

## 차량기지내 철도운행시 발생하는 진동특성에 관한 연구

### Vibration Characteristics of a Railway Depot : Practical Approach

김 정 태† · 김 정 수\* · 손 정 곤\*\*

Jeung T. Kim, Jung S. Kim and Jung G. Son

(2005년 6월 2일 접수 ; 2006년 2월 15일 심사완료)

**Key Words** : Vibration(진동), Building Vibration Isolation(건축물 진동저감), Railway Depot(철도차량기지)

#### ABSTRACT

In Seoul, several railway depots are located at the places where a public can easily access. Since a depot occupy a large amount of land itself, it is natural to use those sites for a public building construction such as an apartment complex or a transportation terminal, as an example. Most of the buildings on a depot, however, are exposed to vibration problems, because foundations are excited from the dynamic loading whenever heavy trains pass on the track. Severe vibration may cause a damage to building structures and a troublesome to a community. In this paper, some vibration practices have been examined in order to resolve the vibration problems. First, a critical speed of a train in a railway depot is evaluated. Then, the structural effect has been investigated. Finally, practical approaches to reduce the vibration level have been proposed. In this first half part of the paper, the focus has been on the critical speed and a structural transmission phenomena.

#### 1. 서 론

국내 대도시에 있는 철도차량기지는 부지 당 최소한 10만 평방미터이상의 대단지로 구성되어 있다. 부지의 지표면에는 레일만이 부설되어 있으며, 입체적인 공간은 미개발되어 있는 실정이다. 따라서, 유휴대지의 활용측면에서 보면, 차량기지의 대지는 공학적인 문제만 해결할 경우, 유용하게 사용될 수 있는 공간이라고 볼 수 있다. 아직까지 차량기지의 상부공간을 공공 건축목적으로 활용하고 있는 경우는 극히 제한되어 있는 수준이다. 국내에서는 최근 들어 철도차량 부지, 대단위 매립장과 적

치장, 철도정비창 등과 같은 유휴토지위에 공공용도의 건축물을 지어 해당 토지를 활용하려는 노력이 사회 일각에서 대두되고 있다.

이는 우리나라와 같이 협소한 공간에서 살아가야 하는 공동체 입장에서는 늦은 감이 없지 않으나, 바람직한 접근방향 이라고 판단된다.

문제는 차량기지를 활용하는 과정에서 부수적으로 발생하는 환경피해이다. 차량부지의 철도레일은 육중한 하중의 철차가 운행되는 관계로 지반진동의 수준이 높게 나타난다. 또한, 철도부지에 입체적으로 건설되는 건축물의 기초구조는 철도차량의 통과시 나타나는 가진력을 직접 받게 되기 때문에 결과적으로 건축물 전체를 진동시키게 된다. 그 결과, 건축물의 구조적 안전에 문제가 발생되고, 건축물 내부에 거주하는 거주하는 주민들에게 생활진동과 소음 등의 문제를 야기시킨다.

따라서, 철도부지를 효과적으로 활용하기 위해서는 예상되는 진동의 피해정도를 합리적으로 분석하

† 책임저자 ; 정희원, 홍익대학교 기계·시스템디자인공학과  
E-mail : jtkim@hongik.ac.kr

Tel : (02) 320-1467, Fax : (02) 320-1634

\* 홍익대학교

\*\* 정희원, 동일기술공사

고, 문제제기가 있을 경우를 대비에 사전에 공학적 기법을 적용하여 적절한 설계방안이 제시되어야 한다.

이 연구에서는 지하철 기지의 차량 진출입시 발생하는 진동문제를 검토하고, 진동저감방안을 마련하고자 한다. 우선, 1부에서는 철도차량부지의 특수성을 진동측면에서 고려한다. 차량의 진입과 진출시 발생하는 임계속도를 예측하여 진동크기와 차량주행속도와와의 상관관계를 검토한다. 이와 함께, 차량기지 건축구조물의 진동전달 특성을 분석한다.

2부에서는 측정된 진동크기를 바탕으로 객관적인 진동허용기준 또는 인체가 느끼는 진동감지의 한계등과 비교 검토하고자 한다. 이와 함께, 진동 방지대책을 제시함으로써, 향후 철도차량기지 등과 같은 대지위에 건설되는 건축구조물에 미치는 진동민원

을 최소화 시키고 쾌적한 주거 환경을 제공하는데 이 논문의 목적이 있다.

## 2. 차량기지의 진동현황

수도권에는 철도공사, 지하철공사, 도시철도공사 등의 기관에서 차량기지를 운영하고 있다. 현재, 차량기지는 10 여개 소에 산재해 있다. 단위 기지의 규모는 작게는 5만평, 크게는 10만평 수준이다. 이 논문에서 검토된 차량기지는 수도권 주거지역내에 소재하고 있는 대지 7만 5천 평 규모의 중간급 시설물이다. 기지의 대지 상부에는 인공적으로 콘크리트 평판이 2만 3천평 규모로 조성되어, 그곳에 3천여 세대의 주민이 거주하고 있다. 문제는 차량의 진출입 시 진동과 소음의 발생으로 인해 피해민원이 제기된바 있어 공학적인 방지대책이 필요한 상황이다. <sup>(1,2,3)</sup>

현장에 있는 특정 아파트 단지에서 측정된 진동수준은 Fig. 1(a)에 정리되어 있다. 차량의 운행속도를 변화시키면서 실내 각 층에서 측정된 진동수준은 50 dB에서 70 dB 사이의 크기를 가지고 있다. 아파트 저층의 경우에는 20 ~ 120 Hz 대역의 진동에너지가 주로 측정된다. 5 층과 10 층 등 위층으로 올라가면, 고주파수대역의 에너지는 급격히 감소된다. 이에 따라, 30 ~ 60 Hz 대역의 진동에너지가 아파트 진동 특징을 차지하는 경향이다. 이러한 진동의 크기를 주관적인 영향평가 기준을 적용하여 평가해 보면 Fig. 1(b)에 정리되어 있는 것과 같이, 측정된 진동의 크기가 지역에 거주하는 주민들에게 짜증을 일으키는 수준이 되고 있음을 알 수 있다.

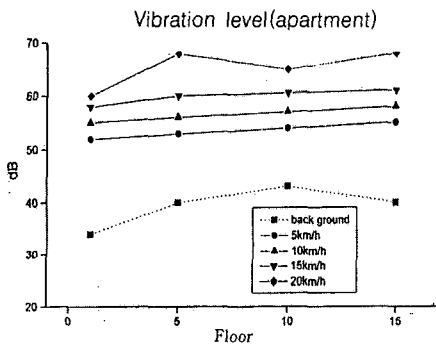


Fig. 1(a) Measured vibration level while a train operating speed is changed from 0 to 20 km/h

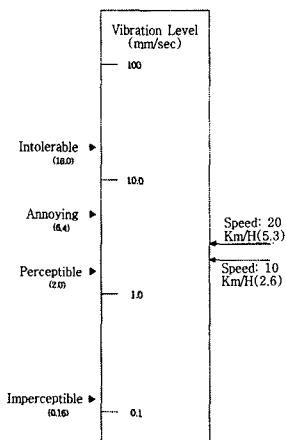


Fig. 1(b) Human perception of the vibration level based on the subjective rating

## 3. 차량기지 진동의 특수성

이 절에서는 차량기지에서 발생하는 진동의 현황을 검토한 후, 진동에너지가 건축물 상부와 주민들에게 전파되는 과정에서 핵심적인 사항을 도출하고자 한다. 도출된 진동의 물리적 특징을 검토해 봄으로써, 차량기지를 효율적으로 사용할 수 있는 진동 방지대책을 마련하고, 더 나아가 향후 차량기지에 새로운 건축물의 설계 시 진동측면에서 고려될 수 있는 방안을 모색하고자 한다.

차량기지서 철도차량의 진입과 진출 시 발생되

는 진동의 특수성을 검토하기 위해서는 레일에서 발생하는 가진원의 특성과 함께, 차량기지 상부에 건설되어 있는 건축구조물의 에너지 전달특성도 포함하여, 포괄적으로 분석하여야 한다. 진동원과 구조물의 전달함수가 복합적으로 작용하여, 그 결과가 건물상부에 있는 구조물의 안전에 영향을 미치고, 동시에 건물에 입주해 있는 주민들에게 영향을 미치게 된다.

**3.1 차량임계속도에 대한 고려**

철도차량의 운행 시 나타나는 소음진동에 영향을 미치는 가장 큰 요소는 차륜과 레일간의 상호작용이라고 할 수 있다. 차륜이 레일위를 굴러가면, 차륜과 레일의 접촉불량, 요철, 간극 등에 의해 충격이 발생되어 진동, 소음으로 나타나거나, 접촉력의 변동에 의해 진동음, 삐걱거리는 소리 등이 발생된다.

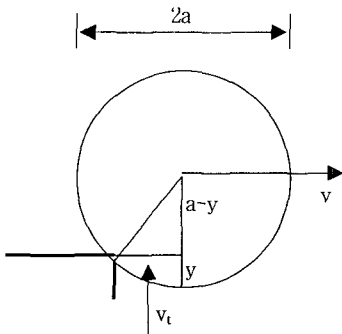


Fig. 2(a) Separation of a wheel from a rail

차량기지의 레일에서 건축물로 전달되는 진동, 소음에너지는 이 중에서 충격에 의한 진동, 소음이 기인한다.

용접에 의해 장대화된 레일이나, 레일의 유지 보수상태가 최상조건으로 유지된 경우를 제외하고는, 레일과 차륜의 접촉면에서 진동 소음이 발생된다. 레일 불연속 현상의 대표적인 예는, 레일간의 이음점, 포인트, 요철이라고 할 수 있다. 또, 차륜의 불연속 현상은 정차 시 브레이크 사용으로 인해 나타나는 편마모(flat)가 있다<sup>(4,5)</sup>.

이와 같이, 레일과 차륜의 불연속 접촉 시 나타나는 충격에너지는

- (가) 철도 차량의 주행속도
- (나) 레일의 표면 거칠기
- (다) 차륜의 형상
- (라) 작용하는 하중
- (마) 레일의 고유진동수

의 함수로 나타나게 된다<sup>(5)</sup>.

물리적으로 진동에너지의 발생은 차륜이 레일 표면을 순간적으로 이탈한 뒤, 자중에 의해 레일표면에 다시 접촉하면서 발생된다. 이러한 순간에 발생하는 충격에너지는 차량의 무게가 크므로 모멘텀이 레일에 작용하여 레일의 하부 구조물을 통해, 건축물 구조에 까지 전파된다. 따라서 충격시 나타나는 모멘텀의 예측이 중요시 된다.

레일에 간극이 있을 때, 차륜이 레일에 충격시 나타나는 에너지를 간단히 예측해 보기로 하자. Fig. 2(a)은 간극지점을 차륜이 통과하는 순간의 차륜-레일 형상을 보여주고 있다. 간극  $w$  를 가진 레일의 통과시, 차륜이 레일을 이탈하는 임계 차량속도  $V_{CR}$  은

$$V_{CR} = \sqrt{g \cdot a \cdot (1 + \frac{M}{m})}$$

로 표시된다. 여기서  $a$ 는 차륜의 반경,  $M$ 은 현가장치위에 놓여져 있는 차량의 질량을,  $m$ 은 차륜의 질량을 나타낸다. 또,  $g$ 는 중력가속도이다. 위 식의 도출과정과 해당변수의 영향에 대한 상세기술은 참고문헌 (6)에 보여져 있다.

차륜과 레일의 접촉조건은 레일 이음매의 간극  $w$  를 가진 형태뿐만 아니라, 다양한 형상이 존재한다. Fig. 2(b)는 차륜과 레일의 다양한 접촉조건 시 나타나는 임계속도를 보여 주고 있다. 한편, 차륜의 이탈

Classification	Condition	Critical speed
Level joint		$V_{cr} = \sqrt{g \cdot a \cdot (1 + \frac{M}{m})}$
Step-down or step-up		$V_{cr} = 0$ (Step-Up) $V_{cr} = \sqrt{a \cdot g \cdot (1 + \frac{M}{m})}$
Rail roughness		$V_{cr} = \sqrt{a \cdot g \cdot (1 + \frac{M}{m})}$
Wheel irregularities		$V_{cr} = \sqrt{a \cdot g \cdot (1 + \frac{M}{m})}$

Fig. 2(b) Discontinuity between wheel and rail

및 재접촉 시 발생하는 수직방향의 충격량  $\pi$ 는 모멘텀의 변화량과 같게 되므로

$$\pi = m \Delta v_y$$

로 표현될 수 있다. 여기서,  $\Delta v_y$ 는 수직방향의 속도 변화량을 나타낸다.

따라서, 차륜의 충격에너지가 차량기지의 지반과 주변 건축구조에 전달되는 것을 피하기 위해서는, 철도차량은 임계속도 이하에서 운행되어야 한다. 철도차량이 임계속도보다 빠르게 차량기지를 진입, 또는 진출하게 되면, 차륜은 간극을 통과할 때마다 레일을 순간적으로 이탈한 후, 재접촉하게 되어 과도한 충격에너지가 발생하게 된다. 물론, 간극의 정도는 임계속도를 결정하는데 영향을 주지는 못하나, 충격모멘텀의 크기에는 결정적인 변수로 작용한다.

### 3.2 건축물의 진동전달 특성

레일을 통해서 발생하는 진동에너지는 차량기지 바닥 건축구조물의 전이층을 연결하는 기둥을 통해서 전달된다. 따라서 진동에너지 전달과정을 분석하기 위하여 차량기지에 있는 기둥의 동특성을 고려하여야 한다.

차량기지를 지지하는 기둥은 단면이  $b, h$  높이  $l$  이라고 하자. 이때의 기둥 굽힘 관성모멘트는

$$I = \frac{1}{12}bh^3$$

가 된다. 한편, 기둥의 고유진동수를 구하려면 경계조건을 고려해야 한다. 기둥의 하단부와 상부는 차량기지바닥과 전이층에 고정되어 있으므로 양단고정지지 조건으로 가정할 수 있다. Euler방정식을 적용하여 예측한 기둥고유진동수  $\omega_n$ 은

$$\omega_n = (\beta_n l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho l^4}}$$

표시된다. 여기서  $\beta_n$ 은 기둥의 경계조건에 의해 결정

Table 1 Constants of various boundary conditions

Boundary Condition	1st $(\beta_1 l)^2$	2nd $(\beta_2 l)^2$	3rd $(\beta_3 l)^2$
Clamped, both	22.4	61.7	121.0
Free, both	22.4	61.7	121.0
Simple support	9.87	39.5	88.9

되는 값이다. 기둥의 경계조건에 의해 결정되는 상수  $\beta_n$  값에 대한 내용은 Table 1에 정리되어 있다.<sup>(7)</sup> 따라서, 콘크리트 영율  $E$ 와 밀도로 부터 단위길이당 질량을 계산하면 해당 차량기지의 기둥이 가지고 있는 고유진동수를 알 수 있게 된다.

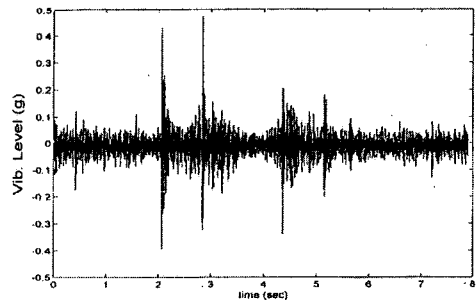
차량기지 건축물의 기둥은 하부측에서는 바닥 기초에 고정되어 있고, 상부측에는 전이층을 지지해 주고 있다. 따라서, 해당구조물의 경계조건은 양단정지지 (clamped-clamped)로 가정할 수 있다.

기둥의 진동전달 특성은 실험을 통해 검증할 수 있다.

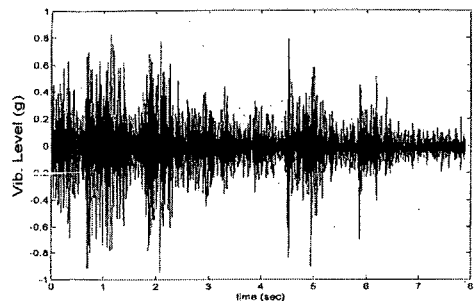
## 4. 차량기지 적용사례

우선, 철도차량이 불연속 레일로 연결되어 있는 차량기지를 운행 할 때의 임계속도를 검토하여 보자. 철도 차량이 가지고 있는 통상적인 값인 질량비( $\frac{M}{m}$ )는 8, 차륜반경  $a$ 는 38 cm가 된다. 앞에서 설명된 임계속도의 식에 이 값을 대입하면, 임계속도  $V_{CR}$ 은

$$V_{CR} = 5.8 \text{ m/sec} , \text{ 또는 } 20.88 \text{ km/H}$$



(a)



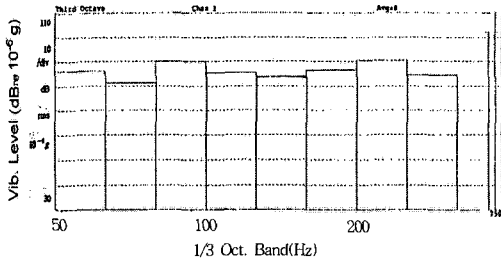
(b)

Fig. 3 Vibration of the rail support structure (a) 10 km/h, (b) 20 km/h

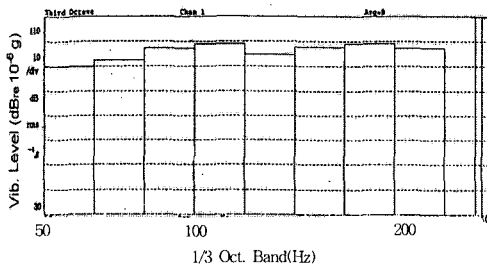
가 된다. 즉, 시속 20 km를 전후로 하여 임계속도가 나타나며, 이때, 차량의 바퀴는 레일과 충돌하면서 진행하게 된다. 이와 같은 충격조건으로 인해, 철도차량의 운전속도가 시속 20 km 이상이 되면 간극의 크기  $w$ 와 무관하게 차륜은 레일 이음매를 통과할 때마다 순간적으로 레일을 이탈하게 된다. 따라서, 충격에 의해 에너지 발생 가능성을 제거하기 위해서는 차량기지에서의 운전속도는 시속 20 km 미만으로 속도의 제한이 요구된다.

실제, 차량주행속도에 따라 레일의 충격에 의해 진동이 발생하는 영향을 검토하기 위하여, 주행속도를 변화시켜가면서 레일받침과 기지기둥에서 진동크기를 측정하였다.

Fig. 3은 기지내에서 철도차량의 운행시 레일받침에서 측정된 진동신호의 시간변화를 보여주고 있다. 전반적으로 시속 10 km로 진출입할 때에는 평균 0.1 g 정도의 범위에서 변화하는 경향을 보여주고 있다. 특정시간에서 최대치는 0.5 g에도 도달하고 있다. 그러나 시속 20 km로 주행하게 되면 진동의 크기는 0.4 g, 최대치는 1 g에 접근한다. 속도가 2배 증가했음에도 진동의 평균크기는 이보다 더 큰 비율로 커져있음을 볼 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 4 Vibration spectrum (a) speed = 10 km/h  
(b) speed = 20 km/h

실제, 진동크기의 변화는 스펙트럼의 분석 후, 해당 주파수별 에너지의 분포를 비교하는 것이 더 의미가 있다. Fig. 4는 차량의 주행속도가 시속 10 km, 20 km일때의 레일받침 및 기둥에 대한 진동스펙트럼을 보여주는 것이다. 스펙트럼의 크기를 비교해 보더라도, 진동크기의 증가는 차량속도의 증가비보다 빠른 비율로 커짐을 볼 수 있다.

철도차량의 주행속도가 변화하게 되면 인접 지반구조물에서 나타나는 진동의 변화량은

$$\Delta dB = 10 \cdot n \cdot \log\left(\frac{V}{V_0}\right)$$

로 알려져 있다. 윗 식은 시속 20 km 이하에서 적용될 수 있는 관계식이며,  $V_0$ 는 기준속도,  $V$ 는 변화된 속도,  $n$ 은 지반의 종류에 따라 결정되는 값이다.

시속 5 km에서 98.9 dB의 진동 값이 속도가 2배 증가된 시속 10 km에서의 진동크기는 102.2 dB이 된다. 시속 2배 증가할 때 나타나는 진동차이는 3.3 dB이 되므로 이 경우의  $n$ 값은 1.1이 된다. 따라서, 시속 10 km의 102.2 dB 진동값이 시속 20 km로 2배가 증가된다면, 105.5 dB이 되어야 한다. 그러나, 실제 시속

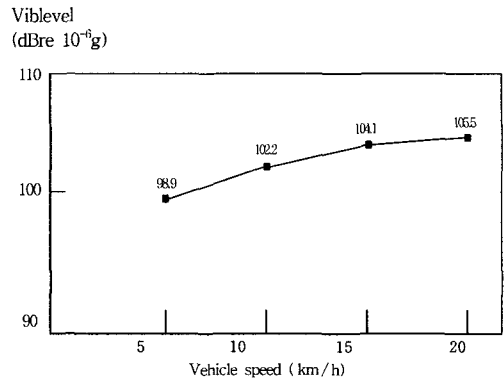


Fig. 5 Production of the vibration level : critical speed effect

Table 2 Classification of vibration effect

unit : dB

speed	5 km/h	10 km/h	15 km/h	20 km/h
Vib. level	98.9	102.2	104.3	109.6
Speed effect	-	3.3	5.2	6.6
Discontinuity effect	-	-	0.2	4.1

20 km 주행시 진동크기는 이보다 4 dB정도가 더 증폭된 109.6 dB로 측정되었다.

Fig. 5는 시속 5 km로 차량주행시 레일받침위치에서 측정된 진동값을 가지고 속도변화량을 보정한 결과를 보여주고 있다. 실제 각각의 속도조건에서 측정된 진동크기는 Table 2에 정리되어 있다. 차량속도가 증가할 때 나타나는 속도증가영향과 레일불연속으로 인해 야기되는 임계속도영향을 분리하여 구분한 결과

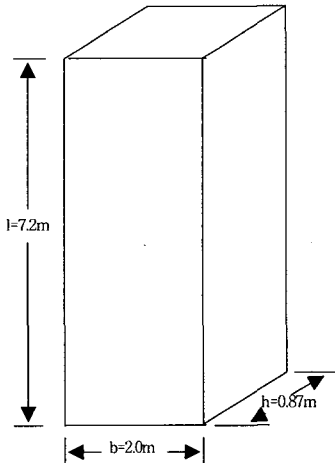


Fig. 6(a) Dimension of the column

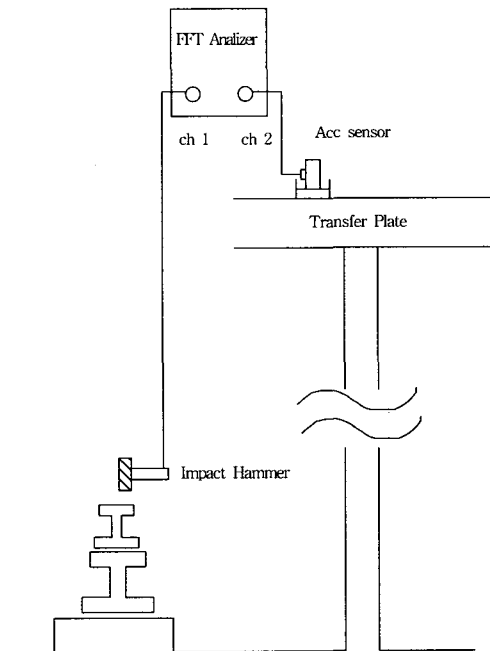


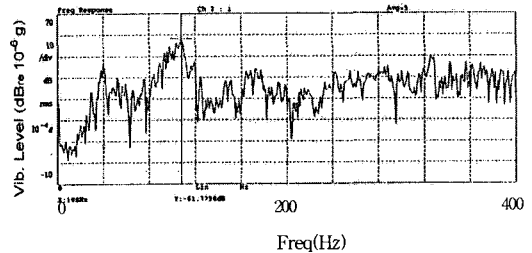
Fig. 6(b) Impact test : rail and structure

는 같은 Table 2에 같이 보여져 있다. 특정속도조건에서 진동의 추가 증폭은 차량의 주행속도가 임계속도 20 km에 근접하면서, 차륜이 레일로부터 이탈과 충돌을 반복하기 때문에 야기된다.

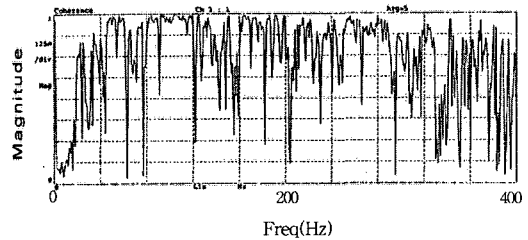
실험을 위해 차량기지 내에서 시속 20 km이상으로 운행하여 데이터를 작성하여야 했으나, 20 km 자체만도 대단한 모험이었고, 그 이상의 속도주행은 허용되지 않았다.

한편, 해당부지에 있는 건축구조물의 물성치는 다음과 같이 고려하였다. Fig. 6은 부지의 기초에서부터 건축물의 전이층을 지탱해 주는 기둥의 단면 특성과 함께, 기둥의 고유진동수를 실측하기위한 측정시스템을 보여주고 있다. 해당기둥의 단면관성모멘트  $I$ 는  $0.11 \text{ m}^4$ 이다. 건축물 기둥은 양단 고정지지조건을 만족시키는 것으로 보고, 차량기지 기둥의 고유진동수를 계산해보면, 그 값은 45.5 Hz 와 121 Hz가 되고 있다. 1차 모드는 45 Hz 근처에 있어, 철도 통과시 이 대역에서 진동원이 발생되면 기둥을 통해 높은 크기의 진동에너지가 전달될 수 있음을 알 수 있다. Fig. 7은 측정된 기둥의 전달함수와 상관도이다. 그림으로부터 고유진동수는 50 Hz와 100 Hz 근처에 있을 것으로 판단된다.

한편, 철도차량이 기지내에서 시속 5 ~ 10 km로 운



(a)



(b)

Fig. 7 Measured TF of the column : (a) FRF, (b) Coherence

행하는 경우, 레일을 가진시키는 스펙트럼은 수십 Hz ~ 120 Hz 대역에 놓여져 있다. 따라서, 기동은 이러한 레일 충격에서 발생하는 진동스펙트럼 에너지를 잘 통과시켜주는 특성을 가지고 있다. 기동의 양 끝단에 진동방지대책이 병행되어야, 발생하는 진동을 차단하게 된다.<sup>(8)</sup>

## 5. 결 론

이 논문에서는 넓은 대지면적을 차지하고 있는 도시지역 철도차량기지를 활용하는 경우, 예상되는 진동의 특성을 분석하였다. 차량기지 현장을 적용사례로 채택하여, 동 현장에서 나타나는 진동크기를 측정 한 후, 공학적 기법을 적용하여 진동을 저감시키는 접근방법을 검토하였다. 차량기지내에서 나타나는 진동의 특수성은 다음과 같이 두가지 측면이 있다.

- (i) 기지내 차량 진출입시 나타나는 임계속도,
- (ii) 지반/건축물 전이층을 연결하는 기동의 고유모드

우선, 임계속도는 차륜에 의해 결정된다. 사례로 적용된 차륜의 크기를 바탕으로 검토한 임계속도는 시속 20 km이다. 따라서, 기지내 운행속도가 임계속도에 도달하면, 차륜이 레일을 이탈 및 충격하는 반복 현상이 나타나 진동이 과다하게 증가한다. 한편, 해당 차량기지는 시속 5 km로 설계되어 있었다. 국내외 대부분의 차량기지도 주행속도는 시속 5 km로 설계되어 있었다. 이것은 임계속도의 영향을 감안한 것으로 판단된다. 시속 5 km 수준의 저속으로 기지내를 운행하는 것은 현실적으로 쉽지 않은 조건이긴 하나, 진동피해를 최소화하기 위해서는 가급적 규정 속도를 준수할 것이 요구되고 있다. 불가피한 경우에도, 시속 20 km 미만으로 운행될 수 있는 속도 규제는 필요하다.

한편, 레일에서 발생하는 진동에너지는 차량기지 바닥과 건축구조물의 전이층을 연결하는 기동을 통해 상부로 전파되므로, 진동전달과정을 분석하기 위해서는 차량기지내에 있는 기동의 동특성을 고려하여야 한다. 기동의 단면특성으로부터 도출된 고유진동특성을 검토한 결과, 해당기동의 1차모드는 45 Hz 근처에 있어, 이 대역의 진동에너지가 상부로 잘 전달된다.

한편, 아파트 주민의 거주 위치에서 측정된 진동에너지는 저층의 경우에는 30 ~ 120 Hz, 중층과 고층의

경우에는 30 ~ 60 Hz 대역에 있다. 기동이 가지고 있는 고유진동수는 레일 충격에서 발생하는 진동에너지를 건축물의 상부로 여과없이 통과시키는 물리적 구조물로 작용하게 된다. 따라서, 차량통과시마다 레일에 나타나는 진동대역의 에너지가 기동을 통해 전파되는 것을 피하기 위해서는 기동단면 설계시 구조변경이 요구된다. 현실적으로, 기존 건축물의 굽힘강성을 증가시키기는 어려우나, 굽힘강성 EI 값을 증가시키면 1차 고유진동수를 높이게 된다. 그 결과, 레일로부터 전달되는 저주파의 진동에너지를 저감시키는 효과를 기대할 수 있다.

## 후 기

이 논문의 일부는 2004년 홍익대 학술연구조성비(환경지반진동의 예측과 적용사례)로 작성되었음.

## 참 고 문 헌

- (1) GERB, Vibration and Control for Buildings and Trackbeds, 2003.
- (2) Eun, H. T., Kim, J. T., 1995, "A Study for the Noise and Vibration of the High-speed Rails : the Criteria and Prevention Measures", KHRI
- (3) KSNVE, Handbook on Noise and Vibration.
- (4) Lee, J. W., Jang, S. I., Kim, D. S., 2004 "Study on the Prediction of Ground-borne Vibration Induced by Subway", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 3, pp. 175 ~ 184.
- (5) Remington, P. J., 1976, "Wheel/rail Noise-Part I: Characterization of the Wheel/Rail Dynamics", JSV, Vol. 46, No. 3, pp. 359 ~ 379.
- (6) Ver, I. L., Ventres, C. S., etc, 1976, "Wheel/Rail Noise-Part III: Impact Noise Generated by Wheel and Rail Discontinuities", JSV, Vol. 46, No. 3, pp. 395 ~ 417.
- (7) Thomson, W. T., Theory of Vibration with Application, 4th Edition, p. 283.
- (8) Hunt, H. E. M., Measures for Reducing Ground Vibration Generated by Trains in Tunnel, NV, pp. 423 ~ 430.