

강수유무센서 관측특성 비교를 통한 기상관측 활용성 평가

황성은* · 이영태 · 인소라 · 김기훈

국립기상과학원 관측연구부

(접수일: 2025년 7월 25일, 수정일: 2025년 8월 12일, 게재확정일: 2025년 8월 23일)

Assessing the Meteorological Utility of Precipitation Detectors through Comparative Observation Analysis

Sung-Eun Hwang*, Young-Tae Lee, So-Ra In, and Ki-Hoon Kim

Observation Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

(Manuscript received 25 July 2025; revised 12 August 2025; accepted 23 August 2025)

Abstract Understanding the observational characteristics of precipitation detectors and selecting appropriate sensors for specific purposes are essential for securing meteorological data and ensuring reliable observations. This study compares the detection characteristics and response times of four types of precipitation detectors through field experiments. The objective is to provide foundational data for establishing sensor selection criteria suitable for meteorological observation. The tested sensors employ capacitive, impedance, radar, and optical detection methods. The impedance and domestic capacitive sensors showed stable detection performance, albeit with occasional missed rainfall events. The foreign capacitive sensor responded later and ceased detection earlier than other sensors, yet demonstrated high accuracy. The optical sensor rapidly detected rainfall onset but continued to report rainfall even after cessation and failed to detect snowfall. The radar-based sensor was effective for snow detection due to its detection principle but occasionally produced false positives under non-precipitating conditions due to atmospheric particles. Based on statistical and characteristic analyses, it is concluded that impedance, capacitive, and radar sensors are generally suitable for meteorological applications, with radar sensors being optimal for snow detection.

Key words: Precipitation detectors, Impedance type, Capacitive type, Radar type, Optical type

1. 서 론

기후변화가 심화되면서 가뭄, 홍수, 폭염, 폭설 등의 극한 기상현상으로 인한 식량문제와 경제적 손실 등의 사회문제가 증가하고 있으며, 이에 대표적인 기상현상인 강수의 예보와 관측의 중요성이 대두되고 있다(Kim et al., 2023). 강수 관측은 크게 강수량 측정, 강수유형 분류, 강수 감지로 나눌 수 있다. 여기

서 강수 감지는 기상관측, 수문 기상학, 재난 예방 및 기후 연구 등 다양한 분야에 필수적인 자료를 제공한다. 또한 강수 감지는 기상현상 및 재난 예방 목적의 관측분야에만 사용하는 것이 아닌 차량, 스마트홈, 스마트 팜 등의 다양한 산업분야에서 활용되고 있다(Feng et al., 2009). 특히 강수의 시작과 종료 시점을 신속하고 정확하게 탐지하는 것은 강수량뿐만 아니라 조기 경보 시스템, 교통 관리, 농업 및 방재 대응 등 실용적 응용에 있어 매우 중요하게 되었다(Sheppard and Joe, 2008). 따라서 강수유무센서의 관측 특성을 이해하고, 목적에 적합한 측기를 선택하는 것은 기상 자료 확보와 관측 수행을 위해 필수적이다.

기존 연구는 강수유무센서 알고리즘 개선 연구

*Corresponding Author: Sung-Eun Hwang, Observation Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, 33 Seohobukro, Jeju 63568, Korea.
Phone: +82-64-780-6610, Fax: +82-64-738-2055
E-mail: icewoolf@korea.kr

(Hwang et al., 2024a)에서 밝힌 것과 같이 정전용량식 센서의 패턴 또는 구조 개발과 감지 알고리즘 연구가 주로 수행되었다. 최근 수행된 연구로는 딥러닝을 이용하여 감지 정확도를 향상하는 연구(Li et al., 2021; Bharathi et al., 2024)와 다수의 강수유무센서를 이용하여 광범위 감지 시스템을 이용한 강수패턴을 확인하는 연구(Alharbi et al., 2024; Nielsen et al., 2024)가 있다. 센서 하드웨어에 대한 연구로는 강수시 발생하는 빗방울 소리를 이용하여 강수유무와 강수강도, 강수량을 측정하는 연구(Machap and Narani, 2024; Hwang et al., 2024b)가 있으며, 기존 정전용량식 센서에 박막을 추가하여 강수강도와 강수량을 측정하는 연구(Clemens et al., 2024)가 있다. 또한 동남아시아에서 비교적 구하기 쉬운 코코넛 껍질을 이용한 친환경 재질의 강우감지기 및 강수 알람 시스템 개발연구(Baranitharan et al., 2024)가 있다.

현재 상용화된 강수유무센서는 정전용량식(capacitive type), 임피던스식(impedance detection type), 레이더식(radar type), 광학식(optical type) 등으로 구분된다. 정전용량식 강수유무센서는 센서 표면의 유전율 변화를 측정하여 강수를 탐지하며, 소형화 및 저전력으로 사용이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 이 방식은 외부 오염 및 산화에 취약하다(Hwang et al., 2024a). 임피던스식은 전극 간 임피던스 변화를 기반으로 강수를 탐지하며, 감도와 내구성이 우수한 편이나, 구조가 복잡하고 유지관리에 부담이 있으며, 레이더식은 고주파 전자파를 방사하고 강수입자에 의한 산란 신호를 분석하여 강수를 감지하는 방식으로 넓은 감지 범위와 비접촉식 측정이 가능하다는 장점이 있으나, 비용이 높고 환경 요인에 따른 신호 왜곡 가능성이 있다는 단점이 있다(McLaughlin et al., 2009). 광학식은 광선의 차단 및 산란 패턴을 기반으로 낙하 또는 감지면에 맺힌 강수입자를 탐지하며, 빠른 반응성과 미세 강수 탐지가 가능하다. 그러나 바람 등의 감지 환경과 입자 크기, 형태의 특성에 따라 감지 성능이 낮아질 수 있다는 단점이 있다(Chinchella, 2023).

본 연구는 정전용량식, 임피던스식, 레이더식, 광학식 강수유무센서 4종의 감지 특성, 반응 시간, 감도 등을 야외 실험을 통해 감지 방식별 특성을 확인하고, 기상관측에 부합하는 강수유무센서 선택 기준을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 자료 및 분석방법

본 비교연구는 국립기상과학원에서 운영중인 고창 표준기상관측소에서 수행되었다. 고창 표준기상관측소는 전북특별자치도 고창군 대산리에 위치하고 있

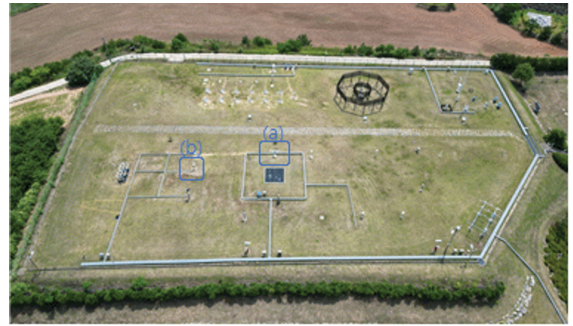


Fig. 1. View of Gochang Standard Meteorological Observatory (GSMO) (a) Rain detectors, (b) Optical disdrometer (Parsivel²).

며, 전체면적 약 5700평의 관측 부지와 관측동 1개소로 구성되어 있다. 서해안과 약 17 km 떨어진 농경지(밭) 가운데 위치하고 있으며, 동남동 방향 4.7 km 거리의 고산(해발 528.3 m)을 제외하면 주변은 평탄하다. 비교관측이 수행된 부지에는 고창(172) ASOS (Automated Synoptic Observing System) 관측 장비와 국립기상과학원에서 설치한 일사, 강수량, 강수감지 등의 지상 비교 관측장비가 설치되어 있다. 고창 표준기상관측소는 현업 관측장비의 성능 개선과 관측 기술 개발을 위한 야외 기준 관측 자료를 제공하고, 현업 장비를 대상으로 장기간·연속적인 비교관측을 수행하기 위해 설립되었다(Fig. 1). 또한 세계기상기구(WMO)의 지상기상관측 기준관측망(Global Climate Observing System Surface Reference Networks, GSRN) 요구사항을 반영하여, 현업 관측장비의 신규 도입 및 개선을 위한 기반을 구축하는 역할을 하고 있다. 비교관측에 사용된 강수유무센서는 임피던스식(Impedance), 국산 정전용량식(Capacitive_K), 돔형 광학식(Optical), 외산 정전용량식(Capacitive_F), 레이더식(Radar) 총 5종이며, 광학 우적계(OTT사 Parsivel²)를 기준으로 비교 수행하였다(Fig. 2). 광학 우적계의 강수강도 관측범위는 0.001~1,200 (mm hr^{-1})이며, 정확도는 액체 $\pm 5\%$, 고체 $\pm 20\%$ 이다. 광학 우적계의 강수강도 관측값은 1분 순간 관측 값(mm min^{-1})을 사용하였다. 관측 자료에 대한 품질관리(quality control; QC)는 결측 및 이중 관측 값을 제거하고 작업으로 인해 관측 값에 오염이 있는 경우는 제거하였으며, 히스토그램과 시계열을 통한 분포를 확인하고 기본적인 물리한계 검사와 지속성검사를 수행하여 사용하였다. Table 1은 비교관측을 수행한 측기의 관측방식과 관측 요소를 나타낸 표이다.

광학 우적계를 기준으로 하여 강수 시작과 강수 종료 후의 측정 여부를 강수 유무센서 별로 확인하였으며, 강수 반응의 정확도를 확인하기 위해 적중률 통



Fig. 2. (a) Comparative observation of rain detectors, (b) Optical disdrometer (Parsivel²).

Table 1. Comparative observation equipment list.

Naming	Detection Method	Sensing item
Parsivel ²	Measurement of optical laser phase change	Precipitation intensity, Particle count, ETC
Impedance Capacitive _k	Impedance capacity change detection	Precipitation count
Optical	Capacitance change detection	
Capacitive _f	Dome-shaped optical scattering measurement	
	Capacitance change detection	
Radar	Radar attenuation measurement	Precipitation intensity, Particle count, ETC

Table 2. Observation case classification table.

Event		Standard Observation	
		Yes	NO
Compare	Yes	Hit (H)	False (F)
Observation	No	Miss (M)	None (N)

계분석을 통해 탐지율(Probability Of Detection; POD), 부적중률(False Alarm Rate; FAR), 임계성공지수(Critical Success Index; CSI)를 산출하였다(Simone et al., 2014). 통계분석을 위한 관측사례 구분표와 계산식은 Table 2와 식(1), (2), (3)과 같다. 식(1)은 CSI로 비교 장비가 기준 장비에 대해 일치한 사례의 비율을 말하는 것으로 기준 장비와 비교 장비 모두 관측하였거나, 두 장비 모두 비를 관측하지 못한 사례를 말한다. 식(2)는 POD로 강수가 발생 사례 전부에 대한 비교 장비에 강수가 감지되고, 기준 장비에 강수가 확인된 사례의 비율이다. 식(3)은 FAR로 비교 장비가 감지되었으나 기준 장비에서 감지되지 않은 사례의 비율이다.

$$CSI = \frac{H}{H + F + M} \quad (1)$$

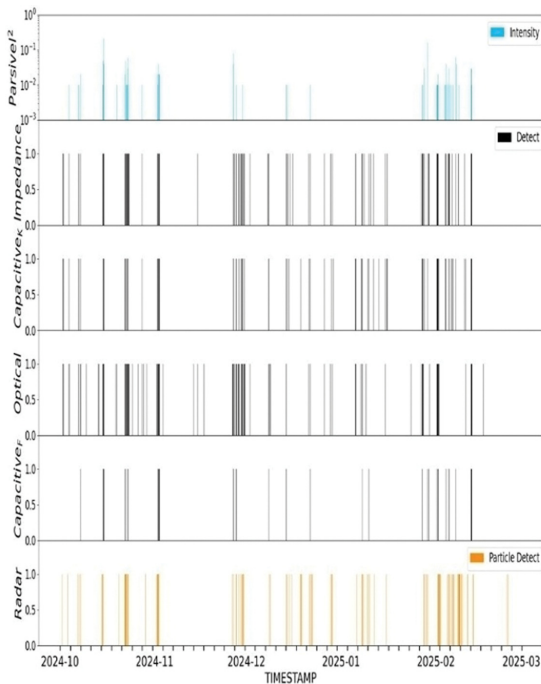
$$POD = \frac{H}{H + M} \quad (2)$$

$$FAR = \frac{F}{F + H} \quad (3)$$

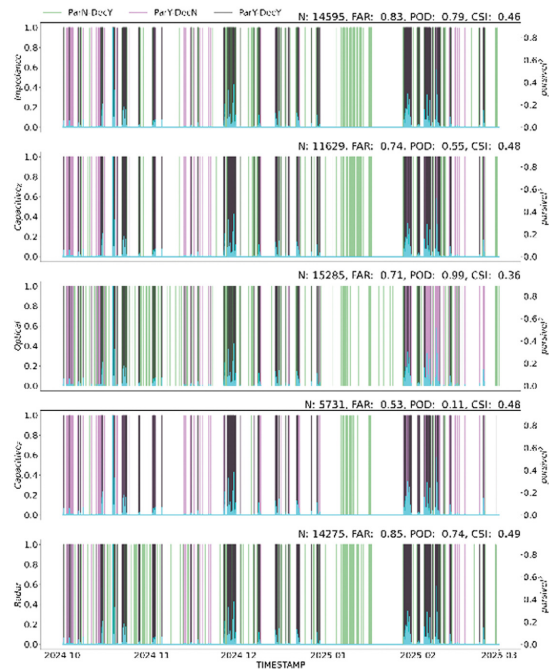
3. 본론: 관측자료 분석결과

3.1 강수유무센서별 특성분석

본 연구는 2024년 10월 1일부터, 2025년 2월 28일까지 151일간의 관측자료를 비교하였으며, 해당 기간 ASOS 기준 61일 동안 241.0 mm, 광학우적계(Parsivel²) 기준 62일 동안 255.1 mm 강수가 발생하였다. Figure 3은 비교기간 동안 광학우적계와 강수유무센서의 관측을 각각 시계열로 나타낸 그래프로 Fig. 3a는 광학우적계에서 인식한 강수량과 각 강수유무센서의 강수 감지 시계열로 위에서 부터 광학우적계, 임피던스식, 국산 정전용량식, 광학식, 외산 정전용량식, 레이더식 순이다. Figure 3b는 광학우적계 기준 각 센서별 강수 일치성을 확인한 시계열이다. 왼쪽 축은 강수유무센서 관측값을 오른쪽 축은 광학우적계 강수 강도 값을 나타낸다. 그래프의 파란색은 광학우적계의 강수 강도(mm min⁻¹)를 의미하며, 초록색은 광학우적계 미인



(a)



(b)

Fig. 3. (a) Time series by rain detectors, (b) Time series comparison of rain detectors using an optical disdrometer (Parsivel²) as reference.

식·강수유무센서 인식한 경우, 분홍색은 광학우적계 인식·강수유무센서 미인식한 경우, 검은색은 두 센서 모두 인식한 경우이다.

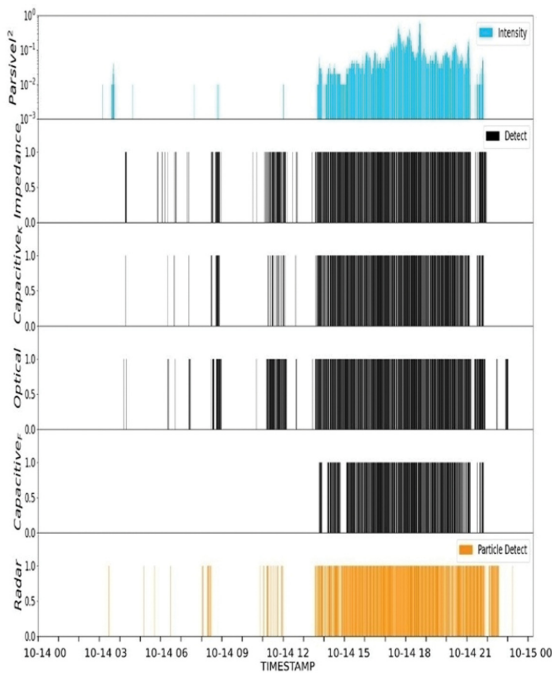
통계분석 결과 POD는 광학식이 0.99로 가장 높게 나타났으며, 임피던스식 0.79, 레이더식 0.74, 정전용량식 국산 0.55, 정전용량식 외산 0.11 순으로 나타났다. FAR는 레이더식이 0.85, 임피던스식이 0.83로 높게 나타났으며, 정전용량식 국산 0.74, 광학식 0.71 정전용량식 외산 0.53 순으로 나타났다. 강수 일치성 확인을 위해 CSI를 확인한 결과 레이더식 0.49, 정전용량식(국산, 외산) 0.48, 임피던스식 0.46, 광학식 0.36 순으로 나타났다. 레이더식은 무강수 시 대기 중 강수입자를 포착하여 강수로 인식하는 특성을 보였으나 가장 높은 CSI 값을 보이며 강수 시 강수 현상을 잘 포착하는 것을 확인하였다. 외산 정전용량식은 약한 강수를 인식 못하는 단점이 있으나 가장 낮은 FAR 값으로 강수 현상 포착 정확도가 높게 나타났다. 국산 정전용량식과 임피던스식은 비교적 높은 FAR 값으로 강수 인식에 오류가 다소 있으나 무난한 CSI 값으로 강수 현상을 잘 포착하는 것으로 확인되었다. 광학식은 높은 POD 값으로 약한 강수 인식을 잘하는 편이나, 강수 현상을 과대 인식하여 가장 낮은 CSI

값을 보였다.

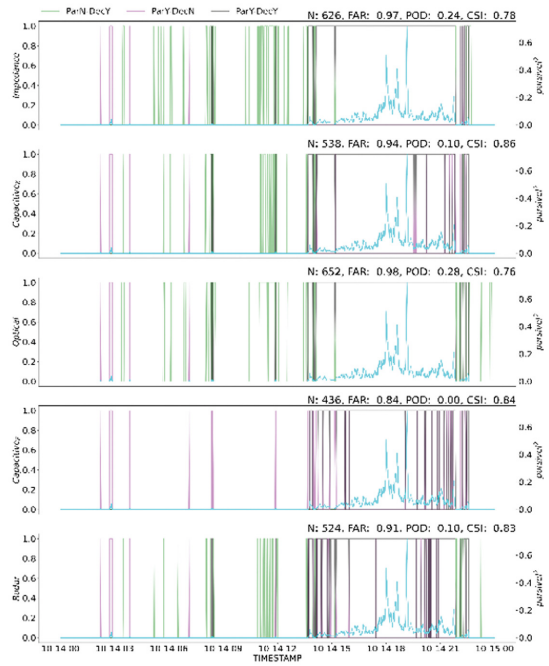
3.2 사례분석

3.2.1 강수사례

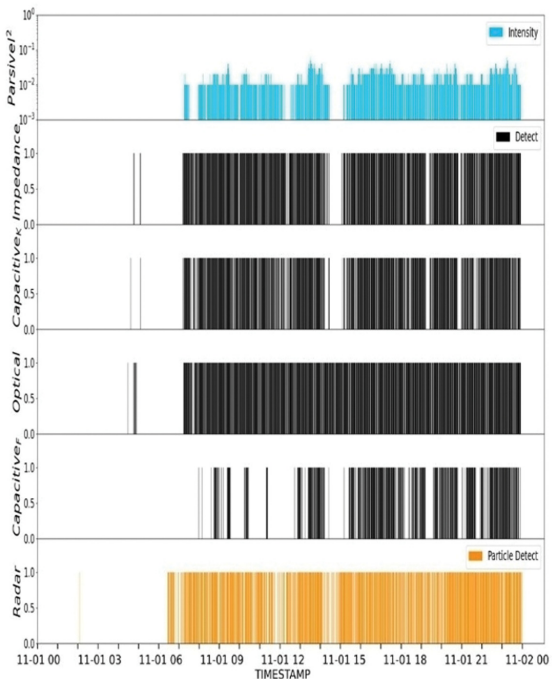
Figures 4a, b는 ASOS 기준 10시간 동안 39.1 mm의 비교적 강한 강수가 내린 사례로 2024년 10월 14일의 자료이다. 자료 분석결과 해당 사례에서는 외산 정전용량식을 제외한 모든 강수유무센서가 광학우적계보다 평균 5분 먼저 반응하고, 평균 3분 더 길게 반응하였으며, 외산 정전용량식의 경우에는 약 8분 늦게 반응하고 강수 중 감지 반응이 끊기는 것을 확인할 수 있었다. 레이더식 또한 강수 중 감지가 누락되는 현상을 보였다. 강한 강수 사례에서 각 센서의 CSI는 국산 정전용량식 0.86, 외산 정전용량식 0.84, 레이더식 0.83, 임피던스식 0.78, 광학식 0.76 순으로 모두 높게 나타났다. Figures 4c, d는 2024년 11월 1일의 강수 사례 그래프로 해당일에는 ASOS 기준 5시간 동안 13 mm의 약한 강수가 내린 사례이다. 초기 강수(0630~1430 LST)의 경우 광학우적계와 외산 정전용량식에는 반응이 없었으나 국산 정전용량식, 임피던스식, 광학식, 레이더식으로는 강수가 인식되었다. 이후 강수(1500 LST 이후)에는 외산 정전용량식이 가



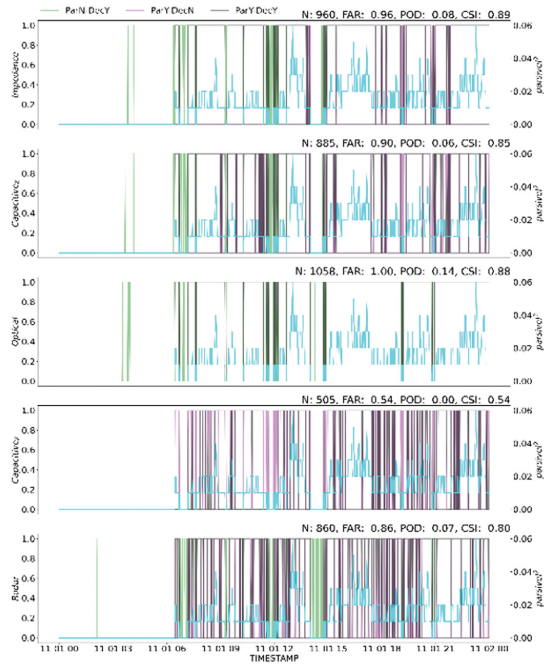
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4. (a) Time series by rain detectors at heavy rainfall, (b) Time series comparison of rain detectors using an optical disdrometer (Parsivel²) as reference at heavy rainfall, (c) Time series by rain detectors at light rainfall, (d) Time series comparison of rain detectors using an optical disdrometer (Parsivel²) as reference at light rainfall.

장 늦게 반응하고 가장 먼저 강수 감지 반응이 종료되었으며, 강수 중 감지 반응이 누락되는 현상을 보였다. 국산 정전용량식과 임피던스식 또한 강수 중 감지 반응이 끊기는 현상을 보였으나, 광학식과 레이더식은 감지 반응이 끊기지 않았다. 약한 강수 사례에서 각 센서의 CSI는 임피던스식 0.89, 광학식 0.88, 국산 정전용량식 0.85, 레이더식 0.80, 외산 정전용량식 0.54 순으로 외산 정전용량식이 가장 낮게 나타났다. 강우 강도별 강우감지기 비교 결과 강한 강우현상에는 모든 강우감지기가 우수하게 반응하였으나, 약한 강우 현상에서는 임피던스식과 정전용량식(외산, 국산)의 감지 반응이 끊기는 현상이 확인되었다. 레이더식은 강수 전 강수 반응이 나타나는 경향을 일부 확인하였으며, 광학식은 가장 먼저 반응하였으나 강수 종료 이후에도 반응이 지속되는 경향을 확인하였다.

3.2.2 강설사례

Figure 5는 2025년 2월 7일부터 8일까지의 강설 사례 그래프로 해당일에는 대설특보가 발효되었으며, ASOS 기준 14시간 동안 15 cm, 최심작설 22.6 cm로 비교적 많은 눈이 내린 사례이다. 겨울철 강설 사례에서는 레이더식이 가장 민감하게 감지하였다. 임피

던스식과 정전용량식(국산, 외산)은 강설의 일부만 감지하였으며, 일부 구간 감지 반응이 끊기는 경향을 보였다. 광학식은 강설을 전혀 감지하지 못하였다. 각 센서별 CSI는 레이더식 0.61로 가장 높게 나타났으며, 임피던스식 0.38, 국산 정전용량식 0.32, 외산 정전용량식 0.29 순이었으며, 광학식은 0으로 전혀 감지하지 못하였다.

3. 결 론

비교연구 결과 임피던스식과 국산 정전용량식은 무난한 감지 성능을 보였으나 강수 중 감지가 끊기는 특성을 보였다. 외산 정전용량식의 경우 다른 강수유무센서 보다 늦게 반응하고 빨리 강수를 종료하는 특성을 보였으나 감지 정확도는 높게 나타났다. 국산과 외산 정전용량식의 차이는 감지 알고리즘의 차이에서 나타나는 것으로 판단된다. 광학식은 가장 빠르게 강수는 포착하였으나, 강수 종료 후에도 감지가 유지되는 현상이 나타났으며 강설을 감지 못하는 단점을 확인할 수 있었다. 이는 감지면의 히터 부재로 인해 적설이 감지면에 잔류하고, 고체 강수의 입자 특성이 센서의 강수 감지 기준을 만족하지 않아 미측정 되었을

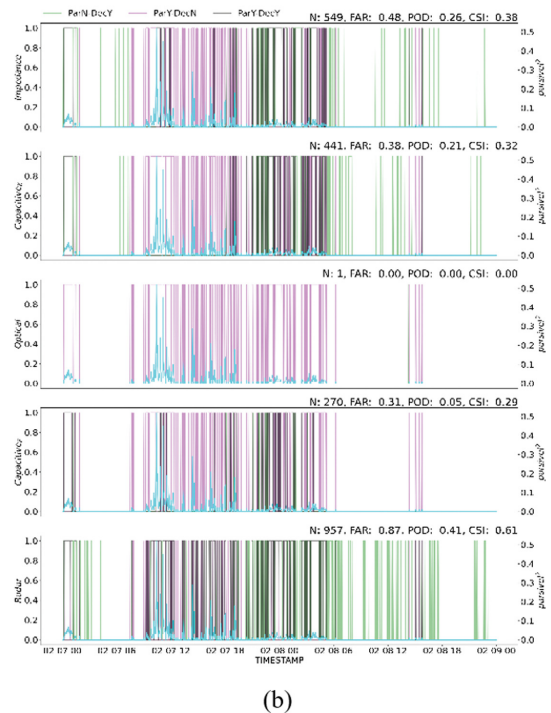
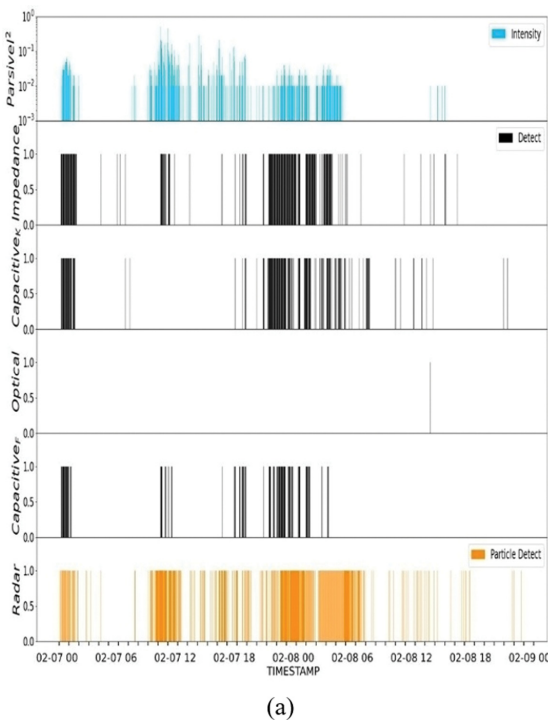


Fig. 5. (a) Time series by rain detectors at snowfall, (b) Time series comparison of rain detectors using an optical disdrometer (Parsivel²) as reference at snowfall.

가능성이 있다. 레이더식은 감지 원리 특성상 강설 감지에 우수하였으나, 강수가 없을 때에도 대기 중의 강수입자를 인식하여 강수로 판단하는 오류가 발생하였다. 통계분석과 특성 확인 결과 기상관측에는 임피던스식, 정전용량식, 레이더식 모두 사용이 가능한 것으로 판단되며, 적설 여부를 판단하기 위해서는 레이더식이 적합하다고 사료된다. 광학식의 경우에는 기상 측정용으로 사용하기 어려우나 즉각적이고 선제적인 반응이 필요한 스마트하우스, 차량 등의 산업용에 적합한 것으로 판단된다.

본 연구에 사용된 강수유무센서는 국내외에서 많이 사용하고 있는 장비로 선별하였으나, 감지형 광학식, 감압식, 음파형 등의 더 다양한 강수유무센서에 대한 비교는 수행되지 않았다. 또한 강수여부의 기준을 강수량계(무게식, 전도형 등)로 하기에 약한 강수 관측이 어려워 광학우계계로 하였으나, 해당 측기의 정확도에 대한 검증이 미비한 문제점이 있다. 향후 장기간의 비교와 더 많은 사례를 수집하여 세부적인 특성을 확인하고 국내 신규 생산 레이더식, 외산 감지형 광학식 등 다양한 강수유무센서를 추가 설치하여 비교연구를 수행할 계획에 있다.

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「국가 기상관측 장비 및 관측자료 표준화(KMA2018-00221)」의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Alharbi, R. S., V. Dao, C. Jimenez Arellano, and P. Nguyen, 2024: Comprehensive evaluation of near-real-time satellite-based precipitation: PDIR-Now over Saudi Arabia. *Remote Sens.*, **16**, 703, doi:10.37446/jinagri/rsa/11.3.2024.1-9.
- Baranitharan, B., S. M. Peraul, D. Sivakumar, K. Kannabiran, S. Priyanka, P. J. Vitoriya, and K. Hariharan, 2024: Developing a sustainable rain alarm sensor for agricultural land. *J. Innov. Agric.*, **11**, 1-9, doi:10.37446/jinagri/rsa/11.3.2024.1-9.
- Bharathi, R. J., R. Sivaranjani, and L. Anisha, 2024: An approach towards rain detection through deep learning and lightweight Embedded Systems. *IEEE Int. Conf. Intell. Commun. Techno. Virtual Mobile Netw. (ICICV)*, **5**, 25-34, doi:10.1109/ICICV62344.2024.00012.
- Chinchella, E., 2023: Bluff-body aerodynamics and transfer functions for non-catching precipitation measurement instruments. *Polytechnic School, University of Genoa, Italy*, 23-40.
- Clemens, C., A. E. Jobst, M. Radschun, J. Himmel, and O. Kanoun, 2024: Signal processing and calibration of a low-cost inductive rain sensor for raindrop detection and precipitation calculation. *Measurement*, **227**, 114286, doi:10.1016/j.measurement.2024.114286.
- Feng, X., T. Hou, and Y. Cui, 2009: Research and design of a smart home system based on raindrop sensor. *IEEE 2009 Int. Conf. Test Meas.*, **1**, 275-278, doi:10.1109/ICTM.2009.5412942.
- Hwang, S.-E., B.-T. Kim, Y. T. Lee, and S.-R. In, 2024: A study on the improvement of rain detectors error status analysis and observation algorithm. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **57**, 627-631, doi:10.3741/JKWRA.2024.57.9.627.
- Hwang, S.-H., C.-H. Jun, C. De Michele, H.-J. Kim, and J.-W. Lee, 2024: Rainfall observation leveraging rain-drop sounds acquired using waterproof enclosure: Exploring optimal length of sounds for frequency analysis. *Sensors*, **24**, 4281, doi:10.3390/s24134281.
- Kim, B.-T., S.-E. Hwang, Y. T. Lee, M.-H. Kim, H.-J. Hwang, S.-R. In, J.-A. Yun, and K.-H. Kim, 2023: The study on the selection of operating conditions of the precipitation heating system for observation of snowfall in winter. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **56**, 461-470, doi:10.3741/jkwra.2023.56.7.461.
- Li, C. H. G., K. W. Chen, C. C. Lai, and Y. T. Hwang, 2021: Real-time rain detection and wiper control employing embedded deep learning. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, **70**, 3256-3266, doi:10.1109/TVT.2021.3066677.
- Machap, K., and S. R. Narani, 2024: IoT audio sensor networks and decision trees for enhanced rain sound classification. *Int. J. Adv. Signal Image Sci.*, **10**, 35-44, doi:10.29284/ijasis.10.1.2024.35-44.
- McLaughlin, D., and Coauthors, 2009: Short-wavelength technology and the potential for distributed networks of small radar systems. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **90**, 1797-1818, doi:10.1175/2009BAMS2507.1.
- Nielsen, J. M., C. Z. R. van de Beek, S. Thorndahl, J. Olsson, C. B. Andersen, J. C. M. Andersson, and J. E. Nielsen, 2024: Merging weather radar data and opportunistic rainfall sensor data to enhance rainfall estimates. *Atmos. Res.*, **300**, 107228, doi:10.1016/j.atmosres.2024.107228.
- Sheppard, B. E., and P. I. Joe, 2008: Performance of the precipitation occurrence sensor system as a precipitation gauge. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **25**, 196-212,

doi:10.1175/2007JTECHA957.1.

Simone, G., T. Manfred, S. Karsten, and L. Eckhard, 2014:
Field Intercomparison and Laboratory Tests of Pre-
cipitation Detectors. *WMO TECO-2014 (Technical*

*Conference on Meteorological and Environmental
Instruments and Methods of Observation)*, Saint
Petersburg, Russian, 13 pp.