# 프링-크래핑 날개의 주기적 운동에 관한 수치적 흐름 가시화

장 조 원† · 손 명 환*

(2004년 4월 8일 접수, 2004년 9월 23일 심사완료)

# Numerical Flow Visualization of Cyclic Motion of a Fling-Clapping Wing

Chang, Jo Won and Sohn, Myong Hwan

**Key Words:** Cyclic Motion(주기적 운동), Fling-Clap Motion(프링-크랩 운동), Numerical Visualization(수치적 가시화), Separation Vortex(분리와류)

**Abstract**

A flow visualization of the two-dimensional rigid fling-clap motions of the flat-plate wing are performed to gain knowledge of butterfly mechanisms that might be employed by butterflies during flight. In this numerical visualization, the time-dependent Navier-Stokes equations are solved for cyclic fling and clap types of wing motion. The separation vortex pair that is developed in the fling phase of the cyclic fling and clap motion is observed to be stronger than those of the fling followed by clap and pause motion(1st cycle motion). This stronger separation vortex pair in the fling phase is attributable to the separation vortex pair of the outside space developed in the clap phase as it moves into the opening in the following fling phase. Accordingly, higher lift and power expenditure coefficients in the fling after clap phase is caused by the stronger separation vortex pair.

기호설명

| | | |
|---|---|---|
| $c$ | : | 시위길이 |
| $C_L$ | : | 양력계수 |
| $P_e$ | : | 소요일률 |
| $Re$ | : | 레이놀즈수 |
| $S_P$ | : | 소요일률계수 |
| $t$ | : | 시간 |
| $u$, $v$ | : | 속도성분 |
| $\vec{V}$, $\vec{V}_s$ | : | 속도벡터 |
| $x$ | : | 흐름방향 |
| $\alpha$ | : | 반열림각 |
| $\dot{\alpha}$ | : | 각속도 |
| $\bar{\dot{\alpha}}$ | : | 평균각속도 |
| $\Psi$ | : | 유량함수 |
| $\omega$ | : | 와도 |
| $\vec{\Omega}$ | : | 회전각속도 |

† 책임저자, 회원, 한국항공대학교 항공운항학과
E-mail : jwchang@hau.ac.kr
TEL : (02)300-0082 FAX : (02)3158-1849
* 회원, 공군사관학교 항공우주공학과

## 1. 서 론

최근 생체유체역학(biofluiddynamics)분야에서 비정상흐름(unsteady flow)에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다.[1,2] Ramamurti와 Sandberg[3]는 피칭운동과 상하운동(heaving motion)을 동시에 수행하는 NACA 0012 에어포일에 대하여 수치적으로 계산하여 최대 추력계수는 피칭운동이 상하운동보다 120° 앞설 때 얻을 수 있다고 하였다. 이와 같은 비정상 흐름 효과를 통한 양력발생 메커니즘에 관한 연구는 작은 말벌(Encarsia Formosa)의 비행

과 관련된 Weis-Fogh[4] 메커니즘으로 시작되었다. 이러한 Weis-Fogh 메커니즘에서 앞전 분리와류(separation vortex)로 인하여 형성되는 프링 단계(fling phase)의 순환(circulation)에 대한 영향이 실험[5]과 점성유동 계산[6]을 통해 규명된 바 있다.

Maxworthy[7]는 날개가 서로 분리되는 단계(moving-apart mode)가 없는 프링-크랩 운동은 자연에서 관찰할 수 있는 현상이라고 하였다. Fig. 1은 나비와 같은 곤충이 비행중일 때 발생될 수 있는 프링-크랩 운동만을 수행하는 날개를 나타낸 것이다. 두개의 동일한 날개는 (a)에서와 같이 접혀진 상태에 있다가, 고정된 뒷전(trailing edge)을 축으로 회전운동을 하여 (b)와 (c)에서와 같이 펼쳐지는데, 이러한 단계를 프링단계(fling phase)라 한다. 두 날개는 완전히 펼쳐진 후 뒷전(trailing edge)을 축으로 하여 (d)와 (e)에서와 같이 서로 접혀지는 회전운동을 하는데 이러한 단계를 크랩단계(clap phase)라 한다. (f)에서와 같이 크랩단계가 끝나게 되면 한 주기가 마치게 되고, 다시 프링단계로 다음 주기의 운동을 반복하는데, 이러한 운동을 버터플라이 메커니즘[7] (butterfly mechanism)이라 한다. 그러나 실제 나비(butterfly)의 운동은 날개가 서로 분리되는 현상이 발견된다.[8] Maxworthy[7]는 나비의 전형적인 날개 운동인 단순한 크랩-프링 메커니즘을 재검토했다. 그는 버터플라이 메커니즘의 프링 단계에서 날개 운동은 Weis-Fogh 메커니즘의 프링 단계와 동일하지만, 크랩 단계에서의 날개 운동은 Weis-Fogh메커니즘(또는 크랩-프링 메커니즘)의 크랩 단계와는 다르다고 하였다. 또한 그는 버터플라이 메커니즘의 크랩 단계에서 날개는 떨어지지 않고, 전형적으로 135°의 최종반열림각(final half-opening angle)을 갖는다고 하였다.

많은 연구가들[9,10]이 날개짓(wing beat) 주파수가 낮고 진폭이 크면서도 낮은 가로세로비(aspect ratio)를 가진 나비(butterfly)의 비행현상을 규명하기 위한 연구를 시도했었다. Betts와 Wootton[11]은 자연계의 다양한 비행형태를 보이는 나비의 비행현상에 대하여 조사하였다. 그들은 가로세로비와 무차원 운동량 매개변수에 의해 특성화되는 날개 형상에서 대표적인 네 가지 비행 형태에 대해 운동학적인 매개 변수를 계산하고 비교했다. 또 필름분석(film analysis)으로부터 날개치기(wing- stroke)의 각도는 비행 방식과 종(species)에 따라서 24°~90°임을 밝혔다. Ellington[12]은 광범위한 크기와 주파수에 걸쳐서 곤충의 필요 동력과 최대 비행 속도를 제공하여 곤충

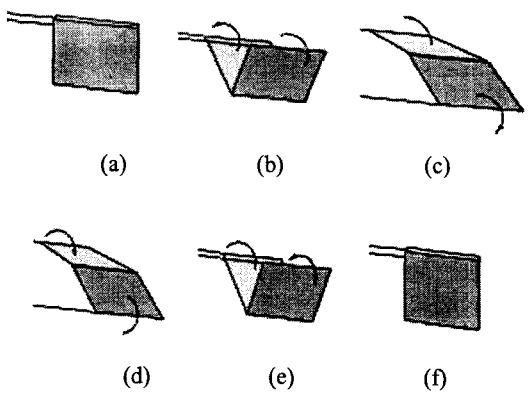



**Fig. 1** Fling-clapping wing

모방 비행체의 설계 특성을 제공했다. 그리고 그는 전형적인 곤충 비행의 운동역학을 보고했다. 최근 나방(Manduca sexta)에 관한 연구에서 날개짓 진폭이 근사적으로 제자리비행시 115°~120°, 최고 속도에서 100°~105°의 범위를 갖는다는 것을 밝혀내었다.

Chang과 Sohn[13]은 2차원 프링-크랩 모델에 대한 실험과 Navier-Stokes 방정식의 수치해를 병행하는 연구를 수행하여 날개면 압력분포를 서로 비교하고, 가시화 실험을 수행하여 날개주위 흐름을 가시화한 실험결과를 발표하였다. Birch와 Dickinson[14]은 프래핑 날개주위의 흐름형태를 PIV를 이용하여 가시화하였다. 그들은 날개가 정지했다가 움직이면서 앞전와류(LEV)가 전개됨에 따라 천이적인 힘(transient force)이 발생되고, 이어서 전개되는 날개와 후류의 상호관계를 규명하였다. Brodsky[15]는 풍동(wind tunnel)에서 비행하는 공작나비(peacock butterfly)의 와류후류 (vortex wake)의 구조가 종전의 곤충비행의 후류와는 아주 다르다는 것을 규명했다. 최근 Sohn과 Chang[16]은 비행의 시작단계 동안 나비에 관한 비정상 공기역학의 지식을 얻기 위해서 날개 모델을 이용하여 수치적 가시화를 수행하였다. 그들은 2차원 프링-크랩 운동의 초기운동을 프링-크랩-정지, 크랩-프링-정지 등으로 구분하여 첫 사이클에 대한 흐름현상을 집중적으로 조사하였다.

실제 곤충의 비행에서 날개운동의 3차원성과 날개재질의 유연성 효과에 대한 고려는 중요하다. 그러나 이와 같은 효과를 고려함에 따른 복잡성을 피하고, 대칭날개 쌍에 의한 분리와류의

발생과 이동, 그리고 이로 인한 비정상 공기력 발생이라는 나비(butterfly) 메커니즘의 기본 흐름 특성은 2차원 강성 날개모델(two-dimensional rigid wing model)에 이해서 그 본질을 규명할 수 있다는 것이 종전의 여러 연구에 의해 입증된 바 있다.[4-7] 따라서 본 연구에서는 주기적인 프링-크래핑 운동을 하는 2차원 평판 날개 모델에 의하여 발생하는 유체흐름현상을 수치적으로 가시화하여 비정상 공기력 발생 메커니즘을 규명하는데 중점을 두었다.

## 2. 수치적 절차

본 연구는 날개 모델로 무한히 얇은 두께의 2차원 평판 날개를 선택하였으며, Fig. 2에 나타난 직선 선분 AB와 CD는 날개를 나타낸다. 선분은 뒷전(trailing edge) B와 C에 연결되어 있는데 뒷전 축을 중심으로 회전운동을 한다. 두 날개는 대칭선에 대해 서로 반대방향으로 움직이며, 날개 CD는 대칭선에 대한 날개 AB의 거울이미지(mirror image)와 같다. 이와 같이 날개는 서로 대칭이기 때문에 본 시뮬레이션에서는 날개 AB를 포함하는 반평면의 흐름장(flow field)만 해석을 수행하였으며, 두 날개 사이의 열림각(opening angle)의 반을 날개 운동을 설명하기 위한 매개 변수로 이용하였다. 와류와 흐름의 함수인 시간의존(time-dependent) Navier-stokes 방정식을 점성영역에 대한 해석장으로 제한하는 미적분 방법에 의해 계산한다. 날개 AB에 고정된 직교좌표계에서 비압축성 Navier-stokes 방정식은 유량함수 $\Psi$에 대한 포아송 방정식(Poission's equation)과 와도 $\omega$에 대한 와도전달방정식(vorticity transport equation)으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial y^2} = -\omega \tag{1}$$

$$\frac{\partial\omega}{\partial t} + \frac{\partial(u\omega)}{\partial x} + \frac{\partial(v\omega)}{\partial y} = \frac{1}{Re}\left(\frac{\partial^2\omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\omega}{\partial y^2}\right) \tag{2}$$

속도성분 u, v는 Fig. 2의 날개 AB에 부착된 이동좌표계(moving reference frame)에서 속도벡터 $\vec{V}$의 x와 y방향 속도성분이다. 식 (1)과 (2)에 대응하는 $\Psi$와 $\omega$의 적분식(integral representation)을 사용하여 경계면에서의 $\Psi$와 $\omega$을 계산하고, 경계면내의 내부유체영역에서의 $\Psi$와 $\omega$는 식 (1)과 (2)를 풀어 구하는 Integro-differential 방법을 사용하였다. 이와 같이 Navier-stokes 방정식 수치해에서 Integro-differential 방법을 적용하는 경우 계산영역은 날개면 가까이의 유체영역만으로 한정시킬 수 있어서 계산효율을 높일 수 있다.

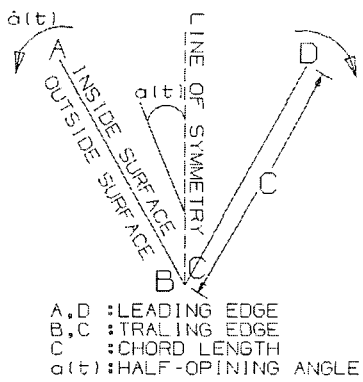



**Fig. 2** Numerical model

속도벡터 $\vec{V}$는 고정좌표계(stationary reference frame)에서의 속도벡터 $\vec{V}_s$와 $\vec{V} = \vec{V}_s - \vec{\Omega} \times \vec{r}$과 같은 관계를 갖고 있다. 여기서 $\vec{\Omega}$는 이동좌표계에 대한 회전각속도이며, $\vec{r}$은 이동좌표계에서의 위치벡터이다. 무차원화된 지배방정식 식 (1)과 (2)에서 사용된 값은 날개의 평균각속도인 경우 $\bar{\alpha}$를, 시간인 경우 $1/\bar{\alpha}$, 와도(vorticity)인 경우 $\bar{\alpha}$를, 유량함수인 경우 $\bar{\alpha}c^2$ 등으로 무차원화 하였다. 식 (2)의 확산항(diffusion term)에 있는 무차원변수 Re는 다음과 같이 정의되는 흐름의 레이놀즈수(Reynolds number)이다.

$$Re = \bar{\alpha}c^2 / \nu \tag{3}$$

본 연구에서는 영이 아닌 와류 구역의 바깥쪽 가장자리에 위치한 계산 영역에서 외부 경계의 유량함수 값과 표면 와류 값을 구하기 위해 적분 방정식을 이용한다. 따라서 날개 모델을 위한 외부 경계의 유량함수 값을 구하기 위한 적분 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.[6]

$$\Psi(\vec{r}, t) = \frac{1}{2\pi}\int\int_R \omega(\vec{r_0}, t)\ln\frac{|\vec{r}|}{|\vec{r_0} - \vec{r}|}\,dR_0 \tag{4}$$

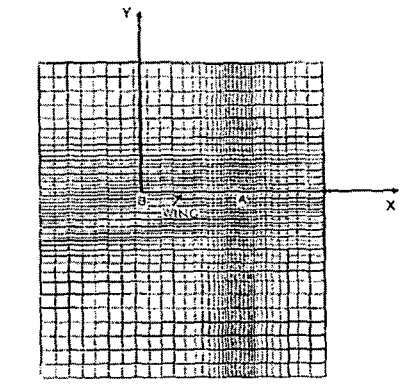
식 (4)는 유체로 채워진 영역 R에서의 $\omega$분포를 알면 임의의 위치에서 각 위치마다 독립적으로 유량함수 값을 계산할 수 있는 식이다. 날개

면의 유량함수 값은 날개운동이 기술되면 그 값이 정해진다. Integral-differential 방법에서는 기술된 날개운동과 식 (4)를 이용하여 계산영역 외부경계의 유량함수 값을 계산하고, 식 (1)을 풀어서 유량함수 값을 구하게 된다. 와도전달방정식 (2)의 외부경계 와도값은 영이며, 날개면에서의 와도값은 속도벡터의 와도장 표현에 의한 보조식을 사용하여 구해진다.[17]

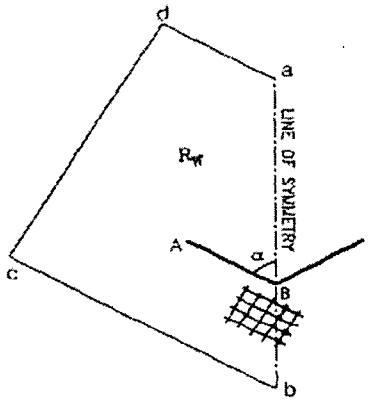
본 연구에서는 비균일 직각 격자(rectangular grid) 시스템을 사용하였다. 이러한 격자는 Fig. 3(a)에서 보여 지듯이 무한히 두께가 얇은 날개 AB에 고정되어 있다. 계산은 왼쪽의 반평면에서 실행하고, 나머지 반평면에서 흐름을 결정하기 위해서 흐름장 대칭을 이용한다. 계산 영역의 외부 경계는 Fig. 3(b)에 나타냈듯이 4개의 선분으로 구성되어 있는데, 반열림각(half-opening angle)이 증가함에 따라서 계산 영역도 늘어난다. 선분ab 위의 와도와 유량함수 값은 대칭이기 때문에 영이 되지만 이러한 선분은 격자선이 아니다. 본 연구에서 와류 값은 대칭선에 바로 근접한 격자점에서 영이 된다. 외부 경계의 격자점에서 유량함수 값은 유량함수의 적분 표현인 식 (4)를 이용해서 구할 수 있다. 날개 표면 경계에서 유량함수 값은 규정된 날개 운동에 의해 얻어진다. 와도전달방정식(vorticity transport equation)의 이산화(discretization)에서 후방의 일차미분은 시간 도함수를 위해 이용되고, 중앙의 이차미분은 발산항을 위해 이용된다. Upwind 미분은 식 (2)의 대류항을 위해 이용되고, 중앙의 이차 미분은 식 (1)에 나타나는 유량함수를 위한 포와송 방정식(Poisson's equation)의 라플라시안 연산자(Laplacian operator)에 이용된다.

SOR(Successive over-relaxation)방법은 식 (1)과 식 (2)의 이산화로부터 기인하는 유한 미분 방정식의 해석에 적용된다. 본 논문에 제시된 수치해석은 이미 2차원 프링-크랩 모델에 대한 실험과 Navier-Stokes 방정식의 수치해를 병행하는 전산연구[13]가 수행되어 이미 검증되었다. 본 수치적 절차에 관한 자세한 정보는 참고문헌[16,17]을 참조하기 바란다.

주기적인 프링-크랩 운동에 관한 연구는 프링 단계에 선행하는 크랩운동의 영향 또는 그 반대로의 영향을 규명하기 위하여 수행되었고, 이러한 연구는 자연계에서나 실험에서 더욱 사실적으로 고려되었다. 본 연구에서 프링-크랩 운동을 반복할 때의 운동은 이미 수행한 실험연구[13]와 전산연구[16]와 동일한 입력자료이며, 다음과 같이 표현할 수 있다.




(a) Moving reference frame




(b) Computational domain

**Fig. 3** Moving reference frame & computational domain

$$\alpha(t) = 5.428[1-\cos(2\pi t)]/2\pi + 0.0649\,rad$$
$$\dot{\alpha}(t) = 5.428\sin(2\pi t)\ rad/\sec \text{ for } 0 \le t \le 2.7 \quad (5)$$
$$\alpha(t) = 0.0649\ rad\ \ \dot{\alpha}(t) = 0\ rad/\sec \text{ for } 0 \le t \le 2.7$$

이러한 운동의 초기 열림각은 3.7°이고 최대 반열림각은 102.7°, 평균각속도는 3.46rad/sec이다. 또한 주기는 1.0sec이고 프링단계는 0.5sec에 끝난다. 평균 각속도와 실험적 모델의 날개 시위에 기초한 흐름의 레이놀즈수는 약 5,600이다. Fig. 4는 상기와 같은 운동의 각속도를 시간에 따라 나타낸 것이다.

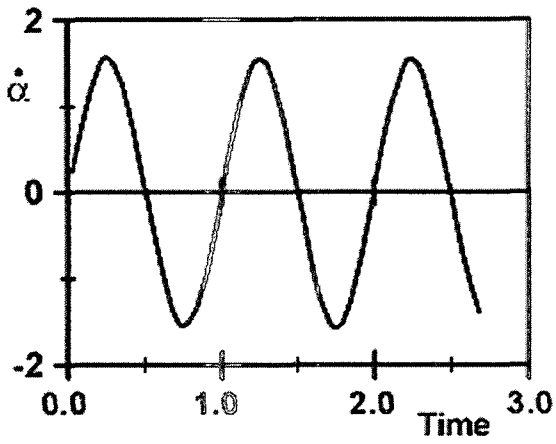
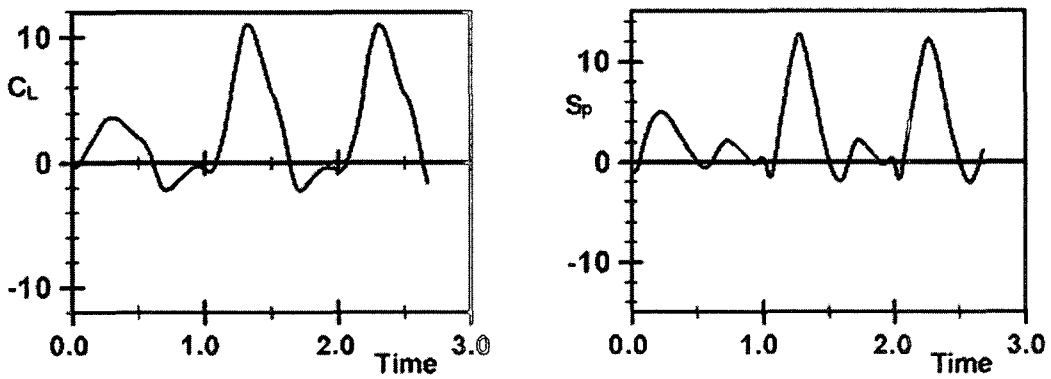



**Fig. 4** Angular velocity of cyclic fling-clap motion




(a) Lift coefficient history (b) Power expenditure coefficient history

**Fig. 5** Lift and power expenditure coefficient history of cyclic motion

## 3. 결과 및 토론

프링-크래핑(fling-clapping) 날개는 고정점을 중심으로 펼쳐지고 접혀지는 프링-크랩 운동을 반복하여 양력과 추력을 발생시키고 있다. 이러한 프링-크래핑 날개는 프링단계 다음 단계에서 Weis-Fogh 메커니즘에서와 다르게 두개의 날개가 서로 분리되지 않는다. 이와 같은 운동은 나비와 같은 곤충에서 발견될 수 있지만, 엄밀하게 똑같은 운동을 수행하지 않는다. 또한 프링-크래핑(fling-clapping) 날개는 이륙하기 위해 날개를 펼쳤을 때의 첫 사이클과 두 번째 이후의 사이클에서는 서로 다른 공기역학적 현상을 나타낸다.

Fig. 5는 프링-크래핑 평판날개가 주기적으로 운동하는 경우의 양력계수 $C_L$과 소요일률계수 $S_P$를 나타낸 것이다. 여기서 양력은 대칭선(line of symmetry)의 윗방향으로 작용하는 힘이 정(+)의 양력을 나타내며, 소요일률은 날개 양쪽면의 압력차에 의한 유체역학적 힘을 이기고 날개를 회전운동 시키는데 필요한 단위시간당의 에너지이다. 따라서 정(+)의 일률은 날개로부터 유체로 에너지를 공급해야하는 것을 의미하며, 부(-)의 일률은 유체로부터 날개로 에너지가 공급되는 것을 의미한다. 이러한 양력계수 $C_L$과 소요일률계수 $S_P$는 다음과 같이 정의된다.

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho \bar{\dot{a}}^2 c^3} \qquad S_p = \frac{P_e}{\frac{1}{2}\rho \bar{\dot{a}}^3 c^4} \qquad (6)$$

두 번째 주기의 프링단계에서 발생하는 양력계수 $C_L$과 소요일률계수 $S_P$ 값은 첫 번째 주기의 프링단계에서 발생하는 양력과 소요일률계수 값보다 크다는 것을 Fig. 5(a), (b)에서 관찰할 수 있다. 그러나 $C_L$과 $S_P$는 두 번째 주기 이후의 크랩단계에서나 첫 번째 주기의 크랩단계에서도 거의 비슷한 크기의 값을 갖는 것을 관찰할 수 있다. 두 번째 주기와 세 번째 주기에서는 각각 프링단계와 크랩단계의 $C_L$과 $S_P$는가 동일한 크기와 형태를 갖는 주기성이 관찰된다. 대칭 평판의 첫 사이클에 대한 연구결과는 참고문헌[16]에서 다루어진 바 있다. 본 연구는 날개가 두 번째 주기 이후의 주기적인 운동을 수행하는 경우 날개주위에서의 흐름을 전산 수치 해를 통하여 가시화한 논문이다.

Fig. 7은 t=1.0 이후 정지유선(stationary streamline: 정지한 주위 유체에 대하여 정지한 관찰자에 대한 유선)에 의해 나타나는 주기적인 프링-크랩 운동의 흐름형태(flow pattern)를 보여주고 있다. Fig. 6은 주기적인 프링-크랩운동의 반열림각을 시간에 따라 나타낸 것이며, 이러한 운동의 초기 열림각은 3.7°이고 최대 반열림각은 102.7° 이다. 이해를 돕기 위하여 각각의 흐름형태를 나타내는 열림각의 위치를 표시하였다. 이러한 흐름형태는 첫 번째 사이클이 아닌 두 번째 사이클 이후의 주기적인 프링-크랩 운동에서의 정지유선을 나타낸 것이며, 유선은 -1.25와 1.35 사이의 유량함수 값을 0.04간격으로 65등분하여 나타낸 것이다.

Fig. 7(a)와 같은 프링단계에서는 주위의 유체가 두 날개 사이에 생기는 V자형의 공간으로 급속히 빨려 들어가게 된다. 이러한 공기의 흐름은 날개 앞전근처에서 폐곡선 형태의 분리와류(separation vortex) $V_3$을 형성한다. 이와 같은 분리와류는 날개의 대칭선을 기준으로 반대편에도 나타나 각각의 날개에 시계방향과 시계반대방향의 순환(circulation)을 형성하는데, 두 날개에 형성되는 순환은 크기가 같고 방향은 반대이므로 전체 순환은 항상 영이 된다. 주기적인 프링-크랩 운동의 흐름형태는 t=1.0 보다 작은 첫 번째 주기에서는 참고문헌[16]에 제시된 첫 번째 형태의 운동인 프링-크랩-정지 운동과 아주 유사하리라는 것을 추정할 수 있다. 그러나 Fig. 7 (a)에서와 같이 두 번째 사이클 이후의 주기적인 프링-크랩 운동에서의 와류 $V_3$은 V자형 열린 공간 상단에 와류 $V_2$가 존재하며, 참고문헌[16]에 제시된 프링-크랩-정지 운동중일 때 프링단계(또는 첫 번째 사이클에서의 프링단계)에서는 와류 $V_2$가 존재하지 않는 상태에서 V자형 열린 공간에 분리와류가 존재한다. (a)에 나타난 주기적인 프링-크랩 운동에서 와류 $V_3$은 이미 참고문헌[16]에서 언급한 프링-크랩-정지 운동중일 때 프링단계에서 나타난 와류보다 훨씬 강하다는 것을 관찰할 수 있다.

열린 내부공간에서 강한 프링 분리와류와 약한 크랩 분리와류를 고려해 볼 때, Fig. 7(a), (b)의 흐름 형태는 참고문헌[16]에 제시된 크랩-프링-정지 운동중일 때 프링단계에서의 현상과 유사하다는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 왼쪽 날개와 대칭선 사이에 발생하는 시계방향 분리와류의 강도는 거의 비슷하다. 그 이유는 크랩운동중일 때 이미 반시계방향으로 회전하는 분리와류가 발생하여 프링단계에 영향을 주기 때문이다. 한편, 본 연구에서는 Weis-Fogh 메커니즘에서 나타나는 분리단계(separation phase)가 없기 때문에 날개 뒷전 근처의 windward 영역에 반시계방향의 유체회전을 나타내는 유선군이 발생하지 않는다. Fig. 7 (c)는 반열림각이 99°인 프링단계에서의 정지유선을 나타낸 것으로 날개 앞전근처에서 폐곡선 형태의 분리와류(separation vortex) $V_3$을 잘 나타내고 있다.

Fig. 7(d)는 크랩단계가 시작되면서 프링단계 (c)에서 관찰되지 않았던 반시계방향 분리와류 $V_4$가 외부공간으로 전개되는 것을 보여주고 있다. (d)는 참고문헌[16]에 제시된 크랩-프링-정지 운동중일 때 정지단계에서 발생한 흐름현상과 아주 유사하다. 또한 (d)에서 발생한 분리와류 $V_4$는 정지단계(pause phase)에서 발생하는 정지와류(stopping vortex)보다 더 강하다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 $V_4$는 두 번째 크랩운동이 진행됨에 따라 외부공간에서 발달된다. 한편, 열린 내부공간에서 서로 다른 회전방향을 갖는 두개의 분리와류($V_2$, $V_3$)는 Fig. 7(e), (f)에서 관찰할 수 있듯이 상호작용을 통해서 급격히 쇠퇴한다. Fig. 7 (e) (t=1.65 sec)에서 뚜렷하게 관찰될 수 있었던 와류 $V_2$와 $V_3$은 Fig. 7(f) (t=1.71 sec)에서는 쇠퇴되어 더 이상 관찰할 수 없다.

Fig. 7(g)는 크랩단계에서 반열림각이 38.8°인 경우에서의 정지유선을 나타낸 것이다. 두 번째 크랩 운동의 후반부에서의 외부공간은 크랩운동으로 발생한 분리와류 $V_4$가 차지하고, 열린 내부

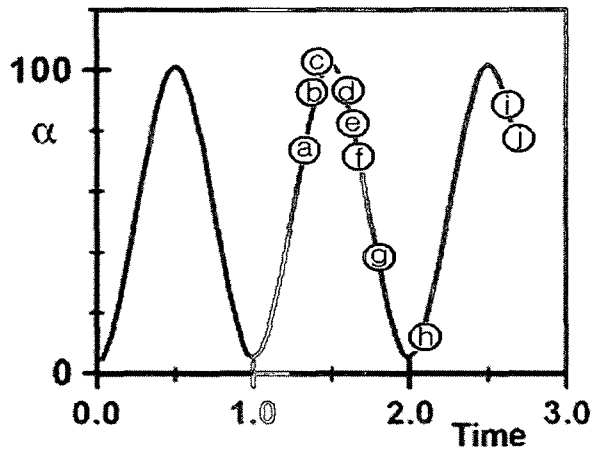
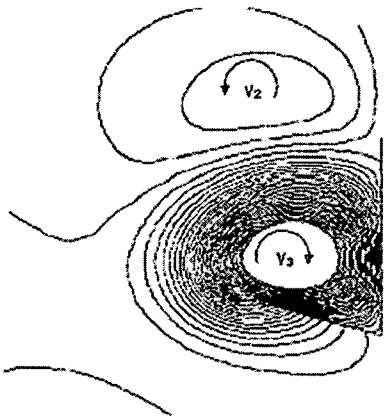
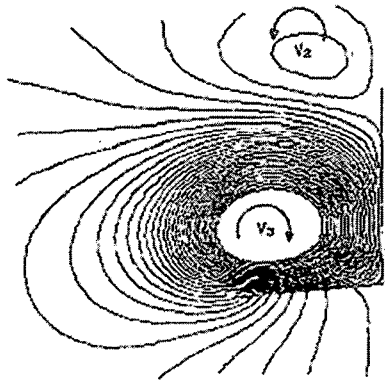


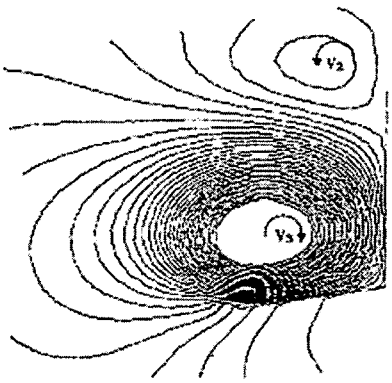

**Fig. 6** Half-opening angle history of cyclic fling-clap motion



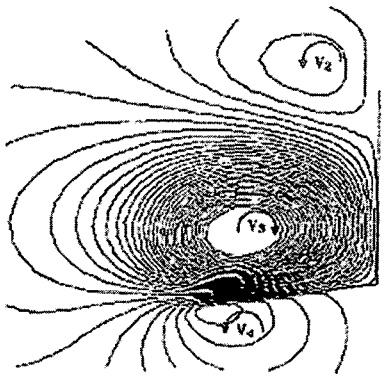

(a) α =73.9°(fling phase)




(b) α =95.1°(fling phase)

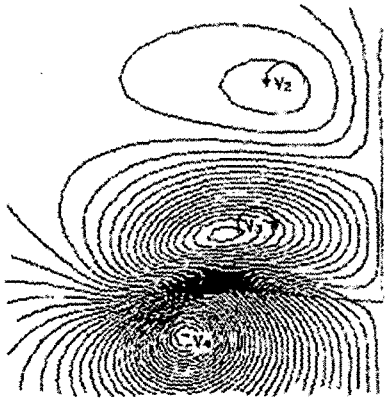



(c) α =99.0°(fling phase)

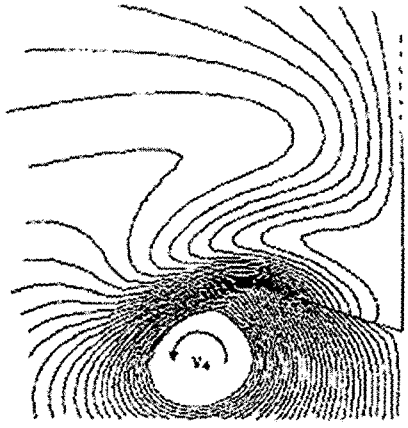



(d) α =96.9° (clap phase)

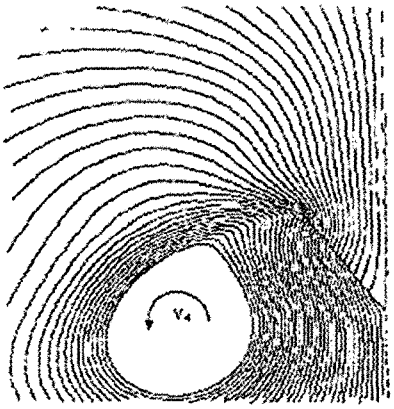
**Fig. 7** Stationary streamline for the cyclic fling-clap motion



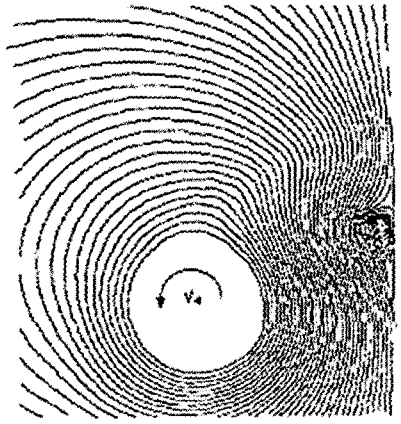
(e) α=84.1°(clap phase)



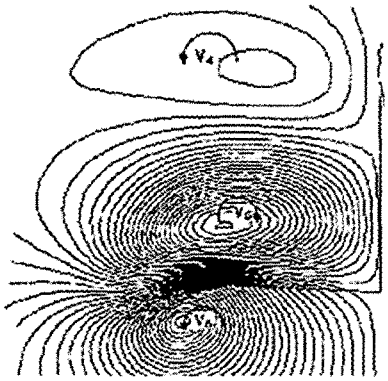
(f) α=72.1° (clap phase)



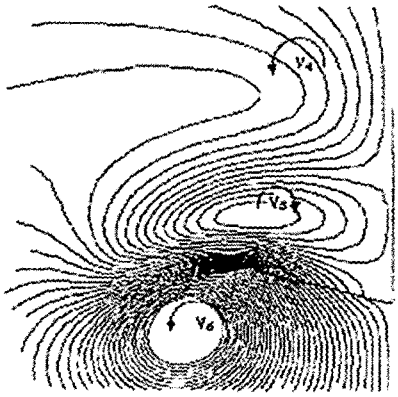
(g) α=38.8°(clap phase)



(h) α=9.0°(fling phase)



(i) α=87.5°(clap phase)



(j) α=76.5°(clap phase)

**Fig. 7** (Continued)

공간은 정지된 유체 내에서 첫 번째 크랩운동을 한 경우에서의 흐름현상과 유사한 자유와도(free vorticity) 영역이 된다. Fig. 7(h)는 프링단계에서 반열림각이 9.0°인 경우에서의 정지유선을 나타낸 것이다. 프링단계에서 두개의 날개사이에 발생하는 매우 작은 와류는 참고문헌[16]에 제시된 바와 같이 크랩운동후 프링운동중일 때의 흐름형태와 동일하다. 이와 같이 주기적인 프링-크랩 운동의 세 번째 사이클(cycle)의 흐름형태는 두 번째 사이클에서의 흐름현상과 거의 동일함을 확인하였다.

Fig. 7(i)는 프링에 이은 크랩단계에서 반열림각이 87.5°인 경우에서의 정지유선(stationary streamline)을 나타낸 것으로 세 가지 와류를 뚜렷하게 관찰할 수 있다. 이러한 세 가지 와류 중에서 $V_4$는 크랩단계에서 외부공간에 발생한 와류가 프링단계와 크랩단계로 이어지면서 이동한 와류이고, $V_5$는 크랩단계 이전의 프링단계에서 날개가 펼쳐지면서 발생한 분리와류이며, $V_6$은 프링단계이후의 크랩단계에서 발생한 외부공간에서의 와류이다. 이러한 분리와류들은 Fig. 7(e)와 거의 동일한 회전방향과 동일한 흐름형태를 나타낸다. 그러나 이러한 흐름형태는 참고문헌[16]에 제시된 프링-크랩-정지 운동중일 때 크랩단계에서 발생한 흐름현상에서 $V_4$는 나타나지 않는다. 이와 같이 크랩단계 중에서 발생하는 와류 $V_4$는 양력변화에 어떠한 영향도 끼치기 않는다는 것을 양력계수와 소요일률계수를 나타낸 Fig. 4를 통하여 알 수 있다.

Fig. 7(j)는 크랩단계에서 반열림각이 76.5°인 경우에서의 정지유선을 나타낸 것으로 서로 다른 회전성향을 띄는 두 분리와류 $V_4$와 $V_5$의 쇠퇴하는 과정을 나타낸다. 이러한 분리와류가 쇠퇴하는 과정은 이미 언급한 바와 같이 Fig. 7(f)와 (g)에 잘 제시되어 있다. 따라서 주기적인 프링-크래핑 날개에서의 흐름현상이 두 번째 사이클 이후의 각 사이클에서의 흐름현상은 동일하게 반복하므로 Fig. 5에 나타난 바와 같이 첫 번째 사이클에서의 $C_L$과 $S_P$값과 다르지만 뚜렷하게 반복성을 갖고 있다고 말할 수 있다.

## 4. 결 론

본 흐름가시화 연구는 2차원 평판날개가 주기적으로 프링-크랩 운동중일 때 시간의존(time-dependent) Navier-Stokes 방정식의 수치 해를 통하여 날개 주위의 흐름형태를 제시하였다.

프링-크래핑 날개가 두 번째 사이클 이후의 주기적인 프링-크랩 운동중일 때 양력계수 $C_L$과 소요일률계수 $S_P$는 첫 번째 사이클에서 프링운동중일 때 발생하는 양력계수 $C_L$과 소요일률계수 $S_P$에 비하여 아주 크다. 이것은 첫 번째 사이클에서 프링운동중일 때의 흐름현상은 V자형 열린 공간 상단에 분리와류(separation vortex)가 없는 상태에서 V자형 열린 공간에 분리와류가 존재하지만, 두 번째 사이클 이후의 주기적인 프링-크랩 운동에서 프링운동중일 때의 흐름현상은 V자형 열린 공간 상단에 크랩단계에서 발생한 분리와류가 존재한 상태에서 열린 공간에 분리와류가 발생하기 때문이다.

나비(butterfly)와 같은 실제 곤충이 주기적으로 프링-크랩 운동을 수행할 때 날개주위의 흐름현상을 보다 자세히 규명하기 위해서는 날개운동의 3차원성과 날개 재질의 유연성 효과까지 확장한 연구를 수행하여야 한다.

## 참고문헌

(1) Wu, J. H. and Sun, M., 2004, "Unsteady Aerodynamic Forces of a Flapping Wing," The *Journal of Experimental Biology*, Vol. 207, No. 7, pp. 1137~1150.

(2) Sane, S. P., 2003, "The Aerodynamics of Insect Flight," *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 206, No. 17, pp. 4191~4208.

(3) Ramamurti, R. and Sandberg, W., 2001, "Simulation of Flow About Flapping Airfoils Using Finite Element Incompressible Flow Solver," *AIAA Journal*, Vol. 39, No. 2, pp. 253~260.

(4) Weis-Fogh, T., 1973, "Quick Estimates of Flight Fitness in Hovering Animals Including Novel Mechanisms for Lift Production," *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 59, pp. 169~230.

(5) 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 Mech.*, Vol. 93, pp. 47~63.

(6) Sohn, M. H. and Wu, J. C., 1987, "A

Numerical Study of the Weis-Fogh Mechanism," *AIAA Paper* No. 87-0238.

(7) Maxworthy, T., 1981, "The Fluid Dynamics of Insect Flight," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 13, pp. 329~350.

(8) Brodsky, A. K., 1994, "The Evolution of Insect Flight," *Oxford University Press.*

(9) Brackenbury, J. H., 1991, "Kinematics of Take-off and Climbing Flight in Butterflies," *J. Zool.*, Lond. 224, pp. 251 ~274.

(10) Wootton, R. J., 1993, "Leading Edge Section and Asymmetric Twisting in the Wing of Flying Butterflies(Insecta, Papilionoidea)," *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 180, pp. 105~117.

(11) Betts, C. R. and Wootton, R. J., 1988, "Wing Shape and Flight Behaviour in Butterflies (Lepidoptera: Papilionoidea and Hesperioidea): A Preliminary Analysis," *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 138, pp. 271~288.

(12) Ellinton, C. P., 1999, "The Novel Aero-dynamics of Insect Flight: Application to Micro-Air Vehicles," *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 202, pp. 3439~3448.

(13) Chang, Jo Won and Sohn, M. H., 1995, "An Investigation of Unsteady Flow Around a Symmetric Flat-Plate Wing Pair Performing Fling-Clapping Motion," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 23, No. 3, pp. 25~32.

(14) Birch, J. M. and Dickinson, M. H., 2003, "The Influence of Wing-Wake Interactions on the Production of Aerodynamic Forces in Flapping Flight," *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 206, pp. 2257~2272.

(15) Brodsky, A. K., 1991, "Vortex Formation in the Tethered Flight of the Peacock Butterfly Inachis Io L.(Lepidoptera Nymphalidae) and some Aspects of Insect Flight Evolution," *Journal of Experimental Biology*, Vol. 161, pp. 77~95.

(16) Sohn, Myong Hwan and Chang, J. W., 2004, "Numerical Flow Visualization of 1st Cycle Motion of a Fling-Clapping Wing," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 32, No. 7, pp. 1～12.

(17) Wu, J. C., 1984, "Fundamental Solutions and Numerical Methods for Flow Problems," *International J. for Numerical Method in Fluids*, Vol. 4, pp. 185~201.