

# 미래 기후 변화 시나리오에 따른 미래 환북극 동토층 전망

이지연<sup>1</sup>, 조미현<sup>1</sup>, 고영대<sup>2</sup>, 김백민<sup>1</sup>, 정지훈<sup>2</sup>

<sup>1</sup>극지연구소, <sup>2</sup>전남대학교

## 1. 서론

북반구 전체면적의 24%인 총 23,000,000km<sup>2</sup>의 북극권 영구동토는 최근 지구 온난화와 함께 더욱 주목 받고 있다. “기후 변화 2014 종합보고서(Climatic Change, 2014: Synthesis Report)”에 의하면, 지구 평균 표면 온도가 상승함에 따라 지표면 근처 영구 동토층의 감소가 예상되며, 다중모델평균을 바탕으로 볼 때, 영구 동토층(지표면 근처 상층 3.5m까지)은 RCP2.5에서 37%, RCP8.5에서 81%까지 감소할 것으로 예측되었다. 그러나 이 IPCC 5차 보고서에는 동토층으로부터 방출되는 탄소는 고려되지 않았다. 사실상 영구 동토층의 감소는 탄소배출과 매우 연관성이 깊다. 영구동토층에는 많은 양의 식물과 동물의 사체가 묻혀 유기물로 오랜 세월 동안 얼어 있다가 온난화에 의해 동토층이 점차 녹게 되면서 유기물도 같이 녹게 되고, 이에 따라 미생물의 분해가 증가되어 땅속의 이산화탄소나 메탄이 공기 중으로 방출 될 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 미래 온난화된 기후에 따라 환북극 동토층의 해동 예측과 그로 인해 초래될 수 있는 이산화탄소와 메탄의 방출을 예측 분석하였다.

## 2. 연구방법

본 연구에서는 동토층 및 전 지구의 미래 변화를 모의하기 위하여 NCAR의 생지화학모델결합 지면모델 CLM(Community Land Model) 4.5의 BGC(Bio Geo Chemistry)를 사용하였다. BGC는 탄소순환 뿐 아니라 메탄 순환까지 포함되어 있는 모델로 이것을 이용하여 메탄의 방출

까지 고려할 수 있었다. CLM4.5는 CCSM 지구시스템 모델의 지면을 구성하는 모델 로써, 생지물리, 수문 생지 화학 과정들이 포함되어있다(Koven et al., 2013; Oleson et al., 2013). 이 실험은 CESM에서 지면 모형만 사용하는 오프라인 실험으로 진행하였고, 실험에 사용된 대기 경계조건은 NCAR의 Parallel Climate Model 기후 모형을 이용하였다. CLM4.5의 오프라인 모델링을 위해서는 대기로부터 지면 모델로 주어지는 강제력이 필요하다. 미래 온난화 시나리오로는 SRES(Special Report on Emissions Scenarios)의 A2 시나리오를 이용하였다. 따라서 현재 이산화탄소 농도는 관측 값대로, 미래의 이산화탄소 농도는 SRES A2 시나리오에 따라 변동하도록 설정하였다. 새로운 보정법을 적용하여 바이어스를 보정하고 다운스케일하여 대기 강제력 값을 주었다(Li et al., 2010). 자료의 수평 해상도는 1°×1°이며, 시간 해상도는 3시간 간격으로 강수, 바람장, 기온, 습도, 태양복사, 기압변수가 지면 모델에 입력되었다. 모의 기간은 2005년부터 2099년으로 현재 기후부터 21세기 말의 미래 기후까지 모의하였다.

## 3. 결과

### 3.1. 동토활동층깊이

동토영역의 활동층 깊이를 모의한 결과, 온난화에 따라 현재에 비해 미래에는 활동층의 깊이가 깊어지는 것으로 예상되었다. 현재 영구 동토층으로 분류되는 유라시아 대륙의 위도 60도 이상 지역이 21세기 중반이 되면서 활동층 깊이가 30m 이상이 되어 사실상 영구동토가 아닌 지역으로 바뀌

게 된다. 특히 21세기 후반이 되면 북극해를 둘러싼 지역을 제외한 카라-바렌츠 해와 접해있는 지역들이 영구동토가 아닌 지역으로 바뀌게 된다. 동토 영역의 활동층 깊이의 증가는 동토층 아래 토양 속 수상의 변화를 의미하는데 녹은 토양에서는 얼음의 감소 및 수상의 증가를 기대할 수 있다. 북미 대륙과 유라시아 대륙의 대표적인 동토 지역인 알래스카와 시베리아 지역의 토양 속 얼음 및 수상의 시간에 따른 변화를 분석한 결과, 두 지역 모두 토양온도의 증가와 함께 토양 얼음상의 감소와 토양 수상의 증가를 보였다.

### 3.2. 미래 동토의 이산화탄소 및 메탄 방출 전망

생태계 호흡의 차이인 순 이산화탄소의 교환량(Net Ecosystem Exchange of carbon, NEE)은 서부 중앙아프리카와 유라시아 지역, 남아메리카 대부분과 북아메리카 일부 지역, 양쯔강 이남 지역에서 양의 값으로 나타나며, 자가영양 호흡이 순 일차 생산량보다 많음을 의미한다. 21세기 중반과 후반에는 이산화탄소의 교환량이 현재보다 증가하는 추세를 보이는데, 특히 양쯔강 이남의 상록수림과 아열대 활엽수림과 침엽수림, 북아메리카 활엽낙엽림, 남아메리카의 열대활엽 몬순지역에서 강하게 나타난다.

기후변화로 온난화된 대기에서 동토의 메탄방출은 습지와 큰 연관성이 있다. 동토층이 녹아내리면 동토활동층에 존재하던 메탄이 방출될 수 있다. 21세기말의 메탄방출은 현재보다 더 고위도 지역에서 까지 진행될 것으로 예측된다. 현재 기후 하에서는 북위 60도 부근 지역에서 범람에 의한 토양의 메탄농도가 강하게 나타난다. 또한, 동토층에서 대기로의 메탄방출과 범람 지역에서의 메탄 방출이 거의 일치한다. 미래 기후에서는 동토 영역에 강의 범람 지역이 증가하는 것으로 추정되며, 강의 범람에 의해 생성된 습지에서 방출 되는 메탄은 유라시아 지역의 북위 60°N 부근과 북아메

리카 지역의 허드슨만 이남 지역에 집중되어 있다.

### 4. 결론

현재부터 21세기 말인 2099년 까지 미래 온실 기체 배출 A2 시나리오에 바탕을 둔 환북극 동토 환경 변화를 전망하는 기후변화 시나리오를 생산하였다. 온난화의 진행에 따라 동토층이 녹아내리면서 토양으로부터의 이산화탄소 및 메탄의 방출이 모두 증가 하는 것으로 전망되었으며, 그 강도는 21세기 말로 갈수록 더 커지는 것으로 전망되었다. 이산화탄소의 방출과 관련해서는 토양 속 미생물 활동의 증가와 함께 토양 호흡량의 증가가 큰 기여를 하는 것으로 분석되었다. 메탄의 방출은 습지와 관련성이 큰 강의 범람 및 북극해 주변에서는 해빙의 용빙과 큰 관련성이 있는 것으로 분석되었다.

### 5. 참고문헌

- Koven C D et al 2013b The effect of vertically-resolved soil biogeochemistry and alternate soil C and N models on C dynamics of CLM4 J. Geophys. Res.-Biogeosci. 10 7201 - 56
- Li, H., J. Sheffield, and E. F. Wood, 2010: Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching, *J. Geophys. Res.*, 115, D10101, DOI:10.1029/2009JD012882.
- Oleson, K., Lawrence, D. M., Bonan, G. B., Drewniak, B., Huang, M., Koven, C. D., Levis, S., Li, F., Riley, W. J., Subin, Z. M., Swenson, S. C., Thornton, P. E., Bozbiyik, A., Fisher, R., Heald, C. L., Kluzek, E., Lamarque, J.-F., Lawrence, P. J., Leung, L. R., Lipscomb, W., Muszala, S., Ricciuto, D. M., Sacks, W., Sun, Y., Tang, J., and Yang, Z.-L.: *Technical Description of version 4.5 of the Community Land Model (CLM)*, NCAR Technical Note NCAR/TN-503+STR, Boulder, Colorado, 420 pp., 2013.