

Weis-Fogh형 추진기구를 장착한 모형선의 진동특성

노기덕¹ · 최병권² · 이정환³ · 오세경[†]

(원고접수일 : 2009년 6월 15일, 원고수정일 : 2009년 9월 21일, 심사완료일 : 2009년 10월 21일)

Vibration Characteristics of a Model Ship with Weis-Fogh type Ship's Propulsion Mechanism

Ki-Deok Ro¹ · Byeong-Kuen Choi² · Jeong-Hwan Lee³ · Se-Kyung Oh[†]

요 약 : 본 연구는 Weis-Fogh형 추진기구를 장착한 모형선을 제작하여, 정지 및 주행하는 모형선에 대해 열림각 변화에 따른 주행특성과 진동특성을 조사한 것이다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 추력 및 선속은 열림각이 자동 조절되는 스프링형이 가장 컸으며, 열림각 $\alpha=30^\circ$, $\alpha=15^\circ$ 순으로, 약 4%정도씩 작게 나타났다. 또한 모형선의 최대 진동진폭 및 RMS 값은 열림각 $\alpha=30^\circ$ 일 때가 가장 작게, 스프링형이 가장 크게 나타났고, 열림각이 같은 경우 정지 때보다 주행 시가 작게 나타났다.

주제어 : 유체기계, 모형선, 날개, 추진기구, 선박추진

Abstract: A model ship equipped with the Weis-Fogh type ship's propulsion mechanism, which is consisted of one wing in a squared channel, was constructed. Sailing and vibration tests of the model ship were performed with the opening angles in a pool. The results are summarized as follows. The thrust and the speed of model ship were the highest for the spring-type wing of which the opening angle is automatically controlled in one stroke. Moreover, these values were approximately reduced by 4% from 30° opening angle to 15° in order. The maximum amplitude and RMS values of the model ship were the lowest for the wing having the opening angle of 30° , but were the largest for spring-type wing. And in case of the same opening angle, these values were lower for the ship on sailing than that on stationary.

Key words: Hydraulic Machine, Model ship, Wing, Propulsion Mechanism, Ship Propulsion

1. 서 론

Weis-Fogh메커니즘[1-2]은 몸통길이 1mm정도 작은 벌의 정지비행을 관찰함에 의해 발견한 독특한, 효율이 좋은 양력 발생기구이다. Tsutahara 등 [3]은 한 쌍의 평판날개로 모델화한 이 메커니즘의 2차원 모델을 수로 내에 설치한 추진모델을 제안

하여 추력, 항력측정실험과 모형선 주행실험을 행하여 이 추진모델이 선박 추진기구로서 유효하게 작동함을 보였다. 노 등[4]은 수로 내의 1매의 날개(이하 1단 모델이라 한다) 및 직렬 2매의 날개(이하 직렬2단 모델이라 한다)로 추진모델화한 모형선을 제작, 성능시험을 통하여, 직렬 2단 추진모

[†] 교신저자(경상대학교기계시스템공학과 · 농생명과학원, E-mail:ohsek@gaechuk.gsnu.ac.kr, Tel: 055-640-3127)

1 경상대학교 기계시스템공학과 · 해양산업연구소

2 경상대학교 정밀기계공학과

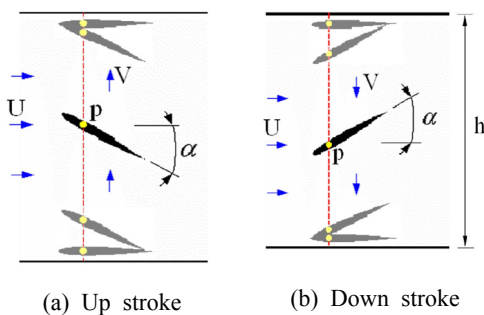
3 경상대학교 대학원 정밀기계공학과

델의 경우, 1단 추진모델에 비해 1.8배의 추력이 발생함을 보였다. 또한 최근 노 등[5]은 가장 간단한 1단 추진모델에 대해 회류수조 내에서 추력 및 항력 측정실험을 행하여, 기존의 딱딱한 평판날개 대신 스프링에 의한 탄성날개를 사용하여 추력, 항력 및 추진효율 특성을 향상시켰다. 하지만 이 탄성날개가 실선에서도 유효하게 동작하는지 조사되지 않았으며, 본 추진기구의 실용화에 중요한 특성인 모형선의 진동특성은 검토된 적도 없다. 따라서 본 연구에서는 가장 기본적인 모델인 1단 추진모델을 장착한 모형선을 제작하여, 날개의 열림각 변화에 따른 주행특성과 진동특성을 비교, 검토함과 동시에, 앞서 언급한 탄성날개가 실선에서도 유효한지 조사하고자한다.

2. Weis-Fogh형 모형선 제작

2.1 추진모델

먼저 Weis-Fogh형 추진모델을 Figure 1에 나타낸다.



(a) Up stroke (b) Down stroke

Figure 1: A model of propulsion mechanism

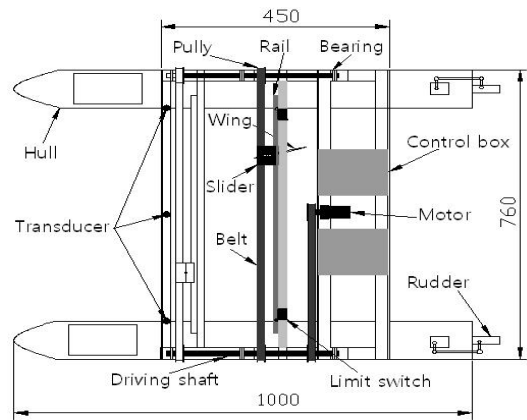
이 모델은 수직상방에서 본 그림으로 1매의 날개를 수로 내에서 정해진 동작을 시킴으로서 그림의 좌측방향 즉 일정류 U 와 반대방향의 추력을 발생한다. 날개는 날개축에 상당하는 p 점이 일정류 U 와 수직방향으로, 속도 V 로 왕복 운동함에 따라, 먼저 아래벽으로 부터 열리고, 열림각 α 를 유지하면서 병진운동하여 위벽에서 회전해서 닫힌다. 그리고 다시 위벽에서 회전해서 열리고 병진운동하여, 아래 벽에서 회전해서 닫히는 동작을 반복한다. 원래 Weis-Fogh메커니즘은 한 쌍의 평판날개가 뒷전을 중심으로 열리면서 각 날개에는 서로 반대방향의 순

환이 형성되도록 되어 있으나, Figure 1의 추진모델에서와 같이 수로 벽을 설치하여, 1매의 날개를 벽면에서 열리도록하면 경상(mirror)의 원리에 의해 한 쌍의 날개에서와 같은 효과를 얻을 수 있다.

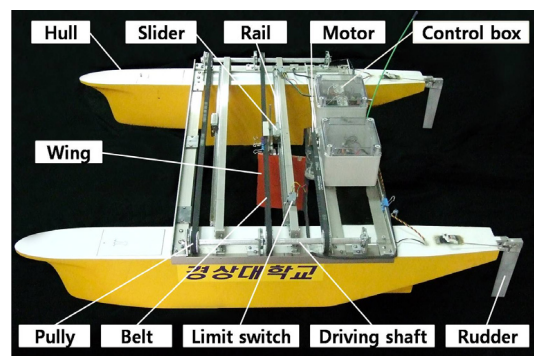
2.2 모형선의 제작

Figure 2 (a)와 (b)에 Weis-Fogh형 선박추진기구를 장착한 모형선의 개략도 및 사진을 나타낸다.

이전에도 유사한 모형선[4]을 제작하여 성능시험을 행하였으나 주행속도가 너무 느려 본 모형선에서는 선풍을 줄이고, 구동용 모터의 출력도 1.7배 정도 증가 시켰으며, 선형 및 날개구동장치도 다소 개량하였다.



(a) Schematic diagram



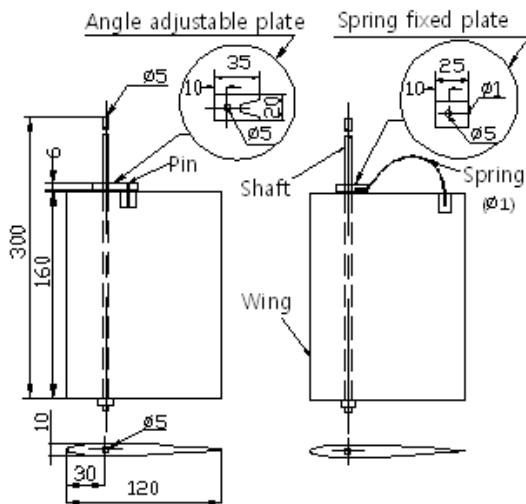
(b) Photograph

Figure 2: Schematic diagram and photograph of model ship(unit : mm)

모형선은 그림에 나타난 바와 같이 추진모델의 수로벽 대신에 쌍동선을 생각했으며, 무게를 줄이기 위해 선체내부를 중공으로 했고, 해수에 잘 견디도록 FRP로 제작했다. 선체의 기본 치수는 전장 1000mm, 전폭 90mm이며, 깊이는 150mm이다. 추진기구는 Figure 1의 추진모델에서와 같은 날개동작을 하도록 다음과 같이 제작했다. 장치의 기본골격은 알루미늄 앵글을 재료로 하였고, 선체의 크기에 맞추어 길이 450mm, 폭 760mm로 했다. 슬라이더 레일은 지지 앵글에 장착되어 있으며, 슬라이더는 상부 벨트에 고정되어 있어 벨트에 따라 움직인다.

즉 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 항력에 의해 날개에 날개 축 둘레의 모멘트가 작용하여 날개가 열리게 되며, 닫힐 때는 날개의 앞전이 선체의 내측 벽면에 부딪쳐 강제적으로 닫힌다.

본 연구에서는 Figure 3 (a), (b)에 나타난 바



(a) Prototype wing (b) Spring type wing

Figure 3: Structure of wing (unit : mm)

와 같이 두 종류의 날개를 사용했다. (a)는 “V”자형 각도조절판과 핀으로 날개의 최대 열림각 α 를 고정 시킨 것으로, $\alpha=15^\circ, 30^\circ$ 의 각도조절판을 만들어 부착하였다. (b)는 날개가 동작할 때 날개에 작용하는 항력에 의해 열림각 α 가 자동적으로 조절되도록 한 것이며 (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 “V”자형 홈의 내측에 부딪쳐 최대 열림각 α 가 한정된다. 이때 각도조절판은 열림각 $\alpha=15^\circ, 30^\circ$ 가 되도록 2종류를 만들었다.

(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.

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 Figure 2에 나타난 바와 같이 쌍동선의 각각에 타를 설치하고 각 타심재에 서보모터를 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 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 흘수는 130mm 정도였다.

이때 날개 축의 행정거리는 0.52m 였고, 수중에서 날개의 이동속도는 $V=0.39\text{m}/\text{s}$ 였다.

3. 모형선의 주행 및 진동 특성

3.1 주행특성 시험

모형선 주행성능실험은 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 용수철 저울을 매달아 측정하였다. 또한 주행속도는 수영장 양 끝에서 길이 방향으로 7.5m 지점을 표시해 놓고, 이 지점을 통과하는 시간 즉 중앙부근 10m를 통과해 가는 모델선의 시간을 초시계로 측정하여 산출하였다. 이때 날개가 10왕복하는 시간도 측정하여 날개의 이동 속도도 산출하였다.

먼저 Table 1에 가장 기본이 되는 추진모델 II의 열림각에 따른 정지상태의 추력 및 주행상태의 모형선의 주행속도를 나타낸다. ()안은 열림각 $\alpha = 30^\circ$ 에 대한 각 값의 비를 표기한 것이다. 여기서 추력이란 배를 미는 힘을 말하며 추진기가 동작할 때 발생하는 추진력을 의미한다.

Table 1: Thrust and speed of model ship with opening angle of wing

α \ T & U	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 ($\alpha=28^\circ, 20^\circ$)	25.0 (1.04)	0.57 (1.02)

스프링의 경우 열림각 α 는 날개가 행정거리의 중간에 왔을 때의 각도를 말하는데, 모형선이 정지한 상태에서는 $\alpha=28^\circ$, 주행 시에는 $\alpha=20^\circ$ 로 주행 시가 열림각이 작게 되는 것은 선속의 영향으로 날개에 작용하는 항력이 감소했기 때문이다. 표 1에 나타난 바와 같이 추력은 열림각을 스프링으로 자동조절 했을 때가 가장 크며, 그 다음으로는 열림각 $\alpha=30^\circ$, $\alpha=15^\circ$ 순으로, 4%정도씩 감소하고 있다. 모형선의 주행속도 역시 추력과 같은 순서로 감소하고 있다.

3.2 진동특성 시험

모형선의 진동특성시험은 가속도 센스(Figure 2(a)의 Transducer)를 추진기구의 지지앵글에 주행방향과 수직방향으로 3개 부착하여, 열림각 α 를 실험변수로 잡아 정지 및 주행 상태의 모형선의 진동을 측정하였다. Figure 4에 나타난 바와 같이 센서에서 측정된 진동 신호는 Pulse3560(B&K사)에서 진처리, 필터링 및 분석 작업을 거쳐 랩톱(Lab top)에서 출력하였다. 사용한 가속도 센서(B&K사)의 감도는 1.003pC/ms^{-2} 이며, 진동 신호는 Pluse Recording 기능을 이용하여 30초 동안에 걸쳐 0~400Hz 대역의 신호를 저장하여 Pulse Labshop version 10.1의 소프트웨어로 처리하였다.

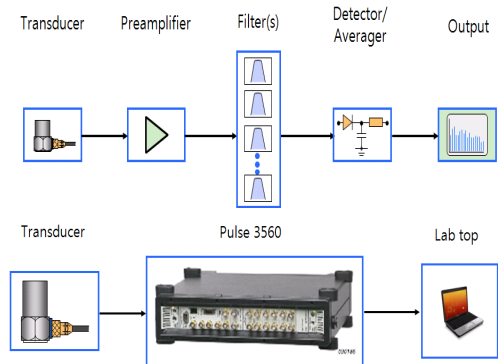


Figure 4: The measurement chain of vibration

Figure 5 및 Figure 6은 각각 열림각 $\alpha=15^\circ$ 인 경우 정지 및 주행하는 모형선의 진동특성을 나타낸다.

그림에서 (a)는 시간파형이고, (b)는 주파수 스펙트럼, (c)는 (b)에서 “part I”를 확대한 그림이다.

먼저 Figure 5(a) 및 6(a)의 시간파형을 살펴보면 모형선의 정지 및 주행시 모두 일정 주기 ($T=1.3\sim 1.4$)마다 진동이 크게 나타나는데 이것은 날개가 선체 벽면에서 반전할 때 생기는 진동으로, 실제 이때 날개운동의 행정주기를 초시계로 확인해보니 1.34초였다. Figure 5(c) 및 6(c)를 살펴보면 주 진동 주파수는 1.375Hz(2X)이며, 이것

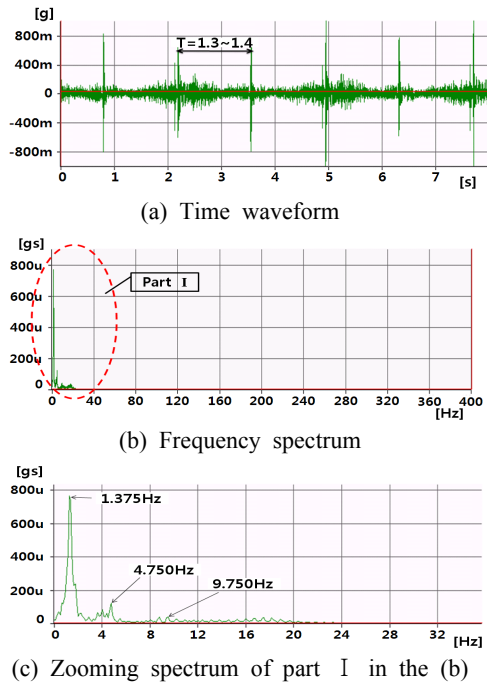


Figure 5: Vibration analysis of the stationary model ship($\alpha=15^\circ$)

은 앞서 설명한 날개운동 행정주파수의 2배수와 유사한 값을 가지므로 날개반전에 기인한 진동으로 평가되며, 이때 최대 진폭 값은 모형선의 정지 시에는 $754\mu\text{gs}$ (2X), 주행 시에는 $535\mu\text{gs}$ (2X)이므로, 정지 시가 주행 시 보다 다소 큰 값을 보인다.

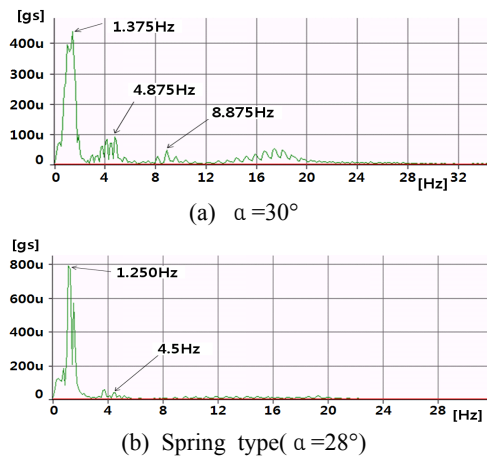


Figure 7: Zooming spectrum for the stationary model ship

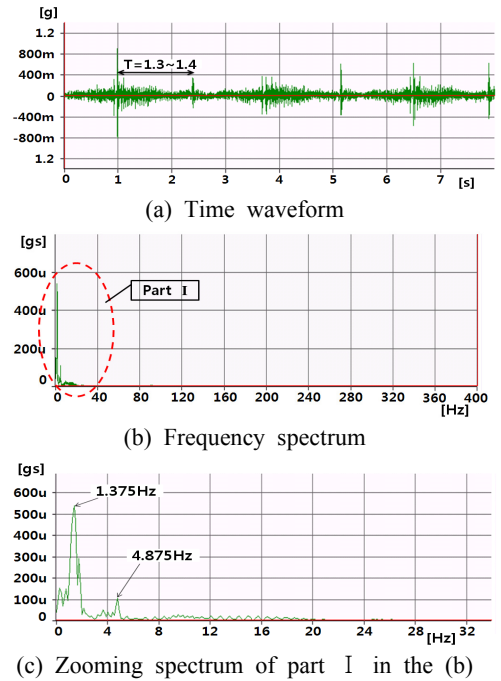


Figure 6: Vibration analysis of the sailing model ship($\alpha=15^\circ$)

또한 Figure 5(c) 및 6(c)에서 구동 모터, 폴리, 구동축의 회전에서 비롯된 주파수 성분인 4.875Hz(1G) 및 그 배수 성분인 9.750Hz(2G)에서 다소 큰 진폭이 나타나 있다.

Figure 7 및 Figure 8은 각각 정지 및 주행하

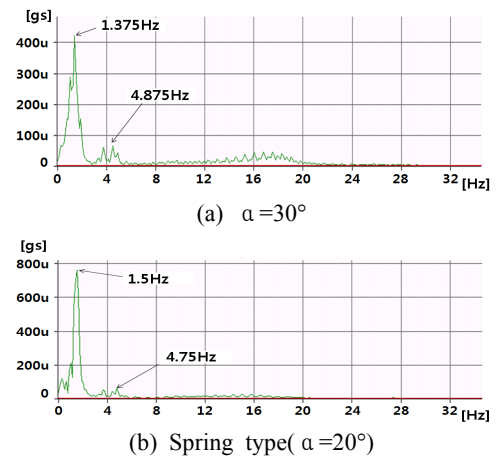


Figure 8: Zooming spectrum for the sailing model ship

는 모형선의 주파수 스펙트럼의 확대도를 나타낸다. 그림에서 (a)는 최대 열림각 $\alpha=30^\circ$ 의 경우이고, (b)는 열림각이 스프링으로 자동 조절되게 한 경우이다. Figure 7 및 Figure 8을 Figure 5(c) 및 Figure 6(c)와 연계해서 고찰해보면 열림각이 변화여도 주 진동 주파수는 변함이 없고, 그 정성적인 특성 역시 같은 경향을 나타내고 있다. 열림각이 같은 경우 정지 시와 주행 시를 비교해보면 주 진동의 경향은 비슷하나 최대 진폭 값은 정지 시가 주행 시보다 다소 크게 나타나 있다.

그리고 열림각 $\alpha=15^\circ$ 및 30° 의 경우 정지 시에는 구동 모터, 풀리, 구동축의 회전에서 비롯된 주파수배수 성분 8.875Hz(2G)에서 다소 큰 진폭이 감지되었으나, 주행 시에는 그 성분이 나타나지 않고 있다.

이는 정지 시가 주행 시보다 날개에 작용하는 항력이 크기 때문에 날개의 반전에 따른 진동 및 회전 부분의 비틀림 진동이 크게 나타난 것으로 추정된다.

Table 2에 정지 및 주행 시 열림각 변화에 따른 주 진동에서의 진폭 값 및 RMS 값을 나타낸다.

Table 2: Value of amplitude for main vibration component and RMS

α & U		Amp.	
		2X (1.375Hz) (μgs)	RMS (μgs)
$\alpha=15^\circ$	stationary	734	1080
	sailing	535	896
$\alpha=30^\circ$	stationary	437	848
	sailing	419	674
Spring	stationary ($\alpha=28^\circ$)	789	1180
	sailing ($\alpha=20^\circ$)	757	1140

진폭 값을 구하는 과정은 Figure 5 및 6에서 설명한 바와 같다. Table 2에 나타낸 바와 같이 열림각 α 가 같은 경우에는 주행 시가 정지 시보다 최대진

폭 및 RMS 값이 작게 나타나 있다. 그리고 정지 시 및 주행 시 모두 모형선의 최대진폭 및 RMS 값은 열림각 $\alpha=30^\circ$ 일 때가 가장 작으며, $\alpha=15^\circ$, 스프링형 순으로 크게 나타났다. 특히 정지 시가 주행 시보다 진동이 크게 나타난 이유는 앞서 Figure 7 및 Figure 8에서 언급한 바와 같이 정지 시가 주행 시보다 날개에 작용하는 항력이 크기 때문에 날개의 반전에 따른 진동이 크게 나타난 것으로 추정된다. 또한 Table 1과 Table 2를 함께 고찰해 보면 열림각이 자동 조절되는 스프링형의 경우 추력은 크지만 진동 역시 크기 때문에 실제 선박에 적용 시에는 추력은 다소 떨어지지만 상대적으로 진동특성이 우수한 열림각 $\alpha=30^\circ$ 가 적합한 것으로 평가된다.

4. 결 론

본 연구는 Weis-Fogh형 추진기구를 장착한 모형선을 제작하여, 정지 및 주행하는 모형선에 대해 열림각 변화에 따른 주행특성과 진동특성을 비교, 검토함과 동시에 탄성날개가 실선에서도 유효한지 조사한 것이다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 추력 및 선속은 열림각이 자동 조절되는 스프링형이 가장 컸으며, 열림각 $\alpha=30^\circ$, $\alpha=15^\circ$ 순으로, 약 4% 정도씩 작게 나타났다. 또한 모형선의 최대 진동진폭 및 RMS 값은 열림각 $\alpha=30^\circ$ 일 때가 가장 작게, 스프링형이 가장 크게 나타났고, 열림각이 같은 경우 정지 때보다 주행 시가 작게 나타났다. 이상을 종합해보면 열림각이 자동 조절되는 스프링형의 경우 추력은 크지만 진동 역시 크기 때문에 추력은 다소 적으나 진동특성이 좋은 열림각 $\alpha=30^\circ$ 가 가장 적합한 것으로 평가된다.

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., "Quick estimates of flight fitness in hovering animals,

including novel mechanism for lift production.” Journal of Experimental Biology, vol.59, pp. 169-230, 1973.

- [2] Lighthill, M. J., “On the Weis-Fogh mechanism of lift generation,” Journal of Fluid Mechanics, vol.60, Part1, pp. 1-17, 1973.
- [3] Tsutahara, M. and Kimura, T., “An application of the Weis-Fogh mechanism to ship propulsion,” Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering, vol.109, pp. 107-113, 1987.
- [4] 노기덕, 오세경, 박지태, 공태희 “Weis-Fogh형 추진기구를 장착한 모형선의 주행”, 한국마린엔지니어링학회지, 제29권, 제4호, pp. 363-368, 2005.
- [5] Ki-Deok Ro, Jung-Hui Cheon, Won-Cheol Kim, “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, 2009.

저 자 소 개



노기덕(盧基德)

1977년 부산수산대학 기관학과 졸업, 1989년 코오베대학대학원 졸업(공학박사), 현재 경상대학교 기계시스템공학과 교수



최병근(崔柄權)

1990년 부경대학교 기계공학과 졸업, 1999년 부경대학교대학원 졸업(공학박사), 현재 경상대학교 정밀기계공학과 부교수



이정환(李廷煥)

2007년 경상대학교 기계항공공학부 졸업, 2009년 경상대학교대학원 정밀기계공학과 졸업(공학석사), 현재 경상대학교 연구인턴



오세경(吳世甯)

1973년 부산수산대학 기관학과 졸업, 2000년 부경대학교대학원 졸업(공학박사), 현재 경상대학교 기계시스템공학과 교수