

공압장치를 이용한 공력 소음 저감 연구

The research on reducing aeroacoustic noise using by Pneumatic Auxiliary Unit.

정경선† · 조형진*

CHUNG kyoungseoun, CHO hyeongjin

Key Words :Aeroacoustic noise, CFD, turbulent

Abstract

We conduct the research for reducing aeroacoustic noise occurred when a vehicle operates in high speed situation without modifying the structural configuration such as deforming A-pillar's side curvature. We introduce PAU (Pneumatic Auxiliary Unit) which is a sort of air duct using intake air through radiator grill. According to our research, we can reduce overall noise levels around the surface of HSM (Hyundai Simplified Model). When a vehicle runs 100km/s, area-weighted acoustic power level (AWAPL) indicates 33dB without PAU. However with PAU, overall AWAPL is decreased to 29dB which means we can improve silentness approximately 12% compared to ordinary case. Moreover we conduct similar implementation to steering situation especially about yawing. In various situations, -10, 0, 10 degree of yawing, we observe 10% reduction in the upstream region of HSM but little increase in downstream region. It seems that inlet air overlap turbulent kinetic energy to surrounding flow. Even though downstream region's noise is louder than upstream region, overall AWAPL is still lower than conventional condition. We also apply this scheme to the real vehicle situation, then we get reasonable output which can support our research outputs.

Nomenclator

- k : Turbulent kinetic energy
- ω : Turbulent frequency
- ρ : Density
- $\rho \bar{u}_i \bar{u}_j$: Unknown Reynolds stress tensor
- G_k : Production of turbulence kinetic energy
- Y_k : Dissipation of k
- G_ω : Production of ω
- Y_ω : Dissipation of ω
- D_ω : Cross- diffusion term

1. Introduction

1800년대 자동차가 최초로 개발된 이후, 소음을 줄이기 위한 노력은 계속되어 왔다. 자동차 소음의 원인에는 크게 엔진 소음, 파워 트레인 소음, 타이어 소음, 그리고 공력소음으로 나눌 수 있다. 이중

엔진 소음과 파워트레인 소음, 타이어 소음은 현재 과학기술의 발달로 상당히 그 세기를 줄여 왔지만, 공력소음은 엔진 성능이 증가함에 따라 차량 소음에 있어서의 비중을 점점 늘려가고 있는 추세이다⁽¹⁾. 1973년 Buchheim et al.⁽²⁾은 100mph에서 공력소음이 큰 비중을 차지한다는 결과를 도출 하였으며, Beidl et al.⁽³⁾ 또한 그의 저서에서 주행속도 60kph 이상에서는 타이어와 공력 소음이 그 외의 소음에 비해 상대적으로 크다고 하였다.

자동차 공력소음은 pressure fluctuation에 의해 발생한다. 이러한 pressure fluctuation을 유발하는 요인에는, 차체 표면에서 박리되어 나오는 separated flow와 문과 창문, 크랙등의 틈에서 발생하는 air leakage, cavity에서 발생하는 공명현상 등이 있다. 또한 Lighthill 식의 일반 해를 유도하면, 공력 소음이 차체 속도의 5~6 제곱에 비례함을 알 수 있다^(4,5). 오랜 시간 동안 이러한 소음 문제를 해결하기 위해 많은 시도가 있었다. 그 중 대표적인 방법이 A-pillar의 형상변화를 통한 소음 저감 기법이다. Kenji Ono et al.⁽⁶⁾은 A-pillar 측면 부가장 자리 부분의 곡률을 변경함으로써 1~4kHz 범위의 노이즈를 효과적으로 줄였다. Walker, R. et al.⁽⁷⁾은 SUV의 사이드 미러의 각도를 변화 시켜 30도 각

† 교신저자; 정희원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : Labiocyanic@gmail.com

Tel : 010-5555-5476

* 한양대학교 기계공학부

도에서 소음이 최소화 됨을 보였다.

현재 자동차 마켓에서 SUV 가 차지하는 비율이 점점 증가하고 있는 추세 이다⁽⁸⁾. 하지만 SUV 는 전면 부 면적이 일반 승용차에 비해 넓고, 차의 특성상 시야 확보를 위해 Wind Shield 의 각도가 큰 것이 특징이다. 이러한 특성은 Pressure Drag 을 크게 만들고, 유체의 Separation 을 유도하여 상대적으로 큰 소음이 발생하게 된다. 이에 우리는 SUV 의 특성을 훼손하지 않는 범위(형상 변화를 주지 않는)에서 공력에 의한 소음을 줄이기 위해 Pneumatic Auxiliary Unit 이라 명명한 추가 Air Duct 를 설치하여 연구를 진행하였다.

2. HSM with PAU MODELING in fixed Wind condition

HSM(Hyundai Simplified Model)은 (1)A 필라 와류 기인 박리-재부착 유동, (2)윈드셴드글래스~차량 루프부 유동, (3)차량 후류 유동을 해석하기 위해 현대 자동차에서 제공한 간략화된 모델이다⁽⁹⁾. 이 모델의 공력 소음을 해석하기 위해 우리는 포면 박리 현상의 효과적인 예측을 위해 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 식. (1), Turbulence Models 인 SST k- ω Model(2 equation model. 식 (2,3,4))을 사용하였고, 소음의 발생을 측정하기 위해 Lighthill's analogy 를 이용한 Broadband Noise Source Models 를 사용하였다.

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (3)$$

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max \left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF2}{\alpha^* \omega} \right]} \quad (4)$$

$$P_A = a \rho_0 \left(\frac{u^3}{l} \right) \frac{1}{a_0^5} \quad (5)$$

$$L_p = 10 \log \left(\frac{P_A}{P_{ref}} \right) \quad (6)$$

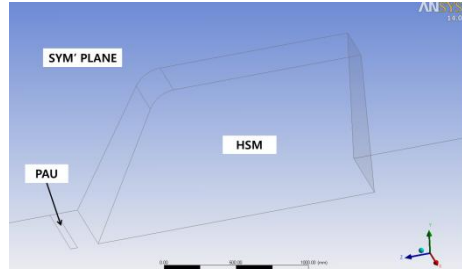


Figure 1 Computational domain of HSM with PAU

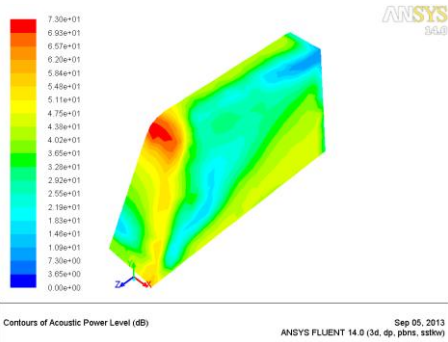
Figure 1 은 이러한 난류 모델에 HSM 과 PAU 를 적용하여 제작한 결과이다. PAU 는 HSM 의 전방 150mm 지점에 위치 시켰으며, inlet velocity 는 0, 60, 100, 140 km/h 로, flow inlet angle 은 wind shield 방향으로 45 도로 설정하였다. 선행 연구 조사^{(2),(3)}의 결과에 따라 공력 소음이 다른 소음 요인에 비해서 상대적으로 커지게 되는 차체 이동속도 100km/h 를 Boundary condition 으로 하였다.

Table 1Acoustic Power Level with variety conditions

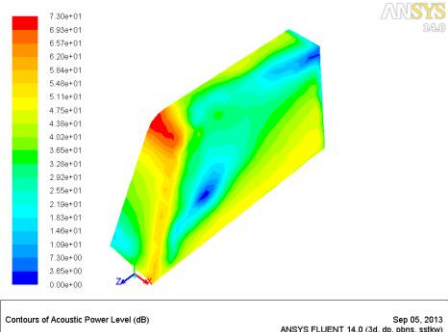
PAU V	0km/h	60km/h	100km/h	140km/h
APL(dB)at HSM	32.59	29.89	33.22	33.7
APS(dB)at Outlet	6.57	6.83	6.91	6.97

Table1 을 보면, PAU 에서 inlet velocity 가 60km/h 일 때 HSM 차체의 면적 평균 APL(Acoustic Power Level)의 값이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 Wind Shield 전방에서 Flow 가 Separation 되는 것을 강제적으로 PAU 가 flow 를 흘려 줌으로써 방지 하기 때문인 것으로 보인다. 때문에 Figure 2 에서와 같이 전방부의 APL 역시 전체적으로 감소함을 볼 수 있다.

하지만 Outlet 에서의 면적 평균 APL 의 값은 PAU 의 Inlet velocity 가 증가함에 따라 동시에 증가함을 볼 수 있다. 이는 Figure 3 에서처럼 PAU 에서 나온 flow 가 A-pillar 를 지나면서 박리되어 Noise 의 source 가 되기 때문으로 보인다. 따라서 PAU 를 장착하는 것은 차량 내부로 전달되는 소음을 저감시키는 데에는 효과적이겠으나, 외부로 전파되는 소음 감소시키지는 못하는 것으로 나타났다.

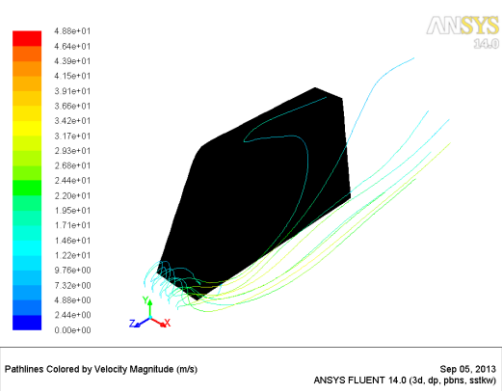


Contours of Acoustic Power Level (dB) Sep 05, 2013 ANSYS FLUENT 14.0 (3d, dp, pbrns, sstkw)



Contours of Acoustic Power Level (dB) Sep 05, 2013 ANSYS FLUENT 14.0 (3d, dp, pbrns, sstkw)

Figure 2 HSM surface APL without PAU(upside) with PAU(downside)



Pathlines Colored by Velocity Magnitude (m/s) Sep 05, 2013 ANSYS FLUENT 14.0 (3d, dp, pbrns, sstkw)

Figure 3 PAU Pathline

3. HSM with PAU MODELING in various Wind conditions

자동차가 주행 중 가질 수 있는 동작의 종류에는 Rolling, Pitching, Yawing 3가지가 있다. 그러나 우리의 이번 연구에서 가정되는 조건은 100km/h 이상의 고속 주행이므로, Rolling과 Pitching이 관여되는 경우는 상대적으로 적다고 할 수 있다. 따라서 Yawing이 일어날 때 PAU가 소음 저감에 어떠한

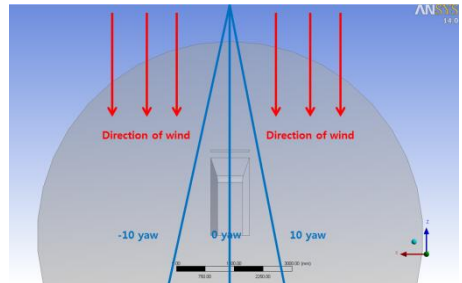


Figure 4 Vehicle yaw angles at 100km/h (After reference [7])

Table 2 Area-Weighted Acoustic Power Level(dB) according to Yaw angles

Yaw angle	0°	10°	-10°
Without PAU	33.31	33.97	33.98
With PAU	29.89	34.14	34.18

Table 3 Specified Acoustic Power Level(dB) distribution at Yaw angle 10°

HSM surface	Front	Back	Left	Right	Top
Without PAU	44.11	10.27	23.17	47.13	39.99
With PAU	42.40	9.89	26.02	45.88	40.32

영향을 미치는지 알아 보는 것도 중요한 연구 방향이라고 할 수 있겠다.

우선 선행 연구 조사로 진행했던 Walker, R. et al(7) 을 기준으로 Yawing 각도 10, 0, 과 -10 degree 를 기준으로 데이터를 측정하였다. (Figure 4) Table 2 를 살펴보면, PAU 를 장착한 Vehicle 이 앞서 진행했던 바와 같이 정면에서 불어오는 바람에서 상당한 소음감소 효과를 보여줌을 알 수 있다. 하지만 Yawing 에 의한 각도 변화에서는 PAU 가 상당히 취약한 것으로 드러났다. 진행한 결과를 좀 더 자세히 살펴보면, Table 3 와 같은 Acoustic Power Level 분포를 얻을 수 있다. 여기서 주목 할 점은 PAU 를 통해 전면 부, 차체 뒷면과 자체 회전 의 반대 방향 쪽 소음을 줄일 수 있지만, PAU 에서 방출된 Air 가 흘러 나가는 방향 쪽에서는 상대적으로 소음이 증가됨을 알 수 있다.

4. Real Model Analysis

앞서 진행한 HSM 시뮬레이션은 실제차량을 상당히 간소화 시킨 모델이기 때문에 실제차량에 적 적용되었을 때 결과를 예측해 볼 필요가 있다. 이에 따라 우리는 실제 시중에서 구할 수 있는 SUV모델



Figure 5 Actual Car Model(10) and Simplified simulation model

Table 4 Real model Area-Weighted Average Acoustic Power Level(dB)

	APL(dB)
Without PAU	24.59
With PAU	24.32

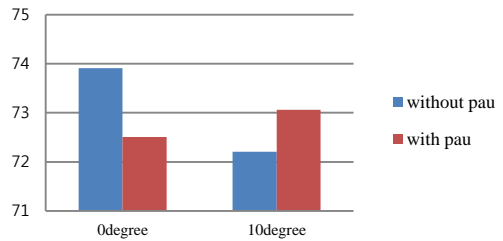
을 선정하고, 이를 최대한 유사하게 모델링(Figure 5) 하여 앞서 진행 연구 과정을 반복하였다.

그 결과 미세하지만 PAU의 추가 시 전반적인 소음 감소효과를 얻어 낼 수 있었다. 이러한 결과는 우리가 모델로 삼은 Porsche Cayenne가 상당히 공기 역학적으로 설계가 되어 있기 때문인 것으로 보인다. 이러한 모델에서도 소음 감소가 이뤄짐을 확인 했기 때문에, 좀더 투박한 형상을 가진 SUV의 경우 더 많은 소음 저감 효과가 있음을 예상 할 수 있었다.

5. Conclusion

이번 연구의 전반적인 목표는 형상변화를 거치지 않고 SUV차체의 소음을 줄일 수 있는 방안을 모색하는 것이었다. 그 결과 추가적인 Air Duct의 설치를 통해 박리 유동을 Control하여 소음을 저감하는 방법을 고안해 낼 수 있었다. Figure 6을 살펴보면, 정면으로 외부 공기가 흐를 때 예는, Maximum noise와 Average noise모두 상당히 감소 함을 볼 수가 있다. (각각 약 2% 와 10%) 이는 우리가 이전에 예측한 바와 같이 차량의 보닛과 윈드실드의 사이에서 일어나는 flow의 separating time을 지연시키기 때문이다. 하지만, Yawing과 측풍 등에 의해서 정면이 아닌 경사진 각도로 유동이 유입되는 경우, 오히려 PAU가 flow의 turbulent kinetic energy를 증가시켜 소음이 증가 되었다. 그러나 Figure 6에서 보이는 바와 같이 정면으로 불

Maximum Acoustic Power Level of HSM



Average Acoustic Power Level of HSM

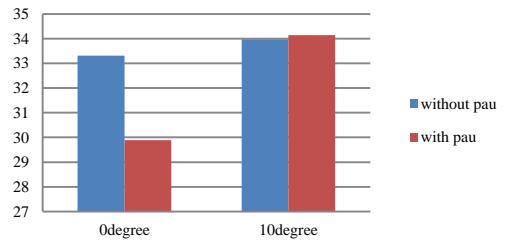


Figure 6 data comparisons

어 오는 상황에서 감소되는 noise의 량에 비해 측면에서 불어오는 상황의 경우 그 증가 량이 미미하므로, PAU의 장착은 전반적인 소음 감소에 상당한 기여를 할 것으로 예측 된다.

또한 우리는 연구를 진행하면서, PAU를 보닛의 상부에 장착하는 것을 가정으로 하였는데, 차량의 측면 부에 PAU를 장착한다면 소음의 주된 원인 중 하나인 측면 부 Vortex flow의 생성을 억제하여 더 많은 소음 감소가 이뤄 질 수 있으리라 예상된다.

Acknowledgment

본 연구는 2013년 현대자동차 공력 소음 해석 벤치마킹 테스트 학생 부문 공모전 참가를 위해 진행 하였다.

참고문헌

- [1] Callister, J. and George, A., "Measurement and Analysis of Automobile Wind Noise," SAE Technical Paper 930299, 1993, doi:10.4271/930299.
- [2] Buchheim, R., W. Dobrzynski, H. Mankau, and D. Schwabe, "Vehicle Interior Noise Related to External Aerodynamics," Int. J. Vehicle Design, Special Publication SP3,1983, pp. 197-209.

- [3] Beidl, C. and Hargreaves, N., "Automotive Noise Reduction and Engineering Desirable Sound," SAE Technical Paper 990040, 1999, doi:10.4271/990040.
- [4] Haruna, S., Kamimoto, I., and Okamoto, S., "Estimation Method for Automobile Aerodynamic Noise," SAE Technical Paper 920205, 1992, doi:10.4271/920205.
- [5] Lighthill, M. J.: 'On Sound Generated Aerodynamically I. General Theory.' Proc. R. Soc. London A211. pp. 564-587, 1952.
- [6] Kenji Ono, Ryutaro Himeno, Tatsuya Fukushima, 'Prediction of wind noise radiated from passenger cars and its evaluation based on auralization', Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 81 (1999) 403-419
- [7] Walker, R. and Wei, W., "Optimization of Mirror Angle for Front Window Buffeting and Wind Noise Using Experimental Methods," SAE Technical Paper 2007-01-2401, 2007, doi:10.4271/2007-01-2401.
- [8] U.S. Environmental Protection Agency, Light-Duty Automotive Technology and Fuel Economy Trends: 1975 through 2005, July 2005
- [9] 2013년현대자동차공력소음해석벤치마킹테스트학생부문공모전상세소개
- [10] Image copyright under Porsche Automobile, URL: <http://www.porsche.com/usa/models/cayenne/cayenne-diesel/gallery/#>