

와류진동 조절에 의한 유동가진 공동 내부의 음압 제어

Control of Sound Pressure inside a Flow Excited Cavity by Regulation of Vorticity Shedding

박종범* · 황철호†

Jong Beom Park and Cheol-Ho Hwang

(2007년 10월 5일 접수 ; 2007년 10월 26일 심사완료)

Key Words : Vortex Diffusion(와류 확산), Vorticity(와도), Flow-excited Cavity(유동가진 공동), Vortex Shedding(와류발산), Sound Pressure Control(음압제어), Spoiler(스포일러), Helmholtz Resonator(헬름홀쯔 공명기)

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

주행중인 자동차에서 선루프를 개방한 경우에 대한 단순모델로서 개구부를 가진 공동(cavity)의 개구부 위로 공기 유동이 발생하면, 자유 전단층이 발달하면서 와류(vortex)를 형성하게 된다. 이 와류의 중심부는 주변보다 낮은 압력과, 원거리장 자유흐름(free stream)의 절반에 해당하는 평균속도를 가지고 공동 개구부를 지나가게 된다. 생성된 와류는 공동 개구부의 뒤쪽 모서리와 만나면서 약화되거나 소

실되며, 이때 압력의 변화를 일으키게 된다. 이러한 일련의 압력변화는 공동을 가진시키는 외력으로 작용하게 되며, 가진된 공동의 응답은 다시 공동 개구부의 앞쪽 모서리에서 다음 와류 생성을 유도한다. 와류발산 주파수가 공동의 고유진동수와 일치하게 되면 뚜렷하고 강화된 세기의 이산 와류가 형성되며 공동 내에서 공진을 일으키게 된다.

주어진 시스템의 제어자 및 피제어자의 규명과 이들의 피드백 루프 구성을 기초로 공동 내부에서 발생하는 자율지속 진동의 크기와 주파수를 예측할 수 있다. Cremer와 Ising⁽¹⁾, Michalke⁽²⁾ 등은 이산와류 생성에서의 진동진폭 예측연구를 하였으며, Mast 등⁽³⁾은 헬름홀쯔 공명기의 수학적 모델을 제안하였다, 이 모델은 공동 뒤쪽 모서리에서의 와류-모서리 상호작용을 기초로 하고 있으며 공동 뒤쪽 모서리에서

† 교신저자 : 정희원, 한남대학교 기계공학과
E-mail : cheolho@hnu.kr
Tel : (042)629-8277, Fax : (042)629-8293

* Herrick Labs. Mechanical Engineering, Purdue Univ.

의 압력분포 위상은 Tang과 Rockwell⁽⁴⁾의 실험 관측 결과를 기반으로 결정하였다. 국형석 등⁽⁵⁾은 와류 음향 이론에 물리적 기초를 둔 전위 이득 함수를 유도하였으나, 진동 폭을 예측하기 위해서는 와류 분산 인자의 실험적인 결정이 요구되었다.

공력 가진으로 유발되는 공진을 제어하기 위해 다양한 제어 체계와 장치들을 사용한 연구 또한 많이 진행되어 왔다. 수동 스포일러는 공동 내 압력을 줄이는 고전적인 기구로서 주로 유체의 재부착점을 이동시키는 방법으로 음향 응답을 약화시키며, 능동 스포일러는 와류 구조를 교란시키는 방법으로 음압을 줄이는 효과를 갖는다. 이들은 유동장에 직접적인 영향을 미치지만 기계적인 대역폭의 제한으로 인해 고차모드 공진의 억제에는 한계가 있다^(6,7). 공동 개구부의 앞쪽 모서리에서의 송풍제어 방식^(8,9)은 유체 전단층에 일정한 공기 유량 또는 펄스 방식의 공기 유량을 가함으로써 유동 불안정성에 변화를 주는, 단순하면서도 직관적인 구조이지만, 음압 억제를 효과적으로 하기 위해서는 상당히 많은 양의 유량이 필요하다는 것이 단점이다. 이밖에도 고주파음 생성기⁽¹⁰⁾, 공진튜브⁽¹¹⁾, 유체 진동제트⁽¹²⁾ 등이 제어 방법으로 적용되어 왔으며, 최근에는 피에조 압전소자를 이용한 연구도 행해지고 있다^(13,14).

수동 스포일러나 송기 제어, 피에조 압전소자 등과 같이 유체유동에 직접 교란을 가하는 개방루프 제어시스템의 경우, 시스템에 대한 동적 응답 모델링이 요구되지 않으므로 구현이 쉽고 비교적 저렴하게 시스템을 구현할 수 있는 장점이 있으나 설계범위가 좁고 시스템 인자의 변화에 민감하지 못한 단점을 가지고 있다. 반면 능동 스포일러등과 같은 폐쇄루프 제어시스템의 경우 외란이 존재하는 경우에도 시스템을 안정시킬 수 있으며 전역범위의 제어 성능을 제공하지만, 상대적으로 시스템 동역학이 내재된 고차 제어가 필요하며 이에 따라 설계비용이 증가하게 된다.

이 논문에서는 공력의 물리적인 형성과정을 기초로 하여 간단한 폐회로 되먹임 회로를 구성하되 전역범위에서 사용가능한 제어방법을 연구하였다. 진동 스포일러를 이용하여 스포일러 끝단에서의 와도를 조절하고 공동 끝단에서의 와류를 효과적으로 확산시킴으로써 공력 가진력을 감소시켜 공동 내 공진 음압 진폭을 줄이는 방법을 제안하였다.

2. 이 론

2.1 공력가진 모델링

공력학적 유동과 공동 내의 음향학적 유동에 대한 수학적 모델은 음향 유동에 대한 외부 가진을 표현하는 전방 이득함수와 외부 공력 가진력에 의한 공명기의 응답을 나타내는 후방 이득함수로 구성된다⁽³⁾. 전방 이득함수는 개구부에서의 외력 \hat{p}_{ext} 에 의해 가진되는 공동 개구부에서의 공기 체적유량 \hat{q}_f 를 출력 위상벡터로 하고 공동내 음향 체적유량 \hat{q}_r 을 입력 위상벡터로 한 단일 입출력 유사선형(quasi-linear) 필터로 근사화하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \hat{q}_f \\ \hat{q}_r \end{pmatrix}_f = \frac{S_o \hat{p}_{ext}}{j\omega M |\hat{q}_r|} \quad (1)$$

여기서 S_o 와 M 은 개구부 면적과 공기 등가질량이다. 후방 이득 함수는 공명기의 외력에 대한 응답 전달함수를 나타내며, 개구부 유량흐름에 대한 음향체적 유량의 비로서 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \hat{q}_r \\ \hat{q}_f \end{pmatrix}_b = \frac{-(2\zeta\omega_r(j\omega) + \omega_r^2)}{(j\omega)^2 + 2\zeta\omega_r(j\omega) + \omega_r^2} \quad (2)$$

여기서 ω_r, ζ 는 공진 주파수와 감쇠비이다.

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

$$\begin{pmatrix} \hat{q}_f \\ \hat{q}_r \end{pmatrix}_f \cdot \begin{pmatrix} \hat{q}_r \\ \hat{q}_f \end{pmatrix}_b = 1 \quad (3)$$

2.2 와류 분산 제어

외력 \hat{p}_{ext} 은 와류에 의해 공동에 가해지는 가진 압력으로서, 비압축성 와류 유동장에서 압축성 음향장으로 행해진 일로부터 다음 식과 같이 정의된다.

$$p_{ext} = \frac{\int_V -\rho(\bar{\omega} \times \bar{v}) dV}{d} = \frac{\rho \Gamma u_c}{d} \quad (4)$$

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

검사체적 내외의 와도유속(vorticity flux) 변화에 레이놀즈 수송정리를 적용하면 총 순환의 변화율을 얻을 수 있다. 여기에 Fourier 급수로 표현된 와도 주기함수를 도입하면 다음과 같이 공동 개구부 끝단에서의 와류 분산정도에 따른 가진력을 나타낼 수 있다⁽¹⁵⁾.

$$p_{ext} = -\frac{1}{2}\rho u_{\infty}^2 - \frac{1}{2}\rho u_{\infty}^2 \sum_{k=-\infty, \neq 0}^{\infty} \frac{\alpha}{jkSt_{\phi}} e^{jk(\omega t - \mathcal{S}_{\phi})} \quad (5)$$

여기서 u_{∞} 는 자유흐름 속도, St_{ϕ} 는 무차원 스트로홀 수(Strouhal number, $\omega d/u_c$)이고, α 는 와류 분산 정도를 표현하는 인자로서 0과 1 사이의 값을 갖는다.

공동 개구부에서 와류는 전단부에서 방출되는 초기 와도로부터 회전과 발달과정을 통해 생성, 발달된다. Fig. 1에 나타낸 것처럼 유동방향을 x , 유동에 수직인 방향을 y 라고 하면, 와도는 수직성분 유속의 유동방향 변화율과 유동방향 유속의 수직방향 변화율에 의해 다음 식으로 표현된다.

$$\bar{\omega} = \nabla \times \bar{v} = \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \hat{k}. \quad (6)$$

따라서 이 초기 속도구배를 조절함으로써 와류 생성 및 발달을 방해하거나 촉진시킬 수 있으며, 개구부 끝단에서의 와류의 분산정도와 식 (5)의 외부 가

진력을 변화시키면 공동 내부에 형성되는 음압의 크기를 제어할 수 있다.

이 연구에서 사용된 스포일러는 공동 목 부분에서의 공기 체적의 운동과 같은 위상의 운동을 통해 수직 유속성분의 유동방향 변화율, 즉 $\partial v_y / \partial x$ 를 최소화하며 이에 따라 와도 성장을 억제, 확산된 와류 분산도를 유도한다.

3. 실험방법 및 실험결과

3.1 실험장치 구성

개략적인 실험장치 구성도는 Fig. 2와 같다. 풍동에 강화플라스틱으로 만든 1/5 축소 모형의 차량 모형을 설치하고, 모형 안에 1/2인치 마이크를 설치하여 모형 내부의 음압을 측정하였다.

차량 모형의 형상 및 크기는 Fig. 3과 같다. 모형의 크기는 관심 주파수영역인 100~150 Hz 대역의

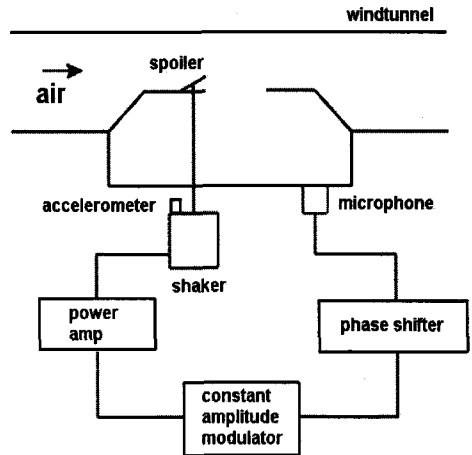


Fig. 2 Experimental setup diagram

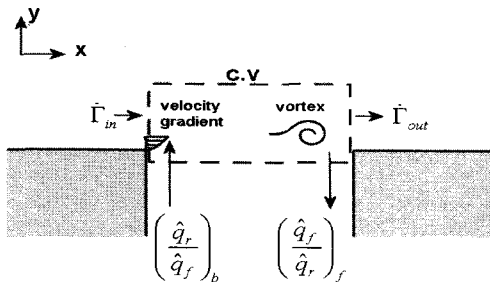


Fig. 1 Flow over the cavity opening and feedback diagram

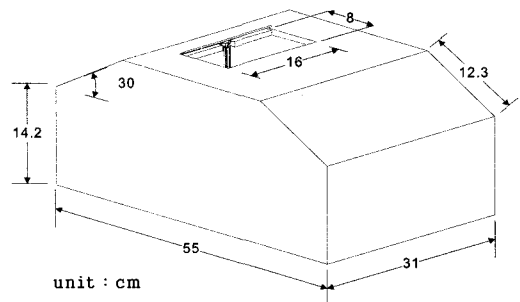


Fig. 3 Cavity dimension

과장보다 작으므로 집중질량 모델의 헬름홀츠 공명기로 볼 수 있으며, 일차원 자유도를 갖는 시스템으로 생각할 수 있다.

이 공명기의 공진 주파수 ω 은 120 Hz이며 감쇠비 ζ 는 0.0455이다. 공동 개구부의 전단에 16 cm×1 cm 크기의 알루미늄 스포일러를 모형 표면과 같은 높이로 부착하였다. 알루미늄 봉으로 가진기와 스포일러 끝을 연결하고 가진기에 의해 스포일러를 가진하며, 스포일러 끝단의 변위 측정을 위해 가진기의 플랜지에 가속도계를 부착하였다. 가진기와 스포일러가 연결된 상태에서 알루미늄봉의 진동 모드를 측정된 결과, 봉의 주 진동 모드는 250 Hz에서 존재하였으며, 관심 주파수 대역인 100~150 Hz에서 7°의 위상 지연이 발생하였다. 이 결과는 계산 과정에 반영하였다.

스포일러는 수평면으로부터 0~30°의 평균 받음각 (angle of attack)을 갖도록 5°씩 변화시켰으며, 각 경우에 대해 공동 내부에 최대 음압이 형성되는 풍속 조건하에서 실험을 실시하였다. 모형 내의 음압은 마이크로폰과 위상변조기, 진폭 조정기를 거쳐 일정한 위상차와 진폭을 갖는 신호로 실시간으로 변조시킨 후 파워앰프를 통해 가진기에 피드백시켰다. 스포일러 운동은 0.01 mm씩 0~0.2 mm의 진폭을 갖도록 조절하였으며, 각 경우에 대해 제어 전·후의 공동 내부 음압을 측정하였다.

3.2 실험결과

실험결과인 Fig. 4로부터, 스포일러 받음각이 낮은 경우에는 스포일러의 진폭이 음압에 그다지 영향을

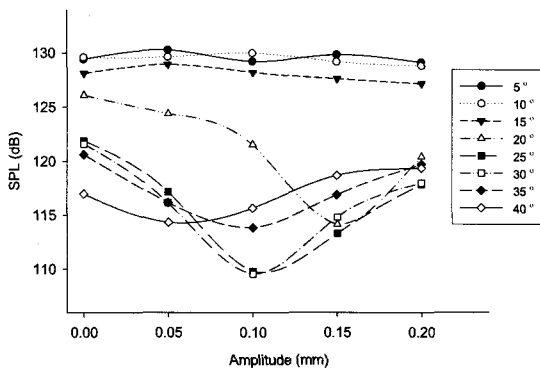


Fig. 4 Sound pressure level variation due to the amplitude change of spoiler oscillation at each angle of attack

주지 않지만, 임계각(20°) 이상에서는 음압변화에 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 이것은 낮은 받음각에서는 공동 내에 강한 음향장이 형성됨으로써 공동 목 부분의 공기체적의 운동 변위가 받음각이 높을 때의 공기체적의 운동변위보다 크므로 스포일러의 운동이 초기 속도구배에 의한 와도 발생에 큰 영향을 주지 못하며 임계각에서의 와류의 재부착점이 개구부의 끝단에 가깝기 때문에 와류의 분산정도가 초기 속도구배 변화에 민감하게 반응할 수 있기 때문인 것으로 판단된다.

받음각이 임계각 이상인 20°와 25°일 때 여러 스포일러 운동 진폭에 대해, 스포일러 운동과 공동 내부 음압의 위상차이인 ϕ 를 0~4 π 까지 변화시키면서 공동 내부 평균음압의 변화를 측정하고 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 이 결과로부터 임계각 이상의

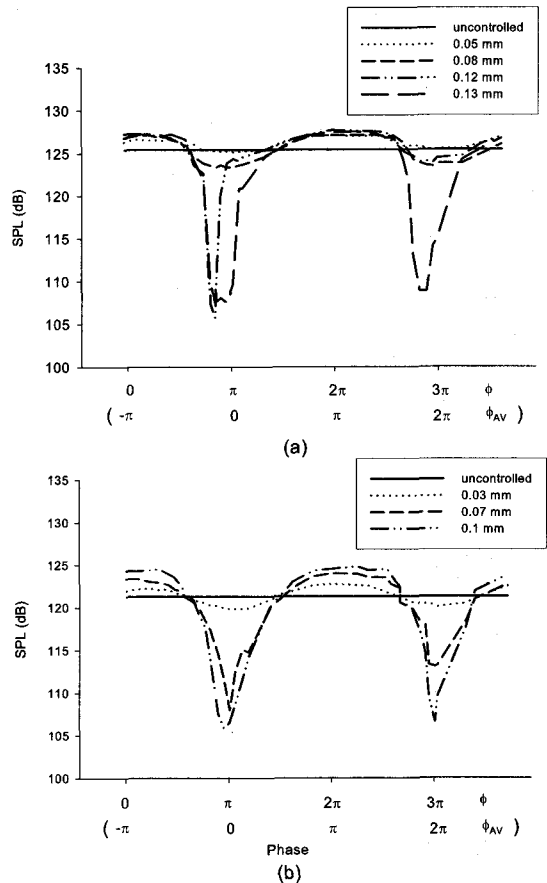


Fig. 5 Cavity pressure variation with respect to the phase change of spoiler motion at the mean angles of (a) 20° and (b) 25°

스포일러 평균 받음각에서 스포일러 운동과 공동 내부 음압의 위상 차이인 ϕ 에 따라 제어효과가 다양하게 나타남을 알 수 있다. 스포일러가 공동 내부 음압과 같은 위상으로 운동하는 경우, 즉 $\phi=0$ 과 $\phi=2\pi$ 에서는 스포일러를 제어하지 않는 경우보다 내부 음압이 오히려 증가하였으며 스포일러의 운동 진폭 크기에 상관없이 공동 내부 음압이 증가하였다. 이는 스포일러 끝단의 운동과 공동 목에서의 공기 볼륨의 운동이 반대위상을 가짐으로써 속도구배가 상대적으로 크게 증가하며, 운동 진폭이 증가할수록 와도가 강화되어 음압 증가폭도 증가하기 때문이다.

위상이 반대인 경우, 즉 $\phi=\pi$, 3π 에서는 음압 레벨이 현저히 감소함을 알 수 있다. 공동 목(neck)에서의 공기 체적이 상승하게 되면 공동의 체적이 증가하게 되어 공동 내부의 압력이 감소하게 되므로 공동 목의 공기 체적의 운동은 공동 내부의 음압과 반대 위상으로 운동한다. 따라서 스포일러가 목 공기 체적과 같은 위상으로 운동할 때 음압 감소 효과가 나타난다. 그러나 $\phi=3\pi$ 에서는 음압감소 효과가 $\phi=\pi$ 에 비해 감소함을 볼 수 있는데, 이는 와류 발산 주파수(vortex shedding frequency)가 일정하게 고정되어 있지 않고 시간에 따라 표류하기 때문이며, 따라서 일정한 주파수의 개방형 루프 형태의 스포일러 운동으로는 유동을 제어할 수 없으며 피드백의 제어구조가 필수적임을 알 수 있다.

Fig. 5(a)에서 스포일러의 운동 진폭이 최저 음압에 해당하는 진폭보다 더 커지면 음압이 최저점으로부터 다시 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 스포일러 끝단에서 속도구배가 증가함으로써 와도가 강화되기 때문이다. Fig. 4에서 스포일러 각이 증가함에 따라 공동 내 평균 음압이 감소하여 음압제어에 필요한 스포일러의 운동진폭도 감소함을 알 수 있다.

스포일러 끝단의 진폭과 공기 볼륨의 운동 변화가 음압 제어효과에 미치는 영향을 분석하기 위해 공동 목에서의 공기체적의 변위 ξ 를 공동 내부 음압 p_c 로부터 구하면, 다음 식과 같다⁽¹⁶⁾.

$$\xi(t) = \frac{V_c}{\rho c_o^2 S} p_c(t) \quad (7)$$

여기서 V_c 는 공동의 체적, c_o 는 음속, S 는 공동 목의 면적, $\rho c_o^2 S / V_c$ 는 단위 면적당 음향학적 유효강성을

나타낸다.

식 (7)에 의해 계산된 공기체적의 운동과 가속도계로부터 구해진 스포일러 끝단의 운동을 스포일러 각 20° 에서 음압감소 효과가 최대일 때에 대해 Fig. 6에 나타내었다.

그림으로부터 공동 목 공기체적의 운동과 스포일러 끝단의 운동은 거의 같은 진폭을 가짐을 알 수 있으며, 따라서 공동 내부 음압 감소치를 최대로 하기 위해서는 스포일러를 공동 목 공기 체적과 동일한 진폭과 동일한 위상을 갖도록 해야 함을 알 수 있다. 이것은 유동이 스포일러를 지나 공동 개구부를 지날 때 유동방향 속도구배 변화인 $\partial v_y / \partial x$ 를 얻지 못해 와도가 최소가 되기 때문이다. 운동 진폭이 증가하면 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 음압이 최저점에서 다시 증가하게 되는데 이것은 동일 위상인 경우에도 진폭 차이에 의해 스포일러 끝단에서의 속도구배가 증가하여 와도가 강화되기 때문이다. Fig. 4에서 평균 스포일러 각도 증가에 따라 공동 내부 평균 음압이 감소하므로 효과적인 음압제어에 필요한 스포일러의 운동진폭도 감소함을 주목할 만하다.

Fig. 7에 스포일러의 제어 유무에 따른 음압변화를 1/3 옥타브대역 스펙트럼으로 나타내었다. 공진 영역의 중심 주파수인 125 Hz 대역에서 약 15 dB, 나머지 대역에서 13 dB 정도 음압이 감소함을 알 수 있다. 저주파 영역에서 음압이 다소 증가한 것은 제어 루프내의 아날로그 진폭 조정기의 저주파 떨림(jittering)현상에 의한 것으로 정밀한 제어효과를 얻기 위해서는 이에 대한 개선이 필요하다.

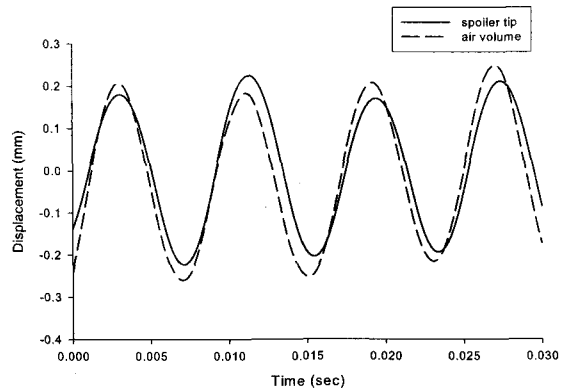


Fig. 6 Comparison between spoiler tip and neck air mass displacements when maximum sound reduction at 20° mean spoiler angle

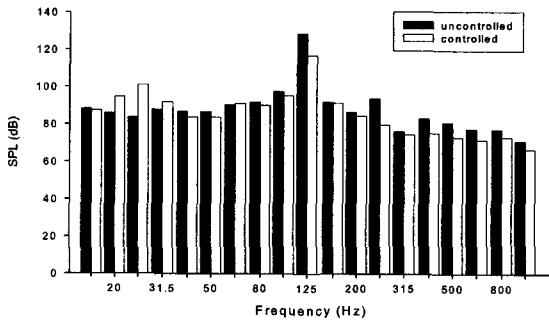


Fig. 7 1/3 octave band spectrums of cavity sound pressure level before and after control at spoiler angle of 20°

4. 결 론

이 논문에서는 공력을 구성하는 초기 와도를 제어함으로써 공력가진 공동의 내부 음압을 제어할 수 있음을 보였다. 제어장치로 간단한 진동 스포일러를 이용하여 스포일러 끝단에서의 와도를 조절하고 공동 끝단에서의 와류를 효과적으로 확산시킴으로써 공력 가진력을 감소시켜 공동 내 공진음압 진폭을 줄이는 방법을 제안하였다. 스포일러의 운동을 공동 목 공기체적의 운동 진폭과 동일한 진폭을 갖도록 하고 공동 내 음압변화와 반대 위상을 갖도록 제어함으로써, 스포일러 끝단에서의 유동의 국부적인 속도구배를 최소화할 수 있고 따라서 공동 내 음압감소 효과를 최대화할 수 있음을 알 수 있었다.

이 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.

이 연구에서 제안된 와도제어에 의한 공동 내 음압제어는 공력의 물리적 형성 과정에 기초하였기 때문에 비단 공진 영역에서 뿐만 아니라 유체 유동의 조건에 관계없이 전역 제어가 가능하며 또한 음압의 직접 피드백만으로 구성되어 졌기 때문에 제어 구조가 간단하므로 추후 보완연구를 통해 실제 산업에 적용이 가능할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) Cremer, L. and Ising, H., 1967, "The Self-excited Vibrations of Organ Pipes", *Acoustica*, Vol. 19, 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) Tang, Y. P. and Rockwell, D., 1983, "Instantaneous Pressure Fields at a Corner Associated with Vortex Impingement", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 126, pp. 187~204.
- (5) 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.
- (6) McGrath, S. F. and Shaw, L. L. Jr., 1996, "Control of Shallow Cavity Acoustic Resonance", *AIAA 96-1949*.
- (7) Kook, H. S. and Mongeau, L., Franckek, M. A., 2002, "Active Control of Pressure Fluctuations Induced by Flow Over Helmholtz Resonators", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 255, No. 1, pp. 61~76.
- (8) Sarohia, V. and Massier, P. F., 1977, "Control of Cavity Noise", *Journal of Aircraft*, Vol. 14, No. 9, pp. 833~837.
- (9) Sarno, R. L. and Franke, M. E., 1994, "Suppression of Flow-induced Pressure Oscillations in Cavities", *Journal of Aircraft*, Vol. 31, No. 1, pp. 90~96.
- (10) Shaw, L., 1998, "Control for Cavity Acoustics", *AIAA 98-2347*.
- (11) Stanek, M. J., Raman, G., Kibens, V., Ross, J. A., Odedra, J. and Peto, J. W., 2001, "of Cavity Resonance Using High Frequency Force - The Characteristics Signature of Effective Devices", *AIAA 2001-2128*.

(12) Williams, D., Fabris, D., Iwanski, K. and Morrow, J., 2000, "Loop Control in Cavities with Unsteady Bleeding Forcing", AIAA 2000-0470.

(13) Cattafesta, L. N. III, Garg, S., Choudhari, M., and Li, F., 1997, "Active Control of Flow-induced Cavity Resonance", AIAA 97-1804.

(14) Cattafesta, L. N. III, Shukla, D., Garg, S., and Ross, J. A., 1999, "Development of an Adaptive

Weapons - Bay Suppression System", AIAA99-1901.

(15) Kook, H. S., 1998, "A Predictive Model for the Tones Generated from Aerodynamically Excited Helmholtz Resonators", Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 478-481.

(16) Kinsler, L. E. et al., 1999, Fundamentals of Acoustics, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.