

작은 곤충의 정지비행 원리를 이용한 배의 추진

노기덕†

Ship's Propulsion Using the Principle of Hovering Flight of a Small Insect

Ki Deok Ro

Key Words : Hydraulic Machine(유체기계), Wing(날개), Propulsion Mechanism(추진기구), Ship Propulsion(선박추진)

Abstract

A mechanism of hovering flight of small insects which is called the Weis-Fogh mechanism is applied to ship propulsion. A model of the propulsion mechanism is based on a two-dimensional model of the Weis-Fogh mechanism and consists of one or two wings in a square channel. A model ship equipped with this propulsion mechanism was made, and working tests were performed in a sea. The model ship sailed very smoothly and the moving speed of the wing was small compared with the advancing speed of the ship.

1. 서론

라이트 형제는 새가 날으는 것을 보고 비행기를 착상했고, 현대에 있어서도 많은 연구자들이 효율 좋은 메커니즘을 개발하기 위한 아이디어를 자연계에서 찾고 있다. 예를 들면 인간의 폐가 열교환기 역할을 한다는 것을 알고 차세대 냉각기나 가열기의 구조가 인간의 폐의 모양을 할 것으로 보

고 그 쪽으로 연구를 서두르고 있다. 또한 로봇개발의 최종 목표는 인간과 같은 기능을 갖게 하는데 있으며, 로봇 과학자들은 인간의 팔과 다리, 뇌의 구조와 기능을 유심히 살피고 있다. 본 연구에서 화두가 되고 있는 Weis-Fogh 메커니즘⁽¹⁾ 역시 *Encarsia formosa*라는 작은 벌의 정지비행을 관찰함에 의해 발견한 독특하고 효율 좋은 양력발생기구이다. 이 메커니즘의 동작원리를 Fig. 1에 나타낸다. 이 벌은 몸통을 수직으로 유지한 채 날개를 수평면으로 회전운동 시킴에 의해 정지 비행을 행하고 있다. 먼저 날개가 몸통의 등쪽에서 앞전을 중심으로 닫힌다. 그리고 날개는 뒷전을 맞닿은 상태에서 열려, 어느 일정한 열림각을 유지하면서

† 경상대학교 수송기계공학부·해양산업연구소
E-mail : rokid@gshp.gsnu.ac.kr
TEL : (055)640-3123
FAX : (055)640-3128

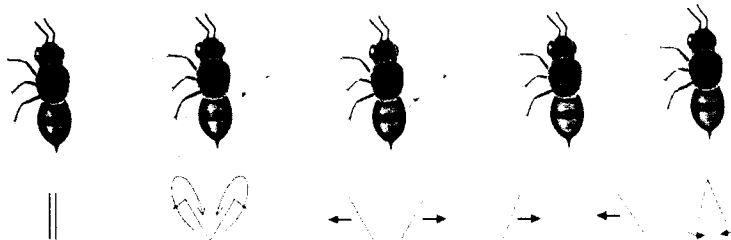


Fig. 1 Hovering flight of *Encarsia formosa*

수평면으로 이동한다. 몸통의 배쪽에서 날개를 반전하여, 다시 수평면으로 이동한 후 등쪽에서 앞진을 중심으로 닫히는 동작을 반복한다. 그림의 아랫부분은 이 운동의 2차원 모델을 나타낸다. 일반적으로 비행기 날개와 같이 날개가 정지상태로부터 움직이기 시작할 경우, 날개주위에 충분한 순환을 얻기 위해서는 어느 정도의 거리를 이동할 필요가 있다. 그러나 이 메커니즘에 있어서는 날개가 뒷진을 중심으로 열리는 순간, 각 날개에는 서로 반대방향의 순환이 형성되어, 이것에 의해 날개의 짧은 행정에도 충분한 양력을 얻을 수 있다. 실제 작은 벌의 정지비행에서는 날개의 움직임이 400Hz 정도로, 날개현장과 앞진의 평균이동속도로 계산한 레이놀즈 수는 30정도이나 양력계수는 3~4정도이고, 또한 날개주위의 점모를 날개면적에 포함시킨 값으로도 1.6이상이며, 이 레이놀즈 수에서의 정상인 날개에 비해서 양력계수가 매우 커서, 효율 좋게 양력을 발생시키고 있음을 알 수 있다⁽²⁾. 이러한 이유로 이 메커니즘은 많은 유체역학자들의 관심을 모으고 있으며⁽³⁻⁷⁾, 최근 이 메커니즘의 공학적 응용도 활발히 시도되고 있다⁽⁸⁻¹⁴⁾.

본 연구에서는 이 메커니즘의 원리를 응용한 수 종류의 추진모델에 대해 각각의 특징을 검토하고, 이 추진모델을 기계화한 소위 Weis-Fogh형 추진장치를 제작, 모형선에 장착하여 해상에서의 주행시험을 행하여 그 주행 특성을 파악하고자한다

2. 추진모델

먼저 가장 기본적인 Weis-Fogh형 선박추진모델(모델 I)을 Fig. 2에 나타낸다.

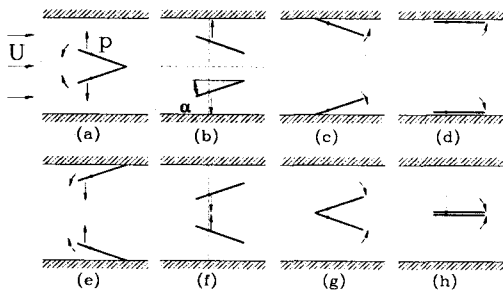


Fig. 2 A model of propulsion mechanism (Model I)

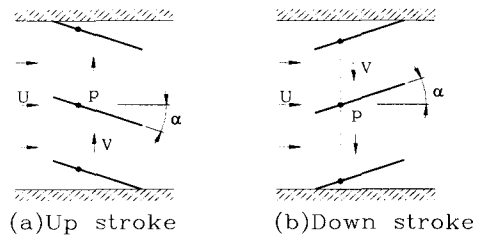


Fig. 3 A model of propulsion mechanism (Model II)

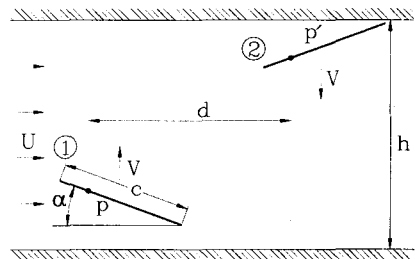


Fig. 4 A model of propulsion mechanism (Model III)

이것은 Fig. 1의 2차원 모델을 그대로 수로내에 옮겨온 것으로 한쌍의 평판날개를 수로내에서 정해진 동작을하도록 하여 그림의 왼쪽방향 즉 배의 진행방향으로 추력을 발생하게 한 것이다. 날개는 날개축에 상당하는 p점이 일정류 U와 수직방향으로 왕복운동함에 따라 회전해서 열리고, 열림각 α 를 유지하면서 병진운동하여, 수로벽에서 회전해서 닫히는 동작을 반복한다.

다음은 단단 Weis-Fogh형 선박추진모델(모델 II)을 Fig. 3에 나타낸다. Fig. 2의 추진모델 I에서 한쌍의 날개는 서로 대칭으로 운동하고 있으므로 대칭축(Fig. 2(b)에서 점선)을 고체벽면으로 생각하여 경상(mirror)의 원리를 도입하면 각 날개에는 같은 방향과 같은 크기의 추력이 발생한다. 즉 모델 II는 모델 I의 대칭축에 수로벽을 설치한 것으로 모델 I을 단순화한 것이다.

직렬2단 Weis-Fogh형 선박추진모델(모델 III)을 Fig. 4에 나타낸다. 이 추진모델은 추진기구의 성능을 향상시키기 위해 모델 II를 다시 직렬2단으로 확장한 것이다. 주행시험에 사용한 추진기구는 모델 III을 기준으로 제작하였으므로 본 연구의 이해를 돕기 위해 간단히 설명한다.

그림에 나타낸 바와 같이 폭 h인 수로 내에서 날개현장 C인 두 날개 ①, ②가 일정한 거리 d 및 위상차 ΔT 를 유지하면서 기준점 p, p'를 중심으

로 속도 V 로 y 방향으로 왕복운동하는 경우를 생각한다. 이때 각 날개의 움직임은 먼저 아랫벽으로부터 p, p' 점을 중심으로 회전해서 열리고(열리는 과정), 열림각 α 를 유지하면서 U 와 수직방향으로 병진운동하여(병진운동의 과정), 위벽에서 p, p' 점을 중심으로 회전해서 닫힌다(닫히는 과정). 또한 다시 위벽에서 열리고, 병진운동하여, 아랫벽에서 닫히는 운동을 반복한다. Fig. 4에서 날개 ①, ②를 각각 앞날개, 뒷날개로 하고, 날개동작에서 동위상이라 함은 위상차 $\Delta T=0^\circ$ 이며 두 날개가 같은 벽에서 동시에 움직이는 경우를, 역위상이라 함은 위상차 $\Delta T=180^\circ$ 이며 두 날개가 서로 수로의 반대측에서 움직이기 시작한 경우를 나타낸다.

3. 모형선의 제작

Fig. 5 및 Fig. 6에 Weis-Fogh형 선박추진기구를 장착한 모형선의 개략도 및 사진을 나타낸다.

모형선은 그림에 나타낸바와 같이 추진모델의 수로벽 대신에 쌍동선을 생각했으며, 무게를 줄이기 위해 선체내부를 중공으로 했고, 해수에 잘 견디도록 FRP로 제작했다. 선체의 기본 촌범은 전장 1000mm, 전폭 100mm이며, 깊이는 150mm이다. 추진기구는 Fig. 4의 직렬2단 추진모델(모델Ⅲ)에서와 같은 날개동작을 하도록 다음과 같이 제작했

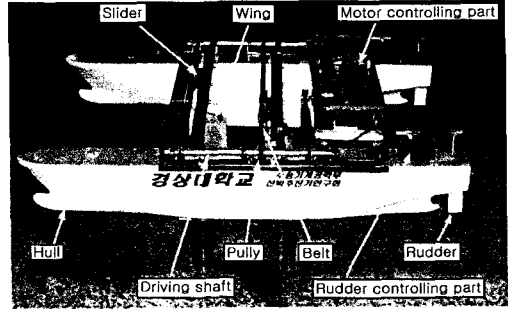


Fig. 6 Photograph of model ship

다. 장치의 기본골격은 선체의 크기에 맞추기 위해 길이 500mm, 폭 760mm로 했으며, 재료는 알루미늄앵글이다. 구동용 모터(DC 3.1W)의 동력은 벨트, 풀리, 구동축, 풀리, 벨트, 슬라이더를 경유해서 날개에 전달된다. 날개의 왕복운동은 슬라이더의 양 끝에 설치된 리미트 스위치와 릴레이회로에 의해 모터를 정, 역회전시켜 행한다. 여기서 날개축은 슬라이더에 고정되어 있고, 날개는 날개축에 끼워져 있어, 슬라이더가 왕복운동을 하면 날개에 날개축 둘레의 모멘트가 작용하여 날개가 열리게 되며, 닫힐 때는 날개의 앞전이 수로벽에 부딪쳐 강제적으로 닫힌다. 이때 날개에 작용하는 항력의 크기에 따라 날개의 열림 각이 다소 조정되도록 Fig. 7에서와 같이 날개축과 날개 뒷전 사이에 피아노선($\phi 1\text{mm}$ 의 강철

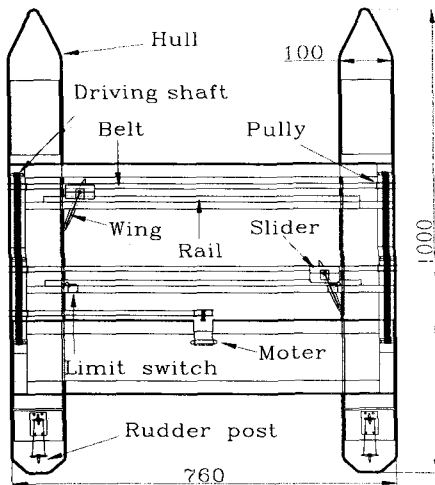


Fig. 5 Schematic diagram of model ship (unit :mm)

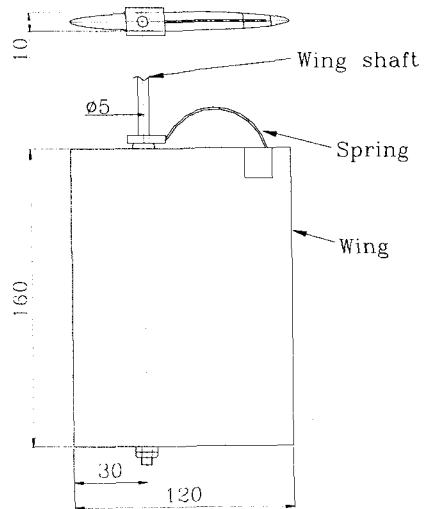


Fig. 7 Structure of wing (unit : mm)

선)을 굽혀 연결했다. 본 실험에 사용한 날개는 현장 120mm, 스패 160mm이며 두께 10mm의 마티카라는 특수목을 갈아서 NACA 64A010의 형태로 만들었으며, 앞전에서 날개 현장의 1/4되는 지점에 $\phi 6\text{mm}$ 의 구멍을 뚫어 날개축을 관통시켰다.

한편 배의 방향을 제어하는 조타장치는 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 쌍동선의 각각에 타를 설치하고 각 타심재에 서어보 모터를 연결하여 무선으로 타각을 조정할 수 있도록 했으며, 모형자동차의 조향장치를 이용해서 제작했다. 이때 쌍동선의 타각은 서로 연동되도록 했으며, 최대 타각이 35° 를 넘지 않도록 설정했다. 동력원으로는 7A, 12V의 직류 배터리(무게 21.5N)를 2개 사용했으며, 균형이 유지되도록 각각의 선체 내부에 장착하여 서로 병렬로 연결했다. 추진기구를 장착한 쌍동선의 총 중량은 배터리를 포함하여 약 185N이며, 해수 중에 띄웠을 때 홀수는 110mm 정도였다.

4. 모형선의 주행시험

본 모형선 주행시험에 사용된 추진기구는 직렬 2단을 기준으로 제작되었으며, 앞날개축과 뒷날개축 사이의 거리 $d=1.5c$ 이고, 각 날개운동의 위상차 $\Delta T=180^\circ$ 로 하기 위해 전부 슬라이더는 상부 벨트에, 후부 슬라이더는 하부벨트에 고정시켰다. 그리고, 단단의 경우는 직렬2단 추진기구의 앞날개를 제거하여 뒷날개만으로 실험했다.

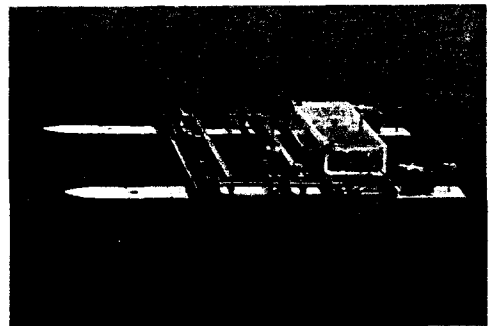
먼저 모형선을 해상에 띄워 정지한 상태에서 조사한 각 추진기구의 성능을 Table 1에 나타낸다. 이 때 날개는 스패 방향으로 150mm 잠겼으며, 추력은 날개를 동작시킨 상태에서 용수철저울로 측정했다. Table 1에 나타낸 바와 같이 본 추진기구

Table 1. Performance of the propulsion mechanism with the stationary ship in a sea

Model Factor	Model II	Model III
Average opening angle($^\circ$)	35	30
Moving speed of wing(m/s)	0.28	0.25
Thrust(N)	4.3	7.8



(a) Front face



(b) Lateral face

Fig. 8 A photograph of sailing model ship

의 추력은 단단(모델 II)의 경우 4.3N이었으며, 직렬2단(모델 III)의 경우는 7.8N으로 단단의 1.8배 정도였다. 다음으로 주행중인 모형선의 사진을 Fig. 8에 나타낸다. 주행시험은 통영 실내수영장 및 통영 앞바다 두 곳에서 실시하였다. 그림에서와 같이 모형선은 날개의 움직임에 따른 가, 감속 없이 매끄럽게 주행하였다. 또한 모형선의 주행은 해상의 파도에도 별다른 영향을 받지 않았으며, 무선 조타에 의한 선체의 선회 특성도 우수했다.

금번의 모형실험은 본 추진기구의 제 특성을 파악하는 것이 목적이 아니고, 앞서 제안한 추진모델이 선박추진기로서 제대로 동작하는지 그 여부를 예비검토한 것이며, 본 모형선의 항력, 추력 및 추진효율 등 정량적인 특성파악은 앞으로의 연구과제이다.

5. 결론

단단형 및 직렬 2단형 Weis-Fogh형 선박추진기를

제작, 모형선에 장착하여 해상 주행시험을 행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 모형선은 날개의 왕복운동에 따른 속도변동 없이 매끄럽게 주행하였다.

(2) 정지상태의 모형선에서 직렬 2단형 추진기구는 단단형에 비해 약 1.8배의 추력을 발생 시켰다.

또한 모형선은 주행에 있어 파도에는 별다른 영향을 받지 않았으며, 선회특성도 우수하여 이 추진기구의 실용화가 크게 기대된다. 앞으로 실용화를 위해 모형선에서 추진기구의 항력, 추력 및 효율특성 등 정량적인 연구가 필요하다.

후 기

이 논문은 2001년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Weis-Fogh, T., 1973, "Quick Estimates of Flight Fitness in Hovering Animals, Including Novel Mechanism for Lift Production," *Journal of Experimental Biology*, Vol. 59, pp. 169~230.
- (2) Lighthill, M. J., 1973, "On the Weis-Fogh Mechanism of Lift Generation," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 60, Part1, pp. 1~17.
- (3) Maxworthy, T., 1979, "Experiments on the Weis-Fogh Mechanism of Lift Generation by Insects in Hovering Flight. Part1. Dynamics of the 'Fling'," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 93, pp. 47~63.
- (4) Edwards, R. H. and Cheng, H. K., 1982, "The Separation Vortex in the Weis-Fogh Circulation-Generation Mechanism," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 120, pp. 463~473.
- (5) Spedding, G. R. and Maxworthy, T., 1986, "The Generation of Circulation and Lift in a Rigid Two-Dimensional Fling," *Journal of*

Fluid Mechanics, Vol. 165, pp. 247~272.

- (6) Ro, K. D. and Tsutahara, M., 1997, "Numerical Analysis of Unsteady Flow in the Weis-Fogh Mechanism by the 3D Discrete Vortex Method with GRAPE3A," *Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering*, Vol.119, pp. 96~102.
- (7) Zhang Shesheng, et, 1999, "Research and Progress of Weis-Fogh Mechanism Hydrodynamics," *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 3, pp. 55~60.
- (8) Furber, S. B. and Ffowcs Williams, J. E., 1979, "Is the Weis-Fogh Principle Exploitable in Turbo-machinery?," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 94, part 3, pp. 519~540.
- (9) Tsutahara, M. and Kimura, T., 1987, "An Application of the Weis-Fogh Mechanism to Ship Propulsion," *Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering*, Vol. 109, pp. 107~113.
- (10) Tsutahara, M., Kimura, T. and Ro, K. D., 1989, "Ship Propulsion Using the Weis-Fogh Mechanism," *Bulletin of the Marine Engr. Soc. in Japan*, Vol. 17, No. 2, pp. 49~55.
- (11) 노기덕, 1993, "Weis-Fogh형 선박추진기구의 개발(유동장의 가시화 및 수치해석)", 대한기계학회논문집. 제17권, 2호, pp. 426~437.
- (12) Ro, K. D., 2000, "Calculation of Thrust and Drag Characteristics for Ship's Propulsion Mechanism of Weis-Fogh Type," *KSME International Journal*. Vol. 14, No. 11, pp. 1249~1258.
- (13) Tsutahara, M. and Kimura, T., 1987, "A Pilot Pump using the Weis-Fogh Mechanism and its Characteristics," *Transactions of the JSME*, Vol. 54, No. 498, pp. 393~397.
- (14) Tsutahara, M. and Kimura, T., 1994, "Study of a Fan Using the Weis-Fogh Mechanism (An Experimental Fan and Its Characteristics)," *Transactions of the JSME*, Vol. 60, No. 571, pp. 910~915.