

## A Time Domain System Identification for Nonlinear Behaviors of a Seismic Isolator Using the Secant Stiffness Model

105

(system identification scheme)

(secant stiffness model)

Duhem

. Duhem

가

가

(GMS)

가

### Abstract

Nonlinear hysteretic behaviors and stiffness changes of a seismic isolator are identified by using a *time domain system identification*(TDSI) based on the secant stiffness model. A new regularity condition of tangent stiffness used in the current TDSI is proposed instead of that used in the conventional Duhem hysteretic operator. The proposed regularity condition is defined with respect to time while that of Duhem hysteretic operator is defined with respect to displacements and restoring forces. The secant stiffness model for the TDSI is obtained by approximating the tangent stiffness under the proposed regularity condition by the secant stiffness at each time step. A least square method is employed to minimize the difference between the calculated response and measured response for the time domain system identification of the secant stiffness. The regularity condition of the secant stiffness is utilized to alleviate ill-posedness of the TDSI and to yield physically meaningful solutions by means

of the regularization technique. An optimal regularization factor determined by geometric mean scheme (GMS) is adopted to yield appropriate regularization effects on the system identification. The validity of the proposed method is presented through two numerical examples.

## 1. 서론

지진에 의해 구조물에 발생하는 진동 및 지진력의 저감을 위해 대상구조물의 용도와 특성에 따라 다양한 종류의 면진장치들이 개발 적용되어 왔다. 특히 지진발생시 원전의 안정성에 치명적인 영향을 줄 수 있는 원전기기 및 구조물에 면진장치를 사용함으로써 사고확률을 효과적으로 감소시킬 수 있다. 미국과 일본에서는 원전기기 및 구조물에 대한 면진장치의 이론적 해석, 실험 및 설계기법에 대한 연구들이 최근까지 진행되어 왔다 [1-2].

면진장치는 기본적으로 대상구조물의 고유진동수를 감소시킴으로써 지진발생시 구조물에 발생하게 되는 지진력과 진동을 감소시킬 뿐만 아니라 대부분의 지진에너지를 면진장치내에서 소산시킴으로써 대상구조물에 전파될 고주파영역의 지진에너지를 감쇠시키는 역할을 하게 된다. 면진장치가 설치되어 있는 면진구조물은 탄성거동을 하는 일반구조물과는 달리 면진장치의 큰 에너지 소산능력 때문에 매우 심한 비선형 거동을 하게 된다. 따라서, 합리적인 면진장치설계와 지진후의 면진장치 손상 평가를 위해서는 지진시 면진장치에 의해 소산된 에너지의 크기와 최대 변위 등을 정확히 추정해야 한다. 이를 위해서 면진장치의 비선형거동을 정확하게 나타낼 수 있는 구성모델에 근거한 면진구조물의 동적해석이 필요하다.

수학적 관점에서 면진장치는 이력모델(hysteretic model)로 표현할 수 있다 [3]. 현재까지 다양한 종류의 이력모델들이 제안되어 왔고, 면진장치에 대한 구성모델들도 이러한 이력모델들에 근거해 있다. 이력모델들의 역학적 특성은 이력모델의 형상을 나타내는 매개 변수들을 이력재료에 대한 수평전단시험으로 얻어진 힘-변위곡선에 대한 회귀분석방법을 통해서 구해지게 된다. 그러나 단순 전단시험에 의한 회귀분석을 통해 얻어진 재료의 구성모델을 이용해서 동적해석을 수행했을 때, 계산된 구조물의 응답은 실제 동적 실험으로부터 측정된 응답과 큰 차이를 보이게 된다. 이는 이력거동을 하는 재료가 가지고 있는 비선형 동특성에 내재해 있는 여러 가지 다른 역학적 특성들을 단순한 재료실험으로부터 얻어진 구성모델로 모사 하는 것에 한계가 있기 때문이다. 특히 지진시 면진장치의 동적 거동은 지진하중의 비정상성에 의해 발생하는 면진장치의 복잡한 비선형성 때문에 해석하기 매우 힘들다. 이러한 한계점을 해결하기 위해서 실제 이력거동을 하는 구조물의 응답을 직접 이용해서 이력거동이나 모델을 추정하는 연구들이 활발히 진행되어 왔다 [5-10].

이 연구에서는 면진장치에 발생하는 비선형거동 및 물성의 변화를 할선강성모델(secant stiffness model)과 시간영역 시스템확인기법(system identification; SI)을 이용해서 추정한다. 시간영역 시스템확인을 위한 접선강성의 새로운 정규조건을 기존의 Duhem 이력연산자에서 쓰이던 정규조건을 대신해서 제안한다. Duhem 이력연산자에서 사용되는 정규조건은 변위와 복원력에 대해 정의되는 반면 제안된 정규조건은 시간에 대해서 정의된다. 접선강성에 대한 정규조건이 시간에 의해 정의되기 때문에 Duhem 이력연산자로 표현할 수 없는 임의의 이력거동을 제한 없이 추정 할 수 있다. 시간영역 시스템확인을 위

한 할선강성모델을 시간에 대한 정규조건으로 정의되는 접선강성을 각 시간단계에서의 할선강성으로 근사하여 얻는다.

시간영역 SI를 위해서 계산된 응답과 예측된 응답의 차이를 최소화시키는 최소자승법을 사용한다. 특히 최소자승법에 근거한 SI의 경우 예측치에 발생하는 모델링오차나 예측 오차에 의해서 수치적인 불안정성을 일으키게 된다 [11]. 추정하려는 매시간 단계에서의 할선강성에 대한 정규조건을 최소자승법에 추가적으로 부과하는 정규화기법을 사용함으로써 수치적 불안정성을 막는 동시에 물리적으로 의미 있는 해를 구할 수 있다. 매 시간 단계에서 추정되는 할선강성에 대한 정규조건을 적용시키기 위한 방법으로 티코노프 정규화기법을 사용한다. 티코노프 정규화 기법에서 적절한 정규조건을 발견시키기 위해서 최적 정규화 계수를 사용해야 하는데 기하평균법(geometric mean scheme; GMS)을 이용하여 최적정규화 계수를 구한다 [11].

제안된 방법을 손상탐지 문제와 먼진장치의 비선형거동 추정문제에 적용시켜 타당성을 검증한다.

## 2. Duhem 이력연산자의 정규조건과 할선강성모델

먼진장치와 같은 이력모델의 비선형 동적 거동을 추정하기 위한 방법은 미분방정식에 근거한 이력모델의 매개변수 추정 방법과 ARMA나 직교다항식을 이용한 비매개변수 추정방법으로 대별될 수 있다 [5-10]. 여기서 매개변수라고 함은 미분방정식으로부터 유도된 내연적, 외연적으로 물리적인 의미를 가진 항들을 의미한다. 예를 들면, 그림 1의 쌍이차모델의 경우는 항복변위, 항복전 강성, 항복후 강성이 매개변수로 취급될 수 있다. 일반적으로 매개변수 추정방법은 추정모델이 미리 지정되어 있기 때문에 적은 개수의 매개변수로도 비선형거동을 평균적으로 모사하게 된다. 단순한 이력모델을 사용하게 되면 매개변수의 개수도 적고 알고리즘은 간단하지만 이력모델이 추정의 유연성이 감소함으로써 실제 거동을 보수적으로 모사할 수 있다. 보다 정확한 거동의 예측을 위해서 정교하고 복잡한 이력모델을 사용하게 되는데 추정의 유연성이 향상되지만 매개변수의 개수가 늘어나고 알고리즘이 복잡해질 수 있다. 이러한 매개변수 추정방법이 가지는 복잡성을 탈피하고 보다 유연한 추정을 위해서 비매개변수 추정법을 사용하게 되는데, 이 때 추정되는 변수들은 매개변수 추정법과는 달리 물리적인 특성과는 무관하게 된다. 각각의 방법이 장점을 취하기 위해서 Masri는 위의 두가지 방법을 혼용한 혼합방법(hybrid method)을 제안한 바 있다 [7].

이 연구에서는 매개변수추정법의 범주에 속하는 할선강성모델을 이용하여 이력모델의 비선형거동을 추정하고자 한다. 그림 2와 같이 할선강성모델은 매 시간단계에서 재료의 할선강성을 추정함으로써 전체시간에서의 비선형거동을 추정하게 된다. 이력모델의 추정에 사용될 할선강성모델의 이론적 배경은 Duhem 이력연산자로부터 유도되는 힘과 변위와의 증분식에서 찾을 수 있다 [3-4].

$$\begin{aligned}
 dR &= k^+(u, R)du^+ - k^-(u, R)du^- \\
 du^+ &\equiv \max(0, du) \quad du^- \equiv \min(0, du) \\
 k^+(u, R), k^-(u, R) &\in H(u, R)
 \end{aligned} \tag{1}$$

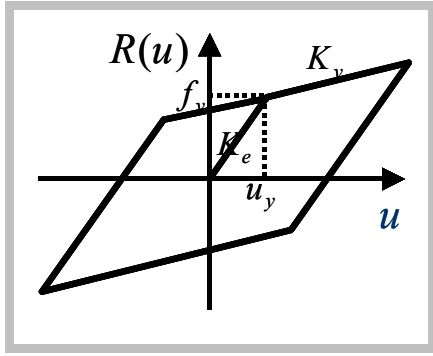


그림 1. 쌍일차 이력모델-초기  
항복변위, 항복전 강성,  
항복후 강성

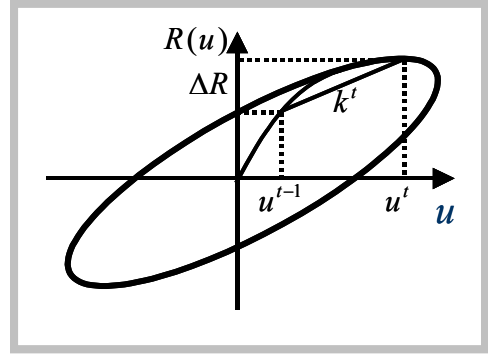


그림 2. 할선강성모델

여기서,  $R$ 과  $u$ 는 복원력과 변위를 나타내고  $H(u,R)$ 는 힘과 변위에 대해 유일한 값을 가지는 임의의 연속 함수들의 공간(holonomic function space)이다 [3-4]. 식 (1)을 살펴보면 함수  $k^+$ 과  $k^-$ 가 각각 양의 속도와 음의 속도 방향에 대한 접선강성(tangent stiffness)임을 알 수 있다. 식 (1)을 시간  $t$ 에 대해서 다시 나타내면 다음과 같다.

$$k^t \equiv \frac{dR^t}{du^t}, \quad k^t \in H(u,R) \quad (2)$$

식 (2)에서 정의되는 접선강성은 Duhem 이력연산자에서 정의된  $k^+$ 와  $k^-$ 가 지니는 정규조건을 따르게 되고, 시간  $t$ 에서 추정되는 할선강성에 의해 복원되는 이력곡선은 모양은 Duhem 이력연산자가 표현할 수 있는 이력곡선의 한도에 국한된다. 이 연구에서는 식(2)의 접선강성으로 표현할 수 있는 이력거동을 확장시킬 수 있는 새로운 정규조건을 제안한다. 기존의 Duhem 이력연산자가 변위와 복원력에 의해서 정의되는 접선강성의 정규조건을 사용하는 대신 시간에 의해서 정의되는 새로운 정규조건을 시간영역 SI에 적용한다. 이를 이용하면 할선강성이 속한 함수공간에 대한 정규조건이 이완되기 때문에 Duhem 이력연산자로 나타낼 수 없는 핀칭(pinching)현상을 포함한 이론적으로 가능한 모든 형태의 이력곡선을 추정할 수 있게 된다. 접선강성이 가질 수 있는 가장 일반적인 형태의 정규조건은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$k^t \in L_2 \equiv \{x \mid \int_0^\infty (x-x_0)^2 dt < \infty\} \quad (3)$$

여기서  $L_2$ 는  $x_0$ 을 중심으로 시간에 대해서 제곱적분가능한 함수공간을 나타내는 것으로 시간에 대해서 접선강성이 조각연속함수(piecewise continuous function)임을 나타낸다 [12].

실제 수치 연산 과정에서는 시간에 대한 이산화 과정이 포함되기 때문에 시간  $t-1$ 과  $t$  사이의 시간간격이 충분히 작다고 하면 식(2)의 접선강성을 다음과 같이 할선강성으로

근사할 수 있다.

$$k^t \approx \frac{R^t - R^{t-1}}{u^t - u^{t-1}}; k^t \in L_2 \quad (4)$$

식(4)의 할선강성은 접선강성이 가지는 식(3)의 정규조건을 그대로 따르게 되고 식(3)과 식(4)로부터 할선강성모델이 정의된다.

### 3. 시간영역 SI와 정규화 기법

매 시간단계에서의 할선강성을 수학적으로 유도된 동적해석 모델로부터 계산된 응답과 실제 측정된 응답의 차이를 최소화하는 다음의 최소자승오차법을 이용하여 구한다.

$$\text{Min}_{\mathbf{x}} \pi_E = \frac{1}{2} \sum_i \|\mathbf{U}_i(\mathbf{x}) - \bar{\mathbf{U}}_i\|_2^2 \quad \text{subject to } \Xi(\mathbf{x}) \leq 0 \quad (5)$$

여기서,  $\mathbf{U}$ ,  $\bar{\mathbf{U}}$ , 그리고,  $\mathbf{x}$ 는 각각 시간단계별로 동적해석모델로부터 계산된 응답, 실제 측정된 응답, 시스템변수인 할선강성을 행으로 나열한 벡터들이고,  $\Xi$ 은 시스템변수에 대한 구속조건이다.  $\|\cdot\|_2$ 는 유클리디안놈(Euclidean norm)을 나타내고,  $i$ 는 응답의 종류를 나타내는데 가속도, 속도, 변위 등 모든 종류의 응답이 사용될 수 있다.

최소자승법에 근거한 SI의 경우 측정치에 발생하는 모델링오차나 측정오차에 의해서 수치적인 불안정성을 일으키게 된다. 식 (4)에서 정의된 매시간 단계에서의 할선강성에 대한 정규조건을 최소자승법에 추가적으로 부과하는 정규화기법을 사용함으로써 수치적 불안정성을 막는 동시에 물리적으로 의미 있는 해를 구할 수 있다 [11]. 정규화 기법에 사용되는 정규화 함수는 식(3)을 시간에 대해 이산화 하여 구할 수 있다.

$$\pi_R = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0\|_2^2 \quad (6)$$

식(6)의 정규화 함수를 식(5)에 부과하기 위해서 티코노프 정규화기법을 사용하고 정규화된 오차함수의 최적화는 다음과 같이 나타낼 수 있다 [11].

$$\text{Min}_{\mathbf{x}} \pi_E = \frac{1}{2} \sum_i \|\mathbf{U}_i(\mathbf{x}) - \bar{\mathbf{U}}_i\|_2^2 + \frac{1}{2} \lambda \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0\|_2^2 \quad \text{subject to } \Xi(\mathbf{x}) \leq 0 \quad (7)$$

여기서  $\lambda(>0)$ 는 정규화 계수라 하고, (5)의 오차함수와 (6)의 정규화함수의 비중을 조정하는 역할을 한다. 정규화 계수를 너무 크게 설정하면 (3)의 정규조건이 과장되어 추정된 해가 실제와 많이 다를 수 있고 반대로 너무 작게 설정하면 (5)가 가지는 수치적인 불안정성이 발생하게 된다 [11]. 적절하게 결정된 정규화 계수는 측정오차로부터 과생되는 해의 진동성분을 제거하고 동시에 (3)에서 정의된 정규조건을 추정된 해에 부과함으로써,

수치적인 안정성을 가지는 동시에 물리적으로 의미 있는 해를 도출할 수 있다. 이를 위해서, 최적의 정규화 계수를 결정해야 하는데, 여기서는 기하평균법(geometric mean scheme; GMS)을 이용하여 결정한다 [11].

#### 4. 민감도

식(7)을 최적화하기 위해서 시스템변수에 대한 계산된 응답의 일차 민감도를 구해야 한다. 여기서는 시간에 대해 표현된 동적평형방정식의 증분식을 시스템변수에 대해 직접 미분함으로써 응답의 일차 민감도를 구할 수 있다. 설명의 편의를 위해 1자유도 동적평형 방정식의 증분식을 이용한다.

$$m\Delta a^j + c\Delta v^j + \Delta R^j = \Delta f^j \quad (8)$$

여기서,  $m, \Delta a^j, c, \Delta v^j, \Delta R^j, \Delta f^j$  는 각각 시간단계  $j$ 에서 질량, 가속도증분, 감쇠계수, 속도 증분, 이력모델의 복원력증분, 그리고 외력증분을 나타낸다. 여기서 이력모델의 복원력 증분은 식 (4)로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta R^j = x^j(u^j - u^{j-1}) = x^j \Delta u^j \quad (9)$$

$x^j$  와  $\Delta u^j$  는 각각 시간단계  $j$ 에서 추정하고자하는 할선접선강성과 변위증분이다. 식 (8)을 시간단계  $k$ 에서의 할선접선강성에 대해 미분하면 다음과 같이 표현된다.

$$m \frac{\partial \Delta a^j}{\partial x^k} + c \frac{\partial \Delta v^j}{\partial x^k} + x^j \frac{\partial \Delta u^j}{\partial x^k} + \Delta u^k = 0 \quad (10)$$

식 (10)에서 필요한 수치적분을 위해서 뉴마크 베타(Newmark- $\beta$ )방법[13]을 사용하면 할선접선강성에 대한 변위증분의 민감도를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial(\Delta u^j)}{\partial x^k} = \left( \frac{1}{\beta \Delta t^2} m + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} c + x^j \right)^{-1} \left( m \left( \frac{1}{\beta \Delta t} \frac{\partial v^{j-1}}{\partial x^k} + \frac{1}{2\beta} \frac{\partial a^{j-1}}{\partial x^k} \right) + c \left( \frac{\gamma}{\beta} \frac{\partial v^{j-1}}{\partial x^k} + \Delta t \left( \frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \frac{\partial a^{j-1}}{\partial x^k} \right) - \Delta u^k \right) \quad (11)$$

여기서  $\beta, \gamma$ 는 각각 뉴마크 베타방법에서 수치 시간적분을 위해 사용되는 상수이다.

식(11)을 이용해서 매시간 단계의 할선접선강성에 대한 매 시간단계의 변위, 속도, 가속도의 민감도를 차례로 구할 수 있다.

#### 5. 예제

두가지 수치예제를 통해서 제안된 방법의 타당성을 검증한다. 그림 3은 예제에 사용될 1자유도 강체-감쇠기-스프링 모델이다. 강체 질량은 100톤으로 설정하였고, 초기 스프링의 강성은 구조물의 고유주기가 1초가 되도록 설정하였다. 감쇠기의 감쇠계수는 구조물

임계감쇠계수의 5%가 되도록 설정하였다.

## 5.1. 손상탐지 문제

첫 번째 예제는 손상탐지 문제로 제안된 방법의 검증과 특성을 관찰하는 것을 목적으로 한다. 지반입력운동은 그림 4와 같이 진폭 1g값을 가지고 주기가 구조물의 고유주기와 같은 조화운동으로 가정하였다. 그림 5는 조화운동에 의해서 손상이 발생하기 전과 후의 구조물의 가속도를 나타낸 것으로 손상은 응답가속도가 순간 최대치에 도달하는 1초 후에 순간적으로 강성의 75%가 감소하는 것으로 가정하였다. 손상이 발생하는 1초 전후로 고유주기가 증가하여 지반운동과의 공진진동을 벗어나게 되므로 응답이 점차 감소함을 확인할 수 있다. 시간에 따른 급격한 강성의 변화로 인해서 구조물의 강성은 손상시점에 큰 비선형 거동을 가지게 된다.

시간에 따른 스프링 강성의 변화를 추정하기 위한 계측치는 가속도로 설정하고, 뉴마크 베타방법으로 시간증분 0.02초를 사용하여 수치적으로 모사하였다. 계측시간은 손상이 발생하는 시점으로부터 2초 후까지 총 3초이고, 151개의 가속도 데이터를 0.02초 간격으로 샘플링하였다. SI를 위한 시스템 변수로는 계측치 각각의 샘플링이 수행되는 시간간격에 해당하는 총 150개의 할선강성이 주어진다. 식 (6)의 시스템 변수를 위한 기저값으로는 손상이 발생하기 전의 강성값으로 가정한다. 식 (7)의 정규화 계수는 매 최적단계에서 기하평균법(GMS)으로 결정하였고, 이후 보여질 그래프들에서 SI에 의한 결과들은 편의상 GMS로 통칭한다.

그림 6은 제안된 방법으로 추정된 시간에 따른 스프링의 할선강성을 손상전 강성으로 기준화하여 나타냈다. 강성의 변화가 급격히 일어나는 시점을 비롯해서 실제 강성의 변화를 정확하게 추정함으로써 손상시점과 정도를 알 수 있다. 1.8초와 3초에 강성이 일시적으로 증가하는 현상을 관찰할 수 있는데 이는 이 시간에 해당하는 강성이 구조물의 응답에 거의 영향을 끼치지 못하므로 정규화효과에 의해 기저값으로 환원되는 현상이다. 그림 7에서는 SI가 종료된 후, 각시간에서 추정된 손상전 강성에 대해 기준화된 할선강성의 변화와 각시간에서의 할선강성값이 구조물의 응답에 영향을 미치는 민감도의 크기를 기준화해서 보여주고 있다. 문제가 되는 1.8초와 3초가 되는 지점에서 민감도의 크기가 거의 0에 가까운 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이는 1.8초와 3초가 되는 지점에서 어떤 임의의 값이 할선강성값이 되더라도 계측된 가속도 응답에는 전혀 영향을 끼치지 못하는 것을 의미하는 것으로 이 시점의 할선강성은 정확한 추정이 불가능함을 의미한다.

따라서 이 시점에 해당하는 할선강성의 값은 정규화효과에 의해서 기저값인 손상전의 강성값을 가지게 된다. 신뢰성 있는 SI를 위해서 추정 결과뿐만 아니라 계측데이터에 대한 민감도 분석도 함께 이루어져야 함을 확인할 수 있다. 또한 모든 시스템변수에 충분한 민감도를 가지는 계측데이터의 확보도 신뢰성 있는 SI를 위해 필수적이다. 그림 8에서는 SI가 종료된 후 각 시간에서의 계측데이터에 대한 할선강성의 민감도와 구조물의 속도와 상관을 보여주고 있다. 속도가 0이 되는 지점에서 민감도가 0으로 가까이 가는 것과 속도의 절대값이 증가함에 따라 민감도도 증가하고 있음을 알 수 있다. 그림 9는 추정된 가속도와 계측가속도를 0.04초 간격으로 표시한 것으로 실제 구조물이 가지는 응답과 정확하게 일치함을 확인할 수 있다.

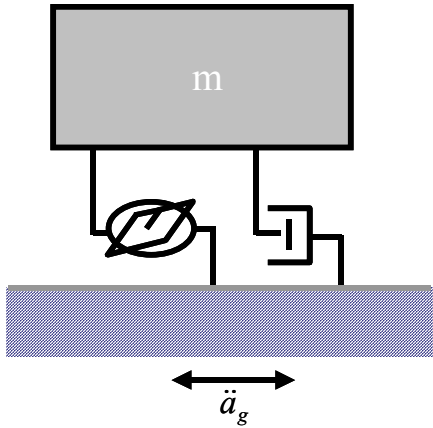


그림 3. 1자유도 강체-감쇠기-스프링 구조물

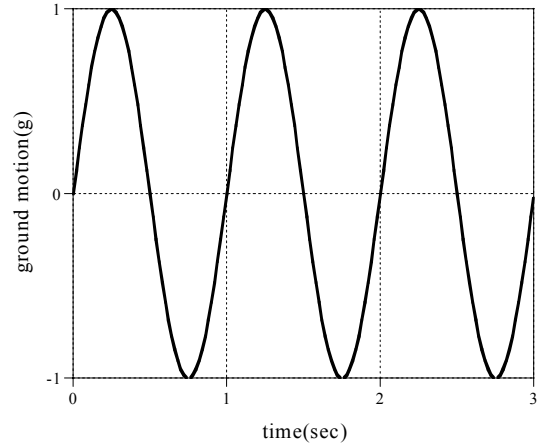


그림 4. 조화지반입력하중

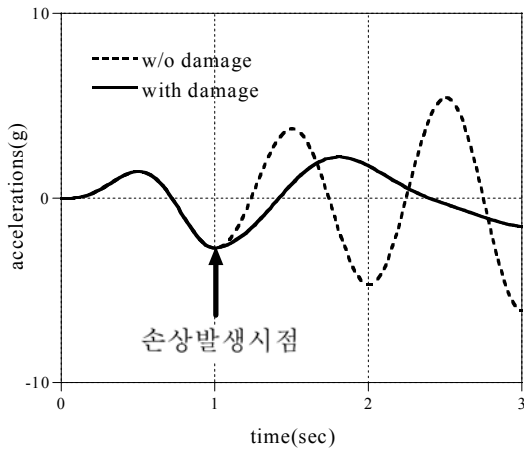


그림 5. 손상전과 1초 후 손상발생시 구조물 가속도의 비교

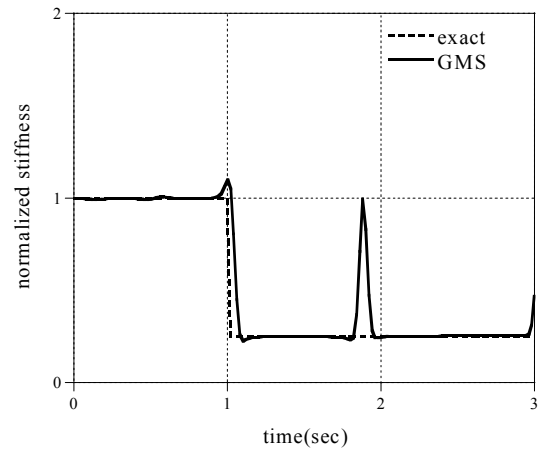


그림 6. SI에 의한 시간에 따른 할선강성의 추정결과

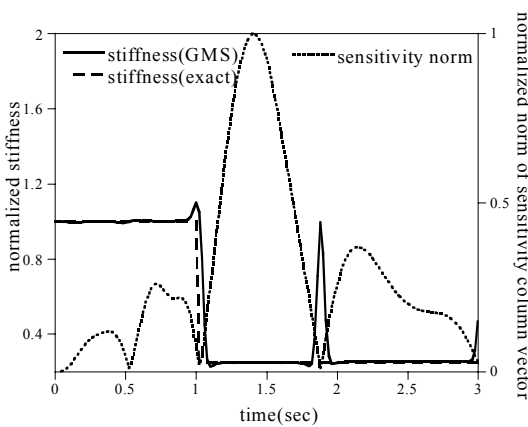


그림 7. SI로 추정된 할선강성과 계측응답에 대한 민감도의 변화

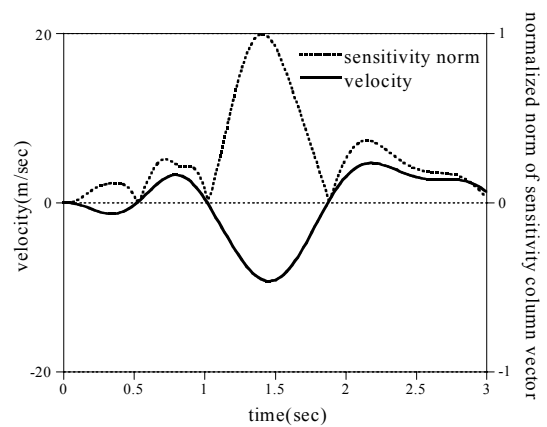


그림 8. 구조물의 속도응답과 SI로 추정된 할선강성의 민감도 비교

그림 10은 가속도데이터에 5% 무작위 비례오차를 주고 SI를 이용해서 각시간에 대한 할선강성을 추정한 결과를 보여주고 있다. 그림 6에 비해서 계측오차에 의한 해의 진동이



발생하고 있고, 특히 그림 7에서 민감도가 0에 가까워지는 시간영역들에 해당되는 활선강성들이 오차에 의해서 다른 영역보다 큰 진동을 일으키고 있는 것을 관찰할 수 있다. 그렇지만 진동이 실제 강성 부근을 기준으로 진동을 일으키기 때문에 평균적으로 손상시점과 정도를 정확하게 파악할 수 있다. 그림 11은 추정된 가속도를 나타낸 것으로 실제 구조물의 응답을 정확하게 추정하고 있음을 알 수 있다.

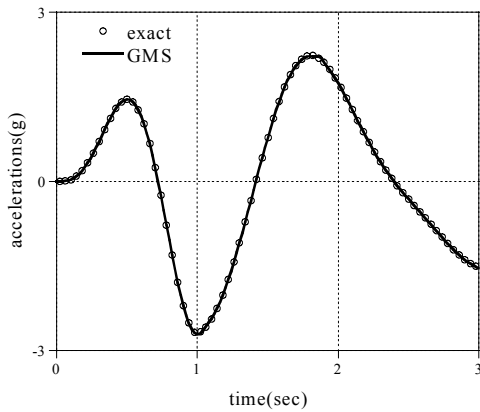


그림 9. SI로부터 추정된 가속도 응답과 계측응답의 비교

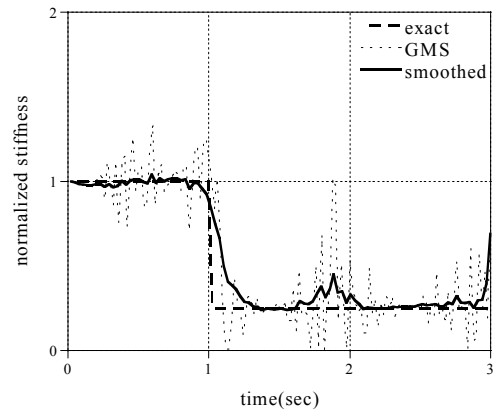


그림 10. 5% 비례계측오차가 있을 때의 활선강성의 추정결과

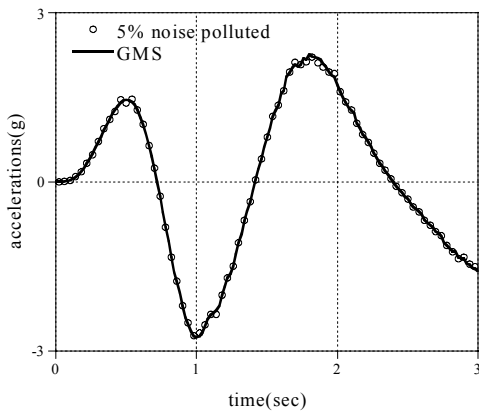


그림 11. SI로부터 추정된 가속도 응답과 계측응답의 비교 (5% 계측오차가 있는 경우)

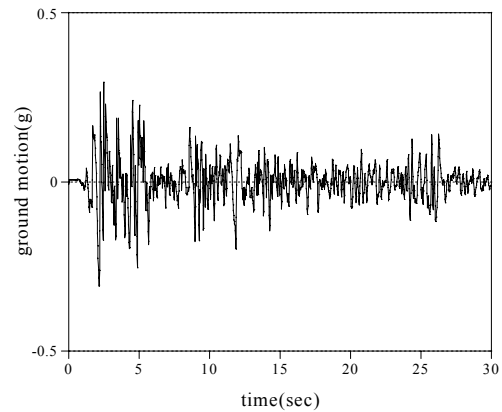


그림 12. 입력지반운동으로 사용된 El-Centro 지진

## 5.2. 지진시 면진장치의 비선형 이력거동 추정

두 번째 예제는 지진시 발생하는 면진장치의 비선형 이력거동을 추정하는 문제이다. 입력지반운동은 그림 12의 El-Centro 지진(최대지반가속도=0.308g)을 사용하였다. 위의 손상탐지 예제와 마찬가지로 가속도데이터를 계측치로 사용하고 뉴마크베타 방법을 사용해서 수치모사를 하였다. 면진장치는 초기탄성상태에서는 고유주기가 1초가 되고 항복후의 강성은 2초, 초기 항복변위는 1.25cm인 쌍일차이력모델(bilinear hysteretic model)로 모델링 하였다. 계측시간은 최대 지반가속도를 포함하는 초기 강진운동이 포함되는 8초까지이고, 401개의 가속도 데이터를 0.02초 간격으로 샘플링하였다. SI를 위한 시스템 변수

로는 계측치 각각의 샘플링이 수행되는 시간간격에 해당하는 총 400개의 할선강성이 주어진다. 식 (6)의 시스템 변수를 위한 기저값으로는 초기탄성상태의 강성값으로 가정한다.

그림 13은 제안된 방법으로 시간에 따른 추정된 할선강성을 면진장치의 초기탄성계수에 대해 기준화하여 나타냈다. 항복이 일어나는 시간간격이 매우 짧은 곳들을 다소간의 차이가 있지만 최대지반 가속도가 수반되는 2초에서 7초까지 면진장치에 에너지소산이 집중되는 항복구간에서는 강성의 변화가 매우 근사하게 추정하고 있음을 알 수 있다. 그림 14는 추정된 가속도와 계측 가속도를 0.04초 간격으로 보여주고 있는데 계측가속도 응답을 정확하게 추적하고 있음을 알 수 있다. 그림 15는 추정된 할선강성들을 이용해서 구한 면진장치의 변위-복원력 곡선인데, 실제 지진하중동안 겪게 되는 면진장치의 이력을 매우 정확하게 추적하고 있음을 알 수 있다. 변위-복원력 곡선을 이용하면 지진하중시 면진장치에 의해 소산되는 지진에너지와 최대 변위 등을 추정할 수 있다.

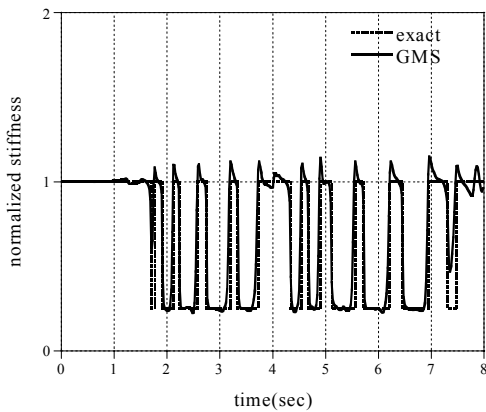


그림 13. SI에 의한 시간에 따른 면진장치의 할선강성의 추정결과

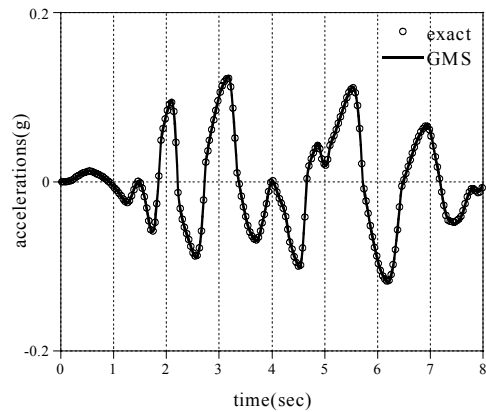


그림 14. SI로부터 추정된 가속도 응답과 계측응답의 비교

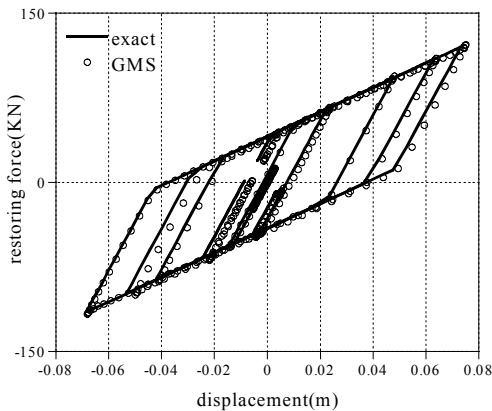


그림 15 SI에 의해 추정된 할선강성을 이용해 구한 면진장치의 힘-복원력 곡선

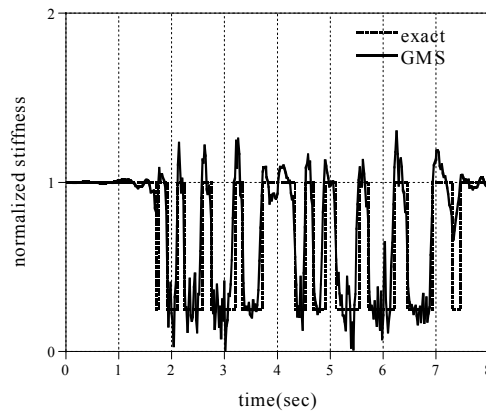


그림 16. 10% 비례계측오차가 있을 때의 할선강성의 추정결과

그림 16은 가속도계측데이터에 10% 무작위 비례오차를 주고 각 시간에 대해 SI를 통해 추정된 할선강성을 보여주고 있다. 그림 13에 비해서 추정된 강성이 오차에 의한 진동

현상을 보이고 있지만, 면진장치의 강성의 변화를 비교적 정확하게 추정할 수 있음을 알 수 있다. 그림 17은 SI를 통해 추정된 가속도 응답을 0.04초 간격으로 보여주고 있는데 실제 계측응답을 정확하게 추적함을 알 수 있다. 그림 18은 추정된 할선강성들을 이용해서 구한 면진장치의 변위-복원력 곡선인데, 큰 계측오차에도 불구하고 실제 면진장치의 이력을 매우 정확하게 복원하고 있음을 확인할 수 있다.

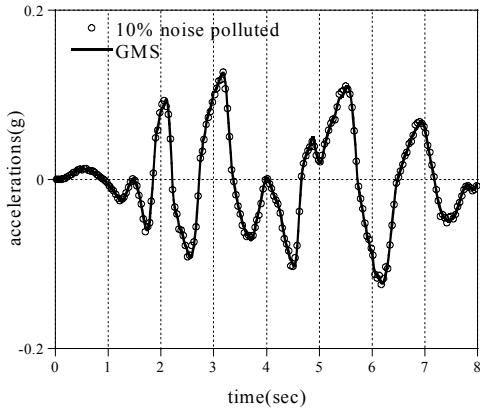


그림 17. SI로부터 추정된 가속도 응답과 계측응답의 비교 (10% 계측오차가 있는 경우)

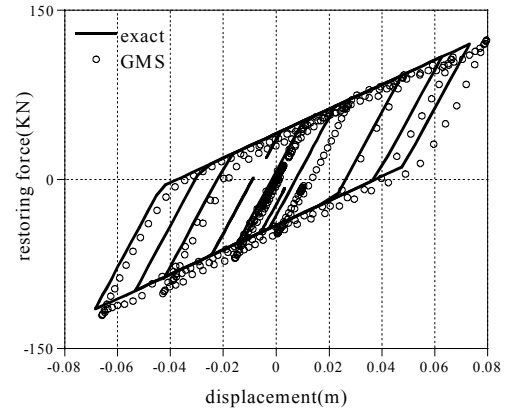


그림 18. SI에 의해 추정된 할선강성을 이용해 구한 면진장치의 힘-복원력 곡선 (10% 비례 계측오차가 있는 경우)

## 6. 결론

이 연구에서는 면진장치의 비선형 이력거동 및 강성변화를 할선강성모델과 시간영역 시스템확인기법을 이용하여 추정하는 방법을 제안하였다. Duhem 이력연산자에서 변위와 복원력에 대해서 정의되는 접선강성의 정규조건을 대신해서 시간에 대해 정의되는 새로운 정규조건을 제안하였다. 시간에 대한 정규조건으로 정의되는 접선강성을 각 시간단계에서의 할선강성으로 근사하여 할선강성모델을 유도하였다. 시간영역 SI에서는 계산된 응답과 계측된 응답의 차이를 최소화시키는 최소자승법을 사용하였고, SI가 가지는 수치적 불안정성을 막는 동시에 물리적으로 의미 있는 해를 구하기 위해 정규화 기법을 사용하였다. 기하평균법을 이용하여 최적정규화 계수를 결정하였다. 제안된 방법을 손상탐지문제와 면진장치의 이력을 추정하는 예제에 적용시켜보았다. 손상탐지문제에서는 손상이 발생한 시간과 정도를 정확하게 추정할 수 있었다. 지진시 면진장치의 이력거동추정문제에서는 계측오차에 큰 영향을 받지 않고 면진장치의 강성뿐만 아니라 변위-복원력 관계도 정확하게 추정할 수 있었다. 그러므로 제안된 방법을 이용하여 추후 면진장치의 손상평가 등을 효과적으로 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계 당국에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Ebisawa, K., Ando, K., and Shibata, K., "Progress of a research program on seismic base isolation of nuclear components," *Nuclear Engineering and Design*, **198**, 61-74, 2000
2. Skinner, R.I., Robinson, W.H., and McVerry, G.H., *An Introduction to Seismic Isolation*, John Wiley and Sons, Chichester, 1993
3. Macki, J.W., Nistri, P., and Zecca, P., "Mathematical models for hysteresis," *SIAM Review*, **35**, 94-123, 1993
4. Ni, Y.Q., Ko, J.M., and Wong, C.W., "Nonparametric identification of nonlinear hysteretic systems," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, **125**(2), 206-215, 1999
5. Ge, L. and Soong, T.T., "Damage identification through regularization method I: Theory," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, **124**(1), 103-108, 1998
6. Masri, S.F., Sassi, H., and Caughey, T.K., "Nonparametric identification of nearly arbitrary nonlinear systems," *Journal of Applied Mechanics, Transactions of the ASME*, **49**, 619-628, 1982
7. Masri, S.F., "A hybrid parametric/nonparametric approach for the identification of nonlinear systems," *Probabilistic Engineering Mechanics*, **9**, 47-57, 1994
8. Zhang, H., Foliente, G.C., Yang, Y., and Ma, F., "Parameter identification of inelastic structures under dynamic loads," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **31**, 1113-1130, 2002
9. Smyth, A.W., Masri, S.F., Chassiakos, A.G., and Caughey, T.K., "On-line parametric identification of MDOF nonlinear hysteretic systems," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, **125**(2), 133-142, 1999
10. Loh, C.H., Lin, C.Y., and Huang, C.C., "Time domain identification of frames under earthquake loadings," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, **126**(7), 693-703, 2000
11. Park, H.W., Shin, S., and Lee, H.S., "Determination of an optimal regularization factor in system identification with Tikhonov regularization for linear elastic continua," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **51**, 1211-1230, 2001
12. Oden, J.T., *Applied Functional Analysis : A First Course for Students of Mechanics and Engineering Science*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1979
13. Chopra, A.K., *Dynamics of Structures : Theory and Applications to Earthquake Engineering* (2nd ed), Prentice-Hall, Upper Saddle River NJ 07458, 2001