

## 주기 회전하는 원형 실린더 주위 층류 유동장의 수치 시뮬레이션

문진국\*, 박종천†\*, 전호환\*, 서성부\*\*

부산대학교 조선해양공학과\*  
중소조선기술연구원\*\*

### Numerical Simulation on Laminar Flow Past a Rotary Oscillating Circular Cylinder

Jin-Kuk Moon\*, Jong-Chun Park†\*, Ho-Hwan Chun\* and Sung-Bu Suh\*\*

Dept. of NAOE, Pusan National University\*  
Research Institute of Medium and Small Ship Building\*\*

#### Abstract

The effects of rotary oscillation on the unsteady laminar flow past a circular cylinder are numerically investigated in the present study. The numerical solutions for the 2D Navier-Stokes equation are obtained using a finite volume method in the framework of an overlapping grid system. The vortex formation behind a circular cylinder and the hydrodynamics of wake flows for different rotary oscillation conditions are analyzed from the results of numerical simulation.

The lock-on region is defined as the region that the natural shedding frequency due to the Karmann Vortex shedding and the forcing frequency due to the forced oscillating a cylinder are nearly same, and the quasi-periodic states are observed around that region. At the intersection between lock-on and non-lock-on region the shedding frequency is bifurcated. After the bifurcation, one frequency follows the forcing frequency( $S_f$ ) and the other returns to the natural shedding frequency( $S_0$ ). In the quasi-periodic states, the variation of magnitudes and relevant phase changes of  $C_L$  with forcing phase are examined.

※Keywords: Rotary oscillating circular cylinder(주기회전 실린더), CFD(전산유체역학), Vortex shedding(와류흘림), Laminar flow(층류), Lock-on phenomena(Lock-on 현상)

---

접수일: 2005년 6월 1일, 승인일: 2005년 7월 26일

†주저자, E-mail: jcpark@pusan.ac.kr

Tel: 051-510-2480

#### 1. 서론

실린더 후류(wake flow) 영역에서의 보오텍스(vortex)와 흘림(shedding)에 관한 연구는 형상의

단순함 뿐만 아니라 공학적 응용의 중요성 때문에 유체역학에서 가장 중요한 문제들 중 하나로 다루어져 왔다(신영섭 2000, 김광수와 서정천 1998, Braza et al. 1986, Mittal and Balachandar 1994, Williamson 1996).

원형 실린더 주위에서 발생하는 카르만 보오텍스(Karman Vortex)의 흘림에 의한 항력 및 양력의 주기적인 변화는 구조물의 진동이나 소음을 야기하며 구조물 설계시 강도상의 문제에 큰 요인으로 작용하기도 한다. 또한, 이로 인해 구조물의 수명에 영향을 주게 된다. 따라서, 보오텍스의 주기적인 흘림에 대한 유동제어는 실용 공학적 측면에서 매우 중요하다. 이에, 다양한 제어방법들을 다룬 연구들이 진행되어 왔다(김광수 등 2003, Baek and Sung 1998, Kang et al. 1999, Kwon and Choi 1996, Choi et al 1993, Sung et al. 1994a, Sung et al. 1994b). 그 중 원형 실린더의 회전을 이용하는 방법이 있다. 예를 들어, 원형 실린더를 반 시계 방향으로 회전시킬 때 실린더의 위쪽에서는 흐름이 감속이 되어 박리가 쉽게 일어나며 그 아래쪽은 가속이 되어 박리가 잘 일어나지 않게 된다. 즉, 실린더의 회전은 보오텍스의 흘림 형태에 큰 변화를 주게 된다. 이에 대한 실험적 연구(Taneda 1978, Tokumaru and Dimotakis 1991)와 수치적 연구(Wu et al. 1989, Baek and Sung 1998, 문진국 등 2005)가 진행 되어왔다.

한편, Filler et al.(1991)은 실험에서 실린더를 유동장의 카르만 보오텍스 진동수(이하, 고유 흘림 진동수, natural shedding frequency,  $St_n$ )와 비슷한 진동수로 강제 주기 회전시킬 경우 실린더 표면 전단면에서의 큰 속도 구배로 인해 유체력들의 응답이 아주 크게 나타나는 사실을 관찰하였다. Van Atta and Gharib(1987)는 원형 실린더의 아주 작은 진동이 고유 흘림 진동수와 실린더 진동에 의한 진동수가 커플링된 한 쌍의 실린더 후류 응답을 만든다는 사실을 알아내었다. 이때 속도 스펙트럼은 고유 흘림 진동수와 주기 회전 진동수(이하, 강제 진동수, forcing frequency,  $S_f$ )의 합이나 차의 복잡한 형태로 상호 관련되어 최고값(peak)을 갖게 되며, chaos의 경우에는 서로 다른 쌍의 응답들이 합쳐지고 바뀌면서 그 속도

스펙트럼 영역이 넓어진다고 했다. Karniadakis and Triantafyllou(1989)는 수치적인 시뮬레이션을 통해 후류 응답의 준주기(quasi-periodic) 상태와 chaos의 경우에 대해서 여러 스펙트럼의 최고값들과 그 주기궤적의 위상이 다르다는 것을 이용하여 각각의 영역을 정의하였다. Baek and Sung (1998)은 기본적인 lock-on영역( $S_f \approx St_n$ 인 영역)에서 보오텍스의 형상을 분류하고 흘림 주기의 위상이 바뀌는 현상을 수치적으로 연구하였다. 또한 Baek and Sung(2000)은 기본적인 lock-on 영역 외부에서 강제 진동수가 lock-on 영역에 가까워질수록 강제 진동수와 고유 흘림 진동수의 위상차는 아주 작아지게 되고 그 크기도 거의 같게 된다는 것을 보고하였다.

Lock-on 현상은 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔다(Baek and Sung 1998, 2000, 2001, Griffin and Hall 1991, Karniadakis and Triantafyllou 1989, Koopman 1967, Ongoren and Rockwell 1988, Stansby 1976, Filler et al. 1991). Lock-on의 외부경계에서는 유체력들이 준주기적 응답특성을 보인다. 이는 한 주기로 원형 실린더를 주기회전 시킨 경우 주기의 어떤 분기점(lock-on 영역의 경계) 근방에서는 실린더의 반류에 여러 진동 성분이 복합적으로 나타난다는 것을 의미한다. 이것을 '준주기성'이라 하고 그 상태는 스스로 사라지지 않으며 계속적으로 또 다른 형태의 주기적 응답을 보인다는 것을 뜻한다. 이 주기적 상태의 Fourier 급수는 주요 흘림 진동수(primary shedding frequency,  $St_0$ )의 정수배가 되는 곳에서  $\delta$ -function으로 나타낼 수 있다. 다시 말해서 준주기적 상태에서는 실린더 반류가 여러 다른 흘림 진동수의 결합에 의해 주기적인 변화를 한다고 생각할 수 있다. 하지만 연속적으로 넓은 범위의 진동수 성분을 갖는 chaos와는 달리 준주기 상태는 일정한 성분만을 포함한다는 것이 큰 차이점이다(Ott 1993).

이런 선행 연구를 토대로, 이번 연구에서는 먼저 주기 회전하는 원형 실린더 후류에서의 보오텍스 흘림에 대한 정량적인 해석을 하였다. 또한 강제 진동수와 고유 흘림 진동수와의 관계를 통하여 lock-on 영역에 대한 정의를 한 후,

lock-on 영역 근처의 준주기 상태에 대해서 검토해 보았다. Lock-on 영역을 벗어나면 흘림 진동수(shedding frequency,  $St$ )가 맥놀이 현상을 보이게 되고 이 현상은 lock-on 영역을 중심으로 하여 거의 대칭적 형상을 띠는 특징을 보인다. Lock-on 영역 주변에서의 이런 흘림 진동수의 변화는 후류의 변화에 의해 새로운 성분의 진동수를 유발한다. 여기서 lock-on과 non-lock-on 영역의 경계는 진동수의 분리에 의해 확인할 수 있다. 분기점 이후에서 하나의 진동수는 강제 진동수와 비슷해져 가고 또 다른 진동수는 오히려 고유 흘림 진동수와 비슷해져 간다.

본 연구에서는 주기 회전하는 원형 실린더 주위의 레이놀즈수  $Re = 110$ 의 비정상 층류 유동장에 관한 수치 시뮬레이션을 하였다.  $Re$ 가 비교적 작은 영역( $\leq 47$ )에서는 정상상태 유동으로 카르만 보오텍스와 같은 현상이 일어나지 않고,  $Re$ 가 큰 영역( $> 200$ )에서는 3차원 효과가 나타나므로 본 연구에서는 상기와 같은 레이놀즈 수를 선택하였다.  $Re = 110$ 일 때의 고유 흘림 진동수는  $St_n = 0.1677$ (Williamson 1996)이고, 강제 진동수는  $S_f = f^0 D / U_\infty$  ( $f^0$ : 강제 진동수)로 정의하여  $0.145 \leq S_f \leq 0.195$ 의 범위에서 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 실린더의 회전 속도 ( $\Omega = \alpha \sin(2\pi S_f t)$ )를 유속의 5%로 고정하였다. 따라서 최대 각속도( $\theta_{max} (^{\circ}) = 180\alpha / \pi^2 S_f$ )가  $S_f$ 에 의하여 변화하게 된다.

2. 수치해석법

비압축성 유동장을 풀기위한 지배방정식은 다음과 같은 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식이다.

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u}\mathbf{u} = -\nabla P + \frac{1}{Re} \nabla \cdot [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{2}$$

여기서,  $\mathbf{u}$ 는 속도벡터,  $t$ 는 시간,  $\nabla$ 은 구배 연산자,  $P$ 는 압력을 밀도로 나눈 값으로 정의되며,  $Re$ 는 레이놀즈 수를 각각 나타낸다.

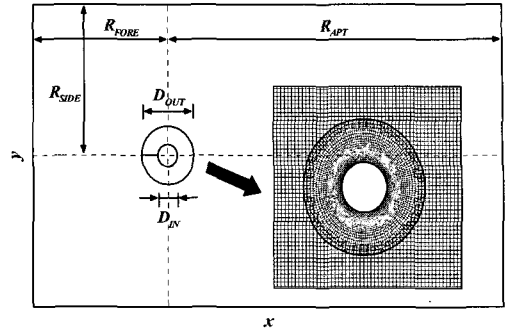


Fig.1 Overlapping grid system.

검사체적을  $V$ , 이 체적을 구성하는 면요소의 면적벡터를  $\mathbf{S}_m$ 으로 하여 식(1)의 양변을 검사체적 내에서 체적 적분한다. Gauss의 정리를 이용하여 체적적분의 일부를 검사체적의 표면적분으로 변환하여 다음 식을 얻는다.

$$\frac{d}{dt} \int_V \mathbf{u} dV = \int_S \bar{\mathbf{T}} \cdot d\mathbf{S} \tag{3}$$

$$\int_S \mathbf{u} \cdot d\mathbf{S} = 0 \tag{4}$$

여기서,  $d\mathbf{S}$ 는 면적벡터이며 미소면적요소  $dS$ 에 폐곡면  $S$ 의 바깥쪽을 향하는 법선 벡터  $\mathbf{n}$ 을 곱한  $\mathbf{n} dS$ 이다.  $\bar{\mathbf{T}}$ 는 응력 텐서이고 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{T}} &= -\alpha \mathbf{u} - \bar{P} + \frac{1}{Re} [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] + \overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'} \\ &= \bar{\mathbf{C}} + \bar{\mathbf{P}} + \bar{\mathbf{D}} \end{aligned} \tag{5}$$

각 항의 의미는,  $\bar{\mathbf{C}}$ 는 대류항,  $\bar{\mathbf{P}}$ 는 압력항,  $\bar{\mathbf{D}}$ 는 확산항이다.

지배변수인 속도와 압력항 모두를 검사체적의 중심에 정의하고, 속도와 압력의 커플링은 Rhie and Chow(1983)의 방법을 따른다. 수치해석법의 내용은 박종천 등(2003a, 2003b)을 참조할수있다.

격자계로, 본 연구에서는 Fig.1과 같이 중첩격자계를 사용한다. 입구 경계(inflow boundary)조건은 균일유동을 주었으며, 실린더 표면은 점착 경계조건(no-slip boundary,  $u = v = U_{rot}$ , 여기서  $U_{rot}$ 는 물체의 회전 속도)을 사용하였다. 또한

중첩 격자계의 내부 격자계와 외부 격자계 간의 인터페이스에서는 물리량들을 선형보간법에 의해 보간하였다. 이에 대하여는 박종천 등(2003a)에 자세히 언급되어 있다.

### 3. 주기 회전하는 원형 실린더 주위 유동장의 특성

#### 3.1 Parameter study

주기 회전하는 원형 실린더 주위 유동장을 수치 시뮬레이션 하기에 앞서 가장 적합한 계산영역과 시간간격을 결정하였다. 계산영역(Fig. 1; RSIDE X RFORE)과 시간간격을 조정하면서 양력계수 ( $C_L$ )의 진폭과 항력계수 ( $C_D$ )의 평균값 그리고 주기 회전하는 실린더 후류의 주요 진동수를 비교하여 가장 적합한 계산조건을 결정하였다.

Figs. 2~3은  $S_f=0.150$ 와  $0.168$ 에서 시간간격을  $0.002$ 로 고정하고 계산영역을 바꾸어 주면서 수치해석 한 결과의 양력계수에 대한 power 스펙트럼을 나타낸다. Table 1에는 각  $S_f$ 에 대한 최고치를 정리하였다. 계산영역의 크기가  $24D_{IN} \times 24D_{IN}$ (여기서  $D_{IN}$ :실린더 직경)의 경우  $S_f=0.150$ 의  $32D_{IN} \times 32D_{IN}$ 와는 경우는 스펙트럼의 최고치가 같고  $S_f=0.168$ 의  $32D_{IN} \times 32D_{IN}$ 와는  $0.04\%$ 의 오차를 보이고 있다. Tables 2~3은 Table 1과 같은 조건에서  $C_L$ 의 시간평균진폭(이후, 평균진폭)과  $C_D$ 의 시간평균치(이후, 평균치)를 각각 정리하였다.  $S_f=0.150$ 의  $C_L$  평균진폭이 다른 값들에 비해서 가장 큰 폭으로 변화하는 것을 볼 수 있는데 이때에  $24D_{IN} \times 24D_{IN}$ 의  $C_L$  평균진폭과  $32D_{IN} \times 32D_{IN}$ 의  $C_L$  평균진폭의 오차가  $0.98\%$ 로 다른 경우에 비해 오차가 가장 작은 것을 알 수 있다. 따라서 계산 영역을  $24D_{IN} \times 24D_{IN}$ 로 결정하였다.

다음에 계산 영역을  $24D_{IN} \times 24D_{IN}$ 로 고정시키고 시간간격을  $0.0005, 0.001, 0.002, 0.003$ 으로 변화시켜 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 각각의 조건에 따른 Power 스펙트럼을 Figs. 4~5에,  $C_L, C_D$ 의 진폭과 평균치를 Tables 4~5에 각각 나타낸다. 시간간격을 변화시켰을 때 결과값이 미세하게 진동하는 것을 알 수 있다. 가장 큰 진동

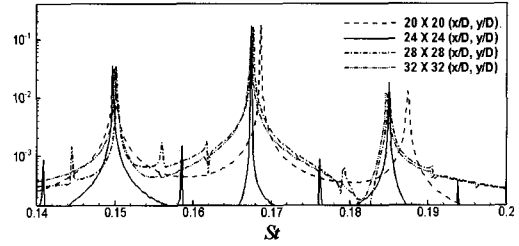


Fig. 2 Power spectra at  $S_f=0.150$  with different domain sizes and  $\Delta t=0.002$ .

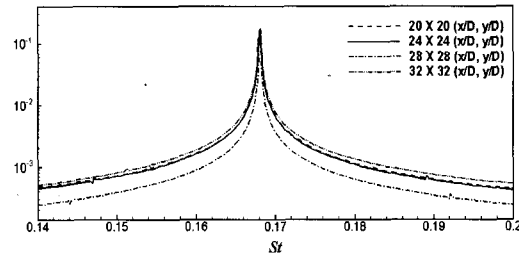


Fig. 3 Power spectra at  $S_f=0.168$  with different domain sizes and  $\Delta t=0.002$ .

을 보이는  $S_f=0.168$ 의  $C_D$  평균치의 경우에도 시간간격  $0.002$ 와  $0.0005$ 의 결과값의 오차가  $0.66\%$ 였다. 따라서 시간간격을  $0.002$ 로 결정하였다.

결정되어진 계산영역  $24D_{IN} \times 24D_{IN}$ , 시간간격  $0.002$ 의 조건으로 정지한 실린더 주위의 유동해석을 한 결과 고유 헬름 진동수 ( $S_n$ )가  $0.1677$ 로 얻어졌으며, Williamson(1989)의 실험식과는  $0.74\%$ 의 오차를 보였다(Fig. 6). 그리고 이번 연구의 선행 연구인 Back and Sung(2000)의 수치 시뮬레이션 결과는  $0.1710$ 으로 Williamson(1989)의 실험식과  $1.21\%$ 의 오차를 보였다. 이것으로 본 연구에서 사용한 계산영역과 시간간격이 타당함을 알 수 있다.

Table 1 Peak values of power spectrum with different domain sizes at  $S_f=0.150$  &  $0.168$  and  $\Delta t=0.002$ .

	20X20	24X24	28X28	32X32
$S_f=0.150$	0.1686	0.1674	0.1676	0.1674
$S_f=0.168$	0.1681	0.1681	0.1680	0.1680

Table 2  $C_L$  amplitudes and  $C_D$  mean values with different domain sizes at  $S_f=0.150$  and  $\Delta t=0.002$ .

	20X20	24X24	28X28	32X32
$C_L$ amp.	0.3648	0.3382	0.3462	0.3415
$C_D$ mean	1.3371	1.3287	1.3295	1.3283

Table 3  $C_L$  amplitudes and  $C_D$  mean values with different domain sizes at  $S_f=0.168$  and  $\Delta t=0.002$ .

	20X20	24X24	28X28	32X32
$C_L$ amp.	0.4287	0.4114	0.4187	0.4151
$C_D$ mean	1.3529	1.3515	1.3510	1.3507

Table 4 Peak points of power spectrum at  $S_f=0.15$  &  $0.168$  with different time interval.

	0.0005	0.001	0.002	0.003
$S_f=0.150$	0.1681	0.1678	0.1674	0.1671
$S_f=0.168$	0.1681	0.1681	0.1681	0.1680

Table 5  $C_L$  amplitudes and  $C_D$  mean values at  $S_f=0.150$  with different time interval.

	0.0005	0.001	0.002	0.003
$C_L$ amp	0.3389	0.3409	0.3382	0.3385
$C_D$ mean	1.3216	1.3246	1.3287	1.3340

Table 6  $C_L$  amplitudes and  $C_D$  mean values at  $S_f=0.168$  with different time interval.

	0.0005	0.001	0.002	0.003
$C_L$ amp	0.4124	0.4119	0.4114	0.4118
$C_D$ mean	1.3425	1.3454	1.3515	1.3578

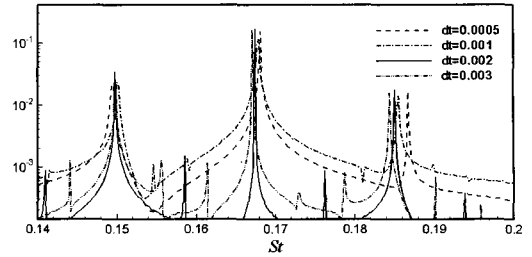


Fig. 4 Power spectra at  $S_f=0.150$  with different time interval and 24X24 of domain size.

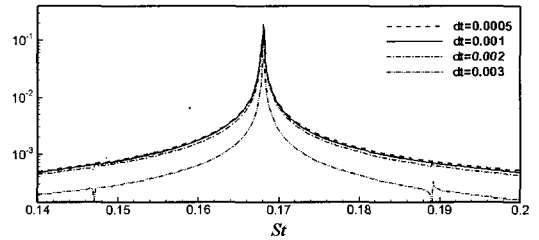


Fig. 5 Power spectra at  $S_f=0.168$  with different time interval and 24X24 of domain size.

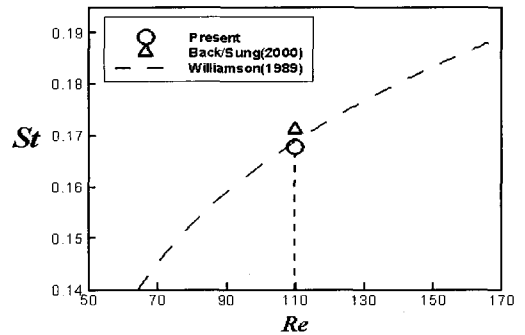


Fig. 6 Comparison of Strouhal number(---, Williamson(1989);  $\Delta$ , Back/Sung(2000),  $\circ$ , present). At  $Re=110$ ,  $S_n=0.169$  (Williamson),  $S_n=0.171$ (Back/Sung) and  $S_n=0.1677$ (present) are obtained.

3.2 시계열 변화 특성 및 Spectrum 분석

Figs. 7~13은  $Re=110$ 에서 강제 진동수의 변화에 따른 양력계수의 시계열 변화특성을 나타낸다.

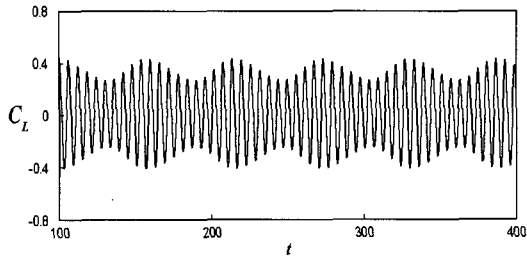


Fig. 7 Time-series of  $C_L$  at  $S_f=0.15$ .

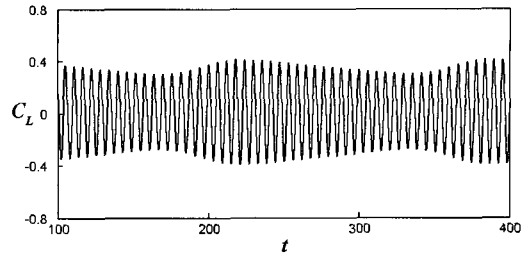


Fig. 11 Time-series of  $C_L$  at  $S_f=0.175$ .

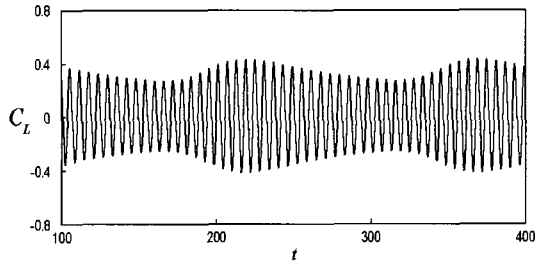


Fig. 8 Time-series of  $C_L$  at  $S_f=0.16$ .

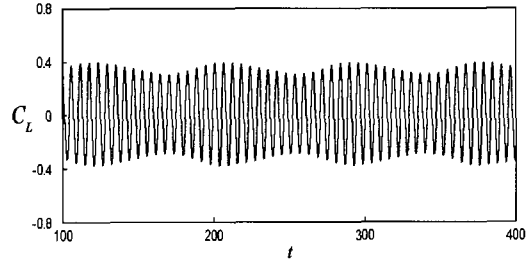


Fig. 12 Time-series of  $C_L$  at  $S_f=0.18$ .

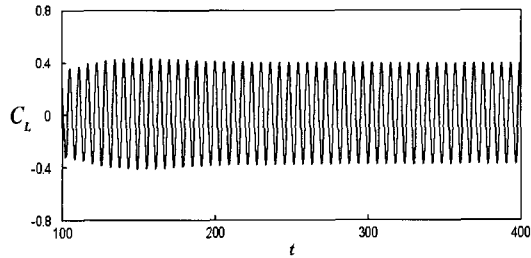


Fig. 9 Time-series of  $C_L$  at  $S_f=0.165$ .

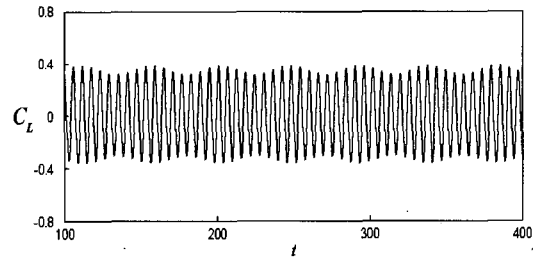


Fig. 13 Time-series of  $C_L$  at  $S_f=0.19$ .

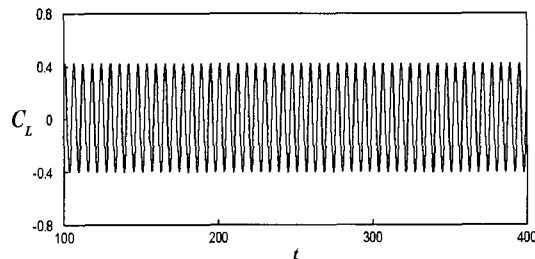


Fig. 10 Time-series of  $C_L$  at  $S_f=0.17$ .

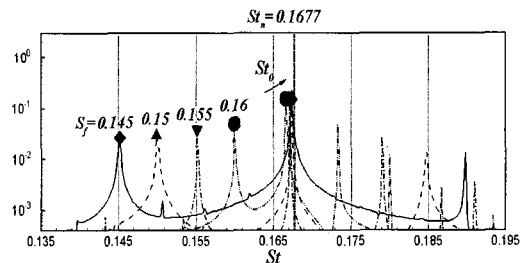


Fig. 14 Power spectra below the lock-on region.

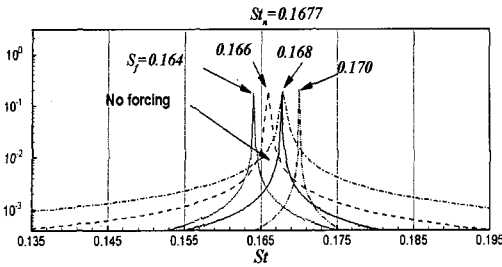


Fig. 15 Power spectra in the lock-on region.

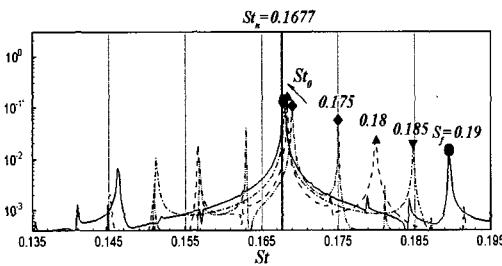


Fig. 16 Power spectra above the lock-on region.

양력 계수의 시계열 변화는 고유 흘림 진동수  $St_n = 0.1677$ 을 중심으로 거의 대칭적인 경향을 띤다. Lock-on 영역( $0.164 \leq St_f \leq 0.171$ )의 경우는 정지한 실린더의 양력 계수에 대한 시계열 변화와 유사하게 맥놀이가 없는 상(phase) 변화를 보인다. 정지한 경우에 비해 평균 항력계수는 최대 약 4%, 양력계수의 진폭은 최대 약 25% 크게 나타난다. 하지만 Lock-on 영역을 벗어나면 강제 진동수에 따라 서로 다른 형태의 맥놀이 현상을 보인다.

양력계수의 스펙트럼 해석 결과를 Figs. 14~16에 나타낸다. 스펙트럼의 주요 성분(primary component)은 강제 진동수에 따라 다르게 나타난다. Lock-on 영역에서는 강제 진동수와 동일한 주요 흘림 진동수만을 갖게 되고, non-lock-on 영역에서의 흘림 진동수는 강제 진동수와 고유 흘림 진동수에 가까운 성분의 주요 흘림 진동수를 가지는 것으로 lock-on과 non-lock-on을 구별할 수 있다. Fig. 14는 non-lock-on 영역이면서

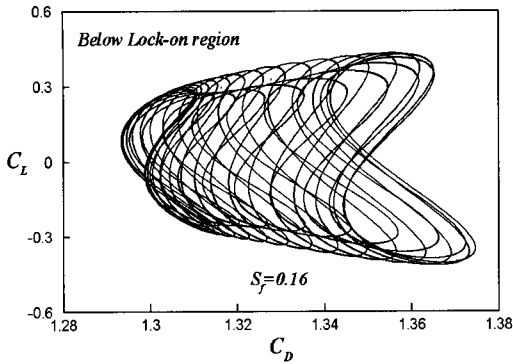
강제 진동수가 고유 흘림 진동수보다 낮은 영역( $St_f < St_n$ )에서의 스펙트럼을 나타낸다. 주요 성분으로는 강제 진동수와 동일한 진동수를 갖는다는 것을 알 수 있다. 주요 흘림 진동수는 강제 진동수가 커짐에 따라 고유 흘림 진동수에서 멀리 떨어져 강제 진동수에 접근하는 경향을 보인다. Fig.15는 lock-on 영역에서의 스펙트럼 분포를 나타낸다. 스펙트럼은 강제 진동수만을 주요성분으로 가지며, 정지한 실린더의 스펙트럼과 유사한 경향을 보인다. Fig. 16은 Fig. 14와는 달리 non-lock-on 영역이면서 강제 진동수가 고유 흘림 진동수보다 높은 영역( $St_f > St_n$ )에서의 스펙트럼을 나타내고 있다. Fig. 16과 Fig. 14의 가장 큰 차이점은 강제 진동수가 커짐에 따라 주요 흘림 진동수가 강제 진동수 멀리 나타나고 고유 흘림 진동수 가까이 나타난다는 것이다.

### 3.3 양·항력계수의 시간변화 상관 특성

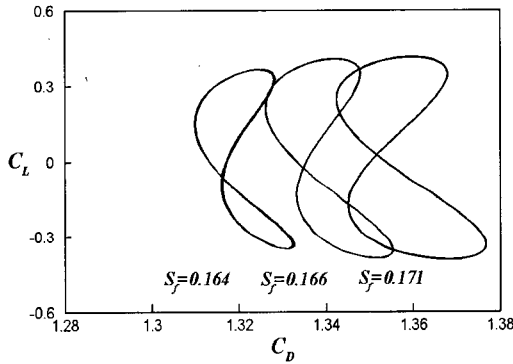
Fig. 17에는 시간  $t=250 \sim 400$  사이에서 양력계수와 항력계수의 시간변화 상관 특성을 나타낸다. Lock-on 영역에서 양력계수와 항력계수는 각각의 강제 진동수에 대하여 동일한 궤적상에서 주기적 상관관계를 보이는데, 강제 진동수가 커짐에 따라 평균 항력계수가 커지며 궤적의 모양도 약간 달라진다. 반면 non-lock-on 영역의 경우 양력계수와 항력계수가 시간에 따라 일정한 규칙을 가지고 일정 범위 내의 연속되는 궤적상에서 변화를 반복하게 된다. 이때 변화하는 상은 강제 진동수에 따라 약간의 차이를 보인다. 강제 진동수가  $St_f < 0.164$ 인 영역에서는 항력계수가 작을 때 양력계수도 작고 항력계수가 클 경우에는 양력계수도 커진다. 하지만  $St_f > 0.171$ 인 경우에는 항력계수의 변화에 상관없이 양력계수의 진폭 변화에 큰 차이가 없다는 사실을 알 수 있다.

### 3.4 양·항력계수의 시간 통계해석 및 흘림 진동수 특성

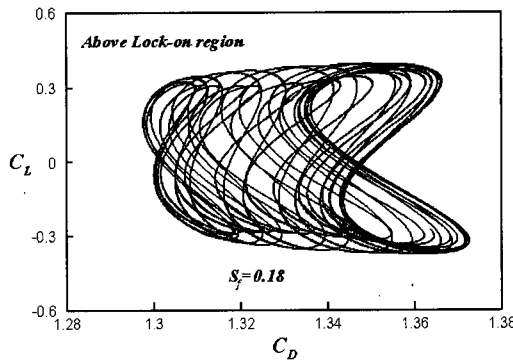
Fig. 18~20은 강제 진동수의 변화에 대한 항력계수의 평균치, 평균 진폭 그리고 양력계수의 평균 진폭을 나타낸다. 세 그림에서 공통적인 경향은 lock-on 영역 이외의 non-lock-on 영역에



(a) below the lock-on region



(b) in the lock-on region



(c) above the lock-on region

Fig. 17 Phase diagrams of  $C_L$  with  $C_D$  during the quasi-periodic states from  $t=250$  to  $t=400$ .

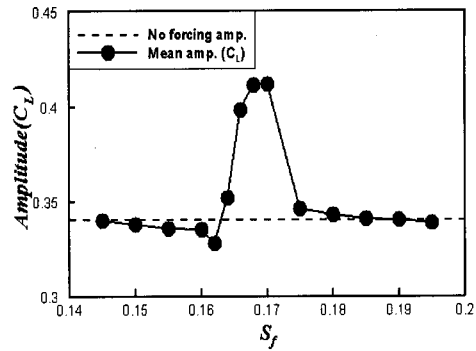


Fig. 18 Amplitudes of  $C_L$  as a function of forcing frequency.

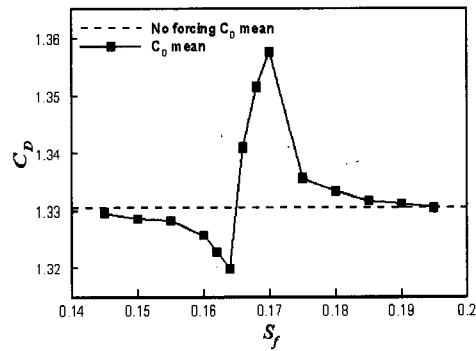


Fig. 19 Time-averaged  $C_D$  as a function of forcing frequency.

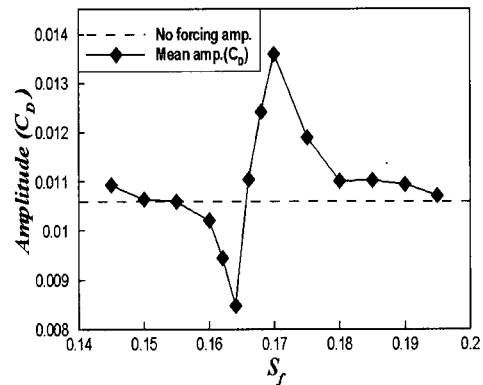


Fig. 20 Amplitudes of  $C_D$  as a function of forcing frequency.



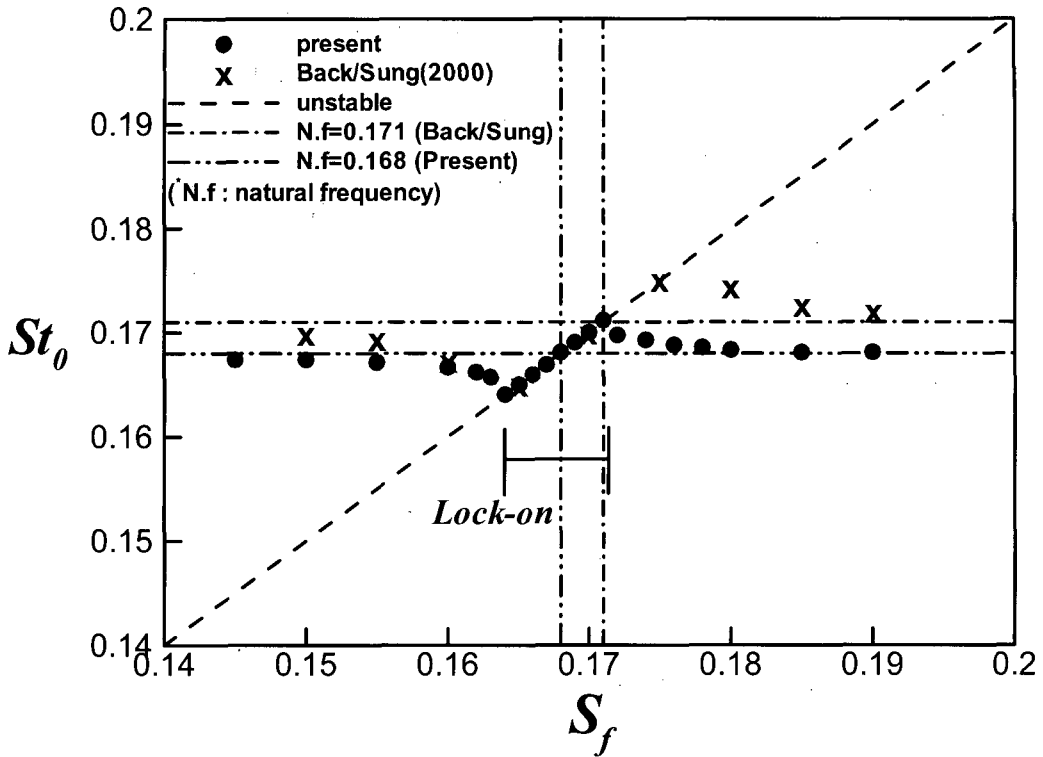


Fig. 21 Frequency selection diagram.

서는 그 값들이 점선으로 표시한 정지한 실린더의 값에 점진적으로 가까워짐을 알 수 있다. 강제 진동수가 커짐에 따라 그 값이 작아지는 것을 관찰할 수 있다. 그러다 lock-on 영역이 시작하는 시점에서 계수들의 값이 가장 작은 값을 가지고 lock-on 영역에서 강제 진동수가 커짐에 따라 각 계수의 값들도 거의 선형적으로 커지기 시작한다. lock-on 영역이 끝나는 시점에서 계수들의 값이 가장 큰 값을 가진다. lock-on 영역이 끝나고 non-lock-on 영역이 시작 되면서 각 계수들의 값은 정지한 실린더와 유사한 수준으로 낮아지게 된다.

Fig. 21은 강제 진동수의 변화에 따른 주요 흘림 진동수의 분포를 나타낸다.

Back and Sung(2000)과 본 연구결과와 공통점은 고유 흘림 진동수를 중심으로 주요 흘림 진동수의 변화가 대칭적이라는 점이다. 하지만 고유

흘림 진동수는 Back and Sung(2000)의 결과와 비교하여 본 수치 시뮬레이션의 결과가 Williamson(1989)의 실험식에 근소하지만 보다 근접한 결과를 보였다. 그리고 본 연구에서는 lock-on 영역을 좀 더 정확히 밝히기 위하여 lock-on 영역 근방에서 강제 진동수를 0.01의 간격으로 수치 시뮬레이션 하였다. 그 결과 고유 흘림 진동수의 차이로 Back and Sung(2000)의 결과에 비해 주요 흘림 진동수의 중심이 변화하였으며 lock-on 영역이 좀 더 좁은 영역에 걸쳐 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 이번 연구에서는 lock-on 영역이  $0.164 \leq S_f \leq 0.171$ 로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는, 중첩격자계의 유한 체적법을 이용하여 주기 회전하는 원형 실린더 주변의 유동장

을 해석하였다. Lock-on 영역을 좀 더 정확히 정의하기 위하여 lock-on 영역 근방에서의 강제 진동수를 0.01 간격으로 수치 시뮬레이션 하여 lock-on 영역이  $0.164 \leq S_f \leq 0.171$ 의 범위에서 나타남을 알았다. 또한, 시뮬레이션 결과의 시간평균의 통계해석을 통하여 lock-on 영역 및 non-lock-on 영역에서의 물리적 특성들에 대하여 살펴보았다.

향후, 좀 더 복잡한 경계 조건을 포함하는(예를 들어, 해저면 주위에서 회전 및 주기회전 운동을 하는) 원형 실린더 주위의 유동해석이나, 높은 레이놀즈 수( $Re > 200$ )에서도 수치해석을 하여 해양 구조물을 구성하는 원형 실린더 주위 유동장의 폭넓은 이해를 위한 연구에 효과적으로 응용할 예정이다.

#### 후 기

이 연구는 한국산업기술재단의 지역전략산업 석 박사인력양성 사업의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- 김광수, 서정천, 1998, “와도를 기초로 한 초기 순간 출발하는 실린더 주위의 점성유동해석,” 대한조선학회 논문집, 제 35권, 제 4호, pp. 1-10.
- 김광수, 이승재, 서정천, 2003, “진동하는 원형 주상체 주위의 와류 수치모사,” 대한조선학회 논문집, 제 40권, 제 2호, pp. 21-27.
- 문진국, 박종천, 윤현식, 이병혁, 전호환, 2005, “회전하는 원형 실린더 주위 층류 유동장의 수치 시뮬레이션,” 한국해양공학회지, (인쇄중).
- 박종천, 전호환, 송기중, 2003a, “중첩 격자계를 이용한 물체운동의 수치 시뮬레이션,” 대한조선학회 논문집, 제 40권, 제 2호, pp. 21-27.
- 박종천, 강대환, 전호환, 2003b, “저항감소를 위한 물체후방의 형상설계에 관한 LES해석,” 한국해양공학회지, 2003, 제 17권, 제 5호, pp. 1-9.
- 신영섭, 2000, “스펙트럴법을 이용한 원형주상 체주위 층류류해석,” 대한조선학회 논문집, 제 37권, 제 4호, pp. 31-39.
- Baek, S.J. and Sung, H.J., 1998, “Numerical simulation of the flow behind a rotary oscillating circular cylinder,” Phys. Fluids, Vol. 10, pp. 869-876.
- Baek, S.J. and Sung, H.J., 2000, “quasi-periodicity in the wake of a rotationally oscillating cylinder,” J. Fluid Mech, Vol. 408, pp. 275-300.
- Baek, S.J. and Sung, H.J., 2001, “Response of a circular cylinder wake to superharmonic excitation,” J. Fluid Mech, Vol. 442, pp. 67-68.
- Braza, M., Chassaing, P. and Minh, H.H., 1986, “Numerical study and physical analysis of the pressure and velocity fields in the near wake of a circular cylinder,” J. of Fluid Mechanics, Vol. 165, pp. 79-130.
- Choi, H., MOIN, P. and Kim, J., 1993, “Direct numerical simulation of turbulent flow over riblets,” J. Fluid Mech. Vol. 255, pp. 503-539.
- Filler, J.R., Marston, P.L., and Mih, W.C., 1991, “Rotary oscillation control of a cylinder wake,” J. Fluid Mech. Vol. 231, pp. 481-499.
- Griffin, O.M. and Hall, M.S., 1991, “Review-vortex shedding lock-on and flow control in bluff body wakes,” Trans. ASME I: J. Fluids Engng, Vol. 113, pp. 526.
- Kang, S.M., Choi, H.C. and Lee, S.S., 1999, “Laminar flow past a rotating circular cylinder,” Phys. Fluids, Vol. 11, pp. 3312-3321.
- Karniadakis, G.E. and Triantafyllou, G.S., 1989, “Frequency selection and asymptotic states in laminar wakes,” J. Fluid Mech. Vol. 199, pp. 441-469.
- Koopman, G.H., 1967, “The vortex wakes of vibrating cylinders at low Reynolds numbers.”

- J. Fluid Mech. Vol. 28, pp. 501-512.
- Kwon, K.Y. and Choi, H.C., 1996, "Control of laminar vortex shedding behind a circular cylinder using splitter plates," Phys. Fluids, Vol. 8, pp. 479-486.
  - Mittal, R. and Balachandar, S., 1994, "Direct Numerical Simulation of Flow Past Elliptic Cylinders," J. of Comp. Physics, Vol. 124, pp. 351-367.
  - Ongoren, A. and Rockwell, D., 1988, "Flow structure from an oscillating cylinder Part 1. Mechanisms of phase shift and recovery in the near wake," J. Fluid Mech. Vol. 191, pp. 197-223.
  - Ott, E., 1993, "Chaos in dynamical system," Cambridge University Press.
  - Rhee, C.M. and Chow, W.L. 1983, "A Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation," AIAA Journal, Vol. 21-11, pp. 1-5.
  - Stansby, P.K., 1976, "The locking-on of vortex shedding due to the cross-stream vibration of circular cylinders in uniform and shear flows," J. Fluid Mech. Vol. 74, pp. 641-655.
  - Sung, H.J., Hwang, K.S. and Hyun, J.M., 1994a, "Experimental study on mass transfer from a circular cylinder in pulsating flow," Intl J. Heat Mass Transfer Vol. 37, pp. 2203-2210.
  - Sung, H.J., Hwang, K.S. and Hyun, J.M., 1994b, "Discrete vortex simulation of pulsating flow behind a normal plate," Trans. ASME I: J. Fluids Engng Vol. 116, pp. 862.
  - Taneda, S., 1978, "Visual Observations of the Flow Past a Circular Cylinder Performing a Rotary Oscillation," J. Phys. soc. Jpn. Vol. 45, pp. 1038-1043.
  - Tokumaru, P.T. and Dimotakis, P.E., 1991, "Rotary oscillation control of a cylinder wake," J. Fluid mech. Vol. 224, pp. 77-90.
  - Van Atta, C.W. and Gharib, M., 1987, "Ordered and chaotic vortex streets behind circular at low Reynolds," J. Fluid Mech. Vol. 174, pp. 113-133.
  - Williamson, C.H.K., 1989, "Oblique and parallel modes of vortex shedding in the wake of a circular cylinder at low Reynolds number," J. Fluid Mech. Vol. 206, pp. 579-627.
  - Williamson, C.H.K., 1996, "Vortex dynamics in the cylinder wake," Annu. Rec. Fluid Mech. Vol. 28, pp. 477-539.
  - Wu, J.M., Mo, J.D. and Vakili, A.D., 1989, "On The Wake of Cylinder with Rotational Oscillations," AIAA Paper, No. AIAA-89-1024.



&lt; 문진국 &gt;



&lt; 박종천 &gt;



&lt; 전호환 &gt;



&lt; 서성부 &gt;