

<응용논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.1.45

Weis-Fogh형 모형선의 주행특성

노기덕* · 석재용**

* 경상대학교 기계시스템공학과, 해양산업연구소, ** 경상대학교 기계시스템공학과

Sailing Characteristics of a Model Ship of Weis-Fogh Type

Ki-Deok Ro*† and Jae-Yong Seok**

* Department of Mechanical System Engineering-Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University

** Department of Mechanical System Engineering, Gyeongsang National University

(Received June 1, 2009 ; Revised November 16, 2009 ; Accepted November 17, 2009)

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

초록: 본 연구에서는 Weis-Fogh 메카니즘의 원리를 응용한 수 종류의 추진모형을 간략하고, 이 추진모형을 기계화한 소위 Weis-Fogh 형 모형선을 제작하여, 추진모형 I, II, III의 주행특성과 진동특성을 비교, 검토함과 동시에, 탄성날개가 실선에서도 유효한지 주행실험을 통하여 파악한 것이다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 추진모형 II에 대하여 추진모형 I 및 III의 추력은 각각 1.31배 및 1.43배의 크기로 발생했고, 선속은 각각 1.20배 및 1.23배 증가했다. 탄성날개를 이용한 추진력 개선은 실선에서도, 모든 추진모형에 대해서도 유효했다. 최대진폭 및 RMS 값은 열림각 $\alpha=15^\circ$ 에서 가장 큰 값을 나타내며, 열림각 $\alpha=30^\circ$ 에서 가장 작게 나타났다. 출력성능 면에서 열림각 $\alpha=30^\circ$, 추진모형 III의 $\Delta T=0^\circ$ 의 경우가 비교적 추력이 크고, 진동특성도 우수했다.

Abstract: A model of the propulsion mechanism, I, II, III was based on a two-dimensional model of the Weis-Fogh mechanism and consisted of one or two wings in a square channel. The sailing and vibration performance characteristics of model ships were tested to compare with each other. we took results as follow. Thrust of propulsion model, I and III was increased by 31% and 43%, the speed of model ship by 20% and 23%, When compared to model II in same condition. The thrust improvement using the elastic spring wing was effective not only on all models but also in the real ship. The maximum amplitude and RMS were largest at the opening angle $\alpha=15^\circ$ and smallest at $\alpha=30^\circ$ on the vibration of model ship. The thrust of propulsion model III with opening angle $\alpha=30^\circ$, phase $\Delta T=0^\circ$ was large, but the amplitude of vibration was small relatively.

1. 서론

작은 벌의 정지비행을 관찰함에 의해 발견한 Weis-Fogh메카니즘^(1,2)은 그 양력발생 메커니즘이 독특하고, 효율이 좋아 많은 유체역학자들의 관심을 받고 있으며, 최근 이 메커니즘을 공학적으로 응용도 활발히 시도되고 있다.

이 메커니즘의 동작원리를 Fig. 1에 나타낸다. 이 벌은 몸통을 수직으로 유지한 채 날개를 수평면으로 회전운동 시킴에 의해 정지 비행을 행하고 있다. 날개의 움직임을 구체적으로 살펴보면

먼저 날개는 뒷전을 맞닿은 상태에서 열려, 어느 일정한 열림각을 유지하면서 수평면으로 회전한다. 그리고 몸통의 배 쪽에서 날개를 반전시켜, 다시 수평면으로 이동한 후 그림에서와 같이 등 쪽에서 앞전을 중심으로 닫히는 동작을 반복한다. 그림의 아랫부분은 이 운동의 2차원 모델을

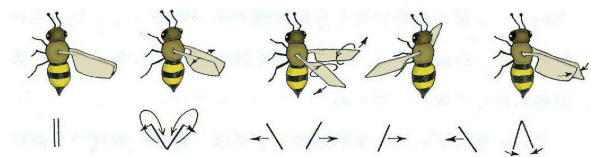
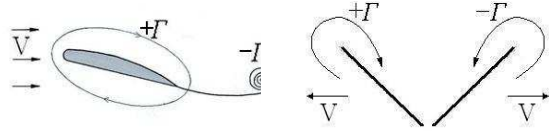


Fig. 1 Hovering flight of Encarsia formosa

† Corresponding Author, rokid@gachuk.gnsu.ac.kr



(a) Wargner effect (b) Weis-Fogh effect

Fig. 2 Wargner effect and Weis-Fogh effect

나타낸다. 일반적으로 비행기 날개와 같이 정지한 날개가 움직이기 시작할 경우, 날개 주위에 충분한 순환을 얻기 위해서는 어느 정도의 거리를 이동할 필요가 있다. 즉 Fig. 2(a)에 나타낸 바와 같이 날개가 움직이면, 날개 뒷전에서 반시계 방향의 볼텍스가 형성되고 이것을 상쇄하기 위해 날개 들레에 시계방향의 순환이 형성되며, 이 순환에 의해 양력이 발생한다. 따라서 비행기 날개 주위에 충분한 순환을 얻기 위해 긴 활주로가 필요하다. 그러나 Weis-Fogh메커니즘에 있어서는 Fig. 2(b)에 나타낸바와 같이 날개가 뒷전을 중심으로 열리는 순간, 각 날개에는 서로 반대방향의 순환이 형성되어, 이것에 의해 날개의 짧은 행정에도 충분한 양력을 얻을 수 있다.

Tsutahara 등^(3,4)은 Fig. 1의 2차원 모델을 그냥 그대로 수로 내에 설치한 추진모델(Fig. 3의 모델 I)을 제안하고 추력, 항력측정실험과 모형선 주행실험을 행하여 이 추진모델이 선박 추진기구로서 유효하게 작동함을 보였다. 노 등⁽⁵⁾은 후술하는 모델 II, III을 추진기구화한 모형선을 제작, 성능시험을 통하여, 직렬 2단(모델 III)의 경우 1단(모델 II)에 비해 1.8배의 추력이 발생함을 보였다. 또한 최근 노 등^(6,7)은 후술하는 모델 II에 대해 회류수조 내에서 추력 및 항력 측정실험을 행하여, 기존의 딱딱한 평판날개 대신 탄성날개를 사용하여 추력, 항력 및 추진효율 특성을 향상시켰다.

하지만 기존의 연구에서는 추진모델 I, II, III의 주행성능을 동시에 비교하지 않았으며, 본 추진기구의 실용화에 중요한 특성인 모형선의 진동특성은 검토된 적도 없다. 특히 선박에서 진동이 커지면 승무원의 승선생활에 따른 신체 피로도를 증가시킬 뿐만 아니라, 선박에 설치되어 있는 여러가지 기계의 수명을 단축시킨다. 또한 추진기에 의한 진동수와 선체의 고유진동수가 일치하면 공진에 의해 선체진동이 급격히 증가하여 선박에 치명적인 타격을 준다.

따라서 본 연구에서는 이 메커니즘의 원리를

응용한 수 종류의 추진모델을 소개하고, 이 추진모델을 기계화한 소위 Weis-Fogh형 추진장치를 만들어 모형선에 장착하여 후술하는 추진모델 I, II, III의 주행특성과 진동특성을 비교, 검토함과 동시에, 앞서 언급한 탄성날개가 실선에서도 유효한지 조사하고자한다.

2. 추진모델

먼저 가장 기본적인 Weis-Fogh형 선박추진모델(모델 I)을 Fig. 3에 나타낸다. 이것은 Fig. 1의 2차원 모델을 그대로 수로 내에 옮겨온 것으로 한쌍의 평판날개를 수로 내에서 정해진 동작을 하도록 하여 그림의 왼쪽방향 즉 배의 진행방향으로 추력을 발생하게 한 것이다. 한쌍의 날개는 날개축에 상당하는 p점이 일정류 U와 수직방향으로 왕복운동함에 따라 회전해서 열리고, 열림각 α 를 유지하면서 병진운동하여, 수로 벽에서 회전해서 닫히는 동작을 반복한다.

다음은 1단 Weis-Fogh형 선박추진모델(모델 II)을 Fig. 4에 나타낸다. Fig. 3의 추진모델 I에서는 한쌍의 날개는 수로를 중심으로 서로 대칭으로 이동하고 있다. 따라서 대칭축(Fig. 3의 수로 중심선)을 고체 벽면으로 생각하여 경상(mirror)의 원리를 도입하면 각 날개에는 같은 방향과 같은 크기의 추력이 발생한다. 즉 모델 II는 모델 I의 대칭축에 수로 벽을 설치한 것으로 모델 I을 단순화한 것이다.

끝으로 직렬2단 Weis-Fogh형 선박추진모델(모델III)을 Fig. 5에 나타낸다. 이 추진모델은 추진기구의 성능 구체적으로 추력 및 선속을 향상시키기 위해 모델II를 다시 직렬2단으로 확장한 것이다. 본 주행시험에 사용한 추진기구는 모델III을 기준으로 제작하였으므로 본 연구의 이해를 돕기 위해 간단히 설명한다. 그림에 나타낸 바와 같이 폭 h인 수로 내에서 두 날개 ①, ②가 일정한 거리 d 및 위상차 ΔT 를 유지하면서 기준점 p, p'를 중심으로 속도 V로 왕복운동한다. 이때 각 날개의 움직임은 Fig. 4의 추진모델II에서와 같다. 날개동작에서 위상차 $\Delta T=0^\circ$ 는 동위상을 말하며 두 날개가 같은 벽면에서 동시에 출발하는 경우를, 위상차 $\Delta T=180^\circ$ 는 역위상을 말하며 두 날개가 서로 수로의 반대측에서 움직이기 시작한 경우를 나타낸다.

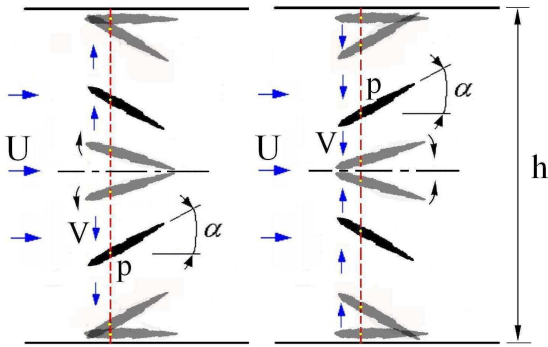


Fig. 3 A model of propulsion mechanism (Model I)

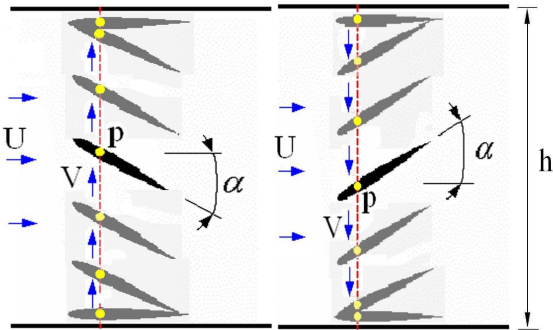


Fig. 4 A model of propulsion mechanism (Model II)

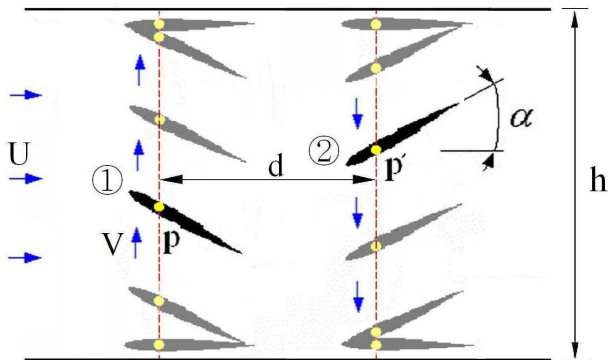


Fig. 5 A model of propulsion mechanism (Model III)

3. 모형선의 제작

Fig. 6 및 Fig. 7에 Weis-Fogh형 선박 추진기구를 장착한 모형선의 개략도 및 사진을 나타낸다. 이전에도 유사한 모형선⁽⁵⁾을 제작하여 성능시험을 행하였으나 주행속도가 너무 느려 본 모형선에서는 선폭을 줄이고, 구동용 모터의 출력도 1.8배 정도 증가 시켰으며, 선형 및 날개구동장치도 다소 개량하였다. 모형선은 Fig. 6 및 7에 나타낸 바와 같이 추진모델의 수로벽 대신에 쌍동선을

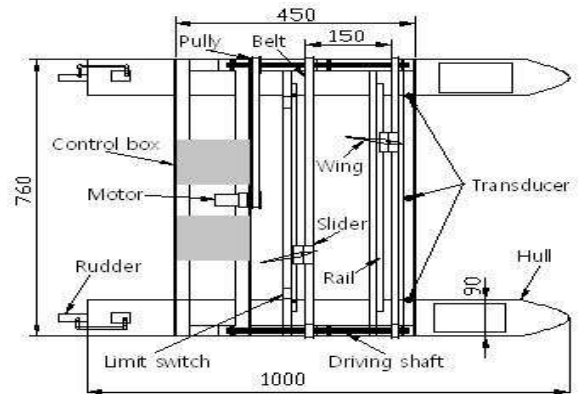


Fig. 6 Schematic diagram of model ship (unit :mm)

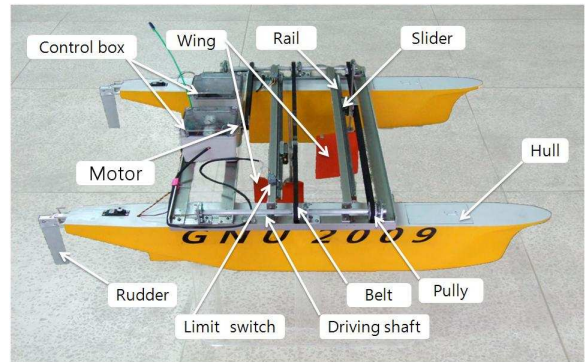


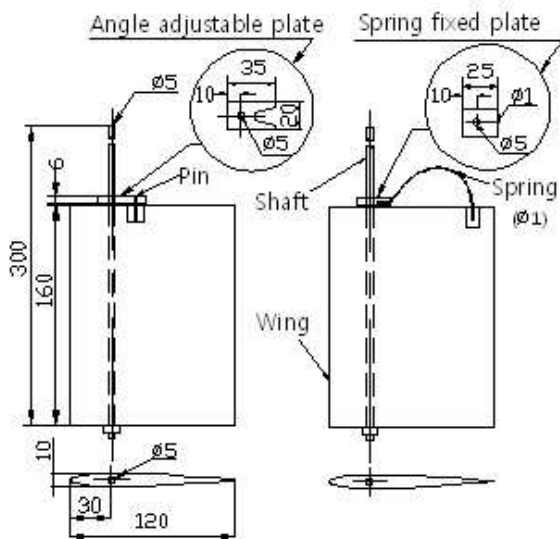
Fig. 7 Photograph of model ship

생각했으며, 무게를 줄이기 위해 선체내부를 중공으로 했고, 해수에 잘 견디도록 FRP로 제작했다. 선체의 기본 치수는 전장 1000mm, 전폭 90mm이며, 깊이는 150mm이다. 추진기구는 Fig. 5의 직열2단 추진모델(모델III)에서와 같은 날개 동작을 하도록 다음과 같이 제작했다. 장치의 기본골격은 선체의 크기에 맞추기 위해 길이 450mm, 폭 760mm로 했으며, 재료는 알루미늄앵글이다. 전, 후단 슬라이더 레일은 각각 지지 앵글에 장착되어 있으며, 전, 후단 날개 축의 최단거리(Fig. 5의 d)는 150mm로 했다. 직열2단 추진기구(모델III)의 경우 회류수조 내에서의 성능시험 및 와법에 의한 수치계산 결과에 의하면 전, 후단 날개 축의 최단거리를 $d=1.1C$ (C:날개현장)로 짧게 하여도 전, 후단 날개의 평균추력은 단독날개의 그것과 유사하다는 보고가 있다.⁽⁸⁾

구동용 모터(DC 5W, 250rpm)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 날개 축은 슬라이더에 고정되어 있고, 날개는 날개 축에 끼워져 있어, 슬라이더가 왕복운동을 하면 날개에 날개 축 둘레의 모멘트가 작용하여 날개가 열리게 되며, 닫힐 때는 날개의 앞전이 수로벽에 부딪쳐 강제적으로 닫힌다.

본 연구에서는 Fig. 8(a), (b)에 나타난 바와 같이 두 종류의 날개를 사용했다. Fig. 8(a)는 그림에서와 같이 “V”자형 각도조절판을 축에 고정시키고, 핀은 날개 상부에 고정시켰다. 그래서 날개 축이 이동하면 이동방향과 반대방향으로 날개에 작용하는 항력에 의해 날개가 축을 중심으로 열리게 되는데 이때 핀이 V자형 홈의 내측에 부딪쳐 최대 열림각 α 가 한정된다. 이때 각도조절판은 열림각 $\alpha=15^\circ, 30^\circ$ 가 되도록 2종류를 만들었다. Fig. 8(b)는 스프링 고정판을 축에 고정시키고, 날개 뒷전 부근에 역시 스프링 고정부를 부착시켜, 이 두 고정대에 직경 1.0 mm, 길이 12mm의 강철선을 휘어 그림에서와 연결시켜 스프링과 같은 역할을 하도록 하였다. 이렇게 하면 스프링에 의해 날개가 동작할 때 날개에 작용하는 항력의 크기에 의해 열림각 α 가 변하게 된다. 이때 사용한 강철선의 스프링 상수는 약 $0.12\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 정도였다.



(a) Prototype wing (b) Spring type wing
 Fig. 8 Structure of wing (unit : mm)

본 실험에 사용한 날개는 현장 120mm, 스펠 160mm이며 두께 10mm의 마티카라는 특수목을 갈아서 NACA 64A010의 형태로 만들었으며, 앞전에서 날개 현장의 1/4되는 지점에 직경 5mm의 구멍을 뚫어 날개 축을 관통시켰다.

한편 배의 방향을 제어하는 조타장치는 Fig. 6 및 Fig. 7에 나타난 바와 같이 쌍동선의 각각에 타를 설치하고 각 타심재에 서보모터를 연결하여 무선으로 타각을 조정할 수 있도록 했으며, 모형 자동차의 조향장치를 이용해서 제작했다. 이때 쌍동선의 타각은 서로 연동되도록 했으며, 최대 타각이 35° 를 넘지 않도록 설정했다. 동력원으로는 7A, 12V의 직류 배터리(무게 16.2N)를 2개 사용했으며, 균형이 유지되도록 각각의 선체 내부에 장착하여 서로 병렬로 연결했다. 추진기구를 장착한 쌍동선의 총 중량은 배터리를 포함하여 약 164N이며, 청수 중에 띄웠을 때 홀수는 130mm 정도였다.

Fig. 6 및 Fig. 7에 나타난 바와 같이 추진기구는 Fig. 5의 직렬2단 추진모델(모델Ⅲ)을 기본으로 하여 제작하였고, 단단(모델Ⅱ)의 경우는 전단날개를 제거하여 실험하였고, 병렬(모델Ⅰ)의 경우는 전단 슬라이더를 빼 내어, 후단레일에 추가하여 실험하였다. 두 개의 날개(모델Ⅰ,Ⅲ)를 사용할 경우, 슬라이더 하나는 상부벨트, 다른 하나는 하부벨트에 고정시키는 방법으로 각 날개를 서로 반대방향으로 움직이게 했고, 두 개 슬라이더 모두 상부벨트에 고정시키는 방법으로 양 날개를 서로 같은 방향으로 움직이게 했다. 이때 날개 축의 행정거리는 모델Ⅰ의 경우 0.22m, 모델Ⅱ, Ⅲ의 경우 0.52m였다.

4. 모형선의 주행성능시험

모형선 주행성능시험은 실내수영장(광도초등학교)에서 행하였다. 수영장의 크기는 길이 25m, 폭 10m로 깊이 0.5m 정도 물을 채웠다. 모형선의 성능시험에서 추력은 모형선을 물에 띄워 날개를 동작시키고, 모형선 뒤쪽에 용수철저울을 매달아 측정하였다. 또한 주행속도는 수영장 양 끝에서 길이방향으로 7.5m 지점을 표시해 놓고, 이 지점을 통과하는 시간 즉 중앙부근 10m를 통과해 가는 모형선의 시간을 초시계로 측정하여 산출하였다. 이때 날개가 10왕복하는 시간도 측정하여

날개의 이동속도도 산출하였다.

먼저 Table 1에서 가장 기본이 되는 추진모델 II의 열림각에 따른 정지상태의 추진력 및 주행상태의 모형선의 주행속도를 나타낸다. ()안은 열림각 $\alpha=30^\circ$ 에 대한 각 값의 비를 표기한 것이다.

스프링의 경우 열림각 α 는 날개가 행정거리의 중간에 왔을 때의 각도를 말하는데, 모형선이 정지한 상태에서는 $\alpha=28^\circ$, 주행 시에는 $\alpha=20^\circ$ 로 주행할 때가 열림각이 작게 되는 것은 선속으로 인해 받음각이 낮아도 항력이 크기 때문에 더 커지지 못한 것으로 판단된다. Table 1에 나타난 바와 같이 추진력은 열림각을 스프링으로 자동조절했을 때가 가장 크며, 그 다음으로는 열림각 $\alpha=28^\circ$, $\alpha=15^\circ$ 순으로, 4%정도씩 감소하고 있다. 모형선의 주행속도 역시 추진력과 같은 순서로 감소하고 있다.

Table 2에 열림각 $\alpha=30^\circ$ 의 경우, 각 추진모델에 따른 추진력의 크기 및 모형선의 주행속도를 나타낸다. ()안은 추진모델 II에 대한 각 값의 비를 표기한 것이다. Table 2에 나타난 바와 같이 추진모델 II에 대하여 추진모델 I 및 III은 추진력은 각각 1.31배 및 1.43배의 크기로 발생했으며, 선속은 각각 1.20배 및 1.23배 증가했음을 알 수 있다. 이전의 연구결과⁽⁸⁾에 의하면 날개의 이동속도가 같은 경우, 직열 2단의 추진기구에서는 단단 추진기구와 비교해서 거의 2배의 추진력이 발생했다고 보고하고 있다. 그러나 이전의 연구는 회류수조 내에서 일정류 중에서 추진력을 측정하였고, 쌍동선 대신 격판을 사용했다. 금번 모형선 실험에서 추진력이 대폭 감소한 것은 물 밑 선체의 3차원 특성이 쌍동선 사이의 흐름에 영향을 주어 양 날개에 작용하는 추진력을 감소시킨 것으로 추정되나 앞으로 이에 대한 구체적인 연구가 필요하다.

그리고 모델III에서는 날개가 동시에 같은 방향으로 움직이는 위상차 $\Delta T=0^\circ$ 의 경우와 서로 반대방향으로 움직이는 위상차 $\Delta T=180^\circ$ 의 경우는 같은 크기의 추진력과 선속을 발생하고 있다. 이는 이전의 추진기구의 단독 실험결과⁽⁸⁾와 같다. 이상을 종합해 보면 출력을 증가시키기 위해서는 직열2단 즉 모델 III이 가장 유효하며, 위상차에 따른 차이는 보이지 않고 있으므로 이는 진동특성 등 다른 특성을 고려하여 결정해야 할 것이다.

Table 3에 스프링형 탄성날개를 이용한 경우, 각 추진모델에 따른 추진력의 크기 및 모형선의 주행속도를 나타낸다. ()안은 추진모델 II에 대한 각 값의 비를 표기한 것이다. Table 3에 나타난 바와 같이 스프링형 탄성날개를 사용했을 경우 역시 추진모델 II에 대하여 추진모델 I 및 III은 추진력은 각각 1.39배 및 1.45배의 크기로 발생했으

Table 1 Thrust and speed of model ship with opening angle of wing (Model II)

T and U Opening angle	Thrust(N) (ratio)	Speed(m/s) (ratio)
$\alpha=15^\circ$	23.0 (0.96)	0.54 (0.96)
$\alpha=30^\circ$	24.0 (1.0)	0.56 (1.0)
Spring ($\alpha=28^\circ$ (stationary), 20° (sailing))	25.0 (1.04)	0.57 (1.02)

Table 2 Thrust and speed of model ship with propulsion model($\alpha=30^\circ$)

T and U Model	Thrust(N) (ratio)	Speed(m/s) (ratio)
Model I	31.4 (1.31)	0.67 (1.20)
Model II	24.0 (1.0)	0.56 (1.0)
Model III($\Delta T=0^\circ$)	34.3 (1.43)	0.69 (1.23)
Model III($\Delta T=180^\circ$)	34.3 (1.43)	0.69 (1.23)

Table 3 Thrust and speed of model ship with propulsion model(spring type)

T and U Model	Thrust(N) (ratio)	Speed(m/s) (ratio)
Model I	34.8 (1.39)	0.68 (1.19)
Model II	25.0 (1.0)	0.57 (1.0)
Model III($\Delta T=0^\circ$)	36.3 (1.45)	0.69 (1.21)
Model III($\Delta T=180^\circ$)	36.3 (1.45)	0.69 (1.21)



Fig. 9 A photograph of sailing model ship



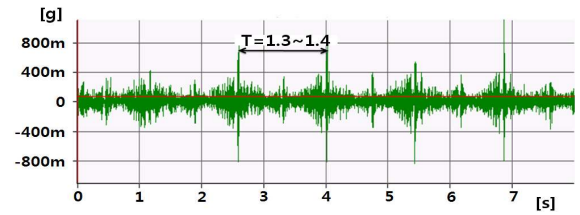
Fig. 10 The measurement chain of vibration

며, 선속은 각각 1.19배 및 1.21배 증가했음을 알 수 있다. 추진력 특성실험⁽⁶⁾에서 스프링형 탄성날개를 이용하면 추진력을 개선시킬 수 있다고 했는데 이는 탄성날개가 실선에서도, 또한 모든 추진 모델에 대해서도 유효함을 알 수 있다. Table 2와 3을 비교해 보면 전반적으로 탄성날개를 채용한 경우 추력은 크게 상승한 반면, 선속은 그다지 증가하지 않고 있다. 이것은 Table 1에 나타낸 바와 같이 모형선이 주행할 경우 선속의 영향을 받아 열림각이 정지시보다 감소했기 때문으로 판단된다.

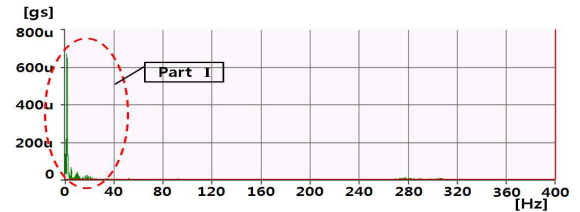
다음으로 주행중인 모형선의 사진을 Fig. 9에 나타낸다. 사진에서와 같이 모형선은 날개의 움직임에 따른 가감속 없이 매끄럽게 주행하였고, 무선 조타에 의한 선체의 선회 특성도 우수했다.

5. 주행하는 모형선의 진동특성시험

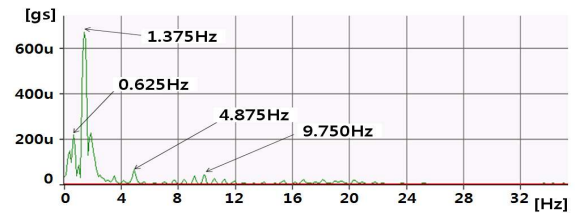
모형선의 진동특성시험은 가속도 센스(Fig. 6의 Transducer)를 추진기구의 지지앵글에 주행방향과 수직방향으로 3개 부착하여, 모형선을 주행시키면서 각각의 추진모델에 대해 진동을 측정하였다. Fig. 10에 나타낸 바와 같이 센스에서 측정된 진동 신호는 Pulse3560(B&K사)에서 저장 처리되어 랩톱(Lab top)으로 결과 값을 디스플레이(display)하였다. 사용한 가속도 센서(B&K사)의 감도는 $1.003pC/ms^2$ 이다.



(a) Time waveform



(b) Frequency spectrum



(c) The enlargement of "part I" in the (b)

Fig. 11 Vibration analysis of Model I ($\alpha=15^\circ$)

Fig. 11은 추진모델 I에서 열림각 $\alpha=15^\circ$ 인 경우 주행하는 모형선의 진동특성을 나타낸다. 그림에서 (a)는 시간파형이고, (b)는 주파수 스펙트럼, (c)는 (b)에서 "part I"를 확대한 그림이다. 먼저 Fig. 11(a)의 시간파형을 살펴보면 일정 주기($T=1.3\sim 1.4$)마다 진동이 크게 나타나는데 이것은 양 날개가 선체 벽면에서 반전할 때 생기는 진동으로, 실제 이때 날개의 1왕복운동 동안의 주기를 초시계로 확인해보니 1.34초였다. 그리고 1주기 중간에서 다소 큰 진동이 나타나 있는데 이것은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 두 날개가 수로의 중간에서 반전할 때 생기는 진동으로 벽면에서 반전할 때보다는 약간 작게 나타난다. Fig. 11(c)를 살펴보면 주 진동 주파수는 $0.625Hz(1X)$ 및 $1.375Hz(2X)$ 이며, 이것은 앞서 설명한 날개의 1왕복운동 및 1행정에 비롯된 주파수로, 이때 진폭 값은 각각 $217\mu gs(1X)$ 및 $667\mu gs(2X)$ 이다. 또한 Fig. 11(c)에서 구동 모터, 폴리, 구동축의 회전에서 비롯된 주파수 성분 $4.875Hz(1G)$ 및 그 배수 성분인 $9.750Hz(2G)$ 에서 다소 큰 진폭이 나타나 있다. 추진모델 I에서 최대 진폭 값은 $1.375Hz(2X)$ 에서 $667\mu gs(2X)$ 이며, 전체 진동의 RMS (Root Mean Square) 값은 $1.20mgs$ 였다.

Table 4 Value of amplitude for main vibration component and RMS (Model I)

Amp. Opening angle	1X (0.625Hz) (μ gs)	2X (1.375Hz) (μ gs)	RMS (μ gs)
$\alpha=15^\circ$	217	667	1,200
$\alpha=30^\circ$	505	623	974
Spring ($\alpha=30^\circ$)	139	536	1,010

Table 5 Value of amplitude for main vibration component and RMS in All Models ($\alpha=30^\circ$)

Amp. Model	2X (1.375Hz) (μ gs)	RMS (μ gs)
Model I	623	974
Model II	419	674
Model III ($\Delta T=0^\circ$)	536	836
Model III ($\Delta T=180^\circ$)	1,140	1,880

Table 4에 추진모델 I의 열림각에 따른 주 진동에서의 진폭 값 및 RMS 값을 나타낸다. 각각의 진폭 값을 구하는 과정은 Fig. 11에서 설명한 바와 같다. 스프링의 경우 열림각 $\alpha=30^\circ$ 는 Table 1의 추진모델 II에서 그것($\alpha=20^\circ$)보다 큰 것은 모델 I의 경우 행정거리가 짧기 때문에 스프링형 탄성날개의 행정거리에 대한 열림각 변화는 이전의 연구[6]에 잘 나타나 있다. Table 4에 나타낸 바와 같이 최대진폭 및 RMS 값 역시 열림각 $\alpha=15^\circ$ 에서 가장 큰 값을 나타내며, 열림각 $\alpha=30^\circ$ 에서 가장 작게 나타나 있다.

Table 5에 열림각 $\alpha=30^\circ$ 의 경우, 각 추진모델에 따른 주 진동에서의 진폭 값 및 RMS 값을 나타낸다. 여기서 열림각 $\alpha=30^\circ$ 를 대표로 잡은 이유는 Table 4에 나타낸 바와 같이 이 각도에서 가장 진동특성이 좋기 때문이다. Table 5에 나타낸 바와 같이 전체 추진모델에서 최대진폭 및 RMS 값이 가장 큰 것은 직열2단 추진모델(모델 III)의 역위상($\Delta T=180^\circ$)의 경우이며, 가장 작은 것은 추진모델 II의 경우이다.

Table 2, 3 및 5를 함께 비교해 보면 출력을 향상시키기 위해서는 직열 2단 추진모델이 적합하며, 특히 열림각 $\alpha=30^\circ$, 직열 2단 추진모델(모델 III)의 동위상($\Delta T=0^\circ$)의 경우가 비교적 추력이 크고, 진동특성

이 우수한 것으로 평가된다. 일반적으로 진동은 상사법칙이 성립하지 않으므로 실선의 크기에 따른 진동의 크기를 정량적으로 예측하기는 어렵다. 그러나 앞서 고찰한 바와 같이 본 추진기구의 진동특성은 날개의 왕복운동에 크게 의존하므로 정성적인 경향은 본 연구에서와 유사할 것으로 추정된다.

6. 결론

본 연구에서는 Weis-Fogh메카니즘의 원리를 응용한 수 종류의 추진모델을 간략하고, 이 추진모델을 기계화한 소위 Weis-Fogh형 모형선을 제작하여, 추진모델 I, II, III의 주행특성과 진동특성을 비교, 검토함과 동시에, 탄성날개가 실선에서도 유효한지 주행실험을 통하여 파악한 것이다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 추진모델 II에 대하여 추진모델 I 및 III의 추력은 각각 1.31배 및 1.43배의 크기로 발생했고, 선속은 각각 1.20배 및 1.23배 증가했다.

(2) 탄성날개를 이용한 추진력 개선은 실선에서도, 모든 추진모델에 대해서도 유효했다.

(3) 최대진폭 및 RMS 값은 열림각 $\alpha=15^\circ$ 에서 가장 큰 값을 나타내며, 열림각 $\alpha=30^\circ$ 에서 가장 작게 나타났다.

(4) 출력성능 면에서 열림각 $\alpha=30^\circ$, 추진모델 III의 $\Delta T=0^\circ$ 의 경우가 비교적 추력이 크고, 진동특성도 우수했다.

후 기

이 논문은 2007년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.R01-2007-000-10038-0(2007))

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) Tsutahara, M. and Kimura, T., 1987, "An Application of the Weis-Fogh Mechanism to Ship Propulsion,"

- Journal of Fluids Engineering*, Vol.109, pp. 107~113.
- (4) 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.
- (5) Ki-Deok Ro, Se-Kyung Oh, Ji-Tae Park, Tae-Hue Kong, 2005, "Sailing of Model Ship with Propulsion Mechanism of Weis-Fogh Type," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol.29, No. 4, pp. 363~368.
- (6) Ki-Deok Ro, Jung-Hui Cheon, Won-Cheol Kim, 2009, "Performance Improvement of Weis-Fogh Type Ship's Propulsion Mechanism Using Spring Type Elastic Wing," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol.33, No.1, pp. 52~61.
- (7) Ki-Deok Ro, 2009, "Performance Improvement of Weis-Fogh Type Ship's Propulsion Mechanism Using Rubber Type Elastic Wing," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, No. 3, pp. 836~844.
- (8) Tsutahara, M., Kimura, T. and Ro, K. D., 1994, "Ship's Propulsion Mechanism of Two-Stage "Weis-Fogh" Type," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 116, pp. 278~286.