

PIV를 이용한 Weis-Fogh형 수차의 유동장 가시화

노 기 덕**

* 경상대학교 기계시스템공학과

Visualization of Flow Field of Weis-Fogh Type Water Turbine Using the PIV

Ki Deok Ro**

* Dept. of Mechanical System Engineering, Gyeongsang Nat'l Univ.

(Received August 14, 2016 ; Revised November 8, 2016 ; Accepted December 6, 2016)

Key Words: Hydraulic Machine(유체기계), Water Turbine(수차), Unsteady Flow(비정상 유동), PIV(입자영상 속도계), Visualization(가시화)

초록: 본 연구는 Weis-Fogh형 수차모델의 비정상 유동장을 PIV를 이용해 가시화한 것이다. 실험은 비교적 효율이 높은 날개의 열림각 $\alpha = 40^\circ$ 및 날개의 이동 속도에 대한 일정류의 속도비 $U/V = 1.5 \sim 2.5$ 범위 내에서 진행했다. 유동장은 각 실험 파라미터에 대해 열리는 과정, 병진운동의 과정 및 닫히는 과정으로 나누어 고찰되었으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 열리는 과정에서는 날개와 벽 사이에 유체가 흡입되며, 그 유입속도는 열림각이 클수록, 속도비가 클수록 증가했다. 병진운동의 과정에서 날개 압력면의 유체는 날개의 이동방향으로 움직였으며, 배면에서의 경계층의 두께는 속도비 2.0일 때 가장 작았다. 닫히는 과정에서는 날개와 벽 사이에서 유체가 분출되며, 그 분출속도는 열림각이 작을수록 증가했지만, 속도비와는 관계가 없었다.

Abstract: In this study, the visualization of the unsteady flow field of a Weis-Fogh-type water turbine was investigated using particle-image velocimetry. The visualization experiments were performed in a parameter range that provided relatively high-efficiency wing conditions, that is, at a wing opening angle $\alpha = 40^\circ$ and at a velocity ratio of the uniform flow to the moving wing $U/V = 1.5 \sim 2.5$. The flow fields at the opening, translational, and closing stages were investigated for each experimental parameter. In the opening stage, the fluid was drawn in between the wing and wall at a velocity that increased with an increase in the opening angle and velocity ratio. In the translational stage, the fluid on the pressure face of the wing moved in the direction of the wing motion, and the boundary layer at the back face of the wing was the thinnest and had a velocity ratio of 2.0. In the closing stage, the fluid between the wing and wall was jetted at a velocity that increased as the opening angle decreased; however, the velocity was independent of the velocity ratio.

1. 서 론

소위 Weis-Fogh메커니즘^(1,2)은 영국의 생물학자 Weis-Fogh가 *Encarsia formosa*로 불리는 체장 1mm 정도의 작은 벌의 정지비행을 관찰함에 의해 발견한 독특하고, 효율이 좋은 양력발생기구이다. 이 벌은 몸통을 수직으로 유지한 채 날개를 수평면으로 회전운동 시킴에 의해 정지 비행

을 행하고 있다. 실제 *Encarsia formosa*의 날개의 움직임은 400Hz 정도로, 날개현장과 앞전의 평균 이동속도로 계산한 레이놀즈 수는 30정도이나 양력계수는 3~4정도⁽¹⁾이고, 또한 날개주위의 섬모를 날개면적에 포함시킨 값으로도 1.6 이상⁽²⁾이며, 이 레이놀즈 수에서의 정상인 날개에 비해서 양력계수가 매우 커서, 효율 좋게 양력을 발생시키고 있음을 알 수 있다. 이러한 이유로 이 메커니즘은 많은 유체역학자들의 관심을 모으고 있으며,⁽³⁻⁹⁾ 최근 이 메커니즘의 공학적 응용도 활발히

† Corresponding Author, rokid@gnu.ac.kr

시도되고 있다.⁽¹⁰⁻²⁰⁾

이 메커니즘의 공학적 응용의 사례를 살펴보면, Furber-Ffowcs Williams⁽¹⁰⁾는 축류 공기압축기에 이 메커니즘의 원리를 적용시켜 압축기의 효율을 향상시켰다고 보고했다. Tsutahara 등⁽¹¹⁾은 이 메커니즘의 2차원 모델을 선박추진기에 적용시켜 추진기로서 매우 유용함을 보였다. 또한 Tsutahara 등은 이 메커니즘을 응용한 펌프⁽¹²⁾ 및 송풍기⁽¹³⁾를 제작하여 특성 실험을 통해 이 메커니즘이 펌프 혹은 송풍기로의 이용 가능성을 나타냈다. 최근 Ro 등은 다양한 Weis-Fogh형 추진 모델에 대해 유동장의 수치계산⁽¹⁴⁾ 및 모형선의 주행시험⁽¹⁵⁾과 스프링을 이용한 성능향상 연구⁽¹⁶⁾을 통하여 본 추진기구의 실용화 가능성을 구체화 했다. 또한 Ro는 이 메커니즘을 응용한 왕복식 수차 모델을 제안하여 수치계산을 통해 이 메커니즘이 수차로서의 유효함을 나타냈고,⁽¹⁷⁾ 다양한 설계변수에 대해 날개에 작용하는 힘의 계수 및 효율 등을 계산⁽¹⁸⁾ 및 실험⁽¹⁹⁾을 통하여 조사한 결과, 열림각 $\alpha = 40^\circ$ 및 속도비 $U/V = 2.0$ 에서 최고 40%의 효율을 얻었다.

한편 본 수차의 열리는 과정 및 닫히는 과정에서는 아주 짧은 시간이지만, 음의 방향의 힘이 발생했고, 속도비에 따라 평균효율도 달랐다.^(18,19) 그러므로 본 수차의 실용화를 위해서는 유동장의 가시화가 필수적이다. 따라서 본 연구는 최고 효율점 부근의 열림각 및 속도비에 초점을 맞추어 열리는 과정, 병진운동의 과정 및 닫히는 과정에서 본 수차의 비정상 유동장을 PIV를 이용한 가시화 실험으로 명확하게 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 Weis-Fogh형 수차의 모델

Weis-Fogh형 수차의 모델을 Fig. 1에 나타낸다. 본 모델은 이전 연구^(17,19)의 수차모델과 동일하나 본 연구의 이해를 돕기 위해 간단히 설명한다. 먼저 날개의 움직임 살펴보면 날개는 날개 축에 상당하는 p점이 일정류 U와 수직방향으로 속도 V로 왕복 운동함에 따라, 먼저 아래벽으로부터 회전해서 열리고(열리는 과정), 열림각 α 를 유지하면서 병진운동하여(병진운동의 과정), 위벽에서 회전해서 닫힌다(닫히는 과정). 다시 위벽에서 회전해서 열리고 병진운동하여, 아래벽에서 회전해서 닫히는 동작을 반복한다. 즉 열리는 과

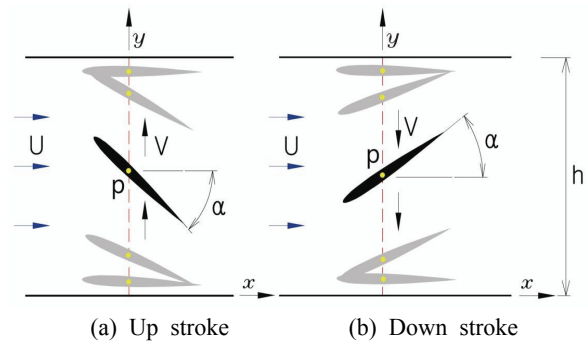
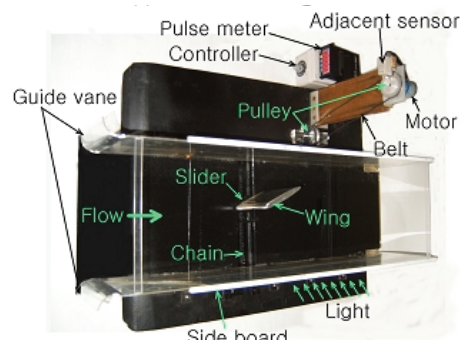
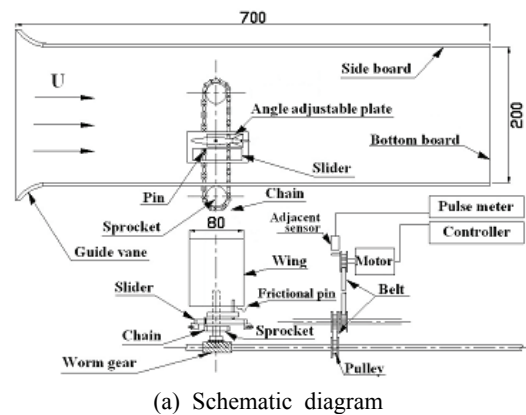


Fig. 1 Model of Weis-Fogh type water turbine



(a) Schematic diagram
(b) Photograph
Fig. 2 Driving system of wing (unit: mm)

정에 열림각 α 만을 설정해 주면 일정류 U에 의해 날개에는 양력이 발생하여, p점이 왕복운동하게 된다.

2.2 날개의 구동장치

날개구동장치의 개략도 및 사진을 Fig. 2에 나타낸다.

장치는 앞서 설명한 수차의 모델과 같은 날개동작을 함과 동시에 가시화실험이 쉽도록 다음과 같이 제작했다. 날개는 그 현장이 80mm, 스패인이 100mm이며, 두께가 10mm인 투명한 아크릴판을 가공하여 NACA0010의 형상으로 만들었고, 날

개 뒷전에서부터 현장의 1/2인 곳에 구멍을 뚫어 축을 끼울 수 있도록 했다. 수로는 그 폭이 200 mm, 길이는 700mm, 높이가 250mm이며, 흐름이 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, 날개구동장치의 일부는 이 밀판 아래에 설치했다. 한편 날개의 구동방법은 Fig. 2에 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 날개 축에 끼워져 있어 슬라이드가 왕복운동하면 날개는 날개 축 둘레로 모멘트가 작용하여 날개가 열리게 되지만, 일정한 열림각을 유지하도록 슬라이드 상부에 각도조절판을 부착했다. 그러나 속도비가 작을 때는 날개 축 둘레의 회전 모멘트가 작아 날개가 충분히 열리지 않기 때문에 Fig. 2(a)에 나타낸 바와 같이 날개 뒷전 아래 부분에 V형 마찰핀(Frictional pin)을 부착하여 이 핀이 수로 밀판에 닿아 날개가 열리게 되며, 닫히는 과정에서는 날개의 앞전이 수로 측벽에 닿아 날개가 강제적으로 닫힌다. 한편 날개의 이동속도 V 는 직류모터의 전압을 제어해서 행하였는데, 이때 모터의 rpm은 근접센서와 펄스미터로 계측했다.

2.3 PIV에 의한 가시화실험

PIV에 의한 가시화 실험장치의 개략도를 Fig. 3에 나타낸다. 실험은 위의 Fig. 2에 나타낸 날개 구동장치를 일정류가 흐르는 회류수조의 수로 내에 Fig. 3과 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 시트(sheet)상의 조명광이 날개를 통과하면 날개 전, 후면의 유동장 밝기가 다소 차이가 나는 데 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 광원의 반대편에 거울을 설치하여 빛을 반사시키는 방법으로 이를 보정하였다. 한편 추적 입자로는 평균직경이 $100\mu\text{m}$ 이고, 비중이 1.02인 구형의 PVC(Poly Vinyl Chloride)를 사용했으며, 본 실험에 사용한

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: $\text{Ø}3.8 \times 11.4\text{mm}$
Resolution	1280×1024pixel
Software	CACTUS 3.2
Error vector(%)	Average: about 0.1%

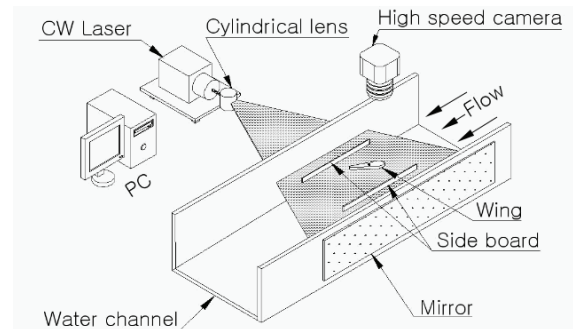


Fig. 3 Schematic structure of experimental device

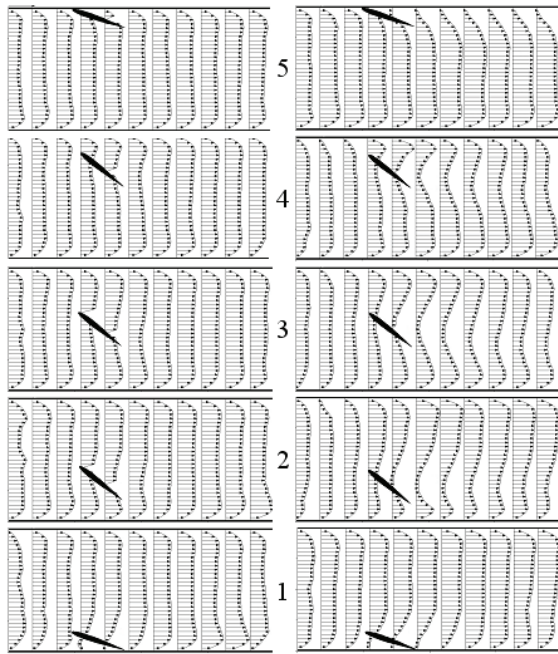
PIV시스템의 주요규격은 Table 1과 같다.

실험은 최대 효율점 부근에서의 열림각 및 속도비에 초점을 맞추어 진행했다. 즉 날개의 최대 열림각 $\alpha=40^\circ$ 로 고정시키고, 속도비 $U/V=1.5\sim 2.5$ 로 변화시켜가며 행하였다. 이 때 레이놀즈 수의 범위는 $Re=0.8 \times 10^4 \sim 1.3 \times 10^4$ 정도이다. 한 개의 실험변수에 대한 연속촬영시간은 16.37초이며, 1/125 초 간격으로 2048프레임의 화상을 얻어, 1/62.5초 간격으로 연속한 2프레임의 화상으로부터 각각 1024장의 속도분포 및 속도벡터장을 추적했다. 그리고 본 PIV 실험 결과를 해석할 때 상관영역크기(interrogation window size)는 41×41 픽셀(pixel)이며, 중복률(overlapping ratio)은 약 43%였다.

3. 결과 및 고찰

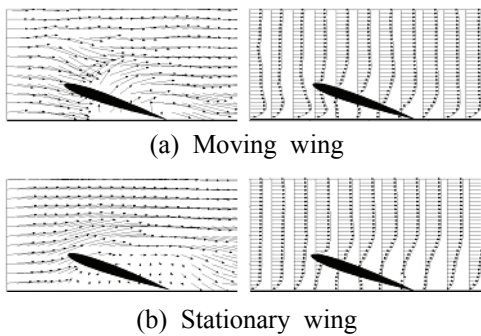
Fig. 4는 레이놀즈 수 $Re=10,000$ 에서 1행정 동안 연속적인 날개주위의 속도분포를 나타낸다.

Fig. 4에서 C는 날개현장, r_p 는 날개 뒷전에서 날개 축에 상당하는 p점까지의 거리이다. 또한 그림에서 1은 열리는 과정, 2~4는 병진운동의 과정, 5는 닫히는 과정이다. 먼저 Fig. 4(a)의 동작 중인 날개주위의 속도분포를 살펴보면 날개 주위의 아주 적은 부분을 제외하고는 거의 일정한 형태를 나타내며, 양 수로 벽에서의 속도 경계층도



(a) Moving wing(U/V=2) (b) Stationary wing

Fig. 4 Velocity profiles around the moving and stationary wings for one stroke ($h=2.5C$, $r_p=0.5C$, $\alpha=40^\circ$)



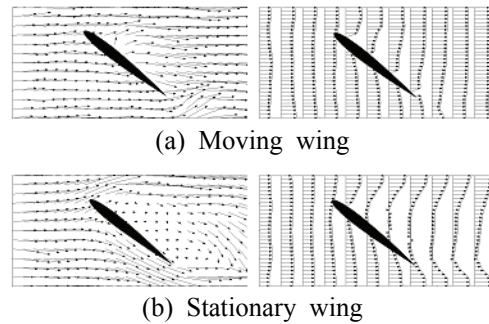
(a) Moving wing

(b) Stationary wing

Fig. 5 Velocity vectors and velocity profile around the moving and stationary wings at the opening stage($\alpha=20^\circ$)

대칭적으로 잘 나타나 있다. 이에 반해 Fig. 4(b)의 정지한 날개주위의 속도분포는 날개의 상류측은 비교적 일정한 형태를 나타내고 있으나, 날개의 하류측은 속도분포가 크게 굴곡 되어있고, 그 굴곡의 형태도 날개의 위치에 따라 서로 다른 모양을 나타내고 있다. 이러한 속도분포의 굴곡은 정지한 날개의 앞, 뒷전에서 흐름의 박리가 일어나기 때문으로 판단된다.

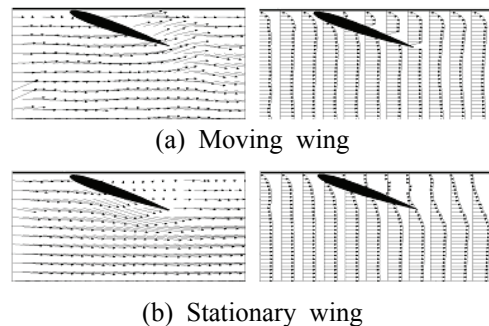
Fig. 5는 열리는 과정에서 동작 및 정지 상태에 있는 날개주위의 속도벡터 및 속도분포를 나타낸다. 여기서 각각의 조건은 Fig. 4와 같다. 먼저 동



(a) Moving wing

(b) Stationary wing

Fig. 6 Velocity vectors and velocity profile around the moving and stationary wings at the translating stage($\alpha=40^\circ$)



(a) Moving wing

(b) Stationary wing

Fig. 7 Velocity vectors and velocity profile around the moving and stationary wings at the closing stage($\alpha=20^\circ$)

작 중인 날개 주위의 속도벡터를 살펴보면 날개 배면의 화살표는 날개의 회전방향으로 향해 있으며, 속도분포에서 보다 더 명확하게 알 수 있듯이 앞전 부근의 흐름이 날개와 벽면 사이에서 흡입되고 있다. 다음으로 정지 중인 날개 배면의 흐름패턴을 살펴보면 날개 앞전 근방에서 흐름의 박리가 일어나 날개 배면 전체가 이 박리영역 내에 놓여 있으며, 날개와 벽면 사이의 흐름은 정지되어 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 병진운동 과정에서 동작 및 정지 상태에 있는 날개주위의 속도벡터 및 속도분포를 나타낸다. 여기서 각각의 조건 역시 Fig. 4와 같다.

먼저 동작 중인 날개 주위의 속도벡터를 살펴보면 날개의 압력면 및 배면의 화살표는 거의 일정한 방향으로 향하고 있다. 다음으로 정지 중인 날개 주위의 속도벡터를 살펴보면 날개 앞, 뒷전으로부터 흐름의 박리가 일어나, 날개 배면 전체가 박리영역 내에 놓여있다. 이러한 박리영역의 크기는 속도분포에서도 잘 나타나 있다.

Fig. 7은 닫히는 과정에서 동작 및 정지 상태에 있는 날개주위의 속도벡터 및 속도분포를 나타낸

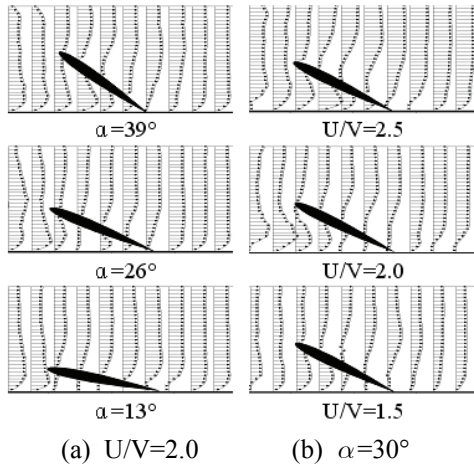


Fig. 8 Velocity profiles around the wings with opening angle and velocity ratio at the opening stage

다. 여기서 각각의 조건 역시 Fig. 4와 같다.

먼저 동작 중인 날개 주위의 흐름패턴을 살펴보면 날개의 압력면의 유체는 거의 날개 면에 붙어 날개와 같이 움직이고 있고, 날개의 배면과 수로벽사에서는 유체가 분출되고 있다. 정지 중인 날개 주위의 흐름패턴을 살펴보면 날개 압력면의 유체는 날개 면을 따라 흐르고 있지만, 날개의 배면과 수로벽사에서의 유체는 정체되어 있다.

Fig. 8은 열리는 과정에서 열림각 및 속도비에 따른 날개 주위의 속도분포를 나타낸다.

Fig. 8(a)는 속도비 $U/V=2.0$ 으로 일정히 한 상태에서 연속적으로 날개를 열 경우의 속도분포이며, Fig. 8(b)는 각각의 속도비에서 날개를 열 경우 열림각 $\alpha=30^\circ$ 일 때의 속도분포이다. 날개와 벽면사이의 속도분포를 주목해보면 열리는 과정에서 날개와 벽사이에서 유체가 흡입되며 그 흡입속도는 같은 속도비에서는 열림각이 커질수록, 같은 열림각에서는 속도비가 클수록 증가하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 9는 병진운동 과정에서 속도비에 따른 날개주위의 속도벡터 및 속도분포를 나타낸다.

먼저 날개 주위의 속도벡터를 살펴보면 세 경우 모두 압력면의 유체는 거의 날개 면에 붙어 날개와 같이 움직이고 있고, 날개배면의 유체는 날개표면에 거의 수직방향 움직인 후, 일정류의 영향을 받아 하류로 흘러가고 있다. 이 때 날개 배면의 속도분포를 살펴보면 속도비 $U/V=2.0$ 의 경우가 $U/V=1.5, 2.5$ 경우보다 경계층 두께가 작아, 효율 좋게 날개가 동작함을 알 수 있다. 실제

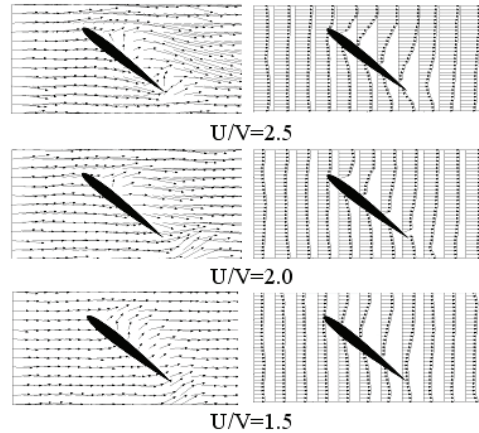


Fig. 9 Velocity vectors and velocity profile around the wings with velocity ratio at the translating stage($\alpha=40^\circ$)

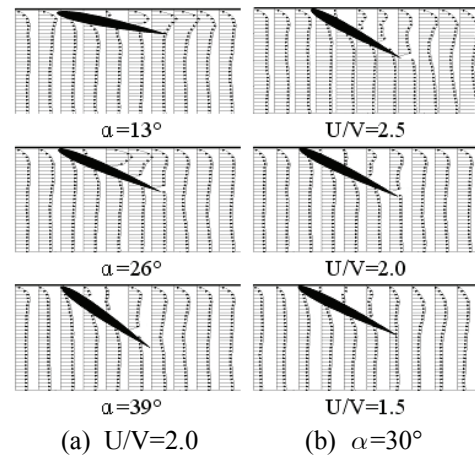


Fig. 10 Velocity profiles around the wings with opening angle and velocity ratio at the closing stage

로 본 수차의 역학적 특성실험⁽¹⁹⁾에서 상대적 열림각 $\alpha' \approx 13.5^\circ$ 부근에서 최고 효율 및 최고 출력을 나타냈다. 즉 속도비에 따라 날개에 작용하는 일정류의 입사각 $\beta (\beta = \tan^{-1} V/U)$ 가 변하는데, Fig. 9에서 열림각 $\alpha = 40^\circ$, 속도비 $U/V = 2.0$ 의 경우 $\beta \approx 26.5^\circ$ 이므로 상대적 열림각 $\alpha' (\alpha' = \alpha - \beta)$ 는 $\alpha' \approx 13.5^\circ$ 가 된다.

Fig. 10은 닫히는 과정에서 열림각 및 속도비에 따른 날개 주위의 속도분포를 나타낸다. Fig. 10(a)는 속도비 $U/V=2.0$ 으로 일정히 한 상태에서 연속적으로 날개의 닫을 경우의 속도분포이며, Fig. 10(b)는 각각의 속도비에서 날개를 닫을 경우 열림각 $\alpha=30^\circ$ 일 때의 속도분포이다. 날개와 벽면사이의 속도분포를 주목해보면 닫히는 과정에서는 날개와 벽사이에서 유체가 분출되며 그

분출속도는 같은 속도비에서는 열림각이 작을수록 증가하지만, 같은 열림각에서는 속도비가 증가해도 분출속도는 거의 변화가 없고, 그 크기도 매우 작다.

4. 결 론

본 연구는 Weis-Fogh형 수차모델의 비정상 유동장을 PIV를 이용해 가시화한 것이다. 실험은 비교적 효율이 높은 날개의 열림각 $\alpha=40^\circ$ 및 날개의 이동 속도에 대한 일정류의 속도비 $U/V=1.5 \sim 2.5$ 범위 내에서 진행했다. 유동장은 각 실험 파라미터에 대해 열리는 과정, 병진운동의 과정, 닫히는 과정으로 나누어 고찰되었으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 날개가 동작할 때 수로 내의 속도분포는 거의 일정하지만, 날개가 정지하고 있을 때는 날개 후류 측 속도분포는 크게 변화였다.

(2) 열리는 과정에서는 날개와 벽 사이에 유체가 흡입되며, 그 유입속도는 열림각이 클수록, 속도비가 클수록 증가했고, 날개가 정지하고 있을 때는 유체의 유입은 없었다.

(3) 병진운동의 과정에서 날개 압력면의 유체는 날개의 이동방향으로 움직였으며, 배면에서의 경계층의 두께는 속도비 2.0일 때 가장 작았고, 날개가 정지하고 있을 때는 날개의 앞, 뒷전에서 박리가 일어났다.

(4) 닫히는 과정에서는 날개와 벽 사이에서 유체가 분출되며, 그 분출속도는 열림각이 작을수록 증가했지만, 속도비와는 관계가 없었고, 날개가 정지해 있을 때 분출은 없었다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입(No. 2015015591).

참고문헌 (References)

(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. Part 1. 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," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 119 pp. 96~102.
 (7) Zhang, S. S., Wu, X. H. and Wang, X. F., 1999, "Research and Progress of Weis-Fogh Mechanism Hydrodynamics," *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 3. pp. 55~60.
 (8) Maxworthy, T., 2007, "The Formation and Maintenance of a Leading Edge Vortex during the Forward Motion of Animal Wing," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 587, pp. 471~475.
 (9) Kolomenskiy, D., Moffatt, H.K., Farge, M. and Schneider, K., 2011, "The Lighthill-weis-fogh Clapfling-sweep Mechanism Revisited," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 676, pp.573~606.
 (10) Furber, S. B. and Ffowcs Williams, J. E., 1979, "Is the Weis-Fogh Principle Exploitable in Turbomachinery?," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 94, Part 3, pp. 519~540.
 (11) 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.
 (12) Tsutahara, M. and Kimura, T., 1987, "A Pilot Pump using the Weis-Fogh Mechanism and its Characteristics," *Trans. of the JSME(B)*, Vol. 54, No. 498, pp. 393~397.
 (13) Tsutahara, M. and Kimura, T., 1994, "Study of a Fan Using the Weis-Fogh Mechanism(An Experimental Fan and Its Characteristics)," *Trans. of the JSME(B)*, Vol. 60, No. 571, pp. 910~915.
 (14) 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," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 128, pp. 481~487.
- (15) Ro, K.-D. and Seok, J.-Y. 2010, "Sailing Characteristics of a Model Ship of Weis-Fogh Type," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 34, No. 1, pp. 45~52.
- (16) Ro, K.-D. 2010, "Performance Improvement of Weis-Fogh Type Ship's Propulsion Mechanism Using a Wing Restrained by an Elastic Spring," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 132, No. 4, pp. 041101-1~041101-6.
- (17) Ro, K.-D. 2012, "Numerical Calculation of Unsteady Flow Fields: Feasibility of Applying the Weis-Fogh Mechanism to Water Turbines," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 135, No. 10, pp. 101103-1~101103-6.
- (18) Ro, K.-D., 2014, "Calculation of Hydrodynamic Characteristics of Weis-Fogh Type Water Turbine Using the Advanced Vortex Method," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 38, No.3, pp. 203~210.
- (19) Ro, K.-D., 2014, "Experiments on Hydrodynamic Performance of Weis-fogh-type Water Turbine," *Trans. of the CSME*, Vol. 38, No. 3, pp. 405~415.
- (20) Ro, K.-D., "Hydrodynamic Calculation of Rotating Weis-Fogh Type Water Turbine with the Advanced Vortex Method," *Trans. of the CSME*, Vol. 39, No. 2, pp. 337~355.