

# 안정 동위원소를 이용한 한강 수계에서의 탄소 순환 연구

이동호<sup>1)</sup> · 이광식<sup>2)</sup>

## 1. 서 론

육상에서의 탄소 순환과정은 크게 식물에 의한 광합성과 토양내 미생물의 호흡으로 대표되는 생태계와 대기와의 교환반응, 그리고 토양 - 지하수 - 하천수를 통해 이동되는 수중에서의 탄소 순환과정으로 구분된다. 이중 생태계와 대기와의 교환반응은 현재 대기중의 이산화탄소 수지에 큰 영향을 주는 것으로 생각되고 있고 따라서 생태계에서 흡수되는 이산화탄소의 총량을 정량적으로 측정하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 수중환경 (지하수와 하천수, 호수 등)에서의 탄소 순환과정은 주로 하천에 의한 무기 또는 유기 탄소의 이동이라는 측면에서 연구되어 왔고 하천과 대기와의 교환 반응에 의한 대기 중 이산화탄소 수지 변화에 대해서는 그 영향이 중요하지 않은 것으로 간주되어 왔다. 하지만 아마존강 수계에 대한 최근의 연구 결과에 의하면 매년 아마존강과 그 지류로부터 대기중으로 방출되는 이산화탄소의 총량은 약  $\sim 10^{15}$  g 에 달해 대기중의 이산화탄소 수지에 큰 영향을 줄 수 있음이 알려져 있다. 따라서 육지의 수중환경에서 일어나는 탄소 순환과정은 탄소의 지표 순환과정에 대한 완전한 이해를 위해 꼭 필요한 부분임을 알 수 있다.

최근 유기 탄소 및 무기 탄소의 탄소 동위원소 조성, 용존산소의 안정 동위원소 조성 등을 이용해 하천의 생태학적 특징을 규명하려고 하는 많은 시도들이 수행되었다. 또한 많은 지구화학적, 지구물리학적 모델의 결과물들이 발표됨에 따라 하천에서의 탄소 순환과정을 연구할 수 있는 자료와 방법론이 축적되고 있다. 국내에서 하천환경에서의 탄소 순환과정에 대한 종합적인 연구는 아직까지 시도되지 않고 있다. 하지만 당면한 기후변화 협약과 가속화되는 수질오염문제 등에 의해 탄소순환과정에 대한 심도 있는 연구의 필요성이 제기되고 있다. 본 연구에서는 한강 수계에 대한 종합적인 연구로서 한강본류와 주요 지류인 북한강과 남한강의 탄소순환과정을 용존탄소의 탄소 동위원소 조성과 기타 지하학적 지시자를 이용하여 살펴보고자 한다. 본 연구를 통하여 1) 한강 수계에서의 용존 무기/유기탄소의 기원과 특성, 2) 한강 수계의 탄소 순환 특성이 한반도 육상 탄소 순환과정에 미치는 영향에 대해 고찰해 보고자 한다.

## 2. 연구대상 및 방법

일반적으로 하천의 수리학적 특성은 유량의 연간 변화에 의해 달라지는데 이는 유량에 따라 유역으로부터 유입되는 물질의 양과 하천 자체의 물리/화학/생태학적 특성이 변화하기 때문이다. 한강 수계는 여름에 집중되는 강우의 영향에 의해 일반적으로 7-8 월에 최고수위 (high water stage), 12-1 월에 최저수위 (low water stage) 그리고 5-6 월의 상승수위 (rising water stage)와 9-10 월에 하강수위 (falling water stage)를 보인다.

---

주요어 : 탄소순환, 용존 무기/유기 탄소, 탄소안정동위원소, 한강수계

1) 연세대학교 대기과학과/지구환경연구소 (dlee@ieg.or.kr)

2) 한국기초과학지원연구원, 대전광역시 (kslee@kbsi.re.kr)

본 연구에서는 2003년 12월, 2004년 5월, 2004년 8월 그리고 2004년 10월에 각각 시료채취가 이루어졌고 시료채취 위치는 북한강의 경우 청평댐(상류)과 양수리(하류), 남한강은 여주(상류)와 양평(하류) 그리고 한강 본류는 팔당(상류)과 잠수교(하류)이다. 각 시료채취 장소에서는 하천의 중심부에서 depth integrated된 대표성있는 시료를 채취하였고 하천수의 물리 화학적 특성 (수온과 pH, Alkalinity, 전기 전도도, 산소 분압 등)이 함께 측정되었다. 탄소 동위원소 측정을 위한 시료는 0.45  $\mu\text{m}$ 의 pore size를 갖는 필터를 이용하여 부유물을 제거한 후 40 ml의 용량을 갖는 amber glass vial에 보관하였다. vial은 주사기를 이용해 시료를 추출할 수 있도록 rubber/silicon septa가 장착된 마개를 이용해 밀봉하였고 미생물의 활동을 억제하기 위하여 소량의  $\text{HgCl}_2$ 를 첨가하였다. 채취된 시료의 용존 무기/유기 탄소의 농도와 탄소 동위원소 비는 Univ. of Ottawa의 G.G. Hatch Isotope Laboratory에서 online DIC/DOC (TIC/TOC) analyzer가 장착된 Finnigan MAT Delta Plus 질량분석기를 이용하여 측정되었다.

### 3. 결과 및 토론

#### 3.1. 한강 수계의 지화학 및 탄소 안정 동위원소 특성

북한강, 남한강 그리고 한강 본류는 유역의 지질학적 특성을 반영하는 수리학적 변수에 의해 구분되는데 먼저 유역의 대부분 결정질암으로 이루어진 북한강의 경우 가장 낮은 전기 전도도와 알칼리니티 값을 보이고 고생대 석회암과 퇴적암이 넓게 분포하는 남한강의 경우 가장 높은 전기전도도와 알칼리니티 값을 갖는다 (Figure 1). 두 지류의 혼합에 의해 형성된 한강본류는 점이적인 특성을 보인다. pH는 대부분 7.5 ~ 9 사이의 값을 보이는데 남한강에서 8.5 이상의 높은 값을 갖는 시료가 관찰되고 북한강은 대부분 8.0 ~ 8.5 사이 그리고 한강 본류는 전체적으로 보다 낮은 값을 보인다. 연구 대상 수계 모두 pH의 변화는 알칼리니티 보다는 산소포화도( $\text{O}_2$  saturation)의 변화에 보다 밀접하게 관련된 특성을 보인다. 따라서 하천수의 pH 변화가 주로 하천 생태계에서의 광합성/호흡에 의한 이산화탄소 분압의 변화에 밀접하게 관련되어 있음을 알 수 있다. 용존 무기탄소의  $\delta^{13}\text{C}$  값은 -13 ~ -6 ‰ 사이의 값을 보이는데 수계에 따른 규칙적인 차이는 관찰되지 않는다. 또한 탄소 동위원소비와 알칼리니티 및 산소포화도와의 상관관계가 명확하게 나타나지 않아 한강 수계의 용존 무기탄소의 탄소 동위원소 조성은 탄산염암의 풍화 및 수중 생태계의 생명활동 등의 과정이 복합적으로 작용하여 결정됨을 알 수 있다.

하천 생태계의 생산성을 지시하는 산소포화도는 한강 본류에서 비교적 낮고(1.0 또는 그 이하) 남한강에서 대부분 1 이상의 높은 값을 갖는다(Figure 1). 일반적으로 남한강의 경우 수중 생물에 의한 광합성이 한강 본류에 비해 우세하게 일어나고 있음을 알 수 있다. 하지만 용존 유기탄소의 함량은 각 수계에서 유사한 범위를 갖는다. 용존 유기탄소의 기원은 육지로부터의 유입과 수중 광합성에 의한 생성 두 가지를 모두 고려해 볼 수 있다. 두개의 서로 다른 기원으로부터 유래한 유기탄소의 분류는 다양한 지시자의 활용을 필요로 한다. 일반적으로 육지기원의 유기탄소가 수중 기원에 비해 보다 작은  $\delta^{13}\text{C}$  값을 가짐을 예상해 볼 수 있으나 절대적인 기준으로 활용하기는 어렵다. 한강 수계 용존 유기탄소의  $\delta^{13}\text{C}$  값은 대부분 -35 ~ -24 ‰ 사이의 값을 가지며 수계에 따른 차이는 분명하지 않다. 용존 유기탄소의 함량과 미약한 양의 상관관계를 보이는데 이는 하천생태계의 광합성에 의해 생성된 상대적으로 높은  $\delta^{13}\text{C}$  값을 갖는 유기탄소가 유입된 영향으로 생각된다.

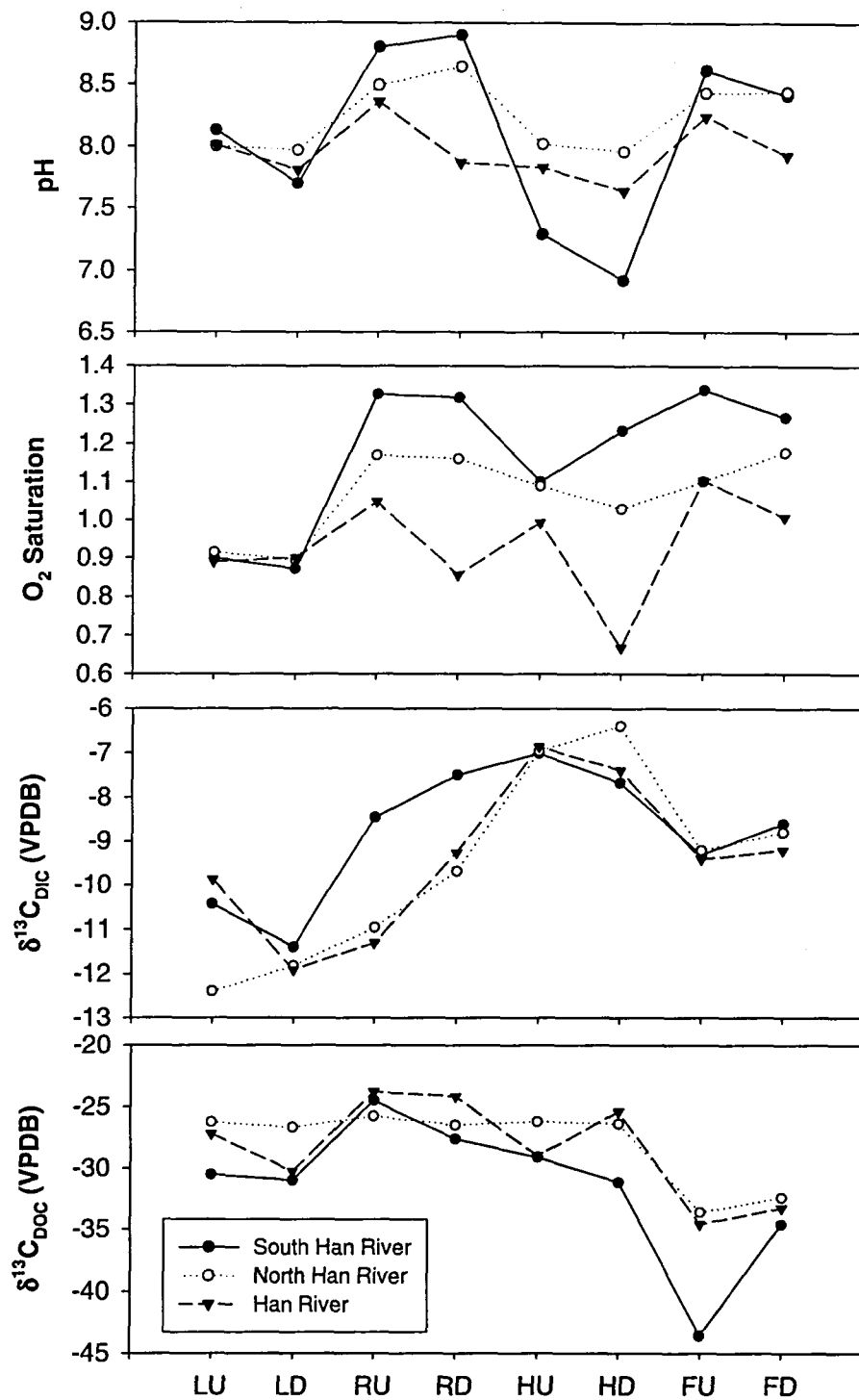


Figure 1. Geochemical and isotopic characteristics of the Han River system (L: low water stage R: rising water stage, H: high water stage, F: falling water stage, U: upstream, D: downstream)

### 3.2 수위에 따른 변화

한강 수계의 물리/화학적 특성은 수위에 따라 현저한 변화를 보인다. 먼저 pH는 각 수계에서 공통적으로 최저수위와 최고수위에서 낮은 값을 보이고 상승 및 하강 수위에서 보다 높은 값을 보인다(Figure 1). 이러한 현상은 하천수의 산소포화도의 변화에서도 비교적 유사하게 나타난다. 하지만 산소포화도의 경우 최고수위기간에도 대부분(한강 하류 제외) 1 이상의 값을 보여 광합성의 상대적인 중요성은 최고 수위에서도 지속되는 양상을 보인다. 따라서 한강 수계의 경우 최저 수위(와 한강 하류의 경우 최고 수위)에서 미생물에 의한 호흡이 영향이 우세하고 호흡에 의해 방출된 CO<sub>2</sub>의 증가에 의해 하천수의 pH가 감소하는 경향이 나타난다. 반면 상승, 최고 및 하강 수위시에는 상대적으로 광합성에 의한 영향이 우세하게 나타나 CO<sub>2</sub> 감소에 의한 pH 증가가 일어난다. 알칼리니티는 유역의 지질학적 특성을 반영하는 변수로서 수위에 따른 현격한 변화가 나타나지 않는다. 예외적으로 한강 본류의 경우 상류에 비해 하류에서 알칼리니티의 현저한 증가가 일관성있게 일어난다. 이는 한강 본류 유역에서의 지질학적 특징의 변화를 반영하기 보다는 도시지역을 통과하며 유입된 각종 오염물의 영향에 의한 것으로 생각된다.

용존 무기탄소의  $\delta^{13}\text{C}$  값은 최저수위와 하강수위 기간중에 감소하고 상승 및 최고수위기간에 증가한다. 하천수에서  $\delta^{13}\text{C}$ 의 증가는 광합성에 의한  $^{12}\text{C}$ 의 선택적 제거 또는 탄산염암의 풍화산물의 유입을 지시한다. 상승 및 최고 수위 기간에  $\delta^{13}\text{C}$  값이 증가하는 것은 이 기간이 봄 - 여름에 해당돼 광합성에 의한 영향을 반영하는 것으로 생각된다. 같은 기간동안 알칼리니티값의 상응하는 변화가 관찰되지 않는 것으로 보아 탄산염 풍화산물의 유입은 큰 변화가 없는 것으로 간주할 수 있다. 전체적으로  $\delta^{13}\text{C}$  값의 변화는 산소포화도의 변화와 유사한 양상을 보인다. 하지만 하강수위기간에 나타나는  $\delta^{13}\text{C}$  값의 감소는 산소포화도의 변화에 의해 설명되지 않는다. 이 기간중의 산소포화도는 1 보다 커 수중 호흡의 상대적인 중요성은 광합성에 비해 크지 않을 것으로 생각된다. 동일한 시기의 용존 유기탄소의  $\delta^{13}\text{C}$  값이 상응하는 감소 패턴을 보이는 점이 주목된다. 즉, 상대적으로 작은  $\delta^{13}\text{C}$  값을 갖는 육지기원 유기물 및 유기물에서 기원된 무기탄소가 유입되었음을 지시하는 현상으로 생각된다.

수위에 다른 용존 무기탄소 함량 변화는 수계에 따라 다양한 특성을 보인다. 북한강의 경우 연중 비교적 일정하게 가장 낮은 함량을 보이고, 남한강과 한강 본류의 경우 최고 수위 기간동안의 급격한 감소를 그리고 한강 본류에서는 상류보다 하류에서 급격한 증가를 보인다. 최고 수위 기간중의 함량 감소는 유량 증가에 의해 나타나는 상대적인 농도의 감소를 의미한다. 한강 하류에서의 함량 증가는 용존 유기탄소의 함량이 반대의 변화경향을 보이는 점을 고려할 때 수중에서 일어나는 유기물 분해에 의한 영향으로 생각된다. 유역의 수문학적 그리고 생물학적 특성을 반영하는 용존 유기탄소의 함량은 남한강과 한강본류의 변화양상이 유사함을 보인다. 즉, 최저수위에서 가장 낮은 함량을 보이고 이후 상승수위기간에 가장 높은 함량을 그리고 이후 점차 감소하는 패턴을 보인다. 북한강의 경우 최고수위 및 상승수위 기간에 높은 값을 보이고 그 이외의 기간에는 낮은 값을 보인다. 각 수계에서 공통적으로 상류에서의 함량이 하류에서의 함량보다 높게 나타나는데 수중에서의 유기물 분해에 의한 영향으로 생각된다.

### 3.3 한강 수계 탄소순환의 중요성

한강 수계에서의 탄소 순환의 중요성은 첫째, 한강 수계를 통해 서해로 이동되는 총 무

기/유기탄소의 양, 둘째, 한강 수계의 탄소의 기원, 셋째, 한강 수계로부터 대기로 방출되거나 대기로부터 흡수되는 탄소의 총량을 통해 검토해 볼 수 있다. 한강을 통해 서해로 공급되는 용존 무기탄소의 양은 연간  $\sim 6 \text{ mg C/kg H}_2\text{O}$ , 그리고 유기탄소의 양은  $\sim 2 \text{ mg C/kg H}_2\text{O}$ 에 해당된다. 이들 탄소종의 기원은 탄산염암의 풍화산물, 토양유기물의 분해산물 그리고 수중 광합성에 의해 생성된 유기물 등 다양하다. 이처럼 다양한 기원을 갖는 탄소종의 상대적인 중요성을 판단하기 위해서는 유역으로부터 유입되는 유기탄소 및 무기탄소의 양과 지화학적 특성에 대한 독립적인 정보가 필요하다. 또한 하천내에서 일어나는 광합성과 호흡의 정량적인 측정자료가 필요하다. 하천수에 과포화상태로 존재하는 이산화탄소는 대기중으로 방출되어 대기의 이산화탄소 함량을 증가시키는 역할을 한다. 대기의 이산화탄소 함량에 미치는 하천의 역할을 보다 정량적으로 규명하기 위해서는 일차적으로 대기과 하천간의 이산화탄소 농도차가 밝혀져야 하지만 바람, 온도, 하천표면의 물리적 성질, 탄소의 하천내 체류시간 등 다양한 변수에 대한 연구가 선행되어야 한다.

#### 4. 감사의 글

이 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 3-2-2)에 의해 수행되었다.