

철도연변 지반진동 Data Base 구축을 통한 지반진동예측 실험식

Development of Empirical Equations for Estimating the Train-Induced Ground Vibration

황 선 근^{0*}, 고 태 훈^{**}, 엄 기 영^{***}, 오 상 덕^{****}
Seon-Keun Hwang, Tae-Hoon Koh, Ki-Young Eum, Sang-Duck Oh

ABSTRACT

In this study, the train-induced vibration was measured at many locations at/around the actual service lines and the data base was constructed using the measurement results. The characteristics of train induced ground vibration was categorized and the empirical ground vibration estimating equations were developed.

On the ground area (level grounds, embankments, cut sections), the vibration estimating equations were developed in terms of ground vibration level which was related with the distance from the source. Especially for the cut section areas, the vibration levels were expressed with the vibration receiving point expressed by the ratio of vertical distance to horizontal distance(V/H) from the source. As a result, when V/H is 0.96, the vibration estimating equation gives a minimum vibration level.

Keywords : Vibration Estimation, Train-induced Vibration, Vibration Level Database, Empirical Equation

1. 서론

열차운행시 발생하는 교통진동이 인접구조물에 직·간접적으로 영향을 미치게 되고 인근지역의 쾌적한 시민생활을 침해하는 경우가 빈번하게 일어나고 있다. 그 결과 최근에는 이로 인한 민원체계가 증가하고 있는 추세이며 이러한 민원에 대한 대책에 많은 노력과 경비가 소요되는 반면 그 효과는 적은 편이다. 향후 고속철도와 기존선 고속화에 따른 선로연변 지반진동의 정확한 예측은 이러한 문제에 대한 대책으로서 필요 불가결하다.

열차주행에 의한 진동의 전파는 궤도구조, 지반을 통해 전파하는 탄성파의 형태, 인접구조물과의 상호

작용 등의 역학적 거동이 매우 복잡하여 수치 모형화하기가 대단히 어렵다. 또한 모형화가 가능하더라도 진동을 정확히 예측하기 위해서는 열차, 궤도, 지반, 인접건물의 물리적 특성에 대한 많은 정보가 필요하다. 이러한 이유로 궤도로부터 일정 거리 이상 떨어진 수신부의 진동을 예측할 경우 수치해석적 방법보다는 기존의 측정자료를 바탕으로 제안된 경험식을 사용하는 것이 편리하고 현실적이다.

본 연구의 목적은 토공구간(평지, 흩쌓기, 땅깍기)과 교량구간에서의 수신거리별 지반진동 database 구축을 통해서 철도 지반진동의 예측을 위한 기본자료로 활용하고 진동예측실험식을 만드는 것이다.

지반진동 database 구축을 위해서 국내 철도노선 중 중요 20 개 구간을 선정하였다.

토공구간에 있어서 평지구간의 경우, 경부선(부곡-성대), (전의-서창), 호남선(개태사-연산), 경인선(개봉-오류), 경원선(왕십리-용봉), 흩쌓기 구간의 경우,

* 한국철도기술연구원 시설연구본부 책임연구원
** 한국철도기술연구원 시설연구본부 주임연구원
*** 한국철도기술연구원 시설연구본부 선임연구원
**** 한국철도기술연구원 시설연구본부 연구원

경부선(성대-화서), (사곡-상모터널), 호남선(장성-옥정), 중앙선(원주-유교), (창교-신림), 땅짜기구간의 경우, 경부선(대전-세천), 호남선(다산-황등), 중앙선(이하-서지)을 선정하였다. 교량구간에 있어서 강교의 경우, 원효가도교(서울-남영), 원주천교(원주-유교), 콘크리트교량의 경우, 금정고가교(산본-금정), 오정고가교(대전조차장-서대전), 선평고가교(순천-임춘), 용당고가교(동순천-동운), 강합성교량의 경우, 오정천교(대전조차장-서대전)를 선정하였다.

2. 철도진동 특성

철도연변에서 발생하는 지반진동의 전형적인 주파수는 100Hz 이하에서 나타나고 있으며 특히, 휠/트랙(Wheel/Track)의 공진(resonance) 주파수와 관련된 40~100Hz 사이에서 주로 발생하고 있다. 그리고 철도에 기인하는 진동문제는 그림 1과 같이 복잡한 경로와 다양한 특성의 매질을 통하여 전파하기 때문에 순수한 해석만을 이용한 진동예측은 많은 노력과 시간이 요구되고 있다. 이 분야의 기본적인 진동예측은 많은 경험적인 식과 데이터를 활용하는 추세이다. 또한 지반은 자유표면이라는 경계조건을 가지고 있기 때문에 압축파(Compression waves), 전단파(Shear waves), 레일리파(Rayleigh waves)라는 체적파와 표면파의 형태로 에너지가 전달된다. 표면파는 일반적으로 진동원의 범위가 비교적 작은 경우에 지배적으로 나타나고 에너지에 비하여 높은 진동을 유발한다. 일반적으로 지반은 불연속, 불균질 특성을 가지고 있기 때문에 이론적으로 지반진동의 전파특성을 예측하는 것은 거의 불가능하다. 특히, 지반진동이 건물에 입사할 경우의 응답을 예측하는 문제는 대부분 경험적인 실험 데이터를 활용하는 실정이다. 이러한 실정은 지반진동의 예측을 위해서는 신뢰성 있는 많은 실측 데이터의 확보가 필요하다.

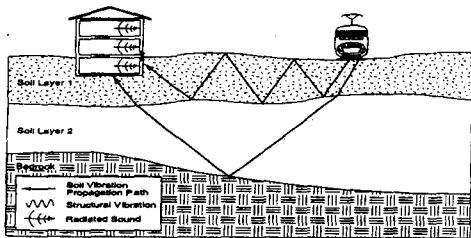


Fig. 1. Properties of Train-induced Vibration

열차주행에 의한 지반진동의 예측과 평가를 위해서는 다음의 3단계를 따른다.

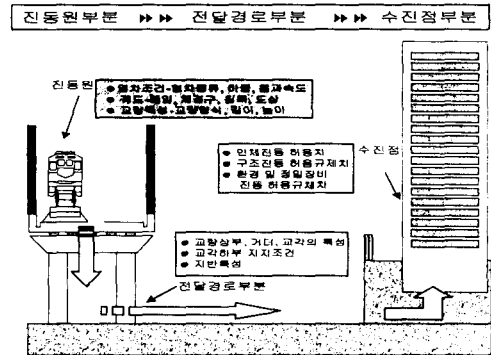


Fig. 2. Steps for Prediction and Assessment of Train-induced Vibration

3. 지반진동의 영향요인

수진점에서의 지반진동의 평가는 많은 요인들에 의해 복잡한 과정을 거치게 된다. 그러한 지반진동레벨에 영향을 미치는 요인들을 다음의 네 가지 범주로 분류하였다.

3.1 차량

차량의 속도, 현가장치의 1차강성, 휠의 마모정도와 같은 요인들은 지반진동문제를 발생시킬 수 있다.

3.2 궤도

레일의 형태, 조건, 궤도지지형태, 레일지지시스템, 궤도지지구조의 중량과 강성은 모두 지반진동레벨에 영향을 끼칠 수 있고 마모정도가 심한 레일과 휠의 충격으로 인해 지반진동이 실질적으로 커질 수 있다.

3.3 지반조건

지반진동레벨에 큰 영향을 끼치며 가장 중요한 요인으로는 강성, 내부감쇠, 기반암까지의 심도를 들 수 있다. 경험적으로 진동전파는 천층의 기반암 지역뿐만 아니라 점토지반에서 좀더 명확하며, 후자의 경우가 지표면에 진동에너지를 집중시켜 결국 궤도에서 멀리 떨어진 수진점까지 지반진동문제를 야기시키는 것으로 판단된다. 또한 지층과 지하수

위와 같은 요인들도 지반진동전파에 영향을 끼칠 수 있다.

3.4 수진구조물

지반진동은 건물내부에 문제를 야기시키므로 수진구조물(건물)의 특성이 지반진동의 평가에 있어서 중요시된다. 열차진동은 건물외부에 있는 사람들에서 감지되지만 외부의 진동이 민원을 야기시키는 것은 매우 드물다. 건물내부의 진동레벨은 수진구조물(건물)의 기초, 기초와 지반의 coupling, 구조물을 통한 진동전파에 도달하는 진동에너지에 좌우된다. 일반적으로 구조물의 중량이 클수록 지반에 발생하는 진동에너지의 응답은 작다.

4. 토공구간의 지반진동 예측식

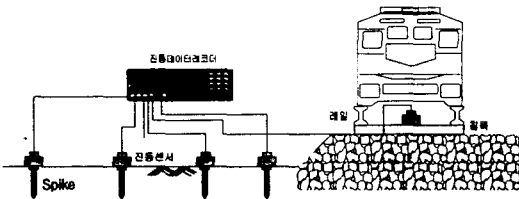


Fig. 3. Train-induced Vibration Measuring System on the level Ground Area

그림 3과 같은 열차진동측정 시스템에 의해 토공구간에서 지형별, 차량별, 수진거리에 따른 진동실측데이터의 D/B구축을 통해서 지반진동예측 실험식을 산정하였다.

실험식에 적용된 데이터는 지반진동의 연직성분으로 인체감각보정을 적용한 궤도중심으로부터 수진거리 1~50m이내의 진동레벨(dB(V))이다.

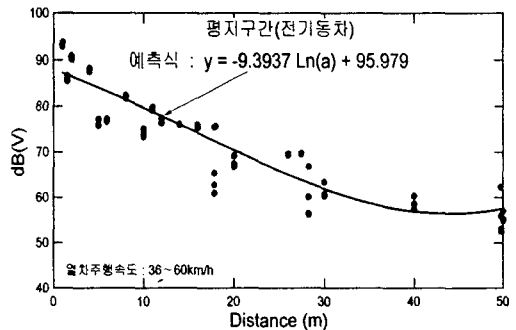
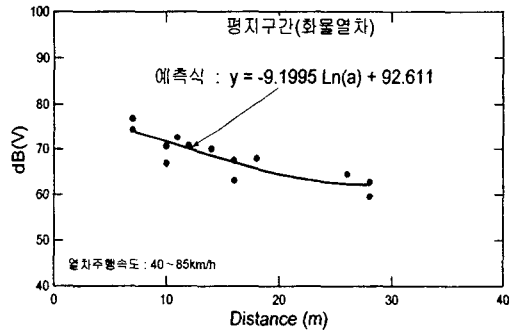
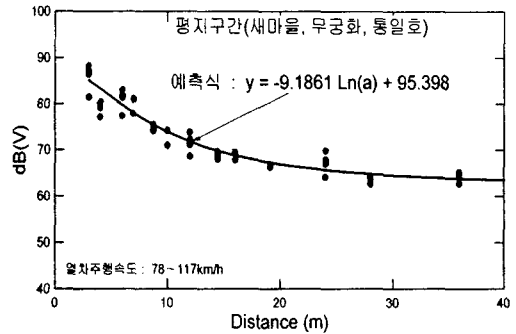
차종별로는 새마을·무궁화·통일호, 화물열차, 전기동차를 대상으로 하였으며 화물열차와 전기동차의 경우 지반진동응답에 영향을 미치는 열차운행속도가 다른 차종에 비해서 현저히 낮으므로 새마을·무궁화·통일호와 분리하여 예측식을 만들었다.

지형별로 평지, 흩쌓기구간은 진동원으로부터 수진(수평)거리에 의해서만 예측식을 만들었으나 땅 짚기구간의 경우에는 수평거리와 더불어 연직거리에 따라서도 진동특성이 상이하므로 진동원로부터의 연직거리도 고려해서 예측식을 산정하였다.

예측식을 산정하기 위해 회귀분석법을 사용하였으며 예측식의 적합성을 평가하기 위해 data의 결정계수(coefficient of determination, r^2)를 이용하였다.

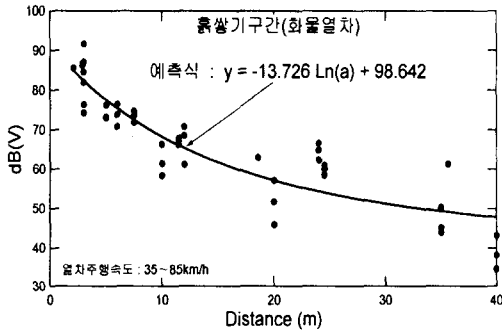
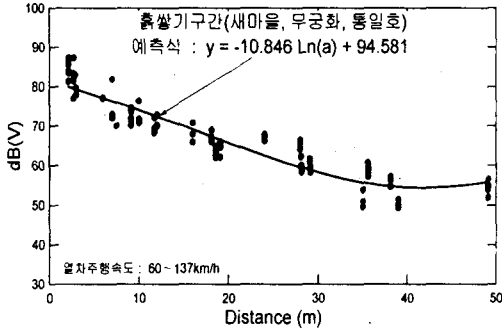
4.1 평지구간

새마을·무궁화·통일호, 화물열차, 전기동차에 대해서 측정데이터를 회귀분석한 결과는 다음과 같다.



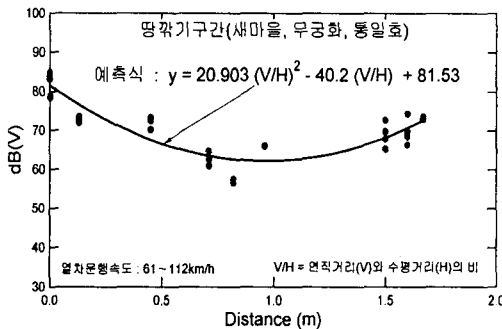
4.2 흙쌓기구간

새마을·무궁화·통일호, 화물열차에 대해서 측정 데이터를 회귀분석한 결과는 다음과 같다.



4.3 땅깍기구간

땅깍기구간의 경우, 일반적인 수진(수평)거리에 따른 거리감쇠현상을 보이지 않고 지형에 따라서 상이한 경향의 진동특성을 보였다. 따라서 수진점을 진동원(궤도 중앙부)으로부터의 수평거리(H) 성분과 더불어 연직거리(V) 성분을 함께 고려했다. 수진점을 연직거리와 수평거리의 비로 표현하고 새마을·무궁화·통일호에 대해서 예측실험식을 산정하였다.



여기에서 주목해야 할 것은 연직거리에 대한 수평거리의 비(=V/H)가 어떤 특정한 값을 가질 때 최소이 지도레벨이 퍼가되오 아 스 이다 즈 V/H가 0.96일 때 약 62dB(V)의 최소진동레벨을 나타냈다.

5. 교량구간의 지반진동 예측식

교량구간에서의 진동 Data Base 구축을 위한 진동측정 시스템은 그림 4와 같다.

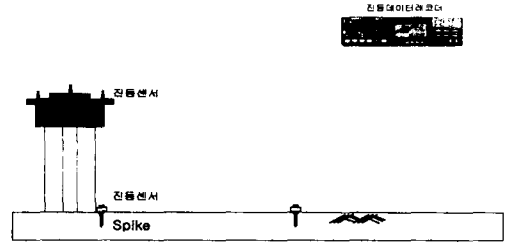
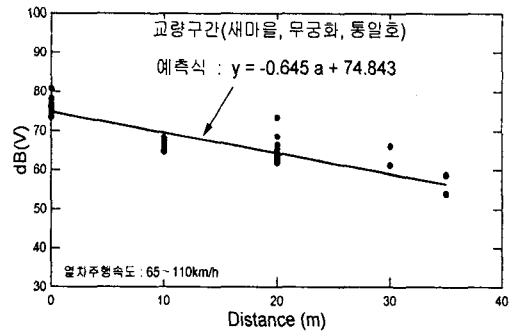
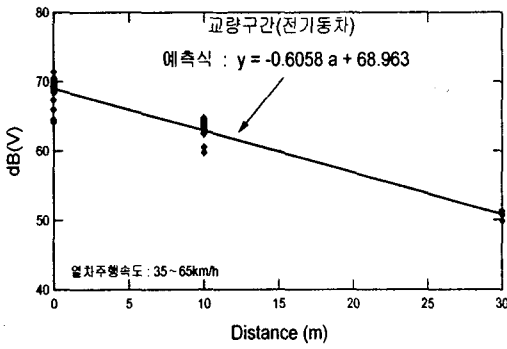
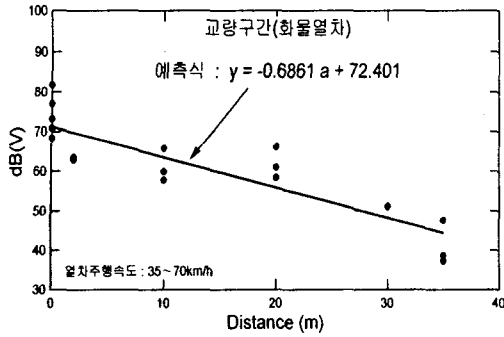


Fig. 4. Train-induced Vibration Measuring System on the Ground Area nearby Bridge

차량별, 수진거리에 따른 진동실측데이터의 D/B 구축을 통해서 지반진동예측 실험식을 산정하였다.

실험식에 적용된 데이터는 지반진동의 연직성분으로 인체감각보정을 수행한 침묵으로부터의 수진거리 1~40m 이내의 진동레벨[dB(V)]이다. 새마을·무궁화·통일호, 화물열차, 전기동차에 대해서 측정데이터를 회귀분석한 결과는 다음과 같다.





6. 지반진동의 거리감쇠 특성

진동원에서 발생하는 진동은 차량과 궤도의 상호작용, 궤도와 지반의 상호작용에 의해 지반으로 전파되어 거리의 함수로 감쇠된다. 그러한 거리감P쇠의 일반적인 특성은 다음과 같다.

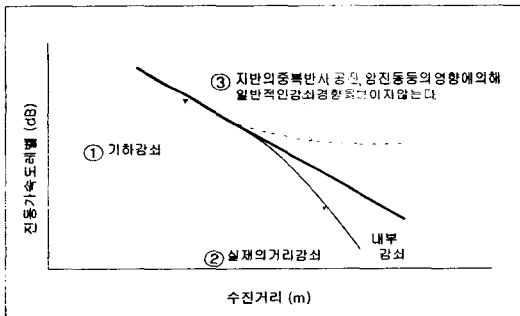


Fig. 5. General Tendency of Distance Damping

본 연구를 통해 현장진동측정데이터의 분포를

살펴보면 토공구간의 경우에는 ③과 같이 지반의 토질구성에 의한 증폭반사, 공진 혹은 기타 진동원의 암진동에 의해 지수함수적으로 감쇠하지 않는 거리감쇠의 경향을 보였으며, 교량구간의 경우에는 기하감쇠가 지배적인 ①과 같은 감쇠경향을 나타냈다. 따라서 본 연구에서는 전형적인 기하감쇠와 토질의 내부감쇠에 의한 지수함수적으로 감쇠하는 일반적인 거리감쇠현상을 나타내지는 않았다.

7. 결론

본 연구를 통하여, 국내철도 노선 중 토공구간과 교량구간 중 중요 20개 구간을 선정하여 진동 Data Base 구축을 통해서 철도 지반진동을 예측할 수 있는 지반진동예측실험식을 산정하였다.

- * 새·무·통 ; 새마을·무궁화·통일호
- * a ; 수진거리 (m)
- * r^2 ; 결정계수

• 토공구간에서 수진거리에 따른 진동레벨을 지형별, 차종별로 산술평균하여 회귀분석한 결과, 다음과 같은 수진거리별 진동예측 실험식을 제안하였다. 각각의 예측실험식의 적합성을 평가하기 위해서 결정계수를 함께 산정하였다.

i) 평지구간

구분 차종	예측식	r^2
새·무·통	$y = -9.1861 \times \ln(a) + 95.398$	0.92
화물열차	$y = -9.1995 \times \ln(a) + 92.611$	0.78
전기동차	$y = -9.3937 \times \ln(a) + 95.979$	0.84

예측식 산정결과, 각 차종별 환경진동기준(야간 기준 60dB(V)) 이내의 수진거리는 다음과 같다.

- 새마을·무궁화·통일호 : 47m 이후
- 화물열차 : 26m 이후
- 전기동차 : 46m 이후

ii) 흙쌓지구간

구분 차종	예측식	r^2
새·무·통	$y = -10.846 \times \ln(a) + 94.581$	0.85
화물열차	$y = -13.726 \times \ln(a) + 98.642$	0.82

예측식 산정결과, 각 차종별 환경진동기준(야간

기준 60dB(V)) 이내의 수진거리는 다음과 같다.

새마을·무궁화·통일호 : 24m 이후

화물열차 : 16.5m 이후

iii) 땅깁기구간

땅깁기구간의 경우 수진점을 진동원(궤도 중앙부)으로부터의 수평거리(H) 성분과 연직거리(V) 성분을 함께 고려하였고 수평거리에 대한 연직거리의 비 즉, V/H 가 0.96이라는 특정한 값을 가질 때 최소진동레벨이 나타남을 알 수 있었다. 이러한 땅깁기구간의 지형에 따른 진동특성을 고려할 때 V/H 와 같은 변수는 민원예상지역의 선로구조물 설계 및 시공시 반영될 수 있을 것으로 사료된다.

구분 차종	예측식	r ²
새·무·통	$y = 20.903 \times (V/H)^2 - 40.2 \times (V/H) + 81.53$	0.83

예측식 산정결과, 연직거리(V)와 수평거리(H)의 비 (=V/H)가 0.96일 때, 62.2 dB(V)의 최소진동레벨을 얻었다.

- 궤도로부터 전파하는 지반진동은 지반의 토질구성에 의한 중복반사, 공진 혹은 기타 진동원의 압진동에 의해 지수함수적으로 감쇠하지 않는 거리감쇠 경향을 보였다.
- 교량구간에서 수진거리에 따른 진동레벨을 차종별로 산술평균하여 회귀분석한 결과, 다음과 같은 수진거리별 진동예측실험식을 제안하였다. 토공구간과 마찬가지로 각각의 예측실험식의 적합성을 평가하기 위해서 결정계수를 함께 산정하였다.

구분 차종	예측식	r ²
새·무·통	$y = -0.645a + 74.843$	0.80
화물열차	$y = -0.6861a + 72.401$	0.88
전기동차	$y = -0.6058a + 68.963$	0.99

예측식 산정결과, 각 차종별 환경진동기준(야간 기준 60dB(V)) 이내의 수진거리는 다음과 같다.

새마을·무궁화·통일호 : 23m 이후

화물열차 : 18m 이후

전기동차 : 15m 이후

- 교량하부 교각으로부터 전파하는 지반진동은 교량형식(강, 강합성, 콘크리트교량)에 의한 영향보다는 교각하부지조건 및 지반특성에 더 큰 영향을 받으며 기하감쇠가 지배적인 거리감쇠 경향을 보였다.

참고문헌

1. 천병식, 오재웅(1993), "지반진동 영향과 대책", 건설연구사, pp.11~44.
2. 한국철도기술연구원(2000), "철도 소음·진동의 효율적 저감방안 연구", pp.280~288.
3. Federal Transit Administration U. S. Department of Transportation (1995), "Transit Noise and Vibration Impact Assessment", pp.7-1~9-4.
4. Federal Railroad Administration U. S. Department of Transportation (1998), "High Speed Ground Transportation Noise and Vibration Impact Assessment", pp.6-1~7-6.
5. 塩田正純(1986), "公害振動의 豫測手法", 井上書院, pp.128~142.