

소규모 교량 자산관리를 위한 계측 테스트베드 구축

Test-bed Development for Long-term Monitoring of Small Bridge Asset Management

박재우*
Park, Jae-Woo

채명진**
Chae, Myung-Jin

이규***
Lee, Gyu

조문영****
Cho, Moon-Young

Abstract

While Category 1 and Category 2 bridges are intensively inspected and carefully managed, many small bridges that are not in the Category 1 and 2 are often forgotten until they decay in serious condition. Since many of these small bridges located in the populated city, failure of them would cause huge negative impact on the community. This paper focuses on the small size concrete bridges for timely repair and rehabilitation work for the effective operation and management. Test bed is developed to define the key parameters to forecast the long term performance of the bridges, mostly concrete box bridges. Key parameters suggested in this paper are cumulative fatigue due to repetitive heavy traffic loads and the acid attacks for concrete material deterioration. The cumulative fatigue is measured by the use of the mileage concept. For the long term data collection and inspection, stable and easy to use data collection system is installed as a test bed. The contribution of this research work is on the development of the test bed to define the key parameters of bridge deterioration.

Keywords : *Infrastructure Asset Management, Small Bridge, Long-term Performance Prediction, USN Monitoring*

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

교량의 고효율화 및 재료의 고성능에 의해서, 현재 교량구조물은 사장교, 현수교 등의 특수 교량의 수가 점차 증가하고 있으며, 이러한 특수한 교량들은 시설물안전관리에 관한 특별법(이하 시특법) 1종시설물에 해당함으로써 주기적인 안전점검을 통해서 관리되어지고 있다. 특수한 교량의 경우는 다수의 계측기를 구조물에 설치하고 여러 개의 컴퓨터를 이용하여 구조물의 특성을 모니터링하고 분석하여 교량의 상태를 판정하고 교량을 유지 관리하

여 시설물 자산을 관리하고 있다. 하지만 시특법의 관리 보호를 받지 못하는 소규모 교량(연장100미터이하, 10년이상경과)은 재난 및 안전관리기본법에 의한 특정관리대상시설물로 분류되어 지자체에 의해서 관리되어지고 있으며 이러한 구조물은 특별한 관리와 모니터링을 하고 있지 않으며 특별한 관리예산도 배정되지 않아 자산 관리 없이 방치되는 실정이다. 하지만 이러한 소규모 교량의 수가 상대적으로 많고 우리생활과 인접하여 위치하고 있기 때문에 구조적 문제가 발생할 경우 커다란 사회 문제를 일으킬 수 있다. 지자체의 경우 소관시설물 개소수(2008년 특정관리대상시설물중 교량이 6,575개)에 비해 담당인력 및 전문성이

* 일반회원, 한국건설기술연구원 전임연구원, 공학석사, jwpark@kict.re.kr

** 일반회원, 한국건설기술연구원 수석연구원, 공학박사(교신저자), chae@kict.re.kr

*** 일반회원, 한국건설기술연구원 전임연구원, 공학박사, giu@kict.re.kr

**** 종신회원, 고려대학교 건축공학과 겸임교수, 공학박사, moonyoung.cho.1950@gmail.com

부족한 형평이어서 제대로 된 유지관리를 하지 못하고 있다. 본 연구에서는 소규모 교량을 대상으로 관리주체가 비교적 적은 예산으로 효율적으로 시설물을 관리하는 방안으로 교량에 소수의 센서를 설치하여 고유 진동수와 변형률의 변화를 모니터링 하여 구조물의 내하력 변화를 관찰 분석하여 적은 예산으로 구조물을 효율적으로 관리하기 위하여 본 연구를 수행하였다.

향후에 이러한 결과를 가지고 구조물 내하력 평가에 따른 잔존 가치 분석이라는 기법을 사용하여 공공 시설물의 자산 관리의 지표로 삼으려는 기획이다. USN 기반 모니터링 시스템을 최적화된 센서 및 통신방법을 설치 및 운영하여 구조물의 열화 및 내하력 감소 등을 자동 계측으로 측정 분석하고 이에 따른 보수 및 보강 조치를 할 수 있도록 함으로써 구조물의 건전성 확보, 인명 보호 등 구조물의 내하력 평가에 의한 공공 시설물의 효율적인 자산 관리 수행을 목적으로 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

일반적으로 소형 교량, 육교 등의 구조물은 여러 가지 첨단 센서 설치를 통한 자동 계측을 수행하지 않고 육안 및 간단한 현장 점검만을 통한 구조물의 안전을 확인 한다. 따라서 고중량 차량의 통과나 홍수 시 하천 수량의 갑작스러운 증가에 따른 하중의 증가로 구조물의 내하력이 급격한 저하가 발생할 경우 인명 보호와 구조물 유지 관리에 어려움이 존재한다. 이러한 소규모 교량은 수가 많고 인구 밀집 지역에 인접하여 있기 때문에 소형 구조물에 문제가 발생할 경우 커다란 사회 문제를 일으킬 수 있다.

따라서, 적은 예산으로 이러한 소규모 교량을 효율적으로 관리하기 위한 방안이 도출되어야 하는데 그 방법 중 하나인 USN 기반 모니터링 시스템을 도입하여 적용하게 되었다.

이에 본 연구에서는 범위는 다음과 같다.

- 1) 고유 진동수 변화에 따른 내하력의 간단한 평가
- 2) 하중 마일리지 개념을 도입한 소규모 콘크리트 교량 자산의 장기성능 평가
- 3) 철근 부식 센서와 중성화 깊이 센서를 이용한 구조물의 물성 변화를 추적 정리하여 구조물의 건전성 평가

시스템의 간편한 관리 운용을 위하여 센서 계측 시스템을 무선으로 구성하고 태양전지를 이용한 독립 전력 시스템을 구축하고 중앙의 컴퓨터 서버 시스템의 자동 평가 프로그램을 구축한다.

무선 시스템은 데이터로거에 ZigBee 통신 모듈을 이용한 USN(Ubiquitous Sensor Network)과 중앙 센터와의 통신을 위한 와이브로(Wibro) 무선 통신으로 구성하며, 독립 전원은 280와트의 대용량 태양전지와 충전기로 구성된 전력 발전 시스템으로 흐린 날씨에도 운용에 문제가 없도록 구축한다.

운영 프로그램은 통신을 비롯한 모든 시스템을 관리 분석 평가하는 소프트웨어로 구성되며 많은 메뉴 보다는 단순하지만 정량적인 계측 및 내하력 평가가 가능한 구조를 갖추었다. 계측 항목의 구성도 합리적이고 단순하지만 절대적인 필요한 항목으로 구성한다. 특히 가속도계를 이용한 고유진동수 변화 이력 추적, 변형률계와 간단한 WIM (Weigh-in-Motion) 센서를 이용한 Rainflow 피로도 분석 그리고 염해 측정을 이용한 철근 부식 센서, 중성화 깊이 센서를 이용한 구조물의 물성 변화를 추적하여 이를 종합적으로 분석 판단하는 시스템을 사용한다. 또한 온도계를 이용하여 구조물이 온도 변화에 따른 장기간동안 구조물의 온도-하중 분포도 확인한다.

1.3 국내외 연구동향

교량의 관리에 대한 연구는 국내외 모두 장대교량을 중심으로 연구가 활발히 진행 중이며, 구조물의 상태, 안전을 위한 진단 시스템을 위해 구조물에 계측 센서를 내장하고 이를 광케이블 등을 이용하여 시설물을 상시적으로 모니터링 할 수 있는 시스템이 활용되고 있는 추세이다. 그러나, 이러한 교량 계측시스템은 주로 장대 교량위주의 특정 시설물에만 제한적으로 사용되고 있으며, 초기 구축비용 및 유지관리가 어렵다(이우식 외 2006).

일본의 Akashi Kaikyo Bridge의 경우 실시간 모니터링 시스템은 MBM (Monitoring Based Maintenance) 방식으로 실시간 상태 평가를 하고 있다. 약 10종류 180개의 센서로부터 신호를 수집하고, 분석한다. 한국의 영종대교는 14종 300여개의 센서를 이용하여 교량의 상태를 실시간으로 관측한다(채명진 외 2006). 이러한 장대 교량은 대부분의 국가에서 주요 시설물로 인식하여 상시 정밀 계측뿐만 아니라, 전문 유지관리 인력을 활용한 육안 점검도 수행하며 체계적으로 관리하고 있다. 그러나 그러한 주요시설물의 범주(한국의 경우 1, 2종 시설)에 들지 않는 대다수의 교량들은 제한적인 점검을 통한 상태 파악에 머물고 있다. 그러나, 재난에 가까운 붕괴가 아니더라도 일반적으로 많은 사회기반 시설물은 환경 또는 하중의 영향으로 인해 점진적 열화를 경험하게 되며, 적절한 유지관리 조치가 수반되지 않는 경우에는 시간이 지날수록 기능을 상실하게 된다(공정식 외 2007). 따라서 시특법상 관리를 제대로 받지 못하고 있는 종의 소규모 교량의 자산관리를 체계적으로 수행하기 위해서는 경제적인 상시 모니터링이 필요하다.

2. 자산관리 성능예측 테스트베드 구축

2.1 소규모 교량 자산관리 테스트베드 선정

본 연구는 비교적 중요도가 낮아 관리가 소홀한 종외(1, 2종 이외) 교량 중 대부분의 형식을 차지하고 있는 콘크리트 교량을 대상으로 하였다. 테스트베드는 서울시와 광명시를 연결하는 교통의 주요 요충지로 길이 245 m, 경간장 40m 왕복 6차선 교량이다. 센서의 위치는 기아자동차에서 생산된 차량을 운반하는 대형 화물차의 통행이 잦아 중차량 하중에 의한 피로 누적에 의한 성능 영향을 평가하기에 적합하도록 광명에서 서울 방향 1차선로 진입 구간에 집중시켰다.



그림 1. 테스트베드(기아대교) 전경

2.2 테스트베드의 구성

본 연구에서는 소규모 콘크리트 교량의 자산관리를 위해 필요한 기본적인 교량 특성을 파악을 위한 최소 계측과 장기 유지관리 활동의 계획 수립에 필요한 구조적, 재료적인 상태에 대해 장기성능예측이 가능하도록 그림 2와 같이 테스트베드를 구성하였다.

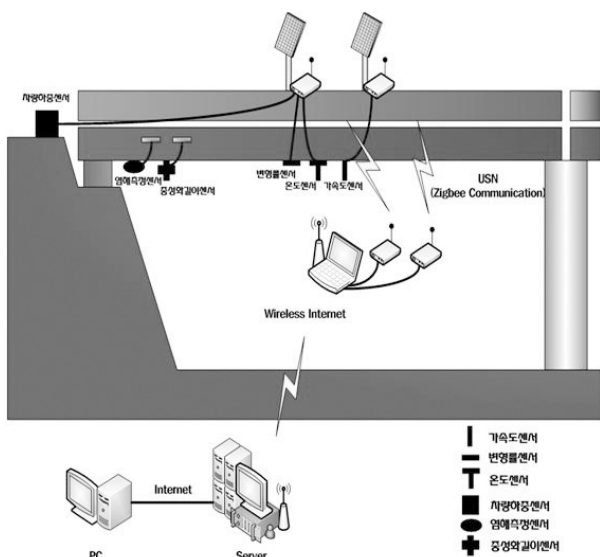


그림 2. 테스트베드 시스템 구성도

이들 교량은 적은 예산으로 효율적인 관리가 필수적으로 요구되므로, 통합 시스템은 최소의 계측 센서와 인력에 의존하지 않고 무선에 의한 자동 데이터 취합 및 전달에 필요한 통신모듈, 각 장치에 전원을 공급하는 솔라셀 및 수집된 데이터를 분석하는 프로그램으로 구성하였다.

2.1.1 장기성능예측을 위한 센서 구성

교량의 상시 진동에 의한 거동 특성 변화를 관찰하여 고유 진동수 및 진폭의 변화를 추적하여 내하력을 측정하는 가속도계를 교량 중앙경간부에 1개소를 설치하였다.

또한 통과 차량의 하중별 분류와 하중별 통과 수를 기록하여 통과 차량에 의한 구조물의 피로도를 파악하고 구조물의 내하력 평가를 위해 WIM(Weigh-in-Motion) 센서와 변형률계를 1개소 설치하였다. 차량이 구조물 통과 시에 변형률계는 축수에 관계없이 한 번의 변형률 변화를 일으키고 WIM 센서는 매 축 통과 시 그 중량에 따른 변화가 일어나므로 변형률계에 의한 차량 수 감지와 WIM 센서에 의한 차량 속도, 축 수, 축당 단위 하중을 계측하였다. 이들 계측의 결과는 소규모 교량의 성능 예측을 위한 하중 마일리지 개념의 적용 가능성을 검증하기 위해 활용되었다. 즉, 중차량에 의해 발생하는 축하중과 교량 상부 슬래브에 발생하는 동적 변형률과의 상관관계를 분석함으로써의 향후 중차량의 통행 속도와 횡수만을 모니터링함으로써 간단히 교량의 누적 피로도를 산출하기 위함이다. 또한, 주요 구조부내의 온도에 대한 영향을 고려하기 위하여 각 부재의 시간에 따른 온도의 변화를 측정하기 위해서 온도센서를 1개소 설치하였다. 시간에 따른 온도의 변화와 다른 센서로부터의 측정치를 비교하여 온도의 변화가 구조물에 미치는 영향을 검토하여 다른 센서의 온도 보정에 사용한다.

마지막으로 겨울철에 뿌려지는 염화칼슘 또는 염분으로 인한 교량의 부식 정도를 파악하고 콘크리트 내부의 중성화 진행 정도를 파악하기 위해서 중성화깊이 측정센서를 설치하였다.

2.2.2 테스트베드 운영 프로그램

소프트웨어는 기아대교 내에 설치된 각종 센서로부터 신호를 수집하여 사용자가 인식할 수 있는 별도의 데이터로 연산 변환하고, 이 데이터를 가공 분석해서 그래프 및 표를 출력하도록 하였다. 구축된 시스템은 데이터 수집과 관리, 분석을 위해서 사용자가 현장 및 센서의 정보를 입력 수정할 수 있도록 하였다.

교량 관리 프로그램에서는 교량의 거동 등을 상세하게 분석하기 위해 센서의 실시간 데이터 전체를 파일로 만들어 내게 된다. 실시간 데이터 파일은 초당 20~100Hz의 샘플링 주기로 작성되기 때문에 24시간 365일의 전체 실시간 데이터를 시스템에서

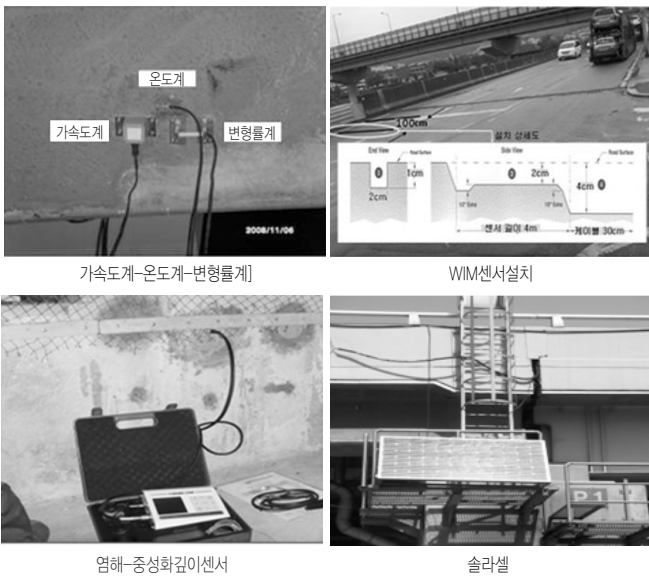


그림 3. 테스트베드 하드웨어설치

저장하지는 않도록 설계 되었다. 또한, 특정 시간대의 실시간 데이터를 파일로 저장하는 방법, 전체 데이터를 저장하고 과거의 데이터부터 삭제하는 방법, 특정 센서의 값이 관리 기준치를 초과한 경우에 해당 시간의 데이터를 실시간 데이터 파일로 저장하는 방법 등을 교량에 맞게 선택적으로 사용할 수 있게 개발하였다.

파일 분석 프로그램은 로그인 화면을 통해 바로 실행할 수도 있으며, 조회 클라이언트에 링크 기능을 이용하여 실행시킬 수도 있다. 실시간 Raw Data 파일은 DAQ 서버 상에 저장되며 네

트워크 연결이나 외부 연결장치를 이용하여 직접 파일을 가져와서 분석 할 수 있다. 프로그램에서 Raw Data를 읽은 상태에서, 읽은 데이터를 이용하여 FFT 분석을 수행할 수 있게 개발하였다. 주로 가속도계를 대상으로 하여 고유 주파수를 추출하는데 사용한다.

2.2.3 성능계측 데이터 취합 및 전달

현장에 설치된 센서들을 각각의 USN 기반의 ZigBee 데이터 로거 모듈에 연결하여 무선으로 데이터를 보내면 현장 데이터 수집용 PC에 연결된 ZigBee 수신 모듈이 데이터를 받고 이를 PC에 저장한다. PC에 저장된 데이터에서 1차 가공된 데이터를 정기적으로 무선 인터넷을 통해 서버로 전송하여 데이터를 저장한다. 서버에 연결된 인터넷망을 통해 관리용 PC에 설치된 관리 및 모니터링 프로그램으로 데이터 확인과 분석 작업을 수행한다.

교량 현장에 설치된 계측 센서는 Anylogger ZigBee 데이터 무선 송신 장치에 연결이 되어 있고 데이터 송신 장치는 센서로부터 취득한 최초 신호를 ZigBee 무선 통신을 이용하여 Anylogger 데이터 취합 장비로 송신한다. 데이터 취합 장비에는 다수의 노드가 연결 할 수 있으므로 여러 개의 센서로부터 송신된 신호를 동시에 취합 할 수 있다. 이 신호는 시리얼 통신을 통해서 PC나 기타 장비로 다시 전송 할 수 있는데, 본 현장에서는 현장에 PC를 설치하여 Anylogger 데이터 취합 장비로부터 데이터를 송신 받아 재처리 하는 역할을 담당하게 하였다. 실제 현장 PC에서는 2대의 Anylogger 데이터 취합 장비로부터 총 5개의 센서로부터 데이터를 전송 받아 전체 데이터와 1분간 통계 데이터를 파일로 저장한다. 이 데이터 파일은 사용자 접근이 용

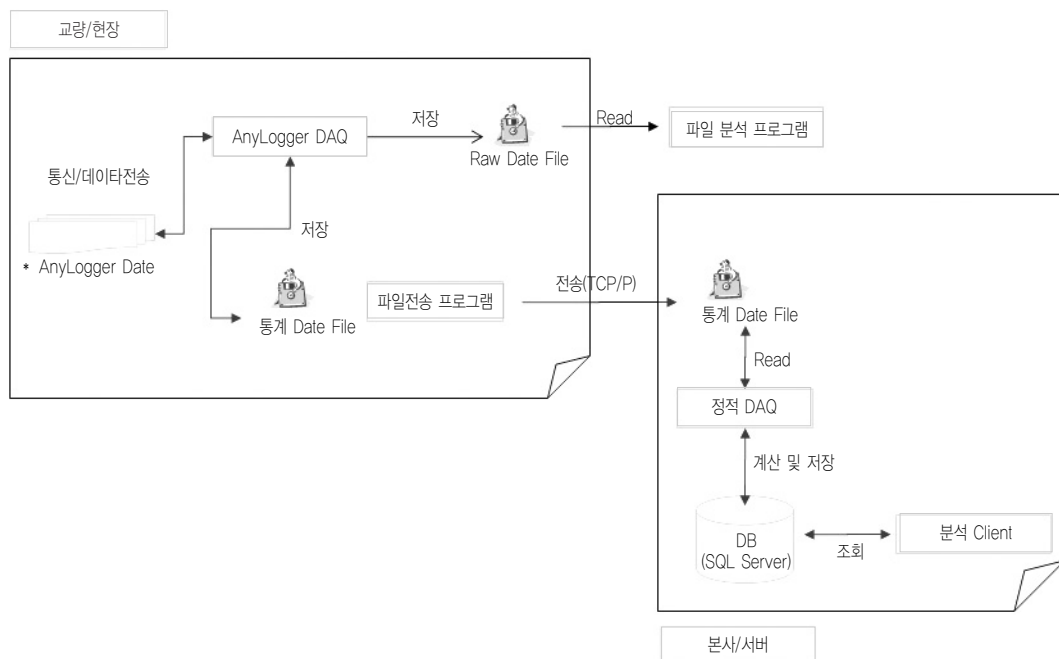


그림 4. 테스트베드 소프트웨어 구성도

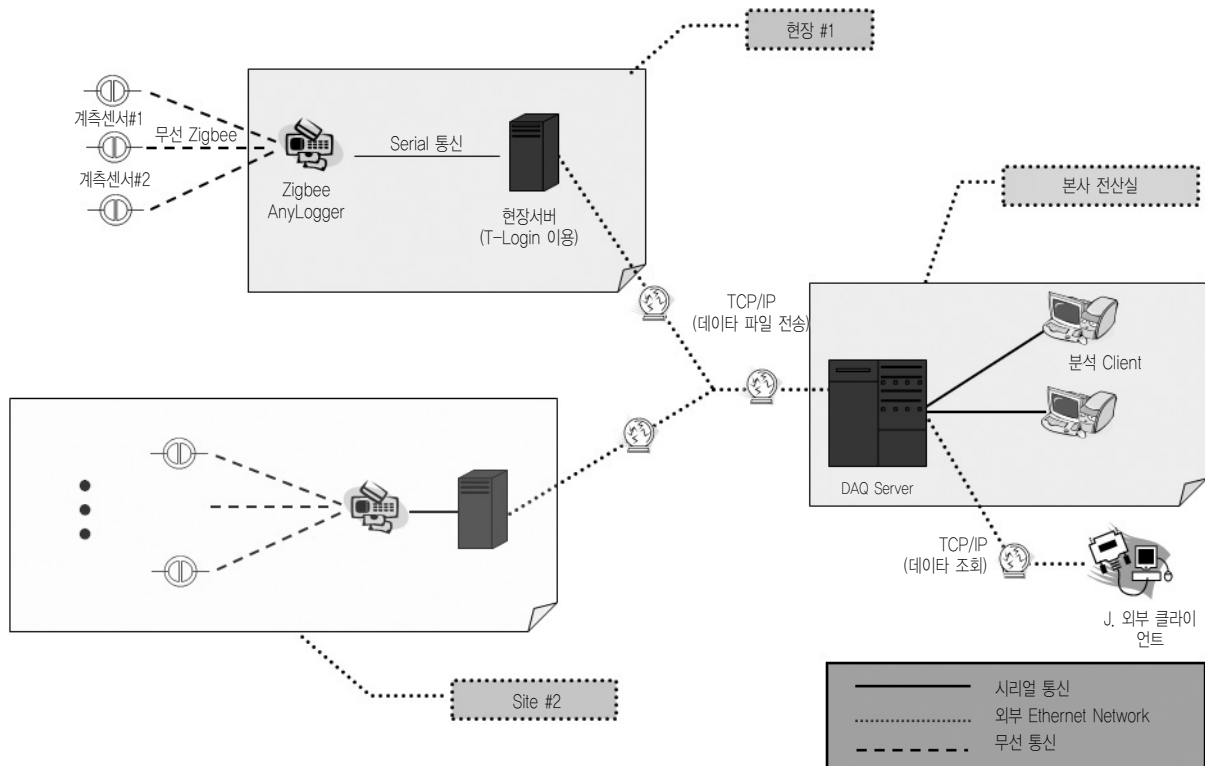


그림 5. 통신 하드웨어 구성도

이한 외부의 서버로 전송을 하는데, 그 방법은 현장 PC상에 T-Login(3G-HSDPA 방식 SK Telecom 모뎀)을 설치하고 원격지 서버는 공인 인터넷 망상에 위치시켜 TCP/IP 인터넷 통신을 이용하여 파일을 전송하도록 하였다. 원활 한 데이터 전송을 위해서 현장 PC는 데이터 취합과 전송 전용으로 구성하며 PC가 재기동 할 경우 항상 해당 프로그램들이 실행상태가 될 수 있도록 한다. 이렇게 전송한 데이터 파일은 향후 분석이나 데이터베이스에 저장하는 용도로 사용한다. 서버의 데이터베이스에 저장된 데이터들은 서버에 TCP/IP 접속이 가능한 내부나 외부의 PC에서 접속하여 조회 분석 작업을 수행할 수 있다. 그림 5는 테스트베드의 통신 하드웨어 구성도를 보여주고 있다.

동수를 FFT 분석을 통해 확인하고 현재까지 주기적으로 측정된 데이터로 분석한 결과 교량의 고유진동수는 설치 당시 7.031 Hz가 측정(그림6 참조)되었으나 현재는 6.543 Hz(그림 7참조) 부근으로 측정되었다. 초기 계측치 대비 약 6.47%의 변화로 유의미를 갖는 값이지만, 2차 계측 당시 테스트베드 교량의 확장 공사가 진행되고 있는 상태로 양쪽 교대부근의 질량과 강성의 변동으로 인해 발생한 것으로 판단된다. 구조물의 실제 손상 여부나 확장 공사로 인한 구조물의 동적 특성 변화를 수치해석을 통하여 분석하고 이를 상호 비교 분석함으로써 확인 가능하지만, 본 논문에서는 성능 예측을 위한 절차 및 방법론의 제시와 검증에 의미를 두고 있어 추가적인 수치해석적 연구는 수행하지 않았다.

3. 테스트베드 시험운영

3.1 소규모 교량 자산의 특성 파악을 통한 건전성 평가

본 테스트 베드의 운영에 앞서 대상 교량의 성능을 파악하고, 향후 지속적인 내하력 관리를 위해서는 먼저 동적인 특성의 계측 및 분석이 반드시 선행되어야 한다. 이는 현재까지 진행된 대상 교량에 대한 노후도의 진행 정도와 구조물의 손상 정도를 간접적으로 확인하고자하는 목적도 함께 가지고 있다.

2008년 11월 설치 초기에 가속도계의 측정된 값으로 고유진

3.2 하중 마일리지를 이용한 성능 평가

본 연구에서는 소규모 교량에 작용하는 중차량에 의한 과도한 반복하중에 의한 피로 누적으로 자산의 장기성능 저하를 예측하기 위해 하중 마일리지 개념을 도입하였다. 하중 마일리지란 중차량 하중과 이에 따라 발생하는 변형률의 상관관계를 도출하여, 일정 중량 이상의 차량 하중 반복회수로 콘크리트 교량의 누적 피로도를 계산하고, 누적 피로도에 따라 적절한 유지관리 활동을 계획하는 장기성능 평가 및 관리 방법이다.

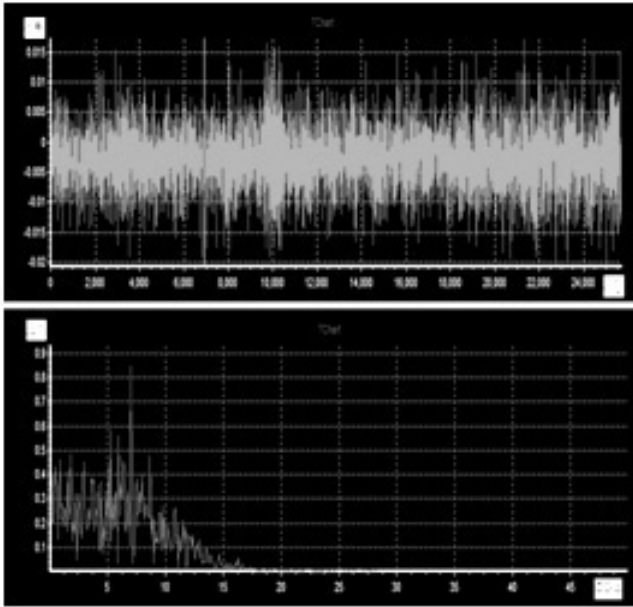


그림 6. 2008년11월 설치 직후의 고유진동수

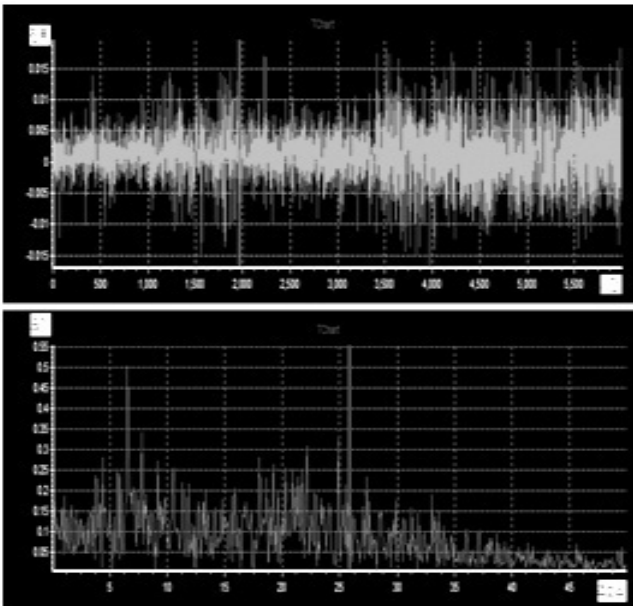


그림 7. 2011년02월 기아대교의 고유진동수

3.2.1 중차량 통행 속도 및 축하중 관계

하중 마일리지 적용을 위해서는 반드시 교량에 발생하는 차량 하중의 측정이 필요하며, 본 연구에서는 일반적인 WIM 시스템을 구성하는 데는 많은 비용이 소요되는 문제를 극복하기 위해 WIM 센서와 변형률계로 감지부를 구성하고, 소형 무선 데이터 로거와 소형 PC로 데이터 저장 처리 장치를 이용하여 소규모 교량에 저경비로 구현할 수 있도록 하였다. 이는 본 논문에서 제안하고 있는 성능 예측 방법론이 현재 유지관리가 거의 이루어지지 않고 있는 소규모 교량을 대상으로 하고 있기 때문에 성능 모

니터링을 위해 고비용을 투자할 수 없음을 감안하면, 최소한의 모니터링으로 거시적인 장기 성능 예측이 가능한 시스템 구축이 요구되기 때문이다.

본 논문에서 활용한 중차량의 통행으로 인해 발생하는 축하중과 변형률의 관계 정식화 절차는 그림 8과 같다.

1단계	차량의 축하중 : W(표 1)
	WIM 센서간 거리 : L
2단계	WIM 센서 값 측정 : P
	WIM 센서 통과시간 측정 : t
3단계	차량속도 산정 : $v=L/t$
	P와 v와의 관계식 도출 : $P=av+b$
4단계	P의 재분배 : $P^o = P-m$
	단위 축하중 : $W/P^o=cv+d$
5단계	축하중 산정 : $W=P^o(cv+d)$
	오차 보정 : $\epsilon^2=(WIM-W)^2=e^2+fv+g$
6단계	축하중 보정 : $W=P^o(cv+d)\pm\epsilon^2$

그림 8. 통행속도 및 축하중 산정단계

1, 2 단계에서 WIM 센서가 설치된 폭만큼의 거리를 통과시 WIM1과 WIM2 사이에는 통과 시간차가 발생하고 그로부터 속도를 알 수 있다. 또한 축하중은 WIM 센서에서 추출한 P1 과 P2의 신호크기로 표출되므로 속도별로 반복시험을 통해 속도와 축하중에 관련된 계산식을 도출할 수 있다.(그림 9) 여기서 WIM 센서별로 출력의 크기가 틀리므로 개별 수식이 나와야 된다.

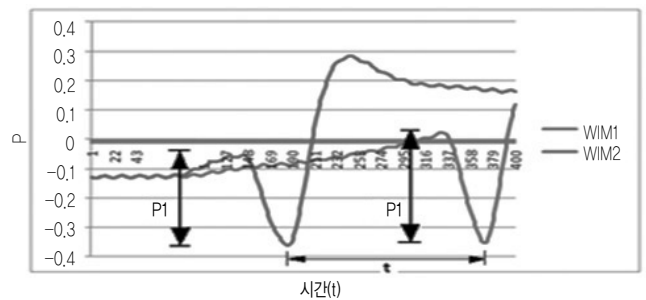


그림 9. 축하중 값의 변화 그래프

표 1. 테스트차량의 축하중 값

구 분	축1(W1)	축2(W2)	축3(W3)	축4(W4)	계
축하중(톤)	11.27	9.35	10.01	10.59	41.22

다음은 3단계 과정으로 WIM 센서 설치 후 40톤 트럭으로 축별 하중을 측정한 다음 속도별 (10km/h - 60 km/h)로 WIM 센서의 값을 읽고 이를 속도에 대한 축하중식으로 계산한 결과 제1축에 대하여 WIM 센서1의 경우 먼저 속도별 P1 값으로 그림 10 과 같이 속도(가로축)와 P(세로축)의 연관식을 도출한다. 여기서 는 속도를 10 km/h 부터 60 km/h 까지 것으로 한정하여 수식에 적용하였다. 그 이상의 속도에 대해서는 데이터 확보가 안 되어 있으므로 포함 시키는 것은 무리가 있다.

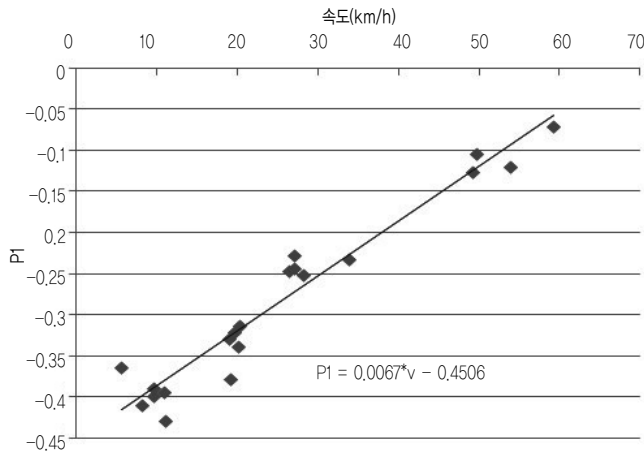


그림 10. 차량속도-WIM1 상관관계

$$P1 = 0.0067 v - 0.4506 \quad (\text{식 1})$$

다음 위의 식 1에서 나온 속도별 P 값을 연산해 낸다. 4단계 과정으로 식 1로 구한 축하중 P1 값이 음에서 양으로 전환되는 값이 속도에 따라 존재하므로 적절한 값을 추가하여 검토 속도 구간에서 부호가 바뀌지 않도록 해준다. 즉, 식 1에서 속도가 60km/h 이상에서는 부호가 바뀌므로 축하중을 재분배하기 위하여 -10을 더하여 $(P1)_0 = P1 - 10$ 으로 분배하였다.

또한 단위 축하중으로 변환하기 위하여 식 1에서 구한 값을 제1축의 축하중으로 나누어서 역으로 취한 현재 속도에서 WIM 센서의 단위 측정 $W/(P1)_0$ 과 차량속도와의 관계 그래프 그림 11에서 관계식 2를 도출한다.

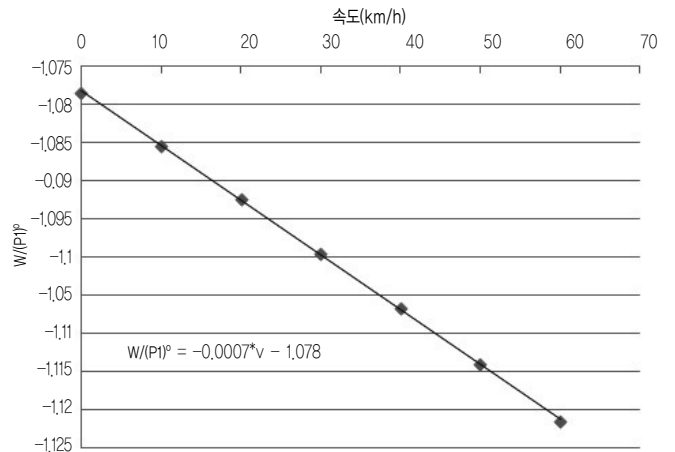


그림 11. 차량 단위축하중과 속도와 상관관계

$$W/(P1)^0 = -0.0007 v - 1.078 \quad (\text{식 2})$$

축하중 산정의 5단계로 식 2를 변화하면 식 3과 같이 된다. 이 때 얻어진 축하중값은 식 1에서 구한 P값을 이용하므로 실제 설치한 WIM 센서의 값으로 구한 축하중과 약간의 오차가 발생한다. 이 오차를 속도별로 나타내면 그림 12와 같이 되며, 이때의 관계식은 식 4와 같다.

$$W = (-0.0007 v - 1.078)(P1)^0 \quad (\text{식 3})$$

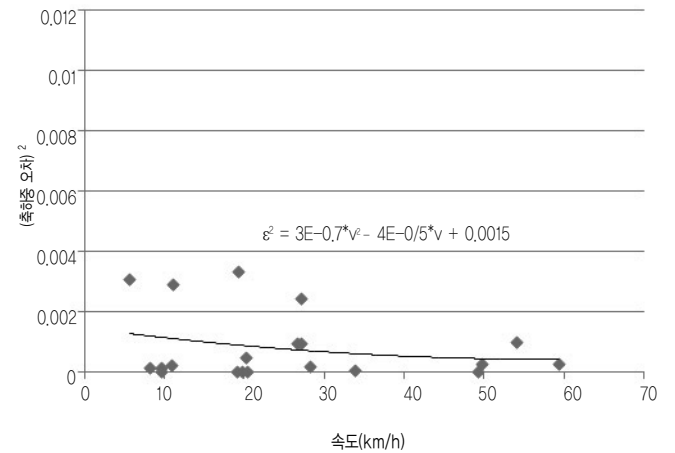


그림 12. 차량 축하중의 오차와 속도와의 관계

$$\epsilon^2 = 3 \times 10^{-7} v^2 - 4 \times 10^{-5} v + 0.0015 \quad (\text{식 4})$$

축하중 산정의 마지막 6단계로 보정 축하중은 식 3에 축하중의 오차 식 4를 더하여 보정하도록 하면, 보정식은 식 5와 같이 된다.

WIM 1 :

$$W1 = P1(-0.0007v - 1.078) - 0.007v - 10.78 \pm \sqrt{\epsilon} \quad (\text{식 5})$$

여기서,

v : 현재속도

P1 : 현재 측정 WIM1 센서 값

ε : 측하중의 오차

동일한 방법으로 WIM 2에 대한 제1축의 측하중 식을 구하면 다음과 같다.

WIM 2:

$$W2 = P2(-0.000625v - 1.084) - 0.00625v - 10.84 \pm \sqrt{\epsilon} \quad (\text{식 6})$$

v : 현재속도

P2 : 현재 측정 WIM2 센서 값

ε : 측하중의 오차

이와 같이 식 5와 식 6에서 구한 측하중 값은 11.233~11.294ton의 범위로 속도별 평균값은 11.257ton이며, 표준편차는 0.0182로 테스트 차량의 1축 측하중 11.27ton에 근접하는 측하중을 산정할 수 있는 간편식이라고 판단된다.

제2축, 제3축, 제4축도 동일한 방법으로 식을 도출할 수 있으나 제1축의 경우가 어떠한 유형의 차량에도 해당되기 때문에 제1축에 대한 것만 언급하였다.

이와 같은 중차량에 대한 측하중 산정방법은 기아대교에 대한 특정대상 구조물에 국한한 것이므로 테스트 베드로서 타교량을 선택하여 소규모 교량에서 범용적으로 적용할 수 있도록 지속적인 연구계획을 진행하고 있다.

3.2.2 중차량 통행 속도에 따른 누적 피로도

축이 여러 개인 차량도 교량의 시간 내에 있으면 개별 측하중에 의한 영향을 주는 것이 아닌 전체 하중으로 시간에 영향을 주므로 변형률계도 이에 따른 결과를 그림13, 그림14에서 보여 준다.

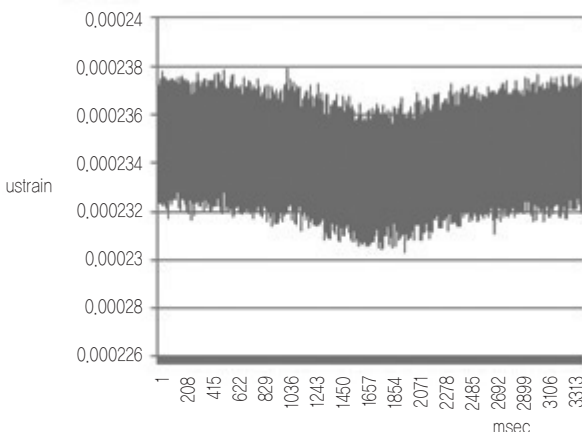


그림 13. 속도10km/h의 변형률값

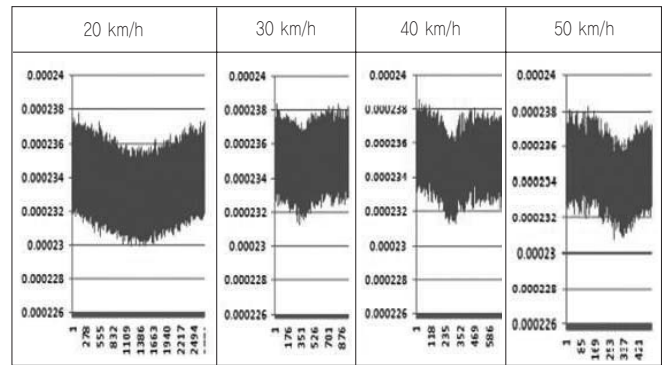


그림 14. 속도20~50km/h의 변형률값

속도별로 반복 측정한 결과 속도와 상관없이 파형의 시간 폭만 변할 뿐 변형률계의 값 변화는 2 μstrain 정도로 일정했다. 그러므로 시간에 미치는 응력 영향은 차량 자체 총하중에 전적으로 의존함을 알 수 있다.

따라서 차량의 하중은 변형률계의 변화값으로도 각 중량별 반복 측정 데이터만 있으면 파악이 가능하며, 여러 대의 차량하중도 알 수 있으며 교량에 영향을 미치는 일정 중량 이상의 횡수도 파악 가능하고 교량의 누적 피로도도 판단 가능할 것이다. 이번 연구에서는 40톤 트럭으로만 측정하여 중량별 변형률 영향에 대한 데이터를 확보하지 못해 관련식과 기준 설정 등을 할 수 없었으나 지속적으로 측정된 변형률 데이터 변화값을 보았을 때 대부분 1 μstrain 이하로 측정되고 있어 피로도의 누적 측면에서 양호한 상태임을 어느 정도 판단할 수 있다.

그림15는 2011년 02월 기아대교가 3차선에서 6차선 확장후 측정한 변형률계 값으로, 차량 통과시 0.5 μstrain 이하로 움직이는 모습을 보여주고 있다. 설치 당시 기준이 235 μstrain 부근이었으나 교량 확장공사 후 기준이 268 μstrain 부근으로 이동되었다.

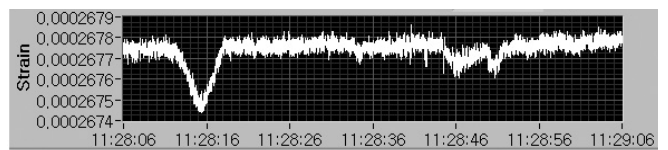


그림 15. 변형률계 1분 데이터값(2011년 02월)

2008년 11월부터 현재까지 주기적으로 점검한 결과 2 μstrain 이상의 변형률이 나타난 것은 없었으며 1 μstrain 이하로 대부분이 나타나고 있어 피로도 누적 측면에서는 상당히 양호한 상태로 평가할 수 있다.

3.3 소규모 교량의 재료적 장기성능 평가

소규모 교량의 자산관리 수행에 필요한 장기성능에 영향을 미치는 요소는 구조적인 건전성뿐만 아니라 구조물이 위치한 환경적 요인과 시간에 따른 재료적 노후도의 평가도 매우 중요하다. 본 테스트베드에서는 염해에 의한 성능 평가를 통해 콘크리트 재료의 대표적인 노후도 인자를 추출하고자 하였다. 염화물의 침투 깊이를 장기간 성능 모니터링을 통해 중성화 깊이와 철근 부식도를 예측하고자 하였다. 평가방법은 각 센서에서 취득되는 전압과 전류가 전압은 -350 mV 이하, 전류는 15 uA 이상일 경우 그 위치까지 염화물이 침투되었다고 평가할 수 있다. (문헌영 외 1999).

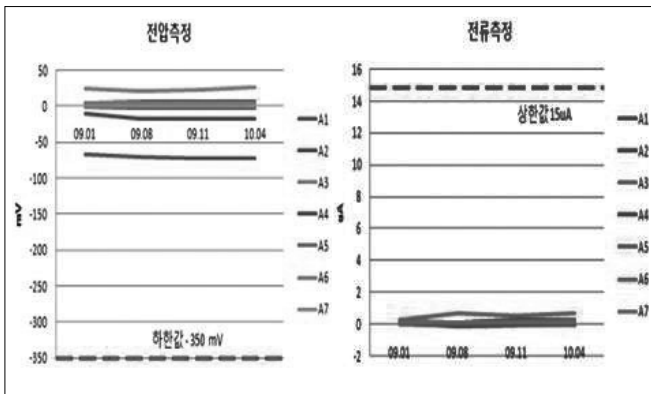


그림 16. 기아대교의 구조물 건전성평가 측정값

그림 16에서 전압측정의 경우 표면에서 10mm위치의 A1 센서 값이 초기 -68 mV 에서 최종 -73 mV 로 측정되었으며 염해 진행속도가 아주 완만하며 현재 상태는 아주 양호한 상태로 평가된다.

또한, 전류측정결과 최대 0.7 uA 이하에서 움직이고 있으며 증가세가 보이지 않고 있어 상한 값 15 uA 대비 아주 양호한 상태로 평가된다.

4. 결론 및 향후 개선사항

본 연구에서는 소규모 교량의 자산관리를 수행함에 있어 반드시 요구되는 구조물의 성능 모니터링과 예측을 위한 방안을 모색한 테스트베드를 구축하였다. 먼저, 테스트베드는 구조물의 성능 예측에 필요한 주요 파라미터를 각각 구조적, 재료적인 관점으로 구분하였다. 구조적으로는 가속도 등 동특성 분석에 필요한 계측 요소를 활용하여 구조적 완결성을 파악할 수 있도록 구성하였다. 그리고 별도의 해석적인 절차 없이 하중 마일리지 개념을 도입하여 주행차량으로 인해 발생하는 반복하중을 관측

함으로써 재료적인 피로도를 파악하여 성능을 예측할 수 있도록 하였다. 이와 병행하여 재료적으로 시간에 따라 필연적으로 발생할 수밖에 없는 콘크리트의 노후도를 평가하기 위해 염해에 의한 콘크리트 중성화 정도를 계측할 수 있도록 하였다.

본 연구를 통하여 얻어진 결론으로는 교량의 상시 진동에 의한 동적 거동 특성 변화를 관찰하기 위해 설치한 가속도계로 고유 진동수 및 진폭의 변화를 추적하는 것은 측정된 데이터와 탑재된 분석 프로그램을 활용하면 장기적으로 교량의 내하력 변화 사항을 판단할 수 있는 것으로 사료된다.

본 연구에서는 통과 차량의 하중별 분류와 하중별 통과 수를 기록하여 통과 차량에 의한 구조물의 피로도를 파악하고 구조물의 내하력 평가를 위해 WIM 센서와 변형률계를 이용하기 위해 설치하였다. WIM 센서에 축 통과 시간으로 속도를 측정할 수 있고 센서 값으로 축하중을 연산하는 식을 도출하였다. 따라서 일정 축하중 이상의 차량 통과를 알 수 있는 방법을 마련하였다. 이와 같이 소규모 교량에 설치한 변형률계는 차량속도 60 km/h 이하에 대해서 차량속도보다 교량 통과 차량의 총하중에 의한 값이 지배적으로 표출됨을 알 수 있었다. 변형률계의 값에 따라 일정 하중이상의 차량이 통과시 교량에 피로 누적 영향을 끼치므로 교량별로 해당 관리값을 설정하여 그러한 차량 수 감지를 하게 되면 해당 교량의 누적 피로도를 파악할 수 있음을 알게 되었다.

향후 해결 과제를 살펴보면 속도에 따른 WIM 센서 값의 파악과 축하중의 연산식에 $10 \sim 60\text{ km/h}$ 까지의 데이터만을 활용하여 그 이상의 속도에 따른 관계식을 유도하기에 무리가 있었는데 향후 이 이상의 고속에서의 데이터를 확보하고 관련 데이터를 축적한다면 중소교량 관리에 있어 활용상 더욱 정확한 데이터로 관리를 할 수 있을 것이다. 하중과 변형률 간의 관계에서 40톤 트럭만으로 값을 얻다 보니 하중과 변형률간의 상관관계를 얻을 수 없었는데 하중과 변형률간의 상관관계를 파악하면 교량별로 관리치 설정과 누적 피로 파악을 더욱 정확하게 파악할 수 있을 것이다.

염해 측정 및 중성화 측정 데이터는 변화가 없는 안정적인 상태로 나타나고 있다. 첫 번째 센서의 위치인 10mm 깊이의 변화가 가장 크지만 그 변화도 아주 적은 값으로 상당히 안정된 결과로 나타났다.

전반적으로 교량 관리를 위한 접근 방식은 좋았으나 앞서 제시한 보완 확보해야할 데이터 및 관리가 이루어진다면 중소형 교량을 저 비용으로 효율적으로 관리가 가능한 시스템 구성이 될 수 있음을 파악하였다. 기술적인 부분에 있어서도 ZigBee 기술의 한계로 어느 정도 오차가 큰 값을 얻을 수밖에 없는 상황으로 향후 좀 더 발전된 기술의 도입이 필요할 것으로 사료된다.

데이터를 취득한 결과를 비교하기 위하여 구조물의 설계도서 및 초기 구조물의 내하력 평가 자료가 필요하나 도서 및 구조 해석 자료를 입수하지 못하여 분석에 어려움이 있었다.

가능하면 이러한 자료를 초기에 분석하면 더욱 효율적인 관리가 가능하고 더 발전된 시스템을 구축하여 제대로 된 데이터들을 축적, 분석을 통해 구조물의 개수 및 보수등의 관리가 과학적이고 체계적으로 이루어지리라 판단된다. 더불어 소형 구조물에 맞는 센서들을 선정 개발하는 작업도 필요하다. 소형 구조물은 거동이 작아서 더욱 민감한 센서가 필요하고 더욱 효율적인 시스템이 필요하다. 현재는 기성품들을 조합하여 구성하였지만 소형 구조물 특성에 맞는 더 효율적인 시스템을 개발 하는 것이 앞으로의 과제일 것이다.

마지막으로, 이 연구의 결과는 향후 연구 계획으로는 1중, 2중 시설물에 포함되지 않은 중외 시설물의 관리지침을 수립하는데 사용되는 것을 계획 해 볼 수 있다. 중외 시설물의 경우 현재 명확한 관리 지침이 없이 운영되고 있으며 본 연구결과를 활용하여 중외시설물 관리 체계 개발에 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

문한영 · 김성수 · 김홍삼 (1999). “콘크리트중의 철근부식억제를 위한 외부전원법의 효과”. 콘크리트학회지 논문집, pp. 221~230

신은영 · 박재우 · 이교선 (2010), “국가 주요시설물 중요도 기준 연구” 한국시설안전공단, pp. 12~18

채명진 · 유현석 · 박재우 · 조문영 (2006), “무선 네트워크를 이용한 실시간 교량 상태 계측”, 한국건설관리학회 학술발표회, pp. 581~585

공정식 · 박경훈 · 임종권 (2007), “유지관리 기술동향 및 발전 방향에 관하여” 한국건설관리학회 논문집. pp. 21~31

이우식 · 남상관 (2006), “유비쿼터스 환경의 시설물 모니터링 시스템 구현을 위한 모듈 설계” 한국건설관리학회, 2006년도 정기학술발표대회 논문집, pp. 606~609.

소방방재청(2008), “2008년도 주요 통계 및 자료”

Sumitro, S., Matsui, Y., Kono, M., Okamoto, T., and Fuji, K. (2001), "Long Span Bridge Health Monitoring System in Japan," Health Monitoring and Management of Civil Infrastructure Systems, Proceedings of SPIE, vol 4337, pp. 517-524.

논문제출일: 2012.06.27
논문심사일: 2012.06.29
심사완료일: 2012.09.04

요 약

'시설물안전관리에관한특별법'에 정의되어 있지 않고 1, 2종 교량에 포함되지 않는 기존의 소규모 교량은 유지관리 관련 제도적 근거가 미비하여 중차량 하중에 의한 구조적 손상이나, 재료적 노후도 관리가 적절히 이루어지지 않고 있다. 그러나 이들 교량의 상당수가 인구 밀집지역에 위치하고 있으며 그 수량이 1, 2 종 시설에 비하여 많은 수를 차지하고 있으며 또한 도심지에 위치하고 있어 사고 발생시 사회적, 경제적 손실은 매우 크다.

이 논문에서는 이들 소규모 교량도 국가 자산의 중요한 일부로 인식하여 시기적절한 유지관리 활동이 가능하도록 장기성능예측에 필요한 핵심 파라미터 분석을 위한 테스트베드를 구축하였다. 테스트베드는 소규모 교량 형식의 대부분을 차지하고 있는 콘크리트 교량을 대상으로 하였으며, 장기 성능에 영향을 미치는 요소로 중차량에 의한 과도한 반복하중에 의한 피로 누적을 하중 마일리지 개념을 도입하여 성능 저하를 예측하고, 염해에 의한 재료적 노후도를 평가할 수 있도록 마련하였다. 테스트베드를 통한 최종 결과물을 도출하기 위해서는 필연적으로 장기적인 성능 관측이 요구되므로, 본 연구는 소규모 교량의 자산관리에 필요한 장기성능예측 파라미터를 추출하기 위한 제반 연구의 기반 구축에 의의가 있다.

키워드 : 자산관리, 소규모 교량, 장기성능예측, 무선통신기술
