



진동하는 익형을 지나는 비정상 유동에 관한 계산 (Computation of Unsteady Flows over an Oscillating airfoil)

양충모¹⁾, 백제현²⁾
C.M. Yang, J.H. Baek

A flowfields around a NACA0012 airfoil pitching about a 1/4 chord and plunging in vertical displacement are analyzed by solving two-dimensional compressible Navier-Stokes equations. A steady solution was solved first as a validation of the code used and the results were compared with experimental data. Then as a unsteady case, the oscillatory airfoil was solved to compare the results with experimental data. Oscillating rate of pitching and plunging motion was set to have analogy and the magnitude of plunging was set using the magnitude of pitching angle of attack. Finally combined pitching and plunging motion was solved to show the effect of 2 different types of oscillating motion of the airfoil.

1. 서론

진동하는 날개 위를 지나는 비정상 유동은 항공기, 전진 비행하는 헬리콥터 로터나 터빈 블레이드 등 많은 공학적인 응용분야에서 발생하는 중요한 현상이다. 대부분의 경우에 진동하는 박리유동은 바람직하지 못한 현상으로 나타나며 공력성능의 제약조건으로 작용한다. 그래서 익형주위의 비정상유동에 대한 연구는 주로 flutter, vibrations, buffeting, gust response, 동적실속 등의 바람직하지 못한 영향을 피하거나 줄이는 것에 관한 것이었다. 특히 동적실속은 총류에서 난류로의 천이 현상, 역압력 구배에 의한 경계층의 발달, 박리된 전단유동에서의 점성-비점성 비선형 상호작용, 익형을 지나는 거대와류의 발달, 익형 후미에서의 두 와류의 결합 등의 복잡한 유동현상을 포함하고 있으며, 정지된 익형을 지나는 정상유동이나 준정상유동과 비교할 때 몇 가지 중요한 특징을 보여준다. 하나는 delayed 또는 massive separation에 의한 양력이나 항력, 회전력 같은 공기력의 hysteresis를 보여준다는 것이고 또 다른 하나는 익형의 아랫부분에서의 큰 규모의 vortex shedding과 pairing으로 야기되는 압력의 진동현상이다. 이때 압축성(compressibility)과 3차원에 의한 영향이 상당하다고 알려져 있다. 이러한 익형의 주기적인 진동에 의하여 발생하는 비정상 유동현상에서 가장 중요한 무차원 변수는 reduced frequency, $k = \omega c / 2U_\infty$ 로서, 이 때 ω 는 진동의 각속도이고, c 는 익형의 코드길이, U_∞ 는 평균 자유유동속도이다.

이러한 유동자체의 복잡성과 그 응용분야의 다양성으로 인하여 지금까지 익형주위의 비정상 유동에 관한 많은 연구가 이루어져 왔다. McCroskey(1982)과 Carr(1988)은 70, 80년대의 동적실속을 포함한 다양한 비정상 유동의 연구에 대한 광범위한 정리를 하면서, 난류모델이나 격자밀집도, 수치확산, 시간중분의 영향 등 수치적 기법을 포함하여 체계적으로 동적실속에 관하여 다루었다. Ko(1995)는 80년대부터 90년대 초반까지의 동적실속 연구에 관한 고찰과 함께 zero-, one-, two-equation 난류 모델을 비교하였으며, attached flow, light dynamic stall, deep stall의 3가지 다른 비정상 유동현상에 대한 수치해석을 실험값과 비교하였다.

한편, plunging에 대한 연구도 초기 익형의 연구와 더불어 일찍부터 이루어져 왔는데, Carta(1979)는 pitching과 plunging의 일대일 대응관계를 해석하였으며, Huang(1983)은 평판과 익형에 대하여 pitching과 plunging 운동에 대한 수치해석을 실시하였다.

본 논문에서는 진동하는 날개위를 지나는 비정상 유동의 효과적인 제어를 위한 전 단계로서 pitching과 plunging하는 익형주위의 유동장에 대한 2차원 비정상, 점성유동을 해석하였다. 익형은

1) 포항공대 기계공학과 대학원
2) 포항공대 기계공학과

NACA0012를 이용하였으며 유동조건이나 진동폭 및 주기는 실험값과 같도록 설정하였다. 우선 2차원 점성코드의 검증으로 $\alpha=2.79^\circ$ 의 RAE2822 익형을 지나서 $M_\infty=0.73, Re_c=6.5 \times 10^6$ 의 점성유동에 정상유동을 해석하였다. 다음으로 익형 코드길이의 1/4 지점을 중심으로 주기적 회전운동하는 익형주위의 $M_\infty=0.73, Re_c=6.5 \times 10^6$ 인 조건의 유동에 대한 비정상유동을 해석하였다. 이 경우 받음각은 $\alpha=\alpha_0+\alpha_m \sin(\omega t)=\alpha_0+\alpha_m \sin(2M_\infty kt)$ 로 주어지며 이때 k 는 reduced frequency로 실험결과와 비교하기 위하여 실험값과 동일하게 설정하였다.

주기적으로 pitching 운동하는 익형의 유동과 비교하기 위하여 해당 받음각의 진동폭에 상응하는 유효받음각을 갖도록 수직이동하는 plunging 운동하는 익형주위의 유동에 관하여 해석하여, pitching 운동만 하는 경우와 pitching과 plunging 운동을 동시에 하는 경우의 공력계수의 hysteresis를 비교하였다.

2. 수치 해석 방법

2.1 지배방정식(2차원 Navier-Stokes 방정식)

2차원 압축성 무차원화된 Navier-Stokes 방정식을 generalized curvilinear 좌표계에서 다음과 같이 나타내어진다.

$$\frac{1}{J} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\hat{F}-\hat{F}_v)}{\partial \xi} + \frac{\partial(\hat{G}-\hat{G}_v)}{\partial \eta} = 0$$

$$Q=[\rho, \rho u, \rho v, e]^T, F=[\rho u, \rho u^2+p, \rho uv, u(e+p)]^T, G=[\rho v, \rho uv, \rho v^2+p, v(e+p)]^T$$

$$F_v=[0, \tau_{xx}, \tau_{xy}, u\tau_{xx}+v\tau_{xy}-\dot{q}_x]^T, G_v=[0, \tau_{yx}, \tau_{yy}, u\tau_{yx}+v\tau_{yy}-\dot{q}_y]^T$$

$$\hat{F}=(\xi_x F+\xi_y G)/J, \hat{G}=(\eta_x F+\eta_y G)/J, \hat{F}_v=(\xi_x F_v+\xi_y G_v)/J, \hat{G}_v=(\eta_x F_v+\eta_y G_v)/J$$

위 방정식에서 ρ 는 밀도, u, v 는 Cartesian 좌표계에서의 x, y 방향 속도성분이며, e 는 단위부피당 총에너지이다. 압력은 완전기체에 대한 상태방정식으로부터 다음과 같이 주어진다. 여기서 γ 는 비열비로서 공기인 경우 1.4이다.

$$p=(\gamma-1)\left[e-\frac{1}{2}\rho(u^2+v^2)\right]$$

2.2 수치해석 기법

공간에 대한 이산화를 위하여 비점성 플럭스 벡터는 Roe의 flux difference splitting 방법(이하 FDS라 한다)를 이용하여 이산화하였다. 이 방법은 cell의 경계상의 플럭스의 차이를 각 특성과(characteristic wave)와 관련된 성분으로 나누는 방법으로, 엔트로피 조건을 만족하지 못하여 물리적으로 불가능한 expansion shock을 초래할 수 있으므로 엔트로피 보정을 해주었다. 또한, 더 높은 정확도를 얻기 위해서 cell 경계 좌우의 상태 변수인 Q_L 과 Q_R 을 낮은 차수의 구간별 다항식 내삽 함수로써 근사하는 MUSCL scheme을 사용하였다. 3차의 정확도를 얻기 위해서는 일반적인 upwind-biased 내삽 식을 이용하고, 단조특성을 위해 limiter를 함께 사용한다. 본 연구에서는 다음과 같은 "minmod" 함수를 사용하였다.

$$\psi_{MD}(r)=\text{minmod}(r, 1)$$

시간에 대한 이산화로는 먼저 지배 방정식의 공간 이산화로부터 coupled differential equation들을 얻은 후에, 위의 식에 후방 Euler 음함수 시간 적분법을 적용하고, Taylor 급수 전개를 이용하여 알려진 n 번째 시간 단계로부터 시간 및 공간에 대하여 선형화함으로써 수치해를 얻는다. 또한 시간에 대하여 2차의 정확도를 가지도록 하기 위하여 Beam-Warming의 해법에서 사용된 세점 Euler 내재적 시간 적분법을 적용하였다.

난류 유동을 해석하기 위해 본 연구에서는 Baldwin-Lomax의 대수적인 난류모델을 사용하였다.



이 모델은 경계층의 두께나 영역내에서의 특성을 결정할 필요가 없는 two-layer algebraic eddy viscosity 모델로서 계산에 사용된 상수들은 다음과 같다.

$$x = 0.41, \quad A^+ = 26, \quad C_{cp} = 1.6, \quad C_{Kleb} = 0.3, \quad C_{uk} = 0.25$$

2.3 격자계의 구성

계산에 사용된 격자계는 RAE2822 익형과 NACA0012 익형을 이용하여 C-type으로 구성하였으며, pitching과 plunging을 묘사하기 위하여 각 경우의 해당 받음각(α)과 수직이동거리(h) 만큼 회전과 이동을 시키도록 하였다.

받음각의 경우 $\alpha = \alpha_0 + \alpha_m \times \sin(\omega t) = \alpha_0 + \alpha_m \times \sin(2M_\infty k t)$ 로 주어지는데, 여기에서 $k = \tilde{\omega} \tilde{c} / 2 \tilde{U}_\infty$ 는 reduced frequency를 나타내며, 실험값과의 비교를 위하여 결정되었다. 또한 수직이동거리는 $h = h_0 + h_m \times \cos(\omega t)$ 로 주어지는데, 유입유동에 대하여 상대적인 움직임으로 인하여 유효받음각은 $\alpha_{eff} = -h / U_\infty$, $(\alpha_{eff})_{max} = -h_{max} / U_\infty$ 으로 계산될 수 있다. 즉 주어진 받음각의 주기와 진폭에 따라 이와 상동한 수직이동의 진폭은 $h_m = \frac{U_\infty}{\omega} \tan \alpha_m$ 으로 계산될 수 있다. 이를 무차원 변수들로 표시하면, $h_m = \frac{1}{2k} \tan \alpha_m$ 로 나타낼 수 있다. 비정상 유동해석을 위하여 매번 시간진행마다 해당 받음각(α)과 수직이동거리(h)의 격자계를 새로 구성하면서 계산을 진행하였다. 보통 진동하는 익형의 비정상 계산에서는 계산시간의 단축을 위하여 최대 받음각과 최소 받음각인 경우의 격자만을 생성한 후 보간법을 사용하여 중간단계의 격자를 계산해내는 경우가 많은데, 본 연구에서는 격자의 질과 정확성을 위하여 매 시간진행마다 해당 격자를 생성하는 방법을 택하였다.

3. 결과

3.1 정상유동에 대한 검증

수치해석의 전체적인 정확성에 대한 검증을 위하여 먼저 RAE2822 익형에 대한 비점성/ 점성 정상유동 해석을 실시하였다. 그림 1은 계산에 사용된 격자계이고, 그림2는 마하수 0.73, 레이놀즈수 6.5×10^6 의 유동에 받음각 2.79° 로 놓여있는 RAE2822 익형 주위의 압축성 정상유동에 대한 점성 해석결과로서, 익형 표면의 압력계수 분포를 나타낸 것이다. Cook et al.(1979)의 결과와 압력파의 크기 및 위치 등이 잘 일치함을 보여주고 있다.

3.2 pitching 운동하는 NACA0012 익형 주위의 비정상 유동해석

다음으로 1/4 코드를 중심으로 pitching 운동하는 NACA0012 익형 주위의 비정상 유동해석을 실시하였는데, 유동조건은 마하수는 $M_\infty = 0.755$, 레이놀즈수는 $Re_c = 5.5 \times 10^6$ 로 주어졌으며 pitching 운동은 아래와 같은 사인함수의 형태로 주어졌다.

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_m \times \sin(\omega t) = \alpha_0 + \alpha_m \times \sin(2M_\infty k t)$$

여기에서 $\alpha_m = 0.016^\circ$, $\alpha_0 = 2.51^\circ$, $\omega = 2M_\infty k$ 이고 reduced frequency, $k = \tilde{\omega} \tilde{c} / 2 \tilde{U}_\infty = 0.0814$ 로서 비교를 위하여 실험 값과 일치시켰다. 비정상 유동해석의 초기조건은 평균 피치각에서의 정상유동 해석결과를 사용하여 전체 5주기를 해석하였는데 주기 2배 이상에서 이미 충분한 주기성을 보여주었다.

그림 3은 한주기동안의 시간변화에 따른 익형의 pitching운동과 익형주위의 압력분포를 나타낸 것으로, 압력파가 익형의 상하면으로 주기적으로 이동하는 모습이 잘 나타나 있다. 그림 4는 익형의 수직력계수와 pitching moment 계수의 받음각 변화에 따른 분포를 실험값과 비교하여 보여주고 있는데, 각 받음각의 정상상태에 비하여 받음각이 증가하는 동안(nose-up)에는 유효받음각의 감소 효과로 양력계수가 줄어들고 받음각이 줄어드는 동안(nose-down)에는 반대로 양력계수가 증가하는

비정상 영향의 hysteresis 보여주고 있다. 그림 5에서는 받음각의 변화에 따른 익형 표면의 압력계수 분포를 실험값과 비교하여 나타내었다. 받음각이 최고치에 가까워지는 nose-up 말기 부근에서 실험값과 약간의 차이가 남을 보여주고 있는데, 이와 같은 결과는 비정상 유동에 대한 난류모델의 부정확성 및 시간에 따른 후류형상의 변화를 고려하지 않은 점등에 의한 수치오차로 여겨진다. 그리고 격자수와 시간증분을 바꾸어 가며 계산한 결과에서는, 주유동방향의 격자수나 시간증분에 비하여 벽면에 수직인 방향으로의 격자점 배치가 수치해의 정확도에 큰 영향을 미침을 확인할 수 있었다.

3.3 plunging 운동하는 NACA0012 익형 주위의 비정상 유동해석

다음으로 유동과 수직인 방향으로 상하 plunging 운동하는 NACA0012 익형 주위의 비정상 유동 해석을 하였는데, plunging의 영향을 좀 더 잘 살펴보기 위하여 평균받음각 $\alpha_0 = 10^\circ$ 과 유효받음각의 최대크기를 $\alpha_m = 10^\circ$ 로 설정하고, 유동조건을 $M_\infty = 0.3$, $Re_c = 4 \times 10^6$ 로 하였다. 이를 바탕으로 plunging 운동의 진폭을 $h = h_0 + h_m \times \cos(\omega t)$, $h_m = \frac{1}{2k} \tan \alpha_m$ 으로 계산하였으며, reduced frequency는 $k = 0.1$ 로 정하였다. 그림 6에서는 수직위치의 변위에 따른 익형의 수직력계수와 pitching moment 계수를 보여주고 있다. pitching의 경우와 마찬가지로 해당 받음각의 정상상태에 비하여 받음각이 증가하는 동안(nose-up)에는 유효받음각의 감소효과로 양력계수가 줄어들고 받음각이 줄어드는 동안(nose-down)에는 반대로 양력계수가 증가하는 비정상 영향의 hysteresis 보여주고 있는데, 그 크기는 pitching 운동의 경우에 비하여 상대적으로 작게 나타남을 보여주었다.

3.4 pitching과 plunging 운동하는 NACA0012 익형 주위의 비정상 유동해석

plunging 운동과 이에 대응하는 pitching 운동을 함께 고려한 NACA0012 익형 주위의 비정상 유동해석을 실시하였다. 유동조건은 $M_\infty = 0.3$, $Re_c = 4 \times 10^6$ 으로 앞의 plunging 운동의 조건과 일치시켰으며, pitching 운동의 받음각 변화는 $\alpha(t) = 10^\circ + 10^\circ \times \sin(2M_\infty kt)$, plunging 운동의 수직변위는 $h = h_m \times \cos(\omega t)$, 이때의 진폭은 $h_m = \frac{1}{2k} \tan 10^\circ$, reduced frequency는 $k = 0.1$ 으로 주어졌다. 그림 7는 pitching 운동의 받음각 변화에 따른 익형의 수직력계수와 pitching moment 계수의 hysteresis를 pitching 운동만이 있는 경우와 비교하여 나타내었다. plunging 운동에 의한 영향이 반영되어 pitching 운동만의 결과에 비하여 비정상의 영향이 적게 나타남을 보여주고 있다. 이러한 plunging 운동이 수직력계수나 pitching moment 계수에 미치는 영향은 plunging 운동의 진동수나 크기, 그리고 변위와 pitching 주기의 위상차등에 의하여 많이 달라지게 된다. 실제 응용문제들에서 pitching과 plunging이 동시에 작용하는 비정상의 유동해석을 위해서는 좀 더 많은 연구가 필요하다.

4. 결론

지금까지 진동하는 날개위를 지나는 비정상 유동의 효과적인 제어를 위한 전 단계로서 pitching과 plunging하는 익형주위의 유동장에 대한 2차원 비정상, 점성유동을 해석하였다. pitching 운동하는 NACA0012 익형 주위의 비정상 유동해석을 통하여 양력이나 항력, 회전력 같은 공기력의 hysteresis 특징을 확인할 수 있었으며, 벽면에 수직인 방향으로의 격자점 배치가 수치해의 정확도에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 다음으로 pitching 운동하는 익형 유동과 비교하기 위하여 해당 받음각의 진동폭에 상응하는 유효받음각을 갖도록 수직이동하는 plunging 운동하는 익형주위의 유동에 관하여 해석하여 pitching 운동의 경우와 유사한 공기력의 hysteresis의 주기적 특성이 나타남을 보여주었다. pitching과 plunging 운동을 동시에 하는 경우의 공력계수의 hysteresis를 pitching 운동만의 결과와 비교하여 plunging의 영향이 상대적으로 적게 나타남을 알 수 있었다.

REFERENCES

Carr, L.W. (1988): *Progress in analysis and prediction of dynamic stall*, J. of Aircraft, Vol.25, No.1: 6-17

Carta, F.O., (1979): *A comparison of the pitching and plunging response of an oscillating airfoil*, NASA CR-3172

Cook, P., McDonald, M. and Firmin, M., (1979): *Aerofoil RAE2822 - pressure distribution and boundary layer wake measurements*, AGARD R-138

Huang, S.M., (1983): *Computational analysis of unsteady flow past airfoils with flapping and/or pitching motion*, Dissertation Abstracts International Part B: Science and Engineering, vol.43, no.10, 159pp

Katz, J. and Plotkin, A., *Low-Speed Aerodynamics - From Wing Theory to Panel Methods*, McGraw-Hill Inc., pp.331-342

Ko, S.H. and McCroskey, W.J. (1995): *Computation of unsteady separating flows over an oscillating airfoil*. Advances in Turbulence Research, 141-165.

McCroskey, W.J. (1982): *Unsteady airfoils*. Ann. Rev. Fluid Mech., Vol.14: 285- 311.

Roe, P.L. (1981): *Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and differerece schemes*. Journal of Computational Physics, Vol.43:357-372.

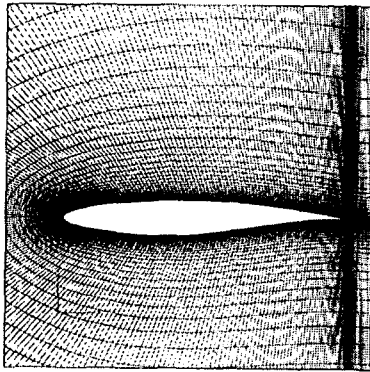


그림 1 RAE2822 익형의 격자계

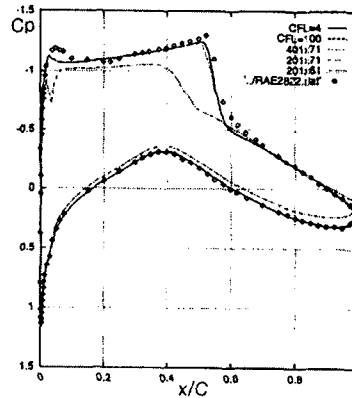


그림 2 RAE2822 표면의 압력계수 분포 ($\alpha = 2.79^\circ$, $M_\infty = 0.73$, $Re_c = 6.5 \times 10^6$, 점성)

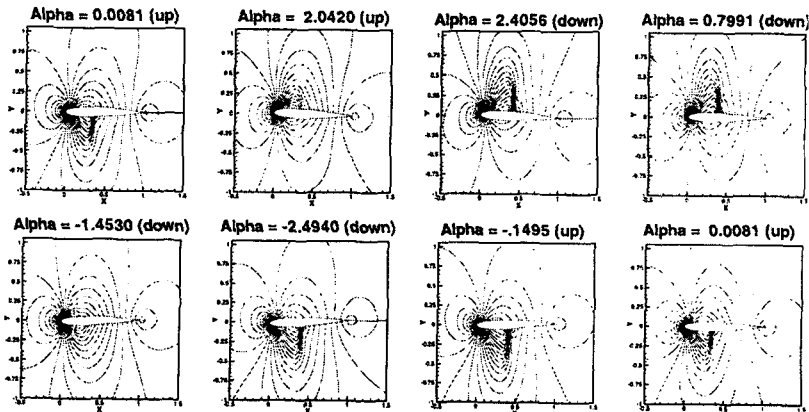


그림 3 pitching 운동시의 받음각에 대한 압력분포도 ($\alpha = 0.016^\circ + 2.51^\circ \sin(2M_\infty kt)$, $k = 0.0814$, $M_\infty = 0.755$, $Re_c = 5.5 \times 10^6$)

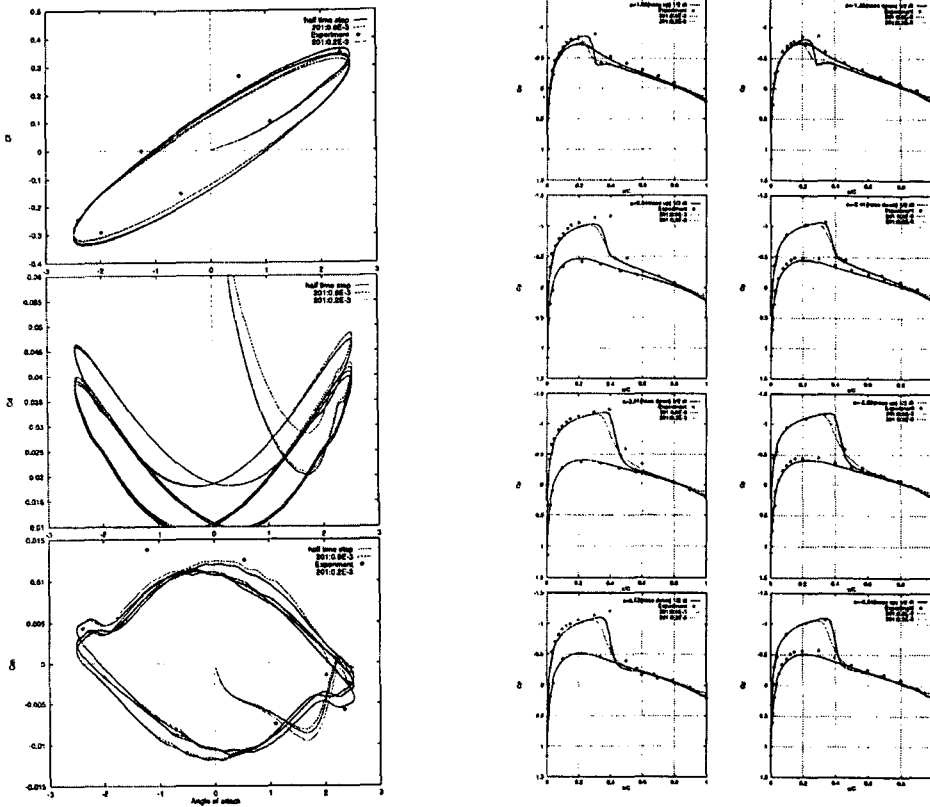


그림 4 받음각의 변화에 따른 pitching 익형의 양력, 항력, 회전력 계수 hysteresis

그림 5 받음각의 변화에 따른 pitching 익형 표면의 압력계수 분포
 ($\alpha = 0.016^\circ + 2.51^\circ \times \sin(2M_\infty kt)$, $k = 0.0814$, $M_\infty = 0.755$, $Re_c = 5.5 \times 10^6$)

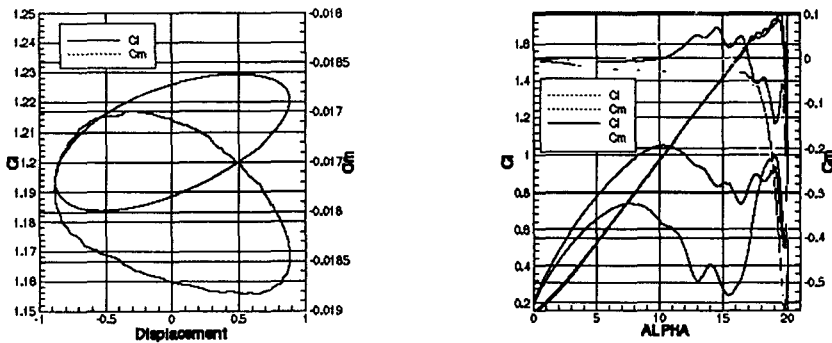


그림 6 plunging 익형의 양력, 항력, 회전력 계수 hysteresis
 ($\alpha(t) = 10^\circ + 10^\circ \sin(2M_\infty kt)$, $k = 0.1$, $M_\infty = 0.3$, $Re_c = 4.6 \times 10^6$)

그림 7 pitching과 plunging 운동을 동시에 하는 익형의 양력, 항력, 회전력 계수 hysteresis
 ($\alpha(t) = 10^\circ + 10^\circ \sin(2M_\infty kt)$, $h = \frac{1}{2k} \tan 10^\circ \cos(2M_\infty kt)$, $k = 0.1$, $M_\infty = 0.3$, $Re_c = 4.6 \times 10^6$)