

실물크기 구조물의 강제진동 실험을 통한 시스템 식별

System Identification of Real-Scale Structures Using Forced Vibration Test

윤경조† · 이상현* · 박은천** · 유은중*** · 민경원****

Youn, Kyung-Jo · Lee, Sang-Hyun · Park, Eun-Churn · Yu, Eunjong · Min, Kyung-Won

Key Words : System Identification(시스템 식별), Forced Vibration Test(강제진동실험), Hybrid Mass Damper(복합질량감쇠기) FE Model Updating Method(유한요소모델 갱신법)

ABSTRACT

System identification of real-scale structure is performed using forced vibration test. There exist various techniques available for identifying the dynamic characteristics of structures using dynamic and static measurements. In this study, The finite element(FE) model of the structure is analytically constructed using ANSYS and the model was updated using the results experimentally measured by the forced vibration test. forced vibration tests showed that Hybrid Mass Damper induced floor responses coincided with the earthquake induced ones which was numerically calculated based on the updated FE model.

1. 서론

최근 지진이나 바람과 같은 강한 외부동적 하중으로부터 건축 및 토목 구조물의 동적응답을 제어하기 많은 연구가 수행되고 있다. 그러나 실제 구조물을 대상으로 제어성능 평가 실험을 수행하는데는 많은 한계가 있으므로, 구조물의 정확한 내진성능을 실험적으로 평가하기 위해서 주로 이용하는 방법중의 하나는 진동대실험이다.(1) 그러나 진동대를 이용하여 실물 크기 구조물을 가진하는 일은 매우 어려우며 일반적 실물 크기의 구조물의 축소모델을 제작하여 진동대실험을 수행한다.(2) 이 방법도 축소된 모델을 제작하면 상사성의 문제가 발생한다. 즉, 많은 축소된 모델의 실험결과로부터 전체구조물의 결과를 추정하는 것은 매우 어렵고 불가능할 경우도 있다. 이와같은 문제점을 해결하기 위해 유은중등은 선형가진기에 의한 구조물의 응답의 역전달 함수를 이용하여 구조물의 지진응답을 모사하는 선형가진 시스템을 설계하였다.(3)

한편, 구조물의 동적응답은 질량, 감쇠 및 강성의 변화에

민감하고 동적응답의 변화는 구조물의 고유주기와 모드형상등과 같은 모드요소의 변화로 나타난다. 따라서 강제진동 실험을 통해 이러한 구조물의 동특성을 시스템식별기법에 관한 많은 연구가 수행되었다.(4),(5) 시스템 식별의 주된 목적은 실험에 의한 응답 데이터와 구조물 요소를 적용한 해석적 모델의 관계를 찾는 데 있다. 본 논문에서는 유니슨 기술연구소의 5층 실물규모 모달 테스트타워 4층에 설치된 HMD(Hybrid Mass Damper)를 이용하여 실물크기 구조물의 시스템 식별을 위해 강제진동 실험을 수행하였다. 본 논문에서 제안하는 구조물의 강제진동실험은 몇 가지 이유에서 중요성이 있다. 첫째 구조물은 실제 규모로 실험이 수행되어 실험실에서 유발되는 많은 인공적인 구속조건에서 자유롭다. 둘째로 다수의 현상상태의 조건을 포함하여 실험이 수행되어 구조물의 내진성능 효과의 검증과 구조물 건전도에 필요한 진동기술의 이용가능성을 평가할 수 있는 매우 가치 있는 데이터를 획득할 수 있다. 그러나 본 논문에서 실시한 강제진동 실험에는 몇 가지 제약조건이 있다. 첫째 강제진동실험은 실험구조물에서 진폭이 큰 진동원을 사용하기엔 부적절하며 특히 안전성의 문제로 구조물의 비탄성거동 범위까지 가진 할 수 없다. 둘째로 실제 넓은 대역폭으로 가진하는 방법의 전통적인 진동원을 사용하기에 부적절하다. 셋째로 현장 실험은 실험 장비 및 설치문제등의 이유로 주요 요소의 거동이 발생하는 부분에 충분히 밀도 있게 센서를 부착하기에 어려운 점이 있다.(3)

본 논문은 실물 규모 선형 탄성구조물의 동적응답을 모사하는 HMD 가진시스템을 개발하는데 주안점을 두고 있으며 제안된 실험방법의 이론적인 바탕이 수치예제를 통해

† 책임저자; 단국대학교 건축공학과

* 교신저자; 단국대학교 건축공학과

** 단국대학교 건축공학과

*** 한양대학교 건축공학과

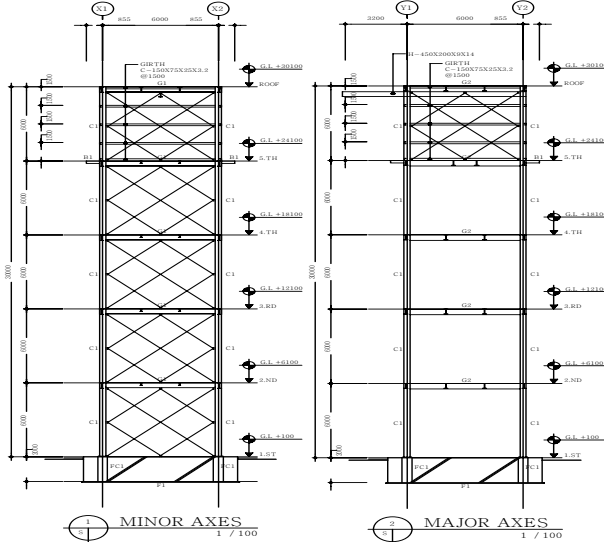
**** 단국대학교 건축공학과

E-mail : kwmin@dankook.ac.kr

Tel : (031) 8005-3734, Fax : (031) 8005-3741

개발됨을 보여준다. 실험결과를 통해 실험데이터를 이용한 유한요소모델 갱신 결과의 타당성을 검증하였다.

2. 실험 모델



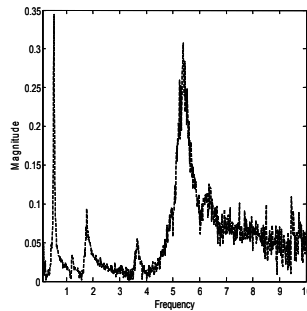
(a) 약축방향 입면도

(b) 강축방향 입면도

그림 1. 대상 실험구조물의 입면도



(a) 대상 실험구조물 사진 (유니슨)



(b) HMD 절대가속도-5층바닥 가속도 전달함수

그림 2. 대상 실험구조물의 모습과 전달함수 특성

대상 실험구조물은 그림 1-2과같이 실물규모의 5층 철골 구조물이고 층고 6m, 슬래브 6mX6m, 층질량 20,000kg을 가진다. 각층은 4개의 등방형 H형강(H-310X310X20X20) 기둥으로 구성되어져 있고 5층에 설치된 HMD는 대용량 리니어 모터를 이용한 감쇠기(Linear Motor Damper; LMD)로서 코일이 고정되어 있고 영구자석과 철심이 가동되어 제자부 역할과 가동질량(1,500kg)의 역할을 동시에 함으로써 가진기 이외에 수동댐퍼로도 사용될 수 있도록 설계 제작 되었다.(6)

3 현장 계측 시스템

현장 계측 시스템은 그림 3-4와 같으며 한 대의 컴퓨터를 이용하여 페루프 시스템으로 구성하였다. 2~5층의 가속도계는 PCB사 모델명 393B12와 HMD 및 옥상층의 가속도계는 KYOWA사 AS-2GB를 사용하였다. 케이블 연결 시스템은 BNC 동축케이블 25m 와 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 전압 신호이며 가진신호는 HMD의 인버터를 통해 전압신호에 해당하는 추력을 발생시켜 HMD의 질량체에 전달한다. 여기서 질량체의 과도한 응답을 피하기 위해 HMD자체의 안전장치가 설치되어 있으므로 가진신호는 HMD의 질량체가 안전장치 이내의 범위에서 움직이도록 생성하여야 한다.



(a) 가진 및 데이터수집 시스템 설치모습

(b) 가속도센서 설치모습

그림 3. 계측, 데이터수집 및 가진시스템 설치사진

4. 시스템식별 및 유한요소모델 갱신

4.1 백색잡음 실험

백색잡음은 필터링 되지 않은 백색잡음신호로써 410초 동안 가진하였다. 데이터 처리의 용이성과 시간지연을 최소화하기 위해 계측 및 가진을 페루프시스템으로 구성하고 데이터 취득과 가진 신호에 대한 시간간격을 서로 일치시켰다. 구조물의 해석모델은 매우 유연하여 저주파 성분이 강하고 고차모드 주파수가 6Hz 미만이며 실험의 편의성을 위해 Nyquist 주파수가 관심영역의 주파수대역의 10배인 50Hz 즉 시간간격 0.01초인 100Hz로 설정하였다. 현장 계측시에는 현장 불규칙적인 변수로 인하여 관심 주파수대역 이외의 노이즈가 발생한다. 이 노이즈를 제거하기 위해 가속도계 앰프에서 제공하는 30Hz 이하의 저주파 통과 필터를 적용하였으며 다시 신호 컨디셔너에서 25Hz Butterworth 아날로그 저주파 통과 필터를 적용하고 RSE(Reference Single Ended) 접지방식으로 데이터를 취득하였다.

그림 5는 HMD 절대가속도 입력에 의한 각층의 전달함수를 보여준다.

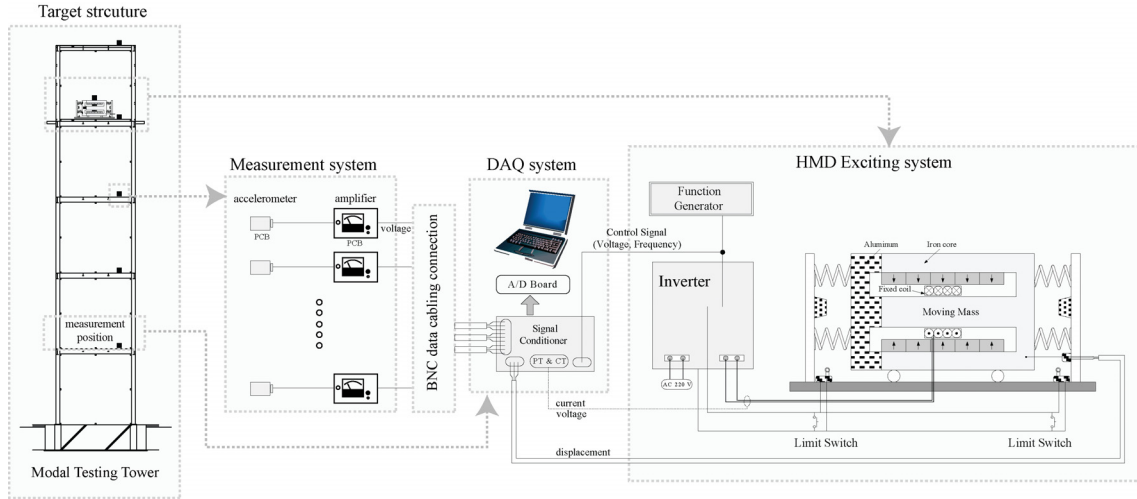


그림 4. 계측, 데이터수집, 가진시스템 실험 개념도

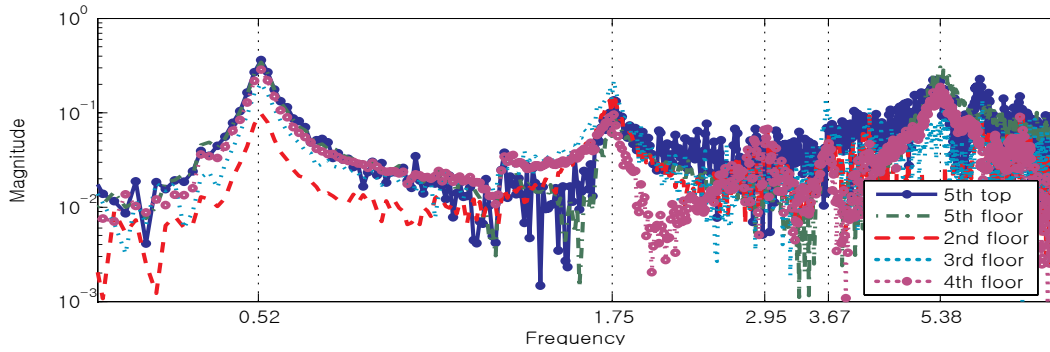


그림 5. HMD 절대가속도에 대한 각종 가속도응답의 전달함수 크기

4.2 시스템식별

실험 데이터를 이용한 시스템 식별은 정밀한 실험과정과 신호처리과정을 통해 얻은 데이터만이 오차를 최소화 할 수 있다. 그러나 현장계측 시스템에서는 센서의 한계, 가진의 어려움, 노이즈에 의한 정확도가 떨어지는 데이터 그리고 외부전원 사용에 의한 전기 노이즈와 접지의 문제점 등으로 인하여 신뢰성 있는 실험체의 유한요소모델을 수립하기에는 많은 어려움이 있다. 따라서 실험 데이터에 기초한 유한요소모델 갱신기법이 개발되어왔다(7). 본 논문에서는 ANSYS를 이용한 실험체의 수치해석 모델을 통해 유한요소모델을 수립하고 실험데이터 이용하여 실측된 모드벡터 등 정보등을 이용하여 모델갱신을 수행하였다.

유한요소모델 갱신기법은 모드데이터를 이용하여 등방성, 접합부연결, 모델의 한정성과 같은 구속조건을 찾아 질량행렬 또는 강성행렬의 변화를 최소화하는 구속최소화문제에 기초한 최적행렬갱신법(The optimal matrix update method) 또는 직접모델갱신법(8),(9)을 이용하였다. 해석모델의 질량행렬이 정확하다고 가정하면 갱신할 강성행렬에 두 가지의 구속조건을 적용할 수 있다. 강성행렬은 측정된 모드데이터와 같은 모드벡터를 생산할 수 있고, 강성행렬 특성상 등방행렬을 갖는다는 조건이다. 식(1)과 식(2)의 구속조건을 이용하여 구조물의 주기변화를 최소화 하는 식

(3)을 적용하여 식(4), (5)의 갱신식을 유도하였다.(9)

$$\mathbf{K}\Phi = \mathbf{M}_a\Phi\Lambda, \Phi^T\mathbf{M}_a\Phi = \mathbf{I} \quad (1)$$

$$\mathbf{K}^T = \mathbf{K} \quad (2)$$

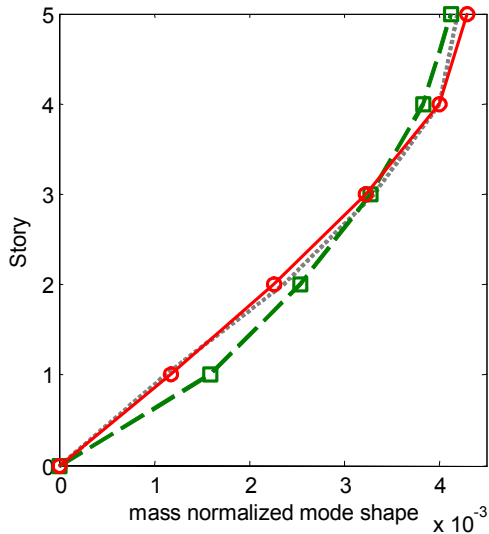
$$J = \frac{1}{2} \|\mathbf{N}^{-1}(\mathbf{K} - \mathbf{K}_a)\mathbf{N}^{-1}\| \quad (3)$$

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

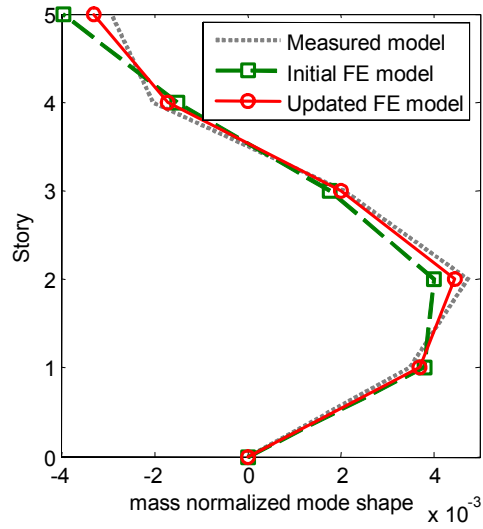
$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_a - \mathbf{K}_a\Phi\Phi^T\mathbf{M}_a - \mathbf{M}_a\Phi\Phi^T\mathbf{K}_a + \mathbf{M}_a\Phi\Phi^T\mathbf{K}_a\Phi\Phi^T\mathbf{M}_a + \mathbf{M}_a\Phi\Lambda\Phi^T\mathbf{M}_a \quad (5)$$

여기서, \mathbf{M}_a 와 \mathbf{K}_a 는 해석모델의 질량, 강성행렬이고 Φ_m 은 측정된 고유벡터 행렬이다. 또한 Λ 는 측정된 고유값이고, \mathbf{N} 은 $\mathbf{N} = \mathbf{M}_a^{1/2}$ 의 값이다.

본 논문에서는 그림 5에서 비교적 정확하게 계측된 1차모드와 2차모드의 정보를 식(6)과 식(7)을 이용하여 추출하였다. 이때 식(7)에서 알 수 있듯이 공진시 전달함수에서 각종의 피크응답의 비로 모드벡터를 추출할 수 있으며 이때 각종 전달함수의 위상차에 따라 부호가 결정된다. Reinhorn 등은 각 모드의 주파수가 근접하지 않고, 떨어져 있는 경우 각 모드의 공진응답은 서로 영향을 주지 않는다고 가정한 후, 공진 시 전달함수를 식(6)와 같이 구하



(a) 갱신된 FE모델의 1차모드 형상



(b) 갱신된 FE모델의 2차모드 형상

그림 6. 초기FE모델과 측정된 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

였다.(10)

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

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

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

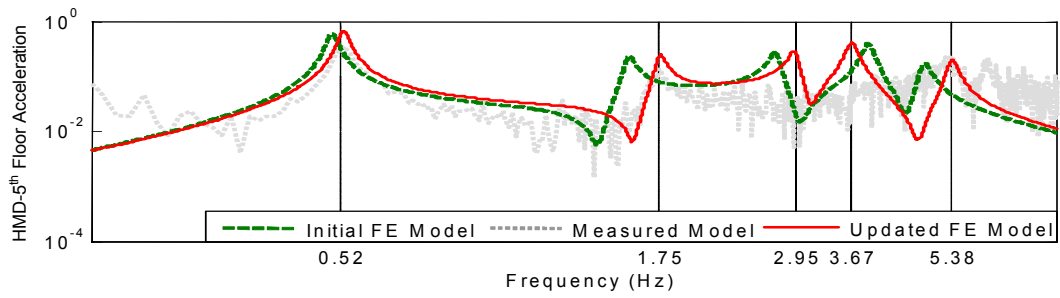
식(4)-(5)의 모델갱신을 통해 최종적으로 얻은 Φ 와 \mathbf{K} 를 적용하여 고유치해석을 한 결과 표 2와 같은 결과를 얻었다. 실험을 통해 실측한 모드와 수치해석모델의 모드는 실측된 2차모드까지만 비교 고려되었다. 충분한 가진이 이루어지지 않아 실측이 어려운 3-5차모드는 각 층의 전달함수에서 신뢰성이 있는 구간의 고유값만을 갱신하였다.

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.

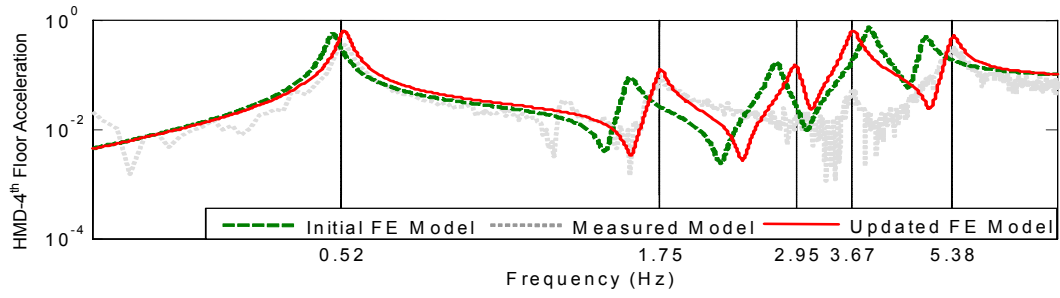
그림 7은 초기 FE모델과 실측된 모델, 갱신한 FE모델을 전달함수를 비교한 것이다. 1차모드와 2차모드는 모두 실측된 모델로 갱신되었고, 3차모드는 1층과 3층의 전달함수를 미루어 신뢰성이 있는 구간을 정하고 고유주기를 갱신하였다. 4차모드는 4층, 3층과 1층에서 신뢰성 구간을 정하였고, 5차모드는 5층, 4층과 1층에서 신뢰성 구간을 정하여 모델갱신을 수행하였다. 이는 고차모드의 충분한 가진이 이루어지지 못한 실측한 응답에서 고유값을 예측하여 모델을 갱신한 것이다.

5. 결론

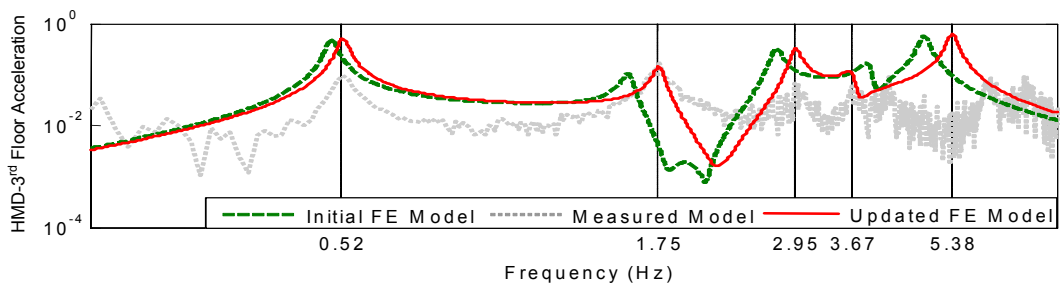
본 논문에서는 주식회사 유니슨 기술연구소에 설치된 실물 크기 5층 모달 테스트 타워를 4층 바닥에 설치된 HMD를 이용하여 강제진동실험을 통하여 구조물의 시스템식별이 수행되었다. 백색잡음으로 가진한 뒤 가속도 응답과 변위 응답을 계측하여 가진기로부터 각 층의 전달함수를 구하였다. 전달함수로부터 얻어진 모드 정보에 기초하여 상용프로그램 ANSYS를 사용하여 유한요소모델을 이용하여 수치해석을 수행한 후 실험에 의해 계측된 응답으로 유한요소모델을 갱신하였다. 이를 통해 본 논문에서 실시한 시스템 식별의 유효성을 검증하였다. 추후 자연가진에 의해 실시간 건전도 평가 및 진동대를 이용하지 않고 지진하중 및 풍하



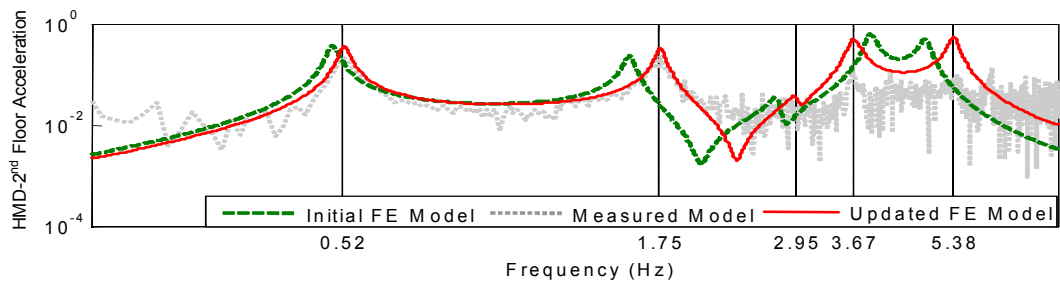
(a) HMD-5층 가속도 전달함수



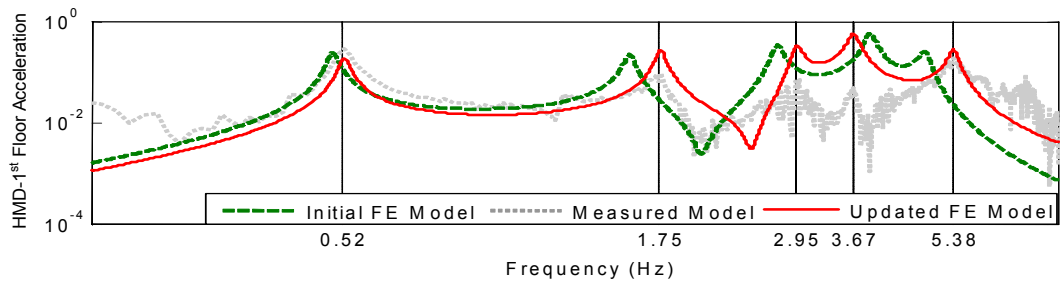
(b) HMD-4층 전달함수



(c) HMD-3층 가속도 전달함수



(d) HMD-2층 가속도 전달함수



(e) HMD-1층 가속도 전달함수

그림 7. 초기, 계측 및 갱신된 유한요소모델의 전달함수 비교

중을 구현하는 연구가 필요하다.

후 기

이 연구는 주식회사 유니스과 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업(R11-2002-101-03004-0)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다

참 고 문 헌

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

(2) Dyke, S. J., Spencer Jr., B. F., Quast, P., Sain, M. K., Kaspari Jr., D. C., and 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.

(3) Kang, K. S., Lee, S. H., and Min, K. W., 2004, "System Identification of a Three-story Test Structure based on Finite Element Model", Transaction of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 5, pp. 416~423

(4) Halling, M. W., Muhammad, I., Womack, K. C., 2001. "Dynamic Field Testing for Condition Assessment of Bridge Bents", Journal of Structural Engineering, Vol. 127, No. 2, pp.161~167

(5) Min, K. W., Lee, S. H., Kim, J. K., Lee, Y. C., Lee, S. J., and Choi, H. H., 2003. "Excitation and System Identification of a Full-Scale Five-Story Structure for the Application of Viscoelastic Dampers", Transaction of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 7, No. 3, pp.1~7

(6) Jeong, S. S., Jang, S. M., Lee, S. H., and Yoon, J. K., 2002. "Development of a Large Capacity Hybrid-Type Linear Motor Damper for the Vibration Control of Building Structures", Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 51B, No. 11, pp. 601~611

(7) Yu, E., Whang, D. H., Conte, J. P., Stewart, J. P., and Wallace, J. W., 2005. "Forced Vibration testing of buildings using the linear shaker seismic simulation (LSSS) testing method", Earthquake Engng Struct. Dyn., vol. 34, pp. 737~761

(8) Alvin, K.F., and Park, K.C., 1994, "Second-Order Structural Identification Procedure via State-Space-Based System Identification", AIAA

Journal, Vol. 32, pp. 397~406.

(9) A. Bagchi, 2005. "Updating the Mathematical Model of a Structure Using Vibration Data", Journal of Vibration Control, Vol. 11, No. 12, pp. 1469~1486

(10) Baruch, M., 1978, "Optimization Procedure to Correct Stiffness and Flexibility Matrices Using Vibration Tests", *AIAA Journal*, Vol. 16, No. 11, pp. 1208~1210