

# 철도 환경소음 규명 및 저감기술

조준호\* · 나희승\*\*

(한국철도기술연구원 \*환경재료연구팀 · \*\*시스템개발팀)

을 설명하고자 한다.

## 1. 머리말

철도의 운행 제반 조건들은 타 교통수단에 비하여 큰 장점을 가지고 있지만 소음·진동 부분에 있어서는 아직까지 해결해야 할 많은 문제들이 남아있다<sup>(1)</sup>. 이러한 철도소음을 저감하기 위해서는 먼저 철도 환경소음의 전파특성을 기술하는 방사소음 예측이 선행되어야 하며 이와함께 소음원의 특성에 맞는 방음벽 등이 적절하게 사용되어야 한다.

단순한 차음벽 기능으로 시작한 철도 환경소음 저감 시설은 관련 산업 발달 및 환경에 대한 사회적 요구에 의해 더욱 더 고도화되어 가고 있으며 새로운 기술이 연구소와 업체를 중심으로 개발되고 실제 현장에 설치되고 있다. 철도 환경소음은 예전의 단순한 옹벽의 수준을 넘어 이제는 환경에 무해한 흡음재 사용, 방음 효율을 기존의 방음벽 보다 향상시킨 고효율 방음벽과 철도 이용 승객 및 철도 연변 주민의 조망과 일조권을 보호하기 위한 투명방음벽과 혼합형 방음벽 등으로 다양화 되어 가고 있다.

따라서 본 글에서는 먼저 최근 철도에 의해 발생한 환경소음을 규명하는 기술에 대해 독일의 ICE를 중심으로하여 논하고 이와같이 발생된 환경소음을 저감하는 기술의 동향

## 2. 철도의 방사소음 예측

본 장에서는 독일의 IC, ICE에 대한 방사소음예측을 중심으로 소개한다<sup>(2)</sup>. 소음원(noise source)은 단극음원(monopole), 쌍극음원(dipole), 난류경계층(turbulent boundary layer; TBL)과 같은 표면음원(surface source) 등으로 모델링되며, 일정거리에서의 총음압은 이들 각각의 음원에서 발생하는 음압의 합으로 간단히 계산된다. 소음예측 모델의 정확도는 마이크로폰 어레이(microphone array)에 의한 측정으로 검증되었다. 이러한 연구는 현재 운행하고 있는 열차뿐만 아니라 향후 개발단계에 있는 차세대 고속열차의 소음예측 및 저감대책에 활용되고 있다.

소음원은 냉각팬 소음(cooling fan noise), 전동 소음(rolling noise), 보기(bogies)나 판타그래프(pantographs)에서 발생하는 공기역학적 소음(aerodynamic noise) 등으로 구별할 수 있다.

다음은 속도 300 km/h에서 소음예측 시 물레이션을 수행한 예이다. 예측지점은 레일 중앙에서 거리 25 m, 지면에서 높이 4.1 m이다. 소음예측은 총음압레벨과 각각의 소음원별로 수행되었으며, 결과는 다음과 같다.

표 1 열차속도 300 km/h에서 소음원별 기여율

Part [%]	Cooling fan noise	Rolling noise	Aerodynamic noise				
			Bogies	Flow sep.	Pantogr.	Insulators	TBL
	9.9	37.0	17.3	3.2	27.5	3.0	2.1

Maximum level  $L_{A,MAX} = 93.5$  dB(A)  
 Passby level  $L_{Aeq,P} = 92.6$  dB(A)  
 Exposure level  $L_{Aeq,E} = 91.7$  dB(A)  
 One-hour equivalent level  $L_{Aeq,H} = 59.3$  dB(A)

총음압은 90 dB(A)를 상회하고 있으며, 이는 국내에서 운행예정인 경부고속철도보다 1.6 dB(A)가량 높다. 주소음원은 전동소음과 공기역학적 소음으로 경부고속철도와 비교해서 공기역학적 소음이 다소 높음을 알 수 있다. 차체 표면에서의 공력소음은 저속에서 문제가 되지 않지만 속도가 증가할 수록 소음의 크기가 커져서 열차속도가 300 km/h를 넘게 되면 지배적 소음이 되고 그 크기는 속도의 6~8승에 비례한다.

다음은 열차속도, 방음벽에 따라 차량소음도의 변화를 시뮬레이션한 사례이다. 이러한 예측은 차량설계와 방음시설에 의한 소음저감대책에 중요한 정보를 제공한다. 차량속도가 200 km/h일 경우 위와 동일한 조건에서 시뮬레이션하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

Passby level  $L_{Aeq,P} = 85.8$  dB(A)

전동소음과 냉각팬 소음의 비율이 커졌으며, 공력소음은 상대적으로 미소함을 알 수 있다. 차륜/레일의 소음(전동소음)은 열차의 속도가 증가할 수록 높아져서 대개 80 km/h이상의 속도구간에서 지배적 소음이 된다고 알려져 있다. 그 크기는 속도의 3승에 비례하나 차륜/레일(wheel/rail) 작용면의

상태에 따라 변화할 수 있다.

철도소음을 감소시키기 위해서는 소음원을 없애거나 감소시키는 것이 가장 좋은 방법이나 선로변과 같이 근본적으로 소음원을 차단시키지 못하는 경우 간접적인 방법, 즉 소음전파 경로를 차단하거나 분산시키는 방법을 사용하여야 한다. 경로차단에 의한 대표적인 소음대책수단으로는 방음벽을 들 수 있다. 다음은 선로중앙에서 4.5 m거리, 레일상면에서 높이 2 m의 방음벽을 설치할 경우 위 300 km/h와 동일한 조건에서 시뮬레이션한 것이다.

Passby level  $L_{Aeq,P} = 88.5$  dB(A)

이와같이 직립 방음벽은 음의 회절현상을 이용하는 소음저감방법으로 소음원의 위치가 낮은 전동소음과 냉각팬 소음의 경우 좋은 효과를 보이나, 소음원의 위치가 높은 판타그라프의 경우 소음저감효과가 미소함을 알 수 있다. 따라서 판타그라프에 발생하는 소음저감대책이 요구된다.

### 3. 철도 환경소음 저감 기술 동향

철도 환경소음을 저감하기 위한 기존 방법은 방음벽을 이용한 투과손실 향상과 높이에 따른 회절소음 저감이었다. 이와 더불어 반대편의 소음 저감을 위해 흡음재를 사용하고 있다. 국내에서 사용되는 흡음재는 주로 유리면(glasswool)과 암면(rockwool)이 대부분이었으나 최근에는 폴리에스터를 사용한 방음벽등도 사용되고 있다.

본 장에서는 최근 국내외에서 연구 및 설

표 2 열차 속도 200 km/h에서 소음원별 기여율

Part [%]	Cooling fan noise	Rolling noise	Aerodynamic noise				
			Bogies	Flow sep.	Pantogr.	Insulators	TBL
	30.4	50.5	6.7	0.6	10.8	0.8	0.2

표 3 방음벽 설치후 열차속도 300 km/h에서 소음원별 기여율 (선로중앙에서 거리 4.5 m, 선로위로 높이 2.0 m 방음벽 설치)

Part [%]	Cooling fan noise	Rolling noise	Aerodynamic noise				
			Bogies	Flow sep.	Pantogr.	Insulators	TBL
	4.0	2.7	3.7	8.5	71.2	7.8	2.1

치되는 방음시설에 대해 그 특성별 종류 또는 제품별로 그 특징 및 성능에 대해 서술한다.

### 3.1 소음감소기(Noise Reducer)

철도 연변 소음 저감 장치로서 방음벽의 선단에서 음향에너지가 집중하는 현상에 주목하여 일본 九州藝術大와 日東紡에서 개발한 소음감소기(Noise Reducer)가 있다.

소음의 전파경로상에 방음벽이 설치되어 있어 음이 회절될 때 날카로운 방음벽의 상부가장자리에서 음에너지가 집중되는 현상이 발생하므로 음원의 영향이 커지게 된다<sup>(3)</sup>. 따라서, 상부 방음벽의 형상을 원통과 같은 둥근형이나 버섯모양으로 하고 이에 흡음재를 넣어 2차적인 음원의 영향을 줄이면 방음벽 배후의 음압이 약해지는 결과가 되어 소음저감효과가 증가하게 된다.

또한, 버섯모양의 소음 감속기 내부가 일종의 공기층 역할을 하고있어 저음역의 주파수 대역에 있어서도 소음저감효과가 나타난다. 그림 1에는 소음감소기의 형상을 나타내었고 표 4에는 소음감소기 구조 및 음향학적 특성을 나타내었다.

그림 2에는 이러한 소음감소기의 철도 연변 설치 장면을 나타내었다. 이러한 소음감소기는 고가 구조물위등 방음벽의 높이를 더 이상 추가하기 어려운 장소등에 설치하면 그 효율성이 크다고 할 수 있다. 그림 3에는 방음벽 선단에 소음감소기를 설치한 경우 주파수별 삽입손실을 측정 한 값의 예를 나타내었다<sup>(4)</sup>.

### 3.2 공명형 방음벽

현재까지 사용되어온 수동적 방음벽 즉, 흡음형 및 반사형 방음벽의 경우 방음벽의 경로차법칙에 의해 그 저감효과가 산정되고 있으나 실제로는 음의 회절현상에 의해 소음저



그림 1 소음감소기 형상



그림 2 철도 연변 설치 장면(일본)

표 4 소음감소기의 구조 및 음향 성능

구분		내 용		
재 질 구성	표면판	고충격 플라스틱계(P/C)		
	내면판	G.I 1.2 THK		
	흡음재	G/W(32K 50T, PVF film 포장)		
판넬 규격		660H × 525(600)W		
판넬 중량		20 kg/m		
음향 성능	주파수	흡음률	투과손실	
	250 Hz	1.11	-	
	500 Hz	1.56	-	
	1000 Hz	1.38	-	
	2000 Hz	1.06	-	
	평균	1.28	-	

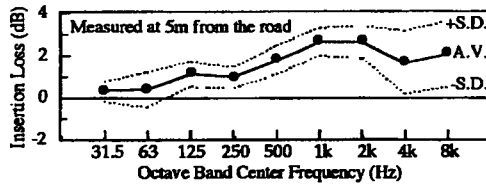


그림 3 소음감소기 설치에 따른 삽입손실 (도로로부터 5m 떨어진 위치)

감효과가 반감되는 양상을 보이고 있다. 공명형 방음벽의 경우 패널내부에 공명통이 내장되어 있어 반능동적 방음벽이라 할수 있으며 기존 방음벽과 달리 전파되는 음파의 위상(phase)에 영향을 미치므로 소음을 효과적으로 저감시킬 수 있다. 또한, 공명통의 크기 및 모양, 유공부의 단면적 및 목부길이 등을 조합, 설계하여 250 Hz~1000 Hz에서 최대의 소음저감효과가 나도록 함으로써 철도 연변소음 및 도로소음의 중심주파수 대역에 대응하도록 설계할 수 있다. 이와같은 공명형 방음벽은 경관, 일조권 문제 등으로 인하여 방음벽 설치높이에 제한이 있는 경우에 사용

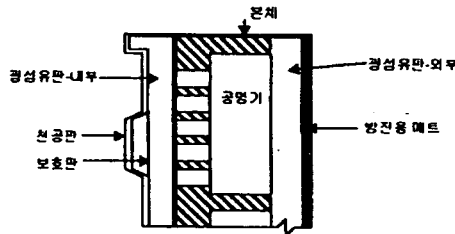


그림 4 공명형 방음벽 내부 구조도

표 5 공명형 방음판의 구조 및 음향성능

구 분		내 용		
재 질 구 성	표면판	알루미늄 또는 아연도강판(G.I)		
	흡음재	유리섬유(80 K, 20 THK) + 공명통(스티로폼90 THK) + 유리섬유(80 K, 10 THK)		
	후면판	아연도강판		
판넬 규격	1960(2960) × 500 × 130 THK			
판넬 중량	15 kg/m <sup>2</sup>			
음향 성능	중심주파수	흡음률	투과손실	
	250 Hz	1.03	18.8	
	500 Hz	0.97	26.7	
	1000 Hz	0.78	37.9	
	2000 Hz	0.91	45.7	
	평균	0.92	32.3	

하면 목적을 달성할 수 있을 것으로 기대된다. 그림 4에는 공명형 방음판의 구조 예로써 독일 Durr사의 방음판 내부구조를 나타내었으며 표 5에는 구조특성 및 음향성능을 나타내었다.

### 3.3 간섭형 방음벽

소음원의 주위에 방음벽을 둘러싸서 차음 및 흡음을 하는 종래의 방법은 음파가 벽을 타고 넘어 전파하는 회절현상이 일어나기 때문에 높이가 높은 방음벽의 설치가 필요하며 벽으로부터 멀리 떨어진 곳에서는 감음효과가 적게되어 충분한 방음효과를 얻을 수 없었다.

간섭형 방음벽은 서로 다른 길이의 중공관(中空管) 형태로 구성된 "음의 지연회로"가 짜여 있어 이것이 소음원으로부터 나오는 여러 가지 파장의 음파와 간섭현상을 일으켜 높은 방음효과를 얻을 수 있는 구조로 되어있다.

일반적으로 음원으로부터 나오는 음의 전파현상은 그림 5와 같은 양상으로 나타나는데 이것을 음파의 굴절, 간섭기능을 갖춘 간섭형 방음벽에 통과시키면 그림 6과 같이 음의 전파현상이 변화하여 감음되는 영역이 크게 나타남을 알 수 있다.

음원으로부터 나온 음파는 방음벽 상단에서 가상 음원이 존재하는 것처럼 퍼지나 간섭형 방음장치를 설치하면 음원으로부터 나온 음파가 간섭장치를 통과한 파(굴절지연파)와 간섭장치를 통과하지 않은 파(직접파)

로 분리되어 그 2개의 파 즉, 굴절지연파와 직접파 사이의 간섭에 의해 감음영역이 발생한다.(참조 그림 7)

이와 같이 간섭형방음벽을 철도에 응용하여 측정된 저감효과 예로 고가로부터 12.5 m 떨어진 위치에서 63~4000 Hz까지의 옥타브밴드에서 약 2~4 dB의 효과가 얻어졌다<sup>(5)</sup>.

간섭형 방음벽의 일종으로 볼수 있는 음향관 배열 방음벽 모델과 분기형 방음벽의 연구개발 예를 최근 일본의 연구를 중심으로 그림 8과 9에 나타내었다<sup>(6,7)</sup>.

### 3.4 능동형 방음벽

다음은 최근 소음 제어 분야에서 그 연구

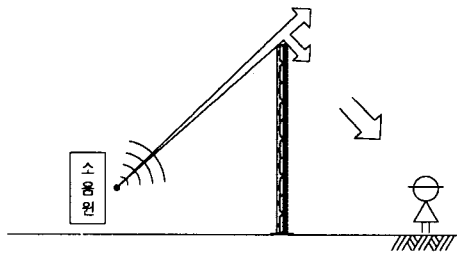


그림 5 기존 방음벽

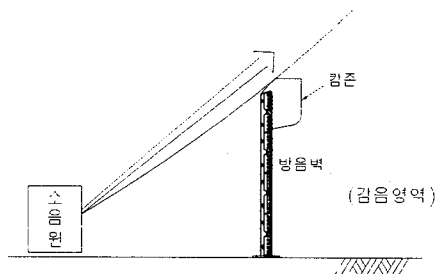


그림 6 간섭형 방음벽

가 활발히 진행되고 있는 능동소음제어(active noise control) 기술을 이용한 능동형 방음벽이다. 이 방음벽은 음원으로부터 발생한 소음을 마이크로폰으로 탐지하여 원하는 지점의 음압을 최소화하도록 2차 음원을 발생시켜 소음을 저감한다.

이러한 능동형 방음벽에 대한 연구는 주로 일본을 중심으로 유럽과 철도유관기관으로는 ERRI의 지원을 받은 SNCF 등에서 수행하고 있다. 아직까지는 시뮬레이션이 대부분이며, 실험은 옥타브밴드별 또는 정상소음원에 대하여 진행되고 있는 정도이다. 그러나 이런

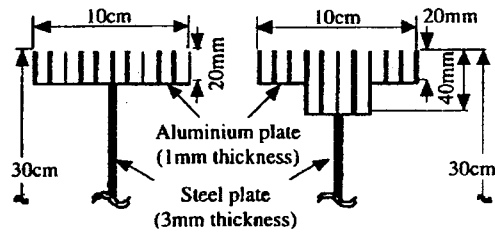
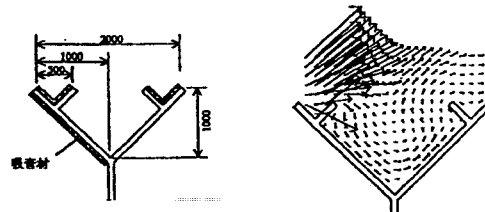
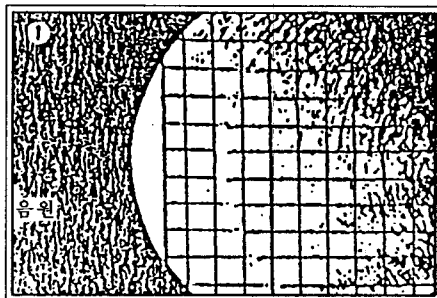


그림 8 대표적 음향관 배열 방음벽 모델

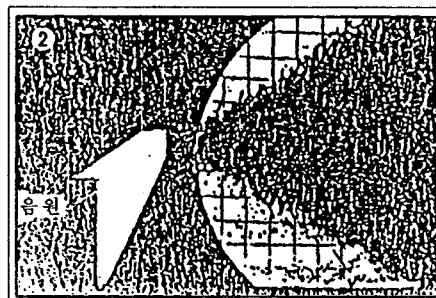


(a) 분기형 방음벽 (b) 분기형 방음벽 상단에서의 음향인텐시티 벡터(1/1옥타브밴드의 250 Hz 대역)

그림 9 분기형 방음벽과 그 상단에서 음향인텐시티 벡터의 측정 예



(a) 캄-존 설치 전 (밝은 부분이 음이 크다)



(b) 캄-존 설치 후 (썩기형의 검은 부분이 음이 작다)

그림 7 브리저스톤에서 개발한 음파 가시화장치에 의해 촬영한 소음 전파 양상

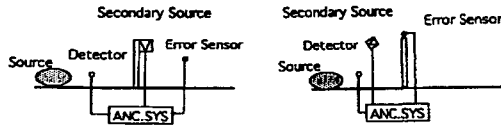


그림 10 능동형 방음벽의 장치 배열 예



그림 11 능동형 방음벽의 실험 장면(일본 구주 예술대학 오모토)

능동형 방음벽에 대한 관심이 높아 머지 않아 철도연변 소음 저감을 위한 기술로 실제 사용될 때가 멀지 않을 것으로 판단된다.

능동소음제어기술은 방음벽에 응용할 경우 2차적인 음을 발생시키는 위치가 중요하다. 그림 10은 이러한 2차 음원 배치의 배열을 나타낸 예이다<sup>(8)</sup>.

능동형 방음벽에서 능동제어 방법 중 하나는 2차음원을 방음벽의 회절 에지(edge)부에 설치하고 음압을 최소화하는 오차 마이크로폰은 방음벽 뒤에 설치한다. 이 방법에서는 저음역의 음에 대하여 10 dB이상의 효과가 얻어진다고 보고되고 있다. 그러나 고음역에서는 효과가 감소되고 장소에 따라서는 음압 레벨이 상승하는 곳도 있기 때문에 능동 제어 배치의 최적화가 필요하다.

일본의 오모토 등은 방음벽의 회절 에지의 음압을 최소화하는 방법으로 제어 배치를 구성하는 것을 제안하였다. 이차음원의 위치를 최적화하는 것에 의해 2차원 음장에서 순음의 경우 30 dB, 광대역에서는 10 dB 가까운 효과가 얻어졌다고 보고되고 있다<sup>(8)</sup>.

#### 4. 결 언

본 글에서는 최근 철도 연변 소음 예측 기

술의 예를 독일 IC, ICE의 연구현황을 중심으로 설명하였으며, 철도 연변소음 저감기술로 제안 및 연구되고 있는 기술을 중심으로 논하였다. 국내에서도 기존에 사용되는 방음벽과 더불어 보다 효율적이고 경제적인 방음 시설에 대한 연구와 제품 개발이 활발하게 이루어져 철도수송에 따른 소음을 줄임으로써 국민에게 보다 쾌적한 생활을 제공해야 할 것이다.

#### 참 고 문 헌

- (1) 나희승, J.P. Clairbois, 1998, "시험선구간(천안-대전)에서 방음시설에 의한 고속철도 소음저감예측", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp. 211~216.
- (2) M. Klemenz, M. Hellmig, 1997, "Application of the AD-PRO Software for the Prediction of Sound Emission of Future High-Speed Trains", 2nd International Workshop on the Aero-Acoustics of High-Speed Trains.
- (3) Areg Gharabegian, 1995, "Improving Soundwall Performance Using Route Silent", Internoise 95, pp 385~388.
- (4) Kohei Yamamoto, Yutaka Shono, Hiroaki Cchiai, Yoshihiro Hirao, 1995, "Measurements of Noise Reduction by Absorptive Devices Mounted at the Top of Highway Noise Barriers", Internoise95, pp. 389~392.
- (5) 村田裕計 外 2人, 1986, "干渉型防音装置の鐵道への應用", 近鐵技報, Vol. 18, pp 76~88.
- (6) 김철환 외 1인, 1998, "상단에 음향관을 배열한 T형 방음벽의 차음성능(I),(II)", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 86~103.
- (7) 渡辺敏幸 外 4人, 平成8年9月, "分岐型遮音壁の騒音低減メカニズム", 日本騒音制御工學會研究發表會講演論文集, pp. 171~174.
- (8) 山本貢平, 1995, "防音壁による騒音制御", 日本騒音制御工學會, 第 2 回技術研究會論文集, pp. 1~12.