

# 고속열차의 차간 공간에서 발생하는 공력소음의 특성

## Characteristics of the aero-acoustic noise generated from the inter-coach spacing of a high-speed train

최성훈\*      박준홍\*\*      박찬경\*\*\*

Choi, Sunghoon   Park, Junhong   Park, Chan Kyung

---

### ABSTRACT

The inter-coach spacing is one of the most important sources of the aero-acoustic noise of a high-speed train. When fluid at high speed flows over an open cavity, such as the inter-coach spacing, large acoustic pressure fields inside the cavity are produced by fluid/structure interactions at the downstream end of the cavity. In this study experiments were performed to investigate the characteristics the aero-acoustic noise generation from the inter-coach spacing of a high-speed train. Results of the measurement confirmed that the noise generated from the gap between mud-flaps are strongly dependent on the size of the gap.

---

### 1. 서론

고속 차량의 실내 소음에 영향을 주는 요인으로는 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, 판토그래프, 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<sup>1,2</sup>. 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 증가한다<sup>3</sup>. 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

---

\* 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원, 고속철도사업단

E-mail : schoi@krri.re.kr

TEL : (031)460-5209 FAX : (031)460-5649

\*\* 한양대학교, 기계공학부

\*\*\* 한국철도기술연구원, 고속철도사업단

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 차간 연결공간에 설치한 머드플랩의 폭을 변경 하였을 때의 고속열차에서의 실내소음 변화를 측정, 비교하였다. 다음으로는 차간 공간에서 발생하는 공력소음의 특성을 규명하기 위하여 풍동장치를 이용한 실험을 수행하였다.

## 2. 고속열차의 실내소음 특성

KTX 및 한국형고속열차의 객차 사이에는 2차 현가장치를 포함하여 각종 기계장치 및 전기장치의 부품 및 배선들이 위치하고 있으며 이 장치들을 오염 등으로부터 보호하기 위해 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 1과 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 따라서도 소음레벨에 편차가 있으며 동일 차량에 대해서도 차륜의 마모 정도에 따라 차내 소음에 변화가 있기 때문에 측정 결과를 비교하는 경우에 유의해야 한다<sup>3</sup>. 따라서 최대한 정확한 비교를 위하여 대칭 위치인 8호차와 11호차 객실에서 측정 되었으며 경부고속선 구간을 왕복하면서 시험을 수행하였다. 그림 2에서는 KTX 차량이 경부선 상행선을 운행하면서 몇 개의 터널 구간을 통과하면서 측정한 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 3에서는 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.

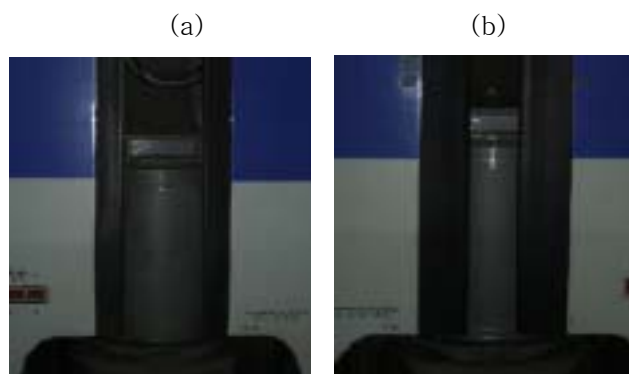


그림 1. KTX 차량의 머드플랩;  
(a) 폭 80mm, (b) 폭 200mm.

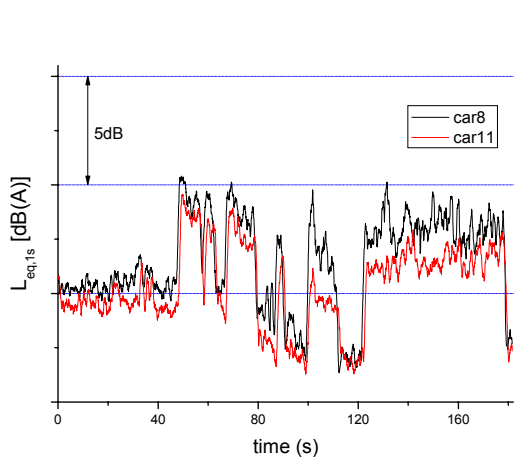


그림 2. 경부선 상행 (KP123~112) 주행 시(270km/h ~ 300km/h)의 실내소음

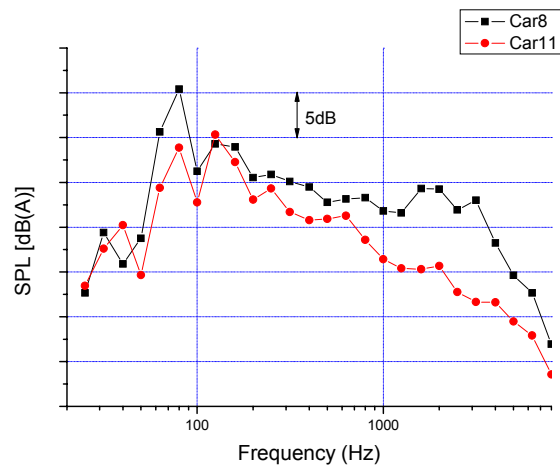


그림 3. 터널 주행 시 머드플랩 변경에 따른 실내소음 스펙트럼 변화

### 3. 공력소음 측정을 위한 풍동 실험

고속열차에 이용되는 실제 머드플랩과 차간 공간에 대한 모델을 제작하여 실험실 풍동 내에 실제 주행 조건을 구현하였다. 풍동 실험 장치는 한양대학교 기계공학부의 중형 아음속 개회로 흡입식 풍동 장치를 이용하였고, FFT 분석기와 마이크로폰, 기체 액주계, 유속 측정 튜브를 이용하여 소음레벨과 유속을 측정하였다. 이 풍동 실험에서 사용한 머드플랩은 그림 4와 같이 실제 고속철에 적용되고 있는 머드플랩을 사용하였고 객차와 객차 사이의 차간 공간을 아크릴 박스로 제작하였다. 머드플랩과 머드플랩의 간격을 조정할 수 있고 차간공간의 형상 및 크기와 최대한 비슷하도록 구성하였다. 머드플랩 간격을 변경하면서 그 영향으로 발생하는 난류의 풍속별 표면 압력과 blocked pressure 를 머드플랩 뒤쪽에 설치한 여섯 개의 마이크로폰(B&K Type 4951)으로 이루어진 마이크로폰 어레이를 이용하여 측정하였다.

그림 5에서는 머드플랩 폭의 변화에 대한 음압레벨 변화를 비교하였다. 시속 180 km 에 대하여 머드플랩 폭의 길이가 2cm, 6cm, 20 cm, 30 cm 의 경우에 대한 측정을 하였다. 그 결과, 머드플랩의 폭이 증가하면 음압레벨은 높아지고 머드플랩의 폭이 줄어들면 낮아지는 것을 알 수 있다. 측정 시 머드플랩의 간격이 30 cm 일 때는 음압레벨이 크게 나타나며 cavity box 의 진동이 강하게 발생하였다. cavity 에 의한 유동은 소음을 유발하고 머드플랩의 폭 변화에 따라 영향을 받았다.

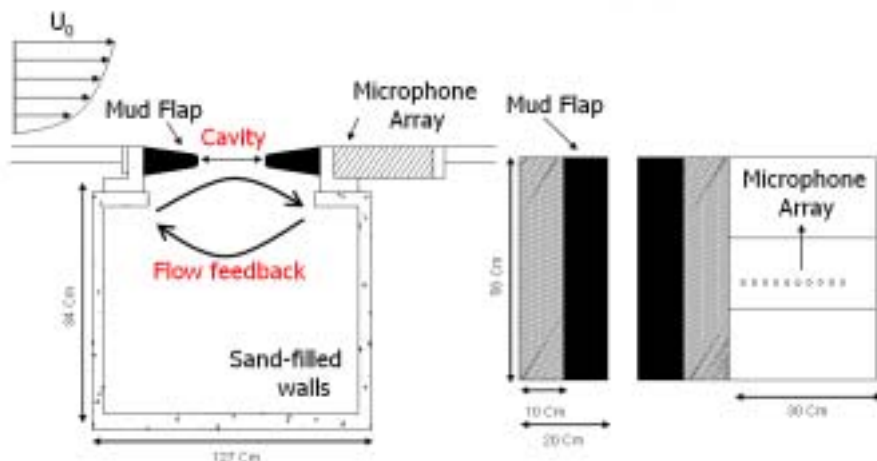


그림 4 풍동시험 장치와 머드플랩 모델

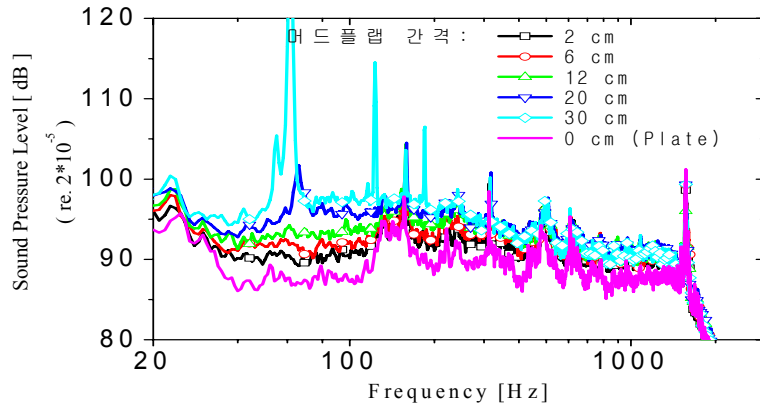


그림 5 머드플랩 간격 변화에 따른 blocked pressure 변화

머드플랩의 폭에 따른 음압레벨이 특히 저주파영역에서 크게 변화하였다. 그림 5에서 머드플랩의 간격이 큰 경우에는 간격이 좁을 때는 없었던 몇 개의 피크가 발생하는 것을 알 수 있다. 이 피크는 유동 피드백 현상으로 설명할 수 있다. 일정하게 흐르던 유동이 머드플랩과 cavity의 앞쪽 모서리를 지나면서 박리되어 생긴 경미한 교란이 하류쪽으로 전달되면서 뒤쪽 모서리에 충돌하게 되어 음파를 발생시키고 이 음파가 상류 쪽으로 전파되어 앞쪽 모서리에 부딪혀 또 다른 교란을 일으키게 되는 현상을 유동 피드백 현상(flow feedback)이라고 하고, 실제 풍동 실험에서 이 현상에 의해 머드플랩 모델이 심하게 진동하는 것을 발견하였다. 음향 피드백 메커니즘에 근거하여 유도한 cavity 내부의 진동 주파수는 실험식인 Rossiter's equation에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{L}{U_c} + \frac{L}{c} = \frac{n - \beta}{f_n}, n = 1, 2, 3 \dots \quad (1)$$

여기서,  $L$  은 cavity 의 길이,  $U_c$  는 대류속도(convection velocity),  $c$  는 음속,  $\beta$ 는 위상지연(phase lag)이며 실험값으로 알려진 0.25 를 사용하였다. Rossiter's equation 에서 사용된 대류속도는 머드플랩 모델에 설치된 마이크로폰 어레이 중 두개의 마이크로폰 사이에서 측정된 크로스 스펙트럼(cross-spectrum)의 위상 차이에 의해 구해졌다. 표 1 에서 180 km/h 일 때 머드플랩의 폭 30cm 에 대한 풍동 실험 결과와 위에서 언급한 Rossiter's equation 에 의해 구한 이론값을 비교하였는데, 전체적으로 실험값과 이론값은 유사하며 특히 1차 모드에서 비교적 정확한 주파수를 예측하는 것을 알 수 있다.

표 1. Measured and predicted tonal frequencies

실험치	63 Hz	123 Hz	185 Hz	242 Hz
이론치	65 Hz	151 Hz	237 Hz	324 Hz

#### 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. 공력소음 발생 메커니즘 해석을 위해 cavity 를 지난 후 발생하는 난류에 의한 blocked pressure 의 측정을 수행하였다. 이를 위해 고속철에 이용되는 실제

머드플랩과 차간 공간에 대한 모델을 제작하여 풍동에 설치하고 실제 주행조건을 구현하였다. 풍동 실험을 이용하여 머드플랩의 간격이 blocked pressure 발생에 미치는 영향 및 압력이 비정상적으로 커지는 메커니즘을 실험을 통해 분석하였다. 실험을 통하여 유동 피드백에 의해 음압이 특정주파수에서 크게 발생하는 현상을 관측하였다. 이 현상에 의해 터널 안에서 내부 소음 발생에 크게 기여할 것으로 해석이 가능하다. 머드플랩 사이 간격이 작을수록 유동 피드백 현상은 높은 주파수에서 발생하며 크기는 작아졌다.

## 후기

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

## 참고문헌

- (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.