

PIV 유동장 가시화 기법을 이용한 썬루프 드론소음 연구

Sunroof Buffeting Flowfield Visualization Using Particle Image Velocimetry

신성룡† · 김동범* · 국형석**

Seong Ryong Shin, Dongbum Kim, and Hyungseok Kook

Key Words: PIV(입자영상유속계), Sunroof(썬루프), Sunroof Buffeting(썬루프 드론소음), Sunroof Deflector(썬루프 디플렉터), Flowfield Visualization(유동장 가시화)

ABSTRACT

Automobile sunroof buffeting is the tonal noise of low frequency around 20Hz. It occurs due to the acoustic feedback process between the shear layer detached from the leading edge of sunroof opening and the Helmholtz resonator-like property of a car cabin. In this paper, PIV visualization technique is applied to the unsteady flow field around sunroof opening of an SUV in the full-scale automotive wind tunnel in order to find out buffeting mechanism. A phase-marking PIV measurement method, in which image and sound pressure are recorded simultaneously, and a phase-rearrangement post-processing program were developed for capturing noise-related velocity fields without expensive synchronization systems. Through this study, some characteristics of the real-car sunroof shear layers under various deflector conditions were identified and these results can provide insights into the noise reduction mechanism of the tube-type deflector.

1. 서론

썬루프는 상품성 측면에서 대형화 및 일반화 추세에 있으므로 썬루프 윈드노이즈는 그 중요성이 증대되고 있다. 썬루프에서 발생하는 윈드노이즈는 썬루프의 모드와 속도 조건에 따라 다양하나, 고객이 가장 극심하게 느낄 수 있는 소음은 완전 개방 저속 주행시 발생할 수 있는 썬루프 드론 소음(sunroof buffeting)이다. 이것은 일종의 공명음으로서 썬루프 개구부 앞전의 전단 유동과 차체의 헬름홀츠 공진 특성이 상호작용하여 발생하는 20Hz 내외에서의 피크 성분이다. 차체의 진동을 수반하며, 극심한 귀압 박감을 유발시킬 수도 있다[1].



그림 1. 썬루프 개구부 단면 및 주요명칭

발생 메커니즘에는 글래스 열림량, 실내 체적, 루프 곡률 등의 영향이 모두 포함되며, 일반적으로 디플렉터가 없을 경우에는 글래스 열림량이 어느 정도 이상이면 드론 소음이 발생하기 마련이다. 디플렉터는 개구량을 유지하면서 이러한 드론 소음을 없애기

위하여 고안된 장치로서, 최근에는 그림 1에서 보이는 튜브형 디플렉터가 자주 사용되고 있다.

본 연구의 목적은 우선, 드론 소음을 발생시키는 썬루프 주변 유동장에 대한 정량적인 정보를 획득하여 드론 소음 발생 메커니즘에 대한 이해를 심화시킬 수 있는 기본 자료를 획득하는 것이다. 이를 위하여 정량적 유동장 가시화 방법인 PIV(Particle Image Velocimetry, 입자 영상 유속계) 기법을 실차 풍동, 실차 썬루프 유동장에 대하여 개발하였다. PIV 기법은 간단히 말하면 사진 촬영이라고 할 수 있다. 촬영하고 싶은 유동장 내에 골고루 퍼진 반사 입자들에 대하여 레이저를 조명으로 하여 짧은 시간 간격의 2 장의 사진을 찍고 그 입자들의 위치 이동을 통계적으로 파악하여 그 순간의 속도장을 구하는 것이다[2].

다음은 개발된 기법을 다양한 디플렉터 조건에 적용하여 튜브형 디플렉터 유동장의 특징을 살펴 보고자 한다. 이를 통하여 튜브형 디플렉터의 드론 소음 저감 원리에 대한 이해를 높일 수 있을 것이다.

2. 실차 썬루프 유동장 PIV 기법

2.1 드론 소음 유동장 PIV 시험 장치 셋업

PIV 에서 좋은 영상을 얻기 위해서는 충분히 강한 레이저 조명과 CCD 카메라의 정확한 초점거리 및 충분한 양의 입자(seed, 올리브유) 분포의 삼박자가 모두 잘 맞아야 한다. 우선, 실차의 경우 차량을 최대한 측면으로 이동한다 하여도 풍동 바람으로 인해 카메라 등이 흔들리는 것을 막기 위하여 OL 영역(차량 중앙 절단면, 계측면)과 2.5m 이상의 간격을 확

† 현대·기아자동차 연구소 기능시험 1팀
E-mail : ssdragon@hyundai-motor.com
Tel: (031) 368-6464

* 현대·기아자동차 연구소 기능시험 1팀

** 국민대학교 기계자동차공학부 부교수

보하여야 한다. 초점 맞는 영상을 구하기 위해 기존 렌즈가 아닌 300mm 망원렌즈를 이용하여 65mm X 65mm 의 측정 영역을 겨우 확보하였다. 측정 영역을 더 확보하기 위하여 렌즈를 멀리 이동시킬 경우는 충분한 레이저 밝기를 얻지 못하였다. 촬영 대상이 아닌 부분이 밝은 경우 입자의 난반사를 유발시키므로, 차량은 무반사 페인트 도포 및 유리부 패딩 등의 준비가 필요하였다. 입자 분출 장치는 번호판 주변에 부착하여 계측면에서 충분한 입자 밀도를 얻도록 하였다. 또한, 속도 조건에 부합하는 사진 촬영 간격 및 촬영 수량 등의 설정이 필요하였다. 이와 같은 차량 위치, 차량 준비, 레이저 설치, 카메라 세팅, 입자 분출 장치 세팅, 측정 간격 등의 최적 세팅에 상당한 노력과 시간이 소요되었다. 마침내 최적 세팅 조건에서 PIV 시험을 수행하는 장면이 그림 2에 나타나 있다.



그림 2. 실차 풍동 PIV 시험 장면

2.2 위상 기록 및 재배열 PIV 기법

평균 유동장은 현재의 PIV 장비(28~32Hz 고정 주파수 레이저 방출)로 일정 시간 촬영하여 단순 평균하면 속도 분포가 양호한 속도장을 얻을 수 있다. 하지만, 윈드노이즈 원인 파악을 위해서는 어떤 소음 현상의 주파수를 확인 후, 그 주파수를 가지는 주기적인 유동장이 있다고 추정을 하고, 그 한 주기 내에서 위상별로 변화하는 유동 패턴의 파악이 중요하다. 특히, 섀시 드론 소음 유동장은 15~20Hz의 주기적인 유동 패턴을 가지는 것이 알려져 있으며, 섀시 개구부 앞전의 전단 유동이 차실의 헬름홀츠 특성과 상호 작용하는 양상을 관찰할 필요가 있다[3, 4]. 또한, 섀시 드론 소음을 이론적으로 다루기 위해서는 와동의 대류 속도와 같은 물리량을 계측하여야 한다[1].

보유 장비의 경우, 레이저 발사 시기 조절은 별도의 장치를 개발하여 위상 조절이 가능하였으나, 레이저 발사 시기와 카메라 촬영 시기와 동기화가 불가능하였다. 따라서, 다음과 같은 데이터 처리 흐름을 가지는 위상 기록 및 재배열 PIV 기법을 개발하였다(그림 3). 먼저, 현재 장비 최적모드인 약 4.3Hz 주기 촬영 방식으로 유동장을 촬영하되, 마이크로폰을 이용한 실내 소음 측정과 카메라 촬영의

펄스 신호를 동시에 기록하도록 한다(위상 기록). 이후 후처리 단계에서 별도의 프로그램을 개발하여 유사 위상의 속도장만 추출, 평균하여 그 위상의 속도장을 확정하고 각 위상들의 속도장을 연결하여 주기적 유동장을 구한다(위상 재배열).

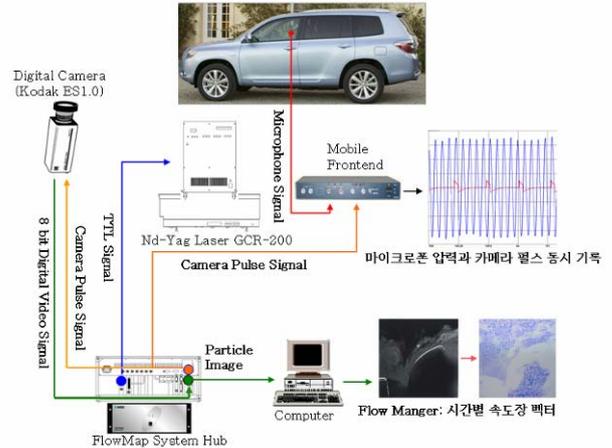


그림 3. 위상 기록 PIV 시험 장치 구성

3. 시험 결과

3.1 시험 영역 및 시험 내용

관심 속도장은 전방 루프 앞전에서 형성되는 수 mm 스케일의 경계층 속도 프로파일, 디플렉터 하단부와 상단부로 나뉘는 유동 및 디플렉터 전후의 속도 프로파일, 디플렉터 상의 박리선으로부터 생성되어 자라는 전단층, 후방 루프 및 섀시 글라스에 충돌하는 거대 와동 구조(직경 10~20 cm)로 섀시 개구부 전 영역에 걸쳐있다. 시험 영역이 비교적 넓으나 시드의 크기에 비해 카메라의 해상도가 비교적 낮은 편이기 때문에 전체 측정 영역을 14 개의 부분 영역으로 나누어 해상도를 가능한 최대로 하여 실험하였다(그림 4). 일반적으로 부분 영역 1~8 만을 측정하였으나, 다른 영역을 측정할 경우도 있다.

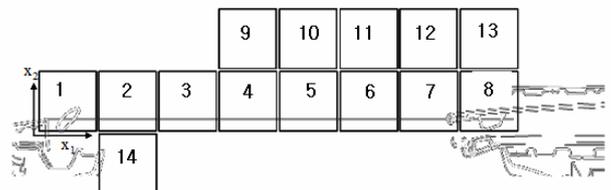


그림 4. 섀시 PIV 부분 측정 영역 구분

50km/h 의 풍속 조건에서 디플렉터 장착 높이를 달리하여 PIV 측정을 수행하되, 기본 데이터 수집을 위해 디플렉터 없는 상태에서도 시험을 수행하였으며, 섀시 열림량 축소 조건을 포함하여 총 7 케이스(표 1)의 시험을 수행하였다.

실험케이스	디플렉터	케이스 설명
e-piv 1	def0	디플렉터 없음
e-piv 2	def1	디플렉터 기본 케이스
e-piv 3	def2	기본 대비 디플렉터 4mm 높임
e-piv 4	def3	기본 대비 디플렉터 8mm 높임
e-piv 5	def4	기본 대비 디플렉터 11mm 높임
e-piv 6	def0	디플렉터 없음, 열림량 축소
e-piv 7	def1	디플렉터 기본 케이스, 열림량 축소

표 1. PIV 시험 케이스

3.2 시험 결과

시험 케이스 e_piv1 에서 위상에 따른 와도의 변화를 그림 5 에 나타내었다. 루프 앞전에서 분리된 전단층이 초기에는 상하 요동을 보이다가 곧 와동이 되어 대류하는 것을 볼 수 있다.

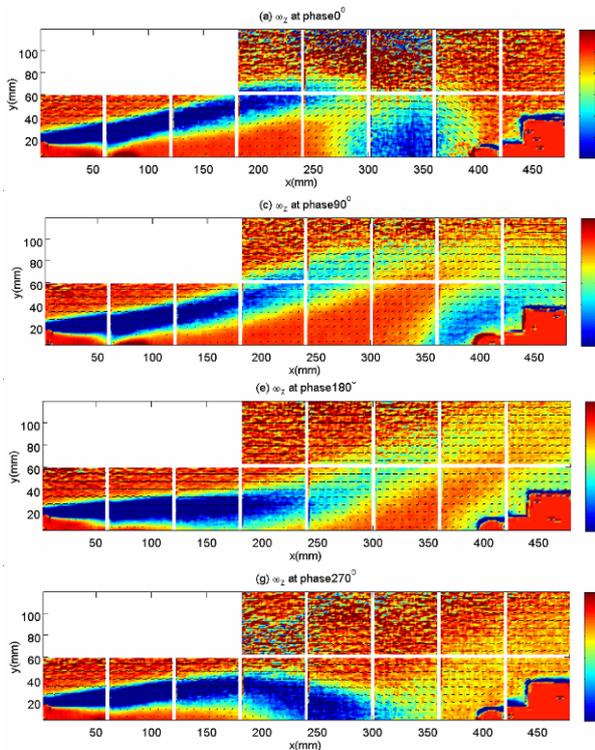


그림 5. 위상에 따른 와도 변화(e_piv1)

그림 6 은 와동의 중심 궤적을 나타낸 것이다. 와동은 위상 236 도, $x_1 \approx 200$ mm 에서 생성되는 것을 볼 수 있었다. 와동의 수평 방향 대류 속도는 드론 소음 예측 모델에서 드론 소음에 대한 공력 가진력의 위상지연을 결정하는데 [3], PIV 자료 판독결과 명목 풍속(50kph)의 약 45%였다.

속도 오버슈트는 자유류가 시험 차량의 윈드실드 등의 곡면을 거치면서 가속되어 나타난다. 개방된 공간이 아니라 제한된 공간의 풍동에서 시험할 때는 더 큰 값이 되기도 하는데, 시험 차량의 경우, 명목 풍속 대비 약 115 % 정도였다.

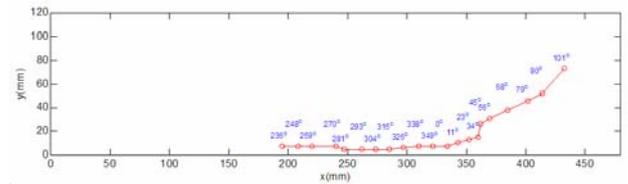


그림 6. 위상에 따른 와도 중심 궤적(e_piv1)

e_piv1 의 시험 결과로부터 부분 영역 1 에서 6 까지의 평균 속도장에서 속도 프로파일을 추출하여 전단층의 자유사성에 대하여 검토하였다.

$$U(x_2) = \frac{U_\infty}{2} \left\{ 1 + \tanh \left[\frac{(x_2 - x_{2,off})}{2\theta} \right] \right\} \quad (\text{식 1})$$

속도 프로파일을 식(1)과 같이 정의된 하이퍼볼릭 속도 함수에 커브 피팅한 결과를 그림 7(a)에 보였는데 부분 영역 1, 2 에서는 전단층 분리 초기이고 프레임 A 의 영향으로 하이퍼볼릭 함수에 다소 벗어난 것을 알 수 있으나, 부분 영역 3 부터는 잘 맞는 것을 알 수 있다. 커브 피팅을 통하여 구한 모멘텀 두께, θ 와 속도 프로파일의 변곡점 수직 위치, $x_{2,off}$ 를 이용하여 각각의 속도 프로파일을 정규화하면 그림 7(b)를 얻을 수 있는데, 부분 영역 1,2 를 제외하고는 평균 속도 프로파일에서 유사성을 확인할 수 있었다.

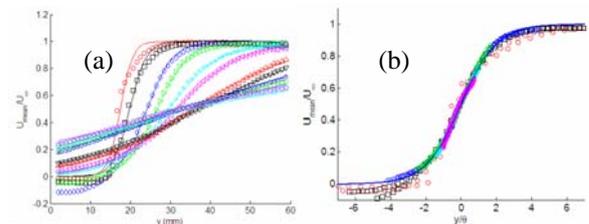


그림 7. 각 부분 영역의 속도 프로파일(e_piv1)

PIV 시험 케이스 e_piv1 와 e_piv6 의 부분 영역 1~6 에서 계산한 전단층 운동량 두께를 그림 8 에 나타내었다. e_piv6 케이스의 경우 전단층의 자연적 운동량 두께 증가율[5]인 아래 식 (2)와 잘 맞음을 볼 수 있다.

$$d\theta/dx_1 \approx C_L \beta \quad (C_L \approx 0.035 \sim 0.045, \beta: \text{전단층 속도비}) \quad \text{----- 식(2)}$$

반면, e_piv1 의 경우에는 $x_1 \approx 100$ mm(프레임 A 가 끝나는 부분)까지는 식(2)의 느린 자연적 증가율에 따르나, 이후 빠르게 증가하여 $x_1 \approx 300$ mm 에 이르면 포화되는 것을 볼 수 있다. 이것은 전단층이 프레임 A 의 끝 부분에 이르면 높은 레벨의 실내 음압 변동에 강제 교란되어 드론 소음 주파수를 가지는 수직 속도 요동 성분의 진폭이 빠르게 증가함에 기인한 것이다. e_piv1 케이스의 드론 소음 주파수와 전단층 대류 속도를 고려하면 드론 소음 주파수의

속도 요동 성분의 파장은 약 390mm 이다. 운동량 두께가 약 32mm 에서 포화되므로 강제 교란 포화 조건인 $\theta/\lambda \approx 0.07$ [5]을 근사적으로 만족함을 알 수 있다.

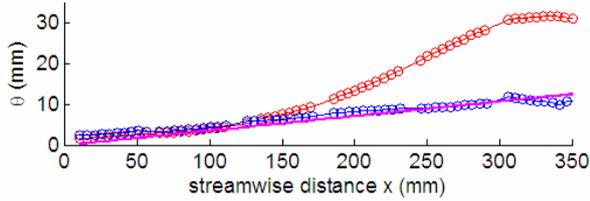


그림 8. 유동 방향 운동량 두께 변화(적색:e_piv1, 청색:e_piv6, 보라색실선:자연적 증가율 곡선)

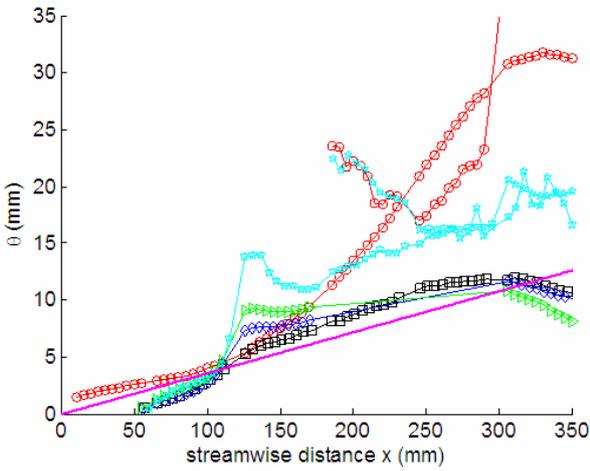


그림 9. 유동 방향 운동량 두께 변화 (적색 원: e_piv1, 검정 사각형: e_piv2, 청색 마름모: e_piv3, 녹색 삼각형: e_piv4, 청록색 별: e_piv5, 보라색 실선: 자연적 증가율 곡선)

그림 9 는 케이스 e_piv1~5 에 대하여 유동 방향 운동량 두께 변화를 보여준다. 부분 영역이 평균속도 프로파일의 일부만을 포함하는 경우에는 커브 피팅을 이용한 운동량 두께 계산이 부정확한 결과를 가져올 수 있으므로, 디플렉터를 사용한 시험 케이스 e_piv2~4 의 경우 부분 영역 4~8, 즉 $x_1 = 180\text{mm}$ 이상에서 계산된 운동량 두께는 신뢰할 수 없다(e_piv5 케이스는 부분영역 5~13 을 계측하였으므로 신뢰할 수 있는 값임). 또한, 부분 영역 3 부터 속도 프로파일이 하이퍼볼릭 함수에 가까워지기 때문에 $x_1 = 120\text{mm}$ 이하 영역의 운동량 두께 계산은 별 의미가 없다.

디플렉터를 장착하는 경우, 디플렉터 하류 3 영역의 전단층의 운동량 두께가 디플렉터를 장착하지 않았을 때보다 크다는 것을 그림 9 에서 알 수 있다. e_piv2 의 경우에는 운동량 두께 증가가 미미하며, 높이가 높을수록 운동량 두께 증가가 뚜렷하여 e_piv5 에서는 $x_1 = 120\text{mm}$ 에서 약 15mm 이다(디

플렉터를 장착하지 않은 경우는 약 4~5mm 정도 임).

e_piv5 의 경우 운동량 두께가 어느 정도 감소하다가 이후 자연증가율에 따라 서서히 증가하는데 이것은 운동량 두께의 증가가 수직 요동 성분의 진폭 증가에 의해서 이루어진 것이 아니라 디플렉터에 의해 일시적으로 이루어진 것이기 때문에 전단층 내에서 수직 요동이 충분히 자라 자력으로 운동량 두께를 다시 확보하기까지 어느 정도의 시간이 걸리기 때문이다.

경계층이 디플렉터를 통과하며 운동량 두께가 증가하는 현상의 원인을 알아보기 위해 평균 속도장에서 디플렉터 밀면을 통과하기 전후의 플럭스를 조사하였다(그림 10,11).

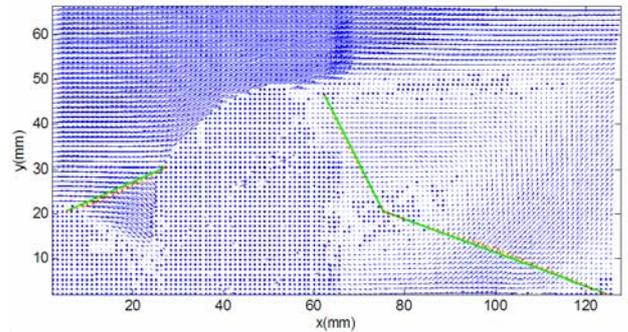


그림 10. 디플렉터 주변 속도장(e_piv5) 및 플럭스 계산 기준선

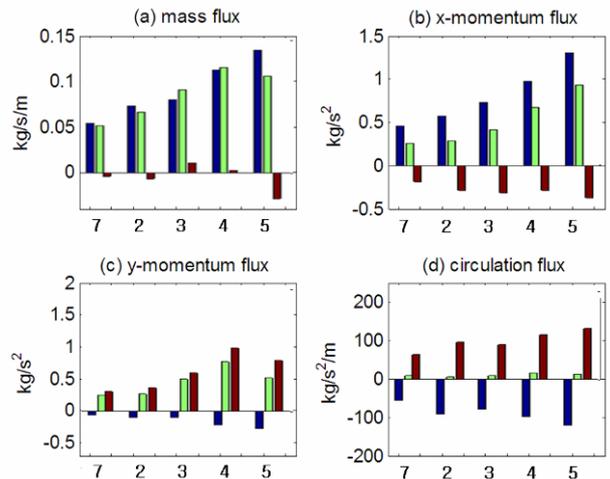


그림 11. 케이스별 플럭스 계산값 (influx, outflux, netflux 순서)

플럭스 계산 기준선 전후로 질량 플럭스(mass flux), x_1 방향 운동량 플럭스, x_2 방향 운동량 플럭스, 회전량(circulation) 플럭스의 차이를 비교한 그래프를 그림 11 에 정리하였다. 그림 11(a)의 질량 플럭스는 순플럭스(net flux: 갈색막대)가 영에 가까운 값이 되어야 한다. e_piv5 의 경우 질량 유입량에 비해 유출량이 적게 나오는데, 이것은 속도장 벡터

에서의 오차이거나 디플렉터와 루프간의 틈이 차폭 방향으로 달라져서 생기는 3 차원 유동의 효과일 수도 있다. 그림 (b)의 순 수평 방향 운동량은 디플렉터와 프레임 A 사이 협로의 저항 때문에 감소하였다.

운동량 두께가 두꺼워질수록 그림 (c)와 (d)의 수직방향 운동량 및 회전량의 증가가 두드러지는 것을 볼 수 있다. 수직 방향 운동량의 증가는 프레임 A에서 유속이 상방향으로 꺾이면서 생기는 현상이다. 공동 입구부 경계층에 질량을 주입하여 전단층에 의한 공동 소음의 레벨을 줄이려는 연구들이 있었다 [6~9]. 질량 주입을 자유 유속 방향 (x1 방향)으로 할 때보다 디플렉터 밑면을 통과해 나오는 유속처럼 45 도 방향으로 질량을 주입할 때와 어떤 주파수로 맥동하는 질량 주입보다는 일정 속도로 질량 주입할 때 소음 저감 효과가 더 우수하였다[6]. 또한, 질량 주입 결과 전단층의 운동량 두께가 증가한 것을 보고하였다[8,9]. 디플렉터에 의한 운동량 두께 증가 효과도 질량 주입에 의한 운동량 두께 증가 효과와 원리상 유사하다고 생각된다. 따라서 운동량 두께의 증가 효과에 디플렉터의 높이도 중요하나, 루프 앞전의 높이와 경계층 높이에 대한 디플렉터의 수직 위치 그리고 디플렉터 밑면과 프레임 A가 형성하는 협로의 형상이 중요하다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 유동의 주기성과 강한 실내 압력장과의 상호작용을 특징으로 하는 실차 썬루프 드론 소음 유동장을 정량적으로 가시화할 수 있는 PIV 기법을 개발하고 이를 여러 가지 디플렉터 조건에 대하여 적용하였다. 장비의 한계를 고려하여 위상 기록 PIV 기법 및 위상 재배열 후처리 프로그램을 개발하여 효과적으로 유동 특징을 파악할 수 있었다. 또한, 튜브 타입 디플렉터 주변 유동장의 특징을 살펴 디플렉터 하단을 통과하는 유동이 전단층의 운동량 두께 증가와 관련이 있음을 확인할 수 있었다.

이러한 연구를 통하여 향후 실차 썬루프 주변 부품들의 드론 소음 발생 기여 메커니즘에 대한 이해를 높이고, 나아가서 실질적이고 근본적인 설계 및 시험 가이드를 제시할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

(1) Shin, S.R., Kim, H., Jung, S.G., and Kook, H., 2006, “ New Sunroof Wind Noise Reduction Strategy Using Analytical Prediction and Automatic Deflector Optimizing System” , JSAE Annual Congress
 (2) www.dantecdynamics.com
 (3) Hyungseok Kook, 1997, “ Prediction and Control of the Interior Pressure Fluctuations in a

Flow-excited Helmholtz Resonator” , Ph. D Thesis, Purdue University

(4) Crouse, B., Senthoooran, S., Balasubramanian, G., Freed, D., and Karbon, K., 2007, “ Computational Aeroacoustics Investigation of Automobile Sunroof Buffeting” , SAE Paper 2007-01-2403

(5) Jimenez, J., 2004, Turbulence and Vortex Dynamics, Lecture Notes of Polytechnique

(6) Sarno, R.L. and Franke, M.E., 1994, “ Suppression of Flow Induced Pressure Oscillations in Cavities” , J. Aircraft 31, 90-96

(7) Vakili, A.D., Wolfe, R.C., and Nagle, P.A., 1995, “ Active Control of Cavity Aeroacoustics” , AIAA-95-175, 1199-1206

(8) Mandoza, J.M. and Ahuja, K.K., 1996, “ Cavity Noise Control through Upstream Mass Injection from a Coanda Surface” , AIAA-96-1767, 1-10

(9) Voorhees, G.C., and Bertin, J.J., 1969, “ Effects of Upstream Mass Injection on the Pressure Field in a Cavity” , AIAA Journal 7, 747-749