

혈관계의 특성이 반영된 심혈관계 시뮬레이터의 개발

이주연¹⁾ · 신상훈^{2)*}

1) 상지대학교 일반대학원 동서의료공학과 / 2) 상지대학교 보건과학대학 한방의료공학과

Abstract

Development of a Cardiovascular Simulator with Cardiovascular Characteristics

Ju-Yeon Lee¹⁾ · Sang-Hoon Shin^{2)*}

1) *Depart. of East-West Medical Engineering, Sangji University*

2) *Depart. of Oriental Biomedical Engineering, Sangji University*

Objectives

Existing cardiovascular simulators are used to evaluate artificial organs such as artificial hearts, prosthetic valves, and artificial blood vessels, and pulses are typically triggered using artificial hearts. However, the forms of pulse waves vary according to the location of arteries, and for precise assessment of artificial blood vessels, the development of simulators that generate diverse pressure pulse waves is necessary. This study developed a novel cardiovascular simulator that generates different forms of pulse waves.

Methods

This simulator consists of a stepping motor, a slider-crank mechanism that transforms the rotation movement of a motor into the straight-line motion of a piston, a piston that generates pulsatile flows, a water tank that supplies fluids, an elastic tube made of silicon, and a device that adjusts the terminal resistance of fluids.

Results & Conclusion

This study examined motor rotation and its operation under conditions similar to the physiological conditions of the heart. The simulator developed in this study produced diverse forms of waves, and the generated pressure waves well satisfied physiological conditions.

Key Words

cardiovascular system, simulator, blood pressure, pulse wave, pulse diagnosis

* 교신저자 : 신상훈 / 소속 : 상지대학교 보건과학대학 한방의료공학과

TEL : 033-738-7611 / E-mail : shshin@sangji.ac.kr

투고일 : 2012년 11월 20일; 수정일 : 2012년 12월 16일; 게재확정일 : 2012년 12월 18일

I. 서론

급변하는 의료환경 속에서 의사의 주관적 감각을 대신하는 의료기기의 사용은 선택에서 필수로 바뀌어가고 있다. 맥진은 손가락 감각을 이용하여 경맥의 박동상태를 관찰함으로써 장부와 경락의 상태를 판단하는, 변증시치의 중요한 수단이다.

맥진은 진단 객관화를 위한 노력이 가장 많이 이루어진 분야로서, 지금까지의 맥진 객관화 연구는 의사의 주관적 감각을 진단기기의 객관적 신호로 정확화하는 맥진기 연구에 집중되어 왔다¹⁾. 맥진기 연구는, 측정기기의 정밀도와 재현성을 높이는 지금까지의 연구성과를 바탕으로, 측정된 맥파신호를 한의학적 맥상으로 자동분류하는 연구로 발전되고 있다²⁾.

현재 개발된 맥진기의 성능이 아무리 뛰어나다고 할지라도, 음양허실로 맥상기전을 설명하는 기존의 방식만으로는 세계인의 공감을 얻기에 부족하다. 맥진을 세계화하려면 한의학적 정체성을 유지하는 범위 내에서 진단의 근거를 현대화된 방식으로 설명하는 것이 무엇보다 중요하다. 맥상기전 연구는 현대의 연구성과를 이용하여 맥상기전을 해석하려는 연구분야이며, 혈류역학을 이용한 해석모델 연구가 주류를 이루고 있다^{3,4)}. 그러나 해석모델은 현상계를 단순화하면서 발생하는 수많은 가정으로 인하여 인체의 생리적 현상을 정확하게 표현하기에 불가능하다. 또한 맥상은 측정위치의 국부적인 상태가 아니라, 인체의 전반적인 상태를 대변하므로 해석모델로 단순화하기에는 어려움이 많다.

기전연구에 대한 전통적인 방법은 동물실험이다. 그러나 한의학적 관점에서는 동물보다 인체를 대상으로 하는 임상실험이 필요하다. 임상실험의 문제점은, 관심 부분의 영향만을 분리하기 힘들고, 인체의 항상성으로 인하여 맥파특성이 일정하지 않으며, 대규모 임상시험에는 막대한 비용이 든다는 것이다.

시뮬레이터란 실제의 물리적 특성과 유사한 현상을 재현하도록 만들어진 장치이다. 그러므로 이상적인 시뮬레이터는 해석모델과 임상시험에서 발생하는 문제점들을 해결할 수 있다. 즉, 해석모델과 달리 인체의 전반적인 특성을 정밀하게 구현할 수 있으며, 임상시험과 달리 원하는 특성을 재현성 있고 저렴하게 측정할 수 있다.

생리학적인 관점에서 맥파는 심장과 혈관계의 상호작용으로 발생되며, 한의학적 관점에서 맥상은 인체의 내부장기 상태까지 반영하는 종합적인 신호이다. 그러므로 맥상기전 연구에 필요한 시뮬레이터는 심장, 혈관계, 그리고 내부장기의 연결까지 고려해야 하는 복잡한 시스템이다. 하지만 내부장기까지 고려된 시뮬레이터는 전세계적으로 전례가 없다. 본 연구는 이상적인 시뮬레이터를 개발하기 위한 첫 단계이며, 맥파에 가장 큰 영향을 미치는 심혈관계 특성을 구현하는 것에 초점을 맞추었다.

기존에 개발되었던 심혈관계 시뮬레이터들은 주로 인공장기를 평가하기 위하여 제작되었다^{5,6)}. 즉 개발된 인공심장이나 인공판막이 인체의 다양한 조건에서 정상적으로 작동하는 가를 평가하기 위하여, 생리적 또는 병리적 조건을 만들어줄 수 있는 시뮬레이터가 필요하였던 것이다. 관심의 대상이 심장에 있었으므로, 혈관특성에 대한 관심은 매우 낮았다. 그러므로 기존의 심혈관계 시뮬레이터에서는 혈관의 컴플라이언스 특성만을 강조하여, 혈관을 압력탱크로 단순화하고 있다. 심혈관계 시뮬레이터를 한의학적 관점에서 살펴본다면, 혈관특성의 중요도는 심장특성에 비하여 결코 뒤지지 않는다. 특히 맥관의 탄성도에 따른 맥파전달 특성은 맥파의 형상을 결정하는 매우 중요한 요소이다. 그러므로 본 연구에서는 혈관의 맥파전달 특성이 고려된 심혈관계 시뮬레이터를 개발하고자 한다.

II. 연구방법

본 연구에서는 심장의 좌심실과 동맥계의 기능을 구현하는 시뮬레이터를 개발하였다. 그림 1은 심혈관계 시뮬레이터의 구성도를 나타낸다.

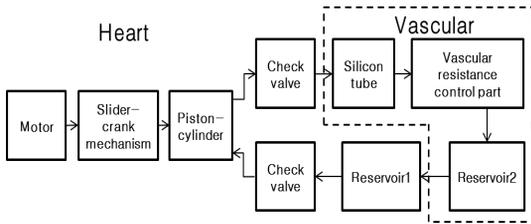


Fig 1. Block diagram of the simulator

1. 시뮬레이터의 구성

수조, 모터, 피스톤-실린더, 그리고 슬라이더-크랭크 기구를 이용하여 좌심실의 기능을 구현하였다. 모터에서 발생한 회전운동은 슬라이더-크랭크 기구를 통해 직선운동으로 변환된다. 수조(좌심방)에 저장된 유체는 체크밸브(승모판막)를 통하여 실린더(좌심실)로 유입되고, 피스톤-실린더에서 맥동이 있는 압력유체로 변환되어 체크밸브(대동맥판막)를 통해 실리콘 튜브(동맥계)로 분출된다.

실린더-피스톤과 결합되는 모터는 선형구동일 때 가장 이상적이지만, 선형모터들을 대부분 고가며 내부의 구동방식과 관련정보를 공개하지 않는 경우가 많아 원하는 동작을 정확하게 구현하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 선형모터 대신, 회전모터(A200K-M599-G7.2 Autonics Co, Ltd.)를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 스텝모터는 제어 시스템이 단순하며 작동에 의한 회전 오차가 누적되지 않는다.

맥동이 있는 유체압력을 생성하는 실린더-피스톤은, 유체흐름을 가시화하기 위해 투명한 아크릴로 제작하였다. 실린더와 피스톤 사이에는 모터의 부하

를 줄이면서 밀폐효과를 최대화하는 다중 실리콘 밀폐장치를 구현하였다. 모터와 실린더-피스톤 사이에는 슬라이더-크랭크 기구부를 추가하여 모터의 회전운동을 피스톤의 직선운동으로 변화시켰다. 심박출량은 심박수와 일회박출량의 곱으로 표현되는데, 심박수는 모터의 회전주기에 대응되며, 일회박출량은 실린더 내부의 피스톤의 행정으로 결정된다. 본 연구에서 개발된 시뮬레이터는 심박수와 일회박출량을 자유롭게 조절할 수 있다. 본 연구에서 일회박출량은 200ml, 박동수는 60회로 설정하였다. 그림2는 본 연구에 사용된 피스톤의 행정 및 주기를 나타낸다. 수축기와 이완기의 시간비율이 1:2가 되도록 모터를 제어하였다.

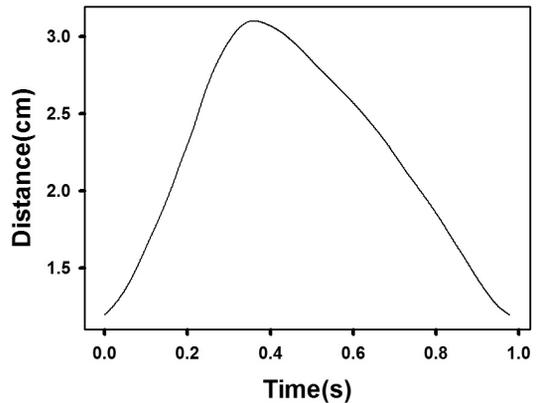


Fig 2. Distance and time of the piston movement

혈액의 비중과 점도 특성을 유사하게 만들기 위하여 모의혈액은 기존의 논문⁷⁾을 참조하여 글리세린 37%와 물 63%의 비율로 만들었다.

체크밸브는 유체가 한쪽으로는 흐르도록 설계된 밸브이다. 본 연구에서는 실험목적에 맞는 체크밸브를 직접 설계, 제작하였다⁸⁾. 체크 밸브는 실린더 내부와 외부의 압력차에 따라 자동적으로 개폐되며, 판막과 동일한 역할을 한다. 체크밸브는 실린더의 앞쪽에 두개가 장착되는데, 하나는 이완기에 수조의

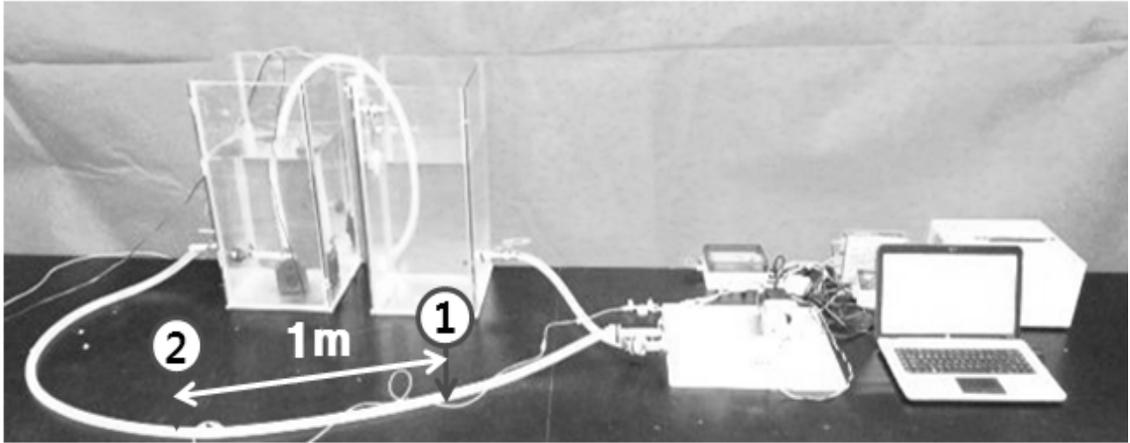


Fig 3. Photograph of simulator and measurement position

유체를 실린더 내부로 유입하는 승모판막 역할이며, 나머지는 압축기에 실린더 내부의 유체를 혈관으로 보내는 대동맥판막 역할을 한다.

본 연구에서는 많은 분지로 구성된 동맥계를 하나의 동맥혈관으로 단순화 시켰다. 혈관의 컴플라이언스는 동맥의 부피변화를 압력의 변화로 나눈 값으로 정의할 수 있다. 이는 동맥의 유연성을 나타내는 지표가 된다. 기존의 연구자들은 압축탱크와 공기를 이용하여 혈관 컴플라이언스 특성을 구현하였는데, 이는 심장특성에 초점을 맞춘 결과이며 혈관계의 특성을 정확하게 반영한 것은 아니다. 본 연구에서는 실리콘 재질의 튜브를 사용하여 혈관의 컴플라이언스를 고려하였다.

원형단면의 튜브에서 유체의 정상상태 흐름은 Poiseuille 공식으로 설명되어진다. 이 공식에 의하면 유량은 직경의 4승에 비례하므로, 튜브직경은 가장 중요한 유체저항 요소이다. 또한 혈관의 직경변화는 대부분 말초혈관에서 일어난다. 그러므로 본 연구에서는 튜브의 끝부분에 밸브를 설치하여 혈관계의 말초저항 특성을 구현하였다.

2. 실험방법 및 측정

그림3은 본 연구에 사용된 시뮬레이터와 압력 측정 위치를 나타낸다. 본 연구에서 개발된 시뮬레이터를 이용하여 혈관의 두께에 따른 압력맥파의 형태와 맥파 전달속도의 변화를 관찰하였다. 그림3에서 위치1은 체크밸브로부터 50cm 떨어진 위치이며, 위치2는 위치1로부터 1m 떨어진 위치이다. 본 연구에서 튜브 내의 압력측정은 실제 임상에서 사용되는 침습적 혈압센서(1620 pressure sensor, msi sensors, Inc.)를 사용하였다. 두 위치에서 동시에 측정된 신호는 DAQ 보드(NI USB-6008, National Instruments)를 통해 LabView로 분석되었다.

본 연구에서 개발된 심혈관계 시뮬레이터의 유용성을 시험하기 위하여, 노화에 따른 동맥경화 상태를 구현하여 보았다. 노화가 진행됨에 따라 혈관벽의 두께는 선형적으로 증가한다. Bruneck study⁹⁾에 의하면, 20대의 혈관두께를 1이라고 하면, 40대는 1.44 그리고 70대는 2.1이었다. 그러므로 본 연구에서는 튜브의 재질과 내경은 동일하나 두께가 다른 세 경우의 실리콘 튜브를 사용하여 혈관노화를 시뮬레이터로 구현하였다.

III. 결과

그림 4는 튜브의 직경(20mm)은 동일하나 튜브의 두께가 다른 (0.65mm, 1mm, 3mm), 세 경우에 대하여 체크밸브로부터 50cm위치(그림3의 위치1)에서 측정한 튜브 내부의 압력이다.

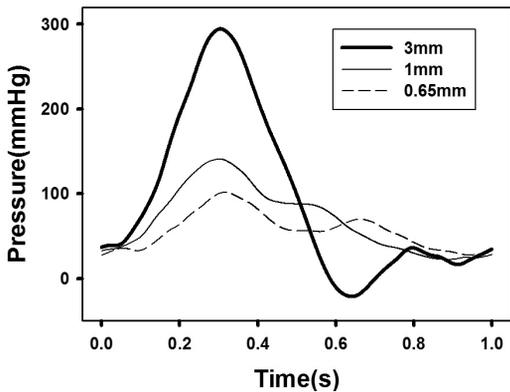


Fig 4. Results of pressure with tube thickness (50cm)

그림 5는 두께0.65mm 튜브의 두 점에서 측정된 튜브 내부의 압력이다.

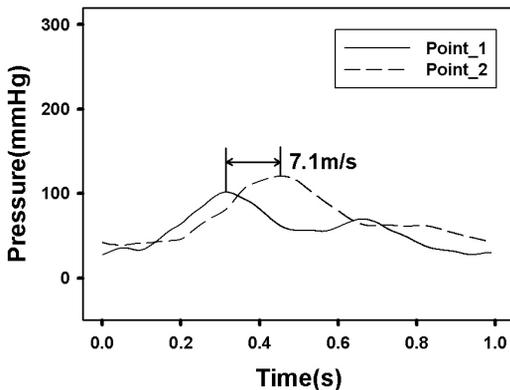


Fig 5. Results of pressure between two points (thickness 0.65mm)

그림 6은 두께 1mm 튜브의 두 점에서 측정된

튜브 내부의 압력이다.

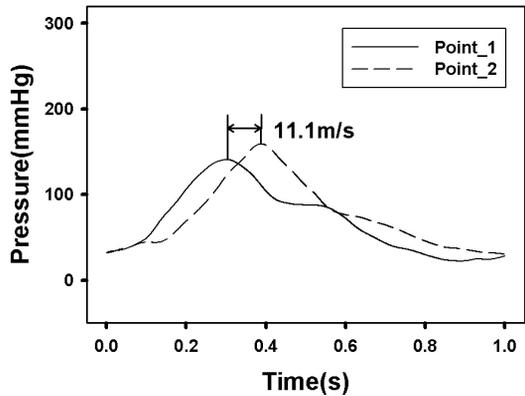


Fig 6. Results of pressure between two points (thickness 1mm)

그림 7은 두께 3mm 튜브의 두 점에서 측정된 튜브 내부의 압력이다.

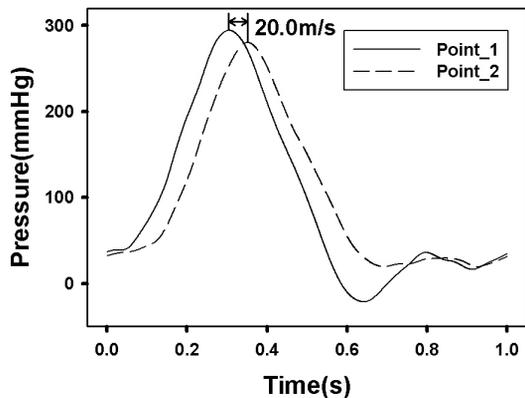


Fig 7. Results of pressure between two points (thickness 3mm)

IV. 고찰

본 연구는 혈관계의 맥파전달 특성을 구현할 수 있는 심혈관 시뮬레이터를 개발하는 것을 목표로 하였다. 개발된 심혈관계 시뮬레이터의 타당성을 검

증하기 위하여, 노화에 따른 동맥경화 현상을 시뮬레이터로 구현하였다. 혈관노화의 주된 특성은 혈관벽의 두께가 증가하는 것이므로, 실리콘의 튜브의 두께변화에 따른 압력파형의 변화를 관찰하였다.

그림4에서는 튜브의 두께가 두꺼워질수록 수축기 압력이 커지고, 수축기 압력과 이완기 압력의 차이인 맥압이 증가하는 현상을 관찰할 수 있다. 이는 노화에 따라 맥압과 최고혈압이 증가한다는 Framingham Heart Study의 임상자료 분석결과¹⁰⁾와 동일한 경향을 보여주고 있다.

그림5, 그림6, 그림7은 튜브의 두께에 맥파 전달속도의 변화를 나타내고 있다. 위치1의 압력변화는 실선으로 위치2의 압력변화는 점선으로 나타내었다. 실린더의 체크밸브로부터 분사된 유체는 위치1을 지나 위치2를 통해 튜브의 말단으로 진행한다. 본 연구는 위치1과 위치2의 압력을 동시에 측정하였으므로, 실선 그래프와 점선 그래프의 최고압력 도달시간의 차이는 맥파 전달속도를 나타내고 있다. 본 연구의 결과에 의하면, 튜브의 두께가 증가할수록 두 지점간의 시간차이가 적어지며 이는 맥파 전달속도의 증가를 나타낸다. 이는 노화에 따라 맥파 전달속도가 증가한다는 Framingham Heart Study의 임상자료 분석결과¹¹⁾와 일치하는 경향을 보여주고 있다.

그림4에 의하면 튜브의 탄성도 변화에 따라 파형이 변화하고 있음을 알 수 있다. 즉, 튜브가 딱딱할수록 이완기 영역에서 파형이 감소하였으며, 가장 딱딱한 튜브의 경우에는 압력이 음으로 되는 현상을 발견할 수 있다. 이는 혈관의 탄성도와 반사파의 중첩으로 설명될 수 있다. 수축기때 피스톤에서 분출된 유체는 팽창된 튜브에 저장되었다가 이완기 동안 서서히 방출된다. 그러나 튜브가 경화되면 수축기때 튜브의 변형으로 튜브에 저장되는 유체의 양이 감소하고, 체크밸브가 차단되어 유체공급이 없는 이완기 때는 진행하는 유체의 관성에 의해 압력이 급감하는 현상이 발생하게 된다. 이는 80대 이후에 이완기 압력이 떨

어져 맥압이 급속하게 증가하는 Framingham Heart Study의 임상자료 분석결과¹⁰⁾를 잘 설명하고 있다. 또한 그림5와 그림6에서는 반사파의 중첩효과를 살펴볼 수 있다. 반사파란 튜브를 따라 진행되는 압력파가 튜브의 끝단에 부딪혀 되돌아오는 것을 말한다. 이때 되돌아오는 반사파의 진행속도는 튜브의 탄성도에 비례하는데, 튜브가 딱딱할수록 빨리 되돌아오므로 진행과와 중첩되는 시점이 빨라지게 된다. 그림 4에서는 튜브가 딱딱해질수록 반사파가 진행과와 중첩되는 시간이 빨라지고 이는 맥파의 형상을 결정하는 요소가 된다. 이는 혈류역학을 이용하여 노화에 따른 맥파의 형상변화를 시뮬레이션한 결과³⁾와 잘 일치하고 있다.

V. 결 론

본 연구는 맥상기전 연구에 필요한 이상적인 시뮬레이터를 개발하기 위한 첫 단계로서, 혈관의 맥파전달 특성이 고려된 심혈관계 시뮬레이터를 개발하였다. 모의혈관의 탄성계수 변화에 따른 압력파형을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었으며, 이는 노화에 따른 맥상의 변화특성과 잘 일치하고 있다.

- 모의혈관이 경화될수록 최고혈압과 맥압이 증가하였다
- 모의혈관이 경화될수록 맥파 전달속도가 증가하였다
- 모의혈관이 경화될수록 반사파가 진행과와 중첩되는 시점이 빨라졌다

본 연구의 결과는, 기존의 심혈관계 시뮬레이터와는 달리, 혈관계의 물리적 특성을 충실하게 반영하고 있음을 증명하였다. 향후 내부장기의 특성까지 고려된 시뮬레이터로 발전한다면, 경맥의 박동상태

로 장부의 상태를 판단할 수 있다는 경험적 진리를, 과학적 진리로 증명하는 중요한 도구가 될 것이다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (과제번호: 2012-0007107).

參 考 文 獻

- 신상훈, 박영배, 임혜원, 김기왕. 중국의 맥진 객관화 연구동향. 대한한의진단학회지. 2004; 8: 45-56.
- 강희정, 허영. 맥 진단기기의 요소기술 및 제품화 동향. 전자공학회지. 2010; 37: 22-31.
- SH Shin, YB Park. Effects of changes in the physical properties of the central elastic artery on haemodynamic characteristics during ageing. JEIM. 2009; 223: 525-535.
- 신상훈, 임혜원, 박영재, 박영배. 심혈관 노화가 脈象에 미치는 영향. 대한 한의진단학회지. 2005; 9: 59-68.
- Timms, D.L. et al. A complete mock circulation loop for the evaluation of left- right- and biventricular assist devices. Artificial Organs. 2005; 29: 564-571.
- Marx TI, Baldwin BR, Kittle CF. A cardiovascular simulator for the evaluation of prosthetic aortic valve. J. Thoracic and Cardiovas. Surg. 1959; 38: 412-418.
- Legendre D, Fonseca J, Andrade A, et al. Mock circulatory system for the evaluation of left ventricular assist devices, endoluminal prostheses, and vascular diseases. Artificial Organs. 2008; 32: 461 - 467
- 이주연, 신상훈. 맥진연구를 위한 심혈관계 시뮬레이터의 개발. 대한한의진단학회지. 2012; 16: 19-26.
- Kiechl S, and Willeit J. (for the Bruneck Study Group). The natural course of atherosclerosis. Part II: vascular remodeling. Arteriosclerosis, Thrombosis, Vascular Biology. 1999; 19: 1491 - 1498.
- Franklin SS, Gustin W, Wong ND, Larson MG, Weber MA, Kannel WB, and Levy D. Hemodynamic Patterns of Age-Related Changes in Blood Pressure. The Framingham Heart Study. Circulation. 1997; 96: 308-315.
- Mitchell GF, Parise H, Benjamin EJ, Larson MG, Keyes MJ, Vita JA, Vasan RS, and Levy D. Changes in arterial stiffness and wave reflection with advancing age in healthy men and women: the Framingham heart study. Hypertension. 2004; 43: 1239 - 1245.

