

히빙익 후류의 유동패턴에 관한 연구

양 창 조†

(원고접수일 : 2005년 7월 8일, 심사완료일 : 2005년 9월 7일)

A Study on the Vortical Patterns of a Heaving Foil

Chang-Jo Yang†

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. The wake formation behind the heaving airfoil was visualized and was measured using PIV systems. 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. After evaluating vortex center, flow patterns in the wake investigated using tracking trajectories in temporal evaluation of the shedding vortices. 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(스트로할수), Dye visualization(염료 가시화), PIV(입자영상유속계), Reverse Kármán vortex street(역 카르만 와류)

1. 서 론

진동익 주변의 비정상 유동은 많은 연구자들에 의해 이론 및 수치계산 기법을 이용하여 연구 되어왔다. 초기의 고전 진동익이론^{[1],[2]}은 항공기의 플래터 현상의 규명을 목적으로 출발하였으며, 특히 진동익에 의한 유동패턴에 관한 연구는 어류, 곤충 그리고 조류의 추진 메커니즘의 해석 등 생체유체역학에서도 중요한 테마가 되고 있다^[3]. 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^{[4],[5]}.

진동익은 후연으로부터 후류에 역 카르만 와열이라고 하는 특이한 유동패턴을 생성함으로써 추력을 발생시킬 수 있다고 보고되고 있다^[6]. 이러한 후류의 평균 유동은 불안정하지만 좁은 폭의 증폭된 영역을 갖는다. 이 비정상 와유동의 메커니즘은 익의 후연으로부터 와의 생성 및 성장에 의존하며, 후연으로부터 방출된 와와 전 단계에서 방

† 책임저자(한국해양대학교 연구원), E-mail:cjyang70@pivlab.net, Tel: 051)410-4940

출된 와가 간섭하여 교호하는 에디들의 열을 만들어 낸다. 또한 진동익에 의해 후류에 발생하는 와 유동은 추진력과도 관계된다.

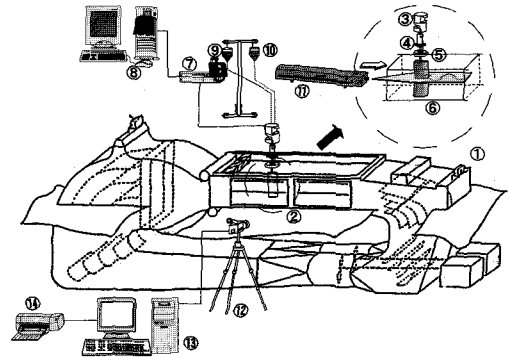
한편, 이러한 와유동에 관한 연구는 다소 진행되고는 있지만, 후류에서 와의 정량적인 위상구조나 이러한 구조가 추력에 미치는 영향 등 아직 규명되지 않은 많은 문제들이 남아있다. 더욱이 관련연구의 대부분이 smoke wire법과 같은 정성적인 가시화나 점계측의 실험 기법이 주류를 이루고 있다. 하지만 정성적인 가시화, 예를 들면 유맥의 rolling-up에 의해 형성된 유동패턴을 가시화하는 것만으로는 이산화된 와의 정량적인 정보를 제공해 주지는 못한다. PIV (Particle Image Velocimetry)를 이용한 유동장의 계측은 tuft법 또는 tracer법과 같은 유동의 가시화나 LDV (Laser Doppler Velocimetry)나 HWA(Hot Wire Anemometer)와 같은 점계측 또는 평균기반의 속도계측에 대한 대안이 될 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 two dye injection법 및 시공간 해상도를 높은 2차원 PIV 계측 시스템에 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 평균속도, 와도 분포 등을 통해 정량적으로 파악하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 전체적인 실험장치의 개요를 보인다. 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. 서보모

터의 회전운동은 볼 스크루를 통하여 상하 병진운동으로 변환되며, 익의 변위는 정현파의 형태로 부과되고, 주파수 f , 진폭 A_h 는 컴퓨터의 프로그램 상에서 설정하도록 되어 있다. Fig. 2의 실선은 서보모터에 $A_h \sin(2\pi ft)$ 을 부과했을 때의 익의 변위를 보인다. 계측단면은 가로 200mm, 세로 100mm의 장방형의 단면이다.



- | | |
|-------------------|-----------------------|
| 1. Water tunnel | 8. Motor controller |
| 2. Test section | 9. Uranine |
| 3. DC servo motor | 10. Rohdamine B |
| 4. Ball screw | 11. Ar-ion Laser |
| 5. 6-axis sensor | 12. High speed camera |
| 6. NACA 0010 | 13. Image processor |
| 7. Motor driver | 14. Printer |

Fig. 1 Experimental apparatus

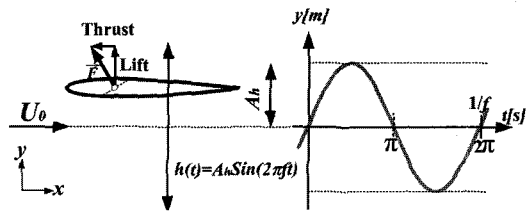


Fig. 2 Trajectory of the heaving airfoil

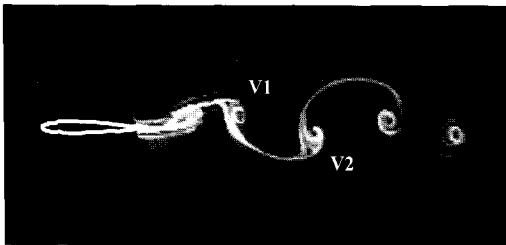
히빙익의 후류는 주입 유맥법인 direct injection법을 이용하여, 포일 내에 설치된 두 개의 작은 노즐에서 분사된 염료에 의해 가시화한 후, 회류수조 하부에 설치된 거울을 통해 비디오크메라(DCR-VX 1000, SONY)로 촬영하였다. 라인 시트 가이드와 렌즈를 조합한 할로겐램프를 시트라이트로 사용하였다. 가시화용 염료로는

uranine과 rohdamine B를 사용하였고, 중력에 의해 노즐을 통해 분사되는 구조로 되어있다.

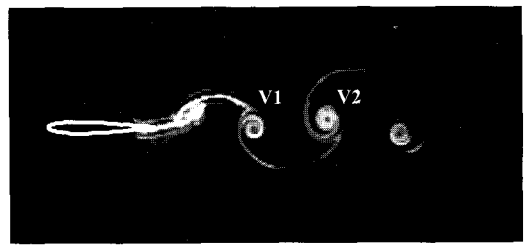
PIV 계측을 위한 조명으로 4W출력의 연속광 Argon-Ion 레이저를 사용하였으며, 두께 2mm 내외의 2차원 시트라이트가 fiber optic cable 및 cylindrical lens를 통해서 유동장에 직접 조사된다. 유동장의 유체입자의 거동을 가시화하기 위하여 추중성이 우수한 입자를 선택하여야 하며 입자의 선별은 광원과 함께 PIV 계측 정도에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 수중에서는 작동수와 비중이 유사한 구형입자를 사용하며 그 크기는 계측 유동장의 공간 스케일을 충분히 재현할 수 있도록 작아야 한다. 본 실험에서는 비중이 1.01 전후의 물과 비중차가 적은 orgasal 입자를 사용하였다. 유동장이 충분히 발달하면 직경 50미크론 전후의 백색 구형입자를 선별하여 정전기를 방지하기 위해 계면 활성제를 혼합한 다음 주입하였다. 산란광은 내부 메모리의 용량이 매우 큰 고속도카메라(Phantom V5.0, Phantom사)에 기록하였다. 이 카메라는 1,024×1,024픽셀의 8비트의 센서를 가지고 풀 해상도로 초당 1,000프레임, 256×32픽셀의 해상도로 초당 62,500프레임의 영상을 획득할 수 있다.

공간 해상도 및 영상에서 입자의 변위에 대한 다이나믹 레인지를 높인 재귀적 상관법을 사용하여 시공간 해상도를 높인 PIV 시스템을 구성하였다. 후처리 과정에서는 기록된 영상의 화질에 따라 발생한 고유의 에러 성분이 이상치를 판별하여 과오 벡터를 제거하는 에러제거, pixel 단위를 실단위로 바꾸는 단위 환산 등을 실시하였다. 에러에 의한 이상치는 속도 발산치에 의한 검출방법으로 자동에러처리를 한 후 제거하였다.

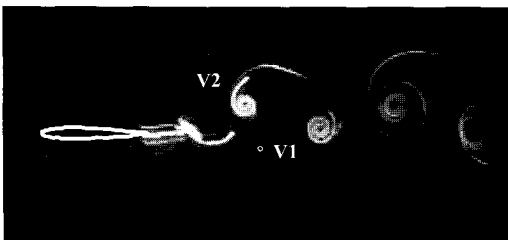
가시화 데이터와 비정상 유체력을 비교하기 위해 소형 6축 센서(MINI 2/10, BL-AUTOTEC)를 이용하여 유체력을 계측하였다. 센서는 x, y, z 방향의 힘 및 모멘트가 동시에 측정 가능한 구조로 되어 있다. 본 실험에서는 NACA 0010을 이용하여, 수조의 중심부에서 주류에 평행하게 히빙운동을 부과하였다. 최대 히빙진폭은 약 0.006m로서 실험유로 폭의 ± 2%정도로 유로 폭의 영향과 테스트 영역의 블로키지(blockage) 효과는 무시 가능하리라 생각된다. 익현장 기준 Reynolds수 $Re = 4.0 \times 10^3$ 이고, 히빙주파수, 진폭을 각각 변화시켜 가면서 실험을 행했다. 주류 속도에 대한 익의 진동수 및 속도의 비를 나타내는 무차원 진동수 $k(= \pi fc/U_0)$ 및 Strouhal수



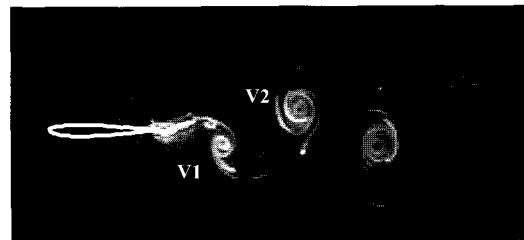
(a) $St = 0.06$ ($k = 2.25$)



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



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



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

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

(무차원 히빙속도) $St (= f \cdot 2A_h / U_0)$ 를 정의하고, 무차원 진동수 $k = 0.0 \sim 5.63$ 의 범위, Strouhal 수 $St = 0.0 \sim 0.36$ 의 범위에서 실험을 행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

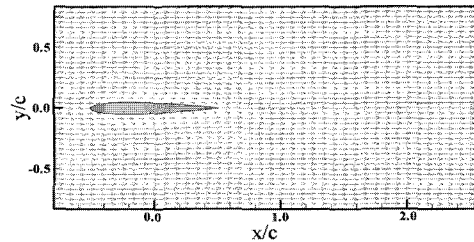
3.1 Two-dye visualization

Photo 1은 임의의 순간에 촬영한 히빙의으로부터 방출되는 후류에서의 와유동의 패턴을 보여준다. two dye visualization 실험은 Reynolds 수 $Re = 4.0 \times 10^3$ 에서 행해졌다. 히빙의는 주기적인 운동을 하며, 주류는 왼쪽에서 오른쪽으로 흐르고 있다. Photo 1 중의 V_1 은 히빙의의 상면에서 방출된 와, V_2 는 익의 하면에서 방출된 와를 나타낸다. Photo 1(a)는 히빙의의 상하면에서 후류로 방출된 와가 서로 교호하고 있는 모습을 나타내고 있다. 이 후류는 원주와 같은 봉퉁한 물체의 후류에서 발견되는 카르만 와열과 유사한 와의 배열을 하고 있다. $St < 0.03$ 의 경우 후류에서는 이산화된 와를 형성하지 못하고, 정현파와 유사한 유동패턴을 유지했다. 그러나 Strouhal수를 조금 증가시키면 흥미롭게도 방출된 와는 후류의 중심선에 1열 횡대로 배열되었다. Photo 1(b)는 그러한 잘 발달된 와의 구조를 보이며, 한 주기 당 한 쌍의 와(V_1, V_2)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. Photo 1(c)은 $St = 0.23$ 의 경우 유동패턴을 나타낸다. 와 V_1, V_2 의 위치가 Photo 1(a)과 비교하여 바뀐 것을 알 수 있다. 특히, 이 유동패턴은 카르만 와열의 경우 유기되는 순환과는 반대방향의 순환 나타내며, “역 카르만 와열”이라 불린다. John et. al.⁽⁷⁾과 Yang et. al.⁽⁸⁾은 이 역 카르만 와열의 구조가 추력 형성과 관련이 있다는 것을 보고하고 있다. 한 주기를 평균하면 후류는 히빙의으로부터 방출된 와들의 상호작용으로 형성된 역 카르만 와에 의해 제트의 속도 프로파일을 나타낸다. 또한 Strouhal수가 증가함에 따라 와의 규모도 커진

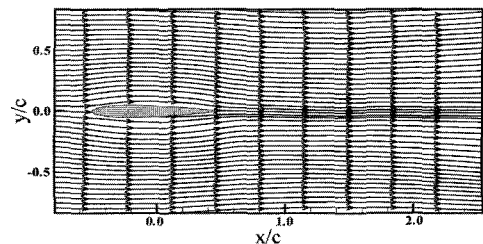
것을 알 수 있다. 이러한 결과는 다음 절에서 보다 정량적인 계측을 통해 익 주변의 와도 분포 및 와의 중심추적을 통해 고찰하기로 한다. Photo 1(d)은 가장 잘 발달된 와 구조를 보이며, 같은 히빙진폭의 경우, 무차원 진동수 k 가 증가함에 따라 와의 간격이 짧아짐이 확인된다.

3.2 평균속도 분포

PIV 실험은 two dye visualization에서와 같은 Reynolds수 $Re = 4.0 \times 10^3$ 에서 행해졌다. Fig. 3(a)는 히빙진폭 $A_h = 0.04$ 로 정현파의 히빙운동을 하는 경우 앙상블 평균한 속도장을 보인다. 앙상블 속도장을 얻기 위해 750개의 연속된 순간의 속도장을 평균하였다. Fig. 3(b)는 앙상블 평균한 속도장의 유선의 분포를 보인다. 히빙의 주변의 유선의 분포는 익을 중심으로 대칭임을 알 수 있다. 또한 전단층 천이 영역에서 봉퉁한 물체의 후류에 발견되는 역류 현상 및 재순환 버블은 발생하지 않음에 주목하자. 이것은 Photo 1에서 본 것처럼 히빙의의 후연으로부터 방출되는 와의 생성방법과 위치가 다르기 때문이다.

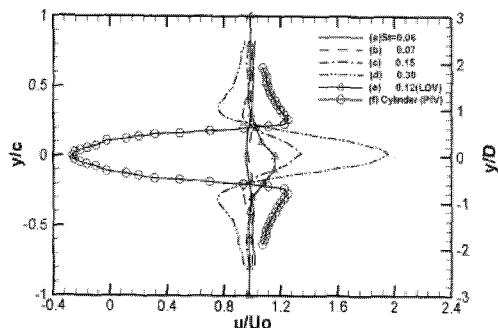


(a) Ensemble averaged velocity field

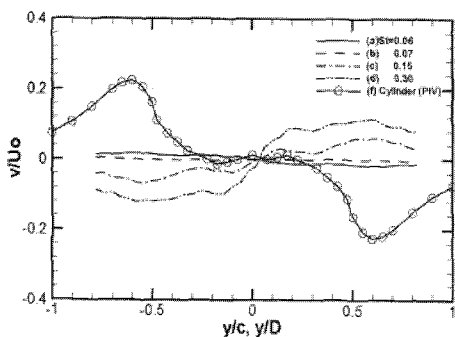


(b) Streamlines from ensemble averaged velocity field

Fig. 3 Ensemble averaged velocity field and streamlines ($k = 4.22, A_h/c = 0.04$)



(a) Mean streamwise velocity profiles



(b) Mean cross-stream velocity profiles

Fig. 4 Mean streamwise and cross-stream velocity profiles ($x/c = 1.25$)

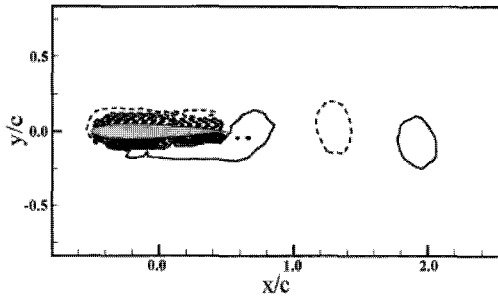
Fig. 4(a)는 주류 방향의 평균속도 프로파일을 보인다. 속도 프로파일은 각각의 Strouhal수에 대해 익의 중심에서 하류방향으로 1.25c 떨어진 곳에서의 분포를 나타낸다. Strouhal수가 증가함에 따라 히빙의 주변의 유동장이 변화하여 운동량의 변화를 초래하므로 각각 다른 프로파일을 보인다. Strouhal수가 0.07보다 커지면 속도결손의 프로파일이 제트의 속도 프로파일로 바뀌는 것을 알 수 있다. 이것은 왜냐하면 후류의 중심선 부근의 속도의 섭동은 Strouhal수가 커지면 중심선에서 더 떨어진 곳에서 보다 더 빨리 하류방향으로 이동하기 때문이다. NACA0012에 대한 Johns et. al.^[7]의 LDV 측정결과도 후류에서의 제트의 프로파일을 보이고 있다. 하지만, Reynolds수 $Re = 3.9 \times 10^3$ 에서 원주(D:직경) 후류의 PIV 측정결과는 속도 프로파일이 속도 결손을 나타내고 있으며, 부의 속도영역이 존재하는 것으로 미루어

보아 히빙역의 후류에서와는 달리 역류영역이 존재함을 의미한다. 한편, $St = 0.07$ 의 경우 평균속도 프로파일은 후류에서 속도의 결손도 과잉도 아닌 영역의 존재를 나타낸다. 이러한 영역은 Photo 1(b)에서 보인 것처럼 상호 교호하는 와가 한 직선상에 배열될 나타난다. 이것은 다음 절의 Fig. 5에서와 중심의 궤적과 방출와의 시간적 변화를 통해 고찰하기로 한다. Fig. 4(b)는 주류의 수직방향에 대한 속도분포를 보인다. Strouhal수가 증가함에 따라 속도의 프로파일이 반시계방향으로 회전하여, 수평축에 대해 부호를 서로 바꾸는 것을 알 수 있다. 이것은 Photo 1에서 본 것 같이 바뀐 와의 배열에 의한 속도분포의 변화 때문이며, Strouhal수가 증가함($St > 0.07$)에 따라 와는 주류의 수직 방향에 대해 반대로 이동함을 나타낸다. 하지만 원주의 후류에 있어서 주류의 수직방향에 있어서의 속도 프로파일은 수평축에 대해 일정한 부호를 유지하였다.

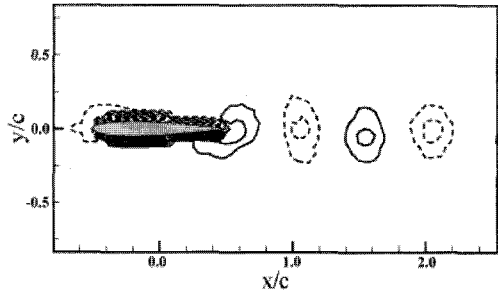
3.3 와도 분포

Fig. 5은 각각의 Strouhal수의 경우 히빙의 주변의 와도의 분포와 와 중심의 궤적을 보인다. 속도 구배의 관점에서 정의되는 와도를 정도 높게 평가하기 위해 Lourenco와 Krothapalli^[9]가 제안한 실험오차와 절단오차의 합으로 정의되는 total error를 최소화하기 위해 각 격자점에서 2차 다항식의 최소자승법을 이용한 adoptive scheme을 적용하였다. 실선과 파선의 등고선은 히빙의 주변의 와도 $\langle \zeta_z \rangle$ 를 나타낸다. Fig. 5(a)의 경우, 히빙에 의해 생성된 주류 방향의 속도 성분은 two dye visualization에서 본 것 같이 카르만 와열과 유사한 유동패턴을 만든다.

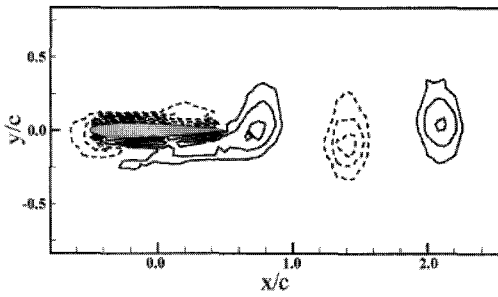
Fig. 6(b)의 경우, 와열이 거의 후류의 중심선에 배열되어 있는 것을 알 수 있다. 또한 와열은 더욱 하류로 이동하더라도 직선을 유지하며 이탈되지 않았다. Fig. 5(b)의 trailing-edge 와는 Fig. 5(a)보다 상대적으로 크며, 전연에는 보다 강한 와도가 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 5(c)의 경우, 교호하는 와가 형성되며 (+)



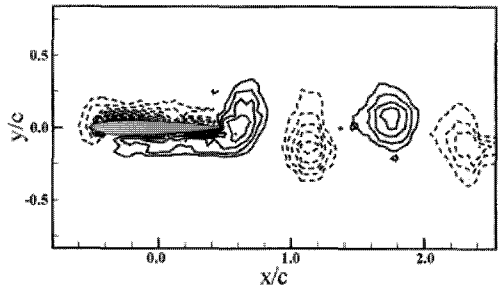
(a) $St = 0.06$ ($A_h/c = 0.04$)



(b) $St = 0.07$ ($A_h/c = 0.04$)

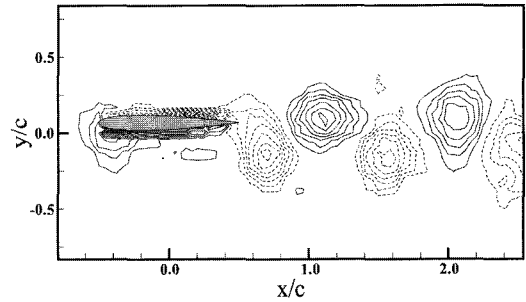


(c) $St = 0.14$ ($A_h/c = 0.09$)

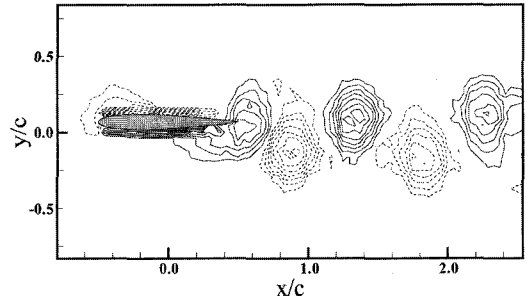


(d) $St = 0.15$ ($A_h/c = 0.09$)

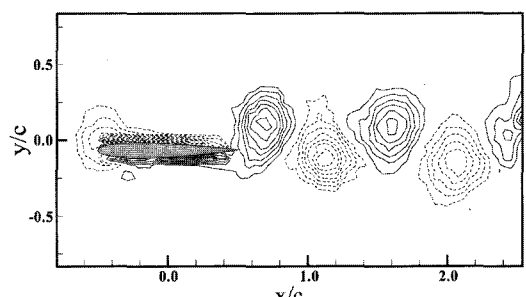
Fig. 5 Phase-averaged vorticity field in the x-y plane (All phases correspond to π)



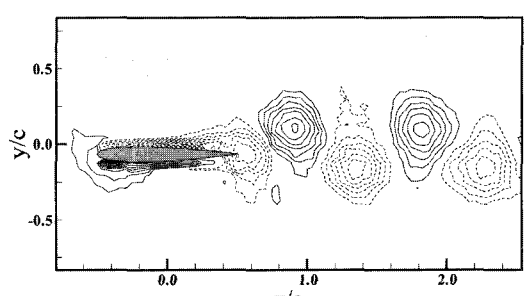
(a) $t^* = 0.125$



(b) $t^* = 0.375$



(c) $t^* = 0.625$



(d) $t^* = 0.875$

Fig. 6 Development of the vorticity during the shedding process ($St = 0.15$, $t^* = t/(1/f)$)

순환을 갖는 와가 후류의 중심선을 기준으로 상부에, (-) 순환을 갖는 와가 후류의 중심선을 기준으로 하부에 형성되는 것을 알 수 있다. 이러한 와열의 구성은 특히 추력을 발생시키는 와구조와 관련이 있다. Wang⁽¹⁰⁾은 플래핑 운동의 최적 주파수는 와의 방출과 성장에 지배된다고 보고하고 있다. 즉 높은 추력은 강한 와의 생성과 관련이 있고, 무차원 주파수인 strouhal수가 커지면 후연으로부터 방출되는 trailing-edge 와는 강한 와도를 동반하며, 전 단계에 방출된 와와 함께 역 카르만 와열을 형성하였다. Fig. 5(d)은 매우 강한 와가 생성된 후 방출하는 것을 보이며, Fig. 6에 한 주기 동안 후류에 방출되는 와의 시간적 변화를 도시하였다. 또한 Strouhal수의 증가에 따라 후류에서 와의 간격이 짧아짐이 확인되며, 와 구조는 Fig. 5(c)의 구조를 유지하며 와의 크기가 더욱 발달함을 보이고 있다.

Fig. 6(a)~(d)는 한 주기 동안 역 카르만 와열이 생성되는 경우 후류에서의 와도의 시간적 변화를 나타낸다. 실선과 파선의 등고선은 히빙의 주변의 와도 $\langle \xi \rangle$ 를 나타낸다. 강한 trailing-edge 와가 형성되어 히빙이 상·하사점을 지난 후 방출되며, 한 주기 동안 한 쌍의 trailing-edge 와가 방출되는 것을 알 수 있다.

3.4 유동패턴의 분류

Fig. 7은 후류에서 유동패턴의 분류를 보인다. Johns et. al.^[7]과 Triantafyllou et. al.^[11]도 와유동의 패턴을 분류한 정보를 제공하고 있지만, 그것은 순수한 정성적 가시화에 의한 것이다. Fig. 7에 유체력의 계측 및 PIV 계측에 의한 후류에서의 와유동 패턴의 분류를 보인다. Mode 1은 후류에서 이산화된 와를 형성하고 못하고, 정현파와 유사한 유동패턴을 의미한다. Mode 2는 Fig. 5(a)에서 보인 카르만 와열을 나타내고, Mode 4는 Fig. 5(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. 또한 Mode 4 위의 영역에서는 유동의 교란과 불안정으로 상·하로 편향된 와열을 보였다.

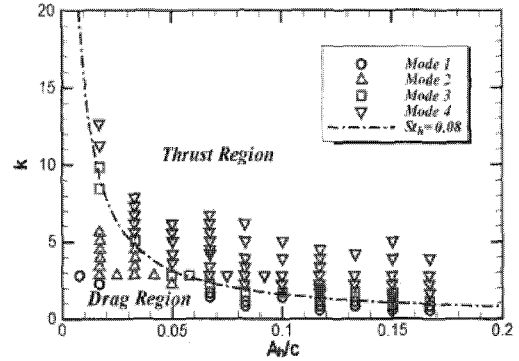


Fig. 7 Wake classification of the vortex patterns

4. 결 론

본 논문에서는 저 Reynolds수 영역에서 히빙의 후류의 유동패턴을 파악하기 위해 후류의 메커니즘을 지배하는 여러 가지 파라미터를 대상으로 주입 유액법인 two dye injection법에 의한 가시화 및 시·공간 해상도를 높인 PIV 계측을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Two dye injection법 및 PIV계측을 통하여 방출와의 거동 및 와도의 분포에 의해 히빙의 후류의 유동패턴을 파악하였다.

(2) 무차원 히빙속도인 Strouhal수가 0.08보다 커지면 후류의 속도결손의 프로파일이 추력을 발생할 수 있는 제트의 프로파일로 바뀐다.

(3) 정량적인 데이터를 기준으로 히빙의 후류에서의 유동패턴을 분류하였다. 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 형성한다.

끝으로 본 연구에서는 정현파의 히빙 운동만을 고려하였지만, 이러한 히빙익을 이용한 유동의 제

어를 위해서는 진동 파형의 변화 및 피칭운동 등과의 조합 등이 필요할 것으로 사료되며, 이에 관해서는 보다 체계적인 연구가 있어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] T. Theodorsen, "General Theory of Aerodynamic Instability and the Mechanism of Flutter," NACA TR 496, 1935.
- [2] R. L. Bisplinghoff, H. Ashley and R. L. Halfman, "Aeroelasticity," Dover Publication, Inc., 1955.
- [3] T. Y. Wu, "Hydromechanics of Swimming Propulsion," J. Fluid Mech., 46, pp. 337-355, 1971.
- [4] C. M. Ho and Y. C. Tai, "MEMS and Fluid Flow," J. Fluid Mech., 30, pp. 579-612, 1978.
- [5] W. Shyy and R. W. Smith, "A Study of Flexible Airfoil Aerodynamics with Application to Micro Aerial Vehicles," AIAA Paper No. pp. 97-1933, 1997.
- [6] T. von Kármán and J. M. Burgers, "General Aerodynamic Theory Perfect Fluids," Berlin-Springer, 1935.
- [7] K. D. Jones, C. M. Dohring and M. F. Platzer, "Experimental and Computational Investigation of the Knoller-Bentz Effect," AIAA Journal, 36-7, pp. 1241-1246, 1998.
- [8] C. J. Yang, M. Fuchiwaki, K. Tanaka and Y. H. Lee, "Unsteady Fluid Forces and Flow Patterns of a Heaving Airfoil," Proc. 5th JSME-KSME Fluids Engineering Conference, 126, 2002.
- [9] L. Lourenco and A. Krothapalli, "On the Accuracy of Velocity and Vorticity Measurements with PIV," Exp. Fluids, 18, pp. 421-428, 1995.
- [10] Z. J. Wang, "Vortex Shedding and Frequency Selection in Flapping Flight," Fluid Mech., 410, pp. 323-341, 2000.
- [11] G. S. Triantafyllou, M. S. Triantafyllou and M. A. Grosenbaugh, "Optimal Thrust Development in Oscillation Foils with Application to Fish Propulsion," Phys. Fluids A3, 12, 1991.

저 자 소 개



양창조 (梁昌照)

1970년 8월 26일생, 1993년 2월 한국해양대학교 기관공학과 졸업(공학사), 1999년 2월 한국해양대학교 대학원 냉동공조공학과 졸업(공학석사), 2004년 3월 큐슈공업대학 대학원 정보공학연구과 졸업(공학박사), 현재 한국해양대학교 연구원