

IoT 기반 하이브리드 계측시스템 실시간 다점 측정 성능 평가

김현영^{1,2}, 강동훈^{1*}

¹한국철도기술연구원 신교통혁신연구소, ²연세대학교 기계공학과

Evaluation on real-time multi-point sensing performance of IoT-based hybrid measurement system

Heonyoung Kim^{1,2}, Donghoon Kang^{1*}

¹New Transportation Innovative Research Center, Korea Railroad Research Institute

²School of Mechanical Engineering, Yonsei University

요약 4차 산업혁명의 도래와 함께 빠른 속도로 발전하고 있는 IoT 기술은 다양한 센서의 무선화를 가능하게 하였으며 많은 분야에서 응용연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만, 철도현장의 경우 수 km에 이르는 교량, 터널 등 계측사이트의 규모가 매우 방대한 특징으로 인해, 보편적으로 활용되는 전기식 센서의 경우 원거리 계측으로 인한 신호 잡음 문제, 진찰화에 따른 고전압 환경에 기인한 전자기파 간섭 문제로 계측에 어려움이 있다. 이를 극복하고자, 전기식 센서를 대체하기 위한 광섬유 센서 연구가 많이 수행되었으나, 센서 종류의 다양성 부족 등이 현장 적용의 한계로 작용하고 있는 실정이다. 이런 현장의 상황을 토대로, 전기식 센서와 광섬유 센서를 동시에 사용할 수 있으며 IoT 기술을 통해 무선 데이터 통신이 가능한 하이브리드 계측시스템이 개발되었다. 본 연구에서는, 선행연구를 통해 개발된 하이브리드 계측시스템의 다양한 계측현장 적용성을 평가하기 위해 4가지 형태의 계측환경을 모사하여 실시간 계측 실험을 수행하였다. 실험결과, 전기식 및 광학식 센서 모두 높은 추종성을 보이며 원격지에서 실시간으로 계측이 가능하였으며, 본 계측시스템이 50개의 센서를 동시에 2.5kHz의 샘플링으로 계측할 경우에도 적용 가능한 수준임을 확인하였다. 향후, IoT 기반 하이브리드 계측시스템의 다양한 현장 적용을 통해 실시간 건전성 모니터링 기술 기반의 구조안전성 향상에 기여할 것으로 기대한다.

Abstract The rapid growth of IoT technology induced by the fourth industrial revolution has resulted in research into various types of wireless sensors, and applications based on this technology are prevalent in many areas. However, among the various sites where this technology is used, railway bridges and tunnels with lengths of tens of kilometers have problems with data acquisition, due to the signal noise induced by the long distance measurement and EMI induced by the high voltage power feeding system, when conventional electric sensors are used. To overcome these problems, many studies on fiber optic sensors have been conducted as a substitute for the conventional electric sensors. However, restrictions on the types of fiber optic sensors have limited their application in railways. For this reason, a hybrid measurement system with IoT based wireless data communication, in which both electric and fiber optic sensors can be applied simultaneously, has been developed. In this study, in order to evaluate the applicability of the hybrid measurement system developed in the previous study, a real-time test for 4 types of measurement environments, which reflect possible railway sites, is performed. As a result, it was confirmed that the signals from both the electric and fiber optic sensors, which were acquired at a remote area in real-time, showed good agreement with each other and that this measurement system has the potential to handle sensors with a sampling rate of 2.5 kHz. In the future, it is expected that the IoT-based hybrid measurement system will contribute to the improvement of structural safety by enabling real-time structural health monitoring when applied to various measurement sites.

Keywords : Hybrid measurement system, Internet of things, FBG sensors, Electrical sensors, Simultaneous measurement

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Donghoon Kang (Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5760 email: dhkang@krrri.re.kr

Received February 5, 2018

Revised March 8, 2018

Accepted April 6, 2018

Published April 30, 2018

1. 서론

4차 산업혁명(4th industrial revolution)의 도래와 함께 빠른 속도로 발전하고 있는 사물인터넷(internet of things, IoT) 기술[1,2]은 계측기술(sensing technology)의 발전에도 큰 영향을 미치고 있다. 일반적으로 산업현장의 실시간 상황 확인이나 유지보수적인 관점에서 장기 거동을 모니터링 하기 위한 목적으로 많이 활용되고 있는 모니터링 기술은 IoT 기술의 발전과 함께 급속히 발전하고 있다. 기존의 경우, 계측기로부터 측정된 데이터는 이더넷(ethernet)과 같은 유선 통신 방식으로 원거리에 있는 사용자에게 데이터를 전송하였으나, IoT 기술 도입을 통해 근거리/광대역 무선 통신(wireless communication) 방식으로 데이터 전송이 가능하게 되었다. 이러한 목적으로 계측기에 연결된 센서 자체를 무선화[3]하는 방법도 가능하지만, 이 경우 다양한 종류의 물리량 계측이 요구되는 센서를 각각 새롭게 개발해야 하는 어려움이 있고, 또한 비용 상승 문제 그리고, 센서 자체의 전원 공급 문제를 해결해야 하는 등 많은 어려움이 있어 특정 목적으로 제한적으로 사용되고 있는 실정이다.

따라서, 현재 계측기술의 경우 기존 센서를 활용할 수 있으면서, 데이터 전송의 무선화가 가능한 IoT 기술의 장점을 함께 접목할 수 있는 방향으로 계측시스템이 개발되고 있다. 하지만, 철도현장의 경우 수 km에 이르는 교량, 터널 등 계측사이트의 규모가 매우 방대한 특징이 있다. 이로 인해, 일반적으로 많이 활용되는 전기식 센서(electric sensor)의 경우 원거리 계측 케이블 연결(wiring)로 인한 신호 잡음(noise) 문제가 발생하고 있다. 또한, 전철화로 인한 고전압(~25kV) 환경은 계측사이트에 전자기파 간섭(electromagnetic interference, EMI)을 유발하고 이는 곧 센서에 신호 잡음을 유발한다. 이를 극복하고자, 광섬유 센서(fiber optic sensor)를 이용한 연구[4-6]가 많이 수행되었으며, 최근 적용 영역을 점차 넓혀가고 있다.

광섬유 센서는 전압차를 통한 측정방법의 기존 전기식 센서와 달리 빛의 다양한 특성을 이용하여 대상으로 하는 물리량을 계측하는 센서이다. 즉, 빛의 세기(intensity), 간섭(interference), 회절(diffraction) 등 복조기법(demodulation method)에 따라 다양한 종류가 있으며, 기본적으로 실리카(SiO₂) 계열의 유리로 제작되므로

부식(corrosion)에 강하고 광섬유 내 빛의 내부전반사(internal total reflection)를 통해 신호를 전송하므로 적은 손실로 원거리 전송이 가능하며 EMI의 영향이 없는 등 많은 장점을 갖는다. 특히, 여러 광섬유 센서 중 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating, FBG) 센서는 다중화(multiplexing)가 쉽고, 대량생산(mass production)이 가능하며 절대측정(absolute measurement)의 추가적인 장점으로 가장 널리 활용되고 있다[7-9].

하지만, 이처럼 많은 장점을 갖는 FBG 센서도 개발된 센서의 종류가 제한적인 문제가 있어 다양한 형태의 계측사이트를 FBG 센서만으로 계측하는데 한계가 있는 것이 사실이다. 따라서, 이를 극복하고자 보편적으로 활용되고 있는 기존 전기식 센서와 FBG 센서를 동시에 사용할 수 있고 IoT기술의 장점을 함께 포함하는 형태의 하이브리드 계측기가 개발된 바 있다[10].

따라서, 본 연구에서는 선행연구[10]를 통해 개발된 하이브리드 계측시스템을 대상으로, 향후 다양한 계측환경 적용을 고려한 실시간 다점 측정 성능을 평가함으로써 개발된 IoT 기반 하이브리드 계측시스템의 유용성을 평가하고자 한다.

2. 본론

2.1 FBG 센서 측정 원리

넓은 파장 스펙트럼을 갖는 광원을 광섬유에 입사 시킬 경우, 브래그 격자 부분에서는 식 (1)과 같은 브래그 조건(Bragg condition)에 의해서 좁은 밴드를 갖는 특별한 파장만을 반사하고 나머지 파장은 Fig. 1과 같이 모두 통과시킨다. 이때 브래그 격자에서 반사된 파장을 브래그 파장이라 한다.

$$\lambda_B = 2n_e \Lambda \quad (1)$$

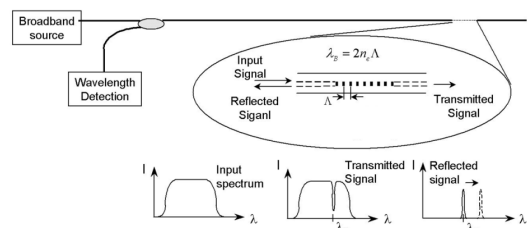


Fig. 1. FBG sensor wavelength-encoding operation [8]

위 식에서 λ_B 는 브래그 파장, A 는 광섬유 코어에 새겨진 격자 주기(grating period)이며 n_e 는 광섬유 격자의 유효 굴절률이다. 격자에서 반사되는 브래그 파장은 유효 굴절률과 격자 주기의 함수이고 유효 굴절률과 격자 주기는 온도와 변형률의 함수이다. 따라서 광섬유 브래그 격자에 온도 변화나 변형이 가해지면 이들 값이 변하여 브래그 파장이 이동하게 된다. 결국 광섬유 격자에 가해진 온도나 변형률을 식 (2)와 같이 계산해 낼 수 있으며 이것이 광섬유 브래그 격자가 센서로 사용될 수 있는 기본 원리이다.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(\alpha + \xi)\Delta T + (1 - p_e)\epsilon] \quad (2)$$

$$p_e = \left(\frac{n^2}{2}\right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (3)$$

여기서 α 는 광섬유의 온도에 따른 열팽창계수(thermal expansion coefficient)이며, ξ 는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수(thermo-optic coefficient)이다. 실리카의 경우 각각의 계수는 $\alpha \sim 0.5 \times 10^{-6}$, $\xi \sim 8.3 \times 10^{-6}$ 정도의 값을 가지므로 온도에 의한 브래그 파장 변화는 대부분 굴절률 변화에 기인한다. 그리고 식 (3)에서 p_e 는 광탄성 상수(photoelectric constant)를 의미하며 p_{11} 과 p_{12} 는 변형률 광학 텐서(strain-optic tensor)의 성분이고 n 은 코어의 굴절률, ν 는 광섬유의 프와송 비(poisson's ratio)이다. 실리카의 경우 광탄성 상수 p_e 는 대략 0.22의 값을 가진다고 알려져 있다.

만약 온도 변화가 없는 상태에서 구조물의 변형률을 측정하면 식 (2)에서 $\Delta T = 0$ 이 되므로 식 (4)와 같이 간단하게 변형률과 파장의 관계식을 얻을 수 있다. 결국, 변형률은 반사된 브래그 파장의 변화량을 측정하면 쉽게 구할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{1}{1 - p_e} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (4)$$

반대로 변형이 없는 상태에서 온도 변화가 발생하면 브래그 격자의 열팽창에 의해 브래그 파장이 이동하게 된다. 따라서 식 (2)에서의 $\epsilon = 0$ 이 되므로 온도 변화량과 파장과의 관계는 식 (5)와 같이 된다.

$$\Delta T = \frac{1}{\alpha + \xi} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (5)$$

2.2 다점 측정 성능 평가 실험 방법

개발된 하이브리드 계측기는 전기식 센서와 광센서를 동시에 측정 가능하도록 개발되었으며, 이에 대한 성능 평가를 위해 다양한 센서를 이용하여 다점 측정 실험을 수행하였다.

실험은 하이브리드 계측기가 적용될 수 있는 다양한 환경을 고려하여 외팔보 진동 실험, 정밀 변위 측정 실험, 열 환경에서의 변형률 측정 실험, 온도 변화 측정 실험 등 총 4가지의 상황을 설정하였다. 서로 다른 종류의 물리량 측정이 가능한 전기식 센서 2종(변형률, 온도) 및 광센서 4종(가속도, 변위, 변형률, 온도) 등 총 6종의 센서를 이용하여 Fig. 2와 같이 다점 측정 시험 장치를 구성하였다. 서로 다른 4가지 실험장치가 동시에 하나의 계측기로 연결된 형태이며, 동시에 진행되는 4가지 실험에 대한 데이터 분석은 각각의 실험장치에 대해 개별적으로 진행하였다. 이와 같이, 다수의 센서에 의해 동시에 측정된 데이터는 LTE 무선통신을 이용해 원격지의 서버(internet data center, IDC)로 전송되며 각 실험 별로 측정된 데이터의 분석을 통해 개발된 하이브리드 계측기의 다점 측정 성능을 평가하였다. 실험은 하이브리드 계측 시스템의 사양을 고려하여 전기식 센서의 경우 128Hz, 광섬유 센서의 경우 1.25kHz로 샘플링 하였다.

2.2.1 외팔보 진동 실험

여러 계측 환경에서 가속도 센서의 이용은 매우 빈번히 발생한다. 특히, 철도분야의 경우 차량이 통과할 때 레일에 가해지는 수직, 수평방향 가속도 측정을 통해 인프라의 안정성을 확인하는 등 다양한 목적으로 사용되고 있다. 본 연구에서 가속도 측정의 경우 FBG 가속도 센서(BPS-700, Tokyo Sokushin Co.)를 이용하여 외팔보 형태의 알루미늄 시편(Al6061, 295×25×4.4mm)의 진동을 측정하는 방법으로 진행하였다.

가속도 센서는 Fig. 3과 같이 빔의 상부 지그쪽에 위치시켰으며, 측정된 데이터의 주파수 분석 및 감쇠비 도출 등 신호분석을 수행하였다.

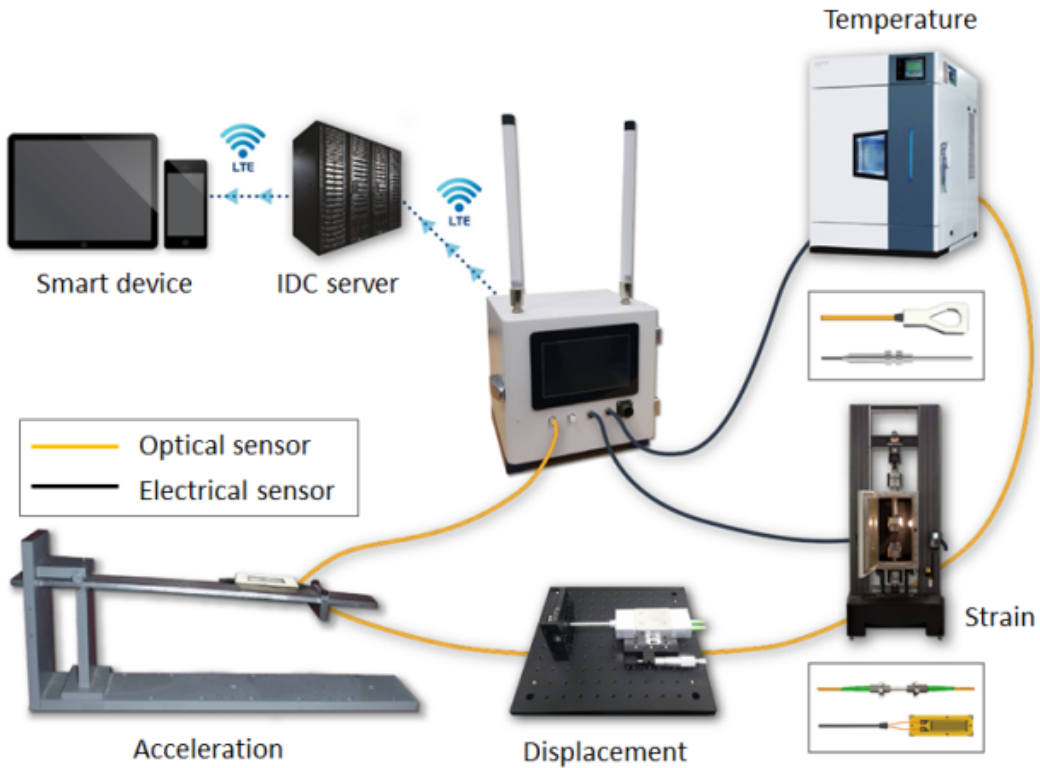


Fig. 2. Schematic diagram for experimental setup of IoT-based hybrid measurement system



Fig. 3. Free vibration test of cantilever beam for measurement of acceleration

2.2.2 정밀 변위 측정 실험

여러 계측 환경에서 변위 측정 또한 매우 빈번히 적용된다. 특히, 철도분야의 경우 교량이나 터널, 노반 등의 각종 처짐값을 측정하기 위해 폭넓게 활용되고 있다. 본 연구에서 변위 측정의 경우 FBG 변위 센서(FBG-DI-310, FBGKOREA Co.)를 이용하여 정밀하게 변위 조절이 가능한 마이크로미터(micrometer)로 0.1mm씩 변위값을 변화시키며 FBG 센서로부터 측정된 변위값과 비교하는 방법으로 진행하였다. 이를 위해, FBG 센서를 브라켓으로 고정한 후 다시 마이크로미터에 브라켓을 연결함으로써 마이크로미터로 FBG 센서에 인가되는 변위값 조절이 가능하도록 하였다.

2.2.3 온도 환경에서의 변형률 측정 실험

일반적으로 상온에서 이루어지는 계측과 달리 고온, 저온 등 특정 온도 환경에서 계측이 요구되는 경우가 있다. 관련하여 철도분야의 경우 철도 운행 안전을 위해 주요 구간에서 레일 등의 변형률을 측정하고 있으며, 하절기의 경우 레일 온도가 70℃를 상회하기도 해 변형률 측정에 많은 제약이 따른다. 따라서, 상온이 아닌 특정 온도 환경에서의 변형률 측정 실험이 요구된다. 본 연구에서는 보편적으로 사용되는 전기식 센서인 변형률 게이지와 FBG 변형률 센서를 이용하여 50℃와 100℃의 두 가지 온도 조건에서 변형률 측정 실험을 수행하였다. 실험은 열챔버가 부착된 만능시험기(Instron 4467, Instron Co.)를 이용해 알루미늄 시편(Al6061, 295×25×4.4mm)의 인장시험 시 발생하는 변형률을 측정하는 방법으로 진행하였다. 시편 표면의 길이 방향 중간 지점에 두 종류의 센서를 부착한 후 만능시험기의 변위제어를 통해 하중을 인가하였으며, 두 센서로 측정된 값을 상호 비교하였다.

2.2.4 온도 변화 측정 실험

다양한 계측 환경 중에서 구조건전성 모니터링 (structural health monitoring)을 목적으로 계측이 수행 되는 경우, 년 단위의 장기 계측이 요구되며 이 경우 절 기 변화에 따른 온도 변화 환경에 노출된다. 일반적으로 철도분야의 경우, 한국철도표준규격(IEC 60068-2-14)에 서 온도사이클 시험의 경우 -40℃~70℃의 온도 범위를 기준으로 제시하고 있어 향후 하이브리드 계측기의 장기 계측적용을 고려할 때 이러한 온도 변화 측정 실험이 필 요하다. 따라서, 본 연구에서는 항온항습기(TH-KE, JEIOTECH Co.)를 이용하여 -40℃~70℃의 온도 변화 조건에서 전기식 온도 센서인 열전대(T-type)와 FBG 온 도 센서(FBG-TE-310, FBGKOREA Co.)로 온도 변화를 측정하는 방법으로 진행하였다.

2.3 다점 측정 성능 평가 실험 결과

2.3.1 외팔보 진동 실험

알루미늄 시편에 충격을 가하여 자유진동을 하는 범 의 지지단 부근에서 측정된 FBG 가속도 센서의 결과는 Fig. 4와 같다.

또한, 주파수 분석을 위해 고속 푸리에 변화(Fast Fourier Transform, FFT)을 수행하였으며, 결과는 Fig. 5 와 같이 지배적인 주파수는 약 36Hz이며, 지배주파수의 약 6배인 227Hz가 조화진동에 의한 것으로 나타났다. 그리고, 충격이 가진된 알루미늄 시편은 자유 진동하면 서 재료 특성인 감쇠비에 따라 진동이 작아진다. 따라서, 감쇠비는 진동 피크값의 3dB(50%)에 해당하는 지점에서 부터 분석을 하였으며, 결과는 Fig. 6과 같이 감쇠비 평균은 1.21%로 일반적인 알루미늄 금속의 감쇠비 범위 (1~4%) 내에서 나타났다.

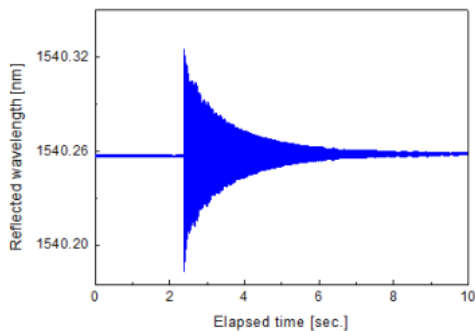


Fig. 4. Free and excited vibration result of cantilever beam for measurement of acceleration

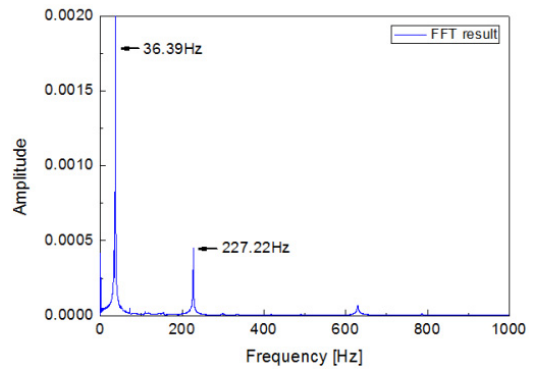


Fig. 5. FFT result of free vibrated cantilever beam

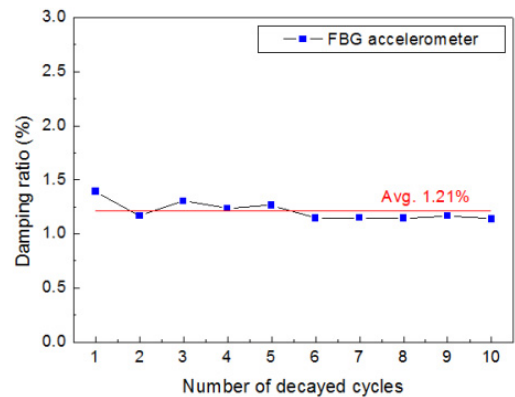


Fig. 6. Damping ratio of aluminum cantilever beam

2.3.2 정밀 변위 측정 실험

변위 측정의 경우 마이크로미터로 0.1mm씩 가진 할 때, FBG 변위 센서를 이용하여 측정된 값을 비교하는 방법으로 실험을 진행하였으며, 결과는 Fig. 7과 같다.

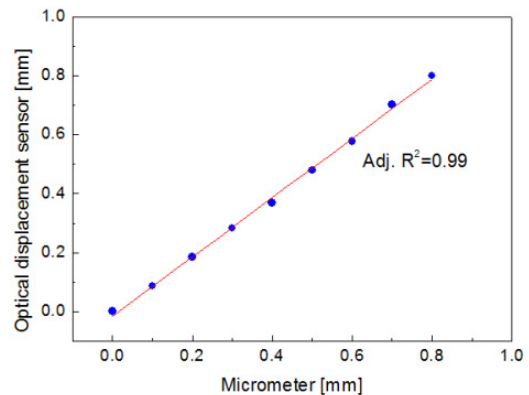


Fig. 7. Displacements of FBG sensor and micrometer

Fig. 7에서 알 수 있듯이, 마이크로미터의 가진 값과 FBG 변위 센서로 측정된 값이 매우 잘 일치하였으며 두 데이터 간 유사도를 나타내는 Adj. R² 값이 0.99로 측정 값이 가진 값을 잘 추종함을 확인하였다.

2.3.3 열 환경에서의 변형률 측정 실험

두 가지 열 환경, 즉 50°C와 100°C에서 알루미늄 시편의 변형률 측정 실험을 수행하였으며, 각각의 온도 환경에서 인장을 통해 측정된 변형률은 Fig. 8과 같다. 2.5Hz의 샘플링으로 데이터 처리를 하여 약 10초 동안 변화하는 변형률을 그래프로 표현하였다. 동일한 하중 조건에서 시편은 50°C에서 약 20μ ϵ , 100°C에서 약 30μ ϵ 의 변형률이 발생하였으며 두 센서의 값은 잘 일치하였다. 본 시험은 하중제어 조건으로 수행을 하였기 때문에, 시편의 분위기 온도 변화(50°C→100°C)에 따라 시편에 가해진 변형률 역시 상승(20μ ϵ →30μ ϵ)하였다. 이는 온도 상승에 따라 소재의 연신률(enlongation) 변화에 기인한 것으로 판단된다.

2.3.4 온도 변화 측정 실험

장기 모니터링 환경을 고려한 온도 변화 측정 실험의 경우, 열 사이클의 형태로 -40°C~70°C의 범위에서 변화하는 온도를 측정하는 실험을 수행하였으며 측정된 결과는 Fig. 9와 같다. 결과에서와 같이 전기식 센서와 FBG 센서 모두 항온항습기를 통해 가해지는 온도 사이클을 잘 추종하는 것을 확인할 수 있으며, 작은 오차는 두 센서 부착 위치에 따른 영향으로 판단된다.

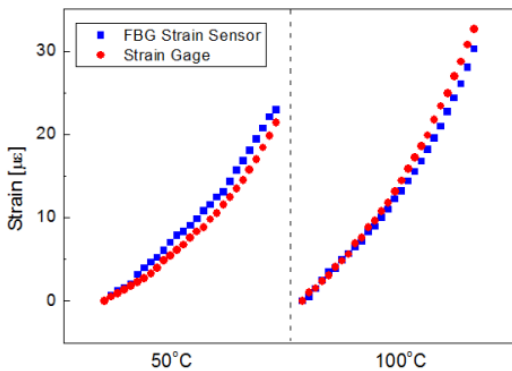


Fig. 8. Strains of FBG strain sensor and strain gage at 50°C and 100°C

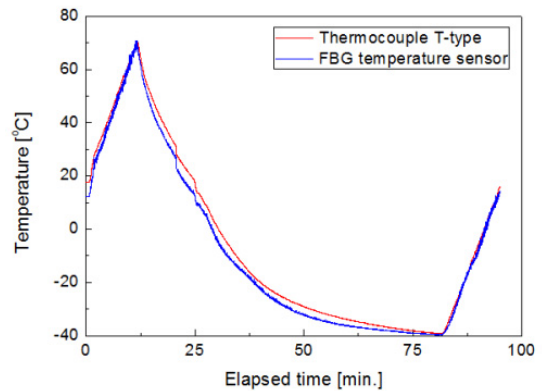


Fig. 9. Temperatures of thermocouple and FBG temperature sensor

2.4 다점 측정 성능 한계 분석

이상과 같이 총 4가지 종류의 다양한 계측환경 적용을 고려한 실시간 다점 측정 성능 평가를 통해 개발된 IoT 기반 하이브리드 계측시스템의 유용성을 성공적으로 평가하였다. 한편, 본 연구에서는 총 6개(전기식 센서 2개, FBG 센서 4개)의 센서를 적용한 경우로 수십 개 수준의 센서를 사용하는 실제 계측환경을 고려할 때 이에 대한 검토가 추가적으로 요구된다. 왜냐하면, 개발된 하이브리드 계측시스템은 계측된 데이터를 LTE 무선통신을 이용해 전송하는 방식이므로 데이터 전송량이 일정 수준을 초과할 경우 실시간 데이터 전송에 한계가 존재하기 때문이다. 따라서, 본 하이브리드 계측시스템의 최대 샘플링으로 50개의 센서를 동시에 적용할 때 데이터 전송률을 확인해보았다.

Table 1. Performance of LTE data transmission [10]

Test no.	Interval (s)	Transmission (byte)	NCK Count	Transmitted Packet	NCK Ratio (%)
1	1.000	12	0	77.341	0.000
2	1.000	120	13	57.540	0.023
3	1.000	120	9	90.056	0.010
4	1.000	600	23	34.920	0.066
5	1.000	1,800	12	6.896	0.174

먼저, 3종류(가속도, 변형률, 온도)의 FBG 센서를 적용하여 최대 샘플링 속도인 2.5kHz로 30초 동안 데이터를 취득하여 LTE 무선통신으로 송신되는 데이터 전송률을 확인해본 결과, 약 100.1Kbyte/s로 이를 토대로 50개의 센서를 동시에 적용할 경우를 가정할 때 데이터 전송

률은 약 1.668Mbyte/s로 추정이 가능하다. 이는 Table 1과 같이 선행연구[10]를 통해 확인된 본 계측시스템의 LTE 데이터 전송 성능결과로부터 1.8Mbyte/s의 전송률 기준 98.3%의 전송 성공 조건이므로, 향후 50개의 센서를 동시에 2.5kHz의 샘플링으로 계측하더라도 실시간 계측에 무리 없이 적용이 가능한 수준임을 짐작할 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 적용 대상이 되는 다양한 계측환경을 고려한 하이브리드 계측시스템의 실시간 다점 측정 성능을 평가하였다. 이를 위해, 각각 특징이 있는 4가지의 실험 환경을 모사하여 실시간 계측 실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

본 연구에서 개발된 하이브리드 계측시스템의 경우 진동, 변위, 변형률 및 온도 등 계측 환경에서 가장 빈번하게 활용되는 물리량에 대해 전기식 및 광학식 센서 모두 높은 추종성을 보이며 원격지에서 실시간으로 계측이 가능하였다.

또한, 계측 시스템의 전송 성능(1.8Mbyte/s)을 고려할 경우 50개의 센서를 동시에 2.5kHz의 샘플링으로 계측할 수 있어 실제 계측현장 적용에 문제가 없는 수준임을 확인하였다.

향후, IoT 기반 하이브리드 계측시스템의 다양한 현장 적용을 통해 실시간 건전성 모니터링 기술 기반의 구조안전성 향상에 기여할 것으로 기대한다.

References

- [1] W. Joe, M. Jiang, K. Jeong, "An M2M/IoT based smart data logger for environmental sensor networks", *Journal of KIISE: Computing Practices and Letters*, vol. 20, no. 1, pp. 1-5, 2014.
- [2] Y. S. Moon, S. P. Choi, E. K. Lee, J. J. Kim, H. R. Choi, "Performance evaluation of advanced container security device(ACSD) system based on IoT(internet of things)", *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 17, no. 9, pp. 2183-2190, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.6109/jkiice.2013.17.9.2183>
- [3] J. Kim, K. Kang, "A study on the reliability of the energy harvesting module for the wireless sensor node of the train", *Proceedings of KSME 2014 spring conference*, pp. 151-151, 2014.
- [4] D. Kang, W. Chung, "Integrated monitoring scheme for a maglev guideway using multiplexed FBG sensor arrays", *NDT & E International*, vol. 42, no. 4, pp. 260-266, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.11.001>
- [5] W. Chung, D. Kang, "Application of FBG Sensors for Monitoring of Railroad Bridge", *Journal of the Korea Concrete Institute*, vol. 24, no. 3, pp. 25-28, 2012.
DOI: <http://doi.org/10.22636/MKCI.2012.24.3.25>
- [6] D. Kang, D. H. Kim, S. Jang, "Design and development of structural health monitoring system for smart railroad-gauge-facility using FBG sensors", *Experimental Techniques*, vol. 38, no. 5, pp. 39-47, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2012.00844.x>
- [7] H. K. Kang, D. H. Kang, H. J. Bang, C. S. Hong, C. G. Kim, "Cure monitoring of composite laminates using fiber optic sensors", *Smart Materials and Structures*, vol. 11, no. 2, pp. 279-287, 2002.
DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/11/2/311>
- [8] W. Chung, D. Kang, "Full-scale test of a concrete box girder using FBG sensing system", *Engineering Structures*, vol. 30, no. 3, pp. 643-652, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.05.003>
- [9] K. H. Lee, D. H. Kim, "Shape monitoring of composite cantilever beam by using fiber Bragg grating sensors", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, vol. 37, no. 7, pp. 833-839, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2013.37.7.833>
- [10] D. Kang, K. Choi, "Development of Hybrid Measurement System for Railway Sites Using IoT Technology", *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, vol. 37, no. 5, pp. 327-334, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.7779/JKSNT.2017.37.5.327>

김헌영(Heonyoung Kim)

[준회원]



- 2013년 2월 : 서울과학기술대학교 기계공학과 (공학사)
- 2015년 2월 : 서울과학기술대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 & 연세대학교 기계공학과 (박사과정)

<관심분야>

광섬유 센서, 구조건전성 모니터링

강 동 훈(Donghoon Kang)

[정회원]



- 1998년 2월 : KAIST 항공우주공학
학과 (공학사)
- 2000년 2월 : KAIST 기계공학과
항공우주공학전공 (공학석사)
- 2004년 8월 : KAIST 기계공학과
항공우주공학전공 (공학박사)
- 2004년 11월 ~ 현재 : 한국철도기
술연구원 책임연구원

<관심분야>

나노소재, 복합소재, 광섬유센서, 비파괴검사, 사물인터넷