

맥진연구를 위한 심혈관계 시뮬레이터의 개발

이주연¹⁾ · 신상훈^{2)*}

1) 상지대학교 일반대학원 동서의료공학과

2) 상지대학교 보건과학대학 한방의료공학과

Abstract

Development of the Cardiovascular Simulator for Pulse Diagnosis Study

Ju-Yeon Lee¹⁾ · Sang-Hoon Shin^{2)*}

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

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

Objectives

The aim of this study is to develop a cardiovascular simulator that can reproduce blood pressure pulse and blood flow similar to those of the human body.

Methods

In order to design a system similar to the human cardiovascular system, the required performances were determined by investigating the hemodynamic characteristics of the heart and the arterial system. Main organ to be imitated is heart in simulator. The rest of the system was minimally designed. Also, a blood pressure and blood flow measurement system was developed for measuring the results.

Results

The developed system showed blood pressure pulse at similar range of the human aorta. The result waveform include primary wave caused by ventricular systole except reflected wave.

Conclusions

The blood pressure and blow flow patterns were replicated by the simulator. These patterns were similar to those of the human body. The system will play an important role in studying pulse diagnostics.

Key Words

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

* 교신저자 : 신상훈 / 소속: 상지대학교 보건과학대학 한방의료공학과

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

투고일 : 2012년3월25일; 수정일 : 2012년4월15일; 게재확정일 : 2012년4월17일

I. 서론

맥진은 고대맥진은 고대로부터 오랜 세월을 걸쳐 임상적 경험을 통하여 축적되고 체계화된 귀중한 유산으로서, 현대의학의 관점에서 본다면 혈관계 모니터링을 통한 기능진단이라는 새로운 진료영역에 속한다. 맥진은 손가락 감각을 이용하여 경맥의 박동상태를 관찰함으로써 장부와 경락의 상태를 판단하는, 변증시치의 중요한 수단이다. 한의학이 급변하는 의료환경 속에서 경쟁력을 가지며 발전하기 위해서는 맥진의 객관화가 중요하다. 지금까지 이루어진 맥진 객관화 연구들 중에서 가장 활발하게 진행된 부분은 의사의 주관적인 감각을 객관화하는 맥진기기의 개발 분야이다.¹⁾ 이는 의사의 주관적 감각을 진단기기의 객관적 신호로 정량화했다는 큰 의미가 있다. 현재 진행되는 많은 연구들이 측정기기의 정밀도와 재현성을 높이는 데 집중되어 있으며,²⁾ 측정된 맥파신호를 이용하여 한의학적 진단을 자동화하는 연구를 진행하고 있다.³⁾

맥진기를 사용하여 임상정보를 객관적으로 측정하는 것만으로 맥진이 세계화될 수는 없다. 고전에서 맥상을 설명하는 전형적인 방식으로는, 먼저 의사의 감각(體狀)을 기술하고 다음으로 그 맥상이 관찰되는 경우나 원인(主病)을 한의학적 용어로 설명하고 있다. 맥진의 세계화를 위해서는 맥상의 기전을 음양기혈로 설명하는 기존의 방식보다는 한의학적 정체성을 유지하면서 세계인들과 공감할 수 있는 현대화된 언어로 표현하는 노력이 필요하다. 신⁴⁾은 물리학의 파동방정식을 이용하여 환자의 피부상태와 거안심 특성을 반영할 수 있는 수학적 해석모델을 개발하고, 이를 이용하여 부맥과 침맥의 기전을 살펴보았다. 또한 신⁵⁾은 동맥계의 혈류역학을 이용하여 복강동맥의 특성변화가 인영과 촌구의 맥상에 미치는 영향을 고찰하였다. 해석모델을 이용한

기존의 연구의 장점은 컴퓨터를 이용하여 다양한 상황을 실험할 수 있으나 해석모델에 내포된 수많은 가정으로 인하여 인체의 생리적 현상을 정확하게 재현하기 힘들다. 그러므로 인체의 심혈관계 특성을 정밀하게 재현할 수 있는 시뮬레이터의 개발이 필요하다.

시뮬레이터(simulator)란 실제의 특성과 유사한 현상을 재현하도록 만들어진 장치를 뜻한다. 전통적인 맥진은 인체의 전반적인 특성을 나타내나, 현대적인 의미에서 맥상은 심장과 동맥계의 특성에 가장 영향을 많이 받으므로, 심혈관계의 구조적 특성과 기능적 특성을 고려하여 조사하였다.⁶⁾ 심장 시뮬레이터로는 인공심장이 있으며, 심장의 혈압과 혈류기능을 대신하는 일종의 치료장비로 사용되고 있었다.⁷⁾ 혈관 시뮬레이터에는 혈압특성을 재현하는 혈압 시뮬레이터와 혈류특성을 재현하는 혈류 시뮬레이터가 있다. 사용목적에 따라 혈압계와 혈류계의 측정정확도를 평가하는 것과 측정자의 감각을 표준화하는 것으로 나눌 수 있다. 혈압 시뮬레이터의 연구는 비침습식 자동혈압계의 측정정확도를 평가하는 용도로 상업용으로 개발되고 있다.⁸⁾ 혈압 시뮬레이터와 마찬가지로 혈류 시뮬레이터도 혈류계의 측정정확도를 평가하기 위하여 사용되나 실험실 수준이다.⁹⁾ 맥진 시뮬레이터는 요골동맥의 맥진부위에서 의사가 손 끝으로 느끼는 맥압의 3차원적인 분포를 재현한다.¹⁰⁾

인체의 혈액유동 현상을 연구하는 혈류역학에 의하면 혈압은 혈류와 혈류저항의 곱으로 표현된다. 이는 혈압과 혈류가 상호 종속적인 물리량임을 나타내고 있다. 혈압계를 평가하기 위하여 혈압 측정과정에서 발생하는 코르토크프음이나 혈관의 진동 특성만을 생성하는 시뮬레이터의 경우⁸⁾는 측정부위의 국부적인 현상만을 나타내는 특수한 시뮬레이터

이다. 그러나 맥상은 심장, 혈관계, 그리고 장부의 특성까지 포함하고 있는 인체의 전반적인 특성이므로, 전통적인 28맥의 기전을 연구하기 위해서는 인체의 혈압과 혈류특성을 동시에 재현할 수 있는 시뮬레이터가 반드시 필요하다. 그러므로 본 연구는 심혈관계에 대하여 혈압과 혈류특성을 동시에 구현할 수 있는 시뮬레이터를 개발하는 것을 목표로 하고 있다.

II. 본 론

1. 시뮬레이터의 요구성능

시뮬레이터에 요구되는 성능을 파악하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 심혈관계의 혈류역학적 특성을 바탕으로 시뮬레이터의 구현특성을 설계 하였다.

脈象의 기초가 되는 혈압은 펌프기능을 하는 심장, 혈관계의 부하특성, 그리고 자율신경계의 조절작용으로 유지된다. 심혈관계에서 가장 중요한 제어 변수는 동맥의 혈압이다. 심장은 일정한 혈류량(심박출량)을 생성하며, 혈관계에 혈액을 공급하기 위해서는 혈류저항을 이겨내야 하는데, 이때 발생하는 혈압은 혈류량과 혈류저항의 곱으로 결정된다. 혈관계의 압력은 압력수용기에 의해 감지되어, 정해진 압력을 유지하도록 자율신경계가 심장과 혈관계를 조절한다.

본 연구에서는 심혈관계의 기능적 특징인 혈압과 혈류를 동시에 모두 재현하는 것을 목표로 한다. 시뮬레이터가 구현할 특성으로는, 심장 박동수 분당 60회, 혈압의 범위 50-100 mmHg, 혈류의 범위 0-70 cm/s로 선정하였다.

2. 시뮬레이터 개발

그림.1은 개발된 심혈관계 시뮬레이터이며 그림.2는 시뮬레이터의 구성도이다



Figure 1. Photograph of the simulator

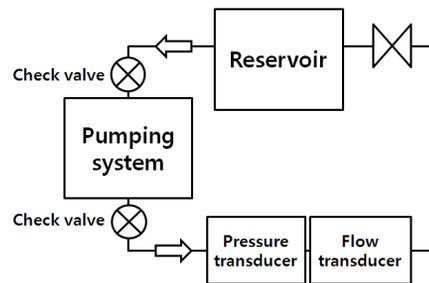


Figure 2. Schematic diagram of the simulator

시뮬레이터는 심장, 혈관계, 그리고 측정부의 세 부분으로 나뉘어진다. 심장의 기능을 모사하는 압력 발생부(pumping system)에는 판막의 역할을 하는 체크밸브가 두 개 달려있다. 혈관계는 동맥계를 모사하는 혈관과 혈류저항을 모사하기 위한 밸브장치, 그리고 정맥계의 특성을 나타내는 수조(reservoir)로 구성되어 있다. 측정부에는 혈압 측정부와 혈류 측정부로 구성되었다.

(1) 심장부

압력 발생부는 모터와 실린더-피스톤 형태의 가

압시스템으로 구성되었다. 모터는 시스템의 모든 부하를 이겨내고 유체를 순환시킬 수 있어야 한다. 따라서 시스템 부하를 측정하는 실험을 통하여 이를 이겨낼 수 있는 충분한 용량의 모터를 선정하였다. 실린더-피스톤의 기구부 사이에 장착된 실링부는 기구가 피스톤 운동을 하는 도중에 생기는 큰 마찰을 견딜 수 있으며 동시에 물이 새지 않도록 제작되었다. 실린더의 용량은 여러 경우의 실험을 할 수 있도록 심장의 일회박출량의 두 배인 200ml로 제작하였다. 그림 3는 압력 발생부의 설계도이다.

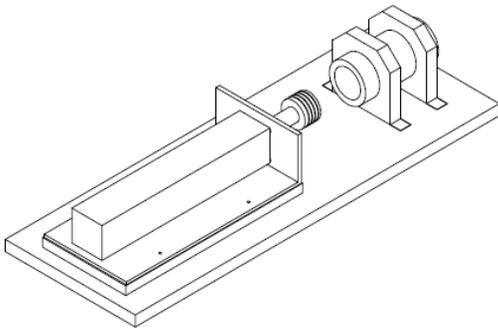


Figure 3. Pressure generating part

실제 심실처럼 혈액의 흡입과 토출이 한 장소에서 이루어지도록 하기 위해서는 실린더에 2개의 구멍이 필요하다. 한쪽 구멍은 심방에서 심실로 혈액이 유입되는 구멍이며 다른 한 쪽은 동맥으로 나가는 구멍이다. 실제 심장에는 이 구멍을 통과하는 혈액이 모두 한쪽 방향으로만 흐를 수 있도록 판막이 위치해 있다. 시스템을 순환하는 유체가 한 방향으로만 흐를 수 있게 하기 위해서는 판막 역할을 할 밸브가 필요하다. 체크밸브는 역류방지 밸브라고도 불리며, 역할과 구조에 따라 여러 가지 종류가 있다. 본 시스템이 구현하는 압력 범위와 관의 구경에 따라 밸브를 조사한 결과 적합한 밸브를 구할 수 없었으므로 본 시스템에 적합한 체크밸브를 직접 설계하고 제작하였다. 그림 4는 체크밸브의 설계도이다.

(2) 혈관부

혈관부는 동맥계, 혈류저항, 그리고 정맥계로 구성되었다. 동맥계는 동맥혈관의 탄성도와 비슷한 실리콘으로 제작되었다. 혈류저항은 수조와 측정부 사이에 높이차와 수조의 입구에 설치된 밸브로 저항요

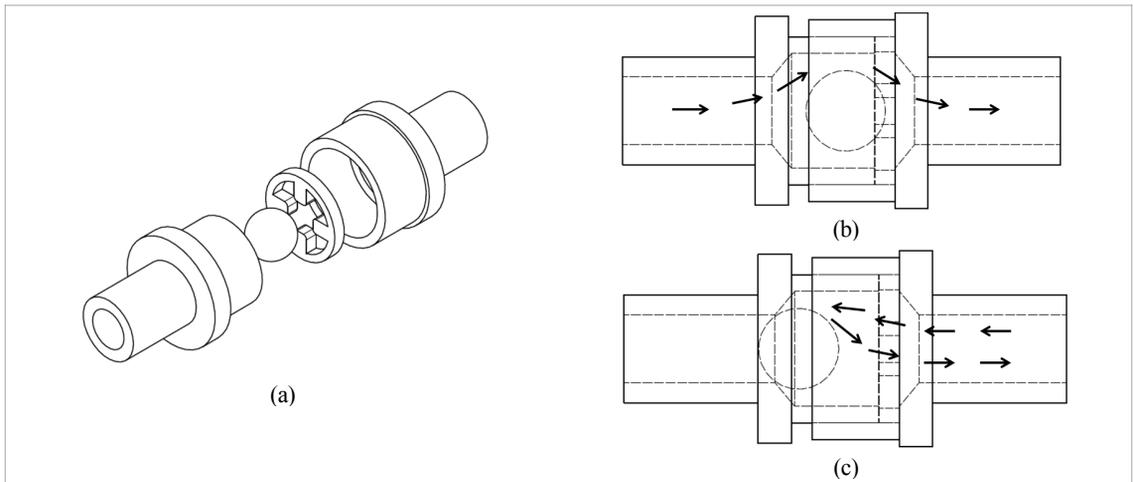


Figure 4. Check valve
 (a) 3D view (b) Flow in the right direction (c) Flow in the opposite direction

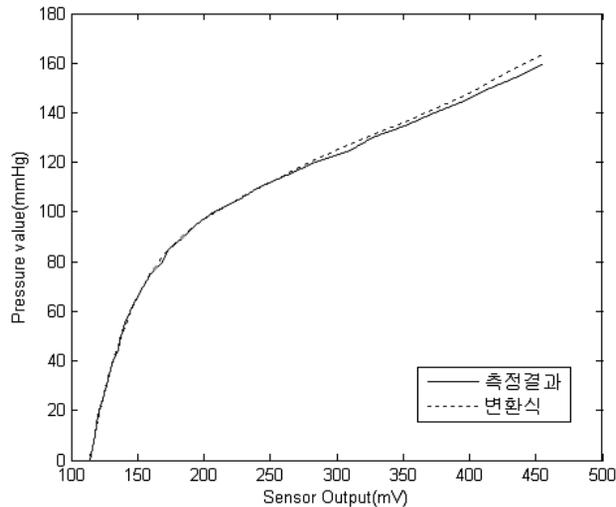


Figure 5. Comparison between the measured and the calculated

소를 만들었다. 1차적으로 혈관의 높이차에 따른 저항을 주고, 2차적으로 밸브의 구경을 조절하여 원하는 혈류저항을 생성하였다.

(3) 측정부

본 실험의 목적은 혈압과 혈류를 재현하는 것이므로, 혈압 측정 시스템과 혈류 측정 시스템이 필요하다.

A. 혈압 측정시스템

본 연구에서는 압력센서를 이용한 삽입식 직접혈압 측정방법을 선택하였다. 혈압을 측정하기 위한 센서는 유체흐름에 영향을 주지 않아야 하고 재현성이 좋아야 하며, 측정 범위를 만족시켜야 한다. 본 연구에서는 실제 임상에서 사용되는 침습적 혈압센서(1620 pressure sensor, msisensors, Inc.)를 이용하여 혈압을 측정하였다. 센서의 전기적인 신호를 원하는 값으로 변환하기 위해서는 두 가지 과정이 필요하다. 첫 번째는 기준 압력계와 비교실험으로 출력신호와 압력값에 대한 그래프를 얻는 것이며, 두 번

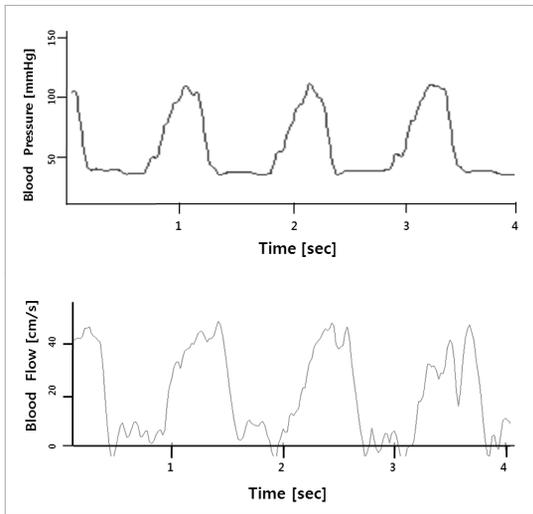
째는 이 그래프를 이용하여 변환 식을 얻는 것이다. 본 실험에서 기준 압력시스템은 정수압으로 선정하였다. 측정결과를 바탕으로 변환식을 추출하였으며, 이를 적용하여 출력전압을 혈압으로 변환하였다. 그림 5는 측정결과와 변환식을 비교한 그림이다.

B. 혈류 측정시스템

본 연구에서는 임상에서 사용되는 도플러식 초음파 센서(ES-100V3, Hadeco Co. Ltd.)를 사용하여 혈류속도를 측정하였다. 초음파 혈류계의 경우 유체에 주는 영향이 거의 없으며 측정범위가 본 실험과 동일하다는 장점이 있다. 신뢰성 있는 초음파 혈류측정을 위해서는 초음파 특성에 맞는 측정각도의 설정이 필요하다. 이상적인 각도는 30-60° 이며, 선정된 혈류계에서는 60°로 고정하였다. 측정의 정확도를 높이기 위하여 지그를 제작하여 최적의 각도를 유지할 수 있도록 하였다. 정밀도가 검증된 유량계를 이용하여 초음파 도플러의 정밀도를 보정하였다.

Ⅲ. 결 과

대동맥의 압력패턴을 구현하기 위해 수축기 시간과 이완기 시간의 비율이 1:2가 되도록 모터를 제어하였다. 맥상의 패턴은 심장의 수축으로 인해 생기는 충격파와, 판막의 닫힘으로 인해 생기는 절흔, 동맥의 분지로 인해 되돌아오는 반사파로 구성되어 있는데, 본 시뮬레이터에는 혈관분지가 없으므로 반사파가 없는 압력파형이 생성되었다. 그림 6은 그 결과를 보여준다.



시뮬레이터의 구동 결과 반사파가 없이 수축과만을 표현하고 있는 것을 확인할 수 있다. 구현 결과 심장 박동수는 분당 55-65번이며, 혈압의 범위는 50-100 mmHg, 혈류의 범위는 0-50 cm/s이다.

Ⅳ. 고 찰

본 연구는 맥진의 기전연구에 필요한 심혈관계 시뮬레이터를 개발하는 것이다. 이를 위하여 인체의 생리적 특성과 유사한 혈압패턴과 혈류패턴을 동시

에 구현할 수 있는 시뮬레이터를 제작하는 것이 목표이다

시뮬레이터는 심장, 혈관계, 그리고 측정부로 구성하였다. 심장은 좌심실의 기능을 구현하는 실린더 방식의 압력 발생부와 판막 역할을 하는 체크밸브로 구성되어 있다. 혈관계는 동맥계를 모사하는 단일혈관과 혈류저항을 모사하기 위한 밸브장치, 그리고 정맥계의 특성을 나타내는 수조로 구성하였다. 시뮬레이터의 특성을 평가하기 위하여 혈압 측정장치와 혈류 측정장치로 구성된 측정부를 제작하였다.

건강한 성인의 요골동맥에서 관측되는 맥파에는 세개의 봉우리가 전형적으로 나타난다. 좌심실의 수축에 의하여 좌심실의 내압이 상승하고 이에 따라 대동맥판이 개방되면서 혈관내의 압력이 급속도로 상승한다. 이때 생성되는 첫 번째 파형을 충격파라고 한다. 이때 생성된 압력파는 동맥혈관을 따라 전신으로 퍼져나가며, 혈관의 분지 또는 혈관벽의 탄성도 변화로 인하여 말단에서 생성되어 되돌아오는 반사파가 중첩됨으로 인하여 조랑파가 생성된다. 또한 수축기 말에 대동맥판이 닫히면서 생기는 반사파의 영향으로 중복파가 생성된다.

그림 6에 의하면, 본 연구에서 개발된 시뮬레이터는 심혈관계의 혈류역학적 특성을 완벽하게 구현하지는 못하였다. 그림.6에서는 반사파 특성인 조랑파의 존재가 관찰되지 않는데 이는 다양한 혈관분지로 구성된 동맥계를 동일한 굵기를 가지는 단일혈관으로 대신한 때문으로 생각된다. 즉 혈관의 분지도 존재하지 않으며, 혈관의 특성이 동일하므로 반사파가 생성될 환경이 조성되지 못하였다. 또한 중복파의 특성도 나타나지 않는데 이는 모터제어의 특성상 절흔과 같은 갑작스러운 압력차단 효과가 미흡하였음을 나타내고 있다.

그림6에서 심장의 이완기에 해당되는 구간에서 혈류속도의 진동현상을 관찰할 수가 있었다. 이는 심장의 수축기에 발생한 충격파가 혈관을 타고 진행하다가 저수조의 입구에서 반사되어 생기는 진동으로 생각되어 진다. 본 연구에서는 인체와 같이 혈관 분지를 구성하지 않았으며, 저수조의 입구를 완전히 개방한 상태 즉 말초저항이 적은 상태이므로, 조랑파가 되기에는 미약한 반사파가 진동을 발생시킨 것으로 생각된다.

그럼에도 불구하고 시뮬레이터로 구현된 충격파의 특성은 만족할 만하다. 수축기 시작점부터 최고 압력에 도달하는 승각시간(upstroke time) 구간에서는 혈압의 증가와 함께 혈류속도의 증가 현상이 발생하며, 수축기 최고압력 지점부터 대동맥관이 닫히는 절흔지점 사이에는 혈압의 급격한 감소가 혈류속도의 급격한 감소현상을 발생시키고 있다. 이는 인체의 생리적인 특성과 잘 일치하는 결과이다.

V. 결 론

본 논문에서는 대동맥의 혈압과 혈류 패턴을 구현해내는 심혈관계 시뮬레이터를 개발하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 심혈관계의 생리적 범위를 시뮬레이터의 구현 특성으로 정하였으며
- 모터와 피스톤-실린더를 이용하여 좌심실의 혈압생성 기능을 구현하였으며, 시뮬레이터에 적합한 체크밸브를 설계/제작하여 판막의 기능을 구현하였다.
- 단일 실리콘튜브를 이용하여 동맥계를 모사하였으며, 튜브의 높이차와 튜브말단에 밸브를 설치하여 혈류저항 특성을 구현하였다. 또한 물

을 저장하는 수조를 이용하여 정맥의 기능을 구현하였다.

- 개발된 시뮬레이터는 충격파의 혈압/혈류 특성은 잘 나타내고 있으나, 조랑파와 중복파의 특성은 관찰되지 않았다. 이는 동맥계를 단일혈관으로 모델링하여 반사파가 생성되지 않았고, 모터제어 기술의 미숙으로 절흔과 같은 급격한 압력차단 효과를 생성하지 못한 때문으로 분석된다.

본 논문은 기존의 연구들이 시도하지 않았던 생리적인 혈압-혈류 패턴의 동시구현이라는 힘든 목표를 설정하고 이를 구체화한 첫걸음이다. 본 연구에서는 충격파의 특성만을 만족시키고 있으나, 향후에는 조랑파와 중복파의 특성도 구현할 수 있는 완벽한 시뮬레이터를 개발할 예정이다.

조랑파를 생성하기 위해서는 반사파의 생성기술이 개발되어야 한다. 반사파가 생성되기 위해서는 두 가지 조건이 만족되어야 한다. 즉 혈관이 여러 갈래로 나뉘는 분지(分枝) 현상과 심장에 가까운 중심동맥보다 말초동맥이 딱딱해지는 혈관경화 현상을 재현해야 한다. 향후에는 혈관의 분지구조 재현과 혈관탄성도의 변화를 통하여 문제점을 해결하려고 한다.

중복파를 생성하기 위해서는 대동맥 판막의 기능을 완성도 있게 재현해야 한다. 즉 심장의 수축기에서 이완기가 시작됨과 동시에 혈액의 흐름을 갑자기 차단할 수 있는 판막기능이 필요하다. 본 연구에서 개발된 체크밸브는, 밸브 전후의 압력차가 거의 없어지는 이완기 초기시점에서 판막기능이 약화되는 문제점이 발생하였으며 향후 이 문제를 해결할 수 있는 구조변경을 시도할 예정이다.

그리고 심혈관계의 생리적 특성을 정밀하게 구현하기 위해서는 심장의 수축력과 관련이 있는 승각시간에 관한 특성도 고려해야 한다. 이를 위해서는 압력 발생장치에 사용되는 모터의 위치 및 속도제어 기술이 필요하며, 향후 정밀한 모터제어를 통하여 구현할 계획이다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(과제번호: 2011-0025919).

본 연구는 2011년도 하반기 상지대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌습니다.

参 考 文 献

- 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.
- 김재욱, 신상훈. 맥진 알고리즘 개발. 전자공학회지. 2010; 37: 32-41.
- 신상훈. 손목의 피부특성을 고려한 맥상과 해석 모델 개발. 대한한의진단학회지. 2011; 15: 159-168.
- 신상훈, 박대훈, 박영재, 박영배. 혈류역학을 이용한 촌구와 인영의 특성비교. 대한침구학회지. 2004; 21: 241-248.
- 신상훈, 이주연. 심혈관계 시뮬레이터의 연구동향. 대한한의진단학회지. 2011; 15: 55-66.
- 선경, 최재순. 인공심장 연구의 최신동향. 보건산업기술동향. 2007; 30: 23-30.
- Ng KG, Small CF. Review of methods & simulators for evaluation of noninvasive blood pressure monitors. J Clin Eng. 1992; 17: 469-479.
- 전세중, 윤병로, 이광복. 혈류 시뮬레이터를 이용한 초음파 혈류계 교정에 대한 연구. 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집. 2009: 637-638.
- 김은근, 남기창, 허현, 허영. 모의 맥과 재현 장치를 이용한 부침맥 구현. 대한전자공학회 하계종합학술대회. 2009: 1170-1171.