

진동하는 원형실린더 주위 유동의 와홀림에 관한 연구

Vortex shedding behind the oscillating circular cylinder

김대형^{1*}, 김기하², 이창훈³, 최정일³연세대학교 기계공학과¹, 연세대학교 천문우주학과², 연세대학교 계산과학공학과³

초 록

본 연구에서는 원형실린더의 강제 수평 및 수직진동에 따른 와홀림을 관찰하였다. EDISON_CFD의 가상경계법을 이용하여 원형실린더 주위 유동현상을 수치 모사하였다. 원형실린더의 강제 진동 특성에 따른 와홀림 진동수, 공력계수 등의 영향을 분석하였다. 특히, 진동방향에 따른 와홀림의 영향을 분석하여, 원형실린더의 강제 진동에 따른 유동의 선형성을 평가하였다.

Key Words : 원형실린더 (Circular Cylinder), 강제 진동 (Forced Oscillation), 와홀림 (Vortex Shedding)

1. 서 론

실린더 형태의 구조물은 인공물뿐만 아니라 많은 자연물 중에서도 관찰이 된다. 이러한 연유로 실린더 주변(특히 후류)에 대한 많은 연구들이 진행 되어왔다. 또한 실린더 유동해석은 유동제어의 근본적인 지식으로 관련연구의 적용분야는 셀 수 없을 정도로 많다. 특히 실린더 후류의 경우 특정 레이놀즈 수에서 와홀림 현상이 나타난다. 정지된 실린더의 와홀림 현상에 관하여는 Williamson et al.⁽¹⁾에 의하여 연구된바 있다. 수직으로 진동하는 실린더의 와홀림 특성은 Pham et al.⁽²⁾에 의하여 연구된 바가 있다. 이 연구에서는 진폭을 실린더 지름의 0.2배로 가진 하였을 때의 lock-on현상의 발생에 대하여 논의가 되었다. 수평으로 진동하는 경우는 Cetiner & Rockwell⁽³⁾에 의하여 연구된 바 있다. 본 연구는 이에 더 나아가 진동 각도에 따른 유동변화와 공력계수의 변화 그리고 와홀림의 스트로울 수($St = fD/U$)변화에 관하여 연구를 하였다. 여기서 f 는 와홀림의 진동수, D 는 실린더의 지름, U 는 유동의 속도를 나타낸다. 연구에 사용된 수치해석 도구로는 가상경계법을 이용한 EDISON_CFD의 YUIBM2 Solver를 사용하였다. YUIBM2 Solver에 사용된 가상 경계법을 이용한 실린더 유동에 관한 연구는 Park et al.⁽⁴⁾에 의해서 진행된바 있다. 본 연구에서는 진동이 없는 경우 레이놀즈 수($Re = UD/\nu$) 200에서 와홀림 진동 위상에 따른 유동장을 분석하였다. lock-on현상이 발생하는 수직 진동(90°)의 유동현상을 관찰하였다. 수직과 수평(0°)을 제외한 임의의 각도를 두 진동의 중첩으로 가정하여 중첩 진동 결과 값이 수직진동과 수평진동의 결과 값으로부터 계산한 선형적 예측과의 관계를 알아보았다.

2. 수치해석 대상 및 방법

2.1 수치해석 대상

본 연구에서는 실린더의 지름을 D 로 하여 모든 길이 단위를 무차원화 하였다. 유동 입구 쪽의 충분한 유동 발달을 위해 $10D$ 의 영역을 설정하였고 위와 아래 원거리는 $15D$ 의 길이로 설정하였다. 후류의 완전히 발달한 형태를 관찰하기 위하여 출구 쪽은 $20D$ 의 비교적 큰 길이로 계산영역 결정하였다. Fig 1. 은 본 연구에 사용된 계산영역 및 각 방향으로의 길이를 나타내고 있다. 본 연구에서는 가상 경계법을 이용하여 진동 시 실린더 위치 변화에 따른 격자 재생성의 불편함을 해소하였다. Fig. 1에서 실린더 위치와 크기를 나타내었지만 실제 계산영역에서 실린더의 형태는 나타나지 않는다.

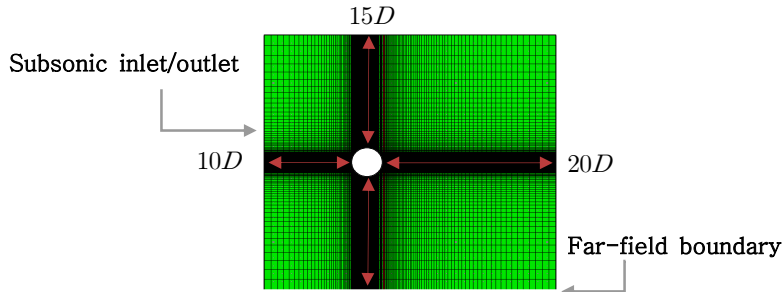


Fig. 1. 계산 영역

2.2 수치해석 방법

격자 분해능을 비교하기 위해서 실린더를 중심으로 가로, 세로 지름크기($D \times D$)의 사각형을 형성하여 격자를 3가지 경우로 만들었다. 각 격자계의 중심부의 점의 개수를 각각 20×20 , 30×30 , 40×40 로 균일하게 배치하였다. 전체 계산 영역 점의 개수는 중앙 사각형의 점의 개수에 비례하여 160×120 , 120×90 , 80×60 으로 배치하였으며 EDISON 전처리기의 격자 배치 비례변수를 1.03으로 설정하여 실린더 주위로 격자를 집중 시켰다. 왼쪽 유동입구와 오른쪽 유동 출구를 아음속 입구/출구 경계조건으로 설정하였고, 위와 아래는 원거리 경계조건을 적용하여 연구를 진행하였다.

3. 결과 분석

3.1 정지된 실린더 주위의 유동

Table 1.은 실린더를 고정한 상태에서 공력계수(항력계수 C_D , 양력계수 C_L)와 스트롤 수를 선행 연구들과 비교한 표이다. 와홀림이 발생하지 않는 레이놀즈 수 20, 40의 영역에서는 C_D 와 박리각도, 박리 기포의 크기를 비교하였다.

Table 1. 정지된 실린더 주위 유동의 레이놀즈 수에 따른 공력계수, 스트롤 수 비교; 160×120 격자계

	Re 20			Re 40		
	L/D	θ	C_D	L/D	θ	C_D
Dennis and Chang [5]	0.94	43.7	2.05	2.35	53.8	1.52
Calhoun [6]	0.91	45.5	2.19	2.18	54.2	1.62
Russell and Wang [7]	0.94	43.3	2.13	2.29	53.1	1.60
Choi et al. [8]	0.90	40.8	2.02	2.24	45.1	1.49
Present	0.77	37.32	2.19	1.51	43.11	1.64
	Re 100			Re 200		
	C_D	C_L	St	C_D	C_L	St
Kim et al. [9]	1.33	± 0.32	0.165	-	-	-
Calhoun [6]	1.33 ± 0.014	± 0.300	0.175	1.17 ± 0.058	± 0.67	0.202
Russell and Wang [7]	1.38 ± 0.007	± 0.322	0.169	1.29 ± 0.022	± 0.50	0.194
Lui et al. [10]	1.35 ± 0.012	± 0.339	0.164	1.31 ± 0.049	± 0.69	0.192
Choi et al. [8]	1.34 ± 0.011	± 0.315	0.164	1.36 ± 0.048	± 0.64	0.191
Present	1.34 ± 0.092	± 0.345	0.159	1.40 ± 0.047	± 0.73	0.192

본 연구의 결과 값은 선행 연구들의 결과 값에 비교하여 큰 차이를 보이지 않았음을 확인 할 수 있었다. 격자 분해능의 유효성을 검증하기 위하여 크기가 다른 3개의 격자계(160×120 , 120×90 , 80×60)의 공력계수 및 스트롤 수를 비교하였다. 레이놀즈 수 60, 100, 150 경우의 값을 Fig 2.에 나타내었다.

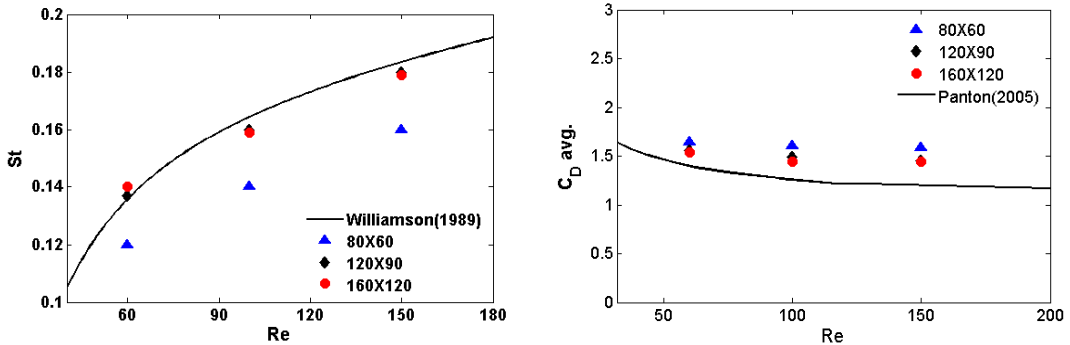


Fig. 2. 격자 크기에 따른 (a) 스트롤 수 변화 (b) 항력계수 평균값(C_{Da}) 변화

Williamson⁽¹¹⁾의 연구에 따르면 레이놀즈 수의 범위 $50 \leq Re \leq 160$ 에서 스트롤 수는 식 (1)을 만족한다.

$$St = -\frac{3.3265}{Re} + 0.1816 + 1.600 \times 10^{-4} Re \quad (1)$$

Fig 2. (a)는 본 연구의 결과 격자의 크기가 커질수록 스트롤 수가 Williamson⁽¹¹⁾의 제시한 값과 근사해지는 것을 보여준다. Fig 2. (b)는 본 연구결과의 C_{Da} 값이 격자의 크기가 커질수록 Panton⁽¹²⁾의 연구 결과와 근사 하는 것을 보여준다. 위의 두 가지 유효성 검사를 통해서 본 연구에서 사용한 160×120 격자계의 신뢰성을 확인하였다.

레이놀즈 수를 200으로 계산 할 경우 스트롤 수는 0.192로 나타났다. 일반적인 와홀림의 주기적 유동 특성을 알아보기 위하여 유동장을 관찰하여 보았다. 한 주기의 자료를 분석한 결과 정확히 반주기의 반대칭(anti-symmetry)를 형성하는 것을 확인 하였다. 이러한 이유로 반주기의 유동장을 Fig 3.에 나타 내었다.

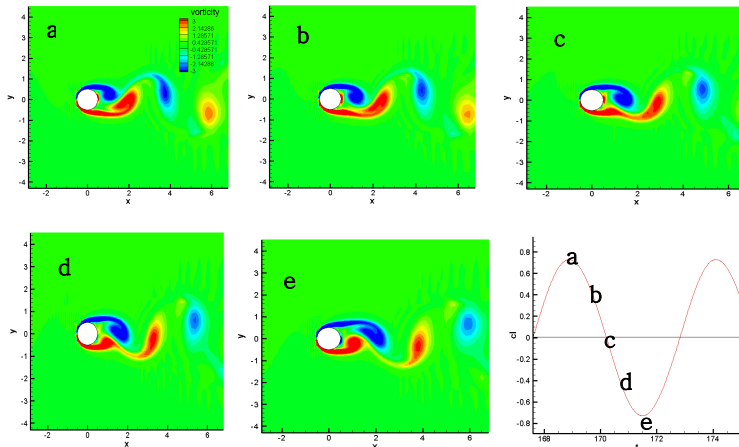


Fig. 3. 진동이 없을 경우 레이놀즈 수 200에서 실린더 주위 유동의 반주기 와도 변화

그림 a에서 아래쪽의 와류가 박리됨에 따라 아래쪽 압력이 회복되어 와류가 남아있는 위쪽 보다 상대적으로 고압이 된다. 이로 인해 C_L 값이 최대 점에 도달한다. 그림 b \rightarrow c \rightarrow d의 순서대로 위쪽 와류가 성장함에 따라 크기를 유지 하지 못하게 되어 박리를 시작하며 그림 e에서 완전히 박리된다. 이 상태는 a의 경우와 정량적으로 반 대칭을 이루기 때문에 이때의 C_L 값은 최소가 된다.

3.2 진동하는 실린더 주위의 유동

본 연구에서는 가진 진동수의 범위를 $0.8 \leq f_s \leq 1.2$ ($f_s = f/f_0$) 로 정하여 $\Delta f_s = 0.05$ 간격으로 계산을 진행 하였다. 여기서 f 는 가진 진동수를 f_0 는 진동이 없을시 나타나는 실린더의 고유 진동수이다. 실린더의 강제 진동은 식 (2)의 형태로 가진 하였다. $\vec{x}(t)$ 는 시간에 따른 실린더의 중심 위치이고 \vec{x}_0 는 초기의 진동기준점이다. A 는 진폭, \hat{e}_x, \hat{e}_y 는 각각 x, y 방향 단위 벡터를 \hat{e}_θ 는 각도 θ 에 따른 진동방향의 단위 벡터를 나타낸다.

$$\vec{x}(t) = \vec{x}_0 + A \sin(2\pi f t) \hat{e}_\theta, \quad \hat{e}_\theta = \cos\theta \hat{e}_x + \sin\theta \hat{e}_y \quad (2)$$

수직진동에서는 Lock-on 현상이 관찰 되었다. Lock-on 현상은 가진 진동수가 고유 진동수 근처일 경우 와홀림의 진동이 단일 진동수를 가지며 크기는 가진 진동수와 비례하는 현상을 말한다. Pham et al.⁽²⁾에 따르면 $A/D=0.2$ (A : 진폭의 크기)일 경우 Lock-on 현상은 $0.8 \leq f_s \leq 1.05$ 에서 나타나고 1.1부터 사라지게 된다. 이러한 현상은 Pham et al.의 결과와 일치하였으며 Fig 4. 에 나타내었다.

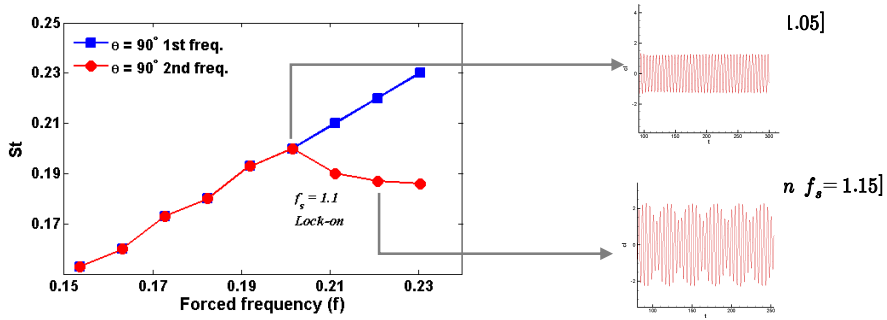


Fig. 4. 가진 진동수에 따른 Lock-on 현상의 유무

Lock-on 현상이 발생하는 경우 단일 진동수를 가지므로 정지된 실린더의 유동과 형태적으로 크게 다르지 않지만 Lock-on이 발생하지 않을 경우 위상에 따른 유동현상이 상당히 다르게 나타난다. 이를 위하여 $f_s = 1.1$ 의 경우 2차 진동수를 기준으로 한 주기의 C_L 극댓값의 유동을 관찰하였다. 실린더 내부의 + 표시는 진동 기준점을 표시한 것이다.

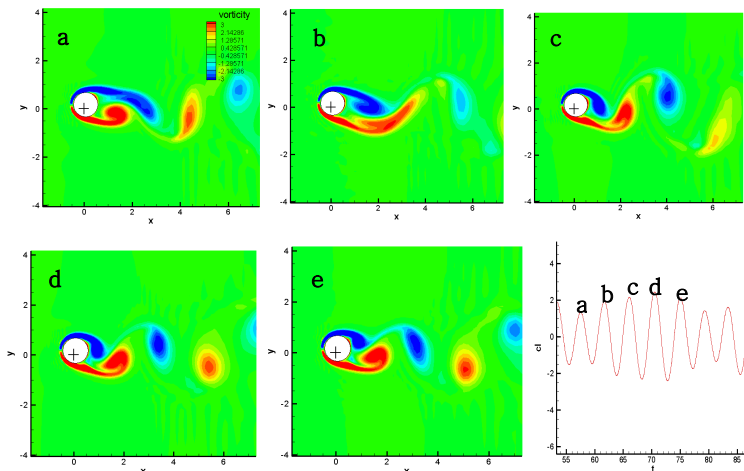


Fig. 5. Non-lock-on($f_s = 1.1$)에서 2차 진동의 1주기 동안 C_L 극대 값에서의 유동

C_L 이 극대 값일 때의 유동이기에 때문에 모든 유동장에서 공통적으로 아래쪽 와류가 박리되는 현상을 보인다. 하지만 고정된 경우와는 다르게 위쪽 와류와의 상관관계에 따라서 C_L 의 값이 다르게 나타남을 알 수 있다. 극단적으로 **a**의 경우 위쪽 와류도 과도하게 성장하여 함께 박리 되므로 C_L 값이 작는데 비해 **e**의 경우 아래쪽 와류는 완전 박리 되지만 위쪽의 와류는 강하게 형성되어 C_L 값이 커지는 것을 볼 수 있다. 수직진동의 연구와는 다르게 수평 진동에서는 Lock-on 현상이 나타나지는 않았다. 다른 진동 패턴과 관련된 스트롤 수 분석은 3.3. 임의 진동 에서 진행하기로 한다.

3.3 임의 진동

본 연구에서는 임의진동의 각도를 45° 로 하여 $A/D=0.2$ 로 가진 하였다. 실험 결과는 아래 Fig 6. 7. 과 같다.

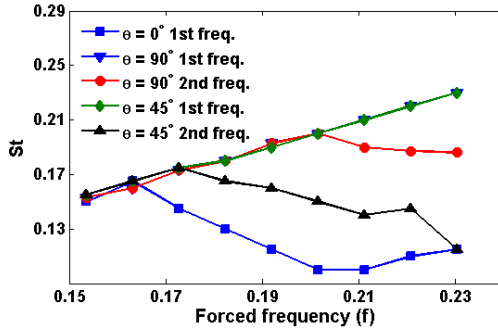


Fig. 6. 임의 진동의 진동수에 따른 스트롤 수 변화와 수직, 수평 진동과의 비교

Fig 6. 을 통해 수직 진동과 임의 진동의 경우 1차 진동의 스트롤 수는 가진 진동수와 일치함을 알 수 있다. 하지만 수평 진동의 경우 Lock-on 현상의 빠른 손실로 인해 1차 진동의 일부가 2차 진동의 형태를 나타냄을 관찰 할 수 있었다. 이런 부분을 고려한다면 전반적으로 임의 진동의 스트롤 수는 수직, 수평 진동과의 선형적 증첩관계를 유지한다고 볼 수 있다.

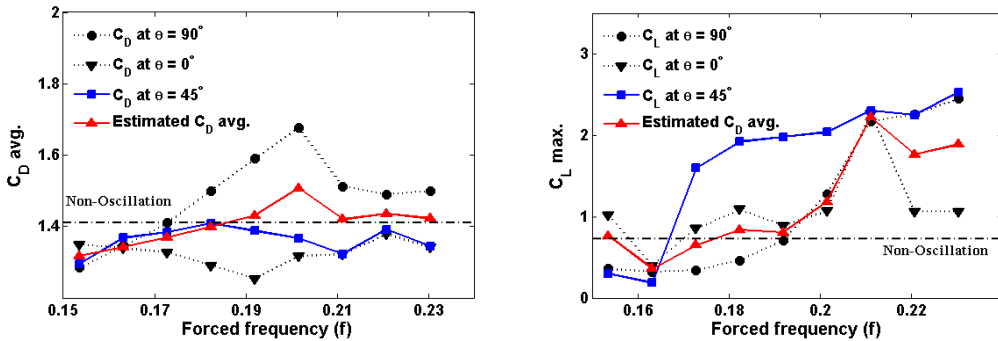


Fig. 7. 임의 진동의 진동수에 따른 공력계수 변화와 수직, 수평 진동과의 비교 (a) 항력계수(C_D) (b) 양력계수(C_L)

Fig 7. 에 표시한 Estimated 값은 공력계수 선형적 증첩효과가 발생할 경우 임의의 각도에 대한 예측을 식 각각 (3), (4)를 이용하여 구한 값 이다.

$$C_D(\theta)_{estimated} = \sqrt{[C_{D,0}\cos\theta]^2 + [C_{D,90}\sin\theta]^2}, \quad C_L(\theta)_{estimated} = \sqrt{[C_{L,0}\cos\theta]^2 + [C_{L,90}\sin\theta]^2} \quad (3)$$

Fig 7. (a) 에서 알 수 있듯이 진동이 없는 경우에 비하여 수평진동의 경우 C_D 값이 낮게 나타났으며 수직진동의 경우 높은 진동수 영역에서 더 커지는 것을 확인 하였다. 또한 C_D 값은 진동수가 낮은 범위

($f_s \leq 1$)에서 중첩현상을 나타냈다. Fig 7. (b)에서는 C_L 값은 수평진동의 경우 정지된 경우 보다 높게 나타나고 수직진동의 경우 높은 진동수 영역에서 크게 나타났다. 하지만 C_L 값은 $C_L(\theta)_{estimated}$ 크게 차이가 나는 것으로 보아 중첩효과는 나타나지 않는 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 EDISON_CFD를 활용하여 강제진동 하는 원형실린더 주위의 2차원 난류유동을 해석하였다. 해석결과와 신뢰성을 알아보기 위해 정지된 실린더 유동의 공력계수 및 스트롤 수를 선행연구와 비교했다. 또한 격자분해능에 따른 공력계수 및 스트롤 수를 확인하여 신뢰성을 검증하였다. 레이놀즈 수가 200일 경우 정지된 실린더의 유동을 관찰하여 C_L 값과 그에 해당하는 순간 유동장의 특징을 알아보았다. 와홀립 와류의 주기적인 박리에 따라서 압력 변화가 발생하고 C_L 값이 변동되는 것을 확인하였다. 수직 진동에서는 $A/D=0.2$ 일 경우 $f_s \leq 1.05$ 범위의 Lock-on 현상을 관찰하였다. 또한 Lock-on 현상이 유지되지 않을 경우 나타나는 특징적인 유동의 C_L 값과 그에 해당하는 순간 유동장의 관계성을 알아보았다. 정지된 경우와 마찬가지로 와류의 박리와 C_L 값의 관계성 확인하였다. 임의의 진동의 경우 수평, 수직 진동의 스트롤 수 변화를 바탕으로 예상되는 선형적 중첩 형태를 나타내는 것으로 확인되었다. 마찬가지로 C_D 값의 경우에도 예상되는 값과 진동수가 낮은 범위($f_s \leq 1$)에서 선형적 중첩이 발생함을 확인하였다. 하지만 C_L 값은 전 진동수 영역에 걸쳐 예상과는 크게 차이가 있어 선형적 중첩효과는 없는 것으로 확인되었다.

참고문헌

- (1) C. H. K. Williamson, R. Govardhan, 2004, "Vortex-Induced Vibrations", Annu. Rev. Fluid Mech. 2004. 36, pp. 413-455.
- (2) Anh-Hung Pham et al., 2010, "Laminar Flow Past an Oscillating Circular Cylinder in Cross Flow", J. Marine Science and Technology, Vol.18, pp.361-368.
- (3) O. Cetiner, D. Rockwell, 2001, "Streamwise Oscillations of a Cylinder in a Steady Current. Part 1. Locked-on States of Vortex Formation and Loading", J. Fluid Mech., Vol. 427, pp. 1-28.
- (4) Hyun Wook Park et al., 2012, "벽 근접 효과에 의한 물체의 항력 양력 변화", J. Comput. Fluids Eng. Vol. 17 pp. 68-74.
- (5) S.C.R. Dennis, Gau-Zu. Chang, 1970, "Numerical solutions for steady flow past a circular cylinder at Reynolds numbers up to 100", J. Fluid Mechanics Vol. 42 pp. 471-489.
- (6) D. Calhoun, 2002, "A Cartesian grid method for solving the two-dimensional stream function-vorticity equations in irregular region", J. Computational Physics Vol. 176 pp. 231-275.
- (7) D. Russell, Z.J. Wang, 2003, "A Cartesian grid method for modeling multiple moving objects in 2D incompressible viscous flow", J. Computational Physics Vol. 191 pp. 177-205.
- (8) Jung-Il Choi et al., 2007, "An immersed boundary method for complex incompressible flows", J. Computational Physics, pp. 757- 784.
- (9) J. Kim, D. Kim, H. Choi, 2001, "An immersed boundary finite volume method for simulations of flow in complex geometries", J. Computational Physics Vol. 171 pp. 132-150.
- (10) C. Liu, X. Sheng, C. H. Sung, 1998, "Preconditioned multigrid methods for unsteady incompressible flows", J. Computational Physics Vol. 139 pp. 35-57.
- (11) C. H. K. Williamson, 1989, "Oblique and Parallel Modes of Vortex Shedding in the Wake of Circular Cylinder at Low Reynolds Numbers", J. Fluid Mech 206, 579.
- (12) Panton, R. L., 2005, "Incompressible Flow", WILEY, Canada.
- (13) Seung-Jin Baek, Hyoung Jin Sung, 1998, "Numerical Simulation of the Flow Behind a Rotary Oscillating Circular Cylinder", Physics of Fluids, Vol. 10-4.