

지하철 차량기지 건축구조물의 진동 특성

김 정 태* · 손 정 곤**

(*홍익대학교 기계공학과 · **대우엔지니어링)

1. 머리말

지하철의 차량기지 진·출입시 발생하는 진동에너지는 발생원에너지 특성과 차량기지 구조물의 에너지 전달특성이 복합적으로 작용하여, 아파트 단지에 입주하고 있는 주민들의 주택에 전파하게 된다.

본 글에서는 차량기지에서 발생된 진동에너지가 주민들에게 전파되는 과정에서 핵심적인 사항을 검토해 봄으로써, 해당 아파트 단지의 저진동 대책을 마련하고, 더 나아가 향후 새로운 차량기지의 설계시 진동방지 대책으로 고려될 수 있는 방안을 모색하고자 한다.

2. 운행속도의 영향

지하철의 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 소리 등이 발생된다. 차량기지에서 아파트 단지로 전달되는 진동, 소음에너지는 이 중에서 특히, 충격에 의한 진동, 소음에 기인한다.

용접에 의해 장대화된 레일이나, 레일의 유지·보수상태가 최상 조건으로 유지된 경우를 제외하고는, 레일과 차륜의 접촉면에서 진동 소음이 발생된다. 레일 불연속 현상의 대표적인 예는, 레일간의 이음점, 포인트, 요철이라

고 할 수 있다. 또, 차륜의 불연속 현상은 정차시 브레이크 사용으로 인해 나타나는 편마모(flat)가 있다.

레일과 차륜의 상태가 불연속 접촉되면 나타나는 충격에너지의 크기는

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

의 함수로 나타나게 된다.

레일에 간극이 있을 때, 차륜이 레일에 충격시 나타나는 에너지를 간단히 예측해 보기로 하자. 그림 1은 간극지점을 차륜이 통과하는 순간의 차륜-레일 형상을 보여주고 있다. 간극 w 를 가진 레일의 통과시, 차륜이

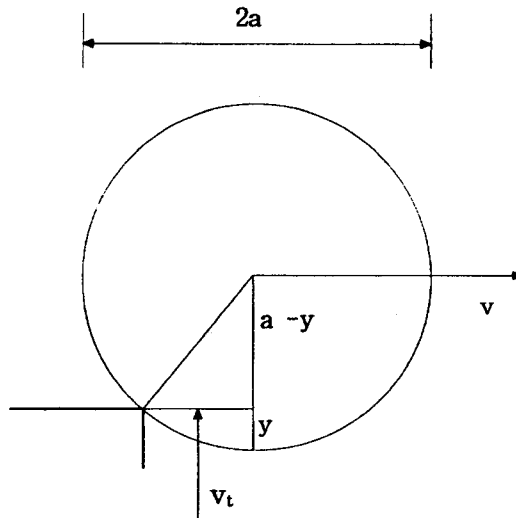


그림 1 레일로부터 차륜이 분리될 때의 상태

구분	형상	임계속도
간극 (Level joint)		$V_{CR} = \sqrt{g \cdot a \cdot (1 + \frac{M}{m})}$
간극과 높이 (Step-down 또는 Step-up)		$V_{CR} = 0$ (Step-Up) $V_{CR} = \sqrt{a \cdot g \cdot (1 + \frac{M}{m})}$
레일 표면 불량		$V_{CR} = \sqrt{r \cdot g \cdot (1 + \frac{M}{m})}$
차륜 편마모		$V_{CR} = \sqrt{a \cdot g \cdot (1 + \frac{M}{m})}$

그림 2 차륜-레일간 불연속 접촉형상

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 중력 가속도값이다.

차륜과 레일의 접촉조건은 레일 이음매의 간극 w 를 가진 형태 뿐만 아니라, 다양한 형상이 존재한다. 그림 2는 차륜과 레일의 다양한 접촉조건시 나타나는 임계속도를 보여 주고 있다. 임계속도의 표현식에 대입하면, 임계속도 V_{CR} 은

$$V_{CR} = 5.8 \text{ m/sec}$$

가 됨을 알 수 있다. 즉, 시속 20 km를 전후로 하여 충격이 발생하므로, 지하철 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 차량 운전속도는 시속 20 km 미만의 엄격한 속도제한규정으로 운영되어야

한다.

철도차량의 주행속도가 변화하게 되면 인접 지구구조물에서 나타나는 진동의 변화량은

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

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

실제, 차량기지에서 진동 변화를 측정 한 결

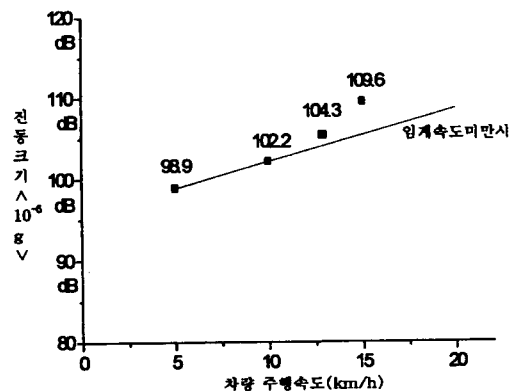


그림 3 차량 주행속도별 레일 받침의 진동크기

과는 그림 3과 같이 표현됨을 알 수 있다. 이러한 진동의 추가증폭은 차량의 주행속도 20 km가 임계속도에 인접되어 있기 때문이며, 주행과정에서 차륜이 레일을 이탈 및 충격하는 반복현상이 나타나기 때문으로 판단된다.

위와 같은 임계속도의 영향을 감안하여, 모든 차량기지는 설계속도에 따른 차량의 주행속도를 제한하고 있으므로, 차량의 운행시 규정속도의 준수가 요구되고 있다.

3. 기둥의 진동전달 특성

레일을 통해서 발생하는 진동에너지는 차량기지 바닥과 아파트 구조물의 전위층(transfer plate)을 연결해 주고 있는 기둥을 통해서 전달된다. 따라서 진동에너지 전달과정을 분석하기 위하여는 차량기지기둥의 동특성을 고려하여야 한다.

기둥에 대한 동특성 해석은 보에 대한 Euler방정식의 적용이 타당한 것으로 판단되며, 따라서 굽힘 관성 EI 를 가지고 있는 보의 굽힘 지배방정식은

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} - \rho \omega^2 y = 0$$

로 표시된다. 여기서 ρ 는 콘크리트의 밀도, ω 는 주파수(radian)을 가르킨다. 위식을 간단히 정리하기 위하여

$$\beta^4 = \rho \frac{\omega^2}{EI}$$

를 사용하여 치환하면 해당기둥의 고유진동수 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. 표 1은 기둥의 경계

표 1 경계조건에 따른 상수값

경계조건	1차 ($\beta_1 l$) ²	2차 ($\beta_2 l$) ²	3차 ($\beta_3 l$) ²
양단고정	22.4	61.7	121.0
양단자유	22.4	61.7	121.0
단순지지	9.87	39.5	88.9

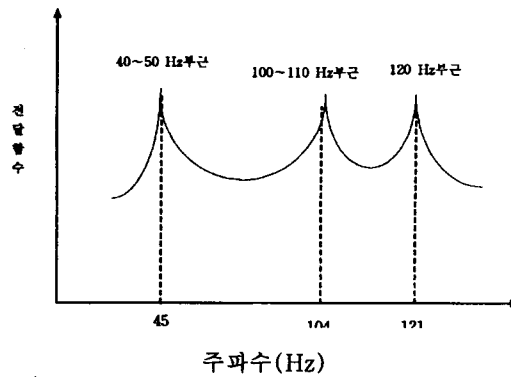


그림 4 예상되는 기둥의 전달함수 특성

조건에 의해 결정되는 상수 β_n 을 보여주고 있다. 따라서, 콘크리트 영률 E 와 밀도로부터 단위 길이당 질량을 하면 해당 차량기지의 기둥이 가지고 있는 고유진동수를 알 수 있게 된다.

한편, 지하철의 통과시, 레일을 가진시키는 스펙트럼은 그림 4에 보여져 있는 것과 같이 40~100 Hz 대역에 놓여져 있다. 따라서, 기둥은 이러한 레일 충격에서 발생하는 진동 스펙트럼 에너지를 잘 통과시켜주는 특성을 가지고 있으며, 기둥의 양끝단에 방진 대책이 병행되어야, 발생하는 진동의 차단이 이루어지게 됨을 볼 수 있다.

따라서, 레일을 가진시키는 40~100 Hz 대역의 진동에너지가 기둥을 통해 전파되는 것을 낮추기 위해서는 기둥의 단면 설계시 고유진동수를 고려한 방안이 요구된다.

4. 레일받침대의 진동전달특성

지하철 철도차량이 주행시 주변구조물에 전파되는 진동에너지의 크기를 결정하는 핵심요소는 레일 받침의 진동 전달특성이라 할 수 있다. 특히, 앞에서 설명된 것과 같이, 차륜과 레일 사이의 충격 등에 의해 건물에 진동피해를 미치는 주에너지성분은 40~100 Hz대역에 위치하고 있기 때문에, 레일 받침 구조의 방진특성 중 해당 주파수 대역에서의 진동전달크기가 중요시 되고 있다.

레일받침구조의 진동전달특성을 분석하기 위해서는 레일을 측정 가능한 힘으로 가진시킨 후, 그에 대한 응답을 비교함으로써 수행할 수 있다. 우리가 대상으로 하는 구조물은

선형시스템이라고 가정할 수 있으므로 입력되는 크기와 무관한 고유모드와 고유진동수를 가지게 된다.

차량기지의 레일전달특성을 실험하기 위하여, 1차로 실험대상은 검차고를 대상으로 하였다. 그림 5는 검차고 레일에 충격되는 햄머를 이용한 주파수 응답특성의 실험과정을 보여 주고 있다. 실험결과의 데이터를 분석해보면 40 Hz의 대역과 100~120 Hz의 대역에서 높은 에너지 전달특성을 가지고 있음을 볼 수 있다. 이러한 원인은 근본적으로 기둥의 전달특성에 기인한다고 볼 수 있다. 즉 기둥의 전달함수는 40 Hz부근에 모드 1개가, 104 Hz 및 120 Hz부근에 모드 2개가 놓여져 있다. 그 결과로 40 Hz부근에서 최대값이, 또 100~120 Hz를 포함한 주파수대역에서 최대값이 나타나고 있는 것이라 판단되고 있다.

이러한 진동전달함수를 실제 사용하는 물리량으로 환산해서 보면, 108 Hz 성분의 경우, 1 kg의 힘을 가했을때 -61 dB(기준 : 1

g)의 진동에너지가 발생된다. 즉, 우리나라의 진동 기준인 $10^{-6}g$ 을 사용하게 되면 59 dB의 크기가 예상된다. 따라서, 실험대상 차량기지의 검차고 레일하부구조는 40 Hz와 100 Hz대역의 진동에너지를 감쇠없이 전달시키는 특이한 구조로 되어 있다. 차량운전시 차륜과 레일에서 위와 같은 대역의 에너지가 발생되면, 아파트 구조물에 여과없이 전달시키게 된다.

이와같이, 차량기지 기둥이 전달하는 40 Hz와 100 Hz대역은 차륜의 레일접촉시 발생하는 진동에너지 스펙트럼의 대역과 겹치게 되므로, 그만큼 아파트 건물로의 진동전달 가능성이 많게 된다. 따라서, 차량기지 기둥의 강성을 증가시켜, 기둥의 고유진동수가 차륜/레일 접촉으로 인해 발생하는 주파수 대역 윗쪽으로 설계되면, 진동의 피해를 예방할 수 있는 효과가 나타나게 된다.

5. 아파트 전위층의 진동전달특성

아파트 구조물이 미치는 하중의 영향을 기초에 균등분포하기 위하여, 실험대상 차량기지의 인근 아파트 단지의 피트 바닥에는 1,200 mm의 전위층이 설치되어 있다. 콘크리트의 밀도를 $2.4 t/m^3$ 로 가정하면, 전위층의 단위면적당 하중은 $2.9 t/m^3$ 이 된다. 따라서 아파트의 폭(10.7 m)과 너비(48.6 m)를 고려하면 전위층의 자중은 1,510 t이 된다. 한편, 대단히 무거운 하중을 가진 전위층 위에는 아파트 자체의 자중이 실려 있다. 1~14층과 15층 및 지붕까지의 무게를 모두 고려하면, 전위층을 포함한 아파트의 자중은 3,600여 톤의 무게를 가지고 있다. 표 2는 아파트의 요소별 자중분포를 보여주

표 2 차량기지 상부 아파트의 하중 구성

구 분	자 중 (ton)		비 고
	전위층 두께 (1,200 mm)	전위층 두께 (1,200 mm)	
전위층	1,510	2,013	
1층~14층	827.5	827.5	
15층	729.2	729.2	
지붕	511.2	511.2	
합 계	3577.9	4,081	14%증가

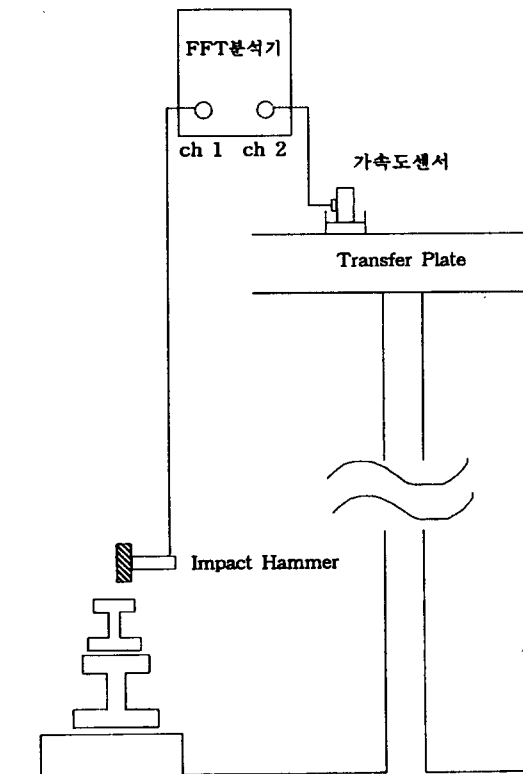


그림 5 레일-지하층 피트간 진동충격 실험개요

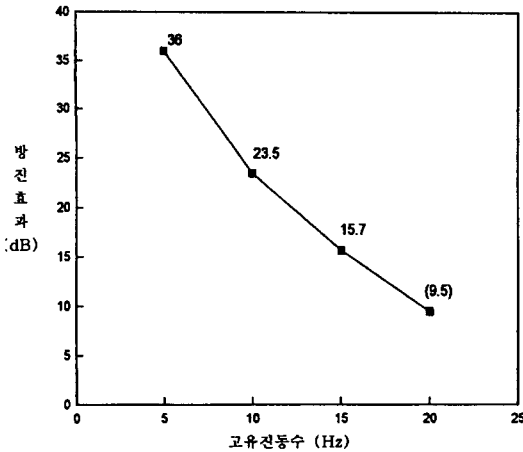


그림 6 방진재 설치시 철도차량 진동원의 저감 효과(여기서 가진원은 40 Hz 에너지로 가정)

고 있다.

실제, 전위층과 아파트 상부 구조간에 강한 연성으로 연결되어 있음을 레일에서부터 아파트상부구조의 지하층 pit바닥간의 전달함수 측정으로 비교가능하다. 그림 6은 레일에서부터 피트간의 전달함수측정방법을 보여주고 있다. 측정에 사용된 계측기는 앞절의 시스템을 동일하게 사용하였으며, 다만 진동가속도계의 설치위치가 종진의 기둥에서 지하층 피트바닥으로 옮겨졌을 따름이다. 실험결과를 보면, 전위층과 같이 대형 구조물이 놓여져 있음에도 불과 24 dB의 낮은 진동저감이 나타나고 있다. 이것은 전위층 상,하 부분에 방진개념의 설계가 고려되지 않고 직접 연결되어 있다고 판단된다.

6. 맺음 말

본 글에서는 차량기지의 아파트구조에 대하여 진동측면에서 세부적인 사항을 검토하였다. 검토결과 도출된 내용을 정리요약하면 다음과 같다

(1) 차량임계속도는 시속 20 km내외에 해당된다. 따라서, 차량의 주행속도가 시속 15 km미만으로 주행할 수 있도록 엄격한 속도관리가 요구되고 있다.

(2) 시속 20 km 주행조건에서 레일하부 구조에서 측정된 진동의 크기는 최대 1.0 g 정도의 값을 가지고 있다.

(3) 레일에서 발생된 진동에너지가 아파트 하부 및 상부층까지 쉽게 전달되는 특성을 가지고 있다.

(4) 차량기지 기둥의 고유진동수는 40 Hz 부근(1차 모드)과 100 Hz부근에 놓여져 있다. 그 결과, 레일에서 발생된 진동에너지 중, 기둥의 고유진동수에 해당되는 에너지가 전위층에 증폭되어 전달된다.

(5) 3,600여 톤에 이르는 아파트 구조는 차량기지와 전위층을 통해 직접 연결되어 있기 때문에 차량기지의 기둥전달 특성이 감소 없이 그대로 아파트 상부구조로 전파된다.

따라서, 차량기지에 위치하고 있는 아파트 주민을 진동공해로부터 피해를 최소화시키기 위해서는 앞에서 검토된 단지의 특수성을 고려한 방진대책의 수립이 요구되고 있다.