

## 기후변화와 담수 생태계: 변화와 대응

주기재 · 김동균\* · 윤주덕 · 정광석†

부산대학교 생명과학과 · \*서울대학교 컴퓨터연구소

### Climate Changes and Freshwater Ecosystems in South Korea

Gea-Jae Joo · Dong-Kyun Kim\* · Ju-Duk Yoon · Kwang-Seuk Jeong†

Department of Biological Sciences, Pusan National University

\*School of Computer Science & Engineering, Seoul National University

#### 1. 서론

인류 문명의 발달과 함께 경제 개발 및 자연환경의 이용, 훼손에 따라 발생하는 여러 가지 현상 또는 문제점은 오랜 기간 동안 기록되고 논의되어 온 문제 중 하나이다. 그 중에서 생태계는 자연환경의 이용이라는 측면에서 가장 영향을 받기 쉬운 대상임에 틀림이 없으며, 특히 인류는 동일한 생태계의 동·식물 구성요소와는 달리 일반적인 범주에서 그 성장패턴이 다를 뿐만 아니라 생태계에 가장 큰 영향을 미치는 생물중의 하나라고 할 수 있다.

이산화탄소의 배출량 증가, 오존층의 파괴, 해수면의 상승 및 난류성 어류의 온대 지방에서 출현, 태풍 및 허리케인에 따른 재해규모 및 집중강우 발생빈도 증가 등은 인간 활동과 더불어 생태계 변화와 밀접한 연관이 있는 것으로 알려져 있으며 동시에 지구온난화의 원인과 결과로 구분되고 있다. 미국 뉴올리언스에서 허리케인 카트리나로 인한 도시 전체의 피해라든지, 혹은 중동지역인 아랍에미리트에서 폭설과 같은 이상 기후현상은 전 세계적으로 잘 알려진 환경기후변화의 대표적인 예로 인식되고 있다.

지구온난화와 같은 환경변화는 지구상의 전체 생태계에 여러 가지 직·간접적인 영향을 미치고 있다. 최근 많은 연구자들에 의해 관련 결과들이 보고되고 있으며,<sup>1)</sup> 수생태계는 기상(온도 등)의 변화와 직접적으로 관련이 있는 것으로 나타난다.<sup>2,3)</sup> 국내의 경우에 있어서도 강우현상의 특징을 살펴보면 과거 1970년대부터 최근 2005년까지의 패턴에서 여름강우가 전체적으로 증가한 것을 찾을 수 있으며, 한강유역에서는 특히 6월 강우가 증가하였고, 낙동강유역에서는 8월 강우가 증가하였다.<sup>4)</sup> 이른 여름철 장마와 태풍 발생이 최근 약 30년간 유의한 수준에서 변화가 있었음을 의미하여, 나아가 기후변화 및 지구온난화 문제와 연관지어 생각해 볼 수 있다. 우리나라 수생태계는 대

부분 댐이나 하구둑이 연계된 조절강 시스템(regulated river system)이며, 강우패턴 변화는 직접적으로 수생태계에 영향을 주므로 그 변화에 대처하기 위하여 수자원관리정책을 비롯한 수생태계 관리 방안과 더불어 그 대응책이 논의될 필요성이 있다.

- 우리나라 담수생태계(강, 호수, 습지 등)는 지구 기후 변화에 따른 변화를 어떻게 받는가?
- 우리나라의 지질대(화강암, 석회암)는 온난화에 따른 변화(소하천의 유량, 건천화)에 따라 얼마나 영향을 받는가?
- 담수생태계 생물상 중 어떤 분류군이 가장 민감하게 반응하는가?
- 유량, 유속의 감소와 증가가 먹이사슬에 어떠한 영향을 줄 수 있는가?
- 온난화에 따른 댐-강-방류량간의 관계는 어떻게 변화하는가?
- 담수생태계 보존을 위해서 최소한 취해야 할 방안은 무엇인가?

#### 2. 지구온난화와 생태계 변화

최근 1세기 동안 생태계 변화와 관련하여 환경단체 혹은 전문가들이 우려하는 것 중의 하나가 바로 지구온난화 현상이다. 급속한 경제발달과 그로 인한 화석연료 사용증가는 이산화탄소 배출을 증가시켰고, 이로 인해 지구내의 평균온도가 상승하고 있다.

인류역사와 비교할 때 최근 약 1세기 동안의 급격한 지구온도의 상승은 인류에게 여러 가지로 환경적 위협요소가 되며, 일련의 변화들을 찾아볼 수 있다. 이산화탄소 증가는 지구온난화의 주범이며, 이로 인하여 강우량이나 하천 유량 및 유속에 대한 변화는 매우 다양하게 나타나고 있다.<sup>5)</sup> 기후변화로 인한 여러 가지의 현상 중에서 가장 혼

E-mail: pow5150@pusan.ac.kr

Tel: 051-510-2258

Fax: 051-581-2962

히 발견되는 것은 담수생태계에 있어서의 수문학적 양상 변화이다. 영국에서 하천 유량에 관한 조사에 따르면, 연중 하천 유량 및 유속 등이 2050년까지 약 20% 정도 증대될 것이라고 예측하였으며 또한 강우빈도가 높은 지역과 건조한 지역의 편차 또한 훨씬 커질 것으로 예상하였다.<sup>6)</sup> 이러한 전 세계적인 기후변화는 토질의 침식을 동반하는 지형적인 특징에 영향을 줄 수 있지만, 담수생태계에 있어서는 유역 전체의 수문학적인 변화를 통한 생물상의 반응에 영향을 주기 때문에 먹이사슬 전체에 혼란이나 교란을 야기할 수 있다.

최근 지구온난화와 관련하여 러시아 지역의 온대지역 범위가 넓어지고, 유럽지역에서 연중 얼음으로 덮여 있는 기간이 줄어들거나, 전 세계적으로 열대야 현상이 증가하는 것을 흔히 볼 수 있다.<sup>7)</sup> 또한 강우량이 증가한 지역이 전 세계적으로 약 2% 정도 나타나고 있으며, 유럽이나 미국 등지에서는 조류(avifauna)의 산란이나 부화시기가 빨라지고 있음이 통계적으로 유의한 수준으로 보고되고 있다.

특히 강우 빈도의 증가는 수생태계 변화와 밀접한 관련이 있으며 홍수의 빈도 또한 이상기후변화와 함께 전 세계적으로 증가하고 있다.<sup>8)</sup> 홍수재해에 대한 요인으로는 인간활동으로 인한 생태계의 물리적 변형도 그 요인이 될 수 있지만, 일차적으로 강우 패턴 변화가 최근 약 20여 년의 자료만 보더라도 쉽게 관찰이 가능하다. 우리나라의 경우에도 1990년대 초 중반까지만 하더라도 낙동강 하류를 중심으로 여름철의 남조류 번성이 큰 사회적 문제로 제기되었었지만, 최근 약 10년 동안에는 여름철 남조류 번성으로 인한 수질문제는 일부 호수 및 저수지를 제외하고는 국내 강생태계에서는 발견되지 않았다. 그 이유는 최근 약 10년 동안 여름철 강우량은 대체로 풍부하였으며, 특정한 해에 상대적으로 강우량이 적게 발생할지라도 조절강 시스템이라는 댐 요소의 특성에 의해 예년의 축적된 수자원을 이용하여 부분적으로 수질문제를 제어할 수 있었기 때문이다. 하지만 다른 측면에서는 홍수 재해 발생으로 인하여 여러 가지 사회경제적 손실이 크게 증가하였다. 이리하여 최근에는 홍수 피해를 줄이는 동시에 생태계 보전 및 복원에 초점을 두어 강생태계 주위에 습지를 조성하거나 복원하는 친변저류지 조성계획에 관한 연구가 진행되고 있다.

담수생태계 어류에 대한 국제적 혹은 국지적 분포에서는 그 온도의 내성 (tolerance)에 따라 어종들을 구분하고 있다. 하지만, 최근 지구온난화 현상으로 인해 이러한 카테고리 분류 체계가 흔들리고 있으며, 새로운 분포양상이 전개되고 있다. 수중생태계의 생물 분포는 새로운 종의 유입이나 이입에 의해 가장 쉽게 변화되는데, 이는 외래종의 입장에서 가장 적절한 생존전략을 위한 서식처를 찾기 위하여 다른 영역을 침범하는 것이며, 기후변화 및 지구온난화 현상은 저위도 지방의 어종들의 종다양성을 감소시키거나 사라지게 만드는 요인이 되고 있다.<sup>9,10)</sup> 또한 먹이가 되는 동·식물, 특히 수서곤충의 경우, 수온 변화에 따

른 우화 주기(life history)가 변하여, 먹이 연쇄로 인한 어류상의 변화도 향후 밝혀져야 할 사항이다.

지구온난화의 영향으로 2030년까지 남반구의 경우 0.5도, 북반구의 경우 2도까지 온도가 상승할 것으로 예측하고 있고, 21세기 후반까지는 1.1도에서 6.4도까지 지구 표면 온도가 상승할 가능성이 있는 것으로 나타났다.<sup>11)</sup> 이 같은 대기온도 상승은 수온 상승을 유발하여 수생태계의 변화를 초래하며<sup>12)</sup> 어류를 비롯한 수생태계 내의 생물들에게도 영향을 미친다. 대부분의 수생생물들은 변온동물로 수온변화는 이들 생물의 행동, 생리적인 측면들에 영향을 끼치게 되며,<sup>13,14)</sup> 결과적으로 수생생물의 재분포가 나타나게 된다. 기후 변화로 인한 수온상승은 생리적으로 체온조절 능력이 없는 담수어류에게도 큰 문제가 되며,<sup>15)</sup> 특히 연어나 송어와 같은 다수의 냉수성 어류(cold water fish)에 있어서는 서식처 소실과 관련하여 상당한 문제를 유발한다.<sup>16~18)</sup> 또한 수계 내에서만 이동할 수 있기 때문에 다른 육상동물에 비해 훨씬 피해를 입기 쉬운 실정이다.<sup>19)</sup> 일반적으로 담수어류 분포는 각 어류의 최대온도(maximum temperature)와 최소온도(minimum temperature)의 내성(tolerance)에 의해 조절된다.

만약 지구 온난화로 인해 수온이 상승하여 어류가 견딜 수 있는 수온을 넘어서게 되면 어류는 하천내의 다른 적합한 장소를 찾아 이동하거나 절멸하는 것이 일반적인 특징이다.<sup>20)</sup> 최근 IPCC와 다른 기관들에서 행해지고 있는 예측모델을 이용한 연구결과에 의하면 수온이 상승하면 냉수성 어종(cool water species)과 약냉성 어종은 줄어들고 온수성 어종(warm water species)은 분포역이 증가하는 경향을 나타내는 것으로 밝혀졌다.<sup>20,21)</sup> 또한 냉수에서 적응하지 못했던 외래종들의 적응을 가능하게 하여 이들의 정착을 야기하기도 한다.<sup>22)</sup>

한편 해양에서도, 군집구조 및 분포 그리고 생물계절학적인(phenological) 측면에서 지구온난화로 인한 많은 변화가 있어왔다. 과거 약 50여년 동안 북동대서양에서의 플랑크톤 군집양상이 북쪽으로 이동해 왔으며,<sup>23)</sup> 갈피(seagrass) 분포도 해수면 온도 상승에 따른 환경스트레스에 따라 변화되어 왔다.<sup>24)</sup>

종합적이고 넓은 관점에서 볼 때, 기후변화나 지구온난화 현상은 홍수, 가뭄 그리고 생물계절학(phenology)에서의 불규칙적인 현상과 같은 갑작스러운 생태학적 변화, 혹은 예상 밖의 자연재해 빈도를 증대시키는 가장 큰 요인으로 꼽힌다. 생태계 내에서 구성요소 및 기능의 변화는 호수나 하천 생태계에서 시공간적인 변이를 유발하는데, 이는 수문학적 요소와 같은 물리적인 요소의 변화에서부터 생태학적 핵심(keystone species)과 같은 생물학적인 요소의 변화에 이르기까지 다양하게 영향을 미칠 수 있다.<sup>25,26)</sup>

### 3. 기후변화와 우리나라 담수생태계의 변화

우리나라 담수생태계는 동아시아권의 전형적인 기후양

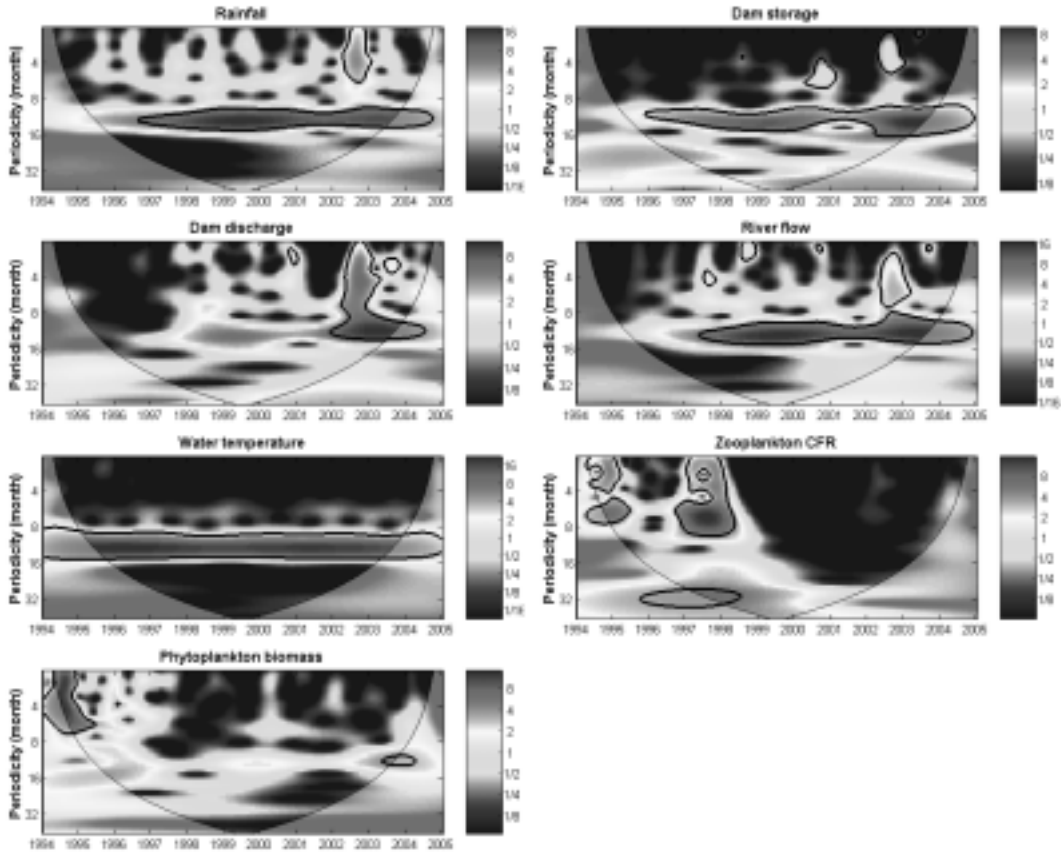


Fig. 1. Periodicity analysis of hydrology and plankton dynamics using wavelet transformation in the lower Nakdong River (Mulgum, 1994-2004, monthly averaged data).

상인 장마와 태풍에 영향을 받는다. 이와 관련된 정보가 상대적으로 많이 축적된 담수생태계는 소양호와 낙동강 하류로, 장기생태 연구를 통한 담수생태계의 변화를 다각도로 추적할 수 있다. 특히, 낙동강은 기후변화와 함께 물리적인 형태 변화를 동시에 관측할 수 있는 조절강 생태계의 좋은 사례로, 기후변화에 따른 강수량 변화에 민감하게 반응하는 담수생태계이다. 담수생태계의 1차생산자 역할을 하는 식물플랑크톤 군집동태는 1987년 하구둑의 축조에 따른 물리적 변화에 의해 크게 바뀌어 여름 남조류의 대변성과 겨울 규조류 대변성이 1990년대 초반에 극심하게 발생하는 양상을 보였다. 하지만 1990년 후반부터 발생하기 시작한 여름 집중강우 현상(장마 및 태풍을 포함한 국지적 게릴라성 강우 포함)은 식물플랑크톤 군집 동태를 다시 한번 크게 변화시키게 되었다. 여름에 발생하는 강우에 의해 남조류 대변성이 크게 억제되며, 몇 년 동안 발생한 많은 강우는 충분한 댐 저수량으로 전환되고, 가뭄이 발생한 연도에도 적절한 유량이 보장되어 남조류 대변성이 저해되는 현상을 보였다.<sup>27)</sup> 증가한 댐 방류량은 겨울 규조류 대변성 역시 저감시키는 양상을 보였으며, 이는 낙동강 생태계의 미생물 먹이환 동태에도 영향을 미쳤다.<sup>28)</sup> 그리고, 댐방류량의 연도별 변화는 동식물플랑크톤간 먹이망 관계에도 영향을 미쳐(Fig. 1), 이에 대한 기후변화의 영향도 파악하여야 할 필요가 있다.

지구온난화로 인한 기후변화와 관련하여 담수생태계의 플랑크톤 동태변화에도 영향을 미치는 것을 밝힌 연구결과에 따르면 봄철 특정 규조류(*Stephanodiscus hantzschii*)의 성장패턴이 기후변화에 따른 온도변화와 밀접한 관련이 있으며, 규조류 번성 규모(peak)와 기간(duration)이 기후변화에 따라 변동하는 것을 잘 나타내었다.<sup>29)</sup> 이는 한강 및 낙동강에서 번성하고 있는 겨울철 규조류 번성과도 매우 밀접한 유사성을 가지고 있다. 현재 우리나라에서는 기후변화와 관련하여 규조류 번성의 규모 및 기간에 대한 연구가 자세히 진행된 바가 없으나, 공간적 패턴 혹은 매년마다 규조류 패턴의 변화가 여러 가지 환경 조건에 따라 다르게 나타나는 것은 국내연구에서도 소개된 바가 있다.<sup>27,28)</sup>

기후변화를 가정하여 기존에 개발된 생태모형<sup>30)</sup>을 이용한 시나리오 분석을 수행한 결과, 댐 방류량과 수온의 변화는 여름철 식물플랑크톤 대변성에 크게 영향을 줄 수 있는 것으로 보인다. 낙동강의 상류에 위치한 안동댐의 방류량을 줄이고 하류부의 수온을 3도 가량 증가시켰을 때, 남조류의 대변성이 여름 초반부터 크게 발생할 수 있으며, 이는 기후변화에 의한 플랑크톤 군집동태 변화로 이어질 수 있음을 반증한다(Fig. 2).

낙동강에 발생한 지난 30년간의 강수량 자료를 분석하여 본 결과, 통계적으로 유의한 상태에서 여름(6~8월) 강수량은 증가하고 겨울(12~2월) 강수량은 감소하고 있는

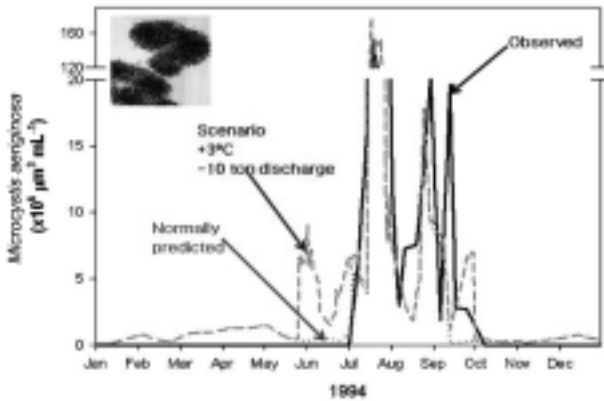


Fig. 2. Scenario analysis based on the ecological model in the lower Nakdong River (scenario: increased temperature, decreased dam discharge).

것으로 나타났다. 이는 상기한 여름 강우량의 중요성을 더욱 부각시킬 수 있는 결과로, 낙동강과 같은 조절강 생태계가 여름 강우량에 크게 의존적일 경우, 기후변화 등에 따른 여름강우량의 감소가 발생할 때 문제가 생길 수 있음을 시사한다. 비록 전년도의 충분한 저수량에 의해 어느 정도 완충효과는 발생하겠지만, 1994~1996년의 3년간 연속된 가뭄과 같은 장기적인 가뭄 현상이 다시 발생할 경우에 대한 취약성은 여전히 남아있는 실정이다. 따라서, 기후변화에 의한 담수생태계 변화와 앞으로의 현상에 대한 대응책이 필요하다고 하겠다.

한편, 기후변화 및 지구온난화는 온대기후 수중생태계에 어류 분포와 관련하여 변화를 야기시키고 있다. 담수생태계의 어종 분포 및 변화는 온도 조건에 따라 그 서식처를 달리하게 만드는 중요한 요소 중의 하나라고 할 수 있다. 우리나라 열목어 서식 남방한계선에 위치한 낙동강 상류의 열목어(*Brachymystax lenok tsinlingensis*)는 수온 상승 현상이 발생하면 생육에 적절한 온도를 위하여 지속적으로 상류로 이동하게 되겠지만 단절된 수계로 인하여 결과적으로 절멸하게 될 것이고, 현재 수온문제로 인하여 국내 수계에 정착하지 못하고 있는 외래종인 나일틸라피아(*Oreochromis niloticus*)는 적절한 생육온도를 얻게 되면서 자연스럽게 정착할 수 있게 된다. 향후 이와 같은 문제는 서식하는 온도의 범위가 넓지 않고 서식처가 제한되어 있는 고유종(endemic species)에서 훨씬 심하게 나타날 것으로 판단되며 장기적으로는 국내 담수어류의 종다양성을 감소시키는 문제를 야기하게 될 것으로 판단된다.

또한, 우리나라에 분포하고 있는 냉수성 어종의 분포는 기후변화에 의한 온난화 현상과 밀접한 관계를 갖는 것으로 예상된다. 특히 한강 수계에 분포하고 있는 냉수성 어종인 열목어, 금강모치, 독중개 및 한독중개 등은 현재에 비해 수온이 상승할 경우 분포 지역이 매우 제한될 것으로 예상된다. 수온은 어류의 분포에 직접적인 영향을 미치며, 장기적으로 기후변화에 의한 수온상승이 진행될 경우, 우리나라의 어종 분포 양상이 크게 달라질 것으로 파악되어, 이에 대한 대책 역시 요구된다.

#### 4. 생태계 변화에 대한 대응방안

지구상에 있는 많은 생태계 변화에 관련하여 산성비, 대기오염, 오존파괴 등의 여러 가지 환경문제들이 있을 수 있지만 지구온난화 문제는 특히 지구 전체의 생태계에 국소적인 영향이 아닌 생태계에 전반적인 영향을 고려하여 그 방안을 모색해야 할 것이다. 이에 대하여 다음 네 가지 관점에서 그 대응책을 마련할 수 있다(Fig. 3).

##### 4.1. 지구온난화에 대한 생태계 변화 인식

지난 수십 년 동안 기후변화를 비롯하여 생태계가 많은 영향을 받아왔으며 지구온난화에 따른 생태계의 여러 가지 변화들은 수많은 연구나 사례를 통해서 지금 현재에도 전 세계 곳곳에서 보고되고 있다. 기후변화로 인한 홍수나 해수면 상승으로 인한 토지면적의 축소 등은 널리 알려져 있는 사실이지만, 그것을 심각한 생태계 문제로까지 연결 지어 생각하는 이는 많지 않다. 하지만, 이러한 사실은 현재 일어나고 있는 사실이며 분명한 현실이다. 생태계 변화와 같은 지구적인 차원에서의 변화는 한순간에 대응책으로 오랜 기간 동안 변화되어온 환경을 짧은 시간 내에 돌이키는 것은 어려우며, 미리 예측하고 그에 대응하는 방안을 마련하기 위해서는 지구온난화에 따른 우리 주변 생태계 변화를 심각하게 인식하여 그 대응책을 생각해 볼 필요성이 있다.

##### 4.2. 국가장기생태연구와 타 분야간의 학제간 연구

생태계의 변화는 순간적인 상황 변화에 기인하기도 하지만, 특히 기후변화와 같은 경우는 오랜 시간동안 모니터링 하여야 파악이 가능한 경우가 많다. 국제적으로 장기생태연구 네트워크가 이미 오래전부터 구축되어 다양한 연구 지점에서 장기생태연구가 이루어지고 있으며, 국내에서도 5년 전부터 국가 장기생태연구사업(Korea National Long-Term Ecological Research)이 담수, 육상 및 연안 생태계에서 이루어지고 있다. 이러한 연구 시스템이 지속적으로 이루어질 경우 우리나라에서 필요로 하는 정보를 국가생태연구 자료와 기후변화자료간의 비교를 통하여 추출할 수 있다.

장기생태연구는 장기간 축적된 자료를 바탕으로 진행되는 것이며, 따라서 매우 복잡한 변이양상을 포함하기 마련이다. 생태학적 변화는 어느 순간에 축적된 자료에서 밝혀지게 되지만, 그 원인을 분석하기 위해서는 다양한 외생변수를 동시에 고려하여야 한다. 즉, 생태학에서 추출된 자료를 보다 효과적으로 분석할 수 있는 분야간의 학제간 연구가 필수적이다.

##### 4.3. 변화에 대응하기 위한 예측 및 분석 프로그램 등의 개발 및 투자

지구온난화와 같은 기후변화가 담수생태계에 미치는 영향은 실험적으로 해석하기에는 상당히 어려운 문제이다.

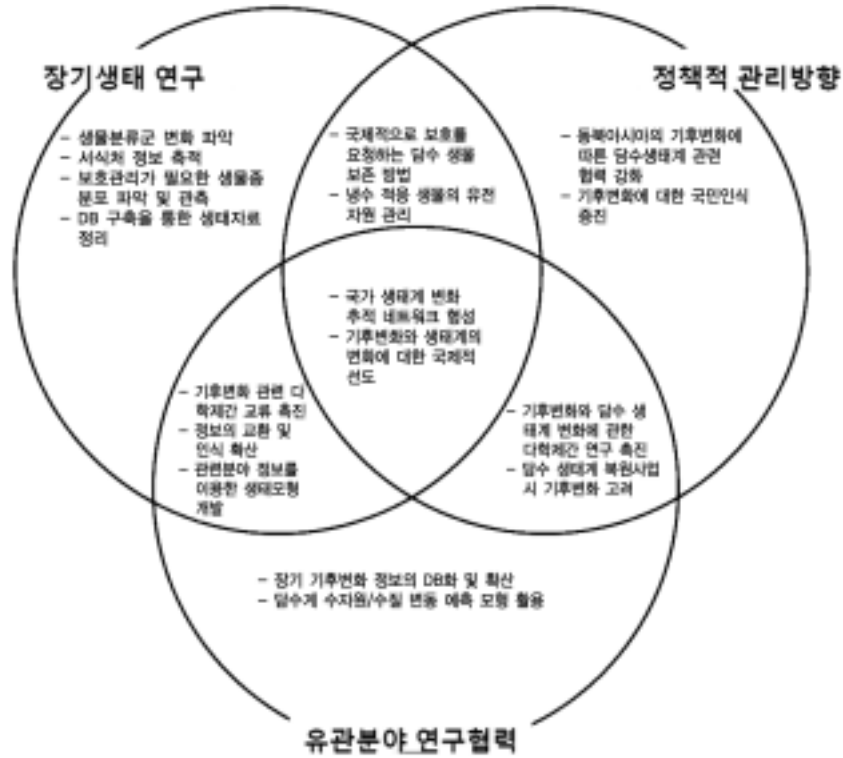


Fig. 3. Climate change and adaptive strategies among LTER, multi-disciplinary approach and ecosystem management.

특히 국내 담수생태계와 같이 여름에 강우가 집중되는 경우에는 계절성 및 실험구성 자체의 어려움 때문에 더욱 연구가 어려운 실정이다. 따라서 모델링과 같은 방법을 통해 담수생태계의 구조와 기능이 어떻게 지구온난화에 반응하는지를 평가하는 것이 효과적인 방법이라 할 수 있다.

생태계를 반영할 수 있는 생태모형(ecological model)은 수질 모형 등과는 달리 생물정보가 입력되어 환경과 생물과의 관계를 파악할 수 있는 모형이다. 즉 모형의 구조에 생물정보를 반영할 수 있는 변수를 이용하는 것이 기존의 하천모형과 다른 점이라 할 수 있다. 기존의 담수생태계 모형의 경우, 특히 하천생태계에서, 다양한 수리수문학적 인 요소와 수질, 그리고 식물플랑크톤 생체량(Chl. a 농도 등)간의 관계를 수학적으로 구조화한 경우가 많으며, QUAL2, WASP, SWAT 등이 그것이다. 하지만 이러한 모형들은 생물과 환경과의 복잡한 관계를 정확하게 반영하기 어려우며, 따라서 보다 효율적인 생태모형 개발 기법이 필요하게 되었다.<sup>31,32)</sup> 그 대안으로 제시된 것이 바로 생태정보학(Ecological Informatics)이며, 이 분야에서는 발전된 컴퓨터 공학 및 전산 알고리즘을 이용하여 생태계의 구조와 기능의 변화를 해석하고 예측할 수 있는 생태모형의 개발에 초점을 맞추고 있다.

#### 4.4. 생태계 보전 프로그램 개발 및 국제적 환경네트워크 활동 증진

현재 알려진 바로는 지구온난화의 주 원인은 이산화탄소 배출에 의한 온실효과로 파악되고 있으며, 이를 저감시키

기 위하여 화석연료 사용을 자제하고 새로운 에너지를 개발하는 데에 많은 노력을 기울이고 있다. 또한 친환경적 가치의 새로운 인식 전환은 생태계 복원으로 주위에 자연 환경을 조성하므로 해서 생태계 보전에 여러 가지로 도움이 되고 있다. 우리나라와 같이 훼손된 도시하천 복원 사업 등의 하천 복원사업이 활발하게 진행되는 경우, 하천의 수온 상승을 억제하기 위해 하천 수변 식생대(riparian zone)를 조성하도록 하는 등의 정책적인 고려가 필요하다.

또한 미래 생태계 보전을 위하여 지구온난화에 대한 생태계 보전활동을 알릴 수 있는 여러 가지 프로그램 개발을 통하여 자연생태계 내에서 친환경적으로 에너지를 개발하여 인간에게 유용한 방향으로 생태계 보호하고 현명하게 이용할 수 있도록 해야 할 것이다. 그리고 국제적인 환경네트워크에 동참하여 지구 환경문제에 대해 국제사회에 이바지하면서 우리나라의 환경문제에 대한 국제적 위상을 높이는 것도 향후 대안이 될 수 있을 것이다.

#### 참고 문헌

1. Vitousek, P. M., "Beyond global warming: ecology and global change," *Ecology*, **75**(7), 1861~1876(1994).
2. Ferrari, M. R., Miller, J. R., and Russell, G. L., "Modeling changes in summer temperature of the Fraser River during the next century," *J. Hydrol.*, **342**(3-4), 336~346 (2007).
3. Komatsu, E., Fukushima, T., and Harasawa, H., "A modeling approach to forecast the effect of long-term climate

- change on lake water quality," *Ecol. Modelling*, **209**(2-4), 351~366(2007).
4. Chang, H. and Kwon, W.-T., "Spatial variations of summer precipitation trends in South Korea, 1973-2005," *Environ. Res. Lett.*, **2**, 1~9(2007).
  5. Williams, P., "Adapting water resources management to global climate change," *Clim. Change*, **15**(1), 83~93(1989).
  6. Arnell, N. W. and Reynard, N. S., "The effects of climate change due to global warming on river flows in Great Britain," *J. Hydrol.*, **183**(3-4), 397~424(1996).
  7. Ochoa, G. and Hoffman, J. Climate the force that shapes our world and the future of life on earth, Rodale International Ltd., London(2005).
  8. Dartmouth Flood Observatory, "Global and regional analyses." [http://www.dartmouth.edu/%7Efloods/archiveatlas/floodnumber85\\_03.htm#](http://www.dartmouth.edu/%7Efloods/archiveatlas/floodnumber85_03.htm#)
  9. Johnson, T. B. and Evans, D. O., "Size-dependent mortality of young-of-the-year white perch: climate warming and invasion of the Laurentian Great Lakes," *Trans. Am. Fish. Soc.*, **119**, 301~313(1990).
  10. Shuter, B. J. and Post, J. R., "Climate population variability, and the zoogeography of temperate fishes," *Trans. Am. Fish. Soc.*, **119**, 314~336(1990).
  11. (IPCC), I. P. o. C. C. Climate Change 2007, TERI press, Sweden(2007).
  12. Poff, N. L., Brinson, M. M., and Jr., J. W. D., Aquatic ecosystems & global climate change: potential impacts on inland freshwater and coastal wetland ecosystems in the United States., Pew Center on Global Climate Change, Arlington, Virginia(2002).
  13. Sweeney, B. W., Jackson, J. K., Newbold, J. D. et al., "Climate change and the life histories and biogeography of aquatic insects in eastern North America," Global climate change and freshwater ecosystems, Firth, P. and Fisher, S. G.(eds.), Springer-Verlag, New York, pp. 143~176(1992).
  14. Rahel, F. J., "Using current biogeographic limits to predict fish distributions following climate change," Fisheries in a changing climate, Symposium 32, McGinn, N. A. (ed.), American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, pp. 99~110(2002).
  15. Wood, C. M. and McDonald, G. Global Warming - Implications for Freshwater and Marine Fish, Cambridge University Press, Cambridge(1997).
  16. Schindler, D. W., Beaty, K. G., Fee, E. J., Cruikshank, D. R., DeBruyn, E. R., Findlay, D.L., Lindsey, G. A., Shearer, J. A., Stainton, M. P., and Turner, M. A., "Effects of climatic warming on lakes of the central boreal forest," *Science*, **250**(4983), 967~970(1990).
  17. Rahel, F. J., Keleher, C. J., and Anderson, J. L., "Potential habitat loss and population fragmentation for cold water fish in the North Platte River drainage of the Rocky Mountains: response to climate warming," *Limnol. Oceanogr.*, **41**(5), 1116~1123(1996).
  18. Stefan, H. G., Fang, X., and Eaton, J. G., "Simulated fish habitat changes in North American lakes in response to projected climate warming," *Trans. Am. Fish. Soc.*, **130**(3), 459-477(2001).
  19. Grant, E. H. C., Lowe, W. H., and Fagan, W. F., "Living in the branches: population dynamics and ecological processes in dendritic networks," *Ecol. Lett.*, **10**(2), 165~175(2007).
  20. Eaton, G. J. and Scheller, R. M., "Effects of climate warming on fish thermal habitat in streams of the United States," *Limnol. Oceanogr.*, **41**(5), 1109~1115(1996).
  21. Mohseni, O., Stefan, H. G., and Eaton, J. G., "Global warming and potential changes in fish habitat in U.S. streams," *Climatic Change*, **59**, 389~409(2003).
  22. Rahel, F. J. and Olden, J. D., "Assessing the effects of climate change on aquatic invasive species," *Conserv. Biol.*, **22**(3), 521~533(2008).
  23. Hays, G. C., Richardson, A. J., and Robinson, C., "Climate change and marine plankton," *Trend. Ecol. Evol.*, **20**(6), 337~344(2005).
  24. Short, F. T. and Neckles, H. A., "The effects of global climate change on seagrasses," *Aquat. Bot.*, **63**(3-4), 169~196(1999).
  25. Firth, P. and Fisher, S. G., Climate Change and Freshwater Ecosystems, Springer-Verlag, New York(1991).
  26. Carpenter, S. R., Complex Interactions in Lake Communities, 283, Springer-Verlag, New York(1988).
  27. Jeong, K.-S., Kim, D.-K., and Joo, G.-J., "Delayed influence of dam storage and discharge on the determination of seasonal proliferations of *Microcystis aeruginosa* and *Stephanodiscus hantzschii* in a regulated river system of the lower Nakdong River(South Korea)," *Water Res.*, **41**, 1269~1279(2007).
  28. Kim, D.-K., Jeong, K.-S., Whigham, P. A. et al., "Winter diatom blooms in a regulated river in South Korea: explanations based on evolutionary computation," *Freshwater Biol.*, **52**, 2021~2041(2007).
  29. Sommer, U. and Lengfellner, K., "Climate change and the timing, magnitude, and composition of the phytoplankton spring bloom," *Glob Change Biol.*, **14**(6), 1199~1208(2008).
  30. Kim, D.-K., Cao, H., Jeong, K.-S. et al., "Predictive function and rules for population dynamics of *Microcystis aeruginosa* in the regulated Nakdong River(South Korea), discovered by evolutionary algorithms," *Ecol. Modelling*, **203**(1-2), 147~156(2007).

31. Jeong, K.-S., Kim, D.-K., and Joo, G.-J., "River phytoplankton prediction model by Artificial Neural Network: Model performance and selection of input variables to predict time-series phytoplankton proliferations in a regulated river system," *Ecol. Inform.*, **1**, 235~245(2006).
32. Jeong, K. S., Recknagel, F., and Joo, G. J., "Prediction and elucidation of population dynamics of the blue-green algae *Microcystis aeruginosa* and the diatom *Stephanodiscus hantzschii* in the Nakdong river-reservoir system (South Korea) by a recurrent Artificial Neural Network," *Ecological Informatics: Scope, Techniques and Applications*, Recknagel, F.(ed.), Springer, Berlin, pp. 195~213 (2006).