

계측모니터링 시스템을 활용한 자정식 현수교의 구조성능 평가

Evaluation of Structural Performance of Self-anchored Suspension Bridge Using Bridge Health Monitoring System

김 정 훈*
Kim, Jeong-Hoon

송 재 호**
Song, Jae-Ho

Abstract

In this paper, the performance of bridge health monitoring system(BHMS) installed in suspension bridge was tested and the field loading tests have been done by using BHMS to get quantitative results on the response of bridge. Before the field tests, globally structural analysis was performed to verify and estimate the test results and the static and dynamic field loading tests were carried out. Depending on comparison with results of field tests and structural analysis, field tests results were evaluated as 30%~50% less than structural analysis results, so it was confirmed that the bridge has excellent structural performance. Therefore field test results were measured within an acceptable error range, so it is verified that the BHMS in the bridge has been reliable and efficient.

요 지

본 연구에서는 시공된 실제 현수교에 구축된 계측 모니터링 시스템의 성능을 확인하고, 이 모니터링 시스템을 사용하여 대상교량의 거동특성에 대한 정량적인 정보를 획득하기 위하여 현장재하시험을 수행하였다. 현장재하시험은 정적재하시험, 동적재하시험 및 충격재하시험으로 구성되었으며, 재하시험을 수행함에 앞서 시험결과를 사전에 예측 및 검증하기 위하여 포괄적인 구조해석을 수행하였다. 재하시험 결과는 구조해석결과와 비교하여 면밀하게 분석하였으며, 비교분석 결과 계측값이 구조해석값보다 약 30~50% 정도 작은 값으로 평가되어 대상교량의 우수한 구조성능을 확인하였다. 또한, 대부분의 계측값이 유효한 범위 내에서 측정되는 것을 확인하여 대상교량에 구축된 계측 모니터링 시스템에 대한 신뢰성과 효율성을 검증하였다.

Keywords : Field loading test, Health monitoring system, Structural analysis, Structural performance, Suspension bridge

핵심 용어 : 현장재하시험, 계측모니터링 시스템, 구조해석, 구조성능, 현수교

* 정희원, 국립금오공과대학교 토목공학과 박사과정

** 정희원, 국립금오공과대학교 토목공학과 교수

E-mail : kimjh@atmacs.co.kr 031-778-1900

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2009년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론(Introduction)

건설재료 및 설계, 시공기법의 발달과 사회기반시설물의 미관에 대한 사용자들의 요구치가 상승함에 따라 교량구조물은 장경간화 및 세장화되고 있으며, 최근에는 시공 및 설계기술의 발전에 힘입어 풍부한 조형미, 경제성, 구조적 효율성 등 여러 가지 장점을 가진 장대교량의 대표적인 형식인 현수교가 우리나라 뿐만 아니라 세계적으로 건설이 증가되고 있다. 이러한 장대교량은 중·소형 교량에 비해 구조적 거동이 복잡할 뿐만 아니라, 구조물 자체의 규모 및 중요도가 높기 때문에 공용 중의 효율적인 유지관리를 위하여 실시간으로 거동을 평가할 수 있는 계측 모니터링 시스템을 구축하고 있는 추세이다. 이러한 계측 모니터링 시스템은 상시로 교량의 주요거동을 모니터링 하여, 교량의 안전도를 지속적으로 관리하는 예방적 차원에서의 유지관리시스템으로 활용될 수 있다.

따라서, 이러한 교량의 계측모니터링 시스템은 대상교량의 구조적 특성을 적절하게 반영하여 공용하중을 포함한 온도하중 등에 의한 교량의 거동을 평가할 수 있어야 하며, 이를 위해서는 계측 모니터링 시스템을 구축함에 앞서 우선적으로 대상교량의 거동 특성을 정확하게 파악하는 것은 매우 중요하다. 특히 전술한 바와 같이 풍하중 및 온도하중과 같이 구조물의 정·동적 특성에 영향을 미칠 수 있는 다양한 영향인자에 대한 변수분석 및 민감도 평가 등을 통하여 정량적인 분석결과를 도출한 연구는 반드시 필요하다고 할 수 있다(박주양, 2006).

한편, 전술한 바와 같이 교량의 유지관리 및 장기적인 안전도 관리에 효과적으로 활용되는 계측 모니터링 시스템은 특수 교량에 있어 매우 중요한 요소이지만, 구축된 시스템 자체의 신뢰도를 검토하는 것은 용이하지 않다. 일반적으로 계측 모니터링 시스템은 교량 전반에 걸쳐 센서가 설치되어 구축되기 때문에, 각각의 개별적인 센서에서 획득되는 전자신호만을 가지고 현재 구축되어 있는 모니터링 시스템에 대한 적절성을 평가하는 것은 바람직하지 않다. 따라서, 실제 교량에 차량을 재하하는 재하시험을 통해, 재하하중에 따른 거동 변화를 교량에 기구축되어 있는 계측 모니터링

시스템을 통해 획득하여 분석하는 전반적인 검토를 수행하는 것이 바람직하다. 교량의 재하시험은 일반적으로 교량의 구조적 안전성과 공용성을 검증하고 향후 지속적인 교량의 유지관리 자료를 얻기 위하여 수행되며, 세부적으로는 구축된 계측시스템을 사용하여 획득한 계측데이터의 신뢰도 검증, 계측 모니터링 시스템의 성능확인, 시공완성도 확인, 교량의 초기상태 및 거동특성에 대한 정량적인 정보획득, 관리기준치 설정을 위한 자료 확보를 위해 실시된다(연세대학교 재해연구소, 1997).

그러나, 지금까지의 재하시험은 단순히 교량의 내하력을 산출하기 위하여 실시하는 것이 대부분이며, 내하력 산출에 필요한 교량의 대표적인 거동인자인 처짐 및 변형률만을 간단히 측정하기 위하여 변위계 및 변형률계를 임시적으로 설치하여 소정의 데이터를 취득하여 수행하는 것이 일반적이다. 즉, 구조해석을 통해 미리 예측한 대상 교량의 관리한계치와 모니터링 시스템을 통하여 구조물로부터 직접 얻은 계측값을 비교하여 이상거동에 대한 평가는 실시하고, 재하시험의 계측 데이터를 바탕으로 공용하중에 의한 대상교량의 거동 뿐 아니라 온도하중 등에 의한 교량 전반적인 거동을 종합적으로 분석한 연구는 국내외로 부족한 실정이다(강경구, 2005).

따라서, 본 연구에서는 계측 모니터링 시스템이 구축된 공용전인 현수교에 대하여 차량재하시험을 실시하여 대상교량의 구조안전성 및 구축된 계측시스템의 신뢰도를 평가하는 것을 최종 목적으로 설정하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 재하시험 결과예측을 위한 구조해석을 실시한 후 실제 설계하중과 근접한 차량하중을 정적 및 동적으로 재하하여 대상교량의 처짐 및 변형률 응답을 포함한 전반적인 구조거동을 모니터링 시스템을 통해 측정하고, 이 계측결과를 구조해석 결과와 면밀히 비교분석하였다. 본 과업의 흐름을 도시하면 Fig. 1과 같다.

2. 계측 모니터링 시스템 개요

2.1 대상교량 소개

본 연구의 대상교량은 전라남도 고흥군에 위치한 3경간 연속 자정식 현수교인 ○○대교이며, 강상판 제

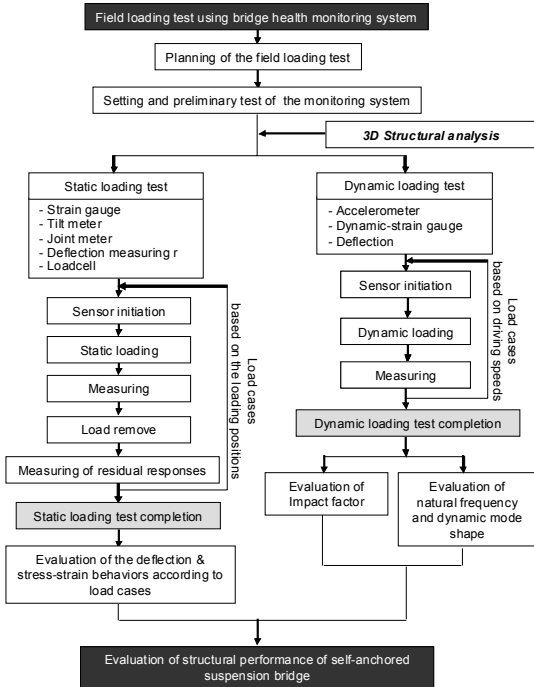


Fig. 1 Procedure of this study

형 상형교 형식의 보강형과 다이아몬드형 콘크리트 주탑의 상부구조 형식을 갖고 있다. 현수교 중앙경간은 250m이며, 교폭은 12.7m의 왕복 2차선 교량으로 DB24의 1등교 하중으로 설계된 교량이다. 본 과업의 대상교량의 전경은 Fig. 2와 같다.

2.2 계측항목

본 연구의 대상교량인 ○○대교에는 향후 유지관리를 위하여 총 54개의 계측센서가 실시간으로 교량을 모니터링할 수 있는 계측시스템이 구축되어 있다. 대상교량에 설치된 계측센서의 종류는 Table 1과 같으며, 설치된 모든 센서는 본 연구의 재하시험에서 계측 대상 센서로 활용되었다. 대상교량에 설치된 센서 위치를 도시하면 Fig. 3과 같다.

2.3 계측시스템 소개

대상교량에 도입된 계측 모니터링 시스템은 Fig. 4



Fig. 2 Scene of tested bridge

와 같다. Fig. 4에서와 같이 온도계, 정착단 변형률계, 하중계, 신축이음계, 경사계 등은 정적데이터로거에 연결되며, 케이블 가속도계, 보강형 가속도계, 지진계, 처짐계, 풍향풍속계, 보강형 변형률계는 동적데이터로거에 연결된다. 이러한 계측 모니터링 시스템이 대상교량의 보강형 내부에 총 3곳 설치가 되며, 각각의 계측시스템은 광미디어 컨버터를 통해 1곳의 계측 PC에서 제어가 가능하도록 연결되어 실시간 교량 계측이 가능하도록 구성되어 있다.

Table 1 Sensor types and measuring items using the field loading test in this study

| Member | Sensor | Measuring item | No. | Measuring types | |
|-----------------|----------------------|--------------------|-----|-----------------|---------|
| | | | | Static | Dynamic |
| Cable | 1-axis accelerometer | Cable force | 5 | | ◎ |
| | Loadcell | Cable force | 5 | ◎ | |
| Pylon | 2-axis tilt meter | Pylon displacement | 2 | ◎ | |
| | 2-axis accelerometer | Pylon vibration | 2 | | ◎ |
| Girder | 2-axis accelerometer | Girder vibration | 6 | | ◎ |
| | Dynamic strain gauge | Girder stress | 10 | | ◎ |
| | Static strain gauge | Girder stress | 16 | ◎ | |
| | Displacement sensor | Deflection | 2 | | ◎ |
| Expansion Joint | Joint-meter | Joint displacement | 2 | ◎ | |
| Tie-down cable | Loadcell | Cable force | 4 | ◎ | |
| Total | | | 54 | 29 | 25 |

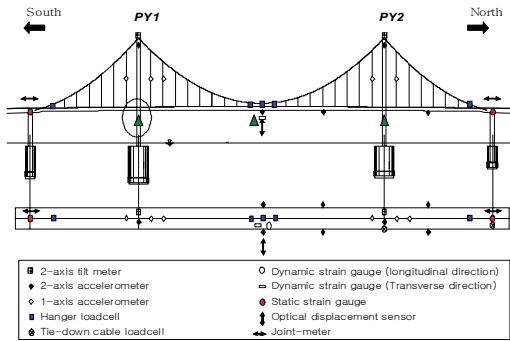


Fig. 3 Sensor locations using the field loading test in this study

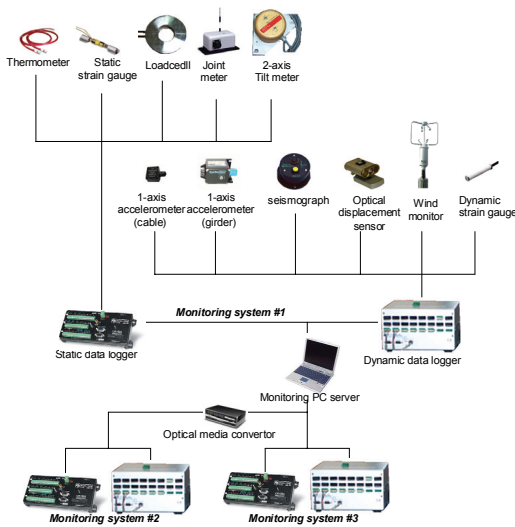


Fig. 4 Bridge health monitoring system

3. 구조해석

본 연구에서는 대상교량의 재하시험에 대한 안정성 평가를 위해서 상용프로그램인 MIDAS를 이용하여 구조해석을 수행하였다. 구조해석의 목적은 시공완료 후 본 연구에서 준공 전에 실시한 재하시험 결과와의 비교분석을 통하여 대상 교량의 사용성 및 안정성을 평가하는 것이다. 이를 위하여 실제 재하된 차량의 하중을 정적 및 동적으로 보강형에 재하시킨 후 구조거동을 검토하였다. 또한, 추가적으로 구조해석 결과는 재하시험에서 각 위치별 센서의 계측값과 비교하여 구조거동에 대한 안전성을 추가로 검토하였다.

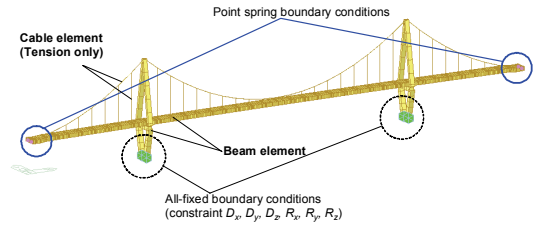


Fig. 5 FE model for structural analysis

한편, 본 연구에서는 해석모델의 검증은 위하여 현수교가 구조물의 자중에 대해서 평형을 이루고 있는 초기평형상태에서의 해석을 실시하고 대상교량에서 실제로 계측한 주케이블의 좌표와 장력의 비교를 통해 신뢰도를 검증하였다. 대상교량에는 Fig. 5와 같이 총 33개의 행어케이블이 사용되었으며, 행어케이블 장력과 설계 장력을 비교한 결과 오차가 10% 이내인 것으로 나타나, 본 연구에서 적용한 해석모델은 실제 대상교량의 초기평형상태를 90% 이상의 신뢰도로 묘사하고 있는 것으로 평가되었다(Yoon, et al. 2001).

3.1 해석방법

해석모델은 대상교량의 현수교 구간에 국한하여 모델링하였으며, 총 703개의 절점과 643개의 요소로 모델링되었다. 현수교의 케이블은 69개의 인장력 전달 요소인 케이블 요소를 사용하여 주케이블과 행어케이블을 모델링하였고, 574개의 보 요소는 주탑, 보강형을 모델링하는 데 사용되었다.

주케이블은 하나의 동일한 단면으로 모델링하였고, 행어 케이블은 단부 행어케이블과 일반부 행어케이블을 구분하여 각각의 해당 단면특성을 반영하였다. 주탑의 경우에는 가로보를 포함하여 총 8개의 단면으로 모델링하였으며, 보강형의 경우 위치별 단면특성을 반영하여 14개의 단면을 각각의 위치에 적용하였다. 경계조건은 현수교 구간과 접속교 구간의 신축이음부 2지점을 각 방향별 스프링강성(spring stiffness)을 입력하여 절점 스프링 경계조건을 적용하였으며, 주탑 하부기초부의 경계조건은 xyz의 모든 변위와 회전을 고정된 경계조건을 적용하였다.

한편, 본 연구에서 수행한 현장재하시험의 경우 교량이 탄성영역에서 거동하므로, 별도의 재료파괴기준을 적용하지 않은 탄성해석을 수행하였다. 경계조건을 포함한 대상교량의 구조해석 모델 형상은 Fig. 5와 같고, 이상의 해석모델을 사용하여 본 연구에서는 대상교량에 대하여 다음과 같이 5가지의 구조해석을 수행하였다(Hongping and Chang, 1999).

- 초기 평형상태해석
- 정적 재하하중조건별 탄성해석
- 외부 온도변화에 따른 거동해석
- 동적 재하하중조건별 시간이력 거동해석
- 고유치해석(eigenvalue analysis)

3.2 구조해석결과

본 연구에서는 초기 평형상태해석, 정적재하하중 조건별 탄성해석, 외부 온도변화에 따른 거동해석, 동적 재하조건별 시간이력 거동해석, 동적 고유치 해석을 각각 수행하였으며, 여기서는 각 해석결과를 간단히 요약하여 정리하였다. 보다 상세한 해석결과는 현장재하시험의 계측결과와 비교하여 추가적으로 나타내었다.

3.3.1 초기평형상태 해석

초기 평형상태해석을 통하여 현장재하시험이 수행되는 평형상태에서의 최종 장력값과 설계장력값을 비교하여 구조해석모델의 신뢰성을 검증한 결과 90%이상의 신뢰도를 확보한 것으로 평가되었으며, 그 외의 초기 평형상태에서의 해석결과는 차량하중이 재하되기 전의 초기값으로 활용되었다.

3.3.2 정적재하하중 조건별 탄성해석

정적재하하중 조건별 탄성해석에서는 편측재하와 양측재하의 하중조건을 모두 고려하였으며, 편측재하의 경우 load case 4에서 대상교량의 중앙경간 보강형에서 약 46mm의 최대 하향처짐이 발생하였으며, 차량 2대가 양측으로 재하된 load case 8에서 약 95mm의 최대 처짐이 발생하였다.

3.3.3 외부 온도변화에 의한 거동 해석

외부 온도변화에 의한 거동을 해석한 결과 외부온도 15℃가 변화할 경우 약 20mm의 주탑변형이 발생하고, 이로인하여 중앙경간의 보강형 중앙부에는 약 3mm의 상향처짐이 발생하는 것으로 해석되었다. 이러한 외부 온도변화에 의한 거동변화는 현장재하시험 시 계측결과의 온도보상 자료로 활용되었다.

3.3.4 동적 재하하중조건별 시간이력 거동해석

주행속도에 따른 교량의 거동을 평가하기 위한 동적 하중재하조건별 시간이력 거동해석을 수행하였다. 해석결과는 편측재하에서 가장 큰 중앙부 처짐을 야기시키는 load case 4와 비교한 결과 속도 40km/h에서 가장 큰 동적처짐이 발생하였으며, 차량의 동적주행에 따라 처짐증가율은 최대 10%로 평가되었다.

3.3.5 고유치해석(eigenvalue analysis)

20차까지 진동모드 형상에 대한 고유치 해석을 수행한 결과, 진동모드형상이 케이블, 보강형 및 주탑이 결합된 복잡한 형태를 나타냈다. 해석결과를 바탕으로 20차까지의 진동모드 형상과 진동 모드별 고유진동수와 변형모드를 정리하여 20차수까지 도출된 고유진동수가 0.364Hz부터 2.591Hz 사이에서 상당히 인접하여 발생함을 확인하였다.

4. 계측모니터링 시스템을 활용한 현장재하시험

4.1 현장재하시험 방법

본 연구에서는 현장재하시험을 정적재하시험과 동적재하시험으로 구분하여 수행하였다. 정적재하시험에는 변형률계, 경사계, 신축변위계, 처짐계, 하중계 등의 정적거동을 계측할 수 있는 센서를 중심으로 소정의 위치에 재하된 정적하중에 대한 교량의 응답을 확인하였다. 동적재하시험에서는 동적거동특성을 계측할 수 있는 가속도계, 동적변형률계, 처짐계 등을 사용하여 속도별로 주행하는 동적하중 대한 교량의 응답을 관측하였다.

정적재하시험에서는 15톤 덤프트럭 2대를 재하차량으로 사용하여 총 67.6톤의 중량으로 설계하중에 최대한 근접하게 재하하였으며, 정적하중의 재하위치는 측경간 및 중앙경간의 최대 모멘트 및 최대 처짐 발생 위치를 고려하여 선정되었다. 또한, 교량의 횡방향 대칭거동을 검토하기 위하여 동일 재하위치에서 차선별 양측재하의 하중재하조건을 추가로 고려하였다. 현장 재하시험에서 정적하중 재하 위치도 및 방법은 Table 2와 같다.

동적재하시험에서는 주행 중 안전상의 문제와 계측시 발생가능한 잡음을 최소화하기 위하여 정적재하시험에서 사용되었던 15톤 만차 덤프트럭 한대를 사용하였다. 동적하중재하방법은 의사정적수준의 주행속도인 5km/h를 시작으로 10km/h 단위로 주행속도를 증가시켜가면서 동적하중을 재하하였다. 본 연구에서 수행한 현장재하시험 전경을 정리하면 Fig. 6과 같다.

Table 2 Outline of static field loading test

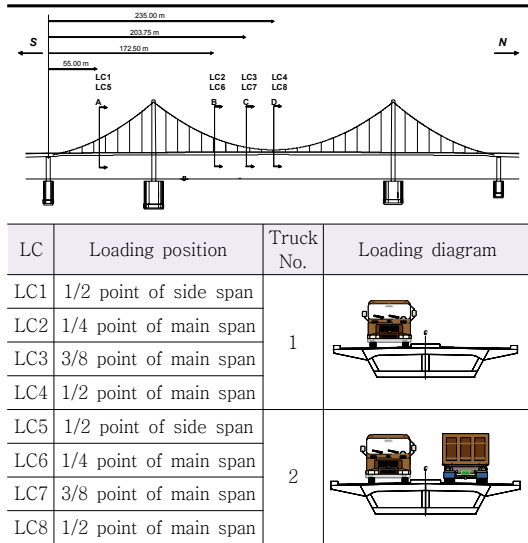


Fig. 6 Scene of field loading test

4.2 현장재하시험 결과 분석

본 연구에서는 현장재하시험 진행 중에 계측된 약 5°C의 일간 온도차가 대상교량에 발생시키는 추가적인 온도변형을 해석적으로 미리 예측하기 위해 수행된 외부 온도변화에 의한 거동 해석결과를 재하시험결과에 반영하여 온도보상하였다. 재하시험 중 발생한 온도차로 인하여 주경간 중앙부에서 약 1mm의 상향 처짐이 발생되며, 남측방향 주탑 PY1은 남측방향으로 약 7mm, 북측방향 주탑 PY2는 북측방향으로 약 7mm의 변형이 발생하는 것으로 해석되었다.

한편, 현장재하시험에 앞서 수행한 구조해석과 재하시험 결과를 비교함으로써, 대상교량에 구축한 계측 모니터링 시스템의 성능을 확인하고, 이를 이용하여 획득한 계측데이터의 신뢰도 검증하기 위한 분석 작업을 추가로 수행하였으며, 이러한 시험 및 해석결과 비교분석은 시공 완료 후 공용전 대상교량의 구조안전성을 평가하는 자료로 활용가능할 것으로 판단된다.

4.2.1 정적재하시험 결과 분석

본 연구에서는 대상교량의 구조부재를 주탑, 주경간 보강형, 주케이블 및 행어케이블로 구분하여 각각의 정적 재하하중 조건에 따른 거동 변화를 계측한 결과를 구조해석 결과와 비교하였다.

(1) 주탑경사

각각의 정적 하중재하조건에 따른 주탑의 변위를 계측한 결과와 구조해석 결과를 비교하면 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서와 같이 교축방향으로의 주탑 변위의 방향성분은 실제 계측값과 구조해석값이 유사한 것으로 분석되지만, 변위의 절대값에 있어서는 실제 계측값이 구조해석값의 약 10%~90% 사이의 작은 값을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 대상교량이 확보한 충분한 구조성능으로 인한 것이라 판단되며, 특히 현수교의 구조적 특성을 고려할 때 실제 대상교량이 해석보다 높은 주탑 강성을 확보한 것은 구조적 안전성 향상에 기여하는 바가 크다고 판단된다. 한편, 주탑의 교축직각방향의 변위는 대칭재하로 인하여 절대값 자체가 1mm 이내의 매우 작은 변위가 발생되었다.

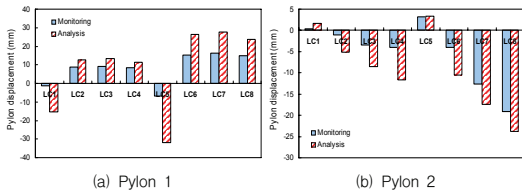


Fig. 7 Comparison of monitoring and analysis results for pylon displacement

(2) 주경간 중앙단면 변형률

각각의 정적 하중재하조건에 따른 주경간 중앙 단면 교축방향 변형률을 계측한 결과와 구조해석 결과를 비교하면 Fig. 8과 같다.

비교 결과 계측값과 해석값에서 압축-인장 변형률이 거동 경향이 동일한 것으로 나타났다. 또한, 차량이 교량의 측경간에 재하되어 중앙경간의 중앙부에서의

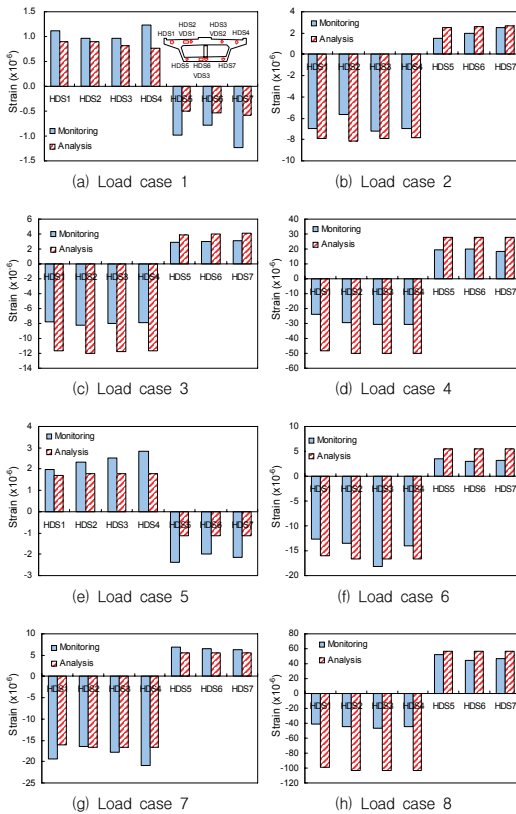


Fig. 8 Comparison of monitoring and analysis results for longitudinal strain in girder

처짐이 상향으로 발생하는 경향도 동일하게 관찰되었다. 이로 인해 측경간 재하조건인 load case 1과 load case 5의 경우 상부 교축방향 변형률은 인장으로 나타났으며, 그 외의 하중조건에 경우에는 하향 처짐으로 인한 상부 교축방향 변형률이 압축으로 나타났다.

이러한 결과는 Fig. 9와 같이 교축직각방향의 변형률에 직접적으로 반영되며, 교축방향으로 인장변형률이 발생하는 경우에는 교축직각방향으로 인장변형률이 발생하는 결과로 나타났다. 특히 차량이 변형률 센서가 설치되어 있는 보강형 단면에 재하되는 load case 4와 load case 8의 경우의 계측값과 해석값을 비교하였을 때 계측값 자체의 절대값이 해석값의 약 50% 수준으로 분석되어 보강형이 충분한 강성한 확보한 것으로 판단된다.

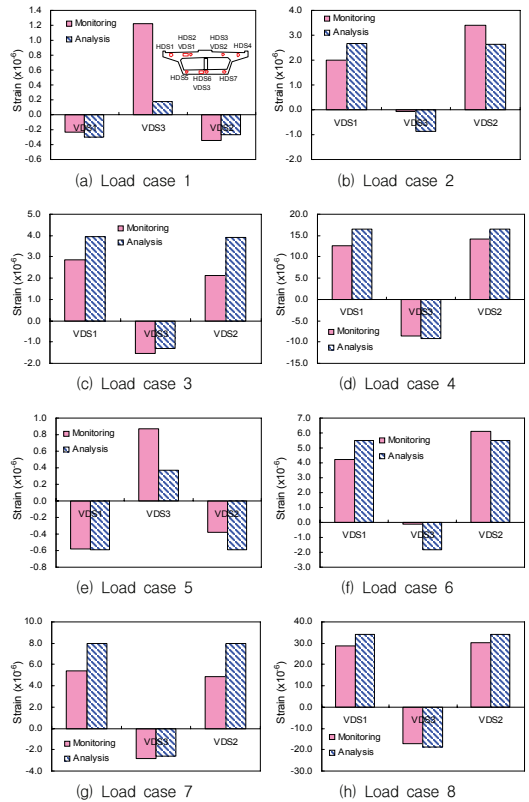


Fig. 9 Comparison of monitoring and analysis results for transverse strain in girder

(3) 행어케이블 장력

각각의 정적 하중재하조건에 따른 행어케이블 장력을 계측한 결과와 구조해석 결과를 비교하면 Fig. 10 및 Fig. 11과 같다. 다른 계측 항목과 마찬가지로 행어케이블의 장력도 계측결과와 해석결과를 비교한 결과, 장력 변화 경향이 동일한 것으로 분석되었다. 즉, 하중재하 조건에 따라서 행어케이블에 하중이 부가되는 위치에서는 장력 증가량의 차이는 다소 있지만 계측값에서도 장력이 증가하는 경향이 관찰되었다. 이러한 결과는 대상교량이 설계시 고려된 구조계를 적절하게 형성하고 있다는 것을 입증하는 결과라고 판단된다. 또한, 계측값과 해석값에서 획득한 행어케이블의 장력의 절대값으로 비교해보면, 계측결과가 해석값의 약 30% 정도에 해당하는 수준으로 나타났다. 이러한 결과도 주탑 경사와 보강형 변형을 비교결과와 마찬가지로 설계값보다 대상 교량이 우수한 강성을 확보한 것에서 기인하는 것으로 사료된다.

한편, 행어케이블의 장력을 본 연구에서는 정착단 하중계와 행어케이블 가속도계를 이용하여 각각 2가지 방법으로 계측하였으며, 계측결과와 해석결과를 비교분석해본 결과 케이블 가속도계를 이용한 간접법을 적용해도 장력을 신뢰성 있게 산정할 수 있음을 추가적으로 확인하였다.

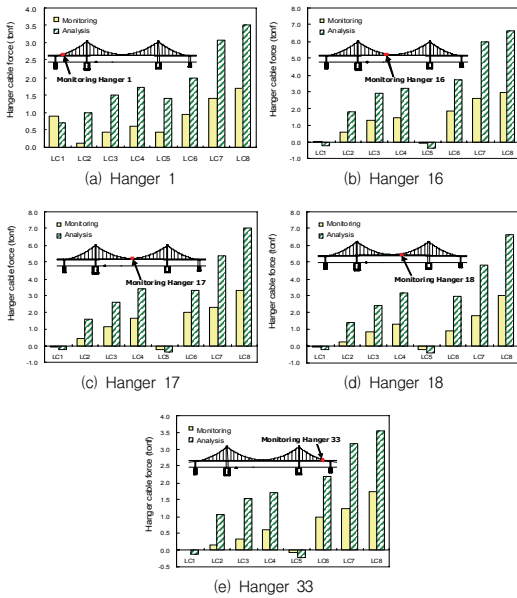


Fig. 10 Comparison of monitoring and analysis results for hanger cable force using the loadcell sensors

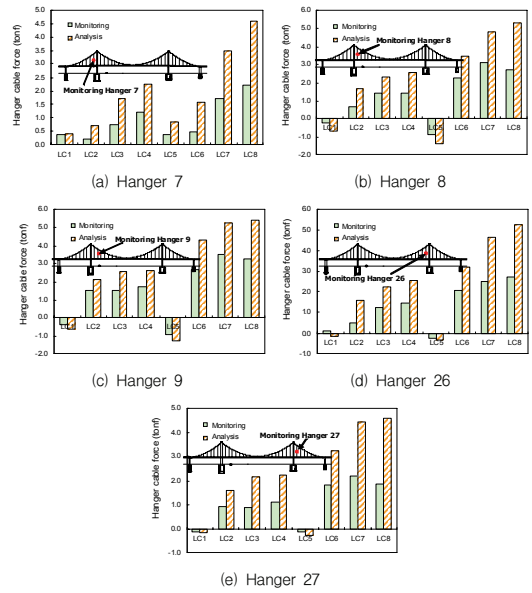


Fig. 11 Comparison of monitoring and analysis results for hanger cable force using the cable accelerometers

(4) 주경간 중앙부 처짐

각각의 정적 하중재하조건에 따른 주경간 보강형 중앙부 처짐을 계측한 결과와 구조해석 결과를 비교하면 Fig. 12와 같다. 계측값과 해석값에서 모두 동일하게 load case 1과 load case 5에서와 같이 차량이 측경간에 재하된 경우에는 중앙경간의 중앙부에서의 처짐이 상향으로 발생하는 경향이 나타났고, 그 외의 재하 조건에서는 중앙부에서 하향 처짐이 발생하여 처짐거동 특성이 동일한 것으로 평가되었다. 계측값과 해석값의 절대값을 비교하였을 때 계측값 자체의 절대값이 해석값의 약 30% 수준의 처짐값을 보였다. 교량에서의 처짐은 구조적 안전성과 구조거동의 특성을 파악할 수 있는 매우 중요한 지표이기 때문에 설계하중에 근접한 하중이 재하된 경우에 예상 처짐값의 30% 수준으로 처짐이 발생한 대상교량의 구조성능은 매우 뛰어나다고 판단된다. 특히 최대 처짐으로 계측된 30mm의 처짐도 현수교의 허용처짐의 4%에 해당하는 매우 작은 값이므로 안전성과 사용성 측면에서 문제가 없다고 사료된다(건설교통부, 2003). 한편, 상대적으로 교축직각방향으로의 보강형 수평변위는 계측값과 해석값이 다소 차이가 있는 것으로 나타났다.

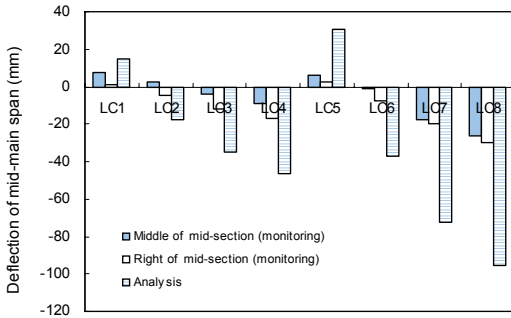


Fig. 12 Comparison of monitoring and analysis results for deflection of mid-main span

그러나, 수평변위로 계측된 값의 절대수치가 매우 작은 값으로 재하하중에 의해 거의 수평변위는 발생하지 않는다는 수준으로 이해할 수 있을 것이다.

4.2.2 동적재하시험 결과

동적재하시험은 의사정적속도 5km/h를 포함한 최고 주행속도인 70km/h까지 주행시의 측정된 동적처짐이력과 정적처짐을 비교하여 동적증가율을 산정하였다. 동적처짐이력곡선을 통해 산정된 동적 최대처짐과 정적처짐을 비교하면 Table 3과 같고, 이때 비교대상인 정적 최대처짐은 차량 주행방향과 동일한 위치에 편측재하된 load case 4에서의 중앙부 처짐값이다. 정적처짐 계측값과 해석처짐값을 비교한 바와 유사하게 동적처짐 계측값도 동적처짐 해석값의 약 30% 정도 수준으로 평가되었으며, 일반적으로 최대 충격계수를 유발하는 40~50km/h의 속도에서 해석과 계측에서 모두 가장 큰 충격계수가 발생하는 것으로 나타났다(연세대학교, 2004). 한편, Fig. 13에서 주행속도

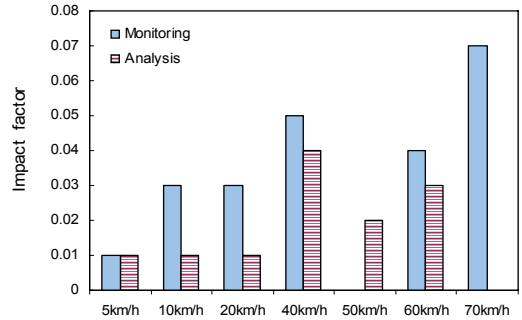


Fig. 13 Comparison of monitoring and analysis results for impact factor

70km/h에서 높은 충격이 발생한 계측결과는 충격계수가 교량의 노면상태와 주행상태 등에 따라 많은 영향을 받는 것을 고려했을 때 주행 외에 기타 외부적인 요인에 의한 것으로 판단되며, 전체적인 동적재하시험 결과와 해석결과의 경향은 매우 유사하다고 평가할 수 있다.

4.2.3 충격재하시험 결과

고유진동수는 교량의 고유한 동적특성을 대표하는 변수로서, 교량의 고유진동수를 측정하기 위해서 일반적으로 실험실 등에서 가진시험을 수행하기도 한다. 그러나, 실물 교량에 대해 가진시험을 수행하기는 무리가 따르므로, 본 연구에서는 현장재하시험 당시 재하차량의 바퀴를 일정 높이에서 낙하시켜 교량에 충격하중으로 작용시킴으로써 대상교량의 수직방향에 대한 변형모드를 계측하였다.

이러한 충격재하시험 결과는 구조해석의 고유치해석 결과와 비교가능하며, 이를 통해 진동차수 별 변형성분을 분석할 수 있다. 충격재하시험을 통해 계측된 수직방향 성분의 가속도를 주파수 분석(FFT)을 통하여 수직방향 변형모드에 대한 고유진동수를 차수별로 정리한 결과와 고유치 해석을 통해 대상교량의 수직방향으로의 변형모드를 비교한 결과는 Table 4와 같다. Table에서 알 수 있듯이 계측결과에서는 가속도계 위치에 상관없이 거의 동일한 수직방향 변형모드에 따른 고유진동수가 나타났으며, 이를 고유치 해석결과와 비교해보면 매우 유사한 값을 알 수 있다. 이상의 충격재하시험 결과를 정리하여 도시하면 Fig. 14와 같다.

Table 3 Summary of dynamic loading test results

| Driving speed(km/h) | | 5 | 10 | 20 | 40 | 50 | 60 | 70 |
|----------------------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Max. Displ. (static) (mm) | M* | -16.58 | | | | | | |
| | A** | -46.30 | | | | | | |
| Max. Displ. (dynamic) (mm) | M | -17.00 | -17.71 | -17.79 | -18.35 | -16.15 | -17.96 | -19.11 |
| | A | -47.60 | -47.50 | -47.60 | -50.6 | -48.20 | -48.10 | -44.80 |
| Impact factor | M | 0.01 | 0.03 | 0.03 | 0.05 | - | 0.04 | 0.07 |
| | A | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.04 | 0.02 | 0.03 | - |

* Monitoring

** Analysis

Table 4 Summary of impact loading test results

| Location of accelerometer | | Order in vertical mode(n) | | Natural frequency(Hz) | | | | | |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|--|--|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | |
| Monitoring | Left of 1/2 of main span | 0.391 | 0.830 | 1.221 | 1.563 | 2.246 | 2.637 | | |
| | Right of 1/2 of main span | 0.391 | 0.830 | 1.221 | 1.563 | 2.246 | 2.637 | | |
| | Left of 3/4 of main span | 0.488 | 0.830 | 1.221 | 1.563 | 2.246 | 2.637 | | |
| | Right of 3/4 of main span | 0.488 | 0.830 | 1.221 | 1.563 | 2.246 | 2.637 | | |
| | Left of 1/2 side span | 0.391 | 0.830 | 1.221 | 1.563 | 2.246 | 2.637 | | |
| | Right of 1/2 side span | 0.391 | 0.830 | 1.221 | 1.563 | 2.246 | 2.637 | | |
| Analysis results | | 0.364 | 0.759 | 1.108 | 1.566 | 2.056 | 2.218 | | |

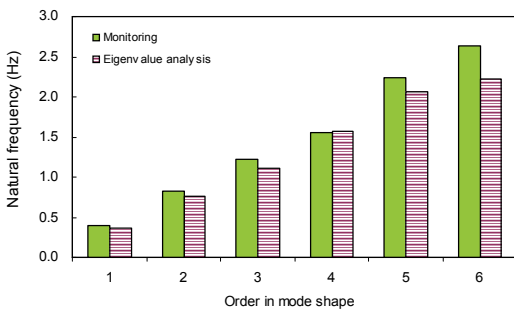


Fig. 14 Comparison of monitoring and analysis results for the natural frequency

5. 결론

본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서는 시공된 실제 현수교에 구축된 계측 모니터링 시스템의 성능을 확인하고, 이를 통해 획득한 계측데이터의 신뢰도 검증과, 시공완성도 확인 및 대상교량의 거동특성에 대한 정량적인 정보획득을 목적으로 현장재하시험을 수행하였다.
- 2) 현장재하시험은 소정의 위치에 하중을 재하하는 정적재하시험, 주행속도별 교량의 동적거동특성을 파악하는 동적재하시험과 충격재하를 통해 교량의 변형성분에 따른 고유진동수 평가를 위한 충격재하시험으로 구성되었으며, 재하시험을 수행함에 앞서 시험결과를 사전에 예측 및 검증하기 위하여 초기 평형상태해석, 정적 재하하중조건별 탄성해석, 외부 온도변화에 따른 거동해석, 동적 재하하중조건별 시간이력 거동해석과 고유치해석을 포함하는 구조해석을 각각 수행하였다.

- 3) 재하시험 결과를 구조해석결과와 비교하여 면밀하게 분석하였으며, 계측값이 구조해석값에서 도출된 값보다 약 30~50% 정도 작은 값으로 평가되어 구조해석상의 가정조건 및 실제 시공된 구조물의 안전을 등을 고려했을 때, 계측된 결과는 충분히 유효한 범위로 평가되며, 이러한 결과는 대상교량의 우수한 구조성능을 입증함과 동시에 구축된 계측 시스템과 계측값에 대한 신뢰성까지 추가적으로 확인하는 결과라 판단된다.
- 4) 이상의 재하시험 결과분석을 통해 본 연구의 대상 교량은 충분한 구조적 안전성과 사용성을 확보했다고 판단되며, 향후 유지관리를 위해 구축된 계측 모니터링 시스템도 충분한 신뢰성과 효율성을 확보했다는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

1. 강경구, 신뢰성에 기초한 사장교 케이블장력관리를 위한 관리체계치 설정에 관한 연구, 박사학위논문, 한양대학교, 2005, pp. 12-50.
2. 건설교통부, 도로교설계기준, 2003, pp. 5-39.
3. 대림산업, 거금도 연륙교 건설공사(1단계) 중 교량계측공사 종합보고서, 2008, pp. 75-159.
4. 박주양, 일사에 의한 온도변화에 따른 강사장교의 주요응답 특성 분석, 석사학위논문, 연세대학교, 2006, pp. 3-7.
5. 연세대학교 재해연구소, 교량 파괴시험 하중재하 기법 개발 및 교량 내하력 평가 기법개선, 연구보고서, 1997, pp. 24-57.
6. Yoon, M. G., Shin, H. Y., and Son, Y. S., "The Construction of the Yongjong Grand Bridge(Self-Anchored Suspension Bridge)", Cable Supported Bridges: IABSE Conference 'Challenging Technical Limits', IABSE, Seoul, Korea, Vol. 84, 2001, pp.38-39.
7. Hongping, Z., Chang, T. Y. P., "Design and Experiment of a Suspension Bridge Model", Journal of Huazhong University of Science and Technology, Huazhong University, Vol. 27 No. 3, 1999, pp. 25-27.

(접수일자 : 2008년 8월 1일)
(심사완료일자 : 2009년 1월 7일)