

도시지역 빗물의 수질 특성 및 이용 가능성 연구

먹는물분석팀

조혜윤 · 김예슬 · 최현숙 · 남경래 · 석은주 · 배정은
이슬비 · 윤종철 · 박진아 · 김현정 · 이목영

A Study on the Water Quality Characteristics and Availability of Rainwater in Urban Areas

Drinking Water Analysis Team

**Hye-yoon Cho, Yea-seul Kim, Hyun-suk Choi, Kyung-rae Nam,
Eun-joo Seok, Jung-eun Bae, Seul-bi Lee, Jong-cheol Yoon,
Jin-a Park, Hyun-jung Kim and Mok-young Lee**

Abstract

We investigated the water quality of rainwater in urban areas to determine its potential as drinking water, living water, or re-use water, and investigated the connection between rainwater and atmospheric environmental conditions such as fine dust, yellow dust, nitrous oxide, and sulfur oxides. Twenty-five to thirty-eight rainwater quality characteristics were analyzed in Seoul, including ion substances, heavy metals, general bacteria, pH, color, turbidity, and ammonia nitrogen. Analyse is of the characteristics of first rainwater from four-story building rooftops, such as ionic materials, heavy metals, and general bacteria. and of the six-point rainwater from the acid rain measuring network were conducted. Analysis of the correlation between the initial rainwater and the atmospheric environmental factors showed that the level of pollution in atmospheric environmental conditions increased with the longer the antecedent rainless hours. In addition, Pearson correlation analysis showed that atmospheric fine dust is strongly correlated with ammonia nitrogen, ionic material, chromaticity and heavy metals in early rainwater; thus, it is deemed that the utilization range should be set depending on the atmospheric conditions when using rainwater. As the rainfall continued, the concentration reduced by about 50 % compared to that in the initial rainfall for most characteristics. Thus, if the initial rainwater is excluded, rainwater utilization could become more ubiquitous. However, since microorganisms do not have a clear tendency to reduce their concentration due to wash out, additional treatment such as disinfection is deemed necessary. All general bacteria were

exterminated under boiling conditions and decreased by more than 40% after filter filtration. The concentration of ammonia nitrogen, ionic substance and potassium permanganate consumption was shown to decrease by more than 50% after filter filtration.

Key words : rainwater, initial rainfall, rainwater quality, first flush

서론

도시지역은 도로 포장과 건물 면적의 증가 등으로 불투수층이 확대되어 빗물이 땅 속으로 스며들지 못하고 도로를 따라 하천이나 하수처리장으로 유실되어 비점오염원으로 작용함과 동시에 지하수 부족현상으로 이어지고 있다. 또한 기후변화의 영향으로 도심의 폭우성 강우피해가 빈번하게 발생됨에 따라 빗물 관리와 이용에 관심이 증가하고 있다(3, 6, 11, 14, 16). 빗물의 기원은 담수 또는 해수의 증발에 의한 것으로 비교적 오염물질을 적게 포함하고 있어 대기오염물질이 포함된 초기 빗물에 대한 고려가 이루어진다면 생활용수뿐만 아니라 먹는물까지 다양한 활용범위를 가지고 있다(9, 21). 또한 지속가능한 생태도시 조성 방안으로 빗물 활용의 중요성이 부각되고(21), 빗물을 먹는물로 자원화하려는 법안이 발의(먹는물관리법 일부개정법률안, 의안번호 9924, 2017.10.26)되는 등 빗물을 새로운 수자원으로 인식하게 되었다.

빗물활용을 위해 다수의 연구에서 집수방식이나 집수관의 재질 또는 저류조 내에서의 체류시간에 따른 수질변화 등에 관한 조사가 이루어지고 있다(1~8). 김(3)은 집수관이 노출된 상태에서 집수하는 방식과 빗물 저류조 전 단계에 필터와 스크린을 설치한 방식 그리고 집수면을 보호하여 집수관의 오염을 배제하는 방식으로 빗물의 수질을 분석하여 가장 수질이 우수한 집수방식을 제시하였고, 김 등(8)은 태양 전지판을 집수면으로 이용하여 초기 빗물을 배제한 수질을 분석하고 화장실 용수와 세탁용수로 사용가능성을 파악하였다. 이 등(14)은 지붕면 재질(나무, 이끼가 서식하는 나무, 콘크리트, 초벌기와, 슬레이트)에 따라 집수된

빗물의 수질을 분석하여 5가지 재질 중 초벌기와가 표면 온도 상승으로 살균효과가 있어 가장 적합한 재질로 보고하였고, 한 등(22)도 집수면 재질(시멘트, 폴리우레탄, 철재)과 저류조 재질(스테인레스 스틸, 시멘트, PVC)에 따른 빗물의 수질을 평가하였다. 안 등(11)과 한 등(21)은 빗물 저류조에서 체류시간에 따른 수질의 변화를 조사하여 저류시간이 증가함에 따라 pH, 색도, 탁도 등의 수질이 개선된다는 연구 결과를 보여주었다.

그러나 강우가 지속됨에 따른 빗물 수질의 변화나 빗물에 직접적인 영향을 끼치는 대기오염물질과의 연관성을 조사한 연구보고는 부족한 실정이다. 특히, 대기오염이 상대적으로 높다고 알려진 도시지역의 빗물일 경우 그 영향을 정확히 파악하는 것이 더욱 중요할 것이다. 또한, 시민이 안심하고 빗물을 활용하기 위해서는 그 수질에 대한 파악과 더불어 용도에 맞는 수질 가이드라인도 마련되어야하므로 그 이용범위를 파악하고 활성화하기 위해 빗물 수질에 관한 연구가 필요하겠다.

이에 도시지역 빗물의 수질을 조사하여 먹는물 및 생활용수 또는 재이용수로서 가능성과 안전성을 파악하고, 미세먼지, 황사, 질산화물, 황산화물과 같은 대기환경과 빗물 수질의 연관성을 조사하여 빗물 이용 활성화를 위한 연구를 하고자한다.

재료 및 방법

1. 시험대상 및 기간

조사대상은 서울에 소재한 4층 건물 옥상 및 서울지역 산성우 측정망 6지점의 빗물로 하였다. 4층 건물 옥상은 서초구와 경기도 과천시 경계지



Fig. 1. Stepwise rainwater collecting sampler on the roof of a four-story building in seoul.

점에 위치하고, 산성우 측정망 6지점은 용산구(서울특별시 중부기술교육원), 광진구(구의아리수정수센터), 도봉구(쌍문동 청소년문화의 집), 강서구(화곡3동 푸른들 청소년도서관), 서초구(반포2동 주민센터), 송파구(서울역사편찬원)에 위치한 주거지역이다.

조사기간은 서울에 소재한 4층 건물 옥상은 2018년 4~11월까지이고 산성우 측정망 6지점은 2018년 1~5월까지 하였다. 서울에 소재한 4층 건물 옥상은 4~6월까지 유리비커를 이용하여 빗물을 수집하였고, 7~11월은 단계적 빗물 채취장치를 제작·설치하였다. 단계적 빗물 채취장치의 구조는 아크릴 재질의 집수관(가로 2m, 세로 0.5m)과 PVC 재질의 빗물 용기 및 배관으로 제작하여 빗물 용기를 10개까지 설치할 수 있도록 하였다(그림 1). 용기 1개 당 최대 2.5L의 빗물을 수집할 수 있고, 첫 번째 용기에 빗물이 채워지면 용기 내부에 있는 플로팅 볼(floating ball)이 수면으로 상승하며 수압에 의해 용기의 입구를 막아 두 번째 용기로 빗물이 흘러가는 순차적 방식으로 빗물을 채취하였다. 연속적으로 2개 이상의 시료를 채취한 경우 첫 번째 수집된 빗물을 초기 빗물로 보았다. 산성우 측정망은 시간당 강우량이 0.2 mm 이상이 되면 센서에 의해 덮개가 열리며 100 mL 유리관에 빗물이 순차적으로 채수되는 자동

채취방식으로, 첫 번째 수집된 빗물을 초기 빗물로 보았다.

집수관과 용기 오염에 의한 수질 오염을 최소화하여 빗물 자체의 수질을 파악하기 위해 매 강우 때마다 집수관과 채취용기 및 유리비커는 미리 세척하여 사용하였다.

대기환경자료는 산성우측정망과 같은 위치에 있는 대기오염측정망의 자료를 이용하였고(대기환경정보시스템, <http://cleanair.seoul.go.kr/main.htm>), 서울에 소재한 4층 건물 옥상은 대기오염측정망 지점이 아니므로 가장 근접한 대기오염측정망 지점(약 8 km)의 자료를 참고하였다. 빗물 수질과 대기환경 인자들 간의 상관성을 파악하기 위한 대기환경 자료는 강우가 시작되어 빗물이 각각의 용기에 채워진 시간동안에 시간 당 대기 자료를 기준으로 산정하였다.

2. 시험방법

분석항목은 pH, 전기전도도, 색도, 탁도, 일반세균, 총대장균군, 분원성대장균군, 불소, 염소이온, 질산성질소, 황산이온, 암모니아성질소, 시안, 페놀, 세제, 과망간산칼륨소비량, 경도, 수은, 붕소, 알루미늄, 크롬, 망간, 철, 니켈, 구리, 아연, 비소, 셀레늄, 스트론튬, 몰리브덴, 카드뮴, 안티몬, 납, 우라늄, 칼슘, 마그네슘, 칼륨, 나트륨으로

Table 1. Analysis Equipment

| Item | Equipment |
|--|---|
| pH | pH meter(Arion 3star, Thermo) |
| Conductivity | Conductivity meter(Orion Star A325, Thermo) |
| Color & Turbidity | WA-22-K, Nippon Denshoku |
| F ⁻ , Cl ⁻ , NO ₃ -N, SO ₄ ²⁻ | Ion Chromatography(Metrohm 940, Metrohm) |
| NH ₄ -N | |
| CN | |
| Phenol | Continuous Flow Analyzer(SYNCA, BLTEC) |
| Anionic surfactants | |
| Hg | Cold Vapor/Atomic Absorption Spectrometry(RA-3420C, NIC) |
| Metals(Cr, Mn, Fe etc.) | Inductively coupled plasma mass spectrometry(iCAP RQ, Thermo) |
| Ca, Mg, K, Na | Inductively coupled plasma(Leeman lab-US/DRE ICP, Leeman) |

총 38항목을 측정하였다. 단, 채취된 빗물의 양에 따라 분석항목은 축소되기도 하였다.

분석방법은 먹는물 공정시험기준에 준하여 분석하였고(1), 분석장비는 표 1과 같다. 빗물의 수질 항목과 대기오염물질과의 상관성을 분석하기 위해 SPSS Statistics 24를 이용하여 유의성을 검증하였다.

결과 및 고찰

1. 초기 빗물의 수질 특성

1) 초기 빗물의 수질 결과

초기 빗물은 대기오염물질과 가장 밀접한 연관성을 가지므로 빗물 활용에 있어 초기 빗물의 특성을 파악하는 것이 중요하다. 이에 서울 소재 4층 건물 옥상에서 4월부터 11월까지 총 20회 강우와 산성우 측정망 6지점에서 1~5월까지 용산구 14회, 광진구 10회, 도봉구 19회, 강서구 15회, 서초구 15회, 송파구 18회 강우의 초기 빗물 수질을 파악하였다(표 2).

오염물질이 포함되지 않은 자연상태 빗물의 pH는 대기 중의 CO₂ 영향으로 약 5.6의 약산성을 띠는데(2), 이보다 낮은 빗물을 산성우 라고 한다

(9). 실제 빗물의 pH는 대기 중에 존재하는 염기들(암모늄이온, 칼슘이온)에 의해 중화된 후에 수소이온 농도로(13) 본 연구의 초기 빗물 pH는 3.9~8.3으로 검출되었다. 표 3과 같이 pH를 상승시키는 것으로 알려진 2가 양이온 성분들과 높은 상관성을 보여 대기 중 이온 성분들이 빗물에 씻겨 강하하여 pH에 영향을 준 것으로 판단된다(25). 한(21) 등 빗물 저류에 따른 수질변화에 관한 다수의 연구에 따르면 초기 빗물은 대부분 산성이지만 저류 시간이 경과됨에 따라 빗물 속 2가 양이온 성분과 산소 유입 등에 의해 pH가 상승하는 것으로 알려져 있어 적절한 저류 과정으로 pH로 인한 빗물 이용의 문제점을 해소할 수 있을 것으로 판단된다.

전기전도도는 수중의 용존 이온물질을 나타내는 지표로 낮을수록 수질이 양호함을 의미하는데, 1~458 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 넓은 범위로 나타났다. 표 3과 같이 음이온 물질과 칼슘, 칼륨, 나트륨, 마그네슘, 미량 금속원소 중 일부항목 등 양이온 물질과도 높은 양의 상관성으로 나타났다.

색도는 0~7도, 탁도는 0.05~7.05 NTU의 넓은 분포로 나타났다. 표 3과 같이 색도는 불소, 황산이온, 암모니아성질소, 칼슘, 나트륨, 알루미늄, 망간, 니켈 등 대부분의 금속원소 물질과도 높은

Table 2. The Concentration of first rainwater water quality

| Item | Unit | Mean | Min. | Max. | Item | Unit | Mean | Min. | Max. |
|---------------------|------------------|-------|-------|--------|------|------|--------|--------|--------|
| pH | | 5.7 | 3.9 | 8.3 | K | mg/L | 0.285 | N.D. | 2.912 |
| EC | $\mu\text{s/cm}$ | 45 | 1 | 458 | Na | mg/L | 0.955 | N.D. | 5.669 |
| Color | ° | 2 | 0 | 7 | B | mg/L | 0.014 | N.D. | 0.060 |
| Turbidity | NTU | 1.20 | 0.05 | 7.05 | Al | mg/L | 0.0240 | N.D. | 0.3767 |
| Total Colony Counts | CFU/mL | 398 | 9 | 2500 | Cr | mg/L | 0.0001 | N.D. | 0.0012 |
| F | mg/L | 0.051 | N.D. | 0.269 | Mn | mg/L | 0.0101 | N.D. | 0.0850 |
| Cl | mg/L | 1.415 | 0.043 | 9.215 | Fe | mg/L | 0.0108 | N.D. | 0.3488 |
| NO ₃ -N | mg/L | 1.227 | 0.048 | 4.451 | Ni | mg/L | 0.0022 | N.D. | 0.0089 |
| SO ₄ -2 | mg/L | 3.730 | 0.212 | 14.638 | Cu | mg/L | 0.0029 | N.D. | 0.0205 |
| NH ₄ -N | mg/L | 1.505 | 0.034 | 5.150 | Zn | mg/L | 0.0275 | 0.0005 | 0.2211 |
| KMnO ₄ | mg/L | 3.6 | 1.2 | 6.2 | As | mg/L | 0.0011 | N.D. | 0.0079 |
| hardness | mg/L | 2.7 | N.D. | 7.0 | Se | mg/L | 0.0006 | N.D. | 0.0034 |
| CN | mg/L | N.D. | N.D. | N.D. | Sr | mg/L | 0.0073 | 0.0002 | 0.0474 |
| Phenol | mg/L | N.D. | N.D. | N.D. | Mo | mg/L | 0.0002 | N.D. | 0.0008 |
| ABS | mg/L | N.D. | N.D. | N.D. | Cd | mg/L | N.D. | N.D. | 0.0006 |
| Hg | mg/L | N.D. | N.D. | N.D. | Sb | mg/L | 0.0002 | N.D. | 0.0020 |
| Ca | mg/L | 1.572 | N.D. | 14.116 | Pb | mg/L | 0.0009 | N.D. | 0.0082 |
| Mg | mg/L | 0.087 | N.D. | 1.450 | U | mg/L | N.D. | N.D. | 0.0001 |

양의 상관성을 나타냈고, 탁도는 입자성 금속인 알루미늄, 철과 높은 양의 상관성으로 나타났다. 탁도는 중금속이나 다른 오염물질을 흡착하는 매질로 작용할 수 있기 때문에 빗물의 수질관리에서 중요한 인자가 될 것으로 판단된다(11).

암모니아성질소는 대기나 빗물 중 산성물질을 중화하는 역할로 도시에서는 가솔린 엔진차량에 촉매변환장치에서 배출되는 자동차 배기가스, 하수처리장, 산업활동, 비료 등에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다(2). 초기 빗물 시료의 약 80%가 먹는물 수질기준인 0.5 mg/L을 초과하며 0.024~5.150 mg/L 범위로 나타나 자동차 배기가스 배출이 많은 도시 지역의 대기 중 암모니아의 영향을 크게 받는 것으로 판단된다. 표 3과 같이 색도, 음이온, 양이온, 금속원소 물질과 높은 양의 상관성

으로 나타났다.

미생물 항목 중 일반세균은 9~2,500 CFU/mL의 넓은 범위로 기온이 상승하는 5월부터 개체수가 높아지며 7월부터 먹는물 수질기준을 초과하였고, 과망간산칼륨소비량과 높은 양의 상관성을 보여 유기물질과 상관성이 있는 것으로 나타났다.

총대장균군과 분원성대장균군을 분석한 16개 시료 중 총대장균군은 7개, 분원성대장균군은 1개(8월)의 7~9월 시료에서 검출되었다. 강우량이 많은 시기가 빗물활용에 용이하다는 측면에서 연간 총 누적강우량의 40~50%를 차지하는 7~9월은 빗물 활용에 중요한 시기라고 하겠다. 이 시기 빗물의 안전성을 확보하여 활용하기 위해서는 미생물에 대한 처리와 관리가 필요할 것으로 판단된다.

음이온 물질 중 불소는 불검출~0.269 mg/L, 염소이온은 0.043~9.215 mg/L, 질산성질소는 0.048~4.451 mg/L, 황산이온은 0.212~14.638 mg/L로 초기 빗물임에도 불구하고 낮은 농도범위로 나타났고, 표 3과 같이 음이온, 양이온, 미량 금속원소 물질과 높은 양의 상관성을 보였다.

미량 금속원소 물질은 대부분 검출되지 않거나 낮은 농도범위로 나타났다. 다만, 알루미늄과 철의 최고 농도가 각각 0.3767 mg/L, 0.3488 mg/L로 높았는데, 이는 4월 황사 발생일의 빗물로 시간당 PM10의 농도가 평균 67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 최대 103 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM2.5 농도는 평균 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 최대 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 (초)미세먼지 최대농도가 대기환경기준(24시간 평균 PM10 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM2.5 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 달하였다. 이러한 결과는 황사 발생시 금속 성분 중 Al, Fe, Mn 등의 농도가 급상승한다는 이(12)와 신(10)의 연구결과와도 같아 토양 입자 유입에 의한 농도 증가로 판단된다.

과망간산칼륨소비량은 1.2~6.2 mg/L의 낮은 범위로 나타났고 일반세균, 암모니아성질소, 경도와 높은 양의 상관성을 보였다.

경도는 물 속 2가 양이온의 함량을 탄산칼슘량으로 환산한 값으로 60 mg/L 이하의 물을 연수로 분류하는데(23), 최고 농도가 7.0 mg/L로 매우 낮아 스케일 발생 등에 대한 문제없이 활용이 가능할 것으로 판단된다.

2) 초기 빗물과 대기환경 인자와의 상관성

대기환경에 직접적 영향을 받는 초기 빗물의 수질 특성을 파악하고자 환경부 미세먼지 예보등급별(18.3.27.) 초기 빗물의 수질을 그룹화하여 비교해보았다(표 4).

표 4에서와 같이 선행 무강우시간(Antecedent rainless hours)은 PM10의 좋음 등급에서 92시간(3.8일), 보통 등급에서 166시간(6.9일)이었고, PM2.5의 좋음 등급에서 70시간(2.9일), 보통 등급에서 168시간(7일), 나쁨 등급에서 194시간(8.1일)으로 선행 무강우시간이 길어질수록 대기 오염의 정도도 심해지는 경향으로 나타나 건기일수가 증가함에 따라 대기 중 먼지의 농도가 증가되는 최(18)의 연구결과와 동일한 결과를 보였다.

미세먼지 예보등급별 평균 pH는 5.6~5.8의 약산성으로 미세먼지의 농도가 높을수록 산성도가 약간 증가하였지만 유의한 차이를 보이지 않았고, 탁도와 일반세균, 과망간산칼륨소비량, 경도를 제외한 수질 항목은 미세먼지 농도가 증가함에 따라 등급별로 약 1.5배 농도차이를 보이며 증가하는 것으로 나타났다. 탁도는 PM 등급별 유의한 차이가 나타나지 않았는데 미세먼지 농도가 좋음이었던 4월 5일 빗물의 탁도 값이 이상치(outlier)에 해당하는 7.05의 높은 농도로 나타나 평균농도를 증가시켰기 때문이다. 이는 강우가 시작되어 종료되는 시간과 빗물을 수집하기 위해 유리비커를 설치하고 회수하는 시간의 차이와 빗물을 수집한 장소와 대기측정소간의 거리(약 8 km) 차이로 인해 발생한 오차로 판단된다. 강우가 시작되어 종료된 시점인 4월 5일 21시부터 4월 6일 5시까지는 평균 PM10은 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM2.5은 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 좋음 단계였지만, 6일 오전부터 황사가 발생하여 11시 이후 급격하게 미세먼지의 농도가 증가하여 11시 기준 미세먼지 농도가 PM10은 69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM2.5은 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 측정되었다. 4월 5일 빗물의 탁도 측정값을 제외하면 PM10 기준 좋음 단계의 탁도 평균은 0.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM2.5 기준 좋음 단계는 0.77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다른 수질항목과 같이 등급별 약 1.5배 농도차이가 있는 것으로 나타나 대기의 오염도가 초기 빗물 수질에 직접적인 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다.

빗물 수질에 가장 직접적인 영향을 주는 대기환경 인자와 초기 빗물 수질의 통계적인 유의성을 검증하기 위해 95% 이상 신뢰수준에서 pearson 상관분석 하였다.

표 3과 같이 (초)미세먼지인 PM10, PM2.5, PM1.0 모두 공통적으로 유의한 상관성을 나타낸 수질 항목은 선행 무강우시간, 암모니아성질소, 질산성질소, 황산이온, 망간, 아연, 니켈, 구리로 나타났다.

선행 무강우시간에 비하여 강우량이 대기오염물질과 상관성이 크지 않은 것은 김(7)의 연구에서와 같이 강우가 대기질에 미치는 영향은 강우 강도와 지속시간 등에 의한 영향이 크기 때문인 것으로 사료된다.

Table 3. Correlation of first rainwater and atmospheric environment factor

| | Rainfall | Rainless* | pH | EC | Color | Turbidity | T_colony* | F | Cl | NO ₃ -N | SO ₄ ²⁻ | NH ₄ -N | KMnO ₄ | Hardness | Ca | Mg | K | Na | B | Al |
|-------------------------------|----------|-----------|---------|---------|--------|-----------|-----------|---------|---------|--------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------|----------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|
| Rainfall | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Rainless* | -0.124 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| pH | 0.031 | -0.090 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| EC | -0.041 | 0.149 | .552** | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Color | -0.219 | -0.046 | -0.270 | .591** | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Turbidity | -0.113 | -0.060 | 0.230 | 0.107 | 0.432 | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| T_colony* | -0.102 | -0.144 | 0.090 | -0.065 | 0.137 | -0.093 | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| F | -0.114 | .245* | .440** | .333** | .684** | 0.071 | 0.023 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| Cl | -0.119 | .267** | .372** | .375** | 0.396 | 0.068 | 0.109 | .750** | 1 | | | | | | | | | | | |
| NO ₃ -N | -0.105 | .336** | .370** | .382** | .501* | 0.185 | -0.021 | .815** | .659** | 1 | | | | | | | | | | |
| SO ₄ ²⁻ | -0.131 | .255** | .335** | .242* | .741** | 0.129 | -0.071 | .922** | .743** | .874** | 1 | | | | | | | | | |
| NH ₄ -N | -0.170 | .235* | 0.151 | 0.199 | .579* | 0.211 | 0.093 | .551** | .307** | .707** | .702** | 1 | | | | | | | | |
| KMnO ₄ | -.583* | 0.344 | 0.145 | 0.450 | 0.197 | 0.379 | .560* | 0.357 | 0.242 | 0.506 | 0.298 | .587* | 1 | | | | | | | |
| Hardness | -.561* | 0.350 | 0.073 | .635* | 0.256 | 0.262 | 0.059 | 0.171 | 0.206 | 0.288 | 0.298 | 0.324 | .729** | 1 | | | | | | |
| Ca | -0.072 | 0.127 | .536** | .333** | -0.020 | -0.231 | 0.191 | .920** | .713** | .696** | .823** | .362** | 0.496 | .772** | 1 | | | | | |
| Mg | 0.014 | 0.004 | .494** | .304** | ∅ | ∅ | ∅ | .610** | .622** | .472** | .529** | 0.087 | ∅ | ∅ | .760** | 1 | | | | |
| K | -0.004 | .229* | .317** | .270** | .626** | 0.043 | 0.231 | .629** | .665** | .625** | .661** | .303** | ∅ | ∅ | .598** | .444** | 1 | | | |
| Na | -0.097 | .242* | .463** | .447** | .489* | 0.032 | -0.126 | .774** | .910** | .738** | .754** | .308** | 0.087 | 0.383 | .781** | .726** | .712** | 1 | | |
| B | -0.227 | -0.021 | 0.098 | 0.059 | 0.454 | 0.061 | -0.048 | .224* | 0.064 | .351** | .272** | 0.172 | -0.090 | 0.089 | .227* | 0.175 | .252** | .242* | 1 | |
| Al | -0.128 | 0.079 | 0.173 | 0.154 | .525* | .858** | -0.160 | .557** | .466** | .525** | .543** | .297** | 0.173 | 0.247 | .465** | .253** | .427** | .496** | .310** | 1 |
| Cr | -0.189 | 0.040 | -0.042 | -0.055 | 0.114 | 0.221 | -0.217 | .243* | .231* | 0.186 | .311** | .243* | 0.049 | 0.135 | 0.161 | 0.040 | 0.130 | 0.177 | 0.082 | .418** |
| Mn | -0.236 | .188* | 0.179 | .243* | .686** | 0.097 | 0.092 | .677** | .606** | .596** | .695** | .358** | 0.333 | 0.346 | .460** | .238* | .577** | .548** | .351** | .655** |
| Fe | -0.124 | -0.093 | 0.150 | 0.064 | 0.412 | .836** | -0.155 | .373** | .280** | .240* | .317** | .199* | 0.172 | 0.234 | 0.193 | 0.142 | 0.157 | .222* | 0.139 | .842** |
| Ni | 0.006 | .363** | 0.144 | .374** | .642** | 0.358 | 0.111 | 0.171 | 0.119 | .291** | .206* | .252** | 0.173 | -0.099 | 0.065 | 0.042 | .227* | .188* | 0.082 | -0.017 |
| Cu | -0.131 | .337** | 0.058 | 0.166 | .530* | 0.235 | 0.139 | .391** | .396** | .640** | .510** | .449** | 0.417 | 0.264 | .297** | 0.092 | .544** | .421** | .300** | .429** |
| Zn | -0.066 | .342** | 0.091 | .409** | .621** | 0.092 | 0.132 | .418** | .435** | .567** | .463** | .440** | 0.037 | -0.111 | .199* | -0.025 | .548** | .369** | .283** | .413** |
| As | -0.136 | -0.106 | .298** | 0.139 | 0.346 | 0.100 | -0.040 | .688** | .453** | .613** | .707** | .446** | 0.259 | -0.142 | .586** | .514** | .451** | .515** | .473** | .637** |
| Se | -0.122 | 0.030 | .370** | .229* | .734** | 0.223 | -0.020 | .953** | .625** | .779** | .899** | .623** | 0.306 | 0.241 | .753** | .568** | .544** | .685** | .356** | .564** |
| Sr | -0.087 | 0.085 | .496** | .267** | .634** | 0.225 | -0.097 | .950** | .728** | .727** | .896** | .457** | 0.492 | .742** | .972** | .717** | .624** | .763** | .303** | .553** |
| Mo | -0.101 | 0.160 | .498** | .417** | .769** | 0.215 | 0.093 | .791** | .776** | .792** | .795** | .578** | 0.270 | 0.310 | .752** | .665** | .593** | .845** | .285** | .408** |
| Cd | -0.167 | -0.190 | -0.003 | -0.002 | .587** | 0.167 | -0.060 | 0.174 | 0.099 | 0.098 | 0.132 | 0.067 | -0.137 | -0.051 | -0.096 | -0.066 | 0.012 | -0.043 | .332** | .512** |
| Sb | -0.092 | 0.025 | .234* | 0.035 | .656** | 0.254 | 0.029 | .706** | .591** | .575** | .726** | .356** | 0.482 | 0.146 | .605** | .525** | .407** | .535** | .329** | .566** |
| Pb | -0.042 | 0.160 | .201* | 0.190 | .645** | 0.206 | -0.103 | .476** | .387** | .580** | .524** | .251** | 0.227 | 0.234 | .440** | .316** | .409** | .407** | .331** | .629** |
| U | 0.040 | -0.037 | .195* | -0.064 | ∅ | ∅ | ∅ | .308** | 0.090 | 0.117 | .239* | -0.027 | ∅ | ∅ | .297** | .220* | 0.166 | 0.175 | 0.018 | 0.028 |
| PM _{2.5} | -0.040 | .449** | -.201* | 0.051 | 0.400 | -0.078 | -0.141 | 0.170 | 0.078 | .270** | .234* | .260** | -0.490 | -0.279 | 0.026 | -0.020 | 0.112 | 0.079 | 0.120 | 0.140 |
| PM ₁₀ | -0.095 | .459** | -0.082 | 0.189 | 0.393 | -0.100 | -0.121 | .335** | .232* | .371** | .365** | .324** | -0.399 | -0.175 | 0.144 | 0.096 | .245* | .220* | 0.100 | .291** |
| PM _{1.0} | -0.063 | .346* | -0.143 | 0.217 | .494* | -0.088 | 0.427 | .369* | 0.153 | .527** | .454** | .518** | -0.374 | -0.362 | 0.211 | 0.237 | .325* | 0.250 | .364* | 0.225 |
| NO ₂ | 0.183 | 0.160 | 0.050 | .290** | 0.311 | -0.085 | 0.395 | 0.117 | 0.151 | 0.181 | 0.108 | 0.195 | -0.411 | -.595* | -0.016 | -0.128 | 0.052 | 0.064 | -0.162 | -0.002 |
| CO | 0.015 | 0.058 | 0.007 | 0.165 | -0.061 | -0.091 | -0.200 | 0.079 | .206* | 0.116 | 0.048 | -0.008 | -0.166 | -0.185 | 0.026 | -0.044 | 0.060 | 0.098 | -0.195 | 0.179 |
| O ₃ | -0.037 | -0.089 | -0.056 | -0.175 | 0.071 | 0.055 | -0.189 | 0.031 | -0.118 | -0.006 | 0.059 | -0.011 | 0.100 | 0.192 | 0.068 | 0.103 | 0.029 | 0.002 | .242* | 0.016 |
| SO ₂ | -0.002 | .290** | 0.102 | .463** | 0.357 | 0.436 | -0.161 | 0.164 | .316** | 0.191 | 0.110 | 0.112 | -0.129 | -0.147 | 0.087 | 0.090 | .262* | .289** | -0.177 | 0.016 |
| TEMP | -0.045 | -.284** | -.501** | -.542** | -0.170 | -.485* | 0.213 | -.340** | -.449** | -.368** | -.266** | -0.161 | -0.021 | 0.084 | -.297** | -.263** | -.286** | -.485** | 0.116 | -0.128 |
| HUM | 0.152 | -0.093 | -0.157 | -.434** | -0.101 | 0.133 | 0.028 | -.274** | -.316** | -.226* | -.209* | -0.071 | -0.511 | -.740** | -.275** | -0.180 | -.218* | -.366** | 0.070 | -0.093 |

* correlation is significant at the 0.05 level(2-tailed)

** correlation is significant at the 0.01 level(2-tailed)

Rainless* Antecedent rainless hours

T-Colony* Total Colony Counts

Table 3. (Continued)

| Cr | Mn | Fe | Ni | Cu | Zn | As | Se | Sr | Mo | Cd | Sb | Pb | U | PM _{2.5} | PM ₁₀ | PM _{1.0} | NO ₂ | CO | O ₃ | SO ₂ | TEMP | HUM | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|------------------|-------------------|-----------------|--------|----------------|-----------------|-------|-----|--|
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| .344" | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| .433" | .537" | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| -0.073 | 0.108 | -0.090 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| .209' | .412" | 0.077 | .304" | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.171 | .621" | .217' | .357" | .658" | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| .290" | .603" | .551" | 0.020 | .293" | .302" | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| .279" | .584" | .398" | 0.110 | .404" | .344" | .843" | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| .277" | .567" | .367" | 0.067 | .317" | .258" | .713" | .832" | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| .195' | .554" | .269" | 0.138 | .368" | .396" | .567" | .765" | .748" | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| .240' | .575" | .664" | -0.136 | 0.023 | .330" | .501" | .195' | 0.153 | 0.124 | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| .283" | .597" | .432" | -0.013 | .302" | .241' | .813" | .901" | .707" | .580" | .286" | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 0.106 | .487" | .275" | 0.033 | .586" | .352" | .465" | .507" | .478" | .397" | 0.058 | .465" | 1 | | | | | | | | | | | |
| -0.164 | 0.081 | -0.007 | -0.098 | -0.036 | -0.157 | .261" | .369" | .292" | 0.117 | -0.093 | .247" | .241' | 1 | | | | | | | | | | |
| -0.024 | .266" | 0.015 | .317" | .285" | .240' | -0.023 | 0.084 | 0.060 | 0.127 | 0.016 | 0.034 | 0.176 | -0.066 | 1 | | | | | | | | | |
| 0.099 | .417" | .202' | .305" | .318" | .363" | 0.169 | .245' | .223' | .258" | 0.155 | 0.163 | .207' | -0.057 | .885" | 1 | | | | | | | | |
| 0.082 | .383' | -0.001 | .390' | .512" | .353' | 0.206 | .346' | 0.283 | .369' | 0.041 | 0.155 | .468" | .876" | .736" | 1 | | | | | | | | |
| -0.177 | .234' | -0.084 | 0.167 | 0.193 | .400" | -0.171 | -0.034 | -0.083 | 0.091 | 0.045 | -0.113 | 0.073 | -0.172 | .410" | .365" | 0.251 | 1 | | | | | | |
| -0.061 | 0.195 | 0.104 | 0.022 | 0.167 | .239' | -0.139 | -0.056 | -0.023 | 0.054 | 0.065 | -0.089 | .214' | -.267" | .254' | .264" | 0.166 | .594" | 1 | | | | | |
| 0.119 | -0.101 | 0.004 | -0.040 | -0.074 | -.233' | 0.186 | 0.148 | 0.140 | 0.014 | -0.113 | 0.111 | 0.044 | 0.146 | -0.083 | -0.029 | .361' | -.641" | -.469" | 1 | | | | |
| -0.175 | 0.113 | -0.020 | .307" | 0.186 | .252' | -0.130 | -0.013 | 0.050 | 0.190 | -0.058 | -0.106 | 0.010 | -.271" | .274" | .377" | 0.227 | .391" | .425" | -.224' | 1 | | | |
| 0.145 | -0.177 | -0.013 | -.262" | -0.153 | -0.193 | -0.015 | -0.153 | -.255' | -.413" | 0.123 | -0.034 | -0.165 | -0.039 | -0.070 | -0.137 | -0.069 | -.308" | -.212' | 0.148 | -.514" | 1 | | |
| -0.148 | -0.165 | -0.044 | -0.032 | -0.082 | -0.123 | -0.158 | -0.192 | -.223' | -.249' | -0.019 | -0.118 | -0.056 | 0.015 | -0.064 | -.263" | -0.107 | -0.015 | -0.088 | -0.157 | -.295" | .245' | 1 | |

Table 4. Average concentration of first rainwater water quality by PM10 and PM2.5 grade

| | Unit | PM10 | | PM2.5 | | |
|---------------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | | 0~30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 31~80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 0~15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 16~35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 36~75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| | | 좋음 | 보통 | 좋음 | 보통 | 나쁨 |
| Antecedent Rainless hours | hr | 92 | 166 | 70 | 168 | 194 |
| pH | | 5.8 | 5.6 | 5.7 | 5.6 | 5.6 |
| EC | $\mu\text{s}/\text{cm}$ | 33 | 59 | 28 | 55 | 46 |
| Color | ° | 1 | 2 | 1 | 2 | - |
| Turbidity | NTU | 1.20(0.75*) | 0.92 | 1.19(0.77*) | 1.22 | - |
| Total Colony Counts | CFU/mL | 423 | 307 | 401 | 388 | - |
| F | mg/L | 0.037 | 0.065 | 0.040 | 0.058 | 0.081 |
| Cl | mg/L | 1.180 | 1.641 | 1.271 | 1.534 | 2.015 |
| NO ₃ -N | mg/L | 0.932 | 1.544 | 0.936 | 1.396 | 1.951 |
| SO ₄ -2 | mg/L | 2.694 | 4.667 | 2.877 | 4.142 | 5.964 |
| NH ₄ -N | mg/L | 1.120 | 1.814 | 1.162 | 1.589 | 2.434 |
| KMnO ₄ | mg/L | 3.8 | 2.4 | 3.8 | 2.8 | - |
| hardness | mg/L | 2.9 | 1.7 | 2.9 | 1.9 | - |
| Ca | mg/L | 1.202 | 1.997 | 1.373 | 1.635 | 2.363 |
| Mg | mg/L | 0.061 | 0.122 | 0.080 | 0.089 | 0.121 |
| K | mg/L | 0.157 | 0.400 | 0.187 | 0.367 | 0.325 |
| Na | mg/L | 0.773 | 1.154 | 0.804 | 1.049 | 1.264 |
| B | mg/L | 0.0130 | 0.0161 | 0.0137 | 0.0143 | 0.0178 |
| Al | mg/L | 0.0150 | 0.0331 | 0.0189 | 0.0299 | 0.0259 |
| Cr | mg/L | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| Mn | mg/L | 0.0055 | 0.0142 | 0.0058 | 0.0134 | 0.0143 |
| Fe | mg/L | 0.0070 | 0.0140 | 0.0086 | 0.0140 | 0.0070 |
| Ni | mg/L | 0.0016 | 0.0027 | 0.0013 | 0.0026 | 0.0035 |
| Cu | mg/L | 0.0019 | 0.0038 | 0.0021 | 0.0036 | 0.0029 |
| Zn | mg/L | 0.0201 | 0.0349 | 0.0216 | 0.0329 | 0.0299 |
| As | mg/L | 0.0009 | 0.0013 | 0.0012 | 0.0011 | 0.0010 |
| Se | mg/L | N.D. | 0.0007 | N.D. | 0.0006 | 0.0007 |
| Sr | mg/L | 0.0055 | 0.0090 | 0.0062 | 0.0076 | 0.0100 |
| Mo | mg/L | N.D. | 0.0002 | N.D. | 0.0002 | 0.0003 |
| Cd | mg/L | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| Sb | mg/L | 0.0001 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0004 |
| Pb | mg/L | N.D. | 0.0012 | N.D. | 0.0011 | 0.0010 |
| U | mg/L | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |

* Average concentration of turbidity except outlier on April fifth

(조)미세먼지는 발생원에서 직접 배출되는 1차 입자와 물리·화학적 반응을 거치면서 생성된 2차 입자(2차적 에어로졸)로 구분할 수 있는데, 무기물, 유기물, 수분, 중금속 등 수많은 구성 성분을 포함하고 있다. 이 중 NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} 가 초미세먼지의 40~50% 구성비율을 가진다고 알려져 있고, 이러한 이온성 물질이 초미세먼지 생성 기작의 전구물질로 작용한다는 연구들이 보고되고 있어(2), (조)미세먼지와 암모니아성질소, 질산성질소, 황산이온이 상관성을 나타낸 것으로 판단된다. 특히, PM_{1.0}이 가장 높은 상관계수로 나타나 미세한 먼지일수록 물리·화학적 반응에 의해 형성된 2차 입자일 가능성이 클 것으로 사료된다.

금속원소 물질 중 망간, 아연, 니켈, 구리는 자동차 타이어와 브레이크 라이닝 마모로부터 배출되는 것으로 알려져 있고(10, 15, 24, 26), 대기 중 망간과 아연이 PM_{2.5}와 높은 상관성을 갖는다는 임(15)의 연구결과를 통해 차량 이동이 많은 도시지역에서 비산먼지로 존재한 금속원소 물질이 초기 빗물에 세정되어 높은 상관성을 보인 것으로 판단된다.

이산화질소는 전기전도도, 망간, 아연과 상관성이 있었고, 아황산가스는 전기전도도, 염소이온, 칼륨, 나트륨, 니켈, 아연과 상관성이 있으며, 일산화탄소는 염소이온, 아연, 납과 상관성이 있는 것으로 나타났다. 이산화질소와 아황산가스, 일산화탄소는 주로 자동차 배기가스 등 화석연료의 연소에 의해 생성되는 물질이므로(2,15), 도시지역에서 주로 난방과 자동차 주행 등으로 발생된 배기가스에 포함된 망간, 아연, 니켈, 납, 염소이온 등과 상관성을 나타낸 것으로 판단된다.

3) 지역별 빗물의 수질 특성

강우의 발생 범위는 크게는 전국에서 작게는 동단위까지 다양하게 발생되므로 한 지역에 강우가 발생하더라도 다른 지역에는 강우가 내리지 않는 국지적인 특성을 나타낼 수 있기에(7), 지역에 따른 빗물 수질의 차이가 발생하는지 알아보려 하였다.

서울에 소재한 4층 건물 옥상과 산성우 측정망 6지점에서 채취한 빗물의 수질 차이 여부를 확인하고자 공통적으로 빗물을 채취한 시기인 4~5월

의 초기 빗물의 수질을 비교하였다(표 5).

평균 농도를 기준으로 pH와 미량 금속원소 물질은 비슷한 농도로 나타났고, 전기전도도와 이온물질의 농도는 산성우 측정망 지점이 다소 높게 나타난 경향을 보였다. 이는 지역에 따라 강우 일시와 강우시의 대기 상태, 강우량, 강우패턴 등의 차이로 인한 결과로 사료된다.

통계적으로 두 지점간의 수질의 차이를 확인하기 위해 독립표본검정(Mann-Whitney검정)을 실시한 결과, 95% 신뢰수준에서 철과 니켈을 제외한 나머지 수질 항목은 지역에 따라 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 철과 니켈 등 미량 금속원소는 대부분 불검출이거나 미량 검출되므로 서울 주거지역에서는 지역차이로 인한 빗물 활용의 제한은 없을 것으로 판단된다.

2. 강우지속시간에 따른 빗물의 수질 변화

강우가 지속됨에 따라 시료채취 장치에 순차적으로 수집된 빗물의 수질을 비교하여 그 추세를 파악하였다. 7월부터 11월까지 연속적으로 2개 이상의 시료를 채취한 경우는 총 10회였고, 해당 수집된 빗물의 개수는 2~14개였다.

14번째까지 채취된 시료는 조사기간 동안 가장 강우량이 많았던 8월 28일의 빗물로 이 날의 총 강우량은 85.6 mm이다. 그림 2와 같이 10번째 시료에서 대부분의 항목에서 농도가 증가하는 경향을 보였는데, 10번째 시료는 시간당 25.8 mm의 강우가 있었던 시점에 채취한 시료로 강우강도가 가장 높았다. 대기환경에 강우 강도가 영향을 미친다는 김(7)의 연구에서와 같이 갑자기 내린 집중 강우시 대기 중에 존재하는 오염물질이 유입되었을 가능성이 있는 것으로 판단된다.

pH는 강우가 지속됨에 따라 소폭 증가하며 강우지속에 따른 정확한 경향이 뚜렷하지 않았다. 이는 대기 중 pH를 낮추는 이산화질소, 아황산가스 등 산성물질이 초기 빗물에 세정된 이후 일정한 농도로 유지된 결과로 판단된다.

색도는 전체 빗물 시료에서 먹는물 수질기준을 모두 만족하였지만 초기 빗물에서 0~3도로 가장 높은 농도로 나타났고 강우가 지속됨에 따라 감소하는 경향을 보였다.

Table 5. Concentration of first rainwater quality of roof and Acid rainwater network sites

| Item | Unit | Roof of a four-story building | | | Acid rainwater network sites | | |
|--------------------|-------------------------|-------------------------------|--------|--------|------------------------------|--------|--------|
| | | Mean | Min. | Max. | Mean | Min. | Max. |
| pH | | 5.5 | 4.3 | 8.3 | 5.7 | 3.9 | 8.3 |
| EC | $\mu\text{s}/\text{cm}$ | 22 | 4 | 458 | 50 | 1 | 458 |
| F | mg/L | 0.033 | N.D. | 0.269 | 0.055 | 0.005 | 0.269 |
| Cl | mg/L | 1.490 | 0.043 | 9.215 | 1.398 | 0.112 | 9.215 |
| NO ₃ -N | mg/L | 0.648 | 0.048 | 4.451 | 1.360 | 0.151 | 4.451 |
| SO ₄ -2 | mg/L | 2.127 | 0.212 | 14.638 | 4.099 | 0.401 | 14.638 |
| NH ₄ -N | mg/L | 0.835 | 0.167 | 5.150 | 1.652 | 0.034 | 5.150 |
| Ca | mg/L | 0.741 | N.D. | 14.116 | 1.746 | N.D. | 14.116 |
| Mg | mg/L | N.D. | N.D. | 1.450 | 0.106 | N.D. | 1.450 |
| K | mg/L | 0.044 | N.D. | 2.912 | 0.335 | N.D. | 2.912 |
| Na | mg/L | 0.571 | N.D. | 5.669 | 1.035 | N.D. | 5.669 |
| B | mg/L | 0.0116 | 0.0004 | 0.0597 | 0.0147 | 0.0011 | 0.0565 |
| Al | mg/L | 0.0356 | 0.0007 | 0.3767 | 0.0215 | N.D. | 0.1701 |
| Cr | mg/L | N.D. | N.D. | 0.0012 | N.D. | N.D. | 0.0008 |
| Mn | mg/L | 0.0118 | 0.0003 | 0.0850 | 0.0098 | N.D. | 0.0544 |
| Fe | mg/L | 0.0317 | N.D. | 0.3488 | 0.0062 | N.D. | 0.0458 |
| Ni | mg/L | N.D. | N.D. | 0.0089 | 0.0026 | N.D. | 0.0089 |
| Cu | mg/L | 0.0017 | N.D. | 0.0205 | 0.0032 | N.D. | 0.0205 |
| Zn | mg/L | 0.0271 | 0.0014 | 0.2211 | 0.0276 | 0.0005 | 0.2211 |
| As | mg/L | 0.0011 | N.D. | 0.0079 | 0.0011 | N.D. | 0.0066 |
| Se | mg/L | N.D. | N.D. | 0.0034 | 0.0006 | N.D. | 0.0034 |
| Sr | mg/L | 0.0044 | 0.0002 | 0.0474 | 0.0079 | 0.0004 | 0.0474 |
| Mo | mg/L | N.D. | N.D. | 0.0008 | 0.0002 | N.D. | 0.0008 |
| Cd | mg/L | 0.0001 | N.D. | 0.0006 | N.D. | N.D. | N.D. |
| Sb | mg/L | 0.0002 | N.D. | 0.0020 | 0.0002 | N.D. | 0.0020 |
| Pb | mg/L | N.D. | N.D. | 0.0082 | 0.0010 | N.D. | 0.0082 |
| U | mg/L | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |

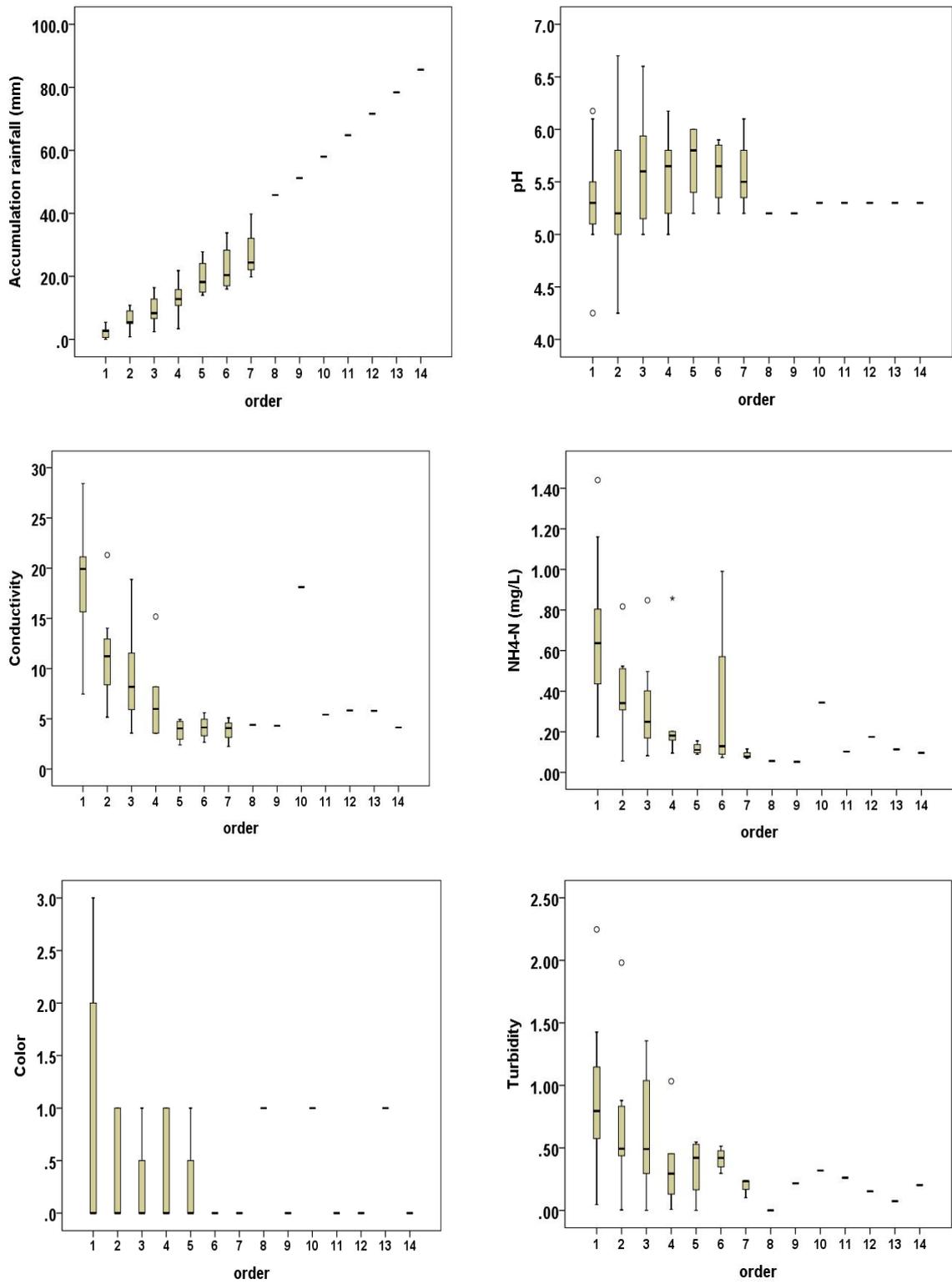


Fig. 2. Box plots of rainwater quality items concentration by order.

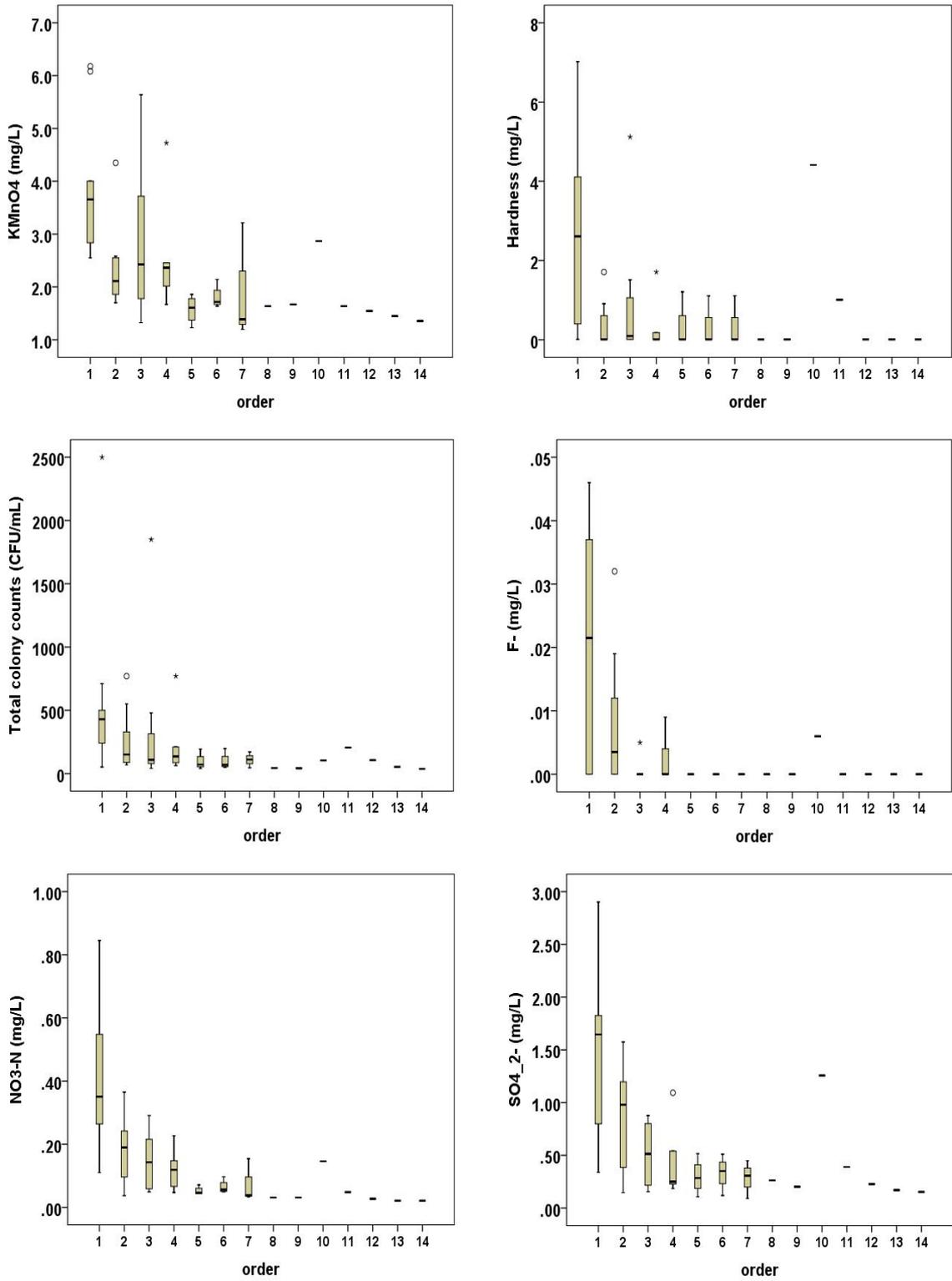


Fig. 2. (Continued)

탁도는 초기 빗물에서 평균 0.89 NTU였고 두 번째 빗물에서 평균 0.64 NTU로 약 30% 농도가 감소하였고, 세 번째 빗물 탁도 평균 0.63 NTU에서 네 번째 빗물이 0.37 NTU로 약 40% 농도가 감소하며 강우가 지속됨에 따라 농도가 감소하는 경향을 보였다. 표 6과 같이 순서별 시료의 평균 농도는 0~0.89 NTU로 먹는물 수질기준에 적합하였지만, 최대 농도의 경우 네 번째 빗물부터 먹는물 수질기준을 만족하여 최대 누적강우량이 20 mm 이상에서 먹는물 수질기준을 만족하는 것으로 나타났다.

암모니아성질소는 초기 빗물 평균농도 0.687 mg/L에서 두 번째 빗물 평균농도 0.385 mg/L로 44% 감소하며 강우가 지속됨에 따라 농도가 감소하는 경향을 보였다. 그림 2에서와 같이 이상치를 제외하고는 초기 빗물 이후부터 먹는물 수질기준 이하로 나타났다. 초기 빗물의 누적강우량이 0.6~5.4 mm이므로 약 5 mm의 초기 빗물을 배제하면 먹는물 수질기준을 만족할 수 있을 것으로 판단된다.

일반세균은 강우가 지속될수록 감소하는 경향을 보였지만, 강우량이 크게 증가하여도 먹는물 수질기준을 초과하는 경우가 많았고, 총대장균군이 검출된 8~10월에는 대부분 강우가 지속되어도 검출되었다. 미생물의 경우, 세정효과가 뚜렷한 이화학 항목과는 다른 경향을 보이며 초기 빗물의 배제를 통한 빗물 이용보다는 살균, 소독 등의 추가적인 처리가 필요할 것으로 사료된다.

전기전도도와 음이온 물질인 불소, 염소이온, 질산성질소, 황산이온은 두 번째 수집된 빗물이 초기 빗물에 비해 약 40~50% 농도가 감소되었다. 이는 빗물의 전기전도도는 강우가 지속되면 초기 빗물에 비해 급격히 농도가 감소한다는 방(9) 등의 다른 연구결과들과 같았다.

과망간산칼륨소비량은 두 번째 빗물이 초기 빗물에 비해 약 40% 농도가 감소되었고, 경도와 칼슘, 나트륨은 50% 이상 농도가 감소되었다.

미량 금속원소는 대부분 불검출이거나 매우 낮은 농도이지만 알루미늄(불검출~0.0442 mg/L), 망간(0.0004~0.0097 mg/L), 철(불검출~0.0419 mg/L), 아연(0.0007~0.2317 mg/L) 등 검출된

미량 금속원소의 경우도 다른 수질항목과 같이 초기 빗물에 비해 두 번째 빗물에서 약 50% 농도가 감소하여 강우지속에 의한 세정효과가 있는 것으로 나타났다.

3. 수처리 후에 빗물 수질 변화특성

연구기간동안 조사된 빗물의 수질특성을 바탕으로 빗물 이용 가능성과 활성화를 위해 간이 수처리를 실시하여 빗물 수질의 변화를 파악하였다. 서울 소재 4층 건물 옥상에서 11월 8일 순차적으로 채취한 빗물 시료 7개를 대상으로 유리플라스틱에서 15분간 끓이는 조건과 천연 코코넛 껍질로 만든 활성탄 여재의 간이여과(B사 가정용 정수필터) 후 수질 변화를 비교해보았다(표 7).

수처리 전 빗물 원수에서 pH, 일반세균, 암모니아성질소는 먹는물 수질기준을 초과하였다.

pH는 끓임 조건에서 유의한 변화가 없었고, 활성탄 여과 후에는 평균 5.6에서 6.4로 증가하여 먹는물 수질기준을 만족하였다.

색도와 탁도는 모든 빗물 시료에서 먹는물 수질기준을 만족하였는데, 탁도는 처리 후 시료에 따라 감소하거나 증가하여 뚜렷한 경향을 파악하기 어려웠고, 색도는 처리 후 오히려 농도가 소폭 증가하였다. 표 7에서와 같이 처리 후 탁도가 2배 이상 증가한 끓임 시료(whole)와 여과 시료(6번)에서 색도가 크게 증가한 결과를 통해 끓이는 과정에서 증발로 인해 탁도 물질이 농축되었거나 여과 과정에서 미량 유출된 여재가 탁도를 유발하여 색도의 방해물질로 작용한 것으로 추정된다.

음이온물질 중 불소와 염소이온은 처리 전후 유의한 변화가 없었고, 질산성질소는 여과 후 대부분 제거되었다. 황산이온도 여과 후 약 50% 농도가 감소하여 이온물질의 경우 여과를 통한 제거 효율이 좋은 것으로 나타났다. 활성탄의 흡착 효율은 공극의 크기, 분포, 표면적, 표면 작용기, 탄화 온도, 흡착 온도 및 용액의 pH에 따라 달라지는데, 이온물질에 따라 제거율이 차이나는 것은 염소이온과 질산이온, 황산이온이 경쟁이온으로 작용한다고 알려져 있고, 활성탄 제조 시 탄화온도가 500℃에서 질산성 질소 제거 효율이 가장 높은 것으로 알려져 있어(17), 여재의 종류와 이온

Table 6. The items concentration of rainwater in study site by order

| Order | | Accumulation | pH | Conductivity | Color | Turbidity | Total Colony | F ⁻ | Cl ⁻ |
|-------|------------------------------------|------------------|---------|---------------|----------------|-----------|--------------------|----------------|-----------------|
| | | rainfall (mm) | | (μ s/cm) | ($^{\circ}$) | (NTU) | Counts (CFU/mL) | (mg/L) | (mg/L) |
| | Drinking water quality standard | | 5.8~8.5 | | ≤ 5 | ≤ 1 | ≤ 100 | ≤ 1.5 | ≤ 250 |
| 1 | Mean | 3.0 | 5.3 | 19 | 1 | 0.89 | 587 | 0.022 | 1.265 |
| | Min. | 0.6 | 4.3 | 7 | 0 | 0.05 | 52 | N.D. | 0.105 |
| | Max. | 5.4 | 6.2 | 28 | 3 | 2.25 | 2500 | 0.046 | 2.814 |
| 2 | Mean | 6.0 | 5.4 | 11 | 0 | 0.64 | 262 | 0.008 | 0.940 |
| | Min. | 0.8 | 4.3 | 5 | 0 | 0.00 | 68 | N.D. | 0.069 |
| | Max. | 10.8 | 6.7 | 21 | 1 | 1.98 | 770 | 0.032 | 2.535 |
| 3 | Mean | 9.3 | 5.6 | 9 | 0 | 0.63 | 362 | 0.001 | 1.033 |
| | Min. | 2.4 | 5.0 | 4 | 0 | 0.00 | 41 | N.D. | 0.082 |
| | Max. | 16.4 | 6.6 | 19 | 1 | 1.36 | 1850 | 0.005 | 2.582 |
| 4 | Mean | 12.9 | 5.8 | 7 | 0 | 0.37 | 233 | 0.002 | 0.928 |
| | Min. | 3.4 | 5.0 | 4 | 0 | 0.01 | 63 | N.D. | 0.061 |
| | Max. | 21.8 | 7.6 | 15 | 1 | 1.03 | 770 | 0.009 | 2.583 |
| 5 | Mean | 19.6 | 5.7 | 4 | 0 | 0.35 | 94 | N.D. | 1.267 |
| | Min. | 14.0 | 5.2 | 2 | 0 | 0.00 | 40 | N.D. | 0.066 |
| | Max. | 27.8 | 6.0 | 5 | 1 | 0.55 | 193 | N.D. | 2.503 |
| 6 | Mean | 22.7 | 5.6 | 4 | 0 | 0.41 | 96 | N.D. | 1.296 |
| | Min. | 16.0 | 5.2 | 3 | 0 | 0.30 | 49 | N.D. | 0.065 |
| | Max. | 33.8 | 5.9 | 6 | 0 | 0.51 | 197 | N.D. | 2.515 |
| 7 | Mean | 28.0 | 5.6 | 4 | 0 | 0.19 | 109 | N.D. | 0.914 |
| | Min. | 19.8 | 5.2 | 2 | 0 | 0.10 | 46 | N.D. | 0.124 |
| | Max. | 39.8 | 6.1 | 5 | 0 | 0.24 | 170 | N.D. | 2.489 |
| 8 | | 45.8 | 5.3 | 4 | 1 | 0.00 | 44 | N.D. | 0.120 |
| 9 | | 51.2 | 5.3 | 4 | 0 | 0.22 | 42 | N.D. | 0.094 |
| 10 | | 58.0 | 6.9 | 18 | 1 | 0.32 | 104 | 0.006 | 0.709 |
| 11 | | 64.8 | 5.4 | 5 | 0 | 0.26 | 205 | N.D. | 0.154 |
| 12 | | 71.6 | 5.8 | 6 | 0 | 0.15 | 106 | N.D. | 0.090 |
| 13 | | 78.4 | 5.8 | 6 | 1 | 0.07 | 53 | N.D. | 0.068 |
| 14 | | 85.6 | 5.3 | 4 | 0 | 0.20 | 37 | N.D. | 0.061 |

Table 6. (Continued)

| | | NO ₃ -N (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) | NH ₄ -N (mg/L) | KMnO ₄ (mg/L) | Hardness (mg/L) | Ca (mg/L) | Mg (mg/L) | K (mg/L) | Na (mg/L) |
|-------|------|------------------------------|---|------------------------------|-----------------------------|--------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| Order | | ≤10 | ≤200 | ≤0.5 | ≤10 | ≤1000 | | | | |
| 1 | Mean | 0.419 | 1.427 | 0.687 | 3.9 | 2.9 | 1.222 | N.D. | N.D. | 0.427 |
| | Min. | 0.110 | 0.339 | 0.176 | 2.6 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| | Max. | 0.845 | 2.902 | 1.440 | 6.2 | 7.0 | 3.035 | N.D. | N.D. | 1.049 |
| 2 | Mean | 0.180 | 0.848 | 0.385 | 2.4 | 0.4 | 0.593 | N.D. | N.D. | 0.115 |
| | Min. | 0.037 | 0.145 | 0.056 | 1.7 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| | Max. | 0.365 | 1.575 | 0.817 | 4.3 | 1.7 | 2.517 | N.D. | N.D. | 0.621 |
| 3 | Mean | 0.147 | 0.511 | 0.322 | 2.9 | 0.9 | 0.396 | N.D. | N.D. | N.D. |
| | Min. | 0.049 | 0.154 | 0.082 | 1.3 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| | Max. | 0.291 | 0.877 | 0.848 | 5.6 | 5.1 | 2.258 | N.D. | N.D. | N.D. |
| 4 | Mean | 0.121 | 0.424 | 0.279 | 2.6 | 0.3 | 0.221 | N.D. | N.D. | N.D. |
| | Min. | 0.047 | 0.184 | 0.095 | 1.7 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| | Max. | 0.227 | 1.093 | 0.857 | 4.7 | 1.7 | 1.329 | N.D. | N.D. | N.D. |
| 5 | Mean | 0.052 | 0.298 | 0.116 | 1.6 | 0.3 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| | Min. | 0.043 | 0.106 | 0.089 | 1.2 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| | Max. | 0.071 | 0.516 | 0.155 | 1.9 | 1.2 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| 6 | Mean | 0.065 | 0.333 | 0.330 | 1.8 | 0.3 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| | Min. | 0.049 | 0.118 | 0.073 | 1.6 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| | Max. | 0.097 | 0.511 | 0.990 | 2.1 | 1.1 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| 7 | Mean | 0.075 | 0.282 | 0.088 | 1.9 | 0.4 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| | Min. | 0.033 | 0.090 | 0.070 | 1.2 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| | Max. | 0.154 | 0.450 | 0.115 | 3.2 | 1.1 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| 8 | | 0.031 | 0.262 | 0.056 | 1.6 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| 9 | | 0.031 | 0.201 | 0.052 | 1.7 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| 10 | | 0.146 | 1.257 | 0.344 | 2.9 | 4.4 | 2.016 | N.D. | N.D. | 0.685 |
| 11 | | 0.048 | 0.390 | 0.102 | 1.6 | 1.0 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| 12 | | 0.027 | 0.226 | 0.175 | 1.5 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| 13 | | 0.021 | 0.169 | 0.113 | 1.4 | N.D. | 0.706 | N.D. | N.D. | N.D. |
| 14 | | 0.021 | 0.152 | 0.096 | 1.4 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |

Table 7. The concentration of rainwater water quality by treatment

| Treat meant | Order | Type | pH | Conductiv ity (μ S/cm) | Color ($^{\circ}$) | Turbidity (NTU) | Total Colony Counts (CFU/mL) | Total Coliforms (/100mL) | Fecal Coliforms (/100mL) | F ⁻ (mg/L) |
|------------------------------------|-------|---------|---------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| Drinking water quality standard | | | 5.8~8.5 | - | ≤ 5 | ≤ 1 | ≤ 100 | Negative | Negative | ≤ 1.5 |
| Raw | 1 | Sampler | 5.2 | 12.9 | N.D. | 0.77 | 460 | Negative | Negative | 0.026 |
| | 2 | | 5.8 | 6.3 | N.D. | 0.83 | 88 | Negative | Negative | N.D. |
| | 3 | | 5.7 | 3.6 | N.D. | 0.65 | 83 | Negative | Negative | N.D. |
| | 4 | | 5.8 | 3.6 | N.D. | 0.45 | 85 | Negative | Negative | N.D. |
| | 5 | | 5.6 | 3.5 | N.D. | 0.55 | 68 | Negative | Negative | N.D. |
| | 6 | | 5.5 | 4.3 | N.D. | 0.40 | 49 | Negative | Negative | N.D. |
| | Whole | Glass | 5.4 | 7.0 | 1 | 0.35 | 19 | Negative | Negative | N.D. |
| Boiling | 1 | Sampler | 5.2 | 34.4 | 1 | 0.64 | 0 | Negative | Negative | 0.032 |
| | 2 | | 5.7 | 36.8 | 1 | 0.75 | 0 | Negative | Negative | N.D. |
| | 3 | | 5.8 | 39.1 | N.D. | 0.48 | 0 | Negative | Negative | N.D. |
| | 4 | | 5.9 | 36.6 | 1 | 0.35 | 0 | Negative | Negative | N.D. |
| | 5 | | 5.9 | 26.8 | 2 | 0.32 | 0 | Negative | Negative | N.D. |
| | 6 | | 5.7 | 38.0 | 1 | 0.53 | 0 | Negative | Negative | N.D. |
| | Whole | Glass | 5.4 | 46.5 | 4 | 0.64 | 0 | Negative | Negative | 0.028 |
| Filtration | 1 | Sampler | 6.5 | 27.6 | 1 | 0.52 | 230 | Negative | Negative | N.D. |
| | 2 | | 6.3 | 34.7 | 2 | 0.82 | 70 | Negative | Negative | N.D. |
| | 3 | | 6.2 | 20.1 | 2 | 0.64 | 54 | Negative | Negative | N.D. |
| | 4 | | 6.4 | 29.0 | N.D. | 0.44 | 69 | Negative | Negative | N.D. |
| | 5 | | 6.3 | 30.3 | 1 | 0.46 | 43 | Negative | Negative | N.D. |
| | 6 | | 6.5 | 47.3 | 3 | 0.90 | 16 | Negative | Negative | N.D. |
| | Whole | Glass | 6.5 | 24.1 | 1 | 0.31 | 2 | Negative | Negative | N.D. |

Table 7. (Continued)

| Treat meant | Order | Type | pH | Conductiv ity (μ s/cm) | Color (°) | Turbidity (NTU) | Total Colony Counts (CFU/mL) | Total Coliforms (/100mL) | Fecal Coliforms (/100mL) | F ⁻ (mg/L) |
|------------------------------------|-------|---------|---------|-----------------------------------|--------------|--------------------|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| Drinking water quality standard | | | 5.8~8.5 | - | ≤5 | ≤1 | ≤100 | Negative | Negative | ≤1.5 |
| Raw | 1 | Sampler | 5.2 | 12.9 | N.D. | 0.77 | 460 | Negative | Negative | 0.026 |
| | 2 | | 5.8 | 6.3 | N.D. | 0.83 | 88 | Negative | Negative | N.D. |
| | 3 | | 5.7 | 3.6 | N.D. | 0.65 | 83 | Negative | Negative | N.D. |
| | 4 | | 5.8 | 3.6 | N.D. | 0.45 | 85 | Negative | Negative | N.D. |
| | 5 | | 5.6 | 3.5 | N.D. | 0.55 | 68 | Negative | Negative | N.D. |
| | 6 | | 5.5 | 4.3 | N.D. | 0.40 | 49 | Negative | Negative | N.D. |
| | Whole | Glass | 5.4 | 7.0 | 1 | 0.35 | 19 | Negative | Negative | N.D. |
| Boiling | 1 | Sampler | 5.2 | 34.4 | 1 | 0.64 | 0 | Negative | Negative | 0.032 |
| | 2 | | 5.7 | 36.8 | 1 | 0.75 | 0 | Negative | Negative | N.D. |
| | 3 | | 5.8 | 39.1 | N.D. | 0.48 | 0 | Negative | Negative | N.D. |
| | 4 | | 5.9 | 36.6 | 1 | 0.35 | 0 | Negative | Negative | N.D. |
| | 5 | | 5.9 | 26.8 | 2 | 0.32 | 0 | Negative | Negative | N.D. |
| | 6 | | 5.7 | 38.0 | 1 | 0.53 | 0 | Negative | Negative | N.D. |
| | Whole | Glass | 5.4 | 46.5 | 4 | 0.64 | 0 | Negative | Negative | 0.028 |
| Filtration | 1 | Sampler | 6.5 | 27.6 | 1 | 0.52 | 230 | Negative | Negative | N.D. |
| | 2 | | 6.3 | 34.7 | 2 | 0.82 | 70 | Negative | Negative | N.D. |
| | 3 | | 6.2 | 20.1 | 2 | 0.64 | 54 | Negative | Negative | N.D. |
| | 4 | | 6.4 | 29.0 | N.D. | 0.44 | 69 | Negative | Negative | N.D. |
| | 5 | | 6.3 | 30.3 | 1 | 0.46 | 43 | Negative | Negative | N.D. |
| | 6 | | 6.5 | 47.3 | 3 | 0.90 | 16 | Negative | Negative | N.D. |
| | Whole | Glass | 6.5 | 24.1 | 1 | 0.31 | 2 | Negative | Negative | N.D. |

경쟁 등의 요인에 의해 질산이온의 흡착율이 가장 높게 나타난 것으로 판단된다.

암모니아성질소는 여과 후에 70% 이상 농도가 감소하여 먹는물 수질기준을 만족하였다. 흡착에 있어 pH는 매우 중요한 변수인데, pH에 따라 물질의 존재비율이 달라지기 때문이다(19). 낮은 pH에서 암모늄 이온은 수소이온과 경쟁하여 흡착이 제대로 이뤄지지 않고, 높은 pH에서는 암모니아 기체로 해리되기 때문에 pH 5~7 영역에서 흡착률이 가장 높아(5), pH 6.2~6.5 영역에서 암모늄 이온의 제거율이 높았던 것으로 판단된다.

과망간산칼륨소비량은 여과 후 60% 이상 농도가 감소하였고, 미량 금속원소는 대부분 불검출 또는 낮은 농도로 인해 간이 수처리에 의한 유의한 변화를 파악하기 어려웠다.

일반세균은 여과 후에 40% 이상 감소효과가 있었지만 먹는물 수질기준은 만족하지 못하였고, 끓임 조건에서 100% 사멸되었다. 따라서 신체접촉 가능한 빗물 활용을 위해서는 여과보다는 끓임 또는 염소 소독과 같은 처리가 더 효과적일 것으로 판단된다.

결 론

1. 서울 소재 4층 건물 옥상과 산성우 측정망 6지점의 빗물 중 이온물질, 미량 금속원소, 일반세균 등 총 25~38항목 분석하여 초기 빗물의 특성을 파악하고, 대기환경인자와의 상관성을 분석한 결과, 선행 무강우시간이 길어질수록 대기환경의 오염 정도가 심하였고 (초)미세먼지 농도가 증가함에 따라 전기전도도, 색도, 이온물질, 암모니아성질소, 칼슘, 마그네슘, 칼륨, 나트륨, 미량 금속원소 물질도 증가하였다. 또한 pearson 상관분석 결과, 대기환경인자 중 (초)미세먼지는 초기 빗물 수질의 암모니아성질소, 이온물질, 색도, 미량 금속원소 등과 연관성이 높아 빗물 활용시 대기환경에 따라 이용범위를 다르게 설정해야 할 것으로 판단된다.
2. 강우가 지속됨에 따라 대부분 항목이 초기 빗물에 비해 약 50% 농도가 저감되는 경향을 보

여 초기 빗물을 배제하면 빗물의 활용도를 높일 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 일반세균과 총대장균군 등 미생물은 세정에 의한 농도감소 경향이 뚜렷하지 않아 빗물의 활용을 위해서는 소독 등의 추가적인 처리가 필요할 것으로 판단된다.

3. 먹는물 기준 적용시 부적합 항목은 대부분 15분간 끓임과 간이여과 처리를 통해 먹는물 기준 이내로 처리됨을 확인할 수 있었다. 일반세균은 끓임 조건에서 모두 사멸되었고, 필터 여과 후에는 40% 이상 감소하였다. 암모니아성질소와 이온물질, 과망간산칼륨소비량은 필터 여과 후 50% 이상 감소되는 효과가 나타났다.
4. 빗물을 생활용수로 사용하기 위해서는 pH의 조절과 미생물학적 안전을 고려하여 저류조에 저장 또는 염소소독 등 간단한 처리가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 국립환경과학원 : 먹는물공정시험기준, 2017.
2. 김정진, 안미진, 김승필, 임윤석, 서광석, 노승근, 김영호, 유승성, 어수미, 정권 : 서울지역 초미세먼지 중 이온성 물질에 대한 통계학적 특성분석 연구, 서울특별시 보건환경연구원보, 53:186~196, 2017.
3. 김성곤 : 빗물의 집수방식별 수질특성에 관한 연구, 창원대학교 대학원 환경공학과, 2016.
4. 김성곤, 이택순, 김용철, 한치복 : 빗물 집수방식 차이에 따른 받은 빗물 수질특성 분석, 한국수처리학회지, 24(2):88~99, 2016.
5. 김성미 : 활성탄의 물리적 특성에 따른 암모니아 흡착 및 효율성 연구, p.48~49, 2013.
6. 김성표, 김두철, 오준식, 김이형, 민경석 : 강우지속시간에 따른 건물지붕빗물의 성장특성 변화에 대한 기초 연구, 한국습지학회, 14(1), 2012.
7. 김수향, 선우영, 박영재, 박무중, 전환돈, 홍기호, 최준규, 김진관 : 서울시에서의 강우가 대기오염물질에 미치는 영향 분석, 한국대기

- 환경학회, 16:109~110, 2009.
8. 김용철, 이택순, 한치복, 전숙례, 박주현 : 태양광 발전 기반 초기빗물배제형 빗물집수장치의 발전량 및 수질특성, 한국수처리학회지, 25(2):83~91, 2017.
 9. 방기웅, 성기은, 대성성, 최창수, 이준호 : 우수 재이용을 위한 지붕우수 유출수의 수질평가, 한국도시환경학회지, 13(3):217~226, 2013.
 10. 신윤미, 엄정훈, 양혜란, 심미희, 이원영, 박세영, 오석률, 이만호, 어수미 : 서울시 (초)미세먼지 중의 중금속 분포 특성, 53:148~156, 2017.
 11. 안상수, 위환, 윤상훈, 장서은, 정숙경, 조영관, 김은선 : 광주지역 빗물이용시설의 수질특성에 관한 연구, 한국환경분석학회지, 19(2):63~71, 2016.
 12. 이민희 : 황사현상시 강우에 의한 대기오염물질의 강하량, 한국대기환경학회, 1:89~92, 1994.
 13. 이종식, 정구복, 김진호, 김원일, 윤순강, 임재철 : 태안지역 강우의 화학성분 특성, 20(4):284~288, 2001.
 14. 이주영, 김충일, 김현우, 한무영 : 집수빗물이용을 위한 지붕면 재질의 영향, 대한환경공학회, p.623~629, 2012.
 15. 임윤석, 조석주, 박창호, 이용민, 조성호, 노승근, 김정연, 어수미 : 서울 송파지역의 초미세먼지 중 중금속 특성 및 발생원 평가, 52:222~230, 2016.
 16. 장병민 : 플라스틱 빗물이용시설의 저장 빗물수질 분석, 광운대학교 환경대학원 환경공학과, 2014.
 17. 최경옥, 서석진, 고상훈 : 지하수의 안전한 음용을 위한 흡착기반 질산성질소 저감화 기술, 18(1):36~41, 2014.
 18. 최광운, 이종태 : 강우, 풍속 및 건기일수와 대기 먼지 오염량과의 상관성 분석, 대한토목학회, 3:119~122, 2000.
 19. 최수아 : 활성탄 충전 칼럼에서의 중금속 이온 흡착 특성 및 공존이온의 영향에 관한 연구, 2010.
 20. 한무영, 이일웅, 김미형, 김형진 : 빗물이용시스템에서 빗물의 pH와 전기전도도에 관한 연구, 상하수도학회지, 16(1):80~86, 2002.
 21. 한치복, 이택순 : 창원지역 빗물의 계절변화 및 저류시간에 따른 수질변화, 대한환경공학회, p.461~468, 2010.
 22. 한치복, 이택순, 서규태, 강미아 : 집수면 및 저장조 재질에 따른 빗물의 수질적 특성에 관한 연구, 21(1):13~21, 2013.
 23. 한치복, 이택순, 서규태 : 창원시 도심 지역의 내리는 빗물 수질 분석, 한국수처리학회지, 22(2):25~36, 2014.
 24. IIR ED, German Informative Inventory Report, 2012.
 25. Mendez, CB, Klenzendorf, JB, Afshar, BR, Simmons, MT, Barrett, ME, Kinney, KA and Kirisits, MJ : The effect of roofing materials on the quality of harvested rainwater, Water Res., 45(5):2049~2059, 2011.
 26. Qi-Li Dai, Xiao-Hui Wu, Yu-Fen Zhang, Jing Wang, Hong Xu, Lin Yao, Li Jiao and Yin-Chang Feng : Characterization and Source Identification of Heavy metals in Ambient PM10 and PM2.5 in an Intergrate Iron and Steel Industry Zone Compared with a Background Site : Aerosol and Quality Research, 15:875~887, 2015.