

프리스트레스트 콘크리트 거더의 긴장력 변화에 따른 휨 진동 응답 특성

Flexural Vibration Characteristics of Prestressed Concrete Girders due to Changes in Prestress Forces

이 정 미*

Lee, Jung-Mi

김 정 태**

Kim, Jeong-Tae

Abstract

In this study, several flexural vibration characteristics of prestressed concrete girders due to changes in prestress forces are experimentally analyzed. In order to achieve the objective, the following approaches are implemented. First, several methods to extract vibration response features from output-only signal are selected. Next, a large-scaled prestressed concrete girder model is constructed to analyze relation between the prestress forces and the vibration features in the prestressed concrete girder. Then acceleration responses are measured from the girder for several prestress force scenarios. Finally, vibration characteristics of the prestressed concrete girder due to change in prestress force are experimentally analyzed. The values of features extracted by the selected methods are reduced due to prestress-loss. Especially, the value of features are linearly reduced in the early prestress-loss.

요 지

본 논문에서는 프리스트레스트 콘크리트 거더의 긴장력 변화에 따른 몇 가지 휨 진동 응답 특성을 실험적으로 분석하였다. 이를 위해, 먼저 구조물의 진동응답특성을 추출하기 위한 기법들을 선정하였다. 진동응답특성은 기준에 많이 이용되는 고유진동수도 포함하였다. 다음으로, 프리스트레스트 콘크리트 거더의 긴장력과 휨 진동 응답 사이의 관계를 살펴보기 위해 모형 프리스트레스트 콘크리트 거더를 제작하고, 긴장력 변화 시나리오에 따라 진동응답실험을 수행하였다. 마지막으로, 긴장력 변화 시나리오에 따라 취득된 동적응답신호를 이용하여 선정된 진동응답특성 분석기법을 적용하였으며, 긴장력과 휨 진동 응답특성 관계를 분석하였다. 선정된 기법들에 의한 진동응답특성은 전체적으로 긴장력 감소에 따라 감소하는 경향이 있으며, 긴장력 감소가 나타나는 초기에는 비교적 선형적으로 감소하였다.

Keywords : Prestressed concrete girder, Vibration response, Acceleration signal

핵심 용어 : 프리스트레스트 콘크리트 거더, 진동응답, 가속도 신호

* 정회원, 부경대학교 해양공학과 연구원

** 정회원, 부경대학교 해양공학과 교수, 교신저자

E-mail : idis@pknu.ac.kr 051-629-6585

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2009년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

구조물 손상에 의한 사회기반시설물의 붕괴는 수 많은 인명피해와 피해 복구를 위한 많은 직·간접비용이 소모된다. 이에 구조물의 손상을 사전에 식별하고 유지보수하기 위한 구조 건전성 평가 시스템의 개발에 대한 연구가 활발히 진행되어왔다. 구조물의 구조 건전성을 평가하기 위한 대표적인 방법으로 구조물의 진동응답 특성을 이용하는 방법을 들 수 있다. 구조물의 진동응답 특성을 이용하는 구조건전성 평가에 관한 연구로서, Adams 등(1978)이 진동모드섭동이론에 근거하여 선형 구조계의 구조특성화를 추정하는 연구를 수행하였으며, Sundermeyer 등(1993)이 균열의 기하학적 형상에 대한 강성도 또는 유연도 등의 구조 특성치의 변화 및 선형·비선형 파괴역학이론을 사용하여 해석하는 연구를 하였고, Kim 등(2003)이 진동모드의 변화를 사용하여 구조계의 손상도를 유연도 및 강성도의 상대적인 변화인 손상지수로써 예측하는 방법을 제시하였다.

최근, 프리스트레스트 콘크리트 거더 형식의 교량에 대한 시공사례의 증가로 프리스트레스트 콘크리트 교량의 안전성 평가에 대한 관심이 높아지고 있다. 프리스트레스트 콘크리트는 외력에 기인한 응력을 소정의 한도까지 상쇄할 수 있도록 미리 인공적으로 그 응력의 분포와 크기를 정하여 내력을 줌으로서, 초기에 도입된 긴장력으로 인해 콘크리트 보의 하면에 인장응력이 작용하더라도, 그 인장응력이 콘크리트의 휨 인장 강도를 넘지 않도록 조절하여 균열 발생을 방지한다. 하지만, 공용 연한과 하중이력, 콘크리트 크리프와 건조수축, 긴장재의 릴렉세이션, 정착부 손상 또는 긴장재 자체의 국부 손상 등의 요인에 의해 공용중인 구조물에서 설계 긴장력과 실제 긴장력과 차이가 존재한다. 이로 인해 구조물의 성능 저하 또는 심각한 안전도 저하가 야기된다(Kim et al., 2004).

외부 하중조건과 환경적 요인들로부터 프리스트레스트 콘크리트 교량에 발생할 수 있는 손상을 미연에 방지하기 위해서 프리스트레스트 콘크리트 긴장재의 긴장력을 어떻게 유지하는가가 프리스트레스트 콘크리트 거더의 사용성과 안전성을 확보하기

위한 중요한 변수로 작용한다. 현재 프리스트레스트 콘크리트 거더의 긴장력 예측을 위한 많은 구조건전성 평가 기법들이 제안되고 있으며, 실험 모형구조물이나 실제 구조물을 대상으로 제안된 기법의 실용성을 검증하고자 노력하고 있다(Kato and Shimada, 1986, Tang and Leu, 1991; Toksoy and Aktan, 1994; Kim et al., 2004).

프리스트레스트 콘크리트 거더 교량의 긴장력을 평가하기 위해 대부분의 기존 연구에서는 고유진동수 변화와 긴장력 사이의 관계를 이용하였다. 하지만 고유진동수의 추출을 위해서는 많은 센서를 이용하여 구조물의 동적 거동을 계속해야 하고, 전문가에 의한 시간소모적인 off-line 실험모드해석과정을 거쳐야 한다. 이는 프리스트레스트 콘크리트 거더 교량의 긴장력을 현장에서 쉽고 빠르게 평가할 수 없게 만든다. 따라서 고유진동수의 추출과 같은 시간소모적인 off-line 해석과정 없이 간편하게 추출할 수 있는 구조물의 응답 특성을 이용하여 긴장력을 추정할 수 있는 방법에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 보다 간단한 긴장력 추정방법 개발에 대한 기초적인 연구로서, 프리스트레스트 콘크리트 거더의 긴장력 변화에 따른 진동응답특성의 변화를 실험적으로 분석하였다. 먼저, 구조물의 진동응답특성을 분석하기 위한 기법들을 선정하였다. 선정된 기법에는 기존에 많이 이용되는 고유진동수(동특성)를 추출하기 위한 기법도 포함하였다. 다음으로, 프리스트레스트 콘크리트 거더의 긴장력과 휨 진동 응답 사이의 관계를 살펴보기 위해 모형 프리스트레스트 콘크리트 거더를 제작하고, 긴장력 변화 시나리오에 따라 진동응답실험을 수행하였다. 마지막으로, 긴장력 변화 시나리오에 따라 취득된 동적응답 신호를 이용하여 선정된 진동응답특성 분석기법을 적용하였으며, 긴장력과 휨 진동 응답특성 관계를 분석하였다.

2. 진동응답특성 분석기법

2.1 가속도 응답 및 주파수 응답함수

구조물에 입력하중 $u(t)$ 와 구조물의 응답 $v(t)$ 사

이에는 다음 식과 같은 관계가 성립한다.

$$m\ddot{v}(t) + c\dot{v}(t) + kv(t) = u(t) \quad (1)$$

여기서 m , c , k 는 각각 구조물의 질량, 감쇠, 강성계수를 나타내며, $\dot{v}(t)$ 는 속도, $\ddot{v}(t)$ 는 가속도 $a(t)$ 를 나타낸다. 위의 식 (1)을 푸리에 변환하면, 다음 식과 같이 주파수 영역에서의 입력하중과 구조물응답 사이의 관계로 나타낼 수 있다.

$$-m(2\pi f)^2 + ic(2\pi f) + k V(f) = U(f) \quad (2)$$

여기서, f 는 구조물의 고유진동수를 나타내고, $V(f)$, $U(f)$ 는 각각 주파수 영역에서의 변위와 하중응답을 나타낸다. 이 때, 구조물의 주파수 응답함수(Frequency Response Function, FRF) $H(f)$ 는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$H(f) = \frac{V(f)}{U(f)} = \frac{1}{-m(2\pi f)^2 + ic(2\pi f) + k} \quad (3)$$

2.2 주파수 영역 분해법

현재까지 입력하중 조건을 모를 경우 고유진동수, 모드형상, 감쇄계수와 같은 모드 특성치를 추출하기 위하여 많은 기법들이 개발되어졌다(Yi and Yun, 2004). 본 논문에서는 모드 특성치를 추출하기 위하여 해석 시간이 짧고 비교적 정확도가 높은 주파수 영역 분해법을 선정하였다. 주파수 영역 분해법은 실험에서 획득된 가속도 데이터로부터 $S_{yy}(\omega)$ ($\in R^{N_m \times N_m}$)와 같은 상호상관스펙트럼 행렬을 특이치분해(Singular Value Decomposition ; SVD)하여 고유진동수 f_i 와 모드형상 ϕ_i 을 추출하는 기법이다. 주파수 영역 분해법에서는 구조응답 $y(\in R^{N_m \times 1})$ 의 상호상관스펙트럼 행렬을 다음 식과 같이 특이치분해하여 $\Sigma(\omega)$, $U(\omega)$, $V(\omega)$ 행렬로 분해한다.

$$S_{yy}(\omega) = U(\omega)^T \Sigma(\omega) V(\omega) \quad (4)$$

$$\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N) \in R^{N_m \times N_m} \quad (5)$$

$$U, V \in R^{N_m \times N_m} \quad (6)$$

여기서, U , V 는 유니타리 행렬(unitary matrix)로서 각각 $U^T U = U U^T = I$ 와 $V^T V = V V^T = I$ 를 만족하며, $S_{yy}(\omega)$ 행렬이 대칭행렬이면 $U = V$ 가 된다. 한편, Σ 는 특이치로 구성된 대각행렬인데, 각 특이치 ($\sigma_i(\omega)$)에서 정점이 발생하는 주파수들이 구조계의 고유진동수 f_i 이고, 이 주파수들에서 $U(\omega)$ 의 열벡터를 취함으로써 모드형상 ϕ_i 를 구할 수 있다. 통상 여러 특이치 ($\sigma_i(\omega)$) 중에 첫 번째 요소인 $\sigma_1(\omega)$ 을 사용한다(Otte et al., 1990).

2.3 주파수 응답함수의 상관계수

어떤 구조물에서 정의되는 두 개의 독립된 주파수 응답함수 $a_1(f)$ 와 $a_2(f)$ 가 있을 때, 이 두 함수를 확률변수로 취급하면, 두 주파수 응답함수간의 상관계수 $\rho_{a_1 a_2}$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_{a_1 a_2} = \frac{C_{a_1 a_2}}{\sigma_{a_1} \sigma_{a_2}} \quad (7)$$

여기서, σ_{a_1} 과 σ_{a_2} 는 각 주파수 응답함수의 표준편차를 나타내고, $C_{a_1 a_2}$ 는 두 주파수 응답함수간의 공분산을 나타내며, 이는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{a_1 a_2} = E[a_1(t)a_2(t)] - \mu_{a_1}\mu_{a_2} \quad (8)$$

여기서, μ_{a_1} , μ_{a_2} 는 각 주파수 응답함수의 평균을 나타낸다. 식(7)와 같은 상관계수는 $-1 \leq \rho_{a_1 a_2} \leq 1$ 의 관계를 만족한다. 만약 $\rho_{a_1 a_2}$ 값이 0이라면 두 주파수 응답함수 사이에는 상관성이 없음을 의미한다. 따라서, $a_1(f)$ 와 $a_2(f)$ 가 서로 다른 특정시간에 동일 구조물로부터 계측된 주파수 응답함수라고 하였을 때, 두 주파수 응답함수 사이의 상관계수 $\rho_{a_1 a_2}$ 가 1에 가까우면 손상이 없음을 의미하고, 1보다 작은 값

으로 통계적 control chart 분석상의 임계치를 벗어난 값을 가지면 손상이 발생하였음을 의미하게 된다.

2.4 주파수 응답비 보증지수

시간 영역의 진동응답을 주파수 영역으로 변환하여 얻어지는 식 (3)과 같은 주파수 응답함수로부터 주파수 응답비 보증지수를 유도할 수 있다. 비례감쇠를 가지는 구조물에서 절점 j 에서의 하중이 k 번째 고유진동수 ω_k 로 가해진다면, 구조물과의 공진에 의하여 i 번째 절점과 $i+1$ 번째 절점에서의 응답은 k 번째 모드형상에 따라 진동한다. 따라서 i 번째 절점과 $i+1$ 번째 절점의 주파수 응답 함수비는 다음 식과 같이 정의될 수 있다(Yi and Yun, 2004).

$$\frac{V_i(\omega_k)}{V_{i+1}(\omega_k)} = \frac{\sum_{j=1}^m H_{i,j}(\omega_k) U_j(\omega_k)}{\sum_{j=1}^m H_{i+1,j}(\omega_k) U_j(\omega_k)} = \frac{H_i(\omega_k)}{H_{i+1}(\omega_k)} \quad (9)$$

따라서 두 점에서의 응답의 주파수 응답비(frequency response ratio, FRR)는 다음 식과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} FRR_{i,i+1} &= \frac{S_{i,i}(\omega_k)}{S_{i,i+1}(\omega_k)} = \frac{E[V_i(\omega_k) V_i(\omega_k)]}{E[V_i(\omega_k) V_{i+1}(\omega_k)]} \\ &= \frac{H_i(\omega_k)}{H_{i+1}(\omega_k)} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, $S_{i,i+1}(\omega_k)$, $S_{i,i}(\omega_k)$ 는 각각 상호 스펙트럼 밀도 함수(cross-spectral density function), 자기 스펙트럼 밀도 함수(auto-spectral density function)를 나타내고, $E[\cdot]$ 는 평균을 의미한다. 비손상 상태의 주파수 응답비와 손상 상태의 주파수 응답비의 일관성(coherence)을 이용하여 다음 식과 같은 주파수 응답비 보증지수(Frequency Response Ratio Assurance Criterion, FRRAC)를 정의한다(김정태 등, 2008).

$$FRRAC(b,d) = \frac{\{FRR_b^T FRR_d\}^2}{\{FRR_b^T FRR_b\} \{FRR_d^T FRR_d\}} \quad (11)$$

여기서, 하첨자 b , d 는 각각 비손상과 손상 상태를 나타낸다. 식 (11)은 비손상 상태의 주파수 응답비 FRR_b 와 손상 상태의 주파수 응답비 FRR_d 의 선형 관계식이다. 만약, $FRRAC$ 값이 1에 근접한다면 손상이 없는 것이며, 1보다 작은 값으로 통계적 control chart 분석상의 임계치를 벗어난 값을 가진다면 손상이 발생한 것으로 판별하게 된다.

3. 실험계획

3.1 대상 구조물

실험을 위해 제작된 모형 프리스트레스트 콘크리트 거더는 Fig. 1과 같은 T형 단면으로 지간은 6.0 m이고 단면의 높이는 0.6m이다. 콘크리트의 28일 압축강도는 23.6MPa이며 단위중량은 240kg_f/m³이다. 축소 제작된 모형 프리스트레스트 콘크리트 거더는 공칭직경이 9.53mm인 D10의 이형철근을 이용하여 콘크리트의 인장, 압축 및 전단에 대하여 보강되었다. 모형 프리스트레스트 콘크리트 거더의 양쪽 지점은 강봉을 이용하여 지지하였다. 또한 지름 15.2mm의 Grade 250 7-연선을 긴장재로 사용하여 하부 플랜지 중앙의 플라스틱 쉬스관에 직선으로 배치하였다. 긴장재는 25mm 덕트 내에 설치되었으며 그라우팅 되지 않았다. 따라서 긴장력은 긴장재의 전 길이에 걸쳐 일정하게 작용하는 것으로 볼 수 있다.

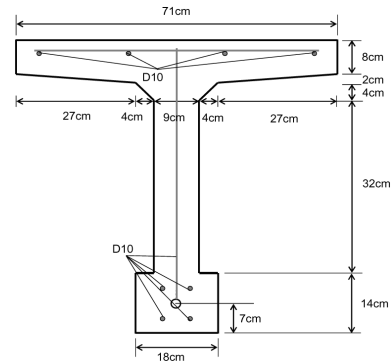


Fig. 1 Cross-section of prestressed concrete girder

3.2 실험계획

실험계획은 Fig. 2와 같고, 총 8개의 압전형 가속도계(PCB 393B04)를 사용하였다. 모형 프리스트레스트 콘크리트 거더 플랜지 상부에 가속도계 7개(Sensor 1-7)를 1m의 등간격으로 부착하였고, 우측의 정착장치에 가속도계 1개(Sensor 8)를 부착하였으며, 1kHz의 샘플링 주파수로 가속도 응답을 계측하였다. 가진력은 E/M 가진기를 이용하여 거더의 오른쪽 지점에서 1.5m 떨어진 위치에 충격가진으로 도입하였다.

모형 프리스트레스트 콘크리트 거더의 긴장력 감소에 대한 진동응답실험을 수행하기 위해서 Fig. 3과 같이 유압잭 및 로드셀을 설치하여 긴장력을 도입하고 측정하였다. Fig. 2에서와 같이 거더의 오른쪽 텐던은 정착식 췌기를 이용하여 고정시켰고, 거더의 왼쪽 유압잭 장착부분의 텐던은 긴장력 도입 후 너트를 이용해 고정하고 유압잭을 제거하였다. 진동응답실험은 Table 1과 같이 초기 긴장력 98.0 kN에서 0kN까지 4.9kN씩 긴장력을 감소시키면서 실시하였다. Table 1의 각 Case별 실험에서 로드셀에 의해 측정된 긴장력은 실험을 진행하는 동안 추가적인 손실(정착장치 활동, 릴랙세이션 등)없이 일정하게 유지되었다.

일반적으로 구조물의 거동은 구조물의 상태 변화

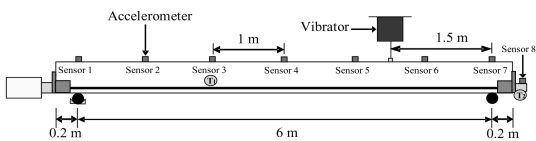


Fig. 2 Experimental setup of prestressed concrete girder

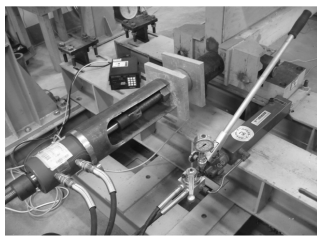


Fig. 3 Prestress forcing device

Table 1 Changes in prestress forces(kN)

Case	Force	Case	Force	Case	Force
1	98.0	8	63.7	15	29.4
2	93.1	9	58.8	16	24.5
3	88.2	10	53.9	17	19.6
4	83.3	11	49.0	18	14.7
5	78.4	12	44.1	19	9.8
6	73.5	13	39.2	20	4.9
7	68.6	14	34.3	21	0

뿐만 아니라 온도의 변화에 따라서도 크게 변화한다. (Kim et al., 2007). 이에, 본 연구에서는 거더, 정착췌기 및 대기 온도를 매 실험 시 측정하였다. 온도 계측결과, 거더의 온도(T_1)는 15.37°C~4.70°C, 정착췌기의 온도(T_2)는 15.48°C~15.11°C, 대기의 온도(T_3)는 16.13°C~14.41°C로 분포하였으며, 이는 온도가 실험결과에 큰 영향을 미치지 않았음을 나타낸다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 가속도 응답 및 주파수 응답 함수

가속도 계측을 위해 Fig. 2에 표시된 것과 같이 총 8개의 가속도 센서를 이용하였으며, E/M 가진기를 이용하여 약 6초 간격으로 충격가진을 주었다. 구조물의 크기에 비해 E/M 가진기의 가진력이 상대적으로 약한 것을 고려하여 신호 분석기에서 증폭비(Gain)를 5배로 하여 신호를 증폭하였다. 가속도 데이터는 각 센서별로 총 50초간 1000Hz의 샘플

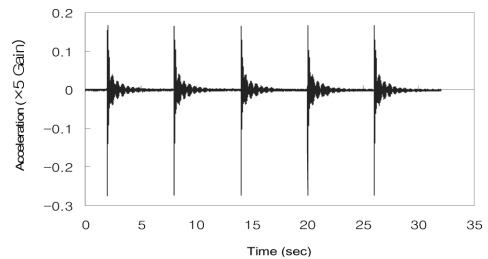


Fig. 4 Acceleration signal measured by sensor 4

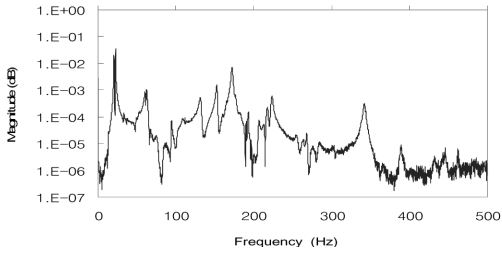


Fig. 5 Frequency response function by sensor 4

링 주파수로 50,000개의 데이터를 획득하였다. Fig. 4는 Sensor 4로부터 0초부터 약 3.3초까지 계속된 가속도 신호를 보여주며, 이에 대한 주파수 응답함수 특성은 Fig. 5과 같다.

4.2 고유진동수 및 모드형상 분석

고유진동수 및 모드형상을 구하기 위하여 프리스트레스트 콘크리트 거더 상부 플랜지에 붙어 있는 7개의 가속도 센서(Sensor 1~7)로부터 취득된 가속도 데이터로부터 주파수 영역 분해법(FDD)을 이용하여 고유진동수 및 모드형상을 추출하였다.

Fig. 6은 FDD법을 이용한 해석과정에서의 특이치 값을 보여주고 있다. 표시된 피크(peak) 점들은 4개의 휨 모드에 대한 고유진동수를 나타내며, 각 피크 점들에 대해 추출된 모드형상은 Fig. 7과 같다. 이상과 같은 FDD법을 이용하여 긴장력 감소 시 나리오에 따라 고유진동수를 추출하였으며, 긴장력 감소에 따른 고유진동수의 변화가 Fig. 8과 같이 나타났다. Fig. 8을 살펴보면 긴장력 감소에 따라 고유진동수의 값이 전반적으로는 감소하는 경향을 보였으나 선형적으로 분석하기에는 어려움이 있었다.

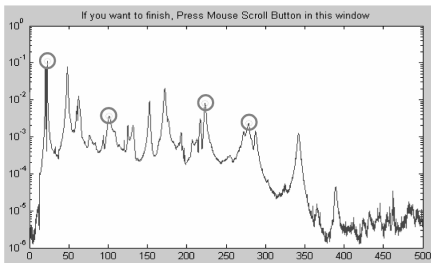


Fig. 6 Singular values of PSD matrix of the responses

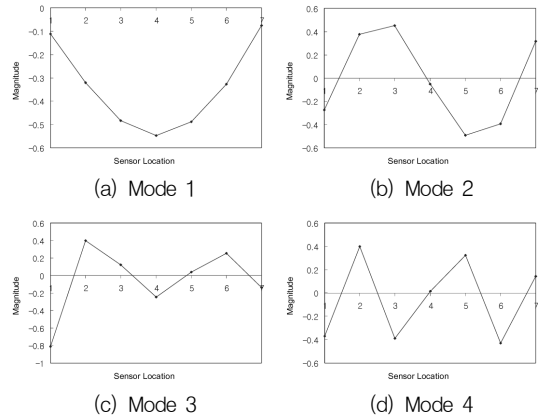


Fig. 7 Four Bending Mode-Shapes Estimated by FDD

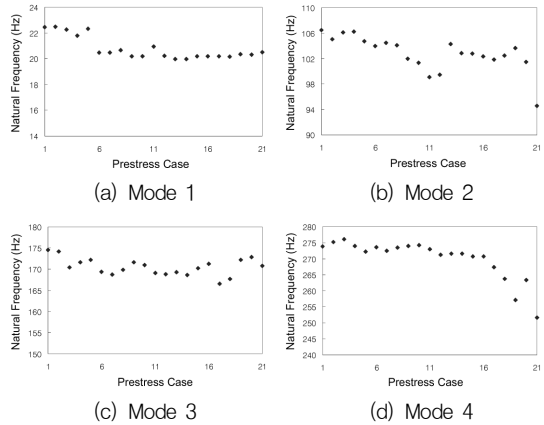


Fig. 8 Natural frequency changes for 21 prestress force case

4.3 주파수 응답 상관계수 분석

앞서 식 (7)에서 제시한 주파수 응답 상관계수를 분석하기 위해 Sensor 4와 5, 8을 선정하였다. Sensor 4의 위치는 1차, 3차 모드특성이 가장 크게 나타나는 위치이고, Sensor 5와 8은 본 연구에서 고려한 4개의 휨 모드에 대한 정보를 모두 포함하고 있는 위치이다.

실제 주파수 응답함수는 식 (3)에서와 같이 구조물의 진동응답과 가진력 정보를 알고 있어야 추출이 가능하다. 하지만 본 연구에서는 가진력 정보를 모르나 가진이 일정하게 적용될 경우를 가정하여 주파

수 응답함수 대신 가속도 신호의 파워스펙트럼밀도 (power spectrum density, PSD) 함수를 이용하였다. 이를 위해 E/M 가진기로 일정하게 충격가진을 주었다. 실험은 총 21개의 긴장력 감소 시나리오에 대하여 각각 8회 가진 실험을 실시하여 총 168회의 가진 실험을 실시하였다.

Fig. 9는 각각의 긴장력 감소 시나리오에 있어 첫 번째 가진 실험에서 Sensor 4를 통해 추출된 파워스펙트럼 밀도함수를 보여준다. Fig. 9와 같이 각 센서별로 취득된 모든 파워스펙트럼밀도 함수와 식 (7)의 두 주파수 응답함수간의 상관계수와와의 관계가 Fig. 11과 같다. Fig. 11을 보면 긴장력 감소에 따라 파워스펙트럼밀도 함수의 상관계수가 Prestress Case 13 (39.2kN)까지는 Prestress Case 5-8을 제외하면 선형적으로 감소하는 경향을 보이고 있으며, 그 이후 Sensor 4, 5의 경우는 상관계수가 증가하는 것을 볼 수 있다.

또한 각 모드별 주파수 대역에 대해 상관계수를

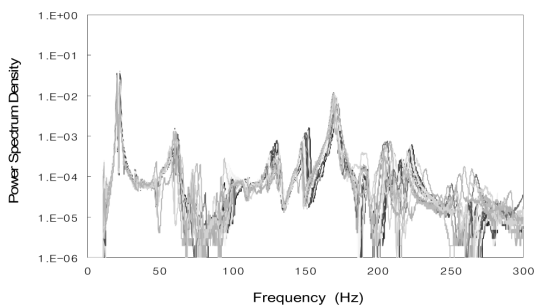


Fig. 9 Power spectral curves by sensor 4 (frequency range: 0~300Hz)

적용해 보았다. 주파수 대역은 Fig. 8에 나타나 있는 비손상 상태(Prestress Case 1)일 때의 각 모드별 고유진동수에 대하여 $\pm 20\%$ 의 주파수 대역을 정하였다. Fig. 10은 sensor 4에서 추출된 각 모드별 주파수 대역에 대한 파워스펙트럼 밀도함수를 보여준다. Fig. 12부터 Fig. 15까지는 1~4차 횡 모드를 포함하는 주파수 대역 각각에 대한 각 센서별 상관계수를 나타내고 있으며, sensor 8을 제외하고는 Fig. 11과 비슷한 패턴을 보여주고 있다. 이상과 같은 결과들에서 Prestress Case 5-8의 결과는 Fig. 10(b)에서 볼 수 있듯이 실험 시 발생된 원치 않는 계측 노이즈에 의해 발생된 peak 점들에 의한 것으로 판단된다. 또한 Prestress Case 13 이후로 상관계수 값이 다시 증가하는 경우는 센서의 위치 주파수의 범위에 따라서 다르게 나타나며 이는 추후 정밀한 해석적인 분석이 요구되어진다.

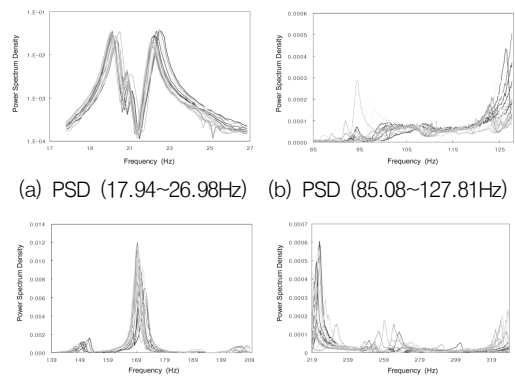


Fig. 10 Narrow-band power spectral curves by sensor 4

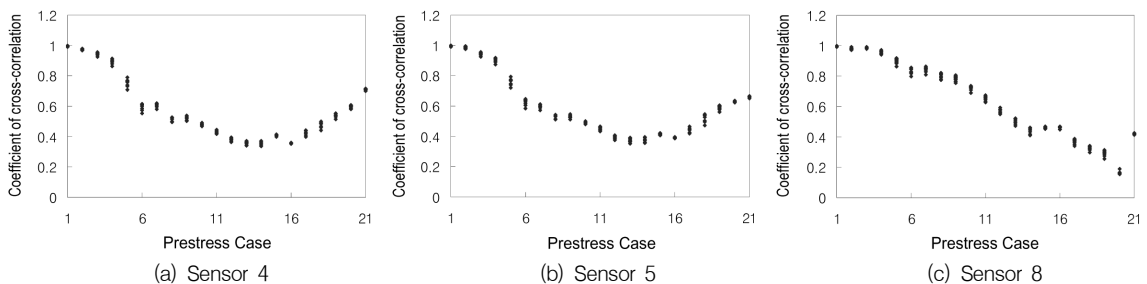


Fig. 11 Coefficients of Cross-correlation for 21 prestress force cases (frequency range: 0~300Hz)

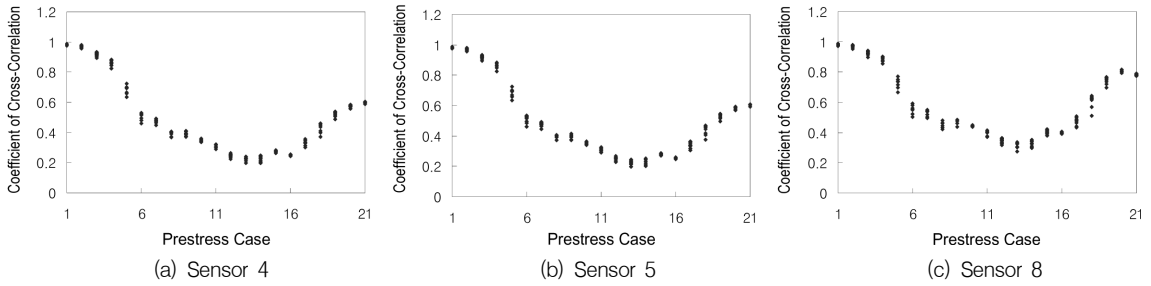


Fig. 12 Coefficients of cross-correlation for 21 prestress force cases (frequency range: 17.94~26.98Hz)

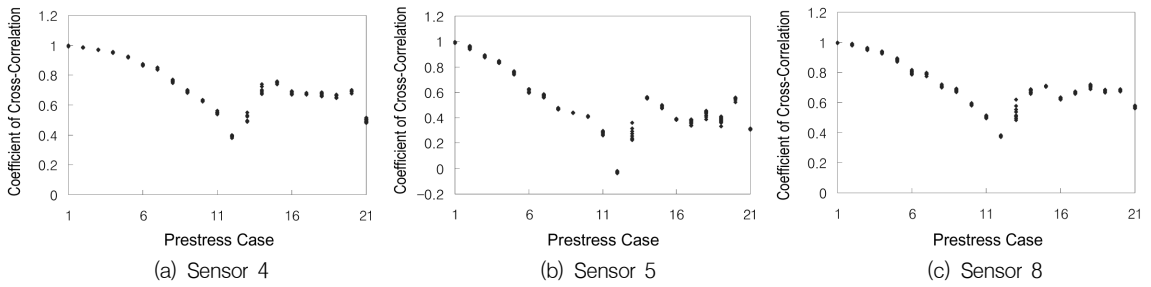


Fig. 13 Coefficients of cross-correlation for 21 prestress force cases (frequency range: 85.08~127.81Hz)

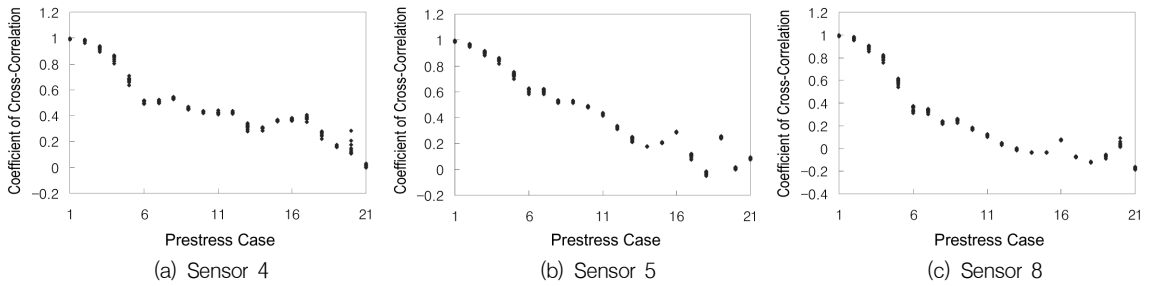


Fig. 14 Coefficients of cross-correlation for 21 prestress force cases (frequency range: 139.53~209.47Hz)

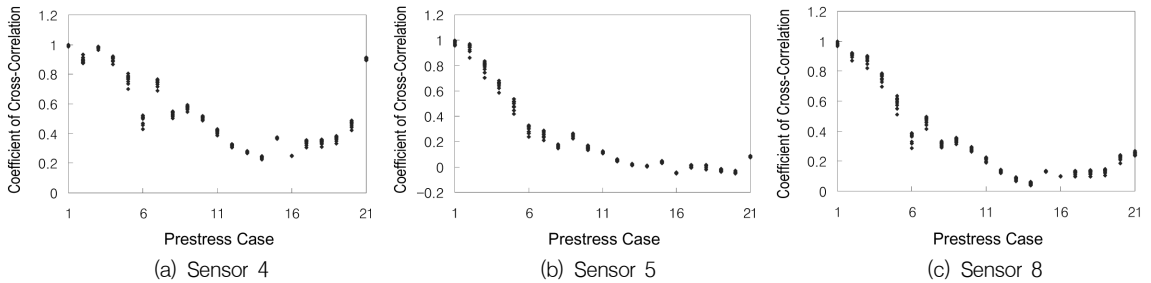


Fig. 15 Coefficients of cross-correlation for 21 prestress force cases (frequency range: 219.12~328.74Hz)

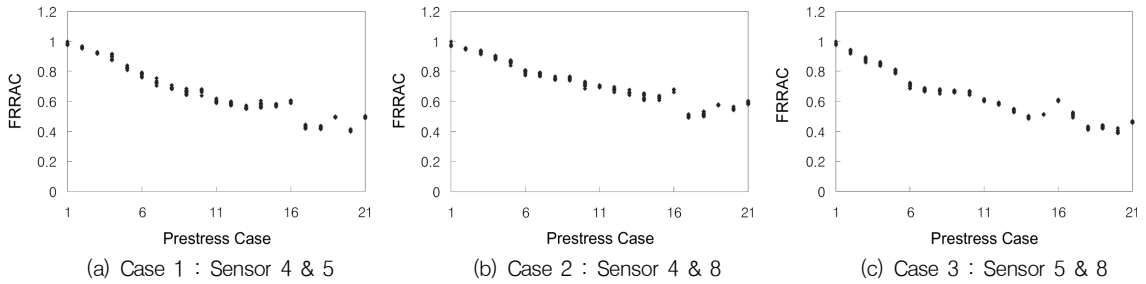


Fig. 16 Changes of FRRAC for 21 prestress force cases

4.4 주파수 응답비 보증지수 분석

주파수 응답비 보증지수(FRRAC)를 분석하기 위해서는 두 위치에서 취득된 응답의 주파수 응답비 함수를 구하기 위해 2개의 센서를 선정할 필요가 있다. 이를 위해 앞서 주파수 응답 상관계수에 이용하였던 3개의 센서인 Sensor 4, 5, 8번을 선정하였다. 센서 위치에 따른 특성을 분석하기 위하여 다음과 같은 3가지 경우(Case)에 대하여 주파수 응답비 보증지수를 분석하였다.

- (1) Case 1 : Sensor 4, 5번을 이용
- (2) Case 2 : Sensor 4, 8번을 이용
- (3) Case 3 : Sensor 5, 8번을 이용

주파수 응답비 함수는 선정된 2개의 센서로부터 자기상관함수와 상호상관함수를 구하고 두 개의 상관함수의 비를 구함으로써 얻을 수 있다. 이러한 방법으로 각각의 센서 선정 Case에 따라 FRRAC를 구한 결과가 Fig. 16에 보여진다. Fig. 16을 보면, 모든 Case에 대해서 대체적으로 긴장력이 감소함에 따라 FRRAC 값이 감소하는 경향을 보여주고 있다. Fig. 16(a)의 Sensor 4, 5를 사용한 경우에는 Prestress Case 13(39.2kN)까지는 계속 감소하며, Fig. 16(b)의 Sensor 4, 8을 사용한 경우에는 Prestress Case 15(29.4kN)까지 감소, Fig. 16(c)의 Sensor 5, 8을 사용한 경우에는 Prestress Case 14(34.3kN)까지 감소하다가 그 이후로는 3가지 Case 모두 증가, 감소를 반복한다. 이와 같이

증가, 감소를 반복하는 구간은 주파수 응답 상관계수에서의 결과에서 상관계수가 감소하다가 증가하는 구간과 거의 일치한다. 하지만 주파수 응답비 보증지수를 이용하였을 경우가 주파수 응답 상관계수를 이용하였을 경우보다 긴장력 감소에 따라서 선형성이 좀 더 뛰어 난 것으로 보인다. Fig. 16으로부터 센서의 선정에 따른 결과를 분석해 보면 그래프에서 보이는 바와 같이 센서의 위치에 따라 크게 영향을 미치는 것은 아닌 듯하지만 Case 3이 긴장력 감소에 따른 FRRAC 값의 변화가 제일 크게 일어나는 것으로 분석된다.

5. 결론

본 연구에서는 보다 간단한 긴장력 추정방법 개발에 대한 기초적인 연구로서 프리스트레스트 콘크리트 거더의 긴장력 변화에 따른 다양한 진동응답특성들의 변화를 실험적으로 분석하였다. 먼저, 구조물의 진동응답특성을 분석하기 위한 기법들을 선정하였다. 선정된 기법에는 기존에 많이 이용되는 고유진동수(동특성)를 추출하기 위한 기법도 포함하였다. 다음으로, 프리스트레스트 콘크리트 거더의 긴장력과 휨 진동 응답 사이의 관계를 살펴보기 위해 모형 프리스트레스트 콘크리트 거더를 제작하고, 초기 긴장력 98.0kN에서 0kN까지 4.9kN씩 긴장력을 감소시키면서 진동응답실험을 수행하였다. 마지막으로, 긴장력 변화에 따라 취득된 동적응답신호를 이용하여 선정된 진동응답분석 기법을 적용하였으며, 긴장력과 휨 진동 응답특성 관계를 분석하였다. 이

상과 같은 실험을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 주파수 영역 분해법을 이용하여 긴장력 감소에 따른 고유진동수 값의 변화를 살펴보았을 경우 감소, 증가를 반복하면서 전체적으로 감소하는 경향을 보였다. 그러나 주변에 발생하는 유사 모드의 peak들에 대한 구분이 어려워 정확한 고유진동수를 추출하는데 어려움이 있었다.

(2) 주파수 응답 상관계수나 주파수 응답비 보증지수를 이용하였을 경우 긴장력이 최대 긴장력(98.0 kN)에서 60% 감소할 때 까지는 주파수 응답 상관계수나 주파수 응답비 보증지수가 비교적 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있었다. 하지만, 긴장력이 약 60% 이상 감소하였을 경우에는 각각의 값이 증가하거나 감소하거나 또는 감소, 증가를 반복하는 경향을 보였다.

(3) 이는 센서의 위치 주파수의 범위에 따라서 다르게 나타나며, 추후 정밀한 해석적인 분석이 요구되어진다.

(4) 긴장력과 본 연구에서 선정한 진동응답특성의 관계가 비교적 선형적으로 나타나는 점을 이용하여 추후 해석적인 분석을 통해 긴장력 추정방법을 개발하는데 용의할 것이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술원 지정 스마트 사회기반 연구센터의 지원과 2단계 BK21 해안항만기반시스템 전문인력 양성 사업팀의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김정태, 홍동수, 박재형, 조현만, "PSC 거더교의 진동기반 긴장력 손실 모니터링", 한국전산구조공학회, 제21권, 제1호, 2008, pp. 83-90.
2. 신현목, "프리스트레스드 콘크리트", 동명사, 2005.
3. 이진학, 윤정방, "구조물의 응답자료만을 이용한 모드계수 추정법에 관한 비교연구", 대한토목학회, 제23권,

- 제2호, 2003, pp. 187-201.
4. Adams, R.D., Cawley, P., Pye, C.J. and Stone, B.J., "A Vibration Technique for Non-destructively Assessing the Integrity of Structures", Journal of Mechanical Engineering Science, 20, 1978, pp. 93-100.
5. Bendat, J.S. and Piersol, A.G., "Engineering applications of correlation and spectral analysis", Wiley, USA, 1993.
6. Elsener, B., "Long-term monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons", Structural Concrete, Vol 6, No 3, 2005, pp. 101-106.
7. Kato, M. and Shimada, S., "Vibration of PC bridge during failure process", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol 112, No 7, 1986, pp 1692-1703.
8. Kim, J.T., Park, J.H. and Lee, B.J., "Vibration-based damage monitoring in model plate-girder bridges under uncertain temperature conditions", Engineering Structures, 29, 2007, pp 1354-1365.
9. Kim, J.T., and Stubbs, N., "Crack detection in beam-type structures using frequency data", Journal of Sound and Vibration, Vol 259, No 1, 2003, pp 145-160.
10. Kim, J.T., Yun, C.B. and Yi, J.H., "Temperature effects on frequency-based damage detection in plate-girder bridges", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol 7, No 6, 2003, pp 725-733.
11. Kim, J.T., Yun, C.B., Ryu, Y.S. and Cho, H.M., "Identification of prestress-loss in PSC beams using modal information", Structural Engineering and Mechanics, Vol 17, No 3-4, 2004, pp 467-482.
12. Law, S.S. and Lu, J.R., "Time domain responses of a prestressed beam and prestress identification", Journal of Sound and Vibration, Vol 288, No 4-5, 2005, pp. 1011-1025.
13. Otte, D., Van de Ponsele, P. and Leuridan, J., "Operational Shapes Estimation as a Function of Dynamic Loads", Proceedings of the 8th International Modal Analysis Conference, 1990, pp. 413-421.
14. Sundermeyer, J.N. and Weaver, R.L., "On crack identification and characterization in beam by nonlinear vibration analysis", TAM Report, No. 74, UILU-ENG-93-604, Univ. of Illinois, 1993.

-
15. Tang, J.P. and Leu, K.M., "Vibration Tests and Damage Detection of P/C Bridges", Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol 14, No 5, 1991, pp 31-536.
16. Toksoy, T. and Aktan, A.E., "Bridge-condition Assessment by Modal Flexibility", Experimental Mechanics, 34, 1994, pp 271-278.

17. Yi, J. H. and Yun, C. B., "Comparative Study on Modal Identification Methods using Output-only Information", Structural Engineering and Mechanics, Vol 17, No 3-4, 2004, pp 445-446.

(접수일자 : 2009년 2월 4일)

(심사완료일자 : 2009년 3월 30일)