

# 추력 및 효율 향상을 위한 Double Hydrofoil 움직임에 대한 수치해석 연구

김수진\* · 한준희\* · 이도형\*†

## Numerical study of Double Hydrofoil motions for thrust and propulsive efficiency

Sue-jin Kim\*, Jun-hee Han\*, Do-hyung Lee\*†

Key Words : CFD(전산유체역학), Thrust(추력), Efficiency(효율), Double hydrofoil(두 쌍 수중익)

### ABSTRACT

The motion of birds and insects have been studied and applied to MAV(Micro Air Vehicle) and AUV(Autonomous Underwater Vehicle). Most of AUV research is focused on shape and motion of single hydrofoil. However, double hydrofoil system is mostly used in real physics. This system shows completely different hydrodynamic characteristic to single hydrofoil because of wake interaction. The goal of this study is define the trajectory of wake interaction in double hydrofoil system. Moreover, trust and efficiency of various combined motion will be demonstrated. Symmetry airfoil is used for analysis an hydrodynamic characteristic. Forward wing's plunging and pitching motion is fixed, hide wing's Heaving ratio, Pitch phase shift from forward plunging and Heaving shift is changed. This study provide necessary basic data of motion optimization for double hydrofoil system.

### 1. 서 론

조류, 곤충 등과 같은 생물들의 날개짓을 모방하여 MAV(Micro Air Vehicle)를 개발하는 것과 마찬가지로 Autonomous Underwater Vehicle(AUV, 이하 자율 무인 잠수정)분야에서도 물고기나 거북이 등 지느러미를 가진 동물들이 물 속에서 헤엄치는 움직임들을 모사하는 연구가 진행되고 있다.

먼저 MAV분야에서 비행에 관한 다양한 연구가 진행되어지고 있다. R. Mittal은 전산수치해석을 이용하여 일반적인 정지비행에서 대하여 single wing와 paired wing를 가진 플레핑 모델에서 두 날개 사이의 위상차 변화에 따른 추력 생성과 효율에 대한 영향에 관하여 연구하였다.<sup>(1)</sup> 김도균 등은 앞날개와 뒷날개의 위상차에 따라 날개에 작용하는 힘과 날개의 위상차에 따라 날개에 작용하는 힘과 날개 주위의 볼텍스 구조 등을 분석 하였다.<sup>(2)</sup> 김현석 등은 잠자리 유형 날개

모델의 공력특성을 예측하고자 가시화를 이용하여 위상차의 변화에 따른 후류의 변화를 관찰하였다.<sup>(3)</sup>

AUV분야에서는 Drucker는 sunfish 지느러미의 움직임 및 후류 분석에 대한 연구를 진행하였다.<sup>(4)</sup> Imran Akhtar은 물고기의 등지느러미에서 발생한 vortex로 인해 꼬리의 유무에 따라 변화는 효율과 추력에 대하여 연구하였다.<sup>(5)</sup> Licht는 거북이의 움직임과 형상을 참고하여 로봇을 제작하여 실험하였다.<sup>(6)</sup>

더 나아가 AUV 및 MAV의 플레핑 모션과 형상을 변형하여 성능을 향상시키고자 하는 연구가 진행되어지고 있다.

I. H. Tuncer는 플러징과 피칭 운동에 대해 최대 추력과 효율을 발생 시키는 형상을 확인하기 위한 최적화 방법을 수행하였다. 특히 이 연구에서 플러징 높이와 피칭 각도에 대해 최대 추력과 효율이 발생하는 움직임에 대해 제시하였다.<sup>(7)</sup> M. A. Ashraf는 heaving과 combined motion(플러징

\* 한양대학교 기계공학부 (Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang University)

† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : Dohyung@hanyang.ac.kr

과 피칭 운동의 조합)에서 에어포일의 두께와 캠버의 변화에 대한 효과가 추력과 효율에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이를 통해 에어포일에서의 최대 추력을 발생하는 형상과 효율에 대한 파라미터들을 제시했다.<sup>(8)</sup> 김일환 등은 단일 hydrofoil을 이용하여 combine motion이 적용된 자율 무인 잠수정의 날개형상과 모션을 결합하여 최대의 추력과 효율을 발생시키는 형상과 모션을 동시에 찾는 최적화 수행하였다.<sup>(9)</sup>

대부분 연구들이 single hydrofoil에 대하여 연구하여 왔으나 실제 자율 무인 잠수정(AUV)의 경우 거북이의 형상과 유사하게 하여 앞뒤로 두 쌍의 Hydrofoil로 움직인다. 이에 따라 각 날개의 움직임에 따라 추력과 효율이 변화한다. 모션에서 큰 영향을 미치는 인자로 뒷날개의 plunge과 pitch angle을 parameter로 선정하였다. 결과적으로, 참고문헌 조회를 통하여 선정한 parameter들로 날개간의 wake interaction의 영향, 추력, 효율 등의 변화를 확인하고자 한다.

더하여 이러한 복잡한 모션을 함께 하는 수치해석의 경우 3차원 해석 수행 시 계산 소요시간이 길며, 많은 자원이 필요하여 2차원 해석으로 수행한다. 이에 대하여 J. Young 등과<sup>(10)</sup> P.C Wilkins 등이<sup>(11)</sup> 플레핑 운동에 대해 NACA Airfoil(이하 에어포일) 모델에 대해 2차원 Navier-Stokes 유동해석을 수행하였고 다양한 레이놀즈 수에서 2차원과 3차원의 수치적 해석의 타당성을 검증하였다.

따라서 본 연구를 2차원 수치해석으로 진행하였다. 수치 해석 시 뒷날개의 모션 변화에 대한 영향성을 분석하기 위하여 동일한 대칭형 익형으로 수치해석을 진행하였다. 이러한 조건들을 바탕으로 double hydrofoil에서의 wake interaction을 관찰하였다. 익형 형상은 일반적으로 널리 사용되는 NACA 4 Digits airfoil을 선택하였다. 뒷날개의 Heaving ratio와 pitch angle 및 phase difference를 변화시켜 각각의 parameter들이 전체 유동에 미치는 영향을 확인하였다. 이들 해석결과들을 통해 double hydrofoil에서 발생하는 유동발생의 메카니즘과 뒷날개 모션 parameter들의 변화가 유동현상에 미치는 영향성을 찾을 수 있다.

## 2. 수치해석

본 연구에 사용된 ANSYS - FLUENT는 유한체적법 (FVM)을 이용하여 질량, 운동량, 에너지 그리고 화학종 보존 방정식을 계산하는 CFD 상용 코드로서 다양한 분야의 유동해석을 수행하는 프로그램이다.

본 연구에서는 Fluent를 사용하여 2차원 비정상 유동 해석을 수행하였다. 이 때 적용되는 유동 지배 방정식은 2차원 비압축성 층류 Navier-Stokes 방정식을 적용하였으며, 식은 다음과 같다. 식 (1)은 연속방정식, 식 (2)은 운동량 방정식을 나타낸 것이다.

$$\nabla \cdot V = 0 \tag{1}$$

$$\rho \left( \frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 V \tag{2}$$

여기서  $V$ 는 속도,  $p$ 는 압력을 의미한다.

### 2.1. 플레핑 운동의 수학적 모델

본 연구에서 AUV의 움직임은 플레핑 운동으로써 앞날개에 적용된 식 (3), (4)와 뒷날개에 적용된 (4), (5)의 플러징과 피칭 운동으로 구분된다. 각각의 기호는  $C$ 는 코드의 길이,  $h$ 는 플러징 높이,  $\theta_0$ 는 피칭 각도,  $\psi$ 는 위상차,  $\phi$ 는 플러징과 피칭의 위상각을 나타낸다. Fig. 2 두 운동이 결합한 것을 나타낸 것이다.

$$y_f(t) = Ch_f \cdot \sin(\omega t) \tag{3}$$

$$\theta_f(t) = \theta_0 \cdot \sin(\omega t + \phi_f) \tag{4}$$

$$y_h(t) = Ch_h \cdot \sin(\omega t + \psi) \tag{5}$$

$$\theta_h(t) = \theta_0 \cdot \sin(\omega t + \phi_h) \tag{6}$$

각각 날개의 중심은 앞전의 삼분의 일 지점을 중심으로 하며, Fig. 2, 3에서 볼 수 있듯이 자유흐름에 대하여 수직인 방향으로 움직이는 upstroke (이하, 업 스트로크)와 downstroke (이하, 다운 스트로크)로 구성된 플러징 운동과 기준 축을 중심으로 회전운동을 하는 피칭 운동도 함께 일어난다.

추력계수는 한 주기 당 추력을 평균으로 식 (5)으로 표현되며, 평균 추력계수  $C_{Tmean}$ 이다.  $u$ 는 free stream velocity (이하, 자유 유동 속도)를 나타낸 것이다. 식(6)는 평균 파워계수  $C_{Pmean}$ 이며, 여기서 주기  $T$ 는 플레핑 운동의 한 주기를 나타낸다. 각각의 날개에 대하여 추력계수 및 파워계수를 산출하여 합하였다. 식 (7)는 추진효율을 나타내며 평균 추력계수( $C_{Tmean}$ )와 평균 파워계수( $C_{Pmean}$ )를 통해 구할 수 있다.

$$C_{Tmean} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} C_D(t) dt \tag{5}$$

$$C_{Pmean} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} [C_L(t)y(t)\dot{t} + C_M(t)\dot{\theta}(t)] dt \tag{6}$$

$$\eta = \frac{(C_{Tmean} + C_{Tmean}) \times u}{(C_{Pmean} + C_{Pmean})} \tag{7}$$

Table 1 Parameters of motion [5]

	앞날개	뒷날개
Pitch Amplitude ( $\theta_0$ )	20°	20°
Heaving ratio ( $h$ )	0.64	0.5 ≤ $h_h$ ≤ 1.5
Heaving shift ( $\psi$ )	-	20 ≤ $\psi$ ≤ 140
Pitch shift ( $\phi$ )	90°	30 ≤ $\phi_h$ ≤ 170

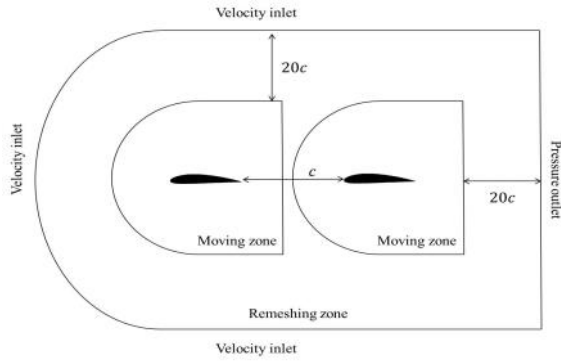


Fig. 1 Boundary condition

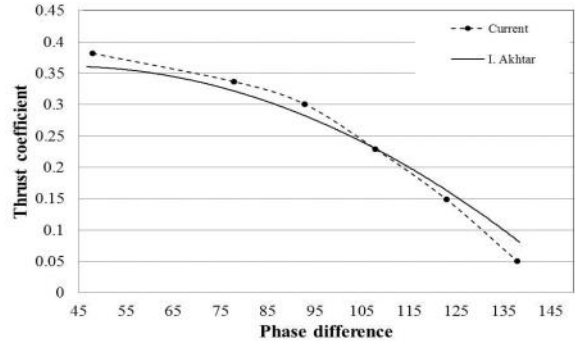


Fig. 4 Validation for the flapping motion: Thrust coefficient

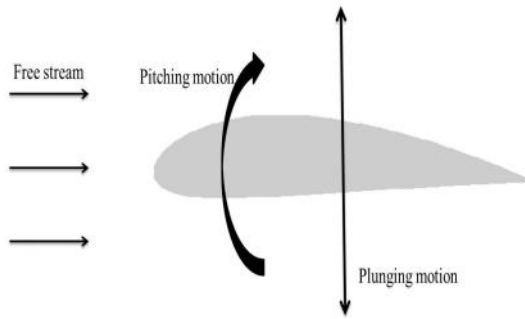


Fig. 2 Flapping motion of an airfoil in combined motion (heaving and pitching motion)

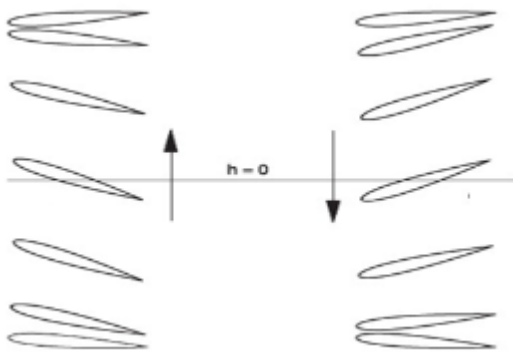
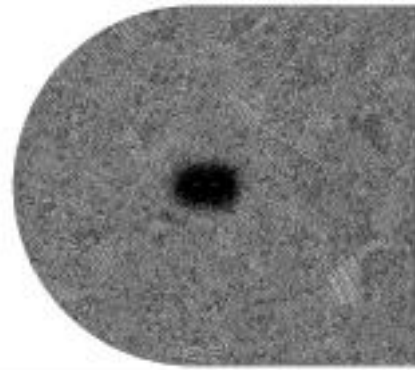
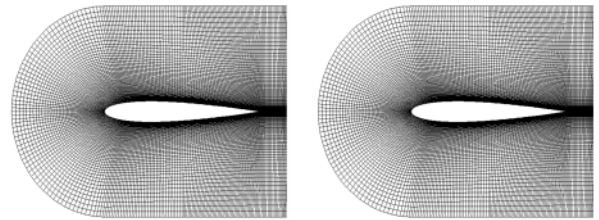


Fig. 3 Flapping motion of applying to AUV



(a)



(b)

Fig. 5 C-type grid mesh

## 2.2. Validation

Fig. 5는 본 연구에 적용한 격자 형태 및 모션을 validation 한 결과이다. Reynolds number는 I. Akhtar[5]의 논문과 동일하게 1200으로 설정하였다. 위상차( $\phi$ )  $48^\circ$ ,  $78^\circ$ ,  $93^\circ$ ,  $108^\circ$ ,  $123^\circ$ ,  $138^\circ$ 일 때 추력 값을 비교하였다.

수치해석의 검증에 위해 적용한 형상은 참고논문과 동일한 타원형 날개를 이용하였으며, c-topology grid를 적용하였다. 유동조건은 Strouhal number 0.19로 설정하였고, reduced frequency는 1.19로 설정하였다. 또한 층류영역이

므로 난류 모델을 이용하지 않고 laminar로 설정하였다. Fig. 4 서 볼 수 있듯이 수치적 값이나 그 경향성이 I. Akhtar[5]의 결과와  $10^{-3}$ 의 오차로 일치한다.

## 2.3. 경계조건

### 2.3.1. Grid Type

본 유동장을 해석하기 위해 적용한 격자와 경계조건은 Fig. 1과 같다. 격자는 c-topology grid로서 운동이 발생하는 moving zone과 운동으로 인해 변형 되는 mesh를 재구성 하는 remeshing zone으로 구성되어 있다. 전체 mesh개수는 약 16만개이며 moving zone 내 7만개, remeshing zone에 9만개로 구성되어있다.

Fig. 5(a)는 전체 유동장 격자 구성이며, (b)는 moving

Table 2 Value of Water applying to Double Hydrofoil

Property	Value
Density	998.2
$\mu(N \cdot s/m^2)$	$998.2 \times 10^{-4}$
$\nu(m^2/s)$	$10^{-6}$
Reynolds number	1200
Reduced frequency	1.19
Strouhl number	0.19
Shape	NACA 0012

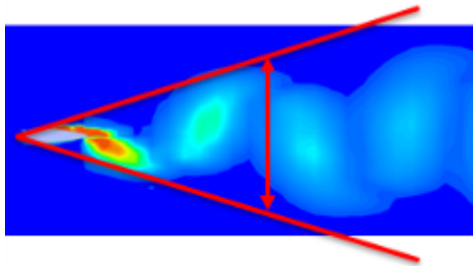


Fig. 6 Thrust and Efficiency about Heaving ratio( $h$ )

zone 격자구성이다. remeshing zone은 비정렬 격자로 구성하였으며 moving zone은 정렬격자로 구성되어있다. 계산 수행 시 moving zone에 대해 UDF(User Define Function) 기능을 이용하여 위에서 언급한 식(3), 식(4)의 함수를 적용하였다. 본 유동장에서 발생하는 작은 vortex의 생성 및 분포를 파악하기 위해서 hydrofoil의 수직 방향으로 코드 길이의  $10^{-5}$ 배 격자 간격을 부여하였다.

### 2.3.2. Parameter 선정

Double hydrofoil에서 뒷날개의 motion변화가 AUV의 추력과 효율에 미치는 영향을 분석하기 위하여 앞날개는 모션은 I. Akhtar[5]의 논문을 참조하여 수치해석을 진행하였다. 앞날개의 pitch Amplitude ( $\theta_0$ )는 I. Akhtar[5]의 연구에서 최대 추력을 갖는 각도를 이용하였으며,  $\phi_f$ 는 최대의 추진효율을 보장받을 수 있는 각을 이용하였다.<sup>(16)</sup> 수치해석에 사용된 형상과 물성치는 Table 1, 2와 같다.

첫 번째 case는 뒷날개 Heaving ratio( $h_h$ ) 변화에 따른 영향 분석을 위하여 뒷날개의  $h_h$ 를 0.5에서 1.5까지 0.1간격으로 변화시켰다.

두 번째 case에서는 앞뒤 날개 간의 상호작용에 가장 큰 영향을 미치는 Heaving shift ( $\psi$ )를 변수로 하여 수치해석을 진행하였다. 변수의 범위는  $20^\circ$ 에서  $140^\circ$ 까지  $15^\circ$ 간격으로 변화를 관찰하였다.

세 번째 case에서는 Pitch shift ( $\phi_h$ )의 변화에 따른 추력과 효율의 변화를 분석하기 위하여  $30^\circ$ 에서  $170^\circ$ 까지  $10^\circ$ 간

격으로 변화를 관찰하였다.

## 3. 수치해석결과

### 3.1. 뒷날개 Heaving ratio( $h$ )에 따른 변화

두 쌍의 동일한 대칭형 익형을 이용하여 앞날개의 Heaving ratio( $h$ )를 기준으로 뒷날개의 Heaving ratio( $h$ )를 변화시켜 이에 따른 추력과 효율 변화를 확인하였다. 날개간의 wake interaction은 추진효율 향상에 많은 영향을 미친다. 앞서 검증한 validation 논문과 동일한 경계조건을 이용하였다. Heaving ratio( $h$ )는 0.5에서 1.5까지 0.1간격으로 변화시켜 가며 추진효율 변화를 확인하였다.

먼저 앞날개의 diffusivity 발생범위를 확인하기 위하여 단일 날개에 대한 시뮬레이션을 먼저 시행하였다. Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 발생 범위는 약 코드길이의 2.5배이다. 그러나 실제 수치해석 결과 1.5이후 큰 변화가 없으므로 코드길이의 1.5배까지로 범위를 한정하였다.

Fig. 7은 뒷날개의 Heaving ratio( $h$ )에 변화에 따른 추력 변화 그래프이다. Heaving ratio( $h$ ) 0.9에서 가장 좋은 추력을 보이며 값은 1.097이다.

Heaving ratio( $h$ )가 커짐에 따라 앞날개에 발생한 vortex의 영향성에 따라 추력이 감소됨을 확인할 수 있다. 따라서 앞날개 후류를 받는 위치에 따라 추력 증감에 영향을 주는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8, 9, 10은 hydrofoil 주변에서 발생하는 vorticity를 나타낸 것이다. 뒷날개 Heaving ratio( $h$ )를 각각 0.5, 0.9, 1.5일 때의 수치해석 결과이다. 앞날개는 heaving과 pitching 모션이 결합된 combine 모션을 하는 반면 뒷날개에서는 Heaving ratio( $h$ )가 추진효율과 후류형성에 미치는 영향을 분석하고자 pitching 모션이 없이 heaving 모션만 적용되어 움직인다. 이를 통해 뒷날개의 움직임에 따라 발생된 vortex의 거동과 앞날개에서 발생된 vortex가 뒷날개의 유동에 미치는 영향성을 확인할 수 있다.

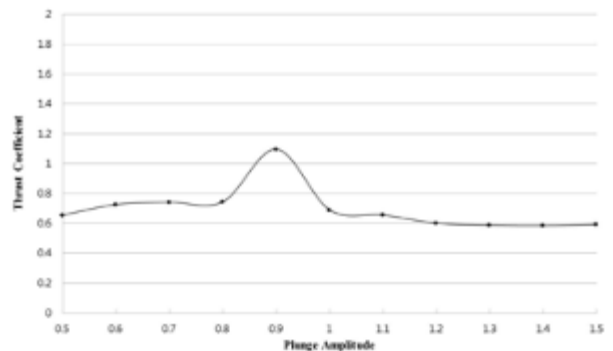


Fig. 7 Thrust about Heaving ratio( $h$ )

Fig. 8 (a)와 같이 다운 스트로크 일 때, 날개 아랫면이 저압으로 변화 하면서 음의 방향의 양력을 발생시킨다. 앞날개에서 발생한 Trailing Edge Vortex(TEV, 이하 뒷전 와류)가 뒷날개로 전이 된다. 이에 따라 뒷날개에서 생성된 크고 작은 vortex를 감싸면서 주변 유동장을 저압으로 만들어주어 뒷날개의 추진효율을 향상시킨다. 앞날개의 뒷전 와류와 뒷날개의 Leading Edge Vortex(LEV, 이하 앞전 와류)가 상호작용을 하여 single hydrofoil의 경우보다 뒷날개의 아랫면을 저압으로 만들어 추진효율 향상에 도움을 준다.

Fig. 9에서는 (a)에서 볼 수 있듯 뒷날개 앞전에서 두 개의 앞전 와류가 생성된다. 두 개의 앞전와류는 앞날개가 다운 스트로크를 하는 (b)에서 앞날개 후단 아랫부분에 저압이 생성된다. 이로 인하여 뒷날개 앞전에서 생성된 두 개의 앞전와류가 저압의 영향으로 앞날개 아랫면으로 이동한다. 이로 인하여 앞날개 아랫면에서 suction 역할을 한다. (c)에서 다시 앞날개가 업 스트로크를 진행하고 이에 따라 free stream의 영향으로 인하여 뒷날개 앞전에서 생성된 두 개의 앞전와류는 뒷날개의 하단 중앙 부분으로 점진적으로 이동하게 된다. 이렇게 점진적으로 이동한 vortex는 (d)에서 뒷날개의 다운 스트로크 진행 시점에 hydrofoil의 중앙으로 이동된다. vortex는 뒷날개 suction 작용을 하게 되어 net  $f(x)$ 발생에 도움을 준다.

Fig. 9와 달리 Fig. 8과 Fig. 10에서는 이러한 vortex interaction에 의한 코어의 움직임을 찾아보기 어렵다. 이는

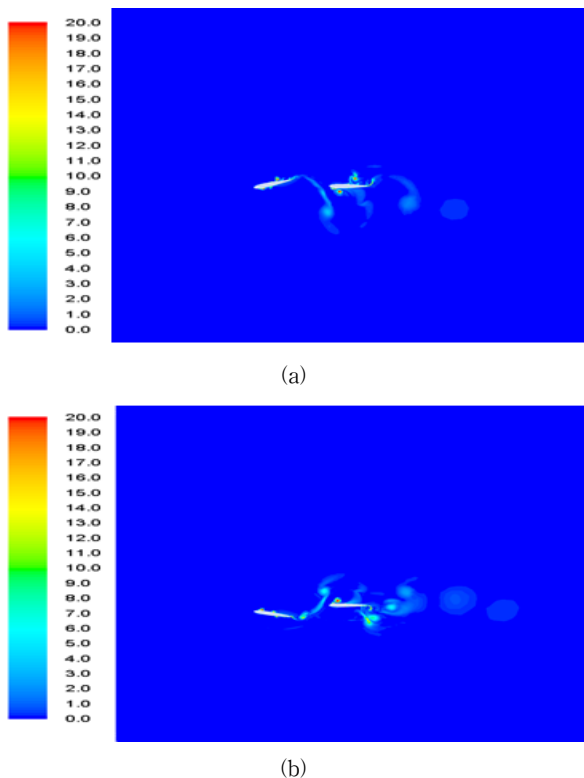


Fig. 8 Vorticity magnitude for Heaving ratio ( $h = 0.5$ )

뒷날개의 Heaving ratio( $h$ )에 따라서 vortex 이동시간이 달라져 상호작용의 강도가 미비하다. 이로 인하여 뒷날개는 앞날개와 별개로 구동되는 것을 확인할 수 있었다.

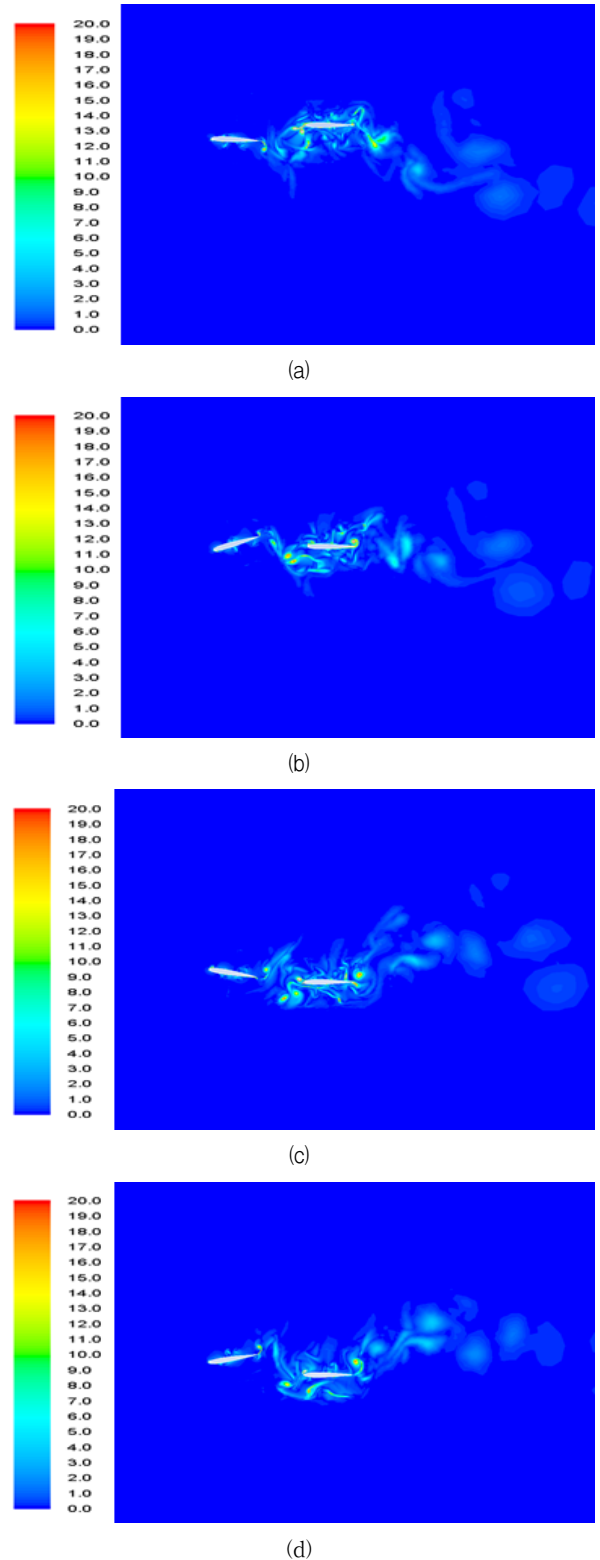
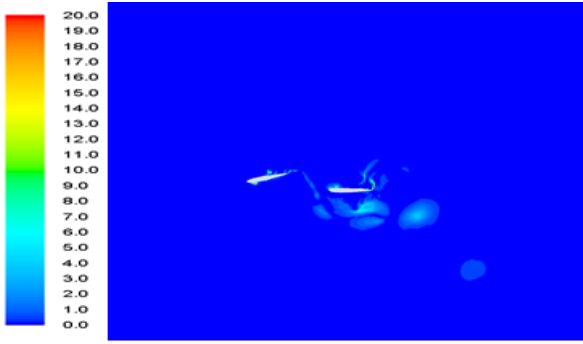
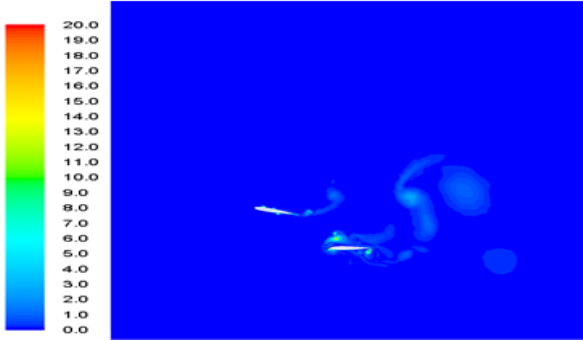


Fig. 9 Vorticity magnitude for Heaving ratio ( $h = 0.9$ )



(a)



(b)

Fig. 10 Vorticity magnitude for Heaving ratio ( $h = 1.5$ )

Fig. 11, 12는 각각 앞날개와 뒷날개의 추력변화를 나타낸 그래프이다. 앞서 vorticity 컨투어를 통하여 vortex에 따른 양력변화를 확인하였다. 이에 따라 추력 또한 Heaving ratio 0.9에서 앞뒤 날개 모두 가장 좋은 추력을 보이는 것을 확인하였다. Fig.11의 경우 3 case모두 앞날개는 동일한 모션으로 움직이므로 추력발생은 유사한 경향을 보인다. 그러나 뒷날개와의 wake interaction에 따라 추력 값의 차이가 남을 확인하였다. Fig. 12는 뒷날개의 추력변화이다. Heaving ratio에 따라서 뒷날개의 추력발생 변화가 각기 다른 경향을 보이며 앞날개보다 비교적 큰 폭의 차이를 보인다. 이는 모션 변화에 따른 영향으로 보인다. 앞날개에서 발생한 vortex의 영향으로 비교적 복잡한 유동현상으로 인하여 추력발생이 균일하지 못한 모습을 보이나 주기성은 확인이 되었다.

### 3.2. 뒷날개 Heaving shift ( $\psi$ )에 따른 변화

두 번째 case에서는 Heaving shift ( $\psi$ )변화에 따라 double hydrofoil의 추진효율을 관찰한다. 이미 많은 연구를 통해서 앞·뒷날개 간의 Heaving shift ( $\psi$ )는 추진효율에 큰 영향을 미친다는 것이 알려져 있다.

Heaving shift ( $\psi$ ) 값에 따라 날개의 움직임 속도를 조절하여 앞날개에서 발생한 vortex가 뒷날개에 도달하는 시점을 조절할 수 있다. 또한 Heaving shift ( $\psi$ )는 wake capturing을 발생시키는 주요한 인자이다. wake capturing이란 양력

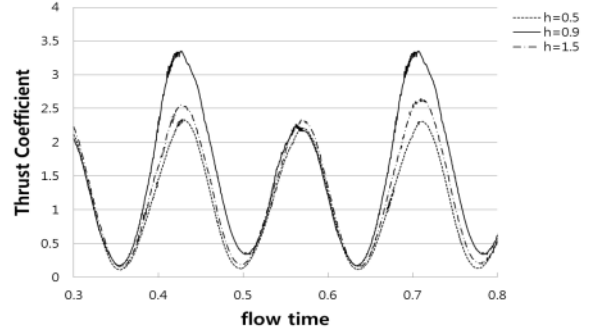


Fig. 11 Thrust about Heaving ratio at fore wing( $h$ )

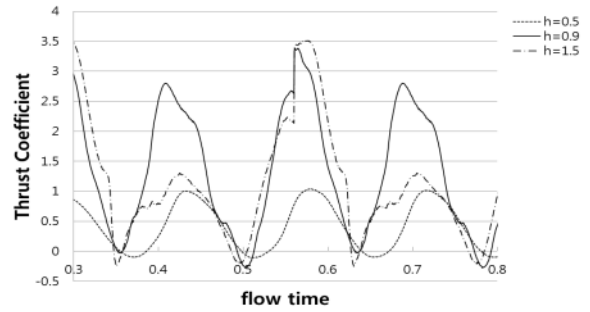


Fig. 12 Thrust about Heaving ratio at hide wing( $h$ )

발생을 야기시키는 주요 메커니즘 중 하나로써 앞의 스트로크에서 형성된 후류와 날개의 상호작용으로 양력을 증대시킬 수 있다는 이론이다.

앞날개에서 생성된 vortex가 뒷날개에 도달하는 시점에 따라 vortex의 영향으로 추진효율이 증감한다. 이는 앞·뒤 날개사이의 wake interaction으로 인하여 발생하는 유동현상이 Heaving shift ( $\psi$ )로 인하여 변화하기 때문이다. 두 날개 간의 간섭효과는 날개의 위치 및 각도에 따라 다르게 나타난다.

Fig. 13은 Heaving shift ( $\psi$ )에 따른 추진효율 변화이다. 앞날개의 유동 추력과 효율에 대해 동등하게 최대화시키기 위하여 식(8)을 이용하였으며,  $b$ (Weighting Factor, 이하 가중치)를 0.5의 값으로 하였다. 추력과 효율의 비중을 0.5로 동등하게 고려했을 때, Heaving shift ( $\psi$ ) 50°에서 최적의 값을 찾았다. 추력의 값은 1.45, 효율은 0.57이다.

$$\begin{aligned} & \text{Find } C_T, \eta \\ & \min f(h, \psi, \phi) \\ & = (1-b) \frac{C_T - C_{Tmax}}{C_{Tmin} - C_{Tmax}} + b \frac{\eta - \eta_{max}}{\eta_{min} - \eta_{max}} \end{aligned} \quad (8)$$

효율에 있어서 점진적으로 감소하는 경향을 보이나 추력은 50°이후 급격히 감소하는 모습을 보인다. 이는 Heaving shift가 추진효율에 영향을 미치며, Heaving shift가 커질수

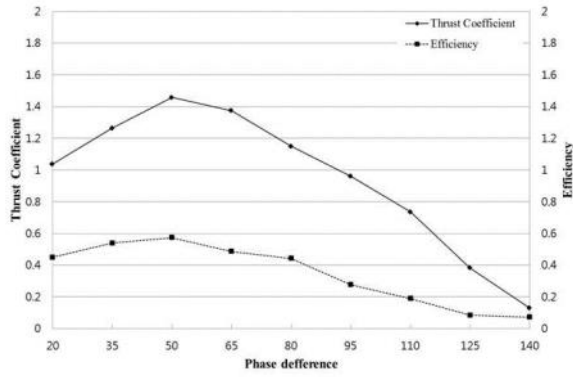


Fig. 13 Thrust and Efficiency about Heaving shift ( $\psi$ )

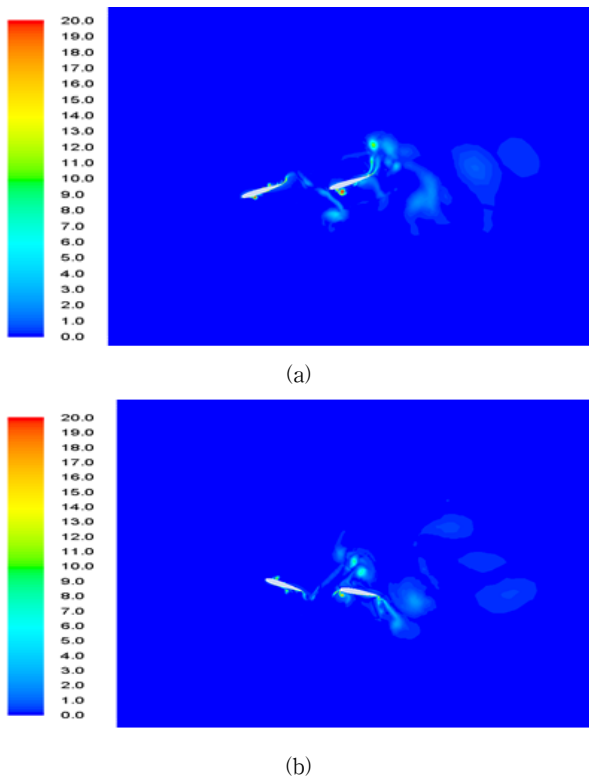


Fig. 14 Vorticity magnitude for heaving shift ( $\psi = 20^\circ$ )

록 추력발생을 저하시키는 것을 보여준다. 이는 Heaving shift ( $\psi$ )가 커질수록 앞날개에서 발생한 vortex가 뒷전 와류로 빠져나가 뒷날개 윗면의 vortex와 결합되어 더 큰 압력 차이로 trailing edge로 빠져나간다. 따라서 Heaving shift ( $\psi$ )가 증가함에 따라 점진적으로 추력이 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 14, 15, 16은 Heaving shift ( $\psi$ )에 따른 Vorticity를 관찰한 contour이다. 각각 Heaving shift ( $\psi$ )가  $20^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $80^\circ$ 일 때의 vorticity 변화이다. Fig. 14에서 Heaving shift ( $\psi$ )  $20^\circ$ 일 때의 vorticity의 변화를 보면 앞날개에서 발생한 뒷전와류가 뒷날개의 이동속도보다 느리게 이동하여 뒷날개 다운스트로크 중 앞전에서 앞전와류가 생성된다. 반면 Fig.

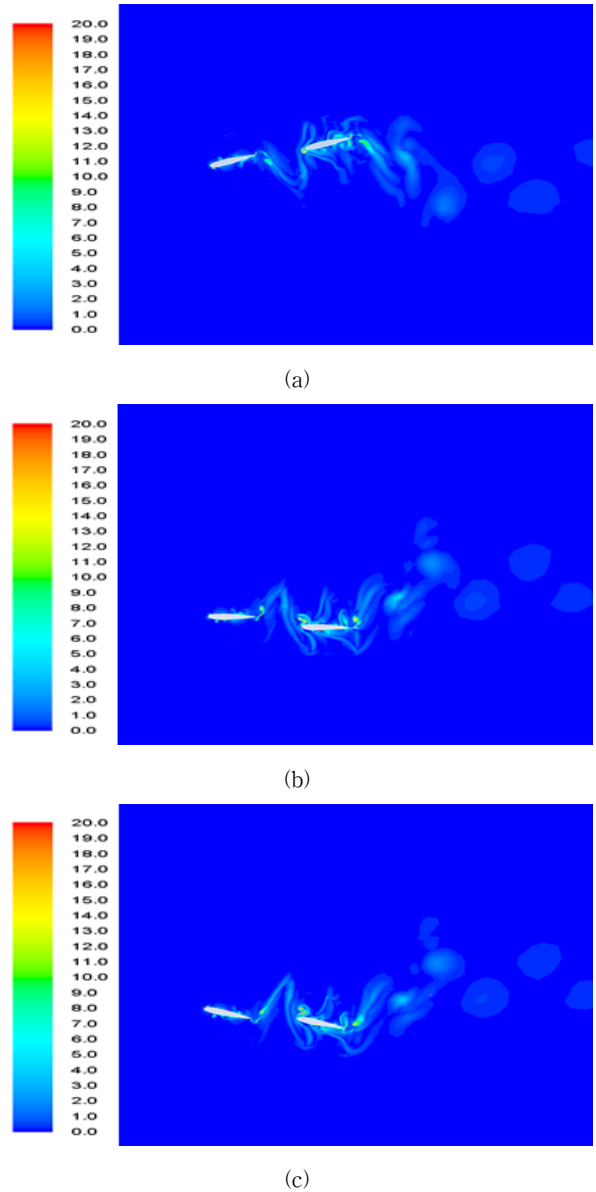


Fig. 15 Vorticity magnitude for heaving shift ( $\psi = 50^\circ$ )

16은 Heaving shift ( $\psi$ )  $80^\circ$ 일 때의 vorticity contour로써 Fig. 14와 달리 뒷날개 업스트로크 중 앞전와류가 생성된다.

이는 뒷날개의 이동속도가 앞날개에서 생성된 뒷전와류의 이동속도보다 느리게 이동하기 때문이다. 이러한 vortex의 부착 및 생성 시점에 따라 추진효율이 변화하는 것을 Fig. 13의 그래프를 통하여 확인할 수 있다. Fig. 15에서 가장 좋은 추진효율을 보여준 Heaving shift ( $\psi$ )  $50^\circ$ 일 때의 vortex의 움직임이다. 다운 스트로크시 생성된 앞날개의 뒷전와류는 Fig. 15(b)와 같이 뒷날개가 업 스트로크 할 때 뒷날개의 앞전와류와의 wake capturing을 일으켜 뒷날개 양력발생을 증대 시킨다. 따라서 Heaving shift ( $\psi$ )값이 앞날개 뒷전와류를 받는 시점이 추진효율에 있어 주요한 인자임을 확인하였다.

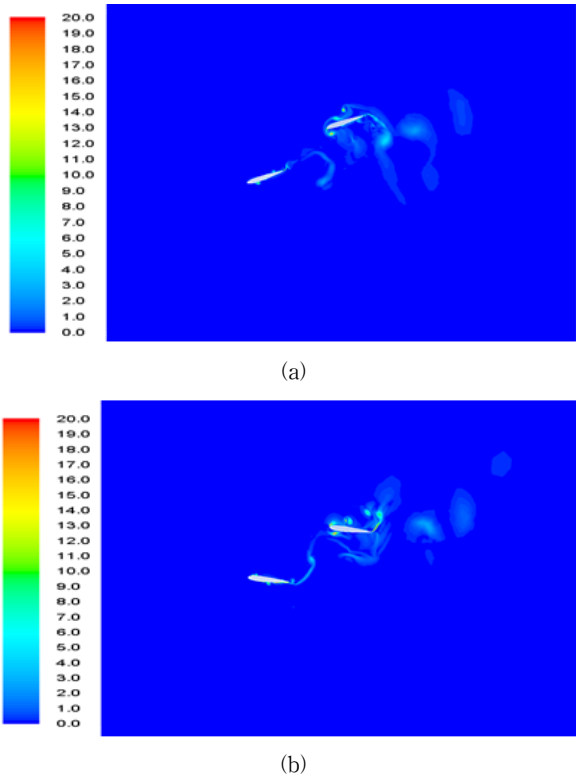


Fig. 16 Vorticity magnitude for heaving shift ( $\psi = 80^\circ$ )

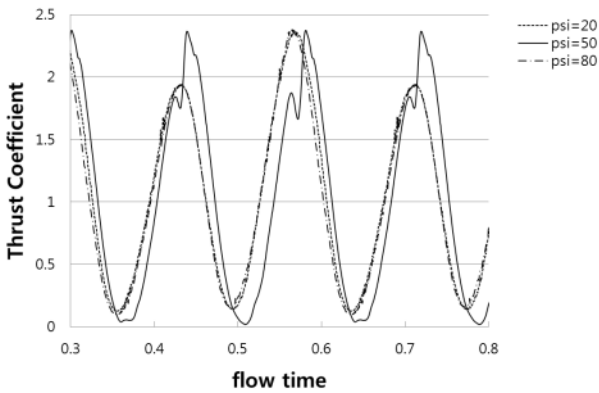


Fig. 17 Thrust about Heaving shift at fore wing( $\psi$ )

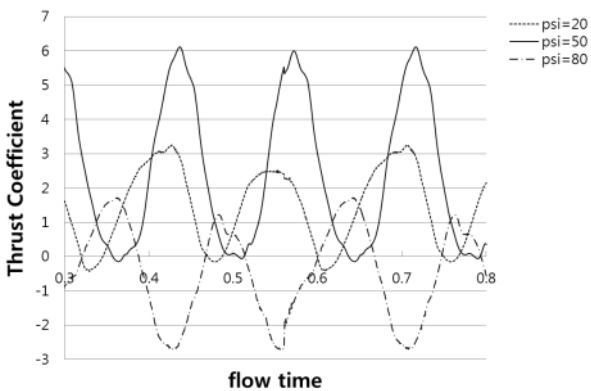


Fig. 18 Thrust about Heaving shift at hind wing( $\psi$ )

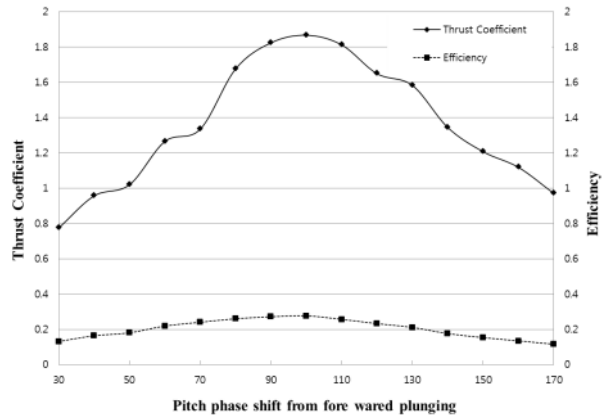


Fig. 19 Thrust and Efficiency about Pitch shift ( $\phi$ )

Fig. 17은 앞날개의 추력변화를 나타낸 그래프이다. Heaving shift ( $\psi$ )  $50^\circ$ 에서 가장 높은 추력을 보여주었으나 다른 두 case와 값의 차이는 크지 않다. 반면 Fig. 18은 뒷날개의 추력변화를 나타낸 그래프로써 Heaving shift ( $\psi$ )  $50^\circ$ 와 비교 하였을 때 추기는 유사하나 값은 큰 차이를 보인다. 이는 날개 간의 wake interaction의 영향으로 인한 양력증대가 추력상승에도 긍정적인 영향을 미침을 보여준다.

### 3.3. 뒷날개 Pitch shift ( $\phi$ )에 따른 변화

앞선 두 가지의 case에서 Heaving ratio( $h$ )에 따른 영향

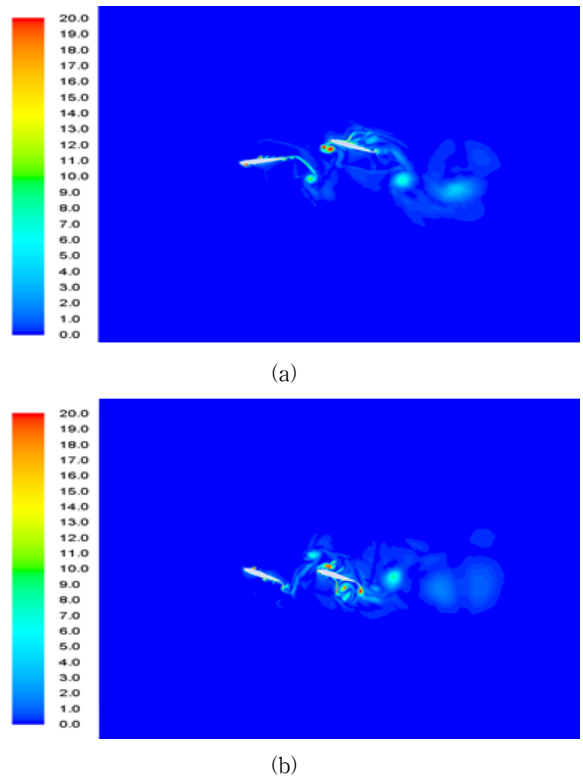


Fig. 20 Vorticity magnitude for Pitch shift ( $\phi = 30^\circ$ )



과 Heaving shift( $\psi$ )에 따른 영향을 분석한 결과 각각 Heaving ratio( $h$ ) 0.9와 Heaving shift( $\psi$ )  $50^\circ$ 에서 추력과 효율이 극대화 되는 것을 확인하였다. 이를 바탕으로 마지막 case에서는 Heaving ratio( $h$ ) 0.9와 Heaving shift ( $\psi$ )  $50^\circ$ 에서 뒷날개의 Pitch shift ( $\phi$ )의 변화가 double hydrofoil의 추진효율과 후류 거동에 미치는 영향을 분석하였다.

Fig. 19은 뒷날개  $\phi$ 변화에 따른 추력과 효율을 비교한 그래프이다. 앞날개와 유사한 각도인 Pitch shift( $\phi$ )  $100^\circ$ 에서 double hydrofoil의 최대의 추력을 보여주는 반면 효율에서는 영향성이 미비하다. 추력 값은 1.86으로 앞의 두 case보다 높았으나 효율은 0.27로 Heaving shift( $\psi$ )보다 낮게 나왔다.

Fig. 20, 21, 22은 Pitch shift( $\phi$ )가 각각  $30^\circ$ ,  $100^\circ$ ,  $130^\circ$ 일 때의 vorticity를 나타냈다. Fig. 20에서 앞날개에서 발생한 뒷전 와류의 발생시점이 뒷날개의 업 스트로크 중에 생성되어 뒷날개 다운스트로크 시 아랫면의 유동을 저압으로 만들어주는 것을 도와주지 못한다. Fig. 20 (b)에서 두 날개가 업 스트로크를 시작하는 시점의 후류 거동을 볼 수 있다. 앞날개에서 발생한 후류가 뒷날개의 앞전 와류와의 wake interaction에 의한 영향이 미비하다. Fig. 22은 Pitch shift ( $\phi$ )  $130^\circ$ 일 때의 vorticity 컨투어이다. Fig. 20와 반대로 후 피칭이므로 업 스트로크시 보다 다운 스트로크 시 뒷날개 앞전에서 vortex가 움직인다. 업 스트로크시 앞날개에서 생성된 뒷전와류는 뒷날개에서 멀리 떨어져있어 뒷날개 유동현상에 미치는 영향이 미비함을 확인하였다. 또한 Pitch shift ( $\phi$ )의 증가로 인하여 날개 밑면에 앞전와류가 생성되어 뒷날개에서 적게 양력발생 한다.

가장 좋은 추진효율을 보여준  $100^\circ$ 에서의 vortex의 움직임을 보면 업 스트로크 시작 시점에서 앞전와류가 생성됨을 확인 할 수 있다. 피칭의 영향으로 뒷날개 앞전에서 하나의 leading edge vortex가 생성된다. 이는 두 개의 leading edge vortex가 생성된 Heaving shift ( $\psi$ )에서 보다 업 스트로크 시 도움을 주어 양력발생을 증대시킨다.

Fig. 23와 Fig. 24은 각각 앞날개와 뒷날개의 추력변화 그래프로서 양력발생 증대에 따라 추력 또한 증가하는 것을 보여준다. 각각  $30^\circ$ ,  $100^\circ$ ,  $130^\circ$ 일 때 추력변화를 보면 Fig. 23의 앞날개에서의 변화는 주기 변화는 유사하나 최대추력은  $100^\circ$ 에서 2.5이상 가장 크게 나온다. Fig. 24의 뒷날개 추력 변화는 앞날개와 비교하여 추력 변화의 폭이 큰 것을 알 수 있다. 이는 앞날개와의 wake interaction으로 인하여 양력이 증대되며 이와 같이 추력도 증대된다.

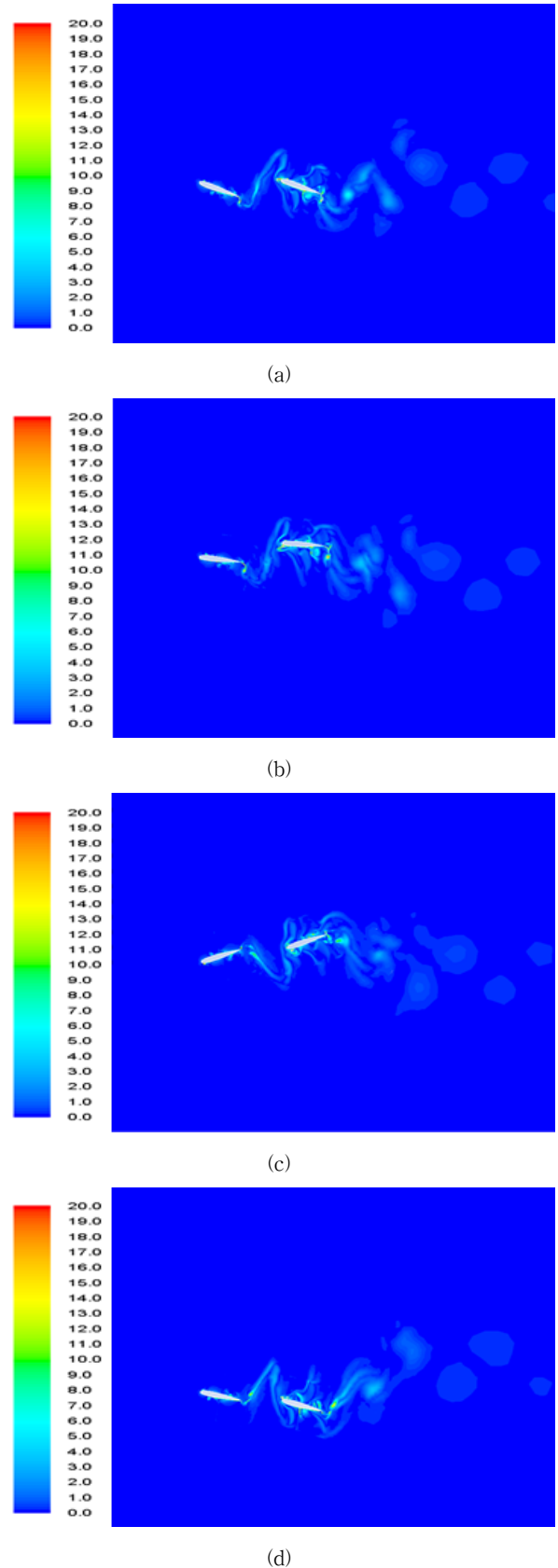


Fig. 21 Vorticity magnitude for Pitch shift ( $\phi = 100^\circ$ )

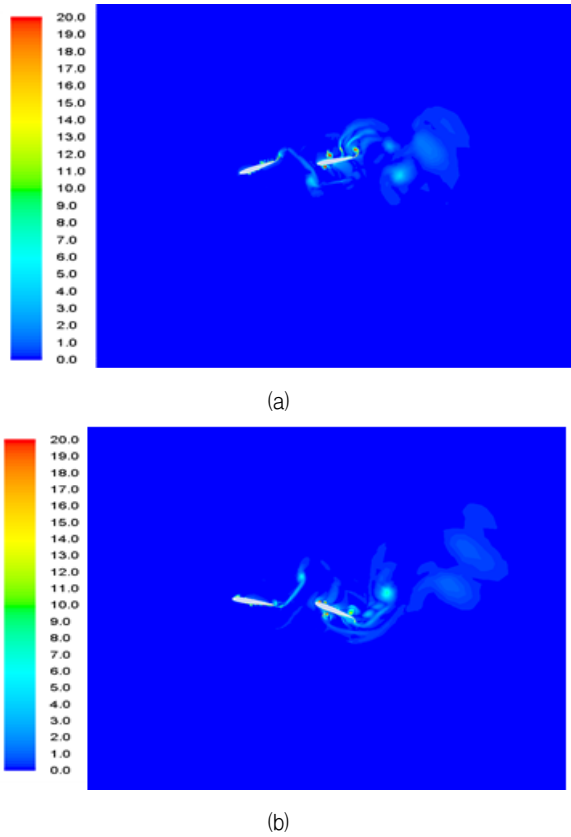


Fig. 22 Vorticity magnitude for Pitch shift ( $\phi = 130^\circ$ )

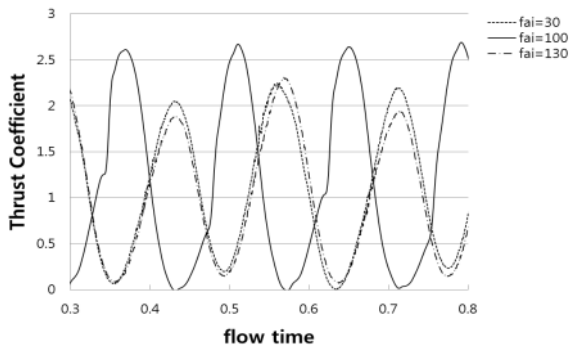


Fig. 23 Thrust about Pitch shift at fore wing( $\phi$ )

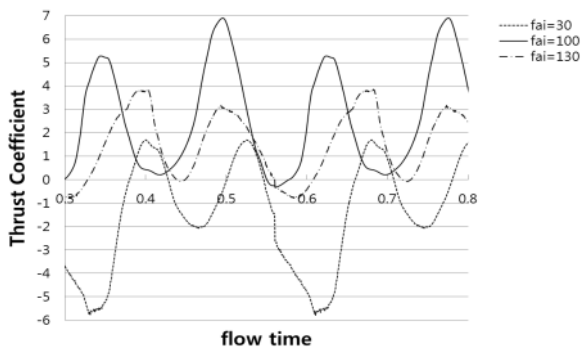


Fig. 24 Thrust about Pitch shift at hind wing( $\phi$ )

#### 4. 결 론

본 연구에서는 double hydrofoil에서의 뒷날개 모션 변화에 따른 추진효율과 후류현상을 분석하고자 하였다. Heaving ratio( $h$ ), Pitch shift ( $\phi$ ) 그리고 Heaving shift ( $\psi$ )를 변화에 따른 추력과 효율 변화 및 두 날개 간의 후류 영향을 분석하였다. 각각  $h = 0.9$ ,  $\psi = 50^\circ$ ,  $\phi = 100^\circ$ 에서 가장 좋은 추력과 효율을 확인하였다.

각각의 변수에 따라 추진효율의 변화 폭 및 앞날개에서 생성된 vortex의 영향성이 변화하였다.

첫째, Heaving ratio( $h$ )는 0.9일 때 추력 값이 1.09로 가장 높은 값을 보여주었다. 이는 뒷날개의 움직임이 앞날개 후류 영향권 내에서 wake interaction이 발생할 때 추진효율이 증대함을 보여주었다.

둘째, Heaving shift ( $\psi$ )에서는  $50^\circ$ 에서 각각 추력 1.4, 효율 0.57로 가장 높게 나왔다. 이로써 앞날개에서 발생한 뒷전와류가 뒷날개의 도달하는 시점에 따라 추진효율이 변화함을 확인하였다.

마지막으로 Pitch shift ( $\phi$ )는  $100^\circ$ 에서 가장 높은 추력 값인 1.86을 보여주었으며, 효율은 0.27로 앞의 Heaving shift ( $\psi$ )의 case보다 낮게 나왔다. 이는 뒷날개의 움직임이 피칭각에 따라 추진효율이 달라지는 것을 의미하며 vortex의 생성시점 혹은 앞날개에서 발생한 뒷전와류가 뒷날개 leading edge에 도달하는 지점이 주요한 변수임을 확인하였다. 본 case의 결과를 통하여 선폭피칭이 후피칭에 비하여 추력발생이 증대됨을 확인하였다.

본 수치해석 결과를 이용하여 double hydrofoil 설계 시 추진효율에 영향을 미치는 모션을 설계변수로 선정하여 보다 정확한 최적화 결과를 얻을 수 있다. 더 나아가 뒷날개의 형상과 모션을 동시에 최적화 하는 연구가 필요하다.

#### 후 기

본 연구는 미래창조과학부 첨단 사이언스·교육 허브 개발 사업(NRF-2011-0020562)지원 및 국방과학연구소(과제 번호 ADD-12-01-08-13)의 기초 연구비 지원에 의한 연구 결과입니다.

#### References

- (1) R. Mittal, Y. Udaykumar, H. S. Udaykumar, "Computational Modeling and Analysis of Biomimetic Flight Mechanisms", AIAA Paper 2002-0865
- (2) 김도균, 최해천. (2003). "날개짓에 의한 공중정지비행의 이차원 메카니즘" 대한기계학회 춘추학술대회, 759-764.
- (3) 김현석, 장조원, 2004, "두쌍 플레핑 날개의 앞.뒤 날개 위

- 상차에 대한 가시화 연구”, 한국항공운항학회 학술대회 pp.108~111
- (4) Drucker, E. G., & Lauder, G. V. (2001). Locomotor function of the dorsal fin in teleost fishes: experimental analysis of wake forces in sunfish. *Journal of Experimental Biology*, 204(17), 2943-2958.
- (5) Imran Akhtar, Rajat Mittal, George V. Lauder, Elliot Drucker, “Hydrodynamics of a biologically inspired tandem flapping foil configurarion”, *Comput. Fluid Dyn.* 155-170
- (6) Licht, S., Wibawa, M., Hover, F., & Triantafyllou, M. (2009). Toward amphibious robots: Asymmetric flapping foil motion underwater produces large thrust efficiently. In *Proceedings of the International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*, Durham, NH.
- (7) Ismail H. Tuncer and Mustafa Kaya, 2005, “Optimization of flapping airfoils for maximum thrust and propulsive efficiency,” *AIAA Journal*, Vol. 43, pp. 2329~2336.
- (8) M. A. Ashraf, J. Young, J. C. S. Lai, 2011, “Reynolds number, thickness and camber effects on flapping airfoil propulsion,” *Journal of Fluids and structures*, Vol. 27, pp. 145~160.
- (9) 김일환, 최중선, 박경현, 이도형, 2013, “자율 무인 잠수정의 최대 추력과 효율을 위한 날개형상 및 운동의 최적설계”, 한국유체기계공업학회, pp.24~31
- (10) M. A. Ashraf, J. C. S. Lai and J. Young, 2007, “Numerical Analysis of flapping wing aerodynamics,” 16<sup>th</sup> Australasian Fluid Mechanics Conference, pp.1283~1290.
- (11) Wilkins, P. and Knowles, L., 2007, “Investigation of aerodynamics relevant to flapping-wing Micro Air Vehicles,” *AIAA paper* 2007-433.
- (12) Licht, S., Wibawa, M., Hover, F., & Triantafyllou, M. (2009). Toward amphibious robots: Asymmetric flapping foil motion underwater produces large thrust efficiently. In *Proceedings of the International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*, Durham, NH.
- (13) King, R., & Johns, D. J. (1976). Wake interaction experiments with two flexible circular cylinders in flowing water. *Journal of Sound and Vibration*, 45(2), 259-283.
- (14) Licht, S., Polidoro, V., Flores, M., Hover, F. S., & Triantafyllou, M. S. (2004). Design and projected performance of a flapping foil AUV. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 29(3), 786-794.
- (15) Low, K. H., Zhou, C., Ong, T. W., & Yu, J. (2007, December). Modular design and initial gait study of an amphibian robotic turtle. In *Robotics and Biomimetics, 2007. ROBIO 2007. IEEE International Conference on* (pp. 535-540). IEEE.
- (16) Jones, K. D., & Platzer, M. F. (1997). Numerical computation of flapping-wing propulsion and power extraction. *AIAA paper*, (97-0826).