

SI기법에 의한 구조물 상태평가 Structural Condition Assessment by SI Schemes

신수봉* · 오성호**

Soobong Shin and Seong-Ho Oh

Key Words : Condition Assessment(상태평가), Model Definition(모델설정), Noise(오차), Sparseness(불완전측정)

ABSTRACT

The paper classified SI schemes for structural engineering applications based on the type of measured data. Only parametric SI algorithms with optimization processes were reviewed where optimal structural parameters are estimated by minimizing an output error between measured and computed responses. Some important issues in applying SI schemes were analyzed with the definition of an analytical model, noise and sparseness in measured data. As a sample study, the application of a nonlinear time-domain SI algorithm for a shear building was examined.

1. 서론

SI(system identification)기법은 다양한 공학문제에 적용되어 왔다. SI기법의 개념은 전기공학분야에 대한 적용에서 시작된 것으로 일반적으로 알려져 있으며, 기계, 항공, 토목 등의 구조공학분야에도 활발하게 적용되어 왔다.^[1-3] SI기법은 일종의 역해석으로 기지의 정보와 추정해야 할 미지의 값이 정해석에 반대되는 개념으로 정의된다. 즉, 입력 작용하중과 출력 거동계측치가 주어지고 이를 사용하여 시스템을 역으로 식별하는 문제라 정의할 수 있다. 그러나, 이러한 역해석 문제는 개념의 명료함과 달리 문제를 풀기 위한 수학의 복잡성으로 인하여 실제 적용에는 많은 문제점을 가지고 있다.^[4] 특히 토목 구조공학분야에 대한 적용은 현장기술자들이 신뢰할 수 있을 정도의 현실성을 아직 보여주지 못하고 있는 실정이다.

본 논문에서는 소개되어 있는 다양한 SI기법들을 정리하고 이들 SI 알고리즘을 개발하고 적용하는데 주요한 고려사항 및 문제점들을 분석하였다. 본 논문에서 다루는 SI기법은 변수형 SI기법에 한정하였으며, 변수는 최적화기법에 의해 추정하는 방법에 한하여 검토하였다. 또한 변수추정은 Fig. 1에서와 같이 출력오차 및 입력오차를 사용하는 두 가지 방법이 있지만 본 논문에서는 출력오차를 사용하는 SI 알고리즘에 한하여 정리를 하였다. SI 알고리즘의 주요 고려사항은 Fig. 1에서 표시하고 있는 바와 같이 입력, 출력 혹은 계측 데이터, 모델의 3대 항목별로 발생할 수 있는 문제점들을 정리하였다. 즉, 해석모델 설정 및 모델오차의 문제, 측정오차, 측정위치 선정 및 불완전 측정의 문제를 검토하였다.

SI기법에 의한 구조물의 상태 및 손상의 평가는 일반적으로 기준값에 대한 구조변수의 변화로 판단하고 있다.^[4] 본 논문에서는 최적화기법을 사용하는 변수형 SI기법의 하나로 개발된 비선형 시간영역 SI 알고리즘을 소개하고 가속도 시간이력을 사용하여 구조물의 손상진단을 한 예제를 수행하였다.

2. 변수형 SI 알고리즘의 분류

변수형(parametric) SI 알고리즘은 계측자료의 특성에 따라 정적 SI, 주파수영역 SI, 그리고 시간영역 SI기법으로 분류할 수 있다. 즉, 사용할 수 있는 계측자료가 정적변위, 고유진동수 및 진동형상, 혹은 가속도인가에 따라 SI기법을 분류할 수 있다.

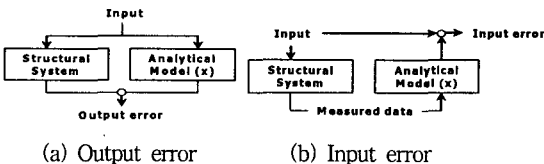


Fig. 1. Conceptual drawing of SI schemes

* 인하대학교 환경토목공학부 토목공학과
E-mail : sbshin@inha.ac.kr
Tel : (032) 860-7552, Fax : (032) 873-7550
** 미승 C&S 검사(주)

2.1 정적 SI 알고리즘

정적 SI기법은 정적하중에 의한 정적변위를 측정하여 사용하는 경우에 적용할 수 있는 기법이다. 토목공학의 경우에는 교량의 정적재하실험, 장대교량의 시공단계별 형상관리, 지반 역해석 문제 등에 적용할 수 있다.^[5]

정적 SI기법은 알고리즘의 개발 측면에서는 수학적 복잡성이 가장 적은 기법이며, 정적변위는 속도 및 가속도에 비하여 측정치에 대한 신뢰도가 높은 구조거동이므로 가능하다면 정적 SI기법을 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 다만, 현장에서 정적하중에 의한 정적변위를 계속하는 것이 현실적으로 거의 불가능하거나 고가의 장비를 동원하여야만 계속할 수 있는 경우가 많기 때문에 현재로서는 적용의 현실성이 낮은 기법이다. 그러나 현장 정적변위 측정이 용이하게 될 경우 적용성이 높은 기법이 될 수 있을 것으로 기대된다.

정적 SI 알고리즘에 의한 변수는 계측변위 u_{mj} 와 해석에 의한 변위 $u(x)$ 와의 오차를 최소화하는 최적화기법을 적용하여 추정할 수 있다.

$$e(x) = \sum [u_j(x) - u_{mj}] \quad j = 1, \dots, nlc \quad (1)$$

여기서 nlc 는 변수추정에 사용한 하중경우의 수이며, 정적 SI 기법의 경우 구조변수는 강성도변수가 된다.

2.2 주파수영역 SI 알고리즘

주파수영역 SI기법은 시간영역 동적거동 계측치를 주파수영역으로 변환한 자료를 사용하는 기법이다. 주파수영역 SI 기법의 적용을 위해서는 고유진동수와 진동형상 데이터 이외 동적하중에 대한 정보는 필요하지 않기 때문에 현장적용성이 높다. 즉 교량구조물에 적용할 경우 강제진동 혹은 자유진동 실험 대신 상시진동 데이터를 바로 사용할 수 있다.^[6] 그러나 현장계측을 통해서는 몇 개의 저차모드 데이터만을 일반적으로 얻게 되어 극히 제한된 동적거동 정보만을 사용하게 된다는 문제점이 있다. 특히 육안으로 확인하기 힘든 국부손상은 일반적으로 고차모드에 보다 크게 영향을 미치기 때문에 대부분의 에너지를 흡수하는 몇 개의 저차모드만 측정된 정보로 구조물의 상태를 올바르게 평가하는 것은 어려운 일이다.^[7]

주파수영역 SI 알고리즘에 사용하는 출력오차는 계측진동 변위 Φ_{mj} 와 해석에 의한 진동변위 $\Phi(x)$ 와의 차이로 정의할 수 있다.

$$e(x) = \sum [\Phi_j(x) - \Phi_{mj}] \quad j = 1, \dots, nmd \quad (2)$$

여기서 nmd 는 측정된 모드의 수이다. 감쇠를 무시하는 경우, 주파수영역 SI 알고리즘에서의 구조변수는 강성도와 질량이 될 수 있으나, 일반적으로 질량은 기지의 값으로 가정하여도 무방하므로 정적 SI기법의 경우와 같이 강성도만을 변수로 추정한다.

2.3 시간영역 SI 알고리즘

시간영역 SI기법은 측정된 가속도 시간이력을 바로 사용하는 것이다. 변수 추정을 위해 다루어야 할 데이터의 양은 주파수영역 SI기법에 비해 급격하게 증대되었으나, 주파수영역 데이터로 변환하면서 사라질 수도 있는 미세한 변화에 의한 정보들도 그대로 사용하게 된다는 장점이 있다. 또한 지진동에 의해 구조물이 진동하고 지진동중에 손상이 발생할 경우 이에 대한 평가는 시간영역 SI기법을 적용하여야만 가능할 것이다.

시간영역 SI기법을 적용하기 위해서는 주파수영역 SI기법과 달리 입력하중에 대한 정보가 필요하게 된다. 지진하중의 경우에는 구조물 기초에서의 지진동가속도 계측치를 사용할 수 있으나, 교량상에 차량하중이 움직이고 있는 동적거동의 경우에는 차량하중 크기에 대한 정보를 추가로 추정하여야 하는 문제가 있으므로 사용상의 제한이 있다.

시간영역 SI 알고리즘에 사용하는 출력오차는 계측가속도 \ddot{u}_{mj} 와 해석에 의한 가속도 $\ddot{u}(x)$ 와의 차이로 정의할 수 있다.

$$e(x) = \sum [\ddot{u}_j(x) - \ddot{u}_{mj}] \quad j = 1, \dots, ntp \quad (3)$$

여기서 ntp 는 변수추정을 위한 시간단계의 수이다.

시간영역 SI기법을 적용할 경우 추정하는 변수로는 질량을 기지의 값으로 가정할 수 있다면 강성도와 감쇠로 정의할 수 있다. 감쇠모델로는 Rayleigh damping 혹은 viscous damping 중 택일하여 사용할 수 있으나, 선행 연구결과에 의하면 감쇠의 추정은 강성도에 비해 시간에 따른 변화가 크기 때문에 용이하지는 않지만 강성도와 감쇠를 동시에 추정하여야만 제대로 구조물을 식별할 수 있다.^[8]

3. SI 알고리즘 적용시 고려사항

3.1 입력정보의 문제점

입력정보는 정적 SI기법의 경우에는 정적하중, 시간영역 SI기법의 경우에는 동적하중으로 정의할 수 있다. SI기법 적용에서 거동이 크게 발생하는 즉 변형에너지가 큰 부재의 상태식별이 보다 용이하다.^[4] 따라서 하중을 어느 위치에 작용하는지가 구조변수 추정의 정확성 및 신뢰성과 연관을 가지게 된다. 그러나 현재까지 이러한 방향에 대한 연구는 심도 깊게 진행되지 않았으며 일반적으로 하중에 대한 정보는 기지의 값으로 가정하고 있다.

3.2 출력정보의 문제점

출력정보는 거동계측 데이터로 SI기법에 따라 정적변위, 고유진동수 및 진동형상, 가속도 시간이력을 나타낸다. 이들 계측자료는 측정오차와 불완전측정의 문제를 가지고 있다. 측정오차는 계측 데이터에는 상존하는 것으로 random하다. 측정오차가 있는 계측자료를 사용하여 구조변수를 추정하는

SI기법의 적용에서는 통계적 분석을 필연적으로 고려하여야 한다.^[4] 따라서 이로 인한 연산과정의 계산량이 급격하게 증대하기 때문에 적절한 수준의 통계적 분석법을 고려하는 것이 필요하다.

불완전측정은 출력오차의 최소화에 의한 최적화기법을 적용하는 SI 알고리즘의 경우 수학적 복잡성을 증대시키는 문제를 야기한다. 기본적으로 구속적 비선형 최적화기법을 정의하여야 하며, gradient vector와 Hessian matrix를 정의하기 위한 오차의 변수에 대한 민감도 정식화가 복잡한 수식을 거쳐야 한다. 또한 SI기법에 의한 변수추정이 측정오차가 있는 데이터의 측정위치에 따라 변하기 때문에 최적의 측정위치를 정하는 추가의 문제를 고려하여야 한다.^[4]

3.3 해석모델 설정의 문제점

변수형 SI기법을 적용하기 위해서는 추정하고자 하는 구조변수를 포함하는 해석모델의 설정이 우선적으로 필요하다. SI기법에서 정의하는 해석모델에 대해서는 크게 두 가지의 관점이 존재한다. 일반적인 접근법으로는 측정된 거동계측치가 가능한 그대로 재현될 수 있도록 모델을 선택하는 것이다. 그러나 Sage^[9]는 대형구조물을 식별하기 위해서는 이러한 단지 계측한 데이터를 정확하게 재현하는 것에 만족하는 것보다 구조물을 올바르게 대변할 수 있는 것이 보다 필요하다고 정의하고 있다. 이러한 해석모델의 문제를 해결하기 위한 수학적 접근법으로 모델축소법^[10]과 변수그룹법^[4]이 소개되어 있다. 모델축소법은 계측데이터를 가능한 정확히 재현하려는 방법이며, 변수그룹법은 Sage^[9]가 정의한 방법에 속한다.

구조해석모델은 유일하게 정의될 수 있는 것이 아니다. 수많은 해가 존재할 수 있는 것이기 때문에 구조물의 성격에 따라 어떻게 정의하는 것이 올바른지에 대한 척도가 애매한 경우가 많다. 국내외적으로 모델오차라는 개념으로 이에 대한 연구를 수행하고 발표된 자료가 최근에 증가하고 있다. 그러나 아직도 국내외적으로 이 분야에 대한 연구가 현재 진행 중이며 추가의 연구를 통해 보다 적절한 해석모델 설정법의 개발이 필요하다.

4. SI기법 적용 예제

4.1 비선형 시간영역 SI 알고리즘

지진동에 의한 구조물의 식별에는 비선형 거동을 고려할 수 있는 SI 알고리즘의 개발이 필요하다. 본 논문에서는 가속도증분의 출력오차를 사용하였다.^[11]

$$e_j(x_j, y_j) = \Delta \tilde{u}_{y_j}(x_j, y_j) - \Delta \tilde{u}_{m_j} \quad (N_m \times 1) \quad (4)$$

여기서 N_m =측정자유도의 수이다. 출력오차를 최소화시키는 최적화문제는 다음과 같이 정의한다.

$$\text{Minimize } J_i(x_i, y_i) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{i+n_f} \|e_j(x_j, y_j)\|^2 \quad (5)$$

$$\text{subject to } C(x_i, y_i) \leq 0$$

4.2 전단빌딩에 대한 실내모형 실험

Fig. 2의 3층 전단건물을 모형으로 실내실험을 수행하여 가속도증분을 사용한 비선형 시간영역 SI기법을 검증하였다. 실험은 서울대학교 토목공학과에서 수행된 것으로 본 연구에서는 계측된 데이터를 활용하였다.^[8] 각 층의 슬래브는 질량 10.24kg의 45cm×45cm의 사각형 강재이며, 기둥과의 연결부를 확보하고 기둥의 휨 강성을 보장하기 위해 슬래브 네 귀퉁이에 보강재를 용접하였다. 면의 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. 실험모형의 기본 제원은 Table 1에 정리하였다.

실험은 손상 전과 손상 후로 나누어 수행하였다. 손상은 Fig. 2과 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 Fig. 3에 각각 정리하였다. 그림에서 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 전·후에 상관없이 거의 동일한 값으로 수렴하였다.

Table 1. Material and sectional properties

Floor	Mass(N · s ² /cm)	Thickness(cm)	Area(cm ²)	Length of CTC(cm)
1	0.1432	0.400	2.00	36.250
2	0.1376	0.300	1.50	40.000
3	0.1368	0.300	1.50	39.250

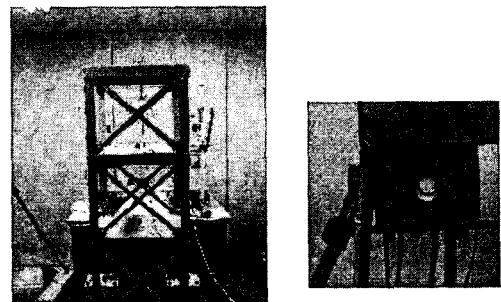


Fig. 2. Laboratory experiment specimen

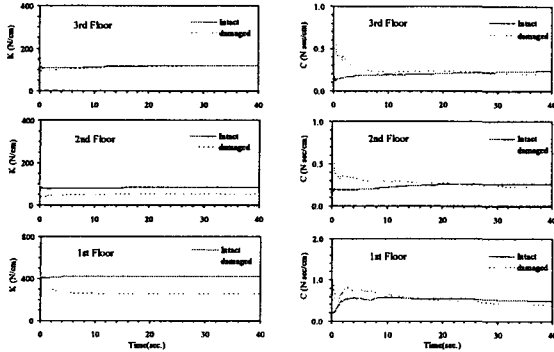


Fig. 3. Variation of estimated stiffness and damping in time

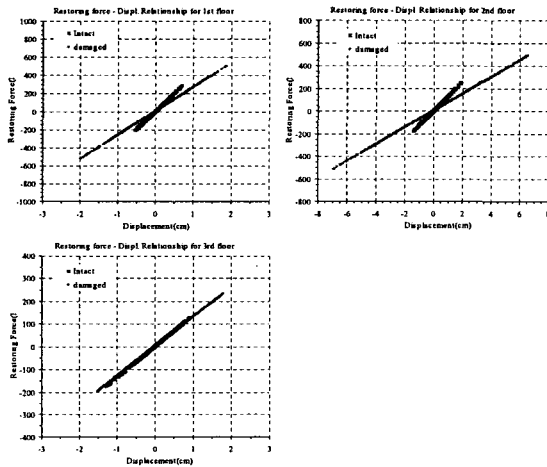


Fig. 4. Comparison of restoring forces

시간에 따라 추정된 구조변수와 Newmark- β 법에 의해 계산한 변위와의 관계를 층별로 재복원하여 Fig. 4에 그렸다. 그림에서 볼트 풀림 손상에 의해서 1층과 2층의 복원력의 기울기가 변화하였으나 구조물은 선형영역에서만 거동을 하였음을 확인할 수 있다. 또한 층별 진동변위가 도입한 손상에 의해 증가하였음을 확인할 수 있다.

5. 결론

SI기법을 구조물의 상태평가 및 손상진단에 적용하는데 고려해야 할 사항들과 문제점들을 검토하였다. 토목구조물의 규모와 복잡성으로 인한 SI기법 적용의 한계성을 검토하였으며 필요한 연구방향을 제시하였다.

실내모형실험 데이터를 사용한 비선형시간영역 SI기법의 정식화 및 예제를 수행하였다. 잘 정리된 데이터를 사용하는 실내실험의 예제를 통해 계측자료의 정확성이 높아지고

구조물의 복잡성이 심하지 않은 경우 SI기법의 구조물 상태평가 및 손상진단에 대한 적용의 가능성을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2004년도 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업 "사회기반 시설물의 성능평가 통합시스템 구축"의 지원에 의한 것으로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Bekey, G. A., 1970, "System identification - an introduction and a survey," Simulation, October, 151-166.
- (2) Beliveau, J.-G., 1987, "System identification of civil engineering structures", Canadian J. of Civil Eng., 7-18.
- (3) Flannely, W. G. and Berman, A., 1983, "The state of the art of system identification of aerospace structures", Modal Testing and Model Refinement, ed. by Chu, D.F.H., ASME, 121-131.
- (4) Shin, S., 1994, Damage detection and assessment of structural systems from measured response", Ph.D. thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, October.
- (5) Sanayei, M. and Onipede, O., 1991, "Damage assessment of structures using static test data", AIAA, J., 29(7), 1174-1179.
- (6) Salawu, O. S. and Williams, C., 1995, "Bridge assessment using forced-vibration testing", ASCE J. of Structural Eng., 121(2), 161-173.
- (7) Raghavendrachar, M. and Aktan, A. E., 1992, "Flexibility by multireference impact testing for bridge diagnostics", ASCE J. of Structural Eng., 118(8), 2186-2203.
- (8) Shin, S. and Lee, H. S., 2003, "Estimation of optimal damping and stiffness parameters from incompletely measured acceleration time history", the 2nd CJK-OSM2, Busan, Korea, November, 527-532.
- (9) Sage, A. P., 1972, "System Identification - history, methodology, future prospects", System Identification of Vibrating Structures, ed. by Pilkey and Cohen, ASME, N.Y.
- (10) Hoff, C., 1989, "The use of reduced finite element model for system identification", Earthquake Eng. and Structural Dynamics, 18, 875-887.
- (11) 오성호, 2004, 측정가속도 응답을 사용한 구조물의 비선형 시간영역 System Identification, 박사학위논문, 동아대학교.