

비대칭 단면 형상을 이용한 루프랙 크로스바의 윈드노이즈 저감 Reduction of Aeolian Noise from Roof Rack Cross Bars Using Asymmetric Section Geometry

이정한* · 이강덕** · 정승균**
Jeonghan Lee, Kang-Duck Ih and Seung-Gyoon Jung

Key Words : Aeolian tone(에올리안 톤), Roof rack cross bar(루프랙 크로스바), Wind noise(바람소리), Karmann vortex(칼만 와), Aerodynamic noise(공력소음), Asymmetric section geometry(비대칭 단면 형상), Dipole noise(쌍극)

ABSTRACT

Roof racks have become a very popular feature of vehicles as the market demand for SUV's and RV's has increased drastically over the years. Aeolian tone from the cross bars however, could be a source of severe discomfort for the passengers. Both experimental and numerical steps are taken to enhance the understanding of the generation mechanism of the wind noise. A successful reduction of the noise is achieved by imposing asymmetry in the section geometry, which reduces the strength of Karmann vortices shed downstream.

1. 서론

SUV 및 RV의 수요 증가와 함께 루프랙 및 크로스바(Fig.1)의 장착이 증가되는 추세이다. 이러한 크로스바는 자동차 주행 시 외부 유동에 직접적으로 노출되며, 윈드노이즈의 대표적인 예인 aeolian tone을 발생시킨다. Aeolian tone은 몽푁한 형태의 물체가 유동에 노출될 경우 주기적으로 발생되는 칼만 와류에 의한 풍절음(風切音)이다. 루프랙 크로스바의 소음은 그 원인인 와류의 주기적 흘림 현상 때문에 특정 주파수에서 높은 피크를 가지며, 매우 불편한 느낌을 주는 소음이다. Rod antenna 장착 차량에서 자주 감지되던 소음이 바로 aeolian tone의 대표적인 다른 한 예이다.

루프랙 크로스바의 경우는 일반적으로 약 70 km/h에서부터 소음이 발생하기 시작하여 속도 증가와 함께 강도가 급속도로 증가하는 특성을 가지고 있다. 소음의 세기가 속도의 6승에 비례하여 증가하는 풍절음의 쌍극 특성으로 인해 저소음화 대책 없이는 속도가 증가할수록 심각한 불만의 소지가 될 우려가 증가한다.

루프랙 크로스바의 후류에서 발생하는 칼만 와열(Karmann vortex street, Fig. 2 참조)은 물체의 표면을 따라 성장한 경계층이 박리되어 발생



Fig. 1 루프랙 크로스바를 장착한 차량

하며, 실린더와 같은 몽푁한 물체일수록 박리점이 전방에 위치하게 되어 와류의 강도가 커지게 된다. 이러한 와류의 생성은 물체 표면에 주기적인 압력 변동을 일으키며, 쌍극(dipole) 형태인 aeolian tone을 발생시킨다. Aeolian tone을 감소시키기 위해서는 그 원인이 되는 칼만 와류의 강도를 줄이는 능동적인 방법이 가장 효과적이다. 이를 위해서는 물체의 두께를 줄인 세장형(細長形) 크로스바를 이용하는 것이 가장 타당하지만 구조 강도가 약해진다는 점에서 짐을 싣기 위한 본래의 목

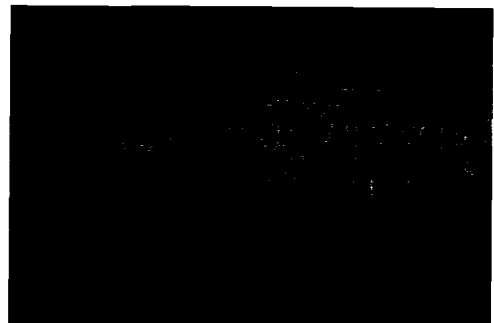


Fig 2. 루프랙에서 발생하는 칼만 와열

* 현대자동차㈜ 기능시험2팀,
trojans91@hotmail.com
Tel : (031)369-6399, Fax : (031) 369-6389

** 현대자동차㈜ 기능시험2팀

적을 달성하지 못하게 된다. 본 연구에서는 크로스바에 상/하 비대칭 단면을 도입함으로써 크로스바의 구조적 강도를 유지함과 동시에 승객에게 큰 불편 요소가 되는 aeolian tone 을 근본적으로 차단하였다.

본 연구는 최근 그 수요가 늘고 있는 SUV 및 RV 차량에 장착된 루프랙 크로스바의 구조적 강성을 달성하면서 윈드노이즈를 발생시키지 않는 루프랙의 단면 형상 개발이 목적이다. 또한 실차에서 실험적으로 개선하던 것을 수치적 해석을 통해 스타일링 단계 및 PROTO 이전 단계에서 업무 적용하기 위한 프로세스 개발에 주안점을 두었다. 이를 위해 전산유체해석 기법을 도입하여 여러 가지 모델을 제작, 실험하는 횟수를 최소화하였다. 이러한 일련의 수치 해석 및 분석 프로세스를 통합하는 디지털 무향 풍동[1] (Digital Aeroacoustic Wind Tunnel, DAWT)을 사용하여, 형상에 대한 디자인 및 설계의 조기 검토 및 적용이 가능하였고 최적 형상 데이터의 확보로 개발 차중에 빠르게 적용할 수 있었다.

2. 본론

2.1 Digital Aeroacoustic Wind Tunnel

(1) PowerFLOW

디지털 무향 풍동(DAWT)은 유동장 분석을 위한 Lattice Boltzmann 방정식을 도입하여 미세 구조(micro-scale structure)를 전산 해석하는 방법을 사용하고 있다. PowerFLOW 는 디지털 물리학에 기초한 전산유체역학 시뮬레이션 코드로 기존의 STAR-CD 나 FLUENT 에 비해 다음과 같은 특징을 가지고 있다. 첫째, 기존의 해석코드는 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 유동장을 거시적 관점(macroscopic view)에서 시뮬레이션하는 반면, PowerFLOW 는 미시적 관점(microscopic view)에서 유체 입자의 역학 관계를 다룬다[2]. 둘째, 기존에 비해 시뮬레이션의 수렴이 항상 이루어진다. 셋째, 육면체의 유동장 격자(grid)를 자동으로 생성하며 마지막으로 순간적인 유동 현상 즉, 비정상 유동의 압력변동을 시간에 따라 포착할 수 있어 유동의 비정상 해석에 효과적으로 적용할 수 있다[3].

(2) 이론적 배경

전산유체역학을 이용하여 유동장 해석을 위해

전통적으로 사용되는 방법은 (1)식의 Navier-Stokes 방정식을 다양한 수치 해석 방법으로 이산화(discretization) 시켜 근접 모사한다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla \cdot \rho \vec{u} \vec{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (1)$$

그러나, 위와 같은 방식들은 근본적으로 수치 해석 기법 자체의 truncation error 들과 컴퓨터로 해를 구할 때 생기는 round-off error 를 가지며 또한, 수렴 불안정성을 항상 갖고 있다.

기존 전산유체역학 시뮬레이션 코드들과는 다르게 PowerFLOW 는 Lattice Boltzmann 방정식을 이용하여 공기 분자들의 상호 작용을 통한 유동장 해석 시뮬레이션 코드이다. 디지털 물리학에서는 유체 역학 시스템이 (2)식의 속도 분포 함수에 의해 결정된다.

$$f(\vec{x}, \vec{c}, t) \quad (2)$$

여기서 \vec{x} , \vec{c} 는 각각 입자들의 위치 및 속도 벡터이다. 디지털 물리학의 지배 방정식인 (3)식의 Boltzmann 방정식에 의해 속도 분포 함수가 결정된다.

Boltzmann 방정식 :

$$\frac{d}{dt} f(\vec{x}, \vec{c}, t) = \frac{\partial}{\partial t} f(\vec{x}, \vec{c}, t) + \vec{c} \cdot \nabla f(\vec{x}, \vec{c}, t) = C(\vec{x}, \vec{c}, t) \quad (3)$$

여기서, $C(\vec{x}, \vec{c}, t)$ 는 충돌항(collision term)이다.

전산 해석을 위해 $f(\vec{x}, \vec{c}, t)$ 을 Lattice 의 이산화 형태로 바꾸면 다음과 같다.

$$f(\vec{x}, \vec{c}, t) \rightarrow n_i(\vec{x}, t) \equiv f_i(\vec{x}, t) \Delta V \quad (4)$$

시간과 공간에 대한 차분화 된 형태의 방정식을 얻기 위해 (4)식을 이용하여 Boltzmann 방정식의 이산화 된 Lattice Boltzmann 방정식을 얻는다[4].

Lattice Boltzmann 방정식 :

$$n_i(\vec{x} + \vec{c}_i, t + \Delta t) = n_i(\vec{x}, t) + C_i(\vec{x}, t) \quad (5)$$

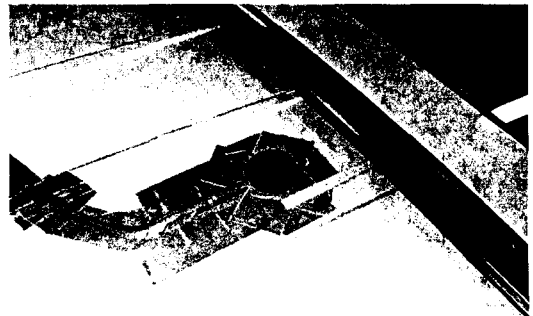


Fig. 3 루프랙 크로스바와 마이크로폰



Fig. 4 DAWT에 설치된 루프랙 크로스바

2.2 실차 실험

(1) On-Road 실험

세가지 루프랙 크로스바 모델의 소음 측정을 위해 1/2 인치 마이크로폰과 녹음용 DAT 를 실차에 장착 (Fig. 3) 하고 남양 연구소의 고속 주회로를 주행하였다.

양산차에는 두개의 크로스바가 장착되지만 상호간의 유동 간섭을 없애고, 단면 형상이 소음에 미치는 영향만을 분리하여 고찰하기 위해 하나의 크로스바 만을 장착하여 실험하였다. 엔진 소음 등의 영향을 최소화 하고 루프랙 크로스바에 의한 소음을 관찰하기 위해 마이크로폰을 루프 위, 크로스바의 뒷전에서 후방으로 10 cm 떨어진 위치에 장착하였다. 유동에 노출되는 부위이므로 반구형 wind shield 를 장착하여 마이크로폰의 자체 소음을 최소화 하였다. 뒤에 다시 언급되겠지만, 크로스바의 aeolian tone 은 상/하 방향으로 가장 크게 방사되며, 따라서 마이크로폰을 크로스바의 바로 아래에 설치하는 것이 소음의 명확한 분석을 위해 가장 좋으나, 유동에 영향을 미칠 수 있어 후방에 설치하였다. 녹음은 휴대용 DAT Recorder 를 이용하였고, 샘플링 주파수는 44.1kHz 이다.

(2) 실험 조건

세가지 모델에 대하여 각각 90,110, 130, 150kph 의 속도로 고속 주회로의 양쪽 직선부를 모두 주행하였고 바람의 영향이 비교적 적은 방향의 결과를 채택하였다. 각 모델을 실험함에 있어 실험 조건(풍속, 온도 등)을 동일하게 유지하기 위해 실험의 시간적 간격을 최소화 하였다.

Fig.4 는 PowerFLOW 에서 풍절음 시뮬레이션을 위해 사용된 DAWT 이다. DAWT 는 측정부의 길이가 모델 길이의 15 배이고, 노즐 입구로부터 6 배 위치에 모델이 위치한다. 차체와 지면은 난류 벽면 조건(turbulent wall condition)이고, 벽면은 주기적인 경계 조건을 구성하였다.

루프랙 크로스바는 길이방향으로 아치(arch)

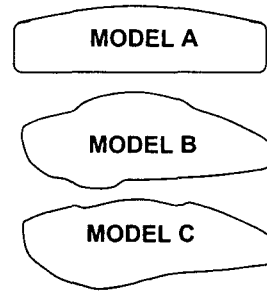


Fig. 5 세가지 roof rack 단면

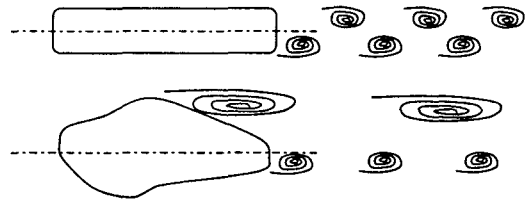


Fig. 6 와류의 주기성 제거

형태를 띄고 있어, 각 단면에서 루프와의 거리가 모두 다르다. 그러나 이러한 3 차원 효과는 칼만 와류의 2 차원 효과에 비해 소음에 미치는 영향이 상대적으로 작으므로, 효과적 분석을 위해 루프랙 크로스바를 2 차원 모델로 단순화 하여 해석하였다.

(3) 실험 모델

실험에 이용된 모델은 Fig.5 의 세가지 이다. 모델 A 는 윈드노이즈를 고려하지 않고 구조적 강성만을 고려한 기본 모델로서 심한 aeolian tone 을 발생시킨다. 이 모델에서 큰 소음이 발생하는 이유는 크로스바의 상부면과 하부면이 거의 비슷하고 유동 박리가 길이방향으로 상/하 비슷한 지점에서 발생하기 때문에 하류에 동일한 주기의 칼만 와류가 생성되는 데 있다.

모델 B 는 상/하 비대칭 형상의 초기 모델로서 윈드노이즈는 감소하고 구조적 강성을 유지시킨 모델이다. 크로스바 단면을 중심선에 대해 상부 단면과 하부 단면을 비대칭으로 만들어 하류에 생기는 칼만 와류를 빨리 소산 시키고자 하는 것이다. 먼저 상부면에는 면의 중앙부에 돌기를 대어 박리가 돌기를 돌아가면서 발생하게 설정되었다. 이에 비해서 하부면은 루프면이 있기 때문에 크로스바 하부면과 일종의 덕트를 구성하게 되는데 하부면 전방향으로 설정한 돌기는 박리가 발생하는 것이 아니라 틈을 빠른 속도로 빠져나가야 하기

때문에 가속된다. 돌기를 지나 하류로 흐르면, 크로스바 하부면과 루프가 만드는 틈의 면적이 서서히 증가하는데 이 구간에서 서서히 유속의 감소가 발생한다. 상/하부의 비대칭 단면에 의해 상부에는 가속된 유동에 의해 강한 와류가 발생하고 하부에서는 감속된 유속에 의해 약한 와류가 발생된다. 또한, 앞전으로부터 박리점간의 거리가 상/하면이 다르기 때문에 상/하면의 와류 생성 주파수가 서로 달라지게 된다(Fig. 6). 결과적으로 생성 주기와 강도가 서로 다른 와류에 의해 후류의 칼만 와류는 제 모양을 갖추지 못하고 급속히 소산되어 버린다. 마지막 모델 C는 모델 B와 동일한 단면이나 상부의 중앙 돌기를 없애고 이음매 부분에 약간의 단차를 둔 형상이다. 본 형상의 상부 단차는 골프공의 딴플과 같은 효과를 발휘하여, 난류 에너지를 유동 경계층에 공급하고 박리점을 최대한 뒷전에 가까이 하는 효과를 가져온다. 따라서 칼만 와류의 강도는 줄어들고 하부 와류와의 위상차는 더욱 커짐으로써 모델 B의 개선을 꾀한 것이다.

DAWT 시뮬레이션에서는 4-CPU의 워크스테이션을 이용하였다

3. 시험 결과

3.1 각 모델간의 유동장 해석 결과 비교

Fig.7은 DAWT 시뮬레이션을 통해 얻은 루프랙 크로스바의 형상별 유동장 그림이다. 주행속도는 모두 110kph이며, 그림은 특정한 시간에 크로스바 주변 유동장의 난류 kinetic energy 분포를 보여주고 있다. 모델 A에서 가장 강력한 칼만 와류는 모델 C에서 그 강도와 주기성의 감소를 보이고 있다. 모델 A의 후방에서 관찰되는 높은 kinetic energy 영역은 모델 B, 그리고 특히 모델 C로 갈수록 그 영역이 넓어지며 강도가 희석되는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 후류의 주기적 섭동은 크로스바의 표면에 압력 변동을 일으키게 되어 풍절음인 aeolian tone을 발생시킨다. 서두에서 언급한대로 크로스바의 소음은 와류의 주기적 변화에 의한 것이므로 특정 주파수에 집중되어 나타나며 그 크기는 와류의 강도에 비례한다. 모델 A의 상부면에 광범위하게 나타나는 고(高) kinetic energy 영역은 다른 모델들의 그것에 비해 강도가 높고 넓은 영역에 걸쳐 있어, 크로스바 표면에 커다란 압력 섭동을 일으킨다. 후류에 나

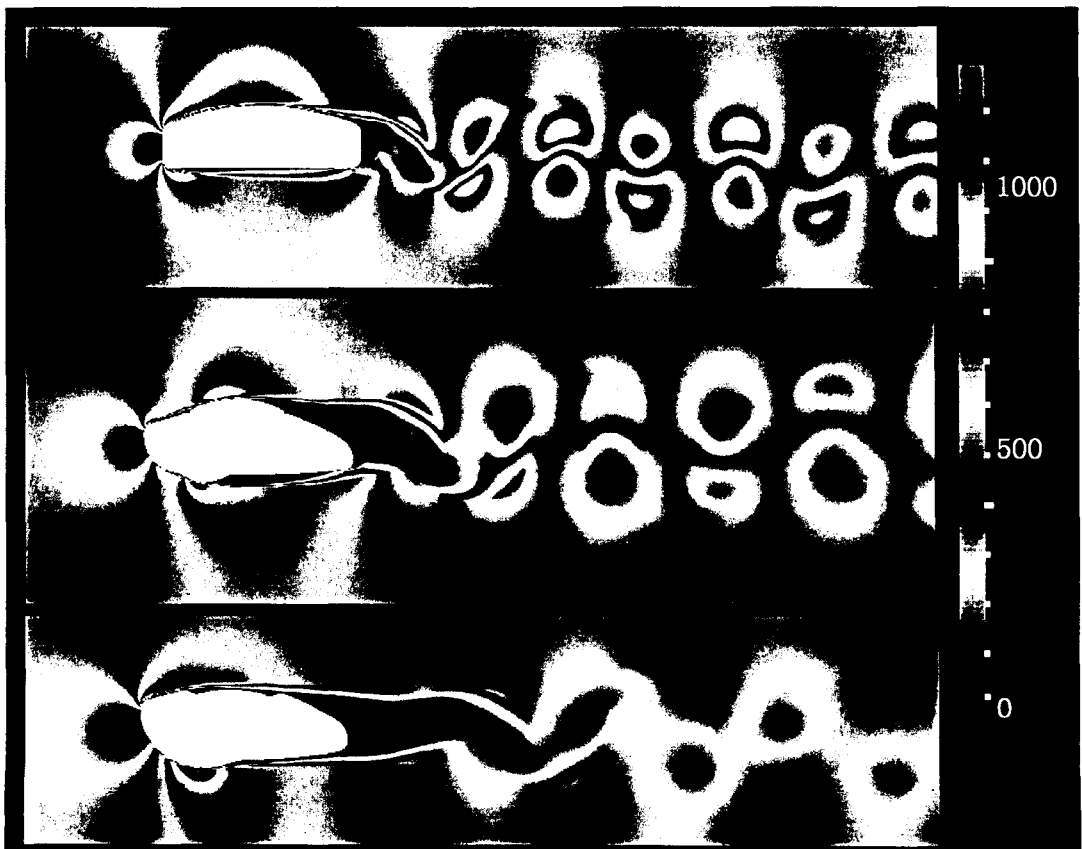


Fig. 7 각 모델의 유동장 가시와 결과 (Turbulence kinetic energy @110 kph)

타나는 와류의 강도 차이에서 모델 A 의 소음이 가장 크고 모델 C 의 소음이 가장 작을 것 이라는 사실을 유추할 수 있다. 와류 생성의 주기성을 살펴보면 모델 A 의 와류가 가장 촘촘하게 배열되어 높은 주파수를 가지고 생성되고 있음을 알 수 있다. 이러한 사실에서 aeolian tone 이 나타나는 주파수 또한 모델 A 가 가장 높고 모델 C 로 갈수록 낮아질 것이라는 유추가 가능하다.

3.2 각 모델간의 양력계수 해석 결과 비교

루프랙 크로스바의 소음은 양력 섭동에 의한 양력 쌍극 (lift dipole) 과 항력 섭동에 의한 항력 쌍극 (drag dipole) 으로 이루어져 있다. 즉, 상/하로 섭동하는 힘과 전후 방향으로 변화하는 힘에 의한 소음이 합쳐져 aeolian tone 을 발생시키는 것이다. 이러한 비정상 (unsteady) 쌍극 소음은 그 방향성에 있어 힘의 섭동 방향으로 가장 크게 발생된다. 즉, 양력 변화에 의한 소음은 크로스바의 상/하로, 그리고 항력 변화에 의한 소음은 크

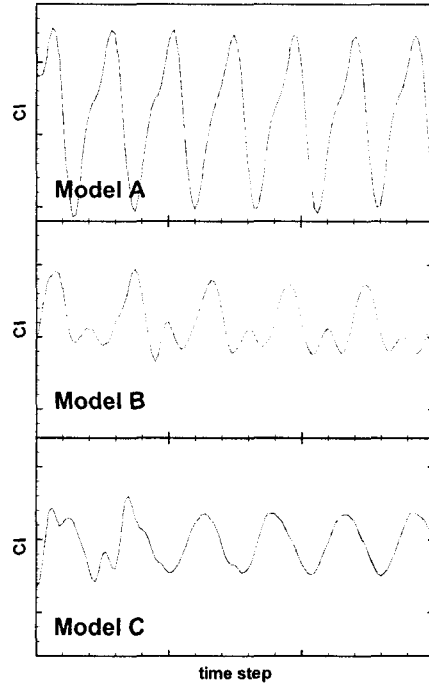


Fig. 8 각 모델의 양력 계수 변화

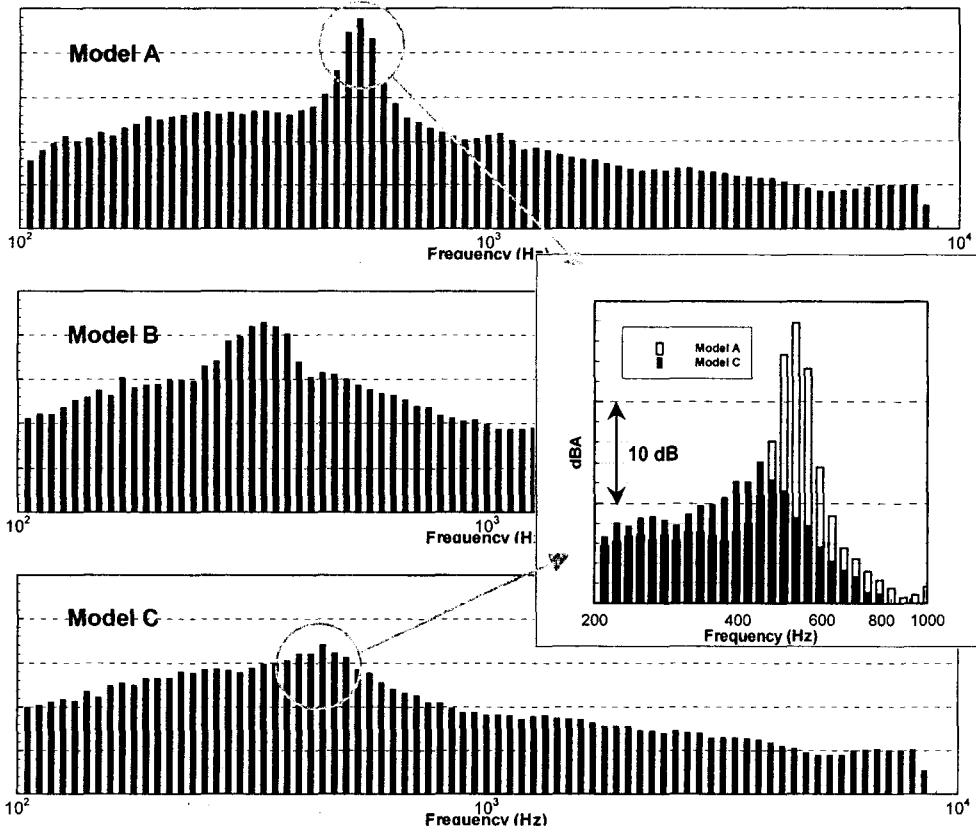


Fig.9 실차 실험에 의한 각 모델의 풍절음 음압 레벨 비교 (110 kph, 1/12 Oct.)

로스바의 전후방으로 큰 방향성을 갖게 된다. 그러나 루프랙 크로스바와 같은 뭉툭한 물체의 경우

양력의 섭동 크기가 항력의 섭동에 비해 매우 크므로, 대부분의 소음이 양력 쌍극의 성질을 가진다고 볼 수 있고, 그 방향성 또한 상/하 방향으로 가장 크게 방사된다.

Fig.8 은 각 모델의 양력계수 변동을 시간에 대해 보여주고 있다. 주기적으로 생성되는 칼만 와류의 영향으로 인해 양력 계수가 일정한 주기를 가지고 변화하고 있다.

모델 A 의 경우 그 진폭이 가장 크며, 모델 C 의 진폭이 가장 작다. 비대칭 상/하 단면이 도입된 모델 B 의 경우, 주된 피크들 사이에 작은 피크들이 관찰된다.

모델 B 의 양력계수 변화선도는 비대칭 단면의 도입으로 상/하면의 와류 생성 주파수를 달리 한 효과를 잘 보여주고 있다. 상/하면에서 같은 위상의 와류가 생성되는 모델 A 에 비해 서로 다른 위상을 가진 와류가 생성되는 모델 B 와 C 는 서로 간섭을 일으키는 와류 쌍에 의해 표면 압력의 변화가 훨씬 작다. 모델 B 와 모델 C 의 양력계수 변화를 비교해 보면 모델 C 의 진폭이 모델 B 에 비해 작을 뿐만 아니라 그 기울기 또한 모델 B 에 비해 작음을 알 수 있다. 풍절음은 쌍극 소음이므로 표면 압력의 진폭과 함께 압력 변화의 기울기에 비례한다는 점을 고려 하면 모델 C 의 소음레벨이 모델 B 의 그것에 비해 작다는 것을 알 수 있다.

3.3 풍절음 계측 결과 및 분석

루프랙 크로스바를 장착하고 On-Road 실험을 수행하여 측정된 소음 스펙트럼이 Fig. 9 에 나타나 있다. 유동장 분석에서 기대된 대로 모델 A 의 530 Hz 대역에서 나타나는 aeolian tone 이 동일한 조건의 모델 C 에서는 사라지는 것을 알 수 있다. 모델 C 의 최대 피크 레벨은 모델 A 에 비해 약 13dBA 정도 감소하였고 이러한 수치는 실차 주행 시 승객이 인지 할 수 없는 정도이다. 총 음압 레벨 또한 모델 C 가 모델 A 에 비해 7dBA 정도 개선 되었다. 모델 B 의 경우는 모델 A 보다 낮은 주파수 (330 Hz) 대역에서 최고치를 갖는다. 이는 칼만 와류의 주기가 길어짐에 따라 생긴 결과이다. 비대칭 단면의 적용 효과는

Table 1 개선 전/후의 총 음압 레벨

속도 (km/h)	모델 A (dBA)	모델 C (dBA)	개선량 (dBA)
90	94.7	87.6	7.1
110	101.2	94.1	7.0
130	107.0	99.2	7.8
150	110.7	103.0	7.7

특정 주파수에 집중되어 있는 aeolian tone 을 분산시키거나 소산 시키는 것으로서 모델 B 와 모델 C 의 소음 스펙트럼에 그 결과가 잘 나타나고 있다. 모델 B 와 모델 C 의 스펙트럼에서 모델 C 의 소음 레벨이 전체적으로 낮아진 것을 알 수 있다. 모델 B 의 표면 상단 돌기는 고무를 대어 만들었으나, 크로스바의 재질인 철과 열 팽창계수가 달라 이음매 부분에 틈새가 생기고, whistle noise 가 생성되는 경우가 있어, 이를 제거하였다. 모델 C 는 고무 돌출부를 제거하며 생긴 이음매를 메워 단차를 생성하여 상/하단의 비대칭성을 유지하였고, 이들 단차들은 경계층 내부에 난류 에너지를 공급하여 박리영역을 최대한 후방으로 유지시킴으로써 칼만 와류의 강도를 줄이고, 소음을 감소시키는 효과를 가져왔다. 다음 표는 각 주행 속도별 모델 A 와 C 의 총 음압 레벨을 정리하여 보여주고 있다. 모든 속도 영역에서 7dB 이상의 개선효과를 얻었으며, 따라서 aeolian tone 은 완전히 제거 되었음을 알 수 있다.

따라서 모델 C 는 모델 B 의 개선 형상으로서 기존의 주물을 그대로 이용하여 추가 비용 없이 소음을 감소시킨바, 최종 모델로 채택되었고 현재 양산되고 있다.

4. 결 론

최근 급격히 늘어난 루프랙 크로스바 장착에 의한 윈드노이즈를 비대칭 단면 형상을 이용하여 효과적으로 저감 하였다. 세계 최초의 상/하 비대칭 단면 도입으로 루프랙 크로스바의 구조적 강성은 최대한 유지하면서도 승객들의 불만 사항인 윈드노이즈(aeolian tone) 는 완전히 제거하였다. 본 연구는 또한 디지털 무향 풍동 (DAWT) 을 이용하여 개발 프로세스를 체계화하고, 복잡한 유체역학 및 소음 현상을 미리 분석함으로써 단순 반복적 스타일링과 실험의 비용을 절감하는데 성공하였다.

가. 상/하 비대칭 단면 형상은 루프랙 크로스바의 구조적 강성을 유지하면서 윈드노이즈의 일종인 aeolian tone 의 음원을 근본적으로 제거한다.

나. 상/하 비대칭 단면을 적용한 최종 모델은 기존 모델에 비해 최대 피크 값이 약 13dBA, 총 음압 레벨은 7dBA 이상 개선 되었다.

다. DAWT 를 이용한 정확한 분석은 제작 및 실험의 반복 횟수를 획기적으로 줄여 개발 기간을 단축하며 시행 착오를 크게 감소 시킬 수 있다.

참고문헌

- (1) 이강덕 등, 2000, “디지털 물리학에 의한 자동차 공력소음예측 소프트웨어 검증 및 적용,” 수송기계 소음·진동 관련 Software 적용 및 개발 세미나, 한국소음진동공학회, pp. 23-30.
- (2) C. Teixeira, 1992, “Continuum Limit of Lattice Gas Fluid Dynamics”, Ph.D. Thesis, MIT.
- (3) G. Strumolo, B. Viswanthan, A. Anagnost, Alajbegovic, H. Chen, 1997, “Digital Physics Analysis of Vehicle Aerodynamics Noise”, ISATA.
- (4) U. Frisch, D. D’Humieres, B. Hasslacher, P. Lallemand, Y. Pomeau,, J. P. Rivet, 1987, “Lattice Gas Hydrodynamics in Two and Three Dimensions”, Complex Systems, 1, 649-707.