

# 花崗岩質 小規模 河川流域의 物質收支特性에 關한 研究\*

朴 秀 鎮\*\*

## 〈차 례〉

1. 序 論	(2) 이온間的 相關關係
1) 研究目的	2) 河川水
2) 研究地域概觀	(1) 河川水의 溶質特性
3) 研究方法	(2) 流量과 이온濃度間的 相關關係
2. 流域의 水文特性	3) 地下水
1) 氣候特性	4. 流域內의 物質收支
2) 季節別 地表流出과 水分收支	1) 季節別 物質收支
3. 降水·河川水·地下水의 溶存이온特性	2) 乾性固着量(dry impaction)의 推定
1) 降水	3) 物質收支와 이온別 流出特性
(1) 降水의 溶質特性	5. 要約 및 結論

主要語 : 화강암 유역, 빗물, 하천수, 지하수, 용존이온, 수분수지, 지화학적 물질수지.

## 1. 序 論

### 1) 研究目的

아직까지 우리나라에서는 지표면에서 나타나는 物質의 流出入 特性과 地表生態界의 狀態把握, 物質循環에서 나타나는 生物圈·非生物圈의 役割등에 관한 연구는 빈약한 실정이다. 그 결과 계절적으로 심한 차이를 보이는 現氣候環境下에서 나타나는 地表生態界의 특성과 각종 물질의 流出入量에 대한 지식은 매우 제한되어 있으며, 風化와 土壤形成作用, 植生의 成長段階등의 時間的 特性을

파악함에도 많은 한계를 가지고 있다.

본 연구는 기후 및 식생의 空間的 分布가 비교적 均一한 小規模 流域을 研究地域으로 선정한 뒤, 현재의 溫帶몬순氣候下의 水分收支, 溶質상태로 이루어지는 物質의 流出入 特性, 단위유역의 物質收支를 분석하고자 한다. 이러한 연구는 지표상의 化學的 諸現象들을 定量的으로 파악할 수 있는 근거가 될 것으로 본다.

강수와 하천수, 지하수 등에 녹아 있는 물질특성을 파악하여 물질의 유출입량과 유역 내의 생태적 특성을 분석한 수문화학적(hydrochemical) 연구들은 1960년대 이후 시작된 뒤<sup>1)</sup>, 지표현상의 파

\* 이 글은 筆者의 碩士學位論文의 一部를 整理한 것임. 指導教授이신 柳根培 教授님께 感謝드립니다.

\*\* 서울대학교 大學院 碩士課程卒業.

1) Johnson, C. M., et al., 1966, "Bulk chemical changes and rate of chemical weathering in central New Hampshire." *Transactions of American Geological Union*, Vol. 47, pp.83-84.

악에서 핵심적인 연구분야로 간주되고 있다. 현재 국내에서 물질수지 연구는 石炭岩 지역<sup>2)</sup>에서 부분적으로 이루어졌을 뿐, 그 선례를 찾기 어렵다.

## 2) 研究地域概觀

연구지역은 京畿道 安養市 石水洞에 있는 서울 大學校 農科大學 樹木院內의 소규모 유역(3.62km<sup>2</sup>)으로, 冠岳山의 南西斜面에 위치한 산림지역이다(그림 1). 유역내의 最高高度는 해발 631m, 분수계 입구의 高度는 약 100m로, 최고점과 최저점간의 경사도는 약 11°이다. 전체적인 유역의 특성은 경사가 심하고 기반암이 노출된 면적이 넓다.

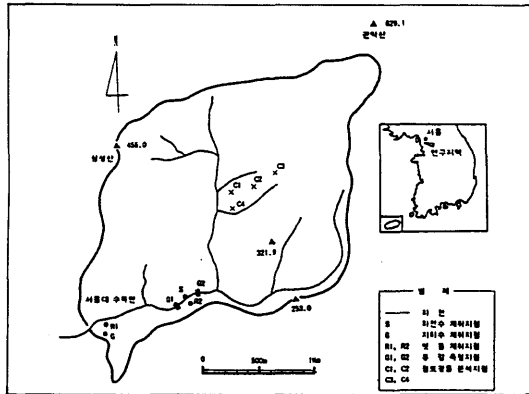


그림 1. 연구지역

1/25,000지형도<sup>3)</sup>상에 나타난 하천의 河系密度는 1.81(km/km<sup>2</sup>)으로 河系網의 발달이 빈약하다. 河床에는 기반암이 노출된 곳이 많으며, 河道 주변에는 boulder급 이상의 亞圓礫들이 堆積되어 있다. 하천은 대부분 급경사의 溪谷部를 따라 흐르며, 하천에는 콘크리트로 된 여러개의 인공댐이

만들어져 있다. 이러한 댐들은 높이가 낮아 물을 저수하지는 못하지만, 河床荷重(bed load)의 운반을 억제하여 댐상류에 砂礫堆積物을 집적시키고 있다.

연구지역의 기반암은 先캄브리아紀의 片麻岩을 買入한 安養花崗岩으로, 저평한 주변지형과는 대조되는 독립산봉을 이룬 岩柱(stock)<sup>4)</sup>이다. 관입 시기는 K/Ar 연대추정법에 의해 약 1억7천만년 전인 侏羅紀로 추정되고 있다.<sup>5)</sup> 구성광물은 조립질의 石英(quartz), 正長石(K-feldspar)과 斜長石(plagioclase)이 主組岩鑛物을 이루고 있고, 黑雲母(biotite), 白雲母(muscovite), 저어콘(zircon)이 소량 나타난다. 본 조사지역의 화강암의 화학적 특징은 사장석내의 CaO<sub>2</sub> 함량이 극히 낮아, 대부분의 사장석은 albite의 형태로 존재하고 있다는 것이다.<sup>6)</sup>

토양은 土壤分類體系(soil classification system)에 따르면 Entisol目(order)의 冠岳統(series)과 秀岩統에 해당된다.<sup>7)</sup> 冠岳統은 유역 대부분지역에 분포하고 있으며, 화강암 풍화층위에 발달한 殘積土(residual soils)다. 秀岩統은 崩積層(colluvium)을 母材로 발달한 토양으로 하천을 따라 兩岸에 발달하고 있다. 토양의 전체적인 특성은 토양배수가 양호하며, 有機物 含量이 낮고 土壤反應은 酸性이다. 鹽基置換容量과 鹽基飽和度도 낮다.

식생은 自然木으로는 소나무가 優占種이며, 신갈나무와 졸참나무가 혼재되어 있다. 植栽林으로는 은사시나무가 하천주변에 분포하고 있다.<sup>8)</sup> 그러나 기반암의 노출면적이 넓기 때문에 식생의 발달상태는 불량하다. 관악산 지역의 식생은 1950년

2) 李泰亨, 1989, 閔慶 카르스트地域의 여름과 겨울의 溶蝕에 관한 研究, 서울大學校 碩士學位論文.

3) 國立地理院, 1986, 1:25,000 地形圖-安養, No. 189-4.

4) 국립지질광물연구소, 1975, 한국지질도-안양도폭(SHEET 6536-II).

5) Kim, O. J., 1977, "Study on the intrusion epochs of younger granites and their bearing to orogenesis in Seoul, Korea", *Korean Mining Geology*, Vol. 4, pp.1-9.

6) 洪永國, 1984, "쥬라기 서울 및 안양화강암의 암석지화학적 연구", *대한지질학회지*, Vol. 20, No. 1, pp. 51-71.

7) 농촌진흥청 농업기술연구소, 1977, 정밀토양도: 시흥군 및 안양시, 안양도폭.

8) 환경청, 1989, 현존식생도, 서울·경기도, 안양(2)도폭.

대에 완전히 파괴된 후, 다시 성장하고 있는 2차 림으로 전체적인 삼림의 성장시기는 약 40-50년 정도이다. 현재 넓은 범위에 걸쳐 나타나는 소나무와 신갈나무군락은 신갈나무군락이었던 산림이 파괴되고 난 후, 소나무 등의 陽樹種이 침입한 것이다. 현 우점종인 소나무는 점차 신갈나무로 대체되고 있다.<sup>9)</sup>

### 3) 研究方法

연구지역에서 지표수, 지하수, 빗물내의 溶存이온과 河川流出量을 분석하였다. 시료채취 및 분석기간은 1990년 10월 10일부터 1991년 10월 2일까지이다. 분석에 사용된 시료는 1주일을 단위로 채취하였으며, 6월과 7월의 장마기에는 분석주기를 3-4일 간격으로 줄였다.

하천수를 채취한 지점은 그림 1의 S지점으로 하상에 기반암이 노출되어 있어 渴水期에도 基低流出에 의해 항상 물이 흐르는 곳이다. 지하수는 G지점에 있는 우물에서 揚水機를 사용하여 채취하였다. 빗물은 R1과 R2지점에서 증발이 억제되도록 개조한 簡易雨量計를 사용하여 채집하였다. 流量은 G1지점에서 Allen의 Salt-Velocity Method<sup>10)</sup>를 이용하여 측정하였다.

시료의 분석대상은 수소이온농도(pH)와 함께 소듐(Na<sup>+</sup>), 포타슘(K<sup>+</sup>), 칼슘(Ca<sup>2+</sup>), 철(Fe), 마그네슘(Mg<sup>2+</sup>), 알루미늄(Al), 실리카(Si) 등의 8가지 양이온과 重碳酸鹽(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), 鹽化이온(Cl<sup>-</sup>),

黃酸鹽(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) 등의 3가지 음이온이다.

pH는 채취한 시료를 개봉하는 즉시 portable pH-meter로 측정하였다. 기타 양이온과 농도는 SS type 濾過器에서 0.45 $\mu$ m membrane filter로 여과한 뒤, ICP Mass Spectrometer로 분석하였다. HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>은 Titration method(pH=4.5)로 濃度를 구했으며, Cl<sup>-</sup>의 농도는 Argentometric method를 사용하여 측정하였다. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 定量分析에는 Spectrophotometer를 이용한 Turbiditic method를 사용하였다.<sup>11)</sup>

## 2. 流域의 水文特性

### 1) 氣候特性

유역에서의 物質收支를 파악하기 위해서는 水分收支를 파악하는 것이 선행되어야 한다. 강우량과 유량의 정기적인 측정결과를 통해 연구기간 동안의 수분수지를 파악하였으며, 수분수지와 물질수지의 특성은 봄, 여름, 가을, 겨울로 구분하여 분석<sup>12)</sup>하였다.

연구기간 동안 氣溫은 例年平均에 비해 겨울의 기온이 상대적으로 낮고 가을의 기온이 높았지만, 예년과 큰 차이를 보이지 않았다. 水原測候所의 관측자료<sup>13)</sup>에 의하면 연구기간 동안의 年中最低氣溫은 -17.6 $^{\circ}$ C(90. 12. 27), 最高氣溫은 34.4 $^{\circ}$ C(91. 8. 20)였으며, 平均氣溫은 12.0 $^{\circ}$ C, 平均濕度는 약 65.9%였다.

- 9) 이병평, 1972, "관악산의 산림군락에 관한 식물사회학적 연구", 식물학회지, Vol. 15, No. 1, pp.1-12.  
 10) Addison, H., 1954, *A Treatise on Applied Hydraulics*, John Wiley & Son, pp.438-491.  
 11) APHA, AWWA, WPCF, 1985, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 16th edition.  
 12) 계절을 구분하는 방법에는 自然季節(溫度, 氣壓配置에 의한 구분), 生物季節, 農事季節 등이 있으나, 본 연구에서는 일평균온도를 사용한 자연계절구분법을 사용하였다.(金蓮玉, 1987, 氣候學概論, 正益社, pp.73-74.)

구분	기온분포	연구기간동안의 계절구분
봄	5-20 $^{\circ}$ C	91. 3. 19-91. 6. 6
여름	20 $^{\circ}$ C이상	91. 6. 7-91. 9. 20
가을	20-5 $^{\circ}$ C	90. 10. 10-90. 11. 30, 91. 9. 20-91. 10. 9
겨울	5 $^{\circ}$ C이하	90. 12. 1-91. 3. 18

13) 기상청, 기상월보, 1990. 10월-1991. 10월

降雨現象<sup>14)</sup>에서는 연강우량이 1296.2mm로 예년(평균인 1170.6mm)에 비해 약 100mm가량 많았다. 특히 다우기인 7, 8, 9월의 강우량이 차지하는 비율은 평균 55.4%보다 높은 64.3%(수목원, 60.0%)를 보이고 있어, 예년에 비해 多雨期의 강우비율이 높았다. 7월의 강우량은 平年에 비해 약 2배 정도 많았던 반면, 8월의 강우량은 적었다. 1990년 10월은 강우가 없었다. 降雪은 12월 초순부터 3월초순까지 나타났으며, 이 기간은 본 연구에서 구분한 겨울과 일치한다.

이러한 기온과 강우량의 차이는 예년과 비교하여 볼 때, 수분수지와 물질수지의 季節間 差異를 높일 것으로 보이나, 전반적으로 큰 例外現象을 나타내지는 않을 것으로 판단된다.

## 2) 季節別 地表流出과 水分收支

연구기간 전체의 流量圖는 그림 2이며, 계절별 강우량과 지표유출량간의 관계는 표 1과 같다. 流況은 河狀係數(最大流量/最小流量)가 3,500을 넘어 갈수기와 홍수기의 유량차이가 큰 山地河川의 특성을 보인다. 그러나 地表流出(overland flow)이 나타나는 장마기의 集中豪雨를 제외한 대부분의 강우에서는 빗물이 토양내로 浸透 혹은 浸漏된 후, 河川堆積物 사이를 흐르는 伏流水 流出(inter flow)과 基底流出(base flow)에 의해 유출패턴이 결정된다.(표1 계절별 강우량과 유출량)

계절별 유출량에서는 降雨量과 降雨強度가 높은 여름에 가장 높은 流出比를 보이는 반면, 降雪이 나타나는 겨울과 강우량이 적었던 가을의 流出比率는 20% 미만이었다. 가을에는 10월의 無降雨를 비롯한 적은 강우량과 토양내 水分保有量의 감소, 氣象條件에 따른 蒸發散量의 증가 등으로 인해 유

출량이 낮게 나타나는 것으로 보인다. 겨울에는 눈 혹은 融雪水가 토양내의 부분적인 결빙으로 장

표 1. 계절별 강우량과 유출량

구 분	강우량(m <sup>3</sup> )	유출량(m <sup>3</sup> )	유출비율(%)
가을	340,280	56,579	16.62
겨울	443,812	69,122	15.57
봄	637,120	351,175	55.12
여름	3,207,320	2,540,307	79.20
전년	4,628,532	3,017,184	65.19

기간 유역내에 머물러 있어 지표유출이 제한되는 것으로 판단된다.

지표유출량의 차이와 지하수를 채취한 우물의 水位變化에서 살펴본 流域內의 水分保有量의 差異는 전년에 비해 약 0.001%정도의 증가를 보였으나, 전체적인 수분수지에는 큰 영향을 미치지 않는 양으로 판단하여 물질수지 계산에서는 제외시켰다. 연구기간 동안의 수분수지<sup>15)</sup>는 總降雨量중에서 地表流出量은 약 65.2%, 蒸發散量은 34.8%인 반면, 토양내 水分保有量의 변화는 낮았다.

## 3. 降水·河川水·地下水의 溶存이온特性

### 1) 降水

#### (1) 降水의 溶質特性

측정된 강수의 溶質濃度는 bulk precipitation (wet deposition+dry deposition)에 의한 측정값으로, 乾性堆積物(dry deposition)이 상당량 포함되어 있다.<sup>16)</sup> 본 연구에서는 乾性堆積物과 濕性堆積物을 정량적으로 분리하지는 못했으며, 아직까지 이 두 가지의 大氣供給物質을 구분하여 측정하

14) 강우량은 수목원에서 측정하고 있는 자료를 사용하였으나, 동계의 강설량은 관악산측후소, 수원측후소, 수목원의 측정치를 산술평균하여 구한 값을 사용하였다.

15) 강우량, 유출량, 지하수 수위의 차이를 근거로 산정한 연구지역내의 수분수지는 다음의 식으로 파악할 수 있다.

$$P=R+ET\pm S \quad (P: \text{강우량}, R: \text{유출량}, ET: \text{증발산량}, S: \text{토양내 수분보유량}).$$

16) Whitehead, H. C. & J. H. Feth, 1964, "Chemical composition of rain, dryfall out, and bulk precipitation at Menlo park, California, 1957-1959", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 69, p.3319-3333.

표 2. 강우의 계절별 용질농도(강우량의 가중평균)

단위 : ppm(pH는 제외)

구분	pH	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al	Si	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Mn	Fe	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
가을	5.12	0.63	0.15	0.04	0.19	0.77	0.63	0.05	0.16	4.64
겨울	4.75	3.55	0.30	0.25	0.24	2.89	0.55	0.05	0.17	7.05
봄	5.42	2.48	0.26	0.04	0.28	2.07	0.92	0.02	0.17	6.06
여름	5.31	0.48	0.10	0.02	0.01	0.74	0.36	0.01	0.27	3.61
평균	5.25	1.06	0.14	0.05	0.08	1.13	0.48	0.02	0.24	4.36

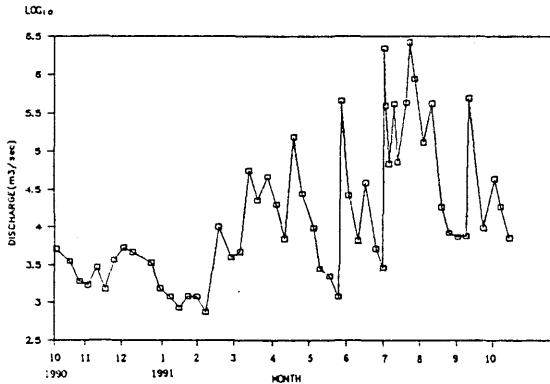


그림 2. 연구기간 동안의 유량도(1990.10.10-1991.10.9)

>K<sup>+</sup>>Mg<sup>2+</sup>>Si>Fe>Al>Mn이다.<sup>18)</sup> 강수내의 이온농도는 인근 서울지역에서 보고된 것과는 상당한 차이를 보이고 있으나, 전체적인 이온별 농도순위는 유사하다.<sup>19)</sup>

강수내의 이온용존량의 계절별 특성(표 2)에서는 모든 이온들이 겨울과 봄에 높은 농도를 보인다. 반면, 여름과 가을의 강수중에는 K<sup>+</sup>를 제외한 전 이온의 농도가 급격하게 감소하고 있으며, Si는 장마기에 거의 검출되지 않고 있다.

각 강우별로 농도의 변화가 심한 이온은 Ca<sup>2+</sup>,

는 것에는 기술적으로 어려움이 있다.<sup>17)</sup>

두 곳에 설치된 강수채집지점(R1, R2)에 나타난 각 이온의 농도는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>를 제외하면 큰 차이를 보이지 않는다. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 Na<sup>+</sup>의 농도는 R2 지점보다 R1지점에서 높게 나타나는 데, 이러한 농도차이는 R2지점이 대기중에 기체상태로 존재하는 황化合物과 粉塵 등의 發生源에 보다 근접해 있기 때문인 것으로 보인다.

강우별로 각 이온의 농도에 강우량을 加重平均하여 구한 溶質濃度の 順位는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>>Ca<sup>2+</sup>>Na<sup>+</sup>

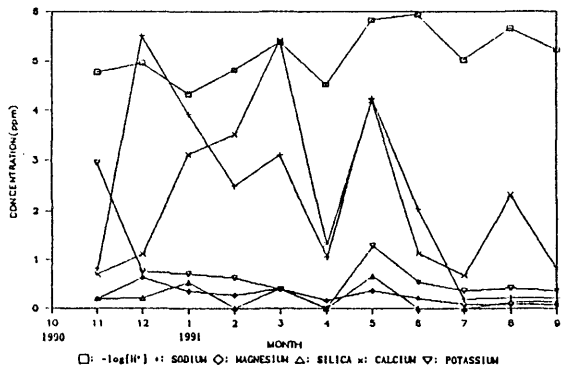


그림 3. 강우의 월별 양이온농도(강우량의 가중평균)

17) Howells, G., 1990, *Acid Rain and Acid Waters*, Eills Horwood, pp.20-22.

18) Cl<sup>-</sup>은 실험오차로 인해 전 시료에서 측정하지 못했으며, 측정된 시료에서의 산술평균에 의하면, 1.74ppm으로 Mg<sup>2+</sup>보다 높은 농도를 보였다.

19) 李敏熙, 外3人, 1989, “黃砂現象시 降水의 化學的 成分에 關한 研究”, 韓國大氣保全學會誌, 제5권, 제2호, 1-11.

朴景烈, 1986, 酸性雨의 ION特性에 關한 調查研究-서울市를 中心으로, 서울大學校 碩士學位論文.

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>이며, 대부분 겨울과 봄에 농도가 급격하게 증가하는 경향을 보인다(그림 3). 이 중에서 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>는 12월에 최고농도를 나타내는 반면, Ca<sup>2+</sup>는 3월에 最大値를 보인다. 이외에 전년을 통해 비교적 균등한 농도를 보이는 K<sup>+</sup>는 11월의 강우에서 높다.

봄철강우에 있어 주목되는 현상은, 1991년에 黃砂現象이 나타난 이후에 채취한 강수(5월9일, 5월26일)에서는 Na<sup>+</sup>(3.43ppm, 3.25ppm), Mg<sup>2+</sup>(0.67ppm, 0.15ppm), Si(0.37ppm, 0.31ppm), K<sup>+</sup>(1.38ppm, 1.26ppm), Ca<sup>2+</sup>(6.09ppm, 1.31ppm), SO<sub>4</sub><sup>2+</sup>(14.15ppm, 4.27ppm) 등이 평균농도를 훨씬 상회하는 농도증가현상을 보이고 있다. 양이온들의 이러한 농도증가현상은 봄철에 中國의 건조지역과 中國大陸 北部的 黃土地帶에서 偏西風에 의해 이동되는 많은 양의 분진이 본 조사유역으로 공급되고 있음을 반증한다.

겨울과 봄의 강우에서 용질의 양이 증가하는 현상은 보다 체계적인 연구가 필요하다. 그러나 강수의 용질량 증가원인을 개략적으로 살펴보면, 겨울의 경우에는 1) 강수량의 감소와 강설, 大氣成層化(stratification)에 따른 大氣粉塵(aerosols)量

의 증가, 2) 화석연료의 사용으로 인한 각종 오염물질의 유입량 증가, 3) 눈표면의 大氣浮遊物質의 固着量 증가 등이 중요한 역할을 하고 있을 것으로 보인다. 그리고 봄철 강우의 경우에는 黃砂現象 등에 의한 분진의 유입량 증가에 큰 영향을 받는 것으로 판단된다. 겨울동안의 강수내의 용질량 증가현상은 京畿道 一圓에서 연구된 결과와 일치한다.<sup>20)</sup>

조사기간 동안의 빗물의 수소이온농도(pH)는 평균 5.25로 대기중의 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 용해로 인한 pH 5.6에 비해 낮은 酸性雨의 특성을 보이고 있다. 각 강우현상별 수소이온농도의 頻度分布에 있어 pH 5.6미만의 산성우는 전체의 72%에 이르며, 4.5미만의 強酸性雨도 2회 나타났다. 강우의 산도를 계절별로 보면 겨울(4.75), 가을(5.12), 여름(5.31), 봄(5.42)의 순서로 높게 나타난다. 이것은 서울지역에서 연구<sup>21)</sup>된 酸性降雨의 계절별 농도인 겨울(4.31) > 봄(4.77) > 가을(4.94) > 여름(5.31)과는 약간의 차이를 보이며, 酸度도 낮다.

(2) 이온間的 相關關係

강수중의 각 이온들간의 相關關係를 표시한 것

표 3. 강수중 이온간의 상관계수

구 분	pH	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al	Si	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Mn	Fe	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
pH		0.10	0.25	0.06	0.12	0.40*	-0.04	0.02	0.24	0.14
Na <sup>+</sup>			0.66 <sup>+</sup>	0.47 <sup>+</sup>	0.40	0.56 <sup>+</sup>	0.12	0.37	-0.08	0.64 <sup>+</sup>
Mg <sup>2+</sup>				0.33	0.47*	0.69 <sup>+</sup>	0.11	0.55 <sup>+</sup>	0.24	0.79 <sup>+</sup>
Al					0.07	0.72 <sup>+</sup>	-0.04	0.26	0.15	0.18
Si						0.45*	0.11	0.32	0.16	0.47*
Ca <sup>2+</sup>							-0.03	0.35	0.18	0.62 <sup>+</sup>
K <sup>+</sup>								0.34	-0.20	0.08
Mn									0.00	0.43*
Fe										-0.02
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>										

※ 단측검정유의도 : \* : -0.01, + : -0.001.

20) 金良均 外, 1989, “大氣汚染物質의 長距離移動과 산성비 降下에 關한 研究(1)”, 국립환경연구원보, 제11권, pp.229-243.  
 21) 朴聖培 外5人, 1989, “서울地域의 酸性降雨現象에 關한 研究”, 大氣保全學會誌, pp.42-54.

이 표 3이다. 이들 이온중에서  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ 는 대부분의 이온들과 밀접한 相關關係를 보이는 반면, pH,  $\text{K}^+$ , Fe 등은 다른 이온들과 상관관계를 가지 못하고 있어 그 원인물질이 相異함을 알 수 있다. 각 이온들의 상관관계에서  $\text{Na}^+$ 와  $\text{SO}_4^{2-}$ 는 높은 相關性을 보이며, 이것은 전술한 강우측정지점 간의 농도차이와 관련되어 있을 것으로 보인다.

강수 중에 포함되어 있는  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ 는 많은 양이 해수중의 氣孔破裂(bubble bursting)에 의해 공급되는 것으로, 두 이온간의 농도의 回歸式은

$$[\text{Mg}^{2+}] = 0.13[\text{Na}^+]$$

(단위 : mg / l)

로 알려지고 있다.<sup>22)</sup> 본 조사구역의 경우, 이들 두 이온의 回歸方程式은

$$[\text{Mg}^{2+}] = 0.078 [\text{Na}^+] + 0.094 \quad (\text{단위 : mg / l}, r=0.66, n=25)$$

으로 나타났다. 이 두 식은 回歸係數중 기울기에서 큰 차이를 보여, 일반적인 해양기원의 강수에 비해  $\text{Mg}^{2+}$  이온이 높게 나타났다. 또한 두 이온 모두 土壤 등의 지표물질을 이루고 있는 Al, Si,  $\text{Ca}^{2+}$ , Mn과도 높은 상관관계를 보이고 있다.

강수중에 포함된 물질중에서  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ 는 대부분 지표면에서 공급되는 것으로 이들 이온은 大陸性降雨의 특성을 지시하는 指標로 간주된다.<sup>23)</sup> 따라서 이들 이온이 다른 이온들과 가장 높은 상관성을 보이는 것은, 강수중에 토양입자, 분진 등의 地表起源物質들이 상당량 포함되어 있다는 사실을 추정할 수 있게 한다. 따라서 본 조사구역은 海岸에 인접해 있음에도 불구하고 주변의 人口過密地域의 都市化와 工業化에 따라 지표기원물질들이 대기에서 다량 공급되고 있다.

## 2) 河川水

### (1) 河川水의 溶質特性

측정된 하천수의 용질농도를 유량과 加重平均한 濃度順位는  $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Si} > \text{HCO}_3^- > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Fe} > \text{Al} > \text{Mn}$ 로 나타났다. 하천수중의 많은 이온들이 강수로 공급되는 물질에 비해 뚜렷한 농도증가를 보인 반면,  $\text{H}^+$ 와  $\text{K}^+$ , Mn, Fe 등은 강수에 비해 농도가 낮거나 비슷한 현상을 나타내고 있다(표 4, 그림 4, 그림 5). 각 이온들간의 相關關係는 표 5와 같다.

하천수의 용존이온농도는 계절별로 많은 차이를 보이고 있으나, 강수에 비해 그 변동폭은 크지 않다. 水素이온濃度(pH)의 경우는 강수보다 높으며, 가을과 겨울에 비교적 높다. 유역내에서  $\text{H}^+$ 는 加水分解作用으로 造岩鑛物들을 풍화시키는 작용을 함으로, 강수에 비해 농도가 감소하는 것이 일반적인 현상이다. 그러나 연구기간중 채취한 모든 시료의 pH는 7미만으로 나타나, 화강암지역의 酸性環境임을 반영하고 있다.

하천수에 녹아 있는 각종 陽이온들은 분석시료 별로 상이한 농도패턴을 보인다.  $\text{Ca}^{2+}$ 는 매우 불규칙적인 농도변화를 보이지만,  $\text{K}^+$ , Si,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ 는 비교적 균등한 농도와 변화경향을 관찰할 수 있다. 그러나 이들 이온들의 농도변화는 계절별로 큰 차이를 보인다.  $\text{K}^+$ 와 Si는 여름과 가을에 농도가 증가하는 경향을 보이지만,  $\text{Na}^+$ 는 겨울과 봄에,  $\text{Mg}^{2+}$ 는 봄과 여름에 높은 농도를 보이고 있다. 微量元素인 Al, Fe, Mn은 여름에 농도가 증가하고 있으나, 그 증가량과 농도는 낮다.

22) Munger, J. W. et al., 1983, "Continental scale variation in precipitation chemistry", *Environmental Science and Technology*, Vol. 17, No. 1.

23) Berner, E. K. & R. A. Berner, 1987, *The Global Water Chemistry: Geochemistry and Environment*, Prentice-Hall, pp.62-83.

표 4. 하천수의 계절별 용질량(유량의 가중평균)

구 분	(단위 : ppm(pH 제외))												
	pH	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al	Si	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Mn	Fe	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	TDS*
가 을	6.02	2.49	0.99	0.07	3.43	4.96	0.66	0.01	0.10	4.58	1.76	8.21	27.27
겨 울	6.03	4.73	0.27	0.14	2.75	6.77	0.43	0.01	0.04	3.04	2.63	9.21	31.02
봄	5.91	4.62	1.50	0.04	2.78	4.90	0.38	0.01	0.03	2.71	3.24	9.56	29.77
여 름	5.86	3.03	1.77	0.24	4.58	5.46	0.76	0.02	0.36	3.51	2.10	9.82	31.66
평 균	5.88	3.25	1.71	0.21	4.30	5.41	0.70	0.02	0.31	3.42	2.24	9.74	31.35

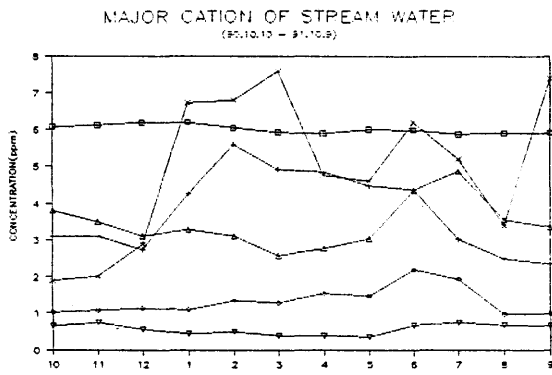


그림 4. 하천수의 월별 양이온 농도(유량의 가중평균)

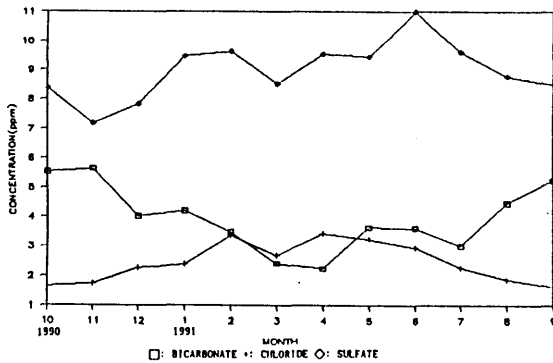


그림 5. 하천수의 월별 음이온 농도(유량의 가중평균)

硅酸鹽礦物의 加水分解 혹은 溶蝕에 의해 공급 되는 Si<sup>24</sup>의 경우, 여름에 비교적 높은 농도를 보인다. Si와 마찬가지로 본 유역의 기반암내에 많은 양이 포함된 Al, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Fe 역시 여름에 농도증가현상을 보이고 있으며, Si의 농도와도 높은 상관관계를 보이고 있다. 이것은 氣溫上昇과 降雨量의 增加에 의한 硅酸鹽礦物의 풍화에 직접적으로 기인된 것으로 볼 수 있다.

반면, 암석의 풍화에 밀접한 관련을 가질 것으로 보이는 Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>는 Si와 낮은 상관관계를 보이고 있어 주목된다. Na<sup>+</sup>는 겨울과 봄에 높은 농도를 보이며, Ca<sup>2+</sup>는 계절별로 큰 차이를 보이지는 않았다. 硅酸鹽 岩石地域에서는 하천수의 용존이온 중 많은 양이 대기에서 공급되며,<sup>25)</sup> 토양내에서는 이들 이온의 이동성이 높다는 것<sup>26)</sup>과 강수 중에서 높은 농도를 보인다는 점을 고려하면 하천수의 Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>의 농도는 대기의 영향을 많이 받고 있는 것으로 판단된다.

陰이온의 경우, 가장 높은 농도를 보이는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>은 봄과 여름의 농도가 가을, 겨울에 비해 높다. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 경우, 강수에서는 겨울과 봄에 높은 농도를 보인다는 점과는 차이를 보이고 있다. 하천수에 녹아 있는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>는 대부분이 대기중에서 공급된다는 사실을 고려할 때, 유입된 물질의 상

24) Meybeck, M., 1987, "Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads", *American Journal of Science*, Vol. 287, pp.401-428.

25) Gambal, A. W. & D. W. Fisher, 1966, "Chemical composition of rainfall eastern North Carolina and southeastern Virginia", *U. S. Geological Survey Water-Supply Paper*, 1535-K.

26) Birkeland, P. W., 1974, *Pedology, Weathering, and Geomorphological Research*, Oxford University Press, pp. 88-89.



표 5. 하천수의 용존이온간의 상관계수

구분	pH	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al	Si	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Mn	Fe	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
D*	-0.56*	-0.28	0.44 <sup>+</sup>	0.57 <sup>+</sup>	0.30	0.05	0.32	0.25	0.64 <sup>+</sup>	-0.65 <sup>+</sup>	-0.11	0.39*
pH		0.19	-0.27	-0.32	-0.14	-0.15	-0.10	-0.13	-0.39*	0.44 <sup>+</sup>	0.05	-0.39*
Na <sup>+</sup>			0.31	-0.01	-0.17	0.43 <sup>+</sup>	-0.48 <sup>+</sup>	-0.30	-0.29	-0.24	0.76 <sup>+</sup>	0.37*
Mg <sup>2+</sup>				0.69 <sup>+</sup>	0.55 <sup>+</sup>	0.34*	0.19	0.18	0.77 <sup>+</sup>	-0.34*	0.43 <sup>+</sup>	0.75 <sup>+</sup>
Al					0.66 <sup>+</sup>	0.37*	0.51 <sup>+</sup>	0.21	0.73 <sup>+</sup>	-0.29	0.05	0.57 <sup>+</sup>
Si						-0.03	0.67 <sup>+</sup>	0.21	0.80 <sup>+</sup>	0.16	-0.25	0.32
Ca <sup>2+</sup>							-0.26	-0.26	-0.02	-0.30	0.46 <sup>+</sup>	0.49 <sup>+</sup>
K <sup>+</sup>								0.41*	0.67 <sup>+</sup>	0.30	-0.57 <sup>+</sup>	0.00
Mn									0.35	0.11	-0.34*	0.06
Fe										-0.14	-0.10	0.47*
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>											-0.42*	-0.36*
Cl <sup>-</sup>												0.38*
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>												

※ D\* : discharge, 단축검정유의도 : \* : -0.01, + : -0.001.

당량이 蒸發散과 河川流量의 減少로 인해 유역내에서 장시간 殘留하고 있을 가능성을 제시하고 있다. 반면 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 식생의 등의 有機物 腐敗가 활발하게 나타나는 여름과 가을에 높은 농도를 나타냈다.<sup>27)</sup>

HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 더불어 生物體의 영향을 받는 이온으로는 K<sup>+</sup>이 있다. 森林生態界에서 식물의 成長期에 生物體內에 저장되는 원소는 K와 N이 있으며, 이러한 이온들은 성장기인 봄에는 하천수에서 농도가 낮아지는 반면, 유기물의 腐植이 활발히 진행되는 여름과 가을에는 그 농도가 증가한다.<sup>28)</sup> 본 연구에서도 이러한 현상이 관찰되어 봄에는 하천수중의 K<sup>+</sup>농도가 강수에 못 미치지만, 여름과 가을에는 그 농도가 2배 정도 증가하고 있다.

연구를 시작한 시점과 종료시점간의 각 이온들의 농도차이는 Ca<sup>2+</sup>를 제외하면 대체로 일치한다. 반면 Ca<sup>2+</sup>는 전기간을 통해 매우 불규칙한 분포를

보일 뿐 아니라, 종료시점에서도 급격한 농도의 증가현상이 나타나고 있다.

### (2) 流量과 이온濃度間의 相關關係

이온의 濃度와 流量間의 關聯性을 알아보기 위해 하천수의 농도와 시료채취시 측정된 유량간의 相關關係를 살펴보았다(표 5).

pH, Mg<sup>2+</sup>, Al, Fe, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>는 유량과 일정한 상관관계를 보이고 있는 반면, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Si, Cl<sup>-</sup>의 농도는 유량과 상관성이 크지 않다. 이 중에서 유량과 상관관계가 가장 큰 이온은 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>로 나타났으며, 유량이 증가할수록 하천수 내 농도는 감소하는 負(-)의 相關關係를 가지고 있다. 반면 상관성을 가지는 다른 이온들은 대체로 유량과 正(+)의 相關關係를 가진다. 그러나 유량의 큰 차이에도 불구하고 전체적인 농도변화는 낮게 나타난다.

27) 토양내에서 유기물부패로 형성된 이산화탄소는 물과 반응하여 탄산(H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)을 형성하며, 탄산은 수소이온과 중탄산이온(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)로 해리된다. 해리된 H<sup>+</sup>의 일부는 규산염광물의 가수분해에 사용되어 암석의 풍화에 중요한 역할을 하며, 중탄산염은 하천수에 녹아 유역을 빠져 나간다.

28) Waring, R. H. & W. H. Schlesinger, 1985, *Forest ecosystems : Concept and management*, Academic Press, pp. 138-140.

이것은 농도가 유량과 밀접한 상관관계를 가지는 것으로 알려진 석회암 지역의 연구와 몇몇의 물질수지 연구결과<sup>29)</sup>와는 차이를 보이는 것이다.

이러한 차이는 근본적으로 지역의 生態의 特性이 다르기 때문인 것으로 보이나, 1) 강우 분석에서 살펴본 바와 같이 降雨 혹은 乾性堆積物에 의한 溶質이 본 유역에 多量供給되고 있다는 점, 2) 지표면에서 강수에 의해 공급된 모든 물이 鑛物들과 충분한 반응을 일으킬 수 있는 토양내 殘留時間(residence time)을 가지기가 어렵다는 점, 3) 유역내에서 유입된 물이 충분한 잔류시간을 가진다 하더라도, 많은 양의 물은 비교적 광물의 反應度가 낮은 하천퇴적물 사이에 저장되어 있다는 점,<sup>30)</sup> 4) 유역내의 식생들은 각종 營養鹽類를 攝取(uptake) 혹은 排出하는 시기가 계절간에 큰 차이를 보인다는 점 등이 중요하게 작용하는 것으로 판단된다. 따라서 암석의 風化率이 낮은 화강암 지역에서는 유량과 용질농도를 직접적으로 관련시키기는 어려울 것으로 보인다.

### 3) 地下水

지하수내의 각 이온들의 농도와 농도변화는 전술한 강우와 하천수와는 큰 차이를 보이고 있다 (그림 6, 그림 7, 표 6). 지하수 내에서의 이온의

농도비는  $SO_4^{2-} > Na^+ > HCO_3^- > Si > Ca^{2+} > Cl^- > Mg^{2+} > K^+ > Al > Mn > Fe$ 의 순이다.

계절적으로 농도의 뚜렷한 傾向性을 보이는 이온은  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Cl_2^-$  등이다.  $Mg^{2+}$ ,  $Cl^-$ 는 봄과 여름에 지속적인 농도의 증가를 보이고 있으며,  $K^+$ 는 봄에 약간의 농도감소를 보인다. 이 세가지 이온들은 공히 7월에 가장 높은 농도를 보인다. 이들을 제외한 다른 이온들은 월별, 계절별로 불규칙적인 농도변화를 보이고 있다. 반면,  $Na^+$ ,  $Si$ ,  $SO_4^-$  등의 전반적인 농도변화패턴은 유사하다.

지하수 내의 總溶質量(TDS)은 계절적으로 여름과 겨울에 비교적 높은 농도증가를 나타낸다. 여름에는 이온 중에서  $Mg^{2+}$ ,  $Al$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Fe$ ,  $Cl^-$ 의 농도증가현상이 두드러진 반면, 겨울에는  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ 의 농도증가가 전체용질량의 증가에 중요한 역할을 하고 있다.

지하수에서 하천수와 비교하여 높은 농도를 보이는 이온은  $H^+$ ,  $Na^+$ ,  $Al$ ,  $Si$ ,  $K^+$ ,  $Mn$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$  등이며, 이 중에  $Na^+$ ,  $Al$ ,  $Si$ ,  $K^+$ ,  $Mn$  등 기반암내에 다량 포함된 양이온은 岩石의 風化로 그 농도가 높게 나타나는 것으로 볼 수 있다. 반면  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Fe$ ,  $SO_4^{2-}$ 의 경우에는 하천수의 농도가 지하수의 농도를 상회하고 있어, 기반암의 풍화 이외에 大氣로부터의 供給 혹은 지표의 特定

표 6. 지하수 내의 용질량 변화(산술평균)

(단위 : ppm)

구 분	pH	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al	Si	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Mn	Fe	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	TDS*
가 울	5.89	6.37	0.76	0.13	7.35	2.35	0.71	0.32	0.19	7.04	2.98	7.67	35.84
겨 울	5.89	8.45	0.81	0.21	6.63	4.77	0.56	0.23	0.08	7.08	3.09	8.27	40.18
봄	5.47	7.89	1.14	0.10	5.10	4.13	0.37	0.07	0.04	5.75	3.67	8.58	36.84
여 름	5.43	7.15	2.47	0.53	6.85	7.99	1.42	0.11	0.36	6.47	5.26	7.98	46.57
평 균	5.64	7.52	5.32	0.25	6.48	5.03	0.77	0.17	0.16	6.61	3.79	8.10	40.22

29) Edward, A. M. C., 1973, "Dissolved load and tentative solute budget of some Norfolk Catchment", *Journal of Hydrology*, Vol. 18, pp.201-217.

李泰亨, 1989, 전계논문.

30) Katz, B. G., et. al., 1986, "Geochemical mass-balance relationships for selected ions in precipitation and stream water, Catoctin Mountains, Maryland", *American Journal of Science*, Vol. 285, pp.931-962.

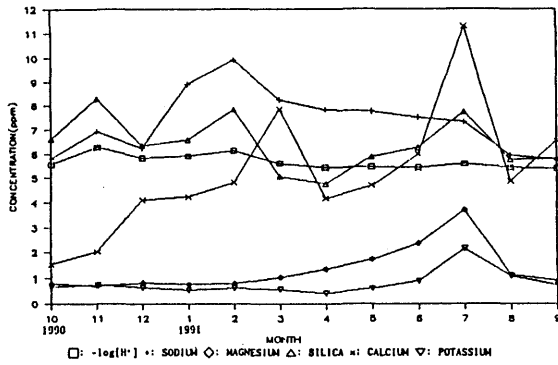


그림 6. 지하수의 월별 양이온 농도(산술평균)

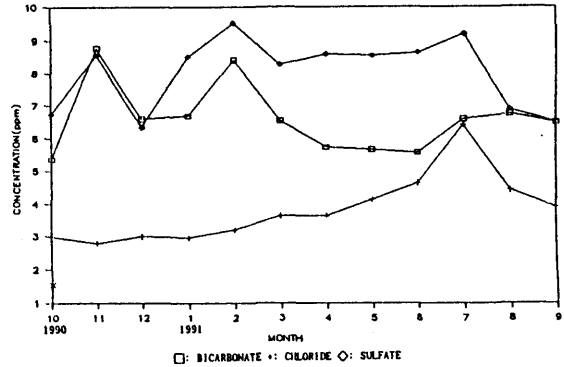


그림 7. 지하수의 월별 음이온 농도(산술평균)

供給源에서 이들 물질이 유출되고 있는 것으로 보인다. 자연수 중의 거의 모든 양이 풍화에 의해 지배되는 Si의 경우, 지하수내에서  $\text{Na}^+$ , Al, Si,  $\text{K}^+$ , Mn과 높은 상관관계를 보이지만  $\text{Mg}^{2+}$ 와  $\text{Ca}^{2+}$ 는 상관관계가 낮게 나타나고 있어, 이러한 주장을 뒷받침하고 있다. 그러나 대부분 대기중에서 공급되는 것으로 알려진  $\text{Cl}^-$ 의 지하수내 농도 증가와 Fe의 농도감소를 결정하는 요인을 파악하지는 못했다.

#### 4. 流域內的 物質收支

##### 1) 季節別 物質收支

降水에 의한 이온의 供給量과 河川水를 통한 流出量간의 관계를 계절별로 살펴보면 표 7과 같다. 조사구역에서 全年을 통해 지속적으로 超過供給되는 이온은  $\text{H}^+$ 인 반면, 超過流出되는 것은 Si와  $\text{HCO}_3^-$ 이다.  $\text{Mg}^{2+}$ 와  $\text{Ca}^{2+}$ 는 겨울을 제외한 기간

표 7. 각 이온의 계절별 공급량과 유출량

구 분	$\text{H}^+$	$\text{Na}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	Al	Si	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	Mn	Fe	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	합계	
가	공급량	2.58	215.0	50.0	10.5	65.7	215.0	262.8	18.2	55.5	-	1574.4	2469.7
	유출량	0.05	141.2	56.0	4.2	194.3	37.1	280.6	0.5	5.8	259.1	464.4	1443.3
올	수 지	+2.53	+73.8	-6.0	+6.3	-126.6	+177.9	-18.6	+17.7	+49.7	+259.1	+1110.0	+1026.4
겨	공급량	7.89	1574.3	133.8	109.1	106.4	244.1	1281.7	20.9	74.3	-	3127.5	6679.7
	유출량	0.07	326.9	87.5	9.8	190.1	29.7	467.9	0.4	3.1	209.9	636.8	1962.2
울	수 지	+7.82	+1247.4	+46.3	+99.2	-63.7	+214.4	+813.8	+20.5	+71.2	+209.0	+2490.7	+4717.5
봄	공급량	2.42	1577.8	163.7	26.4	183.3	585.7	1323.2	14.8	113.3	-	3860.4	7851.0
	유출량	0.43	1621.4	528.5	15.6	976.9	133.7	1719.6	2.6	11.9	951.6	3357.9	9320.1
여	수 지	+1.99	-43.6	-364.8	+10.8	-793.6	+452.0	-396.4	+12.2	+101.4	+951.6	+502.5	-1469.1
름	공급량	15.71	1548.5	318.0	54.8	26.5	1166.3	2365.0	39.1	851.3	-	11602.2	17987.4
	유출량	3.51	7707.6	4494.7	600.9	11625.7	1918.6	13863.2	44.1	920.9	8917.9	24943.2	75040.3
수 지	+12.20	-6159.1	-4178.6	-546.1	-11599.2	-752.3	-11498.2	-5.0	-69.6	+8917.9	-13341.0	-57052.9	

※ + : 공급, - : 유출

동안에는 유출되는 양이 流入量을 초과하고 있으며, 나머지 이온들은 가을과 겨울, 봄 동안에는 流出量보다 流出量이 많았다. 그러나 여름동안에는  $H^+$ 를 제외한 모든 이온의 유출량이 유입량 보다 절대적으로 높으며,  $K^+$ ,  $Fe$ ,  $Mn$  이외의 이온들은 계절별로 초과공급된 것보다 훨씬 많은 양이 유출되고 있다.

유출되는 이온중에서  $Si$ ,  $H^+$ ,  $HCO_3^-$ 를 제외한 이온들은 계절별로 공급이 많은 시기와 유출이 많은 시기가 구분된다. 이러한 사실은 하천수의 용질농도는 강수로 공급된 물이 수분의 증발로 인해 직접적인 농도증가로 연결되지 않으며, 초과공급되는 이온들이 토양내에 상당기간 잔류하고 있음을 의미한다.

계절별로는 여름과 봄에는 유역에서 유출되는 양이 대기에서 공급되는 양보다 많았으며, 그 절대량에 있어서도 가을과 겨울의 純供給量을 크게 상회한다. 이 시기는 강우의 지표유출비가 높은 기간으로, 토양층 혹은 기반암에서 유리된 많은 양의 물질들이 용질상태로 제거되고 있다. 주목되는 현상은 절대량에 있어서는 여름에 유출되는 양이 총유출량의 대부분을 차지한다는 것이며, 이것은 現氣候下에 溶質狀態의 物質除去는 대부분 여름에 局限된다는 것을 의미한다.

## 2) 乾性固着量(dry impaciton)의 推定

대기에서 유역으로 공급되는 물질중에는 건성 퇴적물 이외에도, 植物體의 표면이나 地表裸地에 固着되는 乾性固着現象(dry impaciton)에 의해 유입되는 물질들이 있다.<sup>31)</sup> 건성고착에 의한 물질의 유입은 堆積이 쉽게 되지 않는 작은 粒子 혹은 氣

體狀態로 이루어지기 때문에, 그 양을 bulk precipitation를 통한 강수분석에서 파악하기는 어렵다.

일반적으로 이러한 乾性固着物質은 유역내에 공급원이 없는 특정이온을 대상으로 유입량과 유출량의 차이를 비교한 뒤, 간접적으로 그 양을 파악하는 방법이 사용된다.<sup>32)</sup> 乾性固着量推定の 지표로는 흔히  $Cl^-$ 가 사용되고 있다. 이것은 대기중에는 해수의 氣空破裂에 의해 飛散된  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Cl^-$  등이 일정한 비율로 존재하고 있다는 전제하에 全體 固着量을 추정하는 것이다.<sup>33)</sup> 그러나, 주로 地表에서 공급되고 있는  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $SO_4^{2-}$  등은  $Cl^-$ 로 그 양을 추정하기 어렵다는 한계를 가지고 있다.<sup>34)</sup>

본 유역의 강수특성은 지표기원의 용질량이 높은 大陸性 降雨의 특성을 보이고 있으며,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$  역시 지표면에서 많은 양이 공급되고 있는 것으로 판단된다. 뿐만 아니라  $SO_4^{2-}$ 는 건성고착으로 공급될 수 있는 이온들과 높은 상관관계를 보이고 있기 때문에, 본 연구에서는  $SO_4^{2-}$ 를 사용하여 건성고착량을 추정하였다. 연구지역의  $SO_4^{2-}$ 의 유출량은 유입량에 비해 약 31.41%의 剩餘를 보이고 있다. 분수계 내에는 소량의 pyrite( $FeS_2$ ) 이외에는 黃酸鹽의 공급원이 존재하지 않기 때문에, 대부분의  $SO_4^{2-}$ 는 黃酸鹽과 黃化合物의 형태로 유입된 뒤, 유역내에서 부차되는 과정 혹은 수분과 반응하는 과정에서 酸化되어 유출되는 것으로 볼 수 있다.

## 3) 物質收支와 이온別 流出特性

유역내에서 하천수를 통해 유출되는 양과 강수

31) Eriksson, E., 1960, "The yearly circulation of chloride and sulphur in nature : meteorological, geochemical and pedological implication(2)", *Tellus*, Vol. 12, pp.63-109.

32) Creasey, J., et al. 1986, "The use of catchment studies for assessing chemical weathering rates in two contrasting upland area in Northeast Scotlands", in *Rates of Chemical Weathering of Rocks and Minerals*(Coleman, S. M. & D. P. Dethier(eds.), Academic Press Inc), pp. 467-502.

33) Christohersen, N. & H. M. Seip, 1982, "A model for stream water chemistry at Birkenes, Norway", *Water Resources Research*, Vol, 18, pp.977-996.

34) Creasey, J., et al., 1986, 전계논문.

및 건성고착현상에 의해 유입되는 양을 비교하여, 1년 동안의 물질수지를 계산한 것이 표 8이다. 연구지역의 하천은 전술한 바와 같이 대기의 영향과 유역내의 풍화의 영향을 동시에 받는 하천으로, 유역내의 물질수지는 각 이온별로 서로 다른 剩餘와 缺乏現象을 보인다. 유입되는 양보다 유출되는 양이 많은 이온은 Si, Ca<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 등이다. 그러나, H<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Fe, Mn 등은 유역내로 超過供給이 이루어지고 있는 것을 알 수 있다.

유역으로부터 유출되는 양 중에서 대기에서 공급받는 양은 약 61%이다. 그러나 각 이온별 유입량과 유출량의 비는 큰 차이를 나타낸다. 대기중에서 공급받는 양과 하천을 통해 유출되는 量間의 비율이 가장 낮은 것은 Si로 하천수에 녹아 있는 대부분의 Si는 풍화에 의해 유출되는 것임을 반증하고 있다. 반면, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>는 대기중에서 지표면으로 공급되는 양이 전체 유출량의 절반 이상을

차지하고 있다.

물질수지의 분석에서 주목되는 현상은 기반암 내에서는 극히 낮은 농도를 가진 Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> 이온이 상당량 유출되고 있으며, 물질의 유출입특성에서도 다른 이온들과는 구별된다. 이 두 이온의 相對的 移動性(relative mobility)<sup>35)</sup>은 Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>가 각각 184.33, 75.81으로 나타났다. 대기에서의 공급량을 고려할 경우 각각 214와 73을 나타내고 있어, 이들 두 이온은 유역내의 특정 공급원으로부터 초과유출되고 있음을 추정케 한다.

하천수 내에 존재하는 대부분의 Ca<sup>2+</sup>와 Mg<sup>2+</sup> 이온은 鑛物의 溶蝕 혹은 風化에 의해 공급되는 것이며, 이들 이온에 대한 생물체의 영향은 비교적 적다.<sup>36)</sup> 조사유역에서 이들 이온을 유출시킬 수 있는 광물은 CaO<sub>2</sub>가 미량 포함된 斜長石(plagioclase), 黑雲母(biotite) 등에 불과하다. 따라서 현재 過多流出되고 있는 Ca<sup>2+</sup>와 Mg<sup>2+</sup>는 하천

표 8. 연구지역의 물질수지

단위 : (kg/km<sup>2</sup>/year)

구 분	유 입 량(A)		유출량(B)	물질수지	A/B
	강 수	건성고착	하천수		
H <sup>+</sup>	7.90	3.62	1.12	+10.40	10.29
Na <sup>+</sup>	1,357.87	621.77	2,960.44	-980.80	0.66
Mg <sup>2+</sup>	183.85	84.19	1,491.48	-1,223.44	0.20
Al	55.42	tr	174.17	-118.75	0.32
Si	105.49	tr	3,574.10	-3,468.61	0.03
Ca <sup>2+</sup>	1,445.49	661.89	4,254.93	-2,147.55	0.50
K <sup>+</sup>	610.79	279.68	565.39	+325.08	1.57
Fe	302.32	tr	260.15	+42.17	1.16
Mn	93.00	tr	47.60	+45.40	1.95
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-	-	2,855.92	-2,855.92	-
Cl <sup>-</sup>	1,866.97	357.21	2,224.76	0.00	0.00
SO <sub>4</sub> <sup>2+</sup>	5,571.14	2,551.04	8,122.18	0.00	0.00
합 계	11,600.24	4,559.40	26,532.24	+1,0372.60	0.61

35) relative mobility =  $\frac{\text{해당이온이 하천수에서 차지하는 비율}(\%)}{\text{해당이온이 암석에서 차지하는 비율}(\%)}$

36) Berner, E. K. & R. A., Berner, 1987, 전제서, pp.211-212.

에 인접한 도로, 산지 곳곳에 분포하고 있는 堤防, 팔당-수원간의 地下送水管 등의 石灰性分의 地上·地下構造物에 의해 공급되는 것으로 보인다. 그러나 본 연구에서는 화강암의 화학적 풍화에 의한 치환침출량과 인위적 요인에 의한 유출량을 정량적으로 파악하지 못했다.

강수 중의  $K^+$ 의 농도는 서울에서 분석된 것에 비해 비교적 낮은 농도를 보이고 있으므로<sup>37)</sup>, 유역내의 供給過剩現象은 토양, 식생의 영향에 의한 것으로 보인다.  $K^{2+}$ 이온의 경우, 식물체의 營養鹽類로 사용되어 비교적 낮은 移動性(mobility)을 가지며<sup>38)</sup>, 계절별로 민감한 반응을 보이고 있어 식생의 安定狀態를 지시해주는 이온으로 사용될 수 있다.<sup>39)</sup> 따라서 물질수지에서 관찰되는  $K^+$ 의 초과공급현상은 본 유역의 식생이 아직까지 成長期에 있으며, 전체적으로 물질순환에서 안정상태를 이루지는 못하고 있는 것으로 판단된다.<sup>40)</sup>

여기서 간과할 수 없는 사실은 물질의 固着現象은 식물체내의 저장 이외에도 土壤內의 可溶性 鹽狀態의 殘留, 二次鑛物의 形成 등에 의해 나타날 수 있다는 사실이다. 유역의 토양 중에는 可溶性 鹽基量이 낮기 때문에 양이온의 초과공급현상에는 二次鑛物의 形成이 중요한 역할을 하고 있을 것으로 보인다. 특히  $K^+$ 의 토양내 集積現象은 수암통

에서 나타나는 上部土壤內의  $K_2O$  含量增加現象과 관련되어 있을 것으로 추정된다. 따라서 유역내의  $K$ -feldspar의 풍화에 의한  $K^+$  이온의 溶脫量은 극히 제한될 것으로 판단되며,<sup>41)</sup>  $K^+$ 가 포함된 점토광물의 형성가능성을 암시하고 있다.

$K^+$ 이외에도 물질수지에서는 Fe와 Mn의 유역내 集積現象이 나타나고 있다. 이러한 물질은 植物體의 營養鹽類로 사용되는 양이 극히 제한되어 있기 때문에 風化現象, 혹은 土壤化 作用에 의해 유역내에 固着되고 있는 것으로 보인다. 특히, 본 조사 유역은 강한 酸性環境으로 還元作用(reduction)은 풍화작용에서 중요한 역할을 하지 못하는 것으로 보이며, 이것은 하천수를 통해 유역을 빠져나가는 Fe와 Mn의 양을 줄이는 역할을 할 것으로 보인다.<sup>42)</sup>

반면,  $Si^{43)}$ ,  $Na^{44)}$ , Al 등의 이온은 유역내 화학적 풍화에 약한 albite의 주요구성원소들이며, 植生에 의해 사용되는 양이 극히 제한되어 있기 때문에 이들의 유출량은 본 유역의 화강암 풍화특성과 그 양을 반영하는 증거로 볼 수 있다.  $H^+$ 는 광물에서 양이온을 置換浸出시키는 이온으로 그 절대량의 감소현상이 설명될 수 있을 것으로 보이며,  $HCO_3^-$ 는 加水分解와 石灰物質의 溶蝕現象으로 인해 많은 양이 유출되고 있다.

37) 이민희, 외 3인, 1989, 전계논문.

38) Waring, R. H. & W. H. Schlesinger, 1985, 전계서, pp.179-180.

39) Likens, G. E., et al., 1967, 전계논문.

40) 유역내  $K^+$ 의 공급과잉현상은 미국 북동부의 Hubbard Brook에서의 연구(1963-1965)에서 부분적으로 나타나고 있으나, 다른 지역에서는 찾아보기 어렵다. Hubbard Brook의 연구에서는 1년에 약 0.7kg/ha 정도의 공급과잉현상이 나타나고 있으며, 이것은  $K^+$ 이온의 유출입특성은 암석권과 생물권, 대기권의 균형상태(dynamic equilibrium)하에 있다고 하였다(Likens, G. E. et al., 1967, 전계논문).

41)  $K^+$ 의 공급과잉현상이 기반암에서  $K^+$ 를 함유하고 있는 광물의 풍화가 진행되지 않고 있다는 것을 의미하는 것은 아니다. Cleaves, E. T. et al.(1970)에서는  $K^+$ 와  $Ca^{2+}$ 는 하천에서 측정할 수 없는 양보다 많은 양이 풍화에 의해 암석에서 유리된다고 하였다.(Cleaves, E. T., et al., 1970, "Geochemical balance of a small watershed and its geomorphologic implications", *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 81, pp. 3015-3032).

42) Krauskopf, K., 文建柱(譯), 1991, 地化學入門, 綠苑出版社, pp.241-26.

43) 하천수 중의 silica 농도는 quartz, amorphous silica의 용식에 의해 큰 영향을 받지 않는다.(Bricker, O. P. & R. M. Garrels, 1967, 전계논문)

44) 성장기에 있는 삼림(aggrading forest)에서도 식물체내에 저장되는 Na의 양은 낮다.(Bornmann, F. H. & G. E. Liken, 1979, *Pattern and Process in a forested ecosystem, spring-verlag*, pp.138-140)

## 5. 要約 및 結論

본 연구는 京畿道 安養市에 위치한 花崗岩 單一 岩石地域에서 현재 우리나라의 氣候環境下에서 나타나는 水分收支, 物質의 流出入特性, 物質收支를 분석하는 것으로, 1년동안(1990. 10-1991. 10) 정기적으로 하천수와 빗물, 지하수내에 녹아 있는 12가지의 溶存이온을 분석하였다. 분석을 통해 밝혀진 내용은 다음과 같다.

첫째, 조사기간동안 연구지역에서 나타난 水分收支는 蒸發散量 34.8%, 地表流出量 65.2%, 토양내 水分保有量의 차이는 0.001%였다. 강수량에 대한 계절별 유출량비는 여름(79.2%) > 봄(55.12%) > 가을(16.6%) > 겨울(15.6%)이었다.

둘째, 겨울과 봄에는 大氣汚染과 黃砂現象 등에 의해 地表起源의 물질이 다량 공급되고 있다. 따라서 이 시기에 京畿道 일원에 내리는 강우는 해안에 인접해 있음에도 불구하고, 용질농도는 大陸性 降雨의 특성을 보인다. 반면, 여름과 가을의 강수의 용질 중에는 지표기원물질의 비율이 낮다.

셋째, 큰 차이를 보이는 河川流量에 비해 溶存이온의 변화는 비교적 일정하게 나타난다. 분석된 이온중 pH,  $Mg^{2+}$ , Al, Fe,  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ 는 유량과 일정한 상관관계를 보이고 있는 반면,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ , Si,  $Cl^-$  등은 뚜렷한 상관성을 보이지 않는다. 유량과 상관관계를 가지는 이온중  $HCO_3^-$ 는 負의 相關關係를 보이며, 다른 이온들은 正의 相關關係를 가지고 있다. 이러한 특성은 화강암의 낮은 風化率과 대기로부터의 物質供給, 유역내의 水文學의 特性에 기인한 것으로 판단된다.

네째, 화강암으로 구성된 조사유역의 하천수는 암석의 풍화에 의해 유출되는 물질에 비해 대기중에서 공급되는 용질의 비율이 높게 나타나고 있으

며, 乾性固着量을 고려할 경우 하천을 통한 물질의 총유출량 중 약 61%를 대기에서 공급받고 있다. 그러나 각 이온별로 그 비율은 큰 차이를 보인다.

다섯째, 물질수지에서 季節別로 공급이 우세한 시기와 유출이 우세한 시기로 나눌 수 있다.  $H^+$ 를 제외한 대부분의 이온은 가을과 겨울에는 대기에서의 공급량이 유출량을 초과하고 있지만, 여름과 봄에는 洗淨作用과 風化量의 증가로 인해 유출량이 유입량을 훨씬 능가하고 있다. 특히, 여름의 유출량은 유역에서 나타나는 純流出量의 대부분을 차지하고 있어, 현재 우리나라의 기후환경하에서는 암석의 풍화 및 물질의 제거는 여름에 편중되어 있다.

여섯째, 각 이온의 收支特性에 있어  $H^+$ ,  $K^+$ , Fe, Mn은 유역내로 초과공급되는 이온인 반면, 유출량이 유입량보다 많은 이온은  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ , Si, Al,  $HCO_3^-$  등이다. 이들의 超過供給과 超過流出量은 본문 중의 표 8과 같다.

$H^+$ 의 초과공급은 규산염광물의 가수분해에 의한 것이다. 영양염류로 사용되는  $K^{2+}$ 의 供給過剩現象은 본 유역의 식생이 成長段階(aggradation stage)에 있으며, 物質循環에서 安定狀態에 이르지 못했음을 의미하는 것으로 판단된다. 초과공급된  $K^+$ 와 Fe, Mn 중의 일부는 토양내에서 粘土鑛物과 散化物 혹은 水酸化合物의 형태로 집적되고 있는 것으로 판단되나, 이에 관해서는 보다 체계적인 연구가 필요하다.

화강암의 풍화에 의해 超過流出이 나타나는 이온은  $Na^+$ , Si, Al이며, 주로 biotite, albite의 풍화에서 溶脫된 것으로 보인다. 그러나  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ 는 지표상에 散在한 汚染源에서 많은 양이 유출되고 있다.

# The Geochemical Mass-balance in Small Granitic Catchment

Summary

Park, Soo-jin

The purpose of this study is to clarify the nutrient flux and nutrient budget under the present climatic conditions. The study area is a small granitic catchment (3.62 km<sup>2</sup>) on the southeastern slope of Kawnak mountain in Anyang-shi, Kyoungki-do. In this study area, stream water, ground water, and rain, fall water were weekly collected and the respective concentrations of twelve ions (H<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mn, Fe, Mg<sup>2+</sup>, Al, Si, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) were measured during one year (Oct. 1990–Oct. 1991). The results of the analysis are as follows :

Firstly, the water budget of study period was that 34.8% of the incoming water was evapotranspired, 65.2% was flowed out as stream water, and the storage by soil water and ground water was 0.001%. The runoff ratios by season were :summer(79.2%)>spring(55.1%)>fall(16.6%)>winter(15.6%).

Secondly, the solutes concentration of precipitation was greatly different in terms of seasons. Especially the precipitation during the winter and spring includes lots of surface-origin materials from atmospheric pollution and yellow sand phenomena. But during the summer and fall, not only the concentration of solutes was much lower than that of winter and

spring precipitations, but also the characteristics of solutes were different.

Thirdly, in general, the concentrations of the ions in drainage water were relatively constant although the discharge is varied greatly. The concentrations of pH, Al, Fe, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> were partially correlated with the discharge. HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> had the negative correlation, the others had the positive correlations. But the concentrations of Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Si and Cl<sup>-</sup> did not have correlation with the discharge. Such results came from the low-weathering rate of the granite rock, material influx from the atmosphere, and the hydrological characteristics of the research area.

Fourthly, the solutes of stream water are more greatly influenced by influx from atmosphere than by the chemical weathering of granite rock. Considering the dry impaction, the amount of input from the atmosphere accounted for about 61% of the amount of removal from the drainage basin.

Fifthly, in the aspect of nutrient budget, it was possible to classify the influx-dominant period and efflux-dominant period. During the fall and winter period, the amount of influx from the atmosphere exceeded that of efflux by the streamwater except H<sup>+</sup>. But during



the summer and spring, the amount of efflux was much greater than that of the influx. Especially the amount of efflux during the summer period accounts for net-output, so that the weathering of rock and the removal of nutrient are limited to the summer period under present climatic condition (temperate monsoon climate).

Sixthly, Oversupplied ions into the drainage basin were  $H^+$ ,  $K^+$ , Fe and Mn, but  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ , Si, Al, and  $HCO_3^-$  were removed from the basin by the stream. The surplus of  $K^+$  reflects that the vegetation is under degradation stage, and the nutrient cycle in the studying forest did not reach to the stable sta-

te. And it is presumed that the accumulation of  $K^+$  in the top soil is also related to the surplus of  $K^+$ . Oversupplied Fe and Mn are accumulated in soil by forming iron-oxide and iron-hydroxide.

In opposite, the removal of  $Na^+$ , Si, Al results from the chemical weathering of albite and biotite, and the amount of removal reflects the weathering rate of bedrock. But  $Ca^{2+}$  and  $Mg^{2+}$  are contaminated by the scattered calcareous structures.

**Keywords :** granitic catchment, rain water, stream water, ground water, solutes, water budget, geochemical mass-balance.