

〈 논문 〉

## 피칭 운동익에 작용하는 비정상 유체력

양 창 조\*

(2005년 7월 21일 접수, 2006년 1월 9일 심사완료)

### Unsteady Force Characteristics on Foils Undergoing Pitching Motion

Chang-Jo Yang

**Key Words** : Unsteady Force(비정상 유체력), Pitching Motion(피칭 운동), 6-axis Sensor(6축 센서), Drag(항력), Lift(양력), Hysteresis(이력현상), Angle of Attack(받음각)

#### Abstract

In the present study the unsteady forces acting on the pitching foils such as a flat plate, NACA0010, NACA0020, NACA65-0910 and BTE have been measured by using a six-axis sensor in a circulating water tunnel at a low Reynolds number region. The unsteady characteristics of the dynamic drag and lift have been compared to the quasi-steady ones which are measured under the stationary condition. The pitching motion is available for keeping the lift higher after the separation occurs. Especially, the characteristics of the dynamic lift are quite different from the quasi-steady one at high pitching frequency regions. As the pitching frequency decreases, the amplitude of the dynamic lift becomes closer to the quasi-steady one. However, the phase remains different between the steady and unsteady conditions even at low pitching frequencies. On the other hand, the dynamic drag is governed strongly by the angle of attack.

---

#### 기호설명

- $A$  : 피칭 진폭
- $c$  : 익현장
- $C_D$  : 항력 계수
- $C_L$  : 양력 계수
- $f$  : 피칭 주파수
- $l$  : 익형의 스패 길이
- $k$  : 무차원 진동수 ( $=\pi f c / U_0$ )
- $Re$  : 레이놀즈수 ( $=c U_0 / \nu$ )
- $t_n$  : 무차원 시간
- $U_0$  : 주류속도
- $a$  : 받음각
- $a_m$  : 기본 받음각
- $\nu$  : 동점성 계수

#### 1. 서론

공력 불안정 현상에 대한 해석의 한 예로 피칭 운동익 등 비정상익에 관한 연구가 이론 및 수치 계산 기법 등에 의해 다수 수행되어 왔다.<sup>(1-3)</sup> 비정상익(unsteady foil)이란 익의 진동으로 주변의 흐름이 비정상 상태가 되어 있는 익을 말하며, 이에 관한 연구로서 Theodorsen<sup>(1)</sup>은 항공기의 플래터 현상을 규명할 목적으로 초기의 선형 익이론을 발표하였고, Panda와 Zaman<sup>(4)</sup>은 피칭 운동하는 NACA0012에 작용하는 유체력의 변화 특성을 가시화 실험과 비교하였다. 또한 Chang와 Eun<sup>(5)</sup>은 피칭 운동하는 타원형 익의 근접 후류에서 진동수의 변화에 따른 속도 분포를 예측하고 진동수와 받음각에 따른 속도 변화의 임계값을 예측하고 있다.

이러한 비정상익은 박리의 제어에도 이용될 수 있는데, Lai 등<sup>(6)</sup>은 후향 계단(back step) 유동의

---

\* 회원, 한국해양대학교 기계정보공학부 연구원  
E-mail : cjiang70@pivlab.net  
TEL : (051)410-4940 FAX : (051)403-0381

박리 영역 및 박리가 발생하고 있는 익의 후류에 플라징(plunging) 운동익을 설치하여 박리 제어의 가능성을 보고하고 있으며, Tanaka 등<sup>(7)</sup>은 피칭 운동에 의한 익 주변의 가시화 실험을 통하여 익 형에 따른 무차원 진동수와 받음각의 변화에 의한 박리점의 이동 등에 관해 보고하고 있지만, 이들은 이러한 유동 현상이 익에 미치는 비정상 유체력의 변화는 계측하지 못하였다.

한편, 최근에는 양력의 증대 등 공력 불안정 현상을 해결하기 위하여 비정상익을 이용한 제어 기법<sup>(8)</sup>이 주목을 받고 있으며, 또한 보다 효과적인 유동의 제어를 위하여 MEMS(micro-electro mechanical systems)<sup>(9)</sup> 등을 이용한 제어 기술에 관한 연구에의 관심이 고조되고 있는데, 이에 대한 유효성을 평가하기 위해서는 비정상익에 작용하는 유체력에 대한 시계열의 정량적 계측과 이에 대한 해석이 반드시 수반되어야 한다.

그러나 피칭 운동의 주위의 비정상 박리 유동은 레이놀즈수, 피칭 주파수, 피칭 진폭, 받음각, 익의 형상, 회전 중심 등 많은 파라메타가 존재하므로 매우 복잡한 현상을 나타내며, 아직 규명되지 않은 문제가 다수 남아있다. 또한 피칭 운동의 등 비정상익 주변의 유동에 관한 연구는 대부분이  $Re=10^6$  이상의 고 레이놀즈 영역을 대상으로 하고 있다.

그러므로 본 연구에서는 저 레이놀즈수 영역에서 평판익, NACA0010, NACA0020, NACA65-0910, BTE(Blunt Trailing Edge)익을 대상으로 Tanaka 등<sup>(7)</sup>이 수행한 받음각 및 무차원 진동수 등 다양한 파라미터에 대하여 피칭 운동익에 작용하는 항력, 양력을 회류수조와 소형 6축 센서 등을 이용하여 계측하고, 익형에 따른 비정상 유체력 특성의 비교를 통하여 양력 저감의 억제 등 공력 불안정성을 해결하기 위한 피칭 운동익의 유효성에 관해 고찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 비정상 유체력의 계측을 위한 실험 장치를 나타내며, 회류 수조(Personal Tank PT70, West Japan Fluid Engineering Laboratory), 가진 장치, 익형 및 유체력 계측 장치 등으로 구성되어 있다. 회류 수조의 계측 단면의 크기는 675mm(H)×250mm(V)×300mm(W)이고, 각 익형은

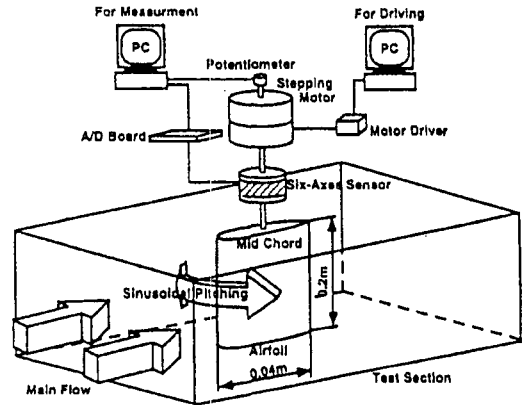


Fig. 1 Experimental apparatus

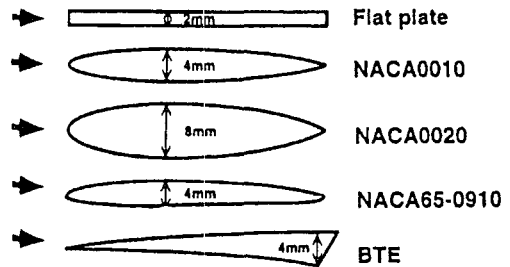


Fig. 2 Configuration of test foils

스테핑 모터(CSK564BP-TG10, Oriental Motor)에 의해 구동되며, 그 양자의 사이에 유체력 측정용 소형 6축 센서(MINI 2/10, BL-AUTOTEC)가 설치되어 있다. 피칭 운동은 익현 길이의 1/2지점을 중심으로 정현파로 부과되며, 받음각  $\alpha$ , 피칭 주파수  $f$  및 피칭 진폭  $A$ 는 프로그램에서 설정하도록 되어 있고 회전각은 포텐셔메타(potentiometer)로 계측한다. 소형 6축 센서는 x, y, z 방향의 힘 및 모우멘트가 동시에 측정 가능한 구조로 되어 있고, 센서로부터의 신호는 실시간으로 A/D보드(PCI-3133, Interface)를 통해 입력된다. 샘플링 주파수는 2.0kHz으로 일정히 유지하였고, 입력 데이터와 센서 보정용 캘리브레이션 매트릭스를 이용하여 행렬연산을 행한 후, 2 성분의 힘 즉, x, y 방향의 힘만을 구하였다. 또한 6축 센서는 다음과 같이 교정하였다. 먼저, 0.0-1.0kgf 계측범위의 센서라면 10gr마다 정지하중을 부과하여 각 센서의 선형성을 보정한 후, 교정용 지그에서 x, y, z 방향의 힘 및 모우멘트를 동시에 측정하면서 캘리브레이션 매트릭스를 수정하여 센서를 교정하였다.

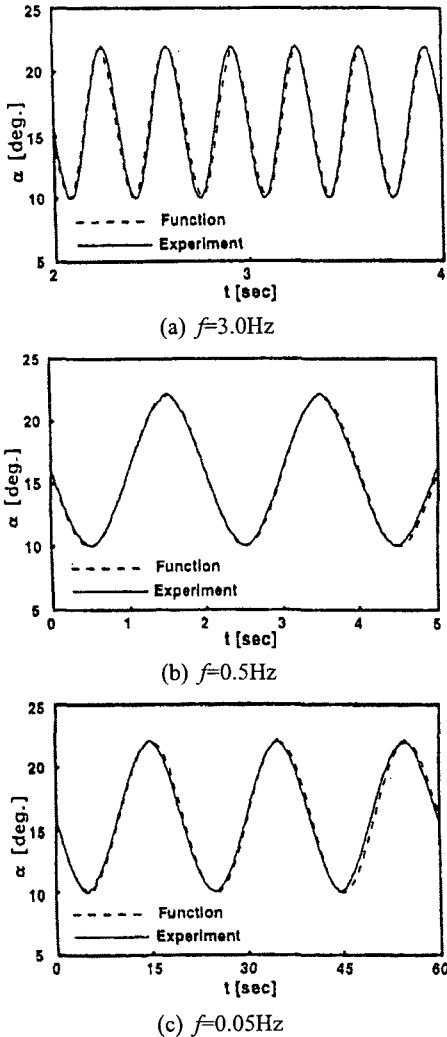


Fig. 3 Trajectory of the angle of attack of the pitching foil

본 실험에서 사용한 익형을 Fig. 2에 나타낸다. 박리점이 고정된 평판익, 익현의 두께가 다른 대칭익 NACA0010과 NACA0020, 캠버익 NACA65-0910, BTE(Blunt Trailing Edge)익의 5 종류를 이용하였다. 모든 익형은 익현장  $c=0.04\text{m}$ , 스패 길이  $l=0.20\text{m}$ 으로 본 논문의 실험조건에서의 scale effect는 매우 작은 것을 확인하였다. 익형의 최대 두께는 평판익이 2mm, NACA0010, NACA65-0910, BTE익이 4mm, NACA0020이 8mm이다. 본 실험에서는 레이놀즈 수  $Re=4 \times 10^4$ , 피칭 진폭  $A=6^\circ$ 로 고정하고, 기본 받음각  $\alpha=6, 12, 16, 24^\circ$ , 비정상 상태 변

수인 무차원 진동수  $k=0.377, 0.063, 0.006(f=3.0, 0.5, 0.05\text{Hz})$ 로 변화시켜 수조의 중심부에서 주류에 평행하게 피칭 운동을 부과하였다. 최대 피칭 진폭은 실험유로 폭의  $\pm 5\%$ 이내로 유로 폭의 영향과 테스트 영역의 블로키지 효과는 무시 가능하리라 생각된다. Fig. 3(a)~(c)는  $\alpha=16 \pm 6^\circ$ ,  $f=3.0, 0.5, 0.05\text{Hz}$ 에서 받음각의 변화를 각각 보인다. 실선은 실험치, 파선은  $A \sin(2\pi ft)$ 로 부여한 함수를 나타낸다. 실험치는 함수치와 거의 같은 파형을 나타내며, 정확한 피칭 주파수, 피칭 진폭을 얻고 있음을 알 수 있다. 본 실험에서는 샘플링 주파수를 2.0kHz로 일정히 유지하고 반복 수행하였고, 위상 평균을 구하기 위하여 소형 6축 센터의 데이터와 함께 기록되는 포텐서메타로부터의 신호를 이용하였다. 테스트 결과, 수렴치를 산출하는데 약 130개의 앙상블이 요구되었다. 그러므로 각 위상에서 180개 이상의 앙상블을 이용하여 평균을 구하였다. 또한 피칭 운동 시의 관성력은 최대 7%로 매우 작으므로 본 실험에서는 고려하지 않았다. 여기서  $X(t), Y(t)$ 는 x, y 방향의 힘, T가 피칭운동의 주기이면, 각 주기 당 시간평균 항력 D와 양력 L은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$D = \frac{1}{T} \int_0^T (X(t) \sin \alpha + Y(t) \cos \alpha) dt \quad (1)$$

$$L = \frac{1}{T} \int_0^T (X(t) \cos \alpha - Y(t) \sin \alpha) dt \quad (2)$$

한편 각 익형에 대하여 반복 실험을 통하여 불확실성 해석을 수행하였다. 편중오차는 주로 스트레인 게이지와 증폭기에서 발생하며 최대 에러는 약 2% 이하였고, 우연오차는 주로 받음각의 측정, 익형의 속도 측정, 익 운동의 파형으로부터 발생하며  $C_D$  및  $C_L$ 의 값은 흩어져 분포하지만 최대 약 4.5% 이하였다. 따라서 전 계측오차( $\Delta \bar{C}$ ) 다음 식에 의하여 최대 4.9% ( $\approx \sqrt{2^2 + 4.5^2}$ )이내였다.

$$\Delta \bar{C} = \left| \frac{1}{T} \int_0^T \Delta \{ (X(t) \sin \alpha + Y(t) \cos \alpha) / \rho v^2 c l \} \right| + \left| \frac{1}{T} \int_0^T \Delta \{ (X(t) \cos \alpha - Y(t) \sin \alpha) / \rho v^2 c l \} \right| \quad (3)$$

### 3. 결과 및 고찰

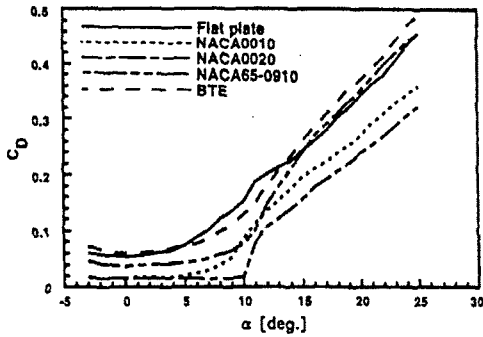
#### 3.1 정상 항력 및 양력

Fig. 4는 정상(정지) 상태에서 각 익형의 받음

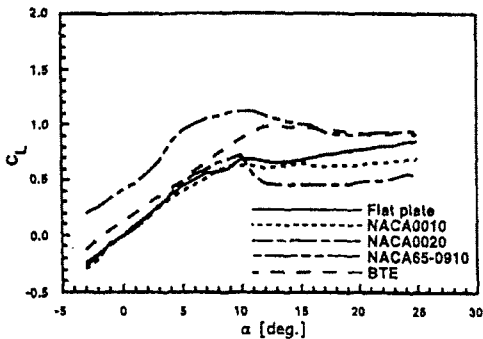
각의 변화에 따른 시간 평균한 항력 계수  $C_D$  및 양력 계수  $C_L$ 를 보인다. 모든 익형에서  $\alpha=10^\circ$  부근에서  $C_D$ 의 기울기가 급격히 감소 또는 일정해지는 것으로부터  $\alpha=10^\circ$  정도부터 받음각이 커지면 익의 전연으로부터 박리가 발생하는 것으로 추측할 수 있다. 특히, NACA 0010, NACA0020의 경우는  $C_D$ 가  $\alpha=10^\circ$  부근에서 급격히 증가하지만, 평판익, NACA65-0910, BTE익은 받음각의 변화에 대하여 점차 증가하고 있다. 또한 동일하게  $\alpha=10^\circ$  부근에서  $C_L$ 의 기울기가 커지는 것으로부터  $\alpha=10^\circ$  정도부터 받음각이 커지면 익의 전연으로부터 박리가 발생하는 것을 알 수 있다.

3.2 비정상 항력의 특성

Fig. 5(a)~(c)는 BTE익에서  $\alpha=16\pm 6^\circ$ ,  $k=0.377$ , 0.063, 0.006에서의 받음각의 변화에 따른 항력의 시간적 변화를 각각 보인다. 파선은 받음각, 굵은 실선은 비정상 항력, 가는 실선은 준정상 항력을 나타낸다. 여기서 준정상 항력이란 각 받음각에서 정상 상태의 항력 계수를 표시하며, Fig. 4에 표시



(a) Drag coefficients

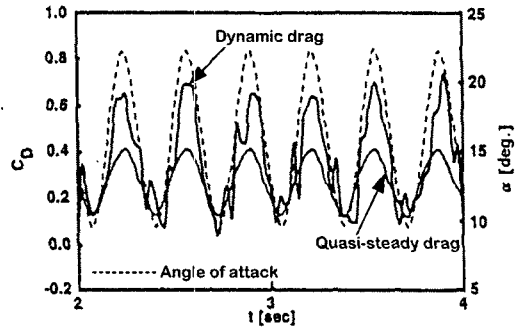


(b) Lift coefficients

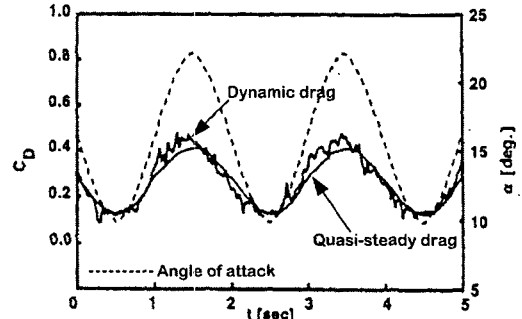
Fig. 4 Drag and lift coefficient under stationary conditions

한 측정값으로부터 보간하여 구하였다.

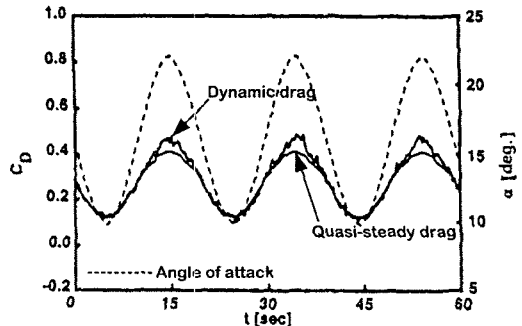
Fig. 4의 결과와 같이 정상 항력은 모든 익형에서 받음각에 대하여 단조롭게 증가하므로 준정상 항력과 받음각 사이에는 위상차가 발생하지 않는다. 또한 비정상 항력의 위상은 모든 무차원 진동수에서 준정상 항력 및 받음각의 위상과 거의 일치하는 것을 확인 할 수 있다. 그러나 무차원 진동수가 작아짐에 따라 비정상 항력이 준정상 항력에 정량적으로 접근하지만 완전히 일치하지 않는 것으로부터 매우 작은 무차원 진동수에서도 비정상성이 남아 있는 것을 알 수 있다. 이러한



(a)  $k=0.377$



(b)  $k=0.063$



(c)  $k=0.006$

Fig. 5 Time histories of  $C_D$  (BTE,  $\alpha=16\pm 6^\circ$ )

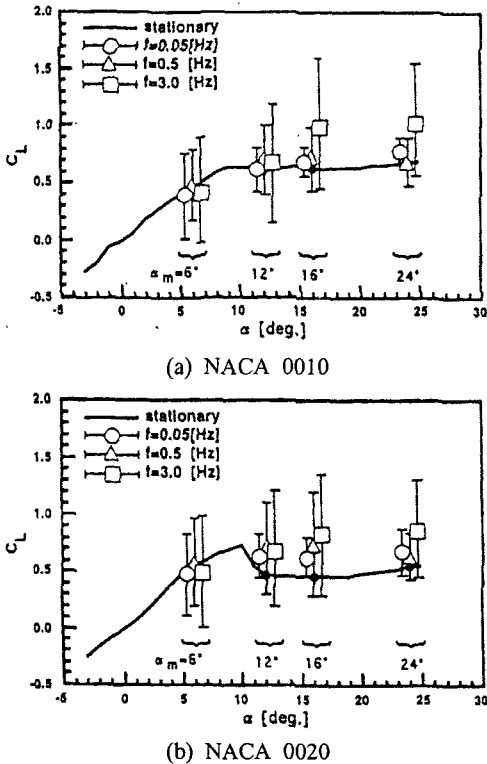


Fig. 6 Amplitude of dynamic lift ( $A=\pm 6^\circ$ )

경향은 다른 모든 익형에서도 확인할 수 있었다.

### 3.3 비정상 양력의 변동 폭

Fig. 6(a), (b)는 4종류의 기본 받음각  $\alpha_m$ 에서 익의 피칭 운동의 효과를 살펴보기 위하여 NACA0010, NACA0020을 대상으로 비정상 양력의 변동 폭과 그 평균치를 각각 보인다. 굵은 실선은 정상 상태의  $C_L$ , ●는 각 기본 받음각에서  $C_L$ , I는 비정상 양력의 변동 폭을 나타낸다. 또한 □, △, ○는 각각  $k=0.377, 0.063, 0.006(f=3.0, 0.5, 0.05\text{Hz})$ 에서 비정상 양력의 평균치를 보인다.

먼저  $\alpha_m=6^\circ$ 의 경우, 비정상 양력은 정상 상태의  $C_L$ 을 중심으로 변동하고 있으며 무차원 진동수가 변화하여도 비정상 양력의 변동 폭은 거의 일정함을 알 수 있다. 이것은 정상 상태에서 박리가 발생하지 않는 기본 받음각에서의 익의 피칭 운동은 양력 특성의 향상에 유효하지 못함을 나타낸다. 그러나  $\alpha_m=12^\circ, 16^\circ$ 의 경우, 무차원 진동수가 커짐에 따라 비정상 양력의 변동 폭도 커지고 그 평균치도 정상 상태보다 커짐을 알 수 있

다. 즉 박리 발생 직후에서의 피칭 운동은 정상 상태 보다도 고 양력이 얻어지는 것으로부터 익형의 성능 향상에 도움이 될 수 있음을 나타낸다.

또한  $\alpha_m=24^\circ$ 의 정상 상태에서 익 전연으로부터 박리가 발생하고 있는 경우는 전 무차원 진동수에서 비정상 양력의 평균치는 정상 상태보다 크고, 특히  $k=0.377$ 의 높은 무차원 진동수에서의 피칭 운동이 보다 유효함을 알 수 있다.

### 3.4 비정상 양력의 이력(hysteresis) 현상

전 절의 비정상 항력 및 양력의 결과에서와 같이 피칭 운동은 정상 상태와 비교하여 익에 작용하는 유체력에 이력현상을 야기하는데, 본 절에서는 이를 보다 자세히 살펴보기로 하자. Fig. 7은 NACA 0020에서  $k=0.377, 0.063, 0.006$ 의 경우  $\alpha=6\pm 6^\circ, \alpha=16\pm 6^\circ, \alpha=24\pm 6^\circ$ 에서의 양력의 이력 현상을 보인다. 굵은 실선은 정상 상태에서 받음각의 증가에 따른  $C_L$ 의 변화를 나타낸다. 먼저,  $k=0.377$ 에서  $\alpha_m=6^\circ$ 의 경우 히스테리시스 루프는 정상상태의  $C_L$ 의 부근에 위치하지만,  $\alpha_m=12^\circ, 24^\circ$ 의 경우는 정상상태의  $C_L$  보다 높이 위치하며 세 루프 모두 오른쪽으로 상승한 기울기(positive slope)를 나타내고 있다. 이것은 피칭 운동에 의한 익 주변의 유동현상의 변화에 의한 것으로 이때의 가시화 결과<sup>(7,10)</sup>에 의하면 무차원 진동수가 큰 경우 익 전연으로부터 발생하는 와류는 받음각이 증가할 때 익 배면에 부착하고, 받음각이 감소할 때 익 배면으로부터 박리되었다. 이러한 유동현상에 의해 비정상 양력은 받음각이 증가할 때에는 증가하고 받음각이 감소할 때는 감소하는 특성을 나타낸다.

한편  $k=0.063$ 에서  $\alpha_m=6^\circ$ 일 때의 히스테리시스 루프는 정상 상태의  $C_L$ 의 주위에 위치하지만,  $\alpha_m=16^\circ$ 의 경우는 익의 다운 스트로크시에 정상 상태의 양력 계수와 일부 겹치고, 업 스트로크시에 정상 상태의  $C_L$ 과는 달라진 루프를 나타내고 있다.  $\alpha_m=24^\circ$ 의 경우도 비정상 양력은 다운 스트로크시에 정상 상태의  $C_L$ 과 일부 겹치고, 업 스트로크시에 정상 상태의  $C_L$ 과는 달라진 루프를 나타내고 있지만,  $\alpha_m=16^\circ$ 의 경우와 비교하면 정상 상태의  $C_L$ 에 보다 접근하고 있다.  $k=0.006$ 에서도  $\alpha_m=6^\circ, 24^\circ$ 의 경우 비정상 양력은 정상 상태의  $C_L$ 과 거의 중복되고,  $\alpha_m=16^\circ$ 의 경우도 일부를 제외하고 중복되어 있다.

따라서 Fig. 6, 7로부터 피칭익에 작용하는 비정상 양력은 정상 상태에서 박리가 발생하지 않는 낮은 받음각 보다는 박리가 발생하는 높은 받음각에서 낮은 무차원 진동수 보다는 높은 무차원 진동수에서 보다 큰 양력이 얻어짐을 알 수 있으며, 이러한 경향은 다른 익형에서도 모두 확인되었다.

3.5 비정상 양력의 특성

Fig. 8, 9(a)-(c)에 평판익과 NACA65-0910의 경우  $\alpha = 16 \pm 6^\circ$ ,  $k = 0.377, 0.063, 0.006$ 에서 받음각의

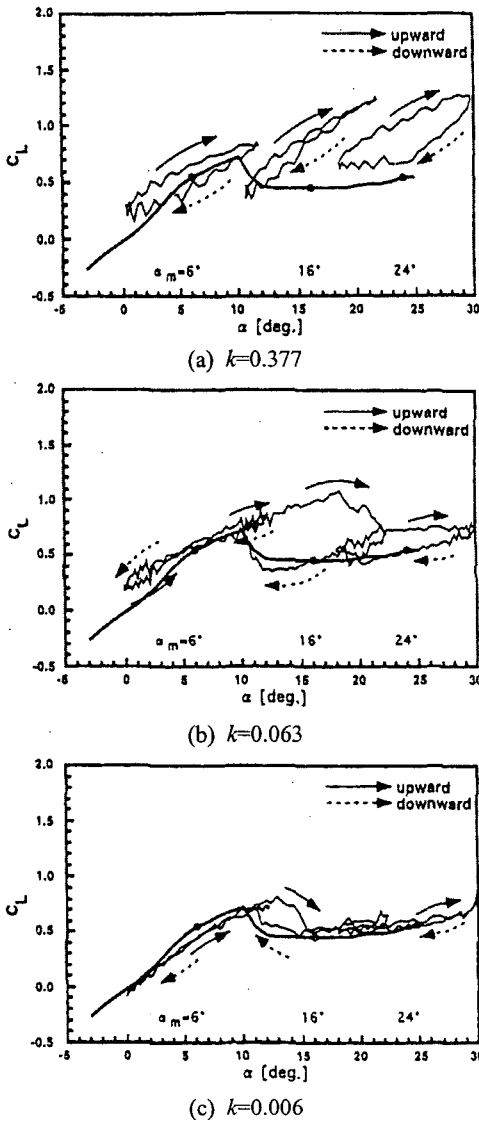


Fig. 7 Hysteresis of dynamic lift (NACA0020  $A = \pm 6^\circ$ )

변화에 따른 양력의 시간적 변화를 각각 보인다. 평판익에서는 Fig. 8과 같이 모든 무차원 진동수에서 준정상 양력과 받음각의 위상이 동기하고 있고 비정상 양력과 받음각의 위상도 거의 동기하고 있다. 또한 3.2절의 비정상 항력의 경우와 같이 무차원 진동수가 작아짐에 따라 비정상 양력은 정량적으로 준정상 양력에 접근하고 있다.

한편, Fig. 9의 NACA 65-0910에서는 준정상 양력과 받음각의 위상이 모든 무차원 진동수에 대하여 일정한 위상차를 나타낸다. 특히  $k = 0.377$ 에서는 비정상 양력과 받음각의 위상은 일치하고 있지만, 무차원 진동수가 감소함에 따라 준정상

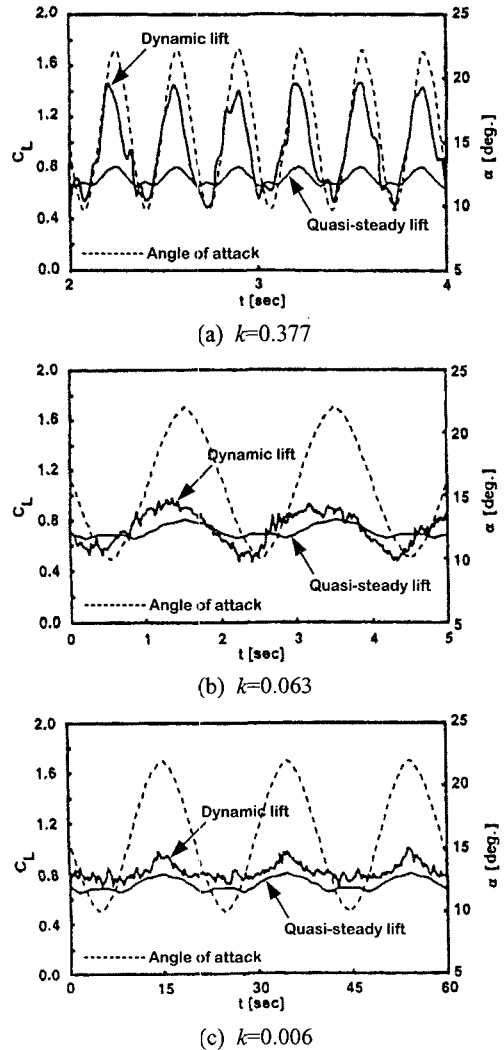


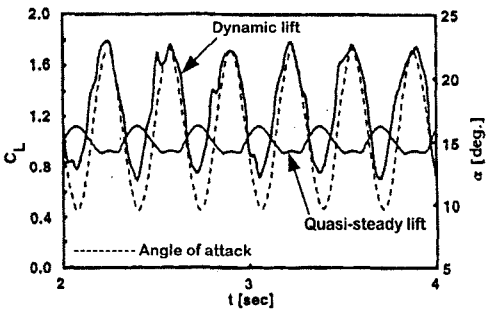
Fig. 8 Time histories of  $C_L$  (Flat plate,  $\alpha = 16 \pm 6^\circ$ )

양력 쪽으로 접근하고 있다. 그러나 비정상성으로 비정상 양력과 준정상 양력의 변화는 완전히 일치하지는 않음을 알 수 있다. 이러한 위상차는 박리점이 이동하기 쉬운 익형의 경우 크게 나타나게 되는데, 다음 절에서 이를 보다 자세히 살펴보기로 하자.

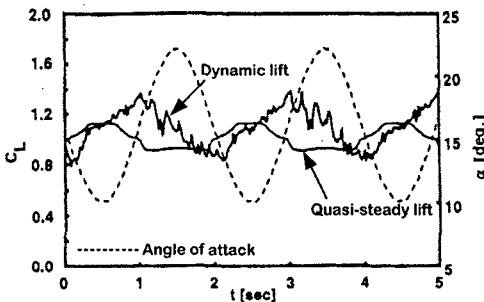
3.6 피칭 운동이  $C_D$ ,  $C_L$ ,  $C_L/C_D$ 에 미치는 영향  
 피칭 운동이  $C_D$ ,  $C_L$ ,  $C_L/C_D$ 에 미치는 영향을 조사하기 위하여 Fig. 10에  $\alpha=16\pm 6^\circ$ 에서 (a)  $C_D$ , (b)  $C_L$ , (c)  $C_L/C_D$ 의 준정상 상태와 피칭 운동 시

의 최대치의 비를 보인다. 모든 익형에서 무차원 진동수가 증가함에 따라  $C_D$ 의 비도 커지지만,  $C_L$ 의 비도 점점 커져 1.0 이상이 되고 있다. 따라서 정상 상태보다 높은 양력을 얻기 위해서는 익의 피칭 운동이 유효함을 보여준다.

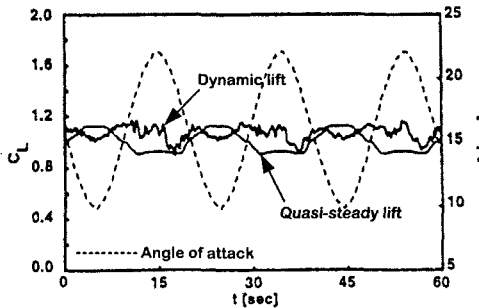
한편  $C_L/C_D$ 의 비는 평판익, NACA0010, NACA65-0910에서는 모두 1.0부근에 있지만, NACA0020, BTE익은 무차원 진동수가 증가함에 따라 1.0보다 커짐을 알 수 있다. 특히, NACA0020의 경우  $k=0.377(3\text{Hz})$ 에서는 2.4로 매우 높은 값을 나타내었다. 따라서 익의 피칭 운동에 의해 높은 양력뿐만 아니라 높은 양항비도



(a)  $k=0.377$

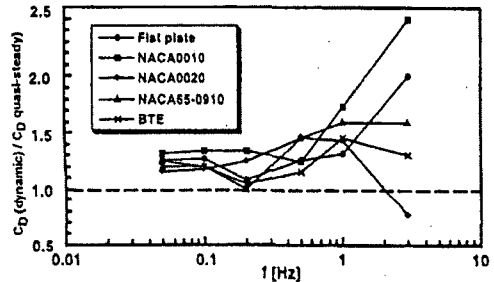


(b)  $k=0.063$

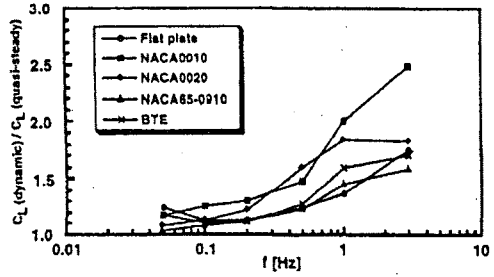


(c)  $k=0.006$

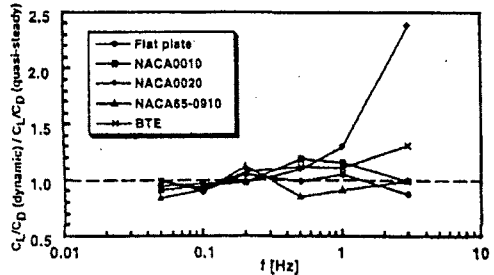
Fig. 9 Time histories of  $C_L$  (NACA65-0910,  $\alpha=16\pm 6^\circ$ )



(a) Ratio of  $C_D$



(b) Ratio of  $C_L$



(c) Ratio of  $C_L/C_D$

Fig. 10 Ratio of  $C_D$ ,  $C_L$  and  $C_L/C_D$  between dynamic and quasi-steady condition ( $\alpha=16\pm 6^\circ$ )

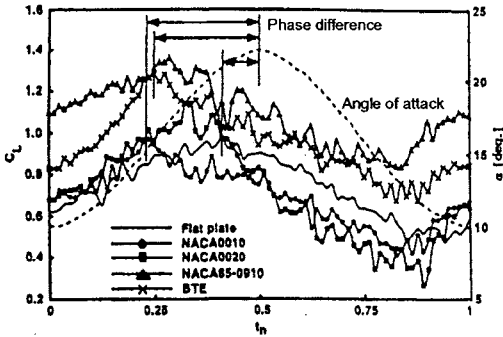


Fig. 11 Influence of foil configuration on phase difference between dynamic lift and angle of attack during one pitching cycle ( $\alpha = 16 \pm 6^\circ$ ,  $k = 0.063$ )

Table 1 Non-dimensional time of max. dynamic lift

Foil	$t_n(C_{Lmax})$	
	Measured	Approximated
Flat plate	0.42	0.39
NACA0010	0.25	0.26
NACA0020	0.32	0.30
ACA65-0910	0.30	0.26
BTE	0.25	0.28

연을 수 있음을 알 수 있다.

한편, Fig. 11에 모든 익형을 대상으로  $k=0.063$ ,  $\alpha=16\pm6^\circ$ 에서 피칭 한주기의 비정상 양력과 받음각의 위상차를 보인다. NACA0010, NACA0020, NACA65-0910, BTE익에서는 비정상양력과 받음각의 위상차가 크지만, 평판익에서는 위상차가 작음을 알 수 있다. Table 1에 Fig. 11에서 비정상 양력이 최대가 되는 무차원 시간  $t_n(C_{Lmax})$ 과 각각을 6차의 근사곡선으로 표시한 결과로부터 얻은  $t_n(C_{Lmax})$ 을 표시한다. 평판익의 경우 측정치와 근사치가 최대 비정상 양력이 되는  $t_n(C_{Lmax})$ 의 값은 약 4.0전후이고, 다른 4가지의 익형의 경우에는 측정치와 근사치가 약 0.3 전후의 값을 나타내고 있다. 이것은 가시화 실험<sup>(7,10)</sup>에 의하면 NACA0010, NACA0020, NACA65-0910, BTE익은 받음각의 변화에 의해 박리점이 쉽게 익 배면 상을 이동하므로 위상차가 발생하지만, 평판익과 같이 박리점이 고정되어 있는 형상에서는 위상차가 발생하기 어렵기 때문에 사료된다.

#### 4. 결론

피칭 운동하는 5가지의 익형(평판익, NACA 0010, NACA0020, NACA65-0910, BTE익)을 대상으로 회류구조, 소형 6축 센서 등을 이용하여 익형에 작용하는 비정상 유체력을 계측한 결과, 비정상 유체력의 이력현상은 Tanaka 등<sup>(7)</sup>의 피칭 운동 시 받음각과 무차원 진동수의 변화에 따른 익 주변의 유동 현상의 변화와 잘 일치함을 보였다. 본 논문의 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 피칭 운동 시 익에 작용하는 비정상 항력과 받음각의 위상은 거의 일치하며, 무차원 진동수가 감소함에 따라 비정상 항력은 정량적으로 준정상 항력에 접근하지만 완전히 일치하지는 않으며 매우 작은 무차원 진동수에서도 비정상상을 유지하였다.

(2) 피칭 운동에 의해 익에 작용하는 유체력에는 히스테리시스 현상이 발생하고, 특히 정상 상태에서 박리가 발생하는 영역에서 무차원 진동수가 증가함에 따라 변동의 폭이 큰 양력이 얻어졌다.

(3) 평판익의 경우 모든 무차원 진동수에서 비정상 및 준정상 양력의 위상은 받음각의 위상과 동기하고 있으나, NACA 65-0910의 경우 준정상 양력과 받음각의 사이에는 위상차가 존재하고, 무차원 진동수가 감소함에 따라 비정상 양력의 위상은 받음각에서 준정상 양력 쪽으로 이동하였다.

(4) 양력 계수는 모든 익형에서 무차원 진동수가 증가함에 따라 커지고, 특히 NACA0020의 경우 피칭 운동에 의해 양력뿐만 아니라 양항비도 크게 증가하였다.

#### 참고문헌

- (1) Theodorsen, T., 1935, "General Theory of Aerodynamic Instability and the Mechanism of Flutter," *NACA TR*, 496.
- (2) Garrick, I. E., 1936, "Propulsion of a Flapping and Oscillating Airfoil," *NACA Report*, 567.
- (3) Bisplinghoff, R. L., Ashley, H. and Halfman, R. L., 1955, "Aeroelasticity," Dover Plication.
- (4) Panda, J. and Zaman, K. B. M. Q., 1994, "Experimental Investigation of the Flow Field of an Oscillating Airfoil and Estimation of Lift from



- Wake Surveys," *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 265, pp. 65~95.
- (5) Chang, J. W and Eun, H. B., 2003, "Reduced Frequency Effects on the Near-Wake of an Oscillating Elliptic Airfoil," *KSME Int. journal*, Vol. 17, No. 8, pp. 1234~1245.
- (6) Lai, J. C. S. and Platzer, M. F., 1999, "Jet Characteristics of Plunging Airfoil," *AIAA Journal*, Vol. 37, No. 12, pp. 1529~1537.
- (7) Tanaka, K., Fuchiwaki, M., Tsukamoto, K. and Tanaka, H., 1997, "Unsteady Separation and Dynamic Lift Around an Airfoil Undergoing Pitching Motion," *ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*, FEDSM97-3673.
- (8) Gad-el-Hak, M. and Bushnell, D. M., 1991, "Separation Control: Review," *Trans. of the ASME J. of Fluids Engineering*, Vol. 28, No. 9, pp. 1535~1552.
- (9) Ho, C. M. and Tai, Y. C., 1998, "MEMS and Fluid Flows," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 30, pp. 579~612.
- (10) Fuchiwaki, M., Tanaka, K. and Baysal, O., 1998, "Dynamic Behavior of Vortices from an Airfoil Undergoing Pitching Motion," *ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*, FEDSM 98-4941.