

관측망 밀도가 기상 자료의 격자형 수평 분포에 미치는 영향

강민수¹⁾ · 박문수^{1)*} · 채정훈¹⁾ · 민재식¹⁾ · 정보연²⁾ · 한성의²⁾

¹⁾한국의국어대학교 대기환경연구센터, ²⁾수도권기상청 관측과

(접수일: 2019년 3월 31일, 수정일: 2019년 5월 30일, 게재확정일: 2019년 6월 20일)

Effects of Network Density on Gridded Horizontal Distribution of Meteorological Variables in the Seoul Metropolitan Area

Minsoo Kang¹⁾, Moon-Soo Park^{1)*}, Jung-Hoon Chae¹⁾, Jae-Sik Min¹⁾,
Boo Yeon Chung²⁾, and Seong Eui Han²⁾

¹⁾Research Center for Atmospheric Environment, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, Korea

²⁾Observation Division, Seoul Metropolitan Office of Meteorology, Suwon, Korea

(Manuscript received 31 March 2019; revised 30 May 2019; accepted 20 June 2019)

Abstract High-quality and high-resolution meteorological information is essential to reduce damages due to disastrous weather phenomena such as flash flood, strong wind, and heat/cold waves. There are many meteorological observation stations operated by Korea Meteorological Administration (KMA) in Seoul Metropolitan Area (SMA). Nonetheless, they are still not enough to represent small-scale weather phenomena like convective storm cells due to its poor resolution, especially over urban areas with high-rise buildings and complex land use. In this study, feasibilities to use additional pre-existing networks (e.g., operated by local government and private company) are tested by investigating the effects of network density on the gridded horizontal distribution of two meteorological variables (temperature and precipitation). Two heat wave event days and two precipitation events are chosen, respectively. And the automatic weather station (AWS) networks operated by KMA, local-government, and SKTechX in Incheon area are used. It is found that as network density increases, correlation coefficients between the interpolated values with a horizontal resolution of 350 m and observed data also become large. The range of correlation coefficients with respect to the network density shows large in nighttime rather than in daytime for temperature. While, the range does not depend on the time of day, but on the precipitation type and horizontal distribution of convection cells. This study suggests that temperature and precipitation sensors should be added at points with large horizontal inhomogeneity of land use or topography to represent the horizontal features with a resolution higher than 350 m.

Key words: Automatic weather station (AWS), high-quality weather information, interpolation, network density, Seoul Metropolitan Area (SMA)

*Corresponding Author: Moon-Soo Park, Research Center for Atmospheric Environment, Hankuk University of Foreign Studies, 81, Oedae-ro, Mohyeon-eup, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17035, Korea.
Phone: +82-31-8020-5586, Fax: +82-31-8030-5590
E-mail: ngeograph2@gmail.com

1. 서 론

최근 도시화와 기후변화에 따른 위험 기상이 국지화·대형화됨에 따라 국민의 생명과 재산을 위협하는 기상 재해가 증가하고 있다. 그 예로 2010년 광화문에서는 침수로 인한 593억원 재산피해가 발생했으며, 2011년 서울 도심 및 경기지역에 집중호우로 인해 62명이 사망하는 등 많은 피해가 발생하였다(Park et al., 2013; Kim et al., 2014). 또한, 2018년 7월과 8월에 전국적인 폭염일수가 29.8일로 평년의 9.2일에 비해 매우 많았으며, 일최고기온이 홍천에서 41.0°C, 서울에서 39.6°C, 일최저기온이 서울에서 30.3°C가 관측되는 등 폭염 관련 극값을 갱신하였다(<https://data.kma.go.kr>).

수도권은 우리나라 인구의 50%가 거주하고 있으며, 세계에서 5번째로 많은 도시지역 인구를 가지고 있다(Demographia, 2018). 수도권은 복잡한 지형, 지리, 지면 조건으로 인해 인접 지역 간에도 다른 형태의 기상 현상이 발생하는 경우가 빈번하다. 특히, 도시에서는 기온 등 기상 변수들의 수평 분포가 주거 지역이나 상업 지역의 건물 블록, 공원, 호수, 야산 등의 100 m에서 수 km의 이웃 규모로 불균일하게 나타난다(Lee et al., 2009; Toparlar et al., 2018). 예를 들면, 고층 건물들로 둘러싸인 도시에서는 시간에 따른 그림자의 변화 때문에 건물면의 방향, 고도별 다른 온도 및 바람 분포를 보인다(Martinelli et al., 2015; Yu et al., 2019). 또한 불투수면의 비율이 높기 때문에 돌발홍수에 취약할 수 있다. 이런 기상 재해에 효율적으로 대비하고 피해를 최소화하기 위해 이웃 규모에 해당하는 100여 m 수평 해상도의 관측망이 필요하다.

관측 자료로부터 변수들의 수평 분포를 산출하기 위해 다양한 내삽법을 이용하는데 이 과정에 관측소의 밀도가 내삽값의 정확도에 영향을 미치게 된다. 만일, 관측망의 밀도가 내삽 해상도와 동일하다면 내삽이 별도로 필요하지 않지만, 일반적인 경우 관측망의 밀도가 국지적인 위험 기상 현상을 탐지할 수 있는 정도의 해상도를 가지지 못한다. 이미 다양한 내삽 방법이 개발되어 있으며, 같은 방법이라 하더라도 적용 방정식의 형태와 지수 등에 따라 내삽 결과가 매우 크게 달라 진다(Shiode and Shiode, 2011; Setianto and Triandini, 2013).

그러나, 도시에서 기상 정보 서비스를 위해 어느 정도 관측망의 밀도가 최적인가에 대한 연구는 여전히 해결되지 않은 상황이다. 모델의 입장에서 OSSE (Observing System Simulation Experiment)와 같이 가상의 관측 지점을 넣을 경우와 넣지 않을 경우의 수치모의를 통해 관측 지점의 유효성을 평가하는 모델

기반의 실험이 있기는 하다(Kuo et al., 1985, 1998). 그러나, 중규모 보다 좁은 영역, 특히 도시와 같이 지표면이 불균일할 경우 적용할 수 있는 모델은 여전히 불확도가 매우 크기 때문에 이를 적용하여 관측망의 밀도 특성을 규명하는 것은 역시 어렵다(Roth, 2000; Arnfield, 2003; Grimmond, 2006; Grimmond et al., 2009; Blumenfeld and Skaggs, 2011).

전지구적인 기후 자료를 만들기 위해 관측망의 밀도를 조정하거나 고해상도 격자의 관측값을 추정하는 연구가 수행된 바 있다(Janis et al., 2002; Arsenault and Brissette, 2014; Gubler et al., 2017). 국내에서도 제주도의 기상관측소 17개 지점의 시우량 관측자료를 활용하여 다중회귀분석이나 지형과 강수와의 상관성 분석을 통한 강우량 보정 기법이 개발되었다(Um et al., 2007; Yun et al., 2009). 강원도 지역의 66개의 기상관측소 시우량 자료에 비계층적 군집 기법인 K-means 법 또는 PRISM (Parameter-elevation Regressions an Independent Slopes Model) 법을 적용하여 강수 지역을 재현하였다(Um et al., 2009; Um and Jeong, 2011). 또한 남한 전국 지역의 526개의 관측소의 월 누적 강수 자료와 PRISM 법을 이용하여 격자형 강수량을 추정하였으며(Shin et al., 2008), 한반도 영역에 12 km 관측 해상도 일 강수량 자료를 적용하여 1 km 해상도의 격자 자료를 추정할 수 있는 MK (Modified Korean)-PRISM이 개발되었다(Kim et al., 2012, 2013). 기존 문헌에서 수행된 연구는 10 km 이상의 평균수평해상도와 1시간 이상의 시간해상도 자료를 사용하였으며, 수 km 이하이며 분 단위의 자료에 대한 효과성의 연구는 부족하였다.

현재 수도권에는 기상청(KMA, Korea Meteorological Administration) 뿐 아니라 경기도청, 인천시 등의 유관 기관, 그리고 SKTechX, KT 등의 민간 기관에서 설치하여 운영하는 기상 관측망이 있다(Park et al., 2017). 수도권에서 발생하는 기상 관련 재해에 효율적으로 대응하기 위해 기상청 자료 이외에 유관 기관이나 민간 기관 관측망 자료를 활용할 필요가 있다. 예를 들면, SKTechX를 포함한 고밀도 관측망 자료로 정량적 강수 추정값을 산출할 경우 기상청 자동기상 관측망(AWS, Automatic Weather Station)의 저밀도 관측망 자료로 산출된 값보다 더 우수한 것으로 연구된 바 있다(Yoon et al., 2015; Yoon and Lee, 2017). 관측 자료 분석을 통해 위험 기상 대응을 위한 최적의 관측망 밀도를 결정하려면 먼저 보다 넓은 영역에 수백 m 수평해상도의 고밀도 관측망이 시범 구축되어 있어야 한다. 도시에 이런 고밀도 관측망을 구축하는 것은 적합한 설치 환경을 가진 장소를 확보하는 것도 매우 어렵지만, 막대한 설치 및 유지 관리비를 필요로 한다. 만일 현재 수준에서 순차적으로 관측망을 추

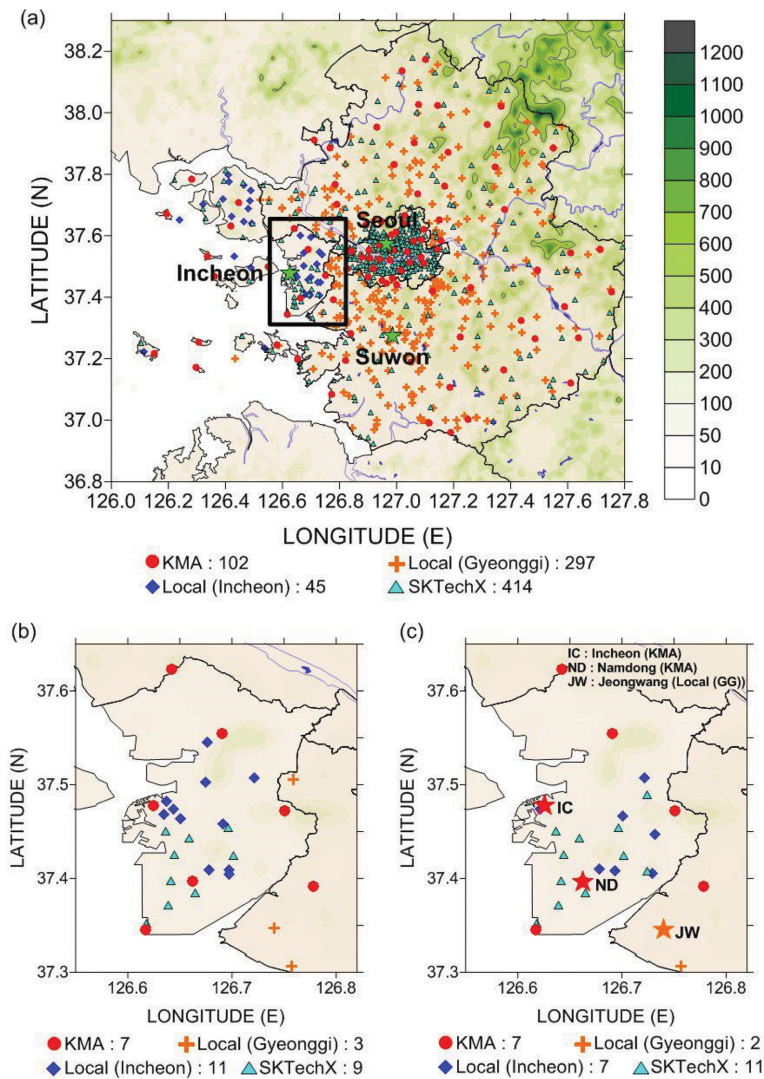


Fig. 1. The horizontal distribution of (a) the stations in SMA, the selected stations for (b) temperature and (c) precipitation analyses in Incheon region operated by KMA (red circle), Gyeonggi local government (orange cross), Incheon local government (blue diamond), and SKTechX (cyan triangle). The location of Seoul, Incheon, and Suwon station are indicated by green star in (a), and Incheon, Namdong, and Jeongwang stations are indicated by star in (c).

가한다면 위험 기상 대응을 위해 도움이 될 관측 지점의 우선 순위를 결정할 필요가 있다.

본 연구에서는 현재 구축된 기상청 AWS의 관측 밀도를 보완하기 위해 유관·민간 기관의 자료들의 활용 가능성과 효율성을 조사하고자 한다. 이를 위해, 수도권 중 유관·민간 기관의 기상관측망이 있는 도시 영역에서 폭염과 집중 호우가 포함된 사례 기간을 선정하여, 관측망 밀도 증가에 따른 기온과 강수량의 350 m 해상도의 격자형 수평 분포 특성을 매 분 단위로 분석하고자 한다.

2. 연구 내용 및 방법

2.1 관측소 및 자료의 선정

2016년과 2017년 6월~8월 중에 수도권(서울, 경기, 인천)에 운영되고 있는 관측망으로는 기상청, 경기도청 관측망(경기도청), 경기도와 인천광역시의 지방자치단체에서 운영하는 관측망[각각, 유관(경기)와 유관(인천)], 민간 기관인 SKTechX에서 운영하는 관측망(SKTechX) 등이 있다. 기상청 관측망은 서울 29소, 경기 50소, 인천 23소로 102소가 있으며, 경기도청 관

Table 1. The number of total observation stations and horizontal grid size of the Seoul, Gyeonggi, and Incheon area.

Observation Network	Total station number	Horizontal grid size (km ²)
KMA	102	Seoul (29): 4.6 × 4.6 Gyeonggi (50): 14.3 × 14.3 Incheon (23): 6.7 × 6.7
Local (Gyeonggi)	297	5.9 × 5.9
Local (Incheon)	45	4.8 × 4.8
SKTechX	414	Seoul (250): 1.6 × 1.6 Gyeonggi (131): 8.8 × 8.8 Incheon (33): 5.6 × 5.6

* KMA: Korea Meteorological Administration, Local: local government

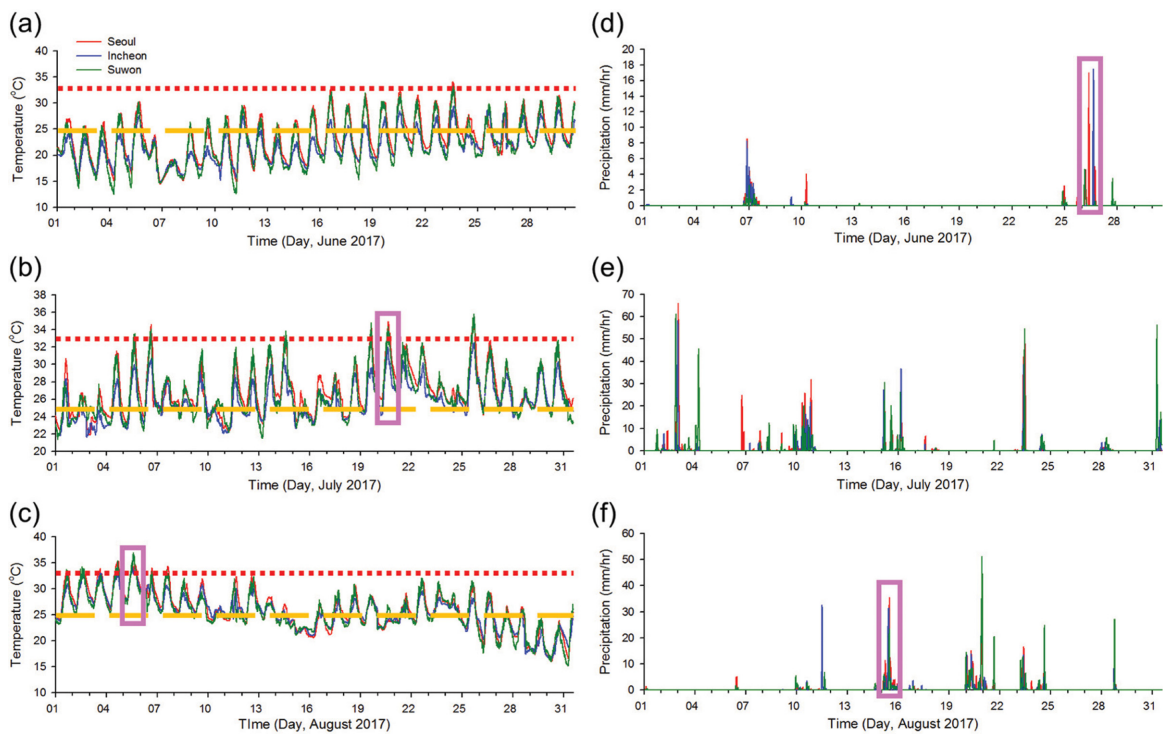


Fig. 2. Monthly time series of (a-c) temperature and (d-f) hourly precipitation observed at KMA-operated Seoul, Incheon, and Suwon stations on (a, d) June, (b, e) July, and (c, e) August 2017. Red dot and yellow dash lines indicate temperature criteria for heatwave (33°C) and tropical night (25°C), respectively. Pink squares indicate selected period in this study.

측망은 66소, 유관(경기)와 유관(인천) 관측망은 각각 297소, 45소가, SKTechX 관측망은 서울에 250소, 경기도에 131소, 인천에 33소로 총 414소가 있다(Fig. 1). 서울, 경기, 인천의 넓이가 각각 605 km², 10,184 km², 1,010 km²임을 고려하면, 서울의 경우 기상청 관측망의 평균수평해상도는 4.6 km, SKTechX는 1.6 km이고, 경기도의 경우 기상청 관측망은 14.3 km, 유관(경기) 관측망은 5.9 km, SKTechX 관측망은 8.8 km이고, 인천

의 경우 기상청 관측망은 6.7 km, 유관(인천) 관측망은 4.8 km, SKTechX 관측망은 5.6 km를 보였다(Table 1).

기상청 관측망의 경우 장비의 유지 관리와 자료의 품질관리가 엄격하게 수행되기 때문에 자료의 품질을 신뢰할 수 있다(KMA, 2006; Chae et al., 2014). 그러나, 유관 기관과 민간 기관 관측망의 경우 기상청만큼 장비의 유지 관리와 자료의 품질관리가 엄격하게 수행되지 않기 때문에 과도한 강수나 인접한 지점에

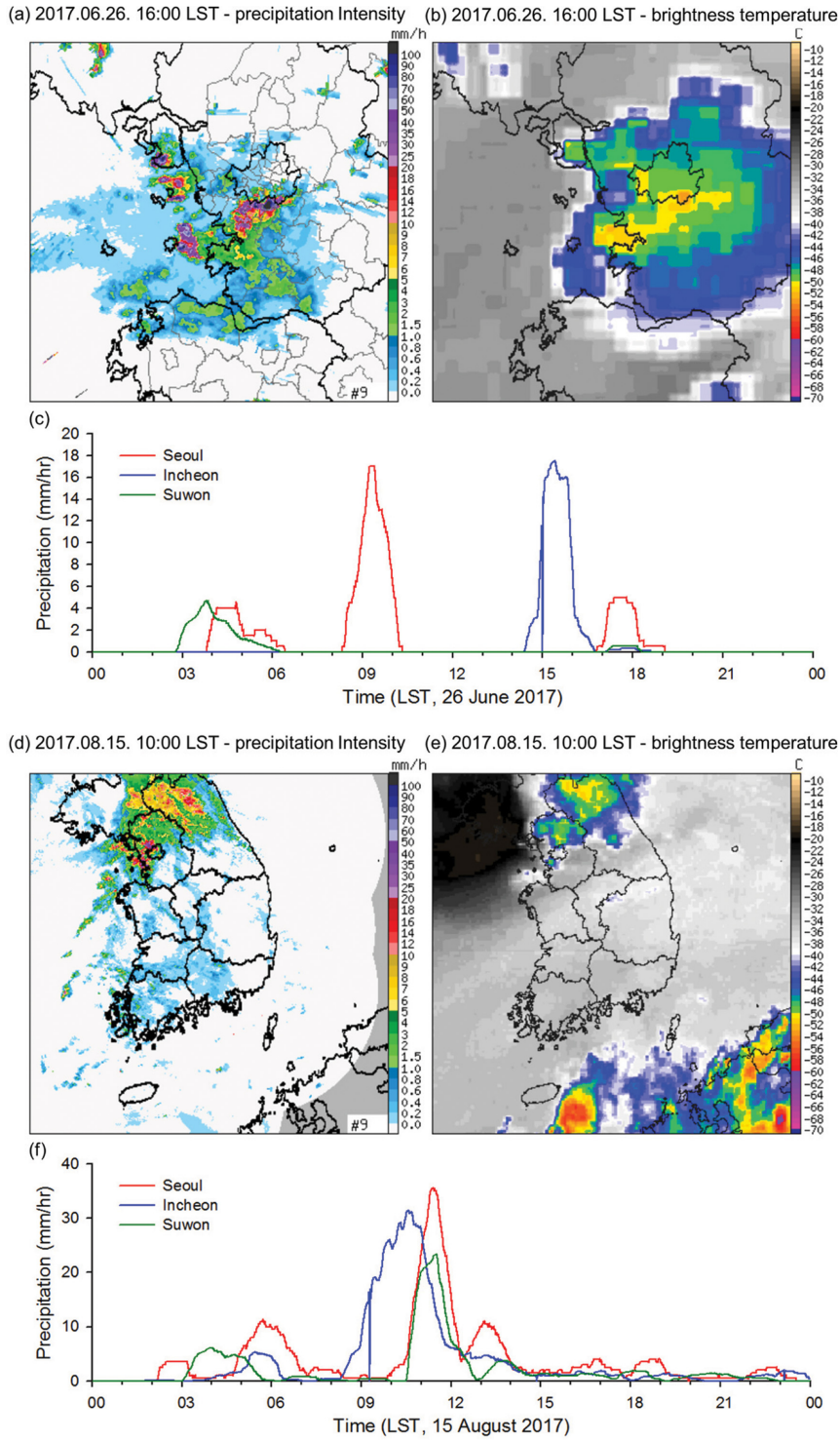


Fig. 3. Horizontal distribution of (a, d) radar CAPPI precipitation intensity and (b, e) the brightness temperature obtained from the Chollian satellite at (a, b) 1600 LST on 26 June, and (d, e) 1000 LST on 15 August 2017 (<https://afso.kma.go.kr>), and time series of hourly precipitation at KMA-operated Seoul, Incheon, and Suwon stations on (c) 26 June and (f) 15 August 2017.

Table 2. Type, station number and grid size of observation network steps in the Incheon area used for the spatial distribution analysis. Based on the collection rate and the mean (m) $\pm 3\sigma$ (standard deviation).

Step	Observation Network type	Station number	Mean grid size (km ²)
Step 1	KMA	Temp: 7 Preci: 7	Temp: 12.3 \times 12.3 Preci: 12.3 \times 12.3
Step 2	KMA + Local (Gyeonggi)	Temp: 10 Preci: 9	Temp: 10.3 \times 10.3 Preci: 10.8 \times 10.8
Step 3	KMA + Local (Gyeonggi) + Local (Incheon)	Temp: 21 Preci: 16	Temp: 7.1 \times 7.1 Preci: 8.1 \times 8.1
Step 4	KMA + Local (Gyeonggi) + Local (Incheon) + SKTechX	Temp: 30 Preci: 27	Temp: 6.0 \times 6.0 Preci: 6.3 \times 6.3

*KMA: Korea Meteorological Administration, Local: local government, Temp: Temperature, Preci: Precipitation.

서 강수가 관측됨에도 불구하고 관측되지 않는 관측 지점들이 있다. 이런 자료들을 배제하기 위해 관측소별 월 통계값을 이용하여 유효한 관측소를 선정하였다. 즉, 유관·민간 기관 자료에 대해 수집률이 80% 이상이고, 월평균기온(월총강수량)이 같은 달 기상청 관측소 102개소의 각 월평균기온에서 표준편차의 3배 값을 기준으로 하여 각 월별로 그 값 이내에 포함되는 관측소를 유효 관측소로 판별하였다.

수도권 폭염과 집중호우의 위험 기상 사례를 선정하기 위해 기상청 관측망 중 서울, 인천, 수원 관측소의 기온과 강수량 자료를 사용하였다. 실험 기간 중 일 최고기온이 33°C 이상이고, 열대야 기준(일최저기온이 25°C 이상)을 충족하는 날은 총 5일이 나타났으며, 이 충족한 5일 중 서울, 인천, 수원 관측소에서 모두 기준보다 특히 높은 2017년 8월 5일(기온사례1)과 2017년 7월 20일(기온사례2)을 폭염사례일로 선정하였다(Fig. 2). 강수의 경우 서울, 인천, 수원에 모두 강수가 기록되며 국지적으로 강수량이 많았던 날인 5 사례 중, 전국적인 강수가 아닌 국지적인 사례로 2017년 6월 26일(강수사례1), 2017년 8월 15일(강수사례2)를 집중호우 사례로 선정하였다(Fig. 2). 기상청 레이더 영상에서 추출된 CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator) 강수강도 분포와 천리안 위성 수증기 채널의 밝기온도 분포로부터 강수사례1과 강수사례2는 각각 수도권 남서쪽 일부 지역과 북쪽의 비교적 넓은 지역에서 나타났던 국지 강수 사례임을 확인할 수 있다(Fig. 3).

2.2 분석 영역의 선정

서울지역은 유관기관 자료를 확보하지 못해 수평 분포 분석에서 제외하였다. 경기 지역에는 경기도청과 유관(경기) 관측망 등 가장 많은 관측소가 있으나 영역이 넓어 4.3 \times 4.3 km²의 수평격자거리를 가지고 있으며, 인천 지역에는 관측소의 수는 경기 지역보다

훨씬 작지만 영역이 좁아 3.2 \times 3.2 km²의 수평격자거리를 가지고 있다. 이에 기상청 관측망에 비해 유관·민간 기관 관측망이 포함되었을 때 해상도가 2배 이상 좋아지는 인천지역의 14 km \times 34 km 영역을 선정하였다. 이 영역에 기온 및 강수 분석에 사용된 기상청 관측망은 7소, 유관(경기) 관측망은 3(2)소, 유관(인천) 관측망은 11(7)소, SKTechX 관측망은 9(11)소가 있었다(Fig. 2; Table 2).

2.3 내삽 방법

불규칙한 지점에서의 관측 자료로부터 격자 형태의 수평 분포를 만들기 위해 내삽법을 적용하게 된다. 알려진 내삽법에는 크리깅(Kriging), 역거리가중(IDW, Inverse Distance Weighting), 셰퍼드(Shepard), 최소곡률(Minimum curvature), 자연이웃(Natural Neighbor), 근접이웃(Nearest Neighbor) 법 등 매우 다양하다. 또한, 같은 방법이라도 선택 사항에 따라 내삽 결과가 매우 다르게 나타난다. 이 중 역거리가중법과 크리깅법이 많이 사용되고 있다(Mehrjardi et al., 2008; Shiode and Shiode, 2011). 역거리가중법은 어떤 격자점에서의 값을 관측값의 거리의 역수의 지수승에 비례하는 것으로 가정하여 내삽하는 방법이다. 즉, i 번째 지점에서 관측값 z_i 를 가지는 N 개의 지점이 있는 경우 어느 격자에서의 내삽값 Z_0 은

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^N z_i d_i^{-n}}{\sum_{i=1}^N d_i^{-n}} \quad (1)$$

에 의해 결정된다(Setianto and Triandini, 2013). 여기서 d_i 는 격자점에서 i 번째 지점까지의 거리를, n 은 거리에 따른 가중치를 나타낸다. n 의 값이 커질수록 관측값의 영향 반경이 줄어든다. 크리깅법도 격자에서의 내삽값 Z_0 은

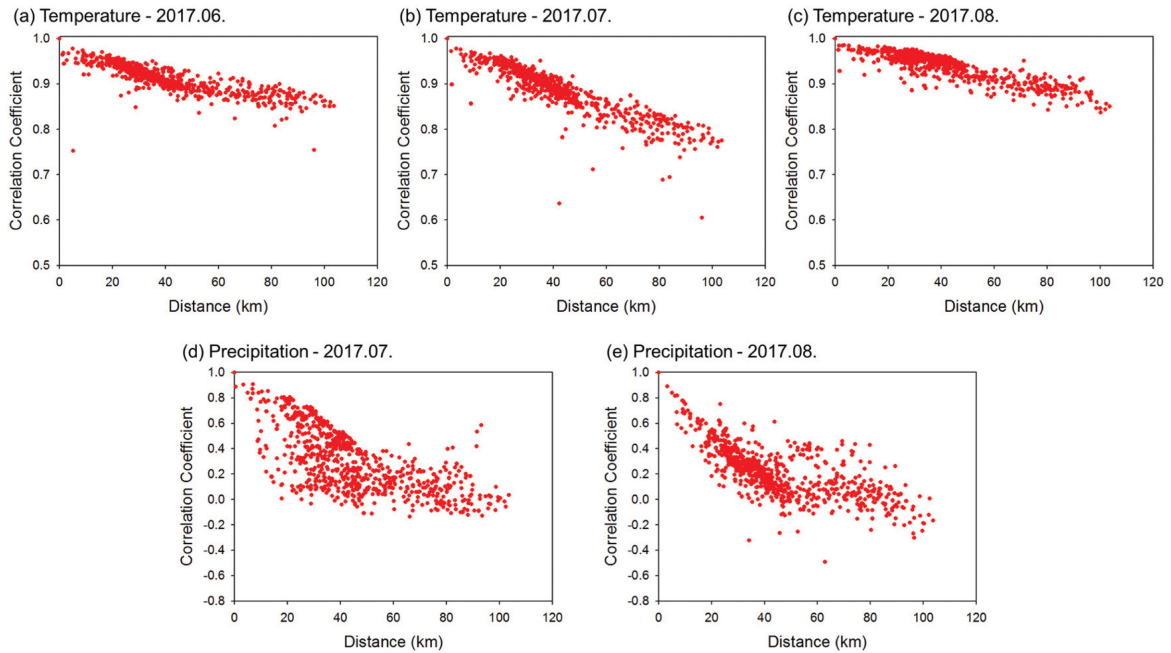


Fig. 4. Distribution of the correlation coefficient for (a-c) temperature and (d-e) precipitation between the KMA Incheon station and each station according to the distance between two stations on (a) June, (b, d) July, and (c, e) August 2017.

$$Z_0 = \sum_{i=1}^N \lambda_i z_i \quad (2)$$

를 이용하여 계산된다(Setianto and Triandini, 2013).

여기서, λ_i 는 관측값의 가중치를 나타내며, $\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$ 이

성립한다. 가중치는 $C = A^{-1} \times b$ 로 계산된다. 여기서, A 가 자료 사이의 $N \times N$ 반분산(semivariance) 행렬이며, b 는 내삽될 때 사용되는 $1 \times N$ 크기의 추정 반분산 행렬이고, C 는 λ_i 를 성분으로 갖는 가중치 행렬이다. x 방향으로 Δx , y 방향으로 Δy 떨어진 두 지점 사이의 반분산은

$$r(\Delta x, \Delta y) = \frac{1}{2} E[(Z(x + \Delta x, y + \Delta y) - Z(x, y))^2] \quad (3)$$

으로 정의된다. 여기서 E 는 같은 거리 떨어진 것들에 대한 평균을 나타낸다. 행렬 b 를 결정하기 위해 선형, 다항식, 지수형, 로그형, 가우시안형 등 특정 함수에 회귀시키게 된다. 이때 사용하는 함수의 종류와 결정되는 계수(예를 들면, 기울기, 절편, 지수 등)들을 사용자가 결정할 수 있다. 이 방법은 관측값과의 거리 뿐 아니라 관측값들 사이의 거리에 따른 상관관계가 반영된다. 반분산은 방향에 따라 다르게 나타나는데

비등방도(anisotropy)의 각도와 비율을 이용하여 이를 고려할 수도 있다. 본 연구에서는 제한된 관측값으로부터 격자점의 값으로 비교적 정확하게 내삽하는 것으로 보고된 크리깅법을 사용하였다(Oliver and Webster, 1990).

2.4 분석 방법

관측망의 밀도에 따른 수평 분포 특성을 분석하기 위해 인천 지역의 관측망을 기상청(Step 1), 기상청 + 유관(경기)(Step 2), 기상청 + 유관(경기) + 유관(인천)(Step 3), 기상청 + 유관(경기) + 유관(인천) + SKTechX (Step 4) 순으로 관측망 밀도를 단계별로 증가시켰다. 각 단계와 기온과 강수 별 관측망의 평균수평해상도를 Table 2에 제시하였다. 여기서, 각 단계별 평균격자크기는 관측소의 수를 전체 영역의 넓이로 나눈 단순 평균수평해상도를 나타낸 것이다.

관측망 밀도에 따른 내삽 자료의 특성을 정량화하기 위해 최고밀도 관측값(Step 4)과 그 관측지점에서 관측망 단계별 내삽값의 산포도를 통해 둘 사이의 상관관계수(R)를 계산하였다. 상관관계수가 수평 분포마다 다르게 나타나기 때문에 분석 기간 중 시간을 달리하며 관측밀도에 따른 상관관계수의 변화 경향 그리고 상관관계수의 분포 특성을 비교하였다.

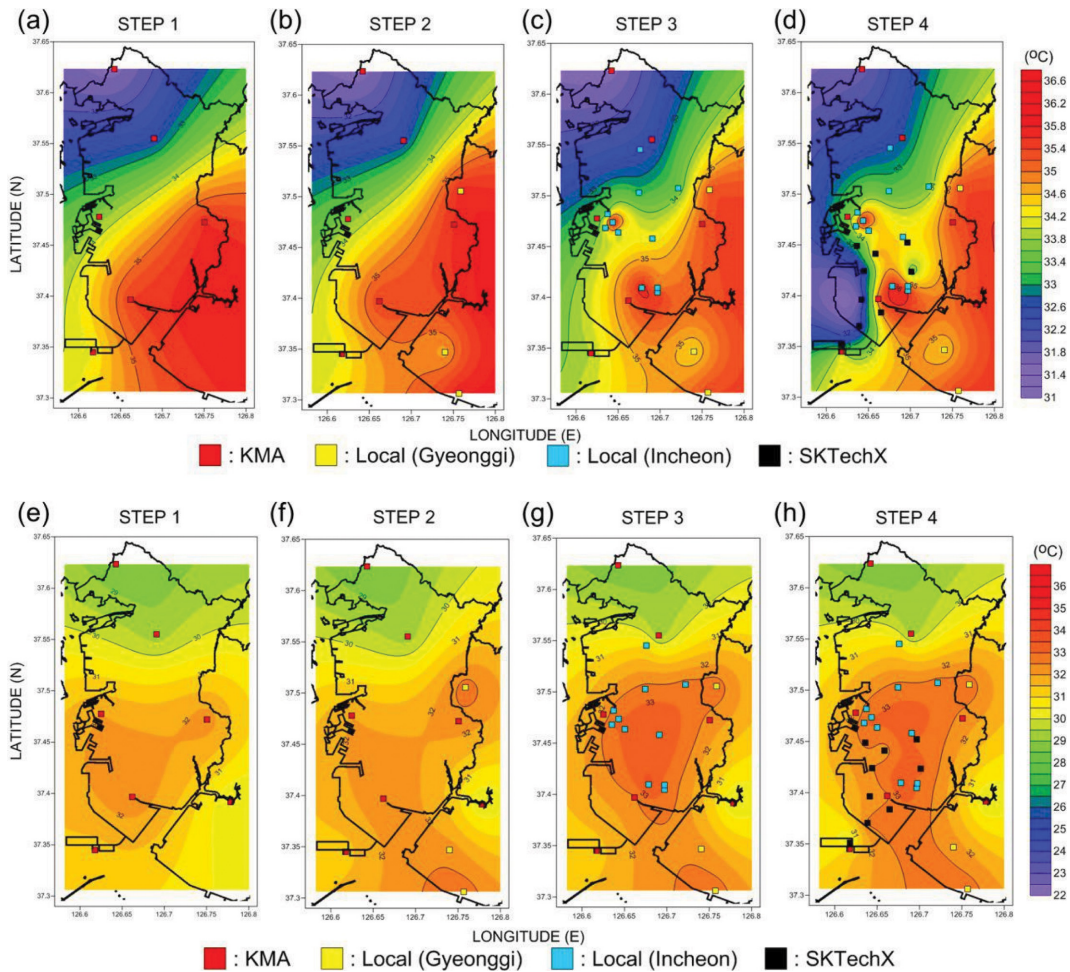


Fig. 5. Spatial distribution using temperature observation data in Incheon region of (a-d) 1330 LST and (e-h) 2000 LST on 26 June 2017 as the density of the stations with (a, e) Step 1, (b, f) Step 2, (c, g) Step 3, and (d, h) Step 4. Area is 17.5 km × 35 km with a resolution of 350 m. The location of KMA, Provincial (Gyeonggi), Local (Incheon), and SKTechX stations used for interpolation are indicated in rectangle with red, yellow, blue, and black, respectively.

3. 결 과

3.1 거리에 따른 기온과 강수량의 상관 관계

일반적으로 기상 변수들은 거리가 멀어지면 상관 관계가 낮아진다. 기온과 강수량의 관측지점사이의 거리에 따른 상관 특성을 살펴 보고자 기상청의 인천관측소와 그 외 관측소들 시계열 사이의 상관 계수를 구하였다. 수도권 전체적으로 924소의 관측소가 있으며(Table 1), 이 중 자료수집률이 80% 이상이며 평균 기온과 총강수량이 평균에서 표준편차의 3배내에 해당하는 관측소로 기온에 대해 637소, 강수량에 대해 726소가 각각 선정되었다. 상관계수의 기준 관측소로 수도권 서부에 위치한 기상청의 인천관측소를

사용하였다. 두 지점 사이의 상관 계수는

$$R(d_j) = \frac{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (z_1(t) - \bar{z}_1)(z_j(t) - \bar{z}_j)}{\sigma_{z_1} \sigma_{z_j}} \quad (4)$$

로 계산되었다. 여기서, $z_1(t)$ 는 기준점에서의 시계열을, $z_j(t)$ 는 j 번째 지점에서의 시계열을, $(\bar{\cdot})$ 는 시간 평균값을, σ_x 는 변수 x 의 표준편차를, T 는 전체 시간, d_j 는 기준점과 j 번째 지점 사이의 거리를 각각 나타낸다.

기온의 경우 거리에 따라 상관 계수가 선형적으로 줄어드나, 그 기울기는 매월 다르게 나타난다. 월별 기온의 변화 폭이 컸던 2017년 7월에는 기울기의 절댓값이 크며(Fig. 4b), 변화 폭이 작았던 2017년 8월

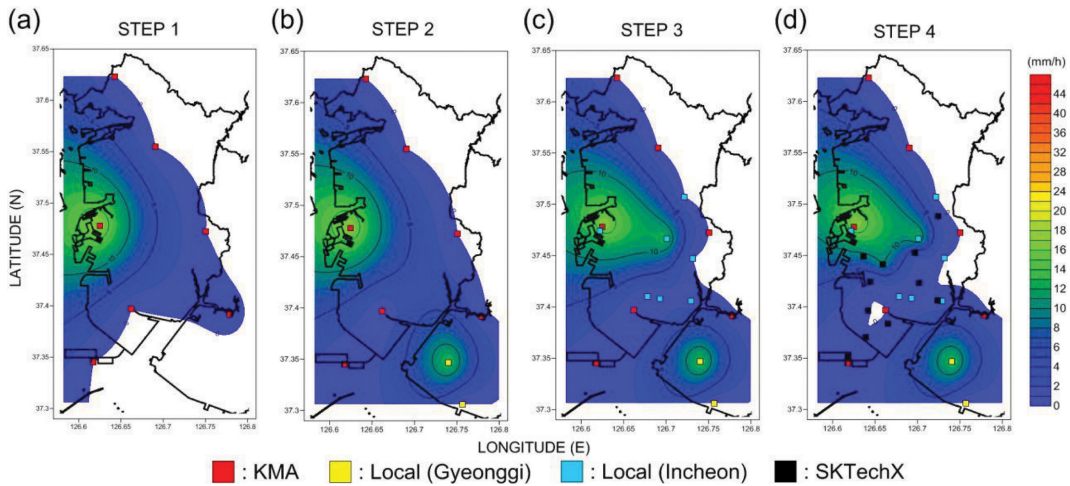


Fig. 6. Spatial distribution using hourly precipitation observation data in Incheon region of (a-d) 1520 LST on 26 June 2017 as the density of the stations with (a) Step 1, (b) Step 2, (c) Step 3, and (d) Step 4. Area is 17.5 km × 35 km with a resolution of 350 m. The location of KMA, Provincial (Gyeonggi), Local (Incheon), and SKTechX stations used for interpolation are indicated in rectangle with red, yellow, blue, and black, respectively.

에는 기울기의 절댓값이 작게 나타났다(Fig. 4c). 강수의 경우 거리에 따른 상관계수가 큰 경향성을 보이지 않거나, 40 km 이내에서만 선형적으로 급격하게 줄어들어 40 km 이상 떨어진 지점에서의 상관 계수는 0 또는 음의 값을 보였다(Figs. 4d-e). 이는 강수가 발생하는 시각이 일시적이고 형태와 규모 역시 불규칙적이기 때문이다. 관측망의 밀도는 이들 상관계수의 임계값으로 결정할 수도 있으며 임계값을 결정하는 것은 또 다른 연구 주제이다. 만일 임계값을 기온과 강수 모두 동일하게 0.9를 적용한다면, 온도계는 30 km 이하의 수평 해상도를 필요로 하며(Fig. 4b), 우량계는 1.2 km 이하의 수평 해상도를 필요로 한다(Fig. 4e). 결론적으로 우량계는 온도계에 비해 훨씬 고밀도 관측망을 요구함을 알 수 있다.

3.2 관측망 밀도에 따른 격자형 수평 분포 특성

관측망의 밀도에 따른 격자형 수평 분포 분석을 살펴 보기 위해 기온과 강수 별로 2.1절에서 제시된 사례들에 대해 매 시간별 내삽 수평 분포를 작성하였다. 관측망 단계별 관측 자료에 크리깅법을 적용하여 17.5 km × 35 km 영역에 수평해상도 350 m의 50 × 100개의 격자 자료로 내삽하였다. 반분산은 1차 방정식을 적용하여 단순화하였으며, 방향에 따른 차이가 없는 등방(isotropy) 조건을 적용하였다. Figs. 5, 6은 각각 2017년 8월 5일 1330 LST와 2000 LST의 기온과 2017년 6월 26일 1520 LST의 강수를 각각 나타낸 것이다.

기온과 강수 모두 모든 사례와 시간 별로 관측망 단계가 커질수록 관측 자료의 밀도가 커지고 세밀한

수평 분포 특성이 나타났다. 2017년 8월 5일 1330 LST의 경우 Step 3에서 Step 4로 관측소 밀도가 증가 하면서 남동쪽 해안가 지역의 기온 관측값이 추가되었고, 이로 인해 이 영역의 내삽값이 갑자기 4°C 이상 떨어지게 되었다(Fig. 5a). 이에 반해 같은 날 2000 LST의 경우 Step 3과 Step 4 사이에 큰 차이를 보이지 않는다(Fig. 5b). 강수의 경우 기상청 관측망만 사용한 Step 1에서는 나타나지 않는 인천 남부 지역의 강수가 Step 2, 3, 4에서는 많이 나타난 것을 확인할 수 있다(Fig. 6). 그에 반해 Step 4(관측소 27)의 수평 분포는 Step 3(관측소 16)의 수평 분포와 큰 차이를 보이지 않는데, 이는 두 단계 사이의 추가된 관측소가 수평 분포에 크게 영향을 주지 않았음을 의미한다.

관측망 밀도의 효과가 항상 일정한 것이 아니라 시간과 조건에 따라 다르게 나타날 수 있음을 보여 준다. 인천 지역의 경우 해안가에 위치해 있고 해풍이 불 경우 해풍전선에 의한 갑작스런 기온 강하, 수증기 증가 현상이 나타날 수 있다(Park and Chae, 2018). 이와 유사한 갑작스런 기온의 변화는 산과 도시의 경계, 또는 하천과 도시의 경계에서 나타날 수 있다. 이런 현상을 규명하려면 관측망의 밀도가 이를 분해할 수 있을 정도로 커야 한다.

3.3 내삽값의 특성

격자형 수평 분포 분석에서 단계별 차이를 정량화 하기 위해 최고밀도 관측소의 관측값(Step 4)과 같은 위치에서 그 앞 단계에서 내삽된 값들 사이의 산포도를 그려 보고 이에 대한 결정계수(R^2)를 계산했다. Fig.

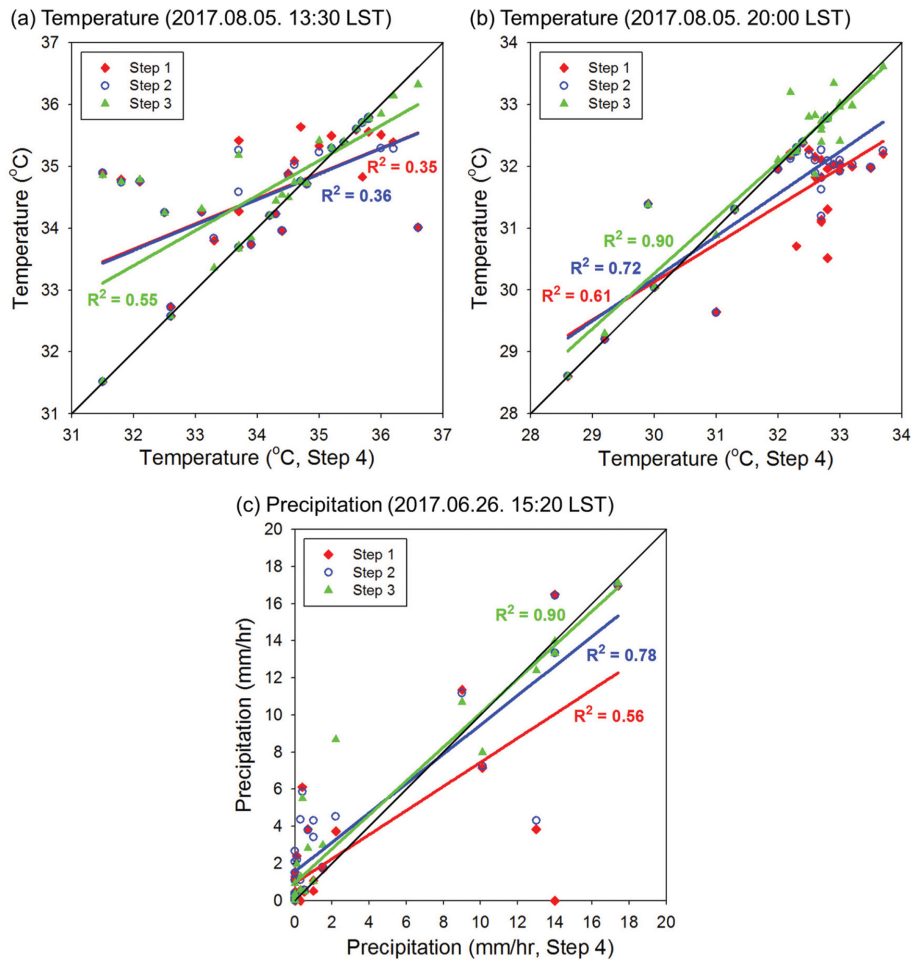


Fig. 7. Scatter diagram between the interpolated variables from each Step network and the observed ones from the Step 4 network at (a) 1330 LST, (b) 2000 LST on 5 August for temperature, and (c) at 1520 LST on 26 June 2017 for hourly precipitation. Coefficients of determination (R^2) are indicated.

7은 Figs. 5, 6에서 제시된 시각의 산포도와 결정계수를 나타낸 것이다. 기온과 강수량 모두 관측망 단계가 증가할수록 기울기가 1에 가까워지며 결정계수 역시 증가하였다. 2017년 8월 5일 1330 LST 기온의 경우(Fig. 7a) 남서쪽 해안가의 찬 기온으로 인해 Step 3조차 결정계수가 0.57로 매우 낮은 반면(Fig. 5a), 2000 LST의 경우 Step 1도 결정계수가 0.64로 큰 것을 확인할 수 있다. 2017년 6월 26일 1520 LST 강수량의 경우(Fig. 7c) 관측망 밀도가 증가함에 따라 결정계수가 0.57, 0.78, 0.91로 각각 증가하며 Step 3과 Step 4의 수평 분포에 큰 차가 없음을 보여 준다(Fig. 6). 이를 통해 관측소 밀도가 변수의 수평 분포에 미치는 영향은 시간이나 강수 형태에 따라 매우 다른 특성을 보일 수 있음을 시사한다.

Figure 8은 기온과 강수량 사례일 동안 관측망 단계별 결정계수의 시계열을 나타낸 것이다. 기온의 경우 2017년 8월 5일과 7월 20일 모두 Step 3의 경우 야간에는 높은 값을 주간에는 약간 낮은 값을 보인 반면, Step 1과 2는 야간에 매우 낮은 값을 보이고, 주간에는 높아져 Step 3과 거의 유사한 값을 보였다(Figs. 8a-b). 이는 주간에는 기온의 수평 분포를 위해서 가장 낮은 밀도의 관측망(KMA, Step 1)이나 가장 높은 밀도의 관측망(Step 4)이 큰 차이를 보이지 않지만, 야간에는 기상청 관측망만 사용하여 수평 분포를 만들 경우 오차가 커질 수 있으며 보다 많은 관측소가 필요함을 의미한다. 강수의 경우 시간에 따른 편차는 발견하기 어려우며 강수 형태와 진행 방향 등에 따라 매우 복잡하게 나타난다(Figs. 8c-d). 강수가 시작할 때

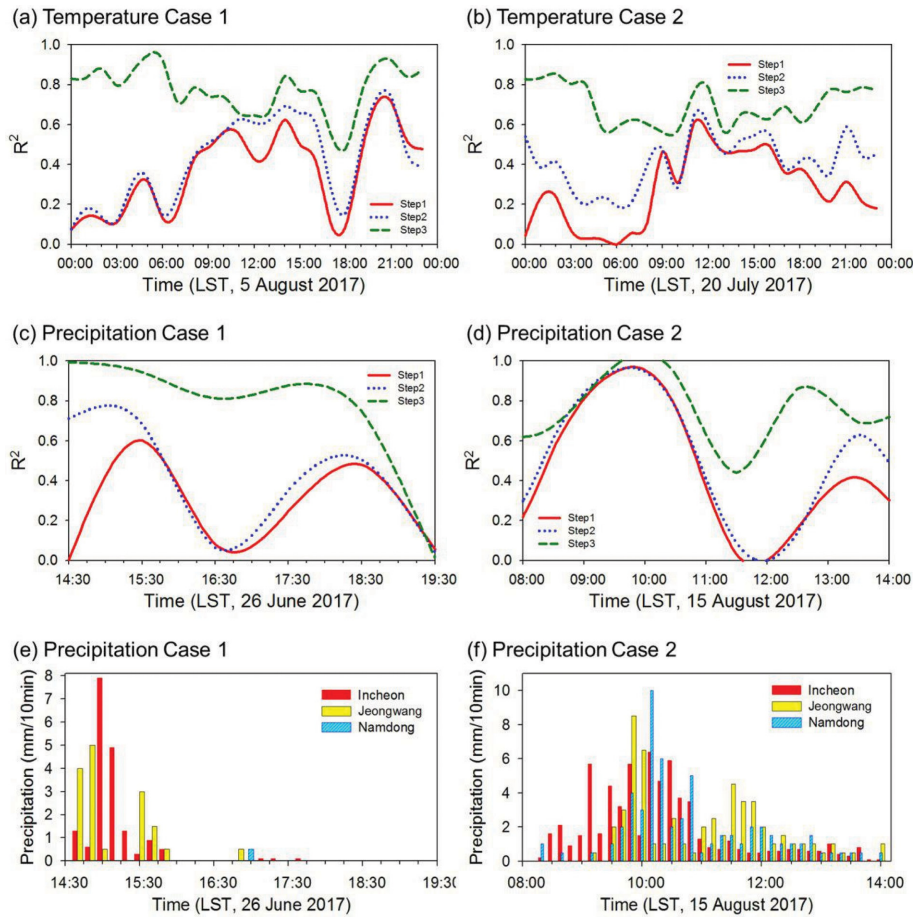


Fig. 8. Time series of coefficients of determination (R^2) for each step during the (a) temperature case 1, (b) temperature case 2, (c) precipitation case 1, and (d) precipitation case 2 periods. Time series of 10-min precipitation at 3 stations in Incheon during (e) precipitation case 1 and (f) precipitation 2 case periods.

와 급격하게 줄어들어 강수량의 시간 변화가 클 때는 결정계수가 매우 낮게 나타났으며, 지속적으로 유사한 양이 내려 강수량의 시간 변화가 작을 때에는 상대적으로 높게 나타났다(Figs. 8e-f). 이는 시간에 따라 강우 강도나 대류 셀의 공간 분포 변화가 큰 강수 현상의 경우에 강수 시작 시간 또는 강도를 보다 정확하게 제공하려면 훨씬 많은 강수 관측망이 필요함을 의미한다. 이를 위해 강수와 관련된 대류 셀은 짧은 시간 동안은 선형적으로 성장, 소멸, 이동한다고 가정해야 한다. 또한 Step 3의 결정계수가 대체로 0.8 보다 낮은 것은 여전히 더 고밀도의 관측망을 필요함을 의미한다.

위 결과를 관측망 단계별 상관계수의 분포를 상사수염그램으로 다시 정리하였다(Fig. 9). 기온과 강수량 모두 관측망 밀도가 증가할수록 결정계수가 커지는

분포를 보였다. 기온의 경우 선정 두 사례일 모두 유사한 분포를 나타냈으며 관측망 밀도의 효과가 Step 1에 비해 Step 2가 약간 좋아지고, Step 2에 비해 Step 3은 많이 좋아졌다(Figs. 9a-b). 또한 Step 3의 경우 1/4 분위값과 3/4 분위값의 차가 크지 않아 신뢰도가 비교적 높다. 강수는 대체적으로 관측망 단계가 증가할수록 결정계수가 증가하기는 하나, 결정계수의 1/4 분위값과 3/4 분위값의 차가 크게 나타나 낮은 신뢰도를 보이는 경우가 많이 발생한다(Figs. 9c-d).

4. 요약 및 결론

기후변화와 도시화로 인하여 위험 기상 이 국지화되고 기상 재해는 증가하고 있다. 현재 기상청 관측망은 수도권과 같은 도시 내의 이웃 규모에서 나타나는

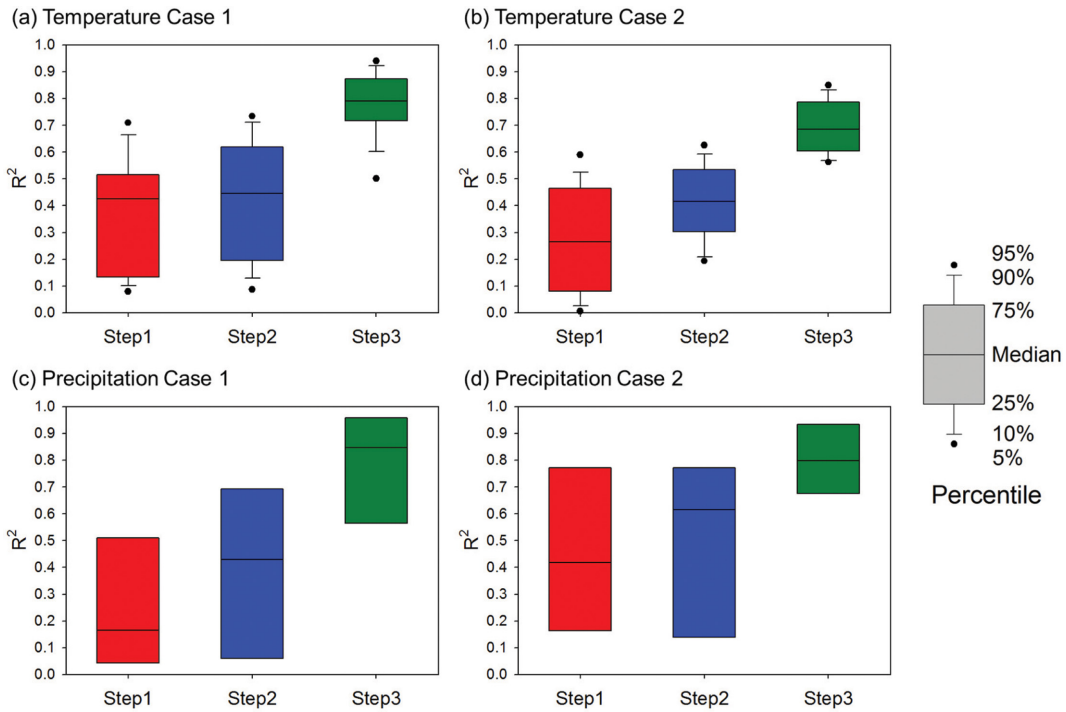


Fig. 9. Box plot of coefficients of determination (R^2) for each step during the (a) temperature case 1, (b) temperature case 2, (c) precipitation case 1, and (d) precipitation case 2 periods.

국지 기상 현상의 수평 분포를 파악할 정도로 충분하지 않다. 이를 보완하기 위해 수도권에 이미 구축되어 있는 유관(경기), 유관(인천), 민간 기관인 SKTechX 관측망 등이 활용 가능하다. 본 연구에서는 인천 영역에서 기상청, 유관, 민간 기관을 포함하여 관측망 밀도를 증가시키고, 내삽 수평분포 특성을 비교함으로써 유관 기관이나 민간 기상 관측 자료의 활용 가능성에 대해 살펴 보았다.

이를 위해 수도권에 분포한 2017년 6-8월 동안 기상청 102소, 경기도청 66소, 유관(경기) 297소, 유관(인천) 33소, SKTechX 414소의 관측망 자료를 확보하였다. 자료의 수집률과 평균과 표준편차 분석을 통해 유효한 관측소를 선별하였으며, 서울, 인천, 수원 기상청 관측망 자료를 이용하여 집중호우와 폭염 사례를 선정하였다. 그 결과 기온의 경우 2017년 8월 5일과 7월 20일, 강수의 경우 2017년 6월 26일과 8월 15일을 선정하였다. 기상청, 유관기관, 민간기관의 자료가 추가됨에 따라 4단계의 관측망을 구성하였으며, 효과를 검증할 수 있는 인천 지역 17.5 km × 35 km 영역을 선정하였다.

선정된 영역에 크리깅 내삽법을 적용하여 격자 수 50 × 100개(수평해상도 350 m)의 내삽 기상장을 산출하였다. 기상청 자료만(Step 1) 이용하여 내삽된 격자

형 수평 분포는 모든 자료를(Step 4) 활용하여 내삽된 수평 분포에 비해 상관관계가 현저하게 낮으며, 유관(경기), 유관(인천), SKTechX 자료를 추가하며 상관관계가 점점 높아졌다. 기온의 경우 관측망 밀도에 따른 상관관계 특성은 시간에 따라 다르게 나타났으며, 강수량의 경우는 시간에 따른 경향성 보다 강수 형태와 이동 방향이 더욱 영향을 주는 것을 확인하였다. 특히, 선정된 인천의 경우 해안이 인접해 있으며, 해안가 부근에서 급격하게 온도가 변하는 경우 민간 기상자료 없이 수평 분포를 만들 경우 상관관계가 낮아짐을 확인하였다. 기온의 경우 주간 보다는 야간에 관측 밀도의 효과가 크게 나타났다. 강수의 경우 강수 패턴과 강수 영역의 분포 및 진행 방향에 따라 관측 밀도의 효과가 매우 크게 차이남을 확인할 수 있었다.

기온 보다는 강수량이 수평 비균질성이 크고, 거리가 조금만 떨어져도 관측값의 차이가 커지기 때문에 현재 가용 관측망 보다 더 고밀도의 관측망이 요구된다. 기온도 해안선 부근, 도시와 농림지의 경계, 하천 경계와 같이 지면 조건이 급격하게 변하는 지점에는 수평 분포의 비균질성이 커지기 때문에 관측소의 추가가 필요하다. 도시에서 기온은 고층건물, 도로, 공원 등의 비균질성으로 인해 수평 관측뿐 아니라 다양한 고도에서의 관측도 고려해야 한다.

유관 기관이나 민간 기관에서 관측한 자료의 정확성은 센서의 특성이다. 안정적으로 고품질 자료를 생산하려면 주기적인 점검과 검정을 수행하고 자료의 품질 관리가 수행되어야 한다(Chae et al., 2014). 예를 들면, 우량계의 경우 수수구가 막혀 강수가 오는 경우에도 기록되지 않거나, 펄스발생부위의 접지 불량으로 지속적인 펄스가 발생하여 매우 많은 강수량이 기록된 사례가 있다. 장기적으로는 현재 시계열 위주의 품질관리는 수평 분포의 연속성을 포함할 수 있도록 개선될 필요가 있다. 또한, 도시에서 관측소의 환경이 기상관측표준화법에서 규정하고 있는 조건을 충족하는 것이 불가능하고 수시로 변하기 때문에 관측 환경에 대한 메타데이터를 작성하고 주기적으로 갱신해야 한다(Stewart and Oke, 2012; Song et al., 2014).

마지막으로 수도권에서 위험기상 현상을 제대로 감시하기 위해 기상청 관측망뿐 아니라 민간이나 유관 기관의 관측망도 반드시 활용해야 한다. 본 연구의 결과가 수도권에서 위험기상 감시를 위한 최적의 관측망 밀도를 결정하는데는 한계가 있으나, 추후 관측망을 추가한다면 우선 순위를 결정하는데 활용이 가능하다. 향후 고해상도 관측망을 가진 시범 지역을 설치하여 타당성을 검증이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상-지진See-At 기술개발연구사업(KMI2018-05612)과 수도권기상청의 ‘고밀도 관측망을 활용한 위험기상감시 효과성 연구 사업’의 지원으로 수행되었습니다. 이 연구를 위해 경기도청, 유관(경기), 유관(인천) 기관의 기상 자료와 많은 조언을 해 주신 수도권기상청 관측과에 감사드립니다. 아울러 SKTechX 자료는 기상청 차세대도시농림융합스마트기상서비스개발(WISE)와 한국외대 공동으로 제공되었습니다.

REFERENCES

- Arnfield, A. J., 2003: Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchange of energy and water, and urban heat island. *Int. J. Climatol.*, **23**, 1-26.
- Arsenault, R., and F. Brisette, 2014: Determining the optimal spatial distribution of weather station networks for hydrological modeling purposes using RCM Datasets: an experimental approach. *J. Hydrometeorol.*, **15**, 517-526, doi:10.1175/JHM-D-13-088.1.
- Blumenfeld, K. A., and R. H. Skaggs, 2011: Using a high-density rain gauge network to estimate extreme rainfall frequencies in Minnesota. *Applied Geography*, **31**, 5-11, doi:10.1016/j.apgeog.2010.03.013.
- Chae, J.-H., M.-S. Park, and Y.-J. Choi, 2014: The WISE quality control system for integrated meteorological sensor data. *Atmosphere*, **24**, 445-456, doi:10.14191/Atmos.2014.24.3.445 (in Korean with English abstract).
- Demographia, 2018: *Demographia world urban areas, Built up urban areas or world agglomerations. 14th Annual edition*, demographia, 118 pp.
- Grimmond, C. S. B., 2006: Progress in measuring and observing the urban atmosphere. *Theor. Appl. Climatol.*, **84**, 3-22.
- _____, and Coauthors, 2009: Urban surface energy balance models: Model characteristics and methodology for a comparison study. In A. Baklanov et al. Eds., *Meteorological and Air Quality Models for Urban Areas*, Springer, 97-123.
- Gubler, S., S. Hunziker, M. Begert, M. Croci-Maspoli, T. Konzelmann, S. Bronnimann, C. Schwierz, C. Oria, and G. Rosas, 2017: The influence of station density on climate data homogenization. *Int. J. Climatol.*, **37**, 4670-4683, doi:10.1002/joc.5114.
- Janis, M. J., K. G. Hubbard, and K. T. Redmond, 2002: Determining the Optimal Number of Stations for the United States Climate Reference Network Final Report. Southeast Regional Climate Center, Research Paper Series, 21 pp.
- Kim, E., I. Ra, K. H. Rhee, and C. S. Kim, 2014: Estimation of real-time flood risk on roads based on rainfall calculated by the revised method of missing rainfall. *Sustainability*, **6**, 6418-6431, doi:10.3390/su6096418.
- Kim, M.-K., M.-S. Han, D.-H. Jang, S.-G. Baek, W.-S. Lee, Y.-H. Kim, and S. Kim, 2012: Production technique of observation grid data of 1km resolution. *J. Climate Res.*, **7**, 55-68 (in Korean with English abstract).
- _____, D.-H. Lee, and J. Kim, 2013: Production and validation of daily grid data with 1km resolution in South Korea. *J. Climate Res.*, **8**, 13-25 (in Korean with English abstract).
- KMA, 2006: Real-time quality control system for meteorological observation data (I) Application. 11-1360000-000206-01 Tech. Note 2006-2, 157 pp.
- Kuo, Y.-H., M. Skumanich, P. L. Haagenson, and J. S. Chang, 1985: The accuracy of trajectory models as revealed by the observing system simulation experiments. *Mon. Wea. Rev.*, **113**, 1852-1867.
- _____, X. Zou, and W. Huang, 1998: The impact of Global Positioning System data on the prediction of

- an extratropical cyclone: an observing system simulation experiment. *Dyn. Atmos. Oceans*, **27**, 439-470.
- Lee, S.-H., K.-S. Lee, W.-C. Jin, and H.-K. Song, 2009: Effect of an urban park on air temperature differences in a central business district area. *Landscape Ecol. Eng.*, **5**, 183-191.
- Martinelli, L., T. P. Lin, and A. Matzarakis, 2015: Assessment of the influence of daily shadings pattern on human thermal comfort and attendance in Rome during summer period. *Builde. Environ.*, **92**, 30-38, doi:10.1016/j.builde.2015.04.013.
- Mehrjardi, R. T., M. Z. Jahromi, Sh. Mahmodi, and A. Heidari, 2008: Spatial Distribution of Groundwater Quality with Geostatistics (Case Study: Yazd-Ardakan Plain). *World Appl. Sci. J.*, **4**, 9-17.
- Oliver, M. A., and R. Webster, 1990: Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *Int. J. Geogr. Inf. Syst.*, **4**, 313-332.
- Park, D. W., N. V. Nikhil, and S. R. Lee, 2013: Landslide and debris flow susceptibility zonation using TRIGRS for the 2011 Seoul landslide event. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **13**, 2833-2849, doi:10.5194/nhess-13-2833-2013.
- Park, M.-S., and J.-H. Chae, 2018: Features of sea-land-breeze circulation over the Seoul Metropolitan Area. *Geosci. Lett.*, **5**, 28, doi:10.1186/s40562-018-0127-6.
- _____, S.-H. Park, J.-H. Chae, M.-H. Choi, Y. Song, M. Kang, and J.-W. Roh, 2017: High-resolution urban observation network for user-specific meteorological information service in the Seoul Metropolitan Area, South Korea. *Atmos. Meas. Tech.*, **10**, 1575-1594, doi:10.5194/amt-10-1575-2017.
- Roth, M., 2000: Review of atmospheric turbulence over cities. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 941-990.
- Setianto, A., and T. Triandini, 2013: Comparison of Kriging and inverse distance weighted (IDW) interpolation methods in lineament extraction and analysis. *J. SE. Asian Appl. Geol.*, **5**, 21-29.
- Shin, S.-C., M.-K. Kim, M.-S. Suh, D.-K. Rha, D.-H. Jang, C.-S. Kim, W.-S. Lee, and Y.-H. Kim, 2008: Estimation of high resolution gridded precipitation using GIS and PRISM. *Atmosphere*, **18**, 71-81 (in Korean with English abstract).
- Shiode, N., and S. Shiode, 2011: Street-level Spatial Interpolation Using Network-based IDW and Ordinary Kriging. *T. GIS*, **15**, 457-477, doi:10.1111/j.1467-9671.2011.01278.x.
- Song, Y., J.-H. Chae, M.-H. Choi, M.-S. Park, and Y. J. Choi, 2014: Standardization of metadata for urban meteorological observations. *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, **30**, 600-618, doi:10.5572/KOSAE.2014.30.6.600 (in Korean with English abstract).
- Stewart, I. D., and T. R. Oke, 2012: Local climate zones for urban temperature studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 1879-1900, doi:10.1175/BAMS-D-11-00019.1.
- Toparlar, Y., B. Blocken, B. Maiheu, and G. J. F. van Heijst, 2018: The effect of an urban park on the microclimate in its vicinity: a case study for Antwerp, Belgium. *Int. J. Climatol.*, **38**, e303-e322, doi:10.1002/joc.5371.
- Um, M.-J., and C.-S. Jeong, 2011: Spatial analysis of precipitation with PRISM in Gangwondo. *J. Kor. Water Resour. Assoc.*, **44**, 179-188 (in Korean with English abstract).
- _____, W. Cho, and H.-W. Rim, 2007: Rainfall adjustment on duration and topographic elevation. *J. Kor. Water Resour. Assoc.*, **40**, 511-521 (in Korean with English abstract).
- _____, C.-S. Jeong, and W. Cho, 2009: Analysis of precipitation distribution in the region of Gangwon with spatial analysis (I): classification of precipitation zones and analysis for seasonal and annual precipitation. *J. Kor. Soc. Hazard Mitig.*, **9**, 103-113 (in Korean with English abstract).
- Yoon, S.-S., and B. Lee, 2017: Effects of Using High-Density Rain Gauge Networks and Weather Radar Data on Urban Hydrological Analyses. *Water*, **9**, 931, doi:10.3390/w9120931.
- _____, _____, and Y. Choi, 2015: Quantitative Precipitation Estimation using High Density Rain Gauge Network in Seoul Area. *Atmosphere*, **25**, 283-294, doi:10.14191/Atmos.2015.25.2.283 (in Korean with English abstract).
- Yu, K., Y. Chen, D. Wang, Z. Chen, A. Gong, and J. Li, 2019: Study of the seasonal effect of building shadows on urban land surface temperatures based on remote sensing data. *Remote Sens.*, **11**, 497, doi:10.3390/rs11050497.
- Yun, H.-S., M.-J. Um, W.-C. Cho, and J.-H. Heo, 2009: Orographic precipitation analysis with regional frequency analysis and multiple linear regression. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **42**, 465-480 (in Korean with English abstract).