

수자원 관리와 먹이망, 안정동위원소



장 광 현 |
경희대학교 환경학 및 환경공학과 교수
chang38@khu.ac.kr



Doi, Hideyuki |
Institute for Sustainable Science and
Development, Hiroshima University
Tenure-track Lecturer
doi@hiroshima-u.ac.kr

1. 머리말 : 수자원 관리와 먹이망

효율적인 수자원 관리를 위해서는 대상 수생태계의 물질유입과 유입된 물질의 생태계내 순환의 연결고리를 파악하고, 주변 환경과의 상호작용으로 인한 물질순환양상의 변화를 분석, 예측하는 일이 매우 중요하다. 영양염류를 포함한 다양한 물질이 집수역에서 수생태계로 유입되면, 이들은 수생태계의 생물군집에 의해 이용되고 순환된다. 일차생산자인 식물은 무기물을 이용하여 광합성을 통해 유기물을 합성하고, 합성된 유기물은 생물군집내의 [먹고 먹히는] 생물학적 상호작용을 통해 이동된다.

이러한 생태계 내의 생물군집의 구성원들의 생물학적 상호작용의 연결 관계를 먹이사슬 (먹이연쇄) 또는 먹이망이라 한다. 일반적으로 먹이사슬은 상

호작용을 가지는 일차생산자와 고차소비자를 모두 영양단계로 나누어 직선으로 연결시킨 개념으로 정의할 수 있다. 한편, 복수의 생산자가 존재하고 있는 생태계에서는 복수의 먹이사슬이 성립되고, 어떤 소비자가 서로 다른 생산자로부터 기원하고 있는 복수의 먹이를 이용할 경우 복수의 먹이사슬이 소비자를 통해 융합되어, 먹이망을 형성한다고 할 수 있다. 즉, 먹이사슬은 먹이망의 부분집합의 개념이라 할 수 있다.

생태계의 물질은 이러한 생물학적 상호작용으로 연결된 [먹이망] 을 통해 이동하고 재생된다. 생물군집을 통한 물질의 순환은 생물군집의 구조 및 생산성에 큰 영향을 미친다. 또한 생물군집의 구조에 따라, 즉, 먹이망이 어떤 생물들로 구성되어 있고, 어떤 관계로 연결되어 있는지에 따라 먹이망내의 물질순환이 변화하고, 그 결과 생태계의 물질환경도 달라질 수 있다.

따라서, 수생태계의 생물군집 구조, 먹이망을 통한 이들의 상호작용 체계를 파악하는 일은 대상 생태계의 물질순환을 이해하고, 효과적인 수자원 관리체계를 수립하는데 있어 가장 기초적이고 중요한 일이라 할 수 있다. 최근, 지구 온난화 및 부영양화 등으로 인해 변화하는 환경은 생태계의 물질 유입에 큰 영향을 미치고, 동시에 서식생물에게도 직, 간접적인 영향을 미침으로 인해 생물군집구조에 많은 변화를 가져오고 있다.

본 논문에서는 수생태계 먹이망 구조의 정량적 분석연구를 소개하고, 수자원 이용과 관리에 있어 먹이망 구조 해석이 가지는 의미에 대해 소개하고자 한다.

2. 먹이망 구조 해석과 안정동위원소

지구상에는 92가지의 원소가 존재하고, 이 들 중 생물체를 구성하는 주요 원소로는 수소, 탄소, 질소 등을 들 수 있다. 이 들 원소는 안정동위체가 존재한다. 동위체는 핵의 양자 수는 동일하지만 중성자의 수가 달라 그 무게(질량수)는 서로 다르지만, 화학적 성질은 매우 유사하다. 이 들 중 시간이 지남에 따라 소멸되는 동위체를 방사성동위원소라 하고 안정적으로 존재하는 동위원소를 [안정동위원소]라 한다. 최근 생태학분야에서는 먹이망의 구조 및 기능(food web structure and function)을 정량적으로 평가, 해석하는 연구가 활발히 진행되고 있는데, 이는 먹이망내의 생물이 가지는 이들 안정동위원소의 존재비를 추적, 비교하여, 생물학적 상호작용을 정량적으로 분석하는 것이다. 안정동위원소가 생태학 연구에 사용되기 시작한 것은 1990년대 continuous flow mass spectrometry라 불리는 분석장치가 개발된 후 부터이며, 현재는 국내에서도 많은 연구자들이 안정동위원소를 이용하여 생태계 생물군집의 구조와 기능에 관한 연구를 진행하고 있다. 먹이망내에서 복잡한 관계로 얽혀 있는 생물들의 안정동위원소 존재비를 비교분석하면 이들이 어떤 먹이를 섭취하고, 영양단계(누가 누구를 먹고, 누가 상위포식자인지)를 정량적으로 평가할 수 있는데, 주로 탄소와 질소의 동위원소가 사용된다.

일차생산자로 이산화탄소를 포함한 무기물을 유기물로 전환시켜 먹이망의 출발점이라 할 수 있는 식물의 탄소와 질소의 동위원소 존재비는 식물의 종류, 서식환경, 계절 및 식물체의 부위 등 다

양한 요인에 의해 결정된다. 반면, 일단 소비자에게 섭취되고 나면 유기물의 질은 변화하지만, 여기에 포함된 탄소의 안정동위원소의 존재비는 크게 변화하지 않는다. 따라서, 다양한 일차생산자가 가지는 탄소의 동위원소 존재비와 이들을 섭취하고 있는 소비자의 탄소의 동위원소의 존재비를 비교함으로써 먹이 기원 등 유기물질의 흐름을 파악할 수 있다.

반면, 질소의 경우는 탄소와는 달리 소비자에게 섭취되면 동위원소의 존재비가 달라진다. 질소의 경우 ^{15}N 이 먹이사슬을 따라 농축되기 때문이다. 이는 소비자가 섭취한 유기물을 동화시키는 과정에서 보다 무거운 ^{15}N 이 몸체를 구성하는 유기물로 사용되는 반면, 상대적으로 가벼운 ^{14}N 이 체외로 배출되기 때문이다.

하지만, 생물간 발생하는 안정동위원소 비의 변화는 아주 미미하다. 따라서, 존재비는 그대로는 표현방법이 어려워, 통상 안정동위원소비는 각 원소에 대해 정해진 표준물질의 원소존재비를 비교해 대상 시료에 존재하는 원소존재비가 어느 정도 차이가 나는지를 천분율로 나타낸다. 예를 들면 탄소의 경우 아래와 같이 나타낸다.

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{측정시료}} = \left(\frac{[^{13}\text{C}/^{12}\text{C}]_{\text{측정시료}}}{[^{13}\text{C}/^{12}\text{C}]_{\text{표준시료}}} - 1 \right) \times 1000 (\%)$$

먹고 먹히는 생물학적 상호작용을 통해 일어나는 탄소와 질소의 동위원소 비의 농축계수는 탄소가 0.8%, 질소가 3.4% 인 것으로 알려져 있다 (Vander Zanden and Rasmussen 2001).

생태계의 일차생산자인 식물이 생태계의 탄소동위원소 비를 결정하고, 이를 기점으로 초식자, 포식자, 및 고차 포식자의 동위원소비가 먹이의 동위원소 비를 어느 정도 반영하는지를 정량적으로 추적하면 아래와 같이 먹이망의 구조를 도면으로 나타내고 해석할 수 있다.

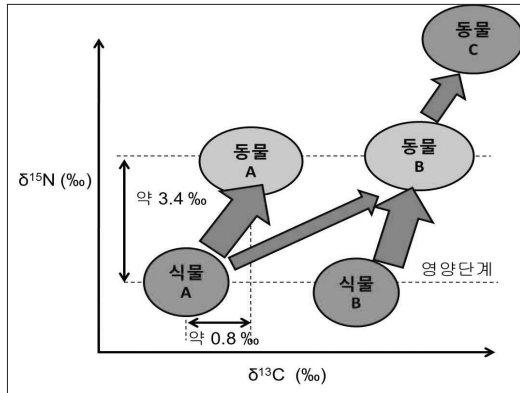


그림 1. 생태계의 먹이망 구조를 탄소와 질소 동위원소 소비 값으로 플롯한 예

3. 수생태계 건강성과 먹이망 구조

최근 생태계 건강성 (ecosystem health)이란 말을 많이 사용하고 있다. 하지만, 무엇이 생태계가 건강한가에 대한 적절한 지표가 되는지에 대해서는 간단히 정의내리기는 힘들다. 수자원 관리 및 생태계 관리의 측면에서 평가 대상이 되는 건강성은 우리 인간을 기준으로 하여, 우리가 생태계로부터 제공받을 수 있는 생태계서비스 (ecosystem service)의 개념으로 정의할 수 있다. 즉, 보다 다양한 서비스를 제공받기 위한 생태계의 풍부함, 또는 생태계가 가진 자원의 풍부함을 생각할 수 있다. 하지만 생태계를 중심으로 생각한다면, 생태계의 구조와 기능이 외부 교란 등에 대해 어느 정도 안정되어있느냐는 관점에서 건강성이란 개념을 생각할 수 있다. 생태계 먹이망의 생물간 상호작용의 연결고리와 이로 인한 물질순환의 네트워크를 분석함으로써 정량적으로 평가할 수 있다.

복잡한 이론은 제쳐두더라도 (Polis and Strong, 1996), 간단하게 생태계 구조의 풍부함과 안정성은 대상 생태계의 먹이망이 얼마나 복잡하게 구성되어 있는가를 평가함으로써 추측이 가능하다. 다양한 먹이원을 모두 포함한 먹이망의 폭을 측정하는 것은 어려움이 따르지만, 최상위포식자와 식물 또는 동물플랑크톤과 같은 가장 아래단계의 영

양단계 생물을 이용하면 생태계 먹이사슬의 길이를 정량화하는 것이 가능하다.

수생태계의 경우, 육상과는 달리 일차생산자와 일차소비자인 동물플랑크톤의 종류와 분포가 비교적 단순하고, 최상위 포식자 또한 쉽게 파악할 수 있다 (보통 우리나라의 하천, 호수의 경우 큰입배스나 쏘가리와 같은 육식어류가 최상위포식자가 된다). 따라서, 일차생산자 (또는 일차소비자)와 최상위 포식자의 탄소, 질소 안정동위원소 비를 이용하여 아래와 같이 먹이사슬의 길이 (최상위 포식자까지의 도달 거리임으로 먹이망 개념에서의 전체 물질이동 연결고리 개념이 된다)를 계산할 수 있다.

생태계먹이사슬 길이 =

$$1 + (\delta^{15}\text{N}_{\text{최상위 포식자}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{식물플랑크톤}}) / 3.4$$

일반적으로 먹이사슬은 최대 5-6 정도가 되며, 먹이사슬이 길수록 많은 생물이 물질이동에 관여하고 있다고 해석 할 수 있다. 또한 이론적 연구에서 먹이사슬의 길이와 먹이망의 복잡성은 생태계의 안정성 (ecosystem stability)에 기여한다고 알려져 있다 (Power et al. 1996). 따라서 다양한 환경을 가지고 있는 수자원의 생물군집의 먹이사슬 길이를 비교하면 각 수자원의 생태계의 건강성을 비교, 평가할 수 있다. 한편, 역으로 이야기하면, 다양한 환경요인과 수생태계의 먹이사슬의 길이를 비교하면 생태계 건강성을 유지시키는 환경변수를 추적할 수 있고, 건강한 수생 생태계를 유지, 관리, 복원하기 위한 중요한 정보로 활용할 수 있다.

일본 시코쿠 지방은 잦은 가뭄으로 인해 많은 농업 저수지가 만들어져 있다 (그림 2). 대부분의 저수지에는 외래 유입종인 큰입배스가 서식하고 있다. 이들 농업용 저수지와 자연호수의 환경요인과 먹이사슬의 길이를 비교하기 위해 식물 및 동물플랑크톤과 큰입배스를 채집하고 이 들로부터 안정동위원소 비를 측정하여 먹이사슬의 길이를 계산하고, 환경요인과의 상관관계를 분석하였다 (Doi et

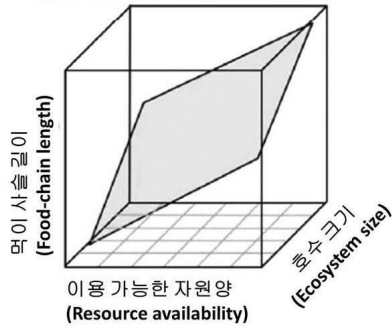


그림 2. 일본 시코쿠 지방 (에히메 현) 의 농업용 저수지 (좌) 와 먹이사슬의 길이, 이용가능한 자원의 양, 생태계 크기의 상호관계 (우)

al. 2009).

실험 결과, 저수지의 크기와 저수지가 가지는 일차생산성에 의해 먹이사슬의 길이가 영향을 받는 것으로 나타났다. 즉, 생태계의 크기가 크고 풍부한 일차생산량이 존재할수록 먹이사슬의 길이가 길어진다.

하지만, 일차생산의 증가로 인한 자원량의 증가가 생태계 건강성을 높일 수 있다는 결과에는 한 가지 의문이 발생한다. 역설적으로 부영양화로 인해 일차생산이 높아지면 생태계의 건강성도 좋아 지는냐는 의문이 들기 때문이다. 본 연구에서는 일반적으로 부영양화로 인해 증가하는 일차생산자, 즉, 남조류를 포함해 동물플랑크톤이 이용할 수 없는 일차생산자를 제외한 일차생산량을 자원량으로 분석한 결과이다. 부영양화로 인한 이러한 일차생산자의 증가와 먹이망의 관계는 다음 장에서 소개한다.

4. 부영양화와 먹이망 구조

인위적으로 발생된 여분의 영양염류 유입으로 야기되는 수생태계의 부영양화는 일차생산자의 폭발적인 증가를 유도함으로써 수자원 관리에 있어 가장 심각한 환경문제의 하나이다. 육상과 달리 일차생산자의 증가가 수생태계에서 문제가 되는 이유는 부영양화로 발생하는 여분의 일차생산 증가가 먹이

사슬의 상위 소비자인 동물플랑크톤이 먹을 수 없는 대형 또는 독성을 가진 남조류이기 때문이다.

한편, 부영양화 환경에서의 일차생산자와 동물플랑크톤의 섭식관계 및 보다 상위 포식자와의 생물학적 상호관계를 분석하고, 이들 관계를 인위적으로 조절하면 먹이망내의 생물학적 상호작용을 이용해 증가하는 일차생산자를 제어 할 수 있다.

실제, 이러한 제어는 Biomanipulation이라 하여 섭식능력이 뛰어난 대형 동물플랑크톤 (*Daphnia*) 을 증가시켜 호수내의 수질을 개선하는 방법으로 1980년대 이후 유럽 등에서 활발히 진행되어 왔다. 하지만, 일차생산자의 종류에 따라 먹고 먹히는 관계에 제약이 따르고, 일차생산자가 가진 물질이 상위 포식자의 생체량으로 전이되지 못하는 경우가 많아 실효성에는 많은 문제가 있다.

이러한 미소생물들간의 생물학적 상호작용을 분석하는데 있어 안정동위원소를 이용하여 생물학적 상호작용을 정량적으로 분석하면, 부영양화로 야기된 일차생산이 먹이망내에서 어떻게 순환되고 있는지를 파악할 수 있다. 또한, 발생하는 일차생산자의 종류에 따른 물질순환 양상을 파악함으로써 대상 수자원의 수질개선 대책을 세우는데 유용하게 사용될 수 있다.

일본의 수와호는 대표적인 부영양화된 호수로 수질변화와 함께 주요 일차생산자가 남조류인 *Microcystis*에서 *Aphanizomenon*으로 변화하였

다. 1980년 말에 측정된 동위원소 비의 데이터 (Yoshioka et al. 1996) 와 2007년에 측정된 동위원소의 데이터를 비교하면 먹이망을 통한 물질순환의 변화를 파악할 수 있다. 과거 *Microcystis*가 우점하였을 때는 *Microcystis*는 일부 동물플랑크톤에 의해 이용되고, 특히 분해되고 나면 소형 지각류의 섭취를 통해 상위 포식자인 어류에게까지 물질순환이 일어나는 것으로 조사되었다. 하지만, 최근 우점한 *Aphanizomenon*과 동물플랑크톤의 동위원소 비를 비교분석하면, 동물플랑크톤은 일부 소형 조류를 섭식하고 우점종으로 대량 증식한 *Aphanizomenon*은 섭식하고 있지 않는 것을 알 수 있다. 최근 이 호수의 어류의 어획량이 급격한 변화를 고려하면, 일차생산자의 종조성의 변화가 부영양화호의 전체의 물질순환에 영향을 미치고 있는 것을 알 수 있으며, 계속 조사 분석이 진행되면, 보다 명확히 먹이망 내의 물질순환 양상이 밝혀질 것으로 예상된다.

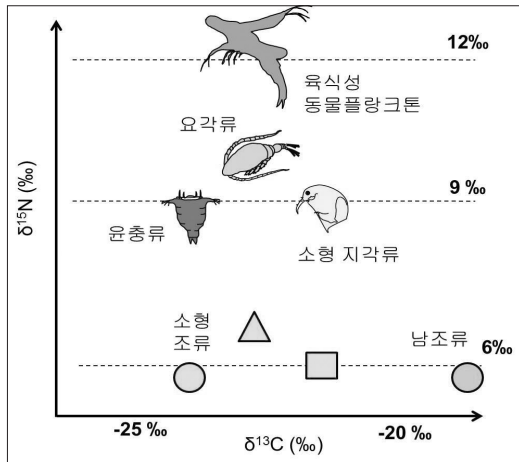


그림 3. 부영양화호에서 남조류 우점시기의 먹이망 구조 (Sakamoto et al. 미발표 자료)

5. 맺음말 : 먹이망 구조 해석의 전망과 수자원 관리에의 활용

최근 동위원소 분석기술의 발달로 인해 안정동위원소 비를 중심으로 먹이망 구조 해석 연구가 활발히 진행되어 왔다. 향후 동위원소 비를 이용한 먹이망해석은 탄소와 질소 외에 유황 및 미량원소를 이용한 다원소동위원소분석 방법을 통해 생물의 이동 및 집수역 오염원 분석 등 생태계와 환경변화에 관한 보다 많은 정보가 얻어지리라 예상된다. 또한, 동위원소를 이용한 바이오마커의 활용방법 개발은 보다 정확하고 세부적으로 생태계 내 물질순환의 연결고리를 분석하는 것을 가능하게 하리라 생각된다.

본 글을 통해 생태계 먹이망을 통한 물질순환과 수자원 환경문제의 연관성을 간략히 소개하였다. 이들 외에 하천에 건설되는 댐이나 저수지의 콘크리트 수변, 인공 수로 등, 수자원의 확보와 관리를 위해 일어나는 수생태계의 물리적 변형 역시 먹이망의 구조와 기능에 큰 영향을 미치고 있다 (Chang et al. 2008; Doi et al. 2010a, b). 수자원 확보와 관리를 위해 필수불가결한 모든 인위적인 변화는 그 것이 좋은 방향이든 아니면 나쁜 방향이든 생물군집의 먹이망과 상호작용하며 생태계 구조와 기능에 영향을 미친다고 할 수 있다. 지속가능한 수자원의 이용과 더불어 아름답고 건강한 수생태계를 가꾸어 나가기 위해서, 생태계에서 일어나는 변화들이 생물군집 구조를 포함한 생태계 먹이망의 기능적 측면에서 보다 면밀히 분석되고 예측되어 수자원 관리에 활용되어야 한다. 🌊

참고문헌

1. Chang, K.H., Doi, H., Imai, H., Gunji, F. and Nakano, S. (2008) Longitudinal changes in zooplankton distribution below a reservoir outfall with reference to river planktivory. *Limnology* 9, 125-133
2. Doi, H. Chang, K.H. and Nakano, S. (2010a) Dispersal, connectivity of systems, and local conditions determine local zooplankton communities in artificially connected ponds. *Aquatic Biology* 10, 47-55
3. Doi, H. Chang, K.H., Ando, T. Imai, H. and Nakano, S. (2010b) Shoreline bank construction modifies benthic-pelagic coupling of food webs. *Ecological Engineering* 36, 601-604
4. Doi, H. Chang, K.H., Ando, T., Imai, H., Ninomiya I. and Nakano, S. (2009) Resource availability and ecosystem size predict food-chain lengths in pond ecosystems. *Oikos* 118, 138-144.
5. Polis, G.A. and Strong, D.R. (1996) Food web complexity and community dynamics. *American Naturalist* 147, 813-846.
6. Vander Zander, J.M. and Rasmussen, J.B. (2001) Variation in $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ trophic fractionation: implications for aquatic food web studies. *Limnology and Oceanography* 46, 2061-2066
7. Yoshioka, T., Wada, E. and Hayashi, H. (1994) A stable isotope study on seasonal food web dynamics in a eutrophic lake. *Ecology* 75, 835-846.