

지능형 자동차를 위한 정신적 부하 수준별 운전자의 ECG 생체신호 특성 분석

이원섭¹, 정기효², 홍원기¹, 박수완³,
박윤숙³, 손준우³, 박세권⁴, 유희천¹

¹포항공과대학교 산업경영공학과

²Pennsylvania State University 산업공학과

³대구경북과학기술원 공공원천기술연구센터

⁴공군사관학교 산업공학과

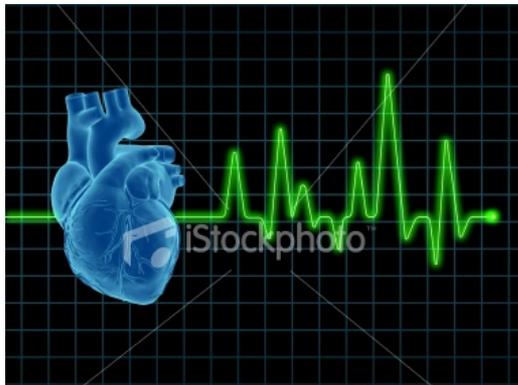
목 차

- 연구 배경 및 목적
- 연구 방법
- 결과
- 토의 및 추후 연구

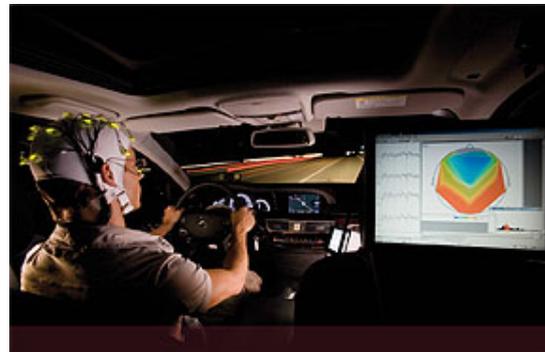
연구 배경

□ 차세대 지능형 자동차의 안전 운전 시스템

- 운전자의 정신적 부하 수준의 정량적 파악
- 운전자 맞춤형 주행 정보 제공
- 운전 부하 수준의 과학적 측정 및 분석 방법: 인간의 생체신호를 이용



생체신호 정보



정신적 부하 파악



지능형 자동차
안전 운전 시스템

생체신호의 종류 및 특성

- 생체신호의 종류: 심전도(electrocardiography, ECG), 호흡 수(respiration rate), 피부전기활동(skin conductance)

□ ECG 지표

- 심박 수(heart rate, HR): **부하 ↑ ⇒ HR ↑** (Mehler et al., 2009)
- 심박 주기 변동(heart rate variability, HRV): **부하 ↑ ⇒ HRV ↓**
(Berntson et al., 1997)

- 운전 생체신호 측정에 적용된 **HRV 척도** 예시 (이원섭, 2009)

- Time domain: SDNN, RMSSD
- Frequency domain: LF/HF

$$SDNN = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (RR_j - \overline{RR})^2}{N - 1}}$$

$$RMSSD = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N-1} (RR_{j+1} - RR_j)^2}{N - 1}}$$

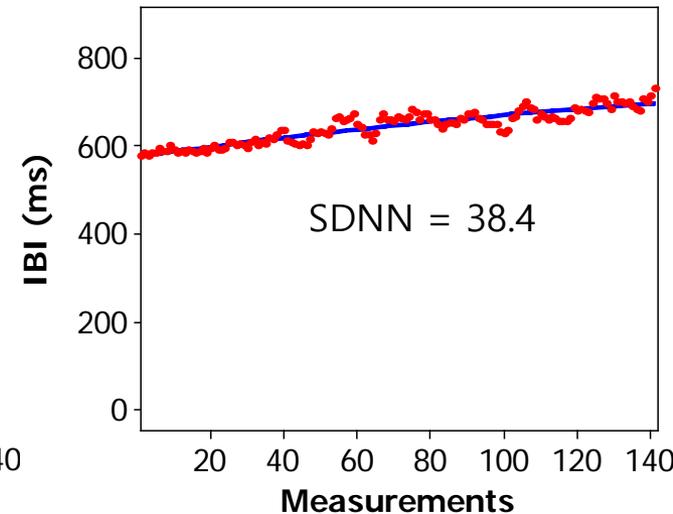
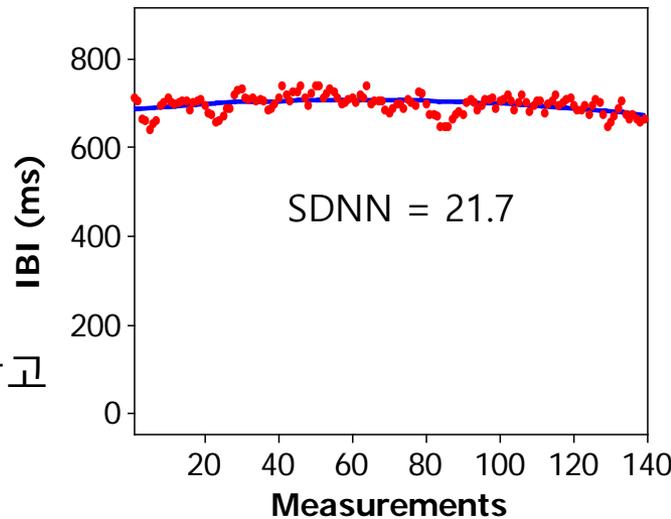
ECG 신호 기반의 작업 부하 파악 연구

- ❑ 항공기 조종 및 자동차 운전 시의 작업 부하 파악을 위해 적용 (Verwey and Veltman, 1996; Boucsein et al., 2007; Perala and Sterling, 2007)
- ❑ **지능형 자동차의 운전자 작업부하 예측에 ECG를 활용하기 위해서는 부하 수준을 민감하고 정확하게 판별하는 최적의 HRV 정량화 척도를 파악하는 것이 필요**



ECG 신호 기반 작업부하 분석의 한계

- 기존의 시간 도메인 척도(SDNN, RMSSD)는 점진적으로 증가 및 감소하는 양상의 ECG 신호에 대한 부하 수준을 민감하게 평가해내지 못함



예시: Data의 변동이 작고
작업부하가 낮은 양상

구분	척도	설명	공식
시간 도메인	SDNN	심박 주기의 표준 편차	$SDNN = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (RR_j - \overline{RR})^2}{N - 1}}$
	RMSSD	인접 심박 주기 간의 평균 제곱합	$RMSSD = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N-1} (RR_{j+1} - RR_j)^2}{N - 1}}$

연구 목적

ECG 생체신호의 지능형 자동차 안전 운전 시스템 개발에 적용

- 작업 부하 시의 ECG 신호 변화 특성을 토대로 신규 HRV 정량화 척도 (RMSE) 제안
- ECG 척도(기존 척도 & 신규 척도)들의 운전 부하 판별 정확성 평가

실험 참여자

- ❑ 20~30대 (28.5세, SD = 4) 남성 8명
- ❑ 평균 운전 경력: 8년 이상 (SD = 2.3)
- ❑ 특이사항: 심혈관계 질환 없음



실험 장면

실험 장비

- 주행 시뮬레이터: STISIM Drive™ (Systems Technology Inc., USA)
- 주행 시나리오
 - 주행 환경: 편도 2차 고속도로 (폭 4.57m)
 - 100km/h 속도로 약 30km 주행



주행 시뮬레이터 설치 (예)



주행 시뮬레이터 화면

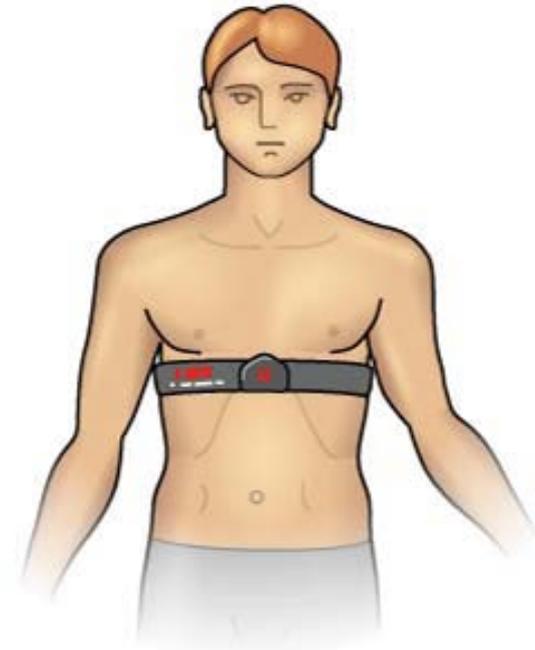
측정 장비

□ ECG 측정

- **MEDAC system/3** (Biomation, USA)
- **BioHarness BT** (Zephyr™, USA): MEDAC의 정확성 검토 평가 용도

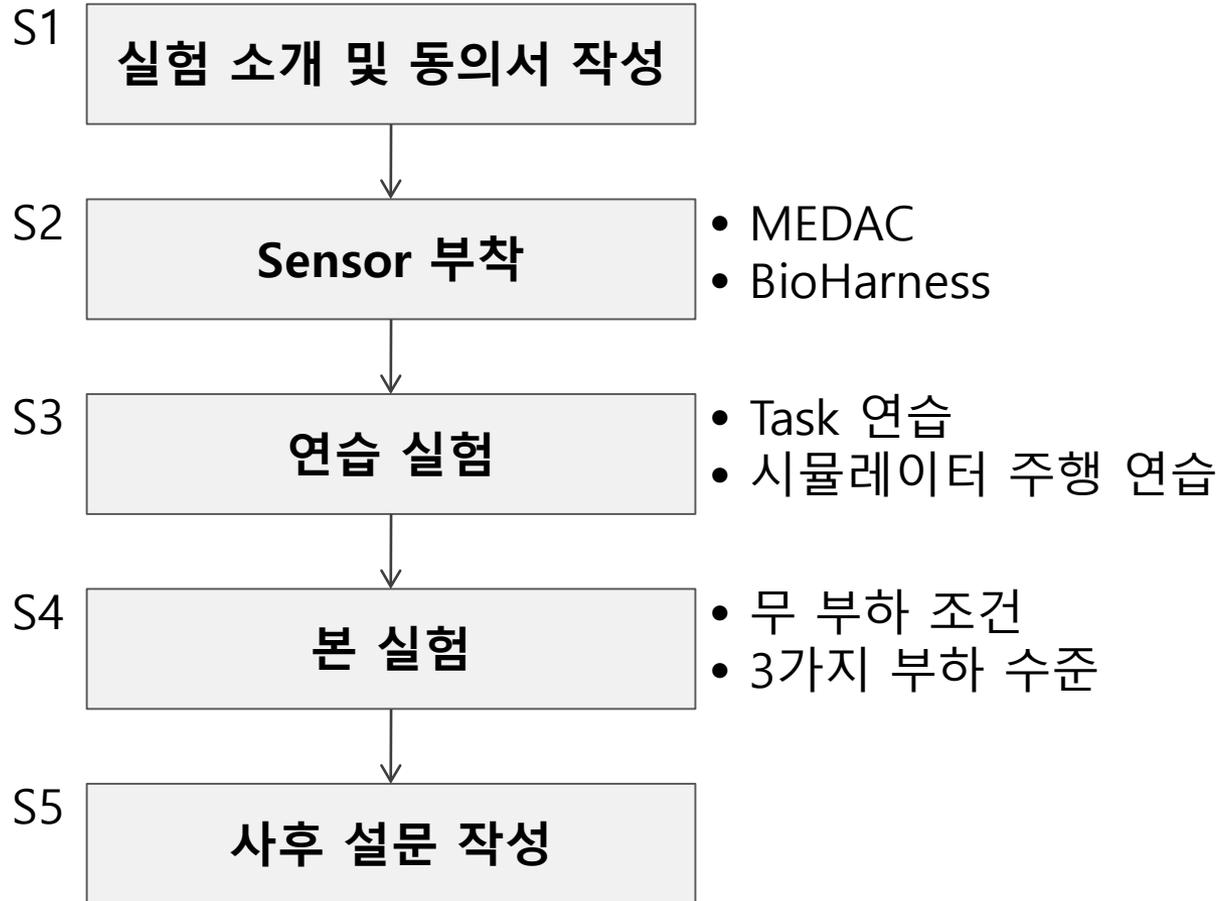


MEDAC sensor 부착
(목 부위; 유선; 250Hz)



BioHarness sensor 부착
(가슴 부위; 무선; 250Hz)

실험 절차



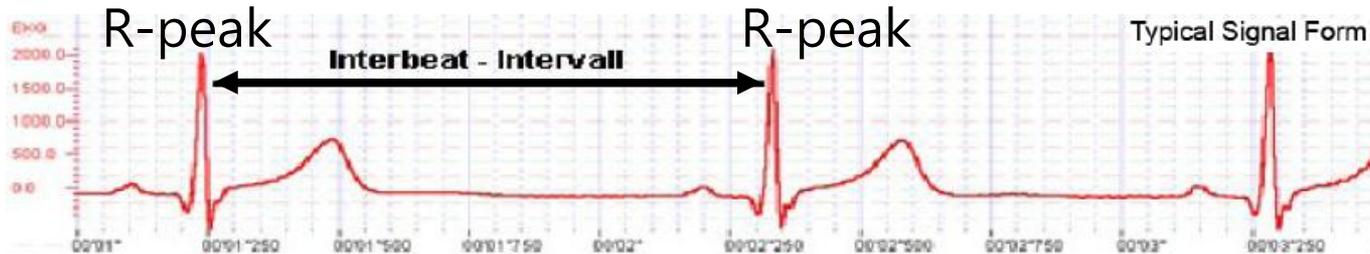
실험 설계

- ❑ One-factor within subject design
- ❑ 실험 변수
 - 독립변수: 정신적 부하 (기준 부하, 낮은 부하, 중간 부하, 높은 부하)
 - 종속변수: ECG 척도 (HR, SDNN, RMSSD, RMSE, LF/HF)
- ❑ 주 작업: 고속도로 주행 (기준 부하 측정)
- ❑ 보조 작업: N-back task
 - 연속적으로 제시되는 무작위 숫자들의 N번째 이전 숫자를 기억해내는 암기 작업 (Son et al., 2010)
 - 0-back: 낮은 부하
 - 1-back: 중간 부하
 - 2-back: 높은 부하



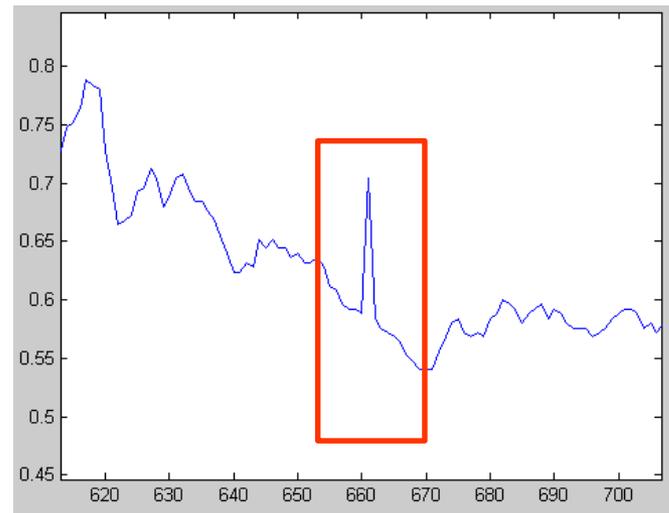
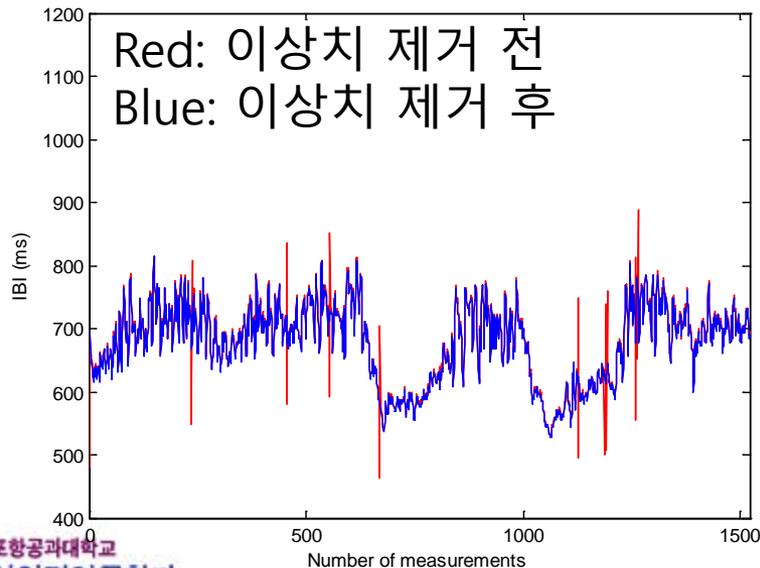
신호 처리 및 이상치 제거

- ECG 신호의 정량화를 위해 inter-beat interval (IBI = R-to-R interval) 추출



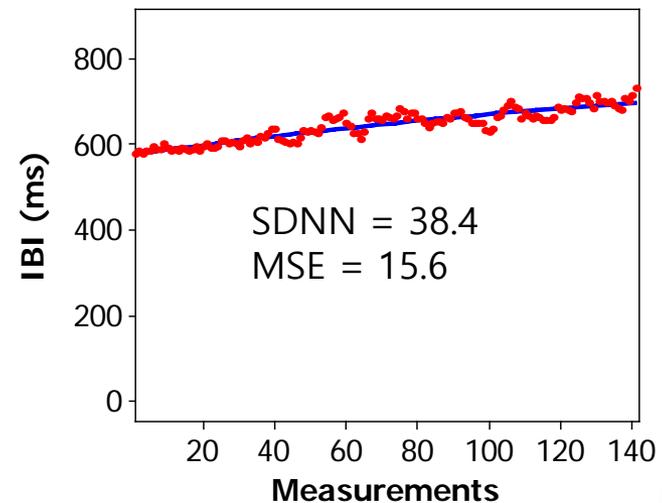
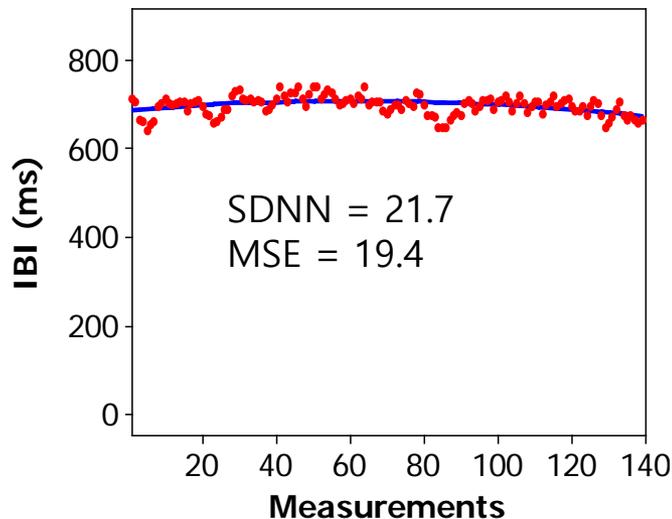
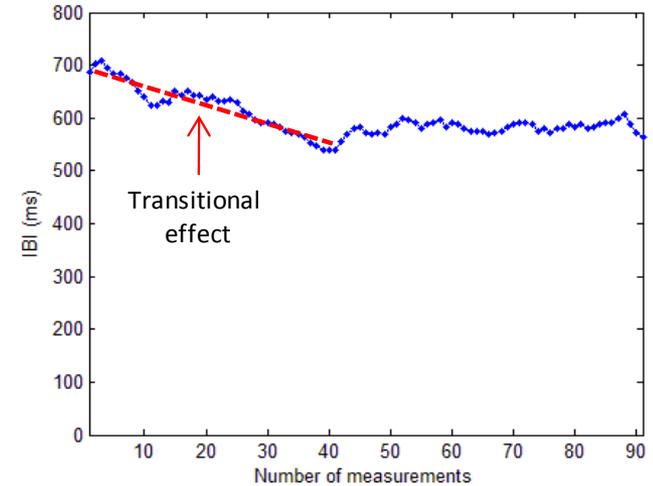
ECG 신호와 inter-beat interval (0.4 ~ 1.2)

- IBI filtering: 직전 IBI의 15% 초과 시 data 제거 (제거율: < 2%)



평가 척도

- 기존 척도: HR, SDNN, RMSSD, LF/HF
- 신규 제안 척도
 - Root mean squared error (RMSE)
 - 작업 부하가 가중되면 IBI가 점진적으로 감소하는 경향(transition effect)을 제외한 실제적인 IBI의 변동성을 파악

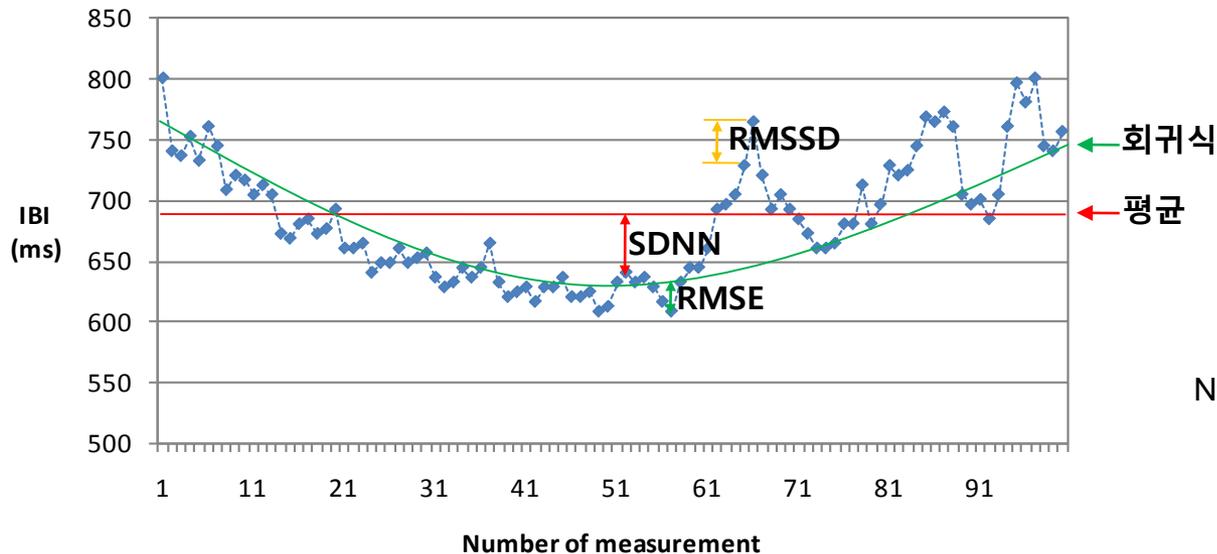


평가 척도 비교

□ Mean $\frac{\sum_{i=1}^n (y_i)}{n}$

□ Variability measure $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i)^2}{n-1}}$

- SDNN: 평균 대비 편차($d_i = y_i - \bar{y}$)
 - RMSSD: 직전 data 대비 편차($d_i = y_i - y_{i-1}$)
 - RMSE: 회귀 추정값 대비 편차($d_i = y_i - \hat{y}$)
- } IBI 변화 trend 반영



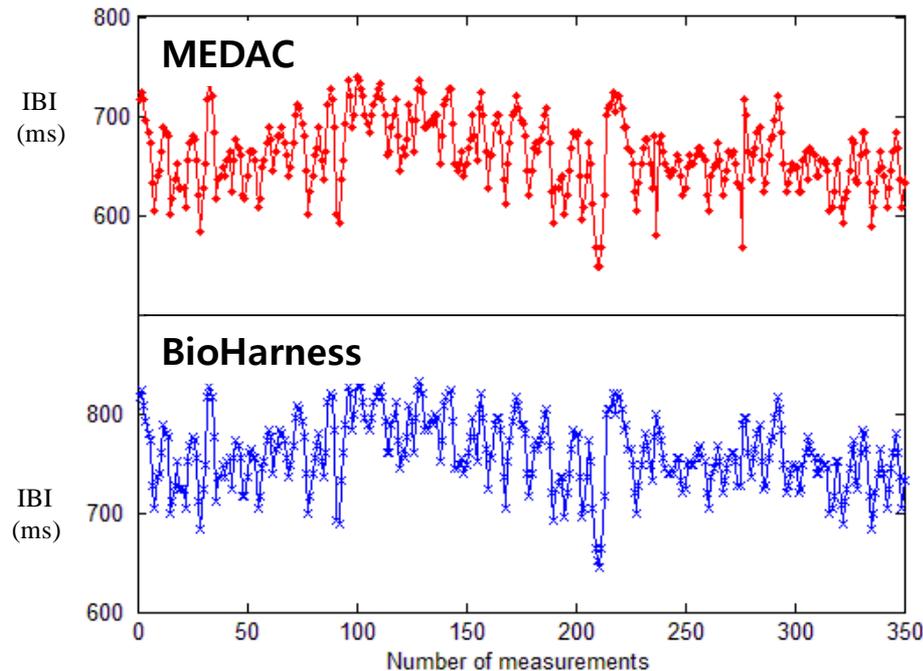
Note: SDNN = Standard deviation of N-N intervals
 RMSSD = Root mean of sum of squared differences
 RMSE = Root mean square error

결과: 측정 장비 정확성

□ MEDAC과 BioHarness 측정값 상호 유사 ($t(11, 389) = 325.1, p < 0.001$)

- 상관계수: 0.91 (SD = 0.13)
- 평균 절대 차이: 10.3 ms (SD = 13.7)

통계적 차이 없음 ($t(22, 780) = -0.21, p = 0.83$)



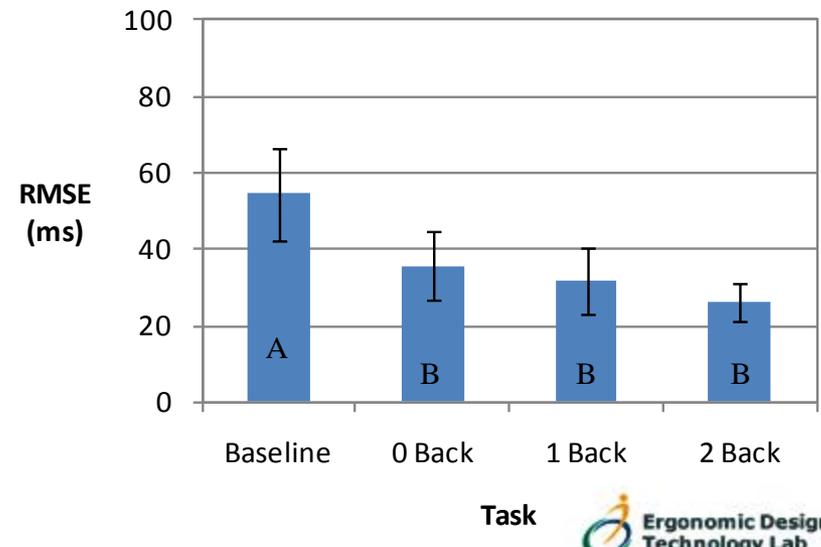
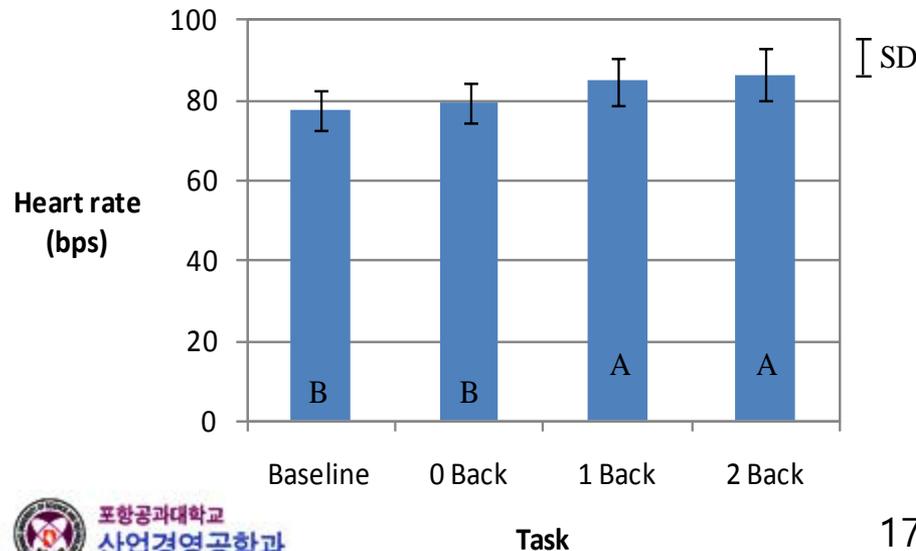
평가 척도별 결과: HR & RMSE

□ Heart rate

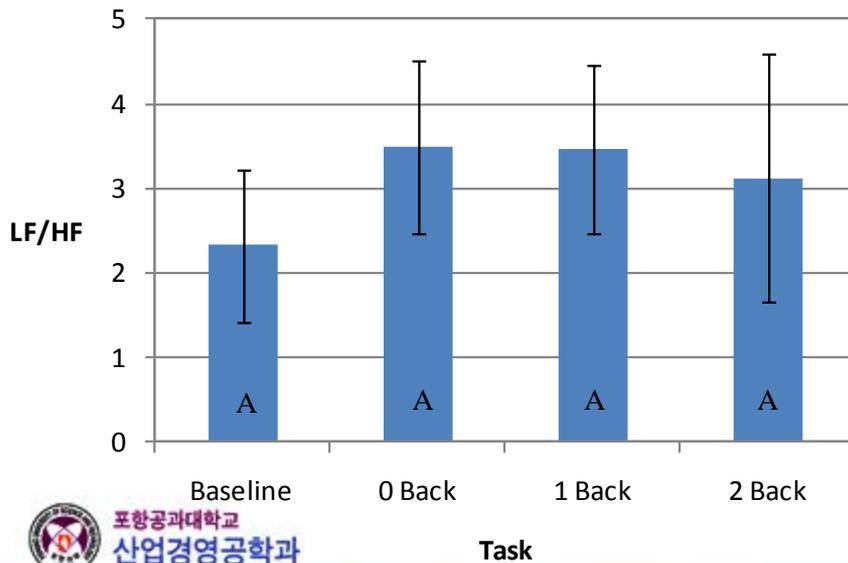
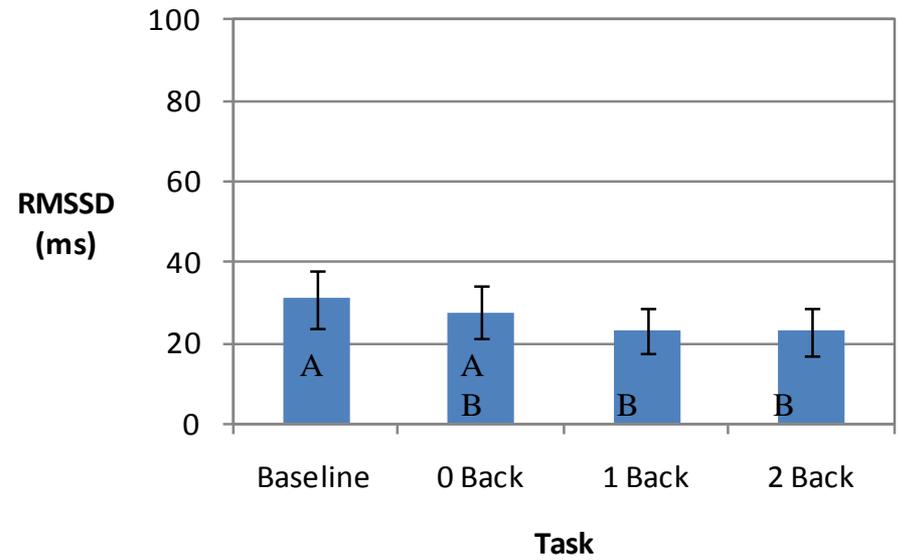
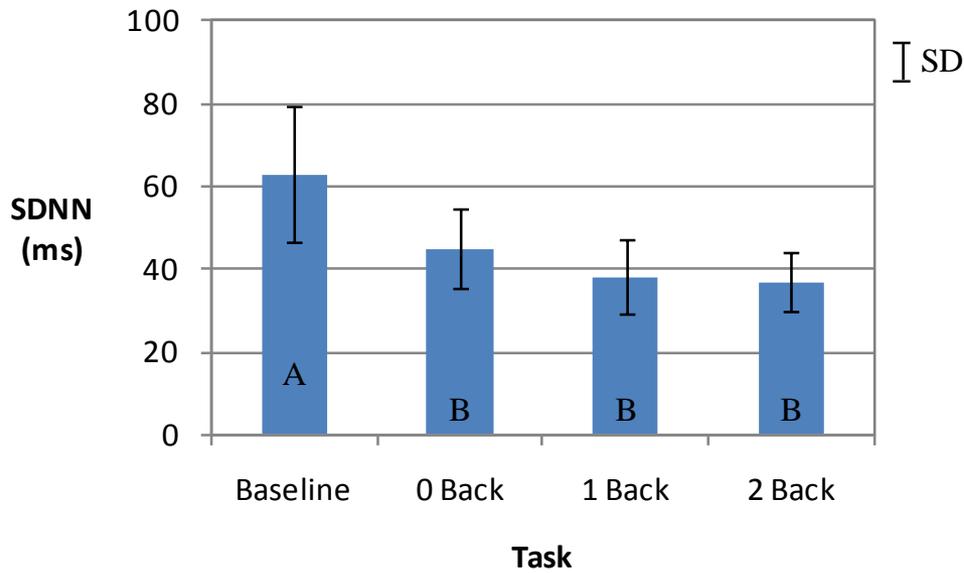
- 부하 수준에 따라 증가하는 경향 ($F(3, 20) = 4.79, p = 0.011$)
- 무 부하(77.4) < 낮은 부하(79.5) < 중간 부하(84.9) < 높은 부하(86.5)

□ RMSE

- 부하 수준에 따라 감소하는 경향 ($F(3, 20) = 9.42, p = 0.004$)
- 무 부하(54.6) > 낮은 부하(35.6) > 중간 부하(32.0) > 높은 부하(26.4)



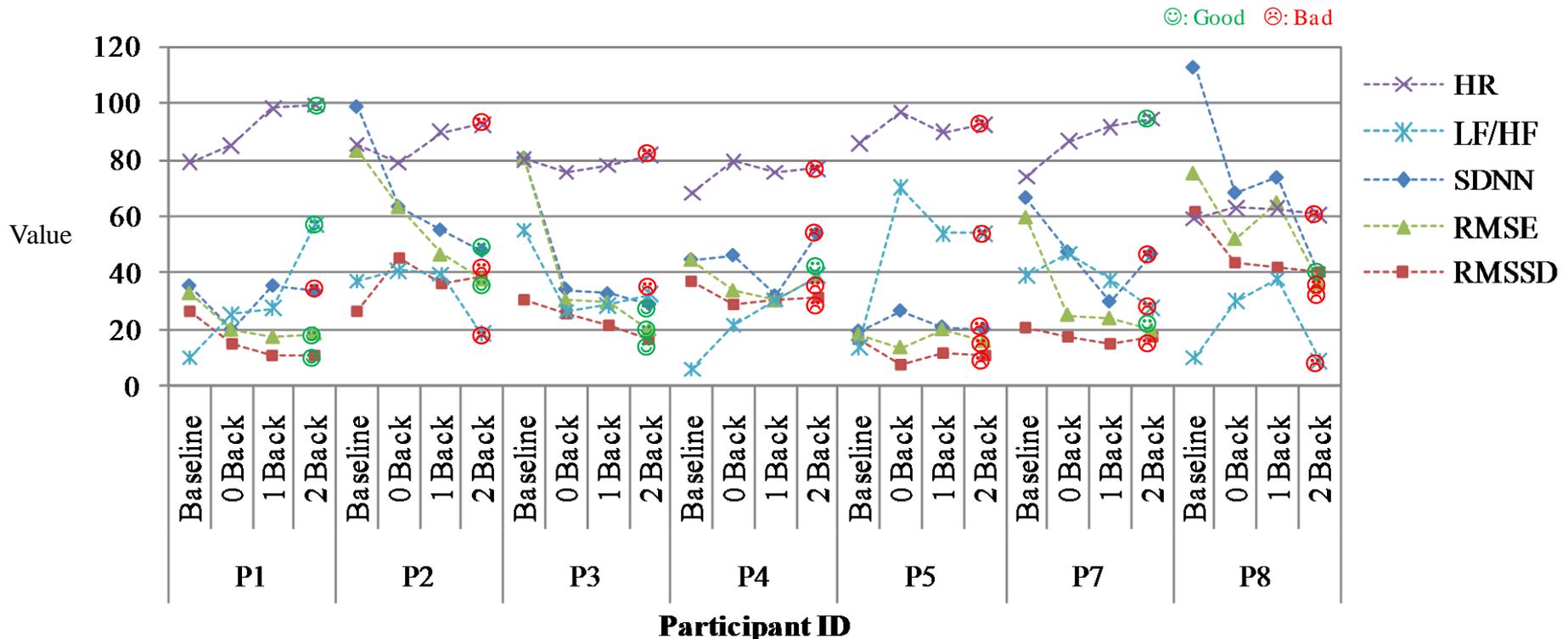
평가 척도별 결과: SDNN, RMSSD, LF/HF



운전 부하 증가에 따른 생체신호 변화 양상

□ 생체신호 변화 추세 부합성

RMSE(57%) > RMSSD(43%) > SDNN(29%) = HR(29%) = LF/HF(29%)

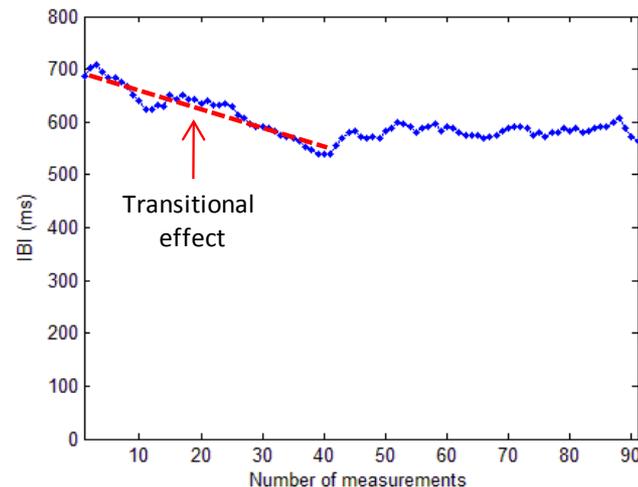


토 의

□ 작업부하 발생 시, 심박 주기가 빨라지는 경향(**transition effect**) 발견

- IBI의 변동이 커서 SDNN과 RMSSD의 값이 증가 ⇒ 작업부하 여부를 민감하게 판별하지 못함

⇒ **Transition effect**를 제거한 후 IBI 변동을 분석하기 위하여 신규 HRV 척도(RMSE) 적용

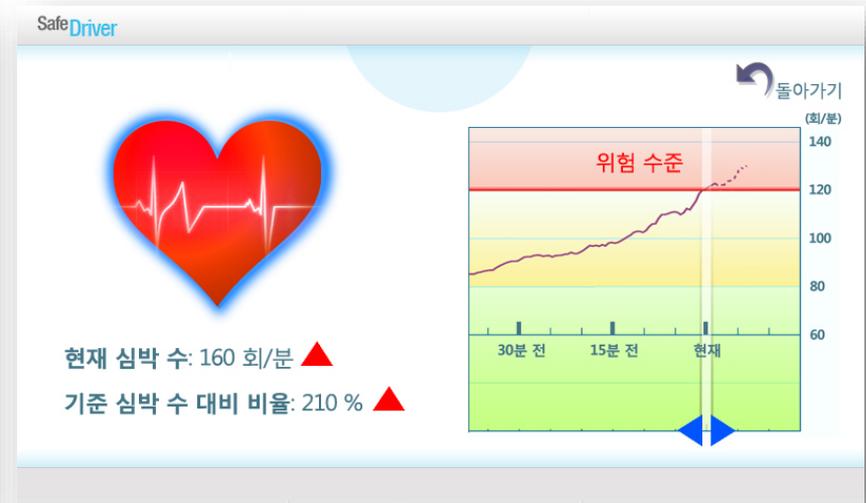
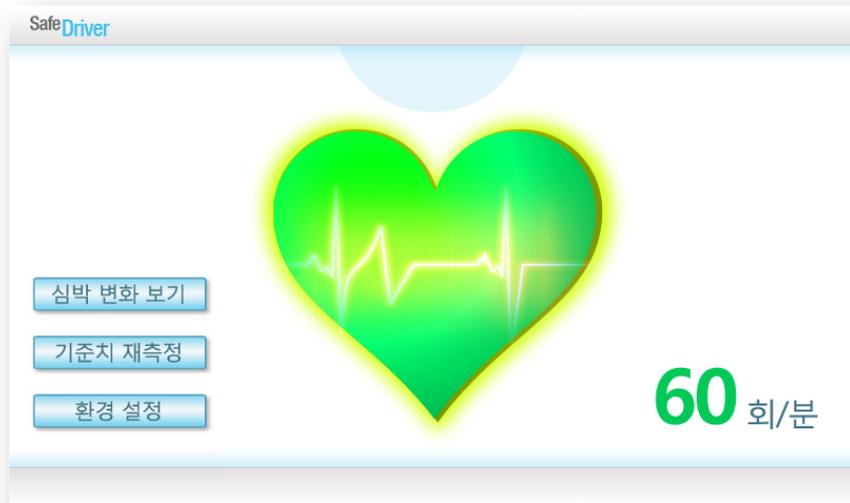


□ 세세한 작업 부하 차이를 높은 수준의 정확도로 판별해주는 척도는 부재

⇒ ECG 기반의 운전 부하 판별 시, **복수의 정량화 척도 사용**이 추천됨

추후 연구

- ❑ **Transition effect**에 대한 정량적 분석 연구
- ❑ **RMSE**의 이론적 배경 조사 및 부하 판별 척도로서의 심층적인 분석 연구
- ❑ 다양한 실험 참여자 대상으로 **생체신호 database 구축**
- ❑ ECG 기반의 운전 작업부하 판별 방법을 적용한 안전 운전 시스템 개발
⇒ **빠른 시간 내에** 작업부하를 **민감하고 정확하게** 파악하여 경고 제시



개발 중인 안전 운전 시스템 화면 (예)

Thank you for attention.