Journal of the Ergonomics Society of Korea
Vol. 30, No. 1 pp.237-250, February 2011 DOI:10.5143/JESK.2011.30.1.237

생체 신호를 이용한 열차 승차감 평가 시스템 연구

송용수[1,3] · 오석문[2] · 이재호[1] · 김용규[1]

[1]한국철도기술연구원 열차제어시스템 연구실 / [2]한국철도기술연구원 정책전략연구실 /
[3]연세대학교 전기전자공학과

Study of Ride Comfort on Train through Physiological Parameter

Yongsoo Song[1,3], Suk-Moon Oh[2], Jae-ho Lee[1], Yong-Kyu Kim[1]

[1]Department of Train control & communication, Korea Railroad Research Institute, Uiwang-si, Gyeonggi-do, Korea, 437-757
[2]Department of Strategy, Korea Railroad Research Institute, Uiwang-si, Gyeonggi-do, Korea, 437-757
[3]Departments of Electrical Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea

ABSTRACT

The train transportation has a lot of advantages-energy efficiency is high, it is eco-friendly, safety is better than normal roads and it is possible for people to arrive on time. In these days, the valuation of ride comfort, which is only limited to road transportation, is newly recognized in order to having competitiveness from other transportation. Especially, in the development of the Korean high-speed railroad business, the ride comfort enhancement of train is very important problem to be solved. Currently, there are international standards of ride comfort such as UIC13, ISO2631. In Korea case, although it has own standard like KS R9216, it mainly depends on the physical parameter such as vibration and noise. So recently, in the valuation of ride comfort, the movements of living parameter technique introduction are increasing on the base of Japan and many developed countries of Europe techniques. Presently, the method of train ride comfort is mainly based of vibration, that is, mechanical parameter adding selection of variable acceleration and noise. This paper would like to show biological parameter; heart rate and blood pressure variation. This method is more direct, based on human body response, than mechanical parameter method. In this experiment, the variability of heart rate and blood pressure of passengers according to tilting angle change of Train, the Korean tilting train, we are supposed to know that the extent of tilting on the simulation has influence on variability of heart rate and blood pressure, which are living parameter of heart's blood.

Keywords: Korean tilting train, Heart rate, Blood pressure

1. Introduction

철도가 다른 교통수단과의 경쟁에서 이기기 위해서는 열차 속도 및 여객 수송의 품질에 대해 최종적으로 평가한다는 점을 감안할 때 승차감을 일정한 수준 이상 향상시키는 것이 필수적이다. 승차감은 인간이 감정으로 느낄 수 있는 다양한 요소(진동, 소음, 온도, 습도, 조도, 개인 공간, 좌석 질감, 천장 높이, 전망, 통풍 등)들이 복합적으로 결합되어 나타나지만, 이러한 제반 요소들을 모두 고려하여 정량적으

교신저자: 송용수
주 소: 437-757 경기도 의왕시 월암동 360-1, E-mail: adair @krri.re.kr
Copyright@2011 by Ergonomics Society of Korea(pISSN:1229-1684 eISSN:2093-8462). All right reserved.

로 승차감을 평가 하는 것은 매우 어려운 일이다. 일반적으로 철도에서는 측정된 진동가속도를 인간의 등가 감응량으로 정량화 시켜 평가하는 방법을 사용하고 있다. 철도 분야의 승차감 평가는 ISO, UIC, CEN 등의 규격에 규정되어 있으며, 이들은 통계적인 방법과 실효 값으로 철도 차량의 승차감을 평가하고 있다. 또한 이들 규격 외에 유럽에서 오랜 기간 동안 사용해온 Sperling이 제안한 "승차감지수"가 철도 차량의 승차감 평가에 사용되어 왔다. 그러나 아직까지 곡선부 승차감을 제시한 규격은 전무후무한 상태이다. 따라서 본 연구는 열차 시스템의 틸팅 승차감 평가기술을 개발하기 위하여, 인체공학적 모델링을 수행하고, 이를 통하여 얻은 최적의 측정 파라 미터를 도출한 후 기존의 철도 승차감 평가 기준과의 융합을 통해 새로운 열차 시스템의 승차감 측정용 평가기술을 개발함을 목표한다. 개발된 평가기술은 컴퓨터 시뮬레이션과 실험적 분석을 통해 평가하며, 국내외 열차에 대한 평가기술의 적용 및 평가 시스템을 개발함으로써 빠른 기술의 도입을 주목적으로 한다.

2. Method

2.1 실험 프로토콜

2.1.1 실험목표

측정 자를 통하여 생체 신호를 측정 후 열차의 상황과 관련하여 연관성을 알아본 후 생체 파라 미터를 통하여 승차감을 평가한다.

2.1.2 주의사항

Sampling Frequency를 측정 시간을 고려하여 조절해야 한다(200Hz).

2.1.3 실험개요

(가) 측정자의 ECG, GSR, EMG(보조 측정: SKT, PPG, RES)
(나) 측정자의 상황을 모니터링 하기 위한 촬영(CAM1)
(다) 실험과정

– 피험자모집, 장비교육



– 틸팅열차 탑승, 생체 데이터 취득



– 실험종료



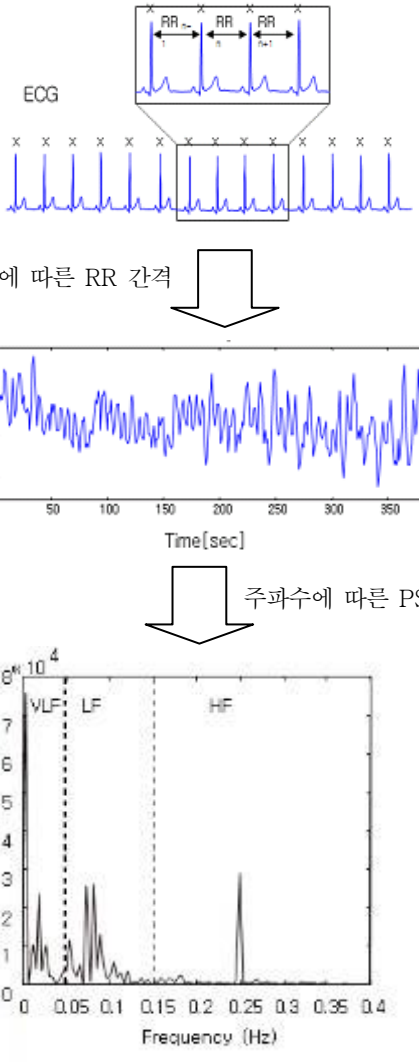
2.1.4 실험 장비

Table 1. 실험 장비

항목	설명
BIOPAC MP30	– 생체 신호 측정장비
BSL PRO 3.7	– BIOPAC 장비와 연결하여 실시간 신호
Complexity 2.8	– (주) 락사의 생체신호 분석 프로그램 (시간 축 및 주파수 석 기능 제공)

2.1.5 분석 방법

분석 방법: HRV 산출 방법 및 주파수 분석



심박동 파형을 시간 축 변화에 따른 RR 간격에 대한 주파수 분석 후 이 주파수대 PSD의 변화율을 교감신경 활성도 변화와 스트레스의 상관관계를 이용 승차감 평가하였다.

2.2 분석 파라 미터 및 평가 방법

2.2.1 ECG 상의 RR 간격 및 흥분성 평가 방법

인체의 심장 박동수는 신경계로부터의 교감, 및 부교감의 길항작용을 바탕으로 조절되며 따라서 ECG 상의 RR 간격을 측정하는 것은 승차감에 있어서 인체의 흥분 상태를 알 수 있는 중요한 요인이 된다.

2.2.2 GSR 및 각성도 평가 방법

GSR은 활동적인 GSR에 대한 측정된 저항을 갖고 신체를 통과시키는 것과 수동적인 GSR에 대해 몸 자체 측정된 신체에 의해 생성시키는 것 2가지가 있다. GSR을 통한 인체 각성 정도는 일정 구간의 이벤트수와 면적(peak까지의 삼각형의 면적)의 합을 통하여 각성 정도를 판별할 수 있다.

2.2.3 EMG 및 근피로도 평가 방법

EMG는 표면 근전도로 한 근육을 구성하는 많은 Motor Unit들의 활동전위(MUAPs)들을 합한 결과이다. EMG를 이용하여 근육의 피로도를 측정하기 위해서는 일반적으로 진폭이 증대되며, 주기가 연장된다. 주파수적 측면에서 본다면 기존의 정상 상태보다 저주파성이 증가하게 된다. 이는 시계열적 측면에서 zero crossing 횟수와 평균 신호 크기를 통하여 분석할 수 있다.

2.3 신호 분석을 위한 데이터 처리

2.3.1 시간에 따른 경향성 파악

동일한 실험 환경과 조건 대상으로 6일 동안의 실험을 통해서 종합적으로 분석하였다. 측정된 ECG, EMG, GSR 데이터를 모두 1분 단위로 분할하였고 1시간씩 통합하여 하루 9시간의 데이터를 분석하였으며 측정기간 6일의 데이터를 통하여 각 생체 파라 미터의 시간에 따른 경향성을 파악하였다.

2.3.2 ECG의 RR 간격을 통해서 본 인체 신경계의 변화

RR 간격은 증가하다가 감소하는 추세를 보였다. 보통의 건강한 사람이 700~800ms의 RR 간격을 보이는 것을 감안할 때, 승차 후 3.5~4.5시간이 될 때까지 안정성을 찾아는 경향을 보인다. 본 인체 모델의 경우 승차 후 3.5~4.5시간이 지나게 되면 RR 간격이 줄어들어 인체 자체는 교감신경의 영향을 더 크게 받고 있음을 알 수 있다.

2.3.3 GSR을 통한 각성도 변화

GSR은 수동적인 GSR의 의미만을 고려하였으며 이벤트 개수와 이벤트 측정 면적은 승차 후 8~9시간 정도부터는

Table 2. 평균 RR 간격표

	RR interval
1(hour)	638.9633698
2	692.452023
3	731.7786775
4	852.1958846
5	800.6795219
6	737.5955307
7	677.0080305
8	647.5773095
9	626.6311926

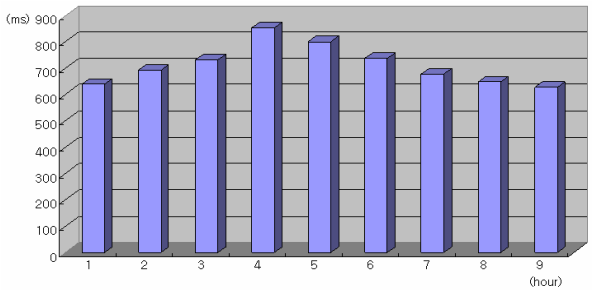


Figure 1. 평균 RR 간격 그래프

아주 민감한 반응을 보이는 것으로 나타났다. 이벤트의 개수도 50배 이상 이벤트 측정 면적은 1,500배 정도 증가하였다. 본 인체 모델의 경우 GSR의 수치를 통해서 본 각성도는 8~9시간이 지난 후부터 급속히 증가하며 예민해지는 경향성을 가지고 있다.

Table 3. GSR의 이벤트 개수 및 총 면적표

	Event No.	Event area
1(hour)	46	0.220168
2	763	0.849484
3	592	3.145872
4	562	6.154619
5	689	19.403536
6	763	28.400771
7	954	30.708583
8	939	84.94843
9	2548	294.36109

2.3.4 EMG를 통해 알아본 하지 근육 근 피로도

EMG는 저주파 성 파악을 위한 Zero Crossing의 개수와

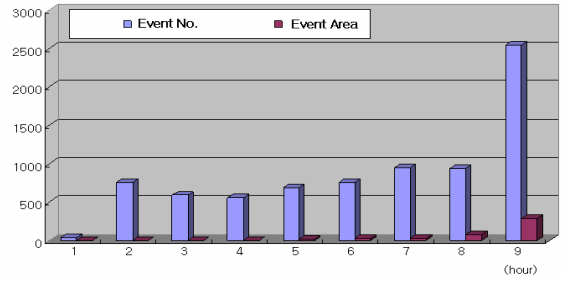


Figure 2. GSR의 이벤트 개수 및 총 면적 그래프

신호의 크기를 측정하였으며 승차 시간이 길어질수록 Zero Crossing의 개수가 줄어 드는 경향을 보였다. 또한 평균 크기는 증가하여 제시된 이론의 결과대로 근피로도가 증가하는 경향을 보였으며 Zero Crossing의 개수는 선형적 감소 추이를 보이는 반면 크기의 측면에서 볼 때 각성도가 증가하는 시점인 8~9시간에 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다.

Table 4. EMG의 Zero Crossing 개수 및 크기표

	Zero Crossing No.	Magnitude
1(hour)	7216	0.487047
2	5724	0.226493
3	5835	0.139279
4	5558	0.096279
5	5523	0.094279
6	4912	0.083279
7	4750	0.077835
8	3256	0.009241
9	2223	0.043366

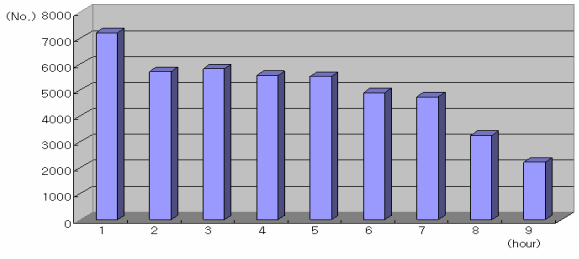


Figure 3. EMG의 Zero Crossing 개수 그래프

2.4 ECG 상의 RR 간격을 이용한 HRV 분석

2.4.1 주파수 영역에서의 분석 개요

주파수 영역의 분석이라 스펙트럼 분석(spectrum analysis)을 가리킨다. 스펙트럼 분석에서는 변동을 정현파

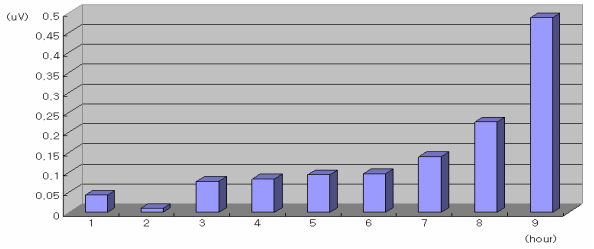


Figure 4. EMG의 크기 그래프

의 집합으로 간주하며, 정현파와 그 스펙트럼과의 기본적인 관계에 대해서 나타낸다. 정현파의 성질은 변동 폭인 '진폭'과 변동 속도인 '주파수'에 의해 표현된다. 스펙트럼 상에서는 하나의 정현파는 하나의 피크(Peak)에 대응하며, 정현파의 주파수는 피크의 위치로서, 진폭은 피크의 크기(높이) 또는 면적으로 표현된다. 스펙트럼 분석에서 전력(Power)이란 그 파형에 기인하는 데이터의 분산이다. 만일 시계열 데이터가 하나의 정현파로 구성되어 있으면 전력은 그 시계열의 분산과 등가이다. 파형이 정현파 모양이면 주파수와는 상관없이 [전력 = 진폭2 /2].

파형과 그의 스펙트럼에는 가산성이 있다. 즉, 주파수가 다른 두 개의 파형을 더하여도 각각의 파형의 성질은 유지된다. 시계열 데이터에 어떤 파형을 더하면 데이터의 분산은 더했던 파형의 전력만큼 증가한다. 또 2개의 파형을 더한 데이터의 스펙트럼은 개개의 파형의 스펙트럼의 합과 등가가 된다. 여러 파형으로 이루어진 시계열의 스펙트럼은 개개의 파형의 스펙트럼의 합과 등가가 된다. 여러 파형으로 이루어진 시계열의 스펙트럼에는 파형의 수만큼 피크가 나타난다. 심박변동 신호에는 저주파 성분(LF component, 0.04~0.15 Hz)과 고주파 성분(HF components, 0.15~0.45Hz)이라고 하는 주파수가 다른 성분이 포함되고, 이러한 성분은 스펙트럼 상에서 각각의 피크로써 나타나게 된다.

Table 5. 주파수 성분 및 신경 활동도

Component	Frequency range(Hz)
초저주파 성분	0~0.05
저주파 성분	0.05~0.15
고주파 성분	0.15~0.45

2.4.2 HRV 분석을 위한 ECG 상의 Peak 점 검출

HRV 분석을 위하여 우선은 측정 데이터인 ACQ 파일에서의 Peak 점 검출이 필요하다. ACQ 상의 Sampling Rate는 100Hz를 기준으로 하였으며 Phantomkey Algorithm을 이용하여 Peak 점을 검출하였다.

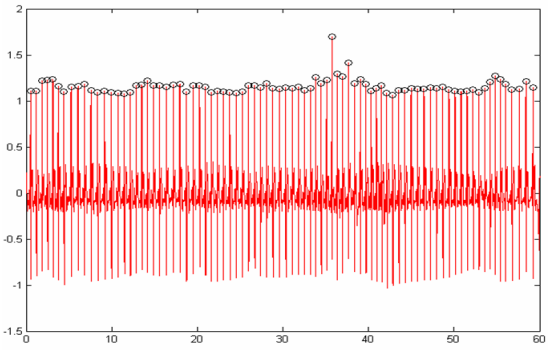


Figure 5. 측정 ACQ 파일의 ECG Peak 점 검출(탑승 초기)

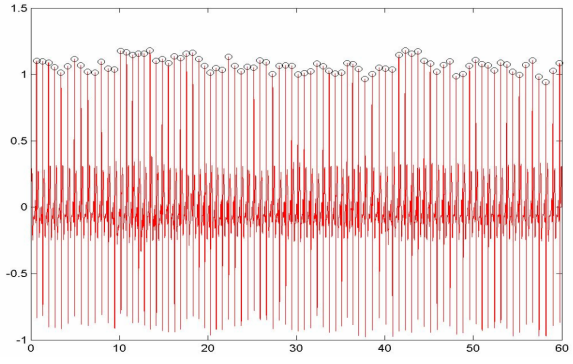


Figure 6. 측정 ACQ 파일의 ECG Peak 점 검출(탑승 4시간 후)

2.4.3 Peak to Peak(RR interval)의 Histogram 화

Peak 점 검출 후 각각의 Peak 값들 간의 간격을 계산하여 60개의 Sample(60unit/min)을 만들게 되며 각각의 Peak to Peak 값 즉, RR 간격을 가지고 Histogram으로 표현하게 된다.

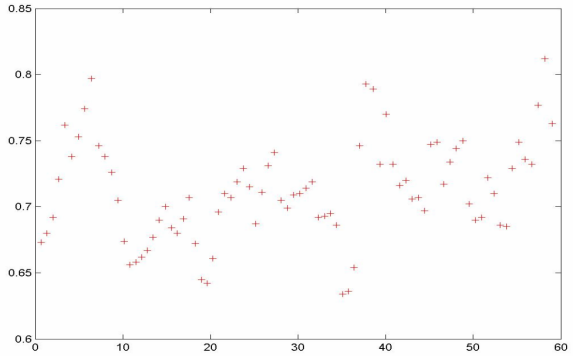


Figure 7. 측정 ACQ 파일의 ECG Peak 점 Histogram(탑승 초기)

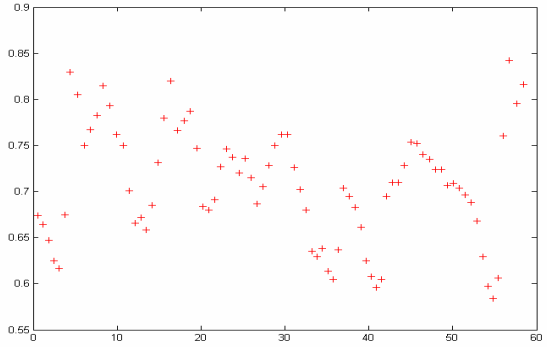


Figure 8. 측정 ACQ 파일의 ECG Peak 점 Histogram (탑승 4시간 후)

2.4.4 데이터의 보간(등간격 신호의 유도)

심박변동 신호의 스펙트럼 분석에는 주의해야 할 부분이 있다. 그것은 R-R 간격 데이터가 심장의 움직임(심박동)과 같은 시간 간격으로 밖에 얻을 수 없으며, 그 때의 간격은 R-R 간격 그 자체이며 변동한다는 점이다. 따라서 앞에서 서술한 방법으로 측정된 심박변동 신호의 시계열 데이터는 샘플간격이 등간격이 아니기 때문에, 등간격 신호를 필요로 하는 전력 스펙트럼 추정알고리즘을 직접 적용할 수 없게 된다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위하여, 심박 변동의 스펙트럼 분석에서는 데이터의 보간(interpolation)과 등간격으로의 재샘플링(resampling)을 수행한다. R-R 데이터를 보간하는 방법에는 직선 보간 spline 보간, 저역필터법, integral pulse frequency modulator model에 기초한 Berger 등의 방법 등이 있다, cubic-spline 방법을 이용한 보간법이 가장 우수하다고 알려져 있다.

보간에 의해 R-R 간격의 시계열 데이터는 연속 함수가 되며, 이 연속 함수로부터 등간격이 데이터를 재구성한다. (resampling) 재샘플링의 간격은 평균 R-R 간격보다 길게 하면 1박마다의 R-R 간격의 변동 특성을 잃게 되고 반대로 짧게 하면 보간법 그 자체의 특성이 잡음(artifact)로서 데이터로 삽입될 우려가 있다. 따라서 일반적으로 성인의 데이터에서는 250~1000ms(1~4samples / Hz)의 간격으로 재샘플링하여 사용하는 경우가 많으며, 본 연구에서는 4H로 재샘플링하여 사용하였다.

2.4.5 선형 근사화에 의한 선형 성분(linear trend)의 제거

전력 스펙트럼 분석에 적용되는 데이터의 각각의 구간(segment)들은 그 구간의 길이보다 더 긴 주기를 가지는 저주파 성분을 포함하고 있으며 이러한 저주파 성분은 '선형 성분(linear trend)'라고 부른다. 선형 성분은 전력 스펙

트럼 상의 저주파 대역에서 중첩을 일으켜 스펙트럼의 왜곡을 일으킨다. 또한 얻어진 심박변동 신호는 큰 DC 성분을 포함하게 되므로 전력 스펙트럼 분석을 위해서는 구간 양쪽 끝의 데이터가 연속성을 가지도록 하기 위하여 윈도우를 적용해야 하나 위도우의 사용은 스펙트럼의 왜곡을 가져온다. 본 연구의 스펙트럼 분석은 초저주파 대역의 신호를 반영하지 않는 단시간 구간에 대한 분석을 목적으로 하므로 선형 성분으로 나타나는 초저주파 성분은 의미를 가지지 못한다. 따라서 심박변동 신호는 전력 스펙트럼을 구하기 이전에 전처리 과정으로 선형 성분의 제거를 거친다. 선형 성분의 제거는 DC 성분까지 제거되므로 선형 성분은 제거한 신호는 나누어진 구간에 대하여 구간 끝의 데이터 간의 불연속성이 없다고 가정할 수 있다.

본 연구에서는 다음과 같은 방법을 사용하여 선형 성분을 제거하였다.

N개의 데이터 $Y=[y_1, y_2, y_3, ...y_n]$가 어떤 선형적인 경향을 가지고 있으며,

그 경향이 u=ax + b라는 직선의 식으로 나타낼 때, 기울기 a와 Y절편 b는 y1와 u의 차에 의한 오차를 최소화하는 값이다. 오차의 합을 Err이라 하면 총 오차는 다음과 같다.

$$E_{rr}=\sum_{i=1}^{n}(y_i-y)^2=\sum_{i=1}^{N}(y_i-ax-b)^2$$

위 식의 양변을 a와 b로 편미분을 하면 미분값이 0일 때 Err은 최소가 된다. 즉.

$$\frac{\delta Err}{\delta a}=\sum_{i=1}^{N}[2x^2a+2(b-y_i)x]=0$$

$$\frac{\delta Err}{\delta b}=\sum_{i=1}^{N}[2b+2(ax-y_i)]=0$$

을 만족하는 a와 b를 구하면 그 때의 y는 y_i의 선형적인 경향을 근사화 한 것이다. a와 b는 다음과 같이 계산된다.

$$a=\frac{N\sum_{i=1}^{N}xy_i-\sum_{i=1}^{N}x\sum_{i=1}^{N}y_i}{N\sum_{i=1}^{N}x^2-(\sum_{i=1}^{N}x)^2}$$

$$b=\frac{\sum_{i=1}^{N}y_i-a\sum_{i=1}^{N}x}{N}$$

2.5 생체 신호를 이용한 틸팅열차 승차감 분석 방법의 확대

2.5.1 일반 구간과 틸팅(곡선) 구간의 심박변화율 비교 분석

2008년 11월 18일(1차 실험)

- 실험 차수: 1차 실험
- 실험 일지: 2008. 11. 18
- 실험 대상: 9명(남: 6명, 여 3명)
- 실험 노선: 호남선
- 분석 결과:

피험자	일반구간	틸팅구간
A1	1.446	1.647
B1	5.247	10.038
C1	1.434	1.779
D1	1.325	3.373
E1	0.433	1.641
F1	1.509	2.755
G1	1.502	2.484
H1	2.328	2.503
I1	1.479	1.563
평균	**1.856**	**3.087**
표준편차	**1.358**	**2.679**

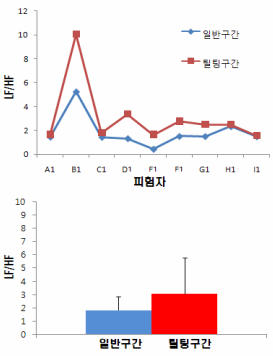


Figure 9. 2008년 11월 18일(1차 실험)

2008년 11월 19일(2차 실험)

- 실험 차수: 2차 실험
- 실험 일시: 2008. 11. 19
- 실험 대상: 9명(남: 6명, 여: 3명)
- 실험 노선: 호남선
- 분석 결과:

피험자	일반구간	틸팅구간
A2	0.748	1.326
B2	1.027	2.335
C2	3.507	6.935
D2	0.881	1.758
E2	3.447	2.889
F2	1.338	1.316
G2	2.020	4.901
H2	3.000	4.335
평균	**1.856**	**3.087**
표준편차	**1.358**	**2.679**

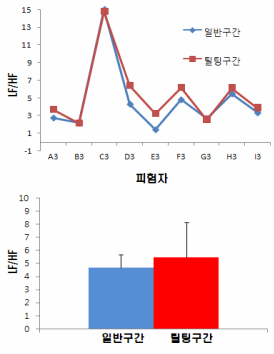


Figure 10. 2008년 11월 19일(2차 실험)

2008년 11월 25일(3차 실험)

- 실험 차수: 3차 실험
- 실험 일시: 2008. 11. 25
- 실험 대상: 10명(남: 5명, 여: 5명)
- 실험 노선: 중앙선
- 분석 결과:

피험자	일반구간	틸팅구간
A3	2.773	3.668
B3	2.184	2.147
C3	14.991	14.800
D3	4.321	6.386
E3	1.447	3.244
F3	4.823	6.199
G3	2.715	2.561
H3	5.486	6.136
I3	3.347	3.877
평균	**4.676**	**5.446**
표준편차	**4.078**	**3.858**

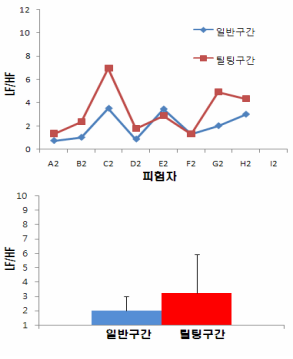


Figure 11. 2008년 11월 25일(3차 실험)

2008년 11월 26일(4차 실험)

- 실험 차수: 4차 실험
- 실험 일시: 2008. 11. 26
- 실험 대상: 10명(남: 5명, 여: 5명)
- 실험 노선: 중앙선
- 분석 결과:

피험자	일반구간	틸팅구간
A4	1.717	2.790
B4	2.891	6.994
C4	1.347	3.671
D4	0.767	4.440
E4	1.145	2.842
F4	2.528	1.941
G4	2.034	2.466
H4	1.610	3.427
I4	3.804	3.746
평균	**1.983**	**3.591**
표준편차	**0.951**	**1.481**

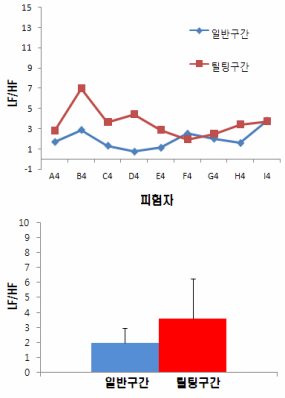


Figure 12. 2008년 11월 26일(4차 실험)

2008년 11월 27일(5차 실험)

- 실험 차수: 5차 실험
- 실험 일시: 2008. 11. 27
- 실험 대상: 10명(남: 5명, 여: 5명)
- 실험 노선: 중앙선
- 분석 결과

피험자	일반구간	틸팅구간
A5	2.803	6.321
B5	1.566	3.608
C5	2.689	3.034
D5	1.601	2.437
E5	2.232	3.894
F5	1.824	2.074
G5	9.727	10.631
H5	2.798	2.509
I5	3.468	8.345
평균	**3.190**	**4.761**
표준편차	**2.533**	**3.010**

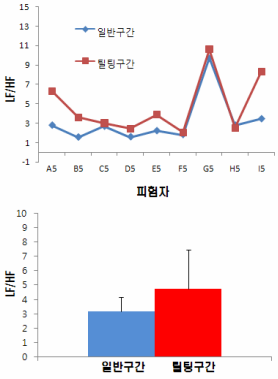


Figure 13. 2008년 11월 27일(5차 실험)

2008년 12월 16일(6차 실험)

- 실험 차수: 6차 실험
- 실험 일시: 2008. 12. 16
- 실험 대상: 10명(남: 5명, 여: 5명)
- 실험 노선: 호남선
- 분석 결과:

피험자	일반구간	틸팅구간
A6	2.842	2.700
B6	0.795	4.221
C6	1.001	1.276
D6	1.606	2.382
E6	1.700	5.597
F6	9.274	2.760
G6	1.474	4.891
H6	2.312	2.935
I6	4.988	3.046
평균	**2.888**	**3.312**
표준편차	**2.705**	**1.344**

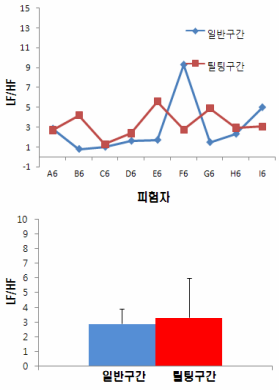


Figure 14. 2008년 12월 16일(6차 실험)

2008년 12월 17일(7차 실험)

- 실험 차수: 7차 실험
- 실험 일시: 2008. 12. 17
- 실험 대상: 8명(남: 6명, 여: 2명)
- 실험 노선: 호남선
- 분석 결과:

2008년 12월 18일(8차 실험)

- 실험 차수: 8차 실험
- 실험 일시: 2008. 12. 18

- 실험 대상: 10명(남: 4명, 여: 6명)
- 실험 노선: 중앙선
- 분석 결과:

피험자	일반구간	틸팅구간
A7	6.587	3.349
B7	0.804	2.476
C7	1.566	1.566
D7	1.067	0.844
E7	2.474	4.497
F7	1.666	2.800
G7	8.154	6.932
H7	5.790	14.490
평균	**3.514**	**4.619**
표준편차	**2.873**	**4.406**

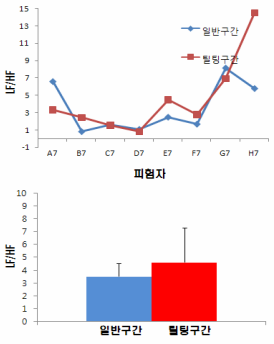


Figure 15. 2008년 12월 17일(7차 실험)

피험자	일반구간	틸팅구간
A8	2.489	4.976
B8	1.180	1.659
C8	1.744	3.103
D8	1.170	2.484
E8	3.599	6.742
F8	3.181	4.521
G8	1.111	1.730
H8	0.927	4.506
I8	1.752	6.593
평균	**1.906**	**4.035**
표준편차	**0.971**	**1.919**

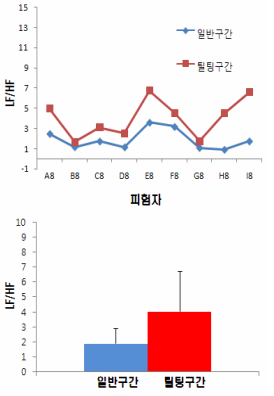


Figure 16. 2008년 12월 18일(8차 실험)

종합적 분석

1~8차의 실험: 틸팅구간과 일반구간에 대한 교감신경 활성도를 종합적으로 분석한 결과는 다음과 같다.

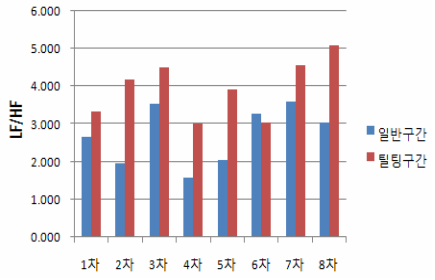


Figure 17. 실험지수에 따른 틸팅구간/ 일반구간 교감심경활성도 비율

위 그래프는 각 실험 차수별로, 틸팅구간과 일반구간의 교감신경 활성도를 비교할 경우, 전반적으로 틸팅구간에서 교감신경 활성도가 일반구간에 비해 높은 경향성을 보여주고 있다.

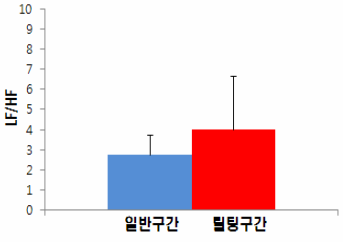


Figure 18. 틸팅유무에 따른 교감신경 활성도 평균치

위 그래프와 같이 일반구간에 비해 틸팅구간에서 교감신경 활성도가 평균적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

2.5.2 틸팅각에 따른 심박변화율 분석

분석방법

틸팅각의 변화에 따른 심박변화율이 어떻게 변하는지 알아보기 위하여 각도 변화에 따른 심박변화율을 5분 단위로 계산하여 15초에 한번씩 업데이트하여 변화를 비교 평가하였다.

분석 방법은 틸팅이 일어난 시점을 기준으로 전후 5분씩 10분의 데이터를 선택하여 기계 데이터와 취득한 ECG 데이터의 시간을 일치시키고 ECG에서 심박변화율(R-R interval Variability)을 구하고, 5분단위로 Moving window를 적용하여 15초 간격으로 PSD를 계산하여 LF, HF의 값을 이용하여 LF/HF 비율을 구하는 순서로 진행되며, 각 과정에 대한 예시를 다음 그림에 보인다.

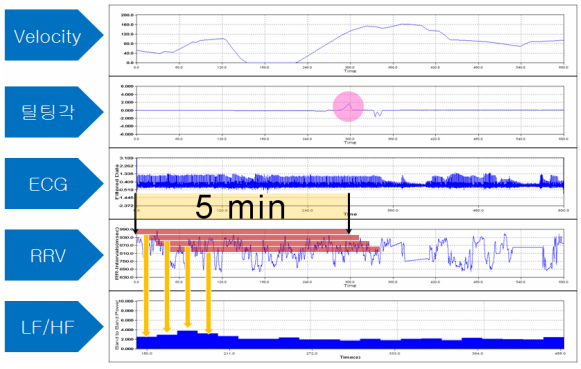
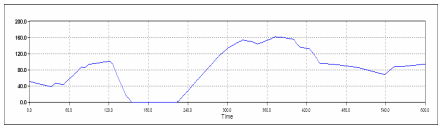
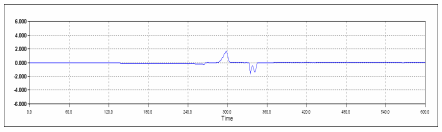
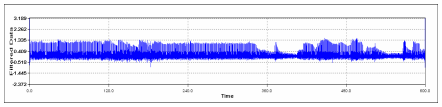
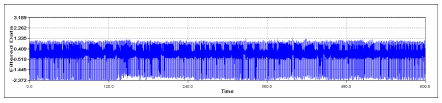
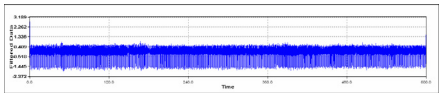
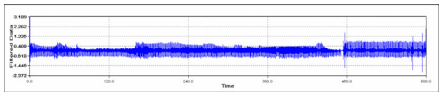
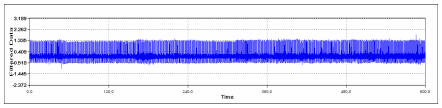
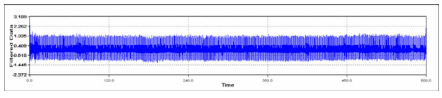


Figure 19. 틸팅각에 따른 심박변화율 분석

틸팅각 2도에서의 심박변화율 비교

① 심전도 (ECG) 데이터

Table 6. 틸팅각 2도에서의 심박변화율 비교

속도		
틸팅		
심전도 ECG	a	
	b	
	c	
	d	
	e	
	f	

② 심박변화율(R-R interval Variability)

Table 7. 심박변화율(R-R interval Variability)

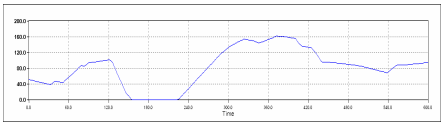
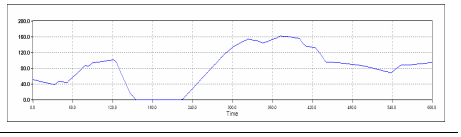
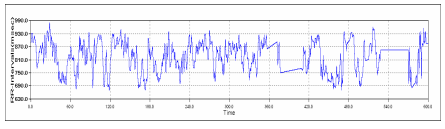
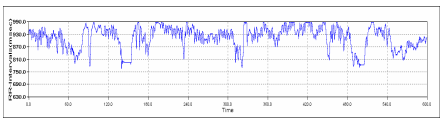
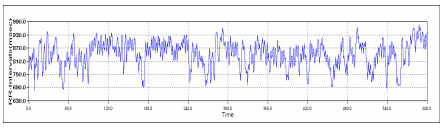
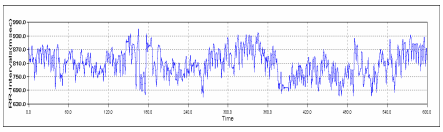
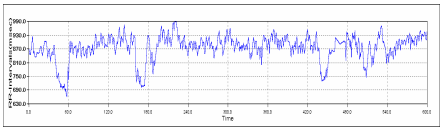
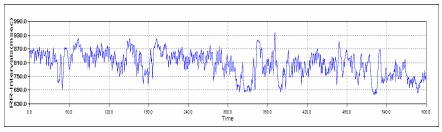
속도		
틸팅		
심박 변화율 (RRV)	a	

Table 7. 심박변화율(R-R interval Variability) (계속)

심박 변화율 (RRV)	b	
	c	
	D	
	e	
	f	

③ LF/HF Ratio

Table 8. LF/HF Ratio

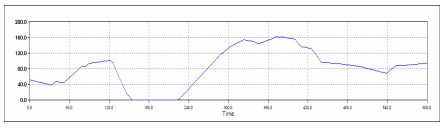
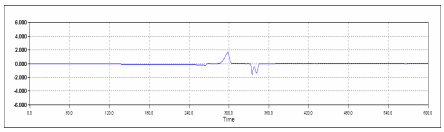
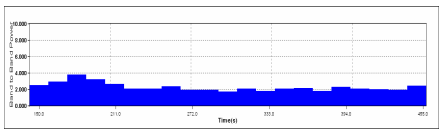
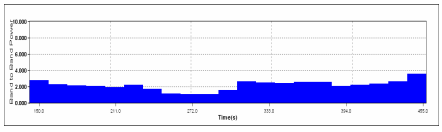
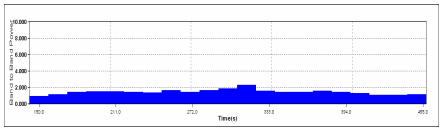
속도		
틸팅		
LF/HF	a	
	b	
	c	

Table 8. LF/HF Ratio (계속)

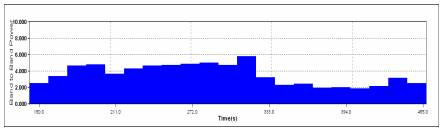
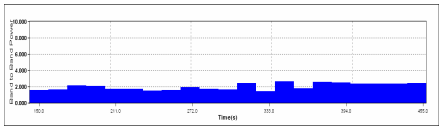
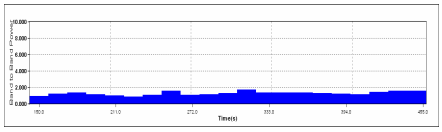
LF/HF	d	
	e	
	f	

Table 9. 시간에 따른 LF/HF Ratio 변화

No	시간	피험자						비고
		a	b	c	d	e	f	
1	00:00~05:00	2.43	2.75	0.92	2.44	1.52	0.89	틸팅 전 5분
2	00:15~05:15	2.92	2.27	1.14	3.30	1.63	1.19	
3	00:30~05:30	3.76	2.13	1.43	4.63	2.13	1.34	
4	00:45~05:45	3.16	2.02	1.47	4.72	2.02	1.08	
5	01:00~06:00	2.60	1.92	1.48	3.58	1.67	0.95	
6	01:15~06:15	2.05	2.17	1.41	4.23	1.71	0.80	
7	01:30~06:30	2.05	1.64	1.35	4.63	1.49	1.01	
8	01:45~06:45	2.33	1.10	1.57	4.64	1.54	1.54	
9	02:00~07:00	1.91	1.01	1.42	4.81	1.87	1.02	
10	02:15~07:15	1.90	1.07	1.57	4.99	1.67	1.14	
11	02:30~07:30	1.68	1.54	1.81	4.71	1.64	1.28	틸팅시점
12	02:45~07:45	2.02	2.58	2.24	5.79	2.39	1.70	
13	03:00~08:00	1.76	2.49	1.51	3.15	1.39	1.34	
14	03:15~08:15	2.02	2.39	1.38	2.27	2.57	1.29	
15	03:30~08:30	2.12	2.55	1.36	2.38	1.75	1.30	
16	03:45~08:45	1.72	2.53	1.54	1.91	2.56	1.25	
17	04:00~09:00	2.22	2.06	1.37	1.96	2.47	1.15	
18	04:15~09:15	2.07	2.14	1.27	1.79	2.33	1.14	
19	04:30~09:30	2.00	2.34	1.03	2.13	2.34	1.37	
20	04:45~09:45	1.91	2.60	1.07	3.10	2.31	1.52	
21	05:00~10:00	2.37	3.53	1.08	2.49	2.42	1.56	틸팅 후 5분

Table 10. 틸팅 전후 LF/HF Ratio 변화

피험자	LF/HF Ratio	
	틸팅 전	틸팅 후
a	2.43	2.37

Table 10. 틸팅 전후 LF/HF Ratio 변화 (계속)

피험자	LF/HF Ratio	
	틸팅 전	틸팅 후
b	2.75	3.53
c	0.92	1.08
d	2.44	2.49
e	1.52	2.42
f	0.89	1.56
평균	1.83	2.24

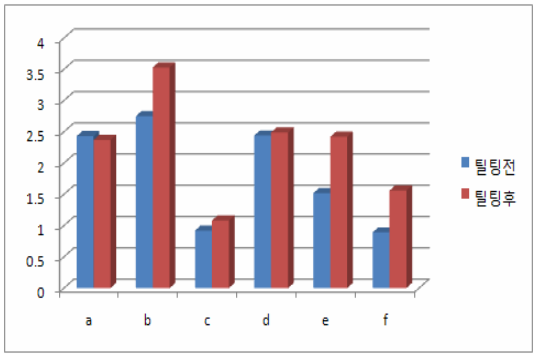


Figure 20. 틸팅 전후 LF/HF Ratio 변화

틸팅각 4도에서의 심박변화율

① 심전도(ECG) 데이터

Table 11. 틸팅각 4도에서의 심박변화율

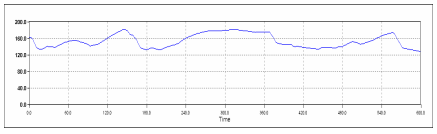
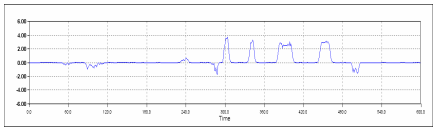
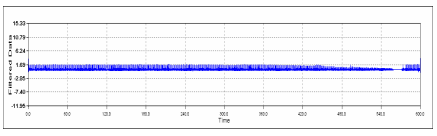
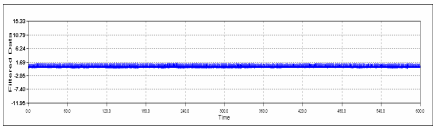
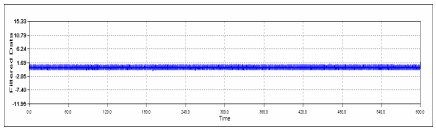
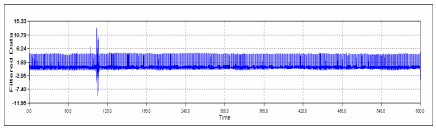
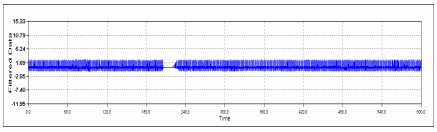
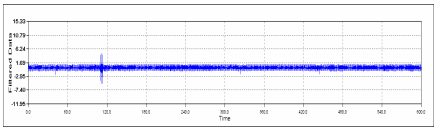
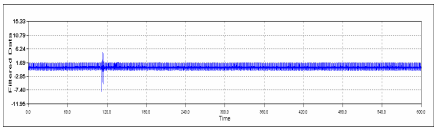
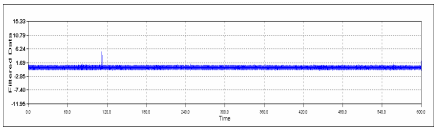
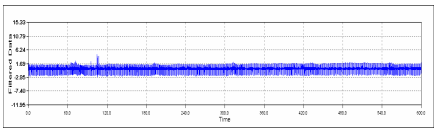
속도		
틸팅		
심전도 ECG	a	
	b	

Table 11. 틸팅각 4도에서의 심박변화율 (계속)

심전도 ECG	c	
	d	
	e	
	f	
	g	
	h	
	i	

② 심박변화율(R-R interval Variability)

Table 12. 심박변화율(R-R interval Variability)

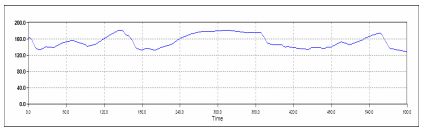
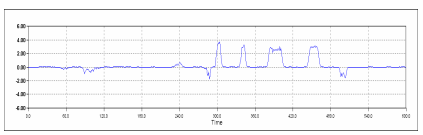
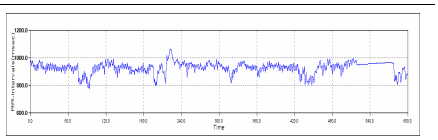
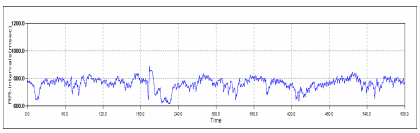
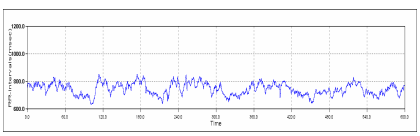
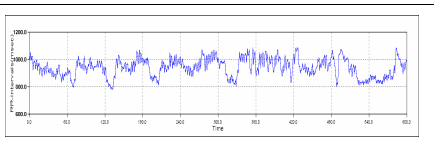
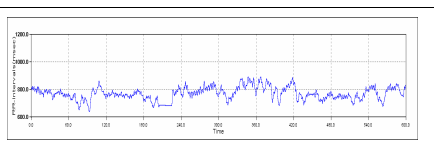
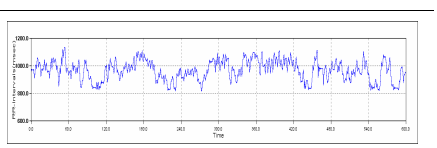
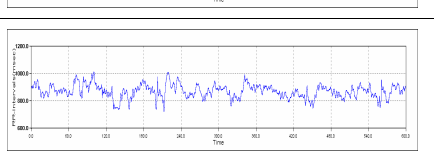
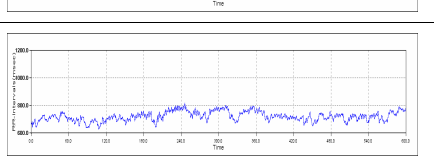
속도		
틸팅		
심박 변화율 (RRV)	a	

Table 12. 심박변화율(R-R interval Variability) (계속)

심박 변화율 (RRV)	b	
	c	
	d	
	e	
	f	
	g	
	h	
	i	

③ LF/HF Ratio

Table 13. LF/HF Ratio

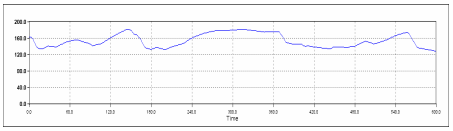
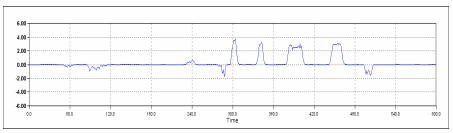
속도	
틸팅	

Table 13. LF/HF Ratio (계속)

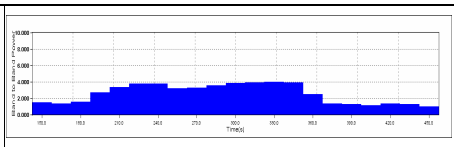
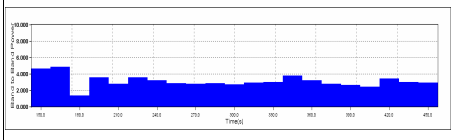
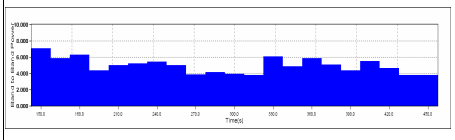
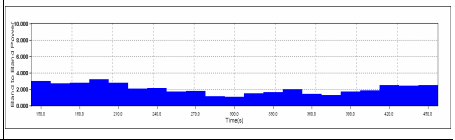
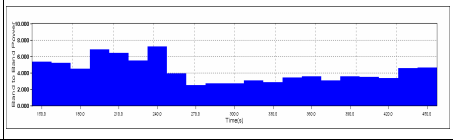
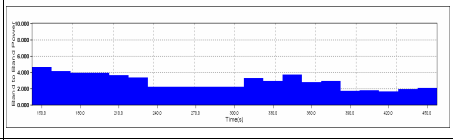
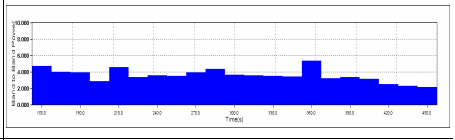
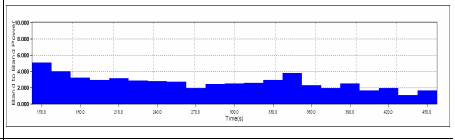
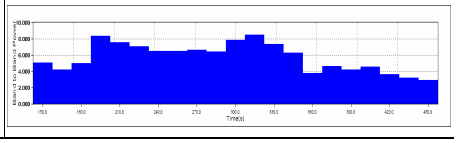
LH/HF	a	
	b	
	c	
	d	
	e	
	f	
	g	
	h	
	i	

Table 14. 시간에 따른 LF/HF Ratio 변화

No	시간	피험자									비고
		a	b	c	d	e	f	g	h	i	
1	00:00~05:00	1.44	4.59	7.02	2.93	5.33	4.59	4.68	5.01	5.05	틸팅 5분 전
2	00:15~05:15	1.44	4.82	5.85	2.69	5.16	4.13	3.94	3.97	4.17	
3	00:30~05:30	1.44	1.32	6.22	2.75	4.47	3.92	3.91	3.15	5.00	

Table 14. 시간에 따른 LF/HF Ratio 변화 (계속)

No	시간	피험자									비고
		a	b	c	d	e	f	g	h	i	
4	00:45~05:45	1.44	3.53	4.30	3.18	6.85	3.92	2.82	2.88	8.31	
5	01:00~06:00	1.44	2.76	4.96	2.72	6.36	3.59	4.50	3.10	7.52	
6	01:15~06:15	1.44	3.56	5.19	2.06	5.48	3.31	3.32	2.85	7.05	
7	01:30~06:30	3.72	3.17	5.43	2.13	7.15	2.21	3.54	2.76	6.47	
8	01:45~06:45	3.16	2.79	4.96	1.66	3.90	2.17	3.47	2.70	6.46	
9	02:00~07:00	3.27	2.76	3.80	1.77	2.44	2.15	3.90	1.91	6.62	
10	02:15~07:15	3.51	2.82	4.13	1.14	2.68	2.18	4.33	2.41	6.41	
11	02:30~07:30	3.81	2.68	3.90	1.05	2.68	2.16	3.58	2.49	7.83	틸팅 시점
12	02:45~07:45	3.89	2.93	3.76	1.44	3.01	3.27	3.55	2.54	8.50	
13	03:00~08:00	3.99	2.97	6.05	1.64	2.85	2.89	3.49	2.86	7.32	
14	03:15~08:15	3.86	3.76	4.82	1.94	3.41	3.69	3.38	3.77	6.25	
15	03:30~08:30	2.43	3.14	5.80	1.42	3.50	2.74	5.31	2.25	3.75	
16	03:45~08:45	1.29	2.77	5.05	1.23	3.04	2.88	3.18	1.86	4.62	
17	04:00~09:00	1.24	2.58	4.34	1.68	3.55	1.71	3.30	2.48	4.17	
18	04:15~09:15	1.07	2.38	5.49	1.82	3.45	1.74	3.14	1.63	4.54	
19	04:30~09:30	1.29	3.38	4.58	2.48	3.34	1.60	2.47	1.87	3.58	
20	04:45~09:45	1.26	2.94	3.73	2.38	4.53	1.89	2.27	1.06	3.17	
21	05:00~10:00	0.97	2.88	3.75	2.43	4.62	2.07	2.10	1.58	2.92	틸팅 후 5분

Table 15. 틸팅 전후 LF/HF Ratio 변화

피험자	LF/HF Ratio	
	틸팅 전	틸팅 후
a	1.44	0.97
b	4.59	2.88
c	7.02	3.75
d	2.93	2.43
e	5.33	4.62
f	4.59	2.07
g	4.68	2.10
h	5.01	1.58
i	5.05	2.92
평균	4.32	2.79

3. Conclusion

틸팅에 따른 심장 박동의 변화를 정확히 수치적으로 나타내기에는 개인간의 특성과 실험 환경의 차이로 인하여 충

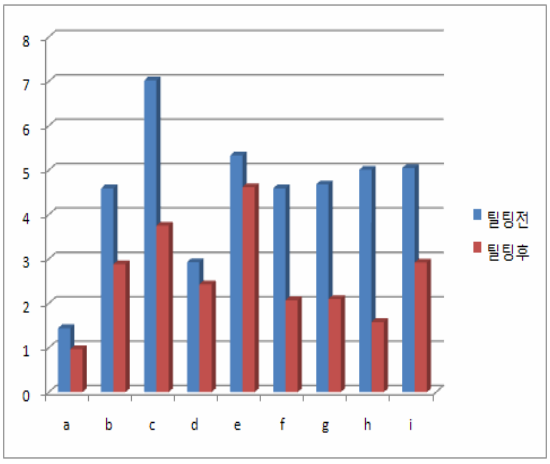


Figure 21. 틸팅 전후 LF/HF Ratio 변화

분히 정량화하기 어렵지만 영역별 PSD(Power Spectrum Density)를 살펴본다면 확실히 틸팅열차 탑승 전의 PSD와 틸팅열차 탐승 후의 PSD에는 확연한 차이를 보이고 있으며 대체적으로 파형의 너울이 더욱 많이 생기는 것으로 보아 틸팅이라는 환경이 인간의 심리적 요인에 작용하여 심장 박동에 영향을 준다는 것을 알 수 있었다. 틸팅 전후 5분간의 심박변화율 비교한 결과 틸팅각 2도에서는 6명의 피험자 중에서 1명을 제외한 5명이 틸팅 전보다 틸팅 후에 증가하였으며 평균 0.41 높게 나타났다. 틸팅각 4도에서는 9명의 피험자 모두 틸팅 전 데이터가 높게 나타났으며 틸팅 전 수치가 평균 1.53 높았다.

2도와 4도 틸팅에서의 LF/HF 비율이 상반된 결과가 나왔지만 2가지 케이스에서 공통적으로 피험자 사이에 일관적인 결과를 나타낸다. 이는 다른 실험 환경 및 피험자군이 다른 것에 대한 오차가 틸팅효과 보다 많은 영향을 미치지 않았나 생각되며, 향후 연구에서는 동일 노선구간 및 동일한 피험자군을 상대로 반복 실험을 통하여 이러한 변수를 줄여야 할 것이다.

또한 실차에 탑승하여 운행 중 실험 이전에 안정된 상태에서의 신호를 취득하여 틸팅 전후 신호 분석에 추가하여 비교 분석이 요구되며, 실차실험 이외에 틸팅 시뮬레이터 실험으로 틸팅효과와 심박변화율의 관계를 규명하는 것이 선행되어야 할 것이다.

References

Bendat, J. S. and Piersol, A. G., Engineering applications of correlation and spectral analysis, *New York, Wiley-Interscience, p.315, 1980.*

Suzuki, H., et al., Research Trends on Riding Comfort Evaluation, *Proc. Instn. Mech. Engrs.,Vol.212 PartF, 1998.*

Kim, Y. K., "Ride comfortness Analysis and Estimation using statistical method according to UIC513R", *Korea Railroad Journal, Vol.7, No. 4, 2004.*

Johan Forstberg, "Ride comfort and motion sickness in tilting trains" *TRITA-FKT Report 2000, 2000.*

Lee, C. H., et al. "Review of Comparative Test Results of Ride Evaluation for Railway Vehicle", *Korea Railroad Journal, Vol.3, pp28-35, 2003.*

Han, S. H., et al. "A Study on Design of the Dynamic Simulator for the Korean Tilting Train", *Korea Railroad Journal, Vol.7, No. 4, 2003.*

Kim, Y. G., et al. "Correlation of ride comfort evaluation methods for railway vehicles", *Proceedings of the I MECH E Part F Journal of Rail and Rapid Transit, Vol.217, No. 2, 2003.*

Guyton, A. C. and Hall, J. E., "Nervous regulation of the circulation, and rapid control of arterial pressure", *Elsevier, 2005.*

Grassi, Guido, "Determinants of hypertension-related cardiac organ damage: beyond the haemodynamic overload", *Journal of Hypertension. 23(5), 941-943, May 2005.*

Johan Forstberg, "Ride comfort and motion sickness in tilting trains" *TRITA-FKT Report 2000, 2000.*

Yamauchi, K., et al. "Effective Countermeasures to Improve Passenger Manners", *QR of RTRI, Vol.46, No.3, 2005.*

Cornish, B. H., et al. "Effect of Temperature and Sweating on Bioimepedance Measurements", *Appl. Radiat. Isot. Vol. 49. No. 5/6 pp 475-476, 1998.*

MIN, M., et al. "An implantable analyzer of bio-impedance dynamics mixed signal approach", *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Budapest Hungary, May 21-23, 2001.*

Robert E. Schmukler, et al. "Microprocessor Controlled Bioimpedance Measurements".

Palko, T., et al. "Multifrequency device for measurement of the complex electrical bio-impedance-design and application", *Proceedings RC IEEE-EMBS & 14th BMESI, 1995.*

Stanislava Papezova, "Signal processing of bioimpedance equipment".

Jennifer Healey, Rosalind Picard, "SmartCar: Detecting Driver Stress", *Proceedings of ICPR'00, Barcelona, Spain, 2000.*

Tetsuhiko Kuboyama, et al. "Changes in cerebral blood flow velocity in healthy young men during overnight sleep and while awake", *Electroencephalography and clinical Neurophysiology 102, 125-131, 1997.*

Hisanori Kataoka, et al. "Development of a skin temperature measuring system for non-contact stress evaluation", *Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Vol.20, No 2, 1998.*

Santiago, T. V., et al. "Correlation between ventilation and brain blood flow during sleep", *J Clin Invest, Feb, 73(2), 497-506, 1984.*

고한우, 이완규, 이건기, "피부전기활동 변화에 의한 각성도의 측정(1)", *의공학회지 1995년도 춘계학술대회 논문집 제 17권 제 1호, 1995.*

고한우, 이완규, "피부 임피던스 변화를 이용한 각성도 측정 시스템", *센서학회지 제 4권 제 3호, 1995.*

고한우, 이완규, 김연호, "피부 전기활동을 이용한 휴대형 각성도 측정 및 제어 시스템", *센서학회지 제 5권 제 3호, 1996.*
고한우, 김연호, "각성 상태에 따른 피부임피던스 신호와 반응시간 및 눈 깜박임의 상관관계(II)", *의공학회지 제 18권 제 4호, 1997.*
김원식, 박세진, 신재우, 윤영로, "각성-졸림 과도기 생리신호 분석 연구", *한국표준과학연구원 인간공학그룹, 연세대학교 의용전자공학과.*
문재국외 4인, "원격의료계측을 위한 한국형 생체 전기 임피던스 분석 시스템의 개발", *의공학회지 제 23권, 제 5호, 2002.*
윤선길, "커뮤니케이션 효과 연구를 위한 정신생리학적 접근 방법의 활용 방법에 관한 고찰", *한신논문집 제 14집, 1996.*

저자 소개



송 용 수: adair@krri.re.kr
연세대학교 전자공학 박사수료
현 재: 한국철도기술연구원
열차제어시스템 연구실 선임연구원
관심분야: Biosignal, 생체정보공학



오 석 문: smoh@krri.re.kr
한양대학교 산업공학과 석사
현 재: 한국철도기술연구원
정책정략연구실 선임연구원
관심분야: 교통 수용 예측 및 통행 분석



이 재 호: prolee@krri.re.kr
고려대학교 제어공학박사
현 재: 한국철도기술연구원 책임연구원
관심분야: 열차 신호, 제어 이론



김 용 규: ygkim1@krri.re.kr
Ph.D in Control Engineering from Institute National Polytechnique de Lorraine, France
현 재: 한국철도기술연구원 열차제어 통신연구실 실장
관심분야: 열차제어, 통신시스템 설계

Date Received : 2011-01-20
Date Revised : 2011-02-11
Date Accepted : 2011-02-11