

< 논문 >

생체 모방익 추진에 대한 수치적 연구

한철희[†] · 이학진* · 조진수**

(2006년 4월 6일 접수, 2006년 7월 27일 심사완료)

Numerical Study of Biomimetic Foil Propulsion

Cheol-Heui Han, Hak-Jin Lee and Jin-Soo Cho

Key Words : Biomimetic Foil(생체 모방익), Biomorphing Foil(생체 형상가변익), Wake Rollup(후류 말림), Unsteady Panel Method(비정상 패널법)

Abstract

A numerical study on the propulsive characteristics of a biomimetic foil is done by developing an unsteady linearly-varying strength vortex method. A biomimetic foil is represented as a deforming foil with a tail fin. Present method is verified by comparing the simulated results with results using finite element and finite volume methods. A new boundary condition is imposed by considering the relative rotational velocity, which has not been included in the previous published literature. It is found that the undulation amplitude increases the thrust while maximum thickness is stepping down the thrust. It is also shown that there exists an optimal frequency for maximum thrust generation. It is believed that present results can be used in the investigation of the propulsive characteristics of the biomimetic deforming foil.

기호설명

A_y : 영향 계수
 c : 시위 길이
 C_l : 양력 계수
 C_t : 추력 계수
 f : 생체 모방익의 평균캠버선
 h_0 : 익형의 플러징 진폭
 H : 생체 모방익 캠버의 진폭
 H_0 : 생체 모방익 꼬리의 최대진폭
 k : 무차원 환산 주파수 ($\omega c/U_\infty$)

n_i : 표면에 수직한 단위 벡터
 r_c : 와핵 반경
 T : 생체 모방익의 두께
 U_∞ : 자유 유동 속도
 Δt : 시간 간격
 γ : 패널의 선형 와류 강도

1. 서론

MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems)관련 기술 및 지능형 재료를 이용한 작동기 응용기술의 발전과 함께, 물속을 수영하는 생물체의 운동 메카니즘을 이해하고 이를 응용하여 새로운 개념의 추진기를 가진 무인 잠수정(Autonomous Underwater Vehicle)을 개발하려는 연구가 조선관련 분야에서 진행되고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 기존의 프로펠러 보다 우수한 추진성능을 가진 플랩핑 추진기를 개발하기 위해서는, 먼저 물고기의 추진원리를 규명하고 이를 이용하여 새로운

[†] 책임저자, 회원, 건국대학교 인공근육연구센터

E-mail : timea@ihanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0546 FAX : (02)2294-0547

* 회원, 한양대학교 항공공학과

** 회원, 한양대학교 기계공학부

패러다임의 추진기를 개발할 필요가 있다.

Lighthill⁽⁵⁻⁷⁾은 물고기들의 움직임과 추력사이의 상관관계를 이론적으로 나타내었다. Kagemoto 등⁽⁸⁾은 와류격자법을 사용하여 계산한 값과 Lighthill^(5,7)의 이론 및 Robo Tuna 의 값을 비교 하였다. Galls 와 Rediniotis⁽⁹⁾는 주어진 경로를 따라 움직이는 생체 모방 운송체의 움직임을 계산하고 결과값을 Navier-Stokes 방법과 비교하였다. 최근 Uchiyama 와 Kikuyama⁽¹⁰⁾는 유한요소법을 사용하여 체내 의약 수송에 적용 가능한 wiggling micromachine 의 추력특성에 관하여 연구를 하였다. 레이놀즈 수가 감소함에 따라 추력이 감소하고 이는 표면마찰항력의 증가에 기인함을 밝혔다. Childress 와 Dudley⁽¹¹⁾는 *clione antarctica* 의 수영을 관찰하여 점성의 영향이 지배적인 Stokesian 영역에서 추력이 발생하는 Eulerian 영역으로 천이하는 임계레이놀즈수가 5-20 임을 이론적으로 유도하였다. 또한, 생체 모방익에서 발생하는 추력은 주로 생체 모방익의 꼬리에서 발생하는 후류 말림의 특성과 큰 관계가 있다. Lighthill⁽⁶⁾은 물고기에서 발생하는 후류가 꼬리지느러미의 진폭이 최대일 때 발생하도록 하는 것이 가장 효과적임을 밝혔다.

전산유체 역학(Computational Fluid Dynamics, 이하 CFD)를 사용하여 생체 모방익의 추진을 연구할 경우 매 시간마다 변형을 하는 격자계를 구성해야 하는 어려움이 발생한다. 또한 대류항을 저차항으로 계산을 할 경우 발생하는 수치적 소산(numerical dissipation)으로 인하여 실제 물리적 현상보다 빨리 후류가 소멸된다. 기존의 이론 및 퍼텐셜 유동에 기반을 둔 수치적 연구들은 국부적인 생체 모방익 표면의 회전이동을 무시하고 단순히 캠버의 상하진동만을 고려하여 생체 모방익의 추력을 예측하였다.⁽⁵⁻⁸⁾

따라서, 본 연구에서는 와핵모델링 및 와핵 첨가법을 도입한 Han 등⁽¹²⁾의 연구결과를 바탕으로 후류 형상을 모사하였고, 기존 연구들에서는 고려하지 않은 생체 모방익의 표면에서의 경계조건에 국부회전 상대 속도항을 새롭게 첨가하였다. 이를 바탕으로 생체 모방익의 형상변화에 따른 후류 형상 및 추력특성을 연구하였다.

2. 수치적 방법

생체 모방익이 비정상 운동을 하며 수영을 할 때, 생체 모방익을 둘러싼 유동장은 비점성, 비압축성, 비회전 유동장이라고 가정한다. 생체 모방익의 비정상 수력특성을 나타내기 위하여 좌표계는 지면에 고정된 관성좌표계와 생체 모방익에 고정

된 물체 고정 좌표계를 도입한다. 물체 고정 좌표계에서의 질량보존 방정식은 다음과 같이 속도퍼텐셜에 대한 Laplace 방정식으로 나타낸다.

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (1)$$

생체 모방익의 표면을 Fig. 1 과 같이 N 개의 패널요소로 이산화 하고, 각 패널요소 위에서의 와도(vorticity)의 강도는 선형이라고 가정 한다. 생체 모방익 후연(trailing edge) 바로 뒤에 위치한 가장 최근 후류(nascent wake vortex)는 일정한 강도를 가진다고 가정 하였다. 하류로 대류하는 일정강도의 후류를 점 와류(point vortex)로 나타내었다.

생체 모방익 표면 위의 각 패널요소 도심점에 유체가 생체 모방익 표면을 뚫고 지나갈 수 없다는 no-penetration 경계조건을 부여함으로써 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\left(\sum_{j=1}^{N+1} A_{ij} \gamma_j + A_{iN+2} \gamma_w \right) \cdot \mathbf{n}_i = -(\mathbf{V}(t) + \mathbf{V}_{iw}) \cdot \mathbf{n}_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

여기서, A_{ij} 는 i 패널에 위치한 단위강도 와류가 j 패널 제어점에 유도하는 속도를, A_{iN+2} 는 가장 최근 후류(most nascent wake)의 와류가 i 패널의 제어점에 유도하는 속도를, \mathbf{V}_{iw} 는 i 제어점에 대하여 한 시간간격 이전에 위치와 강도가 알려진 점 와류들이 유도하는 속도이다. \mathbf{n}_i 은 생체 모방익의 표면에 수직한 단위벡터를, $\mathbf{V}(t)$ 는 생체 모방익의 운동학적 속도(kinematic velocity)를 나타낸다.

$$\mathbf{V}(t) = \mathbf{V}_{inf} + \mathbf{v}_{rel} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r} \quad (3)$$

여기서 \mathbf{V}_{inf} 는 생체모방익의 비행(또는 수영)속도를, $\boldsymbol{\Omega}$ 는 물체고정 좌표계에서 관찰한 생체모방익의 회전속도를 나타낸다. \mathbf{v}_{rel} 은 물체고정 좌표계에서 관찰한 생체모방익 표면의 상대속도로, 기존의 이론 및 수치 연구들⁽⁵⁻⁸⁾은 수직방향 속도성분($v_{vertical} = U_{\infty} \partial h / \partial t$)만을 고려하여 나타내었다. 본 연구에서는 Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 생체모방익에 작용하는 상대속도를 회전속도항과 병진속도항으로 구분하여 나타내었다.

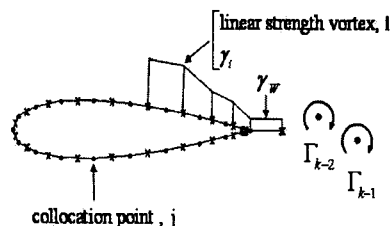


Fig. 1 Nomenclature of the unsteady panel method

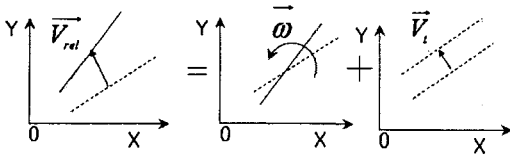


Fig. 2 Nomenclature of the relative boundary condition

$$V_{rel} = V_{translational} (= 0.5 \times d(\bar{r}_{i+1} + \bar{r}_i) / dt) + V_{rotational} (= \bar{\omega} \times (\bar{r}_{i+1} - \bar{r}_i) / 2) \quad (4)$$

생체 모방익과 생체 모방익을 둘러싼 유동장에 Kelvin 정리를 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \left[\frac{(\Delta l_i)}{2} (\gamma_i)_k + \sum_{i=1}^N \left[\frac{(\Delta l_{i-1}) + (\Delta l_i)}{2} (\gamma_i)_k \right] \right. \\ & \left. + \frac{(\Delta l_N) + (\Delta l_w)}{2} (\gamma_{N+1})_k + \frac{(\Delta l_w)}{2} (\gamma_w)_k \right] \\ & = \sum_{k=1}^{NT-1} \Gamma_{k-1} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 Δl 는 패널 길이를, Δl_w 는 후류 패널 길이를 나타낸다. NT 는 시간간격의 총합을, k 는 현 시간단계, $k-1$ 는 전 시간단계를 나타낸다. 생체 모방익 뒷전에 Kutta 조건을 부여함으로써, $(N+2) \times (N+2)$ 영향계수 행렬을 구성할 수 있다.

후류 모델링

생체 모방익은 플랩핑 운동을 하면서 형상을 변화시킨다. 따라서, 생체 모방익에서 발생하는 복잡한 형상의 후류를 정확히 모사하기 위해서, 와해첨가법,⁽¹⁴⁾ 와해 모델법^(13,15) 및 4계 Runge-Kutta 법을 사용하였다.

유체력 계산

비점성, 비압축성 유동장에서 비정상 운동을 하는 물체에 미치는 수력 하중은 비정상 Bernoulli 방정식을 사용하여 계산할 수 있고, i 번째 제어점에서의 압력차 (Δp_i) 는 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} \Delta p_i = \rho [& (V(t) + V_{iw}) \cdot t_i \left(\frac{\gamma_{i2}(x) + \gamma_{i1}(x_2 - x)}{2x_2} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^i \left[\frac{\Gamma_{k2}(x) + \Gamma_{k1}(x_2 - x)}{2x_2} + \frac{\Gamma_{k1}(x_2)}{2x_2} \right]] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 t_i 는 접선 벡터를, γ_{i1} 및 γ_{i2} 는 각 패널 요소의 양단에 위치한 와류강도를 나타낸다. Γ_{k1} , Γ_{k2} 는 각 패널요소 양단에 위치한 순환강도를 갖는 와류를 나타내며, x_1 및 x_2 는 패널 양단의 위치를 나타내며, x 는 패널 요소내 임의의 한 점의 위치를 나타낸다.

추력은 생체 모방익을 둘러싼 검사체적에 대한 운동량보존 방정식을 사용하여 다음과 같이 계산한다.

$$T(or D) = \rho \int_{\infty}^{\infty} V(y) [V(y) - U_{\infty}] dy \quad (7)$$

여기서 $V(y)$ 는 검사체적출구단면에서의 속도프로파일을 나타낸다. 본 연구방법에서 사용한 비점성 패널법은 점성의 영향을 무시한 수치해석 방법으로, 본 연구방법을 사용하여 계산한 추력은 생체 모방익에서 발생하는 역 von Karman 와열로 설명이 되는 체트유동에 기인한 추력을 의미한다. 생체 모방익은 점성마찰항력 및 압력항력을 극복할 수 있을 만큼의 추력을 발생시켜야 앞으로 전진운동을 하거나 등속도 운동을 유지할 수 있다. 생체 모방익 표면의 점성마찰에 기인한 마찰항력 및 압력항력은 본 연구방법으로는 계산할 수 없다. 매 사이클 마다 발생한 추력을 시간 평균한 시간평균추력계수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$C_t = \frac{\bar{T}}{(1/2 \rho U_{\infty}) \cdot c} \quad (8)$$

3. 결과 및 고찰

Fig. 3 은 본 연구에서 사용한 생체 모방익의 형상을 나타낸 그림이다. 생체 모방익의 평균캠버선 (f) 은 Lighthill⁽⁵⁾이 제시한 식을 사용하였으며, 다음과 같다.

$$f(x, t) = H(x) \cos \omega \left(\frac{x}{U_{\infty}} - t \right), \quad H(x) = H_0 x^2 \quad (9)$$

여기서, H 는 시위의 임의의 점에서의 캠버의 진폭을 나타내며, H_0 는 생체 모방익 꼬리의 최대진폭을 나타낸다. 생체 모방익의 두께는 NACA0012 의 두께를 따른다고 가정을 하였다.

Fig. 4 는 급 출발하는 생체 모방익의 시간변화에 따른 양력 양력계수 값의 변화를 계산한 후 Wagner 이론치,⁽¹⁶⁾ 점성 및 비점성 수치해석 결과^(17,18)와 비교하여 나타낸 그림이다. 계산 조건은 받음각이 2.4° , 시간간격 (Δt) 이 $0.05c/U_{\infty}$, 임계길이 (L_c) 가 $3.0\Delta t U_{\infty}$, 와해 반경(r_c)은 $0.03c$ 이다. 그림에서 본 연구방법을 사용한 결과와 Wagner 이론치 및 일정강도 와류패널법의 계산결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 반면에 유한 요소법⁽¹⁷⁾을 사용한 해석결과는 이론치 및 패널법 해석 결과들과 차이를 보이며 더 빨리 수렴한다. 이는 불완전한 초기조건, 공간차분 오차 축적 및 압축성에 의한 비정상 후류 영향의 급속한 감소 등에 기인한다.⁽¹⁷⁾

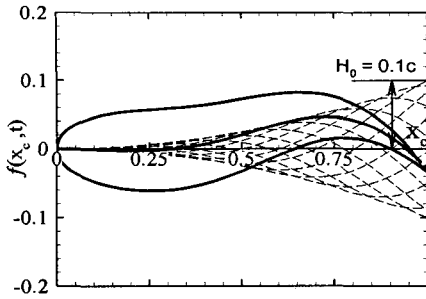


Fig. 3 Geometrical representation of a biomimetic foil

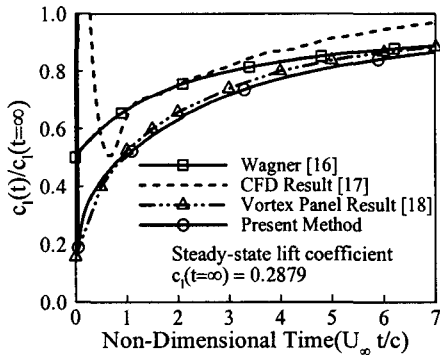
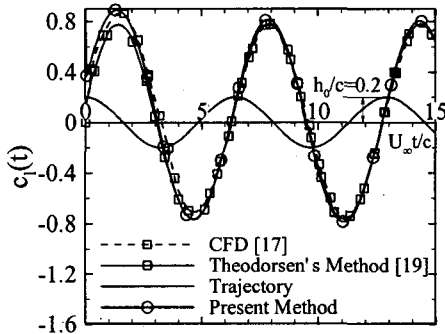
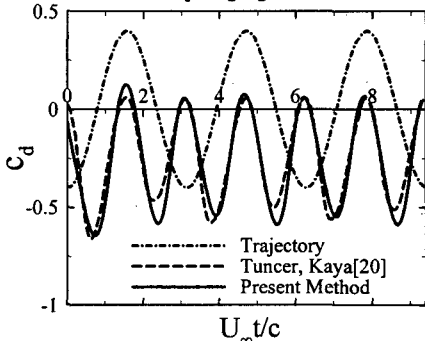


Fig. 4 Lift coefficient of an impulsively started airfoil



(a) Lift coefficient of a plunging NACA 0012 airfoil



(b) Drag coefficient of a plunging NACA 0014 airfoil

Fig. 5 Comparison of aerodynamic coefficients of plunging airfoils

Fig. 5 에 플런징 운동을 하는 NACA 4 자 에어포일의 공력특성을 나타내었다. Fig. 5(a)에 NACA 0012 에어포일이 플런징(plunging) 운동을 할 때, 시간에 따른 양력 계수 값의 변화를 유한요소법 해석결과⁽¹⁷⁾ 및 Theodorsen 이론값⁽¹⁹⁾과 비교하여 나타냈다. $\Delta t = 0.05c/U_\infty$, $r_c = 0.03c$, $L_{cr} = 3.0\Delta t U_\infty$ 의 조건으로 계산하였으며, 플런징 진폭(h_0)은 $0.2c$ 이고, 무차원 환산 주파수(reduced frequency, $k = \omega c/U_\infty$)는 0.974 이다. Fig. 5(b)는 NACA 0014 익형이 플런징 운동을 할 때 나타나는 항력계수 변화 값을 Tuncer 과 Kaya⁽²⁰⁾의 유한체적법 계산 결과와 비교하여 나타낸 그림이다. 계산조건은 $h_0 = 0.4c$, $k = 2$, $Re = 1 \times 10^4$ 이다.

그림에서 본 연구에서 사용한 비정상 패널법의 계산결과와 이론치⁽¹⁹⁾ 및 CFD 해석 결과들^(17,20)과 잘 일치함을 알 수 있다. 양력은 에어포일 운동주기와 같은 주기로 변화하나, 항력은 에어포일 운동주기보다 2 배 정도 빠르게 변하고 있음을 알 수 있다. 이는 에어포일의 플런징 운동 진폭이 최대가 되는 점과 최소가 되는 점에서 와류가 떨어져 나가기 때문이다.⁽⁶⁾ 또한 에어포일이 downstroke 하거나 upstroke 하는 지점에서 비정상 패널법의 계산결과와 Tuncer 와 Kaya⁽²⁰⁾의 계산결과가 차이가 발생한다. 이는 본 연구의 비정상 패널법이 표면점성마찰항력을 고려할 수 없으며, 에어포일 앞전에서 박리하여 하류로 대류하는 앞전와(leading edge vortex)의 영향이 고려되지 않았기 때문이다.⁽²⁰⁾

기존의 선형이론⁽⁵⁻⁷⁾ 및 와류격자법⁽⁸⁾을 사용한 연구들은 에어포일이 undulation 운동을 할 때, 캠버의 형상변화로 인하여 발생하는 상대 속도 중 에어포일 표면의 국부회전에 의한 상대속도항은 무시하고 단지 캠버의 수직방향으로의 상대속도항만을 고려하였다. 본 연구에서는 국부회전 상대속도의 영향을 고려하여, 생체 모방익에서 발생하는 후류 형상 및 추력특성의 변화를 계산하였다.

Strouhal 수는 $St = fh/U_\infty$ 로 정의할 수 있으며 f 는 와의 shedding frequency 를, h 는 와열들 사이의 수직거리 를, U_∞ 는 자유흐름 속도를 나타낸다.⁽²²⁾ Fig. 6 은 국부회전속도 항을 고려한 경우가 국부회전속도항을 고려하지 않은 경우 보다 더 적은 h 값을 예측하고 있음을 보여준다. 따라서, 국부회전속도항을 고려하지 않은 경우가 더욱 큰 Strouhal 수를 나타낸다.

Fig. 7 에 환산 주파수 5 로 꼬리를 진동시키는 생체 모방익에서 발생한 시간에 따른 추력계수 값의 변화와 한 주기 동안의 추력계수 값을 시간평균한 시간평균 추력계수 값을 나타내었다. 상대속도에 회전성분을 첨가하여 계산된 추력계수 값보다 상대속도에 회전성분을 고려하지 않고 계산된 추력계수 값이 더 작은 시간평균 추력계수 값을

보여주고 있다.

Fig. 8 에 최대진폭이 후류형상 및 추력특성에 미치는 영향을 나타내었다. Fig. 8(a)에 생체 모방익 꼬리의 최대진폭(H_0) 크기변화에 따른 후류형상의 변화를 나타내었다. 최대진폭의 크기가 증가할수록 후류의 와열 사이의 수평거리가 감소하고, 후류 말림(wake rollup)의 크기가 커지고 있음을 알 수 있다. Fig. 8(b)에서 최대진폭이 증가할수록 추력도 증가하나, 최대진폭이 $H_0 = 0.1c$ 보다 큰 생체 모방익의 경우 진폭 증가에 의한 추력증가는 없다.

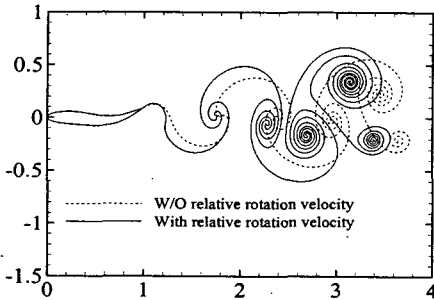
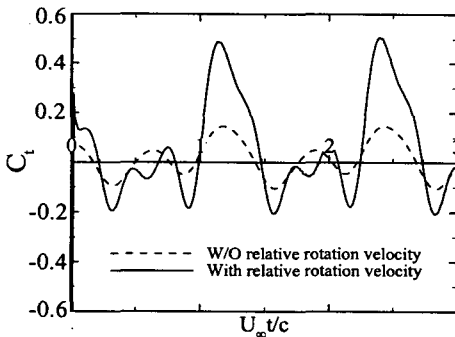
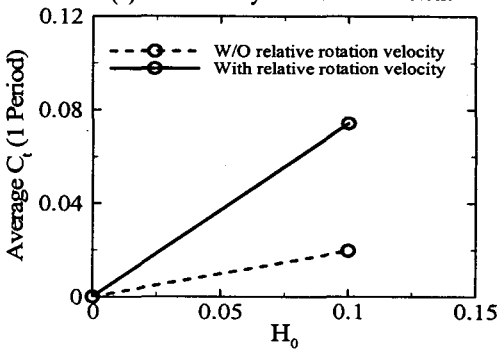


Fig. 6 Effect of relative rotation velocity on wake shapes ($\Delta t = 0.01c/U_\infty$, $L_{cr} = 3.0\Delta t U_\infty$, $H_0 = 0.1c$, $T = 12\%$, $r_c = 0.07c$, $k = 5$)



(a) Time history of thrust coefficient

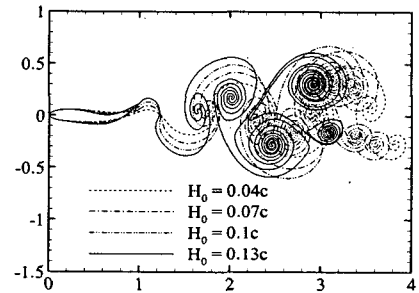


(b) Time-averaged thrust coefficient

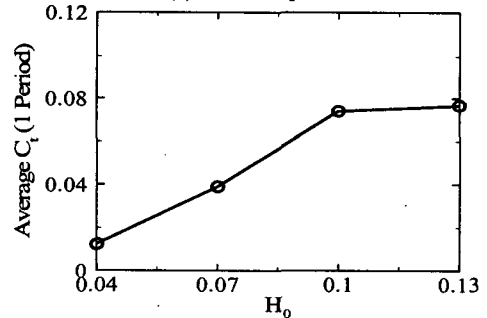
Fig. 7 Effect of the relative rotation velocity on the thrust coefficient ($\Delta t = 0.01c/U_\infty$, $L_{cr} = 3.0\Delta t U_\infty$, $r_c = 0.07c$, $H_0 = 0.1c$, $T = 12\%$, $k = 5$)

Fig. 9 는 생체 모방익의 두께에 따른 추력특성의 변화를 나타내었다. 생체 모방익의 두께가 두꺼울수록 추력 값이 감소하였다. 동일한 최대진폭을 가진 생체 모방익의 경우 에어포일의 두께가 두꺼울수록 생체 모방익 진폭이 작다. 따라서 두께가 두꺼운 생체 모방익의 추력이 두께가 얇은 생체 모방익보다 더 작은 추력을 발생한다.

Fig. 10 에 일정 진폭으로 변형하는 생체모방익의 환산 주파수의 변화에 따른 후류형상 및 추력 특성 변화를 나타내었다. 자연에 존재하는 생물체의 경우 일정범위의 Strouhal 수 범위 내에서 최적 효율을 가지고 있다.⁽²³⁾ 따라서 고정된 진폭으로



(a) Wake shapes



(b) Time-averaged thrust coefficient

Fig. 8 Effect of undulation amplitude on the thrust coefficient ($\Delta t = 0.01c/U_\infty$, $L_{cr} = 3.0\Delta t U_\infty$, $r_c = 0.07c$, $k = 5$, $T = 12\%$)

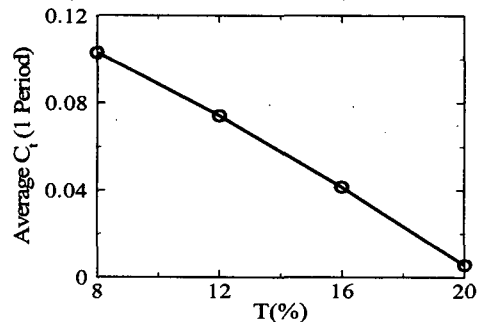


Fig. 9 Effect of thickness on the thrust coefficient ($\Delta t = 0.01c/U_\infty$, $L_{cr} = 3.0\Delta t U_\infty$, $r_c = 0.07c$, $k = 5$, $H_0 = 0.1c$)

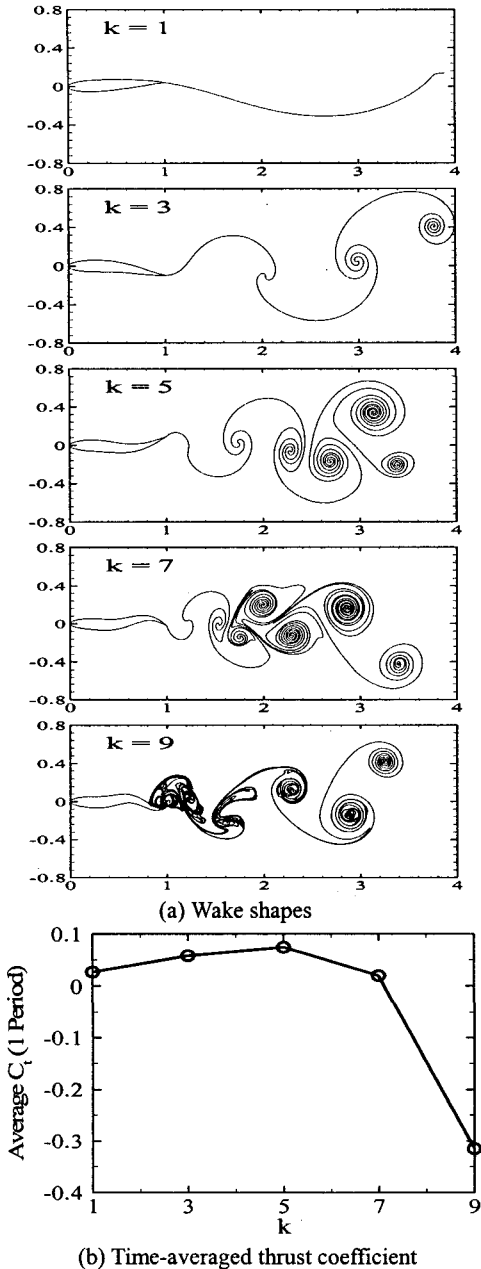


Fig. 10 Effect of reduced frequency on the thrust coefficient ($\Delta t = 0.01c/U_\infty$, $L_{cr} = 3.0\Delta t U_\infty$, $r_c = 0.07c$, $H_0 = 0.1c$, $T = 12\%$)

진동운동을 할 경우 Strouhal 수는 진동주파수의 함수로 나타낼 수 있다. 따라서, 일정주파수 범위 내에서만 역 von Karman 와열 구조가 발생하며 이에 기인한 추력이 발생하고 있음을 알 수 있다. Fig. 10(b)에 최대 진폭이 $H_0 = 0.1c$ 인 본 연구의

경우 무차원 환산 주파수가 5 로 진동을 할 때 생체 모방익이 가장 큰 추력을 발생시킴을 알 수 있다.

4. 결론

비정상 패털법을 사용하여 생체 모방익 꼬리의 최대진폭과 무차원 환산 주파수, 생체모방익의 두께가 생체모방익에서 발생하는 후류형상 및 추력 특성에 미치는 영향을 계산 하였다.

상대속도를 고려하지 않을 경우 추력값이 작게 예측하였다. 꼬리의 최대진폭이 증가할수록 추력도 증가 하였으나, 꼬리가 일정값 이상으로 크게 진동을 할 경우 추력의 증가량은 작다. 꼬리의 진동 주파수가 일정 영역을 벗어 날 경우 역 von Karman 와열이 생성되지 않아 오히려 추력값이 작아진다. 생체 모방익의 두께가 증가 할수록 추력값이 감소했다.

향후 본 연구결과를 다수의 생체 모방익 시스템으로 확장을 하여 생체 모방익들 사이의 상호작용에 대한 연구를 할 계획이다.

후 기

본 연구는 한국과학기술부의 특정기초 연구사업 (R01-2005-000-10310-0)으로 수행된 연구 결과의 일부이며 연구비를 지원해 주신 한국과학기술부에 감사드립니다. 이 논문은 또한 2005 년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-206-D00007).

참고문헌

- (1) Kim, J. and Seo, Y. B., 2002, "Electro-active Paper Actuators," *Smart Materials and Structures*, Vol. 11, pp. 355~360.
- (2) Shinjo, N. and Swain, G. W., 2004, "Use of a Shape Memory Alloy for the Design of an Oscillatory Propulsion System," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 29, No. 3, pp. 750~755.
- (3) Healey, A. J. and Lienard, D., 1993, "Multivariable Sliding Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 327~339.
- (4) Bandyopadhyay, P. R., "Trends in Biorobotic Autonomous Undersea Vehicles," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 29, pp. 1~32.
- (5) Lighthill, M. J., 1960, "Note on the Swimming of Slender Fish," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 9, Part 2, pp. 305~317.
- (6) Lighthill, M. J., 1969, "Hydromechanics of Aquatic Animal Propulsion," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 1, pp. 413~446.

- (7) Lighthill, M. J., 1970, "Aquatic Animal Propulsion of High Hydromechanical Efficiency," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 44, Part 2, pp. 265~301.
- (8) Kagemoto, M. J., Wolfgang, D. K. P., Yue, M. S. and Triantafyllou, 2000, "Force and Power Estimation in Fish-Like Locomotion Using a Vortex-Lattice Method," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 122, pp. 239~253.
- (9) Galls, S. F. and Rediniotis, O. K., 2003, "Computational Simulation of the Autonomous Navigation of a Biomimetic Underwater Vehicle," *AIAA Journal*, Vol. 41, No. 4, pp. 605~611.
- (10) Uchiyama, T. and Kikuyama, K., 2004, "Numerical Simulation for the Propulsive Performance of a Submerged Wiggling Micromachine," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 14, pp. 1537~1543.
- (11) Childress, S. and Dudley, R., 2004, "Transition from Ciliary to Flapping Mode in a Swimming Mollusc: Flapping Flight as a Bifurcation in $Re\omega$," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 498, pp. 257~288.
- (12) Tong, B. G., Zhuang, L. X. and Cheng, J. Y., 1992, "The Hydrodynamic Analysis of Fish Propulsion Performance and its Morphological Adaptation," The Fifth Asian Congress of Fluid Mechanics, August 10-14, pp. 1082~1090.
- (13) Han, C. H., Yoon, Y. H. and Cho, J. S., 2002, "Unsteady Aerodynamic Analysis of Tandem Flat Plates in Ground Effect," *Journal of Aircraft*, Vol. 39, No. 6, pp. 1028~1034.
- (14) Mook, D. T., Roy, S., Choksi, G. and Dong, B., 1989, "Numerical Simulation of the Unsteady Wake Behind an Airfoil," *Journal of Aircraft*, Vol. 26, No. 6, pp. 509~514.
- (15) Choi, K. H., Han, C. H. and Cho, J. S., 2001, "A Study on the Dynamic Ground Effect for Flat Plates in Tandem Configuration Using a Discrete Vortex Method," *Journal of KSAS*, Vol. 29, No. 1, pp. 25~32.
- (16) Wagner, H., 1925, "Über die Entstehung des Dynamischen Antriebes von Tragflugeln," *Z.F.Z.M.M.*, Vol. 5, No. 1, pp. 17~35.
- (17) Timothy, J. C., 2003, "Finite Element CFD Analysis of Super-Maneuvering and Spinning Structures," Ph.D. Dissertation, Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Oklahoma State University.
- (18) John, M., 2003, "Potential Flow 2-Dimensional Vortex Panel Model: Application to Windmills," Ph.D. Dissertation, Department of Applied Science and Engineering, University of Toronto.
- (19) Garrick, I. E., 1936, "Propulsion of a Flapping and Oscillating Aerofoil," NACA Report No. 567.
- (20) Tuncer, I. H. and Kaya, M., 2003, "Thrust Generation Caused by Flapping Airfoils in a Biplane Configuration," *Journal of Aircraft*, Vol. 40, No. 3, pp. 509~515.
- (21) Mohseni, K., 2000, "Studies of Two-Dimensional Vortex Streets," 31st AIAA Fluid Dynamics Conference & Exhibit, 11-14 June.
- (22) Jones, K. D., Dohring, C. M. and Platzler, M. F., 1996, "Wake Structures Behind Plunging Airfoils: A Comparison of Numerical and Experimental Results," 34th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 15-18 January.
- (23) Taylor, G. K., Nudds, R. L. and Thomas, A. L. R., 2003, "Flying and Swimming Animals Cruise at a Strouhal Number Tuned for High Power Efficiency," *Nature*, Vol. 425, pp. 707~711.