

풍동을 이용한 고속철의 차간 공간에서의 공력 소음 측정 및 특성 분석

Wind tunnel tests for analyzing noise generation
from the inter-coach spacing of a high-speed train

박 기 형*·박 준 흥†·송 시 문*·김 태 호*·이 택 진*·최 성 훈**
Kihyoung Park, Junhong Park, Simon Song, Taeho Kim, Taekjin Lee, Sunghoon Choi

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

ABSTRACT

Experiments were performed to investigate the effects of mud-flap width on the aeroacoustic noise generation inside high-speed trains. The open-circuit type wind tunnel was used. The measurement setup was custom-built to simulate intercoach spacing. From the measurements, the characteristics of the turbulent flow after the intercoach spacing and consequent generation of aeroacoustic noise inside the cabin was investigated. Especially the effects of mud flap length on the characteristics of the characteristics of the turbulent flow were identified. The mechanism of noise generation by analyzed interactions with structure vibration characteristics and generation characteristics of blocked pressure was investigated.

1. 서 론

고속철의 소음은 다양한 소음원과 전달되는 전달 경로의 다양성에 따라서 여러 가지 발생 소음이 존재한다. 이 소음은 특정하게 한 가지 주파수에서 발생하는 것이 아니라 비교적 넓은 주파수 영역에서 다양한 원인에 의해 발생한다.⁽¹⁾ 고속철의 주요 소음원으로 공기 전달음인 공력소음을 들 수 있다. 고속철의 공기역학적인 특성상 공력소음은 고속철의 선두부 형상, 차량의 단면 형태, 판토틀라프(pantograph) 등과 같은 차량의 외부 부착물에 의해서 좌우되어진다. 공력소음은 고속철의 표면에서 유동박리(flow separation)로 인한 난류 경계층 유동과 와류(vortex)가 동반되는 비정상적인 유동형상으로 기인된다. 이러한 공력소음은 고속철 주행속도의 여섯 제곱에 비례해서 증가되는 것으로 파악되고 있다.⁽²⁾

고속철에서는 판토틀라프 등에 의한 vortex shedding 에 의해 발생하는 소음, 차간 공간의 cavity 가 유발하는 난류 유동장에 의한 소음, 급격한 표면 변화에 의해 유발되는 유동 박리 현상에 의해 공력 소음이 발생한다. 이러한 소음 예측 분석을 위해 CFD (Computational Fluid Dynamics)를 이용한 방법이 필요하며 예측에 대부분 많은 가정

들이 사용됨으로써 반드시 실험을 통한 검증을 필요로 한다.⁽³⁾ 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.⁽⁴⁾

본 연구에서는 고속철의 공력 소음 발생 특성에 대하여 풍동을 통해 측정하고 분석하였으며, 차간 공간에 설치한 머드플랩의 폭 변경에 따른 소음 특성 변화와 고속철의 창문 진동 특성을 측정, 분석하였다.

2. 공력 소음 측정을 위한 풍동 실험

2.1 풍동 실험 장치

고속철에 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 이용하였다. 이 풍동 실험 장치에 대한 자세한 설명은 논문 [5]에 있다. 시험부 크기가 0.8 m*0.8 m*1.6 m 이며, 5 m/s ~ 70 m/s 의 유속을 낼 수 있다. 고속철의 공력 소음 특성 측정을 위한 풍동 실험은 FFT 분석기와 마이크로폰, 기체 액주계, 유속 측정 튜브를 이용하여 수행되어졌다. 유속 변화에 따른 경향을 파악하기 위해 10 ~ 60 m/s 까지 10 m/s 씩 유속을 증가시켜 가면서 공력소음을 측정하였다. 이 풍동 실험에서 사용한 고

† 한양대학교 기계공학부 음향진동연구실(교신저자)
E-mail parkj@hanyang.ac.kr
Tel : (02) 2220-0424

* 한양대학교 기계공학과

** 한국철도기술연구원 고속철도사업단

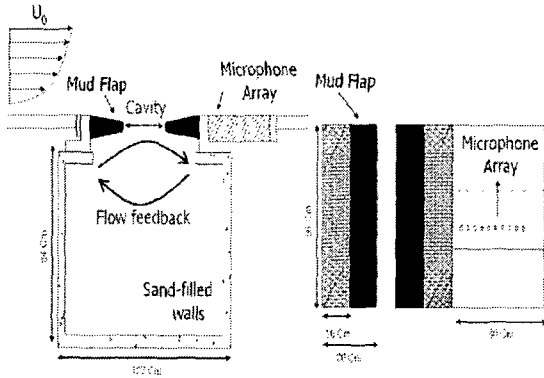


그림 1. 머드플랩 모델

속철의 이 풍동 실험에서 사용한 고속철의 머드플랩 모델은 그림 1 와 같이 실제 고속철에 적용되고 있는 머드플랩을 사용하였고 객차와 객차 사이의 차간 공간을 아크릴 박스로 제작하였다. 머드플랩과 머드플랩의 간격을 조정할 수 있고 차간 공간의 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. 마이크로폰 어레이는 일정한 간격으로 일렬로 놓여져 편향을 통해 유압을 측정할 수 있다.

2.2 머드 플랩 폭 변화에 따른 실내 소음 특성

머드플랩 폭의 변화에 대한 공력 소음을 측정하고 음압레벨 변화를 비교해 보았다(그림 2). 시속 180 km 에 대하여 머드플랩 폭의 길이가 2 cm, 6 cm, 20 cm, 30 cm 의 경우에 대한 측정을 하였다. 그 결과, 머드플랩의 폭이 증가하면 음압레벨은 높아지고 머드플랩의 폭이 줄어들면 낮아진다.

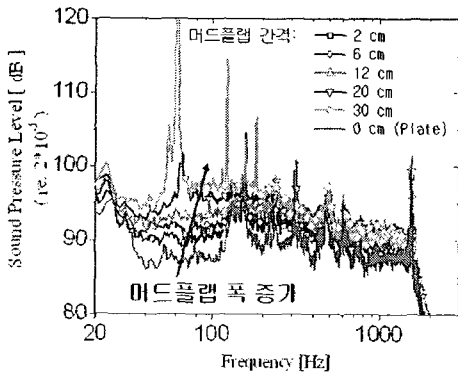


그림 2. 평판과 공동길이에 따른 음압레벨 변화

측정시 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.

3. 음압레벨 변화에 영향을 주는 요인

3.1 풍동 실험 장치의 Fan 에 의한 영향

머드플랩의 폭에 따른 음압레벨이 특히 저주파 영역에서 크게 영향을 받았다. 특히 cavity 가 있을 때 음압레벨의 특정주파수 영역에서 크게 발생하는 공진 현상이 관측되었다. 그림 4 는 180 km/h 일 때 머드플랩 폭 2 cm 와 30 cm 에 대한 음압레벨을 보여준다. 이 그래프에는 cavity 가 없을 때는 관측되지 않은, 특정주파수에서 음압레벨이 크게 나타나고 있다. 각각 주파수대에서 발생되어 음압레벨이 급격하게 증가시키는 원인으로 먼저, 풍동 장치의 송풍기(fan)에 의한 영향을 생각할 수 있다. 이것은 풍동 장치의 송풍기 회전수와 관련이 있으며 식 (1)을 이용하여 송풍기에 의한 공진 주파수(Blade Passage Frequency)를 구할 수 있고 이는 그림 3 의 그래프에서 피크(peak)가 발생한 주파수대역(158 Hz)과 거의 일치하였다.

$$f_{FAN} = \frac{789[rpm]}{60[sec]} * 12[blade] = 157.8[Hz] \quad (1)$$

그러나 이 피크는 풍동 실험에서만 나타나는 현상이므로 실제 고속철의 차간공간을 지나는 난류에서는 발생하지 않는다. 따라서 이 주파수의 음압은 내부 소음에 영향을 미치지 않는다.

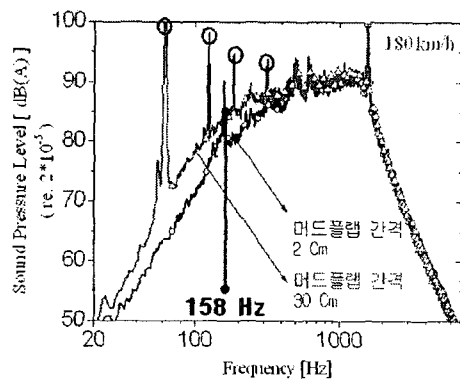


그림 3. 측정된 blocked pressure 의 주파수

3.2 공동 유동(Cavity Flow)에 의한 영향

다음으로 cavity 유동에 의한 영향을 생각할 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 또다른 교란을 일으키게 되는 현상을 유동 피드백 현상(flow feedback, 그림 4)이라고 하고, 실제 풍동 실험에서 이 현상에 의해 머드플랩 모델이 심하게 진동하였으며, 음향 피드백 메커니즘에 근거하여 유도한 cavity 내부의 진동 주파수를 예측하는 실험식인 Rossiter's equation에 의해 해당 주파수를 구하고 실험값과 비교해 보았다(표 1).⁽⁶⁾

Rossiter's equation은 cavity에서 발생하는 유동과 음압의 피드백 현상을 바탕으로 만들어진 실험식이다(식 2).

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

여기서, L 은 cavity의 길이, U_c 는 대류속도(convection velocity), c 는 음속, β 는 위상지연(phase lag)이며 실험값으로 알려진 0.25를 사용하였다. Rossiter's equation에서 사용된 대류속도는 머드플랩 모델에 설치된 마이크로폰 어레이 중 두 개의 마이크로폰 사이에서 측정된 크로스 스펙트럼(cross-spectrum)의 위상 차이에 의해 구해졌다. 그림 5에서 대류속도는 속도에 60% 정도이며 40 m/s 일 때 24 m/s이다. 주파수에 따른 대류속도를 보면 특정 주파수에서 피크가 발생함을 알 수 있다. 이 지점들은 유동 피드백이 발생하는 주파수와 일치한다. 이는 유동 피드백에 의해 음압이 크게 발생하여 대류속도에 영향을 미친다고 생각할 수 있다.

표 1에서 180 km/h 일 때 머드플랩의 폭 30 cm에 대한 풍동 실험 결과와 위에서 언급한 Rossiter's equation에 의해 구한 이론값을 비교해 보았다. 전체적으로 실험값과 이론값은 유사하며, 특히, 1차 모드일 때 꽤 근사치를 보인다. 그림 6은 속도가 36 ~ 180 km/h 이고 머드플랩의 폭이 28 cm 일 때의 풍동 실험에서 측정된 실험값과 Rossiter's equation에 의하여 구해진 이론값의 비교이다. 그래프의 기호들이 속도에 따른 실험값들이며, 실선이 이론값이다. Rossiter's equation으로 구한 이론값은 실험값과 거의 일치한다.

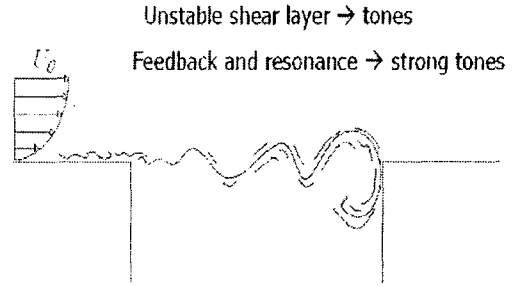


그림 4. 유동 피드백 현상

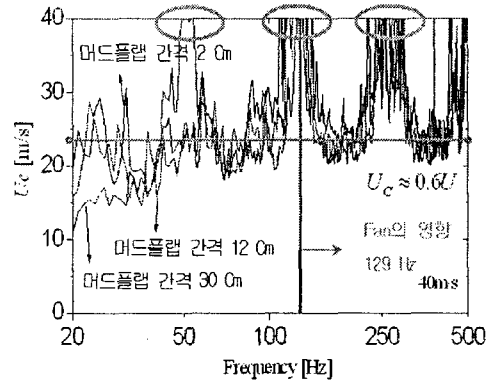


그림 5. Convection Velocity

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

표 1. Rossiter 식에 의한 이론값과 실험값의 비교

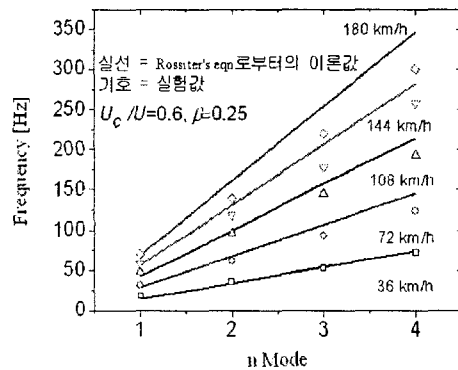


그림 6. 유동 피드백 현상

4. 고속철의 창문 진동 특성 측정

고속철의 창문과 차체의 실험적 모드 해석 기법을 통해 고유진동수와 모드형상을 측정하여 소음 전달 경로를 파악하고 구조물의 진동특성과 blocked pressure 발생 특성 사이의 상관 관계를 분석함으로써 소음 발생 메커니즘을 알아보았다. 그림 7은 실험적 모드 해석으로부터 측정된 응답 함수를 보

여준다. 차체의 주파수 응답 함수보다 창문의 주파수 응답 함수가 더 크게 나타나고 있는데 이로 인해 차체의 진동이 창문 진동에 비해 작게 나타남을 알 수 있으며 외부의 진동이나 소음이 차체를 통해 들어오는 것보다 창문을 통해 전달되어짐을 알 수 있다. 그림 8 은 KHST 과 KTX 창문의 내부 가진시 모드 해석 결과이다. KHST 창문의 경우 1 차 모드가 55 Hz, 2 차 모드가 78 Hz, 3 차 모드가 100 Hz 에서 발생하였다. 이에 비하여 KTX 창문의 경우는 1 차 모드가 37 Hz, 2 차 모드가 68 Hz, 3 차 모드가 144 Hz 에서 발생하였다. 내부 및 외부를 각각 가진하였을 때 고유진동수가 다르게 파악되었는데 이는 임팩트 해머의 가진에 따른 가진력 차이 또는 창문의 비선형성에 기인하는 것이다. 일반적으로 Seal 에 의해 지지된 구조물의 1 차 모드 형상은 1 X 1 모드 형상을 가진다. 그러나 창문 모드 해석 결과에서는 1 차 모드에서 1 X 1 모드 형상이 나타나지 않고 2 X 1 모드 형상이 나타났다. 이는 고속철의 창문 구조 특성상 3 중 또는 4 중 구조로 되어 있고 그 사이 사이가 공기층으로 구성되어 있어서 이러한 현상이 발생하는 것으로 예측된다. KTX 와 KHST 의 차간 공간은 같으나 창문의 진동 특성은 다르게 측정되었다. 이러한 진동 특성의 차이가 난류와의 상호 작용에 의해 발생하는 내부 소음의 차이를 유발하는 원인이 된다.

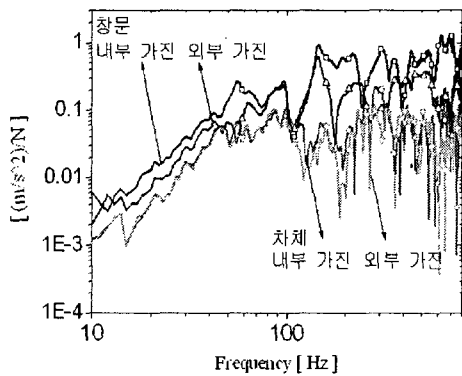


그림 7. 고속철 창문의 응답 함수

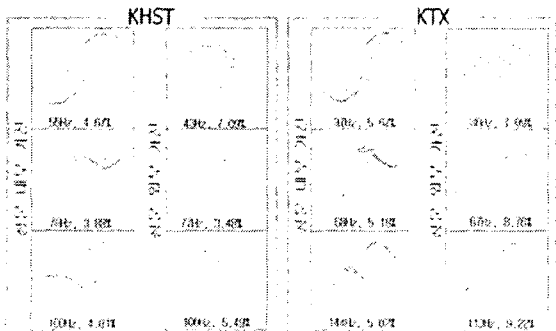


그림 8. KHST 와 KTX 창문의 모드 형상 비교

5. 결론

고속철의 주행 중에 발생하는 공력소음은 열차 주위에 생성된 난류에 의해 영향을 받는다. 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. 또한 구조물 진동특성과 blocked pressure 발생 특성 사이의 상관 관계를 분석하였다. 풍동 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 한국철도기술연구원 고속철도 사업단의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고 문헌

- (1) G.S. Strumolo, The wind noise modeler, Proceedings of the 1997 SAE Noise & Vibration Conference, Traverse City, MI, Paper No. 971921, 1997, pp. 417-425.
- (2) Albert R. George, John R. Callister, Aerodynamic Noise of Ground Vehicles, SAE General Aviation Meeting Wichita, Ks, Paper No 911027, 1991, pp 1-28.
- (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 실내 소음 특성 분석", 춘계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회.
- (5) 고광철 등, 2003, "한양대학교 중형 아음속 풍동의 공력 특성에 관한 연구", 한국항공우주학회지.
- (6) M.S. Howe, Acoustics of Fluid-Structure Interactions, Cambridge University Press, New York, 1998.