

잠자리 유형 모델의 공력특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Aerodynamic Characteristics of Dragonfly Type Model

김송학*, 장조원(한국항공대학교)

1. 서론

초파리나 잠자리와 같은 곤충들은 플레핑 운동을 하면서 양력과 추력을 발생시켜 비행을 한다. 이러한 플레핑 날개에 관한 실험적 연구는 최초 한 쌍 날개를 갖는 초파리의 제자리 정지비행(hovering)상태에서의 양력 발생 메커니즘에 관한 연구와, 유속이 있는 경우 플러징 운동을 수행하는 에어포일의 연구가 수행되어져 왔다. 앞선 연구에서 밝혀진 양력발생의 원인은 앞전와류(leading edge vortex)이다. Dickinson and Gotz[1] 와 Sunada 등[2]은 플레핑 날개의 윗면에서는 앞전과 뒷전사이에 분리기포(separation bubble)가 존재한다고 하였으며, Willmott et al.[3]은 이러한 분리기포가 날개의 캠버를 효과적으로 증가시켜 날개 윗면의 속도를 증가시키고 날개 아랫면의 속도를 감소시킨다고 하였다. 결국 이러한 앞전와류의 재부착 현상이 양력을 발생시키는 원인이 된다. Van den Berg and Ellington[4]은 플레핑 운동을 하는 날개는 downstroke 운동과정에서 앞전와류의 재부착 현상이 발생한다는 것을 연선-가시화 기법으로 밝혔으며, Liu 등[5]은 나방의 제자리 비행(hovering)에 관한 연구에서 나방 날개는 downstroke 운동을 수행할 때 양력이 발생된다는 사실을 전산연구를 수행하여 밝혔다.

Fejtek and Nehera[6]은 유속이 있는 경우 플러징 운동을 수행하는 날개에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 그들의 연구결과에서는 날개가 downstroke 운동 중간지점에서 가장 큰 양력과 추력이 발생한다는 결과를 얻었으며, upstroke 운동 중간지점에서 가장 작은 양력과 추력이 생성된다는 사실을 얻었다.

이와 같이 한 쌍 날개에 관한 공력 측정 연구, 가시화 연구, 전산 연구는 활발히 진행중에 있으나, 앞·뒤날개의 위상차를 이용하는 두 쌍

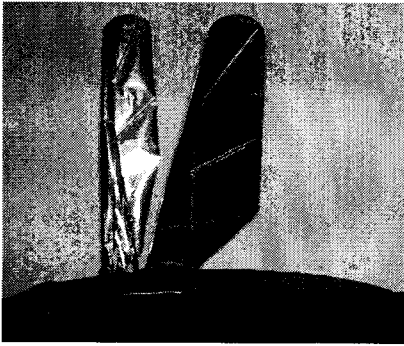
날개를 갖는 잠자리 형태의 공력특성에 관한 연구는 상당히 미흡한 편이다. Okamoto et al.[7]은 잠자리 날개의 공력특성에 관한 실험적 연구를 수행하였지만 플레핑 운동을 수반하지 않는 날개의 캠버, 두께등 주로 날개 형상 및 구조분야에 관한 연구였다.

따라서 본 연구에서는 두 쌍 날개를 갖는 잠자리 모델의 공력특성을 연구하기 위한 기초자료로, 유속이 있는 경우 플러징 운동을 하는 날개에 대한 연구를 수행할 예정이며, 실제 잠자리와 날개 형상이 비슷한 모델을 제작하여 가시화 연구와 함께 공력측정을 수행하였다. 이러한 연구는 향후 플레핑 운동을 수행하는 잠자리 날개에 관한 연구를 수행하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이라 예상된다.

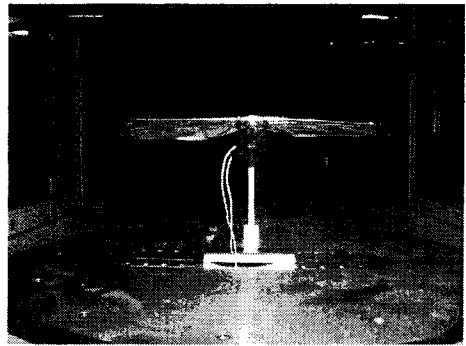
2. 실험 조건 및 방법

본 연구는 잠자리 유형 날개에 대한 공력특성에 관한 연구를 수행하여 가시화 연구결과[8]를 인용하여 날개 주위에서의 흐름이 공력특성에 미치는 영향을 조사하였다.

Fig. 1의 (a)는 가시화 연구에 사용된 모델을 나타낸 그림이다. 앞날개는 붙임각이 0° , 뒷날개는 약 10° 의 붙임각을 갖는다. 또한 날개 위치각도(wing positional angle)는 $+22.8^\circ$ 에서 -16.5° 까지 변화도록 하였다. 가시화 연구에 대한 실험 방법 및 조건에 대한 자세한 설명은 참고문헌[8]을 참고하기 바란다. Fig. 1의 (b)는 공력측정에 사용된 모델로 풍동내부에 장착되어진 모습을 보여주고 있다. 공력측정에 사용된



(a) Visualization model



(b) Aerodynamic force model

<Fig. 1> Dragonfly type model

모델은 가시화 연구에서 사용된 모델을 63% 축소하였지만 서로 기하학적으로 상사하다. 날개는 모터가 포함된 구동메커니즘으로 구동되며 날개위치각도는 $+25.0^{\circ} \sim -19.0^{\circ}$ 로 변화한다. 또한 날개의 재질은 가시화 연구에서 사용되어진 날개 재질과 동일하며, 날갯짓 운동을 수행할 때 유연성(flexibility)의 효과가 발생한다. Singh et al.[9] 제자리 정지 비행을 하는 플라핑 날개에 관한 실험적 연구를 수행하였으며, 날개 뒷전의 프레임(frame) 유무에 따라서 추력의 변화가 생긴다는 결과를 도출하였다. 이러한 결과는 유연성의 효과로 추측할 수 있다. 하지만 그 유연성의 정도는 측정하지 않았으며, 본 연구에서도 날개의 유연성 정도는 측정하지는 않았다.

공기력은 로드셀을 이용하여 측정하였으며 모델의 앞쪽 방향으로 발생하는 힘이 추력성분이고 모델의 수직 방향으로 발생하는 힘이 양력성분이다. 잠자리 유형 모델에서 측정된 힘은 10Hz 지역필터가 장착된 증폭기(amplifier)로 획득하였으며, 획득 주파수(sampling frequency)는 50Hz이다. 또한 본 연구에서 제시한 데이터는 95회 앙상블 평균값을 사용하였다. 공력 측정용 모델은 모터와 기어를 사용한 기계적인 구동메커니즘으로 작동되어 관성력(inertia force)이 발생한다. 따라서 순수한 공기력을 얻기 위해 풍동에서 얻은 데이터에서 99.99% 진공챔버에서 얻은 데이터 값을 빼주었다.

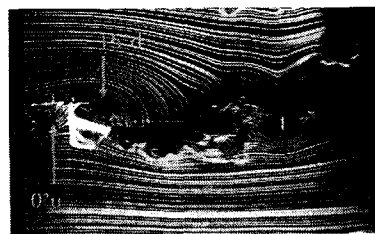
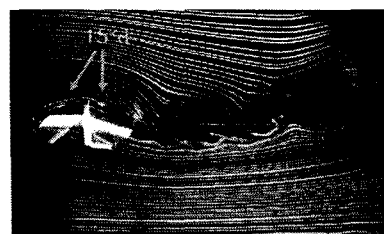
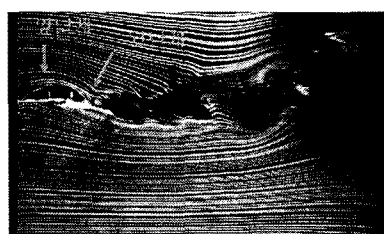
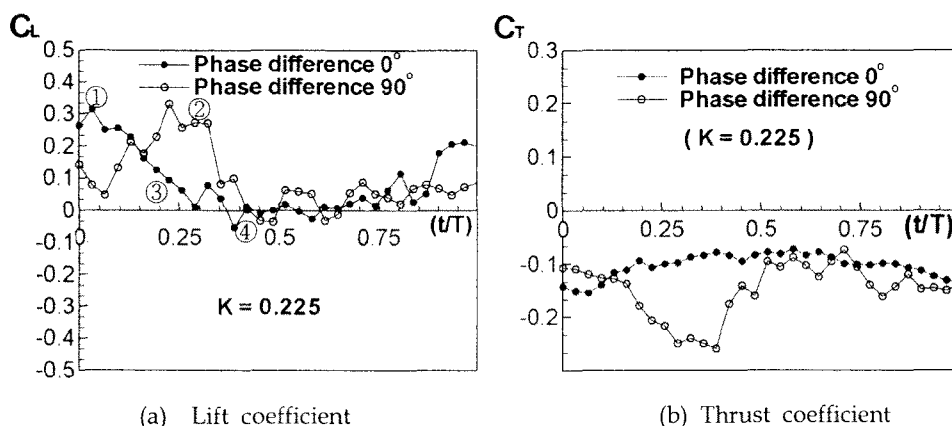
3. 결과 및 토론

본 연구에서는 무차원 진동수 $K=0.225$ 일 때

앞·뒤날개의 위상차가 0° , 90° , 180° , 270° 의 경우에 대해 공력측정에 관한 연구를 수행하여 가시화 결과[8]로 분석하였다.

Fig. 2의 (a), (b)는 위상차 0° 와 90° 일 때 한주기 동안의 양력계수와 추력계수를 나타내는 그래프이며, 그래프에서 표시된 ①~④는 fig. 2의 가시화 사진에 나타난 날개위치 각도를 나타낸 것이다. 가시화 사진 속에 표시된 숫자는 날개위치 각도를 나타내며, 숫자 뒤의 u, d는 각각 upstroke, downstroke를 뜻한다.

Fig. 2의 (a)는 한주기 동안의 양력계수를 나타내는 그래프이다. Fig. 2의 (a)에서 앞뒤 날개의 위상차가 0° 일 경우에는 최대 양력계수가 한주기 시작부분에서 가장 크게 나타나고 있으며, 계속 감소하다 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. Fig. 2의 가시화 사진 ①은 위상차 0° 인 경우의 가시화 사진이며, 앞뒤 날개의 날개위치 각도는 0° downstroke이다. 가시화 사진과 양력계수를 비교하여 보면, Fejtek and Nehera[6]의 연구 결과처럼 downstroke 운동 중간지점에서 가장 큰 양력이 발생한다는 사실을 확인할 수가 있다. 이러한 원인은 downstroke 운동 중간 지점에서 가장 큰 앞전 와류의 재부착 현상이 발생하기 때문이다. 또한 downstroke 운동 중간지점에서 가장 큰 앞전 와류의 재부착 현상이 발생하는 원인은 각 stroke 중간 지점에서 날개의 가속도가 가장 빠르기 때문이다[8]. 위상차 90° 인 경우에는 $t/T = 0.25$ 부근에서 양력이 가장 크게 나타나고 있다. 이러한 원인은 위상차 90° 인 경우에는 앞날개가 downstroke 0° 일 때 뒷날개는 upstroke 운동과정에서 downstroke 운동과정으로 바뀌는 시



<Fig. 2> Aerodynamic data and flow visualizations at phase difference of 0° and 90°

이며, 앞날개가 downstroke 운동 마지막 시점에 위치할 때, 뒷날개는 downstroke 운동 중간 지점에 오게 되어 앞전와류의 재부착 현상이 발생하기 때문이다. 이러한 현상이 가시화 사진 ②에서 잘 나타나고 있다. 가시화 사진 ②는 뒷날개가 downstroke 0° 에서 약간 아래지점인 약 -7° 를 나타내고 있다. 뒷날개의 윗면에서는 앞전와류의 재부착 현상이 나타나고 있으며, 이로 인해 양력계수는 한 주기의 시작 시점보다 증가한 것을 fig. 2의 (a) 그래프로 확인할 수가 있다.

Fig. 2의 가시화 사진 ③과 ④는 각각 위상차 0° , 90° 의 경우에 대한 가시화 사진이며, 뒷날개는 모두 -15° d 이다. 그러나 앞·뒤날개의 위상차로 인해 앞날개의 위치는 다르다. 가시화

사진에 대하여 분석을 하여보면, 위상차 90° 의 경우는 앞날개 아랫면에서 앞전와류의 재부착 현상이 발생하였다. 또한 뒷날개는 -15° d의 과정도로 downstroke 운동 끝 무렵에 있으며, 날개의 각속도가 거의 0에 가까워지고 있다[8]. 가시화 사진에서도 나타나듯이 뒷날개는 앞전와류를 가시화 사진 ②처럼 뚜렷하게 발생시키지 못하고 있다. 이러한 현상을 종합하여 보면, 앞날개는 양력의 반대방향 성분의 힘이 발생하고, 뒷날개는 양력이 거의 발생하지 않아 최종적으로 가장 낮은 양력이 발생할 것으로 예상되며, fig. 2의 (a) 양력데이터로 확인할 수가 있다. 위상차 0° 인 경우의 가시화 사진 ③은 앞·뒤날개 모두 downstroke 운동이 끝날 무렵에 있으며, 양력은 한 주기의 시작점 보다 감소하여 나타나고 있다. 이러한 현상은 Fejtek and Nehera[6]의 연구 결과와 매우 비슷하게 나타

나는 것을 확인할 수가 있었다. 양력이 감소하는 원인은 downstroke 운동이 끝나는 시점은 날개의 각속도가 작아지면서 날개 윗면의 앞전 와류를 재부착 시키지 못하기 때문이다. 이러한 현상은 가시화 사진 ③의 뒷날개에서도 잘 나타나고 있다.

Fig. 2의 (b)는 위상차 0° 와 90° 인 경우에 대하여 한주기 동안의 추력, 항력을 나타내는 그래프이다. 추력은 양의 값을 나타내고, 항력은 음의 값을 나타낸다. 그래프를 살펴보면, 한주기 동안 모두 항력이 발생함을 알 수 있다. 이러한 결과는 Fejtek 와 Nehera[6]의 연구 결과와 정 반대의 결과를 보이고 있다. 그 이유는 Fejtek 와 Nehera[6]의 실험 모델인 날개는 받음각이 없는 에어포일이었으며, 본 연구에서 사용되어진 모델은 뒷날개가 받음각 역할을 하는 10° 의 붙임각이 있기 때문인 것으로 추측된다. 자세한 설명은 참고 문헌[10]을 참조하기 바란다.

4. 결론

본 연구에서는 레이놀즈수 2.88×10^3 에서 잠자리와 같이 두 쌍의 날갯짓 비행체에 대한 공력 특성을 조사하는 연구를 수행하여 가시화 결과와 비교·분석하였다.

무차원 진동수 $K=0.225$ 에서 위상차 0° 일 때는 downstroke 운동 중간지점에서 가장 큰 양력이 발생하며, 위상차 90° 인 경우에는 날개의 면적이 더 큰 뒷날개가 downstroke 운동 중간지점에 있을 때 가장 큰 양력이 발생한다. 또한 받음각과 같은 역할을 하는 붙임각 10° 인 뒷날개에서 양력의 발생은 항력 발생의 주된 요인을 알 수 있었다.

후기

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 선도연구자 지원(KRF-2004-041-D0145)에 의해 연구되었음.

참고문헌

- [1] Dickinson, M.H. and Gotz, K.D., "Unsteady aerodynamic performance of model wings at low Reynolds number," *Journal of Experimental Biology*, Vol. 174, 1993, pp.45-64.
- [2] Sunada, S., Kawachi, K., Watanabe, I. and Azuma, A., "Fundamental analysis of three-dimensional 'near fling'," *Journal of Experimental Biology*, Vol. 183, 1993, 217-248.
- [3] Willmott, A.P., Ellington, C.P. and Thomas, A.L.R., "Flow visualization and unsteady aerodynamics in the flight of the hawkmoth, *Manduca sexta*," *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* Vol. 352, 1997, pp.303-316.
- [4] Van den berg, C. and Ellington, C.P., "The three dimensional leading-edge vortex of a 'hovering' model hawkmoth," *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, Vol. 352, 1997, pp. 329-340.
- [5] Liu, H., Ellington, C.P., Kawachi, K., Van den berg, C. and Willmott, A.P., "A computational fluid dynamic study of hawkmoth hovering," *Journal of Experimental Biology*, Vol. 201, 1998, pp. 461-477.
- [6] Fejtek, I. and Nehera, J., "Experimental study of flapping wing lift and propulsion," *Journal of Aeronautical*, Vol. 84, 1980, pp.28-33
- [7] Okamoto, M., Yasuda, K. and Azuma, A., "aerodynamic characteristics of the wings and body of a dragonfly," *Journal of Experimental Biology*, Vol. 199, 1996, pp. 281-294.
- [8] 김송학, 장조원, "잠자리유형 날개의 무차원 진동수에 따른 가시화 연구," *한국가시화 정보학회지*, 제2권 제2호, 2004, pp.59-65.
- [9] Singh, B., Ramasamy, M., Chopra, I. and Leishman, J.G., "Insect-based flapping wings for micro hovering air vehicles : experimental investigations," *American helicopter society international specialists meeting*, 2004.
- [10] 김송학, 장조원, "잠자리 모델의 공력 특성에 관한 연구," *한국항공우주학회 춘계 학술대회*, 2006, pp. 419-422