

## 자동차 뒷 창문 개방에 의한 공명소음 전산해석 연구

배 익 현, 문 영 준\*

고려대학교 기계공학과

### COMPUTATIONAL ANALYSIS ON DRONE NOISE OF AN AUTOMOBILE WITH OPENED REAR WINDOW

I.H. Bai and Y.J. Moon\*

School of Mechanical Engineering, Korea Univ.

*In modern days, automobiles are the most important means of transportation. With the development of automobiles, noises generated during operation has been recognized as a significant factor of performance to provide drivers with better driving environment along with other passengers. In this study, drone noise(pulsating noise), generated at the rear window when its opened, is predicted to understand the physics of its phenomenon at various velocities. The compressible Navier-stokes equation will be used with 6<sup>th</sup> order compact finite difference scheme to analyze the characteristics.*

**Key Words** : 전산음향학(Computational Aeroacoustics), 공력소음(Aerodynamic Noise), 자동차 공력소음(Automobile Drone Noise), 버페팅 소음(Buffering Noise)

### 1. 서 론

최근 산업이 발달하고 사회가 고도화 되면서 삶의 질을 향상시키기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 소음에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 이는 산업 현장에서 발생하는 소음뿐만 아니라 일상생활에서 발생하는 소음에 대한 연구도 진행되고 있다.

일상생활에 가장 밀접하게 연관되어 있는 산업분야로는 자동차 산업이 있다. 자동차 산업이 발달함에 따라 자동차의 성능뿐만 아니라, 소음에 대한 연구가 최근 주목받고 있다. 소음의 분류로는 기계적 장치에 의해 발생하는 기계소음이 있으며 주행 중 발생하는 공력소음이 있다. 자동차에서 발생하는 공력소음은 주변 환경뿐만 아니라, 운전자에게 불쾌감을 주기 때문에 매우 중요한 분야로 떠오르고 있다.

자동차에서 발생하는 소음에는 a-pillar 부근에서 발생하는 conical vortex에 의해 발생하는 소음과 사이드미러에서 발생

하는 소음 등이 있다. 하지만 이러한 연구는 오래전부터 많이 진행되어 왔으며, 그 유동 구조와 특성은 널리 알려져 있다. 최근에는 선루프를 개방하거나 뒤 창문을 개방할 때 발생하는 소음이 많은 관심을 받고 있다.

이처럼 선루프나 창문을 개방할 경우 발생하는 소음은 개방형공동(Open cavity)소음의 대표적인 예이다[1-7]. 창문을 개방하게 되면 창문의 상류부근에서 발생한 와류가 후류 쪽으로 진행해 후류 쪽 모서리에 부딪혀 압력파가 발생한다. 이때 발생한 압력에 의해 불안정한 경계층에서 발생한 와류의 운동에 의해 발생한다. 이와 같은 작용이 주기성을 갖고 반복되면서 분석적으로는 특정 주파수를 갖게 되는데, 이 주파수가 공동이 갖는 공명 주파수와 동일하게 되면 공동내부는 헬름홀츠 공명기와 같은 공명이 발생하게 되고, 승객은 높은 강도의 소음에 노출되게 된다. 이러한 소음을 윈드 버페팅 노이즈라 하며, 이에 관련된 연구는 꾸준히 진행되고 있다. 특히 선루프에 관한 연구는 이미 많은 연구가 진행되었고, 그 해결방법 또한 다양하게 제시되어 있다[8-9]. 또한, 창문 개방에 의한 소음 역시 최근에 많은 관심을 받고 연구가 되고 있으나, 많은 경우에서 구조의 변형에 의한 해결방안을 찾고 있다. 그렇기에 본 연구에서는 뒤 창문을 개방할 때의 유동구조를 찾고 그 특징을 통해 근본적인 해결방안을 연구하고자 한다.

Received: December 14, 2012, Revised: June 25, 2013,

Accepted: June 25, 2013.

\* Corresponding author, E-mail: yjmoon@korea.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2013.18.2.026>

© KSCFE 2013

## 2. 수치해석 기법

### 2.1 Large Eddy Simulation (LES)

직접수치모사(Direct Numerical Simulation)는 유동현상 및 이에 의한 소음의 발생 및 전파를 동시에 해석하는 방법으로 유동에 의한 소음생성뿐만 아니라 소음에 의한 유동 변화 및 이 둘의 상호작용까지도 모사할 수 있는 방법이다. 하지만 유동 변수에 대한 음향변수의 크기가 상대적으로 작기 때문에 고차의 수치해석 기법이 필요하며, 격자에 의한 수치적 감쇠를 방지하기 위해 많은 격자점이 필요하게 된다. 본 연구에서는 압축성 filtered Navier-Stokes 방정식을 이용한 Large eddy simulation (LES)기법을 적용했다.

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j}{\partial x_j} \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \tag{2}$$

$$\frac{\partial \hat{e}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} ((\hat{e} + \bar{p}) \tilde{u}_j) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij} \tilde{u}_i) + \frac{\partial \hat{q}_j}{\partial x_j} = -\alpha - \beta - \pi + \epsilon \tag{3}$$

$$\sigma_{ij} = \left[ \mu \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$$

$$\tau_{ij} = \frac{1}{2} \bar{\rho} u_i u_j - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j$$

$$\hat{e} = \frac{\bar{p}}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_i$$

### 2.2 컴팩트 유한 차분법(Compact Finite Difference method)

소음장을 나타내는 음향 변수들은 대부분 값이 매우 작으며 이 음향변수들의 감쇠 및 산란의 관계가 매우 중요하므로 수치해석기법의 선택이 소음장의 예측에 있어서 매우 중요하다. 일반적으로 사용된 기법은 이런 변수들의 감쇠 및 산란 관계를 만족시키지 못하는 경우가 많아 고차, 고해상도 수치해석 기법을 필요로 한다. 이에, 본 연구에서는 고차 고해상도 수치해석 기법으로 Lele가 제안한 삼중 대각 행렬 형태(Tri-diagonal form)의 6차 컴팩트 차분법(Compact finite difference scheme)[10]을 사용하며, 시간전진 기법은 4차 룬게-쿠타기법(4th stage Runge-Kutta method)를 이용한다. 여기에 사용된 유한차분법의 1차 미분과 2차 미분에 대한 식은 다음과 같다.

$$\alpha f'_{i-1} + f'_i + \alpha f'_{i+1} = a \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2h} + b \frac{f_{i+2} - f_{i-2}}{4h} \tag{4}$$

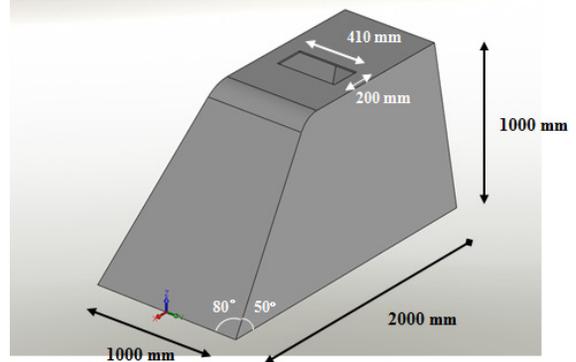


Fig. 1 Bench mark test model

$$\alpha = 1/3, \quad a = 14/9, \quad b = 1/9$$

$$\alpha f''_{i-1} + f'_i + \alpha f'_{i+1} = a \frac{f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1}}{h^2} + b \frac{f_{i+2} - 2f_i + f_{i-2}}{4h^2} \tag{5}$$

$$\alpha = 2/11, \quad a = 12/11, \quad b = 3/11$$

여기서 h는 격자간격을 의미한다.

위 식들을 전체 영역에 대하여 정리하면 삼중 대각 행렬(tri-diagonal matrix) 형태로 나타내게 되며 이를 풀어 차분값을 얻는다. 시간전진 기법은 외재적 4차 룬게-쿠타(Runge-Kutta) 기법을 이용하였다.

### 2.3 경계 조건

전산해석에서는 전체 해석 영역의 경계에서 음파가 반사되지 않고 전파되도록 하는 비반사경계조건(non-reflecting boundary condition)을 사용하는 것이 매우 중요하다. 현재 널리 사용되고 있는 비반사 경계조건들은 특성치 경계조건(characteristic boundary condition), 방사 경계조건(radiation boundary condition) 등이 있다.

본 연구에서는 최근 Edgar and Visbal[11]이 제안한 ETA(Energy Transfer Annihilation) 경계조건을 이용하여 해석 영역의 경계에서 비반사 경계조건으로 적용하였다. 이 기법은 일정한 비율로 격자에 스트레칭을 주어 버퍼영역을 형성하여 수치적 감쇠에 의한 음향파의 소멸을 유도하며 공간필터링을 적용해 격자의 스트레칭에 의한 산란(dispersion) 에러를 제거한다. 버퍼영역 내에서의 격자 분포는 다음과 같이 정의한다.

$$\Delta x_2 = C_H \Delta x_1 \tag{6}$$

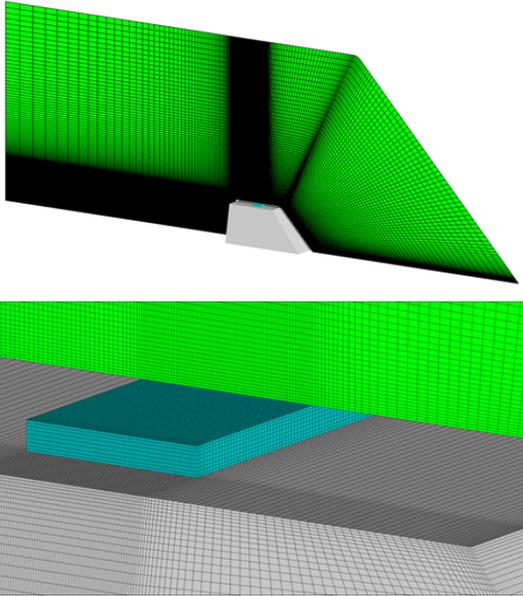


Fig. 2 Computational domain

여기서,  $C_H$ 는 스트레칭 비율이고  $\Delta x_2$ 는 새롭게 생성될 격자와의 간격,  $\Delta x_1$ 는 인접한 격자의 간격이다.

### 3. 수치해석 기법 검증

#### 3.1 실험조건

본 연구에 앞서 비교평가 실험을 통해 본 연구의 수치해석 기법에 대한 검증을 실시하였다. 비교평가실험은 현대자동차(Hyundai Motor Company)에서 풍동실험을 수행했다.

실험에 사용된 자동차의 형상은 Fig. 1과 같으며, 선루프에 대한 실험을 수행했으며, 장의 길이 2,000 mm, 높이와 하단부의 차폭은 1,000 mm이다. 차량 전방은 하단부 부터 50°의 각도로 기울어져 있고, 또한 양 측면 역시 80°로 기울어져 있으며 좌우가 대칭인 형태로 구성되어 있다. 선루프의 크기는 0.41 m × 0.20 m로 천장의 상류로부터 0.305 m 떨어져 위치하고 있으며, 속도는 20 km/h에서 10 km/h의 간격으로 100 km/h까지 진행되었다. 또한, 측정을 위해 사용된 마이크의 위치는 실내 내부의 정 중앙으로 (1.0 m, 0.5 m, 0.5 m)에 설치되었다.

#### 3.2 LES 해석조건

실험과 비교하기 위해 동일한 형상을 이용해 경계고정기법을 이용한 정렬격자를 사용해 수치해석을 진행했으며, 격자는 Fig. 2에서와 같이 I 방향으로 391점, J 방향으로 301점, K 방

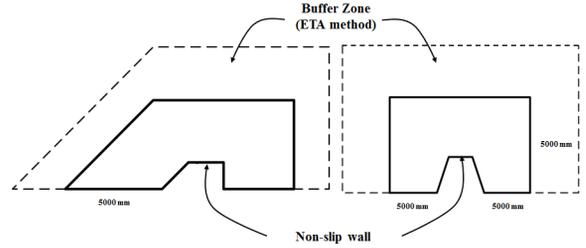


Fig. 3 Boundary condition

향으로 201점으로 총 23,655,891개의 점으로 구성되어 있으며, 계산의 효율을 높이기 위해 328개의 블록으로 나누어 MPI 시스템을 이용했다. 최소 격자의 크기는 3 mm 무차원화에 사용된 특성길이  $L_{ref}$ 는 선루프의 길이 200 mm로 설정하였으며, 20 km/h에서 100 km/h까지 20 km/h의 간격으로 총 5가지 속도에서 수치해석을 진행했다. 또한 해석 영역의 끝에서 반사되어 음향파가 나오는 것을 방지하기 위해 앞에서 언급한 ETA 경계조건을 Fig. 3과 같이 구성했다.

#### 3.3 실험 및 LES 결과

Table 1은 LES 와 실험의 결과이고 이때 음압은 식 (6)을 통해 구할 수 있다.

$$SPL = 20 \log_{10} \left( \frac{\overline{p_s}}{P_{ref}} \right) \quad (6)$$

여기서  $\overline{p_{ref}} = 2 \times 10^{-5}$  Pa를  $\overline{p_s}$ 는 측정된 압력의 산술평균값 (root mean square)을 나타낸다.

실험에서는 음압은 50 km/h와 60 km/h 사이에서 가장 높은 값을 나타내는 것을 확인할 수 있으며, 이때의 주파수는 27 Hz와 30 Hz 사이로 측정되었다. 차량 내부에서의 음압이 가장 높을 때 공진현상이 나타나는데, 공진이 발생하는 속도가 50 km/h에서 60 km/h 사이에서 발생하는 것을 알 수 있다.

Table 1 Comparison of peak frequency and SPL

Speed (km/h)	Peak frequency (Hz)		SPL (dB)	
	Experiment	LES	Experiment	LES
20	27	28.16	87.5	116.89
30	22	-	102.3	-
40	25	27.28	123.3	127.60
50	27	-	128	-
60	30	28.16	118.8	132.17
70	31	-	112.9	-
80	30	29.90	110.6	122.46
90	30	-	111.3	-
100	31	34.30	112.2	115.90

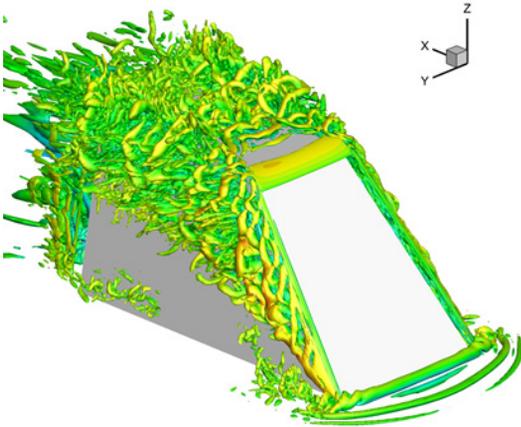


Fig. 4 Iso-surface of a constant  $Q_{cr}(=2.0)$

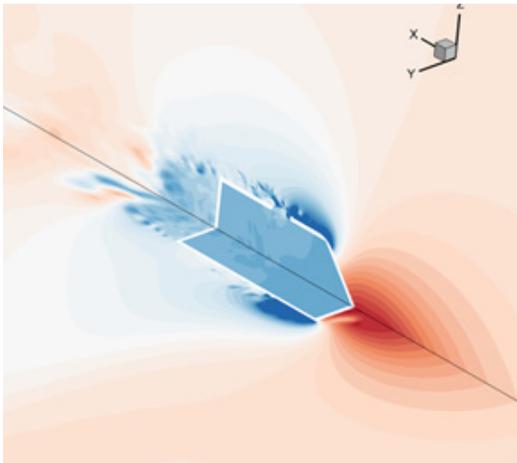


Fig. 5 Instantaneous pressure contours

LES 해석에 의해서 구해진 순간  $Q_{cr}$  (Second invariant property of velocity gradient)과 압력분포는 Fig. 4와 Fig. 5에 나타나 있다. 여기서  $Q_{cr}$ 은 속도구배의 2차 불변항(Second invariant property of velocity gradient)으로써 식 (23)와 같이 구한다.

$$Q_{cr} = (\Omega_{ij}\Omega_{ij} - S_{ij}S_{ij})/2 \tag{7}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

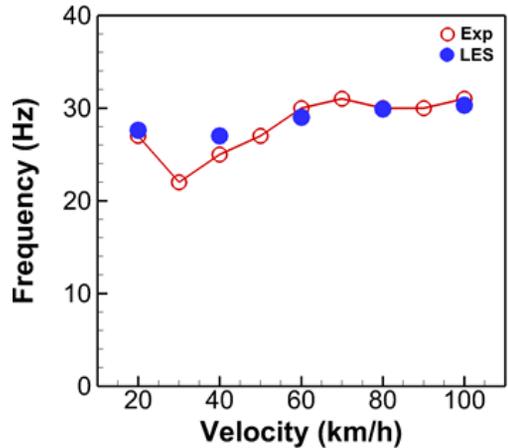


Fig. 6 Peak frequency

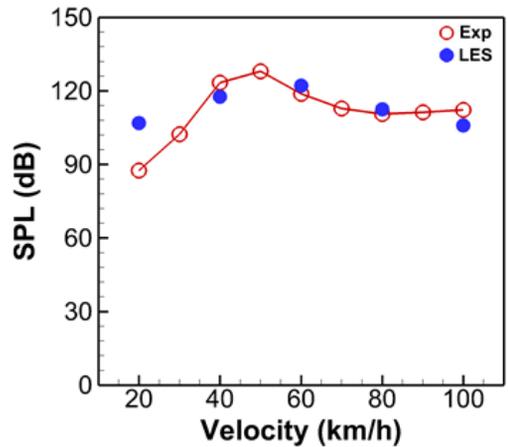


Fig. 7 Sound pressure level

선루프의 상류방향 모서리에서 와류흘림현상(vortex shedding)이 나타나는 것을 확인할 수 있고, 차량의 후방에서 반류(wake)가 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에서 알 수 있듯이, LES를 통해 얻어진 주파수와 실험에 의해 측정된 주파수가 일치하는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 7의 SPL도 20 km/h를 제외하고는 모든 경우에서 일치하는 것을 알 수 있다. 20 km/h의 경우는 낮은 마하수의 값을 가지므로 수치해석에서 수렴이 늦어지는 것으로 추측된다.

#### 4. 수치 해석 결과

##### 4.1 후방 창문 개방에 의한 유동 특성

뒤 창문 개방에 의한 영향을 알아보기 위해 사용한 형상은

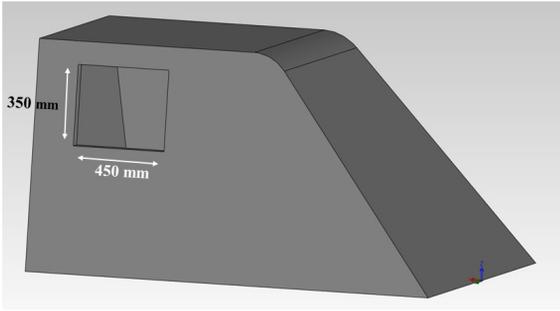


Fig. 8 Computational model

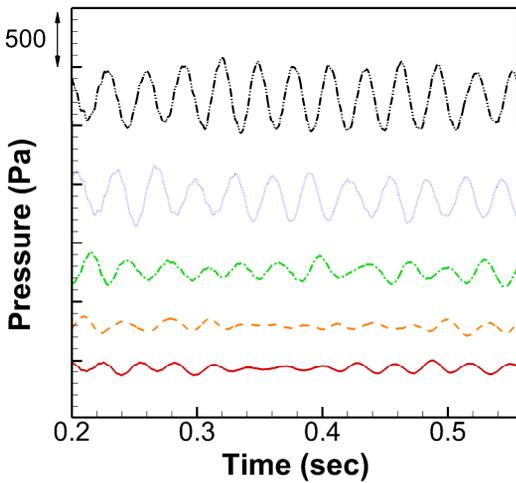


Fig. 9 Time history of pressure fluctuations at (1.01m,-0.17m,0.72m) ; solid: 60 km/h, dash: 80 km/h, dash-dot: 100 km/h, dot: 120 km/h, dash-dot-dot: 140 km/h

현대자동차의 비교평가 실험에서 사용한 형상과 동일하나 단창문의 위치가 Fig. 8에서 보는 바와 같이 우측 후류 쪽, 자동차 후미에서부터 200 mm, 천장에서부터 101.5 mm에 위치해 있으며, 길이는 450 mm, 높이는 350 mm이다. 해석 조건은 60 km/h ~ 140 km/h로 20 km/h의 간격으로 총 다섯 가지 경우로 진행했다. 또한, 누설에 의한 효과를 알아보기 위해 후방 양쪽창문을 모두 개방한 경우와 후방 우측창문과 전방 우측창문을 개방했을 경우에 대해서 140 km/h의 속도로 해석을 진행했다. 측정점은 (1.01 m, -0.17 m, 0.72 m)의 좌표로, 운전석 좌석이며, 무차원화를 위한 특성길이는 후방 창문의 길이 450 mm로 설정했다.

Fig. 9은 각각의 속도에서 측정점의 시간에 따른 압력 변화를 나타낸 결과다. 그래프에서 확인할 수 있듯 내부압력변화는 일정한 주기를 갖고 변화하는 것을 알 수 있으며, 속도가 높아질수록 압력편차가 커지는 것을 확인할 수 있으며,

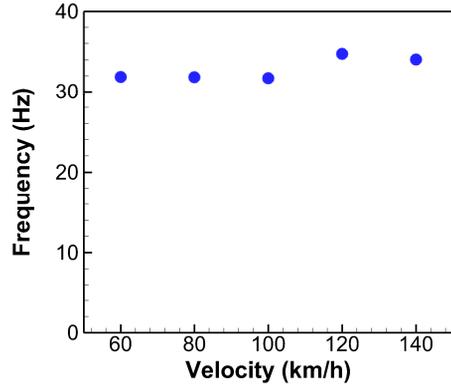


Fig. 10 Peak frequency

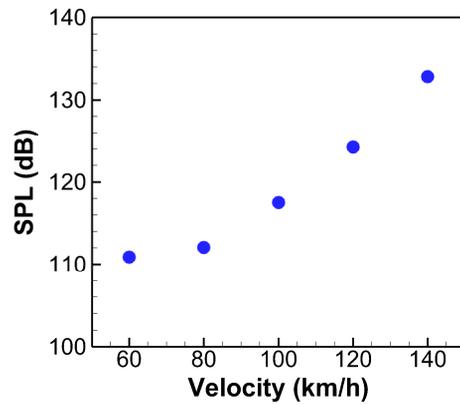


Fig. 11 Sound pressure level

140 km/h일 때 압력 편차가 500 Pa 내외라는 것이 확인된다.

또한, Fig. 10과 Fig. 11을 보면, 각각의 속도에서 주파수와 음압의 경향성을 확인할 수 있으며, 이는 Table 2에서 확인할 수 있다. 뒤 창문이 하나가 개방된 경우의 주파수는 약 32 Hz ~ 34 Hz 사이 값으로 속도와 크게 관계없음을 확인할 수 있으며, 음압은 속도가 증가할수록 비선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

이와 같은 차량 내부의 주기적인 압력변화는 창문에서 발생하는 자유전단층(Free shear layer)의 불안정성 때문에 발생하게 되는데 이와 같은 자유전단층의 Fig. 12에 나타나 있다.

Table 2 Peak frequency and SPL

Velocity (km/h)	Peak frequency (Hz)	SPL (dB)
60	31.88	110.07
80	31.82	112.07
100	31.71	117.50
120	34.76	124.22
140	34.04	132.84

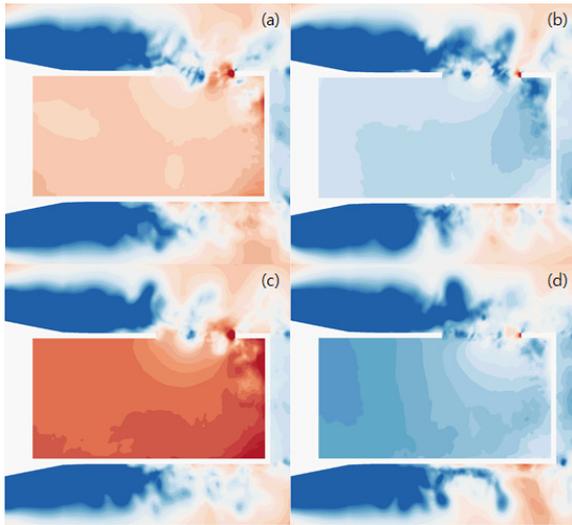


Fig. 12 2D Pressure difference in sequence at 140 km/h (averaged in window height)

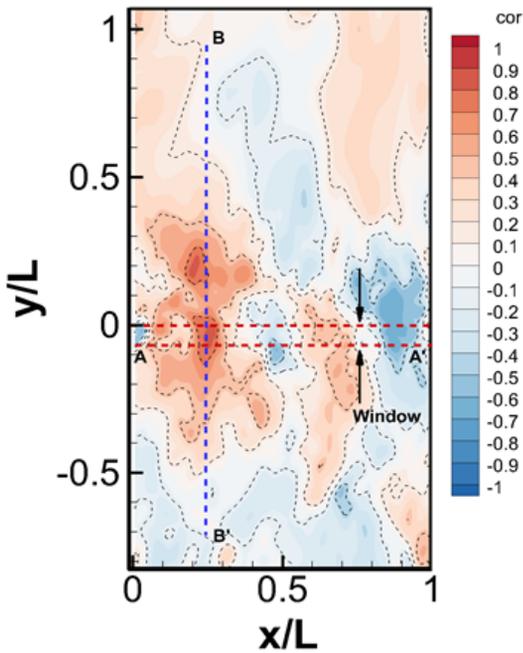


Fig. 13 Correlation coefficient around window at 140 km/h where L : reference length 450 mm

Fig. 12는 창문의 높이방향 평균 외류를 시간 별로 나타낸 것이며, (a)와 (c)는 전단층에 의한 실내공간의 압축이, (b)와 (d)는 전단층에 의한 실내공간의 팽창이 나타나있으며, 이러한 현상이 반복적으로 일어남으로써 내부의 압력이 변하게 된다.

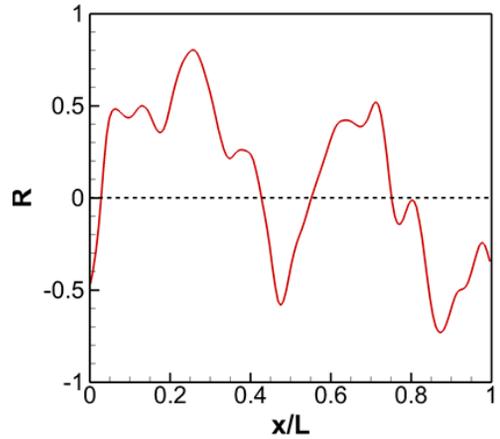


Fig. 14 Correlation coefficient at AA' where L : reference length 450 mm

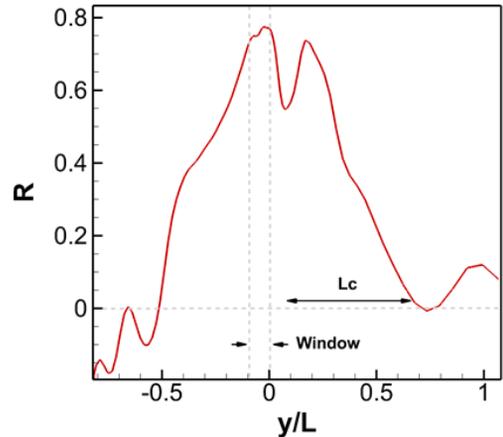


Fig. 15 Correlation coefficient at BB' where L : reference length 450 mm

이 현상은 복잡한 난류현상으로, 그 영향이 명확하게 규명하기가 어렵기 때문에 상관계수를 주로 사용해 분석을 한다. 상관계수 식의 정의는 식 (8)와 같으며, 이를 통해 창문주변에서의 질량유량과 내부 압력변화의 상관관계를 알 수 있으며, 이는 Fig. 13 ~ Fig. 15에 나타나 있다.

$$\gamma(i) = \frac{\sum_{t=1}^t (p_{comp} - \overline{p_{comp}})(v_i - \bar{v})}{\sqrt{\sum_{t=1}^t (p_{comp} - \overline{p_{comp}})^2 \sum_{t=1}^t (v_i - \bar{v})^2}} \quad (8)$$

여기서  $p_{comp}$ 는 기준점에서의 압력을 나타내며  $\overline{p_{comp}}$ 는 기준점의 시간평균 압력을 나타내고  $\bar{v}$ 는 y 축 방향 시간평균 속

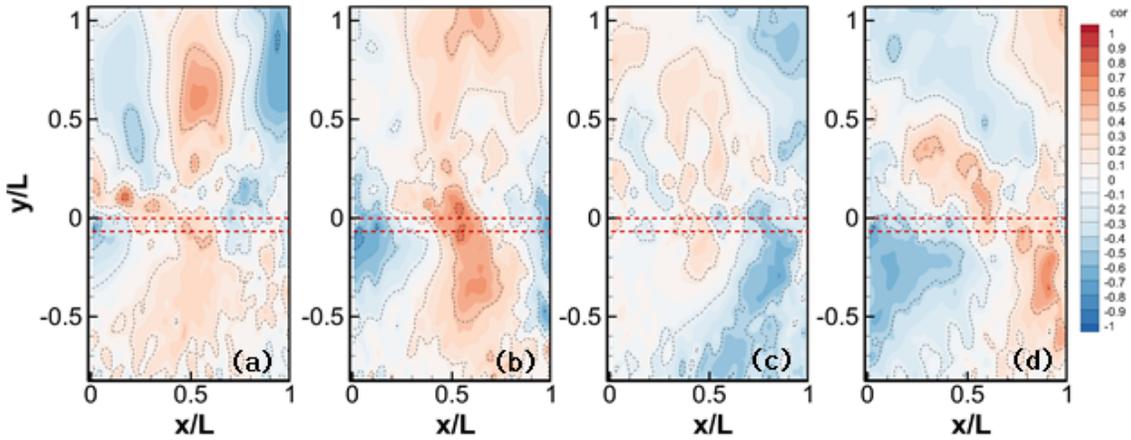


Fig. 16 Correlation coefficient around window at different speeds (dotted line : window, L : reference length 450mm) ;  
 (a) 60 km/h, (b) 80 km/h, (c) 100 km/h, (d) 120 km/h

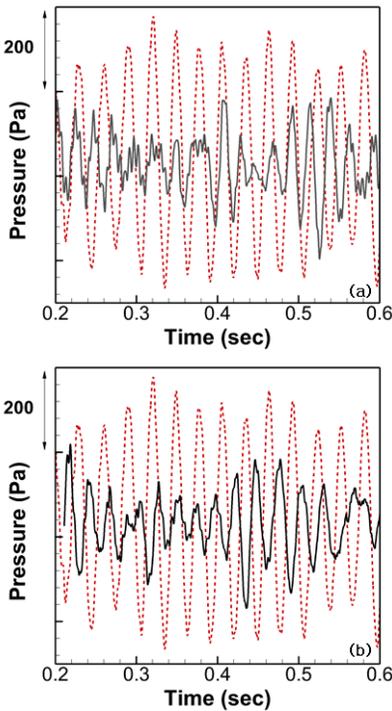


Fig. 17 Pressure fluctuation at monitoring point (dot : pressure fluctuation when one rear window is open) ; (a) two rear window open, (b) one rear window and one front window open

도를 나타낸다.

상관관계 값은 +1.0에 가까울수록 비교하는 두 값의 위상이 일치하는 것이고 -1.0에 가까울수록 위상이 반대가 되는 경우인데, Fig. 13에서 x 방향으로 약 0.4 미만의 위치에서 상

관계수가 가장 큰 것을 알 수 있으며, AA'에서 구한 상관계수는 Fig. 14에 나타나 있다. 이때, 최대 상관계수는 0.25 근방에서 나타나는 것을 알 수 있고 이 값은 0.77로 압력이 상승할 때 질량유량이 내부로 유입된다는 것을 유추 할 수 있다. Fig. 15는 Fig. 13의 BB'의 상관계수를 나타낸 것이며, 이 위치는 Fig. 14에서 상관계수의 가 가장 높은 지점의 x 좌표와 일치한다.

개방형 공동에서 압력변화와 주파수를 변화시킬 수 있는 인자는 식 (9)로부터 구할 수 있다.

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{L_f V_{comp}}} \tag{9}$$

여기서, A는 단면적,  $V_{comp}$ 는 부피,  $L_f$ 는 특성길이를 나타낸다. 일반적인 헬름홀츠 공명기의 경우 이 길이가 결정되어 있으나, 자동차의 경우는 결정이 쉽지가 않으며, Fig. 15에서 구한  $L_c$  ( $\approx 0.22$  m)는 진동을 일으키는 변위로서, 식 (9)에서의  $L_f$ 는  $L_c$ 임을 유추할 수 있다.

이때 구한  $L_c$ 를 식 (9)에 적용하면 주파수를 구할 수 있으며 이때의 구한 주파수가 공명주파수이며 이 경우 31.13 Hz라는 것을 구할 수 있다.

Fig. 16은 60 km/h에서 120 km/h의 상관계수를 나타낸 것이며, 이때의  $L_c$  역시 140 km/h의 경우와 유사한 것을 확인할 수 있다.

#### 4.2 양쪽 후방 창문 개방과 전방 창문 개방에 의한 유동특성

해석에 사용된 창문의 크기는 후방 좌측 창문의 경우 우측 창문과 동일하며, 전방 창문은 높이는 350 mm 길이는 406

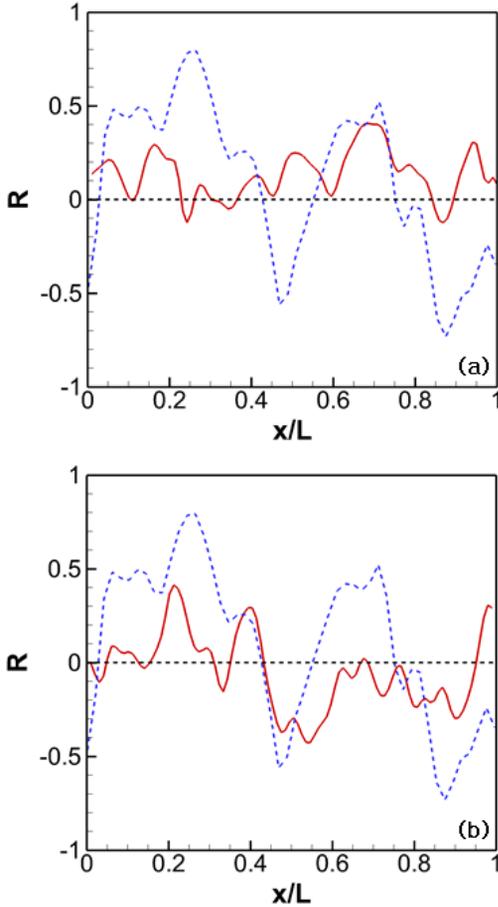


Fig. 18 Correlation coefficient between window and passenger compartment when two rear windows are open (dot : correlation coefficient at same location when one rear window is open, L : reference length 450mm) ; (a) right rear window, (b) left rear window

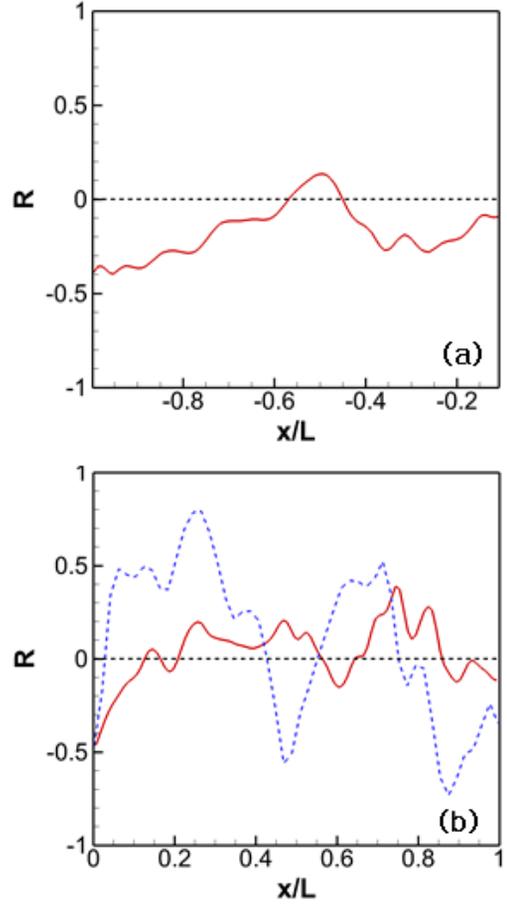


Fig. 19 Correlation coefficient between window and passenger compartment when one rear window and two front window open (dot : correlation coefficient at same location when one rear window is open, L=reference length 450mm) ; (a) front window, (b) right rear window

mm로 설정했으며 위치는 차량 후미에서부터 695.8 mm이다.

Fig. 17 (a)와 (b)는 140 km/h일 때, 후방 양쪽창문을 개방한 경우와 후방 우측창문과 전방우측 창문을 개방한 경우 측 정점에서 압력 변화를 나타낸 것이다. 한쪽창문을 열 경우가 창문을 추가로 개방 할 경우보다 압력 변화의 폭이 큰 것을 확인할 수 있다. Table 3에서 확인할 수 있듯이 창문을 개방 할 경우 음압이 후방 두 창문을 개방할 경우에는 12 dB, 앞

Table 3 Frequency and SPL of different cases at 140 km/h

Case	Frequency (Hz)	SPL (dB)
1 rear window opened	33.95	132.84
2 rear windows opened	37.94	120.59
1 rear window and 1 front window opened	35.7	116.69

창문을 개방할 경우 16 dB가 하락하는 것을 할 수 있으며, 주파수는 크게 변하지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 18과 Fig. 19는 각각 후방 두 창문이 개방되었을 때, 후방 우측창문과 전방 창문이 개방되었을 때 창문에서의 상관계수를 나타낸 그래프다. 각각의 경우 모두 각 창문에서의 상관계수가 낮아지는 것을 알 수 있으며, 특히 앞 창문을 개방할 경우 상관계수가 대부분 음수임을 확인할 수 있다. 이는 앞창문으로 지속적으로 유체의 누설이 발생한다는 것을 의미 하는데, 그 원인으로는 a-pillar 부근에서 발생한 박리로 인해 앞 창문 주변의 압이 낮아지게 된다. 이러한 낮은 압력분포 때문에 창문을 열 경우 외부로 흡입이 생기게 되므로 유체의 누설이 발생하게 된다. 후방 두 창문을 개방하는 경우는 박리에 의한 압력강하의 영향을 받지 못하고 전단층 운동에 의한

누설만 생기게 되므로 누설량이 전자보다 크지 않다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 filtered compressible Navier-Stoke 방정식을 이용해, 자동차 창문의 개폐여부에 따른 내부 압력 변화에 대하여 속도별로 확인했으며, 유동 특성을 알고 있었다.

압력 변화를 낮출 수 있는 방법을 현실적인 방법으로 예측하였으며 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 본 연구에서 LES를 이용한 해석으로, 현대자동차에서 실시한 선루프 버페팅 실험과 비교를 통해 기법의 타당성과 신뢰성을 검증하였다.
- (2) 검증한 기법을 통해 후방 우측창문이 열릴 경우 발생하는 소음을 예측했으며, 속도가 높아질수록 소음의 강도는 세지고 주파수는 큰 변화가 없는 것을 알 수 있었다
- (3) 후방 창문을 개방 할 경우 창문과 내부 공간의 경계면에서 유량과 내부 압력의 상관성을 알아보기 위해 상관계수를 구했고, 이때 상관길이는 창문의 약 98%가 되는 것을 확인했으며 이를 이용해 구한 주파수는 해석에 의해 구해진 주파수와 유사한 것을 알 수 있었다.
- (4) 소음 저감을 하기 위한 현실적인 방법으로는 내부 공기의 누설을 발생시키는데, 이를 창문의 개폐에 따른 누설방법으로 수행했으며, 후방 두창문과 전방 우측창문을 개방함으로써 그 차이와 음압감소를 확인할 수 있었다. 후방 창문을 모두 개방할 경우 7.9 dB가 감소하는 것을 알 수 있었으나 상관계수의 지배적인 구조를 찾을 수 없었으며 이러한 이유에서 차량 내부의 음압이 감소한 것을 알 수 있었다.
- (5) 소음 저감은 전방 창문을 개방할 때 가장 효과적으로 나오는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 박리에 의한 주변 영역의 압력 강하에 의해 내부로부터의 누설량이 커지는 것을 확인 하였다. 앞 창문을 개방 할 경우 약 45.6 cm<sup>3</sup>/s의 기체가 외부로 유출되는 것을 확인하였고, 이러한 누설로 인해 음압이 140 km/h일 때 약 16 dB가 감소하는 것을 알 수 있으며, 후방 양측창문 개방 시 140 km/h의 12.24 dB보다 4 dB 더 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이로 인해 많은 양의 기체를 누출시키는 것이 소음 저감에 효과적인 것임을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 현대자동차(Hyundai Motor Company)의 지원 및

KISTI 슈퍼컴퓨팅 센터 전라과제의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

- [1] 1963, Maull, D.J. and East, L.F., "Three-dimensional flow in cavities.," *J. Fluid Mech.*, Vol.16, pp.620-632.
- [2] 1954, Roshko, A., "On the development of turbulent wakes from vortex streets," *NACA Rep.*, 1191.
- [3] 1964, Rossiter, J.E., "Wind-tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds," *Aeronautical Research Council Reports and Memoranda. Technical report*, 3438.
- [4] 1976, Tam, C.K.W., "The acoustic modes of a two-dimensional rectangular cavity," *J. Sound and Vibration*, Vol.49, pp.141-143.
- [5] 1978, Tam, C.K.W. and Block, P.J.W., "On the tones and pressure oscillations induced by flow over rectangular cavities," *J. Fluid Mech.*, Vol.89, pp.373-399.
- [6] 1999, Colonius, T., Basu, A.J. and Rowley, C.W., "Numerical investigation of the flow past a cavity," *AIAA Paper* 99-1912.
- [7] 1977, Sarohia, V., "Experimental investigation of oscillations in flows over shallow cavities," *AIAA J.*, Vol.15, pp.984-991.
- [8] 2005, Bernd, C., Siva, S., Gana, B., David, F., Swen, N., Luc, M. and Hong, J.-S., "Sunroof Buffeting of a Simplified Car Model: Simulations of the Acoustic and Flow-induced Responses," *SAE Technical paper* 2005-01-2498.
- [9] 2006, Shin, S.R., Kim, H.-K., Chung, S.G. and Kook, H., "New Sunroof Wind Noise Reduction Strategy Using Analytical Prediction and Automatic Deflector Optimizing System," *JSAE paper*, Vol.71, No.06, pp.7-10.
- [10] 1992, Lele, S.K., "Compact Finite Difference Schemes with Spectra-like Resolution," *Journal of Computational Physics*, Vol.103, pp.16-42.
- [11] 2003, Edgar, N.B. and Visbal, M.R., "A general buffer zone-type non-reflecting boundary condition for computational aeroacoustics," *Proc. : 9th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit 2003. AIAA Paper* 2003-3300.