

〈논 문〉

주파수 응답 함수를 이용한 철도차량 실내소음 기여도 분석 및 분포도 측정

Analysis of Noise Contribution using Frequency Response Function and
Measurements of Noise Distribution for Railway Interior Noise

김 재 철* · 유 원 희*

Jae Chul Kim and Won Hee You

(1999년 5월 14일 접수 : 1999년 9월 6일 심사완료)

Key words : Railway (철도), Noise Contribution (소음 기여도), Frequency Response Function (주파수 응답 함수), Noise Distribution(소음 분포도), Interior Noise (실내소음)

ABSTRACT

Speed-up and mass reduction of railway vehicle usually causes increase of the interior noise. One of the best ways to control the interior noise is to identify the noise level radiated from each of parts in the cabin. In this paper, we describe the method to estimate the interior noise and evaluate the noise contribution to each of parts. This method is based that the sound pressure can be calculated by using the frequency response function and acceleration. According to analysis of the noise contribution, we validated that the noise radiated from the floor is the highest in the cabin. We also measured the noise distribution for the side and floor by using the microphone array in order to analyze the effect of the noise flowing into the cabin from the outdoors. Finally, we presented the plan of the interior noise reduction based on the noise levels radiated from each of parts.

1. 서 론

도심권을 중심으로 자동차가 점차 포화상태에 도달함에 따라 철도에 대한 중요성이 증가되면서 철도는 타 교통수단과의 경쟁력 향상을 위해 철도의 고속화와 승객에 대한 서비스 향상에 많은 노력을 기울이고 있으며, 또한 차량에 대한 비용절감과 에너지절감을 위해서 차량의 경량화가 추진되고 있다. 그러나 철도의 수송력이 증대되면서 승객에 대한 승차감 및 안락감 향상측면에서 차량의 실내소음 저감

이 중요한 문제로 발전하게 되었고, 인구증가와 함께 도시의 밀집화로 인해 점차 철도연변에 주거하는 주민이 증가하면서 철도에 대한 환경 소음문제가 중요하게 인식되기 시작하였다.

최근, 철도에 대한 소음진동문제는 점차 심각한 상황에 도달하고 있으나 이러한 소음진동에 대해서 적극적인 대처방안이 제시되지 못하고 있을 뿐만 아니라, 차체의 경량화와 철도의 속도향상은 소음진동의 급격한 증가를 야기해 철도경영정책에 상반되는 결과를 초래하고 있다.

이러한 상반된 요구조건을 만족시키기 위해서는 차량의 설계초기단계에서부터 차량에 대한 효율적인 방음방진 대책이 필요하다. 그러나 현재는 제작 전

* 정회원, 한국철도기술연구원

에 음향투과손실을 확인하는 정도이고, 차량 완성 후에 방음방진의 대한 추가적인 대책이 이루어지고 있어 차량 실내소음에 대한 문제점이 발생하면 현실적으로 접근하기 어려우며 방안 대책도 불가능한 경우가 많다.

따라서, 본 연구에서는 향후 차량제작에 효율적인 방음방진의 대책방안을 제시하기 위해 현재 전동차의 실내소음에 대한 기여도 및 분포도 시험 분석을 통해서 차량 내부의 소음원을 규명한다.

전동차 실내소음의 기여도 분석으로부터 차량 내부의 가속도와 음압의 주파수 응답 함수를 이용하여 차량 내부의 각 부분에서 방사되는 소음을 추정하였으며, 차량 외부에서 직접 유입되는 소음의 기여도를 분석하기 위해서 마이크로폰 격자판을 이용하여 실내소음 분포도 시험을 하였다. 또한 차량 내부의 각 부분에 대한 방음대책을 세우기 위해서 기여도 시험의 결과를 토대로 각 부분에서 방사되는 소음 저감에 따른 실내소음의 저감량을 분석하여 가장 효과적으로 대책방안을 세울 수 있는 근거를 제시하였다.

2. 실내소음 기여도

2.1 실내소음 기여도 측정방법

차량내부의 각 부분에 대한 실내소음 기여도 측정은 각 부분에서 방사되는 소음만을 직접측정하기가 불가능하기 때문에 田中⁽¹⁾는 각 부분의 진동레벨과 소음에 대한 기하학적 관계로부터 실내소음을 추정하는 방법을 제안하여 실제 차량의 방음성능을 향상시키는데 유용하게 사용되었다^(2,3).

田中가 제안한 방법은 비교적 정확한 결과를 얻어졌지만 기본적으로 기하음향학 이론과 차량내부의 흡음율 등의 측정이 수반되어 계산과 시험의 복잡함

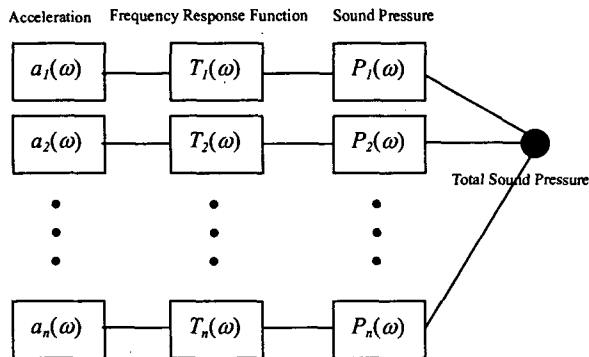


Fig. 1 Frequency response functions between the sound pressures and accelerations

을 피할 수 없어 손쉽게 접근하기가 어렵고 많은 시간이 요구된다.

따라서 본 논문에서는 田中가 제안한 방법보다 더욱 간편하고 손쉽게 차량 실내소음 기여도를 추정할 수 있는 방법을 제안한다.

일반적으로 차량내부의 가속도는 손쉽게 측정이 가능하므로 차량실내를 몇 개의 미소면적으로 분할하여 Fig. 1과 같이 미소면적에 대한 가속도와 음압과의 주파수 응답 함수를 이용하여 차량실내의 음압을 추정한다.

주파수 응답 함수는 차량 정차 시 임펄스 해머에 의한 타격가진 등을 이용해서 측정할 수 있으며, 가속도는 차량 주행 시 미소면적에 가속도계를 부착하여 각 미소면적의 가속도를 동시에 측정한다.

차량 실내음압은 차량 정차 시 측정된 주파수 응답 함수와 차량 주행시 측정된 미소면적의 가속도 및 면적을 식 (1)에 대입해서 각 미소면적에서 방사되는 음압 $P(\omega)$ 를 계산하여 더하면 차량 실내음압을 계산할 수 있다.

본 추정방법은 차량외부에서 직접 유입되는 소음의 기여도는 파악할 수 없으며, 각각의 미소면적의 손실계수가 커서 타격가진 시 다른 미소면적에 전달되는 진동이 작다고 가정하였다.

$$P(\omega)_{total} = \sum_{i=1}^n T_i(\omega) a_i(\omega) Area_i \quad (1)$$

여기서, $P(\omega)$ 는 차량의 실내음압, $a(\omega)$ 는 미소면적의 가속도, $T(\omega)$ 는 주파수 응답 함수를 나타낸다.

2.2 차량 실내의 분할방법

일반적으로 철도차량의 실내형상은 대칭적인 형상을 갖고 있으므로 차량내부를 Fig. 2와 같이 1/4로 분할하여 이 영역에 대해서만 다음과 같이 분할하였다.

- (1) Gangway
- (2) Floor

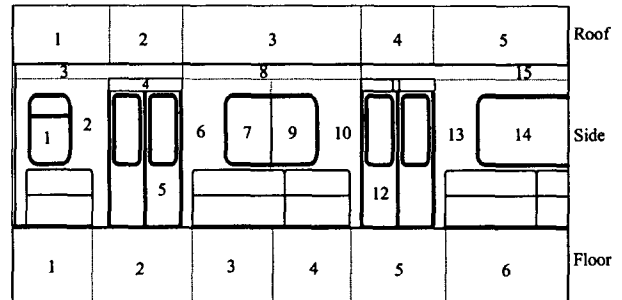


Fig. 2 Small areas for the side, roof and floor

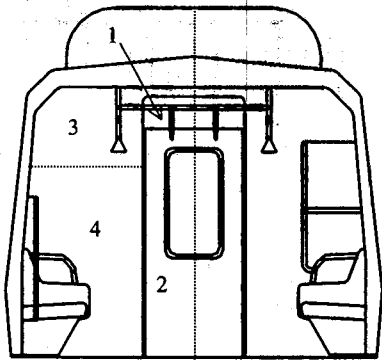


Fig. 3 Small areas for the gangway

- (3) Roof
- (4) Side window
- (5) Side wall
- (6) Side door

또한 위의 6개의 영역에 대해서도 적당한 미소면적으로 분할하여 각 미소면적에 대한 기여도를 추정하였다.

Fig. 2는 차량내부의 천장, 측면 및 마루에 대한 분할상태를 나타낸 것으로서 천장의 경우에는 5개의 미소면적, 측면은 측벽, 창문, 출입문을 15개의 미소면적으로 분할하였으며 마루는 6개의 미소면적으로 분할하였다. 또한 Fig. 3은 갱웨이의 분할상태를 나타낸 것으로서 갱웨이를 2등분하여 4개의 미소면적으로 분할하였다.

2.3 실내소음 기여도 측정순서

전 절에서 분할한 차량내부의 각 미소면적에 대한 기여도 측정 순서는 다음과 같다.

(1) 차량 정차 시 각 미소면적을 임펄스 해머로 타격가진 하여 가속도와 음압과의 전달함수를 측정한다. 음압은 차량중심에서 1.6 m높이의 위치에서 측정한다.

(2) 차량 주행 시 각 미소면적에 대한 가속도와 차량 중심의 실내음압을 측정한다.

(3) 각 분할면에서 방사되는 음압은 각 미소면적에 대한 전달함수, 가속도 및 면적을 식 (3)에 대입해서 계산한다.

(4) 그리고 각 분할면에서 방사되는 음압을 식 (4)에 대입해서 차량중심의 실내음압을 계산한다.

(5) 식 (4)로부터 계산한 실내음압의 결과와 차량 주행 시 측정된 결과를 비교하여 본 추정방법의 타당성을 검토한다.

$$P(\omega)_{gw} = 4 \times \sum_{i=1}^4 T(\omega)_{gwi} a(\omega)_{gwi} A_{gwi} \quad (3)$$

여기서, $P(\omega)_{gw}$ 는 Gangway의 음압 스펙트럼,
 $a(\omega)_{gwi}$ 는 Gangway의 가속도 스펙트럼,
 $A(\omega)_{gwi}$ 는 Gangway의 미소면적을 나타낸다.

$$P(\omega)_{total} = P(\omega)_{gw} + P(\omega)_{door} + P(\omega)_{floor} + P(\omega)_{sidewin} + P(\omega)_{sidewall} + P(\omega)_{roof} \quad (4)$$

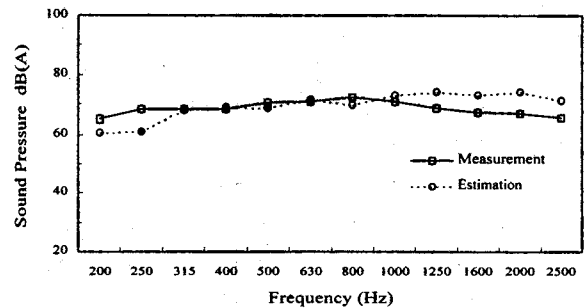


Fig. 4 Comparison between measured and estimated sound pressure levels

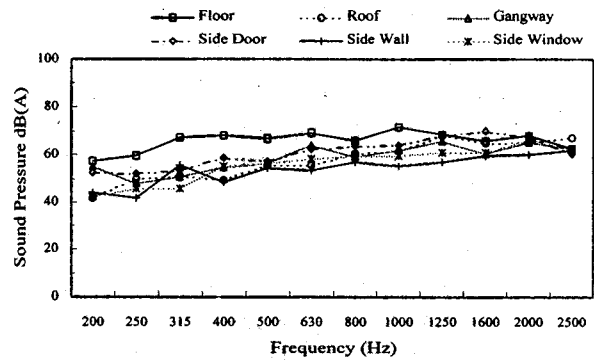
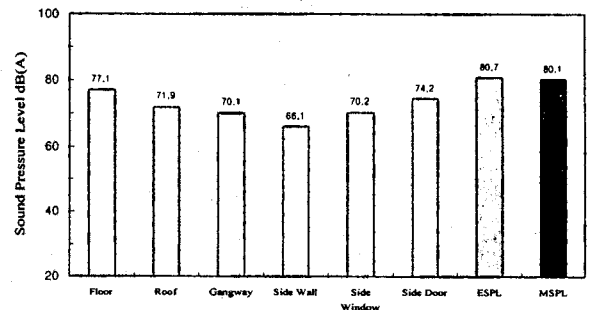


Fig. 5 Sound pressure level for each of parts



ESPL : Estimated sound pressure level
 MSPL : Measured sound pressure level

Fig. 6 Noise contribution for each of parts

2.4 실내소음 기여도 측정결과

본 기여도 시험은 개할지 구간에서 차량이 75 km/h로 정속주행 시 측정하였으며, 시험차량은 판토틀라프가 부착된 모터차량이다.

Fig. 4는 차량 실내소음의 측정결과와 추정결과를 나타낸다. 실선은 차량 주행 시 측정한 실내소음이고, 점선은 주파수 응답 함수와 미소면적의 가속도를 식 (3)과 식 (4)에 대입해서 계산한 실내소음의 추정결과이다.

실내소음의 추정결과와 측정결과가 주파수 200 Hz~250 Hz와 1.25 kHz~2.5 kHz영역에서 약간의 차이가 있으나, 대체적으로 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

주파수 200 Hz~250 Hz영역에서 추정치보다 측정치가 큰 것은 차량외부에서 갱웨이, 출입문 등을 통해서 유입되는 소음의 영향으로 생각되며, 분포도 시험결과로부터 확인할 수 있다.

Fig. 5는 각 분할면에서 방사되는 소음 레벨을 나타낸 것으로 마루에서부터 방사되는 소음 레벨이 전체적으로 다른 분할면보다 큰 것을 알 수 있으며, 1.25 kHz이상에서 천장, 갱웨이 및 출입문의 음압레벨이 점차 커지고 있다. 이 결과가 Fig. 4의 추정치에 영향을 미쳐 추정결과가 측정결과보다 크게 나타난 것으로 생각된다.

Fig. 6은 Fig. 5의 결과에 대한 overall값으로 각 분할면에 대한 차량실내소음에 대한 기여도를 나타낸 것이다. 이 결과로부터 차량실내소음에 대한 기여도는 마루, 출입문, 천장, 창문, 갱웨이 그리고 측벽의 순서로 나타난 것을 확인할 수 있다.

위의 결과에서 마루로부터 방사되는 소음의 기여도가 큰 것은 일반적으로 차륜과 레일에 의해서 발생하는 전동음과 차량하부의 모터에서 발생하는 소음의 기여도가 가장 크기 때문이다. 그리고 천장에서부터 방사되는 소음의 기여도가 크게 나타난 것은 본 시험에서 판토틀라프가 부착된 차량을 이용하였기 때문에 판토틀라프에 의한 소음의 영향으로 생각된다.

3. 실내소음 분포도

전 절에서 측정한 차량 실내소음 기여도 분석은 차량의 각 분할면에서 방사되는 소음레벨을 분리하여 각 분할면이 차량실내소음에 미치는 기여도를 파악할 수 있으나, 차량외부에서부터 직접 실내에 유입되는 소음레벨은 파악할 수 없기 때문에 본 절에서는 마이크로폰 격자판을 이용하여 차량실내소음의 분포도를 파악하여 차량외부에서 직접 유입되는 소

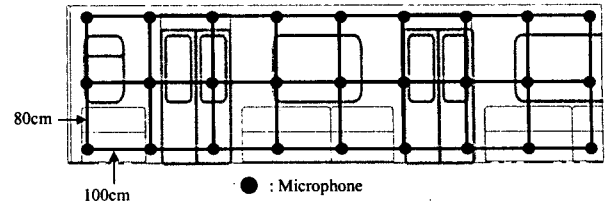


Fig. 7 Microphone array to measure noise distribution

음을 분석하였으며, 본 연구의 기여도 분석방법의 타당성을 검토하였다.

3.1 실내소음 분포도 측정방법

실내소음 분포도 시험은 기여도 시험과 동일한 차량을 이용하여, Fig. 7과 같은 격자판을 제작하여 27개의 마이크로폰(type 4196)을 격자점에 설치하여 차량이 개할지 구간을 약 60 km/h로 정속주행 시 차량 측면과 마루에 대한 소음 분포도를 측정하였다.

소음레벨은 차량측면의 경우에는 약 70 cm, 마루의 경우에는 140 cm정도 격자판을 이격시켜 측정하여 레코더에 저장한 후 분석하였다.

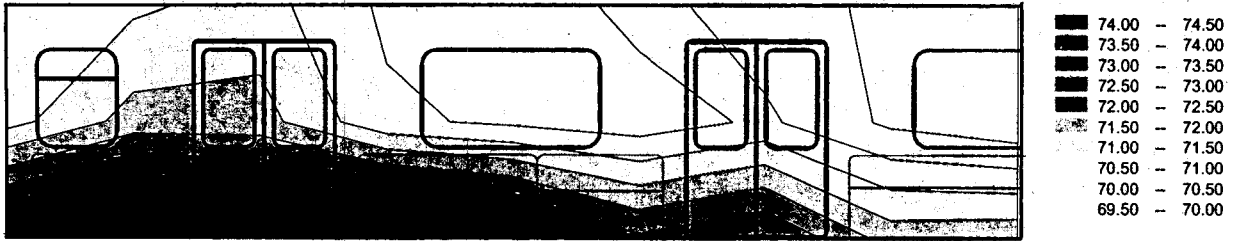
3.2 소음 분포도 시험결과

Fig. 8과 Fig. 9는 차량측면과 마루에 대한 소음 분포도 시험결과이다. Fig. 8은 전주파수에 대한 Overall값을 나타내고, Fig. 9는 주파수 200 Hz에 대한 소음분포도를 나타내고 있다.

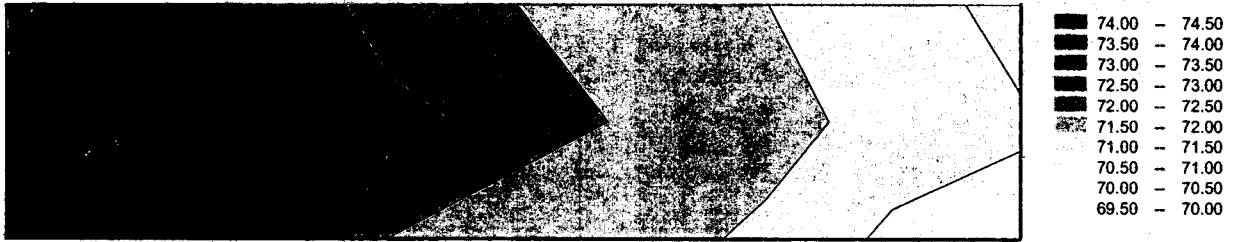
Fig. 8의 분포도 시험결과는 기여도 분석결과와 동일하게 차량의 마루와 출입문에서의 소음이 크게 나타났으며, 출입문 소음의 경우 출입문에서 방사되는 소음 이외에도 차량외부에서 출입문을 통해서 유입되는 소음에 의한 영향이 크게 나타나고 있는 것

Table 1 Reduction level of interior noise based on noise radiated from each of parts
U_{int} : dB(A)

	Floor	Sidedoor	Roof	Gangway	Reduction Level
Case 1	10	0	0	0	2.1
Case 2	5	2	2	0	2.4
Case 3	2	5	2	0	1.9
Case 4	10	2	2	0	3.2
Case 5	2	10	2	0	2.3
Case 6	5	2	2	2	2.7

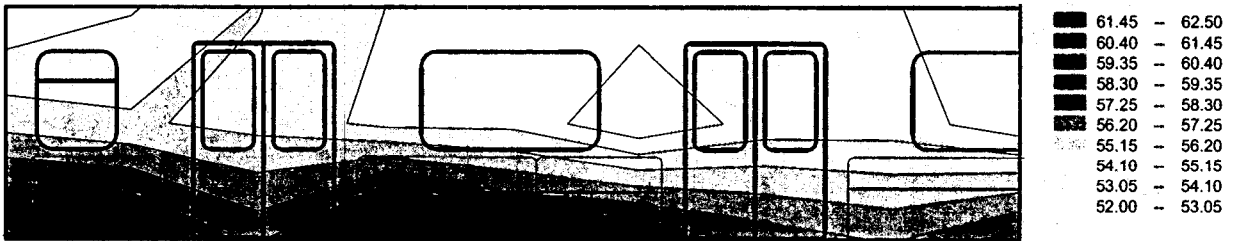


(a) Side

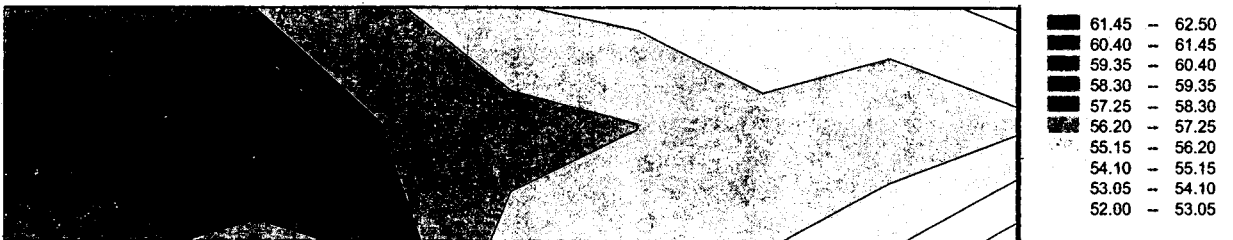


(b) Floor

Fig. 8 Noise distribution for the side and floor (Overall)



(a) Side



(b) Floor

Fig. 9 Noise distribution for the side and floor (200 Hz)

을 알 수 있다. 그리고 특히 마루에서 방사되는 소음레벨은 대차와 근접한 부분에서 가장 큰 것을 확인할 수 있으며, 이러한 결과는 차륜과 레일에 의해서 발생하는 전동음의 영향으로 생각된다.

Fig. 9의 결과는 위의 결과와 유사하게 나타나고 있지만, 특히 갱웨이에서 유입되는 소음의 분포가 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 외부로부터 갱웨이를 통과하여 유입되는 소음이 기여도 분석결과에서 주파수 200 Hz~250 Hz영역에 크게 영향을 미친 것으로 판단된다.

4. 각 분할면의 소음저감에 따른 실내소음 저감효과 분석

각 분할면에 대한 방사소음이 큰 마루, 출입문, 천장 및 갱웨이에 대해서 각 분할면에서 방사되는 소음을 저감시켰을 경우 실내소음의 저감량을 계산하여 차량 실내소음을 2~3 dB(A)정도 저감시킬 수 있는 가장 효과적인 방법을 분석하였다.

Table 1은 차량의 실내소음을 2~3 dB(A)저감시

키기 위한 마루, 출입문, 천장, 갱웨이에서부터 방사되는 소음의 저감량을 나타낸다. 그러나 일반적으로 한 개의 분할면에서 방사되는 소음의 양을 10 dB(A)까지 저감 시키는 것은 현실적으로 불가능한 경우가 많기 때문에 Table 1의 결과로부터 현실적으로 가장 효과적인 저감방안은 Case 2와 Case 6으로 판단된다. 따라서 차량의 실내소음을 2~3 dB(A)저감시키기 위해서는 기여도가 가장 큰 한 개의 분할면에 대한 방음대책보다는 기여도가 가장 커다란 분할면에 대해 방음대책을 세우면서 동시에 여러 개의 분할면에 대한 방음대책도 고려하는 것이 효과적이다.

5. 결 론

본 연구에서는 차량 내부의 각 분할면에서 방사되는 소음레벨을 분리하여 차량 내부의 기여도를 추정하였으며, 또한 마이크로폰 격자판을 이용하여 차량 내부의 소음분포 및 차량외부에서 유입되는 소음을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 차량의 각 분할면에 대한 주파수 응답 함수와 가속도를 이용하여 실내소음을 추정하는 방법을 제안하였으며, 각 분할면에서부터 방사되는 소음레벨 및 기여도를 분석하였다.

(2) 차량 실내소음은 마루에서부터 방사되는 소음의 기여도가 가장 크고, 출입문, 천장, 창문, 갱웨이, 측벽의 순서로 나타났으며, 특히 차륜과 레일에 의해서 발생하는 진동음의 영향으로 인해서 대차와 근

접한 마루부분에서 방사되는 소음레벨이 가장 큰 것을 확인하였다.

(3) 주파수 200 Hz~250 Hz영역의 실내소음은 외부에서부터 갱웨이를 통해서 유입되는 소음의 기여도가 큰 것을 확인하였다.

(4) 차량 실내소음을 저감시키기 위한 각 분할면의 대책방안은 기여도가 가장 커다란 마루에 대해 저감대책을 세우면서 출입문, 천장, 갱웨이에 대한 저감대책도 동시 고려하는 것이 현실적으로 가장 효과적인 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 철도청 기술연구개발사업 연구비 지원으로 수행되었으며 지원에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 田中 俊光, 1994, "고속차량의 저소음화를 위한 지원요소기술과 응용", J-Rail 94.
- (2) 松岡 茂樹 외 5명, 1995, "고속차량에 대한 경량, 고방음 차체구조의 개발", J-Rail 95, pp. 361~364.
- (3) 松岡 茂樹 외 5명, 1996, "고속차량에 대한 경량, 고방음 차체구조의 개발(제2보)", J-Rail 96, pp. 199~202.