

구조물의 System Identification에 관한 개요

이 창 근*

1. 서 언

구조물의 거동을 예측하거나 제어하기 위해서는 먼저 그 구조물에 대한 수학적 모형을 얻는 것이 선행되어야 한다. 이런 수학적 모형을 얻는 방법은 크게 두가지로 나누어 생각할 수 있는데, 그 하나는 구조물이 갖는 형상과 물성치들을 파악한 후 유한요소법 등의 기법을 이용하여 해석적으로 접근하는 방법이며, 다른 하나는 구조물에 다양한 입력을 가한 후 이에 대한 응답성분을 측정하여 입력과 출력과의 관계를 규명함으로써 구조물에 대한 수학적 모형을 얻는 실험적 방법이다.

전자의 방법에 의거하여 얻어진 모형은 구조물을 구성하는 여러 인자들에 대한 정확한 정보를 얻기 어려울 때에는 그 정확성에 제약을 받게 된다. 따라서 노후한 구조물의 안전도 분석이나, 구조물의 거동을 보다 정밀하게 예측하거나 제어할 필요가 있을 때에는 후자의 실험적 방법을 이용하는 것이 보다 합당하다고 생각할 수 있다. 최근 측정기술의 발달과 많은 량의 측정치를 신속히 처리할 수 있는 컴퓨터 성능의 향상으로, 이 실험적 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 (1-8).

주어진 수학적 모형을 이용하여 특정입력에 대한 구조적 거동을 계산하는 과정을 정방향의 문제로 볼 때, 이 방법은 입력과 출력을 측정하여

구조물에 대한 수학적 모형을 추정한다는 맥락에서 “역방향의 문제(Inverse Problem)”로 일컬어진다.

2. 본 론

공학적 문제에 관련한 대부분의 계수추정방법들은 그림1에서 보인 바와 같이 설명되어질 수 있다. 이는 특정입력에 대해 구조계에서 측정된 응답과 이의 해석 모형으로부터 계산되어진 응답간의 차이를 줄이는 방향으로 모형식에 포함된 계수를 추정하는 것이다. 따라서 다양한 입력에 대해 두 응답간의 차이가 최소화되어 지도록 함으로써, 모형이 실제 구조계를 닮아가게(Adaptive) 하는 방법으로 생각할 수 있다. 구조물과 관련하여 동적계수추정법에 대한 대략적인 흐름도를 그림2에 나타내었으며, 이와 관련하여 고찰되어야

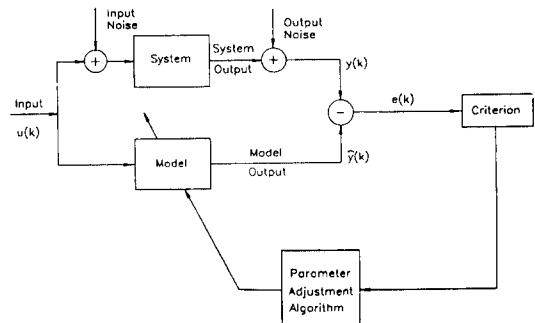


그림 1. System Identification 의 개념도

* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

측정시간 간격 Δt 의 값으로부터 구할 수 있다.

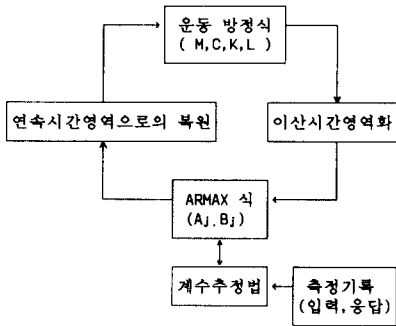


그림 2. 구조물의 동적계수 추정법의 흐름도

할 몇가지 문제들을 다음에 기술하고자 한다.

2.1 이산시간 영역화

일반적으로 구조물에 대한 운동방정식은 아래와 같은 시간에 대한 미분방정식으로 나타내어진다.

$$M\{\ddot{x}\} + C\{\dot{x}\} + K\{x\} = L\{F\} \quad (1)$$

여기서, $\{x\}$, $\{\dot{x}\}$, $\{\ddot{x}\}$ 는 구조물의 변위, 속도와 가속도 벡터, $\{F\}$ 는 절점하중벡터, 그리고 M , C , K , L 은 구조계의 계수행렬이다.

시간에 대한 미분항을 이산화하는 데에는 여러 가지 기법이 있으나, 위에서 고찰한 바와같이 역방향의 문제에 합리적으로 접근하기 위해서는 측정된 입력하중에 대해 zero-order holder 개념(측정시간 간격(Δt))동안 입력하중이 상수라고 가정)을 도입하여 이산화하는 방법이 주로 사용되어진다. 연속시간 영역에서 구조물의 동적거동을 묘사하는 식이 식(1)과 같은 미분방정식으로 대표된다면 이에 상응하는 이산시간영역에서의 식은 아래와 같은 ARMA(Auto-Regressive and Moving Average; 자동회기 이동평균) 식이라고 말할 수 있다.

$$\{Y(k)\} = \sum_{j=1}^n A_j \{Y(k-j)\} + \sum_{j=0}^m B_j \{F(k-j)\} \quad (2)$$

여기서 $\{Y(k)\}$ 는 시간이 $t = k\Delta t$ 에서 측정된 구조물의 응답성분 벡터이며, A_j 와 B_j 는 ARMA식의 계수행렬로서, 식(1)의 계수행렬 M , C , K , L 와

2.2 측정된 구조물의 응답성분에 따른 고찰

구조물의 동적응답 $\{Y(k)\}$ 는 측정장비에 따라 변위, 속도 또는 가속도의 향으로 얻어질 수 있다. 따라서, 역방향의 문제라는 관점에서 볼 때, 측정된 응답성분에 따라 일반적으로 다른 ARMA식을 유도하는 것이 필요하게 된다. 참고문헌 [7]에서 이 문제에 대한 상세한 연구가 수행되어져 있으며, 수치모의해석에 의한 데이터와 실제 실험에서 얻은 데이터들을 사용하여, 제안된 방법에 따라 추정되어진 구조물의 계수들이 상당히 정확한 값에 가까운 것을 보여주고 있다.

2.3 소음에 대한 고찰

그림1에 보인 바와 같이 구조물에 가해지는 입력과 이에 의한 응답성분의 측정기록들은 예기치 못한 소음(Noise)을 포함하고 있다고 보는 것이 합리적이다. 이 소음의 원인으로는 측정과정의 오차 및 구조물의 모형화에 따른 오차를 대표적으로 들 수 있다. 이런 소음의 영향으로 인하여 측정치들을 확률론적으로 처리하는 것이 일반적인 추세이며, 좀 더 정확히 이를 처리할 수 있는 방법을 개발하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있는 실정이다(1-8). 이산시간영역에서의 대표적인 식인 ARMA식이다, 이 확률론적인 소음의 영향까지 고려하여 나타낸 식이 ARMAX(ARMA with Auxiliary Stochastic Input; 확률론적 ARMA) 식이다.

2.4 계수추정방법

전술하였듯이 구조물로부터의 측정기록들이 여러요인에 의한 오차(소음)를 포함하고 있다고 보는 관점에서는, 계수추정의 성공여부는 이 오차의 영향을 제거할 수 있는 적절한 추정방법의 선택에 달려 있다고 할 수 있다. 이를 위해 Least Square 방법, Instrumental Variable 방법, Maximum Likelihood 방법, Generalized Least Square 방법, Extended Kalman Filter 방법 등이 많이 사용되지만, 더 나은 수렴성과 정확성을 가진 것으로 알려져 있는 순차적 예측오차(Seq-

quential Prediction Error) 방법을 이용하는 것이 구조물과 관련된 미지계수추정 문제에 상당히 유용하다고 여겨진다. 이는 ARMAX 식에서 어떤 시점($k\Delta t$)의 측정데이터에 포함된 소음의 영향을 계산해 가면서, 이식의 미지계수행렬을 비선형 최적화기법으로 추정한 후, 이 추정값을 그 다음 시점($(k+1)\Delta t$)에서의 측정기록을 이용하여 다시 보정해가는 기법이다.

2.5 연속시간 영역으로의 복원

추정된 ARMA 식의 계수들(A_j, B_j)로부터, 연속시간 영역의 운동방정식에 대한 계수들(M, C, K, L)을 계산하는 과정이다. 약간의 변형은 있으나 대체로 주어진 운동방정식에 대해 이산시간 영역의 식을 유도하는 방법의 역순으로 행하여진다. 참고문헌 7에 구조물의 운동방정식 상의 계수행렬과 자유진동모우드계수행렬을 ARMAX 식의 계수행렬로부터 계산하는 상세한 방법이 연구되어져 있다.

2.6 해석 예

System Identification 기법의 적용예를 보이기 위하여, 그림3에서와 같이 소형 Shaking Table 위에 설치된 3층빌딩모형에 대한 실험결과와 이의 해석결과를 그림4에 비교하였다. 그림4의 하단의

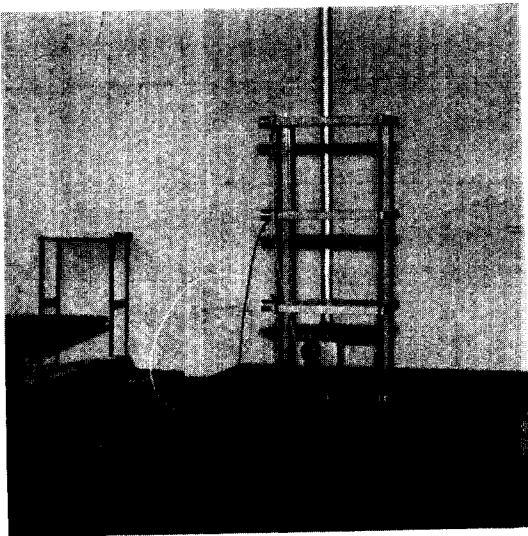


그림 3. Shaking Table위에 설치된 3층구조모형

기록은 입력인 Shaking Table의 지반 수평가속도 기록이며, 상부 좌측의 3개의 기록은 각층에서 측정된 층의 수평가속도기록이다. 이 측정기록들을 이용하여 구조물의 자유진동특성(자유진동수, 진동모우드 행렬, 모우드감쇠비)을 추정하였고, 추정된 자유진동특성계수와 지반 가속도 기록을 사용하여 각 층에서 수평가속도를 계산하였으며, 그 결과를 그림4의 우측 상부에 보이었다. 그림4의 측정된 기록과 추정된 구조계수들을 바탕으로 구한 거동기록이 매우 유사한 것을 볼 때, 추정된 계수들의 타당성을 입증했다고 할 수 있다.

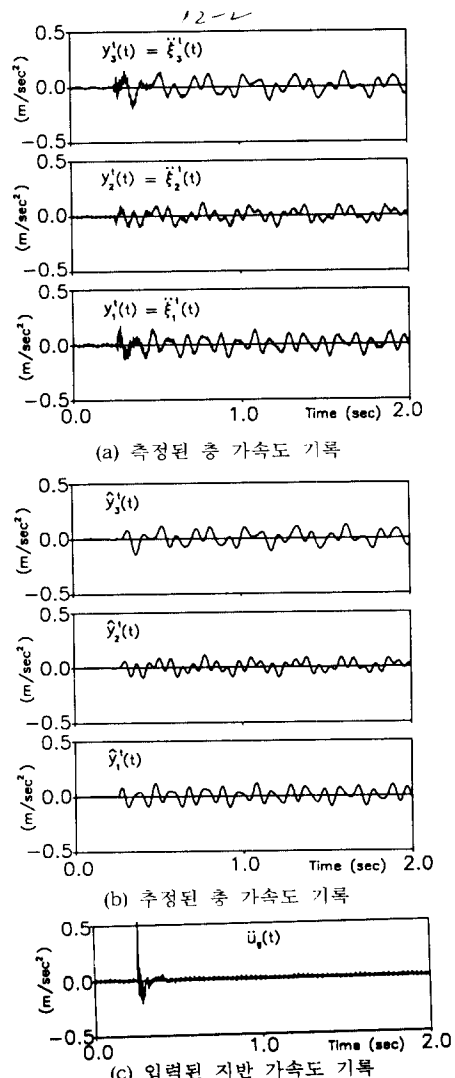


그림 4. 지반입력과 층 거동의 측정치 및 추정된 계수로부터 추정된 층 거동

3. 결 언

구조물의 동적계수 추정방법과 이에 관련된 몇가지 사항들에 대해서 기술하였다. 여러 문제들 중 가장 중요한 것이라고 생각되는 것은 소음(Noise)에 대한 처리문제라고 여겨진다. 순차적 예측오차법과 같은 비선형 최적화기법을 사용하여 측정오차와 관련된 소음영향은 어느정도 처리되어질 수 있다고 생각되나, 많은 자유도를 가진 실제 구조물의 기동을 간단한 모형식으로 나타냄으로써 야기되는 모형화 오차에 대해서는 아직 그 처리방법에 상당한 난점이 있다. 앞으로 이에 대한 많은 연구가 요구되는 실정이다.

참 고 문 헌

1. G.C. Goodwin and R.L. Payne, "Dynamic System Identification", Academic Press, 1977.
2. C-B, Yun and M. Shinozuka, "Identification of Nonlinear Structural Dynamic Systems", J. of Structural Mechanics, 1980.
3. Shinozuka, M., Yun, C-B., and Imai, H., "Identification of Linear Structural Dynamic Systems", J. of Structural Engineering, ASCE, Vol.108, No.EM6, 1982.
4. L. Ljung, "System Identification", Prentice-Hall, 1987.
5. 윤정방, Shinozuka, M., "구조물의 동특성 추정방법에 관한 연구", 한국전산구조공학회 논문집, 제2권 제2호, 1989.
6. 윤정방, "선형구조계의 동특성 추정법", 한국전산구조공학회 논문집, 제2권 제4호, 1989.
7. 이창근, "순차적 예측오차 방법을 이용한 구조물의 동적계수추정법", 한국과학기술원, 박사논문, 1991.
8. C-G, Lee and C-B, Yun, "Parameter Identification of Linear Structural Dynamic System", J. of Computers and Structures, 1991.