

북반구 고위도 동토지역의 21세기 말 생지화학 순환

이지연¹⁾, 조미현¹⁾, 고영대²⁾, 김백민³⁾, 정지훈^{2)*}

¹⁾극지연구소 ²⁾전남대학교 해양학과 ³⁾부경대학교 환경대기과학과

연구배경

온도가 두 해 이상 영하로 유지되고 있는 토양을 영구동토층이라 한다. 이러한 동토층은 북반구 지표면 전체 면적의 약 25%를 차지하며, 동토층 상부에는 활동층으로 구성되어 있다(Caill et al., 2005). 현재 지구온난화가 진행되면서 활동층의 깊이가 점점 깊어지면서 영구동토층이 사라지고 있다(Koven et al., 2013; Schuur et al., 2013). CMIP5 기후모델들은 21세기 후반까지 지표면 근처의 영구동토층 면적이 감소할 것으로 전망하고 있다(IPCC, 2014). 이러한 영구동토층에는 많은 양의 동식물의 사체가 묻혀있어, 해동 시 미생물의 분해가 증가되면서 땅속의 탄소는 이산화탄소와 메탄의 형태로 대기 중으로 방출된다(Deconto et al., 2012). 그러나 IPCC 5차 보고서의 미래 기후변화 RCP 시나리오에는 동토로부터 방출되는 탄소와 메탄은 고려되지 않고 있다. 또한 기후변화에 따라 탄소와 메탄의 방출량과 방출 형태 등 포괄적으로 답을 주는 연구는 아직 부족하다. 본 연구에서는 생지화학과정을 고려한 지면모델을 사용하여 미래 온난화된 기후에 따른 북극지역과 동토층 지역의 해동에 의한 토양 내 변화를 현재와 21세기 후반으로 나누어 예측하고, 주요온실가스(GHG)인 이산화탄소와 메탄의 방출량의 변화를 살펴보고, 그 원인에 대해 분석해 보았다.

연구방법

Model	CLM4.5BGC	
Atmospheric forcing	PCM(Parallel Climate Model) SRES A2 scenarios	
	Variables	강수, 바람장, 기온, 습도, 태양입사량, 기압변수
	수평해상도	1°X1°
	시간해상도	3hr
Period	2005 ~ 2099, Monthly DATA	

*SRES A2 scenarios : 사회경제 유형별 온실가스 배출량 설정된 시나리오로, 이산화탄소 농도가 2000년부터 2009년까지 약 350ppm에서 850ppm으로 증가하도록 설정됨.

연구결과

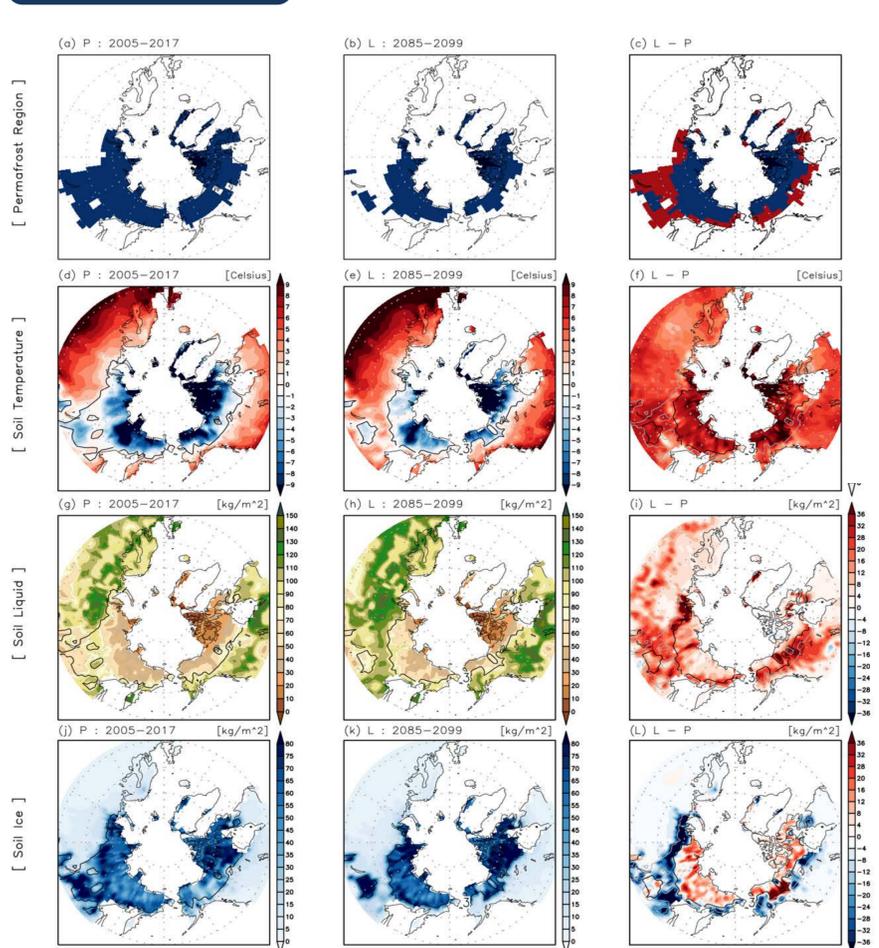


Fig. 1. Projection of permafrost region (a) at the present (Present, P: 2005-2017), (b) at the end of 21st century (Last, L: 2085-2099) and (c) difference between present and end of 21st century (red color : thawing region), (d), (e) and (f) same as (a), (b) and (c) but for soil temperature (g), (h) and (i) same as (a), (b) and (c) but for soil liquid, (j), (k) and (l) same as (a), (b) and (c) but for soil. Contour line is projection of active layer thickness (black line : < 3 m)

	circum-Arctic(60-90°N)	Permafrost Region
Soil Temperature	2.5 °C Increase (-4.53 °C → -2.03 °C)	1.24 °C Increase (-7.13 °C → -5.89 °C)
Soil Liquid	10.75 kg/m ² Increase (59.9 kg/m ² → 70.65 kg/m ²)	1.6 kg/m ² Increase (44.62 kg/m ² → 46.22 kg/m ²)
Soil Ice	Increase (exclude permafrost region)	Decrease : Because the soil temperature is kept below the freezing point

* Permafrost region Definition

3m 이내 토양이 한번이라도 얼어있는 지역 (Lawrence et al., 2015)

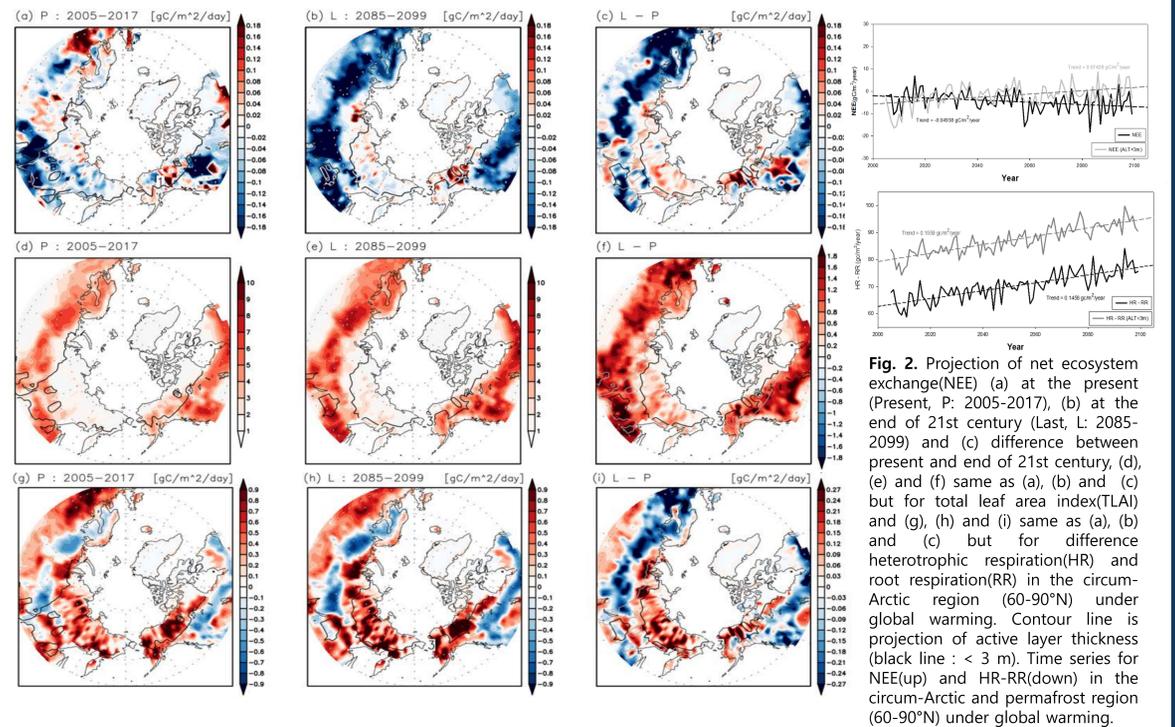


Fig. 2. Projection of net ecosystem exchange(NEE) (a) at the present (Present, P: 2005-2017), (b) at the end of 21st century (Last, L: 2085-2099) and (c) difference between present and end of 21st century, (d), (e) and (f) same as (a), (b) and (c) but for total leaf area index(TLAI) and (g), (h) and (i) same as (a), (b) and (c) but for difference heterotrophic respiration(HR) and root respiration(RR) in the circum-Arctic region (60-90°N) under global warming. Contour line is projection of active layer thickness (black line : < 3 m). Time series for NEE(up) and HR-RR(down) in the circum-Arctic and permafrost region (60-90°N) under global warming.

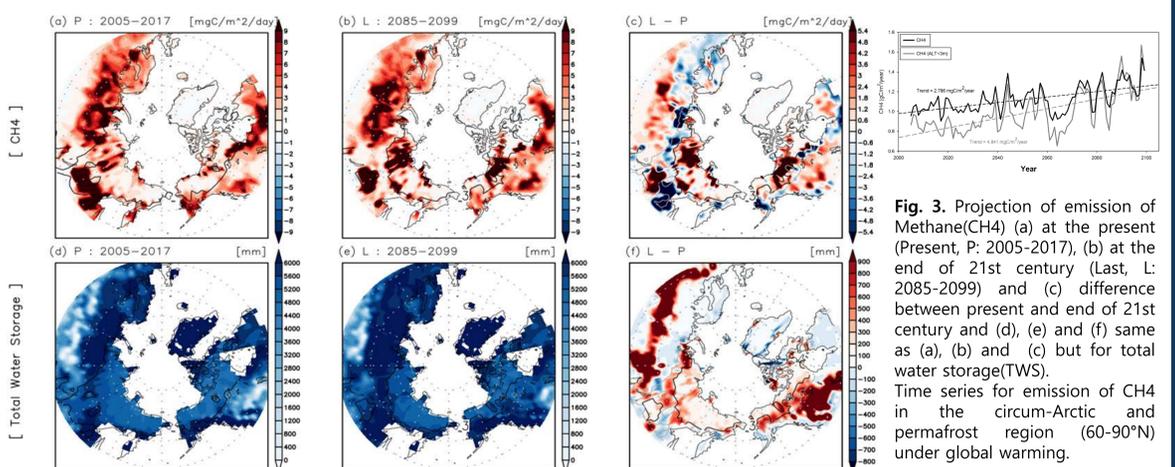
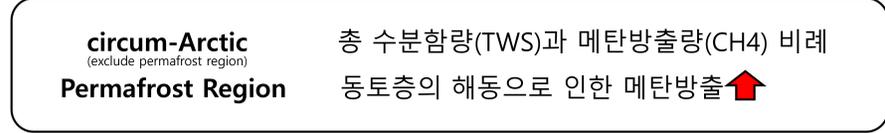


Fig. 3. Projection of emission of Methane(CH4) (a) at the present (Present, P: 2005-2017), (b) at the end of 21st century (Last, L: 2085-2099) and (c) difference between present and end of 21st century and (d), (e) and (f) same as (a), (b) and (c) but for total water storage(TWS). Time series for emission of CH4 in the circum-Arctic and permafrost region (60-90°N) under global warming.



결론

현재(2005-2017)부터 21세기 후반(2075-2099)까지 지구 온난화가 진행됨에 따라 북극지역의 동토층의 감소가 나타났다. 온난화가 진행된 21세기 후반 북극지역에서는 토양온도는 상승하고 토양수분은 증가하였다. 토양얼음의 경우, 동토층을 제외한 북극지역에서는 감소하는 경향이 나타났지만 온난화가 진행되어도 빙점 이하로 유지되고 있는 동토층 지역에서는 토양의 수분의 증가와 함께 토양얼음의 증가가 나타났다. 온난화로 인하여 동토층을 제외한 북극지역에서는 총잎면적지수(TLAI)의 증가로 인하여 순 생태계 호흡량(NEE)의 감소가 발생했으며, 동토층 지역에서는 동토의 해빙으로 인하여 미생물의 호흡량의 증가로 순 생태계 호흡량(NEE)이 증가하였다. 결론적으로 북반구에서는 21세기 후반으로 갈 수록 지표면은 이산화탄소의 흡수원이 되고, 동토층 지역에서 지표면은 이산화탄소의 방출원이 된다. 또한, 수분과 관련이 깊은 메탄방출은 해동으로 인해 수분이 증가한 동토층 지역에서 증가하는 경향을 보여주었다. 동토층을 제외한 북극지역의 메탄방출은 지표면의 총 수분의 양과 비례하는 결과를 보여주었다. 그러나 이 실험은 오프라인 지면모델을 사용한 연구이기에 기후변화에 따른 식생 분포의 변화와 그에 따른 피드백을 고려되지 않았으며, 모델실험은 지면의 강제력에 대한 대기의 변화는 고려되어있지 않다. 미래기후의 탄소순환에 대한 지면모델예측은 불확실성이 있으며, 탄소에 대한 지면민감도에 대한 논쟁은 계속되고 있는 중이고, A2 시나리오도 하나의 가설이기 때문에 시나리오 자체에도 불확실성을 갖고 있다(Deque et al., 2007). 따라서, 향후 보다 정확한 미래기후예측을 위해서는 이를 보완한 연구를 수행해야 할 것이다.