

# 심전도를 이용한 열차 승차감 평가 방법 연구

## Evaluation Method of Riding Comfort of Train by using HRV (Heart Rate Variability)

송용수† 김백현\* 김용규\*  
Yong-Soo Song Baek-Hyun Kim Yong-Kyu Kim

### ABSTRACT

The Purpose of this paper is to characteristics and analysis of ride comfort by using HRV. Although the riding comfort of trains has been managed by setting allowable accelerations of 3-axis motion in cabins, it is impossible for this approach to express the psychophysical relationship between various vibrational factors and riding comfort. in order to propose a function to evaluate the riding comfort of train on conventional railroad, an experiment was performed with the Korea Tilting Tran eXpress(TTX). As a result, by referring to some international standards on the method of evaluating ride comfort, a modified method was proposed to evaluate the lateral vibration in addition to the roll motion on curve transitions.

### 1. 서론

철도 분야에서 틸팅 차량은 곡선 주행시에 차체를 원심력 반대로 기울게 하여, 승객에게 작용하는 원심력을 보상하여 고속 주행하는 열차이다. 우리나라에서는 2007년부터 한국형 틸팅열차가 급곡선이 많은 기존선(호남, 충북, 중앙, 태백)에서 시험 운행 중이다. 세계적으로 70년대 초창기 모델보다 최근에는 틸팅 제어기술로 승차감이 크게 향상되었는데, 아직도 많은 나라에서는 틸팅시의 롤링 등에서 기인하는 불쾌감이 나타나고 있다. 일반 열차의 승차감에 관한 몇 가지의 기준값은 있지만, 우리나라에서는 틸팅열차 곡선부 승차감의 기준은 없다. 본 논문은 틸팅 차량의 승차감 평가법의 새로운 제안하는 동시에, 기계적인 승차감 측정 방법과 동시에 생체 신호를 이용한 승차감 시험의 결과를 병행하는, 승객의 체감과 상관성이 높은 평가법을 제안하고자 한다.

### 2. 기존의 평가법의 정리

#### 2.1 열차의 승차감에 영향을 미치는 요인

열차 주행시에 생기는 진동은 그 진폭이나 주파수가 끊임없이 변동하고 있다. 이러한 랜덤 진동의 경우, 어느 측면이 사람의 승차감에 영향을 주는 물리량인지 찾아내는 것이 해결되어야 하는 과제 중의 하나이다.

다른 일반열차보다 틸팅 열차가 곡선 주행시의 중요한 것은 좌우 방향의 병진 진동(좌우 진동)과 회전 진동(롤링)으로, 특히 후자는 틸팅 차량 특유의 특성이 된다. 그림1은 틸팅 열

† 정회원, 한국철도기술연구원, 열차제어통신연구실  
E-mail : adair@krii.re.kr  
TEL : 031-460-5668 FAX : 031-460-5449  
\* 정회원, 한국철도기술연구원, 열차제어통신연구실

차가 직선에서 곡선으로 주행했을 때 생기는 롤각속도와 차체 좌우 진동가속도의 변화를 시간 축에 따라 나타낸 것이다.

예를 들면 완화 곡선 구간에 들어가면 틸팅되기 시작하므로, 롤각속도(그림의 상단)의 값은 점점 커지지만, 원곡선에 들어가면 틸팅을 마쳐 다시 거의 0으로 돌아간다. 단 차량의 서스펜션과 궤도의 상호 영향에 의해 생기는 롤링 때문에, 직선이나 원곡선 중에 롤링의 값이 완전하게 0이 되지는 않는다. 틸팅시의 롤링의 크기를 나타내는 물리량으로는 완화 곡선 중의 롤각속도의 최대값( $\theta_p$ )이나, 그 변화율을 의미하는 롤각속도의 최대값( $\theta_j$ )이 대표적이다.

한편 궤도 어긋남과 차량의 동적인 상호 작용에 기인하여 생기는 차체 좌우 진동 가속도(그림의 하단)의 경우에는 완화 곡선 구간에 들어가면 차량에 가해지는 원심력의 크기에 따라, 기선으로부터의 어긋남이 관측된다. 원곡선 구간에서는 주행 속도가 변화하지 않는 한, 기선으로부터의 어긋남의 정도는 거의 일정하다. 이렇게 차량이 원곡선을 주행할 때에 정상적으로 생기는 차체 바닥면에 평행한 좌우 가속도를 좌우 정상 가속도( $y_a$ )라고 한다. 차체 좌우 정상 가속도는 일반적으로 좌우 진동 가속도 파형에 로우 패스 필터를 걸어 얻어진 저주파 성분의 평균값으로서 구해진다.

반대로 이러한 저주파 성분을 무시하고, 이른바 진동분파의 최대 진폭을 그 구간 내의 대표값으로 하는 p-p값(peak to peak value)도 지표로서 넓게 이용된다(그림1의  $y_m$ ). 또 기선에서 편측만의 최대 진폭을 대표값으로 하는 경우에는 피크값이라고 한다. 또한 저주파분, 고주파분을 합하여 기선으로부터의 어긋남을 포함하는 좌우 진동 가속도의 최대값을 읽어낸 가속도 최대값( $y_p$ )이나, 완화 곡선중의 좌우 진동 가속도의 시간 변화율(잭) 최대값( $y_j$ ) 등을 지표로 하여 이용하는 경우도 있다.

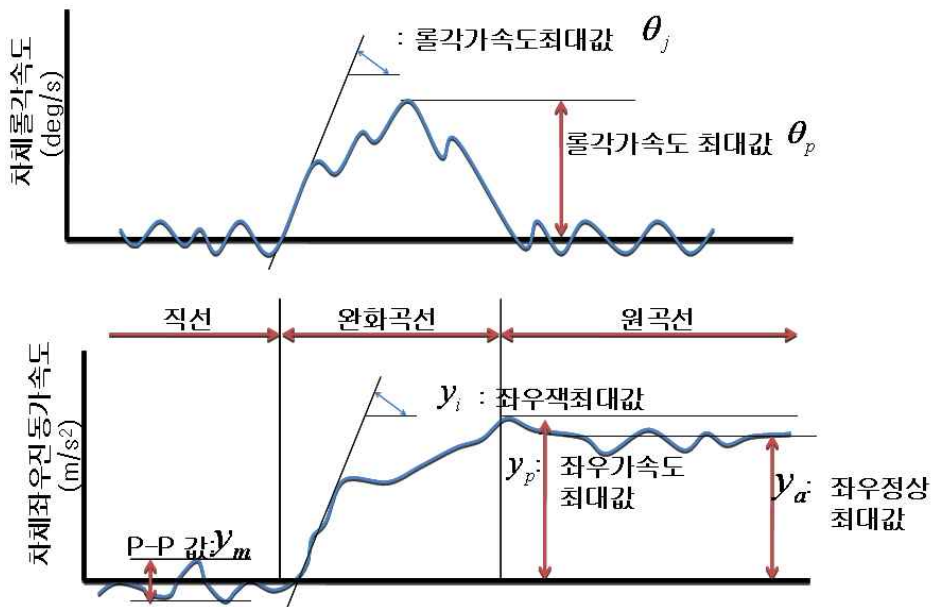


그림 2 틸팅 차량의 곡선 주행시의 승차감을 나타내기 위한 주요 지표

승차감의 쾌적성은 이러한 다양한 진동 특성에 영향을 받기 때문에, 틸팅 열차의 곡선 주행시의 진동 특성을 나타내는 지표로서 어떠한 대표 값을 선택하는가에 의해, 평가 결과가 좌우된다. 아래는 지금까지 이용되어 온 주요 대표 값이다.<sup>1)</sup>

## 2.2 일반 철도의 승차감 평가법

### 2.2.1 좌우 진동 가속도와 좌우 정상 가속도

해외 일반 철도의 승차감 기준은 일반 주행시(=직선 구간의 등속 주행시 등)와 곡선 주행시를 나누어 생각하고 있다. 그러나 한국내의 승차감 평가법은 직선 선로 주행시에 대해서만 적용하고 있다. 보통은 좌우, 상하, 전후 방향의 진동 가속도 피크값을 바탕으로 승차감을 5단계 평가하는 “승차감 계수”나 뒤에서 기술하는 ISO 규격을 참고로 진동 가속도의 실효값(rms값)으로 승차감을 평가하는 “승차감 레벨” 등이 제안되어 있다.

### 2.2.2 롤각속도와 롤각가속도

곡선 주행시에 차체를 원곡선 안쪽으로 기울이면서 좌우 정상 가속도를 저감하고, 보다 고속 주행이 가능하도록 개발된 것이 틸팅열차이다. 틸팅 제어에는 몇 가지 타입이 있는데, 그 첫 번째가 전자식으로 차량에 원심력이 작용하면 굴림대에 놓인 차체가 자연스럽게 내경하는 방식(자연 전자식)을 채용하고 있었다. 그러나 이 방식에서는 곡선에 들어간 뒤 틸팅을 시작하는 지연 등에 의해 곡선 선형을 따른 부드러운 틸팅이 불가능한 경우가 있었다. 그러므로 승차감은 좋지 못하고, 멀미를 하기 쉽다는 평가도 있었다.

또 다른 방식의 전기 제어식으로 액추에이터를 제어하는 방식이다. 이 방식은 틸팅 제어의 정밀도는 크게 향상 된다. 따라서 한국형 틸팅열차는 전기제어식 방식을 채용하고 있다.

## 2.3 외국의 검토 예

### 2.3.1 ISO의 평가 지침(ISO 2631)

ISO에 의한 “전신 진동에 대한 인체 폭로의 평가(ISO 2631)”은 철도 차량의 승차감 평가에 영향을 미친 국제 규격으로<sup>1)</sup>, 지금은 철도 진동의 평가법을 ISO 2631의 독립된 파트(Part4)로서 제정되었다.<sup>3)~5)</sup> 이 규격안에는 “롤링이 승차감에 영향을 미치는 요인의 하나이며, 큰 롤각속도의 운동에 반복 폭로되면 멀미를 일으키기 쉽다”라는 것이 기술되어 있는데, 그 구체적인 측정, 평가법은 명확하지 않다.

### 2.3.2 유럽 규격안

틸팅열차의 곡선 승차감에 대하여 가장 참고가 되는 것은 유럽 표준화 위원회(CEN)에서 심의중인 유럽 규격(EN)안이다<sup>6)</sup>. 국제철도연합(UIC)의 일련의 연구 보고서를 베이스로 한 EN안에는 다음과 같은 곡선 승차감 지표( $P_{CT}$ )가 제안되어 있다.

$$P_{ct} = (8.97\dot{y} + 9.68\ddot{y} - 5.9) + 0.120\theta^{1.626} \quad (1)$$

$\dot{y}$ : 완화 곡선의 “시점”과 “종점+1.6초” 사이의 좌우 가속도 최대값으로, 그림1의  $y_p$ 에 상당한다. 1초마다의 계측값을 0.1초씩 시프트하여, 그 최대값을 구한 것으로, 중력가속도  $g$ 의 백분율을 단위로 한다.

$\ddot{y}$ : 완화 곡선의 “시점-1초”와 “종점” 사이에서 1초마다 산출한 책의 최대값으로, 그림의  $y_j$ 에 상당한다.  $g$ 의 백분율/초를 단위로 한다.

$\theta$ : 완화 곡선 내의 롤각속도 최대값으로, 그림의  $\theta_p$ 에 상당한다. 1초마다의 계측값을 0.1초씩 시프트하여 최대값을 구한 것으로, 도/초를 단위로 한다.

좌우 진동에 대해서는 ISO 2631을 참고로 한 로우 패스 필터(그림2)에 의한 주파수 보정을 실시한 후의 값을 이용해야 한다. 위 식의 괄호 안의 항은 양의 값이 되는 경우에만 채용되고, 음의 경우에는 롤각속도만으로 나타나는 식이 된다.

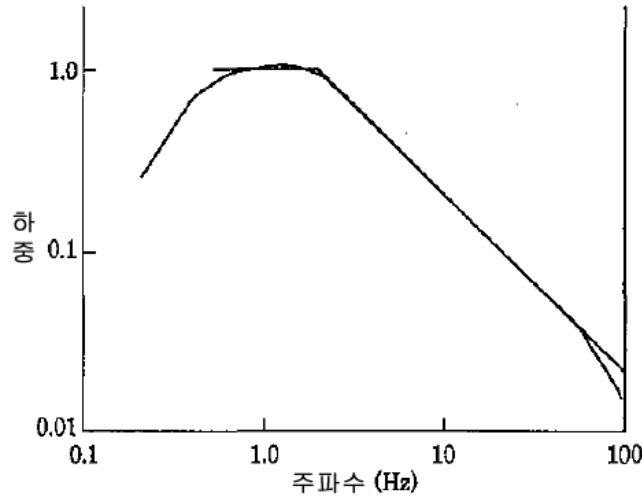


그림 3 주파수 보정 필터(Wd)<sup>6)</sup>

## 2.4 진동과 승차감의 관계

열차에 있어서 승차감은 다양한 진동 특성에 영향을 받기 때문에, 체감과의 상관성이 가장 높아지도록 각종 진동 특성의 가중치 합을 구하여야 한다. 예를 들면 EN안과 같은 평가식을 작성할 수 있다. 그런데 이렇게 표현하면 각각의 변수를 물리적으로 어느 정도 저감하면 승차감이 어떻게 변화하는지 알기 어렵다. 그러므로 “궤도 관리나 차량 설계에 반영하기 어려운 지표”로 평가되기 쉽다. 설계이나 관리면에서는 “ $\theta_p$ 는 5deg/s,  $\theta_j$ 는 15deg/s<sup>2</sup>,  $y_a$ 는 0.8m/s<sup>2</sup> 이하로 억제하는 것”과 같은 값으로 나타내는 것이 적당하다. 그러나 이러한 관리 기준에서는 물리량의 변화에 따라 인간이 느끼는 진동 승차감의 정도가 어떻게 변화하는지의 정량화는 곤란하다.

### 2.4.1 서비스의 질에 대한 인식의 차이

본 논문에서는 승객의 승차감의 좋고 나쁨의 지표와, 궤도 관리나 차량 설계에 유용한 지표는 반드시 같은 것은 아니라는 것을 알 수 있다. 유럽에서는 관리, 설계용의 기준과 체감 승차감의 평가 함수를 구별한 뒤, 승차감 지표의 규격화를 진행하고 있는데, 우리나라에서는 “금방 도움이 되는 것”이 강조되기 때문에, 설계, 관리 지표로서의 승차감에 눈이 가기 쉬워, 서비스의 종합 품질 지표로서의 승차감 기준은 아직 없다. 그러므로 본 논문에서는 생체 신호를 이용한 서비스의 질을 평가하는 의미에서의 승차감 지표에 대하여 검토하였다.

## 3. 심전도 신호를 이용한 평가 시험의 실시

### 3.1 시험 목적

틸팅열차의 곡선 주행시의 승차감에 영향을 주는 진동 특성을 검토하고, 생체 신호와의 연관성을 승차감 평가식으로 작성하기 위한 자료를 얻는다.

### 3.2 시험 실시 개요

시험은 2008년 11월부터 12월까지 중앙선, 충북선, 태백선에서 실시하였다. 차량은 한국형 틸팅 차량(TTX) 6량 편성으로, 시험은 T차 내에서 실시하였다. 한국형 틸팅열차는 전기식 강제 틸팅 방식을 채용하고 있어, 곡선에서 강제적으로 중심을 내측으로 이동시킬 수 있다<sup>8)</sup>. 또 임의의 지점에서 틸팅을 시작하거나, 일정의 틸팅각에서 틸팅을 멈추는 등, 개개의 곡선마다 틸팅 조건을 비교적 자유롭게 설정할 수 있는 특색이 있다.

시험에는 아래 표와 같이 76명(남:42명, 여:34명)이 피험자로서 참가하였다.

표 2 실험 일자 및 인원

| 차수 | 시험일자    | 시험자              | 시험노선 | 시험 내용      |
|----|---------|------------------|------|------------|
| 1  | 11월 18일 | 20대 남: 6명, 여: 3명 | 호남선  | 증속 및 틸팅 실험 |
| 2  | 11월 19일 | 20대 남: 6명, 여: 3명 | 호남선  | 증속 및 틸팅 실험 |
| 3  | 11월 25일 | 20대 남: 5명, 여: 5명 | 중앙선  | 증속 및 틸팅 실험 |
| 4  | 11월 26일 | 20대 남: 5명, 여: 5명 | 중앙선  | 증속 및 틸팅 실험 |
| 5  | 11월 27일 | 20대 남: 5명, 여: 5명 | 중앙선  | 증속 및 틸팅 실험 |
| 6  | 12월 16일 | 20대 남: 5명, 여: 5명 | 호남선  | 증속 및 틸팅 실험 |
| 7  | 12월 17일 | 20대 남: 6명, 여: 2명 | 호남선  | 증속 및 틸팅 실험 |
| 8  | 12월 18일 | 20대 남: 4명, 여: 6명 | 중앙선  | 증속 및 틸팅 실험 |

### 3.2.1 시험 방법

구간 내에 3개의 시험 곡선(곡선 반경  $R=600m$ , 캔트  $e=100mm$ , 원곡선 길이의 평균값  $=327m$ )을 설치하고, 각 곡선의 개시, 종료시를 방송으로 시험자에게 알렸다. 각 시험 곡선에 대하여 그림3에 나타난 구간(A~C)마다 4단계 척도로 승차감을 평가하는 작업을 시험자에게 부여하였다. 평가 용어는 기존의 연구를 참고로 아래와 같이 선정하였다<sup>1)</sup>.

- (1) 전혀 문제 없다.
- (2) 조금 신경 쓰이는 정도
- (3) 불쾌하지만 허용 범위 내이다.
- (4) 불쾌하며 허용할 수 없다.

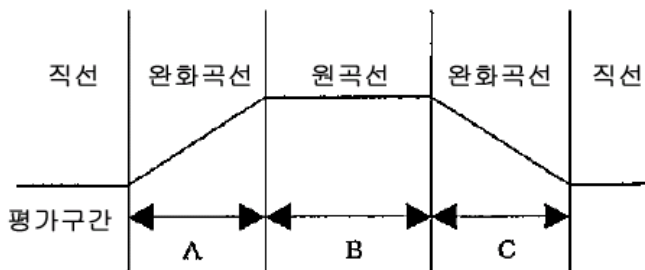


그림3 승차감의 평가 구간

### 3.2.2 시험 주행 조건

새로운 평가법에 대하여 검토하기 위한 자료를 얻기 위해서는, 시험운행중인 열차의 틸팅 패턴을 비롯하여, 다양한 주행 조건 아래에서의 시험자의 평가 데이터를 수집해야 한다. 그래서 표2에 나타난 각 요인을 변화시킴으로서, 다양한 틸팅제어 패턴에서의 데이터 수집을 꾀하였다. 1일의 시험수는 4회이고, 시험은 2달에 걸쳐 낮 시간대에 실시하였다. 시험의 실시 순서가 평가에 영향을 주지 않도록, 각 조건의 주행 순서는 랜덤하게 배치하였다.

표2 틸팅 제어 변수: 변역과 변화 스텝

- ① 틸팅각: 4~7도
- ② 좌우 정상 가속도 보상률: 60~100%(20%씩)

- ③ 곡선 주행 속도: 100~130km/h(10km/h씩)
- ④ 틸팅 타이밍: 완화 곡선의 길이 상당분, 전 또는 후에 이동(완화 곡선 길이의 1/2의 길이씩)

### 3.2.3 측정 물리량

차체 진동 가속도, 차체 롤각, 롤각속도를 측정하고, 합쳐서 속도, KP 마커를 기록하였다.

| 예상시간 | 실험 No | 실험내용   | 비고                     |
|------|-------|--|------------------------|
| 20분  | -     | 역 도착 및 탑승  |                        |
| 50분  | 0     | 측정자의 실험 장비 설치  |                        |
| 20분  | 1     | ECG를 통한 주요파라미터 측정<br>(틸팅에 따른 실험)<br>EMG(상지, 하지) 파라미터 측정 <i>실험시작시</i> | [운행변동 실험]<br>주관적 평가 병행 |
| 20분  | 2     | 행위자의 상태 : 안정상태 실험 (앉기, 수면)   | [행위변동 실험]              |
| 20분  | 3     | ECG를 통한 주요파라미터 측정<br>증속 및 제동<br>EMG(상지, 하지) 파라미터 측정 <i>실험종료시</i>     | [운행변동 실험]<br>주관적 평가 병행 |
| 20분  | 4     | 행위자의 상태 : 불안정상태 실험 (카페인 섭취)  | [행위변동 실험]              |
| 30분  | 5     | 실험 장비 정리 및 도착  |                        |

### 3.2.4 측정 생체 신호

ECG, EMG, PPG, GSR, EMG를 측정하였다.

## 4. 결과와 고찰

본 논문은 틸팅열차 제어 조건과 체감 평과의 관계에 대한 승차감 평가법의 작성에 중점을 두고 고찰한다. 따라서 승차감에 영향을 주는 진동과 승차감에 즉 생체 신호와의 검토는 생략한다.

피험자의 평정값 데이터에 대해서는 1~4의 평점을 인간의 감각량에 대응하는 값으로 보고, 전 피험자의 평정 평균값을 구하고, 이를 “승차감의 정도를 나타내는 지표”로 하였다. 또 특별한 이유가 없는 한 입구측, 출구측의 완화 곡선의 평가(그림3의 A, C)는 구별하지 않고, 함께 분석에 이용하였다. 한편 물리량에 대해서는 그림1의  $y_p, y_j, \theta_p, \theta_j$ 의 4종을 분석에 이용하였다.

### 4.1 생체 신호와의 상관관계

#### 4.1.1 틸팅 구간에서의 교감신경과의 상관관계

아래 그래프는 일반구간에 비해 틸팅구간에서 교감신경 활성도가 평균적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

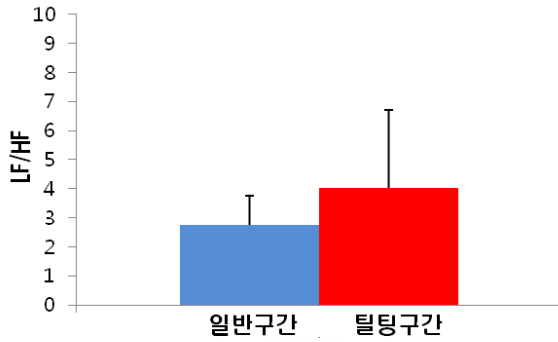


그림 6 틸팅유무에 따른 교감신경활성도 평균치

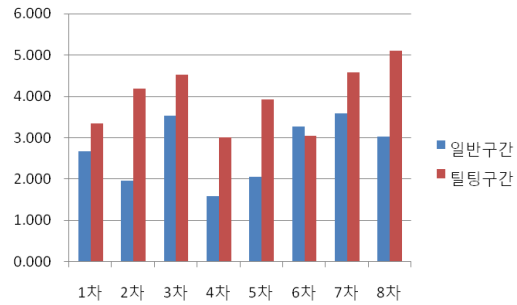


그림 7 실험차수에 따른 틸팅구간/일반구간 교감신경활성도 비율

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

#### 4.1.2 물리량과 상관관계

상기의 4변수의 각각과 피험자 평정 평균값의 상관계수를 나타낸 것이 표4 왼쪽 란이다. 또 표3에 나타난 것처럼, 물리량끼리가 독립인지 않은 것을 고려하여 편상 관계수를 산출한 결과를 오른쪽 란에 나타내었다. 편상 관계수란 상관을 조사하고 싶은 변수 이외의 변수의 영향을 제외하고 산출한 상관계수이다. 예를 들면 이 표에서는  $y_j$ ,  $\theta_p$ ,  $\theta_j$ 의 영향을 제외한 경우의  $y_p$ 와 평정 평균값의 상관계수는 입위에서 0.38, 좌위에서 0.19인 것을 나타내고 있다. 상관계수로 보면 모두  $y_j$ 의 값이 가장 큰데  $\theta_j$ 의 상관이 가장 높다. 단 가장 높은 편상 관계수에서도 0.5미만이기 때문에, 단독의 변수로 체감 승차감의 정도를 예측 하는 데는 한계가 있다는 것을 알 수 있다.

표4 물리량과 피험자 평정 평균값의 상관, 편상관

|            | 상관계수 | 편상관계수 |
|------------|------|-------|
| $y_p$      | .45  | .19   |
| $y_j$      | .63  | .39   |
| $\theta_p$ | .26  | .16   |
| $\theta_j$ | .40  | .19   |

#### 4.2 완화 곡선의 승차감 평가 지표

이상으로부터 체감과 상관이 높은 평가 지표를 작성하는데는 복수 물리량의 합성 변수를 이용하는 것이 바람직하다는 결론을 얻었다. 그래서 몇 가지의 합성 변수에 대하여, 체감과 의 적합도가 어느 정도 있는지를 검토해야 한다.

- (1) 완화 곡선의 길이나 형상, 철도 차량의 승차감에 대한 기대값 등은 나라에 따라 다르다. 그러므로 EN안의 각 변수의 가중치 값을 평가에 그대로 적용해야 하는지 아닌지에 대하여 (식의 각 변수의 유효 자리수를 포함하여) 의문이 남는다.
- (2) 지금까지 틸팅 열차의 승차감 평가에 롤각가속도를 활용하고 있으며, 이 지표의 유효성은 좀더 검토 될 필요가 있다.

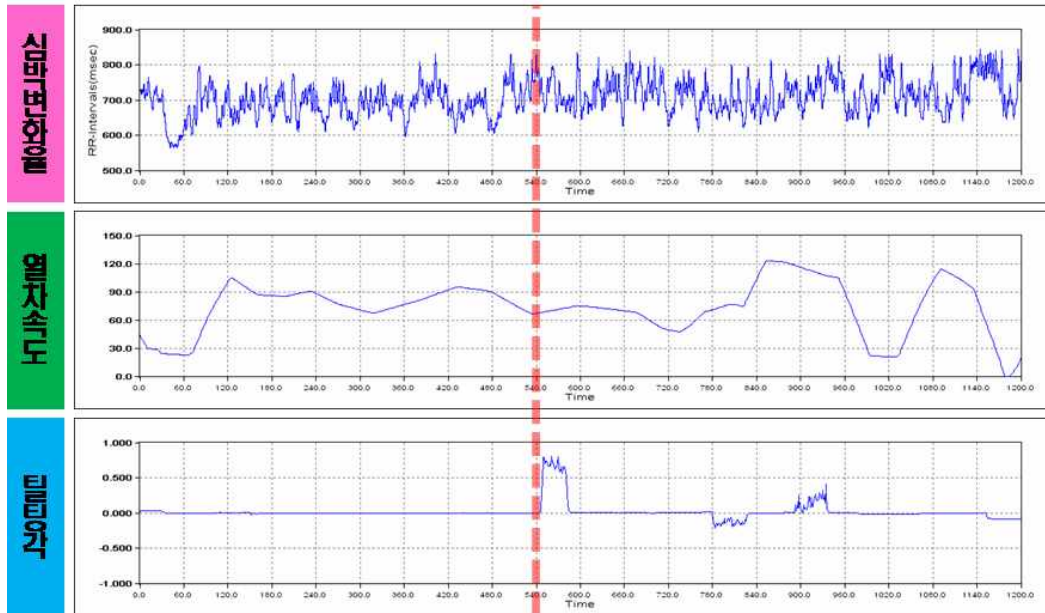


그림 8 속도 및 틸팅각에 따른 심박의 변화율

## 5. 요약

본 보고에서는 틸팅열차가 곡선 구간을 주행할 때의 승차감에 영향을 주는 요인에 대하여 검토하고, 완화 곡선 주행의 승차감의 종합 지표를 제안하고자 한다. 완화 곡선 구간에 있어 ①좌우 가속도 최대값, ②좌우 진동 책 최대값, ③롤각 속도 최대값, ④ 롤각 가속도 최대값의 4변수를 산출하고, 그 가중치 합성합을 작성함으로써, 체감과 상관이 높은 평가가 가능하다는 것을 밝혀내고, 또 이 지표는 “좌우 방향의 병진 진동, 회전 진동(롤링) 각각의 최대값( $y_p$ ,  $y_j$ )과 변화율 최대값( $\theta_p$ ,  $\theta_j$ )으로 구성되어 있다”라고 바꾸어 말할 수도 있다. 또한 이런 기계적인 데이터가 과연 인체 신체에 얼마 만큼의 영향을 미치는가에 대한 실험 또한 병행 하였다.

## 6. 맺음말

많은 데이터의 수집으로 인해서 기계적인 파라미터에 대한 보완 연구 및 적용이 필요하고 또한 실험군의 다양화 및 인체 실험에 대한 의사의 소견 및 검증 또한 남아 있는 숙제이다.

앞으로는 이 승차감 평가 방법에 대한 다양한 시험 방법을 적용함으로써 연관 관계의 신뢰성의 향상을 꾀함과 동시에, 외국의 연구 개발 동향도 주시하면서 정밀도 향상을 꾀할 것이다.

틸팅 차량에 대해서는 승차감과 멀미의 문제가 혼동되기 쉬운데, 본 연구에서 검토한 것은 틸팅 차량이 개개의 곡선을 주행할 때의 “승차감”에 영향을 주는 진동 요인의 해명과 인체가 느끼는 감응현상에 대한 승차감 지수의 반응치이고, 이런 반응치 또한 멀미의 문제는 언급하고 있지 않다. 멀미란 개개의 곡선을 주행할 때마다 “생긴다/생기지 않는다”와 같은 반응이 아니고, 어느 정도의 시간 진동에 계속 폭로되는 것에 의해 발현하는 자율 신경계의 일시적인 실조 상태의 총칭이다. 그러므로 멀미에 대해서는 진동의 영향은 별도 연구중이다<sup>10)</sup>.

## 참고 문헌

- 1) 김영국, 박찬경, 안성권: 고속철도 승차감 평가에 통계적 기법의 적용, 2008년 철도학회 춘계 학술대회, 2008



- 2) 송용수, 한성호, 신광수, 이명호: 틸팅열차 승차감 평가를 위한 생체 파라미터(ECG, GSR, EMG) 측정에 관한 연구, 2008 한국통신학회 하계학술대회 논문집, 2008
- 3) ISO: Mechanical vibration and shock -Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part1: General requirements, ISO 2631-1. ISO, 1997
- 4) ISO: Evaluation of human exposure to whole-body vibration -Part4: Guidelines for the evaluation of the effects of vibration and rotational motion on passenger and crew comfort of fixed guideway transport systems ISO/CD 2631-4. ISO, 1998
- 5) 권순박, 박덕신, 조영민, 박은영, 김세영: USN을 활용한 실내 온습도 모니터링 기술, 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집, 2008
- 6) CEN: Railway applications -Ride comfort of passengers, Measuring and evaluation, Final draft, CEN/TC256 prENV12299. CEN, 1999
- 7) 鈴木浩明: 쾌적함을 측정한다 -그 심리, 행동, 생리적 영향의 평가-, 일본출판서비스, 1999
- 8) 仲川滋: 재래선 도달 시분 단축을 위하여 -TRY-Z에 의한 곡선 통과 속도 향상 시험-, JREA, Vol.41, No.4, pp.26~28, 1998
- 9) 大野央人・鈴木浩明・芳賀一郎・辻野昭道・杉森昌樹: 철도 차량의 차체 롤링 승차감을 규정하는 요인에 관한 고찰, 일본기계학회 제7회 교통, 물류 부문 대회, pp.183~184, 1998
- 10) 鈴木准明・白戸宏明・中川千穂・大野央人: 멀미의 평가에 관한 연구의 현상과 과제, 철도총연보고, Vol.12, No.11, pp.1~6, 1998