

ATMD를 이용한 건축 구조물의 풍응답 구현을 위한 가진시스템

Excitation System for Simulating Wind-induced Responses of a Building Structure using an Active Tuned Mass Damper

박은천*·이상현†·민경원*·강경수**

Eun Churn Park, Sang-Hyun Lee, Kyung-Won Min, Kyung-Soo Kang

Key Words : active tuned mass damper(능동동조질량감쇠기), inverse transfer function(역전달함수), 76-story benchmark problem(76층벤치마크문제), wind-load(풍하중).

ABSTRACT

In this paper, excitation systems using an active tuned mass damper (ATMD) are presented in order to simulate the wind induced responses of a building structure. The actuator force for the excitation systems is calculated by using the inverse transfer function of a target structural response to the actuator. The analyses results from a 76-story benchmark building problem in which wind load obtained by wind tunnel test is given, indicate that the excitation system installed at a specific floor can approximately embody the structural responses induced by the wind load applied to each floor of the structure. The excitation system designed by the proposed method can be effectively used for evaluating the wind response characteristics of a practical building structure and for obtaining an accurate analytical model of the building under wind load.

1. 서 론

실제 지진하중 또는 바람하중의 가진을 받는 건축구조물의 동적 응답 특성의 정확한 시스템 식별은 건축구조물의 내진 및 내풍설계에 있어서 안전성 및 사용성 평가 뿐만이 아니라 수치해석 모델을 검증하는데 사용되었다 [Ljung, L, 1987]. 정확한 입력과 출력 관계를 묘사하는 시스템 행렬을 구성하는 시스템 식별 (System Identification, SI) 분야에서는 구조물의 중요한 모드를 가진할 수 있는 충분한 에너지를 갖는 입력과 구조물 정보를 모두 가지고 있는 양질의 출력신호를 계측하는것이 매우 중요하다[Alvin & Park (1994)과 Madenci & Barut, (1994)].

Dyke등(1994)은 AMD(active mass driver)와 진동대를 사용하여 소형 3층 구조물의 절대 가속도를 계측하여 상태공간 형식의 제어기를 실현하였다. Juang (1994)는 시간이

력의 시스템 Markov 파라미터를 사용하여 관측기/칼만 필터 시스템 식별방법을 제안하였다. 이러한 연구는 입력/출력 관계를 정확하게 묘사하지만 물리적 질량, 강성, 감쇠 행렬을 제공하지 않는 수학적 모델에 대한 제안이며 건전도 평가(health monitoring) 또는 손상도 평가(damage detection)분야 [Herman et al, (2003)]에서는 유한요소 모델에 근거한 시스템 식별기법이 개발되어졌다. Yu등 (2005)은 상시 진동계측(ambient vibration measurement)과 선형가진기와 편심가진기를 이용한 4층 콘크리트 건물의 강제진동실험을 수행하였고, 계측된 데이터를 기본으로 해석모델의 유한요소모델을 수정하였다. 또한 Yu등은 선형 탄성구조물의 지진응답을 묘사하는 선형 가진 시스템을 제안하였고, 이상현등(2006)은 실물규모 크기의 5층 철골구조물의 지진하중을 구현하는 가진시스템을 설계하였다.

그러나 내진설계에 있어서 구조물의 비탄성응답이 매우 중요하며 인공적인 역추에이터 형식의 장비를 이용하여 대형 실물규모 구조물의 비탄성 응답을 표현하기에는 실제적으로 매우 어렵다. 또한 실제 지진이 발생했을 때 구조물의 기초 가속도와 구조물의 응답을 계측한 시도는 드물다.

또한 풍공학 분야에서는 구조물의 각층에 작용한 실제 풍하중을 계측하는 것은 거의 불가능기 때문에 구조물의 응답과 풍하중의 관계를 획득하기 어렵다. 따라서 풍하중 가진을 받

† 교신저자; 단국대학교 건축공학과
E-mail : lshyun00@dankook.ac.kr
Tel : (031) 8005-3735, Fax : (031) 8005-3741

* 단국대학교 건축공학과

** 동명대학교 건축공학과

는 건축구조물의 시스템식별은 일반적으로 입력 정보가 없는 상시진동계측을 통해 계측된 출력 데이터만을 이용하여 수행한다. 자연 가진을 사용하는 출력 기반 시스템 식별은 실험이 진행되는 동안 계측장비가 모든 시간에 대해 작동되어야 한다는 점과 자연 가진은 구조물의 설계에 고려된 진동 구조물의 진동자유도까지 충분하기 가진할 수 없기 때문에 계측된 출력데이터는 구조물의 동적 특성을 정확하게 평가하기에는 좋지 않다.

본 논문에서는 능동 동조질량감쇠기(active tuned mass damper, ATMD)를 이용하여 구조물의 풍하중응답을 모사한다. ATMD가 목표응답의 궤적을 유지하기 위해서 가진기 힘에 의한 구조물의 역전달함수를 상태공간 방정식을 이용하여 구하고 구조물 응답의 이산 푸리에 변환이 수행된다. 제안한 방법의 유효성은 주어진 풍하중의 가진을 받는 76층 벤치마크 구조물의 수치 예제를 통해 규명되며 가진기의 힘의 수렴에 근거한 목표 구조물의 응답의 종류에 따른 그 오차의 크기의 효과를 검증한다.

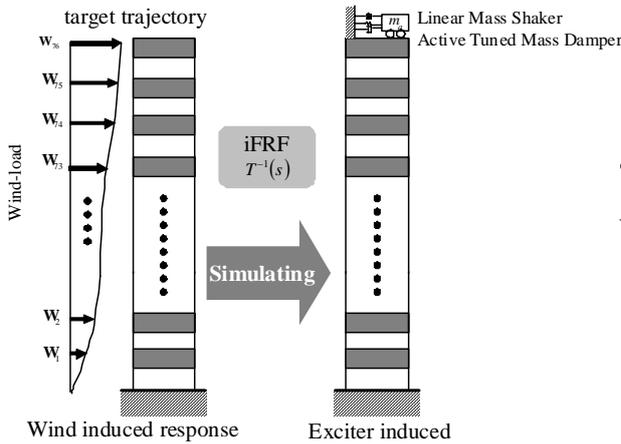


그림 1. ATMD를 이용한 풍응답 모사의 개념도

2. 가진신호의 생성

풍하중 f 의 가진과 가진기에서 생성된 크기 r 의 힘 u 의 가진을 받는 구조물의 상태공간 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{z} &= Az + B_f f + B_u u \\ y &= Cz + D_f f + D_u u \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 z 는 상태벡터이고 y 는 크기 m 의 출력벡터이다. f 와 u 에 의한 출력 전달함수는 다음과 같이 주어진다.

$$T_{yf} = \frac{Y_f(s)}{F(s)} = C(sI - A)^{-1}B_f$$

또는

$$T_{yu} = \frac{Y_u(s)}{F(s)} = C(sI - A)^{-1}B_u \quad (2)$$

여기서 스칼라 s 는 복소변수 $j\omega$ 이다. T_{yu} 의 역전달함수는 크기 r 과 m 이 같을 때 존재하며 가진기에 의한 응답 u 의 라플라스 변환이 이상적으로 바람하중에 의한 응답과 동일하게 하도록 하는 가진시스템 입력은 다음과 같다.

$$U(s) = T_{yu}^{-1} Y_u(s) = T_{yu}^{-1} Y_f(s) = T_{yu}^{-1} T_{yf} F(s) \quad (3)$$

만일 가진 시스템 입력의 수 r 이 출력응답의 수 m 보다 작은 경우에는 구현해야 할 출력응답 중 입력 수만큼의 특정 응답을 선정해야 하며, 선정된 출력응답의 수 r 을 갖는 가진시스템 입력 \bar{y} 의 라플라스 변환은 다음과 같다.

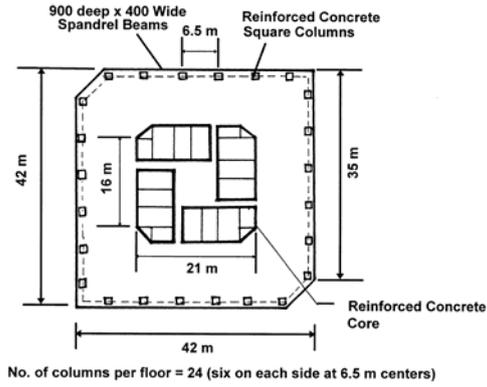
$$\hat{U}(s) = \hat{T}_{yu}^{-1} \hat{Y}_u(s) = \hat{T}_{yu}^{-1} \hat{Y}_f(s) = \hat{T}_{yu}^{-1} \hat{T}_{yf} F(s) \quad (4)$$

여기서, \hat{T}_{yu}^{-1} 은 T_{yu}^{-1} 의 부분행렬이다. \hat{T}_{yu}^{-1} 은 T_{yu}^{-1} 의 목표응답에 해당하는 열을 추출하여 구성된다.

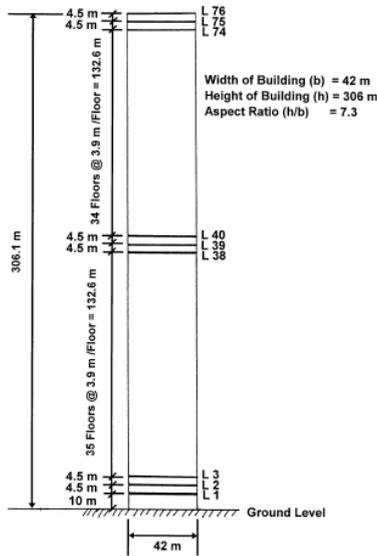
3. 수치예제

3.1 풍하중을 받는 76층 벤치마크 구조물

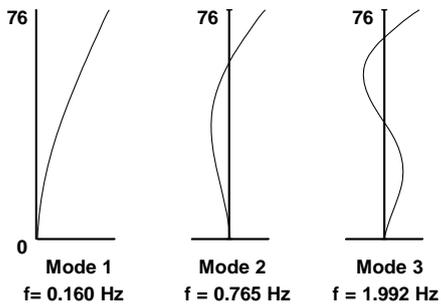
풍하중을 구현하는 가진기는 76층 높이 306m, 폭 높이버는 306.1/42=7.3의 세장비를 가지는 오피스타워 벤치마크 구조물에 적용되었다. 이 벤치마크 구조물의 풍동실험을 통한 풍하중 데이터가 주어졌기 때문에 풍하중을 받는 구조물의 목표응답을 실현하여 가진하는 가진기의 힘은 식(4)를 이용하여 계산할 수 있다. 본 연구에서는 수치해석에 걸리는 시간을 단축하기 위하여 Yang등(1993)이 제안한 23자유도를 가지는 축소된 상태공간 시스템 모델을 사용하였다. 또한 풍하중 벡터는 23자유도 모델에 따른 각 위치에 부근한 풍하중의 합을 계산하여 적용하였다. 그림.3(a), (b)는 76층 벤치마크 문제 구조물의 평면도와 입면도를 보여주며, 그림.3(c), (d)는 구조물의 모드형상과 50층, 60층 그리고 70층의 풍하중의 시간이력을 보여준다.



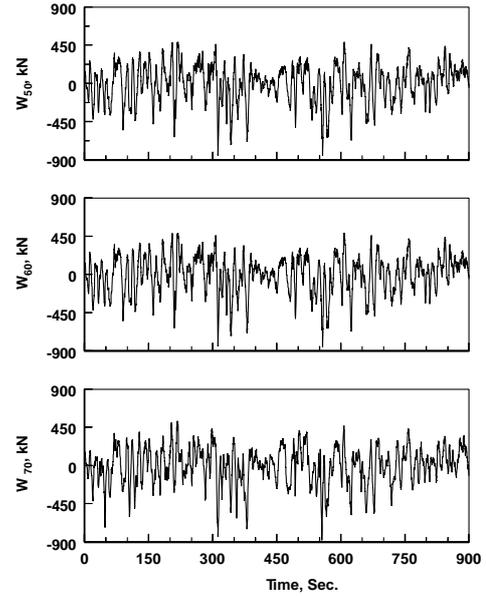
(a) 76층 건물의 평면도



(b) 건물의 입면도



(c) 건물의 초기 3개의 모드형상



(d) 50층, 60층 및 70층의 풍하중 시간이력

그림.3 76층 벤치마크 문제 건물 모델

3.2 오차 평가 지수

바람과 가진기에 의한 구조물의 응답의 비교를 통하여 제안된 방법의 유효성을 검증하기 위하여 시간과 주파수 영역에서의 각각 두 가지의 오차 지수를 고려할 수 있다. 시간 영역에서의 정규화된 추적오차를 다음과 같이 정의한다.

$$e_t = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \sqrt{\{z_a(i\Delta t) - z_f(i\Delta t)\}^2}}{\max[\sqrt{z_f(i\Delta t)^2}]} \quad (8)$$

여기서, Δt 은 시간간격이고, n 은 데이터의 개수, $x_a(i\Delta t)$ 와 $x_f(i\Delta t)$ 는 각각 i 번째 시간 스텝의 가진기와 바람에 의한 구조물의 응답이다. 주파수 영역에서의 정규화된 추적 오차는 다음과 같이 정의한다.

$$e_f = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\{Z_a(\omega_i) - Z_f(\omega_i)\}^2}}{\max[\sqrt{Z_f(\omega_i)^2}]} \quad (9)$$

여기서, N 은 주파수 응답 데이터의 개수이고, $X_f(\omega)$ 와 $X_t(\omega)$ 는 각각 $\ddot{x}_f(t)$ 와 $\ddot{x}_t(t)$ 의 이산 푸리에 변환이며, $E[e_f(\omega)]$ 는 주파수영역에서의 정규화된 평균 추적오차이다.

3.3 ATMD(active tuned mass damper) 가진

76층 벤치마크 문제 건물에서 질량에 스프링 및 점성 감쇠가 추가된 ATMD가 예제 진동제어장치로 사용되었다. 본 절에서는 ATMD를 또다른 가진기로써 고려한다. ATMD의 질량은 500ton이며 비감쇠 고유주파수와 감쇠비는 각각 0.16Hz와 20%를 가진다(Yang등, 1999).

특별히 가진기의 동적특성과 제어기-구조물 상호작용은 벤치마크 문제에서 고려하지 않아 제어환경의 단순화가 수립 되어있다.

최상층에 ATMD를 설치한 건물의 운동방정식은 다음 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

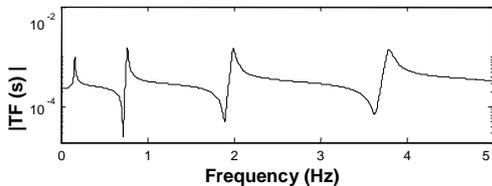
$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx + Hu = \eta W \quad (10)$$

그리고 풍하중 가진이 없다고 가정하면 건물의 운동방정식은 다음 식(11)과 같이 표현된다.

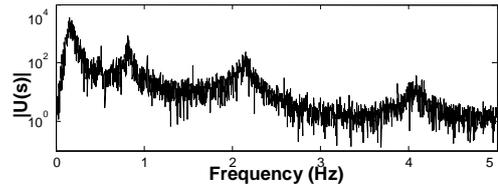
$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & m_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s + c_t B_t B_t^T - c_t B_t & \\ -c_t B_t & c_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s + k_t B_t B_t^T - k_t B_t & \\ -k_t B_t & k_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s \\ x_t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -B_t \\ 1 \end{Bmatrix} u \quad (11)$$

여기서, B_t 는 ATMD가 설치된 층의 위치벡터이고, M_s, C_s 와 K_s 는 각각 건물의 질량, 감쇠계수 및 강성 행렬이며, m_t, c_t 와 k_t 는 각각 ATMD의 질량, 감쇠계수 및 강성이다.

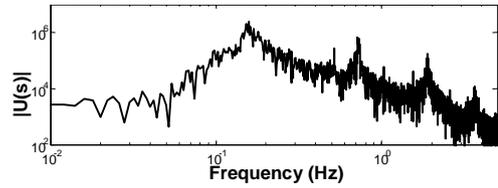
그림.4(a)은 ATMD 절대가속도에 의한 75층의 가속도 전달함수를 보여준다. 1차모드 주파수 근접하여 제로점이 관측되지 않기때문에 즉 역전달함수 적용시 극점이 1차모드 근접하여 발생하지 않는다 따라서 ATMD에 의하여 예측하지 않는 주파수 응답을 발생을 막기위한 밴드스탑필터를 요구하지 않는다. 그림.4(b)는 ATMD의 가진력의 주파수 응답을 보여주며 그림.4(c)와 (d)는 ATMD에 의해 적용된 유효 힘의 시간 및 주파수 응답을 보여준다.



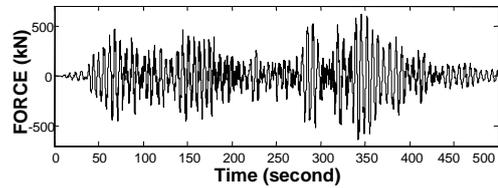
(a) ATMD에 의한 75층의 가속도 전달함수



(b) ATMD 절대가속도의 주파수 응답



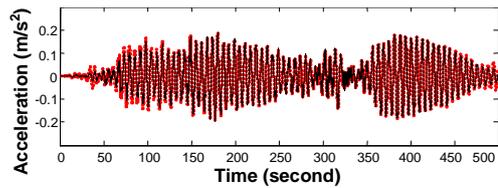
(c) ATMD 가진력의 주파수 응답



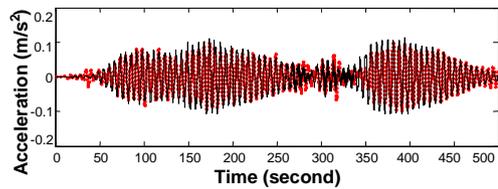
(d) ATMD 가진력의 시간이력

그림.4 ATMD 가진력의 생성

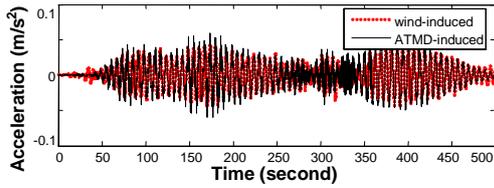
그림.5은 75층 가속도 응답을 목표로 설정했을 때 ATMD 가진에 의한 응답과 풍하중 가진에 의한 응답을 비교한 시간이력 결과이다. 모든 가속도응답은 각각 잘 일치하나 변위 응답의 경우 시간구간에 따라 약간의 과소 및 과대평가가 된다.



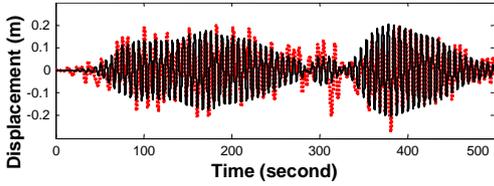
(a) 75층 가속도 응답의 시간이력



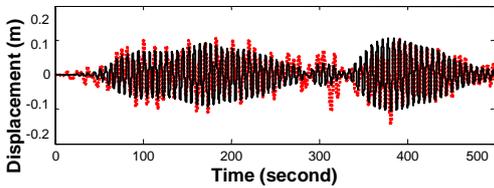
(b) 50층 가속도 응답의 시간이력



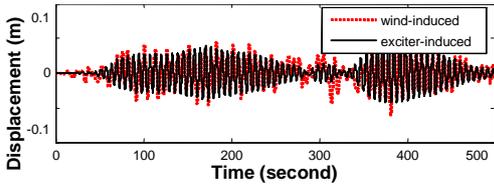
(c) 30층 가속도 응답의 시간이력



(d) 75층 변위 응답의 시간이력



(e) 50층 변위 응답의 시간이력



(f) 30층 변위 응답의 시간이력

그림.5 풍하중 및 ATMD 가진에 의한 응답
(75층 가속도를 목표로 가진력을 발생한 경우)

그림.6는 ATMD 가진 및 풍하중 가진에 의한 75층 가속도 주파수응답을 보여준다. 풍하중과 ATMD가진에 의한 응답이 전 주파수 영역에 걸쳐 잘 일치함을 알 수 있다.

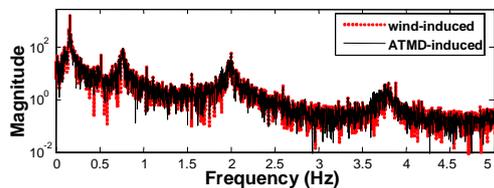


그림.6 풍하중 및 ATMD 가진에 의한
75층 가속도 주파수 응답

그림.7은 목표 가속도응답에 따른 주파수영역의 오차분포를 보여준다. 그림.7(b)에서 e_f 는 목표응답을 75층 가속도로 선택했을 때 가장 작은 값을 가지며 전층의 오차분포는 1%

에서 10% 이내로 분포한다. 따라서 75층을 목표로 선택한 경우 75층 응답을 포함하여 정확하게 풍응답을 모사하는 최적의 성능을 발휘하는 ATMD를 설계했다고 볼 수 있다.

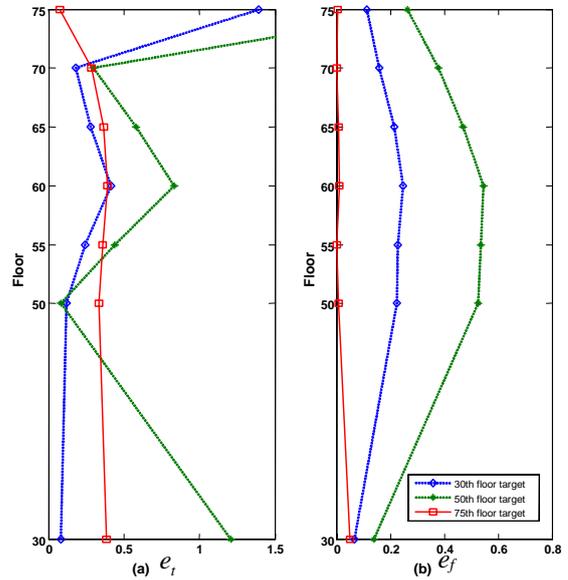


그림.7 ATMD의 오차 분포

4. 결 론

본 논문은 건축구조물의 풍하중 구현을 위한 가진시스템의 설계를 실제 건축구조물에 풍특성평가를 위한 예비 연구로 제안하였다. ATMD에 의한 가진력은 구조물 응답의 역전달 함수를 이용하여 생성하였다. 풍하중이 전층에 가진하는 건물의 응답을 확인 할 수 있는 76층 벤치마크 문제 건물을 통한 수치해석 결과는 특정층에 설치한 가진시스템에 의해 그 응답을 구현하여 일치함으로 제안한 가진시스템의 유효성을 입증하였다. 가진시스템의 성능은 목표 구조물 응답의 종류와 목표 응답층에 의존적이며 변위응답을 통해 가진력을 생성할 경우 가진기의 고속 스위칭현상을 유발하기 때문에 가속도 응답을 구조물의 목표응답으로 사용하는 것이 합리적이다. 수치예제를 통해 오차분포는 가진기가 설치된 층에 목표한 가속도 응답이 최소로 발생함을 보였다. 추후 풍하중을 구현하는 가진시스템의 실제 현장 적용에 있어서는 계측된 데이터를 통한 유한요소모델 수정, 가진시스템의 동적특성 보상 그리고 실제 구조물의 손상을 방지하기 위한 가진시스템의 상사법칙과 구속조건 또는 스트로크 제한 등이 검토되어야 한다.

후 기

이 연구는“건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술 평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술연구 개발사업(03산학연C103A1040001-03A0204-00210)에 의한 것임. 또한 이 연구에 참여한 연구자는 「2단계 BK21사업」의 지원을 받았습니다.

참 고 문 헌

(1) Leo, L. B. and Eric, E. U., 1992, Noise and Vibration Control Engineering, John Wiley & Sons, Inc., New York.

(2) Lee, Y. K., Choi, S. K., Yoon, K. C. and Lee, Y. S., 2003, “NRRO Analysis of 3.5inch HDD Spindle Ball Bearings utilizing the Measured Geometric Imperfection”, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 585~591.

(3) Jeong, S. W. and Jang, G. H., 2001, “Analytical Theory of Ball Bearing Considering Waviness of Rolling Elements”, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol. 11, No. 7, pp. 275~286.

(4) Kenneth, G. M., 1995, Vibration Testing, John Wiley & Sons, Inc., New York.

(1) 이상현, 박은천, 윤경조, 이성경, 유은중, 민경원, 정란, 민정기, 김영찬, “실물 크기 구조물의 강제진동실험 및 지진응답 모사를 위한 HMD 제어기 설계”, 한국지진공학회 논문집 제10권 제6호, 2006, pp.103-114

(2) Ljung, L., "System Identification: Theory for the User", Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1987.

(3) Alvin, K.F., and Park, K.C., "Second-Order Structural Identification Procedure via State-Space-Based System Identification", *AIAA Journal*, Vol.32, 1994, pp.397-406.

(4) Madenci, E and Barut, A. "A free-formulation-based flat shell element for non-linear analysis of thin composite structures", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 37, 1994, pp. 3825-3842.

(5) Dyke, S.J., Spencer Jr., B.F., Quast, P., Sain, M.K., Kaspari Jr., D.C., and Soong, T.T., "Experimental Verification of Acceleration Feedback Control Strategies for an Active Tendon System", *Technical Report NCEER-94-0024*, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY., 1994.

(6) Juang, J.N., "Applied System Identification", *Prentice Hall*, Englewood Cliffs, NJ., 1994.

(7) Herman V.A., Bart P., "Sensors and Systems for

Structural Health Monitoring", *Journal of Structural Control*, Vol.10, 2003, pp.117-125.

(8) Yu E., Whang D.H., Conte J.P., Stewart J.P., Wallace J.W., "Forced vibration testing of buildings using the linear shaker seismic simulation (LSSS) testing method", *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, Vol.34, 2005, pp.737-761

(9) Au F.T.K., Jiang R.J., Cheung Y.K., "Parameter identification of vehicles moving on continuous bridges" *Journal of sound and vibration*, Vol.269, 2004, pp.91-111.

(10) Friswell, M.I., and Mottershead, J. E., "Finite Element Model Updating in Structural Dynamics", *Kluwer Academic Publishers*, Boston, London, 1995.

(11) Yang J.N., Agrawal A.K., Samali B., Wu J.C., "A Benchmark Problem for Response Control of Wind-Excited Tall Buildings", World Wide Website <http://www.eng.uci.edu/~jnyang/benchmark.htm>, 1999