

## 글라이딩하는 날치의 날개형상 및 성능에 관한 연구

박형민\*·최해천\*\*

### Investigation of the Wing Design and Performance of a Gliding Flying Fish

Hyungmin Park\* and Haecheon Choi\*\*

**Key Words** : Flying fish(날치), Lift-to-drag ratio(양항비), Ground Effect(지면효과), Gliding(글라이딩), Stability(안정성)

#### Abstract

Various flyers in nature have attracted great interests with a recent need for developing versatile and small-size flight vehicles. In the present study, we focus on the flying fish which has been observed to glide a long distance just above a seawater surface. Since previous studies have depended on the field observation or measurement of the physical parameters only, quantitative data of the flying fish flight has not been provided so far. Therefore, we evaluate the wing performance of the flying fish in gliding flight by directly measuring the lift, drag and pitching moment on real flying fish models (*Cypselurus hiraii*) in a wind tunnel. In addition, we investigate the roles of wing morphology like the enlarged pectoral and pelvic fins, and lateral dihedral angle of pectoral fins. With both the pectoral and pelvic fins spread, the lift-to-drag ratio is larger and the longitudinal static stability is enhanced than those with the pelvic fins folded. From the glide polar, we find that the wing performance of flying fish is equivalent to those of medium-size birds like the petrel, hawk and wood duck. Finally, we examine the effect of water surface underneath the flying fish and find that the water surface reduces the drag and increases the lift-to-drag ratio.

#### 1. 서론

자연을 모사하여 공학적으로 응용하고자 하는 연구는 유체역학뿐만 아니라 다양한 분야에서 최근 활발히 시도되고 있는 접근 방법이다. 그 중 곤충이나 동물의 비행에 대한 연구는 여러 조건에 따라 운용이 가능한 소형 비행체의 개발과 관련하여 많은 주목을 받고 있는 분야이다. 자연계에는 뛰어난 비행 성능을 보유한 곤충이나 조류 외에도 비행 능력을 보이는 동물들이 존재하며, 그 중 유일하게 비행 능력을 보유한 어류인 날치(flying fish)의 비행은 매우 흥미롭다. Breder[1]는 처음으로 날치의 날개형상(wing morphology)과 비행 능력과의 관계를 언급하였고, Davenport[2,3]와 Fish[4]는 직접 채집하거나 용액에 보관되어 있는 날치 표본의 외형적 특징을 각각 측정하여 날치의 비행 패턴과의 연관성에 대하여 연구하였다. 이들 연구들은 크게 펼쳐진 가슴 지느러미(pectoral fins)와 배 지느러미(pelvic fins)의 형상 또는 크기가 종(species)에 따라 혹은 같은 종 내에서도 매우 다양하다는 것을 밝혔다. 또한 Kawachi 등[5]은 최적제어이론을 적용하여 날치의 비행경로는 비행거리를 최대로 하는 목적으로 진행되는 것을 알아냈다. 하지만 과거의 연구들은 날치의 날개형상의 측정과 비행의 관찰을 근거로 수행되었기 때문에, 실제로 날치의 공력성능과 날개형상 변화가 공력에 미치는 영향에 대한

수치적인 근거는 제시되지 못하였다. 그러므로 본 연구에서는 실제 채집한 날치(*Cypselurus hiraii*)의 박제 모델을 이용한 풍동 실험을 통해 글라이딩 비행 시 날치가 받는 양력, 항력 및 피칭 모멘트를 측정하고, 이들이 가슴 지느러미 및 배 지느러미의 변화에 따라 어떻게 달라지는지 알아보았다.

#### 2. 실험 장치 및 구성

##### 2.1 날치 모델

본 연구에서는 직접 채집한 날치(제비날치, *Cypselurus hiraii*)를 박제한 모델을 적용하였다. 약 40여 마리의 날치를 동해에서 채집하였으며, 그 중 5마리를 실제 글라이딩하는 날개 형상을 가지도록 하여 날치 모델을 제작하였다(Fig. 1). Davenport[3]는 날치가 가지는 커다란 지느러미의 종류에 따라 가슴 지느러미와

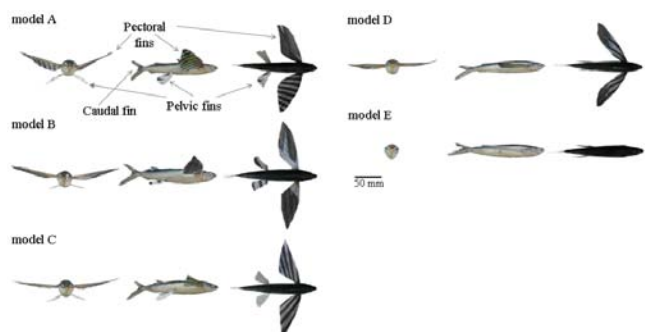


Fig. 1 Flying fish models used in the present study.

\* 서울대학교 기계항공공학부 대학원, neoza0@snu.ac.kr

\*\* 서울대학교 기계항공공학부, choi@snu.ac.kr

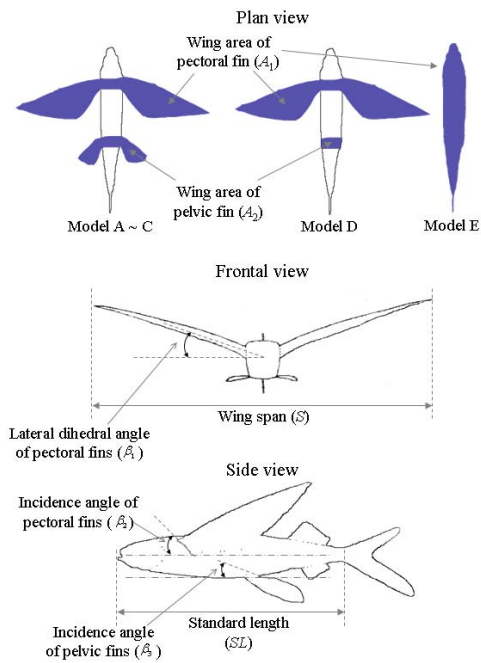


Fig. 2 Definitions of morphometric parameters.

Table 1 Morphometric parameters of the flying fish models.

모델	A	B	C	D	E
SL [mm]	205	209	203	199	202
AR	8.5	9.1	9.8	9.6	-
$A_1$ [mm <sup>2</sup> ]	7468	7392	6946	5639	4640
$A_2$ [mm <sup>2</sup> ]	1858	2020	2131	-	-
S [mm]	252	260	261	233	-
$\beta_1$ [°]	22	12	7	5	-
$\beta_2$ [°]	12	15	12	8	-
$\beta_3$ [°]	2	2	5	-	-

배 지느러미가 모두 큰 경우와 가슴 지느러미만 큰 경우를 각각 'four-winger'와 'two-winger'로 정의하였고, Fish[4]는 전자를 'biplane type', 후자를 'monoplane-type'으로 구분하였다. 본 연구의 제비나비는 'four-winger' 혹은 'biplane type'에 속한다.

날개 형상에 따른 공력의 변화를 알아보기 위해 날치모델은 (i) 가슴 지느러미와 배 지느러미를 모두 넓게 편 경우 (모델 A, B, C), (ii) 가슴 지느러미만 편 경우 (모델 D)와 (iii) 가슴 지느러미와 배 지느러미를 모두 접은 몸통만 있는 경우 (모델 E)를 고려하였다 (Fig. 1). 또한 가장 큰 양력을 발생시키는 가슴 지느러미의 영향을 알아보기 위해 (i)의 모델 A, B, C는 가슴 지느러미의 상반각 ( $\beta_1$ )을 다르게 조정하였다. 하지만 날개의 입사각  $\beta_2$ 와  $\beta_3$ 는 본래 모델이 가지고 있는 값을 적용하였다. 날

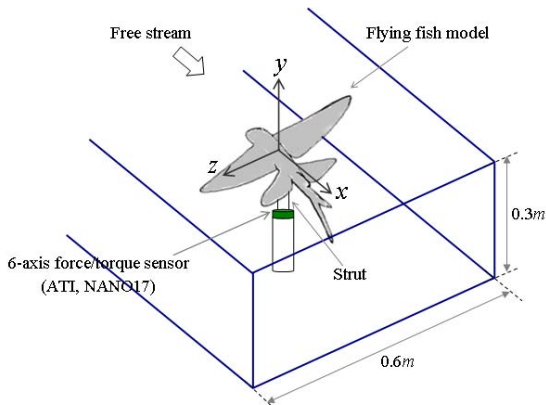


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup.

치모델의 외형적 특징을 정의할 파라미터는 Fig. 2에 표시하였으며, Table 1에 본 연구에 적용한 날치모델의 값을 정리하였다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 날치의 날개는 매우 얇은 막과 이를 지지하는 단단한 뼈대들로 구성되어 있다. 가슴 지느러미의 가로세로비 (AR)는 약 9 정도로 큰 편이며, 끝단 (trailing edge) 방향으로 기울어진 'backward swept' 형상이다. 또한 날개를 폈을 경우 작은 크기의 캠버를 가지고 있다. 작은 날개인 배 지느러미의 면적 ( $A_2$ )은 전체 날개면적 ( $A=A_1+A_2$ )의 약 20% 이상을 차지하였다.

## 2.2. 풍동 및 힘 측정 장치

Fig. 3은 풍동실험 장치 개략도로 3m × 0.3 × 0.6m 크기의 개방형 풍동에서 실험을 하였다. 풍동의 최대속도는 25m/s이며, 속도 10m/s에서 자유류의 난류강도 및 균일도는 0.5% 이내이다.

날치 모델에 작용하는 양력, 항력 및 피칭모멘트는 6축 힘/토크 센서 (ATI, nano17)를 사용하여 동시에 측정하였으며, 센서의 분해능은 힘 및 토크를 측정하는데 각각 1/1280N, 1/256Nmm이다. 본 연구에서 힘 측정의 반복오차는 ±1.5%이다. 센서는 풍동 바닥과 평행하게 설치하였으며, 날치모델은 풍동 시험부의 중앙

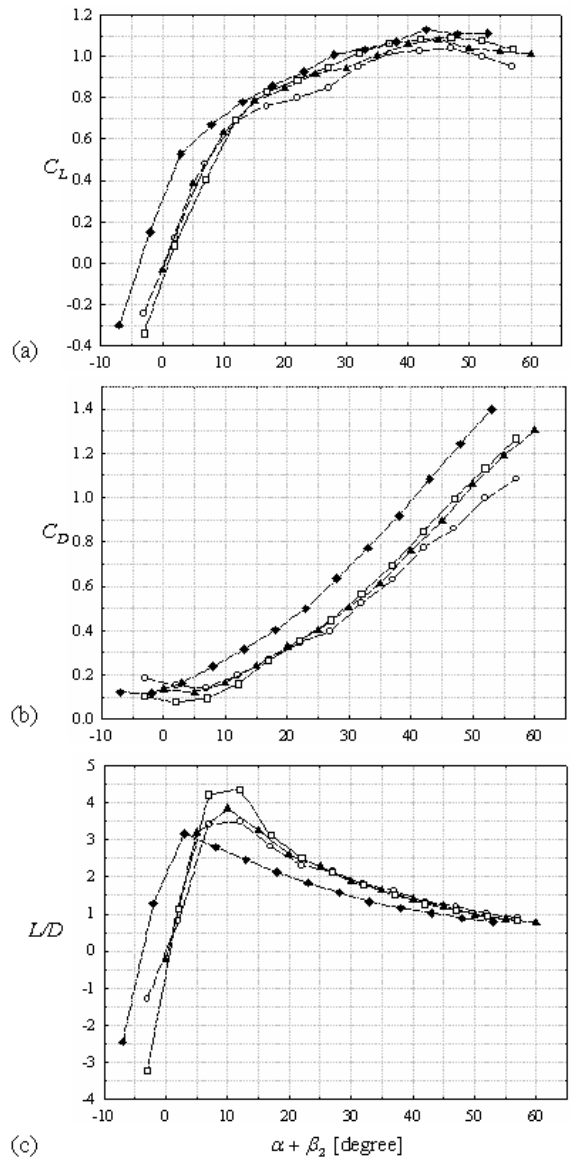


Fig. 4 Force variations with  $\alpha + \beta_2$ : (a) lift coefficient ( $C_L$ ); (b) drag coefficient ( $C_D$ ); (c) lift-to-drag ratio. ○, model A; ▲, B; □, C; ◆, D.

에 위치하도록 하였다. 간섭을 최소화하기 위해 지지대 (strut)의 단면형상은 두께가 얇은 타원형으로 제작하였다. 힘 측정은 받음각 ( $\alpha$ )을  $-15^\circ$ 에서  $45^\circ$ 까지 변화시켜가며 수행하였다. 자유류 (free stream)의 속도는 12m/s로 실제 날치의 최대 비행속도 (10 ~ 20m/s)를 만족시켰다. 이때 큰 날개 (가슴 지느러미)의 평균 코드길이 ( $c$ )를 기준으로 한 레이놀즈 수는 20,000 ~ 24,000이다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 양력 및 항력

Fig. 4는 가슴 지느러미 (pectoral fins)의 받음각 ( $\alpha + \beta_2$ )에 따른 날치모델의 공력의 변화를 보여준다. 대부분의 받음각 영역에서 가슴 지느러미만을 펼친 모델 D의 양력계수 ( $C_L$ )가 가슴 지느러미와 배 지느러미를 동시에 펼친 모델 A ~ C의 양력계수보다 큰 것을 알 수 있다 (Fig. 4a). 앞서 배 지느러미가 전체 날개 면적의 20% 이상을 차지하는 것을 고려할 때, 넓게 펼친 배 지느러미는 날치날개의 익면하중 (wing loading)에는 이득이 되지 못하는 것을 의미한다. 하지만 모델 D의 항력계수 ( $C_D$ ) 역시 모델 A ~ C의 항력계수보다 크게 증가하기 때문에 (Fig. 4b), 글라이딩 성능을 나타내는 양항비 (lift-to-drag ratio)는 가슴 지느러미와 배 지느러미를 동시에 펼친 모델 A ~ C가 가슴 지느러미만을 펼친 모델 D보다 큰 값을 가진다 (Fig. 4c). 본 연구에서 날치날개의 최대 양항비는 약 4.4 (모델 C)로 이는 바다제비 (petrel), 매 (hawk) 등의 새의 날개의 최대 양항비와 유사한 것으로[6], 나비와 같은 비행 곤충보다 뛰어난 날치의 비행 능력을 정량적으로 증명하였다.

한편, 모델 A ~ C를 보면 가슴 지느러미의 상반각 ( $\beta_1$ )이 증가함에 따라 날치날개의 양력계수와 양항비가 감소하였다.

#### 3.2 비행 안정성

글라이딩 비행에 있어서 중요한 공력성능 중 하나는 비행 안정성 (flight stability)이다. Fig. 5는 가슴 지느러미의 받음각 ( $\alpha + \beta_2$ )에 따른 날치모델의 피칭 모멘트 계수 ( $C_M$ )의 변화를 보여준다. 피칭 모멘트는 날치 모델의 무게중심에서 정의된 값이다. 날개의 앞단 (leading edge) 부분이 내려가는 방향으로 작용하는 피칭 모멘트 (nose-down pitching moment)를 (+)값으로 정의할 때, 받음각의 증가함에 따라 피칭 모멘트가 감소할 경우 글라이딩하는 날개는 종방향 정적 비행 안정성 (longitudinal static stability)을 가진다. 따라서 Fig. 5에서 보는 바와 같이 날치는 글라이딩 비행 중에 종방향으로 정적 안정성을 가지며, 배 지느러미 (pelvic fins)를 넓게 펼 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 안정성이 더욱 향상되었다. 이는 날치의 뒤쪽에 위치한 작은 날개인

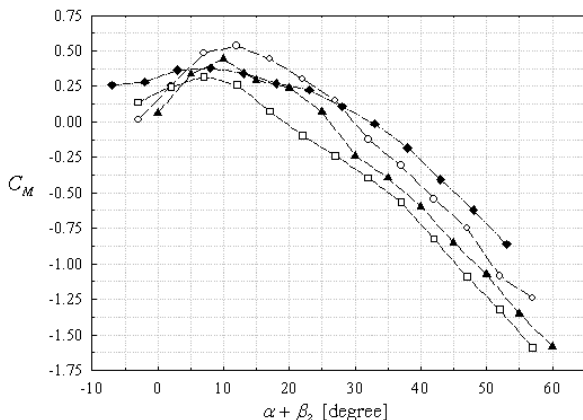


Fig. 5 Variations of the pitching moment coefficient ( $C_M$ ) with  $\alpha + \beta_2$ : ○, model A; ▲, B; □, C; ◆, D.

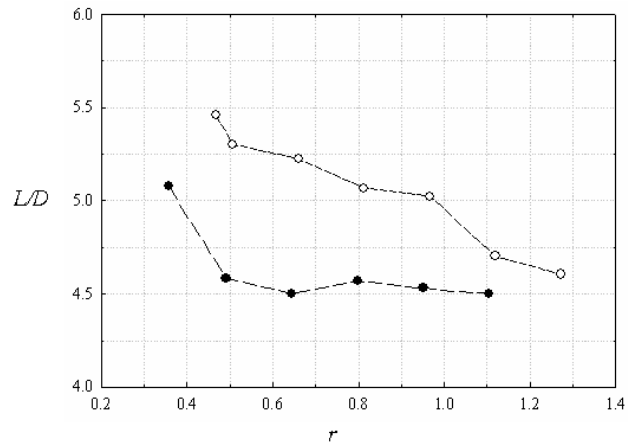


Fig. 6 Variations of the lift-to-drag ratio ( $L/D$ ) of model C with  $r$  ( $b/h$ ), where  $b$  is half wing span and  $h$  is flight height: ○, water surface; ●, solid surface.

배 지느러미가 현재 운용중인 항공기의 tailplane과 동일한 역할을 수행하는 것을 의미한다. 한편, 가슴 지느러미의 상반각이 증가함에 따라 종방향 정적 안정성은 감소하는 경향을 보였다 (모델 A ~ C).

#### 3.3. 지면 효과

지면에 가까운 높이에서 비행하면 비행체의 공력 성능이 향상된다는 지면 효과 (ground effect)는 잘 알려진 현상이다 [7,8]. 날치는 수면에 매우 가까운 높이 (날개의 가로길이 (wing span) 수준)에서 비행하기 때문에 수면 (seawater surface)이 날치의 공력성능에 미치는 영향을 측정하였다. 이를 위해 풍동 시험부의 바닥이 딱딱한 아크릴인 경우와 물인 경우 모델 C에 대하여 비행 높이 (풍동 시험부와 날치모델사이 거리,  $h$ )를 변화시켜가며 앞서와 동일한 방법으로 힘을 측정하였다. Fig. 6은 가슴 지느러미의 가로길이의 절반 ( $b = S/2$ )과 비행높이의 비 ( $r = h/b$ )에 따른 양항비의 변화를 보여준다. 바닥이 딱딱한 고체인 경우와 물로 채워진 경우 각각  $r < 0.6$ 와  $r < 1.1$ 인 조건에서 양항비가 10 ~ 15% 정도 증가하였으며, 특히 바닥이 물인 경우에 양항비가 더욱 증가하였다. 이는  $r$ 이 0.5보다 작은 경우 비행체의 양항비가 증가한다는 과거의 이론적인 연구결과와 잘 부합 한다 [7]. 따라서 날치의 비행에 있어서 바닷물의 지면 효과가 매우 중요한 역할을 수행하며 특히 바다수면에 매우 가까이 나는 비행의 시작과 끝 부분에 큰 이득을 얻을 것이다.

### 4. 결론

본 연구에서는 실제 채집한 날치모델을 이용한 풍동실험을 통해 날치의 공력성능을 구체적으로 제시하였으며, 가슴 지느러미 및 배 지느러미 형상에 따른 공력성능의 변화를 측정하였다. 날치날개의 성능은 바다제비나 매와 같이 중간 크기의 새의 날개가 가지는 성능과 견줄만한 것이었으며, 여타 비행 곤충날개의 성능을 뛰어넘는 것으로 측정되었다. 날치 날개가 발생하는 대부분의 양력은 앞쪽에 위치한 큰 날개인 가슴 지느러미에서 생성되었으며, 날치 몸통 뒤쪽에 위치한 작은 날개인 배 지느러미는 양항비 및 종방향 정적 비행 안정성을 향상시키는 역할을 수행하였다. 한편, 날치의 글라이딩 비행에 있어서 바다 수면에 의한 지면효과가 양항비, 즉 비행 거리를 증가시키는데 중요한 역할을 하는 것을 알았다. 본 연구 결과를 토대로, 날치 날개가 가지는 외형적 특징의 역할에 대하여 구체적으로 알아본다면 실제 비행체 설계에 있어서 공력성능을 제어하기 위한 새로운 장

치를 개발하는데 도움이 될 것이다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업과 교육인적자원부의 BK21의 지원 하에 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] Breder, C. M. Jr., "On the structural specialization of flying fishes from the standpoint of aerodynamics," *Copeia*, Vol. 4 (1930), pp. 114-121.
- [2] Davenport, J., "Wing-loading, stability and morphometric relationships in flying fish (exocoetidae) from the north-eastern atlantic," *J. Mar. Biol. Ass. U. K.*, Vol. 72 (1992), pp. 25-39.
- [3] Davenport, J., "How and why do flying fish fly?" *Rev. Fish. Biol. Fish.*, Vol. 40 (1994) pp.184-214.
- [4] Fish, F. E., "Wing loading and scaling of flying fish with regard to flight performance," *J. Zool., Lond.* Vol. 221 (1990) pp.391-403.
- [5] Kawawchi, K., Inada, Y. and Azuma, A., "Optimal flight path of flying fish," *J. Theor. Biol.* Vol. 163 (1993) pp.145-159.
- [6] Withers, P. C., "An aerodynamic analysis of bird wings as fixed airfoils," *J. Exp. Biol.*, Vol. 90 (1981) pp.143-162.
- [7] Blake, R. W., "Mechanics of gliding in birds with special reference to the influence of the ground effect," *J. Biomech.* Vol. 16 (1983) pp.649-654.
- [8] Rayner, J. M. V., "On the aerodynamics of animal flight in ground effect," *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* Vol. 334 (1991) pp.119-128.