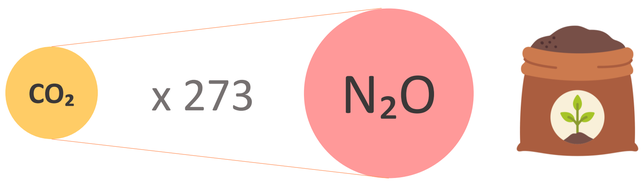
지속가능한 농업을 위한 원격탐사 기반 엽록소 함량 추정 및 질소비료 효율화 연구

류수현 서울대학교 농업생명과학대학 농림생물자원학부 석사
박한비 서울대학교 농업생명과학대학 농림생물자원학부 석사
김형석 서울대학교 농업생명과학대학 조교수*

서론

탄소중립과 농업

기후 변화 대응을 위한 탄소중립 목표 달성은 산업 전반의 온실가스 감축을 요구한다.
농업 부문은 주요 배출원 중 하나로, 특히 질소질 비료 사용 과정에서 발생하는
아산화질소(N_2O)는 CO_2보다 온실효과가 273배 높아(IPCC, 2024) 효과적인 관리가 필수적이다.

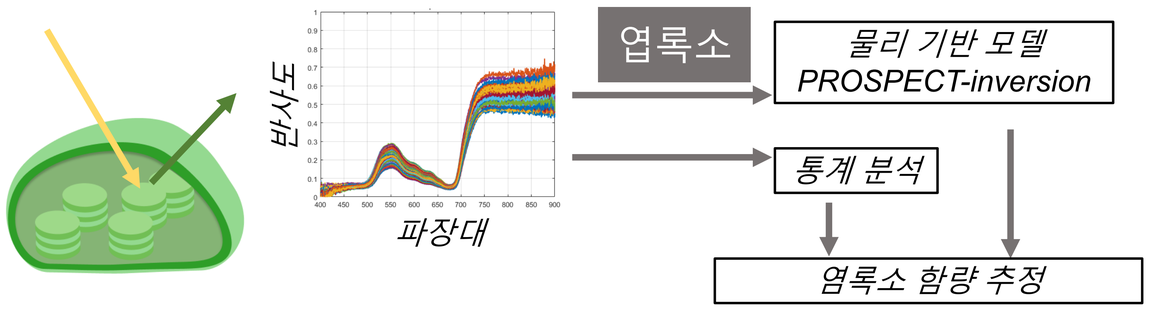


문제 및 필요성

해결책은 작물의 실제 질소 요구도 기반 정밀 시비에 있다. 엽록소 함량은 식물의 질소 영양 상태를 반영하는 핵심 지표로, 이를 신속하고 비파괴적으로 측정할 수 있다면 효과적인 질소 관리의 과학적 토대가 된다.

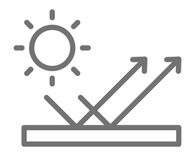
초분광 원격탐사는 식생의 분광 특성을 통해 엽록소 함량을 추정할 수 있으나, 벼 대상 연구는 밀·옥수수 등 타 작물 대비 부족하며 논 환경의 복잡성으로 인해 모델 연구에 어려움이 존재한다.

질소비료 효율화를 위한 원격탐사 기반 엽록소 함량 추정



연구 목적

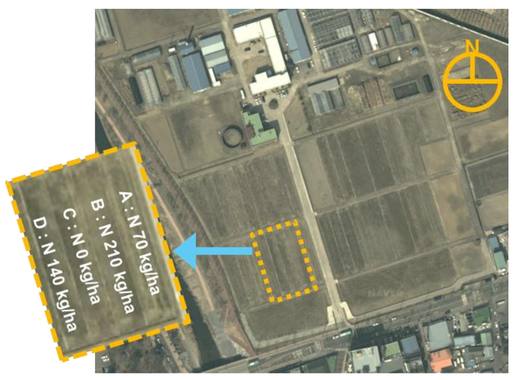
본 연구는 다양한 질소 시비 조건의 벼를 대상으로 잎 수준 초분광 데이터와 실측 엽록소 함량을 연계하여 정밀 추정 모델을 개발하고, 원격탐사 기반 질소 관리 전략 고도화를 통해 농업 부문 탄소중립 달성에 기여하고자 한다.



잎수준 반사도는 생육단계와 질소시비 정도에 따른 차이를 어느정도로 추정할 수 있는가?
여러 잎수준 엽록소 함량 추정 방식에는 어떠한 원리가 추정 성능 차이를 야기하는가?

연구 방법

실험 포장



파괴적 분석

파괴적 엽록소 함량 분석
- 엽록소 함량
- 카로티노이드 함량

파괴적 질소 함량 분석
- 탄소 함량
- 질소 함량



원격 탐사를 통한 데이터 수집



서울대학교 수원 부속농장에서 4개의 서로 다른 질소 비료 양를 시비하였다. 각 처리구에서 소형 분광기로 반사도 데이터를 벼의 전 생육단계에서 주기적으로 수집하였다.
이후 잎을 채취해 엽록소 함량과 탄소와 질소 함량 데이터를 수집하였다.

연구 결과

방법론 #1: 식생지수 GCVI 기반의 엽록소 함량 추정

- GCVI는 서로 다른 질소 시비양에 따른 잎수준 엽록소 함량 차이를 잘 나타내었다.

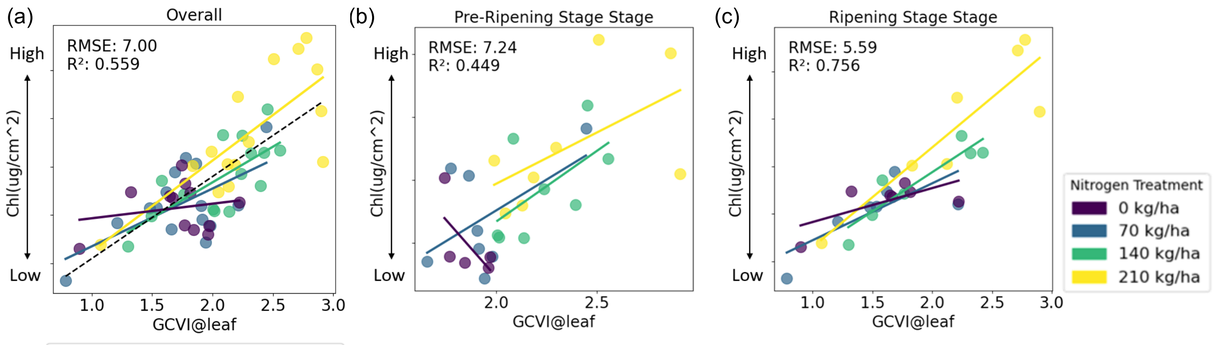


그림 1. 생육단계에 따른 GCVI와 잎수준 엽록소 함량의 상관성
((a) 전 생육단계, (b) 등숙기 전 단계, (c) 등숙기)

방법론 #2: 물리기반 모델 PROSPECT inversion 기반의 엽록소 함량 추정

- PROSPECT inversion 기반 잎수준 엽록소 함량 추정은 방법론 #1과 동일하게 등숙기에서 가장 높은 추정 성능을 보였다.
- 잎수준 엽록소 함량이 높을 경우 실제보다 과소평가되는 경향이 나타났다.

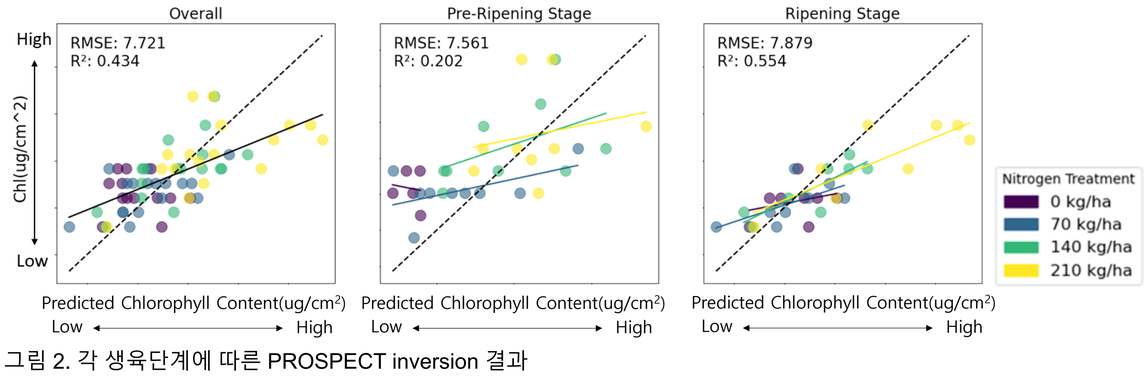


그림 2. 각 생육단계에 따른 PROSPECT inversion 결과

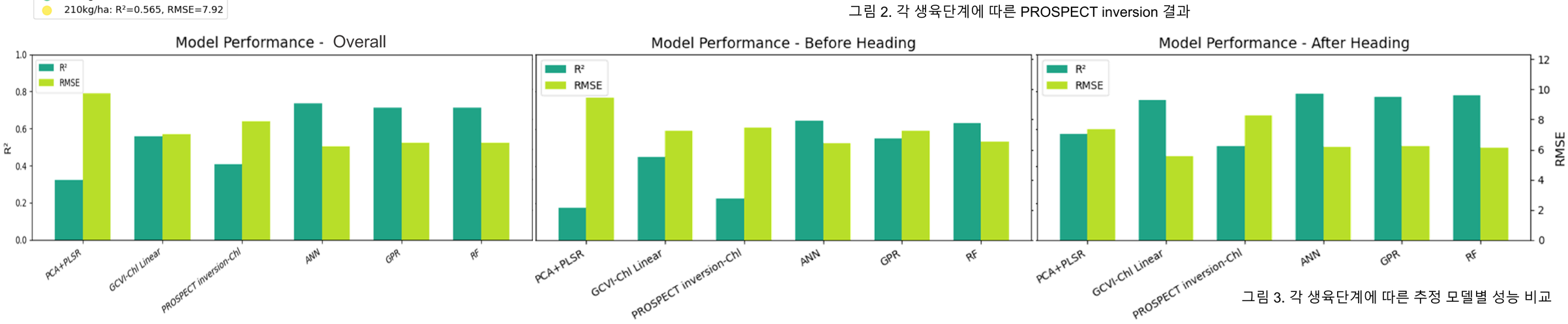


그림 3. 각 생육단계에 따른 추정 모델별 성능 비교

식생지수(GCVI) 기반 접근방법과 머신러닝 기반 모델(ANN, GPR, RF)은 등숙기에서 엽록소 추정에 높은 정확도 보였다. 이는 등숙기에서 작물 생체량과 생산성 예측 가능성을 보이며 이를 기반으로 적정 비료 시비량 결정에 도움을 줄 수 있다. 향후 출수기 전후로 성능 차이가 존재하기에 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

결론

본 연구는 정밀 질소 관리를 통한 농업 부문 탄소중립 기여의 기반 기술로서, 초분광 데이터를 활용한 벼 잎의 엽록소 함량 정밀 추정 모델을 개발하고자 수행되었다. 질소 시비 수준과 생육 단계를 달리한 조건에서 잎 단위 분광 반사율 데이터를 수집하였으며, 식생지수(GCVI), 통계 모델(PLSR), 물리 기반 모델(PROSPECT inversion)의 성능을 비교 분석하였다. 분석 결과, 잎수준 엽록소 함량과 분광 반사도 간의 관계 및 추정 모델의 정확도는 생육 단계에 따라 뚜렷한 차이를 보였으며, 특히 등숙기를 전후하여 그 양상이 변화하는 것을 확인하였다. 이처럼 생육단계에 따라 반사도에 반영되는 엽록소 정보의 양상이 달라지며, 이를 고려하는 것이 엽록소 함량 예측의 정밀도 향상에 중요함을 확인할 수 있었다.

최종적으로 본 연구는 생육 단계에 따른 분광 특성 변화를 규명함으로써, 원격탐사 기반의 벼 질소 영양 상태 진단 기술을 고도화하고 저탄소 농업 실현에 기여할 수 있는 과학적 근거를 제시한다. 이는 원격탐사 기반 질소 영양 진단 기술 고도화와 정밀 시비를 통한 N_2O 배출 저감으로 이어져 농업 부문 탄소중립 실현에 기여할 것이다.