

<논 문>

고속철도 운행에 의한 진동전달특성 및 인접건물에 미치는 영향에 관한 연구

A Study on the Characteristics of Transferring Vibration and Effect of Nearby-Building Induced by the High-speed Train in Operation

배동명* · 신창혁* · 최철은* · 박상곤** · 백용진***

Dong Myung Bae, Chang Hyuk Shin, Chul Eun Choi, Sang Gon Park and Young Jin Baek

(2000년 10월 14일 접수 : 2001년 3월 27일 심사완료)

Key Words : High-Speed Train(고속전철), Vibration Measurement(진동 계측), Transferring Vibration(진동 전달), Vibration Reduction(진동 감소), Dynamic Response Analysis(동적 응답 해석)

ABSTRACT

The vibration induced by high speed train running on rail is dealt with as an environmental problem. The train induced vibration is characterized by moving loads at specific frequencies and soil conditions. In fact, it is predicted that the vibration sources are involved the wheel distance, number of cars, speed of operation, drift of rails, structural born vibration, etc.⁽¹⁾ In this paper the characteristics of transferring vibration induced by the high-speed train in operation is discussed. Field measurements was conducted at region from Chungnam Yungi So-jung-myan to Chungbuk Chungwon hyun-do-myun. In the near future, these data will be used as the fundamental data for establishment of the countermeasure for vibrational reduction of high speed train using the results of the field measurements and quantitative prediction of the vibration level

1. 서 론

고속철도 시스템은 고속화를 목적으로 최적설계 개념에 의해 설계되므로 일반철도에 비해 차량 및 하부 구조물에 큰 진동을 발생하기 쉽다. 또, 고속철도의 운행시 발생하는 진동의 크기는 열차의 속도나 길이, 통과시간, 이격 거리, 선로상태나 종류 및 지반상태, 전파경로 등에 따라 다르다. 지반의 진동영향 평가 측면에서 가장 중요한 진동원의 특성은 진동의 지속시간 및 진동의 발생빈도라고 할 수 있으며, 고속철도 운행시 발생하는 진동은 진동이 일시적으로 멈추기는 하나 일련의 충격진동이 비교적 짧은 시간간격을 두고 반복 발생하는 형태의 단속진동으로 그 발생빈도가

빈번하기 때문에 지속진동에 포함된다.⁽²⁾

현재 시공중인 경부고속철도의 경우 기존의 자료가 거의 없는 실정이며, 현재까지 사용되고 있는 고속철도 자료로서 일본의 신간선이나 프랑스의 TGV의 자료는 국내지형 여건에 적합하지 않아 현재 시공중인 구간의 인접건물이나 주민에게 미칠 환경영향평가 자료로 사용하기에 부적합하다.⁽³⁾ 이에 본 논문에서는 현재 시험운행 중인 충남 연기 소정면에서 충북 청원군 현도면 사이(34.4 km)에서 진동을 측정하고 그 특성을 분석해 보았다. 또한, 인접건물에 미치는 영향을 평가하고자 고속철도의 운행에 따른 진동 응답을 6층 규모의 건물에 적용하여 수치해석을 하였다. 이는 향후 고속철도 운행에 따른 진동저감 대책 수립 및 환경영향 평가에 대한 기초자료로 제시하고자 한다.

2. 계측내용

진동 발생원의 특성 파악을 위하여, 본 계측에서 진동원

* 정회원, 부경대학교 조선해양시스템공학과

E-mail : dmbae@pknu.ac.kr

Tel : (051)622-6484, Fax : (051)620-6480

** 정회원, 부경대학교, 음향진동공학과

*** 정회원, 한국건설안전원

으로 작용하는 고속철도가 평균속도 200 km/h로 통과할 때 시험운행 구간인 충남 연기소정면에서 충북 청원군 현도면 사이(34.4 km)의 교량 구조물이 있는 지역의 교각의 기초에 말뚝(pile)이 없는 A지역과 파일링 된 B지역 두 곳을 선정하였다. A지역에서의 계측 지점은 Fig. 1과 같이 교각 상부 궤도의 침목상부(a점)와 콘크리트 도상(b점)에서의 수직응답, 교각부분의 지반 위쪽으로 70 cm부근에서의 수평응답(c점), 교각 끝단에서 떨어진 거리(이격거리) 별 5 m(d점) 및 10 m(e점)인 지표면에서의 수직응답을 계측하기 위해 가속도 센서를 설치하였으며, B지역의 계측 지점은 Fig. 2와 같이 교각 부분의 지반에서 위쪽으로 70 cm 부근에 3축 센서를 이용한 수직(㉑점) 및 수평(㉒점), 이격거리 5 m (㉓점) 및 10 m (㉔점)인 지표면에 가속도 센서를 설치하고 동시 계측하였다.

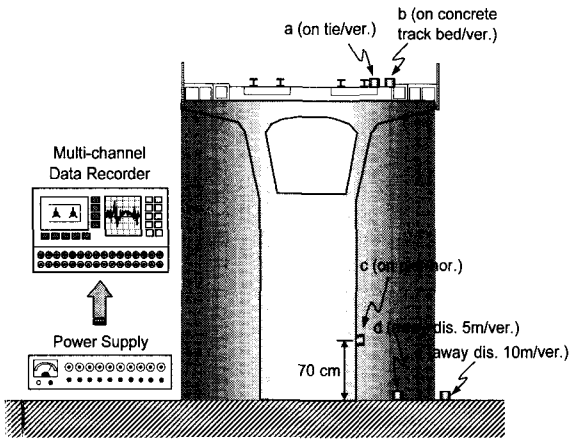


Fig. 1 Measuring points on pier at A region without pile under ground

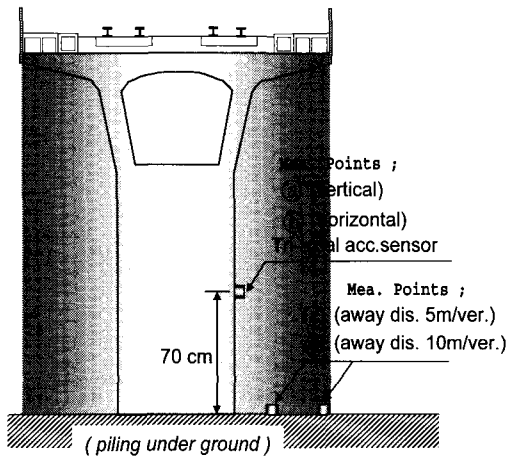


Fig. 2 Measuring points on pier at B region piled under ground

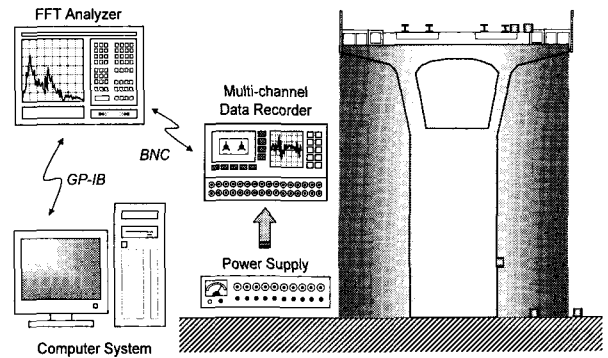


Fig. 3 Measuring and analysis system

- Vibration Transducer (Accelerometer)
 - DYTRAN 3100A, Low Imp. volt. Mode Acc.(10ea.)
 - DYTRAN 3103A triaxial volt. Mode Acc.(1ea.)
 - B&K 4378, High Sensitivity Acc.(2ea.)
- Signal Amplifier
 - DYTRAN Current Source Power Supply 4103, 4105
 - B&K 2635 Charge Amp.
- Signal Analyzer
 - SD 380Z, 4 ch. FFT Analyzer
 - HP 35665A, Dynamic signal Analyzer
- Multichannel Data Recorder, RACAL 16 ch.
- Data Acquisition Sys., Notebook and P-III Computer and Laser Printer.

본 연구의 계측에 사용한 장비 및 분석 시스템의 구성도는 Fig. 3과 같으며 열차가 평균속도 200 km/h로 통과하는 약 16초간의 실시간 진동 가속도를 테이프 레코드에 기록하고, FFT 분석기 통해 환경 진동 공해기준과 고속철도 운행에 따른 주된 관심 주파수 범위인 60 Hz까지 스펙트럼 분석하였다.

3. 계측결과 및 분석

3.1 파일이 없는 교각에서의 계측지점별 진동응답

고속철도의 주행시에 진동레벨에 대한 기준으로 일본의 신간선의 예 (Fig. 4)를 보면 속도증가에 따라 진동레벨이 증가하지만 어느 한계속도(약 150 km/h) 이상의 속도에서는 진동레벨이 일정하다고 보고되고 있으며, 열차속도 감

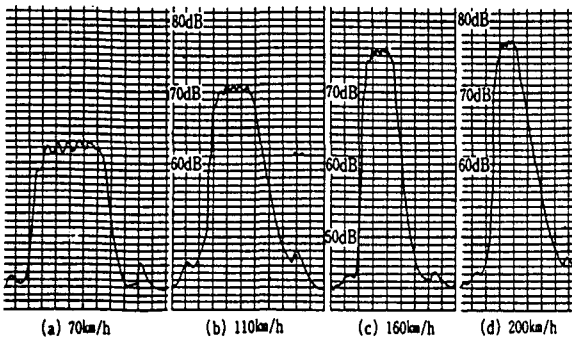
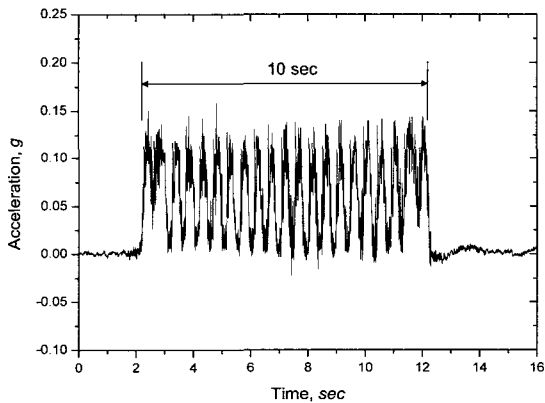
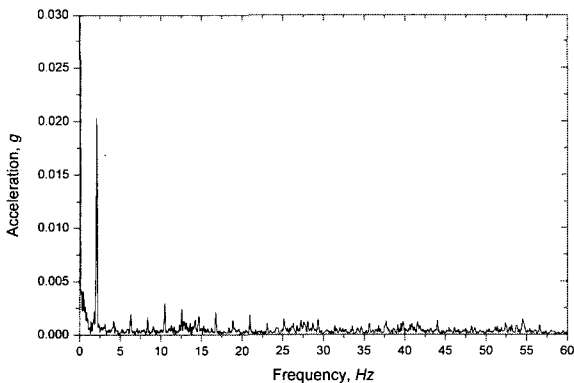


Fig. 4 Ground vibration response when Shinkansen pass through

속 시에도 반드시 진동이 감소하는 것이 아니라 시스템의 고유진동수와 공진으로 진동레벨이 증가하는 것으로 보고 되고 있다. 또한 200 km/h 이상에서의 진동 주파수 응답 (스펙트럼)은 일반적으로 저주파수영역/저역(8~10 Hz), 중간주파수영역/중역(16~25 Hz) 및 고주파수영역/고역(50~63 Hz)의 3개의 성분으로 구성되며, 속도에 따른 증가는 중역에 비하여 상당히 크기 때문에 고속 주행시는 저역의 진동성분이 지배적인 것으로 보고되고 있다.^(1, 3, 4)

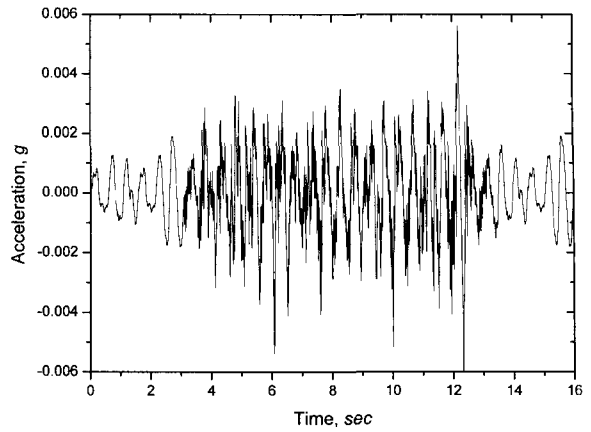


(a) Time history of acceleration response

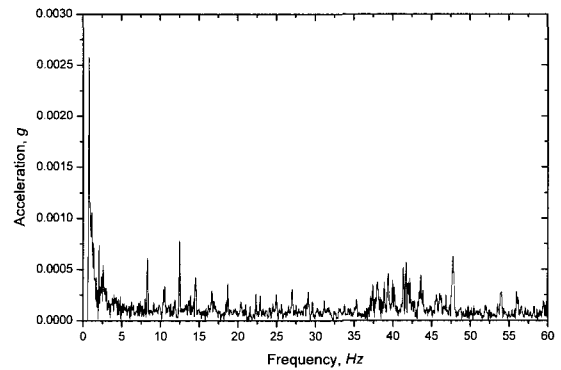


(b) Frequency response of acceleration

Fig. 5 Vertical vibration response on tie(a) of A region



(a) Time history of acceleration response



(b) Frequency response of acceleration

Fig. 6 Vertical vibration response on concrete track bed(b) of A region

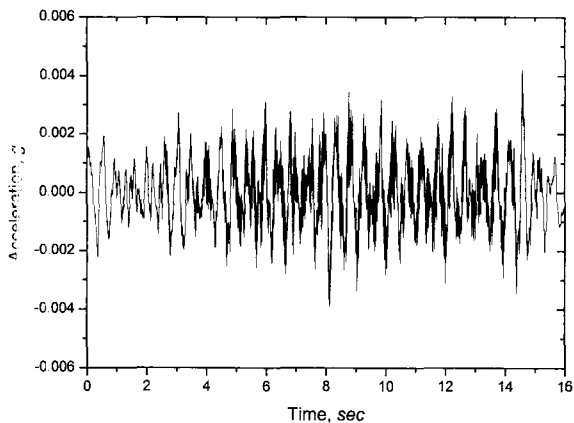
현재 경부고속철도의 최고속도는 300 km/h로 설계함을 원칙으로 하고 평균속도 240 km/h로 고려하고 있으나, 본 연구의 계속 시에는 200 km/h로 시험운행을 할 때 교량의 교각하부 지반에 파일링 되지 않은 A 지역(Fig. 1 참조)의 교각부분에서의 진동응답을 Fig. 5~9에 보이며, 실시간 16초간의 진동가속도응답의 시간이력은 (a)에 이들의 주파수 응답은 (b)에 나타낸다.

열차의 고속 주행시 진동원의 특성파악을 위해 교각지점의 침목 상부에서의 수직진동을 계측한 진동가속도응답의 시간 이력곡선으로서 Fig. 5(a)에서의 진동 파형을 보면 열차의 지점 통과 시간은 약 10초이며 이때 최대진동 가속도 응답은 약 0.15 g 정도로 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5(b)는 (a)에 대한 주파수 응답으로 저주파수 영역인 0~12 Hz 구간과 중간 주파수 영역인 16~26 Hz에서 피크치가 나타나며 특히, 저역의 2 Hz 근방에서 탁월주파수가 두드러지게 나타남을 알 수 있다. 고주파수 영역인 45~60 Hz에는 두드러지게 나타나지 않으며, 주된 주파수영역은 저주파수 영역임을 알 수 있다. 일반적으로 고

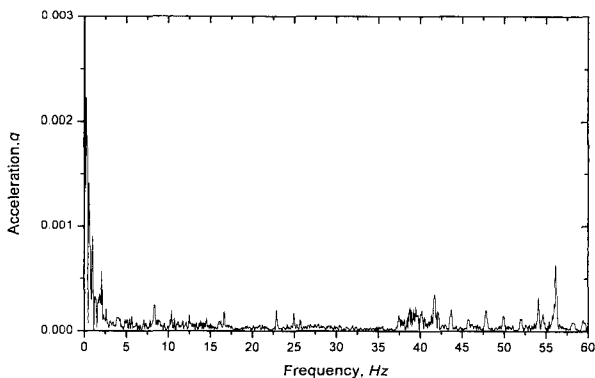
속철도에서는 높은 레벨진동보다는 언급한 바와 같이 저주파영역의 진동성분들이 주된 관심사가 된다.

Fig. 6은 콘크리트도상(b점)에서의 수직 진동응답으로서, 시간이력 곡선(a)에서 최대 진동가속도 응답의 크기가 대략 0.006 g로, Fig. 5의 침목상부(a점)에서의 최대 진동가속도 응답의 크기(0.15 g)와 비교해 보면, 4% 이하로 적어짐을 알 수 있다. 이는 고속철도 운행시의 진동하중에 대한 방진패드의 효과가 우수함을 나타내는 것으로 판단된다. 또, (b)의 주파수 응답에서 보면, 저역에서의 탁월주파수가 1 Hz, 8 Hz, 10.5 Hz 및 12.5 Hz임을 나타내며, 중역에서는 16.5 Hz와 18 Hz가 지배적인 주파수이고, 이 경우의 중역과 고역사이 대역(37 Hz~48 Hz)에서 지배적인 주파수가 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 교각(c점)에서의 수평 진동 응답으로서, 시간이력 곡선(a)에서 최대 진동가속도 응답의 크기가 대략 0.004 g로, Fig. 6의 방진패드에서의 수직응답의 67% 정도임을 알 수 있다. 또, (b)의 주파수 응답에서 보면, 지배적인 주파수 대역으로 저주파수 영역에서 1 Hz 근방, 2 Hz, 8



(a) Time history of acceleration response

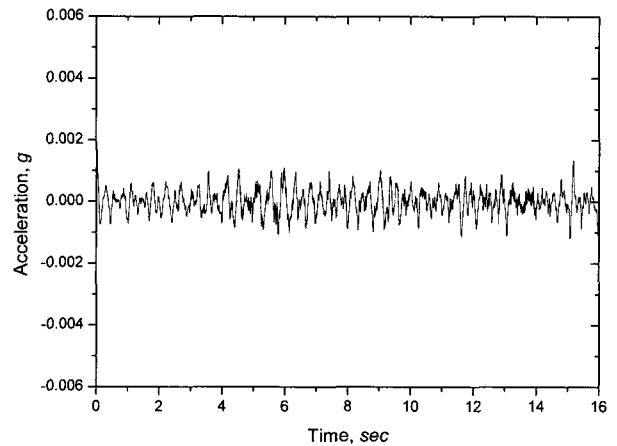


(b) Frequency response of acceleration

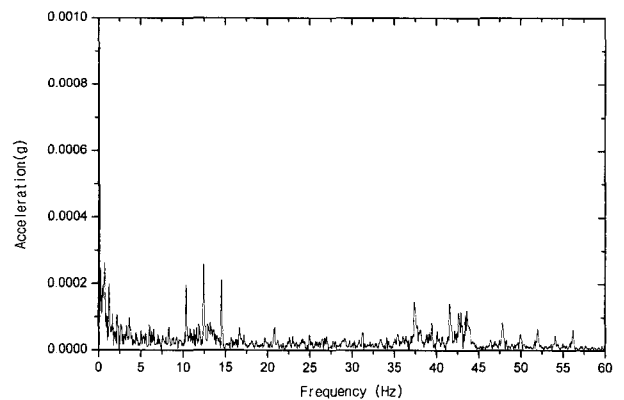
Fig. 7 Horizontal vibration response at pier (c) of A region

Hz 및 10.5 Hz가 지배적인 주파수이며, 중역에서는 17 Hz, 23 Hz 및 25 Hz가 탁월주파수 들임을 나타냄을 알 수 있다. 또, 37 Hz~57 Hz 대역에서, 보다 피크치가 뚜렷한 지배적인 주파수가 초래함을 나타낸다.

Fig. 8과 Fig. 9는 교각 끝단에서 이격거리가 5 m 및 10 m인 지점에서 계측한 지반 진동의 응답으로서, 진동가속도 응답의 시간이력 곡선(a)을 비교해 보면, 이격거리 5 m인 Fig. 8(a)에서 비해서 이격거리 10 m인 Fig. 9(a)에서의 최대 진동가속도 응답의 크기에 있어서 25% 이하로 적어짐을 나타낸다. 이는 진동원에서 거리가 멀어질수록 기하감쇠와 재료감쇠에 의해서 지반진동의 크기가 급격하게 적어짐을 알 수 있다. 또, Fig. 8과 Fig. 9의 주파수 응답(b)를 비교해보면, 공통적으로, 저역에서의 지배적인 주파수는, 0.2 Hz, 10.5 Hz 및 12.5 Hz이며, 중역에서는 14.5 Hz와 21 Hz이고, 37 Hz~60 Hz 대역에서는 37.5 Hz, 41.5 Hz, 43.5 Hz, 50 Hz, 52 Hz 및 56 Hz가 탁월주파수임을 알

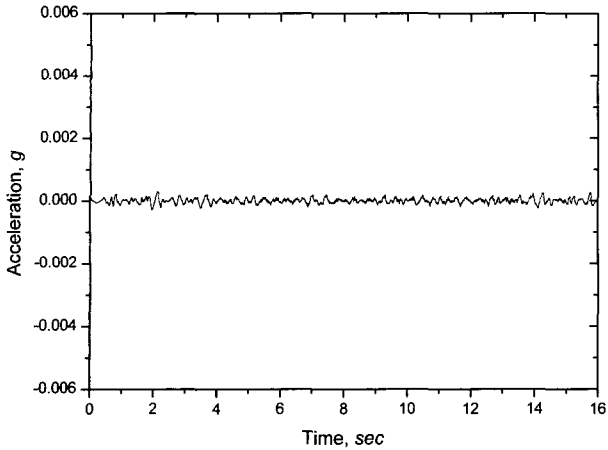


(a) Time history of acceleration response

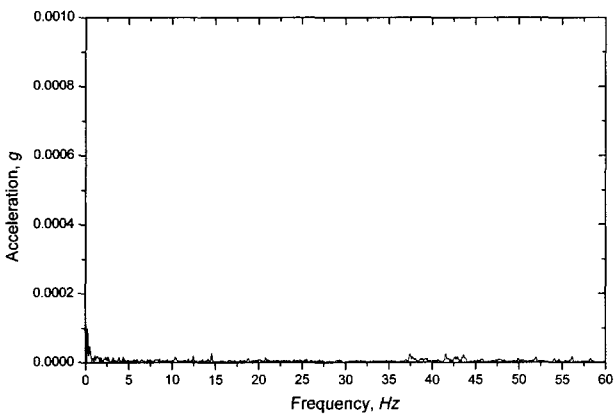


(b) Frequency response of acceleration

Fig. 8 Vertical vibration response on the upper ground (d) at a distance of 5m from the end of pier, of A region



(a) Time history of acceleration response



(b) Frequency response of acceleration

Fig. 9 Vertical vibration on response on the ground (e) at a distance of 10m from the end of pier, of A region

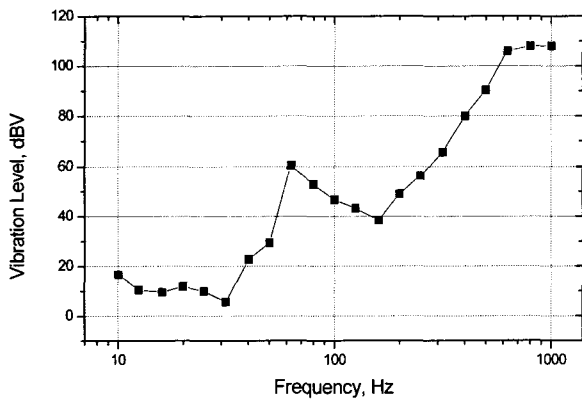


Fig. 10 Vertical vibration level on tie of A region

수 있다.

또 고속철도 운행시 진동원의 근방으로서 침목과 콘크리트 도상(Fig. 1 참조)에서의 진동응답의 1/3옥티브 해석한 결과로서, Fig. 10은 침목(a점)에서의 진동응답수준이고,

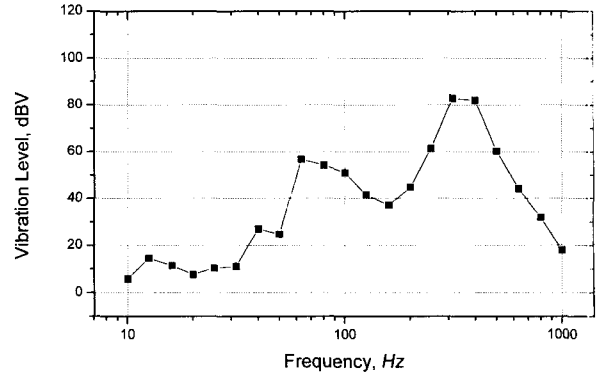
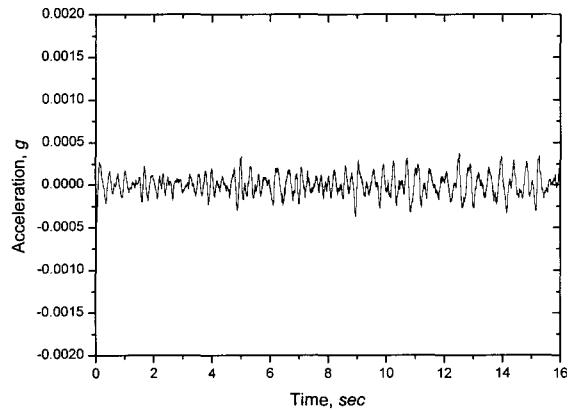


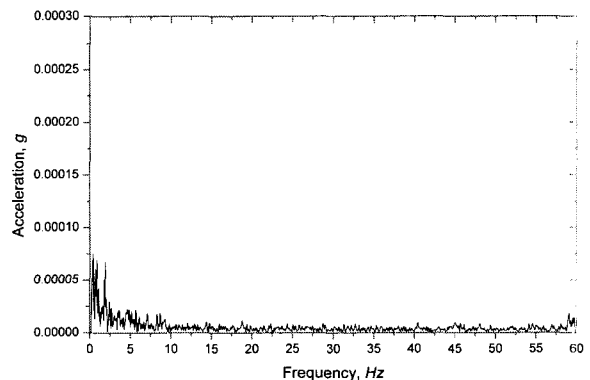
Fig. 11 Vertical vibration level on concrete track bed of A region

Fig. 11은 콘크리트 도상(b점)에서의 진동응답 수준을 나타낸다.

100 Hz 미만의 관심 주파수 대역을 검토해보면, 두 경우 모두 60 Hz까지는 대체로 증가하다가 그 이후부터 100 Hz 자리는 감소하는 경향을 보인다. Fig. 10과 11의 비교에 의하여, 10 Hz 근방의 저역에서는 약 13 dB의 감소, 10



(a) Time history of acceleration response



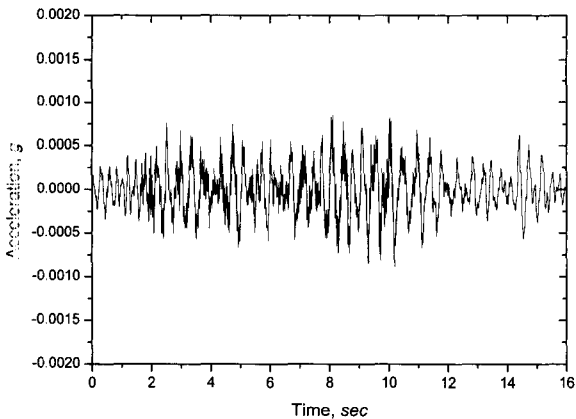
(b) Frequency response of acceleration

Fig. 12 Vertical vibration response on pier(a) of B region

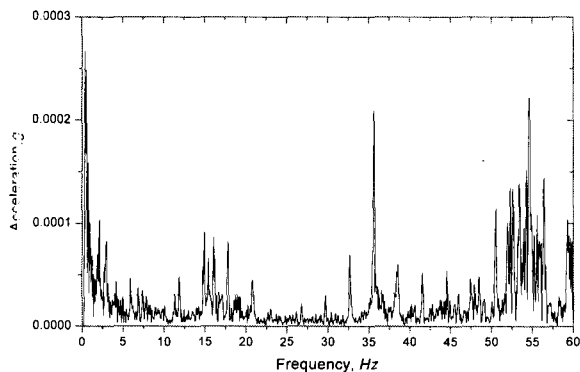
~25 Hz 근방의 중역에서는 5~10 dB 정도의 감소, 50~70 Hz 근방의 고역에서는 3~5 dB 정도의 감소를 나타내며, 저역으로 갈수록 진동의 감소가 대체로 큼을 알 수 있다. 이러한 감소는 침목하부의 방진패드에 의한 것으로 판단되며 고속철도 운행시의 진동은 일반적으로 저주파수 영역의 진동 성분들이 보다 더 관심의 대상이 되므로, 바람직한 방진패드의 방진성을 확인 할 수 있다.

3.2 파일이 있는 교각에서의 계측지점별 진동응답

교각의 지하하부에 파일링 된 B지역(Fig. 2 참조)에서의 응답을 Fig. 12와 Fig. 13은 교각에 있어서 지면으로부터 70cm 높이의 교각에 3축 센서를 이용하여 수직 및 수평진동을 동시 계측한 응답이다. Fig. 12와 Fig. 13의 진동 가속도 응답의 시간이력 곡선(a)를 비교해 보면, 수평인 경우의 최대 진동 가속도 응답이 수직인 경우 보다 약 2.3배 크며, 주파수응답(b)의 파형의 패턴이 완전히 다름을 알 수 있다. 즉 수직인 경우로서, Fig. 12(b)는 10 Hz 이하의 저주파 대역에서 지배적인 주파수가 확인하나, 수평인 경

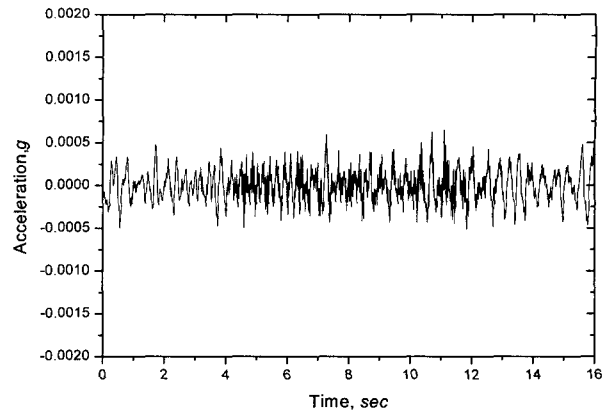


(a) Time history of acceleration response

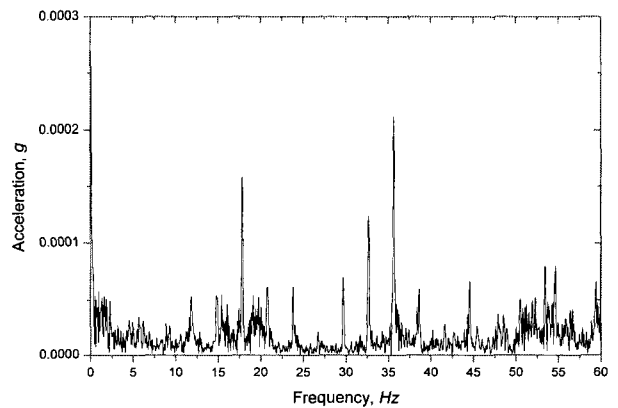


(b) Frequency response of acceleration

Fig. 13 Horizontal vibration response on pier(b) of B region



(a) Time history of acceleration response



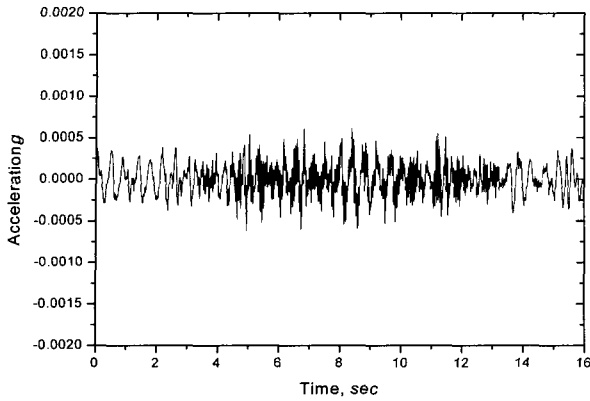
(b) Frequency response of acceleration

Fig. 14 Vertical vibration response on the upper & bound at distance of 5m from the end of pier, of B region

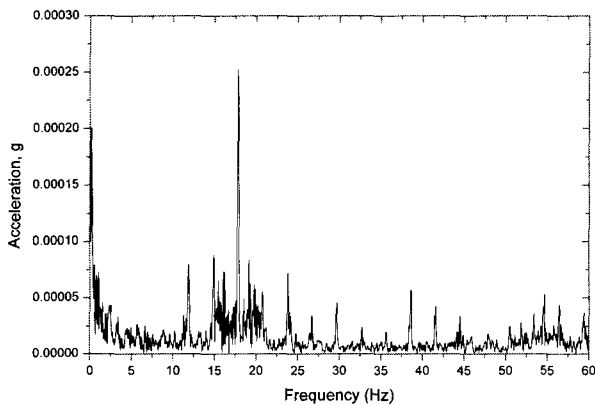
우에는 0~6 Hz, 14~22 Hz, 35 Hz 근방 및 50~57 Hz 대역에서 뚜렷한 피크치가 나타남을 알 수 있다.

Fig. 14와 Fig. 15는 교각의 지면 쪽 끝단에서 이격거리 5m 및 10m 떨어진 지반에서 계측한 지반 진동응답이다. 일반적인 지반진동의 특성으로 진동원으로부터 떨어진 거리에 따라 급격하게 진동의 크기가 감소하는 경향과는 달리 Fig. 14와 Fig. 15의 진동 가속도 응답의 시간이력 곡선들 (a)를 보면 10m 떨어진 곳에서의 최대 진동 가속도 응답이 5m 떨어진 곳에서의 최대 진동 가속도 응답이 5m 떨어진 곳의 약 90% 정도임을 보아 지반의 지질이 경암으로 강성이 커서 지반을 통한 감쇠성분이 아주 적은 것으로 판단된다.

이격거리가 다른 두 계측지점에서의 주파수응답으로서 200 km/h 이상 고속철도의 진동 주파수의 일반적인 특성으로서 나타나는 저역(10 Hz 이하), 중역(16~25 Hz) 및



(a) Time history of acceleration response



(b) Frequency response of acceleration

Fig. 15 Vertical vibration response on the upper & bound at distance of 10m from the end of pier, of B region

고역(50~63 Hz)의 3개의 성분과 비교해 볼 때, Fig. 14(b)와 Fig. 15(b)를 비교해 보면, 파형의 패턴은 서로 비슷하며, 지배적인 주파수 대역으로서, 저주파수 대역(0~2.5 Hz), 중간주파수 대역(14~24 Hz) 및 고주파수 대역(50~60 Hz)으로 나타나며, 특히 중역에서의 주파수 응답의 피크치(18 Hz, 24 Hz)가 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 또 이격거리 5m인 지점에서 주파수 응답의 특성으로서 Fig. 14(b)에서 보면 중역과 고역사이 영역(29~36 Hz)근방에서 지배적인 탁월 주파수(29 Hz, 33 Hz 및 36 Hz 근방)가 나타남을 알 수 있으며, 이격거리 10m인 경우는 중역에서의 응답이 보다 뚜렷함을 알 수 있다.

4. 지반 진동

4.1 지반의 감쇠

본 계측에서는 고속철도 운행시의 진동이 인접 건물에

미치는 영향을 검토함에 있어서 고려해야 할, 전달되는 진동의 감쇠는 거리에 따라 에너지가 확산되는 현상으로 일어나는 기하감쇠(geometrical damping)와 지반 내 매질의 입자간 마찰로 인해 발생하는 에너지 손실로서의 재료 감쇠(material damping)로 나뉘며, 교량구조물을 통해서 지반으로 전달되는 진동이 지반의 지질특성 및 이격거리에 따른 지반 진동의 감쇠특성을 평가하기 위해서 감쇠량의 예측치를 구하고 이를 실측치와 비교해 본다.⁽⁶⁾

고속 철도 운행시의 동하중을 발생시키는 진동원의 기하감쇠량(L_1)을 구하는 모델은 Gutowski 등에 의하면 식(1)과 같다.⁽⁷⁾

$$L_1(\text{dB}) = K \times \log(r/r_0) \quad (1)$$

여기서, K 는 기하감쇠 상수로서 선진동원 일 경우에는 10으로, 점진동원 일 경우는 20으로 가정하였다.

한편, 지반내 내부마찰에 의해서 생기는 재료감쇠로 인한 진동 감쇠량(L_2)를 구하는 방법으로는, 지반 매질의 종류에 따른 진동파의 주파수($f(\text{Hz})$)와 전파속도($c(\text{m/s})$)를 고려한 모델은 식(2)와 같이 제안하고 있다.^(7,8)

$$L_2(\text{dB}) = 27.29 hf(r-r_0)/c \quad (2)$$

여기서, h 는 손실계수(loss factor)이다.

진동원의 진동응답($L_0(\text{dB})$)은 고속철도 운행시 발생하는 진동응답을 2회 반복하여 계측하였다. Table 3은 진동원의 진동수준(크기), 계측치와 감쇠를 고려한 예측치를 비교하고 그 오차 범위를 평가한 것으로서, 진동원의 특성을 선진동으로 가정했을 때, A지역에서는 이격거리 5m 및 10m에서 평균 7.4% 및 5.2%, B지역에서는 이격거리 5m 및 10m에서 평균 6.1% 및 9.3%이며, 점진동으로 가정해했을 때, A지역에서는 이격거리 5m 및 10m에서 평균 22.9% 및 26.9%, B지역에서는 이격거리 5m 및 10m에서 평균 19.6% 및 23%의 평균오차 있음을 알 수 있다. 따라서, 고속철도 운행시의 진동원은 선진동으로 가정하는 것이 예측치가 실 계측에 보다 접근함을 알 수 있다. 여기서, 감쇠를 고려한 예측치(계산치)의 평가는 토질의

Table 1 Geometrical damping for ground vibration

Type of Vib. source	$r(\text{m})$	r_0	$L_1(\text{dB})$
Line Vib. ($k=10$)	5	0.5	10
	10	0.5	13.01
Point Vib. ($k=20$)	5	0.5	20
	10	0.5	26.02

Table 2 Material damping components for ground vibration

r (m)	r_0 (m)	f (Hz)	c (m/s)	h	L_2 (dB)
5	0.5	4	457	0,1	0.12
10					0.24

Table 3 Comparison on between estimated and measured values of ground vibration level

Type of Pier	Mea. No.	Away Dis. (m)	Vib. Source (L_0) O.A Value (dB)	Mea. O.A Value (dB)	Estimated O.A Value (dB)		Error(%)	
					Line Vib. (L_1)	Point Vib. (L_2)	Line Vib.	Point Vib.
A reg. without pile	1	5	69.89	64.78	59.77	49.77	7.7	23.2
		10		59.49	56.63	43.62	4.8	26.7
	2	5	70.69	65.21	60.57	50.57	7.1	22.5
		10		60.87	57.44	44.43	5.6	27.0
B reg. with pile	1	5	79.11	73.75	68.99	58.99	6.5	20.0
		10		73.07	65.86	52.85	9.9	27.7
	2	5	80.21	74.21	70.09	60.05	5.6	19.1
		10		73.35	66.96	59.95	8.7	18.3

특성에 따라 감쇠량은 큰 차이가 나게 마련이며, 본 연구 계측에서는 고속철도 운행에 따른 진동의 암반에서 모래로 전달되는 것으로 가정한 예측치 이므로 실제계측지점의 토질과는 상당히 차이가 예측될 수밖에 없으며, 고속철도 운행시의 진동원을 점진동 또는 선진동 어느 쪽으로 가정하는 것이 보다 합리적인가의 상대적인 평가에 그 의미를 두기 있다.

4.2 지반 진동 응답

이격거리별 (5m 및 10m) 진동수준의 감소를 교각하부

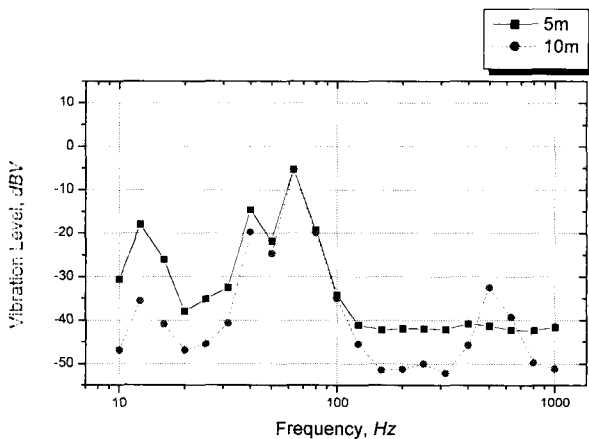


Fig. 16 Vertical vibration level according to away distance type at A region without pile under ground

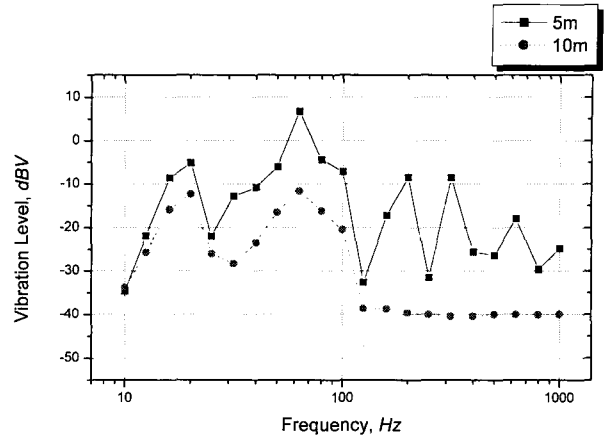


Fig. 17 Vertical vibration level according to away distance type at B region with pile under ground

지반에 파일이 없는 A지역을 Fig. 16에, 파일이 있는 B지역의 진동수준을 Fig. 17에 나타낸다. 100 Hz 미만의 관심 주파수 대역을 중심으로, Fig. 16에서 보면 10 Hz 근방의 저역에서 약 17 dB의 감소, 10~25 Hz 근방의 중역에서는 10~17 dB의 감소 및 50~70 Hz 근방의 고역에서는 2 dB미만의 진동의 감소를 보이며, 주파수 대역이 저역으로 갈수록 진동응답 감소의 폭이 커짐을 알 수 있다. 한편, Fig. 17에서 보면, 10 Hz 근방의 저역에서 2 dB미만의 감소, 10~25 Hz 근방의 중역에서는 3~8 dB 정도의 감소, 50~70 Hz 근방의 고역에서는 10~18 dB 정도의 진동응답의 감소의 폭이 저역으로 갈수록 적어지는 경향을 보임을 알 수 있다.^(9, 10)

5. 수치해석

본 논문은 고속철도의 운행으로 인한 진동의 전파가 인근 건물에 미치는 영향을 평가하고자, 시험운행구간에서

Table 4 Principle of dimension for 6F, B/D structure

Dimension		
Height	21.6 m	
Width(Longi.)	16 m	
Width(Trans.)	24 m	
Element No.	1184 EA	
Node No.	1042 EA	
Column Element (B×D)	C1	0.3×0.4 (2F~4F)
	C2	0.4×0.4 (2F~4F)
	C3	0.3×0.4 (5F~Roof)
Beam Element (B×D)	G1	0.3×0.6 (2F~Roof)

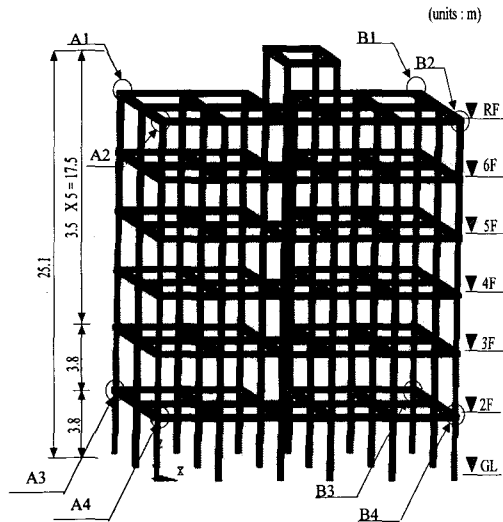
Table 5 Properties of frame structure

Column, Beam	Property	
	Concrete type	General reinforced concrete
	Young's Module	2.1 E5 kg/cm ²
	Density	2.4 E3 kg/m ³
Poisson's No.	0.167	

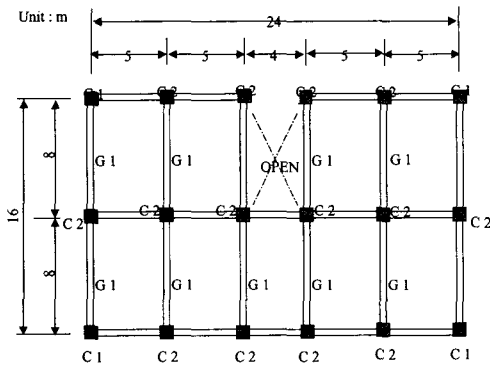
200 km/h의 속도로 운행할 때 앞절에서와 같이 계측한 진동특성응답을 6층 높이(21.6 m)의 건축구조물에 적용하여, 고유치 해석을 하고 동적응답해석을 해보았다. 적용 대상 건축구조물의 모델링은 Fig. 18과 같고, 주요치수와 물성치는 각각 Table 4 및 5와 같다.

Fig. 18에서 보인 구조물의 고유진동수는 Table 6과 같다.

적용한 구조물의 동적응답 해석법^(11, 12)으로는 정확한 해에 수렴하는 정도가 가장 좋은 직접적분법을 사용하여



(a) Modelling and checked points



(b) Plan

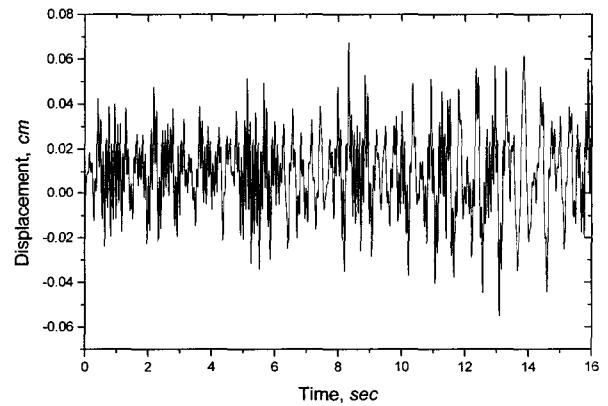
Fig. 18 6F, B/D structure modeling

Table 6 Natural Frequencies of 6F, B/D structure (units : Hz)

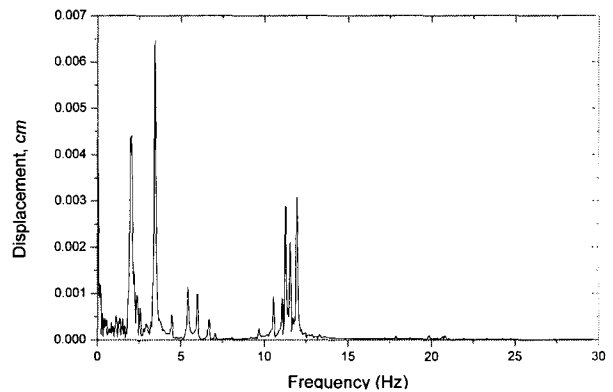
Mode	Frequency
1st	0.7821
2nd	1.9002
3rd	2.1385

Table 7 Maximum or minimum displacements at each node

	Point	Max. disp.	Min. disp.	Point	Max. disp.	Min. disp.
	A2	0.0300	-0.0250	B2	0.0670	-0.0438
	A3	0.0150	-0.0090	B3	0.0022	-0.0019
	A4	0.0021	-0.0020	B4	0.0107	-0.0080
10 m	A1	0.0440	-0.0670	B1	0.0270	-0.0280
	A2	0.0290	-0.0260	B2	0.0620	-0.0553
	A3	0.0090	-0.0100	B3	0.0021	-0.0020
	A4	0.0019	-0.0021	B4	0.0105	-0.0090

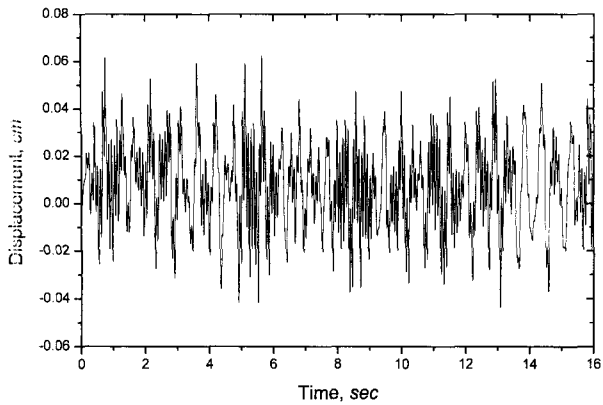


(a) Time history of displacement

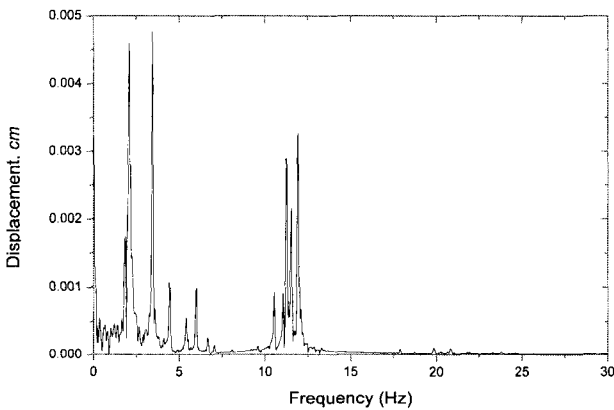


(b) Frequency response of displacement

Fig. 19 Dynamic response at the B2-Node(5 m)



(a) Time history of displacement



(b) Frequency response of displacement

Fig. 20 Dynamic response at the B2-Node(10 m)

대상 구조물을 해석하여 보았다. 고속철도 레일에서 이격 거리 5 m 및 10 m에서 측정된 지반의 진동 파형을 적용하여 구조물의 시간에 따른 거동을 구하였다. 시간간격 Δt 를 0.000156초로 했을 때, 구조물의 8개의 절점에서의 동적 응답을 구하였다. 8개의 절점위치는 Fig. 18(a)에서 보여주고 있다. A1~A4 절점은 고속철도의 레일을 평행하게 마주보는 쪽이고, B1~B4 절점은 반대편이다.

8개의 각 절점들에서의 동적 수직 변위 응답의 최대 및 최소 변위응답은 Table 7과 같으며, 이격거리 5 m에서 8개의 절점들에서의 응답 중 B2 절점에서 0.067 cm의 최대변위응답이, 이격거리 10 m에서는 B2 절점에서 약 0.062 cm의 변위 응답이 나타남을 알 수 있다. 건물의 옥담뒤쪽 부분에 계단이 있는 형태로 비어 있어, 레일쪽에 보다 가까운 A면의 절점들에서의 변위 응답이 B면의 절점들에서의 변위 응답보다 대체로 클 것으로 예측한 것과 다르게 난 것으로 평가된다. 또, B2 절점에서의 이격거리 5 m 및 10 m 인 경우의 동적 변위 응답과 이의 주파수응답을 Fig. 19 및 Fig. 20에 보인다. 두 경우 모두 2.3 Hz 및 12 Hz 부근에서 지배적인 주파수 응답 특성을 보임을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 건설중에 있는 우리나라 고속 철도의 평균속도 200 km/h로 시험 운행하는 구간의 두 지역 즉, 교량의 교각하부 지반에 파일링(piling) 안 된 A지역의 5점과 파일링 된 B지역의 4점의 계측점 들에서 실시간 진동 계측을 하고, 이를 분석하여 고속철도 운행에 따른 진동의 특성을 평가하였다. 또, 고속철도 운행에 다른 인접 건물에 미치는 진동의 영향을 검토하기 위하여, 계측한 진동응답을 5 m 및 10 m 떨어진 거리에 위치하는 것으로 가정한 6층 규모의 건물에 적용하여 그 응답을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 200 km/h 이상의 고속철도의 진동주파수의 응답 특성으로 나타나는 저주파수 영역 (10 Hz이하), 중간 주파수 영역 (16~25 Hz) 및 고주파수 영역(50~63 Hz)과 비교해 보면, 각 계측 점들에서, 평균적으로 저역 (0~13 Hz)에서 대체로 뚜렷한 탁월 주파수가 나타나며 중역과 고역 이외의 사이 영역(37~49 Hz)근방에서 지배적인 주파수 영역이 나타남을 알 수 있다.

(2) 저주파수 영역에서 방진페드의 성능을 확인할 수 있다.

(3) 고속철도 운행시의 진동원은 선진동으로 가정하는 것이 바람직하다.

(4) 고속철도 운행에 따른 지반 진동응답에 있어서 이격거리(궤도에서 떨어진 거리)가 멀수록 진동응답의 수준이 대체로 감소하지만, 주파수 대역이 저역으로 갈수록, 파일이 없는 A지역은 진동응답의 감소 폭이 커지며, 파일이 있는 B지역에서는 오히려 감소폭이 적어지는 경향을 보아서 지반의 지질특성의 영향이 클 수 있다.

(5) 고속철도 운행으로 인한 인접건물에 미치는 영향을 검토하기 위하여 계측한 자료를 6층 규모의 건물에 적용하고 수치해석 해 본 바에 의하여, 크게 문제가 되지 않는 것으로 판단된다.

참고문헌

(1) Takemiya, H. and Goda, K., 1997, "Prediction of Ground Vibration induced by High Speed Operation", Procs of 5th Int. Cong. on Sound and Vibration, pp. 2681~2688.

(2) 양신추, 조양희, 변재양, 1993, "터널내 고속철도 주행에 의한 지반진동의 예측", 한국고속철도 건설공단.

(3) 한국고속철도 건설공단, 1992, "경부고속철도 대전충청권 건설사업 환경영향 평가서".

(4) 은희준, 1995, "고속철도 환경소음기준 및 진동기준

에 대한 연구(진동대책편)”, 한국고속철도 건설공단.

(5) Kurzweil, L.G., 1979, “Noise and Vibration from Underground Rail Systems”, J. of Sound and Vibration, 66(3).

(6) Novak, M. and Hiffnawy, L. EL., 1983, “Effect of Soil-Structure Interaction on Damping of Structure”, Earthquake Eng. and Structural Dynamics, Vol. 11, pp. 595~621.

(7) Gutowski, T. G. and Dym, C. L., 1979, “Propagation of Ground Vibration : A Review”, J. of Sound and Vibration, 49(2), pp. 179~193.

(8) Bender, E. K., Kurze, U. J., Lee, K. S., and Ungar, E. E., 1969, “Predictions of Subway-induced Noise and Vibration in Buildings”.

(9) 배동명 등, 1999, “지하철(분당선) 운행에 의한 진동계측”, 부경대학교 음향진동공학연구소.

(10) 양신추, 1993, “터널내 고속철도 주행에 의한 지반 진동의 예측”, 한국고속철도 건설공단, KHRC/TDR-1.

(11) Clough, R.W. and Penzien, J., 1994, “Dynamics of Structure,” 2nd ed., pp. 219~256.

(12) Chopra, A. K., 1995, “Dynamics of Structures”, Prentice Hall Inc, pp. 467~583.