

산성강하물이 지표수의 산성화에 미치는 영향 I: 현장 조사

김영관, 이동석, 김만구*, 우경식**

강원대학교 환경공학과 *강원대학교 환경학과 **강원대학교 지질학과

Effect of Acid Deposition on the Acidification of Surface Water I : A Field Study

Yeong-Kwan Kim, Dong-Seok Rhee, Man-Goo Kim*, Kyung-Sik Woo**

Dept. of Environmental Engineering, Kangwon National University

**Dept. of Environmental Science, Kangwon National University*

***Dept. of Geology, Kangwon National University*

ABSTRACT

Effects of acid deposition on the acidification of surface water over a short term period were studied during June ~ October, 1995. A reservoir located in Chunchon, Kangwondo was selected for this study because this reservoir had received little man-made pollutants. Geological survey within the study area was carried out and the pH of a small and shallow stream flowing from the mountain valley down to the reservoir was monitored. Rainfall was measured by using a rain gauge and the precipitation was collected by automatic precipitation sampler. During the study period, rain pH was in the range of 3.81~5.77 with an average of 4.8. The EC was in the range of 5~189 μ S/cm with an average of 10.6 μ S/cm. Ionic composition of the rainfall showed that, of the anions, deposition of SO_4^{2-} was highest with 3,119.7 kg/km², and it was NH_4^{+} with 1,053.2 kg/km² for cations. The surface water pHs were maintained neutral or weak basic, representing little evidence of acidification regardless of the acidic rainfall pH. Every time of sampling, however, the pHs exhibited increasing tendency as elevation of measuring site of the stream became lowered, which indicated the impacts of acid-base reactions by acidic or basic substances during travel of water downstream. This result suggested the necessity of further research to determine the respective buffering capacity of soil and underlying rocks.

Key word : acid deposition, acidification, surface water, buffering capacity

요 약 문

산성강하물이 단기간에 걸쳐 지표수의 산성화에 미치는 영향을 조사하기 위하여 1995년 6월 부터 10월까지 외부오염원이 거의 없는 강원도 춘천시에 위치한 저수지를 선정하여 연구를 수행하였다. 연구지역 일대의 지질을 조사하고 산골짜기에서 저수지로 흐르는 작고 얇은 하천의 수질을 분석하였다. 강우량은 우량계를 이용하여 측정하였고 강하물은 자동포집기를 이용하여 포집하였다. 연구기간동안의 강우의 pH 범위는 3.81~5.77로 평균 4.8을 나타내었으며 전기전도도(EC)는 5~189 μ S/cm로 평균 10.6 μ S/cm를 나타냈다. 음이온 중에서는 SO_4^{2-} 의 강하량이 3,119.7 kg/km²로 가장 많았고, 양이온 중에서는 NH_4^+ 가 1,053.2 kg/km²로 가장 많았다. 지표수의 pH는 중성 또는 약염기성으로 강우의 pH가 산성이었음에도 지표수의 산성화 현상은 관찰되지 않았다. 그러나 골짜기에서 흐르는 하천수를 측정할 때마다 측정지점의 고도가 낮아질 수록 pH 값은 증가하는 경향을 나타내어 물이 하류로 흘러가는 동안에 일어난 산성 또는 염기성물질로 인한 산염기반응의 영향을 보여주었다. 이 결과는 토양의 완충능력과 모암내에서의 중화능력을 각각 구별하여 조사할 필요성을 제시하였다.

주제어 : 산성강하물, 지표수, 산성화, 완충능력

1. 서 론

산성강하물은 대기로 배출된 오염물질이 강수에 의하여 지상으로 강하하거나 건조한 기체상태로 지상으로 강하하는 물질을 총칭한다. 산성강하물은 국지적으로 생성되기도 하지만 오염물질이 장거리 이동되어 오면서 발생하기 때문에 산성강하물에 의한 피해는 국경을 넘어 전지구적으로 나타나고 있다. 동아시아지역은 질소산화물과 황산화물의 배출량이 많고 앞으로도 계속 증가할 것으로 예상되고 있으며¹⁾ 특히, 중국과 일본의 사이에 있는 우리나라는 대기오염물질의 이동 가능성이 크다고 할 수 있다. 우리나라에서는 아직 생태계나 인체에 대한 심각한 피해는 조사되지 않았으나 중국과 일본 등 주변국가들의 대기오염물질 배출량이 증가할 것으로 예상되므로 장래 산성강하물에 의한 피해가 우려된다.

산성강하물에 의한 유입수역의 산성화는 유입되는 산성강하물의 양과 함께 유입수역 주변의 토양학적/지질학적 특성에 좌우되는데 산성강하

물의 토양에 의한 중화는¹⁾ 탄산염에 의한 중화,²⁾ 교환성 염기에 의한 중화,³⁾ 음이온의 토양흡착, 그리고⁴⁾ 광물의 화학적 풍화에 의하여 이루어진다. 호수 주변의 유입수역이 석회암 지역인 경우 산성강하물은 호수에 유입되기 전에 이미 중화되어 산성강하물의 영향이 나타나지 않을 수도 있으나 수역 주변이 중화능력이 작은 규산염암으로 이루어졌다면 수질의 산성화가 진행될 것이다. 최근 서울을 비롯한 중부권에 내리는 강우의 pH가 산성을 띠고 있으나 다행히도 우리나라 지표수에서의 수질의 산성화 징후는 아직 나타나지 않고 있으며 김²⁾에 의하면 산림생태계 및 토양환경에 산성강우가 직접적인 영향을 주지 않는 것으로 추측되고 있다.

본 연구는 산성강하물이 지표수에 미치는 영향에 대한 연구의 첫 단계로서 강원도 춘천시 동산면 원창리에 위치한 원창댐에 의하여 조성된 저수지를 택하여 산성강하물이 단기간에 걸쳐 저수지 수질의 산성화에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 연구지역의 지형 및 지질

연구대상 지역의 하류에 위치한 원창댐은 춘천시내에서 남서방향으로 약 4km 지점에 위치하고 있는데 댐의 북쪽에는 고도 640m의 수리봉, 동북동 방향에는 응봉, 동남동 방향에는 고도 850m의 연엽산이 위치하고 있다. 원창댐을 이루는 수괴는 수리봉과 응봉사이의 계곡과 연엽산의 정상부에서 북서방향으로 발달한 두 계곡에 흐르는 하천에 의해 공급되고 있다. 특히 연구지역과 인접한 지역에는 민가가 거의 없고 산업시설이 없어 인위적인 오염이 거의 없는 지역으로 이 하천들이 유입되는 저수지에서의 수질변화는 주로 자연적인 오염원에 의하여 나타날 것으로 판단되는 지역으로 연구대상 지역의 위치와 지질 특성은 Fig. 1에 표시되어 있으며 저수지는 Fig. 1의 중앙에 짙게 칠해진 부분이다.

연구지역의 지질은 선캠브리아기의 용두리편

마암복합체와 이를 부정합으로 피복하는 의암층군, 그리고 이들에 관입한 화성암류로 크게 나눌 수 있다. 용두리 편마암 복합체와 의암층군은 변성암류의 암석으로 이루어져 있으며, 용두리편마암 복합체는 화강암화작용의 정도에 따라 화강암질 편마암, 석영장석질 편마암, 석류석편마암 및 호상흑운모편마암으로 나뉘어진다. 의암층군은 하부로부터 의암규암층, 창촌리층 및 동산층으로 이루어져 있다. 이 중 창촌리층은 대부분이 호상흑운모편마암으로 구성되며, 그 외에 규암, 앵피볼라이트, 투회석·각섬석편암, 결정질 석회암 등이 소량 분포한다. 동산층은 안구상편마암과 호상편마암으로 주로 이루어져 있다.

3. 실험재료 및 방법

산성강하물이 저수지의 수질에 미치는 영향을 조사하기 위한 연구의 첫 단계로서 원창댐 일대

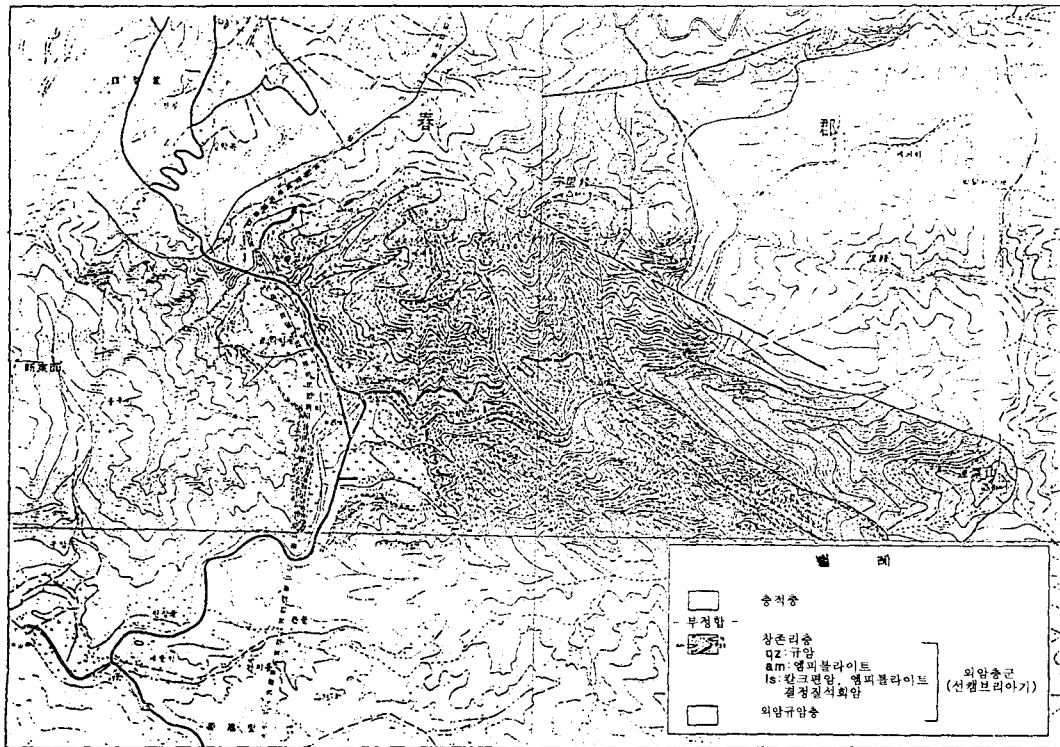


Fig. 1. Location of study area and its geological map.

의 지형 및 지질조사를 수행하였다. 본 연구에서는 원창담 인근지역 중에서 단순한 암질로서 완충능력이 작은 규암이 많이 분포되어 있는 연엽산의 서쪽부분의 골짜기를 수질조사지역으로 선택하였으며 이 지역은 창춘리층내에 협재되는 규암이 우세한 지역이다. Fig. 2는 원창담 상류부분의 창춘리층에서 채취한 규암을 나타내고 있다.

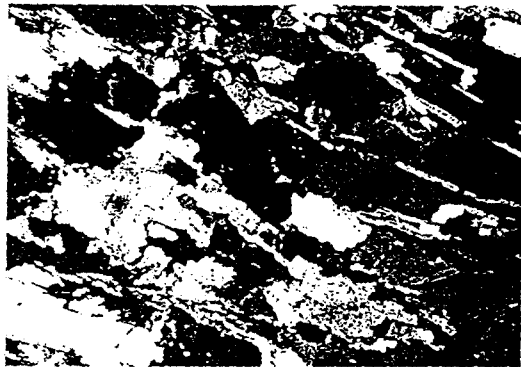


Fig. 2. Thin section of microphotograph of the quartzite in the Changchonri Formation near the study area. Quartz crystals have sutured contacts and show undulose extinction. Muscovite and Sillimanite are aligned in the same orientation.

산성강하물의 포집에 사용된 포집기는 Aerochem Metrics에서 제작된 모델을 응용한 것으로 전원이 없는 곳에서도 포집이 가능하도록 직류 12V를 채택하여 자체 제작하였다. 이 자동포집기의 개요는 Fig. 3과 같으며 자세한 내용은 김 등³⁾에 서술되어 있다. 포집기 본체의 재질은 유기물과 무기물 등에 의한 영향, 산과 알칼리에 의한 부식 등 여러가지 조건을 고려하여 스테인레스를 이용하였다. 포집용기는 40 리터 용량의 비닐백을 사용하였고 최대 포집가능량은 일일 강우량으로 200mm 이었다. 자동강우포집기는 관리상 연구지역인 원창담 부근에 설치하지 못하고 연구지역에서 약 4km 떨어진 강원대학교내 건물의 옥상에 설치하여 오전 10:00부터 다음날 오전 10:00까지 24시간 단위로 포

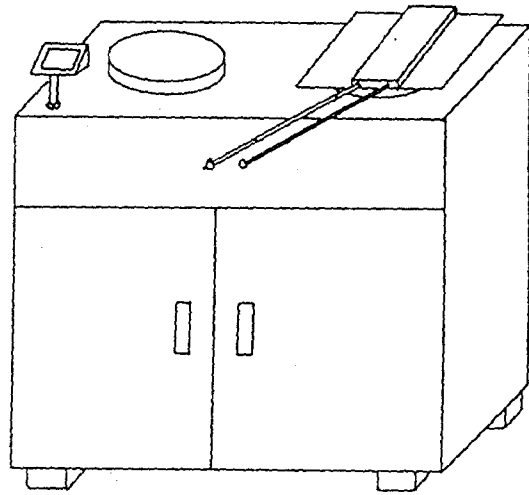


Fig. 3. Automatic precipitation sampler.

집하였다. 강우량의 측정은 강하물 포집기 옆에 설치된 우량계를 이용하였으며 강우계와 산성강하물의 포집기에 포집된 양을 비교하여 포집효율을 구하였다. 강하물의 포집은 '95년 7월부터 9월까지 계속 되었다.

포집된 시료는 실험실로 즉시 운반하여 포집부피를 측정된 뒤 공극 0.45 μ m의 멤브레인 필터를 이용하여 여과하였으며 강하물의 pH (Orion model 290A)와 전기전도도(Horiba Conductivity Meter B-173)는 여과 직후에 측정하였다. 음이온 성분(SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻)은 IC(Dionex, DX-100)를 이용하여 측정하였고 양이온 성분 중 Na⁺와 K⁺는 원자흡광광도계(Varian SpectrAA 20)로 측정하였다. NH₄⁺은 Indophenol법으로 측정하였으며 Ca²⁺과 Mg²⁺은 ICP (Leeman Lab PS Series G)로 분석하였다.

지표수는 연구지역의 골짜기에서 지하수가 유출되어 하천이 시작되는 지점에서부터 저수지에 도달하는 지점까지의 4개 지점과 저수지 유입부의 1개 지점, 그리고 저수지내의 1개 지점을 포함하여 총 6개 지점(Site 1 ~ Site 6)에서 채취하였다. 골짜기 하천의 유량이 평상시 너무 작아 유량을 측정하지는 못하였으나 Site 1부터 Site 4까지의 각 지점별 고도는 440m, 395m.

330m, 280m 이었으며 Site 5와 Site 6 의 고도는 245m 이었다. 하천의 유량을 측정하기 위하여 연구지역의 최상류인 Site 1에서 Site 4 까지 플라스틱 원통관을 설치하였으나 적은 유량으로 측정에 어려움을 겪었고 장마시에는 유실되어 지속적으로 측정하지 못하였으나 지하수의 유입으로 인하여 하류로 내려올수록 유량은 증가하였다.

지표수의 채취는 '95년 5월부터 9월까지 월 1회 또는 2회 1리터 polyethylene 병을 사용하였으며 pH (Orion model 290) 와 온도는 현장에서 측정하였다. 지표수의 양이온은 AAS (Varian SpectrAA 20) 또는 ICP-AES (USN Cetac UT-500) 를 이용하여 분석하였으며 음이온은 IC (Dionex-2000)를 이용하여 분석하였다. 알카리도는 전위차적정에 의하여 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

1995년 7월 1일 부터 '95년 9월 9일 사이에 춘천지역에는 35회의 강우가 있었으며, 강우량은 1.1 ~ 190.5mm로 총 1,137.5mm 이었고 이 기간동안의 포집기의 포집효율은 76.3 ~ 102.0%로 평균 93.6% 이었다. 포집효율의 범위 중에서 낮은 수치는 강우량이 1 mm 정도로 적은 경우 포집기의 덮개가 작동하는 동안 손실된 것이며 효율이 100% 보다 높게 나타난 것은 강우시 심한 바람 등으로 포집부 주변으로 떨어진 빗방울의 일부가 바람에 날려 포집부에 포집되었기 때문이다.

연구기간동안의 강우의 pH의 범위는 3.81 ~ 5.77로 평균 4.80 의 산성을 나타내었으며 pH 변화는 Fig. 4와 같다. 이와같은 산도 (acidity) 는 연구기간이 장마철이었던 관계로 완충능력이 감소하였기 때문인 것으로 판단되는데 경북지역의 경우 우수의 pH와 가장 큰 상관관계를 나타내는 것은 강우량인 것으로 조사된바 있다⁴⁾. 그리고

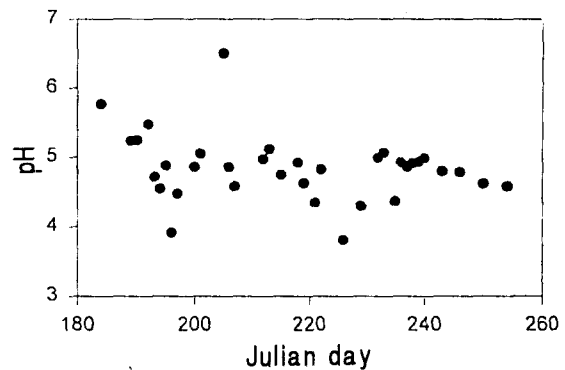


Fig. 4. pH of rainwater collected at Chuncheon during Jul ~ Sep. 1995.

전기전도도 (EC) 는 5 ~ 189 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 평균 10.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 를 나타냈는데 전기전도도가 이와같이 매우 낮게 나타난 이유 역시 장마철 강우에 의한 세정작용에 의하여 대기중에 존재하는 오염물질이 적었던 때문인 것으로 판단된다.

Table 1 은 연구기간 동안의 일일 강우량과 이온별 강하물의 화학적 조성을 나타내는데, Table 1 의 성분별 농도는 강우량을 고려하여 구한 가중평균치이다. 이 기간동안의 춘천지역에 내린 평균적인 이온농도는 음이온은 SO_4^{2-} Cl^- NO_3^- 순이었고 양이온은 NH_4^+ Ca^{2+} Na^+ K^+ Mg^{2+} 순으로 나타났다. 포집기간 동안의 이온별 강하량은 음이온 중에서는 SO_4^{2-} 가 3, 119.7 kg/km^2 로 가장 많았고, 양이온 중에서는 NH_4^+ 가 1,053.2 kg/km^2 로 가장 많았다.

Fig. 5 는 pH와 중화에 기여하는 주된 양이온 (NH_4^+ , Ca^{2+})과 pH를 낮추는데 기여하는 주된 음이온(SO_4^{2-} , NO_3^-)의 비율을 나타낸 것으로 좋

rainfall	pH	E.C. Meas.	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ⁺	
(mm)		$\mu\text{S}/\text{cm}$	$\mu\text{eq}/\text{l}$								
Mean	37.85	4.86	10.6	8.63	8.25	22.42	4.19	24.50	1.59	0.63	11.18
SD	44.04	0.38	33.7	25.39	48.24	103.40	18.51	72.45	2.44	5.02	19.80
Min.	1.1	5.77	4	0.21	1.52	6.94	0.00	10.09	0.00	0.00	7.68
Max.	190.5	3.81	180	113.37	278.08	554.48	94.52	320.18	10.59	22.92	56.64

Table 1. Ionic composition of rainwater collected at Chuncheon during Jul. ~ Sep. 1995.

은 상관관계를 나타내지는 않았다. 문헌에 의하면³⁾ 빗물을 산성화시키는 주요 성분인 SO_4^{2-} 와 NO_3^- 의 농도와 빗물의 pH와의 관계는 외국의 경우 좋은 역상관관계를 보이는 반면 우리나라의 경우는 빗물중의 많은 양의 양이온 성분에 의하여 상관관계를 나타내지 않는다. Fig. 5에 사용된 자료는 연구기간동안에 얻은 자료중에서 강우량이 10mm 이상인 경우만을 사용하였다.

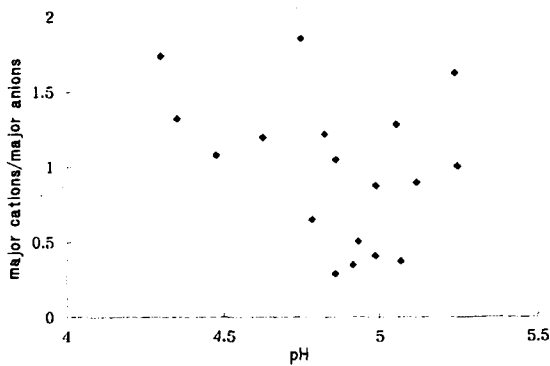


Fig. 5. Relationship between pH and major cations/maior anions(meq/meq)

하천과 저수지에서 채취한 지표수의 주된 성분은 Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ 의 양이온과 SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- 의 음이온이었으며 이 외에 미량으로 Al, Mn, Co, Ni, Cu 등이 ppb 단위로 함유되어 있었다. 분석결과에 따르면 연구지역내의 지표수의

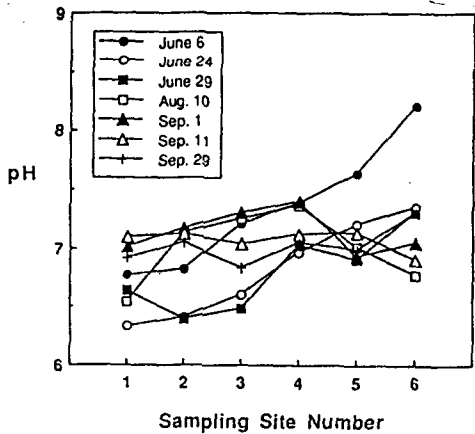


Fig. 6. pH variation of surface waters at 6 sampling sites.

일반적인 오염상태는 매우 미미하였다.

지표수의 지점별 pH는 Fig. 6과 같이 6개 지점에서 조사한 7회 모두에 걸쳐 하류지점으로 내려올 수록 pH가 증가하는 경향을 나타내었으며 조사지역의 가장 하류지점인 원창저수지 상층에서의 pH는 6.90 ~ 8.21 범위를 나타냈다. 위에서 언급된 바와 같이 연구기간동안에 강하물의 pH가 평균 4.80인 점을 고려할 때 산성강하물이 지표수의 산성화에 미치는 영향이 없는 것으로 나타났다. Fig. 6의 자료중 8월에 pH측정을 1회밖에 하지 못한 이유는 8월의 대부분 기간에 장마가 지속되었기 때문이었다.

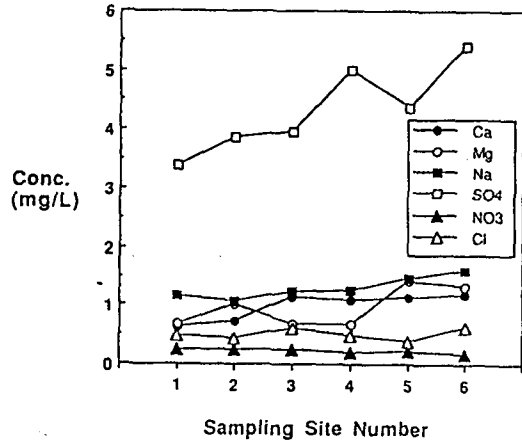


Fig. 7. Average ionic composition of the surface waters at 6 sampling sites.

지표수의 지점별 각 분석항목들의 연구기간 동안의 평균 농도는 Fig. 7과 같이 일반적으로 하천의 하류로 내려갈 수록 높게 나타났으며 측정항목중에서 SO_4^{2-} 농도가 가장 높게 나타났다. 한편, 6월 부터 9월까지 측정된 지표수 pH의 범위(6.90~8.21)를 고려할 때 지표수에서의 산의 완충능력인 알카리도의 주된 형태가 HCO_3^- 이므로 HCO_3^- 농도를 지표수의 Ca^{2+} 농도와 비교한 바 연구지역에서의 측정된 지표수의 알카리도는 Ca^{2+} 농도와 Fig. 8과 같은 상관관계($R^2 = 0.451$)를 나타내었다.

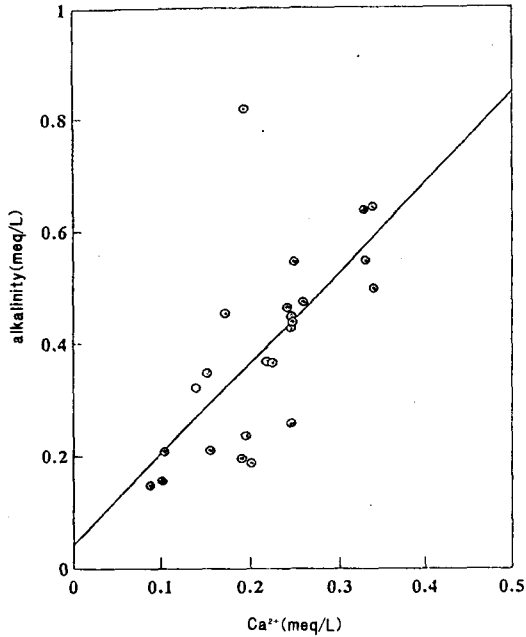


Fig. 8. Relationship between alkalinity and Ca^{2+} concentration

5. 결론

본 연구기간 동안에 연구지역내의 저수지를 포함한 골짜기의 지표수를 채취하여 분석한 결과 지표수의 pH는 중성 또는 약염기성으로 산성강하물에 의한 지표수의 산성화 현상은 관찰되지 않았다. 그러나 골짜기를 따라 하천의 하류쪽으로 측정지점의 고도가 낮아질수록 지표수의 pH 값은 측정시마다 항상 높게 나타나는 경향을 나타내어 산성 또는 염기성물질로 인한 산염기 반응의 영향을 보여주었다. 하류로 내려오며 따라 이와 같이 pH가 증가한 이유로는¹⁾ 연엽산을 피복하고 있는 토양층에서의 산성강하물의 중화반응과²⁾ 지하수가 지표수로 유출되기 전에 암석을 통과하는 기간동안에 일어난 중화반응에 의한 완충 가능성을 들 수 있다.

연구대상 지역의 암석이 비교적 산의 완충능력이 작은 규암으로 구성되어 있는 점을 고려할 때

산성강하물의 중화는 주로 토양층에 의한 것으로 판단된다. 그리고 조사지역내의 토양의 발달정도가 지표수 채취지점별로 비슷하다고 전제할 때 토양에 의한 완충정도 역시 지표수 채취지점별로 거의 차이가 없었을 것으로 판단된다. 한편, 골짜기의 하류로 내려올수록 유량이 증가하였고 이 증가는 토양을 통과한 지하수가 암석내의 절리면을 따라 하천으로 유입된 것임을 고려할 때 토양 외에 암석내에서의 중화를 전혀 무시할 수는 없다. 따라서 토양의 완충능력과 모암내에서의 중화능력을 각각 구별하여 조사할 필요가 있으며 이를 위하여 현재 조사지역 주변의 토양과 암석을 채취하여 컬럼실험을 진행중에 있다.

감사의 글

본 연구는 학술진흥재단에서 지원한 1994년도 대학부설연구소 연구과제의 일부로서 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 岸部 和美 “동아시아지역의 산성비 모니터링 네트워크 설립”, 첨단환경기술, 8, pp.10~14 (1996).
- 2) 김희강 “국내산성비 현황과 대책”, 첨단환경기술, 4, pp.9~13 (1995).
- 3) 김만구, 임양석, 정우석, 유연준 “장마시 춘천 지역 강우의 화학 조성”, 강원대학교 환경연구소 연례발표회 (1995).
- 4) 류성규, 권오일, 배광수, 서길수 “경북 영천과 구미지역 산성강우의 화학적 특성에 관한 연구”, 대한환경공학회지, 18(9), pp.1115~1123 (1996).
- 5) 심상규 “우리나라 산성비 특성과 감시망 현황”, 첨단환경기술, 8, pp.2~9 (1996).