

혈액모사유체의 미세협착채널 내 맥동유동 시뮬레이션

홍현지* · 염은섭*

Numerical simulation of pulsatile flow in stenosed microchannel for blood analogue fluid

Hyeonji Hong*, Eunseop Yeom*

Abstract : In blood flow in the vessels, the viscosity is important in rheology, which is variable characteristics of non-Newtonian fluid. In this study, the pulsatile flows with the period of 10 s were simulated in stenosed microchannels with 60 % severity in diameter of 500 μm . As the Newtonian fluid, the water at room temperature was used. For non-Newtonian fluids, two different solutions of xanthan gum with different concentrations were made. After measuring viscosity of the samples, fitting parameters of Carreau-Yasuda model were determined to simulate the non-Newtonian behavior. A highly oscillating wall shear stress (WSS) during the pulsatile flow were accentuated by the non-Newtonian behavior under the same wall shear rate condition compared with the Newtonian fluid.

1. 서 론

혈액의 점도는 맥동유동 및 복잡한 혈관의 구조에 따라 전단희박유체의 특성을 가지며, 이는 혈유변학적 분석 측면에서 중요한 요소로 여겨진다. 고점도의 혈액은 혈관 내 흐름 저항에 영향을 미치며, 심혈관 질환과 관련된 여러 생물학적 요소와 관련되어 있다.(1) 협착은 비정상적으로 혈관이 좁아지는 순환기 질환의 대표적 증상 중 하나이다. 이러한 협착이 형성된 혈관에 혈액이 흐를 때, 혈유역학적 특성들은 변화하게 된다.(2) 특히, 벽면전단응력은 플라크의 파열이나 막의 강도에 영향을 미치게 되며, 따라서 맥동유동에 의한 응력의 반복적 변화 양상은 혈관의 구조와 연관이 있다고 한다.(3-6) 본 연구에서는 마이크로 입자영상유속 측정법을 이용하여 PDMS 채널 내 비뉴턴유체의 유동 특성을 관측하고, 동일 조건 하에서 시뮬레이션을 시행하여 비교분석 하였습니다.

2. 본 론

2.1. 실험 구성 및 방법

500 μm 의 광섬유와 패트리 접시를 몰드로 하여 PDMS 협착채널을 제작하였다. 85 $^{\circ}\text{C}$ 에서 경화 후 몰드에서 분리하고, 제작된 채널은 60 %의 중간 정도 협착도를 갖는다. 10배율의 현미경 대물렌즈를 통하여 채널 내부의 유동을 관측할 수 있으며, 고속 카메라를 이용하여 400 fps(초당 프레임 수)의 속도로 연속된 이미지를 촬영하였다. 샘플 유체는 프로그램 가능한 주사기 펌프로 주입되었다. 비뉴턴 유체는 잔탄검 혼합 액체를 사용하여 전단희박유체의 특성을 나타내었다. 물과 글리세롤은 각각 79.1%, 20.9%의 부피비로 혼합되었으며, 잔탄검은 0.21 g/L 와 0.42 g/L 농도의 두 가지 샘플을 제조하였다.

2.2. 수치 시뮬레이션

CFX 16.1 (ANSYS, Inc., USA)를 사용하여 실험에 사용된 조건과 동일하게 시뮬레이션을 수행하였다. 실험에서 측정된 채널 입구 유량 데이터를 FFT 분석을 통하여 수식적으로 표현할 수 있었으며, 이를 입구 조건으로 적용하였다. 뉴턴유체와 비뉴턴유체 물성치 역시 실험에서 얻어진 데이터를 기반으로 값이 설정되었

* 부산대학교 기계공학부

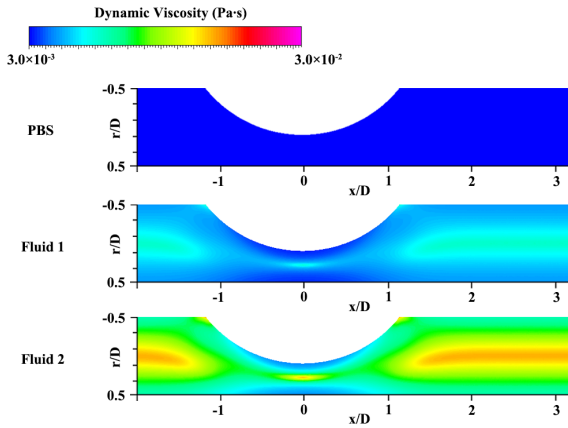


Fig. 1 Viscosity distributions for Newtonian and non-Newtonian fluids depending on the positions of stenotic microchannel at systolic phase.

다. 비뉴턴유체의 점도를 나타낸 곡선은 Carreau-Yasuda 모델을 사용하였다.⁽⁷⁾

3. 결론

협착이 형성된 채널 내 뉴턴유체 및 비뉴턴유체의 맥동유동 특성에 대하여 살펴보았다. Fig. 1은 최대 맥동에서 샘플에 따른 점도 분포의 변화를 보여주고 있다. 비뉴턴유체의 높은 점도는 뉴턴유체에 비해 관의 위치에 따른 속도 분포의 모양을 더욱 뭉툭하게 만들어 준다. 구체적으로는, 동일한 위상에서도 채널의 위치에 따라 유체의 점도가 달라진다. 이는 전단 변형률에 따라 점도가 달라지는 전단희박유체의 특성을 반영한 것이며 이런 경향이 더욱 심해진 샘플 2의 경우 벽면전단응력의 크기와 변동 폭이 더욱 심화됨을 확인할 수 있었다. 이와 같은 고점도의 유체는 협착 구조를 지나면서 벽면전단응력의 변동에 기여하며, 이는 플라크의 불안정성이나 파열 등 협착 병변과도 밀접한 연관이 있으며 좁은 혈관에서의 메커니즘을 이해하는데 도움을 줄 것이라 생각된다.

후 기

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 것임 (NRF-2016R 1C1B2014255).

참고 문헌

- (1) D. M. Toraldo, et al, 2013, "Obstructive Sleep Apnea Syndrome: Blood Viscosity, Blood Coagulation Abnormalities, and Early Atherosclerosis," Lung, Vol. 191, No. 1, pp. 1-7.
- (2) Kwak, B. R., et al, 2014, "Biomechanical Factors in Atherosclerosis: Mechanisms and Clinical Implications," Eur Heart J, Vol. 35, No. 43, pp. 3013-3020.
- (3) Gijssen, F., et al, 2008, "Strain Distribution over Plaques in Human Coronary Arteries Relates to Shear Stress," Am J Physiol Heart Circ Physiol, Vol. 295, No. 4, pp. H1608-H1614.
- (4) Tronc, F., et al, 2000, "Role of Matrix Metalloproteinases in Blood Flow - Induced Arterial Enlargement: Interaction with No," Arteriosclerosis, thrombosis, and vascular biology, Vol. 20, No. 12, pp. e120-e126.
- (5) Cheng, C., et al, 2006, "Atherosclerotic Lesion Size and Vulnerability Are Determined by Patterns of Fluid Shear Stress," Circulation, Vol. 113, No. 23, pp. 2744-2753.
- (6) Steinman, D. A., 2000, "Simulated Pathline Visualization of Computed Periodic Blood Flow Patterns," Journal of Biomechanics, Vol. 33, No. 5, pp. 623-628.
- (7) Pratumwal, Y., et al, 2017, "Whole Blood Viscosity Modeling Using Power Law, Casson, and Carreau Yasuda Models Integrated with Image Scanning U-Tube Viscometer Technique," Songklanakarin Journal of Science & Technology, Vol. 39, No. 5, pp. 625-531.