
인천지역 강우특성 및 영향평가

2022. 1.



인천보건환경연구원
[기후대기과]

< 요약 >

인천지역 강우특성 및 영향평가

☐ 추진배경

- 대기오염으로 산성화된 강우의 자연환경 유입으로 생태계 훼손 우려 증가
- 강우의 오염실태 조사를 통한 문제성 파악 및 대응책 모색

☐ 전략과제

- 인천지역 강우에 대한 시계열적 변동 추이 조사분석
- 지역별, 반기별 강우특성 및 영향평가

☐ 사업개요

- 기 간: 2021년 1월 ~ 10월
- 대 상: 인천 관내 5개 지점(도심 4, 도서해안 1)
- 내 용
 - 자료수집시스템을 활용한 강우량, pH, 전기전도도 분석
 - 지역별, 반기별 강우량에 따른 산성화 현황 조사
- 항 목: 중금속 성분 및 이온물질 등 23항목

☐ 주요실적(100건)

- 강우 시계열적 변동 추이 조사분석 (50건)
- 강우의 중금속 부하계수 평가 (50건)
- 인천지역 강우특성 조사(지역·반기별)
 - 지역별, 반기별 강우량과 용해성분 상관관계 조사

☐ 기대효과

- 인천지역 강우특성 및 중금속 오염실태 조사 결과 등 자연환경 개선을 위한 정책자료 제공
- 강우의 산성화 실태조사 결과 제공으로 인천 시민 보건향상에 기여

인천지역 강우특성 및 영향평가

조영성*, 이지은, 이제훈, 이명진, 이현주, 곽완순, 권문주
인천보건환경연구원 기후대기과

Evaluation of Characteristics and Impacts of Rain in Incheon Metropolitan City

Yeong-Seong Jo*, Ji-Eun Lee, Je-Hoon Lee, Myoung-Jin Lee, Hyeon-Ju Lee,
Wan-Soon Kwack, and Mun-Ju Kwon

Climate and Air Quality Division, Incheon Research Institute of Public Health and Environment

Abstract

This study was conducted to investigate the data of data collection system and the measuring results of acid rain for the purpose of understanding the actual condition of acidification. The acidity decreased from high states in the early stages of rain, and the coastal areas had lower acidity than the urban areas. The acidity was proportional to the anion and inversely proportional to the rainfall. The enrichment factor of heavy metals was severely contaminated with trace elements, and the equivalent concentration ratios of anion was SO_4^{2-} 41.6%, NO_3^- 38.0% and Cl^- 20.4%. In future, the damage to acid rain should be reduced by implementing a policy to reduce acid rain.

Key words : Acid precipitation, Acidity, heavy metal, enrichment factor

I. 서론

오늘날 전 지구적인 산업화는 기온상승, 질병 확산 등 기후변화 위기를 초래하고 있으며, 산성비도 그 중 하나로 인식되고 있다.

대기 중에 방출된 질산화물, 황산화물이 세정작용(rain out)과 흡수·흡착작용(washout)을 통해 산성우로 강하하여 산림파괴, 호소나 토양의 산성화, 문화 유적이나 건축물의 부식 등 다양한 피해를 유발하고 있다.

일찍이 공업이 발달한 유럽이나 북미지역에서는 산림파괴 및 호소·하천의 산성화 문제를 경험하였으며, 이제는 동북아시아 지역의 급격한 산업화 및 편서풍에 의한 대기오염물질 이동으로 우리가 살고 있는 지역에서도 산성비 등 대기오염 조사의 필요성이 증가하고 있다.

국내에서는 환경부에서 전국적으로 산성강하물측정망을 운영하고 있으며 우리 인천시에서도 5개 지역에 측정망을 운영하고 있다. 강우발생 시에는 자동으로 시료를 채취하고 측정 데이터를 전송하고 하고 있어 산성우 발생의 정확한 현상을 이해하고 규명하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서는 인위적으로 배출되어 산성화를 유발하는 질산화물 및 황산화물에 의한 강우산도의 시계열적 변동추이를 살펴보고, 더불어 빗물의 중금속 부하계수 평가로 산성우 실태를 살펴보고자 한다.

II. 연구대상 및 방법

2.1. 조사개요

2.1.1. 조사대상 및 기간

본 연구에서는 인천광역시의 산성강하물을 대표할 수 있는 도심지역의 송도, 송림, 연희, 원당측정소 및 도서해안 지역의 송해측정소를 조사대상으로 선정하였으며, 1월부터 10월까지 매월 중금속, 이온물질 등의 변화량을 조사하였다.

2.1.2. 조사항목 및 지점

조사항목은 대기오염측정망 설치·운영지침에서 관리하고 있는 중금속 12항목(Pb, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, As, Be, Al, Ca, Mg), 이온물질 8항목{양이온(Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}), 음이온(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-})}, 전기전도도, pH, 강수량에 대하여 조사를 진행하였다.

조사지점은 도심지역인 송도(연수구), 송림(동구), 연희·원당(서구)과 도서해안 지역인 송해(강화군)에서 진행하였으며 (Fig. 1)에 자세한 위치를 나타내었다.



Fig. 1. Sampling site for the study

2.1.3. 시료채취 및 분석방법

2021년 1월부터 10월까지 10개월간 산성강하물 시료를 매월 1회 채취·분석하였으며 자료수집시스템을 활용하여 시계열별 변동추이를 조사하였다. 시료는 (Fig. 2)와 같이 강수발생 시 산성강하물측정기{Precipitation-monitor NMO 191 (EIGENBRODT, Environment measurement systems)}로 강우량 및 pH, 전기전도도를 자동 측정하여 자료수집시스템으로 데이터를 전송하고



Fig. 2. Sampling equipment

시료보관부의 bottle에서는 강우시료를 1일 단위로 자동 채취하여 다음 날 아이스박스로 냉장 이동 후 분석하였다.

pH 및 전기전도도는 ORION 4 STAR pH·Conductivity Benchtop (Thermo Scientific)으로 측정하였고, 이온성 물질은 IC(DIONEX ICS-6000 DC, Thermo Scientific), 중금속은 ICP-MS(Agilent Technologies 7800 ICP-MS)로 분석하였다.

2.2. 산성강하물 상관분석

2.2.1. 상관분석

상관분석은 기본적으로 데이터 간에 관계성이 얼마나 존재하는지를 분석하는 것이며, 두 데이터 간에 관계성이 있는지 없는지에 대한 가장 객관적인 결과 값을 보여준다. 두 데이터 간에 관계성이 어느 정도로 양 혹은 음의 관계인지를 수치화하여 보여주는 것이 상관분석이다. 그러므로 상관분석은 최종적으로 관계를 나타내는 수치가 +1과 -1 사이의 값을 제시한다. 상관계수가 양(+)의 값을 가질 때는 정적 상관, 음(-)의 값을 가질 때는 부적 상관이라고 하며, 상관계수가 0일 때는 아무 관련성이 없음을 의미한다.

일반적으로 0.2 ~ 0.4 사이면 상관관계가 낮은 편이고 0.4 ~ 0.6 이면 상관관계가 있다고 말한다. 0.6 ~ 0.8 사이라면 상관관계가 높다고 말할 수 있고, 0.8 ~ 1.0이면 상관관계가 매우 높다(차진욱 등, 2018).

Ⅲ. 결과 및 고찰

3.1. 산성강하물 조사결과

3.1.1. 인천지역 강우에 대한 시계열적 변동 추이 조사

본 연구는 인천 관내 산성강하물의 강우특성을 알아보기 위해 10개월 간 매월 하루를 선택하여 강우시간대에 5분 간격으로 수집된 자료의 시계열적 변동추이를 조사하였다.

지역적 특성을 파악하기 위해 도심지역(송도, 송림, 연희, 원당)과 도서지역(송해)으로 구분하여 5지점을 선정하였으며, 시계열적 변동추이를 (Fig. 3, 4) 및 (Table 1)에 나타내었다. pH는 초기 5분경에 pH 4.7로 가장 낮으며 점점 높아져 55분경에 pH 5.7까지 상승하여 정점을 찍은 후 100분경까지 점진적으로 하강하여 안정화되었다. 강우 초기에 알칼리성 물질(Ca^{2+} , NH_4^+ 등)이 제거되어 pH가 상승하고 이후 산성물질(SO_4^{2-} , NO_3^- 등)이 강우의 pH 저하에 기여하는 것과 관련이 있다고 알려져 있다(송복주, 2003).

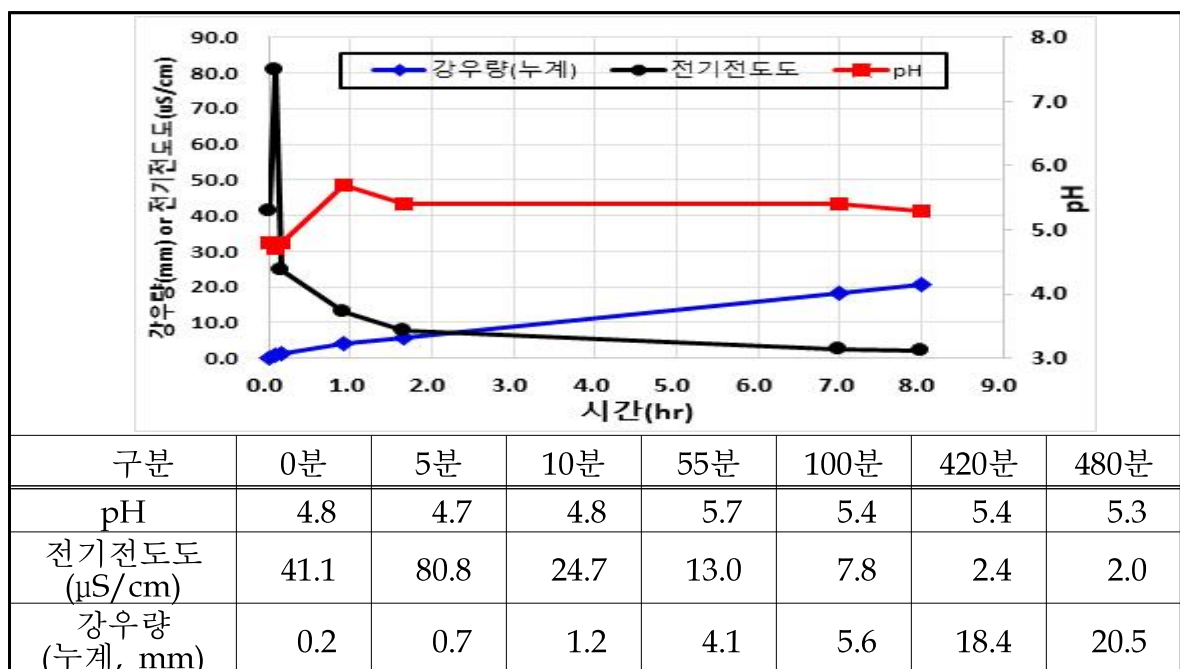


Fig. 3. Changes in pH, electrical conductivity and rainfall.

전기전도도는 강우 초기 41.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에서 급상승하여 5분경에 80.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$

으로 정점을 찍은 후 급격히 하강하여 10분경에 24.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 을 나타내고 이후 점진적으로 하강하는 경향을 나타냈다. 상관분석 결과, 강우 초기 55분간 강우량과 pH는 양의 상관관계, 전기전도도는 음의 상관관계이며, 1시간 후에는 모두 음의 상관관계를 나타냈다.

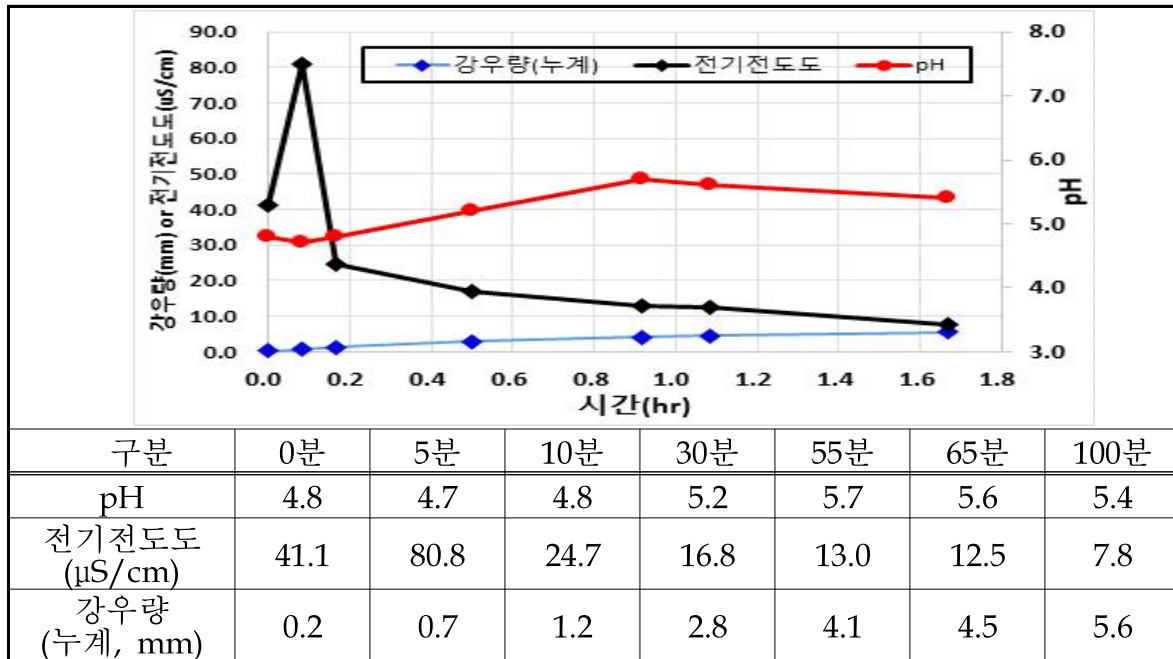


Fig. 4. Changes in pH, electrical conductivity and rainfall.

Table 1. Changes in pH and electrical conductivity by rainfall time.

구분	5분	10분	20분	30분	40분	50분	55분
강우량(누계)	0.7	1.2	2.1	2.8	3.4	3.9	4.1
전기전도도	80.8	24.7	17.4	16.8	14.6	13.1	13.0
pH	4.7	4.8	5.2	5.2	5.5	5.5	5.7
구분	65분	80분	90분	100분	110분	120분	
강우량(누계)	4.5	5.2	5.6	5.6	6.1	6.8	
전기전도도	12.5	11.1	11.9	7.8	6.8	8.0	
pH	5.6	5.1	4.9	5.4	5.3	5.1	
상관계수	○ 강우량 vs. pH: 초기 55분 0.98, 1~2시간 -0.68 ○ 강우량 vs. 전기전도도: 초기 55분 -0.75, 1~2시간 -0.82 ☞ 0.2~0.4(낮음), 0.4~0.6(보통), 0.6~0.8(높음), 0.8~1.0(매우높음)						

3.1.2. 중금속 부하계수 평가

강우의 중금속 및 오염특성을 비교하기 위하여 지각과 토양입자의 전형적인 지시원소인 Al 함량을 이용하여 중금속별 부하계수(Enrichment Factors, EF)를 산출하였다(장구복, 2007). 강우 중 부하계수의 환산식은 $EF = \{(X/Y_{AL})_{rainwater}/(X/Y_{AL})_{crust}\}$ 로 여기에서 $(X/Y_{AL})_{rainwater}$ 는 강우 중 중금속 X 및 Al의 농도비, $(X/Y_{AL})_{crust}$ 는 지각(토양) 중 중금속 X 및 Al의 농도비를 각각 나타낸다(Duce, R, A., 1975). 본 논문의 부하계수 환산은 (Table 2)와 같이 제퍼슨연구소, 이스라엘 과학 및 기술 등을 참고하였으며, 부하계수 값이 높을수록 인위적인 발생원에 의한 영향이 큰 것으로 보고 있다.

Table 2. The ratios of heavy metals in the crust.

(단위: mg/L)

항목	Be	Mg	Ca	Cr	Mn	Fe
중금속농도	2.4	23,400	41,060	158	980	52,160
$(X/Y_{AL})_{crust}$	0.000030	0.286554	0.502817	0.001940	0.012001	0.638746
항목	Ni	Cu	As	Cd	Pb	Al
중금속농도	111	70	1.8	0.14	13	81,660
$(X/Y_{AL})_{crust}$	0.001359	0.000851	0.000022	0.000002	0.000155	-

※ 지각 중금속 농도(제퍼슨연구소, 이스라엘 과학 및 기술 등 다수 참고)

부하계수를 제안한 Duce 등(Duce, R, A., 1975)은 부하계수 값(EF)이 1~10은 대상지역 토양 및 지각의 원소조성 차이에 의한 부하가 아니며, EF 10~100은 지각의 자연 화학조성보다 강우의 성분조성이 상대적으로 부하가 있는 상태, EF 100 이상은 인간활동에 의한 인위적인 오염이 심각하여 부하상태가 매우 높은 것으로 정의하였다.

(Table 3)은 강우의 중금속별 오염상태의 상대적인 지수로 표현하기 위하여 지각 중의 중금속 농도를 기준으로 계산하여 나타낸 부하계수(Enrichment Factors, EF) 값이다. 일반적으로 인위적인 오염이 없을 경우 자연적인 원인에 의한 배경농도로 볼 수 있으나 인간활동에 기인한 여러 가지 인위적인

방출에 의하여 이온 및 금속농도가 증가하고 있는 실정이다. 부하계수 환산의 기준물질인 Al은 토양입자 구성에 있어 전형적인 기원원소이기 때문에 토양 및 지각의 비산이나 기타 물리적 작용에 의해 발생된다. 따라서 지각 조성과 비슷한 자연적 유래 성분들은 낮은 EF 값을 보이지만 인위적으로 발생하는 성분들의 EF 값이 높은 특징을 보인다. 강우의 중금속 부하계수 값은 종별로 다양한 편차가 있으며 그 계수 값 경향치는 $Cd > As > Pb > Cu > Be > Mn > Ni > Mg > Cr > Ca > Fe$ 순이었다. 자연적으로 발생하는 지각 유래원소로 알려진 Fe, Mg 및 Ca와 비교하여 Cd, As, Pb, Cu 등 지각 미량원소의 부하계수가 상대적으로 매우 높았다. 이러한 상황은 (Table 3)에서 보는 바와 같이 인위적 활동으로 대기 중 농도가 증가하고 산성강하물 부하계수도 비례 상승하는 경향으로 추정해볼 수 있다. 각 원소별로는 Fe, Ca 부하계수가 10 이하로 매우 적게 부하되어 있고, Be, Mg, Cr, Mn, Ni는 10~100으로 약간 부하되어 있으며, Cu, As, Cd, Pb는 인위적 오염으로 심각하게 부하되어 있는 것으로 볼 수 있다.

Table 3. The enrichment factors of heavy metals in rainwater.

(단위: 강우중금속 $\mu\text{g/L}$, 대기중금속 $\mu\text{g/m}^3$)

항목		Be	Mg	Ca	Cr	Mn	Fe
중금속 농도	강우	0.0075	114.0150	44.1767	0.3351	5.3263	43.3386
	대기	0.0000	0.1383	0.4208	0.0032	0.0201	0.5281
부하계수	강우	21.7	15.9	2.6	12.2	19.0	1.1
	대기	0.0	1.7	3.0	6.5	6.0	3.1
항목		Ni	Cu	As	Cd	Pb	Al
중금속 농도	강우	0.4278	1.3767	0.3863	0.0436	0.7231	45.8087
	대기	0.0025	0.0207	0.0026	0.0006	0.0169	0.2803
부하계수	강우	18.6	115.3	925.7	2,317.0	231.2	-
	대기	7.1	95.9	439.1	1,336.9	415.3	-

※ 강우부하계수는 산성강하물측정망 시료, 대기부하계수는 중금속측정망 여지(PM10) 시료를 사용

3.1.3. 강우의 화학적인 특성

3.1.3.1. pH

전혀 오염되지 않은 대기권에서부터 내리는 빗물조차도 약한 산성을 띠는데, 이는 빗물 중에 용존 CO_2 가 존재하기 때문이다. 일반적으로 표준 건조 공기의 부피비로 25°C , 400 ppm CO_2 의 농도를 갖는 공기와 평형을 이루는 물은 pH 5.6의 값을 나타낸다(김만구, 2018). 이러한 이유로 오염되지 않은 대기와 평형을 이루고 있는 순수한 물이 7보다 약간 낮은 pH를 가지면서 약산성을 나타내게 된다. 오늘날 강우의 산성화가 문제가 되는 것은 온실가스인 CO_2 의 증가도 일부 원인이 될 수 있지만 보다 근본적으로 대기 중에서 rain out이나 wash out에 의해 형성된 강우 중에 포함된 NO_3^- 나 SO_4^{2-} 에 의한 것이다. 이러한 음이온 물질은 주로 자동차와 화석연료의 연소 시 발생하여 강우의 산성도를 높여 자연계를 손상시켜 우리의 일상생활에 피해를 끼치게 된다.

산성우가 자연계에 미치는 영향으로는 하천이나 호수의 pH 저하에 의한 중금속 용출, 먹이사슬에 의한 기형어 발생, 물고기 호흡장애 등이 있다. 토양의 경우 pH가 낮아져 완충능력을 점진적으로 상실하고 칼슘, 마그네슘 등 염기성분이 유실되므로 영양분이 결핍되어 생산성을 감소시킨다(이준배, 1993). 산성우는 토양 미생물의 활동력을 감소시키고 수목의 생산력을 저하시키므로 생석회 사용 등의 방법으로 토질을 개선시켜 대응하기도 하는데, 이번 조사기간의 평균 pH가 6.0(산성우 pH 5.6 미만)으로 산성화의 문제는 없는 것으로 판단된다.

2021년 1월부터 10월까지 조사한 바(Table 4 ~ 5)에 따르면 상반기 대비 하반기에 음이온 농도가 증가하고 강우량이 감소하면서 산성도가 증가하였다. 지역별로는 도심지역 pH가 5.9(송도 5.7, 연희 5.9, 송림·원당 6.0)로 송해 6.1보다 낮게 나타나 대기오염 물질 발생량이 많은 도심의 산성도가 높은 것을 볼 수 있었다.

Table 4. The half-yearly pH and anion concentration.

구분	pH	강우량	음이온
상반기	6.2	191.4	39.358
하반기	5.7	122.7	55.763

Table 5. The monthly and regional pH.

지점 월	송도	송림	연희	원당	송해	평균
1	5.7	6.1	6.1	6.4	6.8	6.1
2	6.6	7.0	6.6	6.9	6.5	6.6
3	6.9	6.3	6.1	6.2	6.1	6.2
4	6.8	5.9	6.3	5.9	6.0	6.0
5	6.4	6.9	6.3	6.6	6.3	6.5
6	5.5	5.9	7.0	5.8	6.1	5.9
7	6.6	6.3	6.4	6.3	6.6	6.4
8	4.9	5.4	5.0	5.7	5.4	5.1
9	5.7	5.7	5.7	5.7	5.8	5.7
10	5.7	5.9	6.4	5.6	5.8	5.8
봄	6.6	6.2	6.2	6.2	6.1	6.2
여름	5.3	6.0	5.7	6.0	6.2	5.8
가을	5.7	5.7	5.8	5.7	5.8	5.7
겨울	5.8	6.1	6.1	6.4	6.7	6.1
평균	5.7	6.0	5.9	6.0	6.1	6.0

3.1.3.1. 전기전도도

전기전도도는 용액내의 총 이온의 양을 나타내는 자료로서 일반적으로 빗물의 경우 오염 정도가 높을수록 많은 이온 성분들이 용해되어 전기전도도가 높아진다. 대체로 대기 중의 부유분진이 세정(wash out) 작용에 의한 강우로 혼입되어 전기전도도를 증가시킨다. 조사결과 (Table 6)를 보면, 강우량이 증가하면 전기전도도가 감소(상관계수 - 0.65)하고 이온물질 농도가 증가하면 전기전도도가 뚜렷하게 증가(상관계수 0.97)하는 것을 볼 수 있다.

Table 6. The monthly electrical conductivity, rainfall and concentration of ionic substances.

(단위: 전기전도도 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 이온물질 $\mu\text{eq}/\text{L}$, 강수량 mm)

구분	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	평균
pH	6.1	6.6	6.2	6.0	6.5	5.9	6.4	5.1	5.7	5.8	6.0
전기전도도	31.4	76.4	10.3	9.7	7.9	15.1	9.6	17.3	23.1	26.7	13.5
이온물질	412.0	1,085.3	62.9	44.8	52.8	313.3	96.2	235.6	153.4	328.7	116.6
강수량	10.5	1.2	58.9	48.2	64.2	8.5	51.4	12.2	46.3	12.8	314.1
상관계수	<ul style="list-style-type: none"> ○ 강수량 vs. pH: 1~10월 0.29 ○ 강수량 vs. 전기전도도: 1~10월 -0.65 ○ pH vs. 전기전도도: 1~10월 0.28 ○ 전기전도도 vs. 이온물질: 1~10월 0.97 ☞ 상관계수 : 0.2~0.4(낮음), 0.4~0.6(보통), 0.6~0.8(높음), 0.8~1.0(매우높음) 										

3.1.3.1. 이온물질의 연평균 특성

2021년 1월부터 10월까지 산성강하물측정기로 월 1회씩 채취하여 pH, Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ 의 강수량에 대한 가중평균 농도를 구하여 산출하였으며, 전 지역에 대한 연평균 농도는 지역별 강수량을 고려한 강수량 가중 평균치를 구하였다. (Table 7)은 조사기간 동안 주요 이온 성분 에 대한 강수량 가중 평균 농도를 나타낸 것이다.

음이온 성분은 NO_3^- 1.079 mg/L, SO_4^{2-} 0.913 mg/L, Cl^- 0.331 mg/L로 $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ 순으로 나타났으며, 양이온 성분은 Na^+ 0.499 mg/L, NH_4^+ 0.460 mg/L, Ca^{2+} 0.228 mg/L, Mg^{2+} 0.116 mg/L, K^+ 0.096 mg/L로서 $\text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 순으로 나타났다. 각 항목별 이온성분 농도 범위를 보면 음이온 성분 중 NO_3^- 는 0.507 ~ 10.422 mg/L, SO_4^{2-} 0.504 ~ 7.510 mg/L, Cl^- 0.000 ~ 5.761 mg/L를 나타내고 있으며, 양이온 성분 중 NH_4^+ 는 0.098 ~ 4.811 mg/L, Na^+ 0.159 ~ 3.196 mg/L, Ca^{2+} 0.027 ~ 2.954 mg/L, K^+ 0.017 ~ 0.594, Mg^{2+} 0.030 ~ 0.589 mg/L의 범위를 나타내고 있다.

3.1.3.2. 이온물질의 지역별 특성

지역별 이온성분 농도를 비교해 보면 NO_3^- , SO_4^{2-} 는 송해, 송도 지역에서 비교적 높게 나타났으며, 원당에서 비교적 낮게 나타났다. Cl^- 는 송도, 송림, 송해에서 비교적 높게 나타났으며, 연희, 원당에서 낮게 나타났다. Na^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} 은 송도, 송해, 송림에서 비교적 높게 나타났으며, 원당, 연희에서 낮게 나타났다. Mg^{2+} , K^+ 은 대부분 비슷한 가운데 송림이 비교적 높게 나타났다.

또한 측정지점 내에서의 이온성분별 농도를 비교해 보면, 모든 지역에서 음이온 성분은 $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ 의 순으로 나타났다. 양이온 성분은 송도·연희·원당 지점에서 $\text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 의 순으로 나타났으며, 송해·송림 지점은 $\text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 순으로 나타났다. 일반적으로 NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ 는 인위적인 발생으로부터 주로 유입되며, Na^+ , Cl^- 은 해양으로부터 유입된다. 송도·송림·송해는 바닷가 인근 지역으로 연희·원당에 비해 염소이온이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이는 인천시의 강우특성이 잘 반영된 것으로 볼 수 있다(Table 7).

Table 7. The regional concentration of ionic substances(mg/L).

항목 지점	pH	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	NH_4^+	음이온	양이온
송도	5.7	0.428	1.321	0.974	0.227	0.121	0.606	0.087	0.574	2.723	1.615
송림	6.0	0.376	1.028	0.964	0.249	0.122	0.508	0.103	0.515	2.367	1.495
연희	5.9	0.221	0.905	0.824	0.167	0.112	0.470	0.098	0.293	1.950	1.140
원당	6.0	0.250	0.784	0.685	0.202	0.114	0.389	0.098	0.338	1.719	1.141
송해	6.1	0.356	1.353	1.057	0.273	0.112	0.523	0.092	0.539	2.766	1.538
평균	6.0	0.331	1.079	0.913	0.228	0.116	0.499	0.096	0.460	2.324	1.401

3.1.3.3. 이온물질의 월별 농도변화

(Table 8)은 이온성분 농도의 계절적 변화특성을 살펴보기 위하여 각 측정지점의 강우량 가중 계절평균 농도에 지역별 강우량을 고려한 강우량 가중 계절평균 농도를 구하여 나타낸 것이다. 겨울, 가을, 여름, 봄 순으로 계절적 변동 특성을 나타내고 있다. 월별로는 음이온과 양이온이 1~2월에 다소 높게 나타났다가 3월 이후 낮게 나타나는 변동 특성을 나타내고 있다. 이는 계절적 특성으로 1 ~ 2월에 북서풍 계열의 계절풍으로 중국의 오염물질 유입 등의 영향으로 농도가 증가했다가 남동풍 계열의 계절풍 유입 및 다량의 강우량으로 여름철에는 농도가 낮아지는 것으로 볼 수 있다.

Table 8. The monthly concentration of ionic substances(mg/L).

월 \ 항목	pH	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	음이온	양이온
1	6.1	1.773	4.401	3.272	1.109	0.179	1.124	0.068	1.834	9.446	4.314
2	6.6	5.761	10.422	7.510	2.954	0.459	3.196	0.245	4.811	23.693	11.664
3	6.2	0.199	0.662	0.703	0.153	0.051	0.159	0.048	0.213	1.564	0.625
4	6.0	0.072	0.691	0.553	0.027	0.037	0.224	0.017	0.098	1.316	0.404
5	6.5	0.000	0.760	0.504	0.079	0.030	0.395	0.039	0.098	1.263	0.641
6	5.9	0.158	1.348	1.585	0.974	0.589	1.103	0.594	1.675	3.091	4.935
7	6.4	0.396	0.507	0.642	0.189	0.160	0.632	0.106	0.190	1.545	1.276
8	5.1	0.382	2.919	1.005	0.445	0.201	0.550	0.175	1.611	4.307	2.981
9	5.7	0.499	0.915	0.997	0.250	0.197	0.731	0.180	0.692	2.410	2.051
10	5.8	1.092	3.434	2.994	0.487	0.207	1.040	0.170	1.602	7.520	3.506
봄	6.2	0.089	0.707	0.586	0.090	0.039	0.266	0.036	0.138	1.382	0.569
여름	5.8	0.366	1.013	0.814	0.324	0.217	0.673	0.175	0.604	2.193	1.994
가을	5.7	0.628	1.462	1.430	0.302	0.199	0.798	0.178	0.889	3.520	2.367
겨울	6.1	2.178	5.012	3.702	1.296	0.207	1.335	0.086	2.136	10.892	5.060
평균	6.0	0.331	1.079	0.913	0.228	0.116	0.499	0.096	0.460	2.324	1.401

3.1.3.4. 이온성분 구성비율

강우 중 화합물질의 구성형태를 파악하기 위하여 이온성분의 농도를 당량농도로 환산한 후 각 이온성분의 함량 즉, 성분 간의 구성비를 산출하였다. 강우 중에 존재하는 이온성분의 총 당량농도에 대한 각 이온성분 당량농도의 구성비를 (Fig. 5)에 나타냈는데 음이온 성분 중에서는 SO_4^{2-} 41.6 %, NO_3^- 38.0 %로 비율이 높았으며, Cl^- 는 20.4 %로 나타났다. 양이온 성분 중에서는 NH_4^+ 가 35.5 %로 가장 많았으며, Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ 순으로 각각 30.2 %, 15.9 %, 13.5 %, 3.4 %의 비율로 나타났다.

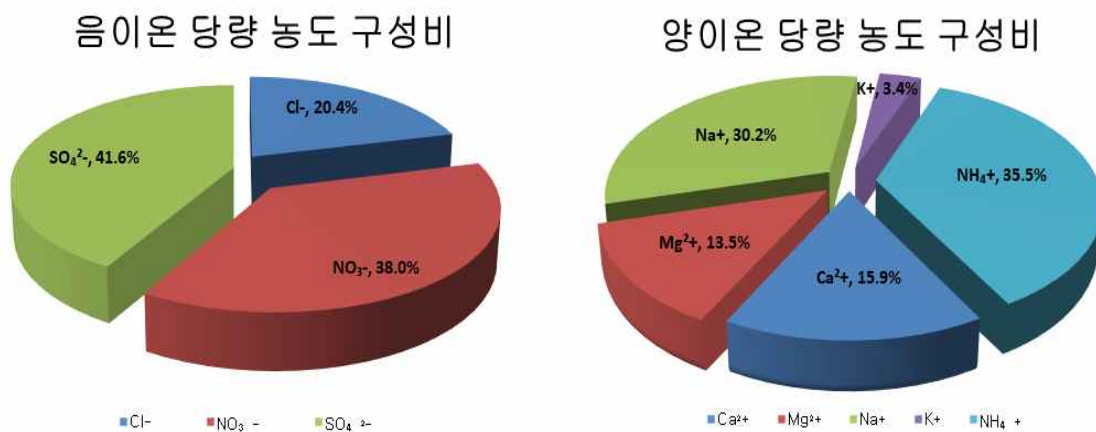


Fig. 5. Composition ratio of ion equivalent concentration in precipitation

3.1.3.5. 이온물질의 당량농도 분석

(Table 9)는 강수의 화학적 조성을 알아보기 위하여 강수량 가중 평균농도 (mg/L)를 당량농도($\mu\text{eq/L}$)로 환산하여 나타낸 것이다. 강수의 음이온과 양이온의 총 당량농도를 비교해 보면 음이온 45.766 $\mu\text{eq/L}$, 양이온 70.882 $\mu\text{eq/L}$ 로서 측정된 음이온 성분이 양이온 성분의 약 64.6 % 정도로 나타났다. 또한 각각의 당량농도를 살펴보면 음이온 중에서는 SO_4^{2-} 가 19.026 $\mu\text{eq/L}$, NO_3^- 17.407 $\mu\text{eq/L}$, Cl^- 9.333 $\mu\text{eq/L}$ 순이었으며, 양이온 중에서는 NH_4^+ 25.581 $\mu\text{eq/L}$, Na^+ 21.711 $\mu\text{eq/L}$, Ca^{2+} 11.415 $\mu\text{eq/L}$, Mg^{2+} 9.701 $\mu\text{eq/L}$, K^+ 2.474 $\mu\text{eq/L}$ 순이었다.

Table 9. The monthly concentration of ionic substances($\mu\text{eq/L}$).

월 \ 항목	pH	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	NH_4^+	음이온	양이온
1	6.1	49.943	70.984	68.171	55.456	14.891	48.890	1.735	101.900	189.098	222.871
2	6.6	162.282	168.091	156.457	147.701	38.249	138.956	6.274	267.263	486.830	598.443
3	6.2	5.595	10.684	14.648	7.675	4.274	6.917	1.236	11.844	30.927	31.945
4	6.0	2.039	11.140	11.524	1.368	3.081	9.753	0.434	5.462	24.702	20.098
5	6.5	0.000	12.251	10.495	3.926	2.474	17.181	1.013	5.453	22.746	30.046
6	5.9	4.462	21.734	33.021	48.706	49.100	47.970	15.219	93.066	59.218	254.061
7	6.4	11.164	8.177	13.377	9.433	13.324	27.481	2.706	10.535	32.718	63.480
8	5.1	10.767	47.087	20.946	22.240	16.736	23.893	4.485	89.494	78.800	156.848
9	5.7	14.048	14.758	20.763	12.501	16.453	31.800	4.627	38.431	49.569	103.812
10	5.8	30.761	55.390	62.379	24.355	17.227	45.205	4.370	88.982	148.530	180.139
봄	6.2	2.497	11.400	12.212	4.495	3.263	11.563	0.927	7.653	26.109	27.901
여름	5.8	10.310	16.338	16.963	16.208	18.103	29.282	4.477	33.560	43.611	101.630
가을	5.7	17.677	23.583	29.802	15.075	16.621	34.711	4.572	49.410	71.062	120.389
겨울	6.1	61.342	80.837	77.130	64.816	17.261	58.029	2.195	118.680	219.309	260.982
평균	6.0	9.333	17.407	19.026	11.415	9.701	21.711	2.474	25.581	45.766	70.882

3.1.3.6. 이온물질간의 상관관계

강우 중에 함유된 주요 이온물질 사이의 상호관계 파악은 산성도 형성의 인과관계를 추정하는데 필요한 과정으로서 각 항목 간 상관분석을 실시하였다. (Table 10)은 강우 중 이온성분의 항목 간 상관분석 결과를 나타낸 것으로서 SO_4^{2-} , NO_3^- 는 Ca^{2+} , Na^+ , NH_4^+ 와 0.9 이상의 높은 상관관계를 나타냈는데, 이는 강우 중에서 SO_4^{2-} , NO_3^- 의 존재형태를 추정할 수 있게 해준다. 또한, 인천의 특성상 주발생원이 해양인 Cl^- 도 Ca^{2+} , Na^+ , NH_4^+ 와 0.9 이상의 높은 상관관계를 나타내고 있다.

Table 10. Correlation coefficient between the concentration($\mu\text{eq/L}$) of ions in precipitation

구분	pH	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	NH_4^+
pH	1.00								
Cl^-	0.40	1.00							
NO_3^-	0.24	0.97	1.00						
SO_4^{2-}	0.34	0.97	0.98	1.00					
Ca^{2+}	0.33	0.95	0.95	0.96	1.00				
Mg^{2+}	-0.03	0.47	0.50	0.56	0.69	1.00			
Na^+	0.35	0.96	0.94	0.96	0.98	0.69	1.00		
K^+	-0.19	0.12	0.16	0.23	0.39	0.93	0.38	1.00	
NH_4^+	0.12	0.92	0.96	0.95	0.97	0.70	0.96	0.42	1.00

V. 결론

본 연구에서는 자료수집시스템의 자료에 대해 시계열적으로 분석하였으며, 인천 관내 산성강하물측정망의 시료를 채취하여 pH, 전기전도도, 강우량, 이온물질 8종 및 중금속 12종을 다음과 같이 조사하였다.

자료수집시스템에서 pH는 초기 5분경에 pH 4.7로 가장 낮으며 점점 높아져 55분경에 pH 5.7까지 상승하여 정점을 찍은 후 100분경까지 점진적으로 하강하여 안정화 경향을 나타냈다. 전기전도도는 강우초기 41.1 $\mu\text{S/cm}$ 에서 급상승하여 5분경에 80.8 $\mu\text{S/cm}$ 으로 정점을 찍은 후 급강하하여 10분경에 24.7 $\mu\text{S/cm}$ 을 나타낸 후 점진적으로 감소하였다.

산성강하물 시료를 채취하여 측정한 결과, 강우 중 pH는 상반기 대비 하반기에 음이온이 증가하고 강우량이 감소하면서 산성도가 증가하였으며, 지역별로는 대기오염물질 발생량이 많은 도심지역 pH가 5.9(송도 5.7, 연희 5.9, 송림·원당 6.0)로 도서지역인 송해(pH 6.1)보다 높게 나타났다. 전기전도도는 용액내의 총 이온의 양을 나타내는 자료로서 이온물질 증가에 따

라 비례하여 전기전도도가 증가(상관계수 0.97)하는 것으로 나타났다.

강우 중에 함유된 중금속 부하계수는 Cd, As, Pb, Cu가 100 이상으로 인위적 '오염심각', Be, Mg, Cr, Mn, Ni는 '약간 부하', Fe, Ca는 '미부하' 상태로서, 지각 중에 미량원소는 산업활동 중 약간의 배출로도 대기 중에서 증가하여 인위적 '오염심각' 상태가 되는 것으로 나타났다.

이온물질 중 음이온 성분은 모든 지역에서 $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ 의 순이었고, 양이온 성분은 송도·연희·원당에서 $\text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, 송해·송림에서 $\text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 순으로 나타났다. 음이온 성분은 북서풍이 우세한 1, 2월에 높았다가 남동풍이 우세한 여름철에는 농도가 낮게 나타났다.

주요 이온물질 상관분석 결과, Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- 는 Ca^{2+} , Na^+ , NH_4^+ 와 0.9 이상으로 높은 상관관계를 나타내어 강우 중에서 상호간의 존재여부를 추정할 수 있다.

본 연구조사를 통해 강우초기의 높은 산성도와 더불어 산업활동으로 인한 중금속 오염부하계수 현황, 반기별, 지역별 산성화 추세를 확인할 수 있었다. 향후 강우의 산성화 및 피해를 줄이기 위해서는 대기오염을 감소시키고 일상생활에서 주의할 필요가 있다. 강우 초기에 산성도가 높아지므로 초기 강우 접촉을 피하고 토양의 산성화에 대응하여 토양개량제를 사용하는 등 부분적인 대응책을 사용할 수 있으나 궁극적으로는 대기오염을 줄이기 위한 정책을 추진해야 한다. 에너지 부분에서는 화석연료의 사용을 줄이고 저황연료로 사용 전환 및 탈황화를 추진하고, 교통 부분에서는 청정연료로 전환하여 질소산화물 발생량을 줄여야 한다. 최종적으로 석탄화력발전소를 조기 폐쇄하고 태양광, 풍력 등 신재생에너지를 사용하여 산업, 교통 등 일상생활 전반적인 부분에서 최종적으로 물 이외의 오염물 배출을 배제하는 친환경 정책을 조기에 정착시켜야 한다.

VI. 참고문헌

1. 차진욱, 김장영, (2018). SPSS를 이용한 대기질과 기상인자와의 미세먼지 상관관계 분석, 한국정보통신학회논문지 22(5), 722-727.
2. 송복주, 지기원, (2003), 산성강하물 조사, 부산광역시 보건환경연구원.
3. 장구복, 이종식, 김원일, 김진호, 윤순강, (2007), 수원지역 빗물의 중금속 함량 평가, 농업과학기술원.
4. Duce, R. A., Hoffman, G. L., and Zoller, W. H. (1975), Atmospheric trace metals at remote northern and southern hemisphere sites: pollution or natural? Science 187, 339-342.
5. 김만구·류설·정현·정형근·최용욱 옮김, (2018), 환경화학, 자유아카데미.
6. 이준배, 배정호, (1993), 우리나라에서의 산성우 연구동향에 관하여, 한국환경농학회지.