

인간동력 항공기용 에어포일의 공력특성 연구

A Study on Aerodynamic Characteristics of Airfoil for Human Powered Aircraft

박준용^{1*}, 임제연¹, 여성윤¹, 유기완¹
진북대학교 항공우주공학과¹

초 록

본 연구에서는 인간동력 항공기의 주익에 적용할 에어포일 형상에 대한 공력 특성을 파악하였다. 인간동력 항공기 날개에 적용하기에 적절한 에어포일을 조사하였으며, DAE11, DAE21, DAE31, SG6043 익형에 대하여 전산유체해석 프로그램인 EDISON_CFD를 통하여 비교하였다. 인간동력 항공기의 낮은 비행속도를 감안하여 6×10^5 의 저 레이놀즈수에서 받음각에 따른 양력계수, 항력계수, 양항비 등을 얻어 내어 상호 비교 분석하였다. 본 연구를 통해 인간동력 항공기 주익에 적용할 저 레이놀즈 에어포일 형상을 최종적으로 선택할 수 있는 근거 자료를 확보하였다.

Key Words : 인간동력 항공기(Human Powered Aircraft), 익형(Airfoil), 양항비(Lift-to-Drag Ratio), 전산유체역학(CFD), 공력특성(Aerodynamic Characteristics)

1. 서 론

오늘날 항공기의 발전은 20세기 초의 그 누구도 예상하지 못했을 것이다. 이제는 단지 ‘어떻게 비행기를 설계해야 날 수 있는가?’는 개념이 아니라 ‘어떻게 하면 더욱 효율적으로 날 수 있는가?’, ‘어떻게 하면 더욱 잘 날 수 있는가?’가 중요한 문제이다. 그러한 점에서 볼 때 인간동력 항공기는 사람의 힘을 이용해 매우 작은 속도로 비행해야 하기 때문에 항공역학에 대한 기본지식이 많이 필요하다고 볼 수 있다. 인간의 근육에서 나오는 힘만을 가지고 비행해야하기 때문에 항공기는 매우 낮은 속도에서 높은 양력을 발생시킬 수 있는 양항비가 뛰어난 익형을 선택해야 한다. 올해 ‘제 1회 인간동력 항공기 경진대회’가 KARI의 주관으로 개최된다. 전북대학교에서는 F.I.R.E라는 팀을 구성하고 JB-1이라 명명한 HPA를 개발하여 대회에 참가하게 되었다. 본 연구를 통해서 현재까지 많은 인간동력 항공기에서 사용되었던 익형들과 저 레이놀즈 익형을 EDISON-CFD를 통해 비교·분석 함으로써 HPA에 가장 적합한 익형을 선정하고, 인간동력 항공기를 설계하고자 한다. 전북대학교 F.I.R.E팀에서 설계한 인간 동력 항공기 JB-1의 개념도는 Fig. 1에 도시하였다. 본 대회를 위하여 설계한 인간 동력 항공기의 설계목표중량은 공허중량 35~40 kg이며, 60 kg의 조종사가 탑승한다고 가정하였을 때, 총 중량은 100 kg 미만으로 설계를 진행하였다. 항공기 주익의 길이는 총 24 m로, 운송을 고려하여 주익의 한쪽이 2 m, 6 m, 4 m의 Main spar를 연결하는 형식으로 설계하였다. 또한, 미익부의 수평 꼬리날개는 2.4 m, 수직 꼬리날개는 2 m의 Spar로 이루어져 있다. 동체의 Boom 길이 역시 운송을 고려하여 8 m로 설계를 하였다.

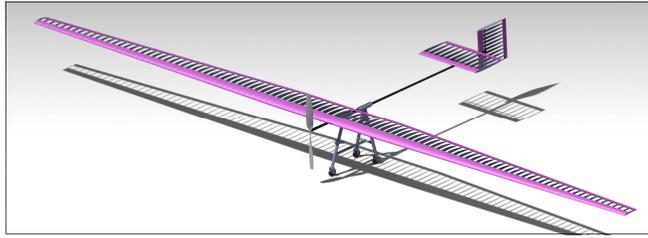


Fig. 1. 전복대 인간동력항공기 설계 개념도

2. 본 론

2.1 에어포일 후보군

본 연구에서는 공력성능이 뛰어난 익형을 선정하기 위해 저 레이놀즈수 유동에 적합한 것으로 알려진 DAE11, DAE21, DAE31과 SG6043의 총 4가지 익형을 선정하였으며 이들 익형의 형상은 Fig. 2에 도시하였다.

2.2 격자계 구성 및 영역

선정한 에어포일을 해석하기 위한 유동장은 비압축성 점성 난류 흐름으로 가정한다. 격자계는 Multi-block 격자계를 적용하였다. 반지름 20인 반원을 이용하여 에어포일을 둘러싸는 경계에 대응하도록 하였으며, 뒷전부분은 길이 20, 높이 20인 정사각형 cell을 위아래로 두 개 만들어 격자 생성 후에 j 방향으로 병합시켰다. S1223에 대한 Rong Ma와 Peiqing Liu의 연구⁽¹⁾로부터 저 레이놀즈수의 익형의 C-Type 격자 생성방법이 제안되었다. 이때 사용된 격자계는 $y^+ = 3$ 으로 하고, 항공기의 순항속도를 7.2 m/s, 평균 시위길이가 1.25m일 때 익형으로부터의 첫 격자의 높이(Δs)가 0.00014이다. 이를 본 연구에 적합하도록 계산하여 앞전과 뒷전에서 정확한 계산을 위한 첫 격자의 높이를 0.0001로 설정하였다. 또한 비교군 익형들이 많이 굽어있는 형상으로 해석의 정확도를 높이기 위해 앞전에서 익형을 둘로 나뉘, 굽어있는 부분에 격자점이 많이 모이도록 윗캠버 111 포인트, 아래캠버 91의 격자점으로 설정하였다. 뒷전의 정사각형 셀에는 길이방향으로 151 포인트, 높이방향으로 101포인트로 구성하였다. 이렇게 구성한 격자계를 Fig. 3에 나타내었다.

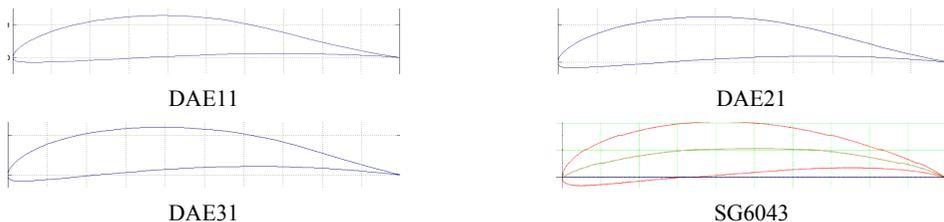


Fig. 2. 에어포일 후보군

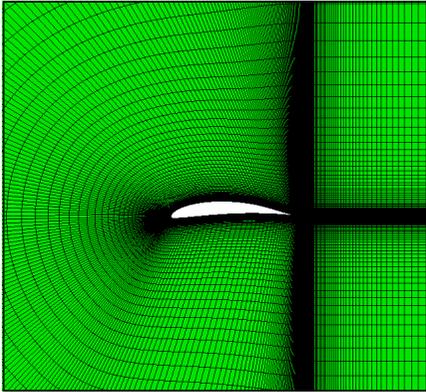


Fig. 3. DAE31 에어포일 격자계

Table 1. 유동조건

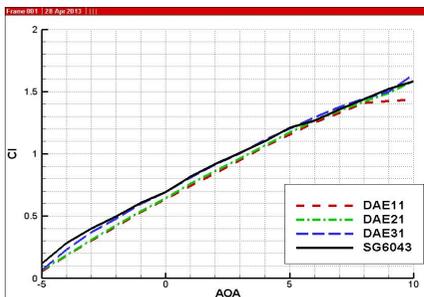
변 수	값
레이놀즈 수	6×10^5
받음각	$-5^\circ \sim 10^\circ$ step : 1°
유동	비압축성 점성 난류 유동

2.3 유동조건

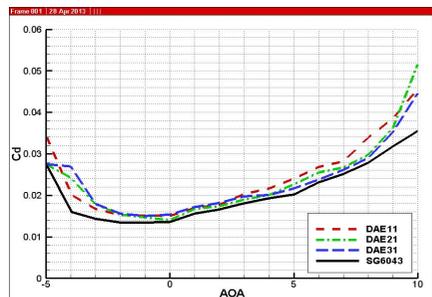
JB-1은 10월 전남 고흥에서 비행을 계획하고 있다. 이때 외나로도에는 여수보다 남쪽에 위치하고 바다를 접해있다는 점을 감안하여 15°C 표준대기 상태를 기준으로 한다. 본 항공기의 비행속도 V_∞ 는 7.2 m/s 이며 주 날개의 평균시위길이 c 는 1.25 m 이다. 이러한 조건을 레이놀즈수 식 $Re = \frac{\rho_\infty V_\infty c}{\mu_\infty}$ 에 넣고 계산하면 본 항공기의 레이놀즈 수는 6×10^5 이 된다.⁽²⁾ 10×10^5 이하의 저레이놀즈수의 유동장은 보통 층류, 천이, 난류유동이 공존한다. 또한 순압력구배와 역압력구배, 이에 따른 박리유동등이 발생하는 매우 복잡한 유동현상이다.⁽³⁾ 계산에 사용한 유동조건은 **Table 1**과 같다. 해석에 사용한 솔버는 2D_Incomp-2.1_p이고, 이 솔버에서는 플럭스 계산 기법으로 Osher's Upwind Scheme, 난류 모델링은 Menter's k-w Shear Stress Transport을 사용하였다.

2.4 결과분석

본 연구에서는 앞에 주어진 조건들을 적용하여, 각 익형들을 EDISON_CFD를 사용하여 분석하였다. **Fig. 4**는 각 익형들의 데이터에 대한 c_l , c_d , c_m , c_l/c_d 곡선을 나타낸다.



(a) c_l



(b) c_d

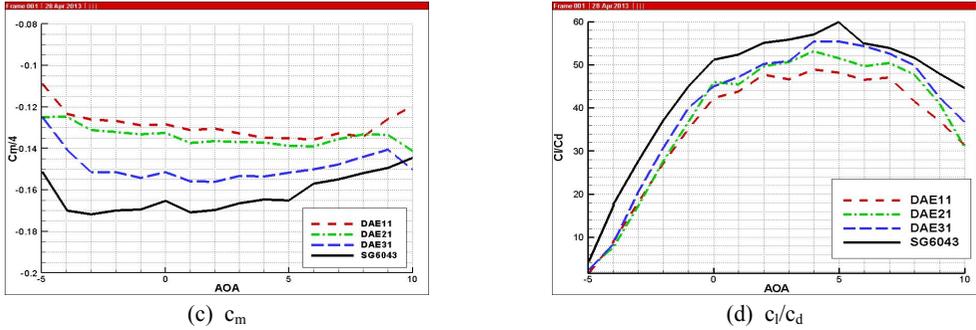


Fig. 4. 각 익형들의 c_l , c_d , c_m , c_l/c_d 곡선

인간동력 항공기의 주익에 적용할 에어포일의 가장 중요한 판단 기준은 높은 c_l 과 높은 양항비이다.⁽⁴⁾ Fig. 4의 c_l 과 c_l/c_d 그래프를 통해 양력이 가장 많이 발생하고 양항비가 높은 에어포일은 SG6043임을 알 수 있다. DAE시리즈, SG6043 에어포일의 양항 극곡선은 Fig. 5과 같다. 낮은 속도에서 운용되는 비행기의 안정성을 위해 c_m 값도 중요한 판단기준이다.⁽⁴⁾ 본 에어포일 비교군 중에 c_m 값이 가장 0과 가까운 에어포일은 DAE11이다. c_m 값이 크면 클수록 항공기의 익형에서 발생하는 모멘트가 커짐으로 이를 제어하기 위해 Tail volume을 늘려야한다. 따라서 항공기 동체길이 연장하거나 꼬리날개의 크기를 늘려야 한다. 인간동력 항공기 경진대회를 위해 운송성을 고려하여 동체의 길이는 8 m로 제한되기 때문에, 수평 꼬리날개의 면적을 조절하여야 한다. 이는 인간동력 항공기의 무게적 측면에서 매우 불리하다. 본 항공기는 제작시 수평꼬리날개에 엘리베이터를 설치하여 피치제어가 가능하도록 설계할 예정이기 때문에 c_m 값보다는 양항비와 c_l 이 우수한 SG6043이 인간동력 항공기의 주익으로서 적절하다.

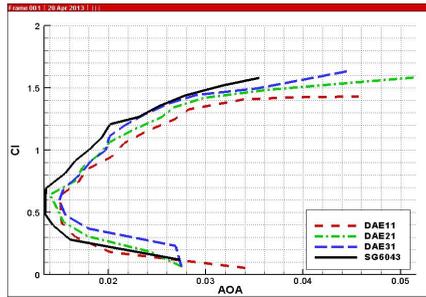


Fig. 5. DAE11, DAE21, DAE31, SG6043 에어포일의 양항 극곡선

2.5 2차원 공력성능 계산

설계될 비행기의 양력은 조종사와 항공기의 무게를 합한 총무게 W_t 보다 항상 커야한다. 따라서 최소 요구 양력 L 은 $L = W_t \times 9.81 m/s^2$ 이다. 따라서 최소 요구 양력은 980 N이다. 2차원 CFD결과와 기존의 경험식을 활용하여 3차원 공력계수로 변환 할 수 있다.⁽⁵⁾

$$C_L = \frac{c_{l_a}}{1 + c_{l_a}} \frac{\pi e AR}{\pi e AR}$$

제 2회 첨단 사이언스·교육 허브 개발(EDISON) 경진대회

이때 e 는 스패 효율 계수(Span efficiency factor)이다. $e = 0.75$ 이다. 본 연구에서 선정된 SG6043의 최대 양향비는 4° 에서 발생하며 $c_{l_i} = 1.101103$ 이다. 따라서 $C_L = 1.08032682$ 이다.

이때 주 날개에서의 양력은 아래 식과 같다.

$$\begin{aligned} L &= 0.5 \times \rho \times V_{air}^2 \times C_L \times S_{wing} \\ &= 1104.54N \end{aligned}$$

날개의 총면적은 32.2 m^2 , 항공기 속도 V_{air} 는 7.2 m/s , 밀도 ρ 1.225 kg/m^3 이다. 양력 $L = 1104.54 \text{ N}$ 에서 주익의 재료인 마이어비닐은 쉽게 변형되어 에어포일 형상을 유지하기가 어렵다. 따라서 10%정도의 손실을 고려하면 총 발생양력은 994.09 N 으로 최소 요구 양력인 980 N 보다 커서, 원하는 양력인 980 N 이 얻어진다. Fig .6는 선정된 익형을 사용한 JB-1의 설계 개념도 이다.

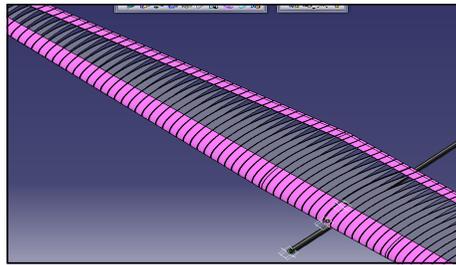


Fig. 6. 주익 설계 개념도

3. 결 론

본 연구는 인간동력 항공기의 주익설계를 위한 연구를 하였다. 인간동력 항공기가 비행하는 저속 저레이놀즈수 유동은 층류, 전이, 난류유동이 함께 발생하는 복잡한 유동장이다. 이러한 유동장에서 필요한 양력과 높은 양향비를 얻을 수 있는 익형을 선정하기 위해 전산유체 해석프로그램인 EDISON_CFD를 사용하여 여러 익형들을 비교, 분석하였다. 비교, 분석을 위해서 저 레이놀즈수 유동에서 유리한 익형으로 널리 알려진 4가지 익형군을 선정하였다. 해석결과 DAE31 익형과 SG6043익형이 양향비가 높고 양력이 높은, 뛰어난 공력특성을 보였다. 하지만 DAE31은 SG6043에 비해 많이 굽어있는 형상으로 SG6043에 비해 제작이 어렵고, 재료의 특성상 효율이 떨어질 것을 고려하여 SG6043 익형을 주익의 익형으로 선정하였다. 또한 이 데이터를 이용하여 3차원 양력계수를 얻고 모델링을 실시하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부 및 한국에너지기술평가원의 지원으로 연구되었으며, 프로그램 수행에 도움을 주신 서울대학교 공력 시뮬레이션 및 디자인 연구실과 KISTI에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Rong Ma, Peiqing Liu, 2009, "Numerical Simulation of Low-Reynolds-Number and High-Lift Airfoil S1223," Proceeding of the World Congress on Engineering 2009 Vol II.
- (2) Mark Drela, 1988, "Low-Reynolds-Number Airfoil Design for the M.I.T. Daedalus Prototype : A Case Study," Journal of Aircraft, Vol. 25, No.8 , pp. 724 ~ 732.
- (3) 이재훈, 정경진, 이길태, 강인모, 2009, "2차원 및 3차원 저레이놀즈수 유동 해석 비교 연구," 한국

전산유체공학회 2009년도 추계학술대회 논문집, pp. 3 ~ 7.

(4) 김경남, 류기명, 송운정, 2012, “인력비행기 Airfoil 선정을 위한 EDISON_CFD 활용,” 제 1회 첨단
사이언스·교육 허브 개발(EDISON) 경진대회. pp. 101 ~ 104.

(5) 안석민 외 21명, 2012, “초경량 유인동력 항공기 개발 사업 최종보고서”