

서울대학교
SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

서울대학교 농업생명과학연구원Elias Kaiser 박사(제1저자)와 조경·지역시스템공학부 류영렬 교수(교신저자) 연구팀은 문헌 분석, 국내 벼·옥수수 군락에서의 초당100회(100 Hz) 고빈도 빛 측정, 그리고 동적 광합성 모델 분석을 결합하여 실제 작물 군락의 선펠렉 특성과 기존 연구 사이의 괴리를 처음으로 정량화했다.

	연구팀은 군락 내 빛을 측정²¹편의 연구 중 대부분이 권장 측정 빈도(100 Hz)보다 500배 낮은 빈도(중앙값 0.2 Hz)로 기록했으며, 식물을 변동광에서 키운 87건의 생장 실험은 빛 변화 빈도가 약 30분에 한 번(0.00056 Hz) 수준으로 실제 윈드플렉(약 1.66 Hz)보다 수천 배 느렸다는 사실을 밝혔다. 또한 강원도 철원의 벼 군락에서 100 Hz로 측정한 빛 자료를 모델에 적용한 결과, 선플렉으로 인한 하루 광합성 손실은 0.85~1.24%에 불과했다. 반면 비현실적인 빛 패턴을 사용하면 손실이 약 13%로 크게 부풀려져, 어떤 빛 패턴을 쓰는가가 결과를 좌우한다는 점을 보였다. 이번 연구는 실제 들판의 빛 환경을 반영한 새로운 작물 개량 목표 설정의 필요성을 제시하며, 기후변화(CO₂ 증가, 고온, 가뭄, 대기 건조) 하에서의 선플렉 광합성 연구와 위성 기반 광합성 추정의 정확도 향상에도 중요한 기준을 제공할 것으로 기대된다. 이 연구는 한국연구재단과 농촌진흥청의 지원을 받아 국제 저명 학술지 Global Change Biology에 게재되었다.
Abstract (영문)	Wind makes crop leaves flicker in sunlight ~2×/s, yet most lab studies use light changes thousands of times slower. Prof. Youngryel Ryu (SNU)'s team show this mismatch may mislead crop improvement targets. Published in Global Change Biology. Professor Youngryel Ryu's group from the Department of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering at SNU, led by Dr. Elias Kaiser (Research Institute of Agriculture and Life Sciences, SNU), has quantified the mismatch between natural sunflecks in crop canopies and the light fluctuations used in experiments and models, and published this work in Global Change Biology. Sunflecks are ubiquitous in crop canopies, yet their properties are understudied. Recent data indicates that on sunny days, wind-induced sunflecks within crop canopies (windflecks) occur roughly twice per second and at amplitudes of roughly 10% of full sunlight. However, studies on the effects of fluctuating light on photosynthesis and plant growth often use fluctuations that do not resemble sunflecks, possibly resulting in irrelevant crop improvement targets. In this review, first, we quantify this mismatch between experiments and reality, showing that most studies measuring light intensities in crop canopies did so too infrequently to capture all sunfleck properties, while studies either simulating dynamic photosynthesis or growing plants under fluctuating light did so using much slower fluctuations than those often encountered in the field. Second, we attempted to estimate the losses of photosynthesis due to sunflecks: using light intensity fluctuations recorded inside a rice canopy at high frequency (100 Hz) on a sunny day, a dynamic photosynthesis model based analysis calculated minimal losses (0.85%–1.24% diurnally; relative to steady-state simulations), suggesting that sunflecks are too frequent, short, and weak to cause substantial losses due to slow dynamics of photosynthesis. We found that the choice of light intensity pattern matters enormously, as estimated losses reached 13% diurnally when using a less realistic light intensity pattern. We also introduce a framework for determining photosynthesis under windflecks based on pulsed light experiments. Thirdly, we present an overview of effects of global climate change on dynamic photosynthesis and crop growth under fluctuating light, concluding that likely, rising [CO₂] will benefit photosynthesis under sunflecks, whereas heat, VPD and drought may be detrimental. Finally, we suggest

	future research directions, noting that new targets for crop improvements under sunflecks will require a much better characterization of sunflecks, their windfleck and cloudfleck components, and their effects on photosynthesis and plant growth.
Journal Link	https://doi.org/10.1111/gcb.71147

■ 본문

□ Elias Kaiser 박사 주도, 서울대 연구진의 국내 현장 측정과 국제적 시각의 결합

- 서울대학교 농업생명과학연구원Elias Kaiser 박사와 조경·지역시스템공학부 류영렬 교수, 협동과정 농림기상학 쑨루이(Rui Sun) 연구원으로 구성된 연구팀은 작물 군락 속‘선플렉(sunfleck)’, 즉 잎 사이로 순간적으로 들어오는 햇빛의 특성이 그동안 광합성 및 작물 개량 연구에서 간과되어 왔음을 밝힌 리뷰 논문을 발표했다.
- 약60년 전 광합성 연구의 선구자들은 자연에 가까운 빠른 빛 변동에서는 광합성이 손실 없이 빛을 활용할 수 있다고 보고했지만, 이후 학계에서는 광합성이 갑작스러운 빛 변화에 느리게 반응하므로 이를 개선하면 작물 수량을 높일 수 있다는 관점이 주류가 되었다. 연구팀은 이 관점이 실제 들판의 빛 환경을 제대로 반영하고 있는지 정면으로 검증했다.
- 해당 성과는 국제 저명 학술지Global Change Biology에 게재되었다

□ 실험과 현실의 괴리: “실제보다 수천 배 느린 빛”

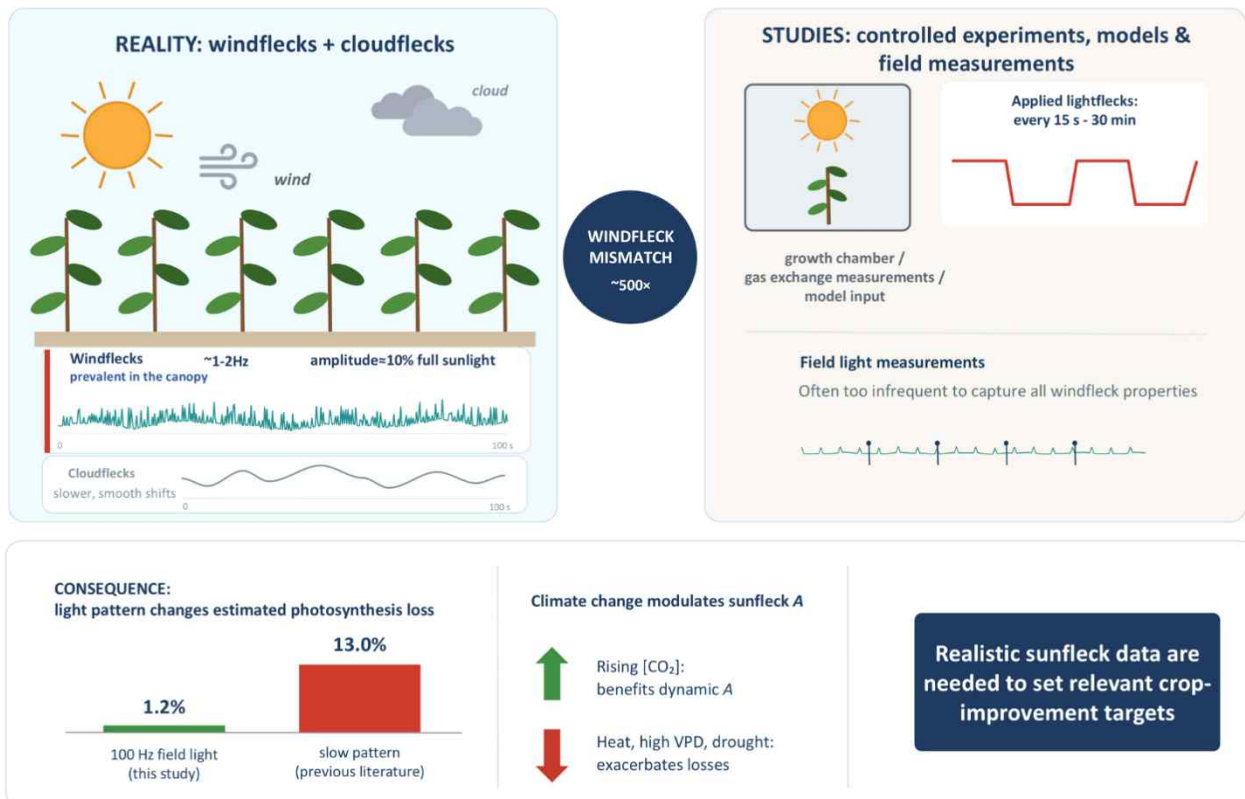
- 연구팀은 먼저 군락 내 빛 측정 연구(21편), 동적 광합성 모델 연구(29편), 변동광 생장 실험(31편, 90건)을 체계적으로 분석했다. 그 결과 군락 내 빛 측정 연구의 대부분은 권장 측정 빈도(100 Hz)보다500배 낮은 빈도(중앙값0.2 Hz)로, 그것도 중앙값2.5일의 짧은 기간 동안만 빛을 기록한 것으로 나타났다. 여러 날에 걸쳐 고빈도로 측정한 연구는 단 한 편도 없었다.
- 모델 연구에서 사용한 빛 변동은 약15초에 한 번(중앙값0.07 Hz) 수준이었고, 생장 실험에서는 약30분에 한 번(0.00056 Hz)에 불과해 실제 윈드플렉(평균1.66 Hz, 즉 초당 약2회)보다 수천 배 느렸다. 빛 변동의 세기 역시 실제 윈드플렉(약 $170 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)의 약 두 배에 달했다. 즉, 지금까지의 많은 연구가 실제 들판에서 작물이 경험하는 것과는 전혀 다른 빛 조건에서 광합성과 생장을 평가해 온 셈이다.

□ 국내 벼 군락 고빈도 측정으로 본 선플렉의 실제 영향

- 연구팀은2025년 여름 강원도 철원의 벼 논과 경기도 수원 의 옥수수 밭에서 초당100회 빛 세기를 측정했다. 맑은 날 군락 내부의 빛은 매우 빠르고 잦게 변동한 반면, 흐리거나 구름이 짙은 날에는 이러한 짧은 변동이 거의 나타나지 않았다.
- 이 벼 군락 실측 자료를 동적 광합성 모델에 입력한 결과, 광합성의 느린 반응으로 인한 하루 광합성 손실은 0.85%에 불과했고, 측정 자료를1분 간격으로 낮추어도1.24%에 그쳤다. 반면 기존 연구에서

사용된 단순화된 빛 패턴을 적용하자 손실이 약13%로 크게 늘었다. 이는 실제 선플렉이 광합성의 느린 반응으로 큰 손실을 일으키기에는 너무 잏고, 짧고, 약하다는 것을 의미하며, 어떤 빛 패턴을 쓰는가가 손실 추정을 좌우한다는 점을 보여준다. 연구팀은 이와 함께 펄스광 실험 결과를 활용해 '윈드플렉 조건의 광합성'을 추정하는 새로운 분석 틀도 제시했다.

Overlooked sunfleck properties: reality vs. how we study them



□ 기후변화와 선플렉 광합성, 그리고 향후 연구 방향

- 연구팀은 기후변화 요인이 변동광 하의 광합성에 미치는 영향도 종합했다. 대기 중CO₂ 농도 증가는 선플렉 하의 광합성과 생장에 이로운 반면, 고온, 가뭄, 높은 대기 건조도(VPD)는 부정적인 영향을 줄 가능성이 큰 것으로 나타났다. 다만 실제 윈드플렉을 모사한 연구가 거의 없어, 이 분야 역시 현실적인 빛 조건에서의 검증이 필요하다고 강조했다.
- 나아가 연구팀은 바람에 의한 윈드플렉과 구름에 의한 클라우드플렉을 구분한 장기·고빈도 빛 관측, 실제 윈드플렉 조건에서의 광합성 측정과 모델 검증, 현실적인 변동광 조건에서의 작물 생장 실험, 그리고 에디공분산 관측망 및 태양유도엽록소형광(SIF) 등 원격탐사 자료와의 연계를 향후 연구 과제로 제안했다.

□ 연구의 의의 및 기대효과

- 이번 연구는 광합성 개선을 통한 작물 개량 연구가 실제 들판의 빛 환경에 기반해야 한다는 점을 정량적

근거와 함께 제시했다는 데 의의가 있다. 실험실의 비현실적인 빛 조건에서 도출된 개량 목표는 실제 들판에서 기대만큼의 효과를 내지 못할 수 있기 때문이다.

- 류영렬 교수는 “위성과 드론 기반 원격탐사로 광역 광합성을 추정할 때에도 작물 군락 속 빛의 변동을 어떻게 고려할지가 중요한 과제”라며, “이번 연구가 실제 들판 조건에 맞는 작물 개량 목표 설정과 기후변화 대응 농업 연구의 기준점이 되기를 기대한다”고 말했다.

□ 연구자

- 성 명: 류영렬(교신저자)
- 소 속: 서울대학교 조경·지역시스템공학부 교수
- 연락처: 02-880-4871, yryu@snu.ac.kr

- 성 명: Elias Kaiser (제1저자)
- 소 속: 서울대학교 농업생명과학연구원
- 연락처: elias.kaiser@wur.nl

- 성 명: 쉰루이(Rui Sun)
- 소 속: 서울대학교 협동과정 농림기상학
- 연락처: ruisun659@gmail.com