

HRV를 통한 운전자 스트레스 정도 추정 가능성 연구

A Study on the Estimation Possibility of Driver's Stress Degrees with the HRV Analysis

이 전*†

Jeon Lee*†

대구한의대학교 한방의공학과*

Department of Oriental Biomedical Engineering, Daegu Haany University*

Abstract

The objective of this study was to test the estimation possibility of driver's stress degrees with the HRV analysis. For this, first, HRV analysis was applied to the 5 driver's ECG signals which were acquired in 7 different stress situations. From this, the facts that HRV trend was different from that in long-distance driving and 6 parameters - meanRR, sdRR, HF, LF/HF, LFnorm, HFnorm were useful for the stress estimation in stress varying driving situation. Next, we designed 5 personalized linear regression models in which 6 HRV parameters were input and the outcomes were 7 different stress degrees. Finally, we tested each model for 5min-long 16 segments individually. Consequently, the models could not hit the stress degrees exactly in some segments but the correlation coefficients between original stress pattern and estimated stress pattern during entire driving showed reasonably high.

Keywords : Driver, HRV analysis, stress degrees estimation, linear regression model

요약

본 연구에서는 Healey 등(2005)의 데이터를 활용하여 스트레스 정도가 단시간에 변하는 운전상황에서 운전자의 심박변이도 분석을 통해 스트레스 정도에 대한 추정이 가능한지를 예비적으로 평가해 보았다. 단시간에 스트레스 정도가 변하는 운전의 경우 심박변이도 변화 양상은 기존 문헌에 나타난 장거리 운전의 양상과 다르며, meanRR, sdRR, HF, LF/HF, LFnorm, HFnorm의 6가지 심박변이도 파라미터가 스트레스 추정에 유의한 변수로 확인되었다. 정상인 운전자 5명에 대해 6가지 파라미터를 입력변수로, 운전 구간에 따라 변하는 스트레스 정도를 출력변수로 하여 개인별 선형회귀 모델($R^2 = 0.8604 \pm 0.0959$)을 도출하였으며, 이 선형회귀 모델의 적합성을 평가하기 위하여 심박변이도 데이터를 5분 길이의 16개 세그먼트로 나눈 뒤 실제 스트레스 정도와 추정된 스트레스 정도를 비교해 보았다. 그 결과 일부 세그먼트에서 부정확한 추정 결과가 관찰되기도 하였으나, 실제 스트레스 변화 패턴과 예측된 스트레스 변화 패턴 사이에 높은 상관성이 확인되었다($r = 0.8560 \pm 0.0619$). 향후 운전자 구속을 최소화하면서 측정 가능한 심박변이도 분석 시스템을 개발하고, 이를 Healey 등의 연구에서와 유사한 운전 프로토콜을 통해 다수의 피험자에게 적용함으로써 본 연구결과가 유효한지 검증할 계획이다.

주제어 : 운전자, 심박변이도 분석, 스트레스 정도 추정, 선형회귀 모델

† 교신저자 : 이 전 (대구한의대학교 한방산업대학 한방의공학과)

E-mail : leejeon@dhu.ac.kr

TEL : 053-819-1478

FAX : 053-819-1271

1. 서론

현대인에게 있어서 자동차는 생활필수품이 되었고 하루 중 많은 시간을 운전해 하고 있다. 그리고 최근 자동차는 첨단 IT 기술의 집합체라 부를 만큼 운전자의 편의와 안전을 위한 첨단 시스템들이 장착되고 있는 추세이다. 그러나 이러한 첨단 시스템들은 운전과 관련된 기계적 요소들에 대한 것이 대부분이며, 정작 중요한 인간적 요소(human factor)와 관련된 것은 극히 미미한 상황이다. 특별히 인간적 요소에 있어서 가장 중요한 것은 운전자의 운전 수행능력(performance)을 유지시켜 주는 것으로써, 전화 통화, 도로상황, 시선유도, 피로(fatigue) 등에 의해 운전 수행능력이 저하되며 사고유발 가능성이 높아지는 것은 잘 알려진 바이다(Angell et al., 2006).

사고는 운전 시간이 증가함에 따라 일반적으로 감소하는 운전 수행능력을 초과하는 작업부하(workload)가 요구되었을 때 발생하는 것으로 알려져 있으며, 이와 관련하여 정봉조 등은 뇌전도(Electroencephalogram; EEG), 심전도(Electrocardiogram; ECG), 안구운동도(Electrooculogram; EOG), 피부표면온도(Skin temperature; SKT), 피부전도도(Galvanic skin response; GSR)와 차량 가속 및 감속 정보를 이용하여 작업부하가 급증하는 고속도로 구간을 검출하고 이를 사고 위험구간으로 판별하는 연구를 수행한 바 있다. 유사 연구로 비행 훈련 중인 전투기 조종사들로부터 측정된 다양한 생체 신호 및 영상정보를 통해 조종사들이 경험하는 작업 부하 또는 조종사들의 작업 수행능력을 평가하는 연구 사례들을 들 수 있다(Wilson et al., 1999; Hankins & Wilson, 1998; Wilson, 2001).

한편, 운전 수행능력에 영향을 미치는 중요 요소인 피로와 심박변이도(Heart Rate Variability; HRV) 간의 연관성에 대한 다양한 연구가 시도되었다. 그 예로 피로가 심박변이도 특성에 영향을 미칠 뿐만 아니라 피로가 증가함에 따라 업무 수행능력이 저하된다는 사실에 근거하여 심박변이도 특성을 통해 업무 수행능력을 추정하거나, 피로정도에 따라 심박변이도 특성이 상이함을 보인 연구들이 있었다(김정민 등, 2004). 또한 장거리 운전을 실시하는 동안 운전시간 경과 및 이에 동반되는 피로 증가에 따른 심박변이도 변화 양상에 대한 연구가 수행되기도 하였다(성홍모 등, 2003). 이 연구 결과 운전시간이 증가하고 피로가 증

가함에 따라 평균 심박동수는 감소하고, 정규화된 저주파 성분(LFnorm) 및 저주파 성분 대 고주파 성분비(LF/HF)는 증가하며, 비선형 파라미터인 ApEn (Approximate Entropy)는 감소하는 경향이 관찰되었다고 한다. 하지만 이는 피로의 원인인 장시간 운전 자세 및 운전 행위와 같은 물리적 스트레스(physical stress)와 집중력 및 각성 유지 노력 등과 같은 정신적 스트레스(mental stress)의 영향을 분리하지 않고 분석하였다는 한계를 갖고 있다.

Demand/Effort 모형에 따르면 정신적 스트레스는 작업부하가 너무 적거나 혹은 너무 많으면 증가하며, 운전자의 작업부하가 적당하여 정신적 스트레스가 최소화될 때 안전운전이 가능하다고 알려져 있다. 때문에 만약 운전자의 스트레스 정도를 추정할 수 있다면 소리 자극, 향기 자극 등을 통해 안전운전이 가능한 최적의 스트레스 상태가 되도록 개입할 수 있을 것이다. 이와 관련하여 Healey 등(2005)은 안정상태, 도심운전, 고속도로 운전 등을 포함하는 실제 운전상황에서 심전도, 근전도, 피부전도도, 호흡의 생체신호와 비디오 영상을 획득한 뒤 각 운전 상태에서의 정신적 스트레스 정도를 추정하는 연구를 수행하였으며 약 97%의 높은 정확률을 얻은 바 있다. 그러나, 이 연구에서 사용된 생체신호 측정 시스템은 실제 차량에 도입하기에는 고가일 뿐만 아니라 운전자를 구속하기 때문에 자연스러운 운전을 제한하는 단점을 갖고 있다.

만약 이들 생체 신호들 중 심박변이도만을 통해 운전자의 스트레스 정도를 추정할 수 있다면, 운전자를 최소한으로 구속하면서 차량에 도입 가능한 안전운전도우미 시스템을 개발할 수 있을 것이다. 이에 본 연구에서는 Healey 등(2005)의 연구에서 측정된 생체신호 데이터 집합 중 일부를 제공받아 심전도 신호와 이로부터 추출된 심박변이도 분석 파라미터만으로도 운전자의 정신적 스트레스 정도에 대한 추정이 가능한지를 예비적으로 평가해 보았다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 심박변이도만으로 운전자의 정신적 스트레스 정도를 추정할 수 있는지 알아보기 위해 Healey 등(2005)의 연구에서 사용된 데이터 집합 중 운전자 5명의 데이터 집합을 연구 대상으로 하였다. 참고로, 이 연구에서는 그림 1과 같이 심전도(EKG),

근전도(EMG), 피부전도도(SC), 호흡(Resp)의 생체신호와 함께 운전자 안면영상(Video)을 측정하였으며, 본 연구에서는 이 중 심전도 신호만을 활용하였다.

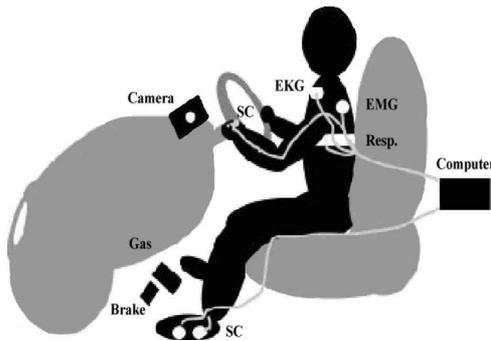


그림 1. Healey 등의 생체신호 측정 시스템 개요

이 연구에서는 운전자들이 운전 전 휴식, 도심 운전, 톨게이트 진입 및 진출, 고속도로 운전, 운전 후 휴식과 같은 다양한 운전 상황을 경험하게 한 뒤 각 상황에서 받은 스트레스 정도를 7점 스케일로 설문하였다. 즉, 운전기간 동안 경험한 최소 스트레스는 1로, 최대 스트레스는 7로 답변하도록 하였다. 그리고 설문결과 얻은 상황별 점수들의 중간값을 상황별 스트레스 점수로 결정하였으며, 주요 상황과 이에 해당하는 스트레스 점수를 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 운전 중 주요 상황에서의 정신적 스트레스 정도

상황 번호	상황 설명	스트레스 점수
1	시작 안정상태(rest1)	1
2	차고 나오기	2
3	도심(city)	4
4	요금소(toll)	3
5	고속도로(hwy)	3
6	경사로 회전(exit)	5
7	도로 합류(merge)	5
8	다리 건너기(bridge)	4
9	차고 들어가기	1
10	종료 안정상태(rest2)	1

각 운전자는 동일하게 출발 전 안정상태(S1) 후 도심 운전1(S2), 고속도로 운전1(S3), 도심 운전2(S4), 고속도로 운전2(S5), 도심운전3(S6), 도착 후 안정상태(S7)를 겪도록 하였으며, 중간에 톨게이트 통과 등과 같이 심박변이도 분석에 필요한 시간간격인 5분보다

짧은 이벤트들은 분석에서 제외하였다. 그림 2는 한 운전자가 7가지 상황을 겪는 동안 획득된 생체신호의 예를 나타낸 것이다.

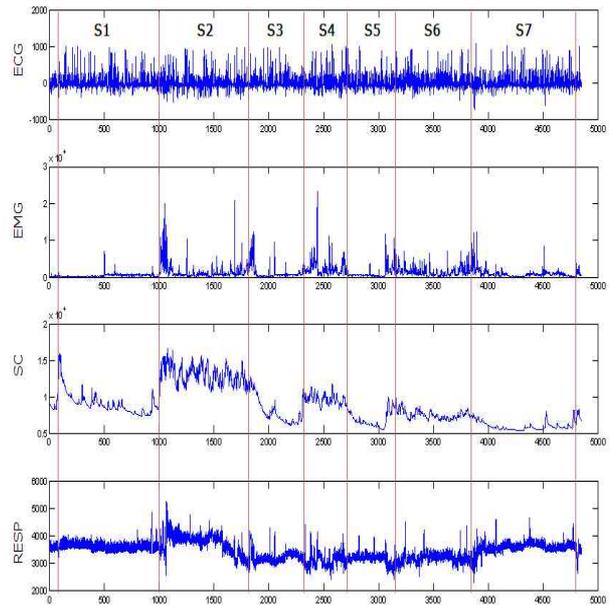


그림 2. 운전동안(S1-S7) 획득된 생체신호의 예

본 연구의 내용을 크게 두 가지로 나누면, 첫째는 5명의 운전자가 정신적 스트레스 정도가 다른 7가지 운전상황(S1~S7)을 겪는 동안 통계적으로 유의한 차이를 보이는 심박변이도 분석 파라미터를 발굴하는 것이며, 둘째는 이들 유의한 파라미터들을 이용하여 운전자의 정신적 스트레스 정도를 예측할 수 있는 판별함수를 설계하고 그 유효성을 평가하는 것이다.

먼저 운전 상황별로 유의한 차이를 보이는 심박변이도 분석 파라미터를 발굴하기 위하여 7가지 운전상황(S1~S7)에 상응하는 5분간 심전도 신호를 추출한 뒤 각 심전도 신호에 대해 심박변이도 분석을 실시하였다. 이 때 운전상황 변화에 따른 과도시간을 고려하여 각 상황 시작 후 2분 뒤의 심전도 신호를 사용하였으며, 5명의 운전자에 대해 동일한 방법으로 심박변이도 분석을 실시하였다. 심박변이도 분석을 통해서 시간 도메인 파라미터인 평균 RR간격(MeanRR), RR간격의 표준편차(sdRR), 심박간격 왜도(skewRR), RR간격 차이의 RMS 평균(rmsSD), 인접한 RR간격의 차이가 50 msec이하인 비율(pNN50)과 주파수 도메인 파라미터인 VLF(0.003~0.04 Hz), LF(0.04~0.15 Hz), HF(0.15~0.4 Hz), LF/HF 및 전체 에너지로 정규화된 저주파 성분(LFnorm) 및 고주파 성분(HFnorm)을 계산

하였으며(Task Force of the European Society of Cardiology, 1996), 추가적으로 비선형 파라미터인 Approximate Entropy(ApEn)도 구하였다. 참고로 ApEn 계산 시, 차원은 $m=2$ 로, 허용 오차범위 $r=0.2 \times SD$ (표준편차)으로 설정하였다(Fleisher et al., 1993). 계산된 심박변이도 분석 파라미터들은 개인별 차이가 크기 때문에 모든 파라미터를 7가지 상황 중 나타난 최대값과 최소값을 이용하여 0~1 사이 값으로 교정하였으며, 일원분산분석(One-way ANOVA)을 통해 5명의 운전자에 있어서 각 상황 간 통계적으로 유의한 차이가 있는 파라미터를 발굴하였다.

이 후 각 상황별로 유의한 차이가 있는 파라미터들을 이용하여 운전자별로 정신적 스트레스 정도를 예측할 수 있는 선형회귀모델을 개발하였으며, 마지막으로 이 모델을 통해 운전시간인 1시간 30분간을 5분 간격으로 분할한 16개 운전구간에서의 스트레스 정도를 예측할 수 있는지 확인해 보았다.

3. 결과 및 고찰

본 연구의 모든 분석에는 상용 프로그램인 Matlab7.5 (Mathworks, USA)을 사용하였으며, 운전자별 각 상황에서의 HRV 분석 파라미터 추출, 각 상황 간 유의한 차이가 있는 파라미터 발굴, 발굴된 파라미터 기반의 스트레스 예측 선형회귀 모델 설계, 선형회귀 모델을 통한 16개 구간의 스트레스 예측 순으로 분석을 실시하였다(Matlab R2009b, 2009).

3.1. 유의한 HRV 분석 파라미터 발굴

먼저 심박변이도 분석 파라미터를 추출하기 위하여 7가지 운전 구간을 검출한 뒤 각 운전 구간 시작 후 약 2분 후부터 5분 동안의 심전도 신호를 분리하였다. 분리된 심전도 신호로부터 먼저 5가지 심박변이도 시간 도메인 파라미터를 계산하였으며, 7가지 주파수 도메인 파라미터는 12차 다항식(polynomial)을 이용하여 심박변이도 신호의 경향(trend)을 제거한 뒤 계산하였다. 그리고 마지막으로 비선형 파라미터인 ApEn을 구하였다. 운전자 5명 모두에서 동일한 방법으로 총 13가지 심박변이도 파라미터를 계산하였으며, 표 2는 ‘운전자1’의 운전상황에 따른 파라미터 변화 양상을 정리한 예이다.

운전상황별 평균의 차이가 있는 심박변이도 파라미터를 확인하기 위해서 일원분산분석 방법을 선택하였는데, 심박변이도 파라미터들의 개인 간 차이가 현저하여 원값으로는 적절한 분석이 불가능하였다. 참고로 출발전 안정상태(S1)에서의 각 파라미터들의 운전자 간 변동계수(CV, coefficient of variance)를 살펴보면, sdRR과 ApEn은 약 9%의 양호한 분포를 나타내었지만, skewRR의 변동계수는 약 160%로 매우 컸다. 그리고 중요 파라미터로 예상되는 LF/HF 변동계수는 약 68%로 표 2에 언급된 ‘운전자1’의 전체 운전기간 동안 LF/HF 변동계수가 약 38%인 것에 비해 매우 큼을 알 수 있었다.

표 2. 운전상황에 따른 심박변이도 파라미터 변화(운전자1)

파라미터	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
meanRR	754.21	540.14	668.67	598.80	713.67	666.29	776.96
sdRR	59.42	55.39	60.30	54.86	48.70	58.25	61.08
skewRR	-0.03	0.52	0.06	0.34	0.16	0.45	-0.13
rmsSD	14.39	0.10	3.95	9.91	1.68	9.34	17.80
pNN50	0.75	0.75	0.00	0.17	0.25	0.33	0.92
VLF	321.86	76.53	147.02	140.81	271.48	451.44	459.05
LF	1.36E+3	340.49	598.21	638.98	1.03E+3	941.21	1.04E+3
HF	671.97	87.76	216.28	164.10	379.46	330.58	1.14E+3
LF/HF	2.02	3.87	2.76	3.89	2.70	2.84	0.91
LFnorm	0.27	0.30	0.29	0.33	0.28	0.28	0.18
HFnorm	0.13	0.07	0.10	0.08	0.10	0.09	0.20
ApEn	0.75	0.42	0.61	0.49	0.81	0.64	0.82

이에 운전자마다 각 파라미터를 전체 운전기간 동안의 최대값이 1, 최소값이 0이 되도록 선형적으로 변환하였다. 그 후 선형 변환된 파라미터들은 각 운전상황(S1~S7) 간 평균의 차이가 있는지(CASE1)와 운전자 상태 즉, 안정상태(S1, S7), 도심운전상태(S2, S4, S6), 고속도로운전상태(S3, S5) 간 평균의 차이가 있는지(CASE2)를 검정하였다. 표 3에 두 가지 경우에 대한 일원분산분석 결과를 각각 정리하였다. CASE1과 CASE2의 결과에서 $p < 0.01$ 의 기준으로 모두 만족한 심박변이도 파라미터는 meanRR, sdRR, HF, LF/HF, LFnorm, HFnorm의 6가지였으므로, 이들을 운전상황별 스트레스 예측함수의 입력변수로 선정하였다.

표 3. 일원분산분석 결과(p-value)

CASE1					
meanRR	sdRR	skewRR	rmsSD	pNN50	VLF
0.0000	0.0014	0.3113	0.1817	0.1784	0.1742
LF	HF	LF/HF	LFnorm	HFnorm	ApEn
0.0247	0.0000	0.0000	0.0003	0.0000	0.194

CASE2					
meanRR	sdRR	skewRR	rmsSD	pNN50	VLF
0.0000	0.0088	0.9664	0.3133	0.0173	0.5864
LF	HF	LF/HF	LFnorm	HFnorm	ApEn
0.1278	0.0000	0.0000	0.0003	0.0001	0.2785

특이한 것은 운전상황 또는 정신적 스트레스 정도가 단기적으로 바뀌는 본 연구에서의 심박변이도 파라미터는 장시간 운전에서의 심박변이도 변화양상과 다르게 나타났다. 대표적으로 성홍모(2003) 등의 연구에서는 3시간 운전동안 meanRR은 지속적으로 증가하고 ApEn은 지속적으로 감소한다고 보고하였으나, 본 연구에서 meanRR은 운전시간과 상관없이 정신적 스트레스 정도에 반비례하는 양상을 보였으며, ApEn은 특정한 변화 패턴을 관찰할 수 없었다. 또한 Apparies 등(1998)의 연구에서는 주행시간이 증가하면 LF 대역이 증가하는 것으로 보고하였으나, 본 연구에서는 LFnorm은 운전시간과 상관없이 정신적 스트레스에 비례하는 양상을 나타내었다.

3.2. 선형회귀 모델 설계 및 스트레스 예측

운전 상황별로 차이가 있는 6가지 심박변이도 분석 파라미터를 발굴한 뒤 이들을 입력 변수(meanRR, sdRR, HF, LF/HF, LFnorm, HFnorm)로 하고, 각 운전 상황에 해당하는 정신적 스트레스 정도를 출력 변수로 하는 선형회귀 모델을 개발하였다. 운전 상황별 정신적 스트레스 정도는 Healey 등(2005)의 설문조사 결과에 근거하여, ‘안정상태=1’, ‘도심운전=5’, ‘고속도로 운전=4’로 하였다. 이 때 정신적 스트레스에 대한 심박변이도 분석 파라미터의 변화 양상이 개인 간 차이가 큰 것을 감안하여, 각 운전자마다 선형회귀 모델을 설계하였다. 그 중 ‘운전자1’의 예를 살펴보면, 설계된 선형회귀 모델의 계수는 [6.7025, 0.3960, -6.7894, 15.6061, -12.5203, 0.5897]였으며, 이 모델의 통계치는 각 RMSE = 0.8871, R² = 0.8004, F = 20.0523, p-value = 0.0065 였다. 이 운전자의 경우, LF/HF와 LFnorm 변

수의 기여도가 크게 나타났지만, 모든 운전자에서 모델 계수의 크기 및 분포가 일정하지는 않았다. 하지만 모든 운전자에서 선형회귀 모델의 통계치는 유사한 수준을 나타냈으며, 참고로 운전자들의 선형회귀 모델 결정계수 R²값은 0.8604±0.0959로 출력변수의 변동 중 약 86 %를 회귀모델이 설명하고 있음을 알 수 있었다(배도선 외, 1999).

설계된 선형회귀 모델이 실제 운전자의 정신적 스트레스 정도를 예측할 수 있는지 평가해 보기 위하여 전체 운전 기간을 5분 길이의 세그먼트로 나누어 심박변이도 파라미터를 구한 뒤 개인별 선형회귀 모델을 적용해 보았다. 모든 운전자의 전체 운전 기간은 약 90분 정도였기 때문에 총 16개의 세그먼트에 대한 평가가 가능하였다. 한편 운전상황을 기준으로 세그먼트를 나눈 것이 아니기 때문에 두 가지 운전상황이 공존하는 세그먼트도 다수 존재하였으며, 이 세그먼트의 스트레스 정도는 두 상황의 평균값으로 하였다. 표 4에는 ‘운전자1’의 16개 운전구간 세그먼트에 해당되는 운전 상황과 부여한 스트레스 정도의 예를 나타내었다.

표 4. 16개 세그먼트별 운전상황 및 스트레스 정도(운전자1)

SegNo	운전 상황	스트레스 정도	SegNo	운전 상황	스트레스 정도
1	R1	1	9	C2	5
2	R1	1	10	H2	4
3	R1	1	11	H2+C3	4.5
4	R1+C1	3	12	C3	5
5	C1	5	13	C3	5
6	C1	5	14	R2	1
7	C1+H1	4.5	15	R2	1
8	H1+C2	4.5	16	R2	1

6개 운전구간 세그먼트의 스트레스 정도는 선형회귀 모델을 통해 예측된 스트레스 정도와 비교하였다. 이때 예측된 스트레스 정도가 1이하인 경우에는 1로, 5이상인 경우에는 5로 교정하는 후처리 실시하였다. 그림 3은 ‘운전자1’의 16개 세그먼트에 부여된 스트레스 정도(SS)와 선형회귀 모델을 통해 예측된 스트레스 정도(Estimated)의 예를 나타낸 것이다.

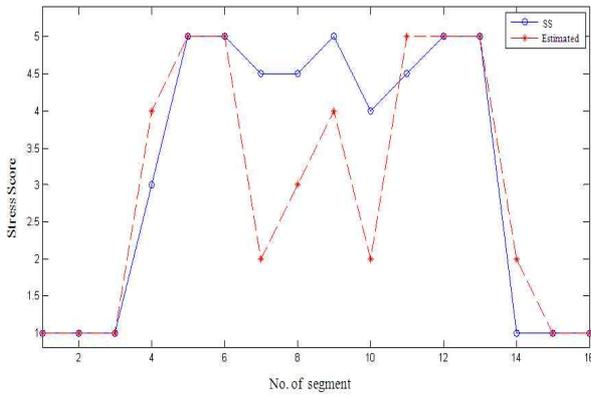


그림 3. 추정된 스트레스 정도(운전자1)

5분 단위의 단시간 스트레스 정도 변화에 대해 큰 지연없이 스트레스 정도를 예측할 수 있음을 알 수 있었으나, 운전시간 중간부분에서는 스트레스 정도가 다소 낮게 예측(underestimated)되는 현상이 관찰되었다. 나머지 운전자에서도 비슷한 수준으로 운전자 스트레스 정도를 예측할 수 있었으며, 운전자별 스트레스 정도와 예측된 스트레스 정도 간의 상관계수를 정리하면 표 5와 같다.

표 5. 원 스트레스 정도와 예측된 스트레스 간 상관계수

	운전자1	운전자2	운전자3	운전자4	운전자5
상관계수	0.8507	0.8339	0.9022	0.7674	0.9256

4. 결론 및 논의

최근 자동차는 첨단 IT 기술의 집합체라 부를 만큼 운전자의 편의와 안전을 위한 첨단 시스템들이 장착되고 있는 추세이나 운전자의 피로 및 수행능력 저하를 경고 또는 방지할 수 있는 시스템에 대한 연구는 미비한 상황이다. 이를 위해서는 운전자의 물리적 스트레스와 정신적 스트레스 정도를 모두 추정할 수 있어야겠다. 그러나 지금까지의 대부분의 연구들은 장거리 운전동안 운전자의 생체신호 신호 변화를 관찰하는 것이 주를 이루었으며, 이들 연구 결과는 대부분 운전 시간 경과에 따른 물리적 스트레스 누적 효과에 의한 것으로 예측된다. 이에 본 연구에서는 스트레스 정도가 단시간에 변하는 운전 프로토콜에서 Healey 등(2005)이 측정된 데이터를 기반으로 심박변이도 분석 파라미터들을 통해 운전 중 정신적 스트레스 정도를 추정할 수 있는지 예비적으로 평가해 보았다.

먼저, 운전자 5명으로부터 7가지 운전상황(S1-S7)에서의 13가지 심박변이도 분석 파라미터를 계산하였다. 주요 결과를 살펴보면, 기존 장거리 운전에서는 meanRR가 운전시간 증가에 따라 증가하는 신체적 부담을 반영하며 감소 즉, 평균 심박동수가 증가하는 양상을 보였으나, 스트레스 정도가 단기간에 변하는 본 연구에서는 meanRR은 운전 시간에 상관없이 스트레스 정도에 비례하여 변하는 것으로 나타났다. 한편 LFnorm의 경우 운전자 스트레스 정도에 비례하여 변하는 것으로 관찰되었는데, 이는 장거리 운전연구에서 LFnorm이 운전시간 증가에 따라 증가하나 운전 중 휴식기를 가지면 급격히 회복되기 때문에 단기간 운전자 상황을 잘 반영한다는 보고와도 일치한다. 마지막으로 심혈관계의 복잡성을 나타내는 ApEn은 장거리 운전연구에서 운전시간 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었으나, 본 연구에서는 운전시간과의 연관성이 관찰되지 않았다. 이는 운전자의 장기간 상태를 관찰하기에 유용한 지표로 알려진 ApEn이 스트레스가 단기간에 변하는 운전상황에서는 유효하지 않음을 의미한다.

계산된 운전상황별 심박변이도 분석 파라미터는 개인별로 차이가 크기 때문에 먼저 운전상황 중 나타난 개인 내 최대값과 최소값을 이용하여 정규화한 뒤, 운전상황별로 평균의 차이가 있는 심박변이도 분석 파라미터를 일원분산분석을 통해 발굴하였다. 그 결과 meanRR, sdRR, HF, LF/HF, LFnorm, HFnorm의 6가지 파라미터가 운전상황별로 평균이 차이가 있었으며($p < 0.01$), 이들을 스트레스 예측함수의 입력변수로 선정하였다.

스트레스 정도 예측함수를 설계하기 위해 운전 상황별 스트레스 정도를 출력변수로 하여 운전자별로 선형회귀 분석을 실시하였으며, 그 결과 모든 운전자에서 성공적으로 선형회귀 방정식을 생성해 낼 수 있었다($R^2 = 0.8604 \pm 0.0959$). 그러나 각 입력변수에 상응하는 계수들의 분포 양상이 개인별로 차이가 크게 나타났으며, 이는 운전상황에 따른 스트레스 반응 또는 심박변이도 반응은 개인 고유의 스트레스 반응성, 운전 숙련도, 심리적 상태 등에 의해 운전자별로 서로 다름을 시사한다.

설계된 스트레스 예측 선형회귀 모델의 적합성은 전체 운전시간을 5분 길이의 16개 세그먼트로 나눈 뒤 각 세그먼트에 대해 평가해 보았다. 그 결과 스트레스 정도를 정확하게 예측하지 못한 세그먼트가 다

수 존재하였지만 그림 3과 같이 실제 스트레스 변화 패턴과 유사한 변화 패턴을 보여 주었으며, 운전자 5명에 나타난 이 둘 사이의 상관계수는 0.8560 ± 0.0619 로 비교적 높았다. 이는 전부 또는 일부 입력변수와 선형회귀 모델이 스트레스 정도변화에 큰 지연없이 응답하는 특성을 갖고 있음을 간접적으로 보여 준 것으로써 이들 입력변수 또는 선형회귀 모델이 스트레스 정도가 수시로 변하는 실제 운전상황에서도 유용하게 활용될 수 있음을 추론할 수 있었다.

결론적으로 본 연구를 통해 1) 스트레스 정도가 단 시간에 변화하는 경우의 심박변이도 양상은 장거리 운전의 것과 다른 것을 알 수 있었으며, 2) 스트레스 정도별로 meanRR, sdRR, HF, LF/HF, LFnorm, HFnorm의 6가지 파라미터 평균이 차이가 나는 것 알 수 있었다. 3) 언급한 파라미터를 입력변수로 하여 스트레스 정도를 예측하는 개인별 선형회귀 모델을 양호하게 설계할 수 있었으며($R^2 = 0.8604 \pm 0.0959$), 이들을 운전자별 16개 운전구간 세그먼트에 대해 테스트 한 결과 일부 세그먼트에서 부정확한 결과가 야기되긴 하였으나, 원 스트레스 정도 변화 패턴과 예측된 스트레스 정도 변화 패턴의 상관성은 비교적 높게 나타났다($r = 0.8560 \pm 0.0619$). 향후 운전자 구속을 최소화하면서 측정 가능한 심박변이도 분석 시스템을 개발할 뿐만 아니라 이를 Healey 등(2005)의 연구와 유사한 운전 프로토콜 및 중간 수준의 스트레스 상황이 추가된 운전 프로토콜에 적용함으로써 본 연구결과가 여전히 유효한지 검증할 필요가 있겠다. 궁극적으로는 운전시간 증가에 따른 물리적 스트레스와 더불어 이러한 정신적 스트레스의 누적이 운전자의 피로 및 집중력 저하에 미치는 영향에 대한 정량화 연구가 수행되어야 하겠다.

참고문헌

- 김정민, 신민주, 이선희, 최환석, 옥선명, 김철민, 정기삼 (2004). 피로를 주소로 내원한 환자의 피로도에 따른 자율신경 변화. *가정의학회지*, 25(1), 52-58.
- 배도선, 이낙영, 권혁무, 장중순, 차명수, 윤원영, 김명수, 이민구 (1999). *통계학 이론과 응용*. 서울; 청문각, 525-584.
- 성홍모, 차동익, 김선웅, 박세진, 김철중, 윤영로 (2003). HRV 분석을 이용한 운전피로도에 관한 연구. *대한의용생체공학회지*, 24(1), 1-8.
- 정봉조, 김주영, 서성필 (2002). 운전자행동 및 반응검지차량을 활용한 도로 위험구간 판별기법 적용 연구(연구보고서). 도로교통기술원.
- 조현준, 김영일, 황태원, 하준수, 성풍현 (2008). HRV 신호를 이용한 소음과 수면부족이 인간 수행도에 미치는 영향 분석. *인간공학회 춘계학술대회*, 75-78.
- Angell, L., Auflick, J., Austria, P. A., Kochhar, D., Tijerina, L., Biever, W., Diptiman, T., Hogsett, J. & Kiger, S. (2006). *Driver Workload Metrics Project Final Report*, National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA).
- Apparies, R. J., Riniolo, T. C., & Porges, S. W. (1998). A psychophysiological investigation of the effects of driving longer-combination vehicles. *Ergonomics*, 41(5), 581-592.
- Fleisher, L. A., Pincus, S. M., & Rosenbaum, S. H. (1993). Approximate entropy of heart rate as a correlate of postoperative ventricular dysfunction. *Anesthesiology*, 78(4), 683-692.
- Hankins, T. C. & Wilson, G. F. (1998). A comparison of heart rate, eye activity, EEG and subjective measures of pilot mental workload during flight. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 69(4), 360-367.
- Healey, J. A. & Picard, R. W. (2005). Detecting Stress During Real-World Driving Tasks Using Physiological Sensors. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 6(2), 156-166.
- Matlab R2009b (2009). *Statistical Toolbox User's Guide*, Mathworks, Inc. (Natick, MA), 285-424.
- Task Force of the European Society of Cardiology the North American Society of Pacing Electrophysiology (1996). Heart Rate Variability Standards of Measurement, Physiological Interpretation, and Clinical Use. *Circulation*, 93(5), 1043-1065.
- Wilson, G. F., Lambert, J. D., & Russell, C. A. (1999). Performance enhancement with real-time physiologically controlled adaptive aiding. *Proceedings of Human Factors and Ergonomics Society 46th Annual Meeting, Santa Monica*, 3, 61-64.
- Wilson, G. F. (2001). An analysis of mental workload in pilots during flight using multiple psychophysiological

measures. *International Journal of Aviation Psychology*, 12(1), 3-18.

원고접수 : 09.12.07

수정접수 : 10.03.10

게재확정 : 10.03.18