

회전 원판 위 액막 유동 찢김 가시화

김동주* · 김대겸†

Visualization of rupturing of rotating films

Dong Ju Kim* and Daegyoun Kim†

Abstract We visualized the rupturing of liquid films flowing over a disk rotating with large angular velocity. A setup of high speed imaging for liquid flows on dark and reflective surfaces are suggested. From the result, rivulet structures are revealed to be strongly governed by three-dimensional surface structures developed in the film flow. Additionally, unique flow structures including the rivulet sliding and internal meandering are investigated. Generation mechanism of such structures are discussed in terms of the dynamic contact angle theory.

Key Words : Liquid film flow (액막 유동), Rivulet flow (리블렛 유동), Dynamic contact angle (동적 접촉각)

1. 서론

회전 원판 위 액막 유동은 회전 원판 반응기, 스프레이 생성기, 항공기 엔진 등에서 자주 활용될 뿐만 아니라⁽¹⁾ 최근에는 반도체 제조 공정에 활용되는 코팅 기술에서 중요하게 다뤄지고 있다⁽²⁾. 회전 원판 위로 액막 유동이 도포되는 과정에서 액체-기체-고체 계면 (이하 접촉선, Three-phase Contact line) 이 그 진행 방향에 수직인 횡축 방향 (transverse) 으로 불안정성을 갖게 되어 리블렛으로 발달하는 액막 찢김 현상이 발생한다. 이에 따라 회전 액막을 사용하는 공정들의 종료 후 원판이 불완전 도포되거나 비산 특성에 주요한 변화가 발생하는 등의 성능 변화를 유발하게 되므로 액막 찢김 현상을 예측하고

분석하려는 노력들이 중요하게 여겨지고 있다.

액체-기체-고체 접촉선의 움직임에 대한 연구는 여러 연구자들에 의해 수행되어왔다. 동적 접촉각의 영향을 고려한 이러한 연구들은 주로 액막이 리블렛으로 천이된 이후의 불안정성⁽³⁻⁵⁾ 및, 액막이 리블렛으로 천이하는 과정에 대해서^(6,7) 수행되었다. 그러나 회전 원판 위 액막 찢김 현상은 액막이 리블렛으로 천이하는 과정이 매우 복잡하다. 접촉선의 불안정성이 발달한 이후 유동 조건에 따라 다양한 형상의 찢김 액막이 형성된 이후 유동이 원판 가장자리를 향해 흘러나가게 되는 것으로 알려져 있다⁽⁸⁾. 이러한 회전 원판 위 액막 찢김 현상에 대해서는 많은 연구가 이루어져 있지 않을 뿐만 아니라 많은 실제 공정이 이루어지는 104.7 rad/s 이상의 고속 회전 조건에 대해서는 거의 연구가 수행되어 있지 않다.

이에 따라 본 연구에서는 원판이 고속으로 회전하는 조건에서 그 중앙에 연직으로 토출되는

† Mechanical Engineering, KAIST

E-mail: daegyoun@kaist.ac.kr

* Mechanical Engineering, KAIST, Ph.D. student

액체 제트에 의해 형성된 액막의 찢김 현상을 가시화하여 유동 조건에 따른 거동 변화를 형태학적으로 분석하고자 한다. 추가적으로 회전 원판 위를 흐르는 액막 유동에서 나타나는 특징적인 표면과의 역할 역시 그동안 리블렛과 연계되어 분석된 적이 없으나, 본 연구에서 관찰한 결과 개별 표면과의 크기 및 간격과 리블렛 거동 변화의 경향성 간에 상관관계가 큰 것으로 나타나 이에 대해서도 가시화 실험 결과와 비교하여 분석을 수행하고자 한다.

2장에서는 액막 찢김 유동 가시화를 위한 셋업을 다룬다. 유동 가시화 결과와 리블렛의 발생 과정은 3장에 기술되어 있다. 3장은 유동 가시화 결과를 분석한 3.1절과 리블렛 유동 발생을 묘사하는 3.2절로 구성되었다.

2. 실험 셋업

본 연구에서는 반지름 15cm의 고체 원판이 고속으로 회전할 때 그 위에 액체 제트를 분사하여 형성되는 액막으로부터 비산하는 액적을 가시화하였다. 실험을 위해 실리콘 웨이퍼를 부착할 수 있도록 고무 chuck을 -95 Pa의 진공펌프에 연결하였고, chuck을 모터에 연결되어 고속으로 회전할 수 있도록 하였다. 코팅 공정에서 자주 사용되는 조건을 따라 액체는 원판 중심으로부터 연직 방향으로 20 mm 거리에 위치한 직경 3 mm의 노즐로부터 유량 제어 시스템을 통해 토출되도록 하였다. 액체 제트의 직경과 토출 위치에 의한 액막 유동의 형태학적 특징은 제트 충돌 지점으로부터 가까운 거리() 까지로 제한된다고 알려져 있다⁹⁾. 액막 찢김 현상이 발생하는 제트 충돌 지점으로부터 먼 거리의 액막 유동은 유량과 점도, 회전 속도를 포함하는 장파 변수 (long wave parameter) 에 의해 지배되므로 본 연구에서는 액체 토출 조건을 유지하고 회전 속도와 유량을 주요 변수로 하였다. 회전 속도와 액체 토출 유량의 제어는 컴퓨터를 통해 수행되었는데, 장비 일체 및 제어 소프트웨어는 주식회사 SEMES 로부터 제공되었다.

웨이퍼 위 액막 찢김 유동을 가시화하기 위해

Table 1. Experimental parameters

Ω	Angular velocity (rad/s)	31~314
Q	Flow rate (10^{-6} m ³ /min)	500, 750, 1000
ρ	Density (kg/m ³)	998, 870
μ	Dynamic viscosity (10^{-3} Pa s)	1.0, 14.4
σ	Surface tension (N/m)	0.072, 0.032

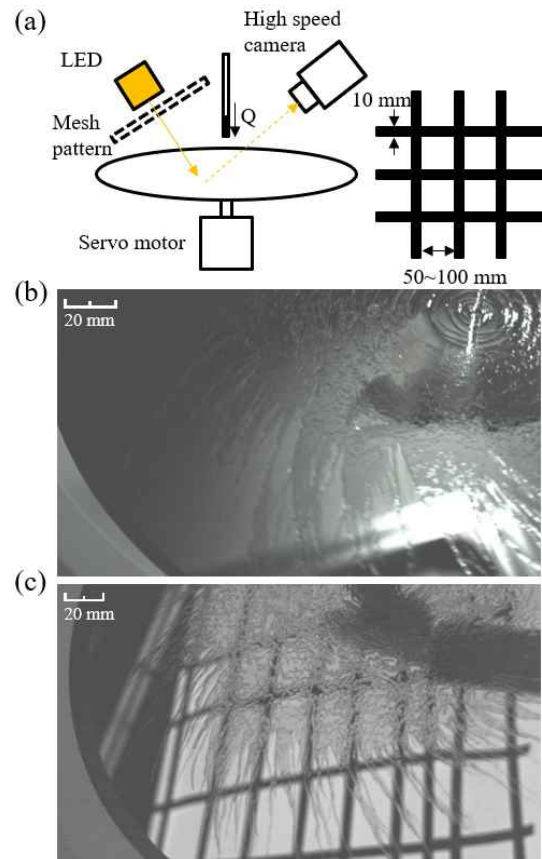


Fig. 1. (a) Schematics of the experimental setup including the mesh geometry. Visualized images without (b) and with the mesh structures (c) are presented (209.4 rad/s, 10^{-3} m³/min, working fluid is 20°C DI water).

고속 카메라 (FASTCAM MINI-UX 50, Photron, Inc.) 가 웨이퍼로부터 연직 방향으로 50 cm 위에 거치되었다. 촬영을 위해 LED 조명을 사용하였고, 초당 프레임 수와 셔터 노출 시간은 원판 회전 속도 52.4 rad/s 인 경우에 대해 각각

5000 fps와 1/50000 s로, 회전 속도에 비례하도록 선택하였다. 촬영 이미지의 공간 분해능은 5.68 mm/px 이다. 실리콘 웨이퍼의 정반사율이 매우 높고 그 색이 어둡기 때문에 일반적인 조명 셋업을 통해 그 위 액체-기체 계면의 형상을 촬영할 경우 조명에 의해 이미지가 백화되어 나타나거나 반사광의 부족으로 계면이 보이지 촬영되지 않는 문제가 있다. 본 연구에서 실험한 결과 조명이 웨이퍼에 반사되어 카메라에 촬영되는 위치에 거치하되 조명 앞에 특정한 패턴의 마스크를 설치하여 공간에 따라 광량의 변화율이 존재하도록 할 경우 고반사율의 어두운 표면 위의 유동에 대해서도 가시화가 용이함을 확인하였다. 이에 따라 격자 모양의 구조물을 광원 앞에 설치하여 가시화를 수행하였다. 격자는 폭 10 mm의 종이를 사용하여 제작하였고, 주기적인 광도 변화를 유도하면서도 광원을 지나치게 가리지 않도록 50~100 mm의 간격을 유지하였다. 실험 셋업의 개략 도 및 촬영 이미지는 Fig. 1에 제시되었고, 유동 조건 및 액체 물성 등의 실험 변수들은 Table.1에 제시된 것과 같다. Fig. 1으로부터 격자 구조가 있을 때 훨씬 넓은 영역에 대해 액막 위에 형성되는 표면파와 접촉선이 더 선명하게 가시화되는 것을 확인할 수 있다.

3. 결과

3.1 가시화 실험 결과

일정 국소 유량 이상의 액막 유동에서 액체-기체 계면은 매우 불안정하다. 이에 따라 특징적인 형상의 표면파와 함께 진행하는데, 이러한 표면파는 접촉선에 횡방향 불안정성을 유발하는 disturbance 로 작용할 것으로 기대된다. Fig. 2에는 앞서 설명한 셋업을 통해 31.4 rad/s의 저속 회전 조건에서 표면파가 잘 관측됨을 알 수 있다. 액체 제트 충돌 지역 주변으로 2차원 동심원 형상의 표면파가 형성된 후 이들이 말발굽 모양의 3차원 표면파들로 분리된다. 이러한 표면파의 천이 거동은 회전수와 유량이 증가함에 따라 그 파장이 감소할 뿐 천이 거동은 유사하

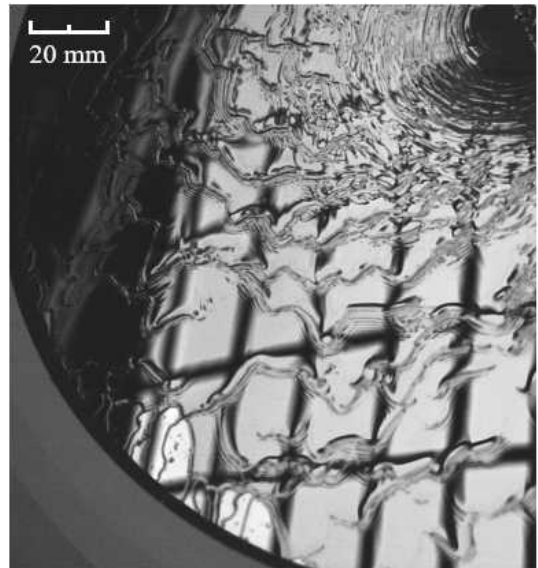


Fig. 2. Visualized images of the surface waves in 31.4 rad/s (10^{-3} m³/min, working fluid is 20°C DI water).

게 나타난다 (Fig. 2-4).

가시화 실험을 수행한 결과 410.9 rad/s 의 높은 회전 속도 조건에서도 리블렛의 구조와 표면파가 잘 촬영되었다 (Fig. 3). 가시화 실험 결과 모든 실험 조건에서 리블렛이 형성되어 길게 성장하는 spindly 모드가 관측되었다⁽⁸⁾. 이는 고속 회전 조건에서 접촉선이 횡축방향 불안정성에 취약함을 의미하는데, 더 바깥쪽에 있는 유체 입자일수록 더 큰 원심력을 받기 때문이다. 리블렛 형성에 있어 원심력이 중요한 영향을 미치는 것은 Fig. 3에서 각속도가 증가함에 따라 나타나는 리블렛 거동 변화 경향을 통해서도 확인할 수 있다. 회전 각속도가 증가함에 따라 리블렛으로 천이가 시작되는 영역의 위치가 회전 중심으로부터 가까워질 뿐만 아니라 각 리블렛의 폭과 형성 간격의 감소하는 것이 관찰된다. 이러한 회전 각속도 증가와 리블렛 거동 변화 경향성 간의 상관관계는 표면파로부터 유추할 수 있다. 액막 위에 형성되는 말발굽 모양의 표면파의 크기와 간격은 액체에 작용하는 체적힘 (본 연구의 경우에는 원심력과 코리올리힘의 합력)의 1/9에 비례하는 것으로 알려져 있다⁽¹⁰⁾ 표

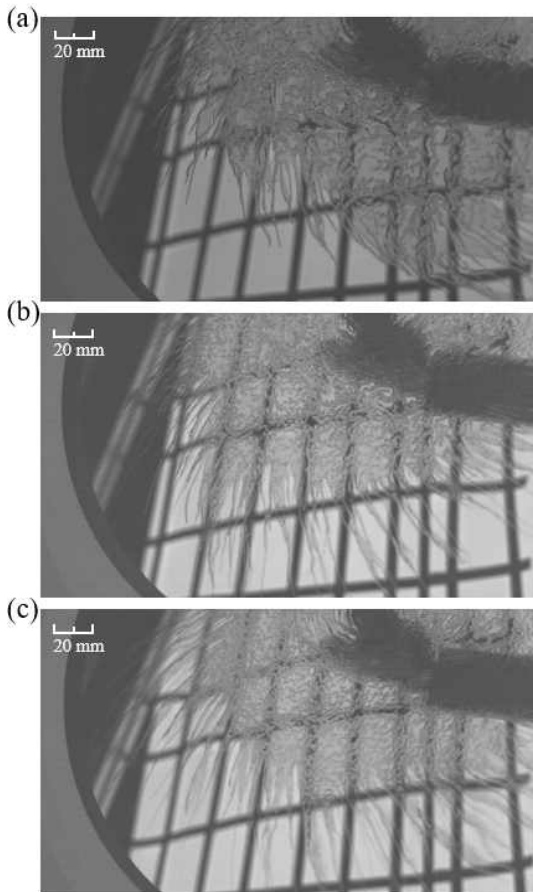


Fig. 3. Visualized images of the rivulets in (a) 104.7, (b) 209.4 and (c) 410.9 rad/s (10^{-3} m³/min, working fluid is 20°C DI water).

면파는 초기 리블렛 형성에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려진 접축선의 횡축방향 불안정성의 파장의 형태로 적용되어 리블렛의 폭을 결정한다. 표면파와 회전 각속도의 상관관계는 가시화 이미지를 통해서도 확인할 수 있다.

리블렛의 형성이 접축선에 제공되는 횡방향 불안정성의 파장 (본 연구에서는 표면파의 크기)에 의해 지배된다는 것은 기존의 연구와 일치하는 결과로⁽⁶⁾, 이는 Fig. 4을 통해서도 확인할 수 있다. 리블렛 형성 초기 상태를 가시화한 Fig. 4(a)에서 리블렛 형성의 위치가 표면파가 동심원 모양의 2차원 표면파에서 3차원 표면파 영역으로 천이한 위치와 일치하는 것을 확인할 수 있는데, 초기에 형성된 리블렛은 그 위치가

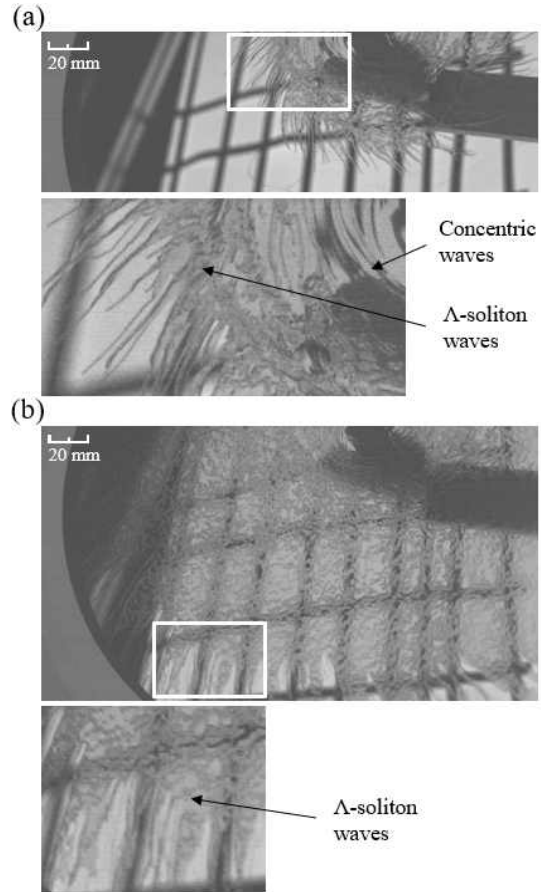


Fig. 4. Visualized images of the rivulets in 209.4 rad/s, 10^{-3} m³/min, working fluid is 20°C DI water, in (a) $t = 0.02$ s and (b) $t = 0.07$ s after the jet impingement.

바깥쪽으로 밀려나면서 그 폭이 더 이상 표면파 크기에 지배받지 않는 것으로 나타난다. 실제로 리블렛 발달 후기인 Fig. 4(b)에서 리블렛의 폭이 매우 커져 그 안에 수 파장의 말발굽 모양 표면파가 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 고속 회전 조건에서 원판위 액막 찢김 현상의 결과 나타나는 리블렛의 거동은 액막의 표면파가 2차원의 동심원에서 3차원의 말발굽 현상으로 천이할 때 그 초기 표면파의 크기에 의해 지배된다는 결론을 얻을 수 있다.

가시화 실험 결과로부터 관측되는 리블렛은 1자로 성장하지 않고 구불구불하게 방향을 바꾸며 성장하는데 (meandering) 그 내부의 유량이

불균일하게 분포한다. 이와 같은 리블렛 내부의 독특한 유동 현상은 Meredith의 연구 등⁽¹¹⁾ 리블렛에 공급되는 유량이 많을 때 실험적으로 관측되는데, 그 메커니즘이나 정확한 원인에 대해서는 보고된 바가 없으므로 본 연구에서는 관측된 리블렛 유동 현상의 발생 과정을 제시한다.

3.2 특성 리블렛 구조 발생 과정

본 연구에서 실험적으로 확인한 spindly 모드 리블렛에서 공통적으로 확인되는 현상은 특정 방향으로의 리블렛 미끄러짐과 내부의 두꺼운 유로 형성 및 그 유로의 meandering이다 (Fig. 5). 초기에 액막의 접촉선은 거의 동심원에 가까운 안정적인 형상을 유지하면서 전진하다가 말발굽 모양 표면파로의 천이 영역에서 횡방향 불안정성을 겪게 되고 이에 따라 리블렛으로 발달하게 된다. 이때 유체가 코리올리 힘을 받게 되므로, 각 리블렛 내부에서는 회전 성분 선속도의 반대 방향으로 체적힘이 작용하게 된다. 이에 따라 초기에 형성된 리블렛의 방향은 회전 반대 방향으로 진행되는 것이 관측된다 (Fig. 5a). 이렇게 회전 반대 방향으로 기울어진 리블렛의 내부에서는 원심력의 작용에 의해 유체의 흐름이 바깥쪽 회전 방향을 향해 기울게 되는데, 그 결과 표면 장력에 의해 두꺼운 제트 형상의 유로가 리블렛 내부 회전 방향 쪽 접촉선에 형성된다 (Fig. 5b). 여기에서 더 나아가 원심력에 의해 리블렛은 그 진행 방향이 아니라 회전 방향쪽 횡방향으로 미끄러져 진행하게 되며 두꺼운 유로 반대쪽 얇은 액막의 면적이 확장되는 것이 관측된다.

접촉선 근처에 많은 유량이 집중되면, 접촉선의 전진 속도가 빨라지게 된다 (은 액막에 흐르는 평면상에서 접촉선에 수직인 단위벡터, 은 해당 평면상에서 정의된 국소적 계면의 유속). 국소적인 접촉선 전진 속도의 증가는 동적 접촉각의 증가를 유발한다. 이에 따라 리블렛의 바깥쪽에 접촉선에 평행한 방향으로 형성된 두꺼운 유로는 접촉선으로부터 받는 증가한 힘에 의해 회전 반대 방향으로 기울어 흐르게 된다. 이

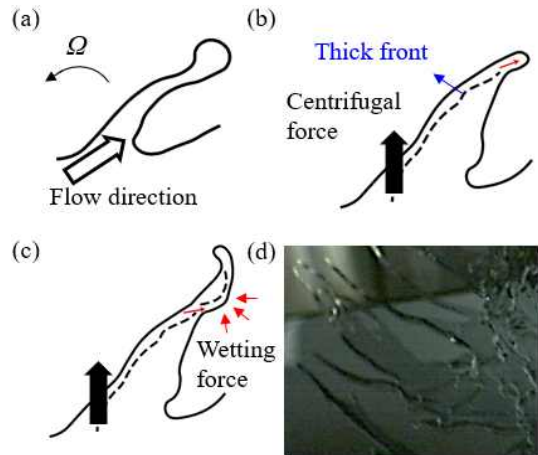


Fig. 5. (a-c) Schematics of the generation of thick front and its meandering. (d) Visualization of the meandering of thick fronts

렇게 형성된 유로가 리블렛의 회전 방향 반대쪽 접촉선에 닿게 되면, 다시 계면 접촉각에 의한 힘을 받아 회전 방향으로 방향을 바꾸어 흐른다 (Fig. 5c). 전술한 과정을 반복하여 두꺼운 유로가 수회 이상 meandering함에 따라 리블렛의 폭이 줄어들고 그 진행 방향은 원심력 방향과 일치하게 된다. Fig. 5(a-c)에 묘사된 각 리블렛 발달 과정은 Fig. 5(d)의 가시화 이미지에 잘 묘사되어 있다.

4. 결론

본 연구에서는 고속 회전하는 원판 위에 형성되는 액막이 찢어져 리블렛으로 천이하는 과정에 대해 가시화 및 분석을 수행하였다. 회전 속도에 따라 리블렛의 크기와 간격을 조사하여 액막에 발생하는 3차원 말발굽 표면파가 리블렛 구조에 큰 영향을 미침을 확인하였다. 또한, 리블렛에 공급되는 유량이 클 때 액막이 찢어져 리블렛으로 발달하는 과정에 대한 분석을 수행하였다. 본 연구는 이후 수행될 액막 찢김 현상에 대한 분석적, 수치적 연구에 참고할만한 물리적 현상 정보를 제공할 것으로 기대된다.

본 연구에서는 액막 찢김 현상의 형태학적 특징에 대하여 주로 분석하였으나, 추후 가시화된

계면의 3차원 재구성을 통해 액체-기체 계면의 에너지와 접촉선에서의 에너지 교환을 특성 유동 구조 (말발굽 모양 표면과 등) 의 크기에 따라 분석하는 정량적인 연구를 수행하고자 한다.

REFERENCE

- 1) Aoune, A. & Ramshaw, C., 1999, "Process intensification: heat and mass transfer characteristics of liquid films on rotating discs", *Int. J. Heat Mass Transf.*, 42, pp.2543~2556.
- 2) Laurence, C. J., 1988, "The mechanisms of spin coating of polymer films", *Phys. Fluids*, 31, pp.2786~2795.
- 3) Schmuki, P. & Laso, M., 1990, "On the stability of rivulet flow", *J. Fluid Mech.*, 215, pp.125~143.
- 4) Kim, H. et al., 2004, "Meandering instability of a rivulet", *J. Fluid Mech.*, 498, pp.245~256.
- 5) Bostwick, J. B. & Steen, P. H., 2018, "Static rivulet instabilities: varicose and sinuous modes", *J. Fluid Mech.*, 837, pp.481~497.
- 6) Diez, J. A. & Kondic L., 2001, "Contact line instabilities of thin liquid films", *Phys. Rev. Lett.*, 86, pp.632~635.
- 7) 박준상 & 황진율, J., 2023, "액체 연료 탱크 내 슬로싱 현상에서의 액적 형성 분석", *한국가시화정보학회지*, 21, pp.102~110.
- 8) Ylitalo, S. et. al., 2019, "Evolution of rivulets during spreading of an impinging water jet on a rotating, precoated substrate", *Phys. Fluids*, 31, 082104.
- 9) Kim, T. & Kim, M., 2009, "The flow and hydrodynamic stability of a liquid film on a rotating disc", *Fluid Dyn. Res.*, 41, 035504
- 10) Demekhin, E. A. et. al., 2007, "Three-dimensional localized coherent structures of surface turbulence. I. Scenarios of two-dimensional-three-dimensional transition", *Phys. Fluids*, 19, 114103.
- 11) Meredith, K. V. et al., 2011, "A numerical model for partially-wetted flow of thin liquid films", *WIT. Trans. Eng. Sci.*, 70, pp.239~250.