



편대비행 두루미의 에너지 절감 메커니즘

김범준^a, 한석영^{a*}

Energy Saving Mechanism of Red-crowned Crane Flying in V-formation

Beom-jun Kim^a, Seog-Young Han^{a*}^a School of Mechanical Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	2	March	2019
Revised	8	April	2019
Accepted	9	April	2019

Keywords:

Computational fluid mechanics
V-formation
Two-jointed arm model
Flapping
Wing tip spacing

ABSTRACT

A flapping flight mechanism of a Red-crowned crane (*Grus japonensis*) in migration was estimated using a two-jointed arm model having an unsteady aerodynamic performance. Inverse drag forces were generated and lift forces were enhanced during downstroke. A pair of flapping advantage vortices (FAV) was generated alternatively in the wake. The first fully developed FAV was developed around 6.6 m from the wing tip of the crane ahead. The width of FAV, corresponding to the wing tip spacing was about 0.62 m in the spanwise section. A crane behind saved about 18.5% of energy by using the induced power caused by FAV in V-formation and by changing wing morphology. Phase difference of flapping between the crane ahead and behind was estimated to be around 68.14° to use aerodynamic benefit caused by FAV. Our results can be applied to engineering flying devices.

1. 서론

날갯짓에 관한 연구는 공기역학적 및 운동학적 측면에서 박쥐와 같은 척추동물로부터 저속으로 날아가는 작은 새에 이르기까지 다양한 연구가 진행되었다^[1-5]. 그 결과, 이러한 동물들의 양력 발생 메커니즘은 LEV (leading edge vortex)라는 것이 밝혀졌다. 그러나 Red crowned crane, Canada geese, Great white pelicans과 같은 철새들의 항력과 양력은 날개의 형상을 연속적으로 변화함으로써 얻어진다. 즉, 날개의 downstroke (날개를 아래로 치는 운동)는 주로 양력과 추진력을 발생시키고, upstroke (날개를 위로 치는 운동)는 항력을 줄이기 위한 날개의 빠른 움츠림과 관련이 있다^[7].

Cranes, geese, swans, cormorants, pelicans, flamingos 등의

큰 새들은 V자 편대비행으로 떼 지어 철새 이동을 한다. 새들의 이러한 비행 형태는 여전히 논란이 많으나 현재 유력한 두 가지 가설은 에너지 절감과 의사소통이다.

에너지 절감과 관련된 많은 연구들이 경험적^[8-11] 및 이론적^[12-14]으로 행해졌다. 이러한 연구들은 철새들이 비행하는 동안에 V자 편대비행에 적응함으로써 비행 시 요구되는 힘을 감소시킨다고 보고하였다. Great white pelicans은 낮은 날갯짓 주파수, 느린 심박수와 긴 활공 시간을 갖고 편대비행의 와류 흐름에서 낚으로써 전체 에너지의 11.4-14%를 절감한다^[11]. 또한, 일부 연구자들은 의사소통 가설을 지지한다^[15,16]. 에너지 절감에 관한 가설에 비해 의사소통에 관한 가설의 증거는 부족하지만, 두 가설은 상호 보충해 준다^[17].

이 두 가설에 기초한 연구들은 depth (새들 간 비행경로를 따라

* Corresponding author. Tel.: +82-2-2220-0456

Fax: +82-2-2290-2299

E-mail address: syhan@hanyang.ac.kr (Seog-Young Han).

서의 거리)와 WTS (wing tip spacing, 비행경로에 수직하고 인접한 새의 날개 끝 간 거리)의 관계가 편대비행의 중요한 기준이라는 것을 밝혀냈다. Depth와 WTS로 정의된 특별한 위치는 새들이 에너지 절감의 최대 이득을 얻을 수 있는 최적의 위치로 생각된다. 이 위치에서 뒤에 위치한 새는 최대 양력 증가(항력 감소)와 최대 에너지 감소를 얻을 수 있다. 그래서 만약 양력 발생을 최대화하는 최적의 depth와 WTS를 찾는다면, 본질적으로 에너지 절감 가설의 이점을 증명하게 된다^[8].

비록 공기역학적 연구에 관한 대부분의 이전 연구들이 depth와 WTS 사이의 관계를 증명하기 위해 시도되었지만, 그 연구들은 모두 날갯짓 날개(flapping wings)의 복잡성을 무시하였다^[18,19]. 또한, 빠른 속도로 날아가는 크고 무거운 새들에 관한 다른 정량적인 연구들은 거의 보고된 바 없다. 그 이유는 DPIV (digital particle image velocimetry, CIV (correlation image velocimetry), 그리고 laser sheet를 사용하는 풍동실험 장치에서 딱딱하게 굳은 새 날개 주위의 유동장을 측정하는 것이 불가능하고, 이러한 기술이 새들에게 위험하기 때문이다^[3]. 그러므로 전산유체역학(CFD)을 활용하는 것이 적절한 접근법이라 할 수 있다.

자연에서 날갯짓하며 나는 생물들의 개선과 진화에 대해 이해하기 위한 몇 가지 시도들이 있었다. 일부 학자들은 sweep angle에 대한 가치 있는 정보들을 제공하였고^[20,21], 다른 연구자들은 outstretched flapping wings를 수치적으로 계산하였다^[22,23]. 그러나 그들은 upstroke 동안에 날개의 움츠림 운동은 무시하였다.

본 연구에서는 대표적인 철새 중 하나인 Red-crowned crane에 대해 다루고자 한다. Red-crowned crane은 흔히 ‘두루미’라고 말하는 것으로, 길이는 약 150 cm이고, 무게는 7-10 kg이며, 날개 폭은 220-250 cm 정도이다^[24]. 두루미들은 번식과 겨울나기를 위해 수천 km를 철새 이동(migration)을 한다. 두루미가 철새 이동 시 사막, 툰드라, 산맥 등을 넘어 비행하는 거리는 1,600-4,800 km 정도^[19]이며, 철새 이동 계절에 Hindu Kush 산맥을 가로지를 때는 약 7300 m의 고도까지 도달할 수도 있다. 그들은 상승 기류를 타거나 바람에 의해 운반됨으로써 에너지 절감을 한다. 또한, 두루미는 짝 뺀 일자 라인이나 V자 편대비행을 이용하여 철새 이동을 한다^[19].

본 연구에서는 두루미 자신의 날갯짓에 의한 에너지 절감과 V자 편대비행 시의 에너지 절감에 대해 전산유체역학(CFD)를 이용하여 규명하고자 한다. 최근에 2관절 모델(two-jointed arm model)을 사용하여 날개의 형상과 움직임으로부터 철새의 날갯짓 특성을 공기역학적 및 동역학적 측면에서 CFD를 통해 조사하였다^[25].

요약하면, 본 논문은 두루미의 3차원 날갯짓 움직임을 2관절 모

델을 이용하여 구현하고, 비정상 공기역학과 운동학적인 측면에서 수치 결과를 구하고, 그 수치 결과를 이용하여 날개의 형상을 변화 시킴으로써 에너지 절감의 메커니즘을 규명하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 수치해석

본 연구에서는 비정상상태의 두루미 3차원 날갯짓 날개 주변의 유동을 해석하기 위해 CFD를 이용하였다. 여기서 이용된 난류 모델은 압력 기반 해법인 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) 중에서 realizable $k-\epsilon$ model이다. 두루미 자신의 날갯짓에 의한 에너지 절감과 새들의 V자 편대비행 시 뒤이어오는 새의 에너지 절감에 대한 연구를 위해 상용 ‘FLUENT 14.0’를, 계산 결과를 시각화하기 위해 Post-processing Tool인 ‘Ansys CFD-POST 14.0’을 사용하였다.

2관절 모델을 사용한 날개의 형상과 움직임으로부터 두루미의 3차원 날갯짓 날개 모델을 재건하였고, 3D 스캐너로 스캔한 실제 두루미의 날개 형상을 만들어내야 하지만, 여건 상 외형적으로 가장 비슷한 갈매기(seagull) 형상을 채택하였다^[25].

두루미의 후류부와 날갯짓 날개 주위의 유동장을 구하기 위한 계산 영역은 Fig. 1처럼 설정하였다. 계산 영역은 보통 에어포일(airfoil)을 계산하는데 이용하는 U-type의 영역을 사용하였다. 수렴 조건을 만족하기 위한 충분한 크기의 영역을 구성하였고 ‘Ansys Meshing 14.0’을 사용해서 총 2,641, 273개의 비정렬 격자(unstructured mesh)를 생성하였다. 계산 영역에서 공기역학적 특성을 계산하기 위한 격자들은 매 타임 스텝($\Delta t = 0.0005$ s)마다 날갯짓 날개의 움직임에 따라 재메시(remesh)되었다. 면 (1)은 입구면으로, 입구조건으로는 입구 속도 조건을 주었고, (2)는 출구면으로, 출구조건으로는 출구 압력 조건을 주었으며, 1,000 m 고도에서의 대기압($P = 8.98 \times 10^4$ Pa)을 적용하였다^[27]. 또한, 면 (3)은 대칭면으로 대칭조건을, 날개면은 wall 조건을 부여하였다. 받음각(AoA: angle of attack) $\alpha = 0^\circ$ 로 가정하였다^[28]. 그 이유는 Tobalske et al.^[29]은 Budgerigar, Cockatiel, Ringed turtle-dove, Black-billed magpie과 같이 11 m/s보다 빠른 속력을 내는 종들의 받음각은 거의 0° 로 수렴한다는 것을 밝혀냈기 때문이다.

날개에는 동적 메시(dynamic mesh)를 사용하였고, 따라서 날개 주위의 격자는 매 타임 스텝마다 재메시된다. 재메시된 cell들의 질을 개선하기 위해 상용프로그램에서 spring-based smoothing과 face remeshing 등의 기술을 사용하였다. 해석결과의 타당성을 얻기 위해 이러한 해석에 적절하다고 알려진 수렴기준인 10^{-5} 로 수렴성을 판별하였다.

철새 이동 계절에 3.624 Hz의 날갯짓 주파수^[30]와 $U_\infty = 68$

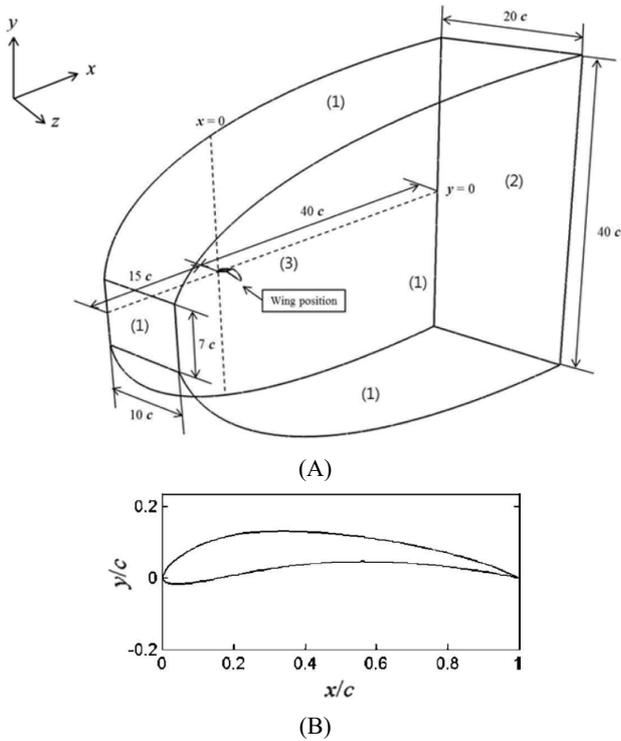


Fig. 1 Computation domain to estimate the aerodynamics forces around the flapping wing (A) and airfoil (Seagull) (B)

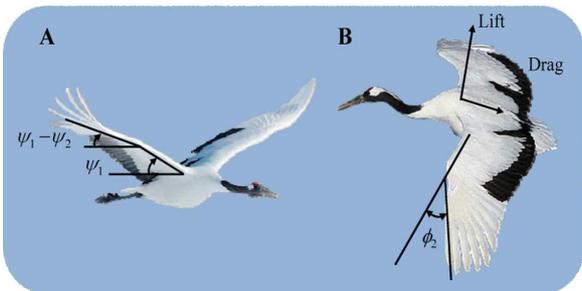


Fig. 2 Typical migration flapping morphology of a Red-crowned crane's wing^[25]

km/h (18.9 m/s)의 전진 비행 속도로 이동하는 두루미의 특성을 공기역학적 및 운동학적인 측면에서 정량적으로 알아보았다^[2]. 두루미 날갯짓 형태의 upstroke와 downstroke 궤적을 시뮬레이션한 날개 모델을 Fig. 2에 나타내었다^[25]. 한 쪽 날개의 길이는 1.2m이고, 날개 끝의 진폭은 1.1024m이다. CFD 해석을 위한 요소들과 두루미 날개의 치수 및 고도 1,000m에서 두루미가 비행하는 조건들을 Table 1에 정리하였다^[32,33]. 이러한 조건들하에서의 후류 유동장의 결과를 통해, x와 z축의 와류 분포 및 속도 벡터로부터 최적의 depth와 WTS를 예측하였다.

2.2 2관절 모델(Two-jointed Arm Model)

본 연구에서는 철새 이동 시 두루미 날개의 날갯짓 움직임을 구현하기 위해 2관절 모델을 사용하였다^[25]. 이 모델은 두 개의 막대

Table 1 Numerical conditions were given that cranes migrate at an altitude of 1,000 m^[19,32,33] (Re is $\rho U_{\infty} c / \mu$ and St is $2hf/U_{\infty}$)

Variable	Value
Chord length (c)	0.53 m
Single wing size	1.2 m
Migrating speed (U_{∞})	18.9 m/s
Amplitude (2h)	1.1024 m
Wingspan (b)	2.4 m
Pressure (P)	8.98×10^4 Pa
Density (ρ)	1.11 kg/m^3
Dynamic viscosity (μ)	$1.76 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$
Temperature (T)	281 K
Single wing area (S)	0.548 m^2
Kinematic viscosity (ν)	$1.58 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Reynolds number (Re)	6.34×10^5
Strouhal number (St)	0.21

가 날갯짓 날개의 1/4-chord line을 따라서 정렬된 형상이다. 두루미의 날갯짓 비행 메커니즘은 세 개의 각도: the arm wing angle ψ_1 , the hand wing angle ψ_2 , the sweep angle ϕ_2 (Figs. 2A and 2B)에 의해 구현된다. 각도의 단위는 degree이다. 세 개의 각도의 정의는 Fig. 2와 같으며, Fourier series를 통해 시간에 대한 함수로 표현된다.

$$\begin{aligned} \psi_1(\omega t) &= C_{\psi 10} + \sum_{n=1}^2 [C_{\psi 1n} \sin(n\omega t) + B_{\psi 1n} \cos(n\omega t)], \\ \psi_2(\omega t) &= C_{\psi 20} + \sum_{n=1}^2 [C_{\psi 2n} \sin(n\omega t) + B_{\psi 2n} \cos(n\omega t)], \\ \phi_2(\omega t) &= C_{\phi 20} + \sum_{n=1}^2 [C_{\phi 2n} \sin(n\omega t) + B_{\phi 2n} \cos(n\omega t)]. \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, 상수 값들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_{\psi 10} &= 8.3065, & C_{\psi 11} &= -4.4519, & B_{\psi 11} &= 25.3910, \\ C_{\psi 12} &= -1.8092, & B_{\psi 12} &= -0.5889; \\ C_{\psi 20} &= 17.0661, & C_{\psi 21} &= -17.3404, & B_{\psi 21} &= -4.0066, \\ C_{\psi 22} &= -3.7029, & B_{\psi 22} &= -4.5122; \\ C_{\phi 20} &= 32.2311, & C_{\phi 21} &= -8.6004, & B_{\phi 21} &= -0.34280, \\ C_{\phi 22} &= 15.2213, & B_{\phi 22} &= 2.6910. \end{aligned}$$

2.2 두루미 날갯짓에 대한 2관절 모델
두루미 날갯짓에 대한 2관절 모델을 사용하여 날갯짓을 구현하기 위해 2관절 모델을 사용하였다. 이 모델은 두 개의 막대 flapping 메커니즘의 요리를 통해 arm과 hand wing angle의 로

다. 이처럼 퍼진 와류는 항력을 증가시키는 속도구배(velocity gradient)를 심화시킨다. 그러므로 typical 날갯짓의 경우가 좀 더 효과적으로 공기역학적 이득을 이용한다. 즉, typical 날갯짓 경우의 C_D 가 다른 Case들보다 훨씬 작다(Fig. 4B 참조). 이러한 항력과 양력계수의 작은 차이가 한 주기에서는 큰 차이를 만든다. x방향의 속도는 typical 날갯짓 날개의 표면에서 점진적으로 증가하지만(Fig. 3C 참조), Case 3에서는 더 급격한 속도 분포가 발생한다(Fig. 3D 참조).

에어포일 아래의 유동장을 살펴보면, typical 날갯짓은 적은 양의 반대 속도 구역이 차지한다. 그러나 Case 3는 반대 속도 구역이 좀 더 지배적이다. 비록 차이가 작을지라도, 항력 감소에 있어서 한 주기, 한 시간, 한 주, 더 나아가 한 달 정도의 시간이 흐른다면 큰 영향을 받는다.

또한, 두루미는 upstroke 동안에 연속적으로 날개의 형상을 변화함으로써 공기역학적 이득을 얻는다. 이것은 에어포일 주위의 유동장으로부터 관찰된다(Figs. 3C and D 참조). 이러한 LEV는 곤충, 박쥐, 낮은 속도로 날갯짓 하는 새들에 대한 비행의 주요한 메커니즘이다^[1-6,34,35]. 비행 속도가 상대적으로 높을 때 LEV는 높은 관성력 때문에 발달하지 않는다는 것이 이러한 현상에 대한 이유가 된다.

2.3절에서 서술한 방법으로 두루미의 날갯짓 날개의 에너지 절감에 대해 조사하였다. Fig. 4A와 같이 typical 날갯짓 비행에 대해 양력계수(C_L)는 mid-downstroke에서 최대이고 mid-upstroke에서 최소이다. 반면, 항력계수(C_D)는 mid-downstroke에서 최소이고 mid-upstroke에서 최대이다. 심지어 항력계수가 downstroke에서 음이 된다는 것을 알았다. 그리고 2사분면에서 downstroke 동안에 음의 항력이 만들어질 때 양력은 강화된다. 그와 대조적으로, 양력계수 또한 upstroke에서 음이 된다는 것을 알았다. 마찬가지로 4사분면에서 upstroke 동안에 음의 양력이 만들어질 때 항력은 강화된다.

항력계수와 양력계수에 있어서 큰 차이가 있다. 예상대로 typical 날갯짓의 경우가 가장 좋은 항력 감소와 양력 증가를 보였다. 그 다음은 Case 1, Case 2 순으로 Case 3가 가장 좋지 않았다. 즉, hand wing angle ψ_2 의 역할이 항력 감소와 양력 증가에 가장 중요하다. 그리고 sweep angle ϕ_2 는 typical 날갯짓 메커니즘의 뒤이은 움직임으로 항력 감소와 양력 증가를 보완한다. 따라서 세 가지 각도를 사용하는 typical 날갯짓이 높은 속도의 날갯짓 비행으로 철새 이동 시 가장 효율적이라는 것을 알 수 있다.

한 주기(0.28 s) 동안 naturally outstretched 날갯짓과 비교하여 typical 날갯짓의 전체 17.83%의 항력 감소와 24.85%의 양력 증가가 이루어졌다(Fig. 4C 참조). 이러한 결과는 hand wing angle ψ_2 와 sweep angles ϕ_2 에 의해 얻어졌다. Case 1에서는 hand wing angle ψ_2 만의 영향으로 4.36%의 항력 감소와 5.25%의 양

력 증가가 이루어졌으며, Case 2에서는 sweep angles ϕ_2 만의 영향으로 0.45%의 항력 감소와 1.65%의 양력 증가가 이루어졌다. 그러므로, 약 18%의 두루미 비행 에너지가 날개의 형상을 변화함으로써 항력 감소에 의해 절감될 수 있다. 그 이유는 에너지 소비는 항력과 비행거리의 곱으로 평가될 수 있기 때문이다. 여기서 항력은 식 (3)에 의해 계산되었다.

3.2 날갯짓 이득 와류(FAV)로 인한 에너지 절감

3.2.1 날갯짓 이득 와류(FAV; flapping advance vortices)

Fig. 5에 보이는 것처럼 후류 유동장을 얻었다. y와 z방향의 한 쌍의 3차원 나선형 와류가 Fig. 7A와 7B와 같이 나타났다. 앞선 두루미로부터 6.56 m의 유동을 확인하면, 음과 양의 반복 패턴이 번갈아 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 반복 와류를 날갯짓 이득 와류(FAV)라고 한다. 앞선 두루미에 의해 발생된 FAV를 사용하여 완전한 공기역학적 이득을 얻기 위한 V자 편대비행에서의 특별한 위치 즉, 뒤이어 오는 두루미의 최적 depth와 WTS를 다음 절에서 측정하였다.

3.2.2 Depth

Fig. 5에 보이는 것처럼 한 쌍의 3차원 나선형 FAV로부터 최적의 depth를 정량적으로 측정되었다. 만약 $t=0.56$ s (앞선 두루미가 downstroke를 시작할 때)에서 유동장을 관찰한다면, 양(반시계 방향 회전)과 음의 와류(시계방향 회전)가 앞선 두루미의 날개 끝 뒤 6.56 m 거리에 만들어진다(Fig. 5A 참조). 그래서 위 방향 속도가 최대인 이러한 와류 사이에서 위 방향 유동(상승기류)이 만들어진다. 또한, $t=0.43$ s(앞선 두루미가 upstroke를 시작할 때)에서 유동장을 관찰한다면, 음과 양의 와류가 같은 거리인 6.56 m에 만들어진다. 아래 방향 유동장(하강기류)이 생성되는 이러한 와류 사이에서 아래 방향 속도가 최대가 된다.

이러한 와류의 패턴은 잘 정렬되어 있고 typical 날갯짓 한 주기와 일치하는 때 0.28 s 마다 반복적으로 나타난다. x축의 방향으로 6.56 m 이전에는 y-z평면에 음과 양의 와류가 공존한다. $t=0.43$ s일 때, 음의 와류가 마침내 날개 끝으로부터 떨어지고 분리되어 회전하기 시작한다. 만약 뒤이어 오는 두루미가 6.56 m 전에 위치한다면, FAV의 효과를 얻을 수 없고 오히려 비행에 역효과를 나타 간섭을 받기 쉽다. 그러나 이러한 공존이 6.56 m 후에 사라지게 되고 그 지점은 FAV가 완전히 발달하게 된다. 일단 FAV가 완전히 발달하게 되면, 뒤이어 오는 두루미는 위 방향과 아래 방향에 있어서 완전한 공기역학적 이득을 얻을 수 있다. 그러므로, 완전히 발달한 FAV의 첫 출현 거리가 최적의 depth로 측정되고, 그 거리는 앞선 두루미의 날개 끝으로부터 약 6.6 m가 된다.

만약 V자 편대비행에서 뒤이어 오는 두루미가 최적의 depth에

위치한다면, 완전한 공기역학적 이득을 얻을 수 있다. 이러한 연구 결과는, 실제 V자 편대비행을 하는 철새들을 Observation 방식(최대한 렌즈와 평행하게 찍은 사진으로 철새간의 거리를 유추) 관측하여 구한 결과인 6.07 m (3.2.4절 참조)와 유사한 결과^[36]를 보인다. 이러한 반복 패턴의 주파수가 3.624 Hz(날갯짓 주파수와 거의 같은)이기 때문에, 일단 새들의 움직임이 서로 맞기만 하면 철새 이동 시 V자 편대비행의 depth가 약 6.6m로 유지될 수 있다. 이것은 철새의 날갯짓 주파수가 V자 편대비행 내내 거의 동일하다는 이전 연구와 일치한다^[17].

3.2.3 날개 끝 간 거리(WTS, wing tip spacing)

Fig. 6에 보이는 것처럼 upstroke와 downstroke 시 y방향의 속도(v-velocity) 분포로부터 최적의 WTS를 정량적으로 측정하였다. WTS는 비행 방향에 수직인 날개의 최대폭(1.2m)을 기준으로 앞선 두루미와 뒤이어 오는 두루미의 날개 끝 간 거리로 정의된다. 비정상 유동 해석을 통해 앞선 두루미와 뒤이어 오는 두루미 사이의 WTS를 정량적으로 측정하였다.

만약 y-z 평면 위에 $t = 0.43$ s, 0.56 s에 대해 앞선 두루미로부터 6.56 m 떨어진 거리에서 와류를 조사한다면(Fig. 5B 참조), FAV가 번갈아 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 그러므로 뒤이어 오는 두루미의 날개 끝이 위 방향과 아래 방향의 유동과 관련된 완전한 이득을 얻기 위한 FAV 사이에 위치 해야만 한다. 또한, $t = 0.43$ s, 0.56 s에 대해 앞선 두루미로부터 $x = 6.56$ m 거리의 y-z평면에 y방향의 속도 분포를 얻었다(Fig. 6 참조). Upstroke 동안 FAV의 최대와 최소 y방향 속도는 각각 1.35 m/s (at $y = 0.2$ m and $z = 0.72$ m)와 0.55 m/s (at $y = -0.3$ m and $z = 1.2$ m)로 측정되었다(Fig. 6A 참조). 마찬가지로, downstroke 동안 FAV의 최대와 최소 y방향 속도는 각각 -2.3 m/s (at $y = -0.3$ m and $z = 0.58$ m)와 -0.3 m/s (at $y = -0.2$ m and $z = 1.2$ m)로 계산되었다(Fig. 6B 참조). 뒤이어 오는 두루미가 아래와 위 방향의 완전한 공기역학적 이득을 이용하기 위해 날개 끝을 FAV 사이에 위치시켜야만 하기 때문에, 최적의 WTS 범위는 최소 y방향 속도에 기초해서 교집합에 해당하는 0.55 m/s를 기준으로 대략 0m에서 -0.62 m 사이로 볼 수 있다. 이 위치는 Hainsworth^[9]와 Andersson & Wallander^[17]에 의해 연구된 결과와 유사하다. 선행 연구에 의해 구해진 뒤이은 두루미의 WTS는 약 -0.27m에서 최고 에너지 절감률을 보인다.

그러므로 뒤이은 두루미의 몸통쪽 날개 0m부터 최고의 에너지 절감률의 WTS 위치를 기준으로 대칭인 -0.54m까지 에너지 절감을 할 수 있는 최적의 WTS로 볼 수 있다. 따라서 해석을 통해 얻어진 최적의 WTS 범위는 0m에서 -0.62 m 사이로 측정된다.

3.2.4 관찰값

해석 결과값의 정당성 확보를 위하여 기존의 선행연구와의 비교하였다. 멸종 위기인 두루미를 대상으로 depth를 구한 논문을 찾을 수 없어 철새들의 비행을 렌즈와 평행하게 찍은 사진을 통해 철새간의 depth를 구하는 방법^[36]을 이용하여 그 값을 구하였다. 먼저 카메라 렌즈와 수평을 이루는 사진들을 이용하여 두루미들의 각 몸통 중심을 투영시켰다. 그리고 사진 상의 날개 중 쪽 뺀 날개의 길이를 기준으로 비율을 측정하여 depth를 구하였다. 이를 바탕으로 최적의 depth로 6.07 m의 값을 얻었다. 이는 해석 결과 값과 비슷한 결과를 보여준다.

3.2.5 FAV로부터의 에너지 절감

FAV가 y-z평면에 번갈아 발생된다. 즉, 양과 음의 와류가 만들어질 때 유익한 상승기류와 하강기류가 나타난다. 날개 뒤의 와류가 빠르게 소멸되고 날개 가까이의 유동장이 복잡한 것을 생각하면, 철새들은 선전적으로 대형의 뒤로 움직인다. 그리고 에너지 절감을 위해 공기역학적으로 완전한 이득인 최적의 depth와 WTS로 위치시킨다^[37].

에너지 절감이 FAV의 평균 v-velocity (vertical bars)에 의해 측정되었다(Fig. 5 참조). 2.4절에 서술한 방법에 따르면 뒤이어 오는 두루미는 최적의 depth와 WTS에 위치하게 된다. 이 때 downstroke와 upstroke 동안의 평균 음(-0.7756 m/s)과 양(0.7507 m/s)의 v-velocity(\bar{v})를 계산하였다. 그리고 downstroke와 upstroke 동안 날개 끝 날갯짓에 대한 평균 음(-7.3493 m/s)과 양(8.4800 m/s)의 v-velocity(\bar{U}_p)에 기초해서 식 (5)를 이용한 전체 에너지 절감을 계산하였다.

그러므로, V자 편대비행에서 뒤이어 오는 두루미가 FAV에 의해 발생한 완전한 이득을 얻음으로써 downstroke 동안 약 20%, upstroke 동안 약 17%의 에너지를 절감할 수 있다.

3.2.6 앞 두루미와 뒤 두루미 간의 위상차

앞선 두루미와 뒤이어 오는 두루미 사이의 위상 차를 추론하기 위해 y방향의 속도와 시간의 그래프를 도출하였다(Fig. 7 참조). FAV의 지속시간이 두루미의 날갯짓 주기와 같은 0.28 s로 되어있기 때문에 뒤이은 두루미는 날갯짓 위상을 FAV 위상으로 움직여야만 한다. FAV의 평균 속도가 약 0.333 s에서 거의 0이 되므로, 뒤이은 두루미가 그 시간에 downstroke를 하기 시작한다. 즉, 앞선 두루미와 뒤이은 두루미 사이의 날갯짓 위상차 시간(Δt)은 약 0.053 s이다. 그러므로, FAV 위상과 맞추기 위해 날갯짓 위상차 시간인 0.053 s가 지연된다고 추론할 수 있다. 그래서 완전히 발달한 FAV가 처음 출현하는 최적의 depth 6.56 m에서 68.14° ($\Phi = \Delta t / \Delta t_{total} \times 360^\circ$ where $\Delta t_{total} = 0.28$ s)의 위상차가 발생한다고 볼 수 있다.

4. 결 론

철새 이동 시 얼마나 많은 에너지 절감을 할 수 있는 지를 조사하기 위해 비정상 공기역학적 측면에서 2관절 모델을 이용하여 두루미의 날갯짓 비행 메커니즘을 연구하였다. 날개 주위와 후류 유동장으로부터 다음의 결론을 얻었다.

(1) 날개의 압력 및 속도 분포로부터, 두루미가 날개의 형상을 변화함으로써 얻는 항력 감소에 의해 약 18%의 에너지를 절감할 수 있다는 것을 알았다.

(2) 후류 유동장으로부터, V자 편대비행에서 뒤이어 오는 두루미가 FAV에 의해 발생된 완전한 이득을 얻음으로써 downstroke 동안 약 20%, upstroke 동안 약 17%의 에너지 절감을 할 수 있다는 것을 알았다.

(3) 본 연구에서는 최적의 depth가 앞선 두루미의 날개 끝으로부터 약 6.6m로 예측되었다. 또한, 최적 WTS는 비행방향에 수직으로 (횡방향으로) 0 m와 -0.62 m 사이의 범위로 측정되었다.

(4) FAV에 의해 발생된 공기역학적 이득을 효과적으로 이용하기 위한 앞선 두루미와 뒤이은 두루미 사이의 날갯짓 위상차는 약 68.14°로 측정되었다.

본 논문의 연구결과는 향후 MAV(micro air vehicle)와 같은 비행물체 개발 시 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다^[37,38].

References

- [1] Ellington, C.P., Van Den Berg, C., Willmott, A.P., Thomas, A.L.R., 1996, Leading-edge Vortices in Insect Flight, *Nature*, 384:6610 626-630.
- [2] Srygley, R.B., Thomas, A.L.R., 2002, Unconventional Lift-generating Mechanisms in Free-flying Butterflies, *Nature*, 420:6916 660-664.
- [3] Dickinson, M., 2008, Animal Locomotion: A New Spin on Bat Flight, *Current Biology*, 18:11 R468-R470.
- [4] Muijres, F.T., Johansson, L.C., Barfield, R., Wolf, M., Spedding, G.R., Hedenström, A., 2008, Leading-Edge Vortex Improves Lift in Slow-Flying Bats, *Science*, 319:5867 1250-1253.
- [5] Videler, J.J., Stamhuis, E.J., Povel, G.D.E., 2004, Leading-edge Vortex Lifts Swifts, *Science*, 306:5703 1960-1962.
- [6] Warrick, D.R., Tobalske, B.W., Powers, D.R., 2005, Aerodynamics of the Hovering Hummingbird, *Nature*, 435:7045 1094-1097.
- [7] Poore, S.O., Sanchez-Haiman, A., Goslow Jr, G.E., 1997, Wing Upstroke and the Evolution of Flapping Flight, *Nature*, 387:6635 799-802.
- [8] Badgerow, J.P., 1988, An Analysis of Function in the Formation Flight of Canada Geese, *Auk*, 105:4 749-755.
- [9] Hainsworth, F.R., 1987, Precision and Dynamics of Positioning by Canada Geese Flying in Formation, *J. Exp. Biol.*, 128:1 445-462.
- [10] Hainsworth, F.R., 1989, Wing Movements and Positioning for Aerodynamic Benefit by Canada Geese Flying in Formation, *Can. J. Zool.*, 67:3 585-589.
- [11] Weimerskirch, H., Martin, J., Clerquin, Y., Alexandre, P., Jiraskova, S., 2001, Energy Saving in Flight Formation, *Nature*, 413:6857 697-698.
- [12] Hummel, D., 1983, Aerodynamic Aspects of Formation Flight in Birds, *J. Theor. Biol.*, 104:3 321-347.
- [13] Lissaman, P.B.S., Shollenberger, C.A., 1970, Formation Flight of Birds, *Science*, 168:3934 1003-1005.
- [14] May, R.M., 1979, Flight Formations in Geese and Other Birds, *Nature*, 282:5741 778-780.
- [15] Gould, L.L., Heppner, F., 1974, The Vee Formation of Canada Geese, *Auk*, 91:3 494-506.
- [16] Heppner, F.H., Convisar, J.L., Moonan Jr., D.E., Anderson, J.G.T., 1985, Visual Angle and Formation Flight in Canada Geese (*Branta Canadensis*), *Auk*, 102:1 195-198.
- [17] Andersson, M., Wallander, J., 2004, Kin Selection and Reciprocity in Flight Formation, *Behav. Ecol.*, 15:1 158-162.
- [18] Hu, H., Clemons, L., Igarashi, H., 2011, An Experimental Study of the Unsteady Vortex Structures in the Wake of a Root-fixed Flapping Wing, *Exp. Fluids*, 51:2 347-359.
- [19] Thien, H. P., Moelyadi, M. A., Muhammad, H., 2008, Effects of Leader's Position and Shape on Aerodynamic Performances of V Flight Formation, arXiv preprint, arXiv:0804.3879. (= Moelyadi, M.A., 2007, Effects of Leader's Position and Shape on Aerodynamic Performances of V Flight Formation, *Proceedings of International Conference on Intelligent Unmanned Systems*, 3).
- [20] Sachs, G., 2005, Aerodynamic Yawing Moment Characteristics of Bird Wings, *J. Theor. Biol.*, 234:4 471-478.
- [21] Sachs, G., Moelyadi, M.A., 2006, Effect of Slotted Wing Tips on Yawing Moment Characteristics, *J. Theor. Biol.*, 239:1 93-100.
- [22] Aono, H., Chimakurthi, S.K., Cesnik, C.E.S., Liu, H., Shyy, W., 2009, Computational Modeling of Spanwise Flexibility Effects on Flapping Wing Aerodynamics, In 47th AIAA aerospace sciences meeting including the new horizons forum and aerospace exposition, 1270.
- [23] Persson, P.O., Willis, D.J., Peraire, J., 2012, Numerical Simulation of Flapping Wings using a Panel Method and a Highorder Navier-Stokes Solver, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 89:10 1296-1316.
- [24] Del Hoyo, J., Elliot, A. and Sargatal, J., 1996, *Handbook of the Birds of the World*, Lynx Edicions, Barcelona.

- [25] Liu, T., Kuykendoll, K., Rhew, R., Jones, S., 2004, Avian Wings, In 24th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, 2186.
- [26] Maeng, J. S., Park, J. H., Jang, S. M., Han, S. Y., 2013, A Modelling Approach to Energy Savings of Flying Canada Geese using Computational Fluid Dynamics, *J. Theor. Biol.*, 320, 76-85.
- [27] Johnsgard, P. A., 1983, *Cranes of the World: Japanese Crane (Grus Japonensis)*, Indiana University Press, Bloomington.
- [28] Hedrick, T. L., Tobalske, B. W., Biewener, A. A., 2002, Estimates of Circulation and Gait Change based on a Three-dimensional Kinematic Analysis of Flight in Cockatiels (*Nymphicus Hollandicus*) and Ringed Turtle-doves (*Streptopelia Risoris*), *J. Exp. Biol.*, 205:10 1389-1409.
- [29] Tobalske, B. W., Hedrick, T. L., Biewener, A. A., 2003, Wing Kinematics of Avian Flight across Speeds, *J. Avian Biol.*, 34:2 177-184.
- [30] Pennycuik, C. J., 2001, Speeds and Wingbeat Frequencies of Migrating Birds Compared with Calculated Benchmarks, *J. Exp. Biol.*, 204:19 3283-3294.
- [31] Alerstam, T., 1993, *Bird Migration*, Cambridge University Press, England.
- [32] Zipcodezoo Home page, n.d., viewed 11 March 2013, <http://zipcodezoo.com/Animals/G/Grus_jap-onensis>
- [33] Oiseaux-birds Home page, n.d., viewed 11 March 2013, <<http://www.oiseaux-birds.com/card-red-crowned-crane.html>>
- [34] Bomphrey, R.J., Lawson, N.J., Harding, N.J., Taylor, G.K., Thomas, A.L.R., 2005, The Aerodynamics of *Manduca Sexta*: Digital Particle Image Velocimetry Analysis of the Leading-edge Vortex, *J. Exp. Biol.*, 208:6 1079-1094.
- [35] van den Berg, C., Ellington, C.P., 1997, The Three-dimensional Leading-edge Vortex of a 'Hovering' Model Hawkmoth, *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. B: Biol. Sci.*, 352:1351 329-340.
- [36] Speakman, J. R., Banks, D., 1998, The Function of Flight Formations in Greylag Geese *Anser anser*; Energy Saving or Orientation?, *Ibis*, 140:2 280-287.
- [37] Kim, B. J., 2015, Energy saving of Red-crowned crane in V-formation using computational fluid dynamics, Thesis of Master of science, Hanyang University, Republic of Korea.
- [38] Kim, B. J., Kim, S. C., Han, S. Y., 2014, Flow analysis of Goose's flapping, Proceeding of KSMTE Spring Conference, 126.