

# 프로펠러 엔진에 의해 가진되는 소형 위그선 주날개의 진동 거동 해석에 관한 연구

공창덕\* · 윤재휘\* · 박현범\*

## Study on Forced Vibration Behavior of WIG Vehicle Main Wing Structure Excited by Propulsion System

Changduk Kong\* · Jaehuy Yoon\* · Hyunbum Park\*

### ABSTRACT

Previously study on structural design of the main wing of the twenty-seat class WIG (Wing in Ground Effect) craft. In the final design, three spars construction was selected for safety in the critical flight load, and the Carbon-Epoxy material was selected for lightness and structural stability. In this study, the forced vibration analysis was performed on the composite main wing structure of the twenty-seat class WIG craft with two-stroke pusher type reciprocating engine. The vibration analysis based on the finite element method was performed using a commercial FEM code, MSC/NASTRAN. Excitations for the frequency response analysis were assumed as the Y-mode (lateral mode), the Z-mode (vertical mode) and the  $M_{xyz}$ -mode (twisted mode) which are typical main vibration modes of engine. And excitations for the transient response analysis were assumed as the X-mode (longitudinal mode) with the oscillating propeller thrust which occurs in operation.

### 초 록

본 연구에서는 선행연구에 의해 설계되어진 20인승급 소형 위그선의 주날개 구조를 엔진 및 프로펠러에 의해 유발되는 진동을 가진력으로 하여 강제진동 해석을 수행하였다. 대상 위그선은 왕복엔진을 날개에 장착하여 프로펠러에 의한 추력으로 비행하며, 미는 형식(Pusher Type)의 엔진 배열을 취하고 있다. 유한요소해석을 위해서 구조해석 상용프로그램인 MSC/NASTRAN을 사용하였으며, 엔진의 주요 진동 특성인 X-mode 와 Y-mode 그리고 Z-mode를 특정 가진 주파수로 하여 주파수 응답 해석을 수행하였고, 엔진의 추력방향 진동 모드인 X-mode를 프로펠러의 회전에 의해 진동을 수반하는 가진 추력으로 가정하여 과도응답 해석을 수행한 후 날개의 진동 특성을 살펴보았다.

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

## 1. 서 론

최근에 지면 효과(Wing-In-Ground Effect)를 이용한 수송 효율이 높은 운송체를 개발하는 연구가 다양하게 수행되고 있는 가운데, 6인승급 소형 시험선의 연구 및 개발이 성공적으로 이루어졌고, 한국해양연구원의 주관으로 현재 20인승급 소형 위그선이 개발 중에 있으며 100톤급 수송용 위그선도 개발될 예정이다.[1] 본 연구를 위한 대상 위그선은 20인승급의 소형 위그선으로서 전체형상은 Fig. 1과 같다. 주익은 지면효과를 높이기 위해 날개가 항공기에 비해 상대적으로 크며 델타(Delta)형을 하고 있다. 또한 착수 운행 중 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 소형 위그선 복합재 주날개의 경량화 구조설계[2]의 선행 연구에 이어 주날개의 구조를 엔진 및 프로펠러의 가진에 의한 강제진동 해석을 수행하고 주요 진동 특성 및 진동에 대한 안전성을 검토하였다.

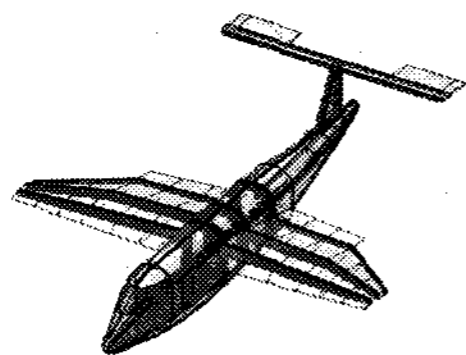


Fig. 1 3D model for whole WIG Craft

\* 조선대학교 항공우주공학과  
연락처, E-mail: aero1613@hanmail.net

## 2. 구조 설계 및 해석

선행연구에서 제시한 날개는 카본/에폭시(Carbon/Epoxy) 복합재료를 적용하여 경량화와 구조적 안정성 특성을 갖는 스킨-스파-폼 샌드위치(Skin-spar-foam sandwich) 구조 형상을 바탕으로 개념설계를 진행하였고, 구조해석을 통하여 상세설계 및 안전성 및 안정성을 평가하였다. 총 6번의 설계단계를 거쳐 최종 설계되어진 날개의 구조형상은 3개의 스파(spar) 형태를 하고 있으며, 설계 요구조건 및 구조적 안전성과 안정성을 모두 확보하였다[2]. 소형 위그선의 설계요구조건과 제원은 Table 1에 나타내었고, 초기 설계형상부터 최종 설계 형상 확정까지 수정 설계 과정을 Fig. 2에 단계별로 나타내었으며 구조해석 결과를 Table 2에 명시하였다.[2]

Table 1 Specification of small WIG vehicle

Design requirements	
Crusing speed	150 km/h
Maximum speed	170 km/h
Gross weight	8500 kg
Empty weight	6500 kg
Load factor	2
Engine thrust	1000 hp × 2
Aerodynamic configuration	
Length	23.5 m
Height	7.75 m
Wing area	108 m <sup>2</sup>
Wing span	20.4 m
Root chord	7.5 m
Tip chord	3.0 m
Target weight of wing	383 kg
Airfoil	Modified NACA 7409

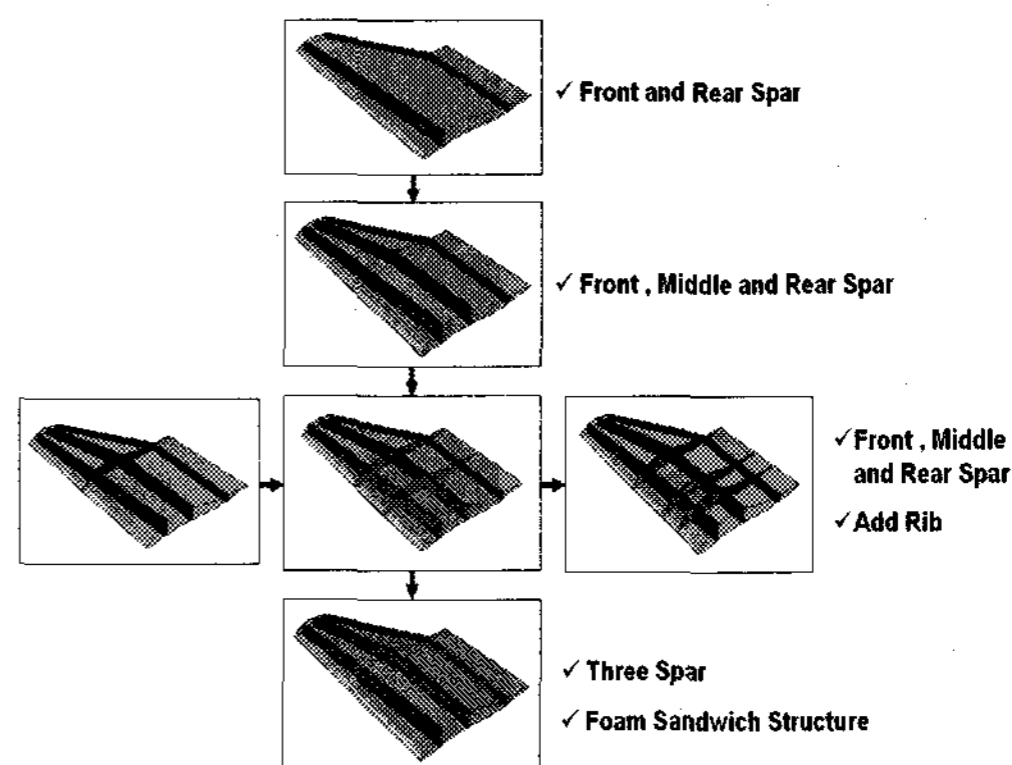


Fig. 2 Flow of design modification

Table 2 Structural analysis results

Analysis results		
Max. stress [Mpa]	Tension	197
	Compression	220
Max. disp. [mm]		59.7
Tsai-Wu failure criterion		0.119
First buckling load factor		1.3855
Designed wing weight [kg]		376

### 3. 강제진동 해석의 이론적 배경

#### 3.1 엔진 가진력 분석

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. 위그선에 사용된 엔진은 1000마력 엔진 2기를 취하고 있고, 프로펠러의 직경은 3 m로서 0.7의 프로펠러 효율을 갖는다. 엔진에서 유발되는 가진력은 엔진을 강체로 가정하여 엔진 자체에서 발생하는 진동과 프로펠러 회전에 의해 진동을 수반하는 추력으로 가정할 수 있다.

강제진동 해석을 위한 가진력중 엔진자체의 떨림에 의한 것은 엔진 회전수 0 rpm에서 최대 회전수인 7000 rpm의 3배까지의 가진 주파수를 고려하였다. 일반적으로 왕복엔진은 피스톤의 왕복, 축의 회전, 엔진 자체 질량에 의한 관성력에 의하여 진동을 유발할 수 있으며 진동양상은 엔진의 수직방향 떨림, 수평방향 떨림, 추력방향 떨림 그리고 각 축에 대한 회전 모멘트인 비틀림 진동의 6가지 모드로 고려할 수 있다[3].

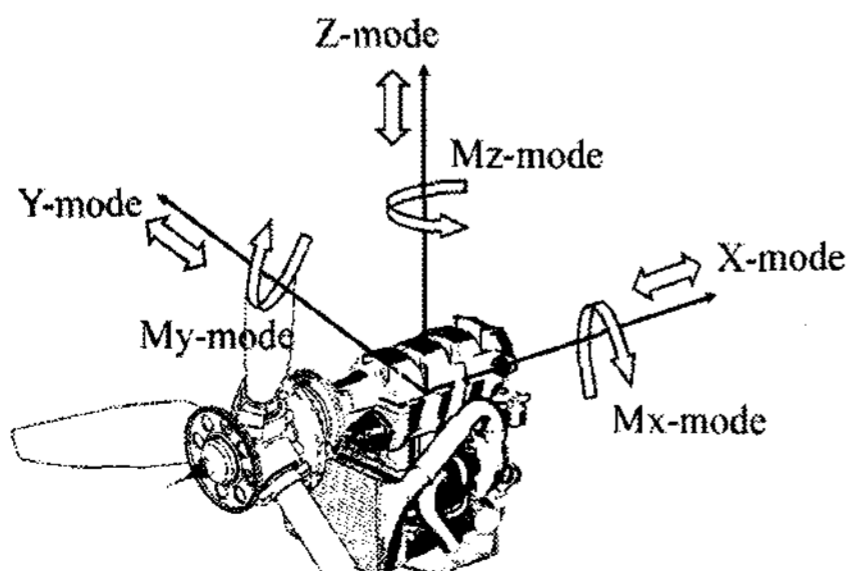


Fig. 3 Definition of vibrational modes

항공기용 프로펠러인 경우는 기동비행 중 나타나는 자이로(Gyro) 효과나 옆 미끄러짐 현상에 의해 하중이 주기적으로 블레이드에 작용되는 현상이 나타난다. 이러한 경우 정적인 상태의 하중과는 달리 정현파형의 주기하중상태가 나타나며 이러한 교변하중의 최대치는 정적하중보다 약 20%의 증가된 값을 갖는다.[4] 따라서 프로펠러에 의해 진동을 수반하는 가진 추력은 프로펠러의 추력에 엔진 회전수를 적용하여 정현파 형태로 프로펠러의 허브 중심에 가진 하였으며, 가진력으로 적용하기 위한 추력 및 엔진 회전수는 해양연구원에서 발표한 소형 위그선의 추력곡선[5]을 참고로 하여 추력 효율식인 식(1)에 의해 대상 엔진의 추력 곡선을 산출 하였고 가진력으로 전용하기 위한 추력 변동율은 해당 추력에 약 3%를 적용하였다.

$$T = \frac{\eta_p \cdot H.P \cdot 550}{V} \quad (1)$$

여기에서,  $T$ 는 가진 추력,  $H.P$ 는 구동마력,  $V$ 는 비행속도이다.

#### 3.2 주파수응답해석

주파수 응답해석은, 특정한 가진 주파수에 대한 구조물의 응답을 계산하기 위한 것으로서 가진 주파수가 고유 진동수와 근접하게 될 때의 응답과 공진가능성을 확인하는 것이 중요하다. 주파수 응답 해석은 기본 운동 방정식으로부터 유한요소 해석을 위한 모달 주파수응답 식으로 변환하기 위해  $\{u(t)\}$ 를  $[\phi]\{q(\omega)\}e^{j\omega t}$ 로 가정하면 다음과 같이 모달 주파수응답 해석을 위한 식(2)의 행렬식으로 나타낼 수 있다[6].

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

#### 3.3 과도응답해석

과도응답해석은 시간에 따라 변화하는 하중을 받고 있을 때의 구조물의 응답을 구하는 해석으로서 외력에 대한 절점의 변위, 속도 및 가속도

를 확인하는 것이 중요하다. 외력을 받는 구조물의 구조감쇠( $g=1\%$ )를 고려한 운동방정식은 식(3)와 같다.

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{f(t)\} \quad (3)$$

모달 과도 응답 해석을 위해서는 변위 벡터행렬  $\{u\}$ 로부터 모달 벡터 행렬  $\{q\}$ 와의 관계식  $u(t) = [\phi]q(t)$ 를 이용하여 변환하면 식(3)는 모달 과도 응답 해석을 위한 식(4)의 행렬식으로 나타낼 수 있다[6].

$$[\phi]^T [M] [\phi] \ddot{q}(t) + [\phi]^T [C] [\phi] \dot{q}(t) + [\phi]^T [K] [\phi] q(t) = \{Q(t)\} \quad (4)$$

여기서,  $Q(t)$ 는 프로펠러의 추력에 의한 가진력을 시간영역에서의 외력벡터로 나타낸 것으로서 정의는 식(5)과 같다.

$$\{Q(t)\} = [\phi]^T \{F(t)\} \quad (5)$$

#### 4. 강제 진동 해석 결과

##### 4.1 고유 진동수 해석 결과

주파수 응답 및 과도응답 해석을 위해서는 고유진동수 해석이 선행되어야 하며, 또한 연료의 Sloshing 까지 고려해야하나 연료의 Sloshing은 그 자체만으로도 상당한 수준의 연구를 필요로 하기 때문에 본 연구에서는 연료가 없는 상태로 가정하였다. 주파수 및 과도 응답 해석을 위해서는 최소한 관심주파수 영역까지의 고유진동수를 포함해야 하기 때문에 기본적으로 300차까지의 고유진동수를 해석하였다. 해석 결과, 1차에서 50차까지의 저차 고유 진동 모드는 13Hz에서 80Hz까지의 고유진동수를 보였고, 300차에서는 278Hz의 고유진동수를 보였다. 본 논문에서는 1차에서 20차까지의 고유진동수 해석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 고유 진동 모드중 거시적으로 확인 가능한 고유 진동 모드는 1차, 3차에서 굽힘 모드 형상을 보였고, 5차, 6차에서 비틀림 모드 형상을 보였다. 이 밖의 모드는 국부적인 형

상을 보였는데, 이것은 날개의 전체적인 공력 형상과 구조 형상에 의한 것으로 판단된다. Fig. 5, 6은 거시적으로 나타난 고유 진동 모드를 도시한 것이다.

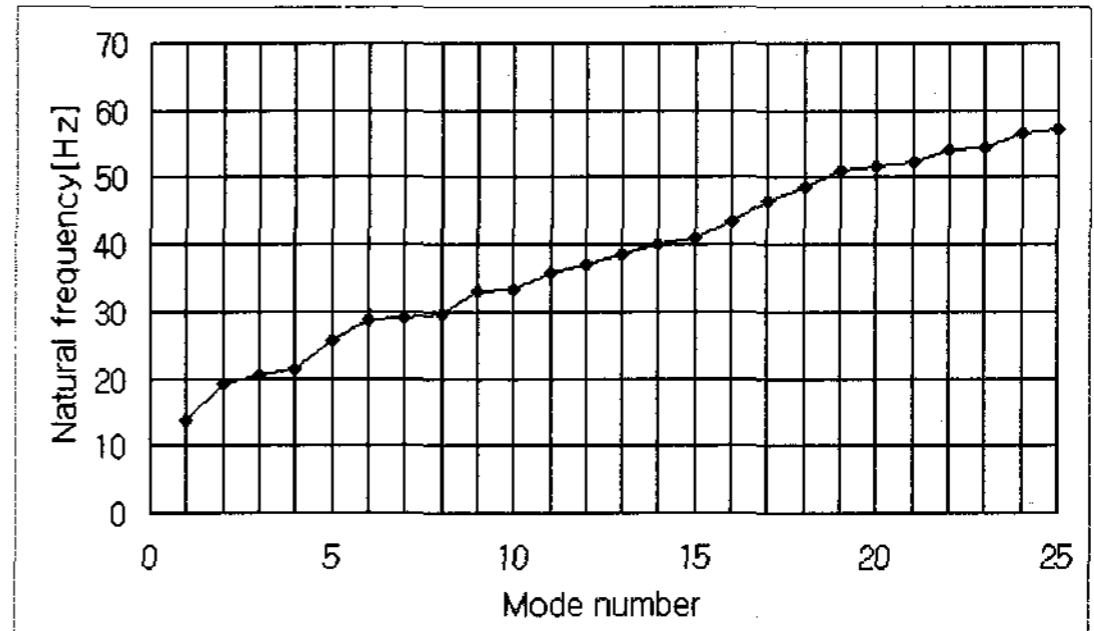


Fig. 4 Natural frequency at each mode number between 1 and 25 mode number for the main wing

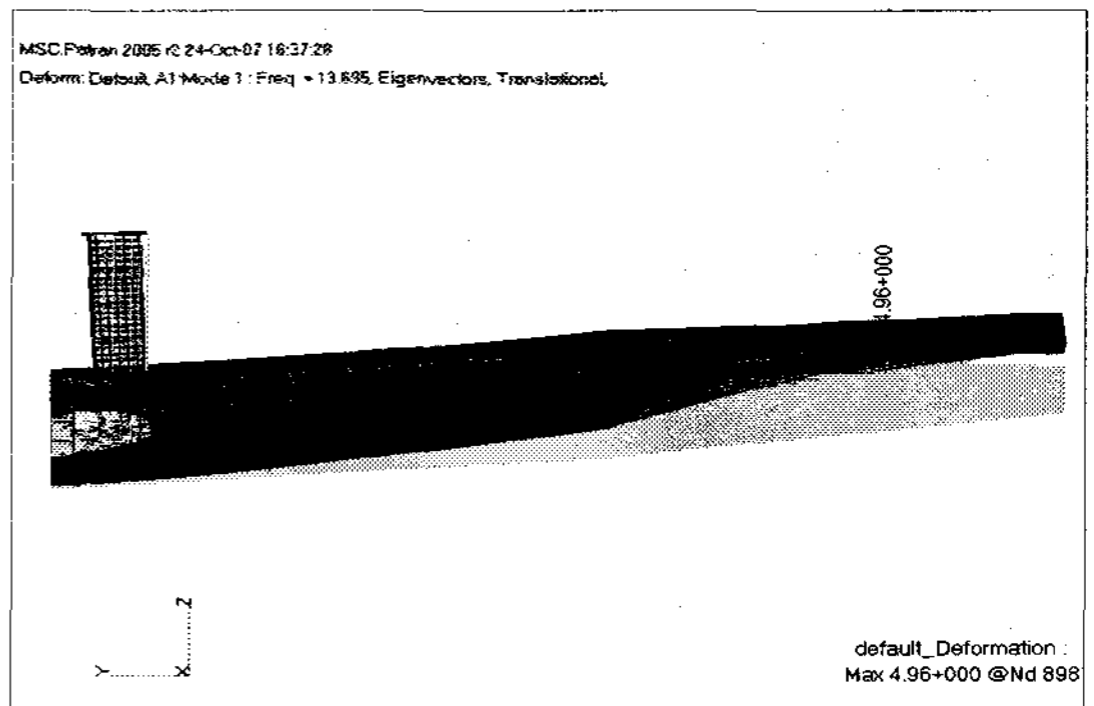


Fig. 5 First flap mode shape and frequency

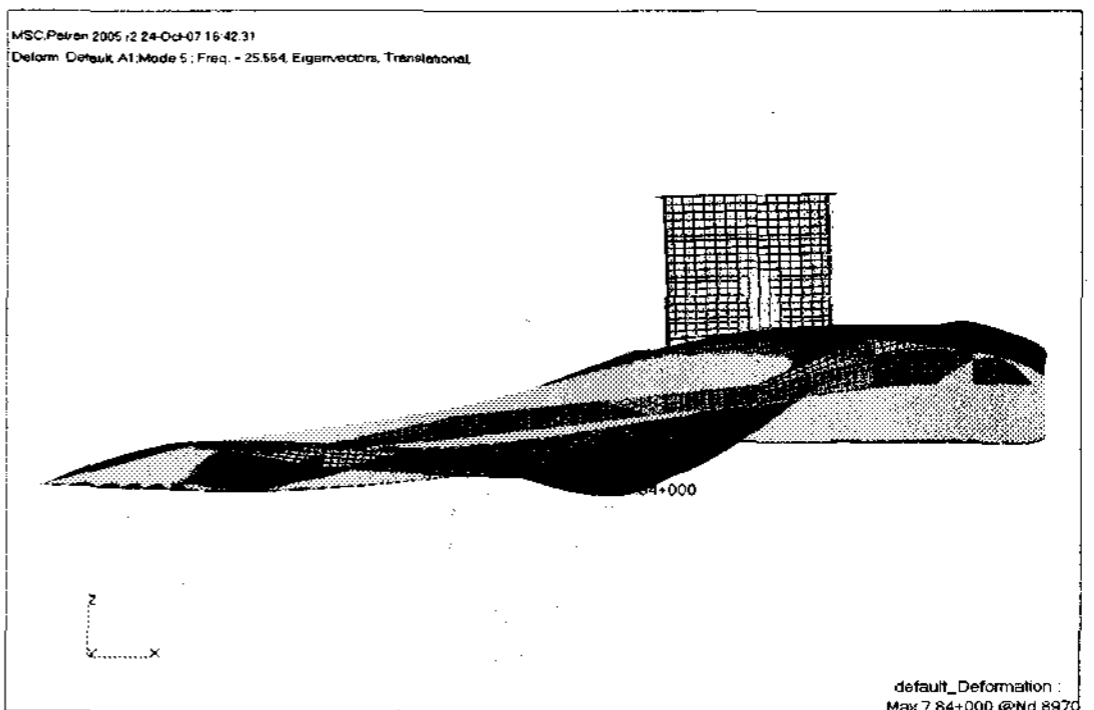


Fig. 6 First torsional mode shape and frequency

#### 4.2 주파수 응답 해석 결과

주파수 응답 해석은 엔진의 전형적 진동양상인 6가지 진동 모드에 대해서 가진력은 공진 가능성만을 확인하기 위한 것으로 각각 회전축에 대해 수직축 방향(z-mode), 횡축 방향(y-mode), 추진축 방향(x-mode)에 단위 하중과 단위 모멘트를 적용하였고, 가진 주파수는 프로펠러 블레이드 수를 고려하여 엔진 회전수의 3배인 350Hz까지를 주파수 응답 해석에 적용하였다. 해석 결과, 6가지의 진동 모드 중 비틀림 진동 모드인 Mx, My, Mz는 병진 진동 모드인 X, Y, Z 모드에 비해 진동 특성이 상대적으로 매우 낮게 나타났다. 또한, 병진 진동 모드 중에서 X-mode가 가장 큰 진동 특성을 보였으며, 관심 주파수는 180Hz로 판단되었다. Fig. 7은 병진 모드에 대한 가속성분 곡선을 보인 것이다.

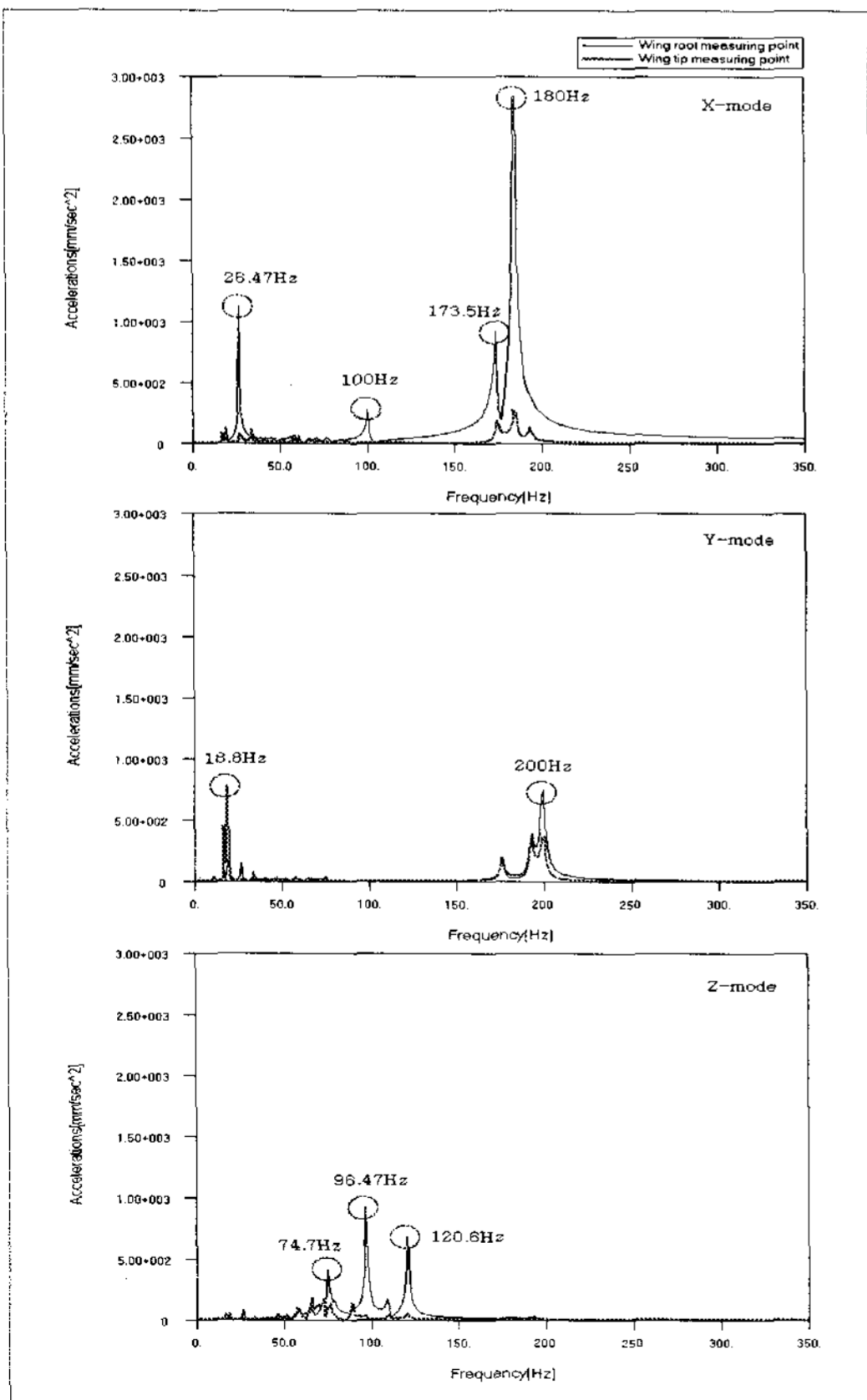


Fig. 7 Frequency acceleration response spectrum in X, Y, Z vibrational modes

#### 4.3 과도 응답 해석 결과

과도 응답 해석은 프로펠러 회전에 의해 진동을 수반하는 가진(Excitation) 추력에 대한 응답을 구하기 위한 것으로서 주파수 응답 해석 결과에서 추력 방향 진동 모드인 x-mode에 대한 응답 중 공진 가능성 및 지배적인 진동 양상을 보이는 주파수 대역과 그때의 추력 변동율을 과도 응답 해석을 위한 외력으로 선정하였다. 구조 감쇠는 ( $g=1\%$ )로 가정하고, 프로펠러에 의해 주기적인 하중이 연속적으로 50주기의 하중이 작용되었을 때를 해석하기 위해서 시간 스텝을 0.00027초로 하여 0.27초 동안의 과도 응답 특성을 해석 하였다. 해석 결과, 최대 Peak점은 날개 뿌리 부위에서 수직축 방향 가속 성분( $a_z$ )이 약  $18547\text{mm/sec}^2(1.9g)$ 로 나타났다. Fig. 8은 가속 및 변위 응답 곡선을 나타낸 것이다.

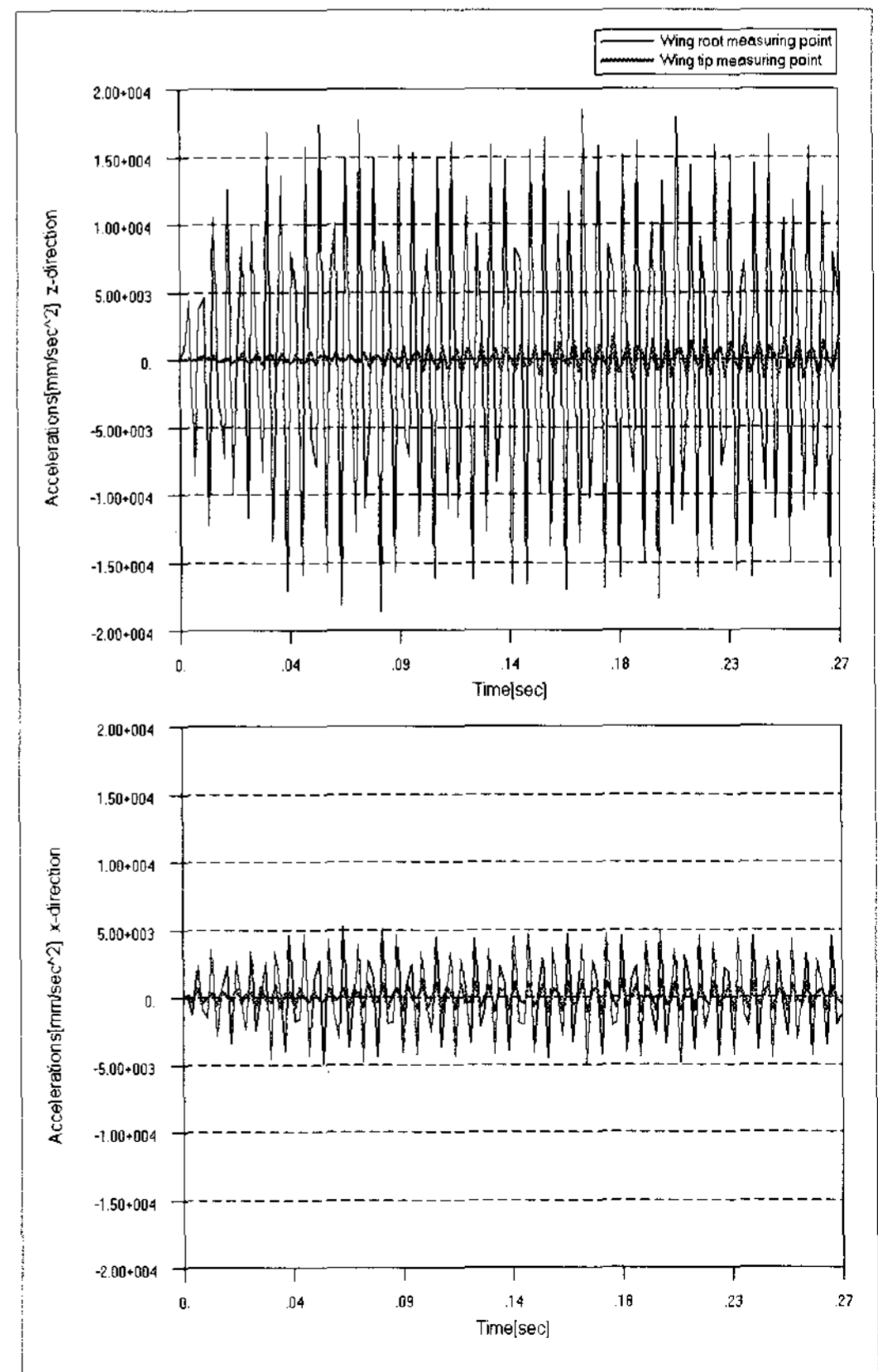


Fig. 8 Transient acceleration response for 50cyclic loading in 40km/h

#### 4. 결 론

본 연구에서는 소형 위그선 주날개 경량화 구조설계의 선행연구에 이어 강제진동 거동 해석을 수행 후 그 특성을 살펴보았다. 엔진을 강체로 가정하였을 때 엔진 자체의 떨림에 의해 유발되는 날개의 진동특성은 추력 방향 진동 모드인 X-mode 일 때, 저차 고유진동수 외에 180Hz 부근에서 공진 가능성이 있음을 알 수 있었다. 따라서 엔진 회전수가 180Hz 일 때 프로펠러에 의해 유기되는 추력 변동율을 적용하여 과도응답해석을 수행하였고, 해석 결과, 엔진과 근접한 날개 뿌리 부위는 가속성분이 중력가속도 보다 큰 약 2g 정도의 가속 성분을 보임으로서 이에 대한 방진 및 진동 절연 대책이 필요할 것으로 판단되어진다.

#### 후 기

본 연구는 2007년도 교육 인적자원부의 지방대학 혁신역량 강화사업(NURI)의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. 공창덕, 박현범, 김주일, 강국진, 박미영, "소형WIG선의 복합재 주날개 구조 개념 설계에 관한 연구", 한국 복합재료학회 추계 학술대회 논문집, 2005.
2. 박현범, "소형 위그선의 복합재 주익의 경량화 구조 설계 및 해석에 관한 연구", 조선대학교 항공우주공학과 석사학위논문, 2007년 2월.
3. 이돈출, "저속 2행정 디젤엔진의 진동특성과 방진대책", 한국소음진동공학회지 제 8 권, 제 3 호, 1998.
4. 김기범, "셀-스파-폼 구조를 갖는 탄소/에폭시 복합재료 프로펠러 블레이드의 구조거동에 대한 해석 및 실험적 연구", 조선대학교 항공우주공학과 박사학위논문, 1997년.
5. 신명수, 김윤식, 이경중, 강국진, 박영하, 이영연, "소형 위그선 개념설계", 대한조선학회 논문집 제 43 권, 제 1 호, 2006년 2월.
6. MSC. Software, MSC/NASTRAN Basic Dynamic Analysis: User's Guide, Ver.68.