

# 고속철도차량의 축상 진동가속도에서 파장대역별 궤도불규칙 추정에 관한 연구

## Estimation of rail irregularity in wavelength-band using axle-box acceleration of high-speed trains

이준석<sup>†</sup> · 최성훈\* · 김상수\* · 박춘수\*

Jun Seok Lee, Sunghoon Choi, Sang-Soo Kim, and Choonsoo Park

### 1. 서 론

궤도불규칙은 차량의 안전과 승차감에 영향을 미치게 되므로 신속하게 찾아 유지보수를 하여 완화시키는 것이 중요하다. 지금까지 궤도불규칙의 검측은 보선원 혹은 궤도검측시스템이 있는 검측차량에 의해 수행되어 왔는데 이들은 속도와 투입시간이 제한되어 있어서 자주 검측을 할 수 없는 문제가 있었다. 이를 해결하기 위해서는 영업차량을 이용한 궤도불규칙 검측을 모색해야 한다<sup>(1)</sup>.

영업차량에서는 비교적 간단하게 설치할 수 있는 가속도계를 이용하여 궤도불규칙을 검측하는 관성측정법을 사용하고 있다. 그런데 이 방법은 가속도 신호로부터 변위를 추정할 때 불안정한 문제가 있다<sup>(1)</sup>.

궤도불규칙은 여러가지 복잡한 파형의 조합이며 파장에 따라 차량의 안전과 승차감에 미치는 영향이 다르게 나타난다. 기존 철도에서 궤도불규칙은 주행 안전성과 재료의 파괴를 고려한 3 ~ 25m 의 단파장 혹은 25 ~ 70m 의 중파장 성분을 중요하게 고려하였다. 그런데 고속철도에서는 중, 단파장 성분과 함께 승차감에 큰 영향을 주는 70 ~ 150m 의 장파장 성분도 중요하게 고려하고 있다<sup>(2)</sup>.

본 연구에서는 칼만필터 및 대역통과필터를 이용하여 축상에서 측정한 가속도 신호로부터 단, 중, 장 파장별로 변위를 안정하게 추정하는 방법과 궤도검측시스템 결과와의 비교에 초점을 맞추고 있다.

### 2. 가속도신호에서 파장별 변위추정

#### 2.1 상태-공간 표현과 칼만필터

가속도 신호에서 변위를 비교적 안정하게 추정하기 위해 상태-공간 표현과 칼만필터를 이용하였는데

그 구성은 그림 1 과 같다.

(1) 상태-공간(state-space) 표현

가속도에서 변위를 추정하기 위해, 우선 3 개의 변위 데이터로부터 상태천이와 가속도를 계산하는 상태-공간 표현을 도입한다<sup>(3)</sup>.

$$\begin{bmatrix} x(n+1) \\ x(n) \\ x(n-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(n) \\ x(n-1) \\ x(n-2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u(n)$$

$$y(n) = \frac{1}{T_s^2} [1 \quad -2 \quad 1] \begin{bmatrix} x(n) \\ x(n-1) \\ x(n-2) \end{bmatrix} + v(n)$$

여기서,  $x(n)$ : 변위,  $y(n)$ : 가속도,  $T_s$ : 표본시간  
 $u(n)$ : 과정잡음,  $v(n)$ : 측정잡음  
 $0 < \alpha < 1$

(2) 칼만필터(Kalman filter)

각종 기계적 혹은 전기적 잡음이 혼합되어 있는 가속도 신호에서 위의 상태-공간 표현을 이용하여 변위를 최적으로 추정(optimal estimation)하기 위해 칼만필터를 도입하였다<sup>(4)</sup>.

- 혁신 (innovation)  $e_n = y_n - Hx_{n|n-1}$

- 혁신 공분산 (innovation covariance)

$$R_{e,n} = H_n P_{n|n-1} H_n^* + R_n$$

- 칼만 예측이득 (Kalman prediction gain)

$$K_{p,n} = (F_n P_{n|n-1} H_n^* + G_n S_n) R_{e,n}^{-1}$$

- 상태추정 (state estimation)

$$\hat{x}_{n+1|n} = F_n \hat{x}_{n|n-1} + K_{p,n} e_n$$

- 상태오차 공분산 (state error covariance)

$$P_{n+1|n} = F_n P_{n|n-1} F_n^* + G_n Q_n G_n^* - K_{p,n} R_{e,n} K_{p,n}^*$$

#### 2.2 파장대역별 필터의 적용

칼만필터에서 추정된 변위신호는 버터워스 무한임펄스응답(Butterworth infinite impulse response) 대역통과필터를 이용하여 파장대역별로 분류하였다. 무한임펄스응답 필터는 제 2 직접형(direct form II) 구조를

<sup>†</sup> 교신저자; 과학기술연합대학원대학교/한국철도기술연구원  
 E-mail: junseok@krii.re.kr

Tel: (031) 460-5272, Fax: (031) 460-5649

\* 한국철도기술연구원 차세대고속철도기술개발사업단



그림 1. 파장별 궤도불규칙 추정 순서

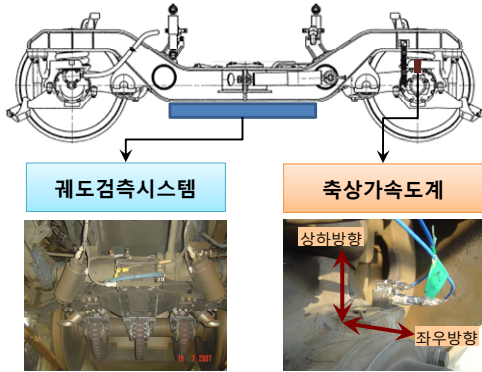


그림 2. 궤도검측시스템과 추상에 설치한 가속도계

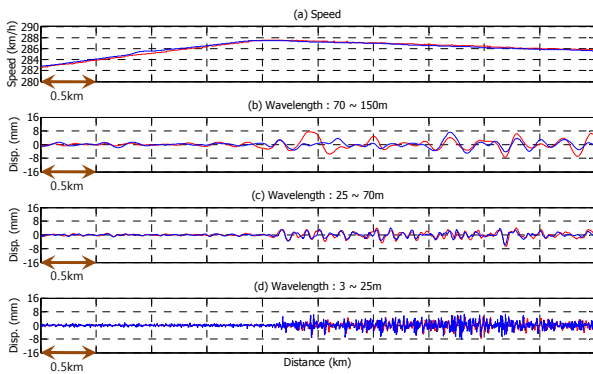


그림 3. 수직방향 궤도불규칙의 궤도검측시스템 측정결과(청색)와 가속도에서 추정결과(적색)의 비교 이용하여 구현하였는데 그 표현은 다음과 같다<sup>(5)</sup>.

$$y(n) = b(1)x(n) + b(2)x(n-1) + \dots + b(k)x(n-k) - a(2)y(n-1) - \dots - a(k)y(n-k)$$

### 3. 측정방법

궤도검측시스템을 설치한 대차의 추상에 진동가속도계를 설치하여 고속주행중 진동신호를 20,480Hz 로 표본하여 저장하였다. 그런데 궤도검측시스템은 4m<sup>-1</sup> 거리기반 표본이어서 이와 비교하기 위하여 차량의 주행속도를 이용하여 시간기반의 데이터를 거리기반 데이터로 재정렬하였다. 또한 시간영역 데이터를 파장대역별 분석을 위해 속도에 따라 대역통과 주파수가 바뀌도록 하여 일정한 파장대역을 유지할 수 있도록 하였다.

### 4. 측정 결과

그림 3 은 280~290km/h 속도구간에서 궤도검측시스템에서 측정한 수직방향 궤도불규칙과 추상 수직방향 가속도에서 칼만필터와 대역통과필터를 이용하여 추정한 궤도불규칙을 비교한 결과이다.

3~25m 단파장, 25~70m 중파장의 경우 두 결과는 서로 유사한 결과가 있는데 특히 중파장은 상당히 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 가속도를 이용한 궤도검측은 두 파장대역에서 좋은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그런데 70~150m 에서는 유사한 부분이 있기는 하지만 일부 구간에서는 차이가 많이 나고 있다. 이는 장파장 대역에서는 가속도계의 응답특성이 좋지 않아서 발생한 것으로 보인다.

### 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 영업차량을 이용한 궤도불규칙 검측을 위해 추상 가속도에 가속도계를 설치하여 가속도 신호를 수집하고, 이로부터 궤도불규칙 변위를 칼만필터와 대역통과 필터를 이용하여 안정하게 추정하였다. 여기서 추정한 결과는 주행속도를 이용하여 거리기반으로 재정렬을 한 뒤 같은 대차에 설치된 궤도검측시스템 측정결과와 비교를 하였다. 비교 결과 단, 중파장 대역의 궤도불규칙은 서로 유사 혹은 일치한다는 것을, 장파장 대역에서는 일부 유사하다는 것을 확인할 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 국토해양부가 시행하는 “분산형 고속철도 시스템엔지니어링 기술개발”과제의 지원을 받고 있음을 밝히며 지원에 감사 드립니다.

### 참고문헌

- (1) Takeshita K. (1995), “Track irregularity inspection method by revenue-earning train”, RTRI report, Vol. 9, No. 2, pp. 29-34.
- (2) 강기동 (2005), “고속철도의 장파장 궤도틀림 분석에 대한 연구”, 한국철도학회논문집 제 8 권 제 2 호, pp. 111-115.
- (3) Oagata, K. (1995), “Discrete-time control systems”, Prentice-Hall Inc.
- (4) Sayed A. H. (2008) “Adaptive filters”, Wiley Interscience.
- (5) Proakis J. G. (2007), “Digital signal processing”, Pearson Education International.