

# 축상 진동가속도계를 이용한 궤도불규칙의 간이검측에 관한 연구

## On a Simplified Measurement of Rail Irregularity by Axle-box Accelerometers

이준석\*                  최성훈\*\*                  김상수\*\*                  박춘수\*\*  
Lee, Jun Seok          Choi, Sunghoon          Kim, Sang-Soo          Park, Choonsoo

### ABSTRACT

This paper is focused on a simplified measurement of rail irregularity by some axle-box accelerometers for high-speed rail condition monitoring with in-service high-speed trains. Generally, the rail condition monitoring has been done by a special railway inspection vehicle with a 10m versine method. But, the monitoring method needs some expensive measurement system, and have been performed only at night due to its speed limit. In this research, a simplified measurement of rail irregularity using axle-box accelerometers is proposed to monitor the rail condition with in-service high-speed trains. The acceleration is measured by using two accelerometers on a axle-box, and stored in an on-board data acquisition system. The displacement is estimated from the acceleration data by a combination of Kalman filter and the frequency selective filter. The estimated results are compared with the measurement from a laser rail inspection system which is near the axle-box. From the comparison, the proposed method shows promise as a tool for the simplified measurement of rail irregularity at high-speed.

### 1. 서론

궤도불규칙은 열차의 반복운행 혹은 외부 환경의 작용에 의해 원래의 위치에서 상하 혹은 좌우방향으로 정적 혹은 동적인 변위가 발생하는 것을 의미한다. 이러한 궤도불규칙은 여러가지 복잡한 파형의 조합으로 구성되어 있고 파장에 따라 차량의 안전과 승차감에 미치는 영향이 다르게 나타난다. 기존 철도에서 궤도불규칙은 주행안 전성과 재료의 파괴를 고려한 3 ~ 25m의 단파장 혹은 25 ~ 70m의 중파장 성분을 중요하게 고려하였다. 그런데 고속철도에서는 중, 단파장 성분과 함께 승차감에 큰 영향을 주는 70 ~ 150m의 장파장 성분도 중요하게 고려하고 있다.<sup>1</sup>

지금까지 이러한 궤도불규칙의 검측은 보선원 혹은 전용 궤도검측차에 의해 수행되어왔다.<sup>2</sup> 그런데 보선원에 의한 검측은 매우 느려 검측구간이 한정되어있을 뿐만 아니라 검측수행은 영업운행이 모두 종료된 야간에만 가능하다. 전용 궤도검측차는 보선원보다는 빠른 검측이 가능하지만 투입시간이 역시 제한되어 있어서 자주 수행할 수 없을 뿐만 아니라 검측속도도 제한되어 있어서 고속철도의 경우 영업운행이 종료된 야간에만 수행이 가능하다. 이와 함께 철도 운영회사는 이용객의 편의를 위해 속도향상, 시격단축, 운행시간 연장 등을 진행하고 있어 기존 검측 방법의 수행은 더욱 어려워지고 있다. 따라서 신속하고 자주 궤도불규칙을 검측하기 위해서는 영업차량에서의 검측수행을 모색해야 한다.<sup>3</sup>

전 연구에서는 칼만필터를 이용하여 가속도 신호에서 변위를 추정하는 방법을 제안하고 궤도검측으로 응용의 가능성이 있음을 밝혔다.<sup>4</sup> 본 연구에서는 이미 제안된 가속도 신호에서 변위를 추정하는 방법에 파장별로 분류하

\* 과학기술연합대학원대학교/한국철도기술연구원, 차세대고속철도기술개발사업단, 정회원

E-mail : junseok@krri.re.kr

TEL : (031) 460-5272

FAX : (031) 460-5649

\*\* 한국철도기술연구원, 차세대고속철도기술개발사업단

는 방법을 더하여 궤도불규칙을 파장별로 검측하는 방법을 제안하고 그 결과를 궤도검측시스템의 결과와 비교하여 제안한 방법의 타당성을 검토하였다. 이를 통해 영업차량의 측상에 가속도계를 부착하여 궤도불규칙을 간이 검측하는 방법을 모색하고자 한다.

## 2. 변위추정

가속도 신호에서 변위 신호를 구하려면 이론상 2회 적분을 이용하면 되지만 실제로는 변위와 속도의 초기조건, 기계적 혹은 전기적 잡음 등이 문제가 되어 실제 변위와는 전혀 다른 값을 구하는 경우가 대부분이다. 변위와 속도의 초기조건은 0으로 두면 해결이 가능하지만 기계적 혹은 전기적 잡음은 측정 중에 계속 발생하여 계측기에 입력이 되므로 간단하게 해결하기 어려운 문제가 있다.<sup>5</sup> 본 연구에서는 이러한 잡음이 혼합되어 있는 가속도 신호에서 안정적으로 변위를 추정하기 위해 상태-공간 표현 및 칼만필터를 이용하였고 추정된 변위를 파장별로 분류하기 위해 대역통과필터를 이용하였다.

### 2.1 상태-공간 표현

변위 추정을 위해 측정에서 변수의 미래 거동은 오직 현재의 상태에만 의존하고 현재 시점에 오기까지의 경로와 무관하다는 마코프 과정(Markov process), 잡음은 정규(Gaussian)과정이고 그 평균은 측정된 전체 시간뿐만 아니라 각 시간 구간에서도 0이라고 가정한다. 이러한 가정을 기반으로 가속도 신호에서 변위를 추정하기 위한 상태-공간 모델을 도입하는데 그 표현은 다음과 같다.<sup>6</sup>

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{n+1} &= \mathbf{F}\mathbf{x}_n + \mathbf{G}u_n \\ \mathbf{y}_n &= \mathbf{H}\mathbf{x}_n + v_n \end{aligned}$$

$$\text{여기서, } \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{H} = \frac{1}{T_s^2} [1 \ -2 \ 1]$$

### 2.2 칼만필터

측정한 측상 진동가속도 신호에는 불규칙 잡음을 포함하고 있으므로 강인한 상태의 추정을 위해 칼만필터를 이용하였다. 칼만필터는 추정값과 측정값의 평균자승 오차(mean square error)에 필터이득을 곱하고 상태천이 모델을 수정하여 추정오차를 최소화하는 처리과정이다.<sup>7</sup> 본 연구에서는 칼만필터를 이용하여 측정된 가속도와 추정된 변위에서 계산한 가속도의 평균자승오차를 최소화하였는데 그 구성은 다음과 같다.

#### (1) 초기화 (Initialization)

$$\hat{\mathbf{x}}_{0|-1} = 0 \quad \mathbf{P}_{0|-1} = \mathbf{I}_0$$

#### (2) 반복 (Recursions)

- 혁신 (innovation)  $\mathbf{e}_n = \mathbf{y}_n - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_{n|n-1}$
- 혁신 공분산 (innovation covariance)  $\mathbf{R}_{e,n} = \mathbf{H}_n\mathbf{P}_{n|n-1}\mathbf{H}_n^* + \mathbf{R}_n$
- 칼만 예측이득 (Kalman prediction gain)  $\mathbf{K}_{p,n} = (\mathbf{F}_n\mathbf{P}_{n|n-1}\mathbf{H}_n^* + \mathbf{G}_n\mathbf{S}_n)\mathbf{R}_{e,n}^{-1}$
- 상태추정 (state estimation)  $\hat{\mathbf{x}}_{n+1|n} = \mathbf{F}_n\hat{\mathbf{x}}_{n|n-1} + \mathbf{K}_{p,n}\mathbf{e}_n$
- 상태오차 공분산 (state error covariance)

$$\begin{aligned}
 P_{n+1|n} &= F_n P_{n|n-1} F_n^* + G_n Q_n G_n^* - K_{p,n} R_{e,n} K_{p,n}^* \\
 &= F_n P_{n|n-1} F_n^* + G_n Q_n G_n^* - K_{p,n} (H_n P_{n|n-1} F_n^* + S_n^* G_n^*)
 \end{aligned}$$

여기서,  $\hat{x}$ 은  $x$ 의 추정자,  $\Pi_0$  :  $x_0$ 의 공분산 행렬,  $Q_n = \langle u_n, u_n \rangle$ ,  $R_n = \langle v_n, y_n \rangle$ ,  $S_n = \langle u_n, y_n \rangle$

### 2.3 추정변위의 파장별 분류

칼만필터를 이용하여 가속도 신호에서 추정한 변위를 파장별로 분류하기 위해 대역통과필터를 이용하였다. 여기서 대역통과필터는 버터워스(Butterworth)필터를 이용하였는데 이는 무한충격응답(infinite impulse response, IIR)필터로 구현하였다. 무한충격응답 필터의 주파수응답 함수는 다음과 같다.

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{\sum_{k=0}^M b_k z^{-k}}{1 + \sum_{k=0}^N a_k z^{-k}} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_M z^{-M}}{a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_N z^{-N}}$$

무한충격응답 필터를 차분형태로 나타내면 다음과 같다.

$$y(n) = - \sum_{k=1}^N a_k y(n-k) + \sum_{k=0}^M b_k x(n-k)$$

여기서  $a_k$ 와  $b_k$ 는 필터의 계수(일반적으로  $a_0$ 는 1로 둬.)로 필터의 주파수응답 특성을 결정하는데 필터의 종류, 차수, 주파수대역에 의해 결정된다.<sup>8</sup> 본 연구에서는 버터워스 2차 대역통과필터를 사용하였는데 이 필터의 단파장(3~25m), 중파장(25~70m), 장파장(70~150m)별 공간주파수응답은 그림 1과 같다. 시간기반으로 수집한 데이터에 위의 대역통과필터를 적용하려면 공간주파수 기반을 주파수 기반으로 변환해야 하는데 이는 파장( $\lambda$ )과 주파수( $f$ )

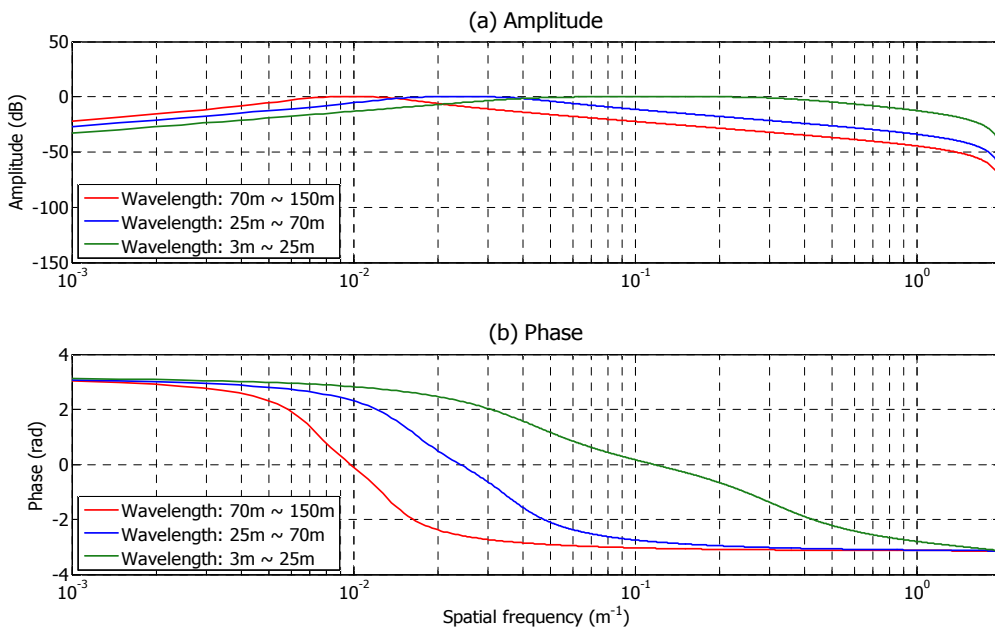


그림 1. 버터워스(Butterworth) 2차 대역통과필터 주파수응답

의 관계식을 이용하여 구하였다.

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (\text{여기서, } v : \text{주행속도})$$

### 3. 궤도검측과 축상진동가속도의 측정

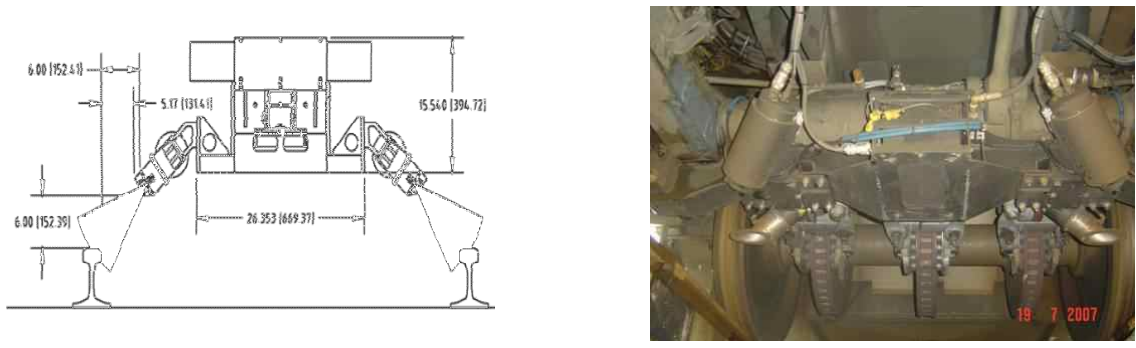
#### 3.1 궤도검측

본 연구에서 사용한 궤도검측시스템은 ImageMap사의 고속 비접촉식 검측 장비로, 한국형 고속열차(한빛 350)에 설치되어 있다. 이 장비는 그림 2(a)와 같이 얇은 띠로 이루어진 레이저를 궤도의 표면에 쏘아주고 이를 CCD 카메라로 수신하여 궤도의 변위를 구한 뒤 차량에 설치된 관성장치를 이용해 보상하는 방법으로 궤도의 불규칙을 검측한다. 이 시스템에서 검측할 수 있는 불규칙은 면틀림, 줄틀림, 수평틀림, 레간틀림, 평면성틀림의 5개 항목이고 주행속도와 킬로정(kilo-post)은 축과 연결되어 있는 엔코더 신호로부터 계산을 한다. 그림 2(b)는 궤도검측시스템의 설치현황을 나타낸다. 이 시스템은 320km/h에서도 궤도 검측이 가능하다.<sup>9</sup>

#### 3.2 진동측정

궤도검측시스템을 설치한 대차의 축상에 상하와 좌우 방향 진동가속도계를 설치하여 주행 중에 진동을 측정하였는데, 이는 궤도검측 시스템의 측정결과와 진동의 측정결과 사이에 지연이 발생하는 것을 방지하기 위해서이다. 측정에서 사용한 가속도계는 좌우방향에 Kistler사 8774A50을 사용하였는데 모두 집적회로 압전소자(Integral Electronics Piezo Electric, IEPE)형이고 1Hz~10kHz 진동측정이 가능하다.

그림 3(a)는 설치한 센서와 데이터 수집 및 저장장치의 구조를 나타내고, 그림 3(b)는 축상 상하 및 좌우방향



(a) 궤도검측 개념도

(b) 설치 현황

그림 2. 궤도검측시스템<sup>9</sup>



(a) 계측시스템의 구조

(b) 상하 및 좌우방향 가속도계 설치현황

그림 3. 진동측정 시스템과 센서의 설치현황

진동가속도계가 부착된 현황을 나타내고 있다. 각 신호는 National Instruments사 PXI(DAQ보드 : PXI-4472, 제어기 : PXI-8187)를 이용하여 20480Hz로 표본(sampling)되어 계측시스템에 저장한 뒤 변위추정을 수행하였다.

시간영역에서 수집한 가속도 데이터를 칼만필터를 이용하여 변위를 추정한 결과를 거리영역 기반의 궤도검측 결과와 비교하기 위해서는 별도의 후처리가 필요하다. 여기에서는 축의 회전에서 나오는 속도신호와 표본주파수를 이용하여 추정된 시간영역 데이터를 거리기반으로 재배열을 하고 궤도검측 결과와 비교하였다.

#### 4. 결과

그림 4는 자갈도상과 콘크리트도상 및 터널이 있는 구간에서 궤도검측시스템 측정결과(적색)와 축상진동가속도에서 변위를 추정한 결과(청색)의 비교를 나타낸다.

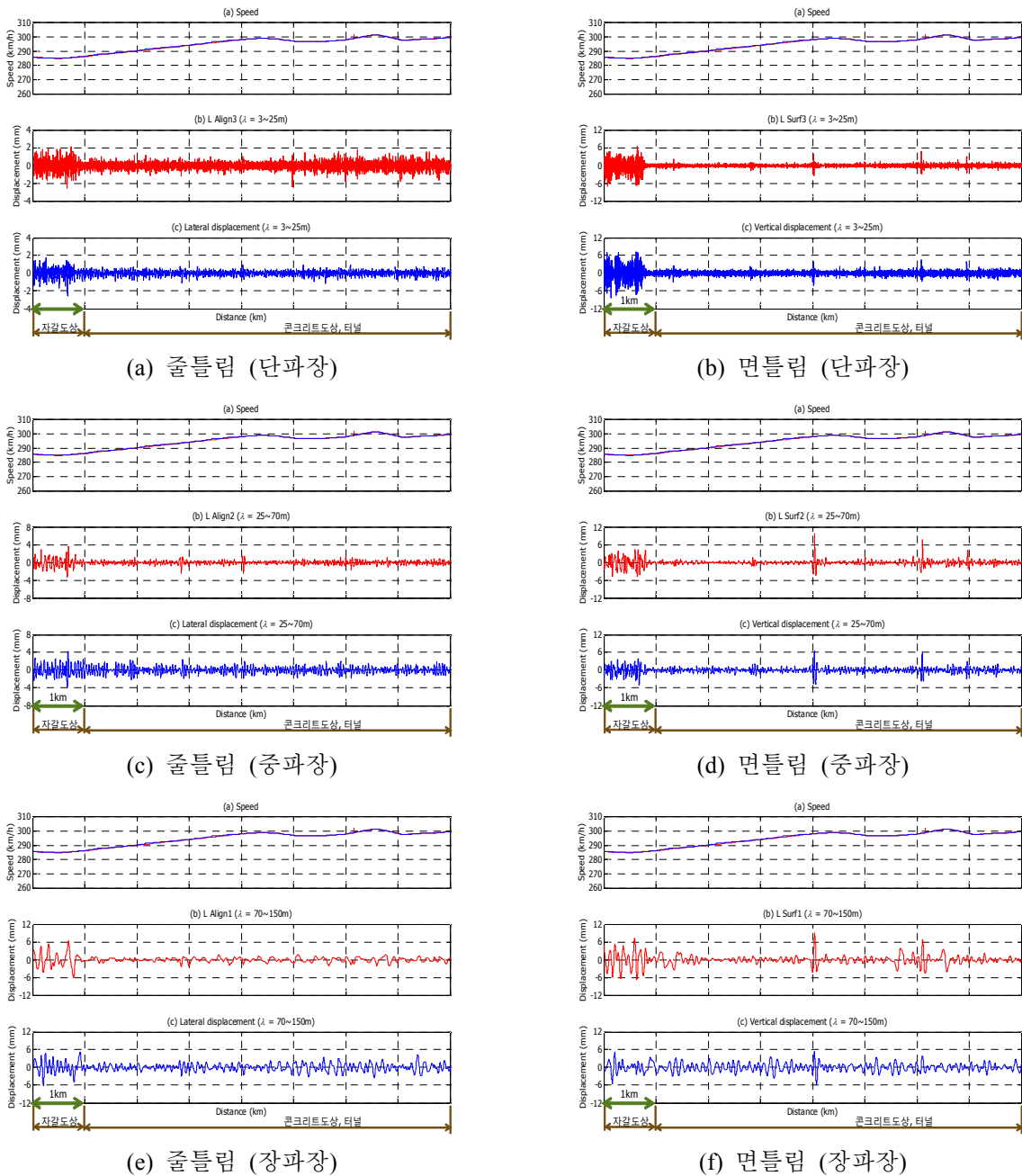


그림 4. 궤도검측시스템 측정결과(적색)와 가속도에서 변위를 추정한 결과(청색)의 비교

그림 (a)와 (b)는 3~25m 단과장 줄틀림과 면틀림의 측정결과를 나타낸다. 궤도검측시스템에서 측정된 결과는 자갈도상에서 각각 2mm내외, 6mm내외이고 콘크리트 도상은 각각 1mm내외, 2mm내외인데 축상 진동가속도에서 추정된 범위에서도 유사한 결과를 나타내고 있다. 특히 콘크리트 도상으로 진입하기 직전과 콘크리트 도상구간에서 상대적으로 크게 나타나고 있는 궤도불규칙은 그 크기와 위치가 일치하고 있다. 그런데 궤도검측시스템은 콘크리트 도상 중간에서 커지고 있는데 비해, 축상 진동가속도에서 변위를 추정된 결과에서는 거의 일정하게 나타나고 있는데 이는 궤도검측시스템의 특성으로 인한 것으로 생각된다.

그림 (c)와 (d)는 25~70m 중과장 줄틀림과 면틀림의 측정결과를 나타낸다. 궤도검측시스템에서 측정된 결과는 자갈도상에서 각각 3mm내외, 1mm내외이고, 콘크리트도상은 각각 5mm내외, 2mm내외인데 축상 진동가속도에서 추정된 범위에서도 유사한 결과를 나타내고 있다. 특히 콘크리트 도상에서 나타나는 비교적 큰 면틀림은 두 결과 모두 분명하게 나타나고 발생한 정도와 위치는 일치하고 있다.

그림 (e)와 (f)는 70~150m 장과장 줄틀림과 면틀림의 측정결과를 나타낸다. 궤도검측시스템에서 측정된 결과는 자갈도상에서 6mm내외, 콘크리트 도상에서는 각각 2mm내외로 나타나고 있는데 축상 진동가속도에서 추정된 범위는 경향이 약간 비슷하지만 차이가 있음을 알 수 있다. 장과장 궤도틀림의 경우 300km/h주행시 0.6Hz~1.2Hz에 해당하는 저주파로 측정에 사용한 가속도계의 저주파 측정한계 1Hz를 초과함으로 인해 발생한 것으로 생각된다.

## 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 영업차량에서 궤도불규칙의 간이검측을 위해 축상 진동가속도 신호를 이용하여 간단하게 궤도의 좌우방향 틀림과 상하방향 틀림을 과장별로 검측하는 방법에 대해서 알아보았다. 이를 위해 칼만필터를 이용하여 잡음이 섞인 가속도 신호에서 변위를 추정하고 대역통과필터를 이용하여 과장별로 분류하는 방법을 제안하였다. 이 방법을 검증하기 위해 궤도검측시스템이 설치되어 있는 대차의 축상에 좌우 및 상하방향 가속도계를 설치하여 고속주행 중에 가속도를 측정 및 변위를 추정하고 궤도검측결과와 줄틀림, 면틀림과 비교하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 칼만필터와 대역통과필터의 사용으로 각종 잡음이 혼합된 축상 진동가속도 신호에서도 변위를 안정하게 추정 및 과장별 분류를 수행할 수 있었다. 따라서 제안한 방법은 축상 진동가속도 신호에서 변위를 추정하는데 유용하게 쓰일 수 있는 방법임을 알 수 있었다.
- (2) 궤도검측시스템에서 측정된 줄틀림과 면틀림의 결과와 축상 좌우 및 상하방향 진동가속도 신호에서 추정된 변위를 비교한 결과 장과장에서는 가속도계의 주파수 특성으로 인해 차이가 있지만 단과장, 중과장의 경우 특정 궤도불규칙이 발생한 정도와 크기가 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 제안한 방법은 영업차량에서 궤도불규칙의 간이검측에 유용하게 쓰일 수 있음을 밝혔다.

향후 장과장 불규칙 추정에서 문제가 되는 1Hz이하 저주파 진동가속도 측정문제를 해결하기 위해 축전형 (capacitive) 가속도계를 도입하고 이를 실제 영업차량의 축상에 설치하여 반복 실험을 통해서 제안한 방법의 신뢰성을 검증할 예정이다. 또한 기존 궤도검측차량에서 사용하고 있는 10m현 중거법 결과와 비교하기 위해 변환 필터도 같이 개발할 예정이다.

## 후기

본 연구는 국토해양부가 시행하는 "분산형 고속철도 시스템엔지니어링 기술개발"과제의 지원을 받고 있음을 밝

히며 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 서사범 (2000), “궤도장비와 선로관리”, 열과 알.
2. 손기준 (2002), “고속검측시스템 소개”, 한국철도기술 1, 2월호.
3. Takeshita K. (1995), "Track irregularity inspection method by revenue-earning train", RTRI report, Vol. 9, No. 2, pp. 29-34.
4. 이준석, 최성훈, 김상수, 박춘수 (2009), “칼만 필터를 이용한 측상 진동가속도로부터 변위추정에 관한 연구”, 한국철도학회 2009 추계학술대회논문집
5. 양경택 (1998), “이동하중을 받는 보의 변위응답 산정을 위한 가속도신호의 적분상 문제점”, 전산구조공학 42, pp. 135-146.
6. Oagata, K. (1995), “Discrete-time control systems”, Prentice-Hall Inc.
7. Sayed A. H. (2008) “Adaptive filters”, Wiley Interscience.
8. Proakis J. G. (2007), "Digital signal processing", Pearson Education International.
9. 김상수, 박찬경, 김기환, 김종선, 김영모 (2006), “한국형 고속열차 검측시스템 구성 방안”, 한국정밀공학회 2006 추계학술대회논문집.