

날갯짓 초소형 비행체 시맥 탄성이 공력 성능에 미치는 영향

Effect of Vein Elasticity on Aerodynamic Performance of Flapping Micro Air Vehicles

1. 서론

생명체를 모방한 날갯짓 비행은 고정익이나 회전익 비행체와 비교하여 효율성, 은닉성, 기민성이 우수하다는 장점 때문에 정찰, 구조 목적 등과 같은 미래형 비행체로 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 날갯짓 초소형 비행체는 15cm 이하의 매우 작은 무인 비행체로, 곤충이나 작은 새의 날갯짓을 모방하여 개발되고 있다. 곤충의 다양한 날갯짓 궤적은 복잡한 구동 메커니즘을 통하여 구현할 수 있지만, 무게 증가로 인하여 효율이 떨어진다. 또한, 높은 날갯짓 주파수로 인한 진동 발생을 최소화해야 하기 때문에 구동 메커니즘은 단순할수록 좋다. 따라서, 구동기를 이용한 능동 회전 방식 대신에, 날개의 유연성을 이용한 수동 회전 방식은 다양한 연구진에서 적용하여 개발되고 있다. 수동 회전 방식은 날개의 유연성만으로는 피칭 모션의 크기에 한계가 있기 때문에, 유연날개에 캠버를 적용하여 만든 캠버 날개가 활용되고 있다. 하지만, 캠버 날개의 복잡한 조건으로 인한 해석의 난이도 때문에, 실험이나 단순화된 이론을 통하여 캠버 날개를 적용하고 있다.

날갯짓 초소형 비행체 유연날개의 수동 회전은 유체-구조 복합적인 대변형/대변위 현상이 발생한다. 매우 빠른 주파수 (10~50Hz)에서 발생하는 공탄성 현상에 대한 분석을 하기 위해서는, 유체-구조 연성해석이 필수적이다. 기존 연구에서 수행된 단일 혹은 선형 재질에 대한 연성해석은 두꺼운 시맥과 얇은 막으로 이루어진 유연날개의 거동을 제대로 모사할 수 없으며, 특히, 캠버 날개와 같은 복잡한 거동을 구현하는 데 한계가 있다. 최근에는, 두 가지 재질로 구성된 Zimmerman 날개의 거동을 모사할 수 있게 되었으며, 연성해석으로 확장하여 실험 날개와 검증되었다.

본 연구에서는 기존에 수행된 검증차원에서의 연구를 확장하여, 보다 복잡한 실제 날갯짓 비행체의 캠버 날개를 해석할 수 있는 프로그램을 개발하였고, 실험을 수행하여 교차 검증을 수행하였다. 캠버 날개는 세 가지 재질, 다양한 경계조건, 구부러진 형상으로 구성되어 있으며, 이를 사실적으로 모델링하여 검증함으로써, 해석의 신뢰성을 확보하였다. 이는, 검증차원에서 수행된 간단한 형태의 날개에 대한 연구를 확장하여, 실제 날갯짓 비행체에 적용되는 복잡한 조건의 날개로 확장함으로써, 실제 비행체 설계에 직접적으로 적용될 수 있다. 개발된 프로그램으로, 유연날개의 공탄성 효과를 분석하고, 공력 성능을 향상시키기 위한 파라미터 연구를 수행하였다. 본 연구진에서 캠버각의 효과 분석을 통해 선정된 캠버 날개에 대하여, 시맥의 탄성이 공력 특성에 미치는 원인을 분석하였다. 이는, 탄성 계수에 따른 공탄성 효과를 분석함으로써, 캠버 날개에서의 시맥의 재질을 선정하기 위한 방향을 제시한다.

2. 연구내용 및 제언

날갯짓 초소형 비행체 날개의 공탄성 거동을 정밀하게 모사하기 위하여, 유체-구조 연성해석 프로그램을 개발하였다 (Fig. 1). 유체 해석자와 구조 해석자를 모듈화 하여 개발하고 이를 결합시키는 partitioned 기법 중에, 대변형/대변위 문제에서 안정적인 해석을 위해 implicit 결합 기법을 적용하였다. 유체 해석자는 arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) 프레임 기반의 3차원 비정상 비압축성 Navier-Stokes 방정식으로 개발되었다. 변형에 따른 유체 검사 체적의 변형을 반영하기 위하여 geometric conservation law (GCL)을 만족시키며, 격자는 transfinite interpolation 기법을 통하여 변형이 결정된다. 구조해석자는 CR (co-rotational) 프레임 기반의 비선형 보와 비선형 쉘 요소를 Lagrange multipliers 기법으로 결합하여 개발되었다. 이는, 서로 다른 재질 (시맥, 박막)과 같은 물체의 거동을 효율적이고 사실적으로 모사할 수 있다. 또한, 유체 해석자와 구조 해석자 사이의 정보량 (유체 압력 및 구조 변위)을 전달하기 위하여 불일치 격자 경계면 사이에서 radial basis function을 통하여 효율적이고 정확하게 정보 전달이 수행된다. 개발된 프로그램은 다중 재질로 구성된 대표적인 형상의 Zimmerman 날개의 실험과 추력, 공탄성 변위, 고유진동수, 모드함수를 정밀하게 비교하여 검증되었다. 캠버 날개의 구부러진 형상을 수치적으로 모델링하기 위하여, 중력장 하의 회전축을 변형시키는 선처리 모듈로 초기 형상을 도출할 수 있다. 보다 복잡한 형상 및 재질로 구성된 날갯짓 비행체의 유연날개 해석에 대한

타당성을 검증하기 위하여, 실험을 수행하였고 공탄성 변위 및 추력을 검증하였다.

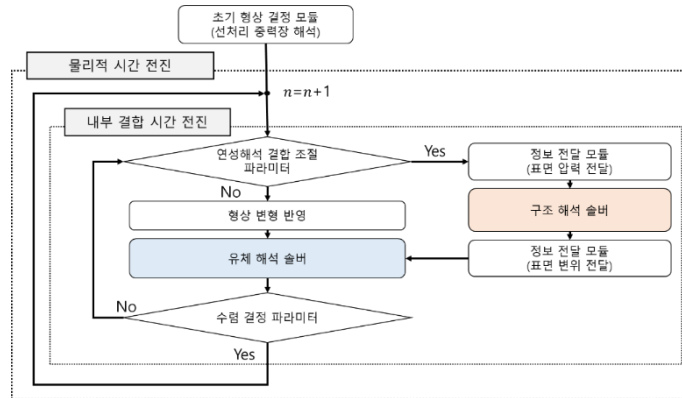
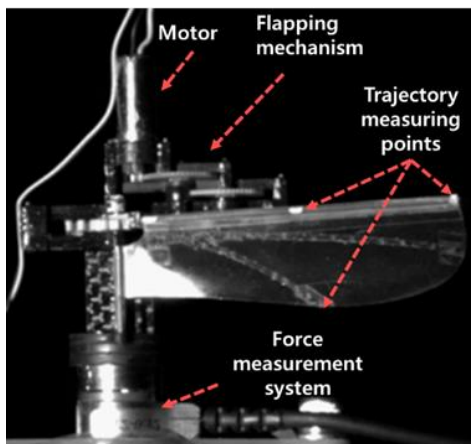
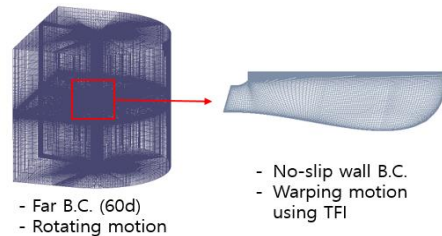


Fig. 1. 유체-구조 연성해석 알고리즘

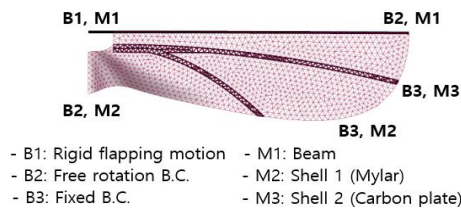
수치해석과 실험은 날갯짓 비행체의 기본 비행 조건 ($f=24\text{hz}$, $\phi_{amp} = 82^\circ$) 에서 수행하였다 (Fig. 2). 먼저, 실험은 날개의 움직임을 구현하기 위하여 Scotch-yoke 링크와 rack-pinion 기어 방식으로 제작되었다. CNC를 활용하여 0.01mm의 정밀도로 카본 플레이트를 가공하여 제작되었다. 6축 센서를 이용한 추력을 추출하였고, 두 대의 카메라로 날개 윗면의 마커를 추적하여 궤적을 측정하였다. 구부러진 캠버 날개의 기본 형상을 구현하기 위하여, 펼쳐진 형태에서 격자를 제작한 후에 중력장 내에서 회전축을 변형시키는 선처리 프로그램을 통하여 구현하였다. 유동해석 모델링은 격자의 변형도 (skewness)를 최소화 하기 위하여 격자 이동을 분리하였으며, 형상을 사실적으로 모사하였다. 구조해석 모델링은 세 가지의 경계 조건과 세 가지의 재질로 구성되어 있다. 카본 봉 (carbon rod), 마일러 (mylar), 카본 플레이트 (carbon plate)로 구성되어 있으며 이에 대한 물성을 수치해석에 직접적으로 반영하였다. 또한, 각 위치에서 적절한 경계조건을 부여하여, 구조적인 거동을 정밀하게 구현하였다.



(a) 날갯짓 실험장비



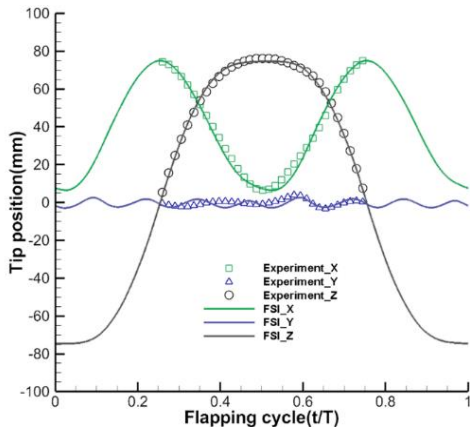
(b) 유동해석 모델링



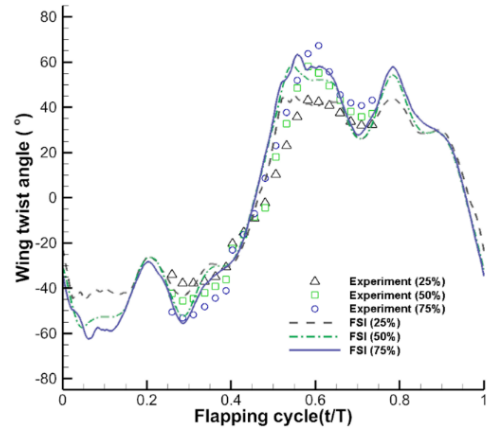
(c) 구조해석 모델링

Fig. 2. 날갯짓 초소형 비행체 실험장비 및 유체-구조 연성해석 모델링

실제 비행체의 유연날개에 대한 연성해석의 신뢰성을 확보하기 위하여, 공탄성 변위와 추력에 대한 실험과의 교차 검증을 수행하였다. 정지 비행 날갯짓 궤적은 상향 날갯짓과 하향 날갯짓이 대칭이기 때문에, 0.5주기 구간에서 검증을 수행하였다 (Fig. 3). 공탄성 변형을 정밀하게 측정하기 위하여 날개 끝단 변위와 비틀림각을 세 구간 (0.25s, 0.5s 0.75s)에서 비교를 수행하였다. 먼저, 날개 끝단 변위는 날개의 유연성으로 인한 최대 변위 및 경향성이 매우 유사하게 나타났다. 또한, 날개의 비틀림각의 거동을 살펴보면 각 스팬방향의 위치에 따라 그 크기나 경향성이 유사하게 발생하였다. 공력 특성에 대한 검증은 추력 평균의 비교를 통하여 수행하였으며, 수치해석에서 추력은 날갯짓 5주기 이후의 3주기 값의 추력을 평균 내어 계산하였다. 그 오차는 약 1%로 발생하여 공력 특성 또한 정확히 예측할 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 개발된 유체-구조 연성해석 프로그램은 복잡한 형상 및 다양한 재질로 구성된 날갯짓 비행체의 유연날개의 공탄성 효과를 잘 예측할 수 있는 것으로 확인되었다.



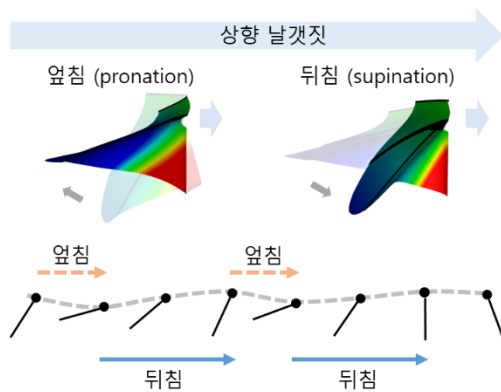
(a) 날개 끝단 변위



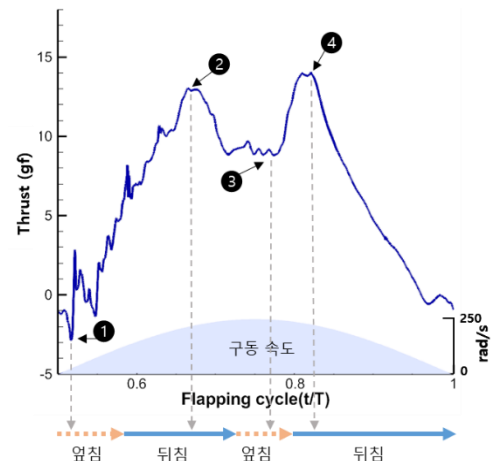
(b) 세 지점 (25s, 50s, 75s)에서의 비틀림각

Fig. 3. 캠버 날개의 공탄성 변위 검증

생명체의 날개를 모방한 이러한 비틀림각의 움직임을 간략히 옆침 (pronation)과 뒤침 (supination)으로 설명한다. 옆침은 비틀림각이 증가하는 움직임으로, 주로 날개의 관성력이나 날개 주변의 압력차이로 인하여 발생한다. 반면에, 뒤침은 비틀림각이 감소하는 움직임으로, 주로 날개가 팽창되어 발생하는 탄성력이나 감속할 때 발생하는 관성력에 의해 발생한다. 이는, 날개 주변에 발생하는 와류 구조에 큰 영향을 발생시키며, 발생 시기는 날개의 구동속도로 인하여 추력의 극대값과 극소값을 갖는다. 극대점에서는 날개의 뒤침으로 인하여, 날개의 위/아랫면의 압력차이가 증가하기 때문에 날개 윗면에 와류가 부착된다. 앞전 및 뒷전에서의 와류 강도가 최대로 증가하여 최대 추력을 발생시킨다. 반면에, 극소점에서는 날개의 옆침으로 인하여, 날개의 위/아랫면의 압력차이가 감소한다. 결국, 점차적으로 앞전 및 뒷전 와류가 이탈되어 추력이 급격히 감소한다. 따라서, 날개의 구동속도에 따른 뒤침의 적절한 시기는 추력에 긍정적인 영향을 미친다 (Fig. 4, Fig. 5).

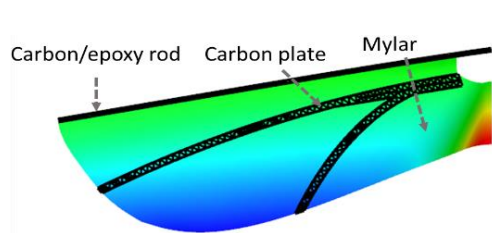


(a) 캠버 날개의 수동 회전 움직임

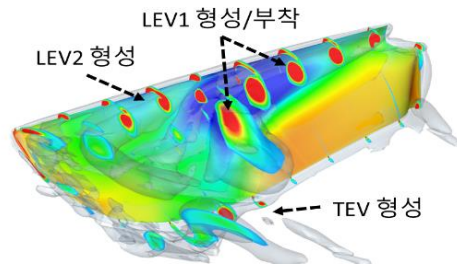


(b) 옆침/뒤침에 따른 추력 변화 양상

Fig. 4. 캠버 날개의 날갯짓 궤적과 추력 변화 양상



(a) 공탄성 날갯짓 거동 분석



(b) 공력 성능 및 비정상 와류 구조 분석

Fig. 5. 유체-구조 연성해석을 통한 유연날개 분석

본 연구에서는, 날개 시맥의 탄성 계수의 효과에 따른 공력 특성 변화에 초점을 맞춘다 (Fig. 6). 탄소 복합 섬유 재질은 다양한 물질적 특성을 갖기 때문에, 실제 날개의 재질 특성을 기준선 (baseline)으로 설정하고 탄성 계수를 변화시킴에 따라서 추력과 효율의 변화를 관찰하였고 그 원인을 분석하였다. 탄성 계수가 큰 영역에서는 앞침과 뒤침의 시기를 변경시키지 않는다. 결국, 날개 최대 구동속도 영역에서의 비틀림각이 가장 크게 형성되는 1.8E 날개에서 최대 추력이 발생하였다. 반면에, 탄성 계수가 작은 영역에서 발생하는 비틀림각의 진동은 앞침과 뒤침의 시기를 변경시킨다. 이는, 날갯짓 구동속도가 최대로 되는 영역에서 뒤침 시기를 지연시키기 때문에, 추력에 부정적인 효과를 발생시켰다. 다만, 이러한 비틀림각의 진동은 날개의 비틀림각을 전반적으로 크게 형성하여 효율 측면에서는 증가된 결과를 확인하였다. 결국, 최소 추력을 발생시킨 날개와 비교하여 4%의 추력 향상을 도출하였다. 이를 통해 본 연구진에서 수행한 캠버각에 따른 공력 성능을 관찰한 연구와 더불어 시맥의 탄성력 변화만으로도 추력과 효율을 향상시킬 수 있음을 보였다. 이는, 비틀림각 궤적에 큰 영향을 주는 중요한 파라미터로, 적절한 탄성력을 확보함으로써 비행체 공력 성능 향상을 도모할 수 있음을 말해준다.

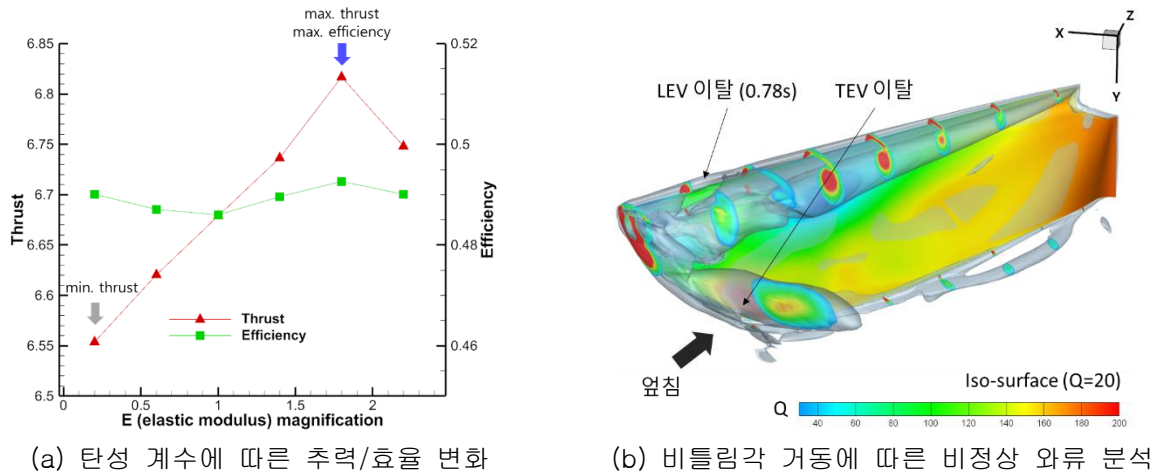


Fig. 6. 탄성 계수에 따른 공력 성능 비교.

3. 결론

본 연구진에서 개발된 유체-구조 연성해석 프로그램은, 과거 검증 차원에서 수행된 단순한 형태의 다중 재질 날개에 대한 해석 연구를 확장하여, 실제 날갯짓 비행체의 캠버 날개의 복잡한 형상 및 재질을 사실적으로 묘사할 수 있다. 이는, 재질의 특성이 서로 다른 다양한 재질, 복잡한 경계조건, 구부러진 형상 등에 대한 공탄성 거동과 공력 구조에 대한 정밀한 분석이 가능하다. 선행 연구와의 검증과, 실제 날갯짓 비행체에 대한 실험을 수행하여 교차 검증함으로써, 해석의 신뢰성을 확보하였다.

날갯짓 비행체의 캠버 날개의 궤적은 공탄성 효과로 인하여 비틀림각의 증가 (앞침)와 감소 (뒤침)가 반복된다. 날개의 앞침은 주로 날개의 관성력이나 날개 주변의 압력 차이로 인하여 발생한다. 반면에, 날개의 뒤침은 주로 날개가 과도하게 팽창되어 발생하는 탄성력이나 감속할 때 발생하는 관성력에 의해 발생한다. 뒤침은 날개 주변에 발생하는 와류 강도에 큰 증가를 발생시키는데, 이는 구동속도와 밀접한 연관이 있다. 또한, 이러한 움직임은 시맥의 탄성력에 의해 변화하므로, 시맥의 탄성 계수는 공력 성능에 큰 영향을 미친다. 적절한 탄성을 갖는 날개는 앞침과 뒤침의 시기를 유지시키면서도 비틀림각을 크게 형성하여 추력 성능을 향상시킨다. 반면에, 작은 탄성 계수를 갖는 날개는 비틀림각의 진동을 추가적으로 발생시킨다. 이는, 앞침과 뒤침의 시기를 변경시키기 때문에 추력은 감소시키지만, 비틀림각을 전반적으로 크게 형성하여 효율 측면에서는 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서, 적절한 탄성 계수의 시맥 선정은 날갯짓 비행체 공력 성능 향상을 위한 필수적인 파라미터이다.

과거 연구에서 유연날개의 재료는 실험적/경험적 방법을 통하여 적용되었다. 하지만, 본 연구에서는 시맥의 탄성에 따른 분석을 수행하였고, 그 결과 비틀림각의 진동이 추력 및 효율 발생에 밀접한 연관이 있음을 도출하였다. 본 연구진에서 수행한 캠버각에 따른 공력 성능을 관찰한 연구에서 도출된 결과에서 더 나아가, 비틀림각의 진동이 추력 및 효율 발생에 밀접한 연관이 있음을 도출하였다. 또한, 개발된 프로그램을 통하여 날갯짓 비행체 공력 성능에 영향을 미치는 다양한 파라미터들에 대한 추가적인 연구가 가능하다. 향후에는, 다양한 설계 파라미터를 도출하고, 도출된 파라미터들 간의 복합적인 효과를 분석함으로써, 유연날개를 활용한 날갯짓 비행체의 최적 개발 절차를 수립할 수 있다.