

Lock-in 영역에서 원형실린더의 와류유기진동 전산해석

이 승 수^{1*} · 황 규 관² · 손 현 아¹ · 정 동 호³

¹충북대학교 토목공학부, ²충북대학교 토목시스템공학과, ³한국 선박해양플랜트연구소

Numerical Analysis of Vortex Induced Vibration of Circular Cylinder in Lock-in Regime

Sungsu Lee^{1*}, Kyu-Kwan Hwang², Hyun-A Son¹ and Dong-Ho Jung³

¹School of Civil Engineering, Chungbuk National Univ., Cheongju, 28644, Korea

²Department of Civil System Engineering, Chungbuk National Univ., Cheongju, 28644, Korea

³Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon, 34103, Korea

Abstract

The slender structures such as high rise building or marine riser are highly susceptible to dynamic force exerted by fluid-structure interactions among which vortex-induced vibration(VIV) is the main cause of dynamic instability of the structural system. If VIV occurs in natural frequency regime of the structure, fatigue failure likely happens by so-called lock-in phenomenon. This study presents the numerical analysis of dynamic behavior of both structure and fluid in the lock-in regimes and investigates the subjacent phenomena to hold the resonance frequency in spite of the change of flow condition. Unsteady and laminar flow was considered for a two-dimensional circular cylinder which was assumed to move freely in 1 degree of freedom in the direction orthogonal to the uniform inflow. Fluid-structure interaction was implemented by solving both unsteady flow and dynamic motion of the structure sequentially in each time step where the fluid domain was remeshed considering the movement of the body. The results show reasonable agreements with previous studies and reveal characteristic features of the lock-in phenomena. Not only the lift force but also drag force are drastically increasing during the lock-in regime, the vertical displacement of the cylinder reaches up to 20% of the diameter of the cylinder. The correlation analysis between lift and vertical displacement clearly show the dramatic change of the phase difference from in-phase to out-of-phase when the cylinder experiences lock-in. From the results, it can be postulated that the change of phase difference and flow condition is responsible for the resonating behavior of the structure during lock-in.

Keywords : slender structure, riser, vortex-induced vibration(VIV), lock-in phenomenon

1. 서 론

해양구조물의 라이저, 교량의 주탑 또는 고층건물과 같은 세장비가 큰 구조물은 바람이나 해류와 같은 복잡한 환경 하중에 노출되어 있어서 쉽게 거동하여 진동이 발생하는 특징이 있다. 특히, 가볍고 유연한 특성을 지니고 있으며 원형 실린더 구조인 해양구조물의 라이저는 동적 하중에 의해 후류에 와흘림(vortex shedding)이 발생하여 구조물에 주기적으로 진동을 유발시키는 와류유기진동(vortex-induced vibration,

VIV)이 발생할 가능성이 높다. 이와 같이 실린더 형상의 구조물 주위를 흐르는 유체로 인한 하중으로 구조물에 변형이 발생하고 이로 인해 나타나는 부가적인 유체력이 물체에 작용하여 구조물의 운동에 다시 영향을 미치는 상호작용이 일어난다. 따라서 와류유기진동은 구조물의 변형과 불안정한 운동을 야기할 뿐만 아니라 이 현상이 구조물의 고유 진동수 영역에서 발생하는 경우 운동진폭이 증폭되는 공진현상이 발생하며, 특히 인접 유동조건에서도 공진이 지속되는 Lock-in 현상으로 구조물의 피로파괴를 일으킬 우려가 있다.

* Corresponding author:

Tel: +82-43-261-3344; E-mail: joshua@cbnu.ac.kr

Received August 9 2015; Revised October 8 2015;

Accepted October 9 2015

©2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이와 같은 원형실린더의 단면 주위에서 발생하는 현상에 대한 연구는 활발히 이루어져 왔다. 국내에서 Lee 등(2013)은 와류유기진동을 대상으로 가상유한요소법을 이용하여 유체-구조 연성해석을 수행하였으며 구조물에 적용 가능성을 제시하였으며 Lee 등(1994)는 세장비가 큰 장대구조물의 내풍 안정성 평가에 대하여 유체-구조 연성해석의 적용에 대하여 기술하였고 낮은 레이놀즈 수에서의 유동은 비교적 정확한 예측이 가능하지만 높은 레이놀즈 수에서는 예측이 어려운 한계점을 서술하였다. 국외의 경우 Blevins(1974)는 유체흐름 속에서 해양구조물에 작용하는 와류유기진동과 교량 및 고층 건물에 작용하는 내풍 진동에 대해서 연구한 바가 있고 Sarpkaya(1979)는 난류영역에서 와류유기진동이 발생하는 경우 와홀림의 형상을 분석하여 실린더의 수직 변위에 따라서 발생하는 위상에 대하여 분석하였다. Blackburn 등(1996)은 2차원 원형실린더에서 발생하는 와류유기진동의 Lock-in 현상과 특징에 대하여 연구하였으나 Lock-in 현상의 발생 원인과 진폭이 증가하는 원인은 언급하지 않았으며 Dettmer 등(2006)는 FEM(finite elements method)를 기반으로 여러 형상에 대하여 와류유기진동에 대하여 연구를 수행하였으나, 원형실린더의 경우 Lock-in 영역을 구현하여 진폭이 증가한 것을 확인하는데 그쳤다. Placzek 등(2009)는 저 레이놀즈수 영역에서 강제진동 및 자유진동해석을 수행하였으며 푸리에(fourier)변환을 통한 파워스펙트럼밀도(power spectral density) 분석에 의해 유효강성도(effective rigidity)에 따른 공기력계수 및 유효강성도와 유속과의 관계를 분석하였다. Guilmineau 등(2004)는 난류영역에서 CPI(consistent physical interpolation)방법을 사용하여 주 흐름에 수직 방향으로 발생하는 원형 실린더의 와류유기진동 현상을 연구하여 양력과 실린더의 변위 사이의 위상각을 분석하였고 레이놀즈 수에 따라서 와류가 발생하는 패턴을 분석하였다. 그러나 다수의 연구에서 구조물의 고유진동수와 와홀림 주파수가 동일하여 공진이 발생하는 지점 이외에 인접 유동조건에서도 공진이 지속되는 Lock-in의 원인이 명확히 기술된 바 없었다. 또한 Lock-in 현상에 의해 운동의 진폭이 증가되는 특징에 대해서 연구된 바 있으나 원인에 대한 설명은 명확하게 나타나지 않았다.

따라서 본 논문에서는 Lock-in 현상이 발생하는 원인과 Lock-in 현상의 대표적인 특징인 진폭이 증가하는 원인을 파악하고자 Lock-in 영역과 그 전, 후의 주파수를 검토하여 양력과 변위의 관계를 분석하고자 하였다. 이를 위하여 유한체적법(finite volume method) 기반의 전산유체해석 기법을 이용하여 지배방정식인 운동방정식과 연속방정식을 비정상영역에서 수치해석을 수행하였다. 또한 본 연구에서는

와류에 의해 유기되는 진동을 반영하기 위하여 수치해석의 매 시간단계에서 유체력에 의해 발생하는 물체의 변위를 반영하는 유체-구조 연성(fluid-structure interaction) 해석을 수행하였다. 이와 같은 유체-구조 연성해석을 위해서는 매 시간 단계마다 이동한 물체를 고려하여 유체영역의 격자를 재생성하는 방법이 요구되는데, 이러한 문제를 해결하기 위한 전산 해석 방법에는 Smoothing과 Layering 그리고 Remeshing 기법이 있으며 본 연구에서는 Remeshing 기법을 이용하였다. 본 연구에서는 이상의 방법을 이용하여 층류 영역에서 주 흐름 방향에 대해 수직방향으로 진동하는 1 자유도의 원형 실린더에 발생하는 공진과 Lock-in 현상을 구현하여 원인과 특성을 분석하였다.

2. 지배방정식과 수치해석 기법

2.1 유체-구조 연성해석 기법

구조-유체 연성해석을 이용하여 주 흐름 방향에 대해 수직 방향으로 물체의 이동 변위가 발생하는 와류유기진동 해석을 수행하기 위해서 매 시간 간격마다 움직이는 물체에 따라서 격자가 효과적으로 재구성되어야 한다. 이에 본 연구에서는 Fig. 1에 보는 바와 같이 매 시간 단계에서 전산유체해석을 통해서 물체에 작용하는 비정상 유체력을 계산하고, 이에 의해 발생하는 물체의 동적 변위를 강제 운동방정식을 수치 해석하여 산정하는 과정을 구성하였다. 이동된 물체의 위치를 고려하여 물체 주위의 유동장 격자를 재생성하고 이에 대한 전산 유체해석을 수행하는 과정을 반복하였다.

격자의 재생성을 위한 방법으로 Smoothing, Layering, Remeshing 등이 있는데, Smoothing 기법은 스프링 상사를 기반으로 인접한 격자점의 위치 변화를 결정하는 방법이다. 주로 변위가 작은 경우에 사용되며, 격자점의 수와 격자 간의 연결에는 변화가 없으며 주로 삼각격자가 사용된다. 두 번째로 Layering 기법은 변위가 발생하는 영역의 격자가 표면에 인접한 격자의 높이에 따라서 새로 생성하거나 제거되는 방법이다. 주로 선형적인 움직임을 갖는 대상에 사용되며, 사각 격자를 사용한다. 세 번째는 Remeshing 기법으로 격자의 비틀림 정도와 격자 크기에 따라서 격자를 재생성하는 방법이다. 비틀림 정도와 격자 크기가 설정한 최솟값 이하인 경우 격자는 삭제되며, 최댓값 이상인 경우 격자를 나누어서 재생성한다. 격자는 삼각 및 사각 격자가 사용되고 변위가 비교적 큰 대상에 적용할 수 있으며, 주로 Smoothing 기법과 같이 사용하여 격자의 품질을 향상시키며 시간 간격이 큰 경우에도 사용할 수 있다. 본 연구에서는 이상의 기법 중 Remeshing

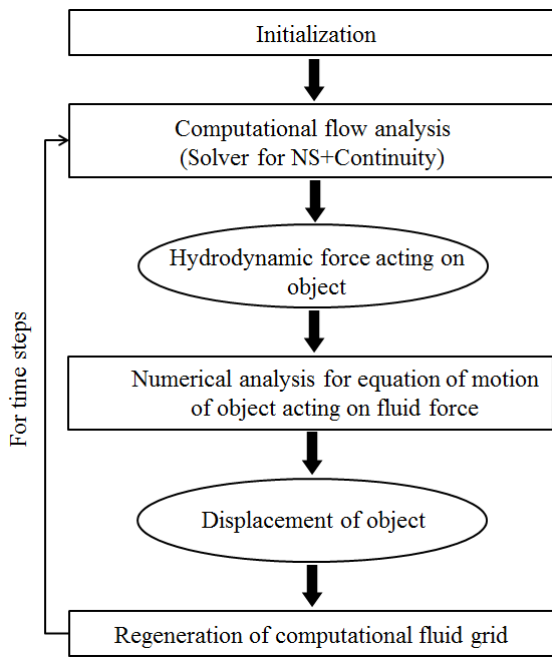


Fig. 1 Computational strategy

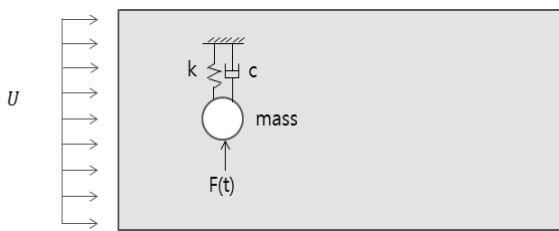


Fig. 2 Given flow condition

기법을 이용하였다.

본 연구의 해석대상은 Fig. 2와 같이 균일유입유속 U 의 주 흐름이 있는 2차원 공간에 단위 길이당 질량 m 인 원형 실린더가 동유체력 $F(t)$ 에 의해 주 흐름에 수직 방향으로 자유 진동하는 1 자유도의 구조시스템이다. 이때 대상 구조 시스템의 강성계수와 감쇠계수는 각각 k 와 c 로 정의한다.

2.2 전산유동해석 지배방정식

전산유동해석을 위한 지배방정식은 2차원 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식으로 식 (1)과 (2)에 각각 나타내었다.

$$\rho \left(\frac{\partial u_j}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0 \quad (2)$$

여기서, u_j 는 속도이며 2차원 유동이기에 때문에 $j=1, 2$ 로써

x, y 방향을 나타내고 ρ 는 공기의 밀도, P 는 압력, μ 는 동점성계수이다.

이와 같이 유체의 유동해석에 사용되는 Navier-Stokes 방정식은 비선형 편미분 방정식으로서 아래와 같은 방법을 사용하여 이산화한 후 대수방정식으로 변화하여 수치해석을 수행한다. 비선형 편미분 방정식을 이산화하는 대표적인 방법에는 유한체적법(finite volume method), 유한차분법(finite difference method), 유한요소법(finite element method) 등이 있다. 먼저 유한체적법은 해석 영역을 유한개의 유한체적(finite volume)으로 세분화하여 각 유한체적을 적분한 후 인접한 유한체적과의 관계를 계산하여 근삿값을 구하는 방법이다. 두 번째로 유한차분법은 유한개의 격자에서 서로 이웃한 격자의 위치변화에 대하여 미분방정식의 미분을 차분식을 이용하여 근삿값을 구한다. 세 번째는 유한요소법으로 해석 대상을 유한개의 요소(element)로 나누어 각각의 요소를 계산한 후 해석 영역의 전체 요소를 취합하여 근삿값을 구하는 방법이다. 본 연구에서는 이상의 방법 중 유한체적법을 기반으로 하였으며 운동량방정식과 연속방정식을 결합하는 알고리즘은 PISO(pressure implicit with splitting of operators)를 사용하였다. 이산화 과정에서 대류항의 보간법은 2차 정확도의 풍상측 차분법(second-order upwind), 격자 중심에서 해석변수에 대한 구배는 최소자승법(least-squares cell based), 압력에 대한 보간법은 PRESTO(pressure staggering option)를 적용하였다.

2.3 물체 운동방정식

와류유기진동 해석은 매 시간 간격마다 움직이는 물체를 모사해야 하는데, 본 연구에서는 2차원 영역에서 원형 실린더가 주 흐름 방향에 대하여 수직 방향으로 1자유도의 자유진동을 하도록 하였다. 주 흐름 방향을 X 라고 할 때 수직 방향의 변위를 Y 에 대한 물체의 운동방정식은 식 (3)에 나타내었다.

$$m \ddot{Y} + c \dot{Y} + k Y = F(t) \quad (3)$$

위의 운동방정식은 수치해석을 하기 위하여 무차원화하여 나타내면 식 (4)와 같다.

$$\ddot{y} + C \dot{y} + K y = \frac{1}{2n} C_L \quad (4a)$$

$$x = \frac{X}{D}, \quad y = \frac{Y}{D} \quad (4b)$$

$$C = 2\xi \left(\frac{2\pi}{U_{red}} \right) \quad (4c)$$

$$K = \left(\frac{2\pi}{U_{red}} \right)^2 \quad (4d)$$

$$U_{red} = \frac{U}{f_n D} \quad (4e)$$

$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (4f)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4g)$$

$$n = \frac{m}{\rho D^2} \quad (4h)$$

여기서, x 와 y 는 실린더의 직경 D 로 무차원화된 주 흐름 방향과 수직방향 변위, K 와 C 는 무차원화된 구조물의 강성도와 감쇄비. U_{red} 는 감소속도(Reduced velocity), ξ 는 감쇄비, f_n 은 물체의 고유진동수, n 은 질량비이다.

또한 본 연구에서는 주 흐름에 수직방향의 진동만을 대상으로 1 자유도 구조시스템을 대상으로 함으로 C_L 은 주 흐름에 수직방향으로 물체에 작용하는 무차원 양력계수를 나타낸다. 이외에 물체에 작용하는 동유체력으로 주 흐름 방향의 항력도 발생하는데 식 (5)는 항력 F_D 와 양력 F_L 에 의한 항력계수와 양력계수를 나타낸다.

$$C_D = \frac{F_D}{0.5\rho U^2 D}; C_L = \frac{F_L}{0.5\rho U^2 D} \quad (5)$$

식 (4a)에 나타난 동유체력이 작용하는 물체의 운동방정식에 2차 Runge-Kutta 기법을 적용하여 매 시간 간격마다 물체의 새로운 수직 변위를 추적하였다.

3. 해석영역 및 경계조건

3.1 해석영역 및 경계조건

본 연구에서 이용된 전산유체해석을 위한 영역과 격자는 Figs. 3~5에 나타내었다. 원형실린더의 전방과 후방에 각각 11D와 45D의 영역을 설정하여 전방 경계면과 후방 경계면이 물체 주위 유동에 미치는 영향을 최소화하였으며, 측면에도 각각 12D의 간격을 설정하였다. 운동하는 실린더의 주위의 격자를 매 시간 간격마다 재생성 해주는 Remeshing 기법을 사용하였으며, Remeshing 영역의 격자가 설정된 비틀림 각도 또는 격자 크기가 정의된 최댓값을 초과했을 때 격자가 재구성되도록 비틀림 정도는 최대 0.4이고 격자 크기는 최소 0.005D와 최대 0.008D로 설정하였다. Remeshing 영역의 격자는 삼각형으로 설정하였고, 나머지 해석영역은 사각형

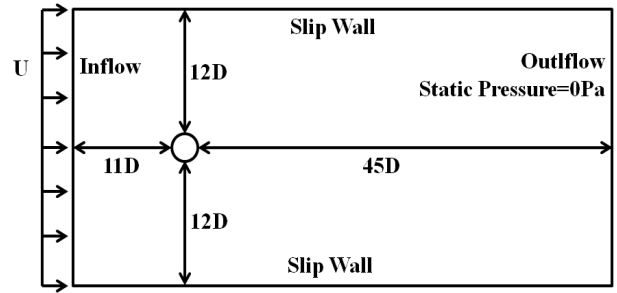


Fig. 3 Computational domain and boundary condition

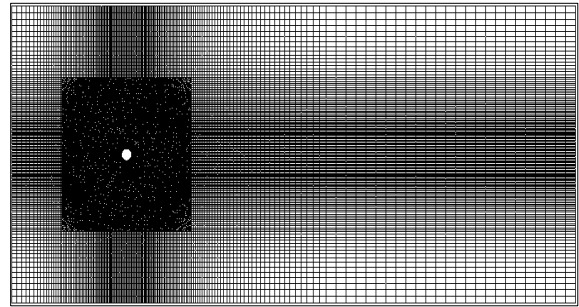


Fig. 4 Computational grid

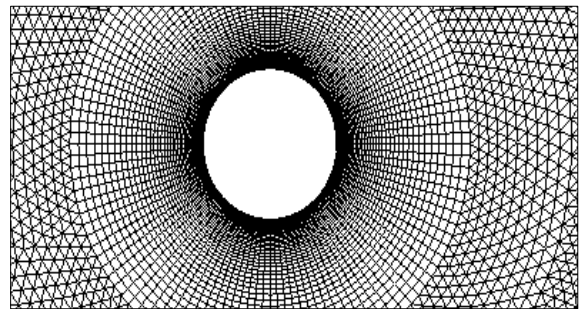


Fig. 5 Close-up of remeshing region

격자를 사용하였다. Remeshing영역의 격자는 Fig. 5에 나타내었다. 특히 실린더 주위는 해석의 정확성을 높이기 위해서 사각형 격자를 사용하였다.

경계조건은 Fig. 3에 보는 바와 같이 균일유입유속 U 의 흐름이 전방 경계면에서 영역으로 유입되도록 하였으며, 후방 경계면에서는 정압을 0pa로 설정하였다. 또한 측면 경계에서는 미끄러짐 조건을 설정하였다.

4. 2차원 원형 실린더의 와류유기진동 해석

4.1 Lock-in 영역에서의 구조응답주파수

본 연구에서는 2차원 원형 실린더에서 층류에 해당하는 레이놀즈 수(reynolds number, Re) 90에서 140까지 1 자유도의 자유진동해석을 수행하였다. 이 때 레이놀즈수는 $Re = \rho UD/\mu$ 로 정의된다. 와홀림 주파수(f_s)와 물체의 고유

진동수(f_n)간의 관계를 Fig. 6에 선행연구의 결과와 비교하여 나타내었다. 선행연구의 결과에서 Lock-in 영역의 범위가 일정하지는 않지만 공통적으로 $Re = 100$ 부근에서 발생하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 수치해석을 이용한 Dettmer와 Peric(2006)의 결과와 유사함을 보였으나 실험 결과인 Anagnostopoulos와 Bearman(1992)의 Lock-in 현상은 범위가 비교적 크게 나타났다. 이는 3차원 공간의 실험 결과로서 수치해석을 수행한 기타 연구에서는 3차원 영향을 고려하지 않아 발생한 차이로 판단된다. Lock-in 이전 및 후의 결과가 여타 선행 결과들과 경향이 유사한 것을 확인하였다. 본 연구는 와류유기진동 현상의 특징인 Lock-in 현상을 구현하였고, 이는 와홀림 주파수가 구조시스템의 고유진동수 근처에서 고착되는 것으로서 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 레이놀즈수가 증가함에 따라 와홀림 주파수는 점차 증가하다가 $Re = 99$ 일 때 와홀림 주파수가 고유진동수 근처에서 고착되기 시작하여 $Re = 104$ 까지 일정하게 유지되고 Lock-in 영역 이후에는 다시 증가하는 것을 확인하였다. Lock-in 현상이 발생하는 유동조건에서는 공진현상이 발생하여 운동진폭이 증가하는 특징이 있는데, 이는 Fig. 7에 보이는 수직변위의 RMS(root-mean-square) 변화에서 나타나고 있다. Lock-in 영역에서 실린더의 수직변위의 RMS는 직경의 약 14%이며 Lock-in 영역 전, 후의 수직변위는 미소하였다.

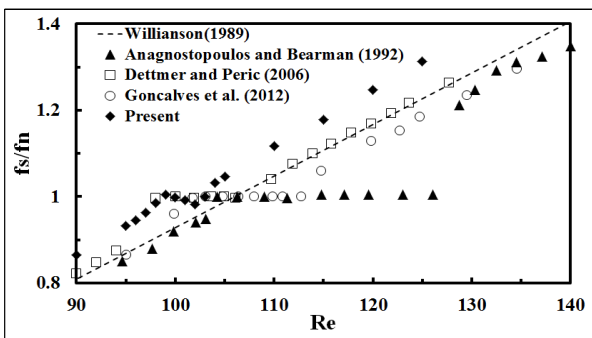


Fig. 6 Comparisons of vortex shedding frequency between present and previous studies

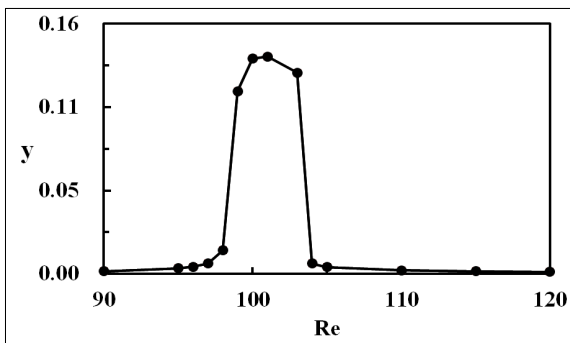


Fig. 7 RMS of vertical displacement versus Reynolds numbers

4.2 항력계수와 양력계수

Fig. 8~10은 레이놀즈수의 변화에 따른 동유체력 변화를 나타내었다. Lock-in 현상이 발생되었을 때 Fig. 8에 나타난 평균항력계수($\overline{C_D}$)가 Lock-in 현상 전후에 대해 약 15% 증가한 반면, Fig. 9의 양력계수의 RMS(C_L')는 3배 가까이 급격하게 증가한 것을 확인할 수 있다. 따라서 유체의 유입방향과 수직으로 작용하는 양력의 급격한 증가로 인하여 Fig. 7에 보인 바와 같이 실린더의 수직변위가 크게 증가된 것으로 판단된다. Fig. 10은 항력계수의 RMS(C_D')를 나타냈는데 양력계수의 RMS에 비해 작지만 Lock-in 영역에서 증가가 나타나는 것으로 판단할 때, 수평방향의 움직임까지

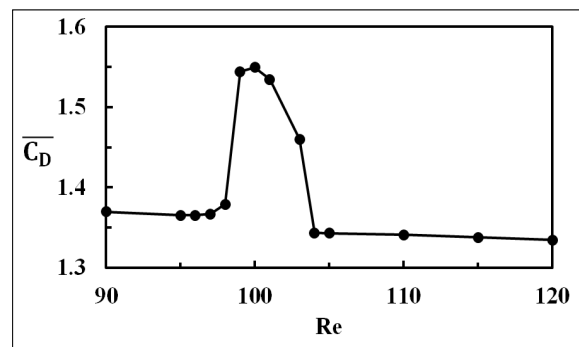


Fig. 8 Mean drag coefficient versus Reynolds numbers

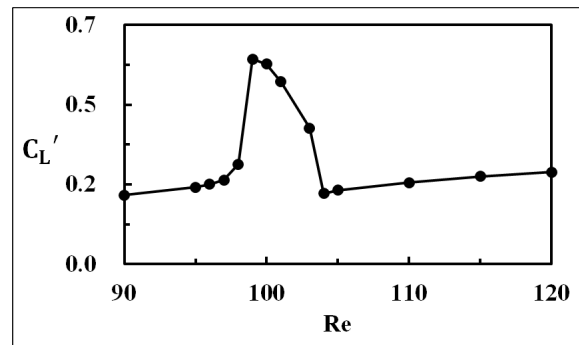


Fig. 9 RMS of lift coefficient versus Reynolds numbers

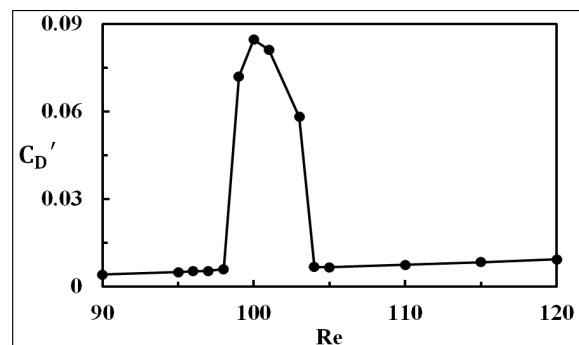


Fig. 10 RMS of drag coefficient versus Reynolds numbers

고려한 2 자유도 운동의 경우 수평방향의 유기진동도 발생할 수 있음을 알 수 있다.

4.3 와홀림 주파수와 파장구조 분석

본 연구에서는 연속된 와홀림의 중심부간 거리를 와홀림 파장(λ)로 Fig. 11과 식 (6)에서 보는 바와 같이 정의하였으며, 무차원 와홀림 주파수인 스트로홀 수(S_t)는 식 (7)에 나타내었다.

$$\lambda = UT \tag{6}$$

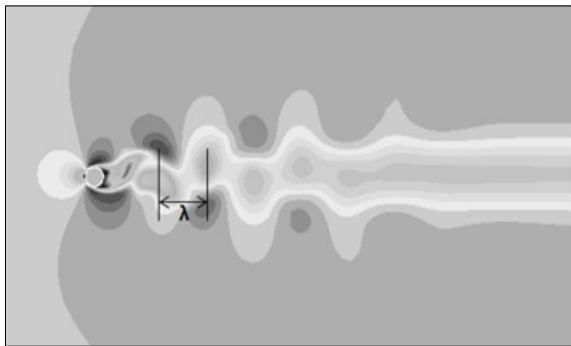


Fig. 11 Define of vortex shedding distance between center of cylinder(λ)

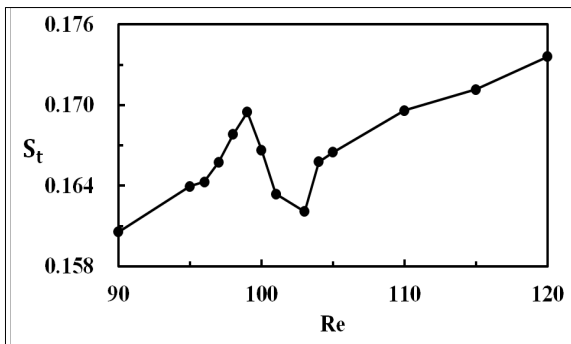


Fig. 12 Strouhal number versus Reynolds numbers

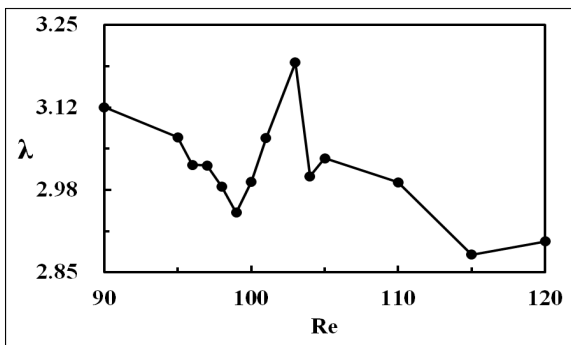


Fig. 13 Distance of vortex shedding versus Reynolds numbers

$$S_t = \frac{f_s D}{U} \tag{7}$$

여기서, T 는 와홀림의 주기이다. Fig. 12는 레이놀즈수 변화에 따른 S_t 의 변화를 나타낸다. Lock-in 영역에서 레이놀즈수가 증가함에 따라서 S_t 는 감소하였는데, 이는 Lock-in 영역에서는 와홀림 주파수가 일정해지는 반면 유속은 증가하기 때문이다. 반면에 Fig. 13에서 보는 바와 같이 Lock-in 영역에서 와홀림 주파수가 일정하고 유속은 증가함으로 연속된 와홀림의 중심부간 거리가 증가한 것을 확인할 수 있다. 그리고 Lock-in 영역 이외의 구간에서는 유입속도의 증가율보다 와홀림 주파수의 증가율이 크기 때문에 연속된 와홀림 사이의 거리는 감소하고 스트로홀수는 증가하는 것으로 판단된다.

4.4 동유체력과 구조 응답의 상관 분석

Figs. 14~16은 각각 Lock-in 발생 이전, Lock-in 영역 및 이후에 해당하는 레이놀즈수 90, 100 및 115의 경우에 양력계수와 실린더 수직변위의 시간 이력을 나타낸다. 모든 경우에 동유체력인 양력과 구조 응답인 수직변위의 주기는 동일한 것으로 나타나며 이로 부터 구조 응답이 절대적으로 동유체력에 종속적임을 알 수 있다. 반면에 양력과 수직변위의 위상차는 유동조건에 따라 급격하게 변함을 알 수 있는데, Lock-in 발생 이전에는 위상이 일치하여 거의 완벽한 상관 관계를 나타내는 반면 Lock-in 발생 이후 영역에서는 위상이 정반대로 나타났다. 한편 Lock-in에 해당하는 영역에서는 그 중간에 해당하는 위상차를 보이고 있다.

해석된 전 유동조건에 대해 실린더의 수직변위와 양력의 상관계수를 분석한 결과, Fig. 17에 보는 바와 같이 Lock-in 발생 이전에는 상관계수가 (+1)을 나타낸 반면 Lock-in 이후에는 (-1)을 나타내었다. 그리고 Lock-in에 해당하는

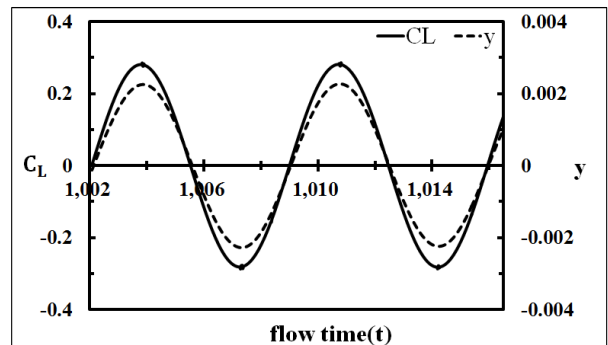


Fig. 14 Time histories of lift coefficient and vertical displacement at Re=90

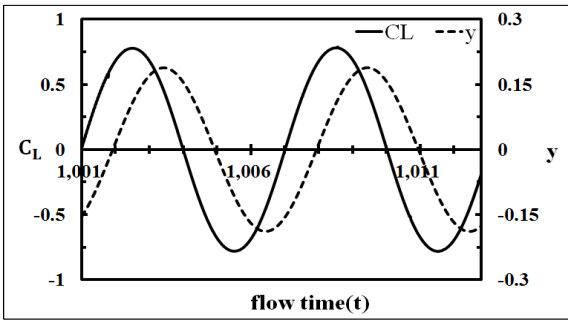


Fig. 15 Time histories of lift coefficient and vertical displacement at $Re=100$

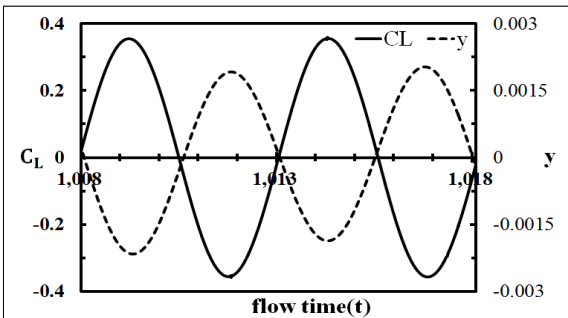


Fig. 16 Time histories of lift coefficient and vertical displacement at $Re=115$

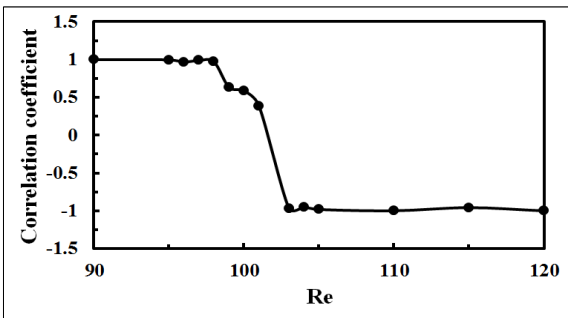


Fig. 17 Correlation coefficient of lift coefficient and vertical displacement versus Reynolds number

영역에서는 유동조건에 따라 상관계수가 (+1)에서 (-1)로 천이함을 확인할 수 있다.

4.5 유동조건 변화에 따른 와홀림 특성 변화

앞 절에서 기술한 Lock-in 영역을 기준으로 나타나는 양력과 수직변위의 위상차 변화를 후류에 발달한 와홀림 특성으로 통하여 분석하였다. 이를 위하여 Fig. 18에 설명된 바와 같이 실린더의 수직변위가 최소일 때와 0일 때 그리고 최대일 때 발생하는 후류의 유선을 Figs. 19~21에 나타내었다.

Lock-in 영역 이전에 해당하는 $Re=90$ 인 경우(Fig. 19), 실린더의 수직변위가 최소일 때 와류는 실린더의 아랫면에서 발생하였고, 실린더의 수직변위가 최대일 때 와류는 실린더의

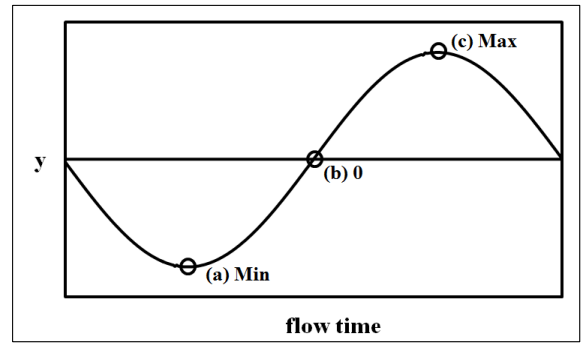


Fig. 18 Definition of position of vertical displacement

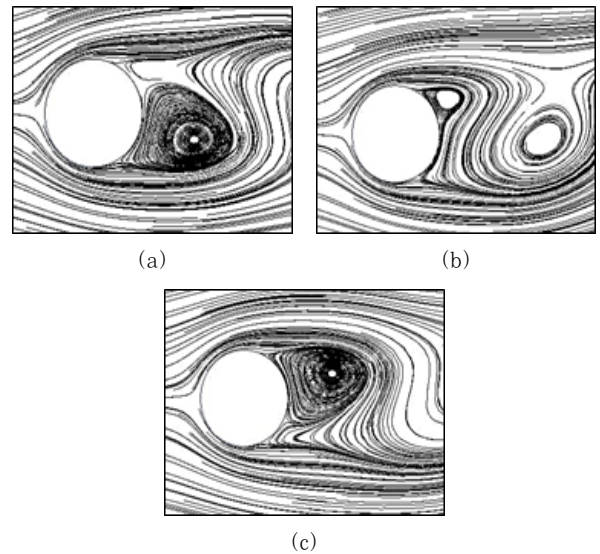


Fig. 19 Streamline at $y=(a)$ min, (b) 0, (c) max for $Re=90$

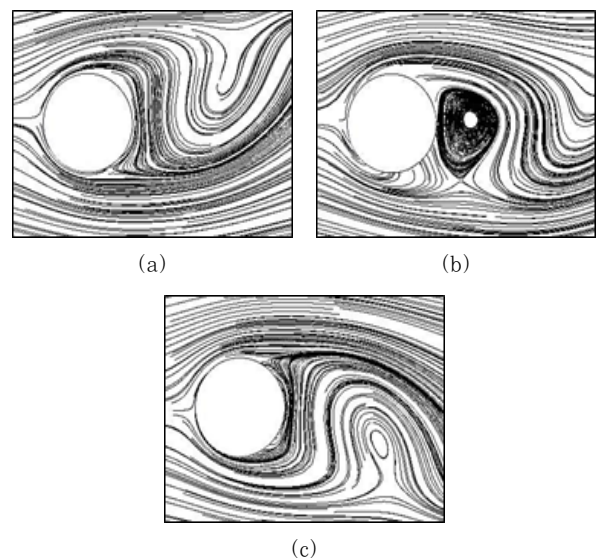


Fig. 20 Streamline at $y=(a)$ min, (b) 0, (c) max for $Re=100$

윗면에서 발생하였다. 이는 Fig. 14에 보인 바와 같이 양력과 수직변위의 위상이 같은 결과로 나타난다. 반면에 Fig. 21의

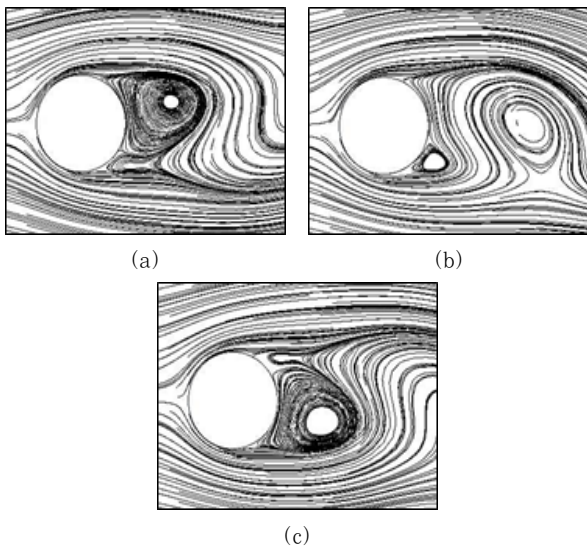


Fig. 21 Streamline at $y=(a)$ min, (b) 0, (c) max for $Re=115$

$Re=115$ 의 경우는 Lock-in 영역 이후로서 이전의 현상과 정반대로 나타났다. 실린더의 변위가 최소일 때 와류는 실린더의 윗면에서 형성되고 실린더의 변위가 최대일 때 와류는 실린더의 아랫면에서 발생하였다. 이 결과 역시 Fig. 16에 보인 반대의 위상으로 나타남을 알 수 있다. Lock-in 영역에 해당하는 Fig. 20의 $Re=100$ 의 경우는 Fig. 15에서 알 수 있듯이 실린더의 수직변위가 최소일 때 실린더의 변위가 최소일 때 아랫면에서 발생한 와류가 후류로 이송된 상태이며, 수직변위가 최대일 때는 윗면에서 발생한 와류가 후류로 이송되고 있음을 알 수 있다. 이는 Fig. 15에서 볼 수 있듯이 수직변위가 최소일 때 양력(+)의 영역에서 증가하는 구간에 해당하며 수직변위가 최대일 때 양(-)의 영역에서 감소하는 구간에 해당하는 것으로 나타난다.

Fig. 7, 9 및 17을 종합해 볼 Lock-in 발생 이전의 유동 조건에서는 양력과 수직변위의 위상이 동일함에도 불구하고 실린더의 수직변위는 실린더 직경의 1% 이내로서 작게 나타났다. 이는 Lock-in 영역 이전에는 상대적으로 낮은 유입속도로써 낮은 U_{red} 를 갖게 되어, 식 (4c)와 (4d)에 보는 바와 같이 구조물의 감쇄비와 강성도가 상대적으로 큰 값을 나타낸다. 따라서 실린더의 수직운동은 비교적 큰 감쇄비와 강성도에 의해 억제되어 수직변위가 미소한 것으로 판단된다.

Lock-in 영역 이후에는 반대로 높은 U_{red} 에 의해 구조물의 감쇄비와 강성도가 상대적으로 작은 값을 갖게 되어 실린더의 수직변위가 더 크게 발생할 가능성이 있으나 양력과 수직변위의 위상이 정반대가 되어 실린더의 운동이 양력에 의해 억제되므로 수직변위가 미소한 것으로 판단된다.

Lock-in 영역에서는 실린더의 변위와 양력의 상관계수가

낮았으며, 유입속도는 Lock-in 현상의 이후보다 작으며 구조물의 감쇄비와 강성도는 Lock-in 현상의 이전보다 상대적으로 큰 값에도 불구하고 Lock-in 영역에서 변위가 크게 증가한 것은 위상차가 엇갈리면서 Fig. 15와 같이 양력과 실린더의 운동이 증첩되어 변위가 증가되는 상호작용이 발생하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 해수 취수용 라이저와 같이 원형 단면을 갖는 세장체의 와류유기진동을 분석하기 위하여 층류영역에서 2차원 원형 실린더 주위의 유동에 대한 전산해석을 수행하였다. 특히, 이 경우 발생하는 Lock-in 현상에 대하여 비정상 유동의 주파수 특성, 박리점의 위치변화에 따른 연속된 와홀림 사이의 거리 및 양력과 수직변위의 상관계수 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 유체-구조 연성해석을 위하여 매 시간 단계마다 유체의 주 흐름방향에 대하여 수직으로 운동하는 2차원 실린더 단면의 1자유도의 운동방정식을 수치해석하여 이동된 위치를 계산하고, 이를 반영하기 위하여 격자변형기법 중 Remshing 기법을 적용하였다.

물체의 고유진동수 부근에서 와홀림 주파수가 고착되는 Lock-in 현상을 구현하여 운동진폭이 최대가 되는 것을 확인한 후 선행연구와 비교를 통하여 본 연구의 타당성을 검증하였다. 연구 결과 Lock-in 현상이 발생할 때 항력에 비하여 양력이 급격히 증가함으로 인해 운동진폭이 최대가 된 것으로 판단된다. 또한 양력과 수직변위의 상관계수 분석을 통하여 Lock-in 영역 이전은 양의 상관관계로서 양력과 수직변위가 동일한 위상을 갖고 와류가 박리되지만 Lock-in 영역 이후는 음의 상관관계로서 양력과 수직변위가 반대의 위상을 갖음을 확인하였다. 반면, Lock-in 영역에서는 상관계수가 상대적으로 낮으며 실린더의 위치에 따라서 양력의 증감과 박리점의 위치가 변하는 천이구간이 형성됨을 확인하였다. 특히 Lock-in 영역 이전에는 무차원화된 강성도와 감쇄비의 증가로 운동이 제한되며, Lock-in 영역 이후에는 양력과 수직변위의 반대 위상이 운동을 제한하는 반면 Lock-in 영역은 위상의 천이영역으로 양력이 진폭을 증가시키는데 큰 역할을 하는 조건이 형성됨을 확인하였다.

감사의 글

본 연구결과는 선박해양플랜트연구소가 지원하는 “해양심층수의 에너지 이용기술 개발” 성과 중 일부이며 지원에 감사드립니다.

기 호

c	Structure damping
C	Structure damping, nondimensional form of equation
C_D	Drag coefficient(= $F_D/0.5\rho U^2 D$), nondimensional
C_L	Lift coefficient(= $F_L/0.5\rho U^2 D$), nondimensional
C_F	Force coefficient(= $F/0.5\rho U^2 D$), nondimensional
D	Cylinder diameter, m
F_D	Drag force, kg/s^2
F_L	Lift force, kg/s^2
f_n	Natural frequency, Hz
f_s	Vortex shedding frequency, Hz
k	Structure stiffness
K	Structure stiffness, nondimensional form of equation
m	Cylinder mass
n	Mass ratio
P	Pressure, kg/ms^2
Re	Reynolds number(= $\rho UD/\mu$), nondimensional
S_i	Strouhal number(= $f_s D/U$), nondimensional
t	Time, s
T	Vortex shedding period, s
U	Uniform flow velocity
U_{red}	Reduced velocity
y	Cylinder cross-flow displacement, m
μ	Fluid dynamic viscosity, kg/ms
ρ	Fluid density, kg/m^3
ξ	Damping ratio, dimensionless
λ	Distance of vortex shedding

References

- Anagnostopoulos, P., Bearman P.W.** (1992) Response Characteristics of a Vortex-Excited Cylinder at Low Reynolds Numbers, *J. Fluids & Struct.*, 14(6), pp.39~50.
- Blackburns, H., Henderson, R.** (1996) Lock-In Behavior in Simulated Vortex-Induced Vibration, *Exp. Therm. & Fluid Sci.*, 12, pp.184~189.
- Blevins, R.D.** (1974) Flow Induced Vibration of Vluff Structures, Degree of Doctor of Philosophy, California Institute of Technology, p.146.
- Dettmer, W., Perić, D.** (2006) A Computational Framework for Fluid-Rigid Body Interaction: Finite Element Formulation and Applications, *Comput. Methods Appl. Mech. & Eng.*, 195, pp.1633~1666.
- Feng, C.C.** (1963) The Measurement of Vortex Induced Effects in Flow Past Stationary and Oscillating and D-Section Cylinders, Degree of Master, National Taiwan University, p.100.
- Gabbai, R.D., Benaroya, H.** (2005) An Overview of Modeling and Experiments of Vortex-Induced Vibration of Circular Cylinders, *Fluid of Sound & Vib.*, 282, pp.575~616.
- Guilmineau, E., Queutey, P.** (2004) Numerical Simulation of Vortex-Induced Vibration of a Circular Cylinder with Low Mass-Damping in a Turbulent Flow, *J. Fluids & Struct.*, 19, pp.449~466.
- Groncalves, R.A., Teixeira, P.R.F., Didier, E.** (2012) Numerical Simulations of Low Reynolds Number Flows Past Elastically Mounted Cylinder, *Therm. Eng.*, 11, pp.61~67.
- Lee, H.B., Rhee, S.H.** (2010) Ananalysis of Two-Dimensional Flow Around an Oscillating Cylinder using Moving Mesh Techniques, *Korean Soc. Comput. Fluids Eng.*, pp.542~547.
- Lee, J.S., Kim, J.D.** (1994) An Analysis of Coupled Wind-Structure Interaction, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 24, pp.4~10.
- Lee, T.L., Jang, Y.S.** (2013) A FSI Simulation Technique based on Immersed Finite Element Method, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 26, pp.43~47.
- Placzek, A., Sigrist, J., Hamdouni, A.** (2009) Numerical Simulation of an Oscillating Cylinder in a Cross-Flow at Low Reynolds Number, *Comput. & Fluids*, 38, pp.80~100.
- Prasanth, T.K., Mittal, S.** (2008) Vortex-Induced Vibrations of a Circular Cylinder at Low Reynolds Number, *J. Fluid Mech.*, 594, pp.463~491.
- Rockwell, D.** (2001) Forced and Wake Modes of an Oscillating Cylinder, *J. Fluid & Struct.*, 15, pp.523~532.
- Sarpkaya, T.** (2004) A Critical Review of the Intrinsic Nature of Vortex-induced Vibrations, *J. Fluids & Struct.*, 19, pp.389~447.
- Willianson, C.H.K.** (1989) Oblique and Parallel Modes of Vortex Shedding in the Wake of a Circular Cylinder at low Reynolds Numbers, *J. Fluids Mech.*, 206, pp.579~627.

요 지

고층빌딩이나 해양 라이저와 같은 세장 구조물은 구조시스템의 동적 불안정의 주요 원인인 와류유기진동(vortex-induced vibration, VIV)에 의한 동하중에 매우 취약하다. 와류유기진동이 라이저의 고유진동수 영역에서 발생하는 경우 Lock-in현상으로 피로파괴의 우려가 있다. 본 논문에서는 Lock-in 영역에서 구조물과 유동의 동적거동에 대한 수치해석을 다루었으며, 유동조건 변화에도 불구하고 공진 주파수가 유지되는 현상에 대해 분석하였으며, 유입유동에 대해 수직방향으로 자유진동하는 1자유도의 2차원 원형실린더 단면에 대한 비정상 층류를 가정하였다. 각 시간 단계에서 물체의 움직임을 고려하여 유동장 격자를 재생성하며 비정상 유동과 물체의 운동에 대한 지배방정식을 순차적으로 수치해석하여 유체-구조연성해석을 수행하였다. 결과는 선행연구와 잘 일치함을 보여주었고, Lock-in 현상에 대한 특성을 잘 나타내었다. Lock-in 영역에서는 양력뿐만 아니라 항력도 크게 증가함을 보여주었으며, 실린더의 수직변위는 직경의 20%까지 이동을 나타내었다. 양력과 수직변위의 상관분석을 통해 실린더가 Lock-in 영역에서 양력과 수직변위의 위상차가 동기로부터 반동기로 천이함을 확인하였으며, 이러한 변화가 Lock-in 영역에서 나타나는 공진거동의 원인이 되는 것으로 판명되었다.

핵심용어 : 세장체, 라이저, 와류유기진동, Lock-in 현상