

水文化學的 資料를 통한 花崗岩質 流域의 化學的 風化特性에 關한 研究*

朴 秀 鎮

본 연구는 소규모 유역에서 하천수와 지하수의 용存이온 특성을 통하여 각종 이온들의 용脫特性和 粘土礦物의 형성환경, 化學的 風化量 등을 추정해 본 것이다. 필자는 본 연구를 위하여 1990년 10월부터 1년간에 걸쳐 유량측정 및 수질분석을 실시하였고 斜面의 4개 지점에서 점토광물을 분석하였다.

분석결과, 암석의 풍화에 의한 용存物質은 전체의 약 39% 미만이었으며, 유역내의 풍화층에 집적되는 이온은 H^+ , K^+ , Fe , Mn 등이었다. 물질의 계절적인 收支特性和 水文學的 자료로 볼 때, 여름에는 Kaolinite가 열역학적 측면에서 안정된 점토광물이며, 2:1 점토광물도 Kaolinite로 변형될 가능성이 높다. 풍화에 의해 유출되는 2차광물의 형성과 식생의 영향이 비교적 적은 Na^+ 를 사용하여 화학적 풍화량을 추정한 결과, 본 유역의 화강암이 1년에 화학적으로 풍화되는 양은 약 $31.31g/m^2$ 정도인 것으로 밝혀졌다.

主要語 : 화강암, 화학적 풍화, 용달, 점토광물, 풍화량

1. 序 論

1) 問題提起 및 研究動向

지표면에서 진행되는 암석의 물리·화학적 풍화는 생태계의 無機物質 供給源으로, 토양과 지형발달의 기본적인 자연현상으로 중요시되고 있다. 그러나 자연상태하의 낮은 風化率은 풍화의 진행도와 그 특성을 파악하기 어렵게 하고 있다. 또한 現存하는 풍화물에는 과거 수차에 걸친 기후변동이 반영되어 있기 때문에, 풍화층의 礦物學的 分析만을 통해 현재 어떠한 풍화특성이 나타나고 있는지를 일반화하기는 어렵다.

이러한 문제점들 때문에 우리나라의 現氣候環境下에서 진행되고 있는 화학적 풍화특성에 관한 연구는 큰 한계를 가질 수 밖에 없었으며, 풍화와 관련된 토양화작용·지형발달과정의 해석에 있어서도 많은 문제점들이 제기되고 있다. 따라서 본 연구는 하천을 통해 흘러나가는 하천수와 지하수의 용存이온특성에는 유역내의 화학적 풍

화특성이 반영되어 있다는 전제하에, 현재 진행되고 있는 풍화특성, 구체적으로는 각종이온들의 용脫特性和 粘土礦物의 形成環境, 化學的 風化量 등을 추정해보고자 한다.

강수와 하천수, 지하수내에 녹아 있는 물질, 즉 溶質(solute)의 특성을 파악하여 암석의 풍화량과 풍화특성을 분석한 연구들은 1960년대 이후 지속적으로 진행되고 있으며(Feth, et al., 1961; Johnson, et al., 1966), 자연상태에서 광물의 風化率과 風化機作을 연구하는 가장 신뢰할 수 있는 연구방법으로 여겨지고 있다(Velbel, 1985). 그 결과, 최근에는 이러한 방법이 공간적인 풍화특성뿐 아니라, 地表剝削率 計算(Crabtree and Trudgill, 1984), 斜面發達의 研究(Crabtree and Burt, 1983), 全地球的 物質循環에서의 암석권의 역할(Meybeck, 1987), 大氣汚染物質의 유입에 따른 地表面의 反應(Drever and Hurcamb, 1986) 등의 분야에서 광범위하게 응용되고 있다. 현재 국내에서는 物質收支(Geochemical mass balance)를 통해 석회암의 풍화량과 지

* 본 논문은 서울대학교 대학원 석사학위 논문 중 일부를 수정·보완한 것이다.

水文化學的 資料를 통한 花崗岩質 流域의 化學的 風化特性에 關한 研究

표식박물을 계산한 연구(이태형, 1989)가 있다.

2) 研究地域概觀

연구지역은 37°25'~37°26'20"N과 126°56'15"~126°58'E 사이에 위치한 경기도 관악산 南西 斜面上의 소규모 화강암유역으로, 그 면적은 3.62km² 정도이다. 연구유역은 전체적으로 均質한 화강암으로 구성되어 있고, 화강암의 불투수성으로 인해 인근 유역과의 지하수 유동이 제한되어 있어, 水文化學的 資料를 통해 화강암의 풍화특성을 연구할 수 있는 좋은 자연조건을 가지고 있다.

전체 유역의 지형특색은 저평한 주변지역과의 대조되는 화강암 岩柱라는 지질적 특성으로 인해 급경사지가 많고 기반암의 노출면적이 넓다. 연구지역을 구성하고 있는 화강암은 先캄브리아

표 1. 安養花崗岩의 岩石特性

조 암 광 물		화 학 분 석	
조 암 광 물	함량(부과:%)	구성화합물	함량(무게:%)
Quartz	33.80	SiC ₂	76.14
K-feldspar	30.55	Al ₂ C ₃	13.32
Plagioclase	34.50	Na ₂ O	4.44
Biotite	0.25	K ₂ O	4.23
Muscovite	0.75	Fe ₂ C ₃	0.77
Zircon	0.10	FeO	0.79
Myrmekite	0.05	CaO	0.43
		MgO	0.06

출처: 洪永國(1984).

紀의 片麻岩을 관입한 安養花崗岩(국립지질 광물연구소, 1975)이다. 主造岩鑛物은 조립질의 石英(quartz), 正長石(K-feldspar), 斜長石(plagioclase) 등이며, 소량의 黑雲母(biotite), 白雲母

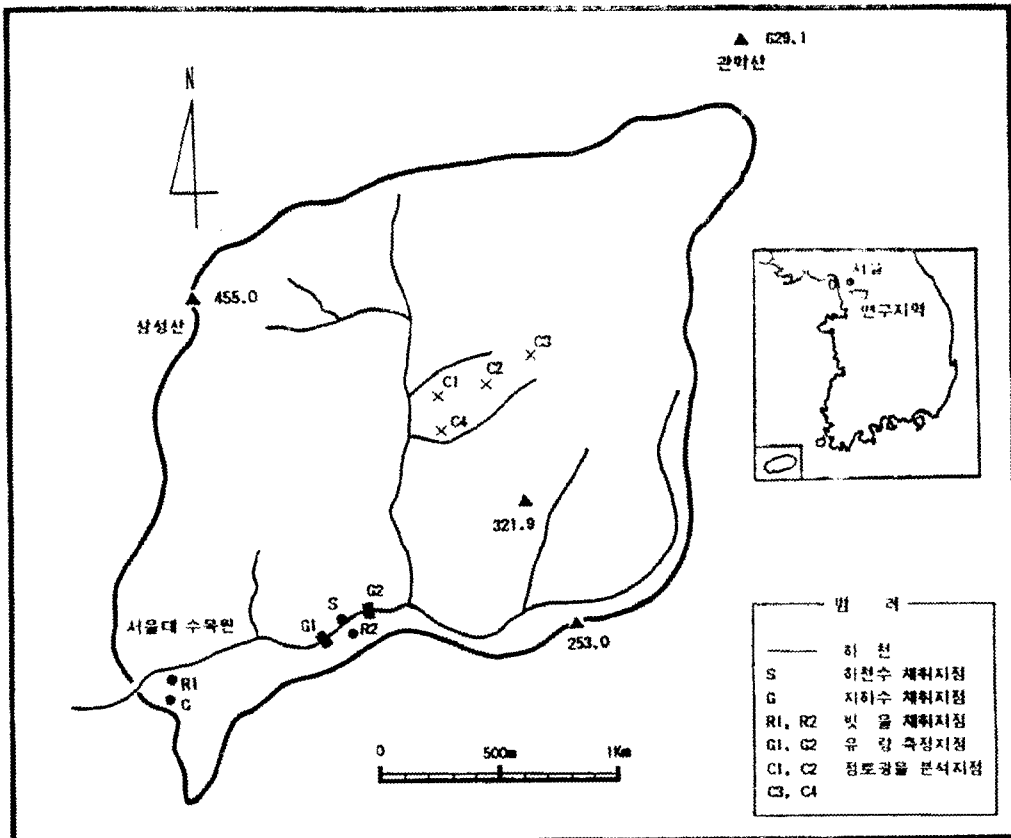


그림 1. 연구지역도

(muscovite), 저어콘(zircon)이 함유되어 있다(표 1). 화강암의 화학적 특징은 CaO₂와 MgO의 함량이 극히 낮고, 대부분의 斜長石은 albite의 형태로 존재하고 있다(홍영국, 1984).

높은 경사도와 화강암의 암석적 특성으로 인해 연구지역의 토양과 식생의 발달은 불량하다. 토양은 土壤分類體系에 의해 Entisol 目(order)의 冠岳統(series)과 秀岩統으로 분류되고 있다(농촌진흥청 농업기술 연구소, 1977). 유역 대부분 지역에 걸쳐 분포하는 冠岳統은 화강암 風化層 위에 발달한 殘積土(residual soils)이다. 土壤層의 발달이 불량하여 A層과 C層만이 나타나며, 기반암까지의 깊이는 70~100cm에 불과하다. 토양 A層의 형태적 특성은 갈색 혹은 암갈색의 砂壤土 혹은 粗砂土로서 발달이 미약한 粒狀構造가 나타나며, 토양배수가 양호하다. C층은 攪亂되지 않은 화강암 풍화층이다. 토양의 전체적인 화학적 특성으로는 有機物 含量이 낮고 土壤反應은 酸性을 보인다. 鹽基置換容量과 鹽基飽和도도 역시 낮다.

秀岩統은 화강암 崩積層(colluvium)을 母材로 발달한 토양으로 하천을 따라 兩岸에 발달하고 있다. 토양은 갈색 내지 적갈색으로 자갈이 많은 細砂壤土를 이루고 있으며, 排水가 양호하다. 유기물함량은 낮고 토양반응은 산성을 보이고 있으나, 鹽基置換容量과 鹽基飽和도는 관악통에 비해 상대적으로 높다.

식생은 自然林으로는 소나무가 優占種이며, 신갈나무와 졸참나무가 混在되어 있다. 植栽林으로는 은사시나무가 하천주변에 분포하고 있다(환경청, 1989). 관악산의 식생은 1950년대에 완전히 파괴된 후 다시 성장하고 있는 2차림으로, 전체적인 산림의 성장시기는 약 40~50년 정도로 추정되고 있다(이병평, 1972).

3) 研究方法

안양화강암에 관한 鑛物學的 風化資料는 유역 내 혹은 인근 화강암 풍화층에서 연구된 연구결과들을 이용하였으며(강승철·전효택·전용원, 1985; 최무웅·임종호, 1990), 사면과 깊이에 따른 점토광물의 공간적인 분포를 살펴보기 위해

동일한 사면의 4개 지점에서 粘土鑛物分析을 실시하였다.

점토광물의 同定을 위해서 사용한 방법은 XRD(X-ray diffraction)이다. 실험실에서 配列化(orientation)시킨 시료들을 각각 自然乾燥, ethelglycerol 處理, 375°C 熱處理, 550°C 熱處理를 하여 diffractogram을 작성하였다. 사용된 X-ray diffractomer는 Ni-Filter와 Cu target을 사용한 Rigaku(MODEL RAD-3C)回折機이다.

연구지역의 수문화학적 특성을 파악하기 위하여 1990년 10월부터 1991년 10월까지 1주일간격으로 강수와 지표수, 지하수를 채취하여 분석하였으며, Allen의 Salt-velocity Method(Addison, 1954)를 이용하여 하천의 유량을 측정하였다.

지하수는 우물에서 채취하였으며, 강수는 유역 내 2곳에 증발이 억제되도록 개조한 간이우량계를 사용하여 채집하였다. 기타 기후자료는 경기도 수원측후소에서 측정하고 있는 기상자료들을 이용하였다(기상청, 1990).

시료의 분석대상은 수소이온농도(pH)와 함께 암석을 구성하는 주요 원소들인 소듐(Na⁺), 포타슘(K⁺), 칼슘(Ca²⁺), 망간(Mn), 철(Fe), 마그네슘(Mg²⁺), 알루미늄(Al), 실리콘(Si) 등의 8가지 양이온과 重炭酸鹽(HCO₃⁻), 鹽化이온(Cl⁻), 黃酸鹽(SO₄²⁻) 등의 3가지 음이온이었다.

2. 分析結果

1) 安養花崗岩의 鑛物學的 風化特性

화강암을 구성하고 있는 각종 珪酸鹽鑛物의 화학적 풍화는 지표면에 노출된 암석이 물과 온도, 압력 등의 環境要因들과 平衡狀態를 이루려는 반응으로 볼 수 있다. 화강암의 풍화과정은 1) 양이온·규소(silica)의 弛緩과 동시에 진행되는 一次鑛物構造의 崩壞, 2) 弛緩된 양이온의 용탈, 3) 환경과의 安定狀態 혹은 準安定狀態(meta-stable equilibrium)下에서 殘留物의 再構造化와 溶液의 結晶化에 따른 二次鑛物의 형성 등의 복잡한 작용을 통해 진행된다(Loughnam, 1968).

안양화강암에서 관찰되는 一次鑛物의 붕괴는 각 광물의 풍화에 대한 安定度에 의해 결정되고

있다. 연구구역의 조암광물 중에서 풍화에 대한 抵抗力이 높은 광물은 quartz>muscovite>K-feldspar>biotite>albite (Na-plagioclase)의 순이다(Goldish, 1933). 안양화강암의 풍화물에 대한 SEM(scanning electron Microscopic) 연구에서는 albite와 biotite가 풍화초기부터 급격하게 붕괴되고 있는 것이 관찰된다. 반면, K-feldspar의 풍화는 기반암의 풍화가 상당히 진행된 후 나타나며, 그 풍화정도도 미약하다(강승철·전효택·전용원, 1985).

안양화강암 풍화물에서의 용탈특성에서는 풍화가 진전됨에 따라 Na, Ca, Si는 용탈되어 토양층 내의 함량이 감소되는 반면, Mg는 증가하는 경향을 보인다. 풍화의 進展度와 밀접한 용탈특성을 보이는 것은 Na₂O이다(최무웅·임중호, 1990). 그러나 K와 Al은 풍화층내에서 불규칙적인 함량을 보이고 있으며, Fe와 Mn은 풍화초기에는 용탈되지만 풍화가 진행됨에 따라 풍화물내의 함량이 증가한다. 철의 산화에 의해 풍화물내에 형성되는 iron-staining 현상은 풍화초기부터 나타나고 있다. K-feldspar의 낮은 풍화현상은 연구지역 인근의 과천에서 연구된 풍화층내 K₂O의 불량한 분포현상과 관련되어 있을 것으로 판단된다.

2) 粘土鑛物 分析結果

연구지역의 토양과 화강암 풍화층의 X-ray 회

折分析을 한 결과, 1차광물로는 石英과 長石(quartz, feldspar), 雲母(mica) 등이 殘留物 상태로 남아 있으며, 풍화에 의해 형성된 2차광물로는 kaolin group, illite, 14A 점토광물(vermiculite, chlorite), smectite와 interstratified clay mineral, iron-oxide, iron-hydroxide 등이 나타난다. 이중 풍화층에서 나타나는 철산화물 혹은 철수산화물은 diffractogram에서 結晶狀態나 종류를 판별할 수가 없었다.

화강암 풍화물내에 존재하는 각종 점토광물의 組成에 있어 Kaolin group과 illite는 모든 지점에서 공통적으로 검출된다. 14A의 점토광물 역시 모든 지점에서 검출되고 있으나, vermiculite가 chlorite보다 우세하게 나타난다. 그러나 chlorite는 풍화층의 下層보다는 上層에서, 특히 colluvium 내에서 우세한 분포를 보이고 있으며, 대부분의 위치에서 smectite 혹은 vermiculite와 혼합된 格子構造를 가지는 mixed-layer 상태로 존재하고 있다. Smectite는 측정지점간에서 불규칙한 산출상태를 보이고 있으며, 상부보다는 하부풍화층에서 주로 검출되고 있다. 그러나 전試料를 통해서 illite와 互層을 이루면서 나타나는 interstratified clay mineral의 흔적이 나타난다.

토양분류별 점토광물의 조성은 관악통과 수암통간에 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 수암통에서는 장석이나 석영등의 조암광물의 양이 관악통에 비해 훨씬 낮게 나타나며, 12A의 mixed

표 2. 위치별 점토광물의 산출상태

분류	시 코	깊이 (cm)	kaolin	Illite	vermiculite-	chlorite	smectite	mixed-layer			비 고
								I/S	C/S	C/V	
관 악 통	A-1	10	+	+	+	+	-	+	?	?	colluvium
	A-2	50	+	+	+	-	+	+	?	?	saprolite
	B-1	10	+	+	+	+	-	?	?	?	saprolite
	B-2	45	+	+	+	-	-	+	?	?	saprolite
	C-1	10	+	+	+	-	-	?	-	-	saprolite
	C-2	50	+	+	+	-	+	+	-	-	saprolite
수 암 통	D-1	50	+	+	+	+	-	+	?	?	colluvium
	D-2	100	+	+	+	+	+	+	-	+	colluvium
	D-3	200	+	+	+	+	-	+	-	-	colluvium

+ : 검출 - : 미검출 ? : 흔적

표 3. 강수, 하천수, 지하수내의 평균이온농도

단위 : ppm(pH는 제외)

구 분	pH	Na ²⁺	Mg ²⁺	Al	Si	Ca ²⁺	K ⁺	Mn	Fe	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁺	TDS*
강 수	5.19	1.60	0.24	0.12	0.17	2.11	0.62	0.04	0.25	—	1.74	5.56	—
하 천 수	6.00	3.80	1.42	0.11	3.57	4.99	0.57	0.01	0.16	3.92	2.51	9.18	29.06
지 하 수	5.64	7.54	1.45	0.28	6.47	5.29	0.83	0.17	0.18	6.54	3.93	8.17	40.82

* 측정된 양이온과 음이온의 총합

layer clay mineral과 chlorite 등은 관악통에 비해 높게 나타나고 있다. 점토광물의 분석에서 나타난 일반적인 점토광물의 조성은 우리나라의 화강암지역에서 관찰되는 점토광물의 산출상태와 유사한 것이다((Choi, 1975; 오경섭, 1989).

3) 研究流域內 物質의 流出入特性

연구지역에서 측정된 강수와 하천수, 지하수의 濃度特性은 표 3과 같다.¹⁾ 이 표에서 하천수와 지하수의 농도는 유역내로 공급되는 강수보다 높은 것을 알 수 있다. 이러한 농도증가는 지표에서 일어나는 加水分解 및 溶蝕作用에 의해 설명될 수 있을 것이다. 특히 하천수와 지하수와 의 관계에서는 강우시 하천수의 直接流出에 의해 하천수의 농도가 지하수보다는 낮게 나타난다.

이온들의 降水에 의한 供給量과 河川水를 통한 流出量간의 收支關係를 계절별로 살펴보면 표 4와 같다. 하천수를 통해 유역을 빠져나가는 이온중에서 Si, H⁺, HCO₃⁻를 제외한 대부분의 이온들의 季節別 收支特性은 공급이 우세한 시기와 유출이 우세한 시기로 구분이 가능하다. 공급이 우세한 기간은 대체로 地表流出量의 감소와 대기중에서 공급되는 乾性堆積物의 양이 많은 시기와 일치한다. 이것은 하천수의 용질농도는 강수로 공급된 물이 수분의 증발로 인해 단순한 농도증가현상을 보이지 않음을 의미한다. 이처럼 유출량이 적은 시기에 하천수내의 용질농도가 증발량을 상쇄시킬 만큼 증가하지 않은 것은 초과공급되는 이온들이 유역내에서 상당기간 殘留하고 있음을 의미한다. 비록 그 양이 전체 유출입량에서 차지하는 비율은 높지 않지만, 잔류 현상은 이러한 이온들이 유역내의 토양·기반암·식생들과 화학반응을 일으키고 있음을 암시한다. 따라서 공급과 유출의 시간적인 차이는

지표면의 반응, 구체적으로는 풍화특성과 토양 화학작용에 상당한 영향을 미칠 것으로 보인다.

계절별 수지는 봄과 여름에는 유역내에서 유출되는 양이 많으며, 그 절대량에 있어서도 가을과 겨울의 純供給量을 크게 상회하는 것이다. 이 시기는 강우의 地表流出比率이 높게 나타나는 기간으로 토양층 혹은 기반암에서 많은 이온들이 溶質狀態로 제거되고 있다. 특히, 그 절대량에 있어서는 여름에 유출되는 양이 1년간 유출되는 양의 대부분을 차지하고 있다. 따라서 여름에는 기온상승과 많은 강우량에 의해 유역에서의 유출이 급격하게 진행됨을 알 수 있다.

4) 水文化學的 資料를 통한 粘土鑛物의 形成特性

유역내의 풍화층에서 일어나는 조암광물과 자연수와의 화학반응은 반응초기에 급격하게 이루어지며(Smith and Dunne, 1977), 반응후에는 지속적인 平衡關係를 유지하는 것으로 알려지고 있다(Bricker and Garrel, 1967). 따라서 자연수내에 녹아 있는 각종 이온들은 유역내의 규산염광물 혹은 점토광물과 熱力學的 安定狀態 혹은 準安定狀態를 이루고 있는 것으로 볼 수 있다. 그러므로 하천수와 지하수에 녹아 있는 각종 이온들의 구성을 파악하면 유역내의 점토광물의 형성특성을 간접적으로 추정할 수 있다.

자연수 중의 이온분석을 통해 점토광물의 형성을 규명하는 방법으로는 鑛物의 安定圖(stability diagram)에 의한 분석(Nesbitt and Young, 1984)과, 地化學的 物質均衡關係(geochemical mass balance)에서 유역내에 殘留하는 물질의 양을 간접적으로 계산하는 방법(Tardy, 1971)이 사용되고 있다.

(1) 鑛物安定圖(Stability Diagram)

표 4. 각 이온의 계절별 공급량과 유출량

단위 : kg/3.62km²

구 분		H ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Al	Si	K ⁺
가 을	공 급 량	2.58	215.0	50.0	10.5	65.7	215.0
	유 출 량	0.05	141.2	56.0	4.2	194.3	37.1
	수 지	+2.53	+73.8	-6.0	+6.3	-126.6	+177.9
겨 울	공 급 량	7.89	1,574.3	133.8	109.1	106.4	244.1
	유 출 량	0.07	326.9	87.5	9.8	190.1	29.7
	수 지	+7.82	+1,247.4	+46.3	+99.2	-63.7	+214.4
봄	공 급 량	2.42	1,577.8	163.7	26.4	183.3	585.7
	유 출 량	0.43	1,621.4	528.5	15.6	976.9	133.7
	수 지	+1.99	-43.6	-364.8	+10.8	-793.6	+452.0
여 름	공 급 량	15.71	1,548.5	318.0	54.8	26.5	1,166.3
	유 출 량	3.51	7,707.6	4,494.7	600.9	11,625.7	1,918.6
	수 지	+12.20	-6,159.1	-4,178.6	-546.1	-11,599.2	-752.3
건 성 고 착*		+3.6	+621.8	+84.2	tr	tr	+279.7
물 질 수 지		+10.4	-980.8	-1,223.4	-118.8	-3,468.6	+325.1
구 분		Ca ²⁺	Mn	Fe	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	합 계
가 을	공 급 량	262.8	18.2	55.5	—	1,574.4	2,469.7
	유 출 량	280.6	0.5	5.8	259.1	464.4	1,443.3
	수 지	-18.6	+17.7	+49.7	+259.1	+1,110.0	+1,026.4
겨 울	공 급 량	1,281.7	20.9	74.3	—	3,127.5	6,679.7
	유 출 량	467.9	0.4	3.1	209.9	636.8	1,962.2
	수 지	+813.8	+20.5	+71.2	+209.0	+2,490.7	+4,717.5
봄	공 급 량	1,323.2	14.8	113.3	—	3,860.4	7,851.0
	유 출 량	1,719.6	2.6	11.9	951.6	3,357.9	9,320.1
	수 지	-396.4	+12.2	+101.4	+951.6	+502.5	-1,469.1
여 름	공 급 량	2,365.0	39.1	851.3	—	11,602.2	17,987.4
	유 출 량	13,863.2	44.1	920.9	8,917.9	24,943.2	75,040.3
	수 지	-11,498.2	-5.0	-69.6	+8,917.9	-13,341.0	-57,052.9
건 성 고 착*		+661.9	tr	tr	—	0.0	+4,559.4
물 질 수 지		-2,147.6	+45.4	+42.2	-2,855.9	0.0	+10,372.6

+ : 공급, - : 유출, tr : 미량, * 건성고착량은 SO₄²⁻의 수지특성을 사용하여 추정

화학적 풍화특성을 분석하기 위해 사용되는 安定圖는 각 광물의 화학조성과 광물들간의 화학반응에서 나타나는 自由에너지의 변화량을 통해 작성된다. 즉, 熱力學的 側面에서 一次鑛物과 二次鑛物, 용액간의 화학적인 均衡관계를 통해, 자연상태에서 안정적으로 존재할 수 있는 광물을 추정하는 것이다(Garrel and Christ, 1965).

점토광물의 형성에 대한 이러한 열역학적인 접근법을 통해 하천수·지하수·토양수내의 이온 구성이 변함에 따라 나타나는 특정 광물의 침전여부, 자연상태에서 가장 안정적으로 존재할 수 있는 광물의 추정, 각 이온의 농도 변화에 따른 광물의 안정성 변화 등을 파악할 수 있다(Weaver, 1989).

안양화강암에서의 화학적 풍화는 長石(albite, K-feldspar), 雲母(biotite, muscovite)에 의해 규제되고 있으며, 이들 광물은 熱力學的으로 $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 와 $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 시스템 내의 相(phase)變化로 특정 광물의 형성이 결정된다. $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 시스템에서는 $[\text{K}^+]/[\text{H}^+]$ 와 $[\text{H}_2\text{SiO}_4]$ 의 函數로, $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 시스템에서는 $[\text{Na}^+]/[\text{H}^+]$ 와 $[\text{H}_4\text{SiO}_4]$ 의 函數로 각 광물의 안정상태를 파악할 수 있다.²⁾

$\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 와 $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 시스템의 安定圖上의 각 계열별 위치에서 알 수 있는 사실은 다음과 같다. 즉 ① 본 지역의 하천수, 지하수에서 나타나는 점토광물의 안정상태는 長期的으로 kaolinite 영역에 속하지만, 지하수의 $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 시스템에서는 kaolinite와 montmorillonite의 혼합영역에 보다 인접하고 있다. ② 지하수보다 하천수에서 kaolinite 안정도가 높게 나타난다. ③ 계열별로는 풍화층내의 수분순환율(flushing rate)이 증가하는 봄과 여름이 가을과 겨울에 비해 kaolinite의 안정도가 높다.

(2) 地化學的 物質均衡(Geochemical Mass Balance)

토양내에 잔류하고 있는 無水珪酸(silica)과 산화알루미늄의 비율을 통해 현재 형성되는 점토광물의 유형을 파악할 수 있다(Buxon, 1968). 이러한 방법하에서 Y. Tardy(1971)는 자연수중에 녹아 있는 알칼리·알칼리토금속 이온과 무수규산의 양으로 유역내에 잔류하는 무수규산과 산화알루미늄의 비율을 추정하는 방법을 제시하였다. 그가 제시한 관계식은 다음과 같다.

$$\text{Re} = \frac{\text{SiO}_2(\text{fixed})}{\text{Al}_2\text{O}_3(\text{fixed})}$$

$$= \left(\frac{6\text{K}_2\text{O} + 6\text{Na}_2\text{O} + 2\text{CaO} - \text{SiO}_2}{\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}} \right)$$

(stream)

여기서 $\text{Re}=0$ (allitite)인 경우는 gibbsite와 같은 알루미늄질의 광물이 형성되며, $\text{Re}=2$ (monosiallitite)인 경우에는 무수규산과 산화알루미늄이 동일한 비율로 남아 1:1 점토광물이 형성된다.

반면 $\text{Re} \geq 2$ (bisiallitite)일 때는 2:1 점토광물이 형성되고 있음을 의미한다. Y. Tardy가 제시한 Re는 다양한 규산염 암석유역에서 점토광물의 형성특성을 규명하는 유용한 방법으로 알려지고 있다(Velbel, 1985).

본 연구에서는 하천을 통해 유출되는 양 중에서 대기에서 공급되는 양을 보정한 物質收支(박수진, 1992)를 통해 Re값을 산출한 결과, 약 2.00으로 나타났다. 이 수치는 유역내에서 형성되고 있는 점토광물은 monosiallitization에 속함을 의미하는 것이다.³⁾

水文化學的 資料를 통한 점토광물의 형성특성 분석에서 鑛物安定圖와 地化學的 物質均衡에서 나온 결과는 대체로 일치하고 있다. 熱力學的 安定度의 측면에서는 본 조사유역의 풍화환경은 부분적으로 풍화층내의 수분순환율(flushing rate)이 낮은 가을과 겨울에 montmorillonite(smectite) 등의 2:1 점토광물이 형성될 수 있는 가능성을 가지고 있지만, 전체적으로는 kaolinite가 安定된 점토광물로 나타났다. 따라서 점토광물분석에서 동정된 illite, vermiculite, chlorite, smectite, interstratified clay mineral 등은 열역학적 측면에서는 불안정한 상태에 놓여 있는 것으로 해석할 수 있다. 地化學的 物質均衡 분석에서도 유역내의 물질균형관계가 kaolinite가 형성될 수 있는 특성을 보인다.

3. 溶脫特性 및 粘土鑛物形成

조암광물에서 풍화에 의해 遊離된 각종 알칼리, 알칼리토금속 이온들은 풍화층내에서의 용탈과 사면을 따른 지하수·토양수의 이동으로 하천수로 흘러 들어간다. 또한 화학적 풍화과정에는 대기에서 공급되는 이온들이 중요한 역할을 한다. 즉, 강수 혹은 전성퇴적물로 공급되는 각종 금속이온은 풍화층내에서 화학적 풍화를 감소 혹은 촉진 시키는 역할을 한다. 따라서 토양층내의 점토광물들은 빗물로 공급되는 양이온에 많은 영향을 받으며, 반대로 점토광물의 형성은 용탈되는 양이온의 양을 규제한다(Dorothy, 1962). 따라서 전술한 물질수지 특성과 용탈특

성, 점토광물의 형성간에는 밀접한 관련성을 가지고 있다.

乾性固着量(dry impaction)을 고려한 각 이온의 수지특성(표 4)에 있어 H^+ , K^+ , Fe, Mn은 유역내로 초과공급되는 이온인 반면, 유출량이 유입량보다 많은 이온은 Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Si, Al, HCO_3^- 등이다. 이들 이온들의 수지특성은 전술한 풍화층내의 용탈특성과 밀접하게 연관되어 있는 것을 알 수 있다.

H^+ 의 초과공급은 규산염광물의 加水分解의 결과로 해석할 수 있다. 營養鹽類로 사용되는 K^+ 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 판단되며, 초과공급 현상은 토양상부에서 나타나는 K_2O 의 함량증가와도 관련되어 있을 것으로 보인다. 특히 광물학적 분석의 결과와 마찬가지로 K-feldspar의 붕괴 및 풍화현상에 따른 K^+ 의 유출은 현 기후하에서는 극히 제한되어 있다는 것을 알 수 있다. Fe과 Mn 등은 풍화층내의 iron-staining 현상과 관련된 것으로, 이들이 풍화층내에서 酸化物 혹은 水酸化物의 형태로 집적되고 있는 것으로 해석할 수 있다.

화강암의 풍화에 의해 초과유출이 나타나는 이온은 Na^+ , Si, Al이며, 이러한 이온들은 주로 biotite, albite의 풍화에서 용탈된 것으로 보인다. 그러나 Ca^{2+} , Mg^{2+} 는 지표상에 散在한 汚染源으로 인해 상당한 교란을 받고 있다.

물질수지의 특성에서 H^+ 의 유역내 소모량과 長石類의 주요 구성원소인 K^+ 의 유출 및 용탈현상은 극히 제한되고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 생물체의 영향을 고려하더라도, 암석의 낮은 풍화량과 풍화층내에 K^+ 를 이용하는 점토광물들이 비교적 안정적으로 존재할 수 있는 가능성을 제시하고 있다. 특히 식생과 영양염류의 순환이 활발하게 진행되는 토양상부층에서 K^+ 의 함량증가는 매우 중요한 의미를 가지고 있는 것으로 판단된다. 일반적으로 점토광물중에 illite와 vermiculite는 K-feldspar, muscovite에서 물리적, 화학적 작용으로 형성된 뒤, K^+ 의 可用性與否에 따라 可逆反應을 일으킨다(Foth, 1984).

또한 풍화층내의 mixed layer clay mineral들은 풍화과정에서 비교적 짧은 입자를 가지고 있는 hydrobiotite, dioctahedral mica-vermiculite, chlorite-vermiculite 등에서 알칼리·알칼리토금속 이온들이 빠져나감에 따라 형성되기 때문에(Wilson and Nadeau, 1984), K^+ 의 낮은 유출은 2:1 점토광물과 mixed layer clay mineral의 형성에 중요한 역할을 할 것으로 판단된다.

이러한 2:1 점토광물의 형성은 지하수의 열역학적 안정도 분석에서도 부분적으로 반영되어 있다. 그러나 水文化學的 特性은 현재 형성되고 있는 점토광물은 kaolinite가 우세하다는 것이다. 실제 풍화층에서 동정된 점토광물의 특성과 수문 화학적 분석에서 나타나는 결과와의 차이를 설명하기 위해서는 풍화층내의 수분순환의 특성과 계절별 기후차가 중요한 요인으로 고려되어야 할 것으로 판단된다.

水文化學的 資料를 통한 점토광물의 형성특성과 실제 점토광물의 조성간의 차이는 온대지역에서 관찰되는 것으로, 그 원인은 각 鑛物粒子 内部와 그 外部의 風化環境의 차이에 기인한 것으로 해석되고 있다(Tardy, 1971). 일반적으로 암석 내부에서는 암석을 이루고 있는 광물의 배열상태 및 암석구조, 조암광물의 결정구조의 차이로 인해 위치별로 서로 다른 이차광물이 형성될 수 있다. 즉, 2:1 점토광물은 주로 加水分解에 의한 이온의 溶脫이 제한되는 粒子面 혹은 粒子內에서 형성되는 반면, 물의 순환이 활발한 粒子間의 틈 혹은 풍화층내의 소규모 균열(micro-crack) 사이에서는 양이온의 활발한 용탈과 금속 이온의 산화반응으로 인해 kaolinite 혹은 鐵酸化合物이 형성된다는 것이다.

풍화현상에서 관련된 암석내부의 微視的 環境의 차이는 광물의 풍화가 鑛物表面에서 나타나는 이온의 擴散(diffusion)에 의해 진행되는 것이 아니라, 熱化學的으로 脆弱한 광물표면에서 부분적으로 나타나는 格子構造의 瓦解로 풍화가 진행되는 것이라는 연구결과(Berner and Holdren, 1977)에 의해 뒷받침되고 있다. 온대지역에서 나타나는 長石의 초기 풍화에서는 점토가 長石面의 소규모의 空胞(vacuoles)內에 형성되며, 그

내부에서 정제되어 있는 물은 長石과 형성된 점토(illite, illite/smectite) 간에 평형상태를 이루고 있는 것으로 알려지고 있다(Eggleton and Buseck, 1980). 따라서 하천수의 열화학적 분석에서 나타나는 kaolinite의 형성은 물의 순환이 활발하게 일어나는 礦物粒子 外部의 풍화특성을 반영하는 것으로 볼 수 있다.

온대기후하에서 나타나는 화강암의 構成礦物과 風化程度에 따른 점토광물의 형성을 연구한 Meunier and Velde(1979)와 Velde and Meunier(1987)에서는 각 광물별로 서로 다른 점토광물의 형성을 제시하였으며, 풍화된 albite, biotite와 수분순환이 활발한 풍화층내의 균열(fissure)에서는 kaolinite의 직접형성(neoformation)이 나타난다고 하였다. 이러한 암석내부의 광물결정특성과 미시환경(microenvironment) 연구는 물의 흐름이 제한되는 곳에서는 2:1 점토광물이, 물의 흐름이 양호한 곳에서는 kaolinite, 鐵酸化物 혹은 鐵水酸化物이 우세하게 형성된다는 것을 제시하는 것으로, 본 지역의 화강암 풍화외도 직접적인 관련성을 가지는 것으로 판단된다.

따라서 유역내 Fe와 Mn의 供給過剩現象은 풍화층내에서 수분순환이 활발한 균열에서는 kaolinite와 함께 다량의 Fe-oxide 및 금속산화물이 형성되고 있는 것을 반증하고 있으며, 이것은 본 지역의 산성환경의 결과로 판단된다. 비록 이들 물질의 하천을 통한 유출이 용질상태보다는 입자상으로 이동되는 양이 많다는 점을 고려하더라도, 공급되는 물질은 일단 산화물의 형태로 풍화층내에 집적되고 있는 것으로 보인다.

이와 같은 풍화층내의 미시적 풍화환경의 차이와 함께 점토광물 형성의 환경적 요인으로 고려되어야 할 것은 지하수 및 하천수의 계절별 열역학적 안정도에서 볼 수 있는 계절별 안정도의 차이이다. 점토광물의 형성에서 雨期(leaching period)와 乾期(drying season)의 역할은 P.W. Birkeland에 의해 그 중요성이 강조되기 시작하였으며, Folkoff and Meentemeyer(1987) 역시 미국의 토양내의 粘土礦物組成은 강우의 계절적인 차이에 큰 영향을 받고 있다고 하였다. 최근에는 기온의 영향보다 계절적인 강우량의 변

동이 풍화 및 점토광물의 형성에 더욱 중요한 영향을 미치고 있는 것으로 알려지고 있다(Pavich, 1986).

따라서 전술한 물질의 계절적인 수지특성과 水文化學的인 자료를 근거로 한 점토광물의 형성특성에서 살펴본 바에 의하면, 대체로 풍화층내의 수분순환율이 낮고, 대기로부터 유역내로 양이온들의 초과공급이 나타나고 있는 가을과 겨울에는 kaolinite가 가장 안정된 점토광물로 형성되기는 어렵다. 이 기간에는 상대적으로 낮은 화학적 풍화율을 보이며, 풍화층 및 토양층에서의 화학반응은 대기에서 공급되는 알칼리·알칼리토금속의 영향을 강하게 받고 있다. 그러나 kaolinite는 전술한 安定圖에서 나타난 결과와 같이 특정 광물(albite, biotite)과 풍화층내의 균열에서 부분적인 형성이 가능할 것으로 보인다.

반면, 높은 수분순환율과 온도를 보이는 봄과 여름에는 계절별 물질수지에서 살펴본 바와 같이 각종 이온들의 급격한 溶脫이 나타나고 있다. 이 시기에 용탈되는 양은 가을과 겨울에 풍화층내에 추가 공급되는 양보다 월등히 많으며, 이러한 현상은 기반암의 급격한 풍화에 기인한 것으로 보인다. 특히 여름의 유출량은 1년을 단위로 했을 때, 유역에서 나타나는 純流出量의 대부분을 차지하고 있다. 따라서 현재 우리나라의 기후환경하에서는 암석의 풍화와 물질의 제거는 대부분 여름에 국한되어 있다는 것을 알 수 있다.

이 시기에는 열역학적 측면에서 kaolinite가 안정된 점토광물로 나타났으며, 여름의 높은 透水環境下에서는 風化帶(weathering front)의 진전과 더불어 illite, vermiculite 등의 2:1점토광물 역시 부분적으로는 kaolinite로 變形(transformation)될 가능성이 높다. 이것은 일반적으로 투수성이 낮은 곳에서 안정적으로 형성되는 smectite가 풍화층 하부에서 부분적으로 나타나고 있으나, 풍화층 상부 혹은 토양층에서는 그 산출상태가 불량해진다는 사실로 뒷받침된다. 즉, 토양화가 진행되면서 양이온의 용탈로 인해 smectite는 점차 kaolinite로 변하는 것으로 해석된다. I/S interstratified clay mineral 역시 이와 유사한 경향을 보여 smectite의 kaolinite로의 變形을

반증하고 있다.

2:1:1 점토광물인 chlorite는 풍화층의 상부와 수암통의 토양화된 곳에서 관찰되며, 이러한 층위적 특성은 풍화가 진행됨에 따라 chlorite가 2차광물로 형성되는 것을 암시하는 것이다. 우리나라 화강암과 화강편마암지역에서 풍화가 진행됨에 따라 형성되는 chlorite에 대해서는 이미 최대웅(1975)에 의해 보고되고 있다. 일반적으로 chlorite는 매우 불안정한 광물로 알려져 있으며, 풍화물내에서 一次鑛物 상태로 검출되는 chlorite는 이 광물을 포함하고 있는 기반암이 미약하게 풍화된 상태에서 나타나는 것인 반면, 풍화가 진행됨에 따라 형성되는 二次鑛物로서의 chlorite는 지화학적 측면에서 강한 풍화환경하에서 vermiculite와 montmorillonite(smectite)가 kaolinite로 변형되는 과정에서 형성되는 광물로 알려져 있다(Folkoff and Meentemeyer, 1987). 따라서 본 유역에서 부분적으로 관찰되는 chlorite 역시 2:1 점토광물이 kaolinite로 변형되는 증거로 볼 수 있다.

4. 安養花崗岩의 風化量

하천수의 각종 溶質의 양에서 화학적인 풍화가 차지하는 양은 다음과 같은 물질의 定量的 關係(mass-balance equation)에서 파악할 수 있다(Waylen, 1979).

풍화에 의해 공급되는 가용성 염 = 유출 - 유입 ± 저장

유입 = 강우에 의한 공급 + 먼지 + 타생태계에서의 유입

유출 = 하천수에 녹아 있는 염 + 타생태계로의 유출

저장 = 생체내 저장 + 토양내 저장

그러나, 이러한 방법으로 정확한 화학적 풍화량을 추정하기 위해서는 生體內에 저장되는 물질의 양과 二次鑛物내에 저장되는 각 이온의 비율을 파악해야하는 難點을 가지고 있다. 대부분의 水文化學的 資料를 통한 풍화의 연구에서는 생태계의 安定狀態를 가정하고 있으며, 점토광물의 반응이 化學量論的 特性으로 진행된다는 전

제하에 연구가 이루어지고 있다.

본 연구의 物質收支에서는 생태계내의 물질순환에서 안정상태를 가정하기는 어렵다. 또한 점토광물의 형성 역시 각 조암광물별·위치별로 다양한 형성특성을 보이고 있어, 化學量論的 側面에서 화강암의 풍화량을 추정하기는 어려운 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서는 화강암의 풍화와 용탈특성을 가장 잘 반영하고 있는 하천수내의 이온을 선정하여, 현 기후하에서 나타나는 화강암의 化學的 風化率(saprolitization rate)을 추정해 보고자 한다.

단위면적당 기반암에서 화학적으로 진행되는 風化量은 다음과 같은 관계식을 통해 계산할 수 있다.⁴⁾

$$Q_r = Q_i, r/X_i, r$$

Q_r : 화학적 풍화율($g\ m^{-2}/year$)

Q_i, r : i 이온이 기반암에서 화학적으로 유지되는 양($g\ m^{-2}/year$)

X_i, r : i 이온이 기반암내에 포함된 양(g/g)

본 유역의 물질수지와 풍화특성에서 살펴본 바에 의하면, 화강암의 직접적인 영향하에서 유출되는 이온은 Na^+ , Si , Al 등이다. 그러나 Al 은 유역내에서 점토광물을 형성하는 주요 원소로 사용되기 때문에 풍화율의 분석에서는 제외시켰으며, Si 역시 부분적으로는 2:1 점토광물의 형성에서 사용되기 때문에 암석의 화학적인 풍화량을 추정하기는 어려운 것으로 보인다. 반면, Na^+ 는 성장이 산림에서 식물체내에 저장되는 양이 적어 비안정상태에 놓여 있는 본 유역에 화강암의 화학적 풍화량을 추정하는 가장 효과적인 지표가 될 것으로 보이며, 지표물질 혹은 인간의 간섭에 의한 오염현상이 낮다. 또한 Na^+ 를 포함하고 있는 smectite가 본 유역에서 부분적으로 나타나고 있지만 이들 광물은 열역학적으로 불안정하며, kaolinite로 변형되고 있는 것으로 보여 전체 추정량에는 큰 오차를 가져오지 않을 것으로 본다.⁵⁾

Na^+ 를 사용하여 풍화량을 추정한 결과⁶⁾, 본 유역의 화강암이 1년에 화학적으로 풍화되는 양은 약 $31.31g/m^2$ 정도를 나타내고 있다. 그러나 본 연구에서는 기계적인 삭박량을 정량적으로

측정할 수 없었다. 따라서 현재 우리나라에 광범위하게 분포하고 있는 풍화층의 형성기간 등을 추정하기는 어려우며, 이를 위해서는 지표면에서의 침식량에 관한 연구가 병행되어야 할 것이다.

5. 結 論

안양화강암의 광물학적 풍화에 관한 기존의 연구결과와 사면별 점토광물분석, 물질수지적 특성 및 수문화학적 자료 등을 이용하여, 현재 우리나라의 온대계절풍 기후환경하에서 진행되고 있는 화강암의 화학적 풍화특성을 분석하였다. 분석의 결과는 다음과 같다.

연구지역을 흐르는 하천에 의해 운반되는 용존물질중에서 암석의 풍화에 의한 양은 전체의 약 39% 미만으로 추정된다. 이것은 화강암지역을 흐르는 하천의 용존물질을 규제하는 요인으로는 화강암의 풍화보다는 대기로부터의 물질공급이 더욱 중요하다는 것을 의미한다.

광물학적인 자료를 통해 화강암 풍화층에서 용탈특성과 하천을 통한 각종 물질의 연간 제거량간에는 밀접한 관계가 있다. 따라서 식생의 영양염류로 사용되는 K^+ 를 제외한 다른 물질들의 연간 유출량은 풍화층내의 용탈량 혹은 집적량과 직접적인 관계를 가지고 있다. 유역내의 풍화층에 집적되는 이온으로는 H^+ 와 K^+ , Fe, Mn 등이 있다. H^+ 의 초과 공급량은 대부분 광물의 가수분해에 사용된 것으로 보이며, K^+ 는 암석의 풍화에서 유리된 양이 현재 식생에 의해 영양염류로 사용되는 양에 미치지 못하고 있는 것으로 판단된다. Fe, Mn 등은 대부분이 금속산화물의 형태로 풍화층내에 집적되고 있는 것으로 보인다. 반대로 기반암의 풍화로 용탈되고 있는 이온은 Na^+ , Si, Al 등이다. 이들 이온은 주로 biotite, albite의 풍화에서 용탈되는 것이다.

물질의 계절적인 收支特性和 水文化學的인 자료를 근거로 한 점토광물형성의 환경적 특성을 살펴보면, 대체로 풍화층내의 수분순환율이 낮고 대기에서 유역내로 양이온들의 초과공급이 나타나고 있는 가을과 겨울에는 kaolinite가 안정된

점토광물로 형성되기는 어려운 환경특성을 보인다. 그러나 kaolinite는 특정 광물과 암석내의 공극과 틈사이에서 부분적인 형성이 가능할 것이다.

반면, 풍화층내의 수분순환율과 온도가 높게 나타나는 봄과 여름에는 각종 이온들이 급격하게 용탈되고 있다. 이 시기에 용탈되는 양은 가을과 겨울에 풍화층내에 추가 공급되는 양보다 월등히 많으며, 이러한 현상은 기반암의 풍화와 풍화층내 수분순환율의 증가에 기인한 것이다. 특히 여름의 유출량은 1년을 단위로 했을 때, 유역에서 나타나는 純流出量의 대부분을 차지하고 있다. 따라서 현재 우리나라의 기후환경하에서 암석의 풍화는 대부분 여름에 국한되어 있는 것을 알 수 있다. 이 시기에는 열역학적 측면에서 kaolinite가 안정된 점토광물로 나타났으며, 여름의 높은 透水環境下에서는 風化帶(weathering front)의 진전과 더불어 2:1점토광물 역시 부분적으로는 kaolinite로 變形될 가능성이 높다.

풍화에 의해 유출되는 물질중 이차광물의 형성과 식생의 영향이 비교적 적은 Na^+ 를 사용하여 연구기간 동안의 화학적 풍화량을 추정한 결과, 본 유역의 화강암이 1년에 화학적으로 풍화되는 양은 약 $31.31g/m^2$ 정도인 것으로 추정된다.

(投稿 1992년 12월 21일)

註

- 1) 자세한 내용은 박수진(1992)을 참조할 것.
- 2) 安定圖에서는 非化學量論的(nonstoichiometric) 化學反應을 보이는 illite와 montmorillonite, vermiculite, mixed layer clay의 安定領域은 표시하지 않고 있다. 이들 광물의 광물학적특성은 아직 완전하게 규명되지 않고 있어, 광물의 안정상태를 정확하게 평가하기 어렵기 때문이다. 최근의 지화학적 연구에 의해 점차 이러한 측면이 보완되고 있다. 본 연구에서는 $K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ 시스템의 경우에는 Aagaard *et al.*(1983)에 의해 제시된 安定圖를 $Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ 시스템에서는 Tardy(1981)가 제시한 안정도를 사용하여 분석하였다.
- 3) 이러한 Re 값은 안양화강암의 풍화층내에서 실제

분석한 SiO_2/Al_2O_3 의 비율(7.53~8.33)과는 큰 차이를 보이는 것이다. 이러한 차이는 Re 값을 구하는 관계식에서는 장석과 운모의 가수분해에 의해 유출되는 물질만을 고려했기 때문에 나타나는 것으로 볼 수 있다. 즉, 광물학적 분석에서는 용식율이 극히 낮은 석영이 다량 포함되어 있어 SiO_2/Al_2O_3 가 높은 수치를 보인다. 석영의 용식으로 공급되는 SiO_2 의 양을 고려한다면, Re의 값은 보다 높아질 것으로 추정된다. 그러나 자연수에서 석영의 용식은 높지 않기 때문에 큰 오차가 발생하지 않을 것으로 판단된다(Bricker and Garrel, 1967).

- 4) 여기서 제시된 식은 기계적 풍화와 화학적 풍화량을 동시에 고려하는 것이나 본 연구에서 기계적인 풍화량을 정량적으로 측정하지 못했다. 그러나 규산염암석의 풍화특성은 풍화되는 암석의 부피 변화가 거의 나타나지 않는 isovolumetric weathering의 특성을 가지고 있다. 따라서 각 광물의 풍화 안정도에 따른 광물별 풍화량에는 차이가 날 수 있지만, 암석의 전반적인 풍화정도(saprolization)는 특정 광물을 중심으로 충분히 파악할 수 있다.
- 5) 풍화량의 추정에서 Na^+ 를 지표로 선정한 것은 T. Paces가 제시한 이온과 일치하는 것이다.
- 6) Na^+ 의 기반암내 무게 비율은 0.0313(g/g)이며, 1년을 단위로 기반암에서 유리되는 양은 $0.98g/m^2/year$ 이다.

文 獻

강승철·전효택·전용원, 1985, “풍화 화강암의 물리적, 암석학적 및 지화학적 특성,” 대한광산학회지, 22, 339-352.

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

기상청, 기상월보, 1990년 10월—1991년 11월.

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

박수진, 1992, “화강암질 소규모 하천유역의 물질수지특성에 관한 연구”, 지리학논총, 19, 11-27.

오경섭, 1989, “화강암 풍화층의 점토조성과 풍화환경,” 지리학, 40, 31-42.

이병평, 1972, “관악산의 산림군락에 관한 식물

사회학적 연구”, 식물학회지, 15(1), 1-12.

李泰亭, 1989, 關慶 카르스트 地域의 여름과 가을의 溶蝕에 關한 研究, 서울대학교 석사학위논문.

최무웅·임종호, 1990, “경기도 지역에 분포한 화강·편마암의 풍화특성과 등급에 관한연구”, 지리학, 41, 1-18.

홍영국, 1984, “주라기 서울 및 안양 화강암의 암석지화학적 연구”, 대한지질학회지, 20(1), 51-71.

환경청, 1989, 현존식생도, 서울·경기도, 안양(2)도폭.

Addison, H., 1954, *A Treatise on Applied Hydraulics*, John Wiley & Son, New York.

Aagaard, P. and Hegelson, H.C., 1983, Activity/Composition relating among silicates and aqueous solution: II Chemical and thermodynamical consequences of atoms on homological sites in montmorillonites, illites and mixed-layer clays, *Clay and Clay minerals*, 31(3), 207-217.

Berner, R.A. and Holdren, G.R., Jr., 1977, Mechanism of feldspar weathering: Some observation evidence, *Geology*, 5, 369-372.

Birkeland, P.W., 1969, Quaternary paleoclimatic implications of soil clay mineral distributions in Sierra Nevada-Great Basin Transect, *Journal of Geology*, 77, 289-302.

Bricker, O.W. and Garrel, R.M., 1967, Mineralogic factors in natural water equilibria, in *Principles and Application of Water Chemistry*(Faust, S.D. and Hunter J.V., (ed.), Wiley), 449-468.

Buxon, B.P., 1968, Measure of the degree of chemical weathering of rock, *Journal of Geology*, 76, 518-527.

Choi, D.U., 1975, A study on the clay minerals of soil in Korea, 농사시험연구보고, 17, 1-43.

Crabtree, R.W. and Trudgill, S.T., 1984, Hydrological budget for a magnesian limestone catchment in lowland, England, *Journal of*

- Hydrology*, 74, 67-79.
- Crabtree, R.W. and Burt, T.D., 1983, Spatial variation solutional denudation and soil moisture over hillslope hollow, *Earth Surface Processes and Landform*, 8, 151-160.
- Dorothy, C., 1962, Rain water as a chemical agent of geologic process—A Review, *U.S.G.S. Geological Survey Water Supply Paper*, 1535-G.
- Drever, J.I. and Hurcomb, D.R., 1986, Neutralization of atmospheric acidity by chemical weathering in an alpine drainage basin in the North Cascade mountains, *Geology*, 14, 221-224.
- Eggleton, R.A. and Buseck, P.R., 1980, High resolution electron microscopy of feldspar weathering, *Clay and Clay Mineral*, 28, 173-178.
- Feth, J.H., et al., 1961, Sources of mineral constituents in water from granitic rocks, Sierra Nevada, California and Nevada, *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper*, 1535-1.
- Forkoff, M.E. and Meetemeyer, V., 1987, Climatic control of the geography of clay minerals genesis, *Annals of the Association of American Geographers*, 77(4), 635-650.
- Foth, H.D., 1984, *Fundamental of Soil Science*, John Wiley & Son, New York.
- Garrel, R.M. and Christ, C.L., 1965, *Solution, Mineral and Equilibria*, Happer and Row, New York.
- Goldich, S.S., 1983, A Study of rock weathering, *Journal of Geology*, 49, 392-401.
- Johnson, C.M., et al., 1966, Bulk chemical changes and rate of chemical weathering in central New Hampshire. *Transactions of American Geological Union*, 47, 83-84.
- Loughnam, F.C., 1969, *Chemical Weathering of Silicate Minerals*, Elsevier.
- Meunier, A. and Velde, B., 1979, Weathering mineral facies in altered granites: The importance of local small-scale equilibria, *Mineralogical Magazine*, 43, 261-268.
- Meybeck, M., 1987, Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads, *American Journal of Science*, 287, 401-428.
- Nesbitt, H.W. and Young, G.M., 1984, Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic consideration, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, 1523-1534.
- Paces, T., 1986, Rates of weathering and erosion derived from mass balance in small drainage basin, in *Rates of Chemical Weathering of Rocks and Minerals*(Colman, S.M. and D.P. Dethier(eds.), Academic Press), 531-550.
- Pavich, M., 1986, Processes and rates of saprolite production and erosion on a foliated granitic rock of Virginia Piedmont, in *Rates of Chemical Weathering of Rocks and Minerals*(Colman, S.M. and Dethier(eds.), Academic Press), 551-590.
- Smith, T.R. and Dunne, T., 1977, Watershed chemistry: The control of aqueous solutions by soil materials in a small Watershed, *Earth Surface Processes*, 2, 421-425.
- Tardy, Y., 1971, Characterization of the principal weathering types by the geochemistry of Waters from some European and African crystalline massifs, *Chemical Geology*, 7, 253-271.
- Velbel, M.A., 1985, Hydrogeochemical constraints on mass balances in forested watersheds of the Southern Appalachians, in *The Chemistry of Weathering*(Drever, J.I.(ed.), Reidel Publishing Company), 231-247.
- Velde, B. and Meunier, A., 1987, Petrologic phase equilibria in Natural clay system, in *Chemistry of Clays and Clay Mineral*(Newman, E.(ed.), John Wiley & Son, New York, 423-458.

Waylen, M.J., 1979, Chemical weathering in a drainage basin underlain by old Red Sandstone, *Earth Surface Processes*, 4, 167-178.
Wilson, M.J. and Nadeau, P.H., 1984, Interstr-

atified clay minerals and weathering process, Drever, J.I.(ed.), *The Chemistry of Weathering*, Reidel, D.

Hydrogeochemical Research on the Characteristic of Chemical Weathering in a Granitic Catchment

Soojin, Park*

Summary

This research aims to investigate some respects of chemical weathering processes, especially the amount of solute leaching, formation of clay minerals, and the chemical weathering rate of granite rocks under present climatic conditions.

For this purpose, I investigated geochemical mass balance in a small catchment and the mineralogical composition of weathered bedrocks including clay mineral assemblages at four respective sites along one slope. The geochemical mass balance for major elements of rock forming minerals was calculated from precipitation and streamwater data which are measured every week for one year.

The study area is a climatically and lithologically homogeneous small catchment (3.62km²) in Anyang-shi, Kyounggi-do, Korea. The bedrock of this area is Anyang Granite which is composed of coarse-grained, pink-colored minerals. Main rock forming minerals are quartz, K-feldspar, albite, and muscovite. One of the characteristics of this granite rock is that its amount of Ca and Mg is much lower than other granite rock.

The leaching pattern in the weathering profiles is in close relation to the geochemical mass balance. Therefore the removal or accumulation of dissolved materials shows weathering patterns of granite in the Korean peninsula. Oversupplied ions into the drainage basin were H⁺, K⁺, Fe, and Mn, whereas Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Si, Al and HCO₃⁻ were removed from the basin by the stream. The consumption of hydrogen ion in the catchment implies the hydrolysis of minerals. The surplus of K⁺ reflects that vegetation is in the aggravation stage, and the nutrient cycle of the forest in study area did not reach a stable state. And it can be also presumed that the accumulation of K⁺ in the top soil is related to the surplus of K⁺. Oversupplied Fe and Mn were presumed to accumulate in soil by forming metallic oxide and hydroxide.

In the opposite, the removal of Na⁺, Si, Al resulted from the chemical weathering of albite and biotite, and the amount of removal of Na⁺, Si, Al reflected the weathering rate of the bedrock. But Ca²⁺ and Mg²⁺ in stream water were contaminated by the scattered calcareous structures over the surface.

Kaolinite is a stable clay mineral under the present environment by the thermodynamical

* M.A., Department of Geography, Seoul National University

analysis of the hydrogeochemical data and Tardy's R_e value. But this result was quite different from the real assemblage of clay minerals in soil and weathered bedrock. This difference can be explained by the microenvironment in the weathering profile and the seasonal variation of climatic factors.

There are different clay forming environments in the study area and these differences originate from the seasonal variation of climate, especially the flushing rate in the weathering profile. As it can be known from the results of the analysis of thermodynamic stability and characteristics of geochemical mass balance, the climate during winter and fall, when it is characterized by the low flushing rate and high solute influx, shows the environmental characteristics to form 2:1 clay minerals, such as illite, smectite, vermiculite and mixed layer clay minerals which are formed by neof ormation or transformation from the primary or secondary minerals.

During the summer and spring periods, kaolinite is a stable forming mineral. However it should consider that the other clay minerals can transformed into kaolinite or other clay minerals, because these periods have a high flushing rate and temperature.

Materials which are directly regulated by chemical weathering in the weathered bedrock are Na^+ , Si, and Al. The leaching of Al is, however, highly restricted and used to form a clay mineral, and that of Si falls under the same category. Na^+ is not taked up by growing vegetation, and fixed in the weathering profile by forming secondary minerals. Therefore the budget of Na^+ is a good indicator for the chemical weathering rate in the study area. The amount of chemical weathering of granite rocks was about $31.31\text{g}/\text{m}^2/\text{year}$ based on Na^+ estimation.

Key Words: Granite, Chemical weathering, Leaching, Clay Mineral, Weathering rate