

풍하중 구현 및 내풍특성 평가를 위한 선형질량 가진시스템 설계

Design of a Linear Mass Excitation System for Simulating Wind-induced Responses of a Building Structure

박은천* · 이상현† · 민경원* · 강경수**

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

Key Words : linear mass shaker(선형질량 가진기), inverse transfer function(역전달함수), 76-story benchmark problem(76층 벤치마크문제), wind-load(풍하중).

ABSTRACT

In this paper, excitation systems using linear mass shaker (LMS) 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. Filter and envelop function are used such that the error between the wind and actuator induced responses is minimized by preventing the actuator from exciting unexpected modal response and initial transient response. 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. 서론

실제 지진하중 또는 바람하중의 가진을 받는 건축구조물의 동적 응답 특성의 정확한 시스템 식별은 건축구조물의 내진 및 내풍설계에 있어서 안전성 및 사용성 평가 뿐만 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 계속하는 것이 매우 중요하다 [Alvin & Park (1994)과 Madenci & Barut, (1994)].

Dyke 등(1994)은 AMD(active mass driver)와 진동대를 사용하여 소형 3층 구조물의 절대 가속도를 계속하여 상해 공간 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. Yu 등 (2005)은 상시 진동계측(ambient vibration measurement)과 선형가진기와 편심가진기를 이용한 4층 콘크리트 건물의 강제진동실험을 수행하였고, 계속된 데이터를 기본으로 해석모델의 유한요소모델을 수정하였다. 또한 Yu 등은 선형 탄성구조물의 지진응답을 묘사하는 선형 가진 시스템을 제안하였고, 이상현 등(2006)은 실무규모 크기의 5층 철골구조물의 지진하중을 구현하는 가진시스템을 설계하였다.

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

또한 풍공학 분야에서는 구조물의 각층에 작용한 실제 풍하중을 계속하는 것은 거의 불가능기 때문에 구조물의 응답과

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

* 단국대학교 건축공학과

** 동명대학교 건축공학과

풍하중의 관계를 획득하기 어렵다. 따라서 풍하중 가진을 받는 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 그림 1처럼 선형질량가진기 (linear mass shaker, LMS)를 이용하여 구조물의 풍하중응답을 모사한다. 선형 가진기가 목표응답의 궤적을 유지하기 위해서 가진기 힘에 의한 구조물의 역전달함수를 상태공간 방정식을 이용하여 구하고 구조물 응답의 이산 푸리에 변환이 수행된다. 밴드스탑필터와 포락곡선함수는 예상하지 않은 모드응답과 초기 과도응답을 제거함으로써 바람하중과 가진기에 의한 응답의 차이를 최소화한다. 제한한 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.

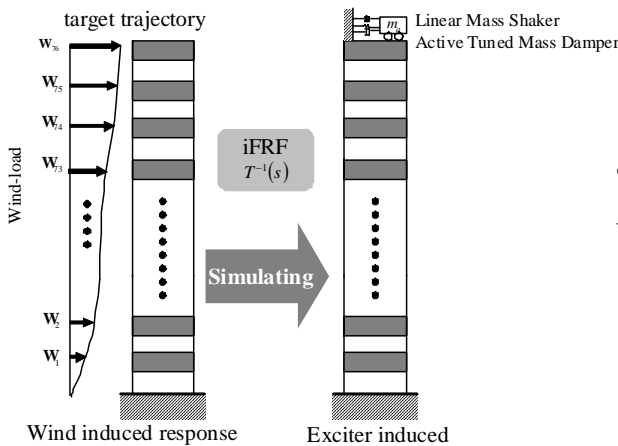


그림 1. LMS를 이용한 풍응답 모사의 개념도

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. 필터 및 포락곡선 함수

구조물의 전달함수의 크기가 0으로 접근하는 주파수구간을 포함할 때 이러한 구간에서의 역전달함수는 무한히 증가할 수 있다. 가진력은 역전달함수와 출력 신호의 곱으로 계산되어지기 때문에 증가된 입력신호는 그 구간을 포함하는 출력 요소가 작은 증폭을 가질 때 계산될 수 있다. 이러한 계산을 통해 가진 시스템은 실제 가진되지 않은 계측 노이즈와 이산 푸리에 변환을 사용하는 신호처리에 있어서 피할 수 없는 스펙트럼 손실(spectral leakage)에 의한 출력 신호의 약간의 주파수 특성 변화에 매우 민감하게 되며 목표 응답이 실제 가진되지 않은 주파수 응답을 불필요하게 큰 에너지의 가진력으로 가진하게 된다. 특히 저주파 성분은 가진기의 매우 큰 스트로크를 유발시킨다. 본 논문에서는 이러한 구간에서 주파수 응답의 발생을 제거하기 위해 구간 cosine 함수를 적용하여 밴드스탑필터(band stop filter, BSF)를

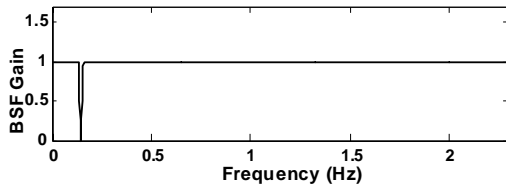
설계하였다.

$$\hat{U}_p(\omega) = G(\omega) \cdot \hat{U}(s) \quad (5)$$

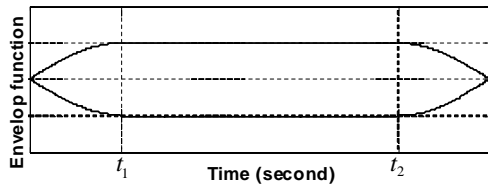
$$G(\omega) = \frac{1 - a_{co}}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{\omega_2 - \omega_1} \omega\right) + \frac{1 + a_{co}}{2} \quad (6)$$

$$a_{co} = \begin{cases} \omega < \omega_1; & 1 \\ \omega_1 \leq \omega \leq \omega_2; & 0 \\ \omega > \omega_2; & 1 \end{cases} \quad (7)$$

여기서, ω_1 와 ω_2 는 컷오프 주파수 구간으로 정의하고 a_{co} 는 컷오프 주파수(cutoff frequency)의 계인값이다. 그림 2(a)는 밴드스탑필터의 형상을 보여준다.



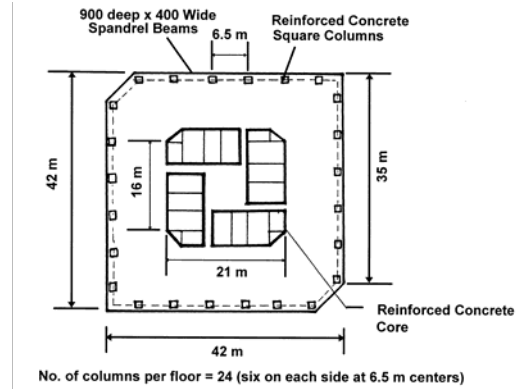
(a) 밴드스탑 필터의 형상



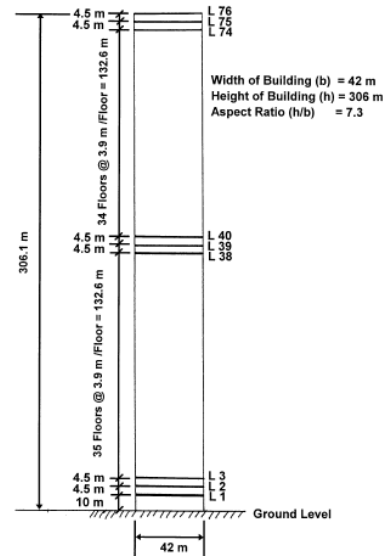
(b) 포락곡선함수의 형상

그림 2. 밴드스탑 필터와 포락곡선함수의 계인 형상

그림 3(c), (d)는 구조물의 모드형상과 50층, 60층 그리고 70층의 풍하중의 시간이력을 보여준다.



(a) 76층 건물의 평면도

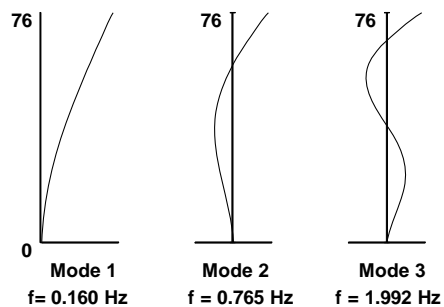


(b) 건물의 입면도

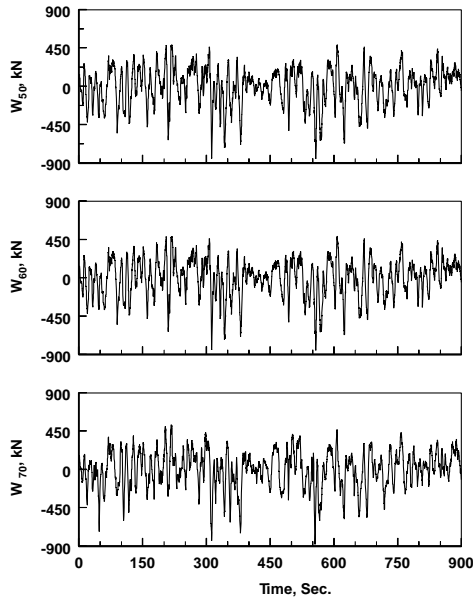
4. 수치예제

4.1 풍하중을 받는 76층 벤치마크 구조물

풍하중을 구현하는 가진기는 76층 높이 306m, 폭 높이버는 $306.1/42=7.3$ 의 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, 그



(c) 건물의 초기 3개의 모드형상



(d) 50층, 60층 및 70층의 풍하중 시간이력

그림.3 76층 벤치마크 문제 건물 모델

4.2 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.

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

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.

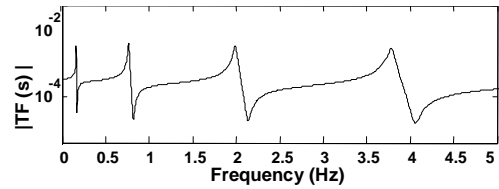
$$e_f = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\{Z_a(\omega_i) - Z_f(\omega_i)\}^2}}{\max \left[\sqrt{Z_f(\omega_i)^2} \right]} \quad (9)$$

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 추적오차

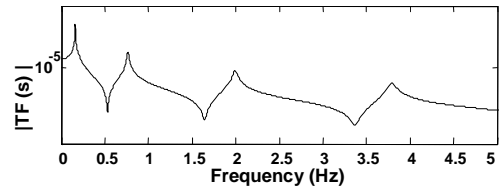
다.

4.3 LMS (linear mass shaker) 가진

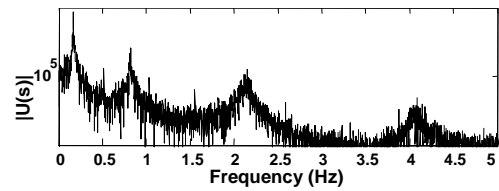
본 절에서는 임의의 요구된 힘을 생성할 수 있는 LMS를 가진기로써 사용한다. LMS는 76층에 설치되며 500ton의 질량을 갖는다고 가정한다. 500ton의 질량은 벤치마크 문제에 진동제어장치로 사용된 ATMD의 질량과 같은 질량으로 일치시켰다. 이 질량은 최상층의 질량의 약 45%의 질량이며 전체 구조물의 질량의 0.327%를 차지한다. 그림.4(a)와 (b)는 75층 가속도와 변위응답의 전달함수를 보여준다. 그림.4(a)에서의 가속도 전달함수에 각 모드 고유주파수 근처 고유 주파수점보다 약간 큰 지점에 전체 풍하중에 의한 구조물 응답을 지배하는 제로점이 관측된다.



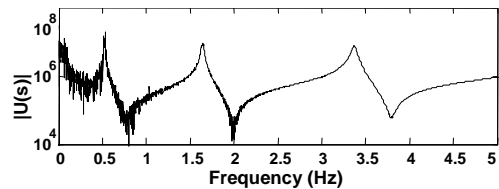
(a) 75층 가속도 전달함수



(b) 75층 변위 전달함수



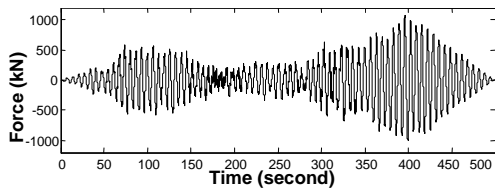
(c) 75층 가속도 응답을 목표로 생성된 가진신호의 주파수 영역



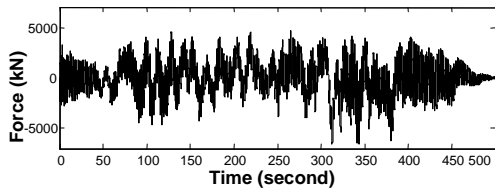
(d) 75층 변위 응답을 목표로 생성된 가진신호의 주파수 영역

그림.4 LMD에 의한 75층 응답의 전달함수

그림.5는 주파수 응답 함수를 보여주며 76층 가속도와 변위 응답을 목표응답으로 선정했을 때 필터처리를 하지 않은 가진기 힘의 시간이력을 보여준다. 그림.5에서 가진기는 가속도 응답보다 변위 응답을 목표로 생성했을 때 매우 큰 힘을 요구하며 그림.4(d)에서 그림.5(b)에서 보여지는 것처럼 제어력의 고속 스위칭현상을 유발하는 고주파 성분을 많이 포함하는 것을 알 수 있다. 실제적용에 있어서 토목 구조공학에서 일반적으로 사용하는 유압식 액추에이터는 이러한 불필요하고 고차모드에서 불안정성을 유발시키는 떨림현상(chattering problem)이 발생하는 것은 부적절하며 본 벤치마크 건물과 같은 풍하중을 받는 초고층 건물에서는 사용성 기준에 있어 가속도 응답이 변위응답에 비해 중대하다. 그림.6은 75층 변위 응답을 목표로 생성된 LMS에 의한 75층 가속도와 변위 주파수 응답과 바람하중에 의한 응답과 비교한 결과를 보여준다. LMD에 의해 가진된 변위응답은 바람하중에 의한 변위응답과 서로 잘 일치함을 보이나 가속도 응답에 경우에는 매우 상이한 결과를 낳는다. 따라서 본 연구에서는 그림.5와 그림.6에 의해 관측된 결과를 근거로 하여 변위와 가속도 응답을 합리적으로 구현할 수 있는 가속도 응답만 LMS힘을 생성하기 위한 목표응답으로 사용하도록 한다.

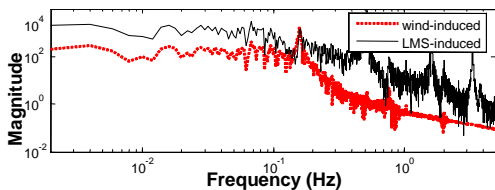


(a) 75층 가속도를 목표로 생성된 LMS 힘의 시간이력

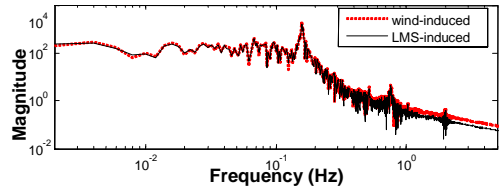


(b) 75층 변위를 목표로 생성된 LMS 힘의 시간이력

그림.5 LMS 힘의 시간이력 (unfiltered)



(a) 가속도 응답



(b) 변위 응답

그림.6 75층 변위응답을 목표로 생성된 LMS에 의한 75층의 주파수 응답

수치해석은 필터와 포락곡선함수의 사용 유무와 목표응답을 바뀌가며 수행하였다. 표.1은 앞에서 언급한 각각의 목표응답의 역전달함수에서 발생하는 제로점에 의한 효과로 불필요한 증폭발생을 제거하는 필터의 컷오프 주파수를 나열하였다. 포락곡선함수는 초기 진폭이 증가하는 시간 $t_1 = 100\text{sec}$ 과 말기 진폭이 감소하는 시간 $t_2 = 100\text{sec}$ 로 구간을 정하였다.

표 1. 필터 설계를 위한 컷오프 주파수

목표응답	$\omega_1(\text{rad/sec})$	$\omega_2(\text{rad/sec})$
75층 가속도	1.01	1.13
50층 가속도	8.17	8.80
30층 가속도	17.59	20.73

그림.7은 각각 목표응답과 필터사용 유무에 따라 앞 절에서 정의한 시간 및 주파수영역에서의 오차의 층 분포를 보여준다. processed 와 unprocessed 는 각각 필터 및 포락곡선함수를 사용한 결과와 사용하지 않은 결과를 나타낸다. 그림.7은 필터를 사용한 결과는 목표응답을 75층 가속도 응답으로 선택했을 때 추적오차가 현저히 줄어드는 것을 볼 수 있는데 이것은 그림.4(a)에서 볼 수 있듯이 75층 가속도 전달함수에 1차 모드 주파수 근처에 발생하는 제로점에 의한 불필요한 응답을 필터를 통해 제거하였기 때문이다. 반면에 30층 및 50층의 가속도 응답을 목표로 선택했을 때 필터의 효과는 거의 발생하지 않는데 이것은 30층 및 50층의 가속도 전달함수의 제로점이 1차모드에서 많이 떨어진 부근에서 발생하였기 때문이다. 또한 목표로 설정된 층의 응답에 비해 목표로 설정되지 않은 층의 오차가 점점 증가하는 오차 분포를 확인할 수 있다. 특히 30층과 50층의 가속도를 목표로 설정했을 때는 사용성 평가에 중대한 75층 가속도 응답에 있어서 풍하중 가진에 의한 가속도 응답과 매우 큰 차이를 보인다.

그림.7(a)와 (b)의 비교결과는 e_t 와 e_f 의 분포경향이 상당히 다르며 e_t 의 크기가 e_f 에 비해 큼을 보여준다. 75층 가

속도를 목표로 설정하였을 때 e_t 와 e_f 는 목표한 75층의 가속도에서 가장 작지만 그 외의 다른 층에서의 e_t 값은 커졌으며 e_f 는 30층의 가속도를 제외한 층의 가속도에서 가장 작은 값으로 유지하고 있다. e_t 의 값이 커지는 결과는 LMS 가진에 의한 응답과 바람에 의한 응답에서 동일 시간스텝 i 에서 약간의 위상차만 발생하여도 그 값이 지속적으로 커지는 결과를 낳는다. 풍하중에 의한 응답에서 위상은 건축구조물의 풍특성 평가에 있어서 중요한 파라미터가 아니므로 e_f 가 LMS를 통해 풍응답 구현 성능에 있어 좀더 적절한 평가 지수라고 할 수 있다.

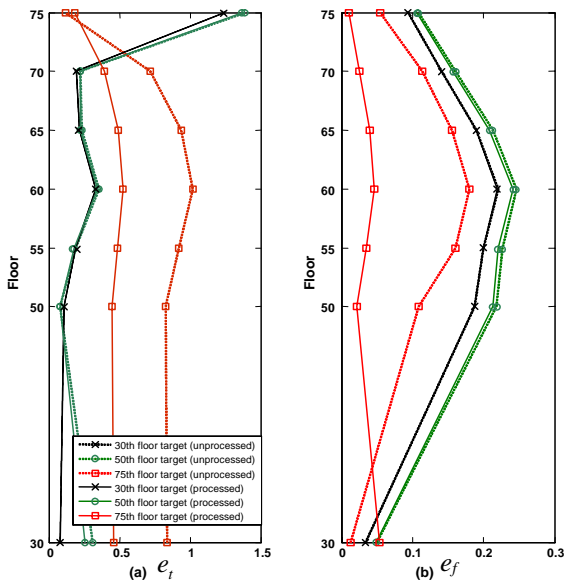
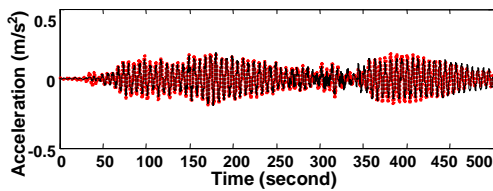
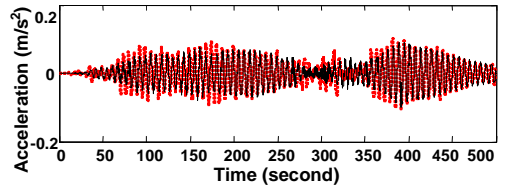


그림.7 필터사용 및 목표 응답에 따른 오차 분포

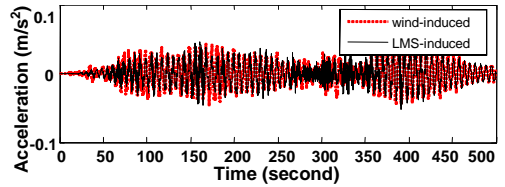
그림.8 과 9는 풍하중과 LMS를 통해 가진한 구조물의 응답의 각각 75층 30층 가속도와 필터를 적용한 목표응답에 따른 시간이력 결과를 보여준다. 그림.8은 LMS가진한 가속도 응답이 목표한 75층 가속도 응답을 포함하여 풍하중에 의한 응답과 잘 일치하는 반면에 변위 응답에 있어서 전층이 LMS에 의한 응답이 다소 과소평가됨을 알 수 있다. 그림.9에서는 30층 가속도를 목표로 가진했을 때의 결과는 변위 응답은 일치함을 보이나 75층 가속도는 과대평가함을 보여준다.



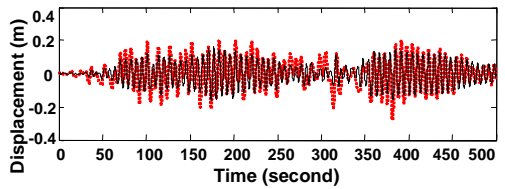
(a) 76층 가속도 응답의 시간이력



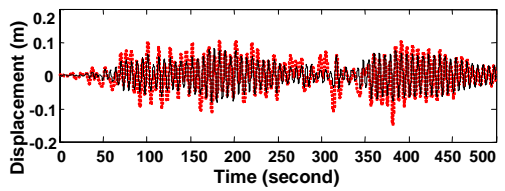
(b) 50층 가속도 응답의 시간이력



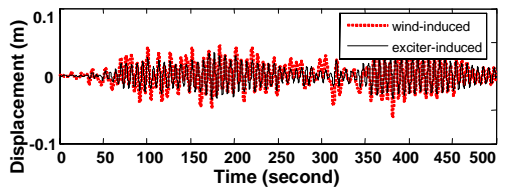
(c) 30층 가속도 응답의 시간이력



(d) 75층 변위 응답의 시간이력

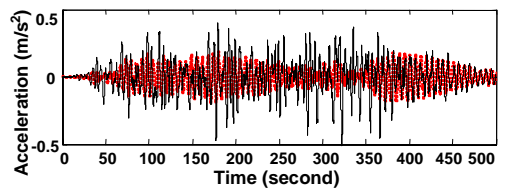


(e) 50층 변위 응답의 시간이력

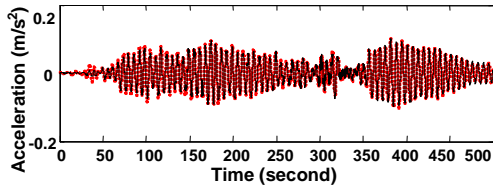


(f) 30층 변위응답의 시간이력

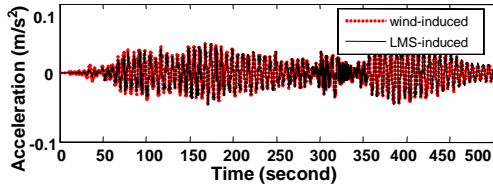
그림.8 풍하중 및 LMS 가진에 의한 응답 (75층 가속도를 목표로 가진력을 발생한 경우)



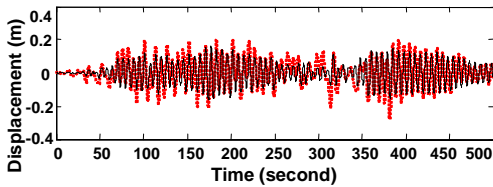
(a) 75층 가속도 응답의 시간이력



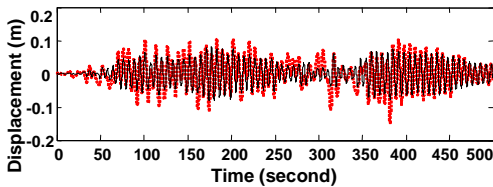
(b) 50층 가속도 응답의 시간이력



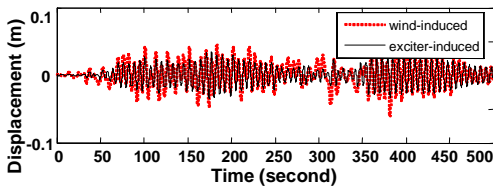
(c) 30층 가속도 응답의 시간이력



(d) 75층 변위 응답의 시간이력



(e) 50층 변위 응답의 시간이력



(f) 30층 변위 응답의 시간이력

그림.9 풍하중 및 LMS 가진에 의한 응답
(50층 가속도를 목표로 가진력을 발생한 경우)

4. 결 론

본 논문은 건축구조물의 풍하중 구현을 위한 가진시스템의 설계를 실제 건축구조물에 풍특성평가를 위한 예비 연구로 제안하였다. LMS에 의한 가진력은 구조물 응답의 역전달함수를 이용하여 생성하였다. 또한 LMS의 경우 예측하지 않은 모드 가진을 하는 재료점을 제거하기 위해 밴드스탑필터를 사용하였으며 초기 과도 상태의 응답으로 인한 오차를 제

거하기 위해 포락곡선함수를 사용하였다. 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 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(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.
- (5) 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
- (6) Ljung, L., "System Identification: Theory for the User", Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1987.
- (7) 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