

# 확장형 칼만 필터를 이용한 고속철도교의 감쇠비 분석

## Damping Estimation of High Speed Railway Bridges Using Extended Kalman Filter

전 범 규† · 박 동 옥\* · 김 남 식\*\*

Bub-Gyu Jeon, Dong-Uk Park and Nam-Sik Kim

Key Words : High Speed Railway Bridge(고속철도교량), Damping Ratio(감쇠비), Extended Kalman Filter(확장형 칼만 필터)

### ABSTRACT

In the cases of high speed railway bridge, dynamic behavior analysis is important because of high passing velocity and moving load at the regular intervals, and the damping ratio is a major element in dynamic behavior analysis. In this paper, damping ratios were estimated by two methods and vibration type sections, and relationship between estimated damping ratio and representative value of bridge vibration. At the results, estimated damping ratio using all time of vibration were more stable then using only free vibration section. And in the case of using extended Kalman filter, estimated damping ratio were trend of growth by growth of representative value of bridge vibration. At last, it was shown that study about reliabilities of estimated damping ratios were need.

### 1. 서 론

2004년 3월 개통된 경부고속철도의 교량들은 열차가 최대 350km/h 이상의 속도로 주행하므로 동적거동이 중요하며, 열차라는 특성상 일정한 간격으로 축하중이 작용하게 되므로, 열차의 축하중과 교량의 공진의 가능성도 높다.<sup>(1)</sup>

고속철도 교량의 동적거동에 있어서, 감쇠비는 교량의 공진으로 인한 발산을 제어하는 중요한 요소이며, 이러한 감쇠비는 외력에 의해서 변할 수 있다. 감쇠비 평가에 가장 많이 이용되는 교량의 응답은 비교적 쉽고 정확하게 측정이 가능한 가속도 응답이다. 또한, 교량의 응답을 이용하여 감쇠비를 평가하는 고전적인 방법으로는 logarithmic Decrement, half-power band width method 등이 있으며, 상시진동신호를 이용한 방법으로 확장형 칼만 필터(extended Kalman filter)<sup>(2)</sup>를 이용한 방법, system identification 기법을 이용한 방법<sup>(3)</sup>들이 있다. 하지만, 감쇠비는 임계속도 부근에서 교량의 응답에 지배적인 영향을 미치며<sup>(4)</sup>, 신호의 크기에 따라 변화될 수 있으므로, 감쇠비를 정확히 추정하는 것이 중요하고 할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 교량 응답신호의 대푯값에 대하여 고전적인 방법들 중 가장 많이 이용되는 half-power band width method와 상시진동신호를 이용하여 감쇠비를 추정할 수 있는 extended Kalman filter를 이용한 방법을 상호 비교하고 보다 안정적인 감쇠비 추정방법을 제안하고자 한다.

### 2. 가속도 응답 계측

본 연구의 대상교량은 경부고속철도 대전-김천 구간

에 위치한 이원고가교와 대전-김천 구간에 위치한 지탄교이며, 대상이 되는 모든 교량에서 명확한 계측응답 결과를 사용하기 위하여 지간 중앙의 하부에서 계측된 결과를 사용하여 감쇠비를 분석하였다. 이 중 이원고가교와 지탄교는 한국철도기술연구원에서 제공하는 자료를 이용하였으며, 계측은 동적데이터 수집장비(DAQ) 장비와 가속도 센서를 사용하여 sampling rate 을 1000Hz로 계측하였다. 그림 1은 고속철도 주행 중 가속도 응답 계측 결과에 대한 예시를 보여주고 있다.

### 3. 감쇠비 평가

확장형 칼만 필터는 백색잡음을 가지는 선형시스템의 최적필터인 칼만 필터(Kalman filter)를 비선형시스템으로 확장시킨 시스템으로 본 논문에서는 교량의 동적 시스템을 백색잡음을 고려하여 추적하는 준최적상태추정방법으로 이용하였다. 확장형 칼만 필터의 algorithm은 그림 2와 같다.

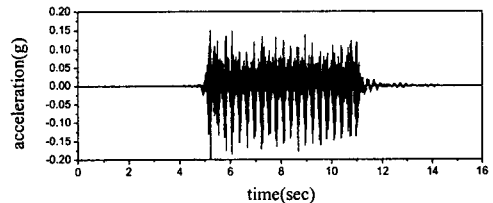


그림 1. 고속철도 주행 중 가속도 응답 계측 예시

가속도 신호를 이용한 감쇠비 추정을 위해 확장형 칼만필터를 운동방정식에 적용하면, 추정대상인 상태벡터  $X$ 는 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

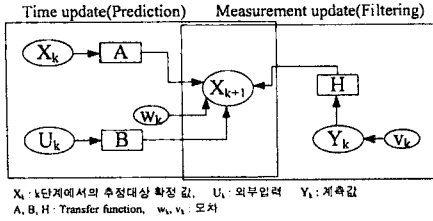
† 교신저자; 부산대학교 사회환경시스템공학과

E-mail : kwenry@pusan.ac.kr

Tel : (051) 510-2189, Fax : (051) 513-9596

\* 부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정

\*\* 부산대학교 사회환경시스템공학부 부교수



$X_k$ : k 단계에서의 추정대상 확장 값,  $U_k$ : 외부입력,  $Y_k$ : 측정값  
 $A, B, H$ : Transfer function,  $w_k, v_k$ : 노이즈

그림 2. 확장형 칼만필터 Algorithm

$$X = \begin{Bmatrix} v(t) \\ \dot{v}(t) \\ \xi_n \\ \omega_n \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

그러므로 상태벡터  $X$  의 미소시간  $dt$  에 대한 변화율은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dX}{dt} = \begin{Bmatrix} \dot{v}(t) \\ -2\xi_n\omega_n\dot{v}(t) - \omega_n^2v(t) + U(t) \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

한편, 측정결과와 데이터는 이산시간의 형태로 주어지므로 추정대상  $X$  역시 이산시간에 관해 정의를 하여야 할 필요가 있다. 시간  $k$  에서  $X$  의 상태를  $X_k$  라 하고, 시간  $k$  와  $k+1$  사이의 증분을  $dX_k$  라 하면, 이산시간에 따른 상태전이방정식(state transfer function)  $A$  는 식 (3)와 같이 나타낼 수 있다.

$$X_{k+1} = X_k + dX_k + W(k) \dots\dots\dots (3)$$

여기서,  $W(k)$  는 오차이다.

반면, 관측함수  $Y$  는 가속도를 측정하였으므로, 시간  $k$  에서의 가속도는 오차  $V(k)$  를 포함하는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_k = \{-2\xi_n\omega_n\dot{v}_k - \omega_n^2v_k + U_k\} + V(k) \dots\dots\dots (4)$$

위 식들을 이용하여 그림 2 에서와 같이  $k$  단계에서의 상태벡터  $X_k$  와 상태전이방정식  $A$  를 이용하여  $X_{k+1}$  를 예상할 수 있으며, 관측데이터  $Y_k$  를 이용하여 보정을 하면, 최종적으로  $X_{k+1}$  를 확정 할 수 있다. 이 과정을 반복하여 추정대상인 이산시간상태의 변위  $v_k$ , 속도  $\dot{v}_k$ , 모드별 감쇠비  $\xi_n$ , 모드별 고유진동수  $\omega_n$  를 추정할 수 있다.

#### 4. 감쇠비 추정 결과

이원고가교의 경우 확장형칼만필터를 사용하여 자유진동구간만을 대상으로 추정한 경우 감쇠비는 0.9~3.5%였으며, 전구간을 대상으로 추정한 경우에는 1.5~2.2%의 감쇠비를 나타내었다. 한편, half-power band width method 를 이용하여 자유진동구간만을 대상으로 추정한 경우 0.8~2.4%였으며, 전구간을 대상으로 추정한 경우 열차 주행시간이 짧아 충분한 가진이 일어나지 못한 경우를 제외하고 2.07~2.53%의 추정 감쇠비를 나타내었다. 그림 3,4 에는 각 교량에서 추정된 감쇠비를 진동신호의 대폭값이라 할 수 있는 RMQ 값 (root mean quad value)에 대하여 방법별로 나타내었다.

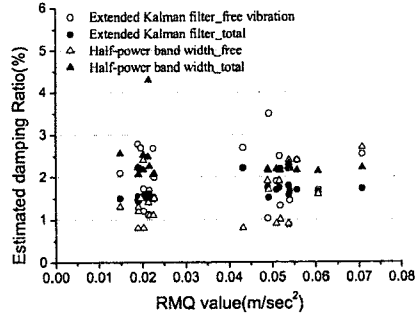


그림 3. 이원고가교의 감쇠비 추정결과

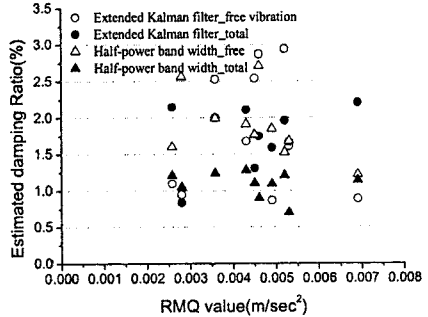


그림 4. 지단교의 감쇠비 추정결과

#### 5. 결론

감쇠비 추정 결과 및 그림 3,4 를 바탕으로 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 자유진동구간만을 대상으로 감쇠비를 추정하는 할 때 보다 전체 진동구간만을 대상으로 감쇠비를 추정할 때 보다 안정적인 감쇠비를 추정할 수 있었다.
2. 확장형 칼만필터를 사용하여 추정된 감쇠비는 계측 신호의 RMQ 값이 커짐에 따라 감쇠비도 증가하는 경향을 보였다.
3. 감쇠비는 추정 방법에 따라 그 평균값이나, 추정범위가 다르게 나타났다. 그러므로, 추정된 감쇠비의 신뢰도에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

#### 후 기

본 연구는 건설교통부 지역특성화연구개발사업의 연구비지원(05 지역특성 B05-01)에 의해 수행되었으며, 계측자료 사용을 허락하여 주신 한국철도기술연구원의 관계자분들께 감사 드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) 박종원, 진원중, 김영진, 김병석, 2003, " 경부고속철도 주행에 의한 콘크리트 상자형 교량의 동적거동", 대한토목학회 논문집, 23(1A), pp.27~36.
- (2) 이진학, 구기영, 김남식, 윤정방, 2004, " 확장형 칼만필터를 이용한 케이블의 동특성 추정", 대한토목학회 논문집, 24 권, 6-A 호, pp.1267~1274.
- (3) 이해성, 강주성, 2003, " 구조물 손상탐지 및 감쇄평가 위한 시간 영역에서의 SI 기법", 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, Vol 2003, pp.430~433.
- (4) 김성일, 유진영, 문제우, 홍성모, 김종태, 2008, " 철도교량 동특성 분석을 위한 계도형식별 모달 테스트", 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, Vol 2008, pp.70.