철도인공대지에 건설된 아파트의 방진대책(II): 설계변수

Vibration Reduction for a Railway Depot Building (II): Design Parameters

김정태*

Jeung Tae Kim

Abstract In the second part of the paper, a design strategy for an apartment complex constructed at a railway depot is proposed for vibration reduction purposes. Various design parameters such as the vehicle operating speeds, artificial land behavior, housing support structure, and apartment sub-structures are individually examined to reduce the transmission of vibrations through building structures. Building construction on an artificial land should be subjected to regulations that require the application of a vibration reduction scheme based on the mechanics that govern the vibration transmission phenomena. The implementation of these parameters at an early design stage will provide a quiet living environment for residents who may be exposed to excessive noise and vibration.

Keywords : Land development, Rail vehicle maintenance depot, Noise and vibration, Environmental issues, Vibration reduction

초 록 전편에서 제시되었던 진동소음 데이터를 기초로 하여 철도차량기지 주변에 기 건설되어 있던 고층아파트 단지의 진동소음 방지대책 수립에 필요한 쟁점들을 검토하고 설계단계에서 필요한 방진기법을 논하였다. 특히, 차량운행속도, 인공대지의 물리적 특징, 건축물 지지구조의 물성치, 아파트 층별구조의 동특성 등에 대하여 진동측면에서 논의하였다. 논문에서 제안된 설계변수와 사례는 향후 개발 예상되는 철도 주변 부지 건축물의 환경문제를 최소화하는 가이드라인으로 사용될 수 있다. 특히, 주민이 거주하는 건축물에 대해서는 설계단계에서부터 합리적인 소음진동 방지대책의 적용이 요구되며, 적극적인 대책을 수립하면 사회적인 비용 또한 저감될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 철도주변 부지개발, 철도차량기지, 철도차량 소음진동, 환경문제, 방진대책

1. 서 론

본 논문은 인공대지 위에 신축되어 있는 대단위 단지에 1,000 여세대의 아파트의 소음, 진동문제를 저감하기 위한 설계변수를 도출하고자 한다. 철도주변에 위치하고 있는 아파트 단지는 차량기지의 인공대지 위에 놓여져 있는 관계로 주민들의 불편한 환경에 놓여 있었다.

전편 논문에서 검토되었던 철도차량 진출입할 시에 발생하는 소음, 진동의 크기를 바탕으로, 철도주변에 존재하는 토지의 활용을 위해 건축물 신축 시 합리적이고 적용 가능한 소음, 진동 방지대책을 제시함으로써, 민원을 최소화 시키고 쾌적한 주거 환경을 제공하고자 한다. 방진을 위한 대책수립을 위해 검토된 항목은 아래와 같다.

2. 본 론

2.1 차량운행속도의 영향

지하철의 차량기지 진, 출입 시 발생하는 진동에너지는 발

생원에너지 특성과 차량기지 구조물의 에너지 전달특성이 복합적으로 작용하여, 아파트 단지에 입주하고 있는 주민들의 주택에 전파하게 된다.

여기에서는 차량기지에서 발생한 진동에너지가 주민들에게 전파되는 과정에서 핵심적인 사항을 검토해 봄으로써, 해당 아파트 단지의 진동방지 대책을 마련하고, 더 나아가 향후 새로운 차량기지의 설계 시 진동방지 대책으로 고려될 수 있는 방안을 모색하고자 한다.

지하철의 운행시 나타나는 소음진동에 영향을 미치는 가장 큰 요소는 차륜과 레일간의 상호작용이라고 할 수 있다. 차륜이 레일 위를 굴러가면, 차륜과 레일의 접촉불량, 요철, 간극 등에 의해 충격이 발생되어 진동, 소음으로 나타나거나, 접촉력의 변동에 의해 진동음, 삐걱거리는 소리 등이 발생된다. 차량기지에서도 아파트 단지로 전달되는 진동, 소음에너지는 이 중에서 특히, 충격에 의한 진동, 소음에 기인한다[1].

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[2].

*Corresponding author.

Tel.: +82-2-320-1467, E-mail : jeungk11@naver.com

©The Korean Society for Railway 2013

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2013.16.5.358>

레일과 차륜의 상태가 불연속 접촉되면 나타나는 충격에너지의 크기는

- 철도 차량의 주행속도
- 레일의 표면 거칠기
- 차륜의 형상
- 작용하는 하중
- 레일의 고유진동수의 함수로 나타나게 된다[3].

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 충격 시 나타나는 모멘텀의 예측이 중요시 된다.

차량기지와 같이 속도가 낮은 구간에서는 진동원의 발생 정도는 식 (1)과 같다[1].

$$\text{진동 차이} = 10 \cdot n \cdot \log(V/V_0) \quad (1)$$

여기서, n 은 지반의 특성에 의해 결정되는 값이며 V_0 와 V_f 은 차량의 속도변화 전, 후에 대한 값을 가리킨다. 이러한 수식은 한계속도이하의 범위까지는 속도변화와 진동크기는 선형적으로 증가함을 보여준다. 한계속도는 시속 150km로 알려져 있다. 이 속도 이상의 영역에서는 속도증가의 영향이 없이 일정한 진동수준을 가진다.

식 (1)의 결과로 부터 지반이 결정되어 있는 선로에서는 속도 V_f 를 낮추면 낮출수록 이에 비례해서 진동원의 발생크기도 낮아지게 된다.

레일에 간극이 있을 때, 차륜이 레일을 이탈하면서 나타나는 충격에너지로 인해 진동이 과다하게 발생된다. Fig. 1은 차륜이 간극지점을 통과하는 순간의 차륜-레일 형상을 보여주고 있다. 간극 w 를 가진 레일의 통과 시, 차륜이 레일을 이탈하는 임계 차량속도 V_{CR} 은 식 (2)와 같다[4].

$$V_{CR} = \sqrt{g \cdot a \cdot \left(1 + \frac{M}{m}\right)} \quad (2)$$

여기서 a 는 차륜의 반경, M 은 현가장치 위에 놓여져 있는

Fig. 1 Rail/wheel discontinuity - model

Classification	Shape	Crit. Speed
Joint		$V_{CR} = \sqrt{g \cdot a \cdot \left(1 + \frac{M}{m}\right)}$
Step up		$V_{CR} = 0 \text{ (Step-Up)}$ $V_{CR} = \sqrt{a \cdot g \cdot \left(1 + \frac{M}{m}\right)}$
Roughness		$V_{CR} = \sqrt{r \cdot g \cdot \left(1 + \frac{M}{m}\right)}$
Surface wear		$V_{CR} = \sqrt{a \cdot g \cdot \left(1 + \frac{M}{m}\right)}$

Fig. 2 Rail/wheel discontinuity - critical speed effect

차량의 질량을, m 은 차륜의 질량을 나타낸다. 또, g 는 중력 가속도 값이다.

차륜과 레일의 접촉조건은 레일 이음매의 간극 w 를 가진 형태뿐만 아니라, 다양한 형상이 존재한다[4]. Fig. 2는 차륜과 레일의 다양한 접촉 조건시 나타나는 임계속도를 보여 주고 있다.

한편, 차륜의 이탈 및 재접촉시 발생하는 수직방향의 충격량 π 는 모멘텀의 변화량과 같게 되므로 식 (3)과 같다.

$$\pi = mv_y \quad (3)$$

여기서, v_y 는 수직방향의 속도 값을 나타낸다.

따라서, 차륜의 충격에너지가 차량기지의 지반과 주변 건축구조에 전달되는 것을 피하기 위해서는, 철도 차량은 임계속도 이하에서 운행 되어야 한다. 철도 차량이 임계속도보다 빠르게 차량기지를 진·출입하게 되면, 간극의 크기에 상관없이 차륜은 간극을 통과 할 때 마다 레일을 순간적으로 이탈한 후, 재접촉하게 되어 과다한 충격에너지가 발생하게 된다.

철도 차량이 가지고 있는 통상적인 값인 질량비(M/m)는 8, 차륜반경 a 는 38cm를 임계속도의 표현 식에 대입하면, 임계속도 V_{CR} 은 $V_{CR}=5.8\text{m/sec}$ 가 됨을 알 수 있다. 즉, 시속 20Km를 전후로 하여 충격이 발생하므로, 지하철 운전속도가 시속 20Km이상이 되면 간극의 크기 w 와 무관하게 차륜은 레일 이음매를 통과할 때마다 순간적으로 레일을 이탈하게 된다.

Fig. 3은 본 연구사례에서 등장하는 차량기지의 다양한 진·출입 속도에서 측정된 진동크기를 보여주고 있다. 측정된 위

Fig. 3 Critical speed effect

치는 차량의 진출입시 차량기지 레일받침 위치에서 이루어졌다. 보여져 있는 결과와 같이 임계속도 이하인 속도한계까지는 진동크기가 선형으로 증가한다. 그러나, 임계속도를 넘어서면, 진동은 급격히 증가함을 볼 수 있다. 그림에서 직선으로 표시된 선은 임계속도의 영향을 배제시켰을 때 예상되는 진동크기를 보여주고 있다. 충격에 의해 에너지 발생 가능성을 제거하기 위해서는 차량 운전속도는 임계속도가 나타나지 않는 속도한계 내에서 엄격한 속도제한규정을 지켜야 한다.

따라서, 시속 20여 km의 임계속도보다 20% 낮은 속도조건을 부과한다면 운전속도는 약 시속 15km가 한계가 된다.

참고로, 철도의 레일지지구조를 강연결에서 약한 연결구조로 변경될 경우, 임계속도는 높아진다. 레일하부의 지지부에 탄성재가 설치되는 경우, 임계속도 V_S 는 식 (4)와 같다[4].

$$V_S = V_{CR} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{m}{1}\right) \cdot \left(\frac{\beta}{2}\right)} \quad (4)$$

여기서, V_{CR} 은 강연결구조의 레일 임계속도를, β 는 차륜의 하중 $[K/4E]^{1/4}$ 을, K 는 레일길이당 기초강성, E 는 영률, I 는 단면관성모멘트를 가리킨다. 따라서 레일 단위길이당 50kg인 경우를 예로 들면, 기초강성 K 값은 $3.5 \times 10^7 \text{N/m}$, 영률 $E = 2.2 \times 10^{11} \text{N/m}^2$, 관성모멘트 I 는 $2 \times 10^{-5} \text{m}^4$ 인 값을 가정해 보자[5]. 이 경우 임계속도는 $V_S = 2.2V_{CR}$ 이 되어 임계속도가 약 2배 증가하게 된다. 따라서, 임계속도는 시속 45km로 나타나게 된다. 따라서, 철도차량의 주행속도를 최고 시속 30~35km까지 증가시켜도 차륜이 레일을 순간적으로 분리되는 경우의 발생은 배제시킬 수 있게 된다.

즉, 차량 기지 내에서 철도의 주행속도를 20km전후로 사용하고자 하려면, 레일의 체결부위는 최소한 탄성지지 되어야 한다. 레일이 탄성지지 되어있지 않은 조건에서는 시속 20km의 사용은 과다한 진동발생은 유발시키므로, 설계속도의 규정을 지키는 방향으로 유지 관리되어야 하며, 부득이한 경우 설계속도를 벗어나더라도 임계속도의 20%이하의 속도로 엄격한 제한조건이 요구된다.

2.2 인공대지 건축물의 동특성

2.2.1 인공대지 지지 기둥의 진동특성

레일을 통해서 발생하는 진동에너지는 차량기지 바닥과 아파트 구조물의 전위층(Transfer Plate)을 연결해 주고 있는 기둥을 통해서 전달된다. 따라서 진동에너지 전달과정을 분석하기 위하여는 차량기지기둥의 동 특성을 고려하여야 한다[6].

사례로 검토된 차량기지의 인공대지 지지기둥의 구조와 1, 2차 고유진동수는 Fig. 4에 정리되어 있다. 우선 기둥의 체원을 고려해 고유치를 계산해 보면, 차량기지의 기둥이 가지고 있는 1차 진동모드는 45Hz에 존재한다. 추가로 100~120Hz 대역 2개의 저주파수 고유모드가 존재한다. Fig 4(a)는 해석

Fig. 4 (a) Dimension of the column and its eigenvalues, (b) Column and its eigenvalues - experimental set up

Fig. 4 Continued. (c) Column and its eigenvalues - test result

결과를 보여 주고 있다.

한편, 기둥의 고유진동수를 실험적으로 구한 결과도 해석 결과와 유사한 경향을 보여주고 있다. Fig 4(b)는 레일에 충격가진을 하면서 기둥의 진동을 측정한 실험을 보여주고 있다. 센서는 바닥으로부터 5m 높이에 설치한 후, 5회의 충격가진이 진행되었다. 측정결과는 Fig. 4(c)에 보여져 있다. 예 측정결과와 비교해 보면 40Hz 근처에 1차 고유값이, 100-120Hz 근처에 고유값이 중첩되어 나타남을 볼 수 있다. 이와 같이 차량통과 시 낮은 주파수 대역의 에너지가 가진 되면 기둥을 통해 에너지가 쉽게 전달되고 있다고 판단할 수 있다.

한편, 지하철의 통과 시, 레일을 가진 시키는 가진원은 40~100Hz 대역에 놓여져 있다. 따라서, 기둥은 이러한 레일 충격에서 발생하는 진동스펙트럼 에너지를 잘 통과시켜주는 특성을 가지고 있으며, 기둥의 양끝단에 방진 대책이 병행되어야, 발생하는 진동의 차단이 이루어지게 됨을 볼 수 있다.

따라서, 레일을 가진 시키는 40~100Hz 대역의 진동에너지가 기둥을 통해 전파되는 것을 낮추기 위해서는 기둥의 단면 설계 시 고유진동수를 고려한 방안이 요구된다. 기둥의 단면을 높임으로써 굽힘 강성 EI 값이 크게 증가하면 1차 모드에 해당되는 주파수는 증가하므로, 충격 진동에너지의 저감 효과가 기대될 수 있다.

2.2.2 인공대지 구조물 진동전달

아파트 구조물이 미치는 하중의 영향을 기초에 균등분포하기 위하여, 아파트 단지의 pit 바닥에는 1,200mm의 전위층이 설치되어 있다. 콘크리트의 밀도를 2.4Ton/m³로 가정하면, 전위층의 단위면적당 하중은 2.9Ton/m²이 된다. 따라서 아파트의 폭(10.7m)과 너비(48.6m)를 고려하면 전위층의 자중은 1510톤이 된다[6]. 이러한 무거운 하중을 가진 전위

층위에는 다시 아파트 자체의 자중이 실려있다. 1~14층과 15층 및 지붕까지의 무게를 모두 고려하면, 전위층을 포함한 아파트의 자중은 3,600여 톤의 무게가 된다.

한편, 전위층과 아파트 상부 구조간에는 직접 연결되어 있다. Fig. 5는 전위층 및 그 위에 건설되어 있는 아파트1층에서 측정된 진동특성을 보여주고 있다. 40-100Hz 대역의 진동스펙트럼을 보면, 전위층과 1층 모두 해당주파수 성분이 진동의 주된 에너지로 나타나고 있음을 볼 수 있다. 다만, 1층에서는 20Hz대역 에너지가 상대적으로 크게 나타나는게 다를 뿐이다. 따라서, 주된 에너지인 40~120Hz 대역 성분은 전위층 상, 하 부분에 방진설계에 대한 고려 없이 직접 연결되어 있다고 판단된다.

따라서, 진동에너지의 차단을 위해서는 기둥과 전위층 사이에 방진재의 설치를 통한 진동저감이 필수적으로 요구되고 있다[7]. 향후 차량기지 위에 아파트를 건설할 시에는 진동특성을 고려한 방진재의 설치가 필요하며, 해당 아파트의 전체 하중이 3,600여 톤으로 대단히 무거운 물체이기 때문에 고유진동수를 5Hz 미만의 낮은 주파수대역으로 설계가 용이할 것으로 판단된다.

Fig. 6은 건물에 방진재를 설치하는 경우, 설계되는 고유진동수 별로 진동에너지 저감 효과를 보여주고 있다. 방진재로 고무탄성재 또는 스프링을 사용함에 따라 설계목표로 하는 고유진동수는 크게 달라질 것이다. 바람직하기는 고유진동수를 5-10Hz 대역으로 설계하기 위해서는 스프링강성을 가진 방진설계가 요구되고 있다. 방진재료를 통해 아파트의 고유진동수를 5Hz미만으로 설계할 수 있게 된다면 40Hz이상의 철도통과진동에너지는 30dB이상 저감된다. 이 경우, 주민들에게 진동피해는 해결될 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 5 (a) Vibration spectrum of the transfer plate, (b) Vibration spectrum of the apartment (1st floor)

Fig. 6 Vibration reduction as a function of the natural frequency

2.2.3 인공대지 전위층의 동특성

전위층의 두께증가가 아파트 구조의 진동저감에 미치는 영향을 검토해 보자. 현재 차량기지 전위층의 두께는 1,200mm로 시공되어 있다. 가령, 전위층의 두께가 1,600mm로 시공되었다면, 전위층의 무게는 두께에 비례하므로 아파트 전체의 무게는 보여져 있는 것과 같이 500여 톤 증가된다. 따라서, 아파트 하중의 증가량 Δm 은 $\Delta m=14\%$ 가 예상된다.

한편, 차량의 운행시, 아파트 단지로 들어오는 진동에너지(파워) Π 는 식 (5)로 표시된다[8].

$$\Pi = m \langle v^2 \rangle_{x,i} \cdot \Delta \omega \quad (5)$$

여기서 m 은 전위층을 포함한 아파트 전체의 무게, $\langle v^2 \rangle_{x,i}$ 는 시간, 공간 평균된 전위층의 진동속도를, $\Delta \omega$ 는 진동에너지의 가진 주파수 밴드를 나타낸다.

따라서, 철도차량의 운행조건이 주어지면, 입력되는 진동 파워 Π 는 일정한 값을 가지고 있으므로 전위층의 두께 변화로 인한 진동값 $\langle v \rangle$ 는 식 (6)과 같다.

$$\langle v \rangle_{x,i} |_{\text{전위층 1,600mm}} = 0.93 : \langle v \rangle_{x,i} |_{\text{전위층 1,200mm}} \quad (6)$$

따라서 현 시공상태인 전위층 두께 1,200mm인 경우에 비해 전위층을 1,600mm로 시공하게 되면 진동의 크기는 7% 낮아지는 효과가 예상된다. 이 값을 dB로 환산하면 식 (7)와 같이 되어 현 상태와 비교해 볼 때 불과 0.63dB만큼 낮아지게 된다.

$$\begin{aligned} \text{전위층변화후} &= \text{현재의진동값} - 0.63 \\ (\text{전위층 : 1,600mm}) &(\text{전위층 : 1,200mm}) \end{aligned} \quad (7)$$

따라서, 현재 시공된 전위층의 두께증가는 아파트 단지의 진동값 변화에 영향을 주는 요소라 볼 수 없으며, 다만 아파트의 역학 측면에서 하중의 균형분포를 목적으로 설치된 구조물이라고 볼 수 있다.

2.3 아파트 상부구조의 동 특성

이와 같이 무거운 물체가 전위층을 통해 기둥에 직접 연결되어 있는 구조로 되어 있기 때문에, 기둥의 진동에너지가 감쇠 없이 아파트 상층구조로 전달된다. 연구에 의하면, 아파트의 진동 전달특성은 1개층을 통과하면서, 적게는 0dB에서부터 많게는 6dB정도 감쇠되는 특성을 가지고 있다고 알려져 있다[9]. 실제, 10층의 철골구조와 강화 콘크리트빌딩에서 측정한 1개층간의 감쇠실험결과를 보면, 낮은 주파수대역에서는 5층 이상의 상층부에서는 1개층당 약 1dB씩, 바닥과 낮은 저층에서는 약 3dB씩 감쇠된다고 한다. 다층 건물의 경우, 일반적으로 높이에 무관하게 1개층당 3dB씩 저감하는 것으로 통상 가정하고 있으며, 실제 건물구조를 통한 진동 전파시 진동에너지가 벽, 바닥 및 천정 등을 통과 하면서 저감되는 특성은 대단히 다양하고 복잡하게 나타나는 경향이라고 할 수 있다.

본 고에서 검토된 차량기지지의 경우, 기둥과 전위층, 전위층과 아파트 슬라브 구조가 직접 연결되어 있기 때문에 1개층 통과시의 진동감쇠가 낮게 나타나고 있다.

지하철 차량이 시속 20km로 진·출입 시 특정된 진동값을 검토해 볼 때, 실내의 경우에는 1층에서의 63dB 진동값이 15개층을 전파한 뒤에 나타난 크기는 59dB로 밝혀졌다. 따라서 1개층당 불과 0.3dB 밖에 저감되지 않고 있다. 복도의 경우에는 더욱이 진동저감 효과가 낮아, 거의 0dB로 변화가 없는 값이다.

이와 같은 이유는 앞에서 설명되었듯이, 기둥에서 전파된 에너지가 손실 없이 전위층과 아파트 상부구조로 전파되는 강한 연성(Coupling Loss Factor)값을 가지고 있기 때문이다[10].

아파트 상부구조의 진동전달 특성 중 특이한 점은 실내의 진동측정 분석치를 보면 25Hz 전, 후에서 에너지가 크게 나타나는 것이라 할 수 있다. 아파트의 실내 진동 스펙트럼을 보면, Fig. 5에 보여져 있는 아파트 저층뿐만이 아니고, Fig. 7에 보여져 있는 최고층인 15층에서도 25Hz 부근에 낮은 감쇠값을 가진 피크치가 나타난다. 이러한 특성은 전위층 진동 스펙트럼과 비교해 볼 때, 25Hz 부근의 진동에너지는 아파트의 고층으로 갈수록, 감쇠되지 않고 크게 나타나는 것으로 보아 아파트 실내바닥의 슬라브 공진현상이라고 판단

된다. 아파트의 층수에 따라 슬라브의 공진 주파수는 1~2Hz 정도의 오차범위를 가지고 변화한다.

아파트에 거주하는 주민은 기둥의 고유진동수, 슬라브의 고유진동수 영향이 모두 중첩되어 진동을 느끼게 된다. 주민의 입장에서는 속도단위의 진동에너지로 느끼기 되므로 가속도 단위의 진동 스펙트럼을 속도로 환산하면 25Hz 부근의 진동에너지는 가중하는 역할을 하게 된다. 따라서 주민이 진동피해를 직접적으로 느끼는 효과는 25Hz 부근의 거실 슬라브 진동이라고 판단된다. 따라서 슬라브 구조의 댐핑재 처리 등 적절한 방진대책의 수립이 요망된다.

3. 결 론

인구 밀집지역인 도심의 토지이용을 극대화하기 위하여 철도주변이나 차량기지 상부에 인공대지를 설치하여 아파트 등 대단위 주거지역의 건설이 예상되고 있다. 철도주변에 인공대지를 설치하여 건축물을 건설하는 경우, 차량기지 상부에 놓여져 있는 주거용 건물에서 진동피해를 최소화하기 위해서는 설계단계에서 진동측면을 고려한 접근방법이 바람직하며, 인공단지의 특수성을 고려한 방진대책의 수립이 요구되고 있다.

본 논문에서는 철도주변의 유휴대지를 이용하기 위하여 인공대지 및 대 단지 아파트를 건설한 사례를 진동소음 측면에서 문제점을 검토하고, 측정 분석한 경험을 정리하였다.

(1) 차량기지내의 레일은 기지바닥과 철근 받침보를 통해 강체로 연결되어 있다. 따라서 레일은 탄성지지 없이 하부구조와 강하게 연결되어 있기 때문에, 이때의 차량임계속도는 시속 20km내외에 해당된다. 시속 20km로 주행하는 조건에서는 차륜은 레일 이음매를 지나갈 때에, 순간적으로 레일로부터 분리된다. 분리된 이후에는 충격모멘텀으로 인해 과다한 진동이 발생된다. 따라서 설계속도의 준수가 요구되나, 불가피한 경우 차량의 주행속도가 시속 15km미만으로 주행할 수 있도록 관리가 요구된다.

(2) 차륜과 레일의 충격으로 발생하는 진동의 주된 에너지는 30~100Hz 사이에 걸쳐 있으며, 시속 20km 주행조건에서 레일하부구조에서 측정된 진동의 크기는 최대 1.0g 정도의 값을 가지고 있다.

Fig. 7. Vibration spectrum of the apartment (15th floor)

(3) 레일 → 레일하부구조 → 차량기지바닥 → 기둥 → 전위층 → 아파트구조로 이루어진 진동에너지의 전달과정에서 각각의 연결부위가 직접 연결되어 있기 때문에 구조물의 진동에너지가 감쇠효과가 낮다. 따라서, 레일에서 발생한 진동에너지가 아파트 하부 및 상부층까지 쉽게 전달되는 특성을 가지고 있다.

(4) 차량운행 시 발생하는 진동에너지의 주된 성분은 차량기지 기둥의 고유진동수(40Hz부근, 100Hz부근)를 포함하고 있다. 그 결과, 레일에서 발생한 진동에너지 중, 기둥의 고유진동수에 해당되는 에너지가 전위층에 증폭되어 전달된다.

(5) 3,600여톤에 이르는 아파트 구조는 차량기지과 전위층을 통해 직접 연결되어 있기 때문에 차량기지의 기둥전달 특성이 감쇠 없이 그대로 아파트 상부구조로 전파된다. 진동방지를 위해서 전위층 하부에 방진재를 설치하여야 한다. 즉, 3,600여톤의 아파트 자체는 질량법칙(Mass Law)에 의하여 30여 dB 이상의 진동방지 효과를 가지고 있다.

한편, 기둥과 전위층이 직접 연결되어 있는 전위층의 두께는 1,200mm 이다. 이를 외국의 경우에서 설계되고 있는 1,600mm로 33 % 증가시켜도 전위층 두께증가로 인한 진동감쇠는 1dB미만으로 극히 적게 나타난다. 전위층은 하중을 분포하는 목적으로 설계되었다고 판단된다.

(6) 전위층에 전달된 진동에너지는 아파트 상부층으로 전파되면서 전위층 진동에너지 중 높은 고주파의 진동에너지는 감쇠된다. 특히, 5층이상에서 측정된 진동스펙트럼을 보면 80Hz이상의 진동에너지가 아파트 슬라브, 기둥 등을 전파하면서 급격히 감쇠됨을 볼 수 있다.

(7) 아파트 내부의 주민이 실제 체감하는 실내진동은 25Hz 부근의 에너지가 크게 나타나는 것으로 측정되었다. 전위층에는 낮게 나타나는 25Hz부근의 에너지가 아파트 상부층으로 갈수록 높은 에너지 성분을 가지고 있는 이유는 아파트 거실 바닥의 슬라브 고유진동수와 일치하고 있다.

후 기

이 논문은 홍익대학교 2012년도 학술연구조성비와 한국연구재단(철도소음예측과 평가를 위한 상사모델 실험기법연구)의 지원으로 이루어 졌습니다.

References

- [1] H.J. Eun, J.T. Kim (1995) Research on the high-speed railway based on environmental noise and vibration Criteria, Korea Train Express.
- [2] The Korean Society for Noise and Vibration Engineering (1995) *Noise and vibration handbook*, KSNVE, Seoul, pp. 348-340.
- [3] P.J. Remington (1976) Wheel/Rail Noise-Part I, *Journal of Sound and Vibration*, 46, pp 359-379.
- [4] I.L. Ver (1976) Wheel/Rail Noise-Part III, *Journal of Sound and Vibration*, 46, pp 395-417.
- [5] L. Cremer and M. Heckl (2005) *Structural-Borne Sound*, Springer, Germany, pp 236.
- [6] J.T. Kim (1997) A Report for NoiseVibration Survey and Reduction in Yangcheon Apartment Complex, Hongik University Research Institute of Science and Technology.
- [7] GERB, Vibration Control for Buildings and Trackbeds, Internal Report.
- [8] R.H. Lyon, R.G. DeJong (1995) *Theory and Application of Statistical Energy Analysis*, Butterworth Heinemann, Newton MA, Ch. 3.
- [9] Discussion with G. Frommer, Manager of Lamtin Depot, MTRC, Hong Kong
- [10] B.M. Gibbs, C.L.S. Gilford (1976) The use of power flow methods, for the assessment of sound transmission in building structures, *Journal of Sound and Vibration*, 49(2), pp 267-286.

접수일(2013년 5월 3일), 수정일(2013년 8월 6일),
게재확정일(2013년 8월 12일)

Jeung Tae Kim : jeungk11@naver.com

Department of Mechanical System Design Engineering, Hongik University, Sang-su Dong, Mapo-Gu 121-791, Korea