

소규모 지역에 대한 강우의 공간변화도 분석 Analysis on Spatial Variability of Rainfall in a Small Area

김 종 필* / 김 원** / 김 동 구*** / 이 찬 주****
Kim, Jong Pil / Kim, Won / Kim, Dong-Gu / Lee, Chanjoo

Abstract

This study deployed six rain gauges in a small area for a dense network observing rainfall and analyzed the spatial variability of rainfall. They were arranged in a 2×3 rectangular grid with equal space of 60 m. The rainfall measurements from five gauges were analyzed during the period of 50 days because one was seriously affected by alien substance. The maximum difference in cumulative rainfall from them is approximately 38.5 mm. The correlation coefficients from hourly rainfall time series differ from each other while daily rainfall coincide. The coefficient of variation in hourly rainfall varies up to 224% and that in daily rainfall up to 91%. The results from uncertainty analysis show that with only four rain gauges areal mean rainfall cannot be estimated over 95% accuracy. For reliable flood prediction and effective water management it is required to develop a new technique for the estimation of areal rainfall.

Keywords : Rainfall, Spatial variability, Point measurements, Uncertainty, Areal rainfall

요 지

본 연구에서는 소규모 지역 내 6대의 우량계를 설치하여 조밀한 강우 관측망을 구축하고 이를 통하여 소규모 지역에 대한 강우의 공간적 변화도를 분석하고자 하였다. 우량계는 60m의 동일한 간격으로 배치하고 총 54일간의 강우관측을 수행하였다. 이물질로 인하여 오작동을 일으킨 1대 우량계를 제외한 5대의 우량계를 이용하여 50일간 강수량에 대하여 분석을 수행하였다. 각 우량계에 관측된 50일간 누적강수량 비교결과 최대 약 38.5mm의 차이를 나타내었다. 상관성 분석결과 일강수량은 소규모 지역에서 매우 일관성 있는 자료를 보여주고 있으나 1시간 이하 강수량 시계열에서는 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 공간 변화도 분석결과, 변동계수가 시강수량의 경우 최대 약 224%, 일강수량의 경우 최대 약 91%로 나타났다. 면적강수량 불확실성 분석결과, 4대의 우량계만을 이용할 경우 대상지역에 대하여 95% 이상의 정확도를 확보하기 힘든 것으로 나타났다. 향후 보다 신뢰성 있는 홍수예보와 효율적인 유역관리를 위해서는 점 중심의 강우 관측이 아닌 면적 강우 관측방법의 개발이 필요할 것으로 생각된다.

핵심용어 : 강우, 공간 변화도, 점 우량계, 불확실성, 면적강수량

* 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원하천연구소, 박사후연구원 (e-mail: jpkim@kict.re.kr Tel: 82-31-910-0569)

Corresponding Author, Post-doc. Researcher, Water Resources and Environment Research Department, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

** 한국건설기술연구원 수자원하천연구소, 선임연구원 (e-mail: wonkim@kict.re.kr)

Senior Research Fellow, Water Resources and Environment Research Department, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

*** 한국건설기술연구원 수자원하천연구소, 전임연구원 (e-mail: kimdg@kict.re.kr)

Research Specialist, Water Resources and Environment Research Department, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

**** 한국건설기술연구원 수자원하천연구소, 수석연구원 (e-mail: c0gnitum@kict.re.kr)

Senior Researcher, Water Resources and Environment Research Department, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

1. 서론

유역 내 홍수량 예측의 성패는 적용된 수문모형의 성능 뿐만 아니라 입력 자료의 품질에 크게 좌우된다. 특히 강우는 대상유역으로의 전체 유입량을 결정하는 변수로서 물 평형 계산에서 가장 중요한 입력 자료이다. 그런데 수문학적 모델링에서는 유역 전체에 대하여 발생된 강우의 총량을 필요로 하기 때문에 일반적으로 유역 내에 설치된 점 우량계 자료를 기초로 통계적 내삽기법을 이용하여 면적 강우량을 추정하고 있다. 강우는 시공간적 변동성이 매우 크기 때문에 이러한 내삽과정을 통하여 유역 전체나 소유역 또는 모형의 계산격자 내 면적 강우량을 추정할 경우 오차를 발생시킬 수 있다(Krajewski et al., 2003; Villarini et al., 2008; McMillan et al., 2012). 그 뿐만 아니라 개개의 우량계로 측정된 강우자료도 언더캐치(undercatch)나 기기의 오작동 등으로 인한 오차를 포함하고 있을 수 있기 때문에 신뢰성 있는 강우량 정보를 얻기 힘들다.

McMillan et al. (2012)은 강우, 하천유량, 수질 등 수문학적 관측 자료의 불확실성에 대한 선행연구들을 조사·검토하였다. 이들은 선행연구들에서 제시된 결과를 토대로 우량계 하나가 가지는 계통오차(주로 언더캐치에 의한 오차)는 일반적으로 약 5~16%이며, 우연오차는 약 5% 정도 나타난다고 보고하였다. 또한 점 우량계 자료로부터 내삽을 통하여 공간 자료로 변환될 경우 100 m 규모에서는 4~14%, 1 km와 10 km 규모에서는 각각 33~34%와 65%의 표준오차를 발생시킨다고 하였다.

또한 비교적 좁은 지역에 대하여 조밀한 강우관측망을 구축하고 이를 통하여 강우의 공간적 변동성을 분석하고자 하는 연구가 다수 수행되었다. Jensen and Pedersen (2005)은 500×500 m 지역의 LAWR(Local Area Weather Radar) 픽셀(pixel) 내 9대의 우량계를 설치하여 관측된 자료를 분석한 결과 픽셀 내 인접한 우량계 사이에서도 변동계수가 100%까지 나타난다고 하였다. Villarini et al. (2008)은 점 우량 자료를 이용한 면적 강우량 추정의 불확실성 분석을 수행한 결과 공간적 표본오차는 누적시간이 증가할수록 감소하는 경향이 있다고 하였다. Bitew et al. (2009)은 HEXB(Hydrological Experiment in Blue Nile) 자료를 이용하여 열대 산악 지역에서 일강우량의 공간적 변화도를 분석한 결과 변동계수가 약 12~320%로 나타났으며, 하나의 우량계로 관측된 강우자료가 5×5 km 지역의 일강우량을 대표할 수 없다고 주장하였다. Pedersen et al. (2010)은 LAWR 픽셀 내 강우의 공간적 변화도를 분석한 결과 500×500 m 지역에 설치된 9대의 우량계로부터 관

측된 강우자료에 대한 변동계수가 1~25%로 나타났다고 보고하였다. Peleg et al. (2013)은 4 km² 지역에 조밀하게 설치된 우량계 자료로부터 레이더 픽셀 내 평균 강우량 산정의 불확실성을 분석한 결과 VRF(Variance Reduction Factor; Rodriguez-Iturbe and Mejia, 1974)가 분 단위에서는 1.6%, 일 단위에서는 0.07%로 나타났다고 하였다.

이상에서 검토한 선행연구들에 의해 소규모 지역에서도 강우의 공간적인 변동성은 분명하게 나타나며, 이러한 점 우량계에 의한 강우관측의 불확실성은 유역의 유출량 산정에 영향을 주어 홍수예측 정확도를 크게 떨어뜨릴 수 있다. 이와 관련하여 우리나라에서 실제 강우 관측 자료를 이용하여 공간 변화도를 분석한 사례가 드물다. 기존 연구(e.g., Yoo et al., 2011; Son et al., 2013)에서는 유역 규모나 도시 지역 전체에 대한 공간 변화도에 초점을 두고 있어 강우 구름의 규모, 지형이나 경사, 토지 이용 특성 등의 영향이 반영되어 있으므로 순수한 강우 관측의 불확실성을 연구한 사례라고 할 수는 없다. 본 연구에서는 동일한 장소에서 측정된 우량 사이에 차이가 있는지를 파악하기 위하여 매우 조밀한 우량계 관측망을 구축하고 이를 통하여 수집된 자료를 기반으로 강우의 공간적 변화도를 분석하고자 하였다.

2. 연구 자료

2.1 대상 지역 및 우량계 설치 방법

본 연구에서는 2014년 7월 11일 한국건설기술연구원 하천실험센터(경상북도 안동시 남후면 소재) 내 야외실험장에 6대의 우량계를 설치하였다(Fig. 1). 6대의 우량계는 모두 주변 식생의 영향을 최소화하기 위하여 1 m 길이의 말뚝을 설치하고 그 상단부에 고정시켰다. 설치장소는 모두 동일한 표고를 가지고 있으며 실험장으로 접근할 수 있는 통로로서 강우 관측에 어떠한 장애물도 없는 곳을 선정하였다. 또한 우량계는 2×3 격자형으로 배치하였으며, 가로방향과 세로방향의 직선거리를 동일하게 하였다. 구축된 관측망이 대표하는 면적은 21,600 m²로 우량계 하나의 대표면적은 1,200 m²가 된다. 또한 우량계 사이의 거리는 직선방향으로 60 m부터 대각선 방향으로 약 134 m이다.

설치된 우량계는 위덴기업(www.wedaen.co.kr)에서 제조한 것으로서, 0.5 mm급 표준 전도형 자기우량계로 정밀도는 시간당 1~100 mm 기준으로 ±1%를 기록하여 기상검정규격인 ±3%를 만족한다. 우량계 외형은 수수구의 직경이 20 cm, 높이가 52 cm인 원통형으로 되어 있으며, 각

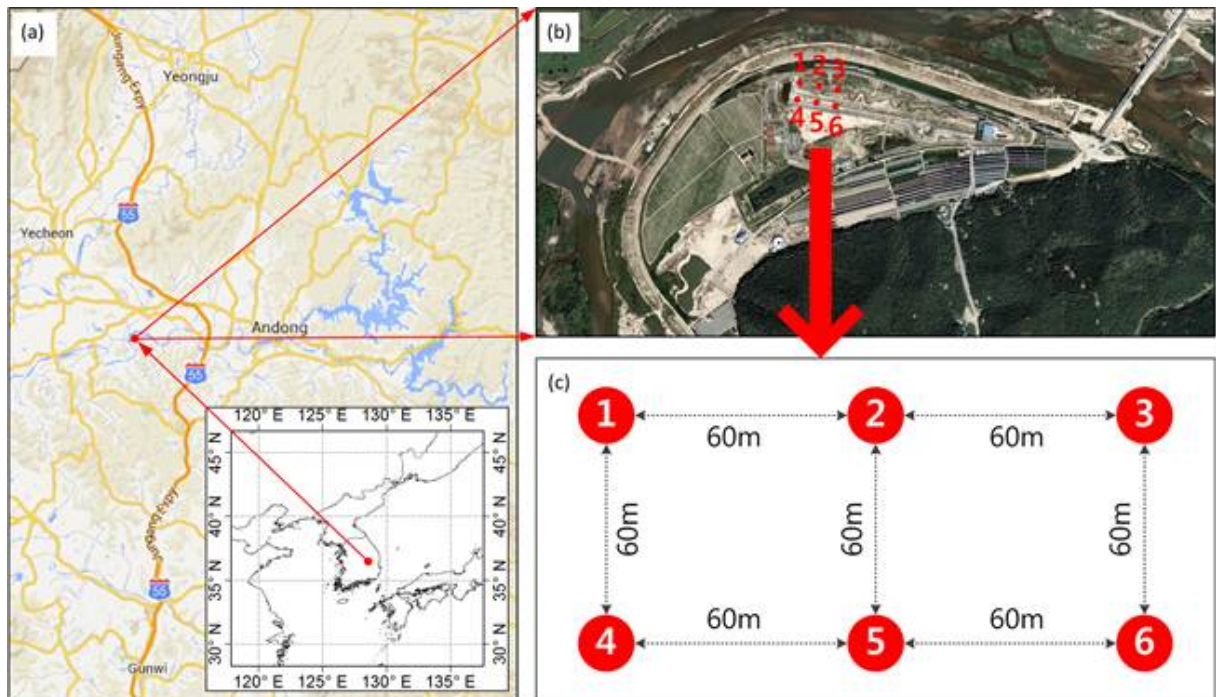


Fig. 1. (a) Location Map and (b) a Satellite Image of the Experimental Site and (c) the Alignment of The Rain Gauges

각의 우량계에는 동일한 로거(logger)를 2대씩 병렬로 설치하여 배터리 방전, 비정상적인 작동 등으로 인한 자료 손실을 예방하고자 하였다. 수수구 상단에서 내부로 연결되는 부분에 철망을 설치하여 각종 이물질의 유입을 최소화하였다. 또한 정기적인 점검을 통하여 우량 계측에 문제가 없음을 확인하였다. Table 1은 본 연구에서 사용된 전도형 자기우량계의 제원을 보여주고 있다.

Table 1. Specification of the Rain Gauges Deployed in this Study

Gauging type	Tipping bucket
Funnel collector	20 cm diameter
Size	20 cm diameter × 52 cm high (stainless steel)
Sensitivity	0.5 mm per tip
Accuracy	± 1% from 1 mm/hour to 100 mm/hour
Output signal	Pulse signal
Reed switch	Normally open type
Contact capacity	10 VA (DC 100 V max, 0.5 A max)
Contact time	150 msec ± 10 msec

2.2 강우자료 수집

우량계를 설치한 2014년 7월 11일부터 9월 2일까지 총 54일간 강우관측을 수행하였다. 수집된 자료는 강우가 발생하지 않은 평상시에는 5분 간격으로 기온이 기록되며, 강우가 발생하여 수수구로 강우가 유입되면 버킷(bucket)이 전도되어 누적강우량과 관측시간이 1초 단위까지 기록되도록 되어 있다. 기록된 원시 강우량 자료를 5분 단위로 누적시켜 5분 단위 강우량으로 변환하였으며, 분석을 위하여 5분, 10분, 15분, 30분, 1시간, 24시간 단위 강우량으로 환산하였다. Fig. 2는 수집된 강우자료의 시강우량 시계열과 누적강우량을 보여주고 있다. Fig. 2(c)에서 보는 바와 같이 RG3의 경우 대략 8월 10일부터 8월 24일까지 강우가 관측되지 않은 것을 확인할 수 있었다. 현장 점검 결과, 조류의 배설물로 추측되는 이물질과 각종 곤충의 사체가 수수구를 막고 있었으며, 일부는 우량계 내부에까지 침투하여 버킷에 들러붙어 있는 상태로 측정된 자료를 신뢰할 수 없기 때문에 RG3은 분석에서 제외하였다.

3. 분석 결과

3.1 자료 비교

우량계로부터 측정된 강우량의 공간적 위치에 따른 차

이를 분석하기 위하여 각각의 강우 시계열 자료로부터 전체 관측기간 동안의 누적강우량, 최대강우량, 그리고 특정 강우강도 이상의 강우량 합계와 각 누적강우량에 대한 비율을 서로 비교하였다.

2014년 7월 13일부터 8월 31일까지 총 50일 동안 수집된 강우자료를 이용하여 우량계별로 누적강우량을 비교한 결과(Table 2), RG1에서 402.0 mm로 가장 많은 강우량을 기록하였으며, RG4에서는 363.5 mm로 가장 적은 강우량을 기록하였다. RG3을 제외한 나머지 5대 우량계의 평균 강우량은 약 386.1 mm이며, 이를 각 우량계에서 수

집된 강우량과 비교하였다. 그 결과 RG1, RG5, RG6은 각각 5대 우량계의 평균 강우량 보다 각각 4.1% (15.9 mm), 3.3% (12.9 mm), 0.5% (1.9 mm) 많은 것으로, RG2, RG4는 약 2.1% (8.1 mm), 약 5.9% (22.6 mm) 적은 것으로 나타났다. 50일간 최대 시강우량은 7월 31일 16시에 발생하였으며, 이때 RG1에 기록된 강우량은 16.5 mm/hour, RG6이 18.5 mm/hour로 2.0 mm/hour의 차이를 보여주었다. 8월 18일에 최대 일강우량을 기록하였는데, RG1이 90.0 mm/day, RG2가 81.5 mm/day로 8.5 mm/day의 차이를 나타내었다.

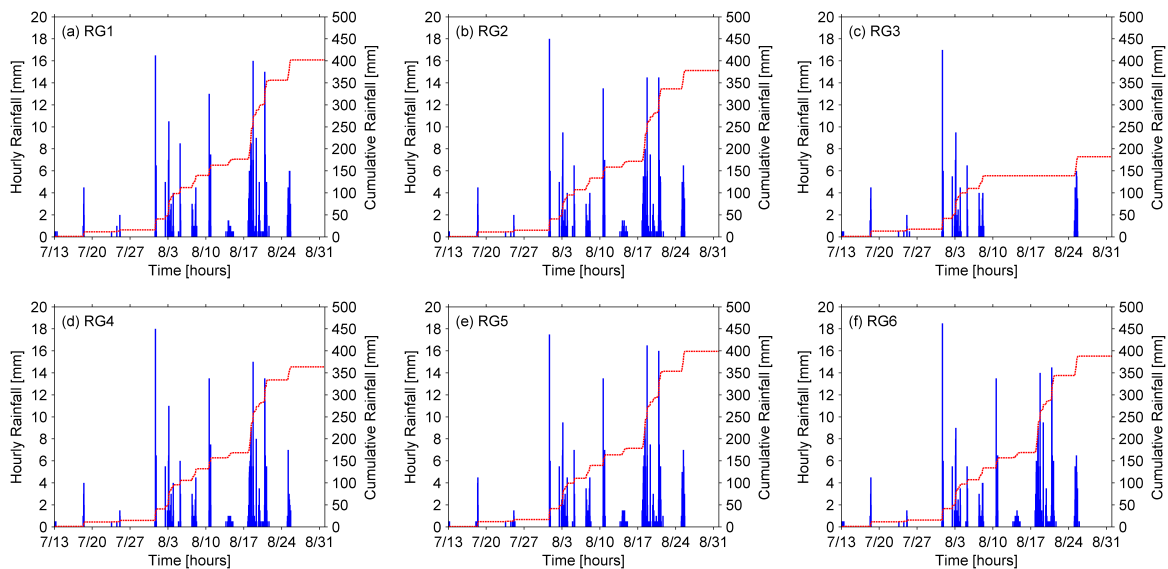


Fig. 2. Plots Comparing the Time Series of Hourly (blue bars) and Cumulative (red lines) Rainfall from Six Rain Gauges

Table 2. Comparison of Cumulative and Mean Daily Rainfall and Sum of Hourly and Daily Rainfall Depths over Different Thresholds. Parentheses Indicate the Percent Ratio of the Sum of Rainfall over Thresholds to the Rainfall Depth Accumulated

		RG1	RG2	RG4	RG5	RG6
Rainfall depth (mm)		402.0	378.0	363.5	399.0	388.0
Maximum value of hourly rainfall (mm/hour)		16.5	18.0	18.0	17.5	18.5
Maximum value of daily rainfall (mm/day)		90.0	81.5	84.5	86.5	86.5
Sum of hourly rainfall over thresholds	≥ 1 mm/hour	378.5 (94.2%)	353.5 (93.5%)	336.0 (92.4%)	373.0 (93.5%)	366.0 (94.3%)
	≥ 5 mm/hour	220.5 (54.9%)	210.5 (55.7%)	206.5 (56.8%)	228.0 (57.1%)	224.0 (57.7%)
	≥ 10 mm/hour	84.5 (21.0%)	72.5 (19.2%)	82.5 (22.7%)	76.5 (19.2%)	74.0 (19.1%)
	≥ 15 mm/hour	47.5 (11.8%)	18.0 (4.8%)	33.0 (9.1%)	50.0 (12.5%)	18.5 (4.8%)
Sum of daily rainfall over thresholds	≥ 10 mm/day	394.5 (98.1%)	371.5 (98.3%)	348.5 (95.9%)	382.5 (95.9%)	372.0 (95.9%)
	≥ 20 mm/day	292.5 (72.8%)	256.0 (67.7%)	245.5 (67.5%)	269.0 (67.4%)	263.5 (67.9%)
	≥ 30 mm/day	222.5 (55.3%)	205.5 (54.4%)	165.0 (45.4%)	220.0 (55.1%)	214.5 (55.3%)
	≥ 40 mm/day	222.5 (55.3%)	166.0 (43.9%)	128.5 (35.4%)	220.0 (55.1%)	214.5 (55.3%)
	≥ 50 mm/day	90.0 (22.4%)	81.5 (21.6%)	84.5 (23.2%)	86.5 (21.7%)	86.5 (22.3%)

특정 강우강도 이상의 강우량 합계를 비교한 결과 1 mm/hour 이상의 강우량 합계에서는 RG6이 366.0mm로 전체 기간 총강우량의 약 94.3%를 기록하였으며, RG4가 336.0mm로 약 92.4%를 기록하여 두 우량계 사이에 0.9%로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 5mm/hour 이상 강우량 합계에서는 RG1이 220.5mm로 약 54.9%를, RG6가 224.0mm로 약 57.7%를 기록하여 두 우량계 사이에 약 2.8%를 보여주었으며, 10mm/hour 이상 합계는 약 3.6%, 15mm/hour 이상의 강우량 합계에서는 약 7.7%의 차이를 보여주었다. 또한 일강우량 시계열을 이용한 분석 결과에서는 10mm/day 이상 강우량 합계에서는 약 2.4%의 차이를, 20mm/day 이상 강우량 합계에서는 약 5.4%, 30mm/day 이상에서는 약 9.9%, 40mm/day에서는 19.9%, 50mm/day 이상에서는 약 1.6%의 차이를 보여주었다.

제시된 결과를 토대로 보면 비교적 좁은 구역에서도 강우 관측 시 우량계의 공간적 위치에 따라 강우량뿐만 아니라 강우강도별 분포특성에서도 차이가 있음을 확인할 수 있었으며, 약간의 차이는 있지만 강우강도가 커질수록 우량계 간의 차이도 큰 것을 볼 수 있었다.

3.2 상관성 분석

각각의 우량계로부터 관측된 강우 시계열 사이의 상관성 분석을 위하여 강우자료 사이의 적률상관계수(Pearson's product-moment correlation coefficient)를 계산하였다. 일반적으로 상관계수를 이용할 경우 자료가 정규분포를 따른다고 가정하고 있다. 만약 강우자료와 같이 정규분포를 따르지 않는 자료로부터 상관계수를 구하게 되면 편향된 결과를 도출할 수 있기 때문에 자연로그를 이용하여 변환하기를 권고하고 있다(Habib et al., 2001). 그러나 이러한 변환과정은 양(+)의 값을 가지는 경우에만 적용이 가능하며, 본 연구에서는 무강우사상을 다수 포함하고 있는 일(day) 단위 이하의 강우 시계열에 중점을 두고 있고

누적시간이나 거리에 따른 상관계수의 변화를 파악하는데 그 목적이 있으므로 따로 강우자료를 변환하지 않았다. 적률상관계수를 계산하는 방법은 일반적으로 잘 알려져 있기 때문에 본 논문에서는 생략하였다.

Table 3은 누적시간과 공간적 거리에 따른 우량계 간의 상관계수 변화를 보여주고 있다. 표에서 보는 바와 같이 누적시간이 증가함에 따라 상관계수가 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3은 RG1과 RG5의 누적시간에 따른 산점도를 나타낸 것으로서, 역시 누적시간이 증가함에 따라서 두 우량계 사이의 상관계수가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 우량계 사이의 거리에 따른 상관계수는 뚜렷한 변화를 찾아볼 수 없었다. 이는 바람의 영향이나 또는 본 연구에서 사용된 우량계의 개수가 매우 적고 동일한 간격으로 배치되어 있어 다양한 거리조건에 따른 상관계수의 변화를 파악하기 힘들기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 따라서 향후 보다 신뢰성 있는 분석을 위하여 우량계를 추가로 설치할 예정이며, 효율적으로 배치하여 거리에 따른 영향을 파악할 수 있도록 할 예정이다.

Table 3과 Fig. 3에서 제시된 결과를 보면 일강우량합계는 소규모 지역에서 매우 일관성 있는 자료를 보여주고 있으나 홍수예측에서 요구되는 1시간 이하의 강우량 시계열에서는 점 우량계로 측정된 강우량 사이에 차이가 있음을 시사한다.

3.3 공간변화도 분석

강우의 공간 변화도를 분석하기 위하여 5대의 우량계로부터 측정된 강우량 자료를 이용하여 공간에 대한 표준편차와 변동계수를 계산하였으며, 이를 5대 우량계의 평균강우량과 비교하였다(Figs. 4 and 5). Fig. 4(a)는 시간우량 자료에 대한 표준편차를 Fig. 4(b)는 변동계수를 보여주고 있다. 시간우량에 대한 표준편차는 시간우량 평균이 5mm/hour일 때 약 2mm/hour로 가장 크게 나타났으

Table 3. Correlation Coefficients for the Accumulation Time and Inter-gauge Distances

	60 m (RG1-RG2, RG1-RG4, RG2-RG5, RG4-RG5, RG5-RG6)	85 m (RG1-RG5, RG2-RG4, RG2-RG6)	120 m (RG4-RG6)	134 m (RG1-RG6)
5 min.	0.5957	0.5459	0.5819	0.5454
10 min.	0.9111	0.9117	0.8988	0.9067
15 min.	0.9428	0.9471	0.9367	0.9412
30 min.	0.9734	0.9758	0.9681	0.9742
hourly	0.9839	0.9865	0.9787	0.9856
daily	0.9955	0.9967	0.9922	0.9987

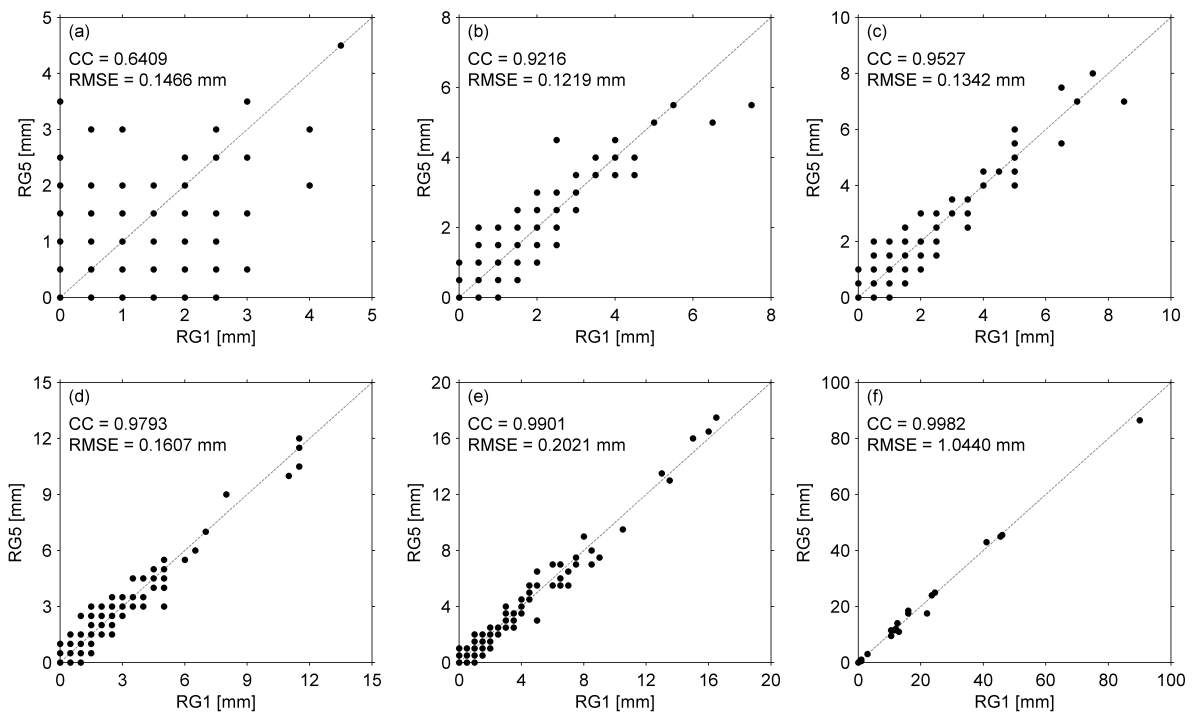


Fig. 3. Scatter Plots Indicating the Linear Relationships between RG1 and RG5 Corresponding to Increasing the Rainfall Accumulation Time: (a) 5 Minutes, (b) 10 Minutes, (c) 15 Minutes, (d) 30 Minutes, (e) 1 Hour, and (f) 24 Hours. The Dotted Gray Lines Indicate a One-to-one Relationships

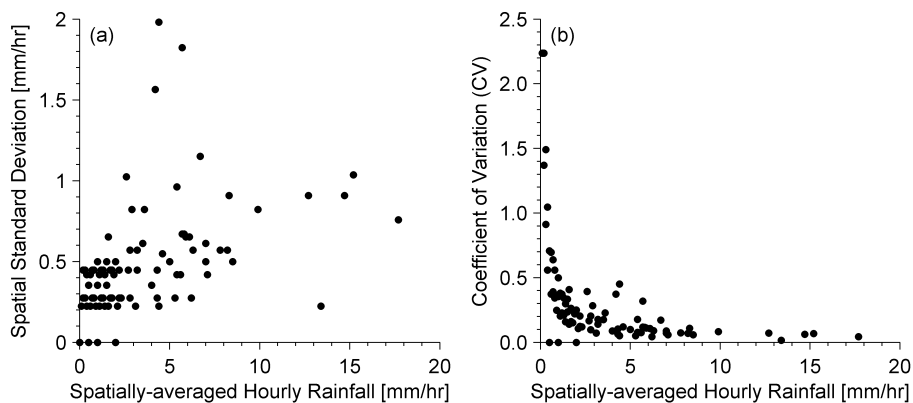


Fig. 4. Plots of (a) Spatial Standard Deviation and (b) Spatial Coefficient of Variation of Hourly Rainfall Time Series as a Function of Spatially-averaged Rainfall Indicating Spatial Variability of Rainfall

나, 이를 제외하고는 대체로 강우량이 증가할수록 공간 변화도가 커지는 경향을 나타내고 있다. 이는 강우의 절대량이 크기 때문에 나타나는 것이므로, 이러한 영향을 배제하기 위하여 Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 변동계수로 표현하였다. 분석결과, 약 2mm/hour 이하의 낮은 강우사상의 경우 적게는 50% 이상 크게는 224%까지 공간 변화도가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 일강우량을 분석할 결과 (Fig. 5)에서도 역시 평균강우량이 증가할수록 표준편차가

증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 변동계수는 약 5mm/day 이하의 강우사상에서 91%에 달하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 소규모 지역일지라도 비교적 강한 강우사상일수록 공간적인 변화량이 증가함을 뜻한다. 또한 절대적인 변화량은 작지만 약한 강우사상에서의 공간적인 변화는 상대적으로 보면 무시할 수 없을 만큼 크게 나타날 수 있다는 것을 알 수 있다.

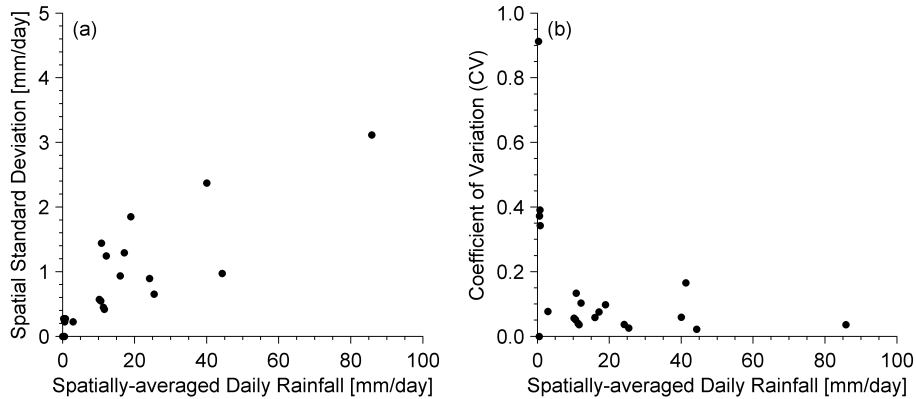


Fig. 5. Plots of (a) Spatial Standard Deviation and (b) Spatial Coefficient of Variation of Daily Rainfall Time Series as a Function of Spatially-averaged Rainfall Indicating Spatial Variability of Rainfall

3.4 면적 강우량 추정치의 불확실성

점 우량계 자료를 이용하여 면적 강우량을 추정에 대한 불확실성을 분석하였다. 면적 강우량의 참값을 알 수 없으므로 다음 식과 같이 5대 우량계의 평균강우량(\bar{R})을 참값으로 가정하였다.

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \quad (1)$$

여기서, R_i 는 i 번째 우량계로부터 측정된 강우량을 의미하며, 5대의 우량계 자료를 사용하였기 때문에 $n=5$ 이다.

추정 면적 강우량(\bar{R}_c)은 다음 식과 같이 5보다 적은 수의 우량계 자료로부터 계산할 수 있다.

$$\bar{R}_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \delta_i \quad (2)$$

여기서, δ_i 는 Kronecker 델타(delta) 함수로서, 두 개의 변수가 서로 같은 값을 가지면 1이 할당되며, 그렇지 않으면

0이 된다. 본 연구에서는 무작위로 선택된 n 개 우량계는 1을, 나머지는 0을 할당하였다. 그렇게 되면 \bar{R} 과 \bar{R}_c 사이의 차이가 곧 추정오차를 의미하며, 선택된 우량계의 개수에 따라 달라진다.

Figs. 6 and 7은 사용된 우량계 개수에 따라 추정된 면적강우량의 분포를 보여주고 있다. 검정색 점선은 5대의 우량계로부터 계산된 평균강우량을, 회색의 어두운 구역은 평균강우량으로부터 (\pm) 5%의 범위를 나타낸 것이다. 50일간의 관측된 시강우량 시계열 중에서 상대적으로 강한 강우사상(7월 31일 16시, 평균 약 17.7 mm/hour), 중간 강우사상(8월 5일 6시, 평균 약 6.7 mm/hour), 약한 강우사상(8월 25일 5시, 평균 약 5.4 mm/hour) 등 임의로 3가지 사례를 선택하여 분석하였다(Fig. 6). 일강우량 시계열에 대해서도 역시 강한 강우사상(8월 18일, 평균 약 85.8 mm/day), 중간 강우사상(8월 25일, 평균 약 41.3 mm/day), 약한 강우사상(8월 5일, 평균 약 10.8 mm/day) 등의 사례에 대하여 분석을 수행하였다(Fig. 7).

분석결과, Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 1대의 우량계

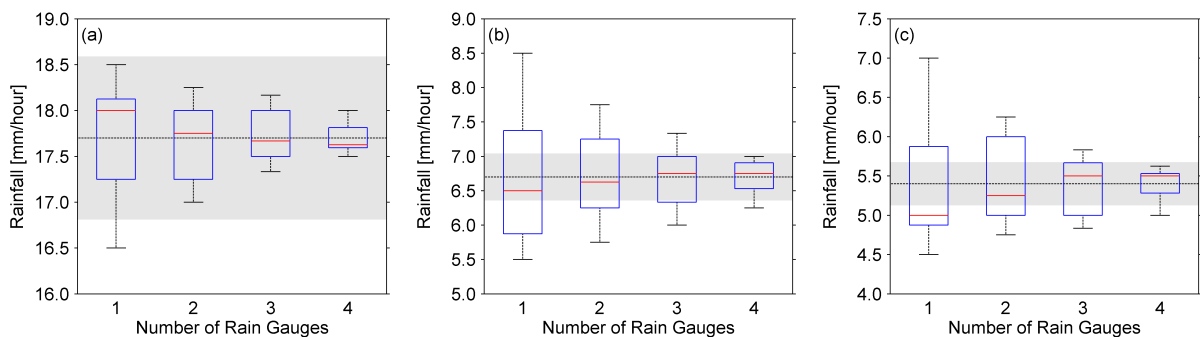


Fig. 6. Distribution of Hourly Rainfall Estimates as a Function of the Number of Rain Gauges at (a) 16:00 July 31, (b) 06:00 August 5, and (c) 5:00 August 25, 2014. The Black Dotted Line Indicates the Reference Rainfall and the Shaded Areas Indicate the upper and Lower Bounds of 5% Deviation from the Reference Rainfall

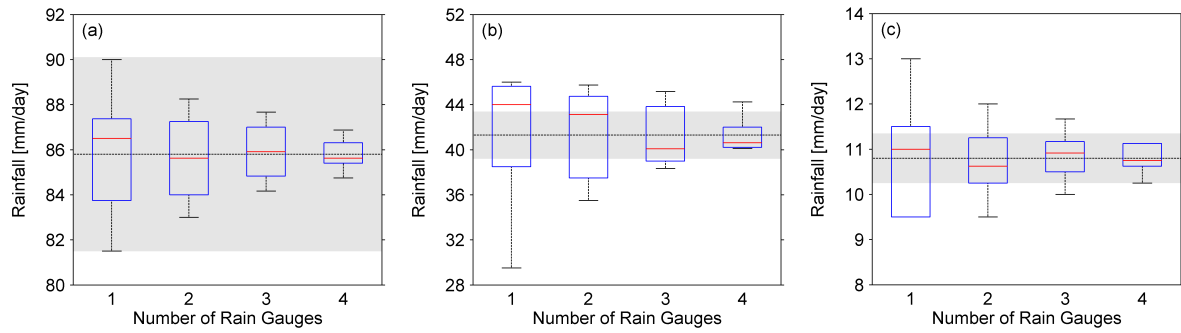


Fig. 7. Distribution of Daily Rainfall Estimates as a Function of the Number of Rain Gauges on (a) August 18, (b) August 25, and (c) August 5, 2014. The Black Dotted Line Indicates the Reference Rainfall and the Shaded Areas Indicate the upper and Lower Bounds of 5% Deviation from the Reference Rainfall

를 사용하여 면적강우량을 추정할 경우 약 16.5 mm/hour에서 18.5 mm/hour까지 변화하는 것으로 나타났으며, 이는 5대 우량계 평균값과 비교하면 (-)1.2 mm/hour에서 (+)0.8 mm/hour까지 추정오차가 발생할 수 있다는 것을 보여준다. 또한 우량계 개수를 증가시킬수록 변화범위는 줄어드는 것을 볼 수 있으며, 면적 강우량 추정 시 2대 이상의 우량계를 필요로 함을 보여준다. 그러나 Figs. 6(b) and 6(c)에서 나타난 것처럼 중간이나 약한 강우사상에 대해서는 모두 5% 경계선을 벗어난 추정범위를 보여주었으며, 이는 4대의 우량계를 사용한다 할지라도 면적강우량 추정 시 95% 이상의 정확도를 확보하기 힘들다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 일강우량 추정에서도 동일하게 나타났으며(Fig. 7), 중간 또는 약한 강우사상의 경우 4대의 우량계로도 면적강우량을 대표하기 힘들다는 것을 알 수 있었다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 한국건설기술연구원 하천실험센터 내에 매우 조밀한 우량계 관측망을 구축하고 이를 통하여 관측된 강우자료를 토대로 소규모 지역에 대한 강우의 공간적 변화도를 분석하고자 하였으며, 도출된 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 각 우량계로 관측된 강우 관측 자료를 50일간 누적시킨 결과, 우량계 사이에 최대 약 38.5 mm의 차이를 나타냈으며, 최대 시강우량에서는 약 2.0 mm/hour를, 최대 일강우량에서는 약 8.5 mm/day의 차이를 나타내었다. 또한 강우강도별 합계를 비교하였을 때 강우강도가 커질수록 우량계 사이의 차이도 커지는 것으로 나타났다.
- 2) 상관성 분석결과에서는 관측 자료의 부족으로 강우

시계열 간의 공간적 상관성을 파악할 수는 없었으나, 누적시간이 길어짐에 따라 상관계수가 증가함을 확인할 수 있었다. 또한 각 우량계로 관측된 일강우량은 소규모 지역에서 매우 일관성 있는 자료를 보여주고 있으나 홍수예측에서 요구되는 1시간 이하의 강우량 시계열에서는 점 우량계로 측정된 강우량 사이에 차이가 있음을 확인할 수 있었다.

- 3) 표준편차를 이용한 공간 변화도 분석결과, 평균강우량이 증가할수록 공간에 대한 표준편차가 커지는 것으로 나타났으며, 이는 강우의 절대량이 증가할수록 변화의 크기가 커지기 때문이다. 변동계수를 분석한 결과에서는 시강우량의 경우 2 mm/hour 이하의 아주 약한 강우사상에 대하여 최대 약 224%, 일강우량의 경우도 역시 5 mm/day 이하에서 최대 약 91%로 약한 강우사상에서 공간 변화도가 더욱 크게 나타났다.
- 4) 점 우량계를 이용한 면적강우량 산정 시의 불확실성을 분석한 결과, 4대의 우량계를 이용하더라도 대상 지역의 면적강우량 산정 시 95% 이상의 정확도를 확보하기 힘들다는 것을 시사한다.

이상의 결과를 토대로 소규모 대상지역에 대해서 강우의 공간 변화도가 크게 나타나며 이를 대표할 수 있는 면적 평균강우량을 추정하는데 어려움이 있음을 알 수 있었다. 본 연구에서 제시된 결과는 강우 관측망이 구축되고 초기단계에서 도출된 것으로서, 그 관측기간이 매우 짧고 동일한 간격으로 배치된 5대의 우량계만을 사용하였기 때문에 거리에 따른 영향을 분석하는데 한계가 있었다. 또한 본 연구에서는 바람의 영향이 고려되지 않았기 때문에 이를 고려할 경우 제시된 결과와는 다른 결과를 얻을 수도 있다. 보다 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서 향후 우량계를 추가적으로 배치하여 장기간에 걸쳐 자료를 구축할

계획이며, 동일한 간격의 정사각형보다 거리에 따른 영향을 분석하기 위하여 적절한 배치방법을 모색하고 있다.

한편, 우리나라의 국토면적은 약 99,720 km²으로, 육지 지역에 설치되어 있는 기상청의 자동기상관측망(AWS, Automatic Weather Station) 우량계는 400개, 국토교통부가 운영하는 우량계는 595개, 지방자치단체에서 운영하는 우량계는 1,368개로 각각 1대의 우량계가 대표하는 면적은 235.6 km², 158.4 km², 68.9 km²이다(Yoo et al., 2011). 본 연구에서 구축된 관측망에서 우량계 1대가 대표하는 면적은 약 1,200 m²로 볼 때 아직까지 우리나라에서 운영 중인 강우 관측망은 홍수예측이나 유출분석을 위하여 요구되는 밀도를 확보하였다고 보기 힘들다. 그러나 현실적으로 이러한 요구를 만족할 수 있을 만큼 우량계 개수를 늘리기는 힘들다. 따라서 보다 신뢰성 있는 홍수예보와 효율적인 유역관리를 위해서는 점 중심의 강우 관측이 아닌 소규모 지역에서 강우의 공간변화도를 반영할 수 있는 면적 강우 관측방법의 개발이 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업 ‘(14주요-임무-재해-우량계)전자과를 이용한 초소형우량계 개발’의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

Bitew, M.M., Gebremichael, M., Hirpa, F.A., Michael, Y., Seleshi, Y., and Girma, Y. (2009). On the local-scale spatial variability of daily rainfall in the highlands of the Blue Nile: Observational evidence. *Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers*, pp. 3801-3809.

Habib, E., Krajewski, W.F., and Ciach, G.J. (2001). "Estimation of rainfall interstation correlation." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 2, pp. 621-629.

Jensen, N.E., and Pedersen, L. (2005). "Spatial variability of rainfall: Variations within a single radar pixel." *Atmospheric Research*, Vol. 77, pp. 269-277.

Krajewski, W.F., Ciach, G.J., and Habib, E. (2003). "An

analysis of small-scale rainfall variability in different climatic regimes." *Hydrological Science Journal*, Vol. 48, No. 2, pp. 151-162.

McMillan, H., Krueger, T., and Freer, J. (2012). "Benchmarking observational uncertainties for hydrology: Rainfall, river discharge and water quality." *Hydrological Processes*, Vol. 26, pp. 4078-4111.

Pedersen, L., Jensen, N.E., Christensen, L.E., and Madsen, H. (2010). "Quantification of the spatial variability of rainfall based on a dense network of rain gauges." *Atmospheric Research*, Vol. 95, pp. 441-454.

Peleg, N., Ben-Asher, M., and Morin, E. (2013). "Radar subpixel-scale rainfall variability and uncertainty: Lessons learned from observations of a dense rain-gauge network." *Hydrology and Earth System Science*, Vol. 17, pp. 2195-2208.

Rodriguez-Iturbe, I., and Mejia, J.M. (1974). "The design of rainfall networks in time and space." *Water Resources Research*, Vol. 10, No. 4, pp. 713-728.

Son, A., Han, K., and Bae, S. (2013). "Temporal and spatial characteristics analysis of rainfall in Seoul." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 13, No. 3, pp. 83-95.

Villarini, G., Mandapaka, P.V., Krajewski, W.F., and Moore, R. (2008). "Rainfall and sampling uncertainties: A rain gauge perspective." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113, D11102, DOI:10.1029/2007JD009214.

Yoo, C., Lee, J., Yang, D., and Chung, J. (2011). "Spatial analysis of rain gauge network: Application of uniform and Poisson distributions." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No. 4, pp. 179-187.

paper number : 15-042

Received : 19 May 2015

Revised : 10 September 2015 / 17 September 2015

Accepted : 17 September 2015