

지진 하중에 의해 발생된 가속도를 이용한 시간창 기법에 의한 구조물의 손상탐지

Structural Damage Detection Using Time Windowing Technique from Measured Acceleration during Earthquake

박승근* · 이해성**

Park, Seung Keun · Lee, Hae Sung

1. 서론

지진 발생 후에 신속하게 구조물의 안전성을 평가하는 것은 사회기반시설의 기능성이나 사용성을 평가하는데 있어서 매우 중요하다. 지진이 발생한 동안에 측정된 가속도를 이용하여 지진에 의해 야기된 구조물의 손상을 탐지할 수 있다면 사회기반시설의 빠른 복구에 큰 도움을 줄 수 있을 것이다. 구조물의 동적 응답을 이용하는 SI 기법으로는 모드 형상과 고유 진동수를 이용하는 모드 접근법이 널리 사용되어 왔다. 그러나, 실제 측정할 수 있는 모드 형상과 고유 진동수는 저차 모드에 국한되어 있고, 일반적으로 저차 모드는 국부적인 손상에 민감하지 않기 때문에 모드 접근법에 의하여는 손상을 탐지하기가 어렵다. 이러한 단점을 해결하고 보다 정확히 손상을 탐지하기 위하여 측정 가속도를 이용한 SI 기법을 제안한다. 제안된 기법에서는 측정 가속도와 수학적 모델에 의한 계산 가속도의 최소 차승오차에 대한 시간 적분을 오차함수로 사용한다. 구조물 감쇄로서 Rayleigh Damping 모델을 사용하며, SI 문제의 불안정성을 극복하기 위하여 정규화 기법을 사용한다. L_1 -truncated singular value decomposition (TSVD)이 L_1 -Regularization 함수를 포함한 오차함수를 최적화하기 위하여 적용된다. 그리고 시간에 따른 시스템 변수의 변화를 추정하기 위하여 Time Windowing Technique이 소개가 된다. 그리고 예제를 통하여 제안된 방법의 유효성과 정확성을 검증한다.

2. 시간 영역에서 변수 추정 기법

구조물의 이산화된 운동 방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\mathbf{M}\mathbf{a} + \mathbf{C}(\mathbf{x}_c)\mathbf{v} + \mathbf{K}(\mathbf{x}_s)\mathbf{u} = -\mathbf{M}\mathbf{a}_g \quad (1)$$

여기서, \mathbf{x}_c 와 \mathbf{x}_s 는 각각 damping parameter와 stiffness parameter를 나타낸다. 식 (1) 에서 주어진 운동 방정식을 시간에 대하여 적분하기 위하여 Newmark- β 방법을 사용한다. 구조물의 강성도 및 감쇄 특성이

* 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정 · 공학사 · 02-880-8740 (E-mail:skpark97@snu.ac.kr)

** 정희원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수 · 공학박사 · 02-880-8388 (E-mail:chslee@plaza.snu.ac.kr) - 발표자

SI 기법에서의 미지수가 된다. 시스템 변수가 시간에 따라서 변하지 않는 경우에는 다음과 같은 최소화 문제를 통하여 시스템 변수를 추정한다.

$$\text{Min}_{\mathbf{x}} \Pi_E(t) = \frac{1}{2} \int_0^t \|\tilde{\mathbf{a}}(\mathbf{x}) - \bar{\mathbf{a}}\|_2^2 dt \quad \text{subject to } \mathbf{R}(\mathbf{x}) \leq 0 \quad (2)$$

여기서 $\tilde{\mathbf{a}}$, $\bar{\mathbf{a}}$, \mathbf{x} 그리고 \mathbf{R} 는 각각 계산 가속도, 측정가속도 시스템 변수 그리고 구조 변수에 대한 구속 조건이며, $\|\cdot\|_2$ 는 vector 의 2-norm 을 나타낸다.

시간에 따라서 시스템 변수가 변하는 경우에 시스템 변수의 추정을 위하여 time windowing technique 를 제안한다. 그림 1 은 time window 의 개념을 보여준다. Time Windowing Technique 에서는 time window 라고 불리는 일정한 time interval 안에서 시스템 확인기법이 순차적으로 진행된다.

$$\text{Min}_{\mathbf{x}} \Pi_E(t) = \frac{1}{2} \int_t^{t+d_w} \|\tilde{\mathbf{a}}(\mathbf{x}(t)) - \bar{\mathbf{a}}\|_2^2 dt \quad \text{subject to } \mathbf{R}(\mathbf{x}(t)) \leq 0 \quad (3)$$

여기서, t 와 d_w 는 각각 주어진 time window의 초기 시간과 window의 크기를 나타낸다. Time window안에서의 시스템 변수값은 일정하다고 가정한다. 그리고 시간 t 일 때 추정한 시스템 변수를 그 시간의 시스템 변수라고 가정한다. 시간에 따라서 time window가 앞으로 진행을 하고 그때마다 시스템 변수를 추정함으로써 시스템 변수의 시간에 따른 변화를 추정할 수 있다.

3. L_1 -Regularization Scheme

최소화 문제로 정의되는 변수추정기법은 해의 비 유일성, 비 존재성, 불연속성 등의 수치적 불안정성을 갖고 있는 역 해석 문제이다. 이 논문에서는 이런 수치적 불안정성을 극복하기 위해 다음 식과 같이 시스템 변수들의 시간에 따른 변화율을 나타내는 정규화 함수를 이용하여 수치적 불안정성을 극복하였다.

$$\Pi_R(t) = \frac{1}{2} \int_t^{t+d_w} \left\| \frac{d\mathbf{x}}{dt} \right\|_1 dt \quad (4)$$

이 방법은 미분 불가능한 함수를 포함하고 있으므로 기존의 Tikhnov 방법으로는 푸는데 어려움이 있다. 이러한 어려움을 피하기 위하여 이 논문에서는 TSVD 방법을 이용한다. 과정은 다음과 같이 정의된다.

$$\text{Min}_{\mathbf{x}} \Pi_R(t) = \frac{1}{2} \int_t^{t+d_w} \left\| \frac{d\mathbf{x}}{dt} \right\|_1 dt \quad \text{subject to } \mathbf{R}(\mathbf{x}) \leq 0 \quad \text{and} \quad \text{Min}_{\mathbf{x}} \Pi_E(t) = \frac{1}{2} \int_t^{t+d_w} \|\tilde{\mathbf{a}}(\mathbf{x}) - \bar{\mathbf{a}}\|_2^2 dt \quad (5)$$

위 식을 discretize 하여 표현하면 다음과 같다.

$$\text{Min}_{\mathbf{x}_{nc}} \|\mathbf{x}_{nc} - \mathbf{x}_{nc-1}\|_1 \text{ subject to } \mathbf{R}(\mathbf{x}_{nc}) \leq 0 \text{ and } \text{Min}_{\mathbf{x}_{nc}} \frac{1}{2} \sum_{k=nc}^{nc+ntw} \|\tilde{\mathbf{a}}_k(\mathbf{x}_{nc}) - \bar{\mathbf{a}}_k\|^2 \Delta t \quad (6)$$

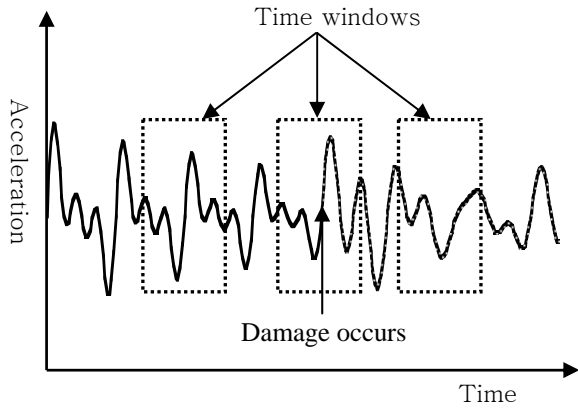


그림. 1. Time window concept

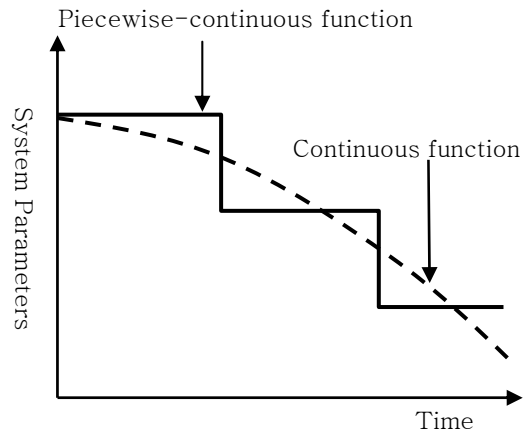


그림. 2 Continuous and piecewise-continuous functions

또한 기존의 L_2 -Regularization function은 continuous한 함수까지 표현하는 것이 가능하지만 L_1 -Regularization function은 piecewise continuous한 함수까지 표현하는 것이 가능하기 때문에 보다 넓은 solution space를 지니고 있다. 그리고 Time Windowing Technique은 시간에 따른 system parameter의 급격한 변화를 표현해야 하므로 정규화 함수는 L_1 -Regularization function을 사용해야 한다.

4. 감쇠 모델

실제 구조물에서 감쇠 특성을 정확하게 파악하는 것은 거의 불가능하다. 하지만 실제 감쇠 특성은 구조물의 동적 응답에 매우 큰 영향을 끼치므로 시스템 변수 추정 법에 있어서 감쇠 특성을 기저의 값으로 보아서는 안되며 강성 특성뿐만 아니라 감쇠 특성까지도 추정해야 한다. 이 연구에서는 가장 일반적인 모드감쇠와 Rayleigh 감쇠를 이용하여 강성 특성뿐만 아니라 감쇠 특성까지도 추정한다.

5. 예 제

제안된 방법의 타당성을 검증하기 위하여 two-span continuous truss를 가지고 numerical simulation study를 수행하였다. 재료의 성질은 다음과 같다. (Young's modulus = 210 GPa, Specific mass = 7850Kg/m³). 상부, 하부, 수직, 사재의 단면은 각각 250 cm², 300 cm², 200 cm², 220 cm²이다. 다음 구조물의 natural frequency는 6.6 Hz 부터 114.7 Hz까지의 범위를 갖는다. Damage에 따른 stiffness의 감소는 7, 16 번 부재에 각각 40%, 50%씩 일어났다고 simulation하였다. 손상은 0.5 초에 갑자기 일어난다고 가정한다. 손상을 입은 부재는 그림에서 점선으로 표시되었다. 가속도는 지반운동에 의해 측정된 가속도를 이용한다. 지반운동은 진동수가 0.75Hz인 sine운동이다. 측정 점은 truss의 아래 부분의 12 개의 node에서 측정하였고 0 초부터 2.0 초까지의 수평, 수직방향의 가속도를 사용하였다. 측정오차는 3%이다. Time window의 크기는

0.2 초이다. 계산가속도를 얻는데 사용된 damping ratio는 그림 7에 나와있다.

그림 4는 두 개의 손상을 입은 부재와 한 개의 손상을 입지 않은 부재의 축강성의 변화를 나타낸다. 그

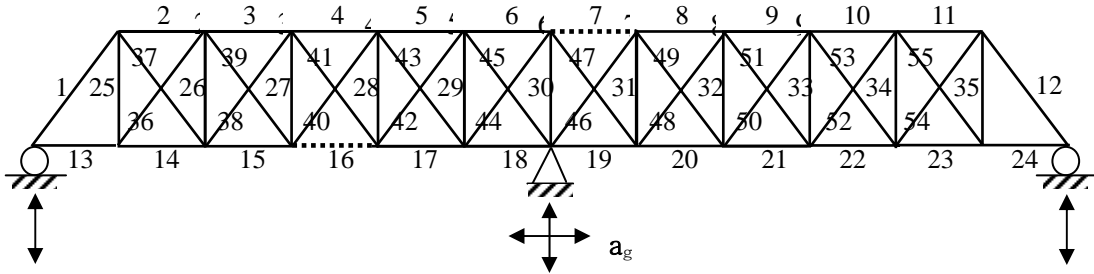


그림 3 : 2-span continuous truss

림으로부터, 손상은 0.5 초에 발생했다는 것을 알 수 있고, 손상을 입은 부재인 부재 7 과 부재 16 은 시간이 흐를수록 실제의 값에 수렴해가고 있다. 그림 5은 마지막 시간 2.0 초에서의 모든 부재의 축강성을 나타낸다. 그림 4 과 그림 5의 수직축은 각 부재의 초기값에 관해서 normalize 된 축강성을 나타낸다. 추정된 축강성은 52 개의 손상을 입지 않은 부재중에서 49 개는 10%의 범위 내에서 진동하고 있고, 3 개의 부재는 10%의 범위 밖에서 진동하고 있다. 그러나 손상을 입은 부재의 축강성이 손상을 입지 않은 부재에 비해서 현저히 작기 때문에 구분을 할 수가 있다. 그림 6은 마지막 시간에서 추정된 시스템 변수의 의해 계산된 왼쪽 경간에서의 가속도와 측정된 가속도를 비교한 그래프이다. Time window 가 손상을 입은 상태의 가속도와 손상을 입지 않은 상태의 가속도를 포함하는 경우를 제외하고는, 계산된 가속도가 측정된 가속도와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 그림 7은 손상이 발생하기 전인 0.3 초와 손상이 발생한 후인 2.0 초일 때 추정된 damping ratio 를 나타낸다. 추정된 damping ratio 가 진동수 60Hz 까지 잘 근사화한다. 진동수가 60Hz 보다 작은 저차모드가 구조물의 거동에 있어서 지배적인 모드이기 때문에 구조물의 동적인 거동을 표현하는데 있어서는 충분하다고 할 수 있다.

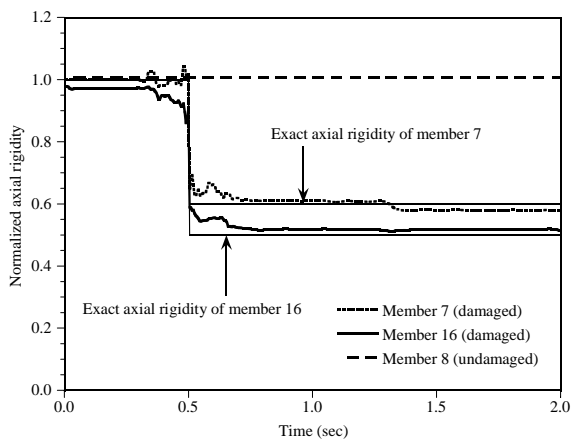


그림 4. 두개의 손상을 입은 부재와 손상을 입지 않은 부재의 축강성의 변화

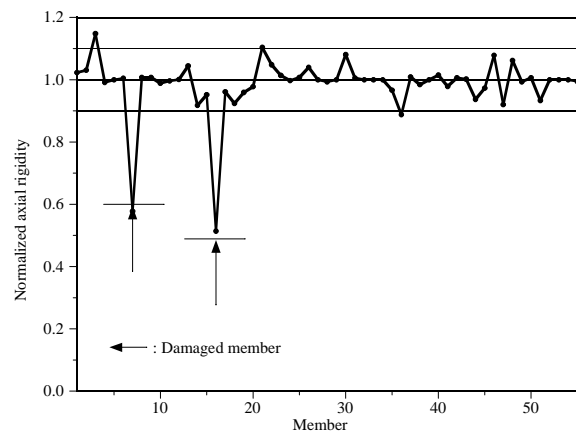


그림 5. 마지막 시간에 추정된 각 부재의 축강성

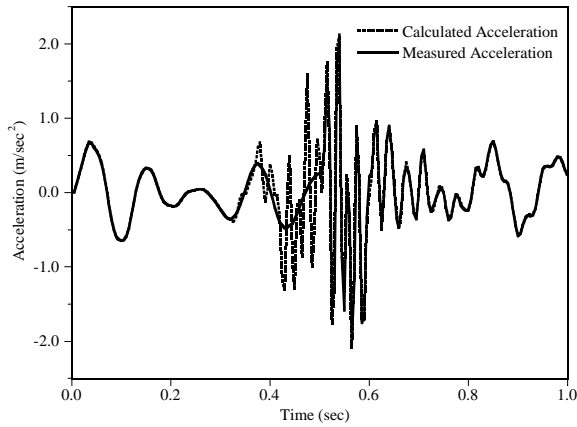


그림 6. 왼쪽 경간 중앙에서의 계산된 가속도와 측정된 가속도

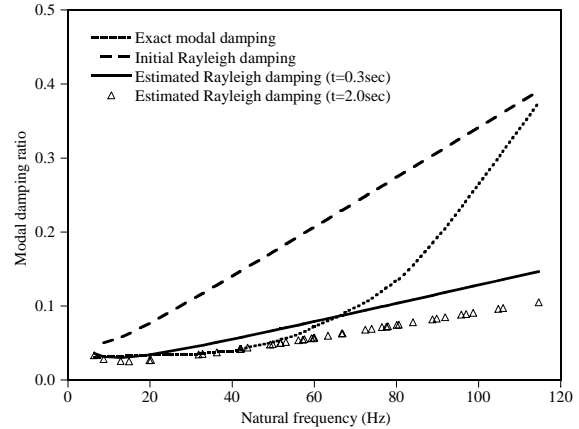


그림 7. 손상 전후의 추정된 damping ratio

6. 결론

시간영역에서 System Identification을 위한 L_1 -Regularization function과 Time Windowing Technique을 제안하였다. 구조물의 stiffness 뿐만이 아니라 damping parameter 까지도 system parameter에 포함이 되어 SI를 수행하였다. 측정 가속도와 계산 가속도와의 차이의 least square error를 error function으로 적용하였다. 역 해석 문제의 불 안정성을 해소하기 위한 Regularization function으로 L_1 -Regularization function을 사용하였다. 시간에 따른 system parameter의 급격한 변화를 표현하기 위하여 Time Windowing Technique을 적용하였다. 또한 Time Windowing Technique에서는 급격한 변화를 표현하기 위해서 사용되는 정규화 함수는 L_1 -Regularization function을 사용해야 한다. 예제를 통하여 제안한 방법이 시간에 따른 system parameter의 변화를 적절히 표현하고 있으며, 추정된 system parameter에 의해 계산된 가속도 또한 실제의 가속도를 잘 따라가는 것을 알 수 있었다. 그리고 추정된 damping parameter역시 실제의 damping parameter를 잘 근사화하는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Yeo, I. H., Shin, S. B., Lee, H. S. and Chang, S. P., Statistical damage assessment of framed structures from static responses, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 126, No. 4, pp. 414-421, 2000
2. Shi, Z.Y., Law, S.S. and Zhang, L.M., Damage localization by directly using incomplete mode shapes, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 126, No. 6, pp. 656-660, 2000
3. Vestouni, F. and Capecchi, D., Damage detection in beam structures based on frequency

- measurements, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 126, No. 7, pp. 761-768, 2000
4. Kang, J.S., Yeo, I.H. and Lee, H.S., Structural damage detection algorithm from measured acceleration, *Proceeding of KEERC-MAE Joint Seminar on Risk Mitigation for Regions of Moderate Seismicity*, pp. 79-86, 2001
 5. Hansen, P.C., *Rank-deficient and discrete ill-posed problems : Numerical aspects of linear inversion*, SIAM, Philadelphia, 1998
 6. Hansen, P. C., and Mosegaard, K. Piecewise polynomial solutions without a priori break points, *Numerical Linear Algebra with Applications*, Vol. 3, 513-524, 1996
 7. Chopra, A.K., *Dynamics of Structures (theory and applications to earthquake engineering*, Prentice Hall, 1995.
 8. 박 현우, “구조물의 손상진단을 위한 SI에서의 정규화 기법”, *공학박사학위논문*, 서울대학교, 2002