

측정 가속도 증분을 사용한 비선형 SI 기법의 개발

Development of a Nonlinear SI Scheme using Measured Acceleration Increment

신 수 봉* 오 성 호** 최 광 규***
Shin, Soo-bong Oh, Seong-Ho Choi, Kwang-Kyu

국문요약

구조물의 손상 진단을 위해 측정 가속도 데이터를 사용한 비선형 시간영역 SI 알고리즘을 개발하였다. 구조물의 비선형 거동을 고려하기 위하여 측정 가속도 증분과 해석에 의한 가속도 증분의 차이로 출력오차를 정의하고, 구속 비선형 최적화 문제를 풀어 최적 구조변수를 구하였다. 개발된 알고리즘은 시간에 따라 변하는 강성도와 감쇠 변수를 추정하도록 하였다. 구조물의 비선형 거동에 의한 복원력은 추정된 시간에 따라 변하는 구조변수와 Newmark- β 법으로 계산한 변위를 사용하여 복원하였으며, 복원 과정에서 비탄성 거동에 대한 어떤 모델도 사전에 설정하지 않았다. 개발한 알고리즘에서는 측정오차와 공간 및 상태에 대한 불완전 측정의 경우를 고려하였다. 개발한 알고리즘을 검증하기 위하여 3층 전단건물에 대한 수치 모의시험과 실내 모형실험을 통한 연구를 수행하였다.

주요어 : 비선형 시간영역 SI, 출력오차, 가속도 증분, 복원력, 측정오차, 불완전 측정

ABSTRACT

A nonlinear time-domain system identification algorithm using measured acceleration data is developed for structural damage assessment. To take account of nonlinear behavior of structural systems, an output error between measured and computed acceleration increments has been defined and a constrained nonlinear optimization problem is solved for optimal structural parameters. The algorithm estimates time-varying properties of stiffness and damping parameters. Nonlinear response of restoring force of a structural system is recovered by using the estimated time-varying structural properties and computed displacement by Newmark- β method. In the recovery, no pre-defined model for inelastic behavior has been assumed. In developing the algorithm, noise and incomplete measurement in space and state have been considered. To examine the developed algorithm, numerical simulation and laboratory experimental studies on a three-story shear building have been carried out.

Key words : nonlinear time-domain SI, output error, acceleration increment, restoring force, noise, incomplete measurement

1. 서 론

다양한 SI(system identification) 기법들이 구조물의 해석 모델을 설정하거나 구조물의 손상을 진단하고 평가하기 위하여 개발되었다. SI 기법은 기계, 항공 구조물 등 토목 구조물 이외의 다양한 구조물들에도 적용되었지만 토목 구조물에 대한 SI기법들의 적용은 상대적으로 그렇게 성공적이지 못한 것으로 평가된다.^{(1),(2)} 그 주된 이유로 토목 구조물이 크고 복잡하며 거동 예측이 용이하지 않거나 제한된 거동 정보만의 예측으로 활용할 수 있는 경우가 많지 않다는 것을 들 수 있다. 따라서 제한된 개수의 센서만이 현장 계측에 사용되는 것이 일반적이기 때문에 불완전 측정의 경우와 측정오차를 고려할 수 있는 효과적인 알고리즘의 개발이 필요하다.⁽³⁾⁻⁽⁸⁾

다양한 하중에 의해 발생하는 손상들 중, 특히 지진에 의한 구조물의 손상은 지진동 중에 심하게 발생한다. 심한 지진동에 의해 구조물의 거동은 쉽게 비선형 영역을 넘나들게 될 것이기 때문에 개발하는 SI기법은 이러한 비

선형 거동을 고려할 수 있어야 한다. 주파수영역 SI 기법에서는 이러한 비선형 거동을 고려하기가 어렵기 때문에, 대부분의 SI 알고리즘들은 시간영역에서 개발되었다. 그러나 대부분의 비선형 시간영역 SI기법은 가속도, 속도, 변위를 모든 자유도에서 계측을 한 경우에 대하여 개발되고 적용되었다.^{(1)-(3), (9)-(11)} 또한 비탄성 거동에 대한 복원력 거동을 복원하기 위해 대부분의 알고리즘들은 미리 설정된 비탄성 거동 모델을 사용하고 있다.^{(12), (13)} 즉 미지의 구조변수를 직접 추정하는 대신 설정한 비탄성 거동 모델을 정의하기 위해 필요한 계수들을 추정하여 복원력 거동을 복원하고 있다. 따라서 공간과 상태에 대해 불완전하게 측정된 거동 데이터를 사용하고 시간에 따라 변하는 구조변수를 직접 추정하여 구조물의 손상을 평가하고 복원력-변위 관계를 성공적으로 복원하는 SI 알고리즘은 아직 소개되지 못한 것으로 판단된다.

기본적으로 주파수영역 SI 기법과 시간영역 SI기법은 동일한 구조거동 시간이력 데이터를 사용한다. 그러나 주파수영역 SI 기법들은 계측한 시간영역 데이터를 주파수영역으로 변환한 것을 사용하기 때문에 시간영역 SI기법들에 비해 상당히 축소된 형태의 모드자료를 사용하게 된다. 현장 계측을 통해 제한된 몇 개의 저차 고유진동수와 이에 상응하는 고유진동 형상만이 일반적으로 얻어지며,

* 정회원 · 인하대학교 토목공학과 부교수 (대표적자 : sbshin@inha.ac.kr)

** (주)대본엔지니어링 구조팀 차장

*** 정회원 · 동아대학교 토목공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 2005년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2004. 9. 20 / 심사종료일 : 2004. 10. 19)

고유진동 형상도 계측센서가 설치된 제한된 자유도에서만 얻어지게 된다. 그러나 구조물에 일반적으로 발생하는 국부적인 손상은 고차모드에 보다 영향을 미치기 때문에 몇 개의 저차모드에 대한 계측 정보만 사용하는 주파수영역 SI 기법은 그렇게 효과적이지 못하다.^{(14),(15)}

이에 반해 시간영역 SI 기법의 사용은 처리해야 할 계측 정보의 양이 너무 방대하다는 문제점을 갖고 있다. 즉 구조변수를 추정하는데 거대한 계측 데이터베이스를 사용해야 하는 부담을 갖게 된다. 그리고 공간과 상태에 대해 불완전한 시간영역 계측데이터의 사용은 알고리즘 개발을 어렵게 만든다.^{(6),(7)} 그러나 지진동에 의한 구조물의 손상진단과 같이, 시간에 따라 변화하는 구조변수의 추적을 요구하고 더불어 구조물의 비선형거동을 추적하고자 할 경우에는 주파수영역 SI 기법이 아닌 시간영역 SI 기법의 적용이 효과적이다.

대부분의 SI 기법 적용에서 구조물의 손상은 강성도 변수의 감소로 정의되었다.^{(8),(15)} 또한 대부분의 시간영역 SI 기법에서도 역시 감쇠 및 질량변수는 기지의 값으로 고정하고 강성도만을 유일한 변수로 고려하고 있다. 그러나 구조물에 대한 평가의 오류로 감쇠를 적절하지 못한 값으로 고정하였을 경우에 강성도변수의 추정이 어려워질 수 있기 때문에 강성도와 감쇠를 동시에 추정하는 것이 필요하다는 결론을 선행연구에서 얻었다.^{(16),(17)} 따라서 강성도와 감쇠를 동시에 추정하는 SI기법의 개발이 필요하며, 특히 지진동에 의한 구조물의 손상 진단에 대한 적용의 경우에는 시간에 따라 변화하는 강성도와 감쇠변수를 효과적으로 추적하는 SI 기법의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 측정된 가속도 증분과 해석에 의한 가속도 증분의 차이로 정의되는 출력오차를 최소화하여 최적의 구조변수를 구하는 비선형 시간영역 SI 기법을 소개한다. 공간과 상태에 대한 불완전측정의 경우와 측정오차를 고려할 수 있으며, 시간에 따라 변화하는 강성도와 감쇠변수를 동시에 각 시간단계에서 추정할 수 있도록 개발하였다. 강성도와 감쇠변수에 대한 가속도 증분의 민감도를 정식화하였으며, 이 민감도를 사용하여 최적화 과정에서 필요한 gradient vector와 Hessian matrix를 정의하였다. 본 연구에서는 감쇠모델로 보다 적은 수의 변수를 사용하는 Rayleigh 감쇠도 있지만 각 요소별로 정의되는 점성감쇠(viscous damping)를 사용하였다. 그리고 연속적으로 변화되어 가는 변수를 시간 단계별로 추정하기 위하여 시간창 개념을 데이터 교란(data perturbation)기법과 같이 적용하였다.⁽⁷⁾

개발된 알고리즘을 검증하기 위하여 3층 전단진동물에 대한 수치 모의시험 연구를 수행하고 이를 바탕으로 실내 모형실험을 수행하였다. 수치 모의시험 연구에서는 시간에 따라 변화되어 가는 강성도 및 감쇠변수 추정의 효율성과 복원력 재구성의 가능성을 확인하였으며, 모형실험을 통해서 실전적인 적용성을 검증하였다.

2. 비선형 시간영역 SI 알고리즘

2.1 증분형 동적지배방정식

구조물의 비선형성을 표현하기 위하여 다음 식 (1)과 같은 증분형 동적 지배방정식을 사용한다.

$$\mathbf{M}\Delta\ddot{\mathbf{u}}_j + \mathbf{C}(\mathbf{y}_j)\Delta\dot{\mathbf{u}}_j + \mathbf{K}(\mathbf{x}_j)\Delta\mathbf{u}_j = \Delta\mathbf{f}_j \quad (1)$$

여기서, $\mathbf{M}(N \times N)$, $\mathbf{C}(N \times N)$, $\mathbf{K}(N \times N) =$ 질량, 감쇠, 강성도행렬, $\Delta\ddot{\mathbf{u}}_j, \Delta\dot{\mathbf{u}}_j, \Delta\mathbf{u}_j, \Delta\mathbf{f}_j (N \times 1) =$ 시간단계 j 에서의 가속도, 속도, 변위, 하중 증분벡터, $N =$ 자유도의 수, $\mathbf{x}_j(N_K \times 1)$, $\mathbf{y}_j(N_C \times 1) =$ 시간단계 j 에서 강성도, 감쇠변수 벡터, $N_K, N_C =$ 강성도, 감쇠변수의 수이다.

식 (1)에서 강성도와 감쇠를 시간에 따라 변화하는 추정해야 할 두 가지 변수로 설정하였으며, 질량은 시간에 따라 변하지 않는 기지의 값으로 가정하였다. 강성도와 감쇠는 식 (2)와 같이 미지 변수와 계수행렬의 선형조합으로 구성할 수 있다.

$$\mathbf{K}(\mathbf{x}) = \mathbf{K}_0 + \sum_{g=1}^{N_g} \sum_{p=1}^{\Pi_g} x_{pg} \mathbf{G}_{Kpg} = \mathbf{K}_0 + \sum_{i=1}^{N_K} x_i \mathbf{G}_{Ki}, \quad \mathbf{C}(\mathbf{y}) = \mathbf{C}_0 + \sum_{i=1}^{N_C} y_i \mathbf{G}_{Ci} \quad (2)$$

여기서, $\mathbf{K}_0, \mathbf{C}_0 =$ 강성도와 감쇠행렬의 기지 부분, $\mathbf{G}_{Ki}, \mathbf{G}_{Ci} =$ 각각 i 번째 강성도와 감쇠변수에 대한 계수행렬, 그리고 $N_g, \Pi_g =$ 변수그룹의 수와 g 번째 그룹의 변수의 개수이다.

2.2 가속도 증분의 출력오차

현장 계측에 의해 사용되는 가속도의 개수는 일반적으로 제한되기 때문에 한정된 자유도에서의 가속도 시간이력만이 계측된다. 또한 속도 및 변위의 시간이력을 측정비용의 경제성과 측정의 어려움으로 인하여 현장에서는 일반적으로 계측하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 이러한 상황을 고려하여 제한된 자유도에서 계측된 가속도 증분 $\Delta\tilde{\mathbf{u}}_{mj}$ 과 해석에 의한 가속도 증분 $\Delta\tilde{\mathbf{u}}_{aj}(\mathbf{x}_j, \mathbf{y}_j)$ 의 차이로 정의되는 출력오차를 식 (3)과 같이 j 번째 시간단계에 대해 정의한다. 식 (3)에서는 비선형 동적거동을 식별하기 위하여 가속도 자체의 출력오차 대신에 가속도 증분의 출력오차를 사용하였다.

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

여기서 N_m 은 가속도 측정 자유도의 수이다.

해석에 의한 가속도 증분 벡터는 식 (4)에서 구해지며, 속도와 변위의 증분 벡터는 측정 가속도로부터 Newmark- β 법에 의해 계산된다.

$$\begin{aligned} \Delta \ddot{\mathbf{u}}_{aj} &= \mathbf{S}_j^{-1} \Delta \mathbf{r}_j \\ \Delta \dot{\mathbf{u}}_{aj} &= \Delta t \ddot{\mathbf{u}}_{aj} + \gamma \Delta t \Delta \dot{\mathbf{u}}_{aj} \\ \Delta \mathbf{u}_{aj} &= \Delta t \dot{\mathbf{u}}_{aj} + \frac{1}{2} \Delta t^2 \ddot{\mathbf{u}}_{aj} + \beta \Delta t^2 \Delta \ddot{\mathbf{u}}_{aj} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, γ 와 β 는 Newmark- β 법의 적분상수이며, \mathbf{S}_j 와 $\Delta \mathbf{r}_j$ 는 다음 식 (5)와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_j(\mathbf{x}_j, \mathbf{y}_j) &= \mathbf{M} + \gamma \Delta t \mathbf{C}(\mathbf{y}_j) + \beta \Delta t^2 \mathbf{K}(\mathbf{x}_j) \\ \Delta \mathbf{r}_j(\mathbf{x}_j, \mathbf{y}_j) &= \Delta \mathbf{f}_j - \Delta t \mathbf{K}(\mathbf{x}_j) \dot{\mathbf{u}}_{aj} - \left[\Delta t \mathbf{C}(\mathbf{y}_j) + \frac{1}{2} \Delta t^2 \mathbf{K}(\mathbf{x}_j) \right] \ddot{\mathbf{u}}_{aj} \end{aligned} \quad (5)$$

속도와 변위벡터는 식 (6)에 의해 계산되기 때문에 속도, 변위에 대한 초기치가 가정되어야 한다.

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{u}}_{aj} &= \ddot{\mathbf{u}}_{a,j-1} + \Delta \ddot{\mathbf{u}}_{a,j-1}, \quad \dot{\mathbf{u}}_{aj} = \dot{\mathbf{u}}_{a,j-1} + \Delta \dot{\mathbf{u}}_{a,j-1}, \\ \mathbf{u}_{aj} &= \mathbf{u}_{a,j-1} + \Delta \mathbf{u}_{a,j-1} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (3)에서 출력오차는 측정 자유도에 대해서만 정의되기 때문에 '0'과 '1'로만 이루어지는 Boolean 행렬 \mathbf{B} 를 사용하여 측정 자유도에 대해 오차벡터를 구성하게 된다.

$$\Delta \tilde{\mathbf{u}}_{aj} = \mathbf{B} \Delta \mathbf{u}_{aj} = \mathbf{B} \mathbf{S}_j^{-1} \Delta \mathbf{r}_j \quad (7)$$

시간 단계마다 최적의 강성도 및 감쇠변수를 추정하기 위한 최적화 문제를 식 (8)에서와 같이 식 (3)에 의해 정의된 출력오차를 최소화시키는 것으로 정의한다.

$$\text{Minimize } J_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n_i} \|\mathbf{e}_j(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i)\|^2 \quad \text{subject to } C(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i) \leq 0 \quad (8)$$

여기서, n_i , n_f = 시간창의 시작과 끝을 정하는 시간 단계의 수이며, $C(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i)$ 는 변수 구속조건이다.

식 (8)에서 사용하고 있는 시간창의 개념은 일정한 시간창에 포함되는 가속도 데이터를 사용하여 시간창 내에서는 일정하다고 가정하는 구조변수를 구하는 것이다. 본 연구에서는 시간창을 통한 평균적인 구조변수를 추정하는 것에 데이터 교란기법을 추가로 적용하여 보다 안정적인 변수를 추정하도록 하였다.

2.3 오차 민감도

식 (3)에서 정의한 오차함수의 강성도와 감쇠변수에 대한 민감도(sensitivity)는 식 (9)와 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{e}_j(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i)}{\partial x'_p} &= \frac{\partial \Delta \tilde{\mathbf{u}}_{aj}(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i)}{\partial x'_p} = -\mathbf{B} \mathbf{S}_j^{-1} \frac{\partial \mathbf{S}_j}{\partial x'_p} \mathbf{S}_j^{-1} \Delta \mathbf{r}_j + \mathbf{B} \mathbf{S}_j^{-1} \frac{\partial \Delta \mathbf{r}_j}{\partial x'_p} \\ \frac{\partial \mathbf{e}_j(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i)}{\partial y'_q} &= \frac{\partial \Delta \tilde{\mathbf{u}}_{aj}(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i)}{\partial y'_q} = -\mathbf{B} \mathbf{S}_j^{-1} \frac{\partial \mathbf{S}_j}{\partial y'_q} \mathbf{S}_j^{-1} \Delta \mathbf{r}_j + \mathbf{B} \mathbf{S}_j^{-1} \frac{\partial \Delta \mathbf{r}_j}{\partial y'_q} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, x'_p , y'_q 는 시간단계 t 에서의 p 번째 강성도와 q 번째 감쇠변수이다. 식 (9)에서 구조행렬 \mathbf{S} 와 여력 $\Delta \mathbf{r}$ 의 각 변수에 대한 민감도는 식 (10)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{S}_j}{\partial x'_p} &= \beta \Delta t^2 \mathbf{A}_{kp}, \quad \frac{\partial \Delta \mathbf{r}_j}{\partial x'_p} = -\Delta t \mathbf{A}_{kp} \dot{\mathbf{u}}_{aj} - \Delta t \mathbf{K} \frac{\partial \dot{\mathbf{u}}_{aj}}{\partial x'_p} - \frac{1}{2} \Delta t^2 \mathbf{A}_{kp} \ddot{\mathbf{u}}_{aj} - \left[\Delta t \mathbf{C} + \frac{1}{2} \Delta t^2 \mathbf{K} \right] \frac{\partial \ddot{\mathbf{u}}_{aj}}{\partial x'_p} \\ \frac{\partial \mathbf{S}_j}{\partial y'_q} &= \gamma \Delta t \mathbf{A}_{Cq}, \quad \frac{\partial \Delta \mathbf{r}_j}{\partial y'_q} = -\Delta t \mathbf{K} \frac{\partial \dot{\mathbf{u}}_{aj}}{\partial y'_q} - \Delta t \mathbf{A}_{Cq} \ddot{\mathbf{u}}_{aj} - \left[\Delta t \mathbf{C} + \frac{1}{2} \Delta t^2 \mathbf{K} \right] \frac{\partial \ddot{\mathbf{u}}_{aj}}{\partial y'_q} \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)에서 속도 및 가속도의 강성도 및 감쇠에 대한 민감도 역시 식 (6)과 같이 구해질 수 있으며, 본 연구에서는 이들의 초기치는 무시할 수 있다고 가정하였다.

2.4 식별조건

제안된 알고리즘은 기본적으로 최소자승 문제를 푸는 것이 된다. 따라서 해를 구할 수 있는 조건은 미지변수의 개수(N_p)가 얻어지는 식의 개수보다 많아지는 조건을 만족하는 것이며, 미측정 자유도가 고려될 경우 식 (11)과 같이 식별조건식을 유도할 수 있다.

$$N_m \times (n_f + n_i - 1) \geq N_p \quad (11)$$

3. 수치 모의시험 연구

개발한 알고리즘을 검증하기 위하여 3층 전단건물에 대한 수치 모의시험 연구를 수행하였으며, 미측정 자유도를 고려하기 위하여 2층과 3층에서만 가속도를 측정할 수 있었다고 가정하였다. 지진동 중의 손상은 1층에 일정 시간 동안 점진적으로 감소하는 강성도와 점진적으로 증가하는 감쇠로 모사⁽¹⁰⁾하였으며, 가속도 시간이력은 200Hz로 수집하였다. 대상 구조물의 비탄성 거동은 bi-linear 모델로 가정하였으나, 구조변수를 추정하고 복원력-변위 관계를 복원하는 과정에서는 비선형 거동에 대한 어떤 선형모델도 가정하지 않았다. 표 1은 수치 모의시험 연구에 사용한 각 층별 질량, 감쇠 및 강성도와 1층의 손상을 50% 강성도 감소로 가정한 것을 정리한 것이다. 가속도 데이터는 5%의 측정오차를 가지고 있는 것으로 모사하였다.

강성도와 감쇠변수를 추정하기 위한 적절한 시간창의 크기를 확인하기 위하여 단자유도 시스템에 대한 선형연구를 수행하였다.⁽¹⁷⁾ 시간창의 크기가 커질수록 강성도 및 감쇠변수 모두 정확한 값에 빠르게 수렴하였으나 시간창의 크기가 작은 경우 감쇠변수는 크게 요동을 치는 결과를 얻었다. 그러나 이런 경우에도 데이터 교란법을 같이 적용하였을 경우에는 보다 작은 시간창에서 빠르게 수렴하는 결과를 얻을 수 있었다. 복원력-변위 관계가 비선형 거동을 할 경우 강성도변수 추정의 정확성이 크게 영향을

주지만, 강성도변수는 작은 시간창에서도 데이터 교란법을 적용할 경우 신뢰할 수 있는 수준으로 추정된다. 따라서 강성도변수에 대한 시간창의 크기는 감쇠변수에 대한 시간창의 크기와 구분하여 작게 설정하여 복원력-변위 관계를 복원하도록 하였다.

그림 1은 강성도와 감쇠변수에 대한 시간창을 각각 2, 50개의 가속도데이터로 설정한 경우 구해진 결과이며, 각각에 대해 데이터 교란은 100회 수행하였다. 그림 1은 이러한 과정을 통해 구한 시간에 따라 변하는 강성도와 감쇠변수를 각 층별로 그린 것이다. 그림에서 1층의 점진적인 손상을 강성도 및 감쇠변수의 변화에서 확인할 수 있다. 강성도변수에 대한 시간창을 최소로 사용함으로 인해 그림 1에서 보는 바와 같이 강성도변수의 시간에 따른 추정치가 평균적으로는 정확한 값을 따라 가고 있지만 국부적으로 크게 요동을 치고 있는 결과를 얻었다. 시간창을 보다 많이 사용하였을 경우에는 강성도변수 추정에서 요동이 거의 없는 훌륭한 결과를 얻을 수 있었지만 복원력-변위 관계가 정확하게 일치하지 못하였다. 그림 1에서 감쇠의 경우에는 시간창의 크기를 상대적으로 크게 하여 경향을 확인할 수 있는 결과를 얻었으나, 시간창을 작게

할수록 평균적인 경향은 확인이 되지만 상당히 크게 요동치는 결과를 얻었다.

표 1 수치 모의시험 연구에 사용한 재료성질과 가정한 손상

Floor	mass (10 ³ kg)	damping (N · s/mm)	stiffness (kN/mm)	simulated
1	5.0	4.0	2.50	Undamaged
		8.0	1.25	Damaged
2	4.0	4.0	2.20	
3	4.0	4.0	2.20	

그림 2는 이렇게 구해진 강성도변수와 Newmark- β 법에 의해 계산한 변위와의 관계를 층별로 재복원한 것으로, 그림에서 확인할 수 있듯이 본 수치 모의시험 연구에 사용했던 bi-linear 거동이 아주 잘 복원되고 있다. 1층에서의 시간에 따른 손상이 기울기의 변화로 나타나고 있으며, 2층에서의 거동이 비선형 영역에 들어가는 것을 확인할 수 있다. 3층의 거동은 거의 선형영역에서 머무르고 있었음도 확인할 수 있다.

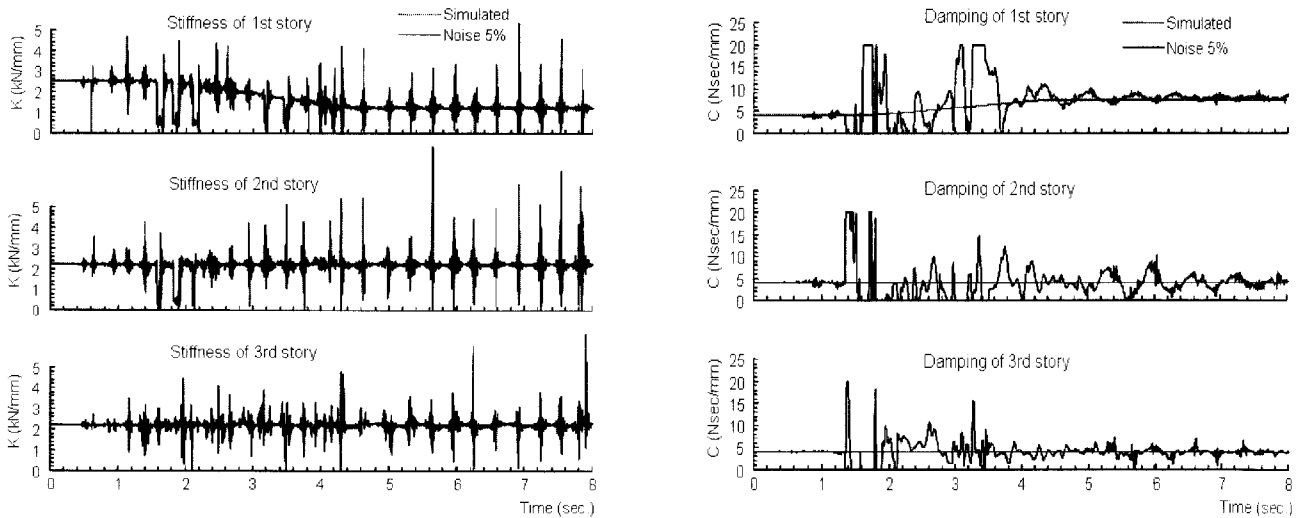


그림 1 각 층별 강성도 및 감쇠변수의 시간에 따른 변화 추정 결과

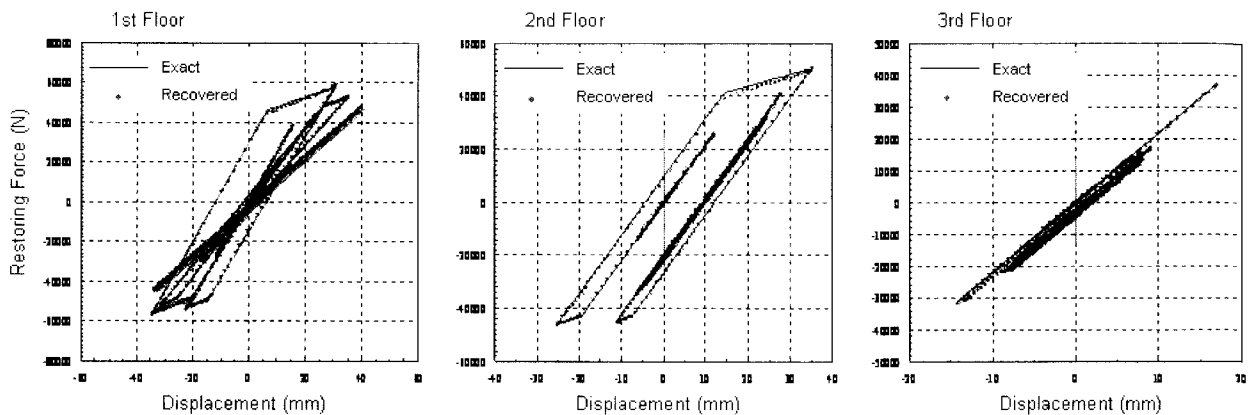


그림 2 층별로 재구성된 비선형 복원력-변위 관계 곡선

4. 모형실험 예제

수치 모의시험 연구를 바탕으로 그림 3의 좌측에 있는 3층 전단건물 모형으로 실내실험을 수행하여 개발한 측정 가속도 증분을 사용한 비선형 시간영역 SI기법을 검증하였다. 실험은 서울대학교 토목공학과에서 수행된 것으로 본 연구에서는 계측된 데이터를 활용하였다.⁽¹⁶⁾ 각 층의 슬래브는 질량 10.24kg의 45cm×45cm의 사각형 강재이며, 기둥과의 연결부를 확보하고 기둥의 휨 강성을 보장하기 위해 슬래브 네 귀퉁이에 보강재를 용접하였다. 면외 거동의 방지를 위해 각층에 진동의 수직방향으로 경사 보강재를 설치하였다. 3층에 12.78kg 무게추를 사용한 수평 정적하중을 가하고, 순간적인 하중의 풀림으로 도입된 자유진동을 각 층 상단 질량중심에서 가속도계로 측정하였다. 측정데이터 50Hz로 200초간 측정하였으며, 본 연구를 위해서 초기 40초의 측정데이터를 사용하였다. 실험

모형의 기본 제원은 표 2에 정리하였다.

표 2 실험모형의 기본 제원

Floor	Mass(kg)	Thickness(cm)	Area(cm ²)	Length of CTC(cm)
1	14.32	0.400	2.00	36.250
2	13.76	0.300	1.50	40.000
3	13.68	0.300	1.50	39.250

실험은 진동중 손상 도입의 어려움으로 인해 손상 전과 손상 후로 나누어 별도로 수행하였다. 손상은 그림 4의 사진에서 보는 바와 같이 1층과 2층의 연결부 볼트의 풀림으로 설정하였다. 미측정 자유도가 있는 경우를 고려하기 위하여 2층과 3층의 측정 가속도만을 사용하여 제안하는 SI 기법을 적용하였다. 각 층별로 추정되는 강성도 및 감쇠변수의 시간에 따른 변화를 그림 5와 그림 6

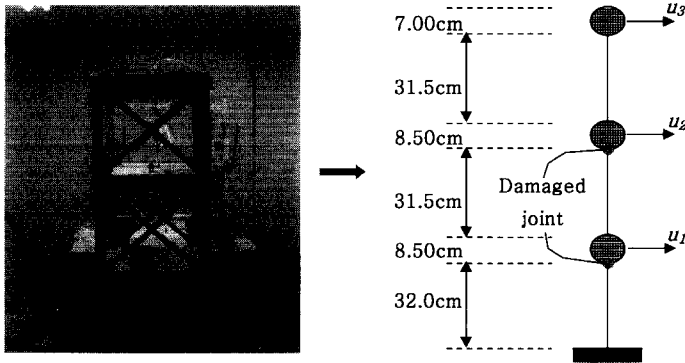


그림 3 전단건물 실험모형 및 해석모델

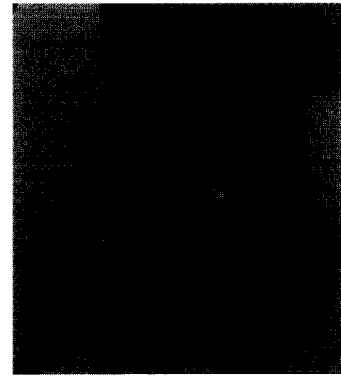


그림 4 볼트연결부의 손상 도입

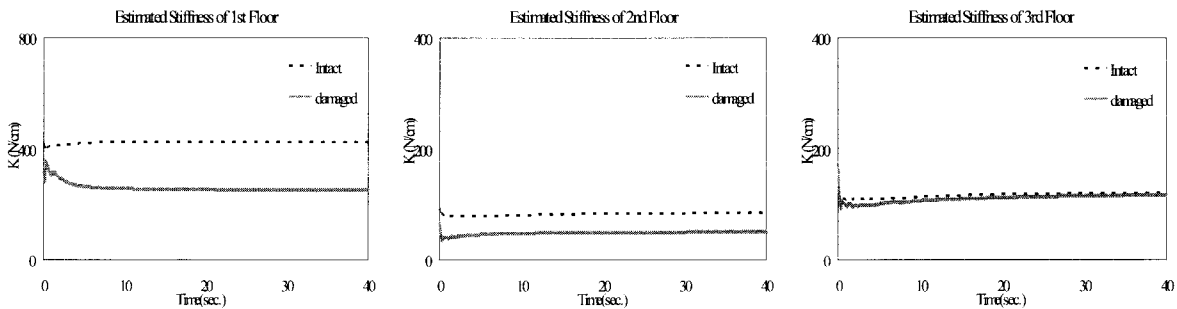


그림 5 손상 도입 전과 후 추정된 강성도변수의 비교(불완전 측정의 경우)

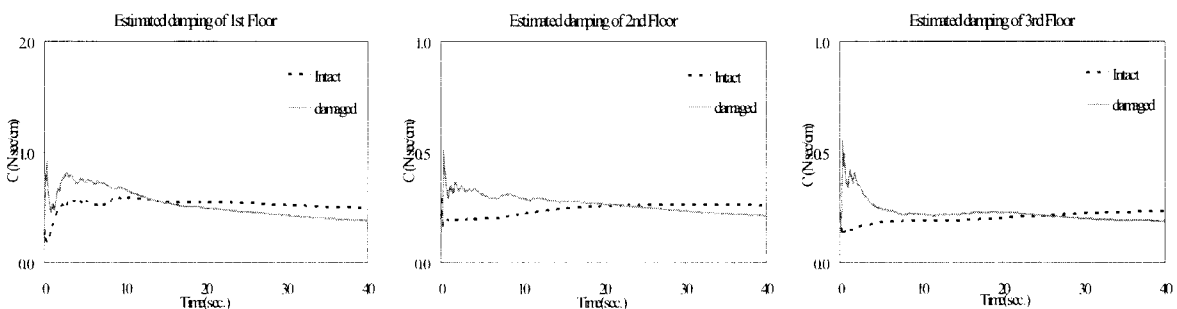


그림 6 손상 도입 전과 후 추정된 감쇠변수의 비교(불완전 측정의 경우)

에 각각 정리하였다. 본 연구에서는 시간창을 10개의 동일한 개수의 시간점의 수를 가지는 가속도 시간이력 데이터로 설정하였고, 50회의 데이터 교란 반복작업을 수행하였다.

그림 5와 6에서 보듯이 강성도변수가 빠르게 일정한 값으로 수렴하며, 감쇠변수 역시 강성도에 비해서는 늦지만 일정한 값으로 수렴하였다. 손상 도입에 의해 1층과 2층의 강성도가 크게 감소하였다. 3층의 강성도는 손상을 1층과 2층 연결부의 볼트 풀림으로 도입하였기 때문에 변하지 않는 결과로 나타났다. 반면에 감쇠는 손상 전후에 상관없이 거의 동일한 값으로 수렴하였다. 그 이유로는 볼트 풀림에 의한 연결부 손상은 구조물의 강성도에는 영향을 미치나 구조물의 파괴 혹은 부재의 파손 등에 의한 손상이 아닌 관계로 구조물의 감쇠에는 크게 영향을 미치지 못하기 때문으로 판단된다.

그림 7과 8은 완전 측정의 경우를 수행한 결과이다. 불

완전 측정에 대한 그림 5와 그림 6의 결과와 비교하여 거의 유사하나, 감쇠의 추정에 대한 안정과 수렴이 보다 빠르게 이루어졌다. 그림 5와 6 그리고 그림 7과 8을 종합적으로 판단할 때, 전체적으로 불완전 측정에 의한 영향이 개발된 알고리즘을 사용하여 변수를 추정한 결과에 많은 영향을 미치지 않았다.

시간에 따라 추정된 구조변수와 Newmark- β 법에 의해 계산한 변위와의 관계를 층별로 재복원하여 그림 9에 그렸다. 그림에서 볼트 풀림 손상에 의해서 1층과 2층의 복원력의 기울기가 변화하였으나 구조물은 선형영역에서만 거동을 하였음을 확인할 수 있다. 그러나 층별 진동변위가 도입한 손상에 의해 증가하였음을 확인할 수 있다. 그림 10에서는 계측한 가속도 시간이력과 추정한 구조변수를 사용하여 해석적으로 계산한 가속도 시간이력을 손상을 도입한 후의 경우에 대해 층별로 비교하였다.

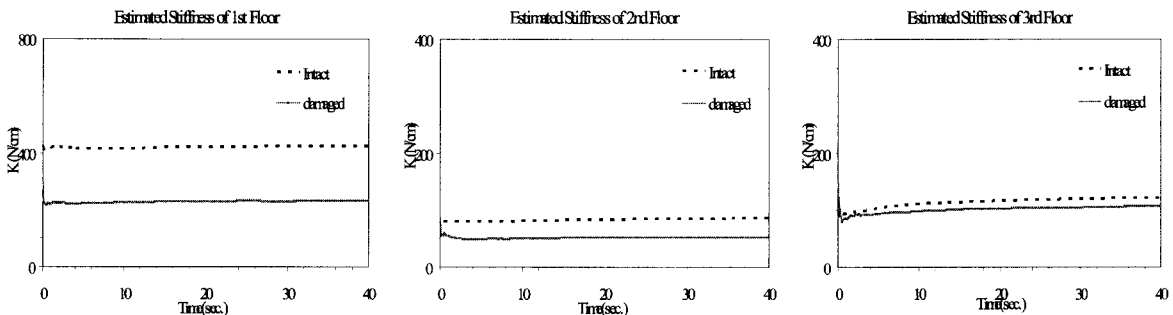


그림 7 손상 도입 전과 후 추정된 강성도변수의 비교(완전 측정의 경우)

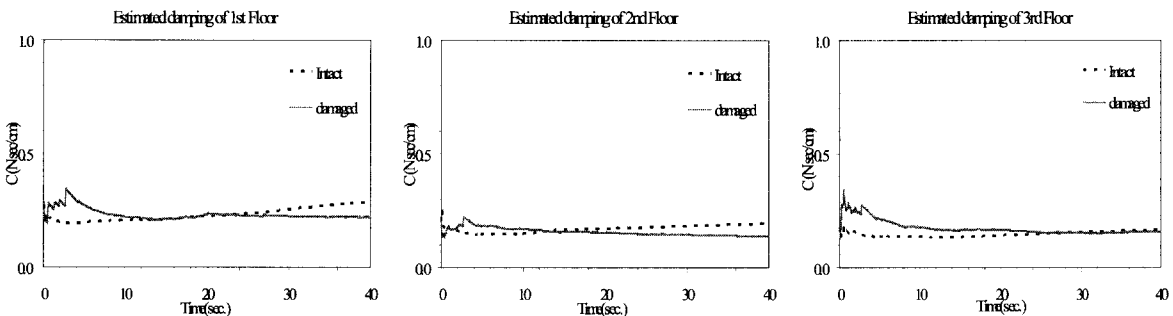


그림 8 손상 도입 전과 후 추정된 감쇠변수의 비교(완전 측정의 경우)

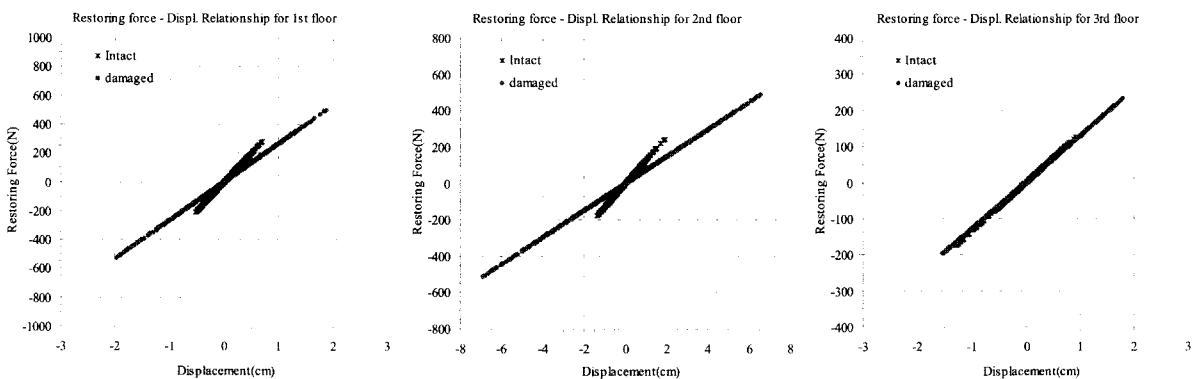


그림 9 복원된 복원력-변위 관계

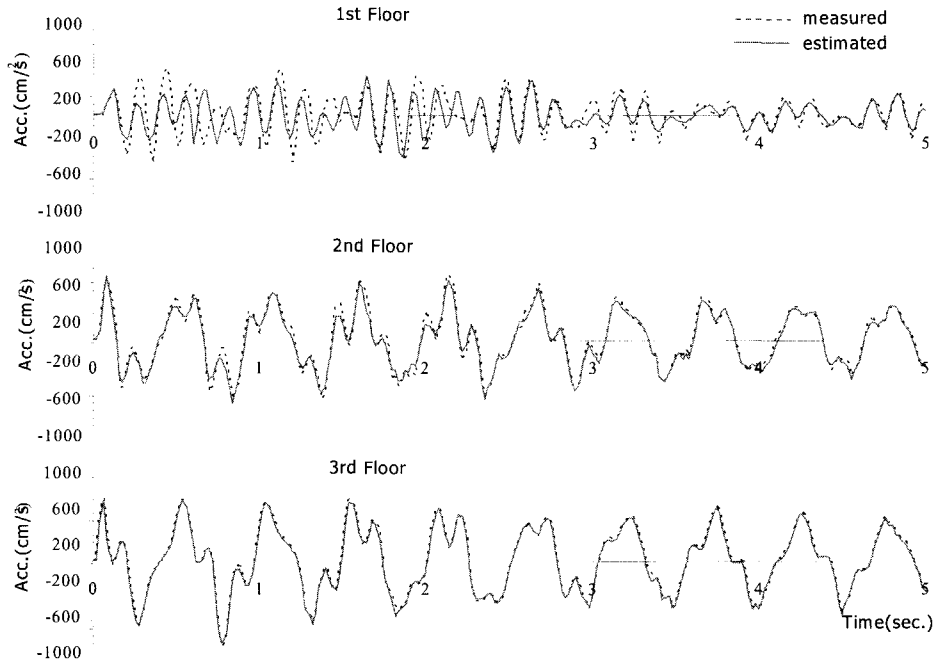


그림 10 손상 도입 후 측정된 가속도와 해석에 의한 가속도의 비교

그림 10에서 1층의 가속도 시간이력이 상대적으로 큰 차이를 보여주고 있음을 확인할 수 있는데 이는 2층과 3층에서 계측한 가속도 데이터만을 사용하여 구조변수를 추정하였기 때문으로 판단된다. 그러나 전반적인 추세 및 거동은 잘 구현되고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

시간에 따라 변하는 강성도 및 감쇠변수를 추정하는 비선형 시간영역 SI 기법을 제안하였다. 측정 가속도 증분과 해석에 의한 가속도 증분의 차이로 정의되는 출력오차를 사용하여 최적의 강성도 및 감쇠변수를 추정하는 알고리즘을 개발하였다. 알고리즘은 불완전 측정의 경우와 측정오차를 고려할 수 있도록 개발되었다.

개발한 시간영역 SI 기법을 검증하기 위하여 3층 전단 건물에 대한 수치 모의시험 연구와 실내 모형실험을 수행하였다. 시간창의 개념을 적용하여 시간 단계별 구조변수를 시간창 내에서의 평균값으로 구하도록 하였으며 데이터 교란법을 같이 사용하여 보다 적은 크기의 시간창에서도 안정적으로 수렴되는 변수값을 구할 수 있었다.

강성도와 감쇠변수의 안정적인 수렴에 필요한 시간창의 크기가 차이가 있음을 확인하였고, 복원력-변위 관계의 복원에 강성도변수에 보다 작은 시간창을 사용할수록 관계곡선을 잘 따라감을 확인하였다. 본 연구에서는 개발한 SI 기법은 이러한 복원력-변위의 비선형 관계 복원에 비선형 거동에 대한 선행모델을 가정하지 않고도 추적할 수 있었다.

3층 전단건물에 대한 실내 모형실험의 결과 개발한 SI 기법이 효과적으로 적용될 수 있음을 검증하였다. 실험에

서 도입한 볼트 풀림에 의한 손상의 위치를 개발한 SI 기법을 사용하여 잘 추적하였으며, 감쇠는 구조물의 파손 등에 의한 손상이 아닌 관계로 손상 전·후에 크게 변하지 않는 값으로 구하여졌다. 본 연구에서 제안하는 비선형 시간영역 SI 기법은 전단건물 이외에 다양한 구조물에 동일한 개념으로 적용될 수 있는 것이기 때문에 보다 복잡한 구조물에 대한 적용과 연구가 차후에 수행될 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터(KEERC)를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 그리고, 본 연구에 사용된 실내 실험 데이터를 활용할 수 있도록 허락하시고 협조해주신 서울대학교 이해성교수님께 감사드립니다.

참고 문헌

1. Li, B. "Reconstruction of linear and nonlinear continuous time system models from input/output data using the Kernel invariance algorithm," *J. of Sound and Vibration*, Vol.233, 2000, pp. 877-896.
2. Hjelmstad, K.D., Wood, S.L., and Clark, S.J., "Parameter estimation in complex linear structures," *Report No. SRS 557, UIIU-ENG-90-2105*, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, 1990.
3. Lin, C.C., Soong, T.T., and Natke, H.G., "Real

- time system identification of degrading structures," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.116, No.10, 1989, pp. 2258-2274.
4. Lee, H.S., Kim, Y.H., Park, C.J., and Park, H.W., "A new spatial regularization scheme for the identification of the geometric shape of an inclusion in a finite body," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.46, No.7, 1999, pp. 973-992.
 5. Loh, C.H. and Lin, C.Y., "Time domain identification of frames under earthquake loadings," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.126, No.7, 2000, pp. 693-703.
 6. Hjelmstad, K.D., Banan, M.R., and Banan, M.R., "Time-domain parameter estimation algorithm for structures: I computational aspects; II numerical simulation studies," *J. of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.121, No.3, 1995, pp. 424-447.
 7. Shin, S., "Damage detection and assessment of structural systems from measured response," Ph.D. Thesis, *University of Illinois at Urbana-Champaign*, 1994.
 8. Hjelmstad, K.D. and Shin, S., "Crack identification in a cantilever beam from modal response," *Journal of Sound and Vibration*, Vol.198, No.5, 1996, pp. 527-545.
 9. Tiwari, R., "On-line identification and estimation of nonlinear stiffness parameters of bearings," *J. of Sound and Vibration*, Vol.234, No.5, 2000, pp. 906-910.
 10. Yoshida, I., "Damage detection using Monte Carlo filter based on non-Gaussian noise," *Proceedings of Nonlinear System Identification and Structural Health Monitoring*, DPRI, Kyoto University, 2001, pp. 281-292.
 11. Yun, C.B. and Shinozuka, M., "Identification of nonlinear structural dynamic systems," *Journal of Structural Mechanics*, ASCE, Vol.8, No.2, 1980, pp. 187-203.
 12. Yoshida, I. and Sata, T. "Damage detection of adaptive Monte Carlo filter," *The 5th Korea-Japan Seminar/Workshop on System Identification and Structural Health Monitoring*, Dongguk University 2004.
 13. 이형진, 김남식, "실측 지진응답을 아용한 지진 손상도 평가 및 소성모형 추정", 한국지진공학회 논문집, Vol.6, No.6, 2002, pp. 7-15.
 14. Raghavendrchar, M. and Aktan, A.E., "Flexibility by Multireference Impact Testing for Bridge Diagnostics," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.118, No.8, 1992, pp. 2186-2203.
 15. Shin, S. and Koh, H.M., "Assessment of bridge deterioration by a system identification method," *Structural Eng. World Congress*, T131-3, San Francisco, USA, 1998, 7.
 16. Shin, S. and Lee, H.S., "Estimation of Optimal Damping and Stiffness Parameters from Incompletely Measured Acceleration Time History," *The 2nd China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems (CJK-OSM2)*, Busan, Korea, 2003, pp. 527-532.
 17. 오성호, "측정가속도 응답을 사용한 구조물의 비선형 시간영역 System Identification", 박사학위논문, 동아대학교, 2004.