

# 고속전철 진동소음해석 및 저감기술개발: G-7과제개요 및 연구방향

## Development of the Vibration & Noise Analysis and Reduction Technology for High Speed Train: G-7 Project Outline and Research Direction

이 우 식\*                      박 철 희\*  
Lee, Usik                      Pak, Chul-Hui

---

### ABSTRACT

This paper introduces the outline of the ongoing G-7 project for the development of vibration and noise analysis and reduction technology for the Korea High Speed Train which will run at 350km/h. Extensively collected materials and data on the vibration and noise characteristics of high speed trains are summarized herein to reduce the research direction.

---

#### 1. 서론

생활수준의 향상과 경제규모의 급속한 확대에 따라 급증하는 교통수요를 해결하기 위해 기존의 고속도로, 철도 및 항공 등의 교통수단에 추가하여 새로운 대량 고속 운송수단이 요구되고 있다. 고속전철은 이러한 요건을 충족시킬 수 있는 대안으로서, 프랑스, 독일, 일본 등을 선두로 철도의 고속화가 60년대부터 꾸준히 추진되어오고 있다. 선진국의 고속전철기술은 현재 500km/h이상의 시험속도를 달성할 정도로 눈부시게 발전하고 있으나, 우리의 경우 아직도 재래식 철도기술 수준에 머물러 있는 실정이며, 고속전철사업의 하나로써 프랑스 고속전철 TGV시스템을 적용한 300km/h급의 경부고속전철(TGV-K)이 최근 많은 논란 속에서 건설중에 있다. 경부고속전철사업을 통해 국내에 전수키로 된 차량 및 전차선 분야의 모든 고속전철기술이 단기간에 전수되기 어렵기 때문에 전수되는 기술을 바탕으로 지속적인 연구와 개발환경이 이루어져야 기술자립화가 가능할 것이다. 이러한 관점에서 350km/h급 한국형 고속전철을 자체개발하기 위한 사업으로서 "고속전철 기술개발 사업"이 선도기술개발사업(G-7사업)의 하나로써 1996년 말부터 착수되었다[1].

프랑스 TGV의 발전과정(도표 1)을 통해서도 알 수 있듯이, 고속전철의 초고속화는 견인력의 향상, 차량의 안정성 향상, 경량화 기술 및 설계기법 등의 발전에 힘입어 현실화 되고 있음을 알 수 있으나, 상용화 과정에서 아직도 장애문제로 남아 있는 문제가 바로 진동소음 문제이다. 이제는 고속전철이 350km/h의 속도로 주행할 수 있느냐가 문제가 아니라 이로인해 발생하는 진동소음을 어떻게 저감할 수 있느냐가 중요한 문제로 대두되고 있다. 프랑스 TGV시험차량의 경우[43] 개활지에서 객차의 실내소음도가 주행속도 300km/h에서 66dB(A), 360km/h에서 71dB(A), 480km/h에서 80dB(A)인 것으로 보고되고 있다(그림 3 참조). 도표 2는 진동소음관련 TGV-K의 계약조건과 한국형 고속전철의 시스템요구사항을 보여주고 있다. 350km/h급 한국형 고속전철의 실내소음도의 목표치를 초기 2세대 TGV에 해당하는 300km/h급 TGV-K의 실내소음도에 맞추어 설정하고 있음을 알

---

\* 인하대학교 기계공학과 교수, 정회원

알 수 있다. 외부소음의 경우도 360km/h에서 측정된 95.5dB(A) 보다 훨씬 낮은 91dB(A)를 목표로 하고 있다(그림 3 참조). 결국 350km/h급 한국형 고속전철 개발의 성공여부는 300km/h급 TGV-K의 진동소음기술을 기준으로하여 실내·외소음 모두 최소 5dB(A)이상 추가로 저감하기 위한 노력이 요구된다. 따라서, TGV-K의 진동소음기술과 선진국의 고속전철 기술을 바탕으로 TGV-K와 동등한 진동소음수준의 한국형 고속전철을 개발하기 위한 연구가 “고속전철 기술개발 사업” 핵심기반기술과제의 하나인 “고속전철 진동소음해석 및 저감기술 개발” 과제로서 인하대학교를 연구주관기관으로하여 국내 대학교수와 연구소의 연구인력이 참여한 가운데 진행중에 있다. “고속전철 진동소음해석 및 저감기술 개발” 과제의 개요는 도표 3과 같다.

고속전철은 차량시스템의 특성과 주행환경에 따라 진동소음원의 종류와 특성 및 전파경로가 다양하게 변하기 때문에 이들에 대한 면밀한 경향분석이 사전에 요구된다. 따라서, 본 원고에서는 고속전철 진동소음해석 및 저감기술개발의 과정에서 요구되는 참고자료로 활용하기 위하여 수집한 고속전철의 진동소음에 관련한 자료를 요약하여 소개하고자 한다.

도표 1. 프랑스 고속전철 TGV의 발전과정 [2, 33]

구 분	1 세 대		2 세 대			3 세 대	4 세 대	
	TGV-SouthEast	TGV-Atlantic	TGV-Reseau	Eurostar	Thalys	TGV-Duplex	TGV-NG	
운 행 구 간	남동 노선 파리-리옹	대서양 노선 파리-보르도	북부-파리- 남서/남동부	런던-파리/ 런던-브르셀	국제노선	남동노선 (2중열차)	차세대 TGV	
생 산 기 간	1978-85	1989-92	1992-96	1993-95	1997-98	1995-97	1997	
속 도	상업	270km/h	300km/h	300km/h	300km/h	300km/h	360km/h	
	시험	408km/h	515km/h	350km/h				
열차구 성	편성	1PC-8C-1PC	1PC-10C-1PC	1PC-8C-1PC	1PC-18C-1PC	1PC-8C-1PC	1PC-8C-1PC	
	대차	6 MT + 7 T	4 MT + 11T	4 MT + 9T	6 MT + 18T	4 MT + 9T	4 MT + 9T	
무 게	열차	385 ton	484 ton	383 ton	752 ton	383 ton	380 ton	
	축중	17 ton						
차 체 재 질	좌석당	1.05 ton	1.00 ton	1.02 ton	0.95 ton	1.02 ton	0.70 ton	
		Steel				Steel	AL Alloy Extr.	N/A
주 요 기 술	▶ Articulated Trainset							
	▶ Wheel Skid Prevent.(Adhesion항상)/Braking System/Pantograph							
	▶ Air-Pressure-Tight							
	▶ New Materials & Design							

PC = Powered Car, C = Coach, MT = Motored Truck, T = Truck

도표 2. TGV-K와 한국형 고속전철의 소음진동 관련사항 [1, 2, 3, 11, 12]

고속전철		TGV-K (계약조건)				한국형 고속전철 (시스템 요구사항)			
차체 고유진동수		동력차/동력객차/객차 = 8/10/13 Hz 이상				구체적 언급없음			
소 음	실내소음 dB(A)	운행조건	위 치	개활지	터널내	운행조건	위 치	개활지	터널내
		동력객차객실	70	운 전 실	78	80			
		운 전 실	78	객 실	60	-			
		정 차 중	객 실	60	-	정 차 중	운 전 실	-	-
	운 전 실		-	-					
실외소음 dB(A)	300km/h	91dB(A)(Leq), Max. 93dB(A)이하			350km/h	91dB(A)(Leq, tp)			
선로중심에서 25m 거리, 레일상면에서 1.2m 높이에서 측정									

도표 3. G-7 고속전철 진동소음해석 및 저감기술개발 과제의 개요

최종 개발목표		고속전철 차량시스템의 설계지원을 위한 차량소음, 진동 해석/저감기술 및 평가기술 개발	
단계별 개발 개 목 표	1 단계 ( '96-'98)	1. 동력차, 동력객차, 객차의 진동해석을 위한 동적모델링 및 해석기법 개발 2. 차량 실내소음해석, 진동해석 및 특성 규명 4. 소음·진동해석 알고리즘 개발	3. 차체 진동해석 5. 소음·진동 평가기법 정립
	2 단계 ( '99-'01)	1. 차량 소음·진동 저감기술 개발 및 응용 2. 차량 진동·소음 저감 대책수립 및 시험	3. 시제차 진동·소음평가 및 해석

도표 4. 고속전철 소음분류 및 소음원 [4, 5, 8, 10, 13, 17-19, 24, 25, 27, 40]

소음 대분류	Noise Mechanisms	세부 소음분류
Machinery Noise (기계소음)	각종 기계장치	- 전동차 냉각팬 소음 - 모터 소음 - 공조장치 소음 (팬, 콤프레서) - 전기장치 소음 - 객차내 장치소음
Rolling Noise (구름소음)	- 바퀴/레일 Roughness - 바퀴 공진 - 바퀴/레일 Interactions	- 레일소음 - 바퀴소음 - 접촉소음 - Squeal소음
Aerodynamic Noise (공력소음)	와 류	돌출부, 보기, 판toedge, 불연속 표면
	유동 박리	동력차 전두부
	난류경계층	차체표면
	공 굴	판toledge, 차량간 간극, 보기 Cavity
Bridge Noise (구조소음)	바퀴/레일/교각 Interactions	- 교각소음

## 2. 고속전철소음의 분류 및 특성

고속전철 소음은 크게 차량 외부소음과 실내소음의 두가지로 나누어 생각할 수 있다. 외부소음은 철도주변에 대한 환경소음 차원에서 다루어지며 실내소음은 승객에게 쾌적한 승차환경을 제공하기 위한 차원에서 다루어지고 있다. 외부소음과 실내소음이 대부분 동일한 소음원에 의해 지배되기 때문에 두 소음문제는 결코 별개의 문제가 아니다. 그럼에도 불구하고 철도 및 고속전철의 진동소음에 관해 국내외 학술지에 발표되고 있는 문헌들을 헤아려볼때 외부소음에 관한 내용이 거의 대부분이며 실내소음에 관한 내용은 극히 적은 편이다. 이는 외부소음 문제의 경우 대부분 방음벽을 설치하는 방법등으로 해결하고 있는 반면에 실내소음 문제는 보다 복잡한 소음저감기술을 요구하기 때문에 선진국에서 이에 대한 노하우를 쉽게 공개하지 않고 있는 이유로도 판단된다. 최근 300km/h급 이상의 고속전철이 등장하면서 실내소음 문제가 심각히 대두되고 있으며 이에 관한 문헌이 조금씩 나타나고 있는 추세이다.

### 2.1 고속전철 소음원의 분류 및 소음지수

고속전철소음은 다양한 소음원을 갖는다. 도표 4에 종합하여 나타낸 바와같이 각종 기계장치로부터 발생하는 기계소음, 바퀴와 레일에서 발생하는 구름소음, 공기역학적으로 발생하는 공력소음, 그리고 교량 등의 구조물진동을 통해 발생하는 구조소음 등으로 구분할 수 있다. 고속전철소음과 주행속도와의 관계는 일반적으로 다음과 같이 소음지수  $\alpha$ 를 사용하여 나타내고 있다.

$$\text{주행속도 } v \text{ 에서의 SPL(dB)} = \text{기준주행속도 } v_0 \text{ 에서의 SPL(dB)} + 10\text{Log}(v/v_0)^\alpha \quad (1)$$

그림 1에 나타난 바와같이 기계소음의 크기는 주행속도에 비례하고 구름소음과 공력소음은 주행

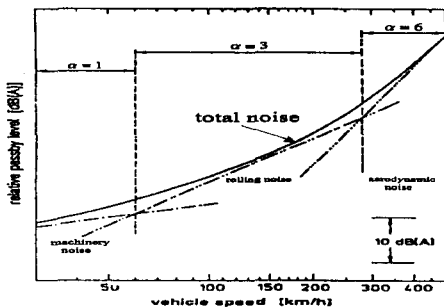


그림 1. 고속전철 주행속도에 따른 외부 소음도(25m거리위치)의 경향[24]

속도의 3승과 6승에 각각 비례하는 것으로 일반적으로 알려져 있다. 그러나, 도표 5로부터 알 수 있듯이 각 소음도와 주행속도와의 관계는 고속전철 종류에 따라 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 신칸센의 경우 구조소음은 70~75dB(A) 정도이고 270km/h이상에서 기어소음(Gear Noise)이 구름소음보다 커지는 것으로 보고되고 있다. 프랑스 TGV의 공력소음중 특별히 차량상부에서 발생하는 공력소음의 지수는 동력차의 경우  $\alpha=8\sim 8.7$ 이고 객차의 경우에는  $\alpha=7$ 인 것으로 측정되었다 [43]. 프랑스 TGV-A의 각 소음부위별 소음지수는 도표 6과 같다[15]. 도표 6에서 기준주행속도는 200km/h이며 5m거리에서 측정된 A-보정된 음압레벨을 기준으로 하고

도표 5. 고속전철에 따른 주요소음원별 소음지수 [4, 5, 17, 18, 22, 24, 25, 27]

고속전철	독 일		일본신칸센	프랑스 TGV	
	ICE	TR-07		동력차	객차
기계소음	1	2.7~3	4~5(Gear소음)	N/A	N/A
구름소음	3(저속): 3.8(350km/h)	없음	2	3 (바퀴소음 지배적)	
공력소음	6(dipole소음)~ 8(quadrupole)	8(유동박리) 8~9(난류경계층)	8	3 (<300km/h) 7~7.5(>350km/h)	3 (<300km/h) 8 (>350km/h)

도표 6. 측정 및 예측한 프랑스 TGV-A (동력차2 + 객차8)의 소음원별 음압레벨 [dB(A); 5m거리]

소 음 원		참고문헌 [15]			실측값을 사용한 예측값	
		200KPH(실측)	200KPH(예측)	$\alpha$	300KPH	350KPH
차 른	중간 객차	90.6	89.7	2.9	95.7	97.6
	앞 동력차	91.5	89.4	3.2	97.1	99.3
	뒤 동력차	90.3	89.6	3.0	95.6	97.6
판토타그래프 (뒤 동력차)		91.8	91.3	5.7	101.8	105.6
냉각팬	앞 동력차	91.6	87.9	4.7	99.9	103.0
	뒤 동력차	88.8	79.6	4.6	96.9	100.0
앞창문 부위 (앞 동력차)		91.9	88.5	5.1	100.9	104.3
객 차 간 사 이		86.6	87.1	4.2	94.0	96.8
대차(보기) 부위		78.7	78.6	6.1	89.4	93.5
난류경계층(평방미터당)		70.4	70.5	4.3	78.0	80.8

도표 7. 바퀴와 레일의 상태에 따른 소음도 차이 [13]

소음상태/조용한상태(기준)	소음차이 dB(A)	소음상태/조용한상태(기준)	소음차이 dB(A)
Joint 레일/용접 레일	7(4-10)	거친 용접레일/잘 용접된 용접레일	4 (3-6)
굴곡된 레일면/잘 연마된 레일면	10(5-15)	편마모 바퀴면/잘 연마된 바퀴면	12(7-15)
거친 바퀴/잘 연마된 바퀴	5 (3-6)	보통 바퀴/유연 마운팅 장치 바퀴	2 (0-3)
보통 바퀴/점탄성 댐핑장치 바퀴	1 (0-2)	보통 바퀴/snap-ring 댐핑장치 바퀴	1 (0-1)

있다.

구름소음은 유럽철도의 경우 바퀴소음이 지배적인 반면 일본신칸센의 경우 레일소음이 지배적인 것으로 알려져 있다. 바퀴와 레일의 상태에 따라 구름소음의 크기가 12dB(A) 이상까지 차이가 나는 것으로 알려져 있다. 도표 6은 직선궤도 구간에서의 바퀴와 레일 상태에 따른 소음변화를 보이고 있다.

바퀴와 레일이 없어 공력소음이 지배적인 독일 MAGLEV(TR-07)의 전체적인 외부소음지수는  $\alpha=6$  정도로써 공력소음 특성이 지배적임을 반영하고 있으며, ICE의 경우 160km/h이하에서는  $\alpha=3$ 으로 기계소음 특성이 그리고 288km/h 이상에서는  $\alpha=6$ 으로 공력소음이 지배적임을 보인다. 또한 일본 신칸센의 경우 200km/h 이하에서  $\alpha=2\sim3$ 인 것으로 조사되었다[13].

## 2.2 측정위치에 따른 외부소음도의 변화

고속전철의 외부소음은 일반적으로 선로중심으로부터 25m거리, 레일상면으로부터 1.2m의 높이에서 측정한다. 그러나 측정위치가 달라지면 외부소음의 측정치도 고속전철에 따라 변하게 된다. 독일 MAGLEV의 경우 100~400km/h구간 주행시험에서 외부소음 측정거리를 2배로 증가하면 4.5dB(A) 감소하는 것으로 나타났다[27]. 이는 고속전철 MAGLEV를 점음원(6dB감소)과 선음원(3dB감소)의 중간음원으로 모델링할 수 있음을 암시한다. 그러나, 다른 독일철도의 경우 15~100m 거리범위에서 측정위치를 2배 증가시키면 5dB(A) 감소하고, 25m거리에서 측정높이를 3.5m에서 1.3m로 낮추면 외부소음 측정치가 2 dB(A)정도 감소하는 것으로 알려져 있다[40].

도표 8. 프랑스 TGV 차량의 방음벽 유무에 따른 주행속도 구간별 외부소음 측정치[43]

차량구분 및 방음벽 유무		주행속도(km/h) 구간 [음압레벨 dB(A)]			
		100 ~ 270	270 ~ 300	300 ~ 325	325 ~ 480
객 차	방음벽 무	71.5 + 32LogV/100		58 + 61LogV/100	
	방음벽 유	56 + 38LogV/100		44.5 + 71LogV/100	
앞 동력차	방음벽 무	78 + 28LogV/100		57 + 75LogV/100	
	방음벽 유	66 + 29LogV/100		41 + 87.5LogV/100	
뒤 동력차	방음벽 무	78 + 28LogV/100		55 + 73LogV/100	
	방음벽 유	66 + 29LogV/100		45.5 + 80LogV/100	

### 2.3 소음원별 기여도

고속전철소음은 그림 1에 나타난 바와같이 저속에서는 구름소음이 지배적이거나 속도의 증가에 따라 공력소음이 전차 커져 일반적으로 280km/h 이상에서는 전체소음중 공력소음이 지배적이다. 프랑스 TGV의 경우 250km/h에서 소음도(dBA)의 크기 순위는 구름소음(85)-차체공력소음(84)-판토공력소음(77)이나 300km/h 이상에서는 차체공력소음-구름소음-판토공력소음 순으로 공력소음의 비중이 커진다[13]. 일본신칸센의 경우 방음벽이 설치된 8~10m높이 고가도의 스테브궤도를 주행할 때 25m거리에서 측정된 각소음원별 기여도는 300km/h이상에서 차량상부의 공력소음과 판토그래프의 공력소음이 바퀴/레일/기어소음 보다 커지는 것으로 알려졌다[14].

### 2.4 방음벽에 의한 외부소음 저감효과

프랑스 TGV의 경우 2m높이의 방음벽에 의해 저감되는 소음도(25m거리에서 측정)는 300km/h에서 8~10dB(A)이고 350km/h에서는 6~9dB(A) 정도이다(도표 8 참조).

### 2.5 고속전철 소음원의 주파수 특성

고속전철에 따른 소음원별 주파수특성을 도표 9에 정리하였다. TGV의 경우 구름소음은 주로 1 kHz이상의 고주파 소음이 지배적임을 짐작할 수 있다. 그림 2는 주행속도에 따라 25m거리에서 측정된 독일철도 외부소음의 주파수특성을 나타낸다. 그림 2로부터 주행속도의 증가에 의해 주로 500Hz이상의 주파수성분이 증가하고 있음을 알 수 있다.

도표 9. 고속전철 소음원의 주파수 특성

소음구분	고속전철	소 음 원	주파수 특성	참고문헌
구름소음	TGV	레일소음	0.1~1 kHz	6
		바퀴소음	1 kHz이상 (표준TGV바퀴 방사진동모드 1.5 kHz)	6, 16
		접촉소음	1 kHz 이상	6
	ICE	바퀴소음	1.4~1.5 kHz (6/7/8차 고유진동수=1.24/1.46/1.64 kHz)	17
		신간선	레일소음	0.5~2.0 kHz
공력소음	TGV	TBL소음	0.7~1.0 kHz	4
		공력소음	광대역	37
	ICE	공력소음	1 kHz 이하	22
		판토그래프	광대역	25
		Louvre	0.5~1.0 kHz (Pure Tone 소음)	25
		Electric Insulator	1.5~2.0 kHz (Pure Tone 소음)	25
		동력차 전두부	0.7~2.0 kHz	25
		창/문/차량간Gap	고주파수 대역	25
		차체표면공력소음	275km/h에서 PWL = 76.5 dB(A)/단위면적	25
Cable Head	0.8~1.6 kHz	27		
구조소음	독일전철	500 Hz에서 지배적 (30~50 Hz 및 500 Hz 부근에서 피크값)	40	
	신 간 선	구름소음보다 저주파수대역 소음 (100 Hz부근에서 피크값)	4, 25	

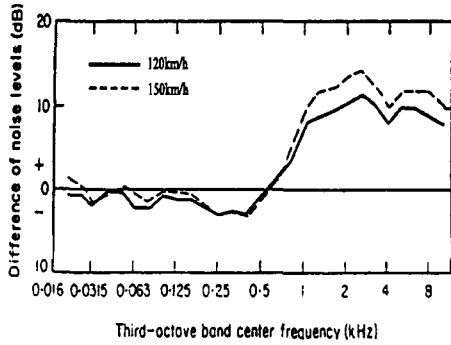


그림 2. 주행속도에 따른 독일철도의 외부소음 음압레벨(25m) 스펙트럼

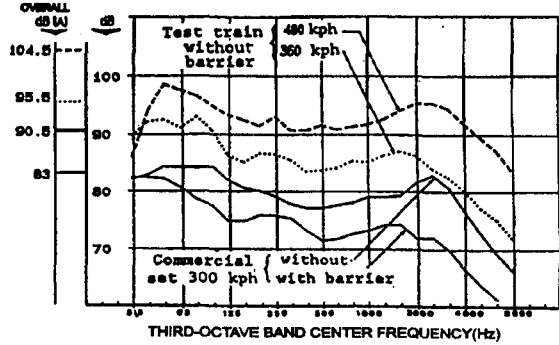


그림 3. 프랑스TGV의 주행속도/방음벽 유무에 따른 외부소음 음압레벨(25m) 스펙트럼

### 3. 고속전철 실내소음 특성

고속전철 실내소음은 크게 네가지 소음원으로 분류할 수 있다. 첫째는 에어컨시설 등 차량내부의 시설이나 장치에서 발생하는 자체소음이다 (equipments noise). 둘째는 외부소음이 공기를 통해 차체벽을 투과하여 차실내로 들어오는 공기전달소음이다 (airborne noise). 셋째는 난류경계층, 유동박리 등에 의해 유체압력 변동이 차체벽에 작용하여 발생하는 공력소음이다(aerodynamic noise). 마지막으로 차륜동을 통해 전달되는 구조진동에 의해 방사되는 구조전달소음이다(structure-borne noise)[36, 38, 39]. 고속전철에 따라 각 소음원의 특성이 다르다. 구조진동소음은 일반적으로 저주파수대역 소음으로 알려지고 있으며[36], 40~200Hz 구간에서 주요소음이 되고 있다[39]. 공기전달소음은 앞에서 다룬 외부소음원의 특성에 의해 거의 지배되며, 이태리 FS ETRY500의 경우 250km/h로 주행시 500Hz 부근에서 구름소음 성분이 크게 나타나고 160Hz 부근에서는 의자간격에 의한 음향공진소음이 나타난 것으로 보고하고 있다[36].

#### 3-1. 대차 및 동력방식에 따른 소음추이

비관절대차의 경우 구조적으로 대차와 바퀴를 감쌀 수 있으므로 외부소음의 저감에는 유리하나 차실내소음에는 불리하다. 그러나 프랑스 TGV와 같은 관절대차의 경우에는 대차수가 감소하므로 객실내 소음감소에 유리하다[2, 4]. 동력방식이 하나로서 프랑스 TGV와 같은 동력집중식은 운전실 소음에 불리하나 객차 실내소음에는 유리하다. 동력분산식의 경우에는 객차하부의 각종 추진장치에 의해 객차 실내소음에 불리하다[2].

#### 3-2. 고속전철 실내소음 기준

철도 및 고속철도의 실내소음에 대한 통일된 규정은 대부분의 국가에서 아직 정착되어 있지 않다. 도표 10은 미국 APTA(American Public Transit Association)의 철도 실내소음 설계기준이다. 여기에서는 실내소음을 평지에서 75dB(A)이하, 터널에서 80dB(A)로 기준하고 있다. 미국철도의 경우 실내소음은 일반적으로 65~105dB(A) 사이이고 주행속도의 1.5~4.0승에 비례하는 경향을 보이며 바퀴/레일상태에 따라 10~15dB(A)정도 소음이 증가한다[48]. 350km/h급 한국형 고속전철의 실내소음 설계기준은 도표 2에 보인 바와같이 300km/h급 프랑스 TGV의 실내소음에 준하고 있어 상당한 소음저감 노력이 요구된다. 프랑스 TGV의 실내소음 측정치[43]를 살펴보면 300km/h로 주행하는 상업차량(동력차 2량 및 객차 10량 편성)의 경우 66dB(A), 4량이 객차로 편성된 시험차량의 경우 360km/h에서 71dB(A), 480km/h에서 80dB(A)로 보고되고 있다. 따라서 프랑스 TGV의 실내소음은 300km/h이상에서 주행속도의 7승에 비례하는 특성을 나타내어 도표 5에서 살핀 바와 같

도표 10. 미국 APTA 철도차량의 실내소음(음압레벨 dB(A)) 설계기준[8]

운전조건			설계기준	운전조건		설계기준	비고 (소음계 빠른반응)
주행시 (최대속도)	평지 자갈도상	용접레일	70 dB(A)	정지상태	모든 보기류 작동	68 dB(A)	
		비용접레일	75 dB(A)		보기류 1 개 작동	65 dB(A)	
	터널 통과시		80 dB(A)		문개폐시		72 dB(A)

도표 11. 공력(A)/구름(R)소음의 TGV 실내 및 대차하부소음에의 주파수대역별 기여 분포도

주파수 대역(Hz)	63-100	125	160	200-500	630-1K	1.25K~
실내소음	A	R	A	A + R	A + R	R
대차하부소음	A		A+R	A		A + R

도표 12. TGV 실내소음에 대한 주파수대역별 주요소음원 추정

주파수 대역(Hz)	63-100	125	160	200-1K	1.25K~
구조전달소음		✓		✓	
공력소음	✓		✓	✓	
공기전달소음					✓

이 공력소음 특성이 실내소음에도 강하게 반영되고 있음을 추정할 수 있다. 참고로, 독일 고속전철의 경우[40] 60~200km/h 속도구간에서 주행속도가 2배 증가할 때 실내소음이 약 9 dB(A) 증가하고, 터널 통과시에는 5dB(A)정도 증가한다. 일본 STAR21[35]의 경우 터널에서의 외부소음투과로 인해 315km/h에서 목표치 65dB의 달성에 실패한 바 있음도 실내소음저감 연구에 참고가 될만한 사항이다.

### 3-3. 고속전철 실내소음의 주파수 특성

고속전철 실내소음의 주파수 특성은 다양한 소음원의 주파수 특성에 기인한다. 도표 11은 프랑스 TGV가 300km/h로 주행시의 실내소음과 대차하부소음에 관한 것이다[49]. Roller바퀴의 경우 200Hz~1kHz사이에서는 공력소음 이외에 레일/바퀴로부터의 가진력이 차체구조진동을 유발하여 발생시키는 구조전달소음이 실내소음을 구성하고, 1.25kHz이상에서는 바퀴의 진동모드방사(도표 9 참조)에 의한 구름소음이 공기전달소음 형태로 직접 차실내로 투과되는 것으로 이해된다. 160Hz 주파수대역에서는 구조진동유발소음과 구름소음의 차실내 투과량 보다는 공력소음의 비중이 지배적이며, 125Hz 주파수대역에서는 오히려 구조전달소음이 지배적임을 알수 있다. 100Hz 이하에서 공력소음이 실내소음을 지배하는 것으로 보아, 300km/h의 고속주행시 저주파수에서는 구조전달소음 등은 전체소음도에 중요하지 않음을 추정할 수 있다 (도표 12).

그러나, 300km/h급 프랑스 TGV의 경우와는 달리, 200km/h 이하의 일반철도 실내소음(그림 4)은 일반적으로 200Hz이하에서는 구조전달소음, 200Hz이상에서는 공기전달소음이 지배적이다[4]. 이는 일반철도의 경우 공력소음의 실내소음에 대한 기여도가 저주파수대역에서 다른 소음원에 비해 상대적으로 작기 때문인 것으로 판단된다.

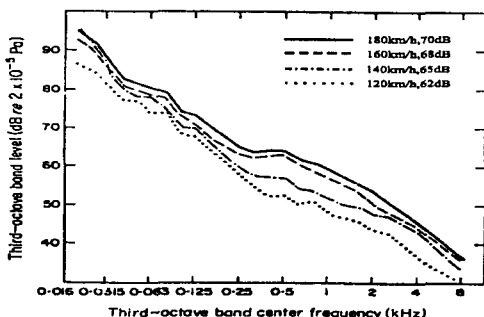


그림 4. 독일철도의 주행속도증가에 따른 실내소음(음압) 주파수특성 변화[40]

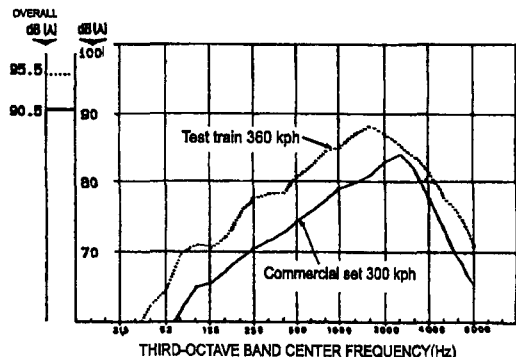


그림 5. A-보정된 TGV 외부소음(음압)스펙트럼

### 3-4. 프랑스 TGV형 고속전철의 실내소음 예측기법

개활지 25m거리에서 측정된 프랑스 TGV의 A-보정된 외부소음을 살펴보면(그림 5), 주행속도가 300km/h에서 360km/h로 증가할때 전 주파수대역에서 소음도가 고르게 증가한다. 그러나 A-보상된 전체외부소음의 크기에 기여하는 주요소음 스펙트럼대역은 300km/h에서 500Hz~5kHz사이이고, 360km/h에서 250Hz~5kHz이다. 도표 12로부터 실내소음에 영향을 주는 구조전달소음의 주요주파수대역이 200Hz이상이라는 사실과 주행속도에 따른 TGV차량의 외부소음도는 도표 8과 같이 주어지고 TGV 차량 6면의 투과손실계수(TL)가 200Hz이상에서는 200Hz에서의 TL값보다 큰 값을 갖는 사실에 근거하여 다음과 같은 실내소음예측식을 제안한다.

$$\begin{aligned} \text{실내소음}[dB(A)] &= \text{실외소음측정치}[dB(A);25m] - \text{Min}[TL(dB) \text{ at } 200\text{Hz}] - 3 \\ &\cong 54 + 70\text{Log}(V/100) - \text{Min}[TL(dB) \text{ at } 200\text{Hz}] \end{aligned} \quad (2)$$

도표 13은 프랑스 TGV 차량의 6면 부위의 TL값중 200Hz에서 최소값인 21.5dB를 사용하여 예측한 실내소음과 실측[43]된 실내소음을 비교한 것이다. 성공적으로 잘 일치함을 알 수 있다. 제안된 예측식에 의하면 350km/h에서의 실내소음은 70.6 dB(A) 정도로 예상된다.

도표13. TGV 실내소음 예측식의 정확성

주행속도(km/h)	300	360	400
예측값[식(2)] dB(A)	66	71.5	80.2
실 측 값 [43] dB(A)	65.9	71	80

### 3-5. 터널통과시의 고속전철 실내소음 특성

터널통과시 실내소음의 특성변화에 대한 자료는 비교적 적은 편이다. 일본 신간선의 경우 [45], 터널의 직경은 9m이고 터널내에 형성되는 압력파장은 17m로서 압력파는 거의 1차원적으로 전파되며 압력파의 에너지는 주로 20Hz이하의 저주파수대역에서 분포되어 있는 것으로 보고하고 있다. 독일철도의 경우[40], 200km/h로 발라스트궤도 터널을 주행할 때 실내소음이 약 10dB(A) 증가한다. 이 경우, 소음증가는 저주파수대역에서의 구조전달소음 보다는 중·고주파수대역의 공기전달소음에 의한 것으로 설명하고 있다(그림 6). 도표 2의 TGV-K에 대한 내용을 살펴보면 300km/h로 터널통과시 7dB(A)까지의 실내소음증가를 명시하고 있다.

## 4. 고속전철 차체 구조진동원

고속전철 차체구조진동은 40Hz이하에서는 승차감(ride quality)에 영향을 줄 수 있으나 대부분의 승차감은 레일-바퀴-대차(현가장치)-차체에 이르는 전체 차량시스템의 동력학특성에 의해 좌우되므로, 차체구조진동은 구조전달소음에 미치는 영향에 그 중요성을 두어야 한다. 차체구조진동은 레일/바퀴로부터 전달되는 다양한 진동원에 의해 발생하므로 구조전달소음의 특성도 이들에 의해 좌우된다.

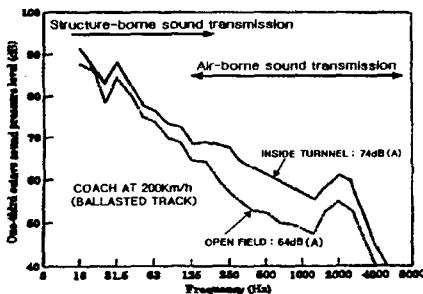


그림 6. 터널통과시의 실내소음 변화 (독일철도: [39])

첫째로, 침묵과 침묵, 대차축과 대차축, 대차와 대차 사이의 간격[d(m)]등과 같은 기하학적 파라미터에 의해 결정되는 가진주파수로 가진되는 주기성 가진이 있다. 이때 가진주파수는  $f(\text{Hz}) = \text{주행속도}(\text{km/h}) / (3.6d)$ 로 주어진다[46, 47]. 침묵간 간격(0.6m [39])에 의한 가진주파수는 300~350km/h구간에서 대략 135~165Hz이다. 두 번째로, 바퀴와 레일면의 비균일성(Irregularity)에 의한 가진으로서 이는 가장 보편적인 가진원의 하나이다[39]. 이경우의 가진주파수는 비균일부위의 거칠기(roughness) 파장( $\lambda(\text{m})$ )에 의해  $f(\text{Hz}) = \text{주행속도}(\text{km/h}) / (3.6\lambda)$ 로 주어진다. 가진주파수 200Hz~5kHz에 해당하는 거칠기파장



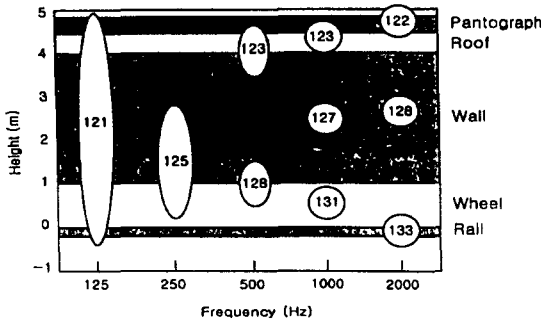


그림 7. TGV-A열차의 단극자 소음원[dB(A)] 분포

한 200Hz이상의 구조진동소음 성분이 존재하는 것으로 판단된다. 참고로, 1.25kHz대역에 존재하는 구름소음 성분은 바퀴공진모드에 의한 방사소음으로 추정된다.

### 5. 한국형 고속전철의 실내소음저감을 위한 대책마련의 방향 및 결론

그림 7은 프랑스 TGV-A가 300km/h로 주행시 25m거리에서 측정된 등가 음압레벨로부터 계산된 등가 단극자 소음원강도[dB(A)]의 분포를 차량높이에 따라 도시한 것이다[26]. TGV-A가 350km/h로 주행할때 5m거리에서 측정된 동력차-동력객차-객차에서 발생하는 소음의 분포는 그림 8에서 관찰할 수 있다[15].

TGV-A 350km/h급 한국형 고속전철이 경부고속전철(TGV-K) 시스템을 근간으로 하여 개발된다는 전제하에, 그림 7의 실측결과와 이상에서 언급한 TGV의 각종 소음특성을 종합하여 한국형 고속전철의 실내소음을 저감하기 위한 대책의 방향을 도표 14와 같이 정리하였다. 그러나, TGV-K와는 달리 한국형 고속전철은 객차의 차체재료가 알루미늄제이기 때문에, 재료변화에 따른 구조진동특성, TL값의 변화, 구조진동소음 방사성능의 변화 등이 추가적으로 고려되어야 할 것이다.

주행속도가 350km/h로 증가할 때 예상되는 추가적인 공력소음의 투과를 효과적으로 차단하기 위하여, 본 논문에서 제안한 식(2)의 실내소음 예측식에서 가장 중요한 파라미터로서 작용하고 있는 200Hz에서의 최소 TL값을 확보하기 위한 흡차음재의 개발과 설계기술이 중요하다. 또한, 중·고주파수의 광대역에 걸쳐 실내소음의 증가에 기여하는 구조전달소음의 저감을 위하여는 구조진동방사소음을 최소화하기 위한 구조설계 및 방진/진동감쇠 기술의 마련이 중요하다. 따라서, 본 고속전철 진동소음해석 및 저감기술개발과제의 1단계(1997년도부터 1999년도까지) 연구에서는 이러한 연구내용들이 단계별로 수행되고 있다.

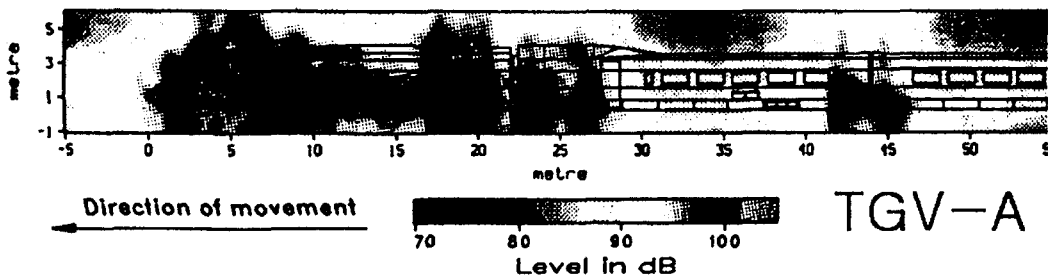


그림 10. 프랑스 TGV-A의 소음분포도 (350km/h주행시 5m거리에서 측정) [15]

도표 14. 한국형 고속전철의 소음원별 및 주파수대역별 실내소음 저감대책의 방향

1/3옥타브중심주파수(Hz)		63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1K	1.25K	1.6K	2K-		
주요 실내소음 전달경로		AE			SB	AE	SB + AE						AB						
소음원 부위 및 소음저 감방안	레일 (-0.2-0.0)				MT/ID													MT/TL	
	바퀴 (0.0-1.0)										MT/ID			SD/TL					
	차체하부(1.0-1.7)									SS/TL									
	객차 차체 내면	객차창문(1.7-2.5)					SS/TL												SS/TL
		객차벽면(2.5-3.5)																	
	동력차 차체 내면	동력차투베(1.7-2.5)					AD/TL												AD/TL
		동력차그릴(2.5-4.0)													AD/TL				
	지붕	객차(3.5-)										AD/TL							
		동력차(4.0-)										AD/TL			AD/TL				
		판토그래프 (4.9)																	AD/TL

AE = Aerodynamic Noise AB = Air-Borne Noise SB = Structure-Borne Noise  
 AD = Aerodynamic Design for Noise Minimization ID = Isolation/Damping MT = Maintenance  
 SD = Structural Design for Noise Minimization SS = Smooth Surface TL = Transmission Loss

(본 논문의 내용에 관한 조언 및 자세한 문의는 다음의 연락처로 하여주시기 바랍니다: 이우식 교수, 인하대학교 공과대학 기계공학과, 인천광역시 남구 용현동 253번지 (우편 402-751), Tel: 032-860-7318, Fax: 032-866-1434, e-mail: ulee@dragon.inha.ac.kr)

참고문헌

1. 차량시스템 통합 및 총괄, 고속전철기술개발사업 연차보고서 (1996), 건교부·통산부·과기처.
2. 차량시스템 개념설계 및 평가기술개발, 고속전철기술개발사업 연차보고서 (1996), 건교부·통산부·과기처.
3. 고속전철 시스템 엔지니어링 기술개발, 고속전철기술개발사업 연차보고서 (1996), 건교부·통산부·과기처.
4. 공력설계, 해석기술 및 전두부개발, 고속전철기술개발사업 연차보고서 (1996), 건교부·통산부·과기처.
5. 고속전철 소음저감기술개발, 고속전철기술개발사업 연차보고서 (1996), 건교부·통산부·과기처.
6. 고속철도소식: 통권 제33호 (1996), 한국고속철도공단
7. Holzl, G. et al. (1994), "Deufrako-2: Localized Sound Sources on the High-Speed Vehicles ICE, TGV-A and TR07," Inter-Noise 94, pp. 193-198.
8. 진동소음해석 및 저감기술개발 (1996), 고속전철기술개발사업 연차보고서, 건교부·통산부·과기처.
9. G7 고속전철기술개발사업 1차년도 연구성과 보고회 (1997), 한국철도기술연구원
10. Raoul, Jean-Claude (1997), "How High-Speed Trains Make Tracks," Scient. Amer, Oct. 1997, pp. 68-73.
11. 고속철도 차량시스템 엔지니어링: 제 2권 (1996), 한국고속철도.
12. Contract: Seoul-Pusan High-Speed Rail Project, Korea High Speed Rail Construction Authority and Korea TGV Consotium.
13. 고속철도 환경소음기준 및 진동기준에 대한 연구: 환경기준 및 방음대책편 (1995), 한국고속철도건설공단.

14. Moritoh, Y., Zenda, Y. and Nagakura, K. (1996), "Noise Control of High Speed Shinkansen," *J. Sound Vibr.*, Vol. 193, No. 1, pp. 319-334.
15. Pallas, M. A., Schmitz, K. P., Barsikow, B., Fodiman, P., and Holzl, G. (1994), "DEUFRAKO: Localized Sound Sources on the High-Speed Vehicles ICE, TGV-A, and TR07," *WCRR'94*, Paris, pp. 377-383. (also presented at *InterNoise'94*, Yokohama, Japan)
16. Guccia, L., Fodiman, P., and Gautier, P.-E. (1997), "High Speed Rolling Noise, Design and Validation of Low Noise Components," *WCRR'97*, Firenze, Italia.
17. Thomas L I gen (1997), "Numerical Simulation of Railway Noise Generation and Propagation at the Deutsche Bahn AG," *WCRR'97*, Firenze, Italia.
18. von Estorff, O., Wandinger, J., Tylkowski, B., and Villmann, J. (1996), "Numerical Methods for the Acoustical Investigation of Railway Vehicles," *WCRR'96*, Colorado Spring, USA, pp. 665-671.
19. Fodiman, P. (1996), "Line Test Validation of Low Noise Railway Components," *WCRR'96*, Colorado Spring, USA, pp. 497-502.
20. Jaschinski, A. and Kortum, W. (1993), "Development and Application of Vehicle Dynamics Analysis and Design Software at DLR," *Proc. Int. Conf. Speedup Tech. Railway Maglev Vehicles*, Yokohama, Japan, pp. 99-104.
21. Goodall, R. M. (1993), "Performance Limits for Active Secondary Railway Suspension," *Proc. Int. Conf. Speedup Tech. Railway Maglev Vehicles*, Yokohama, Japan, pp. 81-86.
22. King III, W. F., Mackrodt, P. A., and Pfizenmaier, E. (1993), "The Aerodynamics and Acoustics of High-Speed Tracked Vehicles," *Proc. Int. Conf. Speedup Tech. Railway Maglev Vehicles*, Yokohama, Japan, pp. 65-69.
23. Holzl, G. (1993), "Modern Vehicle Technology: Measures Carried Out to Reduce Sound Emission," *Proc. Int. Conf. Speedup Tech. Railway Maglev Vehicles*, Yokohama, Japan, pp. 55-58.
24. Barsikow, B. and Muller, B. (1993), "Relevant Sound Sources Generated by the High-Speed Railway Train ICE of the Deutsche Bundesbahn and How They Are Accounted for in Model Calculation of Wayside Noise Prediction," *Proc. Int. Conf. Speedup Tech. Railway Maglev Vehicles*, Yokohama, Japan, pp. 49-54.
25. Moritoh, Y., Zenda, Y., Shimizu, Y., and Nagakura, K. (1993), "Noise Control of High Speed Railway Cars," *Proc. Int. Conf. Speedup Tech. Railway Maglev Vehicles*, Yokohama, Japan, pp. 45-48.
26. van der Toorn, J. D., Hendriks, H., and van den Dool, T. C. (1996), "Measuring TGV Source Strength with Syntacan," *J. Sound Vibr.*, Vol. 193, No. 2, pp. 113-121.
27. Schmitz, K.-P. (1993), "Sound Measurement on TRANSRAPID 07-Methods and Results," *Proc. Int. Conf. Speedup Tech. Railway Maglev Vehicles*, Yokohama, Japan, pp. 33-38.
28. Takano, Y., Torii, A., Terada, K., Sebata, M., Iida, A., Hattori, M., and Kohama, Y., (1993), "Noise Reduction on the New NOZOMI Sinkansen Cars," *Proc. Int. Conf. Speedup Tech. Railway Maglev Vehicles*, Yokohama, Japan, pp. 39-44.
29. Takao, T., Taguchi, H., Tuge, M., and Terai, J. (1993), "Dynamic Characteristics of the STAR21 Experimental Train," *Proc. Int. Conf. Speedup Tech. Railway Maglev Vehicles*, Yokohama, Japan, pp. 17-21.
30. Abe K. and Nishikawa, Y. (1993), "New High Speed Train Structural Design and Strength Test," *Proc. Int. Conf. Speedup Tech. Railway Maglev Vehicles*, Yokohama, Japan, pp. 473-476.

31. Tagawa, N., Yamashiro, H., and Kadota, K. (1993), "Development of New Carbody Structure for High Speed Train," Proc. Int. Conf. Speedup Tech. Railway Maglev Vehicles, Yokohama, Japan, pp. 477-481.
32. Luebke, D. (1993), "Vehicle/Track System Behavior," Proc. Int. Conf. Speedup Tech. Railway Maglev Vehicles, Yokohama, Japan, pp. 313-316.
33. Coget, G. (1993), "Vehicle System TGV-A and Its Lineage Planned Next Generation," Proc. Int. Conf. Speedup Tech. Railway Maglev Vehicles, Yokohama, Japan, pp. 259-264.
34. Yoshie, N. and Yagi, E. (1993), "High-Speed Testing Car WIN350," Proc. Int. Conf. Speedup Tech. Railway Maglev Vehicles, Yokohama, Japan, pp. 275-279.
35. Yoshikawa, T. (1993), "Shinkansen Star 21: Low-Noise High-Speed Experimental Train," Proc. Int. Conf. Speedup Tech. Railway Maglev Vehicles, Yokohama, Japan, pp. 270-274.
36. Bracciali, A. and Pellegrini, C. (1997), "FEM Analysis of the Internal Acoustics of A Railway Vehicle and Its Improvements," WCRR'97, Firenze, Italia.
37. Catherine, D. (1997), "Characterisation of Aerodynamic Noise Sources with Array Measurement Techniques," WCRR'97, Firenze, Italia.
38. Alain, B. and Claude, L. (1997), "Acoustic Comfort of A Large Moving Structure Such As Double Deck TGV. Part 1: Problematic, Process and Strategy for Pilot Studies, Part 2: Some Numerical Studies," WCRR'97, Firenze, Italia.
39. Heckl, M., Hauck, G. and Wettschureck, R. (1996), "Structure-Borne Sound and Vibration From Rail Traffic," J. Sound Vibr., Vol. 193, No. 1, pp. 175-184.
40. Stuber, C. (1975), "Air- and Structure-Borne Noise of Railway," J. Sound Vibr., Vol. 43, No. 2, pp. 281-289.
41. Barsikow, B. (1996), "Experiences with Various Configurations of Microphone Arrays Used to Locate Sound Sources on Railway Trains Operated by the DB AG," J. Sound Vibr., Vol. 193, No. 1, pp. 283-293.
42. Janssens, M. H. A. and Thompson, D. J. (1996), "A Calculation Model for the Noise From Steel Railway Bridges," J. Sound Vibr., Vol. 193, No. 1, pp. 295-305.
43. Mauclair, M. B. (1990), "Noise Generated by High Speed Train: New Information Acquired by SNCF in the Field of Acoustics Owing to the High Speed Test Programme," InterNoise'90, pp. 371-374.
44. Thompson, D. J., "Predicting Railway Rolling Noise"
45. Liang, M., Kitamura, T., Matsubayashi, K., Kosaka, T., Maeda, T., Kudo, N. and Yamada, S. (1994), "Active Attenuation of Low Frequency Noise Radiated from Tunnel Exit of High Speed Train," J. Low Freq. Noise Vibr., Vol. 13, No. 2, pp. 39-47.
46. Krylov, V. V. (1994), "On the Theory of Railway-Induced Ground Vibrations," J. De Physique IV, Vol. 4., pp. C5-769-772.
47. Krylov, V. V. (1996), "Vibrational Impact of High-Speed Trains. I. Effect of Track Dynamics," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 100, No. 5, pp. 3121-3134.
48. Nelson, P. M. (1987), Transportation Noise Reference Book, Butterworths, London
49. 고속철도 차량시스템 엔지니어링, 제2권 (1996), 한국고속철도공단