

## 서울지역 장기간 강수와 미세먼지의 특성 분석에 기반한 미세먼지 세정효과

한수지<sup>1)</sup> · 엄준식<sup>1),2)\*</sup>

<sup>1)</sup>부산대학교 BK21 지구환경시스템 교육연구단, 지구환경시스템학부 대기과학전공,

<sup>2)</sup>부산대학교 환경연구원

(접수일: 2023년 6월 16일, 수정일: 2023년 7월 17일, 게재확정일: 2023년 7월 18일)

## Scavenging Efficiency Based on Long-Term Characteristics of Precipitation and Particulate Matters in Seoul, Korea

Suji Han<sup>1)</sup> and Junshik Um<sup>1),2)\*</sup>

<sup>1)</sup>BK21 School of Earth and Environmental Systems, Division of Earth Environmental System,  
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan, Korea

<sup>2)</sup>Institute of Environmental Studies, Pusan National University, Busan, Korea

(Manuscript received 16 June 2023; revised 17 July 2023; accepted 18 July 2023)

**Abstract** The variabilities of precipitation and particulate matters (i.e., PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>) and the scavenging efficiency of PMs by precipitation were quantified using long-term measurements in Seoul, Korea. The 21 years (2001–2021) measurements of precipitation and PM<sub>10</sub> mass concentrations, and the 7 years (2015–2021) of PM<sub>2.5</sub> mass concentrations were used. Statistical analysis was performed for each period (i.e., year, season, and month) to identify the long-term variabilities of PMs and precipitation. PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> decreased annually and the decreasing rate of PM<sub>10</sub> was greater than PM<sub>2.5</sub>. The precipitation intensity did not show notable variation, whereas the annual precipitation amount showed a decreasing trend. The summer precipitation amount contributed 61.10% to the annual precipitation amount. The scavenging efficiency by precipitation was analyzed based on precipitation events separated by 2-hour time intervals between hourly precipitation data for 7 years. The scavenging efficiencies of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> were quantified as a function of precipitation characteristics (i.e., precipitation intensity, amount, and duration). The calculated average scavenging efficiency of PM<sub>10</sub> (PM<sub>2.5</sub>) was 39.59% (35.51%). PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> were not always simultaneously scavenged due to precipitation events. Precipitation events that simultaneously scavenged PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> contributed 42.24% of all events, with average scavenging efficiency of 42.93% and 43.39%. The precipitation characteristics (i.e., precipitation intensity, precipitation amount, and precipitation duration) quantified in these events were 2.42 mm hr<sup>-1</sup>, 15.44 mm, and 5.51 hours. This result corresponds to 145% (349%; 224%) of precipitation intensity (amount; duration) for the precipitation events that do not simultaneously scavenge PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>.

**Key words:** Scavenging Efficiency, Wet Removal, Particulate Matters, Precipitation

\*Corresponding Author: Junshik Um, Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea.  
Phone: +82-51-510-2171, Fax: +82-51-515-1689  
E-mail: jjunum@pusan.ac.kr

## 1. 서 론

미세먼지(PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>)는 사회적 문제로 떠오른 대기오염의 주된 원인 중 하나로 인체에 악영향을 미치는 요소이다. 미세먼지가 인체에 장기간 노출될 경우 천식과 같은 호흡기 질환을 일으키며, 일평균 질량농도 이상의 고농도 발생 시 급성 호흡기 질환의 발생 확률을 증가시킨다(Dockery and Pope, 1994; Atkinson et al., 2015). 전국 PM<sub>10</sub> 월평균 질량농도가 1 µg m<sup>-3</sup> 증가할 경우 월평균 호흡기 질환 발생건수가 2.4% 증가하며, 특히 서울지역의 경우 호흡기 질환 발병률이 약 3.0% 증가하였다(Park and Hwang, 2017).

수도권 지역의 미세먼지는 해외 유입과 국내 배출원의 복합적 영향을 받는다. 해외 유입의 대표적 사례는 중국과 몽골 내 사막지역에서 발원한 황사로, 장거리 수송되어 수도권 지역에 봄철 PM<sub>10</sub> 고농도 현상을 야기한다(Lee and Kim, 2008; Kim and Lee, 2013; Hur et al., 2021). 황사 사례 이외에도 겨울철 중국에서 발생한 황산암모늄 및 질산암모늄이 장거리 수송되어 국내 미세먼지 질량농도 증가에 기여하는 해외 유입 사례가 존재한다(Park and Han, 2014).

수도권 미세먼지는 해외 유입의 영향과 함께 지역 내 자체 배출원의 영향도 중요하다. 수도권 PM<sub>10</sub>은 신도시 및 산업단지 내 건설현장에서 발생한 비산먼지 배출이 주요 원인이며, PM<sub>2.5</sub>는 산업현장에서 발생한 연소물질이 주요 원인으로 알려져 있다(Kim et al., 2019). 이와 함께 높은 인구밀도 및 많은 교통량으로 인해 타 지역보다 상대적으로 많은 배출원이 존재한다(KEI, 2016). 또한 타 지역과 녹지면적 등의 토지 이용 실태를 비교하였을 때, 수도권은 식생분포에 의해 자연적으로 미세먼지가 저감되기 어려운 지역이다. Kang et al. (2022)은 지역별 단위면적 당 미세먼지 흡착량을 산출하여 수도권이 전국에서 가장 낮은 단위면적 당 흡착량(약 0.3 ton km<sup>-2</sup>)을 나타냄을 밝혔다. 즉, 수도권은 미세먼지가 자연에 의해 제거될 수 있는 흡착량이 낮아 타 지역보다 미세먼지에 취약한 지역이다.

미세먼지의 농도변화는 경계층 높이, 바람 등의 기상의 영향을 받는다(Kim and Kim, 2020). 강수입자는 낙하 시 미세먼지와 충돌하여 대기 중의 미세먼지를 제거하는 습성침적(wet deposition)을 통해 결과적으로 미세먼지 농도를 낮추는 세정효과(i.e., below-cloud scavenging)를 야기한다(Chate et al., 2003). 이 사실에 기반하여 미세먼지 농도 저감의 이론적 기반마련을 위한 수치모의 실험(Jung et al., 2022; Lim et al., 2022)과 실제(in situ) 항공기 인공증우 실험을 수행하였다(Cha et al., 2019; Wu et al., 2022). Lim et al. (2022)은 수치모의를 통해 0.7 mm hr<sup>-1</sup>의 약한 인공증

우 효과 발생 시 인공증우 효과가 없을 때보다 PM<sub>10</sub> 질량농도가 약 11% 감소함을 밝혔다. Wu et al. (2022)은 중국에서 항공기 인공증우 실험을 수행하여 인공증우 효과가 발생한 지역이 인공증우의 영향이 없는 지역보다 미세먼지 질량농도의 증가율이 더 낮게 나타나, 증우효과가 더해진 강수현상으로 인해 대기 중 미세먼지의 축적이 완화될 수 있음을 보고하였다.

인공증우 사례 외에 실제 지상 관측 자료를 기반으로 한 선행연구 사례도 존재한다. Olszowski (2016)은 7년간(2007~2013년) 따뜻한 계절(4~9월)과 차가운 계절(10~3월)을 구분하여 강수강도와 PM<sub>10</sub> 간의 세정효과를 비교하였다. 강수강도가 강할 때 PM<sub>10</sub>의 세정효과율이 더 높게 나타나며, 강수강도의 범위가 동일할 때 따뜻한 계절이 차가운 계절보다 약 25% 더 높은 세정효과율을 보였다. Ouyang et al. (2015)은 중국 베이징에서 관측한 2013년 여름 강수현상을 분석하여 PM<sub>2.5</sub>와의 상관관계를 비교하였다. 누적 강수량과 PM<sub>2.5</sub>는 음의 상관관계가 존재하며 강수강도가 강할수록 PM<sub>2.5</sub>의 세정효과가 효과적으로 발생함을 보고했다.

국내에서는 제한적이기는 하나 지상 관측 자료를 사용한 연구가 수행되었다. Park et al. (2020)은 부산시 부경대학교에서 2020년 3~7월간 관측한 총 6번의 강수 사례와 PM<sub>10</sub> 관측 자료를 사용하여 강수 지속 시간 및 강수강도와 PM<sub>10</sub> 질량농도 간의 상관관계를 도출하였다. 강수가 지속되는 동안 PM<sub>10</sub> 질량농도가 감소함을 확인하였고, 상대적으로 강한 강도의 강수 사례의 경우 PM<sub>10</sub> 저감효율이 더 높게 나타남을 보였다. Kim et al. (2014)은 10년간(1999~2008년) 서울시에서 관측한 PM<sub>10</sub>과 강수량 자료를 사용하여, 강수가 발생했을 때와 발생하지 않았을 때의 PM<sub>10</sub> 질량농도 차이를 비교하였다. 강수가 발생하지 않은 조건에서 PM<sub>10</sub> 질량농도가 더 높게 나타났으며, 강수 지속시간이 길고 누적 강수량이 많을수록 PM<sub>10</sub>이 효과적으로 감소함을 보고하였다. 하지만 이 연구는 강수 관측 지점 한 곳과 미세먼지 관측 지점 두 곳만을 사용하여 공간적 대표성이 높지 않다.

위에 언급한 바와 같이 지상 관측 자료 분석 또는 수치모의 실험을 통한 강수에 의한 미세먼지 세정효과에 관한 선행연구가 존재하지만, 국내 장기간 관측 자료를 사용한 연구는 매우 부족하며 장기간 자료를 사용하였으나 강수에 의한 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 세정효과를 함께 고려한 선행연구는 극히 드물다. 또한, 대학교 내 1개 지점의 사례처럼 연구 대상 지역 내 제한된 기상 및 미세먼지 관측 지점의 자료만을 사용한 사례가 많아 지역 전체를 대표하는 결과로 판단하기 어렵다. 뿐만 아니라 수치모의 결과를 검증할 수 있는 관측 자료를 사용한 미세먼지 세정효과 연구는 많지 않다.

본 연구는 서울시 25개 지역구 전체의 강수와 미세먼지 자료를 사용하여 지역 전체를 대표하는 강수와 미세먼지의 개별적 특성을 도출하였다. 강수를 제외한 다른 기상 영향 최소화하기 위해 장기간 관측 자료를 사용하였다. 또한 강수에 의한 미세먼지 세정 효과에서 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>를 동시에 고려하여 강수로 인해 나타나는 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 변화 정도를 정량적으로 도출하였다. 다수의 선행연구 중 미세먼지 세정 효과와 강수의 상관관계 분석을 위해 강수강도만을 고려하였다는 한계점이 존재하기에 본 연구에서는 강수강도, 강수 지속시간, 누적 강수량을 모두 고려하여 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 세정효과를 세 가지 강수 특성의 함수로 정량화 하였다.

## 2. 연구 자료 및 방법

### 2.1 자료 및 분석 기간

본 연구는 서울시 25개 지역구 전체를 대상 지역으로 설정하였다. 환경부 에어코리아에서 제공하는 미세먼지(PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>) 질량농도 관측 자료와 기상청에서 제공하는 강수량 관측 자료를 사용하였다. 강수량 자료는 21년(2001~2021년) 기상청 AWS (Automatic Weather System) 1시간 강수량 자료를 사용하였다. 1시간 강수량 관측 자료 중 약 1년 이상의 장기 결측이 발생한 자료가 존재하였다. 따라서 25개 지역구 중 장기 결측이 존재하는 지역구의 당해 자료는 모두 제외하였다. 강북구와 구로구의 2001년 자료, 서대문구와 중구의 2013~2014년 자료, 종로구(북악산 지점)의 2001~2010년과 2019~2021년 자료가 이에 해당하였다.

미세먼지 PM<sub>10</sub>은 21년(2001~2021년) 환경부 에어코리아 1시간 평균 질량농도 최종확정측정자료를 사용하였다. 미세먼지 PM<sub>2.5</sub>자료는 최종확정측정자료가 공개된 2015~2021년 총 7년간의 1시간 평균 질량농도 자료를 사용하였다. 또한 미세먼지 자료 중 PM<sub>2.5</sub>가 PM<sub>10</sub>보다 높게 나타나는 경우가 일부 존재하는 것을 확인하였다. 이는 전체 4,747,800개의 자료 중 0.18%인 8,644개로 해당 시간의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 자료는 본 연구에서 제외하였다.

### 2.2 연구 방법

#### 2.2.1 강수와 미세먼지 특성 분석 방법

강수와 PM<sub>10</sub>의 특성 분석을 위해서 21년간(2001~2021년)의 관측 자료를 사용하여 장기적 변동 추이 분석을 수행하였고, PM<sub>2.5</sub>는 관측 자료의 제한으로 인해 7년간(2015~2021년)에 대해 분석을 수행하였다. 강수는 연별, 계절별, 월별 강수강도와 누적 강수량을 기준으로 장기간 변동 추이를 확인하였다. 강수강도는 1시간 강수량을 25개 지역구별로 연별, 계절별, 월별

평균하여 산출하였고, 누적 강수량은 기간별(연별, 계절별, 월별) 합으로 산출하였다. 지역구별 변동성을 계산한 후 25개 지역구 값을 평균하여 서울시를 대표하는 기간별 강수강도와 누적 강수량을 산출하였다. 미세먼지는 기간별(연별, 계절별, 월별) 평균을 기준으로 분석하였다. 25개 각 지역구의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 1시간 평균 질량농도 자료를 기간별 평균하여 공간 분포를 확인한 후, 이를 25개 지역구 전체에 대해 평균하여 서울시 전체의 미세먼지 질량농도 변동 추이를 분석하였다.

본 연구에서 한 해의 기준은 해당 연도의 1월부터 12월까지이며, 계절 평균 분석에서만 시간의 연속성을 고려하여 전년도 12월~당해 11월까지를 한 해의 기준으로 설정하였다. 즉, 계절 평균 분석에서는 사계절을 12개월을 3개월씩 나누어 전년도 12월~당해 2월(겨울), 3~5월(봄), 6~8월(여름), 9~11월(가을)로 구분하였다. 따라서 계절별 분석에서는 연구 대상 기간의 마지막 시점인 2021년 12월의 자료는 2022년 겨울로 구분되기 때문에 이를 제외하기 위해 2021년 11월 까지의 자료만을 포함하였다.

#### 2.2.2 강수의 미세먼지 세정효과 분석 방법

미세먼지 세정효과 분석 시 강수에 의한 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 세정효과를 동시에 정량화 하기 위해 세 관측 자료가 모두 존재하는 2015년부터 2021년까지 7년간의 강수량과 미세먼지 자료를 사용하였다. 모든 강수 사례는 강수강도, 지속시간, 누적 강수량 등의 강수 특성이 각기 다르다. 따라서 강수 특성에 따른 미세먼지 세정효과를 체계적으로 정량화 하기 위해서는 각 강수 사례를 구분해야 한다. 이를 위해서는 독립적인 각 강수 사례에 대해서 강수가 시작되는 시점 및 종료되는 시점에 대한 기준이 필요하다. 본 연구에서는 선행연구(Li et al., 2011)에서 제시한 강수 사례 분리 방법을 적용하여 강수량 자료 간 특정 시간 간격을 기준으로 전후의 강수를 독립적인 강수 사례로 구분하였다. 각 관측 지점별로 1시간 강수량 자료 사이에 2시간 이상 시간간격이 존재할 경우, 전후의 강수 사례를 서로 독립된 강수 사례로 정의하였다.

기상청 AWS에서 관측되는 1시간 강수량은 01분부터 60분까지의 1시간에 대한 누적 강수량으로 정의되며, 1시간 통계자료의 시각은 60분에 해당하는 시각으로 규정된다(KMA, 2021). 예를 들어 08시에 관측된 1시간 강수량은 07시 01분부터 08시 00분까지 관측된 강수량의 누적 합을 의미한다. 즉, 강수 사례가 발생하였을 때 강수의 영향이 없는 시각은 강수량이 관측된 시각으로부터 1시간 전이다. 따라서 강수의 영향이 없는 시점인 강수 사례 시작 1시간 전 미세먼지 질량농도를 세정효과 계산의 기준 시점으로 설정하였다.

미세먼지 세정효과는 강수 사례 종료 후  $PM_{10}$ 과  $PM_{2.5}$ 가 최종적으로 세정된 양( $\mu\text{g m}^{-3}$ )과 세정효율(%)로 계산하였다. 강수 사례 시작 1시간 전의 미세먼지 질량농도와 강수 사례 종료 시점의 미세먼지 질량농도 간의 차이로 최종 세정된 양( $\mu\text{g m}^{-3}$ )을 산출하였고, 이를 강수 사례 시작 1시간 전의 미세먼지 질량농도의 비로 표시하여 최종 세정효율(%)을 산출하였다. 최종 세정된 양( $\mu\text{g m}^{-3}$ )이 양의 값을 나타내면 강수 사례 종료 시점에서 미세먼지 질량농도가 감소한 것으로, 강수 사례가 발생하는 동안 세정효과가 발생한 것으로 분석하였다. 반대로 음의 값을 나타내면 강수 사례가 발생하기 전보다 미세먼지 질량농도가 증가한 것으로 미세먼지 세정효과가 발생하지 않은 것으로 분석하였다. 또한 각 강수 사례에서 나타나는 강수 특성을 함께 정량화 하였다. 강수 사례에서 나타나는 강수 특성을 강수강도의 평균( $\text{mm hr}^{-1}$ ), 누적 강수량( $\text{mm}$ ), 지속시간( $\text{hr}$ )의 세 가지로 설정하였다. 본 연구에서는 최종 세정된  $PM_{10}$ 과  $PM_{2.5}$ 의 양

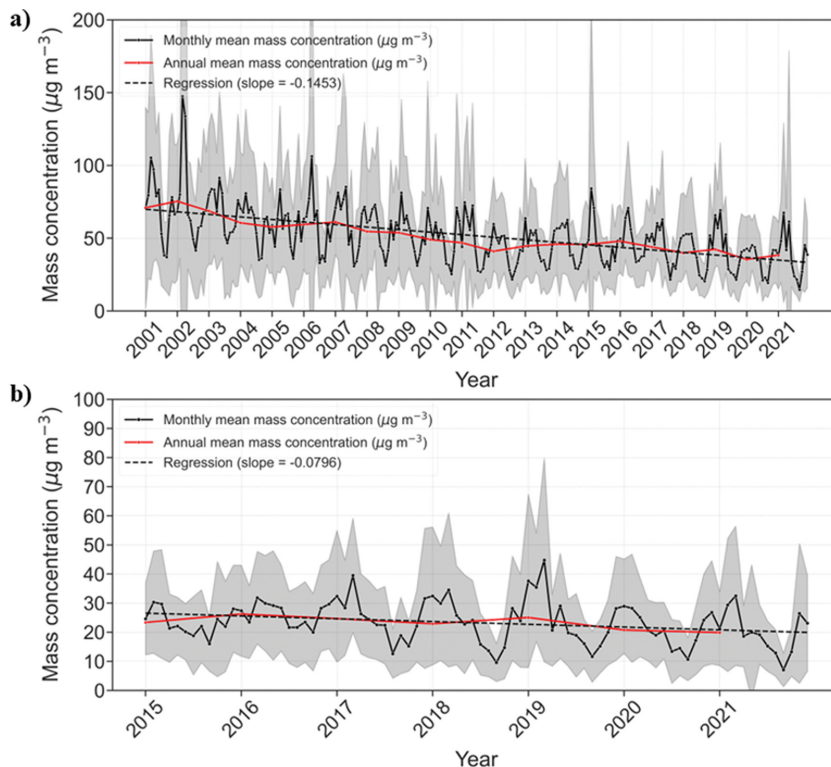
( $\mu\text{g m}^{-3}$ )과 최종 세정효율(%)을 이 세 가지 강수 특성의 함수로 정량화 하여 강수에 의한 미세먼지 세정효과를 강수 특성별로 심층 분석하고 이를 세정효과가 발생하지 않은 경우와 비교하였다.

### 3. 결 과

#### 3.1 강수 및 미세먼지의 장기간 변동 및 특성

##### 3.1.1 미세먼지의 장기간 변동 및 특성

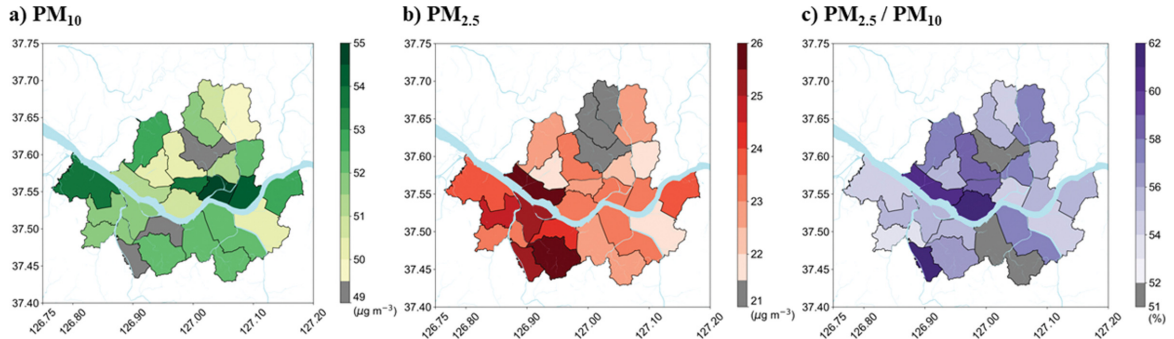
서울시 25개 지역구에서 관측된 미세먼지 자료를 사용하여 21년간(2001~2021년)  $PM_{10}$ 과 7년간(2015~2021년)  $PM_{2.5}$ 의 기간별(연별, 계절별, 월별) 장기 변동 특성에 대해 분석하였다. Figure 1은 연별  $PM_{10}$ 과  $PM_{2.5}$ 의 월평균 질량농도를 보인다.  $PM_{10}$  질량농도는 2001년( $70.92 \pm 57.86 \mu\text{g m}^{-3}$ )부터 2021년( $38.40 \pm 45.63 \mu\text{g m}^{-3}$ )까지 뚜렷한 감소 추이를 나타내며(Fig. 1a),  $PM_{2.5}$  또한 2015년( $23.37 \pm 14.82 \mu\text{g m}^{-3}$ )부터 2021년( $19.89 \pm 17.50 \mu\text{g m}^{-3}$ )까지 감소 추이를 보이나 그 정



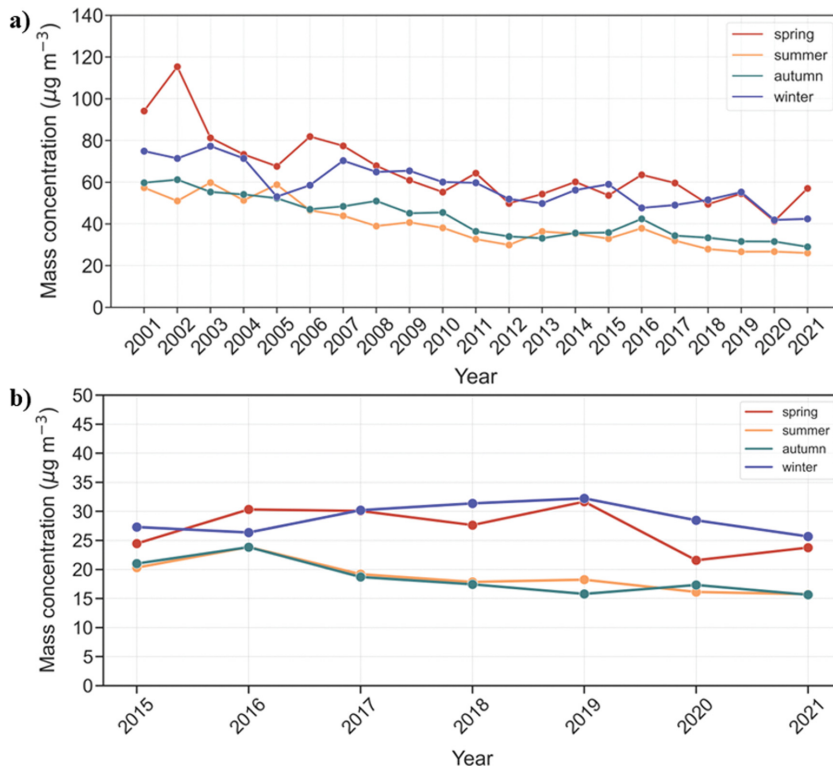
**Fig. 1.** The annual trends of monthly averaged (a)  $PM_{10}$  mass concentrations and (b)  $PM_{2.5}$  mass concentrations. The black solid lines represent 25 stations averaged PM mass concentrations. The standard deviations for monthly averaged PM mass concentrations of 25 stations are indicated with the gray shaded areas. The trends of the annual averaged PM mass concentrations are indicated with the red solid lines. The regression lines of the monthly averaged PM mass concentrations are shown with the black dashed lines.

도가 PM<sub>10</sub>보다 약하다(Fig. 1b). PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 지속적인 감소 추이는 선행연구에서 보고된 바 있으며(Kim and Lee, 2018; Yeo et al., 2019; Byun and Kim, 2020), 연중 발생한 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 최고농도 또한 지속적인 감소 추이를 나타내고 있다(Byun and Kim, 2020). 서울시 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 질량농도는 감소하지

만 고농도 PM<sub>2.5</sub> 발생빈도가 증가하는 경향이 존재하고(Yeo et al., 2019), 이러한 경향이 PM<sub>2.5</sub>가 PM<sub>10</sub>보다 상대적으로 약한 감소 추이를 나타내는데 영향을 준 것으로 보인다. 또한 서울시 25개 지역구의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 연평균 질량농도의 지역구별 변동을 확인하였다. 서울시 PM<sub>10</sub>의 평균 질량농도는  $51.47 \pm 11.84 \mu\text{g}$



**Fig. 2.** The spatial distributions of (a) 21 years (2001~2021) averaged PM<sub>10</sub> mass concentrations, (b) 7 years averaged (2015~2021) PM<sub>2.5</sub> mass concentrations, and (c) 7 years (2015~2021) averaged PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> values. The minimum range of color bar in each panel was shown as gray color.



**Fig. 3.** The annual trends of seasonal averaged (a) PM<sub>10</sub> mass concentrations and (b) PM<sub>2.5</sub> mass concentrations are shown with solid lines. Different colors indicate different seasons.

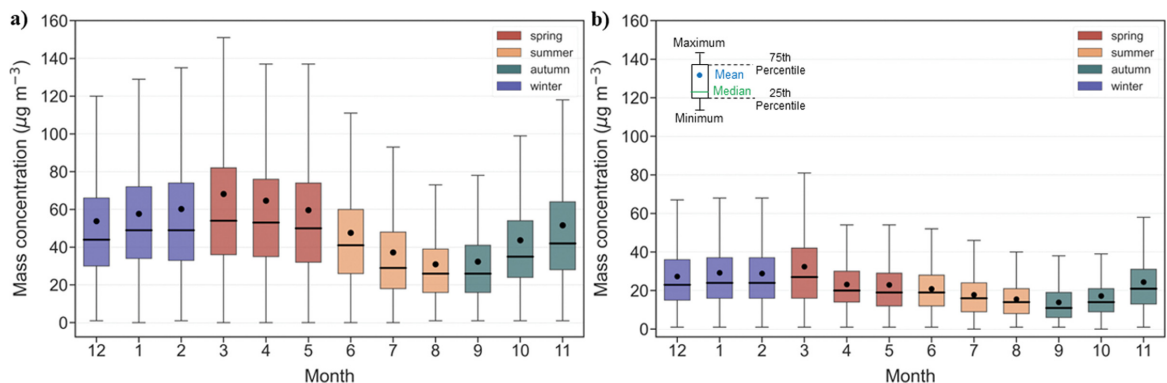
$\text{m}^{-3}$ (최대:  $54.10 \mu\text{g m}^{-3}$ (성동구); 최소:  $49.44 \mu\text{g m}^{-3}$ (금천구))이며  $\text{PM}_{2.5}$ 의 평균 질량농도는  $23.29 \pm 2.63 \mu\text{g m}^{-3}$ (최대:  $25.16 \mu\text{g m}^{-3}$ (마포구); 최소:  $21.77 \mu\text{g m}^{-3}$ (성북구))이었다(Figs. 2a-b).

미세먼지 질량농도의 계절별 특징을 분석한 결과  $\text{PM}_{10}$ 의 21년간 겨울( $58.02 \pm 42.16 \mu\text{g m}^{-3}$ )과 봄( $65.27 \pm 65.64 \mu\text{g m}^{-3}$ )의 평균 질량농도가 여름( $39.30 \pm 29.33 \mu\text{g m}^{-3}$ )과 가을( $42.52 \pm 33.80 \mu\text{g m}^{-3}$ )보다 높았다(Fig. 3a). 또한 모든 계절에 대해  $\text{PM}_{10}$ 은 감소 추이를 보였다.  $\text{PM}_{2.5}$ 는 겨울( $28.87 \pm 19.16 \mu\text{g m}^{-3}$ )과 봄( $27.07 \pm 19.29 \mu\text{g m}^{-3}$ )의 평균 질량농도가 여름( $18.74 \pm 12.08 \mu\text{g m}^{-3}$ )과 가을( $18.52 \pm 14.45 \mu\text{g m}^{-3}$ )보다 높았다(Fig. 3b).  $\text{PM}_{2.5}$ 의 여름과 가을 평균 질량농도는 감소하지만 봄과 겨울의 평균 질량농도는 2015년부터 2019년까지 증가 추이를 보이고, 2020년부터 2021년까지 감소 추이를 나타냈다(Fig. 3b). 2019년 이후 2020년에 감소하는 봄과 겨울철  $\text{PM}_{2.5}$ 의 추이는 COVID-19 발생의 영향으로 판단된다. 2020년 1월 말부터 3월까지의 중국 내 지역 봉쇄 조치에 의해 2020년 2~4월까지의  $\text{PM}_{2.5}$  월별 평균 질량농도가 감소하였다(Tan et al., 2020). 따라서 2020년 국내의 봄과 겨울철  $\text{PM}_{2.5}$  질량농도 감소 추이 역시 북서계절풍에 의해 국내로 유입되는  $\text{PM}_{2.5}$ 가 감소함으로써 나타난 결과로 판단된다.

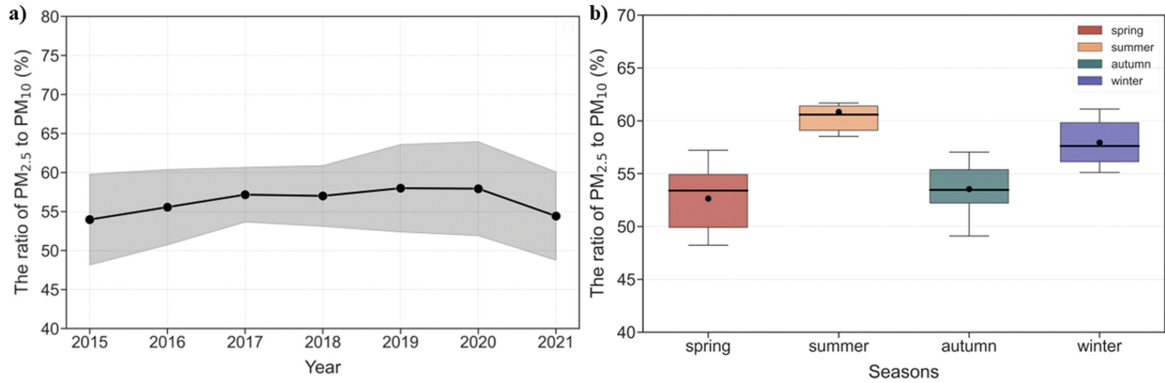
$\text{PM}_{10}$ 과  $\text{PM}_{2.5}$ 의 월별 변동 추이는 유사하였으며 21년간 3월에  $\text{PM}_{10}$ ( $69.46 \pm 67.04 \mu\text{g m}^{-3}$ )과  $\text{PM}_{2.5}$ ( $33.98 \pm 23.65 \mu\text{g m}^{-3}$ )의 최고 질량농도가 나타났다(Fig. 4).  $\text{PM}_{10}$  최저 질량농도는 8월( $31.46 \pm 22.41 \mu\text{g m}^{-3}$ )에 나타난 반면(Fig. 4a),  $\text{PM}_{2.5}$  최저 질량농도는 9월( $13.90 \pm 11.13 \mu\text{g m}^{-3}$ )에 나타났다(Fig. 4b).  $\text{PM}_{10}$ 과  $\text{PM}_{2.5}$  모두 연중 봄에 월평균 질량농도의 최대가 나타나고 여름에 월평균 질량농도가 감소하는 뚜렷한 계절 변

동을 보인다(Fig. 4). 봄에 나타나는 월평균 질량농도의 최대값은 잦은 대기 정체로 인한 질량농도 상승의 영향과 함께 황사 발생으로 인한 고농도 미세먼지 사례의 영향을 받기 때문이다(Nam et al., 2019; Park et al., 2021). 여름에 월평균 질량농도가 감소하는 추이는 연중 여름철에 집중된 강수와 연관되어 있으며, 동시에 타 계절보다 높은 혼합도로 인한 대기 확산의 영향을 받는 것으로 판단된다(Kim and Kim, 2008).

Figure 5는 연별과 계절별  $\text{PM}_{10}$ 에 대한  $\text{PM}_{2.5}$  비율(%)이다.  $\text{PM}_{10}$  질량농도 중  $\text{PM}_{2.5}$ 가 차지하는 비율은 7년간 평균  $56.29 \pm 17.17\%$ (최소:  $53.97\%$ (2015년); 최대:  $57.99\%$ (2019년))였으며 2020년까지 증가 추이를 보이다 2021년에 감소하였다(Fig. 5a). 이러한 추이는 Fig. 1에서  $\text{PM}_{10}$ 과  $\text{PM}_{2.5}$ 의 선형회귀식의 기울기를 비교하였을 때  $\text{PM}_{10}$ 은  $-0.1446$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ 는  $-0.0793$ 으로  $\text{PM}_{2.5}$ 보다  $\text{PM}_{10}$ 의 감소 정도가 더 크기 때문이다. 7년간  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 의 분포는 계절별로 다른 추이를 보인다(Fig. 5b). 연중  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 의 계절별 평균을 산출하였을 때 봄( $52.64 \pm 18.17\%$ )에 가장 낮은 값을, 여름( $60.80 \pm 17.22\%$ )에 가장 높은 값을 보였다(Fig. 5b). 이는 월별로  $\text{PM}_{2.5}$ 보다  $\text{PM}_{10}$ 의 농도 변화 정도가 더 크고(Fig. 4),  $\text{PM}_{10}$ 의 고농도가 나타나는 3월과 저농도가 나타나는 8월의 영향을 받았기 때문이다(Fig. 4a). 또한  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 의 지역구별 변동을 확인한 결과, 서울시에서  $\text{PM}_{10}$  중  $\text{PM}_{2.5}$ 가 차지하는 비율은 평균  $56.32 \pm 3.94\%$ (최대:  $62.00\%$ (용산구); 최소:  $51.33\%$ (성북구))로 나타났다(Fig. 2c).  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 의 값이 클수록 미세먼지 2차 생성의 가능성이 높음을 의미한다(Yeo et al., 2019). 지역 내  $\text{PM}_{10}$ 과  $\text{PM}_{2.5}$ 의 공간 분포와  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 의 공간 분포는 다르게 나타났다(Fig.



**Fig. 4.** The monthly distributions of (a)  $\text{PM}_{10}$  mass concentrations for 21 years (2001~2021) and (b)  $\text{PM}_{2.5}$  concentrations for 7 years (2015~2021). The monthly averaged values of PM mass concentrations are shown with the black dots in each box. The monthly median values of PM mass concentrations are indicated with the black horizontal lines in each box. The capped vertical lines represent the maximum (top) and minimum (bottom) of each month.



**Fig. 5.** The calculated ratio of PM<sub>2.5</sub> to PM<sub>10</sub>. (a) The annual trend of the ratio of PM<sub>2.5</sub> to PM<sub>10</sub>. The black solid line with circle markers represents the annual average. The gray shaded areas represent standard deviations of 25 stations. (b) The seasonal distribution of the ratio of PM<sub>2.5</sub> to PM<sub>10</sub> for 7 years (2015~2021). The seasonal averaged values are shown with the black dots in each box. The seasonal median values are indicated with the black horizontal lines in each box. The capped vertical lines represent the maximum (top) and minimum (bottom) of each season.

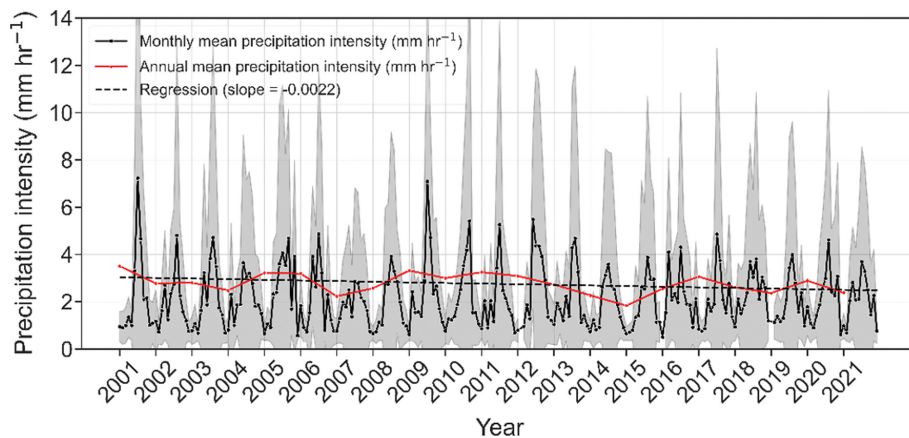
2). 이를 통해 실제로 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>가 고농도를 나타내는 지역과 미세먼지 2차 생성의 가능성이 높은 지역은 다르게 나타남을 확인하였다.

### 3.1.2 강수의 장기간 변동 및 특성

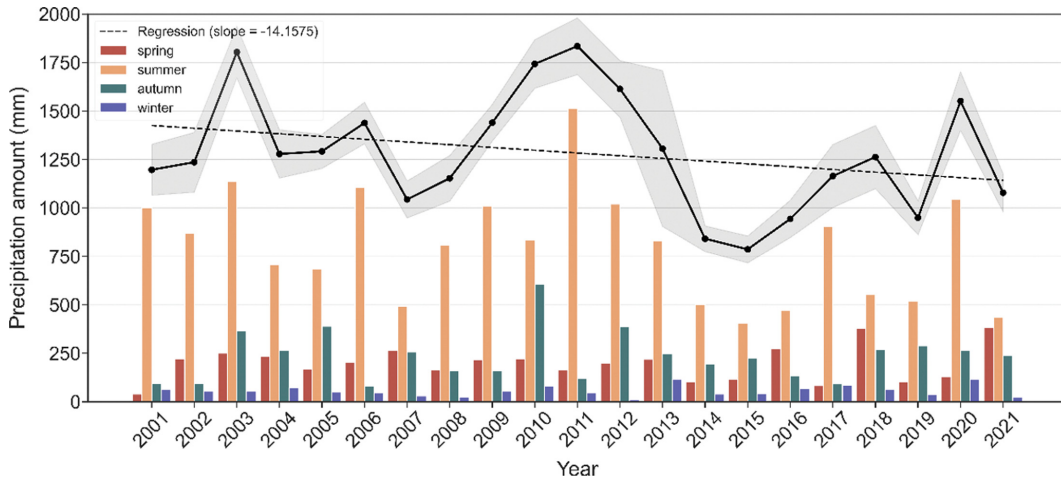
서울시 25개 지역구에서 관측된 1시간 강수량 자료를 사용하여 21년간(2001~2021년) 기간별(연별, 계절별, 월별) 강수강도와 누적 강수량을 기준으로 강수의 장기 변동에 대해 분석하였다. Figure 6은 21년간 강수강도의 월평균을 나타낸 것이다. 21년 평균 강수강도는  $2.77 \pm 4.60 \text{ mm hr}^{-1}$ 였으며 뚜렷한 증감추이는 관

찰되지 않았다. 매년 가장 강한 강수가 나타나는 시기는 7월로, 21년 평균  $4.06 \pm 1.31 \text{ mm hr}^{-1}$ 의 강도를 나타냈다. 1월에 연중 가장 낮은 강수강도가 나타나며 21년 평균  $0.94 \pm 0.39 \text{ mm hr}^{-1}$ 의 강도를 보인다(Figs. 6 and 9b).

Figure 7은 연별 누적 강수량과 계절별 누적 강수량을 나타낸 것으로, 연별 누적 강수량의 회귀선 기울기는 음수를 나타내며 감소 추이를 보였다. 21년 평균 연 누적 강수량은  $1289.10 \pm 118.58 \text{ mm}$ 이었으며 최댓값은 2011년( $1829.52 \pm 145.80 \text{ mm}$ )에 최솟값은 2015년( $799.42 \pm 68.14 \text{ mm}$ )에 나타났다. 최댓값과 최솟값



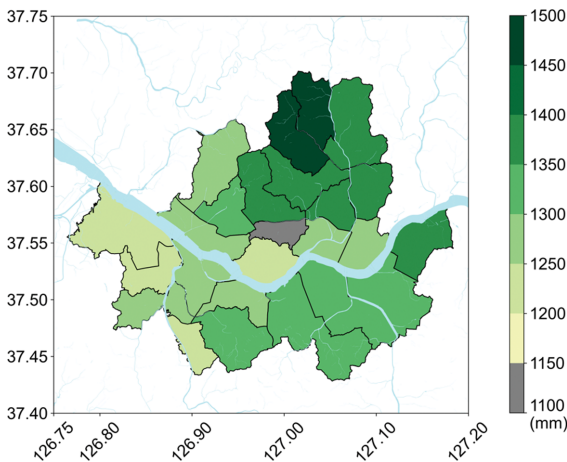
**Fig. 6.** The annual trend of monthly averaged precipitation intensity for 21 years. The black solid line represents 25 stations averaged precipitation intensity. The standard deviations for monthly averaged precipitation intensity of 25 stations are shown with the gray shaded areas. The trend of the annual averaged precipitation intensity is shown with the red solid line. The regression line of the monthly averaged precipitation intensity is indicated with the dashed line.



**Fig. 7.** The annual trends of precipitation amount are shown. The black solid line with the circle markers represents the 25 stations averaged annual precipitation amount. The standard deviations for averaged annual precipitation amount of 25 stations are shown with the gray shaded areas. The four different color bars represent the annual average seasonal precipitation amount based on the average of 25 stations for each year.

의 차이가 1030.10 mm로 연별 누적 강수량의 차이가 크게 발생하였다. 서울시 25개 지역구별 연 누적 강수량의 표준편차의 평균은 118.58 mm로, 지역구 간 100 mm 이상의 강수량 차이가 존재하였다. 25개 지역구별 연 누적 강수량 분포를 확인한 결과 지역구 간 최대 348.04 mm의 강수량 차이(최대: 1459.86 mm(도봉구); 최소: 1111.82 mm(중구))가 존재하였다(Fig. 8). Kim et al. (2011)은 1998년부터 2009년까지의 서울시 및 주변 수도권의 연평균 강수량의 공간 분포를

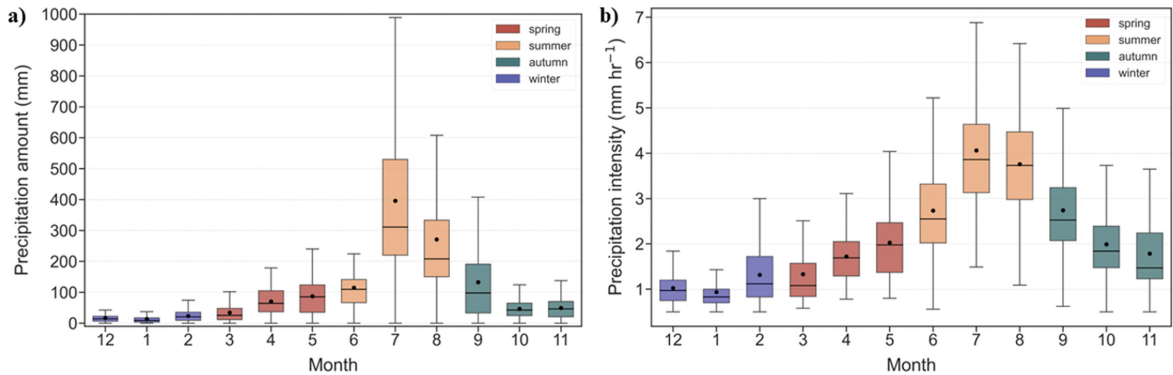
확인하였다. 그 결과 서울의 북동쪽 지역에 해당하는 도봉, 강북, 강동 지역의 연평균 강수량이 1400 mm 이상으로 서울시 전체 평균보다 높게 나타남을 밝혀냈다. 본 연구에서도 도봉구(1459.86 mm)와 강북구(1427.02 mm)의 21년 평균 연 누적 강수량이 1400 mm 이상으로 나타났다. 이를 통해 2009년 이후 현재까지 서울시 북동쪽 지역의 연 누적 강수량이 높게 나타나는 경향이 유지되고 있음을 확인하였다. 서울의 북동쪽 지역은 서울시 내 풍하측 지역으로, 도시의 열적 효과로 발생하는 상승류에 의해 대류성 강수량이 증가할 수 있다(Kim et al., 2011). 따라서 도시 열섬 및 풍하측 지형효과가 반영된 도시강수의 특징이 나타난 것으로 판단된다.



**Fig. 8.** The spatial distribution of 21 years (2001~2021) averaged annual precipitation amount. The minimum range of color bar was shown as gray color.

연 누적 강수량의 변화는 사계절 중 여름 누적 강수량의 추이와 유사하였다(Fig. 7). 21년간 여름 누적 강수량의 평균은  $801.95 \pm 299.66$  mm이며 연 누적 강수량 중 여름 누적 강수량이 차지하는 비율은  $61.10 \pm 12.77\%$ (최대: 86.32%; 최소: 35.86%)이었다. Lee et al. (2011)은 2001~2011년 한반도 전체의 여름 누적 강수량은 연 누적 강수량의 55.30%에 해당함을 보고했다. 서울시 2001~2011년의 연 누적 강수량에 대한 여름 누적 강수량의 비율은 65.29%로, 한반도 전체의 비율과 비교하였을 때 약 10% 높은 비율이 나타났다. 따라서 서울시 연 강수량은 타 지역보다 여름철 강수량의 영향을 더 많이 받고 있음을 확인하였다. 그리고 서울시 2012~2021년까지의 자료를 포함한 후 연 누적 강수량에 대한 여름 누적 강수량의 비율은 61.10%로 낮아졌다. 즉, 2012년 이후 2021년까지 연 누적 강





**Fig. 9.** The monthly distributions of (a) precipitation amount and (b) precipitation intensity for 21 years (2001~2021). The monthly averaged values are shown with the black dots in each box. The monthly median values are indicated with the black horizontal line in each box. The capped vertical lines represent the maximum (top) and minimum (bottom) of each month.

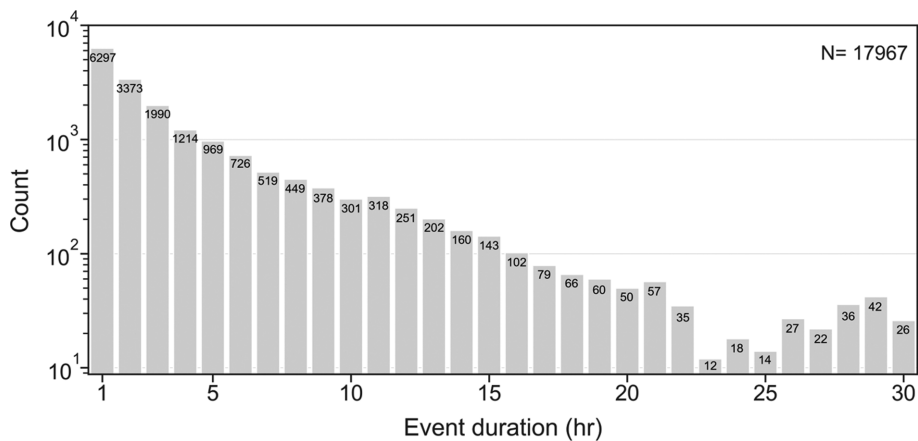
수량에 대한 여름 누적 강수량의 기여도는 감소 추이를 보였다.

월 누적 강수량의 21년 평균을 산출한 결과 6~9월의 강수량은 100 mm 이상을 나타냈다. 월 누적 강수량의 최소는 1월( $13.80 \pm 15.00$  mm)에 나타났으며 최대는 7월( $395.91 \pm 242.96$  mm)에 나타났다(Fig. 9a). 7월은 강수강도( $4.06 \pm 1.31$  mm hr<sup>-1</sup>) 및 누적 강수량 모두 연중 가장 높은 값을 나타냈다(Fig. 9). 7월의 강수량은 여름 누적 강수량의 49.37%에 해당하여 연 누적 강수량에 31.05% 기여하였다. 정리하면 7월의 강수는 서울시 여름 누적 강수량에 기여함과 동시에 연 강수량에도 큰 영향을 미친다. 이는 Lee et al. (2011)의 한반도 전체에서 나타난 7월의 강수량 증가가 연 강수량 및 여름철 강수량 증가에 영향을 미칠 수 있다는 결과와 일치한다.

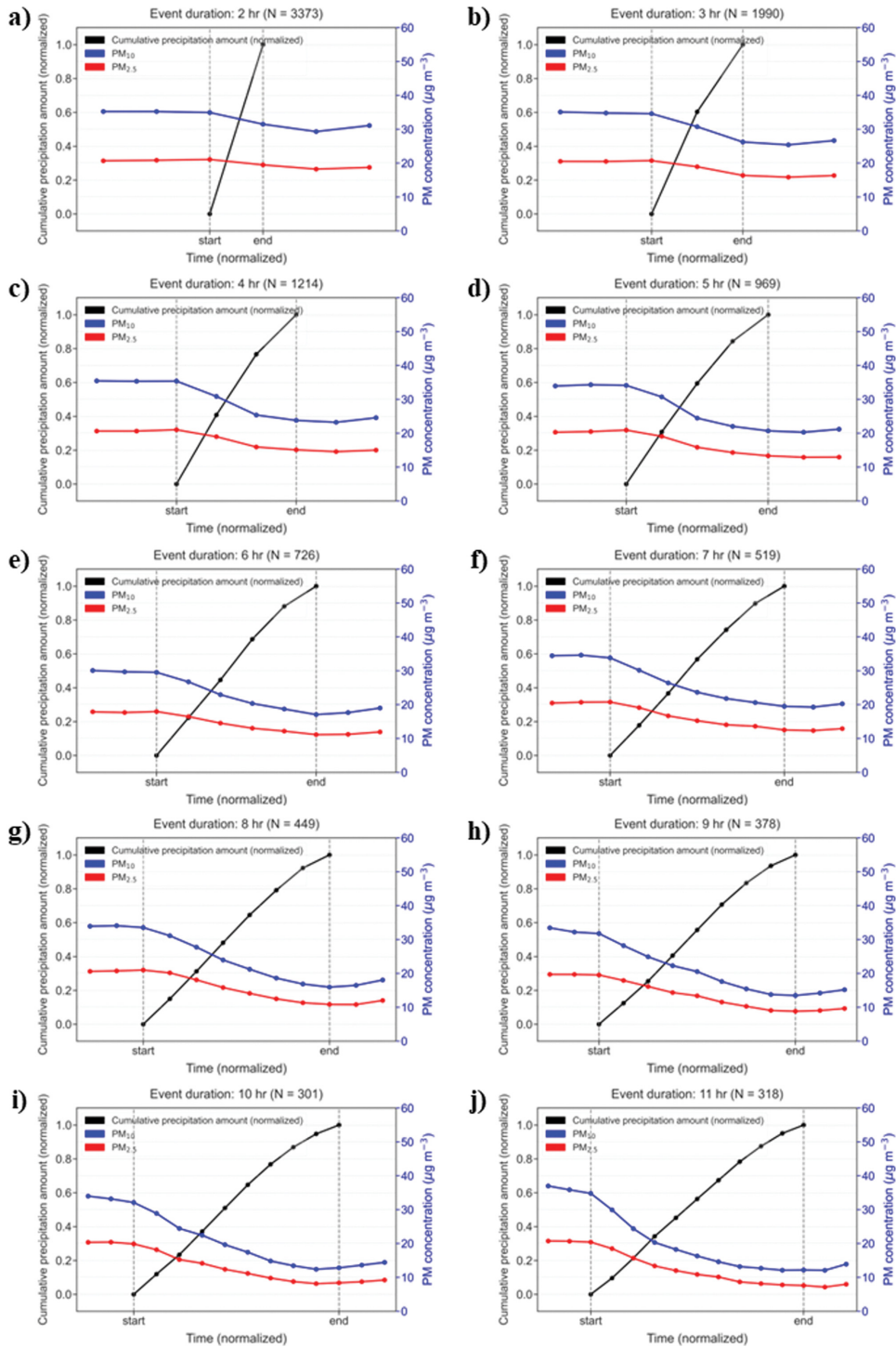
### 3.2 강수의 미세먼지 세정효과

#### 3.2.1 강수 사례 정의 및 현황

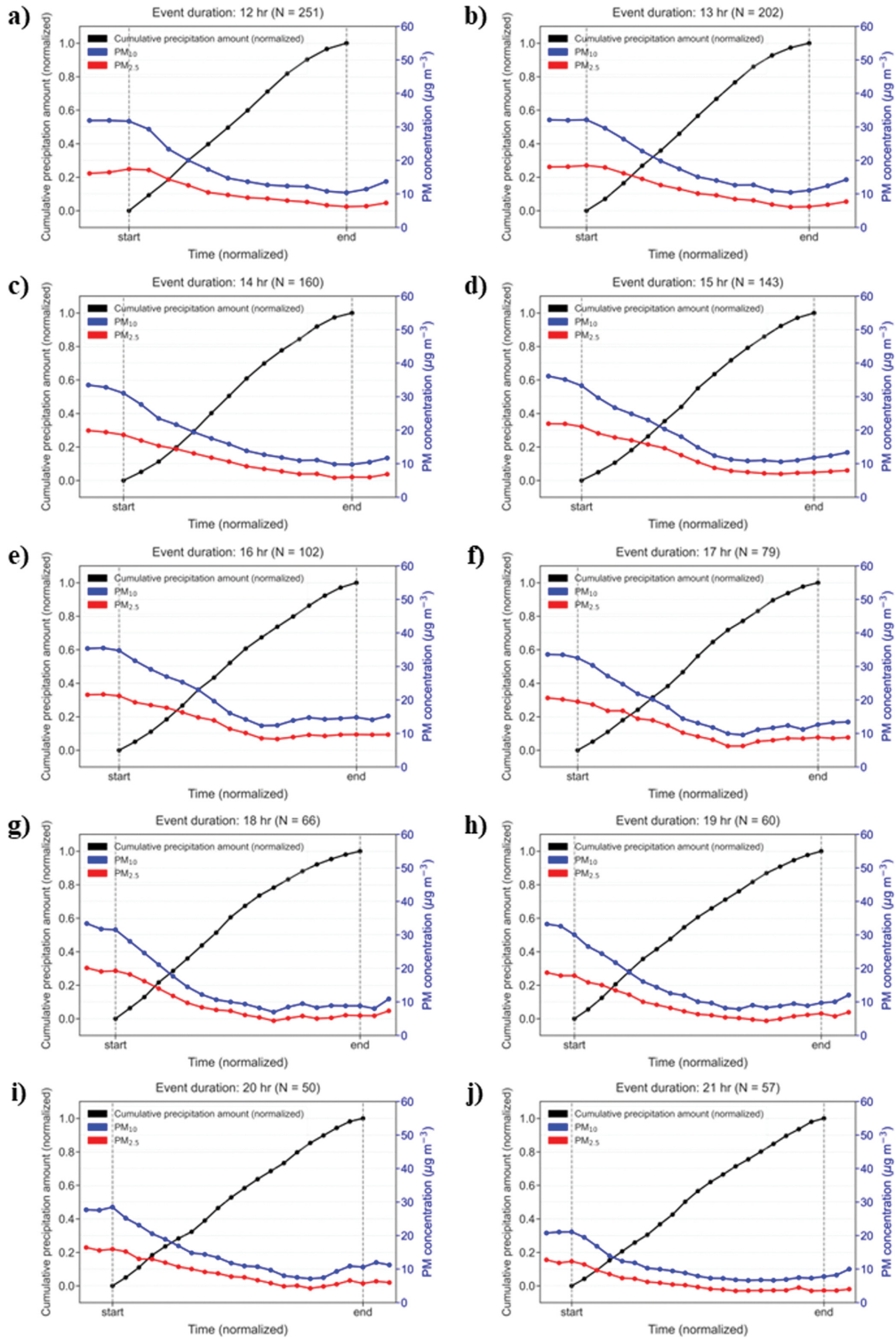
강수에 의한 미세먼지 세정효과 분석에 앞서 강수 사례의 강수 특성 별(강수강도의 평균(mm hr<sup>-1</sup>), 누적 강수량(mm), 지속시간(hr)) 강수 사례 개수 분포를 확인하였다. 전체 17,967개 사례 중 지속시간은 1시간부터 39시간까지 분포하며 지속시간이 1시간인 강수 사례가 전체의 35.05%(6,297개)를 차지하였다(Fig. 10). 강수강도의 평균은 0.5 mm hr<sup>-1</sup>인 사례가 전체의 32.94%(5,918개)로 가장 많은 비중을 차지하였다. 누적 강수량은 0.5 mm인 사례가 가장 많이 발생하였고, 전체의 24.29%(4,364개)를 차지하였다. 기상청 AWS 관측 자료의 최소 시간 해상도는 1시간이며 관측 가능한 최소 강수량은 0.5 mm이다. 즉, 누적 강수량이 0.5 mm인 사례는 지속시간이 1시간인 강수 사례를 의미한다.



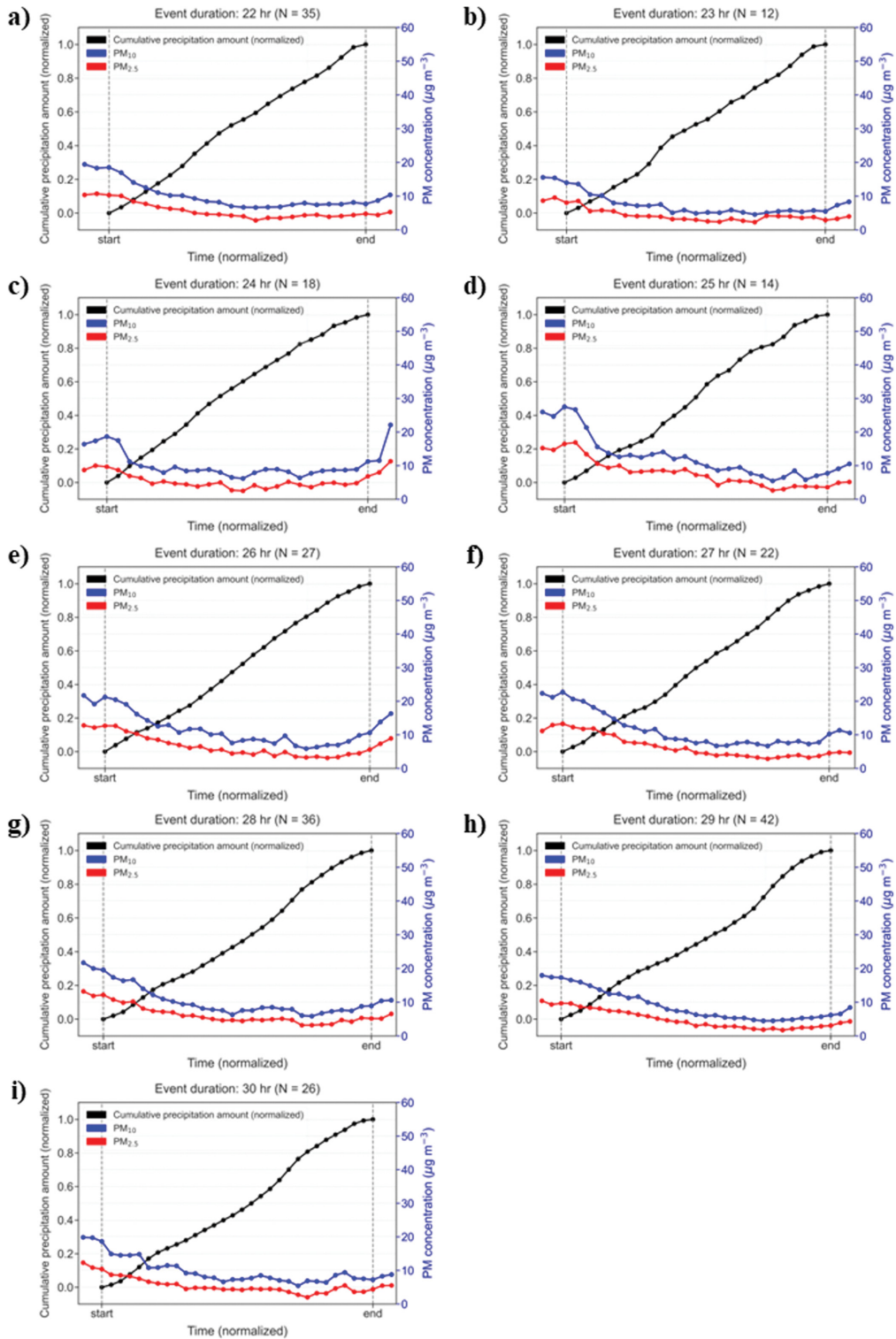
**Fig. 10.** The occurrence of precipitation events by duration. The number of precipitation events for each duration was represented with each bar.



**Fig. 11.** The variabilities in  $PM_{10}$  (blue lines) and  $PM_{2.5}$  (red lines) mass concentrations and normalized cumulative precipitation amount (black lines) for 2~11 hours precipitation events are shown in each panel. Cases with precipitation event durations from 2 to 11 hours are shown in each panel (a) to (j). The onset and the end of precipitation events are shown with vertical dashed lines. The number (N) of precipitation events is embedded in each panel.



**Fig. 12.** The same as Fig. 11 except for the event duration of 12~21 hours. Cases with precipitation event durations from 12 to 21 hours are shown in each panel (a) to (j).



**Fig. 13.** The same as Fig. 12 except for the event duration of 22–30 hours. Cases with precipitation event durations from 22 to 30 hours are shown in each panel (a) to (i).

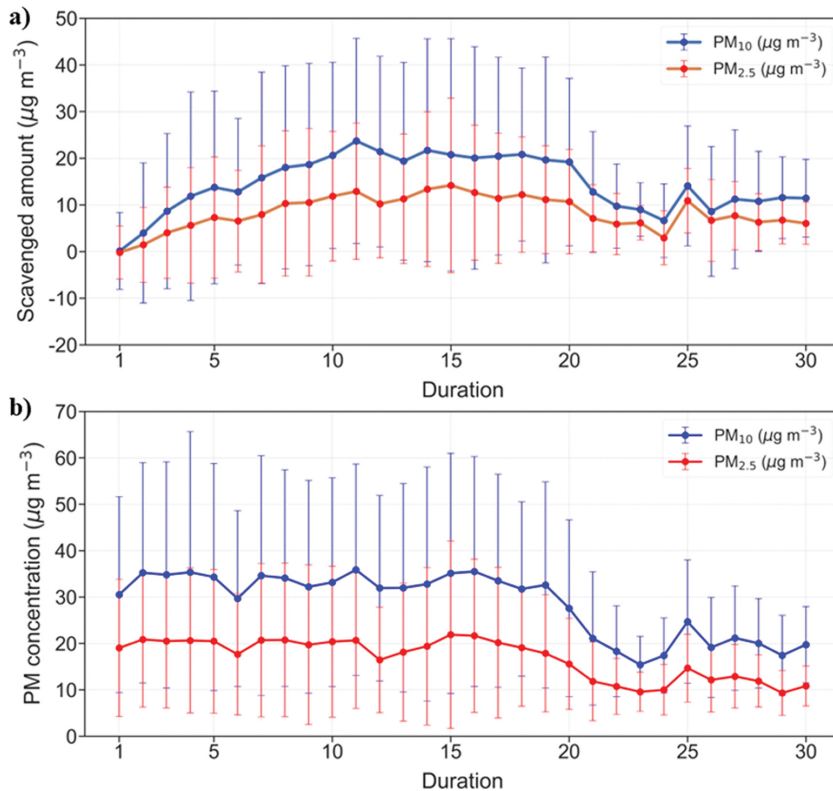
따라서 지속시간이 1시간인 강수 사례 6,297개 중에서 최소 강수량인 0.5 mm가 관측된 사례가 69.30% (4,364개)로 가장 많은 비중을 차지하였다.

### 3.2.2 강수 사례 발생 후 미세먼지 세정효과

강수 사례의 지속시간은 1시간부터 최대 39시간까지 발생했다. 지속시간이 30시간을 초과하면 강수 사례 개수가 10개 이하로 급격히 감소하였다. 따라서 지속시간이 31시간부터 39시간인 강수 사례는 미세먼지 세정효과 분석에서 제외하였으며 지속시간이 1시간부터 30시간까지인 강수 사례만을 분석하였다(Fig. 10). Figures 11-13은 강수 사례의 지속시간별로 강수 사례 내에서 나타나는 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 변화와 함께 1시간마다 누적되는 강수량을 나타냈다. 강수 사례의 시작 시점을 0으로, 종료 시점을 1로 설정하여 강수 사례의 시간 흐름을 정규화 하였다. 동시에 강수 종료 시점까지 누적된 최종 강수량 값을 1로 설정하여 1시간마다 누적된 강수량을 정규화 하였다. 그리고 강수 사례가 시작되기 2시간과 1시간 전의 미세먼지 질량농

도와, 강수 사례 종료 후 1시간과 2시간 후의 미세먼지 질량농도를 함께 표출하였다. 따라서 강수 사례 내에서 1시간마다 누적되는 강수량(mm)의 변화와 강수 사례 발생으로 나타나는 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 변화를 동시에 확인할 수 있다.

모든 강수 사례에서 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>는 강수 시작부터 종료 시점까지 지속적인 감소 추이를 보였으며, 지속시간이 10시간을 초과하는 긴 강수 사례 중 일부 지속시간의 경우 강수 사례의 후반부에 다시 미세먼지 질량농도가 증가하는 추이를 보였다(Figs. 11-13). 강수 사례 종료 후 최종 세정된 미세먼지 양( $\mu\text{g m}^{-3}$ )은 강수 시작 1시간 전 미세먼지 질량농도에서 강수 종료 시점의 미세먼지 질량농도를 뺀 값을 의미한다. 최종 세정효율(%)은 최종 세정된 미세먼지 양( $\mu\text{g m}^{-3}$ )을 강수 시작 1시간 전 미세먼지 질량농도의 비로 나타낸 값이다. 모든 강수 사례에 대해 최종 세정된 미세먼지의 양을 평균하였을 때 PM<sub>10</sub>은  $14.58 \pm 16.85 \mu\text{g m}^{-3}$ , PM<sub>2.5</sub>는  $8.40 \pm 10.68 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 PM<sub>10</sub>이 PM<sub>2.5</sub>보다 더 많은 양이 세정되었다(Fig. 14a). 강수 사례의 지

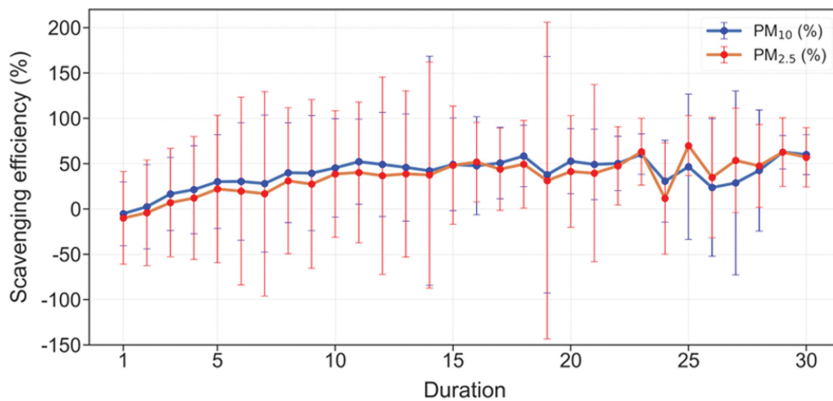


**Fig. 14.** The trends of duration averaged (a) scavenged amount of PM<sub>10</sub> (blue line) and PM<sub>2.5</sub> (red line) after the end of the precipitation events and (b) PM<sub>10</sub> (blue line) and PM<sub>2.5</sub> (red line) mass concentrations before one hour the precipitation events start. The capped vertical lines represent standard deviations.

속시간이 20시간까지는 최종 세정 된 미세먼지의 양은 증가 추이를 보였으나 21시간 이상 지속되는 긴 강수 사례에서는 최종 세정 된 미세먼지의 양이 감소하였다. 이는 강수 사례 시작 전  $PM_{10}$ 과  $PM_{2.5}$ 의 초기 질량농도와 관련이 있다. 지속시간이 1시간부터 20시간까지인 경우 강수 사례 시작 1시간 전  $PM_{10}$ 의 평균은  $33.14 \pm 23.08 \mu\text{g m}^{-3}$ 이며  $PM_{2.5}$ 는  $19.59 \pm 15.02 \mu\text{g m}^{-3}$ 이었다(Fig. 14b). 21시간 이상 지속되는 강수 사례의 경우 강수 시작 1시간 전  $PM_{10}$ 과  $PM_{2.5}$  평균 질량농도는 각각  $19.04 \pm 10.00 \mu\text{g m}^{-3}$ ,  $11.40 \pm 6.00 \mu\text{g m}^{-3}$ 이었다(Fig. 14b). 지속시간이 21시간 이상인 강수 사례의 개수(289개)는 지속시간이 상대적으로 짧은 강

수 사례에 비해 발생빈도가 낮았으며, 여름과 가을에 발생한 강수 사례가 74.05%를 차지하였다(여름: 43.25%; 가을: 30.80%).  $PM_{10}$ 과  $PM_{2.5}$ 의 여름과 가을 평균 질량농도는 타 계절보다 낮은 값을 나타내므로(Fig. 3) 최종 세정 된 미세먼지의 양에도 차이가 발생한 것으로 보인다.

Figure 15는 강수 사례 종료 후 최종 세정 된 미세먼지 양( $\mu\text{g m}^{-3}$ )을 강수 사례 시작 1시간 전 미세먼지 질량농도의 비로 최종 세정효율(%)을 산출하고 지속시간별로 평균한 결과이다. 모든 강수 사례에 대한 최종 세정효율은 강수 시작 1시간 전 미세먼지 질량농도 대비  $PM_{10}$ 은 평균  $39.59 \pm 55.68\%$ (최소:  $-5.26\%$ ;



**Fig. 15.** The averaged scavenging efficiency of  $PM_{10}$  (blue line) and  $PM_{2.5}$  (red line) after the end of the precipitation events as a function of precipitation duration. The capped vertical lines represent standard deviations of calculated scavenging efficiency.

**Table 1.** The calculated scavenged amount and the scavenging efficiency of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  by wet removal effect in four seasons.

Season	Scavenging efficiency			Scavenged amount	
	Statistics	$PM_{10}$ (%)	$PM_{2.5}$ (%)	$PM_{10}$ ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	$PM_{2.5}$ ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )
Spring (N = 3942)	Mean	<b>20.87</b>	<b>11.39</b>	<b>13.57</b>	<b>5.60</b>
	Standard deviation	54.53	69.94	23.34	11.75
Summer (N = 7790)	Mean	<b>8.25</b>	<b>3.11</b>	<b>4.35</b>	<b>2.67</b>
	Standard deviation	47.76	63.79	13.30	9.06
Autumn (N = 3891)	Mean	<b>12.78</b>	<b>5.27</b>	<b>5.92</b>	<b>3.12</b>
	Standard deviation	56.08	76.48	13.58	9.55
Winter (N = 2344)	Mean	<b>11.63</b>	<b>3.40</b>	<b>8.29</b>	<b>4.15</b>
	Standard deviation	44.80	74.87	18.86	13.64

최대: 62.72%), PM<sub>2.5</sub>는 평균 35.51 ± 71.10%(최소: -10.04%; 최대: 69.87%)로 나타났다(Fig. 15). 또한 강수 사례의 지속시간이 1시간부터 12시간인 경우 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 세정효율은 증가하나, 12시간 이상 지속되는 강수 사례에서는 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 모두 세정효율의 증가 정도는 감소하고 일정 수준으로 유지된다(Fig. 15). 12시간 이상 지속되는 강수 사례의 최종 세정효율의 평균은 PM<sub>10</sub>은 46.70 ± 57.29%, PM<sub>2.5</sub>는 45.54 ± 67.22%로 나타났다.

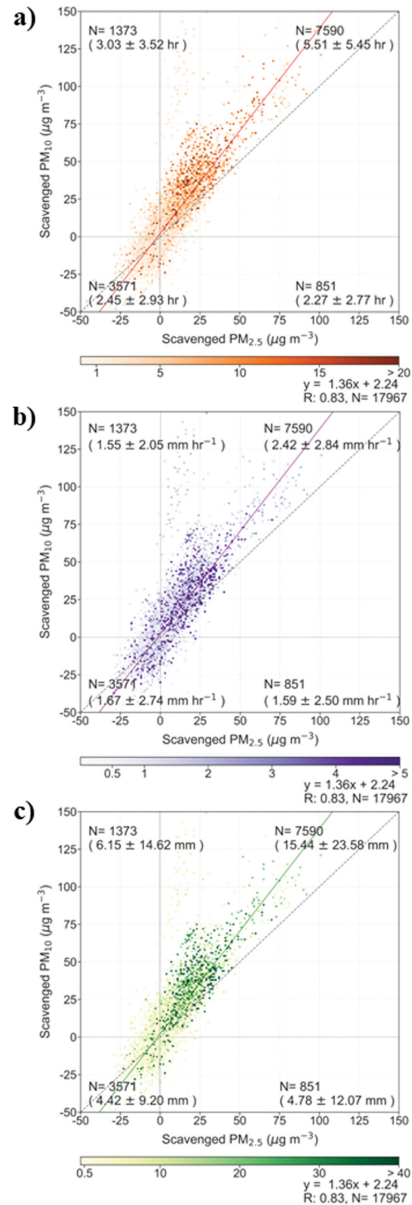
Table 1은 계절별 최종 세정 된 미세먼지의 양과 최종 세정효율을 산출한 결과이다. 최종 세정 된 미세먼지의 양은 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 모두 봄, 겨울, 가을, 여름 순으로 높게 나타났다. 최종 세정효율 또한 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 모두 봄, 가을, 겨울, 여름 순으로 높은 값을 보였다. 미세먼지(PM<sub>10</sub>; PM<sub>2.5</sub>) 세정효과는 봄(20.87 ± 54.53%; 11.39 ± 69.94%)에 가장 효과적으로 발생하였으며 여름(8.25 ± 47.76%; 3.11 ± 63.79%)에 가장 낮은 세정효과를 보였다(Table 1). 따라서 강수에 의한 미세먼지 세정효과는 계절별로 다른 추이를 보임을 확인하였다.

**3.2.3 강수 특성이 미세먼지 세정효과에 미치는 영향**

3.2.2절에서 강수 사례의 지속시간별 최종 세정 된 미세먼지 양( $\mu\text{g m}^{-3}$ )과 최종 세정효율(%)을 정량화 하였다. 최종 세정 된 미세먼지 양( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) 및 세정효율(%)의 표준편차가 크게 나타나는 경우가 일부 존재하였다. 또한 지속시간이 2시간 이내인 강수 사례의 경우 강수 시작 전보다 종료 시점에서 미세먼지 질량농도가 증가하여 세정효율이 음의 값을 나타내는 사례가 존재하였다(Fig. 15). 따라서 모든 강수 사례에 대한 강수 종료 후 최종 세정 된 미세먼지 양( $\mu\text{g m}^{-3}$ )의 분포를 확인하여 미세먼지 세정효과가 발생했을 때의 강수 특성과, 세정효과가 발생하지 않을 때의 강수 특성에 대해 분석을 수행하였다.

Figure 16은 각 강수 사례에서 나타나는 강수 특성을 세 가지(강수강도의 평균( $\text{mm hr}^{-1}$ ), 누적 강수량(mm), 지속시간(hr))로 구분하고, 각 강수 사례 종료 후 최종 세정 된 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 양( $\mu\text{g m}^{-3}$ )을 동시에 나타낸 결과이다. 강수 사례 종료 후 최종 세정 된 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 양( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) 간의 상관계수는 0.83으로, 강수 사례 발생으로 인해 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>가 변화하는 정도가 유사하였다(Fig. 16). 최종 세정 된 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 양을 비교하였을 때 선형회귀선의 기울기(1.36)가 양의 값을 보인다. 이는 강수 사례가 발생했을 때 최종 세정 된 PM<sub>10</sub>의 양이 PM<sub>2.5</sub>보다 더 크게 나타나기 때문이다(Fig. 14a).

강수 사례 발생 후 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 질량농도가 변하는 네 가지 경우에 대해 사분면을 분리하여, 각 사분



**Fig. 16.** The distributions of the scavenged amount of PM<sub>10</sub> (y axis) and PM<sub>2.5</sub> (x axis) for all precipitation events. The precipitation characteristics (i.e., precipitation intensity, precipitation amount, and precipitation duration) of each precipitation event are represented with the color dots in panels (a) precipitation duration, (b) precipitation intensity, and (c) precipitation amount. The solid color line in each panel is a regression line when the scavenged amount of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> are simultaneously compared, while the dotted line is a one-to-one line. The quadrant averaged precipitation characteristics and the number of precipitation events are indicated in each quadrant.

**Table 2.** The determined precipitation characteristics of precipitation events (i.e., precipitation intensity, precipitation amount, and precipitation duration) in four quadrants in Fig. 16, and the calculated scavenged amount and the scavenging efficiency of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> by wet removal effect.

		Characteristics of precipitation events			Scavenging efficiency		Scavenged amount	
		Precipitation intensity (mm hr <sup>-1</sup> )	Precipitation amount (mm)	Precipitation duration (hr)	PM <sub>10</sub> (%)	PM <sub>2.5</sub> (%)	PM <sub>10</sub> (μg m <sup>-3</sup> )	PM <sub>2.5</sub> (μg m <sup>-3</sup> )
<b>Quadrant 1 (N = 7590)</b>	Mean	<b>2.42</b>	<b>15.44</b>	<b>5.51</b>	<b>42.93</b>	<b>43.39</b>	<b>17.33</b>	<b>10.10</b>
Decreased PM <sub>10</sub> Decreased PM <sub>2.5</sub>	Standard deviation	2.84	23.58	5.45	25.18	26.37	18.22	10.75
<b>Quadrant 2 (N = 1373)</b>	Mean	<b>1.55</b>	<b>6.15</b>	<b>3.03</b>	<b>17.26</b>	<b>-36.22</b>	<b>5.28</b>	<b>-3.05</b>
Decreased PM <sub>10</sub> Increased PM <sub>2.5</sub>	Standard deviation	2.05	14.62	3.52	13.20	58.01	5.61	2.63
<b>Quadrant 3 (N = 3571)</b>	Mean	<b>1.67</b>	<b>4.42</b>	<b>2.46</b>	<b>-38.81</b>	<b>-56.62</b>	<b>-7.21</b>	<b>-5.34</b>
Increased PM <sub>10</sub> Increased PM <sub>2.5</sub>	Standard deviation	2.74	9.21	2.93	59.84	100.14	7.74	4.98
<b>Quadrant 4 (N = 851)</b>	Mean	<b>1.59</b>	<b>4.78</b>	<b>2.27</b>	<b>-19.56</b>	<b>19.95</b>	<b>-4.06</b>	<b>3.00</b>
Increased PM <sub>10</sub> Decreased PM <sub>2.5</sub>	Standard deviation	2.50	12.07	2.77	22.88	15.91	4.73	3.00

면별 강수 특성을 정량화 하였다(Fig. 16). PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 세정효과가 동시에 발생하는 1사분면에 포함되는 강수 사례는 전체의 42.24%(7,590개)에 해당한다(Fig. 16). 이 경우 강수 사례의 강수강도의 평균, 누적 강수량, 지속시간의 평균은 각각  $2.42 \pm 2.84 \text{ mm hr}^{-1}$ ,  $15.44 \pm 23.58 \text{ mm}$ ,  $5.51 \pm 5.45 \text{ hr}$ 이며, PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 세정효과가 부분적으로 발생하거나(Fig. 16의 2사분면과 4사분면) 나타나지 않은(Fig. 16의 3사분면) 다른 사분면보다 세 가지 강수 특성이 높은 값을 보였다(Table 2). 이는 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 세정효과는 상대적으로 강한 강수강도가 나타났을 때 효과적으로 발생한다는 선행연구 결과와 일치한다(Ouyang et al., 2015; Gao et al., 2019; Park et al., 2020). 강수 사례에 의해 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 세정효과가 동시에 발생할 때의 최종 세정효율의 평균은 PM<sub>10</sub>은  $42.93 \pm 25.18\%$ , PM<sub>2.5</sub>는  $43.39 \pm 26.37\%$ 였고, 최종 세정된 양은 PM<sub>10</sub>( $17.33 \pm 18.22 \mu\text{g m}^{-3}$ )이 PM<sub>2.5</sub>( $10.10 \pm 10.75 \mu\text{g m}^{-3}$ )보다 더 높은 값을 나타냈다(Table 2).

Figure 16의 3사분면은 강수 사례 시작 전보다 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>가 동시에 증가하는 사례로 전체 강수 사례의 19.88%(3,571개)에 해당한다. 강수 사례 종료 후 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>가 동시에 증가하였을 때 PM<sub>10</sub>은 평균  $38.81 \pm 59.84\%$ , PM<sub>2.5</sub>는 평균  $56.62 \pm 100.14\%$  증가하

였다. 그러나 실제 증가한 양은 PM<sub>10</sub>은  $7.21 \pm 7.74 \mu\text{g m}^{-3}$ 이고 PM<sub>2.5</sub>는  $5.34 \pm 4.98 \mu\text{g m}^{-3}$ 으로, 증가된 효율은 높게 나타났으나 1사분면의 최종 세정된 양과 비교하였을 때 3사분면에서 증가된 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 실제 양은 많지 않았다(Table 2). 이 경우 1사분면에서 나타나는 강수 특성과 비교하였을 때 상대적으로 강수강도가 약하고( $1.67 \pm 2.74 \text{ mm hr}^{-1}$ ), 누적 강수량이 가장 적으며( $4.42 \pm 9.21 \text{ mm}$ ), 강수 지속시간이 짧은( $2.46 \pm 2.93 \text{ hr}$ ) 경우에 발생하였다(Table 2). Zhou et al. (2020)은 강수강도 구간을 다섯 개의 구간으로 나누어 각 구간별 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 세정효과를 분석하였고, 그 결과 강수 발생 시 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>는 유사한 변동성을 보였으며 상대습도가 상대적으로 높고(약 90%) 강수강도가 상대적으로 약한 구간에서( $0 < \text{강수강도} (\text{mm hr}^{-1}) < 1.5$ ) PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 흡습성장(wet growth)이 발생하여 강수 전보다 미세먼지 질량농도가 높아짐을 밝혀냈다. Figure 16의 3사분면 사례의 경우 짧은 지속시간의 강수가 상대습도를 높이는 역할을 함과 동시에, 약한 강수강도로 인해 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 세정효과보다 흡습성장 효과가 더 우세하게 발생하여 강수 사례 종료 후 질량농도가 증가한 것으로 판단된다.

또한 강수 사례로 인해 PM<sub>10</sub>은 세정효과가 발생하고 PM<sub>2.5</sub>는 증가하는 사례와(Fig. 16의 2사분면), 반대



로 PM<sub>10</sub>은 증가하고 PM<sub>2.5</sub>는 세정효과가 발생하는 사례도 존재하였다(Fig. 16의 4사분면). 이 사분면들의 경우도 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 세정효과가 동시에 발생한 경우(Fig. 16의 1사분면)보다 강수 특성의 값이 낮게 나타났다. 2사분면의 강수강도의 평균, 누적 강수량, 지속시간은 각각  $1.55 \pm 2.05 \text{ mm hr}^{-1}$ ,  $6.15 \pm 14.62 \text{ mm}$ ,  $3.03 \pm 3.52 \text{ hr}$ 로 나타났으며, 4사분면의 강수강도의 평균, 누적 강수량, 지속시간은 각각  $1.59 \pm 2.50 \text{ mm hr}^{-1}$ ,  $4.78 \pm 12.07 \text{ mm}$ ,  $2.27 \pm 2.77 \text{ hr}$ 로 나타났다(Table 2).

정리하면 1, 2, 3, 4분면은 각각 전체 강수 사례의 42.24%, 7.64%, 19.88%, 4.74%를 차지하였으며, PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 세정효과가 모두 발생한 1사분면의 강수 사례가 가장 많았다. PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 세정효과가 모두 발생한 1사분면은 세정효과가 부분적으로 발생했거나 발생하지 않은 강수 사례와 비교 시 강수의 지속시간이 상대적으로 길고( $5.51 \pm 5.45 \text{ hr}$ ), 강수강도가 강하며( $2.42 \pm 2.84 \text{ mm hr}^{-1}$ ), 누적 강수량이 많다( $15.44 \pm 23.58 \text{ mm}$ ). Figure 16에서 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 세정효과가 동시에 발생한 1사분면과, 동시에 발생하지 않은 3사분면의 강수 특성을 비교해보면 1사분면의 사례는 3사분면 대비 강수강도는 약 145%, 누적 강수량은 약 349%, 지속시간은 약 224% 크다. 따라서 미세먼지 세정효과가 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>에 대해 모두 효과적으로 발생하기 위해서는 특정 강수 특성의 조건이 만족되어야 하며, 이러한 강수 사례가 인공증우를 통한 미세먼지 저감을 위한 실험 설계에 이론적 기반이 될 것이다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 서울시 25개 지역구에서 장기간 관측된 강수량과 미세먼지(PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>) 질량농도를 분석하여 개별적 장기간 변동 추이를 도출하고, 강수에 의한 미세먼지 세정효과를 분석하였다. PM<sub>10</sub>(2001~2021년)과 PM<sub>2.5</sub>(2015~2021년)의 연별, 계절별, 월별 평균 질량농도 변동 추이를 분석하였고, 연별, 계절별, 월별 강수강도와 누적 강수량을 산출하여 강수(2001~2021년)의 장기간 변동 추이를 확인하였다. 7년간(2015~2021년) 강수, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 자료를 사용하여 강수에 의한 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 세정효과를 분석하였다. 이를 위해 각 강수 사례를 지속시간별로 분류하고, 각 강수 시작 전부터 종료 시점까지의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 변화 추이를 확인하였다. 그리고 모든 강수 사례를 대상으로 강수로 인해 최종 세정된 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 양( $\mu\text{g m}^{-3}$ )과 최종 세정효율(%)을 동시에 비교하였으며, 이를 강수 사례의 강수강도의 평균( $\text{mm hr}^{-1}$ ), 누적 강수량( $\text{mm}$ ), 지속시간( $\text{hr}$ )의 세 가지 강수 특성의 함수로 정량화하였다. 본 연구에서 도출한 중요한 결론은 다음과 같다.

1) PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>는 2001년부터 2021년까지 감소 추

이를 보였으며 PM<sub>10</sub>의 감소 정도가 PM<sub>2.5</sub>보다 더 크게 나타났다. PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>는 봄과 겨울에 고농도가 나타났으며, PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 최고농도는 3월, 최저농도는 PM<sub>10</sub>은 8월, PM<sub>2.5</sub>는 9월에 나타났다.

- 2) 강수의 장기간 변동에서 강수강도는 21년간(2001~2021년) 증감 추이가 나타나지 않았고, 연중 7월에 가장 강한 강수강도가 나타났다. 21년간 연평균 누적 강수량은  $1289.10 \pm 118.58 \text{ mm}$ 이며 이중 여름 평균 누적 강수량은  $801.95 \pm 299.66 \text{ mm}$ 이며, 이는 전체 연 누적 강수량의 61.10%에 해당한다.
- 3) 평균적으로 강수에 의한 미세먼지 세정효과는 지속시간이 1시간부터 30시간인 모든 강수 사례에서 강수 시작 후 종료 시점까지 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>가 지속적으로 감소하였으며, 지속시간이 10시간 이상의 긴 강수 사례 중 일부 지속시간의 경우 강수 후반부에 다시 미세먼지 질량농도가 증가하는 추이를 보였다.
- 4) 모든 강수 사례에 대해 PM<sub>10</sub>은 평균  $39.59 \pm 55.68\%$  ( $14.58 \pm 16.85 \mu\text{g m}^{-3}$ ), PM<sub>2.5</sub>는 평균  $35.51 \pm 71.10\%$  ( $8.40 \pm 10.68 \mu\text{g m}^{-3}$ )의 세정효과가 발생하였으며, PM<sub>10</sub>의 세정효율(세정된 양)이 PM<sub>2.5</sub>보다 4.08%( $6.18 \mu\text{g m}^{-3}$ ) 높게 나타났다.
- 5) 강수 사례 발생 후 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>가 동시에 감소하는 강수 사례는 전체의 42.24%이다. 이때 PM<sub>10</sub>은 평균  $42.93 \pm 25.18\%$ , PM<sub>2.5</sub>는 평균  $43.39 \pm 26.37\%$ 의 세정효율을 보였으며, 이를 야기한 평균 강수 특성은 강수강도  $2.42 \pm 2.84 \text{ mm hr}^{-1}$ , 누적 강수량  $15.44 \pm 23.58 \text{ mm}$ , 지속시간  $5.51 \pm 5.45 \text{ hr}$ 이다 (Table 2의 1사분면).
- 6) 강수 사례 발생 전보다 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>가 동시에 증가하는 강수 사례는 전체 사례의 19.88%이다. 이때의 평균 강수 특성은 강수강도  $1.67 \pm 2.74 \text{ mm hr}^{-1}$ , 누적 강수량  $4.42 \pm 9.21 \text{ mm}$ , 지속시간  $2.46 \pm 2.93 \text{ hr}$ 으로(Table 2의 3사분면), PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 세정효과가 동시에 발생했을 때보다(Table 2의 1사분면) 상대적으로 약한 강수 특성을 보인다.

본 연구는 미세먼지 습성침적과정 중 강수입자에 의한 세정효과를 장기간 관측 자료를 기반으로 산출하였다. 서울시에서 7년간(2015~2021년) 발생한 강수 사례를 대상으로 강수에 의한 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 변동을 동시에 분석한 결과, 평균적으로 강수 사례 발생 중 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 모두 질량농도가 감소하는 경우 약 43%의 세정효율을 확인했다. 하지만 세정효과가 발생하지 않거나 부분적으로 발생한 사례 또한 존재함을 보였다. 이는 강수의 발생이 필연적으로 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 세정효과를 동시에 유발하는 것은 아님을 의미한다.

본 연구 결과는 장기간 관측 자료를 기반으로 다양한 지속시간의 강수 사례를 분석하였다는 점에서 장기적으로 인공증우를 통한 미세먼지 저감 실험 설계의 기초가 될 것이며, 향후 미세먼지 세정효과 연구 및 미세먼지와 강수 상호작용 연구에 기여할 것이다. 하지만 본 연구에는 추가연구를 통해 극복해야 하는 한계점이 존재한다. 향후 연구에서는 본 연구에서 미세먼지 세정효과 정량화를 위해 고려한 강수 특성(지속시간, 강수강도, 누적 강수량) 이외의 다른 강수 특성(예, 강수입자 크기분포)을 고려한 정량화가 수행되어야 하며, 또한 겨울철에 발생하는 강우와 강설에 의한 세정효과를 분리한 세정효과 계산이 필요하다.

본 연구는 미세먼지 세정효과에서 강수 이외에 타 기상변수의 영향을 최소화하고자 장기간 특성 분석을 목표로 하였기 때문에 풍향, 풍속 등의 기상 상태 및 전선과 같은 중관기상 상태가 고려되지 않았다는 한계점이 존재한다. 예를 들어 미세먼지 질량농도에 영향을 미칠 수 있는 기상요소 중 하나로 한랭 전선이 존재한다. 강수를 동반하지 않은 한랭 전선의 영향으로 미세먼지 질량농도가 변할 수 있으며, 한랭 전선이 통과하기 전에 미세먼지 질량농도가 증가하고 전선 통과 후 미세먼지 질량농도가 감소됨이 보고되었다(Feng and Wang, 2012). 긴 지속시간의 강수 사례의 경우 전선 통과와 같은 중관기상 상태가 변할 수 있는 충분한 시간을 갖기 때문에 강수로 인해 발생하는 미세먼지 세정효과와 동시에 강수 이외의 기상 상태 변화에 의한 미세먼지 농도변화가 나타날 수 있다. 따라서 향후 연구에서는 강수에 의한 미세먼지 세정효과와 함께 중관기상의 변화가 고려된 미세먼지 세정효과 연구가 필요하다.

## 감사의 글

이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020R1A2C1013278). 이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020R1A6A1A03044834). 이 연구는 기상청 R&D 기상조절과 구름물리의 지원을 받아 수행된 연구임(KMA2018-00224).

## REFERENCES

- Atkinson, R. W., I. C. Mills, H. A. Walton, and H. R. Anderson, 2015: Fine particle components and health - A systematic review and meta-analysis of epidemiological time series studies of daily mortality and hospital admissions. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, **25**, 208-214, doi:10.1038/jes.2014.63.
- Byun, S., and S.-Y. Kim, 2020: Has air pollution concentration increased over the past 17 years in Seoul, South Korea? : The gap between public perception and measurement data. *Korean Soc. Atmos. Environ.*, **36**, 240-248, doi:10.5572/KOSAE.2020.36.2.240.
- Cha, J. W., and Coauthors, 2019: Analysis of results and techniques about precipitation enhancement by aircraft seeding in Korea. *Atmosphere*, **29**, 481-499, doi:10.14191/Atmos.2019.29.4.481.
- Chate, D. M., P. S. P. Rao, M. S. Naik, G. A. Momin, P. D. Safai, and K. Ali, 2003: Scavenging of aerosols and their chemical species by rain. *Atmos. Environ.*, **37**, 2477-2484, doi:10.1016/S1352-2310(03)00162-6.
- Dockery, D. W., and C. A. Pope, 1994: Acute respiratory effects of particulate air pollution. *Annu. Rev. Public Health*, **15**, 107-132, doi:10.1146/annurev.pu.15.050194.000543.
- Feng, X., and S. Wang, 2012: Influence of different weather events on concentrations of particulate matter with different sizes in Lanzhou, China. *J. Environ. Sci.*, **24**, 665-674, doi:10.1016/S1001-0742(11)60807-3.
- Gao, B., W. Ouyang, H. Cheng, Y. Xu, C. Lin, and J. Chen, 2019: Interactions between rainfall and fine particulate matter investigated by simultaneous chemical composition measurements in downtown Beijing. *Atmos. Environ.*, **218**, 117000, doi:10.1016/j.atmosenv.2019.117000.
- Hur, S.-K., C.-H. Ho, J. Kim, H.-R. Oh, and Y.-S. Koo, 2021: Systematic bias of WRF-CMAQ PM<sub>10</sub> simulations for Seoul, Korea. *Atmos. Environ.*, **244**, 117904, doi:10.1016/j.atmosenv.2020.117904.
- Jung, W., K.-H. Chang, J. W. Cha, J. M. Ku, and C. Lee, 2022: Estimation of available days for a cloud seeding experiment in Korea. *J. Environ. Sci. Int.*, **31**, 117-129, doi:10.5322/jesi.2022.31.2.117.
- Kang, D.-I., S.-H. Kim, J. S. Kim, C. Park, and H. S. Kwon, 2022: Analysis of key management areas by deriving areas vulnerable to particulate matter in Korea. *J. Assoc. Korean Photo-Geographers*, **32**, 57-67, doi:10.35149/jakpg.2022.32.4.005.
- KEI, 2016: KEI focus. KEI Vol. 4, 20 pp [Available online at [https://library.kei.re.kr/dmme/img/001/018/KEI\\_%ed%8f%ac%ec%bb%a4%ec%8a%a4\\_%ed%86%b5%ea%b6%8c17%ed%98%b8.pdf](https://library.kei.re.kr/dmme/img/001/018/KEI_%ed%8f%ac%ec%bb%a4%ec%8a%a4_%ed%86%b5%ea%b6%8c17%ed%98%b8.pdf)].
- Kim, D. Y., M. Choi, and B. Yoon, 2019: Analysis of PM hot-spot emission zone in Seoul metropolitan area. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **35**, 476-501, doi:10.5572/

- KOSAE.2019.35.4.476.
- Kim, S., K.-H. Hong, H. Jun, Y.-J. Park, M. Park, and Y. Sunwoo, 2014: Effect of precipitation on air pollutant concentration in Seoul, Korea. *Asian J. Atmos. Environ.*, **8**, 202-211, doi:10.5572/ajae.2014.8.4.202.
- Kim, S., and S. Lee, 2013: The analysis of the weather characteristics by source region of the Asian Dust observed in South Korea. *J. Korean Geogr. Soc.*, **48**, 167-183.
- Kim, S. D., and C. H. Kim, 2008: The Physico-chemical character of aerosol particle in Seoul metropolitan area. *Seoul Inst.*, **9**, 23-33.
- Kim, S.-U., and K.-Y. Kim, 2020: Physical and chemical mechanisms of the daily-to-seasonal variation of PM<sub>10</sub> in Korea. *Sci. Total Environ.*, **712**, 136429, doi:10.1016/j.scitotenv.2019.136429.
- Kim, Y.-H., D.-Y. Choi, and D.-E. Chang, 2011: Characteristics of urban meteorology in Seoul metropolitan area of Korea. *Atmosphere*, **21**, 257-271, doi:10.14191/Atmos.2011.21.3.257.
- Kim, Y. P., and G. Lee, 2018: Trend of air quality in Seoul: policy and science. *Aerosol Air Qual. Res.*, **18**, 2141-2156, doi:10.4209/aaqr.2018.03.0081.
- KMA, 2021: *Climatological statistics guide*, 87 pp [Available online at <https://book.kma.go.kr/viewer/MediaViewer.ax?cid=37367&rid=5&moi=5513>].
- Lee, J.-J., and C.-H. Kim, 2008: Characteristics of recent occurrence frequency of Asian dust over the source regions - Analysis of the dust occurrences since 2002. *Atmosphere*, **18**, 493-506.
- Lee, K., H.-J. Baek, C. H. Cho, and W.-T. Kwon, 2011: The recent (2001~2010) changes on temperature and precipitation related to normals (1971~2000) in Korea. *Geogr. J. Korea*, **45**, 237-248.
- Li, Z., F. Niu, J. Fan, Y. Liu, D. Rosenfeld, and Y. Ding, 2011: Long-term impacts of aerosols on the vertical development of clouds and precipitation. *Nat. Geosci.*, **4**, 888-894.
- Lim, Y.-K., B.-Y. Kim, K.-H. Chang, J. W. Cha, and Y. H. Lee, 2022: Analysis of PM<sub>10</sub> reduction effects with artificial rain enhancement using numerical models. *Atmosphere*, **32**, 341-351, doi:10.14191/Atmos.2022.32.4.341.
- Nam, K.-P., D.-G. Lee, and L.-S. Jang, 2019: Analysis of PM<sub>2.5</sub> concentration and contribution characteristics in South Korea according to seasonal weather patterns in East Asia: Focusing on the intensive measurement periods in 2015. *J. Environ. Impact Assess.*, **28**, 183-200, doi:10.14249/eia.2019.28.3.183.
- Olszowski, T., 2016: Changes in PM<sub>10</sub> concentration due to large-scale rainfall. *Arab. J. Geosci.*, **9**, doi:10.1007/s12517-015-2163-2.
- Ouyang, W., B. Guo, G. Cai, Q. Li, S. Han, B. Liu, and X. Liu, 2015: The washing effect of precipitation on particulate matter and the pollution dynamics of rainwater in downtown Beijing. *Sci. Total Environ.*, **505**, 306-314, doi:10.1016/j.scitotenv.2014.09.062.
- Park, H., M. Byun, T. Kim, J.-J. Kim, J.-S. Ryu, M. Yang, and W. Choi, 2020: The washing effect of precipitation on PM<sub>10</sub> in the atmosphere and rainwater quality based on rainfall intensity. *Korean J. Remote Sens.*, **36**, 1669-1679, doi:10.7780/KJRS.2020.36.6.3.4.
- Park, J.-W., and B.-D. Hwang, 2017: Analysis of effects of regional air pollutants (PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>, CO) on respiratory disease. *Korean Public Health Res.*, **43**, 53-66, doi:10.22900/kphr.2017.43.3.005.
- Park, R.-S., and G.-M. Han, 2014: Contribution of long-range transported air pollution from China to particulate matter over Korean Peninsula. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, **14**, 26-36.
- Park, S., D. Yoon, H. Kong, S. Kang, and C. Lee, 2021: A case study on distribution characteristics of indoor and outdoor particulate matter (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) and Black Carbon (BC) by season and time of the day in apartments. *J. Environ. Health Sci.*, **47**, 339-355, doi:10.5668/JEHS.2021.47.4.339.
- Tan, Z., X. Li, M. Gao, and L. Jiang, 2020: The environmental story during the COVID-19 lockdown: How human activities affect PM<sub>2.5</sub> concentration in China? *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, **19**, 1001005, doi:10.1109/LGRS.2020.3040435.
- Wu, Y., Y. Wang, Y. Zhou, X. Liu, Y. Tang, Y. Wang, R. Zhang, and Z. Li, 2022: The wet scavenging of air pollutants through artificial precipitation enhancement: A case study in the Yangtze River Delta. *Front. Environ. Sci.*, **10**, 1027902, doi:10.3389/fenvs.2022.1027902.
- Yeo, M. J., Y. S. Im, S. S. You, E. M. Jeon, and Y. P. Kim, 2019: Long-term trend of PM<sub>2.5</sub> concentration in Seoul. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **35**, 438-450, doi:10.5572/KOSAE.2019.35.4.438.
- Zhou, Y., Y. Yue, Y. Bai, and L. Zhang, 2020: Effects of rainfall on PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in the middle reaches of the Yangtze River. *Adv. Meteorol.*, **2020**, 2398146, doi:10.1155/2020/2398146.