

현대 자동차 무향 풍동에서의 외부 소음원 파악 기술

External Wind Noise Source Identification in Hyundai Aeroacoustic Wind Tunnel

정 승 균*
Seungkyun Chung

ABSTRACT

Aeroacoustic technology to improve the acoustic comfort in high-speed became a major topic in vehicle development process. Although most of wind noise reduction and sound quality improvements are possible with full vehicle, the countermeasures should be applied at the early design stage. Acoustic holography technology was used to identify the external wind noise sources of a vehicle in Hyundai Aeroacoustic Wind Tunnel. Microphone self-noise reduction techniques and several reference microphone positions are investigated in order to obtain proper results.

주요기술용어 : Wind Noise(공력소음), Turbulence Noise(풍절음), Leak Noise(흡출음), Cavity Noise(공동소음), STSF(음장의 공간변환법), Acoustic Holography(음향 홀로그래프), Aeroacoustic Wind Tunnel(무향 풍동)

1. 서론

자동차 NVH 기술의 발전과 더불어 공력소음의 중요성은 지난 십 수년 동안 꾸준히 증대되고 있다. 북미 지역에 판매된 자동차에 대한 초기 소비자 만족도 조사(J. D. Power 사)에 따르면, 공력소음에 대한 소비자의 요구 수준은 매년 증가하고 있으며 자동차를 새로 구입하고자 하는 예비 고객의 차량 선정에 많은 영향을 주는 주요 인자 중의 하나이다.

공력소음은 100km/h 이상의 고속 주행 중 운전자와 승객의 피로감에 영향을 주는 가장 중요한 요소이다. 또한, 고속 주행 중의 자동차 실내의 음질 수준을 결정하는 중요한 요소로 음질

개발을 위해서는 빼놓을 수 없는 중요한 항목으로 인식되고 있다.

공력소음은 그 발생 구조에 따라 풍절음, 흡출음, 공동소음으로 대별되며 이외에도 바람에 의한 차체부착 부품의 떨림음 등도 중요한 공력소음의 한 예이다. 110km/h 로 고속 주행 중 자동차 실내에서의 공력소음 성분의 기여도의 예는 Fig. 1 에서 보여주고 있다.

각 성분의 기여도를 살펴 보면, 공력소음 중 차체 하부에서 발생하는 하부 풍절음은 전체 공력소음에서 차지하는 비중이 50% 정도로 가장 중요한 공력소음 발생원이고 흡출음과 상부 풍절음은 각각 25% 정도의 비중을 차지하고 있는데 여기서 흡출음에는 공동소음이 포함된 것이다. 하부 풍절음은 자동차 하부 샤시 부품의 레이어아웃과 차체 바닥의 모양과 관련되며 하부 유

* 회원, 현대자동차 기능시험 2팀

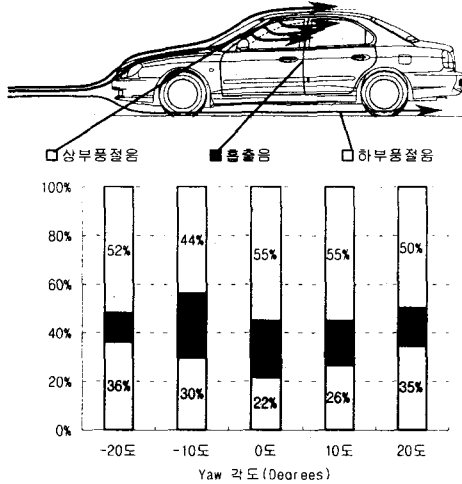


Fig. 1 공력소음의 실내 기어도 분포

동이 되도록 돌출부나 복잡한 형상에 의해 영향을 받지 않도록 레이아웃 설정 단계에서 편평한 구조로 해야 한다. 흡출음 개선 기술은 고무류 제조 및 설계 기술의 발전과 더불어, door 개폐 감, 개폐 내구, 승하강 내구 등의 내구 성능 및 sealing 성능을 동시에 마련할 수 있는 수준에 도달하고 있다. 시험 결과에서 알 수 있는 바와 같이 흡출음은 공력소음 중에서 생각 보다 차지하는 몫이 그렇게 높지 않다는 점이다. 공동 소음은 공동을 스치는 유동에 의해 공동내부 공기 입자의 Helmholtz resonance 현상에 의해 발생하는 것으로 발생구조를 이해하고 있으며, 저감 기술에 대한 연구가 국내에서도 활발하게 진행되고 있다.^{1,2)}

이에 비해서 상부 풍절음은 자동차의 스타일링과 밀접한 관련이 있으며 와 유동, 박리 유동, 재부착 유동에 의해 차체 표면에 발생하는 압력교란 중 실내로 전파되는 성분을 말한다. 특히, 운전석에 가장 영향을 주는 것은 'A'-필라 주위의 유동으로 고속 주행 중 공력소음의 음질을 개선하기 위해서는 'A'-필라 주위 유동 구조 개선이 무엇보다 중요하다. 상부 풍절음을 개선하기 위해서 자동차 제조 회사들은 많은 연구를 진행하고 있는데 이러한 연구들의 대부분은 우

선 상부 풍절음의 발생 부위를 파악하는 기술에 많은 노력을 기울이고 있다.

지금까지 발표된 상부 풍절음 발생부위 파악 기술은 다음과 같다.

우선, 자동차 실내에서 head dummy를 통해 소음을 측정하여 dummy의 왼쪽 마이크로폰과 오른쪽 마이크로폰의 시간 지연을 계산한 후, 각 주파수별 소음 발생원의 방향과 위치를 파악하는 방법³⁾이 있다. 그러나, 이 기술은 광대역 소음인 공력소음의 특성을 고려할 때 특정 주파수에서 그 소음의 위치를 정확 찾아내기가 쉽지 않아 공력소음에 적용하기에는 곤란한 것으로 파악되었다.

둘째, 신경회로망을 이용한 방법⁴⁾이 있다. 신경회로망은 양산 차량에 대한 평가와 자동차 각 부위 제원을 바탕으로 신 차종 개발 시, 제원 데이터를 근거로 공력소음 수준을 미리 예측할 수 있는 방법이다. 그러나, 이 방법은 양산 차량에 대한 각 부위 별 제원이 확보되어야 하고 각 차량에 대한 평가 결과가 반드시 필요하여 일반적인 방법으로 적용하기에는 어려운 점이 있다.

셋째, CFD를 이용한 방법이 있으나, 일부 공력소음을 풀 수 있는 프로그램이 발표되고 있으나 자동차 개발 단계에 이용할 수 있기 위해서는 더 많은 노력과 검증이 필요하다.

그 밖에, 무향 풍동에서 마이크로폰 어레이, intensity probe 및 acoustic mirror 등을 이용해 일정 위치에서 측정된 신호를 가지고 자동차 표면상의 소음 분포를 예측하는 음향 홀로그래프 방법이 있다. 이 방법은 시각적으로 자동차 표면에서의 소음 발생 분포를 볼 수 있기 때문에 개발 단계에서 매우 유용하게 이용할 수 있다.

본 논문에서는 1999년 국내에서 처음으로 건설된 현대자동차 실차 무향 풍동에 도입된 홀로그래프 시스템을 소개하고자 하며, MIRA 자동차에 대한 적용 사례를 통해 개발 단계에서 본 시스템의 적용 가능성을 설명하고자 한다.

2. 현대자동차 무향 풍동(HAWT)

2.1 무향 풍동 성능

현대자동차 무향 풍동은 3/4 개방형에 바닥면을 제외한 모든 벽면에 음향 웨지를 사용하여 마감한 시험부를 가지고 있으며 Göttingen 식 풍동이다. 암소음 레벨은 발란스 중심으로부터 5m 떨어진 위치에서 100km/h 조건에서 57.8 dBA 이며 시험 차량이 있을 때는 72dBA 로 충분한 신호 대 잡음비가 모두 10dBA 이상 차이가 나타나는 것으로 확인되었다. 실차를 가지고 재현성 시험을 수행한 결과, 60~190 km/h 속도 조건에서 SPL 이 최고 0.3 dBA, Loudness 가 최고 0.9 Sones 정도의 불확실성을 가지고 있는 것으로 나타났다.

따라서, HAWT 를 이용하여 외부 소음원 파악 시험을 할 때 고려하여야 할 풍동 성능은 문제가 없는 것으로 나타났다.

2.2 외부 소음 파악용 장비 및 설비

외부 소음 파악을 위해 현대자동차 무향 풍동에 도입된 설비 및 장비의 개략도는 Fig. 3 과 같다.

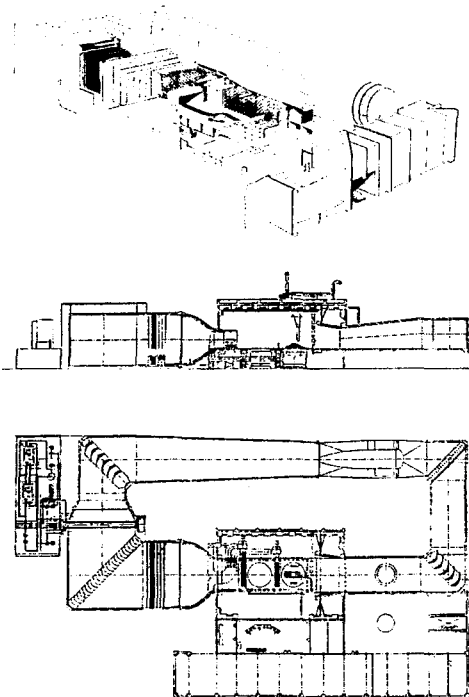


Fig. 2 현대자동차 무향 풍동(HAWT)

자동차 외부소음 및 실내소음을 측정하기 위한 시스템은 STSF(Spatial Transform of Sound Field) 와 Beam forming 방법에 의한 홀로그래피 시스템이 갖추어져 있다. 32CH 의 마이크로폰을 통해 동시에 데이터를 수집할 수 있도록, HP VXi front end 와 이를 분석하기 위한 lms 시스템 및 PAK 시스템이 구축 되었다. 마이크로폰 어레이는 15 개의 1/4" B&K 마이크로폰 어레이를 사용할 수 있다. 또한 고주파 홀로그래프를 위한 직경 1.6m 의 acoustic mirror 가 있으며 X-형 안테나 jig 가 구비되어 있다. 계측 센서는 B&K 1/4" 및 1/2" 마이크로폰, B&K intensity probe 로 구성되어 있다.

3. 음향 홀로그래프^{6,7)}

3.1 실차 풍동에서의 음향 홀로그래프

음향 홀로그래프는 음향 홀로그램면으로 불리는 면에서 측정된 음압 정보를 이용하여 임의의 위치의 음압, 속도 및 intensity 등의 예측을 가능하게 하는 방법이다. 따라서, 음향 홀로그래프 방법은 음장을 가시적으로 볼 수 있고 소음원의 정확한 위치 및 전파 경로를 파악하는데 주로

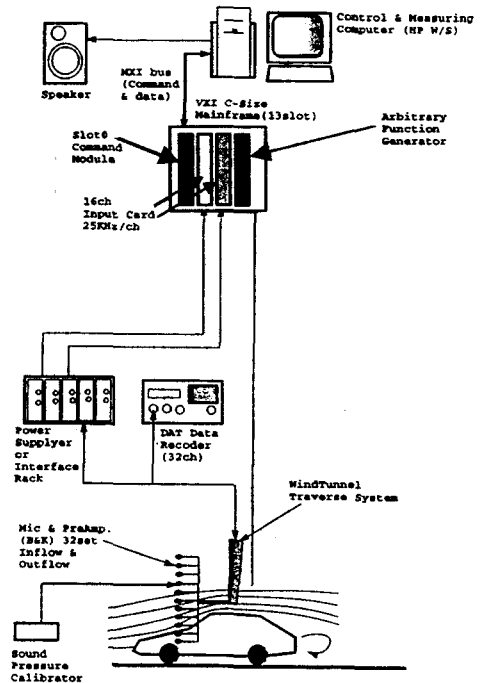


Fig. 3 현대자동차 무향 풍동의 소음 측정 시스템

이용된다. 일반적으로 특정 소음에 대한 주파수에 대해 적용하므로 peak로 나타나는 소음원 파악에 많이 사용한다. 그런데, 대부분의 공력소음은 광대역 특성을 나타내며 뚜렷한 peak를 나타내지 않는 경우가 많다. 따라서, 공력소음에 대한 홀로그래프 기술은 일정 주파수 대역에 대한 소음 분포를 보는 방법을 사용하고 있다.

실차풍동에서는 일반 무향실에서 홀로그래프 기술을 적용할 때와 달리 고려해야 할 사항은 먼저, 움직이는 매질의 영향을 검토하여야 한다. 일정 속도로 이동하는 매질에서는 측정 위치와 소음원 위치 간의 거리에 따라 매질 이동 효과 즉, 도플러 영향을 고려해야 한다. 일반적으로, 측정점과 소음원간의 거리가 1m 이내면, 도플러 영향은 무시할 수 있을 정도로 작다고 알려져 있으나, 그 이상이면, 도플러 영향을 보정해야 소음원의 정확한 위치를 파악할 수 있다. 따라서, 차량과 30cm 거리에서 측정하는 STSF인 경우는 도플러 영향을 고려하지 않아도 되며, 유동 밖에서 음향 거울로 측정하는 경우에는 도플러 영향을 고려해야 한다.

또한, 움직이는 공기 매질이 일정속도로 움직이지 않고 속도 분포를 갖기 때문에 이에 따른 소음 전파 경로의 왜곡 현상(굴절)이 발생한다. 특히, 전단류에서는 이 굴절 현상이 심하게 발생하기 때문에 측정 위치가 유동 밖에 놓이는 음향 거울일 경우, 전단층 보정 방법이 사용되어야 한다.

유동 내에 홀로그램 면을 설정할 경우, 측정을 위해서는 마이크로폰 어레이를 지지할 수 있는 이송장치가 필요하다. 이송장치로 유동장 내에서 소음을 측정할 경우, 이송장치의 영향 즉, 이송장치에서 발생하는 자체 소음과 시험 차량에서 발생한 소음이 이송장치에 부딪혀 전파 경로가 왜곡되는 산란 현상의 영향을 고려해야 한다. 현대자동차 풍동에서 이송장치 영향을 검토해 본 결과, 이송장치에 의한 특이소음의 발생이 없었으며 산란 및 자체 소음에 의한 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

측정하는 마이크로폰이 유동에 노출되기 때문에 마이크로폰 주위 유동에 의한 자체소음이 발생할 수 있다. 만약, 마이크로폰을 그냥 사용할 경우, 마이크로폰 주위의 난류유동에 의한 공력소음이 측정하고자 하는 자동차 풍절음 레벨 보다 높아 충분한 신호 대 잡음비를 얻을 수 없다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 nose cone, wind screen 을 주로 사용한다. 분석 결과, nose cone 은 난류 유동에서는 유동 방향이 일정하지 않기 때문에 자체 소음레벨이 높게 나올 뿐만 아니라 반복성이 떨어지는 것으로 나타나 실차풍동에 적용하기에는 어려운 것으로 나타났다⁸⁾. 이에 비해서 wind screen 은 오히려 안정적인 신호를 얻을 수 있었으며 감성 평가 결과, 난류 특성이 많이 상쇄되는 것으로 나타났다. 현대자동차 풍동에서는 Fig. 4 와 같이 직경이 25mm 인 원형 wind screen 을 사용하였다.

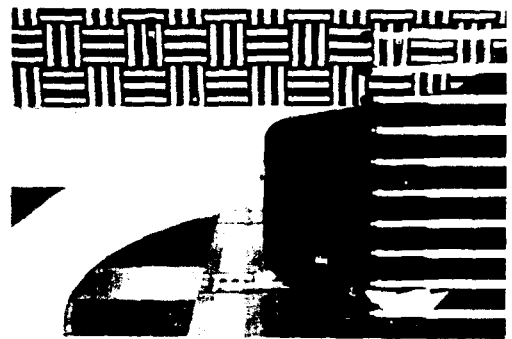


Fig. 4 Wind screen

4. 홀로그래프에 의한 자동차 외부 소음원

4.1 MIRA 표준 자동차

MIRA 자동차는 풍동 별 시험 결과를 보정하기 위한 목적으로 MIRA 풍동에서 표준 자동차로 만들어졌으며 이에 대한 일부 공력 시험 데이터가 공개되어 시뮬레이션에서 검증 데이터로 많이 쓰고 있다.

MIRA 자동차는 Fig.5 와 같이 세단형, 웨곤형 및 fast back 형으로 변환할 수 있으며 곡률이 250mm 적용되어 있어 유동 박리가 거의 일어나지 않는 특성을 갖고 있다.

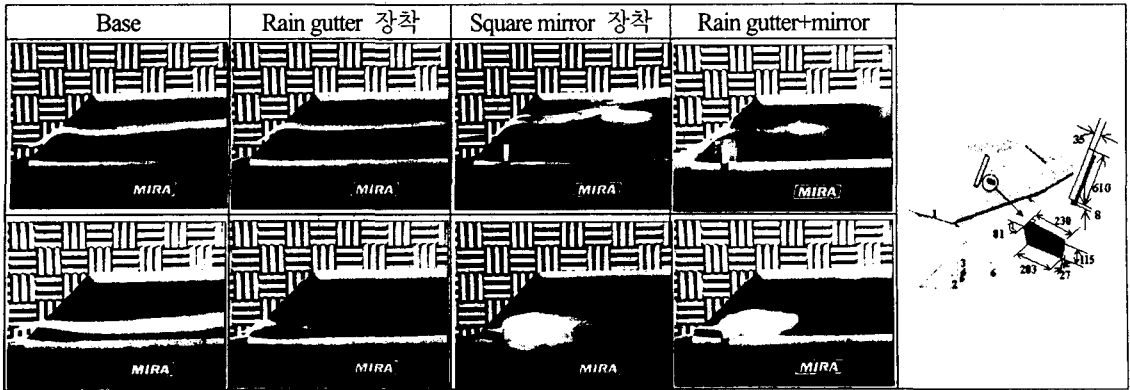


Fig. 5 MIRA 표준 자동차에 대한 유동 가시화 결과

따라서, 후류를 제외한 대부분의 영역이 부착 유동으로, 뚜렷한 공력소음 발생원이 없는 것으로 알려져 있다. 본 절에서는 뚜렷한 소음원이 없는 세단형 MIRA 자동차에 일반 자동차에서 소음원으로 알려진 rain gutter와 후사경을 부착하여 홀로그래피를 통해 이 소음원을 잘 파악할 수 있는지를 점검하고자 한다.

4.2 유동 가시화 시험

공력소음 발생원 부착에 의한 유동 구조를 이해하기 위해 연기에 의한 가시화 시험을 수행하였다.

공력 소음원으로 장착한 것은 'A'-필라 풍절음의 주요 원인으로 알려져 있는 rain gutter와 사각형 후사경이다. 각각의 제원은 Fig. 5와 같다.

MIRA 표준 자동차의 'A'-필라 주위 유동은 와류발생이 없으며 앞좌석 측면 유리에서 후방으로 갈수록 유선이 약간 상승하는 구조를 가진다. Rain gutter를 장착하면 유선이 약간 하강하여 측면 유리에서의 전체적인 유선이 수평을 유지하게 해주는 것으로 나타났다. Rain gutter 없이 사각형 후사경을 달았을 때, 후사경 후방에는 비교적 넓은 후류 영역이 형성되며 'B'-필라 근처에서 와류를 형성하여 45° 상향으로 말려 올라간다. 'A'-필라 상부를 통과한 유선은 후사경의 영향으로 'B'-필라 근처에서 같은 현상이 발견된다. 후사경과 rain gutter를 동시에 적용했을 경우, rain gutter는 말려 올라가는 위치를 'B'-필

라에서 더 후방으로 이동시키는 것을 볼 수 있다.

4.3 홀로그래프 시험

MIRA 자동차에 대한 홀로그래프 시험은 9cm 간격으로 배치된 15개의 1/4" 마이크로폰 어레이를 가지고 9cm 등간격으로 시험 차량을 완전히 덮도록 59회 측정하였다.

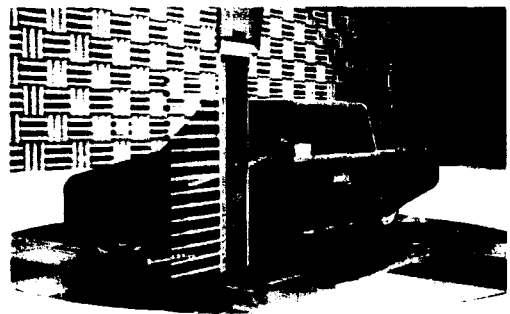


Fig. 6 MIRA 표준차량 홀로그래프 시험 장면
기준 마이크로폰은 6군데 설치하였는데 설정 위치 및 장착 방법은 Table 1과 Fig.7과 같다.

Table 1 기준 마이크로폰 위치 및 장착 방법

구분 번호	장착 위치	장착 방법
1	앞 범퍼 중간	Wind screen
2	'A'-필라	유동에 노출
3	후사경 후방	Wind screen
4	후사경 후방	Wind screen
5	'B'-필라 중간	비닐 테이프
6	유동장 외부 5m	Wind screen

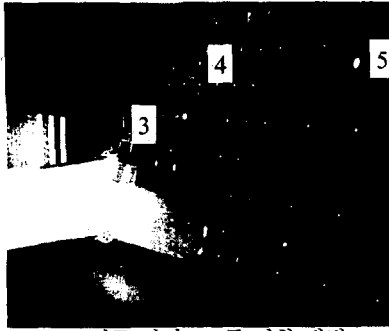


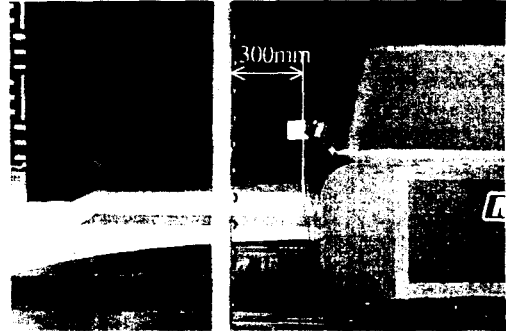
Fig. 7 기준 마이크로폰 장착 방법

6 개 지점에 기준 마이크로폰을 설치한 것은 적절한 기준 마이크로폰 위치를 찾고자 했기 때문이다. 또한, 자동차 표면에 같은 높이로 수직하게 마이크로폰을 장착했을 때, 유동의 교란에 의한 영향을 검토해 보았다.

홀로그래프 면은 MIRA 자동차 측면에서 30 지점으로 설정하였다. 홀로그래프면은 소음원에 가까우면 가까울수록 근접음장의 영향을 잘 반영할 수 있기 때문에 좋은 결과를 얻는 것으로 알려져 있으나, scanning 할 때, 후사경과의 간섭을 피하기 위해 30cm 로 설정하였다.

5. 홀로그래프 방법에 의한 MIRA 자동차 풍절음 발생원인 파악 결과 및 검토

1 번 위치에 wind screen 을 씌운 기준 마이크로폰에 대해 분석한 결과, 앞 범퍼하부와 하체 소음 이외에는 거의 상관성이 떨어지는 결과를 보였다. 따라서, 'A'-필라 주위 소음원 파악 시험인 경우, 기준 마이크로폰 주변의 큰 소음에 의해 관심 있는 소음원에서 발생하는 소음을 마스크 한다는 것을 알 수 있었다. 따라서, 기준 마이크로폰 위치 설정 시, 소음원에서 너무 멀리 떨어지거나 주변의 큰 소음원이 존재하는 곳을 가급적 피해야 한다는 것을 알 수 있다. 2번~5 번 위치와 같이 wind screen, 비닐 테이핑 유무에 상관 없이 rain gutter 와 사각 후사경에 의한 소음원의 위치를 잡아내나 800Hz 이상의 고주파 영역에서는 장착 위치에서 유동의 영향을 많이 받기 때문에 소음원의 위치를 알지 못하는 신차의 경우에는 적용하기가 곤란하다는 것을 알 수 있었다. 즉, 고주파로 갈수록 상류 및 하류가 모



두 소음원으로 간주되어 소음원의 정확한 위치를 파악하기에는 무리가 있었다. 이것은, 유동의 영향을 받는 위치에는 기준 마이크로폰을 두지 말아야 한다는 것을 말해 준다.

MIRA 자동차에 대해 소음원의 위치를 가장 깨끗하게 예측할 수 있는 기준 마이크로폰의 위치는 유동장 밖의 7번 위치였다. 각 주파수 대역별 소음원 위치에 대한 가시적인 분석 결과는 부록의 Fig. 9 에 나타내었다. 분석에 따르면, rain gutter 의 영향은 rain gutter 하단에서 주로 소음이 발생하고, 높이가 8mm 인 이 경우, 전반적으로 rain gutter 의 영향은 그리 크지 않게 나타났다. 후사경 장착에 따른 영향을 보면 주로 중심 주파수가 500~1000 Hz 구간에서 소음이 주로 발생하는 것으로 나타났으며 그 이상의 고주파 영역에 해당하는 소음의 발생 정도는 작게 나타났다.

4. 결론

현대자동차 무향 풍동에서 풍절음에 대한 음향 홀로그래프 기법을 이용하여 풍절음 발생원의 위치 및 강도를 파악하였다. 대상 차량은 'A'-필라에서 와류가 발생하지 않는 MIRA 자동차를 선정하였으며 기지의 풍절음 발생원을 제대로 파악하는지를 확인하였다. 그 결과, 현대자동차 무향 풍동에 외부소음 파악을 위해 도입된 시스템이 외부 소음원을 파악하는데 적절하게 이용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

기준 마이크로폰의 위치 선정 및 장착 방식에 따른 영향을 살펴본 결과, 다음과 같은 교훈을 얻을 수 있었다.

1. 기준 마이크로폰은 유동에 노출되어 있을 때 소음원과 너무 멀리 떨어져 있거나 강한 소음원이 있는 위치에 놓으면 유용한 정보를 얻을 수 없다.
2. 풍절음 주요 발생 부위에 마이크로폰을 유동에 노출되도록 장착하면, 난류 유동의 영향을 크게 받아 소음장에 대한 유용한 정보를 얻기 힘들며 이 현상은 고주파 영역에서 더 심각하게 나타난다.

후 기

본 논문의 진행에 도움을 주신 한국과학기술원의 김양한 교수님께 감사 드리며 시험 및 분석을 도와 주신 김대훈, 김건석, 이명한, 박형건님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 문영준, 고성룡, 조용, 한국유체공학학술대회 논문집, pp. 251-254, 2000.
- 2) 허대녕, 이덕주, 한국유체공학학술대회 논문집, pp. 267-270, 2000.
- 3) Hiroyuki Hoshino, Hiroyasu Katoh, SAE 1999-01-1125, pp.237-243, 1999.
- 4) Oda Kazunori, Sumitani Keiji, JSAE 9730461, Vol. 28, No.1, pp.71-76, 1997
- 5) 이강덕, 이명한, 박형건, 한국유체공학학술대회 논문집, pp.287-290, 2000.
- 6) J.D. Maynard, E.G.Williams, Y.Lee, JASA, Vol.78, No.4, pp.1395-1413, 1985.
- 7) W.A. Veronesi, J.D. maynard, JASA, Vol.81, No.5, pp.1307-1322, 1987.
- 8) M. Brock, B&K application notes, pp. 33-39.