

히빙의 후류의 유동패턴에 관한 연구

양창조⁺, 김유택⁺⁺, 최민선⁺⁺⁺, 이영호⁺⁺⁺⁺

A Study on Vortical Flow Patterns of a Heaving Foil

Chang-Jo Yang⁺, You-Taek Kim⁺⁺, Min-Seon Choi⁺⁺⁺ and Young-Ho Lee⁺⁺⁺⁺

Abstract : It is known that an oscillating airfoil can produce a driving force through the generation of a reversed Kármán vortex street, and this can be expected to be a new highly effective propulsion system. We have been examined various conditions such as frequency number, amplitude in NACA 0010. As Strouhal number is greater than 0.08, wake profile with velocity deficit can be transformed into the wake with velocity excess. We also presented the experimental results on the unsteady vortices structure of the heaving airfoil at various parameters.

Key words : Heaving foil(히빙익), Strouhal number(Strouhal 수), Dye visualization(염료 가시화), Thrust(추력), Reverse Kármán vortex street(역 카르만 와류)

1. 서론

진동의 주변의 비정상 유동은 많은 연구자들에 의해 이론 및 수치계산 기법을 이용하여 연구 되어왔다. 초기의 고전 진동의 이론은 항공기의 플레터 현상의 규명을 목적으로 출발하였으며, 특히 진동익에 의한 유동패턴에 관한 연구는 어류, 곤충 그리고 조류의 추진 메커니즘의 해석 등 생체유체역학에서도 중요한 테마가 되고 있다. 최근에는 미소생물의 운동, MEMS(Micro-electro Mechanical Systems), MAV(Micro Aerial Vehicles) 등과 같은 극소물체를 이용한 유동의 제어기술이 세계적으로 주목을 받고 있으며, 그 때 비정상익을 응용한 유동장의 제어가 중요한 문제가 되고 있다. 진동익은 후연으로부터 후류에 역 카르만 와열이라고 하는 특이한 유동패턴을 생성함으로써 추력을 발생시킬 수 있다고 보고되고 있다^[1]. 이러한 후류의 평균 유동은 불안정하지만 좁은 폭의 증폭된 영역을 갖는다. 이 비정상 와류의 메커니즘은 익의 후연으로부터 와의 생성 및 성장에 의존하며, 후연으로부터 방출된 와와 전 단계에서 방출된 와가 간섭하여 교호하는 에디들의 열을 만들어 낸다. 또한 진동익에 의해 후류에 발생하는 와류는 추진력과도 관계된다.

그러므로 본 연구에서는 Two dye injection법에 기초하여 저 Reynolds수 영역에 있어서 NACA 0010을 대상으로 히빙운동에 의한 비정상 유동패턴을 규명하고자 하였다. 그 결과 히빙익은 어떤 무차원 속도 이상에서 후류에 역 카르만 와열을 형성함을 확인하였다. 또한 후류에서 와의 위상구조나 이러한 구조가 추력에 미치는 영향 등을 파악하였다.

2. 실험장치 및 방법

대상익은 익현장 60mm, 스패น 200mm의 NACA 0010이다. 실험은 회류수조에서 행해졌고, 주류속도는 0.067m/s로 유지하였다. NACA 0010은 익의 위치 정보를 정확히 검출 가능한 로터리 엔코더를 내장한 DC 서보모터(RSA0711, Dyadic Systems)에

의해 구동되고, 그 양자의 사이에 유체력 계측용 소형 6축 센서를 설치하였다. 서보모터의 회전운동은 볼 스크루를 통하여 상하 병진운동으로 변환되며, 익의 변위는 정현파의 형태로 부과되고, 주파수 f , 진폭 A_h 는 컴퓨터의 프로그램 상에서 설정하도록 되어 있다. 계측단면은 가로 200mm, 세로 100mm의 장방형의 단면이다. 히빙익의 후류는 주입 유맥법인 Direct injection법을 이용하여, 포일 내에 설치된 두 개의 작은 노즐에서 분사된 염료에 의해 가시화한 후, 회류수조 하부에 설치된 거울을 통해 비디오카메라(DCR-VX 1000, SONY)로 촬영하였다. 라인 시트 가이드와 렌즈를 조합한 할로겐램프를 시트라이트로 사용하였다. 가시화용 염료로는 Uranine과 Rohdamine B를 사용하였고, 중력에 의해 노즐을 통해 분사되는 구조로 되어 있다.

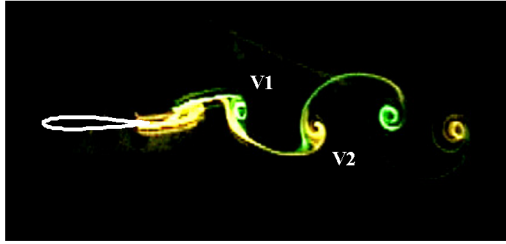
가시화 데이터와 비정상 유체력을 비교하기 위해 소형 6축 센서(MINI 2/10, BL-AUTOTEC)를 이용하여 유체력을 계측하였다. 센서는 x, y, z 방향의 힘 및 모우먼트가 동시에 측정 가능한 구조로 되어 있다. 익현장 기준 Reynolds수 $Re = 4.0 \times 10^3$ 이고, 히빙주파수, 진폭을 각각 변화시켜 가면서 실험을 행했다. 주류속도에 대한 익의 진동수 및 속도의 비를 나타내는 무차원(환산) 진동수 $k (= \pi fc/U_0)$ 및 Strouhal수 (무차원 히빙속도) $St (= f 2A_h/U_0)$ 를 정의하고, 무차원 진동수 $k = 0.0 \sim 5.63$ 의 범위, Strouhal수 $St = 0.0 \sim 0.36$ 의 범위에서 실험을 행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

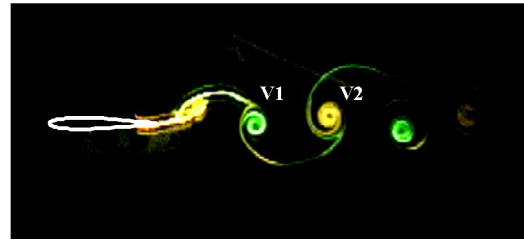
3.1 Two-dye visualization

Fig. 1은 익의 순간에 촬영한 히빙익으로부터 방출되는 후류에서의 와류의 패턴을 보여준다. 히빙익은 주기적인 운동을 하며, 주류는 왼쪽에서 오른쪽으로 흐르고 있다. Fig. 1 중의 V1은 히빙익의 상면에서 방출된 와, V2는 익의 하면에서 방출된 와를 나타낸다. Fig. 1(a)은 히빙익의 상·하면에서

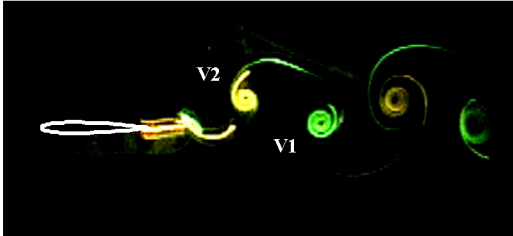
+ 양창조(한국해양대학교 연구원), E-mail:cjyang70@pivlab.net, Tel: 051)410-4940
++ 김유택(한국해양대학교 기관시스템공학부), 부산광역시 영도구 동삼동 1번지
+++ 최민선(목포해양대학교 기관공학부), 전남 목포시 죽교동 571-2번지
++++ 이영호(한국해양대학교 기계 정보공학부), 부산광역시 영도구 동삼동 1번지



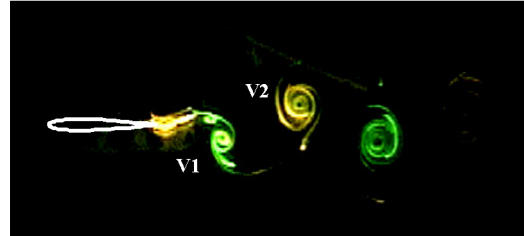
(a) $St = 0.06$ ($k = 2.25$)



(b) $St = 0.07$ ($k = 2.81$)



(c) $St = 0.23$ ($k = 4.22$)



(d) $St = 0.30$ ($k = 5.63$)

Fig. 1 Wake patterns behind the heaving foil ($A_h/c = 0.04$ in (a), (b) and $A_h/c = 0.09$ in (c), (d)).

후류로 방출된 와가 서로 교호하고 있는 모습을 나타내고 있다. 이 후류는 원주와 같은 뚱뚱한 물체의 후류에서 발견되는 카르만 와열과 유사한 와의 배열을 하고 있다. 그러나 Strouhal수를 조금 증가시키면 흥미롭게도 방출된 와는 후류의 중심선에 1열 형태로 배열되었다. Fig. 1(b)은 그러한 잘 발달된 와의 구조를 보이며, 한 주기 당 한 쌍의 와(V1, V2)가 후류로 방출되는 모습을 보인다. 서로 교호하는 와가 유동장의 후류의 중심선에 배열되며, 일정한 흐름 속에 놓은 물체에 항력이 작용하지 않는 경우 후류에 발생하는 “Neural 구조”를 보여주고 있다. Fig. 1(c)은 $St = 0.23$ 의 경우 유동패턴을 나타낸다. 와 V1, V2의 위치가 Fig. 1(a)과 비교하여 바뀐 것을 알 수 있다. 특히, 이 유동패턴은 카르만 와열의 경우 유기되는 순환과 힘과는 반대되는 순환과 힘을 가지며, “역 카르만 와열”이라 불린다. Yang et. al.^[2]는 이 역 카르만 와열의 구조가 추력 형성과 관련이 있다는 것을 보고하고 있다. 한 주기를 평균하면 후류는 히빙익으로부터 방출된 와들의 상호작용으로 형성된 역 카르만 와에 의해 제트의 속도 프로파일을 나타낸다. 또한 Strouhal수가 증가함에 따라 와의 규모도 커진 것을 알 수 있다. Fig. 1(d)은 가장 잘 발달된 와 구조를 보이며, 같은 히빙진폭의 경우, 무차원 진동수 k 가 증가함에 따라 와의 간격이 짧아짐이 확인된다.

3.2 유동패턴의 분류

Fig. 2에 dye injection법 및 유체력 계측에 의한 후류에서의 와유동 패턴의 분류를 보인다. Mode 1은 후류에서 이산화된 와를 형성하고 못하고, 정현파와 유사한 유동패턴을 의미한다. Mode 2는 Fig. 1(a)에서 보인 카르만 와열을 나타내고, Mode 4는 Fig. 1(c)에서 보인 역 카르만 와열을 나타낸다. 카르만 와열의 Mode 2는 낮은 진폭에서만 나타났다. Mode 3은 속도프로파일과 와 중심의 궤적에서 보았던 Neural 구조를 나타낸다. 한편, 점선은 Strouhal수의 의존성을 보기 위해 삽입한 $St = 0.08$ 을 나타낸다. Mode 4는 점선위에 존재함을 알 수 있다. 또

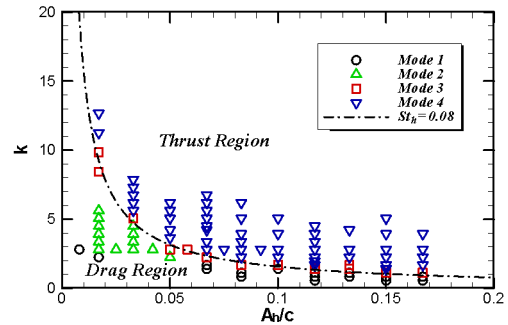


Fig. 2 Wake classification of the vortex patterns

한 Mode 4 위의 영역에서는 유동의 교란과 불안정으로 상·하로 편향된 와열을 보였다.

4. 결론

저 Reynolds수 영역에서 히빙의 후류의 유동패턴을 파악하기 위해 후류의 메커니즘을 지배하는 여러 가지 파라미터를 대상으로 주입 유액법인 Two dye injection법에 의한 가시화를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 무차원 히빙속도인 Strouhal수가 0.08보다 커지면 후류의 속도결손의 프로파일이 추력을 발생시킬 수 있는 제트의 프로파일로 바뀌었다. 높은 추력은 강한 와의 생성과 관련이 있고, Strouhal수가 커지면 후연으로부터 방출되는 Trailing-edge 와는 강한 와도를 동반하며, 전 단계에서 방출된 와와 함께 역 카르만 와열을 형성하였다.

참고문헌

- [1] T. Theodorsen, "General Theory of Aerodynamic Instability and the Mechanism of Flutter," NACA TR 496, 1935.
- [2] C. J. Yang, M. Fuchiwaki and K. Tanaka, "Propulsive Vortical Patterns and Unsteady Fluid Forces of a Flapping Airfoil", ASME Fluids Engineering Conference, FEDSM2003-45227, 2003.