

안정 동위원소를 이용한 육상 생태계의 물과 탄소의 순환 연구: 재검토

이동호

연세대학교 대기과학과/지구환경연구소
(2005년 1월 24일 접수; 2005년 3월 29일 수락)

Stable Isotope Studies for Constraining Water and Carbon Cycles in Terrestrial Ecosystems: A Review

Dongho Lee

Department of Atmospheric Sciences, Global Environment Laboratory, Yonsei University, Seoul, Korea

(Received January 24, 2005; Accepted March 29, 2005)

ABSTRACT

The water and carbon cycles in terrestrial ecosystems are the essential database for better understanding of the causes and the current processes of climate change and for the prediction of its future change. CarboKorea and HydroKorea are dedicated research efforts to develop technologies to quantitatively interpret and forecast carbon/water cycles in typical landscapes of Korea. For this, stable isotope studies have been launched to genetically partition various components of carbon/water cycles in terrestrial ecosystems. From stable isotope studies, practical deliverables such as evaporation, transpiration and gross primary productivity (GPP) can be provided at scales from tower (footprint) to large watersheds. Such reliable field-based information will form an important database to be used for validation of the results from various eco-hydrological models and satellite image analysis which constitute main components of Carbo/HydroKorea project. Stable isotope studies, together with other relevant researches, will contribute to derive quantitative interpretation of carbon/water cycles in terrestrial ecosystems and support Carbo/HydroKorea to become a leading research infrastructure to answer pending scientific and socio-economic questions in relation to global changes.

Key words : Stable isotope, Water and carbon cycle, CarboKorea, HydroKorea, Terrestrial ecosystem

I. 서 언

가장 대표적인 온실가스인 이산화탄소는 화석연료의 사용, 삼림의 파괴와 개간 등에 의해 대기중에서의 함량이 지속적으로 증가하고 있다. 따라서 세계 각국은 이산화탄소를 포함한 중요 온실가스의 배출량을 줄임으로써 잠재적인 기후변화의 가능성을 낮추기 위해 노력하고 있다(IGBP, 1998). 온실가스의 증가에 의해 야기될 수 있는 기후변화를 올바로 이해하기 위해서는 현재 지표 환경에서 일어나고 있는 물/탄소, 에너지의

순환과정에 대한 올바른 이해가 필요하다. 예로, Missing Sink(Houghton *et al.*, 1998)로 대표될 수 있는 탄소 순환의 불확실성은 탄소순환과 기후변화를 연결하는데 필요한 기초자료가 보다 정량적인 방법으로 구축되어야 함을 상징적으로 보여준다. 현재 많은 학자들은 육상 식물 생태계(열대우림지역, 북반구의 온대지역, 한대지역의 침엽수림 등 학자에 따라 다양한 식물 생태계가 제안됨)의 광합성을 대기중의 이산화탄소를 흡수하는 중요한 메카니즘의 하나로 해석하고 있다(Fan *et al.*, 1998). 지표에서의 탄소 순환과정에

대한 연구는 미국이나 EU 등 선진국에서 활발하게 이루어지고 있다. 이는 교토 협약에서 지적된 바와 같이 탄소 순환과정에 대한 정량적인 기술이 이산화탄소에 의한 영향을 정확히 해석하고 예측하는데 필수 불가결한 정보가 되기 때문이다. 또한 각국의 영토에서 자연 흡수되고 방출되는 이산화탄소의 양을 정량적으로 측정하는 것은 교토 협약과 그 이후 일련의 국제적인 협약들을 통해 제시된 온실가스 배출 감축을 위한 의무로부터 면제를 받기 위한 다양한 노력의 하나로서 중요한 의미를 갖는다고 볼 수 있다. 자연상태에서 일어나고 있는 이산화탄소의 발생과 저장과정을 정량적으로 기술하고 불확실성을 제거하는 것은 인위적으로 증가된 대기중의 이산화탄소가 지표의 생태학적 그리고 지화학적 체계를 변화시켜 가는 과정을 연구하는데 기본적인 자료로서 그 중요성이 있다.

육상생태계에서 탄소의 순환과정은 수문순환이라는 거대한 물질 순환과정에 직접적으로 영향을 받는다. 식물의 생산성은 태양으로부터의 에너지와 이용가능한 물의 양이라고 하는 두 가지의 환경적 요인에 의해 절대적으로 지배된다. 따라서 물과 에너지의 순환과정은 지표에서의 탄소 순환 과정을 이해하는데 필수적인 정보가 된다. 이와 같은 상관관계를 상징적으로 보여주는 것이 식물의 광합성을 위해 대기중으로 방출되는 물의 양과 광합성에 의해 흡수된 탄소의 양의 비로 표현되는 물이용효율(water use efficiency, WUE)이다 (Nobel, 1999). 물이 식물의 생산성에 미치는 영향을 잘 나타내주고 있는 이 관계는 범지구적 변화(global change)를 정확히 이해하는데 필수적인 하나의 관점을 제공한다. 따라서 기후변화의 원인으로 알려진 대기중의 이산화탄소 증가가 육상 생태계에 미치는 영향과 그 반작용은 수문순환과의 상관관계 속에서 올바르게 이해될 수 있다. 또한 물이용효율은 대기로부터 흡수된 탄소의 총량 즉, 총일차생산량(Gross Primary Productivity, GPP)이라고 하는 탄소순환의 중요한 구성요소를 수문순환에 대한 정량적인 이해를 통해 산출하는 유용한 도구로 이용될 수 있다(Telmer and Veizer, 2000, 2001; Lee and Veizer, 2003).

대기와 육상생태계간에 일어나는 물과 이산화탄소 그리고 에너지의 교환은 전세계적인 플럭스(flux) 관측망에서 에디 공분산 방법에 의해 측정되고 있다 (Baldocchi *et al.*, 2001). 이와 같은 방법에 의해 측정된 이산화탄소의 순생태교환량(NEE)은 육상 생태계

의 순생태생산량(Net Ecosystem Productivity, NEP)과 관련되어 육상생태계가 이산화탄소의 흡원(sink) 또는 발원(source)으로 작용함을 평가하는 중요한 기준이 되고 있다. 하지만 이미 많은 연구에서 지적된 바와 같이 NEP(또는 NEE)는 생태계내에서 탄소의 순환에 영향을 주는 다양한 생물 지화학적 과정의 결과로서 그 절대량뿐만 아니라 이를 구성하는 요소, 즉 NPP, GPP, 총 생태호흡량 등과 같은 개별 탄소 순환 메커니즘에 대한 구체적인 이해가 보다 중요하다고 할 수 있다. 이는 육상생태계에서 일어나는 탄소 순환 과정의 각 구성요소를 정량적으로 세분하고 중요 환경요인들과의 상관관계를 올바르게 이해하는 것이 기후변화의 원인과 진행과정을 이해하고 미래를 예측하는 데 보다 필수적인 과학적 근거를 제시해 줄 수 있기 때문이다. 이를 위해 토양, 식생, 수문 등의 생태계 구성요소들에 대한 생물 지화학적 연구가 도입될 필요성이 지속적으로 제기되어 왔다. 특히 안정 동위원소를 이용한 연구는 다양한 시간적, 공간적 규모에서 일어나는 물과 탄소의 순환과정을 정량적으로 규명하는데 이용될 수 있어 세계의 많은 플럭스 사이트(flux site)에서 미기상학적인 방법을 보충하는 방법의 하나로서 적용되고 있다(Griffiths, 1998).

국내에서는 2001년부터 시작된 KoFlux 연구에 의해 국내외의 중요 대표 생태계에 플럭스 타워가 설치되어 에디공분산 방법과 기타 미기상학적인 방법에 의한 지속적인 자료 수집이 이루어지고 있다(<http://www.koflux.org>). 그 후속과제로 2004년부터 시작된 CarboKorea와 HydroKorea 연구는 KoFlux 기간동안 구축된 기반을 바탕으로 보다 발전되고 확대된 한반도의 물/탄소 순환 규명을 위한 연구로 계획되었다. 특히 Carbo/HydroKorea 연구에서는 기존의 광범위한 지역에 산재된 연구 기반시설과 인력을 한곳에 집중하여 미기상, 생태수문, 산림생태, 안정동위원소, 토양학, 생물리 및 생태수문모형, 위성영상 등 다양한 분야의 연구가 종합적으로 수행될 수 있는 슈퍼사이트(supersite)를 국립광릉수목원내에 구축하여 운영하고 있다. 이처럼 종합적인 연구를 통해 Carbo/HydroKorea에서는 궁극적으로 다양한 시공간 규모에서 육상생태계의 물/탄소 순환과정을 이해하고 예측할 수 있는 기술개발을 목표로 하고 있다.

안정 동위원소 연구는 슈퍼사이트와 이를 포함하는 한강 수계에 이르는 다양한 공간규모를 대상으로 하여

물/탄소 순환의 구성 요소 즉, 증발, 증산, 총일차생산량(GPP), 총생태호흡량(ER) 등을 밝히기 위하여 도입되었다. 안정 동위원소 연구의 목적은 야외에서 실측을 통해 본 연구를 위해 도입되는 다양한 생태 수문/탄소 순환 모델 및 위성영상의 산출결과를 검증할 수 있는 신뢰성 있는 일차적 자료를 생산하는데 있다. 궁극적으로, 현재 수행되고 있는 다양한 분야의 연구결과와 함께, 기후변화로 인한 물/탄소 순환의 이해와 예측의 불확실성을 최소화하고 당면한 과학적, 정책적 요구에 보다 충실하게 기여할 수 있는 토대를 형성하는데 보탬이 되고자 한다. 본 논문은 Carbo/HydroKorea 프로젝트에 적용될 안정 동위원소 연구의 기본개념과 연구과정을 소개하기 위한 기초 자료로서 준비되었다. 따라서 가시적인 연구결과의 제시보다는 안정 동위원소 연구가 물/탄소 순환과 같은 생물 기상학적 연구에 적용될 수 있는 과학적인 근거와 방법론 그리고 관련분야의 기존 연구 성과를 제시하고 검토하는데 주안점을 두었다. 본 논문의 목적은 이와 같은 이론적 근거위에 구축될 안정 동위원소 연구의 예상되는 문제점과 구체적인 계획을 제시하여 관련분야 연구자들간의 논의를 통해 검증하고 보완하는 데 있다.

II. 이론적 고찰

2.1. 수소와 산소 안정 동위원소를 이용한 증발량 계산

안정 동위원소는 같은 원자번호를 갖는 동일원소이기 때문에 화학적 성질은 유사하지만 질량의 차이에 의해 물리적 성질이 다른 화합물을 형성한다. 예를 들어 무거운 동위원소로 이루어진 화합물은 가벼운 동위원소로 이루어진 동일한 화합물에 비해 느린 분자운동 속도와 상대적으로 강한 화학 결합력을 갖는다(Hoefs, 1997). 따라서 화학반응, 분자의 상태변화, 확산, 이동 등과 같은 물리 화학적 반응이 일어날 때 동위원소 간의 분별(fractionation)이 일어나게 되는데 이러한 정량적인 분별현상은 물리 화학적 반응의 과정을 추적하는 유용한 지시자로 이용될 수 있다.

동위원소비의 분별현상은 분별계수(Fractionation Factor)를 이용하여 정량적으로 나타낼 수 있다. 즉,

$$\alpha = R_A/R_B \quad (1)$$

위 식에서 R_A 와 R_B 는 공존하는 두 화합물 A와 B의 안정 동위원소 비(예를 들어, D/H, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 등)를 의미하고 R_A 는 반응물을, 그리고 R_B 는 생성물을 지시한다. A와 B는 서로 다른 화합물인 경우도 있지만(예를 들어 H_2O 와 CaCO_3), 물리적 상태가 다른 동일한 화합물을 의미할 수도 있다(예를 들어 $\text{H}_2\text{O}(l)$ 와 $\text{H}_2\text{O}(g)$). α 의 값은 실험을 통해 결정되는데 일반적으로 온도나 압력의 함수로서 표현되고 안정 동위원소의 비를 이용한 물리 화학적 반응 연구의 가장 기본적인 도구가 된다.

일반적으로 분별계수 α 의 변화는 매우 작아 소수점 이하 2~3 자리에서 일어나는 경우가 많다. 따라서 동위원소비의 변화를 보다 가시적으로 나타내기 위해 δ 값을 주로 이용한다.

$$\delta = ((R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}})/R_{\text{standard}}) \times 1000 \quad (2)$$

위 식에서 R_{sample} 은 연구대상 시료에서의 임의의 동위원소 비 그리고 R_{standard} 는 기준이 되는 표준시료에서의 동일한 동위원소의 비를 지시한다. δ 의 단위는 ‰ 이다. 표준시료는 원소의 종류에 따라 다른데, 수소의 경우 평균적인 해수(V-SMOW), 탄소는 PDB(Peedee Belemnite, 석회질 화석), 산소는 V-SMOW와 PDB를 모두 사용할 수 있다(Hoefs, 1997). 따라서 δ 가 음의 값을 가질 경우 시료의 무거운 동위원소 함량이 표준시료 보다 작음을 의미하고 양의 값은 그 반대의 경우를 지시한다.

분별계수 α 와 δ 는 상호 관련되는데

$$\alpha_{A-B} = (1000 + \delta_A)/(1000 + \delta_B) \quad (3)$$

와 같이 표현된다(Valley *et al.*, 1986). 위의 수식은 일반적으로 실험실에서 결정된 분별계수가 α 로서 제시되고 실제 연구대상 시료에서 측정된 동위원소 비는 δ 로서 표현되기 때문에 두개의 값을 서로 비교하는 유용한 관계식이 된다.

물분자의 경우, 가장 높은 존재비를 갖는 H_2^{16}O (질량수 18) 그리고 이보다 무거우며 존재비가 낮은 HD^{16}O (19)와 H_2^{18}O (20)로 존재한다. 이와 같은 질량의 차이는 평형상태의 수증기압에 영향을 주어 같은 온도에서 H_2^{16}O 의 수증기압은 HD^{16}O 나 H_2^{18}O 보다

높다. 또한 25°C 의 온도에서 수증기와 평형상태에 있는(즉, 포화수증기압) 액체상태의 물에는 무거운 수소 동위원소로 이루어진 물분자가 7.4% 그리고 무거운 산소 동위원소로 이루어진 물분자가 0.92% 더 포함되어 있다(Friedman and O'Neil, 1977). 포화수증기압 하에서의 증발과 응결현상은 평형상태의 반응으로 실험적인 연구에 의해 정량적으로 기술될 수 있다(Friedman and O'Neil, 1977). 자연상태에서 평형상태의 증발과 응결현상을 관찰할 수 있는 경우는 물표면의 경계층에서 그리고 구름의 응결에 의해 강수가 형성되는 과정을 들 수 있다(Craig and Godon, 1965). 자연상태에서 포화수증기압이 아닌 상태에서 일어나는 물의 증발은 비평형 상태의 반응으로 이때 수증기와 물 사이의 안정 동위원소 분별현상을 정량적으로 기술하기 어렵다. 하지만 이 경우에도 온도, 습도, 대기중에 존재하는 수증기의 안정 동위원소 조성 등 관련 변수가 명확히 밝혀져 있다면 정량적인 기술이 가능하다(Craig and Gordon, 1965). 증발량 계산을 위한 안정 동위원소 관계식은 Craig and Gordon(1965), Allison and Barnes(1983), Gonfiantini(1986), Walker *et al.*(1988), Gat and Bowser(1991), Gibson *et al.*(1993, 1996) Gibson(2002) 등에 의해 제안되었다.

증발계를 이용한 야외에서의 실측과 달리 동위원소를 이용한 증발량 계산은 시간적, 공간적인 취합이 용이하다. 즉, 동위원소 조성 변화의 누적되는 특성(cumulative nature)에 의해 임의의 공간영역 내에서의 값을 측정하거나 임의의 시간 단위의 증발량을 얻는데 쉽게 이용될 수 있다. 안정 동위원소를 이용해 증발량을 계산하는 간단한 원리는 질량 및 동위원소수지 관계(mass and isotope balance relation)의 적용이다(Fig. 1). 호수와 같이 균질한 시스템을 가정했을 때 물의 질량 수지 관계는

$$I = E + O \quad (4)$$

으로 표현된다. 이때 I는 물의 유입량, O는 유출량 그리고 E는 증발량을 의미한다.

같은 현상을 표현하는 동위원소 수지관계는

$$I \cdot \delta_I = E \cdot \delta_E + O \cdot \delta_O \quad (5)$$

가 된다. δ_I , δ_E , δ_O 는 각각 유입, 증발, 유출되는 물

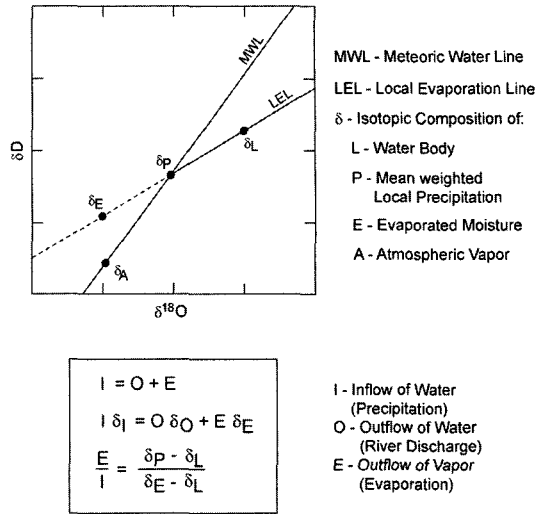


Fig. 1. A schematic diagram showing mass and isotope balance relations used to calculate the evaporation loss from lakes (modified from Gibson *et al.*, 1993)

의 안정 동위원소 조성이 된다. 일반적으로 독립된 수계분지의 경우 δ_I 는 해당 유역내 강수의 평균 안정 동위원소의 조성을, δ_O 는 유출수의 안정 동위원소 조성을 의미한다. δ_E 는 Gonfiantini(1986)에 의해 제안된 다음의 관계식을 통해 구해진다.

$$\delta_E = (1 - h - \Delta\epsilon)^{-1} \cdot ((\delta - \epsilon) \cdot \alpha^{-1} - h \cdot \delta_a - \Delta\epsilon) \quad (6)$$

위 식에서 h는 상대습도(0~1), $\Delta\epsilon$ 는 산소(14.2 (1-h))와 수소(12.5 (1-h))의 동적부화상수(kinetic enrichment factor), δ 는 유출되는 물의 안정 동위원소 조성, α 는 산소와 수소 동위원소의 평형 분별계수(Friedman and O'Neil, 1977), $\epsilon = \alpha - 1$ 그리고 δ_a 는 대기중 수증기의 평균 $\delta^{18}O(\delta D)$ 값이다.

식 4와 5를 결합하면

$$E/I(\%) = (\delta_I - \delta_O) / (\delta_E - \delta_O) \times 100 \quad (7)$$

으로서 전체 물의 유입량에서 차지하는 총 증발량의 백분율을 의미한다.

토양에서 일어나는 증발현상에 대한 정량적인 접근은 식생이 존재하지 않는 토양을 대상으로 하여 Allison and Barnes(1983), Walker *et al.*(1988) 등

에 의해 시도되었다. 식생으로 덮여있는 토양의 경우 대부분 증산에 의한 수분의 손실이 일어나 순수한 증발현상의 영향은 상대적으로 덜 중요한 것으로 간주되고 있다. 하지만 캐노피의 밀도가 작은 개방된 삼림이나 초지 그리고 식물 성장기간 이외의 계절에는 토양으로부터의 증발이 상대적으로 중요할 것으로 생각된다(Yepez *et al.*, 2003). 현재까지 식생으로 덮여있는 토양에서의 증발현상과 안정 동위원소 조성 변화의 상관관계는 활발하게 연구되지 않고 있어 본 연구 과정을 통해 보다 체계적인 이해와 해석이 제시되어야 할 것으로 생각된다.

2.2. 육상 생태계의 수문순환

육상 환경에서 일어나는 수문 순환과정은 연구 대상의 시간적 공간적인 규모에 따라 다르게 기술될 수 있다. 일반적으로 '강수 → 토양수 → 증발산, 그리고 강수 → 지표유출(overland flow) 또는 지하수 충전(recharge)'의 과정으로 진행되는 지표층 중심으로 한 단기간(short-term)의 순환과 '강수 → 증발산 → (토양 및 지하수 충전) → 유출(discharge)'로 표현할 수 있는 장기간(long-term)의 순환으로 나누어 볼 수 있다. 전자의 경우는 지표의 임의의 공간 단위의 연구로서 시간 또는 일 단위 이상의 시간적 규모를 갖는 연구가 가능하고 후자의 경우는 일반적으로 유역과 같은 물의 닫힌 계(closed system)를 공간적 영역으로 하고 해당 지역의 물의 체류시간(residence time)에 따라 수일~수십년의 시간 단위로 연구할 수 있다. 전자의 경우 물의 지표면에서의 순환과정을 대상으로 함으로써 시공간적 해상도가 기존의 플럭스 타워, 모형 또는 위성 영상 단위의 연구와 상대적으로 쉽게 비교될 수 있는 장점이 있다. 반면 후자의 연구는 보다 광역적인 규모와 장기간에 일어나는 수문순환 과정을 기술함으로써 기후변화에 따른 유역단위 수문순환의 경년변화 등을 기술하는데 유용하게 이용될 수 있다.

2.3. 유역단위 수문순환 연구

육상에서의 수문순환을 기술하는데 있어 수계분지(유역) 단위로의 접근은 물의 입력과 출력을 정량적으로 기술할 수 있고 물이 수계분지 내에서 일종의 닫힌계를 이루며 자체적인 순환과정을 갖고 있다는 점에서 편리하면서 유용한 틀을 제공해 준다. 수계분지는 하천의 차수에 따라 여러 개의 작은 수계분지로 보다

세분되거나 또는 같은 차수의 수계분지와 합하여 보다 큰 수계분지를 이루기도 한다. 이와 같은 규모의 임의성은 지금까지 일반적으로 받아들여져 온 상향 또는 하향 스케일링의 유연성(flexibility)의 바탕이 되고 있다. 물의 수소와 산소 안정동위원소 비의 변화는 누적되는 특징을 갖고 있는 것으로 여겨지기 때문에 지표 증발에 의한 영향을 누적하여 보존함으로써 증발량의 시공간적 취합이 용이하다고 일반적으로 받아들여지고 있다. 또한 미기상학적인 방법에 의해 측정된 플럭스량을 해석하는데 필수적으로 수반되는 발자국(Footprint)분석의 불확실성이 수반되지 않는다는 점을 장점으로 들 수 있다(e.g., Schmid, 2002). 안정 동위원소를 이용한 유역단위 증발량 산출 연구는 현재까지 많이 시도되지 않았으며 그 적용성에 대한 정량적인 검증은 아직까지 시도되지 않았다(Gat and Matsui, 1991; Telmer and Veizer, 2000, 2001; Lee and Veizer, 2003).

유역단위 연구와 같은 장기간의 수문 순환 연구에서는 단순화된 수문 순환 모델을 이용한다(Telmer and Veizer, 2000, 2001; Lee and Veizer, 2003).

독립된 수계에서 수문순환 과정은

$$I = Q + ET + \Delta S \quad (8)$$

로 간단히 표현될 수 있다. 여기에서 I 는 해당수계의 궁극적인 물 공급원으로서 독립된 수계의 경우 해당지역의 총 강우량(즉, 차단량을 제외한 지표 도달 강우량)에 해당된다. Q 는 해당 수계로부터의 유출량을, ET 는 총 증발산량을 나타낸다. ΔS 는 지하수의 함량변화를 나타내는데 다른 성분에 비해 상대적으로 작은 값을 가지며 장기간에 걸친 수문순환을 고려할 경우가 값은 $\Delta S \approx 0$ 으로 가정할 수 있다. 따라서 위의 식은

$$P - Q = ET \quad (9)$$

로 단순화된다. 이 중 P (총 지표도달 강우량)와 Q (총 유출량)는 기상학적 또는 수문학적 자료를 이용하여 상대적으로 정확한 자료를 얻을 수 있으므로 총 증발산량(Evapotranspiration)은 위의 식으로부터 단순하게 계산될 수 있다. 위의 식을 다시 전개하면

$$ET (= P - Q) = E + T \quad (10)$$

로 나타낼 수 있고 이때 E는 증발량 그리고 T는 증산량을 나타낸다. E는 다음의 안정 동위원소 관계를 이용해 계산된다.

호수와 같이 시스템내의 안정 동위원소 조성이 균질하고 유입 및 유출되는 물의 안정 동위원소 조성을 명확히 정의할 수 있는 조건하에서의 증발량은 Gonfiantini(1986)에 의해 제안된 아래의 식을 이용하여 기술할 수 있다.

$$x = E/I = (\delta_s - \delta_l)(1 - h + \Delta\epsilon)/[(\delta_s + 1)(\Delta\epsilon + \epsilon/\alpha) + h(\delta_a - \delta_s)] \quad (11)$$

위 식에서 x는 총 강수량 (I)에 대한 증발량 (E)의 비율(%), h는 상대습도, δ_s 는 유출수의 평균 $\delta^{18}O$ (δD) 값, δ_l 는 강수의 평균 $\delta^{18}O$ (δD) 값, $\Delta\epsilon$ 는 산소(14.2 (1-h))와 수소(12.5 (1-h))의 kinetic enrichment factor, α 는 산소와 수소 동위원소의 평형 분배계수(Friedman and O'Neil, 1977), $\epsilon = \alpha - 1$ 그리고 δ_a 는 대기중 수증기의 평균 $\delta^{18}O$ (δD) 값이다. 유사한 계산 방식을 Gibson *et al.* (1993, 1996) 등에서 찾아볼 수 있다. Gat and Bowser(1991), Gat and Matsui(1991)는 물의 증발현상을 보다 복잡한 유역단위의 연구에 적용하였다. 유역단위의 증발은 토양의 표면 그리고 호수나 하천과 같은 물의 표면에서 일어나는데 이들 연구에서는 토양의 경우 식생의 영향에 의해 안정 동위원소 조성에 영향을 주지 않는 증산작용에 의한 수증기의 증발 현상만이 작용한다고 간주하였고 동위원소 조성의 변화는 물의 표면에서 일어나는 증발현상만을 반영하는 것으로 보았다.

식 11로 부터 유역 단위의 증발량이 도출될 수 있는데 증발량으로부터 증산량을 계산해 내기 위해서는 먼저 유역 단위 물수지가 닫힘(폐쇄계임)을 검증해야 한다. 물수지의 닫힘은 대규모 유역의 경우 지하수의 이동에 의한 인접 유역으로부터의 유입(유출)의 효과가 상대적으로 작아 가정의 신뢰성이 비교적 높지만 소규모 유역의 경우 지하를 통한 물의 이동을 무시할 수 없기 때문에 위의 가정을 그대로 이용하기 어렵다. 물수지의 닫힘이 이루어지지 않는 유역의 경우 실제 하천 유출수는 대상 유역뿐만 아니라 인접 유역으로부터 지하저장소를 통해 유입된 성분을 함께 포함하고 있을

수 있기 때문에 위에 언급한 방법을 단순 적용하기 어렵다. 이 경우 독립된 방법에 의해 유입된 물의 영향을 정량적으로 구분하거나 또는 이와 같은 지하수 유입의 영향을 최소화 할 수 있는 적절한 규모 이상의 유역을 대상으로 이와 같은 방법을 적용하는 것이 바람직하다.

위에 언급한 문제점은 주로 소규모의 수계분지에 적용되는 문제점인데 반해 대규모의 수계에서는 유역 내의 불균질성에 의한 불확실성이 존재할 수 있다. 대규모 수계분지에서는 지역에 따라 강수의 안정 동위원소 조성, 지표 온도 및 습도 그리고 식생유형 등의 변수가 다양하게 나타난다. 안정동위원소를 이용한 증발량 계산의 원리는 호수와 같이 유입되는 물의 안정 동위원소 조성을 명확히 규명할 수 있고 시스템내의 안정 동위원소 조성이 균질한 조건하에서 제안되었다(Gonfiantini, 1986; Gibson *et al.*, 1993). 따라서 그 이외의 조건, 예를 들어 유입되는 물의 안정 동위원소 조성이 시간에 따라 변하거나, 수계분지내에 분포하는 물의 안정동위원소 조성이 지역에 따라 다르고 표면의 기상 및 식생환경이 다양한 대규모 수계분지와 같은 조건하에서의 일률적인 적용은 그 신뢰성에 대한 면밀한 검토가 필요하다. 이에 대한 검증 방법으로 제안될 수 있는 것은 연구대상 수계분지와 이를 구성하는 소규모 수계들에 대해 독립적인 연구를 수행하고 그 결과를 상호 비교하는 것이다. 구체적으로, A라고 하는 대규모 수계분지에서 계산된 증발량을 A 수계를 구성하는 보다 작은 규모의 B, C, D 수계에서 각각 독립적으로 얻어진 증발량의 총합과 비교하는 것을 들 수 있다. 두 결과는 이론적으로는 일치할 것으로 예상되지만 위에서 언급한 요인들에 의해 상호 일치하지 않는 결과가 도출될 수 있다. 이 경우 유역단위 연구의 한계성에 대한 보다 구체적인 접근이 가능할 것으로 예상된다.

아울러 증발량 계산을 위한 식은 물의 표면에서 일어나는 증발현상을 기술하는데 적합하게 만들어져 같은 방정식이 비포화대인 토양의 표면에서 일어나는 증발현상을 올바르게 기술할 수 있는지에 대한 불확실성이 존재한다. 특히 물의 공급이 무한대에 가까운 수괴(water body)의 표면과 달리 토양의 표면은 물 공급의 제한성에 의해 완전한 증발이 일어나거나 공극을 통한 수증기의 수직적 이동에 의해 대기/물 접촉면과는 다른 물리적 과정이 수반될 수 있다. 특히 토양의

경우에는 공극률과 공극의 연결도 등 토양의 물리적 특성이 증발에 의해 생성된 수증기의 확산(결과적으로 수증기의 안정 동위원소 조성)에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Allison and Barnes, 1983). 이 경우 수계분지 내에 존재하는 지표수 저장소와 토양의 상대적인 분포에 대한 정보가 필요하다. 또한 위에 언급한 두 가지 증발현상의 상대적인 양적 중요성에 대한 정량적인 검증이 수반되어야 한다.

결론적으로 안정 동위원소를 이용하여 유역단위에서의 물의 순환과정을 정량적으로 기술하는 방법은 다음과 같이 정리해 볼 수 있다. 먼저 flux site를 포함하는 단위 수계(hydrologic unit)를 설정하고 강수와 유출수의 시료를 필요한 시공간적 해상도에 따라 채취하고 안정 동위원소 조성 및 삼중수소(tritium) 조성을 분석한다. 분석 결과는 질량 및 동위원소 수지관계를 적용하여 유역 내 총 증발산량(불수지의 단합이 검증된 지역에서는 증산량도 함께)을 계산하고 물의 체류 시간을 규명한다. 증발(증산)량의 해석은 대상 수계분지내에서 물의 체류시간에 크게 좌우된다. 수계로부터 유출되는 물은 대부분 지하수의 기저유출로 이루어지는데 지하수의 경우 체류시간이 불확실하고 경우에 따라서는 10년 이상의 기간동안 해당지역에 축적된 물을 포함하기도 한다. 따라서 계산된 결과는 현재의 값을 나타내기 보다는 물의 체류기간(수일에서 십년 이상) 동안의 평균값을 의미한다.

2.4. 타워(발자국)단위 수문순환 연구

타워 단위의 수문순환 연구는 플럭스 타워에서 측정되는 수증기 플럭스 자료의 해석을 위해 적용되는 연구로서 측정된 수증기 발원(source)의 공간적 규모를 의미하는 '발자국(footprint)' 단위의 연구로 볼 수 있다. 이 연구는 지표를 중심으로 일어나는 단기간의 수문순환 구성요소의 하나인 증발산량을 증발과 증산으로 구분하기 위한 시도이다. 플럭스 타워에서 수증기 플럭스를 측정하기 위해 이용되는 에디 공분산 방법은 생태계와 대기간에 일어나는 수증기 교환량의 절대값을 얻기 위한 가장 신뢰성있는 첨단 방법이다(Baldocchi *et al.*, 2001). 이때 타워에서 측정되는 값은 기상학적 조건에 따라 변화하는 측정값의 발원지 즉 '발자국(footprint)'에서의 교환량을 의미한다. 발자국의 공간적 규모에서 교환되는 수증기에는 대기중의 수분, 식물의 증산에 의해 발생된 수증기 그리고 토양

으로부터의 증발에 의해 발생된 수증기 등이 혼합되어 있다. 수증기 시료의 안정 동위원소 분석은 이와 같은 각 수증기의 성분을 기원에 따라 구분하는 방법으로 이용될 수 있다.

수증기의 구성요소 분석은 아래의 수식에 의해 증산의 상대적인 비율을 계산함으로써 얻어진다(Yakir and da Sternberg, 2000).

$$F_T(\%) = (\delta_{ET} - \delta_E) / (\delta_T - \delta_E) \times 100 \quad (12)$$

위 식에서 δ_{ET} 는 증발산에 의해 생성된 수증기의 안정 동위원소 조성, δ_E 는 토양에서의 증발에 의해 생성된 수증기의 안정 동위원소 조성 그리고 δ_T 는 증산에 의해 생성된 수증기의 안정 동위원소 조성을 의미한다. δ_{ET} 의 산출은 수증기 샘플의 안정 동위원소 자료를 이용하여 Keeling plot을 적용함으로써 얻어진다. Keeling plot은 두개의 서로 다른 발원으로부터 유래한 수증기를 측정된 수증기의 농도와 안정 동위원소 조성의 상관관계를 이용하여 구분하는 방법으로 생태계에서 순환되는 이산화탄소 및 수증기의 연구에 광범위하게 이용되고 있다. δ_E 는(식 6)을 통해 구할 수 있다. δ_T 는 증산에 의해 생성된 수증기의 안정 동위원소 조성으로 증산작용은 안정 동위원소의 분별을 야기하지 않으므로 수액의 분석을 통해 얻어진다.

타워단위의 안정 동위원소 연구에서 얻어지는 결과의 의미는 미기상학적인 방법을 이용한 발자국분석에 의해 해석된다. 하지만 에디공분산 방법에 의한 수증기 플럭스 샘플링과는 달리 동위원소 분석을 위한 시료는 수증기의 농도 샘플링을 의미한다. 농도 발자국은 일반적으로 플럭스 발자국보다 넓은 공간적 분포를 보인다(Schmid, 2002). 발자국 분석은 측정된 플럭스 값의 공간적 대표성을 산출하는 것으로서 특히 한반도와 같은 복잡지형에서는 실제적 적용에 많은 어려움이 있는 플럭스 연구 중 핵심 분야의 하나이다. 따라서 안정 동위원소를 적용하여 얻어지는 타워 단위 수문성분의 정량적 해석은 연관된 분야의 연구와 함께 이루어져야 한다.

2.5. 수문순환과 탄소순환의 연관성: 물이용효율의 중요성

안정 동위원소를 이용하여 얻어지는 타워 또는 유역 단위의 수문성분은 육상 생태계의 탄소 순환을 기술하

는데 중요한 '증산량'을 지시해 줄 수 있다. 증산량은 식물이 광합성을 위해 방출한 물의 양으로 '물이용효율 (Water Use Efficiency)'에 의해 광합성을 통해 얻어진 탄소의 총량(Gross Primary Productivity, GPP)으로 정량적으로 환산될 수 있다. 증산량을 통해 생태 생산량을 구하는 것은 현재까지 많이 시도되지 않았고(Telmer and Veizer, 2000, 2001), 안정 동위원소를 이용한 생태계의 생산량은 주로 이산화탄소의 탄소 안정 동위원소 구성에 대한 해석을 통해 이루어졌다(Bowling *et al.*, 2001). 증산량과 물이용효율을 이용한 방법은 생산량을 산출하기 위한 또 하나의 새롭고 경제적인 연구방법론을 제시한다는 점에서 큰 의미가 있다.

물이용효율은 주로 경제성 있는 농작물의 재배와 관련하여 생산성을 높이기 위한 방법의 일환으로 연구되어 왔다. Schantz and Piemeisel(1927)의 연구에서 다양한 농작물의 연단위 물이용효율이 다년간에 걸친 실험에 의해 결정되었고 이 결과는 현재까지 가장 대표적이고 광범위한 1차적 자료로서 많은 연구에 의해 인용되어 왔다. 하지만 생태계의 탄소 순환을 이해하기 위해 필수적인 삼림의 경우 실험적인 연구의 어려움 때문에 신뢰성있는 물이용효율의 측정값이 알려져 있지 않고 있다. 한편 Farquhar *et al.*(1989)은 대기 중의 이산화탄소와 식물의 잎에서 측정된 탄소 안정동위원소 비의 차이(Δ)가 물이용효율과 관련되어 있으며 따라서 잎의 탄소 안정동위원소 분석을 통해 식물 개체 단위의 혹은 전체 삼림 단위의 물이용효율을 계산할 수 있음을 제안하였다. Schantz and Piemeisel (1927)의 자료는 다년간에 걸친 실험결과로서 이를 적용할 경우 증산량으로부터 순일차생산량(NPP)의 산출이 가능하다(Lee and Veizer, 2003). Farquhar *et al.*(1989)의 연구방법을 이용할 경우 잎의 호흡에 의해 손실되는 탄소의 양을 제외한 탄소 흡수량을 산출할 수 있는데 이는 총일차생산량(GPP)에서 잎의 호흡량을 뺀 값과 같다. 따라서 이 경우 연구대상 생태계의 총일차생산량(GPP)을 산출하기 위해서는 잎의 호흡량에 대한 독립적인 정보가 요구된다.

2.6. 관련 분야의 기존 연구 결과

안정 동위원소를 이용한 증발량 계산 연구는 Gonfiantini(1986)에 의하여 그 방법론이 정립되었다. 호수에서의 증발량 계산에 적용하기 위한 질량 및 동

위원소 수지 관계를 확립한 이 연구는 이후 Gat and Bowser(1991)와 Gat and Matsui(1991)의 연구에 의해 이론적인 측면과 실제 적용성의 측면에서 보완되었다. Gat and Bowser(1991)는 자연상태에서 관찰되는 물의 지표 저장소(호수)의 공간적 분포와 상호 작용 그리고 증발된 수증기의 이동과 응결에 의한 강수의 동위원소 조성 변화를 고려하여 6개의 증발 시스템을 구분하였고 각각의 경우에 적합한 이론적 증발 모델을 제시하였다. Gat and Matsui(1991)는 아마존 유역에서의 증발현상에 대한 연구를 통해 증발현상을 식생이 덮여있는 토양에서의 증발현상과 하천의 표면에서 일어나는 현상으로 구분하였고 이 두 가지 표면상태의 공간적 분포에 따른 증발 모형을 제시하였다. 실제 수계분지 단위에서 일어나는 증발현상을 보다 잘 반영하고 있는 이 연구에서는 식생이 덮여있는 토양에서의 증발 현상은 증산작용만이 일어나는 것으로 가정하였고 동위원소 비의 변화를 야기하는 증발은 하천이나 호수의 표면에서 일어나는 현상으로 국한하여 설명하였다. Gibson *et al.*(1993, 1996)과 Gibson(2002)은 주로 한대지역에 분포하는 호수를 대상으로 증발량 계산을 통해 물수지를 산출하였고 증발량 계산식의 문제점과 적용성을 검토하였다. Telmer and Veizer (2000, 2001)와 Lee and Veizer(2003)는 기존 연구에 의해 제안된 증발량 계산식과 단순화된 물수지 관계식을 이용하여 북미지역의 대규모 수계분지를 대상으로 평균적인 수문성분들을 산출하였다. 이들 연구에서는 특히 산출된 수계분지에서의 증산량을 물이용효율을 이용하여 해당지역 육상 식물생태계에 의한 순일차생산량으로 환산하였다. 수문순환과 탄소순환의 연관성을 이용한 새로운 연구의 제안으로서 의미를 갖지만 St. Lawrence River(Telmer and Veizer, 2000, 2001) 나 Mississippi River(Lee and Veizer, 2003)와 같은 대규모 수계분지를 대상으로 하여 시스템내의 기상 및 식생조건의 다양성에 의해 야기될 수 있는 불확실성에 대한 논의가 부족하였음이 지적된다.

식생과 대기 사이에 교환되는 수증기나 이산화탄소의 샘플링과 안정 동위원소 분석에 의한 육상 생태계의 증발(증산)량 및 생태계 생산량(호흡량)의 산출은 Yakir and Wang(1996)과 Lloyd *et al.*(1996)의 연구에 의해 그 가능성이 제기되었고 이후 Wang and Yakir(2000), Yakir and da Sterberg(2000), Bowling *et al.* (2001), Yopez *et al.*(2003) 그리고 Williams

et al.(2004) 등에 의해 발전되어 왔다. 이들 기존의 연구에서는 수증기와 이산화탄소에 대한 연구가 실험 및 이론적인 측면에서 상호 독립적으로 진행되었고 산출된 수문순환성분과 탄소순환성분간의 성인적인 관련성은 자세히 언급되지 않았다. 수증기의 분석을 통해 증발(증산)량을 세분하는 연구는 대부분 농경지나 반건조지역의 개방된 삼림에서 이루어져 왔고 복잡지형이나 캐노피(canopy)의 밀도가 높은 열대 - 온대 지역의 대표적인 삼림지역에서는 시도되지 않았다. 산출된 수문성분 즉 증산량을 이용한 생태계 일차생산량의 산출, 신뢰성있는 물이용효율의 산출, 수문순환과 탄소순환을 연관시키는 개념의 적용 등이 현재까지의 관련분야 연구에서 문제점으로 지적될 수 있다.

III. 광릉 소유역의 안정 동위원소 연구

앞에서 살펴본 두 가지의 수문순환 과정과 관련된 광릉 산림 소유역의 안정 동위원소 연구에서 수행되는 세부 내용은 Table 1에 요약하였다.

3.1. 유역단위 수문순환 연구

연구 대상 유역의 선정 및 하천수 시료 채취 : 연구 대상 유역의 선정은 하천 차수의 증가에 따라 소규모 유역에서부터 이를 포함하는 보다 큰 규모의 유역으로 순차적으로 선정하였다. 최소단위는 광릉 슈퍼사이트와 타워의 플럭스 발자국을 포함하는 광릉 소유역으로 선정해 타워에서 관측되는 플럭스 자료와 유역단위 안정 동위원소 연구에서 얻어지는 자료와의 직접적인 비교가 가능할 것으로 예상된다. HydroKorea 및 CarboKorea의 궁극적 목표인 한강 수계 또는 이와 상응하는 규모의 육상 생태계에서의 물/탄소 순환을 규명하기 위해 유역의 최대 규모는 한강 대유역으로 선정 하였다. 본 연구의 대상이 되는 유역과 그 특성은 Table 2와 Hong et al.(this issue)의 Fig. 1에 나타나 있다.

시료채취 주기는 유역의 공간적 규모와 예상되는 수문순환의 시간적 규모에 따라 달라지는데 광릉~퇴계원 수위표 유역은 월 2회 그리고 이보다 대규모의 유역에서는 월 1회 실시된다. 채취된 모든 시료에 대하여 수소와 산소안정 동위원소 조성 그리고 삼중수소의 함

Table 1. Comparisons between Tower (Footprint scale) and Watershed Scale Isotopic Studies.

	Tower (Footprint) Scale Study	Watershed Scale Study
Materials to be analyzed	water vapor, stem water, soil water	precipitation, river discharge
Techniques to be used	- hydrogen and oxygen stable isotope analysis - water vapor sampling system (Multi-level profile system)	- hydrogen and oxygen stable isotope analysis - tritium analysis
Spatial scales	Footprint (m ² ~km ²)	km ² ~10 ⁶ km ²
Temporal resolution	hours~days	days~years
Site characteristics	flux towers equipped with eddy covariance system, instruments for measuring slow response meteorological data and multi-level vapor/gas sampling systems	watersheds with diverse spatial scales
Supplementary information	vapor concentration, relative humidity	precipitation, interception, discharge, mean relative humidity and temperature of watersheds
Deliverable	evaporation, transpiration, GPP	evaporation, (transpiration), (GPP), residence time of water in watersheds

Table 2. Watersheds to be investigated in this study.

Watershed	Area (km ²)	Characteristics
Gwangneung	~2	includes two flux towers and is located within the 'intensive monitoring unit'
Bongsunsa-chon	~40	includes the Gwangneung watershed and is comparable to the MODIS grid
Toegyewon-Soowipyo	201.5	the upper reach of the Wangsook-Chon
Han River (main stream)	2968.5	a part of the Han River watershed excluding the North and the South Han River Basin
North Han River	10744.1	a tributary basin of the Han River
South Han River	12407.6	a tributary basin of the Han River
Han River	26120.2	the Han River basin excluding the Imjin watershed

량이 측정된다.

강수 시료 채취 및 분석 : 강수는 독립된 수계분지의 경우 궁극적인 물의 기원이 된다. 따라서 수계 분지내의 물의 안정 동위원소 비는 우선적으로 강수의 조성에 의해 결정된다. 강수의 수소와 산소 안정 동위원소 비는 여러 가지 요인에 의한 변화를 보이는데 이 중 중요한 것으로 다음의 두 가지를 들 수 있다 (Ingraham, 1998; Rozanski *et al.*, 1993). 먼저 강수의 안정 동위원소 조성의 시간적인 변화로서 수증기 공급원의 계절적인 변동에 따라 나타나는 변화를 의미한다. 또한 단일 강수사건에서 강수 지속시간에 따라 보이는 변화를 의미하기도 한다. 본 연구에서는 강수 시료채취설비를 이용하여 전체 강수에 대한 연속적인 시료채취가 이루어질 예정이므로 부분적인 시료채취에 의해 일어날 수 있는 불확실성은 존재하지 않는다. 하지만 월단위 또는 주단위의 누적 시료채취를 수행함으로써 이보다 작은 규모의 변화가 소멸되는 평균효과가 존재할 것으로 예상된다. 두번째로 유역내에서의 공간적인 변화를 들 수 있는데 강수의 안정 동위원소 조성은 바다 또는 호수와 같은 수증기 공급원으로부터의 거리나 지면의 고도, 위도 등에 의해 영향을 받는다. 연구 대상 지역인 한강 수계의 경우 고도와 평균 기온습도에 따른 영향이 나타날 것으로 보이는데 일반적으로 이와 같은 요인의 영향은 해당 지역의 강수량의 변화로서 나타나 평균적인 강수량과 강수의 안정 동위원소 조성 사이의 상관관계가 존재할 것으로 예상된다. 강수 성분의 공간적인 불균질성은 다양한 지형과 기상 조건을 대표하는 지점에서 강수 시료를 채취하고 이를 분석하여 경험적인 관계를 수립함으로써 정량화할 수 있다.

또한 동절기에 내리는 강설 시료의 경우 기존의 강수 시료 채취 설비로는 샘플링이 되지 않는 단점이 존재한다. 강설은 강우와 마찬가지로 토양의 중요한 수분 공급원이다. 따라서 본 연구에서는 강수 시료 채취 설비에 강설 시료를 채집할 수 있는 기능을 부과하여 기존 연구의 불확실성을 최소화하도록 하였다. 본 연구에서 지속적으로 강수시료가 채취되는 지점은 광릉슈퍼사이트, 춘천(북한강유역), 원주(남한강유역)이다. 춘천과 원주에서는 1개월 단위의 누적 강수 시료가 그리고 광릉슈퍼사이트에서는 1/2개월 단위의 누적 시료를 채취한다. 강수의 경우에도 하천수와 같이 안정 동위원소 조성과 삼중수소 함량이 측정된다.

3.2. 타워단위 수문순환 연구

수증기 샘플링 및 안정 동위원소 분석 : 수증기 시료채취는 광릉슈퍼사이트 내 플렉스 타워에 설치될 다중 고도 시료 채취 시스템(Multi-level Sampling System, Campbell Scientific Inc.)을 활용한다. 본 시스템은 다양한 높이에서의 수증기와 이산화탄소의 농도를 측정하기 위한 설비로서 에디공분산 방법에 의해 측정되는 플렉스값에 미치는 저류항의 영향을 계산하기 위해 이용된다. 본 연구에서는 기존의 샘플링 시스템에 특수 제작된 기체시료 채취용 플라스크를 설치하여 다양한 높이에서의 기체의 샘플링과 농도 측정이 동시에 이루어지도록 계획하였다(Fig. 2). 먼저 2L의 용량을 갖는 기체 채취용 플라스크를 샘플링 시스템에 연결하여 수증기와 이산화탄소 농도가 측정된 공기를 채취한다. 채취된 기체 시료는 실내에서 진공추출라인(vacuum extraction line)에서 응결 온도의 차이를 이용하여 수증기와 이산화탄소 그리고 기타의 기체로 분리된다. 분리된 기체 중 이산화탄소는 6mm의 직경을 갖는 pyrex glass tube에 채집된 후 가열하여 밀봉하고 수증기 시료는 V 자형의 내부형태를 갖는 바이알(vial)을 이용하여 채집한다. 사용되는 바이알은 주사기의 삽입이 가능하도록 실리콘과 고무의 혼합체인 septum이 장착된 마개를 이용하여 밀봉한다. 동일한 플라스크를 이용해 이산화탄소와 수증기를 동시에 채취하는 방법은 기존의 연구에서는 시도되지 않은 방법으로 몇 가지 기술적인 어려움을 극복한다면 경제적이면서 간단하고 신뢰성있는 방법으로 인정받을 수 있다. 즉, 기존의 연구에서 이용되는 야외에서의 냉각 트랩을 이용한 방법(Helliker *et al.*, 2002)에 비해 시간과 설비가 절약되고 공기중의 수분에 의한 오염을 줄일 수 있으며 시료채취에 걸리는 시간과 간격을 보다 작게 함으로써 자료의 시간적인 해상도를 크게 향상 시

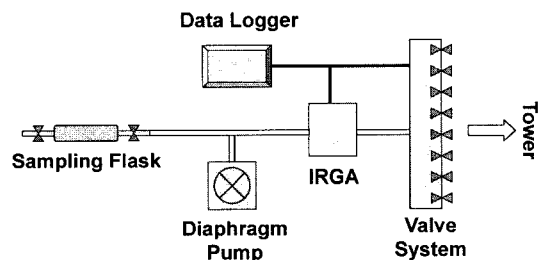


Fig. 2. A schematic diagram of water vapor/CO₂ sampling system. IRGA stands for Infrared Gas Analyzer.

킬 수 있다. 또한 동일한 시공간적 해상도에 따라 수증기와 이산화탄소 시료를 채취함으로써 이들의 안정 동위원소 분석에 의해 산출되는 증발(증산), 총일차생산량, 총생태 호흡량들간의 직접적인 비교가 가능하다. 수증기 시료의 안정 동위원소 분석은 Sharp *et al.* (2001)에 의해 제안된 방법을 이용하여 이루어진다.

토양수 샘플링 및 안정 동위원소 분석 : 토양 표면의 수분은 증발에 의한 영향을 받아 특징적인 안정 동위원소 조성을 갖게 되며 이 값은 타워단위 연구에서 얻어지는 증산량을 계산하기 위한 중요한 변수가 된다. 또한 깊이에 따른 수분 함량과 동위원소 비의 변화는 불포화 상태의 토양으로부터 일어나는 증발 현상의 특성과 물의 동위원소 조성 변화에 미치는 영향을 규명하기 위한 중요한 정보를 제공한다. 토양수의 샘플링은 수증기의 샘플링과 동시에 이루어진다. 즉, 채취되는 수증기의 발원(발자국)내의 대표적인 토양에서 표면으로부터 10cm 깊이(토양의 증발 특성에 따라 달라짐)의 토양층을 채취하여 진공추출라인을 이용하여 수분을 분리한다. 분석을 위해 충분한 양의 수분을 얻기 위해 토양 수분 함량에 따라 채취되는 토양 시료의 양을 결정한다.

수액 샘플링 및 안정 동위원소 분석 : 수액의 안정 동위원소 조성은 증산 작용에 의해 방출되는 수증기의 동위원소 조성을 이해하는데 필수적인 자료이다. 수액 시료의 채취는 토양 시료와 마찬가지로 수증기의 발원에 해당되는 지역의 대표적인 식생으로부터 이루어진다. 수액의 채취는 식물의 생존에 영향을 주지 않는 범위에서 이루어져야 하며 이를 위해 식물생태학 전문가의 자문을 얻어 수행한다.

잎의 탄소 동위원소 분석 : 잎의 탄소 동위원소 조성은 식물 성장 기간 동안의 물이용효율을 산출하기 위한 필수적인 자료이다(Farquhar *et al.*, 1989). 이를 위해 연구지역의 대표적인 식생유형을 대상으로 일조량 및 대기 중 이산화탄소/수증기 농도 변화의 영향을 살펴보기 위해 한 개체내의 각기 다른 높이에서 성장한 잎을 채취한다. 또한 계절에 따른 물이용효율의 변화를 추적하기 위해 식물 성장 기간 중 일정한 시간 간격(약 2 주)으로 샘플링을 실시한다.

시료 채취 기간 및 일정 : 본 연구에서 시도되는 수증기의 샘플링은 μL 단위의 미량시료를 채취함으로써 시료의 시간적 해상도를 크게 확대할 수 있다. 일반적으로 Keeling plot을 구성하기 위해 필요한 최소한의

적정 시료수를 4개로 가정하고 시료 한개 채취에 필요한 시간을 약 10-20분으로 할 경우 본 연구에서는 수증기의 시간 단위 안정 동위원소 비의 변화를 추적할 수 있다. 따라서 증산량의 시간 단위 변화량을 측정하는 것이 이론적으로 가능하고 이를 위해 하루 중 일조량의 변화를 대표할 수 있는 시간대를 선정하여 집중적인 시료 채취가 이루어 질 예정이다. 또한 식물 성장 기간 중 일조량, 토양 수분 등 환경적 요인의 변화가 큰 기간을 대상으로 하여 시료 채취와 분석이 이루어짐으로써 증산/증발량이 생물 기상학적 요인들과 갖는 경험적인 관계에 대한 도출이 이루어질 것으로 기대된다.

IV. 결 론

본 논문에서 고찰된 안정 동위원소 연구는 CarboKorea 및 HydroKorea 연구와 같은 국내 생태계에서의 물과 탄소 순환에 관련된 학제간 연구에 중요한 자료 기반을 제공할 뿐만 아니라 수문순환(증발, 증산)과 탄소순환(GPP)의 구성요소를 세분하고 정량적으로 산출하는 것을 가능하게 한다. 현재 광릉 산림소유역에서는 이 방법을 사용하여 타워(발자국) 단위의 연구로서 수증기, 수액, 토양수의 안정 동위원소 샘플링과 분석을 통해 증산과 증발량 그리고 물이용효율을 이용하여 환산된 총일차생산량을 측정하고 있다. 보다 광범위한 지역에 대한 자료를 생산하기 위하여 다양한 공간규모를 갖는 대표적인 수계가 선정되어 유역 단위 수문성분(강수, 유출수)의 안정 동위원소 분석과 삼중수소 분석이 실시되고 일차적으로 유역단위 증발량과 물의 체류시간이 산출될 예정이다. 이러한 노력은 유역단위 연구를 위해 기존에 제시된 안정 동위원소 관계식을 재검토하고 스케일링의 유연성과 신뢰성에 대한 검증을 가능케 할 것이다. 이러한 연구 결과는 생태수문 및 탄소 모형과 위성영상 산출물을 보정/검정하는데 이용되고 궁극적으로 한반도 전체의 다양한 시공간 규모에서의 물과 탄소의 순환 해석과 실황예보를 위한 기술개발에 핵심적인 기여를 할 것이다.

V. 적 요

육상생태계의 물/탄소 순환은 기후변화의 원인과 진행 과정 그리고 결과를 예측하는데 필수적인 기초 자

료이다. CarboKorea와 HydroKorea 연구에서는 한반도의 대표적인 지형과 식생 유형에 적합한 물/탄소 순환 해석과 실험예보를 위한 기술개발을 목표로, 안정 동위원소를 이용해 물/탄소 순환의 구성요소를 성인적으로 세분하는 연구를 수행하고 있다. 본 논문에서는 이러한 안정 동위원소 연구가 국내 생태계의 물과 탄소 순환연구에 적극적으로 활용될 수 있도록 하기 위해 그 이론적 배경과 광릉 소유역의 연구 사례를 소개하였다. 시간과 공간 규모의 확장을 가능케 하는 안정 동위원소 연구는 다양한 관련분야의 연구와 함께 한반도 육상생태계의 물/탄소 순환과정에 대한 보다 정량적인 해석을 가능하게 함으로써 기후변화와 관련하여 제기되고 있는 당면한 과학적, 사회경제적 요구에 부응할 수 있는 과학적 기반을 구축하는데 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 1-8-2) 및 환경부 “차세대 핵심 환경기술 개발사업(Eco-Technopia 21 Project)”의 지원으로 수행되었다. 본 논문을 위해 귀중한 조언을 주신 익명의 심사위원께 감사드린다.

인용문헌

- Allison, G.B., and C.J. Barnes, 1983: Estimation of evaporation from non-vegetated surfaces using natural deuterium. *Nature* **301**(13), 143-145.
- Baldocchi et al., 2001: Fluxnet: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor and energy flux densities. *Bulletin of American Meteorological Society* **82**, 2415-2434.
- Bowling, D.R., P.P. Tans, and R.K. Monson, 2001: Partitioning net ecosystem carbon exchange with isotopic fluxes of CO₂. *Global Change Biology* **7**, 127-145.
- Craig, H., and L.I. Gordon, 1965: Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and the marine atmosphere, In “Stable isotope studies in oceanographic and paleotemperatures” E. Tongiorgi (ed.), C.N.R., Laboratorio di Geologia Nucleare, Pisa, 9-130.
- Fan, S., M. Gloor, J. Mahlman, S. Pacala, J. Sarmiento, T. Takahashi, and P. Tans, 1998: A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models, *Science* **282**, 442-446.
- Farquhar, G.D., K.T. Hubick, A.G. Condon, and R.A. Richards, 1989: Carbon isotope fractionation and water use efficiency. In *Stable isotopes in ecological research*, P.W. Rundel, J.R. Ehrlinger, K.A. Nagy (eds), 21-40, Springer-Verlag, New York.
- Friedman, I., and J.R. O’Neil, 1977: Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest, in *Data of Geochemistry*, Sixth Edition, Geological Survey Professional Paper, 440-KK, United States Government Printing Office, Washington.
- Gat, J.R. and C. Bowser, 1991: The heavy isotope enrichment of water in coupled evaporative systems, in *Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein*, H.P.Jr. Taylor, J.R. O’Neil, and I.R. Kaplan (eds), *Geochemical Society Special Publications* **3**, 159-168.
- Gat, J.R. and E. Matsui, 1991: Atmospheric water balance in the Amazon Basin: An isotopic evapotranspiration model, *Journal Geophysical Research* **96**, 13179-13188.
- Gibson, J.J., 2002: A new conceptual model for predicting isotope enrichment of lakes in seasonal climates, *IGBP PAGES News* **10**, 10-11.
- Gibson, J.J., T.W.D. Edwards, G.G. Bursley and T.D. Prowse, 1993: Estimating evaporation using stable isotopes: Quantitative results and sensitivity analysis for two catchments in North Canada, *Nordic Hydrology* **24**, 79-94.
- Gibson, J.J., W.D. Edwards, and T.D. Prowse, 1996: Development and validation of an isotopic method for estimating lake evaporation, *Hydrological Processes* **10**, 1369-1382.
- Gonfiantini R., 1986: Environmental isotopes in lake studies, In *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, vol 2, P. Fritz and J.C. Fontes (eds), 113-168, Elsevier, New York.
- Griffiths, H., 1998: *Stable Isotopes, integration of biological, ecological and geochemical processes*. Bios Scientific Publishers, UK.
- Helliker, B.R., J.S. Roden, C. Cook, and J.R. Ehrlinger, 2002: A rapid and precise method for sampling and determining the oxygen isotope ratio of atmospheric water vapor. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* **16**, 929-932.
- Hoefs, J. 1997: *Stable isotope geochemistry*, 4th Completely Revised, Updated, and Enlarged Edition. Springer-Verlag, Berlin. 201.
- Houghton, R.A., E.A. Davidson, and G.M. Woodwell, 1998: Missing sinks, feedbacks, and understanding the role of terrestrial ecosystems in the global carbon balance, *Global Biogeochemical Cycles* **12**, 25-34.
- IGBP, 1998: The terrestrial carbon cycle: Implications for

- the Kyoto Protocol, *Science* **280**, 1393-1394.
- Ingraham, N.L., 1998: Isotopic variations in precipitation. In *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*, C. Kendall and J.J. McDonnell (eds.), 87-118, Elsevier, New York.
- Lee, D., and Veizer J., 2003: Water and Carbon Cycles in the Mississippi River Basin: Potential Implications for the Northern Hemisphere Residual Terrestrial Sink. *Global Biogeochemical Cycles* **17**(2), 1037, doi:10.1029/2002GB001984.
- Lloyd, J., B. Krujic, D.Y. Hollinger et al., 1996: Vegetation effects on the isotopic composition of atmospheric CO₂ at local and regional scales: theoretical aspects and a comparison between rain forest in Amazonia and a boreal forest in Siberia. *Australian Journal of Plant Physiology* **23**, 371-399.
- Nobel, P.S., 1999: *Physicochemical & Environmental Plant Physiology*. Academic Press, San Diego, 474.
- Rozanski, K., L. Aragus-Aragus, and R. Gonfiantini, 1993: Isotopic patterns in modern global precipitation, in *Climate Change in Continental Isotopic Records*, P.K. Swart, K.C. Lohmann, J. McKenzie, and S. Savin (eds), *Geophysical Monograph* **78**, 1-36.
- Schantz, H.L., and L.N. Piemeisel, 1927: The water requirement of plants at Akron, Colorado, *Journal of Agricultural Research* **34**, 1093-1189.
- Schmid, H.P., 2002: Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective. *Agricultural and Forest Meteorology* **113**, 159-183.
- Sharp, Z.D., V. Atudorei, and T. DuraKiewicz, 2001: A rapid method for determination of hydrogen and oxygen isotope ratios from water and hydrous minerals. *Chemical Geology* **178**, 197-210.
- Telmer, K., and J. Veizer, 2000: Isotopic constraints on the transpiration, evaporation, energy and NPP budgets of a large boreal watershed: Ottawa River Basin, Canada, *Global Biogeochemical Cycles* **14**, 149-165.
- Telmer, K., and J. Veizer, 2001: Correction to Isotopic constraints on the transpiration, evaporation, energy and gross primary production budgets of a large boreal watershed: Ottawa River basin, Canada, *Global Biogeochemical Cycles* **15**, 1035.
- Valley, J.W., H.P. Taylor, Jr., and O'Neil J.R., 1986: Stable isotopes in high temperature geological processes, *Reviews in Mineralogy* **16**, Mineralogical Society of America, 570.
- Walker, G.R., M.W. Hughes, G.B. Allison, and C.J. Allison, 1988: The movement of isotopes of water during evaporation from a bare soil surface. *Journal of Hydrology* **97**, 181-197.
- Wang, X., and D. Yakir, 2000: Using stable isotopes of water in evaporation studies. *Hydrological Processes* **14**, 1407-1421.
- Williams, D.G., W. Cable, K. Hultine et al., 2004: Evapotranspiration components determined by stable isotope, sap flow and eddy covariance techniques. *Agricultural and Forest meteorology* **125**, 241-258.
- Yakir, D., and L.S. da Sterberg, 2000: The use of stable isotopes to study ecosystem gas exchange. *Oecologia* **123**, 297-311.
- Yakir, D., and X. Wang, 1996: Fluxes of CO₂ and water between terrestrial vegetation and the atmosphere estimated from isotope measurements. *Nature* **380**, 515-517.
- Yepez, E.A., D.G. Williams, R.L. Scott, and G. Lin, 2003: Partitioning overstory and understory evapotranspiration in a semiarid savanna woodland from the isotopic composition of water vapor. *Agricultural and Forest Meteorology* **119**, 53-68.