

고속철도 소음시험평가

나 회 승*, 김 영 국*, 최 강 윤*, 심 상 덕**, 김 준 업*

Noise Test for High Speed Train

H.S.Na, Y.G.Kim, K.Y.Cho, S.D.Shim and J.Y.Kim

Key words: KTX(한국고속철도),HST(고속철도),Noise Criteria(소음기준),Noise assessment(소음평가)

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 해결하기 위해 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 주

민의 쾌적한 생활공간을 확보하도록 설정된다. 그러나 고속철도에 대한 환경소음기준이 확정되지 않아 국내에서 운행할 고속철도의 소음문제등을 감안한 영향예측 및 저감방안에 많은 어려움을 겪고 있다. 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.

* 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단

**유니슨기술연구소

Table 1. Noise Criteria for KTX

운행조건	경부고속철도			
		개활지	터널	
300km/h	차외소음	91	-	
	차내 소음	객차	66	
		동력 객차	70	7dB(A) 상승
		동력 차	78	
정차중	객차	60	-	

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 공조 시스템과 보조기기가 작동한다. 소음은 1/3 옥타브 밴드로 300~10000Hz 범위에서 불쾌한 순음소음(pure tone)이 없어야 한다. 임의 밴드의 순음소음은 인접한 두 밴드의 평균보다 5dB를 초과하지 않는다.

Table 2. Noise Criteria for KHST

운행조건	고속철도기술개발사업			
		개활지	터널	
300km/h	차외소음	91	-	
	차내 소음	객차	66	73
		동력 객차	78	80
		정차중	객차	60

현재 국내에서 선진국형 고속철도 시스템의 독자기술을 확보하기 위하여 시속 350km급 한국형 고속전철 기술개발 사업이 선도기술개발(G-7)사업의 하나로써 1996년부터 추진되어오고 있다. 표 2는 고속철도기술개발사업 차량의 소음기준이다. 이밖에 차량의 모든 기기는 정상 주행 중에 발생하는 진동과 충격이 가해져도 성능의 저하나 손상 없이 운용될 수 있도록 설계되어야 한다. 승차감은 ISO 2631에 따라 평가되어야 하며 "2.5 hour reduced comfort level"을 초과하지 않아야 한다.

경부고속철도 대전·충청권(천안~청원구간)건설사업 환경영향평가 협의시('92) 고속철도소음에 대한 기준이 없어, 차량 운영시 소음기준을 일본 선

간의 기준인 Lmax 70~75dB(A)를 적용하여 환경영향평가 협의 요청을 하였으며, 환경부와 협의시 기준은 주거지역 Lmax 70dB(A), 상·공업지역 Lmax 75dB(A)로 하여 소음저감방안을 강구토록 협의 되었다. 그러나 고속철도 소음기준이 없는 상황에서 '99.9월 합리적인 고속철도 소음기준 마련을 위하여 건설교통부와 환경부 공동으로 고속철도 소음기준 설정을 위한 공동조사단이 구성되어 국내의 자료 등을 조사한 후 '99년12월 고속철도 환경영향평가 소음협의 기준이 설정되어, 이 기준에 맞는 적절한 방음시설을 설치하여 지역주민에 대한 소음피해를 최소화 하고자 당초 협의 받았던 환경영향평가 소음 협의기준을 변경코자 하였다. 고속철도 소음기준의 단위를 국제적 추세에 따라 Lmax에서 Leq로 전환한다.

Table 3. Noise Impact Criteria for KTX

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·휴양지구의외의 지역, 미고시지역	65dB(A)

단, 건설중인 고속철도에 대해서는 다음과 같이 정한다.

대 상 지 역	시험선 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·휴양지구의외의 지역, 미고시지역	68dB(A)	65dB(A)	70dB(A)	65dB(A)

비고:

1. 각종 방음대책(소음저감대책)으로 협의기준을 만족시키지 못할 경우에는 거리에 관계없이 주민

이 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 3과 같은 소음협의기준(안)을 제시, 법제화할 예정이다.

3. 고속철도의 소음도평가

일반적으로 소음에 사용되는 표시법은 'A' 가중(weight)된 소음레벨이다. 차실내 소음의 평가는 비교적 간단하여 $L_{eq,T}$ 로 평가하나 실외 환경소음은 다양한 평가 방법이 있으며, 다음과 같다.

고속전철은 일반열차와는 다른 소음발생 메커니즘을 갖으며 다른각도에서의 접근방법이 마련되어야 할 것이다. 철도시스템에서 고속에 대한 정의는 200km/h (125 mile /hr) 이상인 속도를 말한다. 이러한 철도의 소음특성은 속도의 증가에 따라 변화하기 때문에 고속철도시스템을 다음과 같이 분류한다.

- High-speed : 최고속도 200 ~ 240km/h
- Very High-speed : 최고속도 320 ~ 400km/h

본 절에서는 이러한 고속철도의 소음평가에 대해 알아본다. 일반적으로 소음평가는 다음과 같은 평가지수를 사용한다.

- a. 1회 통과소음의 최대레벨(L_{max})
- b. 소음노출레벨(SEL)
- c. 시간상당소음레벨($Leq(h)$)
- d. 주야소음레벨(L_{dn} 또는 DNL)

고속철도 시스템의 소음은 종종 유럽이나 일본에서 다른 소음표시법으로 측정 및 보고된다. 이러한 표시법은 표 4와 같다.

Table 4. International Rail Noise Descriptors

Metric	Abbreviation	Country	Definition
A-weighted Passby Level	$L_{aeq,p}$ or $L_{p,p}$	Germany, France	Equivalent A-Weighted sound pressure level, energy-averaged over the time of passby(train length)
	L_{max} (mean)	Scandinavia	
One-Hour Leq	$L_{aeq,1h}$ or $L_{p,1h}$	Germany, France	Sound- pressure level, energy-averaged over one hour
Average A-weighted Maximum Level	L_{Amax}	Japan	Power-averaged "slow" maximum ($L_{max,s}$) of 20 consecutive train passbys.
Sound Exposure Level	LAE	Japan	Power-averaged value of sound exposure within 10dB of L_{Amax} , sampled at a time interval of 5/3sec.

철도소음의 평가에는 일반적으로 등가소음레벨 L_{eq} 가 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 소음 레벨을 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.

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

여기서

L_0 = 열차가 V_0 의 속도로 주행시 궤도에 d_0

떨어진 위치, 표준높이에서의 기준 소음 레벨

k = 열차 길이에 따른 거리 함수계수

d = 수음정과 궤도 중심간 거리

k_0 = 지향성 보정 값

등가소음도 L_{eq} 는 실측 및 예측된 최고소음도 L_{max} 로 계산할 수 있다. 철도소음에 사용되는 등가소음도 L_{eq} 의 계산식은 다음과 같다. 등가소음도 L_{eq} 는 최고소음도 L_{max} , 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. 참고로 재래선에서 다양한 열차가 혼합운행되는 경우, 등가소음도의 크기는 표 5와 같이 계산된다.

Table 5. $L_{max}-L_{eq}$ relationship

	T시간 동안의 열차운행횟수			
	짧은 열차	주요간선철도	화물열차	1량열차
열차종류별 운행횟수	n_1	n_2	n_3	n_4
거리 d에서의 최대 소음레벨	$L_{max} = L_0 - k \log \frac{d}{d_0} + 30 \log \frac{V}{V_0} - k_d$			
	$L(1)$	$L(2)$	$L(3)$	$L(4)$
열차 종류별 편성당 등가소음	$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{t_a}{T} 10^{\frac{L_{max}}{10}} \right]$			
	$L_{eq}(1)$	$L_{eq}(2)$	$L_{eq}(3)$	$L_{eq}(4)$
열차 종류별 등가소음	$L_{eq}(n) = L_{eq}(1 \text{ train}) + 10 \log n$			
	$L_{eq}(n1)$	$L_{eq}(n2)$	$L_{eq}(n3)$	$L_{eq}(n4)$
T시간의 등가소음	각 열차별 등가소음의 합			

Table 6. Noise Prediction Eq. on speed (with and without noise barrier)

차량구분	방음벽 유무	주행속도(km/h)			
		100~270	270~300	300~325	325~480
객차	무	71.5+32LogV/100		58+61LogV/100	
	유	56+38LogV/100		44.5+71LogV/100	
동력차(전)	무	78+28LogV/100		57+75LogV/100	
	유	66+29LogV/100		41+87.5LogV/100	
동력차(후)	무	78+28LogV/100		55+73LogV/100	
	유	66+29LogV/100		45.5+80LogV/100	

참고로 InterNoise'90 (1990년도 국제학술대회)에 발표된 논문(Mauclaire)에서 프랑스 TGV 차량의 방음벽(높이 2m) 유무에 따른 주행속도별 외부 소음 예측식은 표 6과 같다. 소음예측식에서 방음벽 유무 및 차량구분에 따라 임계속도가 270, 300, 325km/h로 변화함을 알 수 있다. 또한 전두부에서

가장 큰 L_{max} 가 발생함을 알 수 있다. 향후 국내 경부고속철도의 경우, 많은 소음측정을 수행하여 표 6과 같은 소음예측식을 작성하고, 이를 바탕으로 보다 정확한 환경영향평가를 시행하여 적절한 소음저감 대책이 이루어져야 할 것이다.

4. 고속철도의 소음시험절차 규격

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 T는 그림 1과 같이 객차부 소음도보다 10dB(A)떨어진 지점을 선택한다.

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

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.

Table 7. Reference documents for outdoor noise

규격번호	제목
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

Table 8. Reference documents for indoor noise

규격번호	제목
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

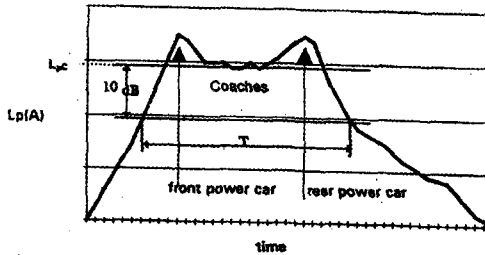


Fig. 1 Choice of the period of integration

5. 고속철도의 소음시험측정

경부고속철도 시험선구간에서 소음시험측정을 수행하였다. 시험은 차량내부 및 외부에서 수행되었으며, 차량내부는 객차에서 66dB(A)를 만족하였다. 터널 주행시 약 7dB(A) 상승하는 것으로 측

정되었으며, 이는 차량계약을 만족한다. 그림 2'5는 교량과 평지지역에서 Lmax를 측정한후, Leq(20.5대/시간)를 계산한 결과이다. 속도에 따라 소음도가 증가하는 경향을 갖고 있으나, 가속 및 감속의 영향으로 동일속도에서 차이가 발생함을 알 수 있다. 평지에서 측정된 결과 차량계약을 어느정도 만족하고 있으며, 교량의 경우 이격거리 및 교량효과에 의해 평지에 비해 소음도가 작다. 그림 6은 방음벽구간에서 측정된 결과이며, 약 10dB(A)가량의 소음저감효과를 보이고 있다.

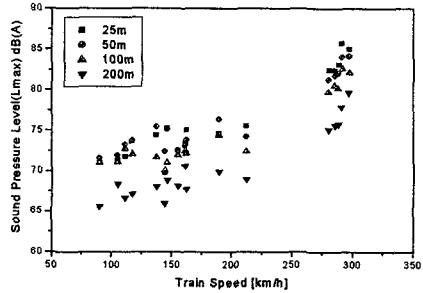


Fig. 2 L_{max} dependence on speed (viaduct)

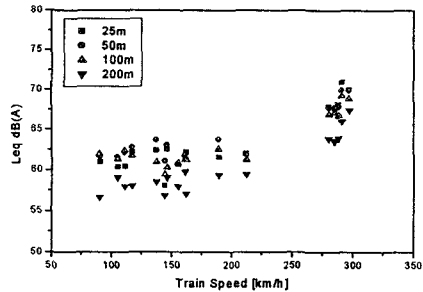


Fig. 3 Leq dependence on speed (viaduct)

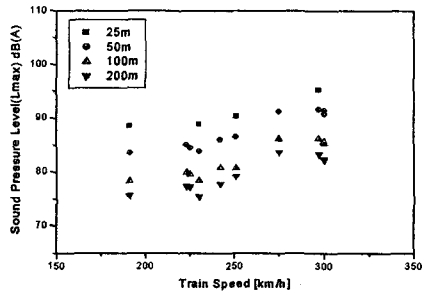


Fig. 4 L_{max} dependence on speed (free field)

6. 결론

고속철도의 운행제한조건들은 타 교통수단에 비하여 큰 장점을 가지고 있지만 소음 진동부분에 있어서는 아직까지 해결해야 할 많은 문제들이 남아 있다. 본 논문은 고속철도의 차량소음기준, 환경소음기준과 차실내외의 소음기준에 관련한 시험절차를 조사하였고, 시험절차에 의한 실측 및 결과를 분석하였다. 보다 신뢰성 있는 실측데이터 확보를 위해 향후 시험계측을 강화하고, 민원 예상지역의 방음성능 평가를 실시한다.

철도의 속도향상은 차량소음의 증가를 의미하며, 개통후 15년에는 환경기준이 강화되기 때문에 지속적인 저소음차량개발 및 방음시설의 성능개선이 시급히 요구된다.

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, rev, 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

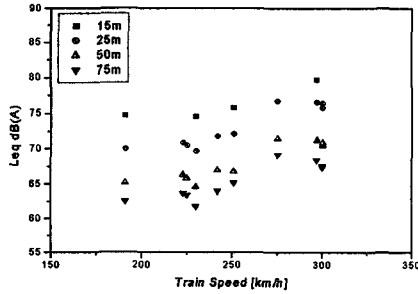


Fig. 5 L_{eq} dependence on speed (free field)

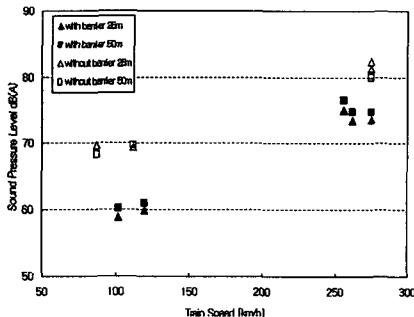


Fig. 6 SPL on speed (with and without noise barrier)

보다 신뢰성 있는 실측데이터 확보를 위해 향후 많은 계측이 계획되고 있으며, 이를 기초로 보다 정확한 소음예측식이 제안이 될 것이다. 참고로 그림 7은 KTX(Korea Train Express)의 운전실 소음 측정 사진이다.

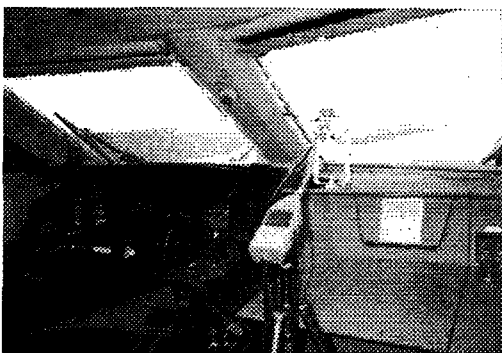


Fig. 7 Noise assessment of KTX in the power car cab