

재하시험을 통한 사장교의 케이블 장력 모니터링 시스템의 적용성 평가

Evaluation of Applicability of Cable Force Monitoring System of Cable-stayed Bridge by Field Loading Test

김 정 훈*

Kim, Jeong-Hoon

송 재 호**

Song, Jae-Ho

Abstract

This study was planned to develop monitoring system of cable force to resolve cable force of cable-stayed bridge efficiently in a long-term plan. In the proposed monitoring system, firstly data are sampled from real-time acceleration record, secondly these sampled data are frequency analyzed by using the FFT(Fast Fourier Transform) algorism and lastly the analyzed results are averaged and generalized. For evaluating the applicability of this monitoring system, field loading test has performed in real cable-stayed bridge. In comparison with cable force by field manual calculation and cable force of monitoring system by semi-automatic calculation, the difference of calculated cable forces has within 1% error range and it is acceptable range. Additionally within negligible 5% error range of difference has occur between field manual calculation and monitoring system by automatic calculation. so monitoring system in this study has been verified to be reliable.

요 지

본 연구에서는 사장교의 케이블 장력을 장기적인 관점에서 보다 효과적으로 분석하고 모니터링할 수 있는 케이블 장력 모니터링 시스템을 개발하는 연구를 수행하였다. 제안된 모니터링 시스템에는 실시간 동적 데이터에서 일정 대상시간 동안의 가속도 데이터를 선정하고, 이를 고속 푸리에 변환 알고리즘에 적용하여 주파수 분석한 결과를 평균하여 일반화시키는 신호해석이론이 적용되었다. 제안된 케이블 장력의 모니터링 시스템의 적용성을 평가하기 위하여 실제 공용중인 사장교에 대한 현장재하시험을 실시하였다. 현장계측을 통한 수동으로 계산된 장력과 모니터링 시스템의 강제저장 기능을 통해 저장된 데이터를 수계산하여 반자동으로 계산된 장력을 비교한 결과, 장력차이가 1% 이내로 발생하였고, 제안된 모니터링 시스템에서 자동으로 계산된 장력을 비교한 결과에서는 약 5% 범위의 무시할만한 차이로 나타나 본 연구에서 제안된 사장교 케이블 장력 모니터링 시스템의 신뢰도를 검증하였다.

Keywords : Cable-stayed bridge, Cable force, Monitoring system, Frequency analysis, Fast Fourier Transform, Field loading test

핵심 용어 : 사장교, 케이블 장력, 모니터링 시스템, 주파수 분석, 고속 푸리에 변환, 현장재하시험

* 정회원, (주)에이티맥스 대표이사

** 정회원, 국립금오공과대학교 토목공학과 교수

E-mail : kimjh@atmacs.co.kr 031-778-1902

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 2009년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론(Introduction)

최근 서해대교, 영종대교, 광안대교 및 남해대교 등과 같이 장대교량들이 활발히 건설되면서, 시공 중 뿐 아니라 공용 중에도 활용할 수 있는 상시 모니터링 시스템을 해당 교량에 구축하여 구조거동을 장기적으로 평가하려는 유지관리계획이 많이 수립되어 진행 중이다. 장대교량의 형식으로는 널센아치교, 사장교 및 현수교 등과 같이 케이블을 사용하여 상부구조 및 공용하중을 지지하는 케이블 교량이 대표적이다. 이러한 케이블 교량은 전술한 바와 같이 지지할 하중의 대부분을 케이블이 부담하기 때문에 케이블의 장력관리가 매우 중요하며, 이는 시공 중에서부터 공용 중까지 세심한 관찰이 필요한 대표적인 계측항목이다.

케이블 장력을 계측하는 방법은 직접법과 간접법으로 대표적으로 구분할 수 있으며, 직접법의 경우에는 케이블 시공방법에 맞는 적절한 하중계(loadcell)를 선정하여 케이블에 도입되는 장력을 직접 측정하는 방법이다. 반면, 간접법의 경우에는 가속도계 혹은 전자기 센서를 케이블에 부착하여 설치함으로써 장력이 도입된 케이블의 진동특성 및 투자율 등을 통하여 케이블 장력을 간접적으로 추정하는 방법이라 할 수 있다. 전자기 직접법의 경우에는 센서의 망실 확률이 상대적으로 높고, 장력 측정센서의 문제가 발생했을 경우 수리 및 교체가 불가능하며, 시공시 하중계 설치를 위한 별도의 공중 및 설계 검토가 필요하다는 단점을 가지고 있다. 따라서, 케이블을 장기적으로 관리해야 하는 모니터링 시스템에는 간접법이 일반적으로 사용되고 있다. 간접법의 경우에는 케이블의 장력을 직접 계측하는 것이 아니기 때문에 장력값 산정을 위한 환산과정이 요구되며, 보다 신뢰성 있는 장력값 산정을 위한 환산방법 및 그에 대한 관리기준치 등에 대한 연구는 기존의 연구자들에 의해 활발히 수행된 바 있다(강경구, 2005 ; 정상국 등, 1999 ; 천병식 등, 1994). 그러나, 간접법을 사용하여 케이블 장력을 산출하는 장기 모니터링을 구축함에 있어 수많은 동적데이터를 효과적으로 처리하고, 실시간으로 변화하는 케이블 장력을 기준치 내에서 효과적으로 관리할 수 있는 실질적인 관리 프로그램 및 시스템 개발에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 다양한 외부환경적인 요인에 의하여 변화하는 교량의 거동 특성을 전반적인 그리고 장기적인 관점에서 관찰할 수 있는 최적의 모니터링 시스템을 개발하는 것을 최종 목적으로 설정하고 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 사장교의 케이블 장력을 장기적으로 모니터링하기 위하여 일정 대상시간 동안의 가속도 데이터에 대한 주파수 분석결과를 평균하여 일반화시키는 신호해석이론을 실제 공용 중인 교량의 케이블 장력 관리 시스템에 적용하였다.

본 연구에서는 제한된 사장교의 케이블 장력 모니터링 시스템의 적용성을 평가하기 위하여 강제진동 및 상시진동에 의한 케이블 장력 계측값을 비교하는 연구를 수행하였으며, 이를 위하여 실제 공용 중 교량에 대해 현장재하시험을 실시하였다. 현장에서 획득한 현장계측 장력 데이터와 모니터링 시스템에서 데이터 강제저장 기능을 통하여 획득한 케이블 가속도 데이터를 수계산을 통하여 장력을 계산 후 비교하고, 이를 장기 모니터링 시스템에서 케이블의 상시 미진동을 이용하여 자동으로 계산되는 장력과 비교분석함으로써 구축된 모니터링 시스템의 신뢰도를 검증하고, 그 적용성을 확인하였다.

2. 케이블 장력 모니터링 프로그램 개발

2.1 케이블 장력 모니터링 시스템 구축

전술한 바와 같이 공용중 계측 및 유지관리를 위한 케이블 장력 모니터링 시스템에는 일반적으로 케이블 진동을 이용한 간접법이 주로 활용되고 있다. 간접법을 이용하여 장력을 산출할 때에는 가속도계로부터 발생한 실시간 계측 데이터를 사용하여 진동방정식법에 의해 계산된다. 이 과정에서 실시간으로 모니터링 되는 케이블의 진동가속도 데이터는 FFT(Fast Fourier Transform) 알고리즘에 의해 초당 100개씩 발생하는 데이터 중 약 1,024~2,048개의 데이터가 샘플링 되어 사용된다. 그러나, 공용중인 교량은 매 순간 풍하중, 차량하중 및 기타 외부하중에 의한 영향을 받게 되며 이는 케이블에 설치된 가속도계의 데이터에 영향을 미치게 된다. 따라서 교량에 외부작용하중이 통제

된 상태에서 순간 장력측정이 아닌 공용 중 상시진동에 의한 케이블 장력 모니터링이 보다 주요한 목적일 경우 계측되는 데이터를 효과적으로 평균화하여 계산하는 과정의 도입이 필요하다.

일반적으로 가속도센서를 활용한 케이블장력 측정시 안정적이고 좋은 결과를 얻기 위해 약 20분 정도 데이터를 수집하며, 경향제거 및 필요 없는 주파수에 대한 필터링 등의 신호처리 과정을 거쳐 케이블의 고유진동수를 구하기 위한 FFT 신호분석과정을 수행하게 된다. 이러한 진동을 이용한 장력추정 방법 중 인위적 가진에 의한 방법의 경우 측정되는 가속도 신호가 명확하여 1회의 계산만으로 장력산출이 가능하다는 장점이 있으나, 측정 시 매번 인력에 의한 가진을 수행해야 한다는 단점이 있다. 일반적으로 구조안전진단, 재하시험 등 현장에서 직접 케이블 장력을 측정하는 경우 적용되고 있다.

그러나 공용중인 교량의 케이블 가속도에 의한 장력 산출시 불규칙한 풍하중이나 교통하중에 의한 상시진동으로부터 고유진동수를 계산해야 하는 문제점이 발생한다. 이와 같은 문제를 해결하는 방법으로 불규칙하게 입력되는 가속도 데이터를 일정 간격으로 중첩하여 반복적으로 FFT처리한 뒤 발생한 차수별 고유진동수 데이터를 활용하는 방안이 있다. 이 방법을 활용할 경우 발생한 차수별 고유진동수는 미리 선정한 헤르츠(Hz) 범위에서 대푯값을 선정할 수 있도록 배열한 뒤 선정된 차수별 대표 고유진동수를 일정 시간대의 장력으로 산출하는 방법이 가능하다.

본 연구에서는 상기 언급한 개념을 바탕으로 가속도 데이터의 중첩에 의한 데이터 처리방법을 활용한 케이블 장력의 장기 모니터링 시스템을 제안하였다. 기존 데이터 처리방법과 제안된 장기계측 데이터 처리방법의 개념을 비교하면 Fig. 1과 같다. 또한, 본 연구에서 제안한 모니터링 시스템에서 장력 산출흐름은 Table 1에 나타내었으며, 이를 정리하면 다음과 같다.

2.1.1 Raw Data 취득

계측 대상 케이블에 부착된 가속도계는 시간당 100개의 데이터를 동적계측기로 전송한다. 전송된 데이터는 매 10분 간격으로 저장되어 FFT 처리에 활용한다.

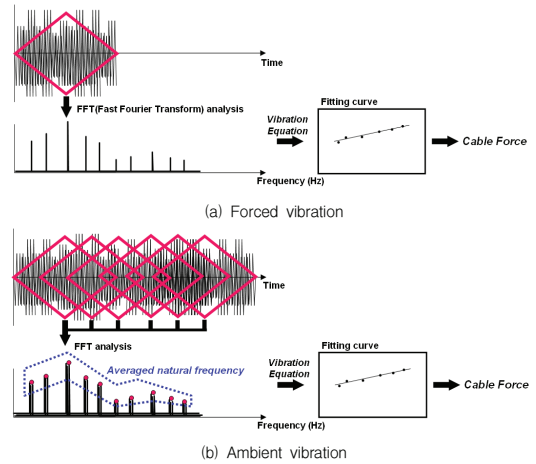


Fig. 1 Comparison of data processing according to cable vibrations

Table 1 Proceeding of cable force calculation of the proposed bridge monitoring program in this study

Step	Description
Raw data acquisition	<ul style="list-style-type: none"> Dynamic monitoring period : 100Hz About 60,000 data during 10 minute
↓	
FFT analysis	<ul style="list-style-type: none"> 1,024 acceleration data used at 1st FFT analysis 60% of previous acceleration data superposed at FFT analysis
↓	
Analyzed data array	<ul style="list-style-type: none"> Array order on analyzed data
↓	
Sampling of order on natural frequency	<ul style="list-style-type: none"> Setting of order on effective natural frequency range Sampling of order on the maximum natural frequency in arrayed data
↓	
Calculation of cable force	<ul style="list-style-type: none"> Application of formulation for cable force (vibration equation)
↓	
Save	<ul style="list-style-type: none"> Save the final cable force and its data by 10 minutes interval : Database Server
↓	
Print	<ul style="list-style-type: none"> Graphical display and printing

2.1.2 FFT 처리 및 변환 데이터 정렬

실시간 저장되는 Raw Data는 10분간 약 60,000개의 데이터를 생성하며, 1회의 FFT처리 시 약 1,024개의 데이터를 사용한다. 이후 두 번째 데이터는 첫 번째 FFT처리 데이터의 60%인 610여개의 분

석된 데이터와 새로운 40%의 데이터를 분석범위로 설정하여 FFT분석을 실시한다. 이와 같이 데이터를 중복하여 처리하는 과정은 FFT처리 과정에서 끊기는 Raw Data의 분석 범위에 연속성을 부여한다. 이러한 과정이 반복되어 60,000개의 모든 데이터에 대하여 n회의 FFT처리를 하게 되며 각 FFT처리 과정에서 산출된 고유 진동수는 각 차수별로 배열되어 임시 기억장소에 저장된다.

2.1.3 차수별 대표 고유진동수 Sampling

케이블 가속도 데이터의 FFT처리 후 산출되는 각 진동모드는 등 간격의 헤르츠(Hz)대역으로 분포하게 된다. 임시 기억장소에 저장된 차수별 고유진동수는 FFT분석 횟수와 동일한 n개가 생성되며, 이들 데이터는 미리 설정한 각 차수별 헤르츠(Hz) 범위 내에서 가장 큰 값이 추출 된다.

2.1.4 장력산출

각 차수별로 추출된 고유진동수는 1차 회귀곡선을 구한 뒤 기울기와 Y절편값을 장력추정공식(진동방정식법)에 적용하여 장력을 산출한다.

2.1.5 저장

10분 간격으로 측정되는 장력은 장기 모니터링 시스템의 데이터베이스에 기록되며 저장된 데이터는 계측관리프로그램과 연동되어 일간, 월간 및 연간 데이터 분석 시 케이블 장력의 장기 추세분석에 활용 가능하다.

2.2 케이블 장력산정

케이블의 현 이론식을 이용하여 케이블의 장력을 추정하는 방법으로는 현과 현에 작용하는 장력과의 방정식을 수립하여 해를 구하는 것이다. 현 이론식에 의할 경우 케이블의 강성을 무시한 경우와 고려한 경우로 구분할 수 있으며, 본 연구에서 모니터링 프로그램 내의 적용성을 고려하여 케이블의 강성을 무시하여 장력을 산정하는 방법을 적용하였다. 케이블 현의 휨 강성을 무시한 경우의 방정식은 다음 식(1)과 같이 나타낼

수 있다.

$$\frac{w}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

여기서, y 는 진폭이고, w 는 단위 길이당 케이블 무게, g 는 중력가속도이고, x 는 길이방향의 좌표, T 는 장력이며, t 는 시간이다.

위의 식(1)을 양단 고정의 경계조건으로부터 풀면 장력을 다음 식(2)와 같이 얻을 수 있다.

$$T = \frac{4wl^2}{n^2g} f_n^2 \quad (2)$$

여기서, f_n 는 n 차 고유진동수이고, l 은 케이블의 길이이며, 식(2)는 본 연구에서 적용한 단순한 현의 진동으로부터 획득한 장력식이다.

3. 케이블 장력 분석을 위한 재하시험

3.1 재하시험 개요

본 연구에서는 실제 공용 중인 사장교의 케이블 장력 모니터링 시스템의 적용성 평가를 위하여 현재 공용 중인 $\Delta\Delta$ 대교를 대상으로 선정하여 재하시험을 수행 하였다. 각각의 하중조건에서 계측방법별 장력차를 비교하기 위하여 강제진동에 의한 현장계측 장력산출, 장력 모니터링 시스템에서 받은 데이터를 이용한 반자동계측 장력산출 및 장력 모니터링 시스템 자동계측 장력산출 결과를 각각 도출하여 비교 분석하였다. 상기와 같은 내용의 시험을 수행하기 위한 현장재하시험의 목적 및 대상을 요약하면 다음과 같다.

3.1.1 재하시험 목적

- 계측방법에 따른 케이블 장력 계측결과 비교 분석
- 상시진동에 의한 케이블 장력 장기 모니터링 시스템의 신뢰도 검증
- 재하시험을 통한 교량의 거동 특성 파악

3.1.2 대상 케이블

- △△대교 북측 동쪽 13번, 17번 케이블(HE13, HE17)
- △△대교 북측 서쪽 13번, 17번 케이블(HW13, HW17)

3.2 재하시험 방법

3.2.1 계측방법

케이블 장력 측정을 위한 계측방법으로 수동계측장비를 이용한 '현장계측'과 대상 교량에 구축된 자동화 장치 모니터링 시스템을 이용한 '자동계측', 그리고 장기 모니터링 시스템의 추가적인 검증을 위하여 장기 모니터링 시스템의 강제저장 기능을 통해 저장된 가속도 raw데이터를 활용하여 수동으로 장력을 재계산하는 '반자동계측' 방법 등 3가지 계측방법을 적용하여 각각의 케이블 장력을 비교하였다. '자동계측'에 의해 계측된 장력은 본 연구에서 제시한 케이블 장력 장기 모니터링 시스템을 대표하는 시험결과로 활용 될 것이며, '반자동계측'에 의해 분석된 장력은 구축된 시스템에서 획득되는 가속도 자료에 대한 신뢰성 검증, 그리고 '현장계측'에 의해 계측된 장력값은 '자동계측'에 의해 산출된 장력에 대한 직접적인 비교 검토 자료로 활용 될 것이다. 각 계측방법 별 특징을 요약하면 Table 2와 같다.

3.2.2 재하차량 및 계측센서 위치

본 연구에서는 대상 교량의 케이블 중 가속도계가 설치되어 있는 대표 단면 2곳에 위치하는 케이블의 총 4개의 가속도계 센서를 분석대상으로 선정하였다. 본 실험을 위해 15톤 덤프트럭 2대가 재하차량으로 사용되었으며, 재하시험에 사용된 재하차량의 총 중량의 합계는 약 56톤으로 설정하였다.

재하시험방법은 시험차량 2대를 이용하여 각각 28톤에 근접하게 중량을 맞추고 2단면의 하중재하 위치에 동시에 재하 하였으며, 재하위치는 해남측 17번 케이블과 13번 케이블이 정착되는 정착지점으로 하여 재하 위치에 정착된 케이블의 장력변화가 최대로 나타나도록 고려하여 재하조건을 선정하였다. △△대교

재하시험의 재하위치도 및 대상 케이블가속도계는 Fig. 2와 같고, 대상교량의 재하시험 전경을 정리하면 Photo 1~Photo 3과 같다.

Table 2 Cable force calculation methods according to monitoring system in field loading test

Items	Monitoring system	Cable force calculation method
Automatic	Web-based bridge monitoring program	Automatic calculation in the program
Semi-automatic	Web-based bridge monitoring program	Manual calculation in person
Field manual	portable equipment	Manual calculation in person

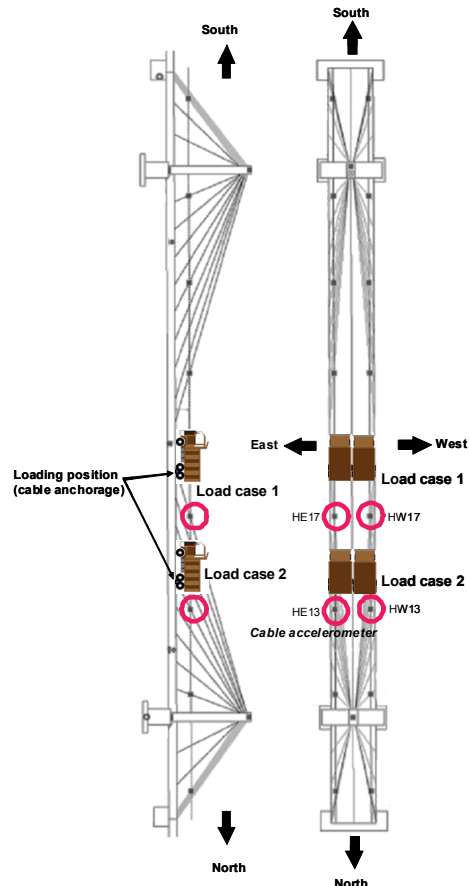


Fig. 2 Sensor and loading positions



Photo 1 Scene of field truck loading



Photo 2 Manual calculation of cable force using portable equipment



Photo 3 Automatic and semi-automatic calculation of cable force using long-term bridge monitoring system

4. 장기모니터링 시스템의 적용성 분석

4.1 Load case 1

HE17, HW17 케이블 정착단 위치의 차량재하 전의 장력과 차량재하 후의 장력변화를 계측한 결과를 비교하여 정리하였다. 현장에서 획득한 현장계측결과를 기준으로 장력값을 비교하였으며, △△대교 장기

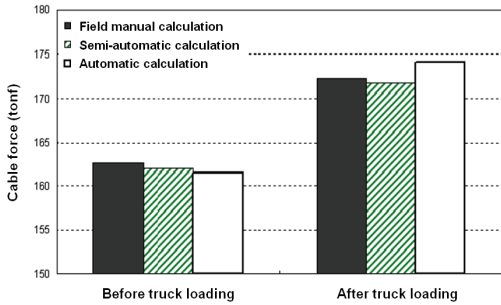
모니터링 시스템의 강제저장 기능을 통해 저장된 데이터로 계산된 반자동계측 장력의 결과는 현장계측결과와의 최대오차가 약 0.8% 범위 이내로 나타나 현재 장기 모니터링 시스템의 장력산출 계산 자료로 활용되는 케이블 가속도 데이터는 이상 없이 정상적으로 측정되고 있는 것으로 확인되었다. 또한, 상시진동에 의한 진동가속도를 본 연구에서 제안한 모니터링 시스템의 프로그램을 이용하여 케이블 장력을 자동으로 계산한 결과는 현장계측결과와 비교하여 약 1% 내외의 매우 낮은 오차를 갖는 것으로 분석되었다. 이러한 결과를 바탕으로 현재 △△대교의 케이블 장력 모니터링 시스템이 적절하게 운용되고 있는 것으로 판단된다. Table 3와 Table 4에 계측방법에 따른 재하전·후 HE17, HW17 케이블의 장력변화를 정리하였으며, 장력변화 결과를 비교하여 도시하면 Fig. 3과 같다.

Table 3 Cable force comparison according to monitoring methods for HE17

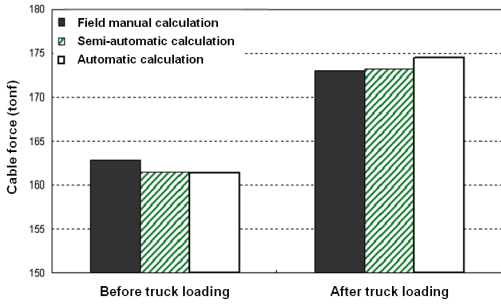
	Monitoring method	Averaged cable force (tonf)	Comparisons with field manual value	
			differ.	error(%)
Before loading	Automatic	161.45	1.18	0.73
	Semi-automatic	162.04	0.59	0.36
	Field manual	162.63	0.00	0.00
After loading	Automatic	174.15	-1.89	-1.10
	Semi-automatic	171.71	0.56	0.33
	Field manual	172.27	0.00	0.00

Table 4 Cable force comparison according to monitoring methods for HW17

	Monitoring method	Averaged cable force (tonf)	Comparisons with field manual value	
			differ.	error(%)
Before loading	Automatic	161.37	1.48	0.91
	Semi-automatic	161.56	1.28	0.79
	Field manual	162.85	0.00	0.00
After loading	Automatic	174.48	-1.44	-0.83
	Semi-automatic	173.25	-0.21	-0.12
	Field manual	173.03	0.00	0.00



(a) Cable force of HE17



(b) Cable force of HW17

Fig. 3 Comparisons of cable forces of HE17 and HW17 according to field truck loading

4.2 Load case 2

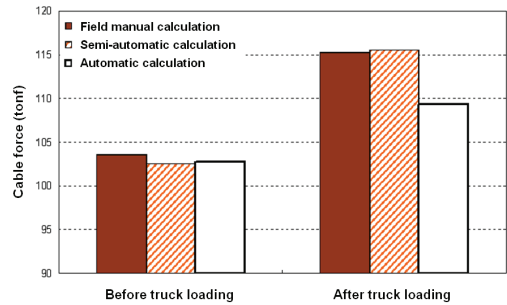
Load case2 채하위치인 HE13, HW13 케이블의 차량제하 전의 장력과 차량제하 후의 장력변화를 계측한 결과를 정리하면 Table 5와 Table 6과 같다. 현장계측결과를 기준으로 반자동계측에 의해 산출된 장력값과의 오차는 약 0.5% 이내의 범위로 나타나 현장계측결과에 매우 근접한 장력측정 결과를 나타내는 것으로 분석되었다. 한편, 본 연구에서 개발된 자동 모니터링 시스템을 통하여 자동으로 계산된 장력을 현장계측을 통해 계산된 장력과 비교한 결과에서는 장력의 오차가 약 5% 범위 내외로 발생하는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 앞서 제안된 Δ 교대의 상시진동에 의한 케이블 자동 모니터링 시스템이 10 tonf 이내의 작은 장력변화도 감지할 수 있음을 보여 준다. 케이블 장력비교 결과를 도시하면 Fig. 4와 같다.

Table 5 Cable force comparison according to monitoring methods for HE13

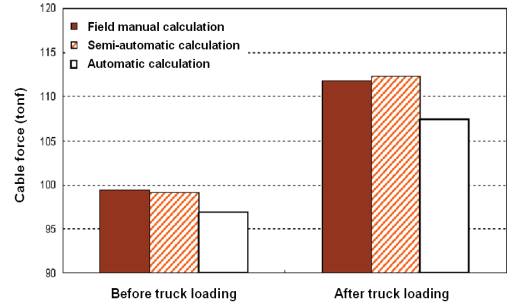
Monitoring method	Averaged cable force (tonf)	Comparisons with field manual value		
		differ.	error(%)	
Before loading	Automatic	102.77	0.80	0.78
	Semi-automatic	102.48	1.09	0.11
	Field manual	103.57	0.00	0.00
After loading	Automatic	109.37	5.83	5.06
	Semi-automatic	115.59	-0.39	-0.34
	Field manual	115.20	0.00	0.00

Table 6 Cable force comparison according to monitoring methods for HW13

Monitoring method	Averaged cable force (tonf)	Comparisons with field manual value		
		differ.	error(%)	
Before loading	Automatic	96.84	2.56	2.58
	Semi-automatic	99.12	0.28	0.28
	Field manual	99.40	0.00	0.00
After loading	Automatic	107.47	4.32	3.86
	Semi-automatic	112.32	-0.53	-0.47
	Field manual	111.79	0.00	0.00



(a) Cable force of HE13



(b) Cable force of HW13

Fig. 4 Comparisons of cable forces of HE13 and HW13 according to field truck loading

4.3 재하시험 결과 고찰

재하시험은 본 연구에서 제안한 케이블 장력 모니터링 시스템의 타당성과 신뢰성을 검증하고자 수행된 것이다. 이를 위하여 현장에서 수동으로 직접 획득한 현장계측데이터와 모니터링 시스템에서 데이터 강제저장 기능을 통하여 획득한 케이블 가속도 데이터를 수계산을 통하여 장력을 계산 후 비교한 결과하였으며, 그 결과 장력차이가 1% 이내로 발생함을 확인함으로써 현재 구축된 모니터링 시스템의 데이터 취득과 이를 통해 산출되는 계측결과의 신뢰도에는 문제가 없음을 검증하였다. 이러한 검증된 데이터의 추가적인 검증을 위하여 차량재하 전·후의 장력변화를 현장에서 계측 결과와 장력 모니터링 시스템을 통한 자동계측결과와 비교한 결과 HE17, HW17 케이블은 장력의 오차가 약 1% 범위 내외로 나타났으며, HE13, HW13 케이블은 장력 오차가 약 5% 범위 내외인 것으로 분석되어 신뢰성 있게 장력을 산정할 수 있는 것으로 평가되었다.

한편, 제안된 케이블 장력 모니터링 시스템은 다양한 외부환경적인 요인에 의하여 변화하는 특수교량의 전반적인 장기거동 특성을 모니터링하기 위한 목적으로 개발된 시스템이다. 즉, 재하시험과 같이 현장에서 강제진동에 의한 케이블 장력 계측보다는 상시진동에 의한 케이블 장력의 장기적인 모니터링이 보다 주요한 목적이다. 따라서, 제안된 모니터링 시스템에서는 장기적인 관점에서 케이블의 거동을 보다 효과적으로 분석하기 위하여 일정 대상시간 동안의 가속도 데이터에 대한 주파수 분석결과를 평균하여 일반화시키는 신호해석이론이 활용되었으며(Kim et. al. 2003), 이로 인하여 재하시험에서 수동계측을 통해 강제진동에 의한 특정시간 대의 가속도 데이터만을 주파수 분석하여 산정되는 장력과 모니터링 시스템에서 실시간 데이터를 일정기간 동안 주파수 분석한 결과를 평균하여 산정되는 장력값 과는 미소한 차이가 발생할 수 있다(김상효 외, 1997) 즉, 본 연구에서 비교한 모든 장력산정 방법에는 동일한 장력계산 알고리즘이 적용되었지만, 상시진동에 의한 장력을 장기적으로 계측하기 위하여 개발된 장력 모니터링 시스템에는 고유진동수 평균화

Table 7 Comparison of natural frequency according to monitoring methods for HW13

Cable force (tonf)	Natural Frequency (Hz)		
	102.77	102.48	103.57
Order	Automatic	Semi-automatic	Field manual
3	2.441	2.441	
4	3.264	3.223	3.32
5	4.06	4.102	4.102
6	4.882	4.883	4.883
7	5.714	5.664	5.664
8	6.541	6.543	6.445
9	7.369	7.422	7.422
10	8.2	8.203	8.203
11	9.037	8.984	8.984
12	9.885	9.863	9.961
13	10.743	10.742	10.742
14	11.604	11.621	11.523
...

과정이 적용되었기 때문에 Table 7과 같이 고유진동수의 미소한 차로 인하여 최종적인 장력차이가 발생한 것으로 판단된다.

그러나, 본 연구에서 제안된 모니터링 시스템을 이용해서도 차량 재하전후 발생하는 약 10tonf 이하의 작은 장력변화도 감지할 수 있다는 것을 확인하였을 뿐 아니라, 수동계측 및 강제저장 데이터 분석을 통해 산정된 장력값 과의 차이도 약 5% 범위 이내의 무시할만한 차이로 나타나 장력 모니터링 시스템의 적용성에는 문제가 없다고 판단된다.

5. 결론

본 연구의 결론을 요약하여 정리하면 다음과 같다.

- 1) 사장교의 케이블 장력을 장기적인 관점에서 보다 효과적으로 분석하고 모니터링하기 위하여 실시간 동적 데이터에서 일정 대상시간 동안의 가속도 데이터를 선정하여 이에 대한 주파수 분석결과를 평균하여 일반화시키는 신호해석이론이 도입된 케이

블 장력의 모니터링 시스템을 제안하였다.

- 2) 제안된 케이블 장력의 모니터링 시스템의 적용성을 평가하기 위하여 실제 공용중인 사장교에 대한 현장제하시험을 실시하였으며, 케이블 장력은 현장계측을 통한 수동으로 계산된 장력, 모니터링 시스템의 강제저장 기능을 통해 저장된 데이터를 수계산하여 반자동으로 계산된 장력, 제안된 모니터링 시스템에서 자동으로 계산된 장력을 각각 비교하였다.
- 3) 현장계측을 통한 수동으로 계산된 장력과 모니터링 시스템의 강제저장 기능을 통해 저장된 데이터를 수계산하여 반자동으로 계산된 장력을 비교한 결과, 장력차이가 1% 이내로 발생하여 모니터링 시스템의 데이터 취득시스템과 이를 통해 취득되는 계측 데이터의 신뢰도에는 문제가 없는 것을 검증하였다.
- 4) 또한, 현장계측을 통한 수동으로 계산된 장력과 제안된 모니터링 시스템에서 자동으로 계산된 장력을 비교한 결과 HE17, HW17 케이블의 경우에는 장력계산 방법에 따른 오차가 약 1% 범위 내외로 나타났으며, HE13, HW13 케이블의 경우에는 약 5% 범위의 무시할만한 차이로 나타나 본 연구의 모니터링 시스템을 활용하여 사장교의 케이블을 유지관리 모니터링하는데는 문제가 없다는 것을 확인하였다.

참고문헌

1. 강경구, 신뢰성에 기초한 사장교 케이블장력관리를 위한 관리한계치 설정에 관한 연구, 박사학위논문, 한양대학교, 2005, pp.12-50.
2. 정상국, 전제성, 이송, 심태섭, "국내 적용되고 있는 흠막이 구조물의 관리기준치에 대한 신뢰도 분석", 대한토목학회지, 19권 I-30호, pp.479-487.
3. 천병식, 곽수현, 남순성, 신경섭, "서울지하철 터널 공사시의 계측관리기준치 결정방법에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표회논문집, pp.747-750.
4. 김상호, 최수일, 여동훈, 이상호, "진동법을 이용한 케이블의 장력측정기법과 계측환경의 영향분석", Journal of the Engineering Research Institute, Yonsei University, Vol. 29, No. 2(47), 1997, pp.143-150.
5. Kim, C.-Y., Jung, D.-S., Kim, N.-S., Kwon, S.-D., Feng, M. Q., "Effect of vehicle weight on natural frequencies of bridges measured from traffic-induced vibration", Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics (IEM), Vol. 2, No. 1, June 2003, pp. 109-115.

(접수일자 : 2008년 12월 5일)

(심사완료일자 : 2008년 12월 31일)