들의 상대적인 영향력을 비교하면, $\theta=30^\circ$ 에서 잠김각, 점성, 회전속도, 표면장력 순으로 두께의 차이가 나타났고, 이는 잠김 각이 커질수록 유동저항의 감소가 동적 초승달 영역의 발달에 크게 영향을 주기 때문이다. 반면에 $\theta=60^\circ$, $\theta=90^\circ$ 은 액막 두께가 일정해 지는 영역에는 점성력으로 전달되는 운동량이 다른 인자들에 비해서 크기 때문에 점성이 잠김 각 보다 영향력이 크다고 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 잉크에 부분적으로 잠긴 회전하는 롤 위의 액막 두께를 수치적으로 연구하였고, Volume of fluid(VOF) 방법을 롤 위의 액막 두께가 형성되는 과정 해석하기 위하여 사용하였다. 액막 두께에 영향을 주는 인자는 잉크의 점성, 표면장력, 롤러의 회전속도, 잠김 각으로 선정하여, 그에 대한 영향력을 비교하였고, 결과는 다음과 같다.

(1) 회전하는 롤러에 액막의 두께는 점성력, 관성력, 표면장력, 중력 등의 작용으로 두께가 결정되고, θ 가 커질수록 동적 초승달 영역에서는 감소되는 폭이 상대적으로 크며, 그 외 부분에서는 액막 두께가 감소되는 폭이 작다.

(2) 잉크의 점성, 회전속도, 잠김 각이 커질수록 액막의 두께는 두꺼워 진다. 동적 초승달 영역에

서는 잠김 각이, 그 외 부분에서는 점성이 액막 두께에 많은 영향을 미친다.

(3) 액막 두께에 대한 표면장력의 영향은 미비하였다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Padas M., Hagberg J. and Leppävuori S., 2004, "Gravure offset printing of polymer inks for conductors," *Progress in Organic Coatings*, Vol.49, pp. 324~335
- (2) Masahiro Inoue and Katsuaki Suganuma, 2006, "Effect of curing conditions on the electrical properties of isotropic conductive adhesives composed of an epoxy-based binder," *Soldering & Surface Mount Technology*, Vol.18, pp. 40~45
- (3) 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
- (4) Tharmalingam S. and Wilkinson W. L., 1978, "The coating of newtonian liquids onto a rotating roll", *Chemical Engineering Science*, Vol. 33, pp. 1481~1487
- (5) 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
- (6) 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
- (7) 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
- (8) 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
- (9) 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