

2006

추계



학술발표회 논문집

Proceeding of the 2006 KSAS Fall Conference

일시 : 2006년 11월 16일(목)-17일(금)
장소 : 파라다이스호텔 부산

주최 : 한국항공우주학회
후원 : 한국학술진흥재단
한국항공우주산업(주)
삼성탈레스(주)
EADS Korea

- 겹침 격자 기법 기반의 매개 변수법을 이용한 항공기 형상 최적 설계 78
이병준*, 임진우, 이준석, 김종암(서울대)
- 발사체 상단부 지상 운동 과정 열해석 82
최상호*, 김인선(KARI)
- 스마트 무인기 냉각시스템 설계안에 대한 열적 안정성 평가 86
홍석우, 홍우람*, 김종암, 김규홍(서울대), 김유신(KARI)
- 항공기 초음속 순항 성능에 미치는 앞전플랩 굽힘 효과 90
정인재, 김상진*, 김명성(ADD)
- 공기부상 전동운동체 공기부양 시스템의 전산유체해석 94
김태령, 김병곤, 최나리*, 안 존(세종대)
- 정량적 가시화를 이용한 구(球) 주위 3차원 난류 유동의 해석 99
장영일*, 이상준(포항공대)
- 초음속풍동 제어 시스템 개발 103
김종록*, 구현식, 김재수(조선대), 임승우, 전승배(JKS기술연구소)
- 유연한 플레핑 날개의 공력특성에 관한 실험적 연구 107
김대관*(KAIST), 권기정(KARI), 김홍일, 한재홍(KAIST)
- NREL 수평축 풍력터빈의 후류특성에 관한 축소모델 풍동시험 111
이기훈*, 이세욱, 조이상, 조진수(한양대)

공기역학 및 응용 (2)

- 로터 공력해석을 위한 수치기법 개발 116
김해동*(세종대)
- 격자점 중심 기법을 이용한 삼차원 압축성 유동해석코드 개발 120
정문승*, 권오준(KAIST)
- Wavelet을 이용한 Euler 방정식의 계산 효율 향상에 관한 연구 126
강형민*, 이동호, 김규홍(서울대), 이도형(한양대)
- 내재적 이중시간 전진기법과 DADI 기법을 이용한 비정상 Navier-Stokes 코드개발 130
이은석*, 설우석, 이수용(KARI)
- 오자이브 형상 로켓의 공력가열 온도예측을 위한 전산 해석적 접근 135
김성룡*, 김영훈, 옥호남, 김인선(KARI)
- 초음속 마이크로 제트유동 특성에 관한 연구 139
김종훈*, 이 열(한국항공대)
- 고압 공기 공급 장치 압력 유지 기법 개발 143
옥호남*, 고주용, 김인선(KARI)
- 벤트 밸브 성능을 고려한 발사체 탑재물 페어링 내부의 압력 변화 예측 149
옥호남*, 고주용, 김인선(KARI)

유연한 플레핑 날개의 공력특성에 관한 실험적 연구

Experimental Investigation on Aerodynamic Characteristics of Flexible Flapping Wing

김대관* (KAIST), 권기정(KARI), 김홍일, 한재홍(KAIST)

1. 서 론

지난 100 여 년간의 항공우주산업의 발전에 비하여 아직도 생물학적 비행체들의 비행방식과 효율성은 공간상의 이동방식에 대한 인간의 욕망을 지배하는 비행방식이다. 그 예로서 비행체의 길이에 대한 이동속도(body-length/sec)는 초음속 비행체 SR-71(32b/s)에 비하여 갈새(140b/s)가 약 4.4배의 속도를 가지고 있으며, 롤-속도(roll rate) 면에서는 A4-Skyhawk(720deg/s)에 비하여 제비(5,000deg/s)가 약 7배가 크며 또한 일반적인 비행체의 최대 중력하중은 4~9g인데 비하여 새의 경우 하루에 수백 번의 10~14g에 해당하는 중력하중을 받으면서 비행을 한다[1]. 또한 일반적인 고정익 항공기는 약 15°의 실속각과 최대 양력계수가 1~1.5를 가지는데 비하여 생물학적 비행체는 60° 이상의 실속각과 4~6의 큰 양력 계수를 갖는다[2]. 이러한 효율적 비행방식을 구현하는 생물학적 비행체들은 날갯짓 비행방식을 이용하고 있다.

새들의 경우 이러한 이상적 비행운동을 구현하기 위하여 인간의 팔과 유사한 골격 및 근육 구조와 날개의 유연성을 이용하여 플레핑 및 비틀림 등의 주요 날개운동뿐만 아니라 캠버의 변화, 날개면적의 수축 및 확대, 날개의 폴딩(folding)운동 등과 같은 다양한 적응형 날개운동을 활용한다. 또한 비정상상태(unsteady state)의 비행조건에서 발생하는 앞전와류(leading edge vortex)에 의한 양력증가 및 지연 실속(delayed stall) 등과 같은 추가적인 공력이득을 활용하여 효율적인 비행을 유지한다[3]. 최근 들어 이러한 생물학적 비행체들의 비행방식을 모방하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있는

나, 고정익 비행체와는 다르게 낮은 레이놀즈(Reynolds) 수 및 3차원 비정상 유동 등과 같은 유동특성에 의해 극히 제한적 해석만이 가능한 실정이다. 따라서 실험적 접근법을 통한 날갯짓 비행의 특성과악이 수행되어야 한다.

본 연구에서는 스마트 재료를 이용한 플레핑 날개 개발을 위해 수행된 선행연구의 결과를 바탕으로 유연한 플레핑 날개의 구조 및 공기역학적 특성을 연구하였다. 특히 MFC 작동기에 의해 유발되는 캠버 효과와 날개의 시위방향 유연성 효과 그리고 낮은 전진속도에서 발생하는 비정상 효과에 대하여 고찰하였으며, Particle Image Velocimetry(PIV) 실험을 통한 유동장 분석을 수행하였다.

2. 공기역학적 특성

스마트 재료를 적용한 플레핑 날개 개발을 위해 수행된 선행연구[4]에서는 Macro-Fiber Composite(MFC) 작동기를 이용하여 날개의 캠버를 변화시킬 수 있는 유연한 플레핑 날개를 제작하였다. 또한 풍동실험을 통해서 스마트 플레핑 날개의 정적 및 동적 공력 특성을 파악하였다. 그림 1은 선행연구에서 제작된 스마트 플레핑 날개의 형상을 보이고 있다. 풍동실험은 플레핑 축의 피치각($\bar{\theta}_0 = -10^\circ \sim 20^\circ$), 날갯짓 주파수($F=0 \sim 8\text{Hz}$), 유동속도($V=0 \sim 10\text{m/s}$)에 대하여 수행되었으며, 3가지 MFC 인가전압($U=-500, 0, 1500\text{V}$)에 의한 상향(upward), 대칭(symmetric), 하향(downward)캠버 조건만을 고려하였다. 본 연구에서는 선행연구의 풍동실험 결과를 바탕으로 스마트 플레핑 날개의 캠버 효과, 유연성 효과 그리고 비정상 효과에 대하여 고찰하였다.

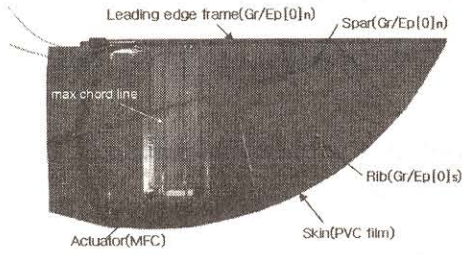


그림 1 스마트 플래핑 날개[3]

2.1 캠버 효과

MFC에 의해 변화되는 스마트 플래핑 날개의 캠버 효과를 확인하기 위하여 정적 풍동실험(F=0Hz)에서 측정된 양력계수를 비교하였다. 그림 2는 4m/s의 유동속도에서 상향, 대칭, 하향 캠버에 대한 양력계수 곡선의 변화를 보이고 있으며, 캠버의 변화에 따라 양력계수 곡선이 이동함을 확인할 수 있다. 이러한 캠버 효과에 의해서 10m/s의 유동속도에서 최대 양력은 대칭 캠버조건에 비해서 하향 캠버조건에서 정적실험의 경우 45.73g(24.4%) 그리고 동적실험의 경우 52.4g(20.8%) 증가함을 보였다. 또한 캠버변화에 따른 양력계수 곡선의 이동은 일반적인 고정익 비행체의 고양력 장치(high lift device)인 뒷전 플랩(trailing edge flap)에 의한 양력계수 곡선의 변화와 같은 특징을 보이고 있다. 따라서 스마트 재료인 MFC를 활용하여 스마트 플래핑 날개의 캠버를 효과적으로 변화시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

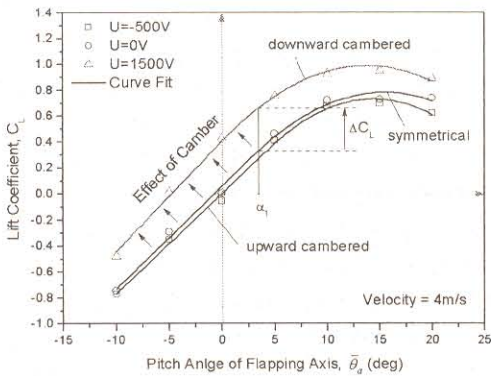


그림 2 정적실험 조건에서의 캠버 효과 (V=4m/s, F=0Hz)

2.2 유연성 효과

스마트 플래핑 날개의 경우 유연한 날개 구조로 이루어져 있으며, 특히 시위방향의 유연성(flexibility)에 의해 플래핑 운동과정에서 날개의 비틀림 운동이 유발되는 운동방식을 이용하고 있다. 이러한 날개의 시위방향 유연성에 의한 공기역학적 특징을 분석하기 위하여 그림 3과 같이 정적실험 조건에서 유동속도의 변화에 따른 양력계수의 변화를 비교하였다. 유동속도(V)가 증가함에 따라 양력계수 곡선의 기울기가 감소함을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 날개의 유연성에 의해서 유동속도가 증가함에 따라 유효받음각(effective angle of attack)이 감소하여 발생한 것으로 판단된다. 또한 날개의 유

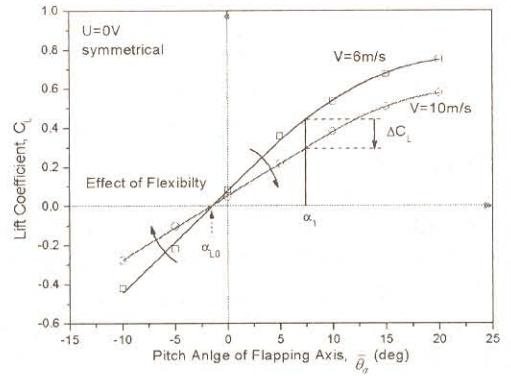


그림 3 정적실험 조건에서의 유연성 효과 (U=0V, F=0Hz)

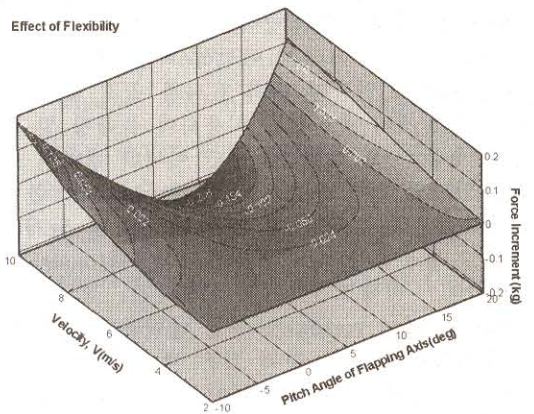


그림 4 정적실험 조건에서의 유연성 효과에 의한 공력이득

연성은 플레핑 운동과정에서 필수적 날개운동인 비틀림 운동을 유발하여 추력을 증가시키는 효과를 나타내지만, 그림 4와 같이 빠른 유동속도와 큰 피치각 영역을 제외한 정적비행조건 ($F=0\text{Hz}$)에서는 유효받음각 감소에 의한 음의 공력이득($\Delta F = \Delta L - \Delta D$)을 유발시킨다. 여기서 공력이득을 위한 기준 계수는 2m/s 에서 측정된 계수 값들을 사용하였다.

2.3 비정상 효과

날갯짓 비행체의 특징 중 하나인 비정상 효과는 높은 양력 계수와 큰 실속각의 공기역학적이점을 유발한다. 스마트 플레핑 날개의 비정상 효과를 분석하기 위하여 그림 5와 같이 서로 다른 날갯짓 주파수에 대한 양력계수의 변화를 비교하였다. 낮은 날갯짓 주파수에서의 양력계수는 정적실험 조건에서의 양력 계수와 유사한 결과를 보이는 반면, 동일한 유동속도에서 날갯짓 주파수가 증가함에 따라 양력계수와 실속각이 증가함을 확인할 수 있다. 최대 양력계수의 경우 정적실험에서 ~ 1 의 값을 보이는 반면, 동적 실험에서는 ~ 5 의 큰 값을 보이고 있다. 이러한 공력특징은 날개 표면에 발생하는 앞전와류에 의해 양력이 증가하는 비정상 효과에 의한 것으로 판단된다.

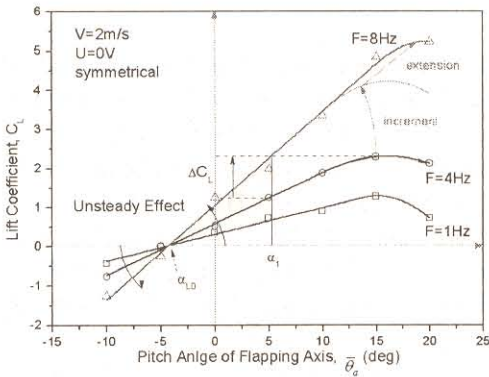


그림 5 동적실험 조건에서의 비정상 효과 ($V=2\text{m/s}$, $U=0\text{V}$)

3. 유동장 분석

스마트 플레핑 날개의 유연성 효과 확인과 비정상 효과를 유발하는 앞전와류의 확인을 위

하여 PIV 실험을 수행하였다. 본 실험은 선형연구의 풍동실험장치를 이용하여 한국항공우주연구원의 1m 급 풍동에서 수행되었으며, 그림 6은 풍동의 시험부 모습을 보이고 있다. 실험은 interrogation window(32×32 pixel), field of view(2048×2046 pixel), image pair(73 pair), pulse delay($100\mu\text{s}$)의 조건에서 수행되었다.

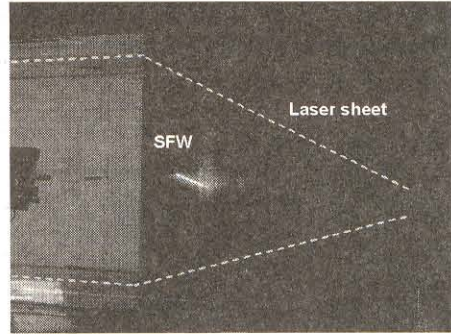
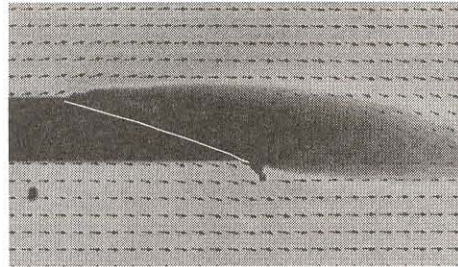


그림 6 PIV 실험을 위한 풍동 시험부

- a) static-1: $F=0\text{Hz}$, $U=1500\text{V}$, $\bar{\theta}_a=20^\circ$,
 $V=4\text{m/s}$ (stall condition)



- b) static-2: $F=0\text{Hz}$, $U=1500\text{V}$, $\bar{\theta}_a=20^\circ$,
 $V=10\text{m/s}$

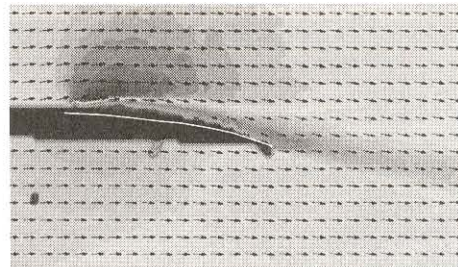


그림 7 정적실험 조건에서의 PIV를 통한 날개 주위 유동장

3.1 정적 실험 및 결과

스마트 플래핑 날개의 유연성 효과를 확인하기 위하여 그림 7과 같이 정적실험 조건에서 스펀의 중간에 위치한 날개단면 주위의 유동장을 측정하였다. 2.2절에서 설명한 바와 같이 속도의 증가에 따라 날개 단면의 유효받음각이 감소함을 확인할 수 있다. 또한 그림 4와 같이 큰 받음각과 빠른 유동장 속도 영역에서 발생하는 양의 공력이득은 날개의 유연성에 의한 유효받음각 감소로 인하여 실속각이 증가하여 발생한 것임을 확인할 수 있다.

3.2 동적 실험 및 결과

비정상 효과를 유발시키는 앞진와류의 확인을 위해서 그림 8과 같이 동적실험 조건에서 날개 단면의 유동장을 측정하였다. 여기서 전진비(advance ratio) J 는 날갯짓 끝단 속도에 대한 유동 속도 비를 의미한다. 결과에서 알 수 있듯이, 큰 전진비의 유동영역(dynamic-1)에서는 날개 표면의 유동은 정적실험 조건의 유동장과 유

사한 경향을 보이는 반면, 작은 전진비의 유동영역(dynamic-2)에서는 날개 앞진 표면에 강한 와류가 발생함을 확인할 수 있다. 따라서 2.3절에서 설명한 날갯짓 주파수 증가에 따른 양력계수 증가는 앞진와류에 의해 유발되는 비정상 효과에 의한 것임을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 스마트 플래핑 날개 개발을 위해 선행되었던 풍동실험 결과를 바탕으로 날개의 캠버 효과, 유연성 효과 그리고 비정상 효과에 대하여 고찰하였다. MFC에 의한 캠버 효과는 효과적 공력이득을 발생시켰으며, 날개의 시위방향 유연성 효과는 유효받음각의 감소를 유발하였다. 또한 작은 전진비의 유동조건에서 발생하는 양력계수의 증가는 앞진와류에 의해 유발된 비정상 효과에 의한 것임을 확인하였다.

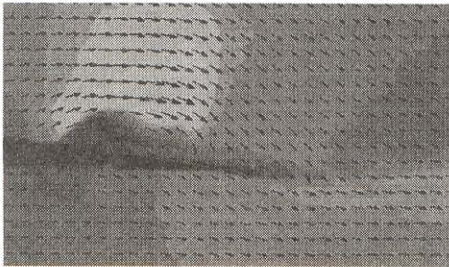
후 기

본 연구는 한국과학재단의 기초연구과제(R01-2005-000-10848-0)의 연구비 지원에 의해 연구 결과입니다.

참고문헌

- 1) Shyy, W., Berg, M., and Ljungqvist, D., "Flapping and Flexible Wings for Biological and Micro Air Vehicles," *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 35, 1999, pp.455-505.
- 2) Promode, R. B., "Biology-Inspired Science and Technology for Autonomous Underwater Vehicles," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 29, 2004, pp. 542-546.
- 3) Norberg, U. M., "Structure, Form, and Function of Flight in Engineering and the Living World," *Journal of Morphology*, Vol. 252, 2002, pp. 52-81.
- 4) 김대관, 김홍일, 한재홍, "날갯짓 비행체의 공력특성에 관한 실험적 연구," 한국항공우주학회 춘계학술발표회 논문집, 2006.

a) dynamic-1: $F=2\text{Hz}$, $U=0\text{V}$, $\bar{\theta}_a=10\text{deg}$, $V=2\text{m/s}$ ($J=1.86$)



b) dynamic-2: $F=7\text{Hz}$, $U=0\text{V}$, $\bar{\theta}_a=10\text{deg}$, $V=2\text{m/s}$ ($J=0.53$)

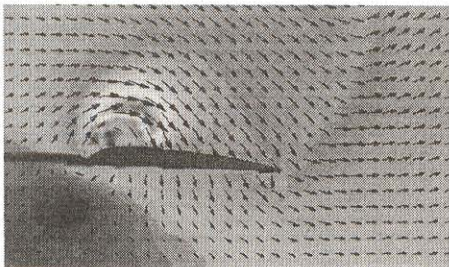


그림 8 동적실험 조건에서의 PIV를 통한 날개 주위 유동장