

적혈구를 갖는 복합유체의 유변학적 거동

이준상*

Rheological behavior of complex fluid with red blood cells

Joon Sang Lee*

Abstract : The objective of this study is to explain the rheology of suspension with red blood cells (RBCs) in the hydrophobic and hydrophilic surface microfluidic channels. The rheological behaviors of the RBC suspension in the surface coated microfluidic channels are observed with respect to several variations, for instance, diameter of channel, volume fraction of RBCs, and wettability of channel. A combination model of the three dimensional lattice Boltzmann method (LBM) and the immersed boundary method (IBM) are used to simulate these suspension systems. The LBM is used to determine incompressible fluid flow with a regular Eulerian grid. The IBM is used to solve the deformation of RBCs and matrix fluid interaction with a Lagrangian grid. To set the hydrophobic surface in the simulation, we change the wettability of channel using different slip ratio on the channel boundary. Systematic fluid resistance is computed using the apparent viscosity. We observe that flow rate and flow profile are changed with respect to wettability of channel in the same pressure gradient. We use the transient analysis to see the relationship between the apparent viscosity and instantaneous deformation of RBCs with wettability change.

1. 서 론

적혈구는 총 혈액량의 35%-45%를 차지하는 신진대사의 중요한 부분을 담당하는 물질이다. 적혈구의 거동은 우리 신진대사와 직접적으로 관련이 있는 중요한 현상이다. 때문에 다양한 형상을 갖는 채널에서의 적혈구의 거동에 대한 연구가 수행되었다.⁽¹⁾

최근 이미징 기술의 진보에 의하여 소수성 표면 채널 내부에서의 유체의 속도 프로파일을 측정할 수 있게 되었고, 이를 통하여 소수성 표면 채널에 벽에서 슬립 효과가 나타남을 관찰할 수 있었다.⁽²⁾

본 연구는 친수성, 소수성 표면을 갖는 마이크로 채널에서 적혈구 혼합 유체의 유동 저항을 시뮬레이션으

로 계산하였다. 격자 볼츠만 법 (LBM)은 소수성 표면을 나타내기 위해 접선 운동량 조절 계수 (TMAC)와 함께 사용되었다.⁽³⁾ 채널의 형상은 10, 20, 30 및 40 μ m의 직경으로 설정되었고, 소수성 표면 채널에서의 유동 저항은 Hagen-Poiseuille 법칙을 수정하여 계산하였다. 또한 유체 - 구조 상호 작용에 잠입 경계 기법(IBM)을 적용하였고, 적혈구의 변형 해석을 위하여 부피, 표면적, 늘어남 및 구부러짐을 계산하였다. 상대 겹보기 점도는 적혈구 혼합 유체를 갖는 채널의 유동 저항을 계산하는 데 사용되었다. 채널 내 적혈구 혼합 유체의 상대 겹보기 점도, Cell free layer (CFL) 과 표면 특성 간의 관계를 시뮬레이션을 통하여 분석하였다.

* 연세대학교 기계공학부

2. 결과

2.1. 시뮬레이션 셋업

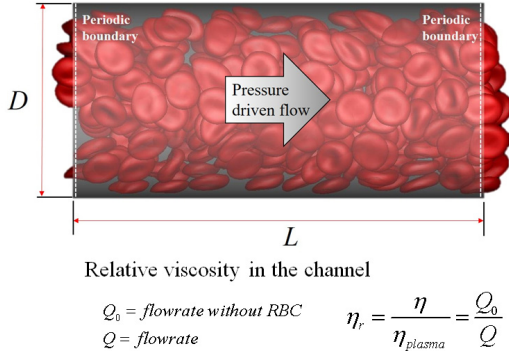


Fig. 1 Simulation overview.

시뮬레이션은 Fig. 1과 같이, 원통형 마이크로 채널에서 압력으로 발달되는 적혈구 혼합물의 유동을 해석하였다. 상대 점도는 같은 압력 조건에서 적혈구가 없을 때의 유량과, 적혈구가 있을 때의 유량의 비로 계산하였다.

2.2. 시뮬레이션 검증

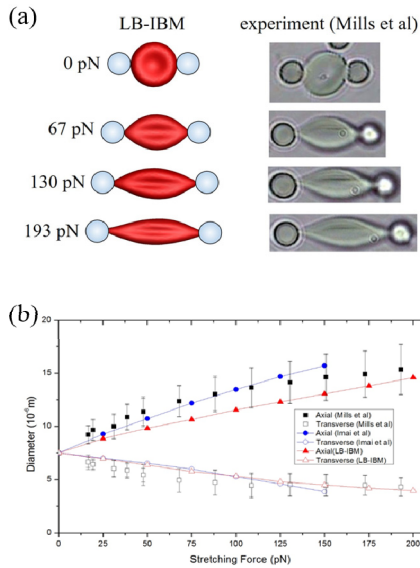


Fig. 2 (a) Images and graph of optical tweezer experiment and simulation results.⁽⁴⁾ (b) Comparison between experimental results and simulation results for the optical tweezer simulation. Simulation overview.

Figure 2에서 적혈구 변형 시뮬레이션 검증을 위하여 실험값과 시뮬레이션 값을 비교하였다.⁽⁴⁾ 광학 집게를 이용하여 적혈구를 당겼을 때 발생하는 변형과 시뮬레이션으로 광학 집게를 구축하여 도출한 결과 값과 비교하였다.

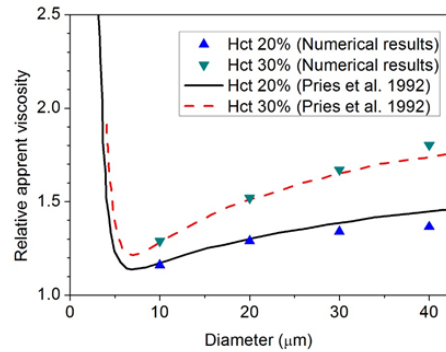


Fig. 3 The relative apparent viscosity as a function of diameter; simulation results are compared with experimental results obtained by Pries et al.⁽⁵⁾

Figure 3에서 적혈구 유동 시뮬레이션 검증을 위하여 실험값과 시뮬레이션 값을 비교하였다.⁽⁵⁾ 원통 형태의 마이크로관 내에 적혈구 혼합물을 흘려 주었을 때 측정되는 상대 점도와 시뮬레이션을 통해 도출한 값을 비교하여 주었다.

2.3. 친수성, 소수성 표면에서의 유체 저항

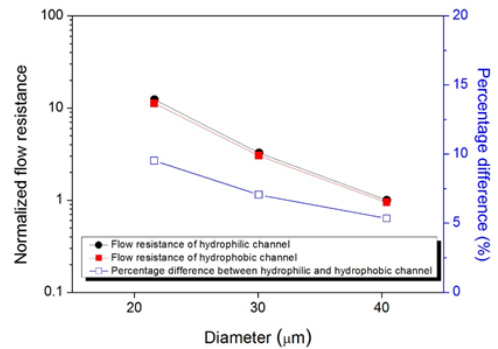


Fig. 4 Flow resistance in a channel as a function of channel diameter. Flow resistance is normalized by its value at $D = 40 \mu m$ in the hydrophobic channel.

Figure 4은 소수성 및 친수성 표면의 마이크로 채널에서 유체 저항을 계산하였다. 유체 저항은 채널의 직경이 $40\ \mu\text{m}$ 인 친수성 표면에서의 유체 저항으로 정규화 하였다. 채널 직경이 낮을 때 유체 저항이 높게 측정되었으며, 소수성 표면에서의 유체저항이 낮게 측정되었다. 소수성 표면에서의 유체저항과 친수성 표면에서 유체저항의 차이는 직경의 크기가 증가할수록 줄었다.

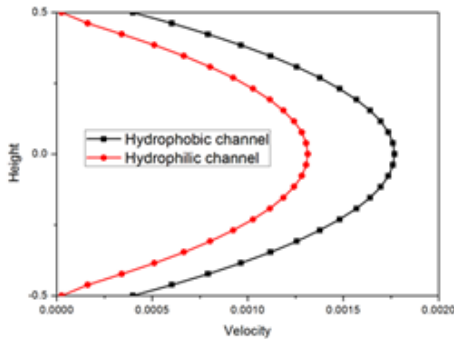


Fig. 5 Velocity profiles in hydrophobic surface and hydrophilic surface channel.

Figure 5에서 친수성 표면 관과, 소수성 표면 관에서의 속도 분포를 나타낸다. 소수성 표면에서는 slip 현상이 일어난다. 따라서 같은 압력하에 같은 관에서 친수성 표면 관에서의 유속보다 더 빠른 유속을 갖는다.

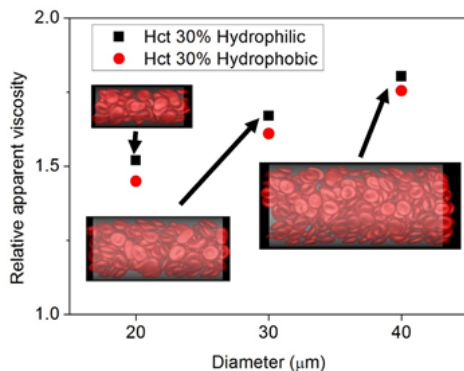


Fig. 6 Relative apparent viscosity of hematocrit (Hct) = 30% RBC flow in the hydrophobic and hydrophilic surface channels at $1.5 \cdot 10^4\ \text{Pa/m}$.

Figure 6에서는 관의 지름을 증가시키며 30%의 부피비를 갖는 적혈구 혼합유체의 상대점도를 보여준다. 모든 케이스에 대해서 관의 지름이 증가함에 따라 상대점도가 증가하였고, 친수성 표면의 관에서 더 높은 상대점도가 계산되었다.

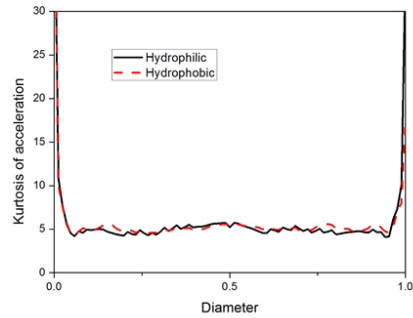


Fig. 7 Kurtosis of flow acceleration of hematocrit (Hct) = 30% RBC flow in the hydrophilic and hydrophobic channel at $D = 40$.

세포와 세포간 간섭의 분포를 측정하기 위하여 반지름 방향의 큐토시스를 측정하였다. 일반적인 유동에서 큐토시스는 3-4정도로 형성되며 이는 가우시안 분포를 따른다. 적혈구들이 밀집되어서 세포와 세포간 간섭을 보이는 적혈구 코어 부분에서는 큐토시스가 5정도로 측정이 되었으며 벽과 간섭이 있는 셀 프리 레이어 (cell free layer) 부분에서는 5이상으로 측정이 되었다. 소수성 표면과 친수성 표면을 갖는 채널 내에 같은 물성치를 갖는 적혈구가 흐르고 있기 때문에 세포간 간섭은 큰 차이를 보이지 않았다.

3. 결론

소수성 및 친수성 표면을 갖는 마이크로 채널에서 적혈구 혼합물의 유변학적 거동을 격자 볼츠만 기법과 잠입 경계 기법을 이용하여 해석하였다. 소수성 표면을 표현하기 위하여 접선 운동량 조절 계수를 이용하였다. 소수성 표면을 갖는 마이크로 채널에서 더 낮은 유체 저항을 갖았고, 관의 크기가 증가할수록 소수성 표면과 친수성 표면간의 유체 저항의 차이가 감소하였다. 소수성 표면에서 상대점도가 더 낮게 측정 되었다. 친수성 표면과 소수성 표면간의 상대점도 차이는 관의 크기가 증가 할수록 감소하였다. 친수성 표면과 소수성 표면 채널에서 세포간 간섭의 차이는 미비하였다.

후 기

이 논문은 2017년도 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No.2015R1A5A1037668)

참고 문헌

- (1) Abkarian, M., & Viallat, A., 2008, Vesicles and red blood cells in shear flow. *Soft Matter*, 4(4), 653-657.
- (2) Tretheway, D. C., & Meinhart, C. D., 2002, Apparent fluid slip at hydrophobic microchannel walls. *Physics of fluids*, 14(3), L9-L12.
- (3) Karniadakis, G. E. M., Beskok, A., & Gad-el-Hak, M., 2002, *Micro flows: fundamentals and simulation*. *Applied Mechanics Reviews*, 55, B76.
- (4) Mills, J. P., et al, 2004,. Nonlinear elastic and viscoelastic deformation of the human red blood cell with optical tweezers, *MCB-TECH SCIENCE PRESS- 1*: 169-180.
- (5) Pries, A. R., Neuhaus, D., & Gaehtgens, P., 1992, Blood viscosity in tube flow: dependence on diameter and hematocrit. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 263(6), H1770-H1778.