

작업 부하에 따른 운전자의 생체신호 처리 및 특성 분석

(Analysis and Processing of Driver's Biological Signal of Workload)

허윤석^{1)*}, 이재천²⁾, 김윤년³⁾

(Yun Seok Heo, Jae-Cheon Lee, and Yoon Nyun Kim)

요약 졸음 운전 등 운전자의 상태 변화에 따른 자동차 사고가 급증하고 있으며 이를 방지하기 위한 시스템 구축 및 운전자의 상태를 판단하는 알고리즘 개발이 요구되어 지고 있다. 본 논문에서는 모의 주행 시스템을 통한 운전자의 심박변이도, 산호 포화도 (SPO2), 체온을 측정하여 운전자의 상태를 알려 주는 실험을 수행하였다. 즉, 심박변이도 (Heart rate variability, HRV) 분석을 위해 운전자의 심전도(Electrocardiogram, ECG) 신호를 획득 한 후 심전도 P,QRS, T 파형 중 R peak 을 자동으로 검출하였고 이를 통해 구한 R-R interval을 이용하여 HRV의 주요 파라메타를 시간영역(time domain)으로 해석하여 작업 환경에 따른 운전자의 상태를 비교 분석하였다.

핵심주제어 : Electrocardiogram(심전도), Heart rate variability(심박변위도)

Abstract The accidents caused by drivers while driving are considered as the major causes along with other causes such as conditions of roads, weather and cars. In this study, we investigated the driver's workloads under three different driving conditions (Weather, Driving time zone, and Traffic density) through analyzing biological signals obtained from a car driving simulator system. The proposed method is able to detect R waves and R-R interval calculation in the ECG. Heart rate variability (HRV) was investigated for the time domain to determine the changes in driver's conditions.

Key Words : Electrocardiogram, Heart rate variability

* Corresponding Author : yunsheo@kmu.ac.kr

+이 논문은 산업통상자원부 기술혁신사업 (2013년 지능형자동차 상용화 연구기반 구축사업, 과제번호 10043348), 산업통상자원부·한국산업기술진흥원 지정 계명대학교 전자화자동차부품지역혁신센터(B0008866) 지원에 의해 연구되었음.

Manuscript received June 18, 2015 / revised June 29, 2015 / accepted July 1, 2015

1) 계명대학교 의용공학과, 제1저자, 교신저자

2) 계명대학교 동산의료원 심장내과, 제2저자

3) 계명대학교 기계자동차공학과, 제3저자

1. 서 론

한국자동차공업협회에 따르면 국내 자동차 등록대수는 2008년 1678만대에서 운전인구의 증가와 자동차 보급률의 지속적인 증가로 인하여 2012년 1887만대로 증가했다[1]. 이에 따른 운전자의 증가와 더불어 졸음운전 등 운전자의 상태 변화로 인한 자동차 사고가 많이 발생하고 있다. 졸음운전을 예방하고자 졸음 시 경고를 주는 시스템 등의 개발이 이루어지고 있으나 이는 먼저 졸음 상태를 감지하는 시스템 개발이 선행되어야 할 것이다. 또한 운전자의 졸음 및 사고를 유발할 수 있는 요인으로는 도로나 날씨 등에 따른 운전자의 작업부하도 중요한 요소로 작용한다. 운전자의 작업부하는 생체신호 분석을 통해 정량적으로 평가될 수 있으며 이를 통해 운전자의 작업부하 및 상태를 분석할 수 있다.

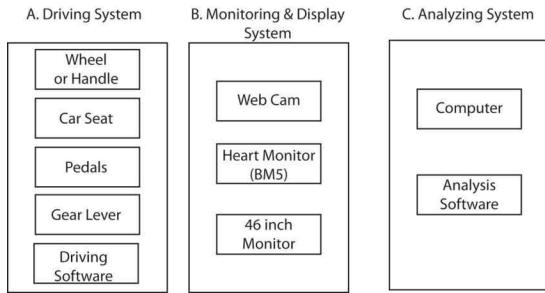


Fig. 1 Driving simulator system is consist of three main parts: Driving System, Monitoring & display system and Analyzing system

졸음과 관계된 생체 신호로는 수면상태에서의 뇌파((electro-encephalography: EEG)와 심박변이도(heart rate variability: HRV)[2,3] 등의 분석을 통한 다양한 접근이 시도되고 있으나 주변실험 환경조성의 어려움 및 졸음을 인식하는 정도에 있어서 실제 자동차가 운행 중인 도로상에서 구현하기 어렵다는 단점도 가지고 있다. 여러 생체 신호 중 심박동(heart rate: HR)과 심박변이도(HRV)는 항공 분야와 자동차 운전 환경 등의 많은 분야에서 작업자의 작업인지능력과 피로

도 연구 등에 이용되고 있다[4-9].

본 연구에서는 모의 운전상황에서 운전자의 생리반응을 통하여 운전자의 생체신호가 어떻게 변화되는지 살펴보고 이 생체신호를 통하여 안전하고 쾌적한 운전상황을 구현할 수 있는 방법을 살펴보고자 하였다. 즉, 운전자의 심전도(electrocardiogram: ECG), 산호 포화도 (SPO2), 체온을 측정하고 심전도의 주요 신호인 P, QRS, T 중 R peak을 자동 검출하였으며[10], R-R interval를 이용하여 HRV의 주요 시간영역(time domain) 파라메타를 구하여 운전자의 작업환경에 따른 운전자의 상태를 비교 분석하였다.

2. 시스템 구성 및 실험

2.1 시스템 구성

본 연구에서는 게임용 운전시뮬레이터를 사용하여 실제 주행 환경과 유사한 환경에서 실험하였다. 시스템은 크게 모의 운전시뮬레이터, 운전 상태 모니터링, 생체 신호측정 및 디스플레이, 신호 분석 시스템으로 나뉘어져 있다(Fig. 1). 구체적으로는 (주) Logitech 사의 Webcam C910, 드라이빙 시뮬레이터인 Control wheel G27을 사용하여 기어변동과 페달을 갖추어 현실감 높은 시뮬레이터를 제공하였다. 운전자의 졸음 판단 여부는 게임 환경에서 webcam 장비로 관찰한 상태에서 2초 이상의 eye close가 분당 3회 이상시 졸음으로 판단하였다. 또 시스템은 주행 화면을 운전자에게 제공하여 운전자로 하여금 모의 운전 환경에 맞게 장시간 주행이 가능하도록 설정하였다.

피실험자의 생체 신호 획득은 on-line 으로 (주) Bionet 사의 BM5로 구성하여 획득하였으며, 생체신호 획득은 0.5Hz-40Hz 대역의 band pass filter와 60Hz의 notch filter와 함께 sampling rate를 75(Hz)로 설정하여 data를 획득 하였다.

Fig.2 와 같이 심전도 신호측정을 위해서 양손목 및 왼 발목에 1회용 패치전극을 3곳에 부착하는 3 lead wire법을 이용하였다.



Fig. 2 Three foam electrodes are attached to left wrist, right wrist and left ankle for the 3-lead ECG measurement



Fig. 3 Driving simulator. ECG signal is measured through the three attached electrodes and recorded by BM5

2.2 실험 절차 및 방법

본 실험에 참가한 피험자 10명(23.5±2.5 평균 연령)은 임상적으로 정상인으로 판단된 대상으로 선정하였고, 실험 전 편안한 상태로 5분 이상 휴식을 취한다음 실험을 실시하였다. 졸음 상태 비교실험에서는 게임용 운전 시뮬레이터 환경에서 각성과 졸음 상태를 구분하여 데이터를 획득하였다. 실험환경에서 졸음을 유도하기 위해서 실험 전날 수면시간을 4시간 이하로 수면부족이 발생하도록 하여 피 실험자를 선정하였으며, 측정시간은 졸음에 영향을 받기 쉬운 시간대인 AM 10시에서 12까지, PM 15시에서 17시에 실험을 실시하였다. 실험에 영향을 줄 수 있는 무리한 운동이나, 흡연, 음주 등을 금하게 하였다. 자동차 운전 미숙하지 않은 1년 이상의 피험자로 선정하여 운전용 게임을 하는 동안 각성과 졸음 상태에서 각각 실험하여 5분 이상의 ECG 신호를 획득하였다. 또한 게임 환경에서는 단조로운 구간

을 위해 traffic 환경 0%로 설정하였으며, 운전자로 하여금 시속 60km로 주행하도록 지시하였다. 운전자의 피로감 누적을 위해 동일한 구간 3회 반복주행을 실시하였다.

2.3 Heart rate variability (HRV)

HRV의 시간영역 측정방법에 있어 사용되는 변수들은 다음과 같다. 1) STD HR (Standard deviation of heart rate): HR의 표준편차, 2) SDNN (Normal to normal deviation of intervals): 정상 RR간격의 표준편차, 3) RMSSD (Root mean square of successive differences of RR intervals): RR간격의 차이의 제곱합의 평균에 square root 한 값, 4) NN50 : 인접한 R-R 간격의 차이가 50ms를 초과하는 R-R간격, 5) pNN50: NN50의 개수가 전체 R-R간격의 개수 중 차지하는 퍼센트(%) 등이 있다.

2.4 R Peak 값 설정

ECG R파의 침두치 위치를 정확하게 찾기 위해서 차분신호(difference), 필터(filter), 임계값설정(thresholding) 및 튜닝(tuning) 과정을 본 연구그룹에서 기 발표한 다음과 같은 알고리즘을 거쳤다 [11].

식(1)은 차분신호의 계산식을 나타내며

$$[n] = x[n] - x[n-1] \quad (1)$$

식(2)는 필터 처리과정을 나타내며

$$[n] = \begin{cases} 1 & , -k \leq n \leq k \\ 2k+1 & \\ 0 & , otherwise \end{cases} \quad (2)$$

여기서 k는 filter의 길이로서 프로그램에서 k=2로 설정하여 시뮬레이션 한다.

필터처리된 신호값은

$$x[n] = x[n] * m[n] (*:convolution operation)$$

식(3)은 $x_T[n]$ with threshold level λ

$$x_T[n] = \begin{cases} 1, & \text{if } x_F[n] > \lambda \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$\lambda = r \cdot \max[x[n], 0 \leq n \leq] \quad (4)$$

r 은 가중치로서 프로그램에서 $r=0.5$ 로 설정하여 시뮬레이션 한다.

$x_T[n]$ 값이 1인 n 은 R의 위치가 될 수 있는 후보점들을 의미한다. $x_T[n]$ 는 후보점들의 잠음이나 $x_d[n]$ 신호의 구간별 비단조 증가 특성(소구간에서 기복이 있는 신호)때문에 정상적인 R위치 사이에서도 여러 개의 후보점들이 존재한다.

따라서 정확한 R wave의 위치를 찾기 위해서 추가적인 절차가 필요하다. 먼저 $x_T[n]$ 에서 신호값이 1인 위치의 간격을 구한다.

$$l_i = n_b - n_f \quad (5)$$

여기서 n_f, n_b 는 $x_t[n]$ 이 1인 인접한 두 신호값에 대한 각각의 n 값을 의미하며, $n_f < n_b$ 이다.

l_i 은 인접한 두 신호값이 1인 $x_t[n]$ 의 신호값 간격을 나타낸다. $0 < i \leq I$, I 는 구간의 개수를 나타낸다.

$L = T \cdot \max[l_i, 0 < i \leq I]$, T 는 tolerance값으로 시뮬레이션에서는 0.3을 사용한다.

최대 간격의 30%를 Tuning을 위한 간격으로 지정한다.

마지막으로 tuning 과정으로 $x_i[n]$ 에서 신호값이 1인 위치를 기점으로 L 간격 구간 내에서 $x_i[n]$ 이 1인 모든 n 에서 원신호값 $x[n]$ 이 가장 큰 n 을 R위치(n_R)로 결정하게 된다.

$$= \max [x[n], n_i \leq n \leq n_i + , \text{if } x_t[n_i] = 1] \quad (6)$$

3. 실험결과

3.1 결과분석

Fig. 4는 차분신호, 필터, 임계값 설정 및 튜닝 과정을 거쳐 검출된 R peak 들을 보여준다. 검출된 R peak에 대응하는 시간을 구한 다음 RR interval을 구한다. Fig. 5는 한 피험자로 부터 정확한 R peak 위치를 찾은 후 R-R interval를 구한 결과를 시간의 추이에 따라 도시한 것이다.

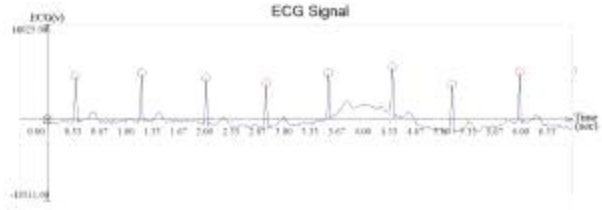


Fig. 4 R peak detection from ECG signal

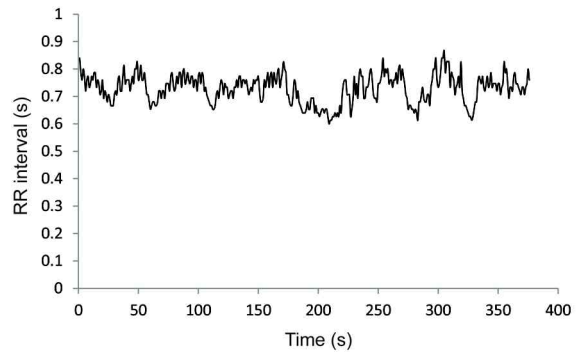


Fig. 5 RR interval time series

모의 환경에서 각성상태와 졸음 운전 시 R-R interval과정을 연속적으로 전체 15분 시간을 비교하였다. 10명의 피험자로 계산한 RR interval을 비교한 결과 각성상태의 구간 평균은 726ms (± 102)이며, 졸음운전 시 R-R interval 평균은 749ms(± 95)로 3.19%로 조금 증가함을 알 수 있었다. Fig. 6은 RR interval 값의 Box plot한 것으로 평균값이 각성 상태에서 졸음 상태로 넘어갈 때 증가함을 시각적으로 확인 할 수 있다. 이는 운전 중 졸음 상태로 변화되면서 운전자가 긴장 완화상태로 가게 되어 심박수가 늦어짐으로써 R-R interval의 평균이 커진다고 생각할 수 있다.

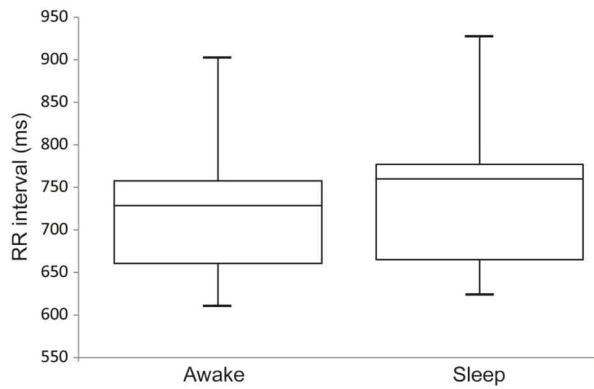


Fig. 6 Plot box for the RR interval between awake and sleep status

추가적으로 작업 환경에 따른 운전자의 생체 신호 변화를 실험하였다. 운전 작업부하 환경을 맑은 날씨와 오후 시간대 (14~16시)를 무 부하조건으로 설정하여 크게 3가지 조건 (날씨, 운전 시간대, 교통량 (traffic density)) 으로 나누어 실험 환경을 운전시뮬레이터 상에서 설정하였다. 첫 번째 작업부하는 비가 오는 날씨로 설정하였고 두 번째 작업부하는 밤 운전 시간대 (02~04시)로 설정하였다. 마지막으로 세 번째 작업부하는 차가 많은 교통상황으로 설정하여 생체신호를 측정하였다. 먼저 무 부하 조건을 5분간 측정한 후 3가지 조건의 부하수준에 대한 생체신호를 차례대로 측정하였다.

작업부하의 변화에 따른 ECG 신호해석은 HRV time domain 중 SDNN, RMSSD 두 파라미터에 대해 분석하였다. SDNN, RMSSD 값은 무 부하 조건에서 보다 각 부하 별 조건에서 감소하는 경향이 나타났다. 각 측정 Data 분석 결과를 Table 1에 나타내었다.

또, 심박수(Heart Rate, HR)는 무 부하 조건에서 평균 82.64(bps), 첫 번째 작업부하 85.13, 두 번째 작업부하 83.58, 세 번째 작업부하 86.87로 부하 수준이 변함에 따라 무 부하 조건에 비해서 증가하는 것을 알 수 있었다. HR의 증가는 말초 혈관의 혈류량이 증가하는 것으로 해석될 수 있고, 혈류량의 증가는 피부온도가 증가하는 것으로 해석할 수 있다. 본 실험에서도 피부온도가 무 부하 조건에서 평균 33.67도(±2.60.)에서 34.33(±2.30),

34.11(±2.84), 34.67(±2.27)도로 HR의 증가와 같이 피부온도도 증가함을 확인할 수 있었다.

마지막으로 산소포화도(SPO2)는 각 부하 별로 큰 차이가 나타나지 않았다.

Table 1 SDNN, RMSSD of HRV time domain

HRV Time Domain	Work Load Conditions	Value (ms)
SDNN	No Load	134.93±36
	Rain	127.06±20
	Night	129.54±28
	High Traffic	131.10±31
RMSSD	No Load	27.16±90
	Rain	18.26±11
	Night	24.21±10
	High Traffic	25.23±12

4. 결 론

본 연구에서 모의 운전자의 ECG 기반 생체 신호를 분석하여 운전자의 작업부하 별 생체신호로 구분이 가능함을 보였다. 즉 모의 운전 중인 운전자로 부터 획득한 ECG 신호를 분석하여 먼저 P-QRS-T 파형에서 R-peak를 검출하고 이를 바탕으로 R-R Interval (RRI) 값을 계산한 후, 모의 운전자의 심박변위도(HRV)를 시간영역 파라미터로 분석함으로써 다양한 운전환경에서 운전자들의 상태를 측정하여 활용할 수 있는 가능성을 확인하였다. 본 연구 결과는 운전자의 생체 신호 분석을 통해 운전자의 졸음 상태를 판단할 수 있는 근거가 될 수 있을 뿐 만 아니라 향후 성별, 나이 차이 등 다양한 그룹의 피실험자들 대상으로 많은 데이터 축적을 통해 졸음 예측 및 안전 운전을 위한 경고 시스템 작동 등 통합 안전 시스템 구현을 위한 초석이 될 것으로 기대된다.

References

- [1] Traffic Accident Analysis Center, "Traffic Accident Statistical Analysis 2012", KOROAD, 2012.
- [2] F. Jurysta, P. Bome, P. Miquotte, M Dumont, J. Lanquart, J. Deqaute, P Linkowski, "A study of the dynamic interactions bwtween sleep EEG and heart rate varability in healthy young men," Clin. Neurophysiol., Vol. 114, pp. 2146-2155, 2003.
- [3] W. Kim, K, Kim, S. Park, J. Shin and Y. Yoon, "Analyzing Heart Rate Variability for Automatic Sleep Stage Classification," Korean J. of the Science of Emo. and sens.,Vol. 6, No. 4, pp.9-14., 2003.
- [4] N. Egelund, "Spectral analysis of heart rate variability as an indicator of driver fatigue. Ergonomics," Vol. 25, pp. 663-672, 1982.
- [5] J. Aasman, G. Mulder, L. Mulder "Operator effort and the measurement of heart rate variability," Human Factors, Vol. 29, pp. 161-170, 1987.
- [6] P. Jorna, "Heart rate and workload variation in actual and simulated flight," Ergonomics, Vol 36, No. 9, pp. 1043-1054, 1993.
- [7] Reed, M.P., Green, P.A. Comparison of driving performance on-road and in a low-cost simulator using a concurrent telephone dialing task. Ergonomics, Vol. 42, pp. 1015 - 1037, 1999.
- [8] L. Gang and W. Chung, "Detection of Driver Drowsiness Using Wavelet Analysis of Heart Rate Variability and a Support Vector Machine Classifier," Sensors, Vol. 13, pp. 16495-16511, 2013.
- [9] A. Karel, Brookhuis, W. Dick, "Monitoring drivers' mental workload in driving simulators using physiological measures," Accident Analysis and Prevention, Vol. 42, pp. 898-903, 2010.
- [10] S. Deboleena, M. Madhuchhanda, "R-peak detection algorithm for ECG using double difference and RR interval processing," Procedia Technology, Vol. 4, pp. 873-877, 2012.
- [11] M.S Kim, Y.N. Kim, and Y.S. Heo, "Characteristics of heart rate variability derived from ECG during the driver's wake and sleep status", Transactions of KSAE, Vol. 22, No.3, pp.136-142, 2014.



허 윤 석 (Yun Seok Heo)

- 정회원
- 고려대학교 기계공학과 학사
- 서울대학교 기계항공공학부 석사
- University of Michigan, Ann Arbor, Biomedical Engineering, Ph.D.
- 계명대학교 의과대학 의용공학과 조교수
- 관심분야 : 진단의료기기, 생체 신호 처리, 생체 역학



이 재 천 (Jae-Cheon Lee)

- 정회원
- 서울대학교 농공학과 학사
- 한국과학기술원 생산공학과 석사
- Oklahoma State University 기계항공공학과 (Ph.D.).
- 계명대학교 기계자동차공학과 교수
- 전자화자동차부품지역혁신센터(RIC) 소장
- 관심분야 : Fluid Power, Automotive Control, Mechatronics



김 윤 년 (Yoon-Nyun Kim)

- 정회원
- 경북대학교 의과대학 의학과 의학사
- 경북대학교 의과대학 의학과 의학석사
- 경북대학교 의과대학 의학과 의학박사
- 계명대학교 의과대학 내과학교실 (심장내과) 교수
- 관심분야 : 부정맥, 전기생리검사, 도자절제술, 영구심박동기, 중재시술, 고혈압, 심부전