실측 강우량과 센서 계측 강우량 관계식을 이용한 미계측 유역의 강우량 예측 기법 개발 및 평가

Development and Assessment of Methods for Predicting Rainfall in Unmeasured Watersheds Using the Relation Between Observed and Sensor-Measured Rainfall

이충대* · 김하룡**

Lee, Chungdae*, and Kim, Hayong**

Abstract

Recently, with the development of information and communication technology and the Internet of Things (IoT), observation technology using sensors is being applied in a variety of ways, such as using a sensor to observe rainfall in an unmeasured area. In this study, the relationship between the rainfall sensor signal (S) and the amount of rainfall (R) was developed through an experiment in an artificial rainfall generator, and the applicability was evaluated through outdoor observation. The coefficient of determination of the relational expression developed through the indoor experiment was 0.95, the mean absolute error was 2.66 mm/hr, the root mean square error was 3.87 mm/hr, the efficiency coefficient was 0.89, and the concordance index was 0.97, showing very high reliability. In the outdoor test results, the error rate was 7.96% when comparing the data from the rainfall sensors in vehicles and the precipitation station, which were not observed at the same location. Despite such errors, it is judged that accurate rainfall observation using a rainfall sensor is possible in an area where a precipitation station is not installed.

Key words : Prediction Methods, S-R Expression of Relation, Rainfall Sensor for Vehicles, Precipitation Network

요 지

최근 정보통신기술과 사물인터넷 기술의 발전으로 센서를 이용한 관측 기술도 다양하게 적용되고 있다. 센서 기술을 활용하여 강우를 관측할 수 있게 된다면 미계측 지역에서의 강우를 산정할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 인공강우발생 장치에서 실험을 통해 강우센서 신호(S)와 강우량(R)과의 관계를 규명하여 관계식을 개발하고 적용성을 평가하였다. 실내 실험을 통해 개발된 관계식의 결정계수는 0.95, 평균절대오차 2.66 mm/hr, 평균제곱근오차 3.87 mm/hr, 효율성계수 0.89, 일치도지수 0.97로 매우 높은 신뢰도를 보여주었다. 실외 실험 결과에서는 강우센서와 강수량관측소 자료를 비교한 결과 오차율은 7.96%로 나타났다. 오차가 발생한 원인은 차량용 강우센서와 강수량관측소가 동일한 위치에서 관측된 것이 아니기 때문에 이동 강우에 따라 강우량의 변화가 발생하여 오차가 발생한 것이다. 이와 같이 일부 오차가 발생하지만 강수량관측소가 설치되지 않은 지역에서는 강우센서를 이용한 강우 관측이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 예측 기법, S-R 관계식, 차량용 강우센서, 강수량관측망

*정회원, 한국수자원조사기술원 책임연구원(E-mail: chungdea@kihs.re.kr)

Member, Principal Researcher, Korea Institute of Hydrological Survey

**교신저자, 정회원, 한국토지주택공사 토지주택연구원 건설기술연구실 책임연구원(Tel: +82-42-866-8407, Fax: +82-42-866-8431, E-mail: civilkhy@lh.or.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Research Fellow, Department of Construction Environment Research Land & Housing Institute

1. 서 론

강우량을 관측하는 방법으로는 표준 원통 우량계, 전도형 자기우량계, 저울형 우량계, 무선로봇 우량계 등 강우량계를 이용하여 직접적으로 측정하는 방법과 도플러 레이더, 이중 편파 레이더 등 기상레이더를 이용하는 방법과 적외선 및 마이크로파를 이용한 인공위성을 이용하는 간접적인 방법이 있다. 강우량계를 이용하여 직접 관측하는 것이 강우 데이터의 신뢰도가 높으나 지점 강우량이므로 강수량관측소가 설치되어 있지 않은 지역은 티센가중치법, 크리깅 기법 등의 공간보간기법인 간접적인 방법을 이용에 따른 불확실성이 증가한다. 미계측 유역에 대한 강우관측 데이터의 신뢰도 향상을 위하여 국토교통부는 강우레이더를 이용하는 강우레이더 통합운영시스템을 구축하고 있고 기상청은 기상관측장비의 현대화와 자동기상관측장비를 증설하고 있다. 미계측 유역의 이동하는 강우량 데이터를 산정할 수 있는 방법 중에 하나는 차량의 와이퍼 작동을 자동으로 조절하는 차량용 강우센서를 개선하여 강우량을 계측할 수 있다면 전국에서 이동하는 차량이 강우량을 관측할 수 있게 되어 신뢰성 높은 강우량 데이터를 실시간으로 계측 가능하다. 물론 차량용 강우센서의 강우 관측이 강수량 관측소 만큼의 정확도는 나올 수 없을 것으로 생각되지만 다수의 정확도가 떨어지는 강우량계가 소수의 매우 정확한 강우량계보다 더 신뢰성 있는 강우정보를 제공할 수 있다(Haberlandt and Sester, 2010). 국외에서는 강우센서를 이용하여 강우량을 관측 하는 방법으로 차량에 비를 검지하는 강우센서 시스템에서 조도 센서를 이용하여 조작부에 신호를 전달해 우적 여부에 따라 신호를 전달하는 이미징 어레이 센서를 개발하였다(Kenneth et al., 2001). 강우량 측정의 새로운 방법으로 차량의 와이퍼를 이용한 방법을 고안하였다. 이 방법은 차량에 위성위치확인 시스템을 장착하여 차량 속도 그리고 와이퍼 빈도를 기록하는 작은 메모리칩을 부착하고 차량이 주행했을 때 와이퍼의 속도와 인근 강수량관측소에서 관측된 강우량 자료를 비교하여 와이퍼의 속도 변화와 관측 강우량과의 상관관계를 이용하여 차량이 이동하는 지점의 강우량을 구하고자 하였다(Haberlandt and Sester, 2010). 강우모의 실험 장치를 제작하여 차량 유리에 2개의 강우센서를 부착하고 강우를 분사하였을 때 와이퍼의 속도 변화에 따른 센서 신호의 변화 값을 강우량의 지표로 사용하여 강우량 값을 측정하고자 하였다(Rabiei et al., 2013). 강우센서를 이용한 실험 결과 자료를 활용하여 기상레이더와 강수량관측소의 면적 강우량 산정시 보정 값으로 사용하여 보다 정확한 면적 강우량을 산정할 수 있는 모델 실험을 수행하고 이를 통해 강우센서 관측 값의 활용성을 제시하였다(Rabiei, 2016). 국내에서는 강우센서를 이용하여 강우량을 관측하는 방법으로 자동차 전면 유리창의 외면을 외부광 도파로로 사용하여 외부 빗방울에 의한 산란광을 수신하고

빗방울의 대소를 판단하는 우적검지 광센서를 실험하였다(Choi, 2011). 카메라 타입 이미지 센서 및 면광원 활용 통합 강우센서를 개발하였다(Kim et al., 2014). 인공강우발생장치에서 분사되는 강우량의 변화에 따른 차량용 강우센서 신호의 변화 값을 분석하여 차량용 강우센서와 강우량의 관계를 이용한 강우 관측 방법을 제시하였다(Lee et al., 2017). 차량용 강우센서를 이용한 강우 관측 방법 개발 및 실외 관측을 통해 강우센서를 이용한 강우량 관측 방법을 제시하였다(Lee et al., 2018; Lee et al., 2019). 국내외에서 강우센서를 이용하여 미계측유역의 강우량 데이터를 산정하기 위해 연구들이 계속적으로 수행되고 있고 최신 기술을 이용한 관계 부처의 사업도 증가하고 있다. 따라서 본 연구에서는 최근에 개발된 차량용 강우센서와 강우량 사이의 관계를 해석하여 S (Rainfall Sensor Signal)-R (Rainfall) 관계식을 개발하고 현장 적용성을 검토하여 개발된 S-R 관계식의 활용성을 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구절차

본 연구의 목적은 차량용 강우센서와 강우량 사이의 관계를 실내실험을 통해 분석하여 S-R 관계식을 개발하고 현장 적용성을 검토하여 활용성을 분석하는 것이다. 이를 위해서 다음과 같은 절차를 통해 연구를 수행하였다. 첫째, 강우센서 실험 장치의 강우분사 조건을 일정하게 유지하기 위하여 대형 수조, 펌프, 인버터, 노즐 등의 장비에 대한 사전 검토를 통해 실험 장치를 구축한다. 둘째, 다양한 분사조건에서 실험을 통해 센서 신호와 강우량계의 관측 자료간의 상관성을 분석하여 S-R 관계식을 개발하고 적합도를 평가한다. 셋째, 차량에 본 연구에서 개발한 차량용 강우센서를 설치하고 강우 발생시 차량을 운행하여 강우량을 관측하고 차량 이동 경로 주변에 위치한 강우관측소의 실측 자료와 비교 분석하는 현장 적용을 통해 개발된 S-R 관계식의 신뢰도를 평가한다.

2.2 강우센서 신호 감지 방법

강우센서는 산란된 신호를 이용하는 것으로 발신부와 수신부를 차량의 전면유리 아래에 위치시킨다. Fig. 1과 같이 발신부에서 발광되는 신호가 빗방울에 반사되는 반사 신호를 수신부가 수신하는 기본 반사구조를 갖게 된다. 실제 신호 경로는 Fig. 1에 표시된 일반적인 경로뿐만 아니라 다양한 경로로 발생한다. 따라서 다양한 산란 신호의 간섭을 피하기 위해 떨어지는 빗방울이 아닌 전면유리에 위치한 빗방울의 반사 신호를 수신부로 수신하는 것이다. 발신부에서 보내진 신호는 거리(R)만큼 떨어진 빗방울까지 이동한다. 그리고 신호는 거리(r)만큼 이동한 후에 수신부로 돌아간다. 광 출력의 수신값은 Eq. (1)로 산정하며 빗방울의 형태,

Fig. 1. Conceptual Diagram of Rainfall Sensor

강우량, 거리(r^2)에 비례한다. Eq. (2)는 강우센서 수신량 $P_i(t)$ 산정을 위한 빗방울에 의한 반사확률을 산정하는 식이며 Eq. (3)은 수광부에서의 수신 확률을 산정하는 식이다.

$$P_i = P_o(t) \times P_{R1}(t) \times P_{R2}(t) \quad (1)$$

여기서, $P_i(t)$ 는 수신량, $P_o(t)$ 는 방사 각도, $P_{R1}(t)$ 는 빗방울에 의한 반사확률, $P_{R2}(t)$ 는 수광부에서의 수신 확률이다.

$$P_{R1}(t) = \frac{\pi r^2}{4\pi R_1^2} \times \Phi_{R1}(r, \theta, \psi, t) \quad (2)$$

여기서, $P_{R1}(t)$ 는 빗방울에 의한 반사확률, $\Phi(r, \theta, \psi, t)$ 는 빗방울의 형태, r 은 수광부와 빗방울의 거리 R 은 발광부와 빗방울의 거리이다.

$$P_{R2}(t) = \frac{S_{PD}}{(4\pi R_2^2)} \times P_{R1}(t) \quad (3)$$

여기서, $P_{R2}(t)$ 는 수광부에서의 수신 확률, $P_{R1}(t)$ 는 빗방울에 의한 반사확률, S_{PD} 는 수광부의 검지영역, R 은 발광부와 빗방울의 거리이다.

2.3 관계식 산정방법

일반적으로 관계식 개발에 활용되는 방법은 선형회귀분석이지만 비선형 관계를 갖는 자료에서는 오차가 크게 발생한다. 이는 강우센서 신호와 강우량 사이의 관계가 선형관계가 아님에도 강우센서 신호와 강우량의 관계를 선형으로만 표현하는 데서 오는 오차이다. 따라서 분석 자료의 크기에 비례하여 증가($\beta_1 =$ 음수)하는 양의 특성을 잘 나타내는

지수모델식 Eq. (4)를 이용하여 자연로그를 취하면 Eq. (5)와 같이 선형화 시킬 수 있다.

$$y = \alpha_1 e^{\beta_1 x} \quad (4)$$

여기서, α_1 과 β_1 은 상수이며, Eq. (4)에 자연로그를 취하면 다음 Eq. (5)와 같이 선형화 시킬 수 있다.

$$\ln y = \ln \alpha_1 + \beta_1 x \quad (5)$$

따라서 x 에 대한 $\ln y$ 는 β_1 의 기울기와 $\ln \alpha_1$ 의 절편을 가지는 직선으로 표현 할 수 있다.

2.4 적합도 평가방법

본 연구에서는 평균절대오차(Mean absolute error, MAE), 평균제곱근오차(Root mean square error, RMSE), 효율성계수(Coefficient of efficiency, CoE), 일치도지수(Index of agreement, IoA) 등 총 4가지 기법을 이용하여 개발된 관계식의 적합도 평가를 분석하였다. 평균절대오차와 평균제곱근 오차는 작을수록 적합도가 높으며 효율성 계수 및 일치도 지수는 1에 가까울수록 적합도가 높다. Eq. (6)은 MAE, Eq. (7)은 RMSE, Eq. (8)은 CoE, Eq. (9)는 IoA 기법의 식이다.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_i - R_i| \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - R_i)^2}{N}} \quad (7)$$

$$CoE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - R_i)^2}{\sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^2} \quad (8)$$

$$IoA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - R_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|S_i - \bar{R}| + |R_i - \bar{R}|)^2} \quad (9)$$

여기서, N 은 자료 개수, S_i 는 강우센서에서 관측한 강우량, R_i 는 강우량계에서 관측한 강우량, $\bar{R}$ 은 강우량계에서 관측한 강우량의 평균값을 의미한다.

3. S (Rainfall Sensor Signal)-R (Rainfall) 관계식 개발

3.1 연구방법

실내실험을 통해 강우센서와 강우량계에서 계측한 강우량 자료를 이용하여 S-R 관계식 개발하였으며 결정계수(R^2), 평균절대오차(Mean absolute error, MAE), 평균제곱근오차(Root mean square error, RMSE), 효율성 계수(Coefficient of efficiency, CoE), 일치도 지수(Index of agreement, IoA) 분석을 통해 개발된 식의 적합도를 평가하였다. 실내실험을 위해 인공강우를 발생장치 등이 포함된 인공강우 실험실을 제작하였다. 인공강우 실험실은 실험 결과의 신뢰성 확보를 위해 실험실 외부 변수 인자를 차단하였다.

3.2 인공강우 실험실

강우센서와 강우량계의 관계 분석을 위하여 인공강우 실험실에 인공강우 발생장치를 제작하였다. 실험실은 인공강우 발생장치, 차량용 강우센서, 강우량계로 구성되어 인공강우 실험실에서 발생하는 강우량을 관측하였다. 강우를 발생시키는 인공강우 발생장치는 펌프와 노즐, 출력을 조절

할 수 있는 인버터로 구성하였다. Table 1은 인공강우 발생장치에 사용된 노즐의 사양으로 실험에 사용된 노즐은 일반노즐(직경 1.0~1.2 mm) 4가지 종류와 미세노즐(직경 0.4~1.5 mm) 4가지 종류, 총 8종류이다. 높은 강우강도는 일반노즐로 낮은 강우강도 미세노즐을 이용하여 다양한 강우분사조건을 설정하였다. 부피 1 m³을 가지는 챔버를 이용하여 지속적으로 물을 공급하여 연속된 강우에 대해 실험하였으며 노즐의 분사 위치에 따라 변화하는 강우 분포에 따른 오차를 줄이기 위하여 강우센서와 함께 강우량계를 설치하여 동시에 계측하였다. 저수조에는 인버터를 설치하여 일정한 압력으로 유량을 공급할 수 있도록 하여 수두 저하에 따른 압력변화로 인한 오차를 방지하였다. Fig. 2는 노즐 설치 현황이며 Fig. 3은 인공강우 발생실험 장치이다.

3.3 강우센서

본 연구에서는 개발한 강우센서는 무강우시 센서에서 송출된 신호가 모두 전반사 되어 수광부로 수신되고 강우시에는 전반사가 되지 않아 수광부로 수신되는 신호가 줄어

Fig. 2. Nozzle Installation Status

Fig. 3. Artificial Rainfall Experiment

Table 1. Type of Nozzle

Nozzle Category		Nozzle diameter (mm)	Injection quantity (cc/min)
Normal nozzle		1.0	850
		1.2 (small)	1,200
		1.2 (large)	1,500
		1.5	2,200
Fine nozzle		0.4	30
		0.5	200
		1.0	300
		1.5	500

드는 방식이다. Fig. 4는 차량용 강우센서의 동작원리이며 Fig. 5는 본 연구에서 개발한 강우센서의 구조이다.

3.4 S-R 관계식 개발

본 연구에서 개발한 차량용 강우센서는 일정한 값을 지속적으로 송출하는 것이 아니라, ± 20 (무차원) 정도의 차이를 가지고 송출하기 때문에 관측 시간이 짧을 경우 분포가 매우 크게 발생한다. 분포가 크다는 것은 센서면의 노이즈 등으로 계측 데이터에 이상치가 많이 포함되는 것이므로 보정을 해야 하나 수천만개 이상의 자료에서 이상치 자료만 분리 및 제거하는 것은 불가능하기 때문에 강우센서에서 계측한 데이터를 이상치를 포함하여 안정화하는 단계가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 상황을 고려하고 기상청 기상관측소 및 한강·낙동강·영산강·금강 홍수통제소에서 제공하는 10분 단위 관측 자료와 비교를 위하여 5분 단위 관측 자료를 활용하였다. 인공강우실험실의 펌프 출력은 900 RPM~1,400 RPM으로 100 RPM 단위로 변경해 가며 실험하였다. Tables 2와 3은 펌프 출력에 따른 강우량계와 강우센서 신호의 관측 값이다. 실험을 통해 계측한 결과

동일한 실험 조건에서도 계측 값이 상이했으며 이는 강우를 발생시킬 때 노즐에서 강우센서까지 충분한 이격거리(1 m 이내)가 확보되지 않아 인공강우 발생장치에서 분사된 강우가 안정화되지 못하였기 때문에 오차가 발생한 것이다. 앞서 기술한 바와 같이 이러한 오차 보정을 위하여 강우량계를 같이 설치하여 계측한 데이터를 이용하였기 때문에 강우센서에서 계측된 자료는 사용가능 할 것으로 판단되며 실험 결과를 이용하여 Fig. 6과 같이 S (Rainfall Sensor Signal)-R (Rainfall) 관계식 Eq. (7)을 개발하였으며 적합도 평가를 통해 계측된 자료의 신뢰성을 확보하였다.

$$R = 0.2395e^{0.0256(800 - S)} \quad (7)$$

여기서, R 은 강우강도(mm/hr), 800은 강우센서 신호(무차원) 초기값, S 는 강우센서 신호(무차원) 관측 값이다.

인공강우 실험실에서 노즐을 통해 발생시킨 강우의 계측 결과 강우강도가 약 28 mm/hr~46 mm/hr 사이에서 높은 분산을 보였다. 이는 강우실험에서 펌프의 출력과 노즐의 상태 때문인 것으로 판단되며 실험결과를 이용하여 개발한

Fig. 4. Operation Principle of Rainfall Sensor

Fig. 5. Precipitation Sensor Assembly Structure

Table 2. Rainfall Sensor Signal and Rainfall Gauge Observation (Normal Nozzle)

Experiment	Pump											
	900 (RPM)		1,000 (RPM)		1,100 (RPM)		1,200 (RPM)		1,300 (RPM)		1,400 (RPM)	
	Signal (dimension-less)	Rainfall (mm/hr)	Signal (dimension-less)	Rainfall (mm/hr)	Signal (dimension-less)	Rainfall (mm/hr)	Signal (dimension-less)	Rainfall (mm/hr)	Signal (dimension-less)	Rainfall (mm/hr)	Signal (dimension-less)	Rainfall (mm/hr)
1	613.2	21.6	621.6	16.8	599.7	30.2	611.1	28.8	600.5	36	597.9	48
2	614.5	26.4	619.9	26.4	598.5	40.8	610.1	31.2	602.9	43.2	602.5	40.8
3	614.1	26.4	618.9	21.6	596.9	40.8	609.2	31.2	604.7	45.6	600.8	36
4	614.1	31.2	616.6	19.2	598	31.2	609.3	33.6	606.1	45.6	602.8	40.8
5	614.5	33.6	614.4	19.2	599.1	38.4	609.6	31.2	607.6	43.2	603.9	38.4
6	614	28.8	609.6	24.6	599	36	609.1	31.2	608.6	43.2	604.3	40.8
7	614.9	28.8	608.4	26.4	601.4	33.6	608.6	31.2	610.3	31.2	606.8	38.4
8	615.3	31.2	609.7	25.6	601.8	38.4	607.4	33.6	612	28.8	607.6	36
9	616.2	33.6	625.4	21.6	602	33.6	607.2	31.2	612	30.2	607.6	40.8
10	615.7	33.6	619.8	19.2	602.8	33.6	606.6	33.6	611.7	38.2	607.8	38.4

Table 3. Rainfall Sensor Signal and Rainfall Gauge Observation (Fine Nozzle)

Experiment	Pump											
	900 (RPM)		1,000 (RPM)		1,100 (RPM)		1,200 (RPM)		1,300 (RPM)		1,400 (RPM)	
	Signal (dimension-less)	Rainfall (mm/hr)	Signal (dimension-less)	Rainfall (mm/hr)	Signal (dimension-less)	Rainfall (mm/hr)	Signal (dimension-less)	Rainfall (mm/hr)	Signal (dimension-less)	Rainfall (mm/hr)	Signal (dimension-less)	Rainfall (mm/hr)
1	651.9	9.8	669.2	6.4	640.8	15.8	670.9	6.8	630.9	18.6	607.3	37.2
2	653.4	10.8	653.0	10.5	644.6	13.8	674.7	4.8	619.3	26.7	606.4	35.2
3	638.9	12.8	660.5	8.7	646.1	13.8	655.3	8.5	625.8	21.5	613.5	27.2
4	639.2	14.7	679.6	5.4	632.4	16.4	655.7	8.8	636.4	15.2	609.5	32.8
5	639.4	14.2	669.2	6.2	649.7	16.2	645.5	12.1	640.5	15.8	615.2	25.4
6	640.2	15.5	656.2	9.1	639.7	16.4	656.2	9.8	622.8	19.8	611.0	26.8
7	640.5	16.5	661.9	7.8	649.7	11.8	656.6	8.2	626.2	21.2	612.7	32.1
8	644.6	12.5	672.8	6.4	650.1	12.4	657.4	9.4	617.7	27.8	630.2	16.8
9	660.0	9.5	669.2	7.2	637.4	14.2	656.6	10.2	631.7	18.4	616.1	25.2
10	633.3	18.4	659.6	8.3	633.1	16.8	656.6	8.4	634.7	16.2	617.3	26.4

Fig. 6. S (Rainfall Sensor Signal)-R (Rainfall) Diagram**Table 4.** Results of Evaluating the Goodness of Fit of the Rainfall Sensor and Rainfall Gauge

Division	Mean rainfall intensity (mm/hr)	Max rainfall intensity (mm/hr)	Minimum rainfall intensity (mm/hr)	MAE (mm/hr)	RMSE (mm/hr)	CoE	IoA
Rainfall Sensor	23.9	43.4	5.2	2.66	3.87	0.89	0.97
Rainfall gauge	24.2	48.0	4.8				

S (Rainfall Sensor Signal)-R (Rainfall) 관계식의 결정계수 (R^2)는 0.9474로 상관성이 높은 것으로 분석되었다.

3.5 S-R 관계식 적합도 평가

개발된 S-R 관계식의 적합도 평가를 위해 평균절대오차 (Mean absolute error, MAE), 평균제곱근오차(Root mean square

error, RMSE), 효율성 계수(Coefficient of efficiency, CoE), 일치도 지수(Index of agreement, IoA) 총 4가지 기법을 이용하여 평가한 결과 Table 4와 같다. 평균절대오차 2.66 mm/hr, 평균제곱근오차 3.87 mm/hr, 효율성계수 0.89, 일치도지수 0.97로 매우 높은 적합도를 보여주고 있다.

4. S-R 관계식 현장 적용

4.1 연구방법

인공강우 실험을 통해 개발된 S (Rainfall Sensor Signal)-R (Rainfall) 관계식의 현장 적용성 평가를 위하여 현장 실험을 수행하였다. 현장 실험은 차량 5대에 본 연구에서 개발한 차량용 강우센서를 설치하고 강우 발생시 차량이 이동 가능한 도로를 중심으로 차량을 운행하여 강우량을 관측하였다. 차량이동을 통한 강우관측을 위해 강우센서, GPS 수신기, 단말기를 설치하였으며 현장측정 전에 분무기로 실외 실험을 통해 차량에 설치된 강우센서 관측 장비의 이상 유무를 확인하였다. 차량용 강우센서에서 관측된 강우량은 차량 이동 경로 주변에 위치한 강우관측소의 실측 자료와 비교 분석하여 검증하였다. Fig. 7은 개발된 S (Rainfall Sensor Signal)-R (Rainfall) 관계식을 이용한 차량용 강우센서 현장 실험 절차를 보여주고 있다.

4.2 연구지역

우리나라 전 지역을 대상으로 차량용 강우센서를 이용하여 강우 관측을 수행하고 기상청 및 한강·낙동강·영산강·금강 홍수통제소에서 제공하는 강우관측 자료와 비교 분석하여 현장 적용성을 평가하였다. 현장 적용을 위한 현장 실험은 2017년 07월 01일부터 2018년 10월 31일까지 15개월 동안 2번의 우기가 관측될 수 있도록 수행하였으며 차량용 강우센서를 통해 계측한 강우량의 검증을 위해 차량 이동중 계측한 지점에서 가장 가까운 위치의 강우관측소의 강우량 관측 자료를 이용하여 비교 분석하였다. 현장 적용 실험에 강우관측소는 60개소이며 Fig. 8에 차량용 강우센서의 관측 위치와 강우관측소의 위치를 나타내었다.

Fig. 7. Precipitation Sensor Field Test Procedure for Vehicle

4.3 연구 결과

본 연구에서 개발한 차량용 강우센서의 현장 적용성 평가를 위해 차량용 강우센서에서 계측한 자료와 60개소의 강우관측소의 계측 데이터와 비교 분석하였다. Figs. 9~13은 각 센서별 5분 단위 관측 자료와 동일 사상 기간 누적 강우 자료를 비교한 결과이다. 각 센서의 5분 단위 강우자료에서 차이는 인근 강수량관측소의 위치와 차량의 이동에 따른 거리변화로 인하여 발생한 것이며 특히 관측 방법 및 위치에 따른 영향이다. 1번 센서는 강우센서 계측 강우량은 13.4 mm, 강우관측소 관측 강우량은 12.0 mm로 에러율 10.4%를 보이는 것으로 분석되었다. 5분 단위 관측 데이터 그래프를 보면 1번 센서는 강우사상 초기에 차량이 계측한 지점에서 국지성 집중호우가 발생한 것으로 분석된다. 2번 센서는 강우센서 계측 강우량은 7.8 mm, 강우관측소 관측 강우량은 7.0 mm로 에러율 10.3%를 보이는 것으로 분석되었다. 5분 단위 관측 데이터 그래프를 보면 2번 센서는 강우사상 초기에 강우관측소가 위치하는 지점에서 국지성 집중호우가 발생한 것으로 분석할 수 있다. 3번~5번 센서에서 관측된 강우량은 0.3 mm~0.5 mm로 매우 작은 강우가 내렸으며 5분 단위 관측 그래프를 보면 매우 작은 강우가 관측 지역에 고르게 분포하여 발생하였다는 것을 알 수 있다. 또한 3번~5번 센서는 차량의 강우센서에서 측정한 값과 강우관측소에서 측정한 값이 비슷하여 이 지역은 강우의 공간적 분포가 거의 유사하였다는 것을 알 수 있다. 현장적용 시험 결과 1번, 2번 강우센서는 집중호우로 인하여 공간적, 시간적으로 다른 강우량을

Fig. 8. Observation Position of Precipitation Sensor and Rainfall Station

보이며 3-5번 센서는 고른 분포와 작은 강우로 인하여 공간적, 시간적으로 유사한 강우량을 보이는 것을 알 수 있으며 강우관측소 위치에서 계측한 강우량으로 미세측 지역의 강우량 자료를 생성하는 것에 문제점이 있다는 것을 증명하

였다. Table 5는 각 강우사상에 따른 강우센서와 강우관측소의 계측 결과의 차이로 오차율은 0.0%~13.0%로 7.96%의 오차율을 보이는 것으로 분석되었다.

Table 5. Observations and Errors of Precipitation Sensors and Rainfall Stations

Sensor number	Rainfall sensor (mm)	Rainfall Station (mm)	Error rate (%)
No. 1	13.4	12.0	10.4
No. 2	7.8	7.0	10.3
No. 3	2.9	2.9	0.0
No. 4	6.9	6.0	13.0
No. 5	3.3	3.5	6.1

(a) 5-minute

(b) Cumulative rainfall

Fig. 9. Comparison of Precipitation Sensor and Rainfall Station Data (No 1.)

(a) 5-minute comparison

(b) Cumulative rainfall

Fig. 10. Comparison of Precipitation Sensor and Rainfall Station Data (No 2.)

(a) 5-minute comparison

(b) Cumulative rainfall

Fig. 11. Comparison of Precipitation Sensor and Rainfall Station Data (No 3.)

(a) 5-minute comparison

(b) Cumulative rainfall

Fig. 12. Comparison of Precipitation Sensor and Rainfall Station Data (No 4.)

(a) 5-minute comparison

(b) Cumulative rainfall

Fig. 13. Comparison of Precipitation Sensor and Rainfall Station Data (No 5.)

5. 결 론

본 연구에서는 미계측 지역에서의 강우데이터 생산을 위한 강우 예측 기법 개발을 위해 차량에서 와이퍼를 자동으로 조절하는 강우센서를 개발하여 실내 및 현장 실험을 통해 연구결과를 검증하였다. 인공강우 실험을 통하여 차량용 강우센서의 신호와 강우량의 관계를 분석하여 S (Rainfall Sensor Signal)-R (Rainfall) 관계식을 개발하였다. 개발된 S (Rainfall Sensor Signal)-R (Rainfall) 관계식의 현장 적용성 평가를 위해 차량에 강우센서를 부착하여 강우관측소 60개 지점을 대상으로 현장 실험을 수행하였다. 차량용 강우센서에서 관측된 자료의 신뢰성 평가를 위해 차량에서 측정된 지점의 인근 강우관측소 자료와 비교 분석을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 인공강우 발생장치를 이용하는 실내실험을 통해 강우 센서 신호와 강우량의 관계를 분석하여 개발한 S (Rainfall Sensor Signal)-R (Rainfall) 관계식은 결정계수(R^2)가 0.9474로 상관성이 매우 높은 것으로 분석되었다.
- (2) S (Rainfall Sensor Signal)-R (Rainfall) 관계식의 적합도 평가 분석결과 평균절대오차(MAE)는 2.66 mm/hr, 평균제곱근오차(RMSE)는 3.87 mm/hr, 효율성계수

(CoE)는 0.89, 일치도지수(IoA)는 0.97로 평균절대오차와 평균제곱근오차 값은 작고 효율성 계수 및 일치도 지수는 1에 가까워 적합도가 매우 높은 것으로 분석되어 미계측 유역에서 강우자료 생산에 활용 가능할 것으로 판단된다.

- (3) S (Rainfall Sensor Signal)-R (Rainfall) 관계식의 현장 적용성 평가를 위해 차량용 강우센서와 강우관측소 60곳의 계측 데이터를 5분 단위로 분석한 결과 오차율은 0.0%~13.0%로 평균 7.96%의 오차율을 보이는 것으로 분석되었다.
- (4) 누적 강우량 검토를 통하여 차량용 강우센서와 강우관측소의 관측 자료를 검토한 결과 차량용 강우센서를 이용할 경우 국지성 호우의 공간적, 시간적 특성을 반영한 강우 데이터 생산이 가능할 것으로 분석되었다.
- (5) 본 연구에서 개발된 S-R 관계식은 실내 실험을 통해 개발된 것으로 실제 실외공간에서 바람, 터널·교량 밑·나무밑 등의 지형특성, 차량속도, 주변 차량, 차량의 종류에 따른 앞 유리창의 각도, 앞 유리창의 검지 면적 및 위치 등 다양한 변수로 인해 차량용 센서 계측 값에 대한 변화가 있을 것임을 감안하여 추가 연구를 통해 불확실성을 줄이는 것이 필요하다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의
지능형 도시수자원 관리사업의 지원을 받아 연구되었습니다
(2019002950003).

References

- Choi, K.N. (2011). Rain sensor using scattered light outside waveguide. *Journal of the institute of electronics and Information Engineers*, Vol. 48, No. 2, pp. 22-27.
- Haberlandt, U., and Sester, M. (2010). Areal rainfall estimation using moving cars as rain gauges a modelling study. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 14, pp. 1139-2010.
- Kim, H.S., Lee, B.C., Oh, Y.S., Lee, J.H., Kong, N.K., and Kim, J. (2014). Development of the integrated rain sensor using image sensor and BLU. *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 2014, No. 11, pp. 840-846.
- Kenneth, S., Larson, M.L., and Vadas, K.J. (2001). *Vehicle rain sensor using imaging sensor*. US Patent 6,320, 176B1.
- Lee, C.D., Lee, B.H., Cho, H.J., and Kim, B.S. (2018). Comparison and analysis of observation data of rainfall sensor for vehicle and rainfall station. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 38, pp. 783-791.
- Lee, C.D., Park, J.S., Lee, B.H., and Kim, B.S. (2019). Development of a rainfall observation method using vehicle rainfall sensors. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 19, No. 3, pp. 33-40.
- Lee, S.H., Kim, Y.G., and Kim, B.S. (2017). Development of relationship equation for vehicle sensor signal and observed rainfall. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 1, pp. 29-35.
- Rabiei, E., Haberlandt, U., Sester, M., and Fitzner, D. (2013). Rainfall estimation using moving cars as rain gauges: Laboratory experiments. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 17, pp. 4701-4712.
- Rabiei, E. (2016). Areal rainfall estimation using moving cars - computer experiments including hydrological modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 20, No. 9, pp. 3907-3922.

Received	October 26, 2021
Revised	October 27, 2021
Accepted	November 12, 2021