

# 실물 크기 구조물의 강제진동실험 및 지진응답 모사를 위한 HMD제어기 설계

## Forced Vibration Test of a Real-Scale Structure and Design of HMD Controllers for Simulating Earthquake Response

이상현<sup>1)</sup> · 박은찬<sup>2)</sup> · 윤경조<sup>2)</sup> · 이성경<sup>3)</sup> · 유은종<sup>4)</sup> · 민경원<sup>5)</sup> · 정 린<sup>5)</sup> · 민정기<sup>6)</sup> · 김영찬<sup>7)</sup>

Lee, Sang-Hyun · Park, Eun-Churn · Youn, Kyung-Jo · Lee, Sung-Kyung · Yu, Eunjong  
Min, Kyung-Won · Chung, Lan · Min, Jeong-Ki · Kim, Young-Chan

**국문 요약** >> 강제 진동 실험은 구조물의 수학적 모델과 실제 모델의 상관관계를 입증하여 구조물의 성능을 정확히 평가하기 위해 중요하다. 동적 및 정적 가진 실험을 통해 구조물의 내진성능을 평가하는 다양한 기법이 사용되고 있다. 본 논문에서는 복합 질량형 감쇠기(Hybrid Mass Damper, HMD)를 이용하여 지진하중을 모사하는 실물크기 철골조 구조물의 강제진동실험이 수행되었다. ANSYS를 사용하여 구조물의 유한요소 해석모델을 구축하였고, 강제진동 실험을 통해 얻은 계측데이터를 사용하여 이 해석모델을 갱신하였다. 의사 지진 가진 실험은 HMD에 의해 유도된 층응답이 실험을 통해 갱신된 유한요소모델을 사용한 수치해석 응답과 일치함을 보여준다.

**주요어** 강제진동실험, 실물규모구조물, 복합질량형감쇠기, 유한요소모델갱신, 역전달함수법, 시스템식별

**ABSTRACT** >> Forced vibration testing is important for correlating the mathematical model of a structure with the real one and for evaluating the performance of the real structure. There exist various techniques available for evaluating the seismic performance using dynamic and static measurements. In this paper, full scale forced vibration tests simulating earthquake response are implemented by using a hybrid mass damper. The finite element (FE) model of the structure was analytically constructed using ANSYS and the model was updated using the results experimentally measured by the forced vibration test. Pseudo-earthquake excitation tests showed that HMD induced floor responses coincided with the earthquake induced ones which were numerically calculated based on the updated FE model.

**Key words** forced vibration test, real-scale structure, hybrid mass damper, finite element model updating, inverse transfer function method, system identification

### 1. 서론

지진공학 분야에서 구조물의 동적특성을 식별하고 내진성능을 평가하기 위한 강제진동실험은 진동대, 편심 가진기, 반력벽 등을 사용하여 축소 및 실규모의 구조물에 이르기 까지

폭넓게 수행되어져왔다. 질량, 감쇠 및 강성으로 구성된 구조물의 동적응답의 변화는 구조물의 고유주기 및 모드형상등과 같은 모드 특성의 변화로 나타나며, 강제진동실험을 통해 얻어진 모드 특성을 이용하여 구조물의 해석모델을 수립하는 시스템식별기법에 관한 연구가 수행되어졌다.<sup>(1,2)</sup> 시스템식별의 주된 목적은 강제가진 실험시 얻어진 가진 하중과 측정응답의 관계를 모사할 수 있는 해석 모델을 구축하는 것이다. Juang은 마르코프(Markov) 파라미터와 관측기/갈만 필터를 이용한 시간영역 시스템 식별기법 및 행렬분해를 이용한 주파수 영역 식별기법을 제시하였다.<sup>(3)</sup> Dyke 등은 3층 소형구조물에 대하여 진동대와 능동질량가진기로 가진하여 각각의 가진하중에 대한 시스템 식별을 수행한 후 모델축소기법을 적용하여 시스템 행렬을 구성하였다.<sup>(4)</sup> 그러나 이 Juang 및

<sup>1)</sup> 단국대학교 건축공학과, 전임강사  
(대표저자: lshyun00@dankook.ac.kr)  
<sup>2)</sup> 단국대학교 건축공학과, 석사과정  
<sup>3)</sup> 단국대학교 건축공학과, 연구전임강사  
<sup>4)</sup> 서울대학교 건축공학과, 박사후 연구원  
<sup>5)</sup> 단국대학교 건축공학과, 교수  
<sup>6)</sup> 유니스기술연구소, 연구원  
<sup>7)</sup> 유니스테크놀로지, 대표

본 논문에 대한 토의를 2007년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 10. 11 / 심사종료일 : 2006. 11. 27)

Dyke등과 같은 일반적인 시스템식별기법을 통해 얻어진 모델은 입력과 출력의 관계를 모사할 뿐 모델 자체가 질량, 점성, 강성과 같은 물리적 의미를 가지지 못한다. 강경수 등<sup>(5)</sup>은 시간영역 시스템식별기법을 통해 얻어진 시스템 행렬로부터 Alvin 등<sup>(6)</sup>이 제안한 CBSI(Common Based-normalized System Identification)기법을 이용하여 물리적 의미를 가지는 유한요소(Finite Element, FE)모델을 추출하였다.

구조물의 내진성능을 실험적으로 정확하게 평가하기 위해서는 실제 지진과 유사한 하중을 모사할 수 있는 진동대 실험을 수행해야 한다. 그러나 진동대를 이용하여 실물 크기 구조물을 가진하는 일은 매우 어려우며 일반적 실물 크기의 구조물의 축소모델을 제작하여 진동대실험을 수행한다. 유은종 등<sup>(7)</sup>은 선형가진기에 의한 구조물의 응답의 역전달함수와 실제 지진하중에 의한 응답과 가진기에 의한 응답의 시간이력 오차를 최소화하도록 하는 방법을 이용하여 구조물의 지진응답을 모사하는 선형 가진시스템을 설계하였다. 그러나 이 결과는 수치해석을 통해서 얻어진 것이며, 이 방법을 실제 구조물에 적용하는 경우 몇 가지 제약조건을 가진다. 첫째 강제진동실험은 실험구조물에서 진폭이 큰 진동원을 사용하기엔 부적절하며 특히 안전성 및 탄성 수치모델을 사용하는 등의 문제로 구조물의 비탄성거동 범위까지 가진 할 수 없다. 둘째로 실제 넓은 대역폭으로 가진하는 방법의 전통적인 진동원을 사용하기에 부적절하다. 셋째로 현장 실험은 실험 장비 및 설치문제 등의 이유로 주요 요소의 거동이 발생하는 부분에 충분히 밀도 있게 센서를 부착하기에 어려운 점이 있다. 최종적으로 구조물이 해석모델에 기초하기 때문에 시스템 식별기법을 이용한 시스템행렬을 구성하는 과정이 전체적인 연구에 추가적으로 포함되어야 한다. 따라서 이러한 제약조건하에서 제안된 의사지진 진동실험의 유효성을 실험적으로 검증할 필요가 있다.

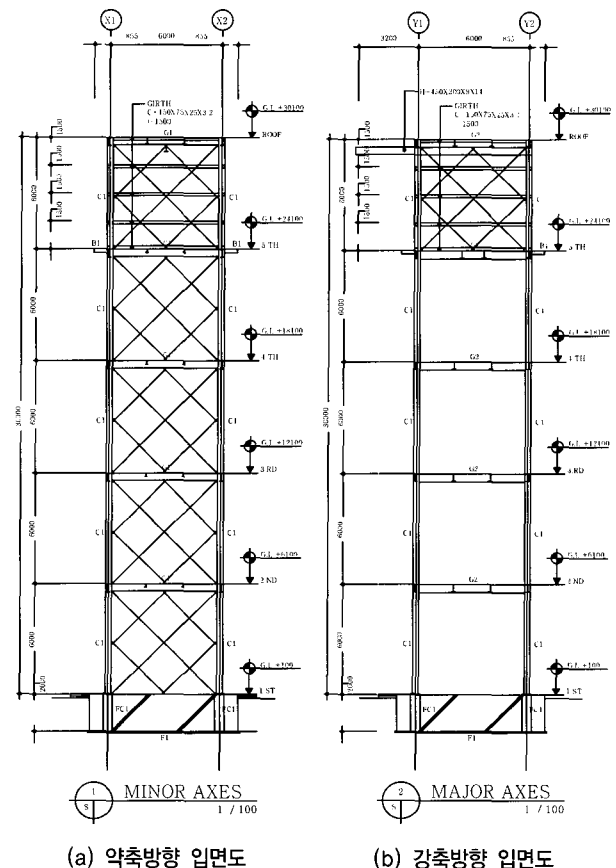
본 논문에서는 유은종 등이 제안한 방법 중 구조물의 역전달함수를 이용하는 방법을 사용하여 지진응답을 모사하는 가진기를 설계한 후 이를 실험을 통해 검증하였다. 먼저 실제 크기의 5층 철골구조물에 설치된 복합형 질량 감쇠기(Hybrid Mass Damper, HMD)를 이용하여 가진을 수행한 후 가속도 응답과 변위응답을 계측하여 가진기로부터 각층 응답의 전달함수를 구하였다. 전달함수로부터 얻어진 모드 정보에 기초하여 상용프로그램을 사용하여 얻어진 수치해석 FE모델을 갱신하였다. 그리고 갱신된 모델에 기초하여 실제 지진하중에 대한 응답을 해석적으로 얻었으며, 이 지진응답 중 특정 목표응답을 모사하도록 HMD 입력신호를 생성한 후 가진하였다. 최종적으로 수치적으로 얻어진 각

층 지진응답과 실험을 통해 얻어진 값을 비교하여 본 논문에서 제시된 방법의 유효성을 검증하였다.

본 논문에서 제안하는 구조물의 현장 의사지진 진동실험은 다음과 같은 공학적 중요성을 가진다. 첫째, 구조물은 실제 규모로 실험이 수행되어 실험실에서 유발되는 많은 인공적인 구속조건에서 자유롭다. 둘째, 다수의 현장상태의 조건을 포함하여 실험이 수행되어 구조물의 내진성능 효과의 검증과 구조물 건전도에 필요한 진동기술의 이용가능성을 평가할 수 있는 매우 가치 있는 데이터를 획득할 수 있다. 셋째, 본 논문에서 제안하는 의사 지진실험법은 상층에 설치된 HMD를 가진하여 지진을 모사하는 실험으로 실험규모의 건축구조물의 내진성능 평가를 위해 대형 진동대를 제작할 필요가 없는 장점이 있다.

## 2. 실험 모델

대상 실험구조물은 그림 1, 2와 같이 실물규모의 5층 철골구조물이고 층고 6m, 슬래브 6mX6m, 층질량 20,000kg을 가진다. 각층은 4개의 H형강(H-310X310X20X20) 기둥으로 구성되어 있고 5층에 설치된 HMD는 대용량 리니어 모터를 이용한 감쇠기(Linear Motor Damper; LMD)로서 코일이



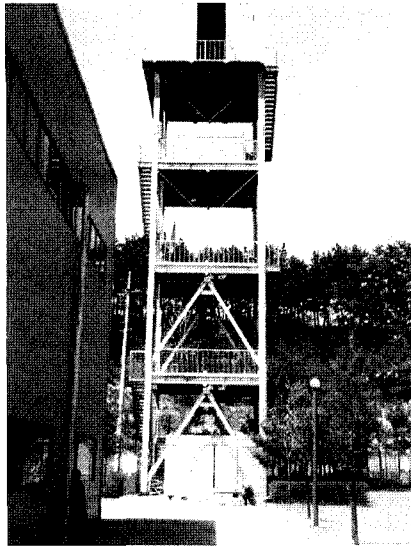
〈그림 1〉 대상 실험구조물의 입면도

고정되어 있고 영구자석과 철심이 가동되어 계자부 역할과 가동질량(1,500kg)의 역할을 동시에 함으로써 가진기 이외에 수동댐퍼로도 사용될 수 있도록 설계 제작 되었다.<sup>(8)</sup> H형강 기둥은 약축 및 강축 방향을 가지고 있으며 HMD는 약축방향

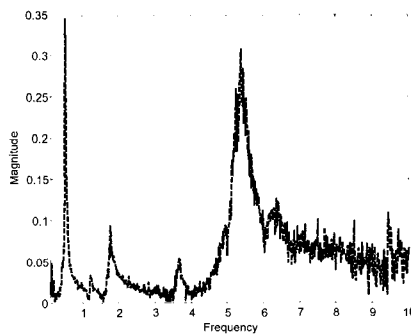
으로 설치되었다. 그림 2(b)는 실험 구조물의 가속도 전달함수를 나타내며 1차모드 주파수가 0.52Hz로 식별되었다.

### 3. 현장 계측 및 실험 시스템

현장 계측 및 실험 시스템은 그림 3 및 4와 같으며 한 대의 랩탑PC를 이용하여 가진과 계측을 동시에 수행하는 페루프로 구성하여 가진 및 계측시스템의 레이턴시(Latency)를 최소화 하였다. 여기서 레이턴시란 데이터 한 샘플을 전송하기 전에 대기하는 시간 또는 수집할 때 대기하는 시간을 말하며 컴퓨터를 이용하는 모든 시스템은 이러한 레이턴시가 존재한다. 즉 두 대의 가진 및 계측시스템을 구성하는 개루프 시스템과 비교했을 때 각각의 시스템의 레이턴시가 서로 일치하지 않아서 발생할 수 있는 전체시간 지연 오차를 페루프 시스템을 구축함으로써 가진신호 내보낼 때의 시간지연과 계측신호를 수집할 때의 시간지연을 내부적으로 최소화 할 수 있다. 계측시스템에서 2~5층의 가속도계는 PCB사 모델명 393B12와 HMD및 옥상층의 가속도계는 KYOWA사 AS-2GB를 사용하였고 가속도계 앰프는 PCB Monitran과 KYOWA DPM-711B를 사용하였다. 데이터



(a) 대상 실험구조물 사진(유니슨)

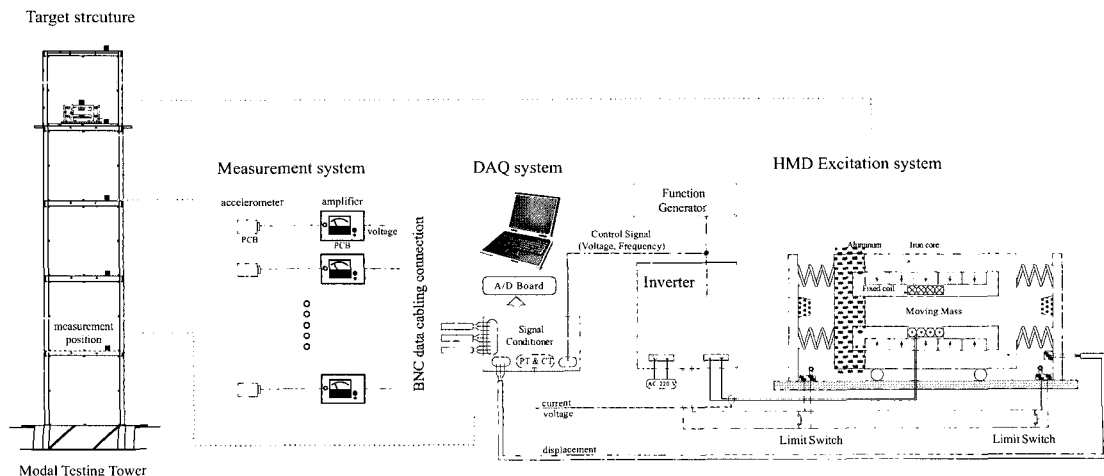


(b) HMD 절대가속도-5층바닥 가속도 전달함수

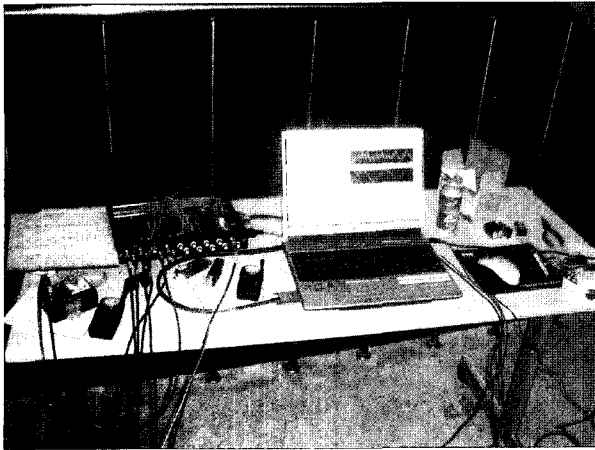
〈그림 2〉 대상 실험구조물의 모습과 전달함수 특성

〈표 1〉 부재 목록

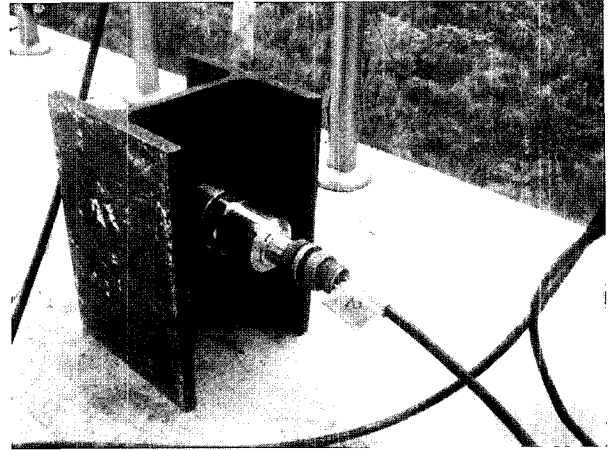
MEMBER LIST	
C1	H-310X310X20X20
G1	H-400X200X8X13
G2	H-450X200X9X14
B1	H-200X100X5.5X8
B2	H-400X200X8X13
RB1	H-400X200X8X13
FC1	500X500



〈그림 3〉 계측, 데이터수집, 가진시스템 실험 개념도



(a) 가진 및 데이터수집 시스템 설치모습



(b) 가속도센서 설치모습

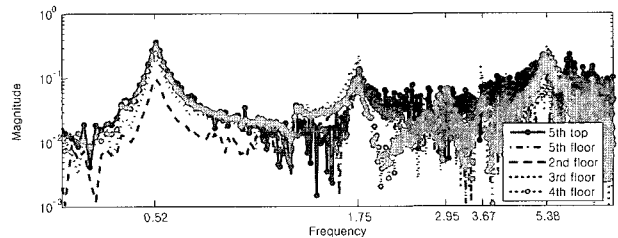
〈그림 4〉 계측, 데이터수집 및 가진시스템 설치사진

케이블 연결 시스템은 BNC 동축케이블 25m와 50m를 사용하였다. 데이터수집시스템은 NI DAQCard-6036E의 16bit AD/DA보드를 사용하였고, 신호컨디셔너 NI SCC-2345에 입력모듈 LP02과 FP01, 출력모듈 AO10을 통해 AD/DA보드와 연결하였다. 가진 시스템에서 계측신호와 가진신호는 모두 전압신호이며 가진신호는 HMD의 인버터를 통해 전압신호에 해당하는 추력을 발생시켜 HMD의 질량체에 전달한다. 여기서 질량체의 과도한 응답을 피하기 위해 HMD자체의 안전장치가 설치되어 있으므로 가진 신호는 HMD의 질량체가 안전장치 이내의 범위에서 움직이도록 생성하여야 한다.

#### 4. 시스템식별 및 유한요소모델 갱신

##### 4.1 백색잡음 실험

백색잡음은 필터링 되지 않은 신호로써 410초 동안 가진하는 시간데이터를 구성하였다. 데이터의 시간간격을 작게 할 경우 레이턴시가 미소하게 존재하나 샘플수가 증가할수록 이러한 미소한 시간이 누적되면서 최종적으로 전체 시간영역에서 시간지연 오차가 크게 발생한다. 따라서 데이터 처리의 용이성과 레이턴시를 최소화하기 위해 시간간격을 0.01초로 설정하였으며, 이는 대상구조물이 매우 유연하여 고차모드 주파수가 6Hz미만이고 Nyquist 주파수 50Hz가 관심영역의 주파수대역을 포함하고 있음을 고려할 때 합리적임을 알 수 있다. 그러나 현장의 상태에 따라 발생하는 관심 주파수대역 이외의 노이즈를 제거하기 위해 데이터 취득시 가속도계 앰프에서 제공하는 30Hz 저주파 통과 필터를 적용하였으며 다시 신호 컨디셔너에서 25Hz Butterworth 아날로그 저주파 통과 필터를 사용한 후 RSE(Reference Single Ended) 접지방식으로 데이터를 취득하였다.



〈그림 5〉 HMD 절대가속도에 대한 각종 가속도응답의 전달함수 크기

그림 5는 HMD 절대가속도 입력에 의한 각층의 전달함수를 보여주며 1차 모드 0.52Hz, 2차 모드 1.75Hz, 3차 모드 2.95Hz, 4차 모드 3.67Hz, 5차 모드 5.38Hz로 식별되었다. 1차 모드와 2차 모드는 전 층에 걸쳐 비교적 정확하게 식별 되었으나 3차 모드 이상에서는 가진기의 성능한계 및 노이즈에 의해 각 층에 모든 모드의 특성을 나타내지는 않는다. 그러나 전 층에서 계측된 정보를 사용하여 5개 모드의 고유값을 찾을 수 있으며 이를 시스템 식별에 사용하였다.

##### 4.2 시스템식별

실험 데이터를 이용한 시스템식별은 노이즈가 최소화되고 구조물의 모드 특성을 충분히 포함하고 있을 때 의미가 있는 모델을 산정한다. 그러나 현장계측시스템에서는 센서 수의 제한과 고차모드의 가진의 어려움, 외부전원 사용에 따른 전기노이즈, 그리고 접지 등의 문제점 때문에 현장계측 신호만을 사용하여 신뢰성 있는 모델을 구성하기에는 많은 어려움이 있다. 따라서 이론적인 FE모델을 기본모델로 하고, 실험데이터에 의해 얻어진 정보를 이용하여 이 해석모델을 수정하는 FE모델 갱신기법이 개발되어왔다.<sup>(9)</sup> 본 논문에서는 상용구조해석프로그램인 ANSYS를 이용하여 FE모델을 구성한 후 실험을 통해 얻어진 정보를 이용하여 모델갱신을 수행하였다.

모델갱신기법은 모드데이터를 이용하여 등방성, 접합부연결, 모델의 한정성과 같은 구속조건을 만족하면서 질량행렬 또는 강성행렬의 변화를 최소화하는 직접모델갱신법<sup>(10,11)</sup>을 이용하였다. 해석모델의 질량행렬이 정확하다고 가정하면 갱신할 강성행렬이 측정된 모드벡터를 생산할 수 있고, 대칭행렬이라는 두 가지 구속조건을 적용할 수 있다. 식 (1)과 식 (2)의 구속조건을 만족하면서 강성의 변화를 최소화 하는 식 (3)을 적용하면 식 (4), (5)의 갱신식이 유도된다.<sup>(10)</sup>

$$K\Phi = M_a\Phi A, \Phi^T M_a \Phi = I \quad (1)$$

$$K^T = K \quad (2)$$

$$J = \frac{1}{2} \| N^{-1}(K - K_a)N^{-1} \| \quad (3)$$

$$\Phi = \Phi_m [\Phi_m^T M_a \Phi_m]^{-1/2} \quad (4)$$

$$K = K_a - K_a \Phi \Phi^T M_a - M_a \Phi \Phi^T K_a + M_a \Phi \Phi^T K_a \Phi \Phi^T M_a + M_a \Phi A \Phi^T M_a \quad (5)$$

여기서,  $M_a$ 와  $K_a$ 는 해석모델의 질량, 강성행렬이고  $\Phi_m$ 은 측정된 고유벡터 행렬이다. 또한  $A$ 는 측정된 고유값이고,  $N$ 은  $N = M_a^{1/2}$ 의 값이다.

본 논문에서는 그림 5에서 비교적 정확하게 측정된 1차 모드와 2차 모드의 정보를 다음 식 (6)과 식 (7)을 이용하여

추출하였다. 이때 식 (7)에서 알 수 있듯이 공진시 전달함수에서 각층의 피크응답의 비로 모드벡터를 추출할 수 있으며 이때 각층 전달함수의 위상차에 따라 부호가 결정된다. Li와 Reinhorn은 각 모드의 주파수가 근접하지 않고, 떨어져 있는 경우 각 모드의 공진응답은 서로 영향을 주지 않는다고 가정한 후, 공진시 전달함수를 식 (6)과 같이 구하였다.<sup>(12)</sup>

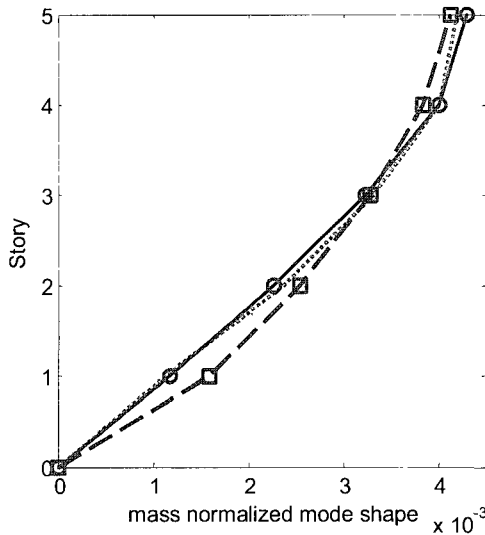
$$T_{ai}(\omega_k) = \phi_{ik} H_{ik}(\omega_k) \Gamma_k \quad (6)$$

여기서  $T_{ai}(\omega_k)$ ,  $H_{ik}(\omega_k)$ 는 각각 공진시 및 비공진시 구조물의  $i$ 층  $k$ 차 모드의 HMD 가속도에 대한 전달함수이며,  $\Gamma_k$ 는  $\Gamma = -\Phi^T M_a^{-1}$ 의  $k$ 번째 스칼라 값이고 1은 HMD하층의 영향벡터이다. 각  $k$ 차 모드 벡터의  $j$ 층에 대한  $i$ 층의 비는 각층 절대가속도 전달함수의 비를 이용하여 계산될 수 있다.

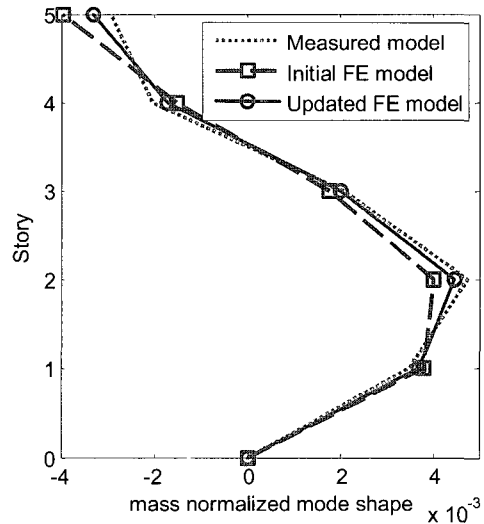
$$\phi_{ik} / \phi_{jk} = T_{ai}(\omega_k) / T_{aj}(\omega_k) \quad (7)$$

식 (4)~(5)의 모델갱신을 통해 최종적으로 얻은  $\Phi$ 와  $K$ 를 적용하여 고유치해석을 한 결과 표 2와 같은 결과를 얻었다.

실험을 통해 실측한 모드벡터와 수치해석모델의 모드벡터는 전층에서 계측이 가능하여 추출이 가능한 2차 모드까지만 비교 고려되었다. 충분한 가진이 이루어지지 않아 실측이 어려운 3-5차 모드는 5개 층의 전달함수 중 2개 층이



(a) 갱신된 FE모델의 1차모드 형상

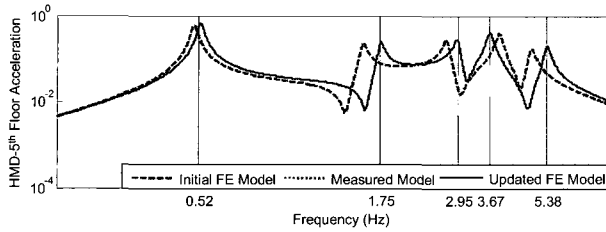


(b) 갱신된 FE모델의 2차모드 형상

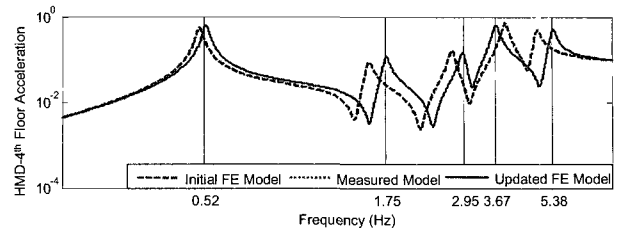
(그림 6) 초기FE모델과 계측된 모델 갱신된 FE모델의 1차모드와 2차모드 형상비교

<표 2> 실험구조물의 고유 주파수

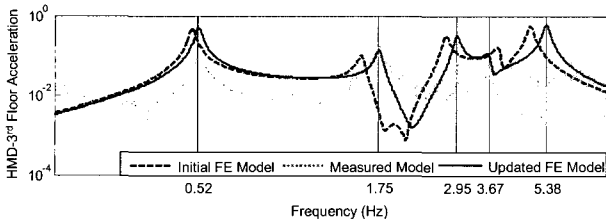
	1st mode	2nd mode	3rd mode	4th mode	5th mode
initial (from analysis)	0.5022	1.5623	2.74	3.91	4.83
measured	0.5249	1.7578	2.94	3.67	5.38
updated	0.5249	1.7578	2.95	3.67	5.38



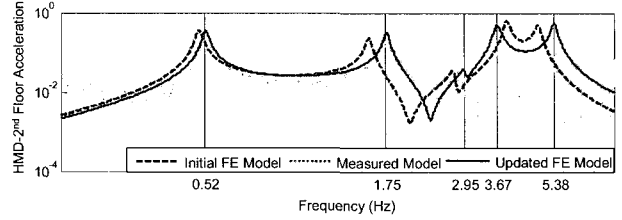
(a) HMD-5층 가속도 전달함수



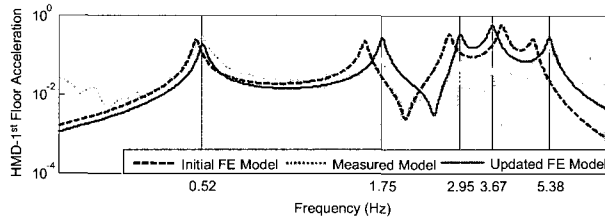
(b) HMD-4층 전달함수



(c) HMD-3층 가속도 전달함수



(d) HMD-2층 가속도 전달함수



(e) HMD-1층 가속도 전달함수

〈그림 7〉 초기, 계측 및 갱신된 유한요소모델의 전달함수 비교

상이 동일한 피크를 보이는 값을 고유진동수로 설정하여 고유진동수만을 갱신하였으며 모드벡타는 해석모델의 값을 사용하였다.

그림 6은 초기 FE모델과 실험을 통해 측정된 모델을 바탕으로 FE모델을 갱신한 모드형상을 비교한 그림이다. 초기모델에 비해 측정된 모델에 근접하게 모드벡터를 갱신한 것을 알 수 있다.

그림 7은 초기 FE모델과 실측된 모델, 갱신한 FE모델의 전달함수를 비교한 것이다. 1차 모드와 2차 모드는 모두 실측된 모델로 갱신되었고, 3차 모드는 1층과 3층의 전달함수를 미루어 예측한 구간을 정하고 피크를 탐색하여 고유진동수만을 갱신하였다. 4차 모드는 4층, 3층과 1층에서 예측 구간을 정하였고, 5차 모드는 5층, 4층, 그리고 1층에서 예측 구간을 정하고 고유진동수를 탐색하여 모델갱신을 수행하였다.

## 5. 유사지진 가진시스템

### 5.1 HMD 입력신호 생성

본 절에서는 구조물의 탄성범위 이내에 HMD에 의해 지진 가진력이 생성되는 과정을 보여준다.  $\ddot{u}_b$ 의 지반가속도와

$\ddot{u}_h$ 의 HMD가속도 가진을 받는  $n$ 자유도 구조물의 상태공간 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{z} &= Az + B_b \ddot{u}_b + B_h \ddot{u}_h \\ y &= Cz + D_b \ddot{u}_b + D_h \ddot{u}_h \end{aligned} \tag{8}$$

여기서  $z$ 는  $2n \times 1$ 의 상태변수벡터이며  $y$ 는 출력벡터이다.  $\ddot{u}_b, \ddot{u}_h$ 의 출력전달함수는 식 (10)과 같이 정의된다. 이때 출력은 모두 절대가속도이므로 지반가속도에 의한 직접 전송행렬  $D_b$ 은 0이 되고, HMD에 의한 직접 전송행렬  $D_h$ 만 존재한다.

$$\begin{aligned} T_h &= \frac{Y_h(s)}{U_h(s)} = C(sI - A)^{-1}B_h + D_h \\ \text{또는 } T_b &= \frac{Y_b(s)}{U_b(s)} = C(sI - A)^{-1}B_b \end{aligned} \tag{9}$$

여기서 스칼라  $s$ 는 복소변수  $i\omega$ 이며  $U_h, U_b, Y_h, Y_b$ 는 각각 HMD가속도 지반가속도 그리고 각각에 대한 구조물의 응답이다. 지반가속도의 대한 응답과 HMD가진에 대한 응답이 서로 일치할 경우의 라플라스 변환한 응답의 식은 다음과 같이 변경할 수 있다.

$$U_h(s) = T_h^{-1}Y_h(s) = T_h^{-1}Y_b(s) = T_h^{-1}T_bU_b(s) \quad (10)$$

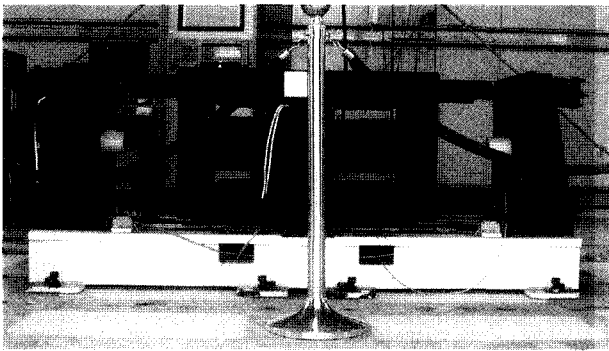
이때 식 (10)이 성립할 조건은 구조물의 역전달함수는  $n$  개의 출력을 가지므로 구조물의 목표응답이 가진기 수만큼만 선택되어야 하며 선택된 구조물의 목표응답이 주어졌을 때 식 (10)은 다음과 같이 변경된다.

$$\widehat{U}_h(s) = \widehat{T}_h^{-1}\widehat{Y}_h(s) = \widehat{T}_h^{-1}\widehat{Y}_b(s) = \widehat{T}_h^{-1}\widehat{T}_b\widehat{U}_b(s) \quad (11)$$

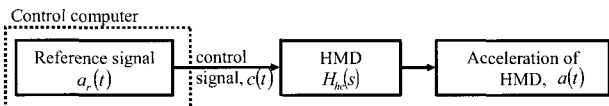
여기서,  $\widehat{T}_h^{-1}$ 은  $T_h^{-1}$ 의 부분행렬이며  $T_h^{-1}$ 의 목표응답에 따른 열벡터로부터 추출되어진다. 따라서 구조물의 역전달함수의 부분행렬  $\widehat{T}_h^{-1}$ 과 지반가속도를 이용하여 HMD가 구현해야 할 가속도를 구할 수 있다.

### 5.2 HMD 제어기 설계

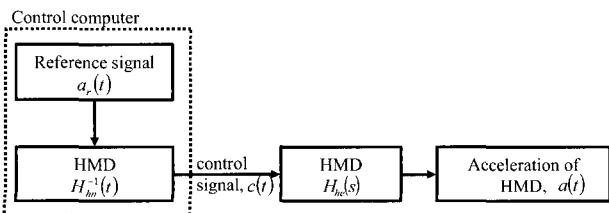
1,500kg의 질량의 HMD는 구조물의 5층에 설치되어 있으며 입력 전압 신호에 의한 HMD의 절대가속도에 HMD 질량을 곱한 힘이 구조물에 가진력으로 작용한다. 따라서 유사지진 가진시스템이 정확하게 구현되기 위해서는 HMD의 동적특성을 보상하여야 한다.<sup>(13,14)</sup> 본 논문에서는 백색잡



〈그림 8〉 5층 바닥에 설치된 HMD 모습



(a) HMD 전달함수의 정의

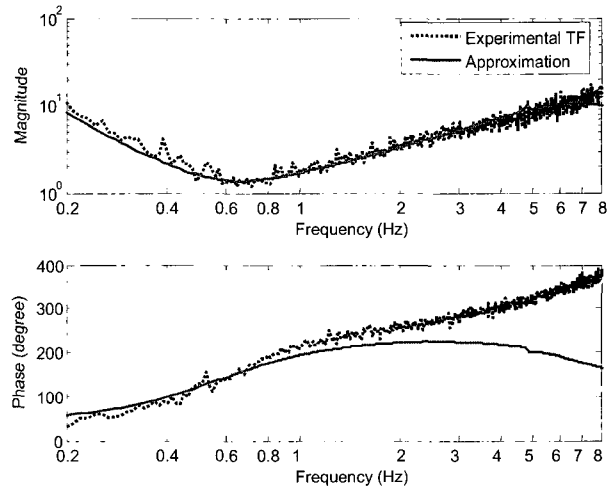


(b) HMD 역전달함수를 이용한 동적특성 보상

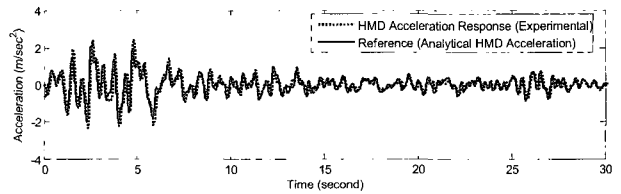
〈그림 9〉 HMD제어기의 개념도

음 실험을 통해 HMD의 입력 전압 신호에 대한 HMD의 절대가속도의 전달함수와 역전달함수를 구한 후 이를 Matlab 함수를 이용하여 곡선적합하였다.

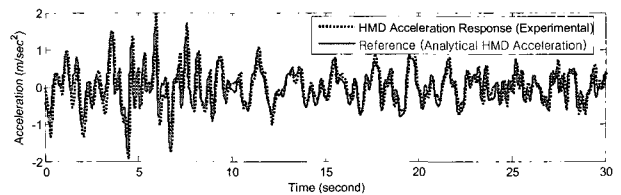
그림 8은 HMD의 모습을 보여주며 그림 9는 HMD제어기의 개념도를 보여주고 있다. 여기서  $H_{hc}(s)$ 는 입력신호에 대한 HMD 절대가속도의 전달함수이며 원하는 가속도응답 즉 참조신호  $a_r(t)$ 에 곡선적합한 HMD의 역전달함수  $H_{hh}^{-1}(s)$ 를 곱하여 HMD 입력신호를 생성함으로써 HMD의 가속도  $a(t)$ 는 HMD의 동특성이 보상됨을 알 수 있다. 그림 10은 HMD 역전달함수의 크기와 위상 그리고 곡선적합한 결과를 보여주고 있다. 그림 11은 본 실험에서 사용될 El Centro, Hachinohe 지진에 대한 HMD가속도의 참조신호와 실제 계측된 가속도를 보여준다. 그림 11로부터 HMD가 목표한 참조신호를 정확히 구현할 수 있음을 알 수 있다.



〈그림 10〉 HMD 역전달함수의 크기와 위상의 곡선적합 결과



(a) El Centro



(b) Hachinohe

〈그림 11〉 각 지진파에 따라 유사 지진가진시스템으로 생성한 HMD가속도의 시간이력과 HMD 가속도의 측정결과(HMD 동적특성 보상)

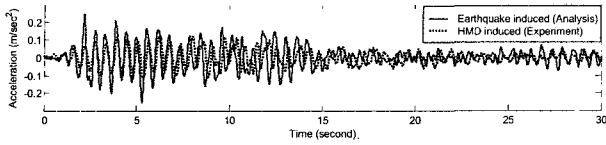
## 6. 실험 결과

### 6.1 지진하중 실험 결과

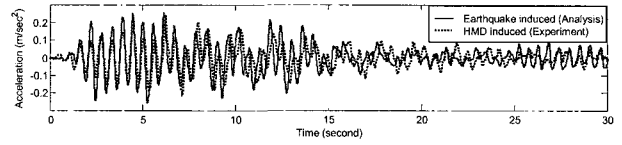
지진하중실험은 EI Centro(1940, NS성분)와 Hachinohe (1968, NS성분) 지진데이터를 사용하였으며 HMD의 신호

제한에 맞추어 0.05g로 스케일을 줄여 사용하였다.

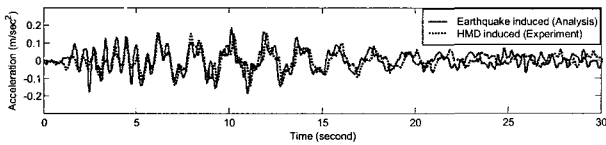
그림 12는 EI Centro 지진의 수치해석 모델 지진응답과 HMD 유사지진 가진시스템의 실험결과의 시간이력 비교를 보여준다. 수치해석은 실험을 통해 갱신된 FE모델에 지반 가속도 가진을 하여 얻은 결과이고, HMD가진은 5층 가속



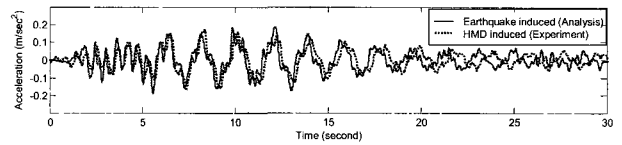
(a) 1층의 EI Centro 지진 가속도 응답의 시간이력



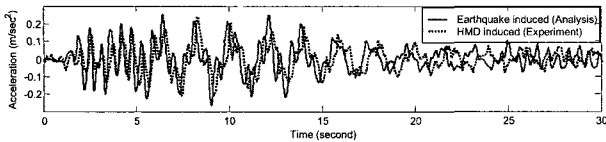
(b) 2층의 EI Centro 지진 가속도 응답의 시간이력



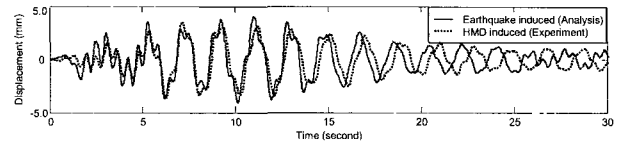
(c) 3층의 EI Centro 지진 가속도 응답의 시간이력



(d) 4층의 EI Centro 지진 가속도 응답의 시간이력

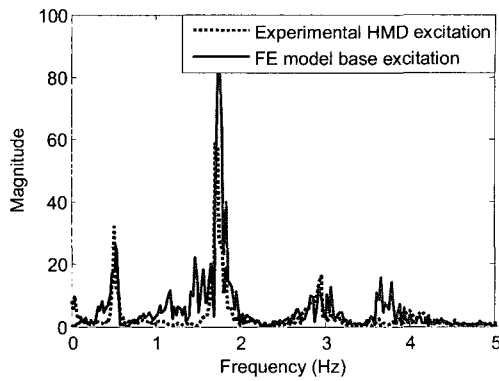


(e) 5층의 EI Centro 지진 가속도 응답의 시간이력

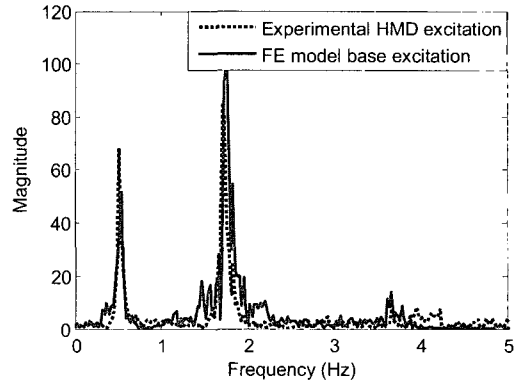


(f) 1층의 EI Centro 지진 변위 응답의 시간이력

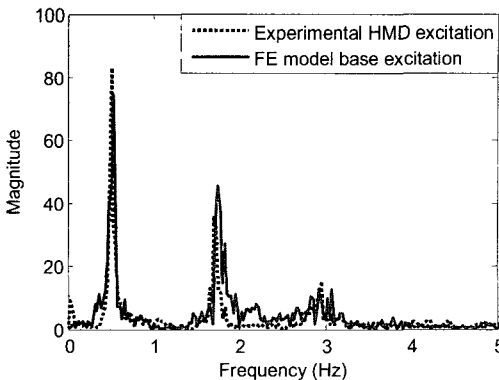
〈그림 12〉 EI Centro 지진의 수치해석모델 지진응답과 HMD 유사지진 가진시스템의 실험결과와 시간이력 비교(목표응답 5층바닥 가속도)



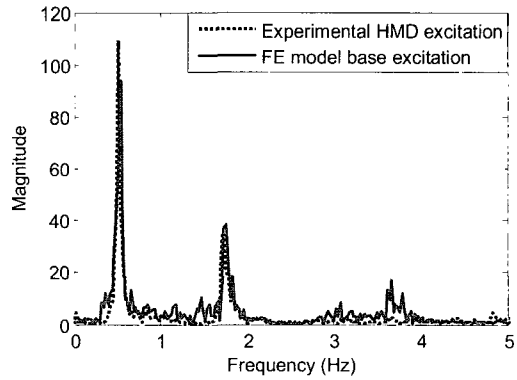
(a) 1층 가속도 응답



(b) 2층 가속도 응답



(c) 3층 가속도 응답



(d) 4층 가속도 응답

〈그림 13〉 EI Centro 지진의 수치해석모델 지진응답과 HMD 유사지진 가진시스템의 실험결과와 주파수영역 비교(목표응답 5층바닥 가속도)



도 응답을 목표응답으로 설정하고 수행되었다. 수치해석값과 실험값은 1층 가속도 이력을 제외하면 대체적으로 잘 일치한다. 특히 응답의 최대값이 발생하는 초반부의 거동을 잘 모사함을 알 수 있다. 그러나 20초 이후의 응답의 후반부는 위상차가 발생하는데 이는 지진응답은 위상보다는 최대 응답이 중요하게 평가되어 HMD 설계에 있어서 위상을 최적화하는 조건보다는 제어기의 안정성과 증폭에 대한 구속 조건을 적용한 결과로 사료된다.

그림 13은 El Centro 지진의 수치해석 모델 지진응답과 HMD 유사지진 가진시스템 실험결과의 주파수 응답함수 비교를 보여준다. FE모델과 실험결과는 대체적으로 일치하며, 1차모드와 2차모드 특성을 비교적 정확히 반영하고 있음을 알 수 있다.

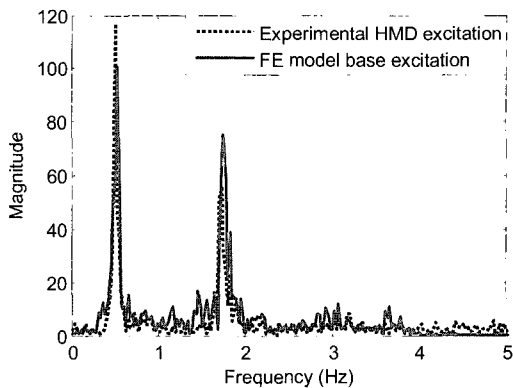
그림 14는 Hachinohe 지진의 수치해석 모델 지진응답과 HMD 유사지진 가진시스템의 실험결과의 시간이력을 보여

준다. Hachinohe 지진응답은 전 층에 걸쳐 대체적으로 일치하며 이로부터 유사지진 가진시스템의 유효성을 확인할 수 있다.

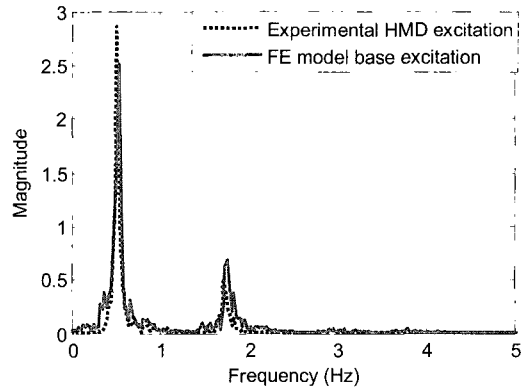
그림 15는 Hachinohe 지진의 수치해석 모델 지진응답과 HMD 유사지진 가진시스템의 실험결과의 주파수응답함수 비교를 보여준다. 1차 모드 및 2차 모드 응답은 대체적으로 일치하나 그림 15(a), (c) 및 (d)에서 3차 모드 응답은 충분히 가진되지 못했음을 알 수 있다.

### 6.2 오차분석

수치해석 모델을 사용한 지반하중 가진시의 절대가속도 응답과 HMD 가진시의 절대가속도 응답의 정규화된 RMS 오차를 식 (12)를 사용하여 구하였다. 그림 16은 정규화된 RMS오차의 목표응답에 따른 층별 분포를 보여준다. El Centro 지진과 Hachinohe 지진의 경우 5층 바닥 가속도를

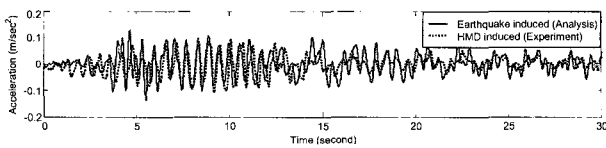


(e) 5층 가속도 응답

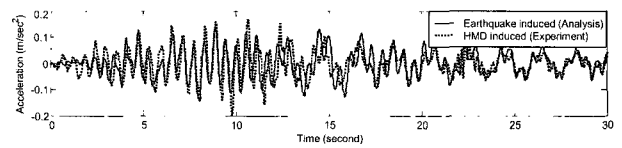


(f) 1층 변위 응답

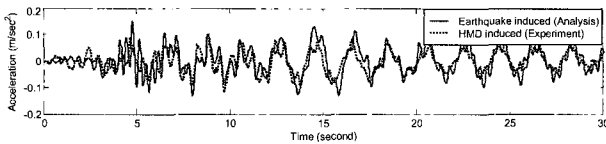
〈그림 13〉 El Centro 지진의 수치해석모델 지진응답과 HMD 유사지진 가진시스템의 실험결과와 주파수영역 비교(목표응답 5층바닥 가속도) (계속)



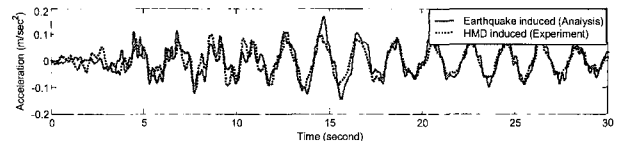
(a) 1층의 Hachinohe 지진 가속도 응답의 시간이력



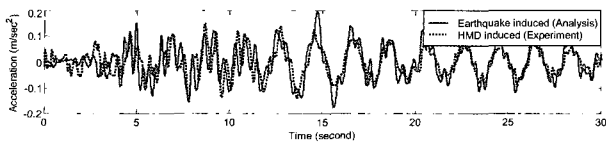
(b) 2층의 Hachinohe 지진 가속도 응답의 시간이력



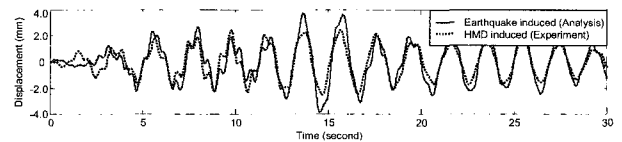
(c) 3층의 Hachinohe 지진 가속도 응답의 시간이력



(d) 4층의 Hachinohe 지진 가속도 응답의 시간이력

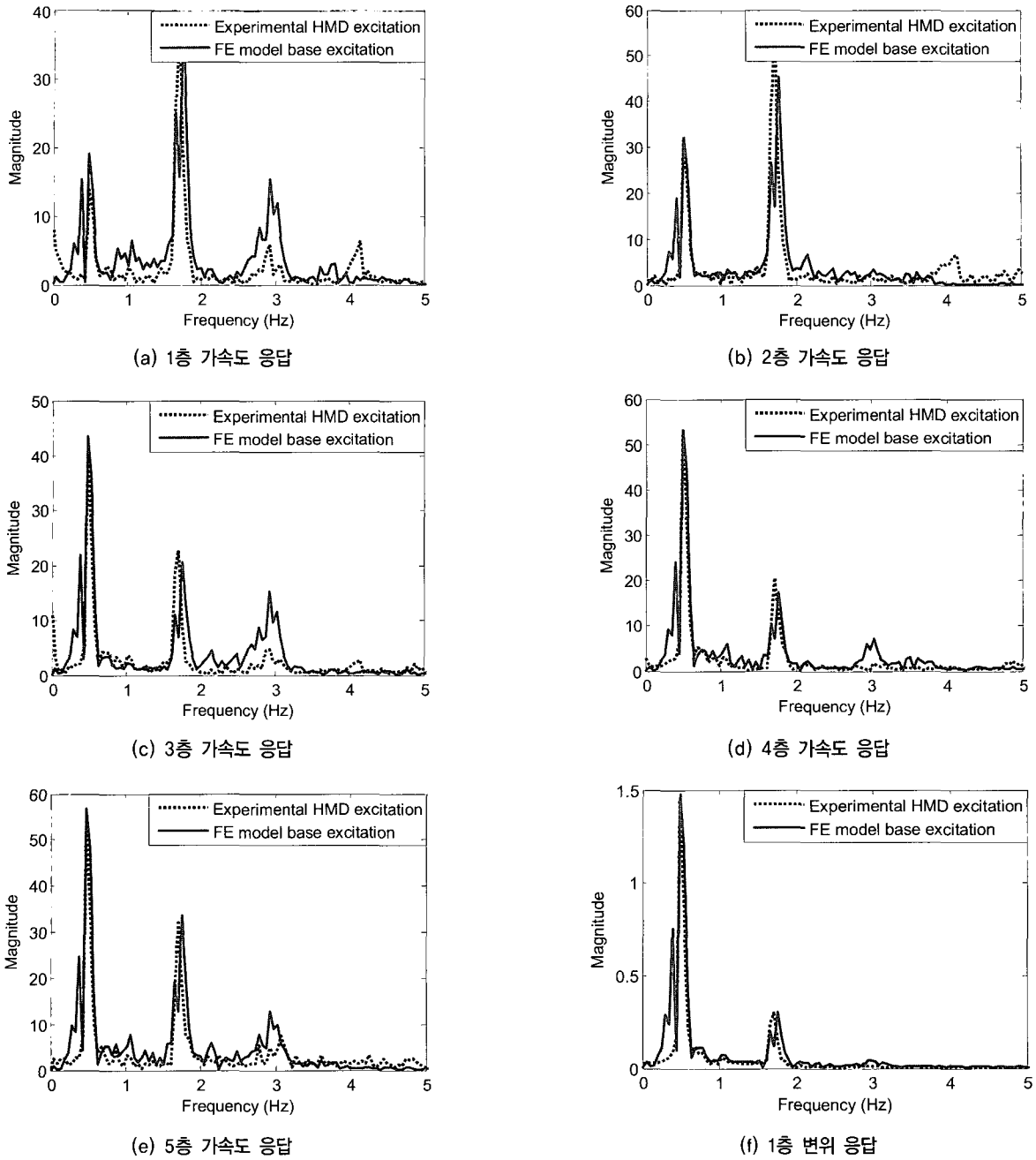


(e) 5층의 Hachinohe 지진 가속도 응답의 시간이력



(f) 1층의 Hachinohe 지진 변위 응답의 시간이력

〈그림 14〉 Hachinohe 지진의 수치해석모델 지진응답과 HMD 유사지진 가진시스템의 실험결과와 시간이력 비교(목표응답 5층바닥 가속도)



〈그림 15〉 Hachinohe 지진의 수치해석모델 지진응답과 HMD 유사지진 가진시스템의 실험결과와 주파수영역 비교(목표응답 5층바닥 가속도)

목표응답으로 HMD제어신호를 생성했을 때 가장 작은 오차를 가진다. 표 3은 RMS 오차의 수치를 보여준다.

$$\text{Normalized RMS Error} ; e_r = \frac{\sum_{t=0}^T \{ \sqrt{y_g(t)^2} \} - \sum_{t=0}^T \{ \sqrt{y_h(t)^2} \}}{\sum_{t=0}^T \{ \sqrt{y_g(t)^2} \}} \quad (12)$$

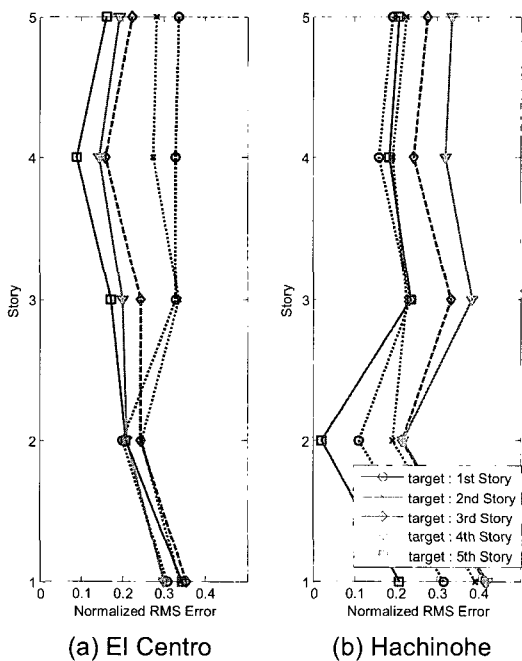
### 7. 결론

본 논문에서는 가진기와 구조물의 역전달함수를 이용하는 방법을 사용하여 지진응답을 모사하는 가진기를 설계한

후 이를 실험을 통해 검증하였다. 먼저 실제 크기의 5층 철골구조물에 설치된 HMD를 이용하여 백색잡음 가진을 수행한 후 가속도 응답과 변위응답을 계측하여 가진기로부터 각층 응답의 전달함수를 구하였다. 전달함수로부터 얻어진 모드 정보에 기초하여 상용프로그램을 사용하여 얻어진 수치해석 FE모델을 갱신하였다. 그리고 갱신된 모델에 기초하여 실제 지진하중에 대한 응답을 해석적으로 얻었으며, 이 지진응답 중 특정 목표응답을 모사하도록 HMD 입력신호를 생성한 후 가진하였다. 갱신된 FE 모델을 사용한 기반 가속도 가진 해석결과와 HMD가진을 통해 얻어진 각 층 응

〈표 3〉 목표응답에 따른 정규화된 RMS 오차의 층별 분포

지반 가속도	층별 오차	목표응답				
		1층 가속도	2층 가속도	3층 가속도	4층 가속도	5층 가속도
El Centro	1층 RMS	0.3064	0.3384	0.3527	0.3006	0.3421
	2층 RMS	0.2001	0.2471	0.2434	0.2117	0.2088
	3층 RMS	0.3273	0.3354	0.2441	0.2002	0.1722
	4층 RMS	0.3278	0.2741	0.1607	0.1433	0.0908
	5층 RMS	0.3363	0.2807	0.2232	0.1915	0.1626
Hachinohe	1층 RMS	0.3140	0.3908	0.4151	0.4199	0.2081
	2층 RMS	0.1121	0.1930	0.2155	0.2177	0.2287
	3층 RMS	0.2359	0.2258	0.3340	0.3847	0.2356
	4층 RMS	0.1585	0.1931	0.2446	0.3192	0.1855
	5층 RMS	0.1920	0.2259	0.2772	0.3352	0.2071



〈그림 16〉 수치해석 모델의 지진 응답과 HMD가진한 실험 결과의 각 목표응답, 지진에 따른 정규화된 RMS 오차의 층별 분포

답의 시간이력과 주파수 특성은 대체적으로 일치하는 경향을 가짐을 확인하였으며, 이를 통해 본 논문에서 제시된 방법의 유효성을 검증하였다.

그러나 HMD의 가진신호가 역전달함수를 사용하여 구해지지 때문에 제안된 방법의 정확성은 시스템식별 모델 및 목표응답의 주파수 특성에 의존할 수밖에 없다. 즉 시스템 식별에서 정확하지 않은 주파수 대역의 목표응답 및 전달함수의 제로점에 가까운 부분에 존재하는 목표응답에 의해 HMD는 불필요하게 큰 가진력을 생성할 수 있다. 이러한 오차를 최소화하기 위해서는 정확한 구조물의 시스템식별과 함께 HMD의 역전달함수 및 구조물의 역전달함수에 불필요한 가진을 최소화할 수 있도록 밴드대역통과필터(Band

Pass Filter) 또는 밴드대역스탑필터(Band Stop Filter)를 적절히 설계하여 사용해야할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

이 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업(R11-2002-101-03004-0)과 건설교통부/한국건설교통기술평가원 2003건설기술연구개발사업(03 산학연 A07-03)의 지원으로 수행되었으며 또한 이 연구에 참여한 연구자는 「2단계 BK21사업」의 지원비를 받았으며 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

- Halling, M. W., Muhammad, I. and Womack, K. C., "Dynamic Field Testing for Condition Assessment of Bridge Bents," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, No. 2, 2001, pp. 161-167,
- 민경원, 이상현, 김진구, 이영철, 이승준, 최현훈, "점탄성 감쇠기 적용을 위한 실물크기 5층 건물의 가진 및 시스템 식별", 한국지진공학회논문집, Vol. 7 No. 3, 2003, pp. 1-7.
- Juang, J.N., *Applied System Identification*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ., 1994, 394pp.
- 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.
- 강경수, 이상현, 주석준, 민경원, "유한요소모델에 기초한 3층 건물모델의 시스템 식별", 한국소음진동공학회논문집, Vol. 14, No. 5, 2005, pp. 416-423.
- 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.
- Yu, E., Whang, D. H., Conte J. P., Stewart J. P. and

- 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.
8. 정상섭, 장석명, 이성호, 윤인기, "건축 구조물의 진동 제어용 하이브리드형 대용량 리니어 모터 댐퍼의 개발", 전기학회논문집, Vol. 51B, No. 11, 2002, pp. 601-611.
  9. A. Bagchi, "Updating the Mathematical Model of a Structure Using Vibration Data," *Journal of Vibration Control*, Vol. 11, No. 12, 2005, pp. 1469-1486.
  10. Baruch, M., "Optimization Procedure to Correct Stiffness and Flexibility Matrices Using Vibration Tests," *AIAA Journal.*, Vol. 16, No. 11, 1978, pp. 1208-1210.
  11. Baruch, M. and Bar Itzhack, I. Y., "Optimal Weighted Orthogonalization of Measured Modes," *AIAA Journal*, Vol. 16, No. 4, 1978, pp. 346-351.
  12. Li, C. and Reinhorn, J. C., "Experimental and Analytical Investigation of Seismic Retrofit of Structures with Supplemental Damping: Part II-Friction Devices," *Technical Report NCEER-95-0009*, National Centre for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY, 1995.
  13. 이성경, 민경원, 박은천, "진동대를 이용한 구조물의 하이브리드 실험", 대한건축학회 논문집 구조계 Vol. 22, No. 5, 2006, pp. 57-63.
  14. Lee, S-K., "Study on the Shaking Table Testing Method Based on the Substructure Method Considering Dynamic Soil-Structure Interaction," Ph. D Thesis, Tohoku University, Sendai, Japan, 2004, 119pp.