

대형구조물 동특성 실험을 위한 가변 동하중 가진 시스템 개발

A Development of a Variable Dynamic Force Type Exciter for Modal Test of a Large Structure

손성완* · 이홍기* · 최수현** · 강동억**

S. W. Son, H. G. Lee, C. H. Choi and D. E. Kang

Key Words : dynamic characteristics(동특성), large structure(대형구조물), new type vibration exciter(신방식 진동가진기)
dynamic performance(동적성능), utility convenience(사용편의)

ABSTRACT

In order to investigate the dynamic characteristics of real structure, many dynamic engineer had been interested in modal test, however it is not easy to perform dynamic test of large structure because of many difficulties such as unsatisfied excitation force in global mode frequency range, measurement of dynamic force and so on. Therefore, new type vibration exciter with variable stiffness support system and dynamic force was developed to provide a improved experimental environment for a large and complex structure. The developed exciter improved from two viewpoint, dynamic performance and utility convenience, its characteristics was shown in this paper.

1. 서론

복잡하고 대형화된 구조물의 경우, 각 요소 구조의 물성치의 신뢰성, 결합부의 연결강성 및 정확한 경계조건 구현 등의 어려움 때문에 유한요소와 같은 수치 해석적인 방법으로는 설계에 반영시킬 수 있는 동적 특성에 관한 신뢰성 있는 정보를 얻기가 힘들다. 따라서, 이러한 어려움을 해결하기 위하여 실제 대형 구조물에 대하여 동적실험을 수행하여 구조물의 동적 거동을 파악하는 방법이 시도되고 있다. 그러나 구조물이 복잡해지고 대형화되면 구조물의 고유 진동수 특성이 다양하게 존재하여 가진 하고자 하는 주파수 영역 뿐 아니라 필요한 동적 가진력의 범위도 다양하게 된다. 그러나 현재 이러한 대형구조물을 비교적 광범위한 주파수 대역에서 가진시킬 수 있는 불평형 질량에 의한 기계적 가진 시스템의 경우 힘의 크기의 변화가 주파수 영역에서 주파수의 제곱에 비례하는 일률적인 특성을 가지

고 있으므로 고 주파수 영역에서는 필요이상의 힘이 가해지게 되어 실험하고자 하는 구조물의 손상 및 안정성 관점에서 문제가 되고 있다. 본 연구에서는 대형구조물에 대한 정확한 동적 특성 진단과 그 대책을 수립하는 기술확보를 위해 기초가 되는 동 특성 실험을 넓은 주파수 영역에서 신뢰성 있고 안정하게 수행하기 위해 실험대상이 되는 임의의 대형구조물의 동적 특성을 고려하여 가진기의 지지강성을 변화시켜 구조물에 전달되는 전달력을 주파수에 따라 가변 할 수 있을 뿐 아니라 사용사의 편의성을 증진시키기 위하여 동일 가진력 대비 소형화, 이동성 보완 및 부착방법의 개선 등을 통해 광범위하게 현장에서 사용될 수 있는 동 특성 실험 시스템을 개발하고자 하였다.

2. 가진기 설계 이론

2.1 진동 발생력

진동 기진력은 진동 Table에 설치된 불평형 진동추가 서로 상반되게 회전되면서 직진 방향의 불평형력이 발생되게 된다. 진동 Table 내부에는 2개의 Shaft가 기어로 맞물려 서로 반대로 돌아가면 각축 양단에 부착된 불평형 질량에 의해 다음식에 의해 가진력이 발생되게 된다.

* 알엠에스 테크놀로지(주)

E-mail : rmstech@rmstech.cokr
Tel : (041) 556-7800, Fax : (041) 556-7808

** 대우조선해양(주) 진동소음연구팀

$$F(t) = 2mrw^2 \quad (1)$$

여기서, m : 불평형 질량
r : 편심거리
w : 회전각속도(rad/sec)

2.2 진동전달력

질량 m인 기계가 $F = F_0 \sin \omega t$ 인 조화진동을 받는다고 하면 Fig.1(a) 와 같이 강성이 큰 지지체에 의해 지지될 경우 하중 F는 그대로 기계 하부에 전달될 것이다. 그러나 Fig.1의 (b),(c) 같이 스프링 상수가 k이고 점성감쇠계수가 c인 탄성층이 기계와 지지물 사이에 존재한다고 하면 수직방향 운동방정식은 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = F_0 \sin \omega t \quad (2)$$

여기서, m : 기계질량

z : 수직방향으로의 변위

\dot{z} : 수직방향으로의 속도

\ddot{z} : 수직방향으로의 가속도

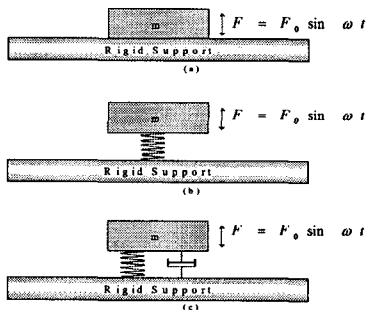


Fig. 1 1 D.O.F. Vibration Transmission Model

식(2)의 일반해를 구하면 식(3)와 같은 형태로 된다.

$$z(t) = e^{-Dnt} (A \sin \omega_n t + B \cos \omega_n t) + \frac{F_0}{k} \frac{1}{(1-\beta^2)^2 + (2D\beta)^2} [(1-\beta^2) \sin \omega t - 2D\beta \cos \omega t] \quad (3)$$

여기서, A, B : 상수 $\beta = \frac{\omega}{\omega_n}$: 진동수비

$$D = \frac{C}{2\sqrt{mk}} : \text{감쇠율 (Damping Ratio)}$$

식 (3)에서 우측 제1항은 자유진동에 의한 해이며 우측 제2항은 강제진동에 의한 정상상태의 해이다. 자유진동에 의한 항은 시간이 증가할수록 그 영향이

소멸되므로 어느 정도의 시간이 경과하면 변위는 정상상태의 해만으로 표현될 수 있다.

$$z(t) = \frac{F_0}{k} \frac{1}{(1-\beta^2)^2 + (2D\beta)^2} [(1-\beta^2) \sin \omega t - 2D\beta \cos \omega t] \quad (4)$$

작용하중 F로부터 스프링을 통해 지지체에 전달되는 하중을 F_T 라고 한다면 F_T 는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$F_T = kZ(t) = \frac{F}{(1-\beta^2)^2 + (2D\beta)^2} [(1-\beta^2) \sin \omega t - 2D\beta \cos \omega t] \quad (5)$$

여기서 작용하는 F와 전달되는 하중 F_T 의 비를 하중전달율 T_F (Force Transmissibility)라고 정의하면 식 (6)와 같다.

$$T_F = \frac{F_T}{F} = \frac{(1-\beta^2) \sin \omega t - 2D\beta \cos \omega t}{(1-\beta^2)^2 + (2D\beta)^2} \quad (6)$$

감쇠를 무시한 비감쇠 진동을 고려할 때 정상상태의 해와 전달하중 그리고 하중 전달율은 각각 식 (7), 식 (8), 식 (9)와 같이 나타난다.

$$z(t) = \frac{F_0 \sin \omega t}{k(1-\beta^2)} \quad (7)$$

$$F_T = \frac{F_0 \sin \omega t}{(1-\beta^2)} \quad (8)$$

$$T_F = \frac{1}{|1-\beta^2|} \quad (9)$$

식(3.8)에서 절대치 표시는 작용하중의 진동수 ω 가 고유진동수 ω_n 보다 큰 경우에 대하여 T_F 가 음수가 되는 것을 방지한다. 식(9)과 Fig. 2으로부터 작용하중보다 전달하중이 작아지기 위해서는 즉 하중 전달율 T_F 가 1보다 작아지려면 진동수비 β 가 1.414보다 커야함을 알 수 있다.

진동저감의 효과를 나타내기 위한 저감율(Isolation Efficiency)을 식(10)와 같이 정의한다.

$$\text{저감률} = 1 - T_f = 1 - \frac{1}{|1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2|} \quad (10)$$

$$\text{또는} = 1 - \frac{1}{|1 - (\frac{f}{f_n})^2|}$$

여기서 ω , ω_n 은 회전각속도로 단위는 (rad/sec)이며 f, f_n 은 진동수로 단위가 (Cycle/sec) 또는 (Cycle/min)으로 나타낸다.

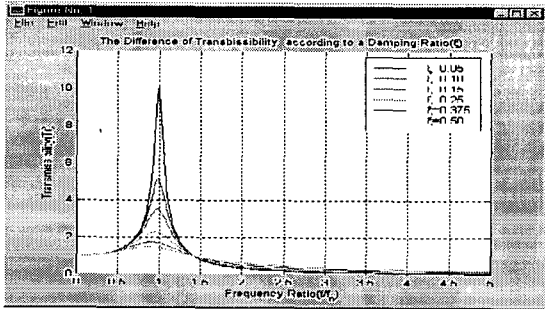


Fig. 2 1 D.O.F. Vibration Transmissibility

3. 가진기 특성 및 제원

3.1 가진기 구성 및 구동

개발된 가진기의 구성은 아래와 같이 5가지의 구조로 되어 있으며 가진기 구동은 Control Panel에서 직접 구동 할 수 있는 Local 구동 방식과 PC에 의해 제어될 수 있는 PC구동 방식으로 되어 있다. PC구동은 DA Card를 이용하여 PC에서 Sweeping Test 및 Step Test를 지원할 수 있도록 되어있다.

(1) 진동 Table(진동발생부)

불평형 질량을 이용하여 직접 진동을 발생시키는 장치로서 모터 및 불평형 가진기 와 동력전달 장치 등으로 이루어져 있다.

(2) 진동 전달부

진동 Table에서 발생되는 가진력을 외곽 Frame을 통하여 구조물에 전달하는 부분으로 진동 발생부의 이동 질량을 지지하기 위해 4개의 코일스프링과 8개의 Air 마운트 및 Air 공급장치 및 damper 구성되어 있으며 강성을 적절히 변경시켜 전체 시스템의 공진주파수 변경으로 인한 진동 가진력을 조절할 수 있다.

(3) 외곽 Frame

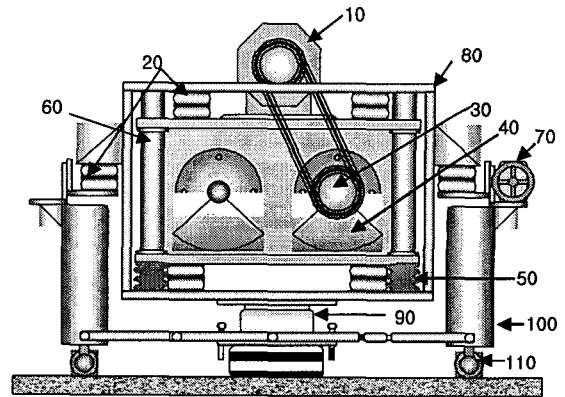
진동 테이블과 진동 전달부를 보호해주며 진동 전달부를 거친 전달력을 구조물에 가해주는 구조로 외곽 Frame 및 마그네틱 Foot 및 구조물로 가해지는 동하중을 직접 계측할 수 있는 힘 측정기(Force Transducer)로 구성되어 있다.

(4) 지지용 지그

외곽 Frame을 포함한 전체 가진기를 지지함과 동시에 수평방향의 가진 실험을 위해 가진기를 회전할 수 있게 할 수 있는 구조로 외곽 Frame과의 절연을 위한 air mount 및 회전용 기어로 구성되어 있다.

(5) Control Panel

인버터를 이용하여 진동 테이블의 구동 모터를 제어하는 장치로서 인버터, 전압변환기, RPM indicator 및 각종 전류/전압 display로 구성되어 있다.



- | | |
|--------------|-------------------|
| 10 : 모터 | 20 : Air Mount |
| 30 : 회전축 | 40 : 불평형 질량 |
| 50 : 코일스프링 | 60 : Linear Shaft |
| 70 : 회전용 기어 | 80 : 외곽 프레임 |
| 90 : 힘 측정계 | 100 : 프레임 지지대 |
| 110 : 이동용 바퀴 | |

Fig. 3 Concept Drawing of Exciter

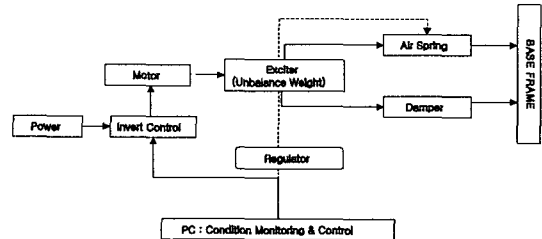


Fig. 4 Operation Diagram of Exciter

3.2 가진기 주요 특성 및 제원

가진기의 주요 특성은 가진기의 작동 주파수 영역, 가진력의 크기 등과 같은 동적 성능 특성과 실제 가진기 설치 및 작동 과 관련한 사용성능 특성으로 나누어 생각 할 수 있다. Table 1에 개발된 가진기의 동적 성능 과 사용 성능 및 주요 제원을 정리하여 나타내었다.

4. 진동 전달력 계측 결과

4.1 진동 발생력

불평형 질량을 이용하여 진동 가진력을 발생시키기 위해 두 개의 평행한 축의 양쪽에 2개의 불평형 질량을 한조로 4 조의 불평형 질량을 부착하여 두축을 역 방향으로 회전시키면서 불평형 가진력을 발생시키도록 하였다. 이때 불평형력의 크기는 식(1)에 의해 25Hz(1500 RPM)에서 15 Ton의 힘이 발생하도록 설계하였으며 필요에 따라 아래의 Table

2와 같이 발생기진력을 조절하기 위하여 한 조로 구성된 2개의 불평형 질량을 회전할 수 있도록 설계하였다.

Table 1 개발 가진기 주요 특성 및 제한

항 목		성 능
주파수 특성	① 가진주파수 영역	1.5 Hz - 25.0 Hz
	② 공진주파수 영역	5 Hz - 8.5 Hz (지지강성 변화)
가진력 특성	① 최대진동 발생력	15 Ton at 25 Hz
	② 최대진동 전달력	abt. 1.0 - 3.1 Ton(공진주파수)
	③ 가진력 방향	수직, 수평
	④ 가진력 측정	하부 Frame 1점에서 지지 및 측정
	⑤ 가진력 조절	- 불평형추 회전에 의한 질량제어 - 지지 강성 제어 - 감쇠력 제어
주요 제한	① 중 량	abt. 1.2 Ton
	② 길 이	1400 mm(850 mm)
	③ 폭	1100 mm(850 mm)
	④ 높 이	900 mm
사용성	① 이동성	비취부착으로 인력으로 인한 수평 방향 이동 가능
	② 설치방법	- 고정식 설치(용접, 볼팅) - 이동식 설치(마그네틱)
	③ 유지보수	본체 및 지지 Frame 조립식 구조
구동방식	① Local 제어	- 배전판에서 직접 RPM 조절
	② PC 제어 (PGM 제어)	- Sweeping Test - Step Test

Table2 불평형 질량의 회전에 따른 진동 발생력 변화

가진중량 Setting	위치	0	1	2	3	4
	각도	0 °	16 °	46 °	103 °	133 °
진동발생력 감소율		100 %	91 %	74 %	45 %	27 %

4.2 진동 전달력 계측

(1) 전달력 계측 시스템

진동 발생부인 진동 테이블에서 발생된 진동 발생력이 진동 전달부를 통한 후 외곽 Frame에 부착된 지지점을 통하여 구조물에 전달되는 진동 전달력을 계측하기 위하여 가진기를 테스트 베드 위에 설치한 후 지지점에 Force Transducer를 설치하여 동하중을 측정하였다. 이때 진동 발생력이 외곽 프레임 지지대를 통해 실험 베드쪽으로 전달되지 않도록 Frame과 지지대 사이에 air mount를 설치하였다. Fig. 5 및 6에 구조물로 전달되는 전달 동하중을 계측하기 위한 구성도 및 측정 전경을 나타내었다.

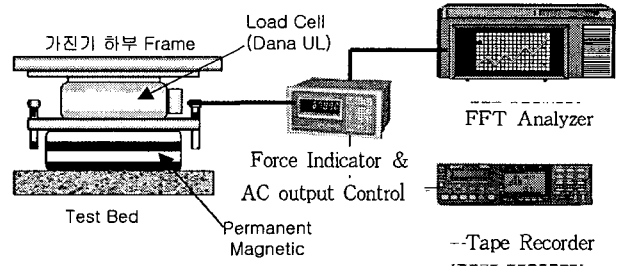


Fig. 5 Dynamic Force Measurement System

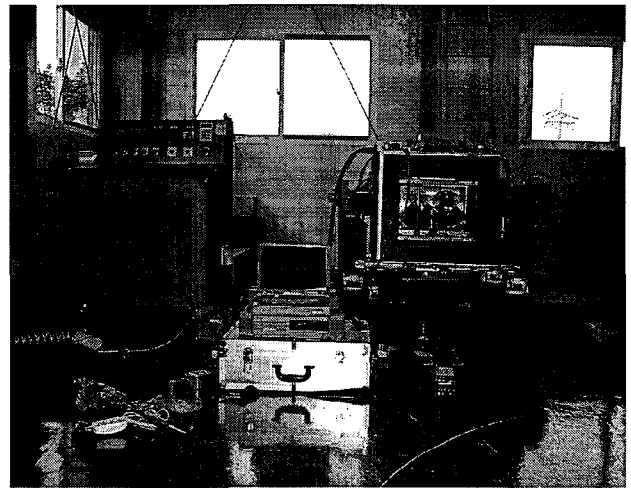


Fig.6 Overview of Dynamic Force Measurement

(2) 계측 조건

진동 전달력 계측은 불평형 추의 위치가 회전되지 않은 100% 상태에서 진동 전달부의 지지강성 변화 및 감쇠력 작동여부에 따라 Table 3에 나타난 4조건하에서 수행되었다. 여기서 air mount의 압력이 0인 상태는 4개의 코일 스프링에 의해 지지되는 상태이며 이때 가진계의 고유진동수가 5Hz, 즉 정적 처짐이 1cm가 되도록 스프링 강성이 결정되었다. Air mount의 압력 변화에 따른 강성의 계산은 식 (11)에 의해 결정된다.

$$K = \frac{[(P_g + 1.01) \times 100] \left[\frac{A_c}{10,000} \cdot V_1^{.38} - \frac{A_g}{10,000} \cdot V_1^{.38} \right] - [101 \cdot \frac{A_c - A_g}{10,000}]}{0.02m}$$

where,

식(11)

K = vertical Spring Rate in KN/m

P_g = Gauge Pressure at design height(bar)

A_c = Effective Area at 10 mm below design height(cm²)

A_g = Effective Area at 10 mm above design height(cm²)

V₁ = internal Volume at design height(cm³)

V_c = internal Volume at 10 mm below design height(cm³)

V_g = internal Volume at 10 mm above design height(cm³)

Table 3 진동 전달 동하중 계측 조건

Case	Air Mount Condition		System Natural Frequency	Damper
	Pressure	Stiffness/EA		
I	0 bar	0	5 Hz	not operating
II	0 bar	0	5 Hz	operating
III	3 bar	67 KN/m	6.5 Hz	operating
IV	5 bar	166 KN/m	8.2 Hz	operating

(3) 계측 결과

테스트 베드위에서 계측된 가진기의 진동 전달 동하중 계측 결과를 정리하였다. Fig. 7에는 Air Mount가 작동하지 않은 상태에서 감쇠기 작동 여부에 따른 진동전달력의 계측 결과를 나타내었으며 Fig. 8에는 Air Mount에 의한 지지강성 변화에 따른 진동 전달력을 비교하여 나타내었다. 각 계측조건에서 600 rpm(10 Hz)에서 전달력의 시간 이력 및 주파수 특성을 Fig. 9에 나타내었으며 Table 4에 각 계측조건에서의 가진시스템의 고유주파수에서의 전달력을 진동 발생력과 비교하여 정리하였다.

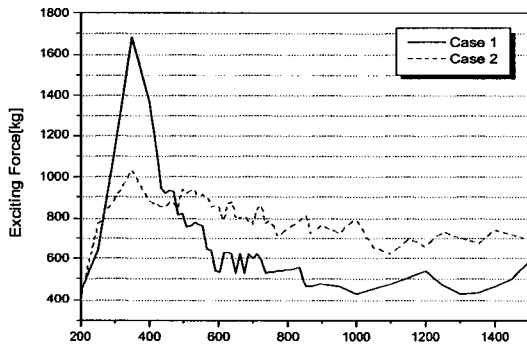


Fig. 7 Measured Dynamic Force with/without Damper (case 1: without damper, case 2 : with damper)

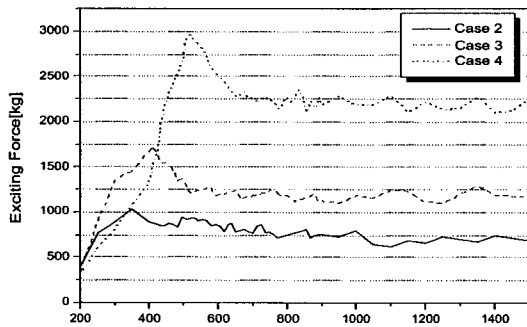


Fig.8 Measured Dynamic Force for Various Air Pressure (case 2 : 0 bar, case 3 : 3bar, case 4 : 5 bar)

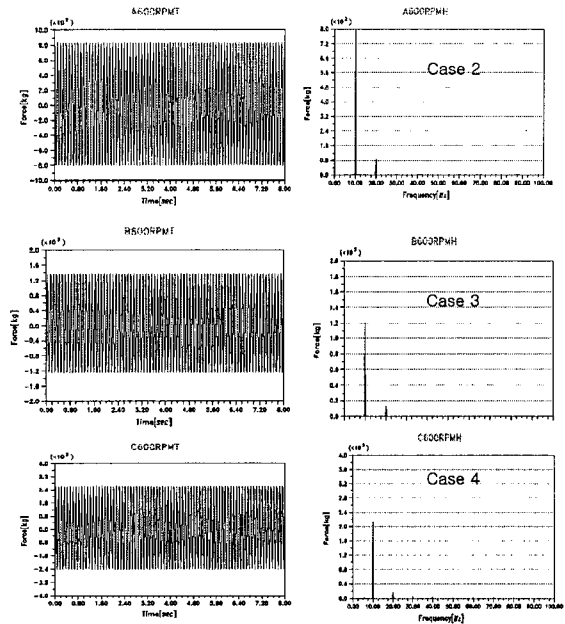


Fig. 9 Time and Frequency Characteristics of Dynamic Force at 600 RPM

Table 4 각 계측조건에서의 가진기 공진점에서의 진동 전달력 및 발생력 비교

Case	Air Mount Pressure	System Natural Freq.	Damper	Transmitted Force	Unbalance Force
1	0 bar	5.1 Hz	×	1684 Kg	625 Kg
2	0 bar	5.1 Hz	○	1034 Kg	625 Kg
3	3 bar	6.7 Hz	○	1728 Kg	1079 Kg
4	5 bar	8.6 Hz	○	2963 Kg	1779 Kg

Fig. 7 및 Table 4에서 나타나듯이 air mount의 압력이 없는 상태 즉, 코일스프링으로만 지지된 상태에서 가진시스템의 공진 주파수에서 구조물로 전달되는 동하중이 damper가 작동하지 않은 경우, damper가 작동한 경우보다 약 60% 정도 크게 나타나고 있으며 공진영역을 벗어난 주파수 영역에서는 damper가 작동 하는 경우가 감쇠의 증가에 따라 전달력이 증가하고 있음을 알 수 있다.

그리고, damper를 작동시킨 상태에서, air mount의 공기압을 조절하여 지지강성을 변화시키면서 전달 동

하중을 계측한 Fig.9의 계측결과를 살펴보면, 공기압이 증가하면 가진시스템의 고유진동수가 증가되면서 공진영역에서의 전달력이 커지는 것을 볼 수 있으며 비 공진 영역에서도 지지강성 증가의 효과로 전달력이 크지고 있음을 알 수 있다. 또한, 세가지 경우 모두에서 공진 영역을 어느정도 벗어난 고 주파수 영역에서는 거의 평탄한 가진력 특성을 보이고 있는데 이것은 고주파수 영역에서의 진동 전달율의 감소와 주파수의 제곱에 비례하는 진동 발생력의 증가 효과가 서로 보상되어 나타나는 현상으로 판단된다. 전달되는 동하중의 시간 이력 및 주파수 영역의 특성을 살펴보면 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 구조물에 가해지는 동하중이 안정된 시간력 및 주파수 특성을 보여주고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

이상에서 대형화되고 복잡한 구조물에 대하여 보다 신뢰성 있고 편리한 동특성 실험 환경을 제공하기 위하여 가변 동하중 가진기를 개발하였다.

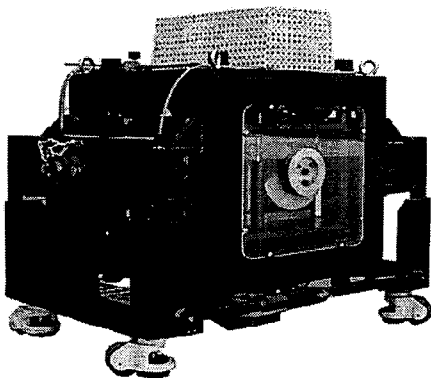


Fig. 10 Variable Dynamic Force Type Exciter

개발된 가진기의 경우 구조물의 전달 동하중 계측 실험을 통하여 air mount의 공기압 변화를 통한 지지강성의 변화 및 damper를 이용하여 저주파수 영역의 가진력 증폭 및 고주파수 영역의 가진력 감소등을 용이하게 제어 할 수 있어 가진기의 동적 성능 개선을 확인 할 수 있었으며 뿐만 아니라 실제 엔지니어들이 사용할 때의 편의를 위해 가진기 설치방식, 이동방식 및 구동방식등의 사용상의 개선도 이루어졌다.

따라서 본 연구에서 개발된 가진기를 이용할 경우

- 대형 구조물의 동적 실험에 있어 광범위한 활용
- 선박 및 교량등 대형구조물의 동적 설계 인자 검증
- 주요 구조물의 내진 성능 검증 및 평가기술 확보
- 대형 구조물의 최적 동적 설계

등의 분야에 활용 될 수 있을 것으로 기대되며 향후 실제 대형 구조물의 적용을 통해 활용성에 관한 검증이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) William. T. Thomson., 1988, Theory of Vibration with Application, Prentice-Hall, Inc.
- (2) Ahid. D. Nashif and David. G. Jones, 1985, Vibration Damping, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (3) Engineering Manual & Design Guide, 2001, Firestone Inc.
- (4) Ziyad H. DUron, Sheldon Rubin and Hakan Ozisik, 1998, Condition Assessment of Large Structure, Sound and Vibration/August
- (5) Hung. C. F and Kuo. H. C., 1993, Optimum Design of Vibration Absorber, TEAM VII paper No.12
- (6) 최 현 등, 1999, "대형구조물의 모빌리티 측정을 위한 공진을 이용한 가진기", 추계학술 발표회 논문집, 한국소음진동 공학회, pp 530-534.