

히빙운동익에 작용하는 비정상 유체력 특성

양창조⁺·김범석⁺⁺·최민선⁺⁺⁺·이영호⁺⁺⁺⁺

Study on Unsteady Forces Acting on a Heaving Foil

Chang-Jo Yang⁺, Beom-Seok Kim⁺⁺, Min-Seon Choi⁺⁺⁺ and Young-Ho Lee⁺⁺⁺⁺

Abstract : A Flapping foil produces an effective angle of attack, resulting in a normal force vector with thrust and lift components, and it can be expected to be a new highly effective propulsion system. A heaving foil model was made and it was operated within a circulating water channel at low Reynolds numbers. The unsteady thrust and lift acting on the heaving foil were measured simultaneously using a 6-axis force sensor based on force and moment detectors. We have been examined various conditions such as heaving frequency and amplitude in NACA 0010 profile. The results showed that thrust coefficient and efficiency increased with reduced frequency and amplitude. We also presented the experimental results on the unsteady fluid forces of a heaving foil at various parameters.

Key words : Heaving Foil(히빙익), Reduced Frequency(무차원 주파수), 6-axis Force Sensor(6축 센서), Thrust(추력), Thrust Efficiency(추진효율)

1. 서 론

유체공학의 분야 중 진동익에 관한 연구는 오래전 부터 고전적인 익이론에 의한 이론적 연구뿐만 아니라, 최근에는 급속히 발달되어 온 실험 및 수치계산기법에 의해 익 주위의 유동 및 익에 작용하는 양항력에 관한 특성 등을 규명하여 왔다^{[1]-[4]}. 비정상익(Unsteady foil)이란 익의 진동으로 주변의 흐름이 비정상이 되어 있는 익을 말하며, 이러한 익의 추진에 관한 연구는 수서동식물의 유영, 조류의 비행 메커니즘의 해석 그리고 특히, 박리의 제어를 이용한 추진기구의 개발 등의 기반연구에 큰 기여를 할 것으로 기대된다. 이를 위해서는 비정상익에 작용하는 시간에 따라 변화하는 비정상유체력의 거동을 반드시 규명할 필요가 있다.

최근에는 미소생물의 운동, MEMS(Micro-electro Mechanical Systems), MAV(Micro Aerial Vehicles)등과 같은 극소물체를 이용한 유동의 제어 기술이 세계적으로 주목을 받고 있으며, 그 때 비정상익을 응용한 유동장의 제어가 중요한 문제가 되고 있다^{[5]-[6]}. 그러나 비정상익 주변의 유동은 다수의 파라메타가 존재하기 때문에 매우 복잡한 현상을 보이고 있으며, 아직 규명되지 않은 문제가 다수 남아있다. 또한, 지금까지의 선형비정상익이론^{[1],[7]}에 의한 flutter 현상의 해석 등에 관한 연구는 다수 보고되어 있지만 그 대부분이 고 레이놀즈수 영역의 유동해석만을 대상으로 하고 있다.

한편, 이러한 비정상익에 관한 최근 연구로서, Koochesfani^[8]은 피칭익, Jones등^[9]은 플러징익(Plunging foil)의 후류에 발생하는 유동패턴에 대해 정성적인 가시화실험 및 수치계산의 결과를 보고

+ 양창조(한국해양대학교 연구원), E-mail:cjyang70@pivlab.net, Tel: 051)410-4940

++ 김범석(한국해양대학교 대학원), 부산광역시 영도구 동삼동 1번지

+++ 최민선(목포해양대학교 기관공학부), 전남 목포시 죽교동 571-2번지

++++ 이영호(한국해양대학교 기계 정보공학부), 부산광역시 영도구 동삼동 1번지

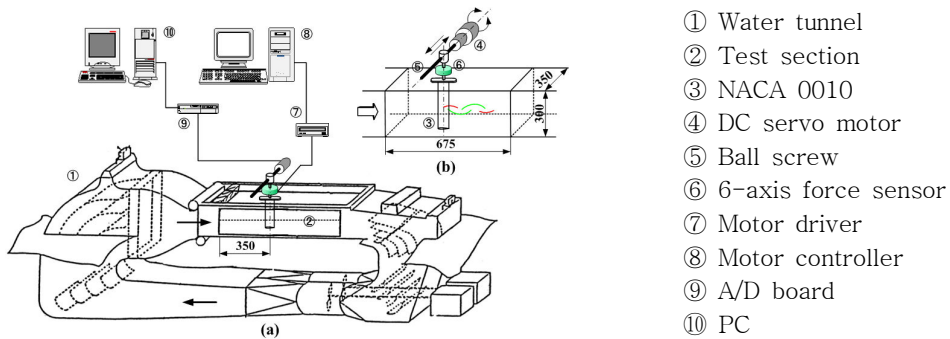


Fig. 1 Experimental apparatus

하고 있으며, Lai 등^[10]은 레이저 도플러 유속계에 의한 계측결과로부터 운동량이론을 이용하여 추력의 발생을 예측하고 있지만, 후류에 추력을 발생시키는 와열이 형성된 경우 익에 작용하는 유체력을 직접 계측을 하지는 못 하였다. 하지만, 이러한 비정상익에 관한 특성을 규명하고 충분한 공학적 이해를 얻기 위해서 가시화와 함께 진동익에 작용하는 비정상유체력에 대한 시계열의 정량적 계측이 반드시 수반되어야 한다.

그러므로 본 연구에서는 저 레이놀즈수 영역에 있어서 NACA 0010을 대상으로 히빙익에 작용하는 비정상유체력을 직접 계측하여 추력 및 양력과 그 이력 현상 등을 정량적인 시계열 데이터에 기초하여 규명하고자 하였다. 그 방법으로 NACA 0010, 회류수조, 소형 6축 센서 등을 이용하여 히빙익에 작용하는 유체력 계측실험을 행한 후, 추력 및 양력계수, 추진 효율 등을 구하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 비정상유체력의 계측 및 가시화를 위한 실험장치의 배치도를 나타내며, 각각 회류수조, NACA 0010, 구동모터 그리고 소형 6축 센서 등으로 구성되어 있다. NACA 0010은 익의 위치 정보를 정확히 검출 가능한 로터리 엔코더를 내장한 DC 서보모터 (RSA0711, Dyadic Systems)에 의해 구동되고, 그 양자의 사이에 유체력 계측용 소형 6축 센서를 설치하였다. 서보모터의 회전운동은 볼 스크류를 통하여 상하 병진운동으로 변환되며, 익의 변위는 정현파의 형

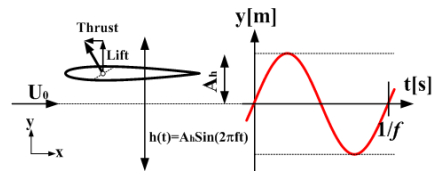


Fig. 2 Trajectory of the heaving airfoil

태로 부과되고, 주파수 f , 진폭 A_h 는 컴퓨터의 프로그램 상에서 설정하도록 되어 있다. Fig. 2의 실선은 서보모터에 $A_h \sin(2\pi f t)$ 을 부과했을 때의 익의 변위를 보인다.

소형 6축 센서(MINI 2/10, BL-AUTOTEC)는 x , y , z 방향의 힘 및 모우멘트가 동시에 측정 가능한 구조로 되어 있고, 센서로부터의 신호는 실시간으로 A/D보드(PCI-3133, Interface)를 통해 입력된다. 샘플링 주파수는 초당 2,000으로 일정히 유지하였고, 입력 데이터와 센서 보정용 캘리브레이션 매트릭스를 이용하여 행렬연산을 행한 후, 2 성분의 힘 즉, x , y 방향의 힘만을 구하였다. 또한 6축 센서는 다음과 같이 교정하였다. 먼저, 0.0-1.0kgf 계측범위의 센서라면 10gf마다 정지하중을 부과하여 센서의 선형성을 보정한다. 그 다음 본 실험 파라미터를 대상으로 교정용 지그에서 익을 구동시켜 힘과 모멘트의 동특성 교정을 행하였다. 그 결과, 이론치와 교정후의 계측치의 오차는 3%내외였다.

본 실험에서는 익현장 $c=0.04$, 0.06m의 NACA 0010을 이용하여, 수조의 중심부에서 주류에 평행하게 히빙운동을 부과하였다. 최대 히빙 진폭은 약 0.006m로서 실험유로 폭의 1/2정도로 유로 폭의 영향과 테스트 영역의 블로키지 효과는 무시 가능하리라

생각된다. Fig. 1(b)은 수조의 개략 손법을 보인다.

익현장 기준 레이놀즈수 $Re=4.0 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^4$ 이고, 히빙 주파수 $f=0.8 \sim 5\text{Hz}$, 진폭 $A_h/c=0.04, 0.09$ 로 각각 변화시켜 가면서, 주류속도에 대한 익의 진동수의 비를 나타내는 무차원 속도 $k(\pi f c/U_0)=0.0-7.0$ 의 범위에서 히빙익에 작용하는 추력과 양력을 계측하였다. 또한 측정된 값으로부터 익의 관성력을 빼어, 익에 작용하는 유체력만을 구하였다. 여기서 $X(t), Y(t)$ 는 x, y 방향의 힘, $h(t)$ 는 히빙 변위, T 가 히빙운동의 주기이면, 각 주기 당 시간평균 추력 F , 양력 L 그리고 동력 W 는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$F = -\frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt \quad (1)$$

$$L = \frac{1}{T} \int_0^T Y(t) dt \quad (2)$$

$$W = \frac{1}{T} \int_0^T Y(t) \frac{dh}{dt} dt \quad (3)$$

시간평균은 주기 당 $f \times 20\text{sec}$ 이상의 데이터를 평균했다. 또한 스팬방향의 길이가 1이면 추력 $\overline{C_T}$, 양력 $\overline{C_L}$ 및 동력계수 $\overline{C_W}$ 는 각각 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\overline{C_T} = \frac{F}{1/2 \rho c l U_0^2} \quad (4)$$

$$\overline{C_L} = \frac{L}{1/2 \rho c l U_0^2} \quad (5)$$

$$\overline{C_W} = \frac{W}{1/2 \rho c l U_0^3} \quad (6)$$

동력의 산출은 서보모터의 소요전력을 측정하는 방법도 생각할 수 있지만, 서보모터의 회전운동을 히빙운동으로 변환시킬 때 기계적 손실이 발생하여 동력 계산을 어렵게 만든다. 따라서 익에 히빙운동을 부과하여 식 (3)과 같이 y 방향의 힘을 직접 계측하여 동력을 산출하였다. 또한 진동익에 의한 추진효율은 유효동력에 대한 추력의 비이므로

다음의 식으로 나타낼 수 있다.

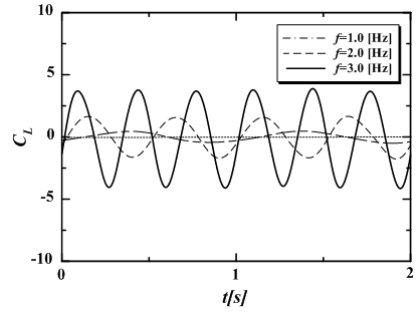
$$\eta = \frac{\overline{C_T}}{\overline{C_W}} \quad (7)$$

3. 실험결과 및 고찰

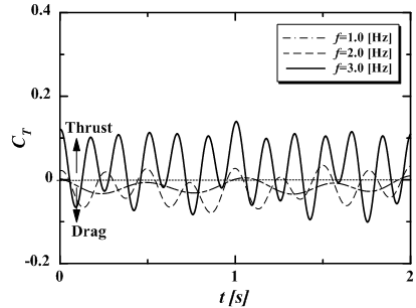
3.1 비정상추력 및 양력

Fig. 3은 NACA 0010에 대하여 주파수 $f=1.0, 2.0, 3.0\text{Hz}$, 진폭 $A_h/c=0.05$ 로 진동하는 히빙익에 대해 실험장치 및 방법에서 기술한 것과 같이 유체력 계측실험을 행한 후 환산한 양력 및 추력계수의 시간적 변화를 보인다. 히빙 주파수는 각각 일점쇄선이 $f=1\text{Hz}$, 파선이 $f=2.0\text{Hz}$, 실선이 $f=3.0\text{Hz}$ 를 나타내며, 또한 각각의 주파수는 Fig. 3(a)의 각 곡선들의 기준시간 당 봉우리의 수에 의해 예측할 수 있다. 또한 Fig. 3(b)은 추력계수 C_T 가 ‘+’ 이면 익에 추력, ‘-’ 이면 익에 항력이 작용하고 있음을 나타낸다.

Fig. 3(a)에서 양력은 $C_L=0$ 의 축(점선)에 대해서 대칭적으로 변화하며, 히빙 운동의 1주기 당 발생하는 평균양력은 항상 ‘0’ 이 됨을 알 수 있다. 이것



(a)



(b)

Fig. 3 Time-dependent thrust and lift coefficients for different frequencies ($A_h/c=0.05$)

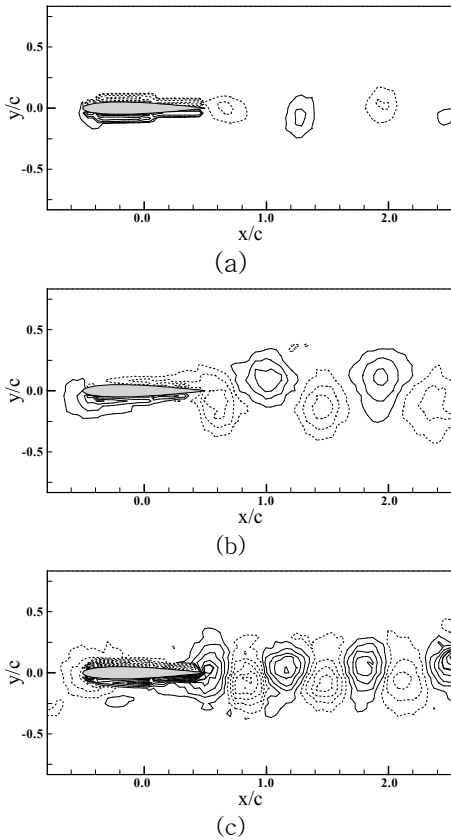


Fig. 4 Contour plot of the wake vorticity^[11]

은 또한 상하 대칭의 히빙 운동에 대한 실험 데이터의 타당성을 보여준다. 그러나 Fig. 3(b)에서는 $C_T=0$ 의 축에서 비대칭적으로 변화하여, 1주기 당 발생하는 추력계수는 '0' 이 되지 않음을 알 수 있다. 이것은 히빙 운동에 의해 익에 작용하는 x 방향의 힘이 $C_T=0$ 의 축에 대하여 진동하며, C_T 곡선이 히빙 주파수의 증가 함께 상승하여, 1주기의 평균치가 '+', 즉 추진력이 발생한 것을 나타낸다. 이와 같이, 추력의 값은 히빙 주파수에 크게 의존하여 주파수가 증가하는 만큼 큰 추력을 얻을 수 있다. 그러나 이러한 경향은 항력의 성분도 마찬가지로 커져서, 히빙 주파수가 커진 만큼 프로파일 항력도 증가한다.

한편, Fig. 3(a), (b)로부터 각각의 곡선의 시간변화에 있어서 추력계수의 주기는 양력 계수의 주기의 1/2배가 됨을 알 수 있다. 이것은 추력은 히빙 운동의 상하의 양단에서 최대치 발생하는 반면, 양력

은 하단에서만 최대치가 발생하기 때문이다.

Fig. 4^[11]는 Fig. 3에서 히빙익에 작용하는 항력 및 추력이 작용할 때의 익 후류의 PIV 가시화 실험으로부터 구한 위상평균 와도분포를 나타낸다. 그림 중 실선은 반시계방향, 파선은 시계방향으로 회전하는 와를 표시하고 있다. 와도의 최고·최저치는 각각 $\pm 0.02s^{-1}$, 등와도선의 간격은 $\pm 0.002s^{-1}$ 이다.

Fig. 4(a)는 히빙익에 항력, Fig. 4(b), 4(c)는 추력이 작용할 때의 후류에 있어서의 와도분포를 나타내고 있다. Fig. 4(a)는 낮은 히빙 주파수로 인하여 각주나 원주와 같은 뚱뚱한 물체의 후류에 잘 발견되는 카르만 와열을 보여주고 있다. 그러나 Fig. 4(b), (c)와 같이 히빙 주파수가 증가 하면 익후류와 구조의 변화를 초래한다. 즉, 히빙의 후연의 상면과 하면에서 방출된 와가 하류에 진행하면서 Fig. 4(a)의 와열과는 다른 역카르만 와열을 형성하고 있다. 이 와열은 유기속도를 가지고 있고, 그 반작용으로 추력을 발생시킨다.

3.2 비정상추력 및 양력의 이력현상

익 또는 익 주변의 유체가 비정상운동을 하는 경우 익에 작용하는 유체력은 이력(히스테리시스) 현상을 보이는데, 본 절에서 자세히 살펴보기로 하자. Fig.5는 주파수 $f=1.5Hz$, 진폭 $A_h/c=0.1$ 로 히빙운동을 하는 익에 작용하는 한 주기의 유체력을 위상평균하여 구한 추력 $\langle C_T \rangle$ 과 양력 $\langle C_L \rangle$ 의 히스테리시스를 나타낸다. 그림 중 화살표는 히빙익의 운동방향을 로마자는 각 계수의 최대, 최소점을 나타낸다. 히빙익의 하사점에서 상사점의 운동을 업스트로크(Downstroke), 상사점(Top dead point)에서 하사점(Bottom dead point)으로의 운동을 다운스트로크(Downstroke)라고 하자. 먼저, 추력은 Fig. 5(a)로부터 a점과 b점간에서 감소, b점과 c점에서 증가한 후 다시, c점과 d점간에서 감소, d점과 a점의 사이에서 증가하는 패턴을 반복하며 볼록한 '∞' 기호형의 히스테리시스 루프를 나타내고 있다. 하지만 Fig. 5(b)의 양력의 경우는 한 개의 경사진 타원형의 히스테리시스 루프를 보이고 있다. 즉 상사점직후와 하사점 직후, 각 1회의 최소점(b)와 최고점(a)을 나타내며, a점과 b점간 증감을 반복하고 있다.

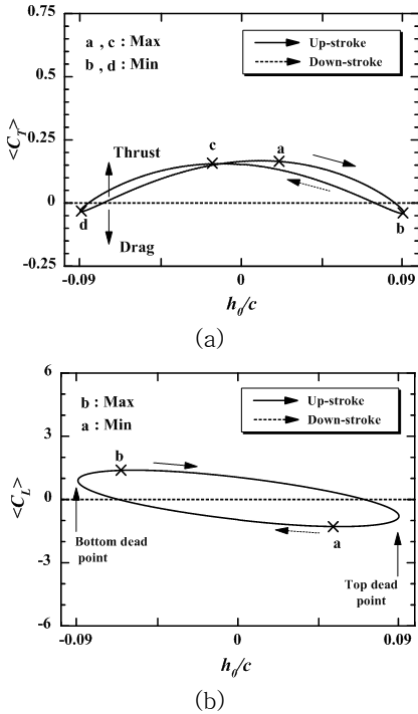


Fig. 5 Hysteresis loop of dynamic thrust and lift coefficients ($f=1.5$ Hz, $A_h/c=0.09$)

추력측정 결과와 가시화실험 결과를 비교하면, 업스크로크시의 경우도 최대최소점(Fig.5(a) a, b), 다운스크로크시의 경우도 최대·최소점(Fig.5(a) c, d)이 존재함을 알 수 있다. 즉, 업·다운스트로크시 추력은 익 후연에서 후류에 와가 방출 될 때(Fig.6(a), (c)) 최대, 방출 된 후(Fig.6(b), (d)) 에 최소가 되며, 히빙 운동의 한주기에 있어서 추력은 각각 2회의 최대점과 최소점을 경과함을 알 수 있다.

3.3 추력계수 및 추진효율

Fig. 6(a), (b)는 무차원 진동수 k 에 대한 추력계수 $\overline{C_T}$ 와 동력계수 $\overline{C_W}$ 의 변화를 보이며, 무차원 진동수의 증가와 함께 추력 및 동력은 증가한다. Fig. 6(a)의 실선은 Garrick^[12]에 의한 진폭 $A_h/c=0.1$ 일 때의 박익(Thin airfoil)의 2차원 진동익이론의 계산결과를 나타내며, 본 실험결과와 비교해 보면 무차원 진동수 k 의 증가와 함께 추력이 증가하나 무차원 진동수가 더욱 증가하면 양자의 차가 커

짐을 알 수 있다. 이것은 박익에 대한 2차원 진동익이론에서는 후류와가 직선상의 분포한다고 가정하지만 실제 유동은 무차원 진동수가 커지면 후류와가 이 가정에서 벗어난 와열을 형성하기 때문이다. 또한, Fig. 6(a)로부터 항력에서 추력으로의 전이하는 임계점이 $A_h/c=0.05$ 의 경우 $k=2.8$ 부근에 존재함을 알 수 있다. 즉, 작은 무차원 진동수에서는 추력을 발생시키는 것이 곤란하며, 이것은 Fig.5(a)의 낮은 진동수의 경우 한 주기당의 히스테리시스 루프의 평균치가 '-'을 나타내기 때문이다.

Fig. 6(c)은 무차원 진동수 k 에 대한 추진효율의 변화를 보인다. 실선은 Garrick^[12]의 이론적인 조건에 있어서는 2차원 선형진동익이론에 의한 결과로서, 비교적 높은 효율을 보이고 있다. 본 실험에서는 무차원 진동수가 증가함에 따라 추력이 '4'가 되고, 추진효율은 증가하지만, 최고점을 지나서 추진효율이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 Wang^[13]은 두께비 0.125의 타원형익에 대한 2차원 수치계산 결과 약 10%정도의 효율을 얻고 있다. 그러나 본 실험에서 사용한 NACA 0010에서는 Wang보다 큰 무차원 진동수 영역에서 일정한 히빙 주파수에 대해서 히빙 진폭의 증가에 의해 보다 큰 추력을 얻었고, 그 최대효율은 약 20%였다.

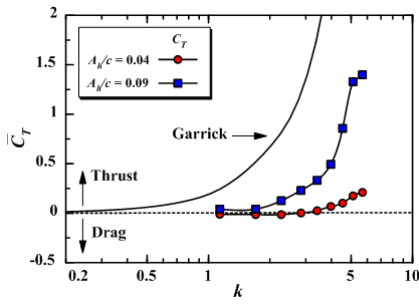
한편, 본 연구에서는 정현파의 히빙 운동만을 고려하였지만, 보다 높은 효율을 얻기 위해서는 진동 파형의 변화 및 피칭운동과의 조합 등이 필요할 것으로 사료되며, 그것들에 대해서는 향후 과제로 남기기로 한다.

4. 결 론

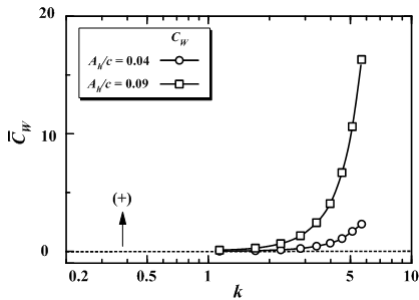
NACA 0010을 대상으로 저 레이놀즈수 영역에서 히빙익에 작용하는 비정상유체력을 회류수조, 소형 6축 센서 등을 이용하여 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 추진계수의 주기는 양력계수의 그것의 1/2배이고, 추력의 경우는 불룩한 '∞' 기호형, 양력의 경우는 경사진 타원형의 이력현상이 나타났다.

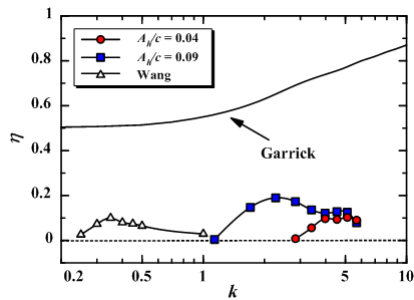
(2) 추력의 경우 최소점은 히빙익의 상사점 및 하



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Thrust, power coefficients and efficiency

사점의 직후, 최대점은 상사점과 하사점의 직전에 얻어졌고, 양력의 경우는 최소점은 히빙익의 상사점의 직후, 최대점은 하사점 직후에 얻어졌다.

(3) 추진효율은 무차원 진동수 및 진폭의 증가와 함께 증가하여, 최고효율은 본 실험에서 약 20%였다.

참고문헌

[1] T. Theodorsen, "General Theory of Aerodynamic Instability and the Mechanism of Flutter," NACA TR 496,

1935.

- [2] T. von Kármán and J. M. Burgers, "General Aerodynamic Theory Perfect Fluids," Berlin-Springer, 1935.
- [3] T. Y. Wu, "Hydromechanics of Swimming Propulsion," J. Fluid Mech., 46, 337-355, 1971.
- [4] G. S. Triantafyllou, M. S. Triantafyllou and M. A. Grosenbaugh, "Optimal Thrust Development in Oscillation Foils with Application to Fish Propulsion," Phys. Fluids A3, 12, 1991.
- [5] C. M. Ho and Y. C. Tai, "MEMS and Fluid Flow," J. Fluid Mech., 30, 579-612, 1978.
- [6] W. Shyy and R. W. Smith, "A Study of Flexible Airfoil Aerodynamics with Application to Micro Aerial Vehicles," AIAA Paper No. 97-1933, 1997.
- [7] R. L. Bisplinghoff, H. Ashley and R. L. Halfman, "Aeroelasticity," Dover Publication, Inc., 1955.
- [8] M. M. Koochesfahani, "Vortical Patterns in the Wake of an Oscillating Airfoil," AIAA Journal, 27-9, 1200-1205, 1989.
- [8] K. D. Jones, C. M. Dohring and M. F. Platzer, "Experimental and Computational Investigation of the Knoller-Bentz Effect," AIAA Journal, 36-7, 1241-1246, 1998.
- [10] J. C. S. Lai and M. F. Platzer, "The Characteristics of a Plunging Airfoil at Zero Free-stream Velocity," AIAA Journal, 37-12, 1529-1537, 1999.
- [11] C. J. Yang, M. Fuchiwaki, K. Tanaka and Y. H. Lee, "Unsteady Fluid Forces and Flow Patterns of a Heaving Airfoil," Proc. 5th JSME-KSME Fluids Engineering Conference, 126, 2002.
- [12] I. E. Garrick, "Propulsion of a Flapping and Oscillating Airfoil," NACA Rept. 567, 1936.
- [13] Z. J. Wang, "Vortex Shedding and Frequency Selection in Flapping Flight," Fluid Mech., 410, 323-341, 2000.