

홍천 계방산지역 내 강수의 산성도와 이온 균형성에 관한 연구

윤희정 · 이승우*

국립산림과학원 산림복원연구과

A Study on the Acidity and Ion Balance of Wet Precipitation in Mt. Kyebang Area, Hongcheon

Hee-Jung Youn and Seung-Woo Lee*

Department of Forest Restoration, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

요 약: 본 연구에서는 비교적 청정지역인 홍천 계방산지역내의 장거리이동에 따른 대기오염물질의 유입정도를 알아보고자 이 지역 내의 강수를 채취하여 산도(pH) 및 이온분석을 실시하였다. 분석 자료에 대한 이온수지와 전기전도도(EC) 검토에서 신뢰성이 확인되었고 홍천 계방산지역 내 강수산도(pH)는 산성우의 기준이 되는 pH5.6 이하의 범위인 pH5.0~5.5 범위에 집중적으로 나타났다. 대체적으로 강수량이 많을수록 이온농도가 감소하는 경향을 나타내었고 산성원인물질의 증감과 중화물질에 따라 강수산도(pH)의 증감에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 한편, 강수 중 이온성분의 조성비율을 살펴보면 음이온은 SO_4^{2-} 와 $nss-SO_4^{2-}$, 양이온은 NH_4^+ 와 $nss-Ca^{2+}$ 가 많은 비율을 차지하였다. 특히 대기오염물질 배출원이 거의 없는 홍천 계방산지역에서 인위적 오염물질인 SO_4^{2-} 와 토양의 유입원인물질인 Ca^{2+} 의 농도가 높았던 결과를 통해 이곳의 강수 화학성이 장거리 이동성 물질에 의해 영향을 받고 있음을 추정할 수 있다.

Abstract: To look into the degree of the long distance movement of the air pollution within Mt. Kyebang, Hongcheon, one of the clean regions, major ions, components of collected wet precipitation, were analyzed by using the ion chromatography after measuring pH and electrical conductivity. The quality assurance of chemical composition data was checked by considering the ion balance and electrical conductivity. Also, the pH of precipitation showed in the pH5.0~5.5 range, less than the pH5.6 in which the standards of the acid precipitation. On the whole, the more precipitation got, the less ion concentration became.: It could showed what it influenced on the fluctuation of the precipitation pH according to fluctuation and neutralization of the according materials. In the meantime, as composition ratios of wet deposition, SO_4^{2-} and $nss-SO_4^{2-}$, NH_4^+ and $nss-Ca^{2+}$ accounted for high percentage. Especially, as the concentration of SO_4^{2-} , the artificial pollutant, and Ca^{2+} , the soil substance, showed high, Mt. Kyebang, Hongcheon having barely fixed air-pollutants sources was most likely to be influenced by the pollutants moved from long distances.

Key words : acidity, wet precipitation, ion balance, electrical conductivity, pH

서 론

최근 들어 동아시아지역의 대기오염현상으로 인하여 산성비가 환경문제로 대두되고 있다(Lee *et al.*, 2000). 이는 우리나라, 중국, 일본을 포함한 동북아시아 지역의 급속한 경제성장에 따른 연료소비량의 증가로 인해 대기오염물질의 대량 배출과 관계, 배출된 1차 대기오염물질은 기상현상에 의해 광범위한 지역으로 이동되거나 화학반응에 의해 유해한 2차 오염물질로 전환됨으로써 산성비 강하의 원인이 된다(강인구와 장성기, 1991; Fujita *et al.*,

1991).

산성강하물은 주로 도시산업의 발달로 인해 대기 중에 배출된 황산화물과 질소산화물이 수화(hydrolysis)된 후 산화(oxidation)됨으로서 발생하는데(Mollitor and Raynal, 1982), 질소산화물과 함께 산성비의 주요원인 물질로 토양 등의 산성화에 영향을 미치고 바람에 의해 장거리 수송되어 다른 지역에 영향을 주며 식물의 잎맥손상 등을 일으키고 시정장애를 일으키며 각종 구조물의 부식을 촉진시킨다. 생태계에 대한 산성비의 영향을 정확하게 파악하기 위해서는 산성강하물에 대한 평가가 필수적이다. 이 중에는 자연적인 발생에 의한 것이 많이 포함되어 해 양기원성분(seasalt : ss)에 의한 입자의 영향을 많이 받는

*Corresponding author
E-mail: soilloverlee@forest.go.kr

Table 1. Chemical properties and composition of wet precipitation in Mt. Kyebang, Hongcheon.

Month	Precipitation (mm)	pH pH	EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	H^+ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$							
					Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
1	7.1	6.2	53.9	5	67.0	91.0	182.0	102.9	162.3	14.4	39.5	157.6
2	9.4	5.3	86.0	51	79.9	178.3	209.4	97.5	386.2	18.3	48.1	189.1
3	34.7	5.3	23.6	158	22.6	54.0	64.4	28.2	103.3	5.4	13.4	65.5
4	34.9	5.0	32.2	352	26.0	140.6	116.6	25.7	46.5	8.3	6.3	71.6
5	7.8	4.9	23.4	108	32.8	217.4	282.0	24.1	107.6	21.6	15.5	126.2
8	152.0	6.0	11.6	155	8.7	28.0	38.7	13.1	16.2	3.0	0.3	6.0
9	115.6	6.0	6.6	130	7.3	11.7	12.5	7.4	5.2	2.7	0.2	2.4
10	47.0	4.6	130.5	1317	77.2	487.3	615.1	60.1	162.9	43.1	21.1	181.9
12	58.4	5.0	59.1	595	77.6	215.4	199.9	85.4	53.8	18.7	12.5	82.5
Avg.		5.4	47.4	319	44.3	158.2	191.2	49.4	116.0	15.1	17.4	98.1

해안지역과는 달리 내륙지방 내 산성강하물의 파악에는 비해양기원성분(non-seasalt : nss)의 양을 산출할 필요가 있는데 이는 대기질 특성을 이해하는데 매우 중요한 지표가 될 뿐만 아니라 환경변화를 측정하는 기준이 된다 (박기형 등, 2005).

한편 국내·외적으로 강수의 이온조성에 대한 연구가 본격적으로 이루어지면서 중국대륙으로부터 황사와 대기오염물질이 편서풍의 영향을 받고 있는 우리나라로 장거리 이동을 하는 것으로 밝혀지고 있어 강수의 산성도 뿐 만 아니라 그 오염수준이 사회적으로 관심을 불러일으킨 바 있다(강공언 등, 2007). 이에 따라 다양한 연구가 진행되어져 왔는데, 국내에서는 1990년대 초부터 강수산도(pH)와 전기전도도(EC)를 비롯하여 주요 수용성 이온 농도 분석이 이루어지게 되었으며, 지금까지 서울을 중심으로 한 대도시 지역을 포함하여 해안 지역 외 다수의 지역에 대한 강수의 화학적 조성이 보고된 바 있다(김선태 등, 1998; 김지영 등, 2000; 방소영 등, 2003). 그러나 상대적으로 오염도가 적은 내륙산간지역에 대한 대기오염물질의 장거리 이동에 관련한 연구는 거의 이루어지지 않은 실정이다.

따라서 본 연구는 내륙지방으로 비교적 인위적 오염도가 낮은 지역인 강원도 홍천의 계방산 지역을 대상으로 산성강하물 채취기를 설치하여 산도(pH)와 이온들의 화학성 및 균형성을 비교 분석하였다.

재료 및 방법

1. 강수의 채취

산악지역인 강원도 홍천군 내에 위치한 계방산에 자동식 습식강하물 채취기를 설치하여 2008년 1월부터 12월까지 강수를 채취하였다. 시료는 강하먼지 등과 같은 건성강하물(dry deposition)의 영향을 받지 않도록 자동강수장치를 사용하여 강수만 채취하는 습성일괄방식으로 채

취하였다. 작동 원리는 강우 및 강설이 시작되어 빗물이 감지판(rain sensor)에 떨어지게 되면 뚜껑이 자동으로 열려 빗물을 받아들 수 있는 Wet sampling 방식이며 채취부는 플라스틱 버킷을 사용하였으며 강우와 강설을 포함한 강수량이 2 mm 이상인 날만을 선정하였다.

2. Ion Chromatography 분석

채취된 시료는 4°C이하에서 냉장보관을 하였고 0.45 μm 의 membrane filter(Millipore Inc.)를 사용하여 여과한 시료는 각각 전기전도도(EC)는 (CM-60S, TOA, Japan), 강수산도(pH)는 (F-52, Horiba, Japan)를 사용하여 측정하였다. 이온크로마토그래피 분석방법을 이용하여 음이온 농도(NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-})는 Sykam(S-5200)을 사용하여 분석하였고, 양이온 농도(NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+)는 Dionex(DX120)를 사용하여 분석하였다. 측정기간 동안 월별 강수의 분석자료와 평균치는 Table 1과 같다.

3. 산도(pH) 값 산출

산도(pH)의 평균치는 산도(pH)값을 수소이온농도로 변환하여 강수량 기중평균을 실시한 후 다시 산도(pH)로 환원하는 방식으로 산출하였다.

4. 분석자료의 검증

측정된 전체 강수량과 2008년도 기상청 자료와의 오차가 발생함에 따라 오류의 오차범위를 최대한 좁히기 위하여 강수분석자료의 신뢰성 검증을 실시하였다. 이온수지법과 전기전도도(EC) 평형에 따른 신뢰성 검토는 전체 시료 중 월별 평균값을 구하여 나타내었다.

결과 및 고찰

1. 강수분석자료에 대한 신뢰성 검증

분석자료에 대한 신뢰성 검토는 일반적으로 이온밸런

스와 전기전도도 밸런스에 의한 두 가지 방법이 사용되고 있다(宗林 信, 1993).

1) 이온 수지(Ion balance)

강수 중 이온성분 분석 자료의 신뢰도를 평가하기 위하여 총 양이온과 총 음이온의 양을 비교하는 방법이다. 강수에 있어서 전하중성(Electro-neutrality)의 원리는 총 음이온 당량이 총 양이온 당량과 같아서 그들의 비가 1이 되는 것이다. 즉 강수 중에 존재하는 수용성 이온성분 중 음이온과 양이온 당량농도의 총합이 서로 같아야 한다는 것이다. 양이온 당량농도($\mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$)의 총합을 T.C. (Total of cations)라 하고 음이온 당량농도의 총합을 T.A.(Total of anions)라 하면 결국 T.C.=T.A.일 때 이온 균형이 일치한다고 볼 수 있다(박기형 등, 2005).

$$\text{T.C.} = [\text{NH}_4^+] + [\text{Na}^+] + [\text{K}^+] + [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{H}^+]$$

$$\text{T.A.} = [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-] + [\text{Cl}^-]$$

위에 나타난 식에 의해 구한 총 음이온과 총 양이온의 상관관계를 Figure 1에 나타내었다. 전체 기울기는 1.1044로 1에 가까웠으며, R^2 은 0.9147($P < 0.001$)로 역시 1에 가까워 분석결과가 신뢰성을 가졌으며, 양이온과 음이온간의 균형은 비교적 양호한 관계를 나타내었다. 양이온의 총합이 음이온의 총합보다 다소 높게 나타났는데 이는 음이온 분석성분이 포함되지 않은 다른 이온 즉 HCO_3^- 와 포름산, 아세트산과 같은 유기산의 영향으로 판단된다.

2) 전기전도도(Electrical conductivity)

전기전도도 평형에 의한 신뢰성 검토는 EC_{meas} 과 EC_{cal} 을 이용하는 방법으로 전기전도도의 계산은 강수의 주성

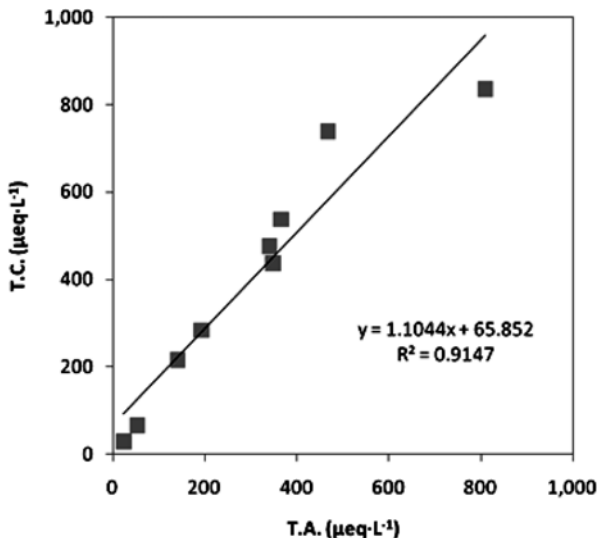


Figure 1. Relation between total anions(T.A) and total cations(T.C.) in wet precipitation.

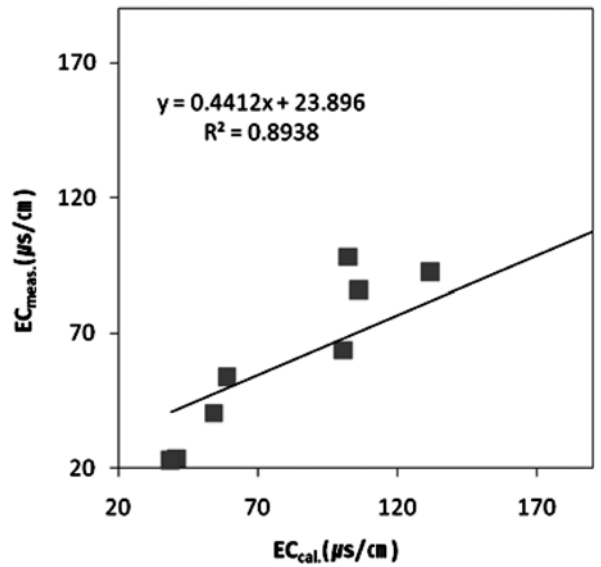


Figure 2. Relation between measured electrical conductivity and calculated conductivity in wet precipitation.

분 농도로부터 각각의 이온수용액 중 극한 당량 전기전도도를 이용하여 구하였으며, 이용된 식은 다음과 같다 (Miles and Yost, 1982).

$$EC_{\text{cal}} = \left\{ \begin{array}{l} 389.8[\text{H}^+] + 73.6[\text{NH}_4^+] + \\ 59.5[\text{Ca}^{2+}] + 73.5[\text{K}^+] + \\ 53.05[\text{Mg}^{2+}] + 53.1[\text{Na}^+] + \\ 71.46[\text{NO}_3^-] + 80.02[\text{SO}_4^{2-}] + \\ 76.35[\text{Cl}^-] \end{array} \right\} \times 10^{-3}$$

위의 식을 이용한 전기전도도 평형의 상관관계를 나타낸 그래프는 Figure 2에 나타내었다.

전기전도도(EC)의 계산값은 측정값보다 높게 나타났으나 전체 기울기는 0.4412, R^2 은 0.8938($P < 0.001$)로 1에 가까워 분석결과가 신뢰성을 갖고 있었고 측정값과 계산값의 균형은 비교적 양호한 관계를 나타내었다.

2. 산도(pH) 분포

Table 2는 산도(pH) 범위별 강수빈도를 나타낸 것으로 대상지역의 강수는 pH5.0~5.5의 범위에 집중적으로 나타났다. 작물의 생육저해 및 가시적 피해한계(Johnston *et*

Table 2. Frequency distribution of pH value for wet precipitation at Mt. Kyebang, Hongcheon.

pH range	No. of Event	Proportion(%)
4.0 ≤ pH < 4.5	2	10.5
4.5 ≤ pH < 5.0	2	10.5
5.0 ≤ pH < 5.5	6	31.6
5.5 ≤ pH < 6.0	4	21.1
6.0 ≤ pH < 6.5	5	26.3

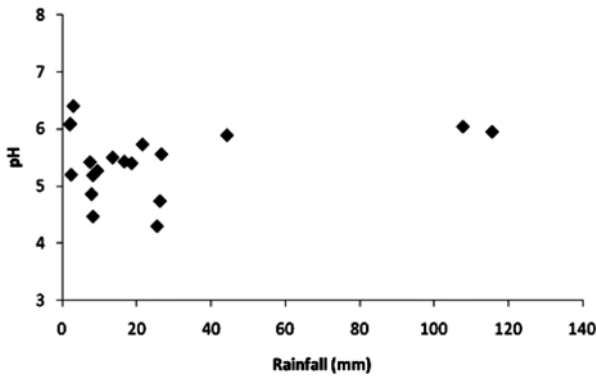


Figure 3. Relation between pH and wet precipitation amount.

al., 1982)인 pH 3.2~4.0보다는 훨씬 산성도가 낮은 수준이었으나 산성강수의 기준이 되는 pH 5.6 이하의 빈도는 63.2%로 비교적 높게 나타났다.

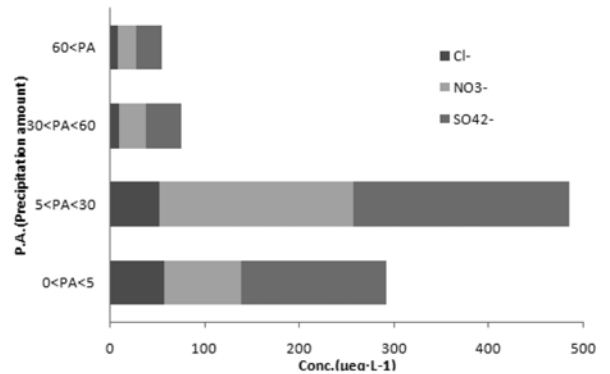
측정된 강수의 pH범위는 4.30~6.40이었으며, 평균 pH의 측정치는 5.45 ± 0.33 , 강수가중치는 5.35 ± 0.33 로 나타났다. 실측치와 강수가중치의 강수시료의 pH가 약간씩 차이가 나는 것은 시료의 pH값 이외에 강수량의 영향을 받기 때문으로 판단된다. 국내 산성비에 관한 측정 자료에 따르면 대부분이 대상지역 빗물의 산성도를 단지 시료의 pH를 단순 산술평균하여 그 지역 강수의 산성도에 대한 대표 값으로 해석하고 있어 측정기간 동안 내린 그 지역 강수의 산성도 특성을 정확하게 반영하지 못할 뿐 아니라 향후 자료의 상호비교와 국제 및 국내공동 연구시 자료호환 상에 문제가 될 수 있다(강공연 등, 1996).

3. 강수산도(pH)와 강수량의 관계

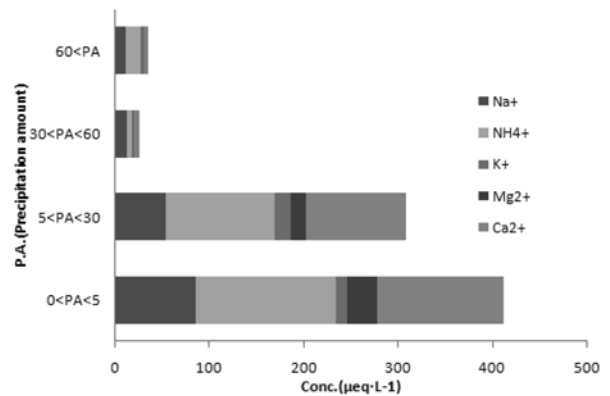
대상지의 강수량범위는 2.0~115.6 mm로 평균 51.88 ± 54.82 mm로 측정되었다. Figure 4는 강수량과 산도(pH)의 관계를 나타낸 것으로 강수량이 50 mm 이하에서 산도(pH)가 넓게 분포하였다. 강수량이 적은 경우 대기 중에 존재하는 산성 물질이 알칼리물질에 비해 상대적으로 많거나 적어 산도(pH) 범위가 넓은 반면, 강수량이 증가할수록 대기 중에 존재하는 알칼리성물질이 산성 물질에 비해 빠르게 제거됨으로써 상대적으로 산도(pH)가 낮아지는 현상에 기인한 것으로 보인다(Ahmed et al., 1990). 그러나 이것은 대상 지역의 지역적 특성, 강수 시 기상조건 및 대기의 조성 등 여러 가지 복잡한 요인에 의한 장기적인 관측 자료가 부족한 관계로 단적으로 설명하기는 어렵다.

4. 주요이온성분과 강수량의 관계

강수량에 따른 이온농도를 살펴보면(Figure 3), 대체로 음이온은 5 mm<P.A.(Precipitation amount)<30 mm에서 높게 나타났고, 양이온은 0<P.A.<5 mm에서 높게 나타났



a) Ratio of anions



b) Ratio of cations

Figure 4. Concentration of anions and cations by wet precipitation amount.

으며 강수량이 많을수록 이온농도가 감소하는 경향을 나타냈다. 특히 0<P.A.<5 mm의 강수량에서 Cl^- 농도 : $56.2 \mu eq \cdot L^{-1}$, Na^+ : $85.2 \mu eq \cdot L^{-1}$, NH_4^+ : $147.7 \mu eq \cdot L^{-1}$, Mg^{2+} : $32.9 \mu eq \cdot L^{-1}$, Ca^{2+} : $133.3 \mu eq \cdot L^{-1}$ 로 전체 강수량 중 가장 높은 농도를 보였다. 일반적으로 강수량이 적을수록 주요 이온성분의 농도가 높아지는 경향을 보이는데 이는 적은 강수량일수록 대기 중에 존재하는 가스나 입자상 물질들이 빠르게 씻겨 내려가기 때문이다(김만구 등, 1999). 또한 강수량과 이온농도와의 관계에서 조대입자와 미세입자의 영역을 고려하지 않을 수 없는데 이러한 입경별 세정 특성에 대해서 세정효율은 입경 4 μm 이상의 조대입자에서 거의 일어나며, 0.5~4 μm 의 입경범위 내에서는 거의 세정이 일어나지 않으며 0.3 μm 이하의 입경에서는 10%의 세정효과가 일어난다고 보고되고 있다(정용, 1999).

해염은 주로 조대입자에 속하며 멀리 이동하지 못하고 가까운 지역에서 건성 혹은 습성강하를 통해 제거된다. 따라서 해염에 의한 영향은 해안에서 떨어질수록 급속하게 나타난다. 이러한 특성으로 인해 조대입자에 속하는 해염입자인 Cl^- 와 Na^+ , 토양입자인 Ca^{2+} 와 Mg^{2+} 는 적은 강수에서 세정효율이 높아져 농도가 높은 것으로 사료된다(정일웅, 2002).

5. 강수이온의 특성

2008년 월별 강수 중 이온성분의 조성비를 살펴보면 음이온은 $\text{SO}_4^{2-} > \text{nss-SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ 순으로 나타났으며, 양이온은 $\text{NH}_4^+ > \text{nss-Ca}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 로 나타났다(Figure 4). 이 중 Na^+ 와 Cl^- 의 경우, 조성비율이 각각 13%, 8%로 다른 이온들에 비해 비교적 낮은 농도를 나타내었는데 이는 이들 성분이 자연발생원인 해염(Sea salt) 기원 이온성분으로서 홍천지역은 해안지방이 아닌 내륙 산간지방에 위치한 것이기 때문으로 판단된다.

대부분의 연구결과에서, 자연발생원인 해염기원의 Na^+ 를 제외할 경우, NH_4^+ 가 강수 중의 주요 염기성 성분이다(박승택 등, 2003). 본 결과에서도 NH_4^+ 는 전체 양이온 중 30%로 가장 높은 농도를 나타내어 주성분임을 알 수 있었다. NH_4^+ 이온 다음으로는 Ca^{2+} 가 25%로 높게 나타났다. 강수 중의 Ca^{2+} 는 해양뿐만 아니라 도로 등의 인위적인 발생원이나 바람에 의해 지표면에서 대기 중으로 증발된 자연발생원의 토양 또는 사막지역으로부터 장거리 이동된 황사입자 등에 기인하는 물질로서(Lee *et al.*, 2000), 홍천지역의 경우, 차량 통행량이 비교적 적고 인접한 지역의 오염발생량이 적어 주변의 인위적인 발생원은 거의 없음을 감안할 때 여러 요인 중, 장거리 이동에 의한 황사의 영향을 받았을 것이라고 추정된다. 또한 SO_4^{2-} 는 음이온 중 차지하는 비율이 33%, 비해염 SO_4^{2-} 의 경우는 31%로 대부분 SO_4^{2-} 의 인위적인 오염현상으로 인한 경우로 예상되나 청정지역인 홍천의 경우, 외부 지역에서 발생한 대기오염물질의 장거리 이동 등에 의해 영향을 받고 있음을 추정할 수 있다.

해수 중의 주된 성분 값을 기준으로 계산하면 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+$ 와 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 의 중량비는 각각 0.251에서 0.038이 된다. 따라서 nss-SO_4^{2-} 와 nss-Ca^{2+} 는 각각 Table 3과 같이 산출된다(日本酸性雨調査法究 1996).

Table 3. Calculation methods for SS and NSS.

Origin	Calculation method
SS ²⁾	$\text{ss-SO}_4^{2-} = 0.251 \times \text{wet precipitation} [\text{Na}^+]$
NSS ³⁾	$\text{nss-SO}_4^{2-} = \text{wet precipitation} [\text{SO}_4^{2-}] - \text{ss-SO}_4^{2-}$
SS	$\text{ss-Ca}^{2+} = 0.038 \times \text{wet precipitation} [\text{Na}^+]$
NSS	$\text{nss-Ca}^{2+} = \text{wet precipitation} [\text{Ca}^{2+}] - \text{ss-Ca}^{2+}$

²⁾SS : Sea salt

³⁾NSS : Non sea salt

Table 4. Concentration ratio of major ions to Na^+ for seawater and wet precipitation.

	Cl^-/Na^+	$\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+$	K^+/Na^+	$\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$
Sea water ²⁾	1.18	0.12	0.02	0.23	0.04
Hongchun	0.94	4.41	0.36	0.31	2.06

²⁾日本酸性雨調査法究, 1996

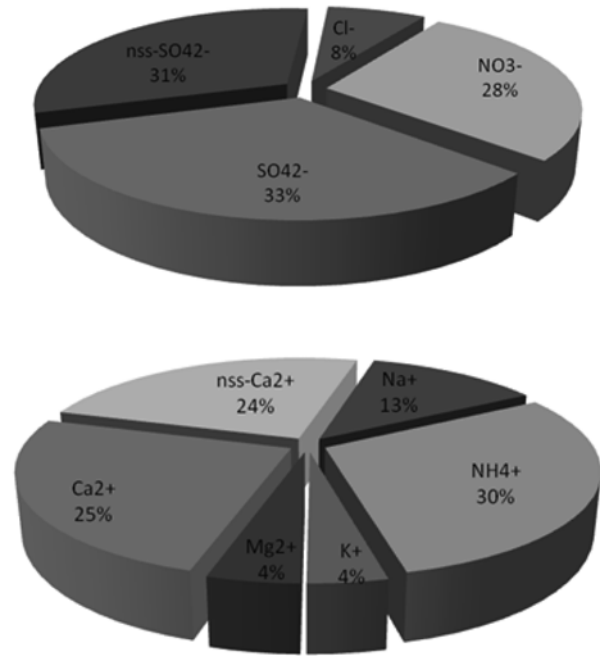


Figure 5. Composition ratios of anions and cations in wet precipitation.

강수의 화학성분 중 인위적인 오염원에 기인한 영향을 파악하기 위해서는 해염에 의한 영향을 보정해야만 한다. 이것은 nss-SO_4^{2-} 와 nss-Ca^{2+} 는 Na^+ 기준에 의한 방법(Table 4)으로 값을 산출하고 있다. 이는 해염입자의 조성이 해수의 조성 과 일치한다는 가정 하에서 강수 중에 포함되어 있는 Na^+ 가 해염 이외의 인위적인 발생원은 없으며 모두 해양 기원으로 간주하고 해양 유래의 성분 농도 비율이 해양-대기(구름)-강수 중에서 변화하지 않는다는 가정 하에서 다른 이온의 해염기원과 비해염기원을 산출한다(Christian, 1963). Na^+ 에 대한 Cl^- 과 Mg^{2+} 의 당량농도비는 각각 해수에서의 당량농도비 각각 1.18과 0.23(日本酸性雨調査法究 1996)에 가까운 0.94와 0.31을 나타내어 대부분의 성분이 해염기원에 의한 것임을 알 수 있다(Table 4). 그러나 음이온 SO_4^{2-} 와 Ca^{2+} 의 경우, 해수에서의 당량농도비인 0.12, 0.04에 보다 매우 높아(Table 4) 대부분의 성분이 비해염 기원에 의한 것임을 알 수 있고 Ca^{2+} 의 경우 토양의 영향을 받는 것으로 추정된다. 특히 Ca^{2+} 의 경우 해수의 농도비보다 51.6배나 큰 차이를 보였는데 이는 주로 지면기원의 토양의 영향을 상대적으로 크게 받고 있음을 의미한다(강공연 등, 2007). 결과적으로 연구 대상지의 강수 중 Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} 성분은 해양이 주 발생원이고, Ca^{2+} 는 토양입자가 주 발생원이며 NH_4^+ , K^+ , SO_4^{2-} 의 경우, 토양입자 외의 다른 영향을 받는 것으로 추정된다.

6. 계절별 강수의 산도(pH) 및 화학성

이온 중 강수의 산도(pH) 저하에 관계하는 강수 중의

Table 5. Monthly chemical composition of wet precipitation in Mt. Kyebang, Hongcheon.

Month	pH	μeqL ⁻¹				N/S ²⁾	N/A ³⁾
		NO ₃ ⁻	nss-SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	nss-Ca ²⁺		
1	6.2	91.0	156.2	162.3	153.7	0.6	1.1
2	5.3	178.3	185.0	386.2	185.4	1.0	2.1
3	5.3	54.0	57.3	103.3	64.5	0.9	1.6
4	5.0	140.6	110.2	46.5	70.7	1.3	0.7
5	4.9	217.4	276.0	107.6	125.3	0.8	0.9
8	6.0	28.0	35.4	16.2	5.5	0.8	3.0
9	6.0	11.7	10.7	5.2	2.1	1.1	2.5
10	4.6	487.3	600.1	162.9	179.6	0.8	0.9
12	5.0	215.4	178.5	53.8	79.3	1.2	0.7
Avg	5.4	158.2	178.8	116.0	96.2	0.9	1.5

²⁾N/S : NO₃⁻/nss-[SO₄²⁻]

³⁾N/A : NH₄⁺/nss-[Ca²⁺]

이온성분은 산성원인물질인 NO₃⁻와 인위적 발생에 의한 nss-[SO₄²⁻]로 알려져 있다(Walter *et al.*, 1987). 본 연구에서 강수의 산도(pH) 범위가 4.6으로 가장 낮은 10월에 NO₃⁻, nss-[SO₄²⁻]가 각각 600 μeq·L⁻¹, 487.3 μeq·L⁻¹로 월별로는 가장 높은 농도를 나타내었다(Table 5). 산도(pH)에 영향을 주는 물질이 어느 것인지를 알려주는 것이 NO₃⁻/nss-[SO₄²⁻](N/S)당량비이며, 강수의 산도(pH) 중화에 관계하는 이온성분은 NH₄⁺와 nss-[Ca²⁺](김상백 등, 2006)로, 이는 NH₄⁺/nss-[Ca²⁺](N/A)의 비로 나타낼 수 있다(강공언 등, 1999).

산술평균한 N/S의 월별 당량농도를 살펴보면, 산도(pH)가 높은 8월에는 N/S비가 감소하는 경향이었고 비교적 산도(pH)가 낮은 4월과 12월에는 N/S비가 각각 1.3, 1.2로 증가하여 강수의 산성화에 질소산화물의 기여도가 높음을 알 수 있다(Table 5). 한편, 비교적 산도(pH)가 낮은 4월과 12월에는 N/A비가 각각 감소하는 경향을 보였고 비교적 산도(pH)가 높은 8월에는 N/A비가 증가하는 경향을 보여 Ca²⁺에 비해 NH₄⁺의 기여도가 높음을 알 수 있다. 산도(pH)가 6.2인 1월에는 N/S비와 N/A비의 큰 차이는 없었으나 N/A비가 다소 높았고 산도(pH)가 각각 6.0인 8·9월에는 음이온 당량비인 N/S비에 비해 양이온 당량비인 N/A비가 각각 3.0, 2.5로 높아 산도(pH)의 증가에 더 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 김상백 등(2006)은 안면도의 강수는 산성원인물질의 증감에 따라 강수산도(pH) 변화가 결정된다고 하였는데, 홍천지역 계방산 역시 그 크기는 다소 약하지만 산성원인물질의 증감과 중화물질의 역할에 따라 강수산도(pH)의 증감에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

결론

홍천 계방산지역의 강수의 산도(pH) 및 이온균형성을

분석한 결과는 다음과 같다.

1) 이온수지와 전기전도도(EC) 검토에서 각각 강수분석 자료에 대한 신뢰성이 인정되었다.

2) 강수산도(pH)는 산성우의 기준이 되는 pH5.6이하의 범위인 pH5.0~5.5범위에 집중적으로 나타났다.

3) 강수산도(pH)와 강수량의 관계에서는 음이온의 경우, 5<P.A.<30 mm에서 높게 나타났고, 양이온은 0<P.A.<5 mm에서 높게 나타났으며 대체적으로 강수량이 많을수록 이온농도가 감소하는 경향을 나타냈다.

4) 크기는 다소 약하지만 산성원인물질의 증감과 중화물질의 역할에 따라 강수산도(pH)의 증감에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 특히 8~9월에는 양이온 당량비가 각각 3.0, 2.5로 높아 산도(pH)의 증가에 더 많은 영향을 미쳤다.

5) 해수에서의 당량 농도비를 살펴보면, SO₄²⁻와 Ca²⁺는 대부분 비해염 기원에 의한 것임을 알 수 있었고, Ca²⁺의 경우 해수의 농도보다 훨씬 높았는데 이는 토양의 영향을 받았기 때문으로 추정된다.

6) 강수 중 이온성분의 조성별 분포를 살펴보면 음이온의 경우 SO₄²⁻>nss-SO₄²⁻>NO₃⁻>Cl⁻순으로 나타났으며, 양이온의 경우 NH₄⁺>nss-Ca²⁺>Ca²⁺>Na⁺>Mg²⁺>K⁺로 나타났다. 주변에 인위적인 오염발생이 적은 홍천 계방산지역내에 SO₄²⁻와 Ca²⁺의 농도가 높았던 결과를 통하여 이 지역의 강수 화학성이 장거리 이동성 물질에 의해 영향을 받고 있음을 추정할 수 있다.

인용문헌

1. 강공언, 김남송, 오경재, 신대운, 유두철, 김상백. 2007. 강설이 겨울철 강수의 화학적 특성에 미치는 영향. 대한환경공학회지 29(1): 113-125.
2. 강공언, 오인교, 김희강. 1999. 익산지역 강수의 계절별 산성도와 화학성장. 한국대기환경학회지 15(4): 393-402.
3. 강공언, 이주희, 김희강. 1996. 서울지역 강수 중 이온 성분 분석시료의 해석. 한국대기보전학회지 12(3): 323-332.
4. 강인구, 장성기. 1991. 대기오염물질의 장거리 이동과 산성비강하에 관한 연구(III). 국립환경연구원. pp. 335.
5. 김만구, 강미희, 임양석, 박기준, 황훈, 이보경, 홍승희, 이동수. 1999. 산성강하물의 침착량과 동태 해명에 관한 연구-춘천과 서울 강우의 화학조성 비교. 한국대기환경학회지 15(2): 89-100.
6. 김상백, 최병철, 오숙영, 김 산, 강공언. 2006. 한반도 배경지역(안면, 울진, 고산) 강수의 산성도와 화학특성. 한국대기환경학회지 22(1): 15-24.
7. 김선태, 임봉민, Tsujino, T., Maeda, Y. 1998. 동북아시아 지역강수의 화학적 성분비교에 관한 연구. 한국환경과학회지 7(4): 523-529.
8. 김지영, 전영신, 조하만, 최재천, 남재철, 김 산. 2000.

- 도시지역과 농촌지역에 내린 강수의 중화특성. 한국기상학회지 36(1): 15-24.
9. 박기형, 이경화, 김동민, 강대신, 이광원, 구분곤, 권세목. 2005. 울산지역 강우의 화학적 특성과 원인물질 기여도 평가. 보건환경연구원보 3권. pp. 180-232.
 10. 박승택, 강공언, 최규철. 2003. 익산지역 겨울철 강수의 산성도와 이온성분의 화학적 특성. 대기환경공학회지 25(12): 1584-1595.
 11. 방소영, 최재천, 박상순, 조경숙, 오성남. 2003. 한반도 배경지역 강수 중 수용성 이온성분의 화학적 특성 분석. 한국기상학회지 39(1): 29-41.
 12. 정 용. 1999. 대기오염물질의 위해성 평가 및 관리기술. 환경부. pp. 1077.
 13. 정일웅. 2002. 강수의 화학조성과 지역강수의 특성. 건국대학교 석사학위논문. pp. 72.
 14. 宗林 信. 1993. わがにおける酸性雨の分析データの解析. 環境技術 22(10): 590-598.
 15. 日本酸性雨調査法究. 1996. 酸性雨調査法. ぎょうせい. pp. 340-341.
 16. Ahmed, AFM., Singh, R.P. and Elmubarak, A. 1990. A chemistry of atmospheric precipitation at the Western Arabian Gulf Coast. Atmospheric Environment 24(12): 2927-2934.
 17. Christian, E.J. 1963. Air chemistry and Radioactivity. Academic Press. pp. 327-330.
 18. Fujita, S., Ichikawa, Y., Kawaratani, R. and Tonooka, Y. 1991. Preliminary inventory of sulfur dioxide emissions in East Asia. Atmospheric Environment 25: 1409-1411.
 19. Johnston, J., William, Jr., Shriner, D.S., Klarer, C.I. and Lodge, D.M. 1982. Effect of rain pH on senescence, growth, and yield of bush bean. Environmental and Experimental Botany 22(3): 329-337.
 20. Lee, B.K., Hong, S.H. and Lee, D.S. 2000. Chemical composition of precipitation and wet deposition of major ions on the Korean peninsula. Atmospheric Environment 34: 563-575.
 21. Miles, L.J. and Yost, K.J. 1982. Quality analysis of USGS precipitation chemistry data for New York, Atmospheric Environment 26(1): 1-22.
 22. Mollitor, A.V. and Raynal, D.J. 1982. Acid precipitation and ionic movements in Adirondack forest soils, Soil Science Society of America 46: 137-141.
 23. Walter, H.C., Al J.S.T., David, H.S.C. and Nevillie W.R. 1987. An analysis of precipitation chemistry measurements in Ontario. Environment Science Technology 21(12): 1219-1224.

(2009년 10월 5일 접수; 2009년 12월 3일 채택)