

# 미생물을 통해본 극지와 우리 :

## 극지 환경변화에 따른 바이오 위협과 대응방안

연세대학교 사회환경시스템공학부\_강호정



- I. 기후변화와 영구동토층의 미생물
- II. 기후변화에 따른 미생물 매개  
병원성 질병의 가능성
- III. 우리나라의 대응 방향과 미래 전망

필자는 토양 내 존재하는 미생물의 군집 구조와 생태계 기능을 연구하고 있으며, 지난 10여 년 동안 극지연구소를 통해 북극에 대한 여러 연구에 참여할 기회를 가졌다. 기후변화의 영향을 가장 크게 받고 있으면서 동시에 기후변화를 가속화할 수 있는 가능성 때문에 북극을 포함한 극지의 연구가 널리 수행되고 있는데 대기, 기상, 해양, 지질 등의 분야에 비해서 극지에 존재하는 미생물에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. 극지 토양의 상당 부분은 영구동토층의 형태로 존재한다. 극지 토양에는 매우 낮은 온도에 적응한 미생물이 많이 존재하며, 유기물 분해속도가 극히 낮아서 유기탄소가 저장되고, 여러 가지 병원성 미생물이 장기간 축적될 가능성도 가지고 있다. 기후변화로 대기 온도가 상승하면 영구동토층의 유기물 분해가 가속화되어 이산화탄소나 메탄 배출이 증가하고, 오래전에 창궐했던 질병의 병원균이 지상으로 노출될 가능성에 대한 우려가 나오고 있다. 특히 COVID-19으로 인해 전 인류가 직면한 현재 상황을 고려하면 바이러스성 질환의 창궐에 대한 우려와 두려움은 당연한 반응이라 생각된다. 본 리포트에서는 극지의 기후변화로 인해서 나타날 수 있는 극지 토양 미생물의 반응과 이로 인해 야기될 수 있는 새로운 질병의 창궐에 대한 과학적 정보를 제공하고 이를 선제적으로 관리하거나 완화할 수 있는 방법에 대해 알아보고자 한다.

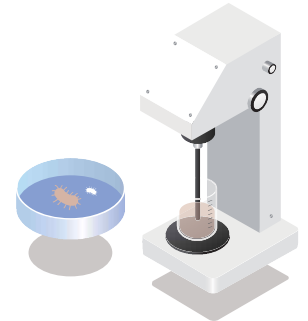
# I. 기후변화와 영구동토층의 미생물

## 1. 영구동토층의 탄소 저장

북극은 Arctic Circle (북위 66°33') 이북의 지역이나 여름 평균 기온이 10°C 이하인 북방수목 한계선 이북 지역을 말하는데, 약 2,500만 km<sup>2</sup> 면적의 해양과 주변 8개국 일부 영토로 구성되어 있다. 육상의 북극지역 중 상당 부분은 2년 이상 토양 온도가 0°C 이하로 얼어있는 영구동토층(Permafrost)이 존재한다. 영구동토층은 전체 면적 중 동결된 비율에 따라 연속성(Continuous), 불연속성(Discontinuous), 산재성(Sporadic), 고립성(Isolated) 영구동토층으로 구분된다. 대부분의 영구동토층은 3개월 이내의 짧은 여름 동안 지표면 식물들의 광합성으로 인하여 상당량의 대기 중 탄소를 고정한다. 다른 생태계와 달리 춥고 긴 겨울 동안 이 식물체들이 죽어서 동결되어 분해되지 않고 토양에 축적된다. 이런 일이 반복되면서 영구동토층은 긴 시간에 걸쳐서 탄소 저장고(Sink)역할을 한다. 북반구의 영구동토층의 면적은 13.9 x 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> 으로 추산되며, 이는 노출된 육상 총면적의 14.6%에 해당하는 면적이다(Obu et al., 2019). 영구동토층 내 토양 표층 (0~3m)에 1,035 ± 150 pg의 탄소가 저장되어 있는 것으로 추산되며, 모든 깊이를 고려했을 때 육상의 영구동토층 내 총 탄소 저장량은 1,330~1,580 pg C 정도인 것으로 추정된다(Schuur et al., 2015). 이는 매년 인간이 산업 활동 및 산림파괴로 배출하는 약 11 pg의 100배 이상에 달하는 엄청난 양으로 북극에 저장된 탄소가 전지구 기후변화에 얼마나 큰 영향을 미칠 수 있을지를 잘 보여 준다. 극한 기후와 기상 조건으로 인해 온대보다 축적된 실측 자료가 부족하기 때문에 영구동토층에 저장된 유기물의 정확한 양에는 큰 부정확도가 존재하고 있고, 더욱이 급격한 기후변화로 인해 이 양의 변화가 빠르게 일어날 것으로 추정하고 있으나 이에 대한 과학적 이해가 부족하여 불확실성은 더욱 커지고 있다.

## 2. 극지방 기후변화와 생태계 변화의 개요

산업혁명 이후 인간이 배출한 온실기체가 대기에 축적되면서 대기 평균 온도가 전지구에 걸쳐서 상승하고 있는데, 특히 북극에서는 이 정도가 크게 나타나고 있다. 지난 30년간 북극은 전 지구상에서 지표면 온도상승 속도가 가장 큰 지역으로 관측되었으며, 모델 예측에 따르면 향후 100년간 온도가 1.5~5.8°C 이상 더 증가할 것으로 예상된다(Overland et al., 2013). 이러한 변화로 인하여 영구동토층의 물리적 환경이 크게 변화될 것으로 예상된다. 예를 들어, 여름철 용해되는 지표면의 깊이인 활성층(Active layer)이 더 깊어질 것이며, 영구동토층의 면적이 전반적으로 줄어 들것이다. 이로 인해 현재까지 관측되었거나 예상되는 변화는 토양 내에 존재하는 유기물의 분해 속도 증가와 얼음층의 붕괴·용해로 인해 나타나는 Thermokarst(용해호; 溶解融) 형태의 호수의 수와 면적의



확대 등이 있다. 또한 이미 10여 년 전부터 북극지방의 관목(Shrub) 지역이 확대되는 것이 관측되었다(Tape et al., 2006). 이 변화는 특히 기후변화와 관련하여 많은 후속 연구와 관심을 끌고 있다. 관목 지역의 확대는 겨울철 적설 깊이를 확장하고, 표면 알베도(Albedo)를 감소시키며, 증발산량의 증가로 인한 국지적 수분 증가 등을 야기하여 결국에는 기후변화를 더욱 가속하는 양의 되먹임으로 작용할 가능성이 제기되고 있다. 기후변화가 생태계의 생물학적 요소에 변화를 일으키는 대표적인 사례로 낙엽성 관목 지역의 확대가 잘 알려져 있다. 이러한 변화가 식생의 추가적인 일차생산성과 이 관목이 토양 내 미생물의 활성도를 억제해서 추가로 토양 내 탄소 저장량을 증가시킬 가능성도 제시되고 있다. 기후변화로 인한 온도 상승뿐 아니라, 강수량의 변화에 의해서도 여름철 극지 식물의 성장에 큰 변화가 나타날 수 있다. 또한 강설량의 변화는 토양의 온도 단열 효과로 인하여 겨울철 지표면의 평균 온도를 상승시킬 수 있어서 온난화 효과를 더욱 가속화할 가능성이 있다. 특히 최근 연구 결과에 따르면 여름철 이외에 가을과 겨울에 걸쳐 발생하는 이산화탄소와 메탄양이 상당한 것으로 알려져 있어 강설량 증가로 인한 토양 온도 상승 효과에 대한 세밀한 연구가 필요한 상황이다. 또한, 여름철의 강수량 증가는 토양 표면의 반사도를 변화시키고, 건조한 극지역의 경우 미생물 활성도를 증대시킬 가능성을 가지고 있어서 이 또한 토양 내 유기물 분해 속도를 증대시킬 잠재력을 가지고 있다.

### 3. 토양 내 미생물의 반응

영구동토층의 이러한 온도수분 변화는 토양 내 존재하는 미생물의 구성과 활성도에 큰 영향을 미치게 된다. 일반적으로 주변 온도가 상승하면 토양 내 미생물은 대사의 속도가 증가하고 호흡량도 증가하게 된다. 또한, 온도 상승은 미생물에 직접적인 영향을 미칠 뿐 아니라 토양 내 동결되어 있던 많은 유기물과 무기염류들의 유동성을 증대시키고 이로 인하여 토양 미생물 군집 전체의 대사를 증대시키고 생체량을 급격히 증가시킬 수 있다. 쉽게 말해서 냉동시켜두었던 음식을 따뜻한 외부에 놔게 두면 음식이 쉽게 상하는 상황을 생각하면 된다. 이러한 변화에 따라서 본래 영구 동토층에 존재했던 미생물 군집구조에도 급격한 변화가 일어날 수 있는데, 예를 들어, 저온에 잘 적응된 호냉성(Psychrophilic) 세균 군집에서 냉대나 온대에서 볼 수 있는 토양 미생물 군집으로의 변화도 일어날 수 있다. 또한 토양 내 수분량의 증가는 토양 내 영양분, 탄소 등의 기질이 미생물과 접촉할 가능성을 증가시켜서 전반적으로 미생물 생장이 활성화 되는 환경이 조성될 수 있다. 이러한 토양 내 환경 및 미생물 활성의 변화는 극지 생태계에 큰 변화를 가져올 수 있다. 예를 들면 토양에 저장되어 있는 다량의 유기탄소가 급격히 분해되면서 이산화탄소와 메탄의 발생량이 증가하여 기후변화 속도가 더 빨라질 수 있고, 영구동토층에 동결 상태로 존재하던 고대의 병원체가 외부로 배출되어 주변 동물이나 인간에게 노출될 수도 있다.

## II. 미생물 매개 병원성 질병의 가능성

### 1. 기후변화와 감염병의 증가

기후변화는 온도의 상승, 강수량의 변화 등의 기후적인 변화를 야기시키고, 이로 인하여 극지 생태계의 여러 가지 특성을 변화시킬 수 있다. 이에 따라서 다양한 종류의 질병원의 분포와 활성도가 변화하게 되고 궁극적으로 인간 사이의 질병의 발생 양상이나 빈도에 영향을 미칠 가능성이 제기되고 있다. 실제로 말라리아, 뎅기열, 웨스트 나일 바이러스, 한타 바이러스, 에볼라 바이러스 등의 분포가 변화하는 것이 보고되었고, 공중 보건에 심각한 위협을 일으키는 병원균들(*Brucella* spp., *Toxoplasma gondii*, *Trichinella* spp., *Coxiella burnetii*, *Puumala hantavirus* 등)의 전 지구적 분포가 대기의 평균 온도 상승에 따라서

점점 북쪽으로 이동하는 것이 보고되고 있다. 특히 북극의 경우 온도 상승의 폭이 다른 생물군계에 비해 매우 크고 영구동토층이라는 독특한 지질적 구조를 갖추고 있어서 기후변화로 야기될 감염병의 촉발과 확산의 가능성이 제기되고 있다. 특히, 가장 문제가 되고있는 '인간과 동물간 상호 전파가 가능한 질병', 즉 인수공통감염병(Zoonosis)에 대한 우려로 인해 바이러스를 매개로 한 질병의 연구가 대두되고 있다. 이외에도 영구동토층에 동결 상태로 존재하고 있는 고대의 미생물들이 동토층 융해로 인해 현대 외기에 방출되고 인간에게 노출될 가능성에 대한 우려가 나타나고 있다.

□ 영구동토층(출처 : 극지연구소 이영미 박사)

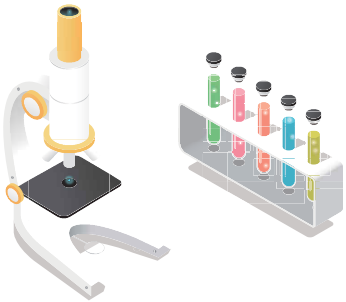


## 2. 인수공통감염병

인수공통감염병이란 사람과 동물(특히 척추동물) 사이에서 상호 전파가 가능한 병원체로 인해 발생하는 감염병을 말한다. 현재까지 인수공통감염병의 병원체는 세균뿐 아니라 바이러스, 기생충, 프로토존과 같은 단백질 등이 알려져 있으며, 이를 매개하는 동물은 조류, 포유류와 일부 무척추동물 등이 알려져 있다. 현재까지 보고된 인수공통감염병은 250여 종에 이른다. 인수공통감염병은 인체와 보건학적 위해성뿐만 아니라 농축산업이나 반려동물 등에게도 큰 위해가 될 수 있어서 사회적 경제적 중요성을 가지고 있다. 특히 인간 정주 지역의 확대로 인하여 야생 동물과 접촉 가능성이 커지고, 기후변화로 인하여 매개체의 분포와 개체수가 확대 되는 이유 때문에 이에 대한 관심과

연구도 고조되고 있다. 극지는 특히 이러한 상황에 가장 크게 노출되어 있는 지역 중 하나이다.

특히 전 세계적으로 널리 연구된 인수공통감염병으로는 진드기 매개로 분야바이러스(Bunyavirus)가 일으키는 중증열성혈소판감소증후군, 모기 매개로 플라비바이러스(Flavivirus)가 일으키는 뎅기/지카/일본 뇌염, 야생동물 매개로 한타바이러스(Hantavirus)가 일으키는 신증후출혈열, 공수병바이러스(Rabies virus)가 일으키는 공수병, 가축을 매개로 인플루엔자 바이러스(Influenza virus)가 일으키는 동물인플루엔자 인체감염증, 그리고 코로나 바이러스가 일으키는 중증호흡기증후군 등이 널리 알려져 있다. 이러한 질병에 관한 연구는 선진국에서 널리 진행되고 있고, 아프리카와 같은 지역에서 다양한 병리학적 생태학적 연구가 수행되고 있으나, 극지에서의 연구는 아직도 제한적이다. 기후변화에 의해 이러한 인수공통감염병의 병원균 자체의 활성화와 공간적 분포가 확장될 가능성도 크고, 더욱이 이러한 질병의 매개체, 즉 인수공통감염병 숙주들의 분포와 이동이 크게 변화하여 보건학적 위해성이 더욱 커질 가능성도 존재한다.



## 3. 극지의 기후변화 관련 병원성 미생물의 연구

극지 영구동토층의 융해는 얼음이나 토양 내에 분해되지 않고 동결되어 있던 미생물, 특히 세균과 바이러스가 외부로 노출되고 이로 인해서 질병이 확산될 가능성이 있지 않을까 하는 우려가 있다(Gross, 2019). 특히, 온도 상승에 따라 영구동토층의 표층 온도가 상승하고 활성층이 깊어짐에 따라 냉동 상태로 존재했던 동물의 사체로부터 인수공통감염병이 증가할 가능성에 대한 우려가 점점 커지고 있다(Revich and Podolnaya, 2011). 예를 들어 1879~1925년 사이에 북러시아 지역에서는 150만 마리 이상의 순록이 탄저병으로 사멸한 기록이 있고, 순록 사이의 발병이 인간에게도 영향을 미쳐 인간 거주지에서 29,000건 이상의 탄저병으로 추정되는 발병이 보고된 바 있다. 이러한 역사적 경험 때문에 순록 사체 매장 지역 부근에서 탄저병이 다시 크게 일어날 수도 있다는 우려는 오랫동안 계속되어 왔으나 직접적인 증거는 부족했다. 그러다 2016년 시베리아에서의 대규모 순록 몰살 사태로 인해 다시 한 번 대중의 관심을 끌게 되었다.

2016년 시베리아 야말(Yamal) 반도에서 일시에 수천 마리의 순록이 폐죽음을 당한 일이 벌어졌다. 또 그 지역 주민 수십 명이 입원하고, 결국 1명이 사망하는 일이 벌어짐으로써 인수공통 감염 질병의 등장으로 위기감이 조성되었다. 이후 연구에서 순록의 폐죽음 원인이 탄저병(Anthrax)이라는 것이 밝혀졌고, 기후변화로 인해 영구동토층이 융해되고 이로 인해 땅속에 안정적으로 묻혀 있던 치명적인 병원균이 외기로 방출되어 일어난 일이라고 알려지기 시작했다. 그해의 최고 온도가 35도까지 올라가는 고온이었다는 것이 알려지면서 이 설명은 더욱 힘을 얻었다. 실제로 미국과 영국의 주요 언론들은 '저주받은 땅', '툰드라가 녹으며 지옥문이 열렸다', '융해되는 영구동토층에는 좀비 바이러스가 존재하나' 등과 같이 선정적인

보도를 앞다투어 진행했고, 대중 과학 잡지에서도 영구동토층의 융해로 인해 오래전 지구에서 사멸된 것으로 알려진 고대의 질병원들이 외부로 노출되어 인간에게 큰 위해를 일으킬 수 있다는 기사들을 다루기 시작했다. 특히 야말 지역과 그전 해에 야쿠티아(Yakutia) 지역의 고고학 발굴 지역에서 획득한 시료의 유전자 분석을 통하여 13세기 이전부터 여러 종류의 탄저병이 여러 차례 이 지역을 휩쓸었으며, 야말 지역의 탄저병은 넓은 지역에 걸쳐 동토층 융해에서 방출된 것으로 추정된 연구 결과가 발표되었다(Timofeev et al., 2019).

그러나 사실 이 사건은 단순히 기후변화와 영구동토층의 융해로 인해 토양 내에 갇혀있던 탄저균이 노출된 것이 원인이라 단정 짓기 어려운 측면이 있다. 특히 그 지역 인구의 증가로 인한 자연의 파괴와 교란, 그리고 백신 사용의 중단과 같은 여러 가지 요소가 작용했을 가능성이 제기되었다(Hueffer et al., 2020). 사실, 야말반도에서는 19세기부터 탄저병으로 추정되는 질병의 발생이 기록되어 있어 인구가 밀집된 국가나 도시와 달리 그 지역에서는 탄저병이 거의 풍토병과 같이 그 지역에 정착하여 유행한 것으로 추정된다. 실제로 러시아 정부에서는 탄저병 관리를 위해서 순록에게 정기적으로 백신을 처치했는데, 2007년 이후에는 탄저병이 완전히 소멸한 것으로 판단하여 순록에게 백신 처리하는 것을 중단하였다. 또한, 2000년대 들어서 순록의 숫자가 너무 많이 증가하여 그 지역에 적절한 상태 용량(Carrying capacity)을 넘어설 정도가 되어 아주 작은 전염병의 발생이 큰 확산으로 이어질 환경이었다는 주장도 있다. 이러한 논쟁에도 불구하고 동토층 융해가 시베리아 전역에서 보고되고 있고, 이로 인하여 오래전 순록의 사체들을 묻어 두었던 지역에서 탄저병이 재발될 가능성이 존재하기 때문에, 탄저병을 포함하여 다양한

질병원에 선제적으로 모니터링과 연구가 절대적으로 요구되는 시점이다(Revich and Podolnaya, 2011).

극지 생태계에서는 영구동토층의 융해로 인해 직접적으로 질병이 증가할 가능성이 있을 뿐 아니라, 이전에는 모르고 있던 생태계의 복잡한 반응을 통해서 예상치 못한 질병 확산의 가능성도 나타나고 있다. 예를 들어, Phocine distemper(볼개 전염성 급성 염증 바이러스)라 불리는 바이러스는 대서양 볼개에 치명적인 질병을 일으키는 질병원이다. 2004년 북태평양 해달(Sea otter)에서도 이 바이러스가 발견되어 이 질병이 점점 확산되는 것이 아닌가 하는 우려가 나타나고 있다. 이러한 이유는 온난화로 병하가 감소하고, 이로 인하여 극지에 서식하던 해양 생물들의 서식처가 변화하여 이들이 아극지 해양 포유류와 접촉할 가능성이 높아지면서 질병의 감염이 증가할 것으로 추정되고 있다. 즉 기후변화로 북극에 서식하던 동물들의 서식처가 변화해서 온대 지방 동물들과의 접촉 가능성이 높아지면서 질병이 확산된다는 말이다. 북극해에서 진행된 장기적인 추적 조사의 결과를 보면, 병하가 감소한 시기와 해양 포유류를 매개로 한 질병의 발생 시기가 높은 상관관계를 보이고 있다(VanWarmer et al., 2019).

극지의 융해속도 증가와 관련하여 사회적으로 가장 큰 관심을 끌고 있는 연구주제는 동토층에 냉동동결되어 있는 오래전의 질병이 다시 노출되어 대유행을 일으키지 않을까 하는 우려다(Waits et al., 2018). 이와 관련해서 많은 과학자는 영구동토층을 포함한 극지에 고대의 바이러스나 세균이 존재하고 있는지에 대한 연구를 수행하고 있다. 예를 들어, 천연두(Smallpox)는 1977년에 지구상에서 완전히 박멸된 것으로 보고되었고, 그 이후에는 발병한 사례가 없다. 그러나 영구동토층의 융해와 더불어 고대에 묻혀서 얼어붙은 동물이나 인간의 사체에 남아 있던 천연두 병원균이 융해되며 외부에 노출될 가능성이 있는지에 대한 연구가 수행되었다. 예를 들어, 야쿠티아 유적지에서

발견된 시체의 병리학적 상태는 천연두에 의한 사망으로 추정되어(Biagini et al., 2012) 천연두를 일으키는 바리올라(Variola) 바이러스를 검출하기 위한 여러 조사가 수행되었다. 다행히 바이러스 자체가 검출되지는 않았지만 바리올라 바이러스의 DNA 일부 조각이 발견되어 향후에 추가 연구가 더 필요하다는 점을 보여주었다.

이밖에도 영구동토층의 깊은 부분이나 동굴 속 얼음 속에서 바이러스나 세균을 검출하려는 연구들이 수행되고 있는데, 32,000년 이상 된 홍적세기에 얼어붙은 것으로 추정되는 동굴 속 얼음호수 내에서 카르노박테리움(Carnobacterium)이라는 세균이 검출되기도 했다(Pikuta et al., 2005). 또한, 시베리아 영구동토층에 갇혀있던 바이러스 두 종을 검출하여 각기 Pithovirus sibericum, Mollivirus sibericum이라 명명했는데, 두 종 모두 현미경으로도 관찰이 가능할 정도로 비정상적으로 큰 소위 '수퍼바이러스' 계열의 바이러스이다. 2003년 현미경으로 관찰이 가능한 엄청난 크기의 미미바이러스(Mimivirus)라는 바이러스가 처음 발견된 이후 2013년에 판도라바이러스(Pandoravirus)가 새로 발견되었고, 이후 발견된 2종의 수퍼바이러스가 모두 30,000년 이상 된 시베리아의 영구동토층에서 발견된 것이다(Legendra et al., 2014; Legendra et al., 2015). 이들의 생태적 환경적 영향에 대해서는 자세히 밝혀진 바 없지만, 영구동토층의 융해와 관련해서 향후 이러한 수퍼바이러스의 새로운 발견과 노출 빈도가 증가할 것으로 예상되어 과학계가 예의 주시하고 있는 상황이다. 현재까지는 이러한 수퍼바이러스의 숙주는 아메바 종류로 알려져 있으나 프랑스에서 썸염(Adenitis)에 감염된 어린이에게서 마르세이유바이러스(Marseillevirus)라는 한 수퍼바이러스 종류가 발견되어, 이러한 수퍼바이러스가 인간에게도 감염될 수 있다는 간접적인 증거가 보고되기도 했다(Popgeorgiev et al., 2013).

북극뿐 아니라, 제 3의 극지라 불리는 티베트에서도 오래된

바이러스를 검출하려는 연구가 수행되었는데 1만 5천년 된 티베트 빙하의 얼음 속에서 다수의 바이러스가 검출되었다. 특히 이 중 네 가지 속(Genera)은 이미 알려진 종이지만, 28 속은 신종으로 판명되어 극지 토양이나 빙하 내에 현재에는 존재하지 않는 세균이나 바이러스가 존재할 가능성이 크다는 점을 보여 주었다(Zhong et al., 2020).

최근 환경 및 보건 측면에서 사회적 관심을 끌고 있는 미생물은 항생제 내성 세균이다. 극지에 존재하는 항생제 내성균에 관한 관심은 두 가지 갈래로 진행되어 왔다. 한 가지 방향은 온대와 냉대에서 인간들의 항생제 사용이 증가함에 따라 토양과 수체 등에서 항생제 내성균이 더욱 널리 분포하게 되고 이것이 동물의 이동과 분변 등을 통해서 인간 교란이 없는 극지에서도 항생제 내성 세균이 검출되는 것에 관한 내용이다. 예를 들어, 최근 연구 결과에 따르면 노르웨이령 스발바드(Svalbard)까지 항생제 내성 세균이 검출되었는데, 이는 조류의 배설물을 통해서 인간의 간섭이 적은 극지까지 확산되는 것으로 추정된다(McCann et al., 2019). 다른 하나는 항생제 내성 세균이 원래 자연에 풍부하게 존재한다는 사실에 근거하여 영구동토층에 오래전에

갇혀있던 항생제 내성 세균이 외부에 노출될 가능성에 관한 연구이다. 현재 사용되고 있는 항생제 대부분이 자연계에 존재하던 물질에서 유래했기 때문에 오랜 지질학적 시간 동안 이에 대한 내성을 가진 미생물이나 내성을 유도하는 유전자가 존재했던 것으로 추정된다(D'Costa et al., 2011). 극지의 융해와 인류 정주지의 확대는 이런 고대 미생물이 인간에게 노출될 가능성이 커진다는 점을 보여 준다. 실제로 인간 활동과 오랜 시간 격리되어 있던 극지역 동굴에서도 항생제 내성을 가진 세균이 발견되기도 했다(Pawlowski et al., 2016). 캐나다 영구동토층에서 수행된 연구에 따르면 항생제 내성에 관련된 유전자는 적어도 5,000년 전에 등장했으며, 자연계에 존재하는 항생제 물질에 대한 내성 유전자뿐 아니라 아미카신(Amikacin)과 같이 자연계 물질에서 변형 합성된 항생제에 대한 내성 유전자도 존재함이 밝혀졌다(Perron et al., 2015). 이런 정보들을 종합해 보면 기후변화로 인해 항생제 내성세균의 노출이 극지를 중심으로 시작되어 냉대나 온대의 인간 정주지역까지 확산될 가능성이 내재되어 있음을 알 수 있다.



□ 영구동토층 탄저균 소독  
(출처 : [www.rbth.com/longreads/siberian\\_plague/](http://www.rbth.com/longreads/siberian_plague/))

### III. 우리나라의 대응 방향과 미래 전망

#### 1. 영구동토층의 과학적 연구

현재의 기후변화 양상이 지속된다면, 토양 유기물 분해 속도의 증가로 인해 더 많은 온난화 기체가 발생하고, 결국 기후변화의 속도를 더욱 가속화 시킬 것으로 예상된다. 우리나라에서는 극지연구소를 중심으로 영구동토층을 포함한 극지에서 기후, 기상, 해양, 지질, 생물 등에 대한 다양한 연구를 수행하고 있다.

생물 분야의 경우에는 식생이나 미생물 군집에 대한 연구와 더불어 기후변화에 의한 영향, 그리고 그 결과로 일어날 수 있는 온실기체의 발생 등에 관한 연구 등도 일부 진행되고 있으나, 기후변화와 관련된 생물학적 되먹임에 대한 종합적 연구는 아직 구체화 되지 못한 상황이다. 특히 생태적 특성을 고려한 모델링에 대한 연구는 전세계적으로 불확실성이 매우 큰 부분으로 토양 내 미생물의 활성도를 고려한 토양 탄소 동태 모델 등이 제시되었으나 각 생물군계 별로 보았을 때 극지 부분의 부정확성이 가장 큰 상황이다. 국내의 탄소 모델링, 미기상 측정, 전구 기후변화 모델링,

토양 미생물 군집 및 활성도 연구자 등의 학계 간 연구를 활성화하여 극지 탄소 순환에 대한 다각적 수준에서의 선도적인 연구가 가능할 것으로 예상된다.

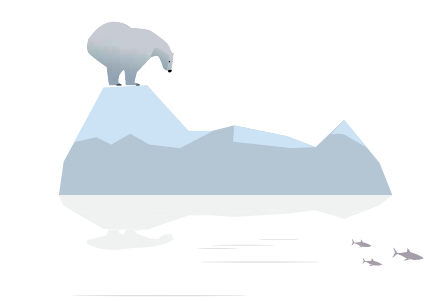
국내에서 극지와 관련된 병원성 미생물에 대한 연구는 아직 초기 단계이다. 차세대염기서열(NGS; Next Generation Sequencing) 분석 등 최신 기법을 활용하여 극지 토양에 존재하는 세균의 군집구조, 즉 어떤 종이 존재하고 있는지에 대한 선행연구 결과가 상당히 축적되어 있으나, 바이러스 유전체 전체에 대한 정보, 소위 바이롬(Virome) 연구나 특정 병원성 미생물을 대상으로 한 결과는 매우 제한적이다. 따라서 COVID-19 사태 이후 국내에 설립될 것으로 예상되는 바이러스연구소나 감염병연구소 등과의 공동 연구를 통하여 극지방과 영구 동토층에 서식하거나 노출되는 병원성 미생물 혹은 바이러스에 대한 선제적 연구는 매우 중요할 것으로 예상된다.

#### 2. 국제협력 강화와 '원 헬스(One Health)' 접근

우리나라는 현재 북극과 관련된 가장 중요한 국제기구인 북극이사회(Arctic Council)의 당사자인 8개의 극지 국가 이외에 중요한 영향력을 행사하는 국가 중 하나로, 프랑스, 독일, 이탈리아, 일본, 네덜란드, 중국, 폴란드, 인도, 싱가포르, 스페인, 스위스, 영국 등과 함께 옵저버(Observer)국가로 참여하고 있다. 북극이사회 산하에는 현재 총 6개의 실무 그룹(Working Group) 활동 중인데, 이들은 북극 오염 활동 프로그램(Arctic Contaminants Action Program), 북극 모니터링 및 평가 프로그램(Arctic Monitoring and Assessment Programme), 북극 동식물상 보존(Conservation of Arctic Flora and Faun), 비상사태 예방 준비 및 대응(Emergency Prevention, Preparedness and Response), 북극해양 환경 보호(Protection of the Arctic Marine Environment), 지속가능발전 실무그룹(Sustainable Development Working Group) 등이다. 이 중 지속가능발전 실무그룹 하에 신종감염병 환극지국제감시(ICS: The International Circumpolar Surveillance of Emerging Infectious Diseases) 프로젝트가 극지에서 일어날 수 있는 감염병에 대한 연구를 주도적으로 수행한 바 있다(Parkinson et al., 2014). 이와 같은 국제협력 사업에 적극적으로 참여하고 주도하여 향후 극지에서 발생할 수 있는 감염병에 대한 과학적인 정보를 축적하고 관련 연구를 선도할 수 있는 기반을 마련해야 한다. 이러한 연구는 북극이사회 옵저버 국가로서의 위상뿐 아니라, 북극에서 유행한 질병이

장기적으로 국내에도 영향을 미칠 가능성이 상존하기 때문에 관련 정보와 기술력을 확보하는 것이 매우 중요하다. 특히 현재 우리가 직면하고 있는 COVID-19 경우에서 볼 수 있듯이 해외에서 시작된 감염병이 매우 빠른 속도로 우리나라에 전파되어 보건, 사회, 경제적 영향을 미칠 수 있다는 점은 시사하는 바가 크다.

국제 협력과 동시에 또 하나 고려해야 할 점은 '원 헬스(One Health)' 개념으로, 이는 공중 보건의 성과를 위해서 여러 섹터가 협력적으로 작업하여 프로그램, 정책, 법제화, 연구 등을 수행하는 것으로 WHO 등에서 주창하고 있는 개념이다. 원 헬스에서 주로 다루고 있는 대표적인 내용은 식품의 안정성, 인수공통감염병, 항생제 내성 등으로 극지의 보건문제를 다루는 내용과 밀접하게 연관되어 있다. 앞 절에서 살펴본 바와 같이 극지에서 발생할 수 있는 병원성 위해는 단순히 병원성 미생물의 검출이나 분석으로 해결될 수 있는 문제가 아니라, 기후변화, 야생 동식물 분포의 변화, 영구동토층의 용해, 인간 정주지역의 확대 및 석유 시추와 같은 다양한 층위의 문제들을 복합적으로 분석하여 해결책을 내놓아야 한다. 더욱이 북극의 경우에는 다국가 간의 국제 협력이라는 더욱 복잡한 외교적 문제와 맞물려 있다. 이러한 측면에서 극지 환경의 바이오 위협에 대한 기초연구, 제도 개선, 선제적 예방책 제시 등에 있어서 문제의 다층성과 다양한 관련 이해 당사자의 참여와 의사소통을 기반으로 한 원 헬스 개념의 도입이 필요하다.



### 3. 미래전망

우리나라에서는 극지연구소를 중심으로 관련 학연 연구자들이 북극을 포함한 극지에 대한 다양한 과학적 연구를 수행하고 있다. 특히 기후변화와 관련된 대기, 해양 분야에서 국제적 수월성을 보이며, 환경오염, 기초생명, 생물소재 관련된 분야에서도 독자적인 연구 체계를 구축해가고 있다. 그러나 기존의 연구 중에 미생물과 기후변화, 그리고 감염병의 관계를 고려한 주제는 매우 제한적으로 향후 이 분야에 대한 새로운 과제와 발굴과 연구진의 구성이 필요하다고 생각된다. 특히 COVID-19 대응행으로 감염병의 위험성과 이에 대한 선제적 대응책 개발이 절실히 요구되는 상황에서, 향후 신설 혹은 재구성되는 연구 조직과 기관에서 극지 관련 연구가 포함될 수 있도록 하는 노력도 매우 중요할 것으로 사료된다. 또한, 기후변화 연구에서 기존의 모델 및 식생 중심의 연구에 덧붙여 미생물 반응을 고려한 연구와 모델 개발이 절실한 시점으로 판단된다. 특히 현재는 북극에서 유래한 질병이 우리나라로 전파되는 상황에 대한 비상계획은 부재한 상황이다. COVID-19의 비상계획 수립과 관련하여 극지 생태계의 변화와 이로 인한 질병의 확산에 대한 내용도 검토가 필요한 시점이다.



### 마치는 말

지금까지 살펴본 바와 같이, 기후변화는 영구동토층 미생물의 군집구조와 활성도에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 이로 인하여 기후변화가 가속화되는 '양의 생물학적 되먹임'에 대한 예측은 거의 이견이 없는 것으로 판단된다. 다만 관건은 그 정도와 속도의 문제일 뿐이다. 새로운 질병의 창궐에 대한 가능성은 여러 가지 방향에서 제시되고 있으나 아직도 과학적 자료와 장기 관측의 확증은 부족한 상황이다. 그럼에도 불구하고, 한번 시작되면 견잡을 수 없게 퍼져나가는 일부 감염병의 특성상 더욱 선제적이고 적극적인 접근이 필요하다. 특히 지구온난화로 인해 극지와 냉대지방의 인간 정주지가 확대되고 농업이나 산업 활동이 증대되면 야생 생물이나 자연 생태계와의 접촉이 더 가속화될 가능성이 크기 때문에 이에 대한 기초적인 연구와 자료의 수집은 극지와의 물리적 거리에도 불구하고 향후 극지연구의 한 축으로 확대해야 할 필요성이 있다. 이를 위해서는 기후변화 연구와 연관하여 진행되고 있는 미생물 생태에 대한 더 깊이 있는 기초연구가 수행되어야 하고, 병원성 미생물에 대한 전문성을 가진 연구기관과 극지연구자들의 협업의 필요성이 더욱 중요하다고 생각한다.



## 참고문헌

1. 외국 문헌
- Biagini P, Theves C, Balaresque P, Geraut A, Cannet C, Keyser C, Nikolaeva D, Gerard P, Duchesne S, Orlando L, Willerslev E, Alekseev AN, de Micco P, Ludes B, Crubezy E. 2012. Variola virus in a 300-year-old Siberian mummy. *New England Journal of Medicine* 367.
  - D'Costa VM, King CE, Kalan L, Morar M, Sung WWL, Schwarz C, Froese D, Zazula G, Calmels F, Debruyne R, Golding GB, Poinar HN, Wright GD. 2011. Antibiotic resistance is ancient. *Nature* 477.
  - Gross M. 2019. Permafrost thaw releases problems. *Current Biology* 29.
  - Hueffer K, Drown D, Romanovsky V, Hennessy T. 2020. Factors contributing to Anthrax outbreaks in the circumpolar north. *EcoHealth* 17.
  - Legendre M, Bartoli J, Shmakova L, Jeudy S, Labadie K, Adrait A, Lescot M, Poirot O, Bertaux L, Bruley C, Couté Y, Rivkina E, Abergel C, Claverie JM. 2014. Thirty-thousand-year-old distant relative of giant icosahedral DNA viruses with a pandoravirus morphology. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111.
  - Legendre M, Lartigue A, Bertaux L, Jeudy S, Bartoli J, Lescot M, Alempic JM, Ramus C, Bruley C, Labadie K, Shmakova L, Rivkina E, Coute Y, Abergel C, Claverie JM. 2015. In-depth study of Mollivirus sibericum, a new 30,000-yold giant virus infecting Acanthamoeba. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112.
  - McCann CM, Christgen B, Roberts JA, Su J-Q, Arnold KE, Gray ND, Zhu Y-G, Graham DW. 2019. Understanding drivers of antibiotic resistance genes in High Arctic soil ecosystems. *Environment International* 125.
  - Obu J, Westermann S, Bartsch A, et al. 2019. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000-2016 at 1 km<sup>2</sup> scale. *Earth-Science Reviews* 193.
  - Overland JE, Wang M, Walsh JE, Stroeve JC. 2013. Future Arctic climate changes: Adaptation and mitigation time scales. *Earth's Future* 10.1002/2013EF000162.
  - Parkinson AJ, Evengard B, Semenza JC, Ogden N, Børresen ML, Berner J, Brubaker M, Sjöstedt A, Evander M, Hondula DM, Menne B, Pshenichnaya N, Gounder P, Larose T, Revich B, Hueffer K, Albihn A. 2014. Climate change and infectious diseases in the Arctic: Establishment of a circumpolar working group. *International Journal of Circumpolar Health* 73: 25163.
  - Pawlowski AC, Wang W, Koteva K, Barton HA, McArthur AG, Wright GD. 2016. A diverse intrinsic antibiotic resistome from a cave bacterium. *Nature Communications* 7: 13803.
  - Perron GG, Whyte L, Turnbaugh PJ, Goordial J, Hanage WP, Dantas G, Desai MM. 2015. Functional characterization of bacteria isolated from ancient arctic soil exposes diverse resistance mechanisms to modern antibiotics. *PLoS ONE* 10: e0069533.
  - Pikuta EV, Marsic D, Bej A, Tang J, Krader P, Hoover RB. 2005. *Carnobacterium pleistocenium* sp. nov., a novel psychrotolerant, facultative anaerobe isolated from permafrost of the Fox tunnel in Alaska. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 55.
  - Popgeorgiev N, Michel G, Lepidi H, Raoult D, Desnues C. 2013. *Marseillevirus* Adenitis in an 11-month-old child. *Journal of Clinical Microbiology* 51.
  - Revich BA, Podolnaya MA. 2011. Thawing of permafrost may disturb historic cattle burial grounds in East Siberia. *Global Health Action* 4.
  - Schurr EA, McGuire AD, Schädel C, Grosse G, Harden JW, Hayes DJ, Hugelius G, Koven CD, Kuhry P, Lawrence DM, Natali M, Olefeldt D, Romanovsky VE, Schaefer K, Turetsky MR, Treat CC, Vonk JE. 2015. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature* 520.
  - Tape K, Sturm M, Racine C. 2006. The evidence for shrub expansion in Northern Alaska and the Pan-Arctic. *Global Change Biology* 12.
  - Timofeev V, Bahtejeva I, Mironova R, Titareva G, Lev I, Christiany D, Borzilov A, Bogun A, Vergnaudet G. (2019) Insights from *Bacillus anthracis* strains isolated from permafrost in the tundra zone of Russia. *PLoS ONE* 14: e0209140.
  - VanWormer E, Mazet JAK, Hall A, Gill VA, Boveng PL, London JM, Gelatt T, Fadely BS, Lander M, Sterling J, Burkanov V, Ream R, Brock P, Rea L, Smith B, Jeffers A, Henstock M, Rehberg M, Burek-Huntington K, Cosby S, Hammond J, Goldstein T. 2019. Viral emergence in marine mammals in the North Pacific may be linked to Arctic sea ice reduction. *Scientific Reports* 9: 15569.
  - Waits A, Emelyanova A, Oksanen A, Abass K, Rautio A. 2018. Human infectious diseases and the changing climate in the Arctic. *Environment International* 121.
  - Zhong ZP, Solonenko NE, Li YF, Gazitúa MC, Roux S, Davis ME, Etten JLV, Thompson EM, Rich VI, Sullivan MB, Thompson LG. 2020. Glacier ice archives fifteen-thousand-year-old viruses. *BioRxiv*.