

움직이는 고체판 사이에서 액적의 퍼짐에 관한 연구

권혁민[†] · 김호영^{*}

A study of drop spreading between moving solid plates

Hyuk-Min Kwon, and Ho-Young Kim

Key Words: Surface tension(표면장력), Painting(페인팅).

Abstract

In a usual painting process, a liquid drop spreads on canvas by being dragged along a paintbrush. To obtain the fundamental understanding of the painting process from the mechanical point of view, we experimentally investigate various dynamic behavior of a liquid drop that spreads between moving solid plates. It is shown that three distinct types of drop spreading take place, i.e. shearing, spreading, and intact dragging, depending on the liquid viscosity and surface tension, the plate speed, and the wettability. We suggest a regime map based on the capillary number and the receding contact angle, which indicates the boundaries between different types of spreading behavior in a dimensionless space.

1. 서론

이번 연구는 붓으로 물감이 칠해지는 과정의 물리적 양상을 역학적인 관점에서 고찰하기 위해 시작 되었다. 본 연구에서는 단순히 역학적인 현상 관찰에만 초점을 두었으나 붓에 의한 액적의 펼쳐짐은 코팅을 비롯한 미소액적을 이용한 마이크로 단위 이하의 구조물 제작 등 여러 가지 산업 분야에서 실용적인 접근이 가능 할 것이다.

붓을 이용한 페인팅의 유체역학적 접근은 Batchelor⁽¹⁾에 의해 제안되었는데, 그는 붓을 등 간격으로 평행하게 배열된 단단한(rigid)한 판들의 연속체로 가정했고, 이 판들이 고체 표면 위로 등속도로 움직일 때 판과 표면사이에서 유체의

움직임에 대한 결과를 제시했다. 그러나 유체내부의 압력구배를 무시하는 가정을 이용했기 때문에 붓에 의해 남게 되는 액체의 두께가 판들 사이의 간격에만 비례한다는 실제 현상과 일치하지 못하는 결과를 얻어냈다.

이번 연구는 Landau and Levich⁽²⁾에 의해 제시된 수조 속에서 등속도로 빠져나오는 무한한 길이의 평판에 대한 연구와 유사하다고 볼 수 있다. 밀도 ρ , 점도 μ , 표면장력 σ 인 액체 수조 안에서 무한히 긴 판이 등속도 U 로 끌어 올려질 때 판위에 남게 되는 액체의 두께 e 와 관련되어서 $e \sim l_c Ca^{2/3}$ 라는 차원 해석이 가능 했다. l_c 는 모세관 길이(capillary length)로서 $l_c = (\sigma/\rho g)^{1/2}$ 이고, Ca 는 모세관 수(Capillary number)로 $Ca = \mu U/\sigma$ 이다. 그러나 이번 연구는 무한히 많은 액체가 들어있는 수조가 아닌, 제한된 부피의 액체가 고정된 판과 등속도로 움직이는 판 사이에서 펼쳐지는 현상으로서 차이가 있다.

붓으로 물감을 칠하게 되면 붓의 속도, 물감의 점도, 표면의 특성 등에 따라 굵고 짧은 선으로 또는 가늘고 긴 선으로 다르게 표면에 남게 된

[†] 회원, 서울대학교 기계항공공학부

^{*} 책임저자, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : hyk@snu.ac.kr

TEL : (02)880-9287 FAX : (02)880-9287

다. 이번 연구는 이렇게 붓에 의해 남게 되는 액체의 서로 다른 양상에 초점을 맞추었다. 등속도로 움직이는 단단한(rigid) 판을 붓으로 가정을 했고, 일정한 부피의 서로 다른 액체와 표면으로 서로 다른 속도에서 액체의 움직임을 고속 카메라로 관찰하였다. 이를 통해서 움직이는 판에 의해 퍼지는 액체의 물리적 양상을 액체가 표면에 남지 않는 intact dragging, 표면에 잘 퍼지는 spreading, 표면과 판 사이에서 찢어지는 형태의 shearing의 세 가지로 나눌 수 있었으며, 이를 모세관 수(Capillary number, Ca)와 액체의 표면에 대한 후퇴 동 접촉각(receding contact angle)에 의해 각각의 양상을 예측할 수 있는 regime map으로 제시하였다.

2. 실험 및 결과

2.1 실험방법

실험은 Figure 1과 같이 장치를 구성했고, 이를 고속카메라로 촬영했다. 액체의 부피에 대한 변화양상은 고려 대상이 아니었으므로 모든 경우에 있어서 $10\mu\text{l}$ 로 균일하게 실험하였다. 두께 1.1 mm, 폭 3.7 mm의 유리판을 피라나(Piranha)⁽³⁾ 용액으로 처리하여 완벽하게 적셔지는 표면으로 만들어 사용하였다. 액체는 에틸렌 글리콜(Ethylene Glycol)과 글리세롤(Glycerol)을 사용하였고, 바닥은 Parafilm, Polycarbonate, Plexi-glass를 사용하였다.

표면을 등속도로 움직이면서 유리판과 표면사이에서 변화하는 액체의 형상을 고속카메라를 이용해 얻게 되었고, 이들의 행동양상을 구분 짓기 위해 액체가 맺혀있는 유리판의 자유단으로부터 먼 쪽에 있는 매니스커스가 표면과 맞닿은 지점사이의 거리를 페인팅 퍼짐 길이(painting spread

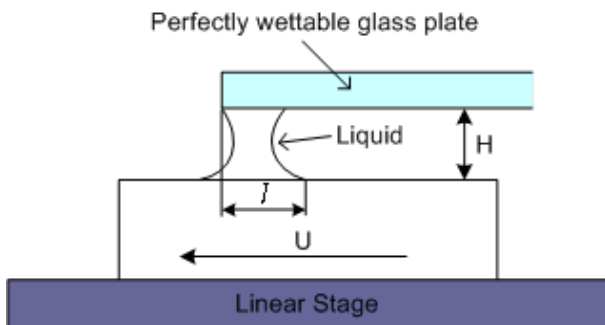


Fig. 1 Schematics of system

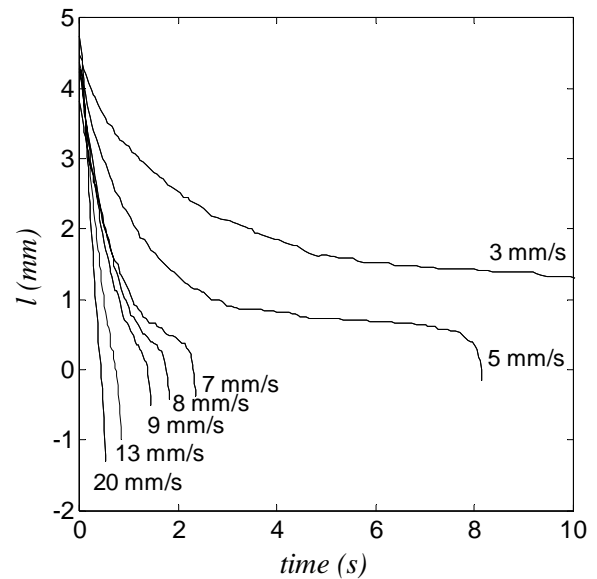


Fig. 2 The rate of painting dspread length(l).

Glycerol drop spread between Parafilm surface and a glass beam 0.8 mm apart from the surface at different velocities.

length) l 로 정의 하였으며 이를 시간에 따라 측정하게 되었다. Figure 2는 실험 결과 중에 하나로서 글리세롤과 파라필름(Parafilm) 바닥을 이용했을 때의 결과로써 서로 다른 속도에서 시간에 따른 페인팅 퍼짐 길이(l)을 나타낸 그래프이다.

2.2 액체의 퍼짐 양상에 대한 정의

2.2.1 Shearing Motion

모든 경우에 대한 실험 결과를 Figure 2와 같은 그래프로 나타내었을 때 일정 속도 이상이 되면 페인팅 퍼짐 길이(l)이 시간에 따라 일정하게 줄어들어 그 결과가 직선에 가까워지게 되는 것을 확인 할 수 있었다. 이런 양상을 보이는 경우, 액체의 점차적인 퍼짐이 아닌 두 판의 움직임으로 인해 매니스커스들이 찢어지는 형상을 띄게 되고, 따라서 이러한 형상을 shearing으로 정의하게 되었다. Figure 2를 보게 되면 바닥판의 이동속도가 빨라지게 되면서 페인팅 퍼짐 길이(l)가 급격하게 감소되는 것을 확인 할 수 있다. 이 부분에서 shearing 양상은 시간에 대한 페인팅 퍼짐 길이(l)의 값이 선형으로 감소하는 구간으로 정의하였고, 이때 선형이 되는 경계를 확인하기 위해서, 선형 근사를 할 때 그 정확도의 척도가 되는 norm of residual 값 1을 기준으로 하였다. 즉, 시

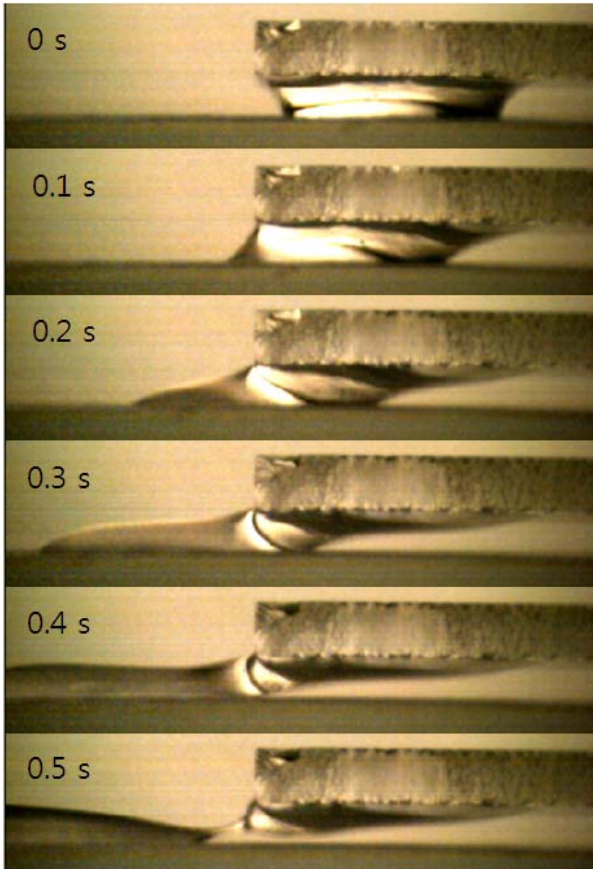


Fig. 3 Shearing motion of glycerol drop under perfectly wettable glass plate 0.8mm high from the Parafilm surface, which moves the constant rate of 20mm/s. The thickness of glass plate is 1.1mm.

간에 따른 페인팅 퍼짐 길이(l) 변화 값들의 선형 근사식을 구했고 이때 근사식의 정확도의 기준이 되는 norm of residual 값이 1 이하가 될 때 부터 시간에 따른 페인팅 퍼짐길이(l)의 감소율이 일정한 것으로 보았고, 따라서 이러한 경우의 액적의 행동 양상을 shearing으로 결정하게 되었다. Figure 3은 shearing에 해당되는 한 실험 결과로써 시간에 따른 액적의 형상 변화를 보여주고 있다.

2.2.2 Spreading Motion

Spreading은 앞서 shearing을 정의 했던 것과 같이 시간에 따른 페인팅 퍼짐 길이(l) 값의 선형 근사식의 norm of residual 값이 1 이상이 되는 것으로 정의 했다. Figure 4는 spreading의 실험결과 중 한 경우에 대해 나타난 것이다. Figure 4에서 알 수 있듯이 시간에 따른 페인팅 퍼짐 길이(l)의 감소가 매우 느리게 진행 된다.

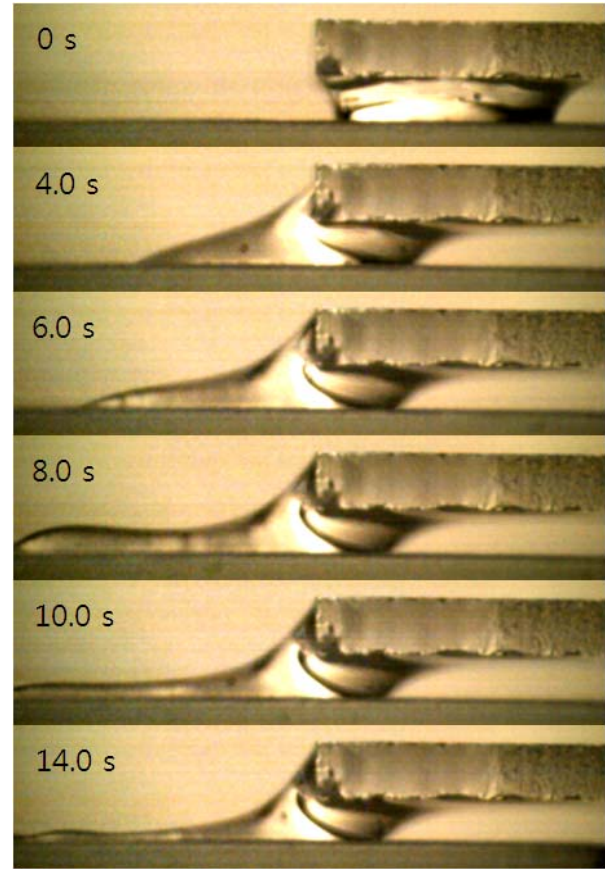


Fig. 4 Spreading motion of glycerol drop under perfectly wettable glass plate 0.8mm high from the Parafilm surface, which moves the constant rate of 3mm/s. The thickness of glass plate is 1.1mm.

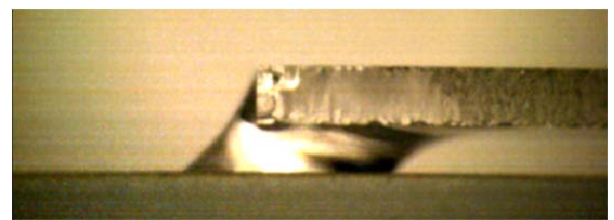


Fig. 5 Intact Dragging motion of glycerol drop under perfectly wettable glass plate 0.8mm high from the Parafilm surface. It is captured while the surface is moving at the constant rate of 2mm/s. The thickness of glass plate is 1.1mm. No liquid remains on the surface.

2.2.3 Intact dragging motion

Intact dragging의 경우에는 액체가 유리판에 이 끌려 움직일 지라도 바닥에는 액체가 전혀 남지 않게 된다. Figure 5는 intact dragging의 실험결과 중 하나를 보여주고 있다.

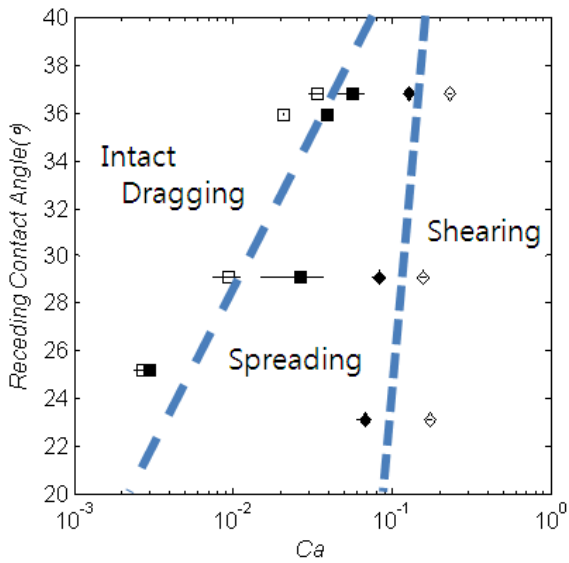


Fig. 6 Regime map of liquid behavior between moving solid plates, based on capillary number and receding contact angle. Squares are the boundary between Intact Dragging and Spreading and diamonds are between Spreading and Shearing. The beam height from the surface is 0.8mm for the open markers and 1.5mm for the closed markers.

2.3 실험결과

앞서 정의 내린 움직이는 고체 판 사이에서 일정한 부피의 액적의 행동양상인 shearing, spreading, intact dragging의 경계를 모세관수(Ca)와 후퇴 접촉각에 따라 구분지어 주는 regime map을 Figure 6에 나타내었다. 에틸렌 글리콜과 글리세롤이 각각 Parafilm, Polycarbonate, Plexi-glass 위에서 적심각이 영도인 유리판에 맺혀 움직이는 모든 경우의 실험결과들을 한 그래프 상에 나타낸 것이다. 이렇게 나타낸 경계점들을 근거로 해서 각각의 행동양상의 경계선을 임의로 나타내 보았다. 후퇴 접촉각이 높을수록 더 큰 Ca 수 까지 intact dragging이 나타나게 되는 것을 알 수 있으며, spreading에서 shearing으로 변화될 때는 대부분의 경우에 있어서 거의 유사한 Ca 에서 경계가 나타나게 되는 것을 확인 할 수 있었다. 바닥으로부터의 유리판의 높이가 높은 경우에는 spreading은 좀 더 높은 Ca 에서 시작되고, shearing은 좀 더 낮은 Ca 에서 시작되는 것을 알 수 있었다.

3. 결 론

이번 연구를 통해 등속도로 움직이는 고체판 사이에 맺혀있는 일정량의 볼륨의 액적의 거동을 서로 다른 양상으로 정의 내렸으며, 이러한 거동 양상을 모세관 수(Capillary number, Ca)와 후퇴 동 접촉각(receding contact angle)을 변수로 하여 예측할 수 있게 해주는 regime map을 도식했다. 이번 연구는 작은 양의 액체를 표면에서 움직이고 또 액체가 표면에 남도록 할 수 있는 방법을 제시했다. 이것을 이용해서 작은 액적을 필요에 따라 조정할 수 있을 뿐만 아니라, 작은 양의 액체를 이용해 원하는 형상의 표면 구조물을 제작할 수도 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학 재단의 지원 (R01-2006-000-10444-0)으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) Batchelor, G. K., 1967, *An Introduction to Fluid Dynamics.*, Cambridge University Press.
- (2) Landau, L. D. and Levish, B., 1942, *Acta Physicochim.*, URSS 17, pp. 42~54.
- (3) Senturia, S. D., 2001, *Microsystem Design.*, Kluwer.