

차량기지내 철도운행시 발생하는 진동특성에 관한 연구 (Vibration characteristics of a railway depot: Practical approach)

김정태*, 김정수**, 손정곤***

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

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, a structural effect on the transmission of a vibration energy 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. 서론

국내 대도시에 있는 철도차량기지는 부지당 최소한 10만 평방미터이상의 대단지로서 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 상부 공간을 공공 건축목적으로 활용하고 있는 경우는 극히 제한되어 있는 수준이다. 국내에서는 최근들어 철도차량 부지, 대단위 매립장과 적치장, 철도정비창 등과 같은 유휴토 지위에 공공용도의 건축물을 지어 해당토지를 활용하려는 노력이 사회 일각에서 대두되고 있다. 이는 우리나라와 같이 협소한 공간에서 살아가야하는 공동체 입장에서는 늦은 감이 없지 않으나, 바람직한 접근방향 이라고 판단된다.

문제는 차량기지를 활용하는 과정에서 부수적으로 발생

되는 환경피해이다. 차량부지의 철도레일은 육중한 하중의 철차가 운행되는 관계로 지반진동의 수준이 높게 나타난다. 또한, 철도부지에 입체적으로 건설되는 건축물의 기초구조는 철도차량의 통과시 나타나는 가진력을 직접 받게되기 때문에 결과적으로 건축물 전체를 진동시키게 된다. 그 결과, 건축물의 구조적 안전에 문제가 발생되고, 건축물 내부에 거주하는 주거민에게 생활진동과 소음 등 문제를 야기시킨다.

따라서, 철도부지를 효과적으로 활용하기 위해서는 예상되는 진동의 피해정도를 합리적으로 분석하고, 문제제기가 있을 경우를 대비에 사전에 공학적기법을 적용하여 적절한 설계방안이 제시되어야 한다.

본 연구에서는 지하철 기지의 차량 진출입시 발생하는 진동문제를 검토하고, 진동저감방안을 마련하고자 한다. 우선, 1부에서는 철도차량부지의 특수성을 진동측면에서 고려한다. 차량의 진출입시 발생하는 임계속도를 예측하여 진동 크기와 차량주행속도와의 상관관계를 검토한다. 이외함께, 차량기지 건축구조물의 진동전달 특성을 분석한다.

2부에서는 측정된 진동값을 바탕으로 객관적인 진동허용 기준 또는 인체가 느끼는 진동감지의 한계 등과 비교 검토한다. 이외함께, 진동 방지대책을 제시함으로써, 향후 철도차량기지 등과 같은 대지위에 건설되는 건축구조물에 미치는

* 주저자, 홍익대학교
E-mail : jtkim@hongik.ac.kr
Tel : (02) 320-1457, Fax : (02) 320-1634

** 홍익대학교

*** 동일기술공사

진동민원을 최소화 시키고 쾌적한 주거 환경을 제공하는데 본 논문의 목적이 있다.

2. 차량기지 진동의 특수성

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

본장에서는 차량기지에서 발생된 진동에너지가 건축물 상부와 주민들에게 전파되는 과정에서 핵심적인 사항을 검토해 봄으로써, 차량기지를 효율적으로 사용할 수 있는 진동 방지대책을 마련하고, 더 나아가 향후 차량기지에 새로운 건축물의 설계시 진동측면에서 고려될 수 있는 방안을 모색하고자 한다.

2.1 차량임계속도에 대한 고려

철도차량의 운행시 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 소리등이 발생된다. 차량기지의 레일에서 건축물로 전달되는 진동, 소음에너지는 이 중에서 충격에 의한 진동, 소음에 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 정차시 브레이크 사용으로 인해 나타나는 편마모(Flat)가 있다.

레일과 차륜의 불연속 접촉시 나타나는 충격에너지는

- 철도 차량의 주행속도
- 레일의 표면 거칠기
- 차륜의 형상
- 작용하는 하중
- 레일의 고유진동수

의 함수로 나타나게 된다.

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 구조에까지 전파된다. 따라서 충격시 나타나는 모멘텀의 예측이 중요시 된다.

레일에 간극이 있을 때, 차륜이 레일에 충격시 나타나는 에너지를 간단히 예측해 보기로 하자. Fig. 1(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

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

로 표시된다. 여기서 a 는 차륜의 반경, M 은 현가장치위에 놓여져 있는 차량의 질량을, m 은 차륜의 질량을 나타낸다. 또, g 는 중력가속도이다.

차륜과 레일의 접촉조건은 레일 이음매의 간극 w 를 가진 형태뿐만 아니라, 다양한 형상이 존재한다. Fig. 1(b)는 차륜과 레일의 다양한 접촉조건시 나타나는 임계속도를 보여주고 있다. 한편, 차륜의 이탈 및 재접촉시 발생하는 수직방향의 충격량 π 는 모멘텀의 변화량과 같게 되므로

$$\pi = m v_y$$

로 표현될 수 있다. 여기서, v_y 는 수직방향의 속도값을 나타낸다.

따라서, 차륜의 충격에너지가 차량기지의 지반과 주변 건축구조에 전달되는 것을 피하기 위해서는, 철도차량은 임계속도 이하에서 운행되어야한다. 철도차량이 임계속도보다 빠르게 차량기지를 진·출입하게되면, 간극의 크기에 상관없이 차륜은 간극을 통과할때마다 레일을 순간적으로 이탈한 후, 재접촉하게 되어 과도한 충격에너지가 발생하게 된다.

2.2 건축물의 진동전달 특성

레일을 통해서 발생하는 진동에너지는 차량기지 바닥과 건축구조물의 전위층(Transfer Plate)을 연결하는 기둥을 통해서 전달된다. 따라서 진동에너지 전달과정을 분석하기 위하여는 차량기지에 있는 기둥의 동특성을 고려하여야 한다.

차량기지에 놓여져 있는 기둥의 단면이 b, h 높이 l 이라고 하자. 이때의 기둥 굽힘 관성 모멘트는

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

가 된다. 한편, 기둥의 고유진동수해석을 위해, 기둥의 하단부와 상부는 차량기지바닥과 전위층에 고정되어 있으므로 양단고정지지조건으로 가정할 수 있다. Euler방정식을 적용하여 예측한 기둥고유진동수 ω_n 은

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

표시된다. 여기서 β_n 은 기둥의 경계조건에 의해 결정되는 값이다. Table 1 은 기둥의 경계조건에 의해 결정되는 상수 β_n 을 보여주고 있다. 따라서, 콘크리트 영율 E와 밀도로 부터 단위길이당 질량을 하면 해당 차량기지의 기둥이 가지고 있는 고유진동수를 알 수 있게 된다. 해석된 기둥의 진동전달 특성은 실험측정을 통해 검증될 수 있다.

3. 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 38cm가 된다. 앞에서 설명된 임계속도의 식에 이 값을 대입하면, 임계속도 V_{CR} 은

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

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

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

Fig. 2은 기지내에서 철도차량의 운행시 레일받침에서 측

정된 진동신호의 시간변화를 보여주고 있다. 전반적으로 시속 10km로 진출입할 때에는 평균 0.1g정도의 범위에서 변화하는 경향을 보여주고 있다. 특정시간에서 최대치는 0.5g 에도 도달하고 있다. 그러나 시속 20km로 주행하게 되면 진동의 크기는 0.4g, 최대치는 1g에 접근한다. 속도가 2배 증가했음에도 진동의 평균크기는 이보다 더 큰 비율로 커져 있음을 볼 수 있다.

실제, 진동크기의 변화는 스펙트럼의 분석후, 해당주파수 별 에너지의 분포를 비교하는 것이 더 의미가 있다. Fig.3 은 차량의 주행속도가 시속 10km, 20km일때의 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

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

로 알려져 있다. 위 식은 시속 20km 이하에서 적용될 수 있는 관계식이며, V_0 는 기준속도, V는 변화된 속도, n은 지반의 종류에 따라 결정되는 값이다.

시속 5km에서 98.9dB 의 진동 값이 속도가 2배 증가된 시속 10km 에서의 진동크기는 102.2dB 이 된다. 시속 2배 증가할 때 나타나는 진동차이는 3.3dB 이 되므로 이 경우의 n값은 1.1이 된다. 따라서, 시속 10km 의 102.2dB 진동값이 시속 20km 로 2배가 증가된다면, 105.5dB 이 되어야 한다. 그러나, 실제 시속 20km 주행시 진동크기는 이보다 4dB정도가 더 증폭된 109.6dB 로 측정되었다.

Fig. 4는 시속 5 Km로 차량주행시 레일받침위치에서 측정된 진동값을 가지고 속도변화량을 보정한 결과를 보여주고 있다. 실제 각각의 속도조건에서 측정된 진동값은 Table 1에 정리되어 있다. 차량속도가 증가할 때 나타나는 속도증가영향과 레일불연속으로 인해 야기되는 임계속도영향을 분리하여 구분한 결과는 같은 Table 1. 에 같이 보여져 있다. 특정속도조건에서 진동의 추가 증폭은 차량의 주행속도가 임계속도 20km에 급접하면서, 차륜이 레일로부터 이탈과 충돌을 반복하기 때문에 야기된다.

실험을 위해 차량기지내에서 시속 20 Km이상으로 운행

하여 데이터를 작성하여야 했으나, 20 Km 자체만도 대단한 모험이었고, 그 이상의 속도주행은 허용되지 않았다.

임계속도와 함께, 해당부지에 있는 건축구조물의 물성치를 고려하여 보자. Fig. 5는 부지의 기초에서부터 건축물의 전위층을 지탱해 주는 기둥의 단면특성과함께, 기둥의 고유진동값을 실측하기위한 측정시스템을 보여주고 있다. 해당기둥의 단면관성모멘트 I 는 $0.11m^4$ 이고 이론적으로 예상된 차량기지 기둥의 고유진동수는 45.5 Hz 와 121 Hz가 되고 있다. 1차 모우드가 45Hz 근처에 있어, 철도 통과시 이 대역에서 진동원이 발생되면 기둥을 통해 높은 크기의 진동에너지가 전달될 수 있음을 알 수 있다. Fig. 6은 측정된 기둥의 전달합수와 상관도이다. 그림으로부터 진동모우드는 50 Hz와 100 Hz 근처에 있을 것으로 판단된다.

한편, 철도차량이 기지내에서 시속 5-10 Km로 운행하는 경우, 레일을 가진시키는 스펙트럼은 수십 Hz- 120 Hz 대역에 놓여져 있다. 따라서, 기둥은 이러한 레일 충격에서 발생하는 진동스펙트럼 에너지를 잘 통과시켜주는 특성을 가지고 있다. 기둥의 양 끝단에는 진동방지대책이 병행되어야, 발생하는 진동을 차단하게 된다.

4. 결론

본 고에서는 넓은 대지면적을 차지하고 있는 도시지역 철도차량기지를 활용하는 경우, 예상되는 진동의 특성을 분석하였다. 차량기지 현장을 적용사례로 채택하여, 동 현장에서 나타나는 진동크기를 측정후, 공학적 기법을 적용하여 진동을 저감시키는 접근방법을 검토하였다. 차량기지에서 나타나는 진동의 특수성은 다음과 같이 두가지 측면이 있다.

- (i) 기지내 차량 진출입시 나타나는 임계속도,
- (ii) 지반/건축물 전위층을 연결하는 기둥의 고유모우드

우선, 임계속도는 차륜에 의해 결정된다. 사례로 적용된 차륜의 크기를 바탕으로 검토한 임계속도는 시속 20 Km이다. 따라서, 기지 내 운행속도가 임계속도에 도달하면, 차륜이 레일을 이탈 및 충격하는 반복현상이 나타나 진동이 과다하게 증가한다. 한편, 해당 차량기지는 시속 5km로 설계되어 있었다. 국내의 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 조건이긴하나, 진동피해를 최소화하기 위해서는 가급적 규정 속도를 준수할 것이 요구되고 있다. 불가피한 경우에도, 시속 20km 미만으로 운행될 수 있는 속도 규제는 필요하다.

한편, 레일에서 발생하는 진동에너지는 차량기지 바닥과 건축구조물의 전위층(Transfer Plate)을 연결하는 기둥을 통해 상부로 전파되므로, 진동전달과정을 분석하기 위해서는 차량기지에 있는 기둥의 동특성을 고려하여야 한다. 기둥의 단면특성으로부터 도출된 고유진동특성을 검토한 결과, 해당 기둥의 1차모우드는 45Hz 근처에 있어, 이 대역의 진동에너지가 상부로 잘 전달된다. 자료분석결과, 철도차량 통과시, 레일에 가해지는 주된 진동 스펙트럼대역은 120 Hz 아래에 놓여 있다. 기둥은 이러한 레일 충격에서 발생하는 진동에너지를 건축상부로 여과없이 통과시키는 구조물로 작용하게 된다. 따라서, 차량통과시마다 레일에 나타나는 진동대역의 에너지가 기둥을 통해 전파되는 것을 피하기 위해서는 기둥 단면 설계시 구조변경이 요구된다. 굽힘강성 EI 값을 증가시키면 1차 모우드값을 높게 되므로, 그 결과, 레일로부터 전달되는 진동에너지를 저감시키는 효과가 기대된다.

후기

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

참고 문헌

- (1) P. J. Remington, " Wheel/rail noise-Part I: Characterization of the wheel/rail dynamics", JSV, 46(3), pp.359-379, 1976.
- (2) I. L. Ver, C. S. Ventres, etc, " Wheel/rail noise-Part III: Impact noise generated by wheel and rail discontinuities", JSV, 46(3), pp.395-417, 1976.
- (3) Hunt, H.E.M, Measures for reducing ground vibration generated by trains in tunnel, NV , pp.423-430.
- (4) GERB, Vibration and control for buildings and trackbeds, 2003.
- (5) 이시우, "철도차량의 진동전파특성", 홍익대학교 석사논문, 2004.
- (6) 은희준, 김정태, "고속철도 환경소음 기준 및 진동기준에 대한 연구", 1995, 한국고속철도 건설공단
- (7) 한국소음진동공학회, 소음진동 편람.

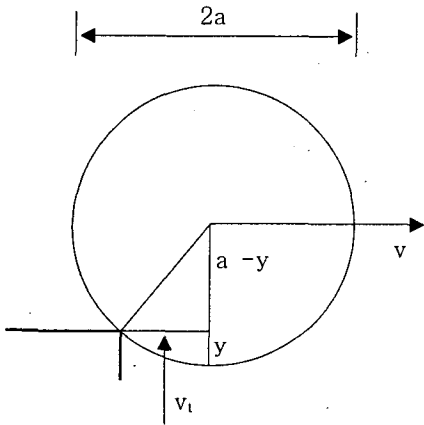


Fig 1(a). Rail Separation

Classification	Condition	Critical speed
Level Joint		$V_{CR} = \sqrt{g \cdot a \cdot (1 + \frac{M}{m})}$
Step-Down or Step-Up		$V_{CR} = 0 \text{ (Step-Up)}$ $V_{CR} = \sqrt{a \cdot g \cdot (1 + \frac{M}{m})}$
Rail roughness		$V_{CR} = \sqrt{r \cdot g \cdot (1 + \frac{M}{m})}$
Wheel irregularities		$V_{CR} = \sqrt{a \cdot g \cdot (1 + \frac{M}{m})}$

Fig 1(b). Discontinuity between wheel and rail

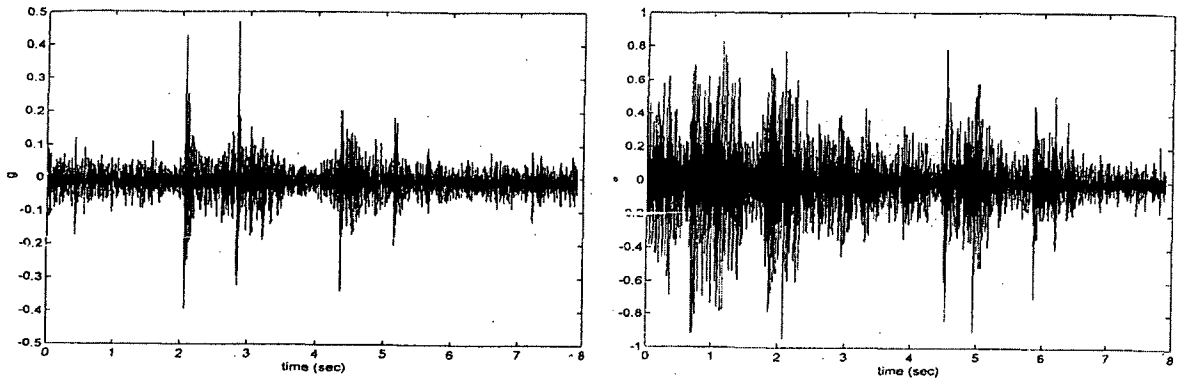


Fig 2. Vibration of the rail support structure (a) 10 Km/h, (b) 20 Km/h

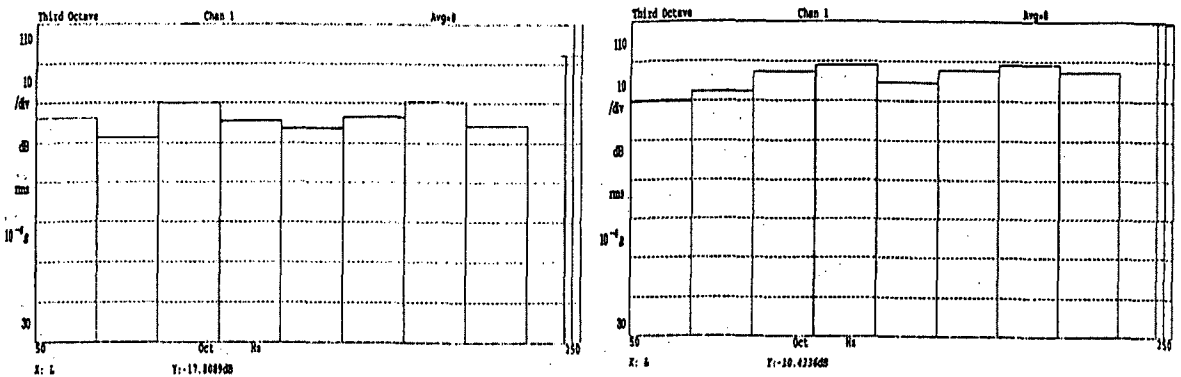
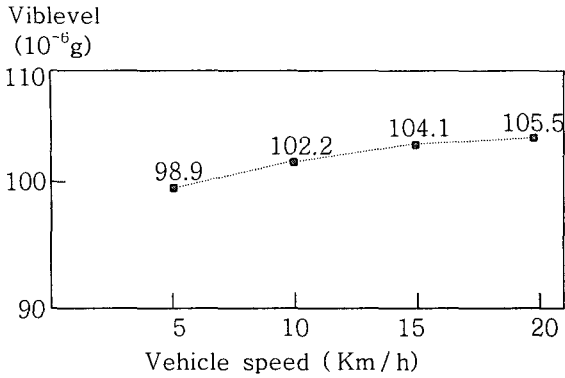


Fig 3. Vibration Spectrum (a) speed = 10 Km/h (b) speed = 20 Km/h



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
Critical Effect	-	-	0.2	4.1

Fig 4. Vibration level : speed effect

Table 1. Classification of vibration effect

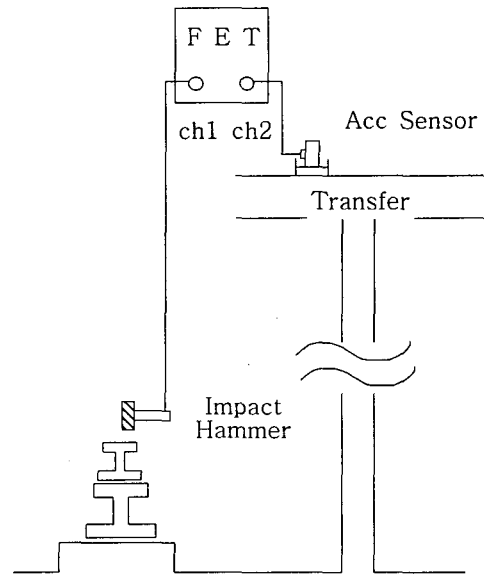
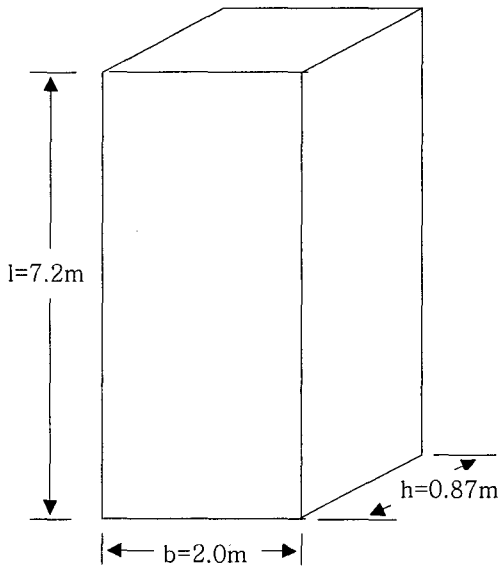


Fig 5(a). Dimension of the column.

Fig 5(b). Impact test : rail and structure

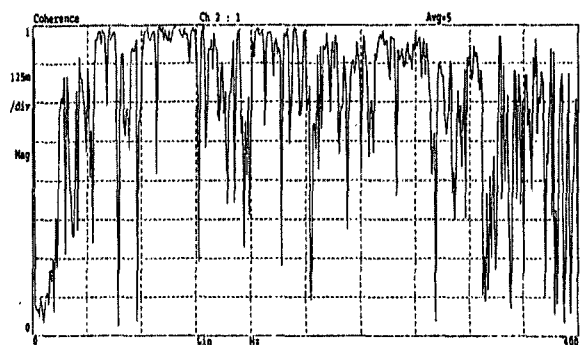
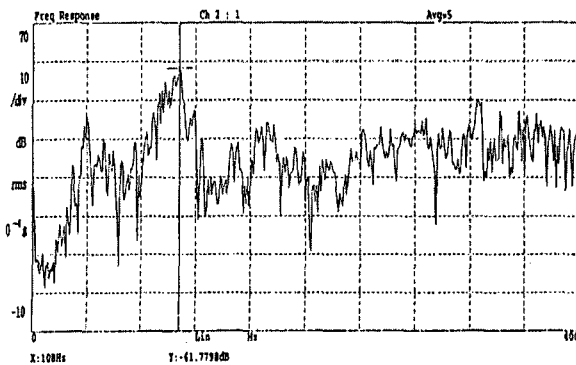


Fig 6. Measured TF of the column : (a) FRF, (B) Coherence