

회전하는 실린더 주변 액막의 거동에 대한 수치해석적 연구

이상혁* · 이정희** · 허남건*† · 서영진*** · 김인철*** · 이성진***

* 서강대학교 기계공학과, ** 서강대학교 다중현상 CFD 연구센터,
*** (주)포스코 기술연구소 압연공정연구그룹

A Numerical Analysis of the Behavior of Liquid Film Around a Rotating Cylinder

Sang Hyuk Lee*, Jung Hee Lee**, Nahmkeon Hur*†,
Young Jin Seo***, In-Cheol Kim*** and Sung-Jin Lee***

* Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ.,
** Multi-phenomena CFD ERC, Sogang Univ.,
*** Rolling Technology Research Group, Posco

(Received November 12, 2010 ; Revised January 27, 2011 ; Accepted January 28, 2011)

Key Words: Liquid Film(액막), Interfacial Flow(계면유동), VOF Method(VOF 방법)

초록: 회전하는 실린더 주변의 액막 거동을 예측하는 것은 제철 산업에서 관재의 부식을 방지하기 위한 박막 코팅 과정에 매우 중요하게 적용될 수 있다. 관재 코팅에 사용할 박막을 만들기 위하여 실린더를 회전하는 경우, 실린더 주변 액막의 거동은 실린더 지름 및 회전 속도, 중력, 유체의 물성에 따라 영향을 받는다. 이러한 변수의 영향으로 실린더를 따라 상승하는 액막의 거동 특성 및 실린더 주변 액막 두께가 결정된다. 본 연구에서는 회전하는 실린더 주변 액막 거동에 대한 경계면을 갖는 이상유동에 대해 VOF 방법을 사용하여 수치해석하였다. 다양한 회전 속도, 실린더 지름, 유체 점성, 표면장력에 따른 액막 거동의 이상유동에 대한 수치해석을 통해 액막 두께를 예측할 수 있었다. 이를 통해, 회전 속도, 실린더 지름 및 유체 점성이 증가함에 따라 더 많은 액막을 상승시켜 두꺼운 액막을 형성하였으며, 이러한 액막 두께에 대한 수치해석 결과는 기존 실험 및 이론적 상관식과 일치하는 결과를 보였다.

Abstract: It is important to predict the behavior of a liquid film around a rotating cylinder in the film coating process of the steel industry. When the cylinder rotates, the behavior of the liquid film on the rotating cylinder surface is influenced by the cylinder diameter, the rotation speed, the gravitational force, and the fluid properties. These parameters determine the liquid film thickness and the rise of the film on the cylinder surface. In the present study, the two-phase interfacial flow of the liquid film on the rotating cylinder were numerically investigated by using a VOF method. For various rotation speeds, cylinder diameters and fluid viscosities, the behavior of liquid film on the rotating cylinder were predicted. Thicker film around the rotating cylinder was observed with an increase in the rotation speed, cylinder diameter, and fluid viscosity. The present results for the film thickness agreed well with available experimental and analytical results.

1. 서 론

박막 코팅을 위한 롤코팅 기술 및 회전체 주위의 액막 생성 등의 현상에서 액막의 거동 특성을 예측하는 것은 매우 중요하다. 이러한 액막의 생성 및 거동 특성을 예측하기 위하여, 단일 또는 다중의 실린더 주변에서 액막 거동에 대한 다양

한 연구들이 수행되고 있다. Chien과 Jang⁽¹⁾은 같은 방향으로 회전하는 2개의 실린더로 인해 형성된 액막의 거동을 수치해석적으로 예측하였다. 또한, Carvalho와 Scriven⁽²⁾은 변형 가능한 실린더를 고려하여 액막의 불안정성에 대한 연구를 수행하였다.

이와 같은 다중 실린더로 인해 형성된 액막의 거동 특성은 단일 실린더 주변 액막의 거동 특성에 영향을 받게 된다. 또한, 단일 실린더 주변 액막의 거동 특성은 액막의 생성 및 거동 특성의

† Corresponding Author, nhur@sogang.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

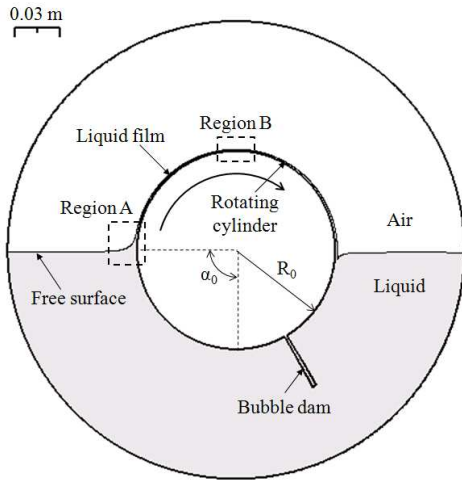


Fig. 1 Liquid film on a rotating cylinder

기본 데이터로 활용될 수 있다. 이에 단일 실린더 주변 액막의 거동 특성 예측을 위한 이론적, 실험적, 수치해석적 연구들이 활발히 이루어지고 있다. Pukhnachev⁽³⁾은 중력장 내 회전하는 실린더 표면에 위치한 액막의 거동 특성을 예측하기 위한 이론적 연구를 통해 이론해를 제시하였다. 또한, Karabut⁽⁴⁾은 Pukhnachev⁽³⁾의 이론적 연구를 기반으로 모세관 현상에 따른 특성을 포함하여 액막 거동 특성을 수치적으로 분석하였다. 그러나 이 연구들은 실린더 주변에 형성된 일정 두께 액막의 회전 및 중력의 영향으로 인한 거동 특성을 예측하였다.

이러한 실린더 주변 일정한 두께의 액막 형성은 기체의 응축 및 액체풀(Liquid Pool)로부터 회전하는 실린더를 따라 액막이 상승하여 형성된다. 액체풀로부터 액막이 상승할 경우, 액막의 거동 및 두께 특성은 액체의 물성치 및 회전하는 실린더에 따라 결정된다. 이와 같은 액체풀로부터 상승하여 형성된 액막의 거동을 예측하기 위하여, Gel'perin과 Nosov⁽⁵⁾는 회전하는 실린더 표면을 따라 상승하여 형성된 액막의 두께 예측을 위한 이론적 연구를 통해, 두께 예측을 위한 이론해를 제안하였다. Ponomarenko 등⁽⁶⁾은 회전하는 실린더로 인해 형성된 액막 거동에 대한 실험을 통해 액막 두께에 대한 실험적 상관식을 제안하였다. 또한, Hasan과 Naser⁽⁷⁾는 실린더의 회전 속도에 따른 액막의 거동 특성 및 액막 두께 예측을 위한 수치해석을 수행하였다. 이와 같은 회전하는 실린더 주위 액막의 거동 특성은 액체 물성치 및 실린더 회전 속도, 초기 액체풀의 높이 등

의 영향을 받는다.

본 연구에서는 회전하는 단일 실린더에 의해 액체풀로부터 실린더를 따라 상승하여 형성되는 액막의 거동 특성을 예측하기 위하여, VOF 방법을 사용하여 회전하는 실린더 주변 액막 거동에 대한 이상유동을 수치해석하였다. 또한, 다양한 실린더 회전 조건 및 액체 물성치에 따른 회전하는 실린더 표면에 형성된 액막의 두께에 대해 분석하고자 한다.

2. 수치해석

2.1 회전하는 실린더 주변 액막 거동

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 회전하는 실린더에 의해 액체풀로부터 상승하여 형성되는 액막의 거동에 대해 수치해석하였다. 반지름 R_0 이 65mm인 실린더가 회전($\Omega_0 = 10RPM$)함에 따라 밀도 1280.84 kg/m^3 , 점도 0.8943 kg/ms , 표면장력계수 0.0598 N/m 를 갖는 Glycerin 액체풀에 잠수되어 있는 실린더($\alpha_0 = 90^\circ$)을 따라 상승하여 형성된 액막 거동의 경우, 실린더 지름을 특성 길이로 한 레이놀즈수($Re = \rho L_0 U_0 / \mu$)가 12.67 정도로 층류 유동 특성을 갖는다. 이와 같은 실린더 회전에 의한 액막 거동 특성을 수치해석하기 위하여, 해석 영역의 설정으로 인해 실린더 주변의 액막 거동에 영향을 미치지 않게 하기 위하여 실린더 크기의 두 배 크기의 해석 영역을 설정하였다. 이와 같은 해석영역에 36만개의 유체격자를 생성하여 2차원 이상유동 해석을 수행하였다. 회전에 따른 액막 거동 수치해석의 경계조건으로, 실린더에 해당하는 해석영역 안쪽은 회전 속도를 갖는 벽 경계조건을 적용하였으며, 해석영역 바깥쪽은 경계조건 설정으로 인해 형성된 주변 유체의 유동이 액막 거동에 영향을 주지 않게 하기 위하여 slip 벽 경계조건을 적용하였다. 실린더가 회전함에 따라 생성된 액막이 액체풀과 합일되는 부분에서 공기가 포획될 수 있다. 실제 현상에서도 이와 같이 기포가 생성될 수 있으나, 기포가 액막이 상승하는 부분까지 영향을 미치지 않는다. 그러나 본 연구에서의 2차원 수치해석으로 인한 기포의 2차원적 거동 특성은 액막이 상승하는 부분까지 영향을 줄 수 있기 때문에, 본 연구에서는 액체풀 내 액막이 상승하는 부분까지 이동하는 것을 방지하기 위하여 액막 거동 예측에

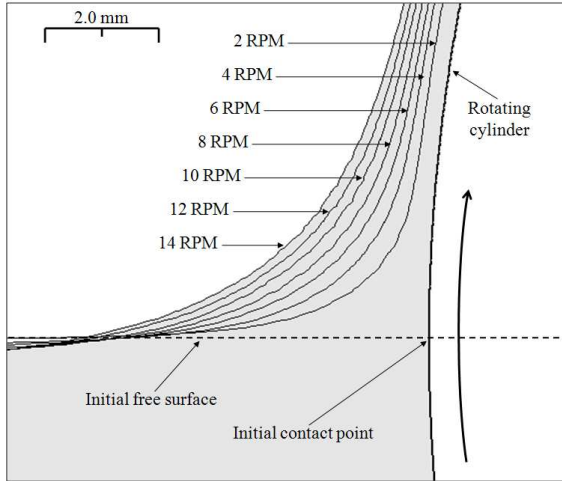


Fig. 2 Behavior of liquid film at the region A rising the liquid film from the liquid pool

영향을 주지 않는 실린더 하단 부분에 기포를 방지하기 위한 장치를 설치함으로써 생성된 기포가 액막 거동에 영향을 미치지 않게 하였다.

이와 같은 회전하는 실린더에 의해 상승하여 형성된 액막의 두께를 예측하기 위한 이론해 및 상관식들이 제시되었다. Gel'perin과 Nosov(1975)는 회전하는 실린더에 의해 형성된 액막의 최소 두께 δ_{\min} 를 예측하기 위하여 표면장력을 고려하지 않은 경우의 이론해를 제안하였으며(식 (1)), 저점도 액막의 경우 액막 두께에 영향을 미치는 표면장력에 대한 영향을 고려하기 위하여 액체풀로부터 상승하는 평판 주변 액막 거동 실험에서 얻어진 표면장력으로 인한 액막 두께 영향을 추가한 이론해(식 (2))를 다음과 같이 제안하였다.

$$\delta_{\min} = \sqrt{\frac{\mu R_0 \Omega}{41.11 \rho g (1 - \alpha_0 / 180)}} \quad (1)$$

$$\delta_{\min} = 0.94 \sqrt[6]{\frac{\mu R_0 \Omega}{\sigma}} \sqrt{\frac{\mu R_0 \Omega}{41.11 \rho g (1 - \alpha_0 / 180)}} \quad (2)$$

여기서, ρ 는 액체의 밀도, μ 는 액체의 점도, R_0 는 실린더의 반지름, Ω 는 실린더의 회전속도, α_0 는 초기 실린더의 잠수되어 있는 각도, g 는 중력 가속도를 나타낸다. 그러나 식 (1)과 (2)의 이론해의 경우, 액막의 두께가 실린더 반지름에 비해 작으며 실린더의 회전 방향으로의 1차원 거동을 가정한 지배방정식을 사용하여 액막 두께를 다소 과다 예측할 수 있다. 이에, Ponomarenko 등 (1979)는 실험을 통해 회전하는 실린더로 인해 형

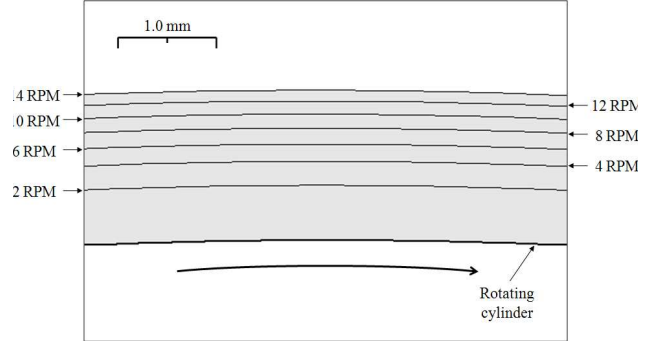


Fig. 3 Behavior of liquid film at the region B with the minimum thickness of liquid film

성된 액막의 두께를 예측하기 위한 상관식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\delta_{\min} = 0.5 \sqrt[8]{\frac{R_0^4 \Omega^4 \sigma^3}{g^5 \rho^3}} \left(\sqrt[4]{\frac{\sigma^3 \rho}{\mu^4 g}} \right)^{-0.7} \sqrt[10]{\frac{\alpha_0}{180}} \quad (3)$$

2.2 지배방정식

본 연구에서는 회전하는 실린더 표면에서의 액막 거동 특성에 대한 유동 해석을 수행하기 위하여, 상용 CFD 프로그램인 STAR-CD(2004)를 사용하였다. 비압축성 층류 유동 해석을 위한 연속 및 운동량 방정식은

$$\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho U_k) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\rho U_i U_k - \mu \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right] = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + f_{\sigma, i} + \rho g_i \quad (5)$$

와 같다. 여기서, U_i 는 i 방향 속도를, P 는 압력, g_i 는 중력가속도, $f_{\sigma, i}$ 는 표면장력을 나타낸다. 이때, 이상유동 특성을 갖는 액막 거동 특성을 해석하기 위하여 해석격자 내 유체의 물성치인 밀도 ρ 와 점성 μ 를

$$\rho = \rho_g (1 - \alpha) + \rho_l \alpha \quad (6)$$

$$\mu = \mu_g (1 - \alpha) + \mu_l \alpha \quad (7)$$

와 같이 구하였다. 이 때, 유체의 물성치는 해당 격자 내 기체와 액체의 체적비 α 에 의해 결정된다. 0과 1 사이의 값을 갖는 체적비 α 는

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\alpha u_k) = 0 \quad (8)$$

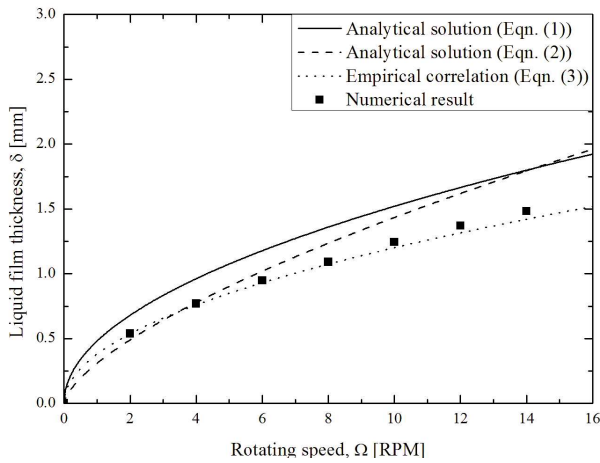


Fig. 4 Liquid film thickness with various rotating speeds

와 같은 스칼라 이류방정식 형태의 지배방정식에 의해 결정된다. 체적비에 대한 계산에 있어 본 연구에서 사용한 유동해석 코드는 상경계면의 정확한 예측을 위한 고차 이산화 방법인 CICSAM (Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes) 기법⁽¹⁴⁾을 사용하고 있다.

이와 같은 수치해석을 통해 회전하는 실린더에 의해 형성된 액막이 일정한 두께를 갖는 결과를 얻기 위하여 실린더가 2회 회전하는 시간까지 해석을 수행하였으며, 1회 회전 이후에는 액막 거동 특성이 준정상상태에 이르는 결과를 얻을 수 있었다. 각 해석조건에 따른 계산을 위해 2.4 GHz AMD Opteron 64bit 1CPU를 사용하여 약 하루 정도의 계산 시간이 소요되었다.

3. 결과 및 토의

3.1 회전 속도에 따른 액막 거동 특성

본 연구에서는 실린더의 회전 속도 및 잠수 정도와 같은 작동 조건 및 액체의 점도 및 표면 장력 계수와 같은 작동 유체 물성치에 따른 회전하는 실린더 주변 액막 거동 특성을 수치해석하였다. 액체풀로부터 액막은 회전하는 실린더에 의해 표면을 따라 상승하게 된다. 이 때, 실린더의 회전은 실린더에 접해 있는 액체의 회전방향 유동을 발생시킨다. Fig. 2는 액체풀에 접하여 회전하는 실린더로 인해 액막이 상승하는 Region A에서의 액막의 거동 특성을 보여주고 있다. 이를 보면, 실린더 주변의 액체는 접촉 조건으로 인해서 실린더의 회전속도에 의해 유동을 발생시키

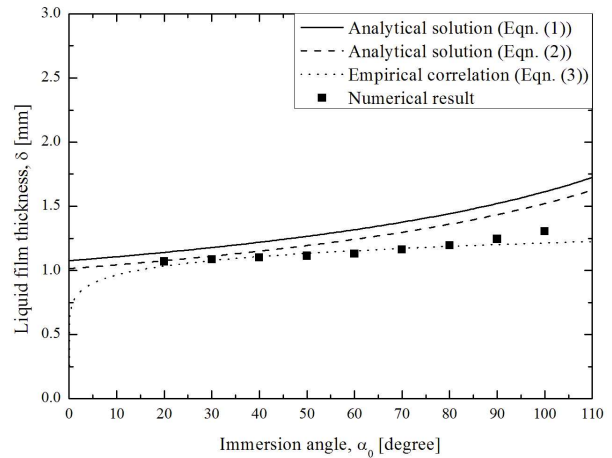


Fig. 5 Liquid film thickness with various immersion angle of cylinder in liquid pool

며, 액체 점도의 영향으로 액체풀로부터 액막을 상승시키게 된다. 이 때, 회전속도에 따른 액막 거동 특성을 얻기 위해 2 RPM ($Re=2.53$) ~ 14 RPM ($Re=17.74$)의 속도로 회전하는 실린더 주변 액막 거동에 대해 해석한 결과를 통해, 회전속도가 더 클수록 더 많은 양의 액체를 상승시키는 것을 볼 수 있었다. 이와 같이 상승된 액체는 회전하는 실린더 주변에 액막을 형성하게 된다. 실린더 주변에서 액막은 중력의 영향으로 실린더의 윗부분에서 최소 두께를 갖게 된다. Fig. 3은 액막의 최소 두께를 갖는 Region B에서 회전속도에 따른 액막의 두께를 보여준다. 최소 두께를 갖는 실린더의 윗부분에서도 액체풀로부터 상승되는 액체의 영향으로 결정되는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 회전하는 실린더 주변의 액막 거동에 대한 수치해석으로부터 얻어진 실린더 윗부분에서 액막의 최소두께를 Gel'perin과 Nosov(1975)가 제안한 이론해(식 (1)과 (2))와 Ponomarenko 등 (1979)이 제안한 실험적 상관식(식 (3))과 Fig. 4와 같이 비교하였다. 이를 보면, 본 수치해석을 통해 얻어진 액막의 두께가 실험적 상관식의 결과와 매우 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나 이론해의 경우 실린더 회전방향 1차원 유동에 대한 지배방정식을 사용함으로 인해 액막의 두께를 다소 과다 예측하는 경향이 있다. 또한, 본 연구에서 사용한 작동유체인 Glycerin의 경우 점도가 높아, 표면장력에 비해 관성이 지배적으로 작용함으로 인해 표면장력을 고려한 이론해보다 표면장력을 고려하지 않은 이론해와 더 비슷한 경향을 갖는 것을 볼 수 있다.

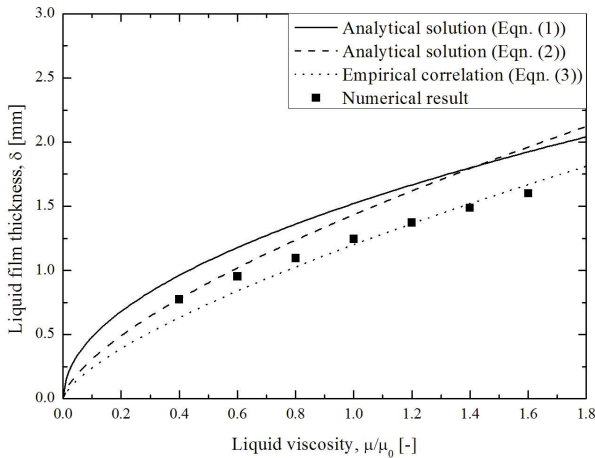


Fig. 6 Liquid film thickness with various liquid viscosity

3.2 실린더 잠수 정도에 따른 액막 거동 특성

회전하는 실린더 주변에 형성되는 액막은 실린더의 회전으로 인해 액체풀로부터 액체를 상승시키에 따라 형성되기 때문에 액막 거동 특성은 실린더가 액체풀에 잠수되어 있는 정도에 의해 영향을 받는다. 본 연구에서는 액체풀에 잠겨 있는 실린더 중심이 상경계면과 이루는 각 α_0 를 20도부터 100도까지 변화하여 수치해석을 수행하였다. Fig. 5는 실린더가 잠수되어 있는 정도에 따른 최소 액막 두께를 보여주고 있다. 이를 보면, 잠수 정도가 작아질수록 상경계면과 회전방향에 갖는 각도가 작아지기 때문에 액체를 상승시키기 위해서는 더 큰 힘이 필요하게 된다. 이러한 영향으로 인해서 잠수 정도가 커질수록 더 두꺼운 액막이 형성되었다. 그러나 실린더 중심이 상경계면과 이루는 각이 약 60도 이하일 경우는, 각도가 작아지더라도 수면의 높이에 큰 변화가 없어 액막 두께에는 큰 변화가 없었다.

3.3 액체 점도에 따른 액막 거동 특성

실린더의 회전으로 인해 액체풀로부터 액막을 상승시킬 경우, 실린더의 회전속도로 인해 결정된 실린더에 근접한 액체의 유동속도가 주변 액체에 영향을 준다. 이로 인해 실린더를 따라 상승하는 액막의 거동 특성이 결정되기 때문에, 주변 액체에 영향을 미치는 정도를 결정하는 액체의 점도 특성은 액막 두께에 밀접한 영향을 미칠 수 있다. Fig. 6은 액체의 점도에 따른 회전하는 실린더 주변 액막 두께를 보여준다. 점도가 증가할수록 실린더의 회전으로 인해 더 넓은 영역의

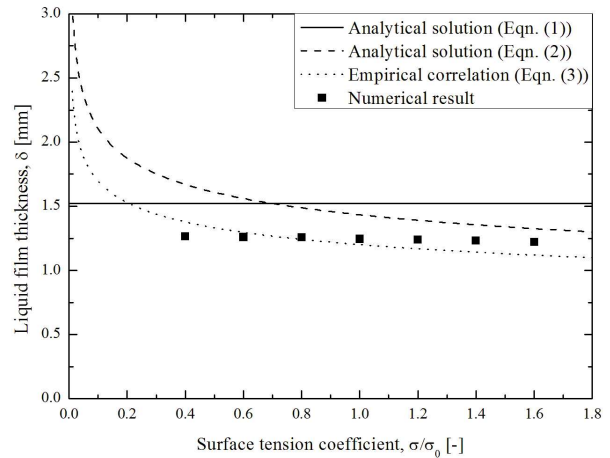


Fig. 7 Liquid film thickness with various surface tension coefficient

액체의 회전방향으로 유동을 발생시킴으로써 두꺼운 액막을 형성하게 된다.

3.4 표면 장력 계수에 따른 액막 거동 특성

실린더의 회전으로 인해 형성된 액막은 상경계면의 곡률이 심하게 형성되는 액체풀로부터 상승하는 부분에서 표면 장력의 영향을 받게 되며, 이 영향으로 액막의 두께에 영향을 미칠 수 있다. Fig. 7은 표면 장력 계수를 변화할 경우 실린더 주변 액막 두께를 보여준다. 이를 보면, 회전하는 실린더 주변 액막의 두께가 본 연구에서 적용한 표면 장력 계수의 증가에 따라 다소 감소하지만 거의 변화가 없는 것을 볼 수 있다. 이는 본 연구에서 기본 작동유체로 선정한 Glycerin이 표면장력의 영향보다 점도의 영향이 커서 관성에 의해 거동 특성이 결정되기 때문이다. 이러한 영향으로 표면장력 특성을 고려한 이론해(식 (2))와 실험적 상관식(식(3))의 경우, 표면장력 및 점성력이 거의 비슷한 액막 거동에 대한 이상유동을 기준으로 제안되었기 때문에 본 연구의 해석결과와 다소 차이가 발생하는 것을 볼 수 있다.

이와 같이 실린더의 회전으로 인해 생성되는 액막의 두께를 예측하기 위한 기존 이론/실험적 상관식이 제시되어 있지만, 이러한 상관식의 경우 현상을 구현하기 위한 물리적 특성의 고려 여부 및 실험을 수행한 물성과 작동조건 범위에 따라 특정 조건에서 액막 두께를 예측할 수 있지만 전반적인 물성 및 작동조건에서의 두께를 예측하기에는 한계가 있으며, 이로 인해 상관식간에도 액막 두께값 뿐만 아니라 경향성에서도 차이가

발생하는 것을 볼 수 있다. 본 연구에서 수치해석을 통해 얻은 액막 두께의 경우, 고점도 액막을 고려한 이론적 상관식과 비슷한 경향성을 보였으며 다양한 범위에서 얻어진 실험적 상관식과 비슷한 액막 두께값을 갖는 것을 볼 수 있었다. 이에, 실제 산업현장에서 액막 두께를 예측하기 위한 이론/실험적 상관식과 더불어 본 연구에서의 수치해석으로부터 얻은 액막 거동 특성을 통한 가이드라인 제시가 가능할 것으로 보이며, 본 연구에서의 수치해석 방법은 특정 물성 및 작동조건에서의 액막 두께 예측을 위한 수치해석을 수행하기 위하여 적용될 수 있을 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 회전하는 실린더로 인해 액체풀로부터 실린더 표면을 따라 상승하여 형성된 액막의 거동특성에 대해 VOF 방법을 사용함으로써 이상유동에 대한 수치해석을 수행하였다. 이로부터, 회전하는 실린더로 인해 액체풀로부터 상승하는 액막의 거동 특성 및 실린더 주변에 형성된 액막의 두께 특성을 얻을 수 있었다. 실린더 주변에 형성된 액막의 두께는 액체풀로부터 액체를 상승시키기 위한 실린더의 회전속도 및 실린더의 잠수 정도와 같은 작동조건 및 액체의 점도 및 표면장력 계수와 같은 액체 물성치에 의해 영향을 받게 된다. 본 연구에서 사용한 작동유체인 Glycerin과 같은 고점도 액체의 경우, 표면장력보다 관성력의 영향이 지배적이기 때문에 표면장력 특성보다 액체의 점도 특성이 액막 거동에 큰 영향을 미치는 것을 볼 수 있었다. 이와 같은 실린더의 회전으로 인해 형성된 액막 거동 특성에 대한 결과는 롤코팅 기술을 통한 박막 생성시 액막 거동 특성 예측을 위한 기본 데이터로 활용할 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받는 ‘다중현상 CFD 연구센터 (No. 20090083510)’ 산학대응 과제의 일환으로 (주)포스코의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- (1) Chien, C.-H. and Jang J.-Y., 2007, "Numerical and Experimental Studies of Thin Liquid Film Flow Between Two Forward-Rollers," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, No. 11, pp. 1892~1900.
- (2) Carvalho, M.S. and Scriven, L.E., 1999, "Three-Dimensional Stability Analysis of Free Surface Flows: Application to Forward Deformable Roll Coating," *Journal of Computational Physics*, Vol. 151, Issue 2, pp. 534~562.
- (3) Pukhnachev, V.V., 1977, "Motion of a Liquid Film on the Surface of a Rotating Cylinder in a Gravitational Field," *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, Vol. 18, No. 3, pp. 344~351.
- (4) Karabut, E.A., 2007, "Two Regimes of Liquid Film Flow on a Rotating Cylinder," *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, Vol. 48, No. 1, pp. 55~64.
- (5) Gel'perin, N.I., Nosov, G.A. and Makotkin, A.V., 1975, "Determinating the Thickness of Liquid Film Holdup on a Rotating Drum Surface," *Chemical and Petroleum Engineering*, Vol. 11, No. 3, pp. 230~233.
- (6) Ponomarenko, V.G., Bei, V.I., Kurland, Y.A., Potebnya, G.F. and Belomyttsev, S.N., 1979, "Calculation of the Thickness of a Viscous Liquid Film Entrained by a Rotating Roller with a Smooth or Ribbed Surface," *Chemical and Petroleum Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 282~285.
- (7) Hasan, N. and Naser, J., 2009, "Determining the Thickness of Liquid Film in Laminar Condition on a Rotating Drum Surface Using CFD," *Chemical Engineering Science*, Vol. 64, Issue 5, pp. 919~924.
- (8) CD-adapco Group, 2004, STAR-CD V3.24 User Guide, London.