

[생물화학심포지움]

습지의 생지화학적 반응과
전지구적 기후 변화의 영향

(2004년 7월 26일(월) 14:50~15:30)

강 호 정

(이화여자대학교)

습지의 생지화학적 반응과 전지구적 기후 변화의 영향



강호정

이화여자대학교 공과대학 환경학과

Influence of Global Climatic Changes on Wetland Biogeochemical Processes

Hojeong Kang

Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University, Seoul, Korea

Abstract

This paper reviewed effects of global climatic changes on wetland biogeochemistry. Wetlands play key roles in global as well as local material cycle, which includes carbon sequestration, CH₄ emission and DOC leaching. Increased air temperature, elevated CO₂ levels and changed precipitation patterns are believed to affect those processes substantially by modifying oxygen supply, carbon sources, and decomposition rates. For example, elevated CO₂ may increase CH₄ emission as well as DOC leaching from wetlands. In addition, interactions of multiple effects warrant further investigation.

서 론

습지는 육상과 수 생태계의 경계에 존재하는 전이지역으로 독특한 물리화학적, 생물학적 특성을 지니고 있다. 습지를 규정짓는 대표적인 특성은 수문학적 특성 (예, 일정기간 이상의 침수), 토양적 특성 (예, 이탄축척이나 환원철의 침적), 그리고 식물학적 특성 (예, 침수식물의 우점) 등으로 일반적으로 이 세 가지 요인에 의해 습지가 정의 되고, 경계를 정하게 된다(15). 그러나, 각각의 습지자체는 매우 다양한 양상으로 나타나는데, 이는 생성, 위치, 수분함량, 수화학, 우점 식물, 토양 특성 등에 의해 결정 된다. 크게 대별되는 대표적인 습지로는 내륙의 경우에는 이탄습지 (peatland), 소택지 (marsh), 하변습지 (riparian wetland), 열대늪지 (swamp) 등이 있고, 해안습지로는 갯벌 (mud flat), 염습지 (salt marsh), 홍수림 (mangrove) 등을 들 수 있다.

실제로 습지가 차지하고 있는 면적은 전 지구 면적의 2-6 % 정도에 지나지 않고, 경제적 이익이나 생태적인 중요성이 널리 알려지지 않아서 20세기 중엽까지도 물을 빼고 개발할 지역, 혹은 폐기물 매립의 용도로 널리 사용되어 왔다. 북미의 경우에는 유럽인들의 거주이전 89.5 x 10⁶ ha 이던 습지가 현재 거의 절반으로 줄어든 것으로 추정되고 있으며, 영국의 경우에는 raised bog 라고 불리는 이탄습지의 경우에는 19세기 중반이후로 약 95%가 사라진 것으로 보고되고 있다 (15). 국내의 경우에는 정확한 기록이 없어서 습지의 파괴정도는 알 수 없지만, 현 면적은 2,884 km² 로 이중 82%가 갯벌을 포함한 해안 습지이다. 그러나, 1970년대 이후 습지의 생태적 환경적 중요성이 알려지기 시작하면서 보호하고 연구할 대상으로 관점의 전환이 일어나고 있다.

이러한 배경에는 다음과 같은 습지의 중요성이 있기 때문이다. 첫째, 습지 특히 이탄이라고 불리는 미분해 유기물을 포함한 이탄습지의 경우에는 전지구적인 탄소 순환에 매우 중요한 역할을 담당하고 있다. 이탄습지에 포함된 유기탄소량은 약 455 Pg(3)으로 이 양은 지구 전체 토양에 존재하는 유기물의 30% 정도로 지구 내 대기에 존재하는 이산화탄소량 전체와 비교할 만한 양이다. 둘째, 습지는 CH₄, N₂O와 같은 강력한 지구 온난화 기체의 발생원이다. 예를 들어, 자연 습지와 논에서 발생하는 CH₄ 양은 전지구적인 CH₄ 발생량의 절반 정도를 차지하는데(16), CH₄는 CO₂ 에 비해 단위 몰당 25배 정도 강력한 온실 기체이다. 셋째, 습지는 무기영양소 특히 질소, 인과 같이 수체의 부영양화를 일으킬 수 있는 물질을 흡수, 보유, 제거 하는 역할을 담당한다. 이러한 특성을 이용하여 인공습지를 건설하여 수처리에 이용하려는 노력들도 진행되고 있다(12). 넷째, 습지는 단위 면적당 가장 높은 일차생산성을 보이는 생태계로 이와 더불어 매우 높은 생물다양성을 보인다. 습지에서는 생물학적 niche가 많이 존재할 뿐 만 아니라, 다양한 물리화학적 환경요인이 빠른 속도로 변화할 수 있어서, 식물 뿐 아니라, 무척추 동물, 곤충, 어류, 양서류, 파충류 등의 다양성도 매우 높게 나타난다(15). 다섯째, 습지는 하천으로 들어가는 유입수의 속도를 늦추고 급격한 유량의 변화를 완충하며 물을 천천히 흘려 보내는 역할을 함으로써, 홍수, 침식, 지하수의 재충전 등의 수문학적 역할을 수행한다. 마지막으로 습지는 심미적 가치를 지니고 있어서 생태공원이나 야외 학습장으로서의 중요성을 갖는다. 본 논문에서는 습지의 여러 가치와 기능 중 생지화학적

인 측면에 초점을 맞추어 논의를 진행하고자 한다.

전지구적인 기후변화는 대기 중 이산화탄소 농도 증가와 이에 의해 유발된 것으로 믿어지는 대기의 평균 기온 상승을 그 핵심 내용으로 하고 있다(10). 또한 이에 의해 촉발되는 여러 가지 기상 현상들, 즉 강우량과 강우 패턴의 변화, 해수면의 변화 등도 환경학자들의 큰 관심사이다. 이러한 전지구적인 기후변화에 대한 연구는 주로 대기과학의 측면이나 해양학의 측면에서 많이 다루어 졌으나, 지난 10여 년 간 생물계에 미치는 영향에 대한 연구가 급속히 증가하고 있다. 그 이유는 현재의 일반순환모델(GCM: General Circulation Model)에서는 생물계의 되먹임에 대한 고려가 없기 때문이다. 현재 대기 중 이산화탄소 농도 증가는 주로 인간 활동, 특히 화석연료 사용과 토지 이용도의 변화에 기인한 것이다. 예를 들어 Fig. 1에 나타난 바와 같이 대기 중 CO₂ 농도의 꾸준한 증가는 생태학자들의 큰 관심을 끌고 있다.

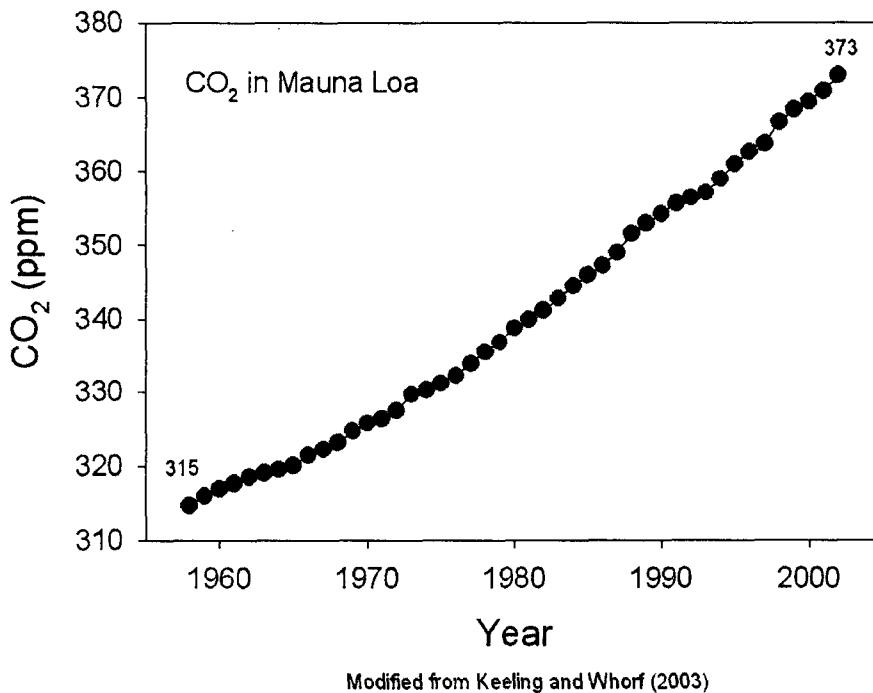


Figure 1. CO₂ concentration in the atmosphere measured at Manua Loa in Hawaii.

하지만 실제 전 지구적인 탄소 순환에서 생물계가 담당하는 양이 엄청나기 때문에 이에 대한 고려가 없이는 정확한 대기 화학적 조성의 예측은 부정확하게 된다. 예를 들어, 인간의 화석연료 사용 및 토지 이용도 변화에 의해 매년 대기 중 배출되는 CO₂의 양은 약 7×10^{15} gC 정도인데, 생물계에 의해 광합성으로 흡수되는 CO₂의 양은 121×10^{15} gC 정도이고 이와 비슷한 양이 생물의 호흡으로 대기 중 되돌아 간다(16). 온도의 상승과 강우 패턴의 변화는 토양미생물을 비롯한 다양한 생물군의 호흡량에 직접적인 영향을 미치며, 광합성량에도 중요한 조절인자 중에 하나

이다. 특히, 습지는 앞에서 언급한 바와 같이 전지구적인 물질 순환에서 매우 중요한 역할을 담당하고 있기 때문에, 많은 연구와 관심의 대상으로 본 논문에서는 기후변화가 습지의 물질 순환에 미칠 수 있는 영향에 대해 알아보도록 하겠다.

기후 변화가 습지에 미치는 영향

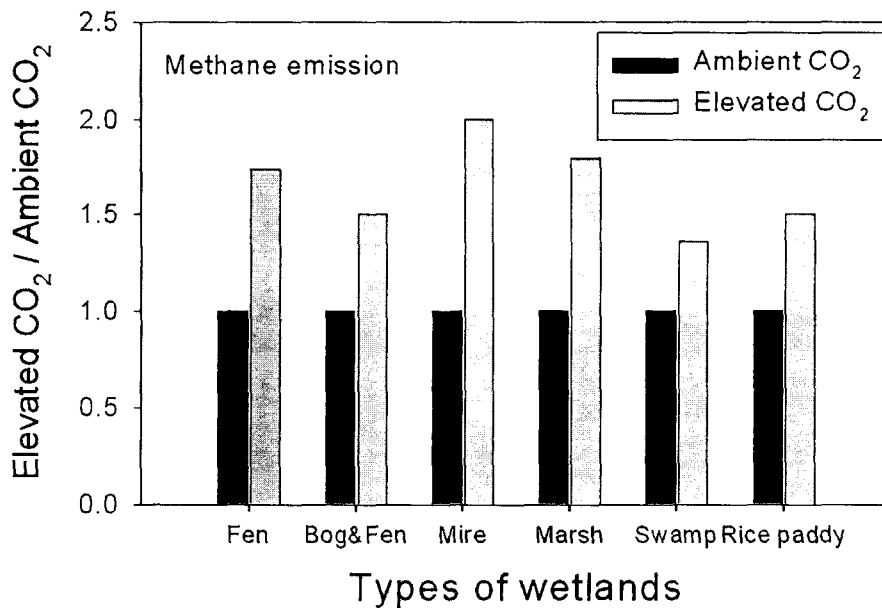
기온 상승의 효과

온도에 의한 효과는 이미 여러 생태계에서 널리 연구되었다. 온도 영향에 대한 배경은 생물체에 의한 생화학적 반응들은 효소에 의해 매개되며, 효소 반응에 대한 온도의 효과는 Arrhenius 식에 의해 설명될 수 있다는 데 근거하고 있다. 일반적으로 생물체가 매개된 반응들은 상온의 범위에서 Q10 value (온도가 10 °C 올라갈 때 반응속도의 비)가 1.5-2.5 정도를 나타낸다. 습지에 대한 온도 효과를 살펴본 연구들을 보면 여러 가지 온도 구배에서 배양을 통해 유기물의 분해나 CO₂, DOC의 배출 등을 살펴본 연구들이 있다. 특히, 하천의 DOC의 일반적인 상승이 지구 온난화와 연관되어 있을 것이라는 추측들도 많이 있었다. 일반적으로 지구온난화로 인하여 영구동토층이 감소하여 식생의 성장 가능 지역이 늘어나고 이로 인해 대기 중 이산화탄소를 제거할 수 있는 능력이 증가할 것이라는 일부 주장도 있으나, 대부분의 연구결과는 이보다는 유기물의 분해 속도가 가속되어 대기나 수체로 탄소가 이동할 것이라는 점을 시사하고 있다(4). 그러나, 현재 GCM에서 예측하고 있는 미래의 기후조건을 살펴보면 최악의 경우에도 4-6 °C 정도의 온도 상승으로써 이 정도의 기온변화에 의해서 습지의 생지화학적 순환이 급격히 변화하지는 않을 것이라는 전망도 많다. 실제로 장기 관측에 의하면 온도와 습지의 DOC 유출은 낮은 상관관계를 보여주었다(8). 그러나, CH₄ 발생에 있어서는 온도가 수위와 함께 가장 중요한 조절인자임이 잘 알려져 있으며, 유기물의 지속적인 분해 증가로 인한 장기적인 영향에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다.

대기 중 CO₂ 농도 증가의 효과

CO₂의 효과는 주로 식물체를 통해 매개된다. CO₂는 식물 광합성의 기질이므로 대기 중 CO₂ 증가에 의해 광합성의 속도가 증가할 것이라는 가설은 많은 식물학자들에 의해 단기 실험에서 증명되었다. 그러나 육상생태계에서 행해진 장기 연구들을 살펴보면 일시적인 광합성의 증가는 시간이 지남에 따라 점점 둔화되고, 실제 식물 지상부의 성장보다는 낙엽 화학성분의 변화, 식물 뿌리의 성장, 식물체내의 탄수화물 성분 변화 등이 뚜렷이 관찰되었다(14). 습지의 경우에는 상대적으로 연구가 적은 편이지만, 식생의 일차생산성에 대한 반응은 뚜렷이 관찰되지 않았다. 특히 Sphagnum이라 불리는 이탄습지에서 성장하는 이끼류의 경우에 CO₂에 대한 반응정도가 가장

미미했다(7). 즉, 대기 중 CO₂ 증가에 의해 식물 생체량이 증가할 가능성은 적다. 그러나, 습지만의 독특한 생지화학적 변화에 대한 중요한 관찰 들이 많이 있다. 예를 들어, 높은 농도의 CO₂에서 성장한 습지에서는 더 많은 CH₄가 배출되는 것이 관찰되었다 (Fig. 2). 그 이유는 CO₂의 증가가 광합성의 증가를 유도하고 이는 식물뿌리를 통해 배출되는 삼출물 (exudates)의 양을 증가 시켜 결국에는 메탄생성세균이 이용할 수 있는 탄소원이 증가하기 때문인 것으로 추정된다. 또한, 최근 연구에 의하면 대기 중 CO₂의 증가는 다양한 이탄 습지의 토양내 공극수의 용존유기탄소 (DOC)의 농도를 급격히 증가시킨다는 것을 증명하여, 앞의 가설을 뒷받침 하고 있다(Fig.3). 또한 이렇게 습지에서 증가한 DOC가 유출되어 최근 유럽과 북미에서 관측되고 있는 하천 내 DOC증가를 일으킨 것으로 추정하고 있다(6). 이밖에도 대기 중 CO₂ 변화는 토양내 미생물의 활성에 변화를 야기하고(13), 미생물 군집 구성에도 영향을 미칠 것으로 추정되고 있다. 또한 탈질 (denitrification) 량에도 영향을 미칠 것으로 추정하나 습지를 대상으로 한 연구는 미흡한 실정이다.



Kang *et al.* (2001), Saarino *et al.* (1998), Ziska *et al.* (1998),
Magonigal & Schlesinger (1997), Hutchin *et al.* (1995), Dacey *et al.* (1995)

Figure 2. Effects of elevated CO₂ on CH₄ emission from various wetlands.

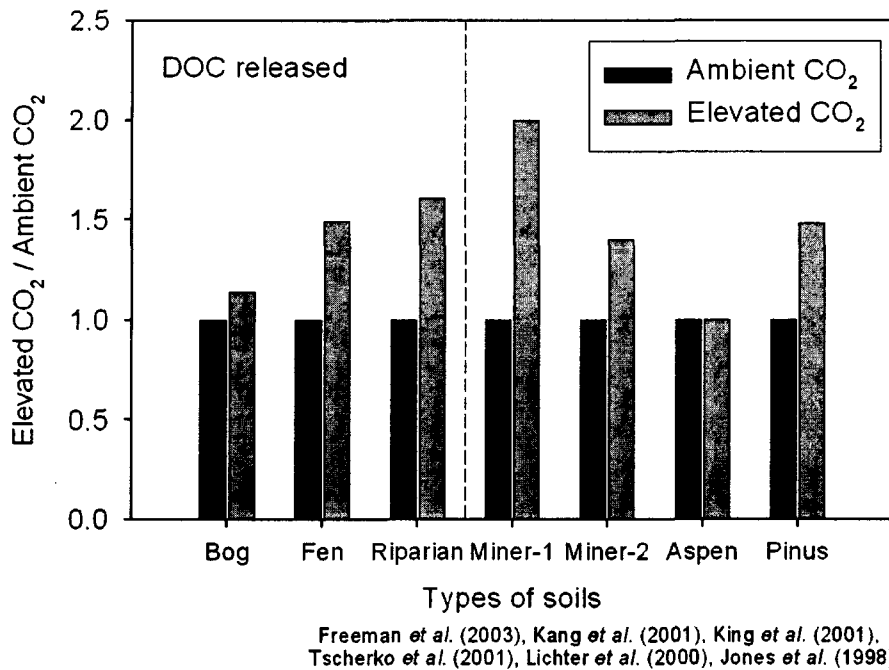


Figure 3. Effects of elevated CO₂ on DOC release from wetlands and upland soils.

강수 변화의 효과

전지구적 기후변화에서 나타날 수 있는 강수의 변화는 습지 연구에 있어서 매우 중요한 부분이다. 그 이유는 습지의 가장 기본적인 존재 특성이 수위로 대표되는 수문적인 특성이기 때문이다. 총강수량의 변화에 대한 예측은 통일된 결론이 나지 않았지만, 가뭄과 홍수의 빈도가 증가할 것에 대해서는 대부분의 기상학자들이 의견을 같이하고 있다. 즉, 지역에 따라서 습지들의 수위는 더 낮아질 수도 있고, 더 많은 시간 물속에 잠겨 있을 수도 있다. 이러한 변화는 습지 식물의 분포에 영향을 미칠 뿐 아니라, 다양한 습지 생지화학적 과정에 영향을 미친다. 예를 들어, 수위가 낮아지면 CH₄ 발생량, N₂O 발생량, 유기물 분해속도가 변화하는 것이 관찰되었다. 특히 CH₄ 발생량의 감소가 메탄생성세균의 수가 감소하여 일어난 것이지, 메탄산화세균의 수가 증가하여 일어난 일이 아니라는 것이 실험적으로 증명되기도 하였다 (Fig. 4). 수위의 감소가 유기물 분해속도를 증가시키는 것도 산소 공급의 증가에 의해 직접적으로 일어나는 것 보다는, phenol oxidase라고 하는 한 효소의 활성에 영향을 미치고 이로 인해 phenolic 계열의 난분해성 저해물질의 제거에 기인한다는 보고도 있었다(5). 강수의 변화는 지역적으로 큰 편차를 보일 것으로 예상되어 전반적인 경향을 말하기는 어렵다. 그러나 북반구 고위도 지역 중 여름 가뭄을 심하게 겪을 것으로 예상되는 지역에서는 DOC의 유출에는 큰 영향이 없지만, CO₂나 CH₄의 발생량에는 큰 변화가 있을 것으로 예상되고 있다(9).

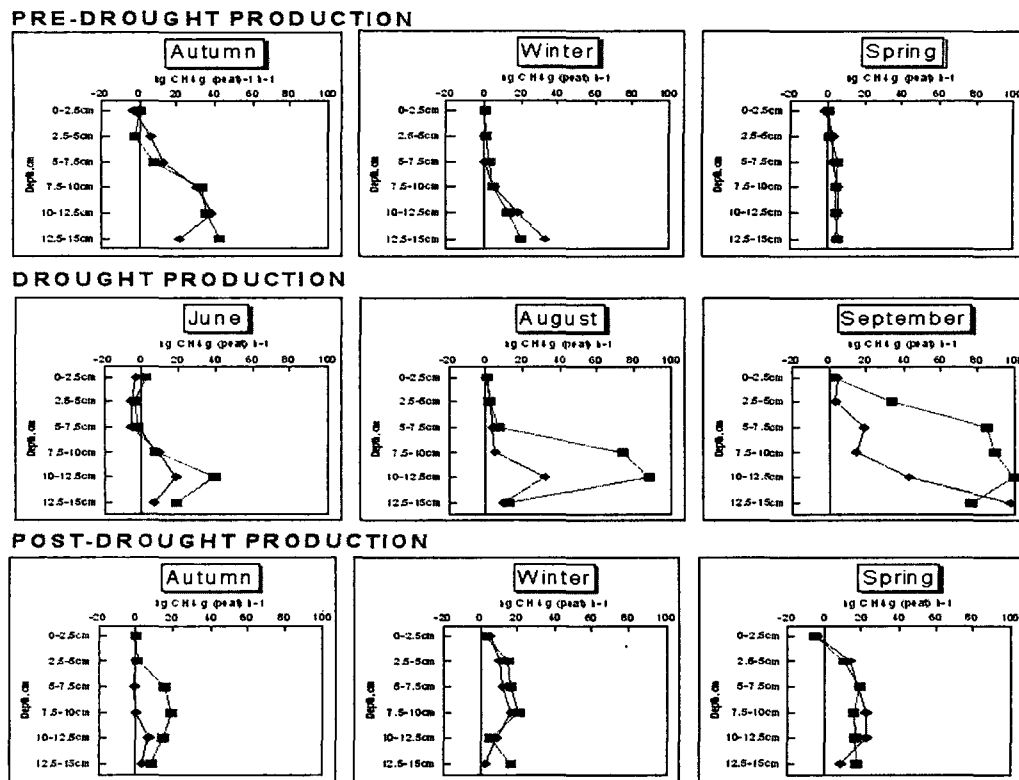


Figure 4. Effects of simulated drought on methane production rates in wetlands. The red square represents the rate under control condition, and the blue diamond represents the rate under drought condition.

대기 강하물의 효과

지구 기후변화와 직접적인 연관은 없지만 대기 침적물에 의한 영향도 관심의 대상이다. 특히 습지는 대기에 노출되어 있는 면적이 상대적으로 크고, 수관부를 형성하는 식생이 없는 편이라 대기 침적물에 의한 효과가 크게 나타날 수 있다. 또한, 일부 습지의 경우 (예, ombrotrophic bog)에는 강수를 통해 대기에서 유래하는 영양물질에 근거하는 시스템으로 구성되어 있어서 대기 침적물의 변화에 더욱 민감하다. 일반적으로 산성비라 불리는 황산 산화물을 과량 포함한 대기 침적물의 영향에 대한 연구가 많이 진행되었으나, 최근에는 질소를 포함한 대기 침적물의 영향에 대한 관심이 점점 높아지고 있다. 우리나라에서 측정된 질소 대기 침적량도 30 kg/ha/yr 이상의 고농도도 보고된바 있고(1), fig. 4에서와 같이 한강하구에서의 총질소량이 계속 증가하고 있어, 주변 습지에 영향이 예상되고 있다. 일반적으로 질소는 여러 가지 생태계에서 제한요소로 작용함으로 질소 침적이 일차생산성에 도움이 된다는 주장이 많이 있었다. 그러나, 최근 집약적인 농업과 비료살포, 자동차의 급증 등으로 인해 질소 침적이 급증하고 이로 인하여 산림 생태계 부정적인 영향을 미칠 것이라는 주장도 제기되고 있다(2). 습지로 유입되는 질소나 황 계열의 물질의 농도가 증가하면 CH₄ 발생량이 감소하는 것이 보고되는 등(11), 습지 물질 순환에 많은 영향이 있을 것으로 추

정되나, 실험결과들의 다양한 반응으로 인하여 최종 결론은 유보된 상태이다.

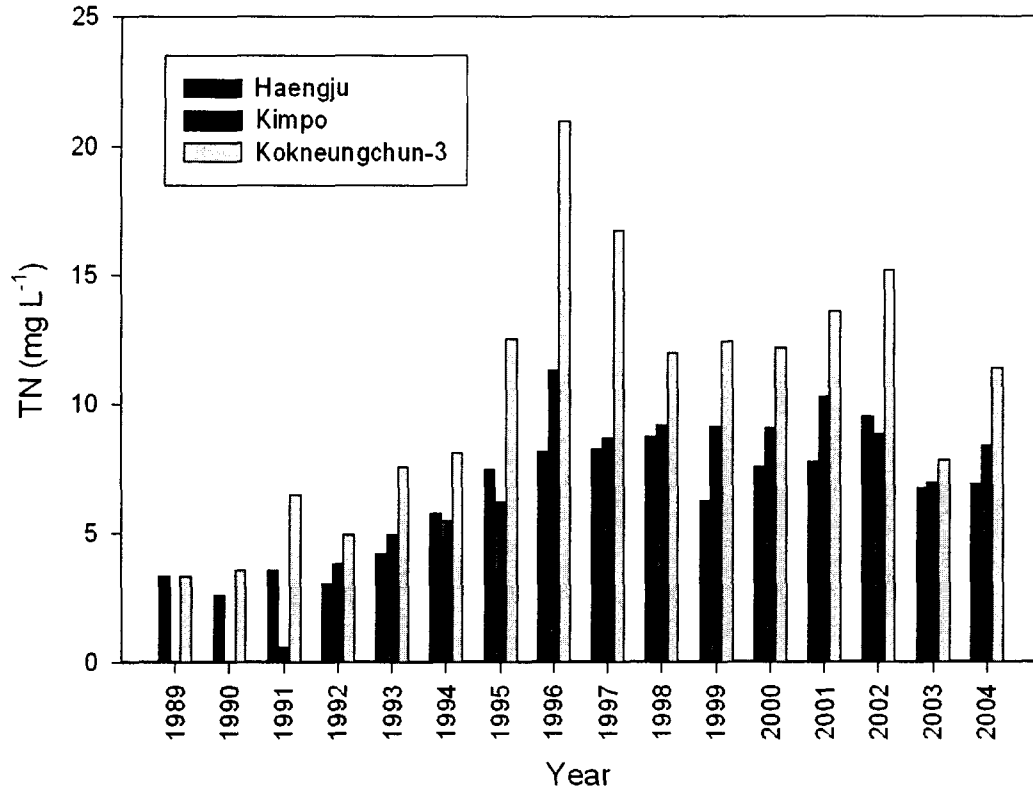


Figure 4. TN concentrations in 3 stations at the estuary of Han river.

결론

장기 자료의 부재로 인한 불확실성이 존재하긴 하지만, 지구 기후변화는 습지의 물질 순환에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 특히, 온도에 의한 효과 뿐 아니라, 대기 중 이산화탄소 증가와 이로 야기되는 식물, 토양 미생물의 연쇄반응에 대한 새로운 보고들이 나오고 있다. 또한 습지의 경우에는 수문학적 특성으로 인하여 강수 패턴의 변화에 큰 영향을 받을 것으로 예상된다. 한가지 중요한 점은, 앞에서 언급된 기후변화가 독립적이 아닌 동시다발적으로 일어날 것이라는 점이다. 즉, 하나의 요인만 제어되는 환경에서 진행된 연구는 미래의 실제 환경을 정확히 반영하지 못할 가능성이 있다. 따라서 온도, CO₂, 수위 변화 등의 변수를 동시에 고려하는 연구가 더욱 필요하다.

감사의 글

본 논문은 차세대바이오환경기술연구센터(R11-2003-006-00000-0)의 지원으로 작성되었음.

REFERENCES

1. 박순웅, 1000. 산성비 감시 및 예측기술 개발. 환경부.
2. Aber, J. D., K. J. Nadelhoffer, P. Steudler and J. M. Melillo (1989), Nitrogen saturation in northern forest ecosystems, *Bioscience* **39**, 378-386.
3. Adams, J. M. and H. Faure (1998), A new estimate of changing carbon storage on land since the last glacial maximum, based on global land ecosystem reconstruction, *Global Plane. Change* **16**, 3-24.
4. Freeman, C., C. D. Evans, D. T. Monteith, B. Reynolds and N. Fenner (2001) Export of organic carbon from peat soils. *Nature* **412**, 785.
5. Freeman, C., J. Ostle and H. Kang (2001), An enzymic latch on a global carbon store, *Nature* **409**, 149.
6. Freeman, C., N. Fenner, N. J., Ostle, H. Kang, D. J. Dowrick, B. Reynolds, M. A. Lock, D. Sleep, S. Hughes and J. Hudson (2004), Dissolved organic carbon exports from peatlands under elevated carbon dioxide levels, *Nature* **430**, 195-198.
7. Hoosbeek, M. R., N. van Breemen, F. Berendse, P. Grosvernier and H. Vasander (2001), Limited effect of increased atmospheric CO₂ concentration on ombrotrophic bog vegetation, *New Phytol.* **150**, 459-463.
8. Hudson, J. J., P. J. Dillon, and K. M. Somers (2003), Long-term patterns in dissolved organic carbon in boreal lakes: the role of incident radiation, precipitation, air temperature, southern oscillation and acid deposition, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **7**, 390-398.
9. Hughes, S., D. J. Dowrick, C. Freeman, M. A. Lock, B. R. Reynolds and J. A. Hudson (1999), Methane emissions from a gully mire in mid-Wales UK, under consecutive summer water table drawdown, *Environ. Sci Technol.* **33**, 362-365.
10. IPCC (2001), Climate Change 2001: The Scientific Basis, Cambridge University Press, Cambridge.
11. Kang, H. and C. Freeman (2002), The influence of hydrochemistry on methane emissions from two contrasting northern wetlands, *Water Air Soil Pollut.* **141**, 263-272.
12. Kang, H., C. Freeman, D. Lee and W. J. Mitsch (1998), Enzyme activities in constructed wetlands: Implication for water quality amelioration, *Hydrobiologia* **368**, 231-235.
13. Kang, H., S-Y. Kim, N. Fenner and C. Freeman (2004), Shifts of soil enzyme activities in wetlands exposed elevated CO₂, *Sci. Total Environ.* (in press).
14. King, J. S., R. B. Thomas, and B. R. Strain (1997), Morphology and tissue quality of seedling root systems of *Pinus taeda* and *Pinus ponderosa* as affected by varying CO₂, temperature, and nitrogen, *Plant Soil* **195**, 107-119.
15. Mitsch, W. J. and J. G. Gosselink (1993), Wetlands, John Wiley & Sons, NY.
16. Schlesinger, W. H. (1997), Biogeochemistry: An Analysis of Global Change, Academic Press, San Diego.