

중소교량의 지리적 특성을 고려한 무선 전력 및 통신 기술 기반 교량 장기 계측시스템 구축 방안 연구

권태호^{1*}, 정규산², 박기태², 김병철², 김재환²

Wireless Bridge Health Monitoring System for Long-term Measurement of Small-sized Bridges

Tae-Ho Kwon^{1*}, Kyu-San Jung¹, Ki-Tae Park¹, Byeong-Cheol Kim¹, Jae-Hwan Kim¹

Abstract: A bridge health monitoring technology is under development for the safety management of aged bridges. The bridge health monitoring technology has been developed mainly for single bridge management at a large scale, so it uses wire-based systems for power supply and data transfer. However, the wire-based systems need to be improved for the sporadically distributed small-sized bridges on local roads. This study proposed a wireless structural health monitoring system for small-sized bridges. The proposed monitoring system overcomes the limitations of wired systems by providing wireless power through solar power and utilizing LTE technology to transmit measurement data. In addition, a remote control system and power management plan were proposed to ensure the stability of the bridge measurement system. The proposed measurement system was installed on 32 bridges on fields and verified the operability by collecting 80.6% of measurement data for one year. The proposed system can support the health monitoring of aged bridges on local roads.

Keywords: Bridge structures, Small-sized bridges, Structural health monitoring system, Wireless-based measurement system, Long-term measurement

1. 서 론

국내외 교량 구조물의 노후로 인한 열화가 진행됨에 따라, 안전사고로 인한 인명피해를 방지하기 위한 교량 유지관리가 수행되고 있다. 정부는 1995년에 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법(MOLIT, 1995) 법안을 제정하여 교량의 규모에 따라 1종, 2종, 3종, 기타시설물로 구분하고, 교량 규모에 따른 점진·진단기반 유지관리를 시행하도록 하였다. 교량의 유지관리는 일정한 주기마다 교량의 상태를 점진·진단하고, 보수·보강을 수행하여 교량의 성능 유지를 목표로 한다. 하지만 점진·진단기반 유지관리는 비연속적 데이터를 기반으로 현재 시점의 정보로만 교량을 판단하여 교량의 성능변화를 추적하기 어렵다. 노후 교량은 2023년 4월에 발생한 정자교 사고와 같이 외부 요인으로 인한 열화, 콘크리트의 내구성 저하의 축적으로 인해 갑작스런 안전사고가 발생할 수 있다. 교

량의 안전사고는 인명피해를 동반할 수 있어, 노후교량의 안전사고를 방지하기 위한 추가 방안이 필요하다. 2022년 교량 통계자료(MOLIT, 2022)에 따르면 1970년대 이후 건설된 국내 교량구조물들은 2031년 기준 17,451개(전체 교량 수 대비 47%)의 교량이 노후화 교량으로 분류될 예정이다. 이를 위해 국내 노후 교량의 관리를 위한 교량의 성능변화를 지속적으로 감지하는 유지관리 방안이 필요하다.

최근 계측센서 기술의 발달로 교량에 계측센서를 활용한 실시간 계측관리시스템을 구축하여 구조물을 모니터링하는 Structural Health Monitoring(이하 SHM) 기술이 적용되고 있다(Kwon et al., 2021; Gordan et al., 2022). SHM 기술인 구조물 계측관리시스템은 계측센서를 통해 구조물 고유특성을 분석하고, 구조물의 상태를 상시 관리하는 목적이 있다. 국내에서는 특수교를 중심으로 계측시스템이 구축되고 있으며(Kim and Yu, 2016), 서울시는 월드컵대교를 포함하여 11개의 한강 교량에 계측시스템을 구축하였다(Seoul Metropolitan Government, 2011). 특수교 계측시스템들은 도심지에 위치하거나 근방에 위치한 관리 업체에서 유선으로 전원을 공급을 받고, 유선연결 혹은 근거리 무선통신을 통해 데이터를 수집하고 구조물의 성능을 관리한다(Wong et al., 2000; Jang et al., 2010). 최근에는 중소교량의 장기계측데이터를 활용하는 연구가 진행되고 있다.

¹정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 연구원, 교신저자

²정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 연구원

*Corresponding author: kwonh@kict.re.kr

Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2023년 9월 30일까지 학회로 보내주시면 2023년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Kyung et al.(1998)은 장기 계측된 처짐데이터를 활용하여 노후 교량의 안정성을 평가하였으며, Park et al.(2012)은 중소교량의 장기계측 데이터를 활용하여 피로 누적에 대한 교량 성능 저하를 예측하였다. 또한, Cho et al.(2007)은 교량의 진동데이터를 토대로 공용내하력을 추정하였으며, Ni et al.(2007)는 신축이음부의 성능을 평가하였다. 이러한 방법들은 장기계측데이터를 활용하여 교량의 현재 안전 상태를 판정하였다. 하지만 중소교량의 지리적 특성으로 인해 장기계측시스템 구축 사례가 부족하여 중소교량의 관리방안이 부족한 상황이다.

중소교량의 계측시스템 구축을 위한 주요 문제점은 전원공급원 확보의 어려움이다. 기존 유선 기반의 시스템은 거리에 따른 높은 구축비용을 요구하여 주로 외곽지역, 산간지역에 위치한 중소규모 교량에 적합하지 않다. 계측시스템의 위치적 한계를 극복하기 위해 Ho et al.(2012) 태양광 발전 기반 전원방식을 활용한 무선 계측센서를 제안하고 사장교에 적용하였다. 이러한 연구에도 실제 중소교량을 대상으로 자가발전 무선 기반 계측시스템을 구축한 사례가 부족한 실정이다. 둘째, 계측데이터와 서버 간의 통신 문제가 해결되어야 한다. 기존의 유선 방식, 근거리 무선통신을 통한 데이터 수집방식은 단일 교량을 관리하기에는 적합하지만, 넓게 분포된 다수의 교량을 관리하기에는 불리하다(Heo et al., 2011; Park et al., 2012). 따라서 본 연구에서는 중소교량의 계측데이터기반 SHM을 위한 무선 기반 상시 계측시스템을 구축하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 중소교량 계측데이터 수집, 관리 및 시스템 유지관리를 위한 무선 기반 상시 계측시스템 구축방안을 제안하였다. 제안한 무선 기반 상시 계측시스템은 태양광을 활용한 전력 확보방안과 무선통신을 활용한 데이터 수집 방안을 포함한다. 또한, 설치한 계측시스템의 신뢰도 확보를 위한 관리 방안도 제시하였다. 제안한 계측시스템은 실제 국내 32개소 교량을 대상으로 제안한 상시 계측시스템을 설치 및 운영하여 검증되었

다. 제안한 계측시스템은 관리 방안을 통해 발생하는 문제점에 대한 원격 개선이 가능함을 확인하였다.

2. 중소교량 계측을 위한 무선 기반 계측시스템 구축방안

본 장에서는 중소교량 계측을 위한 무선 기반 계측시스템을 크게 교량 현장에 설치되는 교량 현장시스템과 계측시스템 관리 방안으로 구분하여 서술하였다.

2.1 중소교량 계측을 위한 교량 현장 계측시스템 설치방안

국내 교량은 규모에 따라 1종, 2종, 3종 구조물로 구분된다. 도로교 기준 경간장이 500m 이하인 2종, 3종 교량은 도심지, 외곽지역과 산간지역에 주로 위치하여 상시전원 수급 및 서버 통신이 어렵다. 위치적 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 중소교량의 실시간 계측을 위한 무선 기반의 계측센서 시스템을 제안하였다. 제안한 계측시스템은 무선 기반 전원 확보방안과 통신방안으로 구분된다. Fig. 1은 제안한 중소교량 계측시스템의 개념도를 나타낸다. 계측시스템은 크게 전원부, 센서부, 통신부로 구분할 수 있다. 전원부는 전원을 생성하고 타 장치로 배전하는 역할을 하며, 센서부는 계측데이터를 수집하는 역할을 하며, 통신부는 계측데이터를 임시 저장 및 데이터베이스로 전달하는 역할을 한다. 본 연구는 무선 전력 확보방안으로 태양에너지를 통한 태양광 발전방식을 활용하였다. 태양광 에너지는 1) 교량 위치에 따른 제약이 가장 적고, 2) 운영비용이 상대적으로 낮으며, 3) 기후 변화를 초래하지 않는 친환경 에너지이기 때문에 선정되었다. 태양광 에너지 확보를 위한 전원부는 태양광 에너지로 직류 전력을 생성

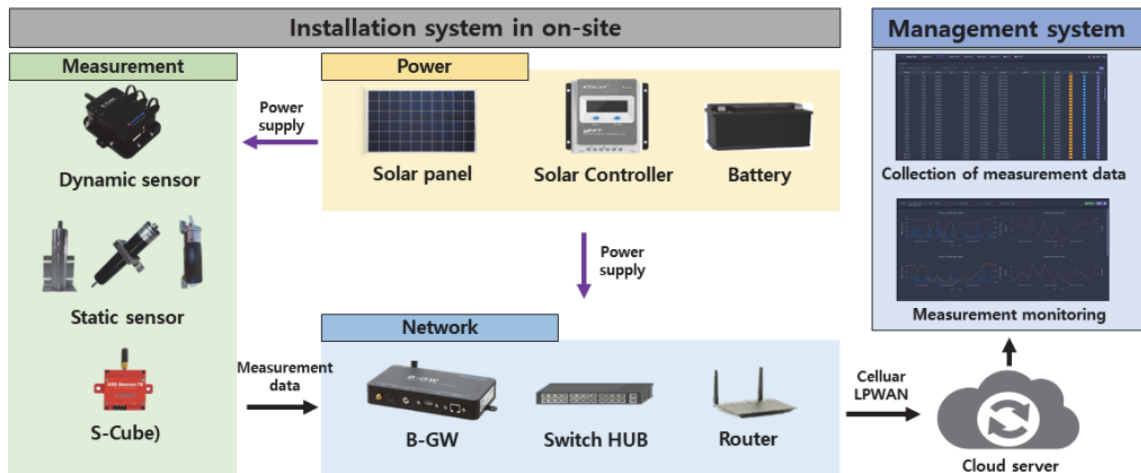


Fig. 1 Concept of a wireless-based measurement system

하는 태양광 패널부, 직류전기를 교류전기로 치환하는 인버터(inverter)부, 생성한 전기를 저장하는 축전지부로 구분된다. 제안한 태양광 전원부 시스템은 안정성 확보를 위해 일조 시간에 태양광 패널부에서 생성한 전류를 축전기에 저장하여 일조량이 없는 시간에 활용하도록 하였다. 태양광으로 생성된 전력은 계측부 및 통신부에 유선으로 공급된다.

계측부는 동적 센서와 정적 센서로 구분할 수 있다. 동적 센서는 가속도 센서 등 시계열 데이터베이스를 구축하는 센서이며, 정적 센서는 균열 등 정적 데이터를 계측하는 센서이다. 각 계측 센서와 통신부의 연결은 근거리 무선통신 방식을 적용하였다. 통신부에서 데이터 수신은 동적데이터는 B-GW로, 정적데이터는 Beacon에 수집하였다. 수집된 계측데이터는 클라우드 기반 데이터베이스로 전송하였다. 통신부와 클라우드 기반 데이터베이스와의 연결은 상용통신망 기반 무선통신 방식을 활용하였다. 본 연구에서는 태양광 전원방식으로 시스템을 운용하기 위해 다른 네트워크대비 낮은 전력을 요구하는 Cellular LPWAN 방식을 활용하였다. LPWAN 통신 라우터를 교량마다 설치하였으며, 게이트웨이에서 클라우드 서버에 송부하게 하였다. 데이터 전송의 효율을 위하여 게이트웨이에서는 1시간마다 수집된 데이터를 전달하였다. 서버에 수집된 계측데이터는 관리시스템과 연동되어 계측데이터를 관리하고, 계측데이터 수집에 대한 안정성 관리가 가능하다.

2.2 중소교량의 교량 계측시스템 관리 방안

제안된 계측시스템은 무선 기반으로 설계되었기 때문에 전력과 통신의 안정성 확보가 중요한 요인이다. 본 연구에서는 전원장치의 안정성 확보를 통한 전력 관리 모니터링 방법과 안정적인 계측데이터 확보를 위한 계측시스템 관리 방안을 제안하였다. 태양광 에너지방식은 이물질 부착으로 인한 태양광 패널의 효율 감소와 겨울철 일조시간 감소에 따른 충전 부족으로 인해 상시 전원보다 불안정하다. 특히, 전원 공급부족은 계측 센서 및 축전기의 방전을 초래하여 부품의 수명을 단축시키고, 데이터의 손실을 야기한다. 제안한 전력 관리 모니터링 방법은 Fig. 2와 같은 프로세스를 포함한다. 첫째, 태양광 패널, 축전기

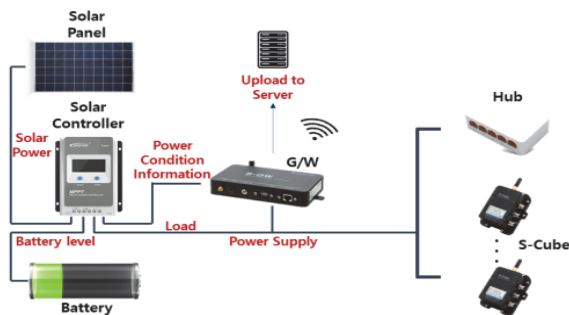


Fig. 2 Monitoring systems for power management

충전상태, 소모 전력을 지속적으로 모니터링 데이터를 수집한다. 둘째, 전원 모니터링 데이터를 통해 전원확보 취약 교량을 선정하고, 보완계획을 수립한다. 또한, 데이터 취득률과 전원 데이터를 비교하여 데이터 미수집 구간에 대한 원인을 분석한다. 계측데이터 미수집의 원인이 충전량의 문제일 경우 태양광 패널을 추가 설치하였으며, 일조간의 충전용량의 문제는 축전기를 추가하도록 하였다. 마지막으로 부품들의 방전을 예방하기 위해 축전기의 잔량이 10% 이하일 때, 센서부에 대한 전원 공급을 차단하게 하였다. 전력공급이 차단된 시스템은 충전용량의 70% 이상이 되면 자동으로 차단 해제되어 전력이 공급된다. 제안한 차단기능은 방전으로 인한 계측시스템의 부품들의 영구적인 손상을 방지할 수 있다.

무선 기반의 중소교량에 설치된 계측시스템의 안정성 확보를 위한 계측시스템 관리 방안을 제안하였다. 계측데이터는 시간 경과에 따라 지속적으로 수집되고, 정해진 간격으로 클라우드 서버에 수집된다. 클라우드 서버에 수집된 중소교량의 계측데이터는 모니터링 시스템을 통해 실시간으로 관리된다. 데이터 수집과정에서는 센서 문제, 통신 장애, 전원 문제 등 장애가 발생하며, 문제를 신속하게 인식하고 보완하는 계

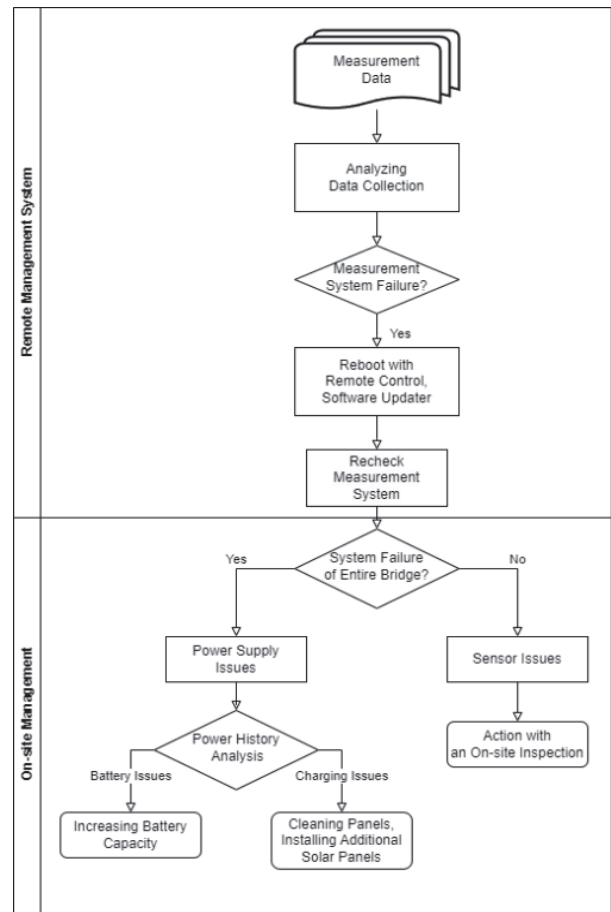


Fig. 3 Management method of bridge monitoring system

측시스템 관리과정이 필요하다. Fig. 3은 본 연구에서 제안한 계측시스템 관리 프로세스를 나타낸다. 점검단계는 실시간으로 계측데이터를 분석하여 분석 결과를 수집한다. 실시간 검사 항목은 계측데이터의 데이터 수신율과 계측 센서의 작동 여부로 설정하였다. 통신서버에 교량 단위의 데이터가 수집되지 않는 경우를 데이터 수집 문제로 판단하였으며, 센서 단위의 데이터 수집 문제를 센서 작동 문제로 판단하였다. 문제가 발생한 계측시스템은 원격제어를 통해 기기 초기화 및 소프트웨어 업데이트를 진행하였다. 중소교량의 현장 점검은 비효율적으로 이동시간 및 인력이 요구되기 때문에 원격제어 적용을 통해 최소화하였다. 원격 제어 이후에도 문제가 지속될 경우에는 손실된 구간 전후 계측데이터와 전력모니터링 결과를 분석하여 데이터 손실 원인을 파악하였다. 전력데이터의 문제는 크게 충전량 문제와 충전량 문제로 구분할 수 있다. 충전량 문제는 일조시간에 충전되는 충전 용량의 한계로 발생하는 경우이며, 충전량 문제는 태양판의 이물질, 우천 등으로 인한 충전량 문제이다. 각 문제들은 충전지 증설과 태양판 청소로 문제를 해결할 수 있도록 하였다. 또한 일부 센서의 문제는 현장 점검을 통해 관리하도록 하였다.

3. 중소교량 상시 계측시스템을 활용한 현장 교량 계측 실험

3.1 중소교량 계측시스템 교량 현장시스템 설치

제안한 중소교량 계측시스템의 적용 실험을 위해 실제 교량 현장에 적용하였다. 중소규모의 교량의 실험을 위한 계측센서 및 통신장비의 사양은 Table 1과 같다. 전원부는 일반적으로 태양광 패널을 1개씩 설치하여 150W를 확보하였으며, 일조시간 외 센서 작동을 위해 80AH용량의 축전기를 설치하였다. 한 교량에 2개 이상의 게이트웨이를 포함한 센서시스템을 구축하는 경우에는 태양광 패널을 추가로 설치하였다. 계측 센서는 총 58개의 가속도센서, 10개의 균열계, 49개의 횡변위계, 50개의 온도계, 48개의 온도계를 제작하였으며, 각 계측 센서는 실험실에서 계측기기의 성능에 대한 검증을 하였다.

제작된 센서 및 장비들을 활용하여 실제 지방도 교량 32개소에 제안한 무선 기반 계측시스템을 설치하였다. 교량의 선정은 1) 전국 교량 중 2중, 3중 이하 규모의 교량을 선정하였으며, 2) 선정 교량 중 국내에서 가장 많은 교량 형식인 RC슬래

Table 1 Hardware specification of wireless structural health monitoring system

Category	Module	Hardware specifications	
		Specification	Values
Power	Solar panel (150W)	Size	1306 x 660 x 40 (mm)
		Maximum-current	7.68A
		Maximum-voltage	20.6V
	Inverter	Excitation voltage	10A
		Current Carrying Capacity	12V
	Battery	Excitation voltage	12V
Capacity		80AH	
Network	CPU	CPU	1.2GHz ARM Cortex-A53 MP4
		RAM	1 GB LPDDR2
		Interfaces	10/100 Mbps Ethernet, USB2.0 X 1
	B-G/W	Wireless Interface	Bluetooth4.0Class 1
		Frequency Range	2.40 ~ 2.480GHz
		Receive Sensitivity	-90 dBm
		AntennaGain	Default 1 dBi, Optional 3 dBi & 5 dBi
	iLOG-beacon	Unit	16bit resolution
		Gain	100 Fixed
		Excitation voltage	2.7V
		Excitation current	50mA
iLOG-beacon	Input range	0V ~ 330mV	
	Temperature range	-20~80℃	
	Humidity range	0~100%	

Table 1 (Continued)

Category	Module	Hardware specifications		
		Specification	Values	
Measurement	Accelerometer	CPU	ARM-A7 1.2GHz , ATxmega128 32Mhz (SBC)	
		RAM	DDR3 256M (SBC)	
		Range	±2.0g	
		Noise Density	22.5 ug/rtHz	
		Sensitivity	400mV/g	
		Sampling rate	50 ~ 200 SPS	
		Unit	24bit	
		Capacity	Micro SD 16GB	
		Crack gauge	Guage Capability	10mm
			Rated output	Approx. 2.5mV/V
	nonlinear		0.5% RO	
	Transverse displacement gauge	Guage Capability	50mm	
		Rated output	Approx. 5mV/V	
		nonlinear	0.5% RO	
		Unit	16bit resolution	
		Gain	100 Fixed	
	Thermo-hygrometer	Excitation voltage	2.7V	
		Excitation current	50mA	
		Input range	0V ~ 330mV	
		Temperature range	-20~80℃	
Humidity range		0~100%		

브교, 라멘교, PSC I형교, 강상자형교 교량을 대상으로 예비 목록을 선정하였다. 선정된 예비 교량들 중 제한한 무선 기반 계측시스템 설치의 작업성을 고려하여 최종 교량이 선정되었다. 선정 교량은 서울, 경기, 충북, 경북 4 개 지역의 지방도 교량이며, 교량들의 형식별 개수는 RC슬래브교 11개소, 라멘교 7개소, PSC I형교 12개소, 강상자형교 2개소였다. 대상 현장

교량에 설치된 계측 센서의 총 개수는 179개이다.

선정된 교량 32개소에 무선 기반 계측시스템을 구축하였다. Fig. 4는 교량에 설치한 계측시스템의 실제 설치 예시이다. 태양광 패널은 원활한 배터리 충전이 가능하도록 하루 중 일조량이 제일 많은 남쪽 방향으로 설치하였다. 태양광 패널의 하루 충전 가능 시간을 1년 평균 일조시간인 3.5시간으로 계



(a) Solar panels



(b) Crack gauge



(c) Network equipments

Fig. 4 The installation cases of proposed bridge monitoring system

산하여 설치하였으며, 배터리의 용량은 충전 불가능을 가정하여 4일 동안 성능유지가 가능한 용량에 안전율 1.25로 설정하였다. 또한 태양광 패널 설치 후 보행자 또는 차량통행에 불편함을 주지 않기 위해 교량 난간의 외부방향 또는 하천의 구조물 위에 설치하였다. 전원 배터리 및 통신부를 포함하는 분전함은 분전함의 고정용이한 교량의 구조물 또는 하천의 구조물 등에 설치 가능한 곳에 설치하였다. 센서부는 계측항목에 따라 설치 위치를 선정하였다. 가속도 센서는 거더의 중앙부, 받침변위 센서는 거더의 양 끝에 설치되었다. 균열 센서는 보수되지 않은 균열부에 설치되었다. 또한, 온/습도 센서를 타 센서 설치위치에 같이 부착하여 온습도의 영향을 보정할 수 있게 하였다. 각 계측 센서의 초기 성능 검증을 위해 설치 직후 데이터 수집 여부 및 계측성능 테스트를 진행하였다. 운영단계에서는 2.2절에서 제안한 계측데이터 관리 프로세스를 기반으로 계측시스템을 관리하였다. 실시간으로 수집되는 계측데이터 수집률을 확인하였으며, 데이터 미수집의 원인을 분석하여 원격제어를 통해 해결하였다. 통신문제의 경우 설치된 B-G/W에 일정 기간의 백업데이터를 구축하여 일부 통신 문제에 대응하였으며, 전원문제의 경우 현지 출장을 통해 태양광 패널 청소, 배터리 교체 등을 수행하였다.

3.2 무선 기반 상시 계측시스템 운영 결과 및 토의

제안된 무선 기반 계측시스템을 현장 교량 32개소에 적용하여 무선 기반 계측시스템을 검증하였다. 제안한 계측시스템의 장시간 계측 가능성을 확인하기 위해 12개월 동안 제안한 무선 기반 계측시스템을 운영하였다. 실험기간은 2021년 9월부터 2022년 8월이다. 동적데이터는 100Hz로 수집되었으며, 정적데이터는 10분마다 수집되었다. B-G/W에 수집된 데이터는 1시간마다 게이트웨이에서 LTE를 통해 통신서버로

전송하였다. 데이터 서버는 계측데이터 및 교량별 전원데이터를 수집하고, 지속적으로 수집데이터를 분석하였다.

본 연구에서는 제안한 계측시스템의 성능지표를 계측데이터의 획득률로 설정하였다. 무선 기반 계측시스템은 전원부 및 통신시스템의 안정성에 따라 데이터 획득률이 증감할 수 있다. 본 연구의 검증을 위해, 각 교량에서 수집된 센서데이터를 동적데이터와 정적데이터로 구분하여 데이터 취득률을 분석하였다. Table 2와 Fig. 5는 데이터 획득률 테스트 결과를 나타낸다. 테스트 결과는 계측시스템의 침수 등 문제로 인한 하루 계측데이터가 없는 경우는 제외한 결과이다. 설치한 계측시스템의 데이터 획득률은 전체 평균 85.0% 였다. 동적데이터인 가속도데이터는 93.3% 였으며, 정적데이터는 80.5% 였다. 동적데이터와 정적데이터의 취득률 차이는 데이터의 특성 차이로 판단된다. 동적데이터는 전체 데이터가 충분하기 때문에 일부 데이터의 손실에도 취득률이 유지되었지만, 상대적으로 정적데이터는 일부 데이터의 손실에도 큰 변동폭을 보였다. 주요 데이터 획득률 감소구간은 겨울철인 10월부터 차년도 1월까지와 여름철인 7월에서 8월까지였다. 실제 현장답사와 전원 데이터 분석을 통해 획득률 감소 원인을 도출하였다. 10월부터 차년도 1월까지 겨울철에 발생한 데이터 손

Table 2 Average collection rate of measurement system

Category	Type	Data acquisition rate
All sensors		85.0%
Dynamic sensors	Accelerometer	93.3%
	Thermo-hygrometer	79.1%
Static sensors	Crack	80.3%
	Transverse displacement	81.8%

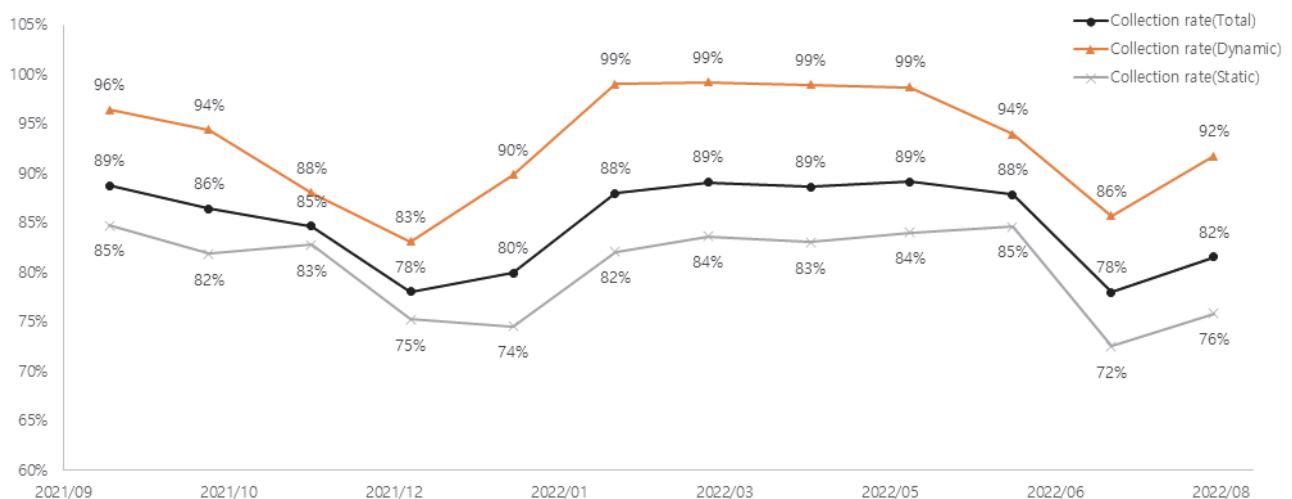


Fig. 5 Monthly collection rate for one year

실의 주요 원인은 태양광 충전량 부족으로 인한 전원 부족이다. 충전 효율 감소는 계절적 특성으로 인해 짧은 일조시간과 눈 등의 이물질로 인한 충전 효율의 감소로 인해 발생하였다. 하루 충전량의 감소는 계측시스템의 정상 작동을 방해하고, 데이터의 손실을 초래하였다. 통신부 문제는 임시 저장형태를 통해 해결이 가능하지만, 센서 전력부족은 계측데이터의 수집률에 직접적인 영향을 주었다. 또한, 7월부터 8월까지 여름철 데이터 손실의 주요 원인은 태풍, 장마 등 폭우로 인한 센서시스템 하드웨어의 침수였다. 교량 사용성 유지를 위해 주로 교량 하부에 계측센서를 부착하였기 때문에 일부 홍수지역의 계측시스템 자체가 침수되었다. 침수된 계측시스템은 기능을 상실하여, 데이터 획득이 불가능하다. 그 외 데이터 획득률 감소 요인으로는 원인 불명의 장치 파손, 손실이 있었다. 관련 문제는 관리 방안을 통해 복구하였으며, 완전히 침수된 시스템 2개소를 제외하고 복구 가능함을 확인하였다.

4. 결 론

교량의 계측시스템은 전원공급과 데이터 통신을 위해 주로 유선 방식을 활용하지만 도심 외곽에 위치하는 중소규모의 교량은 주변 전원 공급원의 부족으로 인해 유선 방식을 활용하기 어렵다. 본 연구에서는 중소규모 교량의 무선 기반 상시 계측시스템을 구축하기 위한 하드웨어 설치 및 운영방안을 제안하였다. 제안한 계측시스템은 실제 교량을 대상으로 실험을 통해 검증되었다. 무선 기반 계측시스템은 다수의 교량을 관리하는 지방자치단체 관리자가 노후 중소교량의 유지관리를 실시간으로 감시하고 신속한 유지관리 의사결정을 가능하게 할 것으로 기대된다. 본 연구결과는 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 기존 유선 중심의 방식의 한계를 극복한 중소교량의 무선 기반 실시간 계측시스템이 개발되었다. 중소교량의 한계점인 전원 확보 문제는 태양광 에너지를 활용한 자가발전 방식을 통해 극복하였고, 원거리 통신 문제는 Cellular LPWAN 데이터 송신 방법으로 가능함을 확인하였다.
- 2) 제안한 방법은 실제 32개소의 현장 실험을 통해 계측데이터의 취득률을 수집하였다. 본 연구의 현장 실험결과는 무선 기반 계측시스템의 안정성을 검증하였다. 주요 데이터 손실 원인은 충전량 부족과 센서의 침수였다. 향상된 안정성을 확보하기 위해서는 교량의 위치와 계절적 변화에 따른 일조량 검토가 충분히 고려되어야 하며, 높은 안전율로 설정되어야 한다. 또한, 침수 가능성을 고려하여 센서 위치가 결정되어야 한다.
- 3) 무선 기반 계측시스템의 한계점을 극복할 수 있는 무선

계측시스템 관리 방안을 제안하였다. 데이터 취득률을 통해 문제점을 발견하고, 원격제어를 통해 해결할 수 있게 하였다. 또한, 전원공급 데이터를 활용하여 전원에 대한 안정성을 확보하여 방전에 의한 피해를 예방하였다. 이러한 방식은 유지보수를 위한 인력을 최소화하고, 방전으로 인한 영구손상을 예방할 수 있을 것으로 예상된다.

- 4) 본 연구는 중소교량의 계측데이터 수집을 목적으로 계측시스템을 구축하였다. 구축된 계측시스템 활용을 위해서는 수집한 상시 계측데이터를 기반으로 중소교량의 실제 유지관리에 활용할 수 있는 기술이 필요하다. 따라서 중소교량 계측데이터의 이상 발생 유무를 감지하기 위한 관리기준치를 설정하는 연구와 계측데이터를 유지관리의 성능지표로써 활용하기 위한 후속 연구가 진행되어야 한다. 또한, 장기적으로 계측시스템을 운영하기 위해서는 계측시스템의 내구성능에 대한 연구가 진행되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(주요사업)사업으로 수행되었습니다(과제번호 2023 0073-001, DNA 기반 노후 교량 구조물 스마트 유지관리 플랫폼 및 활용기술 개발).

References

1. Cho, S. J., Yi, J. H., Lee, C. G., and Yun, C. B. (2007), Evaluation of Load Carrying Capacity of Bridges Using Ambient Vibration Tests, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Korean Society of Civil Engineers, 27(1A), 79-89.
2. Gordan, M., Sabbagh-Yazdi, S. R., Ismail, Z., Ghaedi, K., Carroll, P., McCrum, D., and Samali, B. (2022), State-of-the-art review on advancements of data mining in structural health monitoring, *Measurement*, Elsevier, 193, 110939.
3. Heo, G. H., Lee, W. S., Lee, C. O., Jeon, J. R., and Sohn, D. J. (2011), Development of smart wireless measurement system for monitoring of bridges, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, The Korea institute for Structural Maintenance Inspection, 15(2), 170-178 (in Korean).
4. Ho, D. D., Lee, P. Y., Nguyen, K. D., Hong, D. S., Lee, S. Y., Kim, J. T., Shim, S.W., Yun, C.-B., and Shinozuka, M. (2012), Solar-powered multi-scale sensor node on Imote 2 platform for hybrid SHM in cable-stayed bridge, *Smart Structures and Systems*, International Association of Structural Engineering And Mechanics, 9(2), 145-164.
5. Jang, S., Jo, H., Cho, S., Mechitov, K., Rice, J. A., Sim, S. H. Jung, H.-J., Yun, C.-B., Spencer, B. F., and Agha, G. (2010), Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using smart sensor technology: deployment and evaluation, *Smart Structures and*

- Systems*, International Association of Structural Engineering and Mechanics, 6(5-6), 439-459.
6. Kim, G. S., and Yu, D. U. (2016), Introduction of Long Span Bridge Management Center, *Journal of Disaster Prevention*, Korea Disaster Prevention Association, 18(1), 63-75 (in Korean).
 7. Kwon, T. H., Park, S. H., Park, S. I., and Lee, S. H. (2021), Building information modeling-based bridge health monitoring for anomaly detection under complex loading conditions using artificial neural networks, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, Springer, 11, 1301-1319.
 8. Kyung, K. S., Lee, Y. I., Lee, H. H., and Park, Y. J. (1998), A Study on Maintenance of Deteriorated Bridge By Long-Term Displacement Monitoring. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, The Korea institute for Structural Maintenance Inspection, 2(3), 194-204 (in Korean).
 9. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (1995), Special act on the safety control and maintenance of establishments.
 10. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2022), Yearbook of road bridge and tunnel statistics (in Korean).
 11. Ni, Y. Q., Hua, X. G., Wong, K. Y., and Ko, J. M. (2007), Assessment of bridge expansion joints using long-term displacement and temperature measurement, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, ASCE, 21(2), 143-151.
 12. Park, J. O., Park, S. H., An, S. J., Park, W. J., and Kim, J. H. (2019), A Study on the Application of Bridge Maintenance System using LoRa LPWAN Wireless Communication, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, The Korea institute for Structural Maintenance Inspection, 23(1), 138-146 (in Korean).
 13. Park, J. W., Chae, M. J., Lee, G., and Cho, M. Y. (2012), Test-bed Development for Long-term Monitoring of Small Bridge Asset Management, *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, The Korea institute for Structural Maintenance Inspection, 13(6), 13-23 (in Korean).
 14. Seoul Metropolitan Government (2011), Hangang bridge on-line safety monitoring system, <http://hbsafety25.eseoul.go.kr> (accessed on 10 May 2023).
 15. Wong, K. Y., Lau, C. K., and Flint, A. R. (2000), Planning and implementation of the structural health monitoring system for cable-supported bridges in Hong Kong. *Nondestructive Evaluation of Highways, Utilities, and Pipelines IV*, United States, 3995, 266-275.

Received : 05/26/2023

Revised : 07/25/2023

Accepted : 08/09/2023

요 지 : 국내 교량들의 노후화 진행에 따라 구조물의 지속적인 안전관리를 위한 실시간 계측 기반의 교량 관리시스템이 필요하다. 현재 교량 계측시스템 기술은 대형 단일 교량의 계측을 중심으로 발전하여 유선을 기반으로 전원을 공급하고 계측 데이터를 수집한다. 하지만 산발적으로 분포하는 중소교량에는 위치적 문제로 인해 유선 기반 계측시스템을 적용하기 어렵다. 본 연구에서는 중소교량을 대상으로 무선 기반 계측시스템을 구축하는 방안을 제안하였다. 제안한 무선 기반 계측시스템은 기존 유선 기반의 계측시스템의 한계를 극복하기 위해 태양광 발전을 통해 무선 전원을 확보하였으며, LTE 통신을 활용하여 데이터를 송출하게 하였다. 또한, 교량 계측시스템의 관리를 위한 시스템 원격 제어 방안과 전원 관리 방안도 제안되었다. 제안한 계측시스템의 검증에 위해 실제 지방도상의 교량 32개소에 설치되었으며, 1년간의 장기 계측 데이터를 수집하였다. 설치된 테스트 베드에서 80.6%의 계측데이터 취득이 가능함을 확인하여 제안한 계측시스템의 운용 가능성을 검증하였다. 제안된 시스템 구축방안은 지방도상 노후 교량들의 안전감시에 활용 가능할 것으로 기대된다.

핵심용어 : 교량 구조물, 중소교량, 계측모니터링, 무선 기반 계측시스템, 장기 계측
