

## 불확실한 온도 조건하의 모형 강 판형교의 진동기반 손상 모니터링

박재형\* · 홍동수\* · 김정태\* · 조현민\*

\*부경대학교 해양공학과

## Vibration-Based Damage Monitoring in Model Plate-Girder Bridges under Uncertain Temperature Conditions

JAE-HYUNG PARK\*, DONG-SOO HONG\*, JEONG-TAE KIM\* AND HYUN-MAN CHO\*

\*Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Plate-girder bridges 판형교, Temperature effect 온도영향, Vibration-based 진동기반, Natural frequency 고유진동수, Damage monitoring 손상모니터링

**ABSTRACT:** A vibration-based damage-monitoring scheme is proposed that would generate an alarm showing the occurrence and location of damage under temperature-induced uncertainty conditions. Experiments on a model plate-girder bridge are described, for which a set of modal parameters was measured under uncertain temperature conditions. A damage-alarming model is formulated to statistically identify the occurrence of damage by recognizing the patterns of damage-driven changes in the natural frequencies of the test structure and by distinguishing temperature-induced off-limits. A damage index method based on the concept of modal strain energy is implemented in the test structure to predict the location of damage. In order to adjust for the temperature-induced changes in the natural frequencies that are used for damage detection, a set of empirical frequency correction formulas is analyzed from the relationship between the temperature and frequency ratio.

### 1. 서 론

구조계가 대형화되고 복잡해지며, 구조손상의 형태 또한 복합화 양상을 보여주는 구조물 붕괴사고 이후 종래의 안전진단 기술에 대한 개선의 필요성이 인식되고 있다. 또한 최근 국외에서는 지진에 대한 구조물의 안전성 확보와 성능 평가에 대한 중요성의 증대로 진동기반 손상모니터링 기법의 개발 및 구조진성 평가 시스템에 대한 적용으로 확대되고 있다. 진동기반 손상 모니터링은 진동특성의 변화를 감지하여 구조물의 손상 상태와 안전도를 평가하는 일련의 행위를 말하며, 이를 통해 구조물 성능평가 및 성능개선의 정량적 기준을 제공하는 구조진성 평가의 첫 번째 단계이다. 적절한 손상 모니터링 체계의 필요조건은 1) 구조 응답 신호의 취득, 2) 취득신호로부터 유용한 특징정보의 추출, 3) 특징정보의 분류를 통한 손상위치와 크기의 식별 등을 포함한다(Peeters, 2000; Farrar et al., 2000; Kim and Stubbs, 1995).

1980년대 이후 구조물의 가속도 응답신호의 계측 및 분석을 통해 모드특성치(Modal parameters)를 추출하고 이를 이용하여 비파괴적으로 구조손상을 검출하려는 진동기반 손상 모니터링 연구가 활발히 진행되어 왔다(류정선과 윤정방, 1987; Sohn et al., 2003). 손상 모니터링을 위해 고유진동수나 모드형상과 같은 모드특성치를 이용하는 가장 근본적인 이유는 이를

의 계측이 구조물의 가진 조건에 거의 제약을 받지 않아 비교적 계측하기 쉽고, 신속한 구조물의 상태 진단에 용이하기 때문이다. 하지만, 공용 중 외부 환경에 놓이는 장대 교량과 같은 대형 구조물의 경우, 온도변화와 같은 환경 요인이 구조물의 거동에 직접적인 영향을 미친다. 그러므로 이들 대형 구조물의 손상검색을 위한 입력 자료로서 모드특성치의 적합성은 온도 불확실성의 관점에서 신중하게 고려되어야 한다. 즉, 계측온도가 변화함에 따라 대상 구조물의 모드특성이 변화하며, 이로 인해 계측된 모드특성의 변화가 실제 손상 발생에 기인하였는지를 식별해야 하는 이차적인 분석과정이 필요하다. 이와 관련하여, 온도의 변화가 교량의 진동 특성에 어떠한 영향을 미치는 지에 대한 실험적 연구 결과들이 발표되고 있다 (Cornwell et al., 1999; Farrar et al., 2000; Peeters and De Roeck, 2000; Kim and Stubbs, 2002; Kim et al., 2003; Kim et al., 2005; 김정태 등, 2003). 이들의 연구에서는, 구조적으로 건전한 교량의 동적 응답거동에 미치는 온도변화의 영향이 상당히 큰 것으로 분석되었다. 공용중인 교량의 경우, 온도변동 환경 하에서는 손상발생으로 유발되는 고유진동수의 변화를 식별하기 힘든 것으로 나타났다. 또한, 온도 변동 환경 하에서 계측된 진동모드 특성치를 사용하여 구조손상의 위치와 크기를 추정 시에는 손상검색모델의 정확도가 크게 저하되는 것으로 나타났다.

실 구조물의 진동기반 손상 모니터링 체계를 실현하기 위해서는 다음과 같은 두 가지 관점에서 해결 방안을 강구하여야

교신저자 김정태 : 부산광역시 남구 대연3동

051-620-6227 idis@pknu.ac.kr

한다. 먼저, 계측 모드의 변화가 손상과 온도 요인 중 어느 것에 기인하는지를 구분하여야 하며, 손상유발 모드특성 변화와 온도유발 모드특성 변화를 구분할 수 있는 시스템 식별 기법에 대한 연구가 필요하다. 이를 위해, 온도유발 모드특성의 변화를 어떻게 구분하고 또한 어떻게 정량화 하느냐는 중요한 연구과제이다. 다음으로, 손상검색 결과상의 정확한 손상경보를 온도유발 오류로부터 어떻게 식별하는가 하는 문제이다. 일반적으로 손상경보 결과는 (1) 참 경보(True-alarm), (2) 거짓 경보(False-positive alarm), (3) 경보 실패(False-negative alarm) 중 하나에 속한다. 여기서, 거짓경보는 발생하지 않은 상황을 발생한 것으로 잘못 경보 하는 것으로 정의되며 경보실패는 실제로는 발생한 문제 상황을 경보 하지 못하는 것으로 정의된다. 이상과 같은 손상검색 오류는 다음과 같은 두 가지 상이한 상황에서 발생한다. 첫 번째 상황은 실제 손상이 발생한 경우이다. 이 경우, 실제 손상에 의해 진동특성의 변화와 환경적 요인에 기인한 진동특성의 변화가 계측되어, 이로 인해 경보실패 또는 거짓경보 형태의 오류가 발생한다. 둘째는, 실제 손상은 발생하지 않고 큰 온도 변화만이 발생한 경우이다. 이 경우, 실제 손상에 의한 진동특성의 변화는 없지만 온도변화 유발 진동특성의 변화가 계측되어, 이로 인해 거짓경보 형태의 오류가 발생한다. 그러므로 이와 같이 온도 영향으로 인해 불가피하게 발생하는 손상발생 경보, 손상위치 예측, 손상크기 산정의 정확도를 정량적으로 분석하여 온도유발 손상검색 오류를 정량적으로 평가하여야 한다.

본 논문에서는 온도유발 불확실성 조건하에서 손상의 발생 및 그 위치를 예측할 수 있는 진동기반 손상검색 알고리즘을 제안하고자 한다. 연구내용은 다음과 같은 세 단계로 정리되었다. 첫 번째로, 모형 판형교를 대상으로 불확실한 온도조건에서 일련의 모드 특성치를 계측한 실험과정을 요약하였다. 두 번째로, 대상 구조물의 손상유발 고유진동수 변화의 패턴을 분석하고 온도유발 이상상태를 확률 통계적으로 구분할 수 있는 손상경보 모델을 정식화 하였다. 세 번째로, 모드변형에너지 개념에 근거한 손상지수법을 적용하여 대상 구조물내의 손상의 위치를 예측하였다. 이를 위해 대상 구조물에 대한 온도와 고유진동수 비의 관계를 장기 실험 계측하여 고유진동수 보정 경험식을 구하였으며, 이를 적용하여 온도유발 고유진동수 계측 오차 및 이에 의한 손상검색 오류를 최소화 하였다.

## 2. 대상구조물과 진동모드실험

본 연구의 실험 대상으로 Fig. 1과 같은 단 지간 강 판형(Steel plate-girder)교량 모형을 선정하였다. Fig. 1(a)는 지간 2m인 모형 교량의 횡 단면이며, 좌측 단은 핀 지점으로 그리고 우측 단은 롤러 지점으로 단순 지지되었다. Fig. 1(b)에 보이는 것 같이 상부 구조는 상판(Deck)과 상판지지 시스템으로 구성되었다. 상판은 두께 5mm와 폭 50cm의 강판으로 만들어졌다. 상판지지 시스템은 두 개의 13cm 깊이 강 판형과 세 개의 중공 직사각형 세로 보로 구성되었다. 세로 보들은 두께 3mm와 깊이 30mm의 가로 보에 의해 지지되었다. 하부 구조

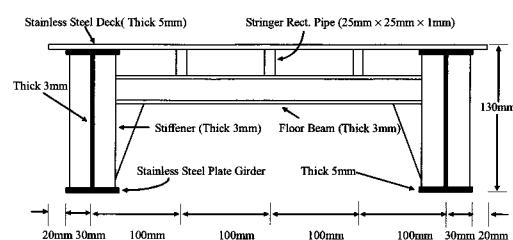
로서, 두 개의 판형 거더를 지지하는 교각들은 강봉(Steel rod)과 강블럭(Steel block)으로 만들어 졌는데, 네 개의 원형 강봉이 12cm × 22cm × 72cm의 강블럭에 고정되었다. 전체 4개의 강블럭들이 실험용 모형 프레임 위에 볼트연결 고정되어 실험구조물의 설치가 완료되었다.

실험실 모형실험은 온도 변화와 구조강성의 변화 조건하에서 대상 구조물의 모드특성의 변화를 계측하도록 진행되었다. 모형실험에서 온도 이외의 환경요인은 고려되지 않았다. Fig. 2 는 실험구조물 상에 설치된 가속도계와 가진기 위치를 도시한 것이다. 남쪽 거더(South girder)에 9개 위치(Stations 1-9)와 북쪽 거더(North girder)에 9개 위치(Stations 10-18)를 선정하여 총 18개의 센서 위치가 선정되었으며, 하나의 고정된 가진 위치가 선정되었다. 이를 통해 최소한 초기 4차 진동모드의 모드형상을 계측하고자 하였다.

다음으로, 가진 시스템과 가속도 계측시스템을 설치하였다. 각 센서 위치에 Dytran 3101 모델 가속도계를 설치하였다. 대상구조물의 휨 거동 응답을 계측하기 위해 가속도계들은 거더 복부 중앙에 연직방향으로 부착하였다. 남쪽 거더의 6번 센서 위치의 상판 위에 연직방향으로 VTS-100 전자기(Electromagnetic) 가진기를 설치하였으며, 랜덤(Random) 입력 가진을 통한 진동실험을 준비하였다.



(a) Model bridge schematic



(b) Deck and girders

Fig. 1 Model plate-girder bridge

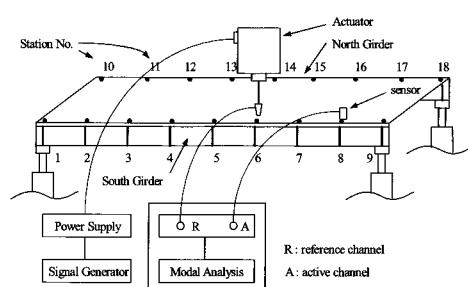


Fig. 2 Test setup for model plate-girder bridge

랜덤신호발생기(Random-signal generator)를 사용하여 50Hz-100Hz 사이의 통과주파수대역(Frequency band-pass)의 랜덤신호를 생성하였으며, 모형교량에 가해지는 가진력 및 가진 주파수는 가진기 첨단에 부착된 가속도센서로부터 계측되어 신호분석기를 통해 제어되었다. 신호분석기로는 8채널의 SA-390와 PC가 사용되었으며 가속도 응답과 파워스펙트럼 및 가속도응답신호를 계측하였다. 계측된 신호로부터 대상구조물의 모드특성을 추출하는 실험모드해석을 위해 Spectral Dynamics의 STAR-Modal 소프트웨어를 사용하였다.

대상구조물에 대한 장기간 모니터링이 1999년 12월부터 2000년 6월까지 7개월간 수행되었다. 이 기간 동안 실험 온도는 섭씨 영하 3도에서 영상 30도 사이에서 변동하였다. Fig. 3은 대상구조물이 비손상 상태이고 계측온도가 섭씨 23도인 실험조건에서 얻은 초기 4개의 진동모드형상이다. Fig. 3(a)와 3(c)는 각각 1차 흔 모드와 2차 흔 모드이며, Fig. 3(b)와 3(d)는 각각 1차 비틀림 모드와 2차 비틀림 모드를 보여준다. 동일한 비손상 상태에서 12개의 다른 온도조건에 대한 진동계측실험이 수행되었다. 계측된 결과는 각 진동모드에 대해 계측온도-고유진동수 관계로 분석되었다. Fig. 4는 대상구조물의 변동하는 온도 조건과 고유진동수의 관계를 실험적으로 계측한 결과이며, Fig. 4(a)-4(d)는 각각 4개 진동모드의 계측온도-고유진동수 관계이다. 하나의 온도조건에서, 예를 들어 영하 3도의 경우에서, 연속적으로 10회의 진동계측을 수행했으며 이를 통해 10개의 고유진동수 결과를 얻었다. 모든 진동모드에서 온도가 증가함에 따라 고유진동수가 감소하는 것으로 관찰되었다. 이 같은 온도 영향 현상은 비틀림 모드 보다는 흔 모드에서 상대적으로 더 민감하게 나타났다. 또한, 흔 모드와 비틀림 모드에서 모두 1차 모드가 2차 모드에 비해 온도영향에 비교적 더 민감한 것으로 관찰되었다. 각 진동모드에서 온도단계별 고유진동수의 평균치를 구하였다. Table 1은 비손상 대상구조물의 6단계 온도조건(0°C, 10°C, 20°C, 23°C, 25°C, 30°C)의 고유진동수를 요약한 결과이다.

Table 1 Pre-damage natural frequencies of model bridge at various temperatures

Mode No	Frequency (Hz) of undamaged structure at various temperature					
	0°C	10°C	20°C	23°C	25°C	30°C
1	76.150	71.822	68.034	66.194	65.328	63.164
2	101.455	98.320	95.185	94.244	93.617	92.050
3	212.223	203.694	195.165	192.606	190.901	186.636
4	295.347	289.123	282.899	281.031	279.787	276.674

Table 2 Post-damage natural frequencies(Hz) of model bridge measured at 23°C

Damage	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
Case 1	64.410	94.248	192.683	281.292
Case 2	62.475	92.395	190.863	279.937

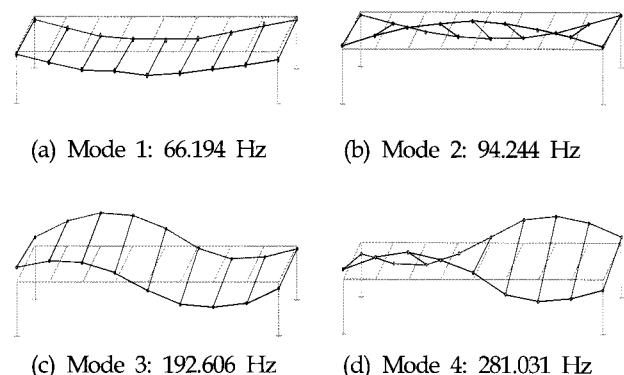


Fig. 3 Pre-damage mode shapes of model bridge measured at 23°C

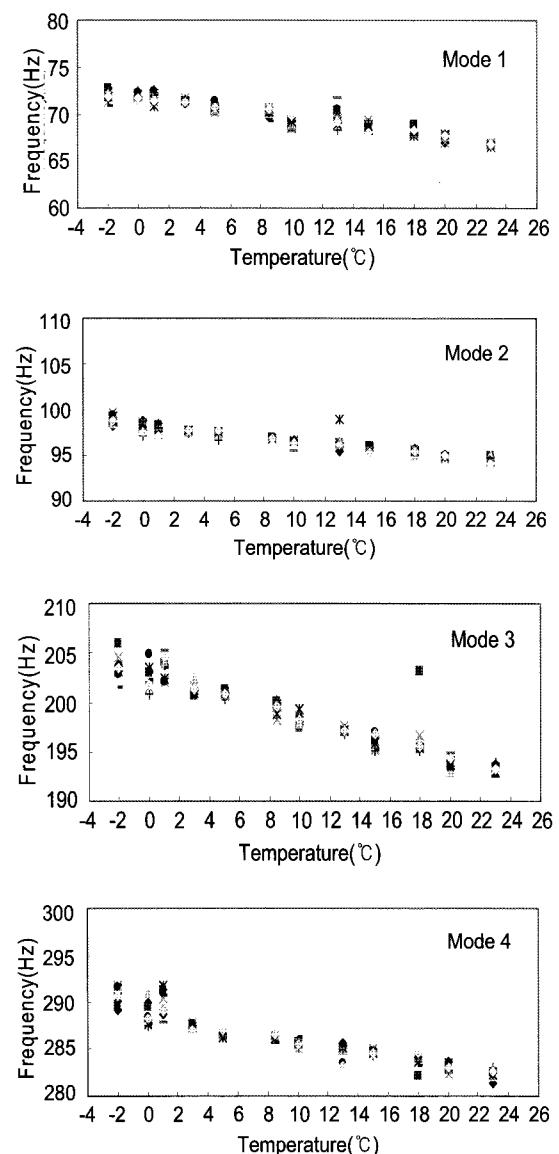


Fig. 4 Pre-damage temperature-frequency history at -2°C~23°C

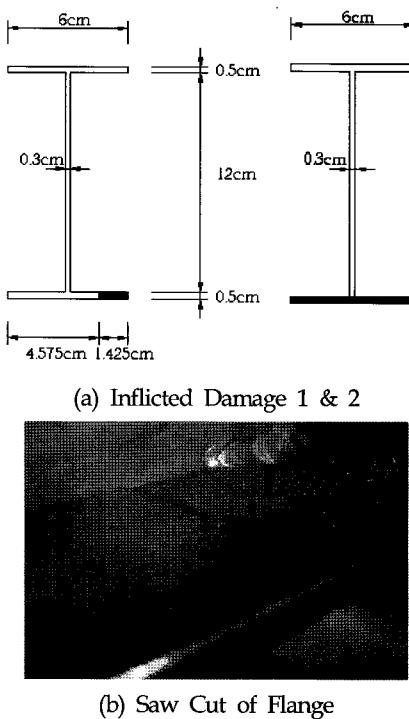


Fig. 5 Damage inflicted in test structure

Fig. 5에 도시된 것 같이, 대상구조물에 대한 손상이 남쪽 거더(Fig. 3의 전면 거더)의 좌측 지점으로부터 0.99m 위치( $x/L=0.495$ )인 지간 중앙 인근에 2 단계의 절단을 통해 도입되었다. Fig. 5에 도시된 것과 같이 1 단계 절단(손상 1)에서는 하부 플랜지의 외측을 절단하였으며, 2 단계 절단(손상 2)에서는 하부 플랜지 전 단면을 절단하였다. 거더 플랜지의 절단을 위해 쇠톱을 사용하였으며 절단부의 두께는 약 2mm이다. 다음으로, 대상구조물의 손상상태의 가속도 신호응답을 계측하였으며 이로부터 진동모드를 식별하여 고유진동수와 모드형상을 추출하였다. 이를 위해 손상 1과 손상 2의 각각의 경우에 대해 온도가 섭씨 23도의 조건에서 일련의 가진 실험을 수행하였다. 가속도 응답신호는 전체 18개 센서 위치에서 취득되었으며 실험모드해석을 통해 손상후 고유진동수와 모드형상을 계측하였다. Table 2는 섭씨 23도의 온도조건에서 대상구조물로부터 계측된 2개 손상 경우들의 고유진동수를 요약한 것이다.

### 3. 통계적 손상경보

#### 3.1 통계적 손상경보 알고리즘

대상구조물의 손상발생을 모니터링 하기 위해 확률통계적 Process control 기법을 도입하였으며, 이는 고유진동수와 같은 구조시스템의 특징(Feature)의 확률분포를 분석하여 손상상태를 식별 할 수 있는 분석법이다. 구조시스템이 비정상 상태일 때 모드특성치와 같은 특징벡터의 확률분포가 변화하며, 이는 확률분포의 평균과 표준편차의 변화를 통해 분석할 수 있다. 통상 제어차트(Control chart)는 시간 또는 온도와같은 독립변

수에 관한 구조시스템의 변화 정도를 산정하는데 사용되며, 이를 적용한 Auto-regressive 평가를 통해 구조시스템의 이상상태를 식별 할 수 있다(Schalkoff, 1992; Sohn et al., 2000; Kim and Stubbs, 2003).

먼저, 구조시스템의 모드특성치를 특징벡터  $f_{ij}$ 로 정의하고, 그 평균 변분량(Mean-variation)을 산정한다. 여기서 첨자  $i$ 는 임의의  $i$  번째 세부그룹을 의미하며, 특징벡터를 총  $q$ 개의 세부그룹( $i = 1, \dots, q$ )으로 분류하였다. 또한 첨자  $j$ 는 각 세부그룹의 관측회수( $j = 1, \dots, p$ )를 의미한다. 특징벡터의  $i$  번째 세부그룹의 평균  $\bar{X}_i$ 과 표준편차  $S_i$ 는 다음과 같다.

$$\bar{X}_i = \text{mean}(f_{ij}), S_i = \text{std}(f_{ij}) \quad (1)$$

각 세부그룹의 분포특성은 중심제약이론(Central limit theorem)에 근거하여 정규분포로 가정되었다. 다음으로, 특징벡터의 제어한계(Control-limit)를 결정한다. 제어한계는 중심선과 상한경계(Upper-limit)와 하한경계(Lower-limit)로 구성된다. 제어한계의 중심선  $\mu$ 와 제어한계의 상한경계  $\sigma_U$  및 하한경계는 다음과 같다.

$$\sigma_U, \sigma_L = \mu \pm Z_{\alpha/2} \frac{S^2}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

여기서 중심선  $\mu$ 는 세부그룹 평균값 집합  $\bar{X}_i$ 의 평균치  $\mu = \text{mean}(\bar{X}_i)$ 이며 분산  $S^2$ 는 세부그룹 분산 집합  $S_i^2$ 의 평균치  $S^2 = \text{mean}(S_i^2)$ 이다.  $Z_{\alpha/2}$ 는 평균이 0이고 표준편차가 1인 표준정규분포상의  $P[z \geq Z_{\alpha/2}] = \alpha/2$  확률을 의미한다.

다음으로, 세부그룹 평균값 집합  $\bar{X}_i$ 를 정규분포로 가정하여식 (2)의 제어한계를 신뢰한도(Confidence level)  $100(1-\alpha)\%$ 로 정한다. 제어한계를 벗어나 상한경계와 하한경계 밖에 속하는 일련의 Outlier들을 관찰하여 손상의 발생과 같은 이상상태의 발생을 분석한다. 이 과정에서 사용되는 정규분포가 실제 분포와 유사한지 그 정도에 따라 손상발생 예측의 정확도가 영향을 받는데, 분포특성이 극단적으로 비정규성을 보이지 않는 한, 이 같은 정규분포의 가정은 실제 적용 가능한 것으로 보고되고 있다(Montgomery, 1997).

#### 3.2 실험구조물의 손상경보

Fig. 4에 도시된 것과 같은 4개 진동모드의 고유진동수가 실험구조물로부터 계측되었다. 전술된 통계적 손상경보 알고리즘을 적용하기 위해 (1) 구조특징으로 고유진동수를 선정하였으며, (2) 총 세부 그룹의 수  $q$ 는 섭씨 영하 2도부터 26도 사이에 계측된 13개의 온도조건을 사용하여 13을 선택하였고, (3) 세부그룹의 관측회수  $p$ 는 앞서 설명된 것과 같이 각 온도 조건에서 고유진동수를 10회 반복 계측하였기 때문에 10을 선정하였다.

고유진동수의 확률밀도곡선은 정규분포로 가정하여 계산되

었다. Fig. 6은 모드 1의 확률밀도곡선이며, 섭씨 영하 2도에서 영상 26도 사이의 13개 온도 조건에 대한 확률밀도곡선이 도시되었다. 각각의 곡선은 해당 온도에서의 고유진동수의 온도 유발 변동성을 보여준다. 모든 확률밀도곡선을 표준화한 후 그 평균을 구하여 단일 표준정규분포곡선을 구하였다. Fig. 7(a)-(d)는 각각 진동모드 1-4의 표준정규분포곡선이다. 각 모드에 대해, 식 (2)와 관련하여, 제어한계의 중심선  $\mu$ 은 0이고 제어한계의 상한경계  $\sigma_U$  및 하한경계  $\sigma_L$ 로 대표되는 통계적 패턴인식모델이다. 예를 들면, 모드 1의 패턴인식모델은 Fig. 7(a)와 같이 상한경계  $\sigma_U = 2.263$ (신뢰한도 98.8%)와 하한경계  $\sigma_L = -2.456$ (신뢰한도 -99.3%)를 갖는다. 비 손상상태의 관측치는 이들 제어한계 내에 위치하는 것으로 예상되며, 이들 제어한계를 벗어나는 관측치는 손상발생의 경우에 속하는 것으로 예측된다.

Fig. 7에 도시된 각 모드별 제어한계의 상한경계  $\sigma_U$  및 하한경계  $\sigma_L$ 를 Fig. 4에 대입하였다. Fig. 8은 제어한계가 적용된 각 모드별 온도-고유진동수 관계선도이다. 23°C에서 계측된 손상후 고유진동수를 Fig. 8에 입력하였다. 그 결과, (1) 제어한계가 적용된 모드 1의 온도-고유진동수 선도에서는 손상 1과 손상 2를 모두 식별 할 수 있었으며, (2) 모드 2-4의 온도-고유진동수 선도에서는 손상 1은 식별 할 수 없었으며 손상 2는 식별 할 수 있었다. 이 결과, 모드 2-4이 모드 1에 비해 상대적으로 온도의 영향을 많이 받은 것으로 나타났다.

#### 4. 진동기반 손상예측

##### 4.1 손상지수법

구조물에 발생한 손상의 위치는 Kim et al.(2003)<sup>9)</sup> 제안한 모드변형에너지기반 손상지수법(Modal strain energy-based damage index method)으로부터 예측 할 수 있다. NM개의 진동모드가 계측된 NE 요소의 구조시스템을 고려하자. 위치  $j$ 의 손상지수는 다음과 같이 정의된다.

$$DI_j = \left[ \sum_{i=1}^{NM} e_{ij}^2 \right]^{-1/2} \quad (3)$$

여기서 첨자  $i = 1, \dots, m, n, \dots, NM$ 이며, 첨자  $j = 1, \dots, q, \dots, NE$ 이다. 또한  $0 \leq DI_j < \infty$ 이며  $DI_j$ 값이 국부 최대값을 보이는 위치를 손상위치로 식별한다.  $e_{ij}$ 는  $i$ 번째 모드와  $j$ 번째 요소의 위치발견 오류이며,  $e_{ij} = 0$ 은 위치발견오류가 0으로서 손상위치가  $j$ 번째 요소와 일치하는 것을 의미한다. 이 같은 위치발견오류는 다음과 같은 모드 정보와 민감도 식으로부터 정의된다.

$$e_{ij} = \Omega_m \left| \sum_{k=1}^{NM} \Omega_k - F_{mq} \right| \sum_{k=1}^{NM} F_{kj} \quad (4)$$

여기서  $F_{ij}$ 는  $i$ 번째 모드와  $j$ 번째 요소의 모드변형에너지 민감도를 의미하며, 두 위치  $x_j$ 와  $x_{j+1}$  사이에 놓인  $j$  요소의 민감도는 다음과 같다.

$$F_{ij} = \int_{x_j}^{x_{j+1}} EI\{\phi_i''(x)\}^2 dx / \int_0^l EI\{\phi_i''(x)\}^2 dx \quad (5)$$

또한,  $\Omega_i$ 는 손상 전후의  $i$ 번째 고유치의 상대적 변화율로서,  $\Omega_i = \delta\omega_i^2/\omega_i^2$ 이며  $\delta\omega_i^2 = \omega_i^{*2} - \omega_i^2$ 이다. 기호  $\omega_i$ 와  $\phi_i$ 는 각각  $i$ 번째 고유진동수와 모드형상을 의미하며, 별표는 손상 후 상태를 의미한다.

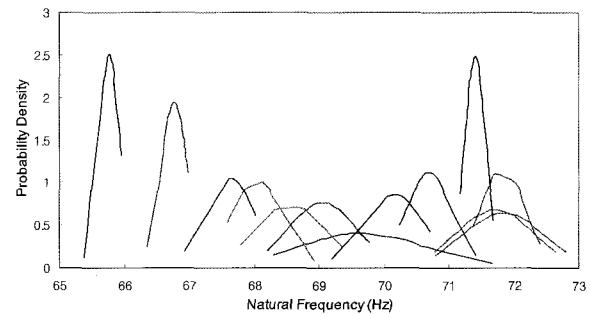


Fig. 6 Probability density curves of natural frequencies at 13 temperature points: Mode 1

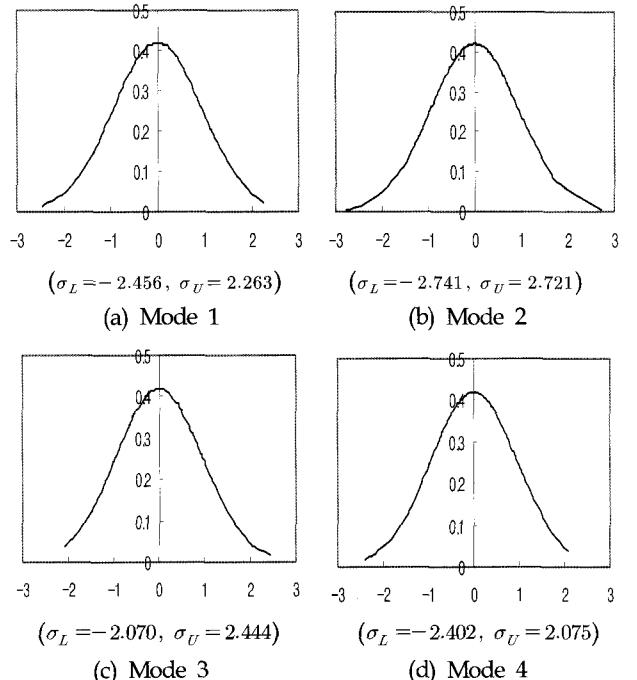


Fig. 7 Standard normal probability density curves of pre-damage natural frequencies with rejection-trigger values

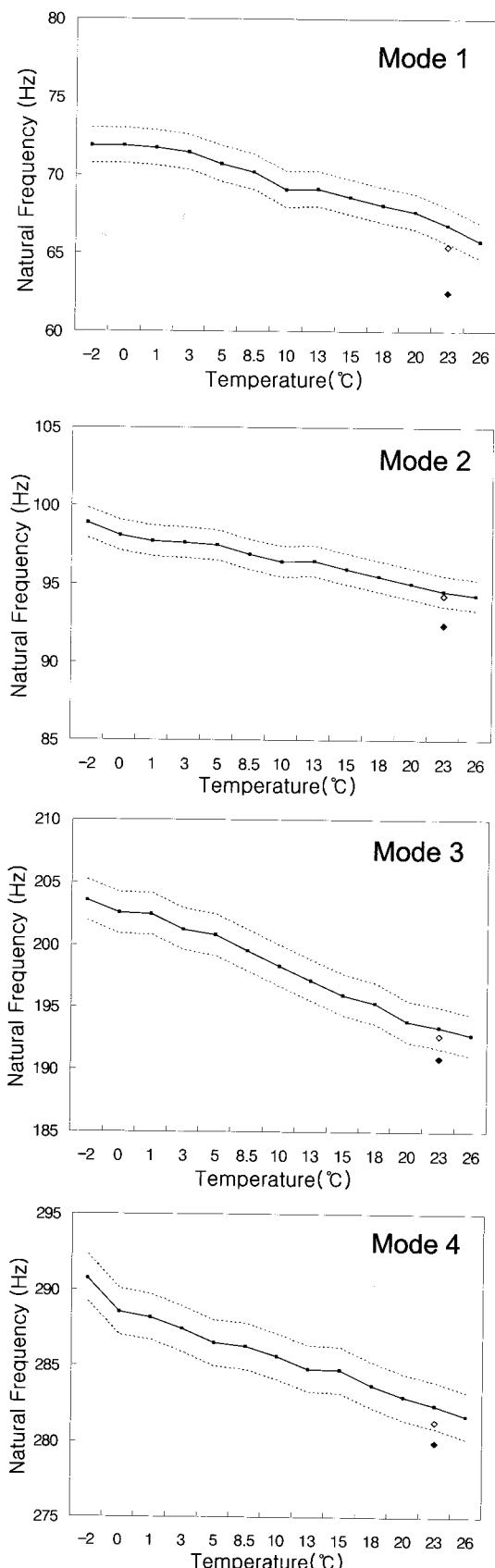


Fig. 8 Damage occurrence on temperature-frequency control chart for Mode 1 ~ Mode 4

#### 4.2 온도유발 불확실 조건하의 손상예측

Fig. 2의 남쪽 거더를 대상으로 손상검색을 수행하였다. 손상검색모델로는 Euler-Bernoulli 보 모델을 사용하였으며, 전체 200개의 균일 길이 보 요소를 사용하였다. 각 요소는 잠정적 손상 위치에 해당하며 요소 길이는 1.0cm이다. Fig. 3과 같은 실제 계측된 모드형상의 제한된 좌표로부터 전체 200개 요소(201개 가상 절점)의 모드형상 값은 읽기 위해 수치 보간법을 사용하였다. 201개의 가상 절점의 모드형상 값으로부터 모드곡률  $\phi''_i(x)$ 을 구한 후 이로부터 식 (5)의 모드 민감도  $F_{ij}$ 를 계산하였다. 다음으로 손상 전후의 고유치의 변화율  $\Omega_i = \delta\omega_i^2/\omega_i^2$ 은 Table 1(6 단계 온도변화시의 비 손상 상태의 고유진동수)과 Table 2(23°C의 손상 1와 손상 2 경우의 고유진동수)의 손상 전후 고유진동수를 사용하여 구하였다. 이를 결과를 식 (3)에 입력하여, 전체 200개 요소의 손상지수를 구하였다. 이를 200개 요소의 손상지수 값은 아래의 식 (6)을 통해 정규손상지수로 변환된다.

$$Z_j = (DI_j - \mu_{DI_j})/\sigma_{DI_j} \quad (6)$$

여기서  $\mu_{DI_j}$ 와  $\sigma_{DI_j}$ 는 손상지수  $DI_j$ 의 평균과 표준편차이다. 정규손상지수의 신뢰한계를  $Z_j \geq 3(99.7\%)$ 으로 설정하여 이 한계를 넘는 경우를 손상발생 요소로 예측하였다.

Table 1에 기술된 것과 같이 0°C와 30°C 사이의 6 단계에서 계측된 고유진동수와 Table 2에 기술된 것과 같은, 23°C에서 계측된 고유진동수를 이용하여, 손상 전후의 고유진동수를 각기 불일치하는 온도조건으로 입력할 수 있는 시나리오를 6 가지로 구성하였다.

- |                   |                     |
|-------------------|---------------------|
| ① 비손상 고유진동수(0°C)  | - 손상후 고유진동수 (23°C), |
| ② 비손상 고유진동수(10°C) | - 손상후 고유진동수 (23°C), |
| ③ 비손상 고유진동수(20°C) | - 손상후 고유진동수 (23°C), |
| ④ 비손상 고유진동수(23°C) | - 손상후 고유진동수 (23°C), |
| ⑤ 비손상 고유진동수(25°C) | - 손상후 고유진동수 (23°C), |
| ⑥ 비손상 고유진동수(30°C) | - 손상후 고유진동수 (23°C)  |

이상의 6개 비손상-손상 상태 온도조건 시나리오의 손상검색 결과는 Fig. 9에 도시되었으며, Table 3에 정리하였다. 실제 손상위치는 손상검색모델상의 요소 103에 해당한다. 비손상 상태의 고유진동수와 손상후 고유진동수가 모두 23°C에서 계측되어 온도 불일치 오류가 없었던 ④의 손상검색 결과는 손상 1 및 손상 2의 두 손상경우에서 모두 요소 100번을 예측하였으며, 이는 위치오류 1.5%에 해당하는 좋은 결과이다. 온도 불일치 오류가 10°C에서 20°C로 증가 할수록 손상검색 오류가 6%~8%로 증가하는 양상을 보이고 있다.

비 손상 상태의 고유진동수의 온도유발 변화를 보정하였다. Fig. 4에 도시된 것과 같이 온도 대역 -3°C와 26°C에서 연속적으로 계측된 고유진동수를 분석하였다. Fig. 10과 같이 각 모드의 고유진동수를 20°C 온도를 기준으로 상대고유진동수 비로

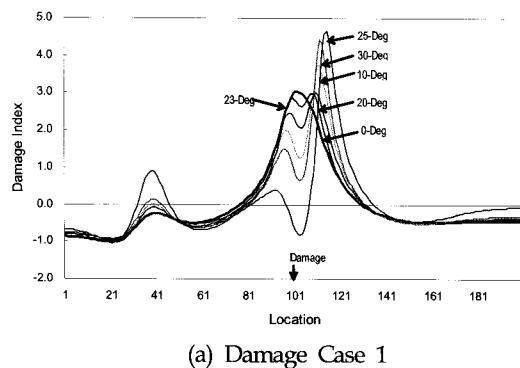
변환한 후 온도-상대고유진동수(T-FR) 선형관계 회귀 직선을 분석하였다. 전체 4개의 진동모드에 대한 T-FR 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} FR_1 &= -0.0063T + 1.1259 \\ FR_2 &= -0.0033T + 1.0679 \\ FR_3 &= -0.0044T + 1.0948 \\ FR_4 &= -0.0022T + 1.0439 \end{aligned} \quad (7)$$

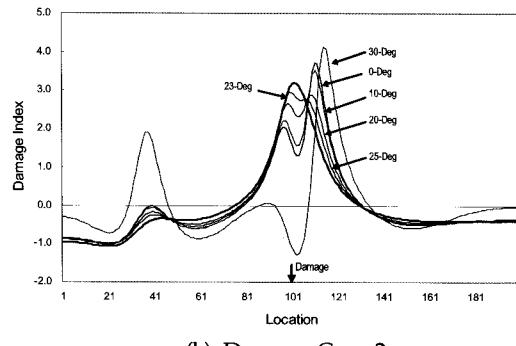
여기서  $FR_i$ 는  $i$ 번째 모드의 고유진동수 비이며  $T$ 는 섭씨 온도이다. 비 손상 상태의  $20^{\circ}\text{C}$  고유진동수의 평균값을 식 (7)에 대입하여, 다시 정리하면 다음과 같은 고유진동수 보정식을 구할 수 있으며, 이를 통해 온도 보정된 고유진동수를 구하였다.

$$\begin{aligned} f_1 &= FR_1 \times 67.635\text{Hz} \\ f_2 &= FR_2 \times 95.004\text{Hz} \\ f_3 &= FR_3 \times 193.847\text{Hz} \\ f_4 &= FR_4 \times 282.927\text{Hz} \end{aligned} \quad (8)$$

Fig. 11은 온도보정된 고유진동수를 사용한 손상검색 결과이다. 손상 전후의 온도가  $23^{\circ}\text{C}$ 로서 일치한다. 손상검색 결과, 두 손상경우에서 요소 100을 손상위치로 예측하였으며, 이는 실제 손상위치가 요소 103에 해당하므로, 이는 매우 높은 정확도라고 할 수 있다.



(a) Damage Case 1



(b) Damage Case 2

Fig. 9 Damage Localization in temperature-induced conditions

Table 3 Damage location prediction in model bridge

Damage case	Real damage location at $23^{\circ}\text{C}$ (Element No.)	Predicted damage location Element No. (location error %)					
		$0^{\circ}\text{C}$	$10^{\circ}\text{C}$	$20^{\circ}\text{C}$	$23^{\circ}\text{C}$	$25^{\circ}\text{C}$	$30^{\circ}\text{C}$
1	100	109 (4.5)	112 (6.0)	109 (4.5)	103 (1.5)	115 (7.5)	113 (6.5)
2	100	112 (6.0)	112 (6.0)	110 (5.0)	103 (1.5)	102 (1.0)	116 (8.0)

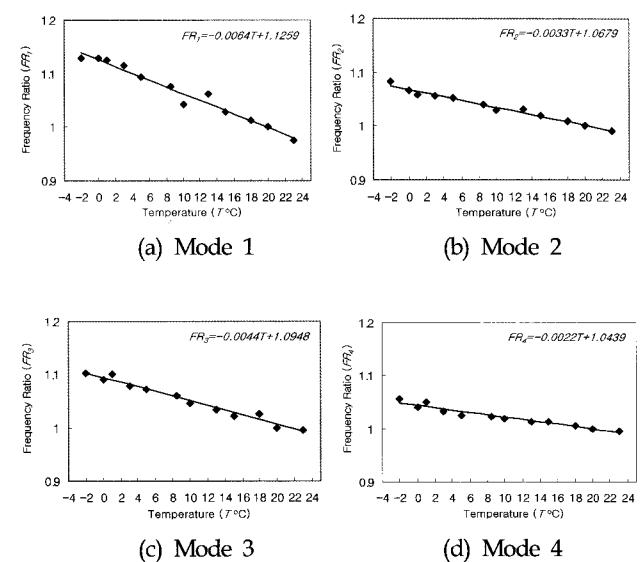
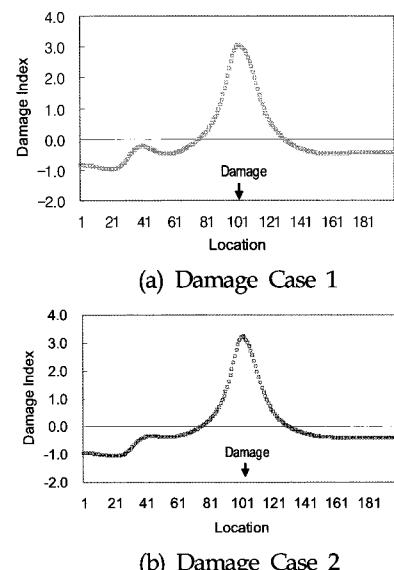
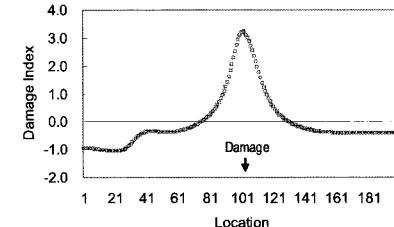


Fig. 10 Empirical frequency-correction formulas



(a) Damage Case 1



(b) Damage Case 2

Fig. 11 Damage localization using temperature-adjusted natural frequencies

## 5. 요약 및 결론

본 논문에서는 온도유발 불확실성 조건하에서 손상의 발생과 그 위치 및 크기를 예측할 수 있는 진동기반 손상검색 알고리즘을 제안하였다. 연구내용은 다음과 같은 세 단계로 정리되었다. 첫 번째로, 모형 판형교를 대상으로 불확실한 온도조건에서 일련의 모드 특성치를 계측한 실험과정이 요약되었다. 두 번째로, 대상구조물의 손상유발 고유진동수의 변화 패턴을 분석하고, 그 온도유발 이상상태를 확률 통계적으로 구분할 수 있는 손상경보 모델이 정식화 되었다. 세 번째로, 모드변형에 너지 개념에 근거한 손상지수법이 사용되었으며, 모형 강판형교의 손상 위치 예측이 수행되었다. 이를 위해 실험구조물에 대한 온도-고유진동수 실험 관계식 및 고유진동수 보정 경험식이 분석되었다. 또한, 온도 보정된 고유진동수를 사용하여 손상검색을 수행하여, 온도유발 손상검색 오류를 최소화 하는 방법을 검증하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 제안된 통계적 손상경보 알고리즘을 적용한 결과, 모드 1은 손상 1, 2를 모두 식별할 수 있었으나, 모드 2-4는 손상 1은 식별할 수 없었고 손상 2는 식별할 수 있었다. 이 결과, 모드 2-4가 모드 1에 비해 상대적으로 온도의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

(2) 손상위치 검색에 있어 온도 불일치 오류가 존재할 경우 약 6%-8%의 손상검색 오류를 보인 반면, 제안된 온도보정 공식을 적용하였을 경우 온도 불일치 오류가 없었던 결과와 동일한 결과를 보여 매우 높은 정확도를 보였다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 스마트 사회기반 연구센터의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

- 류정선, 윤정방 (1987). “랜덤파랑하중에 대한 Guyed Tower의 동적거동해석”, 한국해양공학회지, 제1권, 제1호, pp 57-64.  
 김정태, 윤재웅, 백종훈 (2003). “강판형의 진동모드특성에 미치는 온도의 영향”, 한국해양공학회지, 제17권, 제6호, pp 58-64.  
 Cornwell, P., Farrar, C.R., Doebling, S.W. and Sohn, H. (1999). "Environmental Variability of Modal Properties", Experimental Techniques, Vol 23, No 6, pp 45-48.  
 Farrar, C.R., Cornwell, P.J., Doebling, S.W. and Prime, M.B. (2000). Structural Health Monitoring Studies of the Alamosa Canyon and I-40 Bridges, Los Alamos National Laboratory Report, LA-13635-MS.  
 Kim, J.T., Park, J.H. and Kim, W.J. (2005). "Vibration-based

- Structural Health Monitoring under Uncertain Temperature Conditions", Safety and Reliability of Engineering Systems and Structures (ICOSSAR 2005), Rome, pp 2921-2928.  
 Kim, J.T., Ryu, Y.S., Cho, H.M. and Stubbs, N. (2003). "Damage Identification in Beam-Type Structures: Frequency-Based Method Vs Mode-Shape-Based Method", Engineering Structures, Vol 25, No 1, pp 57-67.  
 Kim, J.T. and Stubbs, N. (1995). "Model-Uncertainty Impact and Damage-Detection Accuracy in Plate Girder", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol 121, No 10, pp 1409-1417.  
 Kim, J.T. and Stubbs, N. (2002). "Improved Damage Identification Method Based on Modal Information", Journal of Sound and Vibration, Vol 252, No 2, pp 223-238.  
 Kim, J.T. and Stubbs, N. (2003). "Nondestructive Crack Detection Algorithms for Full-Scale Bridges", Journal of Structural Engineering, ACSE, Vol 129, No 10, pp 1358-1366.  
 Kim, J.T., Yun, C.B. and Yi, J.H. (2003). "Temperature Effect on Frequency-Based Damage Detection in Plate-Girder Bridges", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol 7, No 6, pp 725-733.  
 Montgomery, D.C. (1997). Introduction to Statistical Quality Control, John Wiley & Sons Inc., New York.  
 Peeters, B. (2000). System Identification and Damage Detection in Civil Engineering, Ph.D. Thesis, Katholieke Universiteit Leuven.  
 Peeters, B. and De Roeck, G. (2000). "One-Year Monitoring of the Z24-Bridge: Environmental Influences Versus Damage Events", Proc. of The 18th IMAC, San Antonio, TX, USA, pp 1570-1576.  
 Schalkoff, R. (1992). Pattern Recognition-Statistical, Structural and Neural Approaches, John Wiley & Sons Inc., New York.  
 Sohn, H., Czarnecki, J.J. and Farrar, C.R. (2000). "Structural Health Monitoring using Statistical Process Control", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol 126, No 11, pp 1356-1363.  
 Sohn, H., Farrar, C.R., Hemez, F.M., Shucnak, D.D., Strnemates, D.W. and Nadler, B.R. (2003). "A review of structural health monitoring literature: 1996-2001", LA-13976, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos

2007년 9월 4일 원고 접수

2008년 1월 9일 최종 수정본 채택