

철도교량의 진동측정 및 방진대책

Measuring the vibration and Vibration control of Railway Bridge

엄기영* · 정홍채** · 한성호***

Ki-young Eum, Heung-Cahi Chung, Sung-Ho Han

Key Words : reason for occurring vibration(진동발생원인), elevated bridge(고가교), measuring the vibration(진동측정) analyze the effect(영향분석)

ABSTRACT

There are many reasons for occurring vibration when trains run on the railway, but the typical vibration are occurring when the trains run on the elevated Railway bridge. For the settlement of the problems form the vibration, it must be performed to analyze the effect of the vibration to human bodies and adjacent area, and to establish the countermeasures. In this paper, we analyzed the effects of the vibration to the bridge itself and to adjacent structures by measuring the vibration of Yong-Dang Elevated Railway Bridge on Jeolla Line and adjacent area.

1. 서론

최근 들어 열차의 속도 향상과 운행빈도의 증가에 따라 철도 소음·진동에 의한 영향으로 철도연변에 위치한 학교, 병원, 아파트 주민 등의 불편이 날로 증가되고 있으며, 환경의 저해요건 중 소음과 진동으로 인한 공해는 인체에 즉각적인 반응을 일으킬 수 있다. 철도차량의 선로주행에 의한 소음과 진동은 여러 가지 요인으로 인해 발생되지만 그 중 대표적인 것으로는 열차가 고가교를 주행 중에 발생하는 소음·진동을 들 수가 있으며, 이를 해결하기 위해서는 열차 운행에 따른 소음·진동이 인체 및 인근 주변지역에 미치는 영향을 분석하고 민원해소 및 선로변에 쾌적한 환경조성을 위한 대책을 수립하여야 한다. 본 논문에서는 이러한 철도교량에서의 진동이 교량과 지반, 인접 구조물에 미치는 영향을 실험을 통하여 분석하고자 한다.

2. 철도진동 전파특성

철도에서 발생하는 진동 및 전파되는 진동의 크기는 열차

의 특성, 속도, 선로 및 지반상태, 전파경로 등 여러 가지 요인의 영향을 받으며 이러한 요인들의 상호 불확실성으로 인하여 아직은 진동의 크기를 정확하게 예측할 수 없다. 철도진동이라는 진동원의 가진작용으로 지반으로 전달된 진동 에너지가 탄성과 에너지의 형태로 지반이라는 매질을 통해 전파된다. 지반에 전달되는 탄성파는 압축파, 전단파로 구성되는 체적파 성분과 표면을 따라 전달되는 표면파성분으로 구성된다. 표면파가 체적파에 비하여 파 에너지가 크면서 거리증가에 따른 파 에너지의 영향은 점점 커지므로, 진동원으로부터 거리가 어느 정도 이상 떨어진 지점의 지반진동은 사실상 표면파에 의한 것이라 해도 과언은 아니다. 철도진동에 의해 발생하는 지반진동의 탁월주파수는 일반적으로 10~30Hz 정도이다. 따라서 지반의 물리적 특성을 알고 있다면 철도진동에 의해 영향을 받는 지반의 심도를 추정할 수 있다. 일반적으로 선로연변 지반의 경우 표면파 영향깊이는 지반진동의 탁월주파수 성분에 따라 3~35m의 범위에 걸쳐 폭넓게 변화한다. 그리고 지반에서 전달되는 철도 진동파가 지하 및 지상 장애물을 만나면 복잡하게 반사 또는 회절되면서 상쇄간섭이나 보강간섭을 일으킨다. 이러한 파동효과에 의하여 거리가 떨어진 곳에서도 큰 진동이 전달될 수 있으므로 지반진동의 거리감쇠 특성이 균질지반의 이상적인 변화양상에서 크게 벗어날 수도 있음에 유의해야 한다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원

E-mail : Kyeum@krri.re.kr

Tel : (031) 461-0234, Fax : (031) 461-0275

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 공학박사

*** 한국철도기술연구원 선임연구원, 공학박사

3. 진동측정

3.1 진동측정 일반사항

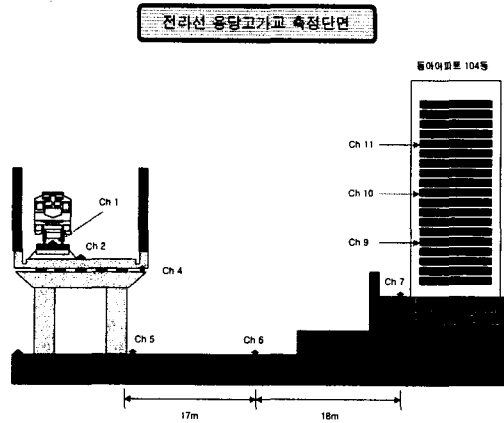
전라선 용당고가교에 대한 측정 일반사항은 다음과 같다.

- ▶ 측정지역 : 전라선 용당고가교
- ▶ 통과열차 : 새마을, 무궁화, 통일호, 화물열차
- ▶ 교량형식 : PC Beam / Preflex Beam 교량
- ▶ 측정방향 : 수직방향(Z방향)
- ▶ 가속도계 : PCB 393B12, PCB 393B31
- ▶ 기록계 : Sony 16-channel DAT Recorder
- ▶ 주파수분석기 : SA390
- ▶ 측정레벨 : 진동가속도레벨 (VAL, dB) 및 진동레벨 (VL dB(V))
- ▶ 측정주파수 대역 : 0~1KHz, 0~200Hz

3.2 측정위치 및 측정방법

열차진입 5초 전부터 열차 통과와 5초 후까지 전파되는 진동 신호를 기록계를 이용하여 기록하였다. 측정 주파수 범위는 진동원인 교량의 경우, 충격성 진동이 전파되어 상당히 넓은 주파수 범위를 갖고 교량을 가진시킴으로 이에 적합하도록 1~100Hz의 범위를 감지할 수 있는 가속도계를 이용하였다. 전파경로인 지반의 경우에는 진동이 전파되는 과정에서 고주파대역의 진동신호는 상당히 빠르게 감소되고 진동크기가 미약해지므로 진동주파수 범위가 1~200Hz이면서 감도가 뛰어난 가속도계를 사용하여 측정을 수행하였다. 현장 측정을 수행하기 전에 측정장비에 과부하(overload)가 걸리지 않을 때까지 충분히 열차를 통과시키면서 측정장비의 입력 범위를 설정하였다.

Algorithm)을 이용하여 진동분석을 수행하였으며, 진동 보정 및 진동레벨 평가를 위해 1/3 옥타브 밴드로 환산



하여 진동특성 평가를 수행하였다. 진동가속도레벨 (Vibration Acceleration Level, VAL)은 진동의 물리량을 dB로 나타낸 것으로, 식 (1)과 같다.

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

여기서, $A_r = 10^{-5} m/sec^2$: 진동가속도 레벨

A_{rms} : 대상진동의 가속도 실효치

진동레벨 (Vibration Level, VL)은 진동가속도 레벨계의 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.

$$VL = VAL(\text{진동가속도레벨}) + W_n(\text{대역별 보정치}) \quad (2)$$

여기서, W_n : 인체감각에 따른 보정값

4.2 열차진동분석 및 결과

주행열차로 인해 전달되는 열차진동을 다음과 같이 세 분야로 나누어 분석하였다. 먼저 진동원으로서의 교량 상부, 진동 전파경로상인 지반, 수신부 지역인 아파트를 중심으로 열차진동을 측정분석하였다. 본 측정결과와 분석에서 사용한 평가레벨은 진동원의 경우 진동가속도레벨 (dB), 수신부의 경우는 ISO-2631규정을 적용한 진동레벨 [dB(V)]을 사용하였고, 지반의 경우는 dB, dB(V) 모두를 평가레벨로 사용하였다.

측정위치		Channel No.	측정주파수 대역
교량	PC 침목	Ch 1	0~1KHz
	슬래브 #1	Ch 2	
	슬래브 #2	Ch 3	
	교각	Ch 4	
지반	교각하단지반	Ch 5	0~200Hz
	교각으로부터 17m 떨어진 지점	Ch 6	
	교각으로부터 35m 떨어진 지점	Ch 7	
아파트	지하 1층	Ch 8	0~1KHz
	지상 5층	Ch 9	
	지상 10층	Ch 10	
	지상 15층	Ch 11	

4. 측정결과 및 분석

4.1 주파수 분석 및 현장 진동보정 방법

본 연구에서는 일반적으로 이용되고 있는 주파수 분석 방법인 FFT알고리즘(Fast Fourier Transform

측정위치		정상운행(상행)		타력운행(상행)	
		화물차	통일호	화물차	새마을
진동원 dB	침목	133	138	133	128
	슬래브1	105	107	103	99
	슬래브2	103	102	102	95
	교각	100	101	95	92
전파경로 dB [dB(V)]	교각하단	75	79	74	73
	지반	[64]	[64]	[59]	[59]
	17m	50	55	51	48
	35m	41	36	39	37
수진부 dB(V)	지하1층	43	40	43	39
	5층	41	39	40	37
	10층	44	42	40	40
	15층	47	44	44	42

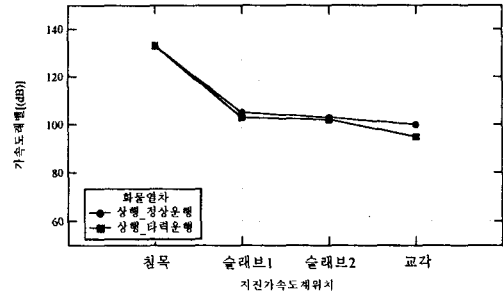
측정위치		정상운행(하행)			
		화물차	새마을	무궁화	통일호
진동원 dB	침목	134	129	132	-
	슬래브1	99	98	104	-
	슬래브2	102	102	99	-
	교각	96	96	98	-
전파경로 dB [dB(V)]	교각하단	75	80	78	71
	지반	[58]	[65]	[63]	[56]
	17m	52	58	55	47
	35m	40	44	43	39
수진부 dB(V)	지하1층	39	40	40	44
	5층	36	37	40	44
	10층	36	37	39	45
	15층	39	40	43	50

(1) 진동원

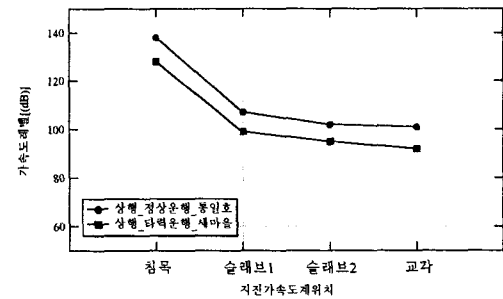
진동원의 경우 열차종류에 대한 타력운행시와 정상운행시 교량에서의 진동수준을 비교하였다. 하행방향 2km지점에 역사가 있는 관계로 상행하는 열차가 하행하는 열차보다 열차진동이 크게 나타날 것으로 추정되나, 진동측정결과 미소한 차이만 발생하였으므로 다른 위치에서의 측정결과는 상행열차만을 언급하기로 한다.

① 상행열차

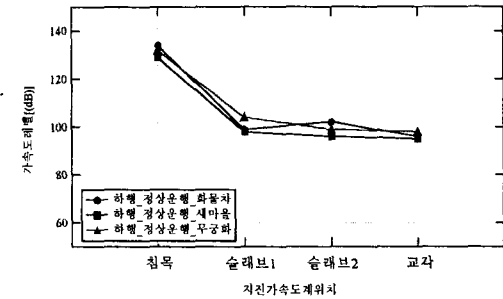
▶ 화물열차



▶ 일반열차



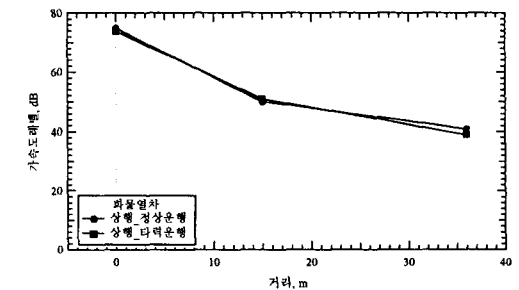
② 하행열차



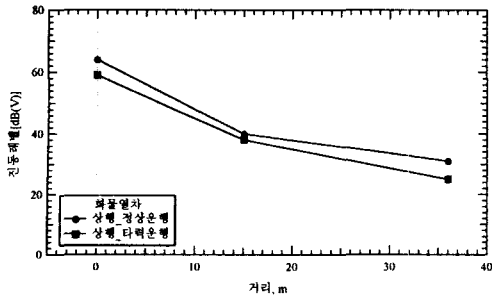
(2) 전파경로

① 상행열차

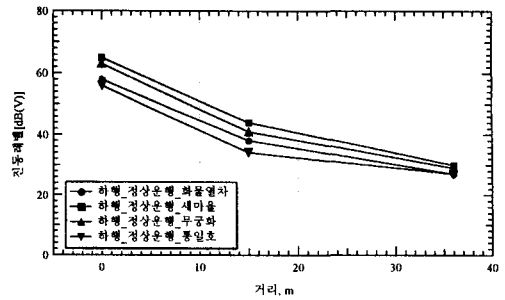
▶ 화물열차



교각하부지반 및 17m, 35m 떨어진 지반

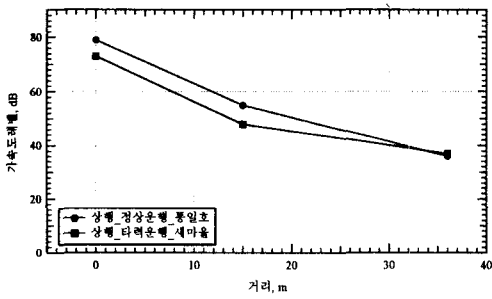


교각하부지반 및 17m, 35m 떨어진 지반

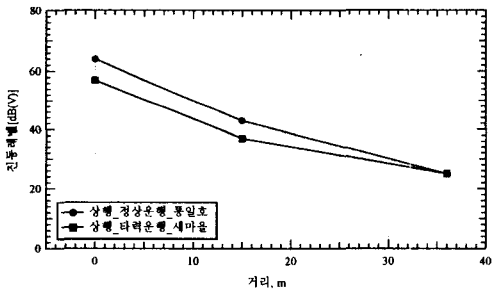


교각하부지반 및 17m, 35m 떨어진 지반

▶ 일반열차(통일호, 새마을호)

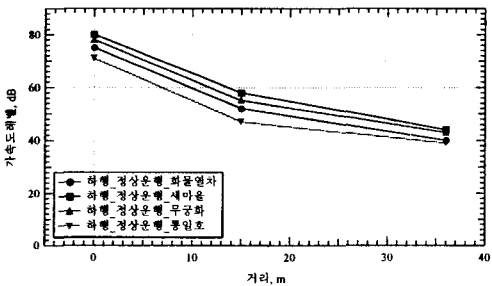


교각하부지반 및 17m, 35m 떨어진 지반



교각하부지반 및 17m, 35m 떨어진 지반

② 하행열차



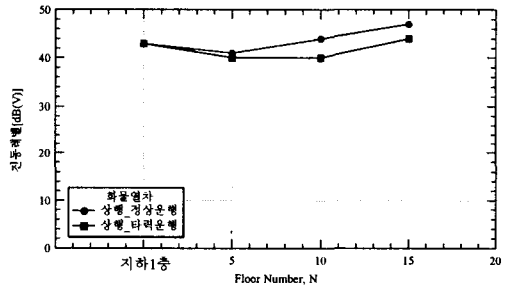
교각하부지반 및 17m, 35m 떨어진 지반

(3) 수진부

아파트로 전달되는 열차진동은 그림과 같이 전체적으로 약 60dB(V) 미만의 진동레벨을 보이고 있다. 화물열차에 대한 정상운행시와 타력운행시 진동레벨의 차이는 최대 4dB(V)의 차이를 나타냈으며 정상운행(상행) 화물열차의 경우 일반열차에 비해 1dB(V)~4dB(V)정도 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

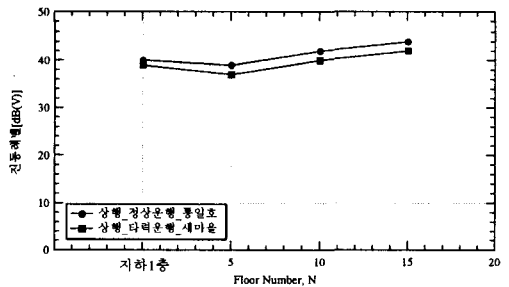
① 상행열차

▶ 화물열차



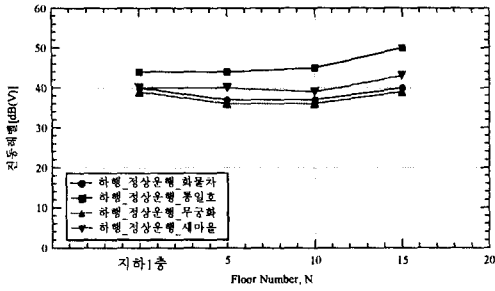
동아 아파트 지하 1층 및 지상 5, 10, 15층

▶ 일반열차(통일호, 새마을호)

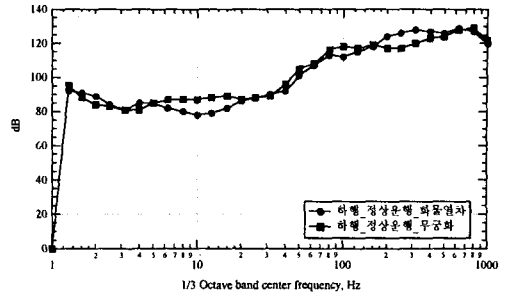


동아 아파트 지하 1층 및 지상 5, 10, 15층

② 하행열차



동아 아파트 지하 1층 및 지상 5, 10, 15층

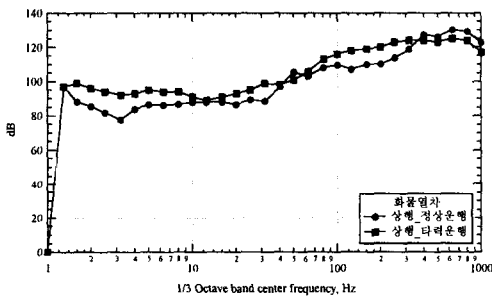


침목에서의 주파수별 진동특성(화물열차, 무궁화)

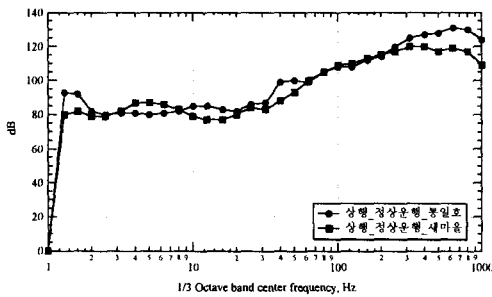
(4) 주파수별 진동특성

주파수별 진동특성을 분석하기 위해서 진동원(침목), 지반에서 35m전파경로(교각하단지반으로부터 35m 떨어진 지점) 그리고 수신부(아파트 15층)를 대상으로 하였다.

① 진동원(침목)

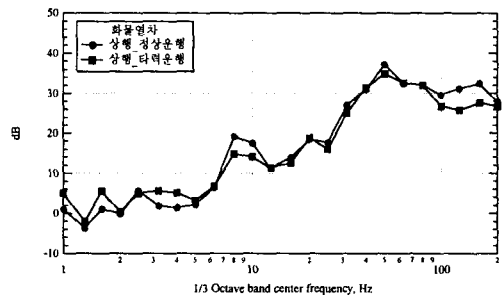


침목에서의 주파수별 진동특성(화물열차)

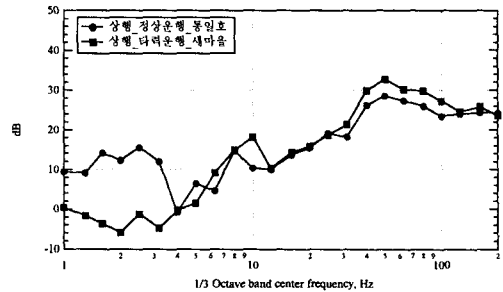


침목에서의 주파수별 진동특성(통일호, 새마을)

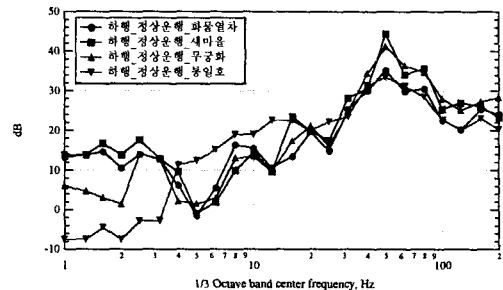
② 전파경로



교각하단지반에서 35m 떨어진 지점의 주파수별 진동특성(화물열차)

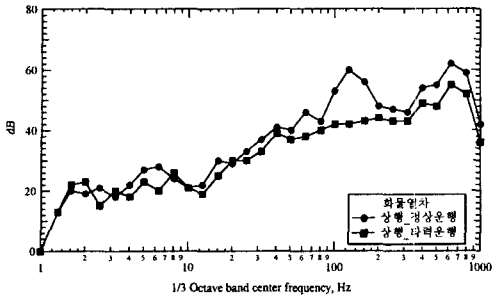


교각하단지반에서 35m 떨어진 지점의 주파수별 진동특성(통일호, 새마을)

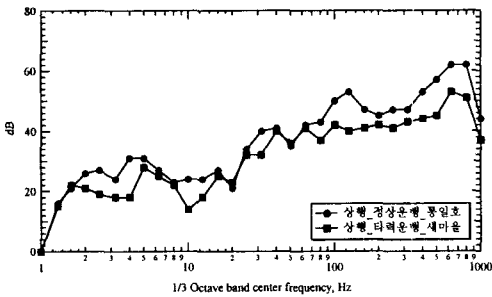


교각하단지반에서 35m 떨어진 지점의 주파수별 진동특성(하행열차)

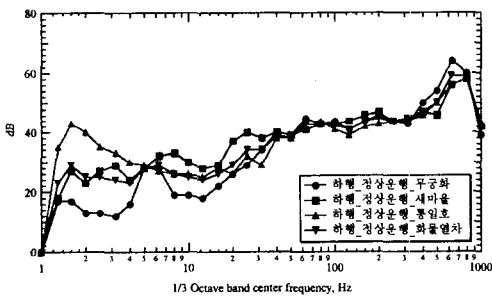
③ 수진원(아파트 15층)



아파트15층의 주파수별 진동특성(화물열차)



아파트15층의 주파수별 진동특성(통일호, 새마을)



아파트15층의 주파수별 진동특성(하행열차)

(3) 수진부를 보면, 아파트로 전달되는 열차진동은 전체적으로 약 60dB(V) 미만의 진동레벨을 보인다. 화물열차에 대한 정상운행시와 타력운행시 진동레벨의 차이는 최대 4dB(V)의 차이를 나타냈으며 정상운행(상행) 화물열차의 경우 일반열차에 비해 1dB(V)~4dB(V)정도 크게 나타났다.

(4) 주파수별 진동특성을 분석한 결과는, 침목에서의 탁월주파수 성분은 대략 그 주파수 대역 600~700Hz에서 나타난다. 지반 35m 지점에서의 탁월주파수 성분은 50Hz부근에서 나타났으며, 수진점 아파트 15층에서는 정상운행(상행)열차와 정상운행(하행) 무궁화의 경우 700~800Hz 대역에서 거의 비슷한 진동레벨을 나타냈다.

참 고 문 헌

- (1) Beskos, D.E., Dasgupta, B. and Vardoulakis, I.G., "Vibration Isolation Using Open or Filled Trenches", *comput. Mech.*, 1(1), 1986, pp.43~63.
- (2) Bhatti, M.H., "Vertical and Lateral Dynamic Response of Railway Bridges due to Nonlinear Vehicles and Track Irregularities", Ph.D. dissertation, Illinois Institute of Technology, Chicago, 1982.
- (3) Emad, K. and Manolis, G.D., "Shallow Trenches and Propagation of Surface Waves, *J. Eng. Mech.*", ASCE, 111(2), 1985, pp.279~282.
- (4) "고속철도 환경소음기준 및 진동기준에 대한 연구(진동 대책편)", 한국고속철도건설공단, 1995.
- (4) 한국지반공학회, "진동 및 내진설계", *지반공학 시리즈8* 1997, pp.161~195.

5. 결 론

- (1) 진동원에서 화물열차의 경우 교각부분에서 정상운행과 타력운행에 약 5dB정도의 차이를 보였고, 침목과 슬래브에서는 최대 약 2dB정도의 미소한 차이를 나타냈다. 일반열차의 경우 정상운행하는 통일호와 타력운행하는 새마을의 경우 최대 약 10dB정도의 차이를 보였다.
- (2) 전과경로에서는 정상운행하는 화물열차의 경우 타력운행에 비해 최대 6dB정도의 긴 진동수준을 나타냈고, 교각에서 35m 떨어진 지반에서 정상운행(상행) 화물열차를 제외한 나머지 열차는 종류와 열차운행에 관계없이 진동레벨이 25dB(V) 정도로 수렴하였다.