

〈논 문〉

구조물-가진기 상호작용에 의한 공진주파수 변동에 대한 해석

한 상 보*

(1995년 9월 29일 접수)

Analysis on the Measured Natural Frequencies Due to the Structure-Exciter Interaction

Sang-bo, Han

Key Words : Structure-Exciter Interaction(구조물-가진기 상호작용), Stinger(연결봉), Coupling Effect(연성효과), Frequency Response Function(주파수 응답함수), Additional Degree of Freedom System(추가자유도계)

Abstract

The purpose of this paper is to investigate the influence of the exciter attached for the measurement of natural frequencies when extracting the frequency response functions of the test structure in experimental modal analysis. The procedure is first to model the attached exciter as an additional degree of freedom system and next to verify the suggested model by experimentally extracting the natural frequencies of the test structure with various values of exciter mass, stinger stiffness and attachment position of the exciter on the test structure. It is concluded that an additional degree of freedom system which includes the natural frequency of the exciter itself and axial stiffness of stinger should be considered to quantitatively define the coupling effects of structure-exciter interaction on the measured natural frequencies. It is not the mass of the exciter itself but the coupling effect of the additional degree of freedom mass-spring system consisting of exciter body and armature coil that characterizes the natural frequency deviation. Therefore, when the natural frequency of this additional mass-spring system is outside of the test frequency range, the coupling effect of structure-exciter interaction can be minimized.

1. 서 론

실험을 통하여 해석하고자 하는 구조물의 동적특성을 파악하기 위한 방법들 중에서 실험적으로 추출되는 주파수 응답함수(frequency response function)로부터 고유진동수, 고유진동형상, 등가질량, 스프

링상수, 감쇠비 등을 해석하는 방법이 실험적 모드 해석(experimental modal analysis)이다. 이 실험적 모드해석법에 있어서 구조물의 동적 응답을 측정하기 위해서는 구조물의 진동을 야기시키는 가진력을 전달시켜야 하는데, 이때 필요한 가진력을 제공하는 가장 보편적인 방법중의 하나가 구조물에 직접 연결되는 전동식 가진기(electrodynamic exciter)를 가진원으로 사용하는 것이다.

전동식 가진기의 구동부는 축방향으로는 매우 유

*회원, 경남대학교 기계설계학과

연하나 축과 수직인 방향으로의 강성이 매우 큰 특징을 가지고 있기 때문에 가진기에 의해 야기된 구조물의 응답방향이 가진기 구동부의 운동축과 일치하지 않는 경우 2차의 가진 효과가 발생하게 되며, 이는 계측하려고 하는 가진력의 측정에 큰 오류를 발생시키게 된다.⁽¹⁻³⁾

부착된 가진기 및 계측장비의 효과가 구조물의 주파수 응답함수의 추출에 미치는 영향에 대한 연구는 정확한 실험결과를 얻기 위한 노력의 일환으로 많은 연구자들의 주목을 끌어 왔다.⁽⁴⁻⁶⁾ 최근 이론적 모형과 수치적 모형의 연계 및 구조물에 대한 이론적 모형의 개선을 위한 연구 분야에서 계측장비로 인한 이러한 오류가 정확한 실험결과와 추출을 방해하는 문제점이 된다는 사실에 대한 인식을 하게 되었으며 그 해결책이 강구되고 있다.

접촉식 장비를 사용한 실험적 모드해석법에 있어서 측정되는 구조물의 진동특성에 영향을 끼치게 되는 인자는 크게 두 가지 측면에서 고려되고 있다.

그 첫째는, 부착된 계측장비들의 질량효과가 구조물에 미치는 영향에 대한 파악과 그로 인한 오류의 제거에 관한 것으로 가장 보편적인 방법은 힘측정기와 가속도계가 일체로 제작된 임피던스 헤드를 사용하고 신호처리과정에서 질량효과를 제거시키는 질량제거기법(mass cancellation technique)이다.^(2,3) 그러나, 이 기법의 단점은 구조물의 주파수 응답함수를 추출함에 있어 가진점과 측정점이 동일한 경우에만 제한적으로 적용될 수 있다는 것이다.

둘째로, 가진기의 구동부가 운동축 방향 외에는 높은 강성을 갖고 있다는 특징때문에 야기되는 문제점으로 실제 실험시의 해결책으로는 축방향의 강성은 높으나 축에 수직인 굽힘방향의 강성은 낮은 연결봉을 사용하여 가진 된 힘과 측정된 힘의 차이가 최소가 되도록 연결봉을 설계하는 것이다.

이 연결봉 설계에 대한 많은 연구 중에서 그 대표적인 예로서 몇 가지를 살펴보면, Hieber⁽⁵⁾는 연결봉의 동특성과 실제 측정시 보통 무시되는 loadcell moment에 대해 실험결과를 발표하였으며, Anderson⁽²⁾은 연결봉의 횡축과 종축방향의 축공진에 대해 연구하였고, Hu와 McConnell⁽¹⁾은 외팔보의 탄성과 전달계수의 성질을 이용해서 연결봉의 운동, 축공진, 힘전달, 그리고 가진력의 산정에 대해 연구하였고, 그리고 Ewins⁽⁴⁾는 연결봉의 설계, 연결구조, 그리고 가진기의 설치에 대한 일반

적인 방법론을 제시하였다.

본 연구의 목적은 고유진동수를 실험적으로 추출하고자 할 때, 가진기와 해석 대상물의 상호작용으로 인하여 발생하는 고유진동수 왜곡현상을 실험적으로 파악하고 상호작용의 효과가 고유진동수 추출에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기 위한 것이다. 즉, 구조물의 가진을 위해 부착시킨 가진기를 추가의 자유도를 가진 구조물의 연결형태로 모형화하고, 실험적으로 추출되는 구조물의 고유진동수가 가진기 질량의 변화와 연결봉 강성의 변화에 대해서, 그리고 가진기 부착위치의 변화에 대해서 어떤 영향을 받게 되는지를 제시된 모형을 통하여 설명하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 2자유도계에 대한 가진기 연결의 수학적 모형의 해석

가진기를 해석 대상 구조물에 연결시키게 될 때 발생하는 상호작용현상의 파악을 위하여 11개의 균등한 절점으로 정의된 $25 \times 25 \times 2000$ mm의 강철보로 된 구조물과 가진기의 결합을 Fig. 1과 같이 구조물에 일자유도의 집중질량계가 부착된 것으로 모형화하였다. 일반적으로 구조물에 부가된 잉여 자유도의 효과에 대한 해석은 전체 계의 운동방정식에 대한 완전해를 구하려는 관점에서 많이 다루어져 왔으나,^(8,9) 본 실험에서는 구조물의 고유진동수 계측에 미치는 구조물과 가진기의 상호작용 효과를 파악하기 위하여 보와 부착된 가진기를 각각의 1자유도계로 고려한 간단한 2자유도계를 대상으로 해석을 시도하였다.

Fig. 1과 같이 1인 균일보에 일자유도 진동자가

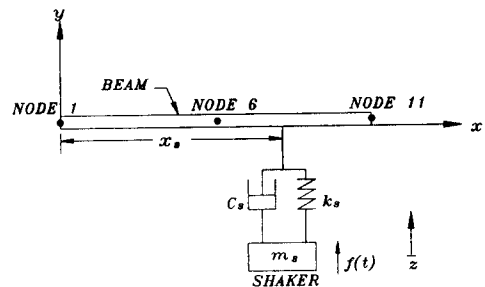


Fig. 1 Two degree of freedom model of structure-exciter interaction

$x = x_s$ 의 위치에 부착된 경우의 Lagrange's 운동방정식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} M\ddot{q} + c_s\dot{q} - c_s\dot{z} + (K + k_s\phi_s^2)q - k_s\phi_s z \\ = 0 \\ m_s\ddot{z} + c_s\dot{z} - c_s\dot{q} + k_s z - k_s\phi_s q = f \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서, 1자유도계로 간주된 보의 일반화질량과 일반화강성은 해당 진동형의 함수로 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} M &= \int_0^L \rho A \phi^2 dx \\ K &= \int_0^L EI (\phi'')^2 dx \end{aligned} \quad (2)$$

즉, 보와 가진기 사이의 상호작용이 보의 특정 고유진동수 추출에 미치는 영향은 해당 고유진동형을 사용하여 식 (2)와 같이 정의된 질량과 강성을 가진 1자유도 구조물과 부착된 가진기 사이의 연성효과를 고려함으로써 파악할 수 있다는 것이다. 예를 들면, 보의 3차 고유진동형을 식 (2)에 주어진 보의 진동형 ϕ 로 사용할 경우 보의 3차 고유진동수 파악에 미치는 가진기의 효과를 반영하는 운동방정식이 식 (1)과 같이 정의될 수 있다는 것이다.

물론 부착된 가진기와 보의 상호작용을 완전히, 그리고 정확히 기술하기 위해서는 참고문헌 (8), (9)와 같은 보이론을 적용시켜야 하지만, 본 논문에서는 고유진동수 변동량만을 해석대상으로 제한하였으므로 이 모형이 갖는 유용성이 인정된다고 생각된다.

주어진 2자유도계의 고유진동수를 구하기 위하여 감쇠계수 c_s 와 외력 f 를 0으로 두면,

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q} \\ \ddot{z} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K + k_s\phi_s^2 & -k_s\phi_s \\ -k_s\phi_s & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q \\ z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

와 같이되며 고유진동수는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \omega_1^2 &= \frac{1}{2}(\omega_s^2 + \omega_n^2 + k_s\phi_s^2/M) \\ &\quad - \frac{1}{2}\sqrt{(\omega_s^2 + \omega_n^2 + k_s\phi_s^2/M)^2 - 4\omega_s^2\omega_n^2} \\ \omega_2^2 &= \frac{1}{2}(\omega_s^2 + \omega_n^2 + k_s\phi_s^2/M) \\ &\quad + \frac{1}{2}\sqrt{(\omega_s^2 + \omega_n^2 + k_s\phi_s^2/M)^2 - 4\omega_s^2\omega_n^2} \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서,

$$\omega_s^2 = \frac{k_s}{m_s}, \quad \omega_n^2 = \frac{K}{M} \quad (5)$$

으로 정의된다.

2.2 3자유도계에 대한 가진기 연결의 수치적 모형 해석

앞절의 2자유도계로 해석한 모형을 확장하여 가진기(exciter) 내부의 구동부(armature)가 가진기 프레임에 대하여 상대적인 운동을 하고 있다는 점을 고려하여 가진기 자체를 2자유도계로 간주한 뒤 보와 연결된 진체계를 Fig. 2와 같이 3자유도계로 모형화하여 해석을 시도하였다. 보의 규격은 2자유도의 경우와 같으며, 역시 운동방정식도 Lagrange 식으로 유도하였다. 운동방정식은

$$\begin{aligned} M\ddot{q} + c_1\dot{q} - c_1\dot{z}_1 + (K + k_1\phi_s^2)q - k_1\phi_s z_1 \\ = 0 \\ m_1\ddot{z}_1 - c_1\dot{q} + (c_1 + c_2)\dot{z}_1 - c_2\dot{z}_2 - k_1\phi_s q \\ + (k_1 + k_2)z_1 - k_2z_2 = f_1 \\ m_2\ddot{z}_2 + c_2\dot{z}_1 + c_2\dot{z}_2 - k_2z_1 + k_2z_2 = f_2 \end{aligned} \quad (6)$$

으로 주어지며 1자유도계로 간주된 보의 일반화질량과 일반화강성은 2자유도계의 경우와 마찬가지로 식 (3)으로 정의된다.

한편, 진동수방정식은

$$\begin{aligned} \omega^6 - \left(\frac{k_2}{m_1} + \frac{k_1}{m_1} + \frac{k_1}{m_2} + k_1 \frac{\phi_s^2}{M} + \frac{K}{M} \right) \omega^4 + \left(\frac{k_1}{Mm_1} - k_2\phi_s^2 \right. \\ \left. + \frac{Kk_1}{Mm_1} + \frac{Kk_2}{Mm_1} + \frac{k_1}{m_1} \frac{k_2}{m_2} + \frac{k_1}{Mm_2} - k_2\phi_s^2 \right. \\ \left. + \frac{k_2}{m_2} \frac{K}{M} \right) \omega^2 - \frac{k_1}{m_1} \frac{k_2}{m_2} \frac{K}{M} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

와 같이되는데, 이식을 ω^2 에 대한 3차방정식으로

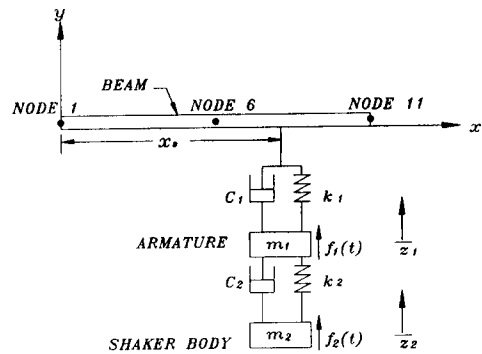


Fig. 2 Three degree of freedom model of structure-exciter interaction

고려하여 그 근을 구하면 고유진동수를 얻을 수 있으며, 이식에서 ω 항들의 계수들은 상수로서 주어진 구조물과 가진기의 질량 및 강성, 그리고 구조물의 진동형에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

Fig. 3에 주어진 것과 같은 계측장비를 사용하여, 11개의 균등한 절점(node)으로 정의된 $25 \times 25 \times 2000$ mm의 양단 자유 균일보에 대하여 부착된 가진기의 질량, 연결봉의 강성, 가진기 부착위치의 변화가 고유진동수 추출에 미치는 영향을 실험적으로 파악하였는데 양단 자유보를 경계조건으로 선택한 이유는 가진기의 부착으로 말미암아 구조물에 불필요한 구속효과를 주지 않기 위해서였다.

11개의 균등 절점으로 정의된 $25 \times 25 \times 2000$ mm의 강철보를 유연한 스프링으로 지지한 뒤 가진기를 수평 방향으로 보에 연결시켰으며 가진기와 보 사이에는 직경 1 mm의 연결봉을 사용하였다. 가진점과 계측점을 정의하는 절점번호 규약은 Fig. 1 및 Fig. 2에 주어진 것과 같이 절점번호 1은 보의 좌단, 절점번호 6은 보의 중앙, 절점번호 11은 보의 우측위치를 나타내게 된다. 가진기의 질량변화에 따른 효과를 파악하기 위해서 추가로 1, 2, 3 kg의 질량체를 가진기에 부착시킨 뒤 계측을 시도하였으며, 연결봉의 강성이 고유진동수 추출에 미치는 영향을 파악하기 위하여 각각 3 cm, 5 cm 길이의 동일한 직경의 연결봉을 사용하였고, 가진기 부착위치의 효과 파악을 위해서는 가속도계를 절점번호 11에 고정부착시킨 뒤 가진기의 부착위치

를 절점번호 1, 3, 6 등으로 변경시킨 뒤 계측을 행하였다. 가진기의 부착위치를 1, 3, 6으로 선정한 것은 절점번호 1에서는 모든 진동형 차수가 가진 되며, 절점번호 3은 1차 진동형의 진동마디에 해당하는 위치이고, 그리고 절점번호 6은 짝수 진동형의 진동마디에 해당하기 때문이다.

비접촉식 가진방법(충격해머를 이용한 가진)과 접촉식 가진방법(부착된 가진기로 가진)의 차이를 비교하기 위한 목적으로 보의 주파수 응답함수를 두 가지 가진방법을 모두 사용하여 추출하였고 보에 가해지는 가진력은 힘측정기(PCB quartz force transducer 218 a)를 사용하여 계측하였으며, 가진기를 구동시키는 가진력의 형태는 랜덤신호(random signal)를 이용하였다.

보의 진동응답은 가속도계(PCB accelerometer 302A07)를 사용하여 계측하였으며, 힘측정기와 가속도계의 전압감도는 각각 2.24 mV/N , 10 mV/g 이다. 힘측정기와 가속도계에 의해 측정된 가진력과 가속도는 PCB 제품의 신호안정기(480D06 power unit)와 전하증폭기(463A dual mode charge amplifier)를 통하여 Onosoki 제품의 신호분석기(CF 350 FFT)에 각각 Ch. a(입력신호)와 Ch. b(출력신호)신호로 제공되었다.

가진기 부착이 고유진동수 추출에 미치는 영향을 각각의 고유진동형 부근에서 자세히 파악하기 위하여 sine sweep 기법을 이용하였으며 가진 주파수의 범위는 보의 5차 진동형까지 포함되는 500 Hz까지로 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

구조물에 부착된 가진장비의 효과가 실험적으로 얻어지는 주파수 응답함수에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 보를 비접촉식으로 가진한 경우, 즉 충격해머(impact hammer)를 사용하여 가진 한 경우의 주파수 응답함수와 접촉식 가진장비를 사용하여 구한, 즉 랜덤신호(random signal)로 가진된 가진기에 의해 입력이 주어진 경우의 주파수 응답함수를 비교한 것이 Fig. 4에 주어졌다. Fig. 4에서, 충격해머를 사용하여 얻은 보의 주파수 응답함수는 미소질량의 가속도계를 제외하고는 부착된 계측장비의 영향이 거의 없으므로 보 자체의 이론적 주파수 응답함수와 같다고 볼 수 있다. 반면, 부착된 가진기를 구동시켜 구한 주파수 응답함수는 충

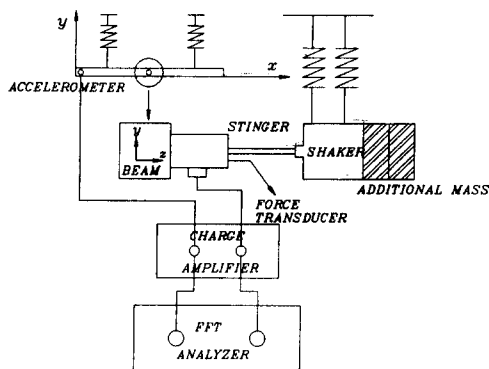


Fig. 3 Instrumentations for obtaining Frequency Response Functions of the test beam

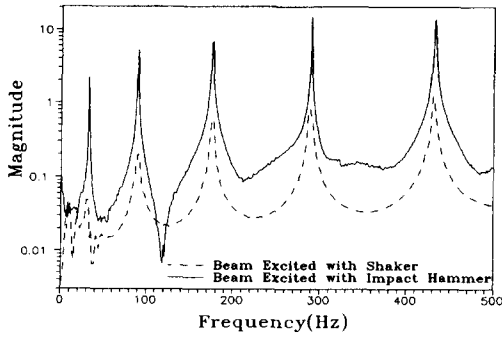


Fig. 4 Comparison of FRF obtained with two different input method

격해머를 사용한 경우와 다르게 나타난다는 것을 알 수 있으며 가진기의 부착효과를 그림에서와 같이 전체적으로 고유진동수에 해당하는 주파수 값들이 서로 다르게 나타나며 감쇠값이 증대된 형태로 나타난다는 것을 알 수 있다. 즉, 두 주파수 응답함수의 차이는 충격함수와 랜덤신호라는 서로 다른 입력신호의 차이에서 오는 것이라기 보다는 가진기라는 계측장비와 보 사이의 상호작용의 존재 유무에 의한 것이라는 점을 나타내고 있다. 만일, 입력신호의 특성상 발생하는 누출오차(leakage error)가 주원인이라면 주파수 응답함수의 크기 차이가 공진주파수에서의 피크 값에서만 발생할 뿐 그림에서와 같이 전 주파수 영역에 걸쳐 나타나지는 않기 때문이다.

Fig. 5는 가속도계를 보의 절점번호 11에 고정시킨 뒤, 충격해머를 사용한 가진력을 보의 절점번호 1에 가했을 때 얻은 보 자체의 주파수 응답함수와 가진기를 보의 절점번호 1에 부착시킨 후 동일한 점에 충격해머를 사용한 가진력을 제공했을 때 얻은 주파수 응답함수를 각각 비교한 것으로써 보 자

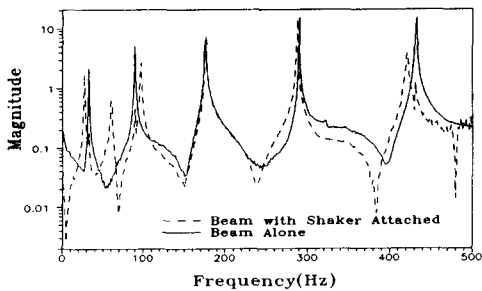


Fig. 5 Comparison of FRF obtained with and without shaker attached

체의 동역학적 특성과 주파수 응답함수를 추출하기 위해 가진기를 부착한 후의 보의 특성은 서로 다르다는 점을 단적으로 보여주기 위한 것이다.

Fig. 5에 의하면 가진기의 부착으로 말미암아 얻어진 보의 주파수 응답함수는 보 자체만의 주파수 응답함수와는 크게 다른 양상을 보여 주고 있으며, 추가의 1자유도에 해당하는 피크점이 보 자체의 1차와 2차 고유진동수 사이에 나타나고 있음을 보여 주고 있다.

이는 가진기의 부착으로 인한 고유진동수의 변화는 보 자체의 1차 및 2차 고유진동형과 가진기의 연결에 따른 추가 자유도계의 연성에 의한 것이라는 점을 단적으로 보여 주고 있다.

Fig. 4 및 Fig. 5에 주어진 주파수 응답함수의 형태를 바탕으로, 접촉식 가진기를 사용할 경우 실험적으로 추출되는 보의 고유진동수가 부착된 가진기의 효과로 말미암아 어떤 형태로 변화되는 가를 가진기의 질량효과, 가진기 연결 기구의 강성효과 및 연결위치의 효과 관점에서 상세히 살펴 보기로 하였다.

가진기를 보의 절점번호 1에 부착시키고, 연결봉의 길이를 5 cm로 고정된 뒤, 부착된 가진기에 질량을 추가시키면서 보를 가진시키기 위해 연결된 가진기의 질량 효과가 측정된 보의 고유진동수 추출에 미치는 영향을 파악한 결과 그림이 Fig. 6.1에 주어져 있다.

Fig. 6(a)은 1.89 kg의 질량을 가지고 있는 가진기 자체만이 부착된 경우, 가진기에 추가의 1 kg ~ 3 kg의 질량이 부가된 경우에 실험적으로 추출된 보의 고유진동수를 보 자체만의 이론적 고유진동수와 비교한 것으로서, 가로축은 보의 이론적 고유진동수를 세로축은 각각의 추가 질량에 대하여 실험에 의해 추출된 보의 고유진동수를 나타내는데, 추출된 보의 고유진동수의 변동량을 보다 상세히 나타내기 위하여 각 진동형마다 서로 다른 척도를 사용하였고, 좌에서부터 1차 2차 진동형 순으로 표시되어 있다.

Fig. 6(a)에 의하면 1차 고유진동형의 경우, 추가로 부착된 질량의 크기가 증대함에 따라 측정된 고유진동수는 이론치보다 낮은 값을 갖게 되며, 최대 3 kg의 질량이 추가로 부착된 경우(가진기 전체의 질량=4.89 kg)는 보 자체의 고유진동수보다 약 9 Hz정도 낮은 값이 계의 고유진동수로 측정됨을 보여 주고 있다.

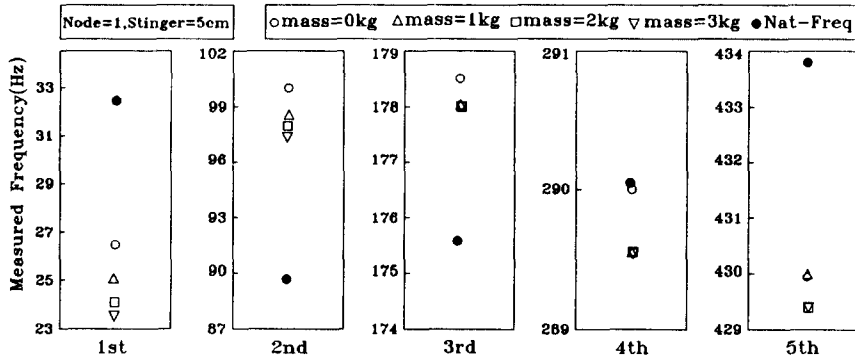


Fig. 6(a) Shift of natural frequencies with varying mass of the exciter (Node=1, Stinger=5 cm)

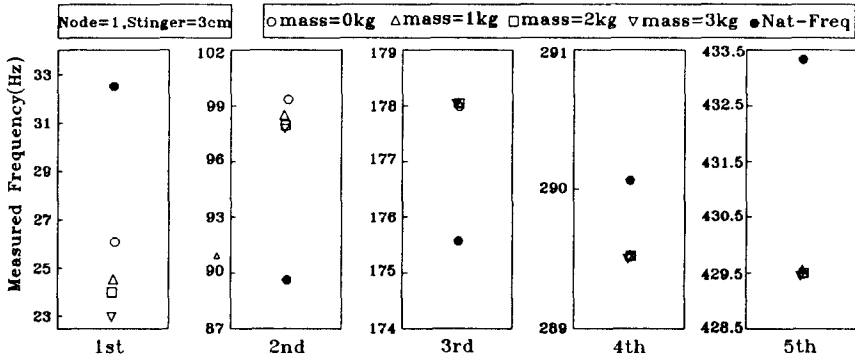


Fig. 6(b) Shift of natural frequencies with varying mass of the exciter (Node=1, Stinger=3 cm)

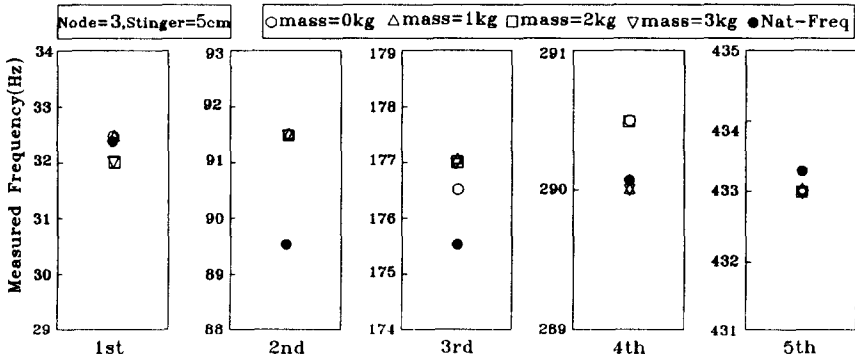


Fig. 6(c) Shift of natural frequencies with varying mass of the exciter (Node=3, Stinger=5 cm)

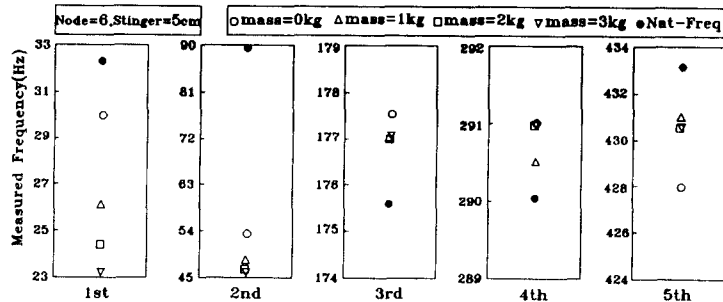


Fig. 6(d) Shift of natural frequencies with varying mass of the exciter (Node=6, Stinger=5 cm)

2차 진동형에 있어서는 1차 진동형의 경우와는 반대로 측정된 계의 고유진동수가 보 자체의 이론치보다 높게 나타난다는 것을 알 수 있으며, 측정치와 이론치의 편차는 부착된 질량의 크기가 클수록 작아진다는 1차 진동형의 경우와는 상반된 모습을 보여주고 있다. 마찬가지로, 3차 진동형의 경우에는 측정된 계의 고유진동수가 보 자체의 고유진동수보다 높게, 4차 진동형의 경우에는 측정된 계의 고유진동수가 보 자체의 고유진동수보다 낮게, 5차 진동형의 경우에도 측정된 계의 고유진동수가 보 자체의 고유진동수보다 낮게 나타남을 알 수 있는데, 3차, 4차 및 5차 진동형에 있어서 측정된 계의 고유진동수 변동량은 1차 및 2차 진동형의 경우에 비해서 그 폭이 적은 것을 알 수 있다.

이 같은 현상은 Fig. 5에 나타나 있는 주파수 응답함수의 분석을 통하여 설명되어질 수 있는데, 본 실험에 사용된 가진기가 연결봉을 통하여 보에 부착될 경우, 추가 자유도계의 고유진동수가 보의 1차 및 2차 고유진동수 사이에 오게 되며, 본 논문에서는 추가 자유도계와 보 자체의 고유진동형 사이의 연성은 보의 1차 및 2차 진동형에서 가장 크게 나타나리라는 점을 말해주고 있다. 또한, 추가 자유도계와의 연성에 의하여 발생하는 보의 1차 및 2차 고유진동수의 변화량이 1차 고유진동형의 경우에는 질량이 증대될 수록 크며, 2차 진동형의 경우에는 질량이 증대될 수록 적어진다는 사실 또한 추가 자유도계의 고유진동수가 질량이 증대될 수록 적은 값을 갖는다는 사실로부터 설명되어질 수 있다.

Fig. 6(b)는 Fig. 6(a)과 동일한 조건하에서의 실험에서 연결봉의 길이만을 3 cm로 변동시켰을 때 추출된 고유진동수의 변동량을 보 자체의 이론치와 비교한 그림으로, 그 일반적 경향이 Fig. 6(1)과 거의 일치함을 알 수 있다. 즉, 동일한 질량의 가진기가 부착된 경우, 연결봉의 길이변화는 추가 자유도계의 고유진동수 변화를 의미하므로 앞서 제시한 2자유도계의 모형에 의하면, 연결봉의 길이가 다를 경우 연성되는 추가 자유도계의 고유진동수의 값이 달라지며 따라서 측정되는 고유진동수의 값도 서로 달라져야 한다. 그러므로, 연결봉에 의하여 보에 부착된 가진기의 효과를 나타내는 추가 자유도계의 효과는 연결봉의 강성과 무관한 것으로 제시되어야 한다는 사실을 알려 주고 있다.

본 논문에서 제시된, 가진기가 부착된 보의 고유

진동수 변화량을 파악하기 위한 연결된 계의 수학적 모형에서, 추가의 1자유도계만을 고려한 해석이 불완전하다는 사실이 위의 실험결과로부터 유추될 수 있다. 즉, 가진기와 연결봉으로 구성된 추가 일자유도계의 거동이 보의 진동 응답과 상호 작용을 일으키고, 그 현상이 보의 고유진동수 변동량에 영향을 미치는 인자라면, 연결봉의 길이 변화, 즉 강성의 변화는 측정된 고유진동수의 $\sqrt{3/5}$ 의 비(5 cm 및 3 cm 연결봉의 강성비)에 해당하는 만큼의 차이가 있어야 하기 때문이다. 따라서 연결봉의 강성과 무관한 추가 자유도계의 거동을 고려한 모형이 되어야만 보-가진기 연결 구조물의 고유진동수 변동현상을 설명해 줄 수 있다고 판단되는 것이며 3자유도계 모형의 필요성을 뒷받침해 주고 있다.

Fig. 6(c)은 가진기를 보의 절점번호 3에 부착시킨 뒤, 가진기의 질량을 차례로 증대시키면서 추출한 고유진동수를 연결봉의 길이가 5 cm의 경우에 대하여 나타낸 것이다. 보의 절점번호 3에 가진기가 부착된 경우는 가진기가 보의 절점번호 1에 부착된 경우에 비하여 측정된 고유진동수의 변동량이 무척 작다는 것을 알 수 있다. 3차, 4차 및 5차 고유진동형의 경우는 말할 것도 없고, 1차 및 2차 고유진동형에서의 고유진동수 변동량이 상대적으로 미미하다는 것을 알 수 있는데, 이는 절점번호 3이 보의 1차 고유진동형의 마디에 근접한 점이며, 이 위치에 부착된 추가 자유도계의 연성 효과는 극소화된다는 식 (4)의 타당성을 잘 입증해 주고 있다.

이와 같은 실험결과는 종래에 준수되어 왔던 진동실험의 큰 원칙을 벗어나는 현상으로서 주목하여야만 한다. 즉 일반적인 진동실험, 특히 실험적 모드해석법 실험에 있어서 유념해야 할 사항은 주어진 특정진동형을 가진하고 계측하기 위해서는 해당 진동형의 비마디점(antinode)에 가진점과 진동응답계측점이 놓여져야 한다는 것인데, 본 실험의 결과에 의하면 가진기의 연결로 말미암은 연성의 우려가 있을 경우에는 해당 진동형의 절점에 가진 위치를 설정하여야 만이 연성효과가 최소가 된다는 상반된 결론을 얻게 된다.

Fig. 6(d)는 가진기를 보의 짝수 진동형의 마디에 해당되는 절점번호 6에 부착시킨 뒤, 가진기의 질량을 차례로 증대시키면서 측정된 고유진동수를 역시 연결봉의 길이가 5 cm인 경우에 대하여 나타낸 것으로, 3차 및 4차 진동형의 경우를 제외하고는 Fig. 6(a) 및 Fig. 6(b)에서 나타난 것과 같이

고유진동수 변동량이 상당히 큰 폭으로 표시되고 있다.

특히 2차 진동형에서의 고유진동수의 측정값이 상당히 큰 폭으로 변하고 있는데, 이는 Fig. 5에 주어진 주파수 응답함수에 나타난 추가 자유도계의 피크에 해당하는 진동수의 값들로서 연결봉에 의해 보에 부착된 가진기 자체가 나타내는 추가 자유도계의 고유진동수 값이 예측된 것이다.

5. 수학적 모형을 이용한 고유진동수 변동량 예측

상기 실험결과들을 바탕으로, 가진기의 연결 구조로 인한 구조물의 고유진동수 변화효과를 가장 적절히 반영할 수 있는 제시된 2자유도계 모형과 3자유도계 모형의 진동특성치들을 결정하였다. 즉, 식 (4)와 식 (7)의 m_s 에 해당하는 값으로 가진기 전체의 질량을 사용하는 것이 정확한지, 아니면 가진기 구동부만의 질량을 반영하는 것이 정확한지, 그리고 k_s 의 값으로는 연결봉의 강성과 가진기 구동부의 강성중 어느 것을 사용하는 것이 정확한 예측 모형인 지에 대한 확인 작업을 통하여 제시된 모형의 타당성을 검증하였다.

보의 일반화질량 M 및 일반화강성 K 는 각각의 진동 차수에 대한 보의 고유진동형으로부터 계산된 값을 사용하였고, 각 진동형에 대한 고유진동수의 변화량 예측은 2자유도계 모형에 대해서는 주어진 진동 차수에 해당하는 보의 거동과 가진기와의 결합으로, 또 3자유도계 모형에 대해서는 보의 거동과 가진기 내부 구동부의 거동 그리고 외부 몸체와의 결합으로 단순화시켜서 해석하였다.

Table 1에 2자유도계 모형에 대하여 수치적으로

계산된 여러 경우에 대한 예측결과가 주어지고 있다.

Table 1에 나타난 계산결과들을 검토하면, k_s 의 값으로 가진기 구동부의 강성 값을 사용한 경우, 고유진동수 변화거동이 거의 나타나지 않는다는 것을 알 수 있다. 이는 가진기 구동부의 강성이 실험 대상물의 강성에 비해 매우 낮기 때문에 연결된 가진기에 의한 추가 자유도의 고유진동수가 연성을 일으키게 되는 진동수 범위밖에 있게 되므로 연성효과가 거의 나타나지 않는다는 것을 의미하며, 이와 같은 모형을 통하여 얻을 수 있는 결론으로서 가진기 구동부는 유연해야 한다는 것은 실제 전통식 가진기의 설계지침 사항이기도 하다. 그리고, m 의 값으로 가진기 구동부의 질량과 k_s 의 값으로 연결봉(stinger)의 강성을 사용했을 때 얻은 각 고유진동수의 결과가 보에 가진기가 연결된 모형을 예측함에 있어서 가진기의 부착효과를 적절히 반영하는 모형임을 알 수 있다.

연결봉의 강성변화가, 그리고 가진기에 추가된 추가질량의 효과가 구조물의 고유진동수 변동에 미치는 영향이 극히 미약하다는 앞서의 실험결과를 미루어 볼 때, 부착된 가진기의 연성효과를 반영하는 모형을 2자유도계만으로 보는 것은 만족한 모형이 될 수 없다는 것을 의미한다. 따라서, 보와 가진기 내부의 구동부, 그리고 가진기 구동부를 감싸고 있는 외부 몸체를 각각 독립된 계로서 간주하는 Fig. 2와 같은 3자유도계의 모형을 정의하여 가진기 질량의 증가는 가진기 내부의 구동부(m_1)에는 영향을 미치지 않고 가진기 외부 몸체에 해당하는 m_2 가 증가하는 것으로 보고, 보와 가진기 구동부가 연결된 연결봉의 강성(k_1)과 가진기 몸체와 연결되는 구동부의 강성(k_2)으로 분리하여 연결봉 길

Table 1 Predicted natural frequencies of 2-degree of freedom model (Input node #1, Output node #11)
unit : Hz

Model case		Mode	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
Beam alone			32.5	90.9	176.3	290.0	432.5
Beam + Shaker	Measured		26.5	100.0	178.5	290.5	429.5
	Shake mass	Stinger stiffness	25.0	68.5	131.2	210.0	293.0
		Armature stiffness	30.0	91.7	180.0	297.2	444.0
	Armature stiffness	Stinger stiffness	31.9	88.2	172.4	284.9	424.9
		Armature Stiffness	33.3	91.7	179.8	297.2	444.0

이 변화에 대한 효과를 잘 반영하는 모형으로 치환하였다.

즉, 이러한 3자유도계 모형은, Fig.6 등에서 나타난 것과 같이 가진기의 질량 증가가 고유진동수 변동량에 미치는 영향이 비교적 적다는 실험결과 및, 연결봉의 길이 변화가 고유진동수 변동량에 미치는 영향이 거의 미미하다는 실험결과를 모두 적절히 반영시켜 줄 수 있는 모형인 것이다.

Table 2는 3자유도계 거동에 대한 수치적으로 계산된 모형에 대해서 예측된 결과와 실험적으로 얻어진 결과를 비교한 것이며, Table 3은 수치적 모형에 사용된 계의 특성치들을 나타낸다.

Table 2에 주어진 6차 진동형의 고유진동수는 3자유도계로 이루어진 전체계에 대하여 가진기 구동부(m_1)와 연결봉(k_1)으로 이루어진 자유도계의 고유진동수에 해당하는 값으로, 그 값이 보의 고유진동수에 비하여 높기 때문에 연성효과에 기여하는 바가 매우 적다는 것을 의미한다.

Table 2에 주어진 수치적으로 계산한 결과와 실험결과를 검토하면, Fig.5에서 나타난 주파수 응답함수에서 추가의 일자유도에 해당하는 피크점이 보 자체의 1차와 2차 고유진동수 사이에 분포하는 현상과 마찬가지로 가진기의 부착으로 말미암아 실험적으로 예측된 고유진동수와 수치적으로 계산된 고유진동수에서도 1차 및 2차 고유진동수 사이에 연성을 일으킨 추가 자유도계의 고유진동수에 해당하는 값이 나타난다는 것을 보여주고 있다.

가진기를 부착했을 때 예측된 보의 고유진동수의 변화는 보 자체만 있을 때 예측된 1차 및 2차 고유진동수 사이에 가진기의 연결에 따른 추가 자유도계의 연성이 존재하므로 보 자체만의 1차 고유진동수보다 낮은 값으로, 2차 고유진동수는 보 자체만의 진동수보다 높은 값으로 나타남을 알 수 있다. 3차, 4차, 그리고 5차 진동수의 변화는 보 자체만 있을 때 예측된 고유진동수와 큰 차이가 나지 않음을 보여주고 있으며, 이는 가진기의 부착으로 인해

Table 2 Predicated and Measured natural frequencies of 3-degree of freedom model(Input node #1, Output node #11) unit: Hz

Model case		Mode	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	6 th	
Beam+Exciter (Mass=0 kg)	Measured		26.5	60.0	100.0	178.5	290.0	429.5	None
	Predicted		28.8	60.2	93.8	176.9	290.6	433.2	3794.5
Beam+Exciter (Mass=1 kg)	Measured		25.0	58.0	98.5	178.0	289.5	429.5	None
	Predicted		26.7	52.3	93.2	176.8	290.6	433.2	3794.5
Beam+Exciter (Mass=2 kg)	Measured		24.0	56.0	98.0	178.0	289.5	429.0	None
	Predicted		24.8	48.5	92.9	176.8	290.6	433.2	3794.5
Beam+Exciter (Mass=3 kg)	Measured		23.5	55.0	97.5	178.0	289.5	429.0	None
	Predicted		23.1	46.4	92.8	176.8	290.6	433.2	3794.5

Table 3 Parameters used in 3-degree of freedom model

Paramter	Mode	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
M (kg)		9.78742	9.78749	9.78749	9.78753	9.77218
K (N/m)		4.0736e05	3.0953e06	1.1896e07	3.2507e07	7.2425e07
m_1 (kg)				0.03		
m_2 (kg)				1.86		
k_1 (N/m)				0.17e08		
k_2 (N/m)				0.21e06		

나타나는 추가 자유도계의 연성이 본 실험의 경우에서는 1차 및 2차의 저차 고유진동형에 한정된다는 것을 의미한다. 수치적으로 예측된 결과도 마찬가지로 추가 자유도계로 인한 연성효과가 1차 및 2차 진동형의 사이에 나타나고 있음을 보여주고 있다.

추가질량에 의한 효과도 4장에서 언급한 것과 마찬가지로 추가의 질량(1 kg, 2 kg, 3 kg)이 증가할수록 1차 및 2차 고유진동형은 실험적으로 계측된 결과와 수치적으로 예측된 결과가 조금씩 낮게 분포하고 3차, 4차, 그리고 5차 고유진동형에서는 거의 변동이 없음을 보여주고 있다.

6. 결 론

구조물의 진동특성치들을 실험적으로 추출하기 위해 접촉식 가진장비를 사용할 경우, 구조물과 가진기의 연성효과에 의해 고유진동수 및 진동 특성치들이 영향을 받게 되며, 이의 효과가 고려되지 않은 실험결과로부터는 잘못된 해석결과가 도출될 수 있다.

부착된 가진기의 결합구조가 고유진동수의 변화에 미치는 영향의 정량적 파악을 위해서는 가진기 자체의 고유진동수와 연결봉의 축방향 강성이 고려된 잉여 자유도계의 효과를 고려해야 하는데, 부착된 가진기로 말미암아 발생하는 구조물의 고유진동수 변화량은 가진 되고 있는 구조물의 특정 진동형에서의 일반화질량 및 진폭 그리고 부착된 가진기 구동부의 강성 및 가진기 질량에 의해 그 크기가 결정된다.

가진기가 부착됨으로 해서 발생하는 질량효과는 가진기 질량 자체에 의한 것이라기 보다는 구동부와 몸체를 연결하는 가진기 내부 결합체의 강성과 가진기의 몸체 질량으로 인해 형성되는 추가 자유도계의 거동과 구조물 자체의 연성에 의해 일어나는 것이다. 따라서, 이 추가 자유도계의 고유진동수가 계속하고자 하는 구조물의 고유진동수 범위에서 벗어나야만이 연성의 효과가 최소화될 수 있다.

일반적으로 가진기 자체의 고유진동수가 구조물의 고유진동수에 비하여 매우 낮고, 연결봉의 강성이 충분히 큰 경우 구조물과 가진기 사이의 연성효과가 가장 적으며 이때 가장 이상적인 실험결과를 얻을 수 있다.

참고문헌

- (1) Hu, X. and McConnell, K. G., 1992, "An Advanced Model for Stinger Force, Motion and Energy Transmissibilities," *IJAEM*, Vol. 7, No. 4, pp. 271~281.
- (2) Anderson, I. A., 1990, "Avoiding Stinger Rod Resonance Effects on Small Structures," *Proceeding of 8th IMAC*, pp. 673~678.
- (3) Mitchell, L. D and Elliott, K. B., 1984, "A Method for Designing Stingers for Use in Mobility Test," *Proceeding of 2nd IMAC*, pp. 872~876.
- (4) Ewins, D. J., 1984, *Modal Testing*, Research studies Press. Letchworth, London, pp. 105~146.
- (5) Hieber, G. M., 1988, "Non-Toxic Stingers," *Proceedings of 6th IMAC*, pp. 1371~1379.
- (6) Soucy, Y. and Deering, D. W., 1989, "Effects of Data Acquisition Conditions on Modal Testing of a Simple Structure," *Experimental Techniques*, Vol. 13, No. 5, pp. 35~39.
- (7) Buzdugan, G. and Mihailescu, E. and Rades, M., 1986, *Vibration Measurement*, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, pp. 189~210.
- (8) Dowell, E. H., 1979, "On Some General Properties of Combined Dynamical Systems," *ASME J. of Applied Mechanics*, Vol. 46, pp. 206~209.
- (9) Bergman, L. A. and Nichol森, J. W., 1985, "Forced Vibration of a Damped Combined Linear Subsystem," *ASME J. of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design*, Vol. 107, pp. 275~281.