

기후변화와 담수생태계¹⁾

황순진 · 신재기^{*2)}

건국대학교 환경과학과, *한국수자원공사 수자원 연구원

서 론

지구환경 문제 중에서 가장 광범위하고 극단적인 결과를 동반하는 것이 기후변화이며 이는 인류를 포함하는 지구상 생명체의 생존에 결정적인 영향을 미칠 수 있다. 최근 세계적으로 뿐만 아니라 우리나라에서도 나타나고 있는 큰 홍수와 가뭄의 연속, 폭설 등의 이상기후의 징후와 현상은 기후변화의 무서움과 피해에 대한 경각심을 고조시키고 있다. 이에 세계의 각국에서 국제 협약과 회의를 통해 기후적으로 지속가능한 지구적 차원의 대응책과 해결방안을 마련하기 위해 노력하고 있다. 그러나 그 미래에 대해서는 아무도 확신할 수 없으며 전망이 그리 밝지만은 않다는 것이 전문가들의 견해이다.

기후변화는 자연적인 결과로 나타날 수도 있으나, 가장 뚜렷한 분기점은 18세기 산업혁명으로, 이 시기에 발전의 동력원으로서 에너지 생산과 화석연료의 사용이 급격하게 증가하였다. 특히, 화석연료의 사용 증가는 대기 중 이산화탄소(CO₂) 등 온실 유도기체의 농도를 가중시켰다. 대기 중 CO₂ 농도는

산업혁명 이후부터 최근까지 약 31% 정도 증가하였다(Houghton *et al.*, 2001). CO₂ 외에도 메탄(CH₄), 일산화질소(NO)와 같은 미량기체 농도도 현저하게 증가하였다. 우리나라에서도 1991년부터 2000년까지 10년 간 제주도에서 관측한 CO₂ 농도가 358 ppm에서 374 ppm으로 4.5% 증가하였으며(기상청, 2002), 이러한 양상은 전 세계적인 경향과 유사하다. 온실가스의 증가는, 태양으로부터 지구 표면에 유입되는 에너지를 대기에서 1차 통과시키고, 지구에서 외계로 방출하는 에너지는 대기의 기층에서 더욱 흡수하는 결과를 점진적으로 누적시켜 지구온난화의 온실효과로 발전되었고, 이는 지구의 기온을 상승시킨다는 관점을 부각시켰다.

대표적으로 지구온난화와 그의 직·간접적인 결과로 나타나는 기후변화는 국지적, 대규모적으로 지구환경을 불안정하게 변화시키고 이에 따라 피해를 유발하고 있다(표 1). 특히, 물환경에 대한 기후변화는 막대하다. 예를 들면, 지구의 온도상승은 강수패턴을 변화시켜 수문학적 변화와 함께 해양과 대기의 에너지 변화를 유도하여 지역적인 홍수, 태풍, 가뭄 등의 기상변화를 초래한다.

1)Climate Change and Freshwater Ecosystems

2)HWANG, Soon-Jin, Professor, Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul, Korea;

E-mail: sjhwang@konkuk.ac.kr

SHIN, Jae-Ki, Senior Researcher, Korea Institute of Water and Environment, KOWACO, Daejeon, Korea

표 1. 기후변화가 생태계, 수자원 및 보건에 미치는 영향과 그에 따른 대응조치

기후변화의 영향	대응 조치
- 작물재배가능 지역의 북상 - 농업생태계 생산성 및 안정성 장애	- 농작물 재배방법 및 적응성 품종 육성 - 지역별 작물재배 체계의 변화
- 산림식생대의 이동 및 구조변화 - 산림재해 및 병해충 발생추이의 변화	- 생물다양성 보전체계 수립 - 산림다양성 유지 및 재해방지 대책 수립
- 해양생태계와 수자원의 변동 - 연안침식과 시설물 유실 - 해수면 상승	- 수산자원 변동에 대한 대응방안 수립 - 연안침식 및 구조물 방어대책 수립
- 홍수, 가뭄 및 태풍에 의한 피해증가 - 수자원의 양적 질적 피해증가	- 재해 대응방안 수립 - 수자원 확보대책 수립
- 더위로 인한 스트레스와 질병증가 - 전염병, 질병 분포 및 이동변화	- 질병예방 활동의 강화 - 전염병 유행 예측사업 시행

*자료 : 권원태, 2005. 기후변화의 과학적 이해: 현황, 전망 및 대응(수정).

물에 관한 한 기후변화는 수리·수문학적 변화와 함께 수질 및 생태계 변화 등 지구 환경을 구성하는 모든 매체(대기, 물, 토양)를 통해 환경적 피해를 초래한다.

본고에서는 기후변화가 물환경에 미치는 영향, 특히 담수생태계에 대한 영향을 고찰함으로써 향후 기후변화와 지구온난화에 따른 수생태계 변화를 예측하고 수환경관리에 도움이 되고자 한다.

기후변화의 역사와 형태

세계적인 기후변화는 인류역사 이전부터 빙하기와 온난기가 반복되는 자연적인 변화를 거쳐 왔다. 최근 10,000년 동안 기후는 안정적이었으나 그 이전에는 빙하기와 간빙기가 100,000년을 주기로 교차하는 기후변동기가 있었다. 20세기에 나타난 기후변화는 지역과 시간에 따라 복잡한 형태로 나타나지만, 그 변화의 폭이 과거 10,000년 동안 나타난 변화의 폭에 비하여 매우 크다는 것이 가장 위협적인 요소라 할 수 있다.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 기후변화에 관한 정부간 협의체) 보고서(2001)에 따르면 20세기 동안에 지구 평

균기온은 0.6°C 상승하였으며, 그에 따라 고산지대의 빙하, 겨울철 적설면적이 감소하였으며, 또한 겨울이 짧아지고 봄의 개화시기가 빨라지는 등 여러 형태의 변화가 나타나고 있다. 또한 대형 자연재해, 해수면상승, 산림 등의 직접적인 피해가 나타나고 있다. 우리나라에 근대적인 기상관측이 시작된 이래, 1904년 이후 2000년까지 약 100년 간 기온변화를 분석하면 평균기온은 약 1.5°C 상승하여, 우리나라에서 나타난 지구온난화 추세는 전지구 온난화 추세를 상회하고 있다(기상연구소, 2002).

과거와 현재의 기후변화를 기초로 할 때 미래의 기후도 변화할 것이며 온실가스가 증가할 것이라는 데는 의심의 여지가 없다. 그러나 그 정도가 얼마 만큼인가 하는 것은 불확실하다. 그 이유는 지역적인 변화와 강수 변화에 대한 예측이 매우 어렵기 때문이다. 그러나 기후변화를 유발하는 여러 가지 요인들에 대한 충분한 이해와 적극적인 대책을 통해 미래의 기후변화와 지구온난화를 감소시킬 것이라는 것은 확실하다. 기후변화와 이에 따른 물환경과 생태계의 변화를 보다 정확하게 예측하기 위해서는 많은 연구와 적극적인 대응이 필요하다.

한국의 기후변화

기온변화

우리나라는 1904년 5개소의 관측을 시작으로 정규 기상관측을 시작하였다. 1911년 이후 우리나라 7개 지점의 평균기온은 100년에 1.5°C가 상승하였는데, 이는 세계 평균기온과 비교해 볼 때 약 2~3배 빠른 경향이다(기상청, 2002). 연평균 기온의 변화 경향도 전 세계적 경향과 같은 추세를 보이며 1910~1950년과 1980년 이후 2단계로 기온이 상승하였다. 이 중 일부는 도시화에 의한 효과가 포함된 것으로 분석되며 도시화의 효과는 20~30% 정도인 것으로 추정된다(김등, 1999).

우리나라 주요 지역에서 연평균 기온의 증가패턴을 보면, 중부북부(수도권, 강원도), 중부남부(대전, 충청권) 및 남부(영호남, 제주권)의 위도에 따른 기온 차이가 있고, 1961년부터 2004년까지 전국적으로 증가한 경향을 보이고 있으며, 1991~2004년 사이에 더욱 증가한 결과를 보이고 있다(그림 1).

우리나라에서 기온상승의 특징은 과거와 비교할 때 겨울철의 기온이 큰 폭으로 상승한 반면, 여름철 기온은 큰 차이가 없다는

것이다. 그 세부적인 내용으로 1980년대 후반부터 겨울철에 영하 10°C 이하의 매우 추운 날이 관찰되는 출현빈도가 현저하게 감소한 것이다(기상청, 2002). 또한, 봄의 도래시기가 빨라졌고, 겨울이 짧아지는 계절의 변화가 특징으로 나타나고 있다. 이러한 결과는 1920년의 시기에 비해 개화 시기가 약 2~3주 정도 빨라지는 경향으로도 더욱 반영되어진다(기상연구소, 2001).

강수량은 기온보다 상대적으로 소규모의 대기운동에 의한 영향을 받기 때문에 강수량의 변화는 기온의 변화보다 시·공간적으로 훨씬 복잡하게 진행된다. 20세기 동안 전 지구의 강수량 변화는 평균적으로 볼 때 뚜렷한 양상을 보이지 않는다. 반면에 전반적으로 열대지역보다는 중·고위도지역의 증가 추세가 크게 나타나며, 대륙의 서쪽보다는 동쪽에서 증가가 크게 나타난다. 아프리카의 사하라사막 부근에서는 강수량이 큰 폭으로 감소한 반면에 기온이 높아진 북반구 고위도 육지에서는 증가한 것으로 나타났다. 우리나라 부근의 동아시아지역은 증감현상이 혼재하는 복잡한 양상을 보이기는 하지만 10년에 0.5~1.0% 정도 증가하는 추세이다(Houghton *et al.*, 2001).

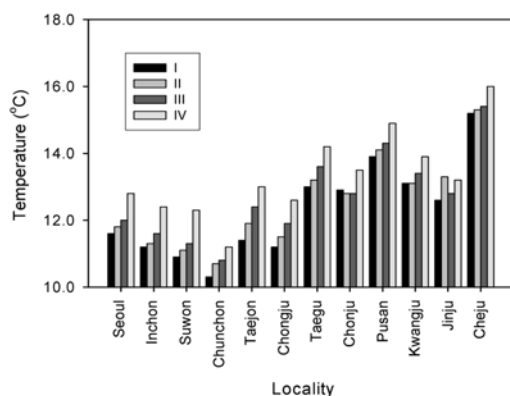


그림 1. 우리나라 주요 지역의 연평균 기온의 변동.
(I: 1961-1970년, II: 1971-1980년, III: 1981-1990년, IV: 1991-2004년).

강수량 변화

온대 몬순기후대에 위치하고 있는 우리나라는 계절적인 강우현상이 뚜렷한 특성을 보이고 있다(그림 2). 기후변화에서 가장 현저하게 관찰되는 것은 강수량의 변화로 볼 수 있고, 이것은 여름철의 집중호우와 겨울철의 폭설이 해당될 수 있다. 집중호우는 태풍에 의한 영향이 직·간접적으로 반영되고 있으며, 최근 들어 국지적인 폭우도 빈번하게 발생하고 있다.

1911년 이후 우리나라의 평균 강수량 변화는 경년변화가 심하게 나타나지만 평균적

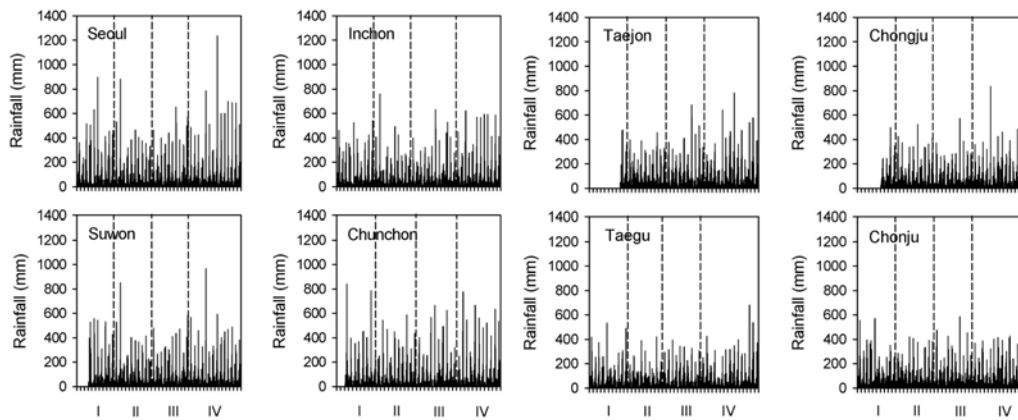


그림 2. 우리나라 중북부 지역(서울, 인천, 수원, 춘천) 및 중남부 지역(대전, 청주, 대구, 전주)의 강수량 변동.
(I: 1961-1970년, II: 1971-1980년, III: 1981-1990년, IV: 1991-2004년).

으로 조금씩 증가하고 있는 추세에 있다. 평균 강수량의 장기변화에서 1920년대 이후 10년 단위로 강수량, 강수일수 및 강수강도를 비교 분석한 결과 1920년 이후 우리나라에서 강수량은 증가하고 있는 추세를 보이는 반면, 강수일수는 다소 감소하는 경향을 보인다(그림 2). 이것은 결과적으로 일 강수량의 세기가 증가하였음을 의미한다. 수치적으로 1920년대에 비하여 1990년대의 강수량은 약 7% 증가했으나, 강수일수는 14% 감소하여, 결과적으로 일 강수강도는 약 18% 강해진 것으로 분석하고 있다(Min *et al.*, 2003).

또한, 계절별로 볼 때 강수량은 여름철에 현저하게 증가한 경향을 보였고, 다른 계절은 증감의 변동이 크지 않았다(그림 2). 반면에, 강수일은 모든 계절에서 감소하였고, 이에 따라 강수의 강도는 모든 계절에서 증가하였다. 1971~1980년과 1992~2001년의 두 기간에 대하여 일강수량의 출현 빈도를 비교한 결과로부터, 최근 들어 과거보다 50 mm 이하의 일강수량 출현빈도는 상대적으로 적게 나타나는 반면, 100 mm 이상의 집중호우는 더욱 자주 발생하고 있다. 특히 일 강수량 150 mm 이상의 집중호우는 30년 전

에 비해 2배 이상 증가하였고(기상청, 2002), 강수량 400 mm 이상은 1990~2004년 동안에 빈도가 70%를 차지하였다. 종합적으로 최근의 강수량 증가는 여름철에 잦은 집중호우에 기인한 것으로 결론지을 수 있다.

담수환경에 대한 기후학적 영향

기후변화로 인한 담수(freshwater)의 수환경에 대한 영향은 수문학에 근거한 양적문제(수자원)와 수질과 생태계에서 다양하게 나타난다. 수자원의 측면에서 기후변화는 대기 기온의 상승·하강과 강수량의 많고 적음 차이에 의해 홍수와 가뭄 현상의 주된 영향으로 반영될 것이다.

기후변화는 단순히 수량에만 영향을 미치는 것이 아니라 수질에 대해서도 결정적인 영향을 미치게 된다(Kalff, 2004). 기온의 상승은 수온상승, 결빙단축, 성층화의 장기화, 유량감소, 체류시간 증가, 수위감소, 습원면적 감소, 발전감소 및 이용 가능한 수자원의 감소 등 많은 부분에서 연쇄적이고 복합적인 영향을 야기할 수 있다. 또한, 강수량의 규모에서 장마기의 호우는 비강우기에 축적된 비점오염물질을 일시에 이동시켜 수질오염

을 더욱 가중시키는 결과를 초래하게 된다. 이러한 부분은 우리나라에서도 매년 발생하고 있어 최근에 이에 대한 많은 관심이 고조되고 있다.

장마와 태풍으로 나타나는 몬순기의 집중호우는 강수량의 계절적 편중에 대한 주요한 요인이 될 뿐만 아니라, 강도와 지속횟수에 따라 우리가 이용할 수 있는 수자원의 수질을 좌우하는 자연적 오염의 제공자로 작용할 수도 있다.

수질의 정도는 생물분포 및 서식공간과 같은 생태환경에도 직접적으로 관련된다. 토양 침식은 여름철에 타수를 통한 수질오염의 근원을 제공할 뿐만 아니라 이동하는 입자의 침강은 서식처 환경에 연속된 교란 요인으로 작용한다(Shin and Hwang, 2004). 또한, 온도나 강수의 기후변화는 생태계 내에서 단순한 계절적 천이 현상이 아닌 생물의 발생과 소멸을 반복하여 겪으면서 변화되는 기후에 적응된 종으로 변화되거나 그 공간에서 완전히 사라지게 하는 가능성도 제공하게 된다. 따라서 기후적 영향은 수문학적·물리적 요인으로만 작용하는 것이 아니라 화학적 또는 생물학적 환경의 전반에 걸쳐 중장기적으로 영향을 가져다 줄 수 있는 강력한 원인자이다.

기후변화는 강수의 증가를 가져오고, 한편으로는 더 많은 증발을 일으키는 요인이 될 것이다. 일반적으로 수문학적 순환의 가속화는 지구를 더욱 습하게 만들 것이다. 결국 문제는 물이 필요한 곳에서 강수량이 얼마나 되느냐에 달려 있다. 강수량은 일부 지역에서는 증가하고, 일부 지역에서는 감소할 것이다.

기후모델은 아직 정확한 지역별 예측을 할 수 없다. 더욱이 물의 순환은 너무나 복잡하다. 강수량의 변화는 지표의 습도, 반사정도 및 식생에 영향을 미치고, 그 다음엔 수증기

의 증발과 구름의 형성에 영향을 미치며, 다시 강수량에 영향을 미친다. 한편, 수문학적 체계는 또한 산림파괴, 도시화, 물의 과도한 사용과 같은 인간 활동에 반응한다. 강수 패턴의 변화는 물 공급량에 영향을 미친다. 몇 가지 기후모델은 앞으로 폭우가 더욱 강해질 것이라고 예상한다. 폭우는 홍수처럼 흡수되지 않고 땅 위에 흐르는 빗물을 증가시키는 반면에 토양에 스며드는 물을 감소시킨다. 계절 주기의 변화는 지하수와 지표수 공급의 지역적 분포에 영향을 미칠 것이다. 기후가 건조해질수록 지역의 물 발생과 순환은 더 민감하게 반응한다. 기온과 강수의 비교적 작은 변화는 스며들지 않고 땅 위로 흐르는 빗물에 상대적으로 큰 변화를 일으킨다. 그러므로 산성 지역과 비산성 지역은 특히 강우량의 감소, 증발의 증가 및 수목의 발산 작용에 민감하게 반응한다.

하천, 강 및 저수지도 기후변화의 영향을 받을 것이다. 지표의 변화는 지하수 공급에 영향을 미칠 것이고 장기적으로 대수층(aquifer)에 영향을 줄 것이다. 수질 또한 강수의 양과 시기의 변화에 따라 달라질 것이다. 땅 위에 흐르는 빗물과 증발의 새로운 유형은 자연 생태계에도 영향을 줄 것이다. 담수생태계는 홍수기와 수위에 반응할 것이다. 수온과 담수 열 구조의 변화는 특정 유기체의 생존과 성장, 그리고 생태계의 다양성과 생산성에 영향을 줄 것이다. 유출, 지하수 흐름 및 저수지와 강에 직접 내리는 강수량의 변화는 양분과 용존 유기산소에 영향을 주고 결국은 수질과 물의 투명도에 영향을 줄 것이다.

기후변화에 따른 담수생태계의 변화

지구의 온난화의 영향은 바다, 호소, 강 등을 포함하는 수생태계에 영향을 미친다. 온

표 2. 지구온난화에 따른 수환경 및 수생태계에서 예상되는 변화

변화 항목	세부 내용
수면의 공기와 물 온도 증가	• 매질의 비열 차이로 인해 해양의 온난화는 대기나 육지의 온난화보다 약 20년 정도 시간적으로 지연(time lag)된다. • 호소는 규모가 해양보다 훨씬 작아 온난화의 time lag가 상대적으로 더 짧다. 그러나 대부분의 경우 수심에 따른 온도(밀도)의 성층(stratification) 현상으로 인하여 표층과 심층이 완전히 섞이지 않기 때문에 표층 아래의 온도는 표면의 온도와 크게 관련되지는 않는다.
물과 얼음의 사이클 변화	• 대기의 온도가 수체에 미치는 영향은 매우 느리기 때문에 온대지역의 경우에 계절적으로 눈이 내리는 시기와 얼음이 어는 시기가 늦어지고 또한 얼음이 늦게 녹게 될 것이다.
수중의 용존산소량의 감소	• 높은 온도는 수중과 수생태계 저층에 분포하는 세균 활성을 증대시킨다. 따라서 미생물의 호흡으로 인한 산소의 소비량이 증대될 것이다. • Blumberg와 Di Toro(1990)는 이산화탄소와 온도변화의 모델(대기중 CO₂ 2배 증가 및 월별 온도 3°C에서 8°C로 증가)을 Eric호에 적용시킨 결과, 여름동안 표층에서의 용존산소의 농도가 약 1 mg/l, 저층에서는 1-2 mg/l 정도 감소한다고 예측하였다. 또한 저층에서의 무산소 상태의 호수면적이 증가하였다.
용존 CO ₂ 농도의 변화	• 해수에서의 탄산염(carbonate)의 화학적 평형에서 볼 때 대기 중 CO₂ 농도가 10% 상승하면 해수에서는 약 1% 정도 증가한다고 보고 되고 있다.
광범위한 지역으로의 물의 이동 및 바람의 강도와 방향의 변화	• 바다에서의 물의 이동은 어느 한 지역에서의 기후변화를 다른 지역에까지 영향을 미친다. • 바람의 방향과 강도의 변화는 수체의 혼합에 영향을 미치며 바다와 연안지역의 조류를 변화시킨다.
강우의 변동에 따른 지역적 수문학의 변화	• 강우의 패턴과 수문학의 변화는 실제 기후변화가 식생과 토양 모두에게 영향을 미치기 때문에 증발을 통한 강우패턴의 변화는 예측하기가 대단히 어렵다. • 약 25%의 강우의 감소는 마른 온대지역에서 약 80%, 습한 온대지역에서는 약 60%, 습한 열대지역에서는 약 70%의 유출(runoff)을 감소시키는 것으로 제시되고 있다(Graves and Reavy, 1996).
하천의 수문학 및 수질변화	• 하천과 개천을 포함하는 흐르는 물은 물의 속도, 용존산소의 정도, 온도, 바닥의 매질 등을 포함하는 환경의 물리·화학적 특성으로 인하여 호소나 해양과 같은 고인 물과는 다른 변화양상을 나타낸다. 상기한 요소들과 그에 적응하는 생물들의 변화는 고인 물에서보다 훨씬 짧은 거리와 짧은 시간 내에 일어난다. • 흐르는 물에 대한 기후변화의 가장 큰 영향은 강우패턴의 변화에 기인한다. 기후변화로 인해 강우가 감소하면, 하천의 수량 감소, 호소나 습지의 감소, 토양침식과 바닥층 물질이동의 불안정, 수질변화(예를 들면 산성화) 등이 동반될 수 있다.

*자료 : 황순진. 1998. 지구온난화와 생태계 변화 - 호소생태계(수정).

도의 상승은 수면의 증발량을 증가시켜 지역적인 강우형태나 수문학적인 변화를 초래할 수 있으며, 빙하를 녹임으로써 해수면의 상승을 유발한다. 국제기후변화위원회(1990)의 예측에 따르면 매년 0.6 cm의 해수면 상승에 의하여 2100년까지(1990년 기준) 약 66 cm가 상승할 것으로 예상하였다.

지구온난화는 또한 물 속에 녹아 있는 산소나 이산화탄소와 같은 가스들의 용해성을

변화시켜 물의 물리·화학적 성질뿐만 아니라 물 속에 살고 있는 생물의 생리적 활성이나 생태에도 영향을 미치게 된다. 생태학적인 관점에서 지구의 온난화는 수중 생물의 다양성을 변화시키며, 장기적으로는 생태계가 가지고 있는 기능, 예를 들면 물질순환, 에너지이동, 안정성을 변화시킬 수도 있다.

실제로 육상의 환경에서 보다 수환경에서의 지구환경의 변화에 대한 영향을 예측하

기가 더욱 힘들다. 그 이유는 지구의 기후와 해양 또는 호소간의 관계에 대한 이해가 매우 미비하기 때문이다. 지구의 온난화가 실제로 영향을 미치는 수생태계와 생태계 내 생물의 생리·생태적 변화에 대한 이해가 아직까지는 크게 부족하나, 기후모델과 과거의 기후변화에 대한 자료와 역사적인 증거를 토대로 할 때 표 2에서와 같이 정리할 수 있다.

지구온난화를 비롯한 기후변화가 담수 및 관련 수생태계에 미치는 영향을 단기적인 연구결과로서 이해하기는 매우 어렵다. 이는 매질의 특성으로 인하여 수생태계가 온도나 다른 기후변화에 대해 반응이 늦게 나타나는 데 원인이 있다. 이러한 의미에서 장기적인 연구는 필수적이며 많은 양의 자료가 있어야만 그 영향을 객관적으로 평가할 수 있을 것이다. 특히, 생태계는 다양한 무기환경 요인과 생물들이 존재하며 생태계에 대한 영향은 총체적으로 생물과 환경의 상호작용의 결과로 나타나게 되므로, 실제로 수생태계에 대한 기후변화 단독의 영향을 파악하기란 매우 어렵다. 따라서 기후변화와 다른 환경오염문제의 관련성에 대한 이해도 수반되어야 한다.

호소에서의 온도상승은 조류의 번성을 촉진시킬 수 있다(Carpenter *et al.* 1992). 특히 우리나라의 경우 대부분의 호소가 높은 농도의 영양물질로 인해 조류의 성장에 매우 좋은 여건을 가지고 있으며, 이러한 조건에서 온도의 상승은 조류번성의 시작 시기를 앞당길 수 있고 또한 그 기간을 연장할 수 있다. 성층화된 호수에서는 수중 산소의 고갈 정도가 증대된다. 조류의 번성은 주로 남조류(blue-green algae)의 증식에 기인하는데 이 결과 조류 군집의 종구성을 변화시켜 다양성을 저하시키고 우점도를 증가시키게 된다.

뿐만 아니라 군집구조의 변화는 먹이망을

통한 물질순환 및 에너지 이동에 큰 영향을 미치게 된다. 많은 종류의 남조류는 군체 또는 사상성(실모양)으로 이루어져 동물플랑크톤에게 좋은 먹이가 되지 못하며, 더욱이 독성물질을 분비하는 종류들이 우점하면 상위단계로의 에너지 이동을 더욱 어렵게 만든다. 이는 최종적으로 어류의 생산성을 감소시키는 결과를 야기한다. 또한 호수 수온의 증가는 빈영양상태의 특이종인 냉한성 생물들을 감소하게 하는 원인이 된다.

호소 표면에서의 조류 번성은 물 속의 빛의 투과를 방해하여 수중의 식물들의 성장을 저해하게 된다. 수중의 식물은 식물성 플랑크톤과 빛과 영양물질의 이용에 대해 서로 경쟁적으로 작용하므로, 이들의 감소는 수체의 안정성뿐만 아니라 투명도에 큰 영향을 미친다(Hwang *et al.* 1998; Havens *et al.* 2000). 뿐만 아니라 탁한 표층에서 산란되는 빛이 다시 대기중으로 반사되기 때문에 장기적으로는 이러한 빛에너지로 인하여 대기의 온도증가를 가중시킬 수 있을 것이다. 특히, 바다와 같은 광대한 표면적을 가진 수역에서의 영향이 더 클 것이다.

지구온난화가 수생태계에 미치는 영향에 대한 간접적인 비교로써 수계에서의 열에 의한 오염(thermal pollution)의 영향을 고려할 수 있다. 열에 의한 오염은 발전소 주위의 연안역에서 발견할 수 있는데, 발전소에서 냉각수로 이용한 후 온도가 높아진 물을 다시 자연계로 방류할 때 발생한다. 온도의 상승은 생물학적 대사작용과 활성(생산과 호흡, 분해 등)을 증대시키게 되며 또한 수중의 용존산소의 양이 감소하고 증발량이 증가하게 된다. 따라서 냉한성 생물들의 수가 감소하며 남아 있는 생물들은 산소감소 또는 고갈로 인한 호흡장애를 일으키게 된다. 결과적으로 생물의 다양성이 낮아지며 생태계의 안정성도 저하된다.

대기 중 이산화탄소의 증가는 수중의 탄산(carbonate) 및 중탄산(bicarbonate) 이온의 평형을 파괴하여 해양에서 뿐만 아니라 완충능력이 약한 호수를 산성화시키고 이에 따라 수중의 모든 생물에게 직·간접적인 영향을 미칠 수 있다(Gates, 1985). 특히, 수온의 증가는 어류의 산란에 악영향을 미치고, 조류의 조성을 섭식이 잘 되는 규조류에서 이용이 어려운 남조 또는 군체 형태의 녹조류로 변화시키게 된다. 수온이 증가함에 따라 계절적인 온도의 균형이 깨어지면서 봄이 일찍 시작되고 가을이 길어지게 되어, 어류의 경우는 산란의 시기가, 곤충의 경우는 우화의 시기가 교란된다. 예를 들어, 페루지역의 멸치(anchovy)와 남극의 크릴새우 등은 식물플랑크톤 생산성에 절대적인 영향을 받는 생물들이다.

열대기후 유역에서의 기후변화로 인한 홍수 또는 빈번한 강우는 해충이나 병원균의 확산을 조장할 수 있는 직접적 또는 간접적인 원인을 제공한다. 열대지역에서 말라리아를 매개로 전염되는 Bilharzia(주혈흡충병)는 인간이나 다른 척추동물에게 체중감소, 간장이상 등의 피해를 유발한다. 이 병은 세계적으로 2500만 명 이상이 피해를 받고 있고 매우 광역적으로 퍼져 있는 전염병이다. 이집트에서 아스완댐의 건설 이후 이 병의 증상이 크게 증가되었다고 보고 되고 있다. 말라리아는 열대 또는 아열대지역에서 강우가 증가함에 따라 증가될 가능성이 크다.

북극지역에서 전체면적의 15% 정도를 차지하는 담수습지는 주로 이탄(peat) 성분으로 이루어져 있으며 지구전체 메탄가스의 약 1/4를 저장하고 있다. 이 지역에서 온도의 증가와 이로 인한 여름기간의 연장은 이산화탄소의 방출을 야기하며 이는 다시 지구온난화의 원인으로 작용할 수 있다(Bridgeham et al. 1995).

지구온난화는 강이나 계류에서의 생태학적 현상을 변화시킬 수 있다. 이러한 시스템에서의 변화의 정도나 시간은 매우 복잡한 현상일 것이다. 특히, 건조한 지역에서 간헐적인 홍수의 빈도가 증가될 것으로 예상된다. Van Blaricum 등(1995)은 대기중의 이산화탄소가 2배가 되면 북반구 지역의 강들은 28% 정도의 유량이 증대할 것이며, 최대 유량의 시기는 현재보다 일찍 나타날 것으로 예측하였다. 한편, 강을 막아 건설된 댐들은 지구온난화를 가중시키는 역할을 할 것이다. 댐들은 많은 산림을 파괴하고 수몰지역을 증대시킴으로써 대기 중의 이산화탄소의 순증가량이 많아져, 온실효과를 초래할 것이기 때문이다.

담수생태계는 수많은 종류의 어류, 양서류, 수생식물, 무척추동물, 미생물 등의 서식지를 제공한다. 아마존강 하나만 해도 3천여 종의 고기가 서식하고 있는 것으로 추정하고 있다. 그러나 담수의 서식지는 상대적으로 불연속적이며 많은 담수생물종들은 육지의 경계를 쉽게 넘어 다른 지역으로 이동할 수 없다. 담수호는 육지로 둘러싸인 형태로 인하여 “생물서식지 섬(Island habitat)”으로 비유된다. 그 결과 담수의 생물종들은 그 지역의 기후나 생태적 변화로부터 살아남아야 하고, 담수생물의 다양성은 매우 지역적 또는 특징적이기 때문에 담수의 생물종 다양성은 매우 높다. 기후변화가 담수생태계에 미치는 영향은 최종적으로 생물서식지의 파괴와 생물다양성의 감소로 나타나며, 그 부작용은 결국 지구환경의 한 구성원인 인간에게로 돌아올 수밖에 없는 것이다.

결론

인간의 활동으로 인한 지구환경 변화와 피해가 세계 곳곳에서 생겨나고 있다. 지구온

난화로 인한 기후변화에 의하여 이상기온, 태풍, 홍수, 가뭄, 엘니뇨현상 등이 발생하고 있고 앞으로도 계속될 전망이다.

온실가스의 증가는 대기온도의 증가와 지표면 그리고 수표면의 온도를 증가시켜 왔으며, 이 결과 강수량의 변동과 같은 수문학의 변화, 물의 표층과 심층온도 차이로 인한 성층현상의 강화 등은 수생태계 내의 생물들의 생리활성, 생태에 대하여 영향을 미친다. 온도의 증가가 수생태계에 미치는 영향은 생산력의 감소, 냉한성 생물의 감소, 용존산소의 감소, 생물 대사율 증대, 생물 성장기간의 증대 등으로 예측된다. 총체적으로 지구의 온난화는 수생태계의 생물다양성과 안정성을 저하시키는 결과를 낳게 된다.

지구온난화는 강수량의 변동, 수분 증발량의 증대, 건조로 인한 화재발생의 증가, 산성비 영향의 변화 등 광범위한 분야에 영향을 미친다. 또한 수생태계는 완전히 독립된 것이 아니라 주변의 육지, 강, 습지, 대기 등과 구조적·기능적으로 연결되어 지구온난화로 인한 여러 가지 복잡한 영향이 수생태계에 직접 영향을 미칠 뿐만 아니라, 주변의 환경을 변화시키고 다른 환경변화(예를 들면 부영양화)와 복합적으로 작용함으로써 간접적인 영향도 미치게 된다. 즉, 지구온난화가 수생태계에 미치는 영향은 실제로 매우 복잡하다. 더욱이 수환경의 온도상승은 대기나 지표면의 그것보다 시간적으로 지연되며 수환경이 가지는 깊이의 특성 때문에 환경 또는 생물상의 변화에 대한 예측을 어렵게 만든다. 따라서 지구온난화가 수생태계에 미치는 영향은 궁극적으로 생태계에 연관된 다른 환경요인과 병행하여 이해하여야 할 것이다.

지구적 기후변화에 대해서는 우리나라도 예외일 수는 없다. 온난화, 열대야현상, 폭한, 가뭄, 홍수 등으로 우리의 생태계가 커다란 영향을 받고 있음에도 불구하고 이 영

향에 대한 체계적이고 장기적인 연구는 거의 없는 실정이다. 자연 및 인공적인 조건에서 지구온난화(예를 들면, CO₂ 농도 변화, 수온의 변화)에 대한 생태학적 영향(수생 동식물의 적응정도, 분해정도, 생물 간의 경쟁, 에너지 이동, 물질 순환, 생물다양성 변화 등)을 조사·평가하는 장기적인 연구가 크게 요구된다. 이는 바로 변화하는 기후와 그에 관련되는 다양한 환경변화 속에서 담수생태계를 보전하고 자연의 기능을 회복하는데 절대적으로 필요한 요건이다.

참고문헌

- 권원태. 2005. 기후변화의 과학적 이해: 현황, 전망 및 대응. 제13회 세계 물의 날 심포지엄 초록. pp.3-11.
- 기상연구소. 2001. 기후변화 시그널 검출기술 개발. 기상연구소. 346p.
- 기상연구소. 2002. 기후변화협약 대응 지역기후 시나리오 산출기술 개발(1). 기상연구소. 441p.
- 기상청. 2002. 한국의 기후변화. 기술노트. 52p.
- 김맹기, 강인식, 박종흠. 1999. 최근 40년간 한반도 도시화에 따른 기온 증가량의 추정. 한국기상학회지, 35: 118-126.
- 황순진. 1998. 지구온난화와 생태계 교란- 호소 생태계. 함께 사는 길 11월호. 환경운동연합. pp.20-21.
- Blumberg, A.F. and D.M. Di Toro. 1990. Effects of climate warming on dissolved oxygen content in Lake Erie. Trans. Amer. Fish. Soc. 119: 210-223.
- Bridgejam, S.D., C.A. Johnson, J. Pastor and K. Upderaff. 1995. Potential feedbacks of northern wetlands on climate change. Bioscience 45: 262-274.
- Carpenter, S.R., S.G. Fisher, N.B. Grimm and J.F. Kitchell. 1992. Global changes and freshwater ecosystems. Ann. Rev. Ecol. Syst. 23: 119-

- 139.
- Min, S.K., W.T. Kwon, E.H. Park and Y. Choi. 2003. Spatial and Temporal Comparisons of Droughts over Korea with East Asia. *International Journal of Climatology*, 23: 223-233.
- Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C.A. Johnson. 2001. *Climate Change 2001, The Scientific Basis*. Cambridge University Press. 991pp.
- Kalff, J. 2004. *Limnology, Inland Water Ecosystem*. Prentice Hall, USA. pp. 174-178.
- Shin, J.K. and S.J. Hwang. 2004. Development and dynamics of turbid water in lotic and lentic ecosystems in Korea. *Proceedings of annual meeting of KSL*. p.29.
- Gate, D.M. 1985. *Energy and ecology*. 377pp. Sinauer Associate, Inc., Sunderland, Massachusetts.
- Graves, J. and D. Reavy. 1996. *Global environmental change*. 226pp. Longman Group Limited, England.
- Havens, K., A. Christina, J. Hauxwell, T. Serge, V. Inan, C. Just, A. Steinman and S.J. Hwang. 2000. Complex interactions between autotrophs in shallow marine and freshwater ecosystems: implication for community responses to nutrient stress. *Environmental Pollution* 113: 95-107.
- Hwang, S.J., A.D. Steinman and K.E. Havens. 1998. Phosphorus kinetics of planktonic and benthic assemblages in a shallow subtropical lake. *Freshwater Biology* 40: 729-745.

회비 납부 및 회원 가입 안내

한국자연보전협회에 가입하신 회원분들의 회비는 협회 발간물의 제작과 발송에 큰 도움이 됩니다. 회비가 연체되었거나 2005년도 회비를 내지 않으신 회원님들께서는 협회 홈페이지(www.kacn.org)의 회원가입 안내를 참조하시어 입금해 주시기를 부탁드립니다. 또한 회원가입을 원하시는 분께서는 협회 홈페이지의 회원가입 안내를 참조하시어 입회원서를 작성하시고 입회비와 연회비를 송금하시면 회원가입을 하실 수 있습니다. 회비 입금 뒤에는 수고스러우시더라도 협회로 연락(02-383-0694, 0638)을 주시면 감사하겠습니다.