PN15082-077-12

# 온도 상승에 따른 동토층 토양유기물 분해 효소 기작 연구

Enzymatic analysis of organic matter decomposition in permafrost soils under elevated temperature



연세대학교

## 제 출 문

#### 극지연구소장 귀하

본 보고서를 "환북극 동토층 환경변화 관측시스템 원천기술 개발 및 변화 추 이 연구"과제의 위탁연구 "온도 상승에 따른 동토층 토양 유기물 분해 효소 기작 연구"과제의 최종보고서로 제출합니다.



2016. 7. 15.

- (본과제) 총괄연구책임자 : 이 방 용
  - 위탁연구기관명 : 연세대학교
  - 위탁연구책임자 : 강 호 정
  - 위탁참여연구원 : 서 주 영
    - " : 채 남 이
      - " : 김 진 현

보고서 초록

위탁연구과제명	온도 상승에 따른 동토층 토양 유기물 분해 효소 기작 연구					
위탁연구책임자	강호정	해당단계 참여연구원수	4	해당단계 연구비	270,	000,000원
연구기관명 및 소속부서명	연세대학교	. 토목환경공학과	참여기업명			
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :					
요약(연구결과를	요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내) 보고서 35 면수			35		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)       면수       35         ①       기후변화 조작실험이 수행되고 있는 캐나다 캠브리지베이 지역에서 효소활성도를 측 정한 결과 기후변화 연차와 효소의 종류에 따라 다른 반응이 나타남       0         ○       가수분해효소 활성도의 경우 조작실험에 의한 차이보다 토양 깊이에 따른 차이만 보 였으며 표토의 유기물 층에서 높은 경향을 보임       0         ○       페놀산화효소의 경우 조작실험 1년차에 온도상승 하에 활성도가 증가하였다가 3년차 에는 다시 차이가 없는 것으로 나타남       0         ○       토양의 용존유기탄소 함량 역시 조작실험보다 토양 깊이에 따른 차이를 보였으나 3 년차에 약간 증가하는 경향을 보임       0         ○       용존유기탄소 함량과 가수분해효소 활성도 간에 양의 상관관계를 보임       0         ○       온도 상승 하에 식물체의 동위원소 비가 바뀌어 건조효과가 있는 것으로 보임       0         ○       온실기체 발생량 및 관련 미생물량은 기후변화 처리구에 따른 유의한 차이를 보이지 않음						
	한 영구-	동토층, 기후변화,	탄소순환, 유	-기물분해, 난	분해성들	물질, 온실
~ 인 어   (간 5개 이사)	글 기기 영 perm	भ afrost. climate	change, car	bon cycle	organio	c matter
	어 dec	composition, recal	citrant orgar	nic matter, gr	eenhou	se gas

## 요 약 문

#### I.제 목

온도 상승에 따른 동토층 토양 유기물 분해 효소 기작 연구

- Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성
- 기후변화(기온상승)가 북극권 영구동토층에 미치는 영향을 파악하고, 특히 토양
   유기물 분해 과정의 본질적 기작을 파악함으로써 향후 기후 변화 예측과 탄소
   저감에 중요한 정보를 제공
- 영구 동토층 탄소순환에 관여하는 인자들과 관련 미생물 활성도 및 온실기체 발 생과의 상관관계규명
- Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범원국지연구소
- 연구개발의 내용: 기후변화 인자 조작 실험을 통한 영구동토층의 유기물 분해
   관련 미생물 효소활성도 측정
- 연구개발의 범위: 캠브리지베이 기후변화모사실험지에서 유기물 분해와 관련된
   가수분해효소 및 난분해성 탄소 분해관련 산화효소의 활성도를 측정함
- Ⅳ. 연구개발결과
  - 기후변화 조작실험이 수행되고 있는 캐나다 캠브리지베이 지역에서 효소활성 도를 측정한 결과 기후변화 연차와 효소의 종류에 따라 다른 반응이 나타남
     가수분해효소 활성도의 경우 조작실험에 의한 차이보다 토양 깊이에 따른 차 이만 보였으며 표토의 유기물 층에서 높은 경향을 보임

· 페놀산화효소의 경우 조작실험 1년차에 온도상승 하에 활성도가 증가하였다가
 3년차에는 다시 차이가 없는 것으로 나타남

도양의 용존유기탄소 함량 역시 조작실험보다 토양 깊이에 따른 차이를 보였
 으나 3년차에 약간 증가하는 경향을 보임

○ 용존유기탄소 함량과 가수분해효소 활성도 간에 양의 상관관계를 보임

오도 상승 하에 식물체의 동위원소 비가 바뀌어 건조효과가 있는 것으로 보임
온실기체 발생량 및 관련 미생물량은 기후변화 처리구에 따른 유의한 차이를 보이지 않음

V. 연구개발결과의 활용계획

기후변화 모사실험 3년간의 온실기체 플럭스 관측, 효소활성도, 동위원소 분석
 등을 종합하여 기후변화가 북극토양 생태계에 미치는 영향을 파악하고, 향후 다
 른 관측요소 및 장기관측결과를 종합하여 논문 작성



## S U M M A R Y (영 문 요 약 문)

- I. Title
- $\odot\,$  Enzymatic analysis of organic matter decomposition in permafrost soils under elevated temperature
- II. Purpose and Necessity of R&D
- Determination of effect of climate change (elevated temperature) on permafrost soil ecosystem and in particular, substantial mechanisms of organic matter decomposition.
- Investigation of relationship between microbial enzyme activity and C cycle of permafrost soil ecosystems.



- III. Contents and Extent of R&D
- $\bigcirc$  As a response of organic decomposition to climate change, extra-cellular enzyme activities were observed under climate change manipulation.
- Activity of enzymes that is related to organic decomposition including hydrolases and phenol oxidase was measured in Cambridge Bay under climate change experiment.
- IV. R&D Results
- Response of extra-cellular enzyme activities to climate change experiment depended on time period and enzyme type

- Hydrolases activity did not show differences among treatments, however, was higher at organic layer than mineral layer
- Phenol oxidase activity was higher under warming after 1 year of experiment, however, did not show differences after 3 years of experiment
- $\odot\,$  Dissolved organic carbon content was higher at organic layer than mineral layer
- Dissolved organic carbon content and hydrolases activity showed positive correlation
- Differences in carbon isotope ratio of plant body suggested drought effect by warming
- $\odot$  Greenhouse gases and related microbial abundance did not show significant differences among treatments
- V. Application Plans of R&D Results
- To know impacts of 3 years of climate change to arctic soils, greenhouse gas fluxes, enzyme activities, and stable isotope results will be considered together. Combining with other observations, this information would be published as a research paper.

복 자
-----

제	1	장	서론		8
제	2	장	국내외	기술개발 현황	9
제	3	장	연구개	발수행 내용 및 결과	10
제	47	장 '	연구개빌	논목표 달성도 및 대외기여도	30
제	5	장	연구개	발결과의 활용계획	32
제	6	장	연구개	발과정에서 수집한 해외과학기술정보	33
제	7	장	참고문	헌	34
				극지연구소	

#### 제 1 장 서 론

- 북극권의 영구동토층은 낮은 온도로 인한 낮은 유기물 분해율로 인해 1400 ~ 1800 Pg 에 달하는 유기탄소가 저장되어 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 최근 의 기온상승과 같은 기후 변화에 따라 온실기체의 발생원으로 작용할 가능성이 있어 이와 관련한 많은 연구가 진행되고 있다. 또한 이에 따른 유기질소의 무기 화와 기후변화에 따른 질소 침적은 미생물의 활성을 더욱 증가시켜 유기물 분해 에 악순환으로 작용할 수 있다.
- 동토층 생태계에서의 지구환경변화 효과는 주로 기온상승에 따른 동토층의 해빙
   및 이에 수반되는 생태계의 생지화학적 구조 및 기능 변화에 있을 것이라고 예
   측되고 있다. 특히 동토층의 경우 향후 50-100년 사이에 현재 면적의 최대 25%
   까지 해빙될 것이라고 예측되어, 장기적으로는 극지의 식생 구조의 변화가 뒤따
   를 수 있으며, 단기적으로 동토층 해빙이 유기물 분해에 관여하는 미생물 활성도
   및 구조에 영향을 미쳐 기후변화에 되먹임 효과를 가져올 것으로 예상되고 있다.
- 지구환경변화가 동토층 생태계의 토양유기물 분해와 같은 생지화학적 순환에 미 치는 영향에 관한 연구는 향후 대기 중으로의 생물학적 되먹임에 있어서 매우 중요한 정보이다.
- 거대한 면적의 동토를 포함하고 있는 북극의 생태계는 이산화탄소의 흡원이면서 메탄의 발원으로서 전 지구적인 역학에서 중요한 역할을 담당한다. 그러므로 툰드라 동토에서 온실기체 모니터링을 통한 탄소 순환의 메커니즘을 구명하는 것이 필수적이며, 이는 극지방에서의 환경 변화에 따른 육상 생태계의 반응을 이해 하고 기후변화 감시에 있어서 매우 중요한 역할을 할 것이다.
- 지표와 대기 간의 탄소 순환에 가장 크게 기여하고 있는 토양에서 대기로 방출
   되고 있는 이산화탄소 플럭스 관측은 접근성과 열악한 기상 조건으로 인해 대부
   분 단기간의 현장 관측 또는 샘플링을 통한 실내 조절 실험으로 현장에서의 연
   속적인 자료 확보가 매우 어려운 실정이다.
- 현장에서 생지화학 순환을 직접 관측할 수 있는 미기상학적 방법을 이용하여, 토양에서 대기로 방출되는 이산화탄소 및 메탄의 정량화가 선행되어야하며, 이 러한 결과는 생태계 순 탄소 교환량과 함께 탄소 순환을 이해하고 예측하는 모 델 개발에 기여할 수 있다.

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

- 북극권 연구는 주로 북극권에 인접한 국가를 중심으로 진행되어왔으나, 최근 북 국권 생태계가 지니고 있는 잠재적 기능이 부각되면서 많은 선진국이 북극 연구 를 전담하는 기관을 설립하고, 현지에 기지를 설치 운영하는 등 동토층을 포함한 북극권 연구에 적극적으로 참여하고 있는 실정이다. 북극권의 지역적 특성상 대 부분의 연구가 다국적 네트워크를 형성하여 진행되고 있으며, 2007년도 선포된 국제 극지의 해(IPY)를 기점으로 극지연구에 있어 국제적 협력 프로그램이 활발 히 진행되고 있다. 특히 극지를 포함한 동토층 해빙과 관련한 기후변화 되먹임 에 대한 연구가 현재 왕성히 진행 중인데 일례로 IPY에 맞추어 동토층 관련 개 인연구과제만 50개 이상 제안된 바 있다.
- 동토층 해빙과 관련, 주목되고 있는 사안인 기후변화 되먹임에 관한 연구의 경우, 해빙이후 극지 토양에서 메탄 기체의 대규모 방출이 관측되었다는 점에 착목 하여 메탄기체 방출에 관여하는 미생물인 메탄생성세균(methanogen) 군집의 구조 및 활성도에 대한 연구가 매우 활발히 진행되고 있는 상황이다. 극지토양에서 메탄생성세균의 분리를 비롯, 환경요인에 따른 이들의 군집구조 및 활성도 변화 및 메탄 유동량(flux)과의 상관관계 분석, 그리고 이를 토대로 한 모델링 등의 연구가 왕성히 이루어지고 있다.
- 북극권이 지니는 지역적 특성상 국내의 연구진이 수행하고 있는 연구는 매우 제 한적인 상황이며, 따라서 국제적 수준의 연구성과를 보다 광범위하게 창출하는 데 어려움이 있다. 특히 국제적으로 주목받고 있는 지구환경변화 및 생물학적 지구환경변화 되먹임과 관련한 연구는 본격적으로 진행된 바 없으며, 현재 극지 연구소를 중심으로 북극권 온실기체 유동량을 관측하고, 온실기체 발생과 관련 한 미생물을 분리, 배양하는 등의 연구를 시작하는 단계에 있다.

## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

#### 제 1 절 북극토양 온도상승에 따른 효소활성도

- 1. 연구내용 및 방법
  - 가. 연구대상지 및 새료채취 시기
  - 대상지는 캐나다 캠브리지베의 지역으로 2012년부터 기후변화모사실험이 수 행되고 있다. 여기에서 open top chamber를 통한 온도 상승(W), 인위적인 강 수 증가(P), 온도상승과 강수 증가(WP), 대조지(Ctrl)를 설정하여 조작실험 전 후의 변화를 조사하였다.
  - 기후변화 모사실험 이전인 2012년 7월, 1년차인 2013년 8월, 3년차인 2015년 8월 기체 및 토양시료 채취를 실시하였으며 2013년 8월에는 또한 Dryas 및 Pedicularis 식물체의 어린잎을 채취하였다. 2012년 및 2013년에는 토양을 0-5cm (D1), 5-10cm (D2) 깊이로 나누어 채취하였으며, 2015년에는 organic 층과 mineral 층을 나누어 채취하였다. organic 층이 깊게 형성된 경우 5cm 깊이를 기준으로 나누어 채취하였다.
  - 나. 체외효소활성도 측정 그지여
  - 각 실험구에서 채취한 토양을 acetate buffer와 혼합하여 원심분리한 뒤 상등
     액의 균질한 효소용액을 얻는다.
  - 가수분해효소: 형광성의 4-methylumbelliferyl 표지된 효소 각각의 기질 용액
     율 효소용액과 혼합하여 상온에서 1시간 배양한 뒤, 형광분석을 통해 분해된
     기질의 양을 측정한다.
  - 페놀산화효소: 3,4-Dihydroxy-L-phenylalanine 용액을 효소용액과 혼합하여 상온에서 15분 배양한 뒤 흡광도 축정을 통해 분해된 기질의 양을 측정한다.
  - 다. 용존유기탄소(DOC) 분석
  - 각 실험구에서 채취한 토양을 물로 용출하여 상등액을 0.45µm 필터한 뒤, TOC-V meter를 통해 탄소의 농도를 측정하고 토양 g당 탄소 함량으로 환산 한다. 위의 효소활성도와의 상관관계를 분석한다.
  - SUVA (specific UV absorbance): 용출한 DOC 용액에서 humic 물질의 비중
     과 상대적 분자량을 조사하기 위해 254 및 365 nm 파장에서 흡광도를 측정

한다.

- 라. 식물체 탄소동위원소 분석
- 광합성기간동안 기후변화의 영향을 알기 위해 채취한 식물체의 어린잎을 60
   도에서 72시간 건조한 뒤 ball mill 장비를 이용하여 분쇄한다. 분쇄한 식물체
   의 탄소동위원소를 EA-IRMS 장비를 이용하여 분석하였다.
- 마. 온실기체 발생량 분석
- Static chamber method를 이용하여 각 실험구에 3개의 챔버를 설치하고 일정 시간 간격으로 headspace의 공기를 채취하였다. 채취한 기체시료의 CO<sub>2</sub> 및 CH<sub>4</sub> 농도를 gas chromatograph 장비를 이용하여 분석하고 단위 면적, 시간 당 기체 발생량으로 환산하였다.
- 바. 메탄플럭스 관련 미생물량 분석
- 채취한 토양에서 미생물 DNA를 추출한 뒤 qPCR을 통해 메탄생성균(mcrA)
   및 메탄산화세균(pmoA)의 유전자량을 측정하였다.



2. 연구 결과

가. 체외효소활성도

- 가수분해효소 활성도의 경우 조작실험의 여부보다 토양 깊이에 따른 차이를 보였다. OTC 설치 이전인 2012년과 1년차인 2013년에는 D1에서 D2보다 높은 활성도를 보였으며, 기후변화 3년차인 2015년에도 유기물층에서 미네랄층 보다 높은 활성도를 보였다. 통계적으로 유의한 차이는 아니아 3년차인 2015년에는 온도를 상승시킨 W, WP 처리구에서 활성도가 약간 높은 경향을 보인 바 보다 장기적인 관측이 필요할 것으로 보인다.
- 분해하기 어려운 복잡한 구조의 탄소를 분해하는 페놀산화효소의 경우 기후 변화 1년차인 2013년 온도 상승에 의해 증가하여 난분해성 유기물 분해가 활 성화될 것으로 보였으나, 3년차인 2015년에는 이러한 경향이 관측되지 않아 현재까지의 결과로는 단기적인 반응인 것으로 사료된다.



## 그림 1 기후변화 모사실험 이전(2012) 가수분해효소 활성도



#### 그림 2 기후변화 모사실험 1년차(2013) 가수분해효소 활성도



#### 그림 3 기후변화 모사실험 3년차(2015) 가수분해효소 활성도



그림 4 기후변화 모사실험 전후 페놀산화효소 활성도

나. 용존유기탄소(DOC)

- 도양 내 용존유기탄소의 함량 역시 모든 관측 시기에 깊이에 따른 차이를 보였다. 2012, 2013년에 D1에서 D2보다 높은 함량을 보였으며 2015년에는 유기 물 층에서 미네랄 층보다 높은 함량을 보였다. 용존유기탄소는 미생물이 이용 하기 좋은 작은 단위의 유기탄소로서 유기물이 풍부한 표토층에서 그 함량이 풍부한 것으로 보인다. 기후변화 조작 처리구에 따른 유의한 차이는 없었으나, 실험의 영향을 가장 많이 받은 3년차에는 WP 처리구에서 다소 증가하는 경향을 보였다. 이는 큰 단위의 유기물이 분해된 산물로 볼 수 있어, 향후 장 기적인 온도 상승에 따라 용존유기탄소 함량이 증가할 경우 유기물 분해율 증가로 해석될 수 있으며, 토양호흡에 의한 온실기체 발생 증가로 이어질 수 있다.
- 용존유기탄소의 질적 분석인 SUVA 값 역시 대체적으로 처리구에 따른 차이 를 보이지 않았으나, 미네랄 층의 humic 물질 함량의 경우 온도 상승에 따른 감소 경향을 보였다.
- 또한 각 토양의 용존유기탄소 함량이 가수분해효소의 활성도와 유의한 상관 관계를 보였다. 이는 유기물이 풍부한 층에서 효소활성도가 높은 현상 및 같 은 유기물층 내에서 효소활성도가 높은 지점의 용존유기탄소 함량이 높은 현 상으로 해석될 수 있다.

Water Content (%)						
	2012		2013			
	$D1^{a}$	$D2^{b}$	$\mathrm{D1}^{\mathrm{a}}$	$D2^{b}$		
No treatment	54.6(6.1)	42.1(7.9)	55.0(3.8)	34.2(8.7)		
Precipitation	60.8(1.9)	49.4(5.5)	54.1(3.9)	40.9(7.7)		
Warming	60.0(6.0)	45.8(5.9)	51.8(6.7)	41.4(5.0)		
W + P	60.7(4.0)	51.2(8.0)	52.7(5.5)	39.6(6.8)		
	Organic Matter (%)					
	2012		2013			
	D1 <sup>a</sup>	$D2^{b}$	D1	D2		
No treatment	51.9(9.0)	34.4(8.9)	54.4(6.0)	32.3(13.6)		
Precipitation	58.8(5.5)	43.9(6.6)	52.8(7.9)	49.2(22.3)		
Warming	60.4(9.2)	38.5(5.6)	52.5(11.4)	35.9(8.2)		
W + P	58.5(7.7)	49.0(7.6)	53.1(8.3)	33.1(6.1)		
	DC	OC $(mg \cdot g^{-1}soil)$				
	2012		2013			
	D1 <sup>a</sup>	$D2^{b}$	$\mathrm{D1}^\mathrm{a}$	$D2^{b}$		
No treatment	0.18(0.03)	0.10(0.02)	0.20(0.03)	0.11(0.03)		
Precipitation	0.23(0.01)	0.13(0.02)	0.22(0.03)	0.14(0.03)		
Warming	0.22(0.03)	0.14(0.02)	0.22(0.05)	0.12(0.02)		
W + P	0.24(0.02)	0.13(0.03)	0.20(0.03)	0.11(0.02)		
SUVA254 $(m^{-1} \cdot mg^{-1} \cdot L)$						
	2012		2013			
	D1	D2	$D1^{a}$	$\mathrm{D2}^\mathrm{b}$		
No treatment	5.0(0.2)	4.0(0.2)	3.1(0.2)	2.3(0.3)		
Precipitation	4.7(0.3)	4.4(0.4)	3.0(0.3)	2.3(0.1)		
Warming	4.7(0.3)	4.2(0.3)	3.0(0.1)	2.8(0.2)		
W + P	4.6(0.1)	5.2(0.4)	3.1(0.2)	2.6(0.2)		
A254/A365						
	2012		2013			
	D1 <sup>a</sup>	$D2^{b}$	$D1^{a}$	$D2^{b}$		
No treatment	6.6(0.1)	11.4(0.9)	5.7(0.2)	6.5(0.1)		
Precipitation	7.1(0.2)	11.3(2.0)	5.3(0.4)	6.5(0.1)		
Warming	7.0(0.4)	10.3(1.0)	5.8(0.2)	6.1(0.2)		
W + P	7.7(0.7)	9.8(1.0)	5.8(0.2)	6.5(0.1)		

표 2 기후변화 모사실험 전후 토양특성 변화



#### 그림 5 기후변화 모사실혐 3년차(2015) 용존유기탄소 함량 및 질적 변화



#### 그림 6 기후변화 모사실험 3년차(2015) 용존유기탄소와 가수분해효소 활성도 간의 상관관계

다. 식물체 탄소동위원소

기후변화 조작실험기간 동안 형성된 어린잎의 탄소동위원소 비를 분석한 결과 온도 상승 처리구에서 613C 값이 높은 것으로 나타났다. 이는 일반적으로 온도가 높고 수분이 부족한 환경에서 나타나는 경향으로서, 본 실험의 온도 상승 처리구 내의 식물 및 미생물이 온도와 증발산 증가의 영향을 받는다는 근거로 생각된다.



그림 7 기후변화 모사실험 1년차(2013) 식물체 탄소동위원소 비

라. 온실기체 발생량

- 아 자치리구의 온실기체 발생량은 처리구에 따른 뚜렷한 경향을 나타내지 않고 조작실험 이전부터 공간적인 차이를 많이 나타냈다. 이산화탄소 플럭스의 경 우 조작실험 이후 모든 처리구에서 흡수되는 경향을 보였는데 이는 연중 측 정시기에 다소 차이가 있어 나타나는 현상으로 생각된다. 이산화탄소 플럭스 의 경우 식물생장상태에 따라 큰 차이를 가지게 되므로 이후 연 1회가 아닌 보다 강화된 관측이 필요하다.
- 메탄의 경우 전체적으로 소멸되는 것으로 나타났으며, 이는 건조한 육상생태 계의 일반적인 결과로 보인다. 처리구 별 유의한 차이는 없었으나 조작실험 1 년차인 2013년 온도 상승에 의해 단기적으로 메탄 발생이 약간 증가한 경향 을 보이나, 역시 연 1회 관측의 한계로 인해 보다 면밀한 관측이 필요하다.



그림 8 기후변화 모사실험 전후 이산화탄소 플럭스 변화



마. 메탄플럭스 관련 미생물량

 도양 내 메탄생성균 및 메탄산화세균의 풍부도는 처리구에 따른 유의한 차이 를 나타내지 않았다. 메탄생성균의 풍부도가 강수를 상승시킨 처리구에서 다 소 높은 경향은 조작실험 이전인 2012년에도 나타나 공간적인 분포의 영향이 더 큰 것으로 보인다. 메탄산화세균의 경우 산소가 풍부한 표토층에서 더 높 은 풍부도를 보였다. 현재까지 메탄 관련 미생물의 풍부도와 메탄 플럭스 간 의 뚜렷한 상관관계는 나타나지 않았으며 이는 식생, 기질 등의 공간적 차이 에 의한 것으로 생각된다.



그림 10 기후변화 모사실험 이전(2012) 및 1년차(2013) 메탄생성균의 풍부도



#### 제 2 절 알래스카 자동챔버 연구

- 1. 연구 내용 및 방법
- 알래스카 카운슬에서 동안 20m × 30m 관측지 내에서 15개의 챔버를 설치하여 관측
- 온실기체 발생을 조절하는 환경 인자들의 관측
- · 각 식생별 토양온도와 광합성 유효복사량을 측정하여 토양 이산화탄소 방출량과
   의 관계 및 호흡량 산출을 위하여 활용
- 자동 챔버 시스템을 이용한 식생별 온실기체 발생량 분석
- 각 식생별 관목와 이끼류(shrub & moss), 이끼류 (moss), tusscok 형태의 초본 (tussock grass) 그리고 지의류(lichen)에서 관측
- 체외 활성도 분석
- 알래스카 카운실 지역의 대표적인 식생 유형 4종(moss, lichen, shrub, tussock)
   에 대한 2014년과 2015년 토양의 체외효소활성도를 분석
- 2. 연구 결과



관측된 광합성 유효 복사량은 오후 1시에서 2시 사이에 최고값을 보였고, 밝은 날의 최고값은 주로 1200-1400 µmol-1m-2s-1이었다. 야간은 PAR이 10µ mol-1m-2s-1 이하가 되는 시간대를 야간으로 정의하였고, 주로 23:00 - 05:00에 해당된다(그림 12).



식생별 깊이(0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 m)에 따른 각 식생별 온도 분포를 조사하였다. 식생 간의 비교에서는 초본(cotton grass)로 이루어져 있는 tussock에서 대체적으로 높은 온도가 관측되었으나, 0.02m 깊이의 경우는 관목과 이끼가 있는 토양에서 맑은 날 20 - 25°C까지 상승하면서 15°C 전후의 온도차를 보이며 매우 큰 폭의 일변화를 보였다. 야간 토양 온도는 관목과 이끼류에서 10°C 전후, tussock에서는 10-15°C, 지의류에서는 3-8°C를 보였고, 이 때 기온은 대체적으로 5-15°C의 범위를 보이며 모든 식생에서 거의 같은 온도 변화 패턴을 보였다(그림 13).



- 나. 자동 챔버 시스템을 이용한 식생별 온실기체 발생량 분석
- 야간 동안 관목과 이끼류(S & M)와 이끼류(Mo)의 이산화탄소 방출량은 평 균적으로 0.1-0.3 mg m-2s-1으로 S & M이 약간 높은 값을 보였고, Tussock(Tu)에서는 0.1-0.2 mg m-2s-1, 지의류(Li)에서는 0 -0.15 mg m-2s-1 였다(그림 14). 이산화탄소 방출량이 큰 관목과 이끼(shrub & moss) 그리고 초본 tussock의 미생물 체외 활성이 이끼류와 지의류 보다 높았다.



그림 14 관목과 이끼류(S & M)와 이끼류(Mo)에서의 토양이산화탄소 방출량



그림 15 Tussock(Tu)과 지의류(Li)에서의 토양이산화탄소 방출량



다. 체외 활성도 분석

 2014년과 2015년 토양의 체외효소활성도를 분석한 결과, 식생의 유형에 따라 그리고 식생에 따른 활성도에서 차이를 보였다(그림 16). 탄소와 관련된 Glucosidase 효소를 이용한 분석에서 2014년의 경우에는 관목과 초본에서 가 장 놓은 값을 보였으나, 2015년의 경우에는 2014년과 비교하여 매우 낮은 값 의 활성도를 보였다. 토양 샘플이 7월에 이루어졌으므로, 이러한 결과는 2015 년 적은 강수량의 영향으로 추정된다.



Glucosidase

그림 16 2014년과 2015년 식생별 토양 체외효소활성도 분석 결과

## 제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

- 1. 연구개발의 최종목표
- 기후환경변화가 동토층 생태계에 미치는 영향을 파악하고, 특히 토양 유기물분
   해 과정의 본질적 기작을 파악함으로써 향후 기후환경변화 예측과 탄소 저감에
   중요한 정보를 제공하고자 함.
- 생태학적 분석 기법을 동토층 생태계에 적용하여 미생물 구조와 생태계 기능의
   연관성을 규명함으로써 동토층 생태계 연구 방법론을 제시함.
- 2. 연차별 연구개발 목표 및 내용

구분	년도	연구개발목표	연구개발내용	
1차년도	2013	동토층 탄소순환관련 연 구방법론 정립 및 적용	미생물 생태학적 연구방법론 정립 및 적용	
2차년도	2014	탄소순환/미생물 상관관계 규명	동토층 유기물 분해 속도 및 관련미 생물, 효소의 상관관계 규명	
3차년도	2015	기후변화에 따른 동토층 유기물분해기작 규명	모사실험, 장기 관측 결과 종합, 기 후변화에 따른 동토층 유기물분해기 작 규명	

3. 계획대비 달성도(선정시 제시된 연구목표)

구분	년도	연구개발목표	달성도
1차년도	2013	동토층 탄소순환관련 연구방법론 정립 및 적용	100 %
2차년도	2014	탄소순환/미생물상관관계 규명	100 %
3차년도	2015	기후변화에 따른 동토층 유기물분해기 작 규명	100 %

4. 관련분야의 기술 발전에의 기여도

가. 국내 극지연구 발전에 미칠 수 있는 영향

- 기후변화에 따른 극지 생태계 반응 및 기작을 선도적으로 규명함으로써 향후 국내 극지연구진이 국제적 연구 협약과 협상을 이끌 수 있는 토대를 마련할 수 있음.
- 국지 생태계의 반응에 관련된 연구를 수행한 전문 인력을 양성함으로써 향후
   기후변화 및 극지 관련 연구 인프라의 구축, 발전을 가져올 수 있음.
- 나. 해당분야 학문발전에의 기여 효과
- 기후변화 및 인위적 교란의 영향 평가 및 예측의 정확도 제고
   기후변화에 인해 야기될 생태계의 되먹임 반응에 대한 정량적 평가로 기후변
   화 영향의 정확한 평가. 현재의 기후변화 모델에 이용될 수 있는 새로운 생태
   인자 제시를 통한 모델의 예측력 향상
- 문자생태학적 기술을 생태계에 응용
   기존의 유전체 연구는 신종 발굴, 특히 의약, 식품, 농업 등에 집중. 본 연구를 통해 자연계에 존재하면서 기후변화 및 다양한 생태계 반응에 관여하는
   미생물의 종류와 구조에 대한 자료 제공
   극지생태계 물질순환에 관여하는 미생물유전체 이해를 통한 미생물생태학의
   진보와 새로운 이론 도출
   향후 다양한 생태계에 적용할 수 있는 분자생물학적 방법론의 진보와 자연시
   료에 적용할 수 있는 방법론의 개선
- 다. 연구수행 과정을 통한 연구 인력 양성 효과
- 국지 관련 전문 인력의 양성: 상대적으로 취약한 극지관련 전문 인력을 양성,
   국지 연구에 활용하는 것과 함께 다양한 생태 기능의 분석이 가능한 전문 인
   력을 양성함으로써 사회 각 분야에서 활용이 가능하도록 함

### 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 장기후속연구로의 발전
   장기적인 기후변화 모사가 유기물 분해와 토양 생태계에 미치는 영향에 대한 연 구로 발전
- 기후변화와 다른 환경오염 인자와의 상호 작용으로 인한 생태계의 영향
   기존의 기후변화 요인과 더불어 오존, 질소 첨가, 유기오염물질 등과 같은 인위
   적인 오염의 복합 작용에 대한 실험적 연구로 발전
- 국제 공동연구 네트워크의 발전
   기후변화 연구는 그 특성상 전지구적 수준의 연구가 필수적이며, 본 과제의 결
   과물을 토대로 향후 전지구적기후변화의 극지 생태계 영향에 대한 국제 공동연
   구를 출범
- 탄소배출권 관련 사업으로의 발전 방향
   극지에서 유래할 수 있는 온실기체발생을 최소화하여 탄소배출권사업으로 발전
   할 수 있도록 활용함

## 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

- 북구 동토대(툰드라)에 저장된 유기탄소의 양은 0-3m 기준으로 현재 1,035±150
  Pg (Pg=109ton)으로 추정되고 있다. 이 북구지역은 지구상의 토양 면적의 15%
  를 차지하고 있지만 탄소 저장량은 생물군계 전체의 약 3분의 1에 해당하며, 이
  는 대기 중 탄소의 1.5배 이다. 또한 3m 이상 깊이에도 상당량의 유기탄소가 저
  장되어 있다 (~400 Pg). 지난 30년간 고위도지방의 온도는 1.8℃ 상승했으며 이
  는 지구 평균의 2배 빠른 속도이다. 기후변화 모델도 향후 극지방의 온도 상승
  이 가장 심할 것으로 예측하고 있다. 따라서 북구의 동토는 융해와 미생물에 의
  한 분해에 노출되어 있고, 이로 인해 대기로 배출되는 탄소(CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>)는 온실기
  체로서 기후변화를 더욱 가속화할 수 있다.
- 으 온도 상승으로 동토가 융해되면 영구동토층(permafrost) 상부의 녹은 상태인 활 성층(active layer) 깊이가 증가하여 분해미생물 활성이 증가하고 침수지대가 생 성된다. 반대로 지하의 얼음이 녹으면서 배수가 일어날 수도 있다. 유기물 분해 와 온실기체 발생에 영향을 주는 요인은 labile carbon pool, C/N raio, 침수와 배수의 정도, 식생의 종류 등이 있다. 침수된 환경의 동토에서는 혐기성 조건이 형성되어 CO2 발생은 줄지만 온난화능이 더 강력한 CH4의 발생이 증가한다. 발 생한 CH4는 표면에서 산화되지도 하는데 사초과 식생이 우점할 경우 식물관을 통해 바로 배출되어 2~5배 높은 CH4 발생량을 보인다. 식생에 따라 공급되는 기 질도 CH4 발생에 영향을 준다. 생태계 모델들은 2100년까지 지금과 같은 온도 상승이 지속될 경우 평균 동토 내 92 Pg의 탄소가 손실될 것으로 예측하고 있 다. 극지방의 기온 상승으로 생장기가 길어지고 식생의 성장이 활성화되면서 얼 마간은 광합성량이 탄소 손실을 상회할 것으로 예상되나, 보다 긴 기간에 걸쳐서 는 탄소 손실이 훨씬 클 것으로 예측된다. 따라서 온도 상승으로 인해 동토에서 의 전체적인 탄소 손실은 증가할 것으로 생각되나 그 형태에 있어 강력한 온실 기체인 CH4 발생이 증가할 것인지는 아주 다양한 요인이 있는 복잡한 문제이다.

## 제 7 장 참고문헌

- Bardgett RD, Freeman C, Ostle NJ. 2008. Microbial contribution to climate change through carbon cycle feedbacks. The ISME Journal. 2:805-814.
- Dorrepaal E, Toet S, van Logtestijn, RSP, Swart E, van de Weg MJ, Callaghan TV, Aerts R. 2009. Carbon respiration from subsurface peat accelerated by climate warming in the subarctic. Nature 460: 616–620.
- Fuhrman JA. 2009. Microbial community structure and its functional implications. Nature 459: 193–199.
- Hoj L, Olsen RA, Torsvik VL. 2008. Effects of temperature on the diversity and community structure of known methanogenic groups and other archaea in high Arctic peat. The ISME Journal. 2:37–48.
- Hopkins DW, Sparrow AD, Shillam LL, English LC, Dennis PG, Novis P, Elberling B, Gregorich EG, Greenfield LG. 2008. Enzymatic activities and microbial communities in an Antarctic dry valley soil: Responses to C and N supplementation. Soil Biol Biochem 40:2130–2136.
- Liebner S, Harder J, Wagner D. 2008. Bacterial diversity and community structure in polygonal tundra soils from Samoylov island, Lena Delta, Siberia. Int. Microbiol. 11:195–202.
- Mannisto MK, Tiirola M, Haggblom MM. 2009. Effect of freeze-thaw cycles on bacterial communities of Arctic tundra soil. Sol Microbiol. 58:621-631.
- Mcguire AD, Anderson LG, Christensen TR, Dallimore S, Guo L, Hayes DJ, Heimann M, Lorenson TD, Macdonald RW, Roulet N. 2009. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change. Ecol. Monogr. 79(4):523 - 555.
- Neufeld JD, Wagner M, Murrell JC. 2007. Who eats what, where and when? Isotope-labelling experiments are coming of age. The ISME Journal 1: 103 - 110.
- Rinnan R, Baath E. 2009. Differential utilization of carbon substrates by bacteria and fungi in tundra soil. Appl. Environ. Microbiol. 75(11):3611–3620.
- Schuur EAG, Vogel JG, Crummer KG, Lee H, Sickman JO, Osterkamp TE. 2009. The effect of permafrost thaw on old carbon release and net carbon exchange from tundra. Nature 459: 556–559.

- Sinsabaugh RL. 2010. Phenol oxidase and organic matter dynamics of soil. Soil Biol Biochem 42:391-404.
- Vinegla B. 2007. Evaluation of the effect of global warming on soil carbon cycling and hydrolase enzyme activities in the Arctic environment: implications for the Global Carbon Cycle. Project summary report. (EC contract No. ARCFAC 026129).
- Wagner D, Kobabe S, Liebner S. 2009. Bacterial community structure and carbon turnover in permafrost-affected soils of the Lena Delta, northeastern Siberia. Can. J. Microbiol. 55:73–83.
- Wagner D. 2008. Microbial communities and processes in Arctic permafrost environments. In: Dion P, Nautiyal CS (eds) Microbiology of extreme soils. Soil biology 13. Springer, Berlin, pp 133–154.
- Zak DR, Kling GW. 2006. Microbial community composition and function across an Arctic tundra landscape. Ecology. 87(7):1659–1670.





