식물과 풍화: 미국 Hubbard Brook에 위치한 실험생태계에서 유출되는 배수의 화학적 연구

Plant and Weathering: Chemistry of Waters Draining Experimental Ecosystems at Hubbard Brook, USA

장수범
경상대학교 지구환경과학과

1. 서 론

식물이 규산염광물의 풍화에 미치는 영향은 지표 및 토양의 변화를 이해하는데 중요할 뿐 아니라 지구의 역사를 통해 대기중 이산화탄소의 농도 변화를 연구하는데 있어서도 결정적인 자료를 제공해줄 수 있다. 특히 관속육상식물이 나타난 실루리아기 이후로 이들 식물에 의하여 풍화작용이 가속화되었다고 생각되고 있다. 규산염광물의 풍화작용이 뿌리를 가진 관속식물에 의하여 증가한 이유에 대한 상세한 연구보고가 존재하지는 않지만 일반적으로 다음과 같이 크게 네 가지 작용이 중요하다고 생각된다. 첫째, 식물의 뿌리 및 이와 공생하는 미생물에 의하여 분비되는 유기산 등의 물질에 의하여 1차광물이 분해되는데 이런 작용은 식물이 영양분인 양이온을 흡수하는 과정에서 일어난다. 둘째, 주로 죽은 식물체에 의하여 생성된 토양내의 유기물이 분해될 때 생기는 유기산과 이산화탄소에 의하여 1차광물이 분해된다. 셋째, 관속식물은 증발산을 통하여 물의 재순환을 증가시키고 그 결과로 강수량이 많아진다. 넷째, 식물의 뿌리는 점토광물이 풍부한 토양을 붙잡아 침식되지 못하게 함으로서 토양수의 함량을 높게 유지한다. 따라서 강수의 유무에 관계없이 지속적인 1차광물의 풍화가 가능하게 된다 (Moulton and Berner, 1998).

규산염광물의 풍화속도는 지표수나 지하수의 형태로 분수계를 떠나는 유수량과 용존 성분의 양을 측정하여 추정할 수 있는데 특히 양이온의 양이 중요한 지시자로 이용되고 있다. 풍화를 받는 암석 내에 탄산염광물이 없고 산성비가 내리지 않는 경우에는 중탄산이온(HCO_3^-) 또한 풍화속도를 추정하는데 사용될 수 있다. CO_2에 의하여 Ca 사장석이 풍화를 받는 경우를 예로 들어 반응물과 생성물을 나타내면 다음과 같다.

$$2CO_2 + 3H_2O + CaAl_2SiO_8 \rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4 + Ca^{2+} + 2HCO_3^-$$

야외조사를 통한 연구는 식물이 풍화에 미친 영향을 파악하는 주된 방법으로 알려져 있으며 수 편의 연구 결과가 보고되어있다 (Moulton and Berner, 1998). 이외에도 실험생태계를 이용한 연구가 있는데 이 경우는 야외조사를 통한 연구에서 정량화하기 어려운 여러 가지 물리, 화학, 생물학적 요인들을 비교적 쉽게 측정할 수 있는 것이 장점이다 (Bormann et al., 1998). 그러나 실험생태계를 이용한 단기적(수 년

에서 수 십 년) 연구가 성숙된 토양에서 진행되는 자연적 풍화현상을 이해하는데는 미흡하다는 단점도 있다.

본 연구에서는 미국 New Hamphshire주 Hubbard Brook 실험삼림 내에서 1983년부터 수행되고 있는 실험생태계들로부터 나오는 배수의 주성분 원소 및 이온들을 분석하여 식물이 풍화작용에 미치는 영향을 정량적으로 파악하였다.

2. 연구 방법

2.1 실험생태계

본 연구에 이용된 3개의 실험생태계는 각각 가로 7.5m, 세로 7.5m(표면적 56.25m^2), 깊이 1.5m의 직육면체형 상자로 실험시작 당시 신선한 석영 및 장석질 모래를 채워 인공토양을 만들었다. 지하로 유실되는 배수가 없도록 이들 모래상자의 지표 아래 5면은 불투수성 수지(Hypalon)로 둘러싸고 모든 배수는 지하관측소를 통하도록 설계되었다. 이 관측소에 설치된 계기들을 사용하여 배수량 측정과 시료 채취가 이루어졌다. 식물의 성장을 돕기 위하여 각각의 모래상자에 약 5cm 두께의 유기질 표토가 첨가되었으며 이 표토는 깊이 20cm까지의 모래와 균질하게 혼합되었다. 본 연구에서는 3개의 실험생태계가 이용되었다. 첫째 생태계에는 소나무(*Pinus resionosa* Alt.)를 심었고 둘째 생태계에는 두 종의 풀들(*Andropogen scoparius* Michx 와 *Paricum vigatum* L.)을 심었으며 마지막으로 식물을 심지 않는 모래상자를 남겨두어 다른 두 생태계로부터 얻은 결과와 비교할 수 있도록 하였다. 그러나 이 무식물생태계의 경우 시간이 지남에 따라 조류, 지의류 및 이끼류 등의 식물이 토양표면에서 성장하기 시작하여 진정한 의미에서는 무식물생태계라 볼 수 없다. 따라서 본 논문에서는 단순히 최소식물생태계(minimum vegetation ecosystem)라 부르기로 한다. 배수 시료는 1983년부터 1993년 3월까지는 간헐적으로, 1993년 4월부터는 1주일에 한번씩 정기적으로 채취되었다. 1993년 4월 이후에 채취된 대부분의 배수 시료는 배수량을 고려한 평균치(volume-weighted average)를 나타내는 혼성시료(composite samples)이다(Berner et al., 1998). 본 실험생태계의 결정적 단점은 Hubbard Brook에 내리는 비나 눈이 pH4-4.5의 산성비라는 점이다. 따라서 본 연구에서 얻어진 결과로부터 자연상태에서의 풍화현상을 추정하는 데는 한계가 있으며 HCO_3^-를 풍화의 지시자로 사용하는 것 또한 불가능하다.

2.2 분석 방법

배수시료의 주성분 양이온(Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}) 및 용존 규소(H_4SiO_4)는 유도결합플라즈마 분석법(Inductively coupled plasma spectrometry, ICP)에 의하여 주성분 음이온(F^-, Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-})은 DIONEX 이온 크로마토그라피(Ion chromatography, IC) 시스템을 이용하여 분석되었다. 분석의 상대표준편차는 양이온의 경우 5% 미만, 음이온의 경우 2-4%였다. 염기도(alkalinity)는 양이온과 음이온의 전하량 차이를 이용하여 계산(charge balance method) 하였으며 대부분의 경우 산염기적정에 의하여 측정된

HCO_3^-의 양과 일치하였다. 이는 본 연구에 사용된 분석방법의 정확성을 보여주는 것이라 할 수있다.

3. 결과 및 토의

1993년 4월 이후에 채취된 배수 시료들로부터 얻어진 양이온과 중탄산이온의 분석 결과를 토대로 실험생태계 배수의 특징을 살펴보면 다음과 같다. 최소식물생태계의 경우 배수 내의 주성분 양이온 및 용존규소의 농도 값들이 Sine곡선과 유사한 계절적 변화를 보이는데 8월에 최고치를 2월에 최소치를 나타낸다. 또한 모든 생태계에 대하여 배수 내의 Ca와 Mg 함량 사이에서는 강한 양의 상관관계(r2>0.7)가 존재한다. 유사한 양의 상관관계가 Na와 K의 함량들 사이에서도 존재하나 상관계수는 상대적으로 작다. 양이온들이 이와 같은 계절적 변화와 상관 관계를 보이는 것은 용존 양이온과 점토 및 유기물에 흡착된 양이온들 사이에 이온교환반응에 의한 화학적 평형상태가 존재하기 때문이라고 생각된다. 이러한 주장은 양이온 농도의 변화가 배수량의 변화와 무관하다는 사실에 의하여 뒷받침된다. 토양의 온도가 높을수록 상대적으로 많은 양의 양이온이 토양수내에 존재하여 계절적 변화를 보이며 이는 깊이 95cm에서 측정된 토양의 온도와 강한 양의 상관관계를 보여준다. 용존 규소의 경우도 이와 유사한 화학적 평형관계가 토양수와 점토광물 사이에 존재한다고 생각된다. 농도의 변화가 온도와 화학평형에 의하여 조절되는 반면 양이온들이 실험생태계로부터 배출되는 속도(flux)는 배수량에 의하여 지배된다. 이는 배수량의 변화가 양이온 혹은 용존규산의 농도 변화에 비하여 훨씬 크기 때문이다. 더욱 흥미로운 점은 소나무 생태계로부터 배출되는 양이온 및 용존규소의 연간총량이 최소식물생태계로부터 배출되는 양보다 적다는 점인데 그 이유는 이들 물질이 소나무의 성장 및 특히 2차풍화광물 형성에 이용되었기 때문이다. Bormann 등(1998)은 1983부터 1988년까지 얻어진 자료를 바탕으로 소나무 생태계에서의 풍화가 10배 내지 18배 빠르며 풍화생성물의 대부분은 소나무의 성장이나 2차광물 형성에 이용되었다고 결론지었다. 이러한 결과는 다른 학자들에 의하여 보고된 값들 (2배-8배)보다 비교적 큰 값이다. 1989년부터 1998년까지 얻어진 자료를 이용한 풍화속도 비교연구는 현재 진행중인데 만약 이 연구로부터 얻어진 풍화속도 비가 이전의 결과(10배 내지 18배) 보다 작다면 그 이유는 소나무가 성장함에 따라 1차광물을 공격하고, 영양분을 흡수하는 속도가 느려졌기 때문이라고 생각할 수 있다.

연구 지역에 내리는 산성비(pH4-4.5)의 영향으로 중탄산이온(HCO_3^-)의 배출량을 풍화의 지시자로 사용하는 것은 어렵다. 이것은 풍화에 의하여 생성된 HCO_3^-의 일부가 산성비로부터 공급된 H^+에 의하여 중화되기 때문이다. 그러나 11월부터 3월에 이르는 겨울철 동안에는 강수의 대부분이 눈으로 쌓이므로 풍화작용에 의하여 생성된 HCO_3^-이 토양 내에 축적되며 4월초에 눈이 녹아 배수량이 갑자기 증가하기 전까지 염기도가 높은 배수가 관측되었다.

4. 참고문헌

Berner R. A., Rao, J.-L., Chang, S., O'Brien, R. and Keller, C. K. (1998) Seasonal variability of adsorption and exchange equilibria in soil waters. Aquatic Geochemistry 4, 273-290.

Bormann B. T., Wang D., Bormann, F. H., Benoit G., April, R. and Snyder, M. C., (1998) Rapid, plant-induced weathering in an aggrading experimental ecosystem. Biogeochemistry 43, 129-155.

Moulton, K. L. and Berner, R. A. (1998) Quantification of the effect of plants on weathering: Studies on Iceland. Geology 26, 895-898.