

# 유동 내 굽힘이 발생하는 힌지의 역학 모델

송민호\* · 유장곤\* · 김대겸†

## Dynamic model of hinge deflection in fluid flow

Minho Song\*, Janggon Yoo\* and Daegyoun Kim†

**Abstract** For application to drag-based propulsion system, the dynamics of a segmented structure with multiple hinges undergoing oscillatory motion are investigated. The side flaps are connected to a centre rod with elastic plates acting as hinges. The hinges bend to only one direction so that the structure behave asymmetrically between the power stroke and the recovery stroke. An analytical model is proposed, which estimates the asymmetric deformation of the segmented structure coupled with hinges. Using the proposed model, the effects of key geometric and kinematic parameters on the dynamics of the structure are analyzed.

**Key Words** : Drag-based propulsion (항력기반 추진), Fluid-structure interaction (유체-구조 상호작용), Oscillatory flow (왕복 유동), Hinge deflection (힌지 변위)

### 1. 서론

수중 유영체의 다양한 추진 전략 중 항력 기반 추진은 제트 추진이나 양력 기반 추진과 대비하여 저속 유영 및 방향 선회 능력이 좋은 것으로 알려져있다<sup>(1)</sup>. 이러한 항력 기반 추진 전략은 항력을 발생시키는 추진기관의 형상적, 물리적 특성과 주기 운동의 거동에 큰 영향을 받는다. 주기적인 추진 기관의 거동은 주된 추진력을 발생시키는 파워 스트로크와 이후 추진기관이 초기 위치로 복귀하는 리커버리 스트로크로 나뉘며 당연히 파워 스트로크 중에는 최대한의 항력을 발생시키고 리커버리 스트로크에서는 최소한의 항력을 발생시키는 것이 추진 효

율을 높일 수 있는 가장 기본적인 전략이다<sup>(2)</sup>.

항력 기반 추진을 하는 물고기의 경우 효과적인 추진을 위하여 파워 스트로크와 리커버리 스트로크 동안 가슴지느러미의 유동에 대한 입사각을 변화하는 것으로 알려져 있으며<sup>(3)</sup>, 이러한 특성을 응용한 물고기 로봇 설계 또한 연구되어 왔다<sup>(4)</sup>. 스트로크 중 추진 기관의 거동 및 입사각에 변화를 주는 방법 이외에 추진 기관 자체의 형상 변환을 활용하여 추진 효율을 증가시킬 수 있다.

항력 기반 추진을 하는 수중 유영체 중 바다 나리의 다리는 깃털과 유사한 형태를 갖고있으며, 깃털과 같은 다리의 깃에 해당하는 구조는 단방향으로 굽힘이 발생한다. 이러한 단방향으로 굽힘이 발생하는 구조에 의해 파워 스트로크와 리커버리 스트로크 간 추진 기관인 다리의 표면적에 큰 변화를 줄 수 있다. 실제 생물체의

† Mechanical Engineering, KAIST, Associate Professor  
E-mail: daegyoun@kaist.ac.kr

\* Mechanical Engineering, KAIST, Ph.D. student

경우 굽힘의 정도 등을 직접적으로 제어할 수 있지만 생체모방 시스템 제작의 관점에서 능동 제어의 요소는 시스템의 복잡도를 지나치게 높일 수 있다. 따라서 주변 유동과의 상호작용에 의해 수동적으로 변형이 되는 유연한 구조체를 사용하여 능동제어 요소를 줄임과 동시에 구조적 장점을 충분히 활용할 수 있어야 한다.

유연한 구조체의 유동에 의한 수동적 변형을 효과적으로 활용하기 위해서는 구조체 주변의 유동 환경에 대한 변형을 잘 예측할 수 있어야 한다. 일반적으로 유동에 의해 변형된 유연한 구조체는 유동에 대하여 항력이 감소하는 형태로 변형을 하게 되는데, 해양 식물, 육지 식물, 실, 유연한 평판 등 다양한 구조체와 정적 및 동적인 유동 환경에 대한 연구들이 수행되어 왔다<sup>(5-9)</sup>.

본 연구에서는 효율적인 항력 기반 추진을 위해 스트로크 간 효과적으로 표면적의 변화를 줄 수 있는 단방향으로 굽힘이 발생하는 힌지 구조를 제시하고자 한다. 간단한 주기적 움직임에 의한 구조체의 역학적 특성을 파악하기 위해 유연한 구조체의 변형 및 항력 특성에 대한 이론적 모델링을 수행한 연구들의 분석을 참고하여 본 연구에서 제시하는 구조체의 거동 및 항력 특성을 예측할 수 있는 모델 개발을 수행한다. 또한 실험을 통한 검증은 통해 제시하는 이론적 모델 및 구조체의 효용성을 검증할 예정이다.

2장에서는 실험 셋업에 대한 설명과 주요 실험 변수들을 제시한다. 3장은 3.1절과 3.2절로 나누어 각각 힌지 특성과 역학 모델에 대한 내용을 다룬다. 4장은 주요 실험 및 이론적 모델의 결과를 제시하며, 마지막으로 5장에서는 연구를 요약한다.

## 2. 실험 셋업

실험은 내부 치수 490 mm (W) × 1200 mm (L) × 500 mm (H) 를 갖는 수조에서 진행되었으며 구조체의 거동이 수조의 벽면에 의한 영향을 받지 않을 정도로 충분히 크다. 실험체는 수조위에 위치한 선형 이송장치 (MW-EQB45, NTRexLAB) 에 연결하였으며, MATLAB (Mathworks inc.) 코

드를 활용하여 이송장치에 연결된 스텝모터의 회전을 제어함으로써 실험체의 왕복운동을 구현하였다. 왕복운동은  $U = U_0 \sin(2\pi ft)$  함수 형태의 속력 프로파일을 사용하여 구현하였으며,  $U_0$  는 속력 크기,  $f$  는 왕복 빈도를 나타낸다. 왕복 운동에 의한 구조체의 주기적 반복성을 위해 모든 실험 케이스에 대하여 10회의 왕복 운동을 수행하였다. 구조체의 유체와 상호작용에 의한 변형을 정량적으로 평가하기 위해 수조의 하단에 초고속 카메라(Fastcam MINI-UX50, Photron Inc.)를 설치하여 1280 × 1024 픽셀 해상도 및 250 fps로 구조체의 거동을 촬영하였다. 힘 측정을 위하여 단축 로드셀(MB-5, Interface Inc.)를 선형 이송장치와 구조체의 연결부에 체결하였으며, 사용한 로드셀의 해상도는 0.01 N이다. 구조체에 가해지는 힘은 500 Hz의 주파수로 측정되었다.

실험 셋업과 사용한 실험체의 개략도는 Fig. 1에 제공되어 있다. 실험에 사용한 구조체는 2.1

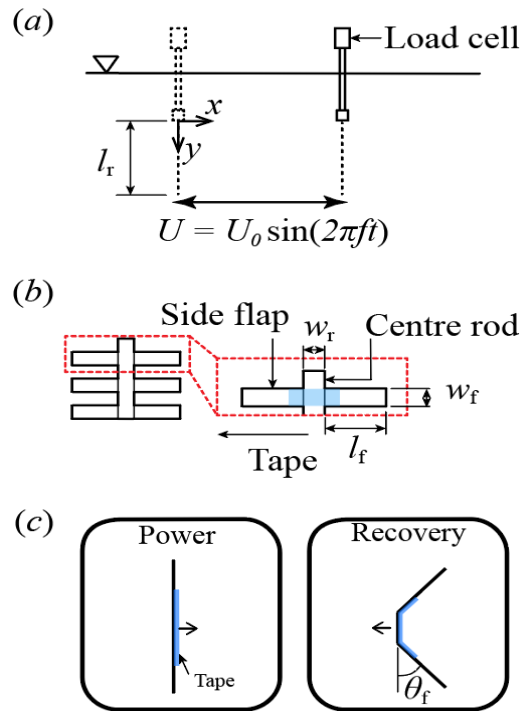


Fig. 1. Schematic of the experimental setup and elastic structure

mm의 아크릴 판을 사용하여 제작하였으며, 전체적인 형상은 Fig. 1(b)의 개략도와 같다. Fig. 1 centre rod의 길이  $l_r$ 는 6 cm, centre rod 및 side flap의 폭  $w_r$ ,  $w_f$ 는 각 2 cm, 1 cm, side flap의 길이는 4 cm로 설정되었다.

Fig. 1에서 명명한 centre rod와 side flap의 연결 및 단방향으로 굽힘이 발생하는 힌지 구조를 구현하기 위하여 일반적인 토크 스프링을 대체하여 얇은 탄성판을 사용하였다. 탄성판은 폴리프로필렌(PP)로 이루어진 접착테이프 (3M Scotch Transparent Film Tape 550, 3M)를 사용하여 제작되었으며 Fig. 1(c)과 같이 구조체의 한쪽 면에만 부착되어 단방향 굽힘이 가능하도록 하였다. 단일 힌지에 사용된 탄성판의 굽힘강도  $B_h$ 는  $0.7 \times 10^{-7} \text{Nm}^2$ 이다. 본 연구는 표면적의 변화를 활용한 항력 성능 향상을 목표로 하기에, 굽힘강도는 쉽게 구할 수 있는 탄성 판들 중 최대한 작은 값으로 선정하였다.

**Table 1.** Experimental parameters

$l_r$	Centre rod length	6 cm
$w_r$	Centre rod width	2 cm
$l_f$	Side flap length	4 cm
$w_f$	Side flap width	1 cm
$h$	Structure thickness	2.1 mm
$\rho_s$	Structure density	1180 kg/m <sup>3</sup>
$\rho_w$	Water density	997 kg/m <sup>3</sup>
$U_0$	Translational speed	20 cm/s
$f$	Oscillation frequency	0.2-1.0 Hz
$Re$	Reynolds number ( $= U_0 w_r / \nu$ )	4000

주된 실험 변수들은 Table. 1에 정리되어 있다. Centre rod의 폭을 기준으로 계산된 레이놀즈 ( $Re = U_0 w_r / \nu$ )는 4000으로 속력 크기는  $U_0 = 20 \text{ cm/s}$ , 물의 동점도는  $\nu = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  ( $20^\circ\text{C}$ )이다. 구조체의 왕복 빈도는 0.2-1.0 Hz의 범위가 사용되었다. 실험의 주 목적은 모델의 검증으로 로드셀의 측정 정확도를 고려하여 해상도 대비 충분히 큰 항력이 나타나는  $U_0$ 를 선정하였으며, 구조체 거동 관측을 위한 촬영 범위보다 긴 스트로크 길이를 갖는 케이스들은 제외되었다.

### 3. 시뮬레이션 모델

#### 3.1 힌지 특성

본 연구에서는 복원력을 갖는 힌지 구조의 제작을 위해 탄성판을 사용한다. 이는 Ishihara<sup>(10,11)</sup>의 연구와 유사하며, 일반적으로 얇고 긴 탄성판을 사용할 경우 판 끝단의 변형 각도는 판에 가하는 토크와 비례하는 관계식을 갖는다. Wu<sup>(12)</sup>의 실험 결과로부터 이러한 관계식이 잘 맞음을 확인할 수 있다. 하지만 본 연구에서 사용하는 단방향으로 굽힘이 일어나는 힌지는 탄성판의 국소적인 변형을 동반하기에 앞선 연구들에서 사용된 관계식과는 다른 관계식이 필요하다.

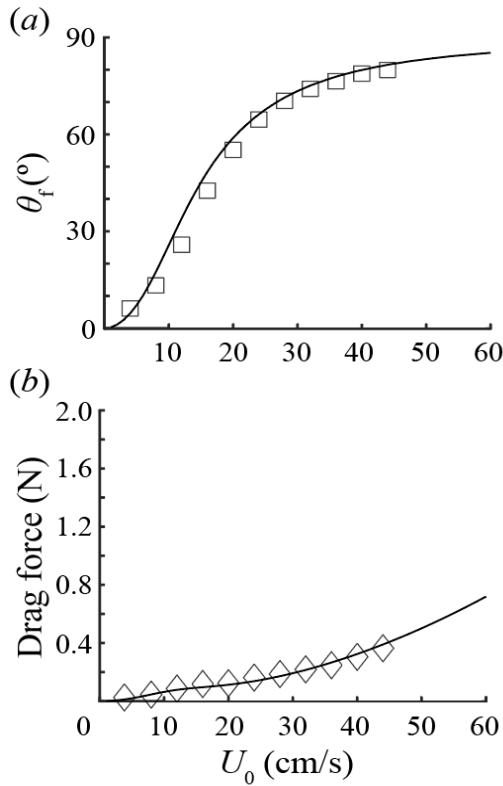
새로운 관계식을 정의하기 앞서 단일 side flap에 가해지는 유체력에 의한 토크를 구해야 한다. 속력  $U_0$ 의 준정상유동에서  $\theta_f$ 만큼 굽힘이 발생한 side flap에 수직인 방향의 유속은  $U_0 \cos \theta_f$ 로 표현할 수 있다. 유동에 의해 발생하는 항력은  $\frac{1}{2} C_N \rho_w w_f l_f (U_0 \cos \theta_f)^2$ 로 표현된다.  $C_N$ 은 구조체에 수직인 방향으로 작용하는 항력계수이며, 얇은 사각 평판에 대하여 정상유동의 경우  $C_N \approx 2$ 이다. 항력에 의한 토크를 표현하면 다음과 같다.

$$\tau = \frac{1}{2} C_N \rho_w w_f l_f (U_0 \cos \theta_f)^2 \frac{1}{2} l_f \quad (1)$$

Wu<sup>(18)</sup>의 연구에서 평판을 사용한 힌지의 비틀림 강성은  $B_h / l_h$ 의 형태로 표현된다. 여기서  $l_h$ 는 힌지에 사용한 평판의 길이를 나타낸다. 유체력에 의한 토크  $\tau$ 와 힌지구조의 변형에 의한 굽힘 모멘트의 균형을 등식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{B_h}{l_h} \theta_f = \frac{1}{2} C_N \rho_w w_f l_f (U_0 \cos \theta_f)^2 \frac{1}{2} l_f \quad (2)$$

앞서 언급한바와 같이 본 연구의 단방향 힌지 구조는 평판의 매우 국소적인 변형을 동반하기에 식 (2)의 형태를 기반으로 실험적으로 구한 다음 관계식이 사용된다.



**Fig. 2.** (a) Deflected angle of the side flap and (b) induced drag force. Symbols denote experimental measurements and solid line denote model estimated values.

$$\frac{B_h}{l_h} \theta_f \cos \theta_f = \frac{1}{2} C_N \rho_w w_f l_f (U_0 \cos \theta_f)^2 \frac{1}{2} l_f \quad (3)$$

Fig. 2는 식 (3)을 사용하여 예측한 유속에 따른 side flap의 변형 정도와 항력 및 실험을 통한 측정값을 나타낸다; Fig. 2의 실험값은 힌지의 특성을 파악하기 위해 본 실험에서 사용하는 구조체가 아닌 별도의 구조체를 통해 구해진 값이다. 보이는 바와 같이 새롭게 정의된 관계식은 힌지의 굽힘 특성을 잘 나타내는 것을 확인할 수 있으나, 국소적 변형에 의한 비선형적인 특성을 실험적으로 근사한 결과이기에  $\theta_f$ 의 예측값이 실험값보다 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있으며,  $U_0 = 10 - 20$  cm/s 범위와 같이 실험값과의 오차가 상대적으로 크게 나타나는 영역이

존재한다. 변형 정도를 더 크게 예측하기에 항력 예측값은 전반적으로 작은 것을 볼 수 있다. 식 (3)을 기반으로 3.2 절에서는 왕복운동을 하는 구조체의 거동을 예측할 수 있는 역학적 모델을 구축한다.

### 3.2 동적 역학 모델

식 (3)의 좌변항은 힌지구조의 굽힘 모멘트를 나타낸다. 준정상유동의 경우와 다르게 힌지의 동적 거동을 모델링 하기 위해 부가질량과 구조체의 관성과 같은 시간에 대하여 변화하는 값들이 고려되어야 한다. 중력에 대하여 수직인 방향으로 움직이며 마찰에 의한 영향은 상대적으로 작기에 부력 및 마찰에 대한 항들은 고려되지 않는다. 토크 밸런스 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_H + \tau_R + \tau_A = \tau_I \quad (4)$$

$\tau_H$ ,  $\tau_R$ ,  $\tau_A$ ,  $\tau_I$ 는 각 힌지 모멘트와 정류 저항, 부가질량, 구조체의 관성에 의한 토크를 나타내며 다음과 같이 표현할 수 있다.

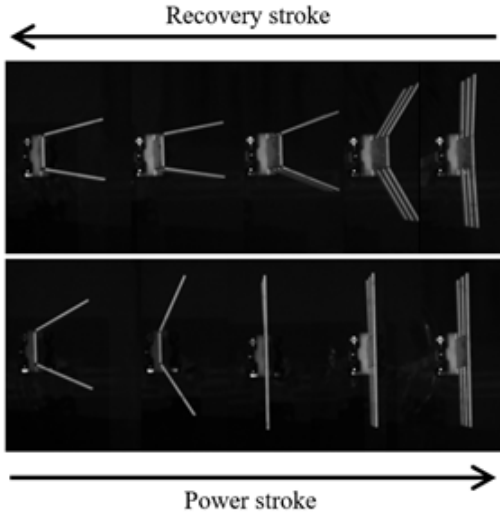
$$\tau_H = -\frac{B_h}{l_h} \theta_f \cos \theta_f \quad (5a)$$

$$\tau_R = \frac{1}{2} C_N \rho_w w_f \int_0^{l_f} |U \cos \theta_f - \dot{\theta}_f l^*| (U \cos \theta_f - \dot{\theta}_f l^*) l^* dl^* \quad (5b)$$

$$\tau_A = \frac{\pi}{4} C_M \rho_w w_f^2 \int_0^{l_f} (\dot{U} \cos \theta_f - \ddot{\theta}_f l^*) l^* dl^* \quad (5c)$$

$$\tau_I = \rho_s h w_f \int_0^{l_f} [\dot{U} \cos \theta_f + \ddot{\theta}_f l^*] l^* dl^* \quad (5d)$$

준정상유동에서의  $C_N$ 값과는 다르게 왕복운동을 하는 평판의  $C_N$ 값은 Keulegan-Carpenter (KC)



**Fig. 3.** Sequential images of the elastic structure undergoing oscillatory motion. Images in the first row are during recovery stroke and images in the second row are during power stroke. Images are from the case of  $U_0 = 20$  cm/s,  $f = 0.5$  Hz and  $l_f = 4$  cm.

수<sup>(13)</sup>에 대하여  $C_N = \max(10KC^{-1/3}, 1.95)$ 과 같이 정의할 수 있다<sup>(7)</sup>.  $C_M$ 은 부가질량 계수로  $C_N$ 과 같이  $KC$ 수에 대하여 값이 변하지만 항력이 주된 힘으로 작용하는 현 연구의 유동 범위에서  $C_M = 1$ 의 고정값을 사용하는 것이 시뮬레이션 결과에 큰 영향이 없는 것으로 알려져있기에<sup>(7)</sup>  $C_M = 1$ 로 설정하였다.  $\dot{\theta}_f$ 와  $\ddot{\theta}_f$ 는 각 side flap이 연결된 힌지각의 각속도와 각가속도이다.  $\tau_R$ 의 경우 적분항 내부 절댓값 표현에 의해  $U_f$ 와  $\dot{\theta}_f^*$ 의 상대적 크기에 따라 4가지의 형태를 갖는다. 식 (5)로 표현되는 식 (4)를 통해  $\theta_f$ 를 시간에 대하여 explicit 하게 구할 수 있다. 힌지 모델을 통해 얻은 side flap의 거동 정보를 바탕으로 side flap들과 centre rod를 포함하는 전체 구조체에 가해지는 항력  $F_{total}$ 을 계산할 수 있다.

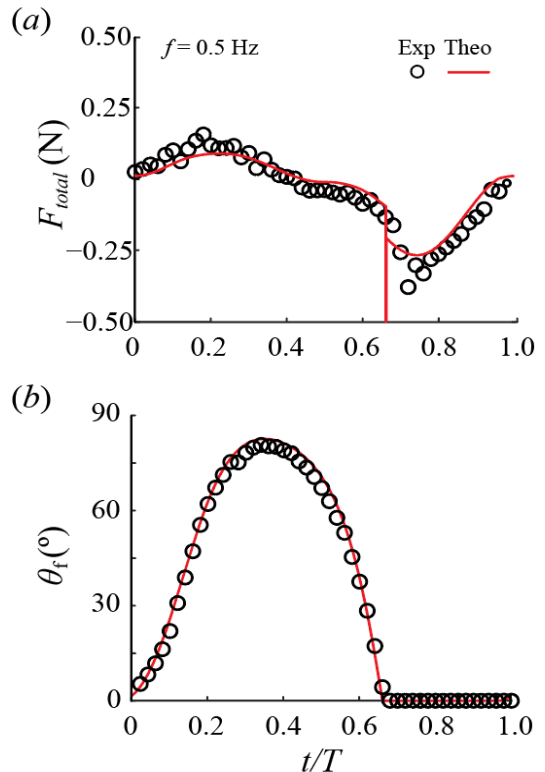
## 4. 결과

### 4.1 구조체의 거동 특성과 모델 검증

단방향으로 굽힘이 발생하는 힌지 구조에 의해

리커버리 스트로크와 파워 스트로크에서 구조체의 거동이 매우 비대칭적일 것을 예상할 수 있다. Fig. 3에서 보이는 바와 같이 리커버리 스트로크의 경우 힌지의 굽힘에 의해 side flap들이 재배열되고 굽힘 정도가 스트로크의 유속의 증가에 따라 증가하다 스트로크의 후반부에 다시 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 파워 스트로크의 경우 초기 굽힘이 발생한 side flap이 다시 펼쳐지는 구간 이후 온전히 펼쳐진 상태를 유지하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4에는 3.2 절에서 제시하는 동적 모델이 구조체의 거동 및 항력을 정확하게 예측할 수 있는지 확인하기 위해 한 주기동안 구조체의 합력  $F_{total}$ 과 side flap의 각도  $\theta_f$ 의 실험값과 모델 예측값이 제시되어있다. 그래프에서 원형 심볼로



**Fig. 4.** (a) Total drag and (b) deflected angle of the side flaps over an oscillation cycle for the case of  $U_0 = 20$  cm/s,  $f = 0.5$  Hz and  $l_f = 4$  cm. Symbols denote experimental measurements and solid line is theoretical model estimated value.

표기된 실험값과 붉은 실선으로 표기된 모델 예측값이 잘 맞는 것을 볼 수 있으며, 이는 3.2 절의 토크 밸런스 식을 구성하는 여러 힘 성분들이 알맞게 정의되었음을 의미한다. 전반적으로 리커버리 스트로크에서 힌지 굽힘에 의한 side flap들의 재배열로 이동 방향에 수직한 표면적이 감소하여 항력 또한 감소하는 것을 볼 수 있으며, 파워 스트로크에서 side flap들이 온전히 펼쳐짐에 따라 표면적의 증가로 인한 항력 증가가 확인된다. Fig. 4(a)의  $t/T \approx 0.65$  부근에서 이론적 모델로 예측한  $F_{total}$ 의 크기의 순간적인 비연속적 증가는 side flap이 온전히 펼쳐진 후 반대 방향으로의 굽힘이 제한되기에 나타나는 현상이다. 모델식의  $\theta_f$  값이 0이 됨에 따라  $\dot{\theta}_f$ 와  $\ddot{\theta}_f$ 의 값이 이산화된 정의에 따라 비연속적으로 매우 크게 변화하며 순간적인 피크가 발생한다. 실험 결과 또한 유사한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 데이터가 제시되지 않는 수행한 모든 실험 케이스들에 대하여 모델이 구조체의 거동을 잘 예측함을 확인하였다. 이후 4.2 절에서는 모델을 사용하여 side flap의 길이  $l_f$  및 구조체의 왕복 빈도  $f$ 가 구조체의 거동에 어떠한 영향을 미치는지를 파악한다.

### 4.2 Side flap의 길이와 왕복빈도의 영향

Side flap의 각도의 시간에 대한 변화 경향은 구조체의 왕복 빈도  $f$ 와 길이  $l_f$ 에 크게 영향을 받는다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 왕복 빈도가 낮을수록 순간 속력이 같은 준정류 환경과 유사한 변형 정도를 보이며  $\theta_f$ 의 변화 경향 또한 이동 속력 프로파일이 거의 같은 위상을 갖는 것을 확인할 수 있다. 하지만 빈도가 높아짐에 따라  $\theta_f$ 의 최대값 또한 전반적으로 증가하며, 리커버리 스트로크가 끝나는  $t/T=0.5$  이후 파워 스트로크가 시작 되고 구조체의 이동방향이 역전되었음에도 side flap이 온전히 펼쳐지지 않은 것을 볼 수 있다. Side flap이 완전히 펼쳐지는데 소요되는 시간 또한  $l_f$ 와  $f$ 가 커질수록 더 커지는 것을 확인할 수 있다.

$l_f$ 와  $f$ 에 의한 side flap 거동의 변화는 구조체

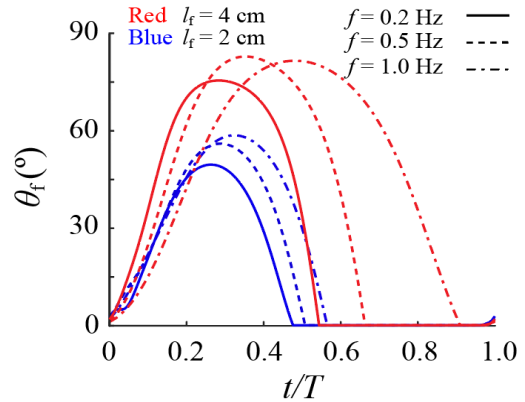


Fig. 5. Deflected angle of the side flaps  $\theta_f$  over an oscillation cycle for the case of  $U_0=20$  cm/s. Red denotes cases with  $l_f=4$  cm and blue denotes cases with  $l_f=2$  cm. Line types indicate different oscillation frequencies as provided in the Figure.

의 이동 거리, 즉, 리커버리 스트로크와 파워 스트로크의 스트로크 길이와 구조체의 왕복 운동에 의한 비정상 유동에 의한 효과로 설명할 수 있다. 먼저 동일한  $U_0$ 와  $f$ 에 대하여  $l_f$ 가 증가할수록 side flap에 가해지는 항력의 크기도 증가하기 때문에 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 상대적으로 짧은 side flap 대비 더 큰 각도의 굽힘이 발생하게 된다. 필연적으로 동일 유동 조건에서 최대한의 side flap 굽힘이 발생하기까지 필요한 스트로크의 길이가 증가하게 되며 최대 굽힘이 발생한 시점에서 side flap이 완전히 펼쳐지는데 소요되는 스트로크 길이 또한 증가한다.

반복 주기  $f$ 의 경우, 동일한  $U_0$ 에 대하여  $f$ 가 증가하면  $KC$ 수가 감소하며 Keulegan<sup>(13)</sup>의 결과와 같이 항력 계수가 증가한다. 동일한  $l_f$ 의 side flap에 가해지는 항력이  $f$ 의 증가에 따라 커지면 리커버리 스트로크의 시작과 동시에 side flap의 굽힘이 더 빠르게 일어나  $\theta_f$ 의 값이 더욱 가파르게 증가한다. 하지만 실질적으로 가속이 되어 side flap의 굽힘이 증가하기 위해서는 충분한 시간 또는 스트로크 길이가 필요한데  $f$ 의 증가는 시간 및 스트로크 길이의 감소를 야기한다. 증가한 항력에 의해 리커버리 스트로크 중반 이후에도 낮은  $f$  케이스들과는 다르게  $\theta_f$ 가 증가

하는 방향으로 합력에 의한 토크가 발생하여  $t/T = 0.5$  이후에  $\theta_f$ 의 최대값이 나타나게 된다. 하지만 감소한 가속 시간에 의한 영향으로 Fig. 5의  $l_f = 4$  cm의 경우와 같이  $\theta_f$ 의 최대값은  $l_f$ 와  $f$ 가 증가함에 꼭 증가하지는 않는다. 결론적으로 side flap의 길이가 증가하면 동일한  $\theta_f$ 의 변화에 대하여 더욱 큰 표면적 변화를 통한 파워 스트로크와 리커버리 스트로크 간의 항력 차이를 극대화 할 수 있다. 하지만 이는 구조체의 변형이 충분히 일어날 수 있는 스트로크 길이가 확보되는 경우로 한정된다. 앞서 설명한 바와 같이 구조체의 왕복 운동 특성을 결정하는  $f$ 의 값에 따라 최적의 주기 당 항력이 발생하는  $l_f$ 의 값이 존재할 것으로 예측되며, 이는 후속 연구를 통해 더 자세한 상관관계를 파악할 예정이다.

## 5. 결론

본 연구는 큰 표면적 변화를 야기할 수 있는 힌지 구조를 갖는 구조체를 제안하고 항력 기반 추진 향상을 위한 비대칭 거동이 가능하도록 힌지 구조를 단일 방향으로 굽힘이 발생하도록 제한하였다. 해당 구조체의 유체-구조 상호작용을 분석하고, 왕복 운동을 하는 구조체의 동적 거동을 예측하기 위한 모델링을 제시하였으며 실험 결과와의 비교를 통해 모델이 역학적 특성을 잘 반영하는 것을 확인하였다. 또한 구조체의 형상 및 거동에 가장 핵심적인 변수들인 side flap의 길이와 왕복 빈도가 구조체의 거동 및 항력 특성에 미치는 영향을 분석하였으며, 이는 추후 유사한 구조적 특징을 접목한 항력기반 추진체의 성능 예측에 활용할 수 있다.

## REFERENCE

- 1) Walker, J. A. & Westneat, M. W., 2000, "Mechanical performance of aquatic rowing and flying," Proc. R. Soc. Lond. B, 267, pp.1875-1881.
- 2) Walker, J. A. & Westneat, M. W., 2002, "Kinematics, dynamics, and energetics of rowing and flapping propulsion in fishes," Interg.

- Comp. Biol., 42, pp.1032-1043.
- 3) Lauder, G. V. & Jayne, B. C., 1996, "Pectoral fin locomotion in fishes: testing drag-based models using three-dimensional kinematics," Amer. Zool., 36, pp.567-581.
- 4) Behbahani, S. B. & Tan, X., 2016, "Bio-inspired flexible joints with passive feathering for robotic fish pectoral fins," Bioinspir. Biomim., 11, 036009.
- 5) Alben, S. et al., 2002, "Drag reduction through self-similar bending of a flexible body," Nature, 420, pp.481-497.
- 6) Gosselin, F. & de Langre, E., 2011, "Drag reduction by reconfiguration of a poroelastic system," J. Fluids Struct., 27, pp.1111-1123.
- 7) Luhar, M. & Nef, H. M., 2016, "Wave-induced dynamics of flexible blades," J. Fluids Struct., 61, pp.20-41.
- 8) Vogel, S., 1984, "Drag and flexibility in sessile organisms," Amer. Zool., 24, pp.37-44.
- 9) Vogel, S., 1989, "Drag and reconfiguration of broad leaves in high winds," J. Exp. Bot., 40, pp.941-948.
- 10) Ishihara, D. et al., 2009a, "A two-dimensional computational study on the fluid-structure interaction cause of wing pitch changes in dipteran flapping flight," J. Exp. Biol., 212, pp.1-10.
- 11) Ishihara, D. et al., 2009b, "Passive maintenance of high angle of attack and its lift generation during flapping translation in crane fly wing," J. Exp. Biol., 212, pp.3882-3891.
- 12) Wu, K. S. et al., 2019, "Scaling of the performance of insect-inspired passive-pitching flapping wings," J. R. Soc. Interface, 16, 20190609.
- 13) Keulegan, G. H. & Carpenter, L. H., 1958, "Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid," J. Res. Natl. Bur. Stand., 60, pp.423-440.