

초음파 펄스 도플러와 4D MRI를 이용한 혈류장 측정

민수홍* · 이청아** · 이주호* · 안돈관** · 송시문** · 팽동국*

Measurement of Blood Flow Field Using Ultrasonic Pulsed Doppler and 4D MRI

Soohong Min*, Cheongah Lee*, Jooho Lee*, Don-Gwan An**,
Simon Song**, Dong-Guk Paeng*

Abstract : The blood flow field in the carotid artery branch is important for understanding the development and progression of the cerebrovascular diseases. The purpose of this study is to measure flow fields using ultrasonic pulsed Doppler and 4D MRI. We constructed an *in vitro* circulation system using a human-based carotid arterial phantom and a pulsatile pump. We confirmed that the radial flow fields measured by ultrasonic pulsed Doppler and 4D MRI were similar at peak systole and when two peak speeds were similar in time, when the viscosity of fluid was 3.86 cp. When the porcine blood with a viscosity of 4.86 cP was replaced, blood flow was reduced about by half.

1. 서 론

뇌혈관 질환이 발생하는 원인은 다양하다. 그 중 본 논문에서는 혈류역학적 원인에 초점을 두고 접근하려 한다. 혈관 질환의 주된 원인인 협착은 보통 심장에서 뇌로 혈액이 전달되는 경동맥의 분지 지역에서 발생한다⁽¹⁾. 총경동맥에서 내경동맥과 외경동맥으로 혈액이 전달될 때 형태학적으로 나뉘는 부분에서 높은 혈관벽 진단 능력이 가해진다. 이 혈관벽 진단 능력은 혈류속도와 밀접한 연관이 있다. 따라서 협착의 원인과 진행 기작을 이해하기 위해서는 혈관 내부의 2차원 혹은 3차원적 혈류장을 획득할 필요가 있다.

현재 인체 혈관 내의 혈류속도를 측정 할 수 있는 대표적인 방법으로 초음파 도플러 모드가 있다. 비 침습적이며 실시간 혈류속도 측정이 가능하다는 장점으로 응급시 혹은 스크리닝 검사로 많이 사용되고 있다. 그러나 정확도가 프로브의 기울기에 따라 다르고 관찰자 마다 차이가 있다는 단점이 있다. 또 다른 방법으로 MRI 기기를 이용한 4D MRI 기술이 있다⁽²⁾. 4D MRI는 다른 측정법에 비해 비교적 정확하게 혈류장을 측정할 수 있다는 장점을 가지고 있지만, 높은 공간,

시간 해상도를 달성하기 위해서는 비교적 오랜 측정시간이 필요하다는 점과 측정 지역의 최대 속도를 어느 정도 예상해야 한다는 점에 있어 한계가 있다. 본 논문에서는 생체의 실험 시스템에서 도플러 모드와 4D MRI를 이용하여 총경동맥의 2차원 혈류장을 측정하여 비교하였다.

2. 본 론

2.1. 실험 및 방법

혈류장을 측정하기 위해 초음파 영상시스템(GE Voluson e, GE Healthcare, Austria)의 초음파 펄스 도플러 모드를 사용하였으며 혈관 중심지역에서 측정하는 주기동안의 혈류속도 프로파일을 그림 1에서 볼 수 있다. 윈도우를 조절하여 혈관 내 각 위치에서의 혈류속도를 측정하였고, 여러 박동 주기동안 평균된 혈류속도를 취합하고 최대 심장 수축기일 때 반경방향으로 혈류장을 가시화 하였다. 펌프는 인체의 심장을 모사한 박동주기 펌프(Model 55-3305, Harvard Apparatus Corp, Holliston, MA, USA)를 사용하였다. 유액은 모사액과 돼지혈액을 사용하였다. 모사액은 물과 글리세린을 3:2 비율로 섞어 점도를 맞추어 주었고 감자 전

* 제주대학교, 해양시스템공학과

** 한양대학교, 융합기계공학과

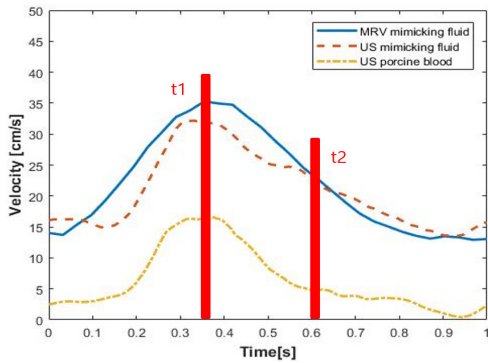


그림 1. 경동맥 팬텀의 혈관 중심 지역에서 한 박동주기동안 측정된 혈류속도 프로파일. t1과 t2 시점에서 혈관의 직경방향으로 혈류속도를 그림2에서 비교함.

분을 산란체로 넣어주었다. 점도계(DV-II Pro, Brookfield, Canada)를 사용하여 점도를 측정하였으며 모사액의 점도는 3.86 cP 였고, 돼지혈액의 점도는 4.87 cP 였다. 본 연구의 생체의 실험 시스템의 평균 유량은 모사액 일 때 약 250 mL/min으로 설정하였고, 같은 펌프 파워에서 돼지혈액일 때 모사액보다 높은 점도로 인하여 유량이 줄어들어 120 mL/min 였다. 4.7 Tesla MRI 기기(BioSpec 47/40, Bruker, Germany)를 이용하여 모사액을 유액으로 혈류장을 측정하였으며 이때 펌프(GJ-N21.JF1S.SE, Micropump, USA)를 사용하여 심장박동을 모사하였다. CT영상으로 인체 경동맥의 형상을 스캔하여 실제 크기와 같게 경동맥 팬텀을 제작하였다. t1을 최대 심장 수축기로 설정하였고, t2를 수축기에서 이완기사이에 구간중 두 시스템의 혈류속도가 유사한 시점으로 설정하였다. t1과 t2 일 때 초음파로 측정된 혈류장과 4D MRI로 측정된 혈류장을 비교 하였다.

2.2. 결과

총경동맥에서 점도 3.86 cP의 모사액을 유액으로 하여 4D MRI를 측정된 결과 t1 일 때 혈류속도는 최대 약 35 cm/s 정도였고, t2 일 때는 약 20 cm/s로 줄어들었다. t2에서도 유사하나 보다 두 모드에서 포물선 형태로 측정되었다. 초음파 도플러 모드로 측정된 모사액의 혈류속도는 4D MRI에서 측정된 혈류장의 형태와 t1과 t2 모두에서 유사하나 4D MRI에서 측정된 혈류가 보다 포물선 형태로 측정됨을 확인 할 수 있다 (그림 2). 돼지 혈액의 점도가 모사액 보다 높아 돼지 혈액을 유액으로 사용했을 때 같은 박동펌프 세팅에서

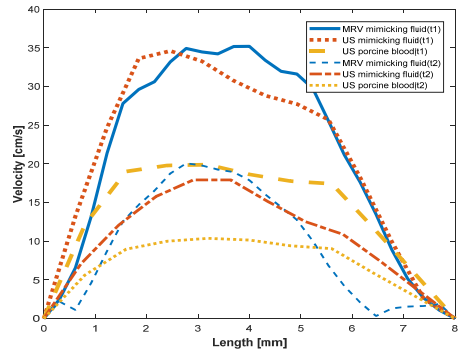


그림 2. 모사액, 돼지혈액에서 4D MRI와 초음파 도플러 모드로 측정된 t1(최대 심장 수축기), t2 일 때 총경동맥의 직경방향의 혈류속도. 초음파 펄스 도플러의 속도는 정상상태에서 측정하여 이른값과 비교하여 보정한 속도.

혈류가 대략 절반으로 줄어들었다. 초음파 펄스 도플러와 4D MRI로 측정된 혈류장으로 계산한 유량과 실험에서 측정된 유량과 거의 동일했으며, 혈류장 측정이 잘 되었음을 확인할 수 있었다.

3. 결론

초음파 도플러와 4D MRI를 이용하여 경동맥 팬텀 내의 혈류장을 측정 하였다. 같은 시스템에서 초음파 펄스 도플러와 4D MRI로 측정된 혈류장이 유사하게 나왔고, 돼지혈액에서는 점도의 증가로 인하여 동일한 시스템일 때 평균 혈류량이 줄어들었다.

후 기

이 논문은 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었다 (NRF-2018R1A2B2007997).

참고 문헌

- (1) CHIU, Jeng-Jiann; CHIEN, Shu. Effects of disturbed flow on vascular endothelium: pathophysiological basis and clinical perspectives. *Physiological reviews*, 2011, 91.1: 327-387..
- (2) LEE, Jeesoo, et al. Validation of magnetic resonance velocimetry for mean velocity measurements of turbulent flows in a circular pipe. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, 31.3: 1275-1282.