

# Phase-contrast MRI를 활용한 대동맥 맥동유동의 in vitro 가시화

고승빈\* · 송시문\*

## In vitro visualization of aortic pulsatile flow using phase-contrast MRI

Seungbin Ko\*, Simon Song\*

**Abstract** : Phase-contrast MRI (PC-MRI) is a versatile tool for measuring massive 3-dimensional (3D), 3-component (3C) velocity data in a short time. Recently, a number of researches of visualizing time-resolved 3D 3C velocity data (4D flow data) of blood flow have been reported in cardiovascular field to relate flow characteristics and cardiovascular disease. In this research, we fabricated real-size flexible aorta phantom of an healthy subject and measured 4D pulsatile flow data. A 3D aorta model was made from chest MRI image of healthy subject using 3D printer and the flexible phantom was fabricated by using the 3D aorta model as a mold and room temperature vulcanization (RTV) silicone rubber as phantom material. After the phantom fabrication, a 4D pulsatile flow data inside the phantom was measured by PC-MRI successfully.

### 1. 서 론

MRI를 이용하여 유동을 측정하는 개념은 주요 장기에 대한 영상을 기존보다 더 선명하게 얻기 위해 혈류에 의한 주변 조직 신호의 저하를 억제시키는 데서 출발하였다.<sup>(1)</sup> 이를 역이용하여 인체 내부의 정지된 조직이 아닌 움직이는 혈류를 가시화하고 혈류속도를 정량적으로 측정할 수 있는 Time-Of-Flight, PC-MRI 기법 등이 개발되었다.<sup>(2-3)</sup>

최근에는 PC-MRI를 이용하여 심혈관 내부의 혈류 유동을 정량적으로 측정하고 벽면전단응력, 진동전단지수와 같은 유체역학적 지표와 심혈관질환 사이의 연관성을 찾으려는 연구가 해외 연구진들 위주로 활발히 진행되고 있다.<sup>(4-5)</sup>

본 연구에서는 in vivo 맥동혈류측정에 앞서 in vitro 측정 protocol을 정립하기 위해 정상인의 대동맥을 대상으로 실제 크기의 대동맥 phantom을 제작하고 PC-MRI를 이용하여 phantom 내부 맥동유동에 대한 4D 유동 정보를 측정하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1. 대동맥 phantom 제작

대동맥 phantom을 제작하기 위해, 먼저 대동맥에 이상이 없는 정상인의 가슴 부분 MRI 영상과 3D 프린터를 이용하여 mold로 사용할 3차원 대동맥 모델을 제작하였고, 제작된 mold와 RTV 실리콘 고무를 이용하여 Fig. 1과 같은 실제 크기의 flexible 대동맥 phantom을 제작하였다. 화살표로 표시된 입구를 제외한 나머지 부분(오른쪽 2개, 왼쪽 1개)은 모두 유동이 나가는 출구이다.

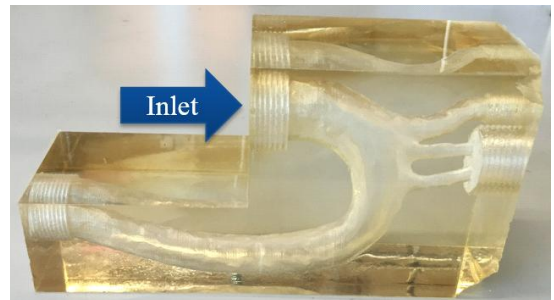


Fig. 1 Fabricated real-size flexible aorta phantom

\* 한양대학교 융합기계공학과

Table 1 PC-MRI setting

Variable	Value
FOV [mm]	192 x 108 x 64 (FH, RL, AP)
Spatial resolution [mm]	1 x 1 x 1 (FH, RL, AP)
Temporal resolution [ms]	100
Encoding velocity [cm/s]	120 x 120 x 120 (FH, RL, AP)
Scan time	1 hour

### 2.1. In vitro 맥동유동 측정

Table 1은 in vitro 맥동유동 측정에 사용된 PC-MRI 세팅이다. 맥동유동을 발생시키기 위해 상용 3상 펌프와 펌프 제어용 인터버를 사용하였으며 작동 유체로 100 mM의 황산구리 수용액을 사용하였다.

측정된 4D 맥동유동 속도데이터는 펌프가 가동되지 않을 때 측정된 속도데이터와 주변 속도벡터와의 조화성을 검증하는 consistency 필터를 이용하여 noise를 제거하는 과정을 거쳤다.

Fig. 2는 PC-MRI를 이용하여 측정된 입구와 출구에서의 맥동유량 그래프이다. Prospective ECG-gating을 통해 100 ms 간격의 9개 속도장을 측정하였으며 그래프에는 각 데이터 포인트를 100 ms의 절반인 50 ms에서의 대푯값으로 생각하여 나타냈다. 측정 결과, 실제 의도했던 최고 유량인 5.2 LPM보다 낮은 최고 유량을 나타냈으며 이는 향후 보완해야할 부분이라 판단된다.

Fig. 3은 유동이 순방향으로 최대치인 0.35초에서의 유선을 나타내는 그림이다. 입구에서 출발한 유선의 일부가 경동맥과 쇄골하동맥으로 이어지고 나머지는 대동맥궁을 지나 하행대동맥으로 향하는 모습이 잘 나타나 있다.

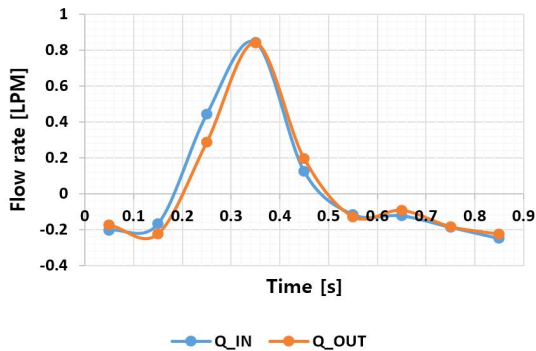


Fig. 2 Measured flow rate of inlet and outlet by PC-MRI

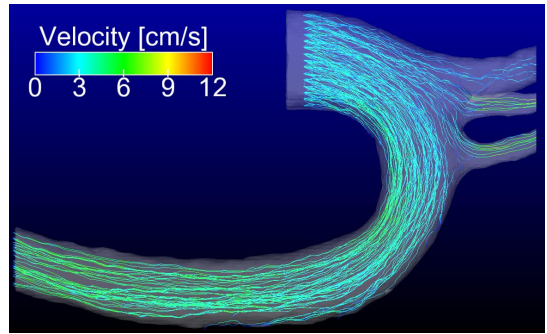


Fig. 3 Streamline at T=0.35 s (Maximum flow rate)

### 3. 결론

본 연구에서는 정상 대동맥을 대상으로 3D 프린터와 RTV 실리콘 고무를 이용하여 실제 크기의 flexible 대동맥 phantom을 제작하고, PC-MRI를 이용하여 제작한 phantom 내부의 맥동유동을 100 ms의 시간분해능으로 측정하였다. 입구/출구 유량 검증과 유선 확인을 통해 4D 맥동유동 데이터 측정이 성공적으로 진행된 것을 확인하였지만 최고 유량이 목표값 보다 낮게 측정된 것은 향후 추가 실험 시 보완해야할 사항이라 판단된다.

### 참고 문헌

- (1) D. G. Nishimura et. al., 1986, "Magnetic Resonance Angiography," IEEE T. Med. Imaging, pp. 140-151.
- (2) C. L. Dumoulin and H. R. Hart, 1986, "Magenetic resonance angiography," Radiology, pp. 717-720.
- (3) J H. Gao et. al., 1988, "Nuclear magnetic resonance signal from flowing nuclei in rapid imaging using gradient echoes," Med. Phys., pp. 809-814.
- (4) A. Harloff et. al., 2010, "In vivo assessment of wall shear stress in the atherosclerotic aorta using flow0sensitive 4D MRI," Magn. Reson. Med., pp. 1529-1536.
- (5) E. T. Biegging et. al., 2011, "In vivo three-dimensional MR wall shear stress estimation in ascending aortic dilatation," Magn. Reson. Imaging, pp. 589-597.