

직교 격자를 이용한 저 레이놀즈 수 유동장내 다중 배치된 실린더의 와유기 진동 해석

한 명륜,¹ 안 형택^{*2}

VORTEX-INDUCED VIBRATION SIMULATION OF MULTIPLE CIRCULAR CYLINDERS IN LOW REYNOLDS NUMBER FLOWS USING CARTESIAN MESHES

Myung Ryoan Han¹ and Hyung Teak Ahn^{*2}

In this paper, the vortex-induced vibration of circular cylinders is studied using the immersed boundary method on the Cartesian mesh. The Reynolds numbers considered is from 100 to 200. Using the configuration of tendemly arranged multiple circular cylinders, the vortex shedding behind of the cylinders and their flow-induced motion are investigated. The staggered MAC grid arrangement, which is the typical grid system for the incompressible flow on the Cartesian meshes, is utilized. Pressure correction method is applied for solving the divergence-free incompressible velocity field. The body motion is described by immersed boundary technique that has advantages for moving object on the fixed computational domain. It is also discussed for the computational noise in hydrodynamic forces when body motion is represented by the immersed boundary method. The Predictor/Corrector method is used for simulating the nonlinear response of the elastically mounted cylinder excited by vortex-shedding.

Key Words : 직교격자(Cartesian Mesh), 가상경계법(Immersed boundary method), 와유기 진동(Vortex-induced Vibration)

1. 서론

유체-구조 연성해석은 다양한 공학해석 분야중 비교적 최근에 들어 활발히 연구 되어 지고 있는 분야이다. 특히 전산 유동해석에서 다양한 기법을 이용해 이 문제에 접근하고 있으며, 보다 복잡하고 복합적인 문제에 대한 유동-구조 연성해석의 연구가 필요할 시점이라 할 수 있다. 본 논문에서는 직교격자를 이용하여 다중으로 배치된 구형 실린더주위에 비정상 유동현상을 모사하고 이를 구조동역학 해석과 연계함으로써, 유체와 구조물을 연성현상을 해석해 보았다.

변형 혹은 운동을 동반하는 물체주위의 전산 유동해석을 위해서는 고정된 물체주위 유동해석에 비하여 변형하는 유동장을 표현하기 위한 추가적인 고려를 하여한 한다. 물체 경

계에 밀착된(Body-Fitted) 격자를 사용하는 경우 물체의 움직임에 따라 매 시간단계 마다 변형하는 물체주위의 유동장을 효과적으로 표현하는 격자변형기법이 필수적이다. 이러한 방법은 물체의 변형이 전체 유동영역에 비하여 비교적 제한적이거나 단일 물체 주위유동인 경우 적합하나 물체의 운동이 커지거나 복잡해지는 경우 추가의 고려가 없이는 일반적인 적용이 어려운 단점이 있다.

최근에는 이러한 제한조건을 극복하는 직교격자 기반의 단순화된 물체 표현방법이 제안되고 있다. 직교 격자로 표현된 유체 도메인 안에 내재되어 있는 물체의 존재를 표현하는 가상경계(immersed boundary)기법을 이용하였다. 이 기법의 가장 중요한 장점은 물체가 움직일 때, 직교 격자의 변형이나 재배치가 필요하지 않다는 것이다. 가상경계법의 초기 논문으로 Peskin[12-13]은 Dirac Delta 함수를 이용하여 3차원 도메인 내 탄성체와 비압축성 유체와의 상호작용을 모사하였다. 이후 Direct Forcing 을 이용한 가상경계 처리 기법이 제안되었고 Fadlun[14] 과 Kim et al.[15]등에 의하여 확장되었다.

본 논문에서는 외부 유체의 속도를 이용해 물체 안의 가상

접수일: 2010년 12월 8일, 수정일: 2011년 3월 27일,

게재확정일: 2011년 3월 28일.

1 정회원, 현대중공업 기본설계실 기본계획부 선형개발팀

2 종신회원, 울산대학교 조선해양공학부

* Corresponding author, E-mail: htahn@ulsan.ac.kr

의 속도를 부여하는 2차 정확도의 Ghost-Cell IBM기법을 이용하여 물체의 움직임을 표현하였고, 비압축성 유체의 Navier-Stokes 방정식을 풀기 위해 Staggered MAC grid[7] 기반의 Pressure correction 방식을 사용하였다. 압력장 해석에 소요되는 계산시간을 줄이기 위해 BICG-STAB(Bi-Conjugated Gradient Stabilized) 방법을 이용하였다.

유체-구조의 연성해석을 하는 방법에는 여러 기법들이 연구되어 왔고, 연구 중에 있다. 특히 Ahn과 Kallinderis[4]의 연구에서는 hybrid mesh 상에서 ALE(arbitrary Lagrangian-Eulerian) 방법을 이용해 저 레이놀즈수 유동에서의 구조-연성 해석을 시도하였다. 또한 Predictor/Corrector 방법을 이용하여 유체-구조문제를 해결하였다. Mittal와 Kumar[11]의 연구에서는 원형 실린더의 구조-유체의 해석을 유한요소법을 이용하여 in-line 과 cross-flow 방향의 유동에서 어떠한 특징을 보이는지 보여 주었다. Newman과 Karniadakis[10]는 DNS기법을 이용하여 저 레이놀즈수 유동에서 긴 케이블 주위에서 나타나는 유동 패턴을 가시화하였다. 본 연구에서는 직교 격자계 내에서 2차원 원형 실린더의 와유기진동(Vortex-induced vibration)이 어떠한 특징을 가지는지 보여주고, 주위의 유동을 관찰하였다.

2. 수치해석방법

2.1 Governing Equation

점성을 가진 비압축성 유체의 Navier-Stokes 방정식을 풀기 위한 지배 방정식은 아래의 두 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} &\text{Continuity equation :} \\ &\nabla \cdot \vec{u} = 0 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} &\text{Momentum equations:} \\ &\frac{\partial}{\partial t} \vec{u} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \Delta \vec{u} \end{aligned} \tag{2}$$

위의 두식에서 \vec{u} 는 유체의 속도, p 는 압력을 나타내며, 레이놀즈수는 $Re = \rho v D / \mu$ 라 정의되며, 이 때 D 는 실린더의 지름을 나타낸다.

2.2 MAC Grid Method

MAC(Marker-and-Cell) Grid Method[7]는 유한 차분법의 하나로, 직교 격자에서 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 풀기 위한 가장 전형적인 방법이다. MAC Grid 시스템(fig. 1)은 각 직교 격자의 중앙에 압력을 배치시키고, 각 속도를 격자의 edge에 배치시켜 계산한다. MAC Grid 시스템에서 Navier-Stokes 방정식을 풀기 위해서는 식(3)을 이용해 임시속

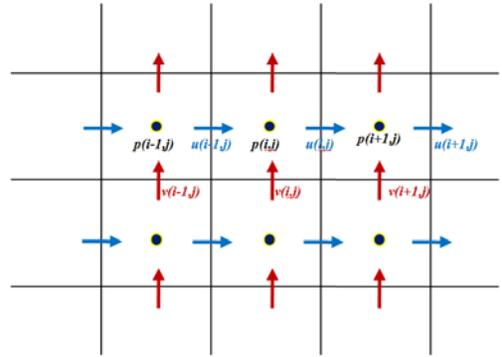


Fig. 1 Staggered MAC grid system

도(intermediate velocity) \vec{u}^* 를 구한 뒤, 압력 Poisson 방정식, 식(4)을 계산하고, 이 압력을 이용하여 다음 타임 스텝의 속도를 얻을 수 있다. 이 때, 압력 Poisson 방정식을 효율적으로 계산하는 것이 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 풀기 위한 전반적인 계산 시간을 줄이는 필수 요소라 하겠다. 따라서 본 연구에서는 안정된 압력을 계산하기 위해, 회귀 행렬의 해를 구하는 implicit method를 이용하였다. 이를 위해 실제 수치 계산시 PETSC 라이브러리에 내장된 BICG-STAB 알고리즘을 사용하였으며, Jacobi, SOR과 같은 explicit method와 비교해 보다 빠른 결과를 도출할 수 있었다. 타임 스텝의 크기는 CFL 조건과 Diffusion limit를 고려하여 설정하였다.

$$\frac{\vec{u}^* - \vec{u}^n}{\Delta t} + [\vec{u} \cdot \nabla \vec{u}]^n = \frac{1}{Re} [\nabla^2 \vec{u}]^n \tag{3}$$

$$\nabla^2 p = \frac{1}{\Delta t} \nabla \cdot \vec{u}^* \tag{4}$$

$$\frac{\vec{u}^{n+1} - \vec{u}^*}{\Delta t} + \nabla p = 0 \tag{5}$$

2.3 Treatment of Immersed Boundary

2차 정확도를 가지는 가상경계 처리 기법은 직교 격자에서 물체를 표현하기 위한 가장 편리한 방법 중 하나이다. 이 기법은 물체 주위의 유체 속도를 이용하여 물체 내부의 속도를 부여하는 방법으로 물체가 일정한 움직임을 갖더라도 격자의 재생성이나 변형 없이 운동을 표현 할 수 있다. 하지만 복잡한 형상 주위의 고속점성유동을 해석 하는 데는 가상경계법에는 한계가 있으며, 일정한 움직임이 있는 물체 주위의 힘을 계산 할 시, 수치오차가 발생된다. 본 연구에서는 일정한 범위 내에서 타임 스텝과 격자의 크기를 조절해 수치오차를 조

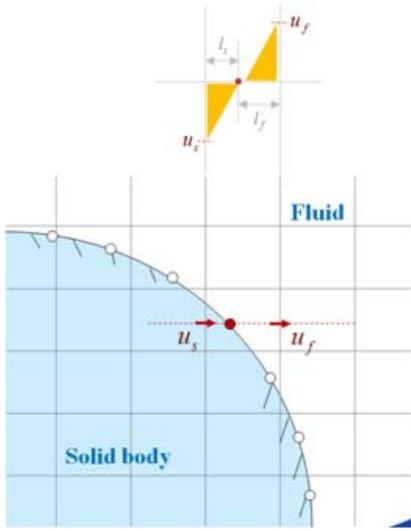


Fig. 2 Treatment of immersed boundary

질 할 수 있음을 확인하였으며, 보다 근본적인 Immersed Boundary 설정기법의 필요성도 확인하였다.

본 연구에서는 Tseng 과 Ferziger 가 제안한 Ghost-cell Immersed Boundary 기법[18] 을 적용하였다. 식(6)은 물체 주위의 속도와 물체 안 속도와와의 관계를 나타낸 식이다. Fig. 2 에서 보듯 물체 안의 속도를 설정하기 위해서는 물체 주변의 가장 가까운 유체 격자를 이용하여야 한다. 다시 말해, 물체의 안쪽에 완전히 속하는 body cell과 유체 영역에 완전히 속하는 fluid cell 사이의 ghost cell를 찾아, ghost cell의 양쪽 edge의 속도 u_f, u_s 를 찾아야 한다. 이 때, u_w 는 물체 표면에서의 속도를 의미하고, u_s 는 물체 안 가장 최외각 격자의 속도를 나타낸다. u_f 는 물체 표면에 가장 근접한 격자의 유체속도를 나타내며, 이 속도를 이용하여 물체 안 속도 u_s 를 설정 할 수 있다.

$$u_w = \left(\frac{w_f}{w_f + w_s} \right) u_f + \left(\frac{w_s}{w_f + w_s} \right) u_s \quad (6)$$

where $w_f = l_s/h, w_s = l_f/h,$

$h = l_s + l_f,$

l_s : length between u_s and $u_w,$

l_f : length between u_f and $u_w.$

2.4 Fluid-Structure Coupling

유체-구조의 연성 해석을 위해서는 식(7)과 같은 운동 방정식을 풀어야 한다. 식(8)은 수치해석을 식(7)을 무차원화 한

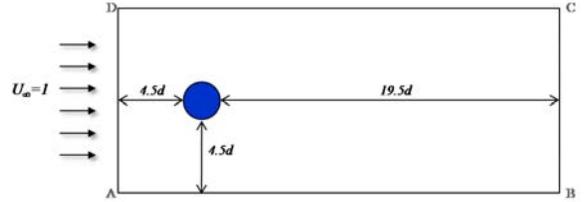


Fig. 3 Simulation domain for single cylinder

것이다. 식(7)의 질량(m)을 무차원화 할 경우, 식(2.14)의 시스템 질량(m)과 물체가 차지하는 체적 m_d 의 비로 나타낼 수 있으며, 이를 mass ratio라 한다. 시스템의 감쇠계수의 무차원화는 $f_n = \sqrt{k/m}$ 강제 진동모드에서의 감쇠비(ζ)를 이용하여 나타내고, 은 시스템의 고유 진동수를 표현한다.

식(2.14)의 강성비(k)를 무차원하기 위해 reduced velocity, U^* 를 사용하고, reduced velocity는 구조물의 고유 진동수(f_n)와 free stream velocity(U_∞)과의 관계로 표현된다. 수치해석에서는 reduced velocity(U^*)를 변경하기 위해 free stream velocity(U_∞)를 일정하게 유지하고, 구조물의 고유진동수(f_n)를 변경하여 적용한다. 즉 수치해석 모델에서 reduced velocity가 변한다는 의미는 고유진동수를 가진 각기 다른 물체의 운동을 해석한다는 의미이며, 이는 일정한 레이놀즈 수에서 구조물의 고유 진동수와 와동 생성 진동수의 관계에 따른 유동의 변화와 물체의 운동을 조사하기 위함이다. 본 연구에서는 무차원화된 운동 방정식을 풀기 위해, Ahn과 Kallinderis[4]의 연구에서 제시한 Predictor/Corrector방법을 사용하였다.

$$m \ddot{Y} + c \dot{Y} + k Y = F_y \quad (7)$$

$$\ddot{y} + \frac{4\pi\zeta}{U^*} \dot{y} + \left(\frac{2\pi}{U^*} \right)^2 y = \frac{C_L}{2m} \quad (8)$$

$$\text{where reduced velocity: } U^* = \frac{U_\infty}{f_n D}$$

$$\text{mass ratio: } m^* = \frac{m}{m_d} \left(m_d = \frac{\pi}{4} \rho D^2 \right)$$

$$\text{structure damping ratio: } \zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}$$

3. 결과

3.1 Single cylinder

3.1.1 Simulation domain

다중으로 배치된 구형실린더의 수치 해석에 앞서, 하나의 실린더에서 운동으로 인한 유동의 변화를 관찰하고, 이로 인

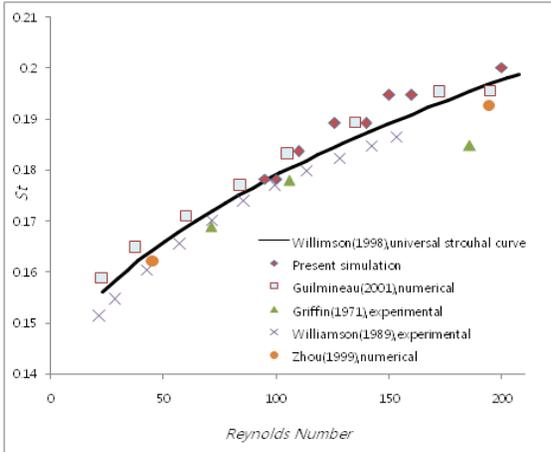


Fig. 4 Strouhal number versus Reynolds number at the stationary cylinder

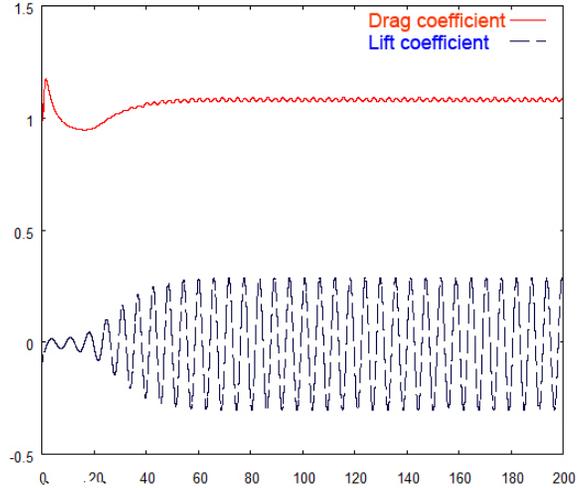


Fig 6 Drag and lift coefficient at Re=100

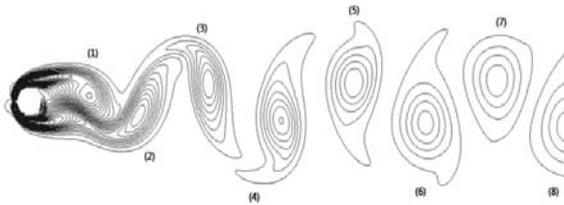


Fig. 5 Vorticity contour at Re=100

한 유체력의 변화를 조사하기위해 Fig. 3과 같은 해석 도메인을 구성하였다. 이 때, Mass ratio는 '2', Damping ratio는 '0'으로 설정하였고, Reduced velocity값을 변화시키며 수치해석을 진행하였다.

3.1.2 Stationary cylinder

(1) Vortex Shedding

유속이 일정한 곳에서의 원형 실린더 주위의 유동은 레이놀즈 수에 의해 그 패턴이 변화한다. 레이놀즈 수에 따른 유동의 변화는 레이놀즈 수가 5미만일 때는 실린더 표면을 따르는 유동이 발생하고, 5이상 45미만일 때에는 유동의 Separation이 발생함과 동시에 와류가 나타난다. 특히, 레이놀즈 수가 45이상 180이하일 때는 엇갈린 와동이 주기적으로 발생하는 유동을 보인다. 이때 발생하는 Shedding 패턴은 실린더에 작용하는 Lift force가 Fig. 6과 같이 변화됨에 따라 발생되며, 특정한 주파수를 가지고 있다. 이를 vortex shedding frequency(f_s)라 하며, 이 주파수를 이용하여 스트로홀 수

$S_t (= f_s D / U)$ 를 구할 수 있다. 스트로홀 수(Strouhal number)는 불안정한 유체에서 물체의 진동주기를 알 수 있는 무차원 진동수로, Fig. 4는 레이놀즈 수가 90이상 200이하 일 때, 스트로홀 수를 이전 연구[5]와 비교한 것이다. 본 연구와 같은 구조-유체의 연성 해석시 스트로홀 수는 2.4절에서 소개한 reduced velocity와 밀접한 관계가 있다. 만약 free stream velocity가 일정하고 구조물의 고유 진동수와 vortex shedding frequency가 같다면, 스트로홀 수의 역수($1/S_t$)는 reduced velocity(U^*)와 일치하게 된다.

Fig. 5은 레이놀즈 수가 100일 때, Vorticity Contour을 그린 것으로 수치해석 영역에서 총8개의 vortex가 나타나고, 실린더를 둘러싼 3개의 와동과 이 와동 이후 vorticity cancellation 현상이 나타남을 알 수 있다. vorticity cancellation 현상이란 Fig. 5의 (4), (5), (6)과 같이 와동의 끝부분이 감소해 떨어져나가는 것을 의미한다.

(2) Drag and Lift Coefficient histories

Fig. 6은 원형 실린더에 작용하는 Drag와 Lift coefficient의 변화를 나타낸 것으로, Lift coefficient의 경우 일정한 주파수를 가지고 0값을 중심으로 변동한다. Table 1은 레이놀즈 수

Table 1 Comparison of drag coefficient at Re=00

Present	1.357	Ding et al.(2007)	1.356
Wiesenberger(1921)	1.326	Menegini et al.(2007)	1.357
Tritton(1959)	1.320	Atal Bihari(2010)	1.352

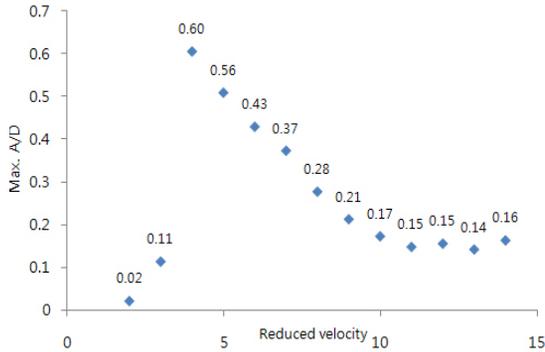


Fig 7. Max. amplitude versus reduced velocity

가 100일 때, Drag coefficient의 값을 이전 연구와 비교한 것으로 Menegini et al(2007)의 연구와 일치되는 결과를 얻을 수 있었다.

3.1.3 Elastically mounted cylinder

본 연구에서는 레이놀즈 수가 100과 150일 때, mass ratio를 2로 설정하고, reduced velocity를 변화 시키며, “Lock-in” 현상을 살펴보았다. Lock-in 현상이란 유동의 vortex shedding frequency가 특정 reduced velocity 영역에서 구조물의 고유진동수(natural frequency)부근에서 고착되는 현상을 의미한다. 이때, vortex shedding frequency와 구조물의 response frequency가 동일하고 위상이 같아지면, 물체의 운동 진폭은 최대가 된다.

Fig. 7은 레이놀즈 수가 150일 때, reduced velocity에 따른 최대 운동 진폭을 나타낸 것으로, Reduced velocity가 4.0일 때, f_n 과 f_s 가 같아져 최대 모션 변위를 보이고, Table 2에서 보듯 Reduced velocity가 5일 때, Ahn과 Kallinderis[4]의 결과와 비교 해 일치되는 결과를 얻을 수 있었다. 또한 “Lock-in” 현상에서의 유동을 설명할 수 있는 특징적 현상이 Fig. 8의 Reduced velocity가 4.0에서 관찰 할 수 있었다. 이때 유동은 vortex pair shedding cycle을 그렸고, 이는 Mittal과 Kumar[11]의 수치 해석 연구에서 cross flow의 “Lock in” 시 vortices contour와 동일한 경향을 보였다. 이는 vortex shedding frequency와 구조물의 고유 진동수가 동일하고, 위상 또한 동일해서 규칙적으로 후류가 발생되어 생기는 현상으로 보인다.

Table 2 Comparison of maximum amplitude (reduced velocity is 5.0)

	Re	Mass ratio	y/A
Present	100	2.0	0.550
Present	150	2.0	0.560
Ahn	100	2.0	0.530
Ahn	150	2.0	0.540

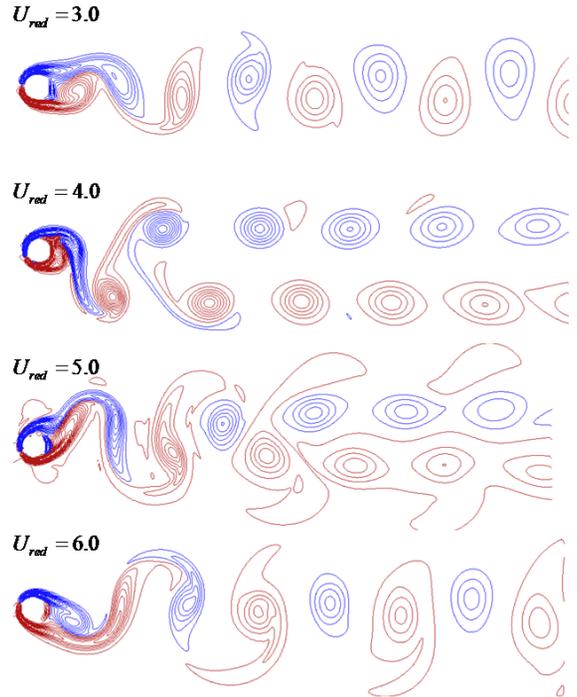


Fig 8. Vorticity contour at Re=100

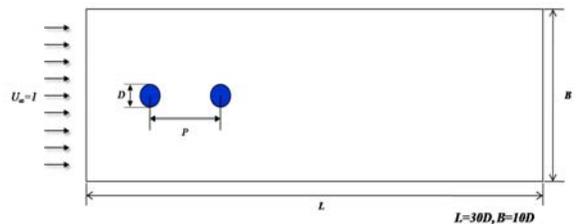


Fig 9. Simulation domain for two cylinder in tandem arrangement

3.2 Two cylinders in Tandem Arrangement

3.2.1 Simulation domain

Fig. 9에서 보이는 바와 같이 위의 해석 도메인은 두 개의 동일한 실린더가 가로 방향으로 일직선으로 배치된 Tandem 정렬을 보여 준다. 두 개의 실린더 사이의 거리를 나타내는 파라미터 P는 실린더의 지름D의 배수로 표현하였으며, 이번 연구에서는 1.5D, 2.0D, 3.0D, 4.0D, 5.0D에 대한 수치 해석을 실행하였다. 하나의 실린더가 있는 경우와 동일하게 Mass ratio는 2.0, damping ratio는 0으로 각각 설정하였으며, Reduced velocity를 변화시키며 유동의 변화와 유체력을 알아보았다. 총80000개의 직교격자 시스템을 사용하였고, PETSC 라이브러리의 BICG-STAB 알고리즘을 이용하였다.

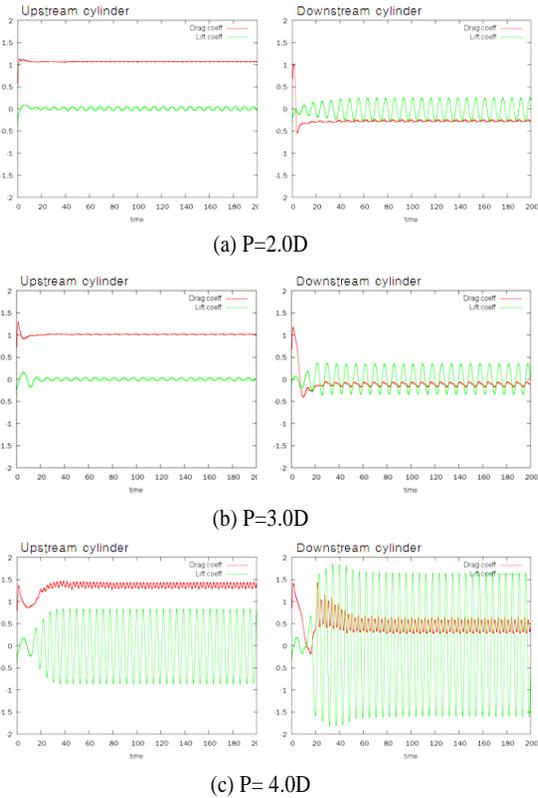


Fig 10. Drag(red line) and lift(green line) coefficient histories at Re=200. left-upstream, right-downstream cylinders

3.2.2 Stationary cylinder

Fig. 10은 고정된 두 개의 실린더의 Drag coefficient와 Lift coefficient의 변화는 두 실린더의 간격에 따라 다른 양상을 보여 준다. Table 3은 간격이 3.0D 이하 일 때, 하방 실린더가 상방 실린더와 반대 방향의 Drag를 받고 있음을 보여주고, 이는 Meneghini[16]와 Zdravkovich[17] 연구와 일치되는 결과이다. 간격이 1.5D와 2.0D일 때, 두 실린더의 Lift Coefficient의 진폭은 단일 실린더가 배치되었을 경우의 Lift Coefficient 진폭보다 작지만, 간격이 3.0D일 때 하방 실린더에서는 단일 실린더가 배치되었을 경우와 유사한 진폭을 얻을 수 있었다. 또한 간격이 4.0D일 때, 두 실린더 모두에서 단일 배치의 경우보다 높은 Lift coefficient 진폭이 관찰 되었다. 간격이 다른 경우라도, 하방 실린더에서 상방 실린더보다 높은 lift coefficient의 진폭을 보였고, 간격이 증가할수록 하방 실린더의 Drag가 증가하는 추세를 보였다. 이것은 두 실린더에서 발생하는 후류의 위치와 Shear Layer 범위의 영향으로 보이며, Fig. 11에서 보듯 간격이 1.5D, 2.0D일 경우에는 마치 한 개의

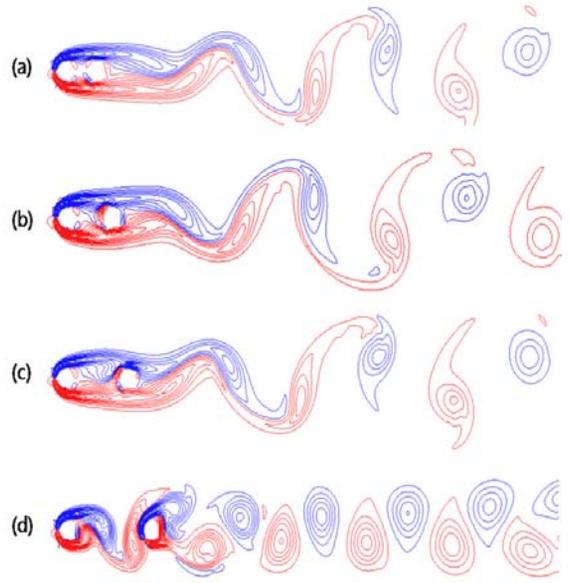


Fig. 11 Vorticity contour at Re=200(a) P=1.5D (b) 2.0D (c) 3.0D (d) 4.0D

물체에서 생기는 후류와 같은 패턴이 발생하고, 간격이 4.0D 일 경우에는 실린더 주위에서 후류가 각각 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

3.2.3 Elastically mounted cylinders

직교격자에서 Immersed boundary를 이용하여 물체의 일정한 움직임을 나타낼 경우, 격자의 변형이나 재배치가 필요없어 간단한 형상의 물체의 움직임을 표현하기에 적합하다고 할 수 있다. Fig. 12는 두 개의 실린더가 배치되어 구조-연성 해석시, 격자의 재배치나 변형이 일어나지 않음을 알 수 있다.

본 수치해석에서는 레이놀즈 수가 200일 때, 두 실린더 모두 mass ratio를 2로 동일하게 설정하고 Reduced velocity를 2에서 16까지 변화시키며, 운동의 변화와 유체력에 대해 조사

Table 3 Comparison of drag coefficient at Re=200 (Cd1: Upstream, Cd2: Downstream)

P (Gap)	Present		Meneghini(2001)	
	Cd1	Cd2	Cd1	Cd2
1.5D	1.07	-0.29	1.06	-0.18
2.0D	1.06	-0.27	1.03	-0.17
3.0D	1.01	-0.11	1.00	-0.08
4.0D	1.36	0.43	1.18	0.38
5.0D	1.37	0.34	-	-

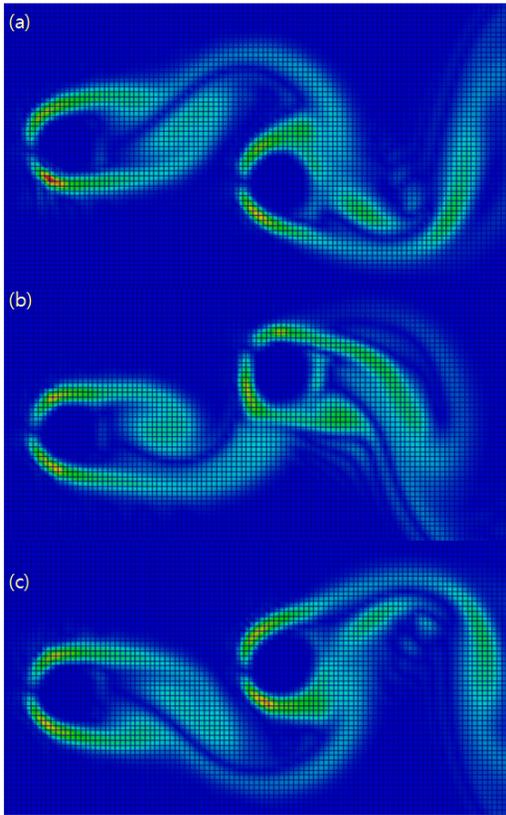
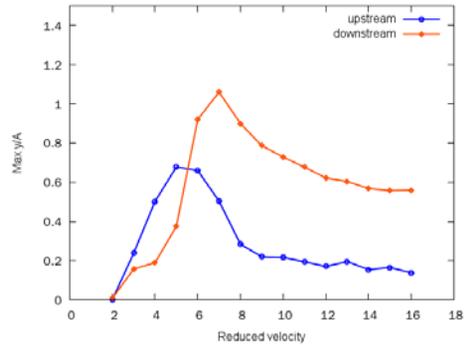


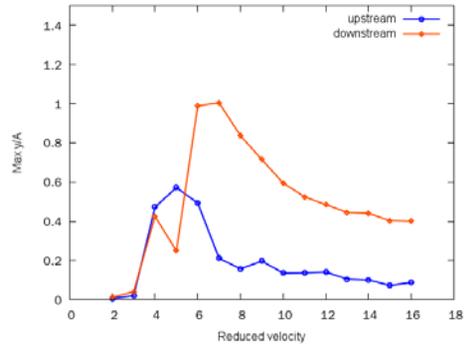
Fig. 12 Immersed boundary on cartesian mesh

하였다. Fig. 13은 각 간격별 실린더의 최대 운동 진폭을 나타낸 것으로, 상방 실린더는 Reduced velocity가 5일 때, 하방 실린더는 Reduced velocity가 7~8일 때, 간격에 상관없이 운동의 최대 진폭을 보였다. 그리고 간격에 상관없이 하방 실린더의 최대 운동 진폭이 상방 실린더보다 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 간격이 3.0D 이상의 경우 상방 실린더가 최대 운동 진폭이 되는 시점에 하방 실린더의 운동 진폭은 갑자기 떨어지는 경향을 보인다. 이런 경향은 $U^* = 5$ 일 때, 상방 실린더의 vortex shedding frequency를 분석해 봄으로써 확인할 수 있다. $U^* = 5$ 일 때, 상방 실린더의 vortex shedding frequency가 다중의 피크치를 가지고 있어 불규칙한 와동이 발생되고, 하방 실린더의 운동 진폭이 감소되는 현상이 나타나게 된 것으로 보인다.

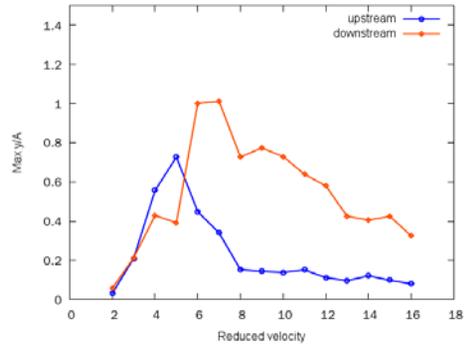
Fig. 14는 U^* 의 변화에 따라 물체의 oscillating frequency를 나타낸 것이다. U^* 가 5에서 7까지 물체의 oscillating frequency가 natural frequency에 근사해 가는 현상을 보이며, 이를 "Lock-in"현상이라 한다.



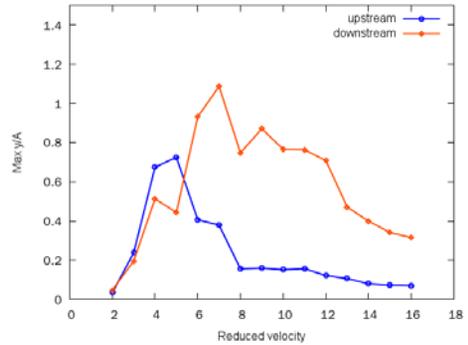
(a) P=2.0D



(b) P=3.0D



(c) P=4.0D



(d) P=5.0D

Fig. 13 Max. amplitude versus reduced velocity

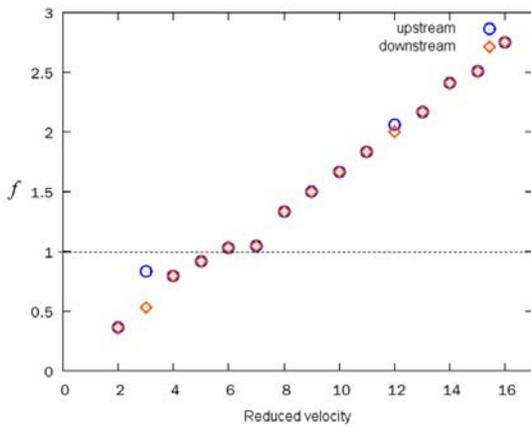
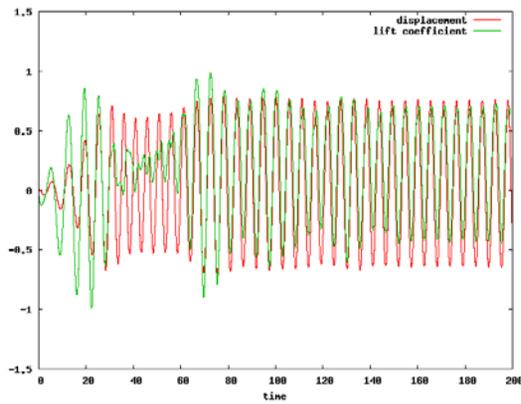
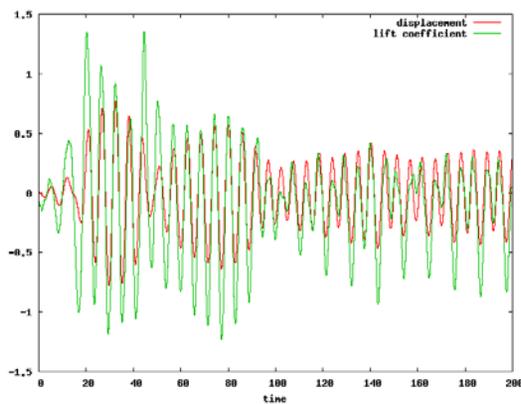


Fig 14. Structure natural frequency versus reduced velocity at P=4.0D

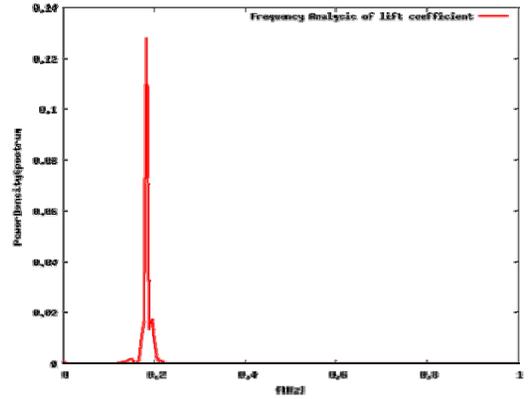


(a) Upstream

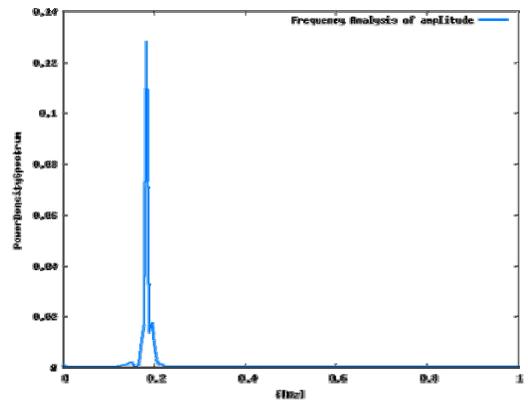


(b) Downstream

Fig 15. Lift coefficient(green line) and amplitude(red line) histories when reduced velocity is 5 at P=4.0D



(a) Power Density Spectrum of Lift coefficient



(b) Power Density Spectrum of Amplitude

Fig 16. Comparison at the upstream cylinder

Upstream실린더의 “Lock-In”시 최대 운동 진폭은 $U^* = 5$ 일 때 발생하는 것을 Fig. 15를 통해 확인할 수 있다. Fig. 15의 (a)는 최대 운동 진폭이 발생할 때 Lift coefficient와 운동의 진폭을 그린 것으로, 이를 주파수 도메인에서 분석해 보면 Fig. 16와 같이 vortex shedding frequency와 structural response frequency 가 동일한 주파수를 가진다는 것을 알 수 있다.

하방 실린더의 운동은 두 실린더의 간격에 따라 각기 다른 운동 패턴을 보이고 있다. Fig. 17은 하방 실린더의 운동 진폭을 나타낸 것으로, 간격이 3D일 경우 reduced velocity가 8이상 부터 특정한 진폭 값에 구속되어져 reduced velocity가 증가 할 수록 그 특정 값이 감소되는 경향을 보이지만, (b)와(c)의 경우에는 불규칙한 패턴 보였다. 이는 Fig. 18의 후류 패턴에서 그 이유를 찾아 볼 수 있다. Fig. 18의 (a)에서는 상방에서 발생한 후류가 규칙적인 패턴으로 하방 실린더에 영향을 미치고 하방 실린더에서 발생하는 후류도 규칙성을 가지고 있음



Fig. 17. Amplitude histories at downstream cylinder

을 확인 할 수 있다. 하지만 (b)에서는 하방 실린더의 후류가 불규칙적으로 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 불규칙한 후류는 하방 실린더에 영향을 미쳐 불규칙한 운동을 하게 된다.

5. 결론

이번 논문에서는 저 레이놀즈수에서 직교 격자를 이용하여 유체-다중 물체간의 상호작용에 대하여 고찰해 보았다. 직교 격자의 격자 생성의 유리함과 Immersed boundary 기법을 적용하여 계산 시간을 줄이고, 이전 연구와 일치하는 해석 결과를 도출 할 수 있었다. 이와 더불어 원주의 고유 주파수와 vortex

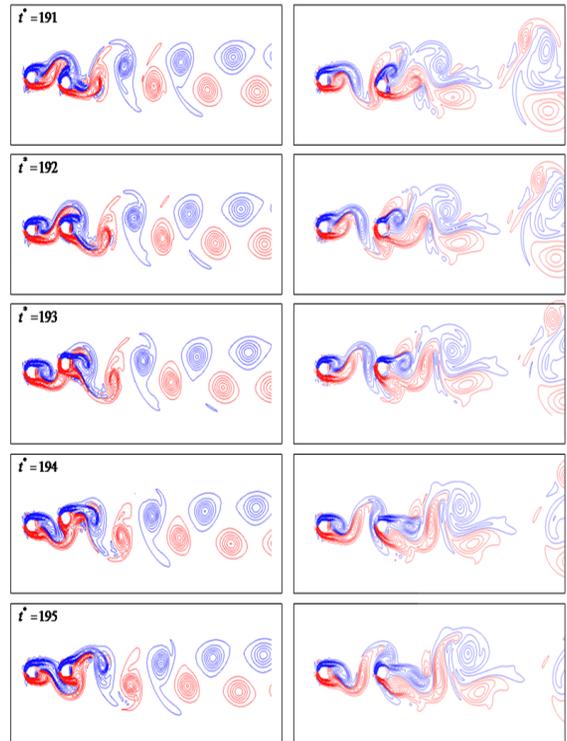


Fig. 18 Vorticity contour when reduced velocity is 10.0

shedding 주파수와의 관계를 이용하여, “Lock in” 현상을 확인 하고, 그 유동을 살펴보았다. 특히 하방에 위치한 물체의 경우 전방 물체로부터 발달된 와류동에 민감하게 반응하는 것으로 관찰할 수 있었고 이는 유동현상 뿐만 아니라, 물체의 고유 진동수와도 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (#2010-0004606).

참고문헌

[1] 2005, Ahn, H.T. and Kallinderis, Y., "CFD Investigation of the Effect of Current Turbulence on the Hydrodynamic Forces on a Cylinder," *Proceedings of the 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*,

- Halkidiki, Greece.
- [2] 2008, Ahn, H.T. and Shashkov, M., "Adaptive Moment-of-Fluid Method," *Journal of Computational Physics*, Vol.228, pp.2792-2821.
- [3] 2009, Ahn, H.T., Branets, L. and Carey, G.F., "Moving boundary simulations with dynamic mesh smoothing," *Journal of Numerical Methods in Fluids*, Vol.64, pp.887-907.
- [4] 2006, Ahn, H.T. and Kallinderis, Y., "Strongly coupled flow/structure interactions with a geometrically conservative ALE scheme on general hybrid meshes," *Journal of Computational Physics*, Vol.219, pp.671-696.
- [5] 1988, Williamson, C.H.K. and Roshko, A., "Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder," *Journal of Fluids and Structures*, Vol.2, pp.355-381.
- [6] 2008, Prasanth, T.K. and Mittal, S., "Vortex-induced vibrations of circular cylinder at low Reynolds numbers," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.594, pp.463-491.
- [7] 1997, Michael Griebel, Thomas Dornseifer, Tilman Beunhoeffler, "Numerical Simulation in Fluid Dynamics," *Society for Industrial and Applied Mathematic*, Philadelphia.
- [8] 2010, Harichandan, A.B. and Roy, A., "Numerical investigation of low Reynolds number flow past two and three circular cylinders using unstructured grid CFR scheme," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.31, pp.154-171.
- [9] 2007, Ding, H., Shu, C., Yeo, K.S. and Xu, D., "Numerical simulation of flows around two circular cylinders by mesh-free least square-based finite difference method," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.53, pp.305-332.
- [10] 1997, Newman, D.J. and Karniadakis, G.E., "A direct numerical simulation study of flow past a freely vibrating cable," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.344, pp.95-136.
- [11] 1999, Mittal, S. and Kumar, V., "Finite element study of vortex-induced cross-flow and in-line oscillations of a circular cylinder at low Reynolds number," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.31, pp.1087-1120.
- [12] 2000, Lai, M.C. and Peskin, C.S., "An immersed boundary method with formal second-order accuracy and reduced numerical viscosity," *Journal of computational Physics*, Vol.160, pp.705-719.
- [13] 2002, Peskin, C.S., "The immersed boundary method", *Cambridge University Press*.
- [14] 2000, Fadlun, E.A., Verzicco, R., Orlandi, P. and Mohd-Yousof, J., "Combined Immersed-Boundary Finite-Difference Methods for Three-Dimensional Complex Flow Simulations," *Journal of Computational Physics*, Vol. 161, pp.35-60.
- [15] 2001, Kim, J., Kim, D. and Choi, H., "An Immersed-Boundary Finite-Volume Method for Simulations of Flow in Complex Geometries," *Journal of Computational Physics*, Vol.18, pp.1026-1035.
- [16] 2001, Meneghini, J.R., Saltara, F., Siqueira, C.L.R. and Ferrari, J.A. Jr., "Numerical Simulation of Flow interference between two circular cylinders in tandem and side-by-side arrangements," *Journal of Fluids and Structures*, Vol.15, pp.327-350.
- [17] 1987, Zdravkovovich, M.M., "The effect of interference between circular in cross flow," *Journal of Fluids and Structures*, Vol.1, pp.327-350.
- [18] 2003, Tseng Y.H. and Ferziger, J. H. "A ghost-cell immersed boundary method for flow in complex geometry," *Journal of Computational Physics*, Vol.192, pp.593-623.