

내륙습지와 갯벌에서의 주요 온실기체 배출량 특성연구

Characteristics of Greenhouse Gas Emissions from Freshwater Wetland and Tidal Flat in Korea

김 득 수* · 나 운 성

군산대학교 환경공학과 대기환경연구소

(2012년 12월 25일 접수, 2013년 2월 7일 수정, 2013년 2월 27일 채택)

Deug-Soo Kim* and Un-Sung Na

*Atmospheric Environmental Research, Department of Environmental Engineering,
Kunsan National University*

(Received 25 December 2012, revised 7 February 2013, accepted 27 February 2013)

Abstract

Wetland has been known as a major biogenic source of CH₄ in globe. In a global scale, the amounts of 55~150 Tg CH₄ are released into the atmosphere annually from wetlands; and it accounts for about 21% of total CH₄ annual global emission. From August 2010 to August 2011, measurements of major greenhouse gas (CO₂, CH₄, N₂O) emissions were conducted from a freshwater wetland at Kunsan (35° 56' 38.94''N, 126° 43' 16.62''E), Korea by using floating closed static chamber method. Flux measurements for these gases from western coastal tidal flat at Seocheon (36° 07' 13.85''N, 126° 35' 43.18''E), Korea were managed from July 2011 to February 2012 by using closed static chamber method. The average gas fluxes and ranges from freshwater wetland experiment were 0.155 ± 0.29 mg m⁻² hr⁻¹ (-0.054 ~ 0.942 mg m⁻² hr⁻¹) for CH₄, 17.30 ± 73.27 mg m⁻² hr⁻¹ (-52.44 ~ 261.66 mg m⁻² hr⁻¹) for CO₂, and 0.004 ± 0.01 mg m⁻² hr⁻¹ (-0.02 ~ 0.07 mg m⁻² hr⁻¹) for N₂O, respectively. Monthly base flux measurement results revealed that CH₄ fluxes during summer months in high water temperature were significantly high, and at least order of one higher than those during other months. The average fluxes and ranges of these greenhouse gases from tidal flat during the experimental period were 0.002 ± 0.08 mg m⁻² hr⁻¹ (-0.16 ~ 0.22 mg m⁻² hr⁻¹) for CH₄, -31.18 ± 75.33 mg m⁻² hr⁻¹ (-298.87 ~ 101.93 mg m⁻² hr⁻¹) for CO₂, and 0.001 ± 0.01 mg m⁻² hr⁻¹ (-0.017 ~ 0.03 mg m⁻² hr⁻¹) for N₂O, respectively. Comparing the results of gas emissions from tidal flat to those from freshwater wetland, we found significantly lower emissions from tidal flat based on the experiment. Physico-chemical parameters of water and soil at these experimental plots were also sampled and analyzed for understanding their correlation with these gas emissions.

Key words : greenhouse gas, gas emission, freshwater wetland, tidal flat, closed chamber

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)63-469-4764, E-mail : dskim@kunsan.ac.kr

1. 서 론

습지의 생태학적 분류는 일반적으로 람사협약의 습지의 정의로 “습지는 자연적이든 인공적이든 관계 없이 소택지, 습원, 이탄지 또는 물로 된 지역을 말한다.”를 따른다. 이는 인간 활동에 의해 교란 받거나 또는 인위적으로 만들어진 지역들도 습지로 포함되는 것을 의미한다. 일반적으로 메탄(CH₄)의 지구규모 배출량은 연간 ~500 Tg yr⁻¹ 정도이며, 습지는 CH₄ 배출의 중요한 자연공급원(natural source)으로서 대략 55~150 Tg의 CH₄를 배출한다(Watson *et al.*, 2000).

습지에서의 온실기체 배출(emission)과 흡수(uptake)는 생·지화학적 과정 등에 의하여 조절된다. 습지 생태에서 탄소의 흡수와 분해 과정을 거쳐 배출되는 양은 기후 및 수생 동·식물, 유기물질의 양 등 생태환경 인자들에 의하여 영향을 받는다. 습지는 일반적으로 혐기성 환경으로 유지되며 미생물에 의해 유기물의 상당 부분이 분해된다. 담수시에는 경작지 또한 혐기상태에 있는 습지환경과 유사한 과정으로 대기 중으로 CH₄를 배출한다. 갯벌은 연안 습지로 분류되며 생·지화학적 과정을 통해 온실기체의 배출과 흡수에 관여하고 갯벌에 퇴적된 유기물 외에도 염류의 유용성과 갯벌토양요소 등의 물리화학적 특성에 의하여 조절된다. 육상 생태계에서 발생하는 토양 내의 분해 과정은 산소가 풍부한 호기성 조건에서 이산화탄소(CO₂)를 배출하며, 혐기성 조건에서는 CH₄ 배출이 우세하다(Moore and Knowles, 1989). 수체 내 분해 과정 중에서 썩지 않은 물질은 수체바닥으로 가라앉아 쌓이게 되며, 이런 유기물이 퇴적되어 침수된 환경에서는 산소가 희박하여 호기성 박테리아와 그 이외의 분해 유기체들의 활동이 저하되기 때문에 CO₂의 배출이 제한된다. 산소가 희박한 조건(혐기성 조건)은 수체의 하층에서 공통적으로 발견되며, 이러한 환경에서는 호기성 박테리아 또는 유사형질의 유기체들로부터 유기물질이 분해되는 것을 방지할 수 있다. 하지만 혐기성 박테리아, 황을 이용하는 세균 등은 이러한 환경에 있는 유기물을 분해할 수 있으며, 분해 과정 중 CH₄를 배출하게 된다. 만약, CH₄가 수체 또는 산화된 토양의 상위 층을 통하여 확산된다면, 또 다른 박테리아(메탄산화세

균 등)에 의해서 CH₄가 탈출하기 전에 부분적으로 CO₂로 산화시킨다. 이와 함께 습지에서는 아산화질소(N₂O)의 배출 또한 나타나고 있으나, N₂O 배출은 외부환경으로부터 질소가 지속적으로 공급되지 않는 한 매우 적다. 습지 중 특히 이탄습지들에서 N₂O 배출은 무기화된 질소의 공급, 즉 토양 비옥도에 의해 조절된다. 영양이 풍부한 조건에서는 pH, 온도, 그리고 수위 같은 물리학적 요인들이 무기질소의 질산화 과정과 그에 따른 N₂O의 배출을 조절한다(Klemedtsson *et al.*, 2005; Martikainen *et al.*, 1995).

이번 연구는 보존되어야 할 자연환경으로 중요한 국내습지환경이 기후변화의 중심단어(key word)인 온실기체 배출(source)과 흡수(sink)와 관련해서 지역 환경에 미치는 영향을 이해하기 위한 기초자료를 생산하고 배출특성을 분석하기 위해 수행되었다. 습지는 탄소와 질소의 생지화학순환(biogeochemical cycle) 고리 역할을 하며, 온실기체 수지(budget)에 기여함에도 불구하고 국내 온실기체 배출량 산정과 정에서 조차 현장 측정을 통한 자료축적이 거의 전무한 수준이다(Kim, 2007). 국내습지에서의 배출에 따른 지역과 지구환경 규모에서의 기후변화 영향을 이해하고 대응·적응하기 위해서는 생태적으로 차이가 있는 습지환경에서의 지속적인 현장 측정을 통한 자료축적이 매우 중요한 요건이 될 것이다. 이번 연구에서는 생태적 환경특성이 다른 내륙습지(담수습지)와 서해안습지(갯벌)에서 일년 반 정도의 기간 동안에 계절단위로 주요온실기체 배출량을 측정·분석하고, 토양(또는 수체)의 이화학적분들과의 상관성을 조사하여 온실기체 배출량 변화에 미치는 영향에 대하여 조사·분석하였다.

2. 연구 및 내용

2.1 조사지점

연구 지역 중 내륙 습지의 경우, 군산시 나운동 은파관광단지 내(35° 56'41.96"N, 126° 42'21.05"E)의 습지를 선정하였다. 해당 습지는 자연 습지가 아닌 군산시 내 저수지의 일부분에 조성한 인공 생태습지로서 2010년 3월에 약 5만m²의 부지를 조성하였으며, 연꽃과 통발, 갈대 및 버들 등 약 20여 종의 수생 식물이 서식하고 있는 지역이다. 연안습지인 갯벌의

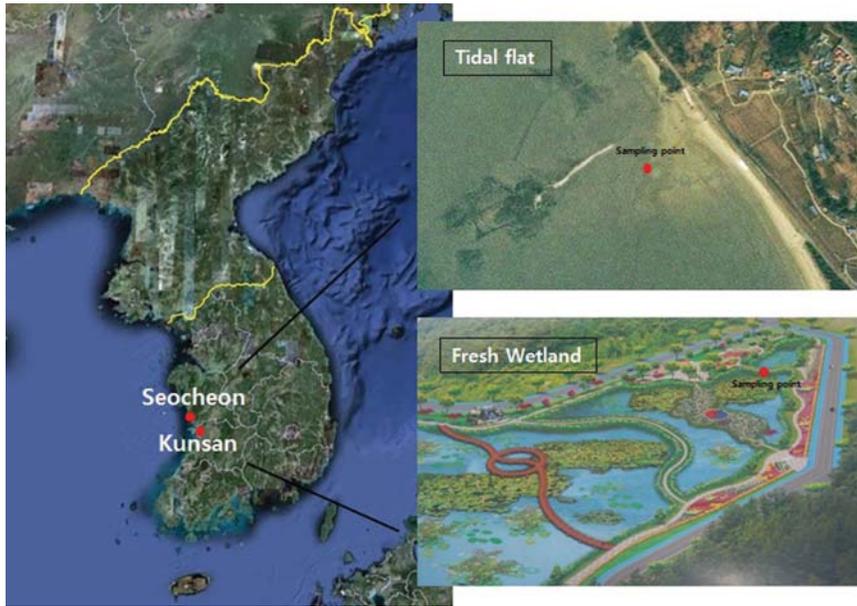


Fig. 1. Map of the sampling sites (freshwater wetland and natural tidal flat).

경우에는 국내 갯벌 중 연구대상인 내륙습지와 지리적으로 가까이 위치한 갯벌을 선정하였다. 선정된 연구지역은 충남 서천군 비인면 장포리에 위치한 갯벌 지역 (36° 07'13.85"N, 126° 35'43.18"E)이었으며, 이들의 위치를 그림 1에 제시하였다.

2.2 Chamber 구성 및 시료채취 방법

지표 또는 수표면 배출량 측정에는 챔버방법 (chamber or enclosure technique)을 사용하였다. 이 방법은 챔버를 표면 위에 설치하여 표면에서 배출되는 기체가 챔버 내부에서 평형상태에 도달하기까지의 시간에 따른 농도 증가율을 측정하고, 증가율을 이용하여 표면에서의 배출량(또는 플럭스)를 산정하는 방법으로 지표로부터의 플럭스 변화를 직접 관찰하는 데 자주 사용되고 있는 측정 방법이다 (Kim, 2007). 이번 연구에 적용된 챔버는 폐쇄형챔버 (closed chamber)이며, 측정 지표면(또는 수체표면) 위에 챔버를 설치 후 챔버 내부와 외부를 단절시킨 후 일정 시간 간격으로 챔버내부의 공기시료를 채취하여 시간에 따른 농도 증가율을 측정하였다.

내륙의 담수습지의 경우는 수체표면 위에서 기체 플럭스를 측정해야하기 때문에 부유식 폐쇄형챔버

(floating closed chamber)를 고안하여 제작 후 사용하였다. 시료채취에 사용된 챔버 형태는 균형을 수월하게 하기 위해 반구형으로 하여 제작하였다(그림 2a). 챔버의 크기는 밑면 706.5 cm², 높이 20 cm인 반구형(약 9.6 L)이다. 챔버는 부유 시에 가능한 물 흐름에 따른 이동을 줄이고 수면으로 부터의 높이를 유지하기 위해 일정한 수준의 무게를 주었으며, 시료채취구 (sampling port)와 온도감지기 설치를 위한 설치구에는 실리콘 o-ring패킹을 사용하여 누출(leaking)을 방지하도록 하였다.

해당 담수습지는 3구역으로 나뉘어져 있고 구역 차이에 따른 수질성분과 환경요소들이 균질하지 않기 때문에 플럭스 챔버 설치 지점이 다름에 따라 배출량에 차이가 나타날 수 있다. 지역배출량의 대표성을 위해서는 가능한 많은 지점에서의 측정을 수행해야 하지만 연구 지역인 습지의 전체 지역을 대상으로 일정 간격으로 챔버를 설치하고 시료를 채취하여 분석하는 것은 이번 연구와 같은 단 기간에 걸친 연구로는 불가능한 일이다. 이번 연구에서는 주어진 연구조건을 최대한 활용하여 해당 습지 수체표면에서의 배출량을 조사하고 동일한 방법으로 측정된 갯벌에서의 배출량과 비교 분석하는 것을 목적으로 하는

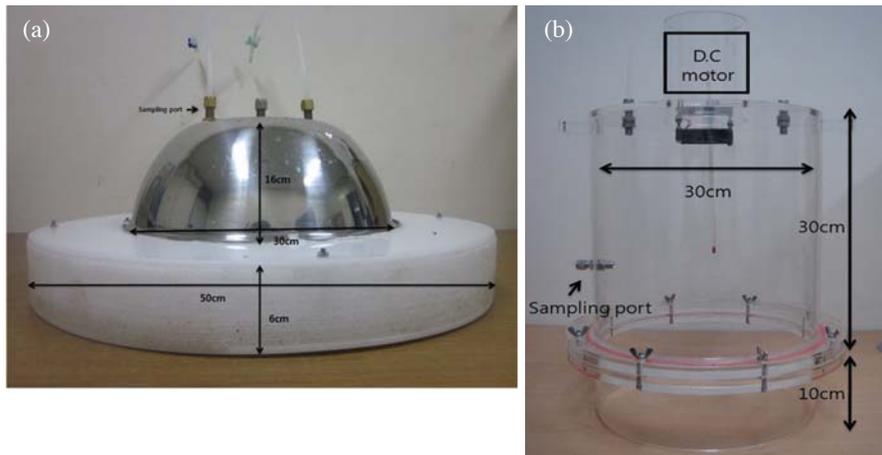


Fig. 2. Schematics of flux chamber system; (a) floating chamber for a constructed wetland and (b) chamber for tidal flat.

기초연구로 시료 측정이 용이한 습지 가장자리의 한 지점을 선택하여 챔버를 설치한 후에 시료를 채취하였다. 시료 채취가 수행된 기간은 2010년 8월~2011년 8월 동안이었으며, 시료 채취 기간 중 계절별로 봄, 여름, 가을철에 해당하는 월에 총 32일 동안에 하루 중 오후 14:00부터 16:00까지 2시간씩 온실기체 배출량 산정을 위한 기체 시료를 채취하였다. 이 때 시료는 항상 정해진 설치지점에 설치된 챔버 내부로부터 루어콕(lure cock)이 장착된 50 mL 주사기를 이용하여 채취되었다.

갯벌의 경우, 시료 채취에 사용된 챔버의 형태는 담수습지와는 달리 갯벌토양 표면에 삽입하여 설치할 수 있도록 그림 2b와 같은 형태로 직경 30 cm, 높이 30 cm인 원통형(부피: 약 21.2 L)으로 투명한 아크릴로 제작하였다. 챔버는 상부 몸체와 하부의 받침 형태로 구분되어 있으며, 상부와 하부에 결합되는 부분은 기체의 누출을 방지하기 위하여 받침 결합부에 홈을 따라 실리콘 O-ring을 장착하였다. 챔버 상부에는 저속 소형 팬을 장착하여 챔버 내부 공기의 균질성을 유지할 수 있게 하였다. 갯벌은 밀물과 썰물의 교차로 갯벌표면(토양)이 드러나는 시간대를 택하여 배출량을 측정하였으며, 결과적으로 항상 일정한 시간 대역에서의 측정이 이루어 질 수 없었다. 갯벌에서의 측정시기와 시간은 국립해양조사원에서 제공되는 조석예보표를 이용하여 2011년 7월~2012년 2월

동안 수행하였다. 실제 플럭스 측정은 각 계절에 해당하는 월에 맑은 날을 택하였다. 측정일 수는 총 28일이었으며 당일 오전 10:00부터 오후 18:00시 사이의 간조 시간에 맞추어 가능한 6시간 이상 배출량 산정을 위한 측정을 실시하였다. 시료채취는 챔버 설치 시에 측정지점 갯벌에 챔버 하부를 삽입함으로써 나타나게 될 토양환경 교란(disturbance)에 따른 영향을 최소화하기 위한 방편으로 챔버 하부를 최소 3~4시간 전에 미리 측정 장소에 설치해야 하지만, 조간대 시간의 변화로 사전 설치가 용이하지 않은 경우도 많았다. 그러한 경우에도 측정 당일 챔버를 최소한 시료채취 30분 전에는 설치하였으며, 2개의 플럭스 챔버를 서로 이웃하여 설치하여 동시에 시료를 채취하여 배출량 산출 자료수를 높여 대표성을 향상시킬 수 있도록 하였다.

시료 채취방법은 완전히 합체된 상태의 챔버 상단에 위치한 시료채취구와 연결된 즉시 lure cock이 달린 주사기를 사용하여 50 mL 정도의 시료를 채취하였다. 매시간 중 20분 동안에 10분 간격(0 min, 10 min, 20 min)으로 각 챔버로부터 3개씩의 시료를 채취하였으며, 시료를 채취한 이후 챔버 상단을 조심스럽게 하단과 분리한 후에 다음 측정 시까지 상부가 열린 상태로 방치를 하여 챔버 내 농도와 주변 대기 농도가 균질하게 두었다. 이후 다음 측정 시간이 되었을 때 챔버 상단을 하단과 결합한 후 동일한 방법

으로 배출량측정을 위한 시료를 채취하였다. 채취한 시료들은 냉암한 저장고에 넣은 후 현장 시료채취가 끝난 즉시 분석실로 이송하였으며, 1~2일 안에 온실기체 (CH₄, CO₂, N₂O) 농도를 분석하였다.

2.3 시료분석 방법 및 배출량 산정

채취한 시료의 분석은 기체크로마토그래피 (GC; Gas Chromatography)를 이용하였으며, 표 1은 온실기체 분석에 사용된 GC의 분석조건을 요약하였다. 분석에 사용된 GC는 Varian CP-3800 Model로 CH₄, CO₂, N₂O를 동시에 분석할 수 있도록 구성하였으며, CH₄ 분석을 위하여 methanizer가 장착되었다. 검출기로는 Pye-Unicam ⁶³Ni를 장착한 전자포획검출기 (Electronic Capture Detector, ECD)와 수소불꽃이온화검출기 (Flame Ionization Detector, FID)를 이용하여 각각 N₂O와 CH₄, CO₂를 분석하였다. 분석에 사용된 컬럼으로는 Porapak Q (80/100 mesh) 3m와 6m를 사용하였으며, 운반가스는 순도 99.999%의 수소 (H₂), 질소(N₂), 공기 (Air)를 사용하였다.

이 후, 플럭스 챔버에서 일정시간 간격으로 채취된 시료들의 GC 분석을 통하여 얻은 온실기체 농도를 이용하여 챔버 내 온실기체 농도의 시간 변화율 (ΔC/Δt)을 구한 결과를 식 (1)의 배출량 산정 식에 대입하여 각 온실기체의 배출량을 산출하였다 (Kim, 2007; Kim and Oh, 2003).

$$Flux = \rho \cdot \left[\frac{V}{A} \right] \cdot \left[\frac{\Delta C}{\Delta t} \right] \cdot \left[\frac{273}{(T+273)} \right] \tag{1}$$

F : flux (mg m⁻² hr⁻¹)

ρ : density of gas (mg m⁻³)

V : volume of the chamber (m³)

A : the bottom area of the chamber (m²)

ΔC/Δt : the average changing rate of concentration with time (ppmV hr⁻¹)

T : average temperature in the chamber (°C)

갯벌 지표 배출량과 갯벌 토양환경인자들과의 상관성분석을 위해서 갯벌에 설치된 챔버 인근에서 토양채취기 (soil auger)를 이용하여 지표로부터 약 30cm 정도의 토양시료를 채취하였으며, 담수 형태인 내륙의 인공습지의 경우는 부유챔버 (floating chamber)가 위치한 수역에서의 이화학적 특성을 파악하기 위해

Table 1. Gas chromatography analysis condition for N₂O, CH₄ and CO₂.

Varian CP-3800		
Gas species	N ₂ O	CH ₄ , CO ₂
Detector	ECD	FID
Flow rate	30 cm ³ /min	30 cm ³ /min
Carrier gas	N ₂ (99.9999%)	Air, H ₂ (99.999%)
Column	Porapak Q (80/100 mesh) 3 m	Porapak Q (80/100 mesh) 6 m
Column temp.	70°C	70°C
Injection temp.	150°C	150°C
Oven temp.	350°C	300°C

1L 채수병에 물을 채수하였다. 채취된 토양, 수질분석을 위한 시료들은 시료의 변질을 최소화 하기위하여 분석하기 전 토양 시료는 자연 건조 시켜 보관을 하였으며, 수질 시료는 발송전까지 냉동 보관하였다. 이들 토양 시료 및 물 시료의 주요 이화학적특성 요소를 분석하기 위해 모든 시료들은 전북 농업기술원에 의뢰하였으며, 분석은 토양화학 분석법과 수질 공정 시험법에 의거하여 각각 수행되었다.

3. 결과 및 논의

3.1 담수습지 배출량

자연 발생원 (source)으로서 습지는 다른 주요 온실기체들에 비하여 CH₄ 배출이 많은 부분을 차지하고 있다. 연구기간 동안 내륙의 담수습지에서 측정된 CH₄ 배출량의 범위는 -0.054~0.942 mg m⁻² hr⁻¹으로 나타나 습지로 흡수 (sink)되는 경우도 있었으나 전체 평균값은 0.155±0.29 mg m⁻² hr⁻¹으로 대부분의 경우 발생원으로서의 역할을 확인할 수 있었다. Freeman *et al.* (2002)의 습지에서의 CH₄ 배출 연구에 따르면 CH₄ 발생은 상대적으로 기온이 높은 여름에 높았고 기온이 낮은 가을에 배출이 낮게 나타났음을 보고하였고, Rask *et al.* (2002)의 습지 배출량 조사연구에서는 CH₄의 배출은 15~30°C에서 온도와 양의 상관성을 갖고 증가함을 보였으나, 온도가 10°C 미만에는 상관성이 거의 없는 것으로 보고하였다. 선행연구 결과는 습지환경에서의 온실기체의 배출에 환경 온도가 매우 중요한 요인으로 작용하고 있으며, 일정 온도 범위에서는 매우 효과적으로 배출량 증가에 영향을 미치고 있음을 보여주고 있다. 본 연구에서도

담수에서의 수온 및 연안습지 내에서 갯벌 지표 온도에 따른 CH₄ 배출량 변화 영향을 분석하였다.

표 2는 측정기간 동안 수행된 내륙습지인 인공생태습지 수면에서 부유채버로부터 시료채취 방법에 준하여 연구기간 동안(2010년 8월 23일~2011년 8월 25일)에 계절 특성을 고려하여 해당 월에 채취된 시료들을 분석하여 산출된 주요 온실기체(N₂O, CO₂, CH₄)들의 일평균(daily average)배출량과 시료 채취할 때의 챔버 주위의 수온과 pH, 질소함량 등 수체의 주요 이화학특성 분석결과를 제시한 것이다. 그림 3(a)에서는 연구 기간 중 담수습지의 이화학 특성치들과 측정된 온실기체 배출량의 일별 변화를 제시하였다. 일평균 CH₄의 배출량은 측정기간 중에서도 여름철인 2011년 7월과 8월에 특히 높은 배출을 보였으며, 여름철 수온에 비해 10°C 이상 상대적으로 낮았던 다른 기간에서는 매우 낮게 나타나 일정 수온 이상에서의 온도 증가가 CH₄의 배출 증대에 크게 영향을 미치고 있을 것으로 추정되었다. 이러한 온도 증가에 따른 배출 증가 경향은 그림 3(a)의 CO₂ 배출 변화에서도 나타나고 있어 여름철 얕은 습지에서의 높은 수온(~30°C)에서는 CH₄와 CO₂배출이 동시에 높게 나타날 수 있음을 보였다. 이 경우 배출되는 CO₂ 중 일부는 얕은 습지에서 수면을 통해 배출되는 CH₄의 산화(oxidation)에 의한 것일 수도 있을 것이다. 그러나 N₂O 배출의 경우에는 동일한 여름철 기온 상승 기간 중에서도 수온이 ~30°C 이상일 때와 이하일 경우에 배출 양상이 다르게 나타났다. ~30°C 이상에서는 0.00159~0.00726 mg m⁻² hr⁻¹의 높은 배출을 보였으나, 7월 22일 이후 수온이 ~30°C 이하로 나타난 기간 중의 배출량은 -0.00219~0.0079 mg m⁻² hr⁻¹로 상대적으로 낮았으며 흡수원으로도 작용하였음을 보였다. 이 기간 중 수온의 차이와 함께 변화가 있었던 환경인자는 pH와 질소량 변화보다는 T-P량의 변화가 확인되었으며 높은 수온 기간 중에 상대적으로 낮았다. 이를 고려한다면 습지환경에서의 탄소와 질소의 생지화학순환(bio-geo-chemical cycle) 과정의 차이로 인해 CH₄, CO₂와 N₂O 배출 양상이 주어진 환경 인자에 다르게 영향을 받았기 때문이었을 것으로 판단된다.

전반적으로 측정기간 동안의 습지의 수온을 포함한 pH 등 습지 수체의 이화학특성과 함께 표 2와 그림 3(a)에서 보듯이 주요 온실기체 배출량의 크기는

2011년 여름철 측정기간 중에 가장 높게 나타났다. 이러한 결과는 여름철 높았던 기온 영향으로 수온 증가가 주요 원인이었을 것이나 그와 함께 pH 변화, T-N, T-P량의 변화도 작용했을 것으로 생각된다. 상대적으로 보면 2010년 8월 23일~25일 기간에서의 온실기체 배출량은 수온이 ~30°C 이하이었지만 그해 기간 평균이 29.3°C로 비교적 높았음에도 CH₄와 CO₂ 배출량이 각각 0.009±0.014 mg m⁻² hr⁻¹, -20.52±25.50 mg m⁻² hr⁻¹으로 2011년 여름철 CH₄와 CO₂ 배출량인 0.562±0.337 mg m⁻² hr⁻¹, 115.44±85.61 mg m⁻² hr⁻¹에 비해 현저히 낮았다. 이 기간 중 다른 환경 인자들의 변화 보다는 pH의 변화가 가장 심하게 나타났으며(2011년 여름, pH 6.58±0.08; 2010년 여름, pH 7.84±0.31), 측정기간 중에 나타난 pH의 차이가 수온 변화와 함께 수체내의 탄소 순환에 영향을 주어 배출량의 차이로 나타났을 것이다. 결과적으로 습지환경에서의 온실기체 배출은 외부요인을 조절할 수 있는 실험실 조건과는 매우 다르며 주요 환경인자들의 배출량에 대한 상호작용을 이해하는 것이 보다 중요할 것으로 판단된다.

여름철을 제외한 N₂O의 배출량은 전반적으로 CO₂와 CH₄에 비해서는 낮거나 배출이 일어나지 않았으며, 측정기간 중 10월에 상대적으로 높은 배출(0.007±0.01 mg m⁻² hr⁻¹)을 보였다. 이 때 10월 평균 배출량이 높았던 이유로는 해당 월이나 계절에 따른 특성 보다는 다른 측정 일에 비해 10월 6일에 측정된 배출량이 측정 기간 동안에 현저히 높았던 것이 가장 큰 원인일 것이다. 특히 10월 6일의 경우 T-N 농도가 4.02%로 가장 높았으며 이때의 T-N 증가는 당시 측정 현장에서 20°C 가까운 적정한 수온과 측정 당일 전에 강수로 주변 오염원을 포함한 습지주변의 유입수에 영향이 크게 나타났기 때문일 것으로 판단된다. CO₂의 배출은 7월에 높은 CO₂의 배출량(120.26±100.13 mg m⁻² hr⁻¹)을 보였으며, 평균값은 17.30±73.27 mg m⁻² hr⁻¹으로 전반적으로 배출원로서의 습지역활이 있음이 확인되었으나, 일별 경향에서는 흡수되는 경우도 나타나서 CH₄와 유사한 배출경향을 보였다. 연구 기간 동안에 담수습지내의 CO₂의 배출은 온도에 따른 영향이 높았을 것으로 판단되며 습지 내에서 서식하고 있는 수생 식물들의 광합성 작용 및 수생 생물들의 호흡을 통한 CO₂ 배출과 함께 수체에서 배출되는 CH₄의 산화작용에 따른 기여도 있

Table 2. Daily average of GHG's fluxes and water parameter for the experimental period (constructed wetland).

Date (Days)	Flux ($\text{mg m}^{-2} \text{hr}^{-1}$)				pH	Water temp. (°C)	Water elements					
	N ₂ O flux	CO ₂ flux	CH ₄ flux				NH ₃ ⁺ -N (mg L^{-1})	NO ₃ ⁻ -N (mg L^{-1})	T-N (%)	PO ₄ -P (mg L^{-1})	T-P (%)	
08/23	-0.0005	-30.0150	-0.0053	-	-	29.4	-	-	-	-	-	-
24	0.0070	8.3651	0.0111	8.2	8.2	29.1	0.36	0.73	2.50	0.11	0.11	0.11
25	-0.0004	-39.9208	0.0225	7.8	7.8	29.3	0.29	0.75	2.41	0.09	0.09	0.09
09/15	-0.0058	-16.7683	0.0132	7.6	7.6	28.6	0.13	0.63	1.91	0.04	0.04	0.03
17	0.0062	-7.2508	0.1155	6.8	6.8	25.3	0.81	0.70	3.51	0.24	0.24	0.29
20	0.0017	-0.6075	0.0125	6.7	6.7	25.3	0.73	1.23	3.56	0.27	0.27	0.33
27	-0.0012	5.1818	-0.0084	6.6	6.6	21.5	0.98	0.57	3.35	0.15	0.15	0.20
10/06	0.0191	-25.7670	0.0300	6.4	6.4	19.3	0.75	0.83	4.02	0.13	0.13	0.30
11	0.0002	-42.1246	-0.0349	6.3	6.3	18.1	0.62	0.86	2.93	0.19	0.19	0.20
18	0.0020	30.8376	0.0095	6.5	6.5	16.2	0.15	0.64	3.38	0.05	0.05	0.17
11/08	0.0050	-12.7953	-0.0183	6.6	6.6	12.0	0.19	0.83	3.35	0.02	0.02	0.15
10	0.0065	19.6619	-0.0114	6.5	6.5	9.8	0.28	0.51	3.66	0.13	0.13	0.18
12	-0.0007	-52.4376	0.0008	6.5	6.5	11.6	1.54	0.86	4.03	0.14	0.14	1.98
12/01	0.0037	-20.4493	0.0088	6.5	6.5	9.9	0.87	0.67	2.98	0.09	0.09	0.11
03/02	0.0055	-3.0665	-0.0321	6.7	6.7	8.5	1.87	13.46	3.69	0.20	0.20	0.58
04	0.0072	-1.6520	0.0009	6.7	6.7	8.5	2.10	12.49	5.64	0.15	0.15	0.23
09	-0.0043	-37.2198	-0.0352	6.9	6.9	8.4	0.90	12.58	3.07	0.07	0.07	0.02
14	0.0037	11.2690	0.0148	6.8	6.8	11.7	0.80	10.63	3.05	0.06	0.06	0.02
16	-0.0013	-40.4222	0.0108	6.7	6.7	9.0	0.58	10.26	2.98	0.05	0.05	0.03
21	-0.0006	3.7680	-0.0543	6.7	6.7	11.4	0.57	0.92	1.98	0.05	0.05	0.01
04/25	-0.0007	-34.2606	0.0167	8.6	8.6	17.5	0.59	0.91	2.06	0.05	0.05	0.22
27	0.0013	1.4432	0.0105	8.2	8.2	15.2	0.90	2.14	5.77	0.05	0.05	0.56
05/30	-0.0002	-38.7813	0.3249	8.0	8.0	20.4	0.69	0.98	2.42	0.04	0.04	0.26
06/01	0.0015	-46.8671	0.0616	7.9	7.9	18.9	0.52	0.79	2.48	0.19	0.19	0.23
07/18	0.0159	-20.5533	0.0657	6.6	6.6	32.3	0.84	1.86	3.43	0.42	0.42	0.81
07/20	0.0726	77.4544	0.1871	6.7	6.7	30.8	0.77	2.55	3.97	0.24	0.24	0.45
22	0.0213	61.7085	0.7217	6.6	6.6	32.3	0.63	0.92	2.29	0.18	0.18	0.38
25	-0.0013	164.8593	0.3133	6.5	6.5	29.5	0.50	1.03	2.61	0.21	0.21	0.39
27	0.0079	175.6094	0.9416	6.6	6.6	29.7	0.40	1.20	2.49	0.23	0.23	0.50
29	-0.0219	261.6567	0.8567	6.6	6.6	29.8	0.58	1.34	3.16	0.25	0.25	0.48
08/03	0.0001	119.1770	0.6662	6.7	6.7	29.7	0.61	1.19	2.96	0.56	0.56	0.60
05	-0.0145	83.5967	0.7399	6.5	6.5	29.7	1.08	1.81	4.58	1.03	1.03	1.82
Aver.	0.0042±0.01	17.30±73.27	0.15±0.29	6.9±0.6	6.9±0.6	20.6	0.73±0.5	2.80±4.1	3.23±0.9	0.18±0.2	0.18±0.2	0.38±0.5
S.E	0.001	4.58	0.02	0.04	0.04	0.54	0.03	0.27	0.06	0.01	0.01	0.03

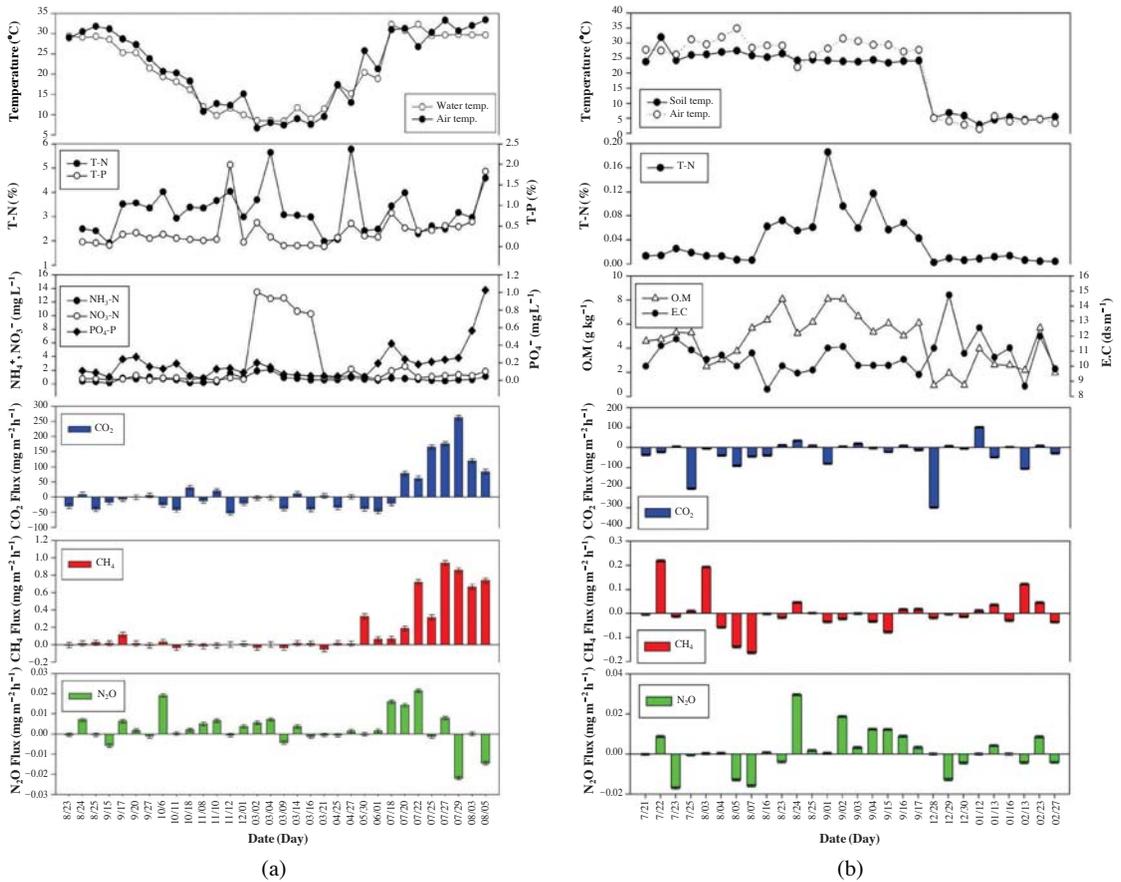


Fig. 3. Daily averages of GHG's fluxes and controlling parameters at (a) inland constructed wetland, and (b) tidal flat site during the experimental period.

을 것이다.

3.2 연안습지 배출량

갯벌은 앞서 언급하였듯이 습지의 한 부분으로 연안습지로 구분 되어있다. 연안습지인 갯벌은 조수 간만의 차가 있어 수면 깊이의 차이가 크며, 내륙의 담수습지와 다르게 환경 상태가 수시로 바뀌어 습지라 하더라도 그 배출량과 배출 특성은 내륙습지의 그것과는 차이가 있을 것으로 생각된다. 갯벌 배출량의 측정은 시료 채취를 용이하게 하기 위해 해수면이 가장 낮은 간조시(10 cm 이하) 시간을 택하여 폐쇄형 챔버를 이용한 배출량 측정시료를 2.2절에서 제시한 시료채취 방법에 준하여 실시하였으며, 측정기간 동

안에 산출된 일별 평균배출량과 갯벌 모양의 이화학 인자들의 분석 결과, 배출경향을 표 3과 그림 3(b)에 나타내었다.

측정기간 동안의 갯벌의 CH₄ 배출범위는 -0.164 ~ 0.219 mg m⁻² hr⁻¹로 평균 flux가 0.002±0.08 mg m⁻² hr⁻¹로 산정이 되었다. 전반적으로 갯벌 지역에서의 CH₄의 배출은 갯벌토양온도와 일정 상관성 없이 배출과 흡수가 나타났으며 계절변화에 따른 일별 배출 경향 또한 확인할 수 없었다. 이는 갯벌 환경조절 인자들에 따른 배출량과의 상관성 조사 경향에서도 나타났는데, Bartlett *et al.* (1987), Magenheimer *et al.* (1996)의 갯벌연구에 의하면 염분이 높을수록 CH₄의 감소를 보인다고 보고 하였으나, 이번 갯벌에서의

Table 3. Daily average of GHG's fluxes and soil parameter for the experimental period (tidal flat).

Date (Days)	Flux (mg m ⁻² hr ⁻¹)			Soil elements				
	N ₂ O flux	CO ₂ flux	CH ₄ flux	pH	Soil temp. (°C)	E.C (dS m ⁻¹)	O.M (g kg ⁻¹)	T-N (%)
07/21	0.000	-37.386	-0.004	8.3	23.8	10.0	4.59	0.01
22	0.009	-23.010	0.219	8.3	31.9	11.4	4.76	0.01
23	-0.017	5.238	-0.013	8.3	24.2	11.8	5.31	0.03
25	-0.001	-204.273	0.010	8.3	26.0	11.1	5.28	0.02
08/03	0.000	-5.162	0.193	8.5	26.2	10.4	2.48	0.01
04	0.000	-39.435	-0.058	8.5	27.0	10.7	3.03	0.01
05	-0.013	-90.756	-0.139	8.6	27.5	10.0	3.76	0.01
07	-0.016	-45.281	-0.164	8.6	25.8	10.9	5.69	0.01
16	0.001	-39.718	-0.002	8.6	25.3	8.5	6.34	0.06
23	-0.004	11.174	-0.017	8.7	26.5	10.0	8.07	0.07
24	0.030	34.208	0.046	8.7	24.2	9.5	5.24	0.06
25	0.002	9.894	0.002	8.8	24.5	9.8	6.17	0.06
09/01	0.001	-80.425	-0.036	8.7	24.2	11.2	8.10	0.19
02	0.019	5.430	-0.023	8.8	23.9	11.3	8.10	0.10
03	0.003	19.867	-0.001	8.9	23.8	10.1	6.65	0.06
04	0.012	-2.993	-0.033	8.8	24.4	10.1	5.34	0.12
15	0.012	-21.985	-0.077	8.9	23.4	10.1	6.07	0.06
16	0.009	9.513	0.017	8.8	24.0	10.5	5.03	0.07
17	0.003	-12.643	0.018	8.9	24.2	9.4	6.10	0.04
12/28	-0.019	-298.874	0.000	8.8	5.1	11.2	0.92	0.002
29	-0.003	8.193	-0.013	8.8	6.8	14.7	1.93	0.009
30	-0.014	-4.950	-0.004	8.8	5.8	10.8	0.93	0.006
01/12	0.013	101.932	0.000	8.7	2.8	12.6	3.97	0.009
13	0.036	-47.815	0.004	8.9	4.5	10.6	2.62	0.012
16	-0.030	2.575	0.000	8.9	5.4	11.2	2.59	0.014
02/13	-0.004	-31.175	0.122	9.0	4.5	8.7	2.17	0.006
23	0.009	75.333	0.045	8.0	4.7	12.0	5.69	0.005
27	-0.004	-298.874	-0.036	8.9	5.5	9.8	1.97	0.004
Aver.	0.001±0.01	-31.175±75.33	0.002±0.08	8.7±0.2	18.8	10.6±1.2	4.6±2.1	0.04±0.04
S.E	0.001	5.38	0.006	0.02	0.70	0.09	0.15	0.003

일별 배출량의 변화와 전기전도도와와의 상관성을 확인해 보았으나 일관성 있는 변화 경향을 확인할 수 없었다. 이러한 원인으로는 여러 가지를 고려할 수 있겠지만 람사협약에서 광의의 습지에 대한 정의와는 달리 국내의 조석간만의 차이가 심한 서해 갯벌과 선행연구의 대상이었던 국외 염습지환경의 생태적 차이가 있어 배출 경향에서 차이를 나타내 영향을 미치는 것으로 생각된다. N₂O와 CO₂의 경우에도 각각 -0.017~0.03 mg m⁻² hr⁻¹, -298.874~101.932 mg m⁻² hr⁻¹으로 극히 미비한 배출 및 흡수를 보였으나, N₂O의 경우 늦은 여름과 가을철에 측정일 평균배출이 나타난 빈도도 높았고 그 값의 범위도

0.00~0.03 mg m⁻² hr⁻¹으로 다른 계절 측정일 평균에 비해 높은 것으로 나타났다. Wang *et al.* (2007), Søvik and Kløve (2007)의 배출량측정의 계절적 비교에서도 여름과 가을에는 비교적 높은 배출량을 보였으며, 봄, 겨울에는 낮게 나타났음을 보고하였다. 또한, 이 같은 결과는 중위도 내지 중고위도 지역에서 결빙/해동 과정에서의 N₂O 발생과정에 영향을 주는 것으로 지표 온도와와의 상관관계가 나타나고 있는 것을 보여주고 있다. 갯벌에서의 CO₂의 경우에는 배출(source)보다는 흡수(sink)가 주로 일어났으며, 배출에 영향을 미치는 환경인자와의 상관성 또한 확인하기 어려웠다. 이들 상관성에 대해서는 다음 절에서

상세히 논의하였다.

전반적으로 갯벌배출량 측정기간 중 온실기체 배출 경향은 주변 환경인자들 중에서는 온도에 따른 영향력이 상대적으로 높았으나 과거 농경지에서의 경우처럼 뚜렷한 상승 경향은 확인할 수 없었다. 이와 같은 경향 차이는 갯벌 토양기질(matrix)이 농경지 토양과는 달리 미립자인 silt 형태로 입자 사이의 공극이 미세하거나 공극이 거의 없고 항상 거의 수분포화 상태로 표면으로의 기체 배출을 제한할 수 있는 조건이며, 서해 갯벌의 특징인 큰 조석간만의 차이로 갯벌이 드러났을 경우에 있어서도 측정일에 따라 환경변수의 변화가 심하게 나타나기 때문으로 생각된다. 또한, 갯벌에서 서식하는 갯벌생물들의 호흡 등 대사 관련 영향도 고려되어야 할 것으로 판단된다.

담수습지와 갯벌로부터의 주요 온실기체 배출은 담수된 논 경작지와 유사한 배출·흡수 메커니즘을 보이며 환경조절 인자들과의 상관성도 서로 비슷한 양상을 보일 수 있을 것으로 사료되었다. 그러나 이들 습지에서의 온실기체 배출은 온도와 pH, 질소함량 등과 같은 조절인자들과의 관계에서 논에서처럼 일관성 있는 경향성을 찾기가 어려웠다. 이러한 원인은 습지환경에서의 항시 담수로 인한 수체환경의 이화학적 인자들의 변화가 기상조건(강수, 바람, 기온 등)과 주변 환경적 요인(습지로 유입되는 수질 변화)에 크게 영향을 받아 변동 폭이 심하기 때문인 것으로 판단된다. 결과적으로 습지 온실기체 배출 변화는 측정지점의 수체의 이화학특성과 더불어 주변의 기상조건 변화와 환경에 따른 수생태계 변화의 영향 또한 고려하여 시간공간영역을 보다 확장하여 조사·평가해야 할 것이다.

3. 3 온실기체배출량과 조절인자 (controlling factors)

Kadlec and Knight (1996)에 따르면 일반적으로 인공습지에서 N_2O 를 배출하는 생산과정은 주로 탈질화(denitrification)에 따른 것으로 보고하고 있으며, Martens and Klump (1980)에 의하면 CH_4 의 배출은 수생 동물들의 활동에 따른 습지면의 파헤침 등으로 과포화 된 CH_4 가 분출되는 경우 주로 나타난다고 보고하였다. 이번 연구에서는 습지환경에서의 온실기체 배출량을 측정하여 배출규모를 확인하는 한편 측정된 습지환경에서의 배출에 영향을 줄 수 있는 조절

인자들(controlling factors) 중 온도와 이화학분석 값(측정기간 중 온실기체시료와 동시에 채취하여 분석)들과 측정된 배출량 사이의 연관성을 분석하였다. 배출량과 습지환경에서의 이들 주요 조절인자들 사이의 상관성 분석은 실제 측정 환경에서 온실기체들의 배출에 중심적 역할을 하고 있는 탄소와 질소순환의 생지화학과정(bio-geo-chemical process)을 이해하는데 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

측정된 온실기체 배출량에 대한 주요 조절인자의 영향을 분석하기 위하여 서로의 1:1의 상관성 조사를 수행하였다. 측정된 환경조절인자와 그에 따른 배출량 산출자료가 장기간에 걸쳐 연속적으로 수행되어 그 자료가 충분하다면 보다 면밀한 통계기법을 적용하여 상관성 분석을 수행할 수 있겠으나, 이번 연구의 경우는 단 기간 연구이며 측정 대상이 자연 환경으로 현장측정의 제약과 측정방법의 어려움으로 지속적이고 연속적인 자료 확보가 불가능하였다. 그러나 측정일 중 한번이 아닌 현장에 머무르는 시간 동안(최소 2시간에서 6시간까지)의 매시간 배출량 측정 자료를 활용할 수 있어 1:1 상관성에 따른 조절인자변화에 따른 배출량의 경향성을 직선성(linearity)의 정도를 이용하여 평가할 수 있을 것이다. 측정기간 동안에 수행되어 산출된 담수습지와 갯벌에서의 배출량과 온도(담수습지의 경우는 수체온도, 갯벌의 경우는 갯벌토 온도)의 x-y plot과 배출량과 주요 이화학특성 값들(수체와 갯벌토의 이화학 성분량)과의 x-y plot을 그림 4와 5에 각각 나타내고, 이들 사이의 상관계수(R^2)와 유의성 검정을 위한 p 값(p-value)을 함께 제시하였다.

그림 4에서 온실기체배출량과 온도와의 상관성을 조사하기 위해 분석된 결과를 보면 담수습지에서의 모든 기체 배출량은 온도 증가에 따라 함께 상승하는 경향성을 보였으나, 갯벌의 경우는 거의 변화 경향을 보이지 않는 것으로 나타났다. 각 기체별로 보면 측정결과 산출된 담수습지에서의 배출량과 수온의 상관성을 분석한 결과, CH_4 는 $R^2=0.3333$ 의 상관계수를 나타냈으며, CO_2 와 N_2O 의 경우 각각 $R^2=0.2345$, $R^2=0.0262$ 로 나타났다(그림 4). 계절별 배출 경향에서 나타난 것처럼 CH_4 가 다른 온실기체보다 높은 수온에서 상대적으로 높은 배출을 보여 온도에 따른 배출영향이 보다 민감한 것으로 나타났다. N_2O 의 경우 앞서 계절 경향성 분석에서 낮은 여름철과 가을

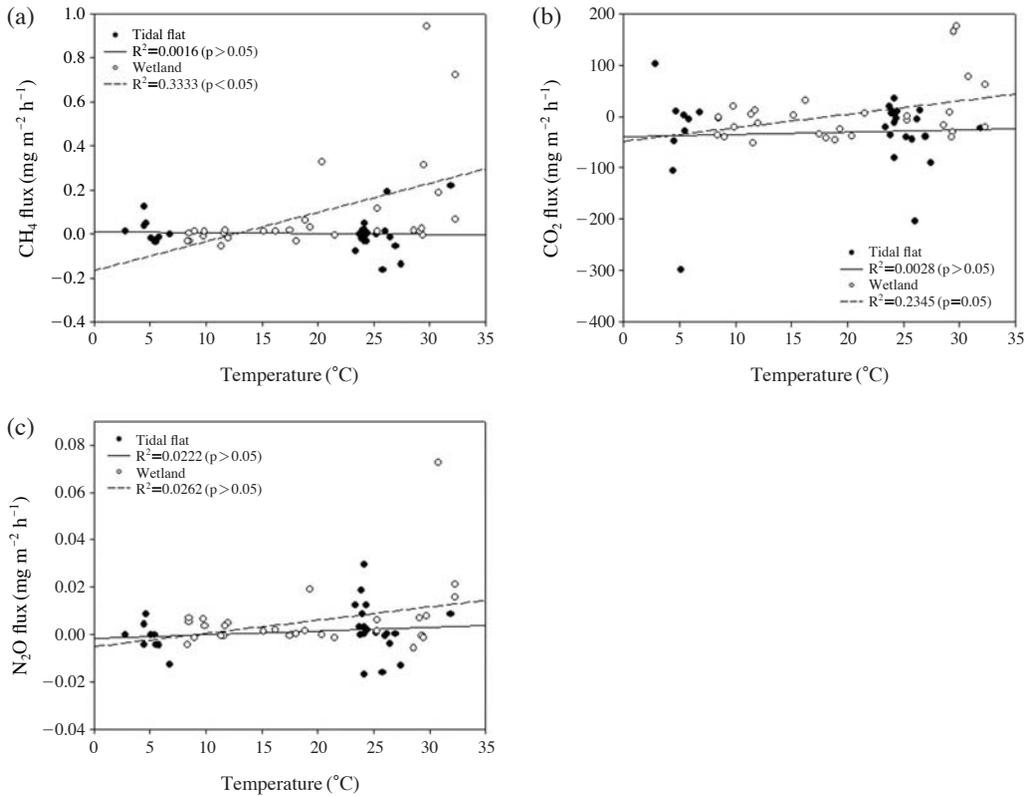


Fig. 4. x-y plots for linear correlation between GHG's flux and temperature at the experimental sites.

철 상대적으로 높아진 온도의 영향으로 배출량의 증가를 보였으나, 1:1 상관성 분석에서는 다른 기체에 비해서는 R² 값이 낮아 약한 상관성을 보였다. 담수습지에서의 CH₄와 수체의 이화학적특성을 나타내는 조절 인자와의 상관성 분석에 있어서 PO₄⁻P와 T-P와의 상관관계를 그림 5(a)와 5(b)에 나타내었으며, CH₄ 배출량과 이들과의 상관계수는 각각 R²=0.3204, R²=0.1253으로 비교적 높은 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. CH₄ 배출량과 인(P)과의 상관관계가 높은 것은 습지 내 깊은 곳의 혐기성 환경조성으로 미생물의 활동에 따른 유기물의 분해로 CH₄ 발생이 있는 것으로 생각된다. 그림 5(c), 5(d), 5(e)는 담수습지에서 CH₄ 이외의 다른 기체들인 CO₂와 N₂O 배출량의 수체 내 질소함량과의 1:1 상관성을 나타낸 것이다. NH₃⁺-N, NO₃⁻-N에 따른 온실기체와의 상관관계에서 각각 CO₂의 경우 각각 R²=0.023, R²=0.0255, N₂O

의 경우 R²=0.0021, R²=0.001로 매우 낮은 상관성을 보였다. 한편 CO₂ 배출의 경우는 유용질소량(NO₃⁻-N, NH₄⁺-N)의 증가에 따라 배출량 감소 경향이 있음으로 나타났으나, N₂O 배출의 경우는 거의 변화가 없었다. 일반적으로 N₂O의 경우 질산화와 탈질화 과정을 통하여 N₂O의 배출이 일어나며, CO₂의 배출은 호기성 상태의 산화 과정에 의해 발생이 일어난다. 이와 같은 결과를 종합하여 볼 때, 담수습지의 온실기체 배출에는 온도 영향이 중요한 인자로 고려 될 수 있으나, 그로 인해 전적으로 온실기체 배출이 조절되는 것은 아닐 것이다. 단편적으로 담수습지 내에서 수생 식물의 광합성에 의한 CO₂ 흡수와 함께 수생 생물로부터의 호흡 및 수체의 와류 현상에 의해 수체에 포화 되었던 온실기체들의 방출, 기후 변화에 따른 영향과 조성 습지의 퇴적층의 상태에 따른 영향 등 습지 온실기체의 배출과 흡수에 관여하는 요소들

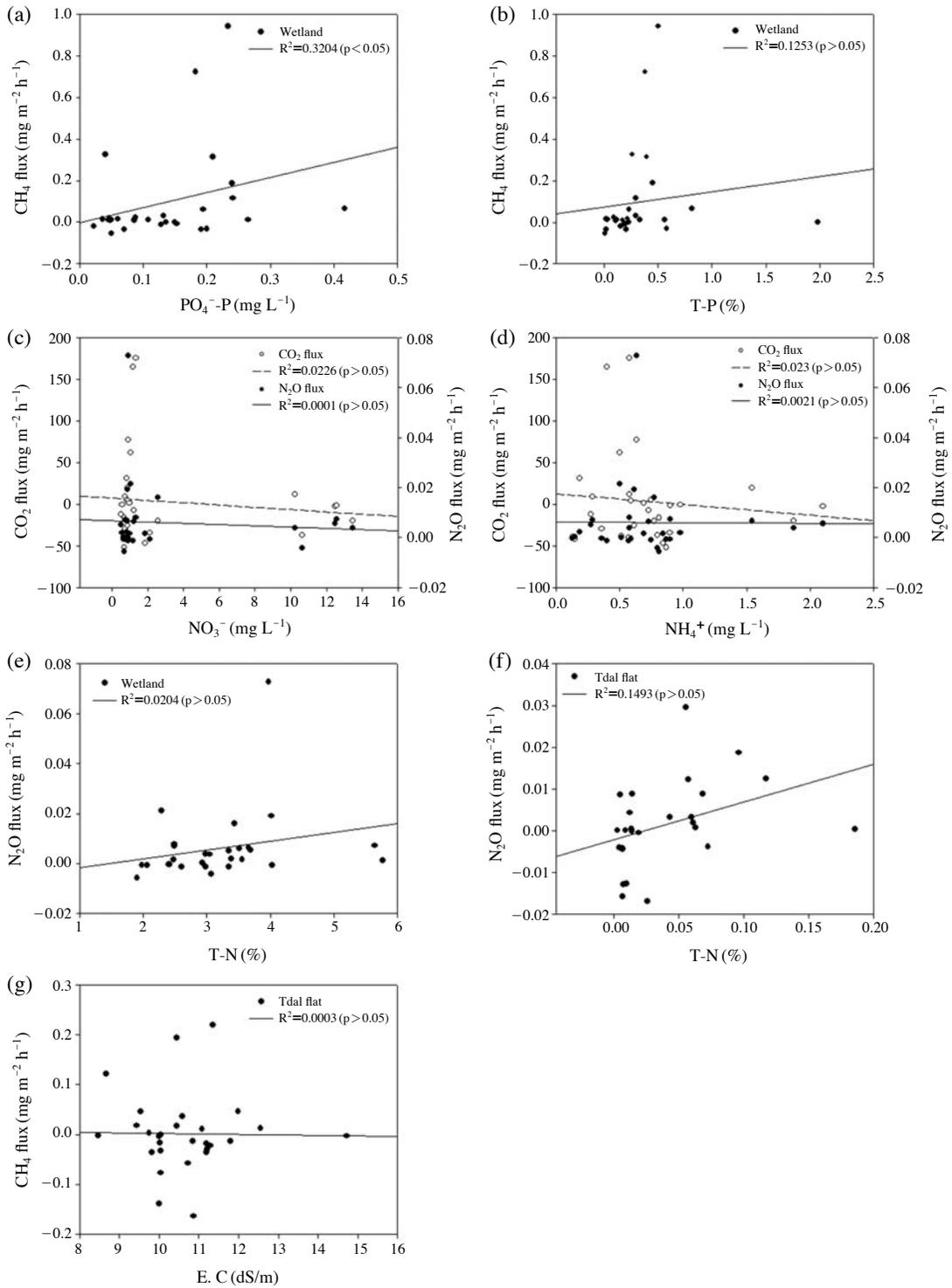


Fig. 5. x-y plots for linear correlation between GHG's flux and chemical controlling factors.

의 역할도 중요하다.

담수습지와는 달리 연안습지인 갯벌측정을 통한 배출량 산출 결과에서는 온실기체와 조절인자와의 상관관계에서는 전반적으로 담수습지에 비해 상대적으로 약한 1:1 상관성이 나타났다. 온도와와의 상관관계의 경우 담수습지와는 달리 모든 온실기체 배출량이 온도 증가에 따른 변화를 보이지 않았다. 담수습지에서의 CH₄의 경우 상관계수인 R²는 0.3333이었지만 갯벌의 경우 토양온도와와의 상관계수 R²는 0.0016으로 매우 낮게 나타났다(그림 4(a)). 또한 선행연구(Magenheimer *et al.*, 1996; Bartlett *et al.*, 1987)에 의하면 염분 농도의 증·감에 따라 CH₄의 배출에 영향을 미친다고 보고하였으나, 본 연구 결과의 전기전도도(EC)와의 상관관계(그림 5(g))는 R²=0.0003 (p>0.05)으로 통계적 유의성이 없는 것으로 나타났다. N₂O 배출의 경우에도 T-N과의 상관관계에서 경향성은 확인할 수 있었으나 담수습지에 비해 극미량의 T-N 함유량이 존재하였으며, R²=0.1493 (p>0.05)로 낮은 상관관계를 나타내었다(그림 5(f)). 일반적으로 T-N의 양이 증가할수록 높은 N₂O의 배출이 기대되고 이번 연구 결과에서도 담수습지와 갯벌에서의 N₂O 배출량은 T-N 증가에 따라 증가하는 경향을 보였으나, 모두 신뢰 구간에서의 통계적 유의성은 나타나지 않았다. 전반적으로 연안습지인 갯벌에서는 온실기체 배출보다는 흡수가 주로 일어났으며 1:1 상관성 조사에 따른 상관관계 또한 낮은 상관성을 나타냈다. 그 원인으로서는 자연환경을 관찰하고 측정하기에 충분한 시간과 확보된 자료의 한계가 있을 것이며, 한편으로 연구지역인 연안습지로서의 서해갯벌은 앞서 언급하였듯이 조차가 큰 조수 간만의 영향으로 수시로 측정 일시에 따라 측정지점의 환경변화가 심하며, 이와 함께 갯벌 생물 등에 의한 토양 형태 변화로 기체배출기구(gas emission mechanism)의 특성이 다른 내륙 토양의 물리화학적 변화 특성과는 매우 다르기 때문일 것으로 판단된다. 대기로의 기체배출과 관련해서는 갯벌의 물리적 토양 상태가 펄 갯벌로써 토양 입자 사이의 공극이 아주 미세하여 온실기체의 배출이 억제될 수 있으며, 내륙 습지와는 달리 연안습지의 염분 높은 해수와 성분 중 황산염의 영향으로 퇴적물 내의 유기물 분해가 방해되어 CH₄ 생성을 억제하는 것으로 생각된다(Kim *et al.*, 2006).

4. 결 론

측정기간 동안 내륙 담수습지 배출량의 증·감은 상관분석에 의한 조사결과 온도변화에 따른 경향이 높았던 것으로 판단되었다. 담수습지 내의 수온과 CH₄ 배출량 사이의 상관계수(R²)는 0.3333이었으며, p<0.05으로 95% 신뢰수준에서 유의성을 보였다. CO₂와 N₂O배출량의 경우 수온에 따라 증가하는 경향을 보이고 있었으나, 상관분석결과에 따른 상관계수들은 R²=0.2345 (p=0.05)와 R²=0.0262 (p>0.05)으로 신뢰수준에서 유의성을 확인할 수 없었다. 화학 특성 조절인자와의 상관분석 결과에서 CH₄ 배출량은 다른 인자들보다는 인산염(PO₄⁻P)과 상대적으로 높은 상관성(R²=0.3204 (p<0.05))을 나타내었다. 이는 습지의 혐기성 환경 조성으로 습지 내 깊은 곳에서의 유기물 분해로 인한 CH₄ 발생이 있었던 때문으로 생각된다.

갯벌에서 온실기체의 배출은 극히 미약하였으며, CH₄배출 변화와 온도 변화와는 일관된 형태의 변화 경향을 확인할 수 없었다. N₂O의 경우 늦은 여름철과 이른 가을철에 가장 높은 배출을 보여 지표 온도 증가에 따른 배출량의 증가를 보이는 것으로 추정되지만, 전반적으로 배출보다 높은 갯벌로의 흡수로 인하여 전체적으로는 온도 상승에 따른 배출 증가 경향을 판단하기는 불확실하였다. 상관 분석에 있어서도 CH₄과 N₂O 배출의 경우 갯벌 토양온도와와의 상관계수는 각각 R²=0.0016 (p>0.05), R²=0.0222 (p>0.05)으로 담수습지의 경우에서 보다 모두 상대적으로 매우 낮은 상관관계를 보였으며, 통계적 유의성도 나타나지 않았다. 전반적으로 이번 연구를 통해 측정된 결과가 해당 생태환경의 대표성을 갖기에는 무리가 있을 것이다. 이를 극복하기 위해서는 자연환경의 지속적인 관찰과 측정을 통해 장기간 동안에 축적된 자료의 확보가 선결되어야 한다. 서해갯벌은 조차가 커서 측정 일시에 따른 측정지점의 갯벌토양의 변화가 심하며, 갯벌생물 서식 등에 따른 환경변화로 배출기구(emission mechanism)의 특성이 내륙의 토양 환경 변화 특성과는 매우 차이가 있다. 대기로의 기체배출과 관련해서는 갯벌의 물리적 토양 상태가 펄 갯벌로써 토양 입자 사이의 공극이 아주 미세하고 수포화 상태로 있어 온실기체의 배출이 상대적으로

억제될 수 있다.

결론적으로 측정기간 동안의 담수습지와 갯벌에서의 온실기체 배출량은 논밭과 같은 경작지에서보다는 비교적 적은 양의 배출 또는 흡수가 나타났다. 측정지점의 환경인자 변화에 따른 온실기체 배출량의 상관성 조사에서도 비교적 낮은 상관성을 보였으며, 조절 인자들과의 상호복합관계로 인하여 배출량과의 1:1 상관성 경향도 일부 조절인자들을 제외하고는 낮게 나타났다. 그러나 지역규모에서 기후변화와 지구온난화에 대응하고 적응하기 위해서는 지구규모에서의 기후변화과학을 이해할 필요가 있으며, 그 이해를 위한 첫 걸음이 배출원에 대한 정보를 확보하는 것이다.

현재 이 같은 온실기체 배출 연구로는 국가 기관(농업과학원)에서의 농업 경종분야(논, 밭) 배출량 조사연구와 함께 국가 온실기체 배출현황 통계가 이루어지고 있으며, 습지(담수, 연안)의 경우에는 배출 연구 및 통계 등이 적용 되지 않고 있다. 습지로부터의 전 지구적 CH₄의 발생은 110 Tg yr⁻¹으로 산출되며, 최근 세계 연간 CH₄ 배출의 ~21%를 차지하는 중요한 자연 배출원(Watson *et al.*, 1992)임에도 불구하고 국내의 경우 습지에서의 측정 자료들은 아직 매우 부족한 실정이다. 이번 연구에서의 CH₄ 배출량은 Kim *et al.* (2002) 연구에서의 논 경작지에서의 배출량과 비교해보면 대략 0.1~3% 정도로 상대적으로 적은 배출량을 보이지만, 지구 기후변화에 대한 영향을 이해하기 위해서는 생태적으로 차이가 있는 국내 여러 습지환경에서의 지속적인 현장 측정을 통한 자료축적이 매우 중요하다 할 수 있다. N₂O의 경우 습지에서의 배출보다 토양으로부터 생·지화학적 매커니즘에 의한 배출이 인위적·자연적 배출원의 70%를 차지하고 있다. 그러나 대체적으로 얇은 내륙습지와 갯벌토양의 혐기성 환경 조성으로 얇은 습지수층과 갯벌표면을 통한 N₂O의 배출이 감지되고 있다. 습지는 다양한 생태환경 형태로 존재하여 국내·외 습지의 자연적 환경 차이에 따른 배출특성을 보일 것으로 판단된다. 이는 국내 습지만의 특이성이 있다는 것을 뜻하며, 특히 N₂O는 CH₄보다 복사강제력(radiative forcing)이 매우 높아 GWP(global warming potential)가 대략 메탄에 비해 10배 이상(CO₂ 대비 ~300배)으로 습지가 국내 온실기체배출에 기여할 수 있는 주요 잠재적 배출원임을 의미한다. 따라서 국내습지

환경에서의 배출량측정 기초연구와 지속적인 측정기술 개발은 향후 국내 온실기체 배출과 대응 연구에 큰 기여를 하게 될 것이며, 현장 측정의 어려움 속에서도 자연환경에서의 양질의 기초 분석 자료를 확보하기 위한 노력이 절실히 요구된다.

감사의 글

이 연구는 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2009-0072936). 연구지원에 감사드립니다.

참고 문헌

- Bartlett, K.B., D.S. Bartlett, R.C. Harriss, and D.I. Sebacher (1987) Methane emissions along a salt-marsh salinity gradient, *Biogeochemistry*, 4, 183-202.
- Freeman, C., G.B. Nevison, H. Kang, S. Hughes, B. Reynolds, and J.A. Hudson (2002) Contrasted effects of simulated drought on the production and oxidation of methane in a mid-Wales wetland, *Soil Biology and Biochemistry*, 34, 61-67.
- Kadlec, R.H. and R.L. Knight (1996) *Treatment wetlands*. New York: Lewis Publishers.
- Kim, D.S. (2007) Greenhouse Gas (CH₄, CO₂, N₂O) Emissions from Estuarine Tidal and Wetland and Their Characteristics, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 23(2), 225-241. (in Korean with English abstract)
- Kim, D.S. and J.M. Oh (2003) N₂O Emissions from Agricultural Soils and Their Characteristics, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 19(5), 529-540. (in Korean with English abstract)
- Kim, G.Y., S.L. Pak, B.H. Song, and Y.K. Shin (2002) Emission Characteristics of Methane and Nitrous Oxide by Management of Water and Nutrient in a Rice Paddy soil, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 21(2), 136-143. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.J., S.H. Jung, and H. Kang (2006) Changes in Methane Production in Coastal Mud Flat under Different Temperature and Salinity, *Journal of Korean Wetlands Society*, 8(4), 41-47. (in Korean with English abstract)

- Klemetsson, L., K. Von Arnold, P. Weslien, and P. Gundersen (2005) Soil CN ratio as a scalar parameter to predict nitrous oxide emissions, *Global Change Biology* 11, 1142-1147.
- Magenheimer, J.F., T.R. Moore, G.L. Chmura, and R.J. Daoust (1996) Methane and carbon dioxide flux from a macrotidal salt marsh, Bay of Fundy, New Brunswick, *Estuaries*, 19, 139-145.
- Martens, C.S. and J. Klump (1980) V. Biogeochemical cycling in an organic-rich coastal marine basin. I Methane sediment-water exchange processes, *Geochim Cosmochim Acta.*, 44(4), 71-90.
- Martikainen, P.J., H. Nykänen, J. Alm, and J. Silvola (1995) Change in fluxes of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide due to forest drainage of mire sites of different trophic, *Plant and Soil*, 169, 571-577.
- Moore, T.R. and R. Knowles (1989) The influence of water table levels on methane and carbon dioxide emissions from peatland soils, *Canadian Journal of Soil Science*, 69(1), 33-38.
- Rask, H., J. Schoenan, and D. Anderson (2002) Factors influencing methane flux from a boreal forest wetland in Saskatchewan, Canada. *Soil Biology and Biochemistry*, 34, 435-443.
- Søvik, A.K. and B. Kløve (2007) Emission of N₂O and CH₄ from a constructed wetland in southeastern Norway, *Sci. Total Environ.*, 380, 28-37.
- Wang, D.Q., Z.L. Chen, J. Wang, S.Y. Xu, H.X. Yang, H. Chen, L.Y. Yang, and L.Z. Hu (2007) Summer-time denitrification and nitrous oxide exchange in the intertidal zone of the Yangtze estuary, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 73, 43-53.
- Watson, R.T., I.R. Noble, B. Bolin, N.H. Ravindranath, D.J. Verardo, and D.J. Dokken (2000) Special Report of the IPCC on Land Use, Land-Use Change, and Forestry, Cambridge University Press, UK. 375.
- Watson, R.T., L.G. Neira Filho, E. Sanhueza, and A. Janetos (1992) Sources and sinks. In: Houghton, J.J., Callander, J.T., Vamey, S.K. (Eds.), *The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, 24-46.