

Matlab 을 이용한 축소 모형건물의 시스템 식별과 제어기 설계

System Identification and Controller Design of a Small-scale Building Structure using Matlab

민 경 원*	김 성 춘**	황 성 호**
Min, Kyung-Won	Kim, Sung-Choon	Hwang, Seong-Ho
호 경 찬***	정 진 욱**	주 석 준****
Ho, Kyoung-Chan	Joung, Jin-Wook	Joo, Soek-Jun

ABSTRACT

This paper presents the system identification of a small-scale building model with an active mass driver and the controller design using Matlab program. As the AMD is a mechanical system which has a dynamic characteristic and whose mass can not be neglected compared to that of the building mass, the AMD-building interaction should be included in the controller design. The system identification is carried out for the AMD-building system with two acceleration inputs of the shaking table and the AMD and single acceleration output of the building. The mathematical model for the AMD-building is obtained and compared with the experimental result. The controller is designed based on the mathematical model using the optimal control algorithm of LQG strategy. The experimental results are compared with the numerical results. It is shown that both results are in good agreement in the system identification and the controlled responses.

1. 서론

제어기의 강인성 및 안정성을 향상시키기 위해서는 동적 시스템에 대한 정확한 수학적 모사가 중요하다. 즉 제어대상인 구조물의 시스템 식별에 의하여 실제 구조물의 거동을 얼마나 수학적 모델로 이상화하는가에 따라서 제어기의 성능이 좌우된다. 그러나 구조물은 비선형적인 거동을 많이 내포하고 있을 뿐만 아니라 응답 측정과 제어기 작동시 전기적 잡음 등으로 인하여 실질적으로

정확한 구조물의 식별에는 어려움이 있다. 따라서 비선형 시스템을 선형 동적으로 모델링화하여 근사화시켜 제어기를 설계한다.⁽¹⁾ 일반적으로 시스템을 선형화하여 수학적 모델링을 하는데 이때 제어기와 건물의 시스템행렬을 각각 구한 뒤 상호작용이 고려되지 않은 시스템행렬을 통합하여 제어기를 설계한다. 그러나 실제 제어기 설치 후에는 건물의 시스템이 제어기와 상호작용으로 인하여 시스템이 바뀌게 된다. 본 논문에서는 좀더 정확하고 현실에 맞는 시스템 식별을 위하여 능동질량형 제어기(Active Mass Driver, 이하 AMD라 함)가 설치된 모형건물에 대한 시스템 식별을 수행하여 AMD-건물의 상호작용(interaction)을 고려하였다. 또한 AMD-건물의 시스템 행렬을 바탕으로 LQG

* 인천대학교 건축공학과 교수, 정회원
 ** 인천대학교 건축공학과, 석사 과정
 *** 인천대학교 건축공학과, 석사
 **** 서울대학교 건축학과, 박사

알고리즘을 적용한 최적 제어를 설계하여 제어 성능을 실험과 해석으로 비교하였다. 시스템 식별, 제어기 설계 및 AMD 구동을 위한 신호처리는 제어해석과 제어기 설계에 많이 사용이 되고 있는 Matlab 프로그램을 사용하여 해석과 실험에서의 신호처리를 간편하게 처리하였다.⁽²⁾

2. 시스템 식별과 제어기 설계

AMD가 설치된 모형건물에 대한 시스템 식별을 수행하여 AMD-건물의 상호작용이 고려된 시스템 행렬을 구하였다. 또한 LQG 알고리즘을 적용하여 제어기를 설계하여 실험에 대한 제어성능을 해석결과와 비교하였다.

2.1 실험 모델

본 실험 모델은 그림 1과 같이 1층의 건물 위에 AMD를 설치한 모델이며 AMD의 이동질량체의 관성력으로 건물에 제어력을 가하게 된다. 건물과 AMD의 순수 이동체 무게는 각각 23.7kgf과 2.5kgf이다. 그러나 AMD를 이루는 모터, 가이드 레일, 볼 스크류, 볼 스크류 너트 등을 모두 포함한 건물의 총 무게는 32.7kgf이다. AMD의 순수 이동체와 건물의 전체 질량비는 7.64%이며 AMD도 또 하나의 동특성을 가지는 구조체이므로 AMD와 건물과의 상호작용을 무시할 수 없다. 본

논문에서는 AMD가 설치된 건물의 시스템 행렬을 구하고 제어기를 설계하였다.⁽³⁾ 신호의 입,출력은 A/D 보드에 의해 이산 신호로 변환시키며 제어기 설계에 의하여 산출된 제어력은 Matlab의 RTW에 의해서 AMD의 모터에 입력신호를 주어 제어력이 가해진다. 실험모델에 가해지는 입력은 진동대의 지반을 통한 지반가속도 \ddot{x}_g 와 AMD의 입력 볼트 u 이다. 출력은 \ddot{x}_{a1} 으로써 1층의 절대가속도이다. 다음 그림 2는 이러한 입출력 관계를 나타내는 그림이다.

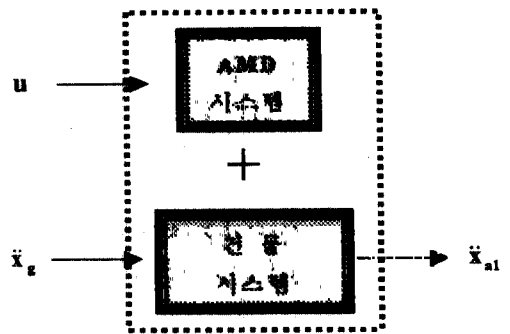


그림 2 시스템 식별 블록 다이어그램

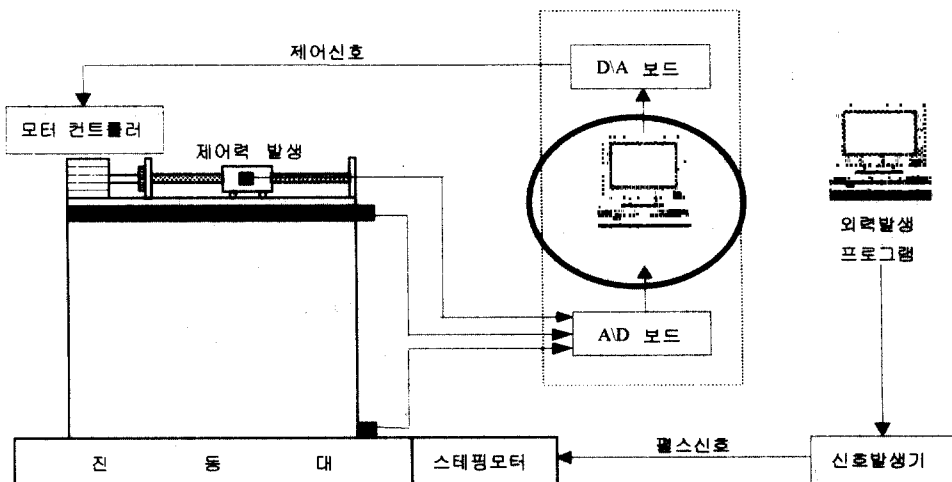


그림 1 실험 모델

2.2 시스템 행렬

본 실험 시스템은 2 개의 입력과 1 개의 출력인 다입력 단출력(multi input single output, MISO) 시스템이나 시스템 식별은 다음과 같이 각각 1 개의 입력에 의하여 수행하기로 한다. 식(1)은 진동대 가진 입력인 \ddot{x}_g 에 의한 출력의 관계식으로 x_1 은 입출력 시스템인 AMD가 고정된 건물의 상태벡터이며 y 는 구조물의 출력인 측정벡터 $y = [\ddot{x}_{a1}]$ 이다.⁽⁴⁾

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= A_1 x_1 + B_1 \ddot{x}_g \\ y &= C_1 x_1 + D_1 \ddot{x}_g \end{aligned} \quad (1)$$

식(2)는 AMD 가진시 입력볼트 u 에 의한 출력의 관계식으로 x_2 는 이러한 입출력 시스템의 상태벡터로 AMD와 건물의 상태벡터이다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= A_2 x_2 + B_2 u \\ y &= C_2 x_2 + D_2 u \end{aligned} \quad (2)$$

식(1),(2)를 결합하여 새로운 상태벡터 $\tilde{x} = [x_1 \ x_2]^T$ 를 정의하여 식(3),(4)와 같은 다입력 단출력 시스템을 구성하였다.

$$\dot{\tilde{x}} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix} \tilde{x} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{x}_g + \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix} u \quad (3)$$

$$\tilde{y} = [C_1 \ C_2] \tilde{x} + D_1 \ddot{x}_g + D_2 u \quad (4)$$

위의 행렬 중 A_1 과 A_2 는 AMD와 건물의 동적특성을 나타내는 시스템 행렬로서 크기는 각각 2×2 , 4×4 이다. 식(3),(4)와 같이 표현된 입출력 관계는 모드가 중복되므로 독립모드의 추출을 위하여 모드응축을 통해 다음 식(5)와 같이 A_r 이 4×4 인 중복된 모드가 없는 상태방정식으로 나타내었다.⁽⁵⁾

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}} &= A_r \tilde{x} + B_{r1} \ddot{x}_g + B_{r2} u \\ \tilde{y} &= C_r \tilde{x} + D_{r1} \ddot{x}_g + D_{r2} u \end{aligned} \quad (5)$$

위에서 \tilde{x} 는 AMD+건물의 상태벡터 4×1 이며 시스템 식별 결과는 부록에 첨부하였다. 그림 3,4,5,6은 시스템 식별에 의하여 구한 동적모델식 (5)를 검증하기 위해서 입력가속도에 대한 1층 상부에서의 응답가속도를 시간영역과 주파수영역에서 비교하였다.⁽⁶⁾ 그림 3과 그림 5는 저주파필터를 통과한 랜덤파를 진동대에 가진한 경우이며 그림 4와 그림 6은 크기가 다른 저주파필터를 통과한 랜덤파로 AMD에 가진했을 때의 응답값을 비교한 그림이다. 그림 3과 그림 4는 시간영역에서의 비교로써 위상과 크기가 전반적으로 일치하는 것을 알수 있어 시스템 식별의 정확성을 판단할 수 있다. 다음 그림 5와 그림 6은 진동대 및 AMD가진시의 출/입력에 관한 전달함수와 위상을 나타낸 그림이다. 10Hz 이상부터는 잡음의 영향으로 전달함수와 위상에 약간의 오차가 발생되나 건물의 고유주파수와 떨어진 비교적 고주파부분이므로는 제어에 큰 영향을 끼치는 부분이 아니라고 판단된다. 그러나 응답에 영향을 많이 주는 저주파부분에서는

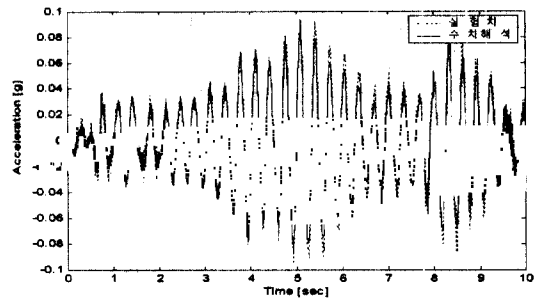


그림 3 진동대 가진시 1층 응답가속도

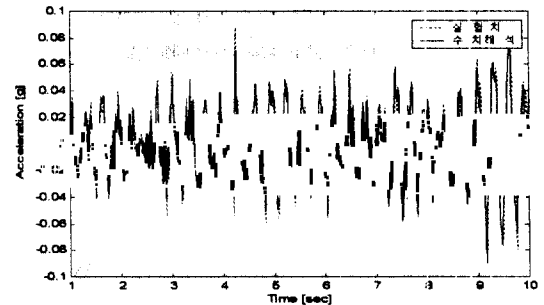


그림 4 AMD 가진시 1층 응답가속도

거의 일치하는 것을 알 수가 있다. 그림 6은 AMD 가진시 의 전달함수인데 0.5Hz 이하에서 오차가 많이 발생된다. 이는 실제 계산된 제어력 크기에 비해 응답이 작게 나타난 결과로써 실험과정에서의 너트와 볼스크루 사이의 마찰, 이동질량과 가이드 레일 사이의 마찰, 벨트부분에서의 마찰 등으로 인하여 감소된 응답의 결과로 분석이 된다. 그러나 이것도 본 실험의 건물의 고유주파수가 3Hz 이므로 응답에는 그다지 중요한 부분이 아니라고 판단된다. 이상과 같이 시간영역과 주파수영역에서 수치해석과 실험치 사이에 중요한 오차가 발생되지 않았다. 따라서 시스템 식별의 결과가 거의 정확히 되었다고 판단되므로 이를 이용하여 제어기 설계를 하였다.

2.3 제어기 설계

아래 그림 7은 시스템 식별의 결과를 이용하여 Matlab 프로그램에서 제어기를 설계하는 흐름도이다. 제어기 설계시에는 LQG 알고리즘을 이용하여 제어력을 구한뒤 다시 건물에 보내어 제어



그림 7 실험시 전체적인 흐름도

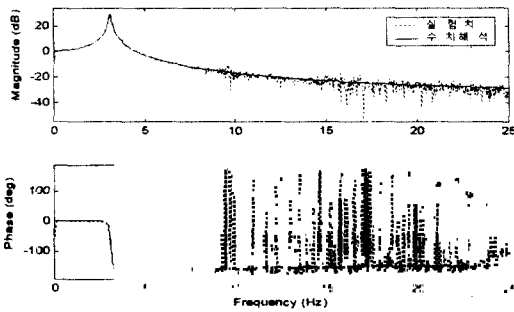


그림 5 진동대 가진시 AMD건물의 전달함수

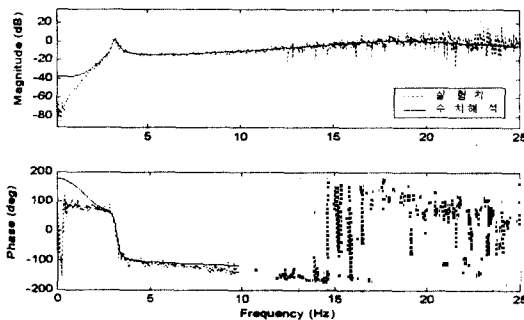


그림 6 AMD 가진시 AMD건물의 전달함수

응답을 분석하였다.⁽⁷⁾ 다음 그림 8은 Matlab 의 RTW를 이용한 제어력 산출 및 제어신호 흐름도를 Simulink 한 그림이다. 일반적으로 해석하는 프로그램과 제어프로그램이 다른 관제로 복잡성과 불편함이 있었으나 본 논문에서는 해석과 실험 프로그램을 Matlab 으로 통일화하여 실험의 편의성 및 정밀성을 높였다. 위의 시스템 식별 결과를 이용하여 제어력을 산출하였는데 여기에서 칼만 필터와 LQR을 결합한 형태인 LQG 알고리즘을 이용하여 제어기를 설계하였다. 다음 그림 9는 동일한 외력으로 자유진동을 주었을때, 제어시와 비제어시의 1층 응답가속도의 실험결과를 비교한 그림이다. 비제어시 경우 건물의 감쇠비가 0.52% 반면 제어시에는 3%로 비제어시보다 감쇠비가 5.8 배가 증가하였다. 그림 10은 시스템 식별을 통해 구한 행렬을 이용하여 제어기를 설계한 후 건물의 고유주파수 대역이 저주파임을 고려하여 25Hz 이상 주파수대역을 필터링한 PGA가 0.08g인 랜덤파를 주어 1층의 응답가속도와 비제어시의 응답을 시간영역에서 서로 비교한 그림이다. 전체적으로 제어기 설치 전에 비해 감소가 잘 되나 3초이하에서는 제어시의 가속도응답이 더 크게 나타난다. 이는 과도기 응답에 따른 영향이라고 판단된다.

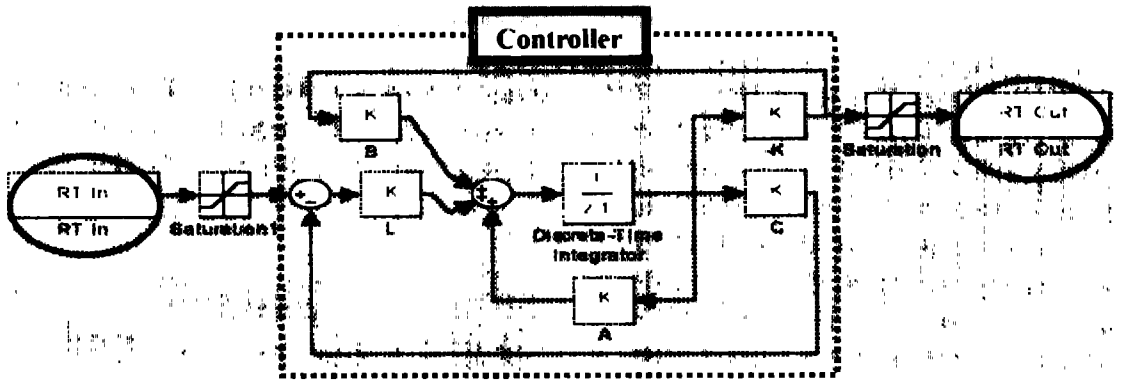


그림 8 Matlab의 RTW를 이용한 Simulink 상에서 제어기 다이어그램

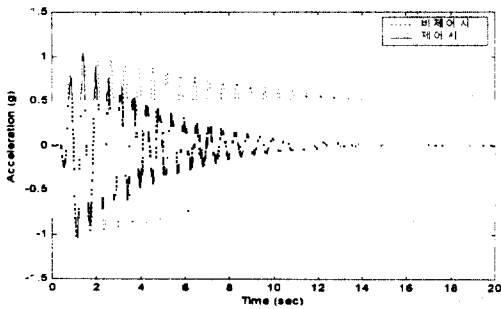


그림 9 자유진동에 의한 1층 응답가속도 비교

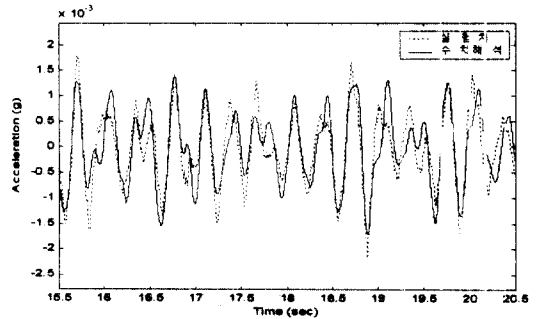


그림 11 제어실험시 실험치와 수치해석 비교

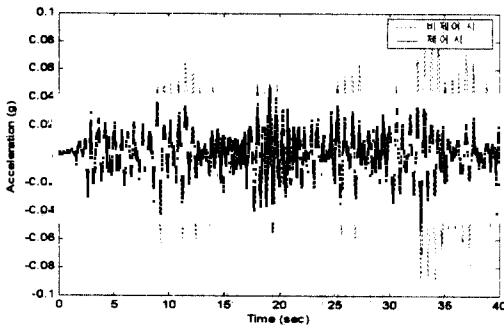


그림 10 Random 파 가력시 응답가속도 비교

다음 그림 11은 제어실험의 결과로써 랜덤과 가진 시 얻어진 1층 응답가속도의 실험치와 수치해석의 결과를 비교한 그림이다. 실험치와 수치해석에

서 시간지연과 같은 오차가 발생하지 않았으며 응답의 크기도 거의 일치한다. 따라서 시스템 식별을 통해 실험모델을 정확히 수치모사 할수 있었다.

4. 결과

제어기 설계 및 신호처리 프로그램으로 널리 쓰이는 Matlab을 이용한 시스템 식별과 제어기를 설계하였다. 그 결과 수치해석과 실험을 하는 프로그램을 통일화하여 편의성과 알고리즘 적용시의 간편성을 높였다. 또한 시스템 식별을 하는데 있어서 가장 중요한 실제 거동을 수학적으로 모델링 하는데 있어서 제어기와 건물의 상호작용까지 고려된 시스템 식별을 통하여 좀더 현실적으로 접근하였다. AMD-건물의 시스템 행렬을 바탕으로

LQG 알고리즘을 적용한 최적 제어를 설계하여 실험치와 수치모사결과를 비교분석하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 STEPI의 지진대응 기술개발과제의 소과제 일부로 수행되었으며, 과학기술부 및 유니슨산업㈜의 연구비 지원에 대해서 감사드립니다.

AMD Using Acceleration Feedback Control", *Microcomputers in Civil Engineering : Special Issue on Active and Hybrid Structural Control*.

- (5) MathWorks Inc. (1992), "MATLAB for Windows User's Guide", MathWorks
- (6) 주석준, "건축구조물의 지진응답의 강인제어에 대한 실험적 연구", 서울대학교 대학원 건축학과 공학박사학위논문, 2000년 2월
- (7) 민경원, 이성경, 김성춘(1999), "LQG 보상기를 이용한 건물의 진동제어 실험", 한국지진공학회 춘계학술대회 논문집, 202-214

5. 참고 문헌

- (1) Special Issue : Structural Control : Past, Present, and Future, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 123, No. 9, 1997, pp175
- (2) MathWorks Inc. (1999), "Real-Time Windows Target", MathWorks
- (3) 민경원, 김두훈, 이성경, 황재승 (1998), "능동 제어장치를 이용한 건물의 진동제어 (I): 시스템 설계", 한국지진공학회 논문집, 제 2 권 제 4 호 (통권 제 8 호), pp. 87~94
- (4) S.J. Dyke, B.F. Spencer, Jr., P. Quast, D.C. Kaspari Jr., and M.K. Sain (1995), "Implementation an

부 록

시스템 식별 결과에 의한 AMD+건물의 행렬

$$A_r = \begin{bmatrix} -0.4052432166 & 19.5611122160 & -1.6251999734 & 0.1757814942 \\ -19.5604301418 & -0.3192661200 & 1.4715359359 & 0.1587017773 \\ 0.8533625950 & -0.1301507394 & -41.5427397751 & -111.6146865166 \\ 0.0042880870 & 0.0020336171 & 111.6146775444 & -0.5298462484 \end{bmatrix}$$

$$B_{r1} = \begin{bmatrix} 3.5170456621 \\ 3.0623876366 \\ 0.0276133287 \\ -0.0044815225 \end{bmatrix} \quad B_{r2} = \begin{bmatrix} 0.0612345684 \\ -0.1354128947 \\ -7.0389784258 \\ 0.7622247899 \end{bmatrix}$$

$$C_r = [3.5175786930 \quad -3.0653800235 \quad 7.0390325880 \quad 0.7622379644]$$

$$D_{r1} = [-0.0145531576] \quad D_{r2} = [0.0967784058]$$