

## 고속열차의 차간 공간에서 발생하는 소음 특성의 시험적 규명

### Experimental Investigation of Noise Generation from the Inter-coach Spacing of a High-speed Train

최성훈<sup>†</sup> · 박춘수\* · 박준홍\*\* · 김상수\*

Sunghoon Choi · Choon Soo Park · Junhong Park · Sang Soo Kim

**Abstract** Aerodynamically generated noise is dominant when the train speed approaches 300km/h. This noise sources is caused by the turbulent flow separations or vortex shedding from the train structure. Experiments were performed to investigate the characteristics of aerodynamic noise sources generated from exterior of the KTX trains and 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 mud-flap 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 the gap. Also performed is an array measurement to locate different noise sources from the high-speed train. spectral characteristics of exterior noise sources are examined.

**Keywords** : High-speed train, aerodynamic noise, cavity

**요 지** 고속열차의 속도가 300km/h 이상이 되면 난류의 박리나 와류발산 등에 의한 공력소음의 영향이 지배적이 된다. 본 연구에서는 KTX와 한국형고속열차의 외부에서 발생하는 공력소음, 특히 차간 공간에서 발생하는 소음의 특성을 시험을 통해 규명한다. 차량 실내외의 소음 측정을 통해 이 소음의 특성을 분석하였고, 풍동시험을 통해 머드플랩 사이의 틈의 크기가 저주파 소음 발생에 직접적인 영향을 준다는 것을 규명하였다. 또한 마이크로폰어레이 시험으로 고속열차의 외부에서 발생하는 소음의 주파수 특성을 분석하였다.

**주 요 어** : 고속열차, 공력소음, 동공

## 1. 서 론

고속철도 차량의 주요 소음원으로는 휠-레일의 상호 작용에 의한 전동음과 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 증가 하게 된다. 고속열차에서 발생하는 공력소음으로는 판토틀라프 등에 의한 와류발산(vortex shedding)으로부터 발생하는 소음, 차량의 전두부, 대차, 차간 공간 등으로

부터 발생하는 난류 유동장에 의한 소음, 그리고 차량의 외부 표면을 따라 형성 난류 경계층의 박리로 발생하는 소음 등이 있다[1-3]. 이러한 원인들에 의해 발생하는 소음은 방사되어 선로 주위에서 외부소음으로 영향을 주는 한편 이때 발생한 난류가 유동의 하부에서 다시 차체 등을 가진 하거나 차체를 투과하여 실내소음에 영향을 준다. 특히 차량 사이의 연결 공간이나 대차 주위 등과 같은 불연속면에서 차량의 주위를 따라 흐르는 유동이 변화를 일으켜 공력소음이 발생하게 된다. 특히 KTX나 한국형고속열차와 같이 관절대차(Articulated bogie)를 적용한 열차에서는 그림 1과 같이 대차가 두 차량을 연결하기 때문에 대차와 함께 연결되어있는 현가장치 등에 대한 유지보수 등의 이유로 차간 공간을 완전히 막지 못하고, 대신 머드플랩(mudflap)을 설치하여 외부로부터의 오염을 막고 있다. 따라서 머드플랩 사이 공간에 의

<sup>†</sup> 책임저자 : 회원, 한국철도기술연구원, 고속철도시스템연구팀  
E-mail : schoi@krii.re.kr

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

\* 한국철도기술연구원 고속철도시스템연구팀

\*\* 한양대학교 기계공학부

해 공력소음의 발생이 필연적인데 이 소음원을 원천적으로 없애는 것은 힘들기 때문에 머드플랩의 크기를 변경하여 소음발생을 줄이는 방안이 제시 되었다[4-6]. 이러한 공력소음의 예측을 위해 CFD (Computational Fluid Dynamics)를 이용한 방법이 사용되지만 해석 시에 많은 가정들이 사용되기 때문에 반드시 실험을 통한 검증은 필요로 한다.

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

## 2. 고속열차의 실내소음 특성

KTX 및 한국형고속열차의 객차 사이에는 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 사이의 간격에 의해서 난류가 발생하게 되는데 이 때 발생하는 유동소음의 크기는 이 간격의 크기와 밀접하게 연관될 것으로 예상할 수 있다. 간격의 크기에 의한 객실소음 변화를 평가하기 위하여 폭이 다른 머드플랩을 장착하여 시험을 수행하였다. KTX 열차는 양쪽 운전실과 18량의 객실 등 총 20량이 1편성을 구성하는데 본 시험을 위해서 10호차부터 12호차 사이에 장착되어 있는 머드플랩의 폭을 80mm에서 200mm로 변경하여 간격을 390mm에서 150mm로 줄였다. KTX 차량의 실내소음은 차량

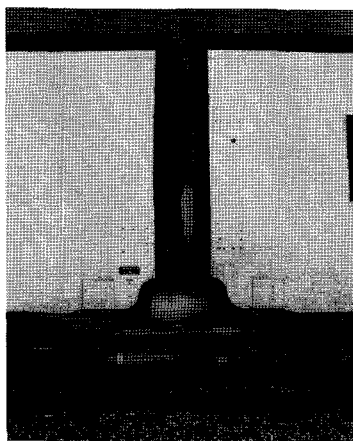


Fig. 1. The articulated bogie and inter-coach spacing of HSR-350x.

의 속도에 가장 크게 영향을 받지만 이 외에도 궤도의 거칠기 및 측정 차량의 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. 본 연구에서는 최대한 정확한 비교를 위하여 대칭 위치인 8호차와 11호차 객실에서 소음을 측정 하였으며, 이 시험을 위하여 차량은 경부고속선 구간을 왕복 주행 하였다.

그림 2에서는 KTX 차량이 경부선 상행선을 운행하면서 몇 개의 터널 구간을 통과하면서 측정한 실내소음의 시간이력을 보여준다. 대부분의 구간에서 정도의 차이는 있으나 머드플랩 변경으로 11호차의 소음레벨이 상당히 감소한다는 것을 확인할 수 있었다. 고속차량이 터널에 진입하면 실내소음이 대체로 5~7dB(A) 정도가 증가하는데 그림 2에서 이런 현상을 확인할 수 있다. 이 그림에서는 또한 소음저감효과가 개활지보다 터널을 통과할 때 비교적 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 머드플랩 사이 간격에서 발생하는 소음은 외부로 방사되었다가 차체 측면을 통해 실내로 유입되는데, 터널 내에서는 벽면으로부터 반사되는 성분이 더해지기 때문에 영향이 개활지에서보다 크게 된다. 그림 3에서는 실내소음 스펙트럼을 보여준다. 머드플랩 형상 변경으로 전 주파수 대역에서 소음이 저감하는 것을 확인할 수 있는데 100Hz 이하의 성분은 큰 폭으로 감소하는 것을 알 수 있다. 이 저주파 소음 성분은 고속열차가 터널을 통과할 때 실내소음에 큰 기여를 하기 때문에 머드플랩 변경의 영향도 터널 내에서 크게 나타나는 것이다. 이 그림에서는 1kHz 이상의 성분도 감소되는 것을 알 수 있지만 이 성분은 저주파 성분보다 10dB 이상 크기가 작기 때문에 전체크기(overall level)에 미치는 영향은 미미하다.

한국형고속열차에서는 머드플랩 변경에 따른 영향을 측정하기 위해 한 객실의 양 끝에 차간공간에 부착되어있는 머드

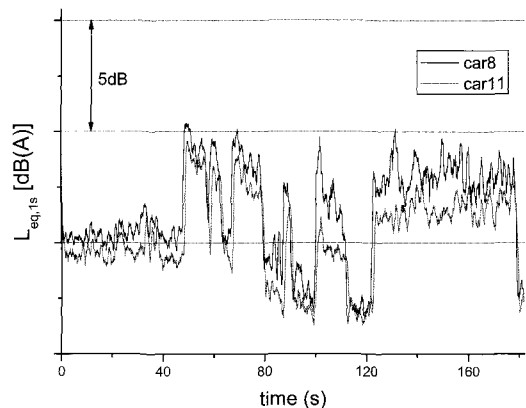


Fig. 2. Interior noise of KTX at Kyung-bu line (KP123~112, 270km/h ~ 300km/h)

플랩을 기존의 머드플랩보다 넓은 것으로 교체하여 머드플랩 간격을 390mm에서 190mm로 변경하였고, 변경 전과 후에 객실소음을 측정하여 비교하였다. 광명-동대구 구간에서 측정된 등가소음 값을 5초 단위로 평균하였고 특히 터널 구간에서의 속도에 따른 실내소음 레벨을 그림 4에 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. 개활지에서 측정된 결과도 터널에서와 마찬가지로 경향을 보여주었다.

위와 같이 머드플랩의 영향이 한국형고속열차에서 상대적

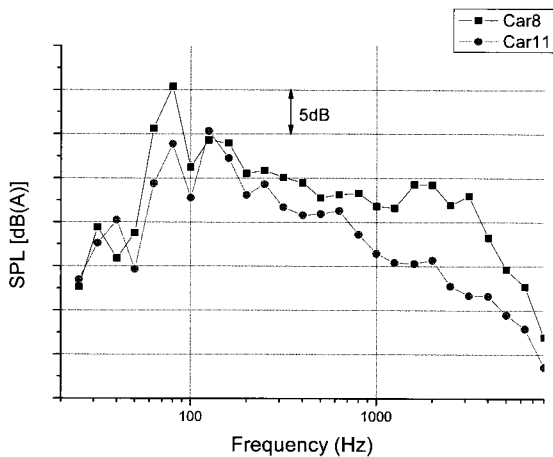


Fig. 3. Comparison of interior noise spectrum of KTX due to mud-flap change (in tunnel)

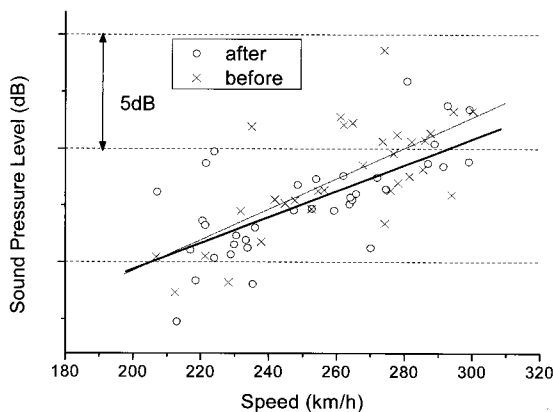


Fig. 4. Comparison of interior noise of HSR-350x due to mud-flap change (in tunnel)

으로 적은 것은 간격의 크기 차이에 의한 원인과 함께 차체의 차음특성 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 소음 저감에도 영향을 줄 수 있다. 그림 5에서는 기존의 머드플랩을 적용한 상태에서 고속 주행시에 측정된 KTX와 한국형고속열차의 실내소음 스펙트럼을 비교하여 보여준다. 이 그림을 보면 저주파 영역에서 두 차량의 실내소음 특성이 다르다는 것을 알 수 있다. 그림 3에서 보면 머드플랩 변경으로 가장 큰 영향을 받는 소음 성분은 100Hz 이하의 저주파 성분인데 그림 5에서 확인할 수 있듯이 한국형고속열차에서는 KTX에 비하여 이러한 저주파 성분이 상대적으로 작기 때문에 머드플랩 간격 변경에 의한 영향도 상대적으로 적다는 것을 알 수 있다. 한국형고속열차에서 머드플랩 변경의 의한 외부 소음 변화는 4절에서 마이크로폰어에리 측정을 통해 확인하였다.

### 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 유속을 측정하였다[7]. 이 풍동 실험에서 사용한 머드플랩은 그림 6과 같이 실제 고속열차에 적용되고 있는 머드플랩을 사용하였고 객차와 객차 사이의 차간 공간을 아크릴 박스로 제작하였다. 머드플랩과 머드플랩의 간격을 조절할 수 있고 차간공간의 형상 및 크기와 최대한 비슷하도록 구성하였다. 머드플랩 간격을 변경하면서 그 영향으로 발생하는 난류의 풍속별 표면 압력과 blocked pressure를 머드플랩

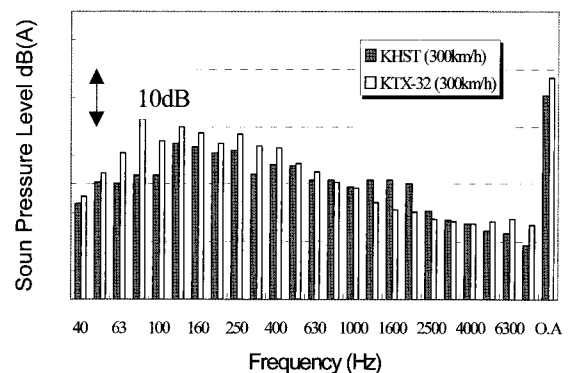


Fig. 5. Interior noise spectrum of HSR-350x and KTX

뒤쪽에 여섯 개의 마이크로폰(B&K Type 4951)을 설치하여 측정하였다. 실제 측정에서는 음압레벨이 마이크로폰 위치에 큰 영향을 받지 않았다.

그림 7에서는 머드플랩 폭의 변화에 대한 첫 번째 마이크로폰에서 측정된 음압레벨 변화를 비교하였다. 이 시험에서 사용한 풍동은 최고 210km/h 까지 시험 가능한데 풍속이 180km/h 이상인 경우 시험 장치에 이상 진동이 심하게 발생하기 때문에 풍속을 180km/h로 하고 머드플랩 사이의 간격이 0 ~ 30cm 인 경우에 대한 측정을 하였다. 그 결과, 머드플랩 사이의 간격이 증가하면 음압레벨은 높아지고 머드플랩의 폭이 줄어들면 낮아지는 것을 알 수 있다. 즉, 머드플랩에 의해 발생한 유동은 소음을 유발하고 머드플랩의 폭 변화에 따라 영향을 받는데, 저주파영역에서 특성이 크게 변화하는 것을 알 수 있다. 특히 머드플랩의 간격이 30 cm 일 때는 음압레벨이 크게 나타나며 아크릴 박스의 진동이 강하게 발생하였다. 그림 7에서 머드플랩의 간격이 큰 경우에는 간격이 좁을 때는 없었던 몇 개의 피크가 발생하는 것을 알 수 있다. 시험에 사용한 박스는 0.8m×0.8m×1.6m의 크기로, 이 공간 내에서의 첫 번째 음향모드는 약 213Hz 이며 Helmholtz 공명 주파수는 약 42Hz 이기 때문에 저주파에 발생한 피크는 유동 피드백(flow feedback) 현상으로 설명할 수 있다.

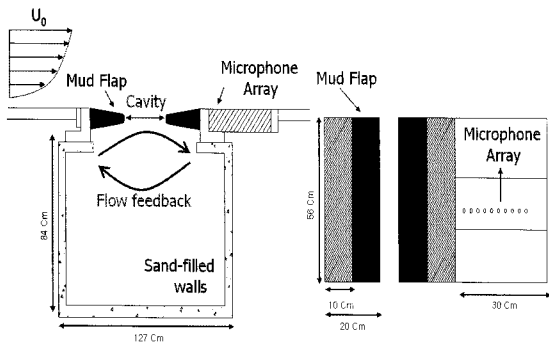


Fig. 6. Wind tunnel test model

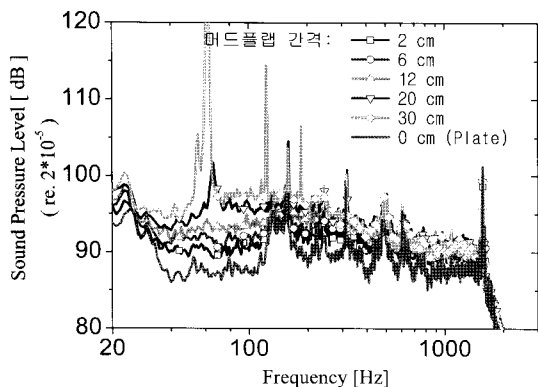


Fig. 7. Blocked pressure spectrum versus mud-flap spacing

일정하게 흐르던 유동이 머드플랩과 동공의 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 현상이라고 한다. 이 같은 매커니즘으로 유동 피드백이 발생하는 주파수는 실험식인 Rossiter 식에 의해 다음과 같이 구할 수 있다[8].

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

이 식에서,  $L$ 은 cavity 의 길이,  $U_c$ 는 대류속도(convection velocity),  $c$ 는 음속,  $\beta$ 는 위상지연(phase lag)이며 실험값으로 알려진 0.25를 사용하였다. Rossiter 식에서 사용된 대류속도는 머드플랩 모델에 설치된 마이크로폰 어레이 중 두개의 마이크로폰 사이에서 측정된 크로스 스펙트럼 (cross-spectrum) 의 위상 차이에 의해 구해졌으며 이 시험에서는 유속의 약 60%로 측정되었다. 유속이 180km/h이고 머드플랩의 간격이 30cm일 때 Rossiter 식에 의해 구한 이론값은 65Hz로 풍동 실험 결과인 63Hz와 유사하다. 같은 방법으로 2절에서 기술한 KTX 머드플랩사이의 간격인 390mm에 대하여 식(1)을 적용하면 유동 피드백이 발생하는 주파수는 약 84Hz로 그림 3에 나타나 있는 주파수와 유사하다. 이 계산에서 대류속도는 직접 측정하지 못하였기 때문에 풍동시험에서와 마찬가지로 유속의 60%로 가정 하였다.

#### 4. 마이크로폰어레이를 이용한 소음원 측정

3절에서는 머드플랩 간격이 커지면서 공력소음이 발생하는 현상을 풍동시험을 통해 확인 하였다. 그러나 2절의 한국형고속열차 실차 시험 결과에서는 머드플랩 변경이 실내 소음에 미치는 영향이 크지 않았기 때문에 본 절에서는 머드플랩 변경으로 한국형고속열차의 외부의 소음 발생에 영향이 있는지를 확인하기 위해 마이크로폰어레이를 이용한 소음 측정을 수행하였다. 시험에 사용된 마이크로폰 어레이(Microphone Array)는 방사형 어레이로 48개의 마이크로폰을 사용하였다. 그림 8은 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. 측정은 BSWA사의 1/4인치 마이크로폰(MPA416)과 National Instruments사의 PXI (PXI-4472, PXI-8187) 모듈을 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. 경부고속선의 오송교 북단에서 KTX와 한국형고속열차에 대하여 측정을 수행하였으며 본 논문에서는 한국형고속열차에 대한 측정 결과를 분석하였다. 측정 시 한국형고속열차는 300km/h의 속도로 주행하였다.

마이크로폰어레이 시스템과 분석 결과의 타당성을 검증하기 위하여 약 700Hz의 하모닉 성분의 음을 발생하는 스피커를 설치하여 음원을 정확히 검출하는지 확인하였다. 한국형 고속열차는 총 7량으로 구성되어 있는데 이 중 두 번째와 세 번째 객차 사이의 대차와 세 번째와 네 번째 객차 사이의 대차에 각각 스피커를 설치하여 측정하였다. 그림 9는 600Hz~800Hz 대역의 발생 소음의 위치를 보여 준다. 이 그림에서

스피커의 위치에서 소음레벨이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있기 때문에 사용한 측정 시스템 및 분석결과에 신뢰성이 있음을 보여준다. 이 시험에서는 스피커 출력을 최대로 하였기 때문에 다른 소음원에 의한 영향은 이 그림에 나타나지 않고 있다.

그림 10과 11은 마이크로폰어레이를 이용하여 측정한 결과를 이용하여 주파수 대역별로 차량의 표면과 수평인 평면의 각 위치의 소음레벨을 계산한 결과이다. 이들 그림에서는 소음의 크기를 컬러맵으로 표시하였는데 소음레벨의 상대적 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 있

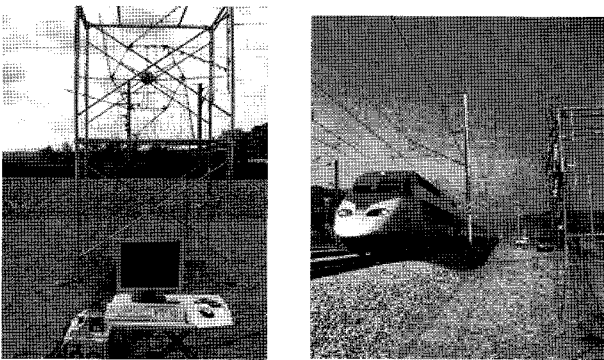


Fig. 8. Measurement of train noise using microphone array

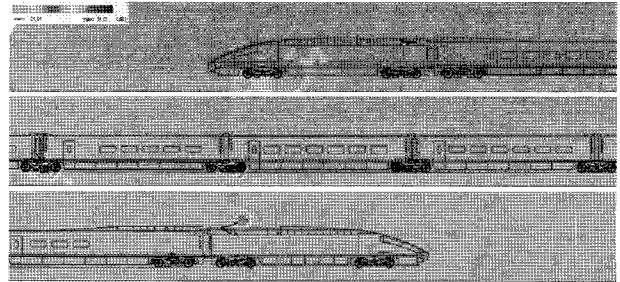


Fig. 9. Noise map at 600 ~ 800Hz range

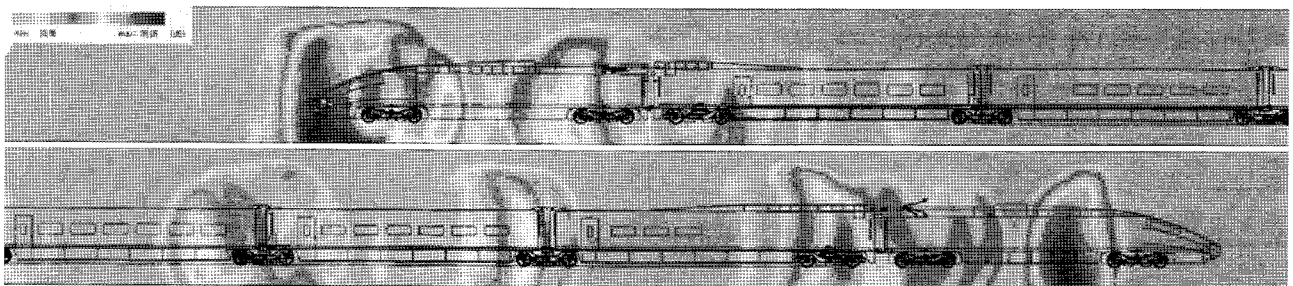


Fig. 10. Noise map at 70~90Hz. Max 39.1dB, depth 6dB

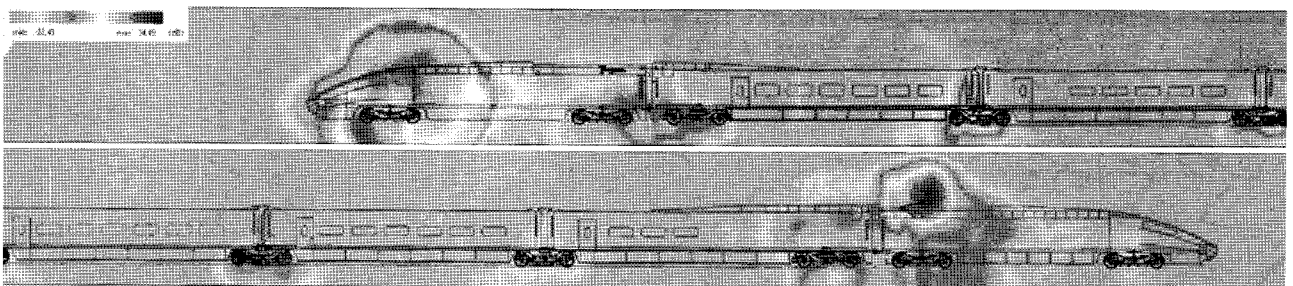


Fig. 11. Noise map at 300Hz~1kHz. Max 34.5dB, depth 12dB

어차지 구분이 가능하기 때문에 본 측정에서 80Hz 분해능은 약 9m이고 125Hz 분해능은 약 3.4m 이다. 그림 10은 70 ~ 90Hz 사이의 소음원을 보여준다. 이 대역의 분해능이 9m이기 때문에 열차의 높이 방향의 위치는 정확히 파악할 수 없고 길이 방향의 소음원 위치만을 확인할 수 있다. 그림에서는 주요 소음원이 전두부 및 차간 연결부에 위치하는 것을 알 수 있다. 앞에서 기술한 바와 같이 한국형고속열차는 머드플랩의 효과를 확인하기 위해 그림의 왼쪽에서 세 번째 객차의 양 끝 차간공간의 머드플랩을 변경하였고 나머지는 기존의 머드플랩을 적용하고 있다. 그림 10에서 세 번째 객차의 양 끝 간격과 다섯 번째 객차의 양 끝 간격에서의 소음원을 비교하면 두 차량 끝에서 발생하는 소음원 크기에 차이가 난다는 것은 확인할 수 있다. 이 위치에서의 차이점은 머드플랩 간격이기 때문에 소음 발생의 차이는 여기에 기인한다고 할 수 있다. 다른 원인으로 차륜의 거칠기에 의한 영향도 고려할 수 있지만 이 위치의 차륜들은 비슷한 시기에 사정하여 관리하였기 때문에 구름소음의 차이는 크지 않을 것으로 보이며, 특히 300km/h의 고속에서는 구름소음 보다는 공력소음의 영향이 크기 때문에 그 원인을 공력소음에서 찾을 수 있을 것이다.

그림 11은 300Hz~1kHz 대역의 소음원을 보여주고 있다. 이 대역에서는 전두부로부터 발생하는 소음과 함께 판토틀라프에서 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.

#### 4. 결론

본 논문에서는 고속열차의 실내소음에 영향을 주는 외부 소음원의 특성을 규명하기 위한 시험결과를 다루었다. KTX와 한국형고속열차의 실내소음을 분석해본 결과 고속주행 시에는 공력소음, 특히 차간 공간에서 발생하는 난류에 의한 소음이 실내소음에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 차간 공간에서 발생하는 공력소음은 공간의 크기와 밀접한 관계를 가지며 고속열차의 머드플랩의 폭을 변경함으로써 실내소음을 저감하였다. 공력소음 발생 메커니즘 규명을 위해 고속열차의 머드플랩과 차간 공간에 대한 모델을 제작하여 풍동에 설치하고 실제 주행조건을 구현하였다. 풍동 실험을 통하여

머드플랩의 간격이 공력소음 발생에 미치는 영향을 규명하였다. 실험을 통하여 유동 피드백에 의해 음압이 특정 주파수에서 크게 발생하는 현상을 관측하였다. 머드플랩 사이 간격이 작을수록 유동 피드백 현상은 높은 주파수에서 발생하며 크기는 작아졌다. 한국형고속열차에서 차간 공간에 의해 발생하는 소음은 마이크로폰어레이를 이용한 측정을 통해서도 확인할 수 있었다. 마이크로폰어레이 시험 분석결과를 보면 머드플랩의 크기를 변경하여 차간 폭을 줄인 차량에서 80Hz 대역의 소음 발생이 감소한 것을 알 수 있었다. 마이크로폰어레이 측정은 전두부, 판토틀라프, 차간 공간, 대차 주위 등으로부터 발생하는 공력소음 뿐만 아니라 차륜 및 레일에서 발생하는 전동음의 주파수 특성을 파악하는데 활용할 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 건설교통부 고속철도기술개발사업의 “고속철도 시스템 신뢰성 및 운영효율화” 과제와 미래철도기술개발사업의 “분산형고속철도 시스템엔지니어링 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., Puskasz, 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.
5. 최성훈 등, 2006, “고속열차의 차간 공간에서 발생하는 공력소음의 특성”, 추계학술발표회 논문집, 한국철도학회.
6. 최성훈 등, 2007, “한국형고속열차의 외부 발생 소음특성 규명을 위한 시험”, 춘계학술발표회 논문집, 한국철도학회.
7. 박기형 등, 2006, “풍동을 이용한 고속철의 차간 공간에서의 공력소음 측정 및 특성 분석”, 추계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회.
8. M.S. Howe, *Acoustics of Fluid-Structure Interactions*, Cambridge University Press, New York, 1998.

(2007년 9월 14일 논문접수, 2007년 11월 13일 심사완료)