

곡률이 있는 모서리 주변에서의 액막 거동에 대한 수치해석적 연구

이 건 강, 허 남 건*, 손 기 현

서강대학교 기계공학과

A NUMERICAL ANALYSIS ON THE BEHAVIOR OF LIQUID FILM AROUND A CURVED EDGE

Geonkang Lee, Nahmkeon Hur* and Gihun Son

Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ.

Due to the effect of surface tension, liquid film around a curved edge of solid surface moves from the corner to the flat surface. During this behavior of liquid film, film sagging phenomenon is easily occurred at the solid surface. Behavior of liquid film is determined with the effects of the properties of liquid film and the geometric factors of solid surface. In the present study, 2-D transient CFD simulations were conducted on the behavior of liquid film around a curved edge. The two-phase interfacial flow of liquid film was numerically investigated by using a VOF method in order to predict the film sagging around a curved edge. In the steady state of behavior of liquid film, the liquid film thickness of numerical result showed a good agreement with experimental data. After verifying the numerical results, the characteristics of behavior of liquid film were numerically analyzed with various properties of liquid film such as surface tension coefficient and viscosity. The effects of geometric factors on film sagging were also investigated to reduce the film sagging around a curved edge.

Key Words : 액막 뭉침(Film Sagging), 액막(Liquid Film), 상경계 유동(Interfacial Flow), 전산유체역학(CFD), VOF 방법(Volume of Fluid Method)

1. 서 론

액체가 고체 표면에 얇은 액막을 형성하고 있을 때, 액막은 기체와 액체, 액체와 고체 사이와 같은 다상의 조건에서 존재하게 된다. 이때, 이 액막은 2상의 유체 사이에서 상경계면을 형성하고 고체 표면에 대하여 접촉각 특성의 영향을 받게 된다. 이로 인해 고체 표면에 존재하는 액막은 정수력, 중력, 표면장력과 같은 다양한 힘의 영향을 통해 거동이 결정된다. 특히 각진 모서리와 같이 평평하지 않은 고체 표면에서 액막은 표면이 가지는 형상학적 특징들로 인해 표면장력이 작용하게 된다. 이와 같은 표면장력의 영향으로 인해 고체 표면의 모서리 주변과 같은 영역에서는 액막이 뭉치는 현상이 발생하게 된다.

이와 같은 액막의 뭉침 현상을 분석하기 위하여 고체 표면

을 흐르는 얇은 액막의 거동에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다. 이를 위하여, 특정 높이의 단이 존재하는 고체 표면에서 특정 두께의 액체가 일정 유속을 가지고 흐를 때 발생하는 유동 패턴에 대하여 수치해석적인 예측이 많이 수행되었다. 특히 표면을 타고 흐르는 액막 거동과 관련하여 액막의 유속이나 압력, 표면에 작용하는 전단 응력 등 다양한 유동 특성 예측을 통해서 액막 뭉침 현상을 분석하는 연구가 다양하게 수행되었다.

특히, 고체 표면에서 나타나는 액막 뭉침은 액막을 구성하는 액체의 물성치에 지배적인 영향을 받게 되며, 이에 따라 액체의 물성치에 따른 액막 거동 해석이 많이 수행되었다. 이에 대하여 Bontozoglou와 Seriff[1]는 액막을 구성하는 액체의 점도와 표면장력 계수, 액막 거동이 가지는 유속을 기준으로 하여 모서리 주변에서 액막이 뭉치는 정도를 비교하여, 액체의 물성치와 유속이 액막 뭉침 현상에 미치는 영향성을 분석하였다. Oscharova[2]는 이와 같은 액막의 거동에 대하여 표면 온도를 기준으로 하여 점도와 표면장력 계수를 다르게 하여, 온도에 따른 물성치 변화가 액막 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 Zhou와 Kumar[3]는 상경계를 구성하는 액체와

Received: October 23, 2012, Revised: November 9, 2012,

Accepted: November 12, 2012.

* Corresponding author, E-mail: nhur@sogang.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2012.17.4.075>

© KSCFE 2012

기체의 물성치 비율에 따른 액막 거동 현상을 예측하여, 2상 유동에서 두 유체 간의 물성치 차이에 따라 나타나는 영향을 분석하였다.

이외에도 얇은 액막의 거동은 액막이 존재하는 고체 표면 형상에 따라서도 많은 영향을 받게 되어 이에 대한 영향성을 분석하는 연구도 다양하게 수행되었다. 이와 관련하여 Kalliadasis 등[4]은 고체 표면에 존재하는 단의 높이를 다르게 하여 액막 거동을 해석하고 모서리에서 나타나는 액막 뭉침 현상을 예측하였다. 또한 Davis와 Toian[5]은 이와 같이 특정 높이의 단이 존재하는 고체 표면에서의 액막 뭉침에 대하여 단의 기울기기에 따라 나타나는 액막의 뭉침 정도를 분석하였다. Pavlidis 등[6]은 모서리 형상에 따른 액막 뭉침 특성을 예측하여 각진 모서리와 곡률이 존재하는 모서리에서의 뭉침 정도를 비교하였다.

이와 같이 고체 표면에 존재하는 얇은 액막의 거동에 대한 연구는 액체의 물성치를 비롯하여 고체 표면의 형상적 특징 등 다양한 변수들에 의한 영향에 대하여 진행되어 왔다. 이때, 액막 거동에 대한 대부분의 연구는 입구에서 특정 유속을 가지고 유입되는 조건을 이용하여, 표면을 타고 흐르는 액막에 대하여 이루어졌다. 이와 같은 유동의 경우, 유입되는 유속에 의한 영향이 포함되어 유속에 따라 유동 특성이 다르게 나타날 수 있다. 이로 인해 모서리 근처에서 작용하는 표면장력의 영향으로 인해 나타나는 유동 특성을 독립적으로 파악하기는 힘들다.

이에, 본 연구에서는 고체 표면 형상에 의한 표면장력의 영향만으로 발생하는 액막의 거동을 분석하기 위하여, 모서리를 포함한 고체 표면에 특정 두께의 초기 액막이 존재하는 조건을 사용하여, 표면장력에 의해 발생하는 액막 거동에 대한 해석을 수행하였다. 이를 통해 시간이 흐름에 따라 나타나는 액막의 두께 변화를 예측하고 고체 표면 중 모서리 주변에서 나타나는 액막 뭉침 현상을 예측하였다. 또한 액막을 구성하는 액체의 표면장력 계수와 점도에 대하여 액막 뭉침 현상에 미치는 영향을 분석하였다. 이외에 액막 뭉침 현상이 완화될 수 있도록 고체 표면의 형상을 변경한 조건에서 액막 거동을 해석하여, 액막 표면이 균일하게 형성되는 고체 표면 형상을 도출하였다.

2. 수치 해석

2.1 액막 거동 해석 기법

물체 표면에 형성된 액막의 거동은 비압축성 유동 특성을 가지며, 이에 대하여 유체의 비압축성 유동 해석을 위한 지배 방정식인 연속방정식과 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} + \rho g_i + f_{\sigma,i} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서 U_i , U_j 는 각각 i 방향과 j 방향의 속도를 나타내며, ρ 는 밀도, μ 는 점도, P 는 압력, g_i 는 중력가속도이며 $f_{\sigma,i}$ 는 액막 표면에 작용하는 표면장력을 나타낸다. 이때 액막 표면에서 표면 곡률에 의해 발생하는 표면장력은 다음과 같은 CSF (Continuum Surface Force) 방법[7]을 이용하여 계산하였다.

$$f_{\sigma,i} = -\sigma \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial x_i} \middle/ \left| \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} \right| \right) \quad (3)$$

여기서, σ 는 표면장력 계수이며 α 는 2상의 유체에 대한 체적비를 의미한다. 이 때, 액막의 거동에 따라 변하는 상경계면 해석을 위하여 각 해석 격자 내에서 밀도 ρ 와 점도 μ 를 격자 내 체적비 α 를 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\rho = \rho_g(1 - \alpha) + \rho_l \alpha \quad (4)$$

$$\mu = \mu_g(1 - \alpha) + \mu_l \alpha \quad (5)$$

이 때, 각 해석 격자 내의 체적비 α 는 다음과 같은 스칼라 이류방정식 형태의 지배방정식을 이용하여 계산하였다.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha u_i) = 0 \quad (6)$$

이와 같은 각 해석 격자에 대하여 체적비 $\alpha = 1$ 일 때는 액체, $\alpha = 0$ 일 때는 기체, $0 < \alpha < 1$ 일 때는 상경계면임을 의미한다. 본 연구에서는 체적비 계산을 통한 상경계면 예측을 위하여 고차 이산화 방법 중 하나인 HRIC (High-Resolution Interface Capturing) 기법[8]을 사용하였다.

이와 관련하여 본 연구에서는 위와 같은 액막 거동 특성 예측을 위한 수치해석 코드로 상용 프로그램인 STAR-CD V4.12[9]를 사용하였다.

2.2 해석 영역 및 해석 조건

본 연구에서는 모서리를 포함한 고체 표면에서의 액막 거동을 해석하기 위하여 Fig. 1(a)와 같은 2차원의 해석 영역을 구성하였다. 고체 표면의 모서리 부분은 반지름 0.3 mm의 곡

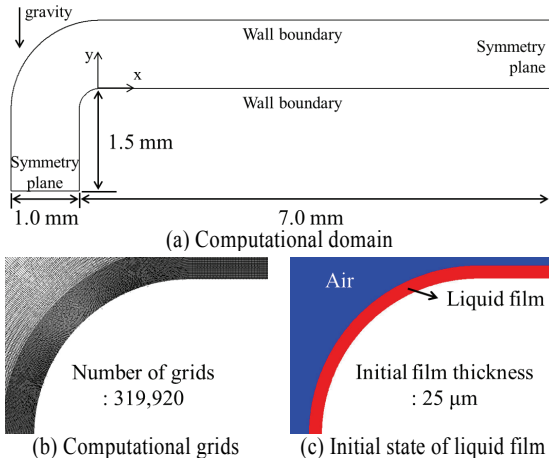


Fig. 1 Computational model to predict the behavior of liquid film on solid surface

를 가지도록 하였으며, 액막이 존재하는 양 끝 면은 대칭 조건을 적용하고 고체 표면 부분과 외부의 상단 부분은 벽면 조건을 사용하였다. 이와 같은 해석 영역에 대하여 상경계면 해석의 정확성과 해석 시간을 위하여 격자 테스트를 거쳤으며, 이를 통해 Fig. 1(b)와 같이 최소 격자 사이 크기가 1.25 μm 인 조밀한 격자를 형성하여 총 319,920개의 격자로 해석 영역을 구성하였다. 이때 Fig. 1(c)와 같이 25 μm의 두께를 가지는 초기 액막을 고체 표면에 형성하여 시간에 따른 액막 거동을 해석하였다.

이때, 고체 표면 전체 영역에 대하여 벽면을 항상 액막에 의한 젖음 상태(wetting condition, contact angle $\theta = 180^\circ$)로 설정하였다. 액막을 구성하는 액체로는 코팅 막 형성을 위해 일반적으로 많이 사용되는 유성도료를 이용하였다. 실험을 통해 측정된 물성치는 Table 1과 같다. 밀도는 959.663 kg/m³, 점도는 0.023975 kg/m·s, 표면장력 계수는 0.027 N/m이며, 점도와 표면장력 계수에 대하여 각각 20%씩 증가, 감소시켜 물성치 변화에 따라 달라지는 액막 거동 특성을 분석하였다.

이와 같은 조건에 대하여 5.0e-5 sec의 시간간격을 이용하여 해석을 수행하였으며, 액막의 거동은 약 15초 정도 시간이 경과 한 후에 준정상 상태에 도달하였다. 해당 시간 동안의 해석을 수행하는 과정에서 AMD Opteron 64bit processor 2.46 GHz 8CPUs 리눅스 클러스터 계산 환경을 이용한 병렬 계산을 통하여 약 5일의 계산 시간이 소요되었다.

Table 1 Properties of liquid film

Density	959.663 kg/m ³
Viscosity	0.023975 kg/m·s
Surface tension coefficient	0.027 N/m

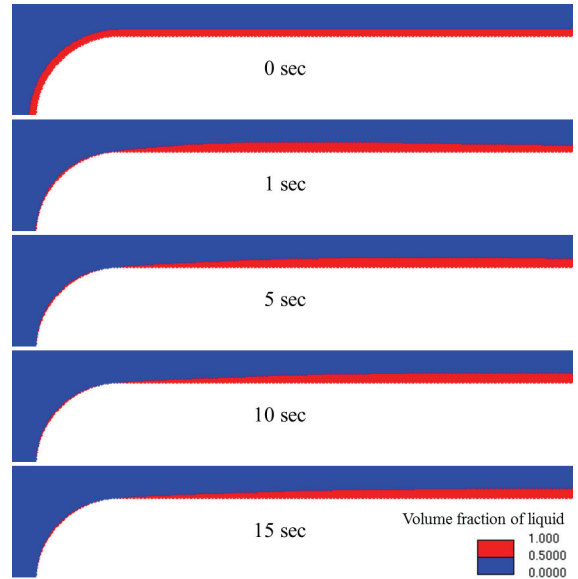


Fig. 2 Behavior of liquid film on solid surface

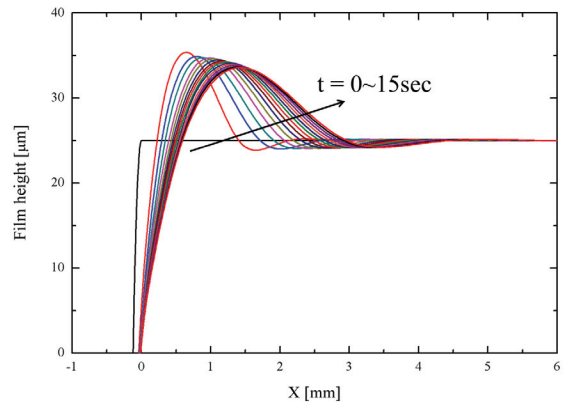


Fig. 3 Time dependent change of film height

3. 결과 및 토의

3.1 표면장력에 의한 액막 거동

본 연구에서는 위와 같은 해석 조건을 이용하여 고체 표면에서 표면장력에 의해 발생하는 액막 거동에 대한 수치해석을 수행하였다. 고체 표면에서 25 μm의 두께를 가지고 형성되어 있는 초기 액막은 모서리 주변에서 형상적인 특징에 의해 존재하는 액체 표면의 곡률로 인하여 표면장력이 크게 작용한다. 이로 인해 고체 표면의 액막은 Fig. 2와 같이 곡률이 있는 모서리 부분에서 평평한 평면 부분으로 밀려나는 거동을 하게 된다. 이와 같은 거동은 액막의 표면에 작용하는 표

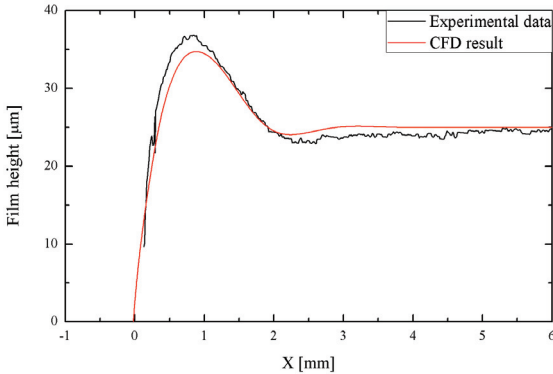


Fig. 4 Comparison of numerical result of film height with experimental data

면에너지가 최소화하는 형태가 되도록 이루어지며 이 과정에서 Fig. 3와 같이 고체 표면에서의 액막 두께가 변하게 된다.

액막의 두께는 평면이 시작되는 지점을 원점으로 하여 위치에 따른 액막 높이를 측정하였다. $x < 0$ 에 해당하는 영역은 곡률이 있는 모서리 부분이다. 이 때, 액막의 거동은 일정 시간이 경과한 후에 최고 액막 높이의 변화 없이 특정 형상을 유지하는 준정상 상태에 도달한다. 본 연구에서는 최고 액막 높이 변화가 초당 $0.01 \mu\text{m}$ 이하가 되는 경우를 준정상 상태의 기준으로 설정하였다.

초기 두께가 $25 \mu\text{m}$ 인 조건에서는 약 15초 정도 경과 후에 준정상 상태에 도달하였으며, 이 때 고체의 모서리 부분에서 밀려나는 액막으로 인하여 상단의 평면 부분에서 액막의 뭉침 현상이 나타난다. 액막 뭉침의 경우 15초 경과 후에 초기 두께에 비해 $8.58 \mu\text{m}$ 가 증가한 $33.58 \mu\text{m}$ 의 높이로 형성되며, 그 폭은 약 2.5 mm 이다. 이와 같은 액막 거동에 대한 수치해석 결과를 검증하기 위하여 동일한 조건에서 발생하는 실제 액막 거동에 대한 실험을 통해 두께 변화를 측정하고 이를 Fig. 4와 같이 수치해석 결과와 비교하였다. 수치해석을 통해 예측한 액막 뭉침 두께와 실험을 통해 얻은 뭉침 두께는 약 $2 \mu\text{m}$ 정도의 높이 차이를 나타냈으며, 뭉침 폭의 경우 거의 일치하였다. 액막 뭉침 부분의 두께에서 발생하는 차이는 액막을 고형화한 후 두께를 측정하는 과정에서 발생하는 실험적인 오차로 볼 수 있으며, 전체적인 액막 형성에 대하여 동일한 경향을 가지며 일치하는 것을 알 수 있다.

3.2 물성치 변화에 따른 액막 거동 특성 변화

이와 같은 액막 거동은 액막을 구성하는 액체의 물성치에 따라 많은 영향을 받게 된다. 특히 액체의 표면장력 계수는 액막 거동을 발생시키는 주된 힘인 표면장력에 직접적인 영향을 주는 값이다. 이에 본 연구에서는 액막의 표면장력 계수

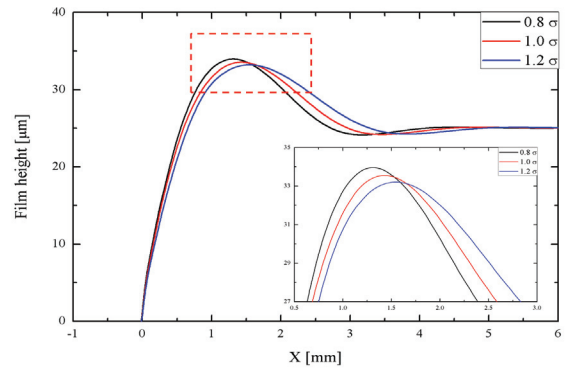


Fig. 5 Height of liquid film with various surface tension coefficient

변화에 따른 액막 두께의 변화를 관찰하기 위하여 기준 표면장력 계수 0.027 N/m 에 대하여 20%씩 증가, 감소 조건에서 액막 거동 해석을 수행하였다. 이때, 액막의 거동은 기본 조건과 유사하게 약 15초 정도가 경과한 후에 준정상 상태에 도달하였다.

Fig. 5는 표면장력 계수에 따른 액막 두께를 나타낸 그래프로 액막 거동이 시작되고 15초가 경과한 후의 두께를 나타내었다. 이때 기준 표면장력 계수에 대하여 20% 만큼 감소하여 0.0216 N/m 인 조건에서 최고 액막 두께는 $33.95 \mu\text{m}$ 로 초기 두께 $25 \mu\text{m}$ 에 비하여 $8.95 \mu\text{m}$ 만큼 높이가 증가한 액막 뭉침 현상이 나타나는 것을 확인하였다. 또한 20% 증가하여 0.0324 N/m 인 조건에서 최고 액막 두께는 $33.20 \mu\text{m}$ 로 초기 두께에 비하여 $8.20 \mu\text{m}$ 만큼 증가한 것을 확인하였다. 기본 조건에서 15초 거동 후 최고 액막 두께가 $33.58 \mu\text{m}$ 인 것과 비교하여 보았을 때 표면장력 계수가 작을수록 높은 액막 뭉침 현상이 나타나는 것을 알 수 있다. 이와 같은 액막 뭉침 높이의 변화는 표면장력 계수가 클수록 액막의 표면에너지를 최소화하기 위한 힘이 크게 작용하여 단면적을 작게 하는 완만한 형상으로 변하기 때문이다. 이로 인해 액막 뭉침 부분의 폭의 경우 표면장력 계수가 클수록 더 넓게 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

고체 표면에서의 액막 거동은 표면장력 계수 외에 액체의 점도에도 영향을 받는다. 점도는 액막의 거동에 있어서 저항력으로 작용하는 요소로 본 연구에서는 점도가 액막 거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 표면장력 계수와 같은 방법으로 기준 점도 값인 $0.023975 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ 에 대하여 20%씩 증가, 감소시킨 조건을 이용하여 해석을 수행하였다. 기본 조건에서 약 15초 경과 후 준정상 상태에 도달한 것과 비교하였을 때 점도가 낮은 조건에서는 약 13초, 점도가 높은 조건에서는 약 17초 경과 후에 준정상 상태에 도달하였다.

Fig. 6은 점도에 따른 액막 두께를 나타낸 그래프로 각 조

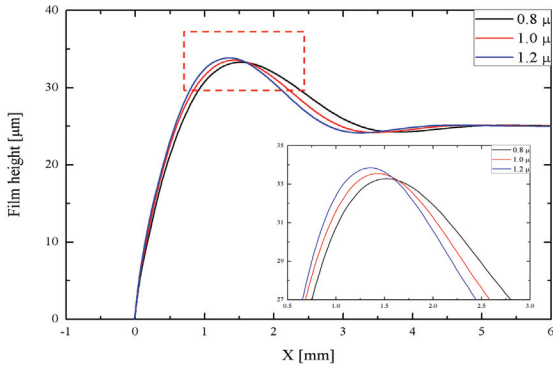


Fig. 6 Height of liquid film with various viscosity

건에서 정상상태 도달 후 점도에 따른 액막 두께를 나타내었다. 이때 기준 점도에 대하여 20% 감소하여 0.01918 kg/m·s인 조건에서 최고 액막 높이는 33.28 μm로 초기 두께에서 8.28 μm 만큼 증가하였다. 또한 20% 증가하여 0.02877 kg/m·s인 조건에서는 33.84 μm의 두께로 초기 두께에 대하여 3.84 μm 만큼 증가하였다. 이를 통해 기본 조건에서의 액막 뭉침 높이 33.58 μm와 비교하였을 때 점도가 높을수록 더 높은 액막 뭉침 현상이 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 동일한 크기로 작용하는 표면장력에 대하여 점도의 영향으로 유동 저항의 크기가 달라져, 평형 상태가 다르게 나타나기 때문이다.

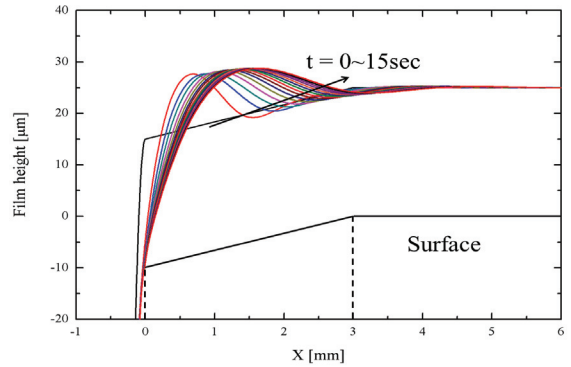
3.3 고체 표면 형상에 따른 액막 거동 특성 변화

이와 같은 고체 표면에서의 액막 거동은 기본적으로 고체 표면이 가지는 형상적 특징으로 인해 발생하는 곡률로 인하여 작용하는 표면장력의 영향으로 발생한다. 따라서 액막이 존재하는 고체 표면의 형상에 따라서 액막의 거동이 달라진다. 본 연구에서는 이와 같은 특징을 이용하여 액막 뭉침 현상이 나타나지 않는 표면 형상을 얻기 위하여 고체 표면 형상을 변경하여 액막 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 고체 표면의 평면 부분에 대하여 특정 높이를 가지는 경사면을 생성하였다. 기본 형상에서 액막 뭉침 폭의 길이가 2.5~3 mm로 나타나는 것을 고려하여 경사면의 길이를 3 mm로 설정하였으며 경사면의 높이는 각각 10 μm, 15 μm, 20 μm로 하였다.

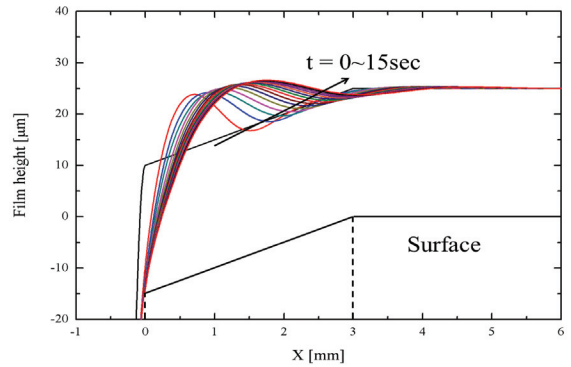
이와 같은 조건에서 액막 거동 해석을 수행한 결과는 Fig. 7(a)-(c)와 같다. 이때, 액막 두께의 비교를 위하여 평면 부분

Table 2 Effect of the corner shape with inclined plane on film sagging

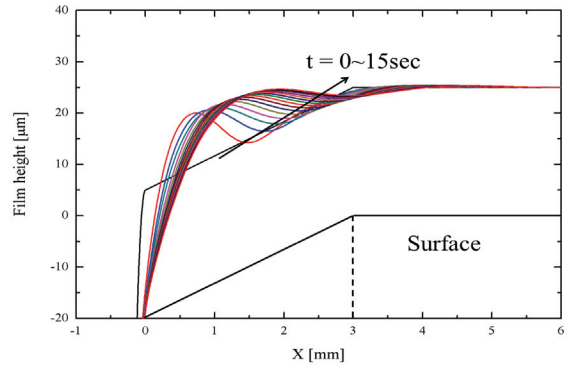
Height of inclined plane h_p	$h_{f,max} - h_{f,0}$
0 μm	8.58 μm
10 μm	3.82 μm
15 μm	1.62 μm
20 μm	0.32 μm



(a) height of inclined plane $h_p = 10 \mu\text{m}$



(b) height of inclined plane $h_p = 15 \mu\text{m}$



(c) height of inclined plane $h_p = 20 \mu\text{m}$

Fig. 7 Behavior of liquid film around the curved edge with various height of inclined plane

의 높이를 기준으로 두께를 나타내었으며, 각 그래프에서 $x < 0$ 인 영역은 곡률 반경 부분에 해당한다. Fig. 7(a)는 경사면 높이가 10 μm인 경우에 시간에 따른 액막 거동을 나타낸 그래프로 15초 경과 후 최고 액막 높이는 28.82 μm로 나타났다. 이는 초기 두께인 25 μm에 비하여 3.82 μm만큼 증가한 두께로 기본 형상에서의 높이 증가량인 8.58 μm에 비하여 약 5 μm 정도 감소한 값이다. Fig. 7(b)은 경사면의 높이가 15 μ

m인 경우에 나타나는 액막 거동으로 15초 경과 후 최고 액막 높이는 26.62 μm 로 초기 두께에 비하여 1.62 μm 만큼 증가하였다. 경사면 높이가 20 μm 인 경우의 액막 거동은 Fig. 7(c)와 같으며 15초 경과 후 최고 액막 높이는 25.32 μm 로 0.32 μm 만큼 두께가 증가한 것을 알 수 있다.

Table 2를 통해 각 표면 형상에서 액막 뭉침 높이를 비교해보면, 평평한 평면에서부터 경사면의 높이가 증가할수록 액막 뭉침 현상은 완화 되는 것을 알 수 있다. 경사면의 높이를 20 μm 까지 증가시킨 조건에서 나타나는 액막의 높이 차이는 0.32 μm 로 액막 뭉침 현상이 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 이와 같은 경사면 생성에 따른 액막 거동 변화는 모서리 주변의 곡률 반경 변화로 인한 것으로 경사면의 생성으로 인하여 모서리 부분의 곡률 반경이 증가하기 때문이다. 모서리 부분과 평면 부분의 사이에 경사면이 존재함에 따라 해당 위치의 곡률 반경이 증가하면 표면장력은 감소하게 된다. 이로 인해 액막 뭉침 현상을 발생시키는 표면장력의 효과가 감소하게 되어 고체 표면에 균일한 두께의 액막이 형성 되게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 모서리를 포함한 고체 표면에 형성되어 있는 얇은 액막의 거동으로 인해 발생하는 액막 뭉침 현상을 수치해석적인 방법을 이용하여 예측하였다. 이를 위해 일정한 두께를 가지고 있는 액막에 대하여 시간에 따른 거동 특성을 예측하였고, 이를 실험 결과와 비교하여 검증하였다. 이와 같은 수치해석 방법을 통하여 액막을 구성하는 액체의 표면장력 계수와 점도가 액막 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 액막 뭉침 현상에 대하여 고체 표면 형상에 따른 액막 뭉침 현상을 예측하여 액막 뭉침 현상을 완화하고 균일한 두께의 액막을 형성할 수 있는 표면 형상을 도출하였다.

후 기

이 논문은 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구

재단의 지원을 받은 ‘다중현상 CFD 연구센터(ERC)’ 과제에 일환으로 수행된 연구임(No.20090083510).

참고문헌

- [1] 2008, Bontozoglou, V. and Serifi, K., "Falling Film Flow along Steep Two-dimensional Topography: The Effect of Inertia," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.34, pp.734-747.
- [2] 2006, Ovcharova, A.S., "Levelling a Capillary Ridge Generated by Substrate Geometry," *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, Vol.46, No.2, pp.305-314.
- [3] 2012, Zhou, C. and Kumar, S., "Two-dimensional Two-layer Channel Flow near a Step," *Chemical Engineering Science*, Vol.81, pp.38-45.
- [4] 2000, Kalliadasis, S., Bielarz, C. and Homsy, G.M., "Steady Free-surface Thin Film Flows over Topography," *Physics of Fluids*, Vol.12, No.8, pp.1889-1898.
- [5] 2005, Davis, J.M. and Troian, S.M., "Generalized Linear Stability of Noninertial Coating Flows over Topographical Features," *Physics of Fluids*, Vol.17, No.7, pp.072103.1-9.
- [6] 2010, Pavlidis, M., Dimakopoulos, Y. and Tsamopoulos, J., "Steady Viscoelastic Film Flow over 2D Topography: I. The Effect of Viscoelastic Properties under Creeping Flow," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol.165, pp.576-591.
- [7] 1992, Brakbill, J.U., Kothe, D.B. and Zemch, C., "A Continuum Method for Modeling Surface Tension," *Journal of Computational Physics*, Vol.100, pp.335-354.
- [8] 1999, Muzaferija, S. and Peric, M., "Computation of Free Surface Flows using Interface-tracking and Interface-capturing Methods," *Nonlinear Water Wave Interaction*, WIT Press, Southampton, pp.59-100.
- [9] 2009, CD-adapco Group, "STAR-CD V4.12 User Guide," London.