

건축구조물의 풍하중 구현 및 풍특성 평가를 위한 가진시스템 설계

Design of an Excitation System for Simulating Wind-Induced Response and Evaluating Wind-load Resistance Characteristics

박 은 천* 이 상 현† 이 성 경** 민 경 원*** 정 린*** 강 경 수****
Park, Eun-Churn Lee, Sang-Hyun Lee, Sung-Kyung Min, Kyung-Won Chun, Lan Kang, Kyung-Soo
(논문접수일 : 2007년 8월 10일 ; 심사종료일 : 2007년 10월 4일)

요 지

본 논문에서 건축구조물의 풍응답 구현을 위한 선형질량가진기(linear mass shaker, LMS)와 능동동조질량감쇠기(active tuned mass damper, ATMD)를 이용한 가진시스템을 제안한다. 가진시스템을 위한 가진기의 힘은 가진기에 의한 구조물의 목표응답의 전달함수를 사용하여 계산된다. 필터와 포락곡선택수는 예측하지 못한 모드응답에 의한 가진과 초기 과도응답을 제거함으로써 실제 바람에 의한 응답과 가진기에 의한 응답의 오차를 최소화하기 위하여 사용되었다. 수치예제로는 풍동실험을 통한 풍하중이 주어진 76층 벤치마크 구조물을 이용하여 수치해석을 수행하였으며, 그 결과는 특정층에 설치된 가진시스템은 풍하중이 전층에 가진되었을 때의 응답을 근사하게 구현할 수 있음을 보여준다. 제안된 방법에 의해 설계된 가진시스템은 실제 건축구조물의 풍응답 특성을 평가하는데, 그리고 풍하중을 받는 건물의 정확한 수치모델을 얻는데 효과적으로 사용될 수 있다.

핵심용어 : 가진시스템, 선형질량가진기, 능동동조질량감쇠기, 전달함수법, 76층 벤치마크 구조물, 풍하중

Abstract

In this paper, excitation systems using linear mass shaker (LMS) and 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. 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.

Keywords : excitation system, linear mass shaker, active tuned mass damper, transfer function method, 76-story benchmark building problem, 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 뿐만 아니라 수치해석 모델을 검증하는데 사용되었다(Ljung, 1987). 정확

† 책임저자, 정회원 · 단국대학교 건축공학과 조교수
Tel: 031-8005-3735 ; Fax: 031-8005-3741
E-mail: lshyun00@dankook.ac.kr

* 단국대학교 건축공학과 박사과정

** 단국대학교 건축공학과 연구전임강사

*** 단국대학교 건축공학과 교수

**** 동명대학교 건축공학과 부교수

• 이 논문에 대한 토론을 2008년 2월 29일까지 본 학회에 보내주시면 2008년 4월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

한 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 계속하는것이 매우 중요하다(Alvin 등, 1994; Madenci 등, 1994).

Dyke 등(1994)은 AMD(active mass driver)와 진동대를 사용하여 소형 3층 구조물의 절대 가속도를 계속하여 상태공간 형식의 제어를 실현하였다. Juang(1994)는 시간 이력의 시스템 Markov 파라미터를 사용하여 관측기/칼만 필터 시스템 식별방법을 제안하였다. 이러한 연구는 입력/출력관계를 정확하게 묘사하지만 물리적 질량, 강성, 감쇠 행렬을 제공하지 않는 수학적 모델에 대한 제안이며 진전도 평가(health monitoring) 또는 손상도 평가(damage detection)분야(Herman 등, 2003)에서는 유한요소 모델에 근거한 시스템 식별방법이 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 가진시스템을 제안하였고, 이상현 등(2006)은 실물규모 크기의 5층 철골구조물의 지진하중을 구현하는 가진시스템을 설계하였다.

그러나 내진설계에 있어서 구조물의 비탄성응답이 매우 중요하며 인공적인 액츄에이터 형식의 장비를 이용하여 대형 실물규모 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 풍하중의 관계를 획득하기 어렵다. 따라서 풍하중 가진을 받는 건축구조물의 시스템식별은 일반적으로 입력 정보가 없는 상시진동계측을 통해 계속된 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 계속된 출력데이터는 구조물의 동적 특성을 정확하게 평가하기에는 좋지 않다.

본 논문에서는 그림 1처럼 선형질량가진기(linear mass shaker, LMS)와 능동동조질량감쇠기(active tuned mass damper, ATMD)를 이용하여 구조물의 풍하중응답을 묘사한다. 선형 가진기가 목표응답의 궤적을 유지하기 위해서 가

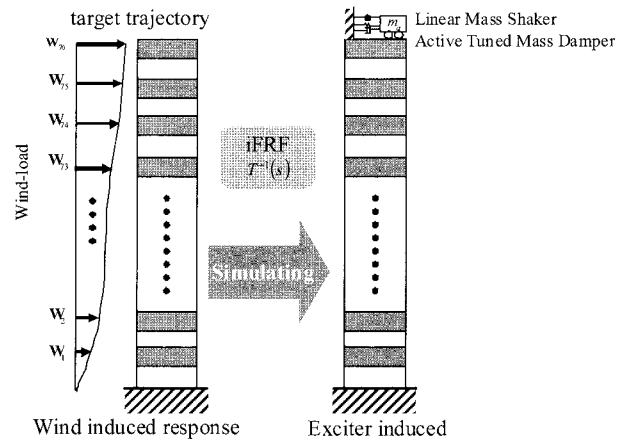


그림 1 LMS와 ATMD를 이용한 풍응답 묘사의 개념도

진기 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. 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.

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.

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

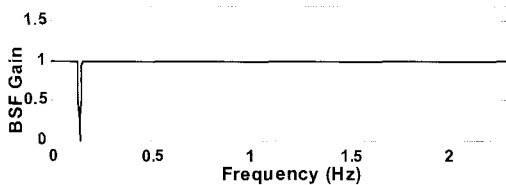
여기서, \widehat{T}_{yu}^{-1} 은 T_{yu}^{-1} 의 부분행렬이다. \widehat{T}_{yu}^{-1} 은 T_{yu}^{-1} 의 목표응답에 해당하는 열을 추출하여 구성된다.

3. 필터 및 포락곡선 함수

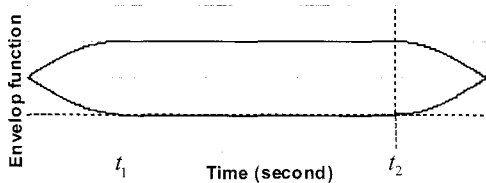
구조물의 전달함수의 크기가 0으로 접근하는 주파수구간을 포함할 때 이러한 구간에서의 역전달함수는 무한히 증가할 수 있다. 가진력은 역전달함수와 출력 신호의 곱으로 계산되어지기 때문에 증가된 입력신호는 그 구간을 포함하는 출력 요소가 작은 증폭을 가질 때 계산될 수 있다. 이러한 계산을 통해 가진 시스템은 실제 가진되지 않은 계측 노이즈와 이산 푸리에 변환을 사용하는 신호처리에 있어서 피할 수 없는 스펙트럼 손실(spectral leakage)에 의한 출력 신호의 약간의 주파수 특성 변화에 매우 민감하게 되며, 목표 응답이 실제 가진되지 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.

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

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



(a) 밴드스탑 필터의 형상



(b) 포락곡선함수의 형상

그림 2 밴드스탑 필터와 포락곡선함수의 계인 형상

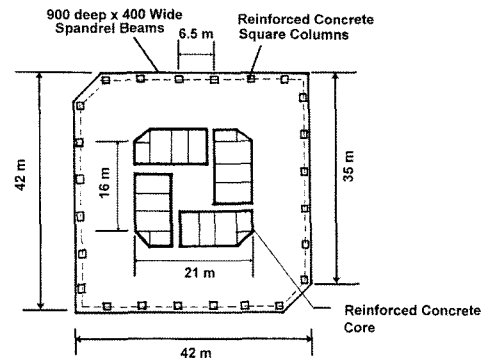
$$a_{co} = \begin{cases} \omega < \omega_1; & 1 \\ \omega_1 \leq \omega \leq \omega_2; & 0 \\ \omega > \omega_2; & 1 \end{cases} \quad (7)$$

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.

4. 수치예제

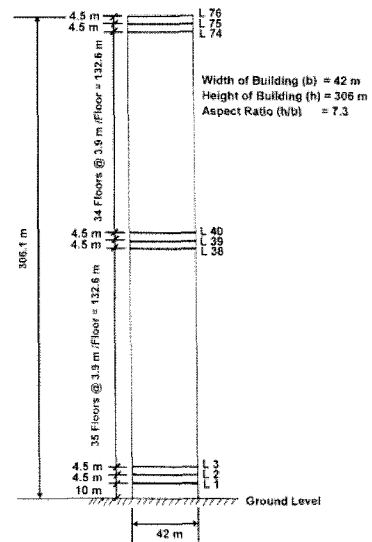
4.1 풍하중을 받는 76층 벤치마크 구조물

풍하중을 구현하는 가진기는 76층 높이 306m, 폭 높이비는 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

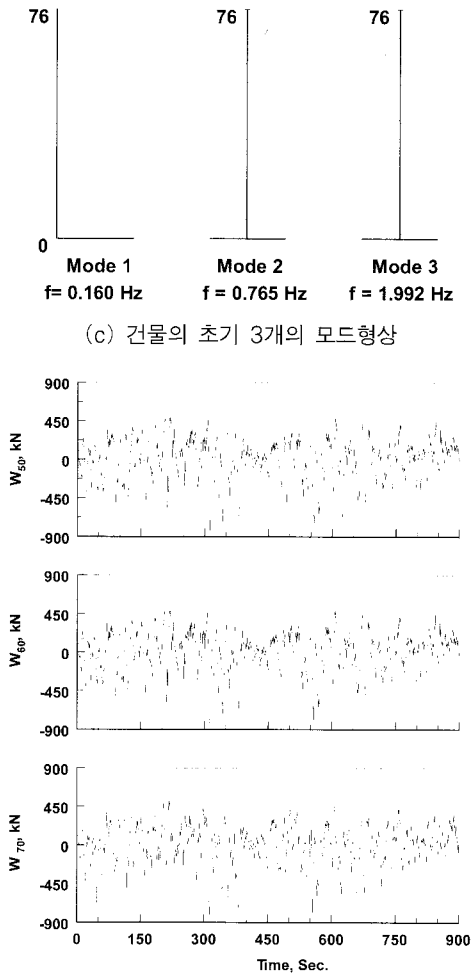


No. of columns per floor = 24 (six on each side at 6.5 m centers)

(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

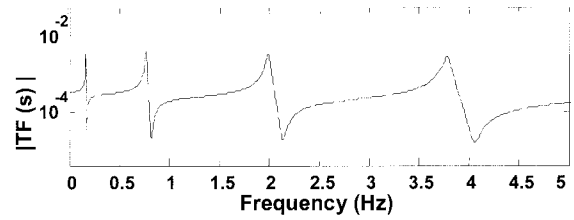
시간을 단축하기 위하여 Yang 등(1993)이 제안한 23자유도를 가지는 축소된 상태공간 시스템 모델을 사용하였다. 또한 풍하중 벡터는 23자유도 모델에 따른 각 위치에 부근한 풍하중의 합을 계산하여 적용하였다. 그림 3(a), (b)는 76층 벤치마크 문제 구조물의 평면도와 입면도를 보여주며, 그림 3(c), (d)는 구조물의 모드형상과 50층, 60층 그리고 70층의 풍하중의 시간이력을 보여준다.

4.2 오차 평가 지수

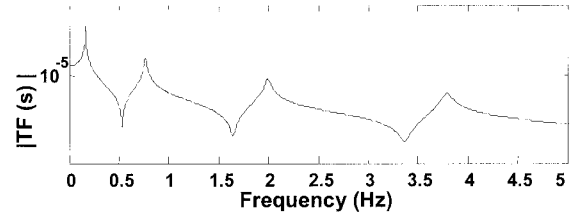
바람과 가진기에 의한 구조물의 응답의 비교를 통하여 제안된 방법의 유효성을 검증하기 위하여 시간과 주파수 영역에서의 각각 두 가지의 오차 지수를 고려할 수 있다.

시간 영역에서의 정규화된 추적오차를 다음과 같이 정의한다.

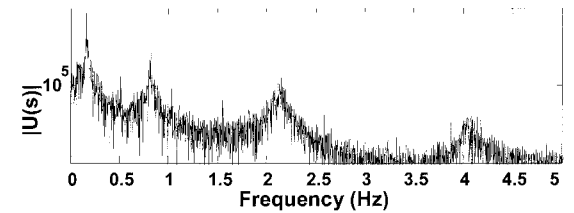
$$e_t = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \sqrt{\{z_a(i\Delta t) - z_f(i\Delta t)\}^2} \quad (8)$$



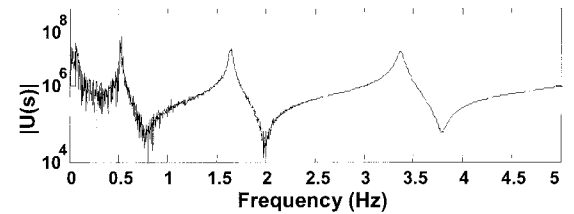
(a) 75층 가속도 전달함수



(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

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.

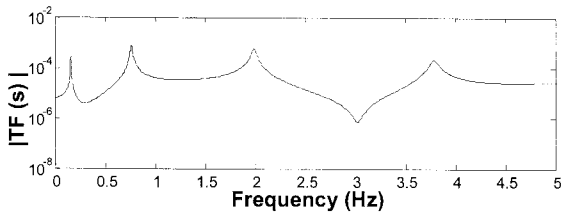
주파수 영역에서의 정규화된 추적 오차는 다음과 같이 정의한다.

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

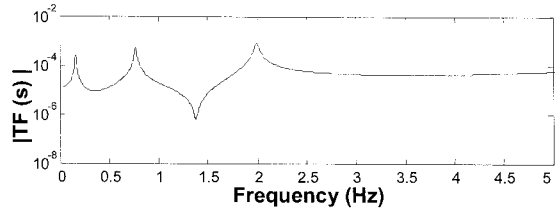
여기서, N 은 주파수 응답 데이터의 개수이고, $X_f(\omega)$ 와 $X_f(\omega)$ 는 각각 $\ddot{x}_f(t)$ 와 $\ddot{x}_i(t)$ 의 이산 푸리에 변환이며, $E[e_f(\omega)]$ 는 주파수영역에서의 정규화된 평균 추적오차이다.

4.3 LMS (linear mass shaker) 가진

본 절에서는 임의의 요구된 힘을 생성할 수 있는 LMS를

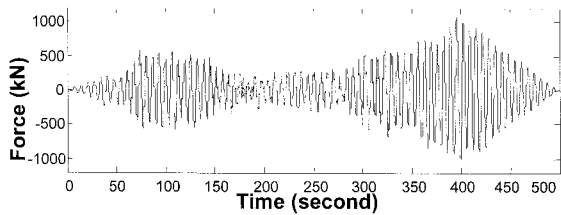


(a) 30층 가속도 전달함수

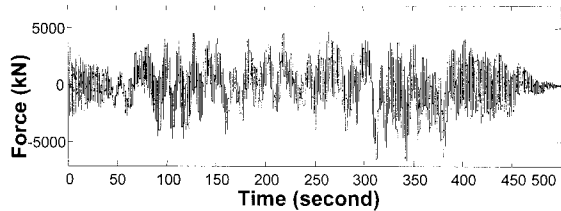


(b) 50층 가속도 전달함수

그림 5 LMD에 의한 30층 및 50층 가속도 응답의 전달함수



(a) 75층 가속도를 목표로 생성된 LMS 힘의 시간이력



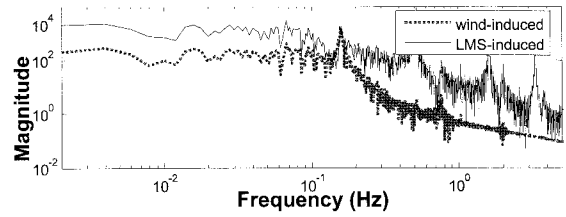
(b) 75층 변위를 목표로 생성된 LMS 힘의 시간이력

그림 6 LMS 힘의 시간이력 (unfiltered)

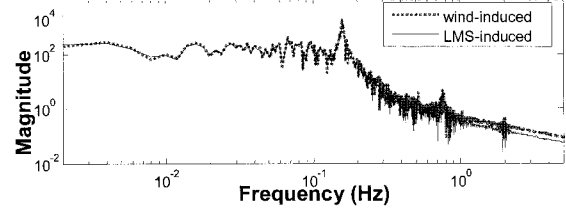
가진기로써 사용한다. LMS는 76층에 설치되며 500ton의 질량을 갖는다고 가정한다. 500ton의 질량은 벤치마크 문제에 진동제어장치로 사용된 ATMD의 질량과 같은 질량으로 ATMD와 비교하기 위해 일치시켰다. 이 질량은 최상층의 질량의 약 45%의 질량이며 전체 구조물의 질량의 0.327%를 차지한다.

그림 4(a)와 (b)는 75층 가속도와 변위응답의 전달함수를 보여준다. 그림 4(a)에서의 가속도 전달함수에 각 모드 고유 주파수 근처 고유 주파수점보다 약간 큰 지점에 전체 풍하중에 의한 구조물 응답을 지배하는 제로점이 관측된다.

그림 5는 주파수 응답 함수를 보여주며 76층 가속도와 변위응답을 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 많



(a) 가속도 응답



(b) 변위 응답

그림 7 75층 변위응답을 목표로 생성된 LMS에 의한 75층의 주파수 응답

표 1 필터 설계를 위한 컷오프 주파수

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

이 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 증대하다.

그림 5(a)~(b)는 각각 30층 및 50층 가속도 전달함수를 보여준다. 여기서 그림 4(a)와 같이 75층 가속도 전달함수와는 다르게 제로점이 거의 발생하지 않았으며, 특히 가진기 스트로크를 매우 크게 발생시킬 수 있는 1차모드 근처의 제로점은 관측되지 않았다.

그림 7은 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 6과 그림 7에 의해 관측된 결과를 근거로 하여 변위와 가속도 응답을 합리적으로 구현할 수 있는 가속도 응답만 LMS힘을 생성하기 위한 목표응답으로 사용하도록 한다.

수치해석은 필터와 포락곡선함수의 사용 유무와 목표응답을 바꿔가며 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 감쇠하는 시간 $t_2=100\text{sec}$ 로 구간을 정하였다.

그림 8은 각각 목표응답과 필터사용 유무에 따라 앞 절에서 정의한 시간 및 주파수영역에서의 오차의 총 분포를 보여준다. processed와 unprocessed는 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 그림 5에서 관측된 것과 같이 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. 그리고 75층의 가속도 응답을 목표 응답으로 선택했을 때 다른 층의 응답들이 시간영역에서의 오차는 커지지만 주파수영역에서의 오차는 감소하는 것으로 나타나있으며, 특히 주파수영역의 응답에서 필터의 영향이 상당히 큰 것으로 나타났다. 그러나 30층과 50층의 가속도 응답을 목표로 한 경우는 주파수영역 응답에서 필터의 영향이 크지 않았다. 이것은 그림 5와 그림 4(a)를 비교하였을 때 설

계된 필터는 1차모드 부근에서 제로점에 의해 발생하는 불필요한 가진기의 스트로크를 감소시키는 결과를 얻지만 그렇지 않을 경우 필터의 효과는 미미한 것으로 판단된다.

그림 8(a)와 (b)의 비교결과는 e_f 와 e_f' 의 분포경향이 상

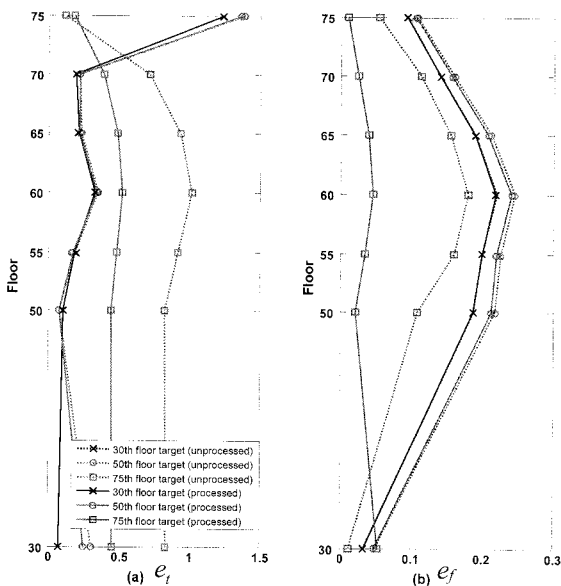
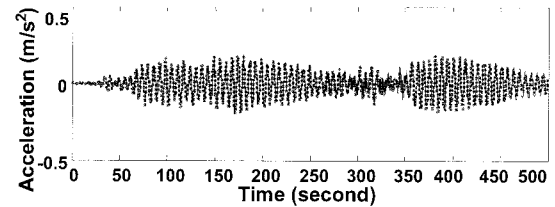
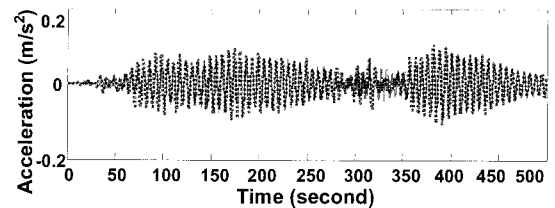


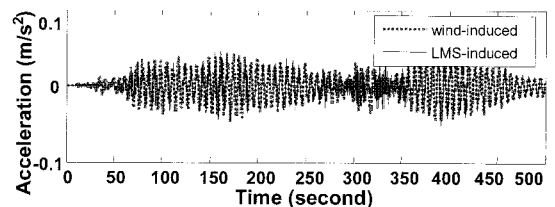
그림 8 필터사용 및 목표 응답에 따른 오차 분포



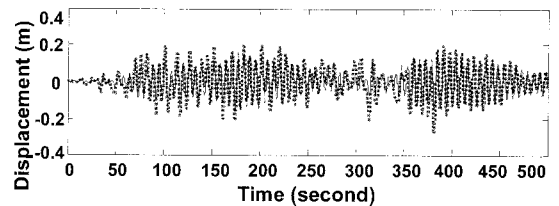
(a) 76층 가속도 응답의 시간이력



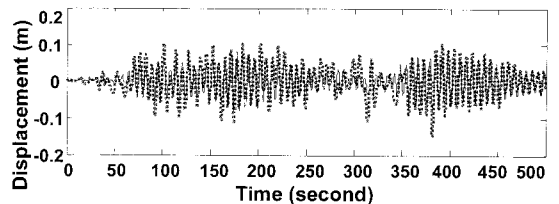
(b) 50층 가속도 응답의 시간이력



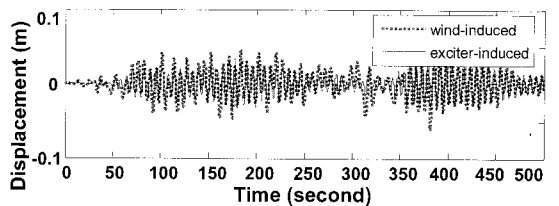
(c) 30층 가속도 응답의 시간이력



(d) 75층 변위 응답의 시간이력

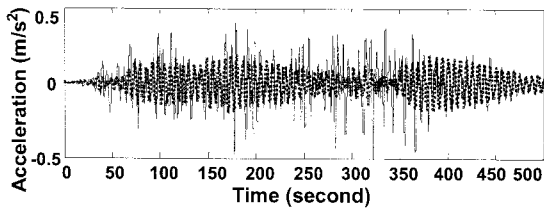


(e) 50층 변위 응답의 시간이력

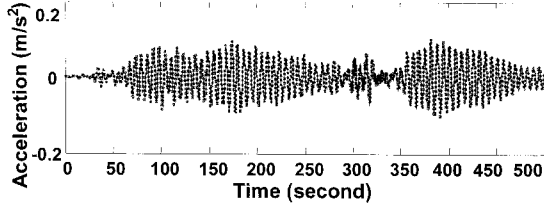


(f) 30층 변위응답의 시간이력

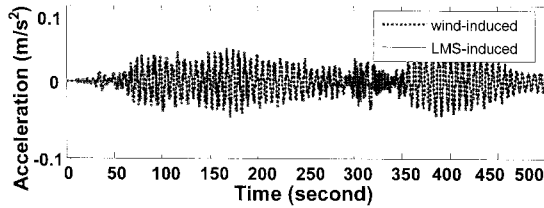
그림 9 풍하중 및 LMS 가진에 의한 응답 (75층 가속도를 목표로 가진력을 발생한 경우)



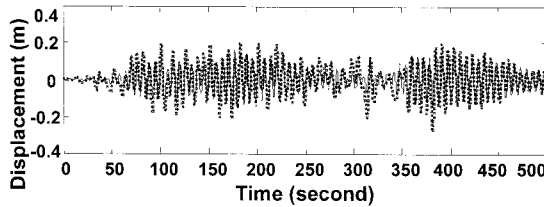
(a) 75층 가속도 응답의 시간이력



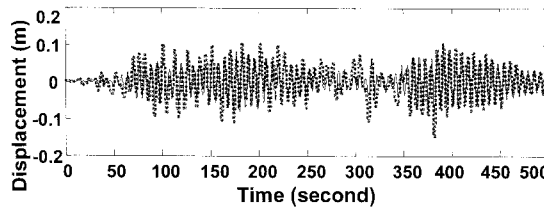
(b) 50층 가속도 응답의 시간이력



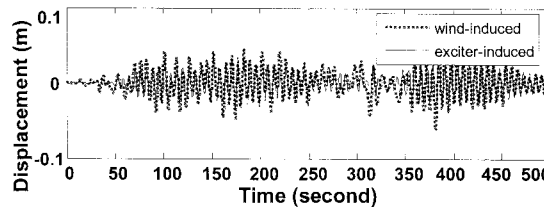
(c) 30층 가속도 응답의 시간이력



(d) 75층 변위 응답의 시간이력



(e) 50층 변위 응답의 시간이력



(f) 30층 변위 응답의 시간이력

그림 10 풍하중 및 LMS 가진에 의한 응답
(50층 가속도를 목표로 가진력을 발생한 경우)

당히 다르며 e_i 의 크기가 e_f 에 비해 큼을 보여준다. 75층 가속도를 목표로 설정하였을 때 e_i 와 e_f 는 목표한 75층의 가속도에서 가장 작지만 그 외의 다른 층에서의 e_i 값은 커졌

으며 e_f 는 30층의 가속도를 제외한 층의 가속도에서 가장 작은 값으로 유지하고 있다. e_i 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 9 와 10은 각각 풍하중과 LMS를 통해 가진한 구조물의 응답의 각각 75층 30층 가속도와 필터를 적용한 목표 응답에 따른 시간이력 결과를 보여준다. 그림 9는 LMS가진한 가속도 응답이 목표한 75층 가속도 응답을 포함하여 풍하중에 의한 응답과 잘 일치하는 반면에 변위 응답에 있어서 진폭이 LMS에 의한 응답이 다소 과소평가됨을 알 수 있다. 그림 10에서는 30층 가속도를 목표로 가진했을 때의 결과는 변위응답은 일치함을 보이나 75층 가속도는 과대평가함을 보여준다.

4.4 ATMD(active tuned mass damper) 가진

76층 벤치마크 문제 건물에서 LMS와 같은 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(Yang 등, 1999).

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

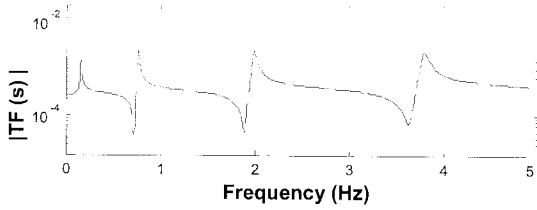
최상층에 ATMD를 설치한 건물의 운동방정식은 다음 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

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

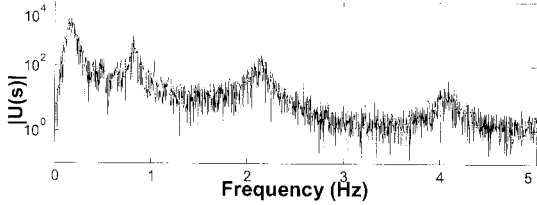
그리고 풍하중 가진이 없다고 가정하면 건물의 운동방정식은 다음 식 (11)과 같이 표현된다.

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

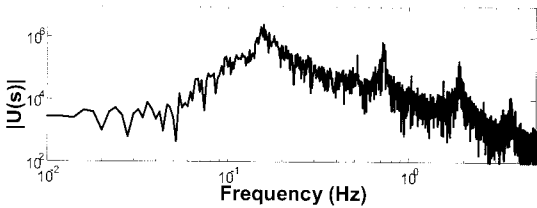
여기서, B_t 는 ATMD가 설치된 층의 위치벡터이고, M_s , C_s 와 K_s 는 각각 건물의 질량, 감쇠계수 및 강성 행렬이



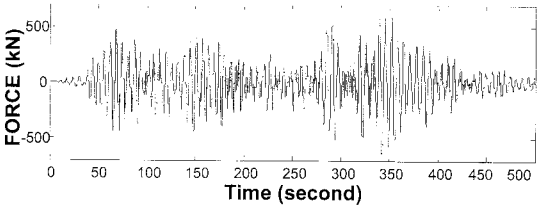
(a) ATMD에 의한 75층의 가속도 전달함수



(b) ATMD 절대가속도의 주파수 응답



(c) ATMD 가진력의 주파수 응답



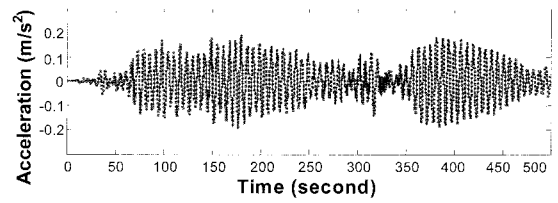
(d) ATMD 가진력의 시간이력
그림 11 ATMD 가진력의 생성

며, m_t , c_t 와 k_t 는 각각 ATMD의 질량, 감쇠계수 및 강성이다.

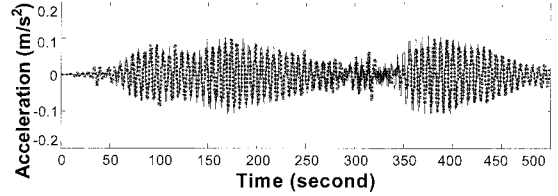
그림 11(a)은 ATMD 절대가속도에 의한 75층의 가속도 전달함수를 보여준다. LMS의 경우와 다르게 1차모드 주파수 근접하여 제로점이 관측되지 않아 ATMD에 의하여 예측하지 않는 주파수 응답을 발생을 막기위한 밴드스탑필터를 요구하지 않는다. 그림 11(b)는 ATMD의 가진력의 주파수 응답을 보여주며 그림 11(c)와 (d)는 ATMD에 의해 적용된 유효힘의 시간 및 주파수 응답을 보여준다.

그림 12는 75층 가속도 응답을 목표로 설정했을 때 ATMD 가진에 의한 응답과 풍하중 가진에 의한 응답을 비교한 시간이력 결과이다. 모든 가속도응답은 각각 잘 일치하나 변위응답의 경우 시간구간에 따라 약간의 과소 및 과대평가가 된다.

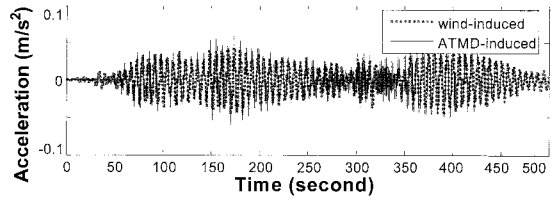
그림 13은 ATMD 가진 및 풍하중 가진에 의한 75층 가속도 주파수응답을 보여준다. 풍하중과 ATMD가진에 의한 응답이 전 주파수 영역에 걸쳐 잘 일치함을 알 수 있다.



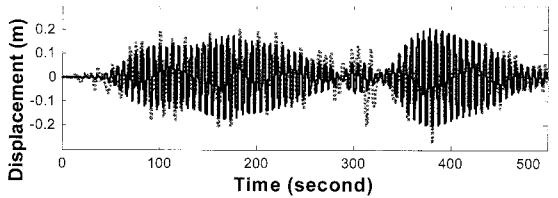
(a) 75층 가속도 응답의 시간이력



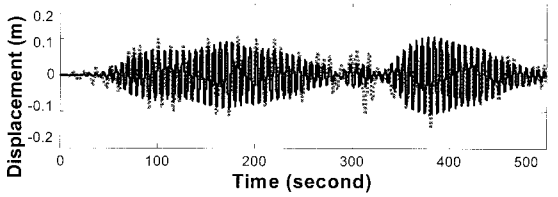
(b) 50층 가속도 응답의 시간이력



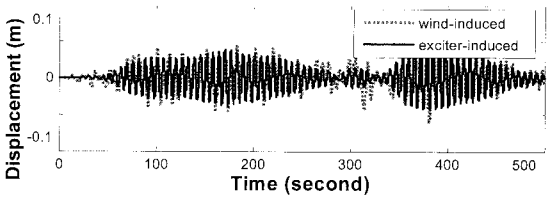
(c) 30층 가속도 응답의 시간이력



(d) 75층 변위 응답의 시간이력



(e) 50층 변위 응답의 시간이력



(f) 30층 변위 응답의 시간이력

그림 12 풍하중 및 ATMD 가진에 의한 응답 (75층 가속도를 목표로 가진력을 발생한 경우)

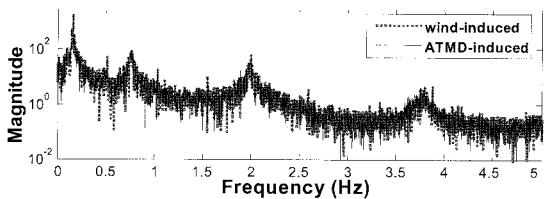


그림 13 풍하중 및 ATMD 가진에 의한 75층 가속도 주파수 응답

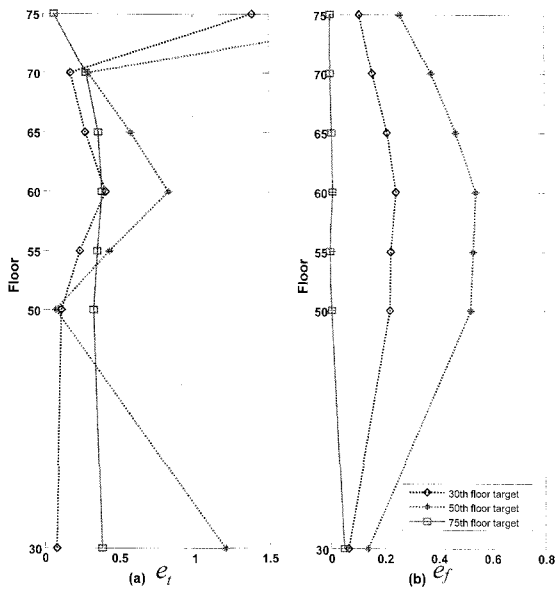


그림 14 ATMD의 오차 분포

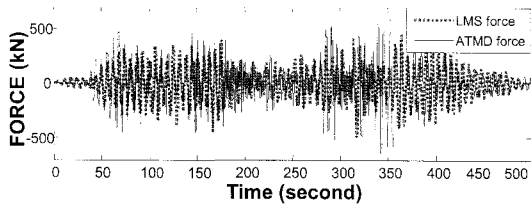


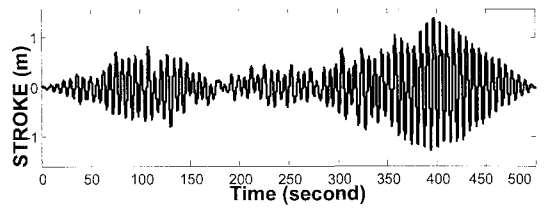
그림 15 LMD와 ATMD의 가진력의 비교

그림 14는 목표 가속도응답에 따른 주파수영역의 오차분포를 보여준다. 그림 14(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 응답을 모사하는 최적의 성능을 발휘하는 ATMD를 설계했다고 볼 수 있다.

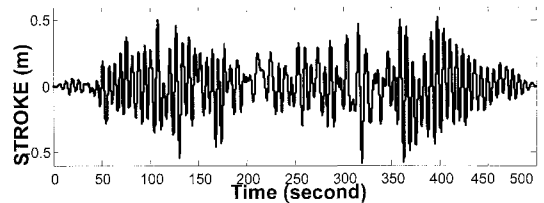
4.5 LMS와 ATMD의 비교

그림 15는 LMS와 ATMD 가진시스템의 가진력의 시간이력을 보여준다. 가진력의 최대값은 LMS에 비해 ATMD가 더 많이 발생한다. 그림 16은 필터 사용 유무와 ATMD의 스트로크를 비교하였다. 필터처리한 LMS의 스트로크는 필터처리하지 않은 LMS와 ATMD의 스트로크보다 훨씬 작다. 이 사실은 ATMD는 풍하중 구현에서의 좋은 성능을 보여주기 위해서는 많은 스트로크를 유발하며 이런 스트로크 요구는 ATMD 제한사항에 검토되어야 한다.

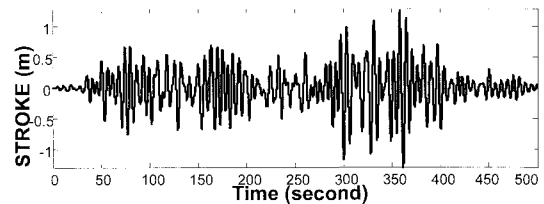
표 2는 필터 유무의 LMS 및 ATMD 시스템의 가진력, 스트로크의 최대값과 RMS값 및 오차의 수치값을 보여준다. 오차는 목표와 평가 응답이 이상적일 때의 결과 값이며, 가진력과 스트로크는 목표응답이 75층 가속도일때의 결과 값이



(a) LMS 스트로크 (unfiltered)



(b) LMS 스트로크 (filtered)



(c) ATMD 스트로크

그림 16 스트로크 비교

표 2 LMS와 ATMD의 비교

| | | LMS (unfiltered) | LMS (filtered) | ATMD |
|-------------------------|-------|------------------|----------------|--------|
| 75th floor acceleration | e_t | 0.117 | 0.192 | 0.074 |
| | e_f | 0.054 | 0.011 | 0.003 |
| 50th floor acceleration | e_t | 0.081 | 0.081 | 0.083 |
| | e_f | 0.219 | 0.213 | 0.525 |
| 30th floor acceleration | e_t | 0.082 | 0.082 | 0.082 |
| | e_f | 0.034 | 0.033 | 0.065 |
| Stroke(m) | Peak | 1.402 | 0.519 | 1.265 |
| | RMS | 0.436 | 0.183 | 0.333 |
| Actuator force (kN) | Peak | 1068.22 | 441.68 | 655.78 |
| | RMS | 323.92 | 136.44 | 170.39 |

다. 그림 15와 16에서 관측된 사실을 정리하면, LMS의 성능은 밴드스탑필터를 사용하여 향상할 수 있으며, ATMD는 LMS에 비해 풍응답 구현에 효과적이지만 ATMD는 많은 가진력과 스트로크를 요구한다.

5. 결 론

본 논문은 건축구조물의 풍하중 구현을 위한 가진시스템의 설계를 실제 건축구조물에 풍특성평가를 위한 예비 연구로

제한하였다. LMS와 ATMD에 의한 가진력은 구조물 응답의 역전달함수를 이용하여 생성하였다. 또한 LMS의 경우 예측하지 않은 모드 가진을 하는 계로점을 제거하기 위해 밴드스탑필터를 사용하였으며, LMS와 ATMD에서 초기 과도 상태의 응답으로 인한 오차를 제거하기 위해 포락곡선함수를 사용하였다. 풍하중이 전층에 가진하는 건물의 응답을 확인할 수 있는 76층 벤치마크 문제 건물을 통한 수치해석 결과는 특정층에 설치한 가진시스템에 의해 그 응답을 구현하여 일치함으로써 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. 또한 실제 풍하중 구현을 적용하기 위해서 구조물에 질량형 제어장치인 ATMD 등이 설치되어 있는 경우는 이러한 제어장치를 이용하여 간단히 풍하중구현할 수 있는 장점이 있으며, 그렇지 않은 경우 양중 및 운반이 용이하고 간단히 설치가 가능한 LMS를 설계하고 설치하여 풍하중 구현을 실현하는 것이 요구된다. 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.

감사의 글

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 기초과학 연구지원사업(R01-2007-000-10872-0)과 우수연구센터육성사업(R11-2007-101-03004-0)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

이상현, 박은천, 윤경조, 이성경, 유은종, 민경원, 정란, 민정기, 김영찬 (2006) 실물 크기 구조물의 강제진동실험 및 지진응답 모사를 위한 HMD 제어기 설계, 한국지진공학회

논문집, 10(6), pp.103~114.

- Alvin, K.F., Park, K.C. (1994) Second-Order Structural Identification Procedure via State-Space-Based System Identification, *AIAA Journal*, 32, pp.397~406.
- Au F.T.K., Jiang R.J., Cheung Y.K. (2004) Parameter identification of vehicles moving on continuous bridges, *Journal of sound and vibration*, 269, pp.91~111.
- Dyke, S.J., Spencer Jr., B.F., Quast, P., Sain, M.K., Kaspari Jr., D.C., Soong, T.T. (1994) 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.
- Friswell, M.I., Mottershead, J. E. (1995) Finite Element Model Updating in Structural Dynamics, *Kluwer Academic Publishers*, Boston, London.
- Herman V.A., Bart P. (2003) Sensors and Systems for Structural Health Monitoring, *Journal of Structural Control*, 10, pp.117~125.
- Juang, J.N. (1994) Applied System Identification, *Prentice Hall*, Englewood Cliffs, NJ.
- Ljung, L. (1987) System Identification: Theory for the User, *Prentice Hall*, Englewood Cliffs, NJ.
- Madenci, E, Barut, A. (1994) A free-formulation-based flat shell element for non-linear analysis of thin composite structures, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 37, pp. 3825~3842.
- Yang J.N., Agrawal A.K., Samali B., Wu J.C. (1999) A Benchmark Problem for Response Control of Wind-Excited Tall Buildings, World Wide Website, <http://www.eng.uci.edu/~jnyang/benchmark.htm>
- Yu E., Whang D.H., Conte J.P., Stewart J.P., Wallace J.W. (2005) Forced vibration testing of buildings using the linear shaker seismic simulation (LSSS) testing method, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, 34, pp.737~761.