

Article

봄·여름철 대기 중 미세먼지와 빗물 수질 상관성 분석

박혜민 ¹⁾ · 김태용 ¹⁾ · 허준용 ¹⁾ · 양민준 ^{2)†}

Analysis of Correlation between Particulate Matter in the Atmosphere and Rainwater Quality During Spring and Summer of 2020

Hyemin Park ¹⁾ · Taeyong Kim ¹⁾ · Junyong Heo ¹⁾ · Minjune Yang ^{2)†}

Abstract: This study investigated seasonal characteristics of the particulate matter (PM) in the atmosphere and rainwater quality in Busan, South Korea, and evaluated the seasonal effect of PM₁₀ concentration in the atmosphere on the rainwater quality using multivariate statistical analysis. The concentration of PM in the atmosphere and meteorological observations (daily precipitation amount and rainfall intensity) are obtained from automatic weather systems (AWS) by the Korea Meteorological Administration (KMA) from March 2020 to August 2020. Rainwater samples (n = 216, 13 rain events) were continuously collected from the beginning of the precipitation using the rainwater collecting device at Pukyong National University. The samples were analyzed for pH, EC (electrical conductivity), water-soluble cations (Na⁺, Mg²⁺, K⁺, Ca²⁺, and NH₄⁺), and anions (Cl⁻, NO₃⁻, and SO₄²⁻). The concentration of PM₁₀ in the atmosphere was steadily measured before and after the precipitation with a custom-built PM sensor node. The measured data were analyzed using principal component analysis (PCA) and Pearson correlation analysis to identify relationships between the concentration of PM₁₀ in the atmosphere and rainwater quality. In spring, the daily average concentration of PM₁₀ (34.11 µg/m³) and PM_{2.5} (19.23 µg/m³) in the atmosphere were relatively high, while the value of daily precipitation amount and rainfall intensity were relatively low. In addition, the concentration of PM₁₀ in the atmosphere showed a significant positive correlation with the concentration of water-soluble ions ($r = 0.99$) and EC ($r = 0.95$) and a negative correlation with the pH ($r = -0.84$) of rainwater samples. In summer, the daily average concentration of PM₁₀ (27.79 µg/m³) and PM_{2.5} (17.41 µg/m³) in the atmosphere were relatively low, and the maximum rainfall intensity was 81.6 mm/h, recording a large amount of rain for a long time. The results indicated that there was no statistically significant correlation between the concentration of PM₁₀ in the atmosphere and rainwater quality in summer.

Key Words: particulate matter, precipitation, rainwater quality, correlation analysis, principal component analysis

Received December 7, 2021; Revised December 16, 2021; Accepted December 21, 2021; Published online December 27, 2021

¹⁾ 부경대학교 지구환경시스템과학부 지구환경과학전공 석사과정생 (Master Student, Division of Earth Environmental System Sciences (Major of Earth Environmental Sciences), Pukyong National University)

²⁾ 부경대학교 지구환경과학과 조교수 (Assistant Professor, Department of Earth and Environmental Sciences, Pukyong National University)

† Corresponding Author: Minjune Yang (minjune@pknu.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

요약: 본 연구는 부산지역의 봄철과 여름철 대기 중 미세먼지(particulate matter, PM) 농도 및 빗물 수질을 정량화하고 다변량 통계분석을 이용하여 계절(봄, 여름) 특성에 따른 대기 중 PM 농도가 빗물 수질에 미치는 영향을 평가하였다. 연구기간(2020년 3월-8월)동안 기상청 AWS (automatic weather system)에서 측정된 대기 중 PM 농도와 총 68번의 강우 특성 자료를 이용하였으며, 총 68번의 강우 이벤트 중 13회 강우를 대상으로 부산 부경대학교 캠퍼스에 집수장치를 설치하여 총 216개의 빗물 샘플을 수집하였다. 빗물의 pH와 전기전도도(electrical conductivity, EC)는 실시간 측정되었으며, 빗물 내 양이온(Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , Ca^{2+} , and NH_4^+) 및 음이온(Cl^- , NO_3^- , and SO_4^{2-}) 농도를 분석하였다. 또한, 자체 제작한 미세먼지 센서를 이용하여 강우 전후로 대기 중 PM_{10} 농도를 측정하였으며, 측정된 데이터를 바탕으로 주성분 분석(principal component analysis, PCA)과 피어슨 상관분석(Person correlation analysis)을 실시하여 대기 중 PM_{10} 농도와 빗물 수질 간 상관관계를 규명하였다. 연구결과, 부산지역의 일평균 대기 중 PM 농도 및 강우 특성은 계절적 차이가 존재하였으며, 대기 중 PM_{10} 농도와 빗물 수질 간 상관성 또한 상이하게 나타났다. 봄철의 경우, 일평균 대기 중 PM_{10} ($34.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 및 $\text{PM}_{2.5}$ ($19.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$)의 평균 농도는 상대적으로 높게 나타났고 일평균 누적 강우량 및 강우 강도는 상대적으로 낮게 나타났다. 또한, 대기 중 PM_{10} 농도는 빗물 수질과 유의미한 상관관계를 보였으며 대기 중 PM_{10} 농도는 pH ($r = -0.84$)는 감소시키고 EC ($r = 0.95$) 및 수용성 음이온($r = 0.99$) 농도는 증가시키는 요인으로 작용하였다. 여름철의 경우에는 일평균 PM_{10} ($27.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 및 $\text{PM}_{2.5}$ ($17.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$)의 평균 농도가 상대적으로 낮은 농도 분포를 보였으며, 최대 일평균 강우 강도는 $81.6 \text{ mm}/\text{h}$ 로 오랜 시간 많은 양의 비를 기록하였다. 상대적으로 낮은 대기 중 PM 농도와 높은 강우 강도로 인해 대기 중 PM_{10} 농도가 빗물 수질에 미치는 영향을 확인할 수 없었다.

1. 서론

최근 대기 중 미세먼지(particulate matter, PM)가 인체 질병 및 사망률과 밀접한 관련이 있음이 보고됨에 따라 미세먼지 관련 연구 및 관리 규제의 필요성이 증대되고 있다. 이에 따라 환경부에서는 미세먼지 측정망 도입(1995) 및 미세먼지 종합대책을 수립(2013)하여 연평균 미세먼지 농도는 지속적으로 감소되고 있으나, 세계보건기구(WHO)의 권고치($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에는 미치지 못하고 있는 실정이다(Kim, 2017; NIER, 2021).

대기 중 미세먼지 농도는 계절에 따라 상이한 특성을 보이는데 특히, 봄철과 여름철에 뚜렷한 특성 차이가 나타난다. 봄철 대기 중 미세먼지 농도는 연중 최대 농도 값을 보이며, 이는 편서풍으로 인한 중국 기원 황사의 다량 유입으로 인해 발생한다(Kim *et al.*, 2012; Son *et al.*, 2012). 반면, 여름철의 대기 중 미세먼지 농도는 남동계절풍 및 강우 등의 계절적 특성으로 인해 연중 최소 농도 값을 보인다. 최근 환경부에서는 미세먼지 계절 관리제를 도입하여 고농도 미세먼지 빈발 시기에 대한 강화된 저감 관리 정책을 통해 계절 및 지역 특성을 반영한 미세먼지 관리 정책을 시행하고 있다(Son *et al.*, 2020).

대기 중 미세먼지는 자연 및 인위적 요인에 따라 복

합적으로 발생하며 다양한 기상인자에 의해 이동 및 소멸의 과정을 거친다(Hwang *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2019). 이에 따라 대기 중 미세먼지 농도와 기상인자 간 상관관계를 규명한 연구들이 활발히 진행되고 있다(Yang *et al.*, 2007; Tai *et al.*, 2010; Tian *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2017). Park *et al.* (2020a) 에서 부산 지역을 대상으로 다변량 통계분석을 이용하여 대기 중 미세먼지 농도에 대한 다양한 기상인자의 영향을 평가한 결과, 누적강우량과 강우 강도가 대기 중 미세먼지 농도 감소에 중요한 요인임을 시사하였다. 그러나 대기 중 미세먼지는 초기 강우에 습식 침착되어 산성비 등 빗물 수질 변화를 야기하고 토양 및 지표수에 유입되어 생태계 교란 등의 피해가 발생할 수 있다. 이에 따라 Park *et al.* (2020b)에서는 강우 강도에 따른 대기 중 미세먼지 저감효과와 빗물 수질 특성을 규명하였으나 계절적 특성에 따른 변화 추이 분석에는 어려움이 따른다. 따라서 본 연구의 목적은 부산 지역을 대상으로 1) 봄철 및 여름철 대기 중 미세먼지 농도 및 빗물 수질을 정량화하고 2) 대기 중 미세먼지 농도와 빗물 수질 간 상관성 분석을 통해 계절별 특성에 따른 대기 중 미세먼지 농도가 빗물 수질에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

2. 연구 방법

1) 연구지역 기후 및 미세먼지 특성

연구지역인 부산은 한반도 남동단에 위치하여 대한해협과 접하고 있으며 해양성 기후가 나타난다(KMA, 2017). 국가통계포털(<http://kosis.kr>)에 따르면 2009년-2018년 동안 부산시의 연평균 기온은 15.1°C로 평균 기온은 0.1°C 감소하였으나 기온의 최고 극값과 최저 극값이 각각 3.9°C, 2.3°C 증감하는 특징을 보였으며, 혹서기와 혹한기의 기온차가 커진 것으로 나타났다. 최근 10년간 연평균 강우량은 1,545 mm로 나타났으며, 봄철(3-5월)과 여름철(6-8월)의 월 평균 강우량은 각각 123.4 mm와 189.6 mm로 여름철에 약 1.5배 높았으며 강우 강도 또한 큰 차이를 보인다.

대기정책지원시스템(clean air policy support system, CAPSS) 배출량 자료에 따르면 2018년 부산 지역 대기 중 오염물질 배출량은 NO_x, SO_x, PM₁₀이 각각 49,951 ton, 7,897 ton, 6,886 ton으로 높게 나타났으며 PM₁₀의 주요 오염원인은 도로재, 건설공사 등으로 발생하는 비산먼지가 4,720 ton으로 가장 많았으며 항공, 해상선박 등으로 발생하는 비도로이동 오염원이 1,459 ton, 자동차로 인한 도로이동 오염원이 291 ton으로 나타났다.

2) 강우 및 미세먼지 모니터링

본 연구기간(2020년 3-8월) 동안 68번 강우 이벤트의 강우 강도와 일평균 누적 강우량은 기상청에서 운영하는 부산 남구 관측소의 AWS (automatic weather system)에서 측정된 데이터를 활용하였다. 대기 중 미세먼지는 입경에 따라 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁로 분류되며 본 연구에서는 PM₁₀과 PM_{2.5}를 대상으로 하였다. 대기 중 미세먼지 농도는 부경대학교 충무관 옥상(35.13°N, 129.10°E)에서 PMS5003 (Plantower, China)센서를 이용한 미세먼지 센서노드를 사용하였다. 센서 노드는 광산란 방식을 이용하여 에어로졸의 농도를 측정하였고 센서의 정확도를 위해 기준기기(air quality monitoring station, 광주(서석동))와 비교측정을 통한 보정을 실시하였다. 보정 결과 센서노드와 기준기기 간 측정치는 높은 상관관계(linear slope: 1.00, R² > 0.83)를 보였으며 이를 통해 센서노드의 신뢰도를 검증하였다.

3) 빗물 샘플링 및 화학적 특성 분석

빗물 샘플링은 2020년 3-8월 동안 총 13번의 강우를 대상으로 수행되었으며, 빗물 샘플은 미세먼지 측정 지점으로부터 동쪽으로 약 100 m에 위치한 부경대학교 환경해양관 옥상(35.14°N, 129.11°E)에서 집수되었다. 집수장치는 80 cm × 50 cm × 30 cm 크기의 폴리프로필렌(polypropylene, PP) 박스에 폴리염화비닐(polyvinyl chloride, PVC) 집수면으로 구성되어 자체 제작하였으며 최적의 집수 및 운반 효율을 고려하여 제작되었다. 총 3개의 집수장치를 2 m 간격으로 배치하여 강우 시작 시점부터 50 mL의 빗물 샘플을 연속적으로 수집하였다. 총 216개의 빗물 샘플이 수집되었으며 빗물의 pH와 전기전도도(electronic conductivity, EC)는 집수 즉시 YSI Professional Plus multiparameter meter (YSI Incorporated, USA)를 이용하여 측정하였으며, 양이온(Na⁺, Mg²⁺, K⁺, Ca²⁺, and NH₄⁺)과 음이온(Cl⁻, NO₃⁻, and SO₄²⁻) 농도는 지구환경융합분석센터 내 Ion chromatography (DIONEX, USA)를 이용하여 분석하였다.

4) 데이터 분석

계절별 대기 중 미세먼지 농도가 빗물 수질에 미치는 영향을 규명하기 위해 주성분 분석법을 수행하였다. 주성분 분석(principal component analysis, PCA)은 고유 벡터 기반의 다변량 분석법 중 하나로서 데이터의 해석을 용이하게 하기 위해 고차원 데이터의 차원을 축소하여 저차원 데이터로 환원하는 기법을 말한다. 차원 축소 시 데이터를 한 개의 축으로 사상시켰을 때 분산이 가장 큰 주성분 축에 데이터를 선형 결합함으로써 기존 데이터의 정보 손실을 최소화할 수 있다. 선형결합식으로 나타난 주성분 축을 이용한 데이터의 해석을 통해 기존 데이터의 분포를 최대한 반영한 상태로 데이터 간 내재된 의미를 해석할 수 있다. 주성분 분석의 변수는 빗물의 EC, 산성도(pH), 음이온 농도(Anions), 양이온 농도(Cations)와 대기 중 미세먼지 농도(PM₁₀)로 결정하여 분석하였다. PCA 분석 과정에 관련된 자세한 내용은 Park *et al.* (2020a)에서 확인 가능하며 본 연구에서는 파이썬 환경의 오픈소스 머신러닝 라이브러리인 scikit-learn (<https://scikit-learn.org/>)을 사용하여 구현하였다.

대기 중 미세먼지 농도와 빗물 수질 인자(pH, EC, 음

이온(NH_4^+ , Cl^- , NO_3^- , and SO_4^{2-}) 및 양이온(Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , and NH_4^+) 간 상관관계를 규명하기 위해 피어슨 상관관계 분석(Pearson correlation analysis)을 수행하였다. 피어슨 상관계수는 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

여기서, \bar{x} 와 \bar{y} 는 각 변수의 평균을 뜻하며 식 (1)의 분자항은 두 변수의 공분산(covariance)을 나타내고 분모항은 두 변수의 표준 편차 간 곱을 나타낸다. 또한, 계절(봄, 여름)에 따른 대기 중 PM_{10} 농도와 빗물 수질 간 상관관계 검증을 위해 스튜던트 t-검정 중 양측검정을 실시하였다. 본 연구에서 유의수준(significance level)은 0.05로 설정하였으며, 유의확률(p-value)이 0.05 이상일 경우 귀무가설을 채택하고, 0.05 이하일 경우 대립가설을 채택하였다. t-검정의 귀무가설은 두 인자 간 상관관계가 없다($r=0$)이며, 대립가설은 두 인자 간 상관관계가 있다($r \neq 0$)이다.

3. 결과 및 토의

1) 강우와 대기 중 PM 농도의 계절적 특성

연구기간 2020년 3-8월을 대상으로 계절별 대기 중 PM 농도와 강우 특성을 Fig. 1에 제시하였다. 계절에 따른 대기 중 PM 농도의 입도 별 분석 결과, 봄철 대기 중 PM_{10} 농도는 평균 $34.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최소 $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위로 나타났으며 여름철의 경우 대기 중 PM_{10} 농도는 $6-70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위로 나타났고 평균 $27.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 상대적으로 낮은 농도로 나타났다(Fig. 1(a)). 또한, 계절별 대기 중 평균 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 봄철과 여름철 각각 $19.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $17.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, 봄철의 농도가 상대적으로 높게 나타났으나, 최대 대기 중 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 여름철에 $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 상대적으로 높게 나타났다(Fig. 1(b)). 부산지역 2020년도 대기 중 PM 농도는 계절적 차이가 존재하였으며, 상대적으로 봄철에 대기 중 PM 농도가 높게 나타났다.

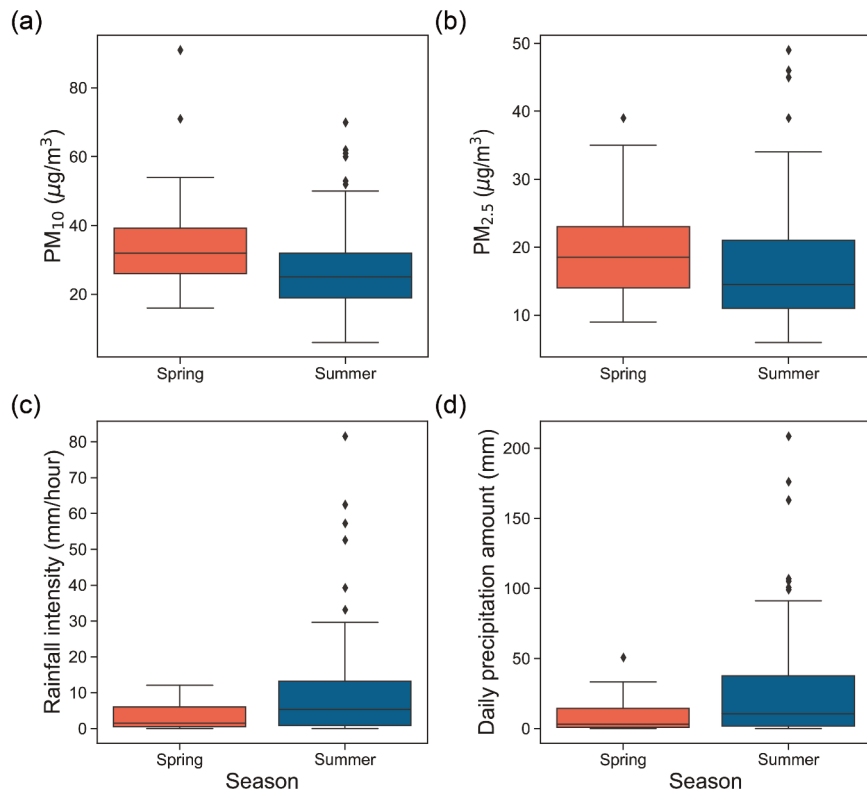


Fig. 1. Seasonal variations of the average (a) PM_{10} , (b) $\text{PM}_{2.5}$ concentration, (c) rainfall intensity, and (d) daily precipitation amount in spring and summer.

연구 기간(2020년 3-8월) 총 68번의 강우 이벤트를 대상으로 계절별 강우 강도와 일평균 누적 강우량을 분석한 결과, 여름철의 경우 45번의 강우 이벤트가 있었으며 일평균 누적 강우량은 최대 208.7 mm로 상당히 많은 양의 비를 기록하였다(Fig. 1(d)). 또한, 여름철 일평균 강우 강도가 최대 81.6 mm/h까지 다양한 범위로 나타났다(Fig. 1(c)). 반면, 봄철의 경우 23번의 강우 이벤트가 있었으며 일평균 누적 강우량은 50.8 mm로 상대적으로 적은 양의 비를 기록했다. 또한, 강우 강도는 최대 12.1 mm/h로 시간당 강우량이 여름철에 비해 상대적으로 낮게 나타났다.

2) 계절별 빗물 수질 특성

연구 기간 13번의 강우 이벤트를 대상으로 총 216개 빗물 샘플의 수질 특성을 Fig. 2에 제시하였다. 계절별 빗물 수질 분석 결과, 봄철 빗물의 EC는 최대 112.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 높게 나타났으며(Fig. 2(a)), pH는 최소 3.94에서 최대 4.99 범위로 산성도가 높게 나타났다(Fig. 2(b)). 또한, 빗

물 내 양이온과 음이온 농도는 각각 최대 13.97 mg/L, 31.05 mg/L로 상대적으로 음이온의 농도가 높게 나타났다(Fig. 2(c), and (d)). 여름철의 경우, 빗물의 EC는 최대 87.53 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 상대적으로 낮게 나타났으며 pH는 4.29-5.59 범위로 나타났다. 빗물 내 양이온과 음이온 농도는 각각 12.34 mg/L, 9.13 mg/L로 상대적으로 양이온의 농도가 높게 나타났다. 계절에 따른 빗물의 수질 특성을 비교·분석한 결과, 봄철 빗물의 EC와 양이온 및 음이온 농도가 높게 나타났으며 pH는 상대적으로 낮게 나타나 여름철대비 산성도가 높은 빗물 특성을 보였다.

연구기간 봄철(2020년 3-5월)과 여름철(2020년 6-8월)에 수집된 총 216개의 빗물 샘플을 대상으로 미세먼지를 구성하는 수용성 양이온(NH_4^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , and K^+)과 음이온(Cl^- , NO_3^- , and SO_4^{2-})의 농도를 분석한 결과를 누적 막대 그래프(stacked bar plot)를 이용하여 Fig. 3에 제시하였다. 봄철 수용성 이온의 평균 농도는 19.22 mg/L로 상대적으로 높게 나타났다. 특히, 빗물 내 NO_3^- 의 평균 농도가 6.69 mg/L로 가장 높게 검출되었

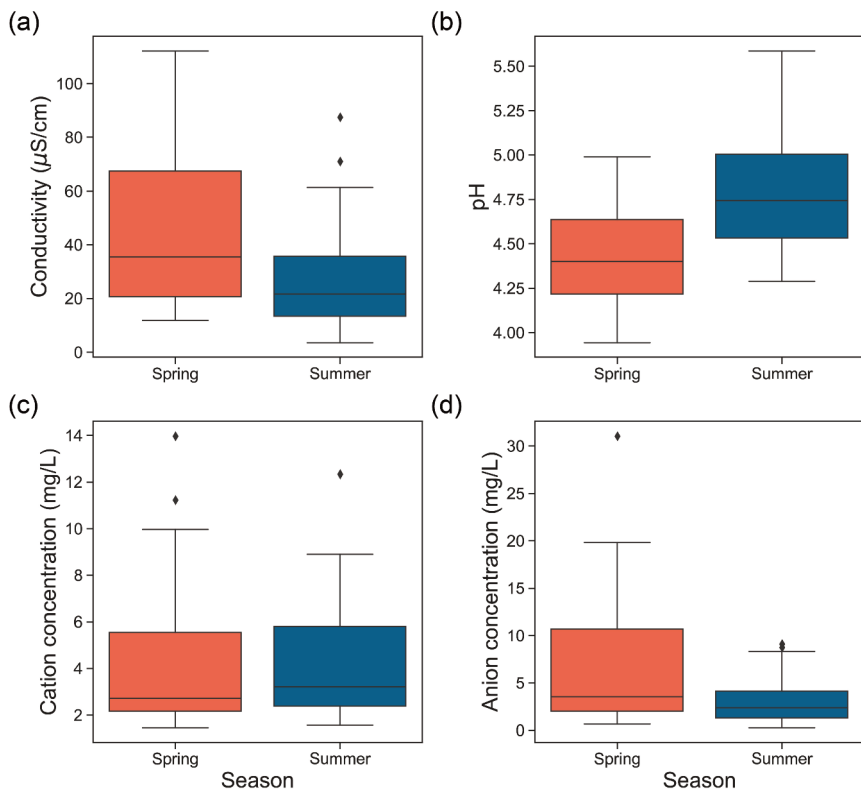


Fig. 2. Seasonal variations of rainwater quality ((a) conductivity, (b) pH, (c) cations, and (d) anions) in spring and summer.

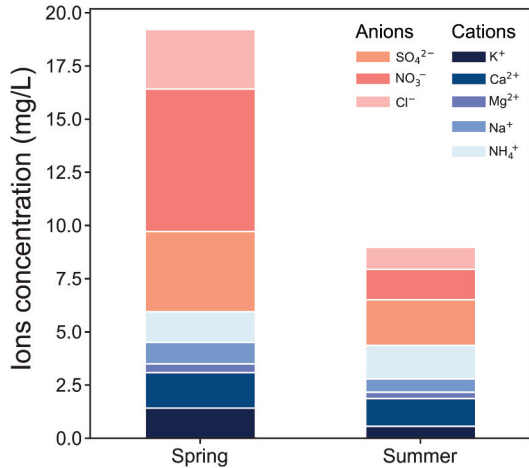


Fig. 3. Distribution of ion concentrations in rainwater samples with two different seasons; spring and summer.

으며 SO₄²⁻ (3.78 mg/L), Cl⁻ (2.81 mg/L) 순으로 음이온의 비율이 상대적으로 높게 검출되었다. 양이온의 경우 Ca²⁺ (1.66 mg/L), NH₄⁺ (1.44 mg/L), K⁺ (1.42 mg/L) 순으로 상대적으로 낮은 농도로 검출되었으며 Mg²⁺의 평균 농도는 0.42 mg/L로 빗물 내 미량으로 검출되었다. 여름철 빗물의 총 수용성 이온의 농도는 8.98 mg/L로 봄철 대비 낮은 농도로 검출되었으며, 빗물 내 SO₄²⁻ (2.15 mg/L), NH₄⁺ (1.56 mg/L), NO₃⁻ (1.43 mg/L)의 평균 농도가 높게 나타났다.

3) 계절별 대기 중 PM₁₀과 빗물 수질 간 상관관계 분석

계절에 따른 대기 중 PM₁₀ 농도와 빗물 수질(EC, pH, and concentration of anion and cation) 간 상관성 분석을 위한 주성분 분석 결과를 Fig. 4에 나타내었으며, 주성분 축에 대한 각 인자들의 선형결합계수를 Table 1과 Table 2에 제시하였다. 봄철을 대상으로 주성분 분석 결과, 전체 데이터 분산(variance)의 77.25% 설명력을 가지는 PC1축의 고유 값은 5.15로 가장 높은 비율로 나타났으며 PC2의 고유 값은 1.39로 전체 데이터의 20.84% 설명력을 가진다(Fig. 4(a)). 봄철 PC1에 대한 대기 중 PM₁₀ 농도, 빗물의 EC, 빗물 내 음이온 농도의 선형결합계수는 각각 0.51, 0.50, 0.50으로 상대적으로 높은 양의 계수

Table 1. Spring loadings of 5 variables (PM₁₀ concentration, conductivity, pH, and concentration of cations and anions) for the two principal components; PC1 and PC2

Variables	PC1	PC2
PM ₁₀ (µg/m ³)	0.51	-0.05
EC (µS/cm)	0.50	-0.03
pH	-0.45	-0.46
Concentration of cations (mg/L)	0.22	-0.88
Concentration of anions (mg/L)	0.50	0.05
Eigenvalue	5.15	1.39
Cumulative % of variance	77.25	98.09

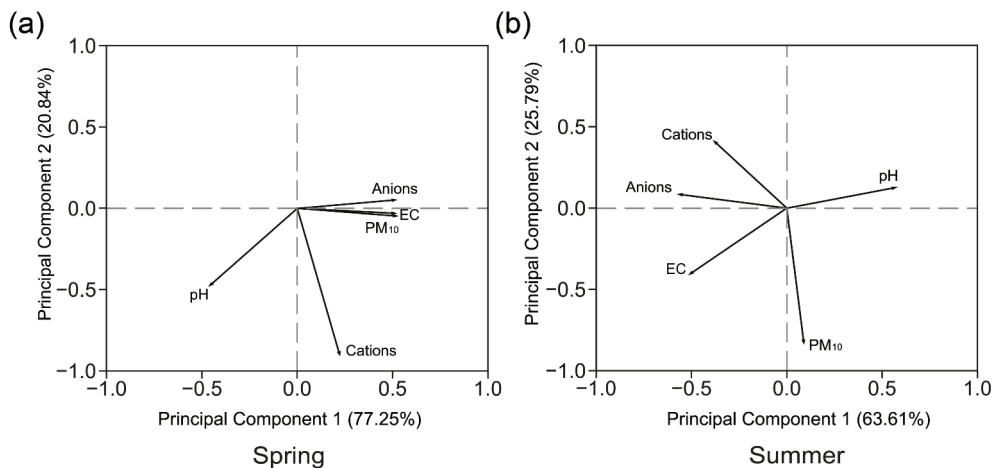


Fig. 4. PCA of concentration of PM₁₀ in the atmosphere and chemical characteristics in rainwater with two different seasons; (a) spring loadings of 5 variables for two principal components (PC1 and PC2), (b) summer loadings of 5 variables for two principal components.

Table 2. Summer loadings of 5 variables (Conductivity, pH, PM₁₀ concentration, and concentration of cations and anions) for the two principal components: PC1 and PC2

Variables	PC1	PC2
PM ₁₀ (μg/m ³)	0.09	-0.81
EC (μS/cm)	-0.50	-0.40
pH	0.55	0.12
Concentration of cations (mg/L)	-0.37	0.40
Concentration of anions (mg/L)	-0.55	0.08
Eigenvalue	4.24	1.72
Cumulative % of variance	63.61	89.40

값을 가지는 반면, pH의 선형결합계수는 -0.45로 높은 음의 계수 값을 보였다(Table 1). 빗물 내 양이온 농도는 PC1에 대하여 선형결합계수가 0.22로 낮은 양의 계수 값을 가지며 PC1에 대하여 영향이 적은 것으로 판단된다(Table 1). 따라서, PC1은 대기 중 PM₁₀ 농도가 빗물 내 양이온 농도를 제외한 빗물 수질 인자에 미치는 영향을 지시하는 축으로 판단되며, 봄철의 경우 대기 중 PM₁₀ 농도의 증가에 따라 빗물의 EC, 음이온 농도는 증가하고 빗물의 pH는 감소하는 것으로 해석될 수 있다.

여름철 대기 중 PM₁₀ 농도와 각각의 빗물 수질 특성을 대상으로 주성분 분석 결과, PC1은 전체 데이터 분산의 63.61%의 설명력을 가졌으며 고유 값은 4.24로 높은 비율로 나타났다(Fig. 4(b)). PC2의 고유 값은 1.72로 전체 데이터 분산율은 25.79%로 나타났으며, 전체 데이터

누적 분산율은 89.40%로 나타났다(Table 2). 여름철 PC1에 대한 빗물의 EC, 빗물 내 음이온 농도의 선형결합계수는 각각 -0.50, -0.55로 상대적으로 높은 음의 계수 값을 가지는 반면, pH의 선형결합계수는 0.55로 높은 양의 계수 값을 보였다(Table 2). 대기 중 PM₁₀ 농도는 PC1에 대해 상대적으로 낮은 계수값(0.09)을 보였으며, PC1에 대한 영향은 적은 것으로 판단된다. PC2에 대한 대기 중 PM₁₀ 농도의 선형결합계수는 -0.81로 높은 음의 계수 값을 보이는 반면, 빗물의 EC, pH, 빗물 내 양이온 및 음이온의 선형결합계수는 각각 -0.40, 0.12, 0.40, 0.08로 PC2에 대한 영향이 미비한 것으로 판단된다. 따라서 PC1은 빗물 수질 인자 간 상관성을 지시하는 축으로 해석되며 여름철의 경우 대기 중 PM₁₀ 농도와 빗물 수질 간 상관성은 확인되지 않았으나, 다양한 빗물 수질 인자 간 상관성을 확인할 수 있었다. 빗물의 EC 및 빗물 내 이온 농도가 증가할수록 pH가 감소되는 것으로 판단된다. 연구결과, 상대적으로 대기 중 PM₁₀ 농도가 높고 강우 강도가 낮았던 봄철에는 대기 중 PM₁₀ 농도가 빗물 수질에 영향을 미치는 것으로 판단되며, 대기 중 PM₁₀ 농도가 낮고 강우 강도가 높은 여름철에는 대기 중 PM₁₀ 농도와 빗물 수질 간 상관성이 미비한 것으로 해석할 수 있다.

대기 중 PM₁₀ 농도와 빗물 수질 특성 간 상관성을 규명하기 위해 피어슨 상관 분석을 실시하였고, 피어슨 상관 계수를 히트맵(heat map)을 이용하여 Fig. 5에 제시하였다. Park *et al.* (2020a)에 따르면 대기 중 PM₁₀ 농도는 강

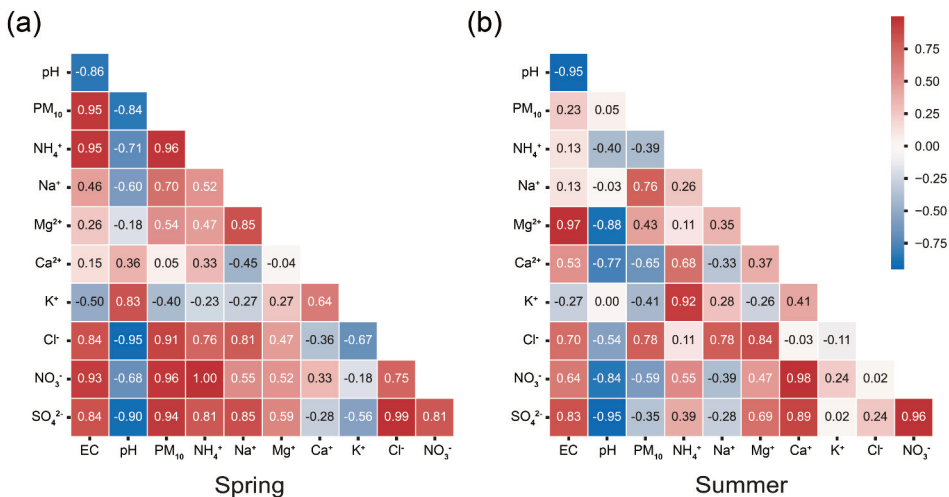


Fig. 5. The correlation coefficients between the concentration of PM₁₀ and water-soluble ions with two different seasons; (a) spring and (b) summer.

우 강도 5 mm/h 이상 높을 경우에 빗물 수질에 영향을 미치는 것으로 판단되었으므로 본 연구에서는 강우 강도 5 mm/h 이상 강우 이벤트를 대상으로 상관성을 분석하였다. 계절에 따라 대기 중 PM₁₀ 농도와 빗물 수질 특성 간 상관관계를 분류하였으며 Fig. 5(a)는 봄철을 지시하고 Fig. 5(b)는 여름철의 결과를 나타내었다. 봄철의 경우 대기 중 PM₁₀ 농도는 빗물의 EC ($r=0.95, p<0.05$)와는 유의한 양의 상관관계를 보였으며 빗물의 pH ($r=-0.84, p<0.05$)와는 유의한 음의 상관관계를 보였다. 또한, 대기 중 PM₁₀ 농도와 빗물 내 수용성 이온 간 상관관계 분석 결과, Cl⁻ ($r=0.91, p<0.05$), NO₃⁻ ($r=0.96, p<0.05$), SO₄²⁻ ($r=0.94, p<0.05$), NH₄⁺ ($r=0.96, p<0.05$) 이온 농도와 유의한 양의 상관관계를 보인 반면, NH₄⁺를 제외한 양이온(Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺) 농도와는 상관관계를 보이지 않았다(Fig. 5(a)). 따라서, 봄철의 경우에는 대기 중 PM₁₀ 농도가 증가할수록 빗물의 EC는 증가되고 pH는 감소되는 요인으로 작용하며, 빗물 내 음이온 농도 증가에 영향을 미친 것으로 판단된다. 반면, 여름철 대기 중 PM₁₀ 농도가 빗물의 EC ($r=0.23$)와 pH ($r=0.05$)에 미치는 영향을 확인하지 못했으며, 빗물 내 양이온($r=-0.31$) 및 음이온($r=-0.29$) 평균 농도와 약한 상관관계가 나타났다(Fig. 5(b)). 연구결과, 대기 중 PM₁₀ 농도가 높고 강우 강도가 낮은 봄철에 대기 중 PM₁₀ 농도가 빗물 수질 특성에 영향을 미치는 반면, 대기 중 PM₁₀ 농도가 낮고 강우 강도가 높은 여름철에는 대기 중 PM₁₀ 농도가 빗물 수질에 미치는 영향을 확인할 수 없었다.

빗물의 EC 및 pH와 빗물 내 수용성 이온 농도간 상관관계 분석 결과, 계절에 따라 상관성이 상이하게 나타났다. 봄철의 경우 빗물의 EC는 음이온(Cl⁻ ($r=0.84, p<0.05$), NO₃⁻ ($r=0.93, p<0.05$), SO₄²⁻ ($r=0.84, p<0.05$)) 과 높은 양의 상관관계가 나타난 반면, NH₄⁺ ($r=0.95, p<0.05$)를 제외한 양이온과는 상관관계를 확인할 수 없었다. 또한, 빗물의 pH는 음이온(Cl⁻ ($r=-0.95, p<0.05$), NO₃⁻ ($r=-0.68, p<0.05$), SO₄²⁻ ($r=-0.90, p<0.05$))와 높은 음의 상관관계를 확인할 수 있었다. 반면, 여름의 경우 상대적으로 빗물 수질 간 상관관계를 확인하기 어려웠다. 연구결과, 상대적으로 대기 중 PM₁₀ 농도가 높고 강우 강도가 낮은 봄철의 경우 대기 중 PM₁₀을 구성하는 수용성 음이온 성분은 빗물의 EC 및 pH에 상당한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 부산지역을 대상으로 2020년 3월부터 8월까지 계절별 대기 중 PM 농도와 빗물 수질을 규명하였으며, 다변량 분석을 통해 계절에 따른 대기 중 PM₁₀ 농도와 빗물 수질간 상관성을 평가하였다. 부산지역의 일평균 대기 중 PM 농도와 강우의 특성은 계절적 차이가 존재하였다. 봄철의 경우, 일평균 대기 중 PM₁₀ 농도와 PM_{2.5} 농도가 각각 평균 34.11 µg/m³, 19.23 µg/m³로 상대적으로 높게 나타났고 일평균 누적 강우량 및 강우 강도는 상대적으로 낮게 나타났다. 빗물 수질 분석 결과 pH는 평균 4.4로 낮게 나타났으며 EC는 평균 35.48 µS/cm로 상대적으로 높게 나타났다. 또한, 빗물 내 수용성 이온은 NO₃⁻ (6.69 mg/L), SO₄²⁻ (3.78 mg/L), Cl⁻ (2.81 mg/L) 순으로 음이온의 비율이 높게 검출되었다. 반면, 여름철에는 일평균 대기 중 PM₁₀ 농도(27.79 µg/m³)와 PM_{2.5} 농도(17.41 µg/m³)가 낮았으며, 강도 높은 강우가 오랜 시간 지속되어 많은 양의 비를 기록했다. 빗물의 수질은 상대적으로 산성도가 낮았으며, 수용성 이온 농도가 낮게 검출되었고 SO₄²⁻ (2.15 mg/L), NH₄⁺ (1.56 mg/L), NO₃⁻ (1.43 mg/L)의 비율이 높게 나타났다. 계절에 따라 대기 중 PM₁₀ 농도와 빗물 수질 간 상관성이 상이하게 나타나는데, 대기 중 PM₁₀ 농도가 높고 강우 강도가 낮은 봄철의 경우, 대기 중 PM₁₀ 농도가 빗물 수질의 pH는 감소시키고 EC 및 수용성 이온의 농도는 증가시키는 요인으로 작용하는 반면, 대기 중 PM₁₀ 농도가 낮고 강우 강도가 높은 여름철에서는 PM₁₀ 농도가 빗물 수질에 미치는 영향을 규명할 수 없었다.

사사

본 연구는 2021년 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원(KEITI)의 지원을 받아 수행한 과제입니다.

이번 연구는 2021년도 교육부의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임(2021R1A6C101A415).

References

- Hwang, Y.J., S.J. Lee, H.S. Do, Y.K. Lee, T.J. Son, T.G. Kwon, J.W. Han, D.H. Kang, and J.W. Kim, 2009. The Analysis of PM₁₀ Concentration and the Evaluation of Influences by Meteorological Factors in Ambient of Daegu Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 25(5): 459-471 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.Y., J.Y. Lee, Y.P. Kim, S.B. Lee, H.C. Jin, and G.N. Bae, 2012. Seasonal characteristics of the gaseous and particulate PAHs at a roadside station in Seoul, Korea, *Atmospheric Research*, 116: 142-150.
- Kim, Y.P., 2017. Research and Policy Directions against Ambient Fine Particles, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(3): 191-204 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.C., E.H. Kim, C.H. Bae, J.H. Cho, B.U. Kim, and S. Kim, 2017. Regional contributions to particulate matter concentration in the Seoul metropolitan area, South Korea: Seasonal variation and sensitivity to meteorology and emissions inventory, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(17): 10315-10332.
- Lee, S., J. Jeong, and M. Choi, 2019. Hydrometeorological Drivers of Particulate Matter Using Bayesian Model Averaging, *Proc. of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Yokohama, JPN, Jul. 28-Aug. 2, pp. 7634-7637.
- Park, H., T. Kim, and M. Yang, 2020a. The effect of meteorological factors on PM₁₀ depletion in the atmosphere and evaluation of rainwater quality, *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(6-13): 1733-1741 (in Korean with English abstract).
- Park, H., M. Byun, T. Kim, J.J. Kim, J.S. Ryu, M. Yang, and W. Choi, 2020b. The washing effect of precipitation on PM₁₀ in the atmosphere and rainwater quality based on rainfall intensity, *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(6-13): 1669-1679 (in Korean with English abstract).
- Son, J.Y., J.T. Lee, K.H. Kim, K. Jung, and M.L. Bell, 2012. Characterization of fine particulate matter and associations between particulate chemical constituents and mortality in Seoul, Korea, *Environmental Health Perspectives*, 120(6): 872-878.
- Son, K., M. Bae, S. You, E. Kim, Y.H. Kang, C. Bae, Y. Kim, H.C. Kim, B.U. Kim, and S. Kim, 2020. Meteorological and Emission Influences on PM_{2.5} Concentration in South Korea during the Seasonal Management: A Case of December 2019 to March 2020, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(4): 442-463 (in Korean with English abstract).
- Tai, A.P., L.J. Mickley, and D.J. Jacob, 2010. Correlations between fine particulate matter (PM_{2.5}) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of PM_{2.5} to climate change, *Atmospheric Environment*, 44(32): 3976-3984.
- Tian, G., Z. Qiao, and X. Xu, 2014. Characteristics of particulate matter (PM₁₀) and its relationship with meteorological factors during 2001-2012 in Beijing, *Environmental Pollution*, 192: 266-274.
- Yang, L.X., D.C. Wang, S.H. Cheng, Z. Wang, Y. Zhou, X.H. Zhou, and W.X. Wang, 2007. Influence of meteorological conditions and particulate matter on visual range impairment in Jinan, China, *Science of the Total Environment*, 383(1-3): 164-173.