

## 진동신호기반 손상검색기법과 온도변화의 영향

### Temperature Effects on Vibration-Based Damage Detection Method

김정태\* · 류연선\*\* · 조현만\*\*\* · 윤정방\*\*\*\* · 이진학\*\*\*\*\*

Jeong-Tae Kim, Yeon-Sun Ryu, Hyun-Man Cho, Chung-Bang Yun, and Jin-Hak Yi

**Key Words** : Temperature effect, modal test, frequency, damage detection, plate-girder

#### ABSTRACT

In this paper, the variability of modal properties caused by temperature effects is assessed to adjust modal data used for frequency-based damage detection in plate-girder bridges. First, experiments on model plate-girder bridges are described. Next, the relationship between temperature and natural frequencies is assessed and a set of empirical frequency-correction formula are analyzed for the test structure. Finally, a frequency-based method is used to locate and estimate severity of damage in the test structure using experimental modal data which are adjusted by the frequency-correction formula. Here, local damage in beam-type structures is detected by using measured frequencies and analytical mode shapes.

#### 1. 서 론

최근 국·내외에서 구조물의 동특성의 변화를 감지하여 손상을 추정하는 기법들에 대한 연구가 활발하며 일부 교량을 대상으로 적용성 검증 연구가 수행 되고 있다. [1-4] 진동특성의 측정에 기초한 강판형교의 손상추정 및 안전도 평가를 위해서는 정확한 진동계측과 모드 특성치 추출이 필요하다. 이를 위해 진동신호의 취득 및 분석 과정에서 발생하는 오류 및 불확실성을 최소화하는 노력과 함께 진동신호의 계측시간의 차이에 의해 야기되는 계측온도의 변화가 진동모드특성에 미치는 영향을 분석하여 모드 특성치를 보정할 수 있는 모델이 필요하다. 온도변화는 재료특성의 변화와 경계조건의 변화 및 구조물에 열 변형 거동을 야기시키며 그 결과로 고유진동수와 모드형상 및 감쇠계수와 같은 진동모드특성의 계측에서 불확실성을 유발시킨다. 또한, 구조물 손상 전·후의 서로 다른 온도조건에서 계측된 진동모드특성을 사용하여 구조물의 손상을 예측하고자 하

는 경우, 이 같은 계측온도 불확실성 요인은 구조물 손상예측의 오류로 나타날 수 있다.

본 논문에서는 강판형 모형을 대상으로 실험적으로 계측온도의 변화에 따른 진동모드특성의 변화를 분석하였으며 그 결과를 대상구조물의 고유진동수 기반 손상검색 기법의 보정에 활용하였다. 연구의 주된 관점은 강 판형 교 모형을 대상으로 저차 진동모드의 고유진동수와 계측온도와의 관계를 실험식으로 구하는 것이다. 또한, 온도-고유진동수 실험식을 사용하여 계측된 고유진동수를 보정하는 것이다.

연구 대상인 강 판형교 모형은 판형, 가로 보, 세로 보 및 상부 맥의 형상과 치수 그리고 지지조건의 종류에 따라 진동모드의 양상을 달리하며, 통상 저차의 굽힘 진동모드와 비틀림 진동모드들을 측정할 수 있다. 연구과정은 다음의 단계로 구성되었다. 첫째, 실험 대상인 강 판형교 모형과 모드실험과정 및 결과를 요약하였다. 둘째, 실험 계측온도에 따른 진동특성치의 변화를 분석하였다. 초기 4개 진동모드의 온도-고유진동수 관계식을 결정하였다. 마지막으로, 강 판형교 모델의 손상위치와 손상크기를 예측하였다. 이때 손상검색을 위해 입력된 손상 전후의 고유진동수는 온도-고유진동수 관계식을 통해 보정되었다.

\* 부경대학교 해양공학과 교수  
E-mail : idis@pknu.ac.kr  
Tel : (051) 620-6227, Fax : (051) 628-8146  
\*\* 부경대학교 해양공학과 교수  
\*\*\* 부경대학교 해양공학과 강사  
\*\*\*\* KAIST 토목환경공학과 교수  
\*\*\*\*\* KAIST 토목환경공학과 연구교수

## 2. 강판형교 모형과 진동모드실험

실험연구에 사용된 강판형 축소모형 단순보의 치수와 형상, 경계조건, 그리고 단면 형상이 Fig.1에 도시되었다[3]. 주형에는 지점부 보강재와 중간 수직보강재 9개를 등 간격으로 배치하였고 각각의 보강재에 세로보를 용접 연결하여 두 개의 주형이 연결되었다. 또한 가로보위에 등 간격으로 3개의 세로보를 설치하였다. 축소모형은 실물구조와 유사한 구조진동거동을 일으키는 관점에서 축소된 모형이었다. 경계조건으로 일단 핀, 타단 로울러 지점이 제작되었고 가진 장치가 설치된 모형프레임에 설치되었다. 실험은 1999년 12월부터 2000년 7월까지 6개월간 부경대학교 스마트구조공학 연구실에서 수행되었으며, 실험 온도는  $-3^{\circ}\text{C}$  부터  $23^{\circ}\text{C}$  까지 변동하였다. 온도와의 환경적인 인자는 고려되지 않았다. 진동기 가진을 통해 강판형의 진동특성을 계측하였다. 진동 가진 실험체계는 Fig. 2에 도시되었다. 진동기법에는 정현신호와 랜덤신호를 선택하여 가진 할 수 있는 VTS-100 가진기가 사용되었으며 Dytran 3101BG 가속도계를 통해 가속도 응답신호를 계측하였다. 가진기는 6번 위치에 고정하여 수직방향으로 가진하였으며 응답신호를 18개 계측점 각각으로부터 계측하였다. 가진신호는 정현신호를 선택하였다. 가진주파수는 구하고자하는 고유진동수의 주파수 영역인 10 Hz~500 Hz내에서 낮은 값으로부터 주파수를 증가시키며 계측하였다. 구조물로부터 가진신호 및 응답신호를 취득하고 모드특성을 분석하기 위해 8채널 신호분석기 SA-390과 모드분석 소프트웨어인 STAR Modal이 사용되었다. 18개의 계측점들을 직교 좌표계상에서 연결하는 모델로서 모형 판형교를 단순 모델링하였다. [참고문헌 3 참조]

먼저, 실험 온도  $-3^{\circ}\text{C}$  부터  $23^{\circ}\text{C}$  까지 10단계에서, 초기 4개 진동모드의 모드형상과 고유진동수를 구하였다. Fig. 3은 초기 4개 모드(1차 굽힘, 1차 비틀림, 2차 굽힘, 2차 비틀림)의 모드형상을 도시한 것이다. Fig. 4는 각 온도 단계에서 계측된 고유진동수 계측 값을 도시한 것이다. 각 온도 단계에서 10회의 계측실험을 수행하였다.

## 3. 계측 온도와 진동모드 특성

진동기법을 통해 모드특성을 계측한 결과들이 Fig. 4에 도시되었다. 계측결과들이 안정적이는데, 이는 가진 신호가 안정되었고 이로 인해 신호의 점진신호의 노이즈가 상대적으로 적은 것에 기인한다. 각 모드 그림의 일정 온도에서 10회 계측치를 모두 표시하였다. Fig. 4(a), 4(b), 4(c), 및 4(d) 각각은 1차 굽힘, 1차 비틀림, 2차 굽힘 및 2차 비틀림 모드의 온도와 고유진동수 사이의 선형관계를 보이고 있다. 고유진동수의 변화가 각 온도 단계에서 일관되게 계측되고 있

다. 이상의 관찰로부터, Fig. 4는 변동 온도조건에서 대상구조물에서 발생할 고유진동수의 변동 폭을 예측할 경험적 모델로서 입을 알 수 있다. 저차 모드일수록 가진방법에 따른 고유진동수의 변화가 큰 것으로 나타났다. 1-2차 굽힘모드의 고유진동수 변동폭이 1-2차 비틀림모드에 비해 크게 나타났다.

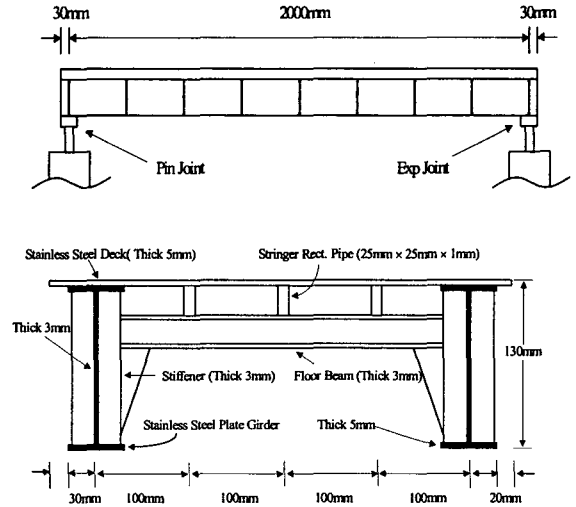


Fig. 1 강판형교 모형

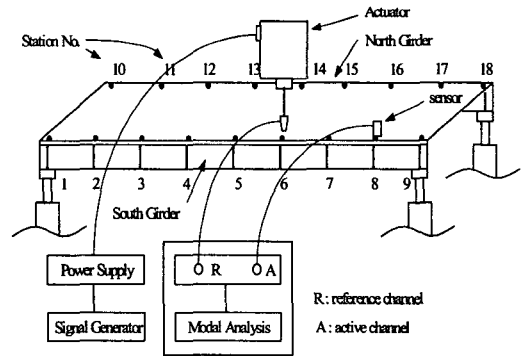


Fig. 2 모드실험체계

다음으로, 계측온도(T)와 고유진동수비(FR)의 관계를 회귀직선으로 분석하였다. 고유진동수를 계측온도 섭씨 20도의 고유진동수를 기준으로 고유진동수비(frequency ratio)로 변환하였다. 각 모드의 경우에 대한 계측온도-고유진동수비(T-FR) 선형관계가 Fig. 5에 각각 도시되었다. 모드 1의 변화율이 가장 크게 나타났다. 굽힘 진동모드인 모드 1과 모드 3의 T-FR에서 기울기가 비틀림 진동모드인 모드 2와 모드 4에 비해 상대적으로 크게 나타났다. 이 T-FR 경험모

텔은 변동하는 계측온도 조건하에서 강관형모형의 고유진동수를 보정하게 된다. 이를 통해 구조물의 고유진동수 변화가 구조적인 손상에 기인하는지 또는 온도변화와 이에 따른 재료특성 및 경계조건 변화에 기인하는지를 판정하는데 사용될 수 있다. 하지만, 본 연구결과는 대상구조물인 강관형 모형에 국한하여 적용될 수 있다.

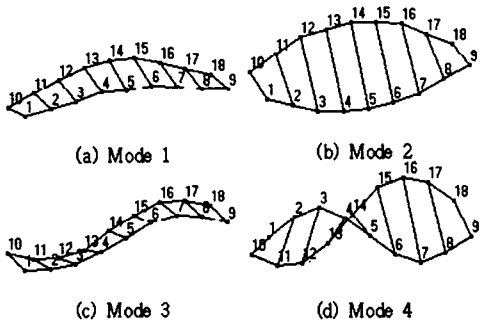
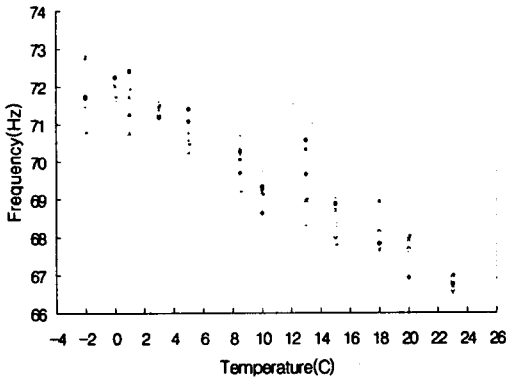
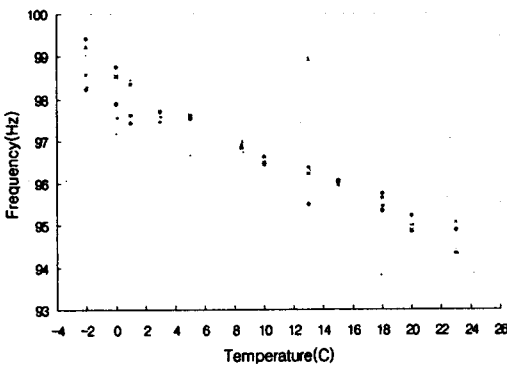


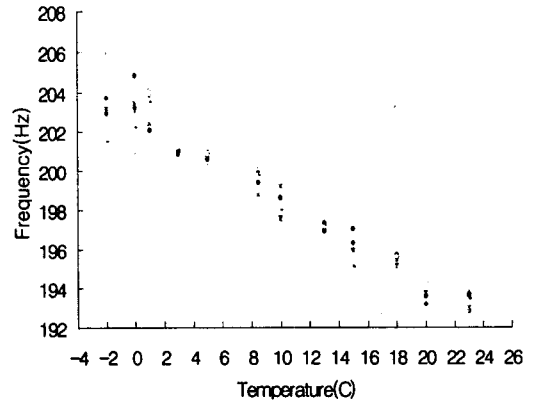
Fig. 3 강관형 모형의 모드형상



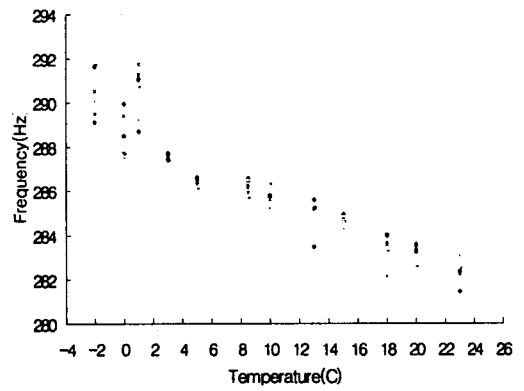
(a) Mode 1



(b) Mode 2

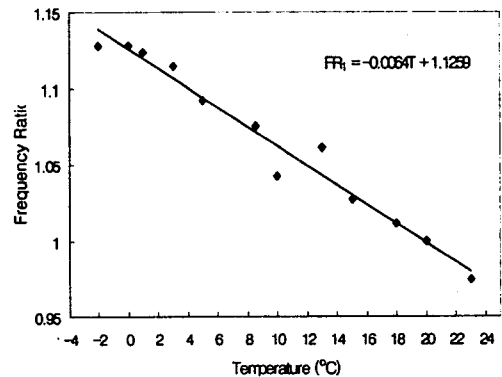


(c) Mode 3



(d) Mode 4

Fig. 4 강관형 모형의 온도-고유진동수 계측치



(a) Mode 1 ( $f_1 = FR_1 \times 67.635\text{Hz}$ )

#### 4. 강 판형 모형의 손상과 고유진동수 기반 손상검색

모형 강판형교에 손상을 주고 섭씨 23도의 일정한 온도 하에서 모드계측 실험을 수행하였다. 남쪽 편향 하부 플랜지에 쇠톱 절단을 통해 손상을 주었다. Fig. 6(a), (b) 및 (c)는 모형 강판형교에 도입된 손상의 위치와 2가지 손상형상을 보여준다. Table 1은 각 손상 시나리오별로 일정온도에서 측정된 고유진동수이다.

고유진동수 기반 손상검색기법은 Kim 외(2003)에서 제시한 알고리즘을 사용하였다. 다음의 식(1)은 모드  $i$ 와 위치  $j$ 에서 손상위치를 예측하는 식이다. 이때,  $F_{ij}$ 는 모드  $i$ 와 위치  $j$ 의 모드민감도로서 실험적으로 계측된 모드형상 또는 이론적인 수치해석으로부터 구할 수 있다. 한편,  $Z_i$ 는 손상 전후 측정된 모드  $i$ 의 고유치의 변화율이다. 계산된  $e_{ij}$ 를 정규화하고, 통계적인 패턴인식에 의해, 위치  $j$ 에 대한 손상지수를 추정한다. 다음으로, 식(2)를 사용하여 모드  $i$ 에서 무차원의 손상크기( $a/H$ ) <sub>$i$</sub> 를 예측한다. 여기서,  $S_{ik}$ 는 모드  $i$ 의 모드형상 곡률로부터 구한 위치  $j$ 의 민감도이다. 아래의 식(1)-식(5)에 대한 자세한 설명은 참고문헌[4]를 참고하기 바람.

$$e_{ij} = Z_i \frac{\sum_{k=1}^{NM} Z_k - F_{m_j}}{\sum_{k=1}^{NM} F_{k_j}} \quad (1)$$

$$F_{ij} = \frac{\{\phi_i\}^T [C_j] \{\phi_i\}}{\{\phi_i\}^T [C] \{\phi_i\}} \quad (2)$$

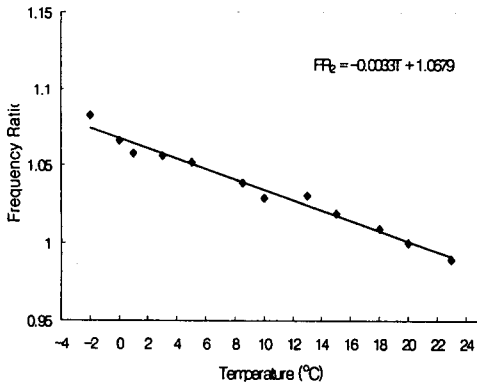
$$Z_i = \delta \omega_i^2 / \omega_i^2 \quad (3)$$

$$\frac{\delta \omega_i^2}{\omega_i^2} = \eta S_{ik} \left( \frac{a_k}{H} \right)_i^2 \quad (4)$$

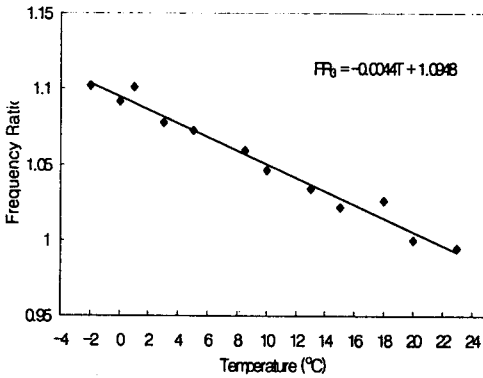
$$S_{ik} = \int \{\phi_i\}^2 dx / \int \{\phi_i\}^2 dx \quad (5)$$

비 손상시의 고유진동수는 Fig. 5로부터 구하였다. 또한 손상시의 고유진동수는 Table 1과 같다. 주 거더를 100개 부재로 나누어 각 부재의 손상지수를 계산하였다. Fig. 7은 손상 1의 경우이며, 손상 전후의 온도가 각각 섭씨 23도로 동일하고, 모드 1-4를 각각 사용한 결과와 모드를 모두 사용한 경우의 결과이다. Fig. 8은 손상 고유진동수(23도)와 비손상 진동수(0-30도)의 경우이며, 모드 1-4 모두 사용하고 있다. 23도에서 손상예측위치(위치 100)가 실제 손상위치와 일치하고 있다.

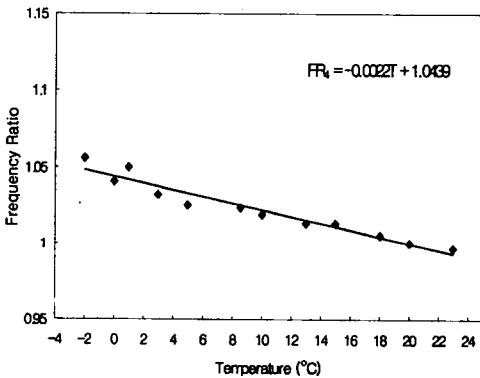
Fig. 9는 손상 2의 경우이며, 손상 전후의 온도가 각각 섭씨 23도로 동일하고, 모드 1-4를 각각 사용한 결과와 모드를 모두 사용한 경우의 결과이다. Fig. 10은 손상 고유진동수(23도)와 비손상 진동수(0-30도)의 경우이며, 모드 1-4 모두 사용하고 있다. 23도에서 손상예측위치(위치 100)가 실제 손상위치와 일치하고 있다. 마지막으로, 식(2)를 사용하여 손



(b) Mode 2 ( $f_2 = FR_2 \times 95.004\text{Hz}$ )



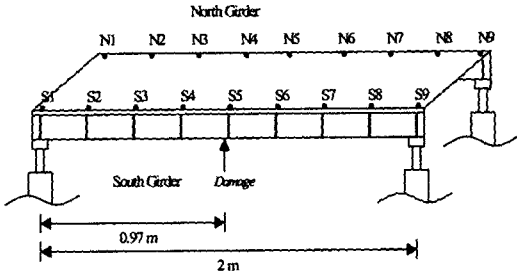
(c) Mode 3 ( $f_3 = FR_3 \times 193.847\text{Hz}$ )



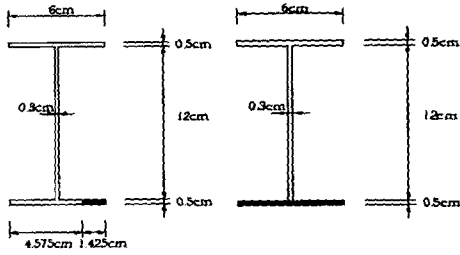
(d) Mode 4 ( $f_4 = FR_4 \times 282.927\text{Hz}$ )

Fig. 5 T-FR Relation of Model plate-Girder

상크기검색을 수행하였으며, 결과는 표 2와 같다. 손상 전후의 온도가 일치하는 조건에서 가장 정확한 손상크기예측을 보였다.



(a) Damage Location



(b) Case 1

(c) Case 2

Fig. 6. 손상 위치 및 크기

Table 1 손상 시나리오별 고유진동수(Hz)

Damage Case	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
1	65.410	94.248	192.683	190.863
2	62.475	92.395	281.292	279.937

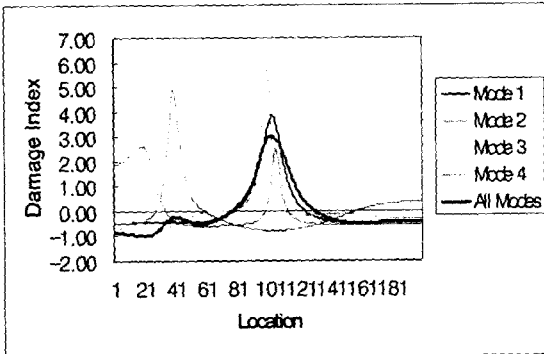


Fig. 7 손상 고유진동수(23도) Vs 비손상 고유진동수(23도)

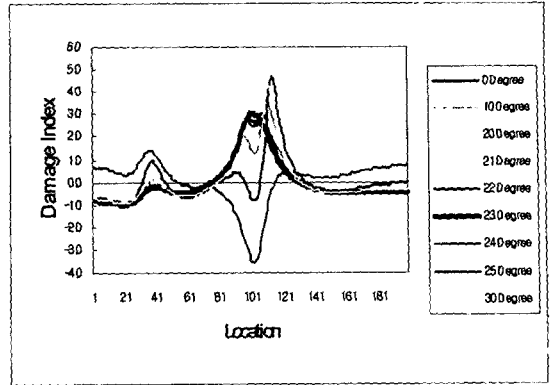


Fig. 8 손상 고유진동수(23도) Vs 비손상 진동수(0-30도)

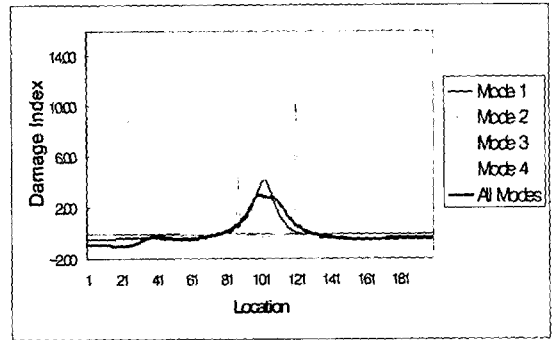


Fig. 9 손상 고유진동수(23도) Vs 비손상 고유진동수(23도)

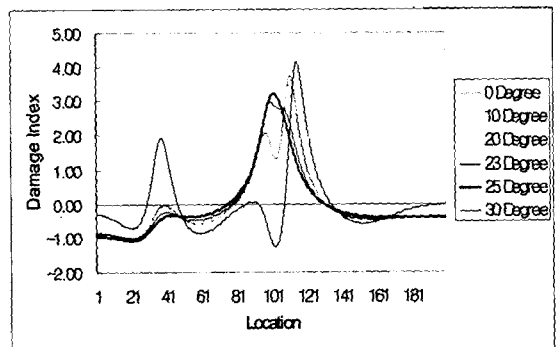


Fig. 10 손상 고유진동수(23도) Vs 비손상 진동수(0-30도)

#### 4. 결론

본 논문에서는 강판형 모형을 대상으로 실험적으로 계측온도의 변화에 따른 진동모드특성의 변화를 분석하였으며 그 결과를 대상구조물의 고유진동수 기반 손상검색기법의 보정에 활용하였다. 먼저, 강 판형교 모형을 대상으로 초기 4개 진동모드의 고유진동수와 계측온도와의 관계를 실험식으로 구하였다. 다음으로, 온도-고유진동수 실험식을 사용하여 계측된 고유진동수를 보정하였다. 초기 4개 진동모드의 온도-고유진동수 관계식을 결정하였다. 마지막으로, 온도-고유진동수 관계식을 통해 보정된 손상 전후의 고유진동수를 사용하여 강 판형교 모델의 손상위치와 손상크기를 예측하였다.

#### 후 기

이 논문은 2003년도 스마트 사회기반기술 연구센터의 지원에 의하여 연구되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Farrar, C.R., Cornwell, P.J., Doebling, S.W., Prime, M.B., et al., 2000, "Structural Health Monitoring Studies of the Alamosa Canyon and I-40 Bridges," Los Alamos National Laboratory Report LA-13635-MS, July 2000.
- (2) Kim, J.T. and Stubbs, N., 2003, "Crack Detection in Beam-Type Structures using Frequency Data", Journal of Sound and Vibration, Vol. 259, No. 1, pp. 145-160
- (3) 김정태, 류연선, 조현만, 윤재웅, 백종훈, 2002, "강판형교의 진동모드특성에 미치는 온도변화의 영향", 한국전산구조공학회, 2002년도 추계학술발표회, 제15권, 제2집, pp. 489-496
- (4) Ewin, D.J., 1986, Modal Testing: Theory and Practice, Research Studies Press Ltd., England.