

PDA와 광섬유 센서를 이용한 교량의 무선계측 시스템 개발

Development of Wireless Measurement System for Bridge Using PDA and Fiber Optical Sensor

곽 계 환* 황 해 성** 장 화 섭*** 김 우 종*** 김 회 옥***

Kwak, Kae-Hwan Hwang, Hae-Sung Jang, Hwa-Sup Kim, Woo-Jong Kim, Hoi-OK

Abstract

This study proposes a wireless measurement system that is a new safety management system by using an FBG sensor and a PDA. The sensor part has many advantages of implementing a wireless measurement system, and the study employs an FBG-LVDT sensor, FBG-STRAIN sensor, FBG-TEMP sensor, and FBG-ACC sensor, using FBG sensors. Also, the study shows a configuration of a signal process system for operating a wireless transmission system of FBG sensors applied to the signal process system, and engrafted the cutting edge information technology industry in order to display from a remote distance using a PDA. In order to verify the applicability of the developed FBG sensors and wireless measurement monitoring system to the field, their accuracy, and usability, the study has conducted a static and dynamic test to a bridge in the field. The study made an assessment of service for the vibration of the bridge by applying dynamic data measured by an FBG-LVDT sensor and FBG-ACC sensor to Meister's curve and prepared methods for assessing the vibration of the bridge by proposing a standard of vibration limitation given the service of vibration of the bridge. As a follow up for this study, it would be necessary to set up an overall model for the standard of service assessment established in this study.

요 지

본 연구에서는 FBG 센서 및 PDA를 이용하여 새로운 안전관리 시스템인 무선 계측 시스템을 개발하기 위해 FBG 센서를 이용하여 광섬유 변위(FBG-LVDT) 센서, 광섬유 변형률(FBG-STRAIN) 센서, 광섬유 온도(FBG-TEMP) 센서 그리고 광섬유 가속도(FBG-ACC) 센서를 특별 제작하였다. 또한, 신호처리 시스템에는 적용된 FBG 센서들의 무선송신 시스템이 가능하도록 신호처리 시스템을 구성하였으며, PDA를 이용하여 원격 거리에서도 display가 가능할 수 있도록 프로그램을 개발하였다. 개발된 FBG 센서들과 무선계측 모니터링 시스템의 현장 적용성, 정확성 및 활용 가능성을 검증하고자 현장 교량에서 정적, 동적 재하시험을 실시하였다. 또한, FBG-LVDT 센서, FBG-ACC 센서에 의하여 측정된 동적 데이터들은 Meister의 진동등감각 곡선에 적용시킴으로서 교량의 진동에 대한 사용성 평가를 실시하였고 교량의 진동 사용성을 고려하여 진동 제한 기준을 제시하여 대상 교량의 진동 평가를 위한 방법을 마련하였다.

Keywords : Bridge, Fiber optical sensor, Wireless measurement system, PDA

핵심 용어 : 교량, 광섬유 센서, 무선계측 시스템, PDA

* 정희원, 원광대학교 토목환경·도시공학부 교수

** 원광대학교 토목환경공학과, 공학박사

*** 원광대학교 토목환경공학과, 박사과정

E-mail : kkh6720@wonkwang.ac.kr 011-680-8724

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

1. 서 론

국내의 교량 구조물의 경우, 구조물의 유지관리를 위하여 정기적으로 혹은 관리자의 판단에 의해 안전 진단 등의 점검을 수행한 후에야 진단 결과에 의해 보수 및 보강 대책을 수립, 시행하고 있는 실정이다. 그러나, 이러한 시스템의 경우 일회성에 그치므로 교량 구조물을 상시 모니터링 할 수 없고, 장기적으로 볼 때 매우 많은 인력과 장비에 따른 비용이 소모되어 비경제적이라고 지적되고 있다(조선정, 2004). 이러한 기존의 진단 시스템에서 구조물의 안전성을 효과적으로 판단하고, 적절한 유지 보수를 선택하기 위한 실시간 모니터링(Health monitoring) 시스템이 최근 구조물의 안전진단 경향이다.

구조물의 변형을 측정하는 센서부에는 다양한 센서 기술들이 사용되고 있는데 특히 스마트(Smart) 센서로서 각광받고 있는 광섬유 센서(Fiber optical sensor)를 적용하려는 연구들이 최근 수행되고 있다. 광섬유 센서는 우수한 민감도와 분해 능력을 가지고 있으며, 그 크기가 작고 유연해서 측정하고자 하는 대상물, 특히 구조물에 쉽게 부착하거나 삽입이 가능한 장점을 보유하고 있어 지능형 구조물 측정에 적합한 센서로서 주목받게 되었다. 다양한 광섬유 센서 중 다중 센싱 능력이 뛰어난 광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg Grating; 이하 FBG) 센서의 연구가 주도적으로 이루어지고 있다. FBG 센서는 구조물의 변형률과 온도 등을 격자의 반사파장 변이를 측정함으로써 간단히 측정할 수 있다. 또한 파장 분할 다중화 기법을 사용함으로써 동시 다점 측정 기술(Multiplexing)을 쉽게 구현할 수 있는 장점이 있다. 이러한 FBG 센서는 변형에 매우 민감한 반면, 출력 신호가 빛의 파장에만 관계하므로 광세기의 변화에 무관하게 측정이 가능하며, 전자기파나 위험에 노출된 시설물에 매우 용이하게 사용할 수 있다.

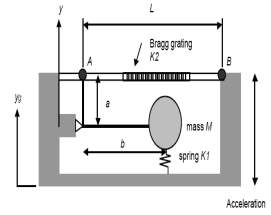
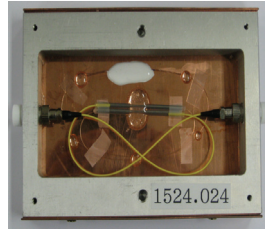
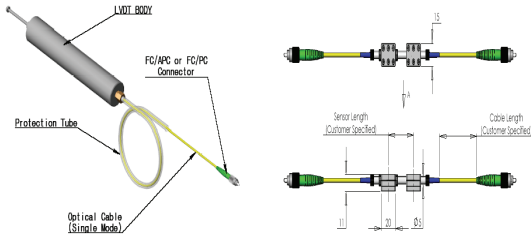
이에 본 연구에서는 FBG 센서 및 PDA(Personal Digital Assistant)를 이용하여 새로운 안전관리 시스템인 무선 계측 시스템을 구축하여 그 성능을 검증하였다. 무선계측 시스템을 구축하기 위하여 센서부에서는 많은 장점을 가지고 있는 FBG 센서를 이용하여

광섬유 변위(FBG-LVDT) 센서, 광섬유 변형률(FBG-STRAIN) 센서, 광섬유 온도(FBG-TEMP) 센서 그리고 광섬유 가속도(FBG-ACC) 센서를 특별 제작하였으며, 그 형상 및 특성은 실 교량 구조물에 적용이 가능하도록 구성 하였다. 또한, 신호처리 시스템에서는 적용된 FBG 센서들의 무선송신 시스템이 가능하도록 신호처리 시스템을 구성하였으며, PDA를 이용하여 원격 거리에서도 display가 가능할 수 있도록 첨단 IT 산업을 접목하였다. 개발된 FBG 센서들과 무선계측 모니터링 시스템의 현장 적용성, 정확성 및 활용 가능성을 평가하기 위하여 현장 교량에 적용하여 실험을 수행한 후 그 결과 값을 분석하였다. 또한, 광섬유 변위, 가속도 센서에서 수집된 동적 데이터를 활용하여 진동과 처짐에 대한 사용성 평가 기준을 정립하였다.

2. FBG 센서의 종류 및 동작 이론

광섬유는 1966년 Kao와 Hockham에 의해 처음 제안되어 1970년 미국 코닝 사에 의해 개발되었다. 광섬유의 가장 큰 특징은 중앙의 코어(Core)부분과 주변의 클래딩(Cladding) 부분의 굴절률의 차이로 인해, 한쪽 코어로 입사 된 빛이 광섬유가 구부러져 있어도 내부에서 전반사를 반복하면서 큰 손실 없이 반대쪽 끝까지 전달된다는 점이다. 적은 손실로 먼 거리까지 신호를 전달할 수 있다는 점에 착안해서 광 통신을 탄생하게 한 모태가 되었다. 같은 특징을 기존의 렌즈와 거울로 구성됐던 광학계에 적용하여 정확한 초점거리와 기기간의 정렬이 필요했던 기존의 광학계를 대체한 광섬유 광학계가 나오게 되었다. 광섬유 센서는 크게 광 강도형 센서와 간섭형 센서, 산란형 센서 그리고 브래그 격자 센서 등이 있다. 이 중에서 브래그 격자 센서는 광섬유 코어에 일정한 간격으로 굴절률이 다른 격자를 새겨서 특정한 파장의 빛만 반사시키고 나머지는 투과시키는 성질을 이용한 것이다.

본 연구에서 제작한 FBG 센서들은 현재 국내에서 상용화 되고 있는 해외 제품이 아닌 순수 국내 재료와 국내 기술에 의해 제작하였으며, 센서의 정확성을 확보하기 위하여 사전에 실내 실험을 반복적으로 수행한 후 보완하면서 제작하였다.



(a)광섬유 변위(FBG-LVDT) 센서 (b)광섬유 변형률(FBG-STRAIN) 센서 (c)광섬유 온도 (FBG-TEMP) 센서 (d)광섬유 가속도 (FBG-ACC) 센서

Fig. 1 개발된 FBG 센서

2.1 광섬유 변위(FBG-LVDT) 센서

광섬유 변위 센서는 기계적인 변위를 광섬유 센서의 길이 변형으로 바꾸어 주며, 이때 나타나는 FBG 센서의 파장변화를 데이터 로거(data logger)를 통해 측정할 수 있게 한다. 광섬유 변위 센서의 구성은 기계적인 변위를 센서에 전달하는 이동스틱(Removable stick) 과 축방향의 이동을 수직방향으로 바꾸어 주는 삼각 바(Trigonal Bar), 수직방향의 변화를 센서에 전달하는 캔틸레버(Cantilver), 그리고 FBG 센서를 보호하는 케이스(Case)로 구성되어 있다. FBG-LVDT 센서의 특징은 아래 Table 1과 같다.

2.2 광섬유 변형률(FBG-STRAIN) 센서

광섬유 변형률 센서의 작동원리는 구조물에 광섬유 변형률 센서의 양 끝단을 측정하고자 하는 위치에 고정하고 센서를 광케이블을 이용해 데이터 로거와 연결한다. 고정된 광섬유 변형률 센서에 외부 변형이 일어나면 센서길이(Sensor Length) 즉 Δ (격자간의 간격) 값이 변화 되고, 이에 따라 설치된 각 센서의 파장

Table 1 FBG-LVDT 센서의 특징

측정범위	$\pm 3,000$ microstrain
측정포인트 수	1 point
정확도	± 0.2 % FS
Strain Sensitivity	1 microstrain(0.0001%)
적용센서	FBG Optic Sensor
동작온도	-20°C to 80°C

변화가 일어난다. 이 변화된 파장 값들을 데이터 로거에서 읽어 변형률(Microstrain)로 표시하는 원리이다.

2.3 광섬유 온도(FBG-TEMP) 센서

FBG 센서는 많은 장점을 가지고 있는 유지관리 분야에서 스마트 센서로서 그 활용 가능성이 매우 높으나 온도의 영향을 많이 받는다는 단점을 가지고 있다. 항상 외부의 온도와 기후에 노출되어 있는 구조물에 FBG 센서를 설치하기 위해선 온도 보정과 함께 FBG 센서를 하나의 모듈로 만들어 설치를 용이하게 할 필요성이 있다. 온도센서 역할을 하는 FBG 센서에 5분경화 에폭시로 피복을 입혀 온도에 대한 감도를 향상시켰다.

2.4 광섬유 가속도(FBG-ACC) 센서

광섬유 가속도 센서는 L-모양의 외팔보, 중량(mass), 스프링(spring)과 브래그 격자로 구성되어 있다. A와 B 점의 중심에 위치한 브래그 격자가 가속도에 의한 변형률을 감지하게 된다.

Table 2 FBG-STRAIN 센서의 특징

측정범위	$\pm 4,000$ microstrain
측정포인트 수	1 point
정확도	± 0.2 % FS
Strain Sensitivity	1 microstrain(0.0001%)
적용센서	FBG Optic Sensor
동작온도	-20°C to 80°C

Table 3 FBG-ACC 센서의 특징

Frequency	0 to 20 Hz
Range	+/- 2000 gal
정확도	± 0.2 % FS
Strain Sensitivity	1 microstrain(0.0001%)
적용센서	FBG Optic Sensor
동작온도	-20℃ to 80℃

3. PDA를 이용한 무선신호 display 시스템

3.1 광섬유 센서의 신호처리 시스템

기존에 연구되고 사용된 일반적인 FBG 센서 시스템의 구성은 LED와 동조 필터(Tunable filter)를 이용하여 구성하는 방식으로 많이 이용하고 있다. 그러나 이러한 FBG센서 신호처리 시스템은 다음과 같은 단점이 있다. 첫째, 이 방식은 신호 처리시 광원이 온도에 영향을 받아 광량의 변화가 심하여 지속적인 측정이 어렵다. 둘째, 미분회로에 의한 미분신호가 광량의 변화에 의해 오차로 나타나며, 셋째, 기준(reference)용 광원과 신호 측정용 광원을 번갈아 측정함으로써 측정시 오차가 발생할 수 있고, 넷째, PD로부터 미분기를 거치고 비교기를 거치는 과정에서 신호처리 및 구성이 복잡하다.

위와 같은 단점을 극복하고자 본 연구에서는 FBG 센서에 대해 다음과 같이 시스템을 구성하였다. 첫째, FBG 센서의 중심파장을 알아내기 위한 신호처리 방식으로 반사 파장 측정방식을 적용하며, 둘째, 넓은 파장을 갖는 swept semiconductor light source를 사용하고, 셋째, tunable filter의 파장을 보정하기

위한 광기준(optical reference)부를 구성하고, 넷째, 여러 지점의 물리량을 구하기 위한 다중 광섬유 격자 센서를 사용하는 병렬 시스템을 설계하며, 다섯째, DAQ(Data Acquisition) 보드와 PC를 이용하여 하드웨어 시스템을 간략화 시키고 고속의 신호처리 구현으로 실시간 안전 진단 시스템을 설계 하고자 하였다.

3.2 PDA를 이용한 무선계측 시스템

무선데이터 계측 시스템을 구현하기 위해서는 교량의 데이터 로거에 네트워크를 연결해야만 한다. 이전에는 전화선을 이용한 모뎀이나 직접 전용선을 연결하여 유선으로 네트워크에 연결하였다. 그러나 최근에는 이동통신 기술의 발전에 따라 무선네트워크를 이용하여도 유선에 버금가는 속도와 안정성을 유지할 수 있다. 본 연구에서는 가장 최근에 상용서비스를 시작한 HSDPA 무선모뎀을 이용하여 무선데이터 시스템을 구축하였다. 이때 전송속도는 다운로드 최대 1.8 Mbps, 업로드 최대 384 kbps 이다.

무선데이터 교량계측 시스템의 구성에서 측정된 데이터의 확인 및 이상 유무 모니터링을 위하여 PDA에 데이터 모니터링 시스템은 데이터 로거에서 데이터 계측 및 표시를 위하여 National Instruments 사의 LABVIEW 프로그램을 사용하였으며 PDA에서의 데이터 모니터링 시스템도 마찬가지로 LABVIEW PDA module을 사용하여 구현하였다.

4. 무선계측 시스템의 현장 적용성 평가

본 연구에서 개발된 PDA와 광섬유 센서를 이용한 무선계측 시스템의 정확성 및 현장 적용성 평가를 위하여 초기점검 대상 구조물인 교량을 선정 한 후 재하 차량에 의한 정, 동적 재하 시험을 실시하여 교량의 응답을 계측하였다.

4.1 현장 실험

실험 대상 교량은 전북 부안에 위치한 교량이며, 초기점검 대상 구조물인 미개통 교량이다. 상하행선이

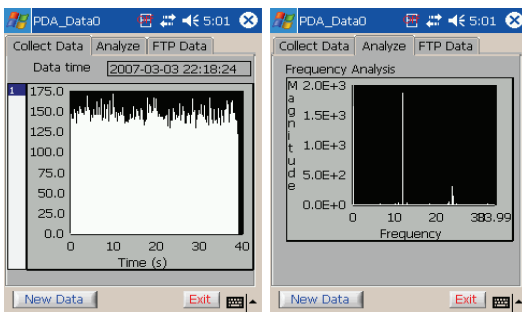


Fig. 2 PDA 데이터 모니터링 시스템 화면

분리된 교량으로서 한 구간을 선정하여 실험을 실시하였다. 현재, 준공이 되지 않은 교량으로 상부에 차량의 통행이 없었으며, 외관조사 및 교량의 상태평가는 매우 양호한 상태였다. 시험에 앞서 본 연구에서 제안한 시스템을 정확히 활용하기 위해서 FBG 센서들 간의 파장 중첩이 되지 않도록 센서를 설치하였으며, 교량과 센서간의 부착력이 확보되도록 설치하였다.

Table 4 무선계측 시스템 적용 대상 교량

구분	구조 형식	교 폭	설계 하중	총연장
W 교	PSC I형교	10.4 m	DB-24	2@30m+2@30m = 120 m
G 교	PSC I형교	10.4 m	DB-24	25 m
WP 교	ST. Box 교	10.5 m	DB-24	40 m
D 교	ST. Box 교	10.5 m	DB-24	35 + 4@50 + 35 = 270 m
GS 교	PSC I형교	10.5 m	DB-24	30.4 m

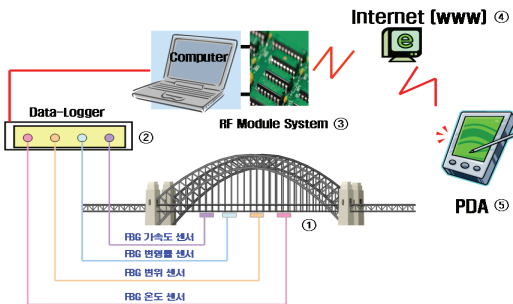


Fig. 3 무선계측 시스템의 구성도



Fig. 4 Box 내부에 설치된 FBG센서

4.2 실험 결과

본 연구에서 개발한 FBG-LVDT, FBG-STRAIN, FBG-TEMP 그리고 FBG-ACC 센서를 이용하여 총 5회에 걸쳐 정적, 동적 재하시험을 실시한 결과 FBG-TEMP 센서 유무에 따른 변형률과 변위 값의 차이가 온도 1도의 차이에 의해 변형률은 50 Micro-strain, 변위의 경우 약 5mm 정도의 오차가 발생됨을 알 수 있었다. 이는 온도변화가 심한 우리나라의 경우 센서의 정확성을 높이기 위해서는 반드시 온도센서를 함께 부착하여 온도보정을 실시해야 한다. 또한, FBG-STRAIN 센서는 교량의 종류나 형식에 관계없이 기존의 전기 저항식 변형률 센서에 비해 미소 변형에 대한 응답이 뛰어나 미소 변형이 일어나는 구조물에 사용이 적합함을 확인 할 수 있었다. FBG-LVDT 센서의 경우 기존의 LVDT와 구조해석 결과 값과 비교해 볼 때 그 정확성 및 현장 적용 가능성을 검증 할 수 있었으며, FBG-ACC 센서의 경우 정확한 고유진동수 및 가속도 응답을 나타냈다. PDA를 이용한 교량의 구조 응답을 실시간으로 모니터링 한 결과 정확한 무선 송수신 능력을 확인하여, 새로운 유지관리 시스템으로서의 그 활용성을 입증하였다. 본 연구에서 대상 교량에 적용한 무선계측 시스템의 경우 모든 데이터가 실시간으로 인터넷 웹상에 저장되면서, PDA로 전송됨을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 무선계측 시스템의 경우 인터넷이나 휴대폰 등의 사용 가능한 지역 어디에서든 사용이 가능하나, PDA의 자체적



Fig. 5 현장실험 데이터를 PDA로 display

인 데이터 저장 용량에 제한적이므로, 너무 많은 양을 지속적으로 저장하는 데는 다소 문제점이 발생된다. 그러나, 앞으로 하드웨어적 측면에 계속 발전될 것이기에 이러한 문제점도 해결 될 수 있으리라 판단된다.

또한, 기존의 전기 저항식 센서의 경우 원하는 데이터 하나에 케이블과 채널이 각각 하나씩 필요하여 많은 양의 케이블과 채널을 필요로 하였으나, 광섬유 센서의 경우 채널 1~2개로 동일 데이터를 수집할 수 있어 경제성 및 시공성이 뛰어난 것을 확인할 수 있었다.

5. FBG센서를 이용한 진동에 대한 사용성 평가

5.1 개요

본 연구에서 개발된 무선계측 시스템 중 광섬유 변위계와 광섬유 가속도계를 이용하여 교량의 진동에 대한 사용성 평가 기준을 정립하고자 한다. 완성된 구조물이 가져야 할 중요한 기능으로 안전성, 사용성 그리고 유지관리 편리성 등을 들 수 있다.

안전성의 경우 본 연구에서 개발된 무선계측 시스템으로 인하여 미소 변형에도 정확한 데이터를 수집할 수 있으며, 노이즈 등의 잡음이 없어 데이터를 분석하는데 보다 효율적이라 할 수 있다. 센서부에서 이렇듯 보다 정확한 데이터를 수집함으로써, 데이터 처리부에서 이를 활용한다면 안전성 평가 기준도 마련 될 수 있다.

사용성의 경우는 정적 사용성과 동적 사용성으로 구분할 수 있으며, 정적 사용성은 설계단계에서 고려가 가능하지만, 동적 사용성은 교통량, 교통패턴등과 밀접한 관계를 가지고 있어 설계단계에서부터 충분한 고려가 힘들다. 교량의 동적 사용성의 경우는 진동 제한 기준과 밀접한 관련이 있으나, 현재 시방서에 기준은 정적 사용성 및 안전성에 치우쳐 있다. 교량의 진동 사용성은 변위, 진폭, 가속도 그리고 지속 시간 등으로 평가할 수 있다. 이러한 진동 사용성 평가를 정립하고자 한국도로공사(2002)에서는 교량 휨진동 방지 장치의 개발 및 실용화 연구를 실시하였다. 그러나, 일반 전기저항식 가속도계와 변위계를 이용한 연구이

며 이를 실용화하기에는 다소 데이터가 부족하다. 따라서, 본 연구에서는 상태평가 및 외관조사 결과 A 등급인 교량을 대상으로 광섬유 변위계, 광섬유 가속도계에서 동적 데이터를 수집하여 처짐, 진동에 대한 사용성 평가 기준을 정립하고자 한다. 진동, 처짐에 대한 사용성 평가 기준은 Meister의 진동등감각곡선을 활용하였다.

5.2 진동에 대한 인체의 감각 곡선

진동의 영향이 구조물에 직접적인 손상을 일으키지는 않으나, 교량에 발생하는 진동은 사용자들에게 불쾌감이나 불안감을 줄 수 있기 때문에, 많은 연구자들에 의해 진동에 의한 인간 감각특성에 대한 연구가 이루어져 왔다. 인체도 일종의 진동체이기 때문에 고유한 진동수를 가지며 외부로부터 가진이 되어지면 공진

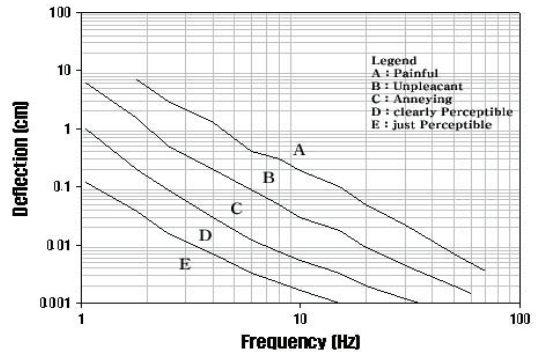


Fig. 6 Meister의 진동 등감각 곡선(변위)

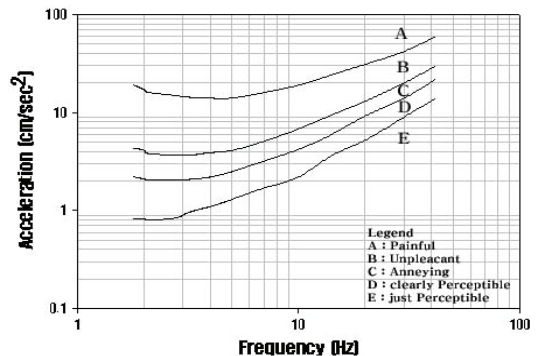


Fig. 7 Meister의 진동 등감각 곡선(가속도)

하기 때문에, 진동에 관한 인체 감각에 대해서 인체를 기계 전달계(전신진동)로 취급하여 오래 전부터 연구되어 왔다. 이 가운데 Meister는 진동수에 따른 감각 곡선을 정의하였으며 이 감각곡선은 인체감각의 기준으로 여러 분야에서 활용되어 왔다.

전신진동에 대한 인체의 진동감각 특성은 자신의 주파수 대역에 따라서 상이하게 반응하는데, 인체의 전신이 진동하는 것은 일반적으로 1~90Hz의 범위이다. 이 이상 높은 주파수에서는 국부적으로 진동하는 것으로 알려져 있다. 전신진동과 인체의 진동감각과의 관계에 대한 대표적인 연구가 Meister의 진동감각 곡선이다.

5.3 교량의 동특성 측정

도로교에서 발생하는 진동의 사용성 평가를 광섬유 센서를 이용하여 분석하기 위하여 실험 대상 교량을 선정 후 동적재하 시험을 재하차량을 이용하여 실시하였다. 동적 데이터는 FBG-LVDT, FBG-ACC 센서에 의해 계측하고 신호처리를 통하여 웹상에 저장하였다. 실험 대상 교량의 경간 선정은 외관조사, 기하학적 조건, 현장 여건 등을 고려하여 결정하였으며, FBG-ACC 센서는 단부에서 일정 간격(5m)씩 떨어진 지점에 설치하였고, FBG-LVDT 센서의 경우는 재하차량이 주행시 가장 변위가 많이 발생할 수 있는 경간 중앙지점을 기점으로 좌우측으로 일정거리 떨어진 지점에서 구조 응답을 측정하였다. 광섬유 센서의 비교를 위해 전기 저항식 센서를 동일 지점에 함께 설



Fig. 8 동일 지점에 부착된 센서 광경

치하였다. 비교 대상인 전기 저항식 센서의 모델 및 측정 장비는 광섬유 센서와 동일한 조건의 센서들을 사용하였다.

동적재하 실험 방법은 처음 10km/hr를 의사정적으로 보고 매 10km/hr씩 증가시키며 실험을 실시하였다. 재하차량은 25ton 덤프트럭에 골재를 만재시켜 실험을 하였으며, 실험에 이용된 재하차량 하중은 평균 약 40ton 정도인 것으로 측정되었다.

5.4 교량의 동특성 분석 결과

W 교의 경우, FBG-ACC 센서에 의해 추정된 고유진동수는 5.43Hz, 전기 저항식 가속도 센서와 같은 고유진동수를 추정하였으며, 구조해석 결과 W교의 고유진동수는 5.36Hz로 분석되었다. 또한, Meister의 진동등감각 곡선에 적용시킨 결과 처짐에 대해서는 B등급으로 분석되었고, 가속도에서는 A등급으로 결정되었다. G교의 경우, FBG-ACC 센서에 의해 추정된 고유진동수는 4.86Hz, 전기 저항식 가속도 센서와 같은 고유진동수를 추정하였으며, 구조해석 결과 G교의 고유진동수는 4.88Hz로 분석되었다. 또한, Meister의 진동등감각 곡선에 적용시킨 결과 처짐에 대해서는 B등급으로 분석되었고, 가속도에서는 A등급으로 결정되었다. WP교의 경우, FBG-ACC 센서에 의해 추정된 고유진동수는 3.68Hz, 전기 저항식 가속도 센서와 같은 고유진동수를 추정하였으며, 구조해석 결과 G교의 고유진동수는 3.76Hz로 분석되었다. 또한, Meister의 진동등감각 곡선에 적용시킨 결과 처짐에 대해서는 B등급으로 분석되었고, 가속도에서는 A등급으로 결정되었다. D교의 경우, FBG-ACC센서에 의해 추정된 고유진동수는 4.96Hz로서, 전기 저항식 가속도 센서와 같은 고유진동수를 추정하였으며, 구조해석 결과 G교의 고유진동수는 4.97Hz로 분석되었다. 또한, Meister의 진동등감각 곡선에 적용시킨 결과 처짐에 대해서는 B등급으로 분석되었고, 가속도에서는 A등급으로 결정되었다. N교의 경우, FBG-ACC센서에 의해 추정된 고유진동수는 3.48Hz로서, 전기 저항식 가속도 센서와 같은 고유진동수를 추정하였으며, 구조해석 결과 G교의 고유진동수는 3.54Hz로 분석되었다.

또한, Meister의 진동등급각 곡선에 적용시킨 결과 처짐에 대해서는 B등급으로 분석되었고, 가속도에서는 A등급으로 결정되었다. GS교의 경우, FBG-ACC센서에 의해 추정된 고유진동수는 5.34Hz로서, 전기 저항식 가속도 센서와 같은 고유진동수를 추정하였으며,

구조해석 결과 G교의 고유진동수는 5.42Hz로 분석되었다. 또한, Meister의 진동등급각 곡선에 적용시킨 결과 처짐에 대해서는 B등급으로 분석되었고, 가속도에서는 A등급으로 결정되었다.

5.5 교량의 A등급 진동특성 제안

본 실험 대상 교량의 경우 현재, 개통이 되지 않은 미개통 교량으로서 상태등급 및 외관상태가 모두 매우 양호한 A등급이었다. 그러나, Meister의 진동등급각 곡선의 변위 부분에서 모든 교량들이 B등급으로 산출되었으며, 이는 건축 구조물을 기준으로 한 곡선이므로 수정이 불가피 하다. 따라서 본 연구에서는 모든 교량들의 진동 상태가 모두 A등급임을 가정하여 동적 변위와 동적 가속도 값을 이용하여 A등급 진동특성곡선을 제안하고자 한다.

본 연구에서 실험을 통하여 구한 동적변위 및 가속도를 종합적으로 나타내면 아래 Fig. 9~Fig. 10과 같다. 실험을 통하여 측정된 가속도 및 변위 값을 분석해 보면 Meister의 진동등급각 곡선에서 변위의 경우 A등급이 너무 크게 제안되어 개통이 되지 않은 미개통 교량에서도 B등급으로 분석되었다. 따라서, 본 장에서는 실제 실험에 의해 측정된 데이터들을 이용하여 Meister의 변위 곡선을 수정하였다. 본 장에서 제안한 곡선의 경우는 A등급을 결정할 수 있는 곡선으로서 최종적 사용성 평가 시에는 Min(가속도, 변위)를 통하여 결정할 수 있다. 추후 전문가의 현장 진동특성 설문 조사등을 통하여 B, C, D등급에 맞는 교량의 실험이 이루어질 필요성이 있다.

6. 결 론

본 연구에 대한 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) PDA를 이용한 교량의 원격거리에서도 모니터링이 가능한 무선계측 시스템을 개발하였다. 그리고 PDA를 통하여 실시간으로 display를 할 수 있는 프로그램을 개발하였다.
- 2) PDA를 이용한 무선계측 시스템 구축을 위해 이용된 센서부에서는 FBG-LVDT, FBG-STRAIN,

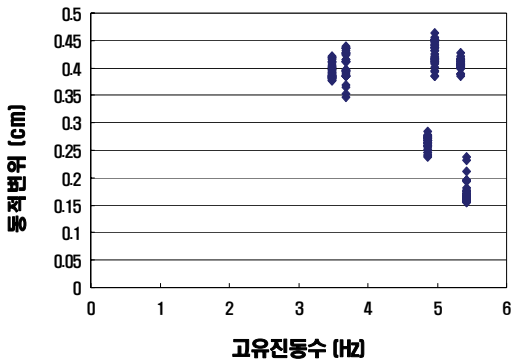


Fig. 9 실험 교량의 변위 진동 등급각 곡선

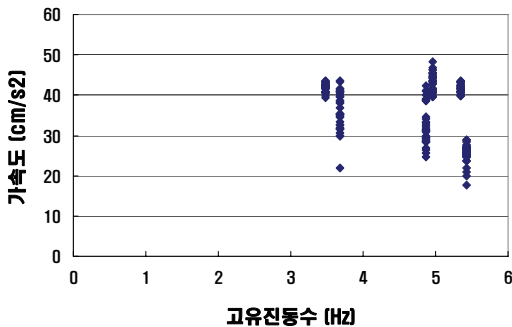


Fig. 10 실험 교량의 가속도 진동 등급각 곡선

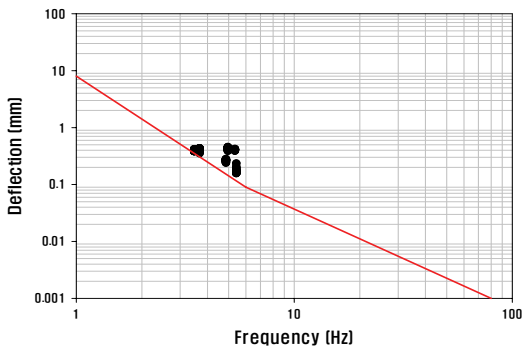


Fig. 11 제안된 변위의 A등급 진동등급각곡선

FBG-TEMP 그리고 FBG-ACC 센서를 사용하여 재하시험시 변위, 변형률, 가속도등의 구조응답을 계측한 후 그 정확성을 검증하였다. 특히 FBG-STRAIN 센서의 경우 일반적인 전기저항식 센서에 비해 미소변형에 대한 응답이 매우 뛰어나므로, 미소변형 측정을 위한 구조물 적용에 효과적으로 적용 가능할 것으로 판단된다.

- 3) 광섬유 센서를 현장의 교량에 이용할 경우 FBG-STRAIN 센서와 FBG-LVDT 센서의 변형률, 변위 값은 온도 변화에 의해 그 값들이 변화된다. 따라서, 광섬유 센서를 이용하여 구조 응답을 계측할 경우 실외 온도에 의해 응답차가 발생되므로, 반드시 현장의 교량 적용시 FBG-TEMP 센서를 함께 사용해 온도에 의한 변형률, 변위 값을 보정해야 한다.
- 4) 교량의 재하시험에 제안한 무선계측 시스템을 이용한 결과 모든 데이터가 실시간으로 인터넷 웹상에 저장되면서, PDA로 전송됨을 확인하였다. 본 연구에서 개발한 무선계측 시스템은 교량의 종류나 형식에 관계없이 모든 교량에 적용 가능하였으며, 원격 거리에서도 데이터 전송 상태가 매우 양호하였다.
- 5) 본 연구에서 제안한 무선계측 시스템의 경우 인터넷이나 휴대폰 등의 사용 가능한 지역 어디에서든 사용이 가능하나, PDA의 자체적인 데이터 저장 용량이 제한적이므로, 너무 많은 양을 계속적으로 저장 하는데는 다소 문제점이 발생된다. 그러나, 앞으로 하드웨어적 측면이 계속 발전 될 것이기에 이러한 문제점도 해결 될 수 있으리라 판단된다.
- 6) FBG-LVDT 센서와 FBG-ACC 센서를 이용하여 교량의 진동에 대한 사용성 평가를 하기 위해 재차 동

적 재하시험을 실시하였다. 동적응답 특성을 Meister의 진동등감각곡선에 적용시킨 결과 변위에 대한 진동 사용성 평가가 모든 교량에서 B등급, 가속도에 대한 사용성 평가는 A등급으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 원광대학교 교비 지원에 의해 연구되었습니다.

참고문헌

1. 광계환, 조선정, 광경현, 정태영, "광섬유 브래그격자 센서를 이용한 교량유지관리 모니터링에 관한 실험적 연구", 대한토목학회 학술발표회, 2002, pp. 7-13.
2. 권일범, 최만용, 정현조, "충격하중을 받는 보에서 압전 필름센서와 웨이브렛 변환을 이용한 분산파동의 해석", 한국구조물진단학회, 제5권, 제4호, 2001, pp. 215-225.
3. 김기수, "긴 게이지길이 광섬유 FBG 센서를 이용한 교각상부 거동 측정", 한국전산구조공학회 2006년도 정기학술대회, 2006, pp. 71-76.
4. 김치엽, 권일범, 최만용, "구조물의 응력분포 측정을 위한 무선계측 연구", 한국구조물진단학회 2000년도 가을학술발표대회, 2000, pp. 23-28.
5. Kwak, K. H., Cho, S. J. and Lee, S. J., Smart Monitoring of Bridge Maintenance Using Fiber Bragg Grating Sensors, IABMAS2004, pp. 273, 2004.

(접수일자 : 2008년 4월 25일)
(심사완료일자 : 2008년 9월 8일)