

**전동차 실내소음특성 및 기여도 분석**  
**Interior noise characteristic and contribution analysis**  
**for rolling stocks**

정승원\*                  이용관\*                  박석태\*\*                  김경환\*\*  
Chung, Seung Weon      Lee, Ying Kwan      Park, Seok Tae      Kim, Kyung Hwan

---

**Abstract**

The purpose of this research is to setup the design procedure of low noise rolling stocks. Noise sources are identified at a field test, and the contribution of noise sources to each part of car interior is ensured by sound intensity measurement technique. Added material to each section of the carbody makes it possible to identify absorption or reflection performance of each part to the exterior random noise. Such experimental tests to the exterior noise intruding through the floor represent that the best countermeasure on the floor is to implement reflecting material which can properly interfere noise.

Design procedure of low noise rolling stocks is set through several experiments.

---

**1. 서론**

생활의 향상과 더불어 소음공해에 대한 관심이 고조되고 있다. 철도차량 소음은 1994년에 개통된 분당선을 시작으로 사회적인 문제로 대두되기 시작했으며, 기존의 유도상 궤도는 자갈과 자갈사이의 공극이 차량 운행시 발생하는 소음을 흡수 할 수 있도록 설계하였다. 그러나, 소음에 대한 정확한 고찰 없이 정비등 유지 관리의 효율성과 본진의 최소화 추구 등을 이유로 콘크리트 도상으로 바꾸면서 철도차량의 소음 문제가 크게 부각되는 계기가 되었다. 그러나 타 분야에 비해 철도차량의 소음 문제에 대한 연구 실적은 상당히 미비하며 대부분의 연구도 차량 자체의 대책보다는 환경 소음과 관련된 외부 소음 위주의 연구가 주종을 이루고 있는 실정이다.

외부 소음과 실내 소음의 경우 대부분 동일한 소음원에 의하여 지배되기 때문에 결코 별개의 문제가 될 수 없다. 그럼에도 불구하고 국내의 학술지에 발표되고 있는 문헌들을 살펴볼 때 외부소음에 관한 내용이 대부분이며 외부 소음의 경우는 방음벽을 이용하는 방법으로 비교적 간단한 대책으로 해결이 가능하지만, 실내소음 문제는 철도차량의 다양성, 복잡한 소음원과 전파 경로로 인하여 고도의 소음저감기술이 요구된다. 또한 선진국 등에서도 이에 대한 노하우를 공개하지 않고 있는 실정이다.

본 연구에서는 소음저감 개발과정을 주행 시험과 정차 시험의 두단계로 구분하여 주요 소음원에 대한 주파수 분석과 소음 기여도등을 각각 파악하였다. 주행 시험에서는 실차 주행시의 차실내 및 대차 하부에서의 소음을 측정하고 이를 분석하여 소음저감할 목표 주파수 밴드를 선택하였다. 이 과정에서 이상소음의 존재와 특징도 도출할 수 있었다.

---

\* 대우중공업(주) 철도차량연구소, 비회원

\*\* 고등기술연구원 설계기술연구실, 비회원

정차시험에서는 음향 인텐시티 시험을 수행하여 차량의 각 패널들을 통과하는 소음의 주파수 밴드별 특성과 전체 소음에 대한 각 패널의 소음기여도를 찾았다. 이 과정을 통하여 효과적인 소음저감을 위한 제진재 선정 및 흡.차음재의 부착위치를 결정하였다. 또한 소음 분포도와 같은 기초데이터는 후속 차량 개발 시에 설계의 기초 자료로 사용되어 저소음 철도차량 개발에 사용하도록 하였다.

## 2. 본론

### 2.1 음향인텐시티법의 개요

음향 인텐시티 측정법은 음의 크기와 방향을 측정하여 소음 분포도를 작성하여 효과적인 소음대책을 세울 수 있는 기법으로서 가진 음원의 위치를 찾는데 사용된다. 소음분포도에서 숫자는 dBA로 표시한 음향 인텐시티 수준을 나타낸다.

음향 인텐시티를 분석하면 전체 소음에 대한 특정 주파수 밴드별 소음의 기여도를 밝혀낼 수 있다. 이를 이용하여 인텐시티 map으로부터 주요 소음원의 위치와 주파수 밴드 및 소음수준을 쉽게 찾을 수 있으므로, 소음원에 대한 적절한 흡.차음재를 적용하여 공기기인 소음을 제어할 수 있다.

음향 인텐시티는 벡터량으로 음파가 진행할 때 단위면적에 입사되는 음향파워로 단위시간당 음향에너지의 흐름을 말한다. 평면파의 경우 진행방향으로의 인텐시티와 음압의 관계는 식(2.1)과 같다.

$$I = p \cdot v = \left( \frac{p^2}{\rho c} \right) \quad (2.1)$$

여기서,  $I$  : 음향 인텐시티 (watt/m<sup>2</sup>)  
 $p$  : 음압 (pa)  
 $\rho$  : 매질의 밀도 (kg/m<sup>3</sup>)  
 $v$  : 매질의 입자속도 (m/sec)  
 $c$  : 음속 (m/sec)

식(2.1)에서 음향 인텐시티 수준과 음압수준의 관계는 식(2.2)가 된다.

$$IL = 10 \log \left( \frac{I}{I_{ref}} \right) = SPL + 10 \log \left( \frac{p^2_{ref}}{\rho c I_{ref}} \right) \quad (2.2)$$

여기서, 공기 중에서는

$IL$  = 음향 인텐시티 수준 (dB)  
 $SPL$  = 음압 수준 (dB)  
 $p_{ref} = 20 \mu Pa$   
 $I_{ref} = 10^{-12} \text{ Watt/m}^2$   
 $\rho c \approx 408 \text{ kg/m}^2 \text{ sec}$

음향 인텐시티는 평면파의 경우에 음압수준을 제측하여 식(2.1)로부터 간접적으로 유추할 수 있으나 일반적인 음장에서는 이와 같은 방법을 적용할 수 없다.

음향 인텐시티는 식(2.3)으로 표현된다.

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) v(t) dt \quad (2.3)$$

Euler 방정식에 의하여 매질 입자의 속도  $v$ 는 거리  $\Delta r$ 만큼 떨어진 두 인접 지점에서의 음압 차이 ( $p_B - p_A$ )로부터 식(2.4)로 근사화 된다.

$$v = - \frac{1}{T} \int_0^T \left[ \frac{p_A - p_B}{\Delta r} \right] dt \quad (2.4)$$

또한 중간 지점에서의 음압은  $\frac{(p_B - p_A)}{2}$ 로 근사시킬 수 있으므로 식(2.4)는 식(2.5)로 나타낸다.

$$I_r = - \frac{1}{\Delta r \rho T} \int_0^T \left[ \frac{p_A + p_B}{2 \int_0^T (p_A + p_B) dt} \right] dt \quad (2.5)$$

식 (2.5)는 음향 인텐시티 측정의 근거가 되는 식이다. 실제의 경우에는 두 개의 마이크로폰으로 구성된 sound intensity probe와 신호 분석기를 사용하여 식(2.5)에서 유도된 식(2.6)을 이용하여 음향 인텐시티를 구한다.

$$I_r = - \frac{1}{2\pi\rho\Delta r} \int_{f_1}^{f_2} \frac{I_m[G(f)]}{f} df \quad (2.6)$$

여기서,  $I_m[G(f)]$  : 크로스 스펙트럼의 허수부  
 $f_1, f_2$  : 측정부의 상, 하한의 주파수

또한 Active Intensity I는 두 신호의 cross spectrum을 써서 식(2.7)로 표현된다.

$$I_r = \frac{1}{\omega \rho \Delta r} I_m[G_{p_2, p_1}(w)] \quad (2.7)$$

## 2.2 시험

시험은 대상차량에 대하여 주행 상태와 정차 상태에서의 소음 진동 시험을 수행하고 분석하였다.

### 2.2.1 주행 시 실내소음 시험

본 시험의 목적은 측정 대상차량의 주행 소음 특성을 파악하여 소음 대책의 필요성 존재와 소음 대책이 필요한 주파수 범위를 선정하는데 있다. 시험조건은 대상차량이 영업운전을 하는 상태와 동일하게 하였다.

실내소음은 KS R9143에 따라 전위대차상부의 중앙에서 측정하였고, 주행상태의 소음을 정확하게 재현하기 위하여 토르소(torso)를 장착하여 토르소의 양쪽 귀에 장착된 마이크로폰으로 binaural 방식 녹음을 하였고, 분석은 SDRC sound quality software를 이용하였다. 시험은 지상구간과 터널 구간에서 각각 수행하였다. 분석시 터널구간에서의 주행속도는 70km/h였고, 지상구간과 고가구간에서는 90km/h에서 분석하였다. 이때의 실내소음과 차량 하부와의 음압차를 아래의 표 1.에 나타내었다.

(가) 주행속도에 따른 대차하부의 음원가진원과 실내소음의 수준차

표 1. Overall 수준에서의 주행속도에 따른 음원가진원과 실내소음 수준차

주행속도 (Km/h)	지상구간 (dBA)	터널구간 (dBA)	고가구간 (dBA)	비고
70	27.1	25.4	27.9	
90	29.8	-	28.3	

주행속도에 따른 가진 음원과 실내에서의 overall 수준에서 소음수준차는 고속에서 약간 커지며 터널구간에서 다른 구간에 비하여 상대적으로 작은 것은 터널 내에서의 반사음의 영향에 의한 것으로 판단된다.

(나) 주행 소음 특성

표 2.에 나타낸 것과 같이 동일 속도 구간에서도 터널구간의 실내소음수준이 다른 구간에 비하여 높게 나타났다. 70km/h의 주행속도인 경우에는 다른 구간에 비하여 3dBa 정도의 소음이 증가함을 알 수 있다.

표 2. 주행속도 70 km/h에서의 실내소음 수준(Overall)

주행속도 (km/h)	지상구간 (dBA)	터널구간 (dBA)	고가구간 (dBA)	비고
70	76.2	79.1	76.0	

표 3.에는 속도대역별 운행구간별 주요 소음 발생 주파수 대역을 나타낸 것으로 500 Hz에서

1500Hz 대역이 주행소음의 주요 주파수 대역이며, 주행속도의 증가에 따라 고주파 대역으로 주요 주파수 대역이 확장되는 것을 알 수 있었다. 이것은 공기기인 소음으로 판단된다.

표 3. 각 구간 소음의 주요 주파수 대역

주행속도 (km/h)	지상구간 (Hz)	터널구간 (Hz)	고가구간 (Hz)	비고
70	500~1k 대역	500~1k 대역	800~1.5k 대역 및 2500	
90	500~1k 대역 및 3150	-	800~1.5k 대역, 2500 및 3150	

표 3.과 그림 1.과 2.에서 알 수 있듯이 70 km/h 정도의 주행 시에 크게 문제가 되지 않았던 2500 Hz와 3150 Hz가 90 km/h로 주행시에 부각되고 있음을 알 수 있다. 음원측면을 보면 속도가 증가함에 따라 1.5 kHz대역에서의 소음이 증가함을 알 수 있다.

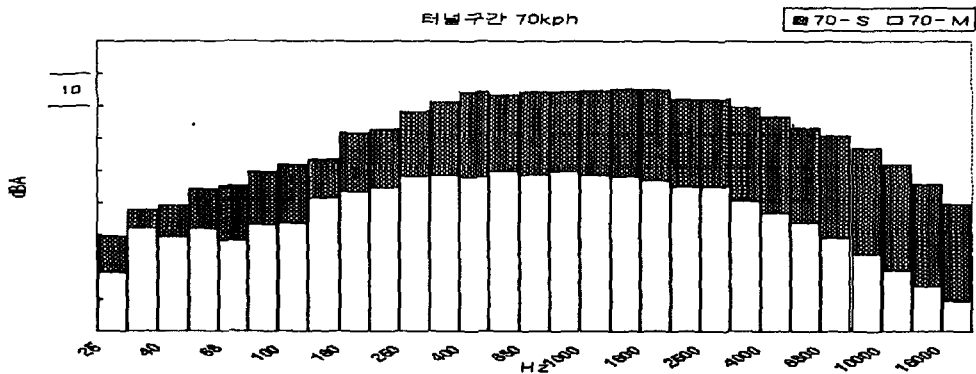


그림 1. 터널구간 70 Km/h 주행시의 소음

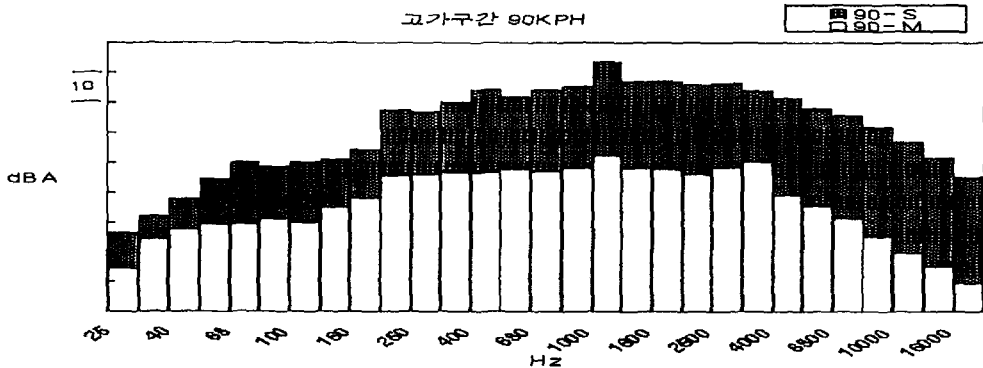


그림 2. 고가구간 90 Km/h 주행시의 소음

따라서 500 Hz에서 1500 Hz 대역에 대한 대책과 고속 주행시의 고주파 대역에 대한 대책도 필요하리라 판단되며, 이러한 주행 소음의 데이터를 음향 인텐시티 측정 결과와 병용하여 적절한 소음대책을 간구하여야 한다.

### 2.2.2 정차시 실내소음 시험

정차시의 시험에서는 측정 시험차량의 바닥면, 측면 및 통로면의 음향 인텐시티를 측정하였다. 효과적인 소음저감을 위한 흡·차음재 부착위치를 파악하기 위하여 음향 인텐시티 분포도를 작성

하였다.

(가) 음향 인텐시티 시험

주행 소음 측정 결과 주파수가 5kHz보다 큰 주파수에서의 소음은 무시할 정도의 수준이어서 12mm 간격을 가지는 음향 인텐시티 탐침자를 이용하여 음향 인텐시티를 측정하고 분석하였다. 음향 가진원으로는 2개의 라우드 스피커를 사용하였으며 각각 전위대차 하부와 후위 대차하부에서 가진하도록 배치하였다. 또한 각 스피커는 레일의 상면으로부터 1m거리에서 음압이 105dBA가 나오도록 하고 4kHz까지 random파를 발생하도록 하였다.

표 4.에 시험차량 실내의 대한 음향 인텐시티 분석 결과를 각주파수 밴드별 최대 음향파워와 음향 인텐시티 수준으로 정리하였다. Overall band에 대하여 바닥면, 측면 및 벽면의 음향 파워 수준은 각각 72 dBA, -59 dBA 및 -57 dBA를 나타내므로 바닥면은 음원가진원이 되고, 측면과 통로면으로 음이 나감을 나타냈다. 특히, 주파수 밴드 500Hz, 1000Hz 및 2000Hz가 전체소음에 대하여 가장 기여도가 큼을 알 수 있었다. 따라서 차실내 소음저감을 위해서는 바닥면에 대한 차음재 처리가 가장 효과적인 것으로 판단된다. 물론 차음재의 특성도 중요하므로 제어하고자 하는 주파수 밴드에 대하여 차음 특성이 좋은 것을 선택하여야 한다.

예를 들어 1000Hz의 소음저감을 목표로 하면 미리 차음재에 대한 차음특성 시험으로 1000Hz에서의 차음특성이 좋은 것을 선택하여야 한다. 따라서 흡.차음재에 대한 데이터 베이스화가 선행되어야 한다.

표 4. 실내 최대 음향 인텐시티 및 음향 파워

주파수 밴드(Hz)	바닥면 (dBA)		측면 (dBA)		벽면 (dBA)		비고
	인텐시티	음향파워	인텐시티	음향파워	인텐시티	음향파워	
63	-	45.0	-	-46.0	-	-39.0	
125	-	57.0	-	56.0	-	-51.0	
250	59.0	61.0	52.0	-54.0	47.0	-51.0	
500	59.0	66.0	51.0	-58.0	54.0	-52.0	
1000	59.0	66.0	54.0	-56.0	54.0	-51.0	
2000	61.0	66.0	56.0	46.0	56.0	48.0	
Overall	64.0	72.0	58.0	-59.0	58.0	-57.0	

상기의 표에서 인텐시티는 중심 주파수 밴드별 측정 대상 단면에서의 최대값을 의미하며, 음향파워는 측정 대상면의 파워를 의미한다.

1) 바닥면 음향 인텐시티 분석

그림 3.은 overall band에 대한 음향 인텐시티 map으로 대차 상면에서의 수준이 높게 나타나며 부호가 (+)이므로 밖에서 안으로 소음이 유입됨을 나타낸다. 500Hz 주파수 밴드에서의 결과를 보면 문 주변에서의 소음수준이 크게 나타나는데 그 원인은 측면에서의 유입되는 소음과 합쳐지는 것으로 추측된다. 음향방사가 가장 큰 위치는 그림의 중앙 하단부이다. 파란색(-)으로 보이고 있는 부분은 소음이 안에서 밖으로 나가는 것을 의미한다.

2) 측면 음향 인텐시티 분석

측면에서의 overall band에 대한 음향 파워는 -59dBA이므로 측면 전체를 볼 때 차실내에서 음이 밖으로 빠져나가는 특성을 보이고 있다. 이것은 소음의 대부분이 바닥면으로부터 실내에 유입되어 측면으로 소음이 유출됨을 뜻한다.

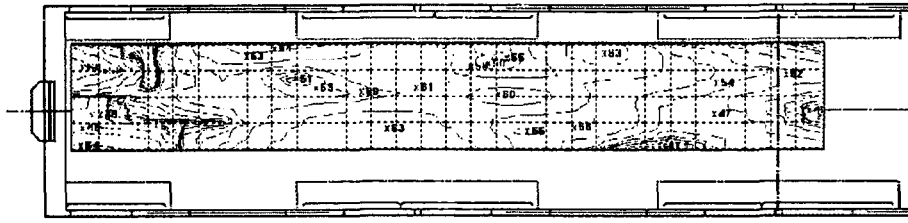


그림 3. 상구조에 대한 음향 인텐시티 map (Overall band)

Overall band에 대한 결과인 그림 4를 보면 문 주위를 제외하고는 소음이 밖으로 나가는 양상을 보이고 있다. 그러나 문 주위에서는 소음수준이 높게 나타나는데 이것은 문 사이의 기밀유지가 안되고 도어 포켓 사이공간을 통하여 음이 들어오기 때문이다.

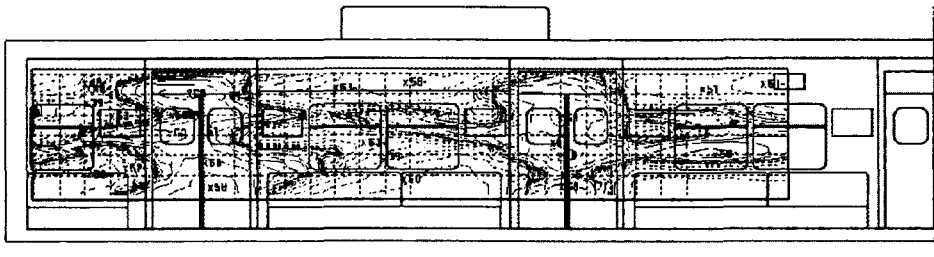


그림 4. 측면에 대한 음향 인텐시티 map (Overall band)

### 3) 벽면 음향 인텐시티 분석

벽면에 대한 음향 인텐시티 분석을 수행한 결과를 그림 5에 나타내었으며, 도어 하부에 대하여는 소음의 유입이 강하고, 유리창과 나머지 부분에서는 소음의 유출이 강함을 알 수 있다. 따라서 gangway 부위의 도어의 하단부에 대한 적절한 차음과 나머지 벽면에 대한 흡음 대책이 요구된다.

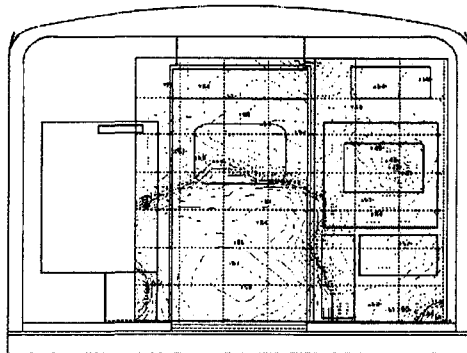


그림 5. 벽면에 대한 음향 인텐시티 map (Overall band)

### 2.2.3 흡.차음재 적용시험

앞에서 수행한 음향 인텐시티 결과를 이용하는 것의 유용도를 검증하기 위하여 흡.차음재를 적용하여 시험을 수행하였다. 바닥면에서는 전체 바닥의 1/2 면적을 8개 부분으로 나누어 흡.차음재를 적용하였다. 흡.차음재 적용에 대한 소음저감 효과를 보기 위한 목적이므로 임의의 흡.차음재를 선정하였다. 사용한 제품은 Sound seal사의 제품인 BBC-13을 사용하였다.

흡.차음재의 폭을 1.2m로 하여 바닥면에 대하여는 8개의 부분으로 나누어 흡.차음재를 적용하

였으며, 측면에서는 외측벽의 1/2 면적을 7개의 부분으로 측정하였으며 문 주변에서는 1.2m 흡차음재를 2장 겹쳐서 시험하였다. 흡차음재 적용에 대한 효과를 검증하기 위해서 실내에서의 소음 측정 위치는 대차상부 위 1.6m 지점에서 측정하였다.

(가) 바닥면에 대한 흡차음재 적용시험

그림 6.에 1/1 옥타브 밴드별로 흡차음재를 적용한 전후의 소음수준을 나타내었다.

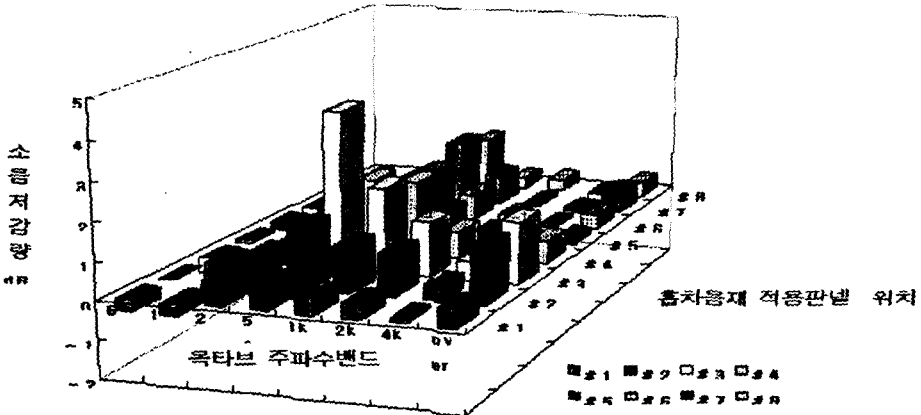


그림 6. 흡차음재 적용 전, 후의 소음수준 차이

그림에서 (+)값은 음이 들어오는 것을 의미하므로 특별한 흡차음대책이 필요함을 의미한다. 그러나 그 값이 클수록 대차 상부를 통하여 실내로 유입되는 소음이 많음을 나타낸다. 예를 들어 주파수 밴드 125 Hz에서의 패널 3은 음향파워가 (-)를 나타내므로 여기에 흡차음재를 적용하면 소음이 나가는 것을 방해하므로 오히려 실내소음이 악화될 수도 있다. 실제로 각 판넬별로 옮겨가며 흡차음재를 부착하기 전과 후의 소음수준을 측정하였다. 이때의 소음수준의 차이가 흡차음재에 의한 효과라 볼 수 있다. 아래의 표 5.은 소음 저감량을 정리한 것으로 패널 3의 경우에 흡차음재를 적용한 것과 안한 것의 차이가 125Hz 밴드에서 -0.8 dBA로 흡차음재를 적용한 결과가 오히려 소음을 크게 함을 알 수 있다. 반면에 500 Hz 밴드에서는 4.1 dBA 소음저감을 보여준다. 그러나 패널 3의 음향파워와 연관하여 생각하면 음향파워가 (+)이므로 흡차음재를 적용하는 것이 옳바르다.

표 5. 흡차음재의 유무에 따른 소음 저감량 비교(바닥면)

(단위 : dBA)

중심주파수 (Hz)	P #1	P #2	P #3	P #4	P #5	P #6	P #7	P #8	비고
63	-0.3	0.0	-0.4	-0.1	-0.2	-0.2	0.1	0.0	
125	-0.3	-0.4	-0.8	-1.4	-0.7	-1.1	-0.4	-0.6	
250	1.1	0.8	0.4	-0.4	-0.6	0.2	-0.2	-0.2	
500	0.8	1.6	4.1	1.9	1.0	1.3	1.7	1.4	
1000	0.5	1.2	2.2	1.9	0.7	0.7	0.8	0.3	
2000	0.4	1.1	1.4	0.7	0.2	0.2	0.1	0.3	
4000	0.1	0.4	0.5	0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	
Overall	0.5	1.5	1.6	0.6	0.2	0.4	0.6	0.4	

(나) 측면에 대한 흡차음재 적용시험

그림 7.은 측면을 7개의 패널로 구분하였을 때에 각 패널을 통하여 흐르는 음향 인텐시티 수준을 주파수별로 분석하여 나타낸 것이다.

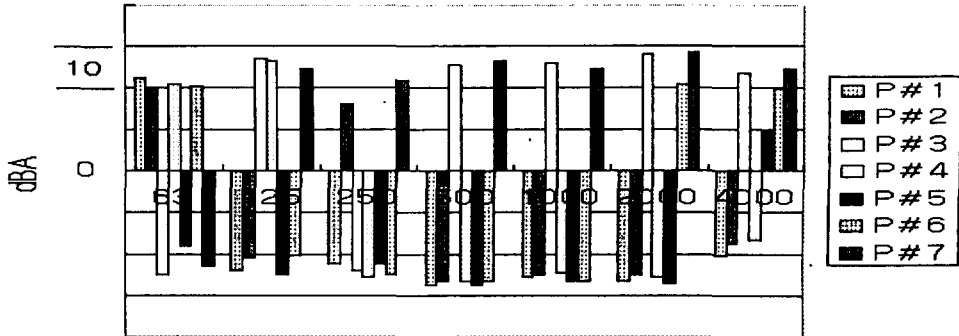


그림 7. 측면에 대한 주파수별 음향 인텐시티 수준

또한 아래의 표 6은 흡.차음재의 유. 무에 따른 소음저감량을 정리한 것이다. 위의 표 5와 비교하여 볼 때, 바닥면에 흡.차음재를 부착하는 것에 비하여 상대적으로 소음저감 효과가 작음을 보여준다.

표 6. 흡.차음재의 유무에 따른 소음 저감량 비교(측면)

(단위 : dBA)

중심주파수 (Hz)	P #1	P #2	P #3	P #4	P #5	P #6	P #7	비고
63	0.0	0.1	-0.1	0.0	-0.2	0.0	-0.2	
125	-0.1	0.1	0.0	0.6	0.3	0.6	0.0	
250	0.7	0.3	-0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	
500	0.0	0.4	0.3	0.0	0.1	0.0	-0.1	
1000	0.1	-0.1	1.3	0.6	0.7	0.6	0.2	
2000	0.3	0.4	1.4	0.0	0.0	0.0	0.5	
4000	0.3	0.2	1.6	0.1	0.3	0.1	-1.5	
Overall	0.2	0.3	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1	

### 3. 결론

본 연구는 저소음 철도차량을 개발하기 위한 과정을 정립할 목적으로 수행하다.

실차시험을 통하여 소음원의 주파수 특성을 규명하였으며, 이로부터 제어할 주요 소음 주파수밴드를 파악하였다. 정차중 인텐시티 시험을 통하여 차량 실내의 각 부위에 대한 소음원의 기여도를 파악하였다. 확인시험으로 흡.차음재를 바닥, 측면 및 벽면에 부가 적용함으로써 각 부위별 흡.차음 성능을 파악하였다. 이를 통하여 바닥면에 차음재를 적용했을 경우가 다른 부위에 적용했을 때에 비하여 소음 저감량이 우수함을 알 수 있었다.

이와 같은 일련의 과정을 통하여 저소음 철도차량을 개발하기 위한 설계과정이 정립되었다.

### 4. 참고자료

- (1) J.R. Hassal, K.Zaveri : Acoustic Noise Measurements, Bruel & Kaer, 1998.
- (2) Hugh J. Saurenman, James T. Nelson, George P. Wilson : Handbook of Urbanrail noise and vibration control, Wilson Ihrig & Associates Inc., 1982
- (3) Morse P.M., Ingrad K.U. : Theoretical Acoustics, McGraw-Hill Inc. 1968.
- (4) K. Saijyou., S. Yoshikawa., : Measurement of structural and acoustic intensities using near-field acoustical holography, Journal of applied Physics of Japan, 35, pp. 3167-3174, 1996.
- (5) User manual, STAR Acoustics
- (6) User manual, STAR Modal