

OKID를 이용한 실험 건물모델의 시스템 식별 실험

Observer Kalman Filter Identification of a Three-story Structure installed with Active Mass Driver

민 경 원† 주 석 준* 이 상 현**

Min, Kyung-Won Joo, Seok-Jun Lee, Sang-Hyun

(논문접수일 : 2003년 9월 15일 ; 심사종료일 : 2004년 3월 18일)

요 지

본 논문은 축소 3층 건물의 최상층에 능동질량형 제어장치를 설치한 시스템에 관한 식별실험분석이다. OKID기법을 적용하여 진동대 및 제어장치의 가진 입력과 건물 및 제어장치의 응답인 출력관계를 분석하여 수학모델을 구하였다. 제어장치가 설치된 건물에 관한 입력은 진동대에 의한 지반가속도와 제어장치 모터의 구동신호이다. 그리고 출력은 건물 각층과 제어장치의 가속도이다. 입출력 관계로 구하여진 수학모델을 바탕으로 제어장치의 최적설계를 수행하였으며 수치해석과 실험결과를 비교한바 서로 일치함을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 시스템식별, 관측기, 칼만필터, 능동질량감쇠기, 최소구현, 고유치

Abstract

This paper deals with system identification of a three-story building model with active mass damper (AMD) for the controller design. Observer Kalman filter identification (OKID) technique is applied to find the relationship between the experimental results of the input and output. The inputs to the building model with AMD are ground accelerations and motor command signal, which are, respectively, simulated earthquake and equivalent control force. The outputs are each floor acceleration and AMD acceleration. The AMD controller is designed based on the experimentally identified building system. Finally it is shown that experimental results agree accurately with simulated results.

keywords : *system identification, observer, kalman filter, active mass damper(AMD), minimum realization, eigenvalue*

1. 서 론

현대의 대형구조물은 구조기술력의 향상, 고강도 콘크리트 및 철골재와 같은 건설재료의 개발 그리고 시공기술의 발달 등의 여러 가지 요인에 의하여 점차 고층, 경량, 세장화되어 가는 추세에 있다. 그러나 이러한 특성을 가진 구조물은 바람이나 지진과 같은 외부 불규칙 하중에 매우 취약하여, 구조적인 안전성은 물론 과도한 진동으로 인해 거주자의 불쾌감을 유발시키는 환경적인 문제가 심각하게 등장하고 있다. 따라서 구조물에 진동제어장치를 설치함으

로써, 안전성 및 사용성을 향상시키는 기술 연구가 진행되고 있다.^{1)~5)} 그러나 이를 위해서는, 기술이 적용될 대상 구조물의 정확한 동적특성을 파악해야 효과적인 제어성능을 구현할 수 있고, 자료가 정확할수록 원하는 수준의 제어효과를 구현할 수 있다.

또한 공학적인 관점에서 기존 구조물의 경과년수 증가함에 따라 구조물 안전진단이 중요한 문제로 인식되면서 구조물의 동적거동 분석을 통하여 구조물의 안전성을 모니터링하는 방법이 부각되고 있다.⁶⁾ 특히 대형구조물에 대한 손상정도의 추정은 현재까지 외관상으로 파악되는 자료

† 책임저자, 정회원 · 단국대학교 건축대학 건축공학과 부교수
전화: 02-709-2731 ; Fax: 02-799-1154
E-mail: kwmin@dankook.ac.kr

* 정회원 · 주식회사 티.이.솔루션 부장

** 서울대학교 공학연구소 객원연구원 공학박사

• 이 논문에 대한 토론을 2004년 9월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2004년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

를 바탕으로 추정하여 왔으나, 이러한 방법은 외관 자체로만 판단하기 때문에 판단자에 따라 주관적인 의견이 개입될 가능성이 많았으며 구조물의 동적특성에 대한 고려가 불충분하였다. 반면에 구조물의 동적응답을 분석하여 구조물의 고유 시스템을 식별해내고, 이를 통하여 손상정도를 파악하는 방법은 객관적이고 실제적인 구조물의 물리적 특성을 고려할 수 있다는 장점이 있다.^{7),8)}

구조 시스템의 동적 모델을 구하기 위해 시스템의 입/출력 관계를 측정하여, 이 거동을 모사할 수 있는 수학적 모델을 구성하는 것을 시스템 식별(system identification)이라 하며,^{9)~11)} 시스템 식별 방법 중 많은 방법이 Markov 파라미터로 알려진 펄스 응답에 기초하고 있다. 그 중 시간 영역에서의 입출력 데이터로부터 직접 Markov 파라미터를 구하는 방법은 알리아싱(aliasing)에 의한 Markov 파라미터의 왜곡은 없으나 감쇠 성능이 낮은 시스템의 경우 매우 큰 입력 행렬의 역행렬을 구해야 하는 단점이 있다.

그러나 Phan¹²⁾ 등이 점근적으로 매우 안정한 관측기를 도입하여 Markov 파라미터의 감쇠를 크게 하면서 상태 공간모델과 관측기 이득을 동시에 결정하는 관측기 식별 알고리즘(observer/Kalman filter identification algorithm, OKID)을 제안하였으며, 본 연구에서는 실험 모델의 시스템을 추정한 후 수치모사와 실험의 결과를 비교하기 위하여 이 방법을 사용하여 결과의 정확성을 검증하였다.

대상 건물모형은 3개 층으로 이루어져 있으며, 각 층은 600×600mm의 알루미늄 상판과 이를 보강하는 I형강으로 이루어져 있다. 총 질량은 15.66kg이며, 기둥은 강재의 판기둥으로 가새와 마찬가지로 1방향 거동이 지배적이 되도록 해주었다. 건물모형의 형상과 치수를 부록 B에 나타내었다.

2. Observer Kalman Filter 식별 이론

2.1. Kalman Filter

일반적으로 연속적인 물리량에 대한 데이터 취득이 이산시간에서 이루어지므로 시스템 식별 과정 역시 이산시간 영역에서 이루어지게 된다. 이산 다변수 선형시스템은 다음 식과 같다.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (1)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad (2)$$

여기서 $x(k)$ 는 $n \times 1$ 의 상태벡터, $y(k)$ 는 $m \times 1$ 의 출력벡터, $r \times 1$ 의 입력벡터이며, A, B, C, D 는 시스템행렬에 해당된

다. A 가 점근적으로 안정한 경우 충분히 큰 정수 p 에 대해 $A^k \approx 0, k \geq p$ 를 가정할 수 있으며 식(1)~(2)는 다음 식(3)과 같이 근사화 할 수 있다.

$$y = Y'U \quad (3)$$

위 식(3)에서 y 와 Y' 는 각각 다음 식(4)와 식(5)로 정리할 수 있다.

$$y = [y(0)y(1)y(2)\dots y(l-1)] \quad (4)$$

$$Y' = [D \ CB \ CAB \ \dots \ CA^{l-1}B] \quad (5)$$

위 식(4)에서 l 은 데이터의 개수로 $l \geq r(p+1)$ 을 만족하도록 하며, 이 때 Markov 파라미터는 다음 식(6)으로부터 근사적으로 구할 수 있다.

$$Y' = y U^+ \quad (6)$$

여기서 $+$ 는 가역행렬(pseudo-inverse matrix)을 의미한다. 그러나 시스템의 감쇠가 작을 경우 식(3)의 가정에 필요한 p 또는 데이터 개수 l 이 너무 커져 U^+ 를 수치적으로 계산하기 어렵게 된다. 이 경우 식(3)을 사용할 수 있도록 시스템의 감쇠를 인위적으로 증가시키기 위해 식(1)에 $Gy(k)$ 를 더하고 빼면 다음 식(7)과 같이 정리할 수 있다.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Gy(k) - Gy(k) \quad (7)$$

$$x(k+1) = A^*x(k) + B^*u(k) \quad (8)$$

여기서 A^* 와 B^* 는 각각 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$A^* = A + GC \quad (9)$$

$$B^* = [B + GD, -G], \quad v(k) = \begin{bmatrix} u(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (10)$$

위의 식(8)에서 $x(k)$ 를 관측기의 상태벡터로 보면 G 는 A^* 가 충분히 안정하도록 선택된 관측기 이득, 식(8)은 관측기 방정식으로 볼 수 있다. 이 때의 Markov 파라미터를 관측기 Markov 파라미터(observer Markov parameter)라고 하며, 시스템오차와 측정오차가 모두 존재할 때 초기조건의 영향을 제거함으로써 시스템의 응답을 정상적(stationary)으로 만들 수 있다.¹³⁾

2.2. Markov 파라미터의 산정

Markov 파라미터는 시스템 Markov 파라미터와 관측

기 이득 Markov 파라미터로 나눌 수 있다. 시스템 Markov 파라미터는 시스템 행렬 A, B, C, D 를 구하는데 사용되며, 관측기 이득 Markov 파라미터는 관측기 이득 행렬 G 를 계산하는데 사용된다. Y^* 의 관측기 Markov 파라미터로부터 Y 의 시스템 Markov 파라미터를 구하기 위하여 Y^* 를 다음 식(11)과 같이 구분한다.

$$Y^* = [Y^*_0 \ Y^*_1 \ Y^*_2 \ \dots \ Y^*_p] \quad (11)$$

위 식(11)을 구성하는 Y^*_0 와 Y^*_k 는 각각 다음 식(12)와 식(13)과 같다.

$$Y^*_0 = D \quad (12)$$

$$Y^*_k = C A^{k-1} B^* \\ = [C (A + GC)^{k-1} (B + GD) - C (A + GC)^{k-1} G] \\ = [Y^{*(1)} - Y^{*(2)}]; k = 1, 2, 3, \dots \quad (13)$$

시스템 Markov 파라미터는 관측기 Markov 파라미터로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$D = Y_0 = Y^*_0 \quad (14)$$

$$Y_k = Y^{*(1)}_k - \sum_{i=1}^k Y^{*(2)}_i Y_{k-i}, k = 1, 2, \dots, p \quad (15)$$

$$Y_k = - \sum_{i=1}^p Y^{*(2)}_i Y_{k-i}, k = p+1, \dots, \infty \quad (16)$$

관측기 이득 G 에 대해서는 관측기 이득 Markov 파라미터를 다음 식(17)과 같이 정의한다.

$$Y^0_k = C A^{k-1} G, k = 1, 2, 3, \dots \quad (17)$$

관측기 이득 파라미터는 관측기 Markov 파라미터로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Y^0_1 = C G = Y^{*(2)}_1 \quad (18)$$

$$Y^0_k = Y^{*(2)}_k = - \sum_{i=1}^{k-1} Y^{*(2)}_i Y^0_{k-i}, k = 2, \dots, p \quad (19)$$

$$Y^0_k = - \sum_{i=1}^p Y^{*(2)}_i Y^0_{k-i}, k = p+1, \dots, \infty \quad (20)$$

위에서 구한 Y_k 와 Y^0_k 를 결합하여 새로운 파라미터 P_k 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P_k = [Y_k \ Y^0_k] = C A^{k-1} [B G] \quad (21)$$

P_k 를 사용하여 $A, [BG], C, D$ 를 구할 수 있다. 이러한 접근방법의 이점은 첫째, 시스템 잡음과 측정잡음에 대한 평가 없이 관측기 이득을 구할 수 있으며, 둘째, 관측기를 사용하여 독립된 Markov 파라미터의 개수를 줄일 수 있다. 셋째, 감쇠가 작은 시스템의 경우에 대하여 하나의 입출력 데이터로부터 독립된 Markov 파라미터의 개수를 결정할 수 있다는 것이다.¹³⁾ OKID의 흐름도는 다음 그림 1과 같다.

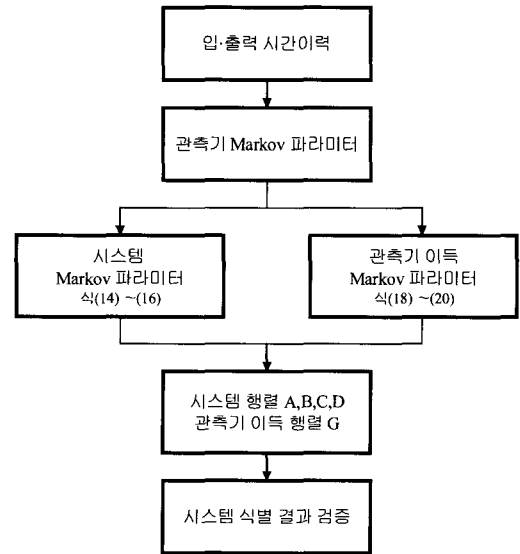


그림 1 OKID의 흐름도

2.3. 최소구현

구현(realization)은 Markov파라미터에 포함되어 있는 시스템 행렬을 의미하는 것으로 특정한 입력에 대하여 동일한 출력을 가지는 구현은 무한대로 존재한다. 최소구현(minimum realization)은 그 중에서 최소 차수의 상태공간을 가지는 모델을 의미한다. 본 연구에서는 Markov 파라미터로부터 시스템 행렬을 구할 때 데이터의 상관관계를 고려한 고유시스템 구현 알고리즘(eigensystem realization algorithm with data correlation, ERA/DC)을 사용하였다. ERA/DC는 펄스응답으로부터 A, B, C 를 구하는 것이다.¹³⁾ 위에서 구한 시스템 행렬로부터 시스템의 주파수, 감쇠비 등의 모드 변수를 구하고 Markov 파라미터를 재구성하여 구현에 사용된 것과 비교함으로써 시스템 식별결과를 검증한다.

3. 예비실험

제어의 대상이 되는 건물모형의 응답, 즉 구조시스템의

출력은 각 층의 절대가속도로 설정하였으며, 이것은 두 가지의 입력의 영향을 받는다. 하나는 지진하중으로 모사되는 지반 가속도로 건물모형의 동역학을 통하여 출력에 영향을 미친다.

다른 하나는 AMD를 통한 제어력 입력으로 AMD와 건물모형의 동역학이 직렬로 결합되어 출력에 영향을 미친다. 제어실험의 시간간격을 0.02초로 설정하였기 때문에 이에 해당되는 유효주파수 25Hz 이내의 고유주파수를 구한 결과 건물모형의 경우 2.8Hz, 7.9Hz, 12.2Hz, 22.5Hz이며, AMD의 경우는 21.2Hz이었다.

이로부터 건물모형의 4차 모드와 AMD의 고유모드의 고유주파수가 매우 인접함을 확인하였으며, 모드간의 상호교란으로 데이터가 왜곡되고 시스템 식별과정에서 이를 구분하지 못할 가능성을 고려하여 개별적인 시스템 식별 후 각 결과를 결합하는 방식으로 시스템 식별을 진행하기로 결정하였다. 우선 건물모형의 운동방정식을 고찰하기 위하여 다음 그림 2의 AMD가 설치된 단자유도 시스템

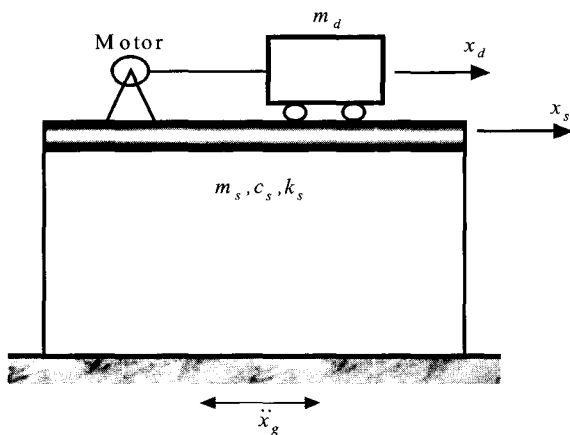


그림 2 AMD가 설치된 단자유도 시스템

그림 2에서 m_s , c_s , k_s 는 구조물의 질량, 감쇠, 강성 계수를 나타내며 m_d 는 AMD의 이동질량체의 질량을 의미한다. x_s 는 구조물의 지반에 대한 상대변위, x_d 는

AMD 이동질량체의 구조물에 대한 상대변위를 각각 나타낸다. \ddot{x}_g 는 구조물에 외란으로 작용하는 지반 가속도 입력이며 이로 인한 구조물의 응답의 제어는 AMD의 이동질량체의 관성력으로 이루어진다. 건물모델에 대한 입력으로 설정된 진동대 바닥판의 절대가속도와 AMD의 3층에 대한 상대가속도는 건물모델의 응답에 지배적인 모드를 충분히 가진할 수 있어야 한다. 이것은 가진 에너지가 지배적인 모드를 포함하는 저주파 대역에 집중되어야 함을 의미한다. 가진 에너지가 응답에 대한 영향이 적은 고주파수 대역으로 분산될 경우 상대적으로 저주파수 대역에서의 시스템 식별 결과가 부정확해질 수 있다. 각 경우에 따른 동적 특성치는 다음 표 1과 같다. 표 1로부터 AMD 가진시의 제어입력의 설정과 진동대 가진시의 AMD 이동질량체의 부착 여부에 따라 수학적 모델의 동적특성이 달라짐을 확인하였다. 따라서 개별적인 입출력 데이터를 취집할 때 수학적 모델의 동적 특성이 일치하도록 실험조건을 조정할 필요가 있다. 즉, AMD 이동질량의 설치 층에 대한 상대가속도를 제어입력으로 설정할 경우에는 AMD의 이동질량을 설치한 상태에서 데이터를 취득해야 하며((a)와 (c)), AMD 이동질량의 절대가속도를 제어입력으로 설정할 경우에는 진동대 가진 시에 AMD의 이동질량을 제거하고 시스템 식별 데이터를 취득해야 한다((b)와 (d)). 이는 시스템 식별의 대상이 되는 시스템을 건물모델과 AMD 이동질량체((a)과 (c)) 또는 건물모델((b)와 (d))로 정의하는 의미가 있다. 본 연구에서는 실제 구조물에서 이동질량의 설치 및 제거가 용이하지 않으므로 전자의 방법((a)과 (c))을 선택하였다.

부가적으로 시스템 식별을 위한 데이터 취집시 진동대와 AMD를 동시에 구동할 경우의 구조물의 운동방정식은 다음 식(22)와 같다.

$$m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s = -m_s \ddot{x}_g - m_d (\ddot{x}_g + \ddot{x}_s + \ddot{x}_d) \quad (22)$$

이것은 전자의 경우((a)와 (c))와 일치하는 것이다. 위의 결과로부터 시스템 식별 실험의 구성은 그림 3과 같이

표 1 각 경우에 대한 운동방정식과 동적특성치의 변화

구 분	(a) $u = \ddot{x}_d$	(b) $u = \ddot{x}_s + \ddot{x}_d$	(c) AMD 이동질량체 부착	(d) AMD 이동질량체 제거
운동방정식	$(m_s + m_d)\ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s = -m_d u$	$m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s = -m_d u$	$(m_s + m_d)\ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s = -(m_s + m_d)\ddot{x}_g$	$m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s = -m_s \ddot{x}_g$
고유각속도	$\sqrt{k_s / (m_s + m_d)}$	$\sqrt{k_s / m_s}$	$\sqrt{k_s / (m_s + m_d)}$	$\sqrt{k_s / m_s}$
감 쇠 비	$c_s / 2\sqrt{(m_s + m_d)k_s}$	$c_s / 2\sqrt{m_s k_s}$	$c_s / 2\sqrt{(m_s + m_d)k_s}$	$c_s / 2\sqrt{m_s k_s}$

설정하였다.

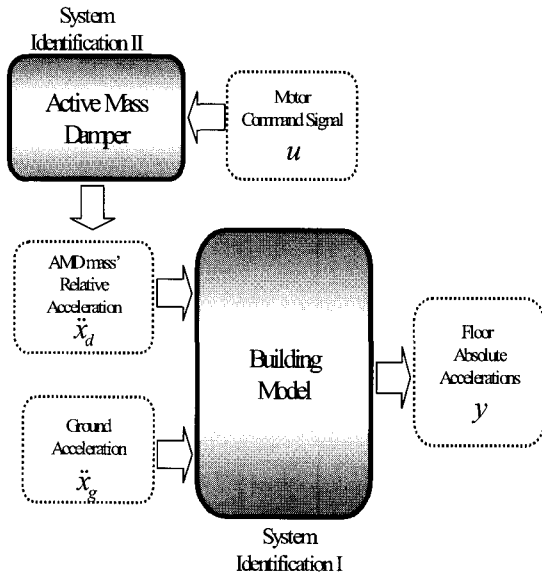


그림 3 시스템 식별을 위한 입-출력 다이어그램

모터 구동신호는 주파수 성분을 달리하기 위하여 백색 잡음 신호에서 13Hz 이상의 주파수 성분을 저주파 통과 필터를 사용하여 대폭 감소시킨 다음, 다음 식과 같은 필터 적분기를 통과시켜 생성하였다.

$$\frac{1}{(s+a)(s+\beta)} \cdot a=40, \beta=40 \quad (23)$$

4. 시스템 식별 결과

시스템 식별은 먼저 단입력다출력(SIMO) 시스템으로 표현되는 각 입력과 출력 사이의 수학적 모델을 구성하고, 이들을 모델 응축(model reduction)을 통하여 결합하는 과정으로 진행하였다.¹⁴⁾

건물모형에 대하여 입력신호는 진동대 바닥판의 절대 가속도 \ddot{x}_g 와 AMD 질량의 3층에 대한 상대가속도 \ddot{x}_d 로 설정하였고, 출력신호는 각 층에 설치된 가속도계의 출력 y 로 가정하였다. 최종적인 수학적 모델은 2개의 입력과 3개의 출력을 가지는 다입력 다출력 시스템이 된다. 먼저 진동대로 가진 하였을 때의 입력 \ddot{x}_g 와 이에 대한 출력 y 사이의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{x}_1 = A_1 x_1 + B_1 \ddot{x}_g \quad (24)$$

$$y_1 = C_1 x_1 + D_1 \ddot{x}_g \quad (25)$$

여기서 A_1, B_1, C_1, D_1 은 시스템 행렬, x_1 은 상태벡터이다. 제

어실험에서의 시간간격 0.02초에 해당되는 Nyquist 주파수인 25Hz 이내의 모든 모드가 포함되도록 수학적 모델을 구성하였다. 이렇게 구성된 수학적 모델의 고유주파수와 감쇠비는 표 2와 같다.

표 2 진동대 가진시 건물모델의 동적 특성

구 분	고유주파수(Hz)	감쇠비(%)
1차모드	2.79	1.04
2차모드	7.87	1.34
3차모드	12.21	1.77
4차모드	22.55	1.45

실험에서 사용된 모델은 3층 전단건물 모형으로, 각 층 바닥의 강성이 매우 크고 이곳에 질량이 집중되어 있기 때문에 3개의 지배적인 모드를 가진다고 볼 수 있다. 이것은 식별과정에서 6개의 특이치가 다른 값에 비해 상대적으로 큰 것으로부터 확인할 수 있다. 4차 모드는 건물모델의 판 기둥이 각 층 바닥에 비하여 강성이 매우 낮기 때문에 이의 변형에 의한 것으로 보인다. 식(24)~(25)의 상태방정식은 4개의 모드를 포함하기 때문에 8의 차수를 가지게 된다.

AMD로 가진 하였을 때의 입력 \ddot{x}_d 와 이에 대한 출력 y_2 의 관계식은 다음 식과 같다.

$$\dot{x}_2 = A_2 x_2 + B_2 \ddot{x}_d \quad (26)$$

$$y_2 = C_2 x_2 + D_2 \ddot{x}_d \quad (27)$$

여기서 A_2, B_2, C_2, D_2 은 시스템 행렬, x_2 은 상태벡터이다. 식(26)~(27)의 수학적 모델이 진동대 가진의 경우와 같이 4개의 모드를 포함하도록 하면, 상태방정식은 8의 차수를 가지게 되며 이러한 수학적 모델의 고유주파수와 감쇠비는 표 3과 같다.

표 3 AMD 가진시 건물모델의 동적 특성

구 분	고유주파수(Hz)	감쇠비(%)
1차모드	2.79	1.05
2차모드	7.79	1.30
3차모드	12.16	1.62

여기서 동일한 건물모델에 대하여 입력만 바뀌었기 때문에 모드 특성은 진동대 가진의 경우와 동일하여야 한다. 그러나 4차 모드의 고유주파수와 감쇠비가 상대적으로

로 큰 차이가 있음을 확인할 수 있다. 이것은 가진 입력의 에너지가 저주파수 대역에 집중됨으로써 고차모드의 가진이 정확하지 않았던 것으로 분석된다.

건물모형은 위의 두 가지의 입력의 영향을 동시에 받는 다입력 다출력 시스템으로 입력 \ddot{x}_g , \ddot{x}_d 와 출력 y 사이의 관계식은 식(24)~(27)으로부터 중첩의 원리(principle of superposition)를 적용하여 구하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{x}_g + \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix} \ddot{x}_d \quad (28)$$

$$y = [C_1 \ C_2] \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + D_1 \ddot{x}_g + D_2 \ddot{x}_d \quad (29)$$

그러나 이것은 건물 모델의 모드가 각각 중복되어 나타나 최소구현이 되지 못하고, 각 입력에 대한 모드 특성의 차이가 큰 4차 모드가 포함되므로 이를 조정할 필요가 있다. 여기서는 균형 구현(balanced realization)에 바탕한 모델 응축 과정을 통하여 중복된 모드와 4차 모드를 소거하였다. 이 작업은 MATLAB 내장함수(balreal, modred)를 이용하여 수행할 수 있으며, 다음과 같은 최종적인 상태 방정식을 구할 수 있다. 시스템 행렬은 부록

A에 정리되어 있다.

$$\dot{x}_s = A_s x_s + B_{s1} \ddot{x}_g + B_{s2} \ddot{x}_d \quad (30)$$

$$y = C_s x_s + D_{s1} \ddot{x}_g + D_{s2} \ddot{x}_d \quad (31)$$

위 식(30)~(31)의 상태방정식은 저주파수 대역의 3개의 모드를 포함하는 것으로 6의 차수를 가지며 표 4와 같은 동적특성을 지닌다.

표 4 모델 응축된 건물모델의 동적 특성

구분	고유주파수(Hz)	감쇠비(%)
1차모드	2.79	1.04
2차모드	7.87	1.34
3차모드	12.21	1.75

시스템 식별 결과를 검증하기 위하여 FFT 분석기를 통하여 구한 전달함수와 식(28), (29)로부터 구성한 해석적인 전달함수를 비교하였다. 그림 4는 진동대 가진시의 입출력의 전달함수를, 그림 5는 AMD 가진 입력에 대한 전달함수를 각각 나타낸다.

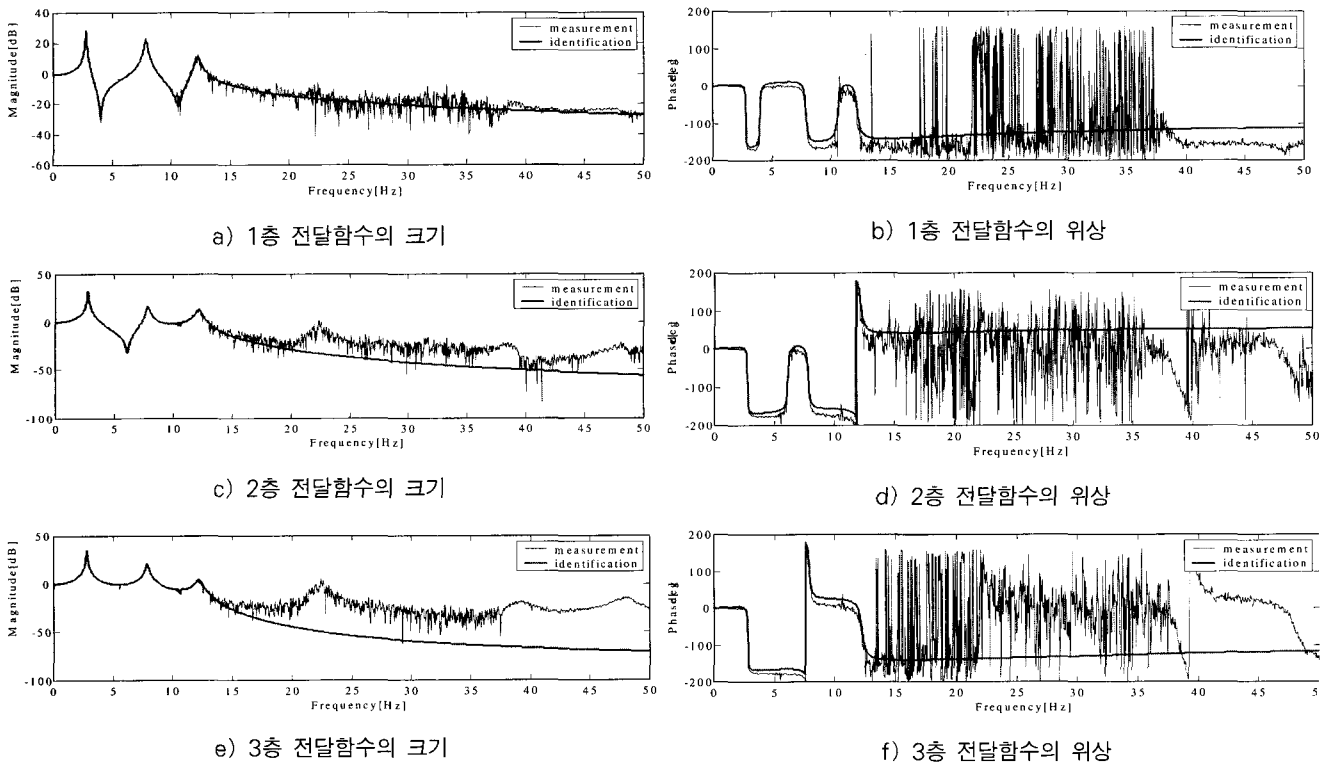


그림 4 지반 가속도 입력에서 각 층 절대가속도에 대한 전달함수 크기와 위상

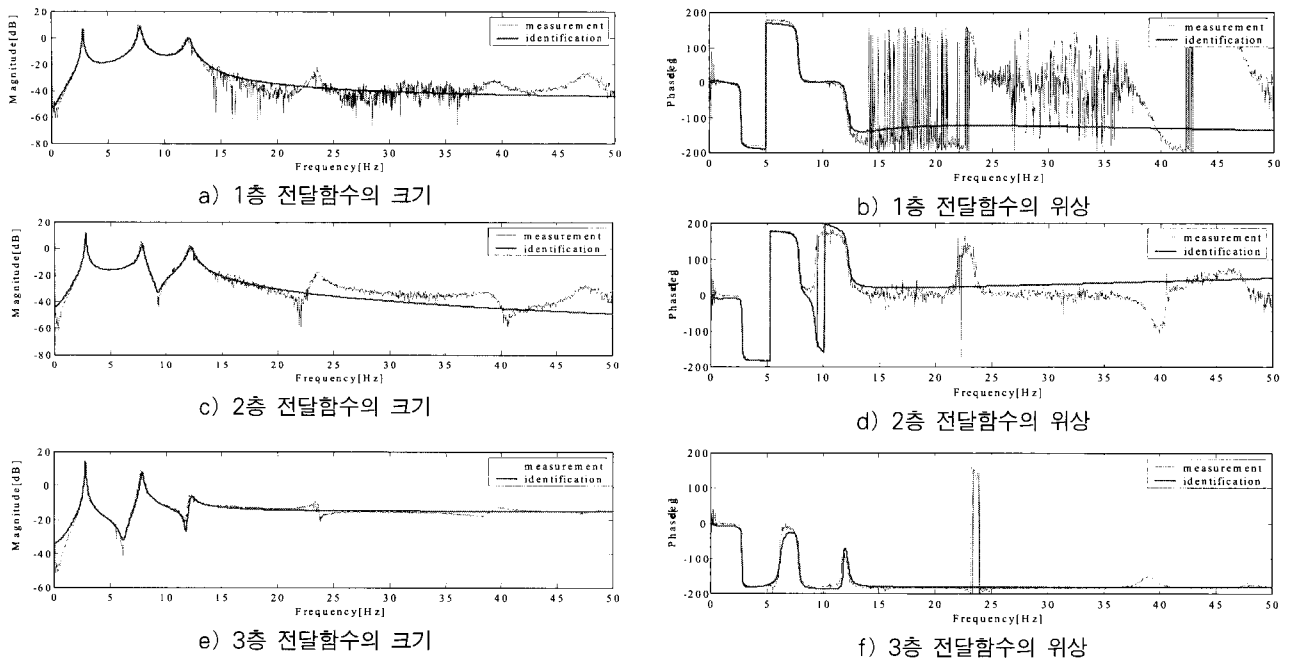
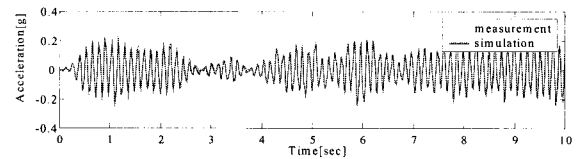


그림 5 AMD 이동질량의 상대가속도로부터 각 층의 절대가속도에 대한 전달함수의 크기와 위상

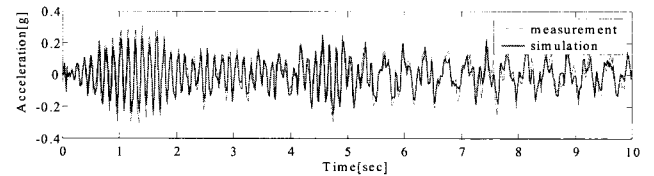
여기서 건물모델의 응답에 영향이 큰 저주파수 대역에서 전달함수의 크기와 위상이 매우 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 고주파수 대역으로 갈수록 전달함수의 오차가 커지는 경향을 볼 수 있으나, 응답에의 영향이 상대적으로 작고 전달함수의 크기가 측정된 전달함수보다 작아 시스템 식별결과가 상대적으로 부정확한 고주파수 대역에서의 제어력을 감소시켜 준다. 이것은 시스템 식별 과정에서 제외된 고차모드가 제어력에 의해 가진 됨으로써 제어시스템이 불안정해지는 스피로버 현상(spill-over effect)을 감소시킬 수 있다.

그림 6~7은 시스템 식별 결과를 이용하여 재구성한 시간이력과 실험에서 측정된 시간이력을 비교한 것으로 진폭과 위상이 잘 일치하고 있다.

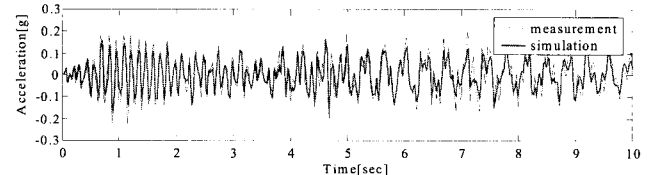


(c) 1층의 절대가속도

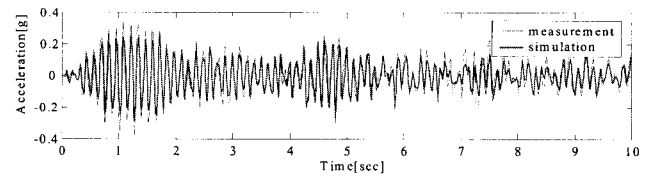
그림 6 지반 가속도 입력에 의한 각층 가속도 응답의 시간이력



(a) 3층의 절대가속도

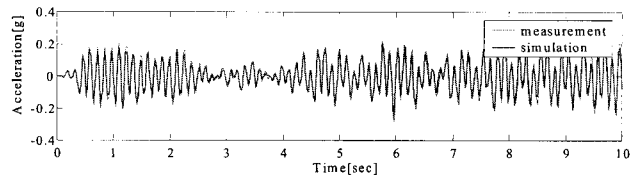


(b) 2층의 절대가속도

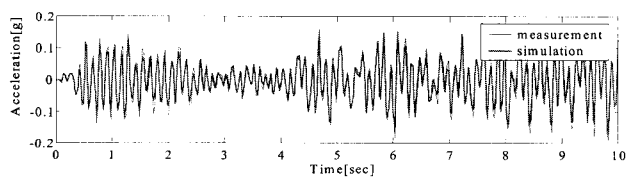


(c) 1층의 절대가속도

그림 7 AMD 상대 가속도에 대한 각층 가속도 응답의 시간이력



(a) 3층의 절대가속도



(b) 2층의 절대가속도

5. 결 론

본 논문에서는 3층의 실험 모형을 제작하여 각층에 가속도계를 설치하고, 3층에 AMD를 설치한 다음 진동대와 AMD로 가진을 한 후 측정된 데이터를 근거로 시간영역 식별 기법 중에서 외곽 효과를 줄이면서도 건물과 같은 저주파의 동적 특성을 가진 식별의 경우에도 가장 접근적으로 안정하다고 알려진 OKID 기법을 적용하여 실험 모형의 시스템을 식별하였다.

우선 수학적 예비실험을 통하여 각 가진시에 따른 동적 특성치를 예측하고 이를 통하여 식별 실험을 계획하여 AMD에 의한 가진에 의한 식별과 진동대에 의한 가진에 의한 식별로 나누어 식별실험을 진행하였고, 이를 검증하기 위하여 추정된 시스템 행렬을 통한 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교하여 검증하였다.

구성된 실험결과 추정된 시스템 식별치가 건물모형의 응답에 영향이 큰 저주파수 대역에서 전달함수의 크기와 위상이 매우 잘 일치하고 있으므로 건물의 동적 특성치를 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

식별과정에서 얻어진 전달함수의 경우 고주파수 대역으로 갈수록 전달함수의 오차가 커지는 경향을 볼 수 있으나 실험 모형의 동적 특성과 AMD 가진 및 진동대 가진의 차이로 분석하여 볼 때 이는 실험상에서 얻어진 기계 잡음 등으로 추정되며 건물의 동적 거동특성에 영향이 작으므로 무시하였다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산학연 C103A2000010-03A0200-01010)에 의한 것임.

참 고 문 헌

1. 민경원, 박지훈, 김홍진, "불규칙 가진을 받는 포화 진동계의 응답제어에 관한 확률밀도 추정", 한국전산구조공학회논문집, 제16권, 제3호, 2003, pp.301~309
2. 김진구, 최현훈, "좌굴방지 가새가 설치된 건물의 지진 응답", 한국전산구조공학회논문집, 제15권, 제2호, 2002, pp.197~207
3. Min, K. W., Hwang, J. S., Lee, S. H. and Chung, L., "Probabilistic approach for active control based on structural energy", *Earthquake Engi*

- neering & Structural Dynamics*, 2003, pp.2301~2318
4. 김태호, 이동근 "복수 절점에 가진되는 건물 바닥판의 해석을 위한 응답스펙트럼 해석법의 응용", 한국전산구조공학회논문집, 제15권, 제1호, 2002, pp.21~32
5. 고현무, 박관순, 박원석, 이규석 "시간지연효과 및 설계제한조건을 고려한 구조물 진동의 능동제어" 대한토목학회논문집, 제16권, 1996, pp. 715~724
6. 이종순, 조효남, 허정원, 이성칠, "제한된 모드형상을 이용한 개선된 손상평가 알고리즘" 한국전산구조공학회논문집, 제15권, 제1호, 2002, pp.127~136
7. Calise, A. J., Craig, J. I. and Gong, G., "Experimental robust control on a laboratory model of a six story building", *Proceeding of the American control conference, Philadelphia*, 1998
8. Lim, K. B., Balas, G. J. and Anthony, T. C., "Minimum-norm model validating identification for robust control", *AIAA, Paper No. 96*~3717
9. Brad, A., John, C. "Identification of base-excited structures using output-only parameter estimation", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 33, 2004, pp.133~155
10. Lu, H., Betti, R. and Longman, R. W., "Identification of linear structural systems using earthquake-induced vibration data", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 28, 1999, pp.1449~1467
11. Lu, H., Betti, R. and Longman, R. W., "Obtaining refined first-order predictive models of linear structural systems", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 31, 2002, pp.1413~1440
12. Phan, M. "Improvement of observer/kalman-filter identification by residual whitening", *Journal of Astronautical Sciences*, Vol. 40, 1992, pp.261~279
13. Juang, J. N., "Applied system identification", prentice-Hall, 1994.
14. Dyke, S. J, "Implementation of an AMD Using Accelerlation feedback Control", *SIAHSCL*, 1995, pp.305~323

부록 A 시스템 식별로 추정된 시스템 행렬

$$A_s = \begin{bmatrix} -2.0558e-1 & -1.7549e+1 & 8.2851e-2 & -6.51139e-2 & -2.6454e-2 & -1.8330e-2 \\ 1.7549e+1 & -1.5857e-1 & -8.1439e-2 & 6.58714e-2 & 1.8898e-2 & 1.2157e-2 \\ -4.1045e-1 & 3.6324e-1 & -8.5548e-1 & -4.94498e+1 & -4.3802e-1 & -2.6386e-1 \\ 2.8186e-1 & -2.4722e-1 & 4.9438e+1 & -4.69108e-1 & 2.7817e-1 & 2.7577e-1 \\ 2.2684e-1 & -3.0050e-1 & 1.4865e+0 & -9.91545e-1 & -1.9027e+0 & 7.6689e+1 \\ 2.1029e-1 & -1.8801e-1 & 9.0892e-1 & -6.34337e-1 & -7.6688e+1 & -7.5714e-1 \end{bmatrix}$$

$$B_s = \begin{bmatrix} 4.0667e+0 & 2.9621e-1 \\ -3.5223e+0 & -3.9499e-1 \\ 3.9332e+0 & -5.4549e-1 \\ -2.7306e+0 & 9.8686e-1 \\ -3.2673e+0 & -8.5770e-1 \\ -2.0286e+0 & -6.7638e-1 \end{bmatrix}$$

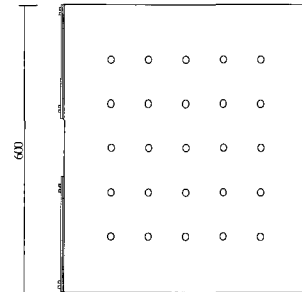
$$C_s = \begin{bmatrix} 4.4563e+0 & 1.1601e+0 & 2.8707e+0 & 1.9361e+0 & -2.1037e+0 & 1.2614e+0 \\ 2.3747e+0 & 2.0402e+0 & 1.3885e+0 & 1.1518e+0 & 2.4757e+0 & -1.5831e+0 \\ 2.9776e+0 & 2.6560e+0 & -2.3661e+0 & -1.8317e+0 & -9.2545e-1 & 6.8941e-1 \end{bmatrix}$$

$$C_s = \begin{bmatrix} 4.4563e+0 & 1.1601e+0 & 2.8707e+0 & 1.9361e+0 & -2.1037e+0 & 1.2614e+0 \\ 2.3747e+0 & 2.0402e+0 & 1.3885e+0 & 1.1518e+0 & 2.4757e+0 & -1.5831e+0 \\ 2.9776e+0 & 2.6560e+0 & -2.3661e+0 & -1.8317e+0 & -9.2545e-1 & 6.8941e-1 \end{bmatrix}$$

$$D_s = \begin{bmatrix} 1.8877e-2 & -4.3634e-3 \\ -3.3189e-3 & -7.3876e-4 \\ -7.6060e-3 & -1.7462e-1 \end{bmatrix}$$

부록 B 건물모형의 치수

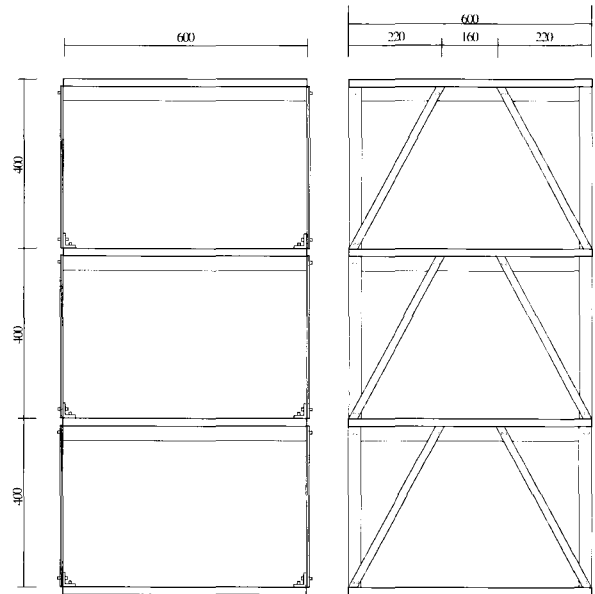
건물모형 형상, 치수



(a) 평면도

건물모형의 사양

	재질	크기(mm)
사용강재	SW400	F _y =2400kg/cm ²
바닥판	알루미늄	600×600×10
기둥	SW400	50×400×4
기새	SW400	38×480×3



(b) 입면도

(c) 측면도