

지진에 의한 강성도 및 감쇠의 실시간 변화 추정



신 수 봉*



오 성 호**

1. 서 론

현재 우리나라에서는 지진의 발생이 그렇게 심각한 편은 아니지만 그에 따른 내진설계 또한 제대로 고려되어 있지 않은 구조물이 많은 관계로 임의의 지진이 발생할 경우 심각한 문제가 발생할 수 있다. 최근 이러한 가능성을 반영하여 주요시설물에 대한 내진설계 기준이 보완되거나 새롭게 설정되고 있으며, 구조물에 대한 지진해석 및 내진설계가 중요한 과제로 인식되고 있다.^{1,2)} 따라서 구조물의 지진에 의한 거동을 해석하고 파괴 및 손상을 실험적으로 규명하며, 수치적 해석 기법을 통하여 분석하고 평가하는 연구들이 국내에서 다양하게 진행되고 있다.^{1)~3)}

본 기사에서는 본 연구진에 의해 개발되고 있는 지진 발생에 의한 구조물의 손상을 평가하는 비선형 시간영역 SI(system identification)기법과 이를 사용하여 수행한 시뮬레이션 결과를 간략히 소개한다. 소개되는 기법은 지진동 중 계측되는 가속도 데이터를 바로 사용하는 것으로 일반적으로 지진 전후의 개별적 실험 결과를 이용하여 손상을 평가하는 방법과 차별성을 가지고 있다.^{4)~7)} 그리고 지진동 중에는 구조시스템이 손상 등으로 인하여 지속적으로 변할 수 있기 때문에 데이터를 계측한 일정한 기간 동안 변하지 않는다는 가정 하에 구조변수를 추정하는 기법과 달리 시간에 따라 변하여 가는 구조변수를 추정한다는 차이점이 있

다. 또한, 지진에 의한 구조거동은 쉽게 비선형 영역과 선형 영역을 순환할 수 있기 때문에 개발되는 SI기법 역시 이러한 구조물의 비선형 거동을 고려할 수 있는 정해석을 바탕으로 이루어졌다. 본 연구에서는 탄소성 거동을 하는 구조물의 손상을 강성도의 감소 및 감쇠의 증가로 시뮬레이션을 하였다.

2. 구조변수 실시간 추정을 위한 비선형 시간영역 SI기법

2.1 비선형 동적거동의 증분형 지배방정식

비선형 동적해석에서 복원력과 감쇠력은 변위와 속도에 대해 더 이상 비례 관계에 있지 않게 된다. 이러한 비선형성을 고려하는 일반적인 방법은 동적거동을 식(1)과 같이 증분형으로 나타내는 것이다.

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

여기서, $x_j(N_K \times 1)$, $y_j(N_C \times 1) = j$ -번째 시간단계에서의 강성도 및 감쇠변수 벡터, $N_K, N_C =$ 강성도 및 감쇠변수의 수, $M(N_d \times N_d), C(N_d \times N_d), K(N_d \times N_d) =$ 질량, 감쇠, 강성도행렬, $N_d =$ 자유도 수, $\Delta\ddot{u}_j, \Delta\dot{u}_j, \Delta u_j = j$ -번째 시간단계에서의 가속도, 속도, 변위 증분벡터이다. 식(1)에서 질량은 기지의 값으로 시간에 따라 변하지

* 인하대학교 토목공학과 조교수 공학박사

** 동아대학교 토목공학과 박사수료

않는다고 가정하였으며, 강성도와 감쇠는 개별 변수에 대한 그룹으로 식(2)와 같이 분리시켰다.

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

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

여기서 \mathbf{K}_o , \mathbf{C}_o 는 강성도와 감쇠행렬의 기지 부분, \mathbf{G}_{Ki} , \mathbf{G}_{Ci} 는 i -번째 강성도 혹은 감쇠변수에 대한 핵심행렬, N_g , Π_g 는 변수그룹의 수, 그룹별 변수 종류의 개수이다.

2.2 가속도증분오차의 정식화

본 기사에서는 일단 모든 자유도 방향으로 가속도 시간이력이 예측된 경우에 대한 SI알고리즘을 정리하였다. 오차벡터는 식(3)과 같이 예측한 가속도증분과 해석에 의한 가속도증분 사이의 오차로 정의하였다.

$$\mathbf{e}_j(\mathbf{x}_j, \mathbf{y}_j) = \Delta \ddot{\mathbf{u}}_{aj}(\mathbf{x}_j, \mathbf{y}_j) - \Delta \ddot{\mathbf{u}}_{mj} \quad (N_d \times 1) \quad (3)$$

$$\nabla \mathbf{J}_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k) = \sum_{j=k-n_i}^{k+n_f} \nabla \mathbf{e}_j(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k)^T \mathbf{e}_j(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k), \quad \mathbf{H}_k^{GN}(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k) = \sum_{j=k-n_i}^{k+n_f} \nabla \mathbf{e}_j(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k)^T \nabla \mathbf{e}_j(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \mathbf{e}_j(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k)}{\partial x_p^k} = \frac{\partial}{\partial x_p^k} (\Delta \ddot{\mathbf{u}}_{aj}(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k) - \Delta \ddot{\mathbf{u}}_{mj}) = \frac{\partial \Delta \ddot{\mathbf{u}}_{aj}(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k)}{\partial x_p^k},$$

$$\frac{\partial \mathbf{e}_j(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k)}{\partial y_q^k} = \frac{\partial}{\partial y_q^k} (\Delta \ddot{\mathbf{u}}_{aj}(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k) - \Delta \ddot{\mathbf{u}}_{mj}) = \frac{\partial \Delta \ddot{\mathbf{u}}_{aj}(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k)}{\partial y_q^k} \quad (6)$$

$$\Delta \dot{\mathbf{u}}_k = \Delta t \ddot{\mathbf{u}}_k + \gamma \Delta t \dot{\mathbf{u}}_k \Rightarrow \Delta \ddot{\mathbf{u}}_k = \frac{1}{\beta \Delta t^2} \Delta \mathbf{u}_k - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{\mathbf{u}}_k - \frac{1}{2\beta} \ddot{\mathbf{u}}_k$$

$$\Delta \mathbf{u}_k = \Delta t \dot{\mathbf{u}}_k + \frac{1}{2} \Delta t^2 \ddot{\mathbf{u}}_k + \beta \Delta t^2 \Delta \ddot{\mathbf{u}}_k \Rightarrow \Delta \dot{\mathbf{u}}_k = \frac{1}{2\beta \Delta t} \Delta \mathbf{u}_k - \frac{1}{2\beta} \dot{\mathbf{u}}_k + \left(1 - \frac{1}{4\beta}\right) \Delta t \ddot{\mathbf{u}}_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial \Delta \ddot{\mathbf{u}}_j}{\partial x_p} = -[\mathbf{M} + \gamma \Delta t \mathbf{C}(\mathbf{y}) + \beta \Delta t^2 \mathbf{K}(\mathbf{x})]^{-1} \left(\mathbf{G}_{Kp} \Delta \mathbf{u}_j + [\Delta t \mathbf{K}(\mathbf{x})] \frac{\partial \dot{\mathbf{u}}_j}{\partial x_p} + [\Delta t \mathbf{C}(\mathbf{y}) + \frac{1}{2} \Delta t^2 \mathbf{K}(\mathbf{x})] \frac{\partial \ddot{\mathbf{u}}_j}{\partial x_p} \right)$$

$$\frac{\partial \Delta \ddot{\mathbf{u}}_j}{\partial y_q} = -[\mathbf{M} + \gamma \Delta t \mathbf{C}(\mathbf{y}) + \beta \Delta t^2 \mathbf{K}(\mathbf{x})]^{-1} \left(\mathbf{G}_{Cq} \Delta \dot{\mathbf{u}}_j + [\Delta t \mathbf{K}(\mathbf{x})] \frac{\partial \dot{\mathbf{u}}_j}{\partial y_q} + [\Delta t \mathbf{C}(\mathbf{y}) + \frac{1}{2} \Delta t^2 \mathbf{K}(\mathbf{x})] \frac{\partial \ddot{\mathbf{u}}_j}{\partial y_q} \right) \quad (8)$$

여기서 $\Delta \ddot{\mathbf{u}}_{aj}(\mathbf{x}_j, \mathbf{y}_j)$, $\Delta \ddot{\mathbf{u}}_{mj}$ 는 j -번째 시간단계에서의 해석과 예측에 의한 가속도증분벡터이다. 강성도와 감쇠 변수는 식(4)의 오차를 최소화하는 구속적 최적화기법을 적용하여 추정하였다.

$$\text{Minimize}_{\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k} J_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k) = \frac{1}{2} \sum_{j=k-n_i}^{k+n_f} \omega_j \|\mathbf{e}_j(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k)\|^2$$

$$\text{s.t. } \mathbf{R}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (4)$$

여기서 n_i , n_f 는 변수추정을 위한 시간창의 크기를 결정하는 시간단계 상수, $\mathbf{R}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ 는 변수의 구속조건함수이다. 구속적 비선형 최적화문제를 풀기 위하여 유도한 gradient vector와 Gauss-Newton Hessian matrix는 다음 식(5)로 정리되며, 각 식에서 오차벡터에 대한 변수별 민감도는 식(6)에 정리하였다. 식(6)에서 오차벡터의 변수별 민감도는 결국 해석에 의한 가속도증분벡터의 변수에 대한 민감도로 구해진다.

가속도증분벡터의 변수에 대한 민감도는 식(1)의 증분형 지배방정식과 식(7) Newmark- β 법에 의해 다음 식(8)로 나타낼 수 있다.

여기서 j -번째 시간단계에서의 가속도증분에 대한 민감도는 j -번째 시간단계에서의 속도 및 가속도의 각 변수에 대한 민감도를 필요로 하고 있음을 관찰할 수 있다. 일반적인 증분형의 정의는 이전 시간단계에서의 값을 사용하여 정의할 수 있기 때문에, 이전 단계의 민감도를 사용하여 식(9)와 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{\partial \dot{u}_{aj}}{\partial x_p^k} = \frac{\partial \dot{u}_{a(j-1)}}{\partial x_p^k} + \frac{\partial \Delta \dot{u}_{a(j-1)}}{\partial x_p^k}, \quad \frac{\partial \ddot{u}_{aj}}{\partial x_p^k} = \frac{\partial \ddot{u}_{a(j-1)}}{\partial x_p^k} + \frac{\partial \Delta \ddot{u}_{a(j-1)}}{\partial x_p^k}$$

$$\frac{\partial \dot{u}_{aj}}{\partial y_q^k} = \frac{\partial \dot{u}_{a(j-1)}}{\partial y_q^k} + \frac{\partial \Delta \dot{u}_{a(j-1)}}{\partial y_q^k}, \quad \frac{\partial \ddot{u}_{aj}}{\partial y_q^k} = \frac{\partial \ddot{u}_{a(j-1)}}{\partial y_q^k} + \frac{\partial \Delta \ddot{u}_{a(j-1)}}{\partial y_q^k} \quad (9)$$

식(4)의 최적화문제는 최소자승법의 문제이므로 다음 식(10)과 같은 식별조건을 만족하는 경우에 한하여 해를 구할 수가 있게 된다. 즉, 추정하고자 하는 변수의 개수 보다 주어지는 계측정보의 량이 많은 경우에 해를 추정할 수 있게 된다.

$$N_d \times (n_f - n_i + 1) \geq N_K + N_C \quad (10)$$

3. 시뮬레이션 연구

개발한 비선형 시간영역 SI알고리즘을 검증하기 위한 시뮬레이션 연구는 그림 1의 3층 전단빌딩을 선택하였으며, 전단빌딩의 층별 자료는 표 1에 정리하였다. 시뮬레이션에 사용한 지진동과 지진동 중에 발생한 손상

을 그림 2에 나타내었다. 그림에서 손상발생은 최대가속도가 발생하는 구간을 중심으로 전단빌딩 2층에서만 점진적인 강성도의 증가와 감쇠의 감소로 묘사하였다. 1층과 3층은 지진동 중에 손상이 발생하지 않고 원래의 구조상태를 유지하고 있다고 가정하였다. 그리고 모든 부재는 탄소성거동을 하는 것으로 가정하였다. 시뮬레이션을 위해 각 층별로 측정된 횡방향 가속도에 측정오차가 최대 5% 있는 것으로 묘사하였고, 측정오차의 통계적 분석을 위해 시간창의 개념을 사용하였다.

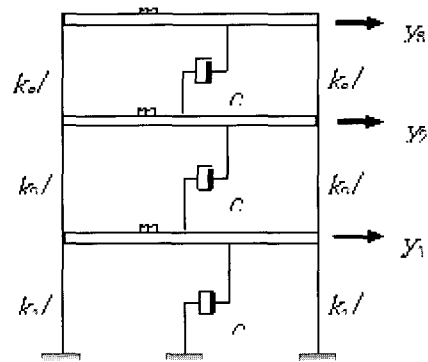


그림 1 3층 전단빌딩 모델

표 1 전단빌딩의 층별 자료

층	질량 (N·sec ² /mm)	감쇠 (N·sec/mm)	강성도 (N/m)
1	2.0	0.89	40
2	1.5	0.67	30
3	1.0	0.32	10

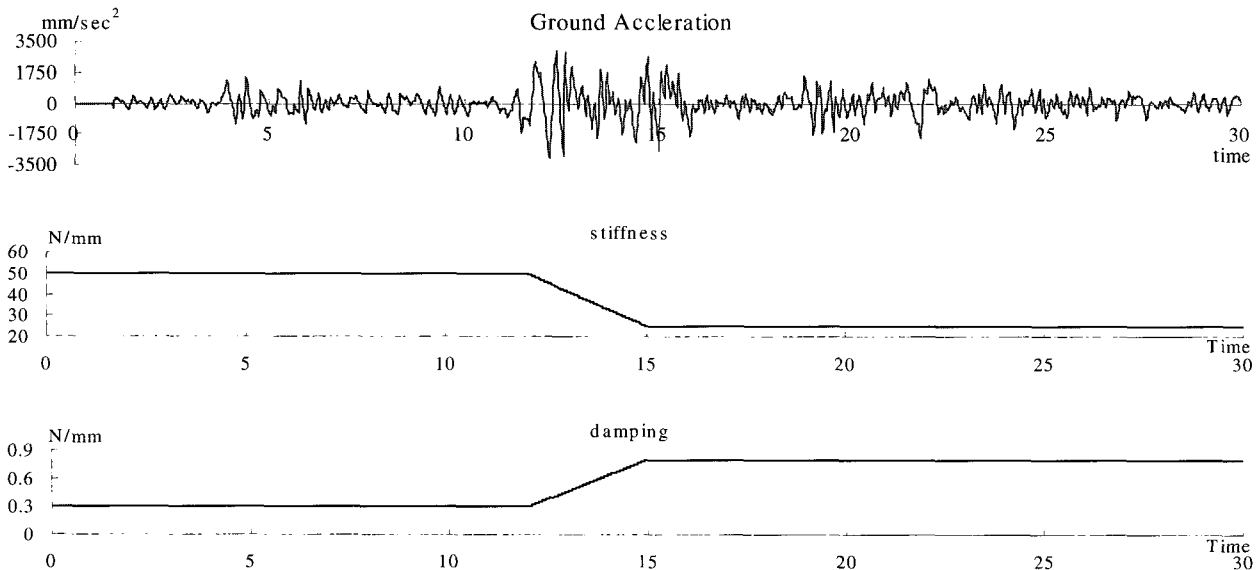


그림 2 사용한 지진동과 손상을 묘사한 강성도의 감쇠 및 감쇠의 증가

그림 3은 시간창을 60개의 시간단계의 데이터로 설정하고 지진동 중 시간단계별로 추정된 각 층별 강성도의 변화 양상이고, 그림 4는 같은 조건에서 구한 층별 감쇠의 시간에 따른 변화이다. 측정오차 5%가 포함되어 있는 경우이지만, 실제 손상이 있는 2층과 그 아래에 있는 1층의 강성도는 거의 정확하게 추정되고 있으며, 손상발생 구간을 잘 나타내고 있음을 관찰할 수 있다. 그림에서 강성도 변화가 유난히 튀는 곳은 일반적으로

구조거동이 소성영역에 있음을 나타낸다. 그러나, 1층과 2층의 신뢰할만한 결과에도 불구하고 3층의 강성도 변화 추정은 실제 손상이 발생하고 난 뒤에서 크게 흔들리는 신뢰할 수 없는 결과를 현재 주고 있다. 그리고 각 층별 감쇠에 대한 추이는 현재에 사용한 방법으로는 전체적으로 강성도에 비해 더욱 크게 흔들리고 있는 것을 확인할 수 있다. 다만, 감쇠의 추정치가 실제값의 범위 근처에서 흔들리고 있는 것을 관찰할 수 있다. 강성

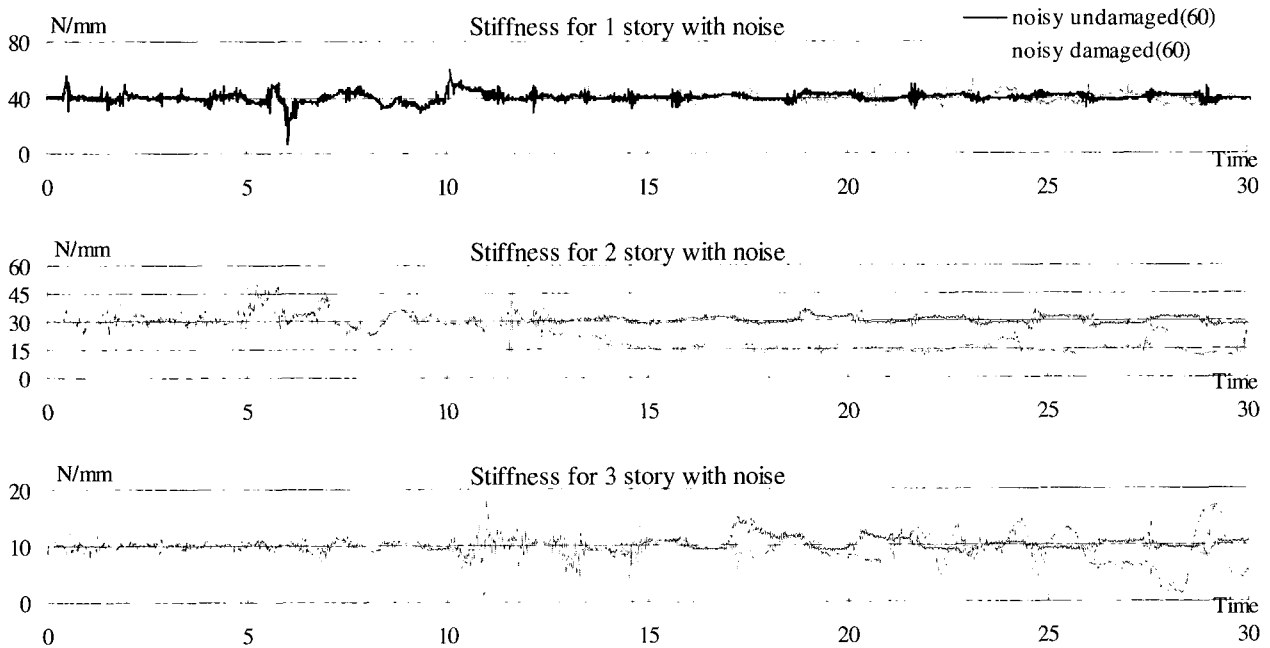


그림 3 층별 강성도변수의 시간에 따른 변화 추정

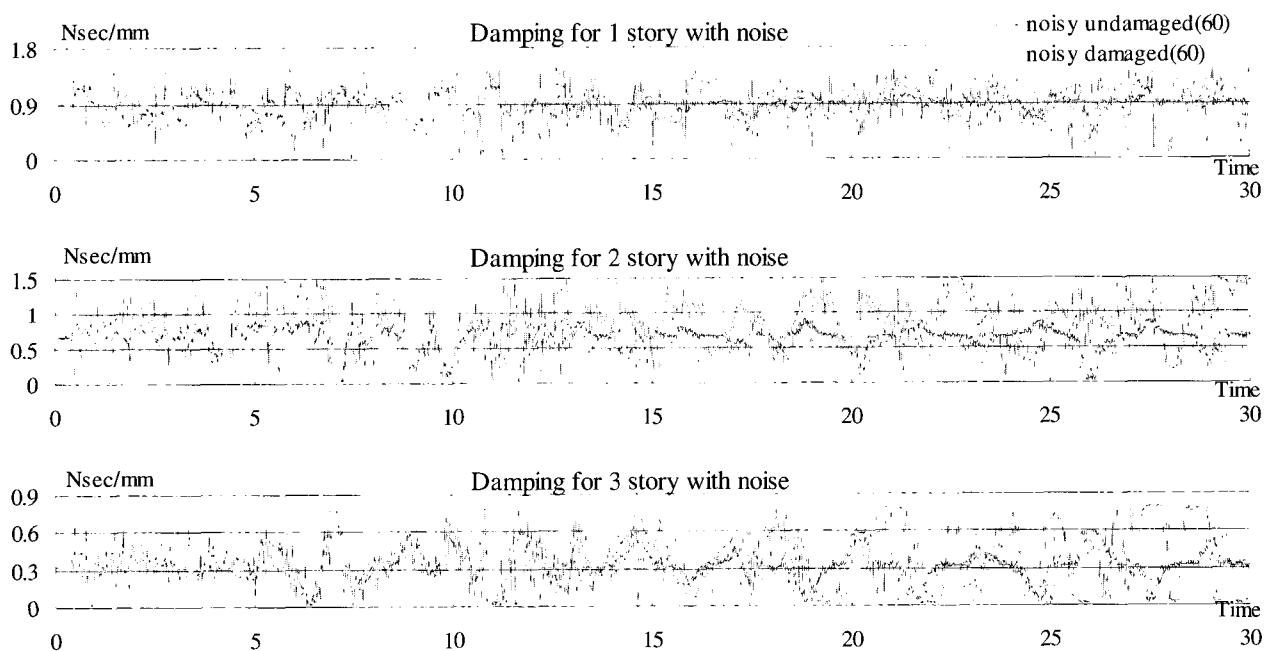


그림 4 층별 감쇠변수의 시간에 따른 변화 추정

도와 감쇠변수 모두 손상이 발생한 2층 위에 있는 3층에서 가장 좋지 못한 결과를 주고 있다.

이러한 손상 발생 후 시간별로 구해지는 해의 불안정성은 측정오차의 영향이 클것으로 판단되어 현재 본 연구진에서는 정규화기법을 적용하여 보다 안정적인 해를 얻는 작업을 진행 중에 있고, 상당한 결과의 진전을 보이고 있다. 그러나 궁극적으로 감쇠의 추정이 강성도의 추정에 비해 다소 어려운 것은 일관된 추세이며, 그 이유로는 손상에 미치는 강성도 변화의 영향이 감쇠에 비하여 월등히 크기 때문이다. 최적화 과정에서 강성도와 감쇠의 크기 차이를 보정하기 위하여 scaling기법을 적용하였으며, 따라서 변수 크기에 대한 문제는 최적화과정 내에서는 존재하지 않는다. 그리고 각 변수의 물리적 상한 및 하한값의 크기는 충분히 여유를 주고 정의하였기 때문에 추정된 강성도와 감쇠의 변화가 비록 많이 흔들리는 부분이 있어도 그림에서 추정되는 값의 크기가 실제 값들의 주위에서 흔들리는 것은 제안된 SI기법의 추정이 전반적으로는 신뢰할 수준에 있다는 것을 의미한다.

4. 결 론

본 기사에서는 지진동 중의 가속도 데이터를 바로 사용하여 실시간으로 구조변수를 추정할 수 있는 시간영역 SI기법을 소개하였다. 소개한 기법은 지진에 의한 구조물의 비선형 거동을 고려할 수 있게 증분형 지배방정식을 사용하였으며, 가속도증분의 구조변수에 대한 민감도를 구하기 위하여 Newmark- β 법을 적용하였다.

본 기사에서는 3층 전단빌딩에 대한 손상 시뮬레이션을 모사하였고, 제안된 기법이 의미있는 범위 내에서 강성도 및 감쇠 변화를 추적하고 있음을 확인하였다. 감쇠 변화의 추정이 강성도 변화에 비하여 보다 많이 흔들리고 있으며, 이는 손상으로 인한 구조물의

거동이 강성도의 변화에 보다 크게 영향을 받고 있음을 나타낸다. 아직 제안된 기법은 해의 불안정성을 극복하기 위하여 정규화기법 등을 추가하는 등 연구가 진행되고 있는 것이지만, 구해지는 해의 흔들림이 실제 값 주위에서 신뢰할 수준에 있음을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. KEERC 2001 Annual Report, *Korea Earthquake Engineering Research Center, Seoul National University*, February, 2002
2. KEERC 2002 Annual Report, *Korea Earthquake Engineering Research Center, Seoul National University*, February, 2003
3. 내진설계기준연구(II) - 내진설계성능기준과 경제성 평가, 한국지진공학회/한국건설기술연구원, 건설교통부, 12월, 1997
4. 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.
5. 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
6. 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
7. 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 