

# 자유낙하하는 판의 fluttering 특성 연구

홍슬기\* · 채석봉\* · 김주하†

## Fluttering Characteristics of Free-falling Plates

Seulki Hong\*, Seokbong Chae\* and Jooha Kim†

**Abstract** Abstract In the present study, the characteristics of kinematics and dynamics in the fluttering motion of free-falling plates are investigated at Reynolds number of  $10^5$ . We record quasi-two-dimensional trajectories of free-falling plates with and without superhydrophobic coating using high-speed camera, and compute the drag and lift forces by trajectory analysis. Translational and angular velocities are modeled as harmonic functions with specific phase differences. In particular, periodic mass elevations near turning points are explained using the suggested models. At each turning point, a sudden drop in lift and a rapid increase in drag occur simultaneously due to fast increase in angle of attack. However, the lift is increased over the buoyancy-corrected weight of plate during gliding flight, resulting in periodic mass elevations near turning points. Superhydrophobicity is shown to increase lift but to reduce drag on a fluttering plate, resulting in the decrease of mean descent speed.

**Key Words** : Free-falling plate(자유낙하 평판), Fluttering(떨림), Lift(양력), Drag(항력)

### 기호설명

$a$  : 평판의 가속도  
 $D$  : 항력  
 $D^*$  : 부력과 중력의 합력의 크기로 무차원화된 항력  
 $\hat{e}_V$  : 평판 속도방향의 단위벡터  
 $E$  : 평판의 Young's modulus  
 $F$  : 동유체력  
 $g$  : 중력가속도

$I$  : 평판의 관성모멘트  
 $I^*$  : 평판의 무차원화된 관성모멘트  
 $h$  : 평판의 두께  
 $L$  : 양력  
 $L^*$  : 부력과 중력의 합력의 크기로 무차원화된 양력  
 $m$  : 평판의 질량  
 $m'$  : 평판의 부력보정 질량  
 $l$  : 평판의 길이  
 $Re$  : 레이놀즈 수  
 $T$  : fluttering 주기  
 $t$  : 시간  
 $t^*$  : fluttering 주기로 무차원화된 시간  
 $V$  : 평판의 속도  
 $V_d$  : 평판의 평균하강속도

---

† Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology  
E-mail: kimjooha@unist.ac.kr

\* Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology

---

$V_x$	: 평판의 $x$ 방향 속도성분
$V_y$	: 평판의 $y$ 방향 속도성분
$w$	: 평판의 폭
$x$	: 수평 방향
$x^*$	: 평판의 폭으로 무차원화된 $x$ 좌표
$y$	: 중력 방향
$y^*$	: 평판의 폭으로 무차원화된 $y$ 좌표
$\beta$	: 너비 대 두께 비
$\theta_c$	: 접촉각
$\lambda$	: 종횡비
$\nu$	: 물의 동점성계수
$\rho_f$	: 물의 밀도
$\rho_s$	: 평판의 밀도
$\omega$	: 평판의 각속도

## 1. 서론

유체 속에서 자유낙하하는 물체의 운동은 중력과 부력 및 동유체력(hydrodynamic force)에 의해 결정된다. 물체 주위의 유동에 의해 물체를 중심으로 한 동유체력의 대칭이 깨지면 낙하하는 물체는 회전하거나(tumbling motion) 연직 방향을 벗어나 측면으로 진동하는 움직임(fluttering motion)을 갖는다<sup>(1)</sup>. 이러한 비정상상태의 자유낙하운동은 1853년 Maxwell<sup>(2)</sup>이 낙하하는 종이의 운동을 정성적으로 관찰한 이래 오랜 연구 주제였으며, 떨어지는 나뭇잎과 씨앗<sup>(3,4)</sup>, 눈송이<sup>(5)</sup> 등의 자연현상 뿐 아니라 인쇄기 내 종이의 펄러임<sup>(6)</sup>, 회전익의 자동 회전 현상<sup>(7)</sup> 등 다양한 공학적 문제를 이해하는 데 기초가 되는 학문적 의의를 갖는다.

평판의 폭을  $w$ , 길이를  $l$ , 두께를  $h$ , 관성모멘트를  $I$ , 밀도를  $\rho_s$ , 평균하강속도를  $V_d$  라 하고 물의 밀도를  $\rho_f$ , 동점성계수를  $\nu$ 라 할 때(Fig. 1), 물 속에서 자유낙하하는 평판의 운동에 관한 무차원수들인 종횡비( $\lambda$ ), 너비 대 두께 비( $\beta$ ), 무차원화된 관성모멘트( $I^*$ ), 레이놀즈 수( $Re$ )는 각각 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\lambda = \frac{l}{w} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{w}{h} \quad (2)$$

$$I^* = \frac{32I}{\pi\rho_f w^5 \lambda} = \frac{8\rho_s h(w^2 + h^2)}{3\pi\rho_f w^3} \quad (3)$$

$$Re = \frac{V_d w}{\nu} \quad (4)$$

이와 같은 무차원수들을 이용하여 평판의 자유낙하운동을 분석하기 위한 다양한 연구들이 진행되었다. Smith<sup>(7)</sup>는  $\lambda$ ,  $\beta$  그리고  $Re$  변화에 따른 운동궤적의 변화를 관찰하여 3가지 형태(stable motion, tumbling motion, fluttering motion)의 상태로 나타내었고(Fig. 2), Andersen 등<sup>(8)</sup>은  $\beta$ 를 변화시켜 fluttering과 tumbling motion 사이의 전이상태(transition phase)를 포함한 4가지 형태의 낙하양상을 관측하였다. Wang 등<sup>(9)</sup>은  $\lambda$ 가 증가할 때 하강 속도가 감소하는 반면 회전 및 수평 속도가 증가함을 보였다. 최근에는 평판의 형상과 크기 변화 외에도 균일하지 않은 질량 분포를 가진 평판<sup>(10)</sup>과 휘어지는 평판<sup>(11)</sup>의 영향이 자유낙하운동에 미치는 영향도 연구되었다. 한편, 관측한 운동 궤적을 바탕으로 주변 유체가 평판에 작용하는 동유체력을 준정상상태(quasi-steady state)를 가정하여 모델링하려는 노력들도 활발히 진행되었다. Tanabe & Kaneko<sup>(12)</sup>는 저항이 속도에 선형적으로 비례한다고 가정하였으나, Belmonte 등<sup>(13)</sup>은 저항이 속도의 제곱에 비례한다고 가정하였고, Mahadevan 등<sup>(14)</sup>은 저항상수를 도입하여 두 가지 경우에 대해 모두 고려했다. Pesavento & Wang<sup>(15)</sup>과 Andersen 등<sup>(8)</sup>은 평판의 기울기가 클 때 이전 모델들의 한계를 극복하고자 저항을 속도와 각속도의 곱에 비례하는 비선형항으로 고려했다.

한편, 최근 들어 유동 저항을 줄이기 위한 방법으로 생체 모방 분야에서 비롯된 초소수성 표면을 응용하는 연구가 주목받고 있다<sup>(16)</sup>. 뭉툭한 물체의 경우 Mchale 등<sup>(17)</sup>은 구가 물 속에서 자유낙하할 때 초소수성 표면 처리를 하면 저항이 5~15% 가량 감소함을 확인하였다. 평판의 경우 Zhao 등<sup>(18)</sup>과 Aljallis 등<sup>(19)</sup>이 표면 거칠기를 증가시켜 초소수성

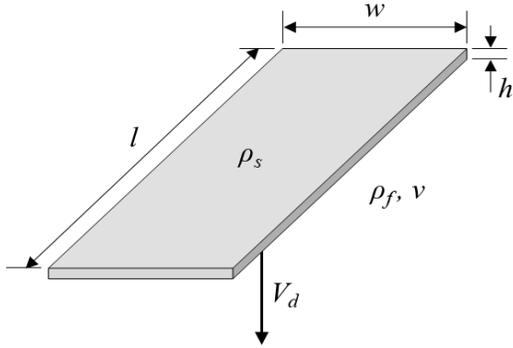


Fig 1. Parameters of a free-falling plate.

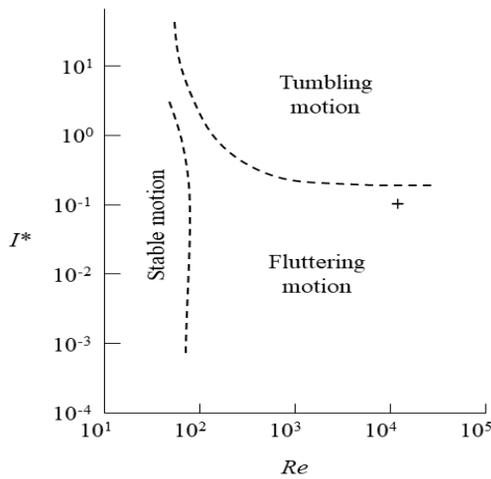


Fig. 2. Phase diagram of two-dimensional falling plate (redrawn from Smith<sup>(7)</sup>). Symbol (+) denotes the present experimental conditions.

표면 처리를 한 후 저항 감소를 관찰한 예가 있으나, 이러한 연구들은 실험 조건이 평판이 고정된 상태에 국한된 한계를 갖는다.

본 연구에서는 물 속에서 자유낙하하는 평판의 2차원 fluttering에 초점을 맞추어 실험을 통해 비행 궤적을 측정하고, 측정된 궤적을 바탕으로 fluttering kinematics와 dynamics의 특성을 분석하였다. 또한 표면에 초소수성 코팅(superhydrophobic coating)한 평판의 자유낙하운동을 동일한 형상과 크기를 지닌 2차원 평판의 자유낙하운동과 비교하여 초소수성 표면이 자유낙하운동에 미치는 영향을 살펴보았다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 실험 장치

본 실험 장치는 낙하장치(releasing mechanism), 전원공급기, 평판, 수조, 초고속카메라, DPSS 레이저로 구성된다(Fig. 3). 이 중 낙하장치는 평판을 원하는 초기각도로 자유낙하시키는 역할을 하며, 회전 스테이지(R11-40)와 주문 제작된 방수 전자석으로 구성된다. 초기각도는 1/80°의 분해능을 갖는 회전 스테이지로 제어하였으며, 본 실험에서는 초기 각도를 20°로 고정하였다. 방수 전자석은 전원공급기와 연결되어 공급전압에 따라 자성의 세기가 변하며, 이러한 성질을 이용하여 평판을 자유낙하시켰다. 자유낙하가 시작될 때 방수 전자석과 평판 간의 상호작용에 의한 유동간섭을 최소화하기 위해 전자석의 세 점에서 평판의 중량을 지지

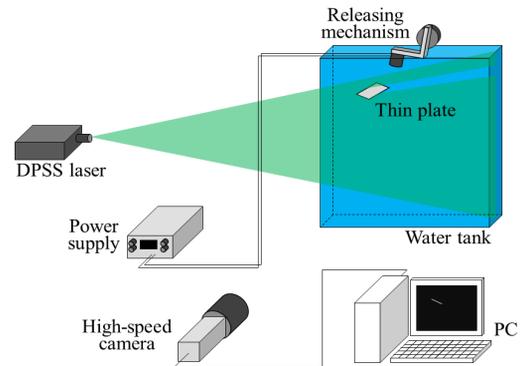
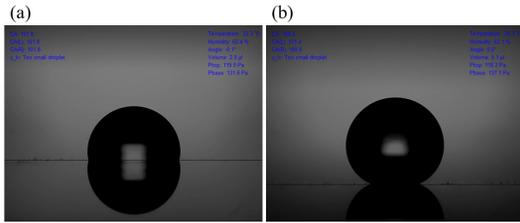


Fig. 3. Experimental set-up.



Fig. 4. Collage of consecutive video fields ( $\Delta t = 0.06s$ ) for a base plate falling in water.



**Fig. 5.** Contact angle measurements of (a) base plate ( $\theta_c = 101.8^\circ$ ); (b) SHPS plate ( $\theta_c = 168.6^\circ$ ).

하도록 설계하였으며, 이를 통해 3개의 지지점을 제외한 면에 대해 평판과 전자석간의 거리는 4mm 이상의 간격을 유지하도록 하였다. 또한 평판을 수조 안의 물 속에 자유낙하시키기 전에는 최소 30분 이상의 시간 간격을 두어 물 속의 잔류유동을 제거하였다. 자유낙하하는 평판의 운동을 선명하게 가시화하기 위해 평판의 측면에서 5W DPSS 레이저(RN-532)를 통해 532nm의 파장을 갖는 레이저 평면을 조사하였으며, 조사된 이미지는 초고속카메라 (SpeedSense M310)를 통해 1280 pixel  $\times$  800 pixel의 해상도와 500fps의 속도로 촬영되었다(Fig. 4). 평판의 자유낙하가 이루어지는 수조는 투명 아크릴로 제작했으며, 내부 치수는 폭 1,000mm, 길이 105mm, 높이 1,000mm 이다. 특히 평판의 자유낙하 운동을 2차원 운동으로 제한하기 위해 수조의 길이는 평판의 길이와 거의 동일하게 제작하였다(11,20). 평판의 크기는 폭( $w$ ) 60mm, 길이( $l$ ) 100mm, 두께( $h$ ) 1mm 이며,  $7.6 \text{ g/cm}^3$ 의 밀도( $\rho_s$ )를 갖는다. 위의 조건에 따른 평판의 무차원화된 관성모멘트( $I^*$ )는 0.1078, 평판의 폭과 평균하강속도를 기준으로 한 레이놀즈 수( $Re$ )는 약 150,000이며, 이 조건에서의 자유낙하 운동궤적은 Smith<sup>(7)</sup>가 제시한 상태에서 fluttering motion에 해당한다(Fig. 2). 자유낙하 중 평판의 휘어짐에 의한 영향을 배제하기 위해 충분히 높은 Young's modulus ( $E = 200 \text{ GPa}$ )를 갖는 재질(SS41)의 평판을 사용하였다. 또한 평판의 네 모서리에는 지름 0.8mm의 스테인리스 비드를 부착하여 평판이 낙하하는 중에 수조 벽면에 닿더라도 그에 따른 마찰을 최소화하여 자유낙하가 가능하도록 하였다.<sup>(11)</sup>

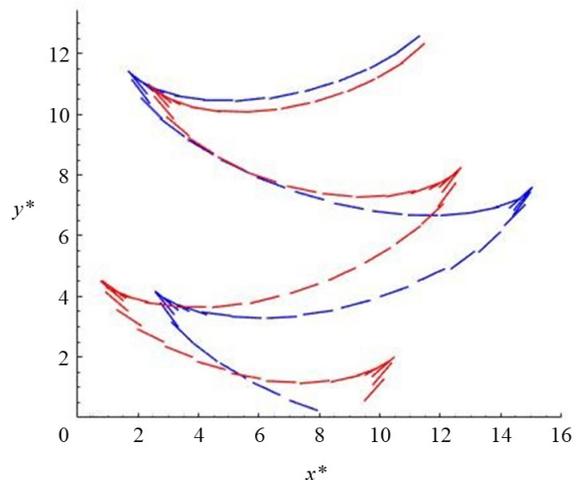
## 2.2 평판 초소수성 표면 처리

본 연구에서 사용된 평판에 초소수성 코팅을 하기 위하여 Soft99사의 GLACO MIRROR COAT ZERO를 사용하였다. 초소수성 코팅이 균일하게 생성되도록 스프레이를 양면에 각각 분사하였으며, 30분 이상의 충분한 건조시간을 가진 뒤 실험에 사용하였다. Fig. 5a는 초소수성 처리를 하지 않은 평판(이하 base 평판), Fig. 5b는 초소수성 처리를 한 평판(이하 SHPS 평판)의 접촉각( $\theta_c$ )을 측정한 결과이다. Bhushan & Jung<sup>(16)</sup>의 정의에 따르면, 두 평판 모두  $90^\circ$  이상의 접촉각을 갖는 소수성(hydrophobicity)을 떠나, SHPS평판의 경우  $\theta_c = 168.6^\circ$ 로 접촉각이  $150^\circ$  이상인 초소수성(superhydrophobicity)을 띠는 것을 확인하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 평판의 fluttering kinematics 분석

Fig. 6은 자유낙하하는 base 평판과 SHPS 평판의 운동 궤적을 0.06초 간격으로 나타낸 것이다. 관성 좌표계의 원점을 수조의 좌하단으로 놓았을 때,  $x^*$ 와  $y^*$ 는 각각 평판의 폭으로 무차원화된  $x$ ,



**Fig. 6.** Measured trajectories of base plate (blue) and SHPS plate (red). The thick line segments show the plate cross-sections with time intervals of 0.06s.

y좌표를 나타낸다. Fig. 6에 도시한 바와 같이 base 평판은 낙하하면서 양 옆으로 펠럭이는 fluttering motion을 보인다. 좌우 양단 근처에서 한 쪽 방향으로의 병진운동이 끝남과 동시에 빠른 속도로 회전운동이 일어나면서 질량 중심이 상승하는 것을 볼 수 있으며, 이로 인해 좌우 양단은 뾰족한 모양을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이러한 fluttering motion의 정성적 특징은 Andersen 등<sup>(8)</sup>의 관찰 결과와도 잘 일치한다. SHPS 평판의 경우, 좌우로 펠럭이는 진폭의 크기가 base 평판에 비해 감소하지만 여전히 fluttering motion을 보인다(Fig. 6). SHPS 평판의 fluttering 주기( $T$ )는 1.604초로 base 평판(1.802초)에 비해 약 11% 짧다. 또한 SHPS 평판의 평균하강속력은 22.32cm/s로 base 평판(23.31cm/s)에 비해 4.25% 감소하는 결과를 보였으며, 이러한 차이의 원인을 알아보기 위해 3.2에서 fluttering dynamics를 분석하였다.

Fig. 7은 시간에 대해 중앙차분법(central difference method)을 이용하여 구한 base 평판과 SHPS 평판의 x방향 속도, y방향 속도 및 각속도의 시간에 따른 변화를 최소제곱법(least square method)을 통해 조화함수로 근사한 결과를 나타낸 것이다<sup>(8)</sup>. 과란 실선은 base 평판, 빨간 실선은 SHPS 평판의 결과이며, 서로 다른 주기를 갖는 두 평판의 비교를 용이하게 하기 위해 각각의 주기로 무차원화된 시간( $t^*$ )에 대해 결과를 도시하였다. 자유낙하가 이루어지는 동안 평판의 x방향 전환점(turning point)이 거의 일정한 진폭을 가지고 주기적으로 나타나기 때문에  $V_x$ 는 가장 단순한 조화함수의 형태를 갖는 것을 볼 수 있다(Fig. 7a). 한편 위에서 언급한 바와 같이 연속된 하강 속에서도 좌우 양단의 전환점 근처에서 질량 중심이 상승하고  $V_x$ 의 한 주기는 두 개의 전환점으로 구성되기 때문에, y 방향의 운동은 x방향 운동의 1/2배의 주기를 갖는 조화함수의 형태를 갖는다(Fig. 7b). 한 가지 흥미로운 것은  $V_x$ 와  $V_y$  사이에는  $T/4$  만큼의 위상차가 존재하며, 따라서  $V_x = 0$ 이 되는 전환점에서  $V_y$ 의 크기는 평균하강속도의 크기와 일치한다는 점이다.

각속도의 경우 단순한 조화함수의 형태로 가정하기에는 복잡한 운동 양상을 보인다(Fig. 7c). 즉,  $\omega$ 는  $V_x$ 와 같은 주기로 일정하게 진동하지만 방향

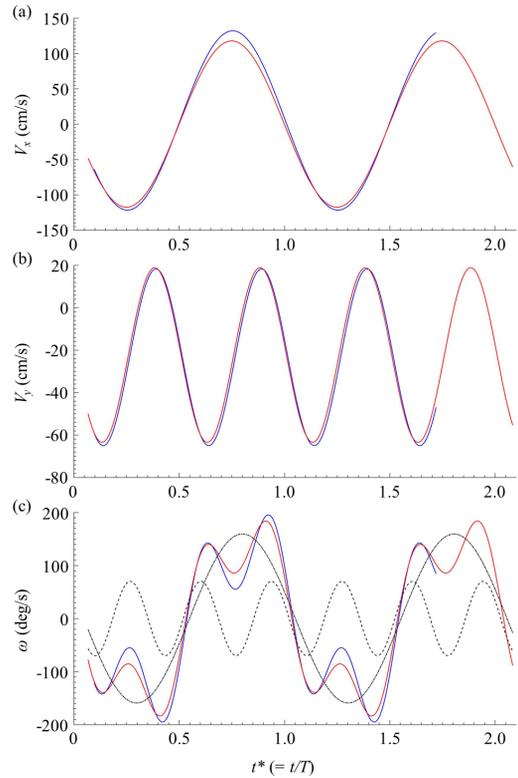
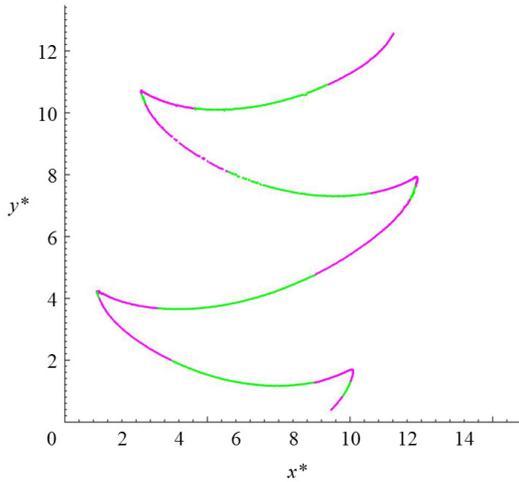


Fig. 7. (a) The horizontal velocity components, (b) the vertical velocity components and (c) the angular velocities of base plate (blue) and SHPS plate (red). Black solid and dashed lines denote the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> term of eq. (5) in the case of SHPS plate, respectively.

전환점 주위에서 x방향 운동의 1/2배의 주기를 가지고 gliding 때 보다 더 큰 각속도를 갖는다. 이와 같은 fluttering 특성을 반영하기 위해 각속도의 근사 함수는 다음과 같이 서로 다른 주기를 갖는 조화함수의 합으로 가정하였다.

$$\omega = \omega_1 \sin(\psi t + \phi_1) + \omega_2 \sin(3\psi t + \phi_2) \quad (5)$$

위 식을 이용하여 나타낸 SHPS 평판 각속도의 첫 번째와 두 번째 항은 각각 Fig. 7c의 검은 색 실선과 점선으로 나타내었다. 첫 번째 항이 양수인 경우 평판이 반시계 방향으로 회전하며, 이는 평판이 수평면과 이루는 각도 변화량의 방향성을 의미한다.

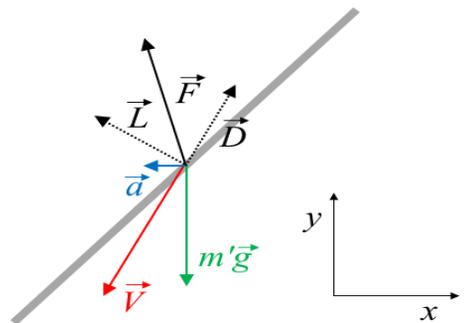


**Fig. 8.** Constructive (pink) and destructive interference (green) of 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> term in eq. (5) on the trajectory of SHPS plate.

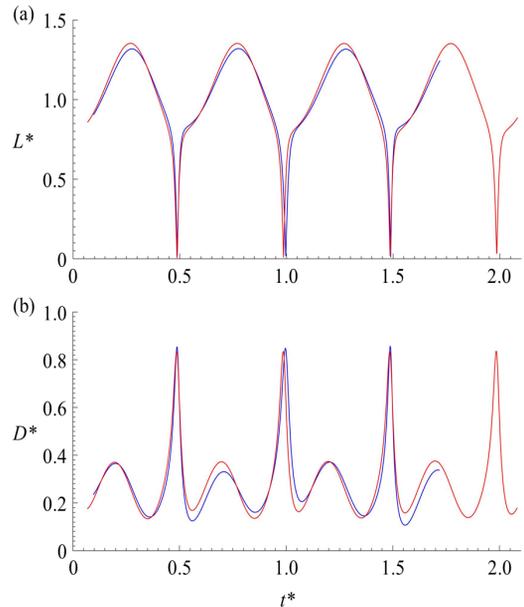
두 번째 항은 첫 번째 항과 부호가 일치하는 전환점 근처에서 각속도의 크기가 증가하고 방향 전환점 사이 구간에서는 각속도의 크기가 감소함을 의미한다. Fig. 8은 식 (5)의 모델이 어떻게 SHPS 평판의 운동 궤적을 구성하는지를 나타낸다. 두 harmonic function이 서로 보강간섭하는 영역과 상쇄간섭하는 영역은 각각 분홍색 실선과 초록색 실선으로 도시하였다. 이를 통해 전환점 주위에서는 두 조화함수가 보강되어 평판이 수평면과 이루는 각도가 급격히 변하는 반면, gliding 구간에서는 두 harmonic function이 상쇄되어 평판이 수평면과 이루는 각도가 완만히 변하는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 7a와 7c의 비교를 통해 각속도의 주기는  $x$ 방향 속도의 주기와 일치하는 것을 알 수 있다. 마지막으로 Fig. 7a-7c의 비교를 통해  $V_x$ ,  $V_y$ 와  $\omega$ 는 서로 일정한 위상 차를 가지고 변화함을 알 수 있는데, 흥미로운 점은  $t^* = 0.55$ 부터 시작해서 반 주기 동안 나타나는 각속도의 세 개의 극점 중 첫 번째와 세 번째 극점은 각각  $y$ 방향 속도의 극점과 동시에 나타나며, 두 번째 극점은  $x$ 방향 속도의 극점과 동시에 나타난다는 것이다.  $V_x$ ,  $V_y$ 와  $\omega$  사이에서 이와 같은 특정 위상차가 나타나는 물리적 원인에 대한 후속 연구가 필요할 것으로 생각된다.

### 3.2 평판의 fluttering dynamics 분석

3.1에서 자유낙하하는 평판의 운동 궤적을 통해 얻은 kinematics 정보를 이용하면 평판에 작용하는 양력과 항력을 포함한 동유체력의 변화 양상을 파악할 수 있다. 자유낙하하는 평판의 운동은 중력, 부력, 양력( $L$ ) 그리고 항력( $D$ )의 균형에 의해 결정되는데, 분석을 용이하게 하기 위해 본 연구에서는 부력보정 질량( $m'$ )을 이용하여 중력과 부력의 합력을 동시에 고려하였다(Fig. 9).



**Fig. 9.** Forces acting on a free-falling plate.



**Fig. 10.** (a) Nondimensionalized lift,  $L^*$  and (b) nondimensionalized drag,  $D^*$  on the base (blue) and SHPS (red) plates.

이를 이용한  $x$ 방향과  $y$ 방향의 운동방정식은 아래와 같다.

$$F_x = ma_x \quad (6)$$

$$F_y = ma_y + m'g \text{ where } m' = (\rho_s - \rho_f)hlw \quad (7)$$

이 때  $F$ 는 양력과 항력의 합력(hydrodynamic force),  $m$ 은 평판의 질량,  $a$ 는 평판의 가속도,  $g$ 는 중력가속도,  $\rho_s$ 는 평판의 밀도,  $\rho_f$ 는 물의 밀도를 나타낸다. 또한 부력보정 질량( $m'$ )의 정의에 따라  $m'g$ 는 중력과 부력의 합력을 나타낸다. 동유체력의 평판 속도( $V$ ) 반대방향의 성분을 항력, 수직방향의 성분을 양력으로 정의할 때, 양력과 항력은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\vec{L} = (\hat{e}_V \times \vec{F}) \times \hat{e}_V \quad (8)$$

$$\vec{D} = (\vec{F} \cdot \hat{e}_V)\hat{e}_V \quad (9)$$

이 때  $\hat{e}_V$ 는 평판 속도방향의 단위벡터를 의미한다. 식 (6)-(9)를 통해 구한 양력과 항력을 각각 중력과 부력의 합력( $m'g$ )의 크기로 무차원화한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 파란 실선은 base 평판, 빨간 실선은 SHPS 평판의 결과를 나타내며, 서로 다른 주기를 갖는 두 평판의 비교를 용이하게 하기 위해 각각의 주기로 무차원화된 시간( $t^*$ )에 대해 결과를 도시하였다. 초소수성 처리를 한 SHPS 평판의 평균 양력은 base 평판에 비해 1.23% 증가하며(Fig. 10a), 평균 항력은 0.71% 감소한다(Fig. 10b). 이는 초소수성 표면으로 인해 마찰항력이 감소하는 기존 연구<sup>(17,18)</sup>와 일치하는 결과이며, 이로 인해 Fig. 7b에서 도시한 바와 같이 SHPS 평판의 평균하강속도가 base 평판에 비해 감소하는 것으로 보인다. Fig. 10을 통해 알 수 있는 fluttering dynamics의 가장 큰 특징은 방향전환이 일어나는 전환점 ( $t^* = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, \dots$ )에서 양력이 급격히 감소하는 동시에 항력이 급격히 증가하는 것이다. 이는 전환점에서 평판의 받음각이 급격히 증가하면서(Fig. 6) 실속(stall)이 발생하기 때문이다<sup>(8)</sup>. 반면 전환점 사이의 gliding 구간에서는 평판의 받

음각이 상대적으로 작기 때문에(Fig. 6) 평판 위에서 부착된 유동 흐름(attached flow)이 형성되며<sup>(8)</sup>, 이에 따라 높은 양력이 발생하는 것을 알 수 있다. 양력의 최대값은 중력과 부력의 합력보다 크기 때문에( $L^*_{max} > 1$ ), 전환점 근처에서 평판의 질량 중심은 상승하게 된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 초고속카메라를 이용하여 물 속에서 자유낙하하는 평판의 fluttering motion을 가시화하고, 운동 궤적의 분석을 통해 fluttering kinematics와 dynamics의 특성을 살펴보았다. 거의 일정한 진폭을 가지고 주기적으로 진동하는 fluttering의 특징 때문에 평판의  $x$ 방향 및  $y$ 방향 속도는 단순 조화함수로 나타낼 수 있었다. 연속된 하강 속에서도 전환점 근처에서 발생하는 질량중심의 상승으로 인해  $y$ 방향의 운동은  $x$ 방향 운동의 1/2배의 주기를 가지며,  $V_x$ 와  $V_y$  사이에는  $T/4$ 의 위상차가 존재함을 확인하였다. 각속도는  $V_x$ 와 같은 주기를 갖지만 방향 전환점 주위에서  $x$ 방향 운동의 1/2배의 주기를 가지고 gliding 때 보다 증가하는 특성을 가지는데, 이러한 특성을 반영하는 조화함수를 제시하였으며 제시된 각속도 함수를 이용하여 평판의 자유낙하에 따른 평판의 각도 변화를 설명하였다. Fluttering dynamics의 분석을 통해 전환점에서 급격한 양력의 감소 및 급격한 항력의 증가가 나타나는 것을 확인하였으며, 이는 받음각의 급격한 증가에 따른 실속과 관계된 것임을 보였다. 또한 gliding 구간에서 상대적으로 낮은 받음각으로 인해 평판 위에 부착된 유동 흐름이 발생하며, 이로 인해 중력과 부력의 합력을 상회하는 양력이 발생하여 전환점 근처에서 평판의 질량 중심이 상승하는 것을 확인하였다. 평판의 표면에 초소수성 코팅 처리를 할 경우 진폭은 감소하지만 여전히 fluttering motion을 보이는 것을 관찰했으며, 주기와 평균하강속력은 각각 11%, 4.25% 감소하는 것을 확인하였다. 또한 SHPS 평판의 평균 양력 증가(1.23%)와 평균 항력 감소(0.71%)로 인해 평균 하강속도가 감소(4.25%)하는 것을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2016R1D1A1B03933176) 및 울산과학기술원의 신임교수정착과제(1.150142.01)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## REFERENCE

- 1) Ern, P., Risso, F., Fabre, D. and Magnaudet, J., 2012, "Wake-induced oscillatory paths of bodies freely rising or falling in fluids," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 44, pp. 97~121.
- 2) Maxwell, J. C., 1854, "On a particular case of the descent of a heavy body in a resisting medium," *The Cambridge and Dublin Mathematical Journal*, Vol. 9, pp. 145~148.
- 3) McCutchen, C. W., 1977, "The spinning rotation of ash and tulip tree samaras," *Science*, Vol. 197, pp. 691~692.
- 4) Varshney, K., Chang, S. and Wang, Z. J., 2011, "The kinematics of falling maple seeds and the initial transition to a helical motion," *Nonlinearity*, Vol. 25, C1.
- 5) Kajikawa, M., 1982, "Observation of the falling motion of early snow flakes," *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, Vol. 60, pp. 797~803.
- 6) Watanabe, Y., Suzuki, S., Sugihara, M. and Sueoka, Y., 2002, "An experimental study of paper flutter," *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 16, pp. 529~542.
- 7) Smith, E. H., 1971, "Autorotating wings: an experimental investigation," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 50, pp. 513~534.
- 8) Andersen, A., Pesavento, U. and Wang, Z. J., 2005, "Unsteady aerodynamics of fluttering and tumbling plates," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 541, pp. 65~90.
- 9) Wang, W. B., Hu, R. F., Xu, S. J. and Wu, Z. N., 2013, "Influence of aspect ratio on tumbling plates," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 733, pp. 650~679.
- 10) Huang, W., Liu, H., Wang, F., Wu, J. and Zhang, H. P., 2013, "Experimental study of a freely falling plate with an inhomogeneous mass distribution," *Physical Review E*, Vol. 88, 053008.
- 11) Tam, D., 2015, "Flexibility increases lift for passive fluttering wings," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 765, R2.
- 12) Tanabe, Y. and Kaneko, K., 1994, "Behavior of a falling paper," *Physical Review Letters*, Vol. 73, p. 1372.
- 13) Belmonte, A., Eisenberg, H. and Moses, E., 1998, "From flutter to tumble: inertial drag and Froude similarity in falling paper," *Physical Review Letters*, Vol. 81, p. 345.
- 14) Mahadevan, L., Ryu, W. S. and Samuel, A. D., 1999, "Tumbling cards," *Physics of Fluids*, Vol. 11, pp. 1~3.
- 15) Pesavento, U. and Wang, Z. J., 2004, "Falling paper: Navier-Stokes solutions, model of fluid forces, and center of mass elevation," *Physical Review Letters*, Vol. 93, 144501.
- 16) Bhushan, B. and Jung, Y. C., 2011, "Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction," *Progress in Materials Science*, Vol. 56, pp. 1~108.
- 17) McHale, G., Shirtcliffe, N. J., Evans, C. R. and Newton, M. I., 2009, "Terminal velocity and drag reduction measurements on superhydrophobic spheres," *Applied Physics Letters*, Vol. 94, 064104.
- 18) Zhao, J. P., Du, X. D. and Shi, X. H., 2007, "Experimental research on friction-reduction with super-hydrophobic surfaces," *Journal of Marine Science and Application*, Vol. 6, pp. 58~61.
- 19) Aljallis, E., Sarshar, M. A., Datla, R., Sikka, V., Jones, A. and Choi, C. H., 2013, "Experimental study of skin friction drag reduction on superhydrophobic flat plates in high Reynolds number boundary layer flow," *Physics of Fluids*, Vol. 25, 025103.
- 20) Tanabe, Y. and Kaneko, K., 1994, "Behavior of a falling paper," *Physical Review Letters*, Vol. 73, pp. 1372~1375.