

고속열차의 차간 공간에 의해 발생하는 실내소음 특성 분석

Noise generated from the inter-coach spacing of a high-speed train

최성훈† · 박준홍* · 박찬경**

Sunghoon Choi, Junhong Park and Chan-Kyung Park

Key Words : interior noise(실내소음), high-speed train(고속철도), aeroacoustic noise(공력소음)

ABSTRACT

When fluid at high speed flows over an open cavity, large acoustic pressure fields inside the cavity are produced by fluid/structure interactions at the downstream end of the cavity. The inter-coach spacing is one of the most important sources of the aero-acoustic noise of a high-speed train. This noise can usually be heard as low frequency structure-borne noise inside the train. In this study experiments were performed in order to investigate the effects of mud-flap length on the aeroacoustic noise generation inside high-speed trains. Results of the measurement confirmed that the characteristics of the noise generated from the inter-coach spacing are strongly dependent on the size of the gap. Also investigated are the characteristics of the turbulent flow after the inter-coach spacing and consequent generation of the aeroacoustic noise inside the cabin.

1. 서 론

고속 차량의 실내 소음에 영향을 주는 인자로는 휠-레일의 상호 작용에 의한 진동음과 동력장치로부터의 소음, 구조 진동에 기인한 구조음, 그리고 공력소음 등이 있다. 이러한 요인들은 서로 복합적으로 작용하기 때문에 열차의 운행 중에 나타나는 실내소음 특성을 명확히 설명 하는 것은 쉽지 않다. 열차의 속도가 300km/h에 이르면 공력소음의 영향이 급격히 증가 하게 되는데, 고속열차에서 공력소음은 차량의 전두부, 판도그래프, 차간 공간 등에서 주로 발생한다. 유체가 구조물의 표면을 따라 흐르다 불연속적인 지점을 만나면 유동에 불안정이 생기고 박리가 생기게 되는데 이때 발생한 난류가 유동의 하부에서 다시 구조물을 가진 하면서 실내소음에 영향을 미치게 된다^{1,2}. 고속열차에서는 차량 사이의 연결 공간 등과 같은 불연속면에서 차량의 주위를 따라

흐르는 유동이 변화를 일으켜 공력소음이 발생하게 된다. 이러한 공력소음은 특히 고속주행 시 실내소음에 큰 영향을 주게 된다.

KTX가 상업운행을 시작하면서 차내 소음, 특히 터널을 통과하는 동안 발생하는 과도한 소음에 대한 민원이 빈번히 발생하여 이를 저감하기 위한 연구가 진행되고 있다. 고속열차가 300km/h의 속도로 터널을 통과하는 동안에는 개활지에 비하여 실내소음이 약 7dB 이상 증가한다³. KTX의 경우에는 저주파 대역의 성분이 크게 나타나고 있는데 특히 슬래브 도상 궤도에서 이 성분이 큰 영향을 미쳐 승차감에 악영향을 주고 있다. 다양한 측정을 통하여 차량 사이의 공간에서 발생하는 공력소음이 실내소음에 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있었다. 차량 사이의 공간에는 여러 가지 부속품을 보호하기 위한 머드플랩이 설치되어 있는데, 이 머드플랩 사이의 간격이 공력소음 발생에 영향을 주고 있다. 따라서 고속열차의 실내소음 대책 중의 하나로 머드플랩의 크기를 변경하는 방안이 제안되었다.

본 연구에서는 먼저 고속열차의 개활지 및 터널에서의 실내소음 특성 측정결과를 비교하였다. 차량의 외부에서 발생하는 공력소음은 차체 또는 창문을 통해 실내로 유입되기 때문에 차체의 진동과 실내소음의 상관관

† 한국철도기술연구원 고속철도사업단
schoi@krrri.re.kr
Tel: (031)460-5200, Fax: (031)460-5649

* 한양대학교 기계공학과

** 한국철도기술연구원 고속철도사업단

계도 살펴보았다. 다음으로는 차간 연결공간에 설치한 머드플랩의 폭을 변경 하였을 때의 실내소음특성 변화를 측정, 비교하였다.

2. 고속열차의 실내소음 특성

고속철도차량의 실내소음 특성 측정을 위해 먼저 경부선을 주행하는 KTX 차량에 대하여 소음 측정을 수행하였다. 소음 측정은 일반 객차와 차체하부에서 수행되었다. 실내소음 측정을 위한 마이크로폰은 차량의 중앙 위치에서 1.2m높이에 설치하였고, 차량의 속도는 대차 프레임에 설치한 속도 측정용 센서를 이용하여 측정하였다. KTX 차량이 운행 중인 경부선 구간에는 40여개 이상의 터널이 있는데 그중 일부 장대 터널의 궤도는 유지보수의 편의를 위해 자갈도상(ballast track) 대신에 콘크리트 슬라브를 적용한 도상을 사용하고 있다. 실내소음 특성은 궤도의 특성파도 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 측정된 결과를 개활지, 교량구간, 그리고 자갈도상 및 슬라브 궤도에 대하여 각각 분석하였다. 소음 신호는 20.48kHz의 샘플링 주파수로 받았고 다음 식에 의하여 등가소음도를 계산하였다.

$$L_{eq,T} = 20 \log_{10} \left[\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left(\frac{p_A(t)}{p_0} \right) dt \right] \quad (1)$$

이 식에서 $p_0 = 2 \times 10^{-5} Pa$ 이며, T는 등가소음을 구하기 위한 시간이다. 측정은 국제규격에⁴ 따라 수행되었다.

그림 1, 2의 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 구조음이 발생하기 때문에 하부소음이 증가하는 것으로 보인다. 주파수분석 결과를 보면 250Hz 이하의 성분이 실내 소음에 큰 기여를 하는 것을 알 수 있다. 이는 일반적인 차량구조물 경우 250Hz 이하에서 상대적으로 낮은 투과손실 값을 가지기 때문이다. 터널 내에서는 63~80Hz의 저주파 소음이 크게 나타나며 이 현상은 슬라브 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 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 구조음 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.

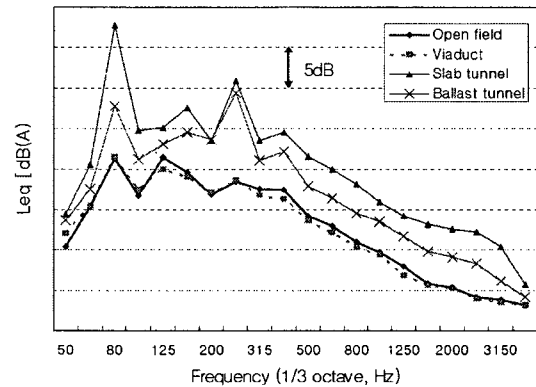


그림 1. 고속철도차량의 객실소음 스펙트럼

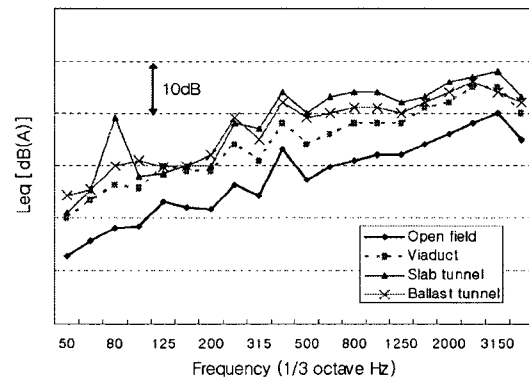


그림 2. 고속철도차량의 차량하부소음 스펙트럼

다양한 원인으로부터 발생한 고속열차의 소음은 공기 전달음의 형태로 실내로 유입되거나 차체의 진동을 통한 구조음의 형태로 실내소음에 영향을 준다. 차량의 외부에서 발생한 공력소음의 영향은 차체의 투과손실 특성에 의하여 결정된다. 차체의 특성을 보면 일반적으로 저주파 대역에서의 투과손실이 고주파대역에서 보다 상대적으로 작기 때문에⁵ 그림 2와 같이 차량 외부의 소음이 고주파에서 크더라도 실내소음은 그림 1과 같이 저주파 성분이 지배적이 된다. 특히 터널의 경우에는 개활지에 비하여 터널벽면으로부터의 반사로 인하여 차체의 천정 및 측면과 창문으로의 소음 투과가 큰 영향을 미

치게 된다. KTX에서 측정된 결과를 보면 객실의 창문 쪽 좌석에서의 소음이 중앙보다 훨씬 크게 측정되고 있고³ 이에 따라 특히 창문의 투과 손실이 실내소음에 큰 영향을 주는 것으로 예상할 수 있다.

그림 3에서는 차체 측면의 진동과 실내소음의 상관관계를 알아보기 위해 객실 중앙에서 측정된 실내소음과 창문의 중앙 및 창문에 인접한 차체에서 측정된 가속도 사이의 상관함수를 보여주고 있다. 측면의 진동은 실내소음과 상당히 밀접한 관계를 가진다는 것을 알 수 있는데 특히 실내소음은 차체의 진동보다 창문의 진동에 더 큰 연관성이 있다는 것을 알 수 있다.

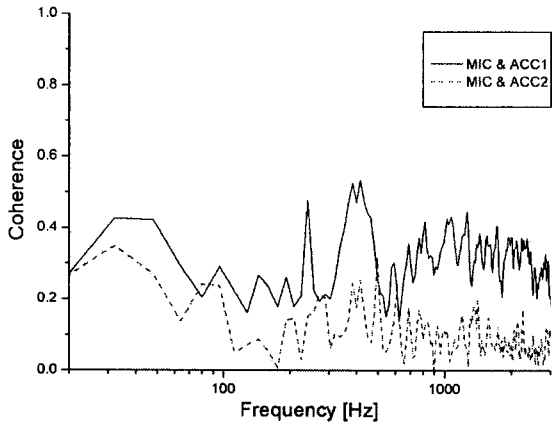


그림 3. 실내소음과 창문진동(ACC1) 및 차체진동(ACC2)의 상관함수

3. 머드플랩 폭 변화에 따른 실내소음 변화

KTX 및 한국형고속열차의 객차 사이에는 2차 현가장치를 포함하여 각종 기계장치 및 전기장치의 부품 및 배선들이 위치하고 있으며 이 장치들을 오염 등으로부터 보호하기 위해 그림 4와 같은 머드플랩을 장착하고 있다. 차량이 고속 주행할 때 차체를 따라 흐르는 유동이 이 공간을 만나면 머드플랩 및 차량 사이의 공간에 의해서 난류가 발생하게 되는데 이 때 발생하는 유동소음의 크기는 이 공간의 크기와 밀접하게 연관될 것으로 예상할 수 있다. 공간의 크기에 의한 객실소음 변화를 평가하기 위하여 그림 4와 같이 폭이 다른 머드플랩을 장착하여 시험을 수행하였다. KTX 열차는 양쪽 운전실과 18량의 객실 등 총 20량이 1편성을 구성하는데 본 시험을 위해서 10호차부터 18호차까지의 머드플랩을 기존의 폭 80mm의 머드플랩을 200mm로 교체하였다. KTX 차량의 실내소음은 차량의 속도에 비례하는 경향을 보이거나 이 외에도 차량의 가속 정도, 궤도의 경사,

차량의 종류 및 측정 위치에 따라 편차를 보인다. 특히 고속차량의 편성에 따라라도 소음레벨에 편차가 있으며 동일 차량에 대해서도 차륜의 마모 정도에 따라 차내 소음에 변화가 있기 때문에 측정 결과를 비교하는 경우에 유의해야 한다³. 따라서 최대한 정확한 비교를 위하여 대칭 위치인 8호차와 11호차 객실에서 측정되었으며 경우고속선 구간을 왕복하면서 시험을 수행하였다.

그림 5에서는 KTX 차량이 경부선 상행선을 운행하면서 몇 개의 터널 구간을 통과하면서 측정된 실내소음의 시간이력을 보여준다. 대부분의 구간 정도의 차이는 있으나 머드플랩 변경으로 11호차의 소음레벨이 상당히 감소한다는 것을 확인할 수 있었다. 소음저감효과는 도상에 관계없이 나타나며, 터널보다는 작지만 개활지에서도 나타나는 것을 알 수 있다. 그림 6에서는 실내소음 스펙트럼을 보여준다. 머드플랩 형상 변경으로 전 주파수 대역에서 소음이 저감하는 것을 확인할 수 있는데 특히 터널 내 소음의 주요 성분인 중심주파수 100Hz 이하의 성분이 큰 폭으로 감소하는 것을 알 수 있다.

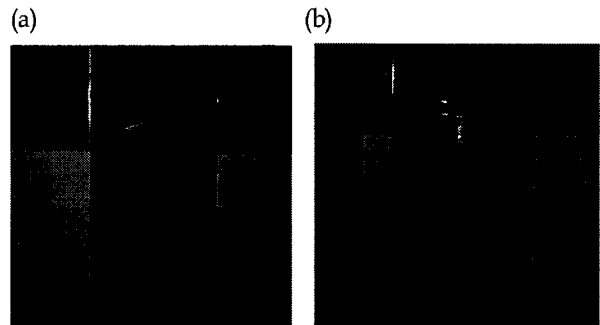


그림 4. KTX 차량의 머드플랩; (a) 폭 80mm, (b) 폭 200mm.

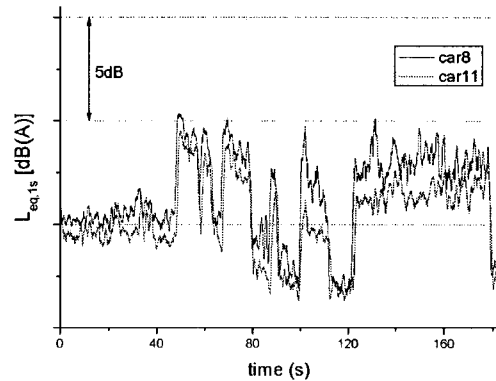


그림 5. 경부선 상행 (KP123~112) 주행 시(270km/h ~ 300km/h)의 실내소음

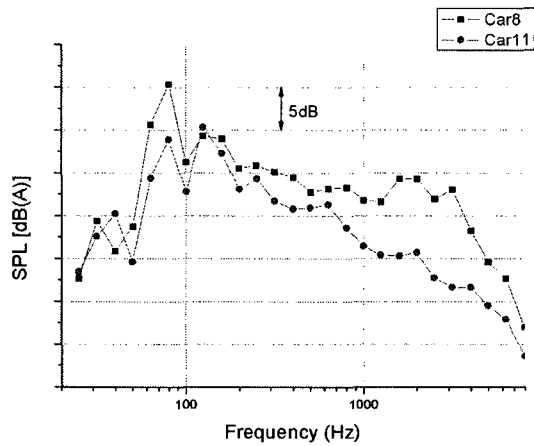


그림 6. 터널 주행 시 머드플랩 변경에 따른 실내소음 스펙트럼 변화

4. 결론

고속열차의 소음을 분석해본 결과 저주파 성분이 실내소음에 큰 기여를 하고 있으며 고속주행 시에는 공력소음, 특히 차간 공간에서 발생하는 난류에 의한 소음이 실내소음에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. 차간 공간에서 발생하는 공력소음은 공간의 크기와 밀접한 관계를 가지며 고속열차의 머드플랩의 폭을 변경함으로써 실내소음이 감소하는 것을 확인하였다. 실내소음과 차체 및 창문의 진동과의 상관함수를 측정하여 공력소음이 주로 창문을 통해 실내로 전달되는 것을 예측할 수 있었다. 향후 차량 외부에서의 소음 측정 및 머드플랩 크기 변화에 대한 소음특성 측정을 통해 차간공간에서 발생하는 공력소음의 발생 메커니즘 및 특성을 밝힐 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 고속철도기술개발사업의 “고속철도시스템 신뢰성 운영효율화 기술개발”과제의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

(1) Han, F., Mongeau L. G., and Bernhard, R. J., 2001, "A model for the vibro-acoustic response of

plates excited by complex flows," Journal of Sound and Vibration, 245(5), 901-926.

(2) Wu, S. F., Wu, G., Puskarz, M. M., and Gleason, M. E., 1997, "Noise transmission through a vehicle side window due to turbulent boundary layer excitation," Journal of Vibration and Acoustics, 119, 557-562.

(3) 최성훈 등, 2004, "KTX 차량의 터널 통과 시 소음특성", 추계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회.

(4) ISO 3381:1976, Acoustics - Measurement of noise inside rail-bound vehicles.

(5) 박철희 등, 1998, 고속전철 진동소음해석 및 저감 기술개발 보고서, 건설교통부.