

풍동을 이용한 고속열차 머드플랩 형상변경에 따른 공력소음 특성 분석

Effects of mud-flap parameters on aeroacoustic noise generation inside high-speed trains

류지명*·박준홍†·박기형*·송시몬**·최성훈***

Jimyung Ryu, Junhong Park, Kihyoung Park, Simon Song, Sunghoon Choi

Key Words : Aeroacoustic noise(공력소음), High-speed train(고속열차), Wind tunnel(풍동), Fluid feedback(유동피드백)

ABSTRACT

Aeroacoustic sound induced from inter-couch spacing is an important contributor to interior noise generation for high speed trains. Especially the open space between mud-flap has significant impact from flow-structure interactions. To understand noise generation mechanism, experiments were performed using the wind tunnel. To find mud-flap parameters for minimal noise generations the various shape of the mud-flap was installed and its effects on the wall-pressure generation were investigated.

1. 서론

열차의 고급화와 고속화 요구에 맞춰 고속열차가 등장하였고 고속열차에서 발생하는 소음은 승객의 안전 및 승차감 향상을 위해 최소화 되어야 하며 각종 저감 대책을 필요로 한다. 고속열차의 실내소음에는 크게 추진장치와 바퀴와 레일 등에 의해 발생하는 구조 전달 소음과 열차의 단면 불균형이나 차간 공간(inter-couch spacing)에 의해 발생하는 공력소음 등의 공기 전달 소음으로 나눌 수 있다. 소음은 고속열차의 속도에 비례하여 나타나지만 고속 운행시에는 구조 전달 소음 보다는 공기 전달 소음인 공력소음의 영향이 급격히 증가하여 이에 대한 연구가 진행되었다.⁽¹⁾⁽²⁾ 차간 공간에는 주행 시 필요한 전기장치들이 있고 장치들을 보호하기 위해 머드플랩(mud-flap)이 설치되어 있다. 머드플랩 사이의 공간인 공동(cavity)에 의해 공력소음이 발생하고 공동은 열차의 우회를 위해서는 필요한 공간이다.

본 연구에서는 풍동 실험 장치를 이용하여 고속열차의 고속 주행 시 머드플랩의 형상변경과 배열에 따른 음압(bloked pressure) 특성을 알아보고 공동 안에 흡음재(acoustic treatments)를 설치하여 소음원의 특성 변화를 측정, 분석하였다.

2. 공력 소음 측정

2.1 풍동 실험 장치

고속철도 차간 공간에 있는 머드플랩과 주행시의 조건을 구현하기 위해서 그림 1의 풍동 장치에 그림 2와 같은 공동을 연결하여 음압을 측정하였다. 풍동 장치 실험부 크기는 0.8 m × 0.8 m × 1.6 m 이고 유속은 5 m/s ~ 70 m/s까지 만들 수 있다.⁽³⁾ 그림 2와 같이 아크릴로 박스를 제작하여 차간 공간을 표현하였고 머드플랩을 장착한 후 머드플랩 사이 간격을 0.3 m로 고정시켰다. 유체가 흐르는 하류에 마이크로폰(B&K Type 4951)으로 음압을 측정하였고 특성분석에는 B&K 3560B를 사용하였다.

연구에서 기준속도로 둔 50 m/s 를 정확하게 측정하기 위해 풍동 장치 안에 관을 설치하고 기체 액주계와 연결하였다.

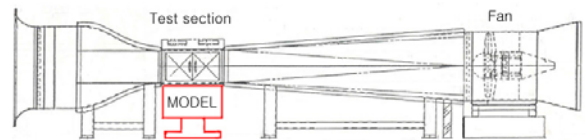


Fig.1 Wind tunnel

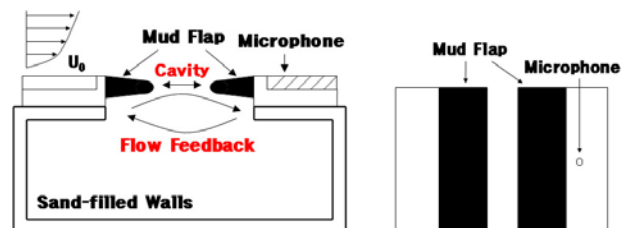


Fig.2 Inter-couch spacing and mud-flap

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

* 한양대학교 대학원 기계공학과

** 한양대학교 부교수 기계공학과

*** 한국철도기술연구원

2.2 머드플랩과 아크릴 머드플랩의 특성 비교

실제로 고속열차에 장착되어 있는 머드플랩은 그림 3 과 같이 편편한 철판을 두꺼운 고무로 두른 것이다. 형상변경에 따른 공력소음의 특성을 분석하기 위해서 제작이 편리한 아크릴로 대체하기 위해 실제 머드플랩과 아크릴 머드플랩에 대한 음압 레벨을 비교해 보았다. 실제 사용되고 있는 머드플랩과 아크릴로 만든 머드플랩은 저주파와 고주파 모든 주파수 영역에서 큰 차이를 보이지 않아 아크릴 머드플랩의 대체가 가능하다고 판단했고 그 결과는 그림 4 와 같다.

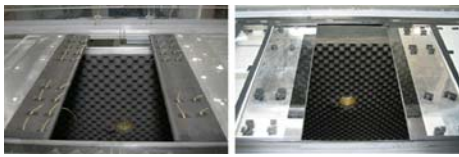


Fig. 3 Two different mud-flaps

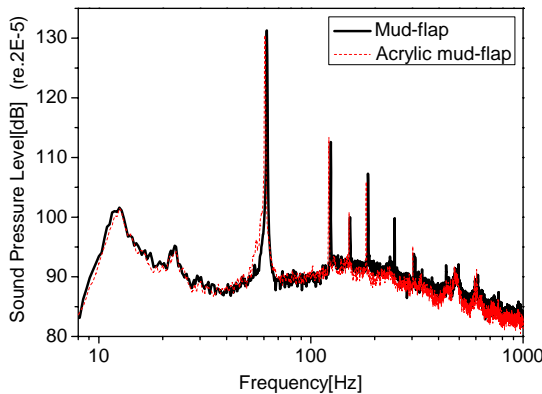


Fig.4 Sound pressure level measured for two different mud-flaps

2.3 공력 소음의 분석

그림 2 와 같이 공동 위로 유동이 있다면 공동이 시작되는 부분에서 유동 박리현상 때문에 소음이 발생하게 된다. 또 유체는 공동이 끝나는 부분에서 물체와 부딪혀 유동피드백 현상을 나타내며 다시 공동의 시작부분으로 돌아가게 되고 이러한 유동피드백 현상이 계속된다. 유동피드백은 Rossiter 방정식인 식 1 과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 L은 공동의 길이, U_c 는 표면의 속도, c는 음속, n은 차수, β 는 실험값 0.25, f_n 은 주파수이다. 표면의 속도는 유체 속도의 약 0.6 배인 30 m/s

이다.⁽⁴⁾ Rossiter 방정식으로 각 차수 별로 얻은 이론 값은 고차가 될수록 실험값과 큰 차이가 나타났고 그 값은 표 1 과 같다.

Table 1. Predicted value[Hz] from Rossiter's equation and its comparison with measured value

차수	1	2	3	4	5
이론값	67	161	253	345	437
실험값	62	124	186	248	306

풍동 실험 장치의 fan 으로 일정한 유속을 만들었고 회전장치인 fan 은 일정한 주파수를 가진다. 50 m/s 의 유속을 만들기 위해 fan 은 760 rpm 으로 회전하였고 날개는 12 개이므로 fan 에 의해 발생하는 공력소음의 이론적인 주파수는 152 Hz 이고 이에 따른 조화성분도 나타나며 실험값에서도 같은 주파수에 피크(peak)가 나타난다.

3. 형상변경에 따른 공력소음의 특성

고속열차에 사용되고 있는 머드플랩은 평판으로 굴곡이 없어 유동피드백 현상의 발생시에 모든 머드플랩 부분에 대해서 같은 주파수의 유동피드백 현상이 일어나게 된다. 머드플랩의 형상을 변경시켜 유동피드백이 일어나는 거리나 위치를 다르게 하여 각 부분마다 유동 피드백의 주파수의 차이를 두어 음압을 낮추고자 하였다.

그림 5 와 같이 굴곡의 수와 배열을 다르게 하여 머드플랩을 제작하였고 굴곡의 수는 한 주기부터 네 주기까지 숫자로 표시하였다. 공동 밖에서의 음압 측정 시에 공동 안에서도 음압을 측정하여 안과 밖의 음압을 비교하였다. 공동 안의 음압은 전 주파수 대역에 걸쳐 나타났지만 특히 고주파 영역보다는 저주파 영역에서 음압이 더 높게 나타났고 저주파 영역에서 나타난 음압은 공동 밖에서 측정한 음압에 지대한 영향을 끼치는 것으로 나타났다.

그림 6 은 그림 5 에서 (a) ~ (d)까지 모양인 대칭 머드플랩의 경우 공동 안의 음압을 측정한 것으로 모든 피크 부분에서 음압이 감소하고 첫 번째 피크에 4 dB 부터 다섯 번째 피크에서는 최고 7 dB 까지 음압이 낮아졌다. 특히 굴곡이 적은 형상변경에서 낮은 음압이 나타났다.

그림 7 은 그림 5 에서 (e) ~ (h)까지 모양인 평행 머드플랩의 경우 공동 안의 음압을 측정한 것이다. 첫 번째 피크에서의 음압은 평판과 형상변경과는 큰 차이가 나타나지 않았다. 두 번째 피크에서 음

압 차가 2 dB 부터 다섯 번째 차수에서는 최고 10 dB 까지 음압이 낮아져 평형 배열과 대칭배열 등 배열에 관계 없이 차수가 높아질수록 그 음압은 낮아 졌다.

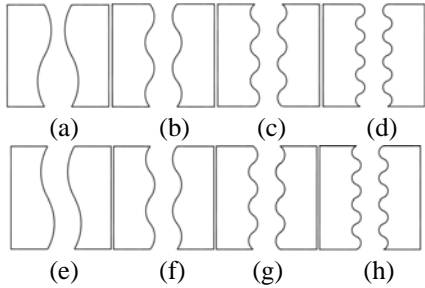


Fig.5 Acrylic mud-flap shapes (a)half-circle 1, mirror, (b)half-circle 2, mirror, (c)half-circle 3, mirror, (d)half-circle 4, mirror, (e)half-circle 1, parallel, (f)half-circle 2, parallel, (g)half-circle 3, parallel, (h)half-circle 4, parallel

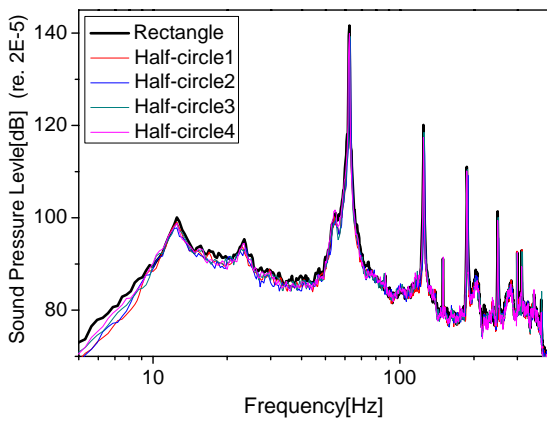


Fig.6 Sound pressure level of mirror mud-flap in cavity

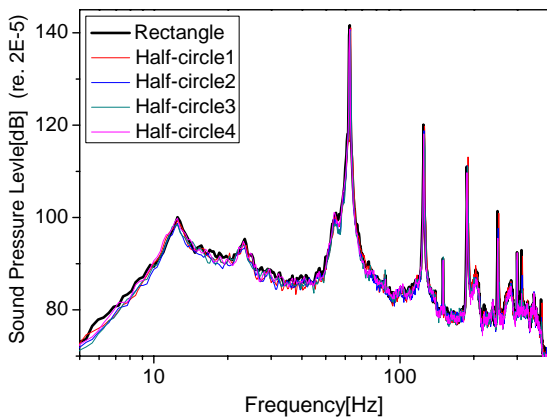


Fig.7 Sound pressure level of parallel mud-flap in cavity

공동 밖의 대칭 머드플랩 음압 레벨을 나타낸 그림 8 은 첫 번째 피크와 두 번째, 네 번째 피크

에서 평균 2 dB 정도의 차이로 평판보다 굴곡이 있는 머드플랩의 음압이 낮게 나타났다. 그러나 세 번째 피크에서는 굴곡의 수가 가장 적은 경우는 6 dB, 그 외의 경우에는 12 ~ 17 dB 차이로, 다섯 번째 피크에서는 평균 2dB 차이로 형상변경의 경우 평판보다 음압이 높게 나타났다. 피크 외의 부분에서는 최고 평균 2 dB 정도의 음압 차이를 보이며 굴곡의 수와 관계없이 평판의 경우 측정된 음압이 가장 낮게 나왔다.

공동 밖의 평형 머드플랩 음압 레벨을 나타낸 그림 9 에서는 첫 번째 피크와 두 번째, 네 번째 피크에서는 평균 2 dB 정도 차이를 보이며 형상 변경된 머드플랩의 음압이 조금 낮게 나타났다. 그러나 세 번째 피크에서는 굴곡수가 가장 적은 경우 4 dB, 그 외의 경우에는 11 ~ 16 dB 의 차이로, 다섯 번째 피크에서는 평균 3 dB 정도의 차이로 형상변경의 음압이 더 높게 나타났다. 또한 피크 외의 부분에서는 굴곡의 수가 적은 것부터 많은 것 순으로 낮게 나타났지만 최고 평균 4 dB 의 차이로 평판의 음압이 가장 낮게 나타났다.

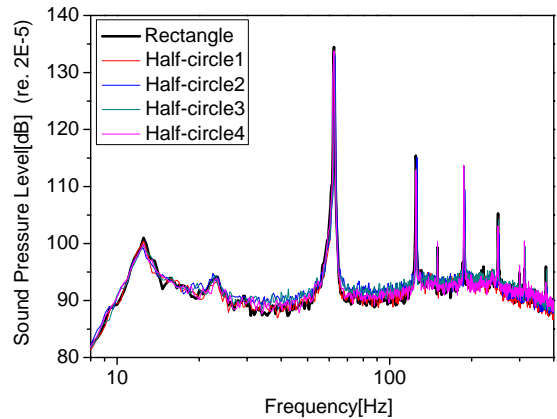


Fig.8 Sound pressure level of mirror arrangement

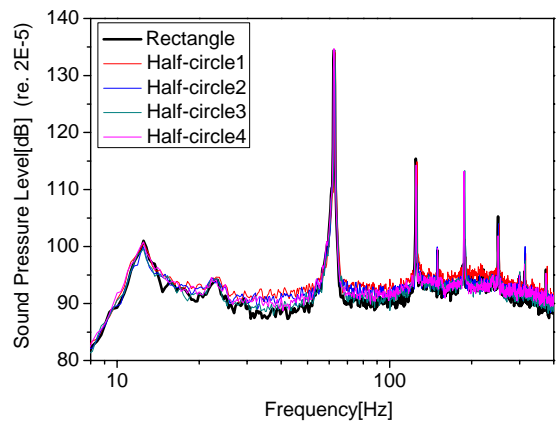


Fig.9 Sound pressure level of parallel arrangement

4. 흡음재를 사용한 공력 소음 저감

공동의 유동피드백에 의한 음압을 줄이기 위해서 공동 안에 흡음재를 사용하였다. 공동의 크기는 $1.2\text{ m} \times 0.6\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ 이고 유동피드백의 생성에 영향을 주지 않기 위해서 흡음재의 높이를 0.15 m 로 하였고 배열은 그림 12 와 같다.

공동 안의 흡음재 사용으로 공동 안의 음압은 그림 10 처럼 전 주파수대역에 대해서 평균 4.3 dB 정도로 음압이 낮게 나타났다. 공동 안에서 생기는 유동피드백에 영향을 받는 공동 밖의 음압은 전 주파수 평균 0.5 dB 정도로 낮게 나타났으나 공동 안에서 발생하는 음압에 영향을 받는 100 Hz 이하의 부분에서는 1.7 dB 정도의 음압이 줄어들었고 이것은 그림 11 과 같다.

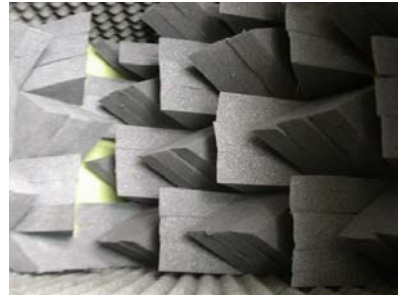


Fig.12 Acoustic treatments in cavity

5. 결 론

고속열차의 고속 주행 시 발생하는 소음의 주원인인 공력소음의 특징에 대해서 알아 보기 위해 풍동 실험 장치를 이용해 주행시의 환경을 구현하여 음압을 측정하였다. 우선 머드플랩의 형상변경으로 유동피드백의 위치나 크기를 변경하여 음압이 낮아지는 것을 기대하였다. 형상변경이 된 머드플랩 제작을 쉽게 하기 위해서 가공이 편한 아크릴 머드플랩과 실제 머드플랩의 음압을 측정하여 유사성을 알고 아크릴로 머드플랩을 형상변경하여 이에 따른 공력소음의 영향을 알아보았다. 또한 공동 안의 피드백현상으로 발생하는 소음을 줄이기 위해서 차간 공간에 흡음재를 설치하여 공동 안과 밖에서 음압이 줄어든 것을 확인하였다. 머드플랩의 형상변경은 저감효과가 나타나지 않았으나 차간 공간에 흡음재를 설치하여 소음원 크기가 감소함을 보았다.

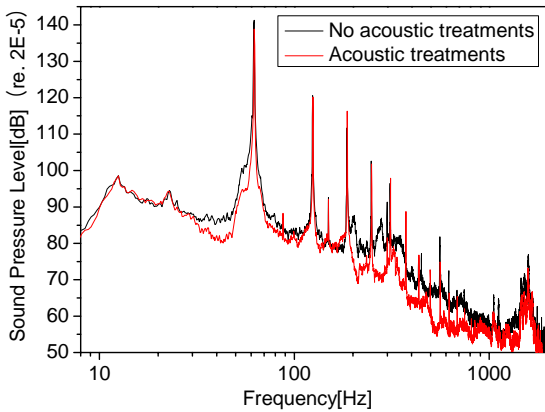


Fig.10 Sound pressure level in cavity before and after acoustic treatments

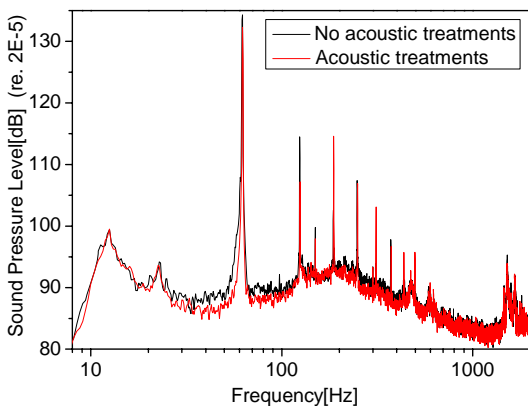


Fig.11 Sound pressure level out of cavity before and after acoustic treatments

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 고속철도 사업단의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) 박기형 등, 2006, “풍동을 이용한 고속철의 차간 공간에서의 공력 소음 측정 및 특성 분석”, 춘계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회
- (2) 고효인 등, 2006, “고속차량 소음원 특성에 관한 연구”, 춘계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회
- (3) 고광철 등, 2003, “한양대학교 중형 아음속 풍동의 공력 특성에 관한 연구”, 한국항공지우주학회지.
- (4) 박기형, 2007, “풍동을 이용한 고속철의 차간공간에 의해 발생하는 공력소음 특성 분석”, 한양대학교
- (5) 최성훈 등, 2006, “고속열차의 차간 공간에 의해 발생하는 실내소음 특성 분석”, 춘계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회