

북극의 거대 싱크홀 발생 등 영구동토층의 급격한 해빙이 지구 환경에 미치는 영향

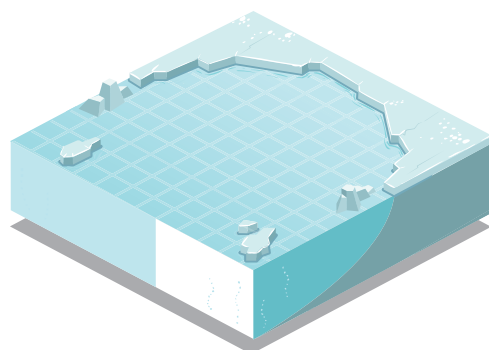
서울대학교 자연과학대학 생명과학부
이은주 교수

필자의 말

북아메리카, 북유럽 등에 존재하는 소위 ‘얼어있는 땅’으로 불리는 영구동토층은 최근 북극권의 기후변화로 인해 융해되면서 사회적으로 큰 이슈가 되고 있다. 영구동토층 위에 설치된 철도나 도로, 거주시설, 건물 등이 지반침하를 일으키면서 파괴, 또는 붕괴되는 현상이 가장 대표적이다. 또한 영구동토층이 녹으면서 이산화탄소나 메탄과 같은 온실가스가 배출되어 지구의 탄소 농도를 상승시켜, 기후변화로 생긴 영구동토층의 융해가 역설적이게도 지구온난화를 더욱 심화시키는 악순환의 고리를 만들고 있다.

영구동토층의 급속한 해빙은 우리가 상상하는 그 이상으로 전 세계적으로 논의되어야 하는 시급한 기후 및 환경 문제 중 하나이다. 이미 북극 지역 주민들의 생활 방식, 생계 및 경제를 파괴하고 있는 것뿐만 아니라 북극의 경계를 넘어 전 세계적으로 영향을 미칠 우려가 있다. 본 리포트에서는 영구동토층의 융빙 이슈에 대한 이해를 돕기 위해 영구동토층이 무엇이고, 이에 따른 최근의 북극 변화에 대해 차례로 살펴보고자 한다. 그리고 대표적인 사례들을 통해 우리나라의 향후 과제에 대해 제시하고자 한다.

- I. 영구동토층이란?
- II. 북극 영구동토층의 해빙
- III. 북극 영구동토층 해빙의 현황
- IV. 영구동토층 해빙이 지역 및 지구 환경에 미치는 영향
- V. 앞으로의 과제



I. 영구동토층이란?

과학적인 의미로 영구동토층(Permafrost)이란 2년 이상 토양 온도가 0°C도 이하로 계속 유지되는 땅으로 육지 또는 바다 아래에 존재한다. 따라서 영구동토층이 지상에 있는 가장 상위층을 의미하지는 않는다. 영구동토층은 지상 토양 표면 아래로 수 cm에서 수천 m 깊이까지 존재할 수 있다. 일반적으로 영구동토층은 대부분 북반구에 분포돼 있다. 북반구 면적의 약 15% 또는 지구 표면의 11%가 영구동토층으로 덮여 있으며 알래스카, 그린란드, 캐나다 및 시베리아의 상당 지역

을 포함하고 있다.(Obu, 2021) 남반구의 경우 산 정상부와 남극의 얼음이 없는 지역 아래에 존재하고 있다. 영구동토층은 육지 토양 내 얼음 형태로 대부분 존재하지만 다공성이 없는 기반암에도 존재할 수 있다. 영구동토층은 다양한 종류의 토양, 모래 및 암석이 결합된 얼음 형태로 형성된다.(Doyle, 2020) 본 리포트에서는 영구동토층에서의 토양 내 얼음이 녹는 현상(Thawing)을 우리말로 해빙이라고 사용하였으나 해빙과 해동은 모두 동일한 의미를 가진다.

<그림 1> 북반구에 분포하는 영구동토층의 위치

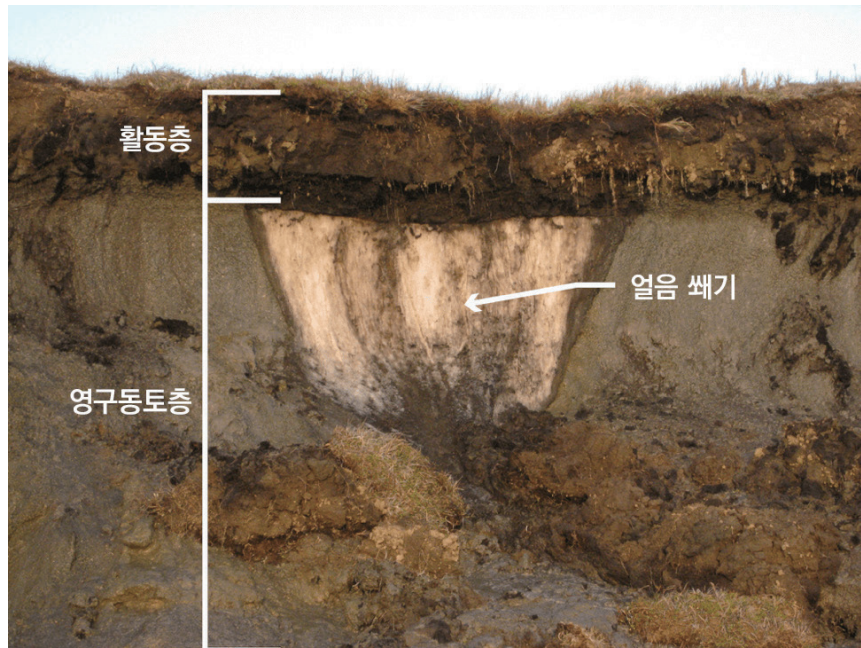


1) 보라색 음영이 짙을수록 영구동토층의 비율이 더 높음을 나타낸다.

실제 영구동토층은 2년 이상 연속으로 동결된 토양, 암석 또는 퇴적물이다. 얼음으로 덮이지 않은 지역에서는 토양, 암석 또는 퇴적층 아래에 존재하며 매년 동결 및 해동을 반복하면 '활동층(또는 활성층, Active Layer)'이라고 한다.(IPA,

2014) 활동층 두께는 지역과 계절에 따라 다르지만 보통 0.3~4m 정도이다. 북극 해안에서는 활동층 두께가 얇고, 시베리아 남부에서는 두껍다.

<그림 2> 활동층과 영구동토층을 보여 주는 토양 단면도



북극에 가까울수록 땅 대부분이 영구동토층이며, 남쪽으로 내려올수록 땅 일부만 영구동토층이다. 따라서 땅속 면적의 90% 이상을 영구동토층이 차지하는 경우를 연속 동토(Continuous Permafrost)라고 하며 주로 시베리아, 캐나다 고위도, 그린란드 등에 있다.

동토 전체의 반 정도(47%)를 연속 동토가 차지하고, 나머지는 동토가 서로 떨어져 있는 부분적인 동토로 아북극과 한대지역에 분포한다. 영구동토층이 50~90% 차지하는 지역을 불연속 동토(Discontinuous Permafrost), 영구동토층이 10~50% 차지하는 지역을 산재 동토(Sporadic Permafrost), 드물게 분포하는 곳(10% 이하)을 고립 동토(Isolated Permafrost)라고 한다. 산재 동토에서는 침엽수가 자라고 있다.

알래스카 중부 수어드 반도에 위치한 카운실(Council) 현장에서 보면 녹고 어는 것이 반복되는 활동층은 지표면 아래로 수십 cm 정도이며, 깊이 1m 이하의 땅속에는 일 년 내내 녹지 않고 얼어붙어 있는 영구동토층이 존재한다. 활동층은 깊이가 계절에 따라 달라진다. 겨울이 지나고 봄이 오면 태양에너지를 받아 동토 표면이 녹으며 활동층이 깊어진다. 가을이 시작되는 9월이 되면 활동층이 가장 깊어지고, 시간이 갈수록 기온이 떨어지며 녹았던 땅이 다시 얼어붙는다. 현장에서 땅을 파보면 본격적으로 여름이 시작되는 6월이면 20~30cm, 8월 말경에는 50~70cm 정도 파면 삽이 잘 들어가지 않는 딱딱한 땅이 닿는 것을 알 수 있는데 이 깊이까지가 바로 활동층이다.

〈그림 3〉 알래스카 카운실 지역의 활동층과 영구동토층 단면도



II. 북극 영구동토층의 해빙

‘북극의 영구동토층이 너무 빨리 해빙되어 싱크홀을 남긴다.’(원제: Permafrost is thawing so quickly in the Arctic it’s leaving sinkholes). 이것은 2020년 2월 24일 미국 CBS News에 실린 기사 제목이다. 도대체 북극 영구동토층에서 어떤 일들이 현재 일어나고 있으며, 북극 영구동토층의 해빙은 주변 경관과 지구 환경에 어떤 영향을 줄까? 기사를 통해서 우리들이 주목해야 하는 점들을 살펴보자.(CBS news, 2020)

전 세계 극지와 기후 관련 과학자들은 북극에서 급속히 해빙되는 영구동토층에 주목하고 있다. 네이처 지오사이언스

(Nature Geoscience) 저널에 최근 발표된 새로운 연구 결과에 따르면 영구동토층의 토양을 하나로 묶어주는 얼음이 녹아 산허리가 무너지고 결과적으로 거대한 싱크홀(Sinkhole)이 형성된다. 그리고 주위 경관(Landscape)에 대한 눈에 띄는 큰 변화뿐 아니라 더 큰 우려는 이 해빙 과정에서 대기 방출되는 탄소의 양이 대폭 증가하는 것이다.(Turetsky et al., 2020)





〈그림 4〉 알래스카에서 동토층이 녹으며 생긴 산사태 (출처: commons.wikimedia.org)



이러한 탄소의 방출 과정에서 이전에 고체 상태인 영구동토층의 급속한 해빙은 토양 속 미생물 활동을 촉진하여 이산화탄소 및 메탄과 같은 온실가스(Greenhouse Gas)를 대기로 방출하여 탄소 농도 수준을 상승시킨다. 높은 탄소 농도는 차례로 지구온난화에 기여를 하는데 북극의 탄소 배출 수준이 이전에 예상했던 것보다 훨씬 높을 수 있다고 경고했다. 이 논문의 저자인 Turetsky et al.(2020)는 갑작스러운 영구동토층의 해빙은 빠르고 극적이며 전례 없는 방식으로 환경에 영향을 미친다고 결론을 맺었다.

같은 논문에서 “영구동토층의 갑작스러운 해빙은 북극의 영구동토층 해빙으로 인한 잠재적 탄소 배출량의 이전 추정치를 두 배로 증가시킬 것이다.”라며 “숲은 한 달 안에 호수가 될 수 있고 산사태가 경고도 없이 발생하며, 보이지 않는 메탄 누출 구멍은 사냥꾼과 스노우 모빌러의 안전을 위협할 수 있다.”라고 언급했다.

Turetsky et al.(2020)가 발표한 연구는 영구동토층의 해빙을 (1) 북극 영구동토층 해빙에 영향을 미치는 점진적인 해빙과 (2) 토양 내 탄소 저장에 영향을 미치는 급격한 해빙의

두 개 유형으로 구별하였다. 북극 영구동토층의 약 20%는 영구동토층 토양 내에 높은 수준의 얼음을 포함하고 있어 이러한 종류의 급속한 해빙에 취약하다. 갑작스럽게 녹는 영구동토층은 훨씬 더 강력한 온실가스인 메탄의 방출을 포함하여 많은 양의 탄소를 대기 중으로 배출하기 때문에 과학자들이 우려하고 있다고 말했다.



또한 과학자들은 북극 영구동토층의 약 5% 지역이 갑작스러운 해빙을 경험할 가능성이 있지만 온실가스 배출량은 점진적인 해빙을 경험하는 다른 지역의 배출량과 동일할 것이라고 말한다. 이러한 민감한 지역에서 영구동토층이 녹으면 지역민들은 정말 급진적이고 빠른 경관 변화를 볼 수 있다.

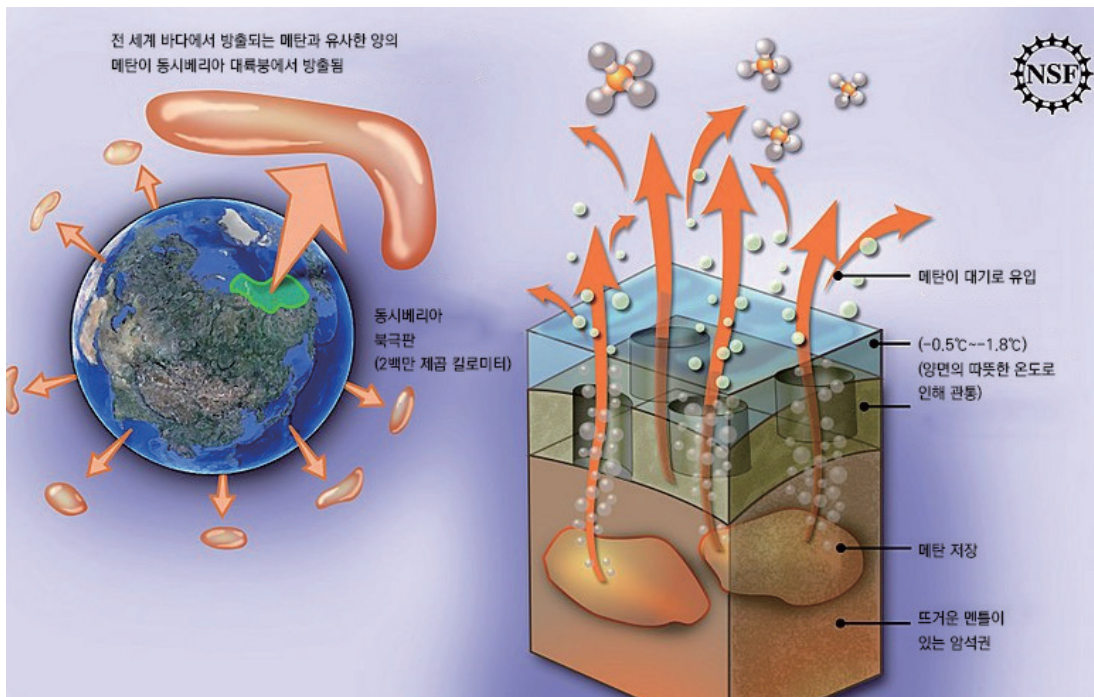
얼음이 풍부한 영구동토층이 녹으면 열카르스트(Thermokarst)라는 현상이 발생하여 지표면이 황폐화가 된다. 일부 지역에서는 이러한 과정이 자연적으로 발생하지만 지구온난화와 빠른 해빙으로 가속화되고 있다. 열카르스트에 의해서 땅이 녹아내리는 슬럼프 또는 산사태는 며칠에서 몇 주 만에 매우 빠르게 발생되며 주변 경관과 대기에 극심한 변화를 가져온다. 갑작스러운 영구동토층의 해빙은 다양한 방식으로 발생할 수 있지만 극적인 생태학적 변화를 가져온다. 일반적인 등산화를 신고 걸을 수 있고 얼었을 때 나무가 자랄 수 있을 만큼 충분히 건조했던 지역은 영구동토층의 급작스러운 해빙으로 인해 동토 생태계가 갑자기 변할 수 있다.

북극은 전 세계 다른 지역과 비교해서 두 배 이상 빠른 속도로 온난화가 진행되고 있다. 최근 연구들은 강력한 기후 관련 정책을 구현하는 것은 물론 모든 유형의 기후 연구 모델에 북극 영구동토층을 포함시켜야 한다는 연구의 필요성을 언급하

고 있다. 또한 우리가 향후 10년 동안 경각심을 가지고 행동한다면 기후 변화의 최악의 상황은 확실히 막을 수 있을 것이라고 이야기한다. 올바른 정책이 북극 지역을 지속가능하도록 유지시킬 수 있을 것이며, 이는 우리의 미래 기후를 완화하는데 도움이 될 것이라는 분명한 증거를 가지고 있다고 덧붙였다.(Turetsky et al., 2020)

현재까지 북극이 지구상의 어떤 지역보다 2배 정도 더 빨리 따뜻해짐에 따라 대중의 관심은 주로 북극 해빙(Sea Ice)의 급속한 소멸에 초점을 맞추고 있다. 그러나 더 큰 변화는 육지에서도 일어나고 있다. 가장 놀라운 것 중 하나는 수천 년 동안 극지방을 덮고 있는 거대한 영구동토층의 해빙이다. 그 해빙은 명확하게 이해되지 않은 복잡한 방식으로 일어나고 있으며 극지 과학자들은 이런 동토층의 해빙이 이번 21세기에 어떻게 전개될 것인지 파악하기 위해 노력하고 있다. 기후학자들은 북극이 현재처럼 계속해서 빠르게 따뜻해지면 약 250만 평방 마일의 영구동토층(세계 전체의 40%)이 금세기 말까지 사라지게 되고, 이는 오랫동안 영구동토층에 갇혀 있던 메탄(CH₄), 이산화탄소(CO₂), 아산화질소(N₂O)를 포함하여 엄청난 양의 온실가스가 방출되는 극적인 결과를 초래할 것이라 예측했다.(Struzik, 2020)

〈그림 5〉 동부 시베리아 동토층에서의 메탄 방출 과정(출처: www.nsf.gov/news/mmg)



III. 북극 영구동토층 해빙의 현황

수천 년 동안 지구 북극 툰드라를 덮고 있던 얼어붙은 토양층이 최근 들어 서서히 녹기 시작했다. 방대한 양의 온실가스를 방출할 수 있는 이 영구동토층의 해빙(Thawing)은 이미 민감한 지역에서 산사태를 일으키고 호수를 만들고 초목을 변화시킴으로써 북극의 환경과 경관을 바꾸고 있다. 이러한 극적인 변화는 북극 지역뿐만 아니라 전지구적으로 영향을 주기 때문에 특히 북반구에 위치한 우리나라는 향후 기후 변화 및 생태계 변화와 관련해서 주목하여야 한다.

(1) 싱크홀

캐나다 과학자 Philip Marsh와 미국 예일대 Ed Struzik는 최근에 얼어붙은 툰드라가 축구 경기장 크기의 싱크홀로 열린

북미 북극 지역인 보퍼트해(Beaufort Sea)의 해안을 세밀하게 연구하였다. 이름이 알려지지 않은 호수의 해안선을 따라 위치한 이른바 해빙 발생지점은 주변 가을 툰드라의 화려한 황갈색, 금색과 뚜렷한 대조를 이루는 회색, 진흙투성이 등으로 이루어진 불모지였다. 이러한 역행적인 해빙 발생지점 또는 산사태(지구온난화가 영구동토층을 빠르게 녹여서 형성됨)는 시베리아의 야나강 유역에 있는 100m 깊이의 바타가이카(Batagaika) 싱크홀을 포함하여 북극 전역에서 점차 증가하고 있다.(Struzik, 2020)



〈그림 6〉 러시아 바타가이카 싱크홀(출처: commons.wikimedia.com)



캐나다 서부지역 북극 툰드라는 오랫동안 크랜베리, 블루베리, 클라우드베리, 관목, 사초, 선태류로 카펫을 깔아놓은 것 같아 회색곰, 순록 및 기타 동물에게 풍부한 먹이를 제공했다. 그러나 이제 영구동토층이 녹고 슬럼프(Slump)와 싱크홀이 확장됨에 따라 그 주변 환경의 일부가 진흙, 미사 및 이탄으로

변모하여 수천 년 동안 영구동토층에 저장된 엄청난 양의 토양에 저장된 탄소를 날려 보내고 있다. 이것이 만약 이어진 원유 파이프라인을 따라 발생했다면 환경 재앙을 초래했을 것이다.

〈그림 7〉 알래스카 툰드라를 가로지르는 석유 파이프라인 (출처: commons.wikimedia.com).



또한 툰드라 생태계를 변화시키는 대대적인 경관 변화는 이누이트 원주민과 북극 동물의 식량 확보를 어렵게 만든다. 이탄, 점토, 암석, 모래 및 기타 무기 광물을 결합하는 지하 얼음의 분해는 산사태를 유발하고 놀라운 속도로 흘러내린다. 이는 하천의 흐름을 바꿔게 하여 호수가 갑자기 배수되고, 해변이 무너지는 등 인간과 야생 생물 모두에게 원치 않는 일이 발생하게 한다. 지난 40년 이상 북극에서 현장 조사를 수행한 캐나다 과학자 마쉬(Marsh)는 1991년 캐나다 Trail Valley Creek에 연구기지를 설립했다. 지구상에서 가장 빠르게 온난화되는 지역에 위치할 뿐만 아니라 새로운 북극 고속도로, 현재 가동 중단된 수백 개의 석유 및 천연가스 시추 장소, 북극에서 가장 중요한 새 서식 지역에서 연구하였다. 마쉬는 “우리는 호수에 있는 대부분의 물이 단 며칠 만에 배수될 수 있는 해안선의 훼손을 보고 있다. 여기 땅의 80%가 얼어붙은 물로 구성되어 있다는 것을 고려하면 놀라운 일이 아니다. 그 얼음이 녹으면 얼어붙은 땅은 말 그대로 뜨거운 죽처럼 무너진다.”라고 말했다. 그는 결론적으로 지구온난화가 수자원 및 영구동토층 생태계에 어떤 영향을 미치는지 더 잘 이해할 필요가 있다고 주목했다.(Struzik, 2020)

(2) 기후변화

영구동토층의 빠른 해빙은 또한 기후 변화에 막대한 영향을 미친다. 3m 깊이의 영구동토층 내에 저장된 탄소는 약 1035 ± 150 기가톤으로 추정되며, 북극 지역은 세계에서 가장 큰 탄소 저장고 중 하나이다. 이는 산업혁명 이후 인간이 방출한 것보다 약 4배 더 많으며 현재 대기에 포함된 것보다 두 배 가까이 되는 양이다. 최근 보고서에 따르면 섭씨 2도의 기온 상승(21세기 말까지 예상됨)으로 2100년까지 세계에 분포하는 영구동토층의 약 40%를 잃게 될 것이라 한다.(Struzik, 2020)

극지 과학자들은 북극 영구동토층에 저장된 탄소 전부 또는 대부분이 녹아 대기 중으로 방출될 것이라고 전망하지 않는다. 최근까지 과학자들은 영구동토층 탄소의 최대 10%를 잃을 것이라고 추정했으며 그것조차도 80년이나 걸릴 수 있다고 생각했다. 그러나 겨울에 동토층의 활동층이 얼지 않으면 상황이 달라진다. 추가적인 온난화로 인해 토양미생물은 토양의 유기 물질을 분해하고 있으며, 매년 여름에 단 몇 달 동안이 아니라 일 년 내내 이산화탄소 또는 메탄을 방출한다. 그리고 겨울철의 북반구 온난화는 영구동토층 전체로 퍼져 더 빨리 해빙이 진행될 것이다.

비행기로 탄소 배출량을 추적하는 컬럼비아대학의 대기화학자인 Róisín Commane은 많은 과학적 예측이 무너지고 있고 연구자들은 초겨울에 알래스카의 노스 슬로프에서 배출되는 CO2의 양이 1975년 이후 73% 증가했음을 발견했다고 했다. 우리는 여름에 의존하여 북극에서 무슨 일이 일어나고 있는지 이해하려고 노력해 왔지만 지금은 연중 CO2 방출이 일어나고 있음을 언급했다. 우리는 눈이 많이 내리는 겨울은 이제 흔하지 않고 온난화로 인해 일부 북극 지역은 연중 온실가스가 방출되고 있음에 주목하여야 한다.(Commane, 2021) 과학자들은 영구동토층 해빙이 느리고 꾸준한 과정이라고 예측했으며 그 과정이 5년 이상 걸릴 것이라 생각했지만 실제 상황은 훨씬 더 빨리 진행되고 있다.

(3) 지역 경관

과학자들이 갑작스러운 해빙이라고 부르는 빠른 해빙은 전체 지역 경관에 또한 영향을 준다. 캐나다 뱅크스 섬(Banks Is.)에서 과학자들은 1984년부터 2013년까지 대규모 지상 싱크홀이 60배 증가했다고 기록했다. 이로 인해 이 지역의 숲이 사라졌다. 캐나다 구엘프대학의 생태학자인 Turetsky는 지난 15년 동안 알래스카 페어뱅크스 근처의 검은가문비나무 숲에서 급작스러운 해빙을 추적했다. 연구자는 그곳의 산사태가 나무뿌리와 줄기를 불안정하게 만든다는 것을 발견했다. Turetsky는 '술취한 숲'에 있는 모든 나무가 곧 넘어져 새로운 습지에 삼켜질 것이라고 예상했다. 영구동토층의 해빙은 대부분 온실가스 배출로 이어진다. 연못과 호수 아래의 산소가 부족한 진흙에서 거품이 나는 가스는 이산화탄소뿐만 아니라 메

탄이며, 이는 이산화탄소보다 25배 강력한 온실가스이다. 알래스카 페어뱅크스대학의 생태학자 Katey Anthony는 20년 동안 북극 호수에서 나오는 온실가스를 측정해 왔으며 2018년에 발표된 최근 계산에 따르면 갑작스러운 해빙으로 생성된 새로운 호수는 영구동토층에서 예상되는 온실가스 배출량보다 3배가량 더 많을 것이라고 발표했다. 이는 새로운 온실가스의 추가적인 배출을 의미하며 지구 전체 온실가스 배출량에 영향을 준다.(Anthony, 2018)

툰드라 영구동토층의 온실가스는 두 가지 방법으로 방출된다. 첫째, 영구동토층이 녹을 때 한동안 휴면 상태였던 토양 미생물이 유기물을 분해하여 메탄과 이산화탄소가 대기 중으로 방출된다. 둘째, 지구온난화에 의한 해빙으로 인해 지구 깊은 저장고에서 녹은 메탄이 대기 중으로 방출될 수 있다. 온실가스 방출로 이어지는 영구동토층의 해빙은 북극 전역에서 더 빈번하게 일어나고 있다. Lewkowicz(2019)의 연구에 따르면 캐나다의 뱅크스 섬에서 발생한 영구동토층의 해빙의 대부분은 기록상 가장 따뜻한 해를 보낸 후 발생했다. 1984년 뱅크스 섬은 60건의 활발한 슬럼프를 겪었고, 향후 몇 년 동안 30,000건의 새로운 활발한 슬럼프를 보게 될 것으로 예상하고 있다. 영구동토층의 해빙은 강물이 유입되는 북극해뿐만 아니라 호수와 개울의 흐름과 수질의 화학성분에 중대한 영향을 미친다. 예를 들어 위성 데이터는 뱅크스 섬의 많은 호수의 색이 파란색에서 청록색으로 바뀌어 한때 맑은 물이 퇴적물로 채워졌음을 나타낸다.

〈그림 8〉 캐나다 북부지역에 발생한 산사태와 싱크홀 (출처: Yale Environment 360)



Evan Wilcox는 북극 기온 상승으로 인한 북극 관목의 급속한 팽창이 영구동토층의 해빙에 미치는 역할에 대해 중요한 발견을 했다. 온난화되는 북극 전역에서 관목은 한때 버과, 사초과 및 이끼류가 우세한 툰드라로 확장되고 있다. 키가 큰 관목이 아래의 작은 식물을 가리고 있을 뿐만 아니라 수문학 생태계도 변화시키고 있다. 땅에서 눈이 녹는 날씨가 활동층 영구동토의 녹는 속도를 결정하는 열쇠라는 것과 난쟁이자작나무와 같은 관목이 있는 툰드라 지역의 눈은 관목이 없는 지역보다 일주일 일찍 녹는 현상을 발견했다. 그 결과 영구동토층 해빙이 더 많이 발생하여 관목이 툰드라로 확장되면 영구동토층 해빙이 가속화된다는 사실을 확인할 수 있다고 보고했다 (Wilcox, 2019).

IV. 영구동토층 해빙이 지역 및 지구 환경에 미치는 영향

북극 영구동토층의 해빙은 우리가 생각하는 이상으로 세계에서 가장 시급한 기후 및 환경 문제 중 하나이며 이미 북극 지역의 생활 방식, 생계, 경제 및 생태계를 파괴하고 있다. 향후 지구가 계속해서 따뜻해짐에 따라 현재 진행 중인 영구동토층의 해빙은 북극의 경계를 넘어 전 세계적으로 영향을 줄 우려가 있다. 영구동토층의 해빙으로 인해 해당 지역 및 전지구상에 향후 어떤 영향을 미칠 수 있는 지에 대해 정리하면 다음과 같다.

1. 영구동토층의 급작스러운 해빙으로 인한 산사태와 대형 싱크홀 발생 증가
2. 지역 주민의 주거 시설과 삶의 방식에 심각한 불편함과 위험 초래
3. 지역 산업 인프라 즉, 파이프라인, 도로, 항만시설 등에 대한 피해 증가
4. 북극 경관 변화에 따른 예기치 못한 야생동물들의 서식지 변화와 축소
5. 가속화된 CO2와 메탄 등 온실가스 방출에 따른 지구온난화 가속
6. 지역적 식생 증가로 인한 영구동토층의 해빙 가속화
7. 해빙에 따른 새로운 병원성 미생물 출현 가능성 증대

8. 영구동토층 해빙에 따른 하천과 해양 수자원 변화 가능성
최근 러시아 북서쪽 야말 반도(Yamal peninsula)의 유류 저장탱크에서 대량의 기름 유출과 북극 지역에서 발생하는 산사태는 현재 기후 변화가 북극에서 일어나고 있다는 또 다른 신호이다. 전지구적 온도 상승과 해수면 상승은 예측조차 할 수 없을 정도로 빠르게 변화하는 환경의 주요인이다. 가장 시급한 지구 환경 문제 중 하나는 지구 표면 아래에 숨어 있는 얼음층인 영구동토층의 변화에 관한 것이다. 영구동토층의 급속한 해빙은 기후 변화에 엄청난 영향을 미친다. 최근 여러 나라의 과학자들이 수십 년 동안 영구동토층을 연구해 왔으나 과학계는 효과적인 전지구적 영구동토층 모니터링 시스템을 얻기 위해 아직 갈 길이 멀다. 북극뿐 아니라 전지구적인 환경 변화에 대한 영향을 알기 위해서 영구동토층에 대한 이해가 반드시 필요하다.





V. 앞으로의 과제

기후 변화의 영향이 가장 큰 북극권 지역과 관련 국가들은 모니터링 계획을 세우고 추가적인 향후 영구동토층의 해동 진행과 관련된 다양한 수준의 위험, 잠재적 피해 및 비용을 평가해야 한다. 북극 영구동토층 해동과 관련된 이슈 해결을 위해서 국제협력은 매우 중요하다. 또한 모든 북극 관련 국가에서 국가 기상 관측 서비스와 긴밀한 상호협력이 매우 중요하다. 그러나 더 중요한 것은 효과적인 전지구적 영구동토층 모니터링 시스템이 필요하다는 것이다. 북극 영구동토층의 해빙의 영향을 해결하려면 정치적 의지와 더 많은 전지구적 과학 협력 및 전략적 파트너십이 필요하다.

우리나라 극지연구소(KOPRI)는 2011년 5월 5일 국제영구동토층협회(International Permafrost Association, IPA)로부터 가입 승인을 받아 IPA에서 워킹그룹에 참여하여 활동을 하고 있다. 참고로 IPA는 영구동토층에 관련된 연구 협력을 증진하기 위하여 1983년에 설립되어 영구동토층 관련 데이터와 자료를 통합관리하고 있고, 2년마다 국제영구동토층학회(International Permafrost Conference)를 개

최하고 있으며, Antarctic Permafrost and Periglacial Environments, Cryosol 등 총 9개의 워킹그룹을 운영하고 있다.

우리나라는 극지연구소를 중심으로 2011년부터 '환북극 동토층 환경변화' 연구를 진행하고 있다. 이 연구를 통해서 우리나라는 북극 다산과학기지를 벗어나 다른 북극 동토 지역에서 장기간 관측할 수 있는 관측 거점을 확보하고 다양한 연구를 수행하고 있다. 관측 거점으로는 노르웨이 스발바르, 알래스카 카운실, 캐나다 케임브리지 베이, 그린란드 노르드 등이 있다. 북극은 영유권이 있는 지역이기 때문에 관측 거점 하나를 확보하기 위해 수많은 연락과 서류 제출 그리고 네트워크를 활용하고 외교적인 노력도 필요했다. 하지만 다른 선진국과 비교해서 영구동토층 연구의 역사가 짧고 전문 연구자 확보도 많이 부족한 편이다. 확보된 북극 동토 지역 관측 거점을 통해서 우리나라 과학자들이 북극 동토 환경변화 연구에서 좋은 성과를 얻을 수 있도록 정부의 과감한 연구 지원과 투자가 필요하다.

참고문헌

1. 외국 문헌

- Anthony K.W., et al. 2018. 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes. *Nature Communications* 9: 1-11.
- Lewkowicz, A.G., Way, R.G. 2019. Extremes of summer climate trigger thousands of thermokarst landslides in a High Arctic environment. *Nature Communications* doi.org/10.1038/s41467-019-09314-7
- Obu, J. 2021. How much of the Earth's surface is underlain by permafrost? *Journal of Geophysical Research*.126 (5): e2021JF006123. doi:10.1029/2021JF006123
- Turetsky M.R. et al., 2020. Carbon release through abrupt permafrost thaw. *Nature Geoscience* 13: 138-143.
- Wilcox E.J., Keim, D., de Jong T., Walker B., Sonnentag O., Sniderhan A.E. 2019. Tundra shrub expansion may amplify permafrost thaw by advancing snowmelt timing. *Arctic Science* 5: 202-217.

2. 기타 자료

- CBS News. 2020. Permafrost is thawing so quickly in the Arctic it's leaving sinkholes. <https://www.cbsnews.com/news/> Retrieved 2021-7-9.
- Commane, R. 2021. Research in atmospheric composition. <https://atmoscomp.ldeo.columbia.edu/> Retrieved 2021-7-15.
- Doyle H. 2020. What is permafrost? NASA Climate Kids. Retrieved 2021-7-12.
- IPA. 2014. What is permafrost? International Permafrost Association. Archived from the original on 2014. Retrieved 2021-7-12.
- Struzik, E. 2020. How thawing permafrost is beginning to transform the Arctic. *Yale Environment* 360. <https://e360.yale.edu/features/how-melting-permafrost-is-beginning-to-transform-the-arctic>