

BSPE99362-10912-4

갯벌의 메탄 플럭스 챔버 실증실험 연구

2016. 02. 29.

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “갯벌의 메탄 플럭스 챔버 실증실험 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2016. 02. 29

총괄연구책임자 : 강정원

참 여 연 구 원 : 김민규, 장민성

보고서 요약

보고서번호	BSPE99362-10912-4			연구기간	2015. 07. 01 ~ 2015. 12. 31
연구사업명	주요사업(신진연구자및창의적아이디어지원)				
연구과제명	갯벌의 메탄 플럭스 챔버 실증실험 연구				
연구책임자	강정원	참여 연구원수	총 : 3명 내부 : 1명 외부 : 2명	해당단계 연구비	정부: 50,000천원 기업: 천원 계: 50,000천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 관할해역지질연구센터		참여기업명		
위탁연구					
요 약				보고서면수	
<ul style="list-style-type: none"> • 갯벌의 메탄 플럭스 연구를 위한 닫힌 챔버법은 잘 알려진 방법이나 연구지역에 맞는 챔버의 설계 및 제작이 요구됨 • 특히 펼갯벌의 경우 일정시간 간격으로 챔버 내의 기체시료를 채취하는 과정 중 측정지점의 원래 퇴적물 상태에 변화를 일으킬 수 있음 • 이에 현장에서 챔버 실험동안 외부와 공기 순환을 최소화하기 위해서는 자동 시료 채취 장치의 디자인이 필요함 • 갯벌생물 서식굴 유무에 따른 메탄 플럭스 연구를 위한 챔버 실험과 동시에 서식굴의 시료채취가 이루어질 수 있는 현장 연구 시스템 구축이 요구됨 • 본 연구사업의 최종목표는 갯벌의 메탄 생지화학 연구기반 구축이며, 당해연도 목표로는 갯벌의 메탄 플럭스 연구를 위한 현장 연구 시스템 개발과 검증임 • 본 사업의 센서를 활용한 기체 플럭스 연구는 챔버 내 메탄 및 이산화탄소 농도변화를 실시간 모니터링 함으로써 온실가스 플럭스의 현장 측정이 가능하며, 현장에 맞는 챔버의 규모 디자인 및 실험실 분석용 시료 채취 시간 간격을 결정하는데 효율적이었음 • 특히 챔버로부터 자동 가스 시료 채취 디자인의 경우, 챔버가 측정지점에 완전히 설치된 후 시료 채취가 완료되는 시점까지 챔버 주변에 인위적인 환경변화가 없기 때문에 시료 채취와 챔버 운용에 효과적임 • 관찰구내 갯벌생물 가재붙이의 서식굴을 확인 후 30 cm 및 90 cm의 각 깊이에서 산소와 온도 모니터링 실시, 향후 생태와 지화학분야간 융합연구를 통한 갯벌생물 서식 활동에 따른 메탄 플럭스 연구기반 구축함 					
색인어	한글	기후변화, 온실가스, 메탄 플럭스, 갯벌, 서식굴			
	영어	Climate change, Greenhouse gases, Methane flux, Tidal flat, Burrow			

요 약 문

I. 제 목

갯벌의 메탄 플럭스 챔버 실증실험 연구

II. 연구개발의 목표 및 필요성

1. 연구개발의 목표

○ 갯벌의 메탄 생지화학 연구기반 구축

- 갯벌의 메탄 플럭스 연구를 위한 현장 연구 시스템 개발
- 현장 연구 시스템의 검증

2. 연구개발의 필요성

- 갯벌의 메탄 플럭스 연구를 위한 닫힌 챔버법은 잘 알려진 방법이나 연구지역에 맞는 챔버의 설계 및 제작이 요구됨
- 특히 썰갯벌의 경우 일정시간 간격으로 챔버 내의 기체시료를 채취하는 과정 중 측정지점의 원래 퇴적물 상태에 변화를 일으킬 수 있음
- 이에 현장에서 챔버 실험동안 외부와 공기 순환을 최소화하기 위해서는 자동 시료 채취 장치의 디자인이 필요함
- 갯벌생물 서식굴 유무에 따른 메탄 플럭스 연구를 위한 챔버 실험과 동시에 서식굴의 시료채취가 이루어질 수 있는 현장 연구 시스템의 구축이 요구됨

III. 연구개발 내용 및 범위

1. 연구개발 내용

- 갯벌의 메탄/이산화탄소 플럭스 연구용 챔버 제작
- 챔버의 자동 가스 시료 채취 디자인
- 챔버와 갯벌생물 서식굴 관찰구가 연결된 하나의 연구 시스템 구축

2. 연구개발 범위

- 메탄과 이산화탄소 플럭스
- 메탄 탄소안정동위원소비
- 관찰구내 인접한 서식굴 확인 및 산소와 온도

IV. 연구개발 결과

1. 갯벌의 메탄/이산화탄소 플럭스 연구용 챔버 제작

- 실시간 챔버내 메탄 및 이산화탄소 농도변화를 모니터링 함으로써 온실가스 플럭스의 현장 측정이 가능하며, 현장에 맞는 챔버의 규모 디자인 및 실험실 분석용 시료 채취 시간 간격을 결정하는데 큰 도움이 예상됨
- 특히 챔버로부터 자동 가스 시료 채취 디자인의 경우, 챔버가 측정지점에 완전히 설치된 후 시료 채취가 완료되는 시점까지 챔버 주변에 인위적인 환경변화가 없기 때문에 시료 채취와 챔버 운용에 효과적이라 보임

2. 갯벌생물 서식굴 연구용 관찰구 운용

- 서식굴 대상생물로는 가재붙이로 관찰구내 30 cm 및 90 cm 깊이에 서식굴을 확인
- 확인된 서식굴의 각 깊이에서 산소와 온도 모니터링 실시, 향후 생태와 지화학분야 간 융합연구를 통한 갯벌생물 서식활동에 따른 메탄 플럭스 연구기반 마련

V. 연구개발결과의 활용계획

- 자연습지의 온실가스 플럭스 관련 연구과제 개발
- 다양한 갯벌 환경의 메탄 플럭스 연구의 기본 자료 생성

목 차

요 약 문	i
목 차	iii
그림목차	iv
표 목 차	v
제 1 장 연구개발과제의 개요	1
제 1 절 연구의 목적 및 필요성	1
제 2 절 연구의 내용 및 범위	3
제 2 장 국내·외 기술개발 현황	4
제 1 절 국내 연구 동향	4
제 2 절 국외 연구 동향	5
제 3 절 현 기술상태의 취약성	6
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	7
제 1 절 깃벌의 온실가스 플럭스 연구용 챔버 제작	7
제 2 절 깃벌생물 서식굴 연구를 위한 현장 관찰구	14
제 3 절 현장 연구 시스템 검증	16
제 4 절 결론	19
제 4 장 연구개발 목표달성도 및 대외기여도	20
제 1 절 연구개발 목표달성도	20
제 2 절 대외기여도	20
제 5 장 연구개발 결과의 활용계획	22
제 6 장 참고문헌	23
부 록	25

List of Figures

Fig. 1. Schematic of closed flux chamber for the experiment.	8
Fig. 2. A closed flux chamber equipped with detectors for CH ₄ , CO ₂ , O ₂ , air temperature, and humidity.	10
Fig. 3. Theoretical flux curve during a chamber experiment.	11
Fig. 4. Automatic air sampling system.	11
Fig. 5. A plot showing the typical curve at very low methane flux.	13
Fig. 6. A hexagonal acrylic observatory for <i>in situ</i> oxygen content in the burrow (A) and silicone-filled holes in the acrylic walls allowed direct measurement in intact burrows with optode oxygen sensor (B, 30 cm depth and C, 90 cm depth).	15
Fig. 7. CH ₄ and CO ₂ diffuse fluxmeter and a handheld computer (PDA) that allows geo-referencing of acquired data.	16
Fig. 8. CH ₄ and CO ₂ flux curves, recorded in burrow (A) and non-burrow (B) sites from the Hwangdo tidal flat, Cheonsu Bay.	16
Fig. 9. Time variations of the CH ₄ concentrations in the closed chamber, recorded in burrow (A) and non-burrow (B) sites.	19

List of Tables

Table 1 Summary of flux curves during a chamber experiment	12
Table 2 Summary of proportion of methanogen from Burrow and Non-Burrow sites at the Hwangdo tidal flat, Cheonsu Bay	17

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 최종목표

○ 갯벌의 메탄 생지화학 연구기반 구축

- 갯벌의 메탄 플럭스 연구를 위한 현장 연구 시스템
- 현장 연구 시스템의 검증

2. 연구사업의 필요성

가. 과학적 측면의 필요성

- 지금까지의 연구에 의하면, 기온의 폭발적 상승을 제어할 수 있는 전환점은 산업화 이전 대비 약 2°C 상승까지임. 목표 달성을 위해서는 대기의 CO₂ 상당농도 (equivalent concentration)를 430~480 ppm으로 억제하여야 함
- 기후변화 예측을 위해서는 지구시스템의 주요과정인 탄소순환, 생태역학 및 화학과정 등을 파악하여 정확한 온실가스 발생농도를 입력하여야함. 기후변화모델에 지구시스템의 과정들이 결합하게 되면 상호작용의 결과로써 모델자체에서 온실가스 농도를 예측할 수 있음
- 갯벌의 기능을 평가하기 위해서는 갯벌 퇴적물 내에서의 유기물 분해와 분해경로, 그리고 그에 따른 생지화학적 물질순환과 물질플럭스 연구가 필수적임
- 온실가스 메탄은 산소의 가용 여부에 따라 혐기적 산화(Anaerobic Oxidation of Methane, AOM) 또는 호기적 산화과정을 거치게 되는데, 국내 갯벌에서는 단편적인 정보만이 알려져 있어 메탄의 거동을 이해하기 위한 자료 축적이 요구됨
- 메탄 발생량이 높은 갯벌 중심의 연안환경에서 기후변화에 따른 메탄 순환에 미치는 생태 환경 인자에 대한 과학적 조사가 요구됨

나. 경제·산업적 측면의 필요성

- 기존의 고려되지 않았던 해양 생태 환경에서 발생하는 메탄 거동 연구를 통해 국가 온실가스 배출계수 연구개발에 활용됨
- 최근 온실가스과 관련한 기후변화 협약의 발효에 따라 각국은 자국 자연계에 축적된 탄소량과 그 동태를 정확히 측정하여 이를 국제 협상에 이용하고 있으나,

국내에서는 아직 자연계에서의 온실가스 배출이나 제거량에 대한 정보가 미흡한 실정임

다. 사회·문화적 측면의 필요성

- 온실가스의 배출을 감축하더라도 기후변화의 영향과 양상은 수백년 동안 지속될 것으로 예상되는데, 이와 관련하여 상대적으로 자연계 온실가스의 거동 파악이 중요하게 인식되고 있음
- 온실가스 배출량 산정에서 고려되지 않고 있는 갯벌에서 메탄 발생량 조사 분석은 기후환경에 미치는 영향을 평가할 뿐만 아니라 지구기후변화 대책수립을 위한 필수 요건임

제 2 절 연구의 내용 및 범위

년 차	연구/사업의 수행내용	구체적인 수행방법 (이론적·실험적 접근방법명 등)
신규 (2015)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 현장 연구 시스템 구축 <ul style="list-style-type: none"> - 메탄 플럭스 연구를 위한 닫힌 챔버 제작 - 갯벌생물 서식굴 연구를 위한 현장 관찰구 운용 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 기존 갯벌의 메탄 플럭스 연구용 챔버의 수정 및 보완 <ul style="list-style-type: none"> - flow-through type 이산화탄소/메탄 센서 장착 - 온습도 및 압력 센서 장착 - 산소 센서 장착 - 챔버로부터 자동 가스 시료 채취 디자인 ○ 선행연구 경험을 바탕으로 서식굴 연구용 관찰구 운용 <ul style="list-style-type: none"> - 한 면이 60×100 cm 크기의 6각 기둥을 갯벌 퇴적물에 설치, 각 면에는 일정한 간격으로 직사각형 구멍(1.5×6 cm)을 만들어 산소 농도 변화 관측 및 시료 채취
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 현장 연구 시스템 검증 <ul style="list-style-type: none"> - 챔버와 관찰구가 연결된 하나의 연구 시스템 구축 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 현장 연구 시스템의 성능 검증 및 보완 <ul style="list-style-type: none"> - 온실가스 연구용 챔버(센서장착)를 갯벌에 설치하여 산소 센서에 의한 일정한 산소 농도 포화도 및 메탄/이산화탄소 센서에 의한 농도구배 확인 - 현장조사에 의한 생태와 지화학분야간 융합연구 정립

제 2 장 국내·외 기술개발 현황

제 1 절 국내 연구 동향

○ 연안환경(갯벌, 하구역)의 메탄 플럭스 연구

- 금강 하구연 주변 갯벌과 습지로부터 닫힌챔버법(closed chamber technique)을 이용하여 계산된 연간 메탄 플럭스는 약 $195 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 이며, 여름철의 플럭스(약 $540 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$)는 겨울과 봄철에 비해 10~100배 수준으로 나타나 갯벌 퇴적물의 여름철 온도 증가에 따른 활발한 미생물 생육과정이 메탄 배출에 영향을 주는 것으로 보고됨(김득수, 2007)
- 충남 서천의 갯벌에서 메탄 플럭스는 $-0.164 \sim +0.219 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{hr}$ 의 범위로 배출(+)과 흡수(-)를 보이는 것으로 보고되었으나, 그 기작과 관련하는 갯벌생물들의 호흡 등 대사 관련 연구가 미흡함(김득수와 나운성, 2013)
- 한국해양과학기술원에서는 ‘원격탐사 자료를 이용한 한반도 주변 환경의 생태적 기능 평가’ 연구를 통해 갯벌에서의 메탄 순환에 대한 기초연구를 수행함
- 학계에서는 질량분석기(MIMS: membrane inlet mass spectrometer)를 이용하여 영산강 하구에서 용존 메탄 분포와 퇴적물로부터의 메탄 플럭스 계절 변화 분석을 수행함

○ 메탄 관련 생체지표 분석을 통한 메탄 거동과 고세균 군집 구조 해석

- 다양한 환경(해양, 습지, 영구동토)에서 미생물에 의한 메탄의 생성기원과 특성을 파악하기 위해 주로 미생물의 지질생체지표 분석을 통해 메탄의 생지화학적 순환과정을 이해(이동현 등, 2014)
- 온도와 염도 감소에 따른 갯벌에서의 메탄발생량 변화 가능성이 실험실 규모 실험을 통해 보고됨(김영주 등, 2006)
- 염전으로부터 호염성 메틸영양미생물 군집특성에 대해 보고됨(김종걸 등, 2010)
- 그러나 갯벌에서 메탄산화 혹은 메탄생성 미생물에 집중된 연구는 없으며, 갯벌의 미생물 다양성을 연구하는 과정에서 메탄산화관련 고세균의 존재를 보고한 사례들이 있음

○ 갯벌 저서동물에 의한 생물교란(bioturbation) 연구

- 갯벌생물에 의한 생물교란(서식굴생성, 먹이활동 등)이 퇴적물 내 산소층 증가에 미치는 정도를 정량화 하였으며, 아울러 서식굴의 크기에 영향을 미치는 환경요인에 대한 연구를 수행함(Koo et al., 2005)
- 갯벌생물의 서식굴 내 산소 농도의 시공간적 분포와 이에 영향을 미치는 환경요인에

대한 연구를 수행함(Koo et al., 2008)

제 2 절 국외 연구 동향

○ 닫힌 챔버법(Static chamber or Closed chamber)을 이용한 온실가스 플럭스 연구

- 생물구조, 가령 식물 호흡근(pneumatophores) 및 계 서식굴의 유무에 따른 이산화탄소 및 메탄 플럭스 연구 결과, 이산화탄소의 경우는 계를 포함한 생물구조가 발생량에 큰 영향을 주며, 메탄의 경우도 이와 비슷하면서 특히 계 서식굴이 메탄 발생량에 중요한 요인으로 조사됨(Kristensen et al., 2008)
- 또한, 양자강 하구 갯벌 식물 서식지(marsh site)에서도 계절적인 메탄 발생량은 여름철 기온 상승에 따라 뚜렷하게 증가하지만, 비 서식지의 경우는 갯벌이 메탄 sink가 관측됨(Wang et al., 2009)

○ 생물교란(bioturbation) 연구

- 해양 퇴적물에서 생지화학적 프로세스와 이와 연관된 미생물 군집은 깊이에 따른 분포를 하며 그 분포는 수직적인 이동기작에 의해 조절됨. 그러나 생물교란 활동은 퇴적물 내 이러한 물리적인 구조를 깨뜨리며, 궁극적으로는 화학종의 층서화된 분포와 퇴적물-물 경계면(sediment-water interface)에서의 물질교환과 같은 일련의 생지화학적 프로세스에도 영향을 미침. 생물교란 활동을 통해 혐기성 퇴적물 속에 호기성 조건의 환경이 만들어지고, 이는 퇴적물 내 산화매개체와 환원화합물간의 다차원적인 확산 패턴을 만들어 퇴적물 내 미생물 군집과 화학종의 재분포 및 일련의 생지화학적 프로세스에 영향을 미치는 것으로 확인됨(Rosenberg and Ringdahl, 2005)
- 유럽 중심의 생물교란 관련 전문가 모임인 ‘Nereis Park’에서는 생물교란이 해양 퇴적물의 생지화학적 프로세스, 미생물 군집, 수층과 퇴적물 경계면에서의 물질순환 등에 미치는 영향 관련한 연구 결과를 상호 자료 공유하고 있으며, EU 지원 하에 활발한 연구 활동을 하고 있음

○ 혐기적 메탄산화 고세균에 대한 연구

- 북해 German Bight에서는 메탄 분포와 생분해에 미치는 환경요인에 대한 연구가 수행됨(Osudar et al., 2015)
- 2010년 네덜란드 연구팀에 의해 아질산염을 이용하여 메탄을 산화하는 과정에 대해서 새롭게 밝혀짐(Ettwig et al., 2010)
- 메탄의 거동과 관련해서는 황산염환원세균과 메탄생성고세균 분포의 상호관계를 중심으로 연구가 진행됨
- 하구역을 포함한 갯벌환경에서 메탄산화는 탁도에 비례하는 것으로 밝혀짐(Abril et

al., 2006)

- 다양한 환경에서 메탄산화세균의 선택적 분석을 위해 안정동위원소로 표지된 메탄을 기질로 이용하는 연구가 이루어짐
- 안정동위원소를 이용하여 메타게놈을 분석함으로써 생지화학적 과정을 재구성하는 연구들이 이루어짐

제 3 절 현 기술상태의 취약성

○ 갯벌의 메탄 생지화학 연구를 위한 현장 연구 시스템 구축 필요성

- 갯벌의 메탄 플럭스 연구를 위한 닫힌 챔버법은 잘 알려진 방법이나 연구지역에 맞는 챔버의 설계 및 제작이 요구됨
- 특히 펄갯벌의 경우 일정시간 간격으로 챔버 내의 기체시료를 채취하는 과정 중 측정지점의 원래 퇴적물 상태에 변화를 일으킬 수 있음
- 이에 현장에서 챔버 실험동안 외부와 공기 순환을 최소화하기 위해서는 자동 시료 채취 장치의 디자인이 필요함
- 갯벌생물 서식굴 유무에 따른 메탄 플럭스 연구를 위한 챔버 실험과 동시에 서식굴의 시료 채취가 이루어질 수 있는 현장 연구 시스템 구축이 요구됨

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 갯벌의 온실가스 플럭스 연구용 챔버 제작

(1) 닫힌(폐쇄형)챔버 시스템(closed chamber technique)

닫힌챔버방법은 퇴적물, 토양 등 표면에 일정 내부 용적을 갖는 enclosure(밀면이 열린 형태의 챔버)로 지면을 덮고 챔버 내부의 기체를 정해진 시간 간격에 포집하여 기체 플럭스를 측정하는 방법으로 많은 연구자들이 주로 사용하고 있다(김득수, 2007; 국립환경과학원, 2012). 특징적으로 농도가 매우 낮은 미량기체의 지표 플럭스를 측정지점에서 직접 측정이 가능하며 퇴적물의 물리화학적 인자들을 함께 측정할 수 있고, 측정 및 분석 장치의 구성과 설치가 용이하며, 기체 플럭스에 영향을 미치는 환경인자들과 플럭스와 상관관계를 직접 조사할 수 있는 장점이 있다. 반면에 챔버 면적에 따른 측정 지점에 대한 제한, 챔버 설치에 따른 설치지점의 교란 및 특히 온실기체처럼 시공간적 변화에 따른 반복적인 현장 조사가 요구되는 등 단점이 있을 수 있다. 일반적으로 CO₂, CH₄ 및 N₂O들과 같이 대기화학반응이 비교적 느린 기체들의 경우 닫힌챔버법이 이용되고 있다(Kim et al., 2002).

(2) 기체 플럭스 측정 및 산출방법

갯벌과 대기간의 온실기체 플럭스를 측정하기 위해 그림 1과 같이 제작하였다(김득수, 2007). 챔버는 밀면 706.5 cm², 높이 30 cm인 반구형(내부부피, 약 21.2 L)으로 몸체와 몸체를 엮을 수 있는 받침 부분으로 구성되어있다. 플럭스 챔버 내부의 기체혼합은 챔버 내의 저속 fan을 통해 실험시 20~25 rpm 속도를 유지하면서 시료의 대표성을 얻을 수 있다. 기체 플럭스 측정을 위해서는 챔버 몸체를 덮은 상태에서 시간에 따라 챔버안의 메탄과 이산화탄소 등의 온실기체 농도변화를 감지해야 한다. 이를 위해서 몸체의 시료 채취구(sampling port, 그림 1)에 플라스틱 재질의 50 mL 주사기 또는 기체시료 채취용 저속펌프와 연결된 테드라(Tedlar) 에어백들이 사용된다(예, 김득수, 2007).

시료는 챔버가 측정지점에 설치된 후 50 mL의 첫 번째 시료(t₀)가 챔버로부터 즉시 채취되며, 이 후 같은 양의 시료를 일정한 시간 간격으로 2(t₁, t₂), 3(t₁, t₂, t₃)번 더 채취한다. 채취된 시료들은 기체크로마토그래피를 이용하여 해당 온실기체(CO₂, CH₄, N₂O)를 정성·정량 분석한다. 가령, 갯벌로부터 기체 배출이 있을 경우는 챔버내 기체 농도의 시간에 따른 증가가 관측된다. 기체 플럭스 산출을 위해서는 시간에 따른 기체 농도의 기울기 이외에 시료 채취시 챔버내 온도와 압력 등이 고려된다.

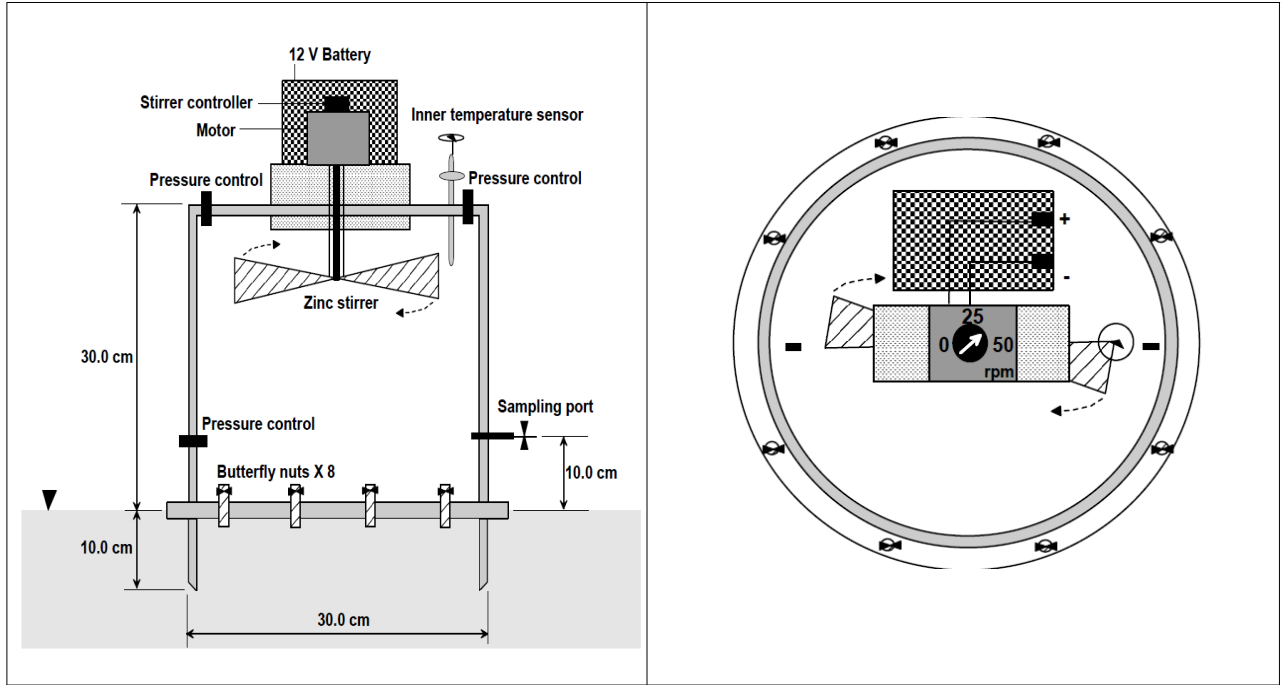


Fig. 1. Schematic of closed flux chamber for the experiment.

기체크로마토그래피를 통해 분석된 기체 농도를 이용하여 갯벌과 대기간의 기체 플럭스는 다음의 식 (1)에 의하여 산출된다(김득수, 2007)

$$F = \rho \times V/A \times \Delta C/\Delta t \times 273/(T+273) \quad (1)$$

F : flux ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$)

ρ : density of gas ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)

V : volume of the chamber (m^3)

A : bottom area of the chamber (m^2)

$\Delta C/\Delta t$: average changing rate of concentration with time ($\text{ppmV} \cdot \text{hr}^{-1}$)

T : average temperature (Kelvin degree) in the chamber ($^{\circ}\text{C}$)

또는 간단히 다음 식 (2)에 의해 기체 플럭스를 산출할 수 있다.

$$\text{Gas emission} = \text{slop} (\text{ppm} \cdot \text{hr}^{-1}) \cdot (\text{chamber volume} (\text{m}^3)/\text{surface area} (\text{m}^2)) \quad (2)$$

하지만 시간에 따른 기체 농도의 기울기는 (1) 챔버 부피 대 면적 비, (2) 챔버내의 온도 및 (3) 압력에 의해 결정되기 때문에, 이러한 세 가지 요인들의 함수 값을 구할 필요가 있다. 세 가지 요인들에 의한 함수 값 산출은 다음의 식 (3)에 의해 결정된다.

$$K = (3600 \cdot P)/(10^6 \cdot R \cdot T_K) \cdot (V/A) \quad (3)$$

P : barometric pressure expressed in mBar (hPa)

R : gas constant 0.08314510 (bar · L · K⁻¹ · mol⁻¹)

T_K : air temperature expressed in Kelvin degree

V : chamber net volume (m³)

A : chamber inlet net area (m²)

식 (3)에서 단위로만 표기할 경우 다음의 식 (4)와 같다.

$$K = F, (\text{moles} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1})/\text{slope}, (\text{ppm} \cdot \text{hr}^{-1}) \quad (4)$$

본 보고서에서는 예비 실험에 의한 기체 플럭스 산출을 식 (2)에 의해 계산이 되었다.

(3) 기존 닫힌 플럭스 챔버 활용의 한계점 분석

국립환경과학원 (2012)의 연구보고에 따르면, 닫힌 챔버를 사용하여 지면으로부터 플럭스를 측정할 경우 다음과 같은 몇 가지 문제점이 있을 수 있다.

- ① 챔버내 증가된 기체의 농도가 정상적인 배출을 제한 할 가능성이 있다(이러한 경우, 측정간격을 짧게 하고 이론적인 교정방정식을 이용하여 해결)
- ② 챔버 설치 시에 기류의 자연적 난류에 의한 지표로부터의 압력 변화가 영향을 받아 변화될 수 있다. 이러한 현상이 지표면의 “pumping action”을 저해하여 닫힌 챔버방법에 의해 측정된 플럭스가 과소평가 될 가능성이 있다(이러한 경우, 챔버에 vent tube 등을 이용한 압력을 평형화시킴으로 해결)
- ③ 지표면과 대기 사이의 경계층에 나타나는 저항(boundary layer resistance)이 챔버 바깥쪽보다 안쪽이 더 높을 수 있어 기체 플럭스가 과소평가될 수 있다.
- ④ 측정지점에 챔버 받침을 삽입함에 의해 측정지의 압력이 변화된다.

위의 문제점들로 인해 시간에 따른 기체농도의 선형성(linearity)이 얻어지지 않을 수가 있다. 특히 ④번의 문제점은 갯벌에서 중요한 요인으로 작용할 수 있다. ④번의 문제점은 챔버를 올려놓을 바닥 틀을 미리 설치하거나, 챔버를 먼저 삽입한 후에 잠시 제거하여 측정지의 기체 이동이 안정된 후 같은 위치에 설치하는 방법, 또는 챔버의 몸체 밑 둘레를 주변 퇴적물/토양 등으로 밀봉함으로 해결할 수 있다. 하지만 다양한 갯벌의 환경 중 특히 썰갯벌(입자가 매우 곱고 지반이 물러서 발이 푹푹 빠짐)의 경우, 시료 채취과정에서 관찰자에 의해 측정지의 압력 및 기체 이동에 영향을 줄 수가 있다. 이러한 갯벌에서 문제점의 해결은 관찰자에 의한 측정지의 교란을 아주 최소화하는 방법을 강구해야한

다.

(4) 센서를 활용한 기체 플럭스 연구

본 보고서에서는 국내에서는 처음으로 WEST Systems사(이태리)의 메탄(HydroCarbon detector)과 이산화탄소(LI820 CO₂ detector)센서가 장착된 portable flux-meter를 닫힌챔버에 적용을 하였다(그림 2). 이러한 온실기체 센서들 이외에 그림 2에서처럼 온습도 및 산소 센서들을 챔버에 장착하였다.



Fig. 2. A closed flux chamber equipped with detectors for CH₄, CO₂, O₂, air temperature, and humidity.

각 센서들로부터 매초 단위로 자료가 저장되며, 챔버의 시간에 따른 전형적인 기체 농도의 변화, 배출이 있는 경우는 S자 형태를 보이게 된다(그림 3). 그림 3에서 C_{Air}는 온실기체의 대기 중 농도(예를 들어, 이산화탄소의 경우 350 ppm, 메탄의 경우 1.8~2 ppm)이며, C_{Soil}은 퇴적물내 온실기체의 농도를 가리킨다. 첫 부분에 “sampling line cleaning” 구간이 나타나며, 이는 챔버내 공기를 기존 펌프, 튜브 및 detector에 잔류한 공기와 순환시키는 시점을 의미한다. 챔버의 온실기체 농도가 퇴적물의 농도에 근접하면서 플럭스 곡선의 기울기는 감소하게 된다. 플럭스 산출은 선형의 직선 기울기(ppm · sec⁻¹)를 보이는 구간으로부터 계산이 된다.

센서를 활용한 기체 플럭스 연구를 하면서 무엇보다 장점은 실시간 챔버내 기체 농도변화를 모니터링 할 수 있다는 것이다. 즉, 앞서 챔버 활용의 한계점 분석에서 언급하였듯이 시간에 따른 기체 농도의 선형관계에 영향을 주는 문제점들을 현장에서 모니터링 할 수 있다. 선형관계가 보이지 않는 사례에 대해서 표 1에 정리하였다. 이러한 실시간 모니터링을 통해 닫힌 챔버법에 의한 기체 플럭스의 신뢰도를 향상 시킬 뿐만 아니라 현

장 운용을 효과적으로 수행할 수 있다.

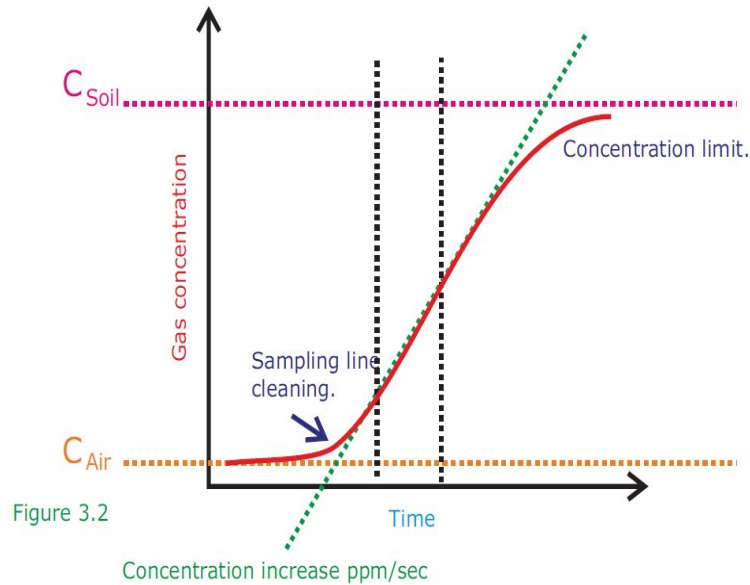


Fig. 3. Theoretical flux curve during a chamber experiment.

(5) 챔버로부터 자동 기체 시료 채취 디자인

갯벌의 유형은 퇴적상에 따라 모래갯벌, 펄갯벌 및 모래펄갯벌(혼성갯벌)로 구분된다. 특히 펄갯벌은 모래질이 차지하는 비율이 10% 이하에 불과하고 펄 함량은 90% 이상에 달하는 갯벌로, 갯벌의 깊이가 깊은 곳은 수 미터나 돼 갯벌조사가 매우 힘든 곳이다. 따라서 펄갯벌에서 기체 플럭스를 측정함에 있어서 문제점은 접근의 어려움도 있을 수 있겠지만, 주사기 등을 이용하여 시간별로 시료 채취가 이루어질 경우 관찰자에 의한 측정치의 교란이 발생하게 되어 압력변화 등 챔버내 기체 농도변화에 영향을 주게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 사업을 통해 시료 채취 및 시간 간격을 PC로 컨트롤 할 수 있는 자동화 장치를 고안하였다(그림 4).

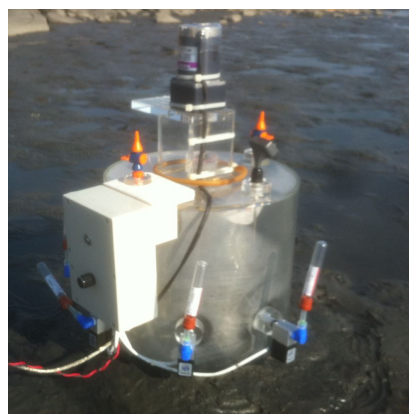
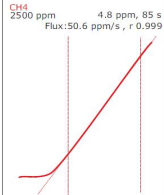
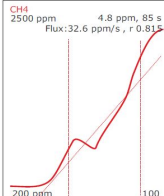
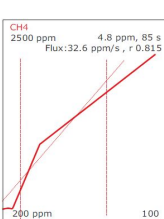
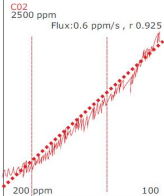
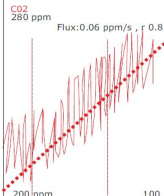
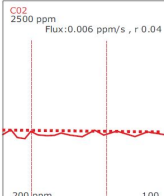
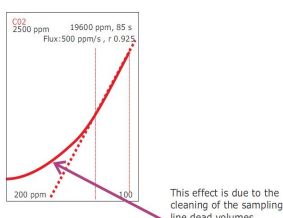


Fig. 4. Automatic air sampling system.

Table 1 Summary of flux curves during a chamber experiment

Examples	Description
	<p>The “perfect” curve</p> <p>The shape of the curve is quite perfect and the computation of the flux is done with a very good accuracy.</p>
	<p>Air contamination</p> <p>The flux curve is no longer “linear”, the linear best fit curve do not fit exactly the flux curve. If you obtain this kind of curve check the sealing of the chamber.</p>
	<p>Gas stratification</p> <p>This shape of curve indicates that the concentration of the target in air, close to the soil, is very high. In this case clean the gas line making a measure in air, one meter above the soil surface.</p>
	<p>Low fluxes</p> <p>This type of curve is normal when the flux is low and the “noise” of the detector is comparable with the increase of concentration.</p>
	<p>Very low fluxes</p> <p>Of course the noise distribution increases when the flux is very low.</p>
	<p>No flux</p> <ul style="list-style-type: none"> - There is no flux. - Is the pump working? - Are the tubes correctly connected?
	<p>Very high flux</p> <p>The first part of the curve is shown effect of the high flux and the sampling line cleaning. To avoid this, the flux curve record time until the concentration of gas reaches the full scale and select the last part of the curve for the flux computation.</p>

대기가스 자동 채취 시스템은 챔버에 부착이 용이한 PC 기반 전자제어 부분과 진공 튜브를 이용한 시료 채취 부분으로 구성되어 있다. 타이머를 통한 시료 채취간격이 결정되며, 챔버내 기체 시료는 자동 On/Off 밸브 끝에 주사바늘을 연결하여 vacutainer를 장착하여 채취된다. 챔버가 측정지점에 완전히 설치된 후 시료 채취가 완료되는 시점까지 측정지에 대한 인위적인 환경변화가 없기 때문에 시료 채취와 챔버 운용에 효과적이라 할 수 있다.

갯벌에서 온실기체가 배출되는 경우, 이산화탄소에 비해 메탄의 플럭스는 낮은 관계로 챔버내 시간에 따른 기체농도 변화는 표 1의 “low fluxes” 예에서 기술한 것처럼 “noise” 영향을 크게 받는다. 그 결과로 메탄의 flux curve는 시간에 따라 “stair-steps” 형태를 보이게 된다(그림 5).

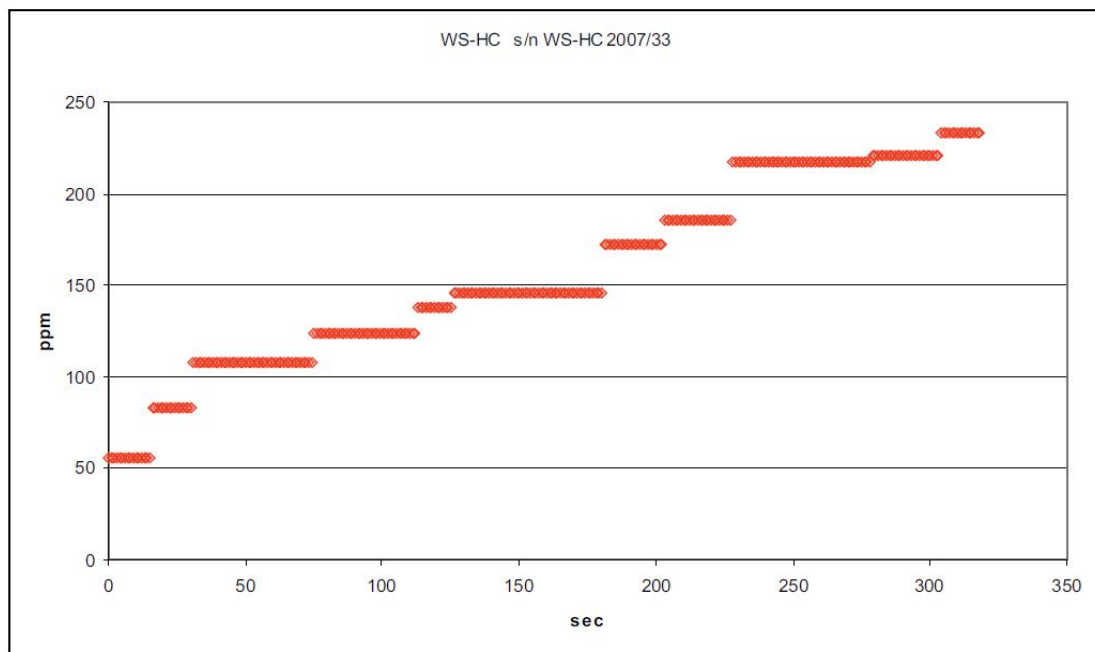


Fig. 5. A plot showing the typical curve at very low methane flux.

따라서 메탄 플럭스가 낮은 갯벌에서 수동으로 일정한 시간 간격으로 시료 채취시, 챔버내 메탄 농도의 시간 증가(또는 감소)율에 따른 선형관계가 보이지 않을 수 있다. 즉, 시간별 비슷한 농도수준의 시료 채취가 발생할 수 있다. 이러한 문제점에 대해서, 앞서 센서에 의한 챔버의 기체 농도변화를 우선적으로 확인한 다음 그림 5에서 대표성을 갖는 시료 채취시점을 결정한다. 그런 다음, 그림 4에서처럼 대기가스 자동 채취 시스템을 이용하여 시간별 대표성을 갖는 시료 채취가 이루어진다.

위와 같이 센서를 이용한 기체 플럭스 연구와 자동 채취 시스템의 활용은 표 1에서 보이는 문제점들을 현장에서 확인할 수 있기 때문에 기존 닫힌 플럭스 챔버 활용에서 보다 실험실의 분석에 따른 시간적 절약 및 현장의 운용 측면에서 효과적이라 할 수 있다.

제 2 절 갯벌생물 서식굴 연구를 위한 현장 관찰구

(1) 갯벌의 메탄 플럭스와 생물교란(bioturbation)

갯벌의 미생물이 동일한 양의 유기물을 분해함으로써 생산 가능한 신진대사 에너지는 전자수용체의 종류에 따라 다르며, O_2 , NO_3^- , MnO_2 , $FeOOH$, SO_4^{2-} , CO_2 순으로 감소한다. 따라서 퇴적물내 전자수용체와 미생물 군집은 산소 투과 깊이에 따른 수평적인 층서 구조를 하게 된다. 또한 유기물 공급량, 퇴적율, 퇴적물 입자크기 등도 이러한 생지화학적 층서구조에 영향을 미친다. 하지만, 무척추동물의 서식굴 형성, 즉 생물교란은 퇴적물내 수 mm에서 수십 cm 규모로 생지화학적 이질성을 발생시킨다. 이러한 이질성은 갯벌생물에 의한 입자의 재이동, 산화환원의 변동, 배설 및 관개 등과 관계한다. 이러한 과정을 통해 퇴적물내로 신선한 유기물의 공급과 새로운 기질로의 미생물의 군집화가 이루어진다. 생물교란의 과정이 중요한 의미를 가지는 것은 빈산소 혹은 무산소 상태의 퇴적물로 산소가 공급된다는 것이다. 즉, 생물이 만든 서식굴은 갯벌 경계면을 증가시켜 생지화학적 프로세스가 일어나는 공간을 증가시키며, 뿐만 아니라 혐기성 환경으로의 산소 공급을 통해 다양한 생지화학적 과정에 영향을 미쳐 유기물을 분해하는 활성을 증가시킨다(이상 한국해양과학기술원, 2010).

서식굴로부터 발생하는 이산화탄소의 일부는 서식굴의 갯벌생물에 기인된다. 가령, 게(*Uca sp.*)의 생체량이 적게 나갈수록 이산화탄소의 호흡량은 높아진다(Kristensen et al., 2008). 하지만, 서식굴의 메탄은 퇴적물내 메탄형성 박테리아(methanogenic bacteria)의 유기물 분해과정에서 발생된다. 메탄은 무산소 환경에서 다른 전자수용체(예, NO_3^- , $Fe(III)$, SO_4^{2-})가 고갈된 조건에서 이산화탄소의 환원($4H_2+CO_2 \rightarrow CH_4+2H_2O$) 및 기질(methanol, acetate, methylamines)의 대사작용 등에 의해 형성된다. 따라서 퇴적층 깊은 곳에서 이러한 과정이 이루어지며, 반면 퇴적물 표층의 산소가 풍부한 경계면에서는 메탄산화(이산화탄소로 전환)가 발생한다(Topp and Pattey, 1997).

본 사업에서는 갯벌의 메탄 플럭스 연구에서 서식굴을 만드는 갯벌생물의 역할에 대해서 고찰하고자 현장 서식굴 관찰구와 닫힌챔버법을 동시에 활용하는 시스템을 디자인하였다. 본 보고서에 이러한 시스템을 활용하는 기획연구 내용을 제시하였다(부록 참조).

(2) 갯벌생물 서식굴 연구용 관찰구

선행연구(한국해양과학기술원, 2010)의 경험을 바탕으로 서식굴 연구용 관찰구를 서해 천수만의 황도 갯벌에 설치하였다. 한 면의 크기가 60×100 cm(가로×세로)인 6개의 아크릴 판(두께 1.2 cm)을 서로 연결하고, 그 아랫면에는 육각형의 아크릴판으로 고정하였다(그림 6A). 갯벌 퇴적물과 접하는 여섯 면에는 일정 간격을 두고서 각 면당 62개의 직사각형 구멍(1.5×6 cm)을 뚫고, 퇴적물에 설치하기 전에 탄력성 있는 실리콘으로 막았다.

실리콘으로 막아 놓은 면에 서식굴이 지나간 곳을 깊이별로 선택하여 산소광학센서와 온도센서를 실리콘을 통해 꽂아 서식굴내 산소농도와 수온의 연속적인 변화를 관측할 수 있다(그림 6B와 C).



Fig. 6. A hexagonal acrylic observatory for *in situ* oxygen content in the burrow (A) and silicone-filled holes in the acrylic walls allowed direct measurement in intact burrows with optode oxygen sensor (B, 30 cm depth and C, 90 cm depth).

제 3 절 현장 연구 시스템 검증

(1) 닫힌챔버 시스템 현장 검증

센서를 활용한 닫힌챔버 시스템에 대한 갯벌 현장 검증이 서해 천수만의 황도 갯벌에서 이루어졌다. 먼저, West Systems사에서 상업적으로 판매하는 accumulation chamber를 이용하여 메탄/이산화탄소 플럭스 측정을 하였다(그림 7). 그림 7에서 보게 되면, 챔버 주변으로 여러 서식굴을 확인할 수 있다. 닫힌챔버 시스템의 현장 검증은 서식굴 하나를 포함한 챔버 실험(Burrow)과 서식굴을 포함하지 않은 비 서식굴 챔버 실험(Non-Burrow)으로 나뉘었다. 메탄과 이산화탄소의 기체 플럭스는 식 (2)에 의해 산출되었다. 앞서 그림 3에서 설명하였듯이, 첫 부분에 “sampling line cleaning” 구간이 나타나며, 플럭스 산출은 선형의 직선 기울기($\text{ppm} \cdot \text{sec}^{-1}$)를 보이는 구간으로부터 계산을 하였다(그림 8).



Fig. 7. CH₄ and CO₂ diffuse fluxmeter and a handheld computer (PDA) that allows geo-referencing of acquired data.

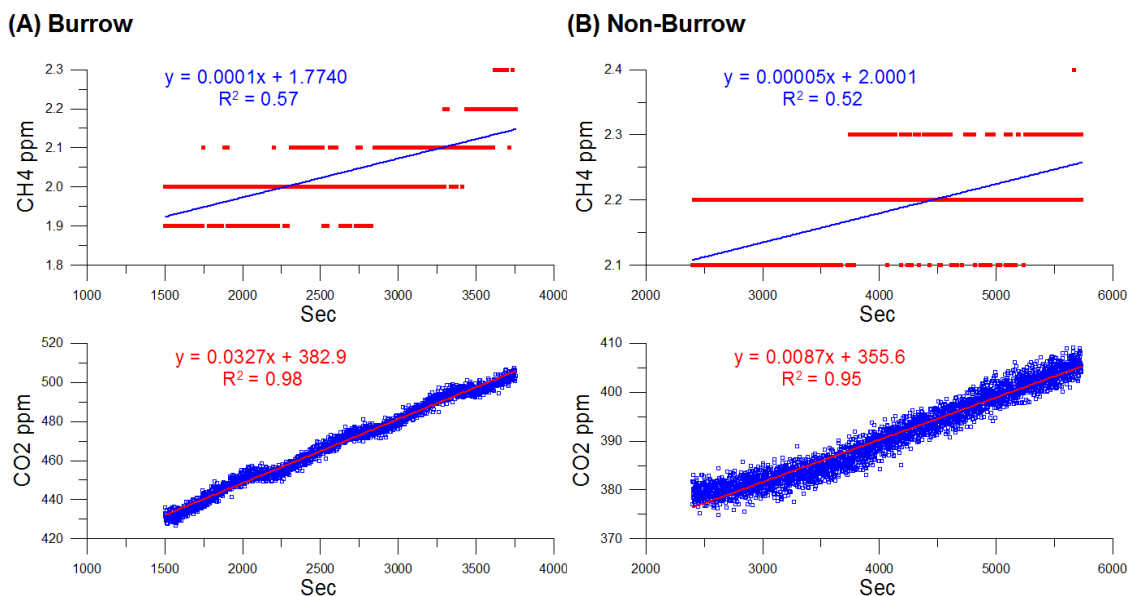


Fig. 8. CH₄ and CO₂ flux curves, recorded in burrow (A) and non-burrow (B) sites from the Hwangdo tidal flat, Cheonsu Bay.

갯벌의 서식굴과 비서식굴의 챔버 실험에서 산출된 메탄 플럭스($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$)는 각각 0.05와 0.03으로 조사되었다. 반면 이산화탄소 플럭스는 각각 45.0과 12.0으로 나타났다. 서식굴의 챔버 실험에서 온실기체 배출량이 많으며, 비 서식굴에 비해 메탄의 경우는 대략 2배, 그리고 이산화탄소는 대략 4배 정도가 많다. 특히 메탄의 경우 매우 낮은 플럭스로 인해 “stair-steps” 형태를 보였다(그림 8).

Kristensen et al. (2008)의 연구에 따르면, 탄지니아의 맹그로브 숲의 경우 메탄과 이산화탄소의 대기로 배출량은 식생, 서식굴 및 생물(이산화탄소의 경우 해당)의 생태환경이 주요한 요인으로 보고하였다. 특히 서식굴의 산소 공급에 따른 메탄 산화가 발생하기 보다는 배출량이 많은 점에 대해서는 서식굴이 하부 퇴적층에 형성되어 있는 메탄에 대해서 대기와의 통로로서 역할을 하고 있는 것으로 이해되었다.

일반적으로 서식굴의 갯벌생물은 굴 내부의 산소 부족 문제를 해결하기 위해, 굴에서 표층으로 이어지는 구멍을 여러 개 만들거나 대부분은 밀물 때 관개활동을 통해 수층으로부터 굴 내부로 산소를 공급한다. 그러나 이러한 방법을 통해서도 굴 상층부의 산소농도 유지가 가능하나 깊은 층의 산소부족 문제는 해결되지 못하며, 깊은 층에서는 대부분 무산소 환경이 만들어진다. 무산소 환경을 극복하기 위해 갯벌생물은 호흡을 참거나, 소위 “hold its breath”, 혹은 일시적으로 혐기성 호흡(anaerobic metabolism)으로 전환하기도 한다. 따라서 굴 내부에서는 미생물 및 갯벌생물에 의한 빠른 산소 소비가 발생한다(이상 한국해양과학기술원, 2010).

메탄형성 박테리아(Methanogens)에 대한 군집분석을 수행한 결과(표 2), 관찰구에서 찾은 서식굴 하부 층의 퇴적물내 박테리아 개체수의 비율이 가장 높았다. 이는 앞서 Kristensen et al. (2008)의 해석처럼 퇴적물 깊은 층의 메탄이 서식굴을 통해 대기로 배출될 수 있음을 제시해준다. 반면 서식굴 상부에서 메탄형성 박테리아의 비율은 비서식굴의 퇴적물 표층에서와 비교하여 뚜렷한 차이가 없었다.

Table 2 Summary of proportion of methanogen from Burrow and Non-Burrow sites at the Hwangdo tidal flat, Cheonsu Bay

		Burrow_Upper			Burrow_Lower*		Surface_Non-Burrow		
<i>Crenarchaeota</i>		63	116	68	579	354	8	23	18
MBGB		6	39	23	11	24	0	5	4
Unclassified		35	70	62	44	25	11	22	20
<i>Euryarchaeota</i>	<i>Methanomicrobia</i>	12	4	8	25	103	4	1	6
	<i>Methanococci</i>	1	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Methanobacteria</i>	0	2	0	47	44	0	0	0
	Others	1787	2017	2487	759	698	487	1311	969
<i>Thaumarchaeota</i>		133	58	148	2	59	50	39	60
AAG		0	1	0	0	0	0	0	0
No. of total reads		2037	2307	2796	1467	1307	560	1401	1077
Proportion of Methanogen (%)		0.64	0.26	0.29	4.91	11.25	0.71	0.07	0.56

*Samples were collected in the lower part of burrow from the acrylic observatory.

기존 금강하구연 갯벌에서 보고된 기체 플럭스($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$) 자료에 의하면(김득수, 2007), 평균적으로 겨울철(2월) 조사에서 메탄 0.004, 이산화탄소 -3.01이며, 봄철(4-5월)에서는 메탄 0.04, 이산화탄소 -46.75로 조사되었다. 기온이 높은 여름철(6월)의 경우 메탄 0.36, 이산화탄소 76.76으로 대기로 배출량이 높았다. 중국의 양자강 하구연 갯벌의 경우(Wang et al., 2009), 식생이 존재하는 marsh지역에서 연평균 메탄 플럭스는 2.06, 그리고 식생이 없는 갯벌 환경에서는 0.04로 보고되었다. 단편적인 비교이지만, 본 현장실험(10월에 행함)의 메탄 플럭스는 기온이 비슷한 시기인 금강하구연의 봄철 및 양자강 하구연의 식생이 없는 갯벌에서의 결과들과 비슷한 수준이다.

(2) 메탄의 탄소 안정동위원소비 분석

동위원소란 원자번호는 같으나 같은 수의 양성자를 가지고 중성자의 수가 다른 원자핵으로 이루어진 원소로, 동위원소 중 방사성 붕괴를 하지 않는 동위원소를 안정동위원소(stable isotope)라고 한다(김민섭 등, 2013). 동위원소 분별작용(fractionation), 즉 가벼운 동위원소가 원자량 및 에너지가 작은 유리한 조건 때문에 반응이 더 빨리, 더 많이 일어나게 된다. 가령, 아세테이트 발효과정(acetate fermentation)은 $\delta^{13}\text{C}_{\text{acetate}}$ 에 비해 발생된 메탄의 ^{12}C 는 25~35% 농축되며, 또한 이산화탄소 환원작용(carbonate reduction)에 의해 생성된 메탄은 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carbon dioxide}}$ 에 비해 ^{12}C 이 55% 이상 농축된다(Whiticar, 1999; 김민섭 등, 2013). 이러한 안정동위원소는 환경변화, 바이오매스 연소와 같은 질량손실로 동위원소의 비가 변하는 원소로 오염원을 추적하거나 물질의 기원 연구에 사용된다(김지훈 등, 2008; 김휘민, 2014). 가령, 비생물 기원(열 기원)의 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ 은 -50~-20%의 범위를 보이며, 반면 생물기원의 경우 -110~-50%의 범위로 상대적으로 가벼운 값을 가진다(Whiticar, 1999).

본 연구에서는 그림 4에서처럼 자동화 장치의 성능 검증을 위해서 챔버내 기체 시료를 채취하여 메탄의 탄소안정동위원소비($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $\delta^{13}\text{C}$)를 분석하였다. 챔버의 메탄농도가 증가하는 구간(그림 8 참조)에서 채취된 시료들의 메탄 $\delta^{13}\text{C}$ 는 평균 $-68.0 \pm 0.5\%$ ($n=4$)로 조사되었다. 미국 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)/ESRL(Earth System Research Laboratory)의 온실기체 관측망 중 하나인 서해 태안반도에서 지난 1991년부터 2011년까지 관측한 대기의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 평균 -47.3% 로 보고되었다(김휘민, 2014). 따라서 태안반도에서 보고된 $\delta^{13}\text{C}$ 값과 비교하여 챔버의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 생물기원을 보여주면서, 특히 챔버의 자동채취 시스템이 문제없이 작동하였음을 말해준다.

제 4 절 결론

- 선행된 연구결과를 보면(그림 9), 서식굴 챔버실험의 경우 초기 메탄농도는 시간에 따라 감소하였지만 선형성(linearity)을 보여주지는 못함. 마찬가지로 비서식굴에서도 증가를 하지만 선형성은 약함
- 본 현장실험에서 보듯이(그림 8) 메탄 플럭스는 낮기 때문에 메뉴얼식 일정한 시간간격으로 시료 채취하여 분석을 할 경우 선형성에 벗어난 시료를 분석할 가능성이 있음
- 이에 본 사업의 센서를 활용한 기체 플럭스 연구는 챔버내 메탄 및 이산화탄소 농도 변화를 실시간 모니터링 함으로써 온실가스 플럭스의 현장 측정이 가능하며, 현장에 맞는 챔버의 규모 디자인 및 실험실 분석용 시료 채취 시간 간격을 결정하는데 중요함
- 특히 챔버로부터 자동 가스 시료 채취 디자인의 경우, 챔버가 측정지점에 완전히 설치된 후 시료 채취가 완료되는 시점까지 챔버 주변에 인위적인 환경변화가 없기 때문에 시료 채취와 챔버 운용에 효과적임
- 학술적인 측면에서 메탄형성과 산화에 관여하는 박테리아들의 활동은 동시에 이루어지며(Topp and Patty, 1997), 산소농도에 따라 두 기작은 상대적인 우위를 차지하기 때문에 산소농도가 유지되는 서식굴에서 메탄산화에 관한 박테리아 연구 추진이 필요함
- 향후 생태와 지화학간의 융합적인 연구가 요구됨 (부록, 기획연구제안서 참조)

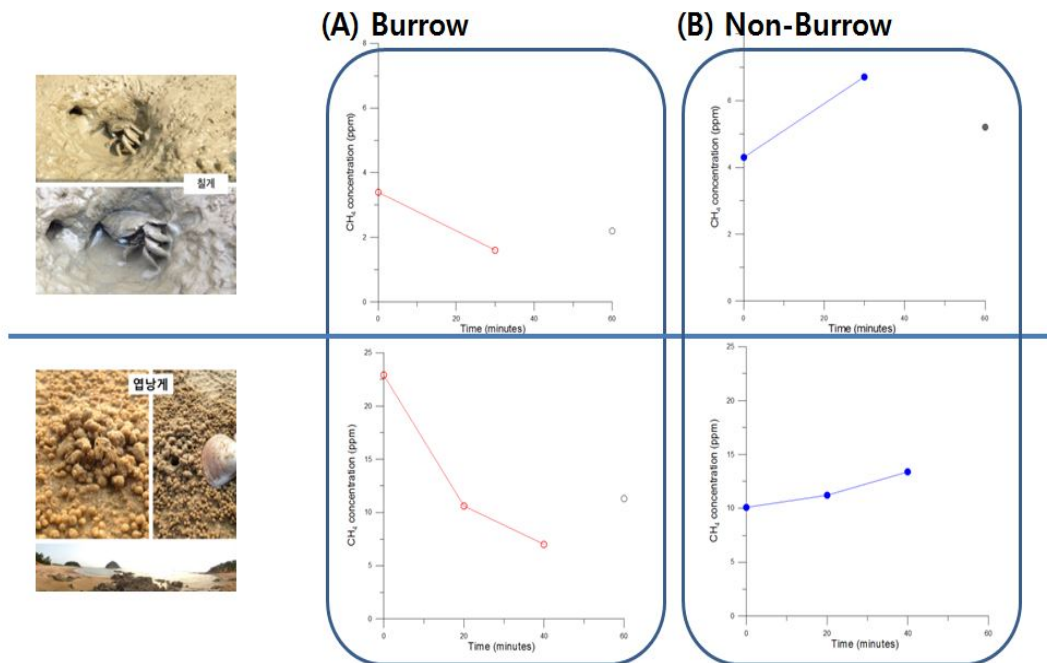


Fig. 9. Time variations of the CH₄ concentrations in the closed chamber, recorded in burrow (A) and non-burrow (B) sites.

제 4 장 연구개발 목표달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발 목표달성도

총 연구기간내 년차별 연구내용 대비 달성율(%)					
년 차	연구 성과	진척율		성취도 (정상, 부진)	특기사항 (우수성 및 부진사유)
		년차별 계획대비	총연구 기간대비		
1차년 (2015)	○ 현장 연구 시스템 구축 - 갯벌의 온실가스 플럭스 연구용 챔버 제작 - 챔버로부터 자동 가스 시료 채취 디자인 - 갯벌생물 서식굴 연구용 관찰구 운용	100	100	정상	온실가스 플럭스의 현장측정 가능
	○ 현장 연구 시스템 검증 - 갯벌 온실가스 연구용 챔버 현장 검증 - 서식굴 현장 조사	100	100		

제 2 절 대외기여도

1. 기술적 측면

- 갯벌의 메탄 배출/흡수 기작 이해 및 메탄 산화 관련 미생물 활성 측정 등을 통해 갯벌의 메탄 흡수능 평가에 관한 연구 기반 마련
- 갯벌의 메탄 발생량 정보는 기후 자료와 연계하여 육상, 해양, 대기 사이의 메탄 플럭스 변동성 연구를 위한 생지화학 모형 개발 및 해양/육상 환경에서 메탄 배출량 기법 개발에 활용
- 갯벌의 생태적 기능 평가를 통해 연안생태계의 통합관리 모델의 핵심정보 제공
- 동아시아 기후변화와 연안습지의 고유 기능 간 역학적 이해
- 해양환경으로부터 자연 발생적 메탄가스의 온실효과에 대한 자료 제공

2. 경제·사회적 측면

- 갯벌 저서생물이 만든 서식굴이 존재하나 현장에서 환경 특성상 생물이 만든 서식굴 형태를 볼 수가 없음. 갯벌생물의 서식굴 입체 가시화를 통해 갯벌의 기능과

생물의 역할에 대한 교육용 교재로 활용

- 갯벌의 객관적인 기능평가 및 효율적인 관리방안 제시로 갯벌의 개발/보전에 관한 신뢰성 있는 정책적 대안 제시로 소모적인 갈등(개발/보전 논쟁) 완화 및 예산 낭비 요소 경감, 국민들에게 균형 잡힌 환경지식 전달
- 기후변화대응 정책수립을 위한 과학적 판단근거 제시(메탄의 자연 배출량 산정은 저탄소 녹색성장과 국가 온실가스 감축에 따른 GDP 손실 평가에 대한 기초자료로 제공)

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 해양환경별(갯벌, 하구역) 메탄 플럭스 변동 연구
 - 갯벌의 침수·노출에 따른 퇴적물의 지질, 지화학적 변화가 퇴적물과 수층 및 퇴적물과 대기 경계에서 메탄 플럭스에 미치는 영향 파악
 - 하구역 메탄의 공급과 제거과정 연구를 통해 메탄 수지(budget)계산 및 하구역과 연안역 사이의 메탄 생지화학적 순환 연구
 - 탄소 격리(C sequestration = C burial - CH₄ + N₂O fluxes)에 대한 갯벌의 생태적 기능평가

- 갯벌의 메탄 발생량 모니터링 기술 개발
 - 메탄 발생량과 다중위성 인식 환경인자간 상관관계 분석을 통한 메탄 발생의 공간 정보화

제 6 장 참고문헌

- 국립환경과학원, 2012. Closed chamber를 이용한 산림지역 토양의 질소산화물 및 메탄의 지표 배출량 조사 연구. pp 129.
- 김득수, 2007. 온실기체(CH₄, CO₂, N₂O)의 하구연갯벌 배출량과 배출특성연구. 한국대기 환경학회지 23, 225-241.
- 김득수, 나운성, 2013. 내륙습지와 갯벌에서의 주요 온실기체 배출량 특성연구. 한국대기 환경학회지 29, 171-185.
- 김민섭, 황종연, 권오상, 이원석, 2013. 안정동위원소비 분석 기법의 이해: 시료의 전처리, 분석 및 자료의 해석과 적용. 생태와 환경(KJEE) 46, 471-487.
- 김영주, 정수현, 강호정, 2006. 온도 증가와 염도 감소에 따른 갯벌토양에서 메탄발생량의 변화. 한국습지학회지 8, 19-25.
- 김종걸, 박수제, 이성근, 2010. 염전으로부터 농화배양된 호염 메틸영양미생물 군집의 특성. 한국미생물학회지 46, 286-290.
- 김휘민, 2014. 1991-2011년 동아시아에서 측정된 이산화탄소, 메탄 농도와 탄소안정동위원소 연구. 석사학위, 한국교원대학교.
- 이동현, 이준호, 정갑식, 우한준, 강정원, 신경훈, 하선용, 2014. 생지화학적 지표를 이용한 서해안 갯벌 퇴적층에서의 유기물 순환에 관한 연구. Ocean and Polar Research 36, 25-37.
- 한국해양과학기술원, 2010. 갯벌기능성 회복을 위한 퇴적/물리/생태학적 핵심 환경요소 연구. pp 583.
- Abril G, Commarieu M-C, Guerin F, 2007. Enhanced methane oxidation in an estuarine turbidity maximum. Limnology and Oceanography 52, 470-475.
- Ettwig et al., 2010. Nitrite-driven anaerobic methane oxidation by oxygenic bacteria. Nature 464, 543-548.
- Kim D-S, Harazono Y, Baten MA, Nagai H, Tsuruta H, 2002. Surface flux measurements of CO₂ and N₂O from a dried rice paddy in Japan during a fallow winter season. Journal of the Air and Waste Management Association 52, 416-422.
- Koo BJ, Kwon K-K, Hyun J-H, 2005. The sediment-water interface increment due to complex burrows of macrofauna in a tidal flat. Ocean Science Journal 40, 221-227.

- Koo BJ, Kwon K-K, Hyun J-H, 2008. Effect of environmental conditions on the variation in the sediment-water interface created by complex macrofaunal burrows on a tidal flat. *Journal of Sea Research* 58, 302-312.
- Kristensen E, Flindt MR, Ulomi S, Borges AV, Abril G, Bouillon S, 2008. Emission of CO₂ and CH₄ to the atmosphere by sediments and open waters in two Tanzanian mangrove forests. *Marine Ecology Progress Series* 370, 53-67.
- Osudar R, Matoušů A, Alawi M, Wagner D, Bussmann I, 2015. Environmental factors affecting methane distribution and bacterial methane oxidation in the German Bight (North Sea). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 160, 10-21.
- Rosenberg R, Ringdahl K, 2005. Quantification of biogenic 3-D structure in marine sediments. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 326, 67-76.
- Topp E, Pattey E, 1997. Soils as sources and sinks for atmospheric methane. *Canadian Journal of Soil Science* 77, 167-178.
- Wang D, Chen Z, Xu S, 2009. Methane emissions from Yangtze estuarine wetland, China. *Journal of Geophysical Research* 114, doi:10.1029/2008JG000857.
- Whiticar MJ, 1999. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane. *Chemical Geology* 161, 291-314.