

건축구조물의 지진응답제어를 위한 시스템 식별의 실험적 연구

Experimental Study of System Identification for Seismic Response Control of Building Structure

주석준* 박지훈* 민경원** 홍성목***
Joo, Seok Jun Park, Ji Hun Min, Kyung Won Hong, Sung Mök

국문요약

건축구조물의 진동제어 시스템의 안정성과 효율성은 대상 시스템의 수학적 모델의 정확성에 크게 좌우 된다. 본 연구에서는 3층의 축소 건물 모델과 소형 AMD(active mass damper)를 대상으로 각각의 상태방정식 모델을 시간영역에서의 시스템 식별 기법인 OKID(observer/Kalman filter identification)를 이용하여 구하였다. 건물 모델은 각 층 절대가속도를 출력으로 선정하고 지반가속도 입력과 AMD의 이동질량의 설치층에 대한 상대가속도 입력에 대하여 시스템 식별을 개별적으로 수행한 뒤 두개의 상태방정식을 모델응축 과정을 통해 통합하였다. AMD의 시스템 식별은 모터제어 신호를 입력으로, AMD 이동질량의 설치층에 대한 상대가속도를 출력으로 선정하여 수행하였으며 큰 감쇠비와 위상지연 현상을 확인할 수 있었다. 결과적으로 얻어진 건물 모델 및 AMD의 상태방정식 모델로부터 재구성한 전달함수와 시간이력은 실험에서의 측정치와 잘 일치하였다.

주요어 : 진동제어, 안정성, 시스템 식별 실험, 모델응축

ABSTRACT

The stability and efficiency of structural control systems depend on the accuracy of mathematical model of the system to be controlled. In this study, state equation models of a small scale test structure and an AMD(active mass damper) are obtained separately using OKID(observer/Kalman filter identification) which is a time domain system identification method. The test structure with each floor acceleration as outputs is identified for two inputs - the ground acceleration and the acceleration of the moving mass of AMD relative to the installation floor - individually and the two identified state equation models are integrated into one by model reduction method. The AMD is identified with the motor control signal as an input and the relative acceleration of the moving mass as an output, and it is shown that the identified model has large damping ratio and phase shift. The transfer functions and the time histories reconstructed from the identified models of the test model and the AMD match well with those measured from the experiment.

Key words : structural control, stability, system identification experiment, model reduction

1. 서 론

현대에 들어 새로운 구조 기법과 고강도, 경량 재료의 등장으로 고층, 장대형 구조물이 늘

어 나고 있으며, 이러한 구조물들이 가지는 낮은 감쇠성능으로 인하여 동적하중에 의한 진동발생 문제가 대두되고 있다.

지진, 바람과 같은 동적하중에 의한 구조물의 진동제어는 구조물의 강성, 질량, 감쇠, 또는 형태를 변화시키거나 수동 또는 능동적인 제어력을 구조물에 부가함으로써 가능하다. 전자의 방법은 구조물의 안전성은 향상시키지만 거주

* 서울대학교 건축학과 박사과정

** 정회원 · 인천대학교 건축공학과 교수

*** 정회원 · 서울대학교 건축학과 교수

본 논문에 대한 토의를 2000년 3월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

자의 안락함과 안전을 보장하는데에는 한계가 있으며, 이런 경우 다양한 형태의 수동(passive), 능동(active), 준능동(semi-active), 혼용(hybrid) 제어기법들이 대안으로써 고려될 수 있다. 현재까지의 제어에 관한 많은 연구의 성과로 일부 방법은 실제 구조물에 적용되어 성공적으로 사용되고 있으며, 지속적인 연구 및 제안들은 제어기법의 효율과 적용 가능성을 향상시켜가고 있다.⁽¹⁾

그러나 건축구조물은 제어문제 연구의 역사가 오래된 우주항공, 기계, 전기분야의 시스템과는 다른 몇 가지 특징을 가지고 있으며 이것이 연구의 방향을 결정짓는 중요한 요소가 된다. 첫째로 건축구조물은 지반에 고정되어 있는 기본적으로 안정한 구조물이며 순수하게 능동제어를 사용할 경우에 있어 오히려 불안정해질 수 있다. 이것은 구조물이 안정하기 위해서는 능동제어가 반드시 필요한 우주구조물등과는 대조적인 것으로 실제 적용에 대한 거부감의 원인이 되기도 한다. 둘째로 구조물에 작용하는 하중이 기계하중 또는 전기부하와는 다르게 매우 불확실하여 하중의 크기와 작용시간 등을 정확히 예측할 수가 없다. 세번째로 구조물의 물리적인 크기와 거동의 비선형적 특성 등으로 인하여 제어기 설계를 위한 수학적 모델의 오차가 상대적으로 크게 된다.⁽²⁾

따라서 건축구조물의 진동제어 문제는 불확실한 특성을 가지는 하중에 대하여 불확실한 수학적 모델을 가지는 대상 구조물을 전체 시스템의 안정성과 효율성을 확보하면서 제어하는 것이라고 정의할 수 있다. 그런데, 대다수의 제어 알고리즘은 시스템의 수학적 모델에 근거하여 제어력을 산정하므로 안정성 및 효율성의 확보는 먼저 대상 시스템의 수학적 모델의 정확성에 크게 좌우되며, 둘째로 제어력 산정 알고리즘에서 하중 및 모델의 불확실성을 고려하는 방법에 달려있다. 본 논문은 전자의 문제를 해결하기 위하여 실험적으로 제어대상 시스템의 수학적 모델을 구하는 과정

을 축소모형 실험을 통해 검증하는 것을 목적으로 한다.

2. 시스템 식별 알고리즘

제어기 설계를 위한 토목, 건축 구조물의 수학적 모델은 시스템의 물리적 크기 때문에 가진이 쉽지 않은 관계로 유한요소 모델을 사용하기도 한다. 그러나 이 모델은 유도에 사용된 가정, 구조 요소의 부적절한 모델링, 모델에서 사용된 재료의 특성과 실제 값과의 차이 등에 의해서 실제 구조물의 동적 특성과는 큰 차이를 지니게 된다. 이에 대한 대안으로서 실험을 통해 구조물의 수학적 모델을 구하는 시스템 식별 기법이 있다.

시스템 식별은 먼저 대상 시스템의 입출력 데이터를 수집한 다음 이 데이터에 의해 표현된 동적 거동을 가장 가깝게 묘사할 수 있는 수학적 모델을 산정한 뒤 모델의 유효성을 평가하는 과정으로 구성된다. 현재까지 매우 다양한 시스템 식별 방법들이 개발되어 있으나 그 중 대다수가 Markov 파라미터로 알려진 펄스 응답의 계산을 기초로 하고 있으며 이 파라미터들로부터 다시 상태방정식 형태의 수학적 모델을 구하는 두 단계로 구성되어 있다.

시스템 식별 방법은 Markov 파라미터의 계산방법에 따라 크게 진동수 영역에서의 방법과 시간영역에서의 방법으로 분류할 수 있다. 먼저 진동수 영역에서의 식별 방법은 초기에는 입력출력 데이터를 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform)하여 진동수 영역에서의 전달함수(transfer function)를 구한 뒤 이를 푸리에 역변환(inverse Fourier transform)하여 펄스응답인 Markov 파라미터를 구했으나 이 과정에서 일어나는 데이터의 왜곡 현상을 막기 위해서 최적화 기법을 이용하여 유리함수에 의한 주파수 응답함수의 커브 피팅(curve fitting)을 통해 Markov 파라미터를 구하는 SSFD(state space frequency domain) 식별방법이 개발되었다. 반면 시간영역에서의 식별 방법은 시간

영역에서의 입출력 데이터로부터 최소자승해법에 의해 Markov 파라미터를 구하게 된다. 이 방법은 알리아싱(aliasing)에 의한 Markov 파라미터의 왜곡은 없으나 감쇠 성능이 낮은 시스템의 경우 매우 큰 입출력 데이터 행렬의 역행렬을 구해야 한다는 단점이 있다. 그러나 Phan 등은 안정한 관측기(observer)를 도입하여 Markov 파라미터의 감쇠를 빠르게 하고 상태공간 모델과 관측기 이득을 동시에 결정하는 관측기/Kalman 필터 식별 알고리즘(observer/Kalman filter identification algorithm : OKID)을 제안하였다.⁽³⁾ 본 연구에서는 OKID(observer /Kalman filter identification)를 이용하여 시스템 식별을 수행하였으며 그 과정은 다음과 같다.

대상 시스템의 이산시간 상태방정식 모델은 다음과 같은 차분방정식(difference equation) 형태로 표현된다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k) \\ x \in \mathbb{R}^n, y \in \mathbb{R}^m, u \in \mathbb{R}^r, k &= 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 A, B, C, D 는 이산시간 상태방정식의 시스템 행렬이며 $x(k), u(k), y(k)$ 는 각각 시스템을 동일한 시간간격 ΔT 로 이산화했을 때에 시간 $k\Delta T$ 에서의 상태변수, 입력, 출력이다.

식 (1)로 표현되는 이산시간 시스템의 시간 $k\Delta T$ 에서의 펄스응답(pulse-response) Y_k 는 다음 식과 같이 쓸 수 있으며 이 일련의 행렬들을 Markov 파라미터라고 한다.

$$Y_0 = D, Y_k = CA^{k-1}B, k = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

위의 식에서 시스템 행렬의 감쇠를 인위적으로 증가시키기 위해 관측기(observer)의 개념을 도입하여 원래의 이산시간 상태방정식에서 관측기 이득 행렬 G 와 출력 벡터 $y(k)$ 의 곱을 더하고 뺀 상태방정식을 만들 수 있

으며 이 상태방정식의 Markov 파라미터를 관측기 Markov 파라미터로 명명하고 \bar{Y}_k 로 표시한다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \bar{A}x(k) + \bar{B}v(k) \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서

$$\begin{aligned} v(k) &= \begin{bmatrix} u(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \\ \bar{A} &= A + GC, \quad \bar{B} = [B + GD, -G] \\ \bar{Y}_0 &= D, \quad \bar{Y}_k = C\bar{A}^{k-1}\bar{B} \end{aligned}$$

관측기 이득행렬 G 에 의하여 충분히 큰 정수 p 에 대하여 $C\bar{A}^k B \approx 0, k \geq p$ 라고 가정할 수 있고 이 때 관측기 Markov 파라미터와 입출력 데이터와의 상관관계는 다음 식 (4)로 정리할 수 있다.

$$y = \bar{Y} \bar{V} \quad (4)$$

여기서

$$\begin{aligned} y &= [y(0) \ y(1) \ y(2) \ \dots \ y(p) \ \dots \ y(l-1)] \\ \bar{Y} &= [\bar{Y}_0 \ \bar{Y}_1 \ \bar{Y}_2 \ \dots \ \bar{Y}_p] \\ \bar{V} &= \begin{bmatrix} u(0) & u(1) & u(2) & \dots & u(p) & \dots & u(l-1) \\ & v(0) & v(1) & \dots & v(p-1) & \dots & v(l-2) \\ & & v(0) & \dots & v(p-2) & \dots & v(l-3) \\ & & & \ddots & \vdots & \dots & \vdots \\ & & & & v(0) & \dots & v(l-p-1) \end{bmatrix} \\ y \in \mathbb{R}^{m \times l}, \bar{Y} \in \mathbb{R}^{(m \times [(r+m)p+r])}, \bar{V} \in \mathbb{R}^{[(r+m)p+r] \times l} \end{aligned}$$

관측기 Markov 파라미터 \bar{Y}_k 는 위 식 (4)의 최소자승해로 다음과 같이 구할 수 있으며 이로부터 시스템 Markov 파라미터 Y_k 를 계산할 수 있다.

$$\bar{Y} = y \bar{V}^T [\bar{V} \bar{V}^T]^{-1} \quad (5)$$

시스템 Markov 파라미터로부터 최소 차수(minimum order)의 이산시간 상태방정식 시스

템 행렬 및 관측기 이득 행렬을 구하는 과정은 ERA/DC (eigensystem realization algorithm with data correlations)를 이용했다. 이 방법은 모든 상태변수의 제어가능 정도와 관측가능 정도가 동일한 최소구현(minimum realization)을 계산하는 ERA(eigensystem realization algorithm)를 측정잡음의 영향을 줄일 수 있도록 개선한 것이다.⁽³⁾

ERA/DC에서 시스템 행렬 및 그 차수를 결정하는 방법은 다음과 같다. 먼저 Markov 파라미터로부터 다음과 같이 정의된 Hankel 행렬을 구한다.

$$H(k-1) = \begin{bmatrix} Y_k & Y_{k+1} & \cdots & Y_{k+\beta-1} \\ Y_{k+1} & Y_{k+2} & \cdots & Y_{k+\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{k+\alpha-1} & Y_{k+\alpha} & \cdots & Y_{k+\alpha+\beta-2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

다음 식과 같이 Hankel 행렬의 상관 행렬을 정의한다.

$$R_{hh}(k) = H(k)H^T(0) \quad (7)$$

이 상관 행렬들로 구성되는 블록 상관 Hankel 행렬(block correlation Hankel matrix)을 다음과 같이 정의한다.

$$\tilde{H}(k) = \begin{bmatrix} R_{hh}(k) & R_{hh}(k+\tau) & \cdots & R_{hh}(k+\xi\tau) \\ R_{hh}(k+\tau) & R_{hh}(k-2\tau) & \cdots & R_{hh}(k+(\xi+1)\tau) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{hh}(k+\xi\tau) & R_{hh}(k+(\xi+1)\tau) & \cdots & R_{hh}(k+(\xi+\zeta)\tau) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$\tilde{H}(0)$ 를 특이치 분해(singular value decomposition)하고 상대적으로 0에 가까운 특이치를 버리고 그보다 큰 나머지 n 개의 특이치만을 선택하면 다음과 같이 표현할 수 있고 시스템 차수는 n 이 된다.

$$\tilde{H}(0) \approx R_n \Sigma_n S_n^T \quad (9)$$

이산시간 상태방정식의 시스템 행렬은 다음과 같이 계산되며 이로부터 연속시간 상태방정식의 시스템 행렬을 계산할 수 있다.⁽³⁾

$$\begin{aligned} A &= \Sigma_n^{-1/2} R_n^T \bar{H}(1) S_n \Sigma_n^{-1/2} \\ B &= [E_\gamma^T R_n \Sigma_n^{1/2}]^* H(0) E_\gamma \\ C &= E_m^T E_\gamma^T R_n \Sigma_n^{1/2} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서

$$\begin{aligned} E_\gamma^T &= [I_\gamma \ O_\gamma \ O_\gamma \ \cdots \ O_\gamma] \\ E_r^T &= [I_r \ O_r \ O_r \ \cdots \ O_r] \\ E_m^T &= [I_m \ O_m \ O_m \ \cdots \ O_m] \end{aligned}$$

3. 실험체 및 계측 시스템 구성

본 장은 시스템식별 실험에 사용된 진동 제어 실험 시스템의 구성요소의 특성과 사양 및 실험의 수행 계획에 관한 것이다. 본 연구에서 사용된 진동 제어 실험 시스템은 건물 모델, 지진모사를 위한 진동대, 제어력 발생을 위한 진동 제어 장치의 일종인 능동질량감쇠기, 제어 신호 발생을 위한 응답 측정 및 신호처리 시스템으로 구분할 수 있다. 본 연구에 사용된 건물 모델, 진동대 및 능동질량감쇠기는 건설교통기술 연구개발 과제[과제번호 R&D 95-0010]를 수행하면서 제작된 것이다.⁽⁴⁾

3.1 건물 모델

구조물의 진동은 구조물의 동적 특성과 입력에 따라 다른 양상을 보이게 되므로, 제어 실험의 대상이 되는 건물 모델은 실제 건물의 동적 특성을 반영할 수 있어야 한다.

건물 모델은 3개 층으로 이루어져 있으며 각 층은 600×600mm의 알루미늄 바닥상판과 이를 보강하는 L-형강으로 이루어져 있으며 총 질량은 15.16kg이다. 실험의 편의상 가진력과 제어력, 건물 모델의 응답의 방향을 1방향으로 제한하였고 이를 위하여 가진 방향과 직각되는 방향으로 가새가 설치되어 있다. 기둥은 강재의 판기둥이며 가새와 마찬가지로 1방향 거동이 지배적이 되도록 해준다. 이에 더하여 건물의 각 층에 설치된 변위계의 스프링이 건물 모델

의 강성 및 감쇠를 증가시켜주는 역할을 한다.

건물 모델의 동적 특성은 고유진동수 및 감쇠비로 나타낼 수 있다. 실제 건물의 기본 고유진동수는 대부분 10Hz이내의 저주파수 대역에 속하며 지진하중의 진동수 성분도 이 저주파수 대역의 성분이 주류를 이룬다. 그리고 감쇠비는 실제 구조물에 대하여 정확한 측정이 불가능하지만 일반적으로 구조물의 유형과 응력도(stress)의 수준에 따라 2~20%의 값을 가정하며 내진규준은 5%의 감쇠비를 가정하여 사용하고 있다.⁽⁵⁾ 시스템 식별 결과 건물 모델의 기본 고유진동수가 2.80Hz이며 1~1.5%의 감쇠비를 가지므로 실제 건물의 동적 특성을 어느 정도 모사해 낸다고 볼 수 있다.

3.2 바닥판 진동대

지진 모사를 위한 진동대의 바닥판의 크기는 600×600mm의 크기로, 건물 모델의 크기 및 중량, 진동대를 구성하고 있는 기계장치의 한계 등을 고려하여 설계된 것이다. 최대 발생 가속도는 중력 가속도의 크기로 지정되었다. 진동대는 모터의 회전력을 볼스크루를 이용해 직선운동으로 바꾸어 가이드 레일 위로 진동대 바닥판이 움직이도록 구성되어 있다. 모터의 회전은 정밀도를 높이기 위하여 감속 기어와 타이밍 벨트를 이용하여 회전력이 볼 스크루로 전달된다.

사용된 모터는 토크성능이 뛰어나 가진되는 건물 모델의 질량을 크게 할 수 있으며, 고속회전이 용이하고, 가격에 비하여 제어성능이 뛰어난 것으로 알려진 AC 서보 모터(AC servo motor)이다. AC 서보 모터는 모터 본체와 드라이버로 구성된다. 모터 드라이버의 기능은 직류전원을 연결하여 모터를 구동하고 외부에서 모터 구동신호를 읽어들이어서 모터의 작동을 제어하는 것이다. 이 때 드라이버는 모터의 제어효율을 높이기 위하여 모터에서 타코 신호를 피드백하여 구동신호를 조정해준다. AC 서보 모터는 Parker Motion & Control(U.K.)사의 APEX620 모델을 사용했으며, 모터 드라이버

는 동일 회사의 APEX20 모델을 사용하였다.⁽⁴⁾

3.3 능동질량감쇠기

능동질량감쇠기(active mass damper, 이하 AMD)는 질량체를 모터로 이동시키고 이때 발생하는 관성력으로 건물에 인위적인 힘을 가하여 건물의 진동을 제어하는 장치이다. 작동원리는 모터의 회전운동을 볼스크루를 이용하여 직선운동으로 전환하여 이동질량체의 가속도를 발생시키는 것으로 진동대와 동일하다.

AMD의 전체 질량은 15.62kg이며, 이 중에서 관성력을 발생시키는 순수한 이동질량체의 질량은 4.7kg 이다. 볼스크루와 모터의 기어 증속비는 1.6(16/10)이다. 모터는 AC 서보 모터로서 Parker Motion & Control (U.K.)사의 ML2340 모델을 사용했으며, 모터 드라이버는 BLH75 모델을 사용하였다.⁽⁴⁾

3.4 응답측정 및 신호처리 장치

실제 구조물의 응답 중 변위와 속도는 지반에 대한 상대적인 값으로 측정되어야 하나 지진의 경우 건물과 지반이 함께 움직이기 때문에 측정이 매우 어렵게 된다. 이에 비해 가속도는 구조물의 임의 지점에서 직접 측정이 가능하며, 비교적 측정 비용이 저렴한 장점이 있다. 실험시 건물 모델의 응답을 측정하기 위하여 진동대 바닥판, 각 층 바닥판 및 AMD의 이동 질량체에 가속도계를 설치하였다. 또한 본 논문의 후속연구에서 수행할 진동제어 실험에서 제어효과를 확인하기 위한 보조수단으로서 각 층에 변위계(LVDT)를 설치하였다. 이 변위계는 시스템식별에는 사용되지 않지만 내부에 장치된 스프링의 변형에 의해 변위를 측정하는 구조를 가지고 있어서 이를 제거했을 때에 건물모형의 고유진동수와 감쇠비가 변화한다는 것을 발견할 수 있었다. 따라서 변위계를 설치한 채로 시스템식별 실험을 수행하였다.

가속도계에서 측정된 가속도는 아날로그 신

호이며 신호증폭기로 증폭되어 컴퓨터에서 인식할 수 있도록 A/D보드를 통하여 디지털 신호로 변환된다. 진동대를 구동하기 위한 모터 구동신호는 컴퓨터에서 만들어지는 디지털 신호로서 D/A보드를 통하여 아날로그 신호로 전환되어 모터 드라이브로 보내지게 된다. 이때 진동대 모터에서 유입되는 다량의 노이즈에 의해서 측정된 신호가 오염되는 것을 막기 위해 진동대 구동을 위한 D/A 변환 보드 및 컴퓨터는 측정신호 저장을 위한 A/D 변환 보드 및 컴퓨터와 다른 것을 사용하여 두 작업을 분리 수행하였다. 일련의 신호의 입출력 흐름은 LABVIEW 프로그램을 이용하여 처리하였으며, A/D & D/A 변환 보드는 NI(national instrument)사의 PCI-MIO-16XE-50과 LAB-PC-1200 모델을, BNC 케이블의 연결보드는 NI사의 BNC-2090과 BNC-2081 모델을 각각 사용하였다. 전체 실험장치 구성을 그림 1에 나타내었다.

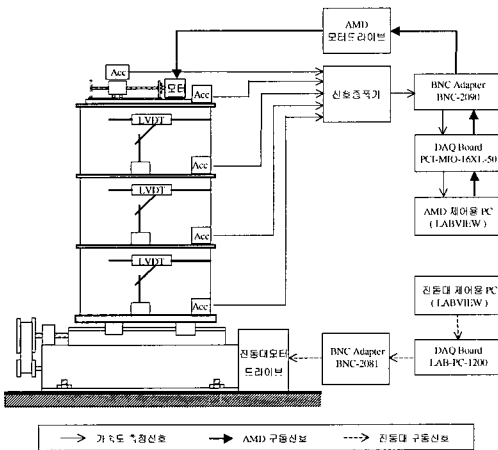


그림 1 실험장치 구성

4. 실험 계획

4.1 예비 실험

본 실험에 들어가기 전에 주파수 분석기를 이용하여 건물 모델과 AMD의 고유진동수를 찾아보는 예비실험을 수행하였다. 예비실험 결과 건물 모델의 고유진동수는 2.8Hz, 7.9Hz, 12.2Hz,

22.5Hz이고 AMD의 고유진동수는 21.2Hz임을 알 수 있었다. 이로부터 건물 모델의 4차모드와 AMD의 고유모드는 진동수가 근접해 있기 때문에 상호교란되어 데이터가 왜곡되고 시스템 식별과정에서 이를 구분하지 못할 가능성이 있으므로 개별적으로 시스템 식별 후 두 개의 시스템 모델을 통합하는 과정을 거치기로 결정했다.

4.2 건물 모델의 입 출력 설정

시스템식별은 실험으로부터 측정된 시스템의 입력과 출력으로부터 시스템의 거동을 모사할 수 있는 수학적 모델을 구하는 것이다. 시스템은 입력과 출력사이의 모든 전기 기계적인 장치들과 구조물들을 포함하는 것으로 입출력의 설정에 따라 시스템이 달라진다.

본 연구에서 시스템에 대한 입력은 진동대를 통한 지반가속도 입력과 AMD를 통한 입력의 두가지가 있다. AMD를 통한 입력으로는 모터의 속도제어 신호, 이동질량의 절대가속도 및 상대가속도의 세가지를 고려할 수 있다. 이 중에서 모터의 속도제어 신호를 입력신호로 하면 AMD의 동적 특성이 포함되기 때문에 이는 AMD의 시스템 식별에서만 사용하였다.

그림 2와 같이 AMD가 설치된 단자유도계 구조물에 대하여 AMD 가진 입력의 설정에 따른 동적 특성치의 변화를 표 1에 정리하였고 동일한 구조물에 대하여 지반가속도를 입력으로 설정했을 때 AMD 이동질량의 유무에 따른 동적 특성치의 변화를 표 2에 정리하였다.

각각의 경우에 대해서 고유진동수의 변화는 AMD 이동질량의 포함 여부에 따라 달라지는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 AMD 이동질량체를 분리하기 힘들므로 이를 설치한 채로 진동대 가진 데이터를 취집했으며 이와 동일한 동적 특성을 얻기 위해 AMD 가진시에는 이동질량의 설치층에 대한 상대가속도를 입력으로 설정하여 데이터를 취집했다.

전체 시스템 식별 실험의 구성을 그림 3에 명시하였다

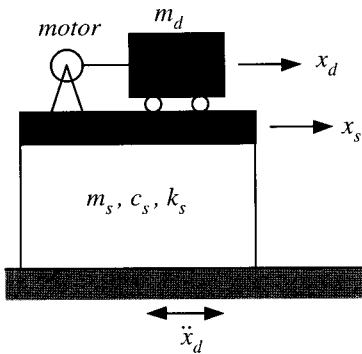


그림 2 AMD가 설치된 1자유도계 시스템

표 1 AMD 가진시 가진입력의 설정에 따른 동적 특성치 변화

구분	$u = \ddot{x}_s + \ddot{x}_d$	$u = \ddot{x}_d$
운동 방정식	$m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s = -m_d u$	$(m_s + m_d) \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s = -m_d u$
고유 진동수	$\sqrt{k_s/m_s}$	$\sqrt{k_s/(m_s + m_d)}$
감쇠비	$c_s/2\sqrt{m_s k_s}$	$c_s/2\sqrt{(m_s + m_d)k_s}$

표 2 진동대 가진시 AMD이동질량의 유무에 따른 동적 특성치 변화

구분	AMD 이동질량 제거	AMD 이동질량 부착
운동 방정식	$m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s = -m_s \ddot{x}_g$	$(m_s + m_d) \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s = -(m_s + m_d) \ddot{x}_g$
고유 진동수	$\sqrt{k_s/m_s}$	$\sqrt{k_s/(m_s + m_d)}$
감쇠비	$c_s/2\sqrt{m_s k_s}$	$c_s/2\sqrt{(m_s + m_d)k_s}$

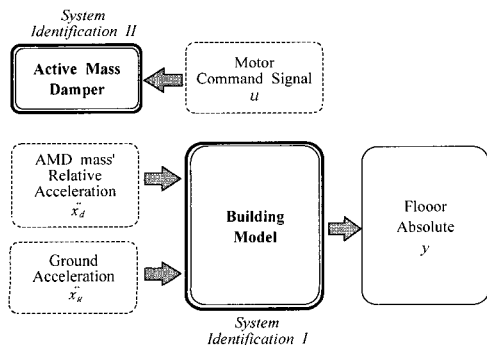


그림 3 시스템 식별을 위한 입력력 다이어그램

4.3 시스템 식별을 위한 모터 구동신호

시스템 식별에 사용되는 입출력 신호는 식별 대상 시스템의 동적 특성을 충분히 표현할 수 있도록 응답에 영향이 큰 모드가 존재하는 저주파수 대역에 에너지가 집중되는 것이 중요하다. 응답에 대한 영향이 적은 고주파수 대역으로 에너지가 분산될 경우 상대적으로 저주파수 대역에서의 모델 오차가 커질 수 있다. 또한 본 연구에서는 가속도 형태의 가진이 속도 제어 서보모터를 통해서 이루어지기 때문에 이를 고려하여 모터입력신호를 생성해야 한다. 본 연구에서는 먼저 백색잡음을 생성한 뒤 이를 저주파 통과 필터(low-pass filter)에 통과시켜 12Hz 이상의 고주파성분을 감소시킨 뒤에 이를 적분하여 모터 입력신호를 생성하였다. 그림 4는 실험에 사용된 모터입력 신호의 파워 스펙트럼 밀도(power spectral density)이고, 이 입력신호에 의해 진동대에서 발생한 지반 가속도 및 동일한 입력신호에 대해 발생하는 AMD 이동질량체의 상대가속도의 파워 스펙트럼 밀도는 각각 그림 5 및 그림 6과 같다.

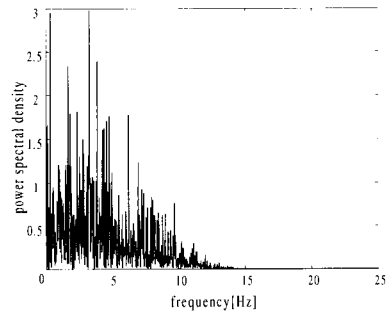


그림 4 모터 입력신호의 파워 스펙트럼

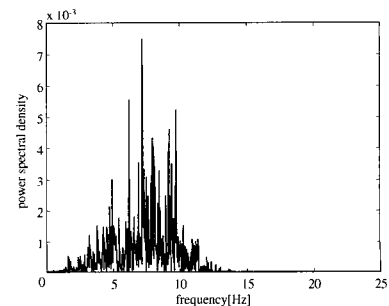


그림 5 진동대에서 발생한 지반가속도 파워 스펙트럼

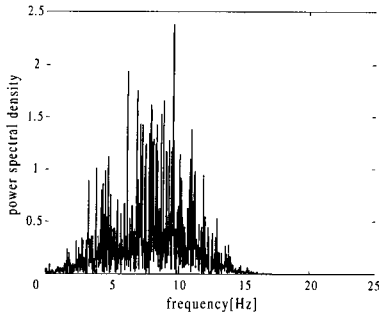


그림 6 AMD 이동질량체의 상대가속도 파워 스펙트럼

5. 실험결과 및 분석

5.1 건물 모델 시스템 식별

그림 3에 표시한 바와 같이 건물 모델의 입력 신호는 진동대 바닥판의 절대가속도 \ddot{x}_g 와 AMD 질량의 3층에 대한 상대가속도 \ddot{x}_d 로 설정하였고, 출력신호는 각 층에 설치된 가속도계의 출력 y 로 가정하였다. 입력이 두개이므로 각각의 입력에 대한 수학적 모델을 구성하고 여기에 모델응축(model reduction)을 적용하여 최종 시스템 모델을 구하였다.⁽⁶⁾

먼저 진동대 가진 입력과 측정된 출력 사이의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= A_1 x_1 + B_1 \ddot{x}_g \\ y &= C_1 x_1 + D_1 \ddot{x}_g \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 A_1 , B_1 , C_1 , D_1 은 시스템 행렬, x_1 은 시스템의 상태벡터이다. 실험에서 사용된 모델은 3층 전단건물 모델로 3개의 모드가 지배적이므로 상태방정식의 차수는 6 이상이 된다. 이것은 식별 과정에서 식 (9)의 특이값 중에서 6개의 특이치가 다른 값에 비해 상대적으로 큰 것으로부터 확인할 수 있다.

AMD 가진 입력에 대한 출력의 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= A_2 x_2 + B_2 \ddot{x}_d \\ y &= C_2 x_2 + D_2 \ddot{x}_d \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 A_2 , B_2 , C_2 , D_2 는 시스템 행렬, x_2 는 시스템의 상태벡터이다. 진동대 가진 입력의 경우와 같이 3개의 모드가 지배적인 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 위의 두 경우에 대하여 각각 8차의 상태방정식을 구하였다. 이것은 입출력 데이터를 주파수 분석기를 사용하여 푸리에 변환(Fourier transform)해 살펴본 결과 22Hz 근처에 4차 모드가 존재하였기 때문이다.

식 (11)과 (12)를 결합하여 다음과 같은 다입력 다출력(multi-input multi-output, MIMO) 시스템을 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{x}_g + \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix} \ddot{x}_d \\ y &= [C_1 \ C_2] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + D_1 \ddot{x}_g + D_2 \ddot{x}_d \end{aligned} \quad (13)$$

그러나 이것은 건물 모델의 모드가 각각 중복되어 나타나 최소구현이 되지 못하므로 모델 응축과정을 통하여 시스템의 차수를 줄일 수 있다. MATLAB 함수(balreal, modred) 등을 이용하여 다음과 같은 응축된 최종적인 상태방정식을 구할 수 있다.⁽⁷⁾

$$\begin{aligned} \dot{x}_s &= A_s x_s + B_{s1} \ddot{x}_g + B_{s2} \ddot{x}_d \\ y &= C_s x_s + D_{s1} \ddot{x}_g + D_{s2} \ddot{x}_d \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)는 8개의 상태변수를 가지는 운동방정식으로 결정되었다. 진동대 가진, AMD 가진 및 모델 응축 결과에 의한 시스템 행렬 A_s , A_2 , A_s 를 각각 고유치 해석하여 고유진동수와 감쇠비를 구하면 표 3 및 표 4와 같다. 진동대 가진의 경우와 AMD 가진의 경우 고유진동수가 서로 일치하지 않으며 이는 AMD 가진시에 건물 모델이 고정되어 있는 진동대의 볼스크류의 회전을 완전히 방지하지 못하면서 발생한 결과로 추측된다. 또한 응축된 모델의 고유진동수와 감쇠비는 AMD 보다는 진동대 가진에 의해서 얻어진 상태방정식의 고유진동수 및 감쇠비에 더 가까웠다. 이는 진동대 가진에 의해서 구조

물에 유입되는 에너지가 AMD 가진에 의한 것보다 훨씬 더 크므로 모델응축 과정에서 특이치가 상대적으로 작은 AMD 가진에 의한 모드를 배제했기 때문인 것으로 생각된다.

표 3 건물 모델의 고유진동수 (Hz)

구분	진동대 가진	AMD 가진	모델 응축
1차모드	2.7931	2.7876	2.7930
2차모드	7.8730	7.7860	7.8682
3차모드	12.2133	12.1635	12.2090
4차모드	22.5517	23.5936	22.5402

표 4 건물 모델의 감쇠비 (%)

구분	진동대 가진	AMD 가진	모델 응축
1차모드	1.0371	1.0489	1.0372
2차모드	1.3418	1.2992	1.3393
3차모드	1.7672	1.6204	1.7548
4차모드	1.4520	2.5085	1.4753

시스템 식별 결과를 검증하기 위하여 주파수 분석기를 통하여 구한 전달함수(transfer function)와 식 (5.4)로부터 구성한 해석적인 전달함수를 비교하였다. 그림 7~9는 진동대 가진 입력에 대한 각종 가속도의 전달함수를, 그림 10~12는 AMD 가진 입력에 대한 전달함수를 각각 나타낸다. 여기서 진동대 가진의 경우 극점(poles)과 영점(zeros)이 매우 잘 일치함을 확인할 수 있다. AMD 가진의 경우에는 저주파 대역에서는 잘 일치하나 4차 모드에 해당되는 극점의 위치에 다소 차이가 있음을 볼 수 있다. 이것은 저주파수 대역 모드의 정확한 식별을 위하여 입력의 파워가 저주파 대역에 집중됨으로써 상대적으로 고차모드의 가진이 정확하지 않았던 것이 원인으로 생각된다.

그림 13과 14는 시스템 식별 결과를 이용하여 재구성한 시간이력과 실험에서 구한 시간이력을 비교한 것으로 잘 일치함을 볼 수 있다. 여기서 AMD 가진의 경우 실제 응답보다 다소 작은 응답을 나타내나 응답의 위상이 일치하고 오차가 크지 않으므로 식 (14)가 이

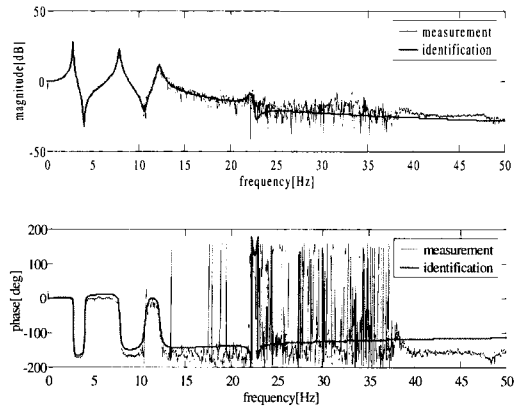


그림 7 지반 입력 가속도로부터 1층의 절대가속도에 대한 전달함수

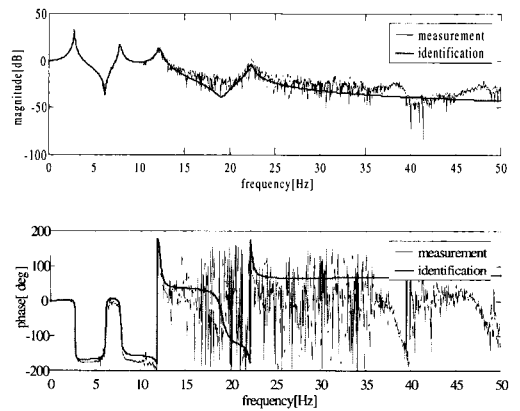


그림 8 지반 입력 가속도로부터 2층의 절대가속도에 대한 전달함수

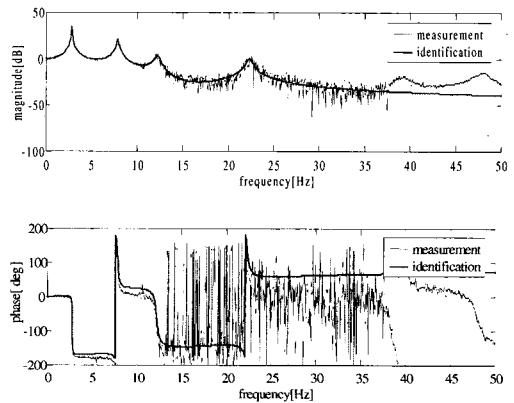


그림 9 지반 입력 가속도로부터 3층 절대가속도에 대한 전달함수

건물 모델을 표현하는데 무리가 없다고 할 수 있다. 그러나 AMD 가진에 의한 입력의 영향이 작게 평가되는 것은 제어 실험시 실제 필요한 제어력보다 오차에 해당되는 만큼 크게 제어력을 산정하는 결과를 가져오게 된다.

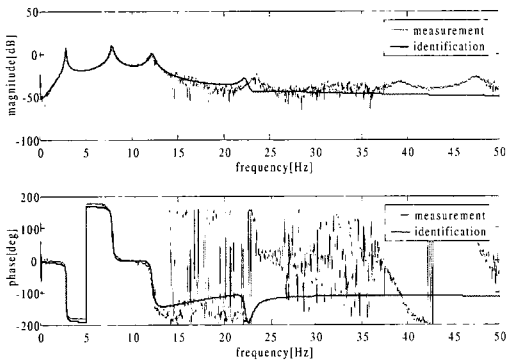


그림 10 AMD 이동질량의 상대가속도로부터 1층 절대가속도에 대한 전달함수

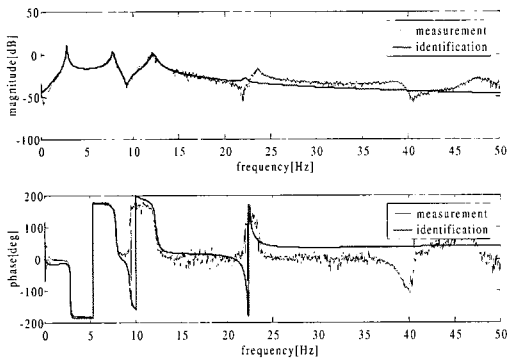


그림 11 AMD 이동질량의 상대가속도로부터 2층의 절대가속도에 대한 전달함수

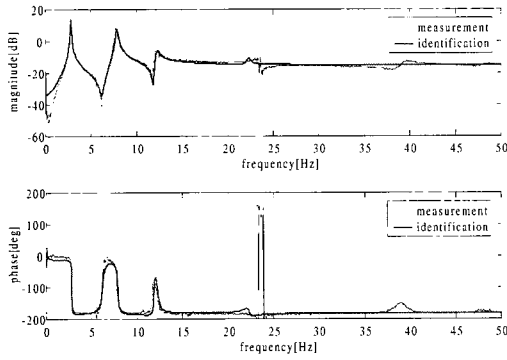


그림 12 AMD 이동질량의 상대가속도로부터 3층 절대가속도에 대한 전달함수

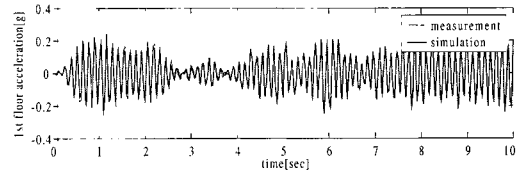
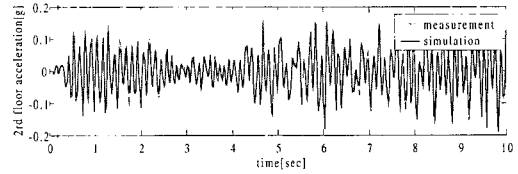
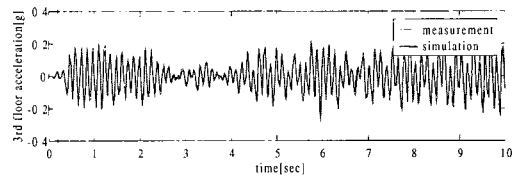


그림 13 지반 입력 가속도에 의한 각 층별 가속도 응답의 시간이력

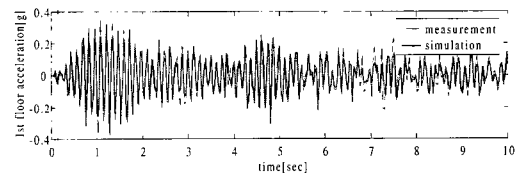
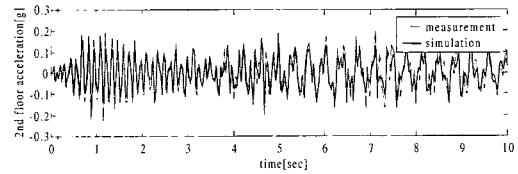
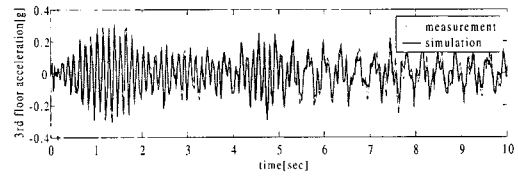


그림 14 AMD 이동질량의 상대가속도에 대한 각 층별 가속도 응답의 시간이력

5.2 AMD 시스템 식별

AMD는 모터에 속도제어 신호를 보내어 이동질량체를 구동함으로써 그 가속도에 의한 관성력을 가진력으로 발생시키는 장치로서 자체의 동적 특성을 무시할 수 있다면 일정한 이득을 가지는 미분기(differentiator) 역할을

하게된다. 그러나 AMD는 몇 단계의 기계적인 메커니즘을 통하여 제어력을 발생시키기 때문에 단순히 미분기로 모델링하는 것은 시간지연 등의 원인이 될 수 있다. 따라서 구조물과는 별도로 시스템 식별이 필요하게 된다.

가력기로 사용되는 AMD의 시스템 식별을 위하여 AMD 모터신호 입력 u 에 대한 AMD 이동질량의 AMD 설치층 바닥판에 대한 상대 가속도 \dot{x}_d 를 측정하였다. 이 때 가진기와 구조물 사이의 상호작용의 영향을 배제하기 위하여 AMD를 건물 모델에서 분리하여 고정된 바닥에 고정시키고 입출력 데이터를 취집하였다. 관측기/Kalman 필터 식별을 이용하여 구한 AMD의 수학적 모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_a &= A_a x_a + B_a u \\ \dot{x}_d &= C_a x_a + D_a u \end{aligned} \quad (15)$$

위 식은 1개의 모드를 가정하여 2차의 상태 방정식으로 구성되었다. 시스템 행렬 A_a 로부터 구한 고유진동수와 감쇠비는 표 5와 같으며 그림 15는 식 (15)를 이용하여 해석적으로 구한 전달함수와 실험에 의하여 구한 전달함수를 비교한 것이다.

표 5 AMD의 동적 특성

고유진동수(Hz)	감쇠비(%)
21.210	11.721

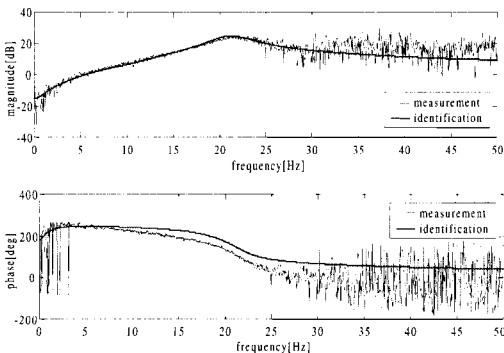


그림 15 AMD 모터 구동신호로부터 AMD 이동질량 상대가속도에 대한 전달함수

AMD는 앞서 언급한 바와 같이 이상적인 미분기 역할을 하는 경우 전달함수의 크기를 dB단위로 표시했을 때 진동수를 따라서 단조 증가하는 로그(log) 함수 형태로 나타나고 위상은 -90 (또는 270)가 되어야 한다(센서의 양의 측정 방향과 가속도의 양의 방향이 반대로 설치되어서 위상에 마이너스 부호가 붙었음). 그러나 그림 15에서 볼 수 있듯이 전달함수의 크기를 보면 고주파수 성분을 충분히 통과시키지 못하고 있으며, 또한 위상도 -90 (또는 270)보다 앞서거나 뒤지는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 AMD의 동적 특성 및 표 5에서 볼 수 있는 높은 감쇠비는 모터 자체의 동적 특성, 이동질량이 고정된 너트와 볼스크루 사이의 마찰력, 이동질량과 가이드 레일 사이의 마찰력, 모터 및 볼스크루의 기어와 이를 연결하는 벨트사이의 백래쉬(backlash) 등이 원인이다. 위와 같은 AMD의 동적 특성의 존재를 제어 실험시에 고려하지 않으면 위상지연에 의해서 불안정성을 유발할 수 있을 것으로 예상된다. 그러나 식별된 결과로부터 얻은 해석적인 전달함수와 실험적으로 구한 전달함수 사이에 존재하는 고주파 영역의 위상 차이는 제어실험시 시간간격을 20msec로 할 경우 유효 진동수가 25Hz이므로 실험 결과에 대한 영향이 작을 것으로 판단된다. 그림 16은 모터 입력 신호에 대한 AMD 이동질량의 상대가속도 시간이력을 비교한 것으로 크기가 다소 작게 계산되나 위상은 거의 정확히 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

그림 17은 시스템 식별에 의해 구해진 건물과 AMD의 모델을 직렬로 연결하여 전체시스템을 재구성한 뒤 모터 입력 신호에 대한 각층

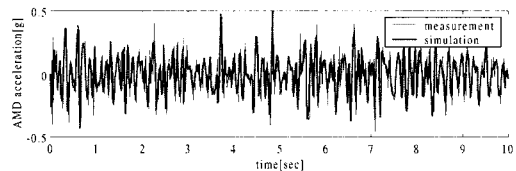


그림 16 AMD 모터 구동신호에 대한 AMD 이동질량의 상대가속도 시간이력

가속도 응답을 시뮬레이션하여 얻은 결과와 실험에서 구한 시간이력을 비교한 것이다. 대체로 잘 일치하고 있으나 2초와 3초부근에서 위상의 지연이 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 건물 모델과 AMD 각각의 식별 결과로부터 얻은 시간이력이 실제 시간이력과 잘 일치하고 있음에 반해 둘을 통합해서 얻은 시간이력에서 위상의 지연이 나타나는 것은 구조물과 가진기 사이의 상호작용에 의한 결과로 해석된다. 따라서 이 문제를 해결하기 위해서는 구조물과 가진기를 통합해서 식별할 필요가 있는 것으로 생각된다.

건물 모델과 AMD가 결합된 전체 시스템의 블록 다이어그램을 그림 18에 나타내었다.

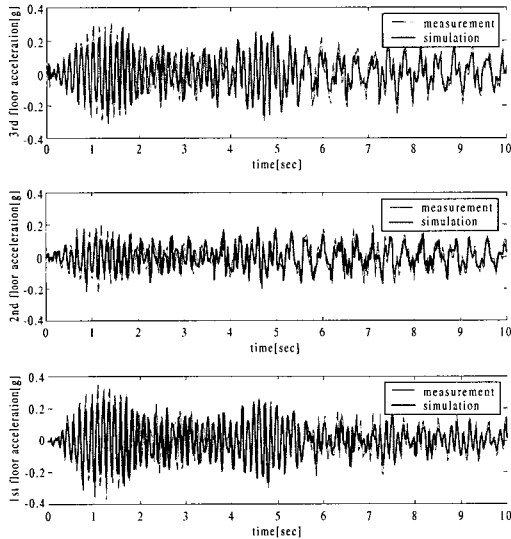


그림 17 AMD 이동질량의 모터입력 신호에 대한 각 층별 가속도 응답 시간이력

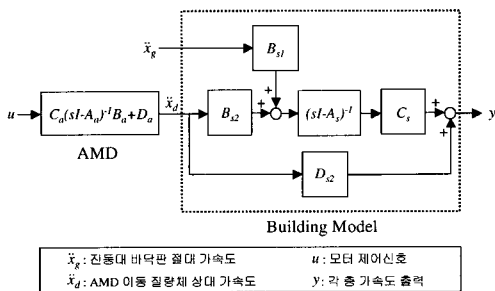


그림 18 건물 모델과 AMD가 결합된 전체 시스템의 블록 다이어그램

6. 결 론

건축구조물의 진동제어 시스템의 안정성과 효율성을 좌우하는 가장 큰 요인 중 한가지는 대상 시스템의 수학적 모델의 정확성이다. 본 연구에서는 건축 구조물의 진동제어 시스템을 구성하는 구조물과 가진기의 수학적 모델을 시스템 식별 기법 가운데 하나인 OKID를 이용하여 각각 실험적으로 구하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 입력신호의 선정에 따라서 건물 모델의 동적 특성이 달라지므로 진동대 가진 실험과 AMD 가진 실험의 결과가 동일한 동적 특성을 가지도록 입력신호를 선정해야 한다.
- (2) 입력신호는 식별 대상 시스템의 응답에 영향이 큰 진동수 대역에 에너지가 집중되도록 필터링 된 제한대역 백색잡음을 사용하여야 한다.
- (3) 3층 전단건물의 시스템 식별 결과 8개의 고유 모드를 가진 상태방정식 모델을 얻을 수 있었으며, 지반가속도 입력과 AMD 이동질량의 상대가속도 입력에 대해 각각 얻어진 건물 모델의 상태방정식 모델을 응축하는 과정에서 상대적으로 유입되는 에너지가 더 큰 진동대 가진에 의한 모델의 동적 특성치에 가까운 모델이 얻어졌다.
- (4) AMD의 시스템 식별 결과 두개의 모드를 가지는 상태방정식 모델을 얻을 수 있었다. AMD의 동적 특성은 모터 자체의 동적 특성, 이동질량이 고정된 너트와 볼스크루 사이의 마찰력, 모터 및 볼스크루의 기어와 이를 연결하는 벨트사이의 부정합성(backlash) 등이 원인으로 생각되며 제어 실험시에 이를 고려하지 않으면 시간지연 효과로 제어시스템의 불안정성을 야기할 수 있다.

참 고 문 헌

1. 황재승, "건축구조물의 능동제어에 관한 실험적 연구", 박사학위논문, 서울대학교, 서울, 1998, pp. 204.
2. "Special Issue: structural control: past, present, and future," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 123, No. 9, 1997, pp. 175.
3. Juang, J. N., *Applied System Identification*, Prentice Hall, New Jersey, 1994, pp. 394.
4. 홍성목, "건축구조물의 진동제어 기술개발에 관한 연구", '95연구개발사업 최종보고서, R&D 95-0010, 건설교통부, 서울, 1997, pp. 285.
5. Chopra, A. K., *Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall, New Jersey, 1995, pp. 729.
6. Dyke, S. J., Spencer, B. F., Quast, P., Sain, M. K., Kaspari Jr., D. C., and Soong, T. T., "Acceleration feedback control of MDOF structures," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 122, No. 9, 1996, pp. 907-918.
7. Grace, A., Laub, A. J., Little, J. N., and Thompson, C. M., *Control System Toolbox*, The Math Works, Natick, Mass., 1992, pp. 260.