

철도차량 구조기인 소음의 저감에 관한 연구

A Study on the Reduction of Structure-borne Noise in a Train

우관제* · 김석현†

Kwan-Je Woo · Seockhyun Kim

Abstract Inside noise levels of running train is the summation of air borne noise and structure-borne noise. In this paper, structure-borne noise, which is known to dominate inside noise level in open field, is investigated. Structure borne noise is analyzed in terms of vibration sources, transmission path and noise generating part so as to reduce inside noise levels.

Keywords : Air borne noise, Structure-borne noise, Vibration sources, Transmission path, Noise generating parts

요 지 철도차량의 실내소음은 공기기인 소음과 구조기인 소음이 더해진 것이다. 본 논문에서는 개활지 주행중 실내소음을 지배한다고 알려져 있는 구조기인 소음에 대해 연구하였다. 구조기인 소음을 진동원, 전달경로 및 소음 발생부로 구분하여 실내소음을 줄이기 위한 방안에 대해 연구하였다.

주 요 어 : 공기기인소음, 구조기인소음, 진동원, 전달경로, 소음저감

1. 서 론

주행중인 철도차량의 실내소음은 공기기인소음과 구조기인소음이 합쳐진 것이다. 두 가지 소음은 발생원과 전파경로 등 소음발생 메카니즘이 서로 다르므로 실내소음을 줄이기 위해서는 서로 다른 대책을 적용해야 한다. 즉, 공기기인소음은 소음원의 발생소음자체를 줄이고, 차체의 투과손실치를 크게 하고, 실내의 흡음성능을 키워야 실내소음을 저감할 수 있다. 실제적으로 차체의 투과손실치를 크게 하기 위해서 사용부재의 질량을 증가시키거나 밀도를 크게 하는 방법을 사용하며 특히 출입문 등의 기밀을 보강하는데 주의를 기울이고 있다[1,2].

한편 구조기인소음은 진동이 구조물을 따라 전파되면서 소음이 발생하는 것이므로 소음을 줄이기 위해서는 진동발생원 자체의 진동크기와 차체로 전달되는 진동의 크기를 줄여야 하며 동일한 가진력에서 작은 응답을 갖도록 피가진체의 강성과 댐핑을 키워야 한다. 또한 승객이 거주하는 공

간에는 동일한 진동레벨에서도 소음발생이 적어지도록 방사계수가 작은 소재를 사용하는 것이 좋다. 진동원의 진동발생을 줄이기 위해서는 밸런싱이나 저진동 장비를 사용하고, 전달되는 진동을 줄이기 위해서는 탄성마운트를 사용하거나 취부부위의 강성을 크게 하는 방법을 사용하고 있다.

본 논문에서는 구조기인소음에 영향을 미치는 인자를 진동발생원, 전달경로 및 소음발생부로 나뉘 설명하였으며 실내소음을 저감하기 위한 방법에 대해 연구하였다.

2. 전동차 실내소음과 바딤진동

개활지를 주행하는 열차의 실내소음은 다음과 같은 변수들의 영향을 받는다.

$$VL_{source}, \Delta V, VL_{inside}, \sigma, \alpha, \dots \quad (1)$$

여기서; VL_{source} : 가진원의 진동레벨

ΔV : 진동전파 경로상의 진동 저감량

VL_{inside} : 실내 내장판의 진동레벨

σ : 소음방사계수

α : 실내 흡음률

* 정희원, 현대로템 기술연구소 응용기술연구팀

E-mail : wookj@hyundai-rotem.co.kr

TEL : (031)596-9490 FAX : (031)596-9747

† 책임저자 : 정희원, 강원대학교, 교수

즉, 실내소음은 가진원의 크기, 진동 저감량, 실내 내장판의 진동레벨과 방사계수, 실내 음향특성에 따라 결정되는 것이다. 물론 식 (1)에는 표현되지 않았지만 열차의 속도, 궤도조건, 축중, 주변 환경, 실내 형상 등의 영향도 있지만 본 논문에서는 자세히 다루지 않았다.

Fig. 1은 개활지를 주행하는 전동차의 실내소음과 바닥진동과의 관계를 나타내고 있다. 실내소음은 대차상부 1.5미터 높이에서 측정하였으며 바닥진동은 대차상부 바닥에 붙인 가속도계로 측정된 결과이다. 측정된 실내소음은 진동에

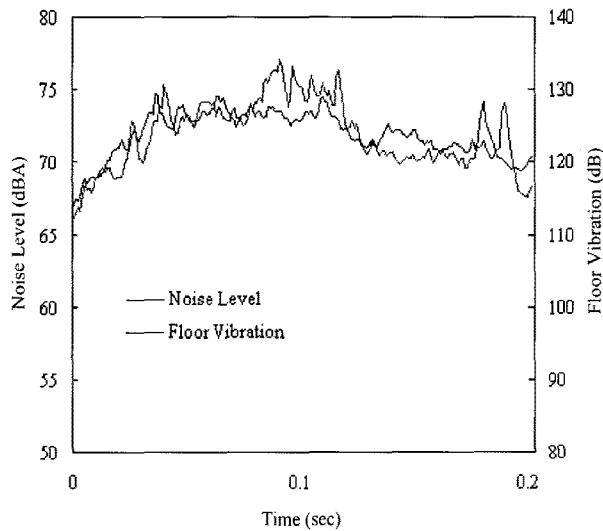


Fig. 1. Noise and Vibration Signals

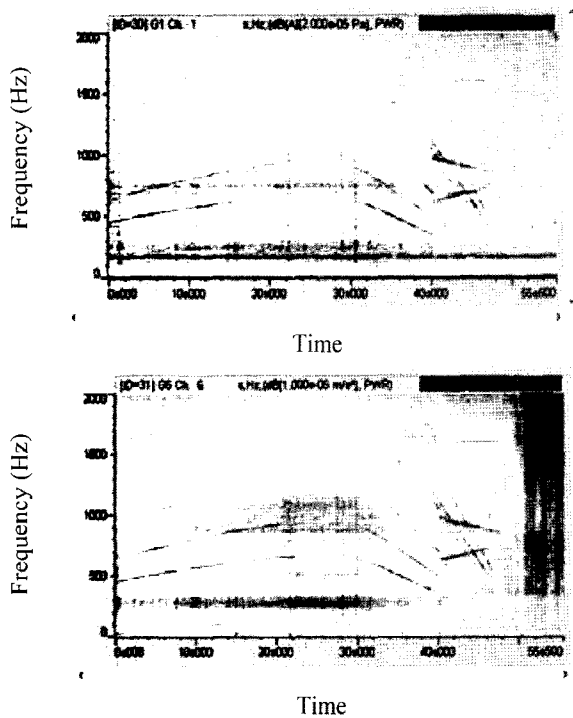


Fig. 2. Thermal Plots of Noise and Vibration (Top: Noise, Bottom: Floor Vibration, Color: Noise and vibration levels)

의한 구조기인소음과 추진장치 등에서 발생하는 공기기인소음의 합이며 시간에 따라 전동차가 정차에서 출발하여 최대속도에 이른 후 제동 시까지 소음과 진동의 크기가 서로 연관되어 있음을 알 수 있다. Fig. 2는 실내 소음신호와 바닥진동신호를 주파수 분석한 결과를 시간에 따른 Thermal Plot으로 나타낸 결과이다(여기서 색상은 소음과 진동의 크기를 나타내는데 붉은 색으로 갈수록 레벨이 높고, 푸른색으로 갈수록 레벨이 낮은 것임). 분석결과를 살펴보면 바닥진동과 실내소음은 주파수 성분에서도 상당한 연관성을 갖고 있는 것으로 나타나고 있다.

3. 구조기인소음 저감방안

3.1 가진원

열차의 진동을 유발하는 가진원으로는 아래와 같은 것들을 들 수 있다.

- (가) 주변압기, 공기압축기, 에어컨
- (나) 차륜/레일 접촉력
- (다) 드라이빙기어 및 전인전동기
- (라) 궤도의 불균일성 및 줄틀림, 면틀림

이중 주변압기, 공기압축기 및 에어컨 등은 정차중과 주행중 모두 실내소음에 영향을 미치는 것이므로 저진동, 저소음의 제품을 사용하는 것이 중요하다. 주변압기는 가선투파수의 2배의 주파수로 진동하므로 방진마운트 설계시 이를 고려해야 하며, 공기압축기는 피스톤 타입 보다 진동이 적은 스크류 타입을 사용하면 진동에 의한 소음을 줄일 수 있다. 특히 에어컨은 작은 공간에 압축기와 콘덴서팬 등 소음과 진동이 큰 부품들이 밀집되어 있고 상대적으로 강성이 낮은 차체 지붕에 설치되므로 진동에 의한 소음발생에 유의해야 한다.

차륜과 레일의 접촉에 의해 발생하는 접촉력은 주행중인 열차의 실내소음에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 차륜과 레일의 접촉력은 차륜과 레일의 표면 거칠기, 자갈이 깔려있는지의 여부, 레일타입, 패드강성, 슬리퍼 간격 등에 의해 변하게 되는데 이 중 실내소음에 가장 큰 영향을 미치는 것이 차륜과 레일의 표면 거칠기이다(Table 1 참조). 열차 운영처에서는 주기적으로 차륜을 삭정하고 있지만 이는 차륜 마모에 따른 리프로파일링 개념이지 소음저감을 위한 조치는 아니다. 표에서 볼 수 있듯이 최적의 레일과 차륜의 표면상태를 유지한다면 최대 8dB 이상의 소음저감이 가능하다. 한편, 실내소음저감을 위해서는 패드의 강성을 크게 할 필요가 있는데 이렇게 되면 열차에서 발생하는 진동이 지반을 통해 전달되는 양이 커지게 되므로 주

Table 1. Major Influence Parameters on Track Noise (ISO 3381: 2005)

인 자	최소소음을 발생시키는 인자	최대소음을 발생시키는 인자	최대소음과 최소소음의 차이(dB)
Rail type	UIC 54 E	UIC 60	0.7
Static Pad Stiffness	$5 \times 10^9 \text{N/m}$	$1 \times 10^8 \text{N/m}$	5.9
Ballast stiffness	$1 \times 10^8 \text{N/m}$	$3 \times 10^7 \text{N/m}$	0.2
Wheel roughness	Smoothest	Roughest	8.5
Roughness of uncorrugated rails	Smoothest	Roughest	0.7 to 3.9
Train speed	80kph	160kph	9.4
Air temperature	10°C	30°C	0.2

의가 필요하다.

궤도의 불균일성 및 궤도 줄틀림, 궤간틀림, 수평틀림, 궤도면틀림에 의한 열차의 진동은 수십 Hz 이하의 주파수 영역에 집중된 것으로 주로 차량의 승차감과 주행안전성에만 영향을 미치고 실내소음에 미치는 영향은 적다고 할 수 있다.

드라이빙기어와 견인전동기는 일반적으로 고도의 밸런싱을 유지하도록 설계/제작되므로 이들이 회전하면서 발생하는 진동레벨은 실내소음에 큰 영향을 미치지는 않는다. 그러나 견인전동기를 구동하는데 사용하는 인버터에서 발생하는 구형파에 의한 토크리플(torque ripple)이 견인전동기를 가진시켜 실내소음을 증가시킬 수 있다.

근래 전동차에서 주로 사용하는 견인전동기는 VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) 타입으로 열차의 추진력과 속도를 제어하기 위해서는 인버터에서 전동기에 가해지는 주파수와 전압을 제어해야 한다. Fig. 3은 인버터에서 견인전동기로 가해지는 전압과 전류의 파형의 예를 보

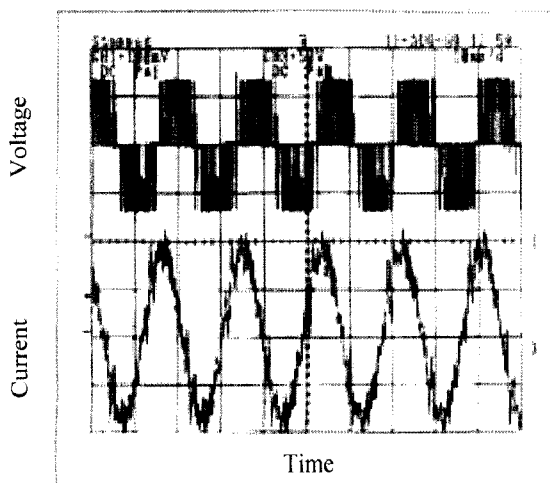


Fig. 3. Inverter Signals for 1 Pulse Mode (Top: Voltage, Bottom: Current)

여주고 있다.

인버터에서는 전동기에 가해지는 신호를 다수의 구형파(square)파로 나누는데 이때 만들어진 구형파에 의해 주파수 영역에서 사이드로브가 발생하며 이것이 견인전동기를 가진하게 되는데 이 현상을 토크리플이라고 부른다. 이 토크리플은 가감속시에 견인전동기를 가진하게 되고 견인전동기의 진동이 대차로 전달되어 대차와 차체를 가진하게 된다. 실제로 개활지를 주행하는 전동차의 실내에서 측정된 실내소음에는 이 토크리플 성분의 주파수가 주를 이루는 경우가 많다(Fig. 2 참조). 즉, 개활지를 주행하는 전동차의 실내소음을 줄이기 위해서는 토크리플을 줄이던지, 차체 또는 바닥판까지 전달되는 토크리플의 차단하는 방안을 찾아야 한다. 토크리플 자체의 크기를 줄이려면 하이펄스모드(high pulse mode)의 사용이나 Beatless control를 사용해야 한다. 그러나 이러한 대책은 장비의 크기나 발열문제 등을 야기할 수 있으므로 주의가 필요하다.

3.2 전파경로

주변압기, 공기압축기 및 에어컨 등의 진동이 차체로 전달되는 것을 최소화하기 위해 이들은 탄성마운트를 사용하여 차체에 취부 해야 하나 주행중의 변위, 안정성 등을 고려하여 전달율 80%~90% 정도의 탄성이 유지되도록 설계한다. 또한 에어컨에 사용하는 콘덴서팬은 냉각성능을 유지하기 위해 고속으로 회전하므로 밸런싱 등급을 정하여 발생하는 진동량을 규제해야 한다.

일반적으로 대차와 차체는 2차 현수장치, 트랙션 로드, 댐퍼 및 엔티롤바 등을 통해 기계적으로 연결되어 대차의 진동이 차체로 전달된다.

이중 2차 현수장치는 강성이 매우 작으므로 수십Hz 이상의 가진력은 많이 필터 아웃되어 일부 저주파 성분만 차체에 전달된다(Fig. 4). 또한 2차 현수장치가 차체에 취부되는 부위는 차체 볼스터이며 폭 방향으로 측벽에 가까우

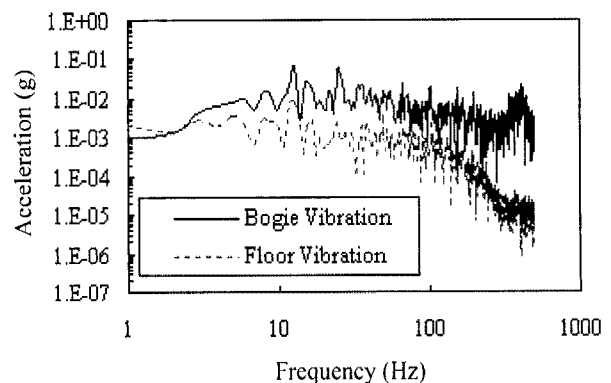


Fig. 4. Vibration Levels of Bogie and Floor

므로 전달된 가진력에 의한 차체의 진동량도 작은 편이다.

트랙션로드로 전달되는 가진력을 줄이기 위해서 로드 끝단에는 러버를 취부 하는 것이 일반적이다. 그러나 열차를 운행하는데 필요한 견인력과 제동력이 가해지는 상태에서 필요한 내구연환을 갖기 위해서는 필연적으로 러버의 강성이 커질 수밖에 없다. 따라서 이 부분을 통해 전달되는 가진력은 실내소음에 상당한 영향을 미치는 크기이다.

일반적으로 철도차량에서 사용하는 댐퍼는 유압댐퍼로서 가진력이 댐퍼를 통과하면서 고주파 성분은 모두 흡수되고 실제로 차체에 전달되는 가진력이 실내소음에 미치는 영향은 무시할 정도이다.

마지막으로 차체와 대차를 연결하는 것이 엔티롤 바이다. 이것은 열차의 롤변위를 제한하기 위해 설치되는 것으로 비록 끝단에 러버를 사용하기는 하지만 차체의 하중을 부담할 수 있는 정도의 강성을 유지해야 하므로 엔티롤 바를 통해 전달되는 가진력은 실내소음에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 엔티롤바를 통해 전달되는 대차진동의 영향을 줄이기 위해서는 볼스타와 같이 강성이 큰 차체부위에 엔티롤바 끝단을 취부하거나 진동이 전달되더라도 피가진체에서 진동량이 작아지도록 조치를 취하는 것이 필요하다.

대차에서 전달된 진동에 의한 차체의 응답을 작게 하기 위해서 sound deadener라고 불리는 댐핑도료를 도포하기도 한다. 일반적으로 아무런 처리를 하지 않은 철판의 댐핑비는 0.01 정도이다. 이러한 철판에 철판두께의 1~2배에 해당하는 댐핑도료를 도포할 경우 중고주파수 대역에서 0.1 이상의 댐핑비를 갖게 되며 이 경우 공진점에서 철판의 응답이 현격히 줄어든다. Fig. 5는 N사에서 제공한 자료에 나와 있는 주파수응답함수로서 두가지 종류의 댐핑도료를 시편에 도포한 경우의 결과를 보여주고 있다.

결국 댐핑도료의 역할에 의해 동일한 크기로 가진한다 하더라도 피가진체인 철판의 진동레벨이 감소되고, 나아가 방사되는 소음의 크기를 감소시키는 역할을 한다. 전동차 연

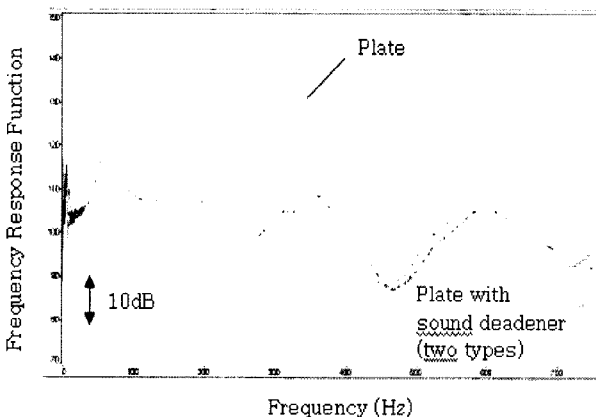


Fig. 5. Frequency Response of Sheets

더프레임의 댐핑비가 전주파수 대역에서 동일하다고 가정하고 0.01일 때와 0.1일 때의 실내소음을 해석하면 동일 가진력에 대해 7dBA 이상의 소음저감효과가 있는 것을 알 수 있다.

실제로 승객이 거주하는 공간은 바닥판, 내장판 등을 사용하여 차체와 구분되나 개활지 주행중인 열차의 실내소음에 가장 큰 영향을 미치는 부위는 바닥이다. 이는 대차에서 발생하는 진동이 주로 차체의 바닥을 통해 차체에 전달되고 그 전달방향이 상대적으로 취약한 수직방향이어서 피가진체인 바닥의 진동량이 커지기 때문이다. 차체의 진동을 바닥판과 절연시키기 위해서는 건축물에서 흔히 사용하는 뜬바닥 구조를 사용하게 된다[3]. 또한 임피던스 차에 의한 진동절연효과를 보기 위하여 구체와 바닥사이에 러버를 삽입하기도 한다[4,5]. 이러한 부유상구조에 의한 진동절연효과를 해석한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 해석에서는 구체와 바닥사이를 소프트러버, 하드러버 그리고 각목으로 연결했을 경우, 상판과 하판의 평균적인 속도레벨차이를 구하였다. 해석결과 소프트러버는 하드러버와 각목에 비해 월등한 진동절연효과를 나타내었고, 하드러버는 각목에 비해 125Hz 이상의 주파수에서 우수한 진동절연효과를 보여주고 있다 [3].

시편단위에서 구한 진동절연특성은 완성차에서의 실내소음을 예측하기 위해 사용할 수 있다. 완성차는 AutoSEA를 사용하여 모델링하였으며 바닥의 진동절연특성은 해석과 시험으로 구한 진동절연특성을 사용하였으며 기타 소음진동 특성은 해석과 시험을 통해 얻은 데이터베이스를 사용하였다.

실내소음 예측결과 대차상부에서 소프트러버가 하드러버나 각목 보다 1~2dBA 정도의 실내소음저감효과를 볼 수 있는 것으로 나타났다. 또한 러버를 사용한 바닥구조는 상판과 하판의 진동절연량을 0으로 놓고 해석한 유니텍스 구조 보다 7~9dBA 정도의 소음저감효과가 있는 것으로 예

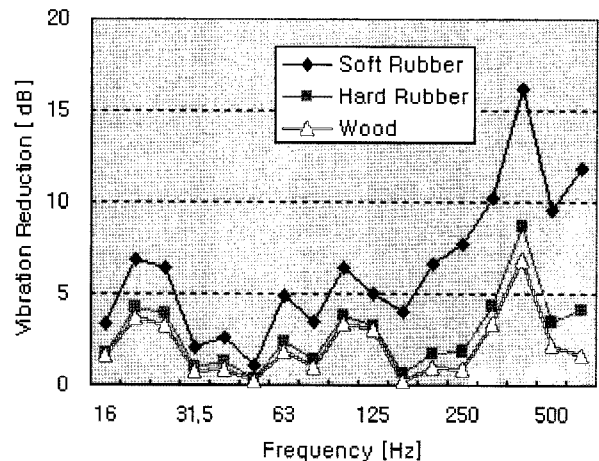


Fig. 6. Vibration Reduction of Floors

Table 2. Predicted and Measured Results (Open field; dBA)

	Soft Rubber	Hard Rubber	Wood	Unitex
Structure-borne Noise	60	65	66	78
Air borne Noise	66	66	66	69
Air conditioner Noise	68	68	68	68
Predicted Noise	70	71	72	79
Measured Noise	70 ¹⁾	-	-	78 ²⁾

Note 1) Noise test result for floating floor train
 2) Noise test result for unitex train

측되었으며 이는 개활지를 주행하는 실제 차량의 시험결과에서도 확인되고 있다(Table 2).

3.3 실내 음향환경

실내소음에 최종적으로 영향을 미치는 인자는 바닥판의 진동속도 레벨이며 동일한 진동속도레벨이라도 방사하는 소음을 줄이기 위해서는 방사계수가 낮은 재질을 사용하는 것이 필수적이다.

$$\sigma = \frac{W}{\rho \cdot c \cdot S \cdot V^2} \quad (2)$$

여기서, 방사효율은 진동하는 표면이 에너지를 매질에 방사할 때의 효율로서 임의 음원의 방사에 의해 발생된 음의 파워와 그 표면과 같은 속도로 움직이는 피스톤에서 방사될 수 있는 음의 파워의 비; σ : 방사효율, ρ : 공기밀도, c : 음속, S : 표면적, V : 속도, W : 방사음의 파워

또한 실내흡음률을 높이기 위해서는 바닥에 카펫, 섬유재질의 의자 그리고 천정에 타공판을 사용하기도 한다.

전동차 실내를 잔향공간이라고 가정하면 실내흡음력과 실내잔향음과의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$\Delta SPL = 10 \log \left(\frac{S_2}{S_1} \right) \quad (3)$$

여기서, ΔSPL 은 실내 잔향음의 차이, S_1 과 S_2 는 대책 전후의 실내흡음력

4. 결론

주행중인 열차에서 발생하는 구조기인소음은 발생메카니즘이 공기기인소음과 다르기 때문에 실내소음을 저감하기 위해서는 소음발생원인을 정확히 파악해야 한다. 본 논문의 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 개활지를 주행하는 전동차의 실내소음은 구조기인소음 영향이 공기기인소음보다 크다.
- (2) 구조기인소음을 줄이기 위해서는 바닥구조의 진동절연 특성을 크게해야 한다.
- (3) 소프트러버는 유니텍스 보다 구조기인소음에서 약 18 dBA 정도 소음저감효과가 있으며, 전체 소음도에서는 약 9dBA 정도의 소음저감효과가 있는 것으로 예측되었다.
- (4) 소프트러버는 하드러버 또는 각목을 사용한 바닥구조 보다 5~6dBA 정도의 구조기인소음 저감효과가 있고, 전체 소음도에서는 1~2dBA 정도의 소음저감효과가 있었다.

참고 문헌

1. 최용운 외, "도시철도 전동차 객실 소음에 관한 연구," 한국철도학회 2008년도 춘계학술대회 논문집, 2008년, pp. 1105-1113.
2. 서승일 외, "전동차 소음저감을 위한 슬라이딩플러그 출입문 개발," 한국철도학회논문집, Vol. 5, No. 2, 2002년, pp. 112-117.
3. 김범수 외, "뽀바닥 구조에서 층간차음재의 계면구조 및 단면형상이 충격진동량 저감효과에 미치는 영향," 한국소음진동공학회 2004년도 춘계학술대회논문집, pp. 296~299.
4. 우관제, 박희준, "철도차량에서 사용하는 부유상구조의 진동절연 특성에 관한 연구," 2006년 추계철도학회, pp. 44~48.
5. 박희준, 우관제, "SEA 기법을 이용한 부유상구조의 구조기인 소음 예측," 2007년 추계철도학회, pp. 255~261.
6. 정일록외, 최신 소음진동 - 이론과 실무 -, p. 99.

접수일(2008년 1월 5일), 수정일(2008년 3월 10일),
 게재확정일(2008년 3월 20일)