

가속도 및 변형을 계측데이터를 이용한 철골 단순보 손상평가

Damage Evaluation of a Simply Supported Steel Beam Using Measured Acceleration and Strain Data

박수용* · 박효선** · 이홍민*** · 최상현****

Park, Soo-Yong · Park, Hyo-Seon · Lee, Hong-Min · Choi, Sang-Hyun

ABSTRACT

In this paper, the applicability of strain data to a strain-energy-based damage evaluation methodology in detecting damage in a beam-like structure is demonstrated. For the purpose of this study, one of the premier damage evaluation methodology based on modal amplitudes, the damage index method, is expanded to accommodate strain data, and the numerical and experimental verifications are conducted using numerical and experimental data. To compare the relative performance of damage detection, the damage evaluation using acceleration data is also performed for the same damage scenarios. The experimental strain and acceleration data are extracted from laboratory static and dynamic tests. The numerical and experimental studies show that the strain data as well as acceleration data can be utilized in detecting damage.

Keywords: damage detection, damage index method, strain energy, strain, acceleration.

1. 서론

최근까지 장대교량, 고층건물, 해양구조물, 원자력구조물 등 기간 구조물의 사용성을 과학적으로 유지하고 관리하기 위한 많은 노력이 기울여져 왔다. 구조물의 건전성을 효과적으로 관리하기 위해서는 물리적 손상 등으로 인한 구조물의 성능 저하를 조기에 발견하는 것이 중요하며, 이를 위해 구조물의 응답 특성 변화를 이용하여 구조물의 국부적인 변화를 탐지하는 방법에 대한 많은 연구가 발표된 바 있다 (서정문 등, 2001; Richardson, 1980; Sohn et al., 2003; Zou et al., 2000). 현재까지 발표된 방법 들은 주로 구조물의 고유진동수, 고유벡터 등의 동적 특성을 이용해왔으나, 소수의 연구자들에 의해 변형을 및 정적변위 등의 적용성이 시험된 바 있다 (Chance et al., 1994; Nwosu et al., 1995; Bakhtiari-Nejad et al., 2005). 최근 Law et al. (2005)은 가속도와 변형을 측정을 통해 손상에 대한 두 응답의 민감도를 비교한 바 있다.

이 연구에서는 보와 같은 구조물의 손상평가에 변형을 적용했을 경우의 성능을 고유벡터를 이용한 결과

* 정회원 · 한국해양대학교 해양공간건축학부 조교수 E-mail: sypark@bada.hhu.ac.kr

** 정회원 · 연세대학교 건축도시공학부 부교수 E-mail: hspark@yonsei.ac.kr

*** 정회원 · 연세대학교 건축도시공학부 박사과정 E-mail: idislee@yonsei.ac.kr

**** 정회원 · 한국원자력안전기술원 선임연구원 E-mail: schoi@kins.re.kr

와의 비교를 통해 평가하였다. 이를 위하여 고유벡터에 기반한 손상탐지이론을 변형률을 적용할 수 있도록 확장하고, 손상 전과 후에 측정된 가속도와 변형률 데이터를 이용하여 손상탐지성능을 비교하였다. 연구에 적용한 손상탐지이론은 모달 변형에너지를 이용한 손상지수법 (Choi et al., 2005)이며, 이 방법은 타 연구자에 의해 수행된 성능비교 연구에서 가장 뛰어난 손상탐지 성능을 나타낸 바 있다 (Farrar and Jauregui, 1996; Alvandi and Cremona, 2006). 가속도와 변형률 데이터를 이용한 성능 비교는 수치해석을 통해 구한 데이터와 실험을 통해 구한 측정 값을 이용하여 수행하였다.

2. 손상탐지 이론

2.1. 손상지수법

손상지수법(damage index method)은 구조물의 질량, 감쇠 및 강성 변화와 모달응답 변화 사이의 민감도 관계를 기반으로 손상에 의한 변형에너지 분포의 변화를 이용하여 손상을 평가하는 방법이다 (Choi et al., 2005). 구조물을 구성하는 임의의 요소 j 의 손상 전·후 강성비를 나타내는 손상지수(β_j)는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\beta_j = \frac{k_j}{k_j^*} \approx \frac{\sum_{i=1}^{NM} [\Phi_i^{*T} C_j \Phi_i^* + \Phi_i^{*T} K \Phi_i^*] \Phi_i^T K \Phi_i}{\sum_{i=1}^{NM} [\Phi_i^T C_j \Phi_i + \Phi_i^T K \Phi_i] \Phi_i^{*T} K \Phi_i^*} \quad (1)$$

여기서 k_j 는 요소 j 의 강성을 나타내는 매개변수; NM 은 적용된 고유벡터의 수; Φ_i 는 i 번째 고유벡터; K 는 구조물의 전체강성행렬; *는 손상후의 매개변수; 그리고 C_j 는 다음 관계식으로부터 구할 수 있다.

$$K_j = k_j C_j \quad (2)$$

여기서 K_j 는 전체강성행렬 중 요소 j 의 강성만으로 구성된 행렬이다. 손상부위를 결정하는 손상탐지는 패턴인식(pattern recognition)을 이용하여 효과적으로 구할 수 있으며, decision 알고리즘을 이용해 손상지수를 유한 개소의 집단으로 분류하여 수행한다. 즉, decision 알고리즘의 기능은 D_n 개의 유한한 집단으로 파티션을 나누는 것으로 본 연구에서는 $n = 2$ 로 다음과 같은 두 가지 경우로 나누었다. 첫째는 구조물의 임의 요소 j 에 손상이 있는 경우이고, 두 번째는 구조물의 임의 요소 j 에 손상이 없는 경우이다. 식(1)의 손상지수를 계산한 후 손상위치를 결정하는 기준은 통계적 이론으로 구할 수 있다. 각 부재로부터 구한 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_N$ 값을 확률변수(random variable)로 고려하여 표준화된 손상지수를 구하면 식 (3)과 같다.

$$Z_j = \frac{\beta_j - \mu_\beta}{\sigma_\beta} \quad (3)$$

여기서, μ_β 와 σ_β 는 각각 손상지수 β_j 의 평균과 표준편차를 나타낸다. 손상부위를 결정하는 마지

막 단계는 앞서 언급한 그룹분류이다. 그룹분류를 하기 위해 여러 가지의 테크닉을 이용할 수 있으나 비교적 이용이 쉬운 Neyman-Pearson 기준(Gibson and Melsa, 1975)을 택하여 사용하였으며 다음과 같은 두 가지 경우의 가설을 설정하였다: (1) 가설 H_0 - 구조물 내 요소 j 에 손상이 없음; (2) 가설 H_1 - 구조물 내 요소 j 에 손상이 있음. 식 (3)에서 구한 Z_j 값으로부터 그 부재에 손상의 유무를 판별할 수 있으며 기준 값에 따라 가설검정의 신뢰도(significance level)도 달라진다. 예를 들어 기준 값을 3이라고 설정하면 가설테스트는 99%의 신뢰도를 가지며, 이때 $Z_j \geq 3$ 이면 가설 H_1 을 택하여 특정 요소 j 에 손상이 있음을 결정하고, $Z_j < 3$ 이면 가설 H_0 을 택하여 손상이 없음을 결정한다.

2.2. 변형률을 이용한 손상지수

2.1절에 소개된 손상지수는 고유벡터를 이용하고 있으므로 변형률 데이터를 직접 적용할 수 없다. 본 연구에서는 식(1)에 제시된 손상지수 표현식에서 유도된 보구조물(beam-like structure)에 대한 손상지수식을 변형률을 적용할 수 있도록 다음과 같이 재구성하였다.

식(1)에 제시된 손상지수 표현식은 모달응답 외에 정적 혹은 동적변위를 포함한 일반적인 변위함수를 적용할 수 있으며(Choi, 1999), 보구조물에 대하여 다음과 같이 재유도 될 수 있다.

$$\beta_j \approx \frac{\sum_{i=1}^{NM} [\int_{\Delta L} (w_i^*)'^2 dx + \int_L (w_i^*)'^2 dx] \int_L (w_i)^2 dx}{\sum_{i=1}^{NM} [\int_{\Delta L} (w_i)^2 dx + \int_L (w_i)^2 dx] \int_L (w_i^*)'^2 dx} \tag{4}$$

여기서 w 는 연직방향 변위를 나타내며, NM 은 정적변위를 이용할 경우 하중케이스가 된다. Euler-Bernoulli 가정에 따라 보구조물 단면 내의 변형률은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\epsilon(x, z) = zw(x)'' \tag{5}$$

식(5)를 식(4)에 대입하고 변형률의 측정 위치가 일정하다고 가정하면 변형률을 이용한 손상지수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\beta_j \approx \frac{\sum_{i=1}^{NM} [\int_{\Delta L} (\epsilon_i^*)^2 dx + \int_L (\epsilon_i^*)^2 dx] \int_L (\epsilon_i)^2 dx}{\sum_{i=1}^{NM} [\int_{\Delta L} (\epsilon_i)^2 dx + \int_L (\epsilon_i)^2 dx] \int_L (\epsilon_i^*)^2 dx} \tag{6}$$

3. 수치해석 모델을 이용한 검증

식(6)에 제시된 변형률을 이용한 손상지수의 유효성을 수치해석모델을 이용하여 검증하였다. 검증에 사용된 보구조물은 그림 1과 같다. 보구조물 모델은 다음장에 수록된 실험체과 같은 단면 및 크기로 시간 4 m,

재질 SS400의 H-150×150×7×10 단면이다. 손상 시나리오는 그림 2에서와 같이 손상케이스 1은 보구조물 중앙에서 하부 플랜지의 절반, 손상케이스 2는 하부플랜지 전체가 절단된 것으로 가정하였다. 고유벡터는 시간 내에 가속도계를 0.4m 등간격으로 설치했다는 가정 하에 11개의 절점에서 추출하였다. 또한 변형률도 같은 지점 플랜지 하부에서 보구조물 중앙에 500kgf의 집중하중 작용 시 측정된 것으로 가정하였다. 손상 평가 결과는 그림 3과 4에 나타났다. 참고로 고유벡터를 이용한 결과는 3개의 굽힘모드를 식(1)로 합성한 결과이다. 그림 3과 4에 나타난 바와 같이 변형률을 적용한 경우도 고유벡터를 이용한 것과 마찬가지로 손상을 찾아낼 수 있음을 확인하였다.

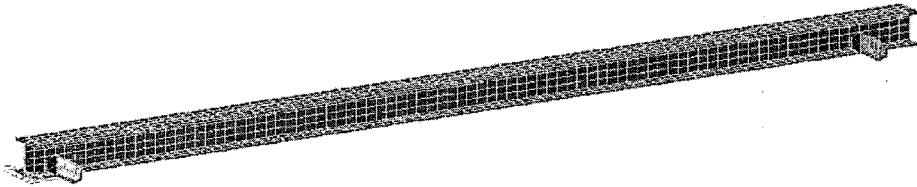
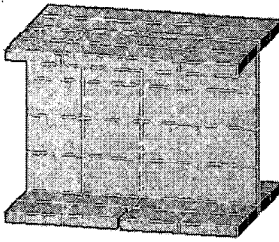
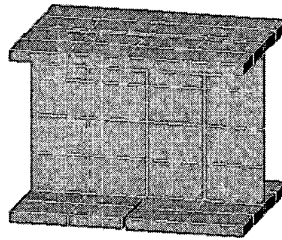


그림 1 수치해석에 사용된 보구조물

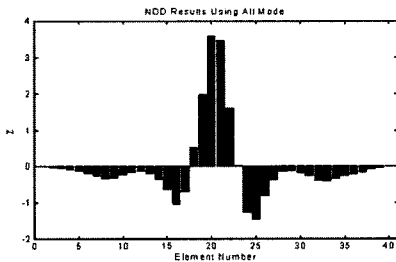


(가) 손상케이스 1

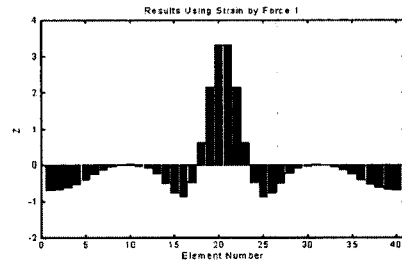


(나) 손상케이스 2

그림 2 수치해석에 적용된 손상시나리오

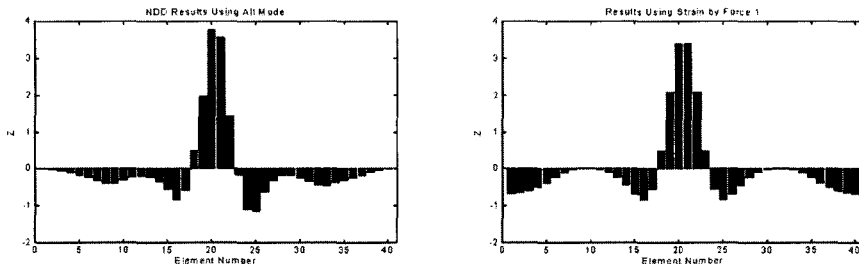


(가) 고유벡터를 이용한 결과



(나) 변형률을 이용한 결과

그림 3 손상 평가 결과 (손상 시나리오 1)



(가) 고유벡터를 이용한 결과

(나) 변형률을 이용한 결과

그림 4 손상 평가 결과 (손상 시나리오 2)

4. 실험을 통한 검증

식(6)에 제시된 변형률을 이용한 손상지수의 유효성을 실험을 통한 계측값을 이용하여 검증하였다. 검증에 사용된 보구조물은 3장에 제시된 것과 동일하며 재질 SS400의 H-150×150×7×10 단면이다. 가속도는 그림 5에 제시된 것과 같이 상부플랜지에 가속도계를 설치하고 시간 내에 0.4m 간격으로 표시된 충격점(Impact Point)을 가력망치(Impact Hammer)를 이용해 가력하여 측정하였다. 변형률은 그림 5에 표시된 위치 하부플랜지에 변형률게이지를 부착한 후 구조물 중앙에 500kgf의 하중을 가력하여 측정하였다. 손상케이스는 수치 해석과 마찬가지로 (그림6) 손상케이스 1은 보구조물 하부 플랜지의 절반, 손상케이스 2는 하부플랜지 전체를 폭 3mm의 균열로 절단하였다. 손상은 변형률게이지와의 간섭을 피하기 위해 보구조물 중앙에서 좌측으로 5cm 벗어난 지점에 설치하였다.

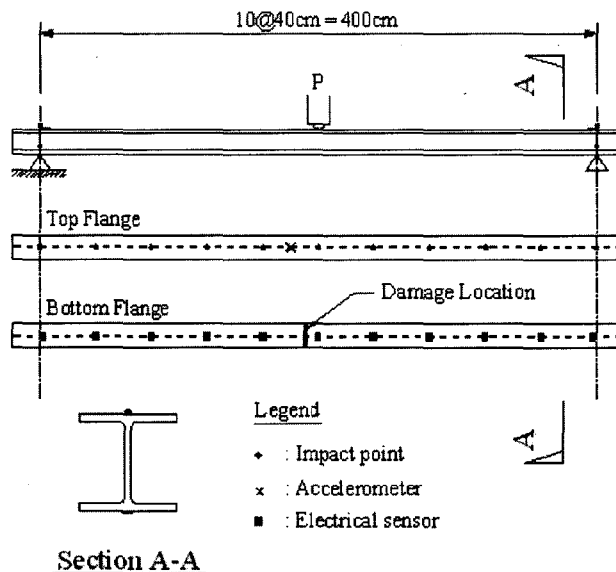
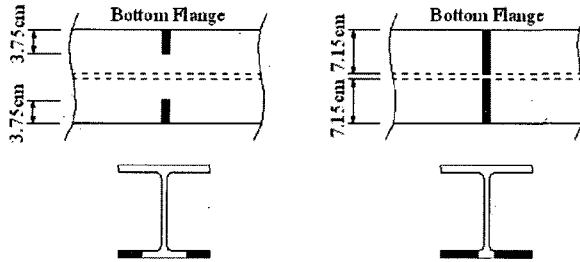
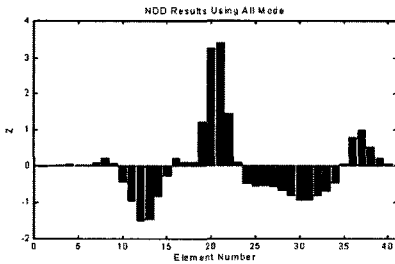


그림 5 실험체, 가력 및 센서 위치

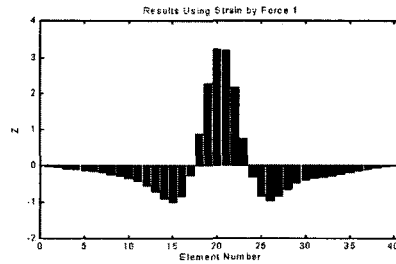


(가) 손상케이스 1 (나) 손상케이스 2
 그림 6 실험체에 적용된 손상케이스

손상 평가 결과는 그림 7과 8에 제시하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 고유벡터 및 변형률을 이용한 결과 모두 구조물 중앙의 손상 위치를 정확히 파악할 수 있었다. 참고로 고유벡터를 이용한 결과는 3개의 고유벡터를 식(1)을 이용해 합성한 결과이다. 주목할 만한 것은 변형률을 이용한 결과가 고유벡터를 이용한 경우보다 선명하게 손상의 위치를 나타냈다는 점이다. 이는 변형률을 이용할 경우 고유벡터와 같은 변위함수를 이용할 때와 달리 수치미분이 필요 없어 오차가 감소하기 때문으로 사료된다. 이러한 결과를 근거로 판단할 때 변형률을 사용했을 때 보다 신뢰성있는 손상평가 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

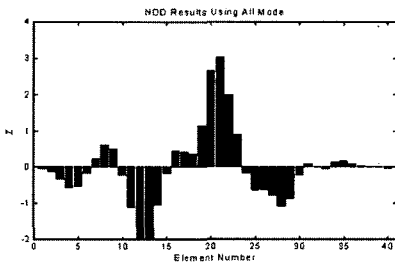


(가) 고유벡터를 이용한 결과

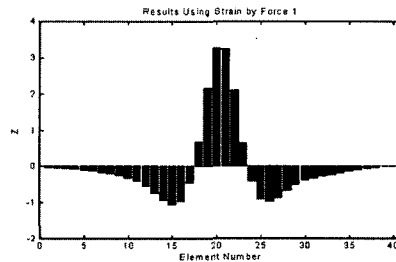


(나) 변형률을 이용한 결과

그림 7 손상 평가 결과 (손상 시나리오 1)



(가) 고유벡터를 이용한 결과



(나) 변형률을 이용한 결과

그림 8 손상 평가 결과 (손상 시나리오 2)

5. 결론

본 논문에서는 변형률 계측값을 이용한 손상 탐지 성능을 고유벡터를 이용한 손상탐지 결과를 이용해 검증하였다. 이를 위하여 고유벡터를 이용한 손상탐지이론을 변형률을 적용할 수 있도록 확장하고, 손상 전과 후에 수치해석 및 실험을 통해 계측한 가속도와 변형률 데이터를 이용하여 손상탐지성능을 비교하였다. 수치해석 및 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 변형률 데이터도 고유벡터와 마찬가지로 손상평가에 이용할 수 있었다.
- 2) 변형률 데이터를 이용할 경우 변위함수 이용 시 수행되는 수치미분을 피할 수 있어 보다 신뢰성 높은 손상 평가 결과를 얻을 수 있다.
- 3) 실험을 통한 계측값 적용시 고유벡터 보다 변형률을 이용했을 때 선명한 손상 탐지 결과를 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 특정 연구 개발사업 국가지정연구실(2005-01504) 사업의 연구비 지원으로 수행 되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 서정문, 전영선, 최인길 (2001) SI 기법을 이용한 격납건물의 손상탐지 기법개발, 한국원자력연구소, KAERI/RR-2136/2000.
- Alvandi, A., Cremona, C. (2006) Assessment of vibration-based damage identification techniques, *Journal of Sound and Vibration*, 292, pp.179-202.
- Bakhtiari-Nejad, F., Rahai, A., Esfandiari, A. (2005) A Structural damage detection method using static noisy data, *Engineering Structures*, 27, pp.1784-1793.
- Chance, J., Tomlinson, G.R., Worden, K. (1994) A Simplified approach to the numerical and experimental modeling of the dynamics of a cracked beam, *Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference*, 1, pp.778-785.
- Choi, S. (1999) Improved Performance of Damage Localization and Severity Estimation via Combining Multiple Damage Algorithms, Texas A&M University, Ph.D. Dissertation.
- Choi, S., Park, S., Stubbs, N. (2005) Nondestructive damage detection in structures using changes in compliance, *International Journal of Solids and Structures*, 42, pp.4494-4513.
- Farrar, C.R., Jauregui, D. (1996) Damage Detection Algorithms Applied to Experimental and Numerical Modal Data from the I-40 Bridge, Los Alamos Lab., LA-13074MS.
- Gibson, J.D., Melsa, J.L. (1975) Introduction to Nonparametric Detection with Applications, Academic Press, New York.
- Law, S.S., Li, X.Y., Zhu, X.Q., Chan, S.L. (2005) Structural damage detection from wavelet packet sensitivity, *Engineering Structures*, 27, pp.1339-1348.
- Nwosu, D.I., Swamidas, A.S.J., Guigne, N.Y., Olowokere, D.O. (1995) Studies on influence of cracks on the dynamic response of tubular T-joints for nondestructive evaluation, *Proceedings of the 13th International Modal Analysis Conference*, 2, pp.1122-1128.

- Park, S., Stubbs, N., Bolton, R., Choi, S., Sikorsky, C.** (2001) Field verification of the damage index method in a concrete box-girder bridge via visual inspection, *Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering*, 16, pp.58-70.
- Richardson, M.H.** (1980) Detection of Damage in Structures from Changes in Their Dynamic (Modal) Properties - A Survey, Lawrence Livermore Lab., NUREG/CR-1431.
- Sohn, H, Farrar, C.R., Hemez, F.M., Shunk, D.D, Stinemates, D.W., Nadler, B.R.** (2003) A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001, Los Alamos Lab., LA-13976MS.
- Zou, Y., Tong, L., Steven, G.P.** (2000) Vibration-based model-dependent damage (delamination) identification and health monitoring for composite structures - a review, *Journal of Sound and Vibration*, 230(2), pp.357-378.