학위논문요약서		
성명	**학과**	**해당 학위**
송현우	**기계공학과**	**석사**
학위개요	○ 논문제목 • 국문제목: 모듈화된 맥파 전달 특성을 이용한 물리지식기반 PPG-중심동맥압 추정 네트워크 • 영문제목: Physics-Informed PPG-to-Central Blood Pressure Estimation Network Using Modular Blood Pressure Transmission Characteristics • 논문심사합격일: 2025.12.17 • 지도교수: 박용화 교수	

주요 내용 요약

Ⅰ. 연구목적

심혈관계 질환은 세계 사망원인 1위로, 그 수가 지금도 계속해서 늘어나고 있는 추세이다. 때문에 심혈관계 질환을 예방 및 관리를 위한 주기적인 심혈관 상태 진단은 필수적이다. 중심동맥압은 대동맥에서 측정되는 혈압으로, 심장과 주요 장기에 직접적으로 작용하는 혈역학적 부하를 나타내기에 심혈관 질환의 위험도를 보다 정확하게 예측하는 독립적 지표로 사용된다.

그러나 중심동맥압은 직접적으로 측정하기 매우 어렵기 때문에, 말초동맥압을 측정 후 인구 기반으로 설정된 일반화된 전달함수(Generalized Transfer Function, GTF)를 사용하여 추정하게 된다. 그러나 이는 개인별 특성을 고려하지 못한다는 한계점이 있다.

본 연구에서는 중심동맥압의 일상적이고 간편한 측정을 위해 PPG(Photoplethysmography)로부터 중심동맥압을 추정하는 물리지식기반 인공신경망을 제안한다. PPG와 말초동맥압 파형, 중심동맥압 사이의 관계를 전달함수로 모델링하고, 이를 심혈관계 하드웨어 시뮬레이터에서 얻어진 균일하고 풍부한 데이터를 바탕으로 인공신경망이 학습하도록 하여 개인화된 전달함수를 추정해내고자 한다.

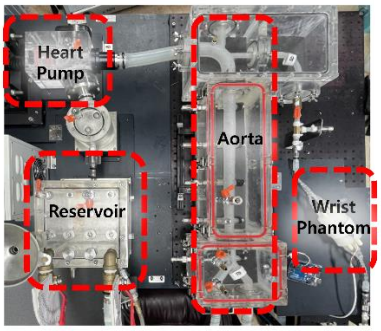

Figure 1. 심혈관계 하드웨어 시뮬레이터

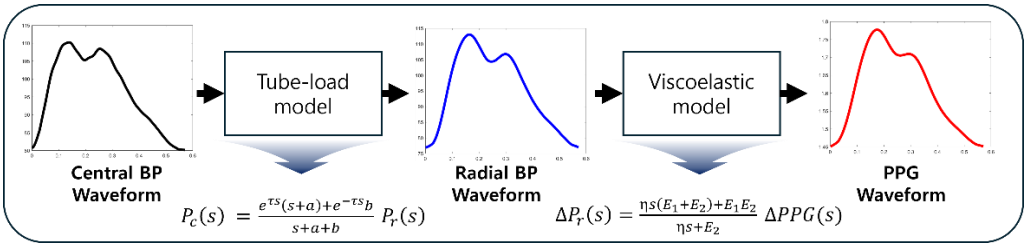

Figure 2. CBP-RBP-PPG 사이의 전달함수 모델링

Ⅱ. 연구내용

본 연구는 최종 목표인 PPG를 통한 중심동맥압 추정을 위해 신호의 전파 과정을 PPG-Radial BP(RBP), Radial BP-Central BP(CBP)의 두 단계로 분리하였으며, 각 단계를 개별적으로 네트워크에 학습하였다. 연구의 과정은 크게 데이터 생성, 각 혈압 전파 과정을 설명하는 지배방정식 모델링, 중심동맥압 추정을 위한 인공신경망 학습의 세 단계로 나누어진다.

먼저 첫 단계에서 인체 심혈관계를 모사한 하드웨어 시뮬레이터를 통해 PPG, RBP, CBP 데이터셋을 취득한다. 이때 심혈관계의 주요한 네 가지 파라미터 Heart rate, Stroke volume, Vascular stiffness, Peripheral resistance를 생리적 범위 내에서 균일한 간격으로 변경하며 총 2709개의 PPG-RBP-CBP 데이터셋을 취득하였다.

다음으로 Viscoelastic model의 일종인 Standard Linear Solid(SLS) model로 PPG와 RBP waveform의 관계를, 혈압 전파 과정을 단순화한 Tube-load model을 사용하여 RBP와 CBP 사이의 관계를 모델링하였다. 각 식들의 식별성을 위해 piecewise constant 가정을 도입하여 Time domain 상에서 각 모델의 output(RBP, CBP)만으로 전달함수의 파라미터들을 식별할 수 있도록 하였다.

마지막으로 이전 단계에서 얻어낸 식을 목적함수로 포함하는 물리지식기반 인공신경망을 설계하여 학습 및 테스트를 진행하였다. 설계된 네트워크는 입력 파형을 input으로 하여 전달함수의 파라미터들을 output으로 도출한다. 이때 각 파라미터를 생리적으로 합당한 범위 내에서 예측할 수 있도록 constraint를 추가하였다.

최종적으로 설계된 네트워크를 전체 데이터를 사용한 경우, 타겟 데이터에 대한 지식 없이 물리 지식만을 사용한 경우 등에서 학습하였고, 모든 경우에서 기존의 GTF기반 방식을 상회하는 성능을 얻어낼 수 있었다.

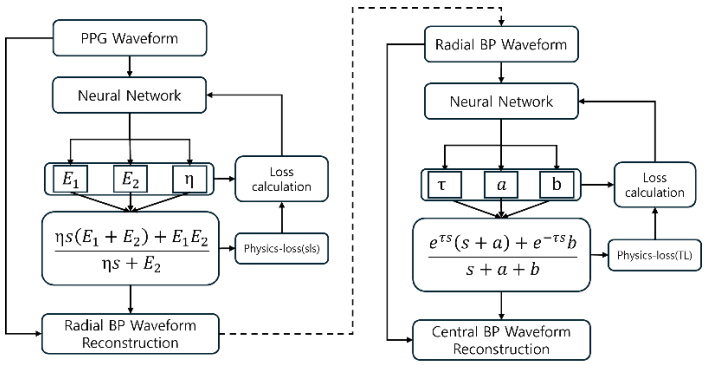

Figure 3. 중심동맥압 추정 네트워크 흐름도

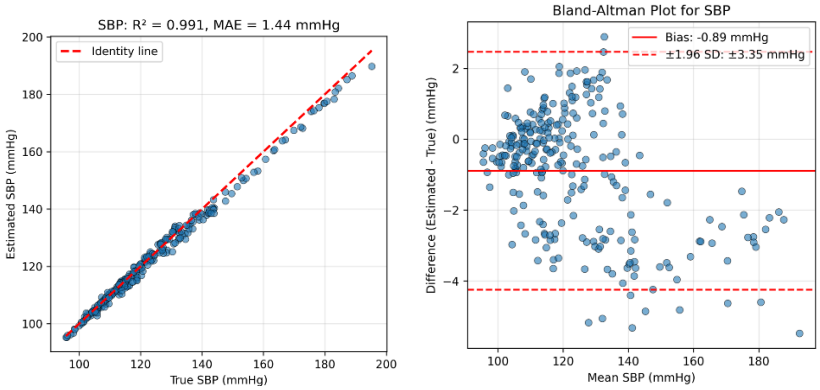

Figure 4. 추정된 CBP의 수축기 압력의 scatter plot과 bland-altman plot