

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(1), 1-9(2013)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.1.1>

동적격자변형기법을 이용한 2차원 실린더의 와류유발진동에 대한 수치해석

이남훈, 백지영, 이승수*

Numerical analysis of the vortex induced vibration of the 2-D cylinder using dynamic deforming mesh

Namhun Lee, Jiyoung Baek and Seungsoo Lee*

Department of Aerospace Engineering, INHA University

ABSTRACT

In this paper, numerical simulations are performed on the lock-in phenomena of vortex induced vibration(VIV) of a two dimensional cylinder. A deforming grid as well as a rigidly moving grid are used to simulate the movement of the cylinder. The grid deformation is accomplished by the linear spring analogy. Converged solutions, which are obtained by controlling the grid size and the non-dimensional time step, are used for comparison and validation of the analysis results. Moreover, the efficiency and the accuracy of the coupling methods for fluid-structure interaction are examined.

초 록

이 논문에서는 2 차원 실린더의 와류유발진동에 따른 Lock-in 현상에 대해 수치해석을 수행하였다. 실린더의 운동을 모사하기 위해 변형격자와 고정격자를 이용하였다. 스프링상사기법을 이용하여 격자를 변형하였다. 격자수 및 시간 간격 등을 조절해 얻은 수렴된 수치해가 비교 및 검증에 사용되었다. 또한, 유체-구조 결합 방법들의 효율성과 정확도를 비교 검토하였다.

Key Words : Fluid-Structure Interaction(유체-구조 연동 해석), Vortex induced Vibration(와류유발진동), Lock-in, Spring analogy(스프링 상사), Deforming mesh (변형 격자), Coupling method(결합 방법)

1. 서 론

항공, 조선, 토목 등 공학의 여러 분야에서 해석 대상이 되는 구조물들은 외부의 유동에 노출되어 있으며, 이런 외부적 요인으로 인해 구조물의 설계 단계에서 유체-구조 연동(Fluid-Structure Interaction, FSI)해석을 필요로 하게 된다. 특히

이런 문제들은 구조물이 복잡한 유동에 노출되어 있을 때 주로 발생하게 된다. 와류유발진동(Vortex Induced Vibration, VIV)은 구조물 후방의 와류에 의해 발생하는 주기적인 유체력으로 인해 구조물이 진동하는 현상을 의미한다. 이 현상은 유체와 구조의 상호 작용에 의해 발생하기 때문에 유체-구조 연계해석이 필요한 대표적인

† Received: September 10 2012, Accepted: December 13 2012

* Corresponding author, E-mail : slee@inha.ac.kr

<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

현상이다. 와류유발진동의 진폭은 구조물의 감쇠 정도, 유체와 구조의 질량비, 유체력의 크기 및 와류회림주파수(Vortex shedding frequency, f_v) 등 많은 요인의 영향을 받는다[1].

특히 와류회림주파수가 진동에 의해 구조물의 고유진동수(Natural frequency, f_n)에 가까워지면 구조물에 공진 현상이 발생하게 되는데, 이 현상을 Lock-in이라고 한다. Lock-in이 발생할 경우 구조물은 과도하게 진동하며, 최악의 경우 파괴될 수 있으므로 구조물의 안전 및 안정성을 위해 이와 관련한 해석은 구조물의 설계 단계에서 필수적이다.

Anagnostopoulos 등[2]은 실험을 통해 저 레이놀즈수에서 레이놀즈수에 따른 실린더의 동적 거동을 관찰하였으며, 이 때 와류에 의한 진동 및 특정 레이놀즈수 영역에서의 Lock-in 현상을 확인하였다. Figure 1은 실린더 직경으로 무차원화된 횡방향 변위(Y/D)와 주파수비(f_v/f_n)를 레이놀즈수에 대해 나타낸 것으로, 실험 결과 특정 레이놀즈수($Re=104\sim 126$)가 되면 Lock-in이 갑자기 발생하여 최대 변위가 관측된다. 이후 변위가 조금씩 작아지다가 Lock-in 현상이 사라지는 것을 확인할 수 있다. 또한 Lock-in 영역 내에서는 주파수비가 거의 일치하여 1이 되며, Lock-in 영역 밖에서는 Roshko에 의해 제안된 Strouhal 주파수 관계식($S=0.212(1-21.2/Re)$)에 근접한다. 이 실험에서 특히 주목한 점은 보다 높은 레이놀즈수($Re=5000\sim 25000$)에서 실험을 수행할 경우, Lock-in 영역 중간 지점에서 최대 변위가 관측되는 것과 달리 이 실험에서는 Lock-in 영역 하한 근처에서 최대 변위가 관측되었다는 점이다.

Dettmer 등[3]과 Schulz 등[4]은 위 실험에 대한 이차원 수치해석을 수행하였다. 그들은 연구 결과를 통해 실험 결과와 같이 특정 레이놀즈수에서 Lock-in 현상이 발생하는 것을 확인하였으며, Lock-in 영역 혹은 그 영역 내에서의 최대 진폭 및 주파수비 변화 등에 있어 실험 결과와 수치해석 결과 사이의 유사성을 확인하였다. 하지만 이들의 수치해석 결과는 Lock-in 영역이나 최대 진폭 등에 있어 서로 분산된 결과를 보여주고 있다. 특히 Dettmer 등의 해석 결과에서는 격자수가 많아질수록 최대 진폭 및 Lock-in 영역 등의 Lock-in 특성이 수렴해 가는 것을 확인할 수 있다.

유체-구조 연동해석은 유체 방정식과 구조 방정식의 결합 기법에 따라 다른 성질의 해를 얻게 된다. 유체 방정식과 구조 방정식을 강성 결합

(Strongly coupled)할 경우 한 physical time step 내에서 유동 정보 및 변위 정보를 서로 교환하면서 반복계산을 수행하므로, 유동에 의한 구조 변형 및 진동 문제에 있어 해의 신뢰성을 확보할 수 있다. 그러나 이 방법은 계산 시간이 오래 걸리고, 유체 방정식과 구조 방정식의 결합이 어렵다는 단점이 있다. 주완돈 등[5]은 2차원 비정상 점성 압축성 Navier-Stokes 방정식과 2계 자유도를 갖는 피치-플러지 모델을 결합하여 2차원 날개의 플러터 해석을 수행한 바 있다.

연성 결합(Loosely coupled)기법은 강성 결합 기법과는 다르게 한 physical time step 내에서 수렴한 유동해를 구조 방정식에 적용하여 구조물의 변형 혹은 변위를 구한다. 강성 결합기법에 비해 계산 과정이 많이 생략되기 때문에 계산시간이 비교적 빠르며, 유체 방정식과 구조 방정식 사이의 결합이 쉽다는 장점이 있다. 그러나 시간 적분 시에 구조 방정식에 공기력이 시간 지연을 갖고 적용되어 해의 시간 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 류한열 등[6]은 수렴 속도 및 수렴성이 좋은 연성 결합기법을 사용하여 회전익 항공기의 전진 비행 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 위 실험에 대한 수치해석을 수행하고 이를 실험 결과 및 선행 연구자들의 수치해석 결과와 비교하였다. 실린더의 운동을 모사하기 위한 격자 기법으로는 동적격자변형 기법 중의 하나인 스프링 상사 기법(Linear spring analogy)을 적용하였으며, 실린더 운동방정식의 시간 적분을 위해 Newmark- β 기법을 사용하였다. 격자수가 많아짐에 따라 Lock-in 특성이 수

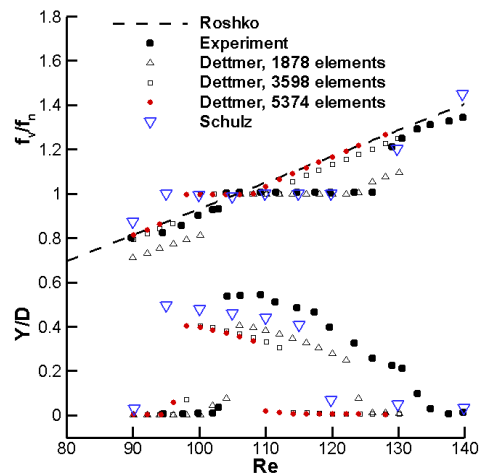


Fig. 1. Amplitudes and frequencies of the oscillating cylinder [2-4]

렴한 결과를 보인 Dettmer 등의 연구결과와 관련하여 수렴한 해를 구할 수 있는 계산 조건을 설정하여 수렴한 상태에서의 Lock-in 특성을 파악하였다. 또한 유동의 지배방정식과 실린더의 운동방정식 사이의 결합 방법에 따른 계산 결과를 비교 및 고찰하였다.

II. 수치기법

2.1 지배방정식

본 연구에서는 2차원 국소 예조건화된 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 해석을 수행하였다. 자유류 조건으로 무차원화된 지배방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{F} = \nabla \cdot \vec{F}_v \quad (1)$$

여기에서 W 는 보존형 변수(conservative variables)로 다음과 같다.

$$W = [\rho \quad \rho u \quad \rho v \quad e]^T \quad (2)$$

식 (1)에서 \vec{F} 는 비점성 유량 벡터, \vec{F}_v 는 점성 유량 벡터를 나타낸다. 식 (1)을 크기가 작은 계산 셀에 대하여 적분하고, 확산정리(divergence theorem)을 적용하면 다음과 같이 근사적으로 쓸 수 있다.

$$\frac{d(VW)}{dt} + \sum \hat{F} \Delta S = \sum \hat{F}_v \Delta S \quad (3)$$

이 때 셀 표면에 수직한 비점성 유량 벡터와 점성 유량 벡터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{F} = \vec{F} \cdot \hat{n} &= \begin{bmatrix} \rho v_n \\ \rho v_n u + p n_x \\ \rho v_n v + p n_y \\ (e + p) v_n + p \xi_t \end{bmatrix} \\ \hat{F}_v = \vec{F}_v \cdot \hat{n} &= \begin{bmatrix} 0 \\ n_x \tau_{xx} + n_y \tau_{yx} \\ n_x \tau_{xy} + n_y \tau_{yy} \\ n_x \Omega_x + n_y \Omega_y \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서 v_n 은 셀 표면에 수직한 유동의 속도 성분이며, ξ_t 는 체적의 이동 속력을 의미한다.

$$\begin{aligned} v_n &= n_x u + n_y v - \xi_t \\ \xi_t &= \xi_x n_x + \xi_y n_y \end{aligned} \quad (5)$$

2.2 공간 및 시간 이산화 기법

식 (3)은 유한체적법(Finite volume method)를 이용하여 공간 이산화를 수행하였다. 점성 유량 벡터의 계산으로는 중앙 차분법을 사용하였으며, 비점성 유량 벡터의 계산을 위해 Roe의 근사 리만해를 사용하였다. MUSCL 외삽법을 사용하여 고차의 공간이산화 정확도를 확보하였으며, Van Albada의 제한자를 사용하여 단조성을 유지하였다. 비정상 해석을 위해 이중시간적분법(Dual time stepping)을 적용하여 이산화 방정식의 시간 미분항을 이산화하였다.

$$\left(1 + \frac{\phi}{2}\right) \frac{\Delta \bar{W}}{\Delta t} - \frac{\phi}{2} \frac{\Delta W^{n-1}}{\Delta t} + \Gamma \frac{\Delta Q_p^l}{\Delta \tau} + \theta R^{l+1} + (1-\theta) R^n = 0 \quad (6)$$

식 (6)에는 원시형 변수로 구성된 가상의 시간항과 Weiss와 Smith[7]의 예조건화 행렬, Γ 가 사용되어 낮은 마하수 유동에서 효율적인 시간 엄밀해를 얻을 수 있도록 하였다. 이때 l 은 이중시간의 iteration level이며, n 은 time level이다. 또한 θ 와 ϕ 는 적분방법의 정확도를 결정할 수 있는 매개변수이다.

2.3 스프링 상사기법

스프링 상사 기법은 경계면에 존재하는 격자점의 변위에 의해 교란된 스프링 시스템의 새로운 평형 상태를 이용하여 새로운 격자계를 구성하는 방식이다. 본 연구에서는 Batina에 의해 제안된 선형 스프링 상사기법[8]에 relaxation

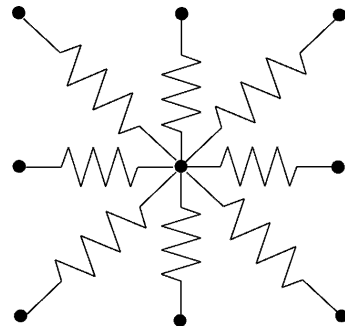


Fig. 2. Spring system of the structured grid

factor를 적용한 방법[9]을 사용하였다.

Figure 2와 같이 각 격자점을 잇는 스프링 시스템을 설정하고 각 스프링의 스프링 상수를 다음과 같이 정의한다.

$$k_m = \frac{1}{[(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2]^{p/2}} \quad (7)$$

식 (7)에서 p 는 스프링 상수를 조절하는 인자로 사용되며, 본 연구에서는 1을 사용하였다. 식 (7)의 스프링 상수를 이용하여 매 시간 간격마다 변형된 격자 변위 δ_{x_i} , δ_{y_i} 를 구하게 되는데, 이는 합력에 의한 각 방향으로의 정적 평형 방정식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\delta_{x_i}^{q+1} = (1 - \omega)\delta_{x_i}^q + \omega \frac{\sum_{m=1}^8 k_m \delta_{x_i}^q}{\sum_{m=1}^8 k_m} \quad (8)$$

여기에서 상첨자 q 는 스프링 상사 기법의 iteration level이다. 식 (8)에서 ω 는 relaxation factor로 본 연구에서는 1.9를 사용하였으며, 이는 수치실험을 통해 구한 최적의 값이다. 변형 정도가 크지 않을 경우 2~4번의 반복 계산으로도 충분한 정확도의 격자를 구성할 수 있다.

최종적으로 변형된 격자점의 새 위치는 식 (8)의 결과를 이용하여 다음과 같이 정할 수 있다.

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \delta_{x_i}^{m+1} \quad (9)$$

2.4 기하학적 보존법칙

변형격자기법을 사용하여 유동해석을 할 때 기하학적인 정보만을 이용하여 격자의 면적(3차원의 경우 체적)을 구하면, 균일 유동(uniform flow)이 이산화 방정식을 만족하지 않게 된다 [10]. 위와 같은 문제를 해결하기 위하여 고안된 기하학적 보존법칙에서는 시간에 따라 균일 유동이 항상 이산화 방정식의 해가 될 수 있도록 격자의 면적을 구하게 된다. 셀 면적은 식 (6)의 시간적분법으로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$V^{n+1} = V^n + \frac{\phi}{2 + \phi} (V^n - V^{n-1}) + \frac{2\Delta t}{2 + \phi} \{ \theta \psi^{n+1} + (1 - \theta) \psi^n \} \quad (10)$$

여기에서 ψ 는 cell의 각 방향의 경계면이 움직이면서 이동한 면적을 나타내며, 다음과 같이 정의된다.

$$\psi = (\xi_t \Delta S)_{i+1/2} - (\xi_t \Delta S)_{i-1/2} + (\xi_t \Delta S)_{j+1/2} - (\xi_t \Delta S)_{j-1/2} \quad (11)$$

III. 탄성 실린더 모델링

본 연구에서는 Anagnostopoulos 등에 의해 수행된 실린더의 와류유발진동 실험[2]에 대한 수치해석을 수행하였다. 실험에 사용된 장치 구성을 Fig. 3에 나타내었다. 이 실험에서 실린더는 와류에 의해 유동의 횡방향으로 진동하게 된다. Fig. 4는 위 실험장치를 2차원화하여 나타낸 1자유도계 실린더 동역학 모델이다.

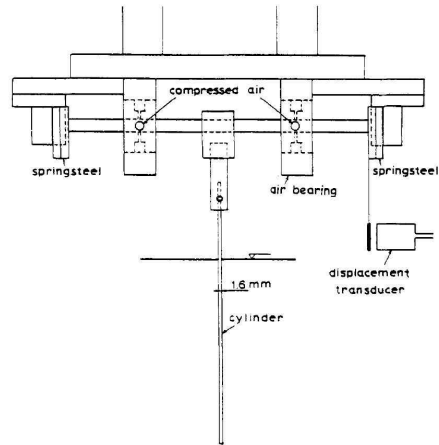


Fig. 3. Experimental setup[2]

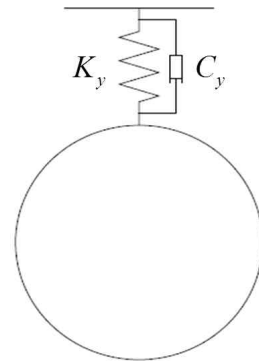


Fig. 4. Dynamic model of the cylinder

이 때 실린더의 운동을 지배하는 운동방정식은 아래와 같다.

$$(m/l)\ddot{Y} + C_Y\dot{Y} + K_Y Y = f_Y(t) \quad (12)$$

여기에서 m/l 은 단위 길이당 실린더의 질량, C_Y 는 감쇄상수, K_Y 는 스프링상수이며, Y 는 실린더 중심의 유동에 대한 횡방향 변위를 나타낸다. 또한 우변의 $f_Y(t)$ 는 유동장에서 계산되는 유동의 시간에 대한 횡방향 외력을 나타낸다.

식 (12)를 유동의 지배방정식과 같이 자유류의 음속 등 자유류 조건과 실린더 지름을 이용하여 무차원화된 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\ddot{y} + 2\zeta\bar{\omega}M_\infty\dot{y} + \bar{\omega}^2M_\infty^2y = \frac{2M_\infty^2}{\mu_s\pi}C_l(t) \quad (13)$$

여기에서 무차원화된 감쇄계수 ζ 및 $\bar{\omega}$, μ_s 는 다음과 같이 정의된다.

$$\zeta = \frac{C_Y}{2\sqrt{mK_Y/l}}, \bar{\omega} = 2\pi\frac{Df_n}{U_\infty}, \mu_s = \frac{2}{n\pi} \quad (14)$$

식 (14)에서 D 는 실린더 지름을 의미하며, n 은 실린더의 무차원화 된 질량비($n = \rho D^2 l / 2m$)이다.

식 (13)의 수치적분을 위해 본 연구에서는 Newmark- β 적분법을 사용하였다. Newmark- β 적분법은 대표적인 내재적(implicit) 적분법 중 하나로 외재적(explicit) 적분법에 비해 해의 수렴성과 해의 안정성이 보장된다는 장점이 있다.

IV. 유체-구조 결합 방법

유동의 지배방정식과 실린더의 운동방정식을 결합하여 해석하기 위해 Fig. 5와 같이 정의된 강성 결합방식과 연성 결합방식을 계산에 사용하였다. 계산 구조에서 알 수 있듯이 강성 결합방식의 경우 비정상 해석의 sub-iteration 사이에서 계속적인 정보 교환을 통한 결합을 수행하였으며, 연성 결합방식의 경우 한 physical time step이 전진할 때마다 수렴한 유동해를 적용하여 운동방정식을 한번 풀어 실린더를 이동시켰다.

V. 계산 결과 및 분석

5.1 고정된 실린더 해석

탄성 지지된 실린더에 대한 수치해석에 앞서 고정된 실린더에 대한 수치해석을 수행하였다.

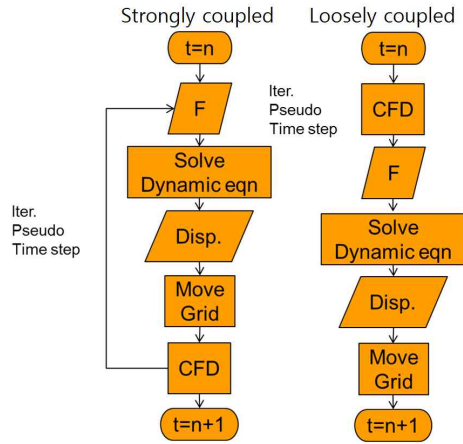


Fig. 5. Coupling methods

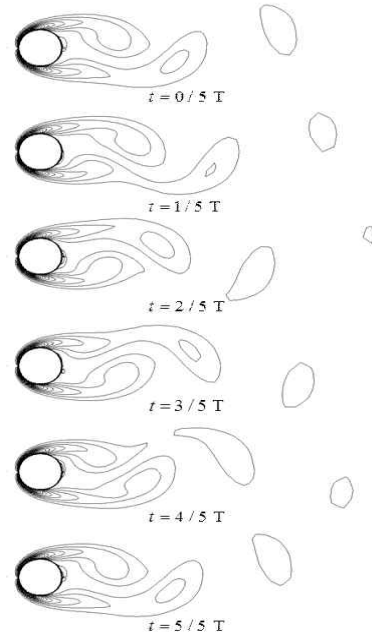


Fig. 6. Vorticity contour plots at Re=100

본 연구에서 수치해석을 수행한 레이놀즈수 90-120 사이의 영역에서는 실린더 후방에서 와류가 엇갈려서 주기적으로 발생하는 것을 관찰할 수 있다. Figure 6에는 레이놀즈수 100일 때의 와도(Vorticity) 선도를 나타내었다. 마하수는 좋은 수렴도를 얻기 위해 압축성 효과가 무시되는 0.2를 사용하였다. 그림으로부터 실린더 표면에서 박리에 의한 와류의 형성 및 이로 인한 비대칭 유동과 함께 주기성을 갖는 와류의 시간에 따른 변화를 관찰할 수 있다.

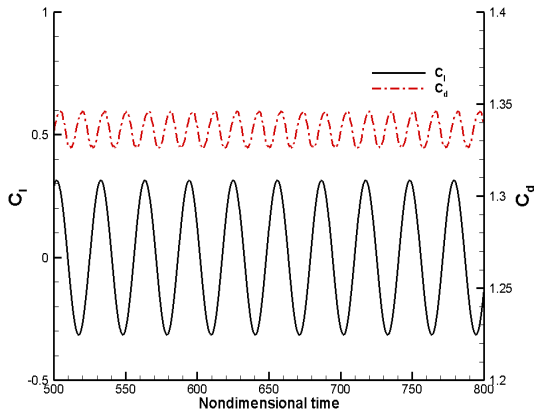


Fig. 7. Drag and lift coefficients at Re=100

Table 1. Comparison of the results at Re=100

	St	c_l	c_d
Present	0.160	± 0.314	1.336 ± 0.010
Liu et al.[11]	0.164	± 0.339	1.350 ± 0.012
Braza et al.[12]	0.160	± 0.250	1.364 ± 0.015
H. Ding et al.[13]	0.164	± 0.280	1.325 ± 0.008

이 때 양력과 항력 역시 특정한 주파수를 가지고 주기적으로 변하게 된다. 이를 Fig. 7에 나타내었다. 양력계수와 항력계수의 변화 및 유동의 Strouhal 수는 Table 1과 같다. 계산 결과 구해진 양력 계수 및 항력 계수, Strouhal 수는 선행 연구자들의 연구 결과[11-13]와 비교하여 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

5.2 탄성 지지된 실린더 해석

본 연구에서는 레이놀즈수 90-120 사이에서 탄성 지지된 실린더의 와류유발진동에 대한 수치해석을 수행하고, 실험 결과[2] 및 타 연구자들의 수치해석 결과[3,4]와 비교하였다. 실험에서의 실린더 물성치는 Table 2와 같으며 유동의 마하수는 고정된 실린더 해석에서와 같이 0.2이다.

Dettmer 등[3]은 연구를 통해 격자수가 많아짐에 따라 Lock-in 특성이 수렴하는 것을 확인하였다. 일반적으로 해의 정확성을 향상시키고, 수렴된 해를 얻기 위해서는 해석 모델의 격자수를 최대한 많이 사용하고 비정상 해석의 시간 간격을 최소화해야 한다. 하지만 해석 시간 역시 중요한

고려 사항 중의 하나이기 때문에 적정 신뢰 범위 혹은 수렴 범위 내에서 해석이 진행되어야 한다.

본 연구에서는 수렴된 해를 얻기 위해 특정 레이놀즈수(Re=108)에서 격자의 크기 및 비정상 해석의 시간 간격에 따른 실린더 변위를 측정하고 수렴 정도를 확인하였다. Fig. 8과 9에는 각각 격자 크기와 비정상 해석의 시간 간격에 따른 실린더의 최대 변위 비율을 나타내었다.

격자에 따른 변위의 경우, 101×101 의 크기를 갖는 격자를 기준으로 격자 크기에 따라 최대 1% 차이를 보인다. 또한 비정상 해석의 시간 간격에 따른 변위의 경우, 무차원화된 시간간격 0.4를 기준으로 최대 약 1%의 차이를 확인할 수 있다. 즉, 이 범위 내에서 계산을 수행할 경우 충분히 수렴한 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 10 과 같은 격자수 101×101 의 O-type 정렬 격자를 사용하여 계산하였다. 비정상 해석의 무차원화된 시간 간격은 0.1이며, sub-iteration 횟수는 40회이다.

Table 2. Cylinder properties

Natural frequency (f_n)	7.016 Hz
Non-dimensional mass ratio ($n = \rho D^2 l / 2m$)	0.00427
Damping ratio (ζ)	0.0012

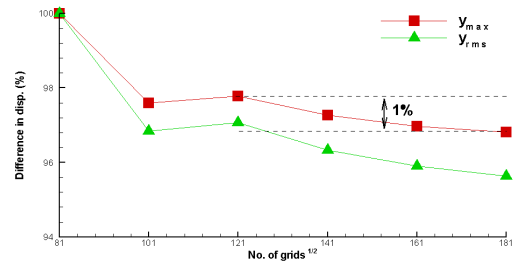


Fig. 8. Displacement changes with the numbers of grid

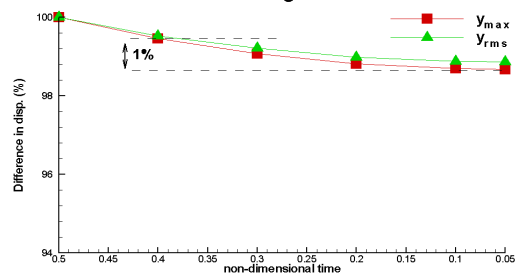


Fig. 9. Displacement changes with the non-dimensional time steps

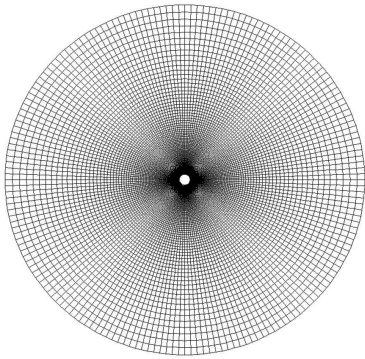


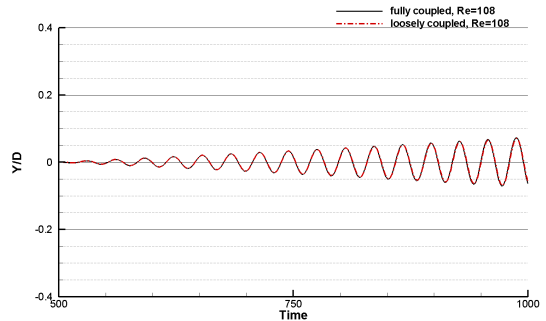
Fig. 10. Configuration of the grid

결합방법이 해석 결과에 미치는 영향에 대해 살펴보기 위해 레이놀즈수 108에서 결합방법을 달리하여 계산을 수행하였다. Table 3에는 두 가지 결합방법에 따른 계산 결과를 나타내었다. 최대 변위에서 약 2%의 차이를 보이고 있지만, Fig. 11에서와 같이 약간의 시간 지연을 제외하고 큰 차이가 없다. 오히려 계산량이 더 적은 연성결합 방법이 주기당 계산시간이 더 적게 걸림으로써 최대 진폭 및 Lock-in 영역을 확인하는데 있어서는 강성결합 방법에 비해 더 효율적인 방법이라고 할 수 있다. 하지만 앞서 언급한 바와 같이 연성결합 방법에는 시간 지연이 존재하므로 엄밀한 시간해를 요하는 계산에서는 강성결합 방법이 더 정확하다.

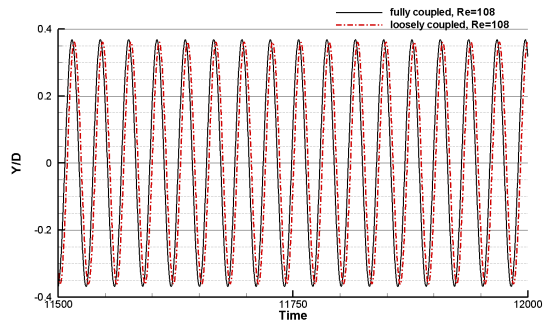
레이놀즈수에 따른 계산 결과를 Fig. 12-14에 나타내었다. Fig. 12에는 FFT를 통해 구한 레이놀즈수 112에서 고정된 실린더와 진동하는 실린더의 Strouhal 수를 나타내었다. Strouhal 수가 실린더의 진동에 의해 바뀔 수 있다. 이 때 와류홀림주파수는 실린더의 고유진동수에 근접하며, 이로 인해 Lock-in 현상이 발생하게 된다.

다음으로 Fig. 13은 진동하는 실린더의 최대 변위비(Y/D)와 주파수비(f_v/f_n)를 나타낸 것이다. 레이놀즈수 102에서 112에 걸쳐 Lock-in 현상이 발생하였으며, 선행 연구자들의 결과와 마찬가지로 Lock-in 영역의 하한에서 최대변위가 발생하였다. 또한 고정격자를 사용하여 격자를 이동시켜가면서 계산을 수행한 이전 연구 결과와 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.

실험 결과와 수치해석 결과를 비교하면 최대 변위 및 Lock-in 영역 폭의 차이를 확인할 수 있는데, 이는 실험 논문[2] 및 Dettmer의 논문[3]에서 밝힌 바와 같이 실험의 3차원 효과 때문인 것으로 예상된다. 실제 실험에서는 실린더의 끝단에 end plate를 설치하지 않아서 결과에 3차원 효과를 포함하고 있다.



(a)



(b)

Fig. 11. Comparison of the displacement according to coupling method

Table 3. Computational results according to the coupling methods

	Strongly Coupled	Loosely Coupled
Y/D_{max}	0.3686	0.3612
Strouhal No.	0.1633	
CPU time(T)	220s	218s

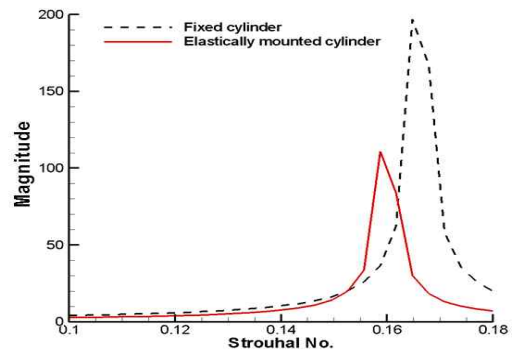


Fig. 12. Frequency response of the transverse force, Re=112

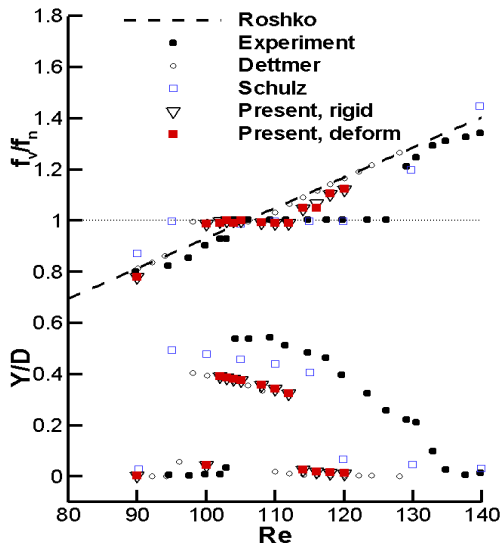


Fig. 13. Amplitudes and frequencies of the oscillating cylinder

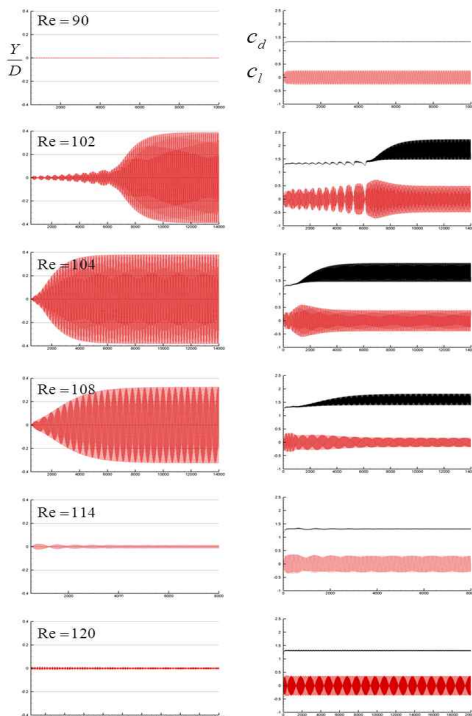


Fig. 14. Evolution of the amplitude and the aerodynamic coefficients

Figure 14에는 진동에 따른 변위 및 양/항력 계수의 발달과정을 나타내었다. Lock-in이 처음 발생하는 레이놀즈수 102에서는 변위가 일정 시

간이 지난 후 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이 때 양력의 경우 이전까지 꾸준히 증가하는 추세를 보이다가 Lock-in이 발생하면서 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 항력은 Lock-in이 발생함에 따라 급격하게 증가한다. Lock-in 영역 내에서는 레이놀즈수가 커질수록 최대 변위 및 양/항력의 변동 폭이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

VI. 결 론

본 연구에서는 저 레이놀즈수에서의 와류유발 진동에 대한 수치해석을 수행하였다. 실린더의 움직임을 모사하기 위해 스프링 상사기법을 적용한 변형격자와 고정격자를 사용하였다. 해석 결과 수렴된 상태에서의 Lock-in 특성을 포착하였다. 해석 결과는 실험 결과 및 타 연구자의 수치 해석 결과와 경향성이 일치함을 확인할 수 있었다. 또한 변형 격자기법을 사용하지 않고 격자를 이동시켜 계산을 수행한 이전 결과와 거의 일치하였다. 시간 엄밀해를 구하지 않고 Lock-in 영역, 최대 변위 등의 Lock-in 특성 확인만을 위해서는 연성 결합방법을 사용할 경우 강성 결합에 비해 효율적인 계산이 가능함을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2011-0029094)

References

- 1) "The Specialist Committee on Vortex Induced Vibrations Committee," Proceedings of 25th ITTC, Vol. II, 2008.
- 2) Anagnostopoulos, P., and Bearman, P.W., "Response Characteristics of a Vortex-Excited Cylinder at Low Reynolds Numbers," Journal of Fluids and Structures, Vol. 6, Issue 1, 1992, pp. 39-50.
- 3) Dettmer, W., and Peric, D., "A Computational Framework for Fluid-Rigid Body Interaction: Finite element formulation and applications," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 195, Issue 13-16, 2006, pp. 1633-1666.

4) Schulz, K.W., and Kallinderis, Y., "Unsteady Flow Structure Interaction for Incompressible Flows Using Deformable Hybrid Grids," *Journal of Computational Physics*, Vol. 143, Issue 2, 1998, pp. 569-597.

5) Joo, W., Lee, K.-H., Yee, K., and Lee, D.-H. "Strongly Coupled Method for 2DOF Flutter Analysis," *J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 34, No. 1, 2006, pp. 24-31.

6) Ryu, H.Y., Shin, S.J., Kwak, J.S., Lee, J., Yee, K., and Kim, D., "Fluid-Structure Combined Analysis for a Helicopter Forward Flight," 2012 KSAS Fall Conference, Yongpyong Resort, Gangwon-do.

7) Weiss, J.M., and Smith, W.A., "Preconditioning Applied to Variable and Constant Density Flows," *AIAA Journal*, Vol. 33, No. 11, 1995, pp. 2050-2057.

8) Batina, J.T., "Unsteady Euler Algorithm With Unstructured Dynamic Mesh for Complex-Aircraft Aeroelastic Analysis," *AIAA Paper* 89-1189, 1989.

9) Baran, O.U. "Control Methodologies in Unstructured Hexahedral Grid Generation",

Ph.D. Thesis, Vrije Universiteit Brussel, 2005.

10) Thomas, P.D., and Lombard, C.K., "The Geometric Conservation Law-A Link Between Finite Difference and Finite Volume Methods of Flow Computation on Moving Grids," *AIAA Paper* 78-1208, 1978.

11) Liu, C., Zheng, X., and Sung, C.H., "Preconditioned Multigrid Methods for Unsteady Incompressible Flows," *Journal of Computational Physics*, Vol. 139, Issue 1, 1998, pp. 35-57.

12) Braza, M., Chassaing, P., and Minh, H.Ha, "Numerical Study and Physical Analysis of the Pressure and Velocity Fields in the Near Wake of a Circular Cylinder," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 165, 1986, pp. 79-130.

13) Ding, H., She, C., Yeo, K.S., and Xu, D., "Simulation of Incompressible Viscous Flows past a Circular Cylinder by Hybrid FD Scheme and Meshless Least Square-Based Finite Difference Method," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 193, Issue 9-11, 2004, pp. 727-744.