

비파괴계측에 의한 사장교의 공용간 상시안전감시시스템

The Real-time Health Monitoring System of a Cable-stayed Bridge Based on Non-destruction Measurement

최만용*[†], 강경구**[†], 김종우**

Man-Yong Choi*[†], Kyung-Koo Kang**[†] and Jong-Woo Kim**

초 록 현재까지 다양한 토목구조물들은 여러 가지 요인에 의한 노후화와 축적된 손상에도 불구하고 별다른 조치없이 계속해서 사용되고 있었다. 따라서, 이러한 구조물들의 효율적인 유지관리를 위해 계측관리가 중요시되었다. 이에 본 논문에서는 비파괴계측에 의해 사장교의 실시간 계측모니터링시스템을 개발하고자 하며 이를 통해 교량의 안전관리를 하고자 하였다. 계측모니터링시스템은 교량의 유지관리를 도모하고, 교량 관리의 경제적 비용을 줄이게 되며 사장교의 새로운 설계 및 분석방법을 개발하는데 중요한 데이터를 제공할 것이다.

주요용어: 실시간 계측모니터링시스템, 진동변수, 유지관리, 사장교

Abstract Many civil and infrastructures continue to be used despite aging and the associated potential for damage accumulation. Therefore, the ability to monitor the health of these systems is becoming increasingly important. The purpose of this paper is to propose a real-time health monitoring system of cable-stayed bridge, based on non-destructive measurement. And also this paper focuses on the safety assessment for bridge from health monitoring system to accomplish this safety assessment. Using the proposed health monitoring system, it helps bridge maintenance and reduces the economic cost of a life-cycle costs. Also it give important data to develop the design and analysis method for cable-stayed bridges.

Keywords: real-time health monitoring system, vibration, maintenance, cable-staged bridge

1. 서 론

최근 사회가 발전되고 여러 가지 사회간접자본들의 특수한 형태의 구조물이 많이 적용됨에 따라 비파괴계측에 의한 구조물의 거동을 예측하는 기술[1] 또한 가속화되고 있다. 특히, 교량과 같이 구조물의 거동형태가 복잡하고 외부 환경요인에 따라 변화의 폭이 큰 구조물에 있어서는 더욱 계측시스템[2]의 적용이 빈번하게 이루어지고 있

다. 일반적으로 이러한 공용간 상시안전감시는 유지관리 계측[3,4]으로 간주하며, 구조물이 존재하는 한 계측이 지속적으로 이루어지는 것을 말한다. 설계와 구조해석에 의한 결과에 근거하여 공용중 상태에서 얻어진 계측결과는 구조물의 상태를 판단 및 평가할 수 있는 정보로 변환되고, 이는 다시 미리 설정된 관리한계치에 대하여 지속적으로 공용여부를 판단하게 된다. 판단의 기준은 관리한계치의 설정방법에 의해 달라지게 되는데, 현재까지는 설계

한계치와 구조물의 완공직후의 초기치를 근거로 한 값에 대해 측정대 측정으로 비교되는 방법이 일반적으로 이용되고 있다.

본 논문은 교량구조물중 사장교의 공용간 상시안전감시를 위하여 다양한 센서를 교량에 장착하여 이를 비파괴계측으로 교량이 공용중 거동상태를 감시하기 위한 기초연구로서 상시안전감시[6]를 위한 계측시스템을 Fig. 1과 같이 제안하고, 이러한 계측시스템으로부터 교량의 안전상태를 추정하는데 주요 관심을 두고 있다.

2. 본 론

2.1. 대상교량의 특징

대상교량은 콘크리트 PC사장교로 교량이 총길이는 1,470m이며, 사장교의 케이블은 24개, 주탑(Pylon)의 높이는 88m로 시공된 교량이다. 대상교량의 구조적 특징은 Fig. 2와 Table 1과 같다.

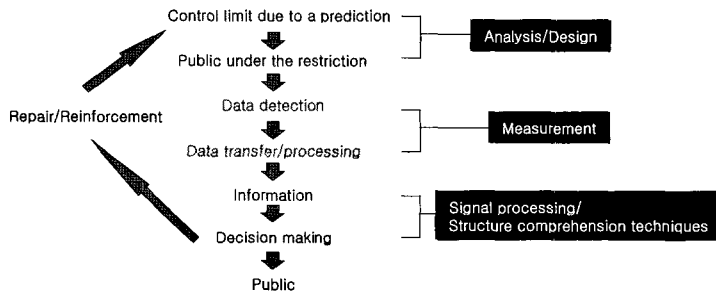


Fig. 1 Main concept of real-time health monitoring system

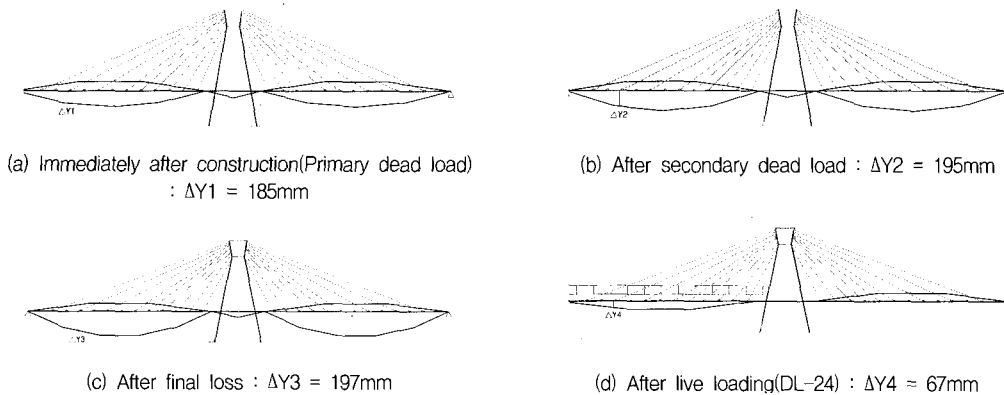


Fig. 2 Mode shape under dead load and live load

Table 1 Specifications of the bridge

Specifications			contents
Bridge form	Superstructure	Cable-stayed bridge	• 2cell PC Box
		Continuous bridge	• 1cell or 2cell PC Box
	substructure	Foundation	• Well foundation
Bridge form of cable-stayed bridge section	Superstructure		• Two-span symmetrical structure of 2cell PS Box Girder
	Cable		• Longitudinal (Fan Type) • Transverse (Single Plane)
	Pylon		• Both directional A-Frame
	Foundation		• Slurry Wall foundation
	Superstructure erection method		• FCM(Free Cantilever Method)

2.2 계측항목 및 센서부착위치

대상교량의 계측항목 및 센서부착은 전반적 계측(global dynamic monitoring system)이 가능하도록 주로 가속도센서로 구성되어 있으며, 이를 이용하여 구조물 전체의 상태평가를 실시하고 있다. Fig. 3은 대상교량의 센서부착위치를 도식적으로 표현한 것이며 Table 2는 설치된 센서 정보를 나타낸다.



Fig. 3 The location of launched sensors

Table 2 The measurement items of the bridge

Name	3-axis accelerometer (FBA23)		
location	Main-girder deck(8S, 8NU, 8ND), pylon		
EA	Main-girder deck: 3EA(9ch), pylon: 1EA(3ch), Total: 4EA(12ch)		
Sensor Specification	<ul style="list-style-type: none"> • Manufacturing company : Kinemetrics(U.S.A) • Sensor type : Force Balanced Type • Advantages : using mainly to low frequency • Measuring ranges : ±1.0g • Frequency : 50Hz • Resolution : 0.0001g 		
Analysis item	<ul style="list-style-type: none"> • 3-axis directional natural frequency of main-girder and pylon • 3-axis directional dynamic displacement using acceleration value (using integral function) • Torsion response characteristics of main-girder (8NU, 8ND) 		
Name	Single-axis accelerometer(8304E2)		
location	4N, 6N, 8N, 10N, 12N, 12S		
EA	Total 6EA(6ch)		
Sensor Specification	<ul style="list-style-type: none"> • Manufacturing company : Kistler (U.S.A) • Measuring ranges : ±2.0g • Advantages : using mainly to low frequency/using mainly to bridges • Frequency : 300Hz 		
Analysis item	<ul style="list-style-type: none"> • Offering maintenance information such as tension calibration and cable alternative through variation of cable's tension value • Dynamic response characteristics of main-girder 		
Name	Anemometer	Location/EA	Pylon and main-girder deck(2EA)
Sensor Specification	<ul style="list-style-type: none"> • Measuring instrument : Wind Observer(Gill Instrument, England) • Measuring ranges : Wind velocity(0 ~ 65m/s), wind direction(0 ~ 360°) 		
Analysis item	<ul style="list-style-type: none"> • Pylon : Wind direction and wind velocity of pylon/entire wind characteristics of han river • Main girder : Wind direction and wind velocity of main-girder 		
Name	Laser displacement sensor	Location/EA	Main girder : 8N, 8S (2EA)
Sensor Specification	<ul style="list-style-type: none"> • Measuring instrument : PSM-R (Noptel, Finland) • Measuring ranges : 0 ~ 220cm • Min. measuring unit : 0.1mm 		
Analysis item	<ul style="list-style-type: none"> • Measuring displacement of main girder for static and dynamic load • Comparison with dynamic displacement of accelerometer • Camber of main girder 		

2.3. 비파괴계측에 의한 계측방법

대상교량의 공용간 상시안전감시는 유지관리 계측으로 공용하중 측, 상시진동하중에 의한 계측방법을 수행하고 있다. 상시진동하중에 의한 계측 수행시에는 미진동에 따라 구조물의 특성을 판단할 수 있는 특성치를 분석하기란 쉬운 문제는 아니다. 따라서 아날로그 및 디지털 신호처리가 필수적이며, 노이즈 제거를 위한 별도의 알고리즘이 필요하다.

상시진동하중에 의해 측정된 계측 시그널은 다시 고유진동수 영역으로 변환되어 구조물의 상태를 평가할 수 있는 인자를 도출하였으며, 이를 기초로 교량의 상태평가를 실시하도록 개발되었다. Table 3은 대상교량의 계측방법에 대하여 하중재하 방법, 데이터수집방법, 분석방법, 교량평가방법에 대하여 개략적인 내용을 정리한 것이다.

2.4. 계측시스템 구성

대상교량의 계측시스템은 유지관리 계측특성에 맞게 자동계측 시스템으로 구성하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 계측시스템은 크게 현장과 중앙관리소를 인터넷을 이용하여 서로 network를 구성함으로써 원격지에서도 손쉽게 실시간 안전감시가 가능하도록 구성하였다.

구성된 계측시스템을 프로그램으로 조절이 가능하도록 계측프로그램을 개발하였다. 계측프로그램은 향후 계측항목의 추가 및 수치해석을 통한 해석치와 계측치의 비교 등 사장교의 상태평가를 효율적으로 수행하기 위하여 모든 기능들을 상호 독립된 객체지향 구조를 지닌 DB구조로 설계하였다.

본 연구에서 수행하고 있는 대상교량은 동적계측을 통하여 교량의 특성치를 추출하여 이를 상시안전감시를 위

Table 3 The measurement method

	content
load test	<ul style="list-style-type: none"> • Health monitoring system for entire behavior valuation of bridge by dynamic measuring • Ambient Vibration Test
Signal processing	
Analysis method	<ul style="list-style-type: none"> • Conversion from time domain to natural frequency domain • Calculation of cable's tension <ul style="list-style-type: none"> - Tension calculation using one-dimensional and two-dimensional natural frequency derived from accelerometer • Launching three accelerometers of main girder and an accelerometer of pylon <ul style="list-style-type: none"> - Vibration specific of longitudinal, vertical, transverse direction of bridge - Torsion mode of main girder
Valuation	<ul style="list-style-type: none"> • Natural frequency according to direction, degree : 1~10 dimension • Representative natural frequency according to direction • Comparison of measuring value and calculation value of natural frequency according to degree

한 인자로 평가한다. 센서, 로거 및 아날로그 유니트(변위계)를 거쳐 입력되는 계측신호는 구조물의 의미 있는 분석에 장애가 되는 전기적, 환경적 잡음(White Noise)이 포함된다. 특히, 상시진동을 이용한 측정은 일반적으로 노이즈에 비하여 신호가 미약한 특성을 가지므로 측정신호가 노이즈에 묻혀버릴 가능성을 가지고 있다. 따라서 계측데이터의 신호처리부터 해석에 이르기까지 별도의 알고리즘 개발이 필요하며 본 연구에서 개발한 신호처리 알고리즘은 Fig. 5와 같다.

신호해석은 제한한 계측시스템을 통하여 계측데이터를 수학적 논리로 가공, 구조물의 상태 및 구조에 관련된 자료로 변환하는 과정을 말한다. 예를 들어 대사교량과 같이 사장교의 경우에는 가속도 파형을 이용하여 케이블의 장력을 추출하는 과정과 보강형 PC박스의 가속도 파형을 이용하여 PC박스의 손상상태를 평가할 수 있는 인자를 추출하는 과정이다. 이러한 신호해석을 위하여 본 연구에서 적용된 방법은 Fig. 6과 같다.

Fig. 5~6과 같은 알고리즘을 적용하여 추출된 계측데이터는 또다시 동적 특성을 추출하기 위하여 동적특성 추출 알고리즘을 개발하였다. 동적특성 추출의 목적은 기존의 재래적인 육안검사 및 국부적인 조사방법의 어려운 일을 최소화하고 보다 객관적인 구조물의 상태를 규명하기 위한 새로운 비파괴계측에 의한 계측수행방법을 통하여 구조계의 지지조건 변화, 강성변화 및 질량변화를 추출하는 것으로 본 연구에서는 다음의 세가지 항목을 추출하기 위한 알고리즘을 개발하였다.

① 고유진동수(Natural Frequency)

3축가속도계의 경우 각 센서별, 방향별로 차수별 고유진동수를 추출되며 이 값은 동적 해석 결과치와 비교되며 각 방향별 대표 고유진동수는 관리기준치와의 비교된다. 또한 비틀림에 의한 고유진동수도 추출하여 동적 해석결과와 비교한다.

② 대수감쇠율(Damping Ratio)

Time domain data와 natural frequency domain data에서 차수별 대수감쇠율을 추출한다.[2],[5]

③ 모드형상(Mode Shape)

각 차수별 모드형상을 도출하여 연직방향모드(휨모드), 교축직각방향모드(수평모드), 비틀림모드별로 동적해석 결과치와 비교한다.

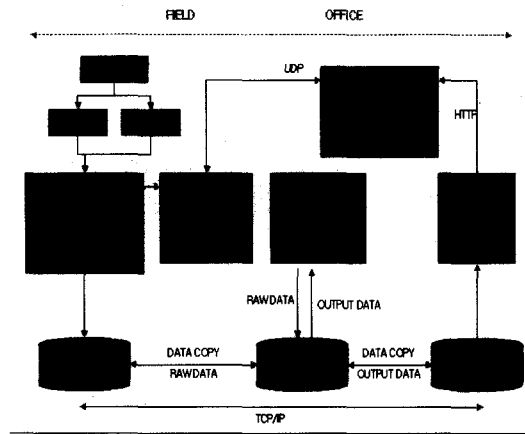


Fig. 4 Flow chart of real-time monitoring system

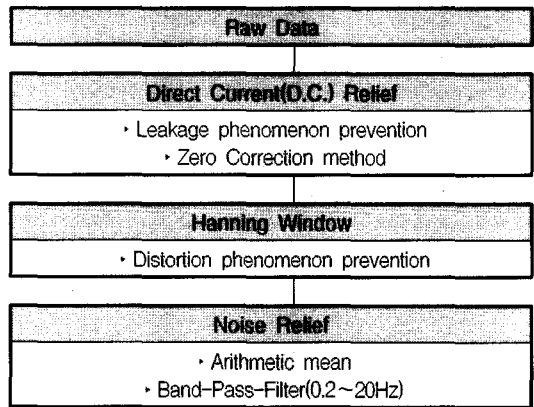


Fig. 5 The algorithm of signal processing

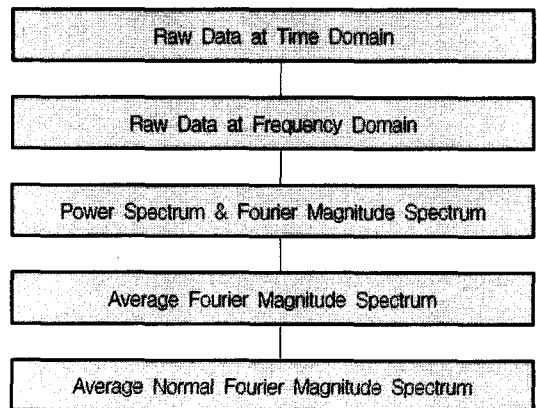


Fig. 6 The algorithm of signal analysis

또한 케이블의 장력추정을 위한 알고리즘을 Table 4에 정리해 보았다.

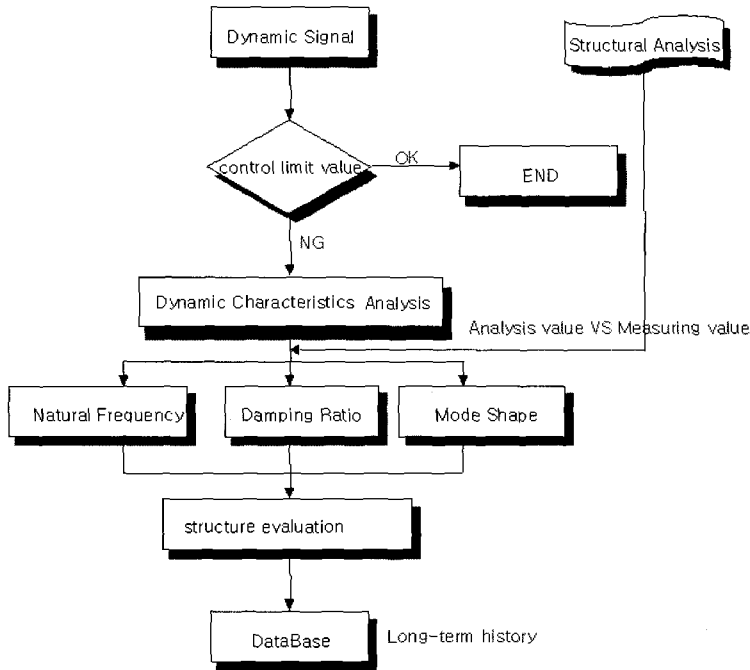


Fig. 7 The algorithm of dynamic specification

Table 4 The algorithm of the cable force

	feature	formula
String formula	<ul style="list-style-type: none"> Cable vibration theory Credit decline by shift of low dimensional mode 	$T = \frac{4w\ell^2}{n^2g} f_n^2$ <p>(T: tension, ℓ: cable length, w: unit weight, g: the acceleration of gravity, n: dimension, f_n: n dimensional natural frequency)</p>
Vibration equation	<ul style="list-style-type: none"> Deriving 2-dimensional regression equation by high dimensional mode to vibration equation of cable considering flexural rigidity High credit by high dimensional mode 	<ul style="list-style-type: none"> Vibration equation ; $\frac{w}{g} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2}{\partial x^2} = 0$ <ul style="list-style-type: none"> Single solution of Differential equation ; $T = \frac{4wL_{eff}^2}{g} \left(\frac{f_n}{n}\right)^2 - \frac{EI\pi^2}{L_{eff}^2} n^2$ <ul style="list-style-type: none"> One-dimensional regression equation $\left(\frac{f_n}{n}\right)^2 = \frac{Tg}{4wL_{eff}^2} + \frac{EI\pi^2g}{4wL_{eff}^4} n^2 = b + an^2$ <ul style="list-style-type: none"> $T = \frac{4wL_{eff}^2}{g} \times b$ $EI = \frac{4wL_{eff}^2}{\pi^2g} \times a$

3. 결론

사용중인 사장교에 대한 안전감시 및 유지관리를 위해서 육안점검이나 정밀진단 기술보다 상시로 구조물의 정·동적상태를 파악할 수 있는 알고리즘 및 시스템을 개발하였고 공용중인 실교량에 적용하고 얻은결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 교량의 상시안전감시를 위하여 비파괴계측법에 의한 시스템 구성기법에 대하여 수행한 것으로 이러한 시스템구성을 통하여 교량의 실시간 모니터링을 실시할 수 있다.
- 2) 교량의 공용기간동안 안전성을 확보하고 향후 건설되는 교량의 설계 및 해석기술을 개발에 필요한 자료를 제공할 수 도 있다.
- 3) 구조물의 예방유지관리를 가능하게 함으로써 이에 필요한 인력 및 전체적인 유지관리 비용의 절감효과를 기대할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 교량의 유지관리를 위한 비파괴계측기술의 적용방안에 대한 기초연구를 수행한 것이며, 후속 연구로 본 연구에서 제안한 사장교의 상시안전감시 시스템을 통하여 그 결과의 타당성을 검증할 것이다. 현재 이를 위한 데이터를 수집 중에 있으며 계속해서 이에 대한 추가 연구결과를 발표할 것이다.

참고문헌

- [1] Steven L. Stroh, Dynamic Behavior of Three U. S. Cable-stayed Bridges, Bridges and Transmissionline Structures, pp. 122-135
- [2] Hiroki Yamaguchi and Manabu Ito, Full-Scale Measurements and Structural damping of Cable-Supported Bridges, Bridges into the 21st Century, pp. 350
- [3] Jean-Philippe FuzierLong stay cables - installation technology for easy maintenance, Bridges into the 21st century
- [4] J. C. Wilson and T. Liu, Ambient vibration measurements on a cable-stayed bridge, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Volume 20, Issue 8, (1991)
- [5] M. A. Garevski and R. T. Severn, Damping and response measurement on a small-scale model of a cable-stayed bridge, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Volume 22, Issue 1, (1993)
- [6] 최만용, 상시계측에 의한 교량안전감시시스템, 과학기술부, KRIS/IR-2001-084