

# 차량의 가속도 진동계측 및 차량안정성 프로그램 개발에 대한 연구

## A Study on Development of Train Stability Analysis Program and Measurement of Acceleration Vibration

김성용†                      박은천\*  
Sung-Yong Kim              Eunchum Park

### ABSTRACT

In this study, vertical and horizontal accelerometers were installed at the both side of car body and tachometer was installed on the bogie, for the purpose of stability analysis of Korail Airport Express Train during driving. By applying the developed algorithm, the peak-to-peaks of horizontal and vertical acceleration which were matched with location by tachometer were found and compared with the threshold values. The threshold values per velocities which were presented in the "Metro Train Performance Criteria" were applied here. The validity of the developed algorithm was shown by comparing the site investigation and the measured values at frost heave locations.

### 1. 서론

철도차량의 동적 주행성능은 주행안전성 및 승차감으로 표현될 수 있으며, 특히, 승차감 보다 주행안전성은 안전과 직결된 문제로서 그 중요성이 더 크다고 할 수 있다. 국내에서 탈선 또는 주행안전성을 평가하는 방법은 스트레인 게이지를 차륜에 부착하여 차륜이 받는 수직하중과 수평하중을 측정함으로써 탈선계수를 계산하는 방법이 있다. 이 방법은 고가의 시험장비로 휠, 레일 상호 작용력을 측정해야하고 극한속도인 임계속도까지 주행하여야 하기 때문에 실제 본선 시운전으로는 수행하기 곤란한 점이 있다. 한편, 도시철도 차량 성능시험기준에서는 도시철도차량 주행시 진동가속도에 대한 속도별 한계치를 제시하여 제작된 차량이 보통수준 내에 들도록 하는, 비교적 간편한 방법을 제시하고 있다.

본 연구에서는 주행 중 차량의 안정성 분석을 위하여, 코레일공항철도 직통열차 차량에 진동가속도계와 타코미터를 부착하여 진동가속도 값을 계측하였으며, 시간영역에서 주행거리에 따른 수직방향 진동의 전진폭과 수평방향 진동의 전진폭을 구하고, 도시철도 차량 성능시험기준에서 제시한 속도별 진동가속도 한계치와 비교하는 시스템을 개발하였다. 개발한 시스템에 대한 타당성은 실제 노반에서 나타난 동상개소와 비교함으로써 유효성을 입증하였다.

### 2. 시스템 구성

열차의 진동 가속도치는 열차의 동적 특성뿐만 아니라 궤도의 틀림 정도에 영향을 받으며 궤도의 틀림은 때에 따라서 빠르게 진행되는 바, 운행 중 열차의 주행안전성을 수시로 확인할 필요가 있다. 또한, 진동가속도는 열차 주행 속도에 따라 진폭이 달라지므로 속도와 진폭이 동시에 계측되어야 한다. 따라서, 김포공항~인천공항간 약 40km구간을 도중에 정차하지 않고 시속 80km/h~110km/h로 운행하는 공항철도 직통열차에 진동가속도계와 타코미터를 설치하였다.

† 정회원, 코레일공항철도(주), 시설팀, 차장  
E-mail : kimsy888@empal.com  
TEL : (032)745-7124 FAX : (032)745-7365  
\* 비회원, 한국유지관리(주), 부설기업연구소, 주임

## 2.1 하드웨어 구성 및 특징

진동가속도계는 그림 2.1 ~ 그림 2.2에서 보듯 차량 제일 앞(반대로 달릴 경우 제일 뒤) 좌우측의 차축, 대차 및 차체에 상하방향 및 좌우방향 진동가속도를 측정할 수 있도록 설치하였고, 본 연구에서는 차체에서 계측된 데이터만 사용하였다. 타코 센서는 차량의 좌측 대차 위에 설치하였고 Data logger는 차량 내에 설치하여 무선으로 데이터를 객실에 있는 측정자에게 송출할 수 있도록 구성하였다.

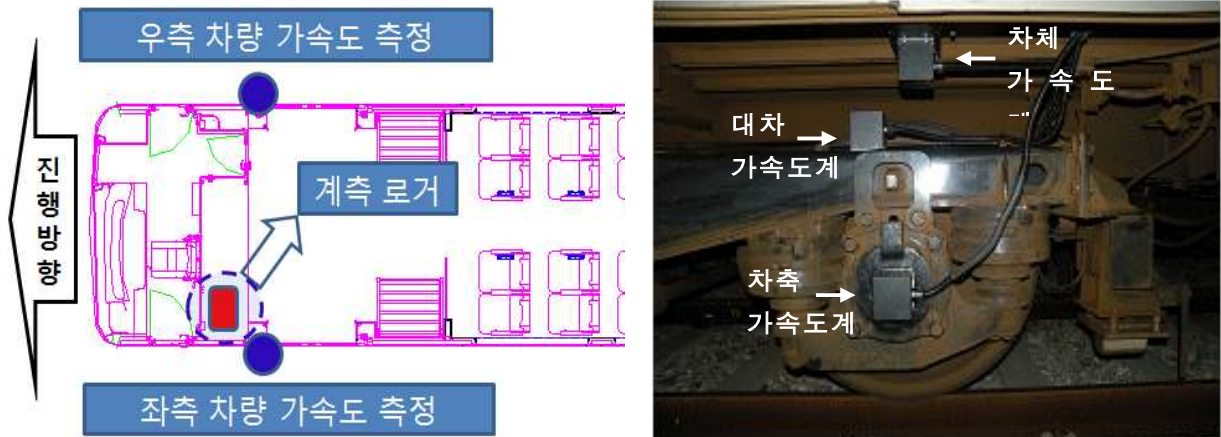
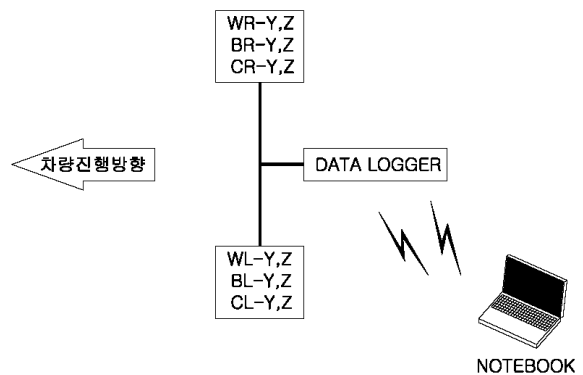


그림 2.1 시스템 설치 위치 및 차량 우측 진동가속도계 사진



(a) 차량내부 Data logger



(b) 시스템 개념도

그림 2.2 Data logger 및 시스템 개념도

본 시스템은 연구목적이 아닌 실제 운행 차량에 시스템을 설치하고 활용하기 위한 목적이므로 몇 가지 사용자 편의성을 고려하여 시스템을 설계하였다.

Data logger내에 램 디스크를 장착하고, 열차가 달림으로서 타코미터로부터 연속된 신호가 있으면 자동으로 데이터가 저장되고 저장된 데이터는 계측자가 언제든지 Down load를 받도록 설계되었으며, 일정기간동안(램디스크 용량상 약 5일) Down load를 받지 않으면 오래된 Data부터 지워나가는 방법으로 설계되었다.

Download는 열차가 정지해 있을 동안 유효반경 약 30m이내에서 받을 수 있도록 무선모뎀을 사용하였고 시스템은 운행이 종료되어 열차가 주박 후 열차의 주 전원을 내리면 같이 꺼지고 주 전원을 올리면 자동으로 켜지도록 구성함으로써 사용자 편의성을 높였다.

## 2.2. 시간영역 진동가속도 분석

### 2.2.1. 도시철도 차량성능시험기준

도시철도 차량성능시험기준에는 도시철도차량 주행 시 차체에서의 진동가속도, 진동수 등의 진동측정 측정방법에 대해 규정되어 있다. 측정 및 결과 분석 방법은 다음과 같다.

#### (1) 측정 방법

- (가) 선정된 선로를 10km/h에서 80km/h까지 매 10km/h마다의 일정속도로 주행시킨다.
- (나) 매 속도마다의 상하·좌우 방향 진동가속도를 저장한다.

#### (2) 결과분석방법

- (가) 저장한 진동가속도 신호를 매 100m 구간으로 나눈다.
- (나) 각 구간 진동가속도의 최대진폭(peak-peak, 2a)과 그때의 속도를 구한다.
- (다) 동일 속도마다 진동가속도 최대 진폭의 평균치를 구한다.
- (라) 주행속도를 가로축으로 진동가속도를 세로축으로 한 그래프를 그린다.

이때의 진동가속도는 최대진폭으로 중력단위인 g로 한다.

평가기준은 그림2.3의 기준에 따라 진동수준을 평가하여 보통 수준 이상이어야 한다고 규정하고 있다

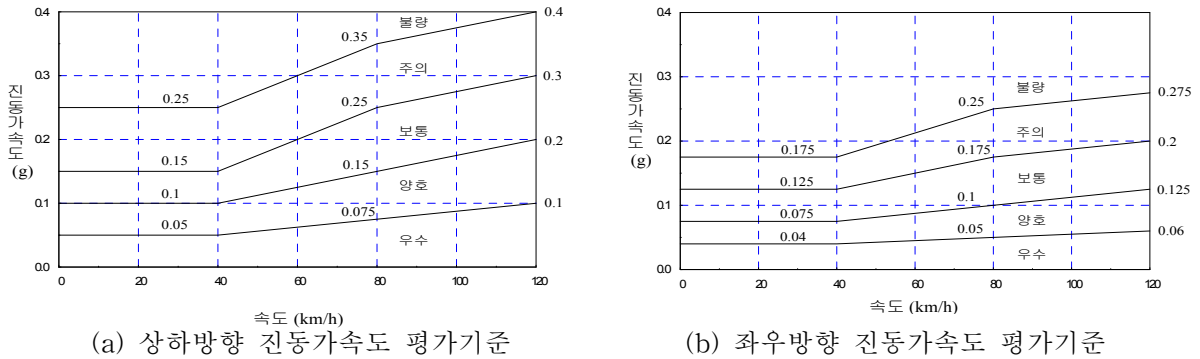


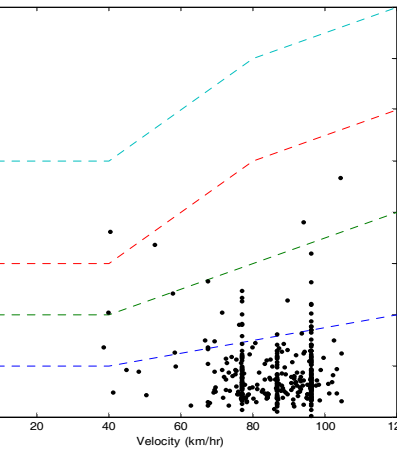
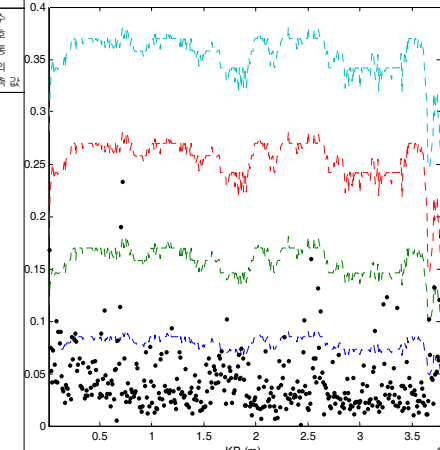
그림 2.3 진동가속도 평가기준

### 2.2.2. 신호처리 및 주행 안전성 분석

데이터는 차체에서 1kHz로 각각 왼쪽, 오른쪽 그리고 상하방향과 좌우방향 진동 가속도 데이터를 수집하였다. 그리고 타코미터의 데이터는 1Hz로 펄스 카운트 데이터를 수집하여 속도와 거리를 환산하고, 환산된 거리와 진동가속도 값을 Match시켰다. 본 연구에서는 차량 성능시험 목적이 아닌 운행중인 열차의 주행안전성을 평가하기 위한 목적이므로 상기 도시철도 차량성능 시험기준에서 제시된 측정 방법 및 분석방법을 변형하여 표 2.1과 같이 적용하였다.

표 2.1 주행 안정성 평가 비교

구 분	도시철도 차량성능 시험기준	본 연구에 적용된 방법
시험 조건	공차상태	승객 탑승(상업 운행)상태
측정 위치	전·후위 대차 중심상의 차체바닥	전위(반대로 달릴 경우 후위) 좌우측의 대차 중심상 차체 바닥
측정 방법	선정된 선로를 10km/h에서 80km/h까지 매 10km/h마다의 일정속도로 주행할 때 진동가속도치 사용	상업운전 속도로 운행 중 운행 속도에 대한 진동가속도치 사용

구 분	도시철도 차량성능 시험기준	본 연구에 적용된 방법
결과분석 방법	저장한 진동가속도 신호를 매 100m 구간으로 나누고 각 구간 진동가속도의 최대진폭(peak-peak, 2a)과 그때의 속도를 구한다. 각 속도별 진동가속도 최대 진폭의 평균치를 한계치와 비교	속도에 대하여 도시철도 차량성능 시험기준에서 제시한 ‘우수’, ‘양호’, ‘보통’, ‘주의’에 해당하는 각각의 한계치를 거리별 진동가속도 최대진폭과 Match 시켜 비교
그래프 도시 예	 <p>가로축 : 속도 세로축 : 속도별 최대진폭 및 한계치</p>	 <p>가로축 : 거리 세로축 : 거리별 최대진폭 및 한계치</p>

### 3. 안전성 분석 시스템 검증

열차 진동은 열차의 동적 특성, 차량의 등가 답면구배, 궤도시스템 종류 및 궤도 하부구조 등에 영향을 받는다. 물론 곡선부 등 레일 선형이나 풍하중 및 가감속 등에도 영향을 받아 어느 한 경우를 가지고 시스템을 검증하기는 사실상 어렵다. 하지만, 본 연구에서는 2010년 겨울내 장기간 온도저하에 따라 공항철도 노반에서 발생한 동상(Frost Heave)현상에 대하여 도시철도 차량성능 시험기준에서 제시한 한계치를 적용할 수 있는지, 개발한 시스템이 합당한지에 대한 유효성을 검증해 보았다.

#### 3.1 동상현상

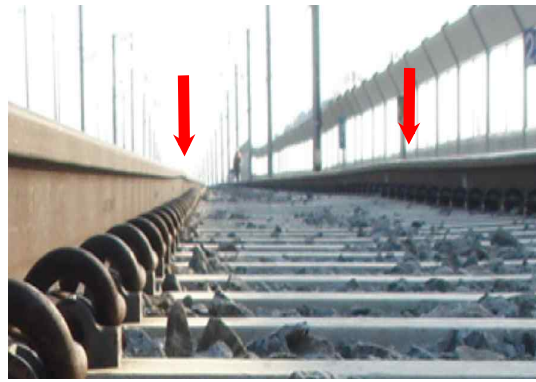
동상(Frost Heave)현상은 겨울철 대기온도가 영하의 기온이 지속되면서 흙속의 물이 동결되고 지하수 아래에서 수분이 공급되면서 다량의 물이 동결(Ice Lens형성)되어 지반이 솟는 현상을 말한다.

Fig 3.1과 같이 동상에 의해 지반이 솟으면 그에 따라 레일도 국부적으로 솟기 때문에 철도 노반에서 동상현상이 나타나면 승차감 불량은 물론이고 심지어는 횡압과 동시에 작용시에는 탈선의 위험도 나타나는 실정이며, 장기간 동결 융해가 반복되면 노반 분니등으로 인한 시설물 내구성에도 영향을 미친다.

이러한 이유로 동상현상이 발생한 개소는 신속히 파악하여 조치를 할 필요가 있으나, 궤도 검측기로 동상개소를 찾는 방법은 영업운행이 종료 후에만 시행이 가능하고, 동상개소에 뜬침목이 발생한 경우에는 영업운행중 궤도 보선원의 선로순회시 육안으로 발견하기 용이하지 않다. 또한 열차를 타고 느끼는 감으로는 그 진동의 크기를 정량화하기 어려워 동상개소가 ‘우선보수’ 개소인지 ‘계획보수’ 개소인지 구분이 되질 않는 실정이다.



(a) 동상개소 사진(1)



(b) 동상개소 사진(2)

그림 3.1 동상 발생개소

### 3.2 동상현상과 계측치 비교

동상은 2010년 1월 28일 3개소가 발생하였다. 계측결과는 아래 그림 3.2 및 그림 3.3와 같으며 그림에서 수직의 붉은색 실선과 점선은 각각 분기부와 신축부를 나타낸다.

동상 발생 후 인력 검측을 시행하여 표 3.1과 같이 검측값과 계측치를 비교한 결과, 실제 동상이 발생한 지점과 개발한 시스템에서 찾은 지점은 약 30~85m 차이가 났다. 이는 열차 가감속중 흔히 나타나는 slip-slide 현상에 의한 거리오차 누적 및 동상발생 구간을 통과하는 열차 속도 등을 고려할 때 비교적 정확하게 동상 위치를 찾은 것으로 판단된다.

진동가속도치는 동상개소에서 약 0.39~0.4g값을 보였으며, 이 값은 도시철도 성능시험기준에서 제시한 ‘주의’ 한계 이상이고, 인력 검측한 결과는 17~20mm로서 선로 관리 기준치인 ‘우선 보수치(±15mm)’ 한계 이상을 나타내므로 열차 안전성 분석시스템은 선로의 과다 틀림치를 찾는 측면에서도 비교적 효과적인 것으로 판단된다.

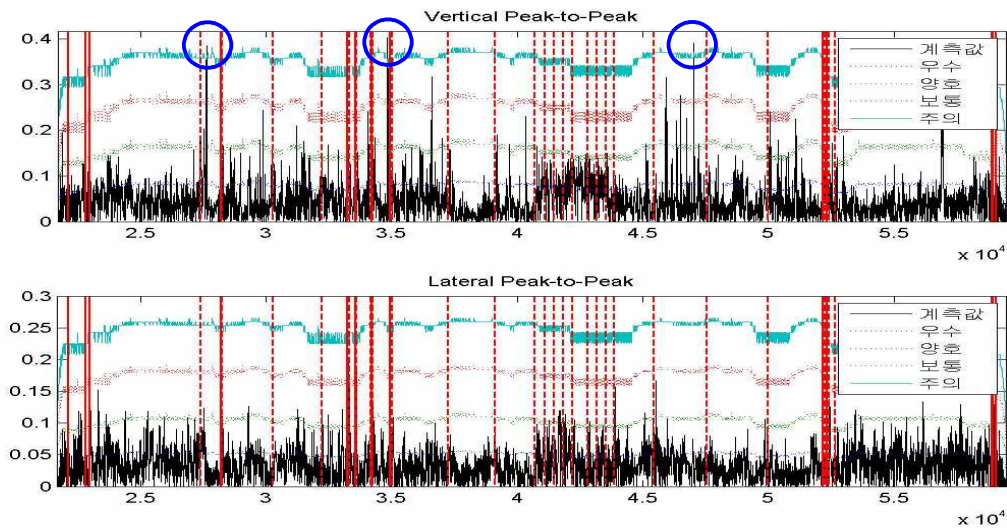


그림 3.2 2010년 1월 28일(동상 발생일) 김포→인천공항 진동가속도 측정 결과



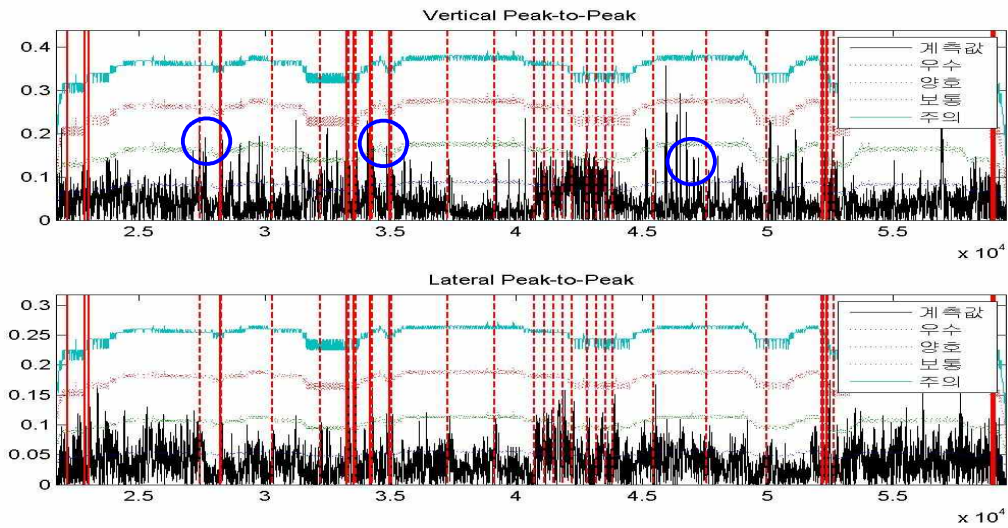


그림 3.3 2010년 2월 3일(보수후) 김포→인천공항 진동가속도 측정 결과

표 3.1 동상개소 인력검측치와 계측치 결과 비교

동상 발생일	인력검측			계측결과		선로 보수일	인력검측	계측결과
	발생지점	동상발생연장(m)	숫음량(mm)	계측된지점	가속도값(g)		보수후틀림량(mm)	보수후가속도값(g)
1/28	27k610	25	20	27k64	0.385	1/31	4.0	0.19
1/28	34k788	34	17	34k84	0.40	1/28	4.0	0.17
1/28	46k955	20	20	47k04	0.39	1/28	4.0	0.15

#### 4. 결론

주행 중 차량의 안정성 분석을 위하여, 코레일공항철도 직통열차 차량에 진동가속도계와 타코미터를 부착하여 진동가속도 값을 계측하였으며, 도시철도 차량 성능시험기준에서 제시한 속도별 진동가속도 한계치와 비교하는 시스템을 개발하였다. 개발한 시스템에 대한 타당성은 실제 노반에서 나타난 동상개소와 비교함으로써 유효성을 입증하였다. 향후, 데이터가 누적되면 궤도 검측기를 이용한 선형 검측결과와 진동가속도치를 비교하여 ‘우수’, ‘양호’, ‘보통’ 등의 한계치와 선로 관리기준상 ‘정비목표치(±6mm)’ 및 ‘계획보수치(±9mm)’와 상관관계 연구를 통한 궤도 선형 불량개소 검출에도 활용하는 방안을 모색할 계획이다.

#### 참고문헌

1. 함영삼 외, “인천국제공항철도 통근형 차량의 주행안전성 평가,” 한국철도학회 2006년도 추계학술대회논문집, 2006.
2. 김상수, 박춘수, “한국형고속열차 고속 궤도검측시스템,” 한국철도학회논문집, 11권, 2호, pp.115-119, 2008.
3. 허현무, 박준혁, 유원희, 박태원, 양철식 “전동차 차륜담면 마모에 따른 차량 진동 특성 영향 분석,” 한국철도학회논문집, 12권, 2호, pp.230-235, 2009.
4. 건설교통부, 도시철도성능시험에 관한기준, 2007.