

궤도지지구조물의 진동특성과 예측

Vibration Characteristics and Prediction of Railroad Track Supporting Structures

황선근¹, 엄기영², 고태훈³

Seon-Keun Hwang, Ki-Young Eum, Tae-Hoon Koh

Key Words : Railroad Track Supporting Structures(궤도지지구조물), Empirical Ground Vibration Estimation Equation(지반진동예측실협식) Frequency Analysis(주파수 분석), Vibration Level(진동레벨), Ground Vibration(지반진동)

Abstract

In this study, field measurements of vibration on the structures supporting railroad track were performed. The vibration data obtained were analyzed to find out any correlation between its magnitude and several factors such as type of bridges, distance from the track, type of train, frequency characteristics, etc. As a result, the magnitude of vibration turned out to be the highest in the steel bridge, the concrete bridge and steel-concrete combined bridge were the next in descending order. It was also found that the dynamic characteristics of ground were the most important factors among several affecting vibration near by the railroad track.

And the empirical ground vibration estimation equation for estimating ground vibration was developed. The proposed equation with respect to distances from the railroad could be easily used for the estimation of ground vibration at the residential areas nearby the track.

1. 서론

열차주행 시 발생된 진동은 흔들림, 균열 등을 일으켜 구조물의 사용성 및 안전성에 악영향을 주게 되고 주변의 생활환경에 공해를 유발시킨다. 이러한 진동이 전파매개체인 지반을 통해 인근으로 전파되어 발생하는 문제를 해결하는 방법으로는 진동원인 궤도구조나 수신점인 인근 구조물에서의 대책과 함께 진동전파 매개체인 지반에서의 대책이 있다. 이러한 대책을 세우기

위해서는 먼저 선로구조물, 궤도, 지반의 진동특성과 경향을 파악하여야 한다. 현재 철도에서 문제가 되는 연변진동의 영향을 저감하기 위해서는 열차의 특성, 속도, 선로 및 지반 상 전달경로, 구조물의 특성 등 여러 가지 영향요인을 고려하여야 하나 영향요인 기여도의 상호 관련성과 연변진동의 크기를 예측하지 못하고 있다. 이에 선로연변과 선로구조물의 특성에 따른 연변진동을 저감하기 위하여서는 각 조건과 특성에 따른 진동측정/분석 데이터의 축적이 요구된다.

본 연구에서는 철도의 운행으로 인해 발생하는 도심지역에서의 주요한 진동원의 하나인 궤도지지구조물에서의 연변진동의 현장측정과 실

¹ 정회원, 한국철도기술연구원 책임연구원

² 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원

³ 한국철도기술연구원 주임연구원

태조사를 통하여 교량형식별, 선구별, 운행조건별, 거리별, 주파수별 특성과 방향별로 진동레벨과의 상관관계와 그 영향을 분석하였다. 또한 수진거리별 진동측정 데이터 베이스 구축을 통해서 철도 지반진동의 예측을 위한 진동예측 실험식을 개발하였다.

2. 철도진동 특성 및 측정/분석 방법

2.1 철도진동 전파 특성

철도에 인접한 구역에서 발생하는 진동의 전형적인 주파수는 100 Hz 이하에서 나타나고 있으며다. 특히, 차륜/궤도(Wheel/Track)의 공진주파수와 관련된 40~100 Hz 사이에서 주로 발생하고 있다. 역사(驛舍)나 지하철과 같은 구조물 통과시 20 Hz 이하의 저주파 고체음이 문제가 되는 경우가 발생하기 때문에 진동과 소음 측정 및 평가에 유의할 필요가 있다. 그리고 철도에 기인하는 진동문제는 Fig. 1과 같이 복잡한 경로와 다양한 특성의 매질을 통하여 전파하기 때문에 단순한 해석만을 이용한 진동예측은 많은 노력과 시간이 요구되고 있다. 이 분야의 기본적인 진동예측은 많은 경험적인 식과 데이터를 활용하는 추세이다.

철도에서 진동문제는 기본적으로 소음과는 다르게 100 Hz 이하의 저주파수 영역의 문제이다. 이 주파수 영역에서 나타나는 주된 진동원은 침목 통과주파수(Sleeper passing frequency)와 차륜 통과주파수(Wheel passing frequency)로서 40~80 Hz에서 최대값을 나타낸다. 그리고 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(discontinuities), 불균질(inhomogeneities) 특성을 가지고 있기 때문

에 이론적으로 지반진동의 전파특성을 예측하는 것은 거의 불가능하다. 특히, 지반진동이 건물에 입사할 경우의 응답을 예측하는 문제는 대부분 경험적인 실험 데이터를 활용하는 실정이다. 이러한 실정은 지반 진동의 예측을 위해서는 신뢰성 있는 많은 실측 데이터의 확보가 필요하다.

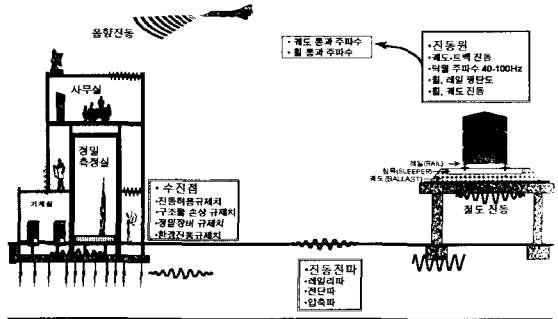


Fig. 1 Characteristics of Train Vibration

2.2 궤도지구조물 진동 평가

궤도지구조물에서의 진동의 예측이나 대책을 위한 평가는 일반적인 철도진동 평가와 마찬가지로 진동원, 전파경로, 수진구조물 관점에서 평가가 이루어져야한다. 먼저 진동원 관점에서 살펴보면 열차운행 조건(구간 통과속도, 열차하중), 교량의 특성, 선로상태 등에 따라 진동원의 특성과 진동문제의 양상이 달라질 수 있으므로 진동원의 문제점을 정확하게 산정하기 위해 신뢰성 있는 측정자료와 예측기술이 필요하다. 두 번째 평가과정은 진동전파 경로에 관한 부분이며, 교량상부, 거더 그리고 교각은 철도진동이 연변수진 구조물에 전파되는 주된 경로이므로 이 부분에 대한 측정 및 분석도 지반진동의 전파특성과 함께 고려되어야 한다. 또한 최근에는 교량을 건설할 경우 내진설계 및 방진을 고려하여 탄성받침 등을 사용하는 경우가 많으므로, 이에 대한 설계기준 및 효과를 검증해야한다. 최종적으로 평가를 수행해야할 부분은 수진구조물

2.3.3 주파수 분석 및 현장 진동보정 방법

본 연구에서는 일반적으로 이용되고 있는 주파수분석 방법인 FFT알고리즘(Fast Fourier Transform Algorithm)을 이용하여 진동분석을 수행하였으며, 진동보정 및 진동레벨 평가를 위해 1/3 옥타브 밴드로 환산하여 진동특성 평가를 수행하였다. 진동가속도레벨(vibration acceleration level:VAL)은 진동의 물리량을 dB로 나타낸 것으로, 아래 식 (1)과 같다.

$$VAL = 20 \log \left(\frac{A_{rms}}{A_r} \right) \text{ dB} \quad (1)$$

여기서, $A_r = 10^{-5} \text{ m/sec}^2$: 진동가속도 레벨
 A_{rms} : 대상 진동의 가속도 실효치

진동레벨(vibration level : VL)은 진동가속도레벨계의 감각보정을 통하여 측정된 값을 인체의 감각량으로 환산된 것으로 식 (2)로 표시할 수 있으며, 그 단위의 표기는 수직 및 수평 감각보정후 dB(V)로 나타내었다.

$$VL = VAL(\text{진동가속도 레벨}) + W_n(\text{대역별 보정치})$$

여기서, W_n 은 인체감각에 따른 보정값으로, 국내에는 철도진동 허용기준과 인체감각보정에 관한 규정은 아직까지는 없다. 따라서 본 연구에서는 ISO-R2631의 규정을 적용하였다.

3. 현장 진동측정 및 분석 결과

레도지지구조물 형식에 따른 동특성을 파악하기 위해 강 교량, 강합성 교량, 콘크리트 교량으로 구분하고 열차특성에 따라 전기동차 구간과 디젤동차 구간에 대해 Table 1에 보이는 교량에 대해서 진동측정을 실시하였다. 전기동차 구간은 원효가도교(강 교량), 금정고가교 직선부(콘크리트 교량), 금정고가교 곡선부(강합성 교량)이고, 디젤동차 구간은 원주천교(강 교량), 오정고가교(콘크리트 교량), 오정천교(강합성 교량)이다. 분

석은 수직(z)방향에 대한 진동레벨을 산술평균하여 나타내었다.

Table 1 Characteristics of Railroad Track Supporting Structures

교량명	교량형식	길이(m)
원효가도교	특수 조상형 강교(직선부)	31
금정고가교	① 강합성교(R=280) ② 콘크리트교(직선부)	2,125
① 오정고가교	① 콘크리트교(직선부)	① 807
② 오정천교	② 강합성교(R=600)	② 201
원주천	판형 강교(직선부)	137

3.1 전기동차 구간

(1) 원효가도교(서울-남영) : Table 2

- 측정위치 : 서울역 기점(1,570~1,600 m)
- 측정지점 : 남영역주변의 직선구간
- 교량형식 : 강 교량
- 레일종류 : 장척레일, 50 kgN
- 침목종류 : 목침목

Table 2 Vibration Level of Won-Hyo Road Bridge

위 치	차 종	진동레벨 dB[V]
		전기동차
교량상부	① 침목위	112
	② 경간중앙	100
	③ 경간단부	95
교량하부	④ 교각상부 2 m	77
	⑤ 교각하단지반	78
	⑥ 수진점(10 m)	62
열차통과속도 (km/h)		45

(2) 금정고가교(산본-금정) 직선구간 : Table 3

- 측정위치 : 안산선 금정역 기점(1,850 m)
- 측정지점 : 하행선 직선구간
- 교량형식 : 콘크리트 교량
- 레일종류 : 장대레일, 50 kgN
- 침목종류 : PC침목, 자갈도상

Table 3 Vibration Level of Kuem-Jung Elevated Railway Bridge (Straight Line Sector)

위 치	차 종	진동레벨 dB[V]
		전기동차
교량상부	① 침목위	88
	② 경간중앙	78
	③ 경간단부	79
교량하부	④ 교각상부 2 m	68
	⑤ 교각하단지반	67
	⑥ 수진점 (10 m)	62
	⑦ 수진점 (30 m)	51
열차통과속도 (km/h)		52

- 레일종류 : 장척레일, 50 kgN
- 침목종류 : 목침목, 자갈도상

Table 5 Vibration Level of Ojung Elevated Railway Bridge

위 치	차 종	진동레벨 dB[V]			
		새마을	무궁화	화물	평균
교량상부	① 침목위	115	118	108	117
	② 경간중앙	93	91	90	91
	③ 경간단부	94	97	93	96
교량하부	④ 교각하단지반	81	80	79	80
	⑤ 수진점 (20 m)	63	63	63	63
열차통과속도 (km/h)		85	86	53	83

(3) 금정고가교(산본-금정) 곡선구간 : Table 4

- 측정위치 : 안산선 금정역 기점(900 m)
- 측정지점 : 상행선 곡선구간
- 교량형식 : 강합성 교량
- 레일종류 : 장척레일, 50 kgN
- 침목종류 : 목침목, 자갈도상
- 곡선반경 : R=280

Table 4 Vibration Level of Kuem-Jung Elevated Railway Bridge (Curved Line Sector)

위 치	차 종	진동레벨 dB[V]
		전기동차
교량상부	③ 침목위	85
	④ 경간중앙	71
	⑤ 경간단부	74
교량하부	⑥ 교각상부 2 m	69
	⑦ 교각하단지반	68
	⑧ 수진점 (10 m)	63
열차통과속도 (km/h)		33

(2) 오정천교(대전조차장-서대전) : Table 6

- 측정위치 : 대전조차장 기점 서대전 방면 (1,220 m)
- 측정지점 : 하행선 곡선구간
- 교량형식 : 강합성 교량
- 레일종류 : 장척레일, 50kgN
- 침목종류 : PC침목, 자갈도상
- 곡률반경 : R=600

Table 6 Vibration Level of Ojung-Chun Bridge

위 치	차 종	진동레벨 dB[V]				
		새마을	무궁화	통일	화물	평균
교량상부	① 침목위	104	98	93	109	101
	② 경간중앙	95	93	97	91	93
	③ 경간단부	94	95	92	94	94
교량하부	④ 교각하단지반	77	76	74	76	76
	⑤ 수진점 (10 m)	66	67	65	66	66
열차통과속도 (km/h)		80	86	65	52	78

3.2 디젤동차 구간

(1) 오정고가교(대전조차장-서대전) : Table 5

- 측정위치 : 대전선 하선 대전조차장 기점 (1,500 m)
- 측정지점 : 하행선 직선구간
- 교량형식 : 콘크리트 교량

(3) 원주천교(원주-유교) : Table 7

- 측정위치 : 청량리역 기점 (109.235 km)
- 측정지점 : 직선구간
- 교량형식 : 판형 강 교량
- 레일종류 : 장척레일, 50 kgN
- 침목종류 : 목침목

Table 7 Vibration Level of WonJu-Chun Bridge

위 치	차 종	진동레벨 dB[V]				
		새마을	무궁화	통일	화분	평균
교량상부	① 침목위	108	110	105	107	111
	③ 경간단부	107	112	113	107	108
교량하부	④ 교각상부 2 m	69	74	73	74	73
	⑤ 교각하단지반	76	78	73	75	76
	⑥ 수진점 (10 m)	69	72	68	68	70
열차통과속도 (km/h)		85	74	94	46	75

4. 진동 특성 및 평가

강교량, 강합성 교량, 콘크리트 교량의 주파수 특성과 교량형식, 전파거리, 차종, 열차주행속도에 따른 진동특성을 수직방향(z)에 대한 진동레벨을 산술평균하여 비교 분석하였다.

4.1 주파수별 특성 및 평가

4.1.1 전기동차 구간

(1) 교량상부

Fig. 5에서 보는 바와 같이, 전기동차 구간에서 궤도지지구조물 자체의 주파수 특성 결과 10 Hz 이하와 30~50 Hz 주파수 대역에서 최대치가 나타났으며 가장 지배적인 주파수 성분은 35 Hz로 강 교량, 강합성 교량, 그리고 콘크리트 교량이 각각 90, 73, 77dB(V)의 최대 진동레벨을 나타냈다. 강합성 교량(금정고가교 곡선구간)의 경우 전기동차의 낮은 통과속도에 의해 발생한

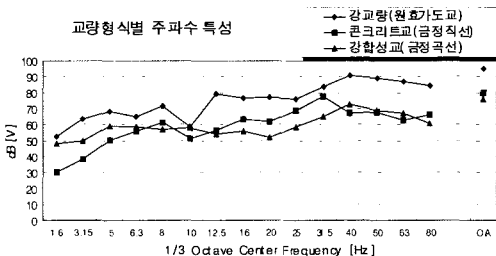


Fig. 5 Frequency Characteristics of Electric Locomotive on Bridge Slab

작은 기진력으로 인해 콘크리트 교량 보다 낮은 진동레벨을 나타냈다.

(2) 10 m 떨어진 수진점

수진점의 경우, Fig.6에서 보는 바와 같이, 강 교량은 35 Hz 주파수 성분이 가장 지배적으로 나타났으며 뚜렷한 최대치(peak)를 나타냈다. 그러나 콘크리트 교량의 경우는 12~40 Hz의 광범위한 주파수 대역에서 최대치를 나타냈고 강합성 교량은 16 Hz 주파수 성분에서 최대치를 갖는 복잡한 주파수 특성을 나타냈다.

이렇듯 지반으로 진동이 전파될수록 지반진동은 궤도지지 형식이나 열차에 의한 영향보다는 지반의 특성에 따라 서로 상이한 주파수 특성을 갖는 것으로 판단된다.

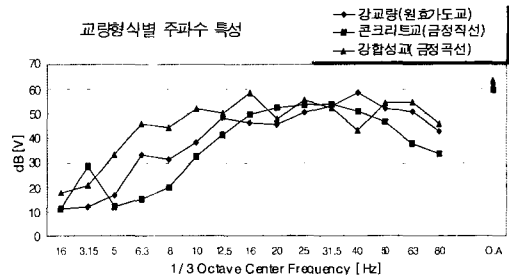


Fig. 6 Frequency Characteristics of Electric Locomotive on Ground Receiver

4.1.2 디젤동차 구간

교량상부에서는 저역(3~5 Hz)에서 진동레벨의 최대치가 나타났으나 지반으로 전파되어 10 m 떨어진 수진점에서는 저역 성분은 사라지고 중역(12.5 Hz 부근)과 고역(25~50 Hz) 성분이 합해진 폭넓은 주파수 대역에서 최대 진동레벨이 분포하였다.

(1) 교량상부

교량상부에서는, Fig. 7에서 보는 바와 같이, 강합성 교량과 콘크리트 교량의 경우 중역(12.5 Hz)과 고역(25-50 Hz)의 주파수 영역에서 진동

레벨의 최대치(peak)가 나타났으나 강 교량의 경우는 약간 높은 주파수 대역(중역(16 Hz), 고역(63 Hz))에서 최대치(peak)가 나타났다.

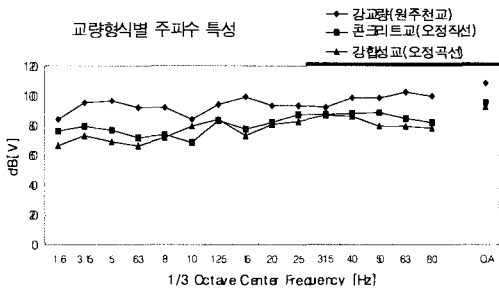


Fig. 7 Frequency Characteristics of Diesel Locomotive (Saemaul) on Bridge Slab

(2) 10 m 떨어진 수진점

수진점에서는, Fig. 8에서 보는 바와 같이, 진동특성이 교량형식보다는 전파 매개체인 지반의 특성에 따라 서로 상이한 주파수 특성을 나타냈다. 하지만 최대치는 교량의 지배적인 주파수 영역 내에서 나타났으므로 교량에서의 방진시공을 수행함으로써 수진부의 방진효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

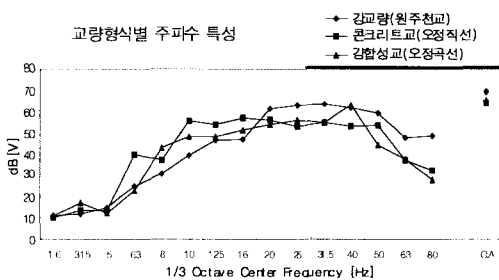


Fig. 8 Frequency Characteristics of Electric Locomotive on Ground Receiver

4.2 교량형식별 특성 및 평가

교량상부에서는 강 교량의 진동레벨이 강합성 교량이나 콘크리트 교량에 비해 전기동차 구간에서 16dB(V) 이상, 그리고 디젤동차 구간에서

10dB(V) 이상 크게 나타났으나 진동이 지반으로 전파될수록 교량형식에 의한 영향보다는 교각하부지지 조건 및 지반특성에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

전기동차 구간에 대해서는 Fig. 9에, 디젤 동차구간의 새마을호 및 무궁화호에 대해서는 각각 Fig. 10 및 Fig. 11에 주어져 있다.

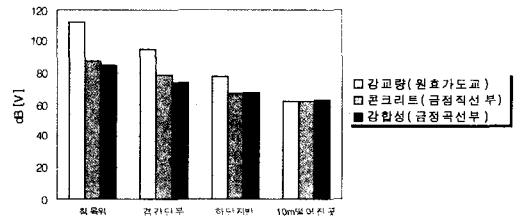


Fig. 9 Characteristics with respect to Type of Bridges

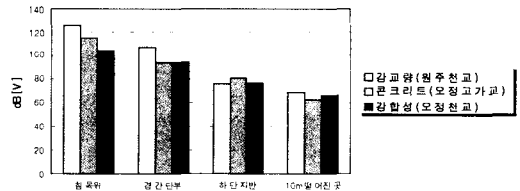


Fig. 10 Characteristics with respect to Type of Bridges (Saemaul)

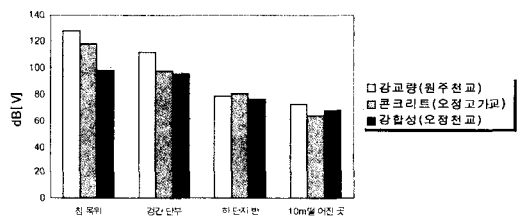


Fig. 11 Characteristics with respect to Type of Bridges (Mugunghwa)

4.3 전파 거리별 특성 및 평가

궤도지구조물 자체의 진동 특성을 파악할 수 있는 교량상부에서 교각하단지반, 수진점의 전파 거리별 진동감쇠는 강 교량의 경우가 가장 크고, 콘크리트 교량과 강합성 교량은 비슷한 수

준을 나타내고 있으나 지반진동과의 경우 수진점으로 전파되면서 교량형식에 관계없이 기하감쇠(geometric damping)로 인한 지반진동 레벨은 비슷한 수준을 나타내고 있음을 알 수 있다. 전기동차와 새마을, 무궁화 주행시의 평균 진동레벨은 각각 Fig. 12, Fig. 13 및 Fig. 14와 같다.

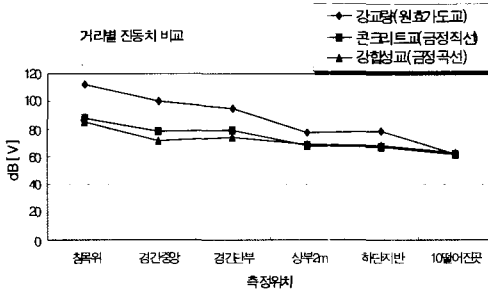


Fig. 12 Characteristics with respect to Distance from the Track (Electric Locomotive)

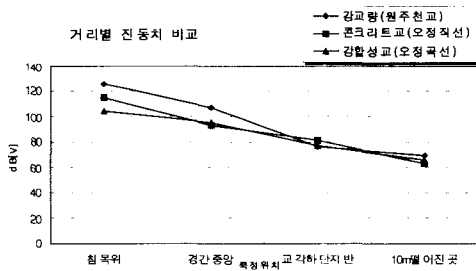


Fig. 13 Characteristics with respect to Distance from the Track (Saemaul)

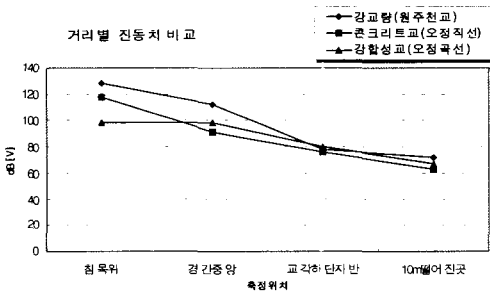


Fig. 14 Characteristics with respect to Distance from the Track (Mugunghwa)

4.4 차종별 특성 및 평가

차종별 진동레벨은 새마을호, 무궁화호, 통일호, 그리고 화물차에 대해 궤도지구조물별로 비교 평가하였다.

열차의 특성(차량의 현가장치, 중량, 주행속도, 레일의 마모상태 등), 교량의 특성(궤도면의 평탄성 등)등과 같은 여러 가지 복합적인 영향요인으로 인해 교량상부에서 강 교량과 콘크리트 교량의 경우, 무궁화호의 진동레벨이 가장 크게 나타났으며 또한 지반으로 진동이 전파하면서 열차 종류에 의한 진동레벨 차이는 거의 유사한 값을 보여 교각하단 지지조건 및 지반 등 선로 주변환경에 의한 영향이 큰 것으로 나타났다. 각 교량별 새마을, 무궁화, 통일, 화물차 주행 시 교량별 평균 진동레벨을 비교 평가하였다. 그 결과는 각각 Fig. 15, Fig. 16 및 Fig. 17과 같다.

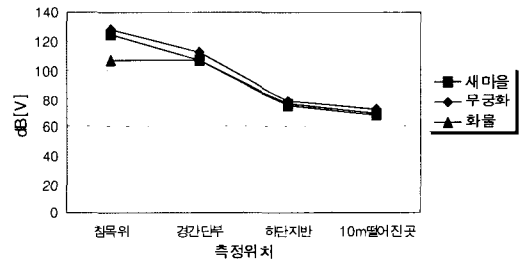


Fig. 15 Characteristics with respect to Type of Train (Steel Bridges)

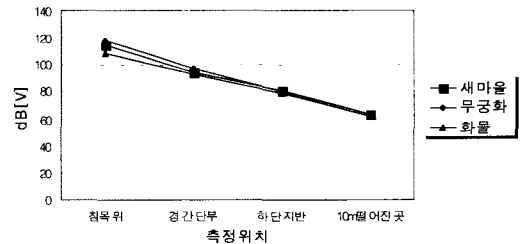


Fig. 16 Characteristics with respect to Type of Train (Concrete Bridges)

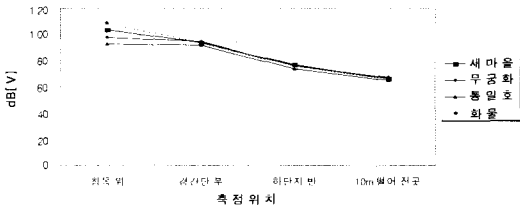


Fig. 17 Characteristics with respect to Type of Train (Steel-Concrete Combined Bridges)

4.5 속도별 특성 및 평가

열차주행속도가 증가함에 따라 궤도에 작용하는 충격하중이 증가함으로써 경험적으로 두배의 속도증가는 4~6 dB의 진동레벨의 증가를 수반한다고 알려져 있다. 본 연구에서는 열차속도에 따라 모든 궤도지지구조물 형식과 열차종류에 관계없이 속도가 증가할수록 진동레벨이 증가했으나 속도비와 진동레벨 증가비가 일정한 경향을 보이지는 않았다. 또한 진동이 지반으로 전파됨에 따라서는 교각하단 지지조건 및 지반환경에 따라 좌우되는 것을 알 수 있다. 금강제1교에서 측정된 새마을, 무궁화호에 대한 속도별 평균 진동레벨은 각각 Fig. 18 및 Fig. 19와 같다.

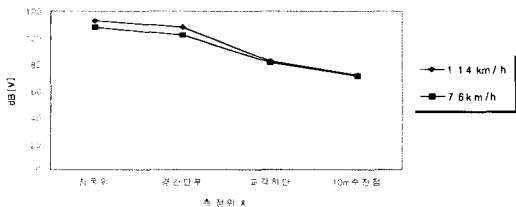


Fig. 18 Characteristics with Train Velocity (Saemaul)

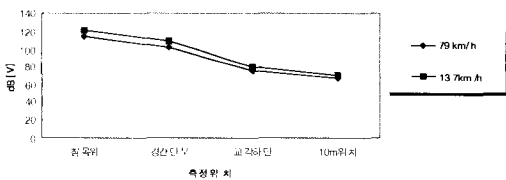


Fig. 19 Characteristics with Train Velocity (Mugunghwa)

5. 지반진동 예측

교각하단지반으로부터 수신거리 30 m 이내의 수신거리별 수직방향(z)에 대한 진동레벨(dB(V))을 이용하여 지반진동 예측실험식을 산정하였다.

지반진동과의 경우 수신점으로 전파되면서 교량형식에 관계없이 기하감쇠(geometrical damping)로 인한 지반진동레벨은 비슷한 수준을 나타내고 있음을 현장 측정을 통해서 알 수 있었다.

따라서 지반진동 예측실험식을 교량형식에 의하지 않고 지반진동 응답의 영향인자인 열차운행속도를 고려하여 60 km/h 이하의 운행속도로 측정된 전기동차 구간과 60 km/h 이상으로 운행되었던 새마을호, 무궁화호, 통일호의 디젤동차 구간으로 구분하여 산정하였다.

회귀분석한 예측식의 적합성을 평가하기 위해 상관계수(r^2)를 함께 고려하였다.

전기동차 구간에 대해서는 Fig. 20과 같으며, 지반진동 예측실험식은 식 (3)과 같다.

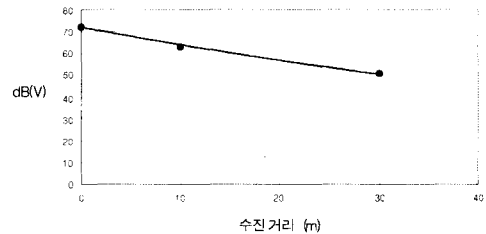


Fig. 20 Empirical Ground Vibration Estimation Equation with respect to Receiver Distances from the Track (Electric Locomotives)

$$y = a_e \times e^{-0.0119 x} \tag{3}$$

여기서, y : 수신점에서의 진동레벨(dB(V))
 a_e : 전기동차운행구간의 진동원(교각하단지반)에서의 진동레벨(dB(V))
 x : 수신점까지의 거리 (m)
 r^2 (상관계수) : 0.9967

그리고, 디젤동차 구간에 대해서는 Fig. 21과 같으며, 지반진동 예측실험식은 식 (4)와 같다.

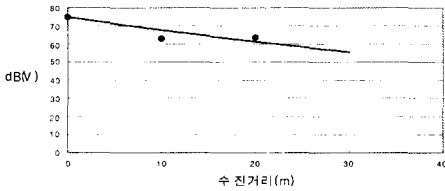


Fig. 21 Empirical Ground Vibration Estimation Equation with respect to Receiver Distances from the Track (Diesel Locomotives)

$$y = \alpha_d \times e^{-0.009x}$$

여기서, y : 수신점에서의 진동레벨(dB(V))
 α_d : 디젤동차 운행구간의 진동원(교각하단지반)에서의 진동레벨(dB(V))
 x : 수신점까지의 거리 (m)
 r^2 (상관계수) : 0.655

위 전기동차 구간과 디젤동차 구간의 경우를 비교해보았을 때 모두 진동원으로부터 가까운 거리에서 진동이 급격히 감쇠하고 거리가 멀어짐에 따라 감쇠가 완만해지는 경향을 나타냈다. 또한 진동원에서 10 m 떨어진 수신점에서 10 dB(V) 정도의 급격한 에너지의 감소를 나타내고 있음을 알 수 있다.

일반적으로 지반진동의 거리감쇠는 토질의 내부감쇠에 의해 지수적으로 감쇠하나 디젤동차 구간의 경우 지반의 토질구성에 의한 중복반사, 공진 또는 기타 진동원의 암진동에 의해 지수적으로 감쇠하지 않는 경우도 있음을 알 수 있다. 향후 측정 데이터의 확보를 통해서 예측식의 보완이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 궤도지구조물(강 교량, 콘크리트 교량, 강합성 교량) 형식에 따른 열차주행에 의해 유발되는 진동특성을 파악하기 위해서 각 교량에서의 주파수 특성과 교량형식, 전파거리, 차종(새마을, 무궁화, 통일, 화물, 전기동차) 및 속도에 따른 진동레벨과의 상관관계를 분석하였다.

그리고 이러한 철도연변 진동측정의 결과를 이용하여 D/B를 구축하고 지반진동 예측을 위한 지반진동 예측 실험식을 제안하였다. 이러한 철도진동의 예측방법은 기존의 철도에 대하여 수신거리에 따른 진동을 실측, 통계처리함으로써 전체적인 영향범위를 예측하고 철도를 신설하는 경우 철도진동의 영향을 예측하기 위하여는 유용할 것으로 판단된다.

본 논문의 결론은 다음과 같다.

본 논문의 결론은 다음과 같다.

(1) 주파수별 특성

전기동차 구간에서 궤도지구조물 자체(교량상부)의 주파수 특성은 강 교량, 강합성 교량, 콘크리트 교량 모두 10 Hz 이하 그리고 30-50 Hz 에서 최대치가 존재하는 유사한 형태를 갖고 있었고 가장 지배적인 주파수 영역은 35 Hz 성분이었다. 따라서 전기동차 구간에서 진동에 기인한 교량이나 수신구조물의 손실을 방지하기 위해서는 35 Hz 주파수 성분의 제어가 바람직하다. 디젤동차 구간의 경우에 있어서는 강 교량이 강합성 교량과 콘크리트 교량에 비해서 약간 높은 주파수 대역에서 최대 진동레벨을 나타냈으나 대체적으로 모든 교량에서 저역(3~5 Hz), 중역(12.5 Hz 부근), 고역(25-50 Hz)의 지배적 주파수 영역을 나타내고 있다.

10 m 떨어진 수신점의 경우는 전기동차 구간과 디젤동차 구간 모두 교량형식보다는 전파 매개체인 지반의 특성에 따라 진동특성이 좌우되어 교량상부에서 뚜렷하게 나타났던 저역의 주파수 성분은 사라지고 중역과 고역 성분이 합해진 폭 넓은 주파수 대역이 지배적으로 나타났다.

(2) 교량형식별 특성

교량상부에서는 강 교량의 진동레벨이 강합성

교량이나 콘크리트 교량에 비해 크게 나타났고 진동이 지반으로 전파될수록 교량형식에 의한 영향보다는 교각하부지지 조건 및 지반특성에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

(3) 전파거리별 특성

궤도지지구조물 자체의 진동특성을 파악할 수 있는 교량상부에서 교각하단지반, 수진점의 전파거리별 진동감쇠는 강 교량의 경우가 가장 크고, 콘크리트 교량과 강합성 교량은 비슷한 수준을 나타내고 있으나 지반진동파의 경우 수진점으로 전파되면서 교량형식에 관계없이 기하감쇠(geometrical damping)로 인한 지반진동레벨은 비슷한 수준을 나타내고 있음을 알 수 있다.

(4) 차종별 특성

열차의 특성(차량의 현가장치, 중량, 주행속도, 레일의 마모상태 등), 교량의 특성(궤도면의 평탄성 등)등과 같은 여러 가지 복합적인 영향요인으로 인해 교량상부에서 강 교량과 콘크리트 교량의 경우, 무궁화의 진동레벨이 가장 크게 나타났으며 또한 지반으로 진동이 전파하면서 열차종류에 의한 진동레벨차는 거의 유사한 값을 보여 교각하단지지조건 및 지반 등 선로 주변환경에 의한 영향이 큰 것으로 나타났다.

(5) 속도별 특성

열차주행속도가 증가함에 따라 궤도에 작용하는 충격하중이 증가함으로써 궤도지지구조물 형식과

열차종류에 관계없이 진동레벨이 증가했으나 속도비와 진동레벨 증가비가 일정한 경향을 보이지는 않았다. 또한 진동이 지반으로 전파됨에 따라서는 교각하단 지지조건 및 지반환경에 따라 좌우되는 것을 알 수 있다.

(6) 지반진동 예측실험식 산정

열차주행속도(60 km/h)를 기준으로 전기동차 구간과 디젤동차 구간(새마을, 무궁화, 통일호)에서의 예측식을 산정하였다. 향후 측정데이터의 축적을 통해서 지반진동예측실험식의 보완이 필요하다고 판단된다.

1) 전기동차 구간

$$y = a_e \times e^{-0.0119 x}$$

2) 디젤동차 구간

$$y = a_d \times e^{-0.0099 x}$$

참고문헌

1. 千柄植, 吳在應, “建設技術者를 위한 地盤振動影響과 對策”, 建設硏究社, 서울, pp. 11~44., 1993
2. 한국지반공학회, “진동 및 내진설계 - 지반공학시리즈 8”, 구미서관, 서울, pp. 161~170., 1997
3. 環境部, “騒音·振動公定試驗方法”, 서울, pp. 59~70, 1995
4. 吉岡 修, “鐵道沿線の地盤振動”, RTRI REPORT Vol. 11, No. 1, 1997.
5. 社団法人 日本鐵道施設協會, “鐵道 騒音振動 對策の硏究”, pp.55~72., 昭和52年