2010년 여름철 수도권 집중관측기간 강수 사례들에서 나타나는 도시화 효과

김도우¹ · 김연희^{2,*} · 김기훈² · 신승숙² · 김동균² · 황윤정² · 박종임² · 최다영² · 이용희²

¹국립방재연구원 복합재난연구실, 121-719, 서울특별시 마포구 마포대로 136

²기상청 국립기상연구소 예보연구과, 156-720, 서울특별시 동작구 여의대방로 16길 61

Effect of Urbanization on Rainfall Events during the 2010 Summer Intensive Observation Period over Seoul Metropolitan Area

Do-Woo Kim¹, Yeon-Hee Kim^{2,*}, Ki-Hoon Kim², Seung-Sook Shin², Dong-Kyun Kim²,
Yoon-Jeong Hwang², Jong-Im Park², Da-Young Choi², and Yong-Hee Lee²

¹Multi-Hazard Research Division, National Disaster Management Institute, Seoul 121-719, Korea

²Forecast Research Laboratory, National Institute of Meteorological Research,
Korea Meteorological Administration, Seoul 156-720, Korea

Abstract: The intensive observation (ProbeX-2010) was performed to investigate an urban effect on summer rainfall over the Seoul metropolitan area from 13 August to 3 September 2010. Two kinds of urban effect were detected. First, weak rainfall ($\leq 1 \text{ mm hr}^{-1}$) was observed more frequently in the downwind area of Seoul than any other area of the country. The high frequency of weak rainfall in the downwind area was also confirmed from the recent five years of observational data (2006-2010). Because the high frequency was more apparent in mountainous regions during nighttime, the weak rainfall seems to be caused by a combined effect of urbanization and topography. Second, sporadically, a convective system was developed rapidly in the downwind area of Seoul, causing heavy rainfall ($\geq 10 \text{ mm hr}^{-1}$). It can be most clearly seen in series of radar images around 1300-1500 KST 27 August 2010. We investigated in detail the synoptic and local weather and upper air conditions. As a result, not only urban-induced high sensible heat but also conditionally unstable atmosphere (especially unstable in low level) and low level moisture were pointed out as important factors that contributed to urban-induced heavy rainfall.

Keywords: ProbeX-2010, urbanization, rainfall, downwind area, radiosonde

요약: 도시화 효과가 여름 강수에 미치는 영향을 분석하기 위해 2010년 8월 13일부터 9월 3일까지 수도권 집중관측(ProbeX-2010)을 수행하였다. 분석 결과, 다음의 두 가지 현상들이 발견되었다. 첫째, 관측 기간 동안 약한 강수($\leq 1 \text{ mm hr}^{-1}$)가 다른 지역보다 서울 풍하측 지역에서 더 자주 발생하였으며, 이는 최근 5년(2006-2010) 자료에서도 확인되었다. 약한 강수는 주로 서울 풍하측 산악 지역에서 야간에 더 자주 발생하였기 때문에 이는 도시지형 뿐만 아니라 산악 지형의 복합적인 효과로 여겨진다. 둘째, 간헐적으로 대류 시스템이 서울 풍하측에서 급격하게 발달해 호우를 야기했다. 이는 특히 8월 27일 1300-1500 KST의 일련의 레이더 영상에서 뚜렷하게 확인되었다. 본 연구에서는 이 강수 사례에 대한 중관·국지적 날씨 특성과 고층 대기 특성을 자세히 분석하였다. 그 결과 도시지형과 연관된 지표 현열 증가 뿐만 아니라 조건부 불안정 대기 상태(특히 대기 하층)와 대기 하층의 습기 유입이 도시화 효과와 연관된 대류성 호우를 야기하는 중요한 요소로 제시되었다.

주요어: ProbeX-2010, 도시화, 강우, 풍하측 지역, 라디오존데

*Corresponding author: kyh@kma.go.kr

Tel: +82-70-7850-6604

Fax: +82-2-834-5922

서론

서울, 인천, 경기를 포함하는 수도권의 면적은 전체 국토의 11.8%임에도 2011년 현재 전체 인구의 48%가 거주하고 있으며, 이에 따라 수도권 내 도시권은 계속 거대화되고 있다. 서울의 경우, 1960년대 244만 명에서 2011년 현재 1040만 명으로 약 4.3배 증가하였다. 이러한 수도권 내 도시의 거대화는 그 지역 날씨 · 기후를 인위적으로 변화시켜 위험기상의 예측을 어렵게 만들고 그 피해를 증대시킬 수 있다. 도시화에 의한 1차적인 변화로는 인공 지표 피복에 의한 지표면 열수지 변화, 연료소비에 따른 인공열 증가에 의해 발생하는 열섬 현상이 있다. 도심과 교외 지역의 온도차가 2-10°C에 이르며, 일몰 후 3-5시간 지난 시점에 가장 뚜렷하게 나타난다(Oke, 1987). 2차적으로는 강수 패턴의 변화를 초래할 수 있다. 도시지형 효과가 강수에 영향을 미치는 메커니즘은 경계층 내 열섬 효과에 의한 불안정화 및 열섬 순환의 풍하측 전도, 도시 환경의 거칠기 증가로 인한 기류 수렴 강화, 도시 환경에서 증가된 에어로졸에 의한 응결핵 증가 등이 있다(Changnon et al., 1981).

미국의 주요 거대 도시들(Laporte, St. Louis, Chicago, Illinois, Cleveland, Washington D.C., Baltimore, Houston, New Orleans)을 대상으로 한 연구에 따르면, 도시와 80 km 이내 풍하측 지역에서 여름 강수량이 8-17% 증가한 것으로 나타났다(Changnon, 1968; Huff and Changnon, 1973). 또한 St. Louis를 대상으로 1971-75년 동안 수행된 Metropolitan Meteorological Experiment (METROMEX) project에서도 강수 증가 구역이 도시와 50-75 km 풍하측에서 나타났으며, 증가량은 5-25%로 추정되었다(Huff and Vogel, 1978; Changnon, 1979; Changnon et al., 1981; Braham et al., 1981; Changnon et al., 1991). 이러한 강수 증가는 전반적인 강수 빈도의 증가 보다는 호우 빈도 증가와 동반되어 나타나는 경향이 있다(Huff and Changnon, 1973). 도시지형 효과는 강수를 새롭게 발생시키기보다는 접근해오는 강수 시스템을 더 강화시킨다는 것이다. 도시화 진행에 따라 호우 · 폭풍우의 빈도가 증가되고 있음이 미국(Phoenix: Balling and Brazel, 1987; Selover, 1997, Chicago: Changnon and Westcott, 2002, Houston: Orville et al., 2001), 인도(New Delhi, Mumbai, Kolkata, Chennai, Bangalore, Hyderabad: Kishtawal

et al., 2009), 멕시코(Mexico city: Jauregui and Romales, 1996), 일본(Tokyo: Fujibe, 2003; Takahashi, 2003) 등의 주요 도시들에서 보고된 바 있다. 하지만 이러한 경향이 도시지형 효과를 분석한 모든 연구들에서 공통적으로 나타나는 것은 아니다. 영국의 주요 도시 Bristol, Cardiff, Newcastle-upon-Tyne, Norwich 에서는 열섬효과는 뚜렷하게 나타나나, 강수량에는 유의한 변화가 나타나지 않았다(Hughes, 2006). 또한 이들 지역에서는 이전 연구들과는 반대로 비도시 지역에 비해 도시 지역에서 강한 강수 빈도는 줄고, 약한 강수 빈도는 증가하는 경향을 보였다.

서울 수도권의 경우도 도시화에 따라 열섬효과가 강화되고 강수 패턴이 변화하였음이 제시된바 있다(e.g., 김연희 외, 2011). 서울의 열섬 효과는 세계 다른 거대 도시들과 유사하게 여름보다 겨울에 더 강하며, 풍속이 강하거나 맑은 구름 상태에서 약해진다(Kim and Baik, 2002). 일 년 평균 열섬 강도는 약 2.2°C이며, 0300 KST에 3.4°C의 최고치를, 1500 KST에 0.6°C의 최저치를 가진다(Kim and Baik, 2005). 강수량은 인근 지역에 비해 서울에서 더 크게 증가하였으며, 특히 호우의 빈도는 서울 풍하측인 양평에서 더 증가하였음이 제시되었다(김연희 외, 2011). 강수 빈도의 변화는 약한 강수에서도 나타났다. 은승희 외(2011)는 최근 36년(1972-2007년)동안 서울 풍하측 춘천, 원주, 홍천 지역에서 약한 강수의 빈도가 증가하였으며, 이와 반대로 동쪽 산악 지역인 대관령에서는 감소하였음을 제시하였다. 그들은 도시 지역 지표 열원과 거칠기에 대한 민감도 수치 모의실험을 통해 서울 풍하측 강수 빈도 증가가 지표 거칠기의 증가보다 열원 강화의 영향으로부터 기인된 것임을 보였다. 서울의 에어로졸 증가 및 대기 성분 변화가 강수 현상에 미치는 영향은 아직 구체적으로 밝혀진 바 없다. 다만 PM10 (Particle Matter 10)과 SO₂ 농도 증가는 서울 풍하측 낙뢰 증가 요인으로 작용한다는 결과가 있다(Kar et al., 2009).

이상의 연구들은 주로 장기간 자료에서 나타나는 도시 지역의 강수 기후 변화를 통계적으로 분석하였다. 이를 위해서 30년 이상 기간이 가용하나 공간해상도가 낮은 전국 약 60개 유인관측소 자료가 사용되었다. 하지만 도시지형이 강수에 미치는 영향을 좀 더 역학적으로 분석하기 위해서는 더 높은 공간해상도를 가지는 관측 자료를 이용하여 기후 규모가 아닌 날씨 규모의 강수 사례에 초점을 맞추어 분석할

필요가 있다. Bornstein and Lin (2000)은 Atlanta에서 1996년 7월 26일에서 8월 3일 동안 열섬효과에 의해 대류성 강우가 3차례 발생하였음을 확인하였다. 공통적으로 고온의 중심이 도시 중심에서 다소 벗어난 풍하측에 위치하였으며, 고온 중심에는 수렴, 그 외곽에서는 발산으로 구성된 열섬 순환이 형성되어 국지적 강수가 유발되었다. Baik et al.(2001)은 Advanced Regional Prediction System (ARPS) 모델을 이용하여 하층 열원이 유도한 풍하측의 상승 운동에 의해 습윤 대류가 유발되고 그에 따라 대류성 강수가 발달함을 모의한 바 있다. Dixon and Mote (2003)는 Atlanta에서 1996-2000년 여름(5월-9월) 동안 총 37 사례의 강수가 열섬 효과에 의해 발생하였음을 확인하였다. 그들은 강수 발생에 있어 열섬 효과도 중요하지만 그보다도 충분한 하층 습기가 더 중요한 역할을 함을 제시하였다. 또한 열섬 효과에 의한 강수 발생일 동안에는 대기 상태가 비강수일 동안보다는 불안정하지만 대규모 대류 현상이 일어날 정도까지는 불안정하지 않은, 즉 약하게 불안정한 경향이 있음을 보였다. 한국의 경우, 김연희 외(2005)는 2004년 8월 4일에 서울 중심의 풍하측에서 열섬효과에 의해 유도된 상승류가 국지적 강우를 발생시켰음을 보인 바 있다. 하지만 그들은 국지적인 지상 바람과 온도 분포만을 주로 다루어, 강수 발생 시의 중관 기상환경 및 대기 연직 구조에 대한 고찰이 부족하였다.

국립기상연구소는 수도권 지역의 도시화에 따른 기상 변화 특성을 조사하고, 도시에 특화된 날씨 관측 및 예측 시스템을 구축하기 위해 수도권 여름 집중관측(Predictability and Observation Experiment of Korea-2010; ProbeX-2010)을 수행하였다. 본 연구에서는 ProbeX-2010 기간 강수 사례들 중 도시 열섬 효과의 영향을 직·간접적으로 받은 사례들을 조사하였으며, ProbeX-2010 고층 관측 자료뿐만 아니라 수도권 및 전국에 조밀하게 분포되어 있는 Automatic Weather System (AWS) 관측망 자료를 이용하여 그 영향을 통계 및 역학적으로 분석하였다.

자 료

ProbeX-2010은 2010년 8월 14일 09시(KST)부터 9월 4일 09시(총 21일)까지 수행되었으며, 주요 관측 지점은 동두천 기상대, 인천공항, 양평 관측소이다. 3

지점에서 일 4회(0300, 0900, 1500, 2100 KST) 라디오존데 고층 관측이 수행되었다. 이들 지점들은 서울로부터 각각 동·서·북쪽 약 30-40 km 떨어진 곳에 위치하며, 공군에서 라디오존데 상시관측을 수행하고 있는 오산지점을 포함하면 관측기간 동안에는 수도권 도시화 효과에 의한 강수사례들의 풍하측과 풍상측의 고층기상환경을 동시에 살펴볼 수 있다. ProbeX-2010 기간 동안 1시간 강수량 자료가 가용한 전국 610개 AWS 자료를 이용하였다. 전체 자료 중 결측 자료의 비율은 1.8%이다. 열섬 효과에 의해 대류시스템이 강화된 사례인 8월 27일 14시 전후로는 수도권 내 114개 AWS 지점의 10분 평균 기온, 풍향, 풍속, 그리고 15분 강수량 자료가 사용되었다. 추가적으로 ProbeX-2010 기간의 분석 결과 신뢰성을 확인하기 위해 전국 591개 AWS의 최근 5년(2006-2010) 시간 강수량 자료를 사용하였다. 전체 자료 중 결측의 비율은 1.5%이다. 또한, 평년 대비 강수 편차를 계산하기 위해 최근 30년(1981-2010)의 전국 60개 지점 일 강수량 자료가 사용되었다. 도시화 효과에 의한 강수 사례의 종관규모 기상환경을 살펴보기 위해 지상 일기도와 위성적외영상을 사용하였으며, 강수 시스템의 발달 과정을 분석하기 위해 50분 간격의 1.5 km Constant Altitude Plan Position Indicator (CAPPI) 레이더 영상을 이용하였다. 그밖에 우리나라 지역의 상승기류 분포를 살펴보기 위해 5 km 해상도 Korea Local Analysis and Prediction System (KLAPS) 분석자료를 사용하였다.

서울 풍하측 약한 강수 빈도의 증가

ProbeX-2010 기간 동안 동해안 지역을 제외한 전국에서 평년 수준을 초과하는 250 mm 이상 강수가 있었다(Fig. 1). 특히 소백산맥, 태안반도, 경기북부 지역에는 450 mm 이상이 관측되었으며, 이는 평년 강수량의 2배를 초과하는 양이다. 한편 영남지역을 중심으로 한 동해안 지역은 약 100 mm 이하의 강수가 있었으며, 이는 평년 대비 50%에 해당되는 양이다. 서울의 경우, 관측기간 21일 중 18일 동안 강수가 있었으며(Fig. 2), 서울 내 위치하는 30 AWS 지점들의 평균 총 강수량은 327 mm이다(Fig. 1a). 수도권 지역을 확대한 Fig. 1b를 보면, 전체적으로 남동에서 북서지역으로 갈수록 강수량이 많으며, 지역적 차이는 약 250 mm에 이른다. 500 mm 이상의 강수

Fig. 1. Distribution of (a) total rainfall ($\text{mm } 21 \text{ days}^{-1}$) and (c) frequency (hours) of weak rainfall ($\leq 1 \text{ mm hr}^{-1}$) during ProbeX-2010 (14 August-3 September). The distributions over the Seoul metropolitan area are enlarged in (b) and (d), respectively. In (b) and (d), a location of AWS is indicated by a small dot and topography (m) is shaded. Cross marks in (b) indicate the ProbeX-2010 radiosonde observation stations (Dongducheon, Incheon Airport, and Yangpyeong). Square marks in (d) represent the stations selected as the downwind region of Seoul (Singok, Changhyeon, Oeseo, Uijeongbu, Cheongpyeong, and Kwangreung).

량이 경기도 최북단 지역뿐만 아니라 서울의 북쪽 의정부와 양주 부근에서도 기록되었다. 수도권에서 총 강수 빈도(1시간 강수량이 기록된 시간 수는 강수량이 많은 북부지역에서 약 100 시간, 강수량이 작은 남동 지역에서 약 65 시간 수준이었다(그림 생략). Fig. 1c에 시간당 1 mm 이하의 약한 강수 빈도 분포를 나타내었다. 전국에서 강수량이 가장 적었던 영남 동해안 지역에서 약한 강수 빈도가 15 시간 이하로 역시 가장 낮게 나타났다. 반면 전국에서 가장 높은 빈도는 총 강수량이 가장 많았던 소백산맥, 태

안반도, 경기 북부가 아닌 경기 중부에서 나타났으며, 특히 서울의 동쪽 지역에서 45시간 이상으로 최고치를 보였다. 수도권을 확대한 Fig. 1d를 보면, 45 시간 이상의 높은 빈도가 서울의 동쪽 가장자리를 둘러싸고 있으며, 특히 서울의 북-북동-동쪽 산악지형 내에 위치한 AWS들에서 50 시간 이상의 최고치가 분포되어 있다. ProbeX-2010 기간 동안 양평, 동두천, 인천공항에서 라디오존데에 의해 관측된 850 hPa 풍향 분포를 보면(Fig. 3), 관측 기간 동안 주풍향이 약 $180\text{--}270^\circ$ 에 분포하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 2. Time-series of mean daily rainfall of 30 AWSs over Seoul.

즉 약한 강수가 가장 빈번히 관측된 지역은 서울의 풍하측 영역에 해당된다. 한편 1, 5, 10 mm hr^{-1} 이상의 강수 빈도 분포도 조사해보았지만, 총 강수량 분포와 거의 흡사하였다(그림 생략). 서울 풍하측 약한 강수 증가는 은승희 외(2011)의 결과와 잘 일치한다. 하지만 그들이 지목한 서울 풍하측 지역은 서울에서 약 65-75 km 떨어진 춘천, 원주, 홍천으로 본 연구에서 지목된 서울 풍하측 지역(서울로부터 북-동쪽 30 km 이내)과는 거리 차이가 있다. 그들이 이렇게 먼 지역에 관심을 둔 것은 수도권 내 조밀하게 분포된 AWS 관측망의 대부분이 2000년대 이후에 설치되었기 때문이라 사료된다. 춘천, 원주, 홍천은 서울 풍하측 영역에서 30년 이상 자료가 가용한 지점들 중 서울과 가장 가까운 지점들이다. 따라서 이후 서울 풍하측의 약한 강수 증가에 대한 통계적 유의성이나 메커니즘을 연구할 때는 춘천, 원주, 홍천뿐만 아니라 본 연구에서 제시된 서울로부터 30 km 이내 풍하측 지역에도 관심을 가질 필요가 있다.

서울 내 위치하는 30개 AWS 지점과 서울 풍하측에 위치하는 6개 AWS(신곡, 창현, 외서, 의정부, 청평, 광릉; Fig. 1d)의 시간대별 약한 강수 발생 평균 빈도를 Fig. 4a에 제시하였다. 02-05시를 제외한 모든 시간대에서 서울보다 서울 풍하측에서 약한 강수가 더 자주 발생하였음이 나타난다. 특히 18-01시에는 신뢰구간 99%에서 유의한 차이를 보였다. 이러한 차이가 ProbeX-2010 기간에 한정된 현상인지를 확인하기 위해 같은 방법으로 최근 5년(2006-2010) 8월 AWS 자료를 분석하였다(Fig. 4b). 풍하측에서 약한 강수 빈도가 높음이 더 뚜렷하게 확인된다. 14-17시를 제외한 모든 시간대에서 95% 신뢰수준에서 유의

Fig. 3. Scatter plot of 850 hPa wind direction and speed observed by radiosonde over the Seoul metropolitan area (Dongducheon, Incheon Airport, and Yangpyeong) during ProbeX-2010 (14 August - 3 September).

한 빈도 차이를 보이며, 특히 18-01시의 빈도 차는 99% 신뢰수준에서 유의하다.

Fig. 5a에 전국 591개 AWS에서 최근 5년(2006-2010)의 8월 동안 야간 약한 강수($\leq 1 \text{ mm hr}^{-1}$)가 관측된 빈도와 해당 AWS 지점의 8월 평균 강수량을 산점도로 나타내었다. 서울 풍하측 6개 AWS 지점은 빨간색 원으로 표시되었다. 추가적으로, 591개 지점 야간 약한 강수 빈도 분포를 그림 내 박스그래프로 나타내었다. 박스그래프에서 풍하측 6개 AWS들의 야간 약한 강수 빈도가 전체 데이터의 상위 25% 수준 이상으로 높으며, 특히 신곡 지점을 제외한 5개 지점의 빈도는 90 백분위수(upper fence) 이상의 아주 높은 수준임이 확인된다. 야간 약한 강수 빈도와 평균 강수량 사이에는 선형적인 관계가 존재하지만, R^2 값이 0.38로 그 관계가 강하지는 않다. 풍하측 6개 AWS 지점의 8월 평균 강수량은 311-368 mm이다. 이 범위 내의 평균 강수량을 가지는 AWS는 전국에 총 50개 존재한다. 이들 지점들 중 풍하측 6개 AWS 지점의 야간 약한 강수 빈도는 각각 3(창현), 5(청평), 10(광릉), 11(외서), 13(의정부), 27(신곡) 번째로 높은 값이다(평균 11.5/50 순위). 50 지점들 중 1 순위와 2 순위로 약한 강수 빈도가 높은 지역은 각각 해발 1597 m와 596 m에 위치하는 설악산과 진부령의 산악지역이다. 한편 4순위 지점(하면: 47505)

Fig. 4. Diurnal distribution of mean frequency of weak rainfall ($\leq 1 \text{ mm hr}^{-1}$) in Seoul (30 AWSs) and the downwind area (6 AWSs) during (a) ProbeX-2010 (14 August–3 September) and (b) recent five August months (August 2006–August 2010).

Fig. 5. Scatter plots between nighttime weak rainfall ($\leq 1 \text{ mm hr}^{-1}$) frequency and (a) August rainfall amount and (b) elevation of observation station for recent five August months (August 2006 – August 2010). Box plot of nighttime weak rainfall frequency is represented in right bottom corner of left panel. Red colored circle indicates the downwind region of Seoul. Dash lines indicate the maximum and minimum value of weak rainfall frequency among the six AWSs in downwind region of Seoul.

은 비록 본 연구에서 선정한 6개 지점에 포함되지는 않았지만, 이 역시 서울의 풍하측 영역에 위치한다(서울로부터 북동쪽 약 30 km에 떨어진 해발 168 m의 지점). Fig. 5b는 전국 591개 AWS의 8월 야간 약한 강수의 빈도와 해당 AWS 지점의 해발고도의 산점도이다. 해발고도가 높은 지점들에서 야간 약한 강수 빈도가 높은 경향이 있지만 그 관계가 선형적이지는 않다. 풍하측 6개 AWS지점의 고도는 23–128 m이다. 전국에서 128 m 이하의 고도에 위치하는 AWS는 총 424개이며, 이 중 풍하측 6개 AWS 지점의 야간 약한 강수 빈도는 각각 2, 3, 7, 8, 11, 36 번째로 높은

값이다(평균 11.1/424 순위). 1 순위는 강원도 태백산맥 동쪽 해안에 위치하는 72 m 해발고도의 양양 공항이다. 한편 4 순위와 5 순위는 서울에서 동남동쪽으로 약 15 km 떨어진 지월(47442)과 퇴촌(47458)이며, 이들도 서울 풍하측 영역에 위치한다. 즉 서울 풍하측 지점들의 야간 약한 강수 빈도는 타 지역들에 비해 유의하게 높으며, 이는 풍하측 지점들과 유사한 강수량을 가지는 지점들보다도, 유사한 고도에 위치하는 지점들보다도 높은 수준이다. 이와 유사하게 중국에서도 베이징 풍하측 산악 지형에서 약한 강수가 빈번하게 관측됨이 보고된 바 있다(Yin et

Fig. 6. Time-series of surface wind direction (W: yellow dot) and speed (S: green line), temperature (T: red line), pressure (P: pink line), relative humidity (H: indigo blue line), and rainfall (R: orange dots) for 15 minutes (pink shading) and for 60 minutes (blue shading) observed in Seoul station (station number: 47108) on 27 August 2010.

al., 2011). 은승희 외(2011)는 최적의 단일 사례(2009년 2월 11일)에 대한 수치모의 실험을 통해 수도권 풍하층에서의 강수량 및 강수 빈도의 증가가 풍하층 지역에서 강화된 상승기류 및 수렴대의 영향임을 보인바 있으며, 이는 도시지역 거칠기 증가보다는 열원 증가의 영향을 더 크게 받음을 제시하였다. 하지만 이는 단일사례에 대한 단지 두 종류(거칠기 10배 증가와 열원 10배 증가)의 민감도 실험의 결과물이다. 따라서 향후 더 많은 사례에 대한 다양한 민감도 실험이 행해질 필요가 있다.

8월 27일 서울 풍하층 대류 시스템 강화 사례

서론에서 소개되었듯이 도시지형 효과가 초래하는 가장 대표적인 강우 현상의 변화는 열섬 순환과 관계되어 도시와 도시의 풍하층에서 대류성 강수 시스템이 강화되는 것이다. 따라서 이 장에서는 ProbeX-2010 동안 열섬 현상이 나타나는 날 서울 혹은 서울 풍하층에서 강수 에코가 생성되거나 급격히 발달한 사례를 조사하였다. 그 결과, 8월 27일 14시경 강수 사례가 이에 해당되었으며, 이 강수 사례의 발달 과정에서 이전 연구들(김연희 외, 2005; Bornstein and Lin, 2000)이 제시한 열섬효과에 의한 강수 발생 특징들이 잘 나타남을 확인하였다.

종관 기상 환경

8월 27일 새벽(0시-6시) 서울은 북상하는 정체전선의 남단 구름대의 영향으로 운량이 8-10인 흐린 하

늘 상태를 보였다. 새벽동안 80% 이상의 높은 상대 습도가 유지되었으며, 풍속은 2 m s^{-1} 내외로 약했다(Fig. 6). 야간 복사 냉각의 효과가 약해 서울 지점의 새벽 기온은 거의 24°C 로 유지되었다. 서울 내 여러 AWS 지점들에서는 새벽동안 25°C 이상 기온이 유지되는 열대야가 발생하였다.

Fig. 7은 27일 09시 지상일기도이다. 23일부터 중부지방에 영향을 미쳤던 정체전선이 27일 09시에는 만주까지 북상하였으며, 따라서 서울의 운량은 3 이하로 작아졌다. 한편 한반도 남쪽에서는 북태평양 고기압의 서쪽 가장자리를 따라 열대성 저기압이 동중국해로 북상하였다. 열대성 저기압의 동쪽 가장자리와 북태평양 고기압의 서쪽 가장자리를 따라 열대공기가 한반도로 유입되었으며, 이는 강수발생에 좋은 환경을 제공한다(최기선 외, 2009; 최기선 외, 2012; 황호성 외, 2010). 일사에 의한 복사 가열, 그리고 10시부터 지배적으로 나타나는 남풍에 의해 서울의 온도가 13시 경에는 약 32°C 까지 상승하였다(Fig. 6). Fig. 8a는 27일 08시의 적외위성영상이다. 남쪽에서 다가오는 열대성 저기압 전면에서 북상하는 열대 기류와 상대적으로 한랭한 중위도 공기가 만나 남해안에서 종관규모 대류운이 발달하였으며, 전라도와 경상도는 약 06시부터 이 시스템의 직접적인 영향을 받았다. 이 시스템은 시간에 따라 다소 약해지며, 약 30 km hr^{-1} 로 북북서진하였다. 이 때 전라남도에서는 최고 7 mm hr^{-1} 의 강수가 있었다. 한편 경기도 지역에서는 일출 후 오전 동안 맑은 하늘 상태가 지속되었다. 13시에 이르러 남쪽에서 다가오는 종관규모 구름대가 충청도까지 북상하였다(Fig. 8b). 13시 KLAPS

Fig. 7. Surface weather chart at 0900 KST, 27 August 2010.

(a) 08 KST

(b) 13 KST

Fig. 8. Satellite infrared radiation images at (a) 0800 KST and (b) 1300 KST, 27 August 2010.

의 700 hPa 연직속도 분석장을 Fig. 9에 제시하였다. 종관규모 대류 시스템의 영향을 받아 대기 중하층에서 상승류가 발달한 지역이 전라남도, 경상도 그리고 충청도로 제한되어 있으며, 경기도에서는 그 강제력이 미미함을 확인 할 수 있다. 하지만 하층의 온난

다습한 공기의 유입은 경기도 곳곳에서 메조 감마 (Meso-gamma) 스케일의 대류를 발달시켰다(Fig. 8b).

서울에서 북쪽으로 약 25 km 떨어진 동두천에서 관측된 라디오존데 자료를 바탕으로 8월 27일 열역학선도를 작성하였다(Fig. 10). 27일은 남풍이 지배적

Fig. 9. Distribution of 700 hPa vertical velocity at 1300 KST, 27 August 2010 derived from KLAPS analysis data. The area of upward motion is shaded with yellow color. Contour interval is 0.5 Pa s^{-1} .

이었으므로, 이날 동두천 지점은 서울 풍하층 영역에 속한다. 동두천에서는 14시 40분에 강수가 시작되었으며, 15시 20분까지 총 3.5 mm의 강수가 내렸다. Fig. 10a는 강수 발생 약 6시간 전인 09시 열역학선도이다. 600 hPa (850 hPa) 이하 기온감률이 $5.38^{\circ}\text{C km}^{-1}$ ($5.80^{\circ}\text{C km}^{-1}$)로 중하층 대기가 조건부 불안정하였다. 동두천은 07시경까지 복상하는 정체전선의 구름대의 영향을 받아 하늘 상태가 흐리거나 구름이 많았으며, 따라서 야간 복사냉각이 매우 약했다. 09시에는 지상기온이 25°C 에 이르렀으며, 지상 1 km 고도의 기온도 약 20°C 로 높았다. 07시 이후 구름대 영향에서 벗어남과 동시에 일사에 의한 지표가열과 낮 동안 도시 열섬에 의한 고온역이 남풍에 의해 동두천 부근까지 이루어져 오면서 12시 20분에 31.3°C 의 낮 최고 기온을 기록하였다. 고온역 형성 및 이류 과정은 다음 장에서 자세히 설명되었다. 30°C 이상의 고온은 강수가 발생하기 직전인 14시 30분경까지 유지되었다. Fig. 10b는 15시 열역학선도이다. 기상청 고층기상관측지침은 라디오존데를 정규관측시각을 기준으로 20-40분 정도 일찍 비양하는 것으로 규정하고 있다. 동두천 지점의 15시 라디오존데는 14시 20분에 비양되었다. 이는 동두천 지역 강수 시작 시점으로부터 약 20분 전 시각이다. 하층 대기의 가열로 인해 600 hPa 이하 기층의 기온 감률이 $6.40^{\circ}\text{C km}^{-1}$ 로 커졌으며, 특히 850 hPa 이하 층에서는 $8.01^{\circ}\text{C km}^{-1}$ 로 커졌다.

Fig. 10. Skew T-log P diagram at (a) 0900 KST and (b) 1500 KST 27 August, 2010 observed in Dongduchen. Black and blue lines indicate temperature and dew point temperature respectively. Red dash line represents saturation-adiabatic lapse rate from LCL to EL.

°C km⁻¹의 급격한 기온 감률을 보였다. 지상 기온은 30.0°C로 이 시각 대류 온도(convective temperature)인 30.6°C에 근접해 있다. 대류응결고도는 약 1 km 상공에 형성되어 있다. 900 hPa부터 150 hPa까지의 깊은 층을 통해 1377 J kg⁻¹의 Convective Available Potential Energy (CAPE)가 존재하여 대기가 진잠재

불안정(real-latent instability) 상태임이 확인되며, 850 hPa에서 750 hPa까지에는 습윤층이 존재한다. 비록 대류응결고도가 비교적 낮지는 않았지만, 하층 대기의 열적 불안정과 함께 하층 수렴에 의해 공기괴의 상승이 강제되면 깊은 대류가 발달할 수 있는 환경이 갖추어져 있다. 여러 종류의 불안정도 지수를 계산한 결과, 하층대기의 습윤량에 특히 민감한 K-index만이 36.4의 높은 값을 가져 강한 불안정을 나타냈으며, 나머지 지수들(Life Index: -3.7, Showalter Index: -0.29, Total Totals Index: 43)은 다소 불안정 함만을 나타내었다. 이러한 특징은 Dixon and Mote (2003)의 연구에서 제시된 열섬효과에 의해 강제된 강수 사례들의 특징들과도 일치한다. 그들은 대규모 대류 운동을 일으킬 만큼 대기가 불안정하면 국지적인 열섬효과에 의한 강수 강제 효과는 나타나지 않음을 언급하였다.

열섬 순환 형성과 강수 발달

Fig. 11은 8월 27일 00시 전국 기상 분포이다. 수도권 지역 도시 열섬효과와 야간동안 약해진 복사 냉각효과에 의해 서울 부근에서 25°C 이상의 전국 최고 기온이 관측되었다. 이러한 강한 열섬효과는 다음날 열섬효과를 강화시키는 역할을 할 수 있으며 (Kim and Baik, 2004), 따라서 27일 13시경에 서울 부근에서 전국 최고 기온이 관측되었다. Fig. 12a에

Fig. 11. Distribution of surface air temperature (°C) at 0000 KST 27 August 2010.

8월 27일 13시에 관측된 수도권 AWS 기상 분포를 제시하였다. 서울과 그 인근 지역에서는 31.5°C 이상의 기온이 관측되었다. 특히 서울 북서쪽의 고양시와 장흥면 부근에서 13시 30분경에 34°C 이상의 고온이 기록되었으며, 이는 약 35 km 떨어진 남양주와 문산에 비해 약 4°C 높은 기온이다. 경기도 내 최고 기온이 서울이 아닌 고양시와 장흥면 부근에서

Fig. 12. Surface (a) air temperature and (b) divergence (blue) and convergence (red) distributions at 1300 KST, 27 August 2010. Dot in (a) indicates a location of AWS.

Fig. 13. CAPPI radar images at (a) 1300 KST, (b) 1350 KST, and (c) 1440 KST, 27 August 2010.

Fig. 14. Rainfall amount (15 mm min^{-1}) distributions at 1300 KST (black), 1350 KST (blue), and 1440 KST (red), 27 August 2010.

나타나는 것은 10시부터 지배적으로 불었던 남풍에 의해 도시의 고온역이 풍하측으로 이루어졌기 때문이다(Fig. 12b, e.g., 김연희 외, 2005; Bornstein and Lin, 2000). 한편, 서울의 남남동쪽 용인시 부근에서는 약 28°C 의 상대적인 저온이 관측되었는데, 이는 이 지역에서 메조 감마 규모의 대류운이 발달하여 강수가 있었기 때문이다(Fig. 12a). Fig. 12b는 AWS 지상 바람과 그로부터 구해진 수렴·발산의 분포이다. 거의 대부분 지역에서 2.5 m s^{-1} 이하의 약한 풍속이 관측되었으며, 풍향은 남풍이 우세하다. 고온역이 나타났던 장흥면과 고양시 부근에서 $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 이상의 수렴역이 나타나며, 그 주위를 둘러싼 파주, 광릉, 광명에서는 발산역이 분포되어 있다. 즉 고온역 주변에서 고온역 중심으로의 국지적 기류 수렴이 형성되어

Fig. 15. Time-series of mean wind direction below 600 hPa observed by radiosonde in Dongducheon, Inchen Airport, Yangpyeong during ProbeX-2010 (14 August-3 September).

있다. 이러한 서울 주변의 기온, 바람, 수렴의 분포 특징과 그 규모는 Bornstein and Lin (2000)의 연구에서 제시된 열섬 효과와 관계된 대류성 강수 사례의 특징들과 잘 일치한다. 용인 부근에서도 수렴역이 발견되나, 이는 이 지역에서 발달한 메조 감마 스케일 대류셀 전면에서 형성된 국지적 수렴이다.

Figs. 13과 14에 시간대별 레이더영상과 AWS 15분 강수량 분포를 각각 제시하였다. 13시에 용인 부근에서 메조 감마 스케일의 대류셀이 생성되었으며, 그에 따라 15분당 약 1 mm 의 약한 강수가 발생하였다. 이 대류셀은 약 35 km hr^{-1} 의 속도로 북상하여 13시 50분에는 서울 상공에 위치함과 동시에 강화되었다. 이로 인해 서울에는 최고 15분당 5 mm 이상의 강수가 발생하였다. 14시 40분에는 대류셀이 고온역과 그에 따른 기류 수렴이 나타났던 서울의 북쪽 풍

Fig. 16. Distributions of heavy rainfall ($\geq 10 \text{ mm hr}^{-1}$) frequency (hours) (a) from 0900 KST, 24 to 0300 KST, 29 August and (b) from 0900 KST, 20 to 0300 KST, 24 August. A gray arrow represents mean wind direction below 600 hPa observed by radiosonde over the Seoul metropolitan area (Dongducheon, Incheon Airport, and Yangpyeong).

하측에 도달하였으며, 동시에 수평규모가 약 50 km 이상으로 확장되었다. 결과적으로 최고 15분당 13 mm 이상의 강한 강수가 발생하였다.

Fig. 15는 ProbeX-2010 기간 수도권 3지점(인천공항, 동두천, 양평)에서 라디오존데에 의해 관측된 600 hPa 이하 평균 풍향의 시계열이다. 대기 중하층의 남풍계열 바람이 8월 27일 뿐만 아니라 8월 24일 09시부터 29일 03시까지 지속되었음을 확인 할 수 있다(평균 풍향: 190°). 이 기간 동안 수도권의 10 mm hr⁻¹ 이상 강수 발생 빈도 분포를 Fig. 16a에 제시하였다. 경기 남부에서는 빈도가 0-1 시간으로 매우 낮은 반면, 북서부에서는 5 시간 이상으로 높았다. 특히 27일 강수 사례에서 대류 시스템이 급격히 발달하였던 서울의 북쪽 풍하측(장흥면, 의정부 부근)에서 6 시간 이상의 높은 빈도가 나타나며, 이는 같은 위도대 지역들에 비해 2배 이상 높은 수치이다. 분석 기간에서 8월 27일 14-15시 강수사례를 배제시키더라도 이러한 분포는 변함이 없었다(그림 생략). 반면, 8월 20일 09시부터 24일 03시까지는 남서풍이 지배적이었다(평균 풍향: 232°). 이 기간 동안 강한 강수의 빈도가 높은 지역은 남풍 사례(24-29일)의 다빈 지역(장흥면, 의정부)에서 동쪽으로 약 15 km 이동된 내촌면 부근이며, 이는 풍향의 변화와도 잘 일치한다(Fig. 16b). 비록 27일 14-15시 강수사례처럼 가시적으로 뚜렷하게 확인되는 사례는 찾기 어려웠지만, 이

는 ProbeX-2010 기간 중 도시지형 효과의 영향을 받은 강수 사례가 더 있을 것이라는 추측을 가능케 한다.

요약 및 토의

본 연구는 수도권 집중관측(8월 14일-9월 3일) 결과를 이용하여 도시지형 효과가 여름 강수에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과, 서울의 풍하측에 약한 강수가 빈번하게 발생했음을 발견하였으며, 간헐적으로 풍하측에서 대류 시스템이 급격히 발달해 호우가 발생하였음도 확인하였다.

한반도는 국토의 대부분이 산악지형으로 구성되어 있어 도시화 효과와 산악 지형 효과가 강수에 미치는 영향을 구분하여 분석하기에는 어려움이 있다. 하지만 본 연구 결과, 약한 강수 빈도가 주로 상승응결 고도가 낮아지는 야간동안 도시 풍하측 산악지역에서 뚜렷함이 확인하였으며, 따라서 향후 연구들에서는 도시지역의 열원, 거칠기 뿐만 아니라 풍하측 지역의 지형 효과도 고려돼야 할 것이다. 본 연구의 초점은 ProbeX-2010 기간에 관측된 강수사례에 대한 것이므로, 약한 강수 빈도 증가 메커니즘에 대한 심층적인 분석은 이후 연구에서 다루어질 계획이다.

관측 기간 동안 도시지형 효과에 의해 강수 시스템이 급격히 발달한 사례로 8월 27일 14시 사례가

자세히 소개되었다. 한반도 남쪽에서는 열대성 저기압이 북상하고 있었으며, 그에 따라 열대성 저기압 전면으로 열대의 고온 다습한 공기가 한반도로 유입되었다. 남풍에 의한 온난이류와 낮 동안 일사에 의해 서울 인근 지역에서 31°C 이상의 고온역이 형성되었다. 특히 최고온역은 남풍에 의한 이류 효과로 인해 서울의 북쪽에서 나타났다. 최고온역과 교외 지역의 온도는 최고 4°C 이상의 차이가 났다. 이에 따라 서울 풍하측 고온역을 중심으로 국지적인 열섬 순환이 형성되었다. 대기 상태는 조건부 불안정하였으며, 특히 하층 대기의 강한 가열로 인해 대기 중하층에서 급격한 기온 감률을 보였다. 서울 남쪽에서 메조 감마 스케일의 대류셀이 생성되어 북상하였으며, 서울을 거쳐 서울의 북쪽 풍하측에 도달함과 동시에 급격히 발달해 15분당 13 mm 이상의 소낙성 강수를 발생시켰다. 비록 한 사례이지만, 강수 발달 과정에 따른 온도, 풍향, 풍속, 기류 수렴, 연직 대기 구조 및 불안정도를 상세히 분석함으로써 대류성 강우에 미치는 도시지형 영향의 가능성을 확인하였다. 이에 대한 심층적인 메커니즘 이해를 위해서는 이후 더 많은 강수 사례들에 대한 통계적 연구뿐만 아니라 사례들에 대한 수치모의 실험을 통한 역학적 연구가 요구된다. 뿐만 아니라 도시와 그 풍하측 지역에 대한 지속적인 관측 자료를 생성할 필요가 있다. 본 연구의 결과는 향후 연구들의 유용한 근거자료로써 사용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국립기상연구소 주요사업 '예보기술지원 및 활용연구(NIMR-2012-B-1)'의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김연희, 구해정, 남재철, 2005, 서울지역 강우 특성 분석을 통한 도시화 영향 평가. 서울도시연구, 6, 165-183.
- 김연희, 최다영, 장동언, 2011, 수도권 지역의 도시 기상 특성. 한국기상학회 대기지, 21, 257-271.
- 은승희, 채상희, 김병근, 장기호, 2011, 한반도 중부지역에서 약한 강수에 미치는 도시화 효과. 한국기상학회 대기지, 21, 229-241.
- 최기선, 강기룡, 김도우, 김태룡, 2009, 인공신경망 기법을 이용한 태풍 강도 및 진로 예측. 한국지구과학회지, 30, 174-182.
- 최기선, 차유미, 김태룡, 2012, 한반도에 상륙한 태풍 빈도수의 십년간 변동 특성. 한국지구과학회지, 33, 59-68.
- 황호성, 변희룡, 이상민, 최기선, 이지선, 2010, 태풍의 약화와 관련된 한국의 강수량 분포. 한국지구과학회지, 31, 322-334.
- Baik, J.J., Kim, Y.H., and Chun, H.Y., 2001, Dry and moist convection forced by an urban heat island. Journal of Applied Meteorology, 40, 1462-1475.
- Balling, R. and Brazel, S., 1987, Recent changes in Phoenix summertime diurnal precipitation patterns. Theoretical Applied Climatology, 38, 50-54.
- Bornstein R. and Lin, Q., 2000, Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: three case studies. Atmospheric Environment, 34, 507-516.
- Braham, R.R., Semonin, R.G., Auer, A.H., Changnon Jr, S.A., and Hales, J.M., 1981, Summary of urban effects on clouds and rain. METROMEX: A Review and Summary, Meteorological Monographs, No. 40, American Meteorological Society, 141-152.
- Changnon, S.A., 1968, The LaPorte weather anomaly-Fact or fiction? Bulletin of the American Meteorological Society, 49, 4-11.
- Changnon, S.A., 1979, Rainfall changes in summer caused by St. Louis. Science, 205, 402-404.
- Changnon, S.A., Semonin, R.G., Auer, A.H., Braham, R.R., and Hales, J., 1981, METROMEX: A Review and Summary. Meteorological Monographs, No. 40, American Meteorological Society, 81 p.
- Changnon, S.A., Shealy, R.T., and Scott, R.W., 1991, Precipitation changes in fall, winter, and spring caused by St. Louis. Journal of Applied Meteorology, 30, 126-134.
- Changnon, S.A. and Westcott, N.E., 2002, Heavy rainstorms in Chicago: Increasing frequency, altered impacts, and future implications. Journal of the American Water Resources Association, 38, 1467-1475.
- Dixon, P.G. and Mote, T.L., 2003, Patterns and causes of Atlanta's urban heat island-initiated precipitation. Journal of Applied Meteorology, 42, 1273-1284.
- Fujibe, F., 2003, Long-term surface wind changes in the Tokyo Metropolitan area in the afternoon of sunny days in the warm season. Journal of the Meteorological Society of Japan, 81, 141-149.
- Huff, F.A. and Changnon, S.A., 1973, Precipitation modification of major urban areas. Bulletin of the American Meteorological Society, 54, 1220-1232.
- Huff, F.A. and Vogel, J.L., 1978, Urban, topographic and diurnal effects on rainfall in the St. Louis region. Journal of Applied Meteorology, 17, 565-577.
- Hughes, K., 2006, The impact of urban areas on climate in the UK: A spatial and temporal analysis, with an emphasis on temperature and precipitation effects. Earth and Environment, 2, 54-83.

- Jauregui, E. and Romales, E., 1996, Urban effects on convective precipitation in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 30, 3383-3389.
- Kar, S.K., Liou, Y.A., and Ha, K.J., 2009, Aerosol effects on the enhancement of cloud-to-ground lightning over major urban areas of South Korea. *Atmospheric Research*, 92, 80-87.
- Kim, Y.H. and Baik, J.J., 2002, Maximum urban heat island intensity in Seoul. *Journal of Applied Meteorology*, 41, 651-659.
- Kim, Y.H. and Baik, J.J., 2004, Daily maximum urban heat island intensity in large cities of Korea. *Theoretical Applied Climatology*, 79, 151-164.
- Kim, Y.H. and Baik, J.J., 2005, Spatial and Temporal Structure of the Urban Heat Island in Seoul. *Journal of Applied Meteorology*, 44, 593-605.
- Kishtawal, C., Niyogi, D., Tewari, M., Pielke Sr, R.A., Shepherd, M., 2009, Urbanization Signature in the Observed Heavy Rainfall Climatology over India. *The International Journal of Climatology*, doi:10.1002/joc.2044.
- Oke, T.R., 1987, *Boundary Layer Climates*. 2nd ed. Routledge, 435 p.
- Orville, R., Huffines, G., Nielsen-Gammon, J., Zhang, R., Ely, B., Steiger, S., Phillips, S., Allen, S., and Read, W., 2001, Enhancement of cloud-to-ground lightning over Houston Texas. *Geophysical Research Letter*, 28, 2597-2600.
- Selover, N., 1997, Precipitation patterns around an urban desert environment topographic or urban influences? *Proc. Association of American Geographers Convention*, Fort Worth, TX, Association of American Geographers.
- Takahashi, H., 2003, Secular variation in the occurrence property of summertime daily rainfall amount in and around the Tokyo Metropolitan area. *Tenki*, 50, 31-41.
- Yin, S., Li, W., Chen, D., Jeong, J.H., and Guo, W., 2011, Diurnal variations of summer precipitation in the Beijing area and the possible effect of topography and urbanization. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28, 725-734.

2012년 3월 9일 접수
 2012년 4월 24일 수정원고 접수
 2012년 5월 27일 채택