

식물성 플랑크톤의 관유동 내 횡방향 이동현상에 대한 홀로그래픽 실험 연구

임승민* · 이상준†

Holographic Microscopy Measurement of Inertia Migration Phenomena of Phytoplankton in Pipe Flows

Seung Min Lim* and Sang-Joon Lee†

Abstract. Inertial migration phenomena of phytoplankton in pipe flows were investigated using a digital holography technique. As the Reynolds number increases, the microorganisms suspended in a pipe flow are focused at a certain radial position which is called equilibrium position or pinch point. In this study, the effects of the size of microorganism and Reynolds number in the range of $1 < Re < 78$ on the inertial migration were investigated and the results are compared with those for solid particles under similar experimental conditions. As a result, the equilibrium position for the elastic microorganisms is not so distinct, compared to the solid particles. This results from deformation of elastic body shape caused by shear-gradient of surrounding flow.

Key Words: Digital holography (디지털 홀로그래피), Elastic particle (유연성 입자), Segre-Silberberg annulus, inertial migration(평형이동)

1. 서 론

미세 유동과 관련된 분야에서 관성력효과는 일반적으로 무시되었다. 왜냐하면 미세유동은 관성력에 비해 점성력이 우세한 Stokes 영역에서 일어나는 유체역학적 현상이기 때문이다. 최근 미세유동에서 유체의 관성이 입자에 미치는 영향에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Serge & Silberberg⁽¹⁾은 무작위로 분포시킨 입자들이 하류에서 일정한 평형위치에 놓이는 현상을 처음으로 관찰했다. 그리고 이것은 입자의 관성 리프트에 기인하는 것임을 수학적 및 실험적으로 밝혔다⁽²⁾. 이러한 관성 리프트를 이용한 평형이동현상은 최근 microfluidics 장치나 lab on a chip 제작에서부터 세포의 sorting과, 분리 그리고 filtration 뿐만 아니라 의약 캡슐 제작 등 다양한 의생명분야에서 다루어지고 있다⁽³⁾. 하지만 대부분의 연구가 딱딱한 고체입자를 중심으로 연

구가 진행되고 biological한 특성을 가지는 elastic한 입자를 이용한 연구는 매우 제한적이다. 특히 관유동이나 채널유동에서 속도구배(velocity gradient)에 기인하여 입자표면에 작용하는 전단응력은 탄성을 가지는 유연한 입자를 변형시키고 유체상호적 특성을 변화시켜 딱딱한 고체입자와는 다른 관성리프트를 가지게 한다. 그리고 대부분의 생물학적 세포들은 수분을 함유하고 있는 유연한 입자형태(elastic particle)이기 때문에 향후 응용연구에 있어서 중요한 연구정보를 제공할 것이다.

본 연구에서는 유체관성에 대해 유연한 입자들의 평형이동현상을 실험적으로 조사하고자 구 형태에 가까운 미세조류(microorganism)인 식물성 플랑크톤을 대상으로 실험을 수행하였다. 3차원 입자추적기법인 디지털 홀로그래피 PTV 기법을 이용하여 마이크로 관유동 내부에서 미세조류의 횡방향 이동현상을 측정하였다. 레이놀즈 수(Re)와 관직경과 유연성입자의 직경비(D/d) 변화가 관성리프트 효과에 미치는 영향을 구체적으로 조사하고 기존의 고체입자에 대한 결과와 비교하였다.

†포항공과대학교 기계공학과

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

*포항공과대학교 기계공학과 대학원

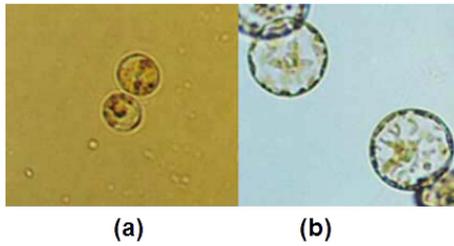


Fig. 1. Particulate cells with a spherical shape. (a) halasisosira allenii, (b) halasisosira tenera.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 샘플 및 장치

본 연구에서 유연성 입자로 사용되었던 미세조류는 *Thalasisosira allenii*⁽⁴⁾와 *Thalassiosira tenera*⁽⁴⁾로 각각 약 10~11 μm 와 25~30 μm 범위의 직경을 가지는 구 형태의 플라크톤이다(Fig. 1). 관성 리프트 효과는 입자의 직경 대비 관의 직경비에도 크게 영향을 받는데, 직경비가 클수록 관성리프트 효과가 커진다고 알려져 있다⁽⁵⁾. 따라서 이전의 실험결과와 비교하기 위해 직경이 다른 두 샘플을 실험에 사용하였는데, 두 샘플 모두 운동성은 없고 부유성만 지니고 있다. 미세조류의 Young's modulus는 같은 종이라도 넓은 범위의 값을 가지며 대장균의 경우 대략 6~200 MPa의 값을 가지고 있다⁽⁶⁾. 일반적으로 실험에 많이 사용되는 polystyrene 미세입자의 Young's modulus는 3~3.5 Gpa⁽⁷⁾ 인데, 이는 미세조류와 비교하여 상당히 딱딱하다는 것을 알 수 있다. 실험에 사용된 샘플은 한국미세조류은행에서 분양받았다. 미세 관유동에서 관의 곡률로 인한 영상왜곡을 최소화하기 위해 물과 거의 비슷한 1.338의 굴절률을

Table 1. Summary of experimental conditions

Pipe diameter, $D(\mu\text{m})$			350
Kinematic viscosity, $\nu(\text{mm}^2/\text{s})$			0.95
Measurement position, L/D			860
Room temperature($^{\circ}\text{C}$)			25
	$D(\mu\text{m})$	D/d	
	10~11		35
	25~30		12~14
Flow rate	25	$\text{Re}(UD/\nu)$	1.6
$Q(\mu\text{l min}^{-1})$	150		9.7
	300		19.4
	900		58.1
	1200		77.4

가지는 내경이 $D = 350 \mu\text{m}$ 인 FEP(fluorinated ethylene propylene)튜브를 사용하였다. 단단한 직선 구조물을 이용하여 FEP튜브를 직선으로 고정시켰으며 유량은 25~1200 $\mu\text{l}/\text{min}$ 범위 내에서 조절하였는데, 관직경에 기반한 레이놀즈 수(Re)는 1.6~77.4이다. 그리고, 입자의 관성리프트 효과로 형성되는 Segre-Silberberg annulus를 확인하기 위하여 유체흐름이 충분히 발달되는 위치인 관입구로부터 860D 지점에서 유동영상을 취득하였다(Table 1).

2.2 디지털 홀로그래피

Fig. 2는 본 연구에서 사용되었던 실험장치의 개략도를 나타내며, 측정은 in-line 디지털 홀로그래피(digital holography)를 사용하였다. Nd:Yag 레이저($\lambda = 532 \text{ nm}$)를 광원으로 사용하여 CMOS 고속카메라(Photron FASTCAM)를 이용하여 초당 60장씩으로 홀로그램 영상을 취득하였다. 홀로그램 영상들의 초점면(focal plane)은 관의 중앙으로부터 200 μm 상부에 위치하도록 조절하였다. Water-immersion방식의 20배 대물렌즈(Nikon, Japan)를 이용할 경우 공간분해능은 약 1.16 μm 이며 취득한 홀로그램 영상에 Fresnel kirchoff 회절적분식을 이용하여 깊이(z-axis)방향의 폭을 1 μm 로 하여 수치적으로 재생하였다. x, y 위치는 수치적으로 재생된 입자영상에서 intensity가 가장 큰 값을 가지는 위치를 찾아서 구하였으며, z 위치 정보는 autofocus function을 이용하여 높은 focusing 값을 가지는 지점으로부터 구하였다. 모든 수치적 재생 및 입자의 3차원 위치정보 추적은 Matlab에서 프로그램된 코드를 사용하여 수행하였다.

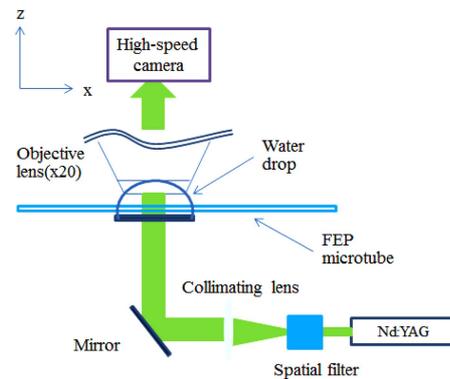


Fig. 2. Experimental set-up for measuring deposition of phytoplankton in a tube using digital holography.

3. 결과 및 고찰

3.1 Segre-Silberberg annulus

미세 스케일의 Poiseuille 유동 내에서 유연한 조류의 관성 이동현상을 미세조류의 크기와 레이놀즈 수 (Re)를 변화시키면서 연구하였다. 본 연구에서 다른 관 직경에 대한 미세조류의 크기 비(D/d)와 레이놀즈 수 (Re) 조건들을 Table 1에 요약하며 나타내었다. 본 연구에서는 충분히 발달된 Segre-Silberberg annulus 를 대상으로 관성이동에 따른 평형위치(equilibrium position)를 구하였다. 관성리프트에 기인한 평형 위치는 전단구배(shear gradient)와 벽면효과에 의한 힘 사이의 평형에 의해 결정되어진다. 레이놀즈 수가 증가하면 입자들이 벽면 쪽으로 이동하는 현상은 이미 많은 연구를 통해 알려져 있는데, 일반적으로 관반경의 0.6배 정도 되는 원환(annulus)에 입자들이 분포하게 된다⁽⁸⁾. 또한 입자의 크기가 커짐에 따라 관성리프트 효과도 증가하여 Segre-Silberberg annulus가 뚜렷하게 관찰되어진다고 알려져 있다^(9,10,11).

Fig. 3은 레이놀즈 수와 미세조류의 직경비(D/d) 변화에 따른 미세조류의 공간분포를 나타낸 것이다. 레이놀즈 수가 증가하고 미세조류의 크기가 증가하더라도 고체형태의 입자를 대상으로 수행한 이전 연구에 비해 Segre-Silberberg annulus가 뚜렷하게 형성되지 않음을 확인하였다. 두 경우 모두 벽면근처에서의 입자가 존재하지 않는 free-layer 영역이 존재함을 확인하였다. 이것은 벽 쪽 영역에는 반발력(repulsive force)이 유속에 상관없이 작용함을 나타내고 free-layer 영역은 레

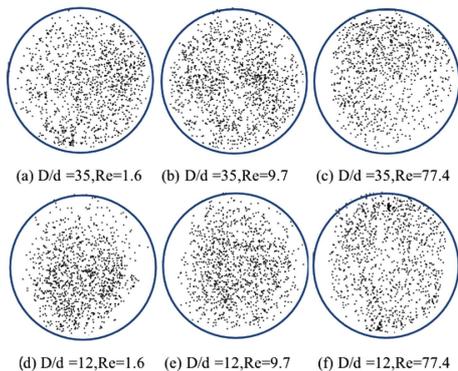


Fig. 3. Spatial distributions of plankton in a cross sectional plane of the micro-tube.

이놀즈 수와 직경비가 커질수록 넓어지는 것으로 나타났다. 또한 관의 중앙쪽에서 입자분포가 열어졌는데, 이것 또한 크지는 않지만 관성리프트 효과에 기인한 것으로 보인다.

3.2 입자의 밀도의 확률분포

관 반경에 따른 유연한 미세조류들의 공간분포를 확인하기 위해 입자 밀도의 확률밀도 함수를 구하고 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 여기서 보면 구형 입자를 대상으로 수행한 이전의 실험결과와는 다르게 특정 위치에 많은 입자들이 집중되는 현상은 보이지 않았다. 전체적으로 넓은 범위에 걸쳐 확률밀도분포를 보이고 있으며, 관의 중심과 벽 쪽면 부근에서 확연히 낮은 밀도분포를 가졌다. 또한 확률밀도 함수값의 변동(fluctuation)이 크게 나타났다. 이것은 미세조류의 표면이 유연하여 여기에 작용하는 전단구배힘과 벽 반발력(wall repulsive force)의 힘이 균일하지 않고 지속적으로 변화하기 때문으로 보인다.

유연성을 가진 미세조류의 경우, 고체입자와는 다르게 전단구배력과 벽 반발력 작용에 기인하여 외형이 변화하게 된다. 이렇게 변형된 입자는 순간 힘의 합력과

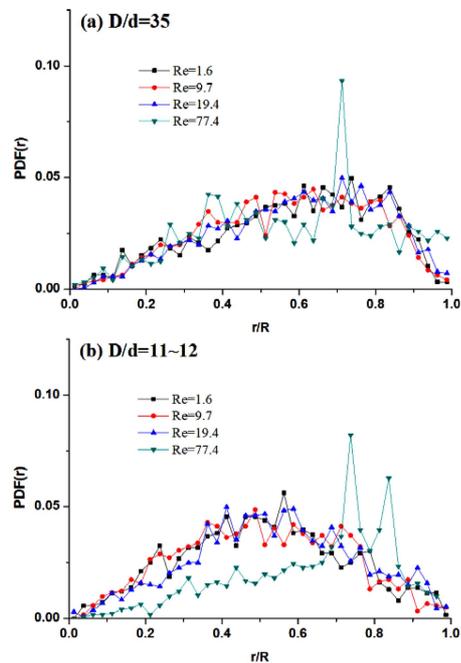


Fig. 4. Probability density function distributions of phytoplankton.

균형이 깨지면서 유체와의 상호작용에 의해 일정한 평형위치에 도달하지 못하고 계속 변동하는 것으로 보인다. 그리고 유연한 특성에 의해 외부에서 힘이 작용할 경우 미세 조류의 탄성에 의한 반발적인 힘이 유체에 작용하여 큰 변동특성을 가지는 것으로 생각되어진다.

또한 실험에 사용된 유연한 생체샘플은 그 크기가 완전히 동일하지 않고 어느 정도의 차를 가질 수 밖에 없는데, 이것도 한 가지 원인으로 생각되어진다. 유연한 미세조류의 크기가 클 경우 작은 경우에 비해 관 반경의 중간 지점에 위치할 확률이 큰 것으로 나타났다. 레이놀즈 수($Re = 77.4$)가 클수록 일정한 반경위치에 보다 큰 입자밀도를 가지는 것을 확인하였다. 유속이 빨라짐에 따라 작용하는 힘의 크기도 커져서 횡방향 이동효과가 뚜렷해지는 경향을 보인다. 전단응력에 의해 입자의 외형이 변화함에 따라 레이놀즈 수가 증가하면 평형위치로 이동하는 것이 뚜렷한 것은 입자의 형태와 단면적에 상관없이 큰 레이놀즈수에서 일정한 반경위치에 포커싱 된다는 기존 연구와 일치함을 알 수 있다⁽¹²⁾.

3.3 고체 입자와 비교연구

취득한 확률밀도분포에서 최대 확률분포를 가지는 peak 위치를 Fig. 5에 나타내고 비슷한 실험조건에서 구형 입자로부터 얻은 Choi(2012)의 결과⁽¹³⁾와 비교하였다. 유연한 미세조류의 경우 Segre-Silberberg 평형위치가 명확하게 나타나지는 않지만 최대 확률분포를 가지는 peak 위치를 추출해서 고체입자와 비교하면 $D/d=35$ 인 경우 비슷한 정점(peak position)을 가지는 것으로 나타났다. 낮은 레이놀즈 수 조건에서는 그 위치가 벽면쪽으로 조금 이동하였다. 레이놀즈 수가 증가함에 따라 정

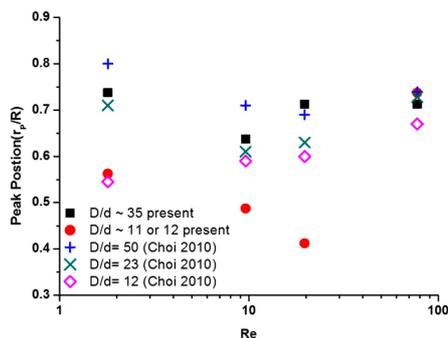


Fig. 5. Variation of Segre-Silberberg equilibrium positions of elastic particles and comparison with the results of a previous study.

점위치가 중앙쪽에서 형성되다가 다시 벽쪽으로 움직이는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 유체와 입자 사이의 상호적인 힘의 균형관계를 전체적으로 알 수 있다. 하지만 $D/d=11\sim12$ 인 경우에는 정점위치가 Re 수 증가에 따라 관 중심으로 이동하다가 다시 벽면쪽으로 이동하였다. 이것은 낮은 레이놀즈 수 영역에서 상대적으로 큰 미세조류의 경우 전단응력에 의해 변형된 형태가 작은 미세조류에 비해 크기 때문에 일반적인 구형태 고체입자의 정점위치와는 다른 경향을 보이는 것으로 생각되어진다.

4. 결 론

본 연구에서는 유연한 성질을 가지는 구에 가까운 미세조류인 식물성 플랑크톤을 이용하여 미세관 유동 내부 평형이동현상에 대하여 연구하였다. 홀로그래피기법을 이용하여 미세조류들의 3차원 위치정보를 취득하였으며, 레이놀즈 수와 생체 샘플의 상대적 크기(D/d)를 변화시키면서 이들이 평형이동현상에 미치는 영향을 조사하였다. 그리고 이 실험결과를 고체입자를 대상으로 비슷한 실험조건에서 수행된 이전결과와 비교하였다. 유연한 미세조류의 크기와 레이놀즈 수가 증가함에 따라 평형위치에서 큰 확률밀도분포 값을 가졌다. 그러나 고체입자에 비해 확률밀도분포가 낮고 Segre-Silberberg annulus도 명확하게 나타나지 않았다. 이것은 유연성을 가지는 미세조류의 탄성력에 기인하여 유체와 입자사이에 작용하는 힘의 상호작용에 차이가 나기 때문으로 전단구배에 의한 외형 변형에 기인한다. 전단력에 의해 변형된 형태의 미세조류에 작용하는 힘들의 벡터 값이 바뀌고 다시 새로운 힘의 균형점을 찾아가게 되어 특정한 평형위치에 이르지 못하고 상대적으로 넓은 확률밀도분포를 가지게 되는 것이다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부/한국연구재단 창의적연구진흥사업(생체유동현상 규명 및 생체모방연구)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Serge G, Silberberg A., 1961, "Radial particle displace-

- ments in Poiseuille flow of suspensions”, *Nature*, Vol. 89, pp. 209-210.
- 2) Bhagat A. A. S., Kuntaegowdanahalli S. S., Papautsky I., 2009, “Inertial microfluidics for continuous particle filtration and extraction”, *Microfluid. Nanofluid.*, Vol. 7, pp. 217-226.
 - 3) Segre G., Silberberg A., 1962, “Behaviour of macroscopic rigid spheres in Poiseuille flow. 2. Experimental results and interpretation”, *J. Fluid Mech.*, Vol. 14, pp. 136-157.
 - 4) KMCC homepage: <http://www.kmmcc.re.kr>
 - 5) Oliver D. R., 1962, “Influence of particle rotation on radial migration in the Poiseuille flow of suspensions”, *Nature*, Vol. 194, pp. 1269-1271.
 - 6) Tuson H. H., Auer G. K., Renner L. D., Hasebe M., Tropini C., Salick M., Crone W. C., Gopinathan A., Huang K. C., Weibel D. B., 2012, “Measuring the stiffness of bacterial cells from growth rates in hydrogels of tunable elasticity”, *Mol Microbiol.* Vol. 84, pp. 874-91.
 - 7) Engineering Tool Box homepage: http://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_417.html.
 - 8) Ho B. P., Leal L. G., 1974, “Inertial migration of rigid spheres in two-dimensional unidirectional flows”, *J Fluid Mech.*, Vol. 65, pp. 365-400.
 - 9) Schonberg J. A., Hinch E. J., 1989, “Inertial migration of a sphere in Poiseuille flow”, *J Fluid Mech.*, Vol. 203, pp. 517-524
 - 10) Matas J, Moris J. F., Guazzelli E., 2004, “Inertial migration of rigid spherical particles in Poiseuille flow”, *J Fluid Mech*, Vol. 515, pp. 171-195.
 - 11) Kim Y. W., Yoo J. Y., 2009, “Three-dimensional focusing of red blood cells in microchannel flows for bio-sensing applications”, *Biosens Bioelectrons*, Vol. 24, pp. 3677-3682.
 - 12) Hur S. C., Choi S. E., Kwon S. H., Carlo D. D., 2011, “Inertia focusing of no-spherical microparticles”, *APL*, Vol. 99, pp.0 44101-1.
 - 13) Choi Y. S., Lee S. J., 2010, “Holographic analysis of three-dimensional inertial migration of spherical particles in micro-scale pipe flow”, *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 9, pp. 819-829.