

비-뉴턴 유체의 점성 특성이 협착 부위 유동특성에 미치는 영향

허형규* · 이상준*

Effect of non-Newtonian viscosity on the fluid-dynamic characteristics in artificial stenotic vessels

Hyung Kyu Huh*, Sang Joon Lee*

Abstract : Although blood is known to have shear-thinning and viscoelastic properties, the effects of such hemorheological properties on the hemodynamic characteristics under various vascular environments are not fully understood yet. In this study, three refractive index-matched blood-analogue fluids with different viscosities, one Newtonian and two non-Newtonian analogues, are tested. They correspond to healthy blood with 45% hematocrit (i.e., normal non-Newtonian) and obese blood with higher viscosity (i.e., abnormal non-Newtonian). Particle image velocimetry (PIV) technique and streakline flow visualization method employed to obtain their velocity field information. are used in current experiment. The centerline jet flow patterns, the length of the recirculation zone, the transitional Reynolds number, and the maximum wall shear stresses are quantitatively evaluated. The shear-thinning effect on the hemodynamic characteristics is not so significant at Reynolds numbers higher than 1000.

1. 서 론

심혈관계 질환은 선진국에서 사망률 1위를 차지하고 있다. 미국심장협회의 보고서에 따르면 7천만 이상의 미국인이 이 질환으로 고통 받고 있다고 한다.⁽¹⁾ 죽상동맥경화증은 심근경색, 뇌졸중, 말초혈관 질환과 같은 심혈관계 질환의 핵심적인 요소로 알려져 있으며, 그 발생원인, 진행과정 및 예후에 관한 연구들이 다방면에서 이루어지고 있다.⁽²⁾

동맥을 따라 흐르는 혈류는 혈관 내벽에 위치한 내피세포에 전단응력을 가하게 되어 내피세포의 형태와 기능발현에 영향을 미치게 되며, 혈관 내 죽상동맥경화증의 발현과도 상관관계가 있다고 밝혀졌다. 혈류역학과 죽상동맥경화증의 상관관계를 보다 정량적으로 이해하기 위해서는 협착된 혈관 후류에서 발생하는 혈류역학적인 특성에 관한 연구가 필요하다. 혈액은 대표적인 비-뉴턴(non-Newtonian) 유체로써, 전단응력이 커짐에 따라 점도가 낮아지는 전단 유동화(shear thinning) 유체임에도 불구하고 기존의 연구에

서는 이러한 혈류 역학적 특성을 크게 반영하지 못하였다.

이에 따라 본 연구에서는 당뇨 등과 같은 질병에 걸렸을 때 증가하는 혈액의 점도를 모사한 작동유체를 제작하여 정상과 당뇨 환자의 협착된 혈관 주위 혈액 흐름의 혈류역학적 유동특성을 연구하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 비-뉴턴 혈액을 모사한 작동유체

정상(NNN) 및 당뇨(ANN) 환자 혈액의 비-뉴턴 특성을 모사하기 위하여 3 차중류수, 글리세롤, 잔탄검 고분자를 서로 다른 농도로 섞어주었다. 그리고 비교검증을 위하여 점도가 2.9 cP로 고정된 뉴턴유체(NN)를 제작하여 실험을 수행하였다. 이 때 PIV 실험을 정확하게 수행하기 위하여 작동유체에 요오드화나트륨을 넣어 협착 모델과 굴절률을 맞춰주었다.(그림.1a) 전단응력 변화에 따른 비-뉴턴 유체의 점도 변화는 Brookfield 회전 점도계를 이용하여 측정하였으며, 비

교를 위해 혈액의 점도변화를 도식화 하였다.(그림.1b)

2.1. 유체의 특성에 따른 협착 주위의 유동장 변화

그림.2는 3가지 다른 초기 유량 조건 ($a=0.2$, $b=0.5$ 그리고 $c=1.0$ L/min)에서 나타나는 속도장 결과로, 초기조건에 따라서 비-뉴턴 특성이 속도장에 영향을 미치는 것으로 확인하였다. 초기유량이 작은 경우, 협착 부위 후방에서 유체는 층류를 이룬다. 이 경우에서는 당뇨혈액을 모사한 ANN이 혈관 내부 중심속도를 가장 크게 감소시킨다. 이것은 낮은 전단응력에 기인하여 작동유체의 점도가 높아져 보다 많은 양의 에너지가 소산되기 때문이다. 이러한 현상은 유량이 증가할수록 감소하였다. 1.0L/min의 경우에는 비-뉴턴 특성에 따른 속도장 변화가 확인되지 않았다. 유량이 0.2L/min 인 경우, 협착 구간 후방에서 발생하는 유체의 재순환영역의 크기가 뉴턴유체와 비교하였을 때 ANN의 경우 3.67배, NNN의 경우 1.72배 감소한다는 사실을 확인 하였다. 이것은 재순환영역 내부 공간에서 전단응력이 감소하고 점도의 국소적인 증가가 일어나기 때문으로 예상된다.

3. 결론

혈액의 비-뉴턴 유체특성을 모사한 인공혈액을 이용하여 협착 부위 주위 유동특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 유량이 낮을수록 유체의 비-뉴턴 유동 특성이 강해지게 된다. 이것은 낮은 전단응력에 기인하여 점도가 증가하기 때문이다. 실제 혈액에서도 적혈구 응집에 기인하여 점도가 증가함을 고려해야 하고 협착 부위에서 발생하는 유속 감소를 고려해야한다.

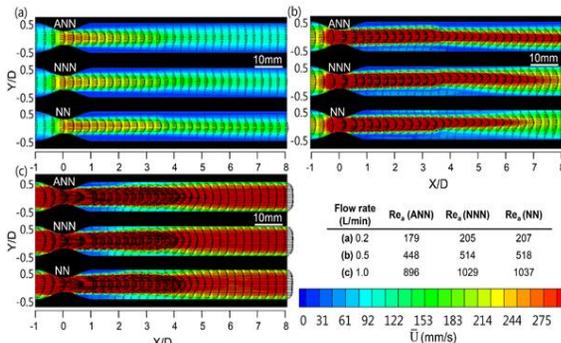


Fig. 1 (a) Variations in the refractive indices. (b) Variations in the viscosities of the blood analogues

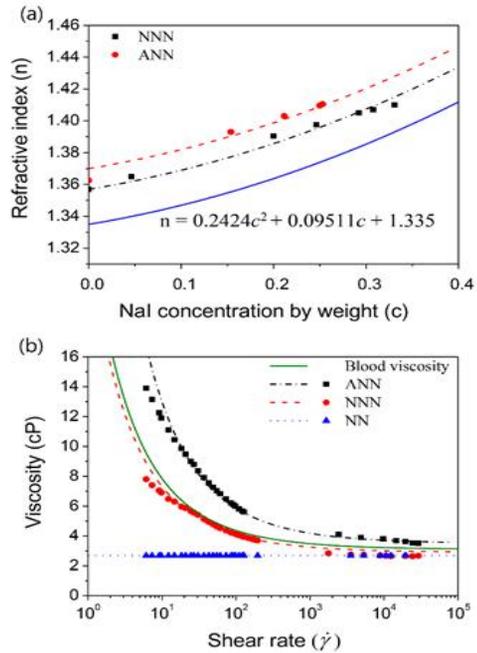


Fig. 2 Comparison of the mean stream-wise velocity fields of the blood analogues according to three flow rates (a=0.2, b=0.5 and c=1.0 L/min)

- 2) 재순환영역의 크기는 비-뉴턴 유동 특성이 강해질수록 줄어드는 경향이 나타난다. 이것은 당뇨 등과 같은 순환기 질환에 걸린 환자의 협착 부위 후류에서 나타날 수 있는 현상이다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2008-0061991).

참고 문헌

- (1) Thom T et al. (2006) Heart disease and stroke statistics - 2006 update - A report from the American Heart Association Statistics Committee and Stroke Statistics Subcommittee Circulation 113:E85-E151
- (2) Fabricant CG, Fabricant J (1999) Atherosclerosis induced by infection with Marek's disease herpesvirus in chickens Am Heart J 138:S465-S468 .