

IPCC SRES A2 시나리오에 따른 환북극 동토층 전망

이지연¹, 조미현¹, 고영대², 김백민¹, 정지훈²

¹극지연구소, ²전남대학교

1. 서론

여름철에도 녹지 않고 영하로 유지되고 있는 토양을 영구동토층이라 한다. 이러한 영구동토층은 북반구의 25%를 차지한다(Camill et al., 2005). 영구동토층 상부에는 겨울철에는 영하로 유지되지만 기온이 올라가면 토양이 해동되는 활동층이 존재한다. 지구온난화가 진행되면서 영구동토층의 해동으로 인하여 활동층의 면적이 증가하고 깊이도 깊어지고 있다(Romanovsky et al., 2010; Koven et al., 2013; Schuur et al., 2013). 실제로 티벳고원에서는 활동층의 깊이가 1995년부터 2007년까지 7.5cm/yr로 증가하고 있다(wu et al., 2010). 영구동토층의 해동은 탄소순환에 큰 영향을 미친다. 영구동토층내에는 많은 양의 동식물의 사체가 묻혀있어서 해동시 미생물의 분해가 증가되면서 토양내의 탄소가 대기 중으로 방출되기 때문이다(Deconto et al., 2012). 이러한 탄소는 지구온난화를 더욱 가속시키는 온실가스로 작용하게 된다. 또한 영구동토층의 해동으로 인하여 습지가 많이 생성되게 되는데 동토층에서 방출된 이산화탄소가 습지의 물과 결합되면서 메탄을 생성한다(Cao et al., 1998; Xie et al., 2011). 메탄은 이산화탄소의 21배에 해당하는 온실효과를 갖는 기체로, 평균 잔류시간이 8.1년으로 매우 안정된 기체이기 때문에 주목해야한다. IPCC 5차 보고서에 의하면 기후변화에 따른 온난화가 극지역에서 더욱 강하게 진행 될 것으로 예측했다. 그러나 동토층의 해동으로 인하여 방출되는 탄소와 메탄은 고려되지 않고 있다.

본 연구에서는 생지화학과정을 고려한 지면 모델을 사용하여 미래 온난화된 기후의 따라 동토층의 해동에 의한 활동층의 변화를 21세기 후반까지 예측하고, 토양내의 변화를 살펴본다. 또한 동토층 해동으로 인해 방출되는 이산화탄소와 메탄의 변화를 살펴보고, 지역적 특징을 분석하였다.

2. 연구방법

본 연구에서는 NCAR(National Center for Atmospheric Research)에서 개발한 생지화학 모듈이 결합된 지면모델 CLM 4.5 BGC (Community Land Model version 4.5 Bio Geo Chemistry)를 사용하여 동토층의 전지구 미래변화를 모의하였다. CLM4.5는 Community Earth System Model (CESM)의 지면을 구성하는 모델로, 생지물리, 수문, 생지화학과정이 포함되어있고, 연속 동토층과 불연속 동토층의 수평분포를 관측과 유사하게 모의하고 있다(Lawrence et al., 2012). BGC는 탄소순환과 메탄순환이 모두 고려되어있는 모델이다. 이 연구에서는 미래기후변화 SRES A2 시나리오를 따라 이산화탄소 농도를 변화하도록 설정하였다. 자료의 수평해상도는 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 이며, 강수, 바람장, 기온, 습도, 태양입사량, 기압변수가 3시간 간격으로 대기강제력으로 지면 모델에 입력되어 2005년부터 2090년까지 모의하였다.

3. 결과

3.1. 미래동토활동층의 깊이

미래기후 시나리오에 따라 활동층의 깊이를 모의한 결과, 지구온난화가 진행됨에 따라 현재에 비해 21세기 후반에는 북반구 고위도의 활동층의 깊이가 점점 깊어지는 것으로 예측되었다. 현재(2005-2017)는 유라시아 동쪽지역 50°N 이상부터 활동층의 깊이가 0.4m에서 3m로 분포되어있다. 그러나 21세기 후반(2075-2090)에는 레나강 주변을 제외하고 50°N 에서 60°N 사이의 활동층이 4m이상으로 깊어졌다. 알래스카($67^{\circ}\text{--}70^{\circ}\text{N}$, $136^{\circ}\text{--}149^{\circ}\text{W}$)와 시베리아($67^{\circ}\text{--}70^{\circ}\text{N}$, $113^{\circ}\text{--}126^{\circ}\text{E}$)의 활동층을 비교해본 결과 현재에서 21세기 후반으로 갈수록 각 0.16m와 0.67m씩 더 깊어지는 것을 확인 할 수 있었다. 두 지역 지표면으로부터 약 3m이내 깊이에서는 토양온도가 0.046°C/yr , 0.040°C/yr 로 증가하는 경향을 보였고, 토양내의 얼음은

감소하고 수상은 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

3.2. 미래 동토 이산화탄소 전망

미래 기후변화에 따른 탄소순환의 변화를 살펴본 결과, 순 생태계 교환량(Net Ecosystem Exchange, NEE)은 21세기 후반으로 갈수록 울창한 산림지역에서 증가하는 것으로 예측되었다. 토양호흡(Soil Respiration, SR)을 구성하는 미생물호흡(Heterotrophic Respiration, HR)과 뿌리호흡(Root Respiration, RR)을 비교했을 때 21세기 후반 북반구 고위도 지역에서 미생물호흡이 더 강하게 나타났다. 21세기 후반으로 갈수록 동토가 해동되면서 동토 안에 있는 미생물들의 호흡(HR)이 활발해진다는 것을 예측할 수 있다.

3.3. 미래 동토 메탄전망

영구동토층 지역에서 메탄은 동토의 해동으로 인한 습지발생과 주위의 강 범람으로 방출된다. 현재는 유라시아의 오비강, 바이칼호, 아무르강 주변에서 메탄방출이 강하게 일어났으며, 이 지역들은 강의 범람으로 인한 메탄발생 지역으로 잘 알려져 있다(Malakhova et al., 2012). 21세기 후반에는 유라시아의 바이칼호, 캐나다 북서부 지역의 그레이트 베어호와 메켄지강 부근에서 메탄방출이 강하게 일어났는데, 이 지역은 거대한 호수와 강이 있는 지역으로 북반구 고위도 동토층의 해동으로 인한 범람으로 메탄방출이 증가 된 것으로 예측된다. 또한 이 지역들은 토양의 온도가 증가함에 따라 메탄방출이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 21세기 후반 메탄의 방출증가는 빙하의 해동도 원인으로 꼽히고 있다. 특히 북극해 주변과 맞닿아 있는 지역은 범람이 아닌 다른 원인에 의해서 메탄방출이 이루어지는 것을 확인 할 수 있었다.

4. 결론

현재부터 21세기말 까지 SRES A2 시나리오에 바탕을 둔 환북극 동토층의 변화를 살펴 보았다. 지구온난화가 진행됨에 따라 영구동토층의 해동으로 인하여 활동층의 면적과 깊이는 증가하고, 토양 내 온도는 증가하고 그에 따라 토양 내 얼음은 감소하고 수상은 증가하는 것으로 예측되었다. 21세기 후반으로 갈수록 탄소

와 메탄 방출도 증가하는 것으로 확인되었다. 영구동토층의 해동으로 인하여 토양속 미생물 활동이 증가하여 미생물의 호흡으로 탄소방출이 증가하였고, 습지증가와 강과 호수의 범람으로 인하여 메탄방출이 증가하는 것으로 예측되었다. 북극해와 근접해있는 영구동토층에서는 메탄방출이 빙하의 해동과 관련성이 있는 것으로 분석되었다.

5. 참고문헌

- Camill, P. (2005). Permafrost thaw accelerates in boreal peatlands during late-20th century climate warming. *Climatic Change*, 68(1-2), 135-152.
- Cao, M., K. Gregson, and S. Marshall, 1998: Global methane emission from wetlands and its sensitivity to climate change. *Atmos. Environ.*, 32(19), 3293-3299.
- Deconto, R. M., S. Galeotti, M. Pagani, D. Tracy, K. Schaefer, T. Zhang, D. Pollard, and D. J. Beerling, 2012: Past extreme warming events linked to massive carbon release from thawing permafrost. *Nature*, 484(7392), 87-91.
- Koven, C. D., W. J. Riley, and A. Stern (2013), Analysis of permafrost thermal dynamics and response to climate change in the CMIP5 Earth System Models, *J. Clim.*, 26(6), 1877-1900.
- Romanovsky, V. E., S. L. Smith, and H. H. Christiansen (2010), Permafrost thermal state in the polar northern hemisphere during the international polar year 2007-2009: A Synthesis, *Permafrost Periglacial Processes*, 21(2), 106-116.
- Schuur, E. A. G., Abbott, B. W., Bowden, W. B., Brovkin, V., Camill, P., Canadell, J. G., ... & Crosby, B. T. (2013). Expert assessment of vulnerability of permafrost carbon to climate change. *Climatic Change*, 119(2), 359-374.
- Wu, Q., and T. Zhang, 2010: Changes in active layer thickness over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1995 to 2007. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 115(D9).
- Xie, K., Y. Zhang, G. Meng, and J. T. Irvine, 2011: Direct synthesis of methane from CO₂/H₂O in an oxygen-ion conducting solid oxide electrolyser. *Energ. Environ. Sci.*, 4(6), 2218-2222.