

혈압과 맥파 도달 시간의 선형 관계에 따른 심박변이도 비교 분석

박성률¹, 이진학¹, 이종실^{1*}, 박훈기², 김인영¹

한양대학교 생체의공학과¹, 한양대학교 가정의학과²

Comparative Analysis of Heart Rate Variability according to Linear Relationship between Blood Pressure and Pulse Arrival Time

Seongryul Park¹, Jinhak Lee¹, Jongshill Lee^{1*}, Hoonki Park², In Young Kim¹

Department of Biomedical Engineering, Hanyang University, Korea¹

Department of Family Medicine, Hanyang University, Korea²

*netlee@hanyang.ac.kr

Abstract

Pulse arrival time(PAT)-based continuous blood pressure estimation is attracting attention. However, since the linear relationship between SBP and PAT changes with time, the estimation results still have not provided satisfactory performance. The aim of this study is to analyze why the linear relationship varies with time from the point of view of the autonomic nervous system by comparing HRV parameters. Using VitalDB, one subject's data were classified into high and low correlation set according to the correlation coefficient between SBP and PAT. As a result, when the correlation was high, RMSSD, SDNN, LF power, and variation of SBP (Max-Min of SBP) were significantly higher.

1. 연구 배경

혈압은 개인의 전반적인 건강 상태를 진단하기 위한 중요한 지표 중 하나이다. 혈압이 높은 상태가 지속되는 고혈압의 경우, 전 세계적으로 30세 이상 79세 이하의 성인 약 13억 명이 보유하고 있는 흔한 질환이나 심장, 뇌 질환을 비롯한 다양한 합병증을 유발하여 조기 사망의 주요 원인이 되므로[1] 혈압을 주기적으로 측정하고 모니터링하는 것이 중요하다.

일반적으로 혈압 측정은 비침습적 방법으로 이루어지며 청진법(Auscultatory method)과 오실로메트릭법(Oscillometric method)이 대표적이다. 하지만 커프(Cuff)를 착용하고 공기로 가압하는 측정 방식은 사용자에게 불편함을 줄 수 있으며 일회성 측정만 제공할 뿐 시간에 따라 연속적으로 변화하는 혈압을 기록할 수 없다는 한계가 존재한다.

따라서 커프 없이(Cuff-less) 혈압을 측정할 수 있는 방법의 필요성이 높아지고 있다. 특히 측정의 편의성으로 인해 ECG로부터 PPG까지의 Time delay인 맥파 도달 시간(Pulse arrival time, PAT)이 활용되고 있는데, 혈압이 상승할 때 맥파 이동 속도가 빨라짐에 따라 PAT가 짧아지게 되는 원리를 기반으로 PAT로부터 혈압을 추정할 수 있다.

심장이 뛸 때마다 동맥 혈압(Arterial blood pressure, ABP), ECG, PPG 신호의 한 Cycle이 발생하므로, 침습적으로 측정된 ABP 신호가 포함된 대규모 환자 데이터베이스를 기반으로 PAT 단일 지표뿐만 아니라 심박변이도(Heart rate variability, HRV), PPG morphological feature를 추가한 복합 지표로부터 연속적으로 혈압을 추정하는 연구가 진행되어 왔다[2][3]. 하지만 추정 정확도를 평가했을 때 두 연구 모두 이완기 혈압(Diastolic blood pressure, DBP) 추정은 국제 가이드라인을 만족했으나 수축기 혈압(Systolic blood pressure, SBP)은 좋은 결과를 보이지 못하였다.

한편, 한 연구에서는 ICU 데이터로부터 Beat-to-beat SBP와 PAT의 선형 관계에 대한 분석을 진행했으며 선형 관계가 시간에 따라 달라진다는 사실을 보였다[4]. 이러한 사실이 PAT 기반의 SBP 추정 정확도를 낮추는 요인이 될 수 있으나 선형 관계가 달라지는 원인에 대해서는 가설만을 제시할 뿐 입증할 수 없었다.

따라서 본 연구의 목적은 SBP와 PAT의 선형 관계가 시간에 따라 변화하는 원인에 대해 분석하는 것에 있다. 이를 위해 SBP와 PAT의 선형 관계에 따라 데이터를 구분한다. 혈압의 순간적인 변화는 주로 자율신경계 변화에 의해 조절되므로 자율신경계를 간접적으로 평가할 수 있는 HRV 지표의 비교를 통해 선형 관계가 달라지는 원인을 자율신경계 관점에서 분석하고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 서울대학교병원 마취통증의학과에서 취득한 VitalDB를 활용하였다[5]. VitalDB는 총 6388명의 수술 중인 환자를 대상으로 취득된 활력 징후(Vital signs)와 생체신호 Waveform으로 구성되어 있으며 포함된 데이터는 환자마다 상이하다. 분석에 사용된 ECG, ABP, PPG 신호는 모두 500Hz의 Sampling rate로 기록되었으며 ECG는 심장 부근에서 Lead II로, ABP는 Radial artery에서, PPG는 손가락에서 각각 측정되었다.

정확한 분석을 위해 품질이 좋지 않은 신호는 제외하고자 신호 품질 평가(Signal quality assessment, SQA)를 통해 데이터 선별을 진행하였다. 모든 데이터를 HRV 주파수 분석의 최소 단위인 2분으로 세분화(Segmentation)한 뒤, 각 Segment에 대하여 생리학적 기준 및 Template matching 기반의 Beat-to-beat SQA를 진행하였다. 각 Segment 내에서 좋은 품질로 판정되는 Beat의 비율이 ECG, ABP, PPG 신호 모두 95% 이상인 Segment만을 분석에 사용하였다.

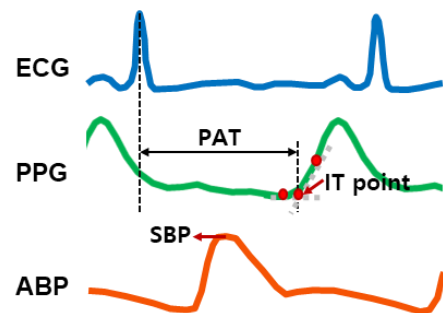


그림 1. Feature Extraction (PAT, SBP)

SBP와 PAT는 Beat-to-beat로 추출하였다. 그림 1. 과 같이 SBP는 ABP 신호의 최댓값이며, PAT는 ECG R peak부터 PPG intersecting tangent(IT) point까지의 Time delay로 계산했다. PPG IT point는 PPG valley의 접선과 최대 미분점의 접선이 만나는 점으로, 신호처리 측면에서 노이즈에 강하다는 장점이 있다. 2분 Segment 내의 모든 Beat에 대해 SBP, PAT 값을 추출하고 Moving median (Window: 10초, Overlap: 5초) 을 통해 이상치를 제거하였다.

각각의 Segment에 대해 SBP와 PAT의 Pearson correlation coefficient(r)로 선형 관계를 구하고, HRV 지표를 추출하였다. $r = -0.7$ 을 기준으로 Segment들을 그림 2. 의 예시와 같이 High correlation set ($r < -0.7$)과 Low correlation set ($|r| < 0.7$)의 두 Subset으로 구분하였다. 추출된 HRV 지표는 RMSSD, SDNN, Mean HR, Standard Deviation of HR(Std HR), LF, HF, LF/HF ratio이며, 추가로 Max-Min of SBP, Max-Min of PAT도 추출하였다. Subset간 지표들의 t-test를 통해 SBP와 PAT의 선형 관계가 다를 때 자율신경계 활동 차이를 분석하였다.

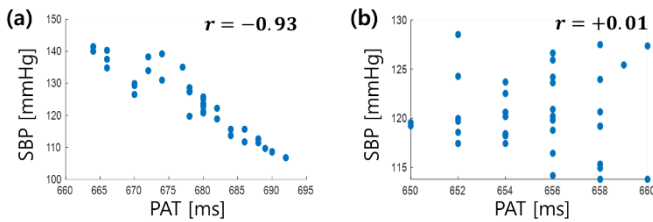


그림 2. SBP-PAT 선형 관계에 따른 Subset별 데이터 예시 (a) High correlation set (b) Low correlation set

3. 연구 결과

HRV 지표는 개인에 따라 값이 다르게 나타나므로 한 개인 내에서만 비교 분석하였으며, SQA 이후 통계 분석에 유의할 만큼 충분한 데이터가 남았는지와 두 Subset 간 Segment 수가 비슷한지를 기준으로 한 명을 선정하였다. (67세 남성, BMI 15 kg/m², 정상 혈압 및 혈당)

그림 3. 은 SQA 이후 선별된 Segment들의 상관 계수(r)에 따른 히스토그램을 나타냈다. High correlation set과 Low correlation set에 해당하는 Segment 수는 각각 54개, 53개이며 $r > 0.7$ 인 부분은 Segment 수가 적어 통계 비교 분석이 제한되므로 제외하였다.

표 1. 은 Subset 간 HRV 지표의 평균과 분산을 나타낸 결과이다. t-test 분석 결과 RMSSD와 SDNN ($p < 0.05$), LF power ($p < 0.01$), Max-Min of SBP ($p < 0.001$)가 유의미한 차이를 보였으며, 나머지 지표들은 Mean HR을 제외하고 High correlation set이 전반적으로 높은 값을 나타냈다.

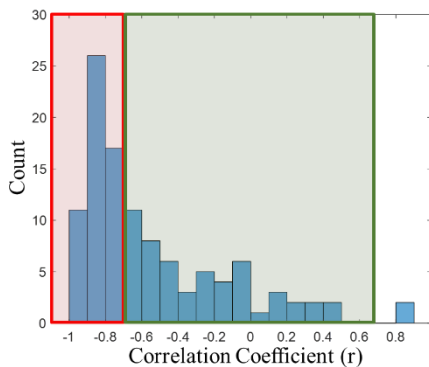


그림 3. 상관 계수에 따른 Segment의 히스토그램 분포 (Red box: High correlation set, Green box: Low correlation set)

Feature	Subset	Mean ± SD	Feature	Subset	Mean ± SD
RMSSD	High	4.58 ± 0.62	LF	High	10427 ± 6572
	Low	4.25 ± 0.81		Low	7325 ± 4803
SDNN	High	11.30 ± 7.41	HF	High	3611 ± 1351
	Low	8.93 ± 3.79		Low	3191 ± 1820
Mean HR	High	86.33 ± 3.52	LF/HF Ratio	High	3.25 ± 2.49
	Low	86.93 ± 5.65		Low	2.43 ± 2.06
Std HR	High	1.39 ± 0.88	Max-Min (SBP)	High	16.20 ± 6.17
	Low	1.12 ± 0.51		Low	12.13 ± 5.30
High $r < -0.7$ Low $-0.7 < r < 0.7$			Max-Min (PAT)	High	14.35 ± 5.56
				Low	13.68 ± 10.11

표 1. Subset 간 HRV 지표의 Mean±SD

결과적으로 SBP의 변화가 클 때, SBP와 PAT는 높은 상관 관계를 보인다. 이때 RMSSD, SDNN, LF power 모두 높은 값을 가지므로 교감신경계와 부교감신경계 모두 활성화 된다고 볼 수 있다[6]. 자율신경계의 균형을 나타내는 LF/HF Ratio는 유의미한 차이를 보이지 않았으나 High correlation set이 평균적으로 높으며, 이는 교감신경계가 우세함을 의미한다. 결과로 미루어 보아 반대로 HRV 분석을 통해 교감신경계가 활성화되는 구간을 알 수 있다면 SBP 변화 뿐만 아니라 SBP와 PAT의 선형 관계가 더 높을 것이므로 PAT로부터 SBP를 더 잘 추정할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 시간에 따라 SBP와 PAT의 선형 관계가 달라지는 원인을 자율신경계 관점에서 해석하고자 하였다. 하지만 본 연구 결과는 한 명의 데이터에 한정적이며, 개인 간 자율신경계 반응은 상이하게 나타나므로 향후 더 많은 사람의 데이터를 분석하고자 한다. 이를 위해 Normalized HRV 지표를 사용한다면 개인 간 차이를 최소화하고 일반화된 결론을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

4. Acknowledgements

이 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2018R1A5A7025522).

5.참고 문헌

- [1] WHO. "Hypertension." WHO, 25 August 2021. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/hypertension> accessed 12 April 2022.
- [2] Lee, Joonnyong, et al. "Analysis of pulse arrival time as an indicator of blood pressure in a large surgical biosignal database: recommendations for developing ubiquitous blood pressure monitoring methods." *Journal of clinical medicine* 8.11 (2019):
- [3] Zhang, Yiming, et al. "Study of cuffless blood pressure estimation method based on multiple physiological parameters." *Physiological Measurement* 42.5 (2021):
- [4] Escobar-Restrepo, Braiam, Robinson Torres-Villa, and Panayiotis A. Kyriacou. "Evaluation of the linear relationship between pulse arrival time and blood pressure in ICU patients: potential and limitations." *Frontiers in physiology* (2018):
- [5] Lee, Hyung-Chul, and Chul-Woo Jung. "Vital Recorder—a free research tool for automatic recording of high-resolution time-synchronised physiological data from multiple anaesthesia devices." *Scientific reports* 8.1 (2018): 1-8.
- [6] Shaffer, Fred, and Jay P. Ginsberg. "An overview of heart rate variability metrics and norms." *Frontiers in public health* (2017):