

## 심전도와 심탄도의 무구속적 동시 측정을 위한 의자 등받이 개발

임용규\*

상지대학교 한방의료공학과

### Development of Chair Backrest for Non-intrusive Simultaneous Measurement of ECG and BCG

Yong-Gyu Lim\*

<sup>1</sup>Department of Oriental Biomedical Engineering, Sangji University

**요약** 심전도와 심탄도를 무구속적으로 동시에 측정하는 시스템을 개발하였다. 제안된 시스템은 의자의 보조 등받이에 설치되어 맥파전달시간(PAT), Pre-ejection period (PEP) 등의 심혈관계 역학 정보를 일상생활에서 무구속적으로 측정하는 것을 목적으로 개발되었다. 본 연구에서는, 의자의 등받이에 부착된 용량성 능동전극과 용량성 접지를 이용한 간접접촉 심전도 (IDC-ECG) 측정 방법에 의해 무구속적으로 심전도를 측정하였으며, 등받이에 부착된 EMFi 압력 센서를 사용하여 무구속적으로 심탄도(ballistocardiogram)를 측정하였다. 제안된 시스템으로 심전도와 심탄도가 무구속적으로 동시에 측정됨을 확인하였으며, 측정된 심탄도는 피검자 사이에서 일정한 패턴을 보이는 것을 알 수 있었다. 또한 심전도의 Q파와 심탄도의 첫 번째 첨두간의 시간차가 pre-ejection period와 높은 상관관계를 보이는 것도 확인할 수 있었다. 이 연구에서 개발된 시스템은 심혈관계의 다양한 지표(심전도, 심박수, PAT, PEP 등)를 무구속적으로 일상생활에서 측정할 수 있음을 보였다.

• 주제어 : 용량성 능동 전극, 간접접촉 심전도, 맥파전달시간, 심탄도, 혈압

**Abstract** A non-intrusive ECG and BCG measurement system is introduced. The system is built on a auxiliary backrest of a chair. The developed system is aimed to non-intrusive assessment of cardiovascular dynamic indices such as pulse arrival time(PAT) and pre-ejection period (PEP). In the system, capacitive active electrodes and capacitive grounding were used for the non-intrusive indirect-contact ECG measurement, and EMFi pressure sensor was used for the non-intrusive BCG measurement. The capacitive active electrodes and the EMFi sensor were attached on the backrest. Using the system, ECG and BCG were successfully acquired. The measured BCG showed peaks that following ECG R peaks. It was shown that the time interval between Q wave in ECG and first peak in BCG correlates Pre-ejection period measured by impedance-cardiogram. The results showed that the introduced system can be used for the non-intrusive various cardiovascular information including ECG, PAT, PEP.

• Key Words : Capacitive Active Electrode, Indirect-contact ECG, Pulse Arrival Time, Ballistocardiogram, Blood Pressure

Received 23 August 2018, Revised 16 September 2018, Accepted 28 September 2018

\* Corresponding Author Yong G. Lim, Department of Oriental Biomedical Engineering, Sangji University, 83, Sangjidae-gil, Wonju-si, Gangwon-do, Korea. E-mail: yglim@sangji.ac.kr

## I. 서론

심전도에서 측정된 R peak와 사지 말단에서 측정된 광용적맥파에서 검출되는 맥파 간의 시간차이는 심장에서 사지 말단까지의 맥파 도달 시간 (PAT, Pulse arrival time)으로 간주된다. PAT는 동맥의 특성과 함께 동맥의 혈압을 추정하는 지표로서 의미가 있다[1]. 또한 심전도에서 측정된 Q 파와 대동맥 판막이 열릴 때까지의 시간차를 Pre-ejection period는 좌심실의 기능과 교감 신경계의 활성 정도 진단에 중요한 지표가 된다.[2][3]. 또한 최근에는 일상생활에서의 PEP 측정에 대한 관심이 증대되고 있는데, 이는 PEP가 무구속 혈압 측정에 적용할 수 있는 맥파전달시간 (Pulse arrival time, PAT) 추정에 중요한 요소가 되기 때문이다.

이와 같이 심혈관계의 역학적 지표를 알아내기 위해서는 전기적 신호인 심전도와 기계적 신호인 맥파의 측정이 필수적이다. 본 연구에서는 일상생활에서의 무구속 심혈관계 진단을 위해, 무구속적인 심전도와 맥파 측정을 할 수 있는 의자 등받이를 개발하였다.

심장의 수축에 의해서 혈액이 심장에서 동맥으로 분출할 때, 역학적인 반작용에 의해 신체가 움직이는 현상이 발생하는데, 이 현상에 의한 신체 일부분의 변위나 일부분에서 측정된 압력의 변화를 기록한 것이 심탄도 (Ballistocardiogram)이다. 심탄도는 심혈관계의 역학적 정보를 제공하며[4], 이 심탄도를 이용해서 PAT를 측정하는 연구도 진행되고 있다[5]. 심탄도를 이용해서 PAT를 측정할 경우는 광용적맥파 (PPG)를 이용한 측정과 달리, 신체에 특별한 장비를 부착할 필요가 없는 무구속 상태로 측정이 가능하다. PAT를 측정할 경우, 기준이 되는 심전도도 측정해야 한다. 기존의 방법으로는 심전도 측정은 전극을 인체 피부에 직접 부착하고 심전도를 측정해야 했으나, 최근에 개발된 간접접촉 심전도 측정 방법 [6][7]을 이용하면, 피부와의 직접 접촉 없이 무구속 상태로 심전도 측정이 가능하다.

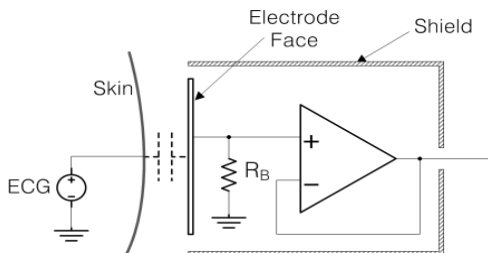


Fig. 1. Structure of capacitive active electrode

본 연구에서는 간접접촉 심전도 측정 기술과 심탄도 측정 기술을 결합해서 무구속적으로 심혈관계 역학 지표를 측정하는 장치를 연구하였다. 제안된 장치는 의자의 보조 등받이에 구현하였다.

## II. 무구속 ECG BCG 측정 시스템 구성

### 2.1 간접 접촉 심전도 (IDC-ECG) 측정 시스템

#### 2.1.1 용량성 능동 전극

간접접촉 심전도 측정 시스템은 용량성 능동 전극 (capacitive active electrode)과 용량성 접지로 구성된다 [4]. 본 연구에서 적용한 용량성 능동 전극은 그림 1에 나타난 것처럼, 심전도에 의해 피부 표면에 발생하는 전위 변화를 인체의 피부 표면과 용량성 결합을 이루는 전극면을 통해서 감지하고, 전극면에 연결된 초단 증폭기를 통해 전극면에서 감지된 전위 변화를 증폭한다. 이 용량성 능동 전극을 이용해서 옷을 입은 상태에서 심전도를 측정하기 위해서는, 직물에 의해 피부와 전극면의 용량성 결합이 수십 pF 정도로 매우 적기 때문에 전극에 부착된 초단 증폭기의 입력 임피던스는 매우 높아야 한다. 본 연구에서는 사양 상으로 입력 임피던스가 수십 T $\Omega$ 인 OPA124 (TI)를 사용하였다. 그러나 opamp의 입력단에서 발생하는 바이어스 전류를 흐르게 해서, 포화를 방지하기 위해 별도의 저항 (그림 1, R<sub>B</sub>)을 부착하여야 하기에 실제 입력 임피던스는 추가로 부착된 저항에 의해 결정된다. 본 연구에서는 5G $\Omega$ 을 R<sub>B</sub>로 사용하였다.

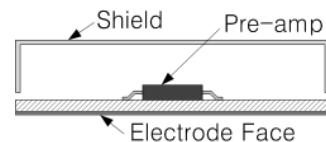


Fig. 2. Profile of capacitive active electrode

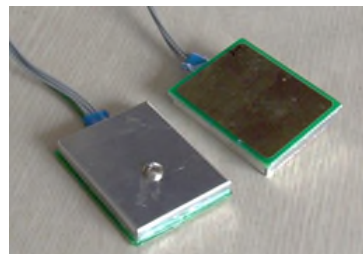


Fig. 3. Photograph of capacitive active electrode

전극면과 피부 사이의 낮은 용량성 결합 (높은 임피던스)는 외부 잡음의 영향을 크게 한다. 그림 2에 나타난 것

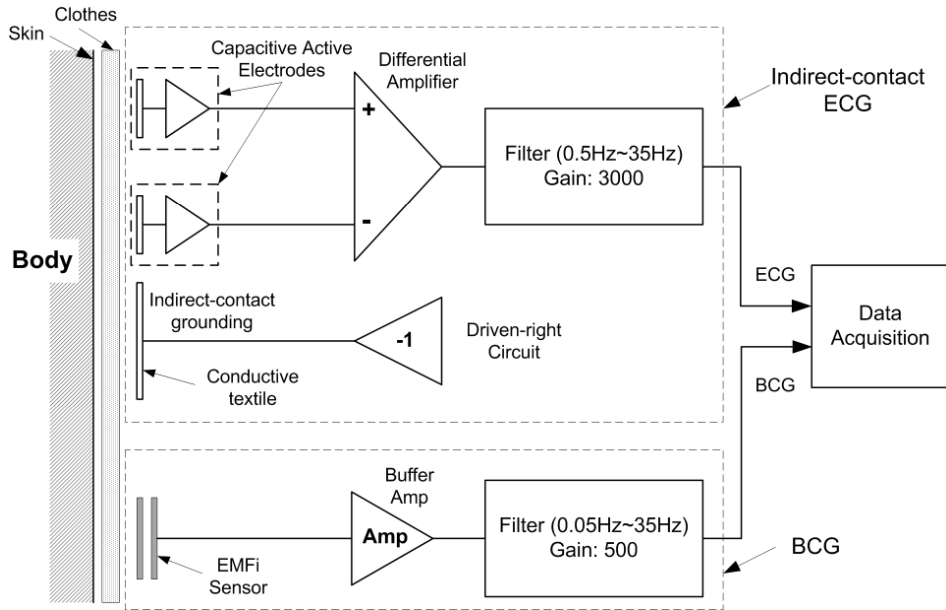


Fig. 4. Diagram of total measurement system

과 같이, 외부 잡음을 차단하기 위해 피부 쪽의 전극면을 제외한 전극의 후면과 초단 증폭기 부분을 금속 케이스로 차폐하였다.

사용된 전극은 높이 6mm, 가로 세로 35x45 mm로 제작되었다. 그림 3은 용량성 능동 전극의 사진을 보여준다.

### 2.1.2 간접 접촉 심전도 시스템 구성

간접 접촉 심전도 시스템은 그림 4와 같이, 두 개의 용량성 능동 전극과 용량성 접지 그리고 증폭기로 구성된다. 두 용량성 능동 전극에서 감지된 인체 표면의 전위 변화는 차동 증폭기에 의해 두 신호의 차동 신호를 추출하며, 이후 증폭기와 필터를 통과하여 심전도 신호가 추출된다. 필터는  $f_c = 0.5\text{Hz}$  2차 고역통과필터와  $f_c = 35\text{Hz}$  인 4차 저역통과 필터 그리고 60Hz notch filter로 구성되었다.

용량성 접지는 측정 시스템의 접지와 연결된 넓은 전도성 직물과 인체간의 용량성 결합에 의해 접지를 하는 것을 의미하며, 인체의 피부와 직접 접촉 없이 의복을 통해서 접지가 된다. 본 연구에서는 접지의 성능을 높이기 위해서, 오른발 구동회로를 구성하고, 전도성 직물을 오른발 구동회로의 출력에 연결하였다.

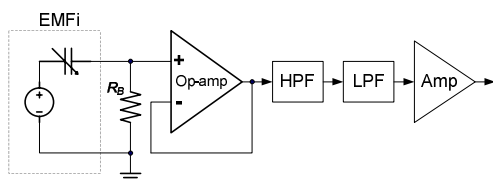


Fig. 5. Schematic diagram of amp and filters for EMFi

### 2.2 무구속 BCG 측정

심탄도를 측정하는 방법은 여러 가지가 있다. 본 연구에서는 심탄도에 의해 발생하는 압력 변화를 측정하는 방법을 적용하였다. 압력 변화를 측정하는 센서로서는 EMFi(Technical Research Center of Finland)를 사용하였다. EMFi 센서는 압력 변화에 의해 전압이 발생하는 일종의 압전 소자의 특성을 보인다. 이 EMFi 센서의 신호를 처리하는 아날로그 회로는 그림 5와 같이 고입력 임피던스 증폭기를 이용한 초단 증폭과 필터 그리고 증폭기의 구성으로 되어 있다. 필터는  $f_c = 0.05\text{Hz}$  1차 고역통과필터와  $f_c = 35\text{Hz}$ 인 2차 저역통과 필터로 구성하였다. 사용된 EMFi 센서는 2cm X 9cm 크기의 스트립 형태의 유연한 센서로서 압력의 절댓값을 측정하기 보다는 미세한 압력의 변화를 측정하는 용도로 사용된다.

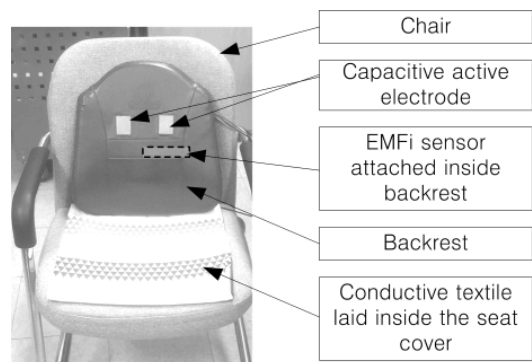


Fig. 6. Picture of the developed non-intrusive cardiovascular monitoring backrest

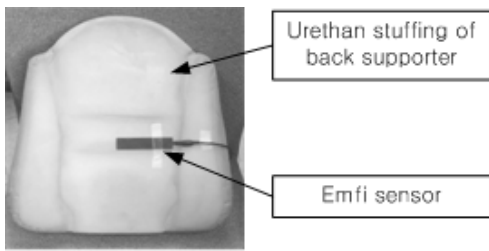


Fig. 7. Picture showing EMFi sensor attached inside the backrest

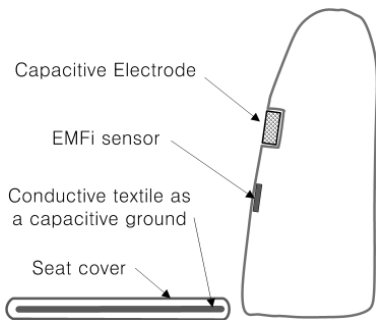


Fig. 8. Layout of electrodes and sensors

### 2.3 무구속 심전도 심탄도 통합 측정용 등받이

간접 접촉 심전도 측정 기술을 적용한 무구속 심전도 측정 장치와 EMFi 센서를 활용한 무구속 심탄도 측정 장치를 의자의 등받이에 함께 설치하였다.

실제 개발된 시스템은 제작상의 편리를 위해 의자의 등받이가 아닌 보조 등받이에 설치되었는데, 향후 개발이 완료되면 의자의 등받이에 쉽게 설치할 수 있을 것으로 기대한다.

그림 6은 개발된 무구속 심전도 심탄도 측정용 보조 등받이의 사진이다. 무구속 심전도 측정을 위한 두 개의 용량성 능동 전극이 등에 접촉하는 부분에 부착되었고, 용량성 접지는 방석 커버 속에 전도성 직물을 넣어 만들어서 의자 좌판에 놓였다. 심탄도 측정을 위한 EMFi 센서는 등받이의 커버 속에 부착되었기에 그림 6에는 보이지 않는다. 대신 그림 7에서 EMFi 센서 부착된 모습을 보여준다. 그림 8은 무구속 심전도 심탄도 측정용 등받이의 단순화한 모식도를 보여준다.

## III. 결과

### 3.1 무구속 심전도 심탄도 측정 결과

제안된 측정 장치로 측정된 신호는 그림 9에 나타내었다. 그림 9의 (a)는 보조 등받이에 부착된 용량성 전극으로 측정된 간접접촉 심전도를 보여주며, (b)는 보조 등받

이에 부착된 EMFi 압력 센서에서 측정된 신호를 보여준다. (b)의 파형에는 호흡에 의한 낮은 주파수의 등받이 압력 변화가 큰 진폭으로 나타나고, 여기에 상대적으로 작은 높은 주파수의 심탄도 (BCG)신호가 더해져 있는 것을 볼 수 있다.

그림 10의 (b)는 앞의 그림 9에서 표시된 BCG 파형을 0.5Hz~20Hz 주파수 대역으로 필터링 한 것을 보여준다. 그림 10의 (c)는 그림 9의 (b) 파형이다. (b)의 BCG 파형을 보면, 심전도의 R peak 이후에 BCG에 peak가 나타나는 것을 볼 수 있다.

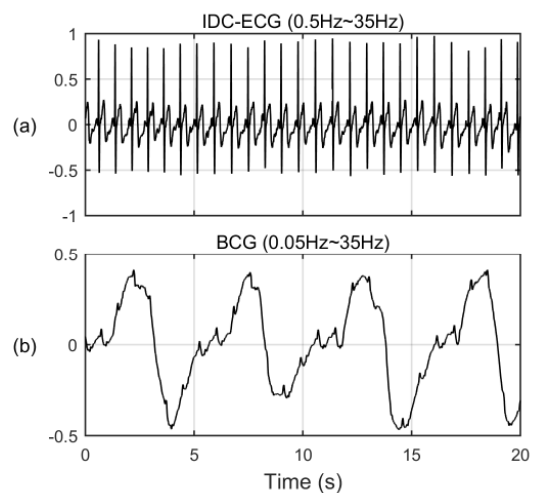


Fig. 9. Measured waveforms of IDC-ECG and BCG

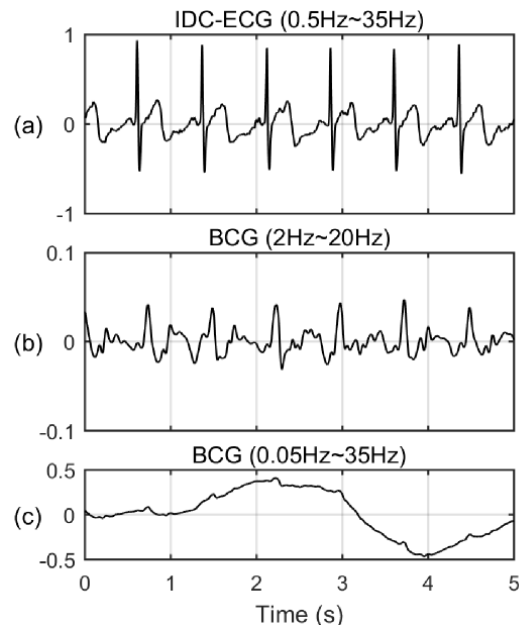


Fig. 10. Filtered BCG waveform of BCG shown in Fig. 9.

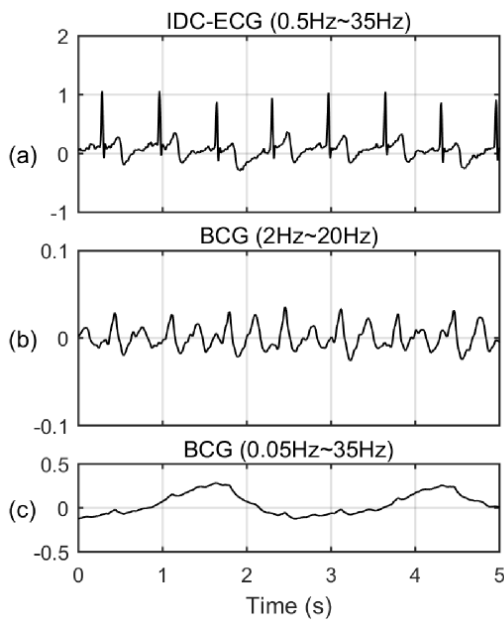


Fig. 11. Filtered BCG waveform

그림 11은 또 다른 피검자로부터 측정된 결과를 보여 준다. 앞의 그림 5와는 BCG 파형이 다르지만, 역시 R peak 이후에 BCG에서 peak가 나타남을 볼 수 있다.

이 측정 방법으로 측정된 BCG 파형이 개인별로 차이가 크게 나타남을 볼 수 있다. 이것은 개인적인 신체 조건이 다르고, 의자에 앉는 자세도 다르기 때문에 발생하는 것으로 이해된다. 따라서 본 측정 방법으로 BCG를 측정할 경우, 각 개인별 맞춤 형태로 분석이 이루어져야 할 것으로 예상된다.

### 3.2 무구속 심전도 심탄도 측정 시스템의 PEP 측정에 적용 가능성 조사

#### 3.2.1 Pre-ejection period (PEP)

문헌에 의하면, PEP는 심전도의 Q파에서 대동맥 판막 열림 시점 사이의 시간차를 의미한다[8]. PEP를 측정하는 가장 정확한 방법은 대동맥 압력을 직접 측정하는 것이다. 하지만 이러한 대동맥 압력의 직접 측정 방법은 침습적이기 때문에, 일상생활에서의 건강관리 목적의 측정으로는 부적합하다. 비침습적 방법으로는 심음도와 초음파를 이용한 echo-cardiogram, 그리고 ICG (impedance-cardiogram) 등이 사용된다[9]. 그중에 ICG가 PEP 측정으로 일반적으로 사용된다.

#### 3.2.2 무구속 PEP 측정

본 연구에서 개발된 무구속 심전도 심탄도 측정용 등

받이를 이용하여 PEP를 측정하고, 이를 ICG (impedance-cardiogram)을 이용하여 측정한 PEP와 비교하였다. 기준으로 사용된 ICG는 일반적인 ICG 측정 방법대로 strip 형태의 전극을 뒷 목 부분과 등의 아래 부분에 붙이고 측정하였다[10]. 측정 장비는 NICO100C (Biopac)을 사용하였으며, 주파수는 100kHz로 설정하였다.

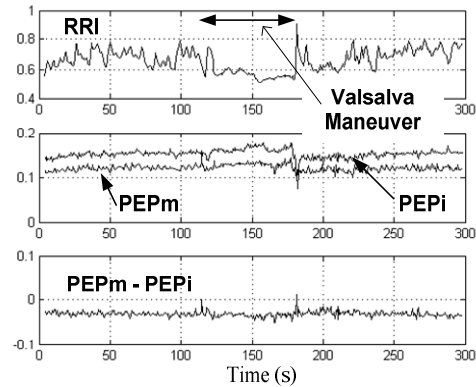


Fig. 12. Comparison between PEP from BCG and PEP from ICG. (a) R-R interval from IDC-ECG. (b) PEPi: PEP from ICG, PEPm: PEP from BCG

측정 결과는 그림 12에 나타내었다. 피검자는 ICG 전극을 부착한 상태에서 무구속 심전도 심탄도 측정 등받이에 기대고 5분동안 측정하였다. 도중에 PEP를 변화시키기 위해 약 1분간 Valsalva maneuver를 실시하였다. 그림 12의 (a)는 심전도에서 측정된 R-R interval를 보여주며, (b)에서, PEPm은 무구속 심전도와 무구속 심탄도에서 측정된 PEP를 나타낸다. PEPm은 심전도의 Q파와 심탄도의 첫 번째 peak사이의 시간으로 계산하였다. (b)에서 PEPi는 ICG로 측정된 PEP를 나타낸다. Valsalva maneuver를 실시하는 동안에 PEP가 변화하는 것을 관찰할 수 있다. 그림3의 (c)는 PEPm과 PEPi의 차이를 보여준다. Valsalva maneuver를 실시한 구간을 포함한 전 측정 구간에서 두 PEP의 차가 일정함을 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 무구속 심전도 심탄도 측정 등받이를 무구속적인 PEP 측정에 적용할 수 있음을 볼 수 있다.

## IV. 결론

본 연구에서 등받이에 부착된 용량성 전극과 EMFi 압력 센서를 이용하면 무구속적으로 심전도와 호흡 신호가 포함된 BCG를 측정할 수 있음을 보였다.

측정된 BCG에서 특징점으로 사용할 수 있는 peak를 검출할 수 있었으며, 이 peak와 심전도의 Q peak간의 시

간차는 pre-ejection period와 높은 상관관계가 있음을 보였으며. 따라서 본 연구에서 개발된 등받이를 무구속적인 pre-ejection period 측정에 적용 가능성을 확인하였다.

본 연구를 통해 개발된 측정 시스템은, 향후의 일상생활에서의 무구속적인 호흡, 심전도, 그리고 Pre-ejection period 측정에 적용하며, 향후 추가적인 연구를 통해 무구속 혈압 측정 연구에도 적용할 계획이다.

REFERENCES

[1] F. S. Cattivelli, "Noninvasive Cuffless Estimation of Blood Pressure from Pulse Arrival Time and Heart Rate with Adaptive Calibration," Sixth International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks 2009, pp 2657-64.

[2] J. C. Kubitz, G. I. Kemming, G. Schultheib, J. Starke, A. Podtschaske, A. E. Goetz, and D. A. Reuter, "The influence of cardiac preload and positive end-expiratory pressure on the pre-ejection period," *Physiol Meas*, vol. 26, pp. 1033-8, 2005.

[3] H. Schachinger, M. Weinbacher, A. Kiss, R. Ritz, and W.Langewitz, "Cardiovascular indices of peripheral and central sympathetic activation," *Psychosom Med*, vol. 63, pp. 788-96, 2001.

[4] E. Pinheiro, O. Postolache, and P. Girao, "Theory and Developments in an Unobtrusive Cardiovascular System Representation: Ballistocardiography," *Open Biomed Eng J*, vol 4, pp 201-216, 2010.

[5] C. S. Kim, et al. "Ballistocardiogram as Proximal Timing Reference for Pulse Transit Time Measurement: Potential for Cuffless Blood Pressure Monitoring," *IEEE Trans Biomedical Eng*, vol 62, pp. 2657-64, 2015.

[6] Y. G. Lim, K. K. Kim, and K. S. Park, "ECG measurement on a chair without conductive contact," *IEEE Trans. Biomedical Engineering*, vol. 53, no. 5, pp. 956-959, 2006.

[7] Y. G. Lim, "A Study on Intrinsic Noise of Capacitively Coupled Active Electrode," *J. of The Institute of Signal Processing and Systems*, vol. 13, no. 1, pp. 44-49, 2012.

[8] S. S. Ahmed, G. E. Levinson, C. J. Schwartz, and P. O. Ettinger, "Systolic time intervals as measures of the

contractile state of the left ventricular myocardium in man," *Circulation*, vol. 46, pp. 559-71, 1972.

[9] J. H. Kim, Y. H. Jeong, "Implementation of Real-time Heart Activity Monitoring System Using Heart Sound," *Journal of the Institute of Convergence Signal Processing*, vol.19, no.1, pp. 14-19, 2018.

[10] Z. Lababidi, D. A. Ehmke, R. E. Durnin, P. E. Leaverton, and R. M. Lauer, "The first derivative thoracic impedance cardiogram," *Circulation*, vol. 41, pp. 651-8, 1970.

저자 소개

임 용 규 (Yong-Gyu Lim)



1988년 2월 서울대 제어계측 (공학사)

1990년 2월 서울대 제어계측 (공학석사)

2006년 2월 서울대 의공학협동과정 (공학박사)

1990년 2월 ~ 1995년 4월 삼성중공업 주임연구원

1995년 5월 ~ 2001년 1월 삼성종합기술원 선임연구원

2007년 2월 ~ 현재 상지대학교 한방의료공학과 조교수  
관심분야 : 의용계측, MRI 시스템