

액적 내부 유동 가시화를 위한 축대칭 형상 왜곡 보정에 관한 연구

김영현* · 고한서†

Study on Correction of Optical Distortion for Flow Visualization inside Axisymmetric Droplet

Yeonghyeon Gim and Han Seo Ko

Abstract. Optical distortion of experimental results can be found in many studies. Thus, a method of the optical correction for visualization of an axisymmetric droplet was developed in this study. The correction method was derived to extract refracted vectors. In order to obtain the refracted vectors, a projection vector and a normal vector should be calculated. Then, a distortion distance can be found by the calculated refracted vector and Snell's law. The developed method was also verified by the simulation and the experimental results to apply for a liquid droplet which was formed at a nozzle tip.

Key Words: Refraction(굴절), Distortion(왜곡), Correction(보정), Axisymmetric(축대칭)

1. 서론

광학을 이용한 열유동 계측 관련 많은 실험에서 왜곡 현상에 의한 오차가 발생한다. 왜곡 현상은 빛이 다른 매질을 만날 경우 굴절하는 특성으로 인해 발생하며, 이 문제를 해결하기 위해 액적 표면에서 굴절에 의한 왜곡 현상을 보정하여 액적 내부 유동 분석 결과에 대한 신뢰성을 높이는 연구가 많은 연구자들에 의해 진행되었다^(1,2,3,4). 본 연구에서는 축 대칭형 액적에 대한 굴절 보정을 수행하는 방법을 포괄화하고 전반적인 개념에 대해 정리하였다. 굴절 보정법에서 가장 핵심적인 부분은 굴절 벡터를 추출하는 것이다. 이 벡터를 구하기 위해서는 프로젝션 벡터와 접선 벡터를 구해야 한다. 그 후 Snell의 법칙을 통해 방법에 대한 증명을 수행하고 왜곡된 거리를 얻어 보정을 진행한다. 본 논문에서는 이 전반적인 내용에 대한 증명을 시뮬레이션과 모형 실험을 통해 수행하고, 실제 액적 내부 속도 분포 분석 실험에 적용하였다.

2. 굴절 보정 방법

굴절 보정을 수행하기 위해 다음과 같은 식(1)을 유도

하였다.

$$\vec{T} = \frac{n_1}{n_2} \vec{P} + \left(\frac{n_1}{n_2} \cos \varphi_i - \cos \varphi_d \right) \vec{N} \tag{1}$$

여기서 \vec{T} 는 굴절 벡터이고, \vec{P} 는 detector 위치에 평행한 입사 벡터이며, \vec{N} 은 액적 표면에 대한 접선벡터이다. 또한 φ_i 는 입사각을, φ_d 는 굴절각을 나타낸다. 접선벡터 \vec{N} 은 식 (2)에서 보이듯이 표면 형상 함수를 통해 구하는데 이를 구할 경우 식 (3)에서 Snell의 법칙을 통해 입사각과 굴절각을 모두 구할 수 있다.

$$\vec{N} = \frac{\nabla F(x,y,z)}{|\nabla F(x,y,z)|} \tag{2}$$

$$\varphi_d = \sin^{-1} \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \varphi_i \right) \tag{3}$$

따라서, 표면 형상을 구할 경우 굴절 벡터를 도출할 수 있다. 식 (4)의 $F(x,y,z)$ 는 zx 단면에 대한 표면형상 함

† 성균관대학교 기계공학부

E-mail : hanseoko@skku.edu

* 성균관대학교 대학원 기계공학과

수를 의미한다.

$$F(x, y, z) = (x^2 + z^2) - g(y)^2 = 0 \quad (4)$$

또한 식 (3)에서 n_1/n_2 는 서로 다른 매질에 대한 상대 굴절률을 의미한다. 프로젝션 벡터는 Detector가 정보를 얻는 방향을 의미하며, 계산의 용이성을 위해 식 (5)처럼 설정하였다.

$$\vec{P} = -\vec{k} \quad (5)$$

이런 과정을 통해 얻은 변수들을 식 (1)에 대입할 경우 한 포인트에 해당하는 굴절 벡터를 구할 수 있고, 이 과정을 반복하여 이미지 전체에 해당하는 벡터들을 추출할 수 있다. 그 후 Image 평면에서 나오는 광선이 액적 표면을 만나는 점과 Object 평면을 만나는 점 사이의 거리와 위 공식으로 구한 단위 벡터인 굴절 벡터(식 (6))의 곱으로 식 (7)에서 왜곡된 위치와 실제 위치 사이의 거리를 구할 수 있으며, 이를 굴절 거리 보정에 사용하면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{T} = a\hat{i} + b\hat{j} + c\hat{k} \quad (6)$$

$$P_i = x_i\hat{i} + y_i\hat{j} \quad (7)$$

$$P_0 = x_0\hat{i} + y_0\hat{j} = (x_i + Da)\hat{i} + (y_i + Db)\hat{j} \quad (8)$$

여기서 P_i 는 왜곡된 위치이며, P_0 는 굴절 보정이 수행된 위치이다.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 개발된 방법에 대한 증명

제시된 방법에 대한 증명을 위해 실험을 수행하고 결과 값과 비교하였다. Fig. 1에서 보이듯이 Polycarbonate로 만들어진 반 원뿔 형태의 투명 물체를 Check board에 부착시킨 후 왜곡된 이미지를 촬영하고 굴절보정을 수행하여 어떻게 보정이 원활하게 되는지를 확인하였다.

굴절 보정에 앞서 이와 똑같은 조건을 시뮬레이션에 구현하여 가상으로 왜곡 후 보정을 수행하였다. 그 결과 Fig. 2에서처럼 왜곡 면적을 제외한 부분이 정상적으로 제자리를 찾아가고 있음을 확인할 수 있었다. 그 후 Fig.

3에서 보이듯이 굴절 보정법을 실제 상황에 대입하여 Check board의 위치가 제대로 보정됨을 확인하였으며, 이를 통해 제시된 방법의 신뢰성을 증명하였다.

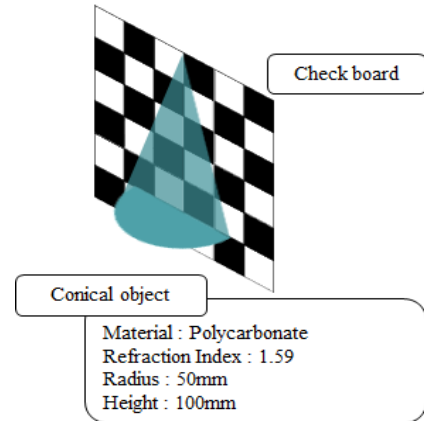


Fig. 1 Schematic of conical object on check board

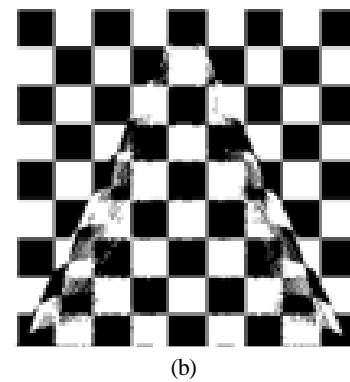
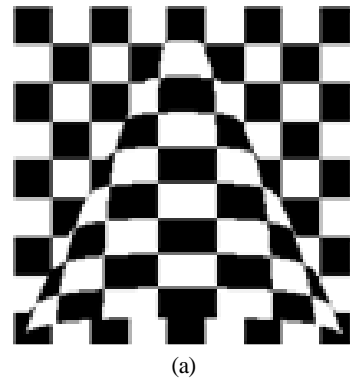


Fig. 2 Simulation of optical correction for conical object; (a) Original image and (b) Corrected image

3.2 실험 결과

증명된 방법을 이용하여 노즐에서 토출되는 액적의 내부 유동장을 가시화하였다. 실험 장치 구성은 Fig. 4와 같다. 사용된 노즐의 직경은 2mm이고, 액적 생성을 위해 Ethanol을 사용하였으며, 상대굴절률은 1.3614이었다. 또한 PIV (Particle image Velocimetry)기법^(5,6,7)을 통해 유동장을 가시화하기 위해 사용된 액적 내 입자 크기는 15 μm 이고, 연속광 레이저인 Ar-ion 레이저를 사용하였으며, 고전압 공급 장치를 통해 노즐에 고전압을 공급하여 액적 내 유동을 야기하였다. 그 후 Detector로 고속카메라를 사용하여 입자의 움직임을 촬영하였다.

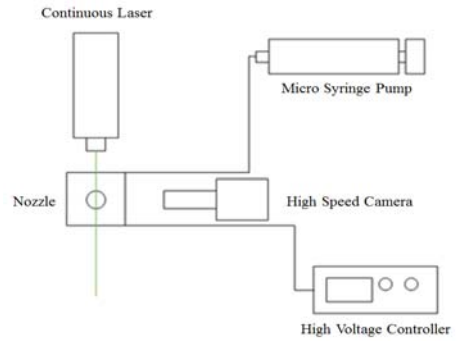
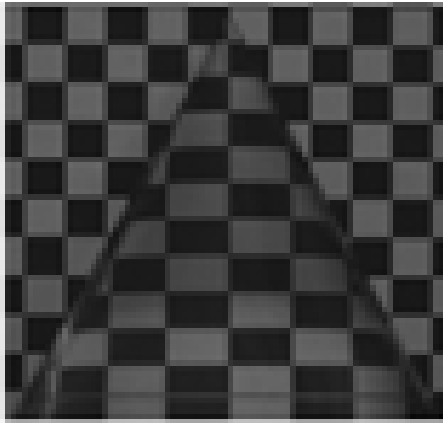


Fig. 4 Experimental setup for flow visualization inside droplet

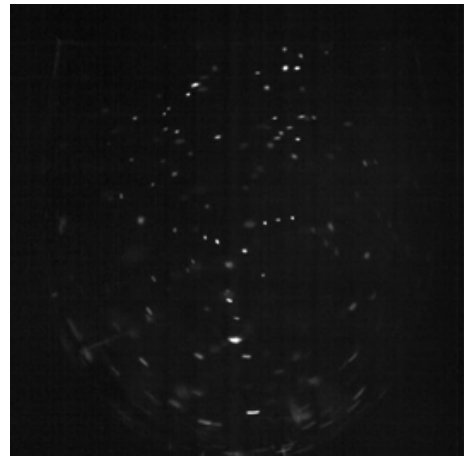


(a)

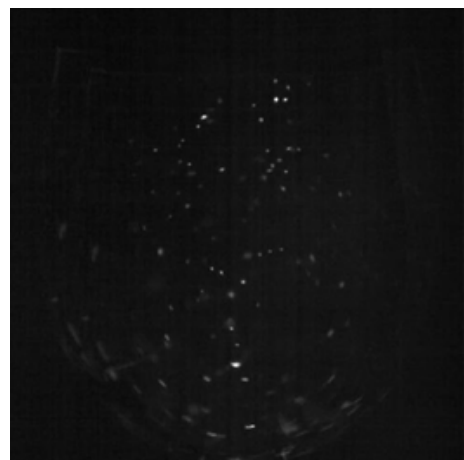


(b)

Fig. 3 Experimental Result of optical correction for conical object; (a) Original image and (b) Corrected image



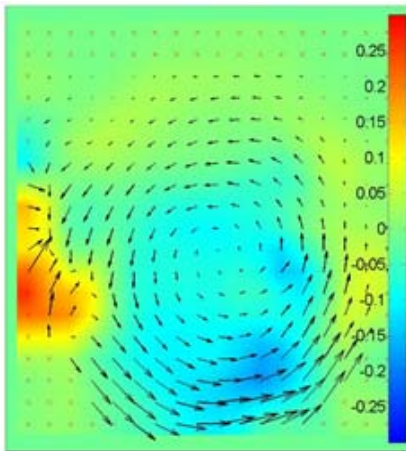
(a)



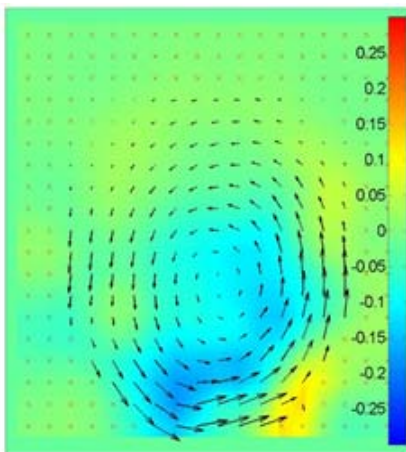
(b)

Fig. 5 Particle distribution inside droplet; (a) Without correction and (b) With correction

Fig. 5와 같이 약 2kV를 공급한 상태에서 액적 내 입자의 이미지를 얻었고 Fig. 6과 같이 액적 내 유동장을 나타내었다. 유동장을 얻는데 사용된 프로그램은 PIVlab_1.32이다. 보이는 것과 같이 액적 내 입자가 반시계방향으로 회전하고 있으며, 굴절 보정을 수행하지 않았을 때 액적 표면 근처에서 경향에 어긋나는 유동을 관찰할 수 있었다. 하지만 굴절 보정을 수행했을 때, Vorticity가 생기는 위치가 바뀌는 것을 볼 수 있었고, 왜곡 보정이 됨으로써 유동이 경향에 맞게 원활하게 진행되고 있음을 확인할 수 있었다. 굴절 보정법의 신뢰성을 증명했기 때문에 보정된 결과 값이 실제 내부 Vorticity의 위치라고 볼 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 6 Velocity vector distribution inside droplet;
(a) Without correction, and (b) With correction

4. 결론

본 연구에서는 축 대칭 형상의 액적 내부 유동에 대해 굴절 보정을 수행할 수 있는 방법을 개발하였다. 표면 형상 함수를 통해 접선 벡터 등 여러 변수를 구하고 최종적으로 굴절 벡터를 계산한 뒤 왜곡된 거리 보정을 수행하였다. 이 방법에 대한 신뢰성을 증명하기 위해 시뮬레이션과 실험을 진행하였으며 보정이 원활하게 되고 있음을 확인하였다. 그 후 실제 실험에 적용하여 보정 시 유동장이 어떻게 바뀌는지를 분석하였다. 그 결과 보정이 수행된 후에는 Vorticity의 위치가 바뀌면서 유동장의 속도 벡터 경향성이 뚜렷하게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 본 연구에서 제시하는 굴절 보정법은 다양한 축 대칭 형상에서 굴절 보정을 수행하려고 할 경우, 표면 형상 함수만 새로 지정해주면 이 방법을 그대로 사용할 수 있다. 비록 2차원 단면의 유동장에서만 적용될 수 있지만, 본 연구는 최종 목적인 3차원 굴절 보정법을 개발하는데 있어서 기초가 될 수 있다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 중견연구자 지원 사업을 통해 이루어졌습니다(NRF -2013R1A2A2A01068653).

참고문헌

- 1) Kang, K. H., et al, 2004, "Quantitative Visualization of flow inside an evaporating droplet using the ray tracing method," Measurement Science & Technology., Vol.15(6), pp.1104~1112.
- 2) Nguyen, X. H., 2013, "Study on Three-dimensional Tomography for Analysis of Droplet Jetting Behavior," PhD thesis, Sungkyunkwan University, Suwon, Republic of Korea
- 3) Minor, G., et al, 2007, "Optical distortion correction for liquid droplet visualization using the ray tracing method: further considerations," Measurement Science & Technology., Vol.18(11), pp.L23~L28.
- 4) Castrejon-Pita, J.R., et al, 2012, "Velocity Profiles in a Cylindrical Liquid Jet by Reconstructed Velocimetry," Journal of Fluids Engineering-Transactions of the Asme., Vol. 134(1), 011201.

- 5) M. Raffel, C. E. Willert, J. Kompenhans, 1991, "Particle image velocimetry: A practical guide.", Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- 6) R. J. Adrian, 1991, "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics.", Ann Rev Fluid Mech, 23, 261-304.
- 7) J. Westerweel, 1993, "Digital particle image velocimetry: Theory and application", PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.