

저비용 고효율의 IoT 기반의 부력식 레벨센서 설계

김병곤^{1,+} · 장수관¹

Design of IoT-based Buoyancy-based Level Sensors for Low-cost and High-efficiency

Byeongkon Kim^{1,+} and Sookwan Jang¹

Abstract

This study developed a buoyancy-based level sensor composed of a buoyant object, a sensing unit, and a signal generation unit to meet the demand of low-cost, high-efficiency inundation-detection sensors. The volume of the submerged buoyant object remained nearly constant even in the presence of water-level fluctuations, allowing stable water-level data acquisition. The measurement resolution and measurement repeatability were confirmed to be within 0.4 mm and 0.3%, respectively. LoRa-based communication was used to implement the IoT-based inundation-detection sensor. The measurement deviation between the sensors is approximately 0.15%. The unresponsive level at which measurement was not possible was confirmed to be approximately 2 mm. Excluding this unresponsive range, the water level measurements exhibited very high linearity, allowing precise measurements. Furthermore, a test bed was established in an inundation-vulnerable area using buoyancy-based level sensors.

Keywords: Buoyancy-based level sensor, Buoyant object, LoRa, Water level, Measurement resolution, Testbed

1. 서 론

침수감지센서는 계측된 데이터를 활용하여 실시간 모니터링, 침수예측, 침수지도 작성 등 다양한 분야에 활용되고 있다. 빅데이터로의 활용 가능성을 높이기 위해서 보다 많은 곳에 침수감지센서가 설치되어야 하고, 침수 데이터의 안정적 확보를 위해서 설치된 센서의 원활한 유지관리가 필수적으로, 이에 저비용 고효율의 센서가 요구되고 있다.

물에 직접 닿지 않는 초음파나 적외선을 이용한 비접촉식 침수감지센서는 부식의 위험이 낮아서 다양한 환경에서의 사용이 가능하나 상대적으로 비용이 높고, 특히 여름철 집중호우에 의한 도심 하천의 수위가 급격하게 변화하는 경우, 강한 물결과 부유물 등에 영향을 받아 신뢰도 높은 계측에 제약이 있다. 이와 비교될 수 있는 접촉식 침수감지센서는 단순한 구조와 비교적 안정적인 내구성을 갖고 있고 설치 비용이 낮아 상대적으로 경제적인 장점이 있지만 물에 장시간 노출되면 부식될 수 있고

염분이나 점성이 있는 액체에 노출되면 정확도가 떨어질 수 있는 단점이 있다[1-5].

본 논문에서는 저비용으로 높은 신뢰도의 데이터 확보의 요구사항을 충족시킬 수 있는 접촉식 레벨센서를 개발하여 테스트베드를 구축하는 데까지의 내용을 다뤘다. 부력을 이용한 레벨센서를 설계하여 높은 해상도와 측정 반복성을 확인하였고, IoT 기반의 침수감지센서로 사용하기 위해서 저전력 블루투스(BLE, Bluetooth Low Energy)와 LoRa (Long-range)통신 기능이 포함된 센서와 연동할 수 있는 시스템 보드도 함께 개발하였다. 단순한 구조로 유지관리가 수월하고 계측 신뢰도가 높게 설계된 부력식 레벨센서를 통해서 침수감지센서로의 활용성 증대와 데이터 확보의 안정성을 실증하여 기존 침수감지센서가 가진 문제점을 해결하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 부력식 레벨센서

2.1.1 부력과 아르키메데스 원리

부력은 액체나 기체와 같은 유체에 잠긴 물체가 받는 위로 떠오르는 힘을 의미하고, 그 힘은 물체가 밀어낸 유체의 무게와 같다. 부력의 크기는 물체가 유체에 잠긴 부피에 비례하며, 이는 아르키메데스의 원리에 의해 설명된다.

¹ 주식회사 세라토르 (CERATORQ, Inc.)
1003, 8, Ori-ro 651beon-gil, Gwangmyeong-si, Gyeonggi-do 14303, Korea
⁺Corresponding author: bkk@ceratorq.com
(Received: Aug. 7, 2024, Revised: Aug. 16, 2024, Accepted: Aug. 23, 2024)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

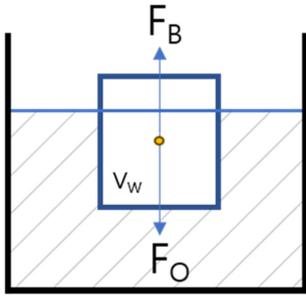


Fig. 1. An illustrated example of buoyancy. A floating object's weight F_O and its buoyant force F_B must be equal in magnitude.

$$F_B = \rho_w g V_w \tag{1}$$

여기서 F_B 는 부력, ρ_w 는 물의 밀도, 그리고 V_w 는 부력부재가 잠긴 부피를 의미한다.

아르키메데스의 원리는 수식 (1)로 표현되고 Fig. 1은 수조의 물에 물체가 떠 있는 상태를 나타낸 그림으로 물체가 잠긴 부피(V_w)에 해당하는 물의 무게가 부력(F_B)이고 이는 물에 떠 있는 물체의 무게와 같아야 함을 의미한다[6-7].

2.1.2 부력식 레벨센서의 구성

액체의 수위 상승과 비례하여 부력이 발생할 수 있는 부력부재(Buoyant Object)가 있고, 부력부재의 하중(F_g)을 측정할 수 있는 센싱부(Sensing Unit)를 포함하는 부력식 레벨센서를 Fig. 2에 도식화하였다.

물과 같은 액체가 유입됨에 따라 공간 내 수위가 L1만큼 상승한다. 이때 부력부재는 L1의 수위상승 따라 센싱부에서 부력부재의 변화된 하중을 감지할 수 있다. 부력부재에 수위가 L2만큼 더 상승하면 L2의 높이와 부력부재의 면적을 곱한 V2부피만큼 더 잠기게 된다. 이때의 부력은 F1에서 F2로 더 커지고 부력부재의 하중은 F_g 에서 F_g' 로 낮아진다.

Fig. 2와 같이 액체에 잠길 수 있는 부력부재와 부력부재의 하중을 측정할 수 있는 센싱부의 종류를 설정하고, 측정된 아날로

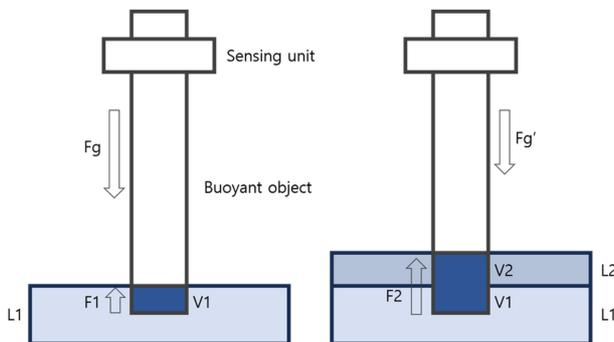


Fig. 2. Changes in buoyancy relative to changes in water levels.

그 데이터를 디지털 데이터로 변환시킬 수 있는 신호발생부를 조합하면 부력식 레벨센서 제작이 가능하다.

2.2 부력식 레벨센서의 시험 환경

부력부재, 센싱부와 신호발생부를 포함한 부력식 레벨센서 5개를 샘플로 제작하였다. 부력부재는 직경이 30 mm, 길이 250 mm의 봉(Rod)으로 재질은 ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) 수지를 사용하였다. 센싱부에는 부력 측정이 가능한 스트레인 게이지(Strain Gauge)를 적용하였고 특성은 Table 1에 정리하였다.

Fig. 3과 같이 스탠드에 샘플을 고정시키고 물이 들어 있는 수조를 높이 조절 장치(Height Adjustment) 위에 올려놓았다. 높이 조절 장치에 의해서 부력부재의 잠긴 깊이를 자유롭게 조절할 수 있게 하였고, 수위 측정에 보다 정확한 위치 설정을 위한 방법으로 레이저 센서를 함께 이용하였다.

부력식 레벨센서의 해상도 평가하기 위해서 부력부재를 10 mm 잠기게 하여 영점(Tare Weight)을 설정하였다. 물이 최대한 흔들리지 않도록 약 3 mm/min의 속도로 잠기게 하면서 센싱부에서 인식하는 최소 변화값을 확인하였다.

5개의 샘플은 차례로 스탠드에 고정, 기준 수위에 위치시킨 후 평가를 진행하였고, 부력부재가 받는 부력의 크기를 계산하기 위해서 수조에 담긴 물의 온도를 측정하여 20 °C 물의 비중인 0.99823을 수식에 적용하였다.

반복성 평가는 부력부재를 기준 수위(10 mm)로부터 100 mm 더 깊게 빠른 속도로 위치시켰고 수조 내 수위가 안정될 때까지 30초 이상 기다린 후 획득한 데이터를 측정값으로 선택하였다. 부력부재를 기준 수위로 원위치 시키는 과정을 반복하였으

Table 1. Properties of strain gauges used in buoyancy-based level sensors.

Parameter	Specification (@ 24°C, 50 %RH)
Gauge Length	5 mm
Resistance	350.6 ± 0.6 Ω
Gauge Factor	2.11 ± 1.0 %
Thermal Expansion	11.7 ppm/°C

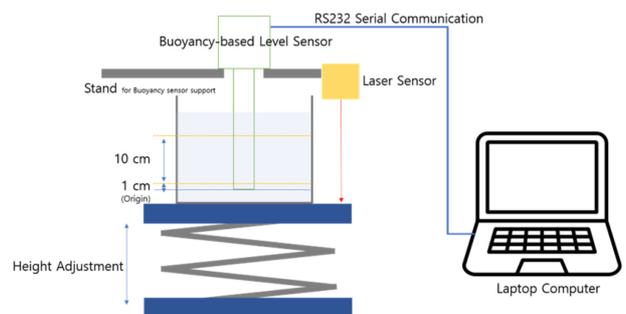


Fig. 3. A test environment for buoyancy-based level sensors.

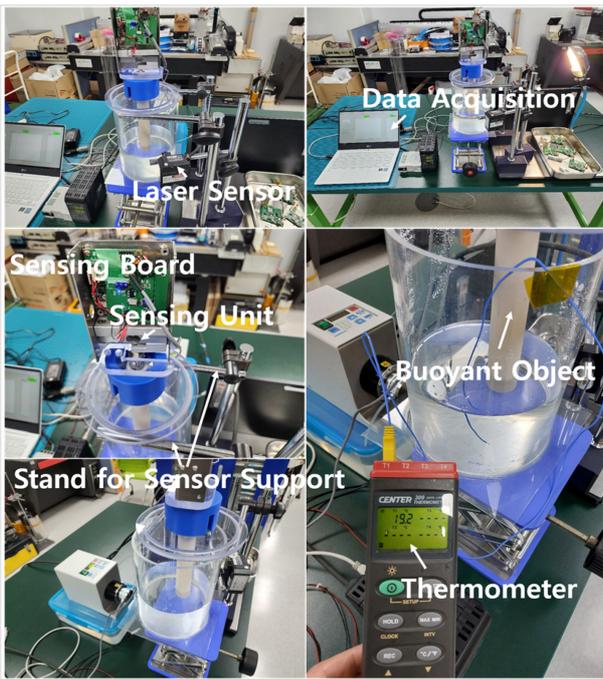


Fig. 4. Evaluation device and environment for water level measurement using a buoyancy-based level sensor.

며 100 mm 잠긴 수위를 측정, 기준수위로부터 발생한 편차를 5회 평균하여 편차율을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 부력식 레벨센서의 특성

모든 샘플이 수위 변화에 따른 부력 변화의 선형성(Sensing Linearity)을 보였고, 수식 (1)을 이용한 부력 계산값과 측정된 데이터가 일치함을 확인할 수 있었으며 부력과 부력부재의 직경으로부터 현재 수위를 도출할 수 있었다. 샘플 센서의 평균 해상도와 반복성은 각각 0.4 mm, 0.3 % 이내로 확인되었다. 5 개의 샘플 센서의 해상도와 반복 측정 정밀도를 Table 2에 정리하였다.

센서 개별로 비교했을 때는 2배가 넘는 편차를 보였는데 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 부력부재와 물 사이에 형성되는 메니스커스(Meniscus)에 의한 것으로 확인되었다.

메니스커스는 액체의 표면이 표면장력에 의해 주위가 중앙에 비해 곡면을 형성한 모습을 의미한다. 액체 간 상호작용, 액체와 물체와의 상호작용의 크기 차이에 의해 형성되는 것으로 부력부재가 물에 잠길 때와 나올 때의 메니스커스의 방향이 반대로 바뀐다.

수위가 올라갈 때에는 위로 볼록한 형태의 메니스커스가 형성돼 부력부재의 수위가 외부 수위보다 낮아져서 메니스커스 높

Table 2. Resolution and repeatability of the buoyancy-based level sensor (each data point represents the average of five measurements).

Evaluation	Data Acquisition				
	Sensor #1	Sensor #2	Sensor #3	Sensor #4	Sensor #5
Resolution(mm)	0.292	0.384	0.472	0.648	0.328
Repeatability(%)	0.096	0.008	0.348	0.45	0.376

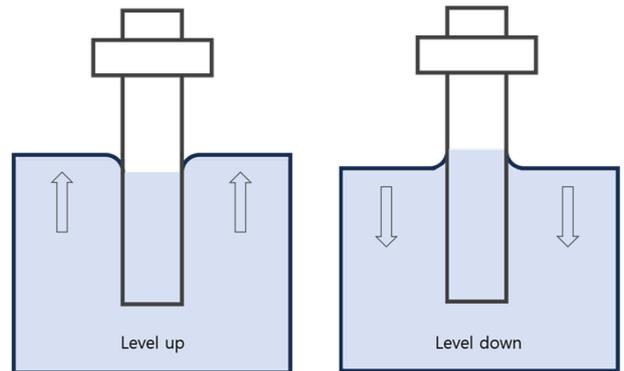


Fig. 5. A schematic of meniscus formation. As the water level rises, it forms a convex meniscus. As the water level falls, it forms a concave meniscus.

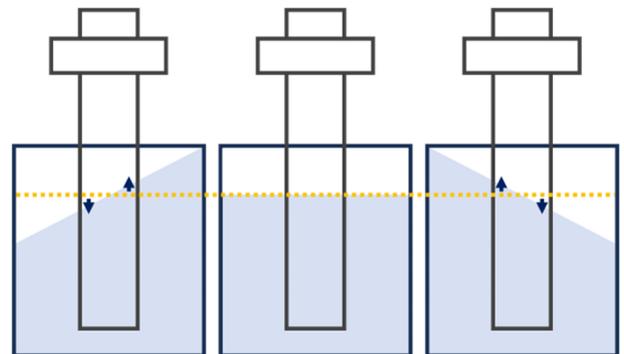


Fig. 6. Buoyancy of a floating object. Even if the water fluctuates, the submerged volume of a buoyant object remains nearly constant.

이만큼 낮은 수위로 측정되고, 수위가 내려갈 때는 이와는 반대로 주변 수위보다 부력부재의 수위가 높아서 메니스커스 높지만 큰 더 높은 수위로 측정된다. 물의 표면장력에 의해 생성된 메니스커스는 부력부재의 부력에 영향을 주어서 정량적 수위 측정에 대한 오차를 발생시키는 요인이 된다. 본 연구에서는 대략 수위 상승 시 -1 mm, 수위 하강 시에는 +1 mm 수준의 오차를 보였다.

이와 별개로 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 해당 수위에서 물이 출렁거리더라도 물에 잠긴 부력부재의 부피가 물결이 없을 때의 부피와 비슷하다. 출렁이는 물에서도 부력부재가 받는 부력이 비교적 일정하게 유지되어 안정적인 수위 데이터의 확보가 가능하였다.

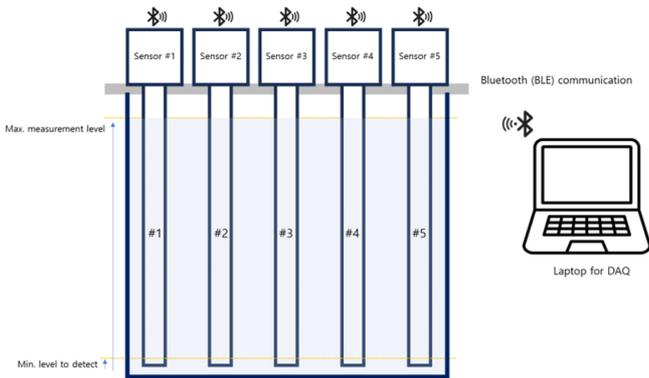


Fig. 7. An example of data acquisition using wireless communication. The diagram shows a water level measurement environment with a 5-sample buoyancy-based level sensor using Bluetooth communication.

3.2 부력식 레벨센서의 침수감지센서 구현

3.2.1 침수감지센서화

부력식 레벨센서를 침수감지센서로 적용하기 위해서 물에 대한 내부식성이 강해야 하고 수위 측정 범위가 넓어야 한다. 구조적으로 부력부재는 일정 길이의 봉(Rod)을 연장하여 사용할 수 있어서 1 m 이상의 수위 측정도 가능하다.

부력부재의 단면적이 넓을수록 동일 수위에서 더 많은 부력을 받아 더 높은 해상도를 구현할 수 있으나, 물의 표면장력에 의한 메니스커스 면적 또한 넓어져서 부력부재 하단면에서의 수위 측정 오차가 심화될 수 있다.

메니스커스의 영향을 줄이기 위해서 304SS (304 Stainless Steel) 재질의 직경 20 mm, 길이 900 mm (450 mm, 2개 체결)의 부력부재를 준비하였고, Fig. 7과 같이 블루투스(BLE) 통신으로 다수개의 센서 데이터를 순차적으로 계측하여 센서 간 편차와 센서가 측정할 수 있는 수위 범위를 확인하였다.

Fig. 8과 같이 5개의 샘플 센서가 부착된 수조에 정량 펌프를 이용하여 약 1 mm/min의 속도로 부력부재를 잠기게 하면서 30 초마다 각각 측정된 센서별 수위를 확인하고 laptop에서 수위 변화가 감지될 때까지 위의 과정을 반복하였다. 측정 수위가 감지되면 수조의 물을 빼고 다시 측정을 반복하여 최소 감지 수위를 확인하였다.

이와 반대로 최대 감지 수위에 대한 평가를 위해서 수조에 100 mm/min의 속도로 물을 채웠으며 100 mm 수위 상승 때마다 센서별로 측정된 수위를 확인하였고, 센서 간의 편차를 확인하면서 900 mm의 부력부재가 거의 다 잠길 만큼의 수위까지 수조에 물을 채웠다.

센서 간의 수위 편차율은 약 0.15 %로 부력부재가 거의 잠길 때까지 측정된 부력의 선형성은 유지되어 계측된 수위와 수조의 수위가 일치함을 확인하였다. 수위 편차율을 계산하기 위한 수위 데이터는 Table 3에 정리하였다.

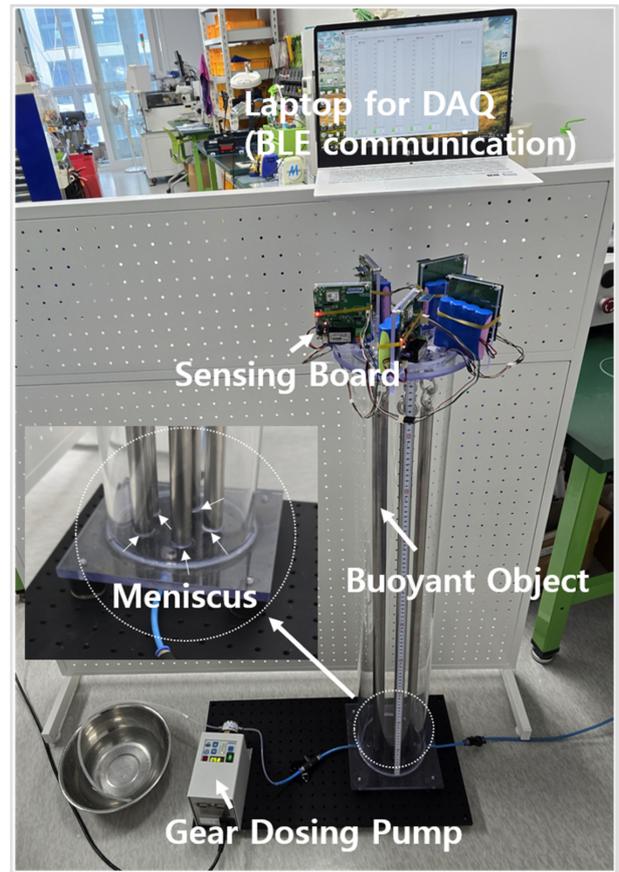


Fig. 8. Minimum and maximum water level measurement environment using the buoyancy-based level sensors.

Table 3. Water level measurements (five sample sensors were measured five times to calculate the water level deviation rate)

	Data Acquisition						Average Level	Standard Deviation
	N	Sens#1	Sens#2	Sens#3	Sens#4	Sens#5		
WATER LEVEL (mm)	1	883	881	878	882	881	881	1.673
	2	873	873	872	873	875	873	0.980
	3	885	884	883	883	887	884	1.480
	4	886	888	890	891	886	888	2.040
	5	885	886	886	885	886	886	0.490
	Total Average						882	1.336

* Deviation Rate = Standard Deviation / Average Level × 100 (%)

최소 감지 수위 평가에서는 메니스커스의 영향을 받아 약 2 mm의 수위에 도달한 이후부터 부력 변화의 선형성이 확인되었다. 이는 불감응 영역이 2 mm 수준이라는 것을 의미하는 것으로 접촉식 레벨센서에서 보편적으로 사용되는 약 25 mm의 불감응 영역을 갖는 필름형 레벨센서(eTape, Milone Technologies, Inc)와 비교하면 불감응 영역이 거의 없다고 판단해도 무방하다고 할 수 있는 수준이었다.

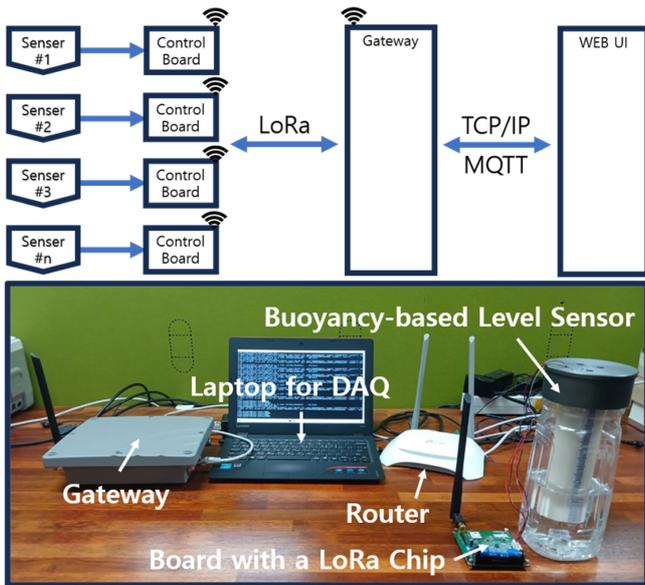


Fig. 9. Setting up a LoRa evaluation environment. Design scenario and validation of a board with an integrated LoRa chip.

3.2.2 IoT기반의 침수감지센서

IoT 기반 침수감지센서는 관리자와 통신할 수 있도록 인터넷에 연결되어야 한다. LoRa 통신은 한 개의 게이트웨이(Gateway)로 다수개의 센서와 통신이 가능한 장점이 있어서 다수개의 센서와 통신할 때 비용측면에서 효율성이 높아 주로 사용되는 통신 방법이다[8]. 다만 많은 데이터 전송량과 게이트웨이와의 잦은 통신은 통신 지연 현상을 야기하고 전력소모를 높이므로 비교적 큰 용량의 배터리를 사용한다고 해도 사용시간에 제약이 따른다. 본 연구에서 개발한 센싱 보드는 LoRa chip을 적용, 실험실과 테스트베드에서 평가를 원활하게 하기 위해서 배터리와 상시전원 모두 사용이 가능하도록 하였다.

Fig. 9에서와 같이 센서에서 게이트웨이로 LoRa 통신을 이용하여 센싱 데이터를 전송하고, TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol)와 MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) 통신을 통해서 관리자의 웹 사이트로 전달될 수 있도록 예제 환경을 구성하였다. 설계 시나리오의 단계별 통신 오류 등을 보완하여 센싱 데이터가 웹 사이트에 원활하게 전송될 수 있도록 하였다.

3.2.3 테스트베드 구축

침수감지센서의 실증을 위해서 침수 사례가 있고 침수에 취약하다고 판단되는 아파트 단지를 선정하여 테스트베드를 구축하였다. 단지 내의 구역을 4곳으로 나눠서 4개의 센서를 설치하였다.

부력식 레벨센서의 부력부재가 외부에 노출되지 않도록 304SS 재질의 케이스를 제작하였고, 다수의 타공홀을 두어 케이스 내부로 물의 유입이 원활할 수 있도록 하였으며 LoRa chip이 내



Fig. 10. An example of the testbed set up using a buoyancy-based level sensor and gateway.

장된 신호발생부는 방수 기능을 갖춘 ABS 재질의 플라스틱 함에 부착하였다. 전원 공급을 위해서 누전차단기와 함께 상시 전원을 설치하였고, 게이트웨이는 WAPS-232N (Gemtek technology, Taiwan) 제품으로 실외에 1 m 길이의 수신 안테나와 함께 설치하여 반경 500 m 내에서 센서 데이터의 수신율을 높였다. Fig. 10과 같이 테스트베드를 구축하였고, 침수위험정보를 웹 사이트로 업로드하여 실시간 상황으로 효과적인 침수대응이 가능하도록 하였다.

수 차례의 집중호우 때에 빗물의 흐름이 지대에 따라서 수위가 오르기는 하나 더 이상 오르지 않는 구역이 있었고, 초기에는 비슷한 수위를 보이지만 시간이 지나면서 물이 고이는 것과 같이 계속해서 수위가 차오르는 구역도 있었다. 또한 단지 밖 도로에서 범람한 물이 들어오는 경우도 있었기 때문에 구역별로 설치한 센서로부터 시간별 수위에 대한 비교가 가능하여 상대적으로 취약한 구역을 구별해낼 수 있어서 적절한 대응책을 마련하는 데 도움을 줄 수 있었다.

다만 측정된 데이터가 게이트웨이를 통해서 웹 사이트로 전송되기 때문에 단지 내에서 정전이 발생한다면 실시간으로 현장을 살필 수 없는 치명적인 상황이 발생할 수 있다. 향후 부력식 레벨센서의 성능을 개선하는 방법으로 전원 안정성 확보를 위해서 상시전원이 끊겼을 때를 대비하여 보조 배터리를 통해서 24시간 이상 구동할 수 있는 기능을 부여하고, LoRa 통신의 복잡성을 대신할 수 있는 LTE (Long Term Evolution) 통신을 적용하여 센서에서 웹 사이트로 센싱 데이터를 직접 송신할 수 있도록 하는 것이 정전에서 야기될 수 있는 문제를 극복하고 현장 설치의 단순화를 구현할 수 있는 설계 방법이라고 판단되었다.

4. 결 론

다수의 지점에서 침수감지 목적으로 설치되는 센서 장치는 저 전력, 저가형 시스템이 요구된다. 이에 부합할 수 있는 부력식 레벨센서를 부력부재, 센싱부 및 신호발생부로 구성하였고, 부력부재는 저비용으로 재질과 형상에 영향을 받지 않아서 환경

에 따라서 선택의 폭을 넓힐 수 있으며 센싱부 또한 스트레인 게이지나 로드셀을 이용하여 저비용으로 구성할 수 있었다. 본 연구에서 ABS와 304SS 재질의 부력부재를 사용하여 0.4 mm의 평균 해상도와 0.3% 이내의 측정 반복성을 확인하였다. 출렁이는 수위의 물결에도 잠긴 부력부재의 부피 변화가 작아 부력이 비교적 일정하게 유지되어 안정적인 수위 데이터 확보가 가능하였다.

측정이 불가능한 수위인 불감응 영역은 부력부재의 끝단에서 약 2 mm 높이 수준으로 물과 부력부재 사이에 형성되는 메니스커스의 영향에 기인한 것으로, 불감응 영역을 제외한 수위 측정에서는 측정된 데이터로부터 부력 변화에 대한 높은 선형성을 확인할 수 있었다.

IoT 기반 침수감지센서로의 활용을 위해서 LoRa 통신을 적용하여 관리자에게 정보를 전달될 수 있게 하였다. 침수 사례가 있는 침수 취약 지역의 아파트 단지를 선정하여 구역별로 침수 감지센서를 설치, 테스트베드를 구축하였다. 테스트베드를 통해 수집한 자료의 활용은 침수로부터 입주민들의 안전과 재산 보호에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 행정안전부 재난안전사업 기술사업화 지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00247279).

REFERENCES

- [1] B. K. Park, J. H. Shin, J. H. Paik, and Y. J. Lee, "Development of Ultrasonic Sediment-level Sensor for Sewage Pipe Application", *J. Sens. Sci. Technol.*, Vol. 30, No. 1, pp. 25-29, 2021.
- [2] H. Golnabi and P. Azimi, "Design and performance of a cylindrical capacitive sensor to monitor the electrical properties", *J. Appl. Sci.*, Vol. 8, No. 9, pp.1699-1705, 2008.
- [3] H. Golnabi, "Design and operation of a fiber optic sensor for liquid level detection", *Opt. Laser. Eng.*, Vol. 41, pp. 801-812, 2004.
- [4] E. Vargas, R. Ceres, J. M. Marti'n, and L. Caldero'n, "Ultrasonic sensor for liquid-level inspection in bottles", *Sens. Actuators A Phys.*, Vol. 61, No. 1-3, pp. 256-259, 1997.
- [5] A. Kulkarni, R. N. Karekar, and R. C. Aiyer, "Liquid Level Sensor", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 76, No. 10, pp. 105108-105113, 2005.
- [6] M. E. Loverude, C. H. Kautz, and P. R. L. Heron, "Helping Students Develop an Understanding of Archimedes' Principle. I. Research on Student Understanding", *Am. J. Phys.*, Vol. 71, No. 11, pp. 1178-1187, 2003.
- [7] P. R. L. Heron, M. E. Loverude, P. S. Shaffer, and L. C. McDermott, "Helping Students Develop an Understanding of Archimedes' Principle. II. Development of Research-Based Instructional Materials", *Am. J. Phys.*, Vol. 71, pp. 1188-1195, 2003.
- [8] M. Cattani, C. A. Boano, and K. Römer, "An Experimental Evaluation of the Reliability of LoRa Long-Range Low-Power Wireless Communication", *J. Sens. Acuatator Netw.*, Vol. 6, No. 2, pp. 1-19, 2017.