

# 철도환경소음 저감기술

2



글 ■ 유원희 / 한국철도기술연구원, 책임연구원  
e-mail ■ whyou@krti.re.kr

이 글에서는 철도차량의 실내환경 및 철도연변의 환경을 쾌적하게 유지하기 위한 철도소음 저감기술에 대한 연구동향을 철도차량에 관련된 기술을 중심으로 소개하고자 한다.

1990년대 이후 산업 전반에 걸쳐 환경에 대한 문제점이 크게 증가하고 있다. 환경소음은 여러 환경문제점 중에 시급성이 다소 떨어지는 것으로 간주되어 왔으나 국민소득의 증대와 더불어 쾌적한 거주공간의 확보가 중요시됨에 따라 그 심각성이 빠르게 표출되고 있다. 이러한 시점에서 기존철도는 교통량이 한계에 도달할 정도로 포화되어 있는 상태이며, 대도시에서는 지하철의 건설 및 운행이 증가하고 있고, 중소도시에서는 경전철의 건설이 추진되고 있다. 아울러 2004년 경부고속철도가 개통이 되면 철도의 환경소음에 대한 문제는 더욱 많아질 전망이다. 이러한 철도차량의 환경소음 문제에 대하여 유럽이나 일본과 같은 철도선진국에서는 이미 오래 전부터 그 심각성을 인식하여 열차의 내부 및 철도연변 거주지역에서의 소음을 감소시키기 위한 노력을 경주하여 왔다. 열차를 구성하는 기계류의 소음에서부터 공력소음에 이르기까지 그 원인을 규명하고 저감대책을 세우기 위한 연구가 활발히 진행됨에 따라 많은 효과를 보게 되었으며, 최근에는 지하철과 같이 곡선부와 터널이 많은 철도에서의 소음대책을 세우기 위해 전동음(rolling noise) 및 곡선부소음의 메커니즘 규명에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

가 제기되어 왔으며, 특히 콘크리트 터널로 이루어진 제2기 지하철 차량에서는 더욱 심각하게 표출되어 왔다. 서울지하철의 경우 인버터소음과 같은 기계류소음과 전동음도 문제이지만 곡선부에서의 날카로운 음이 가장 큰 문제점으로 제시되고 있다. 이에 따라 1998년 건설교통부에서는 지하철 전동차의 차내소음 허용기준을 80dBA로 강화하였으며, 이후 제작되는 차량의 소음에 대한 관리에 만전을 기하고 있다. 한편, 지하철속을 주행하는 지하철에 비하여 개활지를 주행하는 일반철도 차량이나 고속철도 차량의 실내소음 허용기준은 보다 낮게 설정되어 있다. 표 1은 각종 철도 차량의 실내소음 허용기준을 보여주고 있다.

한편, 철도 차량을 이용하는 측면에서 정해진 철도 차량 실내소음 허용기준도 중요하지만, 철도 연변에 거주하는 주민들의 쾌적한 환경을 보장해 주기 위한 철도 연변 환경소음 기준 또한 중요하다. 국내의 철도 관련 환경소음 기준은 1994년 총리령 제473호로 공포되어 2000년 1월 1일부터 시행되며, 공포일 이후에 준공되는 철도는 2010년 1월 1일부터 소음한도를 적용하는 것으로 되어 있다. 그 기준은 표 2와 같다.

표 1 철도차량의 실내소음 허용기준

차종	고속철도 차량 객차 (TGV, 300km/h)	일반철도 차량 객차 (새마을, 무궁화)	국내 지하철 차량 (전동차)
개활지	66	67	
터널	71	73	80
비고	직선구간, 소음계 Fast 반응		

서울지하철이 개통된 이후 서울지하철 차량의 실내소음은 지속적으로 문제



표 2 철도연변소음 허용기준

대상지역	소음한도(Leq dBA)			
	2000년 1월 1일~2009년 12월 31일		2010년 1월 1일부터	
	주간 (06:00~22:00)	야간 (22:00~06:00)	주간 (06:00~22:00)	야간 (22:00~06:00)
주거지역	70	65	70	60
상공업지역	75	70	75	65

이러한 차량 실내소음 및 철도 연변 소음의 허용기준을 만족하기 위해서는 철도소음의 소음원을 규명하고 그로부터 소음원에 대한 대책, 소음 전달경로에서의 대책 및 수음위치에서의 대책 모두 철저히 고려되어야만 한다.

### 차량 소음원

#### 속도대역별 소음원 분류

철도소음은 열차의 속도에 따라 다음 그림 1과 같이 세 개의 구간으로 구분된다. 첫 번째 구간은 저속구간으로서 차량에 장착되는 디젤엔진, 냉각팬, 추진모터, 공기압축기 등 기계류의 소음이 주된 소음원이 된다. 소음의 크기는 속도의 증가에 비례하여 증가하며, 대체로 60km/h 이하의 속도구간이 여기에 해당된다. 두 번째 구간은

중속구간으로서 차륜과 레일 사이의 상호작용으로 인해 발생하는 전동음이 주된 소음원이 된다. 열차속도 약 60~250km/h의 구간이 여기에 해당되며, 속도의 3승에 비례하여 소음의 크기가 증가한다. 마지막 구간은 고속구간으로서 약 250km/h 이상의 속도에서 열차의 전두부, 후미, 바닥 및 판도그래프 등에서 발생하는 공력소음이 주된 소음원이 된다. 이 구간에서는 소음의 크기가 속도의 6~8승에 비례하여 증가한다. 일반적으로 최고운행속도 200km/h급 이상의 고속열차에서는 공력소음 저감방안을 마련해야 한다. 이와 같이 철도소음은 열차의 속도에 따라 그 소음원이 다르기 때문에 저감기술 태한 별도로 세워야 한다. 지하철 차량이나 새마을호와 같은 일반 철도 차량의 경우 기계류소음과 전동음에 대한 대책을 모두 중요시해야 하며, 경부고속철도 차

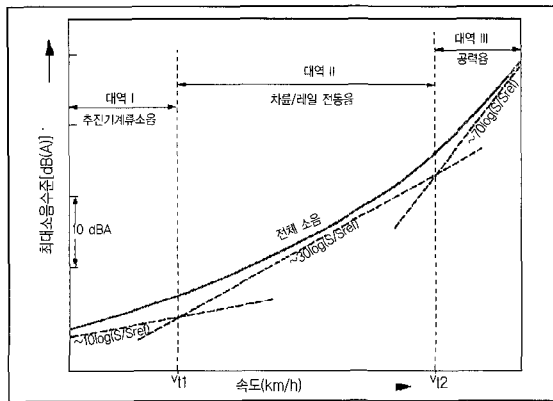


그림 1 속도대역별 철도소음의 특성

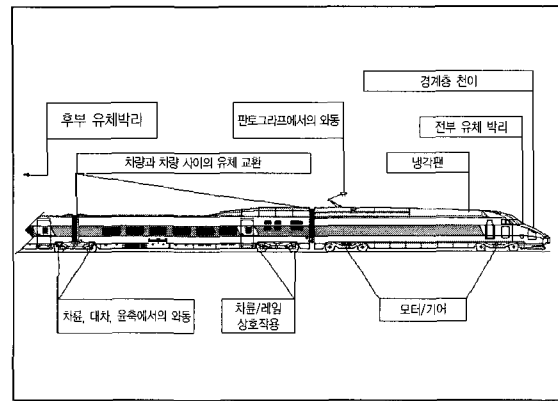
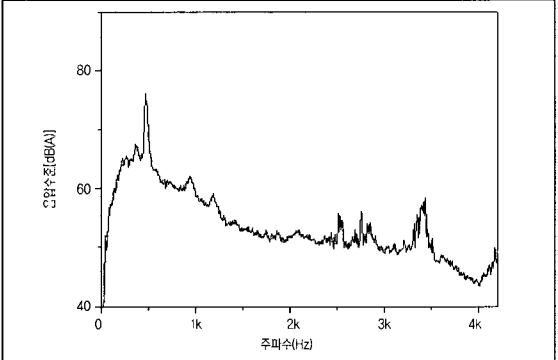
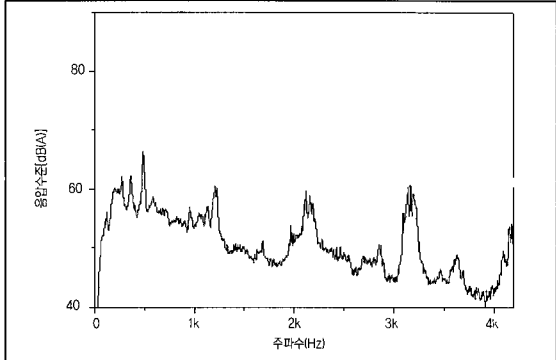


그림 2 철도소음의 소음원별 위치



(가) 시청-종각 구간(곡선반경 140m)



(나) 상계-당고개 구간(곡선반경 180m)

그림 3 서울지하철 곡선부소음의 특성

량과 같은 고속철도 차량에서는 기계류소음, 전동음 및 공력소음 모두 중요하게 고려되어야 한다. 그림 2는 철도소음의 소음원별 위치를 나타내고 있다.

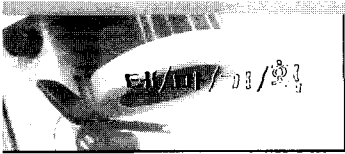
**곡선부소음**

앞에서 언급한 소음원 이외에 매우 중요한 철도소음원으로서 지하철과 같이 곡선부가 많은 철도에서 차량과 레일의 비정상적인 접촉에 의해서 발생하는 곡선부소음이 있다. 곡선부소음은 크게 두 가지 형태로 나타나게 되는데, 첫 번째는 차량의 비선형 좌우진동에 의해 나타나는 스컬소음

(squeal noise)이며, 두 번째는 곡선부에서 차량의 좌우슬립 및 파상마모(corrugation)에 의해 나타나는 하울소음(howl noise)이다. 하울소음은 보통 200~750Hz 범위에서 피크성분을 나타내며, 스컬소음은 그 이상의 여러 주파수 범위에서 사람의 귀에 거슬리는 고주파수의 피크성분을 나타낸다. 이들에 대한 연구는 철도 선진국인 유럽이나 일본에서조차 그 동안 경험 및 실험에 의존되어 왔으며, 최근에 이르러서야 본격적인 이론적 연구가 수행되고 있다. 곡선부소음은 차량의 공진과 관계가 있기 때문에 차량의 동적인 특성 해석과 함께 공진이 발생되지 않도록 하거나 차량의 진

표 3 소음의 발생원인

종 류	정 의	발 생 원 인	비 고
기계류소음	차량에 장착되는 기계류에 의한 소음	- 추진장치(디젤엔진, 모터, 인버터, 냉각팬, 압축기 등의 소음	- 약 60km/h 이하의 저속에서 매우 중요 - 크기는 속도에 비례
전동음	차량/레일 접촉에 의한 소음	- 레일두부 및 차량담면의 요철에 의한 구름소음	- 약 60~250km/h 속도구간에서 지배적 - 크기는 속도의 3승에 비례
공력소음	열차표면 및 판토품의 공기역학적 메커니즘에 의한 소음	- 열차 전두부, 후미 및 바닥에서의 공력소음 - 판토품에서의 공력소음 - 차량 사이의 불연속 부위에서의 공력소음	- 약 250km/h 이상의 속도에서 지배적 - 크기는 속도의 6~8승에 비례
철도구조물소음	열차주행에 따른 진동이 철도 구조물에 전달되어 발생하는 소음	- 궤도의 진동과 충격이 철도구조물에 전달되어 발생 - 이음매 및 분기기에서의 충격소음	
곡선부소음	곡선부에서 발생하는 비정상 소음	- 차량롤러와 레일측면의 접촉 - 차량담면과 레일두부 사이의 스틱슬립	- 급곡선부가 많은 지하철에서 매우 중요



동을 억제하는 연구가 주류를 이루고 있다. 다음 그림 3은 국내 지하철에서의 곡선부소음의 특성을 보여주고 있다.

이상에서 언급한 소음의 발생원인을 요약하여 나타내면 표 1과 같다.

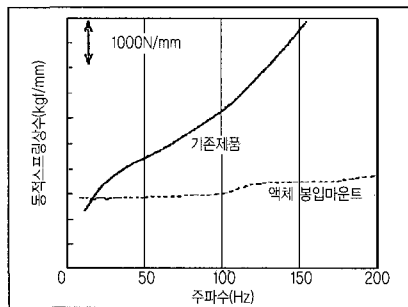
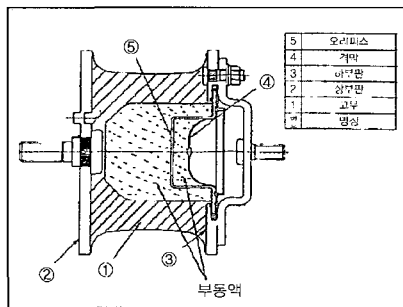
### 궤도소음 저감기술

철도소음의 저감기술은 곡선부소음을 제외하고는 다른 교통수단과 유사하게 적용할 수 있다. 기계류소음에 대한 저감대책이 우선적으로 이루어져야 하며, 차륜/레일 전동음, 공력소음 및 비정상적인 곡선부소음에 대한 저감방안이 필요하다. 소음원에서의 대책이 우선적으로 이루어져야 하며, 그 다음으로 소음이 전달되는 것을 차단하기 위해서 소음전달 손실을 최대화해야 한다. 차량 내부로의 소음전달을 최소화하기 위하여 차체와 창문의 소음전달손실을 증가시켜야 하며, 터널에서는 터널벽에 흡음재를 부착하여 터널벽으로부터의 반사음이 차체나 창문을 통해 차량 내부로 전달되는 것을 차단해야 한다. 또한 차량 외부로는 철도연변에 거주

하는 주민들의 주거환경을 고려하여 방음벽과 같은 철도구조물도 고려해야 한다. 철도소음 저감 기술에는 표 2에서 보는 바와 같이 차량에서의 저감기술과 궤도 및 철도구조물 측면에서의 저감기술이 있다. 이 글에서는 지면 관계로 중요한 사항들만을 일부 선별하여 기계공학적인 측면에서 기술하였다.

### 기계류소음 저감기술

기계류소음을 저감하기 위해서는 기계류 자체의 소음저감대책은 기본적으로 수행되어야 하고, 부수적으로 차량에 장착하는 방법에 대한 것도 고려되어야 한다. 차체에 장착되는 방법에 따라 구조전달소음에 기인하는 소음이 크게 증가할 수도 있다. 디젤엔진으로 추진되는 열차의 경우 엔진 자체에서 방사되는 소음을 줄이기 위한 고성



액체방입 마운트

액체방입마운트의 성능

그림 4 디젤동차의 디젤엔진용 마운트 개발품

표 4 분야별 철도소음 저감방안

분 야	철도소음 저감방안	
궤도 및 철도구조물 분야	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 레일의 주기적인 연마 및 표면조도 관리</li> <li>- 레일의 중량화, 장대화</li> <li>- 방진레일 적용</li> <li>- 궤도의 탄성 유지관리 및 저진동궤도 채택</li> <li>- 궤도진동 저감, 발라스트매트 적용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 터널측벽에 흡음재 부착</li> <li>- 방음벽의 적용</li> <li>- 터널 입·출구에서의 공력설계</li> <li>- 철도구조물에서의 진동차단 및 흡음</li> </ul>
차량분야	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 엔진, 모터, 인버터 등 기계류의 저소음화</li> <li>- 차륜접면의 주기적인 연마, 표면조도 관리</li> <li>- 판토품의 저소음화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 조향대차의 적용</li> <li>- 방음차륜의 적용</li> <li>- 차체 및 창문의 소음투과손실 향상</li> </ul>

능 소음기의 개발과 아울러 구조전달소음에 기인하는 소음을 최소화하기 위한 마운트의 개발이 이루어지고 있다. 그림 4는 일본에서 디젤동차(Diesel Multiple Unit)의 디젤엔진의 소음저감을 위해 개발된 액체붕입마운드를 보여주고 있다. 한편, VVVF(Variable Voltage Variable Frequency) 인버터 및 모터로 추진되는 전동차의 경우 인버터 소음이 가장 큰 문제가 되고 있으며, 이에 대한 대책으로서 인버터에 사용되는 전기소자의 저소음화 개발이 이루어지고 있다.

**전동음 및 곡선부소음 저감기술**

전동음과 곡선부소음은 모두 차륜/레일의 접촉에 의해 발생하는 소음이기 때문에 이 글에서는 함께 다루기로 한다. 전동음은 차륜/레일 접촉에 커니즘, 차륜단면과 레일두부의 형상, 차륜과 레일의 임피던스 및 음향방사효율, 침목의 탄성계수, 궤도 또는 교량의 조건 등에 의해서 많이 달라진다. ERRI(European Rail Research Institute)에서는 전동음 예측프로그램 TWINS(Track-Wheel Interaction Noise Software)를 개발하여 차량과 궤도를 구성하는 요소들이 전동음에 기여하는 기여

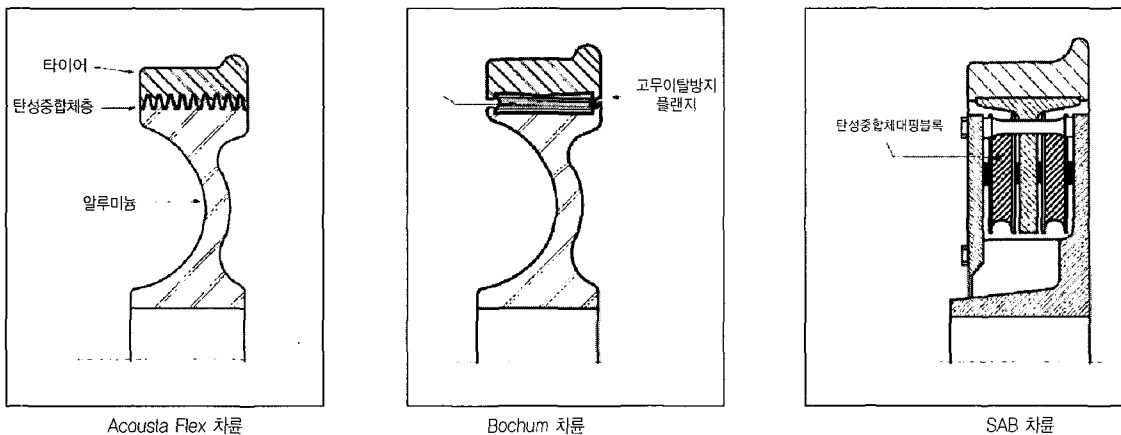
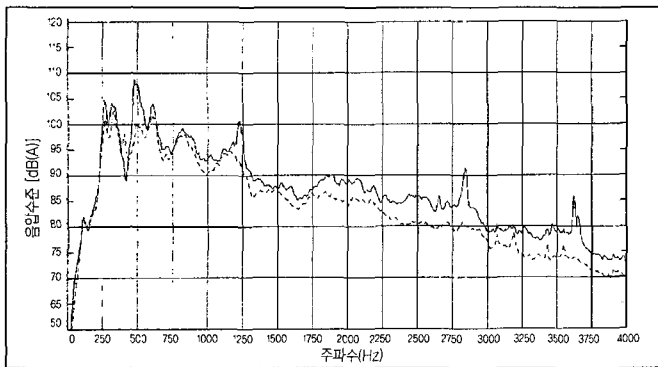
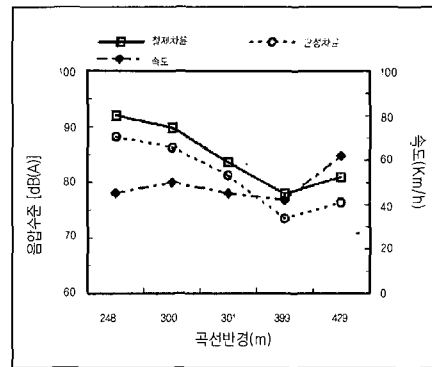


그림 5 탄성차륜



탄성차륜 적용 전후의 곡선부소음



곡선반경별 탄성차륜 소음저감효과

그림 6 서울지하철에서의 탄성차륜의 소음저감효과

도와 저감방안을 도출할 수 있도록 하고 있으나, 우리나라의 철도조건과 많이 상이함으로 인하여 바로 사용하기에는 무리가 있다. 현재 개발되어 사용되고 있는 전동음과 곡선부소음 저감기술은 여러가지가 있지만 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 하나는 차륜 측면에서 접근하는 방법으로서 차륜의 개선에 의해 차륜에서 방사되는 소음을 저감하는 방안이다. 이에 대한 세부기술로서 탄성차륜과 댐핑차륜이 있는데, 탄성차륜은 차륜의 중심과 타이어 사이에 탄성체(주로 고무)가 삽입되어 차륜의 진동을 저감함으로써 차륜의 방사소음을 저감시키며, 댐핑차륜은 차륜 내에 축적되는 굽힘진동에너지를 흡수하여 차륜으로부터 방사되는 소음을 저감시킨다. 그림 5는 여러가지 탄성차륜을 보여주고 있으며 그림 6은 서울지하철에 적용된 탄성차륜의 소음저감효과를 보여주고 있다. 이들 차륜은 여건에 따라 틀리지만 대체로 3~5dB 정도의 전동음저감효과를 보여주며, 곡선부소음의 특성인 피크소음을 상당히 저감시키는 것으로 알려져 있다.

레일의 측면에서는 레일의 진동에 의한 방사소음을 저감하기 위해서 그림 7과 같이 안장레일(saddle profile rail)이 개발되고 있는데 시험결과 450Hz 부근 및 900Hz 부근의 피크소음을 상당히 저감시키는 것으로 보고되고 있다. 한편 그림 8은 두 가지 재료 이루어진 레일(two-material rail)로서 유럽에서 연구가 진행되고 있는 중이다.

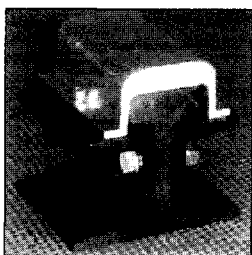


그림 7 안장레일

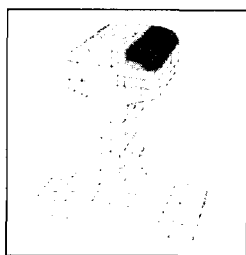
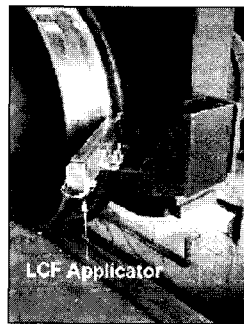
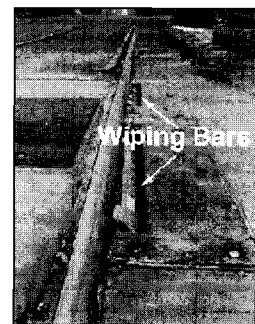


그림 8 이중 재료 레일

전동음과 곡선부소음을 저감하기 위한 두 번째 방법은 차륜과 레일 사이에 윤활을 함으로써 차량이 부드럽게 주행할 수 있도록 하여 곡선부소음을 저감하는 방법이다. 차륜에 대한 윤활은 크게 플랜지 윤활과 답면윤활로 구분되며, 레일에 대한 윤활은 오일스프레이 윤활이 사용된다. 윤활재로는 고체윤활과 그리스, 액체오일 등이 사용되고 있다. 그림 9는 차륜용 윤활과 선로용 오일스프레이 윤활을 보여주고 있다. 서울지하철 당고개-상계 구간 곡선반경 180m인 곡선부에 선로용 오일스프레이 윤활을 적용한 결과 5~10dB의 소음저감효과가 있었으며 곡선부소음의 특성인 피크소음이 상당히 소멸되었음을 확인할 수 있었다. 그러나 이 방법은 환경소음은 저감시키지만, 오일의 환경오염측면에서 보다 세부적으로 검토되어야 한다.



차륜용 윤활



선로용 오일스프레이

그림 9 차륜과 레일의 윤활에 의한 철도소음 저감방법

한편, 이외에도 가장 근본적인 방법으로서 곡선부에서 철도차량이 레일의 궤적에 따라 매끄럽게 주행할 수 있도록 차륜의 주행방향을 적절히 조정해 주는 조향장치기술이 있다. 현재 많은 철도차량에 이 기술을 적용한 대차가 사용되고 있으며, 특히 탈딩차량의 경우에는 곡선부를 고속으로 주행하기 때문에 이 기술의 적용이 필수적이다.

**공력소음 저감기술**

앞에서 언급한 바와 같이 공력소음은 250km/h 이상의 속도에서 가장 주된 철도소음원이 되며 이에 따라 그 저감대책이 철저히 이루어져야 한다. 공력소음은 열차의 전두부, 후미 및 열차 하부에서의 공기역학적 메커니즘에 의해 발생되며, 판토타그래프 및 차량과 차량 사이의 불연속 부위에서도 발생된다. 고속차량에 있어서 공력소음 수준은 상당히 높으므로 공기의 흐름을 매끄럽게 하는 것이 무엇보다도 중요하며, 이에 따라 모든 고속차량은 이러한 관점에서 설계되고 있다. 그림 10은 G7 고속전철기술개발사업에서 개발된 한국형 고속철도차량의 형상을 보여주고 있다. 한편, 차량 측면에서의 공력소음 이외에도 차량이 고속으로 터널을 통과할 때 터널과 차량 사이에 발생하는 미기압파에 의한 차량 내부에서의 이명감 문제와 터널 입·출구에서의 충격성 환경소음 또한 중요한 공력소음의 하나로 볼 수 있다. 이를 해결하기 위해서 차량의 단면적을 축소하거나 터널 입출구의 공력설계를 통한 기술이 연구되어

모든 철도시스템에서 공통적으로 검토되어야 할 전동음 및 곡선부소음에 대한 대책은 일본과 유럽의 철도선진국들이 최근에 이르러서야 본격적인 이론적 연구를 시작하여 그 결과를 발표하고 있다.

적용되고 있다. 그림 11은 터널 미기압파에 대한 현상을 보여주고 있다.

**방음벽**

방음벽은 도시철도는 물론이고, 기존철도나 고속철도 모두에 적용되는 간편한 방법 중의 하나이며 주민 거주지역 가까이 설치되므로 다른 어느 방법보다도 빠르

게 효과를 볼 수 있는 방법이다. 그러나 주위경치에 대한 전망이 가려지는 등 부정적인 측면도 있기 때문에 투명방음벽이 개발되어 적용되고 있다. 형상에 따라 방음벽을 분류하면 직립형, 꺾임형, 혼합형, 터널형, 미관형 등으로 분류할 수 있다. 직립형 방음벽은 지면과 수직으로 설치하여 투과손실에 의한 감음효과는 물론 회절감쇠를 얻기 위한 목적으로 사용되며, 특히 자동차 전용도로, 고가도로 및 철로변 등 차량과 열차의 운행 위치와 방음벽의 설치지점이 근접한 경우에 사용한다.

꺾임형 방음벽은 방음벽의 높이를 낮추기 위해서 방음벽의 상단을 소음발생원 방향으로 30° 또는 45° 각도로 꺾는 방법으로 음의 회절 및 간섭작용으로 방음벽의 높이를 낮추면서 동일한 효과를 얻을 수 있는 방법이다. 혼합형 방음벽은 고층빌딩 또는 도로와 인접한 주택밀집지역의 시야보정 및 채광성을 고려하여 방음벽의 일부를 투명형으로 설치하는 방법이다. 터널형 방음벽은 완전한 소음차

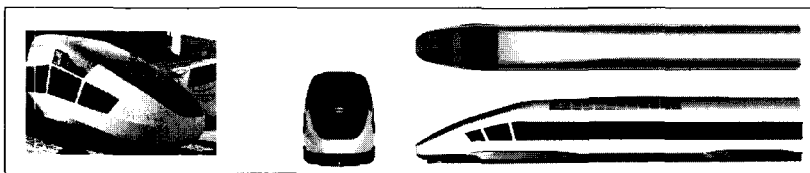


그림 10 한국형 고속철도차량의 형상

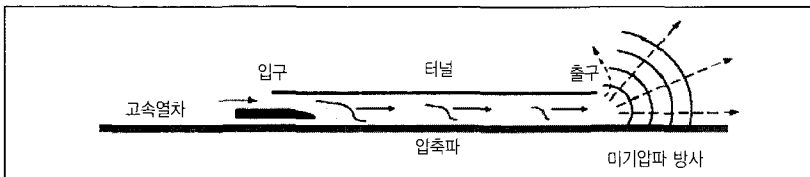
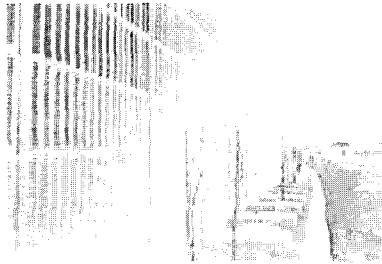
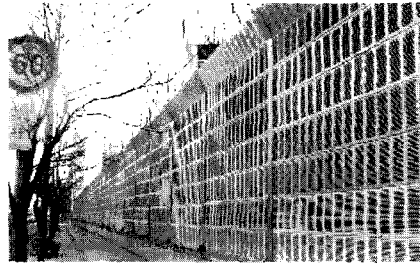


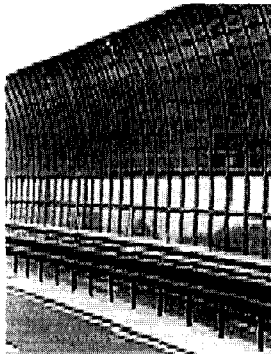
그림 11 터널 미기압파



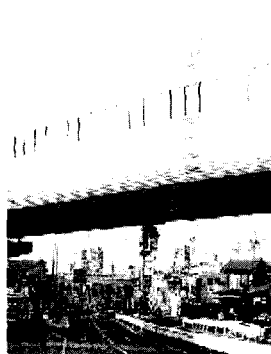
직립형



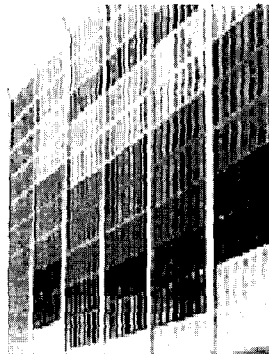
격임형



혼합형



터널형



미관형

단대책으로 양쪽 방음벽과 방음벽의 상부에 방음 천정을 설치 터널형식으로 사용하나 경제적인 측면에서는 비효율적인 방법이다. 미관형 방음벽은 도심지 또는 자연경관 풍치지구에 방음벽을 설치할 경우 지주상단을 라운드형으로 밴딩하여 설치하는 형태로 다양한 모자이크식 컬러와 투명형을 혼합하여 도시미관과 조화를 이루는 방법이다. 그림 12는 방음벽들의 모습을 보여주고 있다.



철도소음의 저감기술은 다양하게 개발되고 다양하게 적용되고 있다. 철도소음 저감기술을 올바르게 적용하기 위해서는 한 가지만의 방법으로 목표를 달성하려고 하면 실패하는 경우가 상당히 있다. 소음원이 많은 만큼 여러가지 방법을 같이 적용해야 한다. 예를 들어 전동음과 곡선부소음

을 효과적으로 해결하기 위해서는 3~5가지의 방법을 동시에 적용해야만 7dBA 이상의 효과를 볼 수 있다. 또한 소음저감을 위한 기술을 적용하는 것만이 전부는 아니다. 저감기술을 적용함으로써 예상되는 부작용을 같이 해결해야 한다. 철도의 환경소음을 저감하기 위해 적용한 기술이 다른 환경문제를 야기한다면 아무런 쓸모가 없는 것이다. 또한 철도의 소음저감을 위해 소요되는 비용이 지나치게 높다면 이것 또한 문제점이 아닐 수 없다. 쉽지 않은 일이지만 저렴하면서도 다른 환경문제를 야기하지 않고 소음저감효과가 큰 방법을 개발해야만 한다.

[참고문헌]

1. 한국철도기술연구원, 2000, 철도 소음·진동의 효율적 저감방안.
2. 한국소음진동공학회, 1995, 소음진동편람.
3. 철도청, 2001, 철도 소음·진동 총람.
4. 한국고속철도건설공단, 1995, 고속철도환경소음기준 및 진동기준에 대한 연구.
5. Federal Railroad Administration, 199, High-Speed Ground Transportation Noise and Vibration Impact Assessment, Final Draft, 8.