

論文

동시에 플래핑하는 직렬배치 익형의 추력 생성 연구

이관중*

A Study on Thrust Generation by Simultaneous Flapping Airfoils in Tandem Configuration

Kwanjung Yee*

ABSTRACT

In this study, the thrust generation by simultaneous flapping airfoils in tandem configuration is parametrically studied with respect to flapping frequency, amplitude and relative location. Navier-Stokes solver with overset grid topology is employed to calculate the unsteady flowfields. The computation results indicate that when the two airfoils stroke in-phase - flapping phase lag is zero - the maximum propulsive efficiency and thrust can be obtained for most frequency and amplitude range. At a flapping amplitude of 0.2 chord and a reduced frequency of 0.75, the propulsive efficiency of aft airfoil is enhanced by about 37 % compared with that of forward airfoil. However, if flapping frequency exceeds some critical value, the strength of the leading edge vortex of aft airfoil is fortified by the trailing edge vortex of the forward airfoil, resulting in poor propulsive efficiency. It is also found that out-of-phase flapping has relatively low propulsive efficiency and thrust since vortical wake of the forward airfoil interacts with the leading edge vortex of aft airfoil in the unfavorable fashion. The total thrust and propulsive efficiency are shown to decrease with the horizontal miss distance of the aft airfoil. On the contrary, the vertical miss distance has little effect on the overall aerodynamic performance.

초 록

본 논문에서는 직렬 배치된 익형이 동시에 플래핑 운동을 할 때의 추력 생성 과정과 유동특성에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 익형의 운동 주파수, 진폭 및 전·후방 익형 간의 상대거리 등에 대한 계산을 체계적으로 실시하여 다음과 같은 사실을 확인할 수 있었다. 먼저, 위상차 없이 전·후방 익형이 동시에 병진운동을 할 경우 대부분의 주파수와 진폭 영역에서 후방익형의 추력과 추진효율이 최대화됨을 알 수 있었다. 플래핑 진폭이 0.2 코드, 무차원주파수가 0.75일 경우, 후방익형의 추진효율이 전방익형보다 37% 이상 개선되는 것으로 계산되었다. 단, 익형의 운동 진폭과 주파수가 임계치를 초과할 경우 전방익형의 뒷전와류에 의해 후방익형의 앞전와류의 강도가 강화되면서 전체적인 추력과 효율이 저하될 수 있다. 둘째, 전·후방익형이 180도의 위상차를 갖고 운동을 할 경우에는 전방익형의 후류와 후방익형이 서로 반대방향으로 상호작용을 함으로써 결과적으로 공력특성이 악화되는 것을 알 수 있었다. 셋째, 후방익형의 배치 위치에 따른 특성은 수평방향으로는 두 익형사이의 거리가 멀어질수록 추력과 효율이 동시에 떨어지며, 수직 방향 위치변화에 따른 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

Key Words : Double Flapping Airfoil(이중 플래핑 익형), Tandem Configuration(직렬배치)

† 2005년 7월 13일 접수 ~ 2005년 12월 5일 심사완료

* 정회원, 부산대학교 항공우주공학과

연락처, E-mail : daedalus@pusan.ac.kr

부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

1. 서 론

특정한 주파수 영역에서 플레핑 운동을 하는 익형에 음의 항력 즉 추력이 발생하는 Knoller-Betz 효과는 20세기 초반부터 이미 알려져 있었으나 응용 범위의 한계 등으로 von Karman의 초기 연구를 제외하고는 주목할 만한 연구가 이루어지지 못하였다[1,2]. 그러나, 최근 저 레이놀즈 영역에서 운용하는 초소형 비행체의 추진 장치로 플레핑 날개가 주목을 받기 시작하면서, 플레핑하는 익형의 비정상 공력특성과 응용 가능성에 대한 연구가 증가하는 추세에 있다.

Ramamurti[3] 등은 익형의 플레핑 주파수와 진폭, 위상차 등에 대한 수치적·실험적 연구를 수행한 바 있으며, Wang[4] 과 Isogai[5] 등은 큰 진폭을 갖는 플레핑 운동의 경우 앞전 박리를 동반한 동적실속(dynamic stall)이 추력발생의 중요한 메커니즘이 될 수 있다는 것을 확인하였다. 국내에서도 이정상 등[6,7]에 의해서 플레핑 익형에 대한 공력특성과 플레핑 유동장에 적합한 최적 익형 설계에 대한 연구가 수행되고 있다. 플레핑 익형에 대한 기존의 연구는 주로 추력 발생 메커니즘을 이해하는데 초점을 맞추고 있는 반면, 추력과 추진효율을 증가시키기 위한 연구는 상대적으로 빈약한 상황이라고 할 수 있다.

최근 Tuncer[8] 등은 플레핑 날개의 추력 및 효율을 향상시킬 수 있는 하나의 방법으로 플레핑 익형을 직렬로 배치하는 형태를 제안하였다. 직렬 배치된 익형 형태는 이미 2차 대전 무렵 독일의 Schmidt에 의해서 고안된 것으로, 이 경우 전방 익형의 후류 영역의 후방 익형이 후류의 와류 에너지를 추력으로 전환하면서 전체적인 추진효율을 배가시킬 수 있다는 것을 실험적으로 증명한 바 있다[8]. 자연계의 곤충 중에서 이와 유사한 날개 형태를 가진 잠자리의 경우도 같은 크기의 다른 곤충에 비해 이륙, 장시간의 제자리 비행 능력 및 기동성 등의 측면에서 월등히 우수한 것으로 알려져 있다[9,10]. HHC(Higher Harmonic Control) 개념을 적용한 OH-6A 헬기의 비행시험 중에도 전·후방 블레이드의 공력 상호작용으로 인하여 로터의 토오크가 이론적 예상치보다 감소하는 현상이 관찰되었다[8].

이에 따라, 플레핑 익형의 추진효율을 개선할 수 있는 장치의 하나로 직렬 배치 익형의 가능성들에 주목하여 Tuncer[8] 등은 수직병진운동(plunging)하는 전방익형과 고정된 후방익형 사이의 비정상 공력 상호작용을 2차원 Navier-Stokes

코드를 이용하여 해석하였다. 계산 결과, 직렬로 익형을 배열했을 때 전체 추력 효율이 약 40% 이상 증가함을 확인하였다[8,11]. 그러나, 여기서는 계산에 이용된 다중 블럭 격자계의 한계 등으로 인하여 후방 익형의 운동은 고려되지 않았으며, 이 경우 잠자리와 같이 후방 익형도 동시에 운동을 할 경우에 어떠한 현상이 발생하는지는 상세히 연구되지 않았다. Lan 과 Sun 등[12]은 겹침 격자계와 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 후방익형의 운동까지 고려하여 전·후방 익형 사이의 공력상호작용에 대한 연구를 수행하였으나, 날개의 형태와 운동 방식이 잠자리 날개를 대상으로 수행되었기 때문에 실제 초소형 항공기에 적용하기는 어려운 점이 있었다.

따라서, 본 연구에서는 저 레이놀즈 영역에서의 추진효율과 추력을 증가시킬 수 있는 추력발생장치로 직렬 배치된 익형 형태에 주목하고, Tuncer 등의 연구를 확장하여 전·후방 익형의 운동에 따른 공력 상호작용 메커니즘과 유동장의 구조에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 우선 익형의 일반적인 운동을 다룰 수 있는 유연성 있는 격자계를 적용한 해석 코드를 개발하고, 이를 이용하여 익형 상호간의 상대위치 및 위상차 등에 따른 전체 공력특성과 유동장의 구조에 대해 체계적으로 고찰하였다.

II. 본 론

2.1 수치해석 기법

전·후방에서 동시에 운동하는 두 개의 익형 주위의 유동장 해석을 위하여 비정상 2차원 Navier-Stokes 방정식을 지배방정식으로 이용하였다. 각 익형의 운동을 유연성 있게 다루기 위하여 겹침격자계(overset grid system)를 적용하였다.

○ 지배방정식

물리영역의 독립변수를 일반 곡선좌표 $\xi = \xi(t, x, y)$ $\eta = \eta(t, x, y)$ 를 이용하여 비정상 2차원 Navier-Stokes 방정식을 변환하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{J} \frac{\partial Q}{\partial t_c} + \frac{\partial E}{\partial \xi} + \frac{\partial F}{\partial \eta} = \frac{\partial E_v}{\partial \xi} + \frac{\partial F_v}{\partial \eta} + \frac{1}{J} \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, $Q = [\rho \quad \rho u \quad \rho v \quad \rho e \quad k \quad \omega]^T$

$J = \xi_x \eta_y - \eta_x \xi_y$ 이다. t_c 는 계산을 위한 가상 시간(Pseudo time)이고, 우변의 t 는 물리적 시간

(Physical time)이다. 모든 길이는 익형의 코드길이 C , 밀도는 ρ_∞ , 속도는 음속 a_∞ 로 무차원화하였다.

비점성항의 공간차분에는 Roe의 풍상차분법(Flux Difference Scheme, FDS), 점성항은 중심차분법을 이용하였다. 시간 적분을 위해서는 식(1)에서 우변항의 물리적 시간항을 소스항으로 간주하고, 고정된 물리적 시간에 대해서 가상 시간 Δt_c 에 대해 반복계산을 수행하여 해를 수립시키는 이중시간 전진기법(dual-time stepping)과 병렬화 계산에 적합한 DP-SGS(Data Parallel Symmetric Gauss-Seidel)기법을 적용하였다.

난류모델은 Menter의 SST(Shear Stress Transport) 모델을 적용하였다. SST 모델은 동적실속과 같이 대박리(massive separation)를 동반한 2차원 유동에서 상대적으로 정확한 해를 산출하는 것으로 알려져 있다. 해석 코드에 적용된 수치해석기법은 참고문헌[13]에 상세히 기술되어 있다.

본 연구에서는 B. Lee 등이 개발한 2차원 비정상, 압축성 Navier-Stokes 코드를 겹침 격자계를 고려할 수 있도록 확장하였다.

○ 겹침격자계(overset grid system)

본 연구에서는 두 개의 익형이 임의의 위치에서 독립적인 운동을 하는 경우를 다룰 수 있도록 격자의 생성이 용이한 겹침 격자계를 적용하였다. 겹침 격자계란 둘 이상의 격자를 독립적으로 형성한 후 공통 경계면이 없이 충분한 겹침영역을 갖도록 중첩시킨 후 이를 통해 유동정보를 교환하는 방법이다. 배경 격자(background)계의 공점(hole)을 찾는 기법은 Dougherty[14]의 방법을 따랐다. 주격자(major grid)와 부격자(minor grid)사이의 유동정보 교환은 쌍선형 보간법(bilinear interpolation)을 이용하였다. 쌍선형 보간법은 자체적으로 보존법칙이 만족되지 않으나 보간되는 격자간의 면적비가 5를 넘지 않을 경우 해석 결과에 큰 영향이 없는 것으로 알려져 있다.

두 개의 익형의 운동을 고려할 때, 일반적으로 배경 격자계(background)를 별도로 두고 두 개의 익형을 부격자계로 구성하는 것이 일반적이나, 공점을 찾고 보간하는데 소요되는 시간을 줄이기 위하여 본 연구에서는 전방 익형의 격자계를 주격자계로 하고 후방 익형의 격자계를 부격자계가 되도록 하였다. 주격자는 265×61 , 부격자계는 235×41 개의 격자를 이용하였으며 각각 C-type 형태로 구성되었다. 주격자와 부격자 간

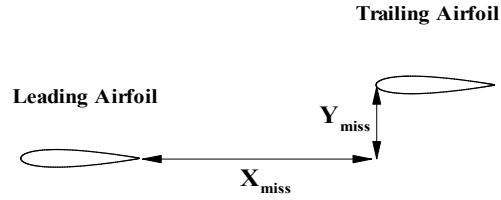


Fig. 1. Definition of trailing airfoil location

의 상대위치는 Fig. 1에 보는 것처럼 전방익형의 뒷전에서 후방 익형의 앞전까지의 거리로 정의하였다.

○ 주요 파라미터 정의

Fig. 2에 보인 것처럼, 코드 길이가 C 인 익형이 O 점을 기준으로 수직병진 운동($h(t)$)과 피치 운동($\theta(t)$)을 한다고 할 때, 각각의 운동은 다음과 같이 기술된다.

$$\begin{aligned} h(t) &= -h_0 \cos(\omega t) \\ \theta(t) &= -\alpha_0 \cos(\omega t + \psi) \end{aligned} \quad (2)$$

피치 운동은 플러징 운동에 위상차는 ψ 만큼 앞선다. 여기서 무차원 주파수(reduced frequency)는 $k = \omega C / 2U_\infty$ 로 정의된다.

시간에 대한 익형의 공기력(F)과 요구동력(P)은 다음과 같이 정의된다[15]. 이때, X , Y 는 각각 기준 축에 수평과 수직방향으로의 힘 성분, Q 는 Z 축방 향으로의 토크를 나타낸다.

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt \\ P &= \frac{1}{T} \left(\int_0^T Y(t) \frac{dh(t)}{dt} + \int_0^T Q(t) \frac{d\theta}{dt} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

이때, 요구 동력계수와 추력계수는 다음과 같이 정의된다.

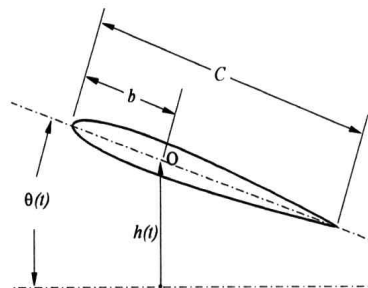


Fig. 2. Definition of principal motion parameters for an flapping airfoil

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho S_0 U_\infty^3} \quad C_T = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho S_0 U_\infty^2} \quad (4)$$

$$\eta_p = \frac{FU}{P} \quad \text{즉,} \quad \eta_p = \frac{C_T}{C_P}, \quad C_T = -C_D$$

2.2 계산결과 및 검토

○ 코드 검증

해석코드의 정확성을 검증하기 위하여 우선 Tuncer 등[8]과 동일한 조건에 대해서 수치계산을 수행하였다. 후방익형의 위치는 $X_{miss} = 1.0c$, $Y_{miss} = 0.0c$ 이고, 무차원 주파수 k 와 진폭 h_0 는 각각 1.5,와 0.1c 이다.

Fig. 3은 $h_0 = -0.03c$ 인 순간의 압력과 수직속도성분의 등고선을 나타내고 있다. 경계면을 전후로 하여 등고선이 매끄럽게 연결되고 있는 것을 확인할 수 있으며, 하방운동 중인 선행익형의 뒷전에서 반시계방향의 와도가 떨어져 나오는 것을 볼 수 있다.

각 익형이 시간에 대한 항력계수의 이력은 Fig. 4에 나타내었다. 두 익형의 경우 모두, 한 주기 이내에 충분한 주기성을 획득하고 있다. 후방 익형도 일정한 위상차를 갖고 추력을 발생시키는 것을 확인할 수 있다.

전방 익형은 후방 익형과 무관하게 추력계수가 거의 동일함을 알 수 있다. 이는 후방 익형의 추력은 전방익형 후류영역의 잉여 운동량으

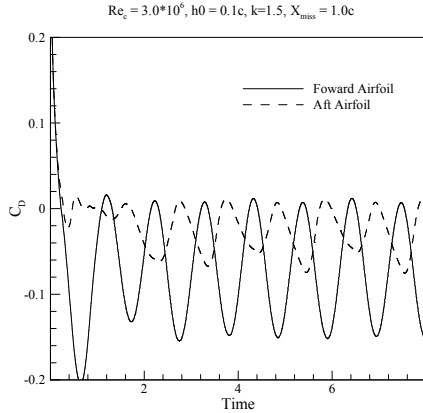


Fig. 4. Time history of unsteady drag ($h_0 = 0.1c, k = 1.5$)

로부터 얻어진 것이라는 것을 의미한다. 즉, 후방 익형의 추력은 전방익형의 와후류(vortical wake)와 상호작용에 의해서 발생한다. 전방익형의 와후류가 후방 익형의 앞부분에서 반시계방향의 강한 와류를 발생시키고, 이를 통해 후방 익형 윗면의 유효받음각을 증가시킴으로써 양력과 추력이 증가하게 되는 것이다. 계산 결과, 추력 효율은 단일 익형일 경우 41.46% 직렬배치 익형의 경우 57.83%로 나타나서, 추력 효율이 약 40%이상 증가하여, Schmidt의 실험치 및 Tuncer의 수치해석 결과와도 전반적으로 일치하는 것을 알 수 있었다[8].

다음으로, 무차원 주파수(reduced frequency, k)와 플러징 진폭(h_0)에 따른 항력계수와 추력 효율의 평균치를 계산하고 Tuncer 와 Platzer[1]의 계산 결과와 비교한 결과를 Fig. 5에 보였다. 무차원 주파수에 따른 항력계수는 일반적으로 Tuncer의 결과와 일치하는 경향을 보여주고 있으나, 주파수가 커질수록 차이가 커짐을 알 수 있다. 무차원 주파수와 진폭이 작을 경우에는 전방 익형에서 발생하는 추력 자체가 매우 작기 때문에 후방익형에 의한 추력증가가 발생하지 않으며, 오히려 특정한 주파수 이하에서는 오히려 추력효율이 단일익형의 경우보다 저하되는 것을 알 수 있다. 일반적으로 진폭이 증가하고 주파수가 감소할수록 추력효율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 본 계산결과는 주파수 k 와 진폭이 작은 영역에서 Tuncer의 결과와 차이가 나는 이유는 명확하지 않으나, 현재로서는 각 계산에서 이용된 난류모델의 차이에서 기인한 것으로 추정된다. 그러나, $k = 1.0$ 이하는 추력의 절대값이 매우 작기 때문에 실제 응용의 관점에

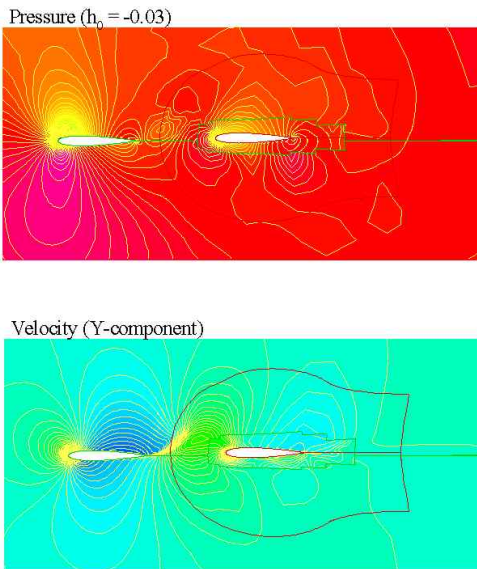


Fig. 3. Computed Flowfield ($h_0 = 0.1c, k = 1.5$)

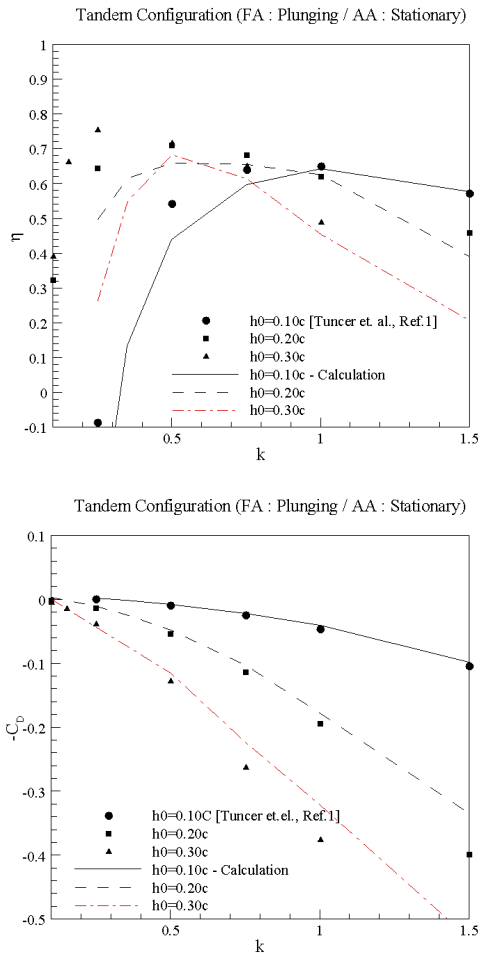


Fig. 5. Average drag coefficient and propulsive efficiency with the reduced frequency and amplitude

서는 큰 의미가 없는 영역이라고 할 수 있다.

○ 동시에 플레핑 운동하는 익형의 경우

In Phase Flapping Motion

전방익형과 후방익형이 위상차 없이 동시에 수직병진운동을 할 경우, 각 익형의 평균 항력 및 추진효율을 Fig. 6에 보였다. 별도의 언급이 없을 경우 이하의 모든 계산은 레이놀즈 수 $Re_c = 3.0 \times 10^6$ 에서 수행한 결과이다. 전방 익형의 항력 특성은 후방 익형의 운동 형태와 무관하게 거의 일정한 형태를 보임을 확인할 수 있었다. 반면 후방 익형의 경우, 전방 익형의 후류와의 상호작용으로 인하여 추력 및 추력효율에 상당한 변화가 관찰된다.

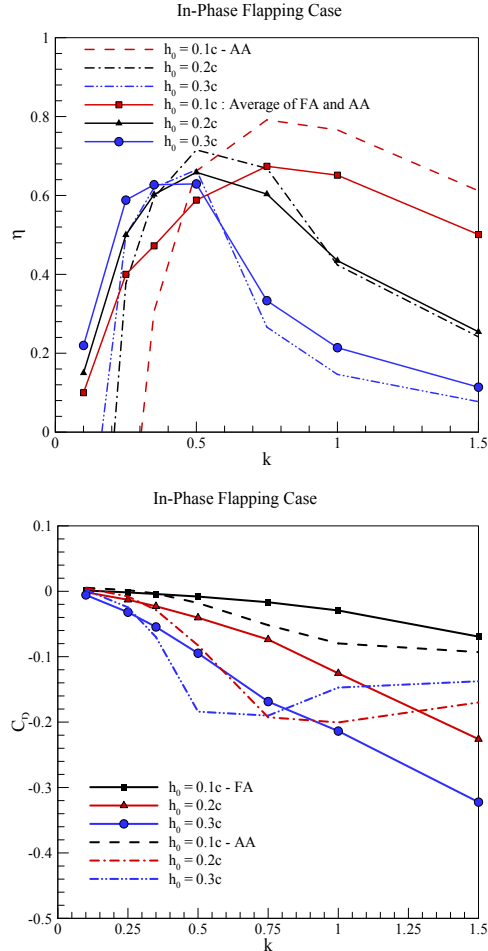


Fig. 6. Average drag coefficient and propulsive efficiency with the reduced frequency and amplitude for in-phase flapping motion (FA : Forward Airfoil, AA : Aft Airfoil)

즉, 후방 익형이 위상차 없이 전방 익형과 동일한 주파수와 진폭으로 수직병진 운동할 경우 (in-phase plunging) 특정한 진폭과 주파수 영역에서 전방익형보다 추력효율과 추력이 크게 개선됨을 볼 수 있다. 예를 들어, $h_0 = 0.2c, k = 0.75$ 일 때, 후방 익형은 전방익형보다 추력은 160% 이상, 추진효율은 37% 이상 증가하는 결과를 보인다. 그러나, 무차원 주파수(reduced frequency)가 1보다 커지면 추력값이 전방익형보다 오히려 작아지게 된다. 결론적으로 후방익형의 추진 효율과 추력이 전방익형보다 좋아지는 특정한 진폭과 주파수 영역이 존재하는 것이다. 계산결과를 보면, 진폭이 작아질수록 주파수의 상한

(upper limit)이 증가함을 알 수 있는데, 대략 $h_0k \geq 0.25$ 이면 후방익형이 전방익형보다 성능이 개선됨을 확인할 수 있다. 위상차가 없이 동시에 플러징을 할 경우 후방익형의 추진효율이 주파수에 따라 변화하는 이유는 무엇 때문인가?

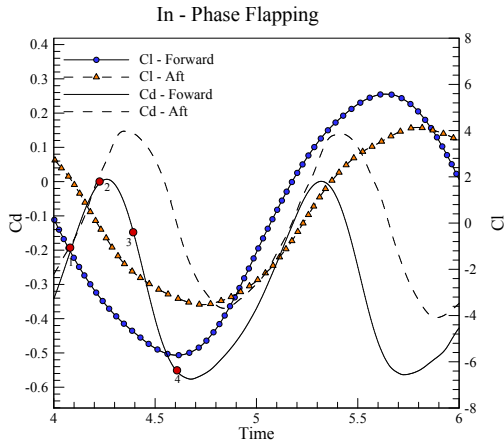


Fig. 7. Definition of Flowfield snapshot points

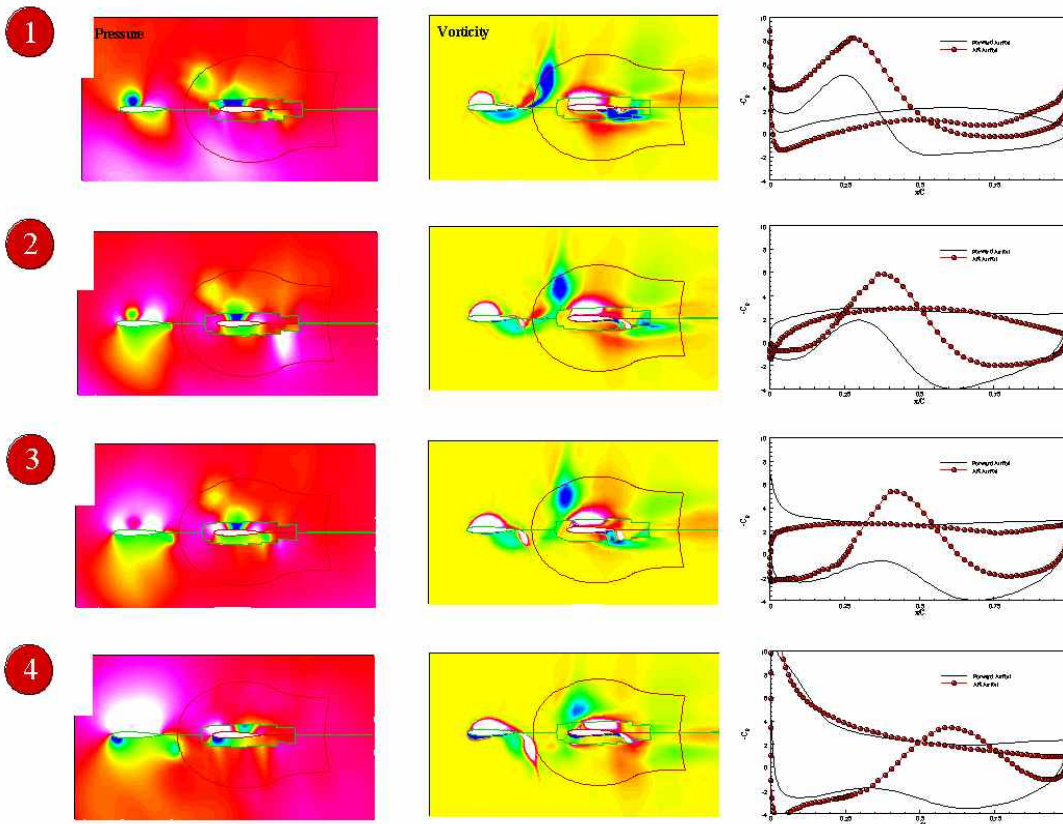


Fig. 8. Snapshots of Computed Flowfield for in-phase flapping motion($h_0 = 0.3c, k = 1.5$)

이를 위해 확인하기 위하여 전·후방 익형의 플러징 운동이 완성되는 한 주기에 대해서 각 익형의 등압력, 등와류 선도 등을 Fig. 7과 8에 비교해 보았다.

병진운동 주파수가 상대적으로 작을 때 두 익형의 공기역학적 상호작용 과정을 설명하면 다음과 같다.

- ① 두 익형이 하방으로 병진 운동을 시작하면 각 익형의 앞전과 뒷전에서는 각각 시계 및 반시계방향으로 강한 와류 쌍이 발생한다.
- ② 전방익형의 뒷전와류는 후방익형의 앞전와류와 상호작용하며 윗 방향으로 이동하며, 후방익형의 전방에 올려씻음(upwash)을 발생시킨다.
- ③ 후방익형은 올려씻음에 의하여 유효받음각(effective angle of attack)이 증가하게 되며 결과적으로 전방익형 보다 큰 강도를 가지는 앞전와류가 발생하게 된다.
- ④ 더 강한 강도를 갖는 후방 익형의 앞전와류는 후방익형에 양력 및 추력계수를 크게 하며 전체적으로 공력 효율을 증가시킨다.

그러나, Fig. 7의 ③~④에서 보듯이 병진운동 주파수가 임계치 이상으로 커지게 되면 ($h_0 = 0.3c$ 일때 약 $k \geq 0.8$) 전방익형의 뒷전와류가 사라지지 않고 후방 익형의 앞전와류와 상호작용을 하게 된다. 이때, 후방익형의 앞전와류는 익형표면을 따라 이동하며 윗면 압력분포를 변화시키고, 결과적으로 전체적인 추력계수를 감소시키는 역할을 하게 된다. 여기서, 전방익형에서 발생하는 뒷전와류의 강도가 후방익형의 공력효율을 결정하는 가장 중요한 요소임을 확인할 수 있다.

Out-of Phase Flapping Motion

전방익형과 후방익형이 180도의 위상차(phase lag)를 가지고 병진운동을 하는 경우(out-of-phase)에 대한 추력 및 추력효율을 Fig. 9에 나타내었다. 후방익형의 경우, 거의 모든 주파수 영역에서 전방익형보다 추력값과 추진효율이 낮게 나타난다. 앞의 경우와 마찬가지로, 앞 주기에 대해서 전·후방 익형의 등압력, 등와류선도 등을 Fig. 10과 11에 비교하였다.

이는 앞서 설명한 것과 동일한 메커니즘으로 설명이 가능한데, Fig. 11에서 볼 수 있듯이, 전방익형의 뒷전 와류가 올려씻음(upwash) 속도를 유도시킬 때 후방익형이 하사점(lower limit)에 있기 때문에 전방익형의 후류의 영향을 거의 받지 못하게 된다. 반대로 전방익형이 하사점에 있을 때는 후방익형이 상사점에 놓여있어 오히려 후류의 영향을 반대로 받기 때문에 후방익형이 전방익형의 후류와 유익한 상호작용을 하지 못함을 알 수 있다. 여기서 보이지는 않았으나, 90도의 위상차를 가질 경우는 앞의 두 경우의 중간정도에 해당됨을 확인할 수 있었다. 결론적으로 두 개의 익형이 동시에 운동하는 경우에도 Knoller-Betz 효과가 충분히 나타남을 확인할 수 있었으나, 이러한 효과는 위상차가 없이 상대적으로 낮은 주파수와 진폭을 가질 때만 나타남을 알 수 있었다.

○ 위상차에 따른 추력 및 추진 효율비교

앞서 계산한 위상차에 따른 전체 추력과 효율을 Fig. 12에 비교하였다. 그래프를 단순화하기 위하여 $h_0 = 0.2C$ 인 경우에 대하여 비교하였다. 전체 추력은 전·후방 익형이 위상차 없이 동시에 병진운동하는 경우에 가장 큰 값을 가진다. 반면 180도 위상차를 갖는 경우에는 전체 추력값이 후방익형을 고정시킨 경우와 유사한 수준에 머물고 있다. 위상차가 0인 경우는 후방익형이 정지해 있는 경우보다 무차원 주파수 k 가 0.7~1.0 사이에서 추력이 훨씬 크게 나타났다.

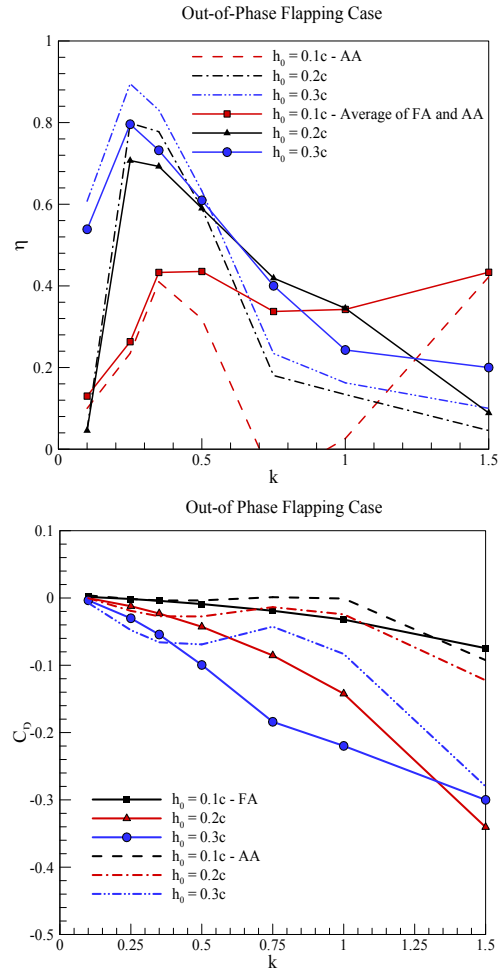


Fig. 9. Average drag coefficient and propulsive efficiency with the reduced frequency and amplitude for out-of-phase

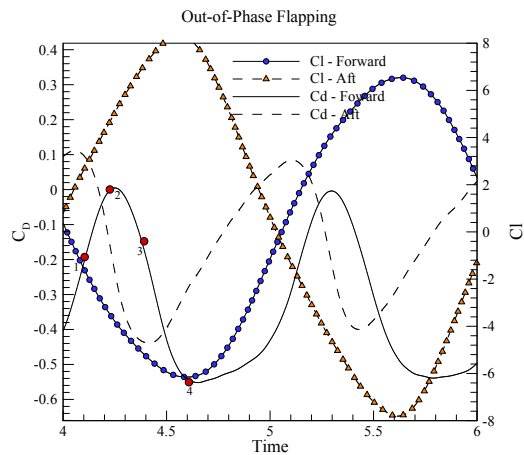


Fig. 10. Definition of Flowfield snapshot points

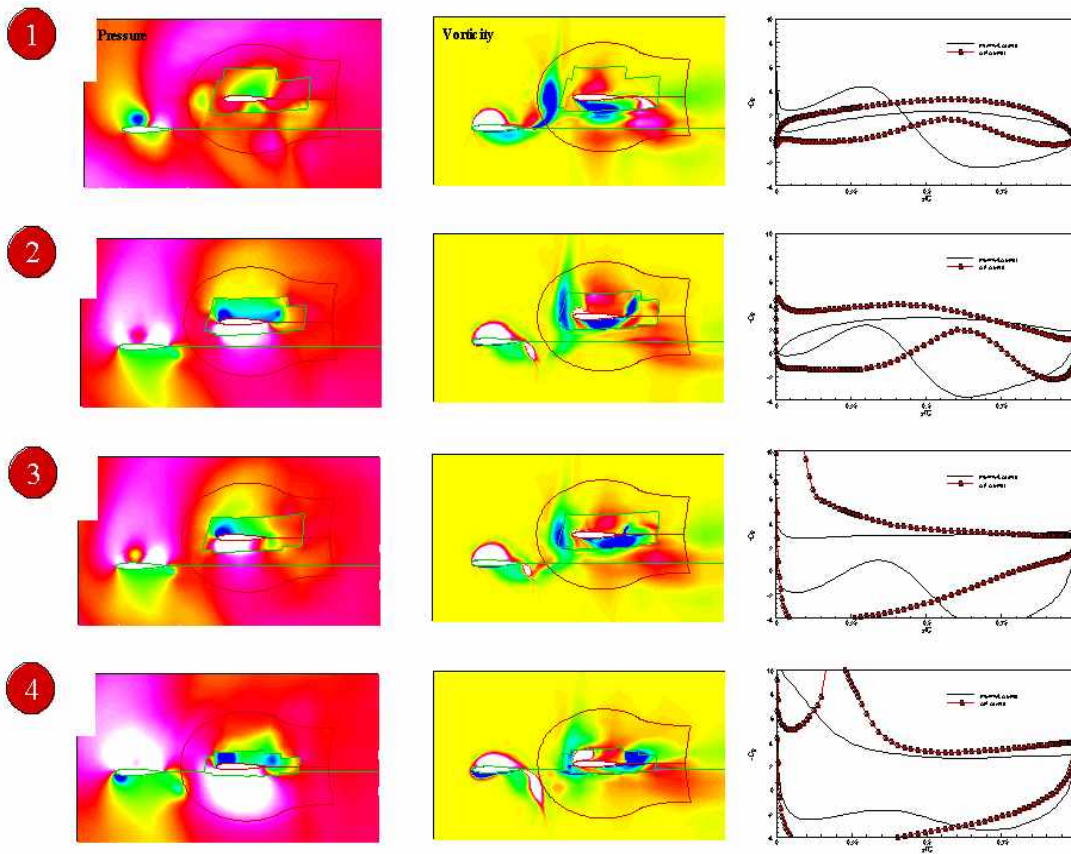


Fig. 11. Snapshots of Computed Flowfield for out-of-phase flapping motion($h_0 = 0.3c, k = 1.5$)

추력효율을 보면 두 익형이 동시에 운동하는 경우는 후방익형이 정지해 있는 경우보다 전체적인 추진효율은 다소 낮아진다. 이는 후방익형이 전방익형의 후류영역에 존재함으로써 양력의 진동폭을 증가시켜 결과적으로 요구동력 수준을 증가시키기 때문으로 판단된다. 추진효율 관점에서 보면, $k=0.5$ 를 기준으로 이보다 클 경우 후방익형이 정지해 있을 때 보다 추진효율이 낮고 그 이하일 때는 추진효율이 커짐을 알 수 있다.

결론적으로 전·후방익형을 동시에 병진운동할 경우, 대부분의 주파수 영역에서 추력은 증가하나 고주파 영역($k \geq 1.0$)에서는 추진효율이 전반적으로 50% 미만이 됨을 확인할 수 있다.

○ 익형간 거리에 따른 효과

Fig. 13에는 후방익형의 배치 위치에 따른 효과를 추진효율과 추력의 변화를 나타내었다. C-형 격자를 중첩하여 계산을 수행한 Tuncer의 경우와 달리, 겹침 격자계를 사용한 본 연구에

서는 후방 익형의 위치를 X_{miss}, Y_{miss} 만큼 평행이동시킴으로써 간단하게 계산을 수행할 수 있다. 계산 조건은 $h_0 = 0.2c, k = 1.0$ 인데, 이는 Fig. 6에서 보인 바와 같이, 전방익형의 뒷전와류와의 상호작용으로 후방익형의 효율이 개선되는 경우이다. 추진 효율과 추력은 서로 반대 경향을 보이고 있는데, 추진효율은 $X_{miss} = 1.5c$ 일 때 최대값을 가지나 전체적으로 큰 변동은 없다. 반면 추력은 X_{miss} 가 커질수록 감소하는 경향을 보이며 $X_{miss} = 2.5c$ 에서 최소값을 가지는 것을 알 수 있다. X_{miss} 가 커짐에 따라 전방익형의 뒷전와류와 후방익형과 직접적인 상호작용이 약화되기 때문에 후방익형과 전방익형의 추력효율이 거의 같아지게 된다. 따라서 상호작용이 커질수록 전체 효율과 추력계수는 미약하나마 감소함을 알 수 있다. 수직방향의 상대 위치 Y_{miss} 가 전체 효율과 추력에 미치는 영향은 상대적으로 미미한 것으로 나타났다.

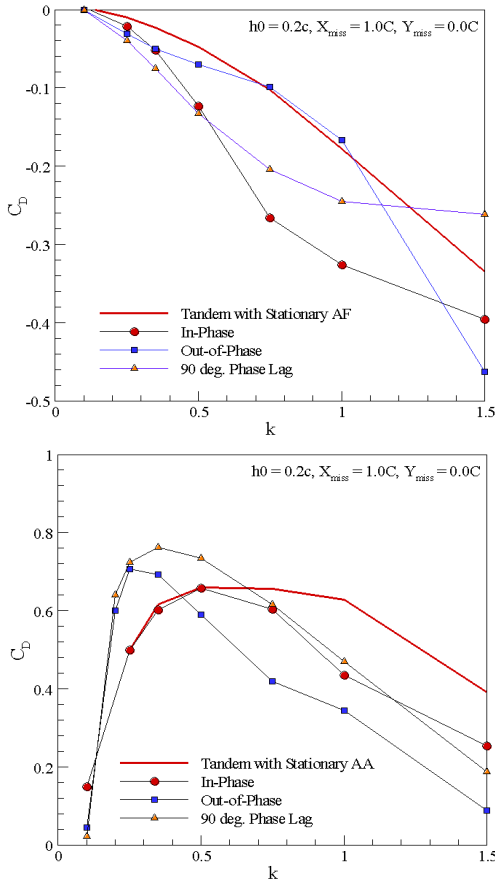


Fig. 12. Comparison of drag and propulsive efficiency for different phase-lag ($h_0 = 0.2c$)

III. 결론

본 연구에서는 Tuncer 등의 연구를 확장하여 직렬로 배치된 익형이 동시에 플래핑 운동을 할 경우의 추력 생성 과정을 해석하고 유동특성을 고찰하였다. 이를 위해 정지된 후방익형에 대해 전방익형이 플러징할 경우에 대한 수치 계산을 수행하여 Tuncer 등의 결과와 비교하였다. 두 익형이 동시에 운동할 경우에 대해서는 각 익형의 수직병진운동 진폭과 주파수 및 상대거리에 따른 파라메트릭 스테디를 수행하고, 이를 통해 아래와 같은 내용을 확인하였다.

첫째, 위상차 없이 전·후방 익형이 동시에 병진운동을 할 때 후방익형의 추진효율과 추력이 극대화 된다. 단, 진폭과 주파수가 임계치를 초과할 경우 후방익형에 앞전와류의 강도가 과도해지면서 추력과 추진효율이 악화될 수 있다.

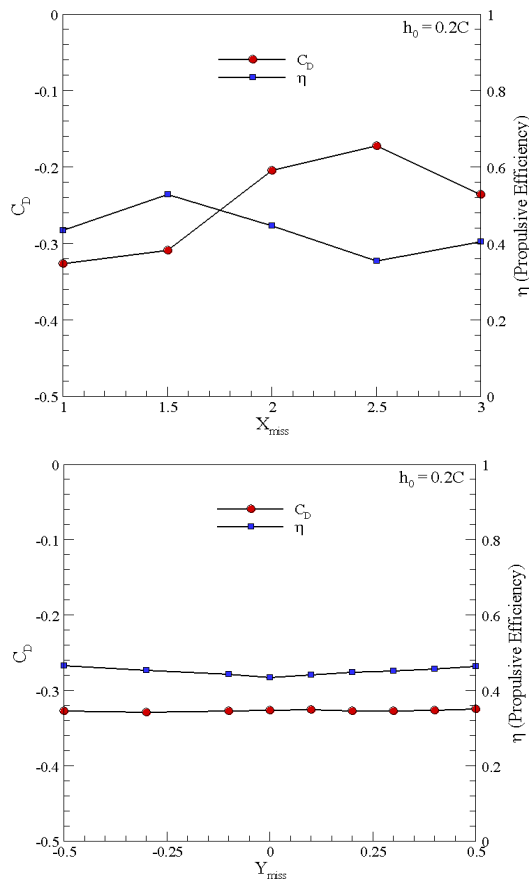


Fig. 13. Variation of total propulsive efficiency and drag with X_{miss} and Y_{miss} ($h_0 = 0.2c, k = 1.0$)

둘째, 전·후방익형이 180도의 위상차를 갖고 운동을 할 경우, 전방익형의 후류와 후방익형이 서로 반대방향으로 상호작용을 함으로써 결과적으로 공력특성이 악화되는 것을 알 수 있었다. 셋째, 후방익형의 배치 위치에 따른 특성은 수평방향으로는 두 익형사이의 거리가 멀어질 수록 추력과 효율이 동시에 떨어지며, 수직방향 위치변화에 따른 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 2005년도 부산대학교 '교내학술연구비(신임교수연구정착금)'에 의한 연구입니다.

참고문헌

1) Tuncer, I. H., and Platzer, M. F., "Thrust

Generation due to Airfoil Flapping", AIAA Journal, Vol. 34, No. 2, Feb. 1996, pp. 324-331.

2) Jones, K. D., Dohring, C. M., and Plazer, M. F., "Experimental and Computational Investigation of the Knoller-Betz Effect", AIAA Journal, Vol. 32, No. 7, July 1998, pp. 1240-1246.

3) Ramamurti, R., and Sandberg, W., "Simulation of Flow about Flapping Airfoils Using Finite Element Incompressible Flow Solver", AIAA Journal, Vol. 39, No. 2, Feb. 2001, pp. 253-260.

4) Wang, Z. J., "Two Dimensional Mechanism for Insect Hovering", Physical Review Letters, Vol. 85, No. 10, Sep. 2000, pp. 2216-2219.

5) Isogai, K., Shinmoto, Y., and Watanabe, Y., "Effects of Dynamic Stall on Propulsive Efficiency and Thrust of Flapping Airfoil", AIAA Journal, Vol. 37, No. 10, Oct. 1999, pp. 1145-1151.

6) 이정상, 김종암, 노오현, "저 레이놀즈 수 유동에서 Flapping-Airfoil의 수치적 공력특성 연구", 한국항공우주학회지, 제30권, 제6호, 2002. 6, pp. 44-52.

7) 이정상, 김종암, 노오현, "Flapping운동의 최적공력성능을 위한 익형연구", 한국전산유체공학회지, 제8권, 제2호, 2003. 6, pp. 24-32.

8) Tuncer, I. H., Lai, J. C. S. and Platzer,

M. F., "A Computational Study of Flow Reattachment Over a Stationary-Flapping Airfoil Combination in Tandem", AIAA Paper 98-0109, 1998

9) Ward-Smith, A. J., Biophysical Aerodynamics and the Natural Environment, John Wiley & Sons

10) Sane, S. P., "The Aerodynamics of Insect Flight", The Journal of Experimental Biology, Vol. 26, pp. 4191-4208.

11) Tuncer, I. H. and Plazer, M. F., "Computational Study of Flapping Airfoil Aerodynamics", Journal of Aircraft, Vol. 37, No. 3, May-June 2000, pp. 514-520.

12) Lan, S. L., and Sun, M., "Aerodynamic Force and Flow Structures of Two Airfoils in Flapping Motion", Acta Mechanica Sinica, No. 17, 2001, pp. 310-331.

13) Lee, B., "Numerical Study on the Control of Unsteady Separated Flowfield", Ph.D Dissertation, Seoul National University, Feb. 2005.

14) Dougherty, F. C., "Development of a Chimera Grid Scheme with Applications to Unsteady Problems", Ph. D Dissertation, Stanford University, June 1985.

15) Anderson, J. M., Streitlien, K. Barrett, D. S. and Triantafyllou, M. S., "Oscillating Foils of High Propulsive Efficiency", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 360, 1998, pp. 41-72.