

해저드리터러시
융합교육연구소

해저드리터러시
교육 프로그램

해저드 리터러시
융합 교육 연구소

극지에서 온 SOS, 영구동토층의 위기



1. 수업 프로그램 설명

본 프로그램은 지구온난화로 인한 극지방의 영구동토층 융해를 중심으로 기권·지권·수권·생물권과 인간 사회의 상호연결성을 탐구하는 교육 프로그램이다. 학생들은 영구동토층이 단순히 일 년 내내 얼어 있는 땅이 아니라, 최소 2년 이상 0°C 이하의 상태를 유지하는 토양 또는 암석층이며, 여름철에 녹는 활동층과 그 아래의 영구동토층으로 구성된다는 점을 이해한다. 또한, 영구동토층의 융해가 지반 침하, 해안 침식, 산사태, 호수와 습지의 변화, 기반 시설 파괴 등 지역적 영향을 일으키는 과정을 탐구한다. 나아가 영구동토층에 저장되어 있던 유기물이 분해되면서 이산화탄소와 메탄이 방출되고, 추가적인 지구온난화를 일으킬 수 있는 양의 되먹임(피드백) 과정을 분석한다. 학생들은 평균 기온, 지표 변화, 탄소 방출과 관련된 자료를 해석하면서 영구동토층 융해의 속도와 영향이 모든 지역에서 동일하지 않음을 이해한다. 또한 극지방 주민의 주거, 이동, 식량 확보, 문화적 장소가 영구동토층 변화의 영향을 받을 수 있다는 점을 살펴봄으로써 기후변화를 사회적·문화적 문제로 확장하여 이해한다. 이를 통해 학생들이 영구동토층의 융해를 전 지구적 탄소 순환과 기후변화를 통해 자신의 삶과 연결된 문제로 인식하도록 구성하였다. 궁극적으로 학생들이 기후 자료를 과학적으로 분석하고, 미래의 변화와 불확실성을 고려하며, 온실가스 감축과 지역사회의 적응 방안을 함께 제안하는 것을 목표로 한다.

수업 대상	고등학교 1~3학년	교육 방법	강의, 자료 분석, 토론
운영 장소	인터넷 환경이 가능한 교실	수업 시간	총 120분 (60분 × 2차시)
준비물	컴퓨터, 노트북 등 인터넷 환경		

2. 교육 프로그램 목표(해저드리터러시 연계)

① 영구동토층과 활동층의 개념을 이해하고, 지구온난화에 따라 영구동토층이 융해되는 과정을 설명할 수 있다.

② 영구동토층 융해가 지구 시스템과 지역사회에 미치는 환경적·사회적 영향을 시스템적으로 분석할 수 있다.

③ 영구동토층 변화 자료를 바탕으로 미래 위험을 판단하고, 온실가스 감축과 지역 적응을 포함한 대응 방안을 제안할 수 있다.

목표	지식·이해		사고·기능					가치·태도			심리·정서			행동·실천		
	A1	A2	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	D1	D2	D3	E1	E2	E3
목표①	O		O		O											
목표②	O	O	O	O	O		O	O	O	O			O			
목표③		O	O		O	O	O	O	O	O		O	O	O	O	O

3. 핵심 개념

- 영구동토층과 활동층
- 영구동토층 융해와 지반 안정성
- 기후변화와 지구온난화
- 지권·기권·수권·생물권의 상호작용 (지구 시스템의 상호연결성)

4. 프로그램 전개

활동의 전개	
Introduction	- 땅이 꺼지거나 건물이 기울어진 북극 지역의 사진을 제시하고 "얼어 있던 땅이 녹으면 어떤 일이 발생할까?"와 같은 질문을 통해 흥미 유발하기 - '영구동토층'이라는 용어에서 연상되는 내용을 자유롭게 작성하기 - 얼음이 섞인 흙과 얼음이 없는 흙의 상태를 비교하고, 얼음이 녹은 후 지표가 어떻게 변할지 예상하기
Global	- 영구동토층이 주로 분포하는 지역과 기후적 특징을 분석하기 - 지표에서 여름마다 녹고 겨울에 다시 어는 활동층과 그 아래의 영구동토층 구조 이해하기 - 시기별 북극 기온, 지표 온도 또는 활동층 두께 자료를 비교하여 변화 경향 분석하기
Local	- 영구동토층 융해의 영향 탐구하기 (지반 침하, 지표 균열, 열카르스트 형성 등) - 북극 지역 평균 기온 상승이 영구동토층 융해에 영향을 미치는 과정을 인과 관계도로 나타내기 - 인과 관계도를 활용하여 양의 되먹임(피드백) 과정 설명하기
Personal	- 가상의 북극 마을을 대상으로 '영구동토층 위기 대응 보고서' 작성하기 - '원인을 줄이는 방안'과 '이미 발생한 변화에 적응하는 방안'으로 구분하여 대응 방안 구축하기 - 영구동토층이 없는 우리나라에서도 이 문제에 관심을 가져야 하는 이유를 탄소 순환, 기후, 경제 및 국제적 책임과 관련지어 설명하기
Wrap-up	- 발표 및 성찰하기 - 극지방의 재해를 바라보는 나의 생각 정리하기

5. 재해·재난 이해를 위한 이론적 배경과 활동 사례

본 프로그램은 영구동토층의 융해를 기권·지권·수권·생물권과 인간 사회가 상호작용하는 기후 재해로 이해하도록 설계하였다. 영구동토층은 적어도 2년 연속 0°C 이하의 상태를 유지하는 토양 또는 암석층이며, 그 위에는 계절에 따라 얼고 녹는 활동층이 존재한다. 기온과 지중 온도가 상승하면 활동층이 두꺼워지고 영구동토층 내부의 얼음이 녹으면서 토양의 부피와 강도가 변화한다. 얼음 함량이 높은 영구동토층이 녹으면 지표가 불규칙하게 내려앉아 열카르스트 지형이 형성될 수 있다. 이러한 변화는 건물, 도로, 활주로, 파이프라인과 상하수도 시설의 안정성을 낮추며 산사태와 해안 침식을 심화할 수 있다. 따라서 영구동토층 융해는 자연환경의 변화와 기반 시설의 위험이 결합된 복합적인 재난 문제로 이해해야 한다. 영구동토층에는 오랜 기간 동안 분해되지 않은 식물과 동물의 유기물이 저장되어 있다. 영구동토층이 녹으면 미생물 활동이 증가하면서 저장된 유기물이 분해되고, 이산화탄소와 메탄과 같은 온실가스가 대기로 방출될 수 있다. 북극의 동결 토양과 영구동토층에는 매우 많은 양의 탄소가 저장되어 있으며, 융해로 인한 온실가스 방출은 추가적인 온난화에 기여할 수 있다.

이 과정은 기온 상승이 영구동토층 융해를 촉진하고, 영구동토층에서 방출된 온실가스가 다시 기온을 상승시키는 양의 되먹임(피드백)으로 설명할 수 있다. 다만 식생 증가에 의한 탄소 흡수, 토양 수분, 배수 조건, 화재와 미생물 활동 등이 함께 작용하므로 모든 지역에서 같은 양과 형태의 온실가스가 방출되는 것은 아니다. 영구동토층 탄소 되먹임의 크기와 속도에는 여전히 불확실성이 존재한다. '영구동토층 위기 대응 보고서'는 문제의 원인과 영향, 미래 위험 및 대응을 구조화하는 활동이다. 학생들은 자료를 바탕으로 현재의 변화와 미래의 가능성을 구분하고, 기후변화의 원인을 줄이는 완화와 이미 발생하고 있는 변화에 대응하는 적응을 함께 제안한다. 이를 통해 극지의 환경 변화가 지역적 현상인 동시에 전 지구적 책임과 협력이 필요한 문제임을 이해하도록 한다.

6. 지도상 유의점

첫째, 영구동토층을 항상 얼음으로만 이루어진 지층으로 설명하지 않도록 한다. 영구동토층은 토양, 암석, 퇴적물과 얼음이 다양한 비율로 구성된 지층이며, 얼음 함량에 따라 융해 이후의 지반 변화 정도가 달라진다.
둘째, 모든 영구동토층이 동시에 또는 동일한 속도로 녹는 것처럼 설명하지 않도록 주의한다. 융해 속도와 영향은 지역의 기온, 적설, 식생, 토양의 얼음 함량, 수분 조건, 지형 등에 따라 달라진다.
셋째, 영구동토층 융해와 온실가스 방출의 관계를 지나치게 단순화하지 않도록 한다. 융해된 토양의 수분과 산소 조건에 따라 이산화탄소와 메탄의 방출 양상이 달라질 수 있으며, 미래 방출량에는 불확실성이 존재한다.
넷째, 개인의 생활 실천만을 기후변화의 해결책으로 강조하지 않도록 한다. 개인적 실천과 함께 에너지·산업 정책, 기반시설 개선, 국제적 온실가스 감축과 지역사회 지원 등 구조적 대응이 필요함을 함께 다룬다.

7. 참고문헌

- Lewkowicz, A. G., & Way, R. G. (2019). Extremes of summer climate trigger thousands of thermokarst landslides in a High Arctic environment. Nature Communications, 10, Article 1329.
- Obu, J. (2021). How much of the Earth's surface is underlain by permafrost? Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 126(5), Article e2021JF006123. https://doi.org/10.1029/2021JF006123
- 이은주. (2021). 북극의 거대 싱크홀 발생 등 영구동토층의 급격한 해빙이 지구 환경에 미치는 영향. 극지이슈리포트, 2021(2021), 44-55.

극지에서 온 SOS, 영구동토층의 위기

주제	영구동토층의 위기 (기후변화)
무엇을 배울까요?	① 영구동토층과 활동층의 특징을 설명할 수 있다. ② 영구동토층 변화 자료를 바탕으로 완화와 적응 방안을 제안할 수 있다.

1 영구동토층은 무엇일까?

활동층, 영구동토층, 여름, 겨울, 2년, 0℃

- 영구동토층은 최소 _____년 이상 연속으로 온도가 _____이하로 유지되는 토양 또는 암석층이다.

- 영구동토층의 위쪽에는 계절에 따라 얼고 녹는 _____이 있다.
- 이 층은 일반적으로 _____ 에는 녹고, _____ 에는 다시 언다.

2 영구동토층 단면 그리기

➢ 다음 공간에 지표, 활동층, 영구동토층, 얼음, 토양을 표시하여 단면을 그려 봅시다.

3 영구동토층 융해의 연쇄적 영향

➢ 영구동토층의 융해는 지구시스템과 인간 사회에 어떤 연쇄적인 영향을 일으킬까?
➢ 인과 관계를 자유롭게 표현해보자.

<조건>

실선 : 자료에서 확인한 관계

점선 : 자료를 근거로 예상한 관계

별표(★): 피해가 가장 크다고 판단한 영향

물음표(?) : 추가 자료가 필요한 관계

되먹임(피드백) 표시(↻) : 결과가 다시 원인을 강화하는 관계

4 영구동토층 위기 대응 방안과 적응 방안

➤ 영구동토층의 위기에 대응할 수 있는 국가적 차원의 방안 및 정책을 제안해 봅시다.

➤ 다른 모둠의 대응 방안을 아래 기준으로 평가해 봅시다.

기준	평가 질문	평가
과학적 타당성	타당한 자료와 과학적 원리에 근거하였는가?	상 / 중 / 하
실현 가능성	실제 지역에서 수행할 수 있는가?	상 / 중 / 하
효과성	위험과 피해를 줄일 수 있는가?	상 / 중 / 하
형평성	피해에 취약한 사람들을 충분히 고려했는가?	상 / 중 / 하
지속가능성	장기적으로 유지할 수 있는가?	상 / 중 / 하