

# 지능형 자동차를 위한 정신적 부하 수준별 운전자의 ECG 생체신호 특성 분석\*

## Analysis of Drivers' ECG Biological Signal under Different Levels of Cognitive Workload for Intelligent Vehicle

이원섭\*\*, 정기효\*\*\*, 홍원기\*\*, 박수원\*\*\*\*,  
박윤숙\*\*\*\*, 손준우\*\*\*\*, 박세권\*\*\*\*\*, 유희천\*\*

\*\* 포항공과대학교 기계산업공학부  
\*\*\* Pennsylvania State University 산업공학과  
\*\*\*\* 대구경북과학기술원 공공원천기술연구센터  
\*\*\*\*\* 공군사관학교 산업공학과

### ABSTRACT

운전 부하를 고려해 안전 운전을 지원하는 지능형 자동차를 개발하기 위해서는 운전자의 정신적 부하 수준을 정량적으로 파악하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 운전자의 심전도 (electrocardiography, ECG)를 이용한 정량화 척도가 상이한 정신적 부하 수준을 판별하는 정확도에 대하여 비교 분석하였다. 심전도는 4 가지 상이한 정신적 부하 수준(무 부하, 낮은 부하, 중간 부하, 높은 부하) 하에서 자동차 시뮬레이터를 주행하는 20대 남성 8명에 대해 측정되었다. 심전도 생체신호의 정량화는 기존 연구의 4 가지 척도(Heart Rate, SDNN, RMSSD, and LF/HF)와 더불어 본 연구에서 제안된 RMSE 척도를 적용하여 이루어졌다. 분석 결과, LF/HF를 제외한 생체신호 정량화 척도들은 정신적 부하 수준의 증가에 부합하는 변화 추세를(RMSE 예: 무 부하 = 54.6 ms, 낮은 부하 = 35.6 ms, 중간 부하 = 32.0 ms, 높은 부하 = 26.4 ms)를 보이는 것으로 나타났다. 실험참여자 개인별 부하 수준의 판별 정확성도는 RMSE(57%)와 RMSSD(42%)가 HR(29%), SDNN(29%), 그리고 LF/HF(29%)보다 높은 것으로 분석되었다. 본 연구에서 파악된 정신적 부하 수준별 심전도 생체신호의 특성은 차세대 지능형 자동차의 안전 운전 지원 시스템 개발에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

**Keyword:** Heart rate variability, Heart rate, Cognitive workload, Intelligent vehicle, ECG

## 1. 서론

운전자의 부하를 고려해 안전 운전을 지원하는 지능형 자동차를 개발하기 위해서는 운전자의 정신적 부하 수준을 정량적으로 파악하는 기술 개발이 필요하다. 지능형 자동차는 운전자의 특성을 고려해 안전 운전 필요한 주행 정보(예: 운전자의 정신적 부하 수준이 과도할 경우 감속 운행 권고)를 적시에 제공해주는 운전자 친화적 차세대 자동차이다(이경수, 2006). 지능형 자동차가 운전자의 정신적 부하 수준을 파악해 맞춤형 주행 정보를 제공하기 위해서는 운전 부하 수준을 과학적으로 측정하고 분석하는 기술 개발이 선행되어야 한다.

운전자의 정신적 부하 수준은 심전도 (electrocardiography, ECG) 측정치를 이용해 계산되는 심박 수(heart rate, HR)와 심박 주기의 변동(heart rate variability, HRV)을 분석하여 파악될 수 있다. HR 은 정신적 부하 수준이 높아질수록 유의하게 증가하게 된다(Mehler et al., 2009). 예를 들면, Brookhuis and Waard (2001)은 일반도로보다 교통이 복잡한 회전형 교차로 진입 및 진출이 HR 을 유의하게 증가하는 것으로 보고하였다. 반면, HRV 는 정신적 부하가 증가하면 유의하게 감소하게 된다(Berntson et al., 1997). 예를 들면, Wood et al. (2002)은 시작 신호가 제시되면 응답하는 단순 작업이 HRV 를 유의하게 감소시키는 것으로 보고하였다.

HRV 는 시간 도메인(SDNN, RMSSD)과 빈도 도메인(LF/HF)의 대표적인 세 가지 척도를 사용해 정량화되고 있다(이원섭, 2009). 시간

\* 본 논문은 대구경북과학기술원의 지원을 받아 수행되었음.

도메인의 SDNN (standard deviation of normal to normal intervals)과 RMSSD (root mean square of successive differences)는 개별 심박 주기(inter-beat interval, IBI)와 평균 IBI 간 차이 또는 인접 IBI 들간 차이의 평균제곱합으로 계산된다. 한편, 빈도 도메인의 LF/HF (ratio of powers in low and high frequencies)는 측정된 ECG 생체신호의 낮은 빈도 대역(0.04 ~ 0.15 Hz)과 높은 빈도 대역(0.15 ~ 0.40 Hz)의 상대적 비율로 계산된다.

지능형 자동차의 운전자 부하 측정에 ECG 생체신호를 적용하기 위해서는 정신적 부하 수준을 정확하게 판별하는 최적의 생체신호 정량화 척도를 파악하는 것이 필요하다. Yao et al. (2008)은 비행기 착륙 작업 시의 HR 이 휴식 및 지상 운행시 보다 유의하게 증가하는 것으로 보고하였으며, Wood et al. (2002)은 단순 반응 작업이 SDNN 을 유의하게 감소시키는 것으로 발표하였다. 그러나, Schubert et al. (2009)은 구두 발표 작업이 반대로 SDNN 을 증가시키는 것으로 보고하였으며, Gould et al. (2009)은 복잡도가 상이한 선박 navigation 방법들이 RMSSD 감소를 유발하지 못하는 것으로 보고하였다. 또한, Veltman and Gaillard (1996)은 청각 정보를 암기하는 작업이 LF/HF 감소를 유도하지 못하는 것으로 발표하였다.

본 연구는 ECG 생체신호의 지능형 자동차 적용을 위해 기존 정량화 척도들과 본 연구에서 제안된 척도의 정신적 부하 판별 정확성을 비교 평가하였다. 이를 위해, 본 연구는 정신적 작업 부하가 가중될 때 심박 주기가 점진적으로 감소하는 경향(transitional effect)을 고려해 새로운 HRV 정량화 척도를 개발하였다. ECG 척도들의 정신적 부하 판별 정확성 평가는 자동차 시뮬레이터 주행 중 다양한 수준의 정신적 부하(4 조건: 무부하, 낮은 부하, 보통 부하, 높은 부하)에서 측정된 ECG 생체신호를 사용하여 이루어졌다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 실험 참여자

본 연구의 실험에는 심혈관계 질환 경험 없이 운전 경력이 3 년 이상인 20 대 남성 8 명이 참여하였다. 실험 참여자들의 평균 연령은 28.5 년(range = 25 ~ 35, SD = 4)으로 나타났으며, 평균 운전 경력은 8 년(range = 5 ~ 12, SD = 2.33)로 조사되었다. 또한 실험 참여자들에게는 금전적 보상이 이루어졌다.

### 2.2 실험 장비

본 연구의 자동차 시뮬레이션 주행은 STISIM Drive™ (Systems Technology Inc., USA)을 사용하여 이루어졌다. STISIM 은 그림 1 에 나타난 것과 같은 주행 화면(해상도 = 1024 × 768)을 운전자에게 제공해 준다. 운전



그림 1. STISIM 의 주행 화면

시나리오는 편도 2 차로의 고속도로(도로 폭 = 4.57 m)를 약 30 km 를 주행하는 것으로 설계되었다.

실험참여자의 ECG 생체신호는 MEDAC System/3 (Biomation, USA; 이하 MEDAC)을 사용하여 측정되었으며, 생체신호 측정의 정확성을 사후 검토를 위해 BioHarness BT(Zephyr™, USA; 이하 BioHarness)를 추가로 사용하였다. MEDAC 은 목 뒤(1 개), 양쪽 손목(2 개)에 sensor 를 부착하여 유선으로 ECG 를 측정하는 반면, BioHarness 는 가슴에 벨트 형태의 sensor 를 착용하여 무선으로 ECG 를 측정한다. 본 연구는 사후 두 장비의 측정값을 비교하기 위해 sampling rate 를 250 Hz 로 동일하게 설정하였다.

### 2.3 실험 계획 및 절차

본 연구의 실험은 one-factor (정신적 부하) within subject design 으로 설계되었다. 독립 변수인 정신적 부하는 4 개 수준(무 부하, 낮은 부하, 중간 부하, 높은 부하)으로 설정되었으며, 상이한 부하 수준의 유발은 N-back 작업(낮은 부하: 0-back, 중간 부하: 1-back, 높은 부하: 2-back)으로 이루어졌다. N-back 작업은 무작위 숫자들이 연속적으로 제시될 때 임의의 시점에 N 번째 이전 숫자를 기억해내는 암기 작업이다(Son et al., 2010).

실험은 5 단계 절차(실험 소개 및 동의서 작성, 센서 부착, 연습 실험, 본 실험, 사후 설문 작성)로 진행되었다. 먼저, 실험 개요를 실험참여자에게 설명한 후 실험 참여 동의서를 받았다. 그리고, MEDAC 과 BioHarness 를 실험참여자에게 부착하였으며, N-back 작업 연습(10 ~ 30 분)과 시뮬레이터 주행 연습(5 ~ 10 분)을 수행하였다. 본 실험은 무 부하 조건을 5 분간 먼저 측정 후, 3 가지 조건의 부하 수준에 대한 생체신호를 각 1 분간 2 회 측정하였다. 마지막으로, 본 실험을 완료한 후 실험참여에 대한 설문조사를 수행하였다.

### 2.4 신호 처리

ECG 생체신호 정량화를 위한 IBI (단위: ms) 추출은 Librow (Librow™, Ukraine)를 이용하여 이루어졌다. 추출된 IBI 의 이상치는 기존 연구(Malik et al., 1989)를 참고하여 설정된

이상치 판별 기준(직전 IBI 의 15% 초과)을 적용하여 제거되었다. 본 연구에서 제거된 이상치의 비율은 2% 이내인 것으로 나타났다.

추출된 IBI 특성은 기존 척도 4 가지(HR, SDNN, RMSSD, LF/HF)와 본 연구에서 제안된 척도 1 가지(RMSE)를 적용하여 정량화되었다. 먼저, HR (unit: bps)은 평균 IBI (unit: ms)와 HR의 산술적 연관관계( $HR = IBI / 1000 \times 60$ )를 고려하여 계산되었으며, SDNN (Malik et al., 1996, unit: ms), RMSSD (Malik et al., 1996, unit: ms), LF/HF (Malik et al., 1996)는 기존 연구에서 사용된 방법을 적용하여 계산되었다. 마지막으로, 새롭게 제안된 척도는 그림 2와 같이 정신적 작업 부하가 가중되면 IBI가 점진적으로 감소하는 경향을 고려해 생체신호 특성을 정량화할 수 있도록 회귀분석의 RMSE (root mean squared error)로 정의되었다.

Medac 과 BioHarness의 측정 정확성은 두 장비에서 측정된 IBI 들의 상관계수( $r$ )와 평균 절대 차이(mean absolute difference)를 이용하여 평가되었다. 상관계수와 평균 절대 차이는 두 장비의 측정 시작점을 동기화시킨 후 계산되었다.

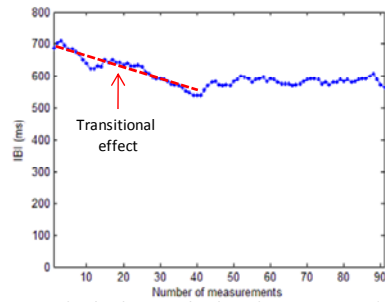


그림 2. 정신적 부하에 따른 IBI 감소 예

### 3. 결과

Medac 과 BioHarness 측정값은 상호 유사성이 높은 것으로 파악되었다. 두 측정값의 상관계수는 0.91 (SD = 0.13)로 유의하게 높은 것으로 분석되었다 ( $t(11,389) = 325.1, p < 0.001$ ). 또한, 두 측정값 간의 평균 절대 차이는 10.3 ms (SD = 13.7 ms)로 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다( $t(22,780) = -0.21, p = 0.83$ ).

LF/HF를 제외한 ECG 정량화 척도들은 그림 3에 나타난 것과 같이 정신적 부하가 증가할수록 유의한 감소 또는 증가 추세를 보이는 것으로 나타났다.

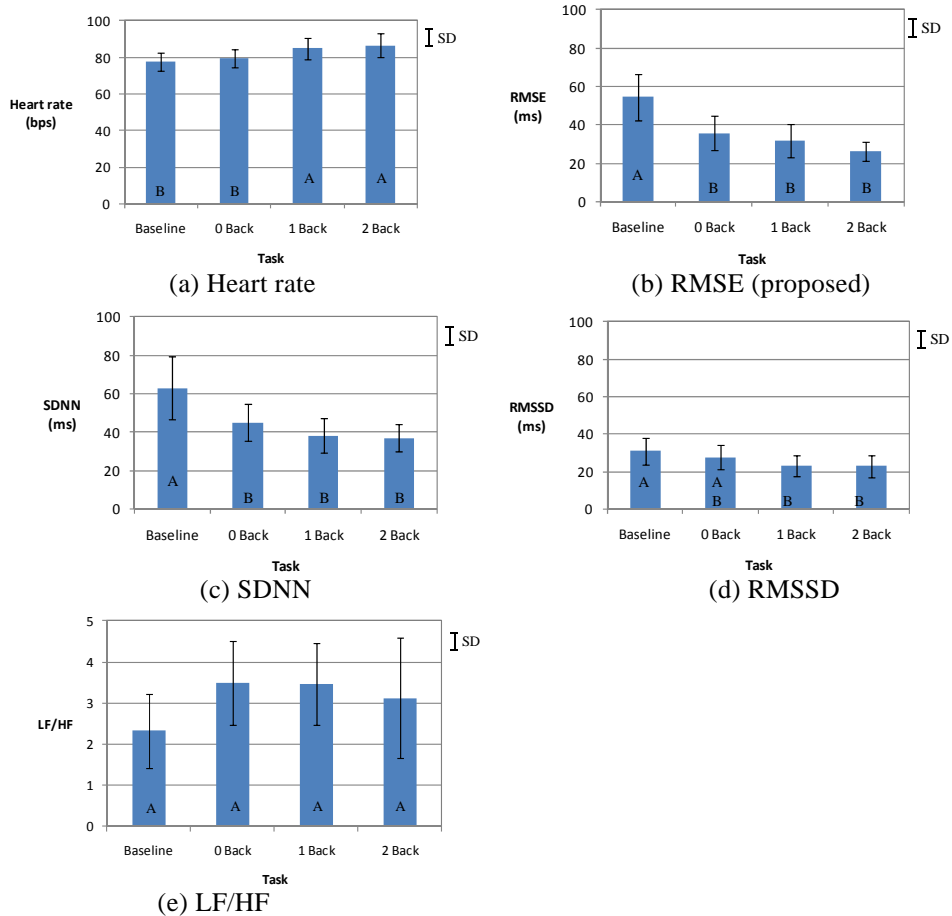


그림 3. 정신적 부하 수준별 생체신호 변화 특성

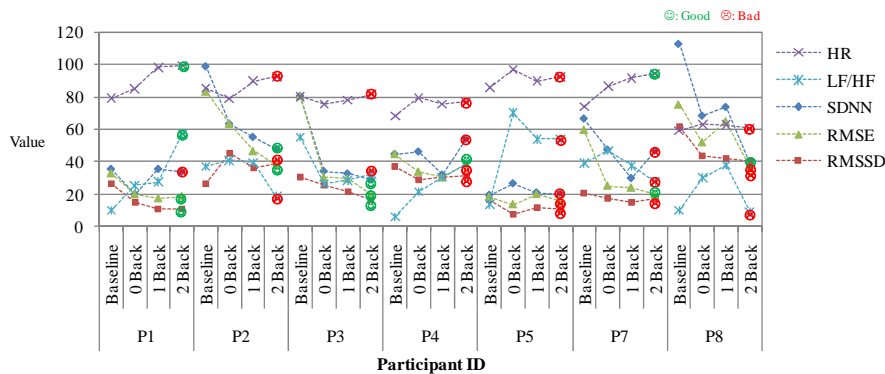


그림 4. 개인별 추세 부합성 분석

먼저, HR 은 정신적 부하 수준이 증가함에 따라 무 부하 77.4 (9.8), 낮은 부하 79.5 (9.8), 중간 부하 84.9 (11.6), 높은 부하 86.5 (13.0) 순으로 증가하는 것으로 분석되었다( $F(3,20) = 4.79, p = 0.011$ ). 또한, HRV 시간 도메인 척도들(SDNN, RMSSD, RMSE)은 정신적 부하가 증가함에 따라 공히 감소하는 경향을 보이는 것으로 파악되었다 ( $F(3,20) = 4.79, p = 0.011$ ). 예를 들면, RMSE 는 부하 수준이 높아짐에 따라 무 부하 54.6 (24.0), 낮은 부하 35.6 (17.8), 중간 부하 32.0 (17.4), 높은 부하 26.4(9.8) 순으로 감소하는 것으로 분석되었다. 반면, LF/HF 는 정신적 부하 수준의 증가에 부합하는 일관된 변화 경향이 없는 것으로 나타났다.

정신적 부하 증가에 부합해 생체신호가 변하는 실험참여자의 비율은 그림 4 에 나타난 것과 같이 RMSE (57%)와 RMSSD (43%)가 SDNN (29%), HR (29%), 그리고 LF/HF (29%)보다 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 한편, 실험참여자별 추세 부합성이 있는 척도는 상이한 것으로 파악되어 ECG 생체신호를 이용하여 정신적 부하 수준을 판별할 때에는 복수의 정량화 척도를 사용하는 것이 추천되는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

이경수 (2006). 지능형 자동차: 차세대 능동 안전 및 운전 보조 시스템. *오토저널*, 28(4), 17-21.

이원섭, 박장운, 김수진, 윤성혜, Xiaopeng Yang, 이용태, 손준우, 김만호, 유희천. (2010). 운전 생체신호 및 운전 수행도 분석 System 개발. *대한인간공학회지*, 29(1), pp.47-53.

Brookhuis, K. A., and De Waard, D. (2001). Assessment of drivers' workload: performance, subjective and physiological indices. In Hancock, P. and Desmond P. (Eds.). *Stress, workload and fatigue: theory, research and practice* (pp. 321-333). New Jersey: Lawrence Erlbaum.

Berntson, G. G., Bigger Jr, J. T., Eckberg, D. L., Grossman, P., Kaufmann, P. G., Malik, M., Nagaraja, H. N., Porges, S. W., Saul, J. P., Stone, P. H., and Van Der Molen, M. W. (1997). Heart rate variability: origins,

methods, and interpretive caveats. *Psychophysiology*, 34, 623-648.

Gould, K. S., Røed, B. K., Saus, E., Koefoed, V. F., Bridger, R. S., and Moen, B. E. (2009). Effects of navigation method on workload and performance in simulated high-speed ship navigation. *Applied Ergonomics*, 40(1), 103-114.

Malik, M., Camm, A. J., Bigger Jr., J. T., Breithardt, G., Cerutti, S., Cohen, R. J., Coumel, P., Fallen, E. L., Kennedy, H. L., Kleiger, R. E., Lombardi, F., Malliani, A., Moss, A. J., Rottman, J. N., Schmidt, G., Schwartz, P. J., and Singer, D. H. (1996). Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *European Heart Journal*, 17(3), 354-381.

Mehler, B., Reimer, B., Coughlin, J. F., and Dusek, J. A. (2009). The impact of incremental increases in cognitive workload on physiological arousal and performance in young adult drivers. In *Proceedings of Transportation Research Board 88th Annual Meeting*, Washington DC.

Schubert, C., Lambertz, M., Nelesen, R. A., Bardwell, W., Choi, J.B., and Dimsdale, J. E. (2009). Effects of stress on heart rate complexity: A comparison between short-term and chronic stress. *Biological Psychology*, 80(3), 325-332.

Son, J., Reimer, B., Mehler, B., and et al. (2010). "Age and cross-cultural comparison of drivers' cognitive workload and performance in simulated urban driving", *International Journal of Automotive Technology*, 11(4), pp. 533-539.

Veltman, J. A., and Gaillard, A. W. K. (1996). Physiological indices of workload in a simulated flight task. *Biological Psychology*, 42, 323-342.

Wood, R., Maraj, B., Lee, C. M., and Reyes, R. (2002). Short-term heart rate variability during a cognitive challenge in young and older adults. *Age and Aging*, 31, 131-135.

Yao, Y. J., Chang, Y. M., Xie, X. P., Cao, X. S., Sun, X. Q., and Wu, Y. H. (2008). Heart rate and respiration responses to real traffic pattern flight. *Psychophysiology Biofeedback*, 33(4), 203-209.