

수로 내에서 왕복 운동하는 에어포일 주위의 유동특성

노기덕[†] · 김광석* · 김종현*

(2008년 2월 14일 접수, 2008년 5월 22일 수정, 2008년 5월 26일 심사완료)

The Flow Characteristics Around Airfoil Moving Reciprocally in a Channel

Ki-Deok Ro, Kwang-Seok Kim and Jong-Hyeon Kim

Key Words: Fluid Machinery(유체기계), Propulsion Mechanism(추진기구), Flow Visualization(유동의 가시화), PIV(입자영상유속계), Unsteady Flow(비정상 유동)

Abstract

The Flow characteristics of a ship's propulsion mechanism of Weis-Fogh type, in which a airfoil(NACA0010) moves reciprocally in a channel, were investigated by the PIV. Velocity vectors and velocity profiles around the operating and stationary wings were observed at opening angles of $\alpha=15^\circ$ and 30° , velocity ratios of $V/U=0.5\sim 1.5$ and Reynolds number of $Re=0.52\times 10^4\sim 1.0\times 10^4$. As the results the fluid between wing and wall was inhaled in the opening stage and was jet in the closing stage. The wing in the translating stage accelerated the fluid in the channel. And the flow fields of this propulsion mechanism were unsteady and complex, but those were clarified by flow visualization using the PIV.

1. 서 론

소위 Weis-Fogh메커니즘^(1,2)은 영국의 생물 학자 Weis-Fogh가 *Encarsia formosa*로 불리는 작은 벌의 정지비행을 관찰함에 의해 발견한 독특하고, 효율이 좋은 양력 발생기구이다. 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 앞전(Leading edge)을 중심으로 닫힌다. 그리고 날개는 뒷전(Trailing edge)을 맞닿은 상태에서 열려, 어느 일정한 열림각(여기서 열림각이란 Fig. 1의 두 번째 그림에서 두 날개가 이루는 각의 1/2로 정의한다)을 유지하

면서 수평면으로 이동한다. 몸통의 배쪽에서 날개를 반전하여, 다시 수평면으로 이동한 후 등쪽에서 앞전을 중심으로 닫히는 동작을 반복한다.

Fig. 1의 아랫부분은 이 운동의 2차원 모델을 나타낸다. 일반적으로 비행기 날개와 같이 날개가 정지 상태에서부터 움직이기 시작할 경우, 날개 주위에 충분한 순환을 얻기 위해서는 어느 정도의 거리를 이동할 필요가 있다(Wagner effect). 그러나 이 메커니즘에 있어서는 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 Weis-Fogh 메커니즘의 2차원 모델을 수로 내에 설치한 추진모델을 제안, 역학적 특성실험과 모형선 주형시험을 행하여 이 추진기구가 새로운 선박 추진기로서 매우 유효하게 동작함을 나타냈다. Ro 등^(5,6)은 와법을 이용, 본 추진기구가 동작할 때 날개주위에 생성되는 비정상 유동장을 시뮬레이션했고, 날개주위의 압력

[†] 책임저자, 회원, 경상대학교 기계항공공학부 해양 연구산업연구소

E-mail : rokid@gaechuk.gsnu.ac.kr

TEL : (055)640-3123 FAX : (055)640-3128

* 경상대학교 대학원 기계시스템공학과

이 매끄럽게 유입되도록 수로입구에는 안내날개를 부착했다. 또한 수로의 양 옆판은 가시화할 때 빛이 잘 투과하도록 투명 아크릴판으로 제작했으며, 밀판과 같이 빛의 투과가 필요 없는 부분은 흑색의 도료를 칠했고, 구동장치의 일부는 이 밀판 아래에 설치했다. 한편 날개의 구동방법에 있어서는 그림에 나타낸 바와 같이, 먼저 모터의 동력은 벨트, 풀리, 웜기어 및 스프로킷을 경유해서 체인을 돌린다. 그리고 날개축이 부착되어 있는 슬라이드의 왕복운동은 이 체인의 상부에 고정되어 있는 핀에 의해 행하여진다. 또한 날개는 날개축에 끼워져 있어 슬라이드가 왕복운동하면 날개의 날개축 둘레로 모멘트가 작용하여 날개가 열리게 되지만, 일정한 열림각을 유지하도록 슬라이드 상부에 각도조절판을 부착했다. 또한 날개의 이동속도 V 는 직류모터의 전압을 제어해서 행하였는데, 이때 모터의 rpm은 근접센서와 펄스미터로 측정했다.

2.3 PIV에 의한 가시화실험

PIV에 의한 가시화 실험장치의 개략도를 Fig. 4에 나타낸다. 실험은 위의 Fig. 3에 나타낸 날개 구동장치를 일정류가 흐르는 회류수조의 수로 내에 Fig. 4와 같이 장착하여, 유동장을 가시화 하였다. 구체적으로 날개 구동장치를 수로 내에 설치한 후 회류수조 밖에서 일정류와 수직, 수평방향으로 연속광 레이저에 의한 시트(sheet)상의 조명광을 비추고 날개의 상부에서 수직하방으로 고속도 카메라를 이용하여 유동장을 연속적으로 촬영하였다. 이때 추적 입자로는 평균직경이 $100\mu\text{m}$ 이고, 비중이 1.02인 구형의 PVC(Poly Vinyl Chloride)를 사용했다. 고속카메라는 PHOTRON사의 FASTCAM 1280 PCI 모델을, 레이저는 JENOPTIK사의 Jenlas D2.8 모델을 사용했으며,

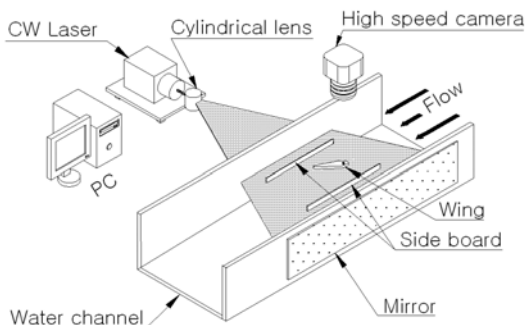


Fig. 4 Schematic structure of experimental device

본 실험에 사용한 PIV시스템의 주요규격은 Table 1과 같다. 실험은 열림각 $\alpha=15^\circ$ 및 30° 의 날개에 대하여 레이놀즈 수 $Re=0.52 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^4$, 일정류에 대한 날개의 이동 속도비 $V/U=0.5 \sim 1.5$ 범위 내에서 행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 레이놀즈 수 $Re=7,000$ 에서 1행정 동안 연속적인 날개주위의 흐름패턴을 나타낸다.

Table 1 Main specification of PIV system

Item	Specification
Image board	Fast Cam-X panel link board drive
Light source	8W continuous wave laser
Sheet light	Cylindrical lens: $\varnothing 3.8 \times 11.4\text{mm}$
Resolution	1280x1024pixel
Software	CACTUS 3.2
Error vector(%)	Average: about 0.1%

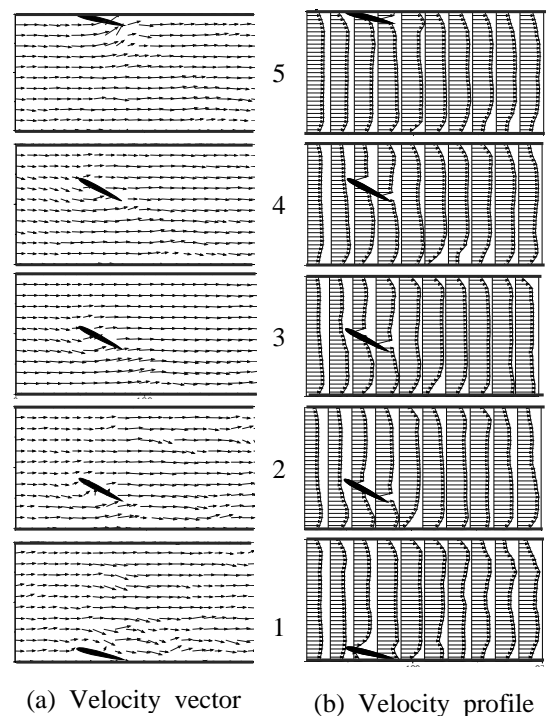


Fig. 5 Flow pattern for one stroke of the wing ($H=2.5C$, $r_p=0.75C$, $V/U=1.0$, $\alpha=30^\circ$)

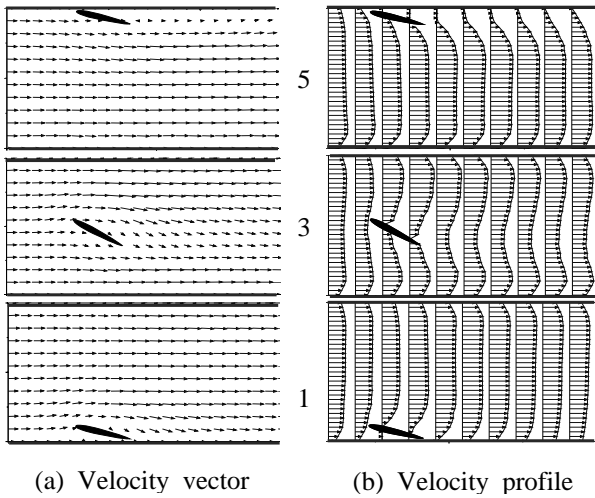


Fig. 6 Flow pattern around the stationary wing ($Re=0.7 \times 10^4$, $\alpha=30^\circ$)

그림에서 C는 날개현장, H는 수로 폭, r_p 는 날개 뒷전에서 날개 축까지의 거리를 나타낸다. 또한 그림 중의 (a)는 속도벡터이며, (b)는 (a)와 같은 조건에서 속도분포이다. 그리고 그림에서 1은 열리는 과정, 2~4는 병진운동의 과정, 5는 닫히는 과정이다.

먼저 (a)속도벡터를 보면 모든 과정에서 날개근방의 속도벡터는 날개가 움직이는 방향으로 향하고 있으며 이것은 시뮬레이션 결과와 잘 일치하고 있다. (b)속도분포를 보면 날개 상류측과 하류측의 흐름패턴은 모든 과정에서 거의 유사한 형태를 보이고 있으나, 하류측의 속도분포 길이가 같은 높이의 상류측 그것보다 길게 나타나 있다. 이것은 날개가 동작함에 따라 수로내의 유체를 가속시키고 있음을 알 수 있으며, 이는 이 추진 기구가 펌프로써도 효과하게 동작함을 나타내고 있다. 또한 날개와 벽 사이에 열리는 과정에서는 유체가 흡입되고 있고, 닫히는 과정에서는 유체가 분출되고 있음을 보이고 있다. 이는 이 부분을 클로즈 업(close up) 촬영한 Fig. 7 및 Fig. 10에서 상세히 고찰하고자 한다.

Fig. 6은 Fig. 5와 같은 조건에서 정지한 날개 주위의 흐름패턴을 나타낸다.

Fig. 5의 1, 3, 5 그림과 Fig. 6의 1, 3, 5의 그림을 비교해보면 앞서 설명한 바와 같이 날개가 동작할 때는 수로 내의 유체를 가속하고 있으나,

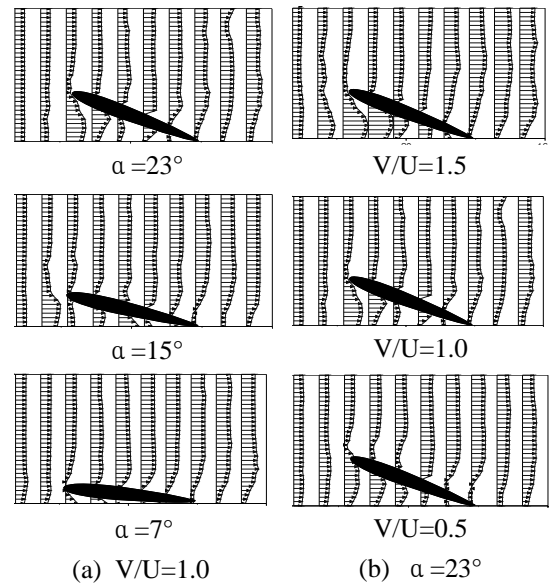


Fig. 7 Velocity profile around wing with α and V/U at the opening stage

정지해 있을 때는 어느 위치에서든지 날개가 단순히 저항체로서 동작하고 있는데, 이는 특히 날개 후류 측 속도분포 Fig. 6(b)에서 명확히 알 수 있다.

Fig. 7은 열리는 과정에서 클로즈 업(close up) 촬영한 열림각 α 및 속도비 V/U 변화에 따른 속도분포를 나타낸다. 먼저 그림에서 (a)는 속도비 $V/U=1.0$ 로 일정히 한 상태에서 열림각 $\alpha=7^\circ, 15^\circ, 23^\circ$ 에서의 속도 분포이다. 그림에서 알 수 있듯이 열리는 과정에서는 날개와 벽 사이에 유체가 흡입되며, 열림각이 증가할수록 유체의 유입속도가 증가하고 있다. 그림에서 (b)는 속도비 $V/U=0.5, 1.0, 1.5$ 인 상태에서 열림각 $\alpha=23^\circ$ 에서의 속도분포이다. 그림에서 알 수 있듯이 열리는 과정에서 속도비가 클수록 날개와 벽 사이 유체의 유입속도는 증가하고 있다.

Fig. 8은 병진운동 과정에서 날개가 수로 중앙에 왔을 때 클로즈 업(close up) 촬영한 열림각 $\alpha=15^\circ$ 및 $\alpha=30^\circ$ 일 때의 흐름패턴을 나타낸다. 먼저 속도벡터를 비교해보면 날개 근방의 속도벡터는 열림각 $\alpha=15^\circ$ 인 경우가 $\alpha=30^\circ$ 인 경우보다 더 많이 날개가 움직이는 방향으로 향하고 있고, 그 크기도 더 크다. 또한 속도분포를 보면 $\alpha=15^\circ$ 인 경우가 $\alpha=30^\circ$ 인 경우보다 일정류에 대하여 압력면의 유체가 더 많이 가속되고 있음을 보여준다. 또한 속도분포에서 일정류에 대하여 압

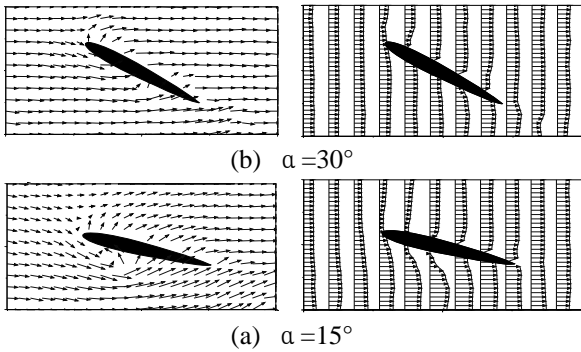


Fig. 8 Velocity vector and velocity profile around wing with α at the translating stage ($V/U=1.0$)

력면측 날개주위의 경계층을 살펴보면 $\alpha=15^\circ$ 인 경우는 $\alpha=30^\circ$ 인 경우와 달리 앞전부근에서 흐름이 박리하여 중앙부근에 재부착하고 있음을 나타내고 있다.

Fig. 9는 Fig. 8과 같은 상태에서 열림각 $\alpha=30^\circ$ 인 경우 속도비 V/U 변화에 따른 흐름패턴을 나타낸다. 먼저 속도벡터를 보면 병진운동의 과정에서 날개주위의 유체는 날개의 이동방향으로 움직이며, 유체의 이동속도는 속도비가 클수록 더 빨리 움직이고 있음을 나타낸다. 또한 속도분포를 보면 병진운동의 과정에서 날개가 동작할 때 일정류에 대하여 압력면의 유체가 가속되고 있으며, 속도비가 클수록 더 빨리 가속시키고 있음을 나타낸다. 이전의 실험결과^(3,4)에 의하면 속도비 V/U 가 클수록 추력은 증가하나 항력이 더 크게 증가하기 때문에 열림각 $\alpha=15^\circ$ 및 30° 모두 최고추진효율은 속도비 $V/U=1.0$ 이하에서 나타나고 있다.

Fig. 10은 닫히는 과정에서 클로즈 업(close up) 촬영한 닫힘각 α 및 속도비 V/U 변화에 따른 속도분포를 나타낸다.

먼저 그림에서 (a)는 속도비 $V/U=1.0$ 로 일정한 상태에서 닫힘각 $\alpha=23^\circ, 15^\circ, 7^\circ$ 에서의 속도분포를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 닫히는 과정에서는 날개와 벽 사이의 유체는 분출되며, 닫힘각 이 작을수록 유체의 분출속도가 증가하고 있다. 그림에서 (b)는 속도비 $V/U=0.5, 1.0, 1.5$ 인 경우, 닫힘각 $\alpha=15^\circ$ 에서의 속도분포이다. 그림에서 알 수 있듯이 닫히는 과정에서는 속도비가 클수록 날개와 벽 사이 유체의 분출속도는 증가하고 있다. 그 이유는 속도비가 클수록 날개가

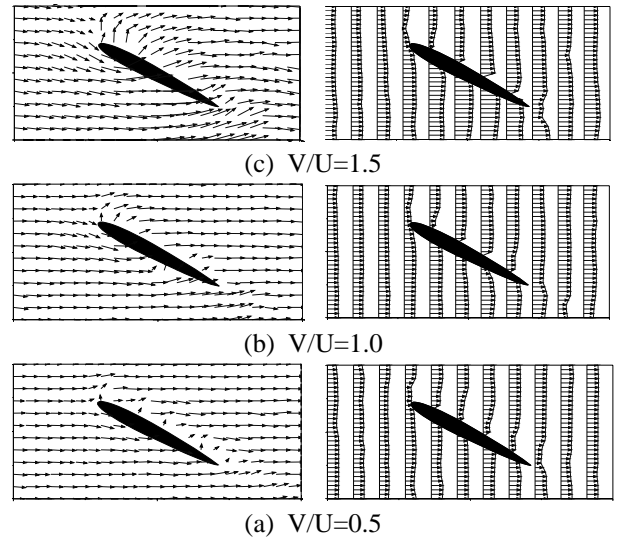


Fig. 9 Velocity vector and velocity profile around wing with V/U at the translating stage ($\alpha=30^\circ$)

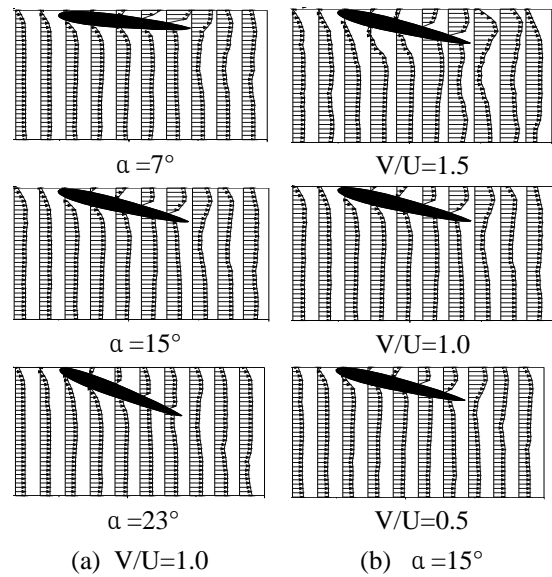


Fig. 10 Velocity profile around wing with α and V/U at the closing stage

빨리 닫히기 때문이며, 특히 $V/U=1.5$ 인 경우 날개의 빠른 속도 때문에 압력면의 앞전부근에서 흐름이 박리하고 있음을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 Weis-Fogh형 선박 추진기구의 비정상 유동장을 PIV를 이용해 가시화한 것이다. 실험은 레이놀즈 수 $Re=0.52 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^4$, 일정류에

대한 날개의 이동 속도비 $V/U=0.5\sim 1.5$, 열림각 $\alpha=15^\circ$ 및 30° 의 범위 내에서 행하였다. 유동장은 각 실험 파라미터에 대해 열리는 과정, 병진운동의 과정, 닫히는 과정으로 나누어 고찰되었으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 날개가 동작할 때 수로 내의 유체를 가속시키지만, 날개가 정지해 있을 때는 저항물체로서 동작한다.

(2) 열리는 과정에서는 날개와 벽 사이에 유체가 흡입되며, 그 유입속도는 열림각이 클수록, 속도비가 클수록 증가했다.

(3) 병진운동의 과정에서 날개주위의 유체는 날개의 이동방향으로 움직이며, 그 이동속도는 열림각이 작을수록, 속도비가 클수록 증가했다.

(4) 병진운동의 과정에서 일정류에 대하여 날개 압력면의 유체는 가속되며, 그 크기는 열림각이 작을수록, 속도비가 클수록 증가했다.

(5) 닫히는 과정에서는 날개와 벽 사이의 유체는 분출되며, 그 분출속도는 닫힘각이 작을수록, 속도비가 클수록 증가했다.

후 기

이 논문은 2008년도 지방대학혁신역량강화사업 및 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구(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, Part 1, pp. 1~17.
- (3) 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.
- (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) 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.
- (6) Ro, K. D., Zhu, B. S. and Kang, H. K. 2006, "Numerical Analysis of Unsteady Viscous Flow Through a Weis-Fogh Type Ship Propulsion Mechanism Using the Advanced Vortex Method," *Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering*, Vol. 128, pp. 481~487.