

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(10), 843-852(2016)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.10.843

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

자동회전 비행을 하는 단풍나무 씨앗의 항공역학적 특성

손명환*

Aerodynamic Features of Maple Seeds in the Autorotative Flight

Myong Hwan Sohn*

Department of Aeronautical and Mechanical Engineering, Cheongju University*

ABSTRACT

The autorotative flight of maple seeds(*Acer palmatum*) is numerically simulated based on the 3D geometry and the motion parameters of real seeds. The nominal values of the motion parameters are 1.26 m/s for descent velocity, 133.6 rad/s (1,276 rpm) for spinning rate, 19.4° for coning angle, and -1.5° for pitch angle. A compact leading-edge vortex (LEV) positioned at the inner span of the seed blade causes a large suction pressure on its leeward surface. The suction pressure peaks occur near the leading region of inner span sections. The flow pattern characterized by the prominent LEV and the values of aerodynamic force coefficients obtained in the present study are in good agreement with experimental data measured for a dynamically-scaled robot maple seeds. A spiraling vortex developed in the leeward region advances toward the seed tip and merges with the tip-passing flow, which is considered to be a mechanism of maintaining stable and attached LEV for the autorotating maple seeds.

초 록

실제 씨앗의 3차원 형상과 운동요소에 기반하여 단풍나무(*Acer palmatum* 종) 씨앗의 자동회전 비행을 수치적으로 해석하였다. 운동요소의 표준 값은 낙하속도는 1.26 m/s, 회전 속도는 133.6 rad/s (1,276 rpm), 코닝 각은 19.4°, 피치 각은 -1.5°이다. 씨앗 날개의 스패 안쪽에 위치한 컴팩트한 앞전 와류가 씨앗 날개 바람 반대면에 커다란 부압을 발생하게 하였다. 부압의 피크는 안쪽 스패 단면 앞전 부근에 발생하였다. 본 연구에서 얻어진 현저한 앞전 와류로 특징되는 흐름 형태와 공기력 계수의 값은 동적 상사를 갖도록 한 로봇 씨앗에 대하여 실험적으로 측정된 자료와 잘 일치하였다. 바람 반대 영역에 발달한 나선형 와류는 씨앗 끝을 향하여 전진하고 씨앗 끝 부분에서 이곳을 지나는 흐름과 합쳐지는데, 이와 같은 흐름이 자동회전하는 단풍나무 씨앗의 안정되고 부착된 LEV를 유지하게 하는 메카니즘으로 여겨진다.

Key Words : Wind dispersal(바람에 의한 퍼짐), Maple seed(단풍나무 씨앗), Autorotative flight(자동회전 비행), Numerical simulation(수치 해석), Seed geometry(씨앗 형태), Leading-edge vortex(앞전 와류), Vorticity(와도), Suction pressure distribution(부압 분포)

† Received : August 9, 2016 Revised : August 30, 2016 Accepted : August 30, 2016

* Corresponding author, E-mail : myongsohn@cju.ac.kr

I. 서 론

종의 재생산 (reproduction)과 퍼짐 (dispersal)은 동물과 식물을 막론하고 매우 중요한 생존 과정 중 하나이다[1]. 움직이는 능력을 갖는 동물과는 달리 땅에 고정되어 움직일 수 없는 식물은 이동능력이 있는 동물을 이용하여 혹은 바람과 물을 이용하여 종을 퍼뜨린다. 바람을 이용하여 종을 퍼뜨리는 바람에 의한 퍼짐(wind dispersal) 방식에는 민들레 씨앗과 같이 무수히 많은 솜털을 씨앗에 부착하여 미세한 바람에도 날리게 하는 '파라슈트(parachute) 방식', *Alsomitra macrocarpa*와 같이 매우 높은 양항비를 갖는 가볍고 얇은 대칭 날개를 씨앗에 부착하여 활공하는 '글라이더 방식', 단풍나무 씨앗과 같이 회전을 하면서 떨어지게 하는 방식 등이 있다[2]. 이 중 단풍나무의 씨앗과 같은 방법을 '헬리콥터 방식' 혹은 '자동회전(autorotation) 방식'으로 분류한다. 이들 세 가지 방식 중에서 파라슈트 방식은 항력을, 글라이더와 자동회전 방식은 양력을 씨앗의 무게와 균형을 이루게 하는 공기력으로 사용한다는 차이가 있다.

파라슈트 방식과 글라이더 방식과 비교하여 자동회전 방식을 사용하는 식물 씨앗의 특징은 씨앗의 무게 (W)를 씨앗에 부착된 씨앗 날개의 면적 (S)으로 나눈 값인 익면하중(wing loading)이 매우 크다는 것이다. 익면하중이 크다는 것은 정해진 날개면적으로 발생시키는 양력이 상대적으로 크다는 것을 의미한다. Lentink 등[3]은 자동회전 방식 씨앗이 다른 바람 퍼짐 방식과 비교하여 4-5배의 큰 익면하중을 가짐에도 불구하고 낙하속도는 30% 정도 밖에 증가하지 않는다는 사실을 지적하고, 자동회전 방식이 다른 바람 퍼짐 방식에 비하여 식물로 하여금 배아(embryo)에 보다 많은 자원(resources)을 투자하면서 높은 퍼짐 성능(dispersal performance)을 갖게 하는 방식이라 하였다.

많은 과학자들이 흥미로운 자연계의 비행 현상 중 하나인 자동회전에 의한 바람 퍼짐 방식을 연구하였다. Norberg[4]는 자동회전 방식 식물 씨앗의 평면형태, 질량 분포 등을 분석하고, 블레이드 요소 이론(blade-element theory)을 적용하여 자동회전 비행의 원리를 해석하였다. Norberg는 식물 씨앗의 자동회전 비행이 정안정성(static stability)과 동안정성(dynamic stability)을 모두 가지고 있으며, 자동회전 비행에서 공기력과 원심력은 피치 안정성(pitch stability)을 갖게 하는 방향으로 상호작용한다고 하였다.

Azuma와 Yasuda[5]는 10여종의 자동회전 방식 바람 퍼짐을 하는 식물 씨앗의 기하학적 형태와 비행 특성과의 관계에 대한 집중적인 자료를 제시하였다. Azuma와 Yasuda는 낙하속도와 회전속도 등과 같은 운동요소가 씨앗의 스펠과 면적, 무게, 단면 형상, 무게 중심의 위치, 회전 반경 등과 같은 형태요소와 밀접하게 관련되어 있다고 하였다. 특히 낙하속도는 씨앗의 익면하중의 제곱근에 비례한다는 것을 보여주었다. Yasuda와 Azuma[6]는 자연 상태의 씨앗과 스티렌 폼(styrene foam) 재질 로봇 씨앗을 자유낙하시키는 실험을 통하여 자동회전 비행이 가능한 무게 중심의 범위를 분석하는 연구를 하였다. Yasuda와 Azuma는 자동회전 방식 식물 씨앗의 무게중심은 씨앗 기저(seed base) 부근의 매우 제한된 영역에 위치하며, 씨앗의 평면형태는 단면형태나 무게중심의 위치에 비하여 자동회전 비행 특성에 미치는 영향이 작다고 하였다. 또한 Yasuda와 Azuma는 씨앗 표면의 거칠기는 회전 토크를 증가시키는 요소라는 의견을 제시하였다.

Lentink 등[3]은 자동회전 방식 바람 퍼짐을 하는 식물 씨앗에 속하는 3가지 단풍나무 씨앗과 hornbeam 씨앗을 대상으로 아크릴 평판으로 만든 로봇 씨앗을 사용한 실험연구를 하였다. Lentink 등은 실제 씨앗의 자동회전 비행과 동적상사성(dynamic similarity)을 갖도록 로봇 씨앗의 크기와 운동요소를 결정하였다. Lentink 등은 이 로봇 씨앗을 점성이 큰 광물유(mineral oil) 탱크 안에서 회전과 병진 운동을 하도록 하고, 로봇 씨앗 주변의 유동장을 스테레오(Stereo) DPIV(Digital Particle Image Velocimetry)를 사용하여 측정하였다. Lentink 등은 자동회전 비행을 하는 식물 씨앗이 갖는 높은 양력이 씨앗 날개의 바람후방 영역(leeward region)에 발달하는 안정되고 강력한 앞전 와류(leading edge vortex, LEV)에 의한 것임을 보여주었다. Lentink 등은 LEV에 의한 양력의 발생 메커니즘은 새와 곤충 등과 같은 동물의 비행에서 뿐만 아니라, 단풍나무 씨앗과 같은 식물 구성요소의 비행에서도 공통적으로 활용되는 수렴적인 공기역학 해결(convergent aerodynamic solution) 방식이라는 의견을 제시하였다.

최근에 Lee 등[7]은 수직풍동(vertical wind tunnel)의 상향 풍속이 자유낙하 하는 단풍나무 씨앗의 낙하속도와 동일하게 조절하고 실제 단풍나무 씨앗이 수직풍동의 일정 높이에 떠서 회전하도록 하면서 DPIV를 사용하여 자동회전 비행을 하는 씨앗 주변의 유동장을 측정하였다. Lee

등의 연구는 X-ray micro-CT에 의한 단층 3차원 이미지(tomographic 3D image)를 통하여 자동회전 비행의 운동요소에 영향을 미치는 실제 단풍나무 씨앗의 자세한 형태요소를 관찰할 수 있게 하였으며, Lentink 등의 로봇 씨앗 연구에서 관찰된 안정되고 부착된 LEV의 존재를 재확인하여 주었다.

본 논문은 실제 단풍나무 씨앗의 형태와 운동요소를 입력 자료로 사용하는 수치해석을 통하여 자동회전 비행을 하는 단풍나무 씨앗의 항공역학적 특성을 분석한 연구이다. 가을에 채집한 샘플 씨앗의 X-ray micro-CT 자료를 사용하여 수치해석의 물체 형상을 구성하였으며, 챔버(chamber)에서 자유낙하하는 샘플 씨앗을 고속 카메라를 사용하여 측정된 자동회전 운동요소를 수치해석의 입력자료로 사용하였다. 수치해석의 결과로 제시한 자료는 씨앗 주변의 유동장 형태, 씨앗 날개면의 압력분포, 단면 양력계수 분포와 평균 수직력 계수, 낙하인자(descend factor) 등이다.

II. 본 론

2.1 자동회전 이론

자동회전을 하면서 낙하하는 식물의 씨앗에 작용하는 힘과 모멘트는 씨앗의 무게, 회전과 낙하에 의하여 발생하는 상대풍에 의한 공기력, 회전에 의한 원심력이 있다. Fig. 1에 자동회전에서 작용하는 힘과 자동회전의 운동 요소들을 나타내었다. Fig. 1a는 설정한 좌표계와 개략적인 자동회전 비행 운동요소를 보여주며, Fig. 1b는 Fig. 1a의 A-A 단면 방향에서 관찰된 평면에서의 힘 성분들과 자동회전 비행 운동요소를 보여준다. Ω 는 회전 각속도, CG는 씨앗의 무게 중심, CP는 압력중심(center of pressure)이다. x -축은 플래핑 축(flapping axis)이며, z -축은 회전축이다. r -축은 씨앗의 무게 중심에 위치한 회전중심을 원점으로 하는 씨앗 날개의 스패ن 방향 좌표이다.

공기력은 양력과 항력 성분으로 분해할 수 있다. 식물 씨앗의 자동회전에서 씨앗 날개 면은 수평면과 평행하지 않으며, 수평면과 일정한 각도(단풍나무 씨앗의 경우 약 15-30°)를 이루면서 회전을 하는데 이 각도를 코닝 각(coning angle)이라 한다(Fig. 1a). 또한 씨앗 단면의 코드 선과 씨앗이 회전하는 면과도 일정한 각도를 가지게 되는데(단풍나무 씨앗의 경우 약 -1°에서 -2° 사이) 이를 피치 각(pitch angle)이라 한다. 본 연구에서 양(positive)의 피치 각은 씨앗 단면의 코드

선이 회전면 쪽으로 향하는 방향으로 정의하였다(Fig. 1b). Fig. 1a에서 V_D 는 낙하속도, V_H 는 회전에 의한 수평 속도(따라서 $V_H = r\Omega$), φ 는 $\varphi = \tan^{-1}(V_D \cos \beta / V_H)$ 로 정의되는 각도이다. 따라서 스패의 각 단면이 갖는 국소 받음각(local angle of attack) α 는 $\alpha = \varphi - \theta$ 가 되며, 스패 방향 좌표 y 의 함수가 된다. 즉 국소 받음각은 씨앗 날개의 회전 중심에서는 매우 커지게 되며(거의 90°) 씨앗 날개 끝에서는 작아지게 된다. 자동회전을 하면서 낙하하는 식물의 씨앗 날개는 전형적인 항공기 날개에 비하여 매우 커다란 받음각을 갖는다는 것을 알 수 있다.

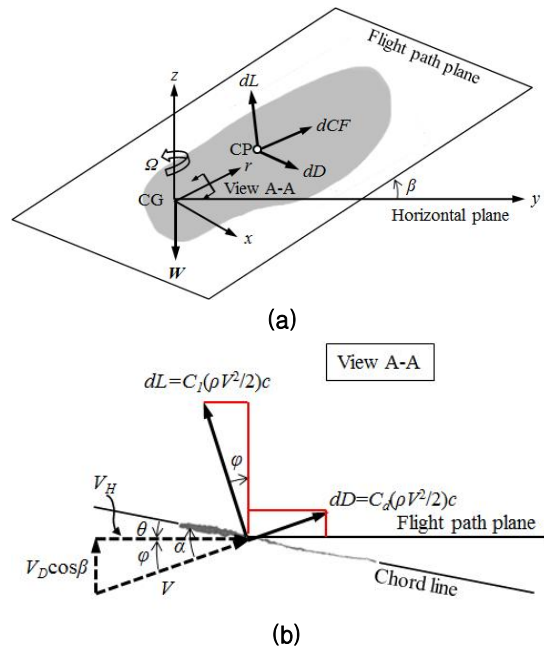


Fig. 1. Forces and motion parameters of autorotation. x , y , and z is the flapping axis, the horizontal axis, and the spinning axis, respectively. The span coordinate r is related with y as $y = r \cos \beta$. W is the weight of the seed, dL is the sectional lift, dD is the sectional drag, dCF is the centrifugal force acting on the section, CG is the center of gravity, β is the coning angle, Ω is the spinning rate, θ is the pitch angle, V_D is the descent velocity, V_H is the horizontal velocity due to rotation ($r\Omega$), V is the effective wind velocity, φ is $\tan^{-1}(V_D \cos \beta / V_H)$, and α is the local angle of attack ($\alpha = \varphi - \theta$)

Figure 1b는 또한 씨앗을 회전시키는 구동 토크(driving torque)는 단면에 작용하는 양력의 flight path 방향 성분인 $dL\sin j$ 이며, 이와 평형을 이루는 저항 토크(resisting torque)는 $dD\cos j$ 성분임을 보여준다. 따라서 양력이 커지거나 j 가 커지게 되면 자동회전의 각속도 Ω 가 증가하게 된다. 일정한 회전 각속도와 낙하속도를 갖고 자동회전을 하는 것은 씨앗의 무게, 씨앗면에 작용하는 공기력, 씨앗의 질량분포에 의한 원심력 등의 힘과 모멘트가 평형을 이룬 것을 의미한다. 수직 방향 (중력 가속도 방향)에 대한 힘, flight 평면에서의 torque, 플래핑 축(x 축)에 대한 모멘트의 평형식은 다음과 같다.

-수직 방향의 힘;

$$\int_{r=-R_b}^{r=R} (dL\cos\varphi + dD\sin\varphi)\cos\beta dr - W = 0 \quad (1)$$

-flight 평면에서의 torque;

$$\int_{r=-R_b}^{r=R} (dL\sin\varphi - dD\cos\varphi)rdr = 0 \quad (2)$$

-플래핑 축(x 축)에 대한 모멘트;

$$\begin{aligned} & \int_{r=-R_b}^{r=R} (dL\cos\varphi + dD\sin\varphi)rdr \\ & - \int_{r=-R_b}^{r=R} [(\Omega^2 r^2 \cos^2\beta) / (r\cos\beta)](r\sin\beta)\rho_w dr \\ & - \int_{r=-R_b}^{r=R} (\rho_w g)(r\cos\beta)dr = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

(1), (2), (3)식에서 적분의 상한치 R 는 r -좌표의 원점으로 잡은 회전축으로부터 씨앗 날개 끝까지의 거리이며, 적분의 하한치 R_b 는 회전축으로부터 씨앗 기저 끝까지의 거리이다. ρ_w 는 씨앗 날개의 단위 스펠당 질량, g 는 중력가속도이다. (3)식에서 첫 번째 항은 공기력에 의한 모멘트이며, 두 번째 항은 씨앗의 분산된 질량에 작용하는 원심력에 의한 모멘트이고, 세 번째 항은 씨앗의 분산된 무게에 의한 모멘트이다.

2.2 샘플 씨앗의 형상 및 자동회전 운동 요소

2.2.1 샘플 씨앗의 형상

샘플 단풍나무 씨앗은 한국에서 가장 보편적인 중중 하나인 *Acer palmatum*종이다. 10월말에서 11월 사이에 충분히 성숙하여 땅에 떨어진 씨앗 중에서 가능한 크기와 모양이 유사한 씨앗들

을 채취하였다. 채취한 샘플 씨앗은 수분이 증발하지 않도록 파라핀으로 밀봉한 플라스틱 상자에 보관하였다. 이 보관된 씨앗샘플을 X-ray micro-CT에 의한 3차원 씨앗 형상 자료 추출, 자유낙하 실험을 통한 운동요소 측정에 사용하였다. 샘플 씨앗의 무게는 0.01 mg 정확도를 가진 OHAUS AP2500(Analytical Plus)을 사용하여 측정하였으며, 샘플 씨앗의 스펠, 코드, 평면적은 확대된 사진을 이용하여 측정하였다. 5개의 샘플 씨앗에 대하여 측정한 질량, 스펠, 씨앗 날개 면적, 익면하중 등과 같은 물리적 크기는 다음과 같다.

질량(m); 42.5 ± 3.5 mg,
스플(b); 22.1 ± 0.8 mm,
씨앗 날개 면적(S); 147.7 ± 12.7 mm²,
익면하중(W/S); 2.83 ± 0.25 N/m²

포항가속기연구소(PAL)의 싱크로트론 X-ray micro-CT를 사용하여 샘플 씨앗의 단면 형상, 표면 거칠기 등이 그대로 재현된 슬라이스 형상 자료를 만들고, 이로부터 샘플 씨앗의 3차원 형태학적 구조(3D morphological structure)를 재구성하였다. Fig. 2는 이와 같은 단풍나무 씨앗의 단층 3차원 이미지를 보여준다. Fig. 2는 많은 관다발(vascular bundles) 들이 씨앗 기저(seed base)에서 출발하여 스펠 방향으로 뻗어가다가 씨앗 끝(seed tip) 근처로 가면서 차례로 뒷전을 향하여 차례로 휘는 것을 보여 준다. 굵은 관다발은 앞전 쪽에 집중되어 있다. 이와 같은 관다발의 분포는 씨앗 날개의 단면이 앞전(leading edge) 부근에서는 두껍고 뒷전(trailing edge) 부근에서는 매우 얇으며, 겉 표면을 울퉁불퉁하게 하는 요소가 된다. 씨앗 전체의 무게중심은 배아가 위치한 씨앗 기저 부분에 있으며, 이 편심된 무게중심에 자동회전의 회전축이 위치하게 된다. Norberg[4]는 Fig. 2가 보여주는 관다발 분포가 자동회전 방식 식물 씨앗이 외부 하중에 의한 비

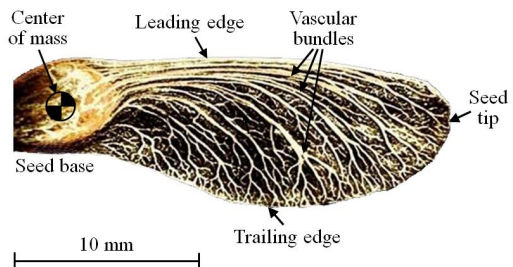


Fig. 2. Tomographic 3D image of the maple seed(*A. palmatum*)[7]

틀림과 굽힘을 견디게 하며, 무게중심을 앞전 부분에 위치하게 하는 요소라고 하였다.

Figure 2는 또한 단풍나무 씨앗이 씨앗 기저에서 씨앗 끝 쪽으로 가면서 코드 길이가 증가하다가 60-70% 되는 스펠 위치에서 최대가 되고 이 지점을 지나면 코드가 감소하는 tapered tip 평면형상을 가지고 있는 것을 보여주고 있다.

2.2.2 샘플 씨앗의 자동회전 비행 운동요소 측정

외풍이 없도록 만든 챔버에서 자유낙하하는 샘플 씨앗에 대한 자동회전 비행 운동요소 측정은 초당 프레임 속도 1,000의 고속 카메라 (Photron Fastcam Ultima APX)를 사용하였다. 자세한 운동요소 측정 방법이 참고문헌 7에 기술되어 있다. 채집한 같은 종 씨앗 5개 샘플을 각각 5회씩 측정한 결과, 자동회전 비행의 운동요소는 다음과 같다.

- 낙하속도(V_D); $1,260 \pm 48.1$ mm/s,
- 회전속도(Ω); 133.6 ± 10.4 rad/s,
- 회전반경(R); 19.8 ± 0.4 mm
- 코닝 각(β); $19.4^\circ \pm 2.5^\circ$

피치 각(θ)은 매우 작은 각으로 측정하지 못하였다. 이와 같은 자동회전 비행 운동요소 값은 단풍나무 씨앗의 자동회전 비행에 대한 다른 연구에서 제시된 운동요소 값들의 범주와 잘 일치하고 있다.

2.3 수치해석 기법

CFD Software로 ANSYS사의 FLUENT12.0을 사용하였다. 지배방정식은 비압축성 유동의 연속 방정식과 운동량 방정식으로 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0$$

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right] = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v}$$

p 는 정압(static pressure), μ 는 점성계수이다. 본 해석에서는 씨앗의 운동요소 즉, 낙하속도 및 회전속도를 일정하게 적용하여 중력에 의한 체적력(gravitational body force)은 제외되었다. 운동량 방정식의 대류 항(convection term)은 1차 상류 스킴(first-order upwind scheme)을 적용하였다.

Figure 3은 수치해석 경계면 구성을 나타내었다. 전체 수치해석 영역(domain)은 회전 영역과 비회전 영역으로 이루어지며, 두 영역은 경계면(interface)으로 인접하여 있다. 회전 영역은 씨앗 주변의 유동 영역이며, MRF(Moving Reference

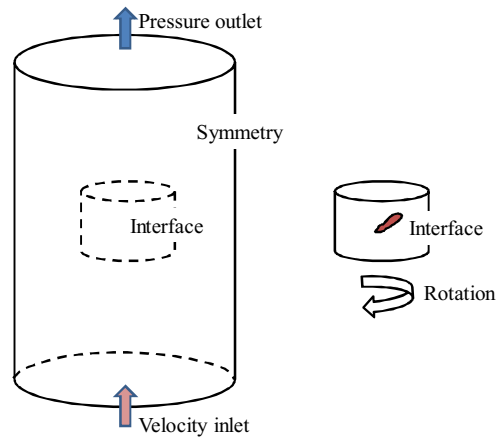


Fig. 3. Boundary conditions in numerical simulation

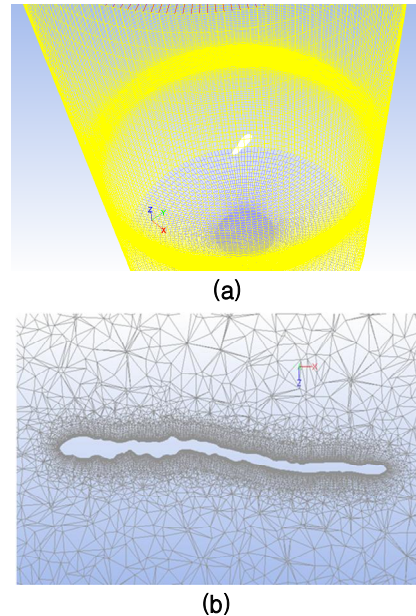


Fig. 4. Grid used in numerical simulation

Frame)기법을 활용하여 씨앗의 회전을 적용하였다. 낙하속도는 유입속도 경계면(velocity inlet)에 적용하였다. 일정한 입력 경계조건인 낙하속도와 회전속도는 각각 1.26 m/s, 133.6 rad/s 이다.

격자는 Gambit과 T-Grid를 사용하여 생성하였다. 총 3차원 격자의 수는 정렬 및 비정렬 격자 모두 약 8,300,000개이며, 격자의 최대 경사도(maximum skewness)는 0.96보다 작게 하였다. Fig. 4는 수치해석 영역 및 격자구성을 보여준다. 특히 Fig. 4b는 씨앗 단면의 형태와 경계면 격자구성을 보여준다. 해의 수렴 정도는 연속방정식

의 x , y , z 방향 속도성분의 리지듀얼(residual)이 10^{-6} 미만인 것으로 설정하였다.

2.4 유동장 형태

Figure 5(a)와 (b)는 각각 세 개의 스펠 위치에서 단면 유선(sectional streamlines)과 스펠 방향 와도 분포(spanwise vorticity distribution)를 보여준다. Fig. 5의 결과에 사용된 자동회전 운동요소 값은 $V_D = 1.26$ m/s, $\Omega = 133.6$ rad/s, $\beta = 19.4^\circ$, $\theta = -1.5^\circ$ 이다. 회전반경 R 은 19.8 mm이며, 이 회전반경과 133.6 rad/s의 회전속도에 기준한 씨앗 끝 속도는 2.64 m/s이다. 씨앗 끝 속도와 평균 코드 길이(10.2 mm)를 사용한 유동 레이놀즈 수(Reynolds number)는 약 1,800이다.

Figure 5는 두드러진 LEV가 씨앗 날개 바람반대 영역(leeward region)에 형성되는 것을 보여 주고 있다. 0.25R 되는 스펠 위치와 0.50R 되는 스펠 위치에서 앞전에서 분리된 흐름이 시계방향 와도의 전단 층(shear layer)을 형성하고, 이 전단 층은 씨앗 날개 바람 반대면(leeward surface)에 부착된 큰 규모의 LEV로 발전한다. 특히 0.25R 스펠 위치에서는 강하고 집중된 LEV(strong and intense LEV)가 바람반대 영역의 코드 앞부분과 씨앗면 가까이 위치하고 있어 이 부분의 씨앗면에 커다란 크기의 부압이 발생할 것임을 유추할 수 있게 한다. 0.5R 스펠 위치에서는 강도와 집중도가

약하여진 LEV가 코드 대부분의 영역을 덮고 있다. 이와 같은 스펠 안쪽에 발달하는 컴팩트한 LEV는 Lentink등[3], Lee 등[7]의 실험연구 결과와 잘 일치하고 있다.

0.75R 스펠 위치에서는 더 이상 바람반대 영역에서 닫혀진 유선(closed streamlines)이 관찰되지 않으며, 시계방향 와도의 전단층이 씨앗면에서 분리되어 씨앗 후방에서 긴 흔적을 갖는 후류 형태가 된다. 3개의 모든 스펠 위치에서 바람 영역(windward region)은 반시계 방향 와도의 흐름이 형성되어 있음을 Fig. 5b는 보여주고 있다.

씨앗 주변의 3차원 흐름 구조를 나타낸 Fig. 6은 씨앗 날개의 바람 반대면 영역에 스펠방향으로 전진하는 나선형 와류(spanwise spiraling vortex)가 발달하는 것을 보여준다. 스펠 안쪽 앞전 부근에서 출발한 유체입자들이 나선형으로 회전하면서 씨앗 끝 쪽을 향하여 전진하다가 씨앗 끝 부근에서 씨앗 면에서 분리되어 후류를 형성한다. Fig. 5의 단면 흐름과 Fig. 6의 3차원 흐름 구조를 종합하면 자동회전 비행을 하는 단풍나무 씨앗 주변의 흐름 구조를 다음과 같이 요약할 수 있다. “스펠 안쪽에서 시작하는 컴팩트한 LEV는 스펠 바깥쪽으로 가면서 집중도는 감소하고 크기는 커지는 팽창하는 나선형 와류로 발달하며, 이 나선형 와류는 씨앗 끝 부근에서 끝 와류(tip vortex)와 합쳐져서 씨앗 끝과 이어지는

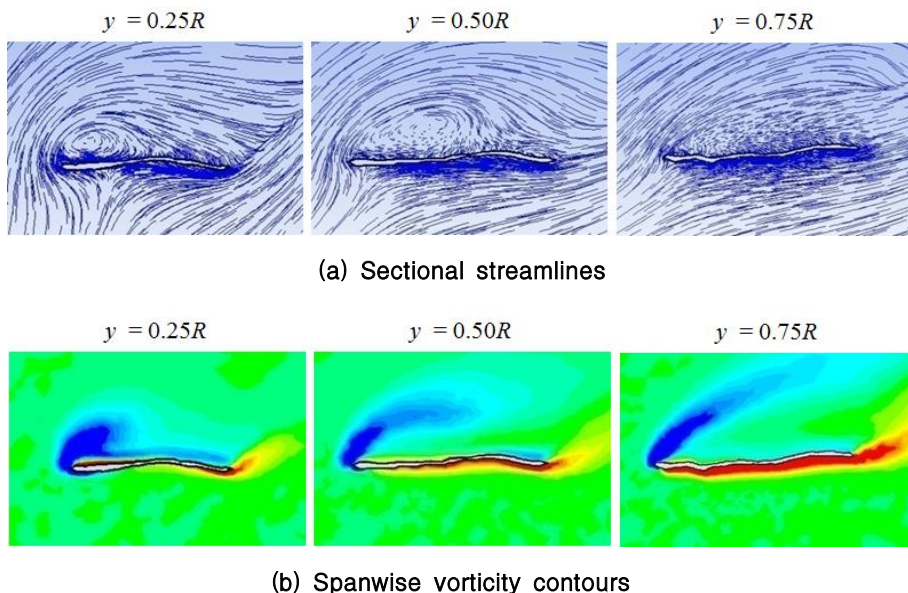


Fig. 5. Flow pattern around the maple seed in autorotative flight

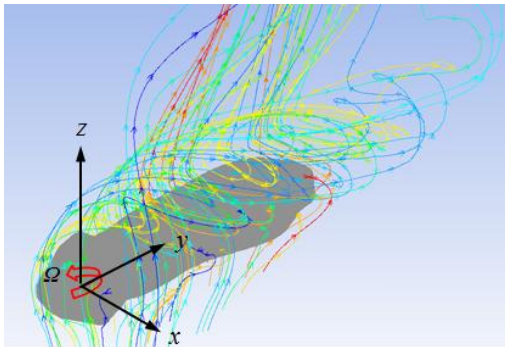


Fig. 6. 3D flow structure around the maple seed in autorotative flight

후류가 된다.” 자동회전 비행을 하는 단풍나무 씨앗에서 관찰되는 이와 같은 스펬방향으로 전진하는 나선형 와류는 델타형 항공기 날개에서 발생하는 원추형 나선형 LEV(conical spiral LEV), Ellington 등[8]이 플래핑 운동을 하는 박각시나방(hawk moth)의 날개에서 관찰한 나선형 와류 LEV와 유사한 흐름 현상이다.

Lentink 등[3]은 스펬 방향 와도에 스펬 방향 속도 성분을 곱한 물리량을 스펬 방향 와도 이동(spanwise transport of vorticity)으로 정의하고, 연구대상 3 가지 단풍나무 씨앗 모두에서 바람 반대 영역에서 스펬방향 와도 이동이 현저한 것을 보여주었다(참고문헌 3의 Fig. 3). Lentink 등은 이와 같은 스펬방향 와도 이동이 자동회전 비행을 하는 단풍나무 씨앗에서 관찰되는 LEV의 안정성과 부착을 가능하게 하는 흐름 메커니즘이라고 제안하고 있다. 본 연구의 결과에서도 컴팩트한 LEV가 발달하는 스펬 안쪽 위치에서 강한 스펬 방향 속도성분과 스펬방향 와도 이동이 관찰되었다. 따라서 씨앗 날개 바람반대 영역의 스펬 안쪽 위치에 발달하는 컴팩트한 LEV의 존재, 스펬방향으로 전진하는 나선형 와류를 통한 와류 이동을 통한 LEV의 안정화 메커니즘은 자동회전 비행을 하는 단풍나무 씨앗에서 발생하는 높은 양력의 핵심이라 할 수 있다.

Birch 등[9]은 플래핑 날개에서 발생하는 LEV의 구조에 레이놀즈수가 미치는 영향을 규명하기 위하여 과일파리(fruit fly) *Drosophila melanogaster*의 로봇 날개를 사용하여 유동장과의 힘을 측정하는 연구를 수행하였다. Birch 등은 동일한 로봇 날개를 사용하고 주변유체의 점성을 달리하는 방법으로 두 개의 서로 다른 레이놀즈수(1,400과 120)를 갖도록 하고 유동장을 측정한

결과 두 개의 레이놀즈수에서 모두 안정된 LEV가 발달하는 것을 관찰하였다. 그러나 레이놀즈수가 1,400인 조건에서는 LEV의 중심(core) 안에 강력하고 좁은 스펬 방향 흐름이 관찰되었지만, 레이놀즈수가 120인 조건에서는 이와 같은 스펬 방향 흐름 현상이 관찰되지 않았다. 이에 근거하여 Birch 등은 연장된 와류 부착(prolonged vortex attachment)을 가능하게 하는 와도 이동 메커니즘은 레이놀즈수에 따라서 서로 다른 형태를 취한다고 하였다.

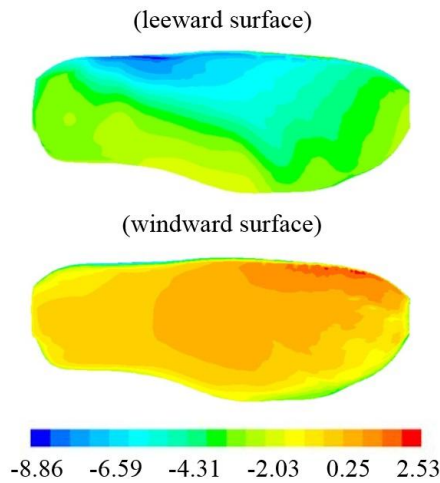
Shyy와 Liu[10]는 레이놀즈수가 6,000인 조건에서 제자리비행을 하는 박각시나방의 날개에서는 집중된 원뿔 형태의 LEV(intense and conical LEV)의 중심에서 팔목할 만한 스펬방향 흐름이 존재하지만, 레이놀즈수가 134인 과일파리의 제자리 비행에서 발달하는 LEV에는 이와 같은 스펬방향 흐름이 미미한 것을 보고하고 있다.

이와 같은 Birch 등, Shyy와 Liu의 연구 결과는 Fig. 6에서 관찰되는 스펬방향 나선형 와류가 3.27 정도의 작은 가로세로비를 갖는 단풍나무 씨앗 형상과, 1,800정도의 레이놀즈수를 갖는 흐름 조건에서 충분히 발생할 수 있는 현상임을 지지하고 있다. 또한 스펬 방향 나선형 와류는 매우 높은 곡소 받음각(0.25R 스펬 위치에서 약 60°, 0.50R 스펬 위치에서 약 42°)에도 불구하고 유동 박리나 와 흘림(vortex shedding) 없이 안정되고 부착된 LEV를 가능하게 하는 와도 이동에 기여하는 역할을 할 것으로 유추된다.

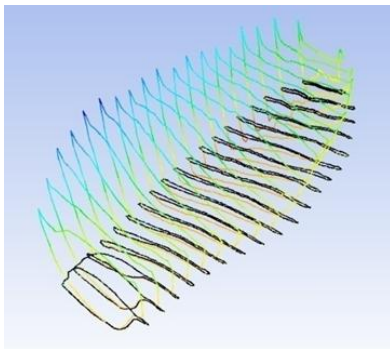
2.5 씨앗 날개면의 압력분포

Figure 7a는 파스칼(Pascal) 단위로 나타낸 압력선도(pressure contour)로 씨앗 날개면의 압력분포를 보여준다. 바람 반대면에는 대부분의 영역에서 매우 커다란 크기의 부압(negative pressure)이 작용하며, 바람면에는 앞전 부분과 바깥쪽 스펬의 뒷전 등 일부를 제외하고 대부분의 영역에 정압(positive pressure)이 작용한다. 가장 큰 크기의 부압은 바람 반대면의 안쪽 스펬의 앞전 부근 좁은 영역에서 발생한다. 이 영역은 Fig. 5가 보여주는 0.25R 스펬위치 단면의 컴팩트한 LEV의 위치와 정확히 일치한다. 최대 크기의 부압 값은 -8.86이었다. Fig. 7a는 자동회전 비행을 하는 단풍나무 씨앗에서 발생하는 높은 양력의 대부분이 바람 반대면에 작용하는 커다란 크기의 부압에 의한 것임을 알 수 있게 한다.

Figure 7b는 여러 스펬 위치에서 단면형태와



(a) Contours of absolute surface pressure on the leeward and windward surfaces



(b) Chordwise distribution of surface pressure coefficient and sectional geometry along the span

Fig. 7. Surface pressure distribution of the maple seed in autorotative flight

코드 방향을 따른 압력계수 분포를 보여준다. 모든 단면에서 앞전 부근에서 현저한 압력계수 피크가 관찰되며, 압력계수의 크기는 뒷전 쪽으로 가면서 급격히 작아진다. 커다란 크기의 부압은 두께가 큰 코드 전반부에서 발생하며, 두께가 작은 코드의 후반부에서 발생하는 부압은 크기가 매우 작다. 따라서 각 단면에서의 압력중심과 씨앗 날개 전체의 압력중심은 코드 전반부에 위치할 것으로 예상된다. Norberg[4]는 자동회전하는 단풍나무 씨앗날개가 씨앗 기저 부근에서는 90° 에 가까운 커다란 지역 받음각을 가지며 씨앗 끝으로 갈수록 지역 받음각이 작아진다는 사실에 근거하여 씨앗 기저 부근에서는 압력중심이 코드

중앙에 위치하며 씨앗 끝에서는 25% 코드에 위치할 것으로 추정하였다. 본 연구에서 압력중심은 0.25R에서는 48% 코드, 0.50R에서는 38% 코드, 0.90R에서는 36% 코드에 위치하였다.

크기와 두께가 매우 작고 빠르게 회전하는 자동회전 비행중인 단풍나무 씨앗의 날개 표면에 작용하는 압력을 실험적으로 측정하는 것은 매우 어려운 일이다. 자동회전 비행중인 식물 씨앗의 날개면에 작용하는 압력에 대한 자료는 Yamada와 Ito[11]의 로봇 씨앗에 대한 자료가 유일하다. Yamada와 Ito는 매우 얇은 두 개의 플라스틱 평판 (평판 두께 0.2 mm) 사이에 공간(공간 두께 0.3 mm)을 둔 단풍나무 로봇 씨앗을 만들고, 이 로봇 씨앗을 수직풍동에서 회전하도록 하면서 씨앗 면에 작용하는 압력분포를 측정하였다. Yamada와 Ito는 아랫면과 윗면에 위치한 222개의 압력공 중 하나의 압력공을 제외한 다른 모든 압력공을 매우 얇은 테이프로 막고 중공 회전축 (외경 2 mm, 내경 1 mm)을 통하여 배출되는 압력과 주변 압력의 차압을 차례로 측정하는 방식으로 씨앗 면에 분포한 전 압력공에 작용하는 정압을 측정하였다.

Yamada와 Ito의 로봇 씨앗은 매끄러운 표면, 직사각형 단면의 앞전 등 실제 씨앗과는 크게 다른 형상을 가지고 있다. 또한 자동회전 비행의 운동요소(낙하속도; 0.9 m/s, 회전속도; 75.2 rad/s, 코닝 각; 14.7° , 피치 각; 0°)도 본 연구의 운동요소와 차이가 있다. 이와 같은 씨앗 형상의 차이와 운동요소의 차이에도 불구하고 씨앗의 바람 후방면에 커다란 부압이 분포하며, 바람면에는 스펀 바깥쪽을 제외한 영역에 작은 크기의 정압이 분포하는 등 전반적인 압력분포 경향에 있어서는 두 연구의 결과가 비슷하였다. 그러나 최대 부압이 작용하는 스펀 위치, 코드 방향 압력 분포 등 세부적인 압력분포 특성에 있어서는 차이를 보였다.

2.6 단면 양력계수 분포(Sectional lift coefficient distribution)와 평균 수직력 계수, 낙하인자(Decent factor)

Figure 8에 본 연구의 샘플 씨앗에 대하여 계산한 단면 양력계수 분포를 Lentink 등[3]의 로봇 씨앗에 대한 단면 양력계수 분포와 비교하였다. Lentink 등은 각 단면에서 와도를 적분하여 단면 양력을 구하였다. 본 연구에서는 씨앗 날개면에 작용하는 압력과 전단응력을 직접 적분하여 단면 양력을 계산하였다. 단면 양력 자체 값은 스펀 중앙 부분에서는 크고 씨앗 기저 부분과 씨

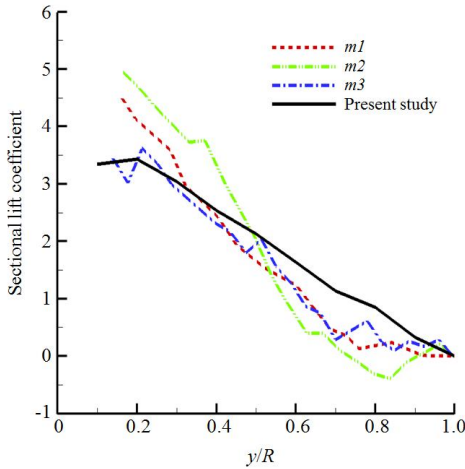


Fig. 8. Variation in sectional lift coefficient along the span

앗 끝 부분에서는 작다. 씨앗의 기저 부분에서는 동압이 매우 작고, 씨앗 끝 부분에서는 동압이 크지만 코드가 작고 날개 끝 와류(tip vortex)로 인한 끝 손실이 있기 때문이다. Fig. 8은 단면양력을 국소 동압 $[0.5\rho(V_D^2 + r^2\Omega^2)]$ 과 국소코드(local chord)로 무차원화한 단면 양력계수를 산출하여 Lentink 등의 단면 양력계수 분포(참고문헌 Fig. 4C)와 비교할 수 있도록 한 것이다.

Figure 8은 본 연구의 샘플 단풍나무 씨앗의 단면 양력계수가 씨앗 기저 부분에서 큰 값을 가지다가 3.46의 값을 갖는 0.20R 스패 위치 이후부터 씨앗 끝으로 갈수록 연속적으로 감소하는 것을 보여주고 있다. 이와 같은 스패를 따른 단면 양력계수의 변화 경향은 Lentink 등의 세 종류 단풍나무 씨앗의 단면 양력계수의 변화 경향과 유사하다. Fig. 8에서 Lentink 등의 단면 양력계수 분포 곡선이 매끄럽지 못하고 꺾이는 곳들이 있는 것은 각 단면에서 일정 폐곡선 안에 있는 와도를 적분하여 양력을 계산한 방식 때문인 것으로 판단된다. Lentink 로봇 씨앗 실험에서 모사한 세 가지 단풍나무 씨앗의 물리적 크기와 자동회전 비행 운동요소 값은 다음과 같다.

- *m1(Acer diabolicum Blume)*: 스패; 36.2 mm, 낙하속도; 0.806 m/s, 회전속도; 102.3 rad/s, 코닝 각; 23.7°, 피치 각; -1.17°, 익면하중; 1.87 N/m²

- *m2(Acer palmatum Thunb. Var. M. Makino)*: 스패; 26.7 mm, 낙하속도; 1.02 m/s, 회전속도; 115 rad/s, 코닝 각; 27.6°, 피치 각; -1.39°, 익면하중; 2.25 N/m²

- *m3(Acer palmatum Thunb.)*: 스패; 14.8 mm, 낙하속도, 1.08 m/s, 회전속도; 189 rad/s, 코닝 각; 15.0°, 피치 각; -0.90°, 익면하중; 2.32 N/m²

일정한 속도로 낙하하는 자동회전 비행 식물 씨앗의 무게(W)와 씨앗에 작용하는 수직 공기력(F_V)이 평형을 이룬다는 조건은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$W = F_V = C_{V,ave}(1+1/\lambda^2)(\rho V_D^2/2)S \quad (4)$$

(4)식에서 $C_{V,ave}$ 는 평균 수직 공기력 계수이고 [3], λ 는 $\lambda=V_D/\Omega R$ 로 정의되는 전진비(advance ratio), ρ 는 공기밀도이다.

(4)식으로부터 낙하속도 V_D 의 역수인 낙하시간 T 는 다음과 같이 된다.

$$T = 1/V_D = \sqrt{(0.5\rho)DF/(W/S)} \quad (5)$$

(5)식에서 DF 는 다음과 같이 정의하는 낙하인자(descend factor)이다.

$$DF = C_{V,ave}(1+1/\lambda^2) = 2W/(\rho V_D^2/2)S \quad (6)$$

(5)식은 낙하시간은 익면하중(W/S)의 제곱근에 역으로 비례하고, 낙하인자(DF)의 제곱근에 직접적으로 비례하는 것을 나타낸다.

Lentink 등[3]은 자동회전에 의한 바람 퍼짐 방식을 사용하는 식물 씨앗이 파라슈트 방식과 글라이더 방식을 사용하는 식물 씨앗에 비하여 익면하중이 매우 큼에도 불구하고 낙하속도의 상대적인 증가 폭이 작은 이유가 전자의 식물 씨앗의 낙하인자가 후자의 식물 씨앗의 낙하인자 보다 월등하게 크다는 사실에 있다고 하였다. Lentink 등은 (6)식과 같이 정의되는 낙하인자는 자동회전 비행을 하는 식물 씨앗의 항공역학적 효율성(aerodynamic efficacy)을 나타내는 중요한 지표로 사용할 수 있다고 제안하였다.

2.2.1에 기술한 샘플 씨앗의 물리적 크기와, 자동회전 운동요소 값, 공기밀도 값 1.23 kg/m³을 사용하여 계산하면 본 연구의 샘플 단풍나무 씨앗의 DF 값은 2.90이 된다. 이 DF 값과 전진비 값 0.477을 사용하여 평균 수직공기력 계수($C_{V,ave}$) 값을 계산하면 0.537이 된다. 참고문헌 3의 Fig. 5에 주어진 익면하중 값과 낙하시간을 사용하면 (5)식을 사용하여 Lentink 등의 로봇 씨앗 연구에서 사용한 단풍나무 씨앗의 DF 값을 계산할 수 있다. 이들 씨앗의 DF 값은 $m1$ 씨앗은 4.63, $m2$ 씨앗은 3.51, $m3$ 씨앗은 3.20이다. 이들 DF 값과 (6) 식을 사용하여 계산한 $C_{V,ave}$ 의

값은 $m1$ 씨앗은 0.330, $m2$ 씨앗은 0.533, $m3$ 씨앗은 0.591이다. 가장 크기가 큰 $m1$ 씨앗의 평균 수직공기력 계수 값이 가장 작고, 가장 크기가 작고 회전속도가 큰 $m3$ 씨앗의 평균 수직공기력 계수 값이 가장 큰 것을 알 수 있다. 또한 본 연구의 샘플 단풍나무 씨앗의 $C_{V,ave}$ 값인 0.537은 Lentink 등[3]의 $m2$ 씨앗과 $m3$ 씨앗의 $C_{V,ave}$ 값인 0.533과 0.591에 가깝다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 본 연구의 수치해석 결과에 의한 평균 수직공기력 계수 값과 Lentink 등의 로봇 씨앗 실험에 의한 평균 수직공기력 계수 값이 매우 유사하다는 사실은 이들 두 연구의 타당성을 교차하여 검증하는 자료라고 할 수 있으며, 아울러 (4)식의 물리적 타당성을 보여준다고 할 수 있다.

III. 결 론

실제 단풍나무 씨앗의 형태와 운동요소를 입력 자료로 사용하는 수치해석을 통하여 자동회전비행을 하는 단풍나무 씨앗의 항공역학적 특성을 연구하였다. 자동회전 비행을 하는 단풍나무 씨앗 날개에서 요구되는 높은 양력은 씨앗 바람 반대면 유동 영역에 발달하는 컴팩트한 LEV에 기인함을 확인하였다. LEV에 의하여 씨앗 바람 반대면에 발생하는 부압은 안쪽 스펠 위치의 단면 앞전 부근에서 현저하게 큰 값을 가지고 분포하며, 뒷전 쪽으로 가면서 급격하게 감소한다. 자동회전 비행을 하는 단풍나무 씨앗 날개가 높은 국소 받음각을 가짐에도 불구하고 컴팩트하고 부착된 LEV를 유지할 수 있는 것은 스펠을 따라 흐르는 나선형 와류를 통하여 LEV 안에 와도를 누적시키지 않고 씨앗 날개 끝으로 와도를 배출하는 메카니즘에 의한 것으로 판단된다.

임의로 형태를 변화시킬 수 있는 새와 곤충의 날개와 달리 식물 구성요소의 비행은 미리 정하여진 형태로 원하는 비행성능을 발휘한다. 따라서 바람 퍼짐을 하는 식물 구성요소의 형태는 비행성능에 영향을 미치는 전부라고 할 수 있으며, 식물 구성요소의 형태학적 특성과 운동성능과의 상관관계는 매우 특별한 것으로 유추된다. 단풍나무 씨앗과 같은 식물 구성요소의 단면형상, 표면구조, 평면형태 등과 같은 형태요소와 자동회전 비행 운동요소와의 상관관계를 규명하는 후속 연구가 필요하다.

References

- 1) Bullock, J. M. R., Kenward, R., and Hails, E. R., "Dispersal Ecology (Blackwell, Malden, MA)," 2002.
- 2) Minami, S. and Azuma, A., "Various Flying Modes of Wind-dispersal Seeds," *J. Theo. Biol.*, Vol. 225, 2003, pp.1-14.
- 3) Lentink, D., Dickson, W. B., van Leeuwen, J. L., and Dickinson, M. H., "Leading edge Vortices Elevate Lift of Autorotating Plant Seed," *Science* Vol.324, 2009, pp.1438-1440.
- 4) Norberg, R. A., "Autorotation, Self-stability, and Structure of Single-winged Fruits and Seeds(samaras) with Comparative Remarks on Animal Flight," *Biol. Rev.*, Vol. 48, 1973, pp.561-596.
- 5) Azuma, A. and Yasuda, K., "Flight Performance of Rotary Seeds," *J. Theo. Biol.* Vol. 138, 1989, pp.23-53.
- 6) Yasuda, K. and Azuma, A. "The Autorotation Boundary in the Flight of Samaras," *J. Theo. Biol.*, Vol. 185, 1997, pp.313-320.
- 7) Lee, S. J., Lee, E. J., and Sohn, M. H., "Mechanism of Autorotation Flight of Maple Samaras," *Experiments in Fluids*, Vol. 55, 2014, 1718.
- 8) Ellington, C. P., van den Berg, C., Willmott, A. P., Thomas, A. L. R., "Leading-edge Vortices in Insect Flight," 1996, *Nature*, Vol. 384, pp.626-630.
- 9) Birch, J. M., Dickson, W. B., and Dickinson, M. H., "Force Production and Flow Structure of the Leading Edge Vortex on Flapping Wings at High and Low Reynolds Numbers," *J. Exp. Biol.* Vol. 207, 2004, pp.1063-1072.
- 10) Shyy, W. and Liu, H., "Flapping Wings and Aerodynamic Lift: the Role of Leading-edge Vortices," *AIAA J.*, Vol. 45, 2007, pp.2817-2819.
- 11) Yamada, T. and Ito, A., "Measurements of Pressure Distribution Acting on Autorotating Samara," *Ryutai Rikigaku Koenkai Koenshu*, Vol. 33, 2001, pp.197-200.