

액체-액체-기체 3상 접촉선에서의 와류에 의한 혼합 가시화

김태홍* · 김형수** · 김승호* · 김호영†

Visualization of Vortex-induced Mixing at the Liquid-liquid-gas 3-phase Contact Line

Tae-Hong Kim, Hyoungsoo Kim, Seungho Kim and Ho-Young Kim

Abstract. Although the motion of the three-phase contact line on a solid substrate has been extensively studied thus far, the understanding of the dynamics of the contact line of liquid/liquid/gas phases is far from complete. Here we deposit a drop of isopropyl alcohol (IPA) on water and HFE-7100 whose free surfaces are exposed to air to observe the flow field around the contact line. By combining the shadowgraph and high-speed imaging techniques, we find that vortices are spontaneously generated at the contact line, which grow in size with time. The flow is attributed to the *Marangoni* stress that pulls a liquid of lower-surface tension toward a liquid surface having a higher surface tension. However, it is not still clear why the entrained lower-surface-tension liquid should whirl rapidly beneath the contact line. We also visualize the flow by the particle image velocimetry (PIV) to find out that the rotational velocity reaches the order of 1 mm/s near the free surface.

Key Words: Vortex(와류), Mixing(혼합), 3상 접촉선(3-phase contact line), 역광선 가시화법(Shadowgraph), 입자 영상 유속계(Particle image velocimetry)

기호설명

σ : 표면장력 (N/m)

ρ : 액체의 밀도 (kg/m³)

1. 서 론

두 액체를 효과적으로 혼합하기 위해 막대를 이용하여 저어주는 방법은 우리가 실생활에서 흔히 사용하는 간단한 방법이다. 그러나 액체의 양이 감소하고 주위 장치들이 작아짐에 따라 극소량의 액체들을 효과적으로 혼합해 주는 문제는 lab-on-a-chip 시스템이나 반도체 세정과정 등에서 부딪히는 큰 문제점 중 하나이다. 대부분의 마이크로 스케일의 액체 혼합은 채널의 구조를 변경하거나 돌기를 부착하여 와류가 생성되어 혼합

되는 수동적인 혼합기(passive mixer) 방식⁽¹⁾이나 외부에서 에너지를 가해 기계적 운동으로 혼합하는 능동적인 혼합기(active mixer) 방식⁽²⁾에 국한되어 있다. 따라서 본 연구에서는 외부 에너지 투입이나 구조물의 변화 없이 극소량의 액체를 표면장력 차이에 의한 마랑고니(Marangoni)⁽³⁾ 힘으로 효과적으로 혼합할 수 있는 와류 생성 원리(vortex generation mechanism)에 대하여 실험적으로 알아보려고 한다.

2. 실험 방법

2.1 역광선(Shadowgraph) 가시화

두 액체의 혼합과정을 정성적으로 관찰하기 위해 Fig. 1과 같은 역광선 가시화 실험장치를 구성하였다. 두께 150 μm 인 커버 글라스 2장을 맞붙이고 그 사이에 밀도가 상대적으로 큰 액체(물 또는 HFE-7100)가 놓일 수 있는 미소 간격을 유지하였다. 그리고 표면장력이 다르고 밀도가 낮은 액체(IPA, isopropyl alcohol)를 마이크로 노즐을 이용하여 유리판 사이로 공급하여

†서울대학교 기계항공공학부

E-mail : hyk@snu.ac.kr

*서울대학교 기계항공공학부

**네덜란드 델프트 공대

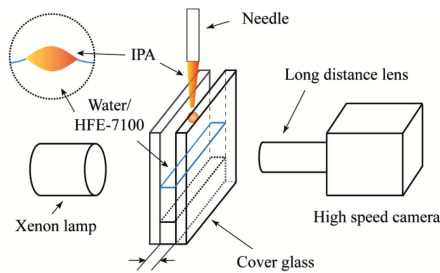


Fig. 1. Preparation for visualization experiments. The upper left inset depicts liquid/liquid/gas contact line when a drop deposits on a bulk of liquid.

Table 1. Properties of liquids.

	Water	IPA	HFE-7100
σ	0.073	0.022	0.014
ρ	998	786	1,493

Fig. 1 왼쪽 위에 삽입된 그림과 같이 액체/액체/기체의 3상이 만나도록 하였다. 표면장력 차이에 따른 와류 방향과 크기를 알아보기 위해 사용된 세가지 액체의 물성이 Table 1에 나와있다. IPA는 반도체 세정과정에서 계면활성제로 주로 사용되는 액체로 물보다 밀도와 표면장력이 낮으며, HFE-7100(3M™ Novec™)은 물과는 혼합되지 않지만 IPA와 쉽게 혼합되는 액체로 밀도는 크지만 표면장력이 아주 낮은 액체이다. 3상이 만나는 점에서 액체의 혼합에 따른 밀도차이가 발생되어 혼합액의 굴절률이 변하는 것을 관찰하기 위해 강한 빛을 내는 xenon 램프를 뒤쪽에서 비추고 초고속 카메라를 이용하여 초당 250 frames으로 촬영하였다.

2.2 입자 영상 유속계 (PIV)

표면장력 차이에 의하여 발생하는 와류의 정량적인 측정을 위하여 입자 영상 유속계를 사용하였다. 속도장 측정을 위하여 지름 20 μm 의 PSP(Polyimide seeding particle)를 IPA 및 물에 넣고 일정량의 방울(droplet)로 만들어 간격 80 μm 인 유리판 사이로 공급하였다. 이때 입자의 균일한 회석을 위하여 플라즈마 처리로 친수화 시켜서 작동유체와 회석하였다. 입자의 농도(density of particle)는 약 0.01 ppp(particle per pixel)로 해상도 1376 \times 1040 픽셀, 12 비트 동적영역의 초고속카메라를 이용하여 초당 최대 500 frames으로 저장하였다. 속도 벡터장은 FFT(Fast Fourier transform)연산법을 이용

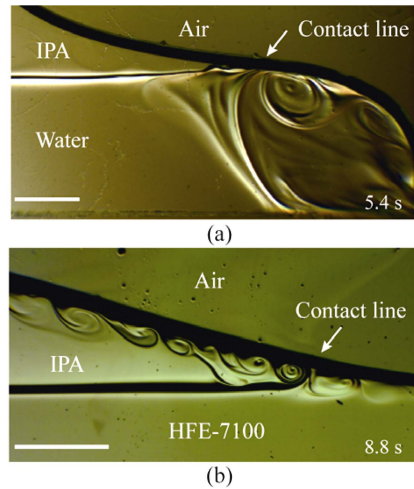


Fig. 2. Shadow graph images of vortex-induced at 3-phase. IPA drops onto (a) water and (b) HFE-7100. Scale bar, 1 mm.

하여 24 \times 24 픽셀의 interrogation window에 50% 중첩하여 cross-correlation방법으로 획득하였다. 이때 high-pass 필터링과 5 \times 5 Gaussian smoothing을 사용하여 이미지 노이즈를 줄였다.

3. 결 과

Fig. 2는 역광선 가시화 방법으로 3상이 만나는 점에서 표면장력차이에 의한 Marangoni 힘으로 와류가 발생하는 것을 보여주고 있다. 초기 공급되는 IPA는 유리판의 미소간격에 의해 원형으로 떨어지다 아래쪽의 액체 계면을 만나면 볼록렌즈모양으로 퍼지게 되고, 3상 접촉선에서 혼합이 일어나면서 그 크기는 점점 줄어든다. Fig. 2(a)는 공급되는 IPA보다 표면장력이 큰 물을 아래쪽에 놓고 IPA와 물이 접촉 후 5.4초가 지난 후의 상황이며, (b)는 IPA보다 표면 장력이 낮은 HFE-7100을 아래쪽에 놓고 8.8초 후 발생하는 와류의 방향과 크기를 보여주고 있다. 이를 통해 액체/액체/기체가 만나는 3상 접촉선에서 표면장력이 큰 액체가 표면장력이 낮은 액체를 끌어 당겨 표면장력이 큰 액체쪽에서 와류가 발생하고 표면장력차이가 클수록(2a) 와류의 크기도 커지는 것을 알 수 있다. 또 기체와 접촉이 없는 액체/액체의 혼합이 발생하지 않는 것을 알 수 있다. Dussaud & Troian⁽⁴⁾은 표면장력이 큰 액체층위에 혼합되지 않는 휘발성 액체가 퍼지는 현상으로부터

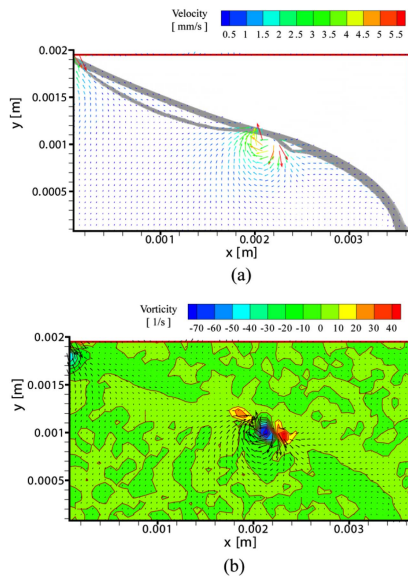


Fig. 3. IPA deposits onto the water. (a) Velocity map and (b) vorticity map.

leading edge(본 연구의 접촉선에 해당)가 시간의 1/2 승에 비례하여 퍼지고 그 아래 회전유동이 발생함을 관찰하였고, Tan & Thoroddsen⁽⁵⁾은 얇은 글리세린 층 위에 물 액적이 충돌할 때 와류유동으로 마랑고니 불안정성이 확대되어 꽃무늬 형태의 패턴이 생성됨을 관찰하였다. 하지만 두 연구 모두 액적이 퍼지는 현상에 초점을 두어 접촉선에서 표면장력의 크기에 따른 와류의 세기 및 혼합에 관해서는 다루지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 앞서 설명한 PIV방법을 사용하여 접촉선 부근에서 속도 및 와류의 세기에 대하여 자세히 알아보았다.

Fig. 3은 물위에 IPA를 떨어뜨렸을 때 3상 접촉선 부근에서 시계방향의 와류가 발생하는 것을 보여준다. 이때 최대 속도는 5.5 mm/s, 와류의 세기는 약 -70 s^{-1} 로 표면장력이 큰 물층쪽으로 와류에 의한 확산으로 혼합이 일어나는 것을 볼 수 있다. 반면 Fig. 4는 IPA보다 표면장력이 낮은 HFE-7100위에 IPA를 떨어뜨렸을 때의 속도 벡터와 와류의 세기를 보여주는 그림으로, 3상 접촉선 부근에서 약 0.8 mm/s의 속도로 반시계방향의 와류가 발생하는 것을 보여준다. 특히 양쪽 3상 접촉선에서 와류가 발생하여 IPA/공기의 계면을 타고 상단으로 이동하여 IPA방울 가운데 부분에서 두 와류가 합쳐져서 최대속도 1.8 mm/s, 와류 세기 20 s^{-1} 으로 확

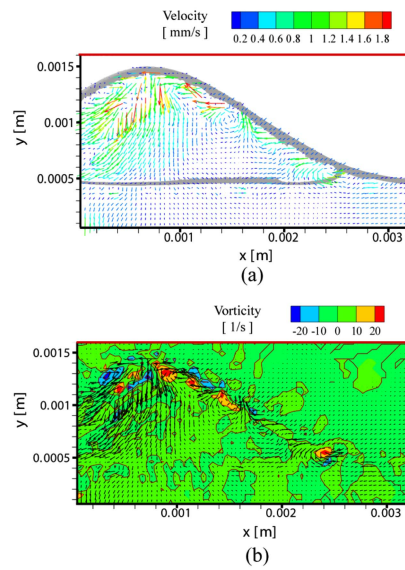


Fig. 4. IPA deposits onto HFE-7100. (a) Velocity map and (b) vorticity map.

산에 의한 혼합이 일어나는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 앞서 살펴본 역광선 가시화기법과 같이 표면장력이 다른 두 액체의 혼합은 3상 접촉선에서 표면장력이 큰 액체가 작은 액체를 끌어당겨 표면장력이 큰 액체 층에서 와류에 의한 확산으로 혼합이 일어나는 것을 알 수 있으며, 두 액체의 표면장력이 클수록 더 빠른 속도의 와류가 생성되는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 액체/액체/기체의 3상 접촉선에서의 혼합은 마랑고니 힘에 의해 지배됨을 알 수 있다.

4. 토 의

본 연구에 사용된 입자 영상 유속계에서 IPA보다 PSP입자는 밀도가 무거워서 정지되어 있는 경우에는 시간이 경과함에 따라 IPA내의 입자들의 침전이 일어난다. 하지만, Marangoni 효과로 지속적으로 회전하는 유동장이 나타나고 있고, 스톡스 수(Stokes number, $Stk = \tau_p / \tau_f$)가 1보다 아주 작은 값을 가지고 있다. 스톡스 수는 입자와 유체 사이의 relaxation time scale의 비로써, 주어진 문제에서 입자들의 대략적인 relaxation time scale (τ_p)은 $O(10^{-6})$ 값이며, 유체의 relaxation time scale(τ_f)은 $O(10^{-1})$ 값으로 IPA의 밀도가 입자의 밀도보다 낮지만, 가시화를 위해 사용된 입자들은 유체의 유

등을 잘 따른다고 볼 수 있다. 또한 접촉 계면에서 서로 다른 두 액체가 섞이고 있으므로 시간이 지남에 따라 IPA의 밀도는 순수 IPA에 비하여 증가 되고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 마이크로스케일의 액체들이 표면장력 차이에 의하여 액체/액체/기체 3상 접촉선에서 와류 확산에 의하여 혼합되는 과정에 대하여 정성적, 정량적으로 가시화하였다. 3상 접촉선에서의 혼합은 표면장력이 큰 액체가 작은 액체를 끌어 당겨 표면장력이 큰 액체층에서 와류 확산에 의하여 혼합되며, 그 크기는 표면장력 차이가 클수록 더 커짐을 알 수 있다. 이를 통해 효과적인 액체 혼합을 위해서는 두 액체의 표면장력 차이가 크고, 액체/액체/기체의 3상 접촉선이 길게 만들어지는 조건이 필요함을 알 수 있다.

후 기

본 연구에 대한 서울대학교 정밀기계설계공동연구소의 행정 지원에 감사드립니다. 본 논문은 2012년 정

부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (과제번호2011-0030744, 2012-3008023).

참고문헌

- 1) R. H. Liu, M. A. Stremler, K. V. Sharp, M. G. Olsen, J. G. Santiago, R. J. Adrian, H. Aref, and D. J. Beebe, 2000, "Passive Mixing in a Three-Dimensional Serpentine Microchannel", *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 6, pp. 190-197.
- 2) L.-H. Lu, K. S. Ryu, and C. Liu, 2002, "A Magnetic Microstirrer and Array for Microfluidic Mixing", *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 11, pp. 462-469.
- 3) L. E. Scriven and C. V. Sternling, 1960, "The Marangoni effect", *Nature*, vol. 187, pp. 186-188.
- 4) A. D. Dussaud and S. M. Troian, 1998, "Dynamics of spontaneous spreading with evaporation on a deep fluid layer", *Phys. Fluids*, vol. 10, pp. 23-38.
- 5) E. Tan and S. T. Thoroddsen, 1998, "Marangoni instability of two liquids mixing at a free surface", *Phys. Fluids*, vol. 10, pp. 3038-3040.