

FMCW 레이더 비접촉 측정 기반 심박 신호의 대동맥판 개방 및 폐쇄 시점 분석에 관한 연구

류형록*, 강우석**, 김경호**
단국대학교*

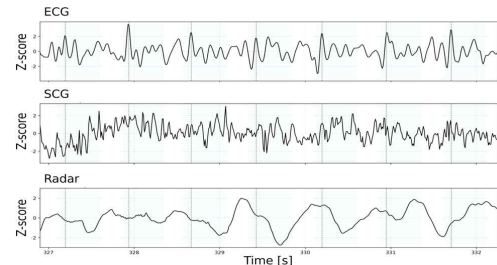
Analysis of Aortic Valve Opening and Closure Using Cardiac Signals Acquired by Non-Contact FMCW Radar

Hyeong-Rok Ryu*, Woo-Seok Kang**, Kyung-Ho Kim**
Dankook University

Abstract - 본 연구는 FMCW 레이더 기반 비접촉 심박 신호에서 대동맥판 개방(AO) 및 폐쇄(AC) 기계적 이벤트의 beat 단위 분석 가능성을 확인하였다. ECG, SCG 및 FMCW 레이더 신호를 600초 동안 동시에 취득하고, ECG R-peak 기준으로 세 신호가 모두 대응되는 848개 beat를 분석하였다. SCG fiducial point 검출 결과를 reference로 사용하여 Radar AO/AC 시점을 비교한 결과, Radar AO는 SCG AO와 근접한 시점 분포를 보였고, Radar AC는 AO보다 큰 상대 시점 차이와 넓은 분포를 나타냈다. CTI 평균 비교에서도 Radar PEP, LVET 및 QS2가 SCG보다 크게 산출되었다. 이를 통해 FMCW 레이더 신호에서 AO/AC 이벤트를 동일한 beat 단위 구조로 관찰할 수 있었으며, 이벤트별 시점 분포 특성이 다르게 나타남을 확인했다.

분석 시스템의 전체 구성을 나타낸다. 시스템은 Signal Acquisition, SCG AO/AC Reference Timing Generation, AO/AC Timing Analysis, Output 단계로 구성된다. ECG와 SCG는 Radar AO/AC 시점 분석을 위한 정렬 기준 및 비교 reference로 사용했으며, Radar 신호는 AO/AC 시점 탐색을 위한 분석 대상 신호로 사용했다.

2.1.1 Signal Acquisition



〈그림 2〉 Simultaneous ECG/SCG/Radar acquisition

〈그림 2〉는 ECG, SCG 및 Radar 신호의 동시 취득 데이터 중 327 - 332초 구간의 파형을 나타낸다. x축은 신호 취득 시간(s), y축은 각 신호를 정규화한 z-score 값이다. 본 연구에서는 단일 피험자를 대상으로 600초 동안 ECG, SCG 및 FMCW Radar 신호를 100 Hz 기준으로 동시에 취득한다. ECG 신호에서 총 600초 데이터에서 853개의 ECG R-peak가 검출하며, 이중 ECG-SCG-Radar 신호가 모두 대응되는 848개 beat를 최종 분석에 사용한다. ECG R-peak는 ECG 파형에서 진폭이 크고 검출이 명확하므로, SCG와 Radar 신호를 동일 심박 주기에서 비교하기 위한 정렬 기준으로 사용한다. ECG 신호는 손목 부착 Lead II 형태로 취득했으며, RA(Right Arm) 전극은 오른쪽 손목, LA(Left Arm) 전극은 왼쪽 손목, LL(Left Leg) 전극은 왼쪽 발목 위치에 부착한다. 입력 ECG 전위는 아날로그 프론트엔드 회로에서 차동 증폭 및 필터링한 뒤 STM32 기반 ADC로 취득하고, 전처리 후 R-peak를 검출한다. SCG 신호는 흉부 중앙 부착 6축 IMU 센서로 취득하며, Radar AO/AC 시점과 비교하기 위한 reference 산출에 사용한다.

Radar 신호는 BGT60TR13C FMCW 레이더를 피험자의 흉부 전방 중앙 약 0.4 m 거리에 배치하여 비접촉으로 취득한다. 레이더는 흉부 방향으로 chirp 신호를 송신하고, 흉벽 미세 움직임에 의해 변조되어 수신된 반사 신호를 frame 단위로 저장한다. raw data는 range FFT를 통해 거리 성분으로 변환하고, 관심영역(Region of Interest, ROI)을 도출한다. ROI의 phase 변화에서 흉부 미세 변위 신호를 추출하고, LMS 필터로 호흡 성분을 제거한다. 정렬된 Radar beat에서 AO/AC 분석 구간을 설정한다.

2.1.2 SCG Reference Generation

SCG AO/AC reference 시점은 선행 SCG fiducial point 검출 연구에서 제안된 방법을 참고하여 산출한다.[1][2] AO는 AO peak detection을 이용하고, AC는 S1/S2 anchor 기반 SCG fiducial point extraction을 이용한다. SCG 신호는 Radar

1. 서 론

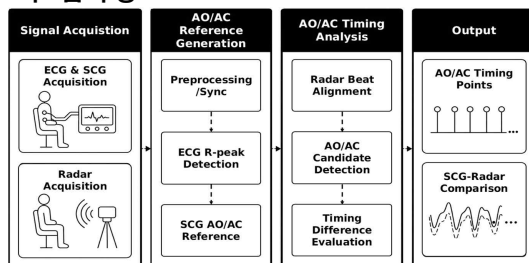
심박수는 심혈관 상태를 평가하는 기본 지표지만, 단순 심박수만으로는 심장의 수축 및 판막 운동과 같은 기계적 이벤트를 확인하기 어렵다. 대동맥판막 개방(Aortic Valve Opening, AO)과 폐쇄(Aortic Valve Closure, AC)는 좌심실 수축기에서 대동맥판이 열리고 닫히는 주요 이벤트이며, 전구혈시간(Pre-Ejection Period, PEP), 좌심실 박출시간(Left Ventricular Ejection Time, LVET), 총 전기기계적 수축시간(total electromechanical systolic interval, QS2) 등 심장 시간 간격(Cardiac Time Interval, CTI) 분석에 활용된다.[1][2]

주파수 변조 연속파(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW) 레이더는 흉부 미세 움직임을 비접촉으로 측정할 수 있어 호흡·심박 모니터링에 활용되고 있으며[3], 심장성 미세 움직임 기반 기계적 활동 분석 가능성도 보고되고 있다.[4] 그러나 레이더 심박 신호에서 AO/AC 이벤트를 beat 단위로 분석하고, SCG reference와 비교한 연구는 제한적이다.

본 연구에서는 심전도(Electrocardiogram, ECG) R-peak 기준 심진도(Seismocardiography, SCG) 및 Radar beat를 정렬하고, SCG AO/AC reference와 Radar AO/AC 시점을 비교해 FMCW 레이더 신호에서 기계적 이벤트의 관찰 가능성을 분석했다.

2. 본 론

2.1 시스템 구성



〈그림 1〉 시스템 구성도

〈그림 1〉은 ECG, SCG 및 FMCW 레이더 기반 AO/AC 시점

AO/AC 시점의 비교 기준으로 사용한다.

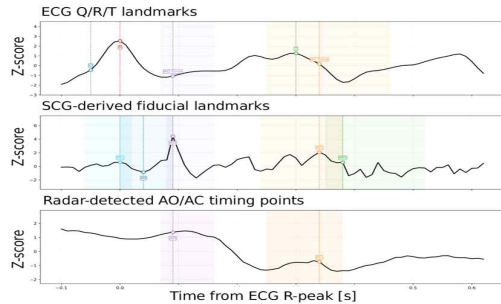
ECG Q 시점과 SCG AO/AC fiducial point를 이용하여 CTI를 산출한다. PEP는 ECG Q 시점 t_Q 에서 AO의 시점 t_{AO} 까지의 시간으로, 심실 전기적 활성화 이후 대동맥관 개방까지의 전구혈 시간을 의미한다. LVET는 AO 시점 t_{AO} 에서부터 AC 시점 t_{AC} 까지의 시간으로, 대동맥관 개방 이후 폐쇄까지의 좌심실 박출 시간을 의미한다. QS2는 ECG Q 시점 t_Q 부터 AC의 시점 t_{AC} 까지의 시간으로, 전기적 활성화 시작부터 대동맥관 폐쇄까지의 총 전기기계적 수축시간을 의미한다. 각 지표는 식 (1)~식 (3)과 같이 계산했다.

$$PEP = t_{AO} - t_Q \quad (1)$$

$$LVET = t_{AC} - t_{AO} \quad (2)$$

$$QS2 = t_{AC} - t_Q \quad (3)$$

2.1.3 AO/AC Timing Analysis

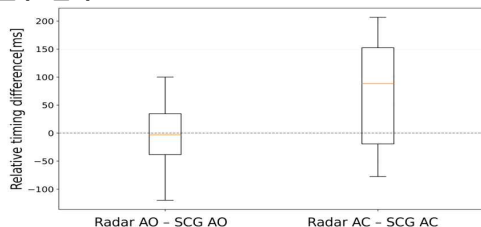


〈그림 3〉 SCG, Radar AO/AC landmarks

〈그림 3〉은 정렬된 ECG, SCG 및 Radar beat에서 AO/AC 시점을 탐색하는 분석 절차를 나타낸다. x축은 ECG R-peak로부터의 상대 시간(s), y축은 정규화된 z-score 값이다. 파란색 계열은 Q, MC, IM 등 초기 fiducial point, 빨간색은 ECG R-peak, 보라색은 AO, 주황색은 AC, 초록색은 T 또는 MO와 같은 후기 fiducial point를 의미한다.

R-peak 이후의 beat 파형을 초기 수축 구간과 후기 수축 구간으로 나누어 시점을 탐색한다. AO 탐색 구간은 R-peak 이후 70 - 160 ms, AC 탐색 구간은 250 - 520 ms로 설정한다. AO는 초기 수축기 이벤트, AC는 후기 수축기 이벤트로 가정하여 탐색 범위를 제한한다. 각 구간에서는 Radar beat의 형태학적 변화를 이용하여 시점을 산출한다. AO는 상승 기울기, 국소 극값, 곡률 변화 및 포락선 에너지로 탐색하고, AC는 하강 기울기, 국소 최솟값, 변곡 특성 및 곡률 변화로 탐색한다. 각 시점에 신뢰도 점수를 부여하고, 이를 융합하여 최종 Radar AO/AC 시점을 정의한다. 최종 Radar AO/AC 시점은 SCG AO/AC reference와 1:1로 대응시켜 비교한다. 상대 시점 차이는 Radar 시점에서 SCG 시점을 뺀 값으로 정의한다. Radar 신호에서 AO/AC 이벤트가 beat 단위로 관찰 가능하지 분석한다.

2.2 연구 결과



〈그림 4〉 Radar vs SCG AO/AC relative timing

〈그림 4〉는 Radar와 SCG reference 간 상대 시점 차이를 boxplot으로 나타낸 결과이다. x축은 Radar AO-SCG AO 및 Radar AC-SCG AC, y축은 Radar 시점에서 SCG reference 시점을 뺀 상대 시간 차이(ms)를 의미한다. 848개 대응 beat 분석

결과, Radar AO-SCG AO는 평균 -3.03 ms, 중앙값 -3.25 ms로 0 ms에 근접했다. Radar AC-SCG AC는 평균 69.76 ms, 중앙값 88.38 ms의 상대 시점 차이를 보였으며, AO보다 넓은 분포를 나타냈다.

〈표 1〉 Mean CTI comparison

CTI	SCG 평균 [ms]	Radar 평균 [ms]	차이 [ms]
PEP	112.4	147.3	+34.9
LVET	287.3	309.8	+22.5
QS2	399.7	457.1	+57.4

〈표 1〉은 848개 대응 beat에서 SCG 및 Radar AO/AC 시점을 식 (1)~식 (3)에 적용하여 산출한 CTI 평균 비교 결과이다. 시점 산출 과정에서 국소 보간 기반 정밀 보정을 적용했으므로 평균값은 소수점 단위로 표시했다. 차이는 Radar 평균에서 SCG 평균을 뺀 값으로 정의했다. SCG의 PEP, LVET 및 QS2는 각각 112.4 ms, 287.3 ms, 399.7 ms로 산출됐으며, Radar의 PEP, LVET 및 QS2는 각각 147.3 ms, 309.8 ms, 457.1 ms로 나타났다. Radar CTI 값은 SCG보다 각각 34.9 ms, 22.5 ms, 57.4 ms 크게 나타났다.

3. 결 론

본 연구에서는 FMCW Radar 신호에서 AO/AC 이벤트 시점을 beat 단위로 분석하고, 이를 SCG reference와 비교했다. 848개 대응 beat 분석 결과, Radar AO/AC 시점은 정렬된 동일한 beat 단위 분석 구조에서 검출되었으며, SCG reference와 1:1 비교가 가능했다. Radar AO는 SCG AO와 비교적 근접한 중심 시점 분포를 보였으나, Radar AC는 AO에 비해 더 큰 상대 시점 차이와 넓은 분포를 나타냈다. 이는 Radar 신호에서 AO/AC 이벤트가 모두 관찰 가능하지만, 두 이벤트가 레이더 파형에서 서로 다른 형태학적 특성으로 나타날 수 있음을 의미한다.

CTI 평균 비교에서도 Radar와 SCG reference 간 시점 차이가 시간 간격 지표에 반영됨을 확인했다. Radar PEP, LVET 및 QS2는 SCG보다 크게 산출됐다. 이는 Radar AO/AC 시점이 SCG reference와 동일한 위치에서 검출되지는 않지만, 동일한 beat 단위 구조에서 PEP, LVET, QS2와 같은 시간 간격 지표로 비교 가능함을 보여준다. 따라서 FMCW Radar 기반 AO/AC 분석은 단순 심박수 추정을 넘어, 심장 기계적 이벤트의 상대 시점을 비접촉 방식으로 관찰가능성을 시사한다.

향후 연구에서는 다양한 피험자 및 부정맥 조건에서 데이터셋을 확장하고, Radar beat의 형태학적 특징을 학습하는 모델을 적용하여 AO/AC 시점 검출 성능을 개선하고자 한다. 또한 SCG뿐만 아니라 echocardiography, ICG, PCG 등 독립적인 기준 신호와 비교하여 실제 판막 이벤트와의 연관성을 검증하고, 차량·SDV 환경에서 운전자 생체신호 모니터링 및 이상 상태 감지로의 확장 가능성을 확인하고자 한다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] C. Zheng et al., "High accurate detection method for aortic valve opening of seismocardiography signals," Biomed. Signal Process. Control, vol. 87, 2024.
- [2] M. Di Rienzo et al., "An algorithm for the beat-to-beat assessment of cardiac mechanics during sleep on Earth and in microgravity from the seismocardiogram," Sci. Rep., vol. 7, 2017.
- [3] C. Li et al., "A review on recent advances in Doppler radar sensors for noncontact healthcare monitoring," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 61, no. 5, pp. 2046 - 2060, 2013.
- [4] J. Qiao et al., "Contactless multiscale measurement of cardiac motion using biomedical radar sensor," Front. Cardiovasc. Med., vol. 9, 2022.