

엔진 및 프로펠러 가진에 의한 위그선 복합재 날개 진동 해석

공창덕* · 윤재휘* · 박현범*

Investigation on Forced Vibration Behavior of Composite Main Wing Structure Excited by Engine and Propeller

Changduk Kong* · Jaehuy Yoon* · Hyunbum Park*

ABSTRACT

In this study, forced vibrations analysis was performed for main wing of small scale WIG vehicle which is equipped two-stroke pusher type propeller engine, in terms of structural. for the frequency response analysis, excitations were assumed by H-mode(Horizontal mode), X-mode(Twisted mode) which is main vibration mode of engine, and for the transient response analysis, excitations were assumed by L-mode(Longitudinal mode) with propeller thrust which is occurred when it revolution.

초 록

본 연구에서는 대상체인 소형 위그선의 주날개 구조를 엔진 및 프로펠러의 가진에 의한 강제진동 해석을 수행하였다. 대상 위그선은 2행정 왕복엔진을 날개의 좌·우에 각각 장착하여 프로펠러에 의한 추력으로 비행하며, 미는 형식(Pusher Type)의 엔진 배열을 취하고 있다. 엔진의 주요 진동 특성인 H-mode 와 X-mode 를 특정 가진 주파수로 하여 주파수 응답 해석을 수행하였고, 엔진의 횡방향 진동 모드인 L-mode를 프로펠러에 회전에 의해 진동을 수반하는 가진 추력으로 가정하여 과도응답 해석을 수행하였다.

Key Words: WIG Craft, Forced Vibration, Frequency Response Analysis

1. 서 론

국내의 지형적 특성상 해상 운송체계는 매우 중요한 수송 수단이다. 하지만 해상에서의 주요 수송체인 선박은 꾸준히 개발되어오고 있음에도

불구하고 속도의 한계가 항공기에 비해 제한된다. 따라서 이러한 선박의 속도한계를 극복하기 위해 수중익선(Hydrofoil), 공기부양선(Hovercraft) 과 같은 각종 고속선들이 개발되었으며 최근에는 지면 효과를 이용한 수송 효율이 높은 운송체를 개발하는 연구가 다양하게 수행되고 있다.

위그선은 1960년대에 러시아에서 최초로 군사 목적으로 개발되었으며, 1970년대 이후에는 최고

* 조선대학교 항공우주공학과
연락처, E-mail: swordship@daum.net

속도 550km/h로 850명의 군 병력 수송이 가능한 위그선이 개발되었다. 그 후 전 세계적으로 위그선의 개발이 이루어지고 있고 국내에서도 한국해양연구원의 주관으로 20인승 소형 위그선이 개발 되고 있고 탑재중량 100톤급 수송용 위그선도 개발될 예정이다[4].

위그선은 날개가 해수면과 가까울 때 날개 밑의 공기 흐름 속도가 감소하는 현상에 의해 양력이 증가하는 원리인 지면효과(Wing-In-Ground Effect)를 이용하여 항공기에 비해 탑재 중량을 증가시킬 수 있어 효율적이면서 신속하게 이동시킬 수 있다. 위그선은 해상에서의 운송시간과 비용을 획기적으로 절감할 수 있기 때문에 향후 군수시장에서의 점유율이 높아질 것으로 예상된다.

본 연구를 위한 대상 위그선은 10인 이하의 소형 시험선으로서 전체형상은 Fig. 1과 같다. 주익은 지면효과를 높이기 위해 날개가 항공기에 비해 상대적으로 크며 델타(Delta)형을 하고 있다. 또한 착수운행중 수면에서의 부력을 발생시키기 위해 해수면과 맞닿는 동체 하단부는 선박의 형상을 하고, 비행운행중 항력을 줄이기 위해 동체 상단부는 항공기의 형상을 하고 있다. 수평 꼬리날개는 비상시 급상승 할 때 안정성을 유지하기 위해 항공기에 비해 상대적으로 크다.

모든 수송체가 갖는 공통된 문제이지만 특히 위그선의 경우는 엔진의 진동, 프로펠러에 의한 진동, 그리고 착륙시 충격(Impact)에 의한 다양한 진동 문제에 직면하게 된다. 따라서 위그선의 다양한 환경에서의 진동 특성을 설계단계에서 미리 파악하여 진동 문제에 대한 안전성을 확보하는 것은 매우 중요한 과제라 할 수 있겠다.

본 연구에서는 대상체인 소형 위그선의 주날개 구조를 엔진 및 프로펠러의 기진에 의한 강제진동 해석을 수행하였다.

2. 강제진동 해석의 이론적 배경

2.1 기진력 계산

강제진동 해석은 강제진동을 수반하는 기진력

에 대한 응답을 계산 하는 것으로서 대상 구조물에 대한 기본 운동방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} CM \\ M0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}(t) \\ \ddot{x}(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & -M \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F(t) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

(1)식을 상태 벡터를 적용하여 상태 공간 모델로 변환하면 (2)식과 같다. 여기서 C 는 감쇠계수행렬, M 은 질량행렬, $x(t)$ 는 진동변위, $F(t)$ 는 기진력을 의미한다.

대상 위그선은 2개의 왕복엔진을 날개의 좌·우에 각각 장착하여 프로펠러에 의한 추력으로 비행하며 프로펠러 후류의 영향을 최소화 하기 위해 미는 형식(Pusher Type)의 엔진 배열을 취하고 있다.

일반적으로 왕복엔진은 피스톤의 왕복, 축의 회전, 엔진 자체 질량에 의한 관성력에 의하여 진동을 유발할 수 있으며 진동양상은 크게 아래의 H 및 X 형의 2가지 모드로 고려할 수 있다 [5].

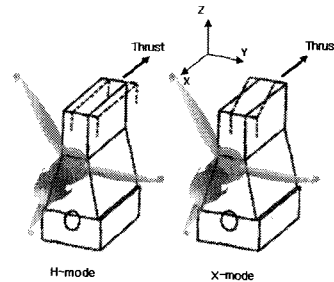


Fig 1. Typical two types of mode shapes due to reciprocating engine

기진력중 엔진자체에 의한 것은 엔진 회전수가 0rpm에서 최대 회전수인 6000rpm 까지의 기진력들을 고려하였고 프로펠러에 의해 진동을 수반하는 기진 추력은 다음과 같은 식을 이용하여 적용하였다.

$$T = \frac{\eta_p \cdot H.P \cdot 550}{V} \quad (3)$$

여기에서 T 는 기진 추력, HP 는 구동마력, η_p 는 프로펠러 효율 계수, V 는 비행속도이다[3]. 추력은 비행 속도별로 적용하였고, 이때 각경우의 비행속도는 각각 최초 10km/h 부터 이속속도[80km/h], 순항속도[110km/h(L.G.E), 120km/h(O.G.E)], 최고속도[130km/h]를 적용하였으며, 프로펠러 회전시 가진 진동수는 엔진 회전수에 프로펠러 블레이드 수를 곱하여 적용하였다. 비행 속도별 엔진 추력, 마력, 회전수는 Table 1과 같고, 한쪽 날개만을 고려하였다.

Table 1 Thrust, horse power and engine rpm at various case of flight speeds

Flight velocity (km/h)	Thrust(N)	Horsepower(HP)	engine rpm
10	1280.7	8.15	3500
80	1143.6	57.7	5000
110	1064.8	74.1	5250
120	1036.6	78.5	5400
130	1008.6	82.8	5450

2.2 주파수응답해석

주파수 응답해석은, 특정한 가진 주파수에 대한 구조물의 응답을 계산하기 위한 것으로서 가진 주파수가 고유 진동수와 근접하게 될 때의 응답과 공진가능성을 확인하는 것이 중요하다[6]. 주파수 응답 해석은 아래 식(4)와 같다.

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F_0 e^{j\omega t} \quad (4)$$

식(4)를 유한요소 해석을 위한 모달 주파수 응답 식으로 변환하기 위해 $u(t)$ 를 $[\phi]q(\omega)e^{j\omega t}$ 로 가정하면 다음과 같이 모달주파수응답 해석을 위한 (5)의 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$(-\omega^2 [\phi]^T [M] [\phi] + i\omega [\phi]^T [C] [\phi] + [\phi]^T [K] [\phi]) q(\omega) = [\phi]^T F(\omega) \quad (5)$$

2.3 과도응답 해석

과도응답해석은 시간에 따라 변화하는 하중을 받고 있을 때의 구조물의 응답을 구하는 해석으로서 외력에 대한 질점의 변위, 속도 및 가속도를 확인하는 것이 중요하다[6]. 해석방법에는 직접 해석법(Direct Method)과 모달 해석법(Modal Method)이 있는데 본 연구에서는 구

조물의 특성상 모달 해석법을 이용하여 과도응답 해석을 수행하였다. 외력을 받는 구조물의 구조 감쇠 운동방정식은 식(6)과 같다.

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n \dot{x} + \omega_n^2 x = f_0 \cos \omega t \quad (6)$$

여기서 $\omega_n = \sqrt{k/m}$, $\zeta = c/(2m\omega_n)$, $f_0 = F_0/m$ 이다. (6)식을 유한요소법에 의한 수치해석을 위한 형태로 변환하면 식(7)과 같다.

$$[M]\ddot{u}(t) + [C]\dot{u}(t) + [K]u(t) = F(t) \quad (7)$$

모달 과도 응답 해석을 위해서는 변위 벡터행렬 $\{u\}$ 로부터 모달 벡터행렬 $\{q\}$ 와의 관계식 $u(t) = [\phi]q(t)$ 를 이용하여 변환하면 (7)식은 모달 과도응답 해석을 위한 (8)의 행렬식으로 나타낼 수 있다[2].

$$[\phi]^T [M] [\phi] \ddot{q}(t) + [\phi]^T [C] [\phi] \dot{q}(t) + [\phi]^T [K] [\phi] q(t) = Q(t) \quad (8)$$

3. 해석 결과

3.1 고유진동모드 해석 결과

주날개의 주파수응답 및 과도응답 해석을 위해서는 고유진동수 해석이 선행되어야 하며 본 연구에서는 사이드힐(Sidehull)이 장착되지 않은 경우와 장착된 경우의 2가지 경우를 고려하여 고유진동수해석을 수행하였다. 사이드 힐(Sidehull)이 장착된 경우는 사이드힐(Sidehull)의 스트러트(Strut)까지 추가되어 질량의 증가로 인해 고유진동수가 다소 낮게 해석되었으며, 각 경우에 대해 모드별 고유진동수 해석 결과는 Fig. 2 와 같다.

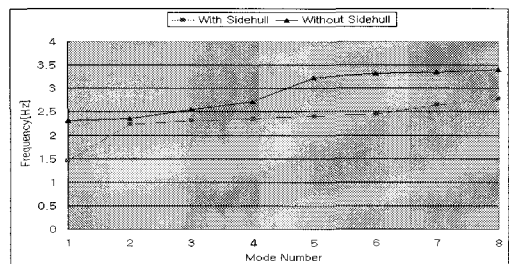


Fig. 2 Natural frequency at each mode number in two cases for main wing

3.2 주파수응답 해석 결과

강제진동응답을 해석하기 위한 엔진 모델링은 엔진을 강체로 가정하여 RBE2 요소를 적용하여 수행하였다. 해석 수행을 위한 날개의 요소는 55,964 요소로 모델링 되었고, 강제진동응답 측정 위치는 엔진 마운트[절점번호 58021]부위, 윙팁[절점번호 275473], 스트러트[절점번호 277930], 그리고 연료에 의한 슬로싱[sloshing] 문제와 직결될 수 있는 연료탱크 부위[절점번호 38030, 절점번호 37829]를 측정점으로 선정하였다.

주파수응답해석은 엔진의 전형적 진동양상인 H-Mode와 X-Mode에 대해서 가진력은 공진가능성만을 확인하기 위한 것으로 각각 회전축에 대해 횡방향 단위하중과 수직축에 대한 단위 회전모멘트를 적용하였고, 가진 주파수는 엔진 회전수의 3배까지 고려하여 최저 0Hz부터 300Hz까지 해석 하였다. 분석결과 H-Mode 와 X-Mode 모두 고유진동수 범위인 3Hz 이하에서 Peak점이 발생하였고, 특히 X-Mode의 경우는 50Hz 부근에서 피크(Peak)점이 한번 더 나타남으로서 공진 가능성을 확인 하였다. 300Hz까지의 X-Mode 와 H-Mode의 그래프는 Fig. 3과 Fig. 4에서 확인할 수 있다.

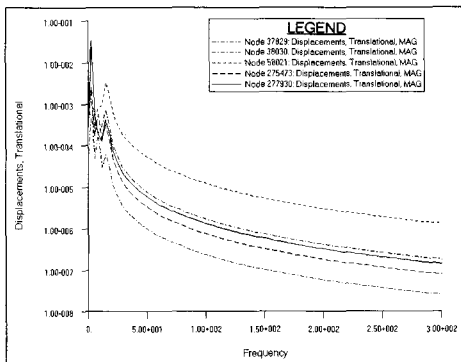


Fig. 3 H-mode frequency response

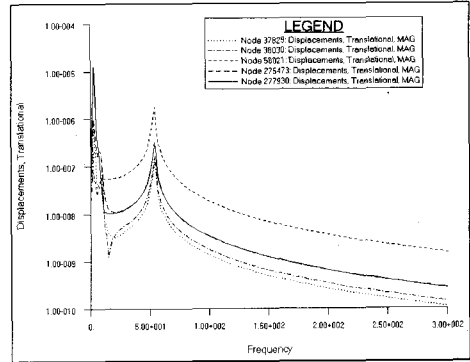


Fig. 4 X-mode frequency response

3.3 과도응답 해석 결과

과도응답해석은 엔진의 최대 회전수인 6000rpm에서 프로펠러가 1회전 하는데 걸리는 시간을 고려하여 시간 스텝을 0.01초로 하고 0.5초 동안의 응답을 해석하였다. 해석 결과 속도별 과도응답에 따른 변위는 크지 않았고 대부분의 경우 진동양상은 비슷한 경향을 보였으나 이수속도인 80km/h 에서의 응답은 나머지 초기 속도, 순항속도, 최고속도의 경우와는 다른 응답 특성이 나타났다. Figure5 ~ 6은 이수속도와 최고속도에 대한 z-방향 변위응답곡선을 나타낸 것이고, Figure 7 ~ 8은 z-방향 가속도 성분을 나타낸 것인데, z-방향 가속도 성분에서 엔진마운트와 가까운 연료탱크 부위는 가속도 성분이 매우 큰 반면 반대쪽 연료탱크 부위는 가속도 성분이 매우 작음을 확인할 수 있었다.

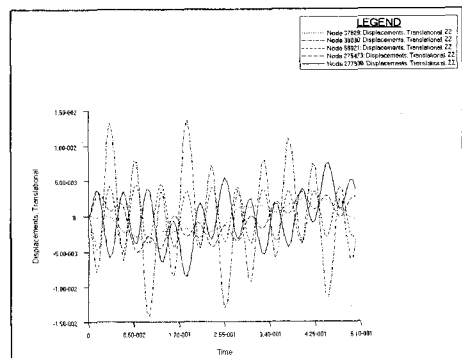


Fig. 5 Z-axis displacement at take-off flight velocity [80km/h]

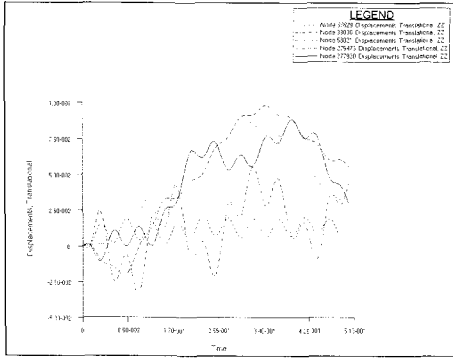


Fig. 6 Z-axis displacement at max. flight velocity [130km/h]

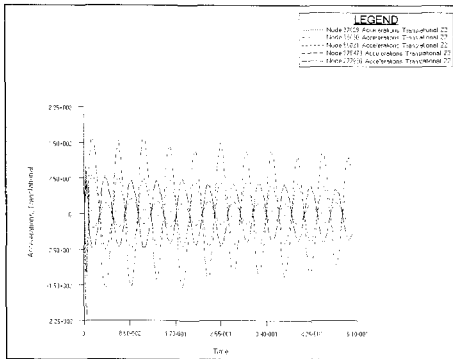


Fig. 7 Z-axis acceleration at take-off flight velocity [80km/h]

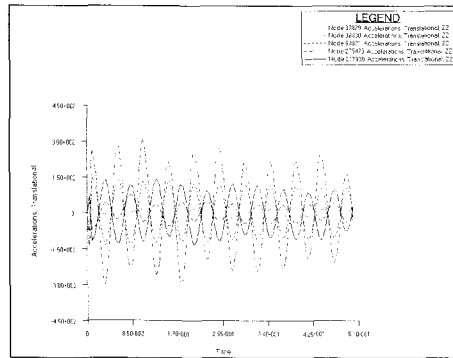


Fig. 8 Z-axis acceleration at max. flight velocity

4. 결 론

본 연구에서는 소형 위그선 주날개에 대한 진동 거동 해석을 수행 후 그 특성을 살펴보았다.

고유진동수 해석에서는 사이드 헐이 없는 경우와 사이드헐이 있는 경우의 2가지를 고려하였는데 두 경우 모두 약 3Hz 이하의 낮은 고유진동수와 국부적인 변위가 발생함을 확인하였다. 주파수응답해석은 엔진의 H-Mode 와 X-Mode 의 두 경우를 고려하였으며 모두 2Hz 부근에서 공진 가능성이 있으나 실제 엔진 또는 프로펠러에 의한 가진주파수는 50Hz ~ 100Hz 이므로 이에 의한 공진은 일어나지 않을 것으로 생각된다. 그러나 X-Mode의 경우에는 50Hz 부근에서 피크점이 한번 더 발생함으로써 최초 10km/h 이하의 속도로 활주 운행시 엔진의 회전수에 의한 공진 가능성이 있음을 확인하였다. 과도응답해석은 속도별로 6가지 경우를 고려하여 해석 하였으며 초기속도와 순항속도, 최고속도에서의 응답은 거의 유사한 특성을 보였으나 이수속도에서의 응답은 상대적으로 다른 특성을 보였다. 이처럼 소형위그선의 주날개에 대한 강제진동응답 특성을 살펴보았는데, 주날개 한쪽에 대한 응답의 결과는 50Hz 부근에서 공진 가능성을 확인하여 이에 대한 개조설계 또는 방진장치 추가 등의 고려가 있어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 이진복 외 공저, "Engineering Vibration, 2nd Edition", (주)피어슨에듀케이션코리아, 2004년 12월.
2. 김동현 외 7명 "탈트로터 허브 동하중을 고려한 복합재 스마트 무인기 진동해석", 한국소음진동공학회논문집 제 15 권, 제 1호, pp. 63~71, 2005.
3. 박현범, "소형 위그선의 복합재 주익의 경량화 구조 설계 및 해석에 관한 연구", 석사학위논문, 2007년 2월.
4. 공창덕, 박현범, 김주일, 강국진, 박미영, "소형 WIG선의 복합재 주날개 구조 개념 설계에 관한 연구", 한국 복합재료학회 추계 학술대회 논문집, 2005.
5. 이돈출, "저속 2행정 디젤엔진의 진동특성과 방진대책", 한국소음진동공학회지 제 8 권, 제 3 호, 1998.
6. MSC. Software, MSC/NASTRAN Basic Dynamic Analysis: User's Guide, Ver.68.