



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

나문재(*Suaeda glauca*) 고사체  
주변의 토양, 식생, 계 활동의  
공간적 변이 :  
소래습지생태공원을 사례로

2021년 8월

서울대학교 대학원

지리학과

이 한 섭

나문재(*Suaeda glauca*) 고사체 주변의  
토양, 식생, 계 활동의 공간적 변이 :  
소래습지생태공원을 사례로

지도교수 김 대 현

이 논문을 문학석사 학위논문으로 제출함  
2021년 8월

서울대학교 대학원  
지리학과  
이 한 섭

이한섭의 석사 학위논문을 인준함  
2021년 8월

위 원 장 박 수 진

부위원장 박 정 재

위 원 김 대 현

## 국문 초록

염습지 생태계는 해수의 지배적인 영향, 빠른 물질 순환 주기 및 서식 생물들의 짧은 생활사 등이 특징인 생태계로, 다른 생태계에 비해 구성 요소들은 단순한 편이지만 그것들이 외부의 영향을 받아 변화를 겪는 빈도는 더 높은 편이다. 그렇기 때문에 생태계 경관 또한 빠르게 변화하는 특징을 가지고 있는데, 그런 가운데에도 해당 생태계에 서식하는 식생이나 개 등의 생활사보다 오래 남아있는 어떤 구성 요소가 있다면 그로 인해 주변 경관에 차이가 발생할 수 있을 것으로 예상되었다.

국내 염습지 생태계에 자생하는 식물 중 중 나문재의 경우 다 자란 성체의 높이가 1.5m까지 자라기도 하며, 자라는 과정에서 줄기는 목질화되어 1년생 초본임에도 그것이 죽은 이후에 바로 분해되어 사라지지 않고 원래의 자리에 남아있다는 특징이 있다. 이렇게 고사체가 된 개체 중 일부는 수년간에 걸쳐 같은 자리에 있는 것이 확인되었는데, 그 경우 주변 식생이나 개 등의 동물들의 생활사보다 긴 시간에 걸쳐 염습지 생태계에 있는 것이므로 존재하는 동안 주변의 생태계 경관에 어떤 차이가 나타날 것으로 볼 수 있었다. 따라서 나문재 개체가 죽기 이전에 그것과 영향을 주고받던 토양, 다른 식생, 개의 활동이 그것이 고사체가 된 이후에 그 주변에서 어떤 분포를 보이는지를 조사하였다.

조사 결과 나문재 고사체가 존재하는 곳은 그 주변부에 비해 식생 피도가 낮고, 개 활동의 흔적은 더 많이 관찰되었으며, 여러 토양 성질 또한 고사체로부터의 거리에 따라 유의미한 차이를 보였다. 이러한 결과는 나문재 고사체가 생명으로서의 기능을 잃었더라도 물리적 영향은 어느 정도 유지하고 있다는 것을 보여주며, 이것이 고사체가 존재하는 지점과 나지와의 생태적 경관의 차이로 이어진다는 원인이 된다고도 볼 수 있었다. 그러므로 본 연구는 향후 염습지 생태계 연구에 있어 식물 고사체가 높은 밀도로 존재할 경우 그 영향도 고려해볼 필요가 있음을 시사한다고 할 수 있다.

**주요어 :** 식물 고사체, 나문재, 식생 피도, 토양, 개

# 목 차

제 1 장 서론 .....	1
제 1 절 연구 배경 .....	1
제 2 절 연구 목적 .....	2
제 2 장 연구 동향 .....	7
제 1 절 과거에 발생한 사건이 이후의 생태계에 영향을 주는 사례 .....	8
제 2 절 염습지에서의 식생, 토양, 계 활동 사이의 관계 ..	9
제 3 장 연구 지역 및 연구 방법 .....	12
제 1 절 연구 지역 .....	12
1. 연구 지역 개관 .....	12
2. 연구 지역의 지형 .....	13
3. 연구 지역의 기후·기상 .....	14
4. 연구 지역의 식생 .....	15
제 2 절 현장 조사 및 실험실 분석 방법 .....	16
1. 연구지 설정 및 구획 .....	16
2. 고사체 위치 측량 및 조사 대상 고사체 선정 .....	17
3. 토양 시료 채취 및 물리·화학적 성질 조사 .....	17
4. 나문재 고사체 주변 염생식물 피도 조사 .....	22
5. 나문재 고사체 주변의 계 활동 조사 .....	22
제 3 절 자료 분석 방법 .....	23

제 4 장 연구 결과 .....	24
제 1 절 연구지 내의 나문재 고사체 분포 .....	24
제 2 절 고사체 분포 지점과 그 주변의 식생 피도 차이	26
제 3 절 고사체 분포 지점과 그 주변의 계 활동 차이 .....	27
제 4 절 고사체 분포 지점과 그 주변의 토양 성질 차이 .....	28
제 5 장 토의 .....	33
제 1 절 연구지 내의 나문재 고사체 분포 .....	33
제 2 절 나문재 고사체가 주변 식생 분포에 미치는 영향	35
제 3 절 나문재 고사체가 주변 계 활동에 미치는 영향 .....	36
제 4 절 나문재 고사체와 주변 토양 성질 .....	37
제 5 절 종합 .....	39
제 6 장 결론 .....	41
참고문헌 .....	43

## 표 목 차

[표 1] 연구 지역의 월별 기온·강수량 자료(1991~2020) .....	15
[표 2] 고사체 분포 지점과 그 주변의 식생 피도 및 차이 분석 .....	26
[표 3] 고사체 분포 지점과 주변 방향별 식생 피도 및 차이 분석 ..	26
[표 4] 고사체 분포 지점과 그 주변의 식생 피도 차와 고사체 크기 간 상관분석 .....	27
[표 5] 고사체 분포 지점과 그 주변의 계 활동 및 차이 분석 .....	27
[표 6] 고사체 분포 지점과 주변 방향별 계 구멍/탑 차이 및 분석 ..	27
[표 7] 고사체 분포 지점과 그 주변의 계 활동 차이와 고사체 크기 간 상관분석 .....	28
[표 8] 고사체 분포 지점과 주변 방향별 계 구멍/탑 차이 및 분석 ..	28

## 그림 목 차

[그림 1] 염습지의 나문재 개체와 나문재 고사체 .....	4
[그림 2] 살아있는 나문재 개체와 주변 생태계 구성 요소들과의 관계(좌) 및 나문재 고사체와 주변 생태계 구성 요소들과의 관계 모식도 .....	5
[그림 3] 연구 흐름도 .....	6
[그림 4] 연구 지역의 항공사진 및 드론 촬영 영상 .....	13
[그림 5] 연구 지역의 월별 평균 기온과 강수량(1991~2020) .....	14
[그림 6] 연구 대상지 격자형 구획 및 중심점 지도 .....	16
[그림 7] 고사체로부터의 거리에 따른 토양 샘플링 zone .....	17
[그림 8] 연구지 내의 나문재 고사체 분포도 .....	24
[그림 9] Ripley's K function으로 확인한 연구지 내 고사체 분포의 패턴	25
[그림 10] 고사체로부터의 거리에 따른 zone별 토양 성질(토양 유기물, 토양 수분,	

Na <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , K <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> ) .....	29
[그림 11] 고사체로부터의 거리에 따른 zone별 토양 성질(NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , pH, 전기 전도도) .....	30
[그림 12] zone별 토양 성질 kriging 결과 .....	31



# 제1장 서론

## 제1절 연구 배경

해안의 염습지 생태계는 조수에 의해 일정한 주기로 드나드는 해수의 영향을 강하게 받는 곳으로, 해수 유입으로 인해 염분 및 침수 스트레스가 높다는 특징이 있다. 또한 염습지 생태계는 해양 생태계와 육상 생태계가 만나는 지점에 자리하고 있어 두 시스템 간의 물질 및 에너지의 교환이 활발하게 일어나는 곳이며 폭풍 해일 등의 교란의 영향도 받기 때문에 생태계 경관이 상대적으로 단시간에 큰 폭으로 변화하는 역동적인 생태계이다(Adam, 1993). 이러한 특징으로 인해 국내 염습지 생태계를 구성하는 식생은 대체로 스트레스에 대한 내성이 강하고 생활사가 길지 않은 1년생 혹은 2년생 초본류가 주를 이루고 있다(심현보 등, 2009).

이처럼 염습지 생태계는 그를 구성하고 있는 생물적·비생물적 요소가 비교적 단순한 반면, 환경적 요인으로 인해 그 구성 요소들의 변화는 빈번하게 일어나는 특징이 있다. 이러한 특성으로 인해 어떤 염습지 생태계를 구성하고 있는 주요 요소들이 무엇인지를 파악하고 난 다음(Nixon & Oviatt, 1973), 요소들 사이에 나타나는 상호작용의 양상은 어떠한가(Bertness, 1991), 그 양상이 외부 환경 변화 등에 의해 어떻게 영향받는지에 대해 연구한 사례가 많다(Wang *et al.*, 2006).

그런데 이때 염습지에 나타나는 빈번한 변화로 인해 물질 순환 주기가 짧다는 것은 염습지 생태계 내에서 어떤 환경적 현상 또는 생명 현상이 다른 생태계에서보다 상대적으로 적은 시간 동안 지속되더라도 그 안에서 실질적인 영향을 가질 수 있다는 것을 의미한다. 다른 생태계의 경우 해당 생태계에 서식하는 주요 생물의 생활사를 여러 번 거치거나 지형 변화 등이 여러 차례 발생하는 데에는 오랜 시간이 걸릴 수 있지만, 염습지 생태계에서는 수년 내에도 그러한 변화가 일어날 수 있다. 따라서 염습지 생태계 내에서 발생한 어떤 현상의 지속 기간이 아주 길지 않더라도 그로 인해 생태계 경관에 차이가 나타날 가능성이 존재한다.

우리나라 염습지 생태계에 서식하는 일부 초본식물 가운데에는 생장기간 동안 그 줄기가 목질화되어 생활사를 마치고 꽃이나 잎과 같은 부분은 모두 떨어져 나가도 줄기와 뿌리는 그대로 그 자리에 몇 년씩 남아있는 경우가 있다. 국내 염습지에 자생하는 식물 종들은 대체로 1~2년생 식물이므로 이러한 식물의 고사체가 분해되지 않고 남아있는 지점 주변의 여러 생태계 구성 요소는 고사체가 존재하지 않는 나지와 비교해 다를 것으로 예상할 수 있다. 고사체의 존재로 인해 그 주변의 식물 분포나 동물 활동 및 모래의 이동, 토양 성질 분포 등의 양상 등에 실제로 차이가 나타난다면 그에 대한 분석을 통해 염습지 생태계 경관의 공간적 변이의 일부 양상에 대한 설명을 제시할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 염습지 생태계에 식물 고사체가 잔존함에 따라 주변의 생태계 구성 요소들에 실질적인 차이가 나타나는지를 확인하고, 실제로 그러한 차이가 나타났다면 그것이 어떤 의미를 가질 수 있는지에 대해 논해보고자 한다.

## 제2절 연구 목적

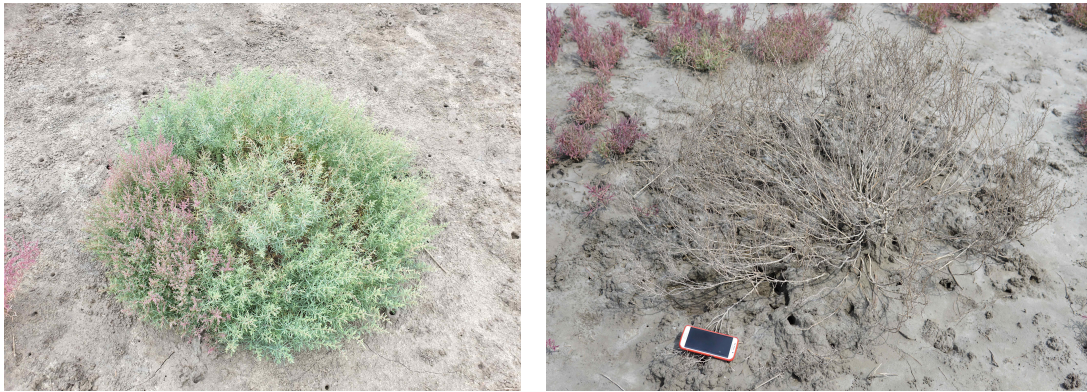
자연상의 생태계를 이루고 있는 구성 요소들이 어떤 공간적 분포를 보이며 그 원인은 무엇인지에 대한 많은 연구가 있어왔는데, 대체로는 각 요소의 분포를 설명함에 있어 각 요소 내부의 상호작용 또는 다른 요소와의 상호작용으로 인해 공간상의 분포가 결정되고 변화한다고 보았다. 식생 분포의 경우 시스템 내에 분포하는 종간 상호작용 또는 종 내부의 영향이 식생 분포에 영향을 주거나, 지형(Medina *et al.*, 2006), 토양(Van Breemen & Finzi, 1998) 등 환경적 요인의 영향으로 그 분포가 결정되기도 하고, 동물과의 상호작용(Strauss & Irwin, 2004)에 의해 그 분포가 영향받기도 한다는 기존 연구 결과가 있었다. 어떤 시스템 상에서의 토양 성질 역시 해당 시스템 내의 식물 또는 동물의 분포나 활동에 영향을 받기도 하며(Whitehead, 2000), 강수, 침수, 화재 등 다른 환경적 요인에

의해 그 분포가 결정되기도 한다. 마찬가지로 어떤 시스템 내에서 동물 활동의 공간적 분포 또한 다른 동물의 분포, 식생 분포, 토양 및 지형 등의 환경적 요인의 분포에 영향을 받는다는 것이 많은 선행연구를 통해 밝혀져 왔다.

이러한 연구들은 대체로 어느 한 시점에 생태계 상에 존재하는 요인들을 대상으로 하므로 해당 시점 이전에 발생한 사건의 영향이 이후에도 지속되거나, 이전에 존재했던 구성 요소가 시간이 지남에 따라 그 성질이 변하게 되는 경우 그로 인해 발생할 수 있는 생태계 구성 요소의 공간적 변이에 대해서 제대로 다루고 있는 경우는 많지 않다. 이와 관련하여 최근에는 생태계 상에 과거의 영향이 오랜 기간 남아있는 사례에 대한 연구는 다양한 생태계를 대상으로 진행되고 있다. 그러나 생물이 죽어 사체가 되는 것과 같이 어떤 생태계 구성 요소의 성질이나 상태가 변한 채로 생태계 상에 계속 존재하게 되는 경우에 대한 연구 사례는 여전히 드문 편이다. 앞서 언급한 생물이 비생물이 되는 경우 대체로 그 사체가 분해되는 속도가 빨라 그것이 주변 생태계 구성 요소에 어떤 영향을 줄 만큼 충분히 오래 남아있지 않기 때문에 연구의 대상이 되지 않는다고 볼 수 있다. 그러나 일부 국내 염습지에 자생하는 식물 종의 고사체는 그것이 형성된 이후에도 수년간 분해되지 않고 그 자리에서 형태를 유지하고 있다. 이 경우 그것이 고사체의 형태로 존재하는 기간이 주변 생물의 생활사나 비생물적 요소의 순환 주기보다 길다고 볼 수 있으므로 그 기간 동안 고사체 주변의 생태계 구성 요소 분포에 공간적 변이가 발생할 것으로 볼 수 있다.

우리나라 염습지에 자생하는 초본 식물 중 나문재속 식물들은 다 자란 성체의 높이가 50cm~1m 정도로 큰 편이며, 특히 그중에서도 나문재(*Suaeda glauca*)는 성체의 크기가 가장 큰 편에 해당한다. 나문재는 주로 서해안 염습지 일대에 자생하는 한해살이풀로, 아래 사진과 같이 원기둥 모양의 줄기로부터 옆으로 많은 가지가 뻗어 나가는 외형을 나타낸다. 다 자란 성체의 경우 높이가 1m 정도까지 자라며, 일부 큰 개체의 경우 높이가 1.5m에 달하기도 한다(심현보 외, 2017). 이처럼 크게 자란

성체의 경우 초본임에도 불구하고 그 줄기는 목질화되어 개체의 외형이 관목처럼 변하게 된다. 이 경우 개체가 죽은 뒤에도 일반적인 초본 식물처럼 바로 물리적, 화학적으로 분해되어 없어지지 않고 고사체의 형태로 같은 자리에 수년간 더 남아있다는 특징이 있다.

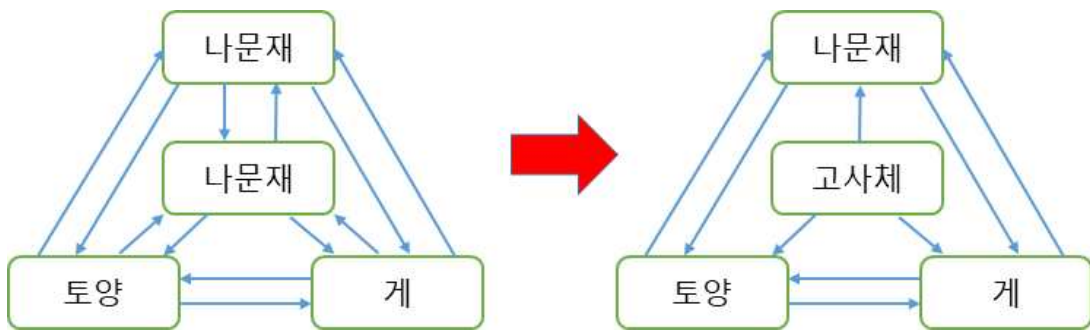


<그림 1> 염습지의 나문재 개체(좌)와 나문재 고사체(우)

우리나라 염습지에 자생하는 초본들이 대부분 1년생에서 2년생이므로 염생식물이 죽은 뒤 사라지지 않고 고사체의 형태로 그 자리에 수년 동안 남아있게 되면 이후 그 주변의 식생, 토양, 동물 활동 등의 분포는 나 지에서의 분포와는 다른 양상을 보일 것으로 예상할 수 있다. 식물 고사체의 경우 더 이상 생명 활동을 하지 않으므로 그로부터 비롯되는 토양 및 동물들과의 상호작용은 없을 것이지만, 식물의 외관이 그대로 유지된 다면 식물의 물리적 영향력은 여전히 가지고 있다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 개체가 죽은 이후에도 고사체가 오랫동안 그 자리에 남아 있는 나문재를 대상으로 고사체가 존재할 때 주변 생태계 구성 요소의 분포가 고사체가 없는 곳과 실제로 다른지를 확인하고, 그것이 생태계 경관 변화로 이어질 수 있는지에 대해서도 알아보고자 한다.

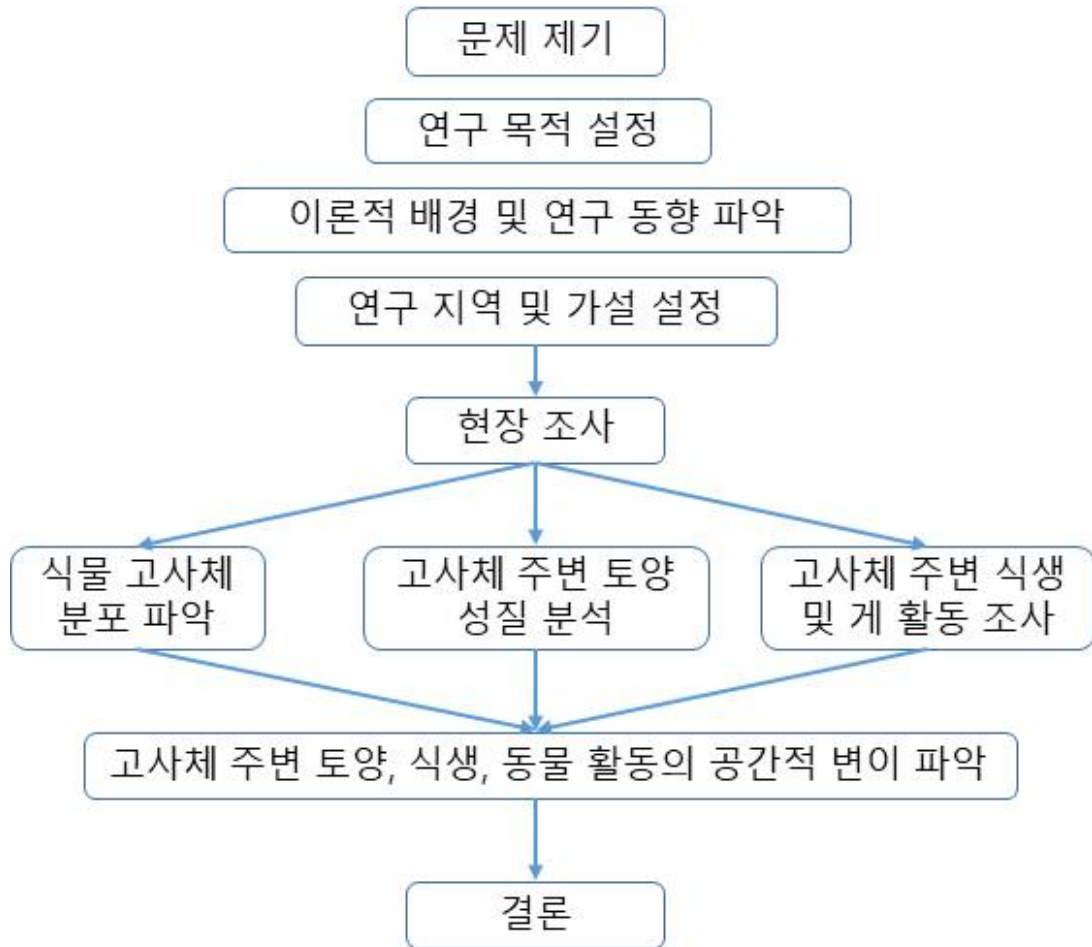
나문재 고사체가 잔존함에 따라 그 주변에서 분포가 달라질 것으로 예상되는 생태계 구성 요소로는 조사 시점에서의 식생, 토양 및 염습지에 서식하는 계 활동의 분포를 선정하였다. 식생과 계의 경우는 염습지 생태계 상에서 분포가 명확히 드러나는 편이고 각각 염습지 생태계를 구성 하는 대표적인 생물적 요소라고 할 수 있으며, 토양은 개별 성질의 공간

적 변이가 식생 및 계와의 상호작용과 관련이 있으므로 이들을 연구 대상 요소로 선정하였다. 이때 식생, 토양 성질 및 계의 활동과 살아있는 식물 개체는 서로 영향을 주고받으며 상호작용하는 관계이지만, 식물이 고사체가 될 경우 그것과 상호작용을 하기보다는 그것이 차지하고 있는 공간 등으로 인해 분포에 제한이 발생하는 등 관계가 일방적으로 변할 수 있을 것으로 보았다.



<그림 2> 살아있는 나문재 개체와 주변 생태계 구성 요소들과의 관계(좌) 및 나문재 고사체와 주변 생태계 구성 요소들과의 관계 모식도

위의 그림은 나문재 개체가 살아있을 때와 고사체로 변했을 때 각각 다른 식생, 토양, 계 활동과의 예상되는 관계를 모식도로 나타낸 것이다. 그러면서 나문재 고사체의 존재로 인한 주변 생태계 구성 요소들의 공간적 변이에 대한 가설로는 먼저 식생의 경우 나문재 고사체가 공간을 차지하고 있기 때문에 그와 인접한 곳은 그에서 좀 떨어진 곳보다 식생이 적게 분포할 것이라고 예상했다. 다음으로 계 활동의 경우 나문재 고사체가 계에게 피난처 및 유기물 제공 등의 역할을 할 수 있어 고사체 분포 지점에서 그 주변보다 계 활동 정도가 더 높게 나타날 것이라고 예상했다. 마지막으로 토양 성분의 경우 앞선 가설이 맞다면 고사체 분포 지점 가까이에서 계의 활동이 더 활발하여 그로부터 비롯되는 유기물 및 무기물이 더 많을 것이고, 시간이 지나면서 고사체가 분해되어 그로부터 비롯되는 영양분도 있을 것으로 생각되어 토양 성분의 분포 역시 고사체 분포 지점과 그 주변에서 다르게 나타날 것으로 예상하였다. 이를 검증하기 위해 다음의 연구 흐름도와 같은 과정으로 연구를 진행하였다.



<그림 3> 연구 흐름도

## 제2장 연구 동향

본 연구는 염습지 구성 요소 중의 하나로 다른 구성 요소들과 계속해서 영향을 주고받던 식물 개체가 고사체가 된 이후에도 소멸되지 않고 남아있으면서 생태계 경관 변화에 관여할 것이라는 가정에서 식물 고사체 주변의 식생, 토양, 계 활동 분포를 조사하고자 하였다. 이때 나문재 고사체가 상대적으로 오랜 기간 기존 생태계에 그대로 남아있으면서 다른 생태계 구성 요소에 어떤 영향을 준다면 이는 또 하나의 생태계 구성 요소가 된다고 볼 수 있다. 그러나 식물 고사체와 주변의 다른 생태계 구성 요소 간의 관계나 상호작용에 대한 연구는 제대로 되어있지 않은 편이다. 대신에 본 장에서는 먼저 염습지 생태계 상의 식물이 고사체가 되기 전 생명 활동을 하는 상태에서 주변의 다른 식생, 토양 및 계와 어떤 상호작용을 하는지에 대해서 알아보하고자 한다.

또한 나문재 개체가 죽어서 고사체가 되는 것은 고사체가 존재하는 시점에서는 과거의 사건인데 이후의 생태계에 영향을 주고 있는 것으로도 볼 수 있다. 과거에 발생한 사건이나 존재했던 것이 이후의 생태계에 영향을 주는 것에 대해서는 Perry(1994)가 이전 생태계의 상태로부터 비롯되는 영향, 특히 교란 발생 이전의 생태계의 상태에서 교란 상태 이후에도 지속되는 것을 생태학적 유산 효과(ecological legacy effect)라고 정의한 이래로 2000년대 넘어서는 다양한 생태계를 대상으로 연구되고 있다. 본 장에서는 이와 같이 여러 생태계에서 발생한 과거의 사건이 이후에도 남아있으면서 영향을 주는 사례에 대한 연구를 종합해보고, 연구의 후반부에 나문재 고사체가 염습지 생태계 상에서 생태학적 유산 효과와 같은 과거의 영향으로 간주될 수 있는지에 대해 고찰해보고자 한다.

## 제1절 염습지에서의 식생, 토양, 계 활동 사이의 관계

염습지 생태계는 앞서 언급한 바와 같이 해수의 영향이 지배적인 곳으로, 염분과 침수 등의 영향으로 서식 가능한 식생이 제한적이고 해수의 움직임으로 인한 물질 교환 속도가 빠르며, 일반적인 육상 생태계에 비해 서식하는 동물의 종 수도 적은 편이다. 그러므로 염습지 생태계를 구성하는 요소는 다른 생태계에 비해 단순한 편이지만, 각 구성 요소들 간의 상호작용 관계를 연구하는 것은 보다 용이하다고 할 수 있어 그에 관한 연구가 지속적으로 보고되어 왔다.

먼저 염습지 식생과 토양 성질 사이의 영향에 대한 연구로 토양의 염분 농도 구배에 따라 염습지 식생이 대상분포를 보이고(Pennings & Callaway, 1992; Silvestri *et al.*, 2005), 토양 염분 농도로 인해 식생의 신규 발생이 제한되는 것(Shumway & Bertness, 1992) 등이 보고된 바 있으며, Bertness와 Ellison은 이로 인해 토양 성질이 염습지 식생의 분포 패턴을 결정하는 요인으로 작용하게 된다고 주장하였다. 또한 식생이 토양에 뿌리를 내리고 서식하게 됨으로써 주변 토양의 유기물 함량이 높아지고(Valiela *et al.*, 1985), 토양 미생물 군집에 영향을 줘(Chaudhary *et al.*, 2018) 토양 성질을 변하게 된다는 연구도 있었다.

다음으로 식생 분포와 계 활동 사이의 영향에 대해서 계가 토양에 굴을 파는 활동이 염습지 식생의 생산성을 증대시킨다는 연구가 보고된 바 있으며(Smith *et al.*, 1991), 계의 염생식물 섭식 및 염생식물 뿌리의 계 굴 지지 역할 등으로 인해 염생식물의 분포가 염습지 상의 계의 분포에도 영향을 준다는 연구 사례도 있었다(Nomann & Pennings, 1998; Qin *et al.*, 2010). 다음으로 계의 활동이 토양 성질에 미치는 영향에 대해서 Wang 등(2010)은 계가 염습지 토양에서 굴을 파는 등의 활동이 bioturbation 작용을 일으켜 토양 내 탄소와 질소의 이동을 촉진한다고 하였고, Xin 등(2009)은 계의 염습지에서의 활동이 토양 공극수의 이동을 유도하여 토양 공극률을 높인다고 보고하였다. 또한 Bang 등(2019)은 앞서 언급한 계의 활동이 토양 성질에 미치는 영향에 더해 계의 굴파기 활동과 식생 분포의 영향이 합쳐져 토양 성질에 미치는 영향을 분석했



고, 그 결과 두 요인의 결합된 영향으로 염습지 내에서 토양 성질의 이질성이 나타난다고 보고하였다.

이를 종합해보면 염습지 생태계를 이루는 식생과 토양, 그리고 염습지에 서식하는 계의 활동은 서로 영향을 주고받으며 각각의 분포를 결정하는 요인으로 작용한다고 볼 수 있다. 이때 본 논문에서 연구 대상으로 선정한 염생식물 고사체는 비록 식물 개체가 죽은 이후 생리적 활동을 하지는 않으나 그 실체는 그 자리에 그대로 남아있으면서 기존 개체의 물리적 영향은 그대로 나타낼 것으로 볼 수 있다. 따라서 앞서 확인된 식생, 토양, 계 활동 사이의 상호작용 중에서 식물 개체의 물리적 존재로 인해 나타나는 것이나, 고사체의 존재로 인해 그 영향이 오래 보존되는 것의 경우 나뭇재 개체가 고사체가 된 이후에도 그 영향이 지속되는 것이 있을 것으로 예상할 수 있다.

## 제2절 과거에 발생한 사건이 이후의 생태계에 영향을 주는 사례

과거 어떤 시점에 생태계 내에 발생한 사건이 일정 시간이 지난 이후의 생태계에도 영향을 주는 사례는 대체로 과거의 사건이 규모가 컸거나 특정 요소에 대해 비가역에 가까운 변화를 일으켜 그 영향이 지속되는 경우가 많다. 따라서 과거에 발생한 대규모의 교란이 이후 생태계에 미치는 영향에 관한 연구가 보고되어왔다. 먼저 Gough 등(2007)은 산림에서 대규모의 벌목이나 산불의 발생 이후 해당 산림에서의 탄소 흡수량을 추적하였고, 그러한 교란의 발생은 이후 수십 년간 산림의 탄소 흡수에 영향을 준다고 보고하였다. 마찬가지로 Evans 등(2020)은 습지에서 가뭄 또는 홍수의 발생이 이후 오랜 기간 해당 생태계에서의 탄소 저장량에 영향을 준다고 하였다. 또한 연륜연대학 연구를 통해 과거 산림에서의 기상학적 교란 발생과 그 이후의 영향을 추적하여 산림의 식생 구조, 새 개체 발생, 바이오매스 축적 등에 대한 교란의 영향이 수십 년 이상 지속될 수 있다는 연구도 있었다(Pederson *et al.*, 2014; Trotsiuk *et al.*, 2016). 그밖에 Bowd 등(2021)은 대규모 산불이 발생한 이후 회복된 산림에서 다시 산불이 발생했을 때 그 산림이 다시 회복되는 속도는 이전의

대규모 산불이 발생한 시점으로부터 어느 정도 시간이 지난 후 다음 산불이 발생했는지에 영향을 받는다고도 했다.

다음으로 생태계 내에 존재하던 어떤 생물 개체 또는 군집이 죽거나 사라진 이후에 새로운 영향이 나타나거나 기존의 영향이 지속 또는 변형되는 사례에 관한 연구도 보고되어왔다. 먼저 기존 산림에 자생하지 않던 질소 고정 수종이 침입 또는 도입되었다가 이후에 일제히 제거된 이후에도 해당 산림의 토양 내 질소 분포에 영향을 준다는 연구가 있었다 (Von Holle *et al.*, 2013; Nsikani *et al.*, 2013). 또한 Grman 과 Suding(2010)은 외래종이 도입되고 해당 생태계의 토양 성질이 그들이 서식하기에 적합하게 변화하여 이후 해당 외래종이 제거되어도 변화된 토양의 특성은 그대로 남아 고유종의 재진입을 억제하는 영향을 낳는다고 주장하였다. Šamonil 등(2010)은 수목이 뿌리째 뽑히면서 하부의 토양이 드러나게 되면 해당 지점은 이후에 주변과는 다른 토양 형성 프로세스를 거친다고 하였으며, Mueller 등(2019)은 수목 개체의 고사는 그 주변에 서식하던 외생균근 군집에 영향을 주게 되고, 이는 이후 그 주변에 새 수목 개체가 진입하는 데에도 영향을 주게 된다고 보고하였다. Hastings 등(2007)과 Wohl(2021)은 비버가 만든 댐이 비버가 죽은 이후 기능이 쇠퇴하게 되면서 점차 목초지로 변해가는 것도 비버 치사의 영향이 이후 오랜 기간 해당 생태계에 영향을 주는 사례라고 언급하였다.

이에 더해 어떤 생태계에 인간의 활동이 개입되고 나면 그것이 사라진 이후에도 생태계에 대한 영향은 남아있다는 연구도 여러 차례 보고되어왔다. Martin 등(2011)은 미국 미시간 주의 한 호수를 대상으로 그 주변의 토지 이용 및 피복 이력을 조사하고 이후의 수질 변화를 추적한 결과 인간의 토지 이용은 그 시점이 한참 지난 이후에도 주변 수계의 수질에 상당한 영향을 주는 것으로 나타났다고 하였다. 수계에 대한 인간의 토지 이용의 영향은 이밖에도 호수의 부영양화(McTammany *et al.*, 2007), 어류 및 저서성 무척추동물의 생물다양성(Harding *et al.*, 1998), 퇴적물 순환 양상(Bain *et al.*, 2012) 등에 시·공간적으로 광범위하게 나타나는 것으로 보고되었다. 또한 산림에서도 인간의 토지 이용은 이용 당시의

직접적인 영향 이외에도 오랜 기간에 걸쳐 식생의 생물다양성(Foster *et al.*, 1998), 토양 성질(Fratterigo *et al.*, 2005), 산림 내 탄소 순환(Woodbury *et al.*, 2006) 등에 많은 영향을 준다고 보고된 바 있다.

## 제3장 연구 지역 및 연구 방법

### 제1절 연구 지역

#### 3-1-1. 연구 지역 개관

본 연구의 연구 지역이 속한 소래습지 생태공원은 인천광역시 남동구 논현동의 장수천과 신천이 합류하는 곳 일대에 조성되어 있으며 수리적 위치는 북위 37° 24' 08"~37° 25' 14", 동경 126° 44' 24"~126° 45' 14"에 해당한다. 소래습지 생태공원 일대는 일제 강점기인 1930년대에 염전이 조성되었던 곳이며 1996년 염전이 폐쇄될 때까지 계속해서 소금 생산의 역할을 하던 지역이었다. 수익성 저하로 염전이 폐쇄된 이후 시에서는 이곳에 공원을 조성하여 습지 생태계를 복원하고 이에 대해 시민들이 다양한 체험을 할 수 있는 공간으로 만들었다. 그리하여 1999년에 생태전시관과 관측소 및 각종 체험장을 갖춘 소래습지 생태공원이 개장되었고, 이후 습지 조성사업을 통해 담수습지, 기수습지, 염수습지가 차례로 나타나는 현재의 모습을 갖추게 되었다(곽남현, 2016).

소래습지 생태공원의 서쪽을 따라 흐르는 장수천, 동남쪽을 따라 흐르는 신천과 공원 사이에도 염습지가 발달해 있으며, 이 지역은 만조 시에 높아지는 해수에 의해 침수된다. 그러나 인근 소래포구 일대에 매립 사업이 진행되면서 해수 유입 통로가 좁아짐에 따라 해당 지역은 해수에 의해 침수되는 빈도가 점차 낮아지는 퇴행성 염습지가 되었다. 현재 이 염습지 구역은 한 달에 약 두 차례 정도 침수되는데, 이전과 비교해 해수의 영향이 낮아짐에 따라 구역 내 식생 분포와 종 구성에도 변화가 나타날 것으로 예상된다.

소래습지 생태공원 일대를 대상으로 이루어진 연구는 대체로 소래습지 주변의 식생에 관한 연구였으며, 그중 가장 먼저 보고된 것은 고미연(1986)의 연구로 이 연구는 소래습지 일대의 해홍나물 집단의 분포 패턴을 분석하고 이를 분석하기 위해 ordination 기법을 적용하였다. 이후 이

근접과 오계철(1989)은 소래 염전 부근의 간석지에서 수로변과 제방 부근의 칠면초 개체군 간의 형태적 차이를 비교하고, 해당 차이에 관여하는 요인을 파악하기 위해 두 장소의 토양 표본을 분석하였다. 정주영 등(2000)은 1999년 6월부터 이듬해 6월까지의 해당 지역에서의 식생 조사를 통해 자연 염습지와 폐염전에 서식하는 염생식물 종이 서로 유사함을 밝혔고, 염분에 대한 내성과 수분 스트레스 내성이 강한 해홍나물은 전 조사 지역에서 우점종으로 나타났다고 하였다. 이정희(2003)는 소래습지의 기수습지와 염습지의 환경적 차이에 따라 갈대 개체군의 형태와 유전형질이 어떻게 달라지는지를 비교하였다. 또한 류근환(2019)은 소래 지역의 염생식물 생육특성을 분석하여 이를 바탕으로 이후의 생태복원 방향에 대한 제언을 하였으며, 김영주(2019)는 소래습지의 변화하는 환경하에서 쇠퇴하고 있는 염생식물군락의 복원 방안에 대해 연구하였다.



<그림 4> 연구 지역의 항공사진(중간) 및 드론 촬영 영상(우)

### 3-1-2. 연구 지역의 지형

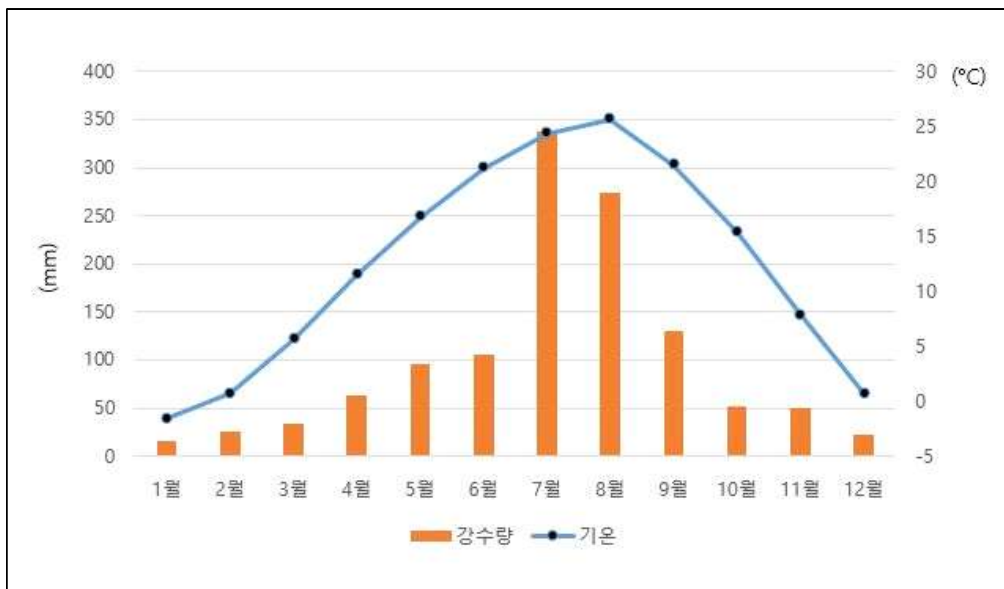
소래습지 생태공원은 장수천과 신천이 하구에서 만나는 지점 일대에 조성되어 있으며, 강으로부터 염습지에 이르는 갯골 지대는 경사도가 높은 편이나 갯골 안쪽의 염습지는 대체로 평탄한 지형을 나타낸다. 김영주(2019)에 의하면 소래습지 생태공원의 표고는 2~5m에 해당하는 면적이 전체의 84.2%에 해당하며, 공원 내부 면적의 약 80%는 경사도가 2°

미만인 평탄지로 나타났다. 이러한 지형적 특성은 만조 시에 갯골 너머로 해수가 차오르게 될 경우 그로 인해 침수된 염습지에서 낮은 경사도로 인해 배수가 활발히 진행되지 않아 상대적으로 오랜 시간 동안 해수가 머무르게 하는 요인이 된다. 이로 인해 해당 지역은 침수 빈도가 점차 감소하고 있음에도 염분 스트레스에 취약한 식생이 진입하기 어려운 염습지 식생의 모습을 유지하게 된다.

소래습지 생태공원 내 연구지에 해당하는 지역은 위와 같은 이 일대 염습지의 일반적 특징을 대부분 갖추고 있다. 하천과 염습지 사이에는 경사도가 높은 갯골이 존재하며, 갯골이 턱과 같은 형태를 띠고 있어 갯골의 최상단은 배후의 염습지보다 다소 고도가 높다. 갯골 안쪽의 염습지는 대체로 경사가 평탄하게 안쪽의 보행로까지 이어진다.

### 3-1-3. 연구 지역의 기후·기상

지난 1991년부터 2020년까지 연구 지역이 속한 인천광역시에는 연평균 기온 12.5°C, 연평균 강수량 1207.5mm를 기록하고 있다. 평균 연교차는 28.5°C로 큰 편이며, 강수량은 초여름부터 초가을에 해당하는 6~9월 사이에 전체 강수량의 약 70%에 해당하는 848.6mm가 기록되어 강수의 계절적 편차가 상당히 큰 것을 알 수 있다.



<그림 5> 연구 지역의 월별 평균 기온과 강수량(1991~2020)

	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	전체
기온	-1.5	0.7	5.6	11.5	16.8	21.3	24.4	25.6	21.5	15.3	7.9	0.7	12.5
강수량	15.9	25.1	33.8	63.5	96.3	106	337.7	274.6	130.3	51.1	50.8	22.3	1207.5

<표 1> 연구 지역의 월별 기온·강수량 자료(1991~2020)

자료 : 기상청 기상자료개방포털, 기온 : °C, 강수량 : mm

### 3-1-4. 연구 지역의 식생

소래습지 생태공원 일대의 식생은 그것이 분포하는 습지 주변 수계의 염도에 영향을 받아 나타난다. 공원 동쪽 신천으로부터의 유입수에 영향을 받는 지역은 수로로부터의 거리에 따라 해수 역류 시의 염분 유입 정도에 차이가 나므로 염수습지, 기수습지, 담수습지가 차례로 나타난다. 담수습지 주변의 육상식물 군락에는 버드나무(*Salix pierotii*), 락(*Imperata cylindrica*), 산조풀(*Calamagrostis epigeios*) 등이 나타나며, 기수습지 일대에는 갈대(*Phragmites australis*), 모새달(*Phacelurus latifolius*), 산조풀, 락 등이 주로 분포한다. 수로와 가까운 염수습지 주변에는 염생식물 식생이 나타나는데 해홍나물(*Suaeda maritima*), 칠면초(*Suaeda japonica*), 통통마디(*Salicornia europaea*) 등의 염생식물이 서식하고 있으며 갈대, 락, 산조풀, 갯개미취(*Aster tripolium*) 등도 함께 나타난다.

소래습지 생태공원 탐방로와 하천 사이의 염습지는 대체로 해홍나물, 나문재, 칠면초, 통통마디 등의 염생식물이 우점하고 있으며, 갈대나 모새달이 염생식물 주변으로 대상분포를 보이는 지점도 있다. 본 연구의 연구 대상 지역에 해당하는 곳은 해홍나물과 나문재가 우점하는 곳으로 두 종의 서식 범위 바로 밖에는 모새달이 대상분포하고 있다.

## 제2절 현장 조사 및 실험실 분석 방법

### 3-2-1. 연구지 설정 및 구획

소래습지 생태공원과 주변 하천 사이의 염습지 중 염생식물 고사체의 영향을 파악하기 용이한 지역을 선택하여 연구지로 설정하였다. 선정 지역은 소래습지 생태공원 북서쪽과 장수천 사이에 위치한 곳으로, 수리적 위치는 북위 37° 25' 05.35" ~ 37° 25' 08.00", 동경 126° 44' 27.00" ~ 126° 45' 29.50"에 이른다. 해당 지역 내에는 나문재가 우점하고 있으며, 주변 환경에 영향을 줄 것으로 예상되는 나문재 고사체를 쉽게 찾아볼 수 있다. 그뿐만 아니라 연구지 바로 바깥 모래밭이 대상분포하고 있는 곳 안쪽으로는 일부 해홍나물 이외에는 대부분 나문재만 서식하고 있어 식생 분포를 파악하는 데 있어 중간 상호작용의 영향이 적을 것으로 예상되었다. 연구 지역을 선정한 다음 해당 지역에서 드론(Phantom 4 Pro)을 통해 사진 측량을 하고, 이를 ArcGIS(Ver 10.5) 상에서 8×8m 격자형으로 구획하여 하나의 조사구로 만들었다. 그렇게 만들어진 조사구는 총 30개이며, 각 조사구 및 중심점의 위치는 다음 그림과 같다.



<그림 6> 연구 대상지 격자형 구획 및 중심점 지도



### 3-2-2. 고사체 위치 측량 및 조사 대상 고사체 선정

연구지 내의 나문재 고사체 분포를 파악하기 위해 RTK GPS(Trimble R2)를 이용해 연구지 내에 분포하는 모든 나문재 고사체의 위치 좌표를 구하였다. 그런 다음 나문재 고사체의 크기가 일정 정도 이상 되어야 주변 환경에 유의미한 영향을 줄 것으로 예측하여 전체 고사체 중 부피지수((고사체 지름(cm)<sup>2</sup> 또는 장축 길이 × 단축 길이)/4 × 고사체 높이)가 10000 이상인 것을 조사 대상 고사체로 선정하여 주변 식생 분포 및 개활도 등을 조사하였다. 또한 토양 시료 채취는 조사구별로 중심점에 가장 가까운 대상 고사체의 주변에서 실시하였다.

### 3-2-3. 토양 시료 채취 및 물리·화학적 성질 조사

#### 3-2-3-1. 조사구별 토양 시료 채취

앞서 연구지를 격자로 나누어 설정한 조사구별로 하나의 나문재 고사체를 선정하여 그 주변으로부터 거리를 두고 총 세 지점에서 토양 시료를 채취하였다. 먼저 대상 나문재 고사체는 조사구의 중심점으로부터 가까운 것 중 크기가 일정 정도 이상으로 커서 주변의 환경에 영향을 줄 수 있을 것으로 판단되는 것으로 선정하였다. 그런 다음 고사체로부터 거리가 0~30cm, 30cm~1m, 1m~2m의 영역을 각각 zone 1, 2, 3이라 설정하고 zone별로 하나의 토양 샘플을 채취했다. 총 30개의 조사구 중 13번 조사구의 경우 그 내부에 나문재 고사체가 없어 토양 시료를 채취하지 않았고 나머지 조사구에서 세 개씩 총 87개의 토양 시료를 채취하였다.

#### 나문재 고사체



0~30cm (zone1)	30~100cm (zone2)	100~200cm (zone3)
-------------------	---------------------	----------------------

<그림 7> 나문재 고사체로부터의 거리에 따른 토양 샘플링 zone

### 3-2-3-2. 토양의 물리적 성질 조사

#### 3-2-3-2-1. 수분 함량

토양을 기반으로 살아가는 식물과 미생물의 경우 생명 활동에 필요한 수분을 토양 공극수로부터 얻기 때문에 토양의 수분 함량은 식물과 미생물의 생장에 상당히 중요한 역할을 한다(Passioura, 1991). 본 연구에서는 전체 토양 시료의 중량 가운데 수분의 중량이 어느 정도인지를 측정하는 중량 측정법을 통해 수분 함량을 측정하였다. 이를 위해 습윤 시료 20g을 시료용 도가니에 넣고 24시간 동안 105°C에서 건조시킨 다음 건조된 토양 시료의 무게를 측정하여 증발된 수분 중량의 비율을 구하였다.

### 3-2-3-3. 토양의 화학적 성질 조사

#### 3-2-3-3-1. 토양 pH

토양 pH는 토양의 산성도를 나타내는 척도로 pH에 따라 토양 내 미생물의 활성이나 이온의 용해도 및 식물의 이온 흡수도 등이 달라지기 때문에 토양을 기반으로 한 식물의 생장에 중요한 역할을 한다(Robson, 2012). pH에 대한 생물학적 반응은 종별로 다르게 나타나므로 식물 종에 따라 생장에 적합한 적정 pH 범위가 달라지기 때문에 토양 pH를 파악하는 것은 식물 분포 연구에서 주요하게 고려되는 토양 변수이다(Thomas, 1996). 본 연구에서 토양 pH를 측정한 방법은 다음과 같다.

1. 건조를 완료한 토양 시료 5g을 50ml conical tube에 넣고 증류수 25ml를 첨가한다.
2. Conical tube를 shaker로 30분간 진탕한 다음 1시간 동안 방치한다.
3. pH 4.0과 7.0, 10.0 표준 용액으로 보정한 다목적 측정기(pH/DO/CD meter, YK-2001PHA)로 토양 용액의 pH를 측정하여 기록한다.

#### 3-2-3-3-2. 전기 전도도

토양에 염이 어느 정도 포함되어 있는가에 따라 토양 수분의 삼투 포텐셜이 달라지며, 이에 따라 식물의 토양 수분 이용 가능성이 결정된다.

토양에 염이 많이 용해되어 있을수록 이온 농도가 높아져 전기 전도도가 증가하기 때문에 본 연구에서는 전기 전도도 측정을 통해 토양에 염이 녹아있는 정도를 추정하였다. 토양 전기 전도도의 측정 방법은 다목적 측정기의 설정을 전기 전도도 측정 모드로 바꾸어 pH 측정과 동일한 방식으로 진행하였다.

#### 3-2-3-3-3. 유기물 함량

토양 유기물은 토양을 기반으로 살아가는 생물들에게 영양분과 유기산을 공급하는 역할을 하므로 유기물이 풍부한 토양은 생물의 생장에 도움을 준다(Hargrove & Thomas, 1981). 또한 생명 활동이 활발할수록 그로부터 비롯되는 유기물의 양이 많아지므로 유기물 함량의 측정을 통해 해당 지점에서 서식 생물의 존재 또는 생물 서식 적합성을 예측해볼 수 있다. 본 연구에서는 토양의 유기물 함량 측정에 토양 내의 유기물을 고온에서 모두 태워버리는 강열감량법을 사용하였다. 이를 위해 20g의 토양을 105°C에서 24시간 동안 건조시켜 무게를 측정하고, 이후 다시 600°C에서 6시간 동안 가열한 다음 1시간 동안 시킨 후 무게를 측정하여 유기물 제거 이전의 무게와 비교하였다.

#### 3-2-3-3-4. 질산염 이온과 암모늄 이온 농도

질소는 단백질을 구성하는 원소 중 하나이므로 식물의 생장에 반드시 필요한 요소인데, 식물은 대기 중에 기체 상태로 존재하는 질소를 바로 이용할 수 없고 질소 고정이나 유기물 분해 등을 통해 생산된 암모늄 이온이나 질산 이온 형태만을 흡수할 수 있다(Tilman, 1986). 일반적으로 염습지 생태계에서는 콩과 식물에 의한 질소 고정 작용이 거의 일어나지 않고 식물이나 미생물 사체 등의 분해를 통해서만 암모늄 이온과 질산 이온이 공급되기 때문에 질소가 염습지 식물 생장의 제한 요소로 작용하는 경우가 많다. 본 연구에서 질산염 이온과 암모늄 이온 농도를 측정할 절차는 다음과 같다.

1. 105°C에서 건조하고 2mm 체로 거른 토양 시료 8g을 50ml conical

tube에 넣고 2M KCL 용액 40ml를 첨가한다.

2. 용액이 담긴 튜브를 shaker에서 70rpm으로 30분간 진탕한다.

3. 진탕한 용액을 원심분리기(Centrifuge, Vision VS-5500N)에서 3000rpm으로 7분간 원심분리한다.

4. Whatman No.42 여과지를 통해 상등액을 걸러 새 튜브에 받는다.

이와 같이 전처리 작업이 끝나면 질산염 이온과 암모늄 이온 검출을 위해 서로 다른 시약을 첨가하는 중간 과정을 거치는데 먼저 질산염 이온 검출을 위한 중간 과정은 다음과 같다.

5-1. 용액이 담긴 튜브를 45°C의 항온수조에서 30분간 가열하고 Phenate buffer(Phenol + Sodium hydroxide) 0.4ml와 reducing solution (Hydrazine sulfate solution + Cupric sulfate solution) 0.2ml를 넣고 vortex한다.

6-1. 튜브를 다시 45°C의 항온수조에 30분간 둔 다음 Sulfanilamide + NED (N-(1-Naphthyl)ethylenediamine dihydrochloride) 0.4ml를 넣고 vortex한다.

또한 암모늄 이온 검출을 위한 중간 과정은 다음과 같다.

5-2. 용액에 PE solution(Phenol-Ethanol) 0.4ml, Potassium ferrocyanide solution 0.4ml, Oxidizing solution(Alkaline citrate solution + Sodium hypochlorite) 1ml를 첨가하고 vortex한다.

6-2. 용액을 투명한 유리 바이알에 넣고 365nm 파장의 자외선을 45분간 조사한다.

마지막으로 가시광선 분광광도계에서 시료의 흡광도를 측정하고 이를 통해 용액 내 질산염 이온과 암모늄 이온의 농도를 구한다.

7. 앞선 과정에서 얻은 용액을 투명 큐벳에 1ml 담고 이를 가시광선 분광광도계(Visible spectrophotometer, Ultrospec 2100 pro)에 넣은 뒤 질산염 이온의 경우 543nm, 암모늄 이온의 경우 640nm의 파장에서 흡광도를 측정한다.

### 3-2-3-3-5. 인산 이온 농도

인은 DNA, RNA, ATP, 세포막 인지질 등의 구성 원소로 생명체의 형성과 생장에 반드시 필요한 원소이다. 생물이 이용 가능한 인은 인산염 형태의 무기 수용성 인인데, 육상 생태계로부터 이러한 형태로 유입되는 인의 양은 제한적이므로 염습지 생태계에서 인이 식물 생장의 제한 요소로 작용하는 경우가 많다(Schlesinger, 2005). 본 연구에서 인산 이온 농도를 측정하는 과정은 다음과 같다.

1. 105°C에서 건조하고 2mm 체로 거른 토양 시료 5.7g을 50ml conical tube에 넣은 후 Bray II solution(NH<sub>4</sub>F + HCl) 40ml를 첨가한다.
2. 용액이 담긴 튜브를 shaker에서 70rpm으로 2분간 진탕한다.
3. 진탕한 용액을 원심분리기에서 3000rpm으로 5분간 원심분리한다.
4. Whatman No.42 여과지를 통해 상등액을 걸러 새 튜브에 받는다.
5. 용액에 MA solution(Ammonium molybdate + Antimony Potassium tartrate + sulfuric acid) 1ml, AA solution(Ascorbic acid + Ethanol) 0.1ml를 첨가하고 vortex한다.
6. 용액이 담긴 튜브를 45°C의 항온수조에서 30분간 가열한다.
7. 용액을 투명한 큐벳에 담아 가시광선 분광광도계에서 675nm의 파장으로 흡광도를 측정한다.

### 3-2-3-3-6. 치환성 양이온 농도

치환성 양이온이란 토양 입자 표면의 음전하로 인해 흡착되어 있는 양이온으로, 토양 용액 중의 다른 양이온과 치환될 수 있다(Thomas, 1983). K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup> 등의 주요 치환성 양이온은 식물의 생장에 필요한 무기 영양소로 기능하므로 앞서 언급한 다른 토양 성분 및 성질과 마찬가지로 식물 생장의 적합성을 판단하는 지표가 될 수 있다. 먼저 K<sup>+</sup>은 생물의 세포 내액의 주요 성분으로 세포의 삼투압을 유지하는 데 중요한 역할을 하며, 식물체 내에서 신진대사, 기공의 개폐 조절, 광합성 및 단백질 합성 등에 관여한다. Ca<sup>2+</sup>은 K<sup>+</sup>과 더불어 식물의 신진대사 및 기공 개폐에 관여하며, 세포막과 세포벽을 구성하는 성분 중의 하

나이기도 하다.  $Mg^{2+}$ 은 식물의 엽록체를 구성하는 성분이며 광합성 효소의 보조인자로 작용하기도 한다. 또한 세포벽을 이루는 구성 요소이며, 식물 내에서 탄수화물을 수송하는 역할도 수행하므로 식물이 토양에서 충분한 양을 공급받지 못할 경우 결핍 현상이 나타나기도 한다(Barbour *et al.*, 1987). 본 연구에서는 주요 치환성 양이온이라 할 수 있는  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ 의 농도를 측정했으며, 이온 농도 측정 과정은 다음과 같다.

1.  $105^{\circ}C$ 에서 건조하고 2mm 체로 거른 토양 시료 4g을 50ml conical tube에 넣은 후 1N Ammonium acetate 수용액을 Acetic acid로 pH 7로 맞춘 다음 튜브에 첨가한다.
2. 용액이 담긴 튜브를 shaker에서 70rpm으로 60분간 진탕한다.
3. 진탕한 용액을 원심분리기에서 3000rpm으로 7분간 원심분리한다.
4. Whatman No.42 여과지를 통해 상등액을 걸러 새 튜브에 받는다.
5. 앞선 과정에서 얻은 용액을 원자흡광광도계(Atomic absorption spectrometer, Varian AA240FS)에 주입하여 불꽃반응을 통해 흡광도를 조사한다.

#### 3-2-4. 나문재 고사체 주변 염생식물의 피도 조사

나문재 고사체가 존재함에 따라 그 주변의 식생 분포가 영향을 받을 것으로 예상되었기 때문에 조사 대상 고사체로 선정된 개체들이 분포하는 지점과 그 주변에서의 염생식물 피도를 조사하였다. 조사 대상 나문재 고사체는 전체 연구지 내에서 90개를 선정하였으며, 식물 피도는 방형구 조사법으로  $1 \times 1m$  방형구 내의 식물 피도를 나문재 고사체가 있는 지점과 그로부터 동·서·남·북쪽으로 1m씩 떨어진 지점에서 측정하였다.

#### 3-2-5. 나문재 고사체 주변의 계 활동 조사

본 연구의 조사 대상지에서 활발히 활동하는 염습지 동물로는 농게(*Uca arcuata*)와 갈게(*Helice tridens tientsinensis*)가 있으며, 이들은 염습지에서 서식지를 만들기 위해 구멍을 파고 구멍을 팔 때 뭉쳐놓은 토

양 알갱이를 구멍 주변에 쌓아 탑을 만든다. 따라서 게 구멍과 게 탑은 염습지에서의 게의 활동을 정량화할 수 있는 지표로 볼 수 있어 조간대에서의 게 풍부도를 조사하는 지표로 활용되기도 한다(Warren, 1990). 본 연구에서는 조사 대상 고사체 분포 지점과 그 주변에서 게의 활동이 어느 정도로 나타나는지 파악하기 위해 1×1m 방형구 내에서 게 구멍과 게 탑이 각각 몇 개씩 나타나는지를 조사하였다.

### 제3절 자료 분석 방법

전체 연구지 상에 분포하고 있는 나문재가 2019년과 2020년 두 번의 조사 시점에서 어떤 분포 양상을 보이고 있는지를 파악하기 위해 각 시점의 점 분포 자료에 대해 Ripley's K function을 활용하여 분포 패턴을 분석하였다(Ripley, 1976). 다음으로 한 해의 나문재 고사체의 분포와 이전 해의 고사체의 분포 사이에 어떤 패턴이 나타나는지 확인하기 위해서 이변수 Ripley's K function을 실행하여 두 시점의 고사체 분포를 비교 분석하였다.

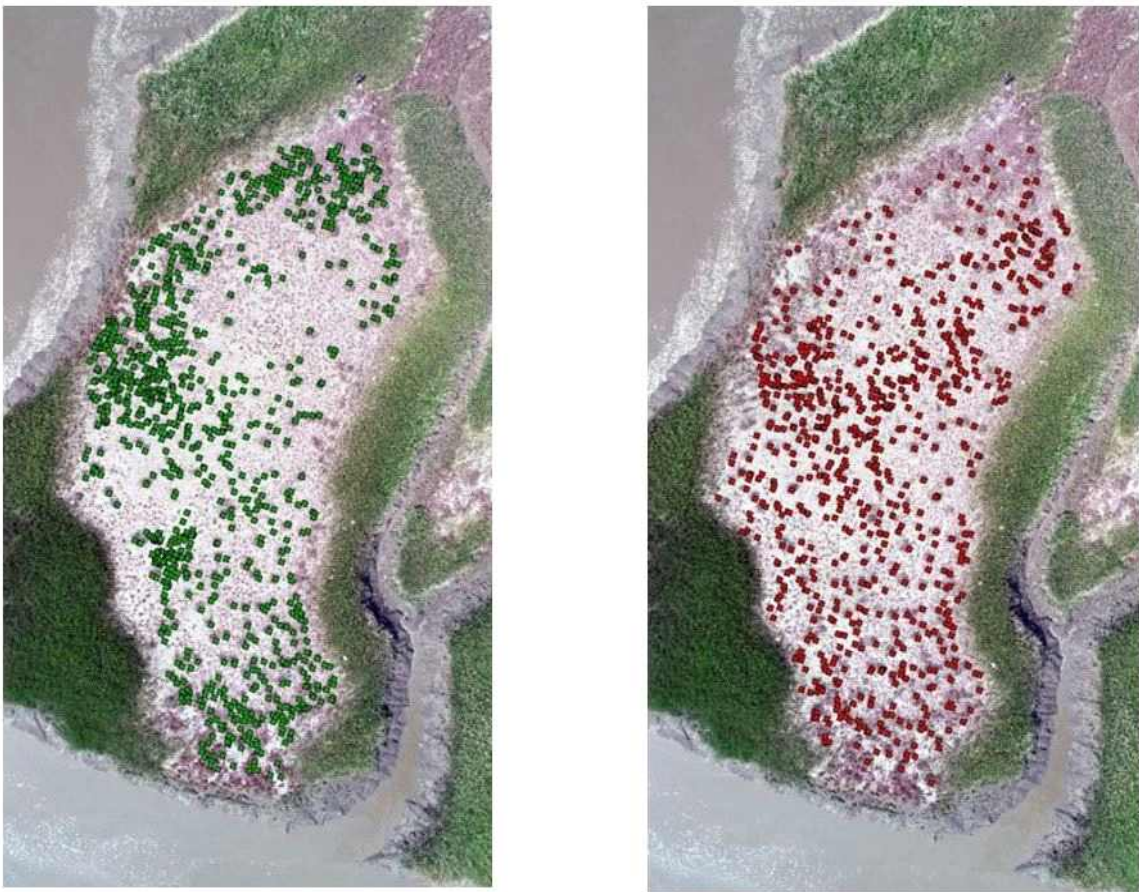
다음으로 고사체 분포 지점과 그로부터 거리가 더 떨어진 주변 지역의 게 구멍, 게 탑, 식생 피도에 유의미한 차이가 있는지 파악하기 위해서 두 집단 간 t-test를 실시하여 평균 비교를 했다. 고사체 주변 지역의 전체적인 평균 이외에 고사체로부터의 방향에 따른 차이가 있는지를 파악하기 위해서는 고사체 분포 지점과 고사체의 동·서·남·북쪽의 측정값을 가지고 분산분석을 실행하였으며, 분산분석에서 유의미한 차이가 확인된 경우 Kruskal-Wallis 검정을 통해 사후 분석을 실행하였다.

나문재 고사체의 크기가 클수록 주변의 식생 피도와 게 활동 정도에 큰 영향을 주는지 확인하기 위해서는 고사체의 크기와 식생 피도 차이 및 게 활동 지표의 차이를 상관분석을 통해 분석하였다. 또한 고사체로부터의 거리를 나타내는 토양 샘플 zone에 따라 여러 토양 성질의 측정값이 차이 나는지 파악하기 위해서도 분산분석을 실행하였으며, 유의미한 차이가 나타날 경우 Kruskal-Wallis 검정으로 사후 분석을 진행하였다.

## 제4장 연구 결과

### 제1절 연구지 내의 나문재 고사체 분포

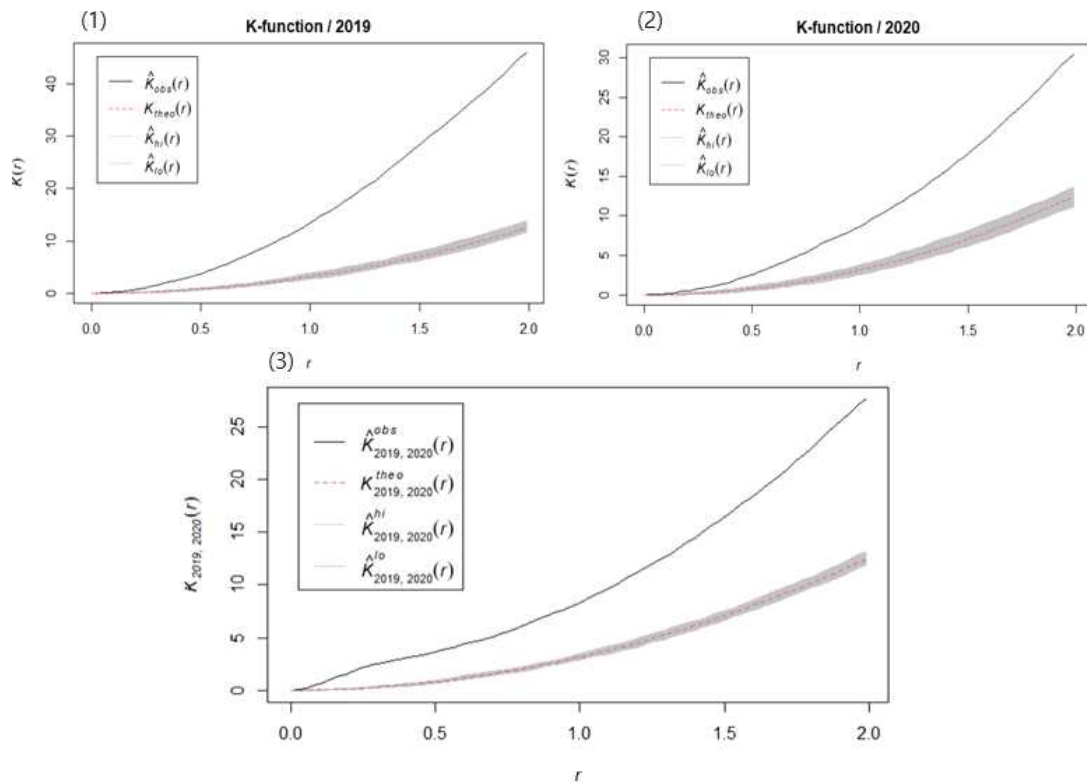
연구지 내 나문재 고사체 주변의 토양, 당년도 식생, 계 활동의 분포를 살펴보기 이전에 먼저 연구지 전체에 존재하는 고사체의 분포에 어떤 패턴이 나타나는지를 파악하고자 했다. 이를 위해 2019년과 2020년 2개년에 걸쳐 연구지 범위 내에 남아있는 나문재 고사체의 위치를 전수조사하였다. 그 결과 연구지 내의 총 나문재 고사체 개수는 2019년에 1006개, 2020년에 813개가 확인되었으며, 연도별 분포는 아래 그림과 같다.



<그림 8> 연구지 내의 나문재 고사체 분포도, 2019년(좌), 2020년(우)



이때 두 시점에 모두 같은 위치에서 발견된 개체는 약 300여개로 2019년 전체 고사체 중 30% 정도가 이듬해까지 남은 것으로 확인되었다. 이 개체들은 최소 2년 이상 고사체인 상태로 염습지 상에 존재한 것으로 볼 수 있으며, 첫해에 조사한 고사체 중 크기가 큰 것들이 다음 해까지 더 남아있는 경향이 있었다.



<그림 9> Ripley's K function으로 확인한 연구지 내 고사체 분포의 패턴,  
 (1) 2019년 고사체의 K function, (2) 2020년 고사체의 K function,  
 (3) 2019년 고사체 분포 지점과 2020년 고사체 분포 지점의 K function

다음으로 이러한 고사체들이 연구지 상에서 어떤 분포를 보이고 있는지를 파악하기 위해 전체 고사체를 대상으로 Ripley's K function을 사용하여 그 분포 양상을 분석하였다. 그 결과 2019년의 고사체는 연구지 상에서 거리에 상관없이 모여서 분포하는 양상을 보였으며, 2020년의 고사체 또한 거리에 상관없이 모여서 분포하는 것으로 나타났다. 또한

2019년과 2020년의 고사체 분포 지점을 비교하기 위해 이변수 Ripley's K function으로 패턴을 분석한 결과 두 조사 시점의 고사체 분포는 거리에 상관없이 균집을 이루는 분포로 나타났다.

## 제2절 고사체 분포 지점과 그 주변의 식생 피도 차이

나문재 고사체가 분포하는 지점과 그 주변에 식생이 분포하는 정도에 차이가 있는지 알아보기 위해 방형구를 이용해 식생 피도를 조사한 결과 고사체가 위치한 지점의 식생 피도는 37%, 그 주변의 식생 피도는 46%로 나타났다. 주변 지역의 식생 피도를 조사한 방위별로 나누어 살펴봤을 때도 고사체 주변 동·서·남·북쪽의 식생 피도보다 나문재 고사체 분포 지점의 식생 피도가 유의미하게 낮게 나타났다.

	고사체 분포 지점	고사체 주변부
식생 피도(%)	37.06	46
t-test p-value	0.0001	

<표 2> 고사체 분포 지점과 그 주변의 식생 피도 및 차이 분석

	고사체 지점	고사체 동쪽	고사체 서쪽	고사체 남쪽	고사체 북쪽
식생 피도(%)	37.06	48.17	43.11	44.28	48.44
Kruskal-Wallis	0.001 / 고사체 분포 지점이 낮음				

<표 3> 고사체 분포 지점과 주변 방향별 식생 피도 및 차이 분석

또한 나문재 고사체의 크기에 따라 고사체 분포 지점과 그 주변의 식생 피도에 더 큰 차이가 나타나는지를 확인하기 위해 고사체 분포 지점과 그 주변 식생 피도의 차이값을 피도차라 정의하고 피도차와 나문재 고사체의 크기와의 상관계수를 구한 결과는 아래와 같다.

	고사체 높이	고사체 면적지수	고사체 부피지수
피도차	0.2855	0.2283	0.2789
p-value	0.006	0.03	0.008

<표 4> 고사체 분포 지점과 그 주변의 식생 피도 차와 고사체 크기 간 상관분석  
 ※ 면적지수 : (고사체의 반지름의 제곱 또는 장축×단축)/4; 부피지수 : 면적지수×높이  
 ※ 피도차 : 고사체 주변 지역의 식생 피도 - 고사체 분포 지점의 피도

### 제3절 고사체 분포 지점과 그 주변의 개 활동 차이

다음으로 나문재 고사체가 분포하는 지점과 그 주변에 나타나는 개의 활동 정도에 차이가 있는지 알아보기 위해 방형구 내의 개 구멍 개수와 개 탑 개수를 조사한 결과 고사체 분포 지점에는 개 구멍이 28.24개, 개 탑이 11.72개 발견되었으며, 그 주변에서는 개 구멍 25.67개, 개 탑 10.67개가 발견되었다. 이때 주변 조사 지점을 방위별로 나누어 살펴보면 고사체가 분포하고 있는 지점에서가 그 주변 모든 방향에서보다 개 구멍과 개 탑이 더 많이 발견되었다.

	고사체 분포 지점	고사체 주변
개 구멍 개수	28.24	25.67
t-test p-value	0.029	
개 탑 개수	11.72	10.67
t-test p-value	0.011	

<표 5> 고사체 분포 지점과 그 주변의 개 활동 및 차이 분석

	고사체 지점	고사체 동쪽	고사체 서쪽	고사체 남쪽	고사체 북쪽
개 구멍 개수	28.24	25.63	25.03	25.37	26.66
Kruskal-Wallis	0.001 / 고사체 분포 지점에 더 많음				
개 탑 개수	11.72	10.92	9.89	10.6	11.29
Kruskal-Wallis	0.001 / 고사체 분포 지점에 더 많음				

<표 6> 고사체 분포 지점과 주변 방향별 개 구멍/탑 차이 및 분석

또한 나문재 고사체 크기에 따라 분포 지점과 그 주변의 계 활동 정도에 차이가 나타나는지를 확인하기 위해 분포 지점과 주변의 계 활동 및 계 탑 수의 차이와 나문재 고사체 크기와 상관분석을 시도한 결과는 아래 표와 같다. 그러나 계 구멍 및 계 탑 수의 차이와 고사체 크기 간에는 유의미한 상관관계가 나타나지는 않았다.

	고사체 높이	고사체 면적지수	고사체 부피지수
계 구멍 차이	0.071	0.159	0.137
p-value	0.507	0.134	0.197
계 탑 차이	-0.149	0.11	0.055
p-value	0.164	0.303	0.607

<표 7> 고사체 분포 지점과 그 주변의 계 활동 차이와 고사체 크기 간 상관분석

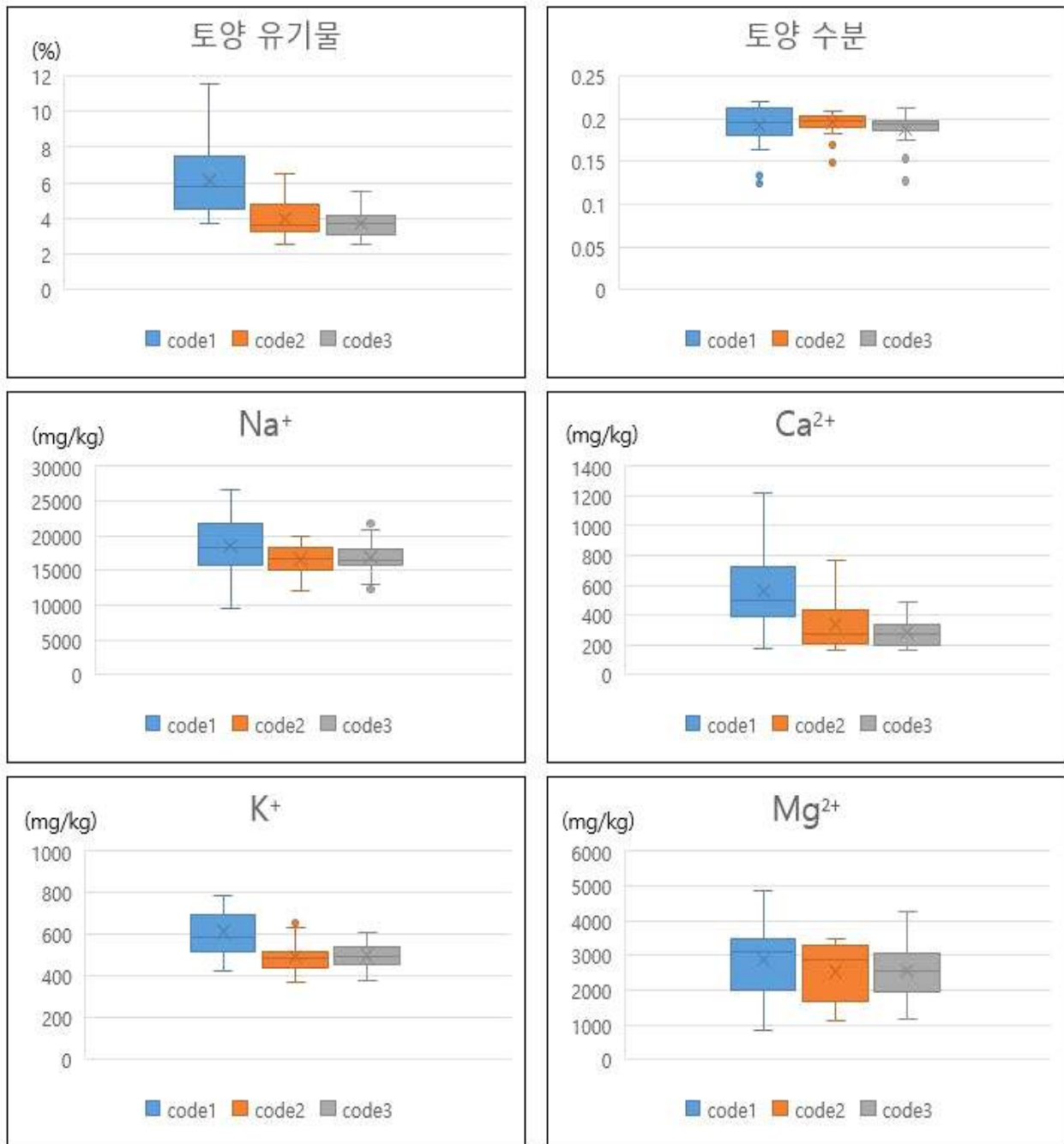
#### 제4절 고사체 분포 지점과 그 주변의 토양 성질 차이

연구지를 8×8m 크기의 조사구 30개로 구획한 다음 각 조사구의 중심에서 가장 가까운 고사체로부터 거리를 달리하여 토양 시료를 채취하였다. 그런 다음 각 시료에 대해 유기물 및 수분 함량, 치환성 양이온 농도, 질산/인산 이온 농도, pH 및 전기 전도도 등의 토양 성질을 조사한 다음 각 성질이 고사체로부터의 거리에 따라 차이 나는지 분산분석을 통해 확인하고, 차이가 있다고 나오는 경우 사후분석을 실시하여 어느 그룹의 값이 다른지를 분석하였다.

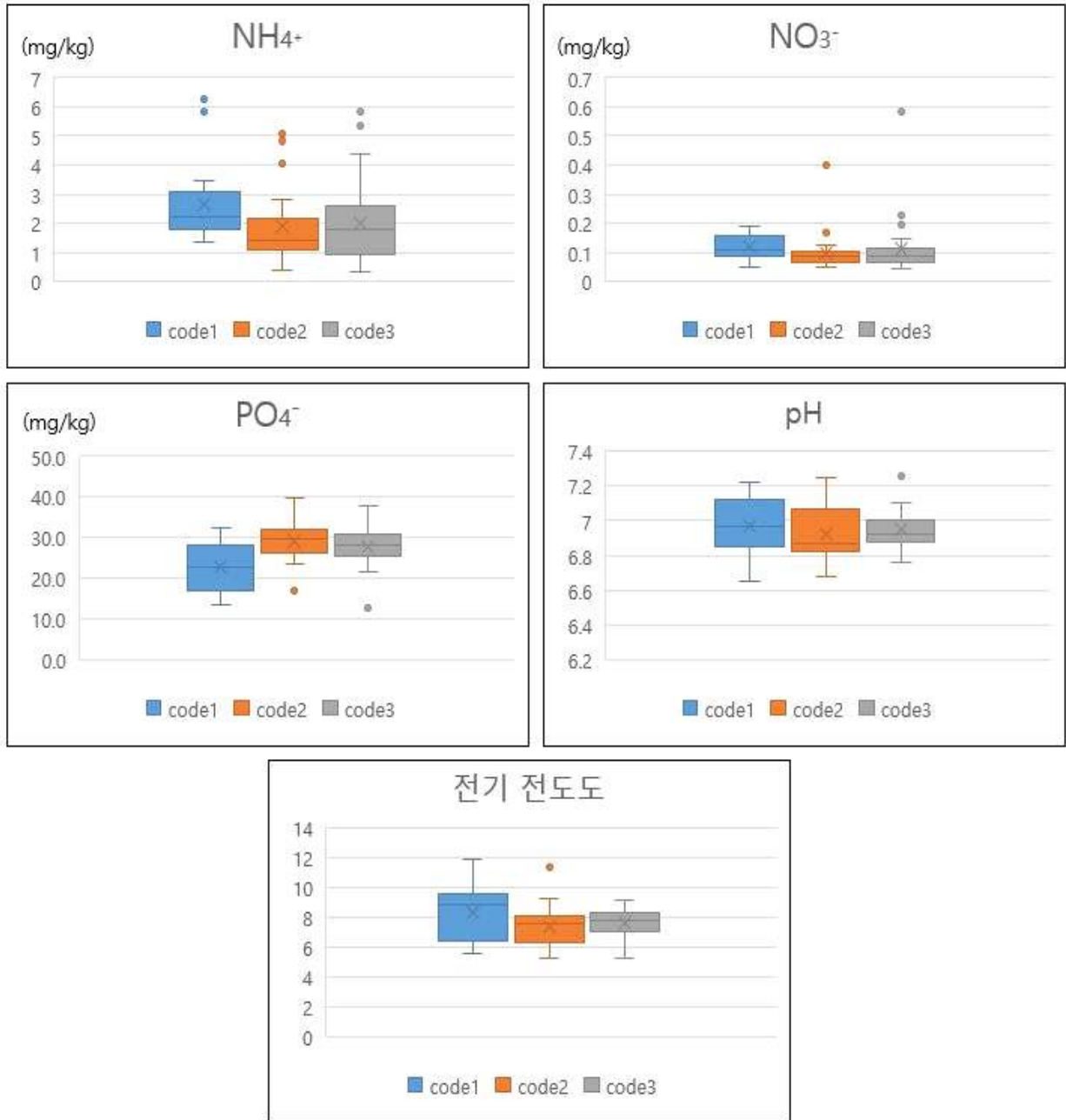
	유기물 (%)	수분 (%)	Na <sup>+</sup> (g/kg)	Ca <sup>2+</sup> (mg/kg)	K <sup>+</sup> (mg/kg)	Mg <sup>2+</sup> (g/kg)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/kg)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/kg)	PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mg/kg)	pH	EC
zone1	6.46	19.2	18.59	562.6	614.1	2.894	3.154	0.121	22.84	6.97	8.36
zone2	4.02	19.5	16.59	333.1	491.6	2.528	1.878	0.15	29.14	6.93	7.41
zone3	3.89	18.8	16.81	285.7	495.9	2.523	2.022	0.213	27.78	6.95	7.65
p-value	<b>1E-7**</b>	0.351	0.017*	<b>5.5E-8**</b>	<b>4.5E-9**</b>	0.166	<b>0.036*</b>	0.617	<b>1.3E-5**</b>	0.579	0.031
Kruskal-Wallis	<b>0.000</b>	-	0.065	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	-	<b>0.002</b>	-	<b>0.000</b>	-	0.081

<표 8> 고사체로부터의 거리에 따른 토양 성질 및 차이 분석

※ 고사체로부터의 거리 - zone1 : ~0.3m, zone2 : 0.3~1m, zone3 : 1~2m

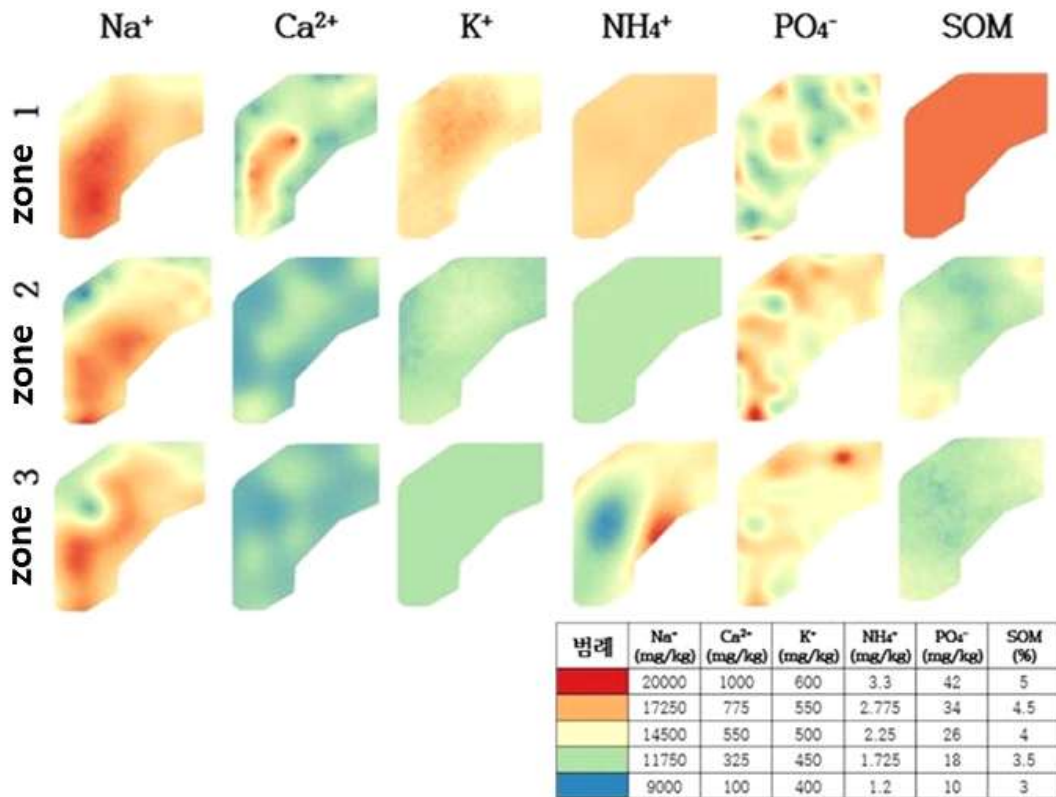


<그림 10> 교사체로부터의 거리에 따른 zone별 토양 성질(토양 유기물, 토양 수분, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>)



<그림 11> 고사체로부터의 거리에 따른 zone별 토양 성질(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, pH, 전기 전도도)

토양 실험 결과 나문재 고사체로부터의 거리에 따라 토양의 나트륨, 칼슘, 칼륨, 암모늄, 인산 이온, 유기물 함량 및 전기 전도도에 차이가 나타났으며, 사후 분석 결과 유의미한 차이가 나타나는 모든 성질에서 고사체로부터 가까운 곳의 토양이 그보다 먼 두 곳의 토양 성분 함량과 차이를 보였다. 이때 나트륨, 칼슘, 칼륨, 암모늄 이온, 유기물 함량 및 전기 전도도는 고사체와 가까운 곳에서 더 높게 나타났으며, 인산 이온의 경우 고사체와 가까운 곳에서 함량이 더 낮게 나타났다.



<그림 12> zone별 토양 성질 kriging 결과

또한 고사체로부터의 거리에 따라 농도에 차이가 나타나는 토양 성질에 대하여 고사체의 영향 이외에 다른 요인의 영향을 받아 차이가 나타났는지를 파악하기 위해 각 고사체가 분포하는 조사구의 위치를 바탕으로 kriging을 실시하여 토양 성질의 전반적인 공간적 분포를 확인해보았

다. 그 결과 칼슘, 칼륨, 암모늄 이온과 유기물 함량의 차이는 고사체로부터의 거리에 따라 나타나는 차이가 공간상에서도 유사하게 나타났다. 그러나 나트륨의 경우 샘플링 거리별 차이보다 해수가 유입되는 갯골로부터의 거리가 가까울수록 두드러지는 것으로 나타났으며, 인산 이온의 경우 고사체로부터의 거리에 다른 공간상에서의 차이는 불균등한 양상으로 나타났다.



## 제5장 토의

### 제1절 연구지 내의 나문재 고사체 분포

다른 생태계 구성 요소에 대한 나문재 고사체의 영향을 알아보기에 앞서 연구지 내의 고사체 분포를 조사한 결과 조사 첫해에 1006개, 이듬해에 813개의 고사체가 확인되었으며, 첫해에 조사된 것들 중 약 300여개가 이듬해에도 남아있는 것으로 확인되었다. 조사된 전체 고사체 가운데 이듬해까지 남아있는 개체의 비율을 고사체의 잔존율이라고 한다면 이는 약 30%가 되며, 한희상(2012)이 대부도에서 나문재속 식물들의 리터(litter)의 1년 잔존율이 40~50% 정도라고 보고한 것보다는 낮은 수치이다. 그러나 해당 연구는 염생식물 고사체 잔해를 리터백에 넣어둔 다음 중량 측정을 통해 잔존율을 구한 것인데 반해 자연 상태에서 고사체는 교란 등의 영향을 받아 소실될 수 있으므로 고사체 개체의 잔존율은 단순 분해에 의한 리터 잔존율보다 더 낮게 나타날 수 있다.

위와 같이 계속해서 남아있는 개체의 비율로 구한 잔존율인 30%로 단순히 변화 추이를 판단하면 처음 발생한 나문재 고사체는 2~3년 내에 대부분이 사라질 것으로 볼 수 있다. 그러나 조사된 고사체 중 크기가 크고 목질화가 더 많이 진행된 개체일수록 조사 첫해에 이어 이듬해에도 발견되는 경향이 있었다. 실제로 주변의 식생 피도와 계 활동을 알아보기 위해 선정한 고사체 개체는 연구지 내 고사체 중에서도 크기가 커서 주변에 영향을 줬을 가능성이 높은 것들을 선택했는데 이들 90개체 중 83개가 조사 첫해에도 고사체 상태로 있었던 것으로 확인되었다. 따라서 고사체의 크기가 충분히 크다면(본 연구의 고사체 선정 기준인 부피지수 10,000이상) 그것이 같은 자리에 2년 혹은 그 이상 존재할 확률이 상대적으로 높다고 볼 수 있다. 연구지의 식생이 대부분 1년생 종으로 이루어져 있고 연구지에 자생하는 계의 수명이 2년 안팎인 것을 감안하면, 고사체가 같은 자리에 2~3년 이상 존재하는 것은 그 주변의 환경에 실질적인 영향을 주기에 충분한 기간이라고 볼 수 있다.

다음으로 나문재 고사체들이 연구지 내에서 어떤 분포 패턴을 보이고 있는지를 Ripley's K function을 통해 분석한 결과 2019년과 2020년 두 해 모두 거리에 상관없이 연구지 내의 고사체는 군집 분포를 이루는 것으로 나타났다. 이러한 군집 분포가 나타나는 것은 먼저 나문재가 연구지 내의 특정 지역에 군집을 이루며 분포하는 것이 원인이 될 수 있다. 식생은 대체로 그 서식조건이 최적에 가까운 곳에서 가장 높은 밀도를 나타내므로 연구지 내에서도 나문재의 서식에 좀 더 적합한 조건을 갖춘 곳에 더 많은 나문재가 분포할 수 있다. 또한 염습지와 같이 스트레스가 높은 환경에서는 식생이 분포함으로써 주변 환경이 다른 식물들이 서식하기에 보다 유리하게 변하는 촉진 작용이 발생하여 이로 인해 식생의 군집 분포가 나타날 수 있다.

다음으로는 나문재의 분포와 별개로 특정 지역에 고사체가 더 많이 남게 되는 것이 고사체가 군집 분포하는 것의 원인이 될 수 있다. 앞서 언급한 것처럼 연구지 내에 식생 밀도가 높게 나타나는 지역이 존재할 수 있을 뿐만 아니라 적당한 환경 및 경쟁 조건으로 인해 크기가 큰 개체들이 많이 발생하는 지역이 있을 수 있다. 이 경우 크기가 큰 고사체가 연구지 상에 더 오래 남는 경향이 있는 만큼 그 주변의 고사체 밀도가 더 높게 나타날 수 있다. 또한 고사체 주변에 다른 고사체가 존재하면 교란 발생 시 해수의 급격한 유입이나 바람의 영향이 분산될 수 있으므로 식생의 촉진 현상과 마찬가지로 기존 고사체의 존재는 이후에 발생한 고사체가 더 오래 남게 하는 효과를 가져올 수 있다. 실제로 2019년과 2020년의 고사체 분포 지점 간의 패턴을 분석했을 때에도 두 해의 고사체 분포는 서로 군집을 이루는 것으로 나타났는데, 앞서 언급한 것처럼 기존에 고사체가 존재할 경우 그 주변에 있던 나문재가 고사체로 변한 뒤에도 더 오래 잔존하게 하는 요인으로 작용할 수 있다.

이처럼 연구지 내의 전체 나문재 고사체의 분포와 패턴 및 그 변화에 대해 살펴본 결과 일부 고사체, 특히 크기가 큰 일부 고사체의 경우 주변 환경에 실질적인 영향을 줄 정도의 기간만큼 염습지 상에 잔존한다고 볼 수 있었다.

## 제2절 나문재 고사체 주변의 식생 분포 양상

나문재 고사체가 위치한 지점과 그 주변의 식생 분포를 피도를 통해 조사한 결과 고사체가 위치한 곳의 식생 피도가 그 주변의 평균 피도보다 유의미하게 낮게 나타났다. 또한 주변 피도를 동·서·남·북쪽으로 나누어 고사체가 위치한 지점의 식생 피도와 비교했을 때 고사체가 위치한 지점의 피도만이 다른 지점들보다 낮게 나타났으므로 고사체 주변 식생 피도에 대한 갯골과의 거리 및 향 등의 영향은 적다고 볼 수 있다. 연구지 내의 고도 차는 앞서 3장에서 언급한 것처럼 미미한 수준이므로 이 또한 식생 피도에 유의미한 영향을 준다고 보기 어렵다.

이러한 지형적 요인 이외에 고사체와 그 주변의 식생 피도에 영향을 줄 수 있는 것에는 종자의 발아 정도와 개체 간 공간 경쟁 등의 생물적 요인이 있다. 염생식물 종자의 발아는 식생 피도에 직접적인 영향을 주는 요인으로, 해수의 움직임(Koutstaal *et al.*, 1987), 염도(Haraguchi & Matsuda, 2018) 및 주변의 식생 구조(Rand, 2000)에 의해 영향을 받는다. 일반적으로 본 연구지로의 해수 유입은 해변에서와 같은 파랑의 형태가 아닌 만조에 가까워지면서 서서히 차오르는 형태이므로 해수의 움직임으로 인한 종자 분산의 영향은 고사체로부터 반경 2m의 범위에서는 크게 차이하지 않을 것으로 볼 수 있다. 토양 염도를 나타내는 지표인 나트륨 농도는 고사체 분포 지점이 그 주변보다 높는데 식생 피도는 고사체가 위치한 곳이 더 낮으므로 토양 염도로도 고사체 주변의 식생 피도 차이를 설명하기 어렵다. 또한 연구지 내의 식생 분포 패턴은 기준 거리에 상관 없이 군집 형태를 띠므로 식생 구조 차이에 따라 식생 피도가 달라진다고 볼 수도 없다.

다음으로 나문재 고사체의 존재를 이후 식생이 진입할 공간의 관점에서 보면 고사체가 있는 곳에는 아직 지하부의 뿌리가 있어 새 식생이 뿌리를 깊게 내려 자리잡기에 불리하다. 또한 고사체의 지상부가 차지하는 공간의 바로 아래나 그 인접한 곳에서는 높이생장이 제한되므로 해당 지역에 식생이 진입한다고 하더라도 개체 수 대비 피도는 낮을 가능성이

높다. 이처럼 나문재 고사체가 이후 식생이 진입할 수 있는 공간을 차지하는 객체로서 기능한다고 본다면 고사체의 존재 및 크기에 따라 그 주변 식생 분포에 차이가 나는 것을 설명할 수 있다. 실제로 본 연구에서 고사체 크기를 나타내는 지표인 고사체의 높이, 면적지수, 부피지수가 클수록 고사체가 위치한 곳과 그 주변의 식생 피도 차이가 유의미하게 크게 나타나는 것으로 확인되었다. 따라서 연구지 내에 나문재 고사체가 존재하는 곳은 그 물리적 부피로 인해 다른 주변 나지와는 다른 조건을 나타내고, 그곳의 식생 피도 또한 고사체가 없는 곳과 유의미한 차이를 나타낸다고 볼 수 있었다.

### 제3절 나문재 고사체 주변의 계 활동 분포 양상

나문재 고사체가 위치한 지점과 그 주변의 계 활동 분포를 계 구멍 및 계 탐 개수 조사를 통해 확인한 결과 고사체가 위치한 곳의 계 활동이 그 주변의 평균 계 활동보다 유의미하게 높게 나타났다. 또한 고사체 주변을 동·서·남·북쪽으로 나누어 고사체가 위치한 지점의 계 활동 정도와 비교했을 때 고사체가 위치한 지점의 계 구멍과 계 탐 개수는 다른 주변 지점들보다 높게 나타났다. 고사체로부터 일정 거리가 떨어진 주변 지역의 계 활동은 방위에 따른 차이가 나타나지 않아 고사체 주변 계 활동에 대한 갯골과의 거리 및 향 등의 영향은 적다고 볼 수 있다.

Christy(1982)에 의하면 계가 굴을 파서 구멍을 만드는 목적은 크게 번식기에 산란을 하고 지낼 공간을 마련하기 위한 것과 수위 상승, 포식자 등의 위협으로부터 자신을 보호하기 위한 것으로 나눌 수 있다. 이때 계 구멍 주변에 탐 또는 돛 형태로 흙을 쌓아놓은 경우 수컷의 구애 행동과 관련이 있어 계 구멍 형성의 목적 중 전자에 해당한다고도 하였다. 계의 굴 파기 행동과 탐 쌓기 행동이 이와 같은 목적을 위해 행해진다면 먼저 번식 공간 마련을 위해서는 상대적으로 지하부에 식물 뿌리 등의 방해되는 요소가 적은 곳을 선호할 것이다. 나문재 고사체가 있는 곳은 그 주변보다 식생 피도가 낮아 현재 식생의 지하부 부피가 작고, 고사체

의 지하부는 시간이 경과함에 따라 부패하여 질량과 부피가 감소하게 된다. 따라서 계가 번식 활동 및 산란을 위한 충분한 공간을 확보하는 데 있어서는 고사체 인근이 그 주변부보다 더 유리하다고 볼 수 있다. 다음으로 계가 피난처 확보를 위한 굴 파기를 하는 경우 고사체가 차지하고 있는 공간 아래에 계 구멍을 만들면 포식자를 피하는 데에 더욱 효과적이므로 고사체 분포 지점이 피난처 형성에 있어 선호될 수 있다. 또한 Genoni(1991)는 계는 부패하고 있는 염생식물에서 자라는 미생물 균주를 먹이로 삼기도 하므로 다른 먹이가 부족한 상황에서는 고사체 주변에 더 많은 구멍을 만든다고 보고하였는데 이것 역시 계가 굴을 파는 장소로 고사체 주변을 선호하는 이유가 될 수 있다. 다만 고사체의 높이, 면적지수, 부피지수와 같은 크기와 고사체 분포 지점과 그 주변의 계 활동 정도의 차이는 서로 유의미한 상관관계를 나타내지는 않았다.

#### 제4절 나문재 고사체 주변의 토양 성질 분포 양상

나문재 고사체와 바로 인접한 곳과 그로부터 거리가 더 먼 곳에서 토양을 채취해 성질을 측정해 본 결과 여러 토양 성질에서 고사체로부터의 거리에 따라 차이가 나타났다. 유기물 함량,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ , 전기 전도도는 고사체로부터 가까운 zone 1에서 더 높게 나타났고,  $\text{PO}_4^-$ 는 zone 1에서 더 낮게 나타났다. 다음으로 토양 성질마다 zone별로 자료를 나누고 kriging을 통해 연구지 상에서의 분포를 시각화한 결과  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{PO}_4^-$ 는 zone이 달라짐에 따라 연구지 내의 분포가 다르게 추정되었고,  $\text{Na}^+$ 은 수계와 인접한 정도에 따라 분포에 구배가 나타났다.

위와 같이 염습지 내 토양 성질의 분포가 연구지 내에서 공간적으로 차이를 나타내는 이유로는 먼저 계와 식물 등의 생명 활동을 들 수 있다. 계가 굴을 파거나 유기물 분해를 만들어 계 탑을 만드는 과정에서 유기물이 염습지 토양 표면에 축적되기도 하며, 계의 고사체 및 외피에서 떨어져 나온 부분이 분해되는 과정에서 칼슘이나 칼륨 등이 토양으로 방출되기도 한다. 한편 식물의 생명 활동으로 인해서는 토양 내 질소를

포함한 이온의 농도가 직접적으로 영향받을 수 있는데, 염습지 상에서 쉽게 결핍되는 이용 가능한 형태의 질소를 확보하기 위해 식물이 뿌리에서 질산화 작용 등을 할 경우 그 주변의 암모늄 이온 농도에 변화를 일으킬 수 있다.

앞선 절에서 계의 활동이 고사체가 위치한 지점에서 더 많이 관찰되었음을 확인했기 때문에 토양 성질 중  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  및 유기물이 고사체와 가까운 지점의 토양에서 더 높게 나타나는 데에 계 활동의 영향이 있었을 것이라고 볼 수 있다. 다음으로 질산 이온 및 암모늄 이온 농도에 대해 살펴보면 먼저 질산 이온은 연구지 전반에서 그 농도가 낮게 나타났기 때문에 연구지가 질산 이온 결핍 상태에 있다고 볼 수 있다. 이 경우 식물은 더 많은 양의 가용 질소를 확보하기 위해 암모늄 이온을 질산 이온으로 만드는 질산화 과정을 거칠 것으로 추측할 수 있으며, 나문재 고사체로부터 가까운 지점에서는 염생식물의 밀도가 낮기 때문에 그만큼 질산화 작용이 덜 일어나 암모늄 이온의 농도는 상대적으로 높게 나타난 것으로 볼 수 있다. 다만 인산 이온의 경우 식물이 생명 활동에 필요한 것임에도 고사체로부터 거리가 가까운 곳에서 오히려 그 농도가 더 낮게 나타났으며, 연구지 내 전반적인 분포 또한 뚜렷한 패턴을 드러내지 않아 그 분포를 결정하는 메커니즘에 대해 명확한 추정을 하기 어려웠다. 그밖에 나트륨의 경우는 해수의 영향을 받아 농도가 결정되므로 하천 유로부터의 거리에 따라 구배가 형성된 것으로 보여지며, 고사체로부터 가까운 곳에서 그 농도가 높게 나타난 것은 고사체가 그 자리에 오랫동안 존재하면서 발달한 미지형으로 인해 그곳에서 해수가 머무는 시간이 상대적으로 길어졌기 때문으로 볼 수 있다. 또한  $\text{PO}_4^-$ 를 제외한 이온의 농도는 zone 1에서 가장 높게 검출되었기 때문에 그에 따라 전체 이온 수도 많을 것이므로 zone 1에서 전기 전도도가 가장 높게 나타난다고 볼 수 있다.

이처럼 나문재 고사체 자체는 더 이상 생명 활동을 하지 않기 때문에 그 존재 자체가 토양 성질에 미치는 직접적인 영향은 제한적일 것으로 예상할 수 있다. 그러나 나문재 고사체의 존재로 인한 계 활동 및 식생 밀도의 차이는 그로부터 비롯되는 토양 성질의 차이로 이어지기 때문에

고사체로부터 가까운 곳과 먼 곳의 토양 성질에는 여러 차이가 발생한다고 볼 수 있다.

## 제5절 종합

앞선 장에서는 연구지에서 나문재 고사체로부터의 거리에 따라 식생, 계 활동, 토양 성질에 차이가 나는지 확인하고, 차이가 있다면 그 원인에 대하여 고찰해보았다. 분석 결과 나문재 고사체가 있는 곳과 그 주변의 식생 피도, 계의 활동 및 토양 성질에는 유의미한 차이가 나타났고, 이를 바탕으로 고사체는 더 이상 생명으로 기능하지 않음에도 그것이 차지하고 있는 공간 등으로 인해 분포 지점에서 물리적인 영향을 가지고 있다고 볼 수 있었다. 고사체가 된 나문재는 생명 활동을 하지는 않으므로 그를 통해 주변 환경을 직접적으로 변화시키지는 못하지만, 그것이 물리적 공간을 차지하고 있다는 특성으로 인해 계의 활동이 촉진되거나 식생의 진입이 억제되기도 한다. 이러한 계 활동과 식생 분포 정도의 차이는 각각 그로부터 유발되는 토양 성질 변화의 차이로 이어지므로 고사체 주변 토양의 화학적 성질도 이질적인 분포를 보이게 된다고 볼 수 있다.

본 연구의 연구 대상지와 같은 국내 서해안 염습지 가운데에는 나문재를 비롯해 해홍나물, 칠면초, 기수초, 방석나물 등의 나문재속 식물들이 분포하고 있는 지역들이 상당수 존재한다. 이때 이러한 나문재속 식물 개체들이 적절한 환경에서 1년간 일정 크기 이상으로 자라게 되면 그것의 생활사가 끝나 고사체가 된 이후에도 바로 분해되거나 사멸되지 않고 그 자리에 더 남아있을 가능성이 높아진다. 그렇게 고사체가 된 이후에도 자리를 지키고 남아있게 되면 그 물리적 영향으로 인해 분포 지점 주변은 일반적인 나지와 미세하게 다른 환경이 조성된다고 볼 수 있으며, 그러한 지역과 고사체가 없는 곳의 생태계 경관은 다르게 변화할 것이라고 예측할 수 있다.

본 논문의 서론에서 언급한 것과 같이 일반적인 생태계 연구에서는 조사 시점 당시에 생태계를 구성하고 있는 요소들의 분포와 요소들 간의

상호작용 등을 주로 연구하는 경향이 있다. 그러나 생태계 경관을 형성하는 데 있어서는 특정 시점에 생태계를 구성하고 있는 주요 구성 요소들뿐만 아니라 생태계에서 과거에 발생했던 어떤 사건의 영향이 이후에 까지 남아있는 경우도 있고, 이전에는 주요 구성 요소로 기능하던 것이 어떠한 이유로 그 특성이 변하게 되어 그 영향이 생태계 경관에 반영되는 수도 있다. 본 연구에서는 기존에 생물이었을 때 다른 염습지 생태계 주요 구성 요소들과 활발히 상호작용하던 나문재가 죽어 고사체가 된 이후에 그 생물학적 기능은 상실했지만 원래의 형태가 분해되어 소실되지는 않은 경우 그것이 계속해서 물리적 기능은 유지하고 있지 않은지의 관점에서 나문재 고사체가 분포하는 지점과 그 주변의 생태계 구성 요소의 공간적 변이를 살펴보았다. 그 결과 나문재 고사체가 존재하는 지점은 그 주변과 비교하여 식생 분포, 토양 성질, 계 활동 양상 등에서 유의미한 차이를 나타냈으며, 이는 식물 고사체가 수년에 걸쳐 염습지 생태계에 잔존하는 경우 주변 생태계 경관의 변화는 일반적인 나지에서서의 변화 양상과 달라질 수 있음을 시사한다고 볼 수 있다.

다만 이와 같은 생태계 구성 요소의 공간적 변이가 식물 고사체가 존재하는 동안 누적되어 나타나는 것인지, 아니면 그 이전에 이미 형성되었던 환경적 차이로 인해 다른 요소들의 분포가 달라졌는지에 대해서도 밝힐 필요가 있다. 전자일 경우에는 식물 고사체의 존재 자체가 생태계 경관 형성에 있어 어떤 영향을 가진다고 볼 수 있다. 그러나 후자일 경우 식물 고사체 주변의 경관은 나지와는 다르지만 이는 이전부터 있었던 공간적 변이가 고사체의 물리적 역할로 인해 유지되는 것이거나, 그저 이전에 나문재 개체가 선택한 환경이기 때문에 주변과 차이가 나타나는 것이라고 볼 수도 있다. 더불어 나문재 고사체가 염습지 상에 존재하는 기간 또한 어느 시점을 기준으로 그 영향이 드러나는지 명확히 알기 어렵다는 문제도 존재한다. 이러한 사안들의 쟁점에 대해서는 본 연구의 결과만으로는 명확히 밝히기 어려우므로 후속 연구를 통해 살아있는 나문재 주변과 나문재 고사체 주변의 대조 연구 또는 수년간의 장기 추적 연구 등을 통해 본 연구를 보완할 필요가 있다.



## 제6장 결론

일반적으로 생태계 경관은 주요 생태계 구성 요소들의 분포 및 요소들 사이의 상호작용에 의해 결정된다고 볼 수 있다. 그러므로 많은 앞선 연구들이 생태계 공간에 관한 연구를 진행함에 있어 먼저 생태계 내에 어떤 주요 구성 요소가 어느 정도 분포하고 있는지를 파악하고, 이들의 상호작용은 어떻게 나타나는가를 분석해왔다. 그러나 생태계 경관을 이루는 주요 구성 요소라고 간주되지 않는 요소 혹은 주요 구성 요소였던 어떤 것이 상태가 변하여 원래의 성질을 잃은 경우에 대해서는 그것의 생태계 경관에 대한 기여 혹은 영향에 대해 많은 연구가 진행되지는 않았었다.

염습지 생태계는 구성 요소는 비교적 단순하다고 할 수 있으나 높은 역동성으로 인해 생태계 구성 요소를 둘러싼 변화가 빈번한 생태계이다. 그에 더해 염습지 생태계를 기반으로 하는 생물들의 생활사도 짧은 편이기 때문에 어떤 구성 요소가 생태계 내에서 실질적인 영향을 가지게 되기까지 필요한 시간 또한 짧은 편이라고 할 수 있다. 국내 염습지 생태계의 주요 생물적 구성 요소라고 할 수 있는 식생 및 염습지에 서식하는 계의 경우 대부분 수명이 1~2년 안팎으로 그보다 더 길게 염습지 상에 남아있는 경우 그것이 존재함으로써 인해 생태계 경관에 어떤 변화가 나타날 수 있을 것으로 예상해볼 수 있었다.

국내 염습지 생태계에 자생하는 식물 중 중에는 개체가 죽은 이후에도 바로 분해되어 없어지지 않고 고사체의 형태로 남아있는 것들이 있는데 그것이 주변 식생이나 계 등의 생활사보다 오래 남아있다면 그로 인해 주변의 생태계 구성 요소의 분포에 차이가 나타날 것으로 볼 수 있었다. 나문재는 이처럼 줄기가 목질화되어 죽은 이후 염습지에 고사체의 형태로 남아있는 국내 초본식물 중에 크기가 가장 큰 편이고, 고사체도 쉽게 찾아볼 수 있어 그것의 고사체가 존재할 때 주변 환경에 공간적 변이가 나타나는지 파악하기가 용이할 것으로 판단되었다. 따라서 본 연구에서는 실제로 나문재 고사체가 주변 환경에 실질적인 영향을 줄 만큼 염습

지 상에 오래 남아있는지 확인하고, 만약 그렇다면 그 기간 동안 나문재 고사체의 존재로 인해 주변 환경에 유의미한 차이가 나타나는지를 확인하고자 했다. 이때 나문재 고사체의 존재로 인해 영향받을 수 있는 생태계 구성 요소로는 식생 피도, 계 활동 정도 및 토양 성질을 선정하여 그것이 고사체가 위치한 지점과 그 주변에서 유의미한 차이를 보이는지 조사하였다.

현장 조사 및 분석 결과 나문재 고사체가 존재함에 따라 고사체가 존재하는 지점과 그 주변의 식생 피도 및 계 활동 빈도에 유의미한 차이가 나타났으며, 식물의 활동 및 계 활동의 복합적 영향으로 토양 성질 또한 나문재 고사체로부터의 거리에 따라 차이가 나타나는 것을 확인했다. 이는 나문재 고사체가 존재하는 지점이 그렇지 않은 나지의 염습지 공간과는 다른 특성을 가지고 있음을 보여주는 결과이며, 이를 통해 나문재 고사체는 생명으로서의 기능을 상실한 이후에도 최소한 이전의 물리적 영향력은 유지하고 있다고 볼 수 있었다. 그러므로 앞서 <그림 2>에서 보았던 것처럼 나문재 개체와 그 주변의 토양, 식생, 계와의 관계는 상호 영향을 주고받는 관계에서 일정 부분 일방적으로 변하게 된다고도 볼 수 있었다.

이러한 연구 결과는 기존에 염습지 생태계에서 주요 생태계 구성 요소로 여겨져 연구 대상이 된 요인들 이외에 다른 것에 의해서도 염습지 생태계 경관에 차이가 나타날 수 있음을 보여주고 있다. 그러나 본 연구는 명확한 한계점도 가지고 있는데, 우선 나문재 고사체의 영향으로 인해 주변 생태계 구성 요소들에 차이가 발생했다는 것에 대한 인과를 밝히지 못했으므로 고사체 주변에 나타난 공간적 변이가 고사체의 영향으로 인한 것인지 아니면 이전부터 이미 환경적 차이가 형성된 곳에 해당 나문재 개체가 진입했는지에 대해 판단할 수 없다. 그에 더해 나문재 고사체가 어떤 영향을 가진다고 하더라도 어느 정도의 시점이 경과해야 그 영향이 드러나는지에 대해서도 본 연구의 결과를 통해서도 파악할 수 없다. 그러므로 향후 살아있는 나문재 개체와 나문재 고사체 주변의 비교 연구 또는 수년 단위의 시계열 연구를 통해 이러한 사안들에 대해서도 밝힐 필요가 있다.

## 참 고 문 헌

- 고미연, 1986, 인천 소래 부근 해홍나물 종집단에 대한 Pattern 및 Ordination 분석기법 적용, 서강대학교 석사학위논문.
- 곽남현, 2016, 인천광역시 도시 변화에 따른 공원녹지 변화 특성 연구, 서울시립대학교 박사학위논문.
- 기상청, 기상자료개방포털, <https://data.kma.go.kr/>, 2010년-2019년.
- 김영주, 2019, 인천 소래습지생태공원 염생식물군락 복원 방안 연구, 서울시립대학교 석사학위논문.
- 류근환, 2019, 대부도와 소래 갯벌지역의 염생식물 생육특성 및 생태복원 기초연구, 단국대학교 박사학위논문.
- 심현보, 조원범, 최병희, 2009, 한반도 해안염습지와 사구 염생식물 분포, 한국식물분류학회지, 39(4), p.264-276.
- 심현보, 이기무, 이병윤, 김원희, 남기흠, 심선희, 2017, [한국의 해안식물], 국립생물자원관.
- 이근섭, 오계철, 1989, 인천 소래 간석지내 두 개의 칠면초(*Suaeda japonica*) 개체군간의 차이에 관하여, Journal of Ecology and Environment, 12(3), p.133-144.
- 이정희, 2003, 토양 염분도가 다른 두 생육지에서 갈대 개체군의 표현형 비교, 인하대학교 석사학위논문.
- 정주영, 이만우, 조강현, 최병희, 2000, 인천 논현동 일대 염습지의 식물 다양성과 보존 방안, 환경생물, 18(3), p.337-345.
- 한희상, 2012, 대부도 염생식물의 분해과정에 영향을 미치는 환경요인, 서울대학교 석사학위논문.
- Adam, P., 1993, Saltmarsh ecology, Cambridge University Press.
- Amaranthus, M. P., Perry, D. A., 1989, Interaction effects of vegetation type and Pacific madrone soil inocula on survival, growth, and mycorrhiza formation of Douglas-fir, Canadian Journal of Forest Research, 19(5), p.550-556.

- Bain, D. J., Green, M. B., Campbell, J. L., Chamblee, J. F., Chaoka, S., Fraterrigo, J. M., ... & Leigh, D. S., 2012, Legacy effects in material flux: structural catchment changes predate long-term studies, *Bioscience*, 62(6), p.575–584.
- Bang, J. H., & Lee, E. J., 2019, Differences in crab burrowing and halophyte growth by habitat types in a Korean salt marsh. *Ecological Indicators*, 98, p.599–607.
- Barbour, M. G., Burk, J. H., Pitts, W. D., 1999, [Terrestrial plant ecology], 3<sup>rd</sup> edition, *The Benjamin/Cummings Publishing Company*.
- Bertness, M. D., 1991, Interspecific interactions among high marsh perennials in a New England salt marsh, *Ecology*, 72(1), p.125–137.
- Bertness, M. D., Ellison, A. M., 1987, Determinants of pattern in a New England salt marsh plant community, *Ecological Monographs*, 57(2), p.129–147.
- Bowd, E. J., Blair, D. P., Lindenmayer, D. B., 2021, Prior disturbance legacy effects on plant recovery post high severity wildfire. *Ecosphere*, 12(5), e03480.
- Chaudhary, D. R., Kim, J., Kang, H., 2018, Influences of different halophyte vegetation on soil microbial community at temperate salt marsh, *Microbial ecology*, 75(3), p.729–738.
- Christy, J. H., 1982, Burrow structure and use in the sand fiddler crab, *Uca pugilator* (Bosc), *Animal Behaviour*, 30(3), p.687–694.
- Foster, D. R., Motzkin, G., Slater, B., 1998, Land-use history as long-term broad-scale disturbance: regional forest dynamics in central New England, *Ecosystems*, 1(1), p.96–119.
- Fraterrigo, J. M., Turner, M. G., Pearson, S. M., Dixon, P., 2005,

- Effects of past land use on spatial heterogeneity of soil nutrients in southern Appalachian forests, *Ecological Monographs*, 75(2), p.215-230.
- Genoni, G. P., 1991, Increased burrowing by fiddler crabs *Uca rapax* (Smith)(Decapoda: Ocypodidae) in response to low food supply, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 147(2), p.267-285.
- Gough, C. M., Vogel, C. S., Harrold, K. H., George, K., Curtis, P. S., 2007, The legacy of harvest and fire on ecosystem carbon storage in a north temperate forest, *Global change biology*, 13(9), p.1935-1949.
- Grman, E., Suding, K. N., 2010, Within year soil legacies contribute to strong priority effects of exotics on native California grassland communities, *Restoration Ecology*, 18(5), p.664-670.
- Haraguchi, A., & Matsuda, T., 2018), Effect of salinity on seed germination and seedling growth of the halophyte *Suaeda japonica* Makino, *Plant Species Biology*, 33(3), p.229-235.
- Harding, J. S., Benfield, E. F., Bolstad, P. V., Helfman, G. S., Jones, E. B. D., 1998, Stream biodiversity: the ghost of land use past, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95(25), p.14843-14847.
- Hargrove, W. L., Thomas, G. W., 1981, Effect of organic matter on exchangeable aluminum and plant growth in acid soils, *Chemistry in the soil environment*, 40, p.151-166.
- Kane, E. S., Dieleman, C. M., Rupp, D., Wyatt, K. H., Rober, A. R., Turetsky, M. R., 2020, Consequences of increased variation in peatland hydrology for carbon storage: legacy effects of drought and flood in a boreal fen ecosystem. *Frontiers in Earth Science*, 8, 683.

- Koutstaal, B. P., Markusse, M. M., De Munck, W., 1987, [Vegetation between land and sea], *Springer*, Dordrecht.
- Martin, S. L., Hayes, D. B., Rutledge, D. T., Hyndman, D. W., 2011, The land use legacy effect: Adding temporal context to lake chemistry, *Limnology and Oceanography*, 56(6), p.2362–2370.
- Medina, B. M. O., Ribeiro, K. T., Scarano, F. R., 2006, Plant - Plant and Plant - Topography Interactions on a Rock Outcrop at High Altitude in Southeastern Brazil, *Biotropica: The Journal of Biology and Conservation*, 38(1), p.27–34.
- McTammany, M. E., Benfield, E. F., Webster, J. R., 2007, Recovery of stream ecosystem metabolism from historical agriculture, *Journal of the North American Benthological Society*, 26(3), p.532–545.
- Mueller, R. C., Scudder, C. M., Whitham, T. G., Gehring, C. A., 2019, Legacy effects of tree mortality mediated by ectomycorrhizal fungal communities, *New Phytologist*, 224(1), p.155–165.
- Nixon, S. W., & Oviatt, C. A., 1973, Ecology of a New England salt marsh, *Ecological Monographs*, 43(4), p.463–498.
- Nomann, B. E., Pennings, S. C., 1998, Fiddler crab - vegetation interactions in hypersaline habitats, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 225(1), p.53–68.
- Nsikani, M. M., Novoa, A., van Wilgen, B. W., Keet, J. H., Gaertner, M., 2017, *Acacia saligna*'s soil legacy effects persist up to 10 years after clearing: Implications for ecological restoration, *Austral Ecology*, 42(8), p.880–889.
- Padisak, J., 1992, Seasonal succession of phytoplankton in a large shallow lake(Balaton, Hungary)-A dynamic approach to ecological memory, its possible role and mechanisms, *Journal of Ecology*, 80, p.217–230.

- Passioura, J. B., 1991, Soil structure and plant growth, *Soil Research*, 29(6), p.717-728.
- Pederson, N., Dyer, J. M., McEwan, R. W., Hessel, A. E., Mock, C. J., Orwig, D. A., Rieder, H. E., Cook, B. I., 2014, The legacy of episodic climatic events in shaping temperate, broadleaf forests. *Ecological Monographs*, 84(4), p.599-620.
- Pennings, S. C., Callaway, R. M., 1992, Salt marsh plant zonation: the relative importance of competition and physical factors. *Ecology*, 73(2), p.681-690.
- Perry, D. A., 1994, [Forest ecosystems], *Johns Hopkins University Press*.
- Qin, H., Chu, T., Xu, W., Lei, G., Chen, Z., Quan, W., Chen, J., Wu, J., 2010, Effects of invasive cordgrass on crab distributions and diets in a Chinese salt marsh, *Marine Ecology Progress Series*, 415, p.177-187.
- Rand, T. A., 2000, Seed dispersal, habitat suitability and the distribution of halophytes across a salt marsh tidal gradient, *Journal of Ecology*, 88(4), p.608-621.
- Ripley, B. D., 1976, The second-order analysis of stationary point processes, *Journal of applied probability*, 13(2), 255-266.
- Robson, A., 2012, [Soil acidity and plant growth], *Elsevier*.
- Šamonil, P., Král, K., Hort, L., 2010, The role of tree uprooting in soil formation: a critical literature review. *Geoderma*, 157(3), p.65-79.
- Schlesinger, W. H., 2005, [Biogeochemistry], 8<sup>th</sup> edition, *Elsevier*.
- Smith III, T. J., Boto, K. G., Frusher, S. D., Giddins, R. L., 1991, Keystone species and mangrove forest dynamics: the influence of burrowing by crabs on soil nutrient status and forest productivity. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 33(5),

p.419-432.

- Shumway, S. W., Bertness, M. D., 1992, Salt stress limitation of seedling recruitment in a salt marsh plant community, *Oecologia*, 92(4), p.490-497.
- Silvestri, S., Defina, A., Marani, M., 2005, Tidal regime, salinity and salt marsh plant zonation, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 62(1-2), p.119-130.
- Strauss, S. Y., Irwin, R. E., 2004, Ecological and evolutionary consequences of multispecies plant-animal interactions, *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 35, p.435-466.
- Thomas, G. W., 1983, [Exchangeable cations: Methods of soil analysis part 2], *American Society of Agronomy*, 9, p.159-165.
- Thomas, G. W., 1996, [Soil pH and soil acidity: Methods of soil analysis part 3], *American Society of Agronomy*, p.475-490.
- Tilman, D., 1986, Nitrogen limited growth in plants from different successional stages, *Ecology*, 67(2), p.555-563.
- Trotsiuk, V., Svoboda, M., Weber, P., Pederson, N., Klesse, S., Janda, P., ... & Frank, D., 2016, The legacy of disturbance on individual tree and stand-level aboveground biomass accumulation and stocks in primary mountain *Picea abies* forests, *Forest Ecology and Management*, 373, p.108-115.
- Valiela, I., Teal, J. M., Allen, S. D., Van Etten, R., Goehring, D., Volkman, S., 1985, Decomposition in salt marsh ecosystems: the phases and major factors affecting disappearance of above-ground organic matter, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 89(1), p.29-54.
- Van Breemen, N., Finzi, A. C., 1998, Plant-soil interactions: ecological aspects and evolutionary implications, *Biogeochemistry*, 42(1), p.1-19.



- Von Holle, B., Neill, C., Largay, E. F., Budreski, K. A., Ozimec, B., Clark, S. A., Lee, K., 2013, Ecosystem legacy of the introduced N<sub>2</sub>-fixing tree *Robinia pseudoacacia* in a coastal forest, *Oecologia*, 172(3), p.915–924.
- Wang, J. Q., Zhang, X. D., Jiang, L. F., Bertness, M. D., Fang, C. M., Chen, J. K., Hara, T., Li, B., 2010, Bioturbation of burrowing crabs promotes sediment turnover and carbon and nitrogen movements in an estuarine salt marsh, *Ecosystems*, 13(4), p.586–599.
- Wang, Q., Wang, C. H., Zhao, B., Ma, Z. J., Luo, Y. Q., Chen, J. K., Li, B., 2006, Effects of growing conditions on the growth of and interactions between salt marsh plants: implications for invasibility of habitats, *Biological Invasions*, 8(7), p.1547–1560.
- Warren, J. H., 1990, The use of open burrows to estimate abundances of intertidal estuarine crabs, *Australian Journal of Ecology*, 15(3), p.277–280.
- Whitehead, D. C., 2000, [Nutrient elements in grassland: soil–plant–animal relationships], Cabi Publishing.
- Wohl, E., 2021, Legacy effects of loss of beavers in the continental United States, *Environmental Research Letters*, 16(2), 025010.
- Woodbury, P. B., Heath, L. S., Smith, J. E., 2006, Land use change effects on forest carbon cycling throughout the southern United States, *Journal of Environmental Quality*, 35(4), p.1348–1363.
- Xin, P., Jin, G., Li, L., Barry, D. A., 2009, Effects of crab burrows on pore water flows in salt marshes, *Advances in Water Resources*, 32(3), p.439–449.

## Abstract

# Spatial Variation of Soil Properties, Vegetation Distribution, Crab Activities Around the Dead Body of *Suaeda glauca* in Sorae Wetland Ecological Park

Han-Seop Lee

Department of Geography

The Graduate School

Seoul National University

Salt marsh ecosystem is characterized with the dominant influence of sea water, fast material circulation cycle, and short life cycle of the organisms in it. It consists of relatively simple ecosystem components, but the components usually go through a lot of changes because of the external influences which causes frequent changes of the ecosystem landscape. However, if there is a component which remains longer than the life cycle of the vegetation or crab, it seems that some difference can be caused in surrounding area.

*Suaeda glauca* is a halophyte which grows in Korean salt marsh ecosystems and some of it grows up to 1.5m. If the individual *Suaeda glauca* grows big enough and its trunk gets thick like a

shrub, it is not disposed and disappear after the death. Some of it even remain in their original spots for a few years, which is longer period than the life cycle of the vegetation and crabs. During the period, there might be some differences around the dead body of the halophyte because of the presence of the dead body. Therefore, I investigated the distribution of soil characteristics, vegetation, and trace of the crab activities around the dead body of *Suaeda glauca* to see if there is a significant difference.

In the result of the research, the area where *Suaeda glauca* is located shows lower vegetation cover and more trace of the crab activities. Several soil characteristics also shows significant differences depending on the distance from the dead body. The result shows that the dead body of the *Suaeda glauca* still holds its physical role in surrounding area, and it can make the differences in ecological landscape between the 'dead body area' and the bare land. Therefore, the result of this study suggests that if there are a lot of dead bodies of halophyte in salt marsh, then the presence of the dead body should be regarded as a landscape shaping component of the ecosystem.

**Keywords :** plant dead body, *Suaeda glauca*, vegetation cover, soil, crab