

헬름홀츠 공진에서 톱니 효과에 대한 수치적 연구

Numerical Investigation of Serration Effect on the Helmholtz Resonance

이 승 수* · 전 민 우* · 이 수 갑†

Seungsoo Lee, Minu Jeon and Soogab Lee

(Received July 9, 2015 ; Revised October 27, 2015 ; Accepted November 17, 2015)

Key Words : Helmholtz Resonance(헬름홀츠 공진), Serrated Deflector(톱니 디플렉터), Serration Effect(톱니 효과)

ABSTRACT

The flow-excited Helmholtz resonance phenomenon was investigated numerically using Reynolds averaged Navier-Stokes approach. The fundamental cause of the Helmholtz resonance phenomenon is known as shedding of a single discrete vortex from orifice edge that travels during one period of the oscillation. In this study, serrated deflector, which is biomimetic design of the owl's feather, is used to split a single vortex into small vortices. Rectangular deflector and serrated deflector are compared with numerical results of pressure and streamline inside the cavity. Consequently, the serration breaks the shedding period of vortex core and eliminates the resonance. Also, it changes the flow pattern in according to the location of different serration height. By making inflows and outflows occur simultaneously in spanwise direction in the cavity, the period of Helmholtz resonance disappears. Comparing between rectangular deflector and serrated deflector, the serrated deflector can deal with the Helmholtz resonance more effectively.

1. 서 론

헬름홀츠 공진에 대한 연구는 다양한 산업분야와 학문에서 오랫동안 널리 연구되어졌다. 이는 헬름홀츠 공진이 음향학적 요인과 상호작용하며 매우 복잡한 원리에 의해 발생하기 때문에 그 원리를 정확히 규명해 내기 쉽지 않았기 때문이다. 일반적으로 헬름홀츠 공진은 유동이 공동의 입구 위를 지나면서 발생하는데, 공동의 앞전에서 발생하는 유동의 전단층 불안정성(shear layer instability)에 의해 주기적으로 떨어져 나오는 하나의 소용돌이 덩어리(single

discrete vortex)가 공동 내부의 공진을 일으키며 톱니 소음을 발생시킨다⁽¹⁾. 이때 주기적으로 진동하는 전단층의 주파수가 공동의 공진 주파수와 매우 가까워지게 되면 공동 입구에서의 작은 압력 변동이 공동 내부의 큰 압력진동을 일으킨다.

헬름홀츠 공진은 횡적 모드의 공진을 발생시키며 파장이 공동의 입구 길이와 공동 부피의 1/3승 ($V^{1/3}$)에 비하여 매우 크기 때문에 공동의 내부를 공간적으로 균일하다고 여길 수 있다. 헬름홀츠 공진기의 2차원 형상을 보면 유동이 입구를 지나며 입구에서 와도(vorticity)에 의해 전단층이 형성되고 이로 인해 공진이 발생하며 이에 따른 스트로우홀

† Corresponding Author ; Member, Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Seoul National University
E-mail : solee@snu.ac.kr

* Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Seoul National University,

‡ Recommended by Editor Heung Soo Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

수를 갖는다. 헬름홀츠 공진은 비교적 낮은 마하수에서 발생하며 마하수에 따라 공진의 발생 여부가 결정된다. 특히 공진이 발생하는 경우 마하수가 공진 영역의 중심이며 공진이 발생하지 않는 경우는 공진 영역의 사이인 것을 확인할 수 있다⁽²⁾.

이 공진 현상의 심각한 문제점은 공동 내에서 발생하는 공진에 의한 압력변동이 공동이 내부에 심각한 구조적 피해를 입힐 수 있으며, 공동 내부에서 발생하는 공진은 저주파수의 큰 압력변동을 만든다는 것이다. 특히, 뒷창문이나 선루프를 열고 달리는 자동차의 내부는 밖에서 유동이 흐르는 공동으로 여겨질 수 있으며 열려있는 창문이나 선루프에 의해 차 내부에서 앞서 설명한 공진이 발생하게 된다. 이 공진을 가리켜 버페팅이라 하는데 버페팅은 20 Hz~100 Hz에서 약 120 dB의 큰 압력변동을 동반한다. 버페팅 현상이 차량 내부에 발생하게 되면 운전자와 승객의 귀를 매우 강하게 압박하여 위험한 상황을 만든다. 뿐만 아니라 자동차 차체 구조에도 불안정한 영향을 주기 때문에 헬름홀츠 공진을 예측하고 다루는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다.

헬름홀츠 공진인 자동차의 버페팅을 제거하기 위한 다양한 연구들이 진행되어졌다. Balasubramanian et al.⁽³⁾는 차량의 뒤쪽에 인위적인 구멍을 뚫어 시스템의 감쇠를 증가시킴으로써 공진을 제거하려 하였으나 큰 효과를 보지 못하였고, 다른 방법으로 2009년에 나눔 막대(dividing post)를 이용하여 공기역학적 불안정성(aerodynamic instability)을 변화시킴으로써 공진을 제거하려는 수치적인 연구도 수행되었다.

이번 연구에서는 헬름홀츠 공진을 제거하기 위해 새로운 개념인 톱니 형상의 디플렉터를 제안하려 한다. 여기서 제안한 톱니 형상은 공력 소음 분야에서 다양하게 사용되어져 왔다. Ver⁽⁴⁾은 제트 엔진 뒷전에 톱니 형상을 설치함으로써 제트 소음을 5 dB 이상 줄였고, Hersh와 Hayden⁽⁵⁾은 톱니 형상을 날개 앞전에 붙임으로써 톱니 형상이 작은 소용돌이들을 생성하여 후류의 주기적인 소용돌이 시스템을 붕괴시킨다는 사실을 실험을 통해 확인하였다. Howe^(6,7)는 톱니 형상에 따른 소음 저감 효과의 관계에 대해서 연구를 하였다. Kim⁽⁸⁾ 또한 에어포일에 부착된 톱니 형상이 후류의 거대한 소용돌이 구조(coherent vortex structure)를 부시는 모습을 수치적으로 연구하였다. 새로운 디플렉터로써 제안하는 톱니 디플렉터는 기존의 소용돌이 구조를 붕괴하고 유동의 특성을 변화시키는 것을 수치적으로 보이기 위해 우선 검증을 거치고 헬름홀츠 공진의 메커니즘을 분석한 후 직사각형 디플렉터와 톱니형 디플렉터의 유동 특성을 수치적 결과로 보일 것이다.

2. 수치해석 검증 및 메커니즘 분석

2.1 수치해석기법

헬름홀츠 공진을 수치적으로 해석하기 위해 압축성 unsteady Reynolds averaged Navier-Stokes(URANS)를 이용하였다. URANS는 하나의 불안정성(gross unsteadiness)을 갖는 유동 중 소용돌이가 출렁이는 주파수(vortex shedding frequency)가 톤 주파수인 유동을 잘 예측한다⁽⁹⁾. URANS는 연속방정식인 식 (1)과 Navier-Stokes식인 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial \rho} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

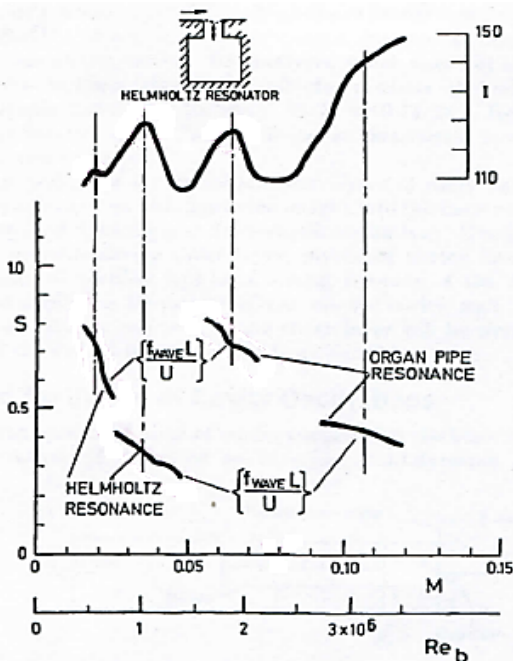


Fig.1 Strouhal number with Mach number of Helmholtz resonator⁽²⁾

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] \\ & \quad + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{\rho u_i u_j}) \end{aligned} \tag{2}$$

위 식의 유동 변수들은 모두 앙상블 평균(ensemble average) 값이며 u' 은 변동(fluctuating)값을 나타낸다.

난류 모델은 전단층과 순환 유동을 잘 표현하기 위해 $k-\epsilon$ 난류 모델을 사용하였다. k -방정식과 ϵ -방정식은 식(3)과 식(4)와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\mu_t}{\rho} S^2 - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{1}{\rho} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \tag{3}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \\ &= \frac{\epsilon}{k} \left(C_{1k} \frac{\mu_t}{\rho} S^2 - C_{2\epsilon} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{1}{\rho} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \tag{4}$$

2.2 검증 결과

시뮬레이션은 Purdue 대학의 Herrick 연구실에서 실행한 실험을 토대로 타당성 검증을 수행하였다⁽¹⁰⁾. 공동 모델은 Fig. 2와 같이 실험에서 사용한 모델과 동일하게 만들어졌으며 유입류의 속도는 25 m/s이며 압력 측정 지점은 공동 바닥의 중심이다.

100만개 이상의 언스트럭처 메시(unstructured mesh)를 사용하여 시뮬레이션이 수행되었으며 정상상태

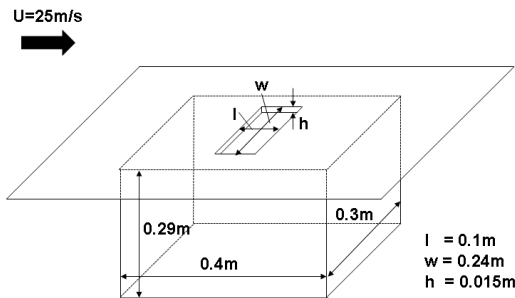


Fig. 2 Cavity model

값을 비정상상태의 초기 상태로 사용하였다. 경계값은 실험 상황과 동일하게 부여하여 시뮬레이션 되었다. 또한 시뮬레이션의 시간 간격 크기는 공동의 공진 주파수와 그 하모닉 주파수들이 예측 가능한 크기로 결정하였다.

Fig. 3은 실험과 시뮬레이션의 타당성 검증 결과로서 공동 내부 측정지점의 주파수 영역에서 음압 레벨을 보여준다.

시뮬레이션된 결과를 보면 첫 번째 정점이 약 107 Hz에서 발생하며 이 주파수가 공기역학적 불안정성에 있어 핵심적이며 지배적인 주파수임을 확인할 수 있었으며 실험치와 거의 일치하는 것을 확인하였다. 또한 다른 조화 주파수로서 215 Hz, 323 Hz, 그리고 430 Hz에 정점이 있는 것도 확인할 수 있다. 헬름홀츠 공진기의 고유 주파수는 공진기의 형상에 의해 결정되는데 그 식은 아래와 같다.

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{Vl}} \tag{5}$$

여기서 S 는 입구의 면적이며, V 는 공동의 부피, 그리고 l 은 입구의 유효 두께(effective neck thickness)이다. 공진기의 고유 주파수와 유사한 주파수로 공동의 앞전에서 전단층 모드가 형성되면 공진이 발생하게 되는데 이 전단층의 주파수는 유동의 속도와 경계층 두께에 의해 결정된다. 실험값이 약 101 Hz로 수치해석 값과 6 Hz 정도 차이를 보이는 것 역시 전단층의 주파수가 수치해석에서 오차로써 차이가 나타나기 때문으로써 경계층의 두께 차이에 의한 것이다. 일반적으로 경계층에 두께가 증가할수록

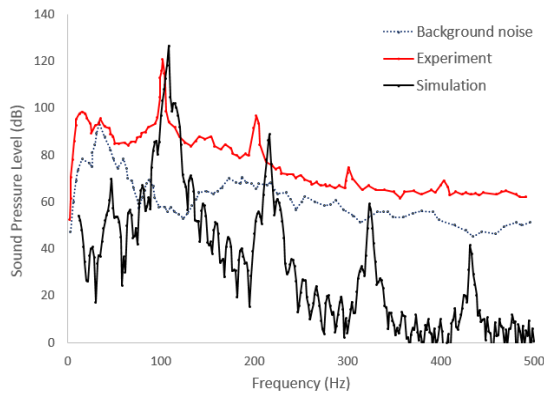


Fig. 3 Sound pressure level at receiver point

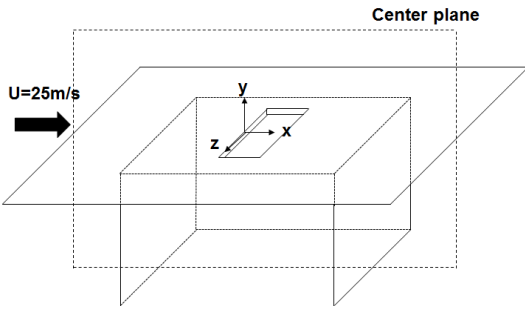


Fig. 4 Center plane of the cavity

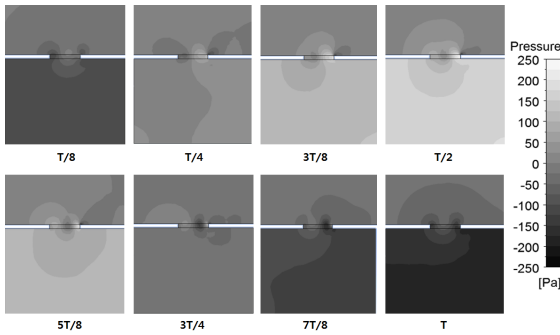


Fig. 5 Instantaneous pressure contour for one period



Fig. 6 Instantaneous vorticity contour for one period

주파수는 감소하는 것으로 확인되었다⁽¹¹⁾.

2.3 메커니즘 분석

헬름홀츠 공진의 원리를 Fig. 4와 같이 공동의 중심 단면에서 한 주기 동안의 압력 분포와 와도를 통해 확인할 수 있었다.

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 압력과 와도를 한 주기에 서 나타낸 것이다. 그림을 보면 공동의 입구에서 압력이 낮은 원형의 소용돌이 중심을 확인할 수 있다. 이 낮은 압력을 갖는 소용돌이 중심은 와도 그림을

통해서도 위치를 확인할 수 있는데 소용돌이 중심이 주기 동안 앞전에서 뒷전으로 출렁이며 흘러가는 것을 볼 수 있다. 각 주기별로 위치를 보면 소용돌이 중심은 $T/8$ 부터 $3T/8$ 동안 앞전에서 중심으로 이동한다. 이 기간에 유동은 외부에서 공동 내부로 유입되며 $4T/8$ 에서 내부 압력을 최대로 만들게 된다. 반면, $5T/8$ 부터 $7T/8$ 사이에 소용돌이 중심은 중심으로부터 뒷전으로 이동하며, 이 사이 유동은 공동 내부에서 외부로 유출되며 공동 내부 압력을 낮춘다. 이렇게 발생하는 순환은 공동 내부에서 헬름홀츠 공진을 만들며 공진은 전단층이 교란되는 동안 계속 유지가 된다.

3. 직사각형 디플렉터와 톱니 디플렉터 수치실험 및 결과비교

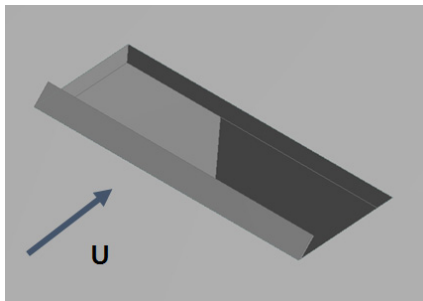
3.1 수치실험 모델

Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)는 각각 직사각형 디플렉터와 톱니 디플렉터의 도식적인 형상이다. 직사각형 디플렉터는 톱니 디플렉터의 높이와 같은 높이로 디자인되었다. 수치해석은 아음속 유동인 $5\text{ m/s} \sim 25\text{ m/s}$ 영역에서 5 m/s 단위로 수행되었으며 이 속도 영역에서는 모두 톱니 형상이 공진을 제거하는 것으로 확인되었다. 아래의 결과는 25 m/s 에서 수행된 결과를 사용하였다.

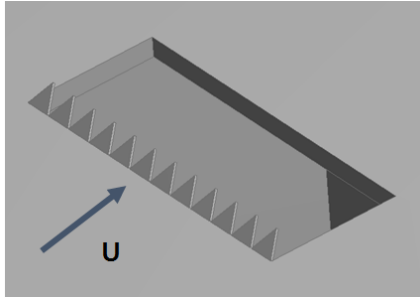
3.2 Pressure Contour 결과

직사각형 디플렉터와 톱니 디플렉터에 의해 공동의 내부 유동이 어떻게 변화하는지에 대해 수치적으로 해석한 결과이다. Fig. 8은 각각 직사각형 디플렉터와 톱니 디플렉터 중심의 단면에서의 압력 변화를 나타낸 것이다.

결과를 보면 직사각형 디플렉터의 내부 압력은 기존과 마찬가지로 한 주기 동안 압력 변동이 일어나며 입구에서 소용돌이 중심이 앞전에서 뒷전으로 흐르는 것도 확인되었다. 이로 인해 직사각형 디플렉터일 때 공동 내부에서 공진이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과는 Wang이 직사각형 디플렉터에서는 유동의 속도가 25 m/s 를 넘어설 때 효과가 거의 없다는 실험과 일치하였다⁽¹⁰⁾. 반면, Fig. 8(b)와 같이 톱니 디플렉터가 부착된 공동 내부는 시간이 변함에 따라 관계없이 압력이 변하지 않고



(a) Rectangular deflector



(b) Serrated deflector

Fig. 7 Two deflector models

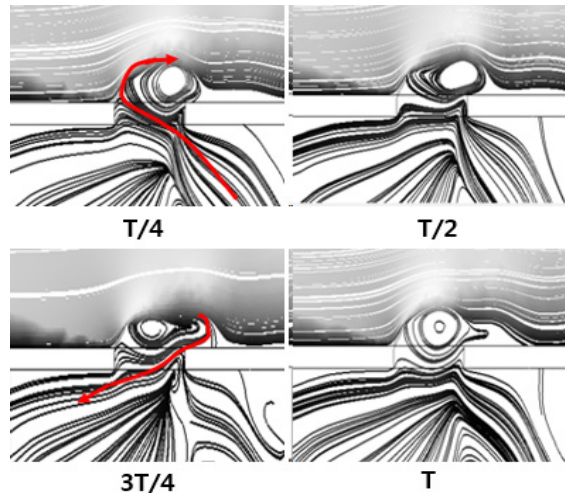


Fig. 9 Streamline of rectangular deflector for one period

외부로 유출되는 것을 확인할 수 있었다. 이로 인해 $2T/4$ 시각에 공동 내부의 압력이 낮아졌고, 이후 $3T/4$ 에서는 소용돌이 중심이 직사각형 디플렉터 끝에서 발생하면서 뒤로 이동하는 동안에 유동이 화살표를 따라 공동 내부로 유입되면서 압력이 높아지는 것을 볼 수 있었다. 반면 Fig. 8에서 확인할 수 있었던 듯이 톱니 디플렉터는 시간에 따라 공동 내부의 압력이 거의 일정하였다. 톱니 디플렉터는 직사각형 디플렉터와 달리 디플렉터의 스펠 방향에 따라 유동의 특성이 확연히 변한다는 것을 알 수 있기 때문에 톱니 디플렉터의 유동 특성을 확인하기 위해서는 디플렉터 스펠 방향에 따라 유동의 특성을 볼 필요가 있다. 따라서 톱니의 높이가 0인 평면($z = 0 \text{ m}$)과 톱니의 높이가 최대가 되는 평면($z = 0.01 \text{ m}$), 이렇게 두 평면에 대해 유동 특성을 살펴보았다.

Fig.10의 결과를 보면, 톱니 높이가 없는 평면의 유선은 디플렉터를 통과하여 화살표 방향으로 입구 뒤쪽을 지나 공동 내부로 유입되고 있다. 반면 톱니 높이가 가장 높은 $z = 0.01 \text{ m}$ 평면에서는 앞에서부터 오는 유동이 디플렉터를 지나 공동 내부로 유입되지 않고 지나가며 공동 내부에서 유동이 유출되는 것을 확인할 수 있었다. 이 유선의 결과를 보면 톱니 형상은 톱니 디플렉터의 스펠방향의 유동 특성을 변화시켜 유동의 유출입이 동시에 일어나게 만들어주고 있다. 이렇게 톱니 모양은 유동의 유출입을 동시에 일어나게 함으로써 공진이 갖는 주기적인 특성을

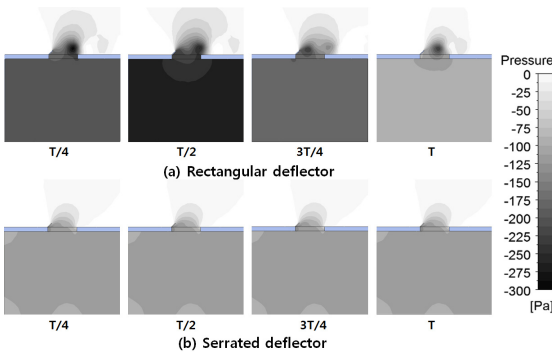


Fig. 8 Instantaneous pressure contour for one period

거의 일정한 것을 확인할 수 있었다.

3.3 두 디플렉터에 의한 유동 유선 비교

위의 서론에서 헬름홀츠 공진의 메커니즘을 소용돌이 중심 이동과 함께 유동의 유출입으로 이해하였듯이 이를 통해 서로 다른 두 디플렉터의 유동 흐름에 대해서 확인해보았다. Fig. 9는 직사각형 디플렉터가 부착된 공동 내부의 유선을 보여주고 있다.

소용돌이 중심이 입구 중심에서 뒷진으로 이동하는 $T/4$ 동안 유동이 화살표 방향으로 공동 내부에서

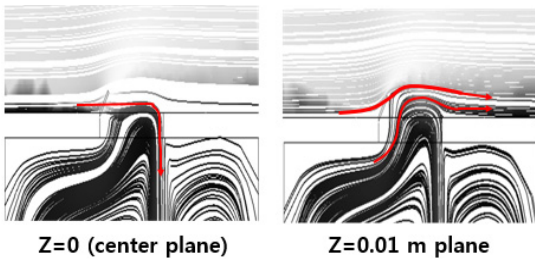


Fig. 10 Streamline at two different planes

의 우주핵심기술개발사업(NSL)으로부터 지원받아 수행한 연구과제입니다 (2013M1A3A3A02042024).

This work was supported by the International Collaborative Energy Technology R&D Program of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP), granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea.(No. 20138520021140)

References

- (1) Nelson, P. A., Halliwell, N. A. and Doak, P. E., 1981, Fluid Dynamics of a Flow Excited Resonance, Part I: Experiment, Journal of Sound and Vibration, Vol. 78, No. 1, pp. 15~38.
- (2) Harrington, M. C., 1957, Excitation of Cavity Resonance by Air Flow, Presented at the Meeting of the Division of Fluid Dynamics of the American Physical Society, New York.
- (3) Balasubramanian, G., Crouse, B. and Freed, D., 2009, Numerical Simulation of Leakage Effects on Sunroof Buffeting of an Idealized Generic Vehicle., AIAA 2009-3348
- (4) Ver, I. L., 1987, Noise of Jet Engine Test Cells, Naval Facilities Engineering Command, Jet Engine Test Cell Meeting.
- (5) Hersh, A. S. and Hayden, R. E., 1971, Aerodynamic Sound Radiation from Lifting Surfaces with an Without Leading-edge Serrations, NASA Technical Report CR-114370.
- (6) Howe, M. S., 1991, Aerodynamic Noise of a Serrated Trailing Edge, Journal of Fluids and Structures, Vol. 5, No. 1, pp. 33~45.
- (7) Howe, M. S., 1991, Noise Produced by a Sawtooth Trailing Edge, Journal of the Acoustic Society of America, Vol. 90, No. 1, pp. 482~487.
- (8) Kim, T. H., 2014, A Numerical Study on Generation and Reduction of Rotating Blades Broadband Noise, Ph.D. Thesis, Seoul National University.
- (9) Iaccarino, G., Ooi, A., Durbin, P. A. and Behnia, M., 2003, Reynolds Averaged Simulation of Unsteady Separated Flow, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 24, No. 2, pp. 147~156.

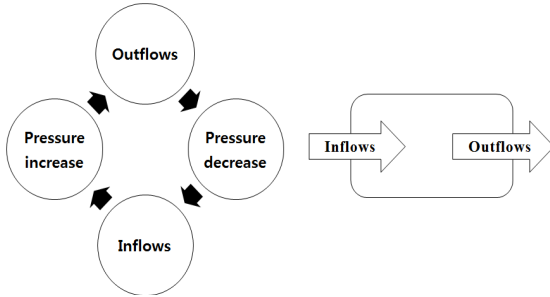


Fig. 11 Schematic principle of serrated deflector

제거한다. Fig. 11은 공진이 발생하고 톱니 형상이 공진을 제거하는 원리를 도식적으로 나타낸 것이다. 공진이 발생하는 경우는 유동이 유입되고 이로 인해 압력이 높아지며 유동이 유출되고 다시 압력이 낮아지는 주기적인 순환을 형성한다. 하지만, 톱니 형상이 만드는 효과는 유동의 유출입을 톱니 높이에 따라 변화시켜 동시에 유출입이 일어나게 하여 압력변화를 최소화시킨다.

4. 결 론

이 연구에서 우리는 압축성 Navier-Stokes 방정식을 통해 헬름홀츠 공진을 보였으며 시뮬레이션 검증 후, 새로운 개념인 톱니 디플렉터를 제안했다. 톱니 디플렉터는 직사각형 디플렉터와 달리 공동 내부의 유동의 유출입을 동시에 일어나게 함으로써 헬름홀츠 공진을 제거하였다. 톱니 효과의 메커니즘을 이해함으로써 톱니 디플렉터가 헬름홀츠 공진을 제거하는데 유용하게 사용될 수 있다.

후 기

이 연구는 한국연구재단을 통해 미래창조과학부

(10) Wang, Y. P., Lee, H. C., Li, K. M., Gu, Z. Q. and Chen, J., 2012, Experimental and Numerical Study of Flow Over a Cavity for Reduction of Buffeting Noise, *Acta Acustica United with Acustica*, Vol. 98, No. 4, pp. 600~610.

(11) Ashcroft, G. B., Takeda, K. and Zhang, X., 2003, A Numerical Investigation of the Noise Radiated by a Turbulent Flow Over a Cavity, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 265, No. 1, pp. 43~60.



Seung-Soo Lee received his M.S. degree in Aeroacoustics from Seoul National University in 2016. He works as a principal researcher in Agency for Defense Development. His research interest includes the fluid-resonant cavity oscillation and the effect of deflector on a flow vortex.