

세화여고 환경지킴이 화학조 보고서 - 최유정,정연서,최서영,정민서,정현주,홍민경

〈 제설제가 가로수의 미치는 영향 〉

- 탐구동기 및 목적

겨울철 눈이 내린 후, 도로의 결빙을 방지하기 위해 염화칼슘이 제설제로 널리 사용되고 있다. 그러나 염화칼슘을 통한 제설은 작업 후 가로수 주변 토양이나 나뭇가지가 흰색으로 변하거나, 봄이 되어도 잎이 제대로 피지 않는 등의 이상 현상을 유발한다. 관련 자료를 조사한 결과, 국립산림과학연구원의 연구에 따르면 염화칼슘은 토양의 알칼리화를 유발하여 식물의 영양분 및 수분 흡수에 장애를 일으킨다고 쓰여있고 특히 도시 환경에서 가로수는 미세먼지 저감과 온도 조절 등 다양한 역할을 하고 있기 때문에 도시생태계보존에 있어 중요한 가로수의 건강을 해치는 요인 중 하나인 제설제(염화칼슘)를 정확하게 규명하고 대처방안을 찾는 것이 중요하다. 이에 따라 본 보고서에서는 '염화칼슘이 식물에 미치는 영향'을 과학적으로 탐구하기 위해 약 한달간의 실험을 통해 염화칼슘을 지속적으로 접촉한 식물과 그렇지 않은 식물을 대조하여 장기적인 염화칼슘 사용이 식물에게 미치는 영향, 염화칼슘과 식물생장사이의 상관관계를 탐구하고 대체방안을 탐구하는것을 목적으로 한다.

- 실험 내용

제설제가 가로수에 미치는 영향을 파악하기 위해 식물에 제설제로 많이 사용되는 염화칼슘을 뿌려 비교하는 실험을 진행했다. 실험은 7/21부터 8/18일까지 총 29일간 진행하였으며, 제설제 투여를 조작변인으로 두고 실험을 하였다.

[사용한 도구와 재료]

- 느티나무 두 그루
- 제설제(염화 칼슘) - 주 2회, 회당 20g씩
- 물 - 주 2회
- pH 측정기
- 줄자, 저울

[관찰 내용]

-나뭇잎 변색 정도- 눈으로 관찰 + 사진

-줄기의 두께 - 눈으로 관찰 + 사진

-토양 산성도- pH 측정기로 측정

[실험 절차]

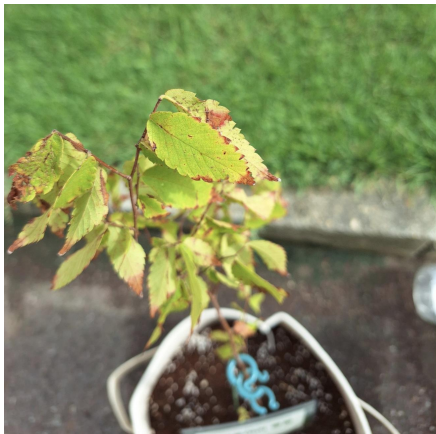
1. 2개의 화분에 비슷한 크기인 느티나무 2그루를 각각 심는다.
2. 2개의 묘목에 같은 양의 물을 주 2회 (월.목) 준다. (휴의 표면이 촉촉할 정도로, 비가 많이 온 경우는 추가적으로 물을 주지 않았음)

3. 그 중 한 그루에는 제설제를 20g씩 주 2회(화, 금) 뿌려준다.
4. 묘목과 토양의 변화(나뭇잎 변색, 토양 산성도, 줄기 생장 등)를 일주일에 5일 관찰한다.
5. 실험 종료 후, 전체적인 결과를 기록하여 분석한다.

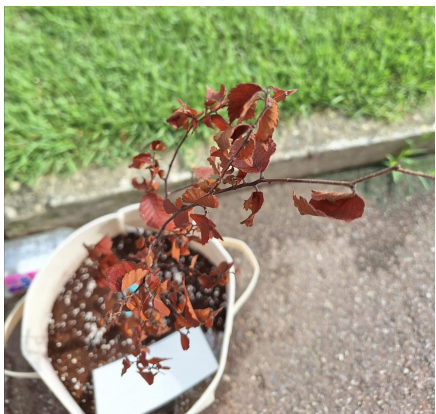
[실험 결과]



옆 사진은 실험을 하며 찍은 사진이다. 왼쪽은 염화칼슘을 뿌리지 않은 나무, 오른쪽은 염화칼슘을 뿌린 나무이다. 사진에서도 보이듯이, 왼쪽에 비해 오른쪽이 비정상적으로 갈변된 것을 볼 수 있다. 이는 염화칼슘이 나무의 갈변에 영향을 준다는 것을 보여준다.



위 사진은 왼쪽 나무(염화칼슘을 뿌리지 않은 나무)를 가까이에서 찍은 사진이다. 살짝 건조해지긴 하였으나, 29일 전과 비교하였을 때 묘목의 줄기의 두께나 잎이 크게 변하지 않았다. 오히려 물을 주고 키우며 나무의 잎이 더 많이 생기고 조금 커졌다. 토양의 산성도는 pH 6.8~7로 중성 상태였다.



위 사진은 오른쪽 나무(염화칼슘을 뿌린 나무)를 가까이에서 찍은 사진이다. 사진에서 보듯이 방금 전 사진의 왼쪽 나무에 비해 갈변된 것이 더 자세하게 보인다. 묘목의 줄기는 두께가 얇아지고, 왼쪽 나무에 비해 상태가 매우 악화되었다. 토양의 산성도는 pH 7~7.5로 염기성, 즉 알칼리화가 되었다.

결론적으로, 제설제를 뿌린 식물이 제설제를 뿌리지 않은 식물보다 더 상태가 악화되었다. 두 나무의 차이는 제설제이므로, 이 상태가 발생한 이유는 제설제의 주성분인 염화칼슘으로 분석할 수 있다.

- 과학적 원리

그럼 이 상태가 발생하는 이유가 염화칼슘이라면, 어떤 원리로 발생하는 것일까? 겨울철 도로 안전을 위해 널리 사용되는 제설제는 주로 염화칼슘(CaCl_2)이나 염화나트륨(NaCl)과 같은 염물질로 이루어져 있다. 그러나 이러한 제설제가 토양에 축적되면 식물에 '염 스트레스(salt stress)'를 일으켜 생육에 악영향을 준다.

1) 세포탈수 : 제설제가 토양에 녹아들면 토양 용액의 염분 농도가 높아진다. 이때 뿌리 세포는 삼투현상에 의해 세포 내부의 물을 잃게 되는데, 이를 세포 탈수(cell dehydration)라고 한다.

앞서 말한 '세포탈수'란 삼투현상과 관련이 있다. 삼투현상이란 물이 농도가 낮은 쪽에서 높은 쪽으로 이동하려는 성질이다. 뿌리 세포 안은 보통 염 농도가 낮기 때문에, 세포 내로 물이 들어와야 정상적으로 세포 팽압이 유지된다. 그러나, 제설제를 뿌림으로써 토양에 고농도의 염류가 쌓이면, 토양 용액의 삼투압이 뿌리 세포보다 더 커져서, 물이 오히려 세포 밖으로 빠져나가거나 유입이 어려워지게 된다. 이로 인해 식물은 탈수 스트레스를 받게 된다. 탈수 스트레스는 몸 속의 물이 부족해서 겪는 생리적, 화학적 스트레스를 말한다. 이를 겪게 되면 식물이 잎의 기공을 닫아 광합성이 줄고, 세포가 쭈그러들면서 시들게 된다.

따라서, 세포가 물을 잃으면 원형질 분리가 일어나고, 기공이 닫혀 광합성이 제한된다. 이는 이후의 여러 연쇄적인 변화를 촉발하는 것이다.

2) 광합성 장애와 에너지 불균형 : 세포 탈수로 기공이 닫히면 CO_2 흡수가 감소한다. 그러나 여전히 도달하는 빛은 광합성 과정에서 물을 분해하고 ATP와 NADPH(산화효소 복합체)라는 에너지를 만드는 빛반응이 일어나며 부산물로 산소와 전자가 나온다. 이 에너지는 이산화탄소를 포도당과 같은 유기물로 고정하는 과정인 암반응에 사용되지만, 이산화탄소가 흡수되지 않으면 전자가 사용되지 못하고 쌓이며 정상 경로를 벗어나 산소 분자로 튀어들어간다. 그 결과, 엽록체 내에서 활성산소(ROS)가 다량 생성된다.

3) 활성산소(ROS)의 폭증과 세포 손상 : ROS는 O_2^- (슈퍼옥사이드)($\text{O}_2 + e^- \rightarrow \text{O}_2^-$), H_2O_2 (과산화수소),

$\text{OH}^\cdot$ (하이드록실 라디칼) 등 반응성이 큰 산소 분자를 포함한다. 이들이 과도하게 축적되면 단백질을 변성시키고,

세포막의 지질을 산화하여 세포막의 투과성을 무너뜨린다. 또한 DNA 손상까지 유발하며 세포 분열 및 유전자 발현에 장애가 생기는 등, 식물 세포의 생리적 기능을 크게 저하시킨다.

4) 엽록체 손상과 잎 색 변화 : 특히 ROS는 엽록체 내부의 엽록소를 파괴하는데, 이는 초록색을 잃게 하는 직접적인 원인이다. 엽록소가 손상되면 남아 있던 카로티노이드(노란색 색소)만 드러나 잎이 노랗게 변하고, 심한 경우 갈색으로 고사한다. 또한 엽록체 막이 파괴되면서 광합성 자체가 불가능해지고, 식물은 에너지 생산을 멈추게 된다.

결론적으로, 제설제는 토양의 염분 농도를 높여 식물에 염 스트레스를 유발한다. 이 과정에서 세포 탈수가 일어나고, 기공이 닫히며 CO₂ 흡수가 줄어든다. 그 결과 엽록체에는 과잉 에너지가 축적되고, ROS가 폭증하여 세포막과 엽록소가 손상된다. 이러한 연쇄 반응은 잎의 색 변화를 거쳐 결국 갈색 고사 현상으로 이어진다.

따라서 제설제가 단순히 잎을 말려 죽이는 것이 아니라, 세포 수준의 탈수, 활성산소 증가, 엽록체 손상, 색 변화라는 과정을 통해 식물을 서서히 약화시키는 것임을 알 수 있다.

- 해결방안

겨울철 안전한 도로 주행을 위해 제설제 사용은 불가피하다. 그러나 본 실험 결과와 기존 연구에서 확인된 바와 같이, 염화칼슘(CaCl₂)과 같은 염화물계 제설제는 식물 생육에 직접적인 피해를 주는데, 염분이 식물 체내로 축적되면 영양 불균형과 세포 독성이 발생하고, 이는 변색·고사·성장 정지 등으로 이어진다. 특히 도로변 가로수와 인근 농작물은 반복적인 제설제 노출로 인해 지속적인 생태계 피해를 입게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 학생 개인이 할 수 있는 실천적 대응과 지자체 차원의 정책적 방안을 종합적으로 제시할 필요가 있다.

***실천적 대응(학생 개인이 할 수 있는 활동)**

1) 가로수 및 화단 세척 활동

제설제 살포 후 눈이 녹으면서 토양 속으로 염분이 스며드는 것을 방지하기 위해, 학생들이 직접 가로수 주변을 물로 세척할 수 있다. 이러한 작은 활동은 뿌리로 흡수되는 염분을 줄여 식물 고사를 예방하는 효과가 있다.

2) 보호대 및 차단재 설치

학교나 지역사회 봉사활동의 일환으로 나무 뿌리 주변에 짚, 톱밥, 거름망, 친환경 매트 등을 덮어두면 제설제가 직접 닿는 것을 방지할 수 있다. 이는 염분 피해를 예방하는 단순하면서도 효과적인 방법이다.

3) 환경 교육과 캠페인 전개

단순한 인식 제고를 넘어, 캠페인을 통해 주민들이 염화칼슘 대신 친환경 제설제를 선택하도록 유도하는 것이 중요하다. 예를 들어, 일부 지역 주민들이 캠페인 참여 후 주택 앞 제설에 '모래, 톱밥, 친환경 제설제'를 사용한 사례가 있다. 이러한 변화는 도로변 가로수의 피해를 줄이는 직접적인 효과를 가져온다. 따라서 학생들이 과학 발표회, 환경

동아리 활동에서 본 실험 결과를 발표하고, 캠페인을 통해 구체적인 대체 방법을 제시할 때 해결방안으로서 의미가 커진다.

***정책적 방안(지자체 차원의 해결방안)**

1] 친환경 제설제 도입 확대

현재 사용 중인 CaCl_2 와 NaCl 의 사용량을 줄이고, CMA(Calcium Magnesium Acetate)나 음식을 쓰레기 발효 기반 CMO(Calcium Magnesium Salt of Organic acids) 등 친환경 제설제를 단계적으로 확대해야 한다.

* CMA: 초산염 기반 제설제로, 금속 부식을 줄이고 식물 피해가 적은 특성을 가진.

* CMO: 음식을 쓰레기 발효에서 추출된 유기산 제설제로, 저렴한 비용으로 생산 가능하며 토양에서 영양원 역할을 할 수 있음.

2] 정기적인 도로 세척 및 관리 체계 구축

제설제 살포 이후 일정 기간마다 도로변을 세척하고, 가로수 주변의 토양을 교체하거나 복원하는 정책을 시행해야 한다. 이는 염분이 장기간 토양에 축적되는 것을 예방하고, 뿌리 손상을 최소화하는 효과가 있다.

3] 가로수 보호 시설 설치

도로변 가로수와 화단에 제설제가 직접 닿지 않도록 차단막, 보호 울타리, 배수 시설 등을 설치해야 한다. 특히 고속도로와 주요 간선도로 주변에는 이러한 물리적 차단 장치가 효과적으로 작동할 수 있다.

4] 연구 및 시범사업 지원

음식을 쓰레기, 농산물 폐기물 등을 활용한 유기산 제설제(CMP, CMO) 개발을 적극적으로 지원해야 한다. 또한 일부 구간을 시범사업 구역으로 지정하여 친환경 제설제를 먼저 적용해 보고, 그 효과를 데이터로 검증한 뒤 점진적으로 확대하는 방식이 필요하다.

5] 주민 참여형 프로그램 운영

단순한 제설 프로그램이 아니라, 주민이 참여하여 자신의 주택 앞 제설제 사용 방식을 친환경 제설제로 바꾸도록 유도해야 한다. 예를 들어, 일부 지자체에서는 '주민에게 CMA 시범 보급'을 시행해 주택가 앞 식재 피해가 크게 줄어든 사례가 있다. 학생과 주민이 함께 '도로변 가로수 보호 캠페인'을 진행하면 단순한 인식 개선을 넘어 실제 행동 변화와 피해 완화로 이어진다.

본 실험을 통해 염화칼슘 제설제가 식물의 변색과 생육 장애를 일으킨다는 사실을 명확히 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 학생 차원에서는 작은 실천과 캠페인을 통해 주민의 행동 변화를 이끌어내고, 지자체 차원에서는

정책적·제도적 노력을 통해 친환경 제설제로의 전환과 환경 보전을 추진해야 한다. 특히 환경 교육과 주민 참여는 단순한 인식 개선을 넘어, 실제로 제설제 사용 방식을 바꾸고 피해를 줄이는 구체적 행동으로 이어질 때 효과적인 해결방안이 된다. 이러한 다층적 접근은 단순히 제설제 문제 해결을 넘어, 지역 사회의 지속 가능한 환경 관리와 미래 세대를 위한 생태계 보호로 이어질 것이다.