

## 강판형교의 진동모드특성에 미치는 온도변화의 영향

### Effect of Temperature Change on Modal Properties of Plate-Girder Bridges

김정태\* 류연선\* 조현만\*\* 윤재응\*\*\* 백종훈\*\*\*\*

#### ABSTRACT

Monitoring frequency change is a tool to indicate the change in structural parameters. However, even critical reduction of stiffness is predicted in the range of indication errors due to the effect of temperature on the frequency change. In this study, an experimental work to examine the effect of various temperatures on modal characteristics of steel plate-girders is presented. A model plate-girder used for the experiment is described. Natural frequencies are monitored by using two different excitation sources - impact and shaker. The relation between measurement temperatures and natural frequencies are analyzed.

#### 1. 서 론

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 모드특성치를 보정할 수 있는 모델이 필요하다. 온도변화는 구조물에 열 변형 거동을 야기 시키며 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 손상 예측의 오류로 나타날 수 있다 (Kim 외, 1995).

본 논문에서는 강판형 모형을 대상으로 실험적으로 계측온도의 변화에 따른 진동모드특성의 변화를 분석하였다. 이를 통해 강판형 모형의 저차 진동모드의 고유진동수와 계측온도와의 관계를 제시하고자 하였다. 연구 대상인 강판형은 판형, 가로 보, 세로 보 및 상부 텍의 형상과 치수 그리고 지지조건의 종류에 따라 진동모드의 양상을 달리하며, 통상 저차의 굽힘 진동모드와 비틀림 진동모드들을 측정할 수 있다. 연구과정은 다음의 단계로 구성되었다. 첫째, 측정하고자 하는 진동모드를 위해 설치해야 할 가진기와 센서의 좌표에 관하여 분석하였다. 또한 가진 방법에 따른 진동특성치의 차이를 검토하였다. 이를 위해 충격해머법과 진동기법의 두 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 둘째, 실험 계측온도에 따른 진동특성치의 변화를 분석하였다. 두 실험법 각각에 대하여, 계측온도의 변동조건에서 실험하여 계측온도와 고유진동수의 관계를 검토하였다.

\* 정회원 · 부경대학교 해양공학과 교수  
\*\* 정회원 · 부경대학교 해양공학과 시간강사  
\*\*\* 한진중공업 제품관리부  
\*\*\*\* 부경대학교 해양공학과 석사과정

## 2. 진동모드실험

실험연구에 사용된 강판형 축소모형의 치수와 형상, 경계조건, 그리고 단면 형상이 Fig.1에 도시되었다. 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. 또한, 온도·습도의 조절을 위해 냉·난방기를 사용하였다.

가진방법에 따른 강판형의 진동모드특성을 검토하기 위하여 충격해머법과 진동기법을 각각 사용하였다. 실험 온도는 23°였으며 습도는 50%-60% 범위로 유지되었다. 먼저, 충격해머 가진을 통해 강판형의 진동특성을 계측하였다. 충격해머법의 실험체계는 Fig. 2에 도시되었다. 충격해머법에 의한 계측은 기준(reference)센서(Fig. 4의 3번 계측점)를 일정한 위치에 고정시키고 능동(rovong)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 모델로서 모형 판형교를 단순 모델링하였다. Fig. 3는 3번 계측점에 대한 주파수 응답신호를 도시한 것이다. 각 계측점에서 24회의 반복 취득되었고, 각 계측점마다 이들 주파수 응답신호의 평균을 취하고, 이를 500Hz low-pass 영역에서 분석하여 고유진동수와 모드형상을 추출하였다. 충격해머법을 사용하여 계측한 초기 4개의 고유진동수의 평균과 표준편차가 Table 1에 요약되었다. 또한 이들 4개 모드의 모드형상은 Fig. 5과 같다.

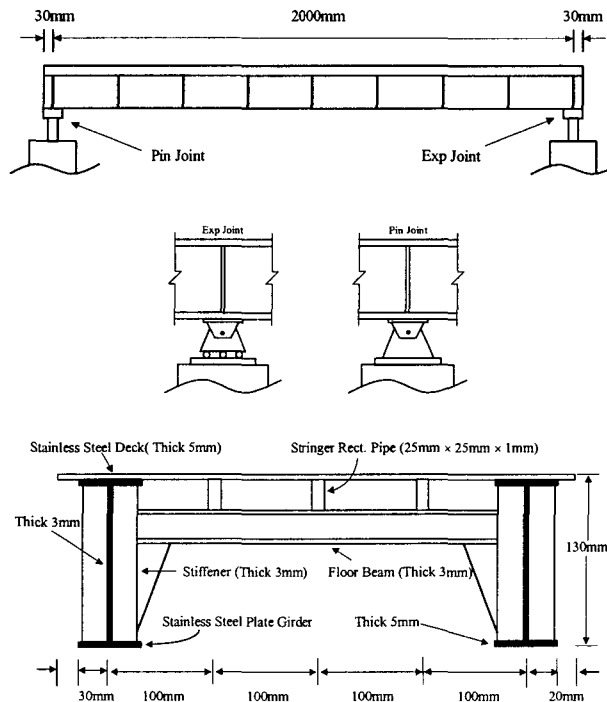


Fig. 1 Schematic, Support Conditions, and Cross-Section of Model Plate-Girder

다음으로, 진동기 가진을 통해 강관형의 모드특성을 계측하였다. 진동기법에는 정현신호와 랜덤 신호를 선택하여 가진 할 수 있는 VTS-100 가진기가 사용되었다. 가진기의 부가질량이 구조물에 미치는 영향을 최소화하기 위해 정적인 상태에서 재하가 되지 않도록 하였다. 하지만 동적인 가진 시에 가진기의 부가질량이 고유진동수에 미치는 영향은 예상되었다. 진동기법의 실험체계는 Fig. 6에 도시된 것과 같다. 가진기는 6번 위치에 고정하여 수직방향으로 가진하였으며 응답신호를 18개 계측점 각각으로부터 계측하였다. 가진신호는 정현신호(sinusoidal signal) 또는 랜덤신호(random signal)의 두 가지 가진의 경우에 대해 계측실험을 수행하였다. 가진주파수는 구하고자 하는 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. 5과 같다.

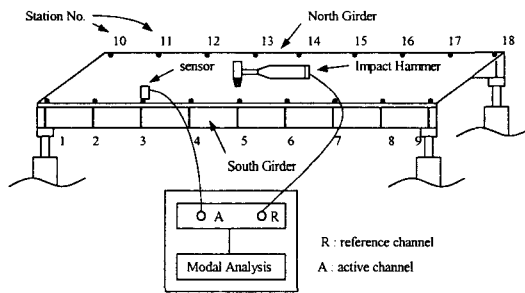


Fig. 2 Hammer Test Set-up on Model Plate-Girder

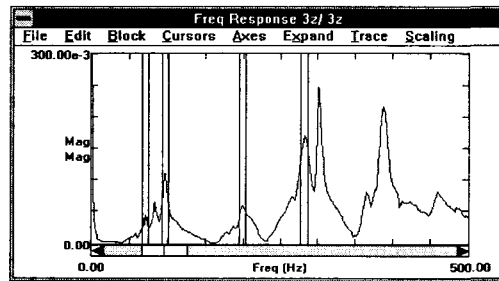


Fig. 3 Frequency Response Spectrum at Station 3

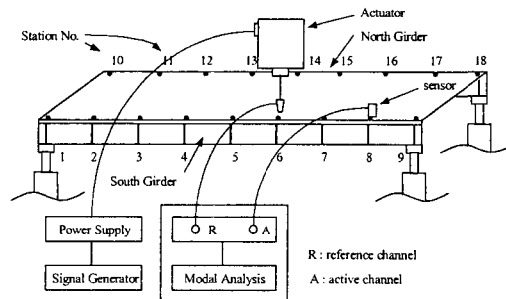
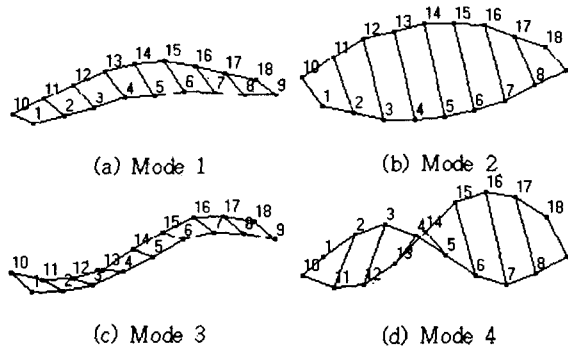


Fig. 4 Shaker Test Set-up on Model Plate-Girder

Table 1로부터 가진방법에 따른 고유진동수의 변화를 관찰 할 수 있다. 모든 모드에서 충격가진의 경우 진동기 가진의 경우에 비해 고유진동수가 크게 계측되었다. 이는 진동기 가진시의 침부질량의 효과에 기인하며, 구조물 진동모드 계측시 가진장치에 따른 고유진동수의 차이를 신중히 고려해야함을 보여주는 것이다. 저차 모드일수록 가진방법에 따른 고유진동수의 변화가 큰 것으로 나타났다으며, 첫 번째 모드에서 온도변화에 따른 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. 5** Mode Shapes of Model Plate-Girder

### 3. 계측 온도와 진동모드 특성

실험온도가 변동하는 조건하에서 계측 온도와 고유진동수의 관계를 실험적으로 분석하였다. 이를 위해 충격해머법과 진동기법 두 가지 경우로 실험을 수행하였다. 계측온도는 섭씨  $-3^{\circ}\text{C}$ 로부터  $23^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 변화하였다. 계측온도의 매 단계마다 각각 10번의 진동계측 및 진동특성치 추출 실험을 수행하였다. 개별 실험당 8회의 반복가진 및 주파수응답신호의 취득과 분석을 수행하여 계측온도-고유진동수(T-F) 관계를 얻었다.

#### 충격가진법의 T-F 결과

가진방법으로는 앞서 비교되었던 충격해머법과 진동기법이 사용되었다. 먼저, 충격해머법을 사용하여 초기 4개 진동모드의 계측온도-고유진동수 관계를 계측한 결과가 Fig. 6에 도시되었다. Fig. 6(a)는 1차 굽힘모드인 모드 1에서 계측온도의 변화에 따른 고유진동수의 변화를 보여준다. 각 온도 단계에서 계측한 고유진동수의 변동폭이 컸다. 하지만 전반적으로 온도의 감소에 따라 고유진동수가 크게 증가함을 보이고 있다. Fig. 6(b)는 1차 비틀림 모드인 모드 2의 고유진동수의 변화

를 보여준다. 고유진동수의 변화가 각 온도 단계에서 일관되게 계속되고 있다. 1차 굽힘모드에 비해 고유진동수의 변화율이 상대적으로 약간 작게 관찰되었다. 계측온도와 고유진동수간의 선형관계를 나타내고 있다. Fig. 6(c)는 2차 굽힘모드인 모드 3의 고유진동수의 계측결과이다. 온도변화에 따라 고유진동수의 변화가 불규칙하게(계측오류에 기인하여) 증감하는 경향을 보인다. 전반적으로 온도와 고유진동수간의 선형관계를 관찰 할 수 있다. Fig. 6(d)는 2차 비틀림 모드인 모드 4의 고유진동수 계측결과이다. 대략 섭씨 3도에서 고유진동수 계측에 오류를 보이고 있다. 이를 제외하면 온도에 따른 고유진동수의 선형적인 변화를 관찰 할 수 있다.

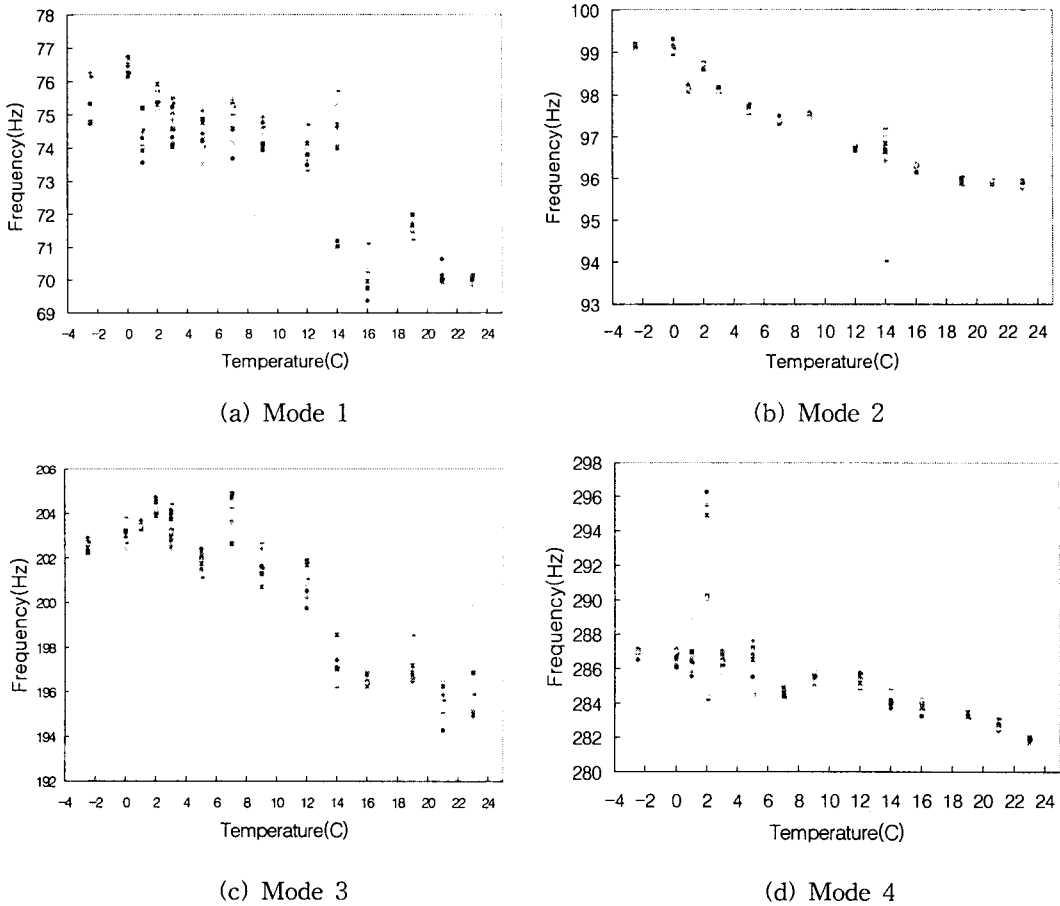
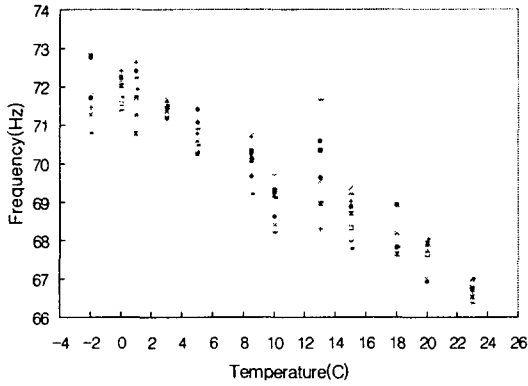


Fig. 6 Temperature Vs Natural Frequencies for Impact Hammer Test

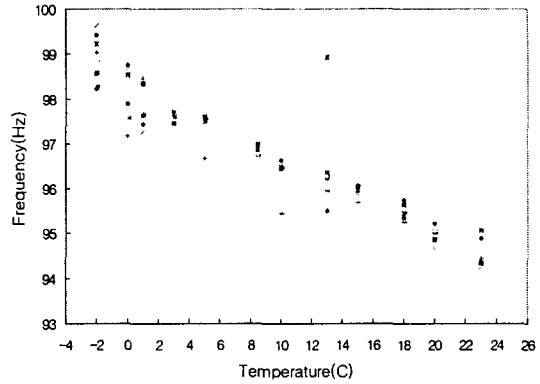
### 진동기법의 T-F 결과

진동기법을 통해 모드특성을 계측한 결과들이 Fig. 7에 도시되었다. 충격해머법에 비하여 계측 결과들이 안정적이다. 이는 가진 신호가 안정되었고 이로 인해 신호의 검진신호의 노이즈가 상대적으로 적은 것에 기인한다. 각 모드 그림의 일정 온도에서 10회 계측치를 모두 표시하였다. Fig. 7(a)는 1차 굽힘모드인 모드 1의 온도와 고유진동수 사이의 선형관계를 보이고 있다. Fig. 7(b)는 1차 비틀림 모드인 모드 2의 온도변화에 따른 고유진동수의 변화를 보여준다. 고유진동수의 변화가 각 온도 단계에서 일관되게 계속되고 있다. Fig. 7(c)는 2차 굽힘모드인 모드 3에서 온도변동에 따른 고유진동수의 변동 보여준다. 충격해머법의 경우인 Fig. 10에 비해 온도변화에 따른 규칙적

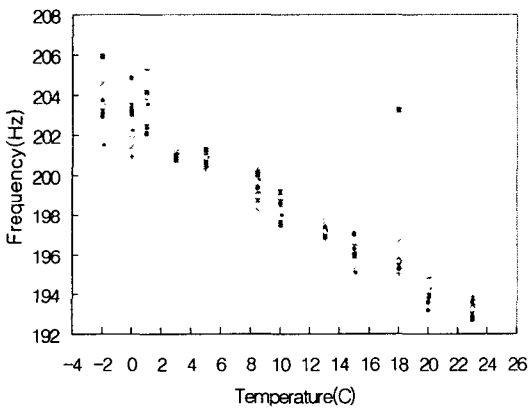
인 고유진동수의 선형적인 변화 관계를 보인다. Fig. 7(d)는 2차 비틀림 모드인 모드 4의 고유진동수 계측결과이다. 충격해머법에 비해 온도 변동에 따른 고유진동수의 선형적인 변화를 관찰할 수 있다. 이상의 관찰로부터 Fig. 7은 온도조건에서 발생할 고유진동수의 변동폭을 예측할 경험적 모델임을 알 수 있다.



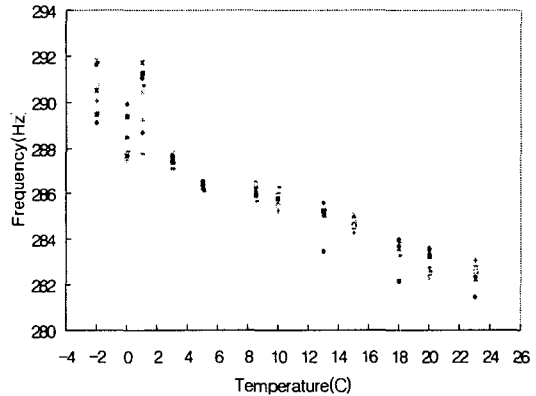
(a) Mode 1



(b) Mode 2



(c) Mode 3



(d) Mode 4

Fig. 7 Temperature Vs Natural Frequencies for Shaker Test

### T-FR 경험모델

진동기법을 통해 얻은 고유진동수를 계측온도 섭씨 20도의 고유진동수를 기준으로 고유진동수 비(frequency ratio)로 변환하였다. 또한, 계측온도(T)와 고유진동수비(FR)의 관계를 회귀직선으로 분석하였다. 각 모드의 경우에 대한 계측온도-고유진동수비 (T-FR) 선형관계가 Fig. 8에 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 경험모델은 변동하는 계측온도 조건하에서 강판형모형의 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 대상구조물

인 강관형모형에 국한되어 적용될 수 있다. 강관형교의 다양한 부재 치수 및 경계조건에 대한 T-FR 관계식이 실험적으로 연구되어야 하리라 사료된다.

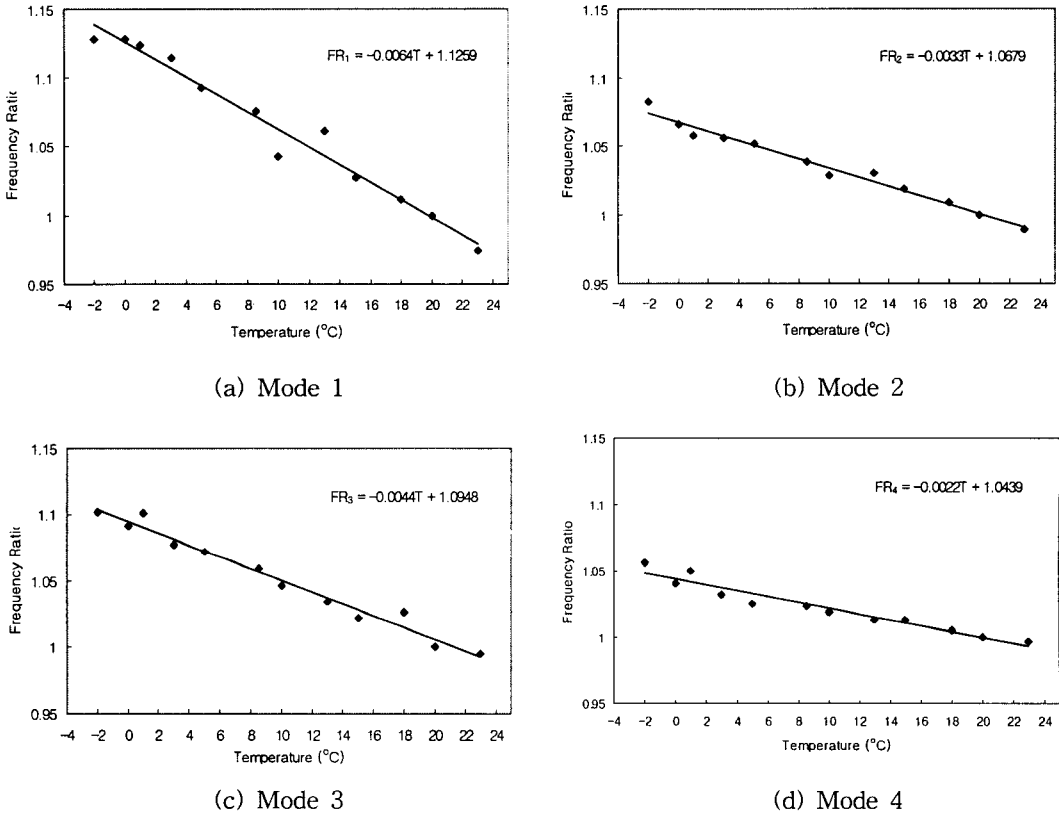


Fig. 8 T-FR Relation of Model plate-Girder

#### 4. 결 론

강관형 모형을 대상으로 계측온도의 변동이 모드특성에 미치는 영향을 2 단계의 실험연구를 통해 분석하였다. 첫째, 가진 방법에 따른 진동특성치의 차이를 검토하였다. 이를 위해 충격해머법과 진동기법의 두 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 둘째, 실험 계측온도에 따른 진동특성치의 변화를 분석하였다. 두 가진법 모두 온도의 감소에 따라 고유진동수가 크게 증가하는 선형적 관계를 보이고 있다. 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. 각 모드의 경우에 대한 계측온도-고유진동수 비 (T-FR) 선형관계를 얻었다. 모드 1의 변화율이 가장 크게 나타났다. 굽힘 진동모드인 모드 1 과 모드 3의 T-FR에서 기울기가 비틀림 진동모드인 모드 2와 모드 4에 비해 상대적으로 크게 나

타났다. 이 T-FR 경험모델을 사용하여 구조물의 고유진동수 변화가 구조적인 손상에 기인하는지 또는 온도변화와 이에 따른 재료특성 및 경계조건의 변화에 기인하는지를 판정하는데 사용될 수 있으리라 사료된다. 하지만, 본 연구결과는 대상구조물인 강관형모형에 국한되어 적용될 수 있다. 강관형교의 다양한 부재 치수 및 경계조건에 대한 T-FR 관계식이 실험적으로 연구되어야 하리라 사료된다.

## 후 기

이 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다. (KRF-2000-041-E00583)

## 참 고 문 헌

- 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.
- Kim, J.T., and Kim, T.G. (1996). "System Identification of Truss Structures Via Modal Parameters", *한국해양공학회 논문집*, Vol. 11, No. 8, pp. 108-116.
- Stephens, J.E., and Yao, J.T.P. (1987). "Damage Assessment Using Response Measurements", *J. of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 4, pp. 787-801.22.
- 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.
- Kim, J.T. (1995). "A Robust Damage Localization Algorithm for Highway Plate-Girder Bridges", *Proc. of SPIE*, Vol. 2446, pp. 103-110.
- Ewin, D.J. (1986). *Modal Testing: Theory and Practice*, Research Studies Press Ltd., England.
- Randall, R.B. (1987). *Frequency Analysis*, B&K, Denmark.