

경부고속전철 시험선구간에서 소음영향 시험평가

⁰나 희 승*, 김 선 우**, 김 정 태***, 정 성 수****, 조 대 승*****, 김 준 엽 *

Noise Test of High Speed Train along Test Track

H. S. Na, S. W. Kim, J. T. Kim, S. S. Jung, D. S. Jo, J. Y. Kim

ABSTRACT

High speed railroad noise is one of the main causes of environmental impact. An estimate of the relevant noise levels is usually required in order to evaluate the noise barrier and the anti-noise trailer. This paper introduce the test procedure and the estimate for HST noise. The aim of this is to measure, by means of a test, the level of acoustic pressure present during the passing of a KTX(Korea Train Express), in order to satisfy the contractual requirements and the noise criteria. A number of measurements are carried out in order to estimate noise impact by HST along test track.

1. 서 론

최근 국가경제규모가 급속히 늘어남에 따라 수송수요가 지속적으로 증가하게 되고 이에 따라 재래선과 고속도로등 기존 시설들이 포화상태에 이르게 되었다. 정부는 이러한 문제점을 해결하기위해 경부고속철도 사업을 시행하게 되었고, 1992년 3월에 건설주체인 한국고속철도건설공단이 창립되면서 본격적으로 업무에 착수하여, 건설공사와 아울러 제반업무가 현재 진행중이다.

고속철도의 운행제한조건들은 타 교통수단에 비하여 큰 장점을 가지고 있지만 소음 진동부분에 있어서는 아직까지 해결해야 할 많은 문제들이 남아 있다. 고속철도의 소음기준은 소음원인 차량소음도와 수음자측에서의 환경소음기준으로 분류할 수 있다. 차량소음도는 차량설계시 기본사양에서 결정되고, 차량의 기술개발은 이러한 기준을 만족하도록 연구가 수행되어져야한다.

환경소음기준은 이러한 차량소음도를 고려하고 주민의 쾌적한 생활공간을 확보하도록 설정된다. 소음기준은 차량 소음도와 차실내외의 소음도에 대한 목표를 제공하고, 환경기준 강화와 속도 향상에 따른 소음저감 방안을 강구하는데 매우 중요하다. 최근 건교부와 환경부는 고속철도 소음기준(안) 공동 조사단을 발족하여 국내실정에 적합한 소음기준(안)을 제시하였다.

본 논문은 고속철도의 차량소음기준 및 환경소음기준을 소개하고, 각 소음기준의 특성을 알아본다. 차실내외의 소음기준과 관련한 시험절차를 조사하고, 시험절차에 의한 실측 및 결과를 분석한다.

2. 고속철도의 차량 및 환경 소음기준

다음은 승객의 쾌적한 승차환경을 위한 차량소음기준과 연변 주민의 주거환경 보호를 위한 환경소음기준에 대해 알아본다. 표 1은 경부고속철도 도입시 차량계약서에 의거한 차량의 소음기준이다. 참고로 차외소음은 선로중앙에서 25m 이격거리, 레일상면에서 1.2m 높이에서 측정한 결과이다. 이는 Leq,passby를 의미하며, Lmax로 환산시 93dB(A)이다. 객차소음은 객차중앙부에서 측정하며, 터널의 단면적은 100m²이다. 정차중에는 공조시스템과 보조기기가 작동한다. 소음은 1/3 옥타브

* 한국철도기술연구원
** 전남대학교
*** 홍익대학교
**** 한국표준연구원
***** 부산대학교

밴드로 300~10000Hz 범위에서 불쾌한 순음소음 (pure tone)이 없어야 한다. 임의 밴드의 순음소음은 인접한 두 밴드의 평균보다 5dB를 초과하지 않는다.

표 1. 경부고속철도 차량의 소음기준

운행조건	경부고속철도		
	차외소음	개활지	터널
300km/h	차외소음	91	-
	차내소음	객차	7dB(A) 상승
		동력	
		객차	
동력	70		
정차중	객차	78	-
		60	-

경부고속철도의 환경소음기준은 '99.9월 합리적인 고속철도 소음기준 마련을 위하여 건설교통부와 환경부 공동으로 고속철도 소음기준 설정을 위한 공동조사단이 구성되어 국내외 자료 등을 조사한 후 '99년12월 고속철도 환경영향평가 소음협의 기준이 설정되어, 이 기준에 맞는 적절한 방음시설을 설치하여 지역주민에 대한 소음피해를 최소화 하고자 하였다. 고속철도 소음기준의 단위는 국제적 추세에 따라 Lmax에서 Leq로 전환한다.

표 2. 소음협의기준(안)

대 상 지 역	소음협의 기준 (Leq)
주거지역, 녹지지역, 준도시지역중 취락지구 및 운동·휴양지구, 자연환경보전지역, 학교·병원·공공도서관의 부지경계선으로부터 50미터 이내 지역	60dB(A)
상업지역, 공업지역, 농림지역, 준농림지역 및 준도시지역중 취락지구 및 운동·휴양지구의 외의 지역, 미고시지역	65dB(A)

단, 건설중인 고속철도에 대해서는 다음과 같이 정한다.

대 상 지 역	시험선의 구간 (Leq)		시험선 구간 (Leq)	
	개통시	개통 15년 이후	개통시	개통 15년 이후
주거지역, 녹지지역, 준도시지역중 취락지구 및 운동·휴양지구, 자연환경보전지역, 학교·병원·공공도서관의 부지경계선으로부터 50미터이내지역	63dB(A)	60dB(A)	65dB(A)	60dB(A)
상업지역, 공업지역, 농림지역, 준농림지역 및 준도시지역중 취락지구 및 운동·휴양지구의 외의 지역, 미고시지역	68dB(A)	65dB(A)	70dB(A)	65dB(A)

비고:

1. 각종 방음대책(소음저감대책)으로 협의기준을 만족시키지 못할 경우에는 거리에 관계없이 주민이 원하면 이주보상하며, 기타 민원사항은 고속철도 운영자와 주민과의 합의에 의해 자율적으로 해결하도록 촉구한다.

2. 향후 환경소음저감을 위해 정부 및 고속철도운영자로 하여금 다음의 사항에 대해 제도적 장치를 마련하도록 촉구한다.

- 방음시설 개량에 의한 소음저감
- 차량의 저소음화를 통한 소음저감
- 주택에 대한 방음대책
- 신규철도 건설시 공학적 방법을 통한 소음예측 및 검증

고속철도 소음기준은 아직 법으로 정해지지 않았다. 하지만 외국 고속전철보유국의 소음기준을 반영하고, 경제적 측면과 환경보호적 측면을 고려하여, 표 2와 같은 소음협의기준(안)을 제시, 법제화할 예정이다.

3. 고속철도의 소음도평가 및 소음시험규격

철도소음의 평가에는 일반적으로 등가소음레벨 Leq가 적용되며, 등가소음은 통과시의 최대 소음레벨, 노출시간, 운행 빈도 등에 의하여, 결정된다. 소음 전파특성은 일반적으로 주파수에 따라 변화하므로 주파수 밴드별로 소음레벨을 계산할 필요가 있으나, 간단한 계산을 위하여는 주파수 밴드별 예측을 생략하고 전체 소음레벨을 이용하여 계산할 수 있다. 여기서는 자유음장에서의 최대 소음레벨과 등가소음레벨 계산에 대하여 알아 본다.

통과 열차의 최대 소음레벨 자유음장에서 열차 통과시의 최대 소음레벨은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$L_{max} = L_0 - k \log \frac{d}{d_0} + 30 \log \frac{V}{V_0} - k_d \quad (1)$$

여기서

L_0 = 열차가 V_0 의 속도로 주행시 궤도에 d_0

떨어진 위치, 표준높이에서의 기준 소음레벨

k = 열차 길이에 따른 거리 함수계수

d = 수음정과 궤도 중심간 거리

k_0 = 지향성 보정 값

등가소음도 Leq는 실측 및 예측된 최고소음도 Lmax로 계산할 수 있다. 철도소음에 사용되는 등가소음도 Leq의 계산식은 다음과 같다. 등가소음도 Leq는 최고소음도 Lmax, 소음노출시간, 소음노출의 빈번도를 모두 고려한 종합적인 소음평가도이다.

$$L_{eq} = 10 \log \left(\frac{t}{T} 10^{\frac{L_{max}}{10}} \right) + 10 \log(n) \quad (2)$$

여기서, L_{eq} 는 등가소음도, t 는 열차통과시 소음노출시간, T 는 자유음장에서 등가소음도 계산을 위해 주어진 시간, n 은 주어진 시간 T 에서의 열차 통과횟수이다.

고속철도에 관련된 기초자료가 거의 없는 시점에서 소음문제 해결 및 방지를 위한 실제운행자료 축적이 필수적이다. 따라서, 고속철도소음의 예측과 평가기술 및 효율적으로 소음을 저감할 수 있는 기술개발을 위해 고속철도 현장소음측정 및 분석자료를 확보하는데 목적이 있다. KS, ISO, NF 규격에 기초하여 소음 측정의 시험절차를 검토하고, Alstom에서 기술이전된 시험절차서를 활용하였다. 표 3은 환경소음 측정과 관련한 규격이며, 표 4는 차량내 소음측정과 관련한 규격이다. NF는 프랑스 규격으로 코드번호와 규격명이 다소 차이가 있으나 ISO규격과 동일하다. 국내의 KS는 일본의 JIS와 유사하다. IEC는 소음계에 대한 일반 규격이다. ISO, NF를 기초로 경부고속철도의 시험평가와 관련한 소음평가 절차서가 작성되었으며, 이는 다음과 같다.

- a. QUALIFICATION TEST PROCEDURE EXTERIOR NOISE AT 300KM/H (차외소음측정 절차서)
- b. QUALIFICATION TEST PROCEDURE NOISE IN THE POWER CAR CAB AT 300KM/H (차내소음측정 절차서-동력차)
- c. QUALIFICATION TEST PROCEDURE NOISE LEVEL TRAILERS (차내소음측정 절차서-객차)

참고로 시험절차서에서 차량소음도는 차량이 통과하는 시간 T 동안의 등가 소음도이며, 아래식에 의해 계산된다. 차량이 통과하는 시간 T 는 객차부 소음도보다 10dB(A)떨어진 지점을 선택한다.

$$L_{eq,passby} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_T \left(10^{\frac{L_p(t)}{10}} \right) dt \right] \quad (3)$$

이러한 측정을 하기 전에 자갈이 깔린 궤도로 (ballasted track) 5000km를 달려야만 한다. 측정은 W1 하중(load)에서 수행되어야 하고, 레일의 거칠기가 1.5 μ m r.m.s 이하이어야 한다.

표 3. 환경소음 측정과 관련한 규격

규격번호	제 목
KS A 0701-1972	소음도 측정 방법 (Methods for Measurement of Sound Level)
ISO 3095	Measurement of noise emitted by railbound vehicles
NF S 31-019	Test code for the measurement of noise emitted by vehicles operating on rails
IEC 651	Sound level meters

표 4. 차량내 소음측정과 관련한 규격

규격번호	제 목
KS B 8143-1982	철도 차량의 차내 소음 시험 방법 (Methods of Noise Test Inside Railway Rolling Stock)
ISO 3381	Measurement of noise inside railbound vehicle
NF S 31-028	Test code for the measurement of noise inside railbound vehicles
IEC 651	Sound level meters

4. 고속철도의 소음시험측정 및 분석

다음은 300km/hr 주행시의 소음실측을 통한 저감시설의 적정성 확인을 위하여 현재 시험선구간에서 측정되어지고 있는 소음실측자료(속도별, 주파수별)를 소프트웨어의 예측치와 비교·검토될 수 있도록 그래프 및 도표를 이용하여 제시하였다.

경부고속철도 시험선구간에서 소음시험측정을 수행하였다. 경부고속철도 시험선구간에서 이격거리별 소음계측 및 평가 결과는 부록 2에 첨부하였다. 그림 1은 마이크로 폰 어레이를 이용하여 이격거리 25m, 50m, 75m, 100m에서 각각 소음을 측정 한 결과이다. 차량의 전두부에서 가장 큰 소음도 L_{max} 가 측정되며, 후두부, 객차순으로 소음도의 크기가 결정된다.

다음은 차량소음도 $L_{eq,passby}$ 를 경부고속철도 차량계약서와 프랑스 Alstom사의 시험절차서에 의거하여 그림 2와 같이 계산하였다. 표 5는 시속 300km/h에서 9회 측정하여 차량소음도를 계산한 결과이다. 이때 지형조건은 개활지이다. 약 88dB(A)로 경부고속철도 차량계약서 및 시험선구간 방음시설설치 설계에 제시된 91dB(A)를 만족함을 알 수 있다. 계산 결과 $L_{eq, passby}$ 가 91dB(A)보다 작게 나타나는데 이는 고속철도 기술이 향상되었으며 궤도 및 차량이 노후되어 있지

않고, 승객이 탑승하지 않아 무게가 다소 가벼운데서 기인하는 것으로 추정된다. 특히 시험선구간 방음시설 실시설계에서 소음원의 소음도가 $L_{eq,passby} = 91\text{dB(A)}$ 인 것을 고려할 때 설계 및 시공 오차에 대한 어느정도의 여유가 있음을 알 수 있다.

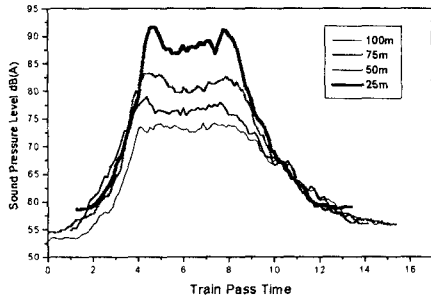


그림 1 고속전철 통과시 시간선도 (개활지, 300 km/h)

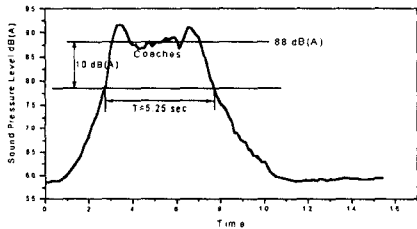


그림 2 차량소음도 ($L_{eq,passby}$, 이격거리 25m, 평지)

$$L_{eq,passby} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T} \int_T \left(10^{\frac{L_i}{10}} \right) dt \right] = 88.3 \text{ dB(A)}$$

표 5. 평지 구간 25m 이격 지점에서의 차량소음도

NO.	열차 제원			평지구간		
	열량수	속도 (km/h)	방향	$L_{eq,passby}$ dB(A)		
				Coaches 위치 dB(A)	Time (sec)	$L_{eq.pa}$
1	16	299.1	상행	87.8	5.13	87.86
2	16	300.1	하행	88.0	5.25	88.3
3	16	299.6	상행	87.4	5.25	87.4
4	16	300.1	하행	88.0	5.00	88.4
5	16	299.1	상행	87.4	5.00	87.6
7	16	299.1	상행	87.9	5.00	87.8
8	16	159.5	하행	75.0	8.91	75.4
9	16	272.2	상행	84.6	5.40	84.9
비 고	○ 암소음 : 50~51 dB(A)					

다음은 민원 예상지역에서 소음을 계측하였다. 시험선구간에서 시험운행중인 고속철도차량에 대하여 차량속도가 300km/h로 운행하는 구간(오송교, 연계교)에 대하여 소음측정을 시행하였으며 특히 민원예상지역 선정은 시험선구간의 방음벽 실시설계를 검토하여, 방음벽 설치전·후에 민감한 지역을 선정하여 소음실측을 하였으며 그 결과치는 다음 표 6과 같다.

표 6. 소음 실측 지점 및 측정소음도

열차제원				최대 음압레벨(Lmax) dB(A)			
횟수	열량 수 (량)	속도 (km/h)	방향	측정지점			
				R8	R9	R11	R12
1	20	300	상행	80.4	78.9	79.2	79.8
2	20	300	하행	79.2	76.7	78.6	77.4
3	20	300	상행	80.9	77.8	79.9	78.6
4	20	300	하행	79.7	77.5	78.5	76.8
5	16	300	상행	-	-	-	-
평 관				80.0	77.7	79.0	78.1
비 고	방음벽 유무			○	○	○	○
	이격거리(m)			20	39	26	25
	배경소음 (dB(A))			53.0	51.5	48.3	43.8

한편 상기의 실측된 소음도를 각 지점별로 방음벽 실시설계시 예측한 예측치와 비교하여 보면 다음 표 7과 같으며 실측결과 각 지점에서 소음협약의 기준 준농림지역 및 농림지역 기준을 만족하고 있으며, 소음예측치와 실측치를 분석하여 보면 R8, R19지점에서의 실측소음도가 예측소음도와 유사하나 나머지 지점에서는 다소의 오차가 발생하였다. 이는 측정당시의 기상여건과 지형모델링의 오차, 차량의 소음도가 예상보다 낮고, 설계프로그램의 한계인 것으로 추정되며, 또한 현재의 측정 분석치는 여건상 불가피하게 설계당시 적용한 20.5대/시간의 차량대수를 측정된 것이 아니라 몇회에 걸쳐 측정하여 평균후 20.5대/시간으로 환산한 것으로서 이 또한 예측과 실측의 오차발생요인일 것으로 판단된다. 고속철도 소음은 운행속도가 높을수록 소음도가 증가하는 경향을 갖고 있으나, 가속 및 감속의 영향으로 동일속도에서 수 dB 내외의 차이가 발생함을 알 수 있다. 평지에서 측정된 결과 고속철도 차량계약서 $L_{eq,passby} = 91\text{dB(A)}$ 를 만족하고 있으며, 교량부의 경우 교량자체의 회절효과에 의해 평지보다 소음도가 낮았다. 또한 방음벽 설치부는 미설치부와 비교하여 약 10dB(A)의 소음저감효과를 나타내었다. 그림 4는 평지부에서의 방음벽 설치 유

무에 따른 속도별 소음 분포도이다. 그림 5는 교량부에서의 방음벽 설치 유무에 따른 속도별 소음 분포도이다.

표 7. 각 지점별 예측소음도와 측정소음도 비교

열차제원				등가소음도(L _{eq}) dB(A)/노출시간(sec)		
횟수	열량수 (량)	속도 (km/h)	방향	측정 지점		
				R19	R20	R21
1	20	300	하행	61.5	60.5	65.2
2	20	300	상행	60.8	60.1	65.8
3	20	300	하행	61.7	60.8	65.9
4	20	300	하행	61	60.5	66.1
5	20	300	상행	60.9	60.1	66.6
평균				61.1	60.4	65.9
예측 소음 레벨(L _{eq})		방음벽 설치전		69.6	67.8	65.9
		방음벽 설치후		61.3	63.5	63.9

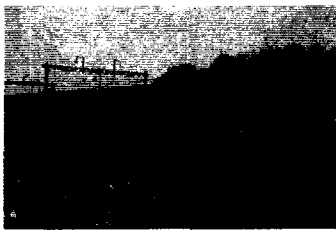


그림 3 측정지점 R19 지점

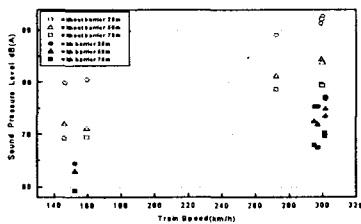


그림 4 방음벽 설치 유무에 따른 속도별 소음 분포도(평지역)

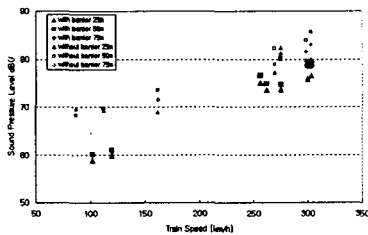


그림 5 방음벽 설치 유무에 따른 속도별 소음 분포도(교량부)

다음은 방음벽의 재질이 고속철도발생소음의 주파수대역에 걸쳐서 소음감쇄효과를 충분히 발휘할 수 있는지의 여부를 평가한다. 위에서 언급한 것처럼 방음벽 설치부는 미설치부와 비교하여 약 10dB(A)의 소음저감효과를 나타낸다. 시험선구간에서 측정된 경부고속철도차량의 주파수특성은 그림 6과 같다. 그림 7은 비슷한 평지 방음벽지역에서의 주파수 특성이다. 그림 6과 그림 7을 비교해보면 대부분의 주파수대역에서 소음감쇄효과가 나타나고 있다. 단, 150Hz미만에서는 소음감쇄효과가 상대적으로 낮지만 소음감쇄전 150Hz이상의 주파수대역과 비교하여 상대적으로 소음도가 낮기 때문에 전체적인 소음감쇄효과에 기여율이 낮음을 알 수 있다.

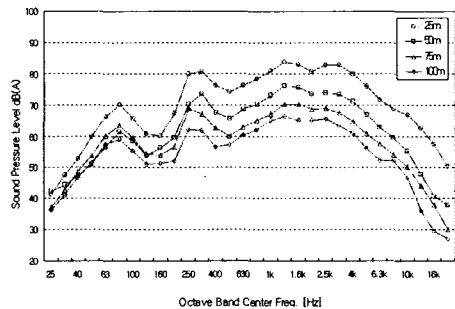


그림 6 고속전철 통과시 주파수 특성 (평지지역, 속도 300 km/h)

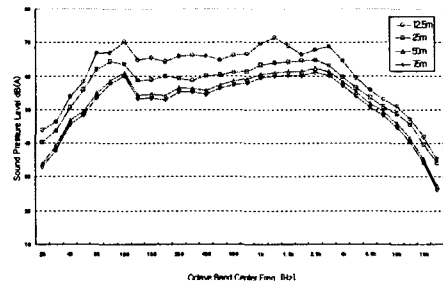


그림 7 고속전철 통과시 주파수 특성 (평지 방음벽지역, 속도 300 km/h)

다음은 교각 및 상판에서 저주파 소음효과를 검토하기 위하여 평지 및 교량부의 소음측정 결과를 비교하였다. 그림 8과 그림 9를 비교해보면 전체적인 소음특성이 유사하고, 특히 교량부에서 특정한 모드가 발생되고 있지 않아 초기에 우려하였던 교량의 구조진동에 의한 소음은 거의 미미한 것으로 나타나고 있다. 이러한 현상은 설계 및 시공시 교량을 일반 철교량이 아닌 콘크리트 교량으로 시

공하고 방진시설을 도입하여 소음을 저감한 결과로 추정된다.

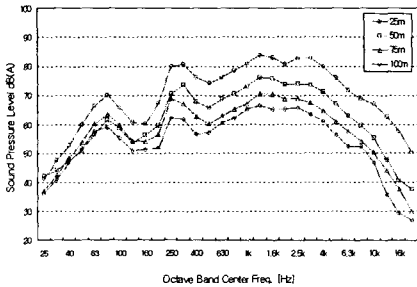


그림 8 고속전철 통과시 주파수 특성 (평지지역, 속도 300 km/h)

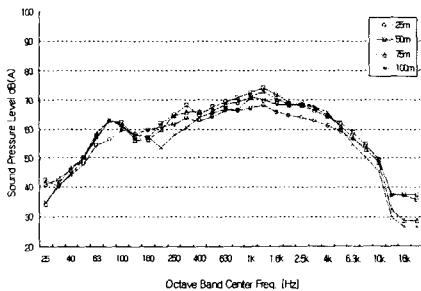


그림 9 고속전철 통과시 주파수 특성 (교량부지역, 속도 300 km/h)

6. 결론

기존 육상교통수단 중에서 가장 빠른 속도를 자랑하는 고속전철이 가져다 줄 혜택은 경제적으로, 사회적으로 막대할 것으로 기대된다. 그러나 고속전철이 가져다 줄 이러한 혜택 못지 않게 소음 피해라는 부작용 또한 무시할 수 없는 것이 사실이다. 90년대 들어 각종 환경피해로 인한 민원 발생이 급증하고 있는 상황에서 고속전철 소음은 또 다른 민원 발생의 주요 원인이 될 가능성이 높다는 점에서 고속전철이 새로운 미래의 교통수단으로서 국민들에게 인정받기 위해서는 보다 철저하고 종합적인 대책이 마련되어야 할 것이다.

본 논문은 고속철도의 차량소음기준, 환경소음기준과 차실내외의 소음기준에 관련한 시험절차를 조사하였다. 고속철도의 소음기준은 소음원인 차량소음도와 수음자측에서의 환경소음기준으로 분류할 수 있다. 차량소음도는 차량설계시 기본사양에서 결정되고, 차량의 기술개발은 이러한 기준을

만족하도록 연구가 수행되어야 한다. 환경소음기준은 이러한 차량소음도를 고려하고 주민의 쾌적한 생활공간을 확보하도록 설정된다.

보다 신뢰성 있는 실측데이터 확보를 위해 시험계측을 강화하였고, 민원 예상지역의 방음성능 평가를 실시하였다. 경부고속철도 시험선구간의 속도별, 주파수별 소음측정을 수행하고, 소음의 실측치와 예측치 비교, 검토하여, 계획중인 방음벽 재질이 고속철도발생소음의 전 주파수대역에 걸친 소음저감효과를 만족하는지, 교각에서 방사되는 2차소음의 피해가 있는지를 파악하였다. 속도 300km/h로 시험주행중인 시험선구간에서 방음벽이 시공된구간의 민원지역 피해실태를 조사하였다. 추후에 측정된 데이터를 기초로 정밀분석을 수행할 예정이며, 관련된 컴퓨터 시뮬레이션을 병행할 계획이다. 이를 기초로 보다 정확한 소음예측식이 제안이 될 것이다. 철도의 속도향상은 차량소음의 증가를 의미하며, 개통후 15년에는 환경기준이 강화되기 때문에 지속적인 저소음차량개발 및 방음시설의 성능개선이 요구된다. 이에 대한 기초조사를 추가적으로 수행할 예정이다.

참고 문헌

- (1) Korea High Speed Rail Construction Authority and Korea TGV Consortium, Contract: Seoul-Pusan High-Speed Rail Project
- (2) 고속철도기술개발사업 고속전철 시스템 기본 사양서
- (3) 한국소음진동공학회, 1995, 소음진동편람.
- (4) Minist. Fr. Environ. & Cadre de Vie, 1980, Guide du bruit des transports terrestres/Prevision des niveaux sonores, C.E.T.U.R..
- (5) H. J. Saurenman, J. T. Nelson, G. P. Wilson, 1982, Handbook of Urban Rail Noise and Vibration Control, Wilson, Ihrig & Associates, Inc., U.S. Department of Transportation, Report No. Dot-TSC-UMTA-81-72, Washington, D.C.
- (6) High-Speed Ground Transportation Noise and Vibration Impact Assessment, U. S. Department of Transportation Federal Railroad Administration, December 1998
- (7) 본문에 소개한 규격들