

전라선 고가교 방음터널 효과검증

The Verification on Effect of Sound Absorption Tunnel for Elevated Railway in Cholla Line

김병삼[†] · 이태근^{*}

Byoung-Sam Kim · Tae-Keun Lee

Key Words : Train Noise(철도소음), Structure Borne Noise(고체전파음), Equivalent Noise Level(등가소음도)

ABSTRACT

The source of wayside noise for the train are the aerodynamic noise, wheel/rail noise, and power unit noise. The major source of railway noise is the wheel/rail noise caused by the interaction between the wheels and rails. The Structure borne noise is mainly a low frequency problem. The train noise and vibration nearby the elevated railway make one specific issue. In this paper, the train noise and structure borne noise by train are measured. From the results, we investigated the effect on the sound absorption tunnel for elevated railway.

1. 서론

1960년대 이후 국가 경제규모가 급속히 늘어남에 따라 사회, 경제활동 영역의 확대에 수송에 대한 수요는 지속적으로 증가되고 있으나, 기존의 철도와 고속도로 등 주요 교통시설은 이미 포화 상태에 이르렀다. 따라서 1980년대에 이르러 철도산업의 중요성은 재인식되기 시작하였다. 이러한 현상은 보다 빠르며 정확한 수송 및 이동성 요구의 증가에 대처하기 위한 움직임이었다. 실제로 150년이 넘게 지속된 철도의 개념은 최근에 고속철도, multi-current power engine 그리고 하상 터널과 같은 빠른 기술적 진보를 가져왔다. 철도의 건설은 교통 애로 개선, 운송시간 단축으로 지역개발, 공로교통의 전환에 따른 유류절감과 대기오염 물질의 감소 등으로 사회전반에 막대한 공헌을 해왔다. 생활수준이 향상될수록 의식주에 대한 기본적인 욕구만족으로부터 쾌적한 환경에 대한 욕구가 점점 더 커지게 되었다. 이러한 욕구는 상품에 대한 가치 판단에서도 중요한 척도로 작용하게 된다. 철도와 같은 운송수단의 경우, 소음문제는 차량내의 승차환경 뿐만 아니라 철도가 통과하는 주변지역의 환경문제와도 관련된 복합적인 영향력을 가진 사항이라 할 수 있다. 또한 철도의 소음과 진동으로 인한 공해는 선로 주변 주민으로부터 불평, 불만, 소

송 등을 유발시켜 차량 교통수송에 대한 대안으로서 대두되고 있는 철도교통 수송에 대한 대중의 지지를 감소시키고 있다. 철도와 관련된 소음문제 중에서 철도 차량내의 실내 소음문제는 차량의 상품가치와 관련하여 국제 경쟁력 제고 차원에서, 차량운행으로 야기되는 환경 공해문제는 인근 지역의 민원발생의 소지를 해결한다는 차원에서 체계적이고 장기적으로 고려해야 할 사항이다.

철도소음은 공기역학적 소음, 차륜과 레일의 상호작용에 의한 전동소음과 고가구조음으로 나눌 수 있다. 열차의 속도한계에 의해 재래철도의 주소음원은 전동음이라고 알려져 있으며, 전동음에 대한 많은 연구가 이루어졌다. 또한 전동음을 주소음원으로 하여 철도소음에 대한 예측모델을 제시하고, 철도소음의 전파특징에 대한 연구가 다수 이루어졌다^(1,2). 또한 근래에는 고가선로에 대한 고가구조물음에 대한 연구가 진행되고 있다⁽³⁻⁷⁾.

본 연구에서는 전남 순천시 용당동 동아아파트 인근 고가선로를 통과하는 철도소음이 인근 아파트 입주민에게 미치는 영향을 최소화하기 위해 고가선로에 방음벽을 설치한 후 방음벽에 대한 효과를 파악하였다.

2. 고가선로 연변소음에 대한 모델링

2.1 철도소음의 특성

철도 운행에 따라 발생하는 소음은 기관차에서 발생되

[†] 교신저자; 원광대학교 공과대학 기계자동차공학부

E-mail : anvkbs@wonkwang.ac.kr

Tel : (063)850-6697, Fax : (063) 850-6691

* 광원텍(주)

는 소음과 객차에서 발생하는 소음의 2개의 음원으로 구성된다. Fig.1은 시간 변화에 따라 청감을 보정한 소음레벨의 변동을 보인 것이다. 철도소음의 평가에는 일반적으로 등가 소음레벨 L_{eq} 가 적용되며 등가소음은 열차 통과시 최대 소음레벨, 노출시간, 운행빈도 등에 의하여 결정된다.

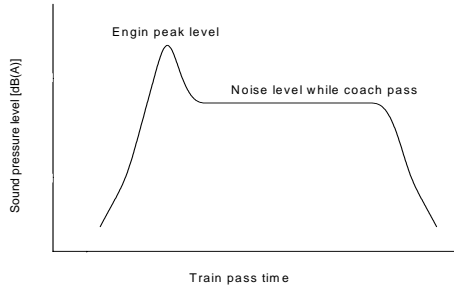


Fig. 1 An example of train noise in time domain

2.2 고가와 열차의 소음발생기구

철도소음에는 차륜과 레일의 접촉에서 발생하는 바퀴/레일 소음이 있고, 열차에 전력을 공급하는 판토틀라프 시스템에서 발생하는 소음과 달리는 열차의 표면에서 공기역학적 메커니즘에 의해서 발생하는 공력소음이 있으며 이외에도 전동기 등 추진 장치와 각종 보조 장치의 소음 발생원을 들 수 있다. 이들 여러 소음 발생원은 열차의 속도에 따라서 그 중요도가 변하는 것은 일반적인 현상이다. 차체 표면에서 공력소음은 열차속도가 낮을 때는 문제가 되지 않지만 속도가 증가할수록 발생소음의 크기가 커져서 열차속도가 250~300km/h 정도에 이르게 되면 모든 소음을 압도하는 지배적 소음이 된다고 알려져 있다⁽⁸⁾. 반대로 전동기 등 추진 장치와 각종 보조 장치의 소음은 고속에서는 다른 소음에 비하여 상대적으로 중요도가 떨어지지만 저속에서는 차륜/레일 소음과 유사한 중요도를 갖는 것으로 간주되고 있다. 따라서 철도의 주요 소음발생원으로 취급되고 있는 바퀴/레일 소음과 차체 공력 소음, 구조진동음 등에 대해서 그 발생 기구와 메커니즘과 발생소음의 특성을 살펴보면 다음과 같다.

(1)바퀴레일소음

바퀴/레일 소음은 열차속도가 증가할수록 음압레벨이 높아져서 일반적으로 80km/h 이상의 속도구간에서는 다른 기계적 소음을 압도하는 지배적 소음이 된다. 종래 측정결과에 의하며 바퀴/레일 소음은 식(2-1)과 같은 속도의 함수로 나타낼 수 있다⁽⁹⁾.

$$\text{바퀴/레일소음} \propto 30 \log v \quad (2-1)$$

여기서, v 는 열차의 속도이다. 식(2-1)에 의하면 열차

속도가 2 배 증가하면 소음도는 9dB 증가한다. 식(2-1)은 실험식이기 때문에 모든 경우에 적용될 수는 없지만 바퀴/레일 소음의 속도에 따른 변화특성을 쉽게 인식할 수 있게 한다. 일본 신간선의 경우 바퀴/레일 소음은 $20 \log v$ 에 가깝게 변하는 것으로 보고되고 있다. 이 경우 열차속도가 두 배 증가하면 소음도는 6dB 증가한다.

바퀴/레일 소음 발생의 지배적인 메커니즘은 바퀴와 레일 사이의 상호작용이다. 따라서 바퀴/레일 소음은 이들 상호작용의 상태에 따라 크게 변할 수 있다. 연결부위가 평탄하게 용접된 직선 궤도 구간을 달리는 열차는 광대역 주파수 소음을 지속적으로 발생시키며 이 소음을 흔히 전동소음(rolling noise)이라고 부른다. 궤도 중심선으로부터 30m의 거리를 기준점으로 할 때 전동소음은 식(2-2)으로 나타낼 수 있다.

$$L_A = 30 \log(v/v_0) \quad (2-2)$$

여기서 $v_0 = 60 \text{ km/h}$ 는 기준속도이고 식(2-2)은 식(2-1)과 동일한 속도 의존함수이다. 실제로 측정되는 대부분의 열차 전동소음은 식(2-2)으로 주어지는 값의 $\pm 6 \text{ dB}$ 정도 범위내의 값을 갖는다. 동일한 속도로 달리는 열차의 전동소음은 이처럼 큰 폭으로 다를 수 있는 것은 실제 환경에서 바퀴 면이나 레일 면의 상태가 크게 다르기 때문이다. 바퀴와 레일은 각각 특수 연마기와 헤일 연마 열차에 의해서 보수 정비되어 표면의 평탄성을 유지할 수 있다. 이러한 정비가 제대로 안될 때의 비정상 상태는 여러 가지 형태가 될 수 있으며 그 결과로 나타나는 전동소음 역시 큰 폭으로 다를 수 있다.

(2)차체공기역학적 소음

열차속도가 커지면서 바퀴/레일 소음이 증가하는 것이 사실이지만 차체 공력소음의 증가폭이 훨씬 커서 결국은 전체 열차소음에서 공력소음의 기여가 지배적이다. 공력소음은 식(2-3)과 같이 열차속도의 6승의 대수함수로 주어진다고 알려져 있다⁽¹⁰⁾.

$$\text{공력소음} \propto 60 \log v \quad (2-3)$$

식(2-3)을 식(2-1)과 비교하면 열차속도(v)가 어떤 특정값 이상인 구간에서는 공력소음이 바퀴/레일 소음을 압도하게 됨을 예상할 수 있다. 이 특정속도는 열차마다 다르지만 현재 운행 중인 열차의 경우 대체로 280~300km/h 인 것으로 알려져 있다. 공력소음은 열차표면 경계층에서 와류현상과 혼합(mixing) 및 전단(shear) 영역 등의 존재에 의해서 발생한다. 이러한 소음발생 메커니즘은 열차표면의 돌출부에서 특히 강하게 작용하기 때문에 열차표면의 유선화가 공력소음 감소의 기본이라고 볼 수 있다. 이에 따

라 열차 하면의 추진시스템을 가능한 한 차체내부로 흡수하고 집전계의 판토틀레프의 크기를 최소화하는 등으로 공력소음을 감소시키고 있다. 바퀴/레일 소음과 달리 공력소음은 열차의 표면형태와 재질이 주어지면 이론적으로 상당히 정확하게 예측할 수 있다. 특히 바퀴/레일 소음은 무시할 수 있는 자기부상열차에 이론식을 적용하는 경우에 비교적 쉽게 실측치와의 비교가 가능하다.

(3) 구조진동음

우리나라의 경우 많은 콘크리트 고가교가 존재한다. 고가교에서 열차 통과시 레일의 진동은 트랙과 고가교와 같은 구조물로 전파된다. 콘크리트 구조물의 진동으로 인하여 발생하는 소음을 구조 진동음(structure noise)이라 정의한다. 구조 진동음의 주파수의 특성은 일반적으로 전동음에 비하여 저주파수 대역이고 나타나고 슬래브 트랙과 벨라스트 트랙(ballast track)의 구조진동음의 A-특성 음압레벨의 차이는 거의 나타나지 않는 것을 발견하였다. 즉, 1,000Hz 이하의 주파수에서 슬래브 트랙(slab track)과 벨라스트 트랙(ballast track)은 같은 탄성을 가진 스프링과 같이 거동한다. 연마되지 않은 레일에서 고가 구조 진동음은 25m 떨어진 지점에서는 약 70~75dB(A)로 측정된다(열차속도 200km). 연마를 하면 약 65dB(A)까지 저감시킬 수 있다. 벨라스트 트랙(ballast track)의 경우 벨라스트와 고가상판 사이에 벨라스트 매트(약 30mm)를 설치하여 약 10dB(A) 정도 저감 할 수 있는 것으로 측정되었다. 고가구조 진동음 측정시에 약 100Hz 부근에서 피크치가 나타나는 것으로 보고되어 있다. 현재까지도 100Hz에서의 피크레벨이 나타나는 것은 이론적으로 규명되어지지 않은 상태이다.

3. 평가 및 실험방법

3.1 고가선로의 소음평가

철도소음의 평가에는 일반적으로 등가소음도(equivalent noise level : L_{eq})가 적용되며 등가소음은 열차 통과시 최대소음레벨, 노출시간, 운행빈도 등에 의하여 결정된다. 등가 소음도란 소음의 에너지 평균레벨, 즉 임의의 측정시간 동안의 변동 소음 에너지를 시간적으로 평균하여 상용대수를 취해 10을 곱한 값으로 정의한다.

본 연구에서는 1시간 등가소음도를 측정하여 고가선로에 방음벽 설치전후의 효과를 파악하였다. 이를 위해 주·야간 암소음과 현행법에 의한 1시간 등가소음도를 측정하였으며 암소음과 1시간 등가소음도를 방음대책 전과 비교하였다. 암소음과 1시간 등가소음도는 용당동 동아아파트 101, 102, 103, 104동 옥상에서 측정하였으며, 각 동마다 선로와 가장 근접한 거리에 소음계 설치하였다. 소음을 측정하기 전에 보정기를 이용하여 소음계의 정상 작동 여부를

를 확인한 후 측정하였다. 방음대책 후 열차운행으로 인한 소음이 용당동 동아아파트에 미치는 영향과 방음벽 적용구간의 적합성 여부를 평가하기 위하여 선로변과 아파트 사이의 거리가 가장 가까운 동아아파트 102동과 104동 5층, 10층, 15층, 19층, 옥상 등에서 소음을 측정하여 주파수 분석을 실시하였다. 방음벽 개구부의 회절감쇠 효과를 파악하기 위하여 방음벽로부터 25m 떨어진 지점에서 방음벽 개구부의 폭(2m, 3m, 4m)에 대한 영향을 조사하였다.

3.2 진동평가방법

열차의 정상운행으로 인한 소음 중 고체전파음에 영향을 조사하기 위하여 주·야간 암진동과 현행법에 의한 1시간 등가진동도를 측정하였다. 용당동 동아아파트 104동 14층에서 소음과 진동을 동시에 측정·분석하였으며, 방음벽 표면에 최대한 가까이 소음계를 설치한 후 방음벽 표면에서 방사되는 고체전파음을 측정·분석하였다.

4. 측정결과 분석

4.1 고가선로의 소음 측정결과

방음 대책후의 주·야간 암소음 측정결과, 주간 51.1~53.2 dB(A), 야간 47.0~50.3 dB(A)로 방음 대책전 측정결과인 주간 52.0~58.0 dB(A), 야간 44.0~51.0 dB(A)과 유사한 결과를 보이고 있었다. 현행법에 의한 주·야간 1시간 등가소음도 측정결과를 정리하면 다음과 같다.

unit : dB(A)

	102동	104동	법규	대책전과의 차이	열차통과 대수
주간	54.3	54.4	70	11.2~11.4	2~5대
야간	55.8	51.2	65	8.5~11.7	

특히, Fig. 2, 3에서는 방음대책 공사 전·후, 주·야간 1시간 등가소음도를 비교한 것으로 102동의 경우 주간 11.4 dB(A), 야간 8.5 dB(A), 104동의 경우 주간 11.2 dB(A), 야간 11.7 dB(A)의 소음레벨이 저감되었음을 알 수 있었다. 또한, 향후 철도소음에 관한 현행법이 강화되어 주·야간 1시간 등가소음도가 각각 5 dB(A)씩 감소된 주간 65, 야간 60 dB(A)를 적용하여도 측정결과와 소음레벨이 법규에서 제시한 소음 규제치 이내임을 알 수 있었다. 철도소음은 순간적이고 반복적인 특징이 있어 열차가 민원지역을 통과할 때의 순간최대소음도를 측정한 결과는 Fig.4와 같다. Fig. 4에서 보는바와 같이 방음대책 전·후 순간최대소음도는 102동의 경우 16.9 dB(A), 104동의 경우 17.1 dB(A)이 저감되었음을 알 수 있었다.

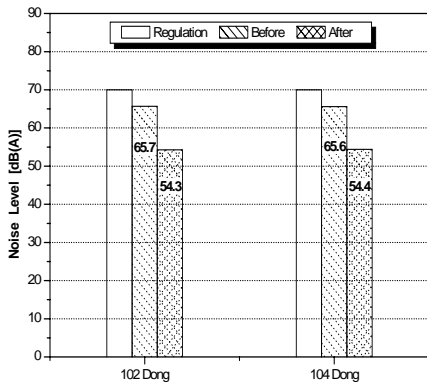


Fig. 2 Measurement data of Leq at the day time

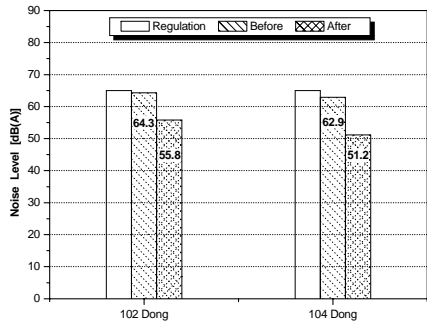


Fig. 3 Measurement data of Leq at the night time

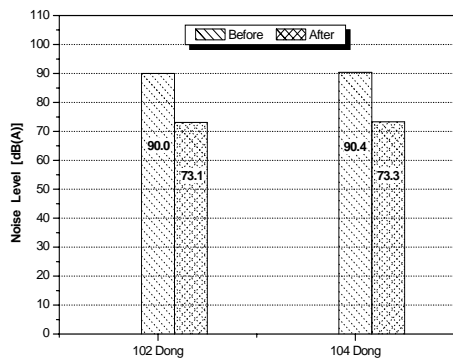


Fig. 4 The effect of instant peak noise level

고가교에 방음벽을 설치한 후 아파트 높이별 소음저감 효과를 조사한 결과, 102동에서는 19층의 소음레벨이 가장 높았고 15층, 10층 순으로 소음레벨이 높았으며, 104동에서도 14층, 10층, 5층 순으로 소음레벨이 높았다. 아파트의 높이가 높아지면 소음레벨이 높아졌는데, 이는 방음벽 사이의 개구부로 소음에너지가 누수되는 현상과 열차 통과

시 고가교의 진동에 의한 고체전파음 영향인 것으로 판단된다. 또한, 고가교 방음벽 개구부 중심으로부터 25m 떨어진 지점에서 소음레벨을 측정·분석한 결과, 개구부 사이가 커지면 소음레벨이 약간 증가하는 것을 알 수 있었으며 그 차이가 1dB(A) 이내임을 알 수 있었다. 개구부 사이 거리에 대한 영향을 정확한 판단하기 위해서는 개구부 중심으로부터 25m 떨어진 지점에서 측정 높이를 증가하면서 측정하여야 하나 실제로 용당동 동아아파트의 경우에는 대부분의 세대가 방음벽 개구부의 사이가 2m 떨어진 지점에 위치하고 있어 더 이상 개구부에 대한 영향을 검토하지 않아도 될 것으로 판단된다.

Fig. 5는 방음벽 연장으로 인한 소음저감 효과를 분석한 결과이다. 102동의 경우 방음벽을 60m(2구간) 연장하면 6.9 dB(A), 104동의 경우 4.3 dB(A)의 저감효과가 있을 것으로 예상된다.

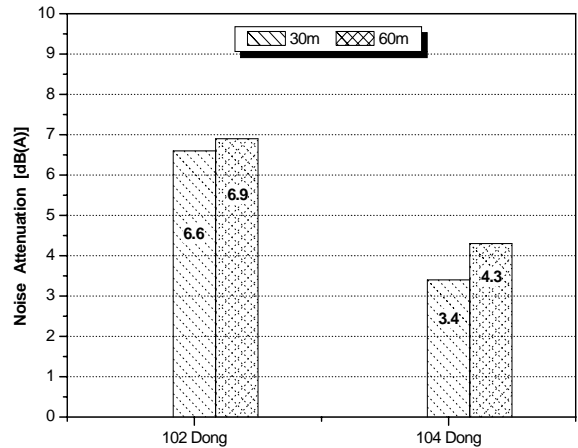


Fig. 5 The effect of the extension of the barrier

4.2 진동에 의한 고체전파음 측정결과

Fig. 6~8은 열차 통과시 102동 15층과 104동 14층에서 측정된 진동가속도레벨과 고체전파음의 주파수 분석결과를 실내소음 평가척도(NC: Noise Criteria)와 비교한 결과이다. 102동과 104동에서의 암진동은 30dB(V) 이내이었으며, Fig.에서 보는바와 같이 열차 통과시 102동에서의 진동가속도레벨은 50.4 dB(V), 104동에서의 진동가속도레벨은 47.1 dB(V)로 철도진동에 관한 현행법 이내임을 알 수 있었다. 그러나 104동 14층에서 창문을 닫고 열차 통과시 공기를 통해 전달되는 공기전파음을 차단한 후 진동에 의한 고체전파음을 측정하여 분석한 결과를 실내소음 평가기준과 비교한 결과 NC-50을 상회하고 있었다. 본 연구에서 측정된 지역의 경우에는 열차 통과시 진동은 현행법에 의한 규제치 이하임에도 불구하고 열차 진동에 의한 고체전파음의 영향을 받아 있음을 알 수 있었다.

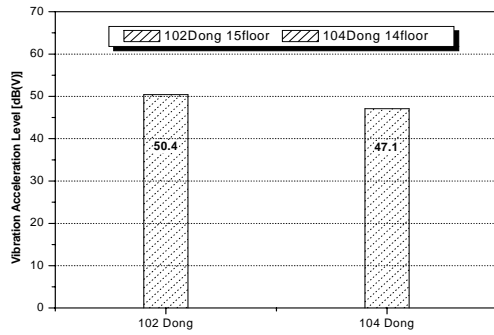


Fig.6 The vibration level when the train passes

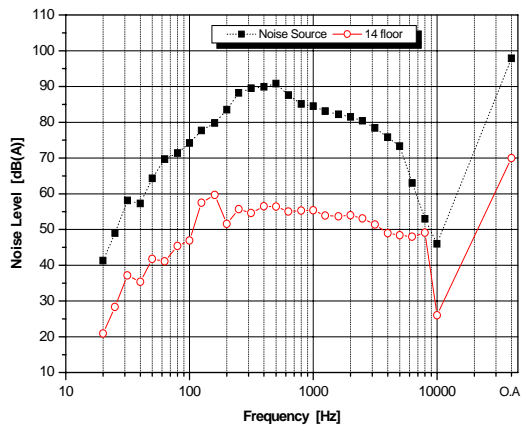


Fig. 7 Measurement data of structure-borne noise

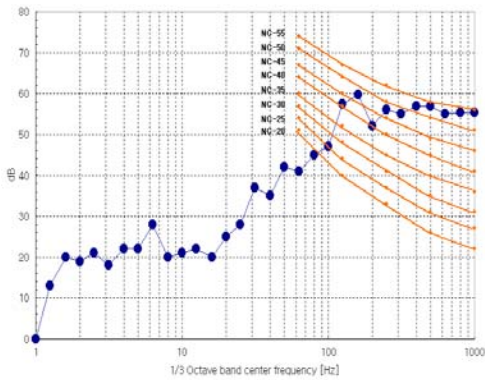


Fig. 8 The comparison between structure-borne noise and NC

5. 결론

본 연구 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

고가교 열차 통과로 인한 인근 아파트 지역의 소음은 방음벽 설치공사로 현행법에 의한 1시간 등가소음도 및 순

간최대소음도가 대폭적으로 저감되었음을 알 수 있었다. 또한, 열차 통과시 소음측정의 기준 지점인 고가교 중심으로 부터 25m 떨어진 지점에서 개구부(2m, 3m, 4m)의 영향을 조사한 결과, 개구부 폭의 증가로 인한 소음레벨의 변화는 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 방음벽 연장 여부를 판단 하기 위하여 102동에서 정밀 측정하고 방음벽 연장의 효과를 예측한 결과, 방음벽을 60m 연장하면 최대 6.9 dB(A)의 저감효과가 있을 것으로 예측된다. 그러나 102동에서 측정한 소음을 주파수 분석해 보면 공기를 통해 전달되는 공기전파음보다는 진동에 의한 소음 주파수가 대부분인 점을 고려할 때 방음벽을 연장하여도 102동에서의 소음은 크게 저감되지 않을 것으로 판단된다.

14층에서 고체전파음을 측정한 결과 NC-50을 상회하고 있었다. 따라서 용당고가교 열차 통과로 인해 발생하는 기관음과 진동음 등은 방음벽의 설치로 많이 저감되었음을 알 수 있었으나 진동에 의한 소음으로 저감되지 않았음을 알 수 있었다. 특히, 방음벽 표면에서 방사되는 고체전파음 측정결과를 살펴보면 용당고가교의 진동이 방음벽에서 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

고가교의 방음벽 설치로 고가교 인근 소음이 대폭적으로 감소됨을 실험적으로 파악할 수 있었으며, 진동에 의한 고체전파음 저감을 위해 고가교에 방진재를 설치하면 더 효과가 있을 것으로 판단된다. 그러나 방진재 설치는 철도 운행시 이루어져야 하는 어려움이 있으므로 아직 설치되지 않은 선로에 방진매트 등을 설치하고, 기존 설치된 선로에는 침목 밑에 방진재를 설치하면 진동에 의한 고체전파음을 저감시키는데 효과적일 것으로 예측된다.

참 고 문 헌

- (1) 장승필, 강기동, 서사범, “고속전철에 의한 지반 진동과 소음” 한국소음진동공학회지 제3권 제3호 pp.220~230, 1993
- (2) 김석홍, 이성춘, 김준호, “경부선 소음진동의 전파특성에 관한 기초 연구”, 한국소음진동공학회지 제3권 제1호 pp.47~55, 1993
- (3) 김정태, 은희준, “고속철도의 소음특성과 전파현상”, 한국소음 진동공학회지, 제6권, 제3호 pp.349~355, 1996
- (4) 김정태, “고속철도소음의 전파특성”, 한국소음진동공학회춘계학술대회논문집, pp.73~74, 1996
- (5) 황철호, 정성수, “철도소음의 예측기술 개발”, 과학기술처 수행기관 보고서 번호 KRISS-95-147-IR, KRISS-96-142-IR 1995, 1996
- (6) 구동희, 김재철, 박태원, 문경호, “한국형 고속철도(KTX) 방사패턴에 관한 연구”, 한국소음진동공학회춘계학술대회논문집, pp.836~842, 2001

- (7) J. S. Joo et al., "Prediction of Train Noise Propagation from a Level Road", 한국소음진동공학회추계학술대회논문집, pp.111~115, 1995
- (8) V. V. Krylov, Noise and vibration from high-speed train, Thomas Telford, Preface, 2001
- (9) B. Hemdworth, "Recent developments in wheel/rail noise reserch", Journal of sound and vibration, 66, pp.297~310, 1979
- (10) T. Kitagawa, Nagakura, "Aerodynamic noise generated by shinkansen car", Journal of sound and vibration, 231(3), pp.913~924, 2000