

# 한국형고속열차의 외부 발생 소음특성 규명을 위한 시험

## Experimental examination of noise generation from exterior of the HSR-350x

최성훈\*                  박준홍\*\*                  김영기\*\*\*                  고효인\*\*\*\*  
Choi, Sunhoon          Park, Junhong          Kim, Youngkey          Koh, Hyo-In

---

### ABSTRACT

Aerodynamically generated noise is significant when the train speed exceeds 250km/h. Experiments were performed in order to investigate the characteristics of aerodynamic noise sources generated from exterior of the HSR-350x, especially from the inter-coach spacing. Measurements of both the inside and outside of the cabin are carried out to investigate the characteristics of the noise. Effect of the size of the gap has been investigated through an wind tunnel test and it has been found that the low frequency noise is strongly dependent on the size of gap. Also performed is an array measurement to locate different noise sources from the high-speed train. Spectral characteristics of exterior noise sources have been examined through these experiments.

---

### 1. 서론

고속철도 차량의 주요 소음원으로는 휠-레일의 상호 작용에 의한 진동음과 동력장치로부터의 소음, 구조 진동에 기인한 구조음, 그리고 공력소음 등이 있다. 이러한 요인들에 의한 소음의 크기 및 기여 정도는 차량의 속도에 따라 달라지는데 열차의 속도가 300km/h에 이르면 공력소음의 영향이 급격히 증가하게 된다. 고속열차에서 발생하는 공력소음으로는 판토그래프 등에 의한 vortex shedding으로부터 발생하는 소음, 차간 공간의 cavity 가 유발하는 난류 유동장에 의한 소음, 급격한 표면 변화에 의해 유발되는 유동 박리 현상에 의한 소음 등이 있다. 이러한 원인들에 의해 발생하는 소음은 방사되어 선로 주위에서 외부소음으로 영향을 주는 한편 이때 발생한 난류가 유동의 하부에서 다시 차체 등을 가진 하여 실내소음에 영향을 준다<sup>1,2</sup>. 특히 차량 사이의 연결 공간이나 대차 주위 등과 같은 불연속면에서 차량의 주위를 따라 흐르는 유동이 변화를 일으켜 공력소음이 발생하게 된다. 이러한 공력소음의 예측을 위해 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 이용한 방법이 사용되지만 해석 시에 많은 가정들이 사용되기 때문에 반드시 실험을 통한 검증은 필요로 한다<sup>3</sup>. 특히 차량 사이의 공간에는 여러 가지 부속품을 보호하기 위한 머드플랩(mudflap)이 설치되어 있는데 이 머드플랩 사이의 간격이 공력소음 발생에 영향을 주고 있다. 따라서 고속열차의 실내소음 대책 중 하나로 머드플랩의 크기를 변경하는 방안이 제안되었다<sup>4</sup>.

본 논문은 고속열차의 외부에서 발생하는 소음의 특성을 규명하기 위한 시험과 그 결과에 대하여 다룬다. 먼저 차간 공간에서 발생하는 소음이 실내소음에 미치는 영향에 다루고, 이 소음의 발생원인과 특성을 규명하기 위하여 수행한 풍동 시험을 소개한다. 이와 함께 고속열차가 300km/h로 주행하면서 발생하는 소음원의 위치와 주파수 특성을 규명하기 위해 수행한 마이크로폰어레이 측정 시험 결과를 정리한다.

---

\* 한국철도기술연구원, 고속철도사업단, 정회원

E-mail : schoi@krri.re.kr

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

\*\* 한양대학교, 기계공학부

\*\*\* (주)에스엠인스트루먼트

\*\*\*\* 한국철도기술연구원, 차량시스템안전연구본부

## 2. 고속열차 머드플랩 변경에 따른 실내소음 변화

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.

한국형고속열차에서의 머드플랩 변경에 따른 영향을 측정하기 한 객실의 양 끝에 차간공간에 부착되어있는 머드플랩을 기존의 머드플랩보다 넓은 것으로 교체하고 변경 전과 후에 객실소음을 측정하였다. 측정된 등가소음 값을 5초 단위로 평균하여 속도에 따른 실내소음 변화를 도시하였다. 광명-동대구 구간의 터널과 개활지 구간에 대하여 속도에 따른 실내소음 레벨을 그림 2~3에 도시하였다. 실내소음 수준을 속도에 대해서만 비교하였지만 측정이 동시에 이루어진 것이 아니라 다른 날 이루어져 있기 때문에 동일 속도에서도 가속 정도, 외부 기후, 차륜 마모 상태 등의 영향은 본 결과에서 고려되지는 않았다. 측정 결과를 보면 머드플랩의 변경에 의한 효과는 대체로 1dB(A) 이하라는 것을 알 수 있다. 소음 측정의 특성상 여러 변수가 많기 때문에 여기서 보여준 제한된 시험으로 보여준 1dB(A) 차이로는 머드플랩 변경으로 한국형고속열차의 실내소음을 저감시킬 수 있다고 말하기는 힘들다.

최근 연구 결과를 보면 KTX에서는 머드플랩의 변경으로 인지할 만한 실내소음 저감 효과를 얻은 것으로 알려졌다<sup>4</sup>. 위와 같이 머드플랩의 영향이 한국형고속열차에서 상대적으로 적은 것은 차체의 특성 때문으로 유추할 수 있다. 한국형고속열차는 차체 경량화를 위해 KTX 차량의 마일드 스틸 대신 알루미늄 압출재를 사용하였고 소음 및 진동 저감을 위한 여러 가지 방안을 적용하였다. 차체 재질뿐만 아니라 창문의 두께가 증가했기 때문에 창문을 통해 외부로부터 전달되는 소음을 저감에도 영향을 줄 수 있다. 즉 차량의 외부로부터 발생하는 소음이 차체의 투과손실 차이 때문에 실내에 영향을 주는 정도가 다른 것이다.

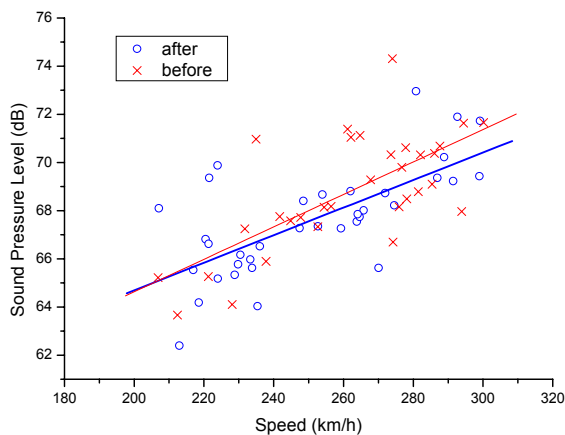


그림 2. 터널 구간에서의 한국형고속열차 머드플랩 변경 전후 실내소음 비교

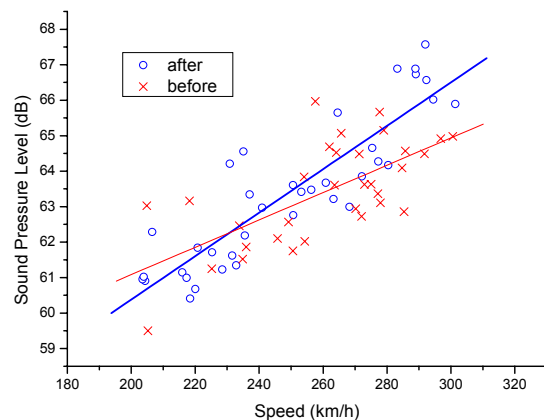


그림 3. 개활지 구간에서의 한국형고속열차 머드플랩 변경 전후 실내소음 비교

## 3. 공력소음 측정을 위한 풍동 실험

고속열차의 머드플랩 폭 변화에 의한 소음 발생 특성 규명을 위하여 실제 머드플랩과 차간 공간에 대한 모델을 제작하여 풍동 내에 실제 주행 조건을 구현하였다. 풍동 실험 장치로는 아음속 개회로 흡입식 풍동 장치를 이용하였고, FFT 분석기와 마이크로폰, 기체 액주계, 유속 측정 튜브를 이용하여 소음레벨과 유속

을 측정하였다. 이 풍동 실험에서 사용한 머드플랩은 그림 4와 같이 실제 고속열차에 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 여섯 개의 마이크로폰(B&K Type 4951)을 설치하여 측정하였다.

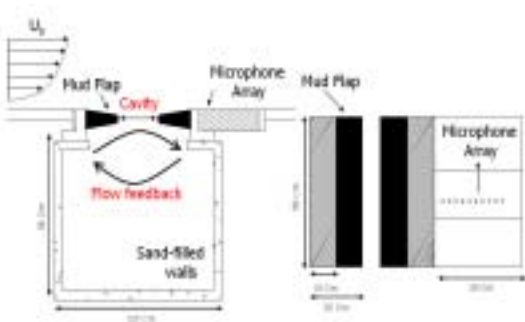


그림 4. 풍동시험 장치와 머드플랩 모델

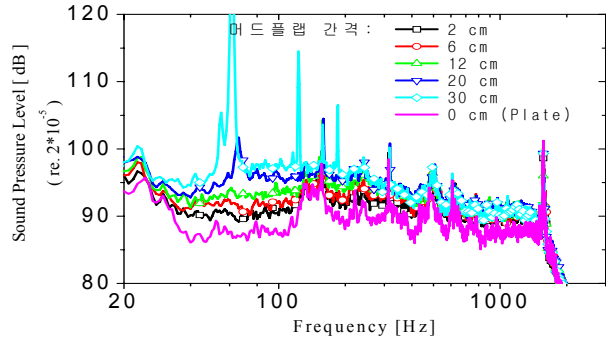


그림 5. 머드플랩 간격에 따른 blocked pressure 변화

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.

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 하류 쪽으로 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.

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

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. 유속이 180 km/h이고 머드플랩의 폭이 30cm일 때 Rossiter's equation 에 의해 구한 이론값은 65Hz로 풍동 실험 결과인 63Hz와 유사하다.

#### 4. 마이크로폰어레이를 이용한 소음원 측정 시험

고속열차의 외부에서 발생하는 소음원 측정을 위한 시험에 사용된 마이크로폰 어레이(Microphone Array)는 방사형 어레이로 48개의 마이크로폰을 장착하였다. 그림 6은 실험에 사용된 방사형 어레이와 시험 장면을 보여준다. 어레이의 직경은 2.4m이고 마이크로폰의 간격은 0.1~0.2m의 간격을 유지하고 있으며 안쪽의 간격은 넓고 바깥쪽은 좁다. 마이크로폰은 BSWA사의 1/4인치(MPA416)를 이용하였다. 측정은

National Instruments사의 PXI(DAQ 보드 : PXI-4472, 제어기 : PXI-8187)를 이용하였고 샘플링 주파수는 16kHz 이며 3.4Hz ~7.3kHz의 대역 통과 필터를 적용하였다. 어레이는 선로로부터 5m 떨어진 곳에 설치되었고 어레이 중심의 높이는 선로를 기준으로 약 1.6m ~ 2.0m가 되도록 하였다. 고속열차의 주행 속도는 선로변에 부착한 포토센서를 이용해 차량의 통과시간을 측정하여 계산 하였다. 측정 장소는 경부고속선의 오송교 북단으로 이 구간에서 고속열차는 거의 300km/h의 속도로 주행하고 있다.



그림 6. 마이크로폰어레이를 이용한 고속열차 주행소음 시험 장면

마이크로폰어레이 시스템과 분석 결과의 타당성을 검증하기 위하여 약 700Hz의 하모닉 성분의 음을 발생하는 혼을 설치하여 음원을 정확히 검출하는지 확인하였다. 한국형고속열차는 총 7량으로 구성되어 있는데 이 중 두 번째와 세 번째 객차 사이의 보기 그리고 세 번째와 네 번째 객차 사이의 보기에 각각 혼을 설치하여 측정하였다. 그림 7은 600Hz~700Hz 대역의 발생 소음의 위치를 보여 준다. 이 그림에서 혼의 위치에서 소음레벨이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있기 때문에 본 연구에서 사용한 측정 시스템 및 분석결과에 신뢰성이 있음을 보여준다.

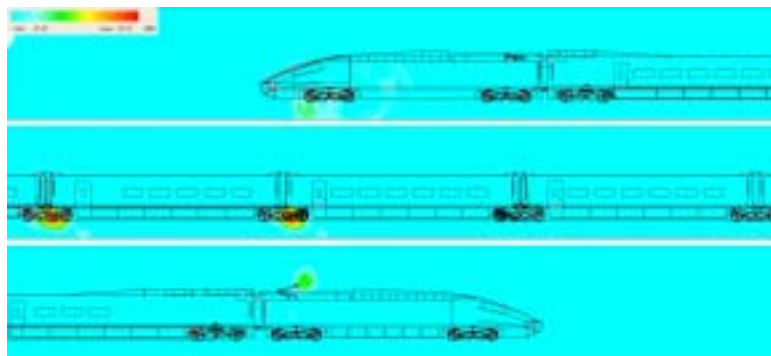


그림 7. 600 ~ 800Hz 대역의 소음원 위치 재구성

그림 8~9는 마이크로폰어레이를 이용하여 측정한 결과를 이용하여 주파수 대역별로 차량의 표면과 수평인 평면의 각 위치의 소음레벨을 계산한 결과이다. 이들 그림에서는 소음의 크기를 컬러맵으로 표시하였는데 소음레벨의 상대적인 값의 비교를 위하여 각 그림에서의 최대값과 함께 최대값과 최소값의 차이인 depth를 표기 하였다. 마이크로폰어레이 측정의 분해능은 인접한 음원을 구별할 수 있는 능력을 말하는데 빔의 폭  $b = r_0(\lambda/2)/D$ 에 의해 정의 된다. 이 식에서  $r_0$ 는 음원에서 측정위치까지의 수직거리이고,  $D$ 는 어레이의 직경,  $\lambda$ 는 음의 파장을 나타낸다. 음원이 최소  $2b$  이상은 떨어져 있어야지 구분이 가능하기 때문에 본 측정에서 80Hz 분해능은 약 9m이고 125Hz 분해능은 약 3.4m 이다. 그림 8은 70~90Hz 사이의 소음원을 보여준다. 이 대역의 분해능이 9m이기 때문에 열차의 높이 방향의 위치는 정확히 파악할 수 없고 길이 방향의 소음원

위치를 확인할 수 있다. 주요 소음원이 전두부 및 차간 연결부에 위치하는 것을 알 수 있다. 한국형고속열차는 머드플랩의 효과를 확인하기 위해 세 번째 객차의 양 끝 차간공간의 머드플랩을 변경하였고 나머지는 기존의 머드플랩을 적용하고 있다. 차간 공간에서 발생하는 공력소음은 80Hz 성분이 가장 큰 것으로 알려져 있는데<sup>4</sup> 이 그림을 보면 공간의 폭을 줄임으로써 이 주파수 대역의 소음 발생이 저감되고 있음을 확인할 수 있다. 그림 9는 300Hz~1kHz 대역의 소음원을 보여주고 있다. 이 대역에서는 전두부로부터 발생하는 소음과 함께 판토타그래프에서 발생하는 소음 레벨이 큰 것을 알 수 있다. 이와 함께 각 대차 주위에서도 소음이 발생한다는 것을 알 수 있다. 대차 부위에서 발생하는 소음의 원인으로서는 대차 주위의 유동 변화에 의한 공력소음과 차륜과 레일의 상호작용에 의한 전동음이 있을 수 있는데 이들 소음원의 구별을 위해서는 보다 정밀한 분석이 필요할 것이다.

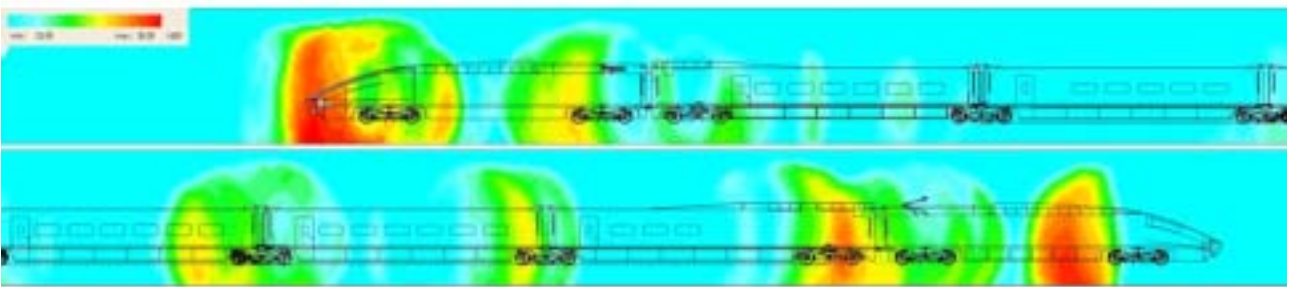


그림 8. 70~90Hz 대역의 소음원. Max 39.1dB, depth 6dB.

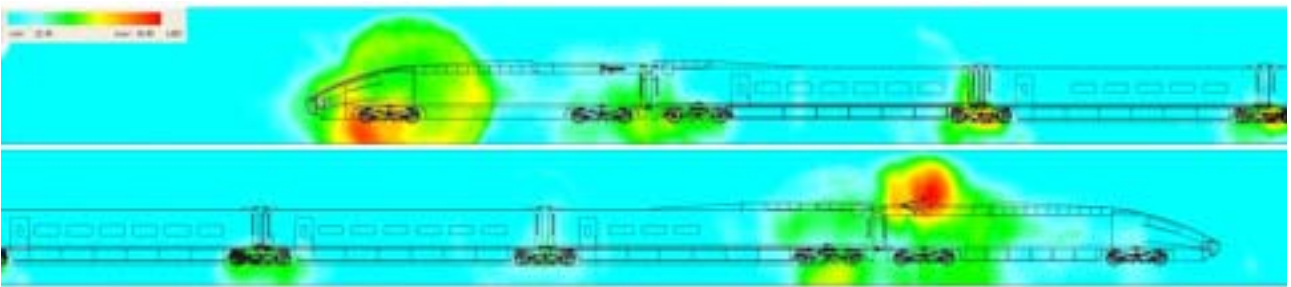


그림 9. 300Hz~1kHz 대역의 소음원. Max 34.5dB, depth 12dB.

#### 4. 결론

본 논문에서는 한국형고속열차의 실내소음에 영향을 주는 외부 소음원의 특성을 규명하기 위한 시험 결과를 정리하였다. 실내소음을 분석해본 결과 100Hz 이하의 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. 머드플랩과 차간 공간에 대한 모델을 이용한 풍동 실험을 통하여 머드플랩의 간격이 blocked pressure 발생에 미치는 영향을 규명 하였다. 실험을 통하여 유동 피드백에 의해 음압이 특정 주파수에서 크게 발생하는 현상을 관측하였다. 머드플랩 사이 간격이 작을수록 유동 피드백 현상은 높은 주파수에서 발생하며 크기는 작아졌다. 차간 공간에 의해 발생하는 소음은 마이크로폰어레이를 이용한 측정을 통해서도 확인할 수 있었다. 마이크로폰어레이 시험 분석결과를 보면 머드플랩의 크기를 변경하여 차간 공간의 폭을 줄인 차량에서 80Hz 대역의 소음 발생이 감소한 것을 알 수 있었다. 마이크로폰어레이 측정은 전두부, 판토타그래프, 차간 공간, 대차 주위 등으로부터 발생하는 공력소음 뿐만 아니라 차륜 및 레일에서 발생하는 전동음의 주파수 특성을 파악하는데 활용할 수 있다.

## 후기

본 연구는 고속철도기술개발사업의 “고속철도시스템 신뢰성 및 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) H. Kook, L. Mongeau, Analysis of the periodic pressure fluctuations induced by flow over a cavity, *Journal of Sound and Vibration* (2002) 251(5), 823-846.
- (4) 최성훈 등, 2006, “고속열차의 차간 공간에 의해 발생하는 실내소음 특성 분석”, *춘계학술발표회 논문집*, 한국소음진동공학회.