

고유진동수를 이용하여 압축력이 작용하는 철골 부재의 구조계 추정

System identification of steel member acting compressive force using natural frequency of vibration

심학보* · 박수용** · 박효신***

Shim, Hak Bo · Park, Soo Yong · Park, Hyo Seon

Abstract

The aim of this study is to estimate the compressive force of steel member using a system identification technique with vibration measurements. To date, several methods have been presented to estimate the compressive force using static and /or dynamic responses of the steel member. However, each and every one of these methods has its disadvantages as well as advantages in its procedures, level of accuracy, and equipment requirements. The paper reports a qualitative investigation of vibration under monoharmonic excitation. The methodology utilizes the relationship between the natural frequencies, the structural parameters, and the compressive force of the member. In this paper, experimental results are presented with a steel beam subjecting to several compressive forces and the proposed method is validated using both numerical and experimental data.

Key words : dynamic responses, monoharmonic excitation, system identification, compressive force

1. 서론

압축 부재는 교량, 빌딩 그리고 다른 건물을 포함하여 다양한 구조물에 사용된다. 고층 건물의 모니터링 뿐만 아니라 구조물의 강도는 부재에 작용하고 있는 압축력의 평가를 요구한다. 따라서 구조 부재에 작용하고 있는 압축력의 정확한 추정을 위한 실제적이고 신뢰성 있는 방법의 개발이 매우 중요하다. 그동안 많은 연구자들은 진동 방법을 이용한 인장력의 추정에 초점을 맞췄다.(Shinke et al., 1980; Kyska et al., 1991; Park et al., 2006). 그러나 압축력 추정에 관한 연구는 소수 몇 명에 의해서 진행되었다. S. Timoshenko는 1955년에 축하중을 받는 단순보의 진동식에 관한 이론식을 제시하였으며 이 방정식은 보의 고유진동수가 구조물의 변수인 인장력과 압축력의 크기에 대한 함수임을 보였다.

이 논문의 목적은 고유진동수를 이용하여 압축력이 작용하는 철골부재의 압축력을 추정하는 것이다. 구조물의 변수 추정을 위해 개발된 SI 기법은 휨 부재에서 압축력을 추정하는 것으로 확대된다. 방법은 고유진동수와 구조물의 변수 그리고 부재의 압축력과의 관계를 이용하며 진술된 과정은 다음 순서대로 진행되었다. 첫째, 고유진동수의 민감도를 이용하는 SI기법을 검토한다. 둘째, 방법의 타당성을 단순보의 모의실험 데이터를 이용해 검증한다. 셋째, 제안된 방법을 다양한 압축 하중을 받고 있는 양단 고정된 보 구조물의 실험 데이터에 적용한다. 마지막으로 실험결과를 밝히고, 제안된 방법을 수치 해석 모델과 실험 데이터를 이용하여 검증하게 된다.

2. System identification 적용

이 이론은 S. Timoshenko의 the effect of axial force on vibrations of beams into vibration problems in

* 정회원 · 연세대학교 건축공학과 · 석사과정 · E-mail : myth97@yonsei.ac.kr
** 정회원 · 한국해양대학교 해양공간건축학부 · 교수
*** 정회원 · 연세대학교 건축공학과 · 교수

engineering으로 부터 발췌하였다. 이론은 보 요소의 진동에 관해 설명하고 있다. 그러나 이 이론은 인장력, 압축력이 작용하는 단순보에서만 단지 적용될 수 있으며 단순보 이외의 다른 경계 조건에서는 적용되지 않는다. 그래서 이 연구는 압축력 추정을 위해 수치해석 검증을 통한 SI 기법을 사용한다.

S. Timoshenko에 의한 이론으로부터 응답하는 고유진동수를 획득한다.

$$P_i = \frac{i^2 \pi^2 a}{l^2} \sqrt{1 + \frac{S l^2}{i^2 E I \pi^2}} \quad (1)$$

여기서 P는 고유진동수, i는 고유진동수의 차수, E는 탄성계수, I는 단면 2차 모멘트, S는 압축력 혹은 인장력이다. $a = \sqrt{EI/\rho A}$ 이고 ρ 는 질량 밀도이다.

인장력 대신 압축력이 부재에 작용한다면, 진동에 의한 고유진동수는 감소한다. S를 -S로 변경함으로써 압축력을 추정한다.

$$P_i = \frac{i^2 \pi^2 a}{l^2} \sqrt{1 - \frac{S l^2}{i^2 E I \pi^2}} \quad (2)$$

이론으로부터 SI 기법에 적용되는 민감도 매트릭스에 대한 이론과 알고리즘은 참고문헌을 이용한다. 'Park, S. Y., Choi, S. H., Oh, S. T., Stubbs, N., 2005. Identification of the tensile force in high-tension bars using modal sensitivities. The International Journal of Solids and Structures.'

3. 모델링을 이용한 수치해석 검증

제안된 알고리즘은 압축력에 적용된 철골 부재의 수치해석 모델을 통해 검증하게 된다. 모델의 부재 단면적은 $4cm^2(2cm \times 2cm)$ 이고 부재 길이는 50cm이다. 구조물의 재료 특성에서 질량 밀도는 $8.005 \times 10^{-9} tf/cm^3$, 탄성계수는 $2.100 \times 10^3 tf/cm^2$ 이며 5ton의 압축력을 작용하였고 모델은 100개의 요소와 101개의 노드로 구성되었다. 고유진동수를 포함한 모달 파라미터는 MIDAS 6.3.2를 이용하여 자유 진동 결과 값을 얻었다.

초기값 변수는 10ton의 압축력과 탄성계수 $2.500 \times 10^3 tf/cm^2$ 를 적용하였다. 획득된 고유진동수를 가지고 system identification하는 과정은 3단계로 구성된다. 1) 초기 유한요소 모델로부터 고유진동수 값을 얻는다. 2) 유한요소 모델을 이용하여 강성과 압축력과의 민감도를 구한다. 3) 알고리즘을 통해 유한요소 모델의 변수를 업데이트 시키면서 수렴 결과를 얻는다. 결과는 표1에 요약되었으며 이 표에서 몇 번의 iteration을 통해 성공적으로 탄성계수와 압축력을 추정하는 것이 확인된다. 초기 압축력과 탄성계수의 오차는 100%와 19.04%였으나 3번의 iteration 이후에는 0%와 0.005%로 수렴하는 것을 확인할 수 있으며 고유진동수는 3번의 iteration 이후에 1차 고유진동수는 136.994, 2차 고유진동수는 693.532, 3차 고유진동수는 1598.790으로 처음 설계된 구조물의 고유진동수에 근접해지는 것을 확인할 수 있다.

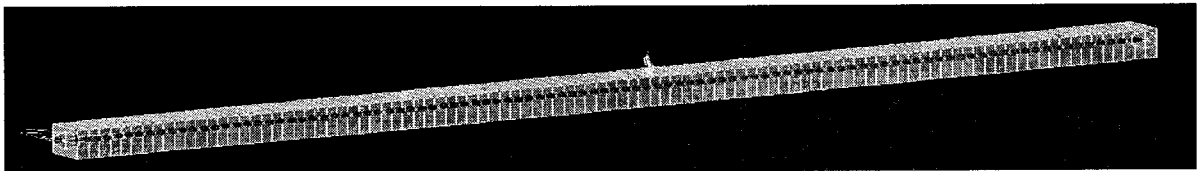


그림 1. 압축력을 받고 있는 단순보의 MIDAS 모델링

표 1. 탄성계수와 압축력의 수렴 결과

Mode	Frequency of Initial FE model (Hz)	Updated Frequencies(Hz)			Frequency of Target Structure (Hz)	Error(%)	
		Iteration 1	Iteration 2	Iteration 3		Initial	Final
1	98.484	136.991	136.992	136.994	136.989	28.11	-0.004
3	722.501	693.531	693.531	693.532	693.524	-4.18	-0.001
5	1711.451	1598.788	1598.789	1598.790	1598.773	-7.04	-0.001
	Initial Value	Updated Value			Target Value	Error(%)	
		Iteration 1	Iteration 2	Iteration 3		Initial	Final
P(tf)	10	5.0002	5.0001	5.0000	5	-100	0
$E(tf/cm^2)$	2.500×10^3	2.1001×10^3	2.1001×10^3	2.1001×10^3	2.100×10^3	-19.04	-0.005

4. 실험적 검증

압축력 부재로부터 얻은 실험 데이터를 가지고 제안된 방법을 설명한다. 실험 동적 테스트는 압축력 부재에 수행되었으며 철골 부재 길이는 2m이고 부재 형상은 100x100x6x8형태의 H형강이다. 양단 고정으로 체결하였고 철골 부재는 5ton 부터 50ton 까지 압축력을 받게 하였다.

동적인 응답 데이터를 얻기 위해 해머를 가지고 부재에 가력 하였으며, 1개의 가속도계(DYTRAN 3191A)를 부재의 중앙에서 10cm 떨어진 웹 부분에 부착하였다. 데이터를 획득할 때 샘플링 고유진동수는 3200Hz으로 세팅되었고($t=3.125 \times 10^{-4}$ 초) 전체 획득 시간은 10.24초이다. 그리고 한 지점에서 3번 가력한 결과 값을 획득 하였고 이들의 평균값으로 계산하였다. 실험데이터부터 System identification은 2가지 단계로 나뉘어 진행된다. 1) 하중이 없는 상태에서의 고유진동수 데이터를 이용하여 강성 파라미터를 측정한다. 2) 3번 측정된 압축력에 대한 고유진동수 데이터를 이용하여 압축력을 추정한다. 수치해석 검증을 통해 보았듯이, MIDAS 6.3.2를 이용한 초기 유한 요소 모델이 수행되었으며 유한 요소 모델은 63개의 노드와 62개의 보 요소로 구성되었다. 이 경우에 부재는 양단이 고정이며 구조물에 제안된 부재 특성에서 질량밀도는 $8.005 \times 10^{-9} tf/cm^3$ 이고, 업데이트 된 모델의 탄성계수는 $1.7629 \times 10^3 tf/cm^2$ 이다.

표 2는 15ton에서의 고유진동수가 제안된 방법으로 수렴하는 것을 보여준다. 1차, 3차, 5차 고유진동수 값을 구하게 된 것은 가력지점이 웹의 중앙부분에서 근접했기 때문에 정확한 2차, 4차 모드 해석 값을 구할 수가 없었으므로 이 값들을 간주하지 않았다. 이 표에서 실험을 통해 얻은 정확한 하중 결과 값과 SI기법을 통해 얻게 된 하중 수렴 값의 오차율이 3.11%라는 것을 보여주며, 1차, 3차, 5차 고유진동수 오차율이 1.83%, 2.77%, 0.21%에서 0.39%, 2.34%, 0.54%로 감소되는 것을 보여준다. 이 오차는 노이즈, 모드해석에 대한 오차, 다른 불확실성 요소 때문에 나타나는 것이며 두 값의 비교를 통해 얻게 된 사실은 압축력의 크기가 커질수록, 고유진동수 값이 감소한다는 것이다.

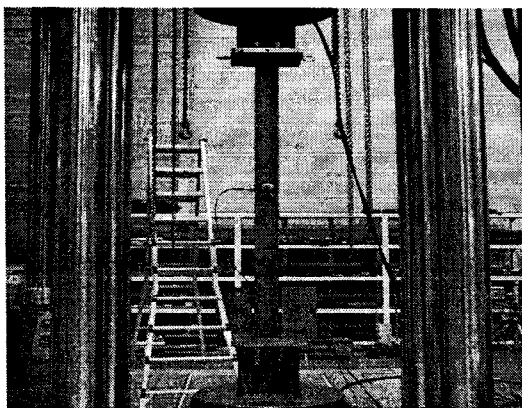


그림 2. 실험실에서 사용된 압축 부재

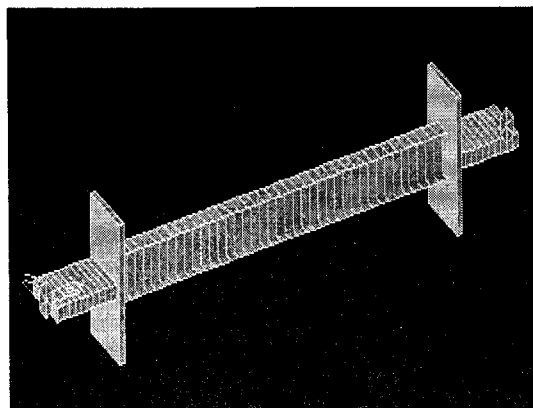


그림 3. 압축력 추정을 위한 MIDAS 모델링

표 2. 15tonf 경우의 수렴 결과

Mode	Frequency of Initial FE model (Hz)	Updated Frequencies(Hz)				Frequency of Experimental Structure (Hz)	Error(%)	
		Iteration 1	Iteration 2	Iteration 3	Iteration 4		Initial	Final
1	91.271	93.319	93.328	93.332	93.333	92.97	1.83	-0.39
3	417.812	419.627	419.636	419.639	419.640	429.7	2.77	2.34
5	634.926	637.004	637.014	637.017	637.019	633.6	-0.21	-0.54
P(tonf)	Initial Value (tonf)	Updated Value(tonf)				Experimental Value (tonf)	Error(%)	
		Iteration 1	Iteration 2	Iteration 3	Iteration 4		Initial	Final
P(tonf)	25	15.5136	15.4708	15.4532	15.4660	15	-66.67	-3.11

5. 결론

이 논문은 system identification 기법을 이용하여 압축을 받고 있는 부재의 압축력을 추정하는 과정을 나타내었다. 이 방법은 부재의 강성, 압축력 그리고 고유진동수 사이의 동적인 민감도 관계를 이용한 것이며 이 방법은 압축을 받고 있는 부재로부터 획득된 실험 데이터를 가지고 설명되었다.

이 연구로 얻게 된 결론은 다음과 같다.

- (1) SI 기법을 통해 매우 적은 오차 값으로 탄성계수와 압축력을 추정하는 것이 가능함을 수치해석 모델을 통해 검증하였다.
- (2) 실험을 통해 제안된 방법으로 압축력을 추정할 수 있다는 것을 확인하였다. 그러나 노이즈, 모델링 오차 그리고 다른 불확실한 요소에 영향을 받는다는 것을 알게 되었다.
- (3) 제안된 민감도에 기초한 방법이 수치해석과 실험 연구의 결과로부터 압축을 받는 부재의 강성 특성과 압축력의 결과를 추정하는데 유용한 접근 방법임을 확인하게 되었다.
- (4) 수치해석 그리고 실험 연구에서 압축력과 탄성계수에 의한 수렴이 독립적으로 작용하는 것을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2005-01504).

참고문헌

1. Kyska, R., Koutny, V., Rosko, P., 1991. Tension measurement in cable of cable-stayed bridges and in free cables. In: Proceedings of the Second Conference on Traffic Effects on Structures and Environment, Zilina, Slovakia. pp. 190-194
2. MIDAS 6.3.2, 2005, User's Manual. MIDAS Information Technology Co., Ltd., Korea
3. Park, S., Choi, S., Oh, S., Stubbs, N., Song, H., 2006. Identification of the tensile force in high-tension bars using modal sensitivities. International Journal of Solids and Structures 43 (10), pp. 3185-3196.
4. Shinke, T., Hironaka, K., Zui, H., Nishimura, H., 1980. Practical formulas for estimation of cable tension by vibration methods. Proceedings of JSCE 294, pp. 25-34
5. Timoshenko, S., 1955. Vibration Problems in Engineering. 3rd Edition, D. Van Nostrand Company, Inc., New York.
6. Wittrick W. H., 1985. Some observations on the dynamic equations of prismatic members in compression. The International Journal of Mechanical Sciences, Volume 27, Issue 6, 1985, pp. 375-382.
7. Galambos, T.V., Ravindra, M.K., 1978. Properties of steel for use in LRFD. Journal of the Structural Division 104 (ST9), pp. 1459-1468.
8. Ewins, D.J., 1986. Modal Testing: Theory and Practice. Research Studies Press, Hertfordshire England.
9. Blasi, C., Sorace, S., 1994. Determining the axial force in metallic rods. Structural Engineering International 4 (4), pp. 241-246.