혈류 시뮬레이터를 이용한 초음파 혈류계 교정에 대한 연구
Calibration of a Ultrasonic Blood Flow Meter using a Blood Flow Simulator

*전세종 [1], 윤병로 [1], 이광복 [1]
*S. Chun(sjchun@kriss.re.kr)[1], B. R. Yoon [1] , K. B. Lee[1]
[1] 한국표준과학연구원 기반표준본부 유동음향센터

Key words : blood flow, blood flow simulator, ultrasonic blood flow meter

1. 서론

혈류계는 인체의 혈류량을 측정하는 유량계로서 뇌혈류, 관상동맥 혈류, 모세혈관 혈류를 측정할 수 있고 심혈관계 외과 수술의 성공 여부를 판단하거나 질병의 유무를 진단하는데 사용된다. 혈류계에는 도달시간차이(transit time) 방식의 초음파 혈류계와 초음파 도플러(Doppler) 혈류계, 다이오드 레이저 도플러 혈류계, 전기 임피던스 혈류계(ICG, Impedance Cardiography), 체적량 혈류계(Plethysmography), 자기장 혈류계 등의 여러 종류가 있다. 1999 년 이후 한국산업기술시험원의 의료기기 정보기술지원센터에 등록된 혈류계에 대한 국내 현황을 보면 약 55 개의 혈류계 품목 중에 대부분의 품목이 초음파 도플러 혈류계이다 [1].

혈류계의 성능을 시험하기 위해서는 혈류 측정 범위와 정확도를 확인할 수 있는 시설이 있어야 한다. 대부분의 혈류계들은 0 ~ 16 L/min 의 측정 범위에서 ±10 %의 정확도로 혈류를 측정한다. 인체 내에서는 0 ~ 5 L/min 범위에서 혈액이 순환된다 [2]. 따라서 0 ~ 5 L/min 의 혈류 측정 범위에서 혈류계를 시험할 수 있어야 한다 [3].

본 연구에서는 동물의 임상 실험에 사용되는 혈류 시뮬레이터와 정량펌프를 활용하여 휴대용 초음파 혈류계의 성능을 시험하였다. 혈류계를 교정하기 위해서는 정량 펌프를 사용하여 일정한 유량을 발생시켰고 기준 혈류계와 초음파 혈류계의 측정값을 비교하였다. 혈류계를 시험하기 위해서는 혈류 시뮬레이터를 사용하였고 맥동 주기, 맥동 지수(pulsatility index), 저항 파라미터(resistance parameter) 등의 시험 항목을 참고하였다.

2. 연구 방법

혈류 시뮬레이터와 정량펌프를 활용한 혈류계 시험 장치를 Fig. 1 에 나타냈다. 혈액 펌프(blood pump)는 제어 콘솔(Hybrid BiVAD, 고려대학교 인공장기연구센터,KAOC)에 의해 맥동 주기와 진폭이 조절되었다. 혈액 펌프와 정량펌프(Manostat Preston Varistaltic Pump, Thermo Scientific Inc.)는 병렬로 연결되어 있었고 혈류계를 교정할 때에는 정량 펌프를, 맥동 유동에 의한 성능을 시험할 때에는 혈액 펌프를 사용하였다. 혈액 펌프와 정량 펌프의 후류에는 기준 혈류계(reference blood flow meter)를 설치하였고 실리콘 튜브로 연결하였다. 작동 유체로는 점도가 약 3.32 cSt 인 글리세롤 수용액을 사용하였다. 기준 혈류계로는 전자기 유량계(Promag 53H08, Endress+Hauser Inc.)를 사용하였고 확장 불확도는 약 0.2 % 이내였다. 시험부에는 지름 12.7mm 인 배관을 설치하였다. 시험용 혈류계는 휴대용 초음파 도플러 혈류계(ES-100V3, Hadeco Co. Ltd.)였고 도플러 신호를 측정하기 위해 배관 방향에 대해 60° 기울여 설치하였다. 시험부 후류에는 압력 챔버와 저장소(reservoir)를 설치하였다. 압력 챔버에는 혈압계용 수동 펌프와 압력계를 설치하였고 시험 장치를 작동시키는 동안 압력이 약 90 ~ 110 mmHg 를 유지하도록 조절하였다. 압력 챔버와 저장소 사이에는 밸브를 설치하여 전체적으로 유량이 조절되도록 하였다.

초음파 도플러 혈류계를 교정할 때에는 기존 액체 유량계를 교정할 때와 같은 방법으로 교정하였다. 0 ~ 5 L/min 의 유량 범위에서 5 개 측정 지점을 정의하였고 각 측정 지점에서 3 회 반복 측정하였다. 초음파 도플러 혈류계를 시험할 때에는 다음과 같이 맥동 지수를 정의하여 계산하였다.

$$PI = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{\overline{U}} \tag{1}$$

단, PI 는 맥동 지수, $U_{\max}$ 는 혈류 파형의 최대값, $U_{\min}$ 은 혈류 파형의 최소값, $\overline{U}$ 는 혈류 파형의 평균값이다. 맥동 주기는 초음파 도플러 혈류계에서 측정된 값을 기록하였고, 기준 혈류계의 유량에 따른 변화를 관찰하였다.

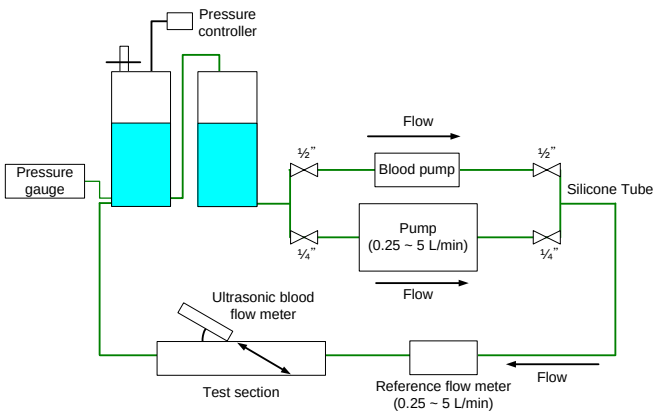

Fig. 1 Experimental setup for calibrating blood flow meters

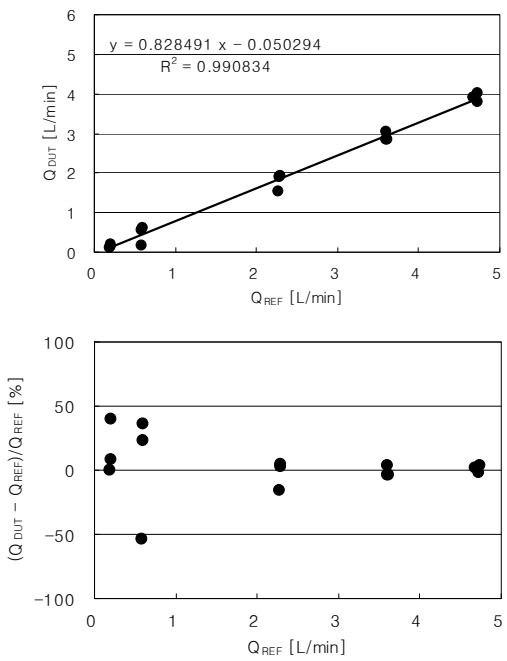

Fig. 2 Calibration of ultrasonic blood flow meter

3. 연구 결과

초음파 도플러 혈류계를 교정한 결과를 나타내면 Fig. 2 와 같다. 교정 계수를 나타내면 다음과 같다.

$$Q_{DUT} = 0.828491 Q_{REF} - 0.050294 \qquad (2)$$

단, Q_{REF} 는 기준 혈류계, Q_{DUT} 는 초음파 도플러 혈류계에서 측정되는 혈류량이다. 기준 혈류계와 초음파 도플러 혈류계의 상대 편차를 나타내면 Fig. 2 에 나타낸 것과 같다. 낮은 유량에서는 상대 편차가 ±50 % 정도였고 유량이 증가할수록 줄어들었다. 높은 유량에서 상대 편차는 ±5 % 정도였다. 그 이유는 본 연구에서 사용한 정량 펌프가 낮은 유량에서는 맥동을 발생시키기 때문이다. 따라서 낮은 유량에서 맥동을 줄이면 상대 편차가 줄어들 것으로 예상된다. 단, 본 연구에서 사용한 초음파 도플러 혈류계는 ±10 % 이내의 정확도를 나타내는 것으로 알려져 있으므로 초음파 도플러 혈류계의 정확도도 고려되어야 한다.

식 (1)에서 정의한 맥동 지수를 측정한 결과를 Fig. 3 에 나타내었다. 0 ~ 4 L/min 범위의 평균 유량에서 맥동 지수는 1.6 ~ 3.2 범위에서 분포하였고 기준 혈류계가 초음파 도플러 혈류계보다 높은 값을 나타냈다.

4. 결론

본 연구에서는 초음파 도플러 혈류계를 교정 또는 시험하기 위해 혈액 펌프와 정량 펌프를 활용하여 혈류계 시험 장치를 만들었다. 정량 펌프를 사용하여 초음파 도플러 혈류계를 교정하였고 낮은 유량에서는 상대 편차가 ±50 % 정도였다. 유량이 증가할수록 상대 편차는 감소하였고 높은 유량에서 상대 편차는 ±5 % 정도였다. 혈액 펌프를 사용하여 초음파 도플러 혈류계를 시험하기 위해 맥동 지수를 측정하였다. 맥동 지수는 0 ~ 4 L/min 범위의 평균 유량에서 1.6 ~ 3.2 였고 유량에 대해 맥동 지수는 대체로 일정하였다.

참고문헌

1. 한국산업기술시험원 의료기기 정보기술지원센터 홈페이지 (http://www.ktlmedi.re.kr/ 참고)
2. Waite, L. and Fine, J., “Applied biofluid mechanics,” McGraw Hill, 2007.
3. Charara, J., Ruel, J., Lemay, J. and Doillon, C. J., “Development of a flow simulator to study haemodynamic behaviour of natural and artificial blood vessels under physiologic flow conditions,” Journal of Medical Engineering & Technology, 1464-522X, **23**, 3, 83 – 95, 1999.

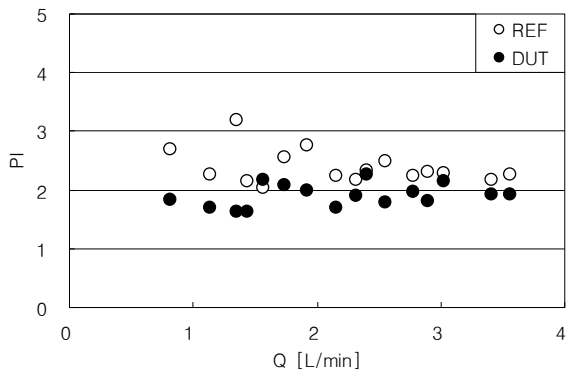

Fig. 3 Pulsatility index of ultrasonic blood flow meter