

## 측정가속도를 이용한 구조물의 지진손상평가 Seismic Damage Assessment on Structures using Measured Acceleration

오 성 호<sup>1)</sup>      신 수 봉<sup>2)</sup>  
Oh, Seongho      Shin, Soobong

---

### ABSTRACT

A time-domain system identification (SI) method is developed for seismic damage assessment on structures. SI algorithms for complete measurements with respect to degrees-of-freedom are proposed. To take account of nonlinear dynamic response, an equation error in the incremental dynamic governing equation is defined for complete measurement between measured and computed acceleration. Variations of stiffness and damping parameters during earthquake vibration are chased by utilizing a constrained nonlinear optimization tool available in MATLAB. A simulation study has been carried out to identify damage event and to assess damage severity by using measured acceleration time history. Mass properties are assumed as known a priori. The effects of measurement noise on the identification are also investigated.

---

### 1. 서론

지진에 의한 구조물의 손상은 지진동 중에 대부분 발생한다. 따라서, 지진 중에 구조물의 거동을 계측하지 못한 경우에는 지진 전과 후에 구조물에 대한 진동실험을 실시하여 SI(system identification)기법을 사용하여 구조변수를 추정하고, 이를 비교하여 손상을 식별하여야 한다. 그러나, 눈에 띄는 손상의 조짐이 없는 구조물이라고 하여도 실제로는 지진에 의해 손상을 입었을 가능성이 있기 때문에 지진동 후에 구조물에 대한 진동실험을 실시하는 것은 위험하다. 따라서, 지진동 중의 구조거동을 계측하고 이 시간이력을 바로 사용하여 손상진단을 하는 것이 현명하다. 만약 지진 전의 손상되지 않은 구조물의 특성치들이 기지의 값이라면 지진에 의한 손상을 진단하는 것이 보다 용이할 수도 있으나, 비록 이런 정보가 없어도 지진동 중의 계측자료 만으로도 손상 전과 후의 구조특성치의 시간에 따른 변화를 추정할 수 있을 것이다.

구조물을 진동시켜 계측한 구조거동을 사용하는 기법은 주파수영역 SI기법과 시간영역 SI기법으로 크게 분류할 수 있다. 주파수영역 SI기법은 시간영역 데이터를 변환한 고유진동수와 진동형상 데이터를 필요로 하며, 많은 방법들이 이미 소개되어 있다 [1-2]. 그러나, 주파수영역 SI기법들은 구조물을 진동하는 동안 구조물의 특성치가 일정하게 변하지 않는다는 가정 하에 구한 고유진동수와 진동형상을 사용한다는 제약을 가지고 있다. 그러나, 지진동 중 손상에 의해 구조물의 구조 특성치는 시간에 따라 갑자기 혹은 점진적으로 변하기 때문에 주파수영역 SI 기법을 사용하는 것

---

1 동아대학교 대학원 토목공학과 박사과정

2 인하대학교 환경토목공학부 토목공학과 조교수, 정회원

은 바람직하지 않다. 따라서, 지진동 기간 전체에 대한 평균적인 변수값을 구하는 것이 아니라 실시간으로 변하는 구조변수의 변화를 추적하기 위해서는 시간영역 SI기법을 사용하는 것이 보다 바람직하다.

많은 시간영역 SI 알고리즘들이 제안되어 있고, 이런 관점에서 효능이 검토되었다. 이러한 시간영역SI 알고리즘은 공간상태모델(space state model)을 사용하는 방법[3-7]과 동적지배방정식에서 직접 구한 오차를 정의한 오차함수를 최소화하는 최적화기법을 사용하는 방법[8-10]으로 크게 분류할 수 있다. 각 방법마다 장단점이 있지만, 구조물이 대형화되고 복잡해질수록 공간상태모델을 사용하는 시간영역 SI기법은 알고리즘에 사용되는 행렬의 크기에 대해 보다 많은 제한을 받는다고 판단된다 [9]. 따라서, 본 논문에서는 공간상태모델을 사용하지 않고 최적화기법을 적용하는 방법을 개발하였다.

지진동에 의한 구조물의 거동은 쉽게 선형한계를 벗어날 수 있음에도 불구하고 이러한 구조물의 비선형거동을 제대로 고려한 시간영역 SI기법은 많이 소개되고 있지 못하다 [11-17]. 특히 지진동 중에 발생하는 구조물의 손상을 진단하고자 할 때, 이러한 구조거동의 비선형성은 식별 알고리즘에 반드시 고려되어야 한다. 이러한 비선형 효과를 제대로 고려하지 못할 경우에는 소성영역과 같은 비선형 구간 역시 강성도의 감소로 나타나기 때문에 추정되는 강성변수의 감소가 실제 손상 때문인지 아니면 소성영역으로 인한 것인지 분간하기가 어려울 것이다. 본 논문에서는 비선형 구조거동을 고려할 수 있는 증분형 동적지배방정식의 오차를 최소화시키는 최적화기법을 사용하는 새로운 시간영역 SI기법을 제안한다. 본 논문에서는 다자유도에 대한 수식오차를 사용하여 완전추정의 경우에 대해 알고리즘을 정리하였으며, 알고리즘에서 현재 시간단계를 포함하는 정해진 크기의 시간창에서 강성도와 감쇠는 상수로 추정된다. 이러한 구조 매개변수는 확인가능한계를 만족시키는 시간창의 크기가 충분히 커야하고 비선형 구역의 지속시간이 시간창의 크기에 비해 일반적으로 짧기 때문에, 만일 거동이 선택된 시간동안 비선형 구역으로 들어가고 나올지라도 추정된 매개변수들은 선형구역의 값들과 상당히 비슷한 값들로 구해진다.

개발된 알고리즘의 효용성을 검토하기 위하여 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 본 논문의 수치 시뮬레이션에서는 공간상에서 완전추정의 경우에 대해 3층의 전단건물에 대해 고려하였다. 손상은 지진동 동안 일정 기간에서의 점진적인 강성도의 감소와 감쇠의 증가로 모사하였다. 제안된 알고리즘은 모든 자유도에서 가속도 시간이력이 측정되었으며 속도 및 변위는 Newmark- $\beta$ 법을 사용하여 수치적으로 계산되었다고 가정하였다. 수치모의실험을 위한 컴퓨터 프로그램은 MATLAB의 상용 tool을 사용하여 개발되었다. 현재의 알고리즘에서 감쇠는 각 자유도에 대해 강성도와는 독립적으로 추정하였으며, 질량은 기지의 값으로 하였다.

## 2. 비선형 시간영역 SI 알고리즘

### 2.1. 증분형 동적지배방정식

비선형 거동을 하는 구조물에서 복원력과 감쇠력은 더 이상 변위와 속도에 비례하지 않게 된다. 따라서, SI 알고리즘 역시 이러한 구조거동의 비선형성을 고려하여 개발되어야 한다. 비선형성을 고려하기 위하여 다음 식(1)과 같이 동적지배방정식의 증분형을 사용하는 방법을 본 논문에서 개발한 알고리즘에서는 적용하였다.

$$M\Delta\ddot{u}_j + C(y_j)\Delta\dot{u}_j + K(x_j)\Delta u_j = \Delta f_j \quad (1)$$

여기서,  $x_j(N_k \times 1), y_j(N_c \times 1) =$  각각 시간 단계  $j$ 에서 강성도와 감쇠 매개변수,  $N_k, N_c =$  각각 강성

도와 감쇠 매개변수의 수,  $\mathbf{M}(N_d \times N_d), \mathbf{C}(N_d \times N_d), \mathbf{K}(N_d \times N_d) =$  각각 질량, 감쇠 그리고 강성도 행렬,  $N_d =$  자유도의 수,  $\Delta\ddot{\mathbf{u}}_j, \Delta\dot{\mathbf{u}}_j, \Delta\mathbf{u}_j =$  각각 시간 단계  $j$ 에서 가속도, 속도 그리고 변위의 증분이다. 식(1)에서 질량은 시간의 변화에 따라 변하지 않는 기지의 값으로 가정하였다. 강성도와 감쇠는 식(2)처럼 분리될 수 있다.

$$\mathbf{K}(\mathbf{x}) = \mathbf{K}_0 + \sum_{g=1}^{N_g} \sum_{p=1}^{\Pi_g} x_{pg} \mathbf{G}_{Kpg} = \mathbf{K}_0 + \sum_{i=1}^{N_K} x_i \mathbf{G}_{Ki}$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{y}) = \mathbf{C}_0 + \sum_{i=1}^{N_C} y_i \mathbf{G}_{Ci}$$
(2)

여기서,  $\mathbf{K}_0, \mathbf{C}_0 =$  각각 강성도와 감쇠 행렬의 기지 부분,  $\mathbf{G}_{Ki}, \mathbf{G}_{Ci} =$  각각  $i$ 번째 강성도와 감쇠 매개변수에 대한 kernel 행렬, 그리고  $N_g, \Pi_g =$  각각 그룹의 수와 그룹 매개변수의 개수이다.

## 2.2. 입력오차법(Equation Error Estimator)

만약 가속도의 시간이력을 모든 자유도에서 완전하게 측정할 수 있다고 가정한다면, 각 시간단계에서의 오차벡터는 동적지배방정식의 오차로 식(3)과 같이 정의할 수 있다. 이러한 완전측정의 가정은 각 층에서의 측방향 가속도를 계측하는 전단빌딩 모델에 적용할 수 있다.

$$\mathbf{e}_j(\mathbf{x}_j, \mathbf{y}_j) = \mathbf{M}\Delta\ddot{\mathbf{u}}_j + \mathbf{C}(\mathbf{y}_j)\Delta\dot{\mathbf{u}}_j + \mathbf{K}(\mathbf{x}_j)\Delta\mathbf{u}_j - \Delta\mathbf{f}_j \quad (N_d \times 1)$$
(3)

여기서,  $\Delta\ddot{\mathbf{u}}_j =$  측정 가속도 시간 이력으로부터 구해진 시간단계  $j$ 에서의 가속도 증분벡터이다. 식(3)에서 하중 증분벡터는 기지의 값으로 가정하였으며, 속도와 변위 증분벡터는 식(4)의 Newmark- $\beta$ 법을 사용하여 수치적으로 구한다.

$$\Delta\dot{\mathbf{u}}_j = \Delta t \ddot{\mathbf{u}}_j + \gamma \Delta t \Delta\ddot{\mathbf{u}}_j$$

$$\Delta\mathbf{u}_j = \Delta t \dot{\mathbf{u}}_j + \frac{1}{2} \Delta t^2 \ddot{\mathbf{u}}_j + \beta \Delta t^2 \Delta\ddot{\mathbf{u}}_j$$
(4)

시간단계  $j$ 에서 속도와 변위 증분벡터가 식(5)처럼 구해지므로, 속도와 변위의 초기치가 필요하다.

$$\dot{\mathbf{u}}_j = \dot{\mathbf{u}}_{j-1} + \Delta\dot{\mathbf{u}}_{j-1}$$

$$\mathbf{u}_j = \mathbf{u}_{j-1} + \Delta\mathbf{u}_{j-1}$$
(5)

시간단계  $k$ 에서 최적 강성도와 감쇠의 추정을 다음의 식(6)과 같이 구속 최적화로 정의할 수 있다.

$$\text{Minimize } J_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k) = \frac{1}{2} \sum_{j=k-n_i}^{k+n_f} \|\mathbf{e}_j(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k)\|^2 \quad \text{s.t. } R(\mathbf{x}, \mathbf{y})$$
(6)

여기서  $n_i, n_f =$  추정에 대해 시간창의 크기로 정의되는 시간단계의 수이며,  $R(\mathbf{x}, \mathbf{y}) =$  매개변수에

대한 구속조건이다. 시간단계  $k$ 에서의 매개변수들은  $k$ 번째 시간단계 주변의 평균값으로 나타난다.

### 2.3. 오차 민감도

최적화기법을 사용하여 측정응답으로부터 변수들을 정의하기 위하여 gradient vector와 Hessian matrix가 계산되어야 하며, 미지의 변수  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{y}$ 에 대하여 강성도와 감쇠행렬의 민감도 식(7)로 정의할 수 있다.

$$\frac{\partial \mathbf{e}_j(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k)}{\partial x_p^k} = \frac{\partial \mathbf{K}(\mathbf{x}_k)}{\partial x_p^k} \Delta \mathbf{u}_j = \mathbf{G}_{Kp} \Delta \mathbf{u}_j$$

$$\frac{\partial \mathbf{e}_j(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k)}{\partial y_q^k} = \frac{\partial \mathbf{C}(\mathbf{y}_k)}{\partial y_q^k} \Delta \dot{\mathbf{u}}_j = \mathbf{G}_{Cq} \Delta \dot{\mathbf{u}}_j$$
(7)

여기서,  $x_p^k$ ,  $y_q^k$  = 시간단계  $k$ 에서  $p$ 번째 강성도와  $q$ 번째 감쇠변수이다.

### 2.4. 식별조건

제안된 알고리즘은 기본적으로 최소자승 문제 (least squared problem) 를 푸는 것이 된다. 따라서, 이러한 문제에서 해를 구할 수 있는 조건은 미지수의 개수가 얻어지는 식의 수보다 많아지는 조건인 식(9)를 만족하는 것이다.

$$N_d \times (n_f - n_i + 1) \geq N_p$$
(9)

## 3. 수치 시뮬레이션 연구

### 3.1. 단자유도 구조계

본 논문에서는 수치모의 실험의 첫 단계로서 그림 1에 있는 단자유도 구조물에 대한 수치 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 구조물은 강성도  $k = 50 \text{ N/mm}$ , 감쇠계수  $c = 0.3 \text{ Nsec/mm}$  ( $=5\%$ ), 그리고 질량  $m = 0.18 \text{ Nsec}^2/\text{mm}$ 으로 되어 있다. 구조물은 그림 2와 같은 탄소성거동을 하는 것으로 최대 복원력이 인장과 압축에 대해 각각  $R = \pm 400 \text{ N}$ , 고유주기  $T = 0.377 \text{ sec}$  이며, 가속도 측정 주기는  $200 \text{ Hz}$  ( $t = 0.005 \text{ sec}$ )로 하였다.

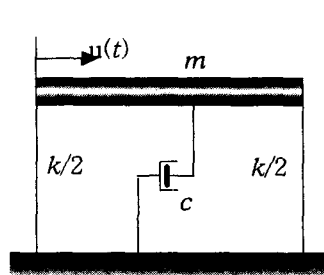


Fig. 1 A SDOF system for the study

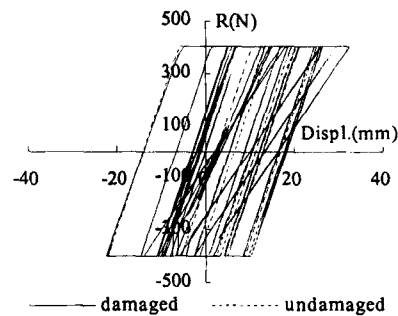


Fig. 2 Elasto-plastic behavior

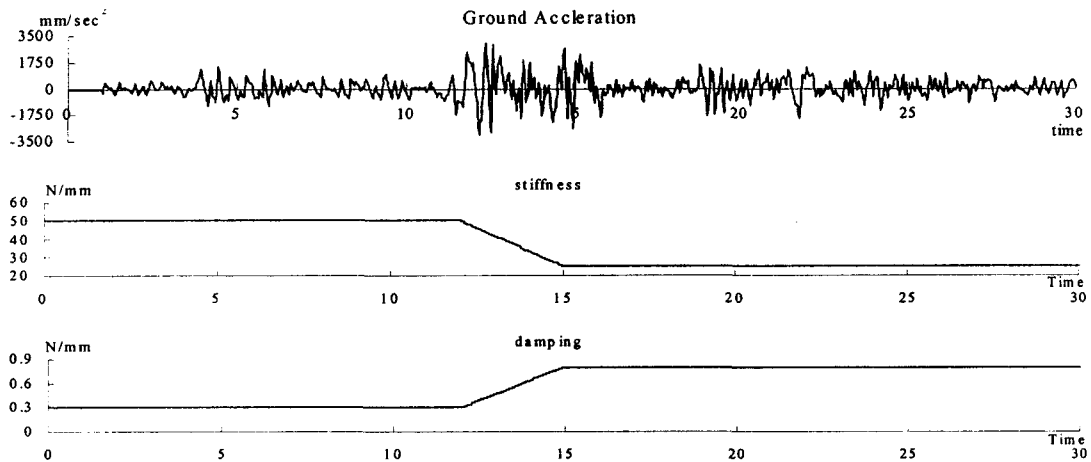


Fig. 3(b) Simulated ground motion and damage by gradual change in stiffness and damping

작용한 지진동은 그림 3에서와 같이 El Centro 지진기록치를 약간 변조한 것을 사용하였다. 시뮬레이션 연구를 위해 손상은 최대가속도가 발생하는 지진동 근처인 12초 - 15초 사이에서 발생하는 것으로 설정하였다. 손상은 다른 연구자들이 사용하고 있는 것과 유사한 방법으로 그림에 보이는 것처럼 강성의 점진적인 증가와 감쇠의 점진적인 감소로 묘사하였다[7]. 그림 2는 그림 3의 지반진동에 의한 구조물의 복원력과 변위의 비선형 관계를 나타낸 것이며, 그림에 손상이 없는 경우와 구조물이 손상이 된 경우의 복원력과 변위 관계를 비교하였다.

그림 4는 측정가속도에 5% 비례측정오차가 있는 경우에 대해 강성도와 감쇠 변수의 변화 추이를 추정한 것이다. 그림 4에서 실선은 손상이 있는 경우에 대해서, 점선은 손상이 없는 경우에 대한 것이다. 손상이 없는 경우에 대해서 강성도와 감쇠가 변동이 많은 구간은 소성영역과 관계가 있으며, 대부분의 변동이 심한 구간이 최대 가속도 구역 직후에서 나타난다. 손상이 있는 경우에 대해 손상 구역 이후에 변동이 심해지는 것을 볼 수 있으며, 손상 발생 이후 강성도에 비해 감쇠가 특히 심해짐을 알 수 있다. 따라서, 아래의 그림으로부터 손상 구간을 쉽게 확인할 수 있으며, 강성도의 감소치로 손상정의 정도를 평가할 수 있다. 손상 발생 이후에 나타나는 심한 변동은 Newmark- $\beta$ 법을 사용한 속도와 변위의 계산에 기인한 수치오차로 여겨진다.

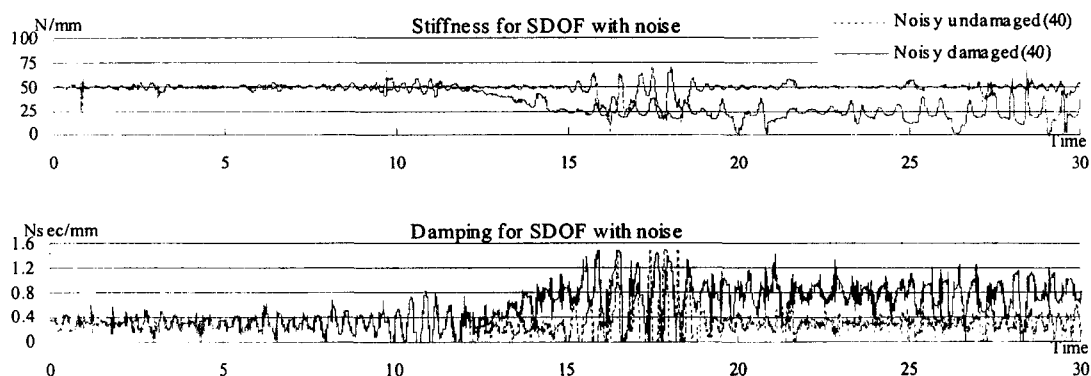


Fig. 4 Estimated parameters of the SDOF system with 5% noise in acceleration

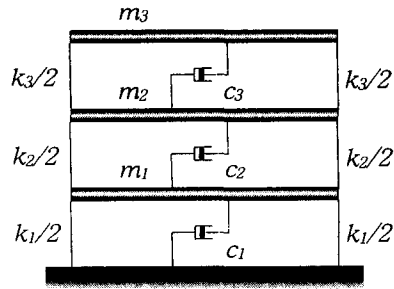


Table 1 Properties of the shear building

Floor	Mass (Nsec <sup>2</sup> /mm)	Damping (Nsec/mm)	Stiffness (N/m)
1	2.0	0.89	40
2	1.5	0.67	30
3	1.0	0.32	10

Fig. 5 A three-story shear building the study

### 3.2. 3층 전단건물

제한된 수치오차를 사용한 시간영역 SI 알고리즘에 대해 그림 5의 3층 전단건물을 수치시물레이션 실험으로 수행하였다. 구조물에 대한 구조 특성치가 표 1에 제시되었으며, 구조물의 거동 역시 그림2의 탄소성 거동으로 가정하였으며, 인장과 압축에서 최대 복원력  $R = \pm 4000$  N, 최대 고유주기  $T = 0.895$  sec 이며, 가속도 측정 주기는 100 Hz ( $t = 0.01$  sec)로 하였다. 그림 3의 지반 가속도가 동일하게 작용하였으며, 손상은 2층에만 적용하였다. 손상에 대해 강성도는 30에서 15 N/m로 점진적인 감소를, 감쇠는 0.67에서 1.0 N·sec/mm의 점진적인 증가로 모사하였다.

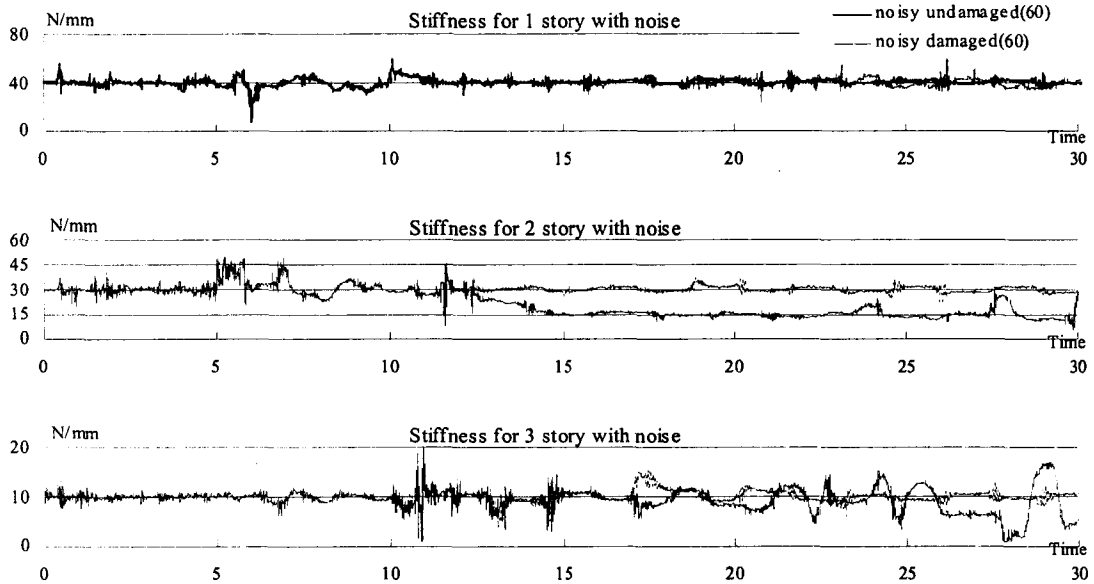


Fig. 6 Identified stiffness variation at each story with 5% noise

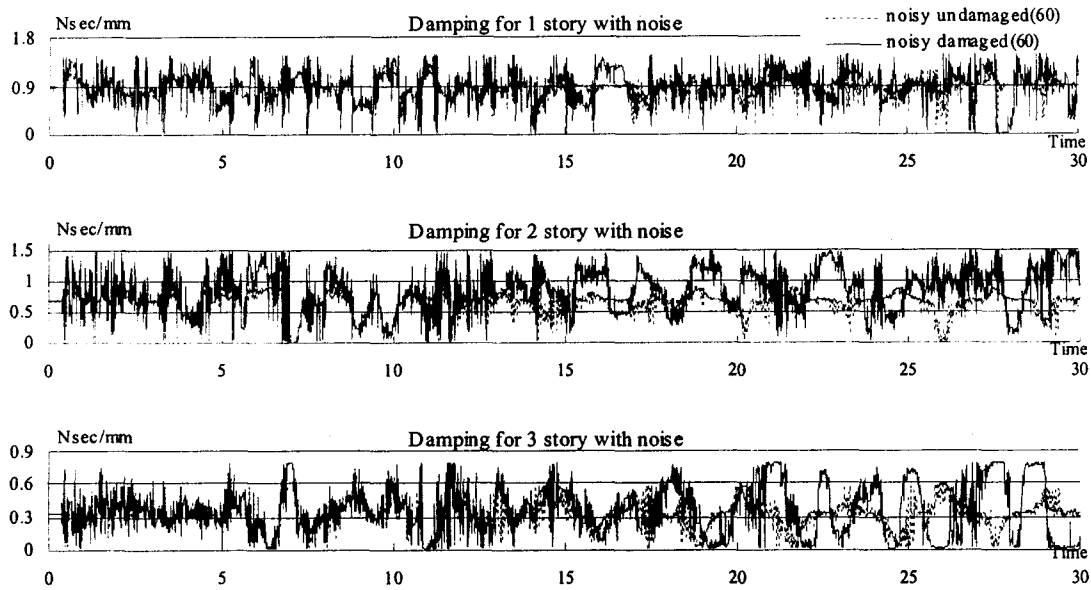


Fig. 7 Identified damping variation at each story with 5% noise

그림 6과 7은 각각 측정 가속도에 대해 5% 비례측정오차가 있는 경우에, 그림 4와 마찬가지로 추정된 강성도와 감쇠의 변화 추이를 각 층에 대해 손상이 있는 경우와 없는 경우에 대해 보이고 있다. 2층의 강성도 변화로부터 손상 발생과 손상의 정도를 거의 정확하게 알 수 있으며, 손상 발생 이후에 3층의 강성도 추정이 많은 변동을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 2층의 손상 발생에 의한 영향에 기인한 것으로 보이며, 1층의 강성도 변화는 다른 층에 비해 훨씬 많이 줄고 거의 정확해 짐을 알 수 있다. 강성도 변화와 비교해서 감쇠의 변화는 단자유도에서와 같이 많은 변동을 보이고 있으나, 각 층의 경향을 분석할 수는 있다. 감쇠 추정에 대해 3층에서의 변화는 강성도 변화에 대한 이유와 동일하지만 더 크게 변화가 나타나고 있다.

#### 4. 결론

지진동에 의한 구조물의 손상을 평가할 수 있는 비선형 시간영역 SI 알고리즘을 개발하였으며, 개발된 알고리즘은 최적화 문제의 목적함수에 동적 지배방정식의 증분형 오차함수를 적용하였다. MATLAB에 있는 구속 최적화 tool을 사용하여 강성도와 감쇠 변수의 시간에 따른 변화를 추정하였다. 알고리즘에서 감쇠는 질량과 강성도에 상관없이 독립적으로 추정할 수 있도록 하였다.

알고리즘은 공간상에서 완전측정의 경우에 수식오차에 대해 정리하였으며, 단자유도 구조물과 3층 전단건물에 대해 수치모의 실험을 수행하였다. 손상은 지진동 중의 강성도의 점진적인 감소와 감쇠의 점진적인 증가로 모사하였으며, 수치 시뮬레이션을 통해 개발된 알고리즘이 구조변수의 시간에 따른 변화와 지진동 중 손상 발생 구간을 성공적으로 식별할 수 있음을 확인할 수 있었다.

손상 발생 이후 손상된 층(2층) 이후의 층(3층)에서 강성도와 감쇠가 좀더 큰 변화를 보이고 있으며, 이는 직전 층에서의 손상에 의한 영향으로 판단된다. 손상 발생 이후의 추정에 대한 오차에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 보인다.

## 참고문헌

1. C.-B. Yun and M. Shinozuka, "Identification of nonlinear structural dynamic systems," *ASCE, J. of Structural Mechanics*, Vol.8, No.2, 1980, pp.187-203.
2. M. Shinozuka, C.-B. Yun, and H. Imai, "Identification of linear structural dynamics systems," *ASCE, J. of Engineering Mechanics*, Vol.108, EM6, 1982, pp.1371-1390.
3. H. Imai, C.-B. Yun, O. Maruyama, and M. Shinozuka, "Fundamental of system identification in structural dynamics," *Probabilistic Engineering Mechanics*, 1989, Vol.4, No.4, pp.162-173.
4. K.F. Alvin and K.C. Park, "Second-order structural identification procedure via state-space-based system identification," *AIAA J.*, Vol.32, No.2, 1994, February, pp.397-406.
5. T. Shi, N.P. Jones, and J.H. Ellis, "Simultaneous estimation of system and input parameters from output measurements," *ASCE, J. of Engineering Mechanics*, 2000, Vol.126, No.7, July, pp.746-753.
6. Lin, C.C., Soong, T.T., and Natke, H.G., "Real time system identification of degrading structures," *ASCE, J. of Engineering Mechanics*, 1989, Vol.116, No.10, pp.2258-2274.
7. K.D. Hjelmstad and S. Shin, "Crack identification in a cantilever beam from modal response," *J. of Sound and Vibration*, 1996, Vol.198, No.5, pp.527-545.
8. J.H. Jang, I. Yeo, S. Shin, and S.P. Jang, "Experimental investigation of SI-based damage assessment of structures," *ASCE, J. of Structural Engineering*, 2002, May (will be published).
9. Hjelmstad, K.D., Banan, M.R., and Banan, M.R., "Time-domain parameter estimation algorithm for structures: I computational aspects; II numerical simulation studies," *ASCE, J. of Engineering Mechanics*, Vol.121, No.3, 1995, March, 424-447.
10. Shin, S., Oh, S.-H., Kwak, I.-J., and Koh, H.-M., "Structural damage assessment using transient dynamic response," *J. of the Computational Structural Eng. Institute of Korea*, 2000, Vol. 13, No. 4, pp. 395-404.
11. N. Distefano and A. Rath, "System identification in nonlinear structural seismic dynamics," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1975, Vol.5, pp.353-372.
12. S.F. Masri, R.K. Miller, A.F. Saud, and T.K. Caughey, "Identification of nonlinear vibrating structures: part I formulation part II - applications" *J. of Applied Mechanics*, 1987, Vol.54, pp.918-929.
13. A.O. Cifuentes and W.D. Iwan, "Nonlinear system identification based on modeling of restoring force behaviour," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1989, Vol.8, No.1, pp.2-8.
14. Billings, Li, "Reconstruction of linear and nonlinear continuous time system models from input/output data using the Kernel invariance algorithm," *J. of Sound and Vibration*, 2000, Vol.233, pp.877-896.
15. R. Tiwari, "On-line identification and estimation of nonlinear stiffness parameters of bearings," *J. of Sound and Vibration*, 2000, Vol.234, No.5, pp.906-910.
16. C.-H. Loh and C.-Y. Lin, "Time domain identification of frames under earthquake loadings," *ASCE, J. of Engineering Mechanics*, 2000, Vol.126, No.7, pp.693-703.
17. R.H. Sues, S.T. Mau, and Y.-K. Wen, "Systems identification of degrading hysteretic restoring forces," *ASCE, J. of Engineering Mechanics*, 1988, May, Vol.114, No.5, pp.833-846.