

# 유동가진 공명기 내부의 음압 제어 Control of Sound Pressure Inside a Flow Excited Resonator

황 철 호\* · 박 중 범\*

Cheol Ho Hwang, Jong Beom Park

**Key Words** : Vortex Diffusion(와류 확산), Flow-excited Resonator(유동가진 공명기), Helmholtz Resonator(헬름홀츠 공명기), Sound Pressure Control(음압제어), Spoiler(스포일러), Active Control(능동제어)

## ABSTRACT

Flow traveling over a cavity opening forms a vortex due to unstable shear layer and induces an aerodynamic pressure excitation from the diffusion of the vortex convecting out of the trailing edge of the opening. The interaction between the excitation force and the cavity response sustains resonance in the resonator(cavity) and locked-in vortex shedding at the leading edge of the opening. The aerodynamic excitation force can be described from the diffusion of the vortex over the trailing edge and the level of its diffusivity is related to the strength of vorticity seeded at the leading edge. In this study, the control scheme of the internal pressure oscillation was proposed from regulating the vorticity at the leading edge by use of an oscillating spoiler. It was found that the relative motion between the spoiler and the air mass at the cavity opening influenced vorticity strength and the control was achieved by direct feedback of the cavity pressure fluctuation to the actuator.

## 1. 서 론

개구부를 가진 공명기 위로 공기 유동이 발생하면, 자유 전단층이 발달하면서 와류를 형성하게 된다. 이 와류의 중심부는 주변보다 낮은 압력과, 원거리장 자유흐름의 절반에 해당하는 평균속도를 가지고 공동 개구부를 지나간다. 생성된 와류는 공동의 뒤쪽 모서리와 만나면서 약화되거나 소실되며, 이때 압력의 변화를 일으키게 된다. 이러한 일련의 압력변화는 공명기를 가진시키는 외력으로 작용하게 되며, 가진된 공명기의 응답은 다시 공동의 앞쪽 모서리에서 다음 와류 생성을 유도한다. 와류발산 주파수가 공명기의 고유진동수와 일치하게 되면 뚜렷하고 강화된 세기의 이산 와류가 형성되며 공명기 내에서 공진을 일으키게 된다.

공명기 내부에서 발생하는 자율지속 진동의 크기와 주파수는 주어진 시스템의 제어자 및 피제어자의 규명과 이들의 피드백 루프 구성을 기초로 하여 예측한다. Cremer와 Ising<sup>(1)</sup>, Michalke<sup>(2)</sup> 등은 이산와류 생성에서의 진동진폭 예측연구를 하였으며, Mast<sup>(3)</sup>은 헬름홀츠 공명기의 수학적 모델을 제안하였으며, 국형석<sup>(4)</sup>은 와류 음향이론에 근거

한 전방 이득함수를 유도하였다. 공력 가진으로 유발된 공진 제어를 위해 스포일러, 압전소자 등 다양한 제어 체계와 장치들을 사용한 연구가 많이 진행되어 왔다.

본 논문에서는 공력의 물리적인 형성과정을 기초로 간단한 폐회로 되먹임 회로를 구성하되 전역범위에서 사용가능한 제어방법을 연구하였다. 진동 스포일러를 이용하여 스포일러 끝단에서의 와도(vorticity)를 조절하고 공동 끝단에서의 와류를 효과적으로 확산시킴으로써 공력 가진력을 감소시켜 공동 내 공진 음압 진폭을 줄이는 방법을 제안하였다.

## 2. 이론

### 2.1 공력가진 모델링

공기역학적 유동과 공명기 내의 음향학적 유동에 대한 수학적 모델은 음향 유동에 대한 외부 가진을 표현하는 전방 이득함수와 외부 공력 가진력에 의한 공명기의 응답을 나타내는 후방 이득함수로 구성된다.<sup>(3)</sup> 자유유동에 의해 공동 개구부에서 유도된 유량 위상자(phasor)를  $\hat{q}_r$ , 공동 내 음향 체적유속(volume flux) 위상벡터를  $\hat{q}_f$ 이라 하면, 후방 이득 함수는 공명기의 외력에 대한 응답 전달함수를 나타내며, 다음 식과 같이 나타낼 수 있다:

$$\left( \frac{\hat{q}_r}{\hat{q}_f} \right)_b = \frac{-(2\zeta w_r(j\omega) + w_r^2)}{(j\omega)^2 + 2\zeta w_r(j\omega) + w_r^2} \quad (1)$$

† 한남대학교 기계공학과

E-mail : cheolho@hannam.ac.kr

Tel : (042)629-8277

\* Herrick Labs. Mechanical Engineering, Purdue Univ.

여기서  $w_r, \zeta$ 는 공진 주파수와 감쇠비를 나타낸다.

전방 이득함수는 개구부에서의 외력  $p_{ext}$ 에 의해 가진되는 공기 체적유량  $\hat{q}_r$ 를 출력 위상벡터, 영점으로 기준된 위상각( $\angle \hat{q}_r = 0$ )을 갖는 음향 체적유량  $\hat{q}_f$ 을 입력 위상벡터로 한 단일 입출력 유사 선형필터로 다음 식과 같이 근사화할 수 있다:

$$\left(\frac{\hat{q}_f}{\hat{q}_r}\right)_f = \frac{S_o^2 \hat{p}_{ext}}{j\omega M |\hat{q}_r|} \quad (2)$$

여기서,

$$\hat{q}_f = \frac{S_o^2 \hat{p}_{ext}}{j\omega M}, \quad (3)$$

$$\hat{q}_r = |\hat{q}_r|, \quad (4)$$

이며,  $S_o$ 와  $M$ 은 개구부 면적과 공기 등가질량이다.

공력에 의한 자동지속 진동의 주파수 및 진폭은 상기 두 전달함수의 안정화 루프 조화조건에 의해서 다음 식에 의해 결정된다.

$$\left(\frac{\hat{q}_f}{\hat{q}_r}\right)_f \cdot \left(\frac{\hat{q}_r}{\hat{q}_f}\right)_b = 1. \quad (5)$$

## 2.2 와류 분산 제어

식 (2)의 외력  $\hat{p}_{ext}$ 은 와류에 의해 공동에 가해지는 가진 압력으로서 비압축성 와류 유동장에서 압축성 음향장으로 행해진 일로부터 다음 식과 같이 나타낼 수 있다:

$$p_{ext} = \frac{\int_S -\rho(\bar{w} \times \bar{v}) dS}{d} = \frac{\rho \Gamma u_c}{d} \quad (6)$$

여기서,  $S$ 는 공동 개구부의 계산 검사체적,  $\rho$ 는 공기밀도,  $\bar{w}$ 와  $\bar{v}$ 는 유동의 국부적인 와도(local vorticity)와 속도,  $d$ 는 개구부 길이,  $u_c$ 와  $\Gamma$ 는 와류의 대류속도와 검사 체적내의 총 순환(circulation)을 나타낸다.

검사체적 내의 와도유속(vorticity flux) 변화에 레이놀즈 수송정리를 적용하면 총 순환의 변화율을 얻을 수 있다. 여기에 푸리에 시리즈로 표현된 와도 주기함수를 도입하면 다음과 같이 공동 개구부 끝단에서의 와류 분산정도에 따른 가진력을 나타낼 수 있다<sup>(5)</sup>:

$$p_{ext} = -\frac{1}{2} \rho u_{\infty}^2 - \frac{1}{2} \rho u_{\infty}^2 \sum_{k=-\infty, \neq 0}^{\infty} \frac{\alpha}{jkSt_{\phi}} e^{jk(m\omega - St_{\phi})} \quad (7)$$

여기서,  $u_{\infty}$ 는 자유흐름 속도,  $St_{\phi}$ 는 무차원 스트로홀 수(Strouhal number,  $wd/u_c$ ),  $\alpha$ 는 와류 분산 정도를 표현하는 인자로서 0과 1 사이의 값을 갖는다.

공동 개구부내에서 전단부에서 방출되는 초기 와도로부터 회전말림(rolling-up) 과정을 통해 와류의 생성과 발전이 이루어진다. Fig. 1에 나타난 것처럼 유동방향을  $x$ , 유동에 수직인 방향을  $y$ 라고 할 때, 와도는 수직성분 유속의 유동방

향 변화율과 유동방향 유속의 수직방향 변화율에 의해 다음 식으로 표현된다:

$$\bar{w} = \nabla \times \bar{v} = \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \hat{k}. \quad (8)$$

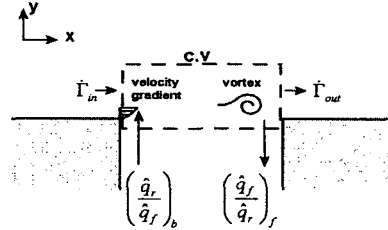


Fig. 1 Flow over the cavity opening and feedback diagram.

따라서 이 초기 속도구배를 조절함으로써 와류 생성 및 발전을 방해하거나 촉진시킬 수 있으며, 개구부 끝단에서 와류의 분산정도 및 식 (7)의 외부 가진력을 변화시키면 결과적으로 공동내에 형성되는 음향장의 크기를 제어할 수 있다.

본 연구에서 사용되는 스포일러는 공동 목 부분에서의 공기 체적의 운동과 동일 위상을 갖는 운동을 하여 수직 유속 성분의 유동방향 변화율, 즉  $\partial v_y / \partial x$ 를 최소화하며 이에 따라 와도 성장을 억제하여 확산된 와류 분산도를 유도한다.

## 3. 실험

개략적인 실험장치 구성도는 Fig. 2와 같다. 공동에 강화 플라스틱으로 만든 1/5 축소 모형의 차량 모델을 설치하고, 모델 안의 음압은 1/2인치 마이크로폰으로 측정하였다.

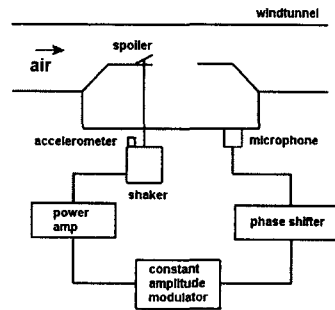


Fig. 2. Experimental setup diagram.

차량모델의 형상 및 크기는 Fig. 3과 같다. 모델의 크기는 관심 주파수영역(100~150 Hz)의 파장보다 작으므로 집중질량 모델의 헬름홀츠 공명기로 볼 수 있으며, 식 (1)의 일차원 자유도를 갖는 시스템으로 생각할 수 있다.

이 공명기의 공진 주파수  $\omega_r$ 는 120 Hz이며 감쇠비  $\zeta$ 는 0.0455이다. 공동 개구부의 전단에 16x1 cm 크기의 알루미늄 스포일러를 모델 표면과 같은 높이로 부착하였다. 전기 가진기를 알루미늄 봉으로 스포일러 끝에 연결하여 스포일러

러를 가진하며, 스포일러 끝단의 변위 측정을 위해 가진기의 플랜지에 가속도계를 부착하였다. 가진기와 스포일러가 연결된 상태에서 알루미늄봉의 진동 모드를 측정된 결과, 주 진동 모드는 250Hz에서 존재하며 관심 주파수대역에서 7°의 위상 지연만 발생하였다. 이 결과는 계산 과정에 반영하였다.

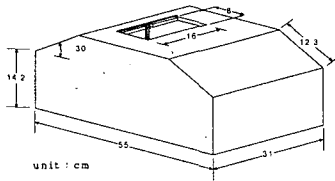


Fig. 3 Cavity dimension.

스포일러는 수평면으로부터 0~30°의 평균 받음각(angle of attack) 범위내에서 5°씩 변화시켰으며, 각 경우에 대해 공동 내에 최대 음압(공진)이 생성되는 풍속 조건하에서 실험을 실시하였다. 모델 내의 음압은 마이크로폰과 위상변조기, 진폭 조절기를 거쳐 일정한 위상차와 진폭을 갖는 신호로 실시간으로 변조된 후, 파워앰프를 통해 가진기에 피드백되었다. 스포일러 운동은 0.01 mm씩 0~0.2 mm의 진폭폭을 갖도록 조절하였으며, 각 경우에 대해 제어 전·후의 공동 내 음압을 저장하였다.

#### 4. 실험 결과

Fig. 4에서 알 수 있듯이, 스포일러 받음각이 낮은 경우에는 스포일러의 진폭이 음압에 그다지 영향을 주지 않지만, 임계각(20°) 이상에서는 음압변화에 큰 영향을 미친다. 이것은 낮은 받음각에서는 공동 내에 강한 음향장이 형성되어 공동 목부분에서의 공기 제척의 운동 변위가 높은 받음각에서의 경우보다 크므로 스포일러의 운동이 초기 속도구배에 의한 와도 발생에 큰 영향을 주지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 임계각에서의 와류의 재부착점(reattachment point)이 개구부의 끝단에 가깝기 때문에 와류 분산정도가 초기 속도구배 변화에 민감하게 반응할 수 있기 때문이다.

임계각 이상의 스포일러 평균 받음각에서 스포일러 운동과 공동 내 음압의 위상차  $\phi$ 에 따라 제어효과가 다양하게 나타났다. 다양한 스포일러 운동진폭에 대해, 위상을 0~4 $\pi$ 까지 변화시키며 음압의 변화를 추적한 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

위상이 동일한 경우( $\phi=0, 2\pi$ ) 오히려 제어 전보다 음압레벨이 증가하였으며, 위상이 반대인 경우( $\phi=\pi, 3\pi$ ), 음압레벨이 현저히 감소하였다. 공동 목에서의 공기 볼륨의 운동은 내부 음압과 위상이 반대이므로 스포일러가 목 공기 볼륨과 위상이 동일할 때( $\phi=0, 2\pi$ ) 음압이 감소됨을 알 수 있다.

공동 목에서의 공기 볼륨의 변위  $\xi$ 는 다음과 같이 공동 내 음압  $p_c$ 으로부터 구할 수 있다.<sup>(6)</sup>

$$\xi(t) = \frac{V_c}{\rho c_0^2 S} p_c(t). \quad (9)$$

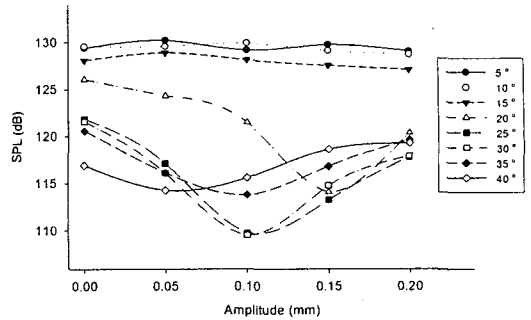


Fig. 4 Sound pressure level variation due to the amplitude change of spoiler oscillation at each mean angle.

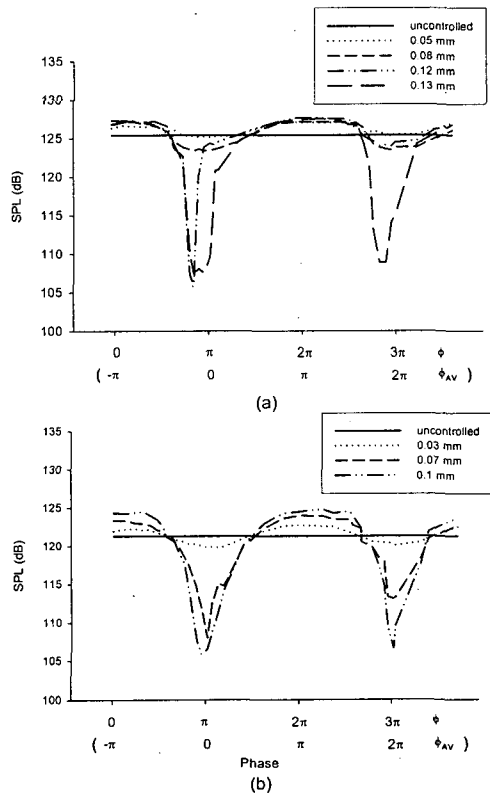


Fig. 5 Cavity pressure variation with respect to the phase change of spoiler motion at the mean angles of (a) 20° and (b) 25°.

여기서,  $V_c$ 는 공동의 체적,  $\rho$ 와  $c_0$ 는 공기의 밀도와 음속,  $S$ 는 공동 목의 면적,  $\rho c_0^2 S/V_c$ 는 단위 면적당 음향학적 유효 강성을 나타낸다. 계산된 공기 볼륨의 운동과 가속도계에서 구한 스포일러 끝단의 운동을 스포일러각 20°에서 최대 음압감소 효과를 얻었을 경우에 대하여 그림 6에 나타내었다.

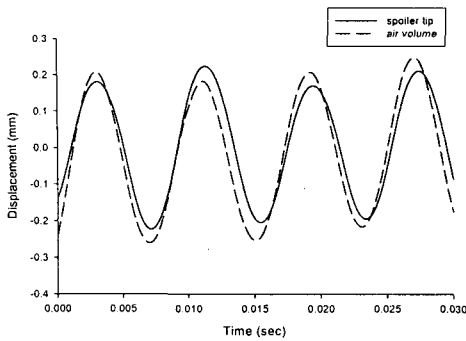


Fig. 6 Comparison between spoiler tip and neck air mass displacements when maximum sound reduction at 20° mean spoiler angle.

각 운동은 거의 동일한 진폭을 가지며, 따라서 최대 음압 제어효과는 공동 목의 공기 볼륨과 동일한 위상에서만 아니라 동일한 진폭으로 운동하는 스포일러에 의해서도 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이것은 유동이 스포일러를 지나 공동 개구부를 지날 때 유동방향 속도구배 변화를 얻지 못해 와도가 최소가 되기 때문이다. 운동 진폭이 증가하는 경우 음압이 최저점에서 다시 증가하는데, 이것은 동일 위상으로 운동해도 진폭 차이에 의해 스포일러 끝단에서 속도구배가 증가하여 와도가 강화되기 때문이다. Fig. 4에서 평균 스포일러 각의 증가에 따라 공동 내 평균 음압이 감소하여 음압제어에 필요한 스포일러의 운동진폭도 감소함을 알 수 있다.

Fig. 5에서 볼 수 있듯이 반대 위상( $\phi_{av}$ )의 스포일러 운동은 진폭에 관계없이 항상 내부음압을 증가시켰다. 이는 상반된 스포일러 끝단의 운동과 공동 목에서의 공기 볼륨의 운동으로 인해 속도구배가 상대적으로 크게 증가하기 때문이며 운동 진폭이 증가할수록 와도가 강화되어 음압 증가폭도 증가하기 때문이다. 동일 위상의 배수( $2n\pi$ )인 위상의 변화에도 음압은 감소하였으나, 그림에서 알 수 있듯이 그 효과는 감소하였다. 이것은 와류 발산 주파수가 일정한 상수가 아니라 시간에 따라 부유하기 때문이며, 따라서 일정한 주파수의 개방형 루프 형태의 스포일러 운동으로는 유동을 제어할 수 없음을 알 수 있다.

Fig. 7에 제어 유무에 따른 음압변화를 1/3 옥타브대역 스펙트럼으로 나타내었다. 공진영역의 중심 주파수(125Hz) 대역에서 약 15 dB, 나머지 대역에서 13 dB 감소하였다. 저주파 영역에서 약간의 증가를 보인 이유는 제어 루프내의 아날로그 진폭 조정기의 저주파 떨림(jittering)현상에 의한 것으로 정밀한 제어효과를 위해서는 이의 개선이 필요하다.

## 5. 결론 및 토의

공력가진 헬름홀츠 공명기의 내부 음압제어는 공력을 구형하는 초기 와도를 제어함으로써 달성할 수 있음을 보였다.

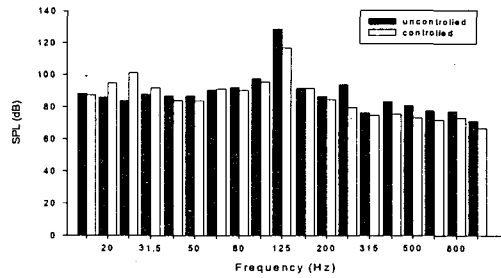


Fig. 7 1/3 octave band spectrums of cavity sound pressure level before and after control at spoiler angle of 20°.

제어 장치로는 간단한 스포일러를 사용하였으며 효과적인 와도 제어를 위해서는 공동 내 음압 변화와 반대 위상을 갖는 스포일러 상대운동이 중요하며, 스포일러 끝단에서의 국부적인 유체의 속도구배 조절로 가능함을 보였다.

본 연구에서 사용된 시스템은 공동 목 길이 대 깊이의 비율( $L/D$ )이 0.5 부근의 값을 가진 깊은 공동 흐름으로서 고속의 얇은 흐름에서 발생할 수 있는 고주파 공진 모드 및 유속방향의 다중와류생성 모드 제어에는 기계적인 한계를 가질 수 있다. 그러나, 저속( $Ma < 0.5$ )에서의 공동 흐름에는 효과적으로 적용할 수 있음을 보였으며 선루프 개방에 의한 차량 내 노이즈 제어 등에 응용이 가능하다.

본 연구에서 제안된 와도제어에 의한 공명기내(공동) 음압제어는 공력의 물리적 형성 과정에 기초하였기 때문에 비단 공진영역에서 뿐만 아니라 유체 유동의 조건에 관계없이 전역 제어가 가능하며 또한 음압의 직접 피드백만으로 구성되어 있기 때문에 제어 구조가 간단하고 실제 산업에의 적용이 용이하다.

## 참고 문헌

- (1) Cremer, L., and Ising, H., 1967, "The self-excited vibrations of organ pipes," *Acoustica*, Vol. 19, 1967, pp. 143-153.
- (2) Michalke, A., 1965, "On spatially growing disturbances in an inviscid shear layer," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 23, pp.521-544.
- (3) Mast, T. D., and Pierce, A. D., 1995, "Describing function theory for flow excitation of resonators," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 97, pp. 163-172.
- (4) Kook, H., and Mongeau, L., 2002, "Analysis of the periodic pressure fluctuations induced by flow over cavity," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 251, pp. 823-846.
- (5) 국형석, 1998, "공기역학적으로 가진되는 헬름홀츠 공명기에서 발생하는 소음에 관한 예측모델," *한국소음진동공학회 논문집*, pp. 478-485.
- (6) Kinsler, L. E. et al., 1999, *Fundamentals of Acoustics*, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.