현장 난류특성을 고려한 해상 사장교의 내풍안정성 분석

Wind Stability Analysis of an Over-Sea Cable Stayed Bridge Considering In-site Turbulence Properties

신현섭*** · 김병철** · 임성순*** · 이영호** · 송재준** · 황윤국**

Shin, Hyun Seop · Kim, Byeong Cheol · Yhim, Sung Soon · Lee, Young Ho · Song, Jae Joon · Hwang, Yoon Koog

Abstract

The safety as well as serviceability of over-sea bridges can be threatened by excessive vibration, because the bridge should endure harsh condition such as high-speed wind during the expected life time. The buffeting, which is typical wind induced vibration, is hard to be estimated without verifying the exact wind properties. This study investigates a method for improving an accuracy of the buffeting analysis of a cable stayed bridge by considering in-site turbulence property. The two-year, 100 Hz, wind and acceleration data measured by integrated measurement system is used to analyze the properties of the wind and the structure more accurately. The buffeting analysis considering an effect of in-site wind turbulence is performed by using measurement-based model. The method calculating limit speed of serviceability is considered to be reliable, because the result from the analysis has enough similarity with the measured one. It is expected that the serviceability evaluation criteria of each bridge can be more reasonably determined considering wind properties, if enough data is stored on the system.

Key words : Wind stability, Buffeting, Cable stayed bridge, Turbulence property

요 지

해상교량은 공용기간동안 높은 풍속을 포함한 가혹한 환경을 견뎌 내야 하므로 과대 진동의 발생은 교량의 안정성뿐만 아니라 안전까지 위협할 수 있다. 교량의 안정성과 관련된 대표적인 내풍진동 현상인 버페팅은 교량에 불어오는 바람의 난류특성을 규명하지 않고는 정확한 응답을 예측하기 어렵다. 본 연구는 현장 특성을 반영하여 사장교의 버페팅해석 신뢰도를 높이기 위한 방법을 고찰하였다. 바람 및 구조물의 특성을 정확하게 파악하기 위해 서남해안의 사장교 1개소에서 통합유지관리 계측시스템에 의해 2년 동안 수집된 100 Hz의 풍속 및 가속도 데이터를 이용하였다. 해석대상 사장교의 계측기반 유한요소모델을 작성하고, 현장의 난류특성을 고려한 버페팅 해석을 수행하였다. 산정된 결과는 교량의 실제 변위응답과 유사성을 나타내므로 현장계측에 기반한 사용성 한계풍속 산정방법은 신뢰도를 갖는 것으로 판단된다. 향후, 지속적인 계측과 모니터링을 통하여 많은 데이터가 축적되는 경우 풍특성을 고려한 교량 마다의 안정성 기준 마련에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 내풍안정성, 버페팅, 사장교, 난류특성

1. 서 론

해상교량은 공용기간동안 높은 풍속을 포함한 가혹한 환경을 견뎌 내야 하므로 과대 진동의 발생은 이용자의 안정성뿐만 아니라 안전까지 위협할 수 있다. 교량의 안정성과 관련된 대표적인 내풍진동 현상인 버페팅은 교량에 불어오는 바람의 난류특성을 규명하지 않고는 정확한 응답을 예측하기 어렵다. 또한, 준공이후 시간이 지남에 따라 변화하는 재료적

성질 및 케이블 장력, 노후화에 따른 지점조건의 변화, 보수 보강에 의한 질량 및 강성의 변화 등은 구조물의 특성을 변화시키기 때문에 설계 시에 사용된 ‘초기 해석모델’만으로는 외력에 의한 구조물의 거동특성을 정확하게 예측할 수 없다.

본 연구는 현장특성을 반영하여 사장교의 버페팅해석 신뢰도를 높이기 위한 방법을 고찰하였다. 일반적으로 설계에 사용되는 구조해석 모델은 구조물의 정확한 응답을 산정하여 유지관리를 효율적으로 수행하는 것보다는 구조물의 안전을

*교신저자. 정회원. 한국건설기술연구원 인프라구조연구실 수석연구원(Tel: +82-31-910-0287, Fax: +82-31-910-0121, E-mail: hsshin@kict.re.kr)

Corresponding Author. Member. Senior Researcher

**한국건설기술연구원 인프라구조연구실
 Structural Engineering Research Division, KICT

***서울시립대학교 토목공학과 교수
 Professor, Department of Civil Engineering, University of Seoul

최우선으로 두고 단면의 강성, 질량 등을 보수적인 입장에서 결정하게 된다. 따라서, 시공 전의 상황들을 가정하여 구조물을 이상화시킨 유한요소모델은 실제의 교량 구조물과는 구조적 특성이 다소 상이할 수 있다.

위와 같은 이유로 초기모델을 통한 해석결과와 실제 구조물의 거동에는 일정 이상의 차이가 존재하기 때문에, 완공 후 또는 공용 중의 교량에 대해서는 설계에 사용되었던 해석모델의 적절한 수정이 요구된다(Kim *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2008; Park *et al.*, 2010; Yoon and Chang, 2002; Zhang *et al.*, 2000). 따라서, 구조물의 외력에 의한 응답을 정확하게 평가하기 위해서는 설계자료, 유지관리이력, 재하시험 결과를 반영하는 ‘기저모델(base analysis model)’을 토대로 계측자료를 이용하여 교량의 현상태를 모사할 수 있는 ‘계측기반 모델(analysis model based on measured data)’을 수립하여야 한다. 이러한 계측기반 모델은 중차량, 태풍, 지진 등의 주요 하중에 대한 응답을 높은 신뢰도로 예측하기 위해 활용할 수 있다.

본 연구는 특수교 통합유지관리를 위한 계측시스템이 구축되어 운영 중인 사장교를 대상으로, 계측시스템으로부터 얻은 실측 데이터(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2011)를 활용하여 실제 거동을 모사할 수 있는 유한요소모델을 작성하고, 이를 기반으로 대상 특수교량의 진동을 평가하였다. 진동해석을 위해 보수보강 이력 및 계측자료를 분석하고 현재의 거동특성을 구현할 수 있는 계측기반 해석모델을 수립하였다. 비폐팅해석을 위해 대상교량에 작용하는 풍하중을 정량화하였고, 비폐팅해석 결과와 계측데이터와의 비교분석을 통해 해석모델을 검증하였다. 다양한 풍속에 대한 비폐팅해석 결과를 토대로 대상교량의 진동사용성을 검토하였다. 또한, 현장의 난류특성을 반영한 해석과정에 있어서는, 적용되는 해석이론과 수치적인 기법에 대하여 고찰하였다.

2. 대상 교량 개요

해석대상의 교량은 Fig. 1 및 Table 1에 나타난 바와 같이 중앙경간 230 m, 측경간 103 m로서 총 연장은 436 m이며 주탑은 H형상의 철근 콘크리트 구조로 높이는 90 m이다. 교량상판은 강재 주형 위에 프리캐스트 콘크리트 슬래브를 설치하여 만든 강합성 구조로 되어 있다.

해석대상 교량의 안전관리 및 유지관리를 위해 구축된 상

Table 1. General Information about Analysis Bridge

구분	내용	구분	내용
상부	형식	3경간 강합성 사장교	차로수
	교장	436.0 m (103+230+103)	가변3차로
주탑	H형 RC 구조	케이블	2열 수직배치
신축이음	Rail Joint	받침	Spring Bearing
설계하중	DB-24	설계 최대풍속	64.5 m/s

시계측시스템에는 풍향풍속, 진동, 처짐, 장력, 온도 등 9개의 계측항목에 대해서 초음파풍향풍속계, 가속도계, 레이저 처짐계 등 7종류, 총 66개의 센서가 설치되어 있다.

3. 풍특성 분석

케이블을 주부재로 사용하는 사장교나 현수교와 같은 장대교는 다양한 외부하중 중에서 풍하중에 가장 민감한 영향을 받는다. 풍하중의 경우 동일한 평균풍속의 바람이 불어오더라도 지형적 조건, 구조물의 형상, 고도에 따라 상이한 응답을 나타낸다. 바람에 의한 교량의 응답을 높은 신뢰도로 예측하기 위해서는 교량에 설치되거나 교량과 인접한 지역에 위치한 풍속계를 통한 계측결과로부터 풍하중을 정량화하여야 한다. 본 연구에서는 기상청의 자료 및 대상 교량에 설치된 풍속계의 자료를 수집하여 풍향을 조사하였다. 해당 풍향을 갖는 풍속자료를 토대로 난류강도 및 난류스펙트럼을 산정하였으며, 정량화된 풍하중 특성을 비폐팅해석의 초기 입력값으로 사용하였다.

3.1 풍향풍속 및 난류 특성

구조물이 바람으로부터 받는 힘은 일반적으로 풍속의 제곱에 비례하여 증가하므로, 구조물의 내풍성능에 관계하는 인자들 중에서도 특히 중요한 인자의 하나는 풍속이다. 본 연구에서는 평균 해수면에서 35 m 고도에 위치한 보강거더와 92 m 고도의 주탑상부에 위치한 풍속계에서 2011년 6월 26일~2011년 8월 8일 사이에 계측된 주요 계측자료로부터 10 분간의 실시간 데이터 36구간을 분석하였다.

풍속데이터 중에서 평균풍향과 평균풍속의 관계를 Fig. 2의

Fig. 1. Front View of Analysis Bridge

Fig. 2. Windrose Diagram: Data Measured by Anemometer Installed on Analysis Bridge

Fig. 3. Windrose Diagram: Data Measured at the Observation Station for the Past Two Years

바람장미도(Windrose diagram)에 도시하였다. 풍속이 큰 바람은 거더의 경우 주로 동쪽에서, 주탑의 경우 주로 남동방향에서 불어온다. 그러나, 해석대상 교량의 인근에 위치한 계측소에서 관측한 2년간의 10분 평균풍속 자료를 검토한 결과에 따르면, Fig. 3에 나타난 바와 같이 평균풍속 6 m/s 이상의 바람은 주로 서풍에 집중되어 있다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2011). 대상기간 동안에 측정된 풍향과 장기계측에 의한 풍향이 다른 것은 대상기간 동안 태풍이 발생한 것이 원인으로 판단된다.

Fig. 4는 평균풍속에 대한 난류강도를 나타낸 것이다. 풍속이 작을수록 난류강도가 큰 일반적인 경향을 나타내고 있으며, 풍속이 20 m/s 이상인 경우 난류강도는 주탑의 경우 평균 14.6% 이하, 거더의 경우 평균 10.1% 이하의 값을 나타낸다. 해당지역의 평균풍속과 난류길이의 관계는 Fig. 5에 나타났다. 평균풍속이 20 m/s 이상의 바람에서 난류길이는 거더에서 258.1 m~311.2 m, 주탑의 상부에서 165.4 m~182.1 m로 나타났다.

현장 난류특성을 고려한 해상 사장교의 내풍안정성 분석

Fig. 4. Mean velocity - Turbulence Intensity Diagram

Fig. 5. Mean Velocity - Turbulence Length Diagram

3.2 풍응답 해석을 위한 풍하중 특성

계측된 풍특성을 교량의 비파괴해석에 적용하기 위해서는 설계풍속, 난류강도, 난류길이, 변동풍속의 파워스펙트럼을 결정해야 한다.

설계풍속의 경우, 여수 기상대에서 제공되는 최근 60년 동안의 계측자료에 근간한다. 이에 따르면 우리나라의 연 최대 풍속의 누적분포와 잘 일치하는 것으로 알려진 Gumbel 분포로부터 100년 빈도의 10분 평균풍속의 최대값은 99.0%의 비초과확률을 가지는 풍속으로서 34.52 m/s로 산정된다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2011). 설계기본풍속은 지표상 10 m 고도를 기준으로 계측된 값이므로, 교량에 작용하는 풍하중을 산정하기 위한 풍속으로 사용하기 위해서는 고도에 따른 보정을 해야 한다. 고도 10 m의 기준 풍속 34.52 m/s를 지수법칙을 이용하여 보정한 보강거더 평균 높이의 설계풍속은 48.30 m/s로 계산된다.

난류강도와 난류길이는 Fig. 4 및 Fig. 5에서 보강거더에서 계측된 풍속 10 m/s 이상인 바람의 평균난류강도 12.6%와

Fig. 6. Comparison of Measured Wind Power Spectrum with Karman Spectral Equation

평균난류길이 133.6 m를 적용하였다. 변동풍속의 파워스펙트럼은 Eq. (1)과 같은 Karman 스펙트럼 모델을 사용하였다. 여기서, S는 PSD(Power Spectral Density), L_u 는 난류길이, $U(z)$ 는 보강거더 높이의 설계풍속, I 는 난류강도(turbulence intensity)를 의미한다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 현장에서 계측된 풍속데이터의 파워스펙트럼은 정량화된 계측 풍특성을 이용해 산정된 Karman 스펙트럼에 준하는 경향을 나타내고 있다.

$$\frac{fS_u(z, n)}{\sigma_n^2} = \frac{4 \left\{ \frac{fL_u}{U(z)} \right\}}{\left[1 + 70.8 \left\{ \frac{fL_u}{U(z)} \right\}^{2.5/6} \right]} \quad (1)$$

4. 유한요소모델

교량은 공용연수가 길어질수록 구조물을 구성하는 부재의 재료적 특성의 변화 또는 지점의 마찰 등의 특성이 달라진다. 더불어 보수·보강 등에 의해 구조물의 질량 또는 강성의 변화를 일으킬 수 있으므로, 이러한 변화를 설계도면 및 보강 계획 도면 등을 참고하여 해석모델에 반영해야 하며, 구조물의 응답을 더욱 정확하게 예측하기 위해서는 계측에 의한 구조물의 특성과 해석모델의 특성을 일치시키는 과정이 필요하다(Kim *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2008; Park *et al.*, 2010; Yoon and Chang, 2002; Zhang *et al.*, 2000).

교량의 실제 응답을 모사할 수 있는 계측기반 모델을 수립하기에 앞서 현재의 교량 형상 및 상태를 파악하고 강성과 경계조건 및 질량분포를 적절히 이상화하는 기저모델 작성과정이 필요하다. 이를 위해 대상교량의 준공부터 현재까지의 관련 자료(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 1999~2006, 2011; Daelim Industrial Co., 2000)를 조사하여 실제 교량에 적용되고 있는 고정하중 및 단면조건 등을 파악하였다. 유지관리과정에서 재포장, 보수·보강과 같이 구조물에 영향을 미칠 수 있는 유지관리 이력을 분석하여 변경 단면과 추가된 하중으로 인한 고정하중 분포의 변화 등을 분석함으로써 기저모델 구축 시 정확한 단면특성, 재료특성, 고정하중 등이 반영될 수 있도록 하였다.

Fig. 7에 나타난 기저모델은 총 697개의 절점과 80개의 케이블, 507개의 Frame요소로 구성되어있다. 주탑 및 보강거더는 Frame요소로 모델링하였으며, 케이블은 등가트러스요소를 이용하였다. 교각부의 탄성받침, 다운링크와 전단기는 지점부에 연결되는 Elastic Link요소를 사용하였고, 주탑부의 윈드슈와 전단기는 동일한 요소로 주탑과 연결하여 모델링하였다. 사용된 프로그램은 범용 유한요소해석 프로그램인 MIDAS이다.

이와 같이 작성된 구조해석 모델이 실측된 진동특성을 갖도록 하기 위해서는 모델의 업데이트 및 보정이 필요하다. 이를 위해 현장재하시험이나 계측시스템에 의해 측정된 결과를 모델의 보정에 사용하게 되며, 정적실험 결과 중에서는 처짐형상과 동적실험 결과에서는 고유진동수를 모델의 보정

에 주로 사용하고 있다. 측정 오차를 포함하는 정적 처짐형상에 비하여 고유진동수의 정밀도가 더 높은 것으로 밝혀지고 있기 때문에, 해석모델의 보정을 위해 실측 고유진동수를 사용하였다.

실측 고유진동수는 구조물의 가속도계에서 계측된 시간이력 가속도를 Discrete Fourier Transform 방법으로 변환하여 Peak 주파수를 분석하여 산정하였다. 10분 동안의 시간이력 가속도를 Fast Fourier Transform을 이용하는 경우 고유진동수는 소수점 이하 2자리가 한계 정확도를 나타내지만, DFT를 이용한 경우는 소수점 이하 3자리까지 정확한 진동의 Peak값을 확보할 수 있다.

구조해석 모델의 보정시 고려할 수 있는 변수로서 거더의 연직강성 및 횡강성, 비틀림강성, 주탑의 강성, 탄성받침의 횡강성 및 횡방향 회전강성을 고려하였으며, 각각의 변수 변화에 대한 고유진동수의 민감도를 분석하였고, 민감도 분석의 결과를 토대로 계측진동수와 상사시키기 위해 계측진동수를 목표 진동수로 두고 편차의 제곱의 합이 최소가 되도록 반복 해석함으로써 해석에 의한 고유진동수를 실측치에 가깝도록 조정하였다.

Table 2는 기저모델 대비 계측기반 모델에 사용된 각 변수를 비교해 놓은 것이며, Table 3 및 Table 4는 기저모델

Fig. 7. FE Model for Analysis Bridge

Table 2. Revised Parameters in Contradiction to the Case of Base Analysis Model

파라미터	기저모델	계측기반모델
거더 비틀림강성(%)	100.00	90.31
거더 연직강성(%)	100.00	97.30
거더 횡강성(%)	100.00	119.90
주탑 강성(%)	100.00	91.12
받침 탄성(kN/m)	5,000	97,556
지점 횡방향 회전강성(kN-m/rad)	0	12,388

Table 3. Comparison of Measured Frequency with Frequency Estimated by Base Analysis Model

모드	모드형상	계측	기저모델	오차 (%)
1	연직 1차	0.458	0.487	6.3
2	연직 2차	0.640	0.665	3.9
3	횡방향 1차	-	0.676	-
4	주탑 횡방향 1차	-	0.751	-
5	횡방향2차	0.848	0.846	0.2
6	연직3차	1.031	1.166	13.1
7	비틀림 1차	1.125	1.242	10.4

Table 4. Comparison of Measured Frequency with Frequency Estimated by Analysis Model Based on Measured Data

모드	모드형상	계측	계측기반 모델	오차(%)
1	연직 1차	0.458	0.453	0.0
2	연직 2차	0.640	0.618	3.4
3	횡방향 1차	-	0.636	-
4	주탑 횡방향 1차	-	0.723	-
5	횡방향2차	0.848	0.815	3.9
6	연직3차	1.031	1.040	0.9
7	비틀림 1차	1.125	1.134	0.8

(base analysis model) 및 계측기반모델(analysis model based on measured data)을 사용했을 때의 계측 고유진동수 대비 해석 고유진동수를 비교해 놓은 것이다. Fig. 8은 계측 기반 모델에 의해 해석으로 구한 연직 1차에서 3차까지의 진동모드에 대한 교량 형상을 나타낸 것이다. 고유진동수 비교에 따르면 계측 진동수와 기저모델의 주요 진동모드의 진동수는 최대 13.1%의 차이를 보이는 반면에, 계측기반 모델에 의해 구한 진동수는 실측 고유진동수와 3.9% 이하의 차이를

(a) Vertical 1st (0.453Hz)

(b) Vertical 2nd (0.618Hz)

(c) Vertical 3rd (1.040Hz)

Fig. 8. Vibration Mode of Analysis Bridge Estimated by Analysis Model Based on Measured Data

현장 난류특성을 고려한 해상 사장교의 내풍안정성 분석

나타내어 교량의 실제 진동특성을 비교적 잘 모사할 수 있음을 알 수 있다.

5. 버페팅 해석

자연풍과 같이 작용하는 바람 자체가 교란되어 발생하는 버페팅과 같은 진동은 구조물 자체를 파괴에 이르게 하는 경우는 없다. 그러나, 부재나 연결부 등의 부분적인 피로문제, 주행차량의 안전확보, 통행자의 불안감 등과 같은 사용성 측면에서 문제가 될 가능성이 있으므로 내풍설계에 있어서 중요한 검토과제 중의 하나이다.

4장의 유한요소모델에 대해 구조해석 프로그램인 RM의 buffeting 해석모듈을 이용하여 주파수영역 하에서 버페팅 해석을 하였으며, 현장 계측자료와 비교함으로써 모델 및 해석의 적합성을 검증하였다. 해석에 사용된 모델의 모든 요소와 단면상수, 하중 및 질량 등의 특성은 계측기반 모델에서 사용된 것과 동일하다. 해석시 구조물의 감쇠계수는 대수감쇠 0.03을 적용하였다.

5.1 해석조건

(1) 공기력계수

버페팅 응답해석에 필요한 공기력계수 및 기울기는 풍동실

Table 5. Aerodynamic Force Coefficients of Analysis Bridge

영각	항력계수 C_d	양력계수 C_l	모멘트계수 C_m
-10°	2.90	-0.49	-0.06
-8°	2.56	-0.46	-0.06
-6°	2.26	-0.42	-0.06
-4°	1.96	-0.36	-0.07
-2°	1.78	-0.29	-0.07
0°	1.62	-0.14	-0.07
2°	1.69	0.02	-0.07
4°	1.78	0.16	-0.06
6°	2.17	0.21	-0.04
8°	2.18	0.41	-0.02
10°	2.43	0.48	-0.01

Fig. 9. Aerodynamic Force Coefficient According to Angle of Attack

험 보고서(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 1998)에서 산정된 값을 참고하였다. Table 5 및 Fig. 9는 영각에 따른 보강거더의 공기력계수를 나타낸 것이다. 해석에 사용된 공기력계수는 영각 0°에 해당하는 값을 사용하였으며, 공기력계수 기울기를 구하기 위해 사용된 보강거더의 높이 및 폭은 각각 2.715 m와 21.193 m이다.

(2) 난류강도 및 난류길이

난류강도와 난류길이는 3.2절에 나타난 바와 같이 보강거더에서 계측된 풍속 10 m/s 이상인 바람의 평균난류강도 12.6%와 평균난류길이 133.6 m를 적용하였다.

(3) 풍특성(Wind Property)

해석프로그램에 입력데이터로 사용된 풍하중의 특성을 Fig.

(a) Distribution of mean velocity

(b) Distribution of turbulence intensity

(c) Wind power spectra

Coherence data: Coherence type 1

Coherence	Longitudinal DX	Vertical DY	Lateral DZ
Longitudinal	2	8	8
Vertical	4	4	8
Lateral	4	4	4

(d) Coherence

Fig. 10. Wind Property Used in Buffeting Analysis

10에 나타내었다. 풍속 스펙트럼은 Karman 제안식에 현장에 계측된 난류길이를 적용하여 결정하였다. 코히런스는 기본 제안값을 적용하여 바람의 공간상관성을 고려하도록 하였다.

5.2 해석결과

계측시스템으로부터 측정된 자료를 이용하여 공용중인 교량의 특성을 반영한 계측기반 해석모델로 버페팅해석을 하였으며, 그 결과를 풍속-변위 계측자료와 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. 계측변위는 중앙경간의 1/2 지점에서 측정된 것이며, 풍속은 10분 평균풍속이다.

응답의 비교결과, 10 m/s 이하의 풍속에서는 현장계측에 의한 연직변위 응답이 버페팅해석에 의한 결과를 약간 상회하고 있다. 이와 같은 이유는, 차량이 주행하고 있는 상시계측 조건에서 측정된 변위의 경우 차량주행에 의해 발생하는 진동의 영향으로 낮은 풍속에서의 계측값이 해석에 의한 응답치 보다 큰 값을 나타낸 것으로 판단된다. 그러나, 풍하중이 교량의 사용성에 주된 영향을 미칠 수 있는 10~15 m/s 이상의 풍속에서는 실측 변위와 전반적으로 매우 유사한 추세를 보이고 있어서, 버페팅해석 결과가 동적 사용성 검토의 기초 자료로 충분한 신뢰도를 갖는 것으로 판단된다.

한편, Manual tuning에 의한 분석방법 및 과정을 고찰해보면, 교량의 중요 설계변수가 고유진동수에 미치는 영향을 검토함으로써 해당 설계변수에 대한 고유진동수의 민감도를 파악할 수 있다. 또한, 민감도 분석과정을 통해 얻은 결과를 바탕으로 계측기반 해석모델을 구할 수 있으며, 이 해석모델을 사용하여 버페팅해석을 할 수 있다. 그러나, 버페팅응답만을 산정하는 것이 목적이라면 각 상세 부재의 질량과 강성의 특성을 조정할 필요 없이, 설계모델의 모드형상에 계측을 통해 얻은 고유진동수를 대입하는 방법인 단일모드 주파수영역법을 사용하여 버페팅응답을 산정할 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 11. Comparison of Measured Displacement with Analysis Results

6. 진동사용성 평가

일반적으로 진동사용성이란 공용중의 활하중에 대하여 차량이 안전하게 주행할 수 있고 이용자에게 불쾌감을 주지 않는 구조물의 성능수준을 말한다. 케이블을 주부재로 이용하는 장대교량은 지역적으로 높은 상징성을 갖기 때문에 교량의

진동이 차량의 주행성이나 이용자의 심리적 안정성을 저해하는 일이 없어야 할 것이다. 장대교의 경우 바람이 교량에 진동을 발생시키는 주요한 원인이 되므로 바람에 의한 교량의 진동이 사용성에 미치는 영향을 검토해야 한다. 다음은 버페팅해석 결과에서 얻은 변위 및 가속도를 이용하여 대상교량의 진동사용성을 검토한 것이다.

6.1 평가 방법

진동사용성 기준은 외부의 진동에 대하여 인체가 느끼는 감각에 대한 기준으로서 Reiher-Meister(1931)의 진동감각곡선, ISO 2631(1997)에 제시된 연직 진동가속도 기준, Postlethwaite(1944)의 진동제한기준 등 다양한 기준이 연구되어 왔으며, 이를 활용한 사용성평가가 교량 및 건축구조 등 다양한 분야에서 진행되어 오고 있다(Cho and Hong, 2006; Jeon and Kim, 2007; Kang *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2006). 이중 Reiher-Meister의 진동감각곡선은 주파수성분에 대한 최대변위 혹은 가속도를 기준으로 동적 사용성을 평가할 수 있어 다양한 분야에서 적용되고 있으나, 적용 가능한 주파수영역이 1.1 Hz~50 Hz 정도로 대상교량의 주요 고유진동수와 비교하였을 때 적용하기 곤란하다. 본 연구에서는 교량에 적용하기에 합리적으로 평가된(Kim *et al.*, 2006) Postlethwaite의 진동제한기준을 사용하여 대상교량의 진동사용성을 평가하였다. Postlethwaite의 진동제한기준에 따르면 고유진동수로부터 변위와 가속도를 산정하게 되며, 진동사용성은 계측자료를 Eq. (2) 및 Eq. (3)로 표현되는 허용기준과 비교하여 평가될 수 있다.

$$\delta(m) = 76 \left(1 + \frac{194}{f^2} \right) \times 100^{-6} \quad (2)$$

$$a(m/s^2) = \delta \times (2\pi f)^2 \quad (3)$$

여기서, f 는 해당모드의 고유진동수(Hz)이며 조합응답인 경우 지배진동수, δ 는 모드별 최대변위이며 조합응답인 경우 최대 조합변위를 나타낸다.

6.2 평가 결과

대상교량의 진동사용성을 검토하기 위해 다양한 풍속에 대해 버페팅해석을 하였다. 버페팅해석의 변위는 RMS응답에 진동수별 Peak Factor를 곱하여 산정한 동적응답의 최대값을 이용하였으며, 모드별 최대응답과 함께 조합응답의 최대값을 사용성기준과 비교하였다.

비교결과, 해석대상 교량은 거더 높이를 기준으로 약 29 m/s의 풍속까지 진동사용성 기준을 만족하는 것으로 분석되었다. Fig. 12는 Postlethwaite의 제안식에 의한 변위와 가속도 응답의 평가기준을 이용하여 사용성을 검토한 그래프로서, 29 m/s의 풍속이 작용하는 경우에 대해 예로써 나타낸 것이다. 여기서, 지배진동수는 각 교량모델의 연직 1차 모드의 진동수를 나타내며 검토결과, 약 29 m/s의 풍속이 작용할 때까지는 지배진동수에 따른 최대 조합변위와 최대 조합가속도가 진동사용성 기준을 만족하고 있다.

(a) Displacement

(b) Acceleration

Fig. 12. Evaluated Vibration Serviceability of Analysis Bridge for Wind Velocity 29 m/s

7. 결 론

본 연구는 서남해안에 위치한 해상 사장교의 내풍안정성을 현장난류의 특성을 고려하여 분석하였다. 분석과정에 필요한 해석이론과 수치해석적인 기법에 관하여 고찰하였으며, 이로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 초당 100회의 시간이력 가속도 데이터로부터 구조물의 고유진동수를 산정하는 과정에 있어서 Fast Fourier Transform을 적용하는 것보다 조화함수로 적분되는 Discrete Fourier Transform을 적용함으로써 비교적 더 정밀한 고유진동수를 산정할 수 있었다.
- 2) 해석모델과 공용교량의 고유진동수를 일치시키는 과정에서 계측데이터에 기반한 manual tuning 방법을 이용하는 경우 고유진동수의 차이를 4% 이내로 근사시킬 수 있었다.
- 3) 버페팅해석에 의하면 해석결과가 대상 교량의 진동특성을 비교적 정확히 모사하고 있는 것으로 분석되었다. 추후 수집되는 다년간의 데이터를 기반으로 할 경우 신뢰성이 더 향상된 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.
- 4) 진동사용성 검토결과에 따르면, 보강거더가 위치한 높이에서 약 29 m/s의 풍속이 작용할 때까지는 지배진동수에

대한 최대변위와 최대가속도가 Postlethwaite에 의해 제안된 진동제한기준을 만족하고 있음을 알 수 있었다.

- 5) 계측기반 해석모델을 얻기 위해 manual tuning 방법을 이용하면 구조물의 고유진동수에 대한 설계변수의 영향 및 주요 변수를 파악할 수 있다. 그러나, 버퍼팅응답만을 산정하는 것이 목적이려면 설계모델의 모드형상에 계측 고유진동수를 대입하는 방법인 단일모드 주파수영역법을 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서 수행한 현장계측에 기반한 사장교의 사용성 한계풍속 해석은 일정 신뢰도를 갖는 것으로 판단된다. 향후, 지속적인 계측과 모니터링을 통하여 좀 더 많은 데이터가 축적되는 경우 풍속 및 풍향을 고려한 교량 마다의 안정성 기준 마련에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- Cho, K.P. and Hong, S.I. (2006) Review on Human Comfort Criteria in Tall Buildings, *Journal of the Wind Engineering Institute of Korea*, Vol.10, No.1, pp.73-82.
- Daelim Industrial Co. (2000) Analysis of Construction Step for Samcheonpo Bridge - 2nd Construction Site between Changseon and Samcheonpo.
- ISO 2631 (1997) Mechanical vibration and shock - evaluation of human exposure to whole-body vibration.
- Jeon, B.G. and Kim, N.S. (2007) Evaluation of Comfort Limit on Bridge Vibration, *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol.17, No.10, pp.923-935.
- Kang, S.H., Choi, B.H., and Park, S.J. (2011) Vibration Serviceability Evaluation for Pedestrian of Concrete Cable-stayed Bridge by Experimental Method, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.11, No.2, pp.59-66.
- Kim, H.K., Ahn, S.S., Seong, T.R., and Park, S.D. (2006) Serviceability Evaluation Criteria and Procedure for Cable-Stayed Bridges, *Proceeding of the Wind Engineering Institute of Korea*, pp.93-99.
- Kim, H.K., Lee, H., Jang, J.H., and Ro, S.K. (2007) Development of Field-Measured Data-based Analysis Model of a Suspension Bridge, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 6A, pp.829-836.
- Lee, S.S., Chun, H.M., Lee, J.W., and Hong, K.P. (2006) A Comparative Study on the Evaluation Scales Suggested in Floor Vibration Evaluation Methods, *Journal of the Architectural Institute of Korea(structure & construction)*, Vol.22, No.3, pp.3-10.
- Lee, S.H., Park, W.S., Kim, H.K., and Koh, H.M. (2008) Finite Element Model Updating of Seohae Bridge Using a Sensitivity Method, *Proceeding of the Korea Society of Civil Engineering*, pp.2473-2476.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (1998) Bridge Construction between Changseon and Samchopo - Design Change (2nd construction site), Wind Tunnel Test Report.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (1999) Bridge Construction between Changseon and Samcheonpo - Design Change (2nd construction site), Internal Report.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2003) Design of Highway Bridge Constructed between Changseon and Samchopo - 2nd construction site
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2006) Monitoring and Maintenance of Namhae Bridge and Samcheonpo Bridge, Internal Report.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2011) Unified maintenance of cable-stayed bridge on the national highway, annual internal report.
- Park, J.C., Lee, I.K., and Gil, H.B. (2010) Updating and Application of Finite Element Model of Seohae Cable-stayed Bridge, *Proceeding of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, pp.371-372.
- Postlethwaite, F. (1944) Human susceptibility to vibration, *Eng. J.*, Vol.157, pp.61-63.
- Reiher, H. and Meister, F.J. (1931) Human sensitivity to vibration, pp.381-386.
- Yoon, J.G. and Chang, S.P. (2002) Initial Loading Test and Baseline Model for Seohae Bridge, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, Vol.14, No.1, pp.64-67.
- Zhang, Q.W., Chang, C.C., and Chang, T.Y.P. (2000) Finite element model updating for structures with parametric constraints, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol.29, pp.927-944.

© Received July 3, 2013

© Revised July 8, 2013

© Accepted October 11, 2013