

# 고속철도구간 방음벽 제진재 시험제작 및 성능평가에 관한 연구

## A Study on Sample manufacturing and Performance Evaluation for Vibration Insulation Material of Noise Barrier for High-Speed Railway

김순철\*      강정옥\*\*      한광섭\*\*\*      전병찬\*\*\*\*\*      한종문\*\*\*\*\*  
Kim, Soon-Cheol    Kang, Jeong-Ok    Han, Kwang-Seob    Jeon, Byung-Chan    Han, Jong-Moon

---

### ABSTRACT

The commercial service of KTX from April 1st 2004 has realized that whole country has shrunk into half-day life zone and it opened the times of speed. However, some technical problems unexpected before service have been raised and, among them, the noise generation at train passing was claimed by the residents living nearby the track and it is often publicized by the broadcastings and newspapers. In case where the residential area is close to the track, the installation of noise barrier at trackside is the general measures for noise reduction on bridge section and earthwork section. In case of KTX project, such measures were actually taken without any exception; however, the noise level is still high. In this study, analysis for the reason of higher noise level in spite of which the noise barriers are being installed was carried out, the sample of insulation material effective for noise barrier was manufactured and the performance of the insulation material was evaluated to verify its effectiveness

---

### 1. 서 론

일반적으로 고속철도에서의 소음 진동 발생특성은 일반철도와는 다소 다른 양상으로 나타나며 소음 진동 방출량도 일반철도에 비해 월등히 커진다. 이것은 대부분 고속으로 운행되는 열차속도에 기인되는 것으로 굳이 외국의 사례나 보고자료 등을 살펴보지 않더라도 이제는 경부고속철도 선로현장에서 충분히 체험할 수 있게 되었다.

때문에, 환경문제 해소차원에서 고속철도 선로변에 주거지가 인접되어 있는 경우에는 교량은 물론 토공노반 구간에서도 소음 저감대책으로 방음벽을 설치하게 되며 경부고속철도에서도 예외없이 그러한 조치가 이루어진 것이 사실이나 그럼에도 불구하고 불특정한 일부구간에서의 소음도는 여전히 높다.

본 연구는 이와 같이 방음벽을 설치하였음에도 소음 방출량이 기대치 이상인 점에 대해 원인을 분석하고 그에 대한 적절한 방안을 강구하여 소음도 저감에 의한 주민피해를 최소화할 목적으로 효율성과 경제성에 중점을 두어 방음벽 제진재를 시험 제작하였으며, 이를 경부고속철도 노선중 연계교 시점부 상행선측 일부교량구간 방음벽에 시험 설치하여 설치 전·후 소음 진동 방출량을 측정 비교하였다.

또한 이를 교량 시점부 토공노반에 설치된 방음벽구간에서 발생하는 소음도와도 비교하여 교량상에 설치된 방음벽의 효율성을 판단하여 소음 저감성능 저하의 원인을 분석하고 그에 대한 적절한 대책으로서 제진재의 필요성과 현장시험에서 시험제작한 제진재의 방음성능을 확인하였다.

---

- \* (주)석탑엔지니어링 제도부 전무, 정회원
- \*\* (주)석탑엔지니어링 제도부 과장, 정회원
- \*\*\* (주)석탑엔지니어링 제도부 대리, 정회원
- \*\*\*\* (주)석탑엔지니어링 제도부 사원, 정회원
- \*\*\*\*\* (주)석탑엔지니어링 제도부 사원, 정회원

## 2. 고속철도에서의 소음특성

고속철도에서 열차운행에 의해 발생하는 소음의 발생 특성을 기술하면 그림 1과 같으며 이러한 소음은 차량이나 궤도 또는 궤도를 지지하는 노반구조물별로 각각 소음을 발생시키는 영향요소가 있으며 표 1과 같이 그에 대한 적절한 저감 대책이 있는 것도 사실이다.

또한 각각의 소음은 고속철도별로 각기 표2와 같은 주파수 특성을 갖고 있으며, 이 중 본 연구대상은 구조음으로서, 고가교 등에서 발생하는 구조음은 전동음과 마찬가지로 차량/레일 간에 작용하는 가진력이 원인이 되며, 이 진동은 레일로 부터 도상 또는 슬라브를 경유하여 구조물에 전달되며 이렇게 전달된 진동은 방음벽을 포함한 구조물의 외벽면이 음원이 되어 방사하게 되는 것이 일반적이다. 본 연구의 대상으로 하는 이와 같은 구조음은 열차속도의 1~2승에 비례하여 증가하며 주로 저주파 성분이 지배하는 것으로 알려져 있다.

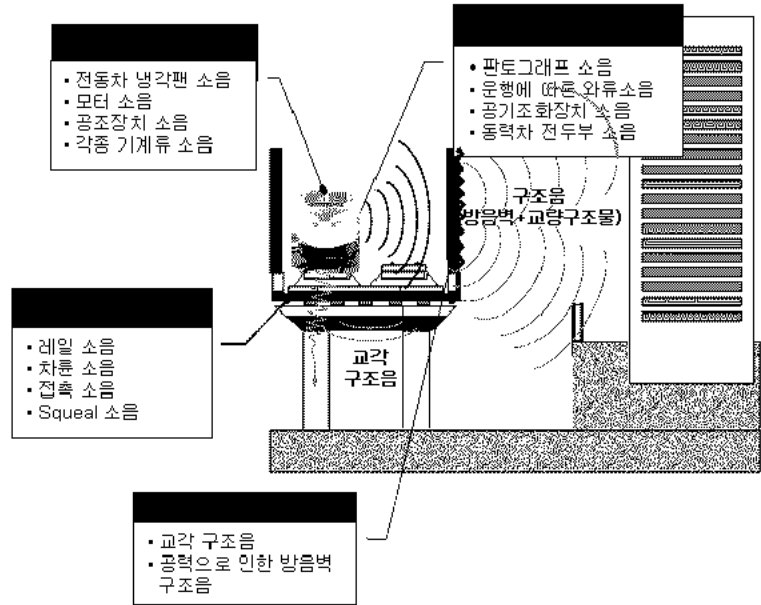


그림 1. 고속철도 소음발생 개념도

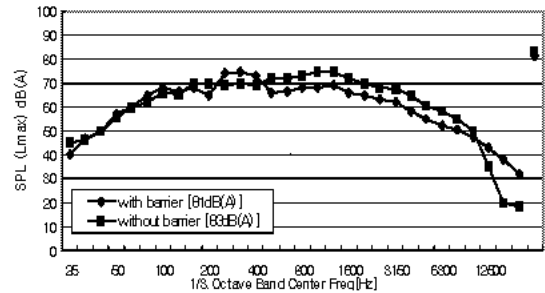
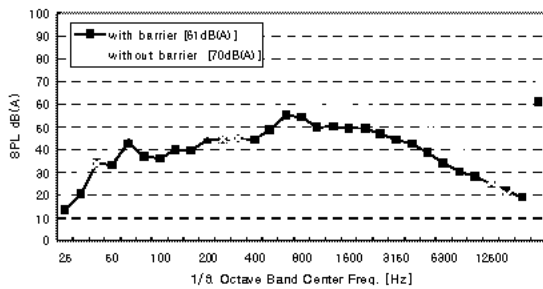
표1. 소음발생 영향요소 및 대책		구분	표2. 소음별 주파수 특성		
영향요소	대책		소음원	주파수 특성	
차체	·바닥, 벽, 천장재의 흡진성 ·프레임 강성도/유연도 ·현가 스프링	TGV	레일소음	0.1~1kHz	
			차량	·대차	·레일, ·체결구, ·침목 ·도상자갈, ·슬라브
				·차축	
				·차륜	
·자체 광학 기계설비	·부싱, 베어링 ·차륜 편마모, 베어링 ·기계설비 균형 배치, 진동격리재	전동소음	지지물	·토공 : 노상, 노반 ·교량 : 상부구조, 교각, 하부구조 ·터널 : 개착식 박스, 굴진터널	
궤도	·레일 평활도 ·장대레일 ·레일패드 ·방진패드 ·방진침목패드 ·방진슬라브궤도	ICE	차륜소음	1.4~1.5 kHz (6/7/8차 고유진동수 = 1.24/1.46/1.64 kHz)	
		신간선	레일소음	0.5~2.0 kHz	
		TGV	TBL 소음	0.7~1.0 kHz	
		ICE	공력소음	1 kHz 이하	
지지물	·다짐도, 흡진재 ·상부구조지반전달 진동역지/차진계 ·인버트/라이닝두께, 라이닝 배면 공동충진/흡진	공력소음	관통소음	0.5~1.0 kHz(Pure Tone 소음)	
			신간선	Louvre	0.5~1.0 kHz(Pure Tone 소음)
			신간선	Electric Insulator	1.5~2.0 kHz(Pure Tone 소음)
			ICE	동력차 전두부	0.7~2.0 kHz
구조음		신간선	창/문/차량간 Gap	고주파수 대역	
			차체표면	275km/h에서 PWL = 76.5 dB(A) 단위면적	
			공력소음		
			Cable Head	0.8~1.6kHz	
신간선	500 Hz에서 지배적 (3~50kHz 및 500kHz 부근에서 피크값)	전동소음보다 저주파수 대역 소음			

### 3. 경부고속철도 방음벽 설치구간에서의 소음 실태

일반적으로 방음벽은 토공노반구간이나 고가교 구간 중 주벽이 인접해 있을 경우에 설치하게 되며 방음벽 설치로 인한 소음저감 기대치는 수음측과 음원의 높이, 방음벽의 높이, 음원의 특성 등에 따라 다소 다르기는 하나 흡음형 방음벽일 경우 수음측에서 8~13dB(A) 정도 저감효과가 있는 것으로 알려져 있다.

여기서, 고속철도건설공단 보고서 “시운전시 궤도 노반시설물의 성능검증(2000.12)”에 수록된 내용중 연제교에서 소음 측정된 결과를 요약하면 방음벽 설치구간에서 소음경향은 소음측정위치(교량 중심에서 25m, 50m이격)와는 관계없이 속도에 비례하여 증가하는 경향을 보여 이격거리에 따른 거리감쇠효과가 없는 반면 회절에 의한 소음 증가가 상당한것으로 추정되었다.

또한, 그림2에서 보는 바와 같이 방음벽이 설치되지 않은 구간에서도 방음벽을 설치한 구간과 소음 경향은 유사하나 전반적으로 소음도가 높으며, 방음벽 설치 유무에 따른 소음도 상대비교에서 저속운행시에는 약 9dB(A) 정도의 방음효과를 보이고 있으나 고속일 경우에는 고작 약 2dB(A) 정도의 방음효과를 보이고 있는 것으로 나타나 고속운행시 공력음이나 구조물 진동으로 인해 방음벽 후면에서 2차 구조음이 발생되고 있는 것으로 추정되었다.



(a) 저속운행시

(b) 고속운행시

구간	운행속도	(a) 저속운행시 (120km/h)	(b) 고속운행시 (300km/h)	비고
방음벽 설치 유		61dB(A)	81dB(A)	저속은 Leq 기준
방음벽 설치 무		70dB(A)	83dB(A)	고속은 Lmax 기준
소음 저감 효과		약 9dB(A)	약 2dB(A)	

그림2. 고속철도 교량구간에서 방음벽 설치 유무에 따른 소음특성

이와 같은 추정을 가능하게 하는 것은 일반적으로 토공노반구간에 방음벽을 설치할 경우 저속운행시 약 8dB(A), 고속운행시에는 약 16dB(A) 정도의 소음저감효과가 있다는 점과 비교가 될 뿐만 아니라 본 연구를 위해 새로이 측정한 데이터에서도 고가교량부의 소음도가 상대적으로 높게 나타나 이와 같은 사실을 뒷받침해주고 있다.

그림3과 4는 본 연구를 위해 연제교 시점부에서 방음벽이 설치된 토공노반 구간과 고가교량 구간에서 측정한 소음 측정 결과이다. 단, 이 측정은 제진재 설치 유무에 따른 성능평가를 위해 방음벽에 근접하여 측정하였다. 측정결과 토공노반구간과 교량구간의 소음도가 약 10.9dB(A) 차이가 나타남을 알 수 있다.

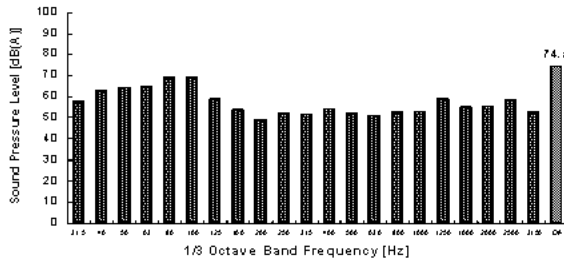


그림3. 토공노반 구간 소음도 (방음벽 설치)

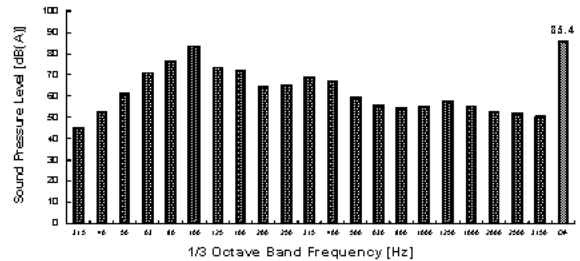


그림4. 고가교 구간 소음도 (방음벽 설치)

#### 4. CLD(Constrained Layer Damping) System 개요

이상과 같이 고가교에 방음벽을 설치했을 경우에 대한 소음도 저감 성능이 토공노반구간에 방음벽을 설치했을 경우에 비해 현저히 낮게 나타나는 주된 원인이 구조물 진동이라는 것으로 판단 되었으며, 이에 따라 본 연구에서는 교량구간의 소음수준을 최소한 토공노반구간 정도의 소음수준으로 낮추는 것을 연구 목표치로 하였으며 이를 위해 방음벽을 교량구조물과 절연시키는 방안과 교량 구조물에 제진재를 설치하여 구조물 진동을 원천적으로 억제하는 방안 등 여러 가지 방안 중 저비용 고효율성을 고려하여 가장 적절한 대책으로 **CLD(Constrained Layer Damping) System** 방음벽을 채택하여 연구를 수행하였다.

**CLD System** 방음벽이란 방음벽 후면에 특별히 제작한 제진재를 부착하여 방음판의 떨림을 억제하는 System 으로 기본적인 방진개념은 다음과 같다.

본 **System** 은 이미 기계, 항공 분야에서 널리 사용되는 있는 에너지를 제어하는 방식의 진동저감 시스템이다. 즉, 그림5에서와 같이 sandwich 형태로 기본 판넬(base Layer)과 구속 판넬(Constraining Layer) 사이에 제진재(Damping Layer)를 삽입하는 방식으로, 판에 외력이 가하여 진동이 발생되면 CLD 제진재에 힘이 발생하여 인장과 압축 변형이 반복적으로 발생하며 이러한 반복운동으로 인해 진동에너지가 소산시키는 원리이다.

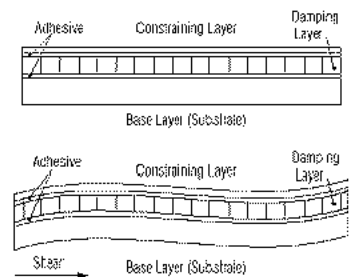


그림5. CLD system 개념도

따라서, 여기에 사용하는 제진재에 요구되는 물성은, 첫째 각 판넬과 제진재가 일체로 거동해야 하므로 최상의 성능을 발휘하기 위해서는 제진재의 점착성이 높을 것이 요구되며, 둘째 같은 이유에서 제진재의 두께가 가능한 얇아야 (약 2mm 정도) 유리하며, 셋째 제진재의 표면상태가 거칠수록 표면적이 증가하므로 방음효과가 우수해진다.

이와 같이 기존 방음벽에 CLD system을 적용시 효과에 대해 한국소음진동공학회지에 발표된 연구자료에 의하면 제진재 미설치시에 비해 7배 이상 진동이 감소되고 공진주파수의 진폭은 약 40% 이상 감소되는 효과가 있으며, 손실계수의 증가로 진동이 감소되어 구조물 방사음을 저감시키고 특히, 100~400Hz의 주요 주파수 대역에서 약 5dB 정도의 소음저감 효과가 기대되는 것으로 기술하고 있다. 그림 6과 7은 한국소음진동공학회지에 발표된 연구자료와 관련 자료 성능표로서 기존 방음벽에 CLD system 적용시 진동량과 주파수별 Power Spectral Density에서 제진재 설치시 진동저감효과가 개선됨을 보여주고 있다.

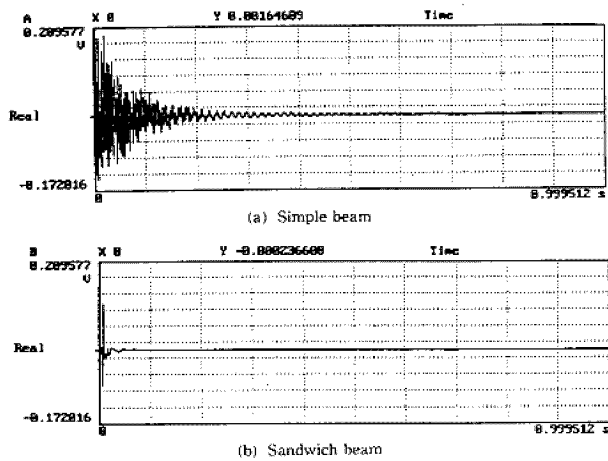


그림6. 제진재 설치전후 진동량 비교

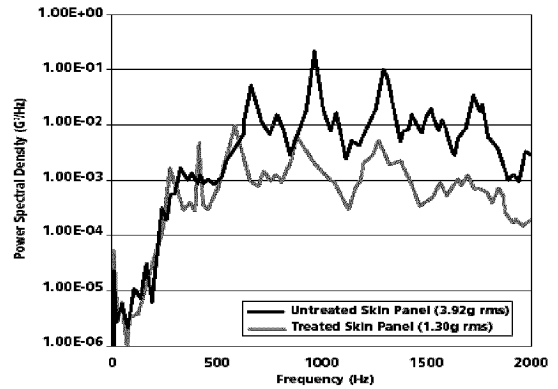


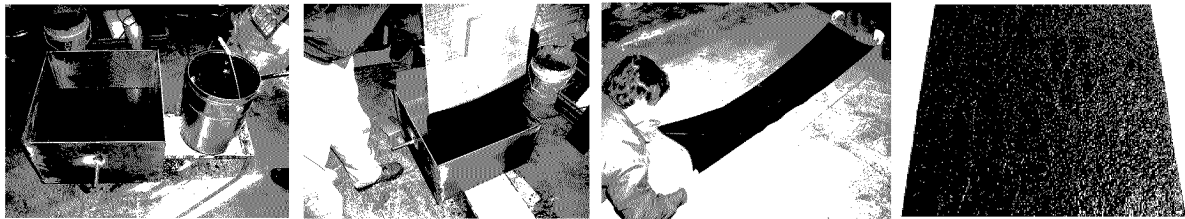
그림7. 제진재 설치전후 주파수분석

## 5. 방음벽 제진재 시험제작 및 시험설치 계획

### 5.1 제진재 시험제작

본 연구의 핵심이라고 할 수 있는 제진재 시험제작에 대해 성공적인 연구성과를 얻기 위해서는 전항에서 기술한 제진재 요구물성을 만족시키는 것이 무엇보다 중요하므로 여러번의 시행착오를 거쳐 우선 시험에 사용할 수 있을 정도의 품질을 만족하는 재료를 제작하였다.

제진재는 제진기능을 발휘할 점착성의 유액과 이 유액을 판지형태로 고형화할 sheet로 구성되며, 시험에 사용한 점착성 유액은 아스팔트계열의 유액으로서 점착성능을 향상시키는 첨가제를 배합하였으며, sheet는 얇은 알루미늄 망을 사용하였다. 이에 따라 제진재는 얇으면서도 매우 거친 표면을 갖도록 제작할 수 있었으며, 따라서 제진재로서의 기본적인 요구물성을 만족할 수 있었다.



(a) 점착제(유액) 배합 (b) sheet에 점착제 도포 (c) 판넬에 sheet 부착 (d) 완성된 제진재 표면  
그림8. 제진재 제작과정

### 5.2 제진재 시험설치(연제교) 및 소음측정개요

- 설치일자 : 2005. 4. 6 (수) 오후 (단, 제진재 설치후 소음 측정은 2005. 4. 7 오전)
- 설치위치 및 연장 : 경부고속철도 연제교 시점부 P1 상선측 방음벽면(외벽), L=10m
- 설치방법 : 1800 × 460 × 0.5mm 아연도금판에 제진재를 부착하고 이를 방음벽 외벽면 부착
- 측정장비 : 다음 장비외에 차음 box를 사용하여 회절음 등 불필요한 소음을 차단하여 측정하였음

No.	측정 장비명	모델명	용도	비고
1	주파수분석기	sDAQ	진동측정분석용	Simulation Techniques Inc.
2	주파수분석 프로그램	sVIEW	진동분석	Simulation Techniques Inc.
3	Accelerometer	333B52	진동신호검출	PCB
4	마이크로폰	377A02 / 426D01	소음신호검출	PCB

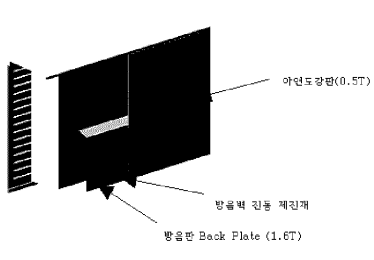


그림9. 제진재 부착 개요도

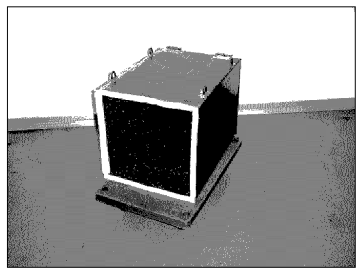


그림10. 차음 box(회절음 차단)

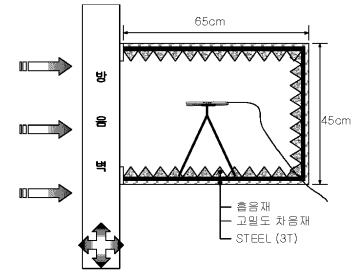


그림11. 차음 box 설치개요

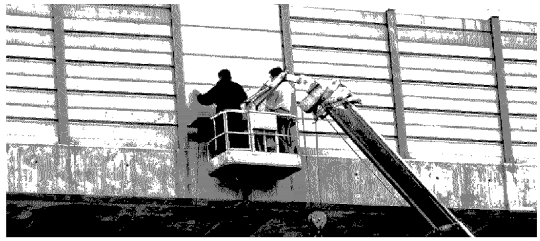


그림12. 방음벽에 제진재 부착



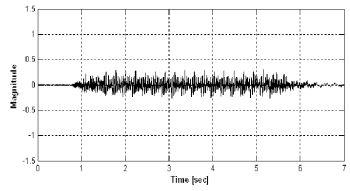
그림13. 제진재 부착후 소음·진동 측정

### 6. 방음벽 제진재 성능평가

방음벽 제진재의 성능을 평가하기 위해 고가교 구간 및 토공노반구간에서 측정한 제진재 설치 전 후의 소음·진동 결과를 비교 분석하였다.

우선 고가교에서 열차주행으로 인한 진동 전달경향을 살펴보기 위해 그림14 및 그림15의 시간이력 진동가속도 그래프에서 고가교 슬라브 상단부의 진동가속도와 방음벽 지주부의 진동가속도를 비교한 바 제진재 설치 유무에 관계없이 거의 동일한 크기의 진동가속도가 나타나는 반면, 토공노반의 방음벽 지주에서는 이 값이 상대적으로 현저하게 낮게 나타나므로 고가구조물의 진동이 방음벽지주에 직접적으로 전달됨을 알 수 있었으며, 그림15에서 방음벽 판넬에 대한 시간이력 진동가속도 비교에서는 고가교에 제진재 설치후에는 제진재를 설치하지 않은 토공노반구간 정도의 값을 보이고 있을 뿐만아니라 그림16의 주파수 대역별 진동가속도 그래프에서도 청각에 민감한 100Hz ~ 2000Hz대역에서 토공노반구간과 유사한 정도를 보이고 있어 제진재 성능이 소정의 목표를 달성하는 것으로 평가되었다. 단, 제진재 설치후 60Hz대역에서 진동가속도가 상대적으로 높게 나타나나 이는 청각에 둔감한 대역이므로 문제될 것은 없는 것으로 판단되었다.

시간이력 진동가속도



주파수대역별 진동가속도

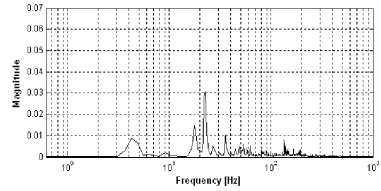


그림14. 고가교 슬라브 상단부 진동가속도

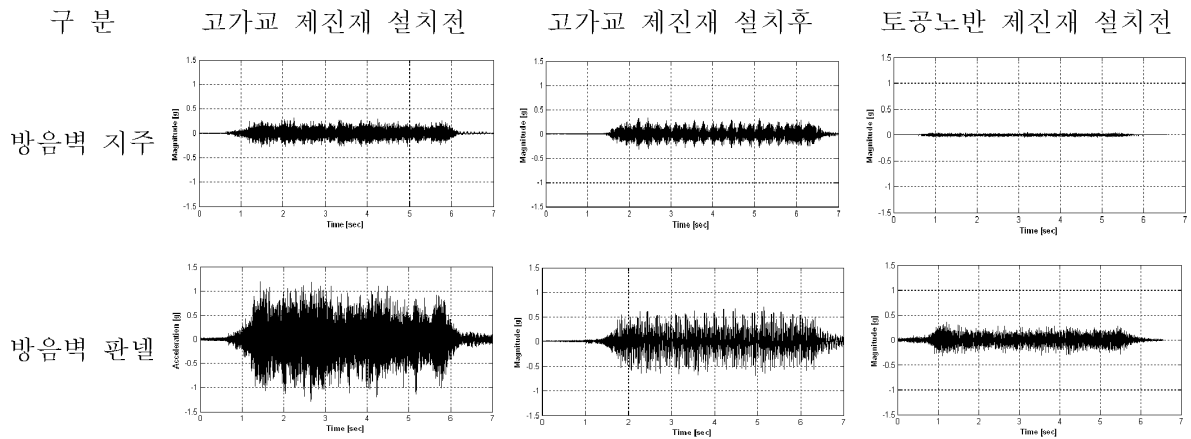


그림15. 시간이력 진동가속도 비교

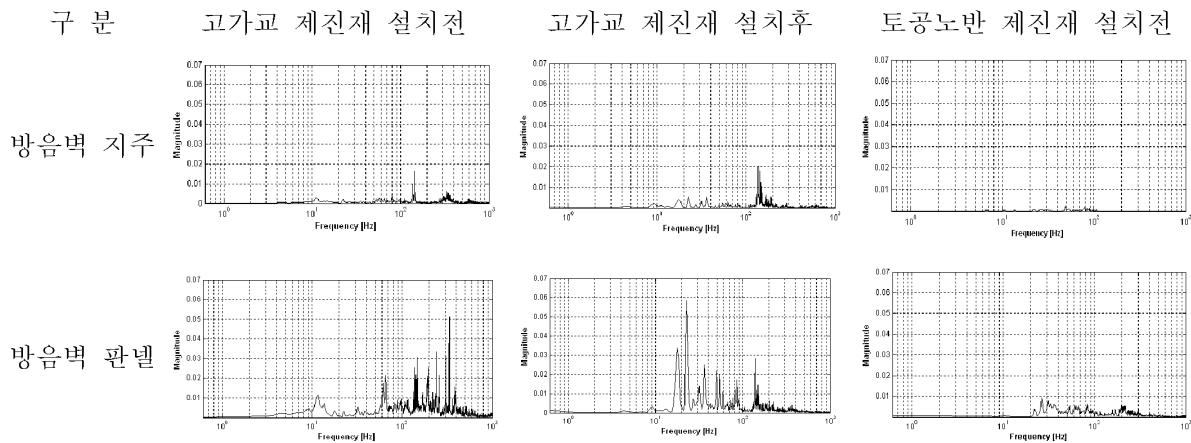


그림16. 주파수 대역별 진동가속도 비교

또한, 그림17의 주파수대역별 진동속도에서도 청각에 민감한 100Hz ~ 2000Hz 대역에서 고가교에 제진재 설치후가 토공노반구간과 유사한 경향을 보이므로서 제진재의 진동저감 성능을 예측할 수 있었으며, 이로써 구조음 방사음이 감소될 것이라는 예측은 충분히 가능하였다.

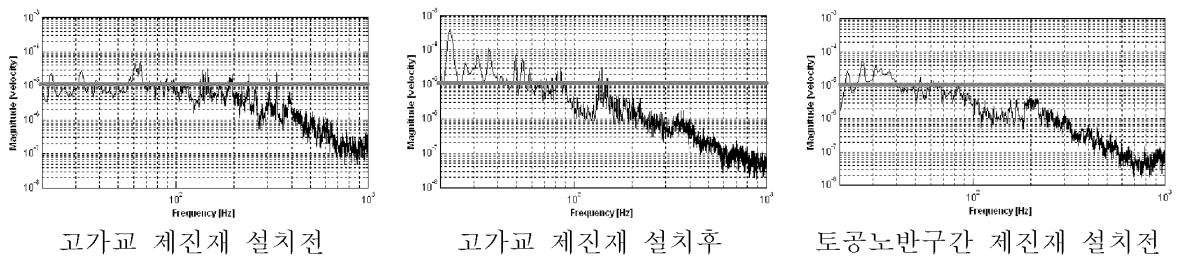


그림17. 주파수 대역별 진동속도 비교

상기 예측에 대해 소음도를 측정 비교한 바 그림18과 같이 제진재 설치 후 약 11.5dB(A)의 소음저감효과가 나타났으며 이것은 결국 그림19와 같이 토공노반구간의 소음도와 유사한 정도의 소음도로써 매우 만족스러운 성과이며 연구목표치를 달성하게 되었다.

## 7. 결 론

본 연구는 고속철도노선에서 고가교 방음벽에 대한 구조음을 저감시킬 목적으로 CLD System에 착안하여 이에 적합한 제진재를 시험 제작하였으며 이를 연체교에 시험부설하여 그 성능을 평가하였다.

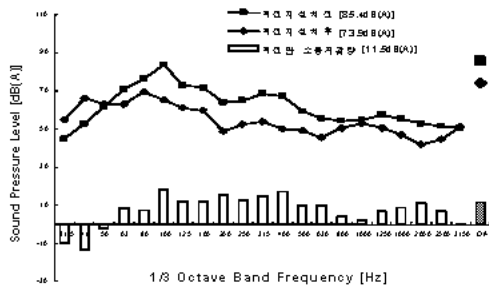


그림 18. 고가교에서 제진재 설치 전후 소음 비교

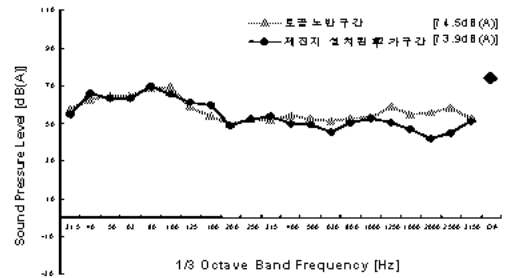


그림 19. 고가교(제진재 유)와 토공노반(제진재 무) 소음비교

시험결과 비록 제작상태가 매우 정교하지 않은 시제품임에도 소음 저감효과가 기대치를 충분히 만족하는 것으로 나타나 매우 성과가 높은 것으로 평가되었으며, 만일 제진재가 양산체제에서 정교하게 제작되고 더욱이 이를 방음벽 내벽면에 설치할 수 있다면 보다 더 효과적인 것으로 판단되었다.

다만, 본 연구에서 시험부설연장이 고작 10m 이었기 때문에 회절음 등 외부 소음을 차단한 채 방음벽면 가까이에서 측정한 결과이므로 고가교에서 상당거리 이격된 위치에서 사람이 느끼는 정도와는 차이가 있을 수 있으나, 측정결과를 토대로 볼 때 교량 전구간을 대상으로 제진재를 설치한다면 회절음이나 반사음 등을 감안하더라도 적어도 약 3~5dB(A)의 소음저감효과를 기대할 수 있을 것으로 추정되어 충분히 그 실효성이 있다고 판단된다.

#### 참고문헌

1. 한국철도기술연구원 (2000년), “시운전시 레도 노반시설물의 성능검증”, 한국고속철도건설공단
2. 박용순, 박세만, 박명균, 박성규 (1997년), “점탄성층을 삽입한 3층 적층보의 진동감쇠특성에 관한 연구”, 한국소음진동공학회지 제 7호 3호, pp.511~519
3. 강대준, 이재원, 박준철 (2004년), “고속철도소음 현황과 특성”, 한국소음진동공학회논문집, 제 14권 11호, pp1161~1165.
4. 김재철, 구동희, 문경호 (2002년), “한국형 고속철도에서 방사되는 소음분석”, 한국소음진동공학회 논문집, 제 12권 9호, pp668~673
5. V.V. Krylov (2001년), “Noise and Vibration from High-speed Trains”
6. 양윤석, 김관주 (2000년), “유한요소법과 경계요소법을 이용한 한국형 고속전철의 전동소음예측”, 한국소음진동공학회지 제 10권 3호, pp.444~450