

## 열차하중에 의한 인접 지반의 진동 감쇠 특성 분석

이주호\*, 박광순\*\*, °박경래\*\*\*, 염종윤\*\*\*

### Analysis of Vibration Damping Characteristics of the Ground Nearby Railroad Induced by Train Loading

Joo-Ho Lee\*, Kwang-Soon Park\*\*, °Kyoung-Lae Park\*\*\*, Jong-Yoon Yum\*\*\*

#### ABSTRACT

In this study, the vibration were measured to analyze the characteristics of propagating vibration on the railroad, the roadbed and the ground nearby railroad induced by traveling trains. About Fifty cases of passing trains were measured with different types and speed, changing the source of loading and the points of measurement. The measured signals were analyzed in time domain and frequency domain. As a result of analysis, sudden reduction of energy was shown in near part from vibration source and the contents of high frequency was reduced more rapidly as the distance was increased. The amplitude of vibration and the contents of frequency did not make big differences in spite of different types of train which is recently used in Korea.

#### 1. 서론

현재 우리나라는 급속한 도시화의 과정에서 일어나는 교통수요로 인하여, 기존 건물이나 구조물에 인접하여 도로나 철도, 지하철 등이 계속적으로 건설되고 있다. 이 과정에서 교통하중으로 인하여 발생하는 진동이 환경영향의 측면에서 사회 문제화 되고 있다. 상대적으로 진동의 크기가 큰 교통하중에 의하여 인접한 구조물에 미치는 진동 영향에 대한 국내기준은 아직 미미한 실정이며, 여러 선진국에서는 기준이 마련되었으나 나라마다 선택하는 주파수 대역이 다르고 진동 측정 방법이

다르기 때문에 이런 기준의 직접적인 적용은 어려운 상황이다[1-3].

기존 열차에 인접한 지반에서 지반진동의 전달에 대한 연구[4-6]에 의하면 열차 통과시의 진동의 전파는 각 지반의 특성에 따라서 달라지지만 대략 300 Hz 미만에 대한 고려로도 충분한 것으로 보고되었다. 또한 측정결과 철로에서 직접 측정된 데이터는 지반에서 측정된 것과 비교할 때 크기뿐 아니라 주파수 성분에서 차이를 보이고 그 진동의 크기와 분포는 토질과 차종, 통과속도 등의 영향 인자에 의해 지배된다.

본 연구에서는 고속주행하는 열차의 운행에 의하여 철로, 노반 및 인접한 기초지반에서 발생하는 진동을 계측하여 전파되는 지반진동의 특성을

\* 롯데건설 기술연구소 책임연구원

\*\* 롯데건설 기술연구소 선임연구원

\*\*\* 롯데건설 기술연구소 연구원

파악하고자 하였다. 이를 위해서 철로에서부터 거리를 달리하여 진동을 측정하였으며 진동원의 계측을 위하여 침목에서도 계측을 수행하였다. 지반 진동의 측정에는 가속도계를 사용하였으며 계측된 데이터는 16채널의 DAT recorder를 이용하여 기록한 후 PC상에서 분석하였다.

계측된 진동신호의 분석은 시간영역해석과 주파수영역해석으로 나누어 실시하였다. 시간영역해석에서는 계측된 신호의 절대적인 크기와 유효진동 시간 등을 분석하였다. 주파수영역해석에서는 진동의 auto-spectrum과 1/3 옥타브밴드 해석을 통하여 주파수특성과 열차의 종류에 따른 진동전파 특성을 분석하였다.

## 2. 계 측

계측은 경부선상의 간이역인 병점역에서 실시하였다. 간이역이므로 대부분의 열차들은 운행중 정속도를 유지하며 통과하게 된다. 계측은 하행선에 대해서만 실시하였으며 이때 병점역에 설치한 계측기의 위치는 Fig 1.과 같다.

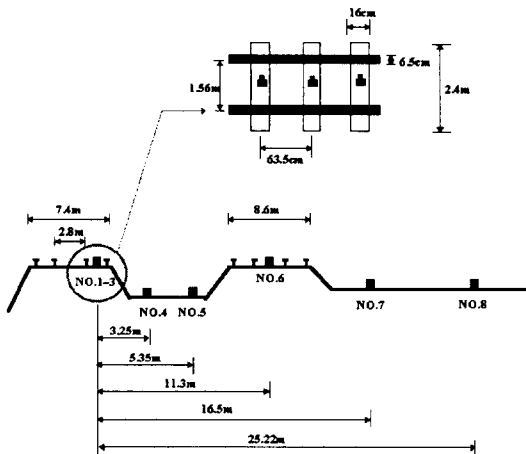


Fig. 1 The measurement points of Byung-Jum Station

진동은 가속도계를 사용하여 계측하였다. 지반 진동의 계측에 사용한 가속도계는 저주파 특성이 우수한 B&K의 8318과 4378 가속도계를 사용하였으며 침목에서의 진동을 계측하기 위해서는 진동의 크기가 큰 진동을 계측할 수 있도록 민감도 (sensitivity)가 상대적으로 낮은 4371 가속도계를 사용하였다. Fig. 2 는 계측시스템의 구성개념도를 나타내고 있다.

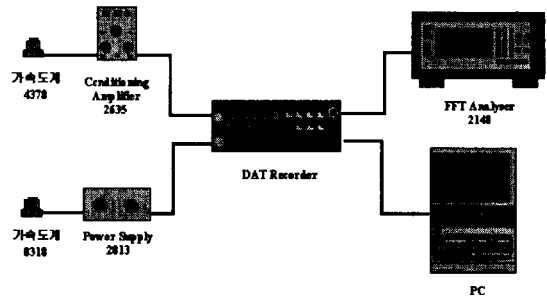


Fig. 2 The concept of measurement system

계측은 2일간에 걸쳐 약 50개의 열차에 대해서 실시하였다. 각 열차가 통과시에는 스피드건을 이용하여 통과속도를 계측하였으며 각 열차의 종류와 객차수도 육안으로 확인하였다. 열차의 종류에 따른 통과속도와 객차수 등의 제원은 Table 1 에 정리하였다.

Table 1 Specification of passing trains

열차종류	객차수 (량)	통과속도 (km/h)	축당하중 (ton)
새마을	8~16	114~136	12.49
무궁화	8~12	111~120	11.79~12.78
통일호	8~12	110~119	10.29~10.97

여기서 축당하중은 열차제원표에 나와있는 값들을 바퀴수 만큼으로 평균하여 계산한 값이다.

각 열차의 통과시의 진동계측은 열차통과 전후에 충분한 시간을 두어서 통과시의 진동을 계측하였다. 계측은 동시에 8채널을 입력하여 기록하였으며 샘플링 간격은 1/6000초로 설정하여 한계진동수(Nyquist Frequency)가 3000Hz가 되도록 하였다.

실제 계측 결과 열차가 통과하는 시간은 열차의 량수에 따라서 약 5초에서 10초 정도의 시간이 소요되었다. 기록된 계측의 분석은 유효한 시간기록의 전후를 합쳐서 15초가 되도록 하여 이 시간기록을 사용하였다.

계측지점의 지반은 인접한 현장의 토질주상도에 준한다고 가정하여 판단하였다. 주상도에 의하면 지면하 1~1.5m의 표피층은 점토나 실트질의 지반이며 그 이하의 지반은 8~15m 정도까지 모래질 지반이다. 모래질 지반의 하면은 풍화암층으로 구성되어 있었다.

### 3. 계측 결과

실제 계측된 결과를 처리하여  $m/s^2$ 의 단위로 표시하였다. Fig. 3은 계측된 가속도기록의 예이다. 이 기록은 12량의 통일호가 113km/h의 속도로 통과시 계측한 결과이다. 이때 (a) ~ (f)는 각각 침목, 3.25m, 5.35m, 11.3m, 16.5m, 25.2m의 계측결과를 나타낸 것이다. 계측된 결과로 부터 열차가 통과할 때 약 7-8초 정도의 시간이 걸리는 것을 알 수 있다. 또한 열차 통과중에는 어느 정도 일정한 형태의 진동이 유지되는 것을 알 수 있다. 거리가 멀리 떨어질수록 진동의 형상이 밋밋해지는 것으로 판단할 때 고주파 성분이 먼저 감소되는 것을 알 수 있다.

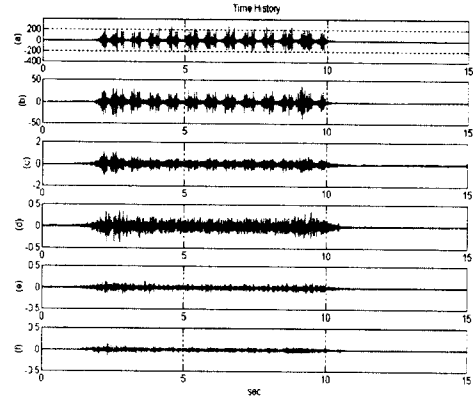


Fig. 3 Example of measured time history data  
열차통과시 계측된 유효범위의 RMS 값을 구한 결과를 Table 2에 수록하였다. 계측된 결과에서 알 수 있듯이 열차하중을 직접 받게 되는 침목에서는 매우 큰 값을 가지고 있으나 거리가 멀어짐에 따라 급속히 그 크기가 줄어드는 것을 알 수 있다.

Table 2 Summary of RMS Values ( $m/s^2$ )

위치	침목	3.25m	5.35m	11.3m	16.5m	25.2m
RMS	30.95	6.68	0.199	0.088	0.036	0.027

계측된 시간기록을 주파수영역에서 분석하기 위해서는 Auto-Spectrum과 1/3-옥타브밴드 해석의 2가지의 방법을 사용하였다. 주파수분석의 경우 계측시 샘플링시에 오차가 발생할 수 있으므로 이에 대비 하여야 한다[7]. Aliasing이나 leakage 등의 오차를 줄이기 위하여 windowing 등의 기법을 사용하지만 본 계측에서는 실제 한계주파수인 3000Hz보다 훨씬 작은 500Hz 정도의 값을 사용하므로 aliasing효과는 무시할 수 있었다.

먼저 진동의 Auto-spectrum을 구하는 경우 실제로 계측된 진동은 비정상 불규칙 과정(Non-stationary random process)이지만 열차 통과시 신

호의 형상이 일정하게 되는 구간에서는 정상적 (Stationary)이라고 가정하여 이 유효구간에서 Auto-spectrum을 구하였다. 즉,

$$S(f) = \left\langle \frac{X(f)X^*(f)}{T} \right\rangle \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다 (여기서  $\langle \rangle$ 는 앙상블평균을 나타낸다). 이것을 실제 계산하는 방법으로 다시 표현하면, 정상적이라고 가정할 수 있는 구간을 설정하여 내부에서 2<sup>n</sup> 개 크기의 계측데이터를 포함하는 구간으로 나누어서 각각의 구간을 FFT 한 후 평균화(averaging)를 통해서 Auto-spectrum을 구하게 된다. 실제 결과를 비교하는 경우에는 절대적인 물리량에 관심이 있으므로 물리량을 일치시키기 위하여 Auto-spectrum을  $\sqrt{S(f)}$ 로 사용하였다. 실제로 이렇게 Auto-spectrum을 구하지 않고 직접 FFT를 통해서 주파수영역의 결과를 확인하는 경우 잡음신호의 영향으로 결과를 파악하기가 어려우므로 Auto-spectrum을 통하여 평균화(averaging)한 후 결과를 분석하는 것이 결과를 평가하기 용이하다.

이렇게 구한 주파수 영역에서의 결과를 Fig. 4에 표시하였다. 결과는 식(2)와 같이 데시벨(dB) 단위로 표시하였다.

$$dB = 20 \log \frac{a}{a_0} \quad (2)$$

여기서  $a_0 = 10^{-6} m/s^2$ 을 사용하였다. 각 곡선은 순서대로 위치에 따른 해석결과를 나타낸다. 결과를 살펴보면 침목에서의 진동은 전 대역에 걸쳐서 고른 에너지분포를 갖고 있는 것을 알 수 있다. 또한 약 50Hz 부근에서 지반진동들의 최고값이 나타남을 알 수 있다.

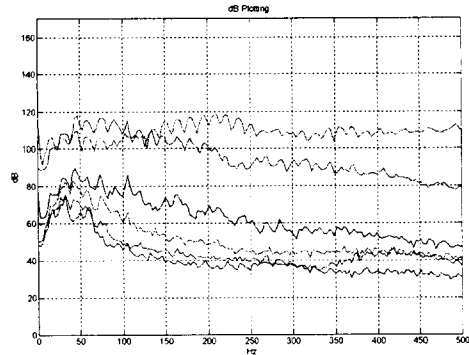


Fig. 4 Auto-spectra of measured data

하중원은 전 영역에 걸쳐서 비슷한 에너지를 유지하고 있으나 지반진동은 거리가 멀어질수록 고주파성분이 많이 감소되는 것을 알 수 있다. 또한 3.25m지점의 50Hz 부근에서 침목에서 보다 더 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다. 이것은 지반의 특성에 의해서 나타나는 결과라고 판단된다.

1/3 옥타브밴드해석시에는 실시간분석기(Real time analyzer)를 사용하지 않고 PC상에서 각 옥타브밴드값에 해당하는 대역통과필터(Band-pass filter)를 설계하여 이를 이용하였다. 즉 각 시간 이력 데이터를 미리 설계한 필터에 통과시켜 나온 결과의 RMS 값을 사용하여 옥타브밴드 해석결과를 구하였다. 사용한 필터는 MATLAB에서 지원하는 Butterworth 필터를 사용하였다. 필터의 특성상 대역폭이 매우 작은 경우에는 그 거동이 불안해지므로 대역폭이 작게 설정되는 저주파 영역의 값은 이용하기가 곤란하였다. 따라서 20Hz이상의 값만을 해석하였다. 필터의 차수(order)는 반복수행을 통하여 결정하였다.

옥타브밴드 해석결과는 Fig. 5에 수록하였다. 전체적으로 주파수성분의 분포는 Fig. 4의 결과와 유사한 형상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 전체

진동의 크기는 옥타브밴드 해석결과가 더 크게 나타난다. 이것은 Auto-spectrum의 경우 평균화를 통하여 전체 진동의 크기가 작아졌기 때문에 일어난 현상이다.

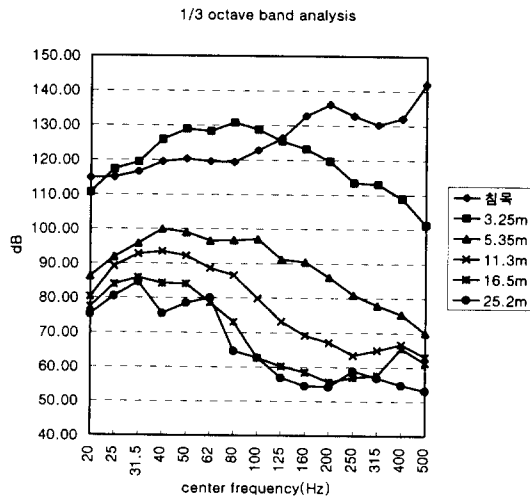


Fig. 5 Result of 1/3-octave band Analysis

열차의 종류별 전파특성을 분석하기 위해서는 새마을호, 무궁화호, 통일호 열차의 계측결과를 각각 6개씩 임의로 선택하였다. 선택된 결과들은 속도 및 열차의 량수에 차이가 있지만 주파수 영역에서의 형상과 크기는 유사하다. 이때 각 열차 별로 평균한 값을 1/3 옥타브밴드 해석을 통하여 나온 결과의 예를 Fig. 6 에 수록하였다. 이 결과는 철로에서 5.35m 떨어진 곳에서 계측한 결과이다. 계측결과를 살펴보면 열차의 종류에 따른 차이가 크지 않다는 것을 알 수 있다. 따라서 110 ~ 130 km/h 정도의 속도로 주행하는 현재의 열차들에 있어서는 진동의 크기나 주파수 성분이 큰 차이가 없을 것으로 사료된다.

열차종류별 진동의 전파 형상(5.35m)

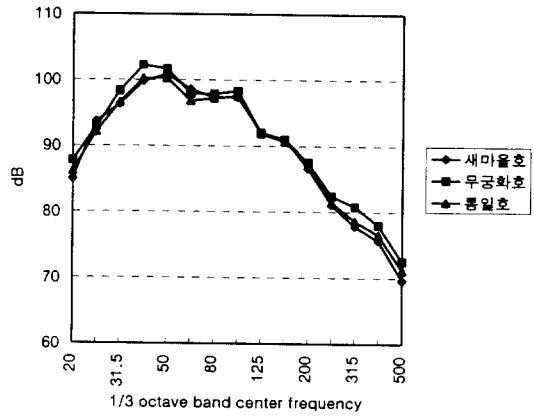


Fig. 6 The frequency contents of different trains

#### 4. 결론 및 추후 연구과제

해석결과는 예상한 바와 같이 진동원에서 가까운 부분에서 급격한 에너지의 감소를 나타내고 있으며 거리가 멀어질수록 고주파 성분이 먼저 감소되는 것을 알 수 있었다.

현재 주행중인 열차들은 주행속도와 축하중에 큰 차이가 없기 때문에 전파되는 진동의 크기와 주파수 성분은 비슷한 것으로 판단된다.

차후에는 지반에서의 진동뿐 아니라 전파된 진동에 의한 인접구조물의 영향 및 지반진동과의 상관관계를 분석하고자 한다. 또한 지반에서의 진동 전파 특성을 알기위하여 진동원과 임의 위치에서의 전달함수(transfer function)를 구하여 각 위치간의 상관관계에 대하여 분석하고자 하며, correlation 해석 등을 통하여 지반 내부의 물성을 추정하는 비파괴 시험의 적용 등에 대해서도 연구하고자 한다.

#### 5. 참고문헌

- (1) 한국고속철도건설공단, 고속철도 환경 소음 기준 및 진동기준에 대한 연구 (진동대책편), 1995.
- (2) 帝道高速度交通營團, 騒音・振動對策 研究會 報告書 vol I & II, 1971 - 1981 (日本語).
- (3) 차일환, 옥정권, "소음진동공학", 문운당, 1994.
- (4) T.M. Dawn and C. G. Stanworth, "Ground Vibrations from Passing Trains", Journal of Sound and Vibration 66(3), p355-362, 1979.
- (5) T. M. Dawn, "Ground Vibrations from Heavy Freight Trains", Journal of Sound and Vibration 87(2), p351-356, 1983.
- (6) G. Volberg, "Propagation of Ground Vibrations near Railway Tracks", Journal of Sound and Vibration 87(2), p371-376, 1983.
- (7) J. S. Bendat and A. G. Piersol, Random Data, 2nd Rdition, John Wiley & Sons, 1991.