

강판형의 진동모드특성에 미치는 온도의 영향

김정태* · 윤재웅** · 백종훈*

*부경대학교 해양공학과

**한진중공업(주)

Modal Characteristics of Steel Plate-Girder Under Various Temperatures

JEONG-TAE KIM*, JAE-YOONG YUN**, AND JONG-HOON BAEK**

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

**Hanjin Heavy Industry and Construction Co. Ltd., Busan, Korea

KEY WORDS: Modal Characteristics 진동모드특성, Natural Frequency 고유진동수, Temperature 계측온도, Steel Plate-Girder 강판형

ABSTRACT: The performance of vibration-based damage detection methods is dependent upon the accuracy of modal parameters measured from structures of interest. Vibration monitoring, performed on a structure under uncertain temperature conditions, results in the uncertainty in modal parameters of the structure. In this study, an experiment on the effect of various temperatures on modal characteristics of steel plate-girders is presented. First, the model plate-girder used for the experiment is described. Second, natural frequencies measured from the structure, using two different excitation sources, are described. Third, natural frequencies measured from the structure, under various temperatures, are described. Finally, the relationship between measurement temperature and natural frequency is analyzed.

1. 서 론

대형 구조물들은 설계 및 시공과정에서의 결함 또는 설계 당시에 고려하지 못하였던 각종 요인으로 인하여 구조손상이 발생되며, 또한 사용 기간이 경과함에 따라 노후화 되어 안전성이 위협을 받게 된다. 심각한 정도의 구조손상이 발생한 구조물의 경우에는 설계 당시에 계획되었던 설계사용연한에 크게 못 미칠 정도로 사용연한의 단축을 초래하는 경우도 빈번히 발생하고 있다. 특히 교량, 댐, 해양 구조물, 원자력 발전소 등과 같은 대형 기간시설물들은 각종 운영 하중, 외부 물체에 의한 충격, 지진, 풍 하중, 파랑 하중, 부식 등에 지속적으로 노출되어 있어서, 이들로부터 구조물의 안전을 확보하는 문제는 경제, 사회적으로 지대한 관심의 현안이 되었다 (Stubbs et al., 1990). 이들 대형 구조물들의 손상검색에 사용되는 기술은 비파괴검사법과 더불어 진동특성 측정법 등이 사용되고 있다. 진동특성치를 이용한 구조손상추정법은 구조거동 모니터링 체계와 계측 자료를 통해 구조손상을 검색하는 체계로 구성된다. SID 기법에 기초한 구조계의 손상추정기술은 1970년대에 해양 구조물의 노후화를 진단하는데 적용되기 시작한 이후로 토목, 기계 및 우주항공 등의 분야에서 적용이 확대되고 되고 있다 (Kim et al., 1996).

그 동안의 연구노력에도 불구하고 강판형교와 같이 복합적으로 여러 기능의 구조부재를 포함하는 구조물의 안전도 평가를 위해서는 많은 과제들이 있으며, 특히 기존의 진동모드특성을 사용하는 구조물 손상평가법들을 강판형교에 적용하여 구조물의 손상유무와 손상위치 및 손상도를 평가하기 위해서는 신뢰할 수 있는 진동모드 계측자료의 확보가 필수적이다 (Stephens et al., 1987). 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 모드특성치를 보정할 수 있는 모델이 필요하다 (McConnell, 1995). 온도변화는 구조물에 열변형 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 하는 경우, 이 같은 계측온도 불확실성 요인은 구조물 손상예측의 오류로 나타날 수 있다 (Kim et al., 1996; Kim et al., 2001).

본 논문에서는 강판형 모형을 대상으로 계측온도의 변화에 따른 진동모드특성의 변화를 실험적으로 분석하였다. 이를 통해 강판형의 저차 진동모드의 고유진동수와 계측온도와의 관계를 제시하고자 하였다. 연구 대상인 강판형은 판형, 가로 보, 세로 보 및 상부 데크의 형상과 치수 그리고 지지조건의 종류에 따라 진동모드의 양상을 달리하며, 통상 저차의 굽힘 진동모드

제1저자 김정태 연락처: 부산광역시 남구 용당동 산100번지
051-620-6227 idis@pknu.ac.kr

와 비틀림 진동모드들이 주요 진동형에 해당한다. 강판형 모형을 대상으로 아래의 3 단계의 실험연구를 수행하였다. 첫째, 모드데이터의 측정에 적합한 센서좌표 설계조건을 실험적으로 분석하였다. 측정하고자 하는 진동모드를 위해 설치해야 할 가진기와 센서의 좌표에 관하여 분석하였다. 둘째, 가진 방법에 따른 진동특성치의 차이를 검토하였다. 이를 위해 충격해머법(Impact Hammer Test)과 진동가진법(Shaker Test)의 두 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 셋째, 실험 계측온도에 따른 진동특성치의 변화를 분석하였다. 이를 위해 충격해머법과 진동가진법 각각에 대하여, 계측온도가 섭씨 영하 3°로부터 영상 25° 까지 변동하는 기후 하에서 실험을 수행하여 계측온도와 고유진동수의 관계를 검토하였다.

2. 실험 구조물

실험연구에 사용된 강판형 축소모형의 치수와 형상은 Fig. 1, 경계조건들은 Fig. 2, 그리고 판형 단면 형상은 Fig. 3에 도시하였다. 실물교량의 1/24 정도로 축소된 형태이며, 스테인리스 강판을 사용하였다. 제작시 주형, 횡형, 종형 및 상판은 적절히 용접 연결하였다. 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.

주형과 세로보위에 상판을 얹음으로 강판형 모형이 완성되었다. 다만, 축소모형은 실물구조물의 각 부재 치수 및 재료성질을 정확하게 축소한 형태가 아니며 실물구조와 유사한 구조 진동거동을 일으키는 관점에서 축소된 모형이었다. 경계조건은 일단 핀, 타단 로울러 지점으로 정교하게 제작·설치되었으며, 모형 진동실험의 신뢰도를 높이기 위하여 강판형 모형은 가진장치가 설치된 모형프레임 하에서 실험되었다. 실험에 있어서 온도·습도는 냉난방기를 이용해서 조절하였다.

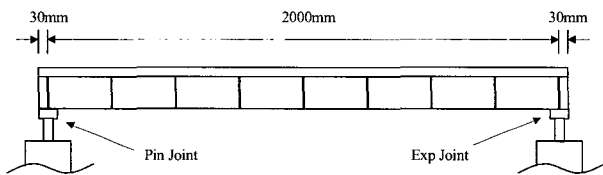


Fig. 1 Schematic of Model Plate-Girder

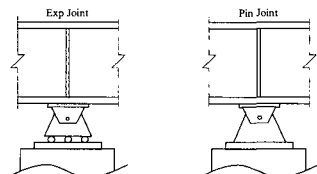


Fig. 2 Support Conditions of Model Plate-Girder

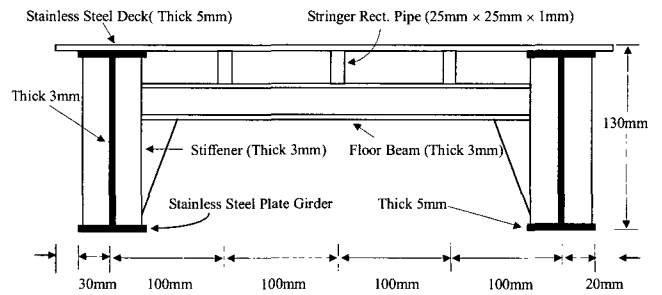


Fig. 3 Cross-Section of Model Plate-Girder

3. 가진방법과 진동모드특성

가진방법에 따른 강판형의 진동모드특성을 검토하기 위하여 충격해머법과 진동가진법을 각각 사용하였다. 실험 온도는 23°였으며 습도는 50%~60% 범위로 유지되었다. 먼저, 충격해머가진을 통해 강판형의 진동특성을 계측하였다. 충격해머법의 실험체계는 Fig. 4에 도시하였다. 충격해머법에 의한 계측은 능동(active)센서(Fig. 4의 3번 계측점)를 일정한 위치에 고정시키고 기준(reference)센서가 부착된 해머를 측정 위치에 따라 이동시키며 가진하여 실험하였다. 전체 18개의 계측점(거더 당 9개 위치)에서 응답신호를 취득하였다 (Ewins, 1986; Randall, 1987).

구조물로부터 가진신호 및 응답신호를 취득하고 모드특성을 분석하기 위해 8채널 신호분석기 SA-390과 모드분석 소프트웨어인 STAR Modal이 사용되었다. 18개의 계측점들을 직교 좌표계상에서 연결하는 모드 모델(modal model)로서 모형 판형교를 단순 모델링하였다. Fig. 5는 3번 계측점에 대한 주파수응답신호(frequency response signal)를 도시한 것이다. 각 계측점에서 24회씩의 가진 및 응답의 취득이 반복되었고, 이들을 전체 16개 계측점 위치에서 수행하였으며, 각 계측점마다 이들 주파수응답신호의 평균을 계산하고 이를 500Hz low-pass 영역에서 분석하여 고유진동수와 모드형상이 추출되었다. 충격해머법을 사용하여 계측한 초기 4개의 고유진동수의 평균과 표준편차가 Table 1에 요약되었다. 또한 이들 4개 모드의 모드형상은 Fig. 6과 같다.

다음으로, 진동기 가진으로부터 강판형의 모드특성을 계측하였다. 진동가진법에는 정현신호와 랜덤신호를 선택하여 가진할 수 있는 VTS-100 가진기가 사용되었다. 가진기의 부가질량이 구조물에 미치는 영향을 최소화하기 위해 정적인 상태에서 재하가 되지 않도록 하였다. 하지만 동적인 가진시에 가진기의 부가질량이 고유진동수에 미치는 영향은 예상되었다. 충격해머법과 마찬가지로 가진기에 기준센서가 설치되어 있다.

진동가진법의 실험체계는 Fig. 6에 도시된 것과 같으며, 가진 위치를 6번 측정점으로 고정하고 이동센서를 18개 계측점 각각에 위치시켜가며 계측하였다. 가진신호가 정현신호(sinusoidal signal) 또는 랜덤신호(random signal)의 두 가지

가진에 경우에 대해 계측실험을 수행하였다. 가진주파수는 구하고자하는 고유진동수의 주파수 영역인 10 Hz~500 Hz내에서 낮은 값으로부터 주파수를 증가시켜가며 계측하였다. 전술된 충격해머법과 유사한 과정으로부터 주파수응답신호의 계측 및 모드특성의 분석이 수행되었다. 진동기 가진을 통해 계측한 초기 4개의 고유진동수의 평균과 표준편차가 Table 1에 요약되었다. 또한 이들 4개 모드의 모드형상은 Fig. 7과 같다.

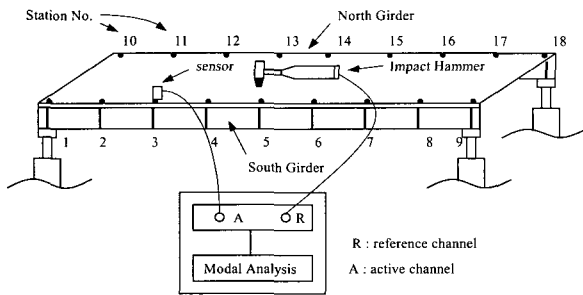


Fig. 4 Hammer Test Set-up on Model Plate-Girder

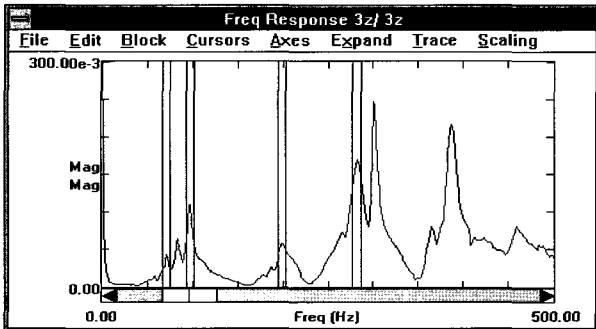


Fig. 5 Frequency Response Spectrum at Station 3

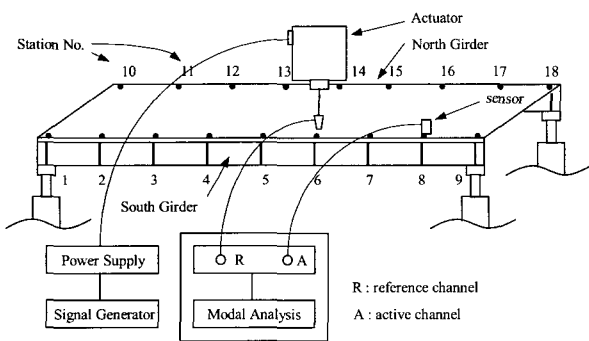


Fig. 6 Shaker Test Set-up on Model Plate-Girder

Table 1로부터 가진방법에 따른 고유진동수의 변화를 관찰할 수 있다. 모든 모드에서 충격가진의 경우 진동기 가진에 비해 고유진동수가 높게 계측되었다. 이는 진동기 가진의 첨부질량의 효과에 기인하며, 구조물 진동모드 계측시 가진

장치에 따른 고유진동수의 차이를 신중히 고려해야함을 보여주는 것이다. 저차 모드일수록 가진방법에 따른 고유진동수의 변화가 큰 것으로 나타났으며, 첫 번째 모드에서 고유진동수의 변화율이 최대를 보이고 있다.

Table 1 Natural Frequencies of Model Plate-Girder

Mode	Frequency (Hz)			
	Impact Hammer		Shaker	
	Mean	Std	Mean	Std
1	69.93	0.20	65.78	0.05
2	95.46	0.22	94.25	0.10
3	195.39	0.22	192.79	0.13
4	281.54	0.15	281.79	0.03

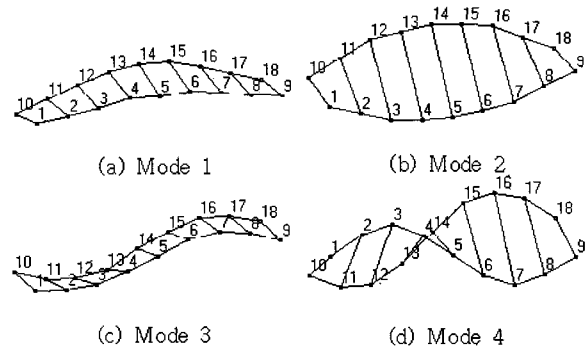


Fig. 7 Mode Shapes of Model Plate-Girder

4. 계측온도와 진동모드특성

실험온도가 변동하는 조건하에서 계측온도와 고유진동수의 관계를 실험적으로 분석하였다. 이를 위해 충격해머법과 진동가진법 두 가지 경우로 실험을 수행하였다. 계측시의 온도는 섭씨 -3℃로부터 23℃의 범위에서 변화하였다. 계절적으로는 겨울에 실험하여 실외공기를 실내로 유입시켜 저온 실험조건을 만족시켰다. 계측온도를 매 단계마다 유지하며 각각 10회의 진동모드특성을 계측하였다. 각 회당 8회의 반복 가진 및 주파수응답신호의 취득과 분석을 수행하였다. 가진방법으로는 앞서 비교되었던 충격해머법과 진동가진법이 사용되었다. 먼저, 충격해머법을 사용하여 계측온도와 초기 4개 모드의 고유진동수의 관계를 Fig. 8~Fig. 11에 각각 도시하였다. 계측온도의 일정 단계에서 측정된 고유진동수 10회 계측치를 모두 표시하였다. Fig. 8은 1차 굽힘모드인 모드 1의 고유진동수의 변화를 보여준다. 각 온도 단계에서 계측한 고유진동수의 변동폭이 컸다. 하지만 온도의 감소에 따라 전반적으로 고유진동수가 크게 증가함을 보이고 있다. 특히, 14℃~16℃ 대역에서 고유진동수

가 급격하게 변화함을 보여주는데, 이는 경계조건의 변화 또는 재료특성의 변화와 같은 불확실한 요인에 기인하는 것으로 생각된다. Fig. 9는 1차 비틀림 모드인 모드 2의 고유진동수의 변화를 보여준다. 고유진동수의 변화가 각 온도 단계에서 일관되게 측정되고 있다. 1차 굽힘모드에 비해 고유진동수의 변화율이 상대적으로 약간 작게 관찰되었다. 측정온도와 고유진동수 간의 선형관계를 나타내고 있다. Fig. 10은 2차 굽힘모드인 모드 3의 고유진동수의 측정결과이다. 온도변화에 따라 고유진동수의 변화가 불규칙하게(측치오류에 기인하여) 증감하는 경향을 보인다. 전반적으로 온도와 고유진동수 간의 선형관계를 관찰할 수 있다. Fig. 11은 2차 비틀림 모드인 모드 4의 고유진동수 측정결과이다. 대략 3°C에서 고유진동수 측정에 오류를 보이고 있다. 이를 제외하면 온도에 따른 고유진동수의 선형적인 변화를 관찰할 수 있다.

진동가진법을 통해 모드특성을 측정한 결과들이 Fig. 12 - Fig. 15에 도시되었다. 충격해머법에 비하여 측정결과들이 안정적이다. 이는 가진 신호가 안정되었고 이로 인해 신호의 검진 신호의 노이즈가 상대적으로 적은 것에 기인한다. 각 모드 그룹의 일정 온도에서 10회 측정치를 모두 표시하였다. Fig. 12은 1차 굽힘모드인 모드 1의 온도와 고유진동수 사이의 선형관계를 보이고 있다. Fig. 13은 1차 비틀림 모드인 모드 2의 온도변화에 따른 고유진동수의 변화를 보여준다. 고유진동수의 변화가 각 온도 단계에서 일관되게 측정되고 있다. Fig. 14는 2차 굽힘모드인 모드 3에서 온도변동에 따른 고유진동수의 변동 보여준다. 충격해머법의 경우인 Fig. 10에 비해 온도변화에 따른 규칙적인 고유진동수의 선형적인 변화 관계를 보인다. Fig. 15은 2차 비틀림 모드인 모드 4의 고유진동수 측정결과이다. 충격해머법에 비해 온도 변동에 따른 고유진동수의 선형적인 변화를 관찰할 수 있다. 이상의 관찰로부터 Fig. 12-Fig. 15는 온도조건에서 발생할 고유진동수의 변동폭을 예측할 경험적 모델임을 알 수 있다.

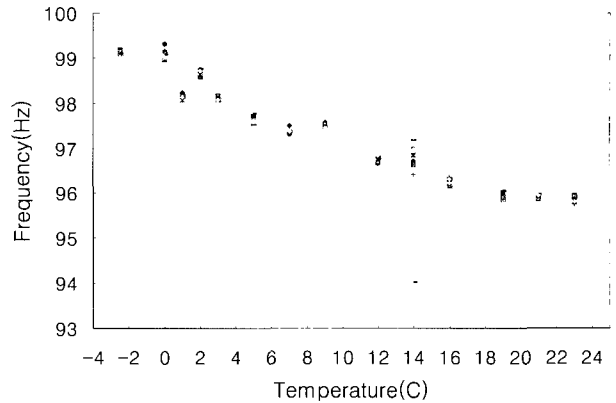


Fig. 9 Temperature vs Natural Frequencies of Mode 2 - Impact Hammer Test

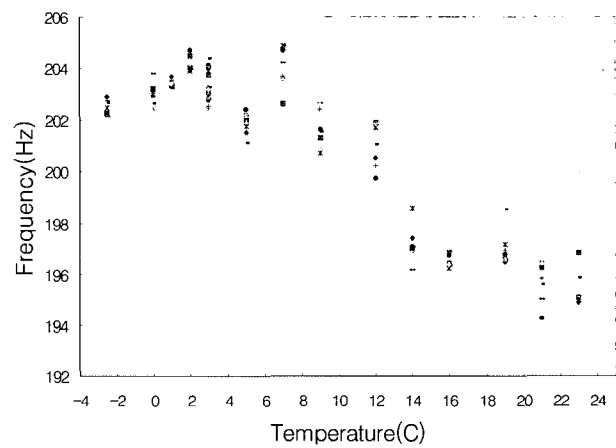


Fig. 10 Temperature vs Natural Frequencies of Mode 3 -Impact Hammer Test

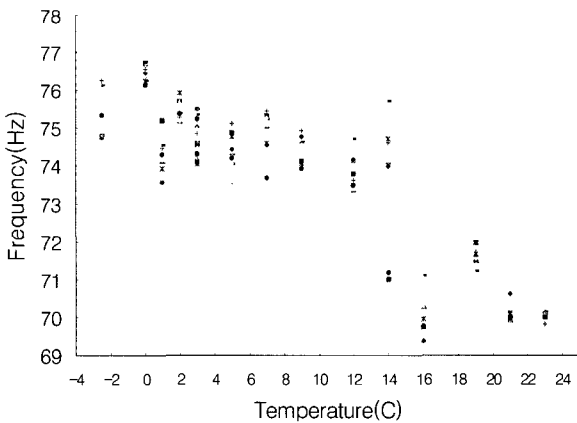


Fig. 8 Temperature vs Natural Frequencies of Mode 1 - Impact Hammer Test

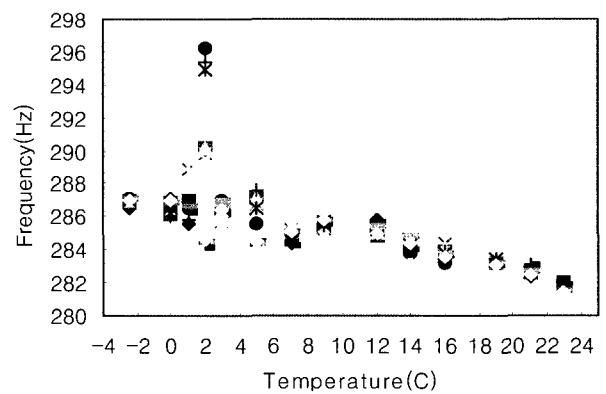


Fig. 11 Temperature vs Natural Frequencies of Mode 4 -Impact Hammer Test

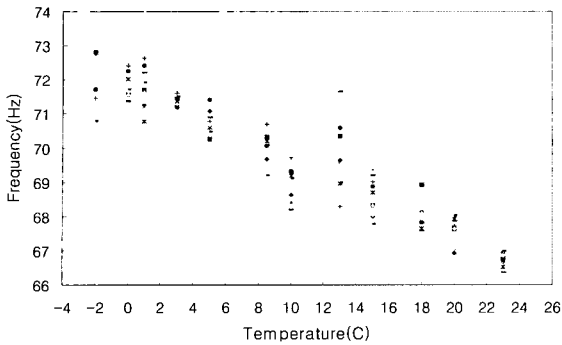


Fig. 12 Temperature vs Natural Frequencies of Mode 1 -Shaker Test

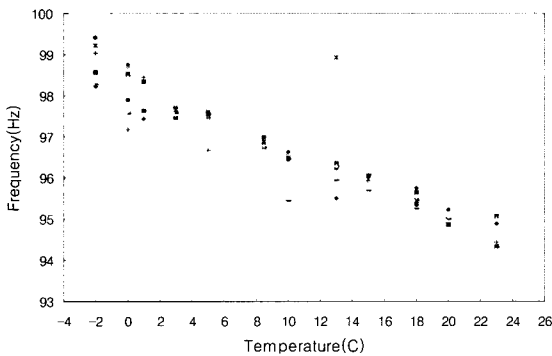


Fig. 13 Temperature vs Natural Frequencies of Mode 2 -Shaker Test

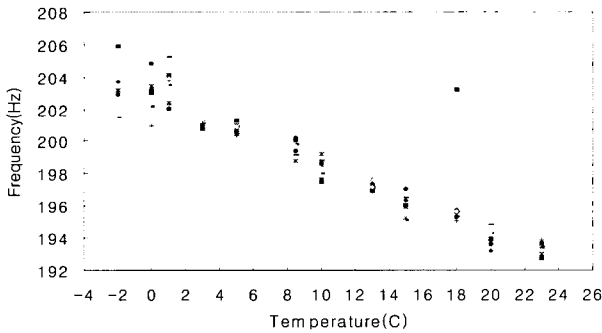


Fig. 14 Temperature vs Natural Frequencies of Mode 3 -Shaker Test

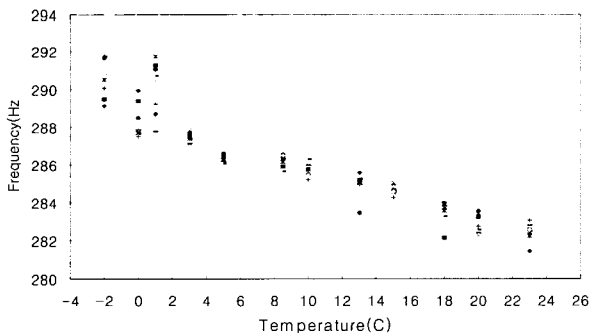


Fig. 15 Temperature vs Natural Frequencies of Mode 4 - Shaker Test

5. 계측온도(T)-고유진동수비(FR) 관계

진동기법을 통해 얻은 고유진동수를 계측온도 섭씨 20도의 고유진동수를 기준으로 고유진동수비(frequency ratio)로 변환하였다. 각 온도에서 계측된 고유진동수의 평균을 구한 후, 계측온도(T)와 고유진동수비(FR)의 관계를 회귀직선으로 분석하였다. 모드 1~모드 4 각각 경우에 대한 계측온도 - 고유진동수비 (T-FR) 선형관계가 Fig. 16~Fig. 19에 각각 도시되었다. Fig. 16는 1차 굽힘 진동모드인 모드 1의 T-FR 관계이며, 온도에 따른 고유진동수비의 변화율이 크게 나타났다. 모드 1의 온도 보정된 고유진동수 f_1 은 20°C의 모드 1 고유진동수 (67.635Hz)를 FR1에 곱하여 구할 수 있다. Fig. 17는 1차 비틀림 모드인 모드 2의 T-FR 관계이다. 모드 2의 온도 보정된 고유진동수 f_2 는 20°C의 모드 2 고유진동수(95.004Hz)를 FR2에 곱하여 구할 수 있다.

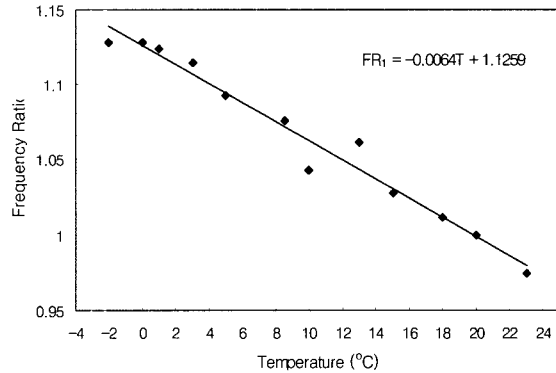


Fig. 16 T-FR Relation of Mode 1

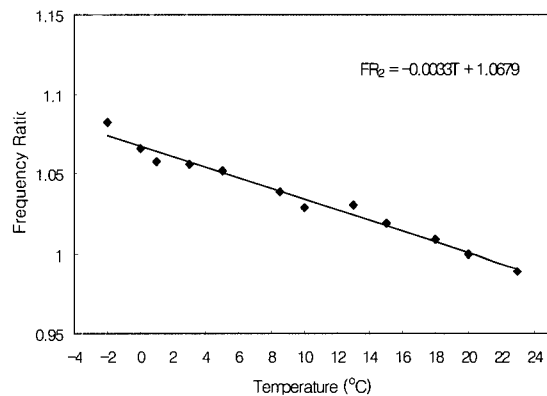


Fig. 17 T-FR Relation of Mode 2

Fig. 18은 2차 굽힘 진동모드인 모드 3의 T-FR 관계이다. 모드 3의 온도 보정된 고유진동수 f_3 는 20°C의 모드 3 고유진동수(193.847Hz)를 FR3에 곱하여 구할 수 있다. Fig. 19는 2차 비틀림 모드인 모드 4의 T-FR 관계이다. 모드 4의 온도 보

정된 고유진동수 f_4 는 20°C의 모드 4 고유진동수(282.927Hz)를 FR4에 곱하여 구할 수 있다.

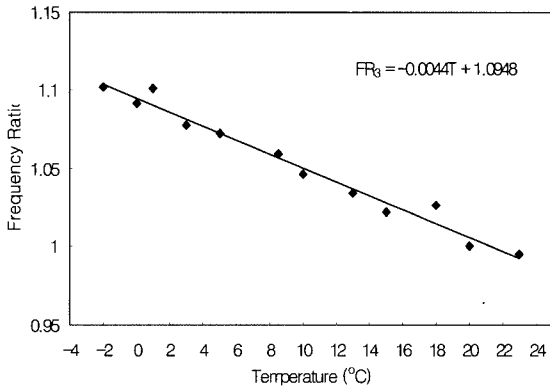


Fig. 18 T-FR Relation of Mode 3

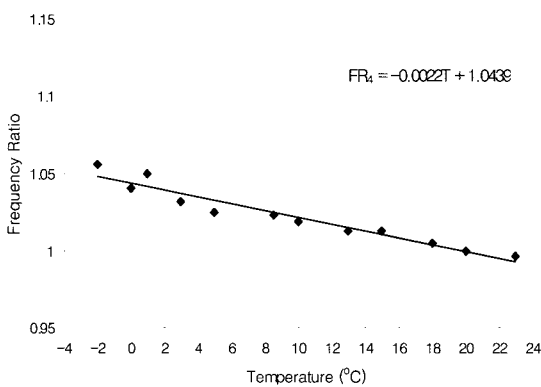


Fig. 19 T-FR Relation of Mode 4

굽힘 모드인 모드 1과 모드 3의 T-FR 관계 변화율이 비틀림 모드인 모드 2와 모드 4의 T-FR 관계 변화율에 비해 상대적으로 크게 나타났다. 이 T-FR 경험모델은 변동하는 계측온도 조건하에서 강관형모형의 고유진동수를 보정하게 된다. 이를 통해 구조물의 고유진동수 변화가 구조적인 손상에 기인하는지 또는 온도변화와 이에 따른 재료특성 및 경계조건의 변화에 기인하는지를 판정하는데 사용될 수 있다. 하지만, 본 연구결과와는 대상구조물인 강관형모형에 국한되어 적용될 수 있다. 강관형교의 다양한 부재 횡수 및 경계조건에 대한 T-FR 관계식이 실험적으로 연구되어야 하리라 사료된다.

6. 결 론

강관형 모형을 대상으로 계측온도의 변동이 모드특성에 미치는 영향을 실험적으로 검토하였다. 온도변화는 구조물진동 거동의 변화를 야기시키며 그 결과로 고유진동수와 모드형상 및 감쇠계수와 같은 진동모드특성의 계측에서 불확실성을 유

발시킨다. 또한, 구조물 손상 전·후의 서로 다른 온도조건에서 계측된 진동모드특성을 사용하여 구조물의 손상을 예측하고자 하는 경우, 이 같은 계측온도 불확실성 요인은 구조물 손상예측의 오류로 나타날 수 있다.

강관형 모형을 대상으로 3단계의 실험연구를 수행하였다. 첫째, 모드데이터의 측정에 적합한 센서좌표 설계조건을 실험적으로 분석하였다. 측정하고자 하는 진동모드를 위해 설치해야 할 가진기와 센서의 좌표에 관하여 분석하였다. 둘째, 가진 방법에 따른 진동특성치의 차이를 검토하였다. 이를 위해 충격해머법과 진동가진법의 두 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 셋째, 실험 계측온도에 따른 진동특성치의 변화를 분석하였다. 이를 위해 충격해머법과 진동가진법 각각에 대하여, 계측온도가 -3°C로부터 영상 25°C까지 변동하는 기후 하에서 실험을 수행하여 계측온도와 고유진동수의 관계를 검토하였다.

두 가진법 모두 전반적으로 온도의 감소에 따라 고유진동수가 크게 증가하는 선형적 관계를 보이고 있다. 굽힘모드인 모드 1과 3이 비틀림 모드인 모드 2와 4에 비해 변동폭이 컸다. 또한 굽힘모드에서는 모드 1의 변화폭이 모드 3보다 컸으며, 비틀림모드에서는 모드 2의 변화폭이 모드 4보다 컸다. 전반적으로 충격가진을 사용된 경우보다는 진동기 가진을 사용한 경우에 각 온도 단계에서 계측된 고유진동수의 변동폭이 작았다. 진동기 가진을 통해 측정되고 분석된 계측온도와 고유진동수 사이에 선형적 관계를 예측할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 연구비 지원(KRF-2000-041-E00583)과 2001년도 부경대학교 연구년교수지원에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

Ewin, D.J. (1986). Modal Testing: Theory and Practice, Research Studies Press Ltd., England.

Kim, J.T. and Kim, T.G. (1996). "System Identification of Truss Structures via Modal Parameters", 한국해양공학회지, 제11권, 제8호, pp 108-116.

Kim, J.T., Park, S.Y., Yun, J.W. and Baek, J.H. (2001). "Integrated Damage Identification System for Large Structures via Vibration Measurement", International Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol 4, No 1, pp 31-37.

Kim, J.T. and Stubbs, N. (1995). "Model Uncertainty and Damage Detection Accuracy in a Plate-Girder Bridge", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol 121, No 10, pp 1409-1417.

Kim, J.T. (1995). "A Robust Damage Localization Algorithm for Highway Plate-Girder Bridges", Proc. of SPIE, Vol 2446, pp 103-110.

- McConnell, K.G. (1995). *Vibration Testing Theory and Practice*, John Wiley and Sons, Inc, USA.
- Randall, R.B. (1987). *Frequency Analysis*, B&K, Denmark.
- Stubbs, N., Broome, T.H. and Osegueda, R. (1990). "Nondestructive Construction Error Detection in Large Space Structures", *AIAA Journal*, Vol 28, No 1, pp 146-152.
- Stephens, J.E. and Yao, J.T.P. (1987). "Damage Assessment Using Response Measurements", *Journal. of Structural Engineering*, ASCE, Vol 113, No 4, pp 787-801.

2003년 2월 26일 원고 접수

2003년 11월 24일 최종 수정본 채택