

미소 액적 내부 유동의 속도측정에 관한 연구 - 굴절영상의 이미지 보정

허영근[†] · 전영훈[†] · 서용권^{*}

Study on the Measurement of Fluid Velocity Within a Small Droplet - Compensation of Refracted Image

Young Gun Heo, Young-Hun Jeon and Yong Kweon Suh

Abstract. In this paper we report the method of visualizing and measuring the fluid flow within a small droplet of millimeter size. We use a vertical laser sheet in visualization of the micrometer size and special attention is given to the arrangement of microscope to obtain clear images. Then we use a PIV technique to measure the velocity of the internal flow from the images taken. Since the droplet is of spherical shape, the images represent highly deteriorated picture of the real objects due to the refraction phenomenon. In order to compensate the refraction, we in this study developed two kinds of methods for the real velocity. In the first method, the refracted images are directly used to obtain the velocity in the image space, and then the velocity is transformed to the real space. In the second method the images are first transformed to the real-space objects, and then the PIV is used to measure the velocity field. We compared the two results to prove the usefulness of the compensation technique.

Key Words: Droplet(액적), Refraction(굴절), Compensation(보정), Flow visualization(유동가시화)

기호설명

- A : 실제의 입자가 존재하는 위치(X,Y)
- B : A위치의 굴절된 위치 (x,y)
- O : 액적폭률의 원점
- R : 액적폭률의 반지름
- h : O점에서 액적 바닥까지의 수직 높이
- s : \overline{OB} 의 길이
- ρ : \overline{OA} 의 길이
- β : 원점 O를 기준으로 y축으로부터 A입자까지의 각도
- θ_1 : 입사각
- θ_2 : 굴절각

1. 서 론

본 연구는 OTFT-EPD(Organic thin-film transistor electrophoresis display; 유기박막트랜지스터 기반 전 기영동 디스플레이) backplane⁽¹⁾ 용 반도체 제작공정 중 노즐을 통하여 osc(organic semiconductor) 분자를 용질로 한 용액을 기판에 분사시켜 기판 상에 액적을 만들고 용질의 증발 후에 액적 중의 osc 분자만이 기판에 부착되도록 하는 방법에서 액적 내 유동의 가시 화기법 개발에 관한 기초연구이다. 이러한 공정에서 가장 문제시 되는 것이 용매가 증발한 뒤 osc분자들이 액적의 가장자리에 얼룩의 형태로 남는 문제(coffee stain)이다⁽²⁾. 따라서 이를 해결하기 위하여 다양한 방 법이 시도되고 있으며 그 효과를 분석하기 위한 연구 가 진행 중이다. 이를 위해 액적 내부의 유동을 가시화 하는 기술개발이 기본적으로 수행되어야 한다. 국내에 서 액적연구를 위하여 K.H. Kang등에 의하여 액적 내 부 가시화가 이루어져 왔었다.^{3,4)} 하지만 수 mm에서 수십 μm 의 직경을 가지는 액적의 내부유동을 가시화

[†]동아대학교 기계공학과 대학원

^{*}동아대학교 기계공학과

E-mail : yksuh@dau.ac.kr

하기 위해서는 구형 액적의 표면에서 발생하는 강한 굴절 현상을 보정하는 테크닉이 필요하다.

증발에 따른 액적의 내부 유동을 가시화하기 위하여 수십 μm 의 얇은 두께를 가지는 평면레이저를 액적에 수직하게 비추고 카메라를 수평하게 두어 깨끗한 수직 단면 영상을 얻는다. 이후 PIV 기술을 이용하여 속도 벡터를 구하여 내부유동을 분석하게 된다. 하지만 이 때 얻은 영상은 구형 액적의 표면에 의한 굴절된 영상으로 실제의 액적 내부 유동을 가시화하기 위해서는 이 굴절 현상을 보정해야한다. 실제의 액적 내부 유동을 분석하기 위하여 우리는 두 가지의 영상보정방법을 개발하였다. 첫 번째 방법은 속도벡터를 굴절된 영상에서 얻은 후 굴절을 보정한 속도벡터로 변환하는 것이다. 두 번째 방법은 굴절된 영상을 실제 액적내부영상으로 보정한 후 속도 벡터를 구하는 것이다. 이렇게 구한 두 가지 결과를 비교하여 보정기술에 대한 유용성을 증명하고자 한다.

2. 굴절영상보정

2.1 굴절영상 보정에 대한 이론

Fig. 1(a)에서 A지점은 액적의 곡률에 의하여 굴절되어 B지점에서 보이게 된다. 본 연구에서는 굴절된 B점을 통하여 A점의 위치를 알아내기 위하여 다음과 같은 식들을 사용하였다.

우선 액적의 표면은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\phi = x^2 + y^2 + z^2 = R^2 \quad (1)$$

원점(O점)에서 B점을 지나는 직선선분의 단위벡터 \hat{n} 은

$$\begin{aligned} \hat{n} &= \frac{\nabla\phi}{|\nabla\phi|} = \frac{2(x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k})}{2\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \\ &= \frac{1}{R}[x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}] \end{aligned} \quad (2)$$

이며, $z = \sqrt{R^2 - x^2 - y^2}$ 이다. 또한 입사각 θ_1 은 다음의 관계식으로 계산되어진다.

$$\hat{n} \cdot \hat{k} = \cos\theta_1 \quad \text{또는} \quad \frac{z}{R} = \cos\theta_1 \quad (3)$$

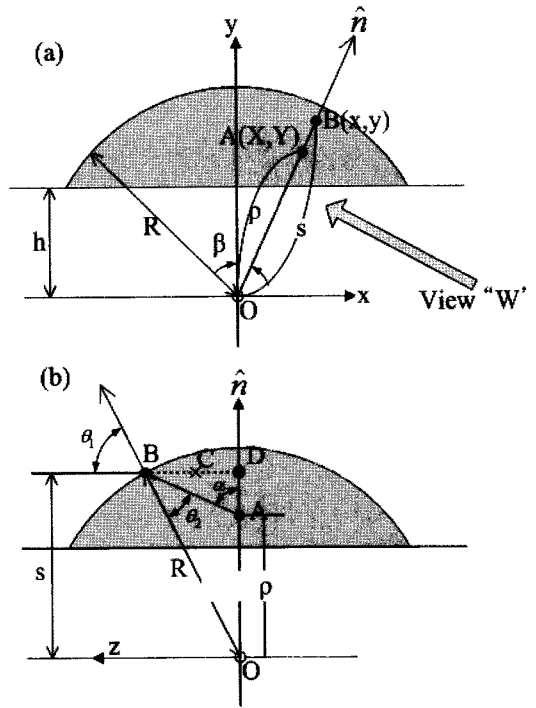


Fig. 1. Relation between coordinates of the real object A and image C; (a) front view, (b) view "W"

한편 굴절각은 Snell의 법칙 즉

$$n = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} \quad (n=\text{굴절률}) \quad (4)$$

으로 구할 수 있다. 또한 삼각형 OAB에서 \overline{OA} 의 길이는

$$\frac{\overline{OA}}{\sin\theta_2} = \frac{R}{\sin(\frac{\pi}{2} - (\theta_2 - \theta_1))} = \frac{R}{\cos(\theta_2 - \theta_1)} \quad (5)$$

또는 $\overline{OA} = \frac{R\sin\theta_2}{\cos(\theta_2 - \theta_1)}$ 이며 β 는

$$\tan\beta = \frac{x}{y} = \frac{X}{Y} \quad (6)$$

으로 구할 수 있다.

다음으로 굴절현상을 고려하여 $B(x, y)$ 를 원래의 위치인 $A(X, Y)$ 로 보정해야한다. 우선 $\overline{OA} = \sqrt{X^2 + Y^2}$, $\alpha = \tan^{-1}(X/Y)$ 으로 두고, 미지의 변수 $x, y, \theta_1, \theta_2, z$ 를 포함한 5개의 식을 정리하면 다음과 같다.

$$z = \sqrt{R^2 - x^2 - (y+h)^2} \quad (7)$$

$$z = R \cos \theta_1 \quad (8)$$

$$n \sin \theta_2 = \sin \theta_1 \quad (9)$$

$$R \sin \theta_2 = \sqrt{X^2 + Y^2} \cos(\theta_2 - \theta_1) \quad (10)$$

$$m = X/Y = x/y \quad (11)$$

위의 5개의 식을 이용하여 x , y 를 구할 수 있다.

그리고 X , Y 가 주어진 경우에는 θ_1 , θ_2 를 구하는 과정이 비선형 방정식이므로 Newton-Raphson의 방법을 이용하여 식 (11)에서부터 식 (7)로 역으로 계산해 나가게 된다.

2.2 가상 액적의 보정

실제 실험에 앞서 컴퓨터로 영상의 굴절과 그 복원

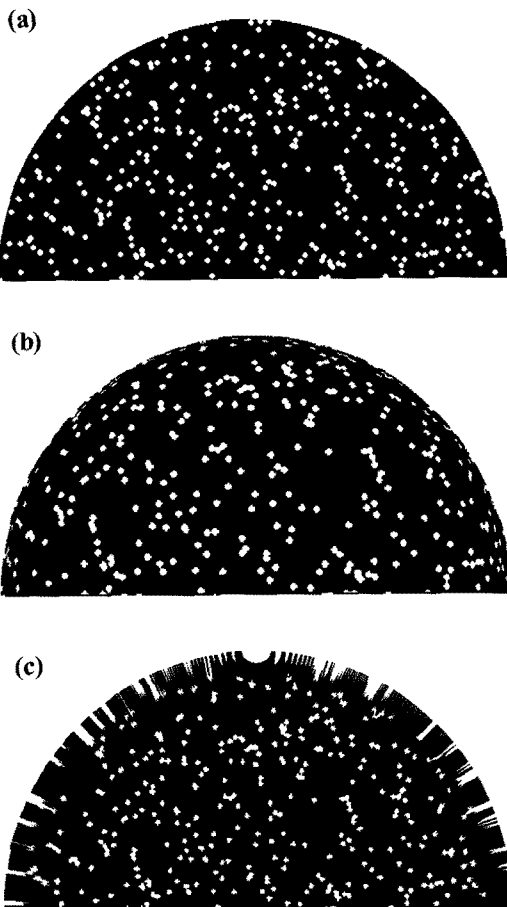


Fig. 2. Performance of the image compensation technique; (a) a virtual droplet, (b) refracted image of the virtual droplet, (c) the image transformed to the real space.

에 대한 가상실험을 수행하여 2.1절에서 제시한 계산식의 유용성을 확인하였다. 즉, 컴퓨터로 만든 가상 액적의 중심단면에 입자를 분포시킨 뒤 이들의 영상을 굴절시키고 다시 원래의 입자 영상을 복원시켰을 때 과연 얼마만큼 원래의 영상이 복원되는지를 확인함으로써 계산식의 유용성을 검증하고 더불어 영상복원 기술의 근본적인 문제점을 확인해 보았다.

Fig. 2(a)에서와 같이 가상의 크기의 액적에 400개의 입자를 난수발생함수를 이용하여 생성하였으며 물의 굴절률을 이용하여 Fig. 2(b)와 같이 굴절된 영상을 만들었다. 이 영상이 카메라를 통하여 실제로 획득되는 영상이다. 이 그림을 통하여 액적 곡률의 중심을 기준으로 곡면 방향으로 굴절되는 것을 알 수가 있으며 액적 외곽으로 갈수록 굴절되어 위치가 이동되는 정도가 심하다는 것 또한 확인 할 수 있다. 이 굴절된 영상이 앞서 설명한 보정계산식에 적용하여 Fig. 2(c)의 영상을 만들었다. Fig. 2(c)는 Fig. 2(a)와 같은 실물 영상이 되어야 한다. 그러나 이 둘을 비교해 보았을 때 액적의 외곽부분이 많이 다르다는 것을 볼 수 있다. 이는 가장 자리의 굴절 현상이 심하고 픽셀의 수가 유한하기 때문이다. 더욱 구체적으로 설명하자면, 액적의 외곽은 굴절이 중심부분보다 심하기 때문에 중심부분에 비하여 많은 픽셀의 색상값이 비어버리게 되고 이를 재보정하는 과정에서 상이 심하게 일그러진 것으로 추측된다. 하지만 액적 외곽의 부분을 제외한 나머지 부분은 원래의 영상(Fig. 2(a))과 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통하여 실험에서 얻은 굴절된 영상에 대한 보정이 어느 정도 가능하다는 것을 판단할 수 있다.

3. 실험

구형 액적의 자연대류에 따른 내부유동을 관측하기 위하여 CCD 카메라와 레이저 그리고 광학 렌즈를 사용하였다. 선명한 영상을 얻기 위하여 액적의 수직 위에서 정확하게 액적의 중앙을 향하도록 레이저를 설치하였으며 액적의 수직 단면을 가시화하기 위하여 볼록 렌즈를 통하여 얇은 레이저 스팟을 만든 후 원통형 볼록렌즈를 두어 최종적으로 수십 μm 의 두께를 가지는 평면 레이저광을 얻었다. 레이저광 두께 측정은 투명한 작은 상자에 농도가 진한 형광입자를 가진 물을 채우고 밀폐시킨 후 만들어진 레이저 평면을 비추어서 형광입자가 발광하는 영역의 폭을 측정하는 방법을 사

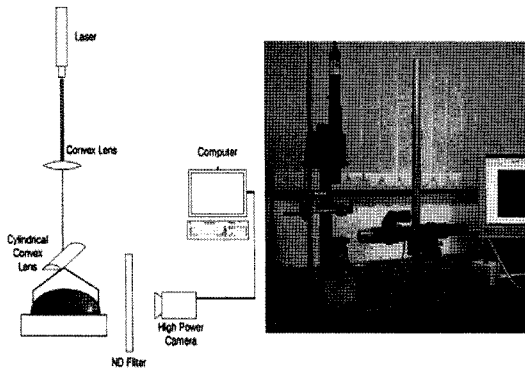


Fig. 3. Diagram showing the experimental setup (LHS) and experimental arrangement of laser and camera to obtain clear images(RHS)

용하였다. 또한, 평면광에 수직하며 액적과 동일선상에 CCD 카메라를 두어 평면 레이저광으로 부터의 영상을 정확하게 카메라에 비춰지도록 정렬하였다. 실험에 사용된 액적은 물이며 액적 내부에는 레이저가 비춰졌을 때 발광하는 1 μm 직경의 형광 입자를 혼입하였다. 액적은 실리콘 기판 위에 만들었으며 체적은 2 μl 이며 직경은 1.98 mm로 측정 되었다.

액적내부 유동은 실리콘 기판을 가열하여 생긴 자연 대류에 의해 생성되는 것이며, 자연대류는 정성적으로 액적 표면에서의 증발 등에 따른 냉각효과로 발생하는 것으로 이해되고 있다. 유동이 느리기 때문에 1초 간격으로 액적을 촬영하였으며, 레이저에 의한 가열과 그로 인한 증발심화 효과를 피하기 위하여 카메라가 촬영할 때에만 레이저 장비를 작동시켜 영상을 획득하였다.

4. 결과 및 고찰

실험을 통하여 1초 간격으로 Fig. 4(a)와 같은 연속 사진들을 얻었으며, 액적의 하부에 바닥면의 선이 보인다. 이것 또한 굴절에 의하여 나타난 것으로 개발된 보정 기술을 이용하여 굴절효과를 제거하면 바닥면은 Fig. 4(b)와 같이 액적의 하단으로 내려가게 된다. 그리고 액적의 외곽 부분이 액적의 중심방향으로 일그러진 것을 볼 수 있는데 이는 2.2절의 Fig. 2(c)에서와 같이 외곽은 굴절이 심하기 때문에 이를 재보정하는 과정에서 상이 일그러졌다고 할 수 있겠다.

미소 스케일에서의 PIV 기술⁽⁵⁾을 이용하여 획득한

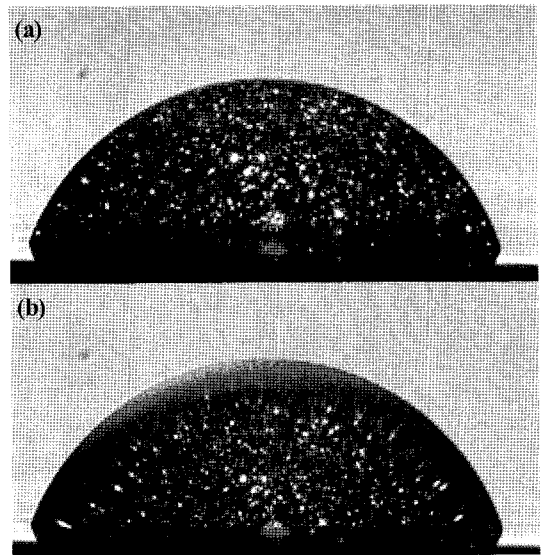


Fig. 4. Contrast between (a) the actual visualization of the cross-section and (b) the image after compensation.

영상의 속도벡터장을 구해보았다. 우선 실험에서 획득한 영상, 즉 굴절되어진 영상을 그대로 사용하여 속도벡터장을 구할 수 있었다(Fig. 5(a)). 다음으로, 속도벡터가 나타나 있는 영상에 해 개발한 보정기술을 적용시켜 실제의 액적 내부 유동을 나타내는 속도벡터장으

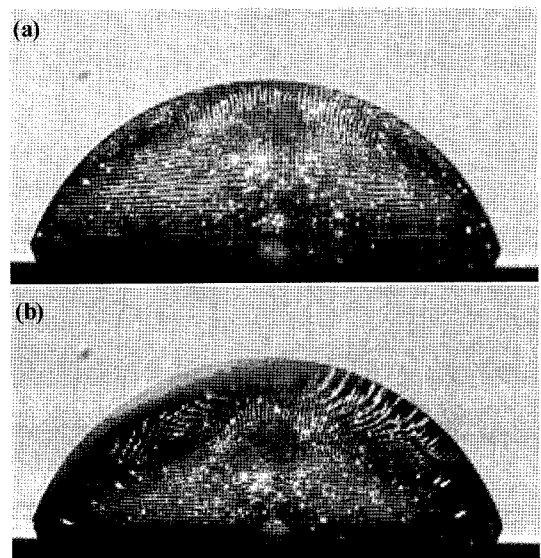


Fig. 5. Velocity vectors; (a) the original results obtained from a PIV calculation, (b) the one after transformation of the positions of vectors.

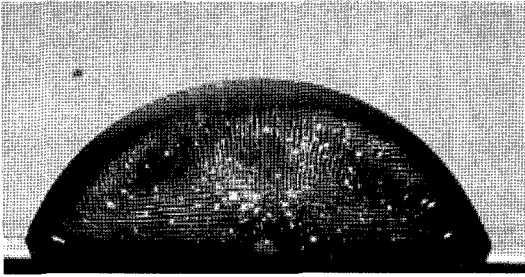


Fig. 6. Velocity vector field obtained from the compensated image.

로 변환시킨 결과가 Fig. 5(b)이다. 이 사진에서도 액적 외곽부분의 벡터가 일그러진 것을 확인할 수 있는데 이것 또한 재보정하면서 생긴 문제이다.

속도벡터장을 보정시키는 것은 벡터가 가지는 특성에 의하여 가능한 것으로 영상에 표현된 속도벡터는 보정되면서 그 크기와 방향이 바뀌게 된다. 하지만 속도벡터장을 가진 영상의 보정은 몇 가지 제한이 있다. 일반적으로 PIV에서는 유동장 확인이 용이하도록 전체 벡터의 크기를 조절하여 나타내는 경우가 많다. 이렇게 조절된 영상을 보정하게 되면 벡터가 입자의 위치를 정확하게 지시하지 못하는 경우가 있다.

두 번째 방법으로 실험에 의하여 획득한 굴절된 영상의 굴절효과를 보정한 영상(Fig. 4(b))을 이용하여 속도벡터장을 구한 것이 Fig. 6이다. 보정된 영상의 가장자리는 많이 일그러지기 때문에 가장자리 영역은 PIV해석할 때 제외시켰다. Fig. 6에서의 속도벡터장은 보정된 입자의 위치간의 변위를 이용하여 구한 벡터이므로 Fig. 5(b)의 결과보다는 정확하다고 할 수 있다.

결과적으로, 액적내부 유동의 속도장 측정을 위해서는 영상을 먼저 보정한 후 PIV 혹은 PTV 처리하는 것이 더 양호한 결과를 제시함을 알 수 있다. 앞으로, 개발된 보정 기술을 이용하여 굴절률, 접촉각의 변화에 따른 액적을 보정하여 내부 유동을 측정하고 정량화하여 보정 기술의 유용성을 검증해 나가는 것이 추후의 연구과제이다.

5. 결 론

본 연구에서는 구형액적에 의한 굴절영상을 보정하는 기술을 개발하였으며 이 기술을 이용하여 실험에서

획득한 굴절된 영상을 보정하거나 굴절된 영상에서 획득한 속도벡터장을 보정하는 방법을 이용하여 보정 기술의 유용성을 알아보았다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 굴절효과 보정 기술을 적용한 결과 액적의 외곽부분이 매우 심하게 왜곡된다는 것을 확인하였다. 하지만 외곽을 제외한 나머지 부분에 대해서는 실제의 모습으로 돌아가는 것을 알 수 있었다.

(2) 액적의 외곽부분에 대하여 심한 왜곡을 제거하기 위하여 추가적인 보정 기술에 대한 연구가 필요하다.

(3) 속도벡터장을 구한 영상에 대하여 보정을 했을 경우에는 벡터가 입자의 위치를 정확히 지시하지 못하는 경우가 발생되므로 굴절을 보정한 후 속도장을 구하는 것이 좀 더 정확하다는 것을 알 수 있었다.

(4) 이 기술을 TFT기판제작에 이용되는 osc용액에서 침전시 발생하는 내부 유동 가시화에 이용하여 기판 패터닝 기술의 개발에 기초 자료로 사용할 수 있을 것이다.

후 기

이 연구는 지식경제부의 지식경제 프론티어기술개발사업인 차세대정보디스플레이기술개발사업단의 연구비(F0004023-2009-32)지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) 이명원, 2009, “유지막막 트랜지스터 기반 전기영동 디스플레이용 유연 하판 설계 및 제작”, 동아대학교 대학원 전기공학과 석사논문
- 2) 윤성철, 임종선, 이창진 2007, “인쇄전자소자: 고해상도 인쇄공정기술의 현황 및 전망”, *Polymer Science and Technology* Vol. 18, No. 3, June 2007, 238~245.
- 3) Ko, S.H., Lee, H. and Kang, K.H., 2008, “Hydrodynamic flows in electrowetting”, *Langmuir*, Vol. 24, pp. 1094~1101.
- 4) Lee, H.W, Kang, K.H, Lee, C.M, Lee, S.J, 2005, “Scaling Relations for the Flow inside an Evaporating Droplet and the Effect of No-slip Boundary Condition on Droplet Surface”, *KSME*, pp.862~867.
- 5) S.M. Kang, Y.Y. Wang, 2008, “A PIV study of AC-Electroosmotic flow in Microchannels”, *ICNMM* 2008.