

주기적 회전을 이용한 원봉 후류의 되먹임 제어

백 승 진* · 성 형 진†

(2001년 12월 31일 접수, 2002년 7월 11일 심사완료)

Feedback Control of a Circular Cylinder Wake with Rotational Oscillation

Seung-Jin Baek and Hyung Jin Sung

Key Words: Feedback Control(되먹임 제어), Cylinder Wake(원봉 후류), Lift Coefficient(양력 계수), Lock-on(동조)

Abstract

A new feedback control law is proposed and tested for suppressing the vortex shedding from a circular cylinder in a uniform flow. The lift coefficient (C_L) is employed as a feedback control signal and the control forcing is given by a rotational oscillation of the cylinder. The influence of the feedback transfer function on the C_L reduction is examined. The main rationale of the feedback control is that a feedback control forcing is imposed at a phase which is located outside the range of lock-on. By applying the feedback control law, C_L is reduced significantly. Furthermore, the reduction mechanism of C_L is analyzed by showing the vortex formation modes with respect to the forcing phase.

기호설명

- C_L : 양력 계수 (lift coefficient)
- S_f : 가진 주파수 (forcing frequency)
- St_0^* : 자연 와홀림 주파수
- Re : 레이놀즈수 ($\rho U_\infty D / \mu$)
- α : 되먹임 이득 (feedback gain)

1. 서론

원봉 후류는 와홀림 현상에 의한 자려 진동 (self-sustained oscillation)의 특성을 가지고 있다. 이로 인한 원봉 후류에서 발생하는 유동 유기 진동/소음 및 열/물질 전달 등의 문제 해결을 위해

서 와홀림 구조의 제어에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다.^(1,2) 대부분의 이전 연구의 방향은 와홀림 억제에 초점이 맞춰져 왔다. 이를 위해서 기하학적 형상 변경의 수동적 방법 외에도 원봉의 수직 진동, 회전 진동, 표면에서의 흡입/분사, 음향 가진 등의 가진 방법 등이 많이 이용되어 왔다.⁽³⁻⁹⁾ 문헌 조사에 의하면 이러한 연구는 대부분 일정한 주파수와 크기로 가진한 경우(open loop)에 와홀림 구조 변화를 관찰한 것이다. 대표적으로 알려진 결과는 가진 주파수와 와홀림 주파수의 일치인 lock-on 현상이다. 또한 수치적·실험적 가시화에 의해서 자연 와홀림 주파수 부근의 가진 주파수로 가진한 경우에 원봉의 가진 위상에 대한 와홀림 위상이 대략 180° 정도의 급격한 변화를 한다는 사실이 알려져 있다.⁽⁴⁻⁶⁾

위와 같은 open loop의 주기적 가진에 관한 많은 연구가 있으나, 상대적으로 되먹임 제어(feedback control)에 관한 연구는 적다.⁽¹⁰⁻¹³⁾ 되먹임 제어는 원봉 후류 유동장의 정보를 측정하여 가진 크기를 결정하는 것으로 크게 두가지로 구분

* 회원, 현대자동차 남양연구소

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원기계공학과

E-mail : hjsung@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3027 FAX : (042)869-5027

할 수 있다. 하나는 유동장의 고정된 한 점에 센서를 고정시키고 시간 지연의 크기를 바꾸는 경우이고, 나머지 하나는 시간 지연을 고정시키고 센서의 위치를 바꾸는 경우이다. Roussopoulos (1993)⁽¹⁰⁾은 되먹임 제어의 풍동 수행을 수행하여 와홀림 시작 레이놀즈수인 48보다 약 20%가 높은 레이놀즈수까지 와홀림을 억제하였다. Park, Ladd & Hendricks (1994)⁽¹¹⁾는 원봉 일부 표면에서의 분사, 흡입을 이용하여 레이놀즈수 60에서 와홀림 억제가 가능하나 레이놀즈수 80에서는 불가능한 사실을 보였다. Huang (1996)⁽¹²⁾과 Fujisawa, Kawaji & Ikemoto (2001)⁽¹³⁾은 센서의 위치를 고정시키고 되먹임 시간 지연양을 조절하여 최적 조건에서 유동장의 섭동량이 감소하고 항력 등이 감소하는 결과를 보였다. 그러나 위와 같은 되먹임 제어는 몇가지의 단점을 가지고 있다. 와홀림 억제를 위한 센서의 위치나 시간 지연양의 조건을 찾기 위해 각각에 대한 실험이 행해져야 한다는 것이다. 또한 이러한 와홀림 억제가 가능한 센서의 영역이 좁고, 원봉 후류의 반응이 센서 위치에 따라서 매우 민감하다는 것이다. 센서의 위치가 바뀌게 되면 와홀림 억제가 가능하지 않고, 반대로 강화 될 수도 있다.

본 연구에서는 가진과 와홀림 위상 관계를 이용한 되먹임 제어 방법을 제안한다. 이전 연구에서 유동장의 섭동량을 제어신호로 이용하는 것에 대신하여 원봉의 양력 계수(C_L)를 이용하였다. C_L 의 변화는 와홀림 위상에 직접적으로 연관되어 있다. 자연 와홀림 주파수 부근의 primary lock-on지역에서 가진 위상에 따른 양력 계수의 위상차는 약 180° 의 크기 영역에 분포한다. 일반적으로 lock-on이 발생하는 경우에 C_L 등과 같은 비정상 섭동량은 자연 와홀림 경우와 비교해서 증가된다. 따라서 와홀림이 강화되는 lock-on 주파수 영역의 중심에서의 위상차와 180° 가 다른 위상차를 되먹임 제어를 통하여 강제적 부과함으로써 lock-on 상태와 반대되는, 와홀림이 약화되는 상태를 만들 수 있다. 이를 원봉 후류에 적용하여 만족스런 결과를 얻었다.

본 연구의 목적은 가진과 와홀림의 위상 관계를 이용한 원봉 후류의 제어이다. 가진 방법으로 원봉의 회전을 이용하였고, 이차원의 원봉 후류를 수치모사하였다. 가진 크기가 너무 크게 되는

경우에 제어가 비효율적이며 자연 와홀림 상태와는 아주 다른 상태로 천이 될 수 있기에 최대 가능 회전 가진 크기를 자유 유동 속도의 25%로 제한하였다.

2. 수치 방법

아래와 같은 무차원화된 비정상 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 수치모사하였다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} u_i u_j = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial}{\partial x_j} u_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

수치 모사 방법은 일반 좌표계에서의 부분 단계 변환을 이용하였다.⁽¹⁴⁾ 자세한 격자수, 경계 조건 등은 이전의 논문에서 참조할 수 있다.⁽⁶⁾

3. 주기적 가진에 따른 원봉 후류의 반응

되먹임 제어에 앞서 원봉 후류의 제어를 위한 위상 관계를 찾기 위해 주기적 가진에 따른 반응을 먼저 조사하였다. 본 연구에서는 원봉의 회전 가진을 한 경우에 $Re = 120$ 에서의 위상 변화를 관찰하였다. $Re = 120$ 에서 자연 와홀림 주파수 $St_0^* = 0.173$ 를 얻었다. 이는 Willamson (1989)⁽¹⁵⁾와 Fey, Konig & Eckelmann (1996)⁽¹⁶⁾의 실험 결과와 잘 일치한다.

유동의 기하학적 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 일정한 주파수와 크기로 가진한 open loop의 경우 원봉의 회전 속도는 아래와 같이 주어진다.

$$\Omega = \Omega_{max} \sin(2\pi S_f t) \quad (3)$$

여기서 $t = t^0 U_\infty / D$, $S_f = f^0 D / U_\infty$ 는 0 로 표시되는 차원량 f^0 와 f^0 를 무차원화한 것이다. 식 (3)에서 원봉은 $0T$ 에서 $0.5T$ 까지는 반시계방향 회전을, $0.5T$ 부터 T 까지는 시계방향 회전을 하게 된다.

자연와홀림 주파수 부근의 주파수로 가진을 하여 와홀림 주파수와 가진 주파수가 일치되는 lock-on현상이 일어나게 되면 가진위상과 양력 계수의 위상차가 고정된다(phase-locked). 이러한 위

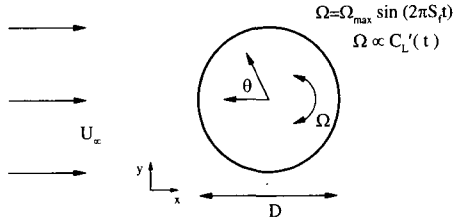


Fig. 1 Flow configuration

상차는 가진주파수와 가진크기에 따라 결정된다. 가진 주파수 간격을 0.005로 하여 최대 회전 속도 $\Omega_{max} = 0.20$ 에 대한 lock-on 주파수 영역을 조사하여 가진 주파수 $S_f = 0.140$ 에서 $S_f = 0.195$ 까지 lock-on이 발생하는 것이 관찰되었다. Fig. 2에서 $S_f = 0.140$ 와 $S_f = 0.195$ 의 경우에 있어서 가진 속도 Ω 와 양력 계수 C_L 의 시간에 따른 크기 변화를 보이고 양력이 최대가 되는 위상 ϕ 를 표시하였다. 위상차 ϕ 는 각 주기에서 원봉이 반시계방향을 시작하는 위상($2\pi S_f t = 0$)에서 양력이 최대가 되는 위상까지의 차이를 나타낸다. 이 때 $C_L = C_{Lmax} \cos(2\pi S_f t - \phi)$ 로 표현된다. Fig. 2에서 보이는 바와 같이 가진 주파수 ϕ 가 S_f 에 따라 크게 변화하는 것을 볼 수 있다. 즉 $S_f = 0.140$ 의 경우에는 Ω 과 C_L 이 거의 반대 위상을 가지고, $S_f = 0.195$ 의 경우에는 거의 같은 위상을 가지고 있다. 이러한 위상의 차이는 각 가진 주파수에 따라 와의 생성과 흡입되는 위치가 바뀐다는 것을 의미한다⁶⁾. 일반적으로 와가 형성되게 되면 원심력과의 평형을 위해 압력이 낮은 지역이 분포하게 된다. 따라서 와가 아래쪽에서 형성되면 C_L 이 음의 값을, 위쪽에서 형성되면 C_L 이 양의 값을 가지게 된다. 따라서 $S_f = 0.140$ 가 Ω 와 거의 반대의 위상을 가지고 있다는 것은 원봉이 반시계방향 회전을 할 때 아래쪽에서 와가 형성되고, 시계방향 회전을 할 때에는 위쪽에서 와가 형성된다는 것을 의미한다. 하지만 $S_f = 0.195$ 의 경우에는 C_L 과 Ω 의 위상이 같기 때문에 원봉이 반시계방향 회전을 할 때 위쪽에서 와가 형성되고, 시계방향 회전을 할 때 아래쪽에서 와가 형성된다.

위에서 언급된 바와 같이, 와흡림의 형상은

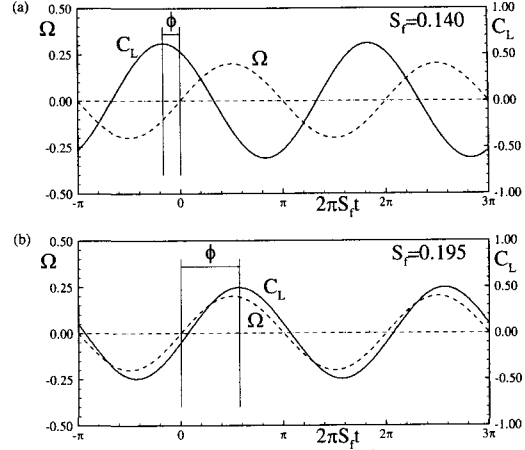


Fig. 2 Evolutions of C_L with respect to Ω

C_L 의 위상인 ϕ 와 밀접한 관련이 있다. 가진 주파수 S_f 에 따른 ϕ 의 변화를 Fig. 3에 보였다. Fig. 3에서 보이는 바와 같이 ϕ 는 대략 -0.2π 와 0.8π 사이에 위치하면서 lock-on 영역에서 대략 π order의 크기 변화를 보이고 있다. Fig. 3에서 $\phi = \pi$ 의 관계는 미리 결정된 가진 주파수로 가진을 한 경우에 얻을 수 없다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 lock-on이 발생하는 경우에 C_L 등과 같은 비정상 섭동량은 가진이 없는 자연 와흡림 경우와 비교해서 증가된다. 따라서 와흡림이 강화되는 lock-on 주파수 영역의 중심에서의 위상차와 180° 다른 위상차를 되먹임 제어를 통하여 강제적 부과함으로써 lock-on 상태와 반대되는, 와흡림이 약화시키거나 C_L 을 감소시키는 상태를 만들 수 있는 가능성을 추측할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 C_L 을 감소시키기 위해서 $\phi = \pi$ 의 관계를 부여하는 되먹임제어를 적용하였다.

4. 제어 결과

$\phi = \pi$ 의 조건을 만족하기 위해서는 $\Omega \propto C_L$ ($t - \Delta t$)의 관계에서 $2\pi S_f t_0 \Delta t = 3\pi/2$ 가 되도록 Δt 를 결정해야 된다. 여기서 $S_f t_0$ 는 되먹임제어 할 때의 와흡림 주파수를 나타낸다. 그러나 가진을 하게 되면 유동장의 와흡림 주파수가 자연와

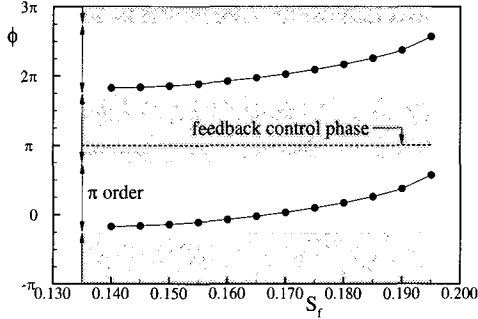


Fig. 3 Distributions of ϕ against S_f

홀림 주파수에서 다른 주파수로 변화하게 된다. 따라서 어느 주파수로 변화하게 될지 미리 예측할 수 없기 때문에 Δt 를 미리 결정할 수 없다. 이것을 피하기 위해서 $2\pi S_f \Delta t = 3\pi/2$ 일 때 아래의 관계가 성립하는 것을 이용하였다.

$$\Omega \propto C_L(t - \Delta t) \propto C_L'(t) \quad (4)$$

C_L' 은 C_L 의 미분한 값으로 Ω 와 C_L' 이 같은 위상을 가지고 있다는 것을 이용한 것이다.

$$\begin{aligned} C_L' &= -\frac{dC_L}{dt} = -C_{L_{\max}} 2\pi S t_0 \sin(2\pi S t_0 t - \pi) \\ &= C_{L_{\max}} 2\pi S t_0 \sin 2\pi S t_0 t \end{aligned} \quad (5)$$

위와 같이 C_L' 에 비례하도록 Ω 를 결정하면 $\phi = \pi$ 의 조건이 만족되는 것을 알 수 있다. 한편 미분하더라도 $2\pi S t_0^*$ 는 크기는 대략 1 정도이므로 값의 크기가 크게 변하지 않는다. 제어기의 전달함수를 쓰면 아래와 같다.

$$\frac{Q(s)}{C_L(s)} = \frac{as \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (6)$$

여기서 s 는 미분을 나타내면 a 는 피드백의 gain을 나타낸다. 그리고 미분이나 잡음으로 인한 고주파수 성분을 제어하기 위해 로패스필터를 함께 적용하였다. ζ 와 ω_n 는 각각 로패스필터의 감쇠율과 고유주파수이다. Fig. 4는 전달함수의 Bode diagram을 그린 것이다. $\alpha = 1.0$, $\zeta = 0.4$ 이다.

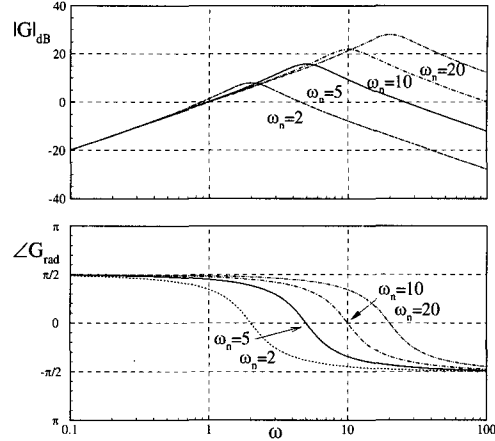


Fig. 4 Bode diagram

Bode diagram은 s 에 $j\omega$ 를 대입해서 얻어진다. ω_n 은 2, 5, 10, 20으로 ω_n 부터 전달함수의 크기 $|G|_{dB}$ 의 크기가 감소하기 시작하므로 일종의 cut-off 주파수라고 할 수 있다. $Re = 120$ 에서 자연 와홀림 주파수는 $S t_0^* = 0.173$ 로 $2\pi S t_0^*$ 는 1.09 정도가 된다. 따라서 $\omega \approx 1.0$ 부근에서의 위상 변화율 $\angle G_{dB}$ 가 중요하다. ω_n 이 낮아지면 $\omega \approx 1.0$ 에서의 위상 변화율 90° 에서의 오차가 증가하는 것을 볼 수 있다.

위의 전달 함수를 이용하여 $\alpha = 0.2$ 의 제어 결과를 Fig. 5에 나타내었다. $t = 0$ 에서 제어가 시작되면 C_L 이 감소되는 것을 볼 수 있다. 그리고 ω_n 이 클수록 감소율도 증가해서 $\omega_n = 12$ 일 때 $C_{L_{\max}}$ 가 약 27%가 감소한 것을 볼 수 있다. 그러나 ω_n 이 너무 커지면 Ω 의 고주파수 성분이 크게 증가해서 C_L 이 감소되지 않는다. 따라서 자연 와홀림의 경우보다 order가 하나 정도 높은 $\omega_n = 10$ 이 적당하다고 볼 수 있다. 시간에 따른 Ω 와 C_L 의 변화를 보면 Ω 가 C_L 보다 위상이 $\pi/2$ 보다 빠른 $\phi = \pi$ 관계가 성립하고 있는 것을 볼 수 있다.

본 제어에 의한 C_L 의 감소 메카니즘을 살펴보는 일은 중요하다. 그를 위해, 이에 앞서 Fig. 6에 주기적 가진의 경우에 와형성의 간단화된 도형을 정의 하였다. Baek & Sung (1998)⁽⁵⁾에서 저주파수 경우 ($S_f < S_f^*$)와 고주파수의 경우

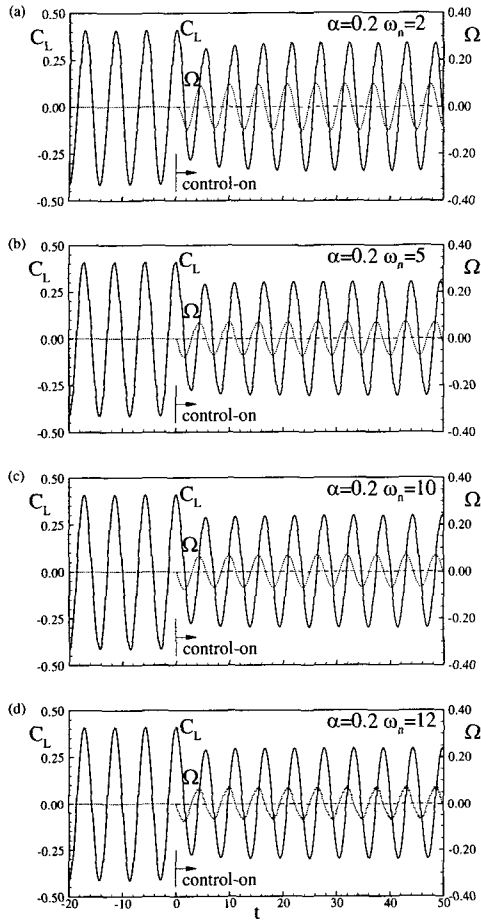


Fig. 5 Control results

($S_i > S_{i0}^*$)를 택하였다. 일반적으로 와가 반시계방향 회전할 때 원봉 위쪽의 유동은 감소를 받아 박리되기 쉬워지고, 아래쪽의 유동은 가속을 받아 박리가 지연되거나 억제된다. Fig. 6(a)의 저주파수 가진의 경우에 있어서, 원봉이 반시계방향회전을 할 때 유동은 충분한 가속을 받지 못해서 아래쪽에 와가 형성된다. 이것은 음의 양력값을 만들어 낸다 ($C_L < 0$). 이러한 저주파수 가진에 대한 음의 양력 상태를 L_- 로 정의한다. 원봉이 시계방향회전을 할 때 위와 반대의 유동 패턴이 관찰된다. 이는 L_+ 로 표시되는 저주파수 가진에 대한 양의 양력 상태를 만들어 낸다. 고주파수 가진에 대한 와형성의 모양은 저주파수 가진과 완전히 다르다. Fig. 6(b)에 보여진 것처럼 지난 반주기 동안 가속을 받은 유동이 원봉의 회

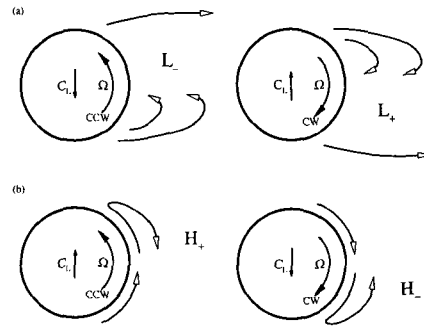


Fig. 6 Definition : vortex formation

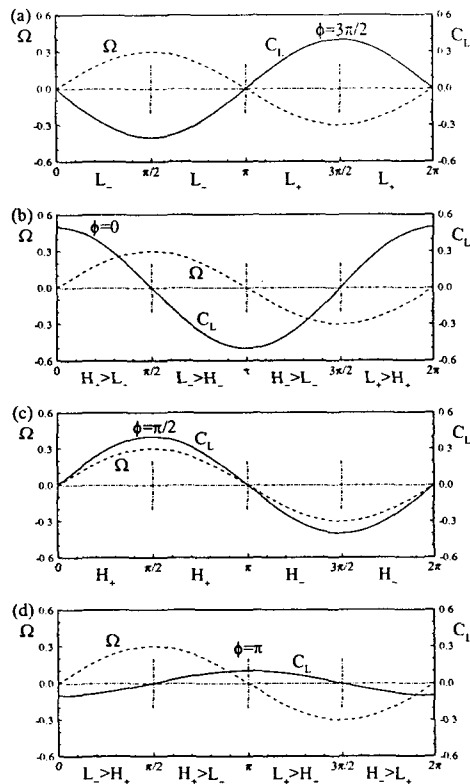


Fig. 7 Vortex formation modes

전에 의한 유동과 만나게 된다. 이는 원봉의 회전 방향과 다른 방향을 가진 와를 형성시킨다. 반시계방향 회전일 때 양력은 양의 값이 되고, H_+ 로 표시된다. 이와 반대로 시계방향 회전일 때 음의 양력값을 가지고 H_- 로 나타낸다. 자세한 와의 형성 모양은 Baek & Sung (1998)⁽⁵⁾에 나타나 있다.

위에 결과를 기본으로 하여, 가진에 대한 와형성의 위상차 (ϕ)를 구분하기 위해서 Ω 에 대한 C_L 의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 6에서 정의한 와형성 모드를 가진 위상인 x 축에 표시하였다. 저주파수 가진이 Fig. 7(a)에, 고주파수 가진이 Fig. 7(c)에 표시되어 있다. 저주파수의 경우 ($S_f < S_f^*$)에 C_L 은 Ω 와 반대의 위상을 가지며 C_L 의 최대값은 $\phi = 3\pi/2$ 에 위치한다. 고주파수의 경우 ($S_f > S_f^*$)에 C_L 은 Ω 와 같은 위상을 가지며 C_L 의 최대값은 $\phi = \pi/2$ 에 위치한다. 가진 주파수가 자연와플림 주파수와 거의 같은 중주파수 영역의 와형성 모드는 Fig. 7(b)에 나타나 있다. 중주파수 영역의 와형성 모드는 앞의 두 경우가 함께 결합된 모양을 가지고 있으며 $\phi = 0$ 이다. 이 경우 C_L 은 크게 증가하는데⁽⁵⁾ 이는 저주파수와 고주파수의 보강 간섭이라고 볼 수 있다. 결합된 와형성 모드는 Fig. 7(b)의 x 축에 표시되어 있다. 예를 들어 $0 < 2\pi S_f t < \pi/2$ 일 때 $H_+ \oplus L_+$, $\pi/2 < 2\pi S_f t < \pi$ 일 때 $L_- \oplus H_-$, $\pi < 2\pi S_f t < 3\pi/2$ 일 때 $H_- \oplus L_-$, $3\pi/2 < 2\pi S_f t < 2\pi$ 일 때 $L_+ \oplus H_+$ 이다. 여기서 앞의 모드가 뒤의 모드보다 더 강함 영향을 준다. 이렇게 같은 부호의 결합은 와플림을 강화시키고 C_L 를 증가시킨다. 이와 반대인 제어를 한 경우가 Fig. 7(d)에 나타나 있다. 이를 살펴 보면 C_L 의 부호가 중주파수 영역 C_L 의 부호와 반대이고, 그 크기가 작다는 것을 알 수 있다. 각 단계에서의 와형성 모드의 결합을 볼 수 있는데, $0 < 2\pi S_f t < \pi/2$ 일 때 $L_- \oplus H_+$, $\pi/2 < 2\pi S_f t < \pi$ 일 때 $H_+ \oplus L_-$, $\pi < 2\pi S_f t < 3\pi/2$ 일 때 $L_+ \oplus H_-$, $3\pi/2 < 2\pi S_f t < 2\pi$ 일 때 $H_- \oplus L_+$ 이다. 여기서도 앞의 모드가 뒤의 모드보다 강함 영향을 가지는데 이러한 반대 방향의 부호는 일종의 상쇄 효과를 가져서 C_L 을 감소시킨다. C_L 의 부호는 앞의 모드와 같으며 C_L 의 최대값은 $\phi = \pi$ 이다.

위에서 언급한 C_L 의 감소는 Fig. 8의 연속적인 유선 모양에서 볼 수 있다. C_{Lb} 를 되먹임 신호하여 $\alpha = 2.0$ 일 때의 경우에 대해 $\Delta t = 0.25$ 로 반주기 동안을 그린 것이다. 시간에 따른 $C_L(t)$ 가 위쪽에 그려져 있고, 표시된 점들이 유선의 각순간을

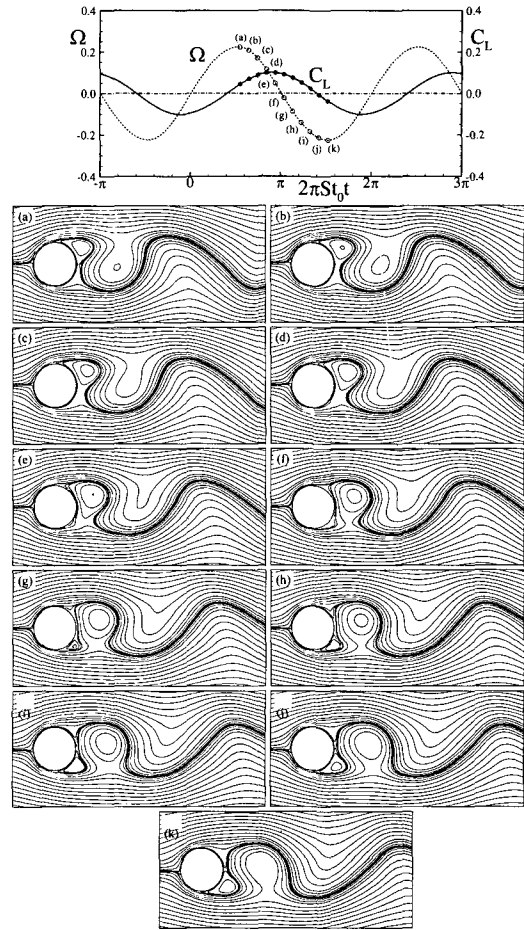


Fig. 8 Streamline patterns

나타나 있다. Fig. 8(a)의 순간에 와가 원봉의 위쪽에 형성되어 있다. (a)-(e) 동안에 반시계방향의 속도가 점차 감소하고, 시계방향을 가진 와는 위쪽에서 흘림된다. 감소되고 있는 회전 속도는 와를 강화시키지 못한다. (e)와 (f) 사이에 원봉의 회전 방향은 반대로 된다. (f)에서 (k) 동안 원봉의 시계방향 속도는 증가한다. 시계방향의 회전에 의해 가속된 아래쪽의 유동은 앞에서 오는 유동과 만나서 반시계방향의 작은 와를 형성한다. 하지만 유동이 충분히 가속받지 못했기 때문에 와는 강하지 못하다. 위쪽에서 시계방향의 회전은 시계방향의 와가 후류로 흘림되는 것을 도와준다. 아래 쪽의 와의 영향이 위쪽의 와보다 커짐에 따라 C_L 은 음의 값을 가지게 된다.

5. 결 론

본 연구에서는 이전의 연구에 밝혀진, lock-on 이 발생할 때의 원봉의 와홀림 위상과 가진 위상 사이의 관계를 이용한 제어 방법을 제안하였다. 일반적으로 lock-on이 발생하는 경우에 C_L 등과 같은 비정상 섭동량은 가진이 없는 자연 와홀림 경우와 비교해서 증가된다. 따라서 와홀림이 강화되는 lock-on 주파수 영역의 중심에서의 위상차와 180° 다른 위상차를 되먹임 제어를 통하여 강제적 부과함으로써 lock-on 상태와 반대되는, 와홀림이 약화시키거나 C_L 을 감소시키는 상태를 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Griffin, O. M. & Hall, M. S., 1991, "Review -Vortex Shedding Lock-on and Flow Control in Bluff Body Wakes," *Trans. ASME I: J. Fluids Engng*, 113, p. 526.
- (2) Rockwell, D., 1998, "Vortex-Body Interactions," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 30, p. 199.
- (3) Kwon, K. & Choi, H., 1996, "Control of Laminar Vortex Shedding Behind a Circular Cylinder Using Splitter Plates," *Phys. Fluids*, 8, p. 479.
- (4) Filler, J. R., Marston, P. L. & Mih, W. C., 1991, "Response of the Shear Layers Separating from a Circular Cylinder to Small-Amplitude Rotational Oscillations," *J. Fluid Mech.*, 231, p. 481.
- (5) Baek, S.-J. & Sung, H. J., 1998, "Numerical Simulation of the Flow Behind a Rotary Oscillating Circular Cylinder," *Phys. Fluids*, 10, p. 869.
- (6) Baek, S.-J. & Sung, H. J., 2000, "Quasi-Periodicity in the Wake of Rotationally Oscillating Cylinder," *J. Fluid Mech.*, 408, p. 275.
- (7) Baek, S.-J., Lee, S. B. & Sung, H. J., 2001, "Response of a Circular Cylinder Wake to Superharmonic Excitation," *J. Fluid Mech.*, 442, p. 67.
- (8) Williams, D. R., Mansy, H. & Amato, C., 1992, "The Response and Symmetry Properties of a Circular Cylinder wake Subjected to Localized Surface Excitation," *J. Fluid Mech.*, 234, p. 71.
- (9) Blevins, R. D., 1985, "The Effect of Sound on Vortex Shedding from Cylinders," *J. Fluid Mech.*, 161, p. 217.
- (10) Roussopoulos, K., 1993, "Feedback Control of Vortex Shedding at Low Reynolds Numbers," *J. Fluid Mech.*, 248, p. 267.
- (11) Park, D. S., Ladd, D. M. & Hendricks, E. W., 1994, "Feedback Control of von Karman Vortex Shedding Behind a Circular Cylinder at Low Reynolds Numbers," *Phys. Fluids*, 6, p. 2390.
- (12) Huang, X. Y., 1996, "Feedback Control of Vortex Shedding from a Circular Cylinder," *Exp. Fluids*, 20, p. 218.
- (13) Fujisawa, N., Kawaji, Y. & Ikemoto, K., 2001, "Feedback Control of Vortex Shedding from a Circular Cylinder by Rotational Oscillations," *J. Fluid Struct.*, 15, p. 23.
- (14) Choi, H., Moin, P. & Kim, J., 1993, "Direct Numerical Simulation of Turbulent Flow Over Riblets," *J. Fluid Mech.*, 255, p. 503.
- (15) Williamson, C. H. K., 1989, "Oblique and Parallel Modes of Vortex Shedding in the Wake of a Circular Cylinder at Low Reynolds Numbers," *J. Fluid Mech.*, 206, p. 579.
- (16) Fey, U., Konig, M. & Eckelmann, H., 1998, "A New Strouhal-Reynolds-Number Relationship for the Circular Cylinder in the Range $47 < Re < 2 \times 10^5$," *Phys. Fluids*, 10, p. 1547.