

< 논 문 >

가진기의 동적 거동 해석

Analysis on the Dynamic Behavior of Shaker

한 상 보* · 김 윤 환** · 송 장 규***

Sangbo Han, Yun Whane Kim and Jang Kyu Song

(1997년 5월 22일 접수 ; 1997년 7월 25일 심사완료)

Key Words : Test Structure(실험대상 구조물), Vibration Parameters(진동 파라미터), stinger(연결핀), Shaker(가진기), Structure-Shaker interaction(구조물-가진기 상호간섭작용)

ABSTRACT

It is a well known fact that the shaker used in the vibration test interacts with the test structure and thus influences the test results. A two degree of freedom model of shaker is suggested and the vibration parameters of this model is experimentally extracted. According to this experimental results, the vibration parameters of the shaker can vary with respect to the test structure as well as the stinger used in the connecting mechanism. It is also found that the vibration parameters of the shaker provided by the manufacturer can not be accurate and these parameter values should be reevaluated based on the test environments.

기 호 설 명

- m_A : 가진기 구동부 질량
- m_B : 가진기 기저부 질량
- k : 2자유도계로 치환된 가진기의 등가 강성계수
- c : 2자유도계로 치환된 가진기의 등가 감쇠계수
- k_s : 연결핀의 등가 강성계수
- c_s : 연결핀의 등가 감쇠계수
- M : 실험대상 구조물의 질량
- ω : 고유 진동수
- F : 가진력
- ζ : 감쇠비

1. 서 론

초정밀 기계에서부터 대형기계에 이르기까지 최근의 고속화, 경량화에 추세에 비추어 볼때 동하중에 의한 구조물의 거동에 대한 정확한 해석은 갈수록 중요성이 커진다고 할 수 있다. 구조물의 동특성을 파악하기 위한 실험적 해석방법을 통해서 구조물에 계획된 입력을 가하고 그에 따른 응답을 측정하여 주파수 응답함수를 얻은 후 구조물의 고유진동수 및 감쇠비, 모드 형상 등을 파악할 수 있고 이러한 방법으로 얻은 동특성을 이용해서 구조물의 설계변경을 행할 수 있다. 따라서 구조물의 동특성에 대한 신뢰성 있는 정보를 구하기 위해서는 정확한 실험의 수행이 선행되어야 한다는 것은 자명한 사실이다. 구조물의 동특성을 실험적으로 파악하기 위해서는 대상 구조물에 진동을 일으키는 힘을 제공하고 그에 따른 응답을 측정하여야 하는데, 구조물에 힘

* 정회원, 경남대학교 공과대학 기계공학부

** 경남대학교 대학원

*** 삼성라디에이터(주)

을 제공하기 위하여 보편적으로 사용되는 것이 가진기이다. 전동식 가진기(electromagnetic shaker)는 일반적으로 실험적 모드 해석시 계획된 가진력을 제공하여 주파수 응답함수를 얻고자 할 때 사용한다. 따라서 가진기의 동적 특성을 이해하는 것은 실험적 모드 해석 작업에 사용되는 측정 시스템의 이해 측면 뿐만 아니라 해석 결과의 타당성 검증에도 필수 불가결한 사항이다. 일반적으로 가진력을 제공하기 위하여 가진기를 구조물에 부착시킬 경우, 부착될 가진기와 구조물의 상호 간섭작용으로 말미암아 구조물의 진동응답에 부수적인 구속효과를 주게 된다는 사실이 알려져 있다^(1,2). 이러한 구조물-가진기 상호간섭작용으로 인한 실험적 오류를 제거 시켜주기 위한 방법으로 3채널 측정법을 이용한 주파수 응답함수의 추출⁽³⁾, 질량제거기법⁽⁴⁾, 연결핀의 적용과 그 특성 이해⁽⁵⁻⁷⁾ 등의 연구결과들이 발표되었으나 가진기 자체의 동특성을 고려한 실험대상 구조물의 진동특성 파악에 대한 연구 결과는 그리 흔하지 않다.

실험적 모드 해석법에 있어서 전동식 가진기를 입력 수단으로 사용할 경우 가진기 내부의 전자력에 의해 발생하는 가진력은 가진기 운동부(armature)의 왕복운동에 의한 기계적인 힘으로 변환되어 구조물에 전달되게 되는데, 이 경우 단일 방향의 힘이 전달될 수 있도록 하기 위해 고안된 연결 기구로 연결핀을 사용하게 된다.

시스템의 동적 거동을 실험적으로 파악하고자 하는 경우, 특히 구조물과 측정장비가 접촉식인 경우 정확한 해석을 어렵게 만드는 여러 가지 요인이 있다. 예를 들어 최초의 가진 신호로부터 실험대상 구조물에 입력되기 직전까지의 과정, 즉 증폭기, 가진기로 연결되는 가진 시스템의 주파수 응답함수의 비선형성, 힘측정기와 구조물의 진동응답으로 출력되는 과정에서의 가속도계의 부가질량효과 그리고 실험에 대한 가정에서의 오차 즉, 경계조건 구현의 타당성, 측정시 각 단계에서의 잡음 등으로 인하여 이론적인 해석과는 차이가 난다. 본 연구에서는 진동 실험에 사용되는 가진기와, 주어진 가진기가 실제 실험상황에서 구조물에 연결될 경우의 동역학적 특성을 파악하고 이를 바탕으로 실험에 사용된 가진기의 특성이 실험대상 구조물에 끼치는 영향을 파악하기 위한 수학적 모형을 설정하여 정확한 실험방법론의 확립을 시도해 보려고 한다.

2. 가진기의 동역학적 모형

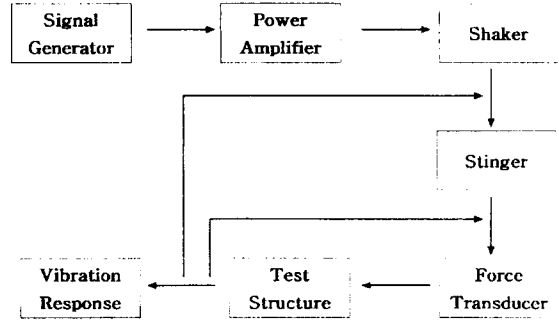


Fig. 1 Schematics of measurement system for modal analysis

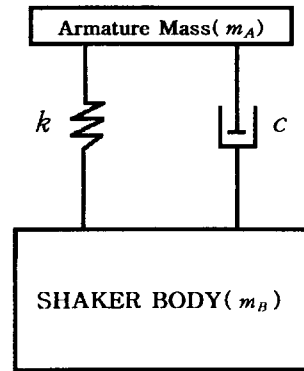


Fig. 2 Two degree of freedom model of shaker

실험적 모드 해석법의 실험 장치도는 Fig. 1과 같이 구성되어 있다고 볼 수 있다.

본 연구의 목적은 가진력을 제공받은 구조물과 가진기 사이의 상호작용에 대한 관계를 설명할 수 있는 가진기 모형의 설정에 있다. 전동식 가진기는 자체 중량에 비하여 비교적 넓은 범위의 가진력과 가진 주파수를 제공할 수 있기 때문에 진동 실험시의 가진기로 널리 사용되는데, 전자장을 제공하는 비교적 큰 중량의 기저부(base)와 가진 운동을 발생시키는 운동부 즉, 아마추어(armature)로 크게 구성되어 있다. 가진기의 운동부인 아마추어는 다시 운동판(table), 연결대(spider), 코일(coil)로 구성되어 있는데, 연결대는 운동판과 코일을 연결하는 구조물로 일반적으로 미세한 직경의 원형기둥들로 결합되어 있거나 단일구조의 박판으로 된 원형실린더로 되어 있으며, 코일은 비자성 철심(nonmagnetic core)에 감겨져 있으면서 강력한 자장을 발생시키며 원형의 철심 자극 사이에서 가진 축방향으로 자유롭게 움직이게 되어 있다. 따라서, 아마추어는 횡방향과 회전방향으로는 강성이 높고 운동축 방향으로의 강성이 낮은 스프링에 의해

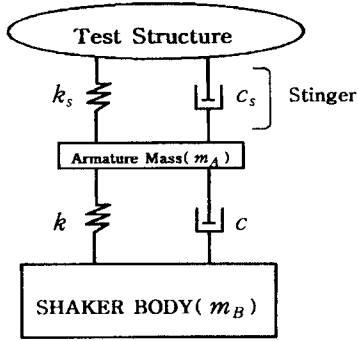


Fig. 3 Dynamic model of shaker connected to the test structure through a stinger

여 기저부에 연결되어 있다고 볼 수 있으며 실험대상 구조물과 연결되어 연성 작용을 하게되는 가진기 자체의 동역학적 모형은 Fig. 2와 같은 2자유도계로 치환할 수 있다.

Fig. 2에 주어진 모형의 장점은 구조물-가진기 상호작용을 해석하기 위해 과거로부터 제시되어 왔던 단순 질량체로 간주된 가진기의 모형을 포함할 뿐 아니라, 실험에 사용되는 가진기의 가진 방법에 따라 변화하게 되는 다양한 조건을 표현할 수 있다는 점이다. 예를 들면 진동 실험시 가진기가 지면에 고정되어 사용될 경우에는 Fig. 2에서 $m_B \rightarrow \infty$ 인 경우로 가진기의 기저부(몸체)를 고정 경계조건으로 치환할 수 있으며 가진기가 가진 방향에 대하여 수직인 탄성 지지대에 매달려 수평 방향의 가진력을 전달할 경우에는 가진기의 기저부를 강체 질량으로 치환할 수 있다는 것이다. 또한, 가진기가 모드 해석 실험에 사용될 경우 구조물과의 결합 형태를 Fig. 3과 같이 모형화하여 연결편의 진동 특성을 고려해 줄 수 있다.

3. 실험 장치 및 방법

본 연구에서 사용된 가진기 구동 신호는 신호 발생기가 내장된 신호 분석기(Onosokki CF 350)로부터 제공되는 사인스weep(sine sweep) 및 랜덤(random) 신호를 사용하였다. 제공된 가진 신호는 증폭기를 통하여 가진기로 제공되는데 본 연구에서 사용된 2개의 가진기는 모두 내부의 전자력이 운동부를 기계적인 운동으로 바꾸는 전동식 가진기이다. 가진기로부터 전달되는 가진력은 힘측정기(PCB 218A)를 통해 실험 대상 구조물에 전달되고 진동 응답은 가속도계(PCB 302A07)를 통하여 측정하였다. 힘측정기와 가속도계로부터 측정된 신호는 각각 전하증폭기(PCB 463A)와 신호 안정기(PCB 482A04)

를 통해 신호분석기 내로 들어가며 위의 과정을 거쳐서 들어간 신호는 FFT 프로그램에 의해 주파수 응답함수를 계산한다. 실험에 사용된 시편으로는 가진기 자체의 특성을 파악하기 위해서 3가지 서로 다른 질량체(25g 가속도계, 426g, 1kg의 질량체)를 가진기와 직접 체결함으로써 가진기 구동부의 m_A , k , c 를 파악하였다. 또한, 연결편을 체결한 상태에서 가진기를 구동하여 연결편의 등가 강성계수와 등가 감쇠계수 k_s , c_s 를 추출하였다.

4. 가진기의 동역학적 특성치 추출

가진기의 동특성이 실험대상 구조물에 미치는 영향을 고려하기 위해서는 Fig. 2 및 Fig. 3에 주어진 등가의 모형들에 대한 진동 특성치, 즉 m_A , m_B , k , c , k_s , c_s 등에 대한 정확한 값을 파악하여야 한다.

우선, m_A 와 k 를 추출하기 위해서 Fig. 4와 같이

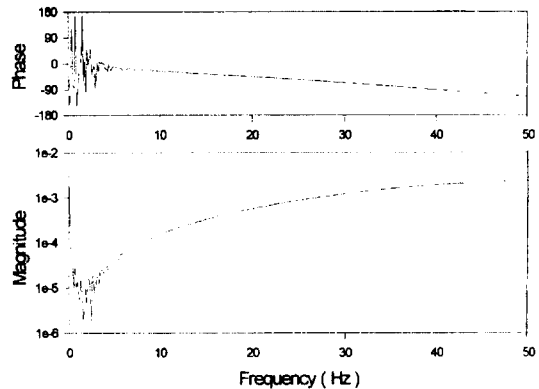


Fig. 4 Test structures to experimentally extract vibration parameters of the shaker

Table 1 Attached masses to measure the natural frequency of the shaker in Fig. 4 (unit : kg)

	Mass 1	Mass 2	Mass 3
Shaker A	0.025	0.426	1
Shaker B	0.025	0.261	1

Table 2 Natural frequencies of the test structures in Fig. 4 (unit : Hz)

f_n	Type (1)	Type (2)	Type (3)
Shaker A	39.75	27.1	20.7
Shaker B	35.55	29.34	21.9

서로 다른 3개의 질량체가 체결된 가진기에 대한 고유진동수를 실험적으로 구하였으며 주어진 실험대상 물에 대응하는 질량체의 제원은 Table 1에 주어졌다.

Fig. 4에 주어진 가진기의 모형에 대한 진동 특성치들을 실험적으로 추출하기 위하여 주어진 입력 신호와 가진기 운동부의 가속도 사이의 주파수 응답함수를 구한 것이 Fig. 5에서 Fig. 8까지에 걸쳐 주어졌다. 또한, Table 2는 실험적으로 파악한 실험대상 질량체들에 대한 고유진동수이다.

가진기 구동부의 질량 m_A 와 등가 강성계수 k 는 주어진 모형에서 파악된 값들로부터 다음의 식 (1)을 사용하여 구할 수 있다.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{M + m_A}} \quad (1)$$

즉, 각 실험 대상 구조물의 고유진동수 ω 는 Fig.

5~7의 주파수 응답함수들로부터 구할 수 있으며, 실험대상 구조물의 질량 M 은 기지의 값이므로 m_A, k 에 대한 2개의 연립 방정식을 만들 수 있는 고유진동수 ω 에 관한 실험치만 얻게되면 구하고자 하는 값 m_A, k 를 찾을 수 있다. 또한, 가진기의 등가 감쇠계수는 일자유도계 주파수 응답함수의 위상각 곡선으로부터 해당 모형의 감쇠비를 파악해 내고 그로부터 등가 감쇠계수를 파악해 낼 수 있다. 이로부터 도출된, 본 실험에 사용된 2개의 가진기에 대한 진동 특성치들을 실험적으로 파악하여 그 값을 사양서에 제시된 값들과 비교한 것이 Table 3과 4에 주어졌다.

한편, 모드 실험을 위하여 연결편이 가진기에 체결되었을 경우, 가진기 구동부의 질량과 실험대상 구조물이 연결편을 통하여 체결된 2자유도계로 치환이 가능하며, 치환된 모형에 대한 운동방정식은 식 (2)와 같이 주어질 수 있다.

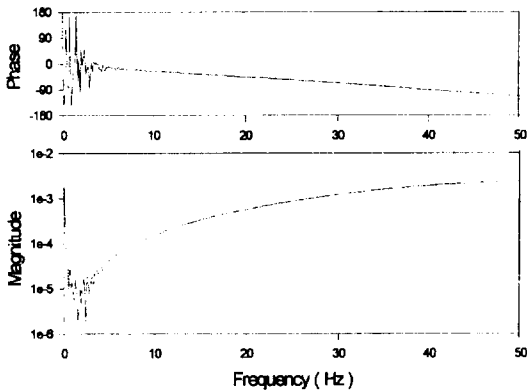


Fig. 5 Bode diagram of FRF of shaker A with bare table up to 50 Hz

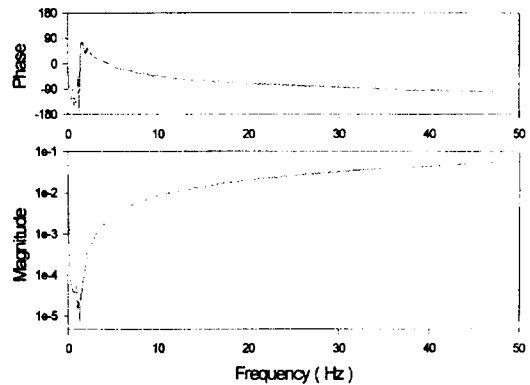


Fig. 7 Bode diagram of FRF of shaker B with bare table up to 50 Hz

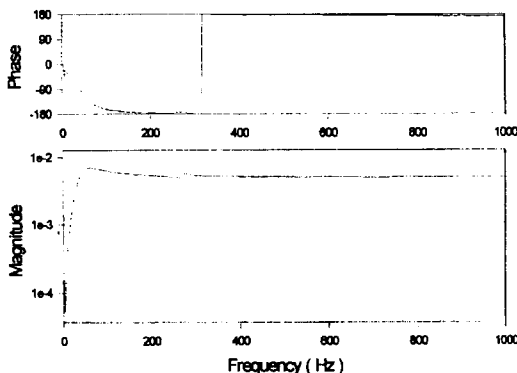


Fig. 6 Bode diagram of FRF of shaker A with bare table up to 1000 Hz

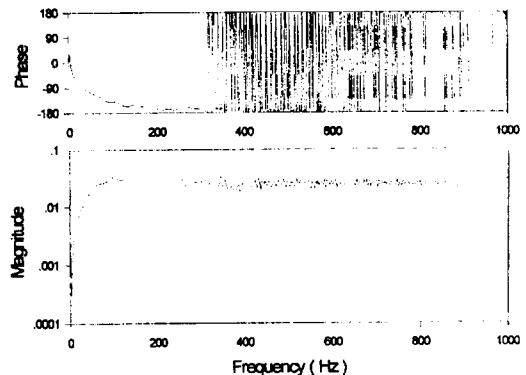


Fig. 8 Bode diagram of FRF of shaker B with bare table up to 1000 Hz

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} c+c_s & -c_s \\ -c_s & c_s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} k+k_s & -k_s \\ -k_s & k_s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

위 운동방정식으로 나타내어지는 2자유도계의 고유진동수는 특성방정식

$$\begin{vmatrix} -m_1\omega^2 + k + k_s & -k_s \\ -k_s & -m_2\omega^2 + k_s \end{vmatrix} = 0 \quad (3)$$

의 해로 주어지며 기지의 질량체들에 대한 값과 실험적으로 측정된 고유진동수들을 이용하면 구하고자 하는 연결핀의 등가 강성계수 k_s 는

$$k_s = \frac{m_1 m_2 \omega^4 - m_2 k \omega^2}{m_1 \omega^2 - k + m_2 \omega^2} \quad (4)$$

으로 나타내어지는데, 여기서 m_1, m_2 는 각각 가진기 구동부와 실험 대상체로 부착된 가속도계의 질량이며 k 는 가진기의 등가 강성계수, ω 는 연결핀을

Table 3 Comparison of experimentally extracted vibration parameters of shaker A with the specification value (V405 vibrator manufactured by ling dynamic systems)

	m_A (kg)	m_B (kg)	k (KN/m)	c (kg/sec)
Specification value	0.426	63.074	17.5	Not given
Experiment value	0.348	63.152	23.20	89.9

Table 4 Comparison of experimentally extracted vibration parameters of shaker B with the specification value (Model 1501 manufactured by environmental equipment)

	m_A (kg)	m_B (kg)	k (KN/m)	c (kg/sec)
Specification value	0.45	33.55	2.94	Not given
Experimental value	0.525	33.475	27.10	119.3

Table 5 Dimensions and vibration parameters of the stinger used in the experiment

Dimensions		Vibration parameters	
Material	Polyethylene	k_s	2.75×10^5 N/m
Length	300 mm		
Diameter	6 mm	c_s	1.66 kg/sec

체결한 상태에서 실험적으로 구한 2자유도계의 고유진동수이다.

연결핀의 등가 감쇠계수 c_s 는 주파수 응답함수로부터 모드 감쇠비를 추출한 뒤 그로부터 다음의 식 (5)에 의해 구할 수 있다.

$$c_s = 2\zeta m \omega_n \quad (5)$$

Fig. 9와 10은 가속도계를 연결핀에 연결된 실험 대상 구조물로 간주한 경우의 2자유도계에 대한 주파수 응답함수들이며, 이 주파수 응답함수들의 해석을 통하여 얻은 본 실험에 사용된 연결핀의 진동 특성이 Table 5에 주어져 있다.

5. 실험 결과의 고찰

Fig. 5에서 Fig. 7에 걸쳐 주어진 가진기의 주파수 응답함수에 의하면 사양서에 주어진 가진기의 작동주파수 영역보다 낮은 주파수대에서는 가진기의 특성이 선형적이지 못하다는 것을 확인할 수 있으며,

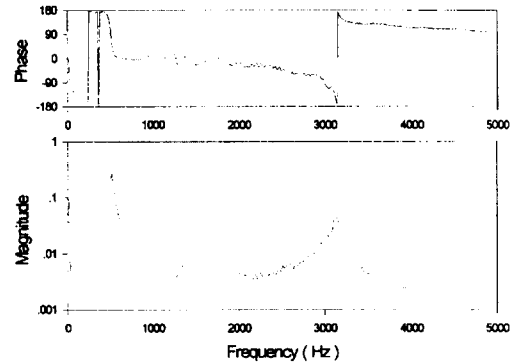


Fig. 9 Bode diagram of FRF of shaker A with stinger up to 5000Hz

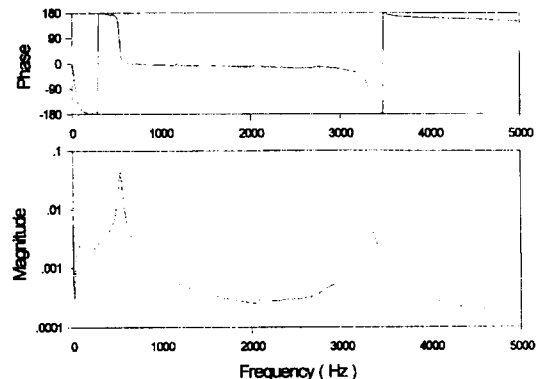


Fig. 10 Bode diagram of FRF of shaker B with stinger up to 5000Hz

가진기 운동부의 감쇠비가 비교적 높은 값을 갖도록 하여 작동 주파수 영역 내에서 주파수 응답함수의 값이 일정하도록 제작되고 있다는 사실을 알 수 있다. 일반적으로 가진기의 제조업체에서 제공되는 사양과 실제 특정 실험에 사용되는 가진기의 진동 특성치 사이에는 큰 차이가 있다는 것을 Table 3과 Table 4에 주어진 결과들로부터 확인할 수 있다.

가진기와 실험 대상물을 연결할 때 사용되는 연결핀(stinger)은 가진기에서 제공되는 단일 방향의 가진력 외에 구속에 의한 모멘트가 구조물에 전달되지 않도록 하는 역할을 한다. 일반적으로 연결핀은 축방향 강성은 매우 높고 축에 수직인 방향으로는 유연한 봉 형태의 구조물을 사용하여야 한다는 지침이 주어졌으나 이 연결핀의 축 방향 공진 현상이 실험 결과에 미칠 수 있는 영향을 파악하기 위하여는 연결핀의 진동특성을 밝혀 둘 필요가 있다. Fig. 3과 같이 실험대상 구조물에 연결되는 가진기의 강성과 감쇠계수의 값을 실험적으로 파악하기 위한 주파수 응답함수가 Fig. 9와 10에 주어졌다. Fig. 9의 FRF에서 가진기 운동부의 공진 주파수는 Fig. 5에서와 마찬가지로 거의 나타나지 않고 있으며, 두 번째 피크는 연결핀으로 인한 공진주파수를 나타내고 있다. 또한 3300 Hz 부근의 피크점은 가진기 기저부의 공진 주파수에 해당하는 것으로 이 역시 제작사의 사양에 의한 값(6000 Hz)보다는 훨씬 낮게 나타난다는 것을 알 수 있다. 이는 가진기와 실험대상 구조물의 연결 상태에 따라 가진기의 동역학적 특성이 변하게 된다는 것을 분명히 보여 주고 있다. 또한, 연결핀의 공진 주파수 역시 연결된 가진기와 구조물의 특성에 따라 변할 수 있다는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

진동 실험에 사용되는 가진기의 동역학적 특성은 실험 대상 구조물과의 연결 상태에 따라 가변적이며 특히 연결핀과 가진기 운동부의 상호 작용에 의한 진

동 특성을 고려하지 않을 경우 실험 결과의 해석에 큰 오류가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 가진력을 제공하기 위하여 실험대상 구조물과 연결되는 가진기의 동역학적 모형을 설정하고 이 모형에 대한 진동 특성치들을 실험적으로 추출하였다. 이와 같은 진동 특성치들을 가진 가진기와 연결핀의 동역학적 특성이 실험 대상물과의 상호 작용에 의해 실험 결과에 영향을 끼치지 않을 것이라는 관행적인 생각은 큰 오류를 범할 수밖에 없을 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Rao, D.K., 1987, "Electrodynamic Interaction between a Resonating Structure," *Proceeding of 5th IMAC*, pp. 1142~1150.
- (2) McConnell, K.G., 1995, "Vibration Testing, Theory and Practice," John Wiley & Sons, New York.
- (3) Brown, K.T., 1984, "Measurement of Modal Density : An Improved Technique for Use on Lightly Damped Structures," *J. of Sound and Vibration*, 96(1), pp.127~132.
- (4) Ewins, D.J., 1984, "Modal Testing : Theory & Practice," Research Studies Press LTD, England.
- (5) Hu, X. and McConell, K. G., 1992, "An Advanced Model for Stinger Force, Motion and Energy Transmissibilities," *IJAEM*, Vol. 7, No. 4, pp. 271~281.
- (6) Anderson, I., 1990, "Avoiding Stinger Rod Resonance Effects on Small Structures," *Proceeding of 8th IMAC*, pp. 673~678.
- (7) Mitchell, L. D and Elliott, K. B., 1984, "A Method for Desining Stingers for Use in Mobility Test," *Proceeding of 2nd IMAC*, pp. 872~876.