

# KTX 차량의 터널 통과 시 소음특성

## Interior noise of a KTX vehicle in a tunnel

최성훈\* · 김재철 · 이찬우 · 조준호

Sunghoon Choi, Jae-Chul Kim, Chan-Woo Lee and Jun-Ho Cho

**Key Words** : Interior Noise, High-speed Train, Tunnel.

### ABSTRACT

High-speed trains with the maximum speed of 300 km/h have started revenue services since April 2004. A large portion of the 'Kyung-Bu' line is comprised of tunnels or bridges, which may cause excessive noise in a vehicle. The vibration generated by the trains propagates into the structure of the tunnel and the vehicle and it can be radiated as noise inside the vehicle interior. This noise can usually be heard as low frequency structure-borne noise. Measurement of the noise and vibration inside the KTX vehicle confirmed that the noise comprises of frequencies below 250 Hz with a couple of broad peaks.

### 1. 서 론

지난 4월 개통한 고속전철(KTX)은 경부선과 호남선의 고속선과 기존선 구간에서 상업운행을 수행하고 있다. 대체적으로 성공적으로 평가되는 운행 중에도 몇몇 기술적인 문제점이 대두되고 있는데, 차량내의 소음 문제도 그 중 하나로 많은 민원의 대상이 되고 있다. 특히 KTX 차량이 터널을 통과할 때의 소음은 개활지에서의 소음레벨에 비하여 상대적으로 크기 때문에 승객들의 쾌적한 여행을 방해하는 요소가 되고 있다. 국내의 지리적인 환경 때문에 고속선에서 터널이 차지하는 부분이 많으며, 특히 경부선이 경우에는 전체 구간 412km 중에서 교량구간이 109km (27%), 그리고 터널 구간이 191km (46%)를 차지하기 때문에 대책 마련이 시급한 실정이다.

터널 내에서는 벽면에서의 반사 등에 의하여 차량 내부의 소음이 증가하기 때문에 실내소음에 대한 규정에서도 개활지와 비교하여 7dB 정도 증가하는 것으로 평가하고 있다. 표 1에는 KTX 차량과 외국의 고속철도 차량의 소음기준이 비교되어 있는데 KTX 차량의 실내소음 기준은 외국의 경우에 비해 엄격하다는 것을 알 수 있다. 그러나 KTX 차량의 실제 주행에 의한 측정결과 터널 내에서의 실내소음 증가 정도가 이를 상회하는 경우가 있으며, 또한 소음의 주파수 특성이 개활지와는 상이하게 나타

나 동일한 소음레벨 하에서도 승객이 느끼는 불편감(annoyance)은 다를 수 있기 때문에 터널 주행 시 차내 소음에 대한 정밀 분석이 필수적이다. 또한 독일의 ICE3와 같이 최근 개발된 차량의 경우에는 소음 기준이 상당히 엄격하게 바뀌는 추세이기 때문에 향후 국내에서 개발 예정인 고속 차량의 실내소음에 대한 검토도 필요하다.

표 1. 고속 차량의 실내소음 기준

고속열차	최고속도	객실소음[dB(A)]	
		개활지	터널
KTX	300 km/h	66	73
프랑스 TGV	300 km/h	66	71
일본 신간선	240 km/h	69	74
독일 ICE3	300km/h	64	69
미국 APTA	-	70	80

국내에 도입되는 고속전철은 20량 1편성으로 이루어져있으며, 동력차에 의해서 운행되는 동력집중방식으로 구성되어있기 때문에 동력장치에 의한 소음과 차륜과 레일의 접촉에 의한 소음이 주 소음원이다. 고속 주행 시 가장 큰 문제가 되는 소음은 전동음(rolling noise)이며 이는 레일과 차륜에 존재하는 미세한 요철에 인하여 발생하기 때문에 레일의 연마와 차륜의 삭정을 통하여 이를 저감한다. 차량이 곡선을 통과할 때 차륜의 플렌지와 레일의 측면이 마찰하면서 스켈소음(squeal noise)이 발생하는데 이는 수 kHz 이상의 고주파 소음으로 실내 소음에는 큰 영향을 주지 않는다. 이 외에도 고속 주행 시에는 공력소음의 기여도가 커지게 된다. 이러한 소음원은 차량의 운전실과 객차의 실내소음에 커다란 영향을 미쳐 차량의 소음문제를 유발시키기 때

\* 한국철도기술연구원 차량기계연구본부

E-mail : schoi@krti.re.kr

Tel : (031) 460-5209, Fax : (031) 460-5279

문에 설계단계에서부터 소음 저감을 고려하고 있다.

소음 저감을 목적으로 소음을 분류할 때에는 앞에서 기술한 바와 같이 소음원에 따라 분류하기도 하지만 소음이 전달되는 경로를 기준으로 분류하기도 한다. 철도차량의 실내소음의 경우에는 크게 공기전달음(air-borne noise)과 구조전달음(structure-borne noise)으로 나눌 수 있다. 공기전달음은 여러 원인에 의해 발생된 소음이 공기를 통해 전달되어 차체를 투과하거나 문이나 갱웨이(gangway) 등의 틈을 통해 실내로 전달되는 소음으로 200Hz 이상의 중-고주파 성분이 지배적이다<sup>1)</sup>. 반면에 구조전달음은 200Hz 이하의 저주파 성분이 지배적인데, 레일과 차륜의 상호작용 또는 동력장치에 의해 발생된 소음 또는 진동 성분이 철도차량의 보거나 차축 등의 구조물을 가진하고 이로부터 발생한 진동이 차체 구조물을 가진 하여 차량의 실내에 소음을 유발하는 것이다. 저주파 대역의 소음 성분의 경우에는 차체의 투과 손실에 의한 소음 저감 효과가 적으므로 이에 적절한 대책이 요구된다.

본 연구에서는 KTX 차량의 운행 중 실내소음 및 차량 하부 소음을 측정 하였고 터널 구간에서의 실내소음 특성을 개괄지 및 교량 구간에서의 결과와 비교 분석하였다. 특히 터널의 궤도 구조에 따른 결과의 차이점을 분석하고 소음증가의 원인을 고찰한다.

## 2. KTX 차내 소음 측정 결과

KTX 차량이 운행 중인 경부선 구간에는 40여개 이상의 터널이 있는데 그중 일부는 길이가 5km 이상인 장대 터널로, 이들 터널 내의 궤도는 유지보수의 편의를 위해 자갈도상(ballast track) 대신에 콘크리트 슬래브(slab)를 이용한 도상을 사용하고 있다. KTX 차량의 실내소음 측정을 위해 경부선 구간 중 광명~동대구간의 왕복운행 차량에 대하여 소음 측정을 수행하였다. 소음 측정은 동력실이 부착된 동력객차와 일반 객차에서 수행되었으며, 외부소음과의 비교 분석을 위해 차체하부와 대차하부에서도 소음을 측정 하였다. 소음측정용 마이크로폰은 차량의 중앙 위치에서 1.2m높이에 설치하였고, 차량의 속도는 대차 프레임에 설치한 속도 측정용 센서를 이용하여 측정하였다.

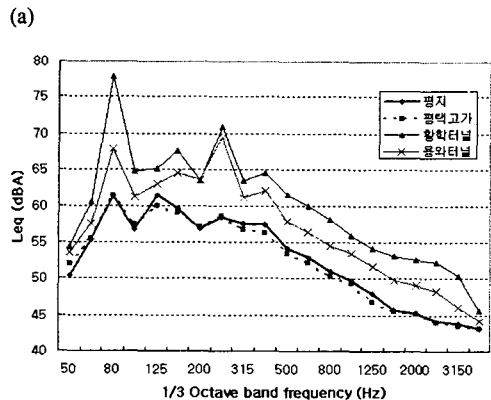
표 2는 경부 고속선 광명~동대구간 주행 시 일부 구간에서 측정된 객차 및 동력객차 내에서의 소음 과 차체 하부에서 측정된 소음레벨을 보여준다. 터널 내에서의 소음레벨과의 비교를 위하여 평지 구간과 교량 구간의 결과를 비교하였는데 교량구간은 평택 고가를 통과할 때의 측정값을 이용하였고 평지 구간은 하행선 서울기점 55~58km 구간의 측정값을 이용하였다. 고속차량의 실내소음 평가를 위한 측정은 완전한 개활지에서 수행해야하며 신뢰성 있는 결과를 얻기 위한 여러 가지 조건을 만족해야한다<sup>2)</sup>. 본 측정에서 선택한 평지 구간은 터널 및 교량에서의 실내소음과의 비교를

위해서 편의상 선택한 구간으로 이러한 조건을 모두 만족시키지 못하기 때문에 측정 결과가 표 1의 기준치를 초과한다. 황학터널은 길이가 9975m로 슬래브도상 구간이고 용와터널은 1760m의 길이로 자갈도상 구간이다. 그림 1과 2는 이 구간에서의 주파수 스펙트럼을 1/3 옥타브 밴드에서 보여주고 있다.

표 2. 경부선(하행) 구간에서의 실내 및 하부 소음레벨

구간	Leq (dBA)			평균속도 (km/h)
	객차	동력객차	차체하부	
평지	69	69	115	297
평택고가	69	70	121	296
황학터널	80	76	125	289
용와터널	75	74	123	297

측정 결과를 보면 평지와 교량에서의 실내소음레벨은 비슷하지만 하부소음의 경우는 교량이 평지 구간보다 6dB 정도 높다는 것을 알 수 있다. 평지에서 사용되는 장대레일과 달리 교량에서는 레일의 이음매가 있기 때문에 이로 인한 충격음이 발생하고 이와 함께 교량의 진동으로 인한 구조전달음이 발생하기 때문에 하부소음이 증가하는 것으로 보인다. 주파수분석 결과를 보면 250Hz 이하의 성분이 실내 소음에 큰 기여를 하는 것을 알 수 있다. 이는 일반적인 차량 구조물 경우 250Hz 이하에서 상대적으로 낮은 투과손실 값을 가지기 때문이다. 평지나 고가 구간에서는 동력소음 때문에 동력객차의 소음이 약간 크다는 것을 알 수 있는데 주파수 스펙트럼을 비교하면 특히 500Hz 이상의 고주파 성분이 동력실에서 두드러진다는 것을 확인할 수 있다. 터널 내에서는 63~80Hz의 저주파 소음이 크게 나타내며 이 현상은 슬래브 구조의 터널에서 두드러짐을 알 수 있다. 터널 벽면에서의 소음 반사로 인한 소음 증가와 함께 궤도 구조의 진동에 의한 구조음이 차내로 유입되어 전체적인 소음레벨이 증가하는 것으로 판단된다.



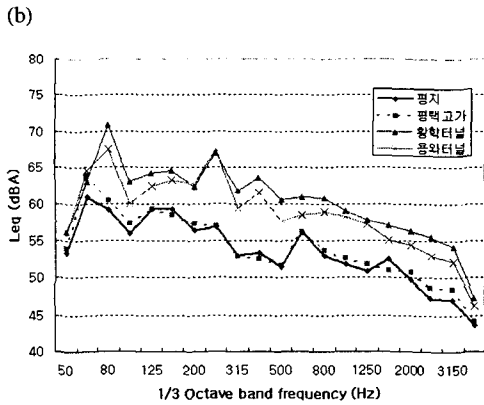


그림 1. 고속철도 차량의 실내소음 스펙트럼. (a) 객차, (b) 동력객차.

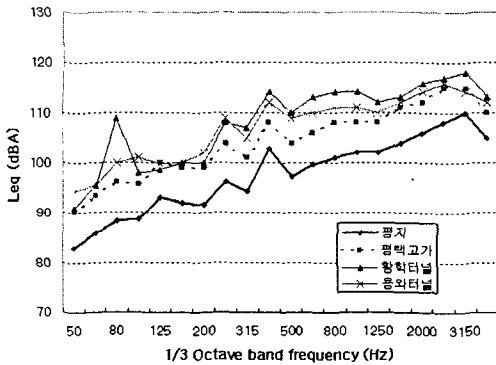


그림 2. 고속철도 차량의 하부소음 스펙트럼.

그림 2의 하부소음 측정 결과를 보면 평지에 비하여 교량과 터널을 지날 때 차량 하부의 소음이 전 주파수 영역에서 증가한다는 것을 알 수 있다. 평지와 교량 구간에서 하부소음의 차이는 6dB 인데 차량 실내소음의 차이는 크지 않은 반면 터널구간에서는 하부소음 차이는 8~10dB 인데 실내소음의 차이는 5~10dB가 되는 것을 알 수 있다. 교량 및 터널 구간에서는 구조진달음 및 충격음 등의 증가로 레일 및 하부구조물에서 방사되는 소음이 증가하는 것을 보여주며 이렇게 증가된 소음원이 터널 내에서는 벽면에서 반사되어 차량 내부로 전달된다는 것을 알 수 있다.

### 3. 고찰 및 결론

궤도 구조물(레일, 침목, 슬래브)에서의 진동은 차량 주행 시 차륜과 레일의 상호작용에 의하여 발생한다. 진동이 발생하는 원인으로는 바퀴 및 레일 표면의 마모 등에 의한

불균일성에 의하여 발생하는 것이 있고 바퀴가 레일을 통과 하면서 침목간격 등에 의하여 강성이 규칙적으로 변화하기 때문에 발생하는 것이 있다. 전자의 경우는 구름소음의 원인이 되는데 대부분의 경우 250Hz 이상의 주파수에 해당한다. 후자의 경우인 규칙적인 원인에 의하여 발생 가능한 진동의 주파수는 속도와 관계있으며 이를 계산하면 다음과 같다. 표에 나타난 주파수의 진동원이 차량 및 궤도구조를 가진하게 되는데 이는 차량 실내에서 측정된 소음의 원인 중 하나로 생각된다. 하지만 그림 1에서 확인할 수 있던 것처럼 실내소음을 지배하는 소음 성분은 63~80Hz로 침목 및 차륜에 의한 가진과는 정확히 일치하지는 않기 때문에 이러한 외부 가진과 차량의 진동 특성을 함께 고려해야 정확한 원인을 찾을 수 있을 것으로 판단된다.

표 3. 궤도 구조 진동원의 주파수

진동원		발생주파수 (300 km/h)
차륜 간격	3.0 m	27.8
대차 간격	18.7 m	4.5
침목 간격	0.625 m	133.3

다음으로 KTX 실내에서의 음향특성을 살펴보기 위해 수치해석 방법을 이용하여 실내 공간의 음향모드와 외부 가진에 대한 주파수 응답 특성을 구하였다. 먼저 실내 공간의 음향모드를 구하기 위해 아래 차량 단면의 유한요소 모델을 작성하고 음향 유한요소해석 방법으로 모드를 구하였다. 이 모델은 총 699개의 질점과 649개의 요소로 구성되어있다. 해석은 상용소프트웨어인 SYSNOISE를 이용하였고 차체 벽면의 경계조건으로 임피던스(2.6E+6kg/m<sup>2</sup>s) 조건을 주어 고유모드를 계산하였다. 경계조건의 영향을 고려하기 위해 임피던스 조건을 변화시키면서 계산을 해 본 결과 모드의 형상과 주파수에 큰 변화는 없었다. 본 해석은 KTX 차량의 2차원 단면에서의 정성적 음향특성을 살펴보기 위한 것이기 때문에 경계조건의 영향은 고려하지 않기로 한다.

그림 3에서는 KTX 차량의 처음 네 개의 2차원 음향모드를 도시하였다. 음향모드의 주파수는 각각 67.3, 79.4, 108.8 및 131.8Hz 이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 100Hz 이하의 저주파 영역에서 단면에 수평 방향과 수직 방향으로 음압 구배가 생기는 모드가 생긴다는 것을 알 수 있다. 차량의 3차원 모델에 대한 해석을 하면 길이방향으로의 모드가 관찰될 것으로 예상 되는데 이들 모드는 저주파 특성을 가지는데 60Hz 이하에 6~7개 정도의 모드가 형성될 것으로 예상된다. 차량의 외부에 가해지는 외력은 길이 방향으로 변화가 크지 않고 일정하거나 주기적인 경우가 많기 때문에 3차원 모드에 비하여 그림 3에 보인 단면 모드의 역할이 클 것으로 생각된다. 보다 정확한 해석을 위해서는 차내의 의자 등을 함께 모델링해야 하나 본 해석에서는 차내 공간의 정

성적인 음향 특성을 살펴보기 위해 내부 공간을 단순화 하였다. 의자 등을 포함하면 임피던스가 작아지는 효과가 있으나 내부 공간이 작아지기 때문에 주파수 특성이 약간 높아질 것으로 예상된다.

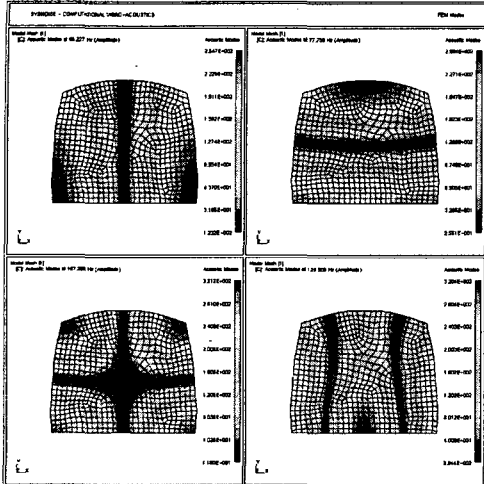


그림 3. KTX 차량의 실내 음향 모드.

터널 주행 시 실내소음이 증가되는 주요 원인은 1차적으로 발생한 소음이 터널 벽면으로부터 반사되어 차체를 투과하여 내부로 전달되는 것으로 볼 수 있으며 슬래브 궤도의 경우에는 구조적인 특성 때문에 구조전달음이 증가하여 실내소음을 증가 시키는 것으로 보인다. 특히 측벽으로부터의 투과음은 그림 3에서 보인 차량의 단면 좌우로 음압구배

가 생기는 모드를 가진 할 가능성이 있어 실내소음 증가에 중요한 역할을 하는 것으로 보인다. 실제 주행 중 측정 결과에서도 차량의 중앙과 창가 쪽 좌석에서의 음압레벨 차이가 상당한 것으로 밝혀졌다.

현재까지는 차량의 실내소음과 하부소음의 측정 결과만을 가지고 소음 증가의 원인을 추정했기 때문에 정확한 원인을 규명하기에는 한계가 있다. 보다 정확한 원인 규명을 위해서는 차량 실내 및 궤도상의 각 부위에서의 진동측정 결과와 함께 실내소음의 상호 연관성을 파악하여야 할 것이다. 터널 내에서 고속 차량의 실내소음 저감을 위해서는 우선 차량 측면에서 보면 차량 구조물의 저주파 투과손실 향상 방안 및 차체 벽의 진동 저감 방안을 마련하는 것이 있고 궤도구조 측면에서는 터널 벽면의 반사저감을 위한 대책과 함께 유지보수의 편의를 위해 도입한 슬래브궤도의 진동 저감 및 차량과의 인터페이스를 면밀히 검토하는 것이 필요할 것이다.

### 참 고 문 헌

- (1) J. G. Walker and M. F. K. Chan, "Human response to structurally radiated noise due to underground railway operations," *Journal of Sound and Vibration*, 193(1) 49-63 (1996).
- (2) 최성훈, 김재철, 이찬우 문경호, "한국형 고속철도 차량의 운행조건에 따른 차내 소음 분석" 2003년 철도학회 추계 학술대회는문집 (2003).