

01

식물자원분야
- 다시, 광합성을 생각한다

이문섭
충북대학교
농업생명환경대학
식물자원학과
/ 조교수
mlee128@chungbuk.ac.kr



이예솔
충북대학교
농업생명환경대학
식물자원학과
/ 연구원
a5338@naver.com



유가람
충북대학교
농업생명환경대학
식물자원학과
/ 연구원
river9799@naver.com

1. 머리말

오늘날 농업은 과학과 기술의 발전 속에서 빠르게 변화하고 있다. 인공지능, 자동화, 데이터 기반 농업 등 새로운 도구들이 등장하며 생산의 효율성과 정밀성이 높아지고 있지만, 이러한 변화 속에서도 농업의 본질은 여전히 ‘생명을 이해하는 것’에 있다.

작물은 생명체이자 스스로 에너지를 만들어내는 존재이다. 그 중심에는 광합성이 있다. 광합성은 단순한 에너지 전환 과정이 아니라, 생명체가 환경과 상호작용하며 살아가는 방식을 보여주는 핵심 현상이다.

작물을 이해한다는 것은 곧 광합성을 이해하는 일이며, 이는 농업의 모든 현상을 해석하는 출발점이 된다. 생육, 환경, 그리고 생산성의 모든 변화는 결국 광합성의 반응을 통해 설명될 수 있다. 따라서 광합성은 ‘식물 생리’의 한 단면이 아니라, 생명을 이해하기 위한 언어라 할 수 있다.

최근 우리는 기술이 주도하는 시대에 살고 있다. 새로운 장비와 분석 도구가 등장할 때마다 그것을 ‘어떻게 활용할까’를 먼저 고민하지만, 정작 ‘무엇을 이해하기 위한 것인가’라는 질문은 뒷전으로 밀려나곤 한다. 필자의 경우, 동료 연구자들과의 대화를 통해 최신의 초분광카메라를 도입하거나 드론을 활용해 데이터를 수집하는 데서 그치는 사례를 종종 보았다. 그러나 그러한 데이터를 왜 생산하는지에 대한 근본적인 질문, 생산된 데이터가 어떤 생리적 의미를 가지는지, 그리고 그 결과가 실제 작물의 생육과 어떻게 연결되는지에 대해서는 깊이 있는 논의가 부족한 경우가 많았다.

지도교수님께서 해주신 말씀이 지금도 마음에 남는다. “기술은 수단이지만, 이해는 목적이다.”

농업이 진정으로 발전하기 위해서는 기술의 적용보다 먼저, 그 기술이

다루고자 하는 생명 현상에 대한 깊은 이해가 선행되어야 한다. 광합성은 그 출발점에서 우리에게 여전히 “생명을 이해하는 눈”을 제공한다.

이처럼 광합성은 농업의 본질을 다시 생각하게 하는 출발점이 된다. 작물이 어떻게 성장하고, 어떤 환경에서 더 잘 자라는가를 이해하기 위해서는 우선 광합성의 원리와 반응을 이해하는 일이 선행되어야 한다. 작물의 생육은 단순히 시간이 지남에 따라 커지는 과정이 아니라, 환경 조건 속에서 광합성이 얼마나 효율적으로 이루어졌는가의 결과이다. 즉, 작물의 생육과 생산성은 광합성의 누적된 기록이라 할 수 있다.

빛의 세기, 온도, 수분, 이산화탄소 농도, 그리고 잎의 구조적 특성까지, 모든 요인이 광합성 속도와 효율을 결정하며, 이는 다시 생육으로 되돌아온다. 따라서 작물의 생리적 반응과 생산성을 이해하기 위한 첫걸음은 언제나 광합성에 대한 이해에서 출발한다. 나아가 광합성은 단순히 작물 생리와 생산성 향상의 영역에 머무르지 않고, AI 기반 농업과 스마트농업 등 농업 산업 전반에 적용 가능한 통합 개념으로 확장될 수 있다.

본 글에서는 작물의 광합성에 대한 기본적인 특성과 이러한 특성이 농업 현장에서 어떻게 적용될 수 있는지, 그리고 다른 분야에서는 어떠한 방식으로 활용되고 있는지를 함께 살펴보고자 한다.

2. 광합성- 작물 생육의 근본적 결정자

2.1 광합성의 원리

광합성은 작물의 생존과 생육에 필수적인 반응이다. 식물은 대기의 이산화탄소를 흡수하고, 빛 에너지를 이용하여 유기물을 합성한다. 작물의 생육(growth)은 단순히 시간이 지남에 따라 커지는

과정이지 아니라, 환경 속에서 이루어진 광합성 효율의 누적 결과라 할 수 있다.

빛, 온도, 수분, 이산화탄소 농도, 엽록소의 양과 분포 등 다양한 요인이 광합성 속도를 결정하며, 이는 다시 잎의 성장, 줄기의 신장, 뿌리의 발달로 이어진다. 즉, 광합성은 생육의 원동력인 동시에 농업 생산성의 기초이다.

예를 들어, 고온에서는 기공이 닫히면서 이산화탄소의 공급이 줄어들고, 이에 따라 광합성 효율이 감소한다. 반대로 수분이 충분하고 광량이 적절한 조건에서는 탄소동화가 원활히 일어나 생육이 촉진된다.

이러한 반응들은 기상 조건이나 재배 관리의 영향을 받지만, 그 중심에는 항상 ‘광합성의 반응’이 존재한다. 따라서 광합성은 생육을 설명하는 기초 단위이자, 환경 관리와 생리 반응을 연결하는 핵심 관문이라 할 수 있다.

광합성 속도는 이산화탄소 농도, 빛의 세기, 온도에 따라 달라진다. 일반적으로 이산화탄소 농도가 높아지면 광합성률이 증가하며, 빛의 세기 역시 일정 수준까지는 광합성률을 높인다. 그러나 이들 요인은 한계점(Saturation point)에 도달하면 더 이상 광합성률을 증가시키지 않는다. 온도 또한 중요한 요인으로, 최적 온도를 벗어나면 효율이 급격히 떨어진다.

스마트팜에서 흔히 볼 수 있는 탄산시비(이산화탄소 시비)는 이러한 원리를 응용한 대표적 사례이다. 대기보다 높은 농도의 이산화탄소를 공급함으로써 광합성률을 높이고 생산성을 향상시키는 것이다. 반면 빛의 세기는 일정 수준 이상이 되면 더 이상 광합성률에 영향을 주지 않기 때문에, 스마트온실에서는 조도를 효율적으로 조절하여 불필요한 에너지 소비를 줄인다.

또한 식물이 이산화탄소를 흡수하고 산소를 방

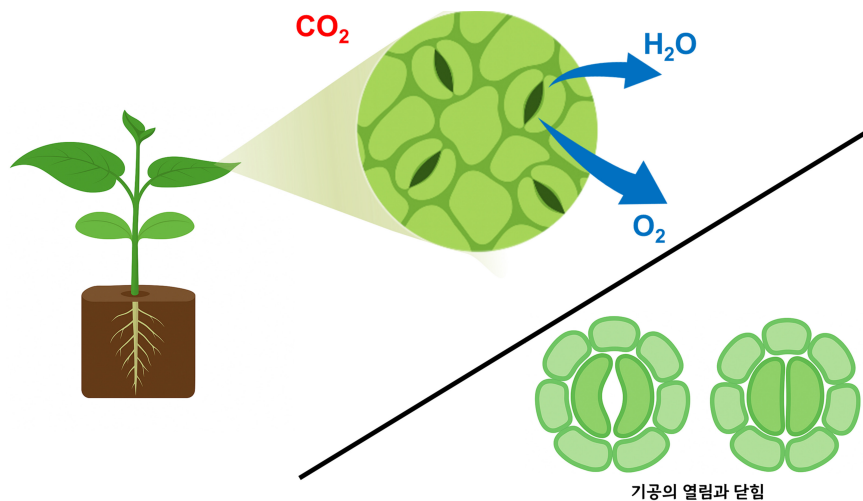


그림 1. 기공 개폐에 따른 기체 교환 과정

출하는 과정은 잎의 기공(stomata)을 통해 이루어진다. 기공이 열려 있는 동안에는 이산화탄소가 흡수되지만, 동시에 내부의 수분이 외부로 증발한다. 이와 같은 기공 개폐 조절은 광합성과 증산의 균형을 유지하는 핵심 생리 메커니즘이다.

기공은 잎의 표면에 존재하는 미세한 공극으로, CO_2 는 흡수되고 O_2 와 H_2O 는 방출. 기공 개폐는 광합성과 증산 조절에 핵심적인 기능을 수행한다.

2.2 광합성과 기후변화

현재 대기 중 이산화탄소 농도는 약 430 ppm에 이르렀으며, 지속적으로 증가하고 있다. 이러한 급격한 농도 증가는 지구 역사 전체를 놓고 볼 때 매우 짧은 기간 안에 일어난 변화로, 인류의 산업화 이후 불과 수십 년 만에 이루어진 현상이다. 이러한 급진적인 환경 변화는 지구상의 식물이 자라는 환경이 근본적으로 달라진 것으로, 식물에게는 커다란 도전이자 생육에 중대한 영향을 미치는 요인이다.

이산화탄소의 증가는 온실효과를 강화시켜 지구의 평균 온도를 상승시키며, 이는 곧 작물의 광합성 반응과 생육 환경 전반에 영향을 미친다. 온도 상승은 고온 스트레스를 유발하여 광합성 효율 저하, 수분 증발 증가, 기공 폐쇄 등을 초래하고, 결국 이러한 복합적인 영향은 농업 생산성의 감소로 이어질 수 있다.

이러한 맥락에서 미국 일리노이대학교의 FACE(Free Air Concentration Enrichment) 연구는 미래 기후 조건에서 작물의 반응을 규명하기 위한 중요한 시도로 평가된다. 그러나 지역의 기후와 작물 특성이 상이한 만큼, 우리나라의 기후 조건과 재배 환경에서도 이러한 연구가 반드시 수행될 필요가 있다. 더불어, 기후변화 시대의 농업에서는 변화하는 환경 속에서도 광합성을 안정적으로 유지할 수 있는 관리(management) 기술의 중요성이 커지고 있다. 이 글에서는 복잡한 광합성 생리의 세부 메커니즘을 다루기보다, 이러한 생리적 원리를 바탕으로 농공학적 응용 가능성을 제시하고자 한다.

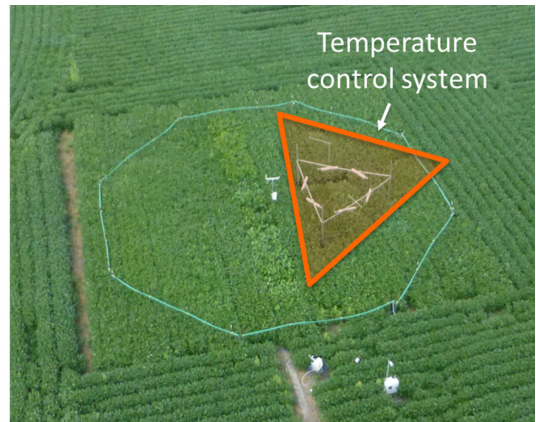
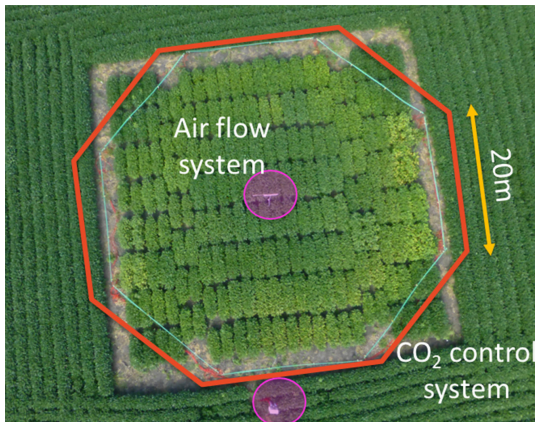


그림 2. 미국 일리노이대학교의 FACE(Free Air Concentration Enrichment) 시스템: 미래 기후 조건(고농도 이산화탄소, 오존 및 온도 상승)에서의 작물 반응 분석. 출처: University of Illinois SoyFACE Project (<https://soyface.illinois.edu/>)

2.2.1 광합성과 원격탐사

광합성은 기공의 개폐와 밀접하게 연관되어 있다. 기공이 열리면 이산화탄소가 흡수되지만, 동시에 수분이 증산되며 잎의 표면 온도가 낮아진다. 이러한 현상은 열화상(Thermal imaging) 기술을 통해 간접적으로 관찰할 수 있다.

예를 들어, 관수량을 달리한 잔디 실험에서 광합성이 활발한 구역은 상대적으로 낮은 온도를 나타내며, 열화상 카메라로 그 차이를 시각적으로 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 작물의 수분 상태, 관수 시기, 광합성 활성 정도 등을 대규모 농경지 단위에서 분석할 수 있으며, 나아가 정밀 관개 및 생육 진단 시스템 구축에 활용할 수 있다.

광합성은 토양 수분과도 밀접하게 연결되어 있다. 토양의 수분 상태는 기공 개폐와 증산 속도를 조절하며, 이는 곧 광합성 효율에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 토양 수분 센서와 열화상·광합성 지표를 결합한 물관리 시스템은 물환경 및 토질 기반 자원관리의 효율화를 이끄는 중요한 농공학적 응용 방향이 될 수 있다.

즉, 열화상 카메라는 광합성을 직접 측정하지 않지만, 기공의 개폐 상태와 증산 냉각 효과를 확

용하여 광합성 활성도를 추정할 수 있는 유용한 도구이다.

또한, 광합성은 영상 기반 분석기술, 특히 초분광카메라(Hyperspectral camera)와 깊은 관련이 있다. 작물의 잎은 빛의 반사(Reflectance), 투과(Transmittance), 흡수(Absorption) 특성을 지니며, 가시광선 이외의 특정 파장대에서 이러한 반응은 광합성 특성과 밀접한 상관관계를 가진다.

예를 들어, Fu et al.(2020)은 초분광 데이터를 활용하여 광합성의 주요 생리 지표(V_{cmax} , J_{max} 등)를 예측하였으며, 이는 미국 일리노이대학교에서 수행된 고속 대량 표현형 분석(High-throughput phenotyping) 연구의 기반이 되었다. 이러한 접근은 드론 센서와 영상 분석 기술을 통해 넓은 면적의 작물 광합성 효율을 비파괴적으로 측정할 수 있는 가능성을 보여준다.

2.2.2 광합성과 탄소저감 모델링

광합성은 기본적으로 이산화탄소를 흡수하는 과정이다. 최근 전 세계적으로 탄소상쇄(carbon offset)와 탄소배출권(carbon credit)에 대한 관심이 높아지면서, 농업 또한 탄소중립 실현의 핵



그림 3. 미국 일리노이대학교의 고속대량표현형 분석시스템.
RGB, 열화상, 초분광 카메라를 장착하여 작물의 광합성 효율 및 생육 변화를 모니터링하고, 우수 형질 작물을 선별

심 분야로 주목받고 있다. 농업은 단순히 식량 생산을 넘어 이산화탄소 저감의 주요 축으로 기능할 수 있다.

그러나 현재 농업 현장에서 탄소가 얼마만큼 흡수·배출되는지를 정량적으로 평가할 수 있는 데이터와 모델링 체계는 아직 부족하다. 실제로 농업 부문이 탄소 감축 기여도를 입증하고 보상을 받기 위해서는, 광합성을 포함한 탄소 순환 과정의 정량적 근거가 필요하다.

광합성 모델링을 활용하여 지역별 또는 작물별 탄소 수지를 계산한다면, 농업의 탄소상쇄 효과를 과학적으로 제시할 수 있을 것이다. 예를 들어, 잎 단위의 광합성 측정 단위인 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 를 기반으로, 작물군의 총 이산화탄소 동화량을 공간적으로 확장하면 농공학적 탄소저감 모델 구

축이 가능하다. 이러한 모델은 단순한 학문적 분석을 넘어, 탄소중립 농업정책 수립과 탄소 크레딧 제도 설계에 활용될 수 있다. 즉, 광합성 기반의 탄소흡수 정량화는 농공학이 과학적 근거와 정책적 실천을 연결하는 핵심 매개체가 될 것이다.

2.2.3 광합성과 디지털 트윈

미국 일리노이대학교의 대표적인 광합성 연구 프로젝트인 RIPE(Realizing Increased Photosynthetic Efficiency)은 광합성 효율 향상을 위해 Modelling - Improve - Translate의 세 단계로 연구를 구성하였다. 즉, 모델링을 통해 광합성 과정의 병목(Bottleneck)을 규명하고, 이를 유전·생리적 수준에서 개선한 후, 그 결과를 실험실을 넘어 실제 포장(Field) 환경에 적용하는

것이다. RIPE 연구의 초기 단계에서 수행된 핵심 작업 중 하나가 바로 디지털 트윈(Digital Twin) 개념의 적용이었다. 복잡한 170여 개의 세부 반응 단계로 이루어진 광합성 메커니즘 중에서 어떤 과정을 우선적으로 개선해야 할지를 결정하기 위해, 가상의 컴퓨터 모델(디지털 트윈)을 통해 수많은 조건을 시뮬레이션하였다. 이 접근은 실제 실험에 소요되는 막대한 시간과 자원을 절약하며, 효율적인 연구 방향 설정에 큰 기여를 하였다.

최근 농공학 분야에서도 인공지능(A.I.)과 센서 데이터를 기반으로 현실의 재배 환경을 가상 공간에 재현하는 디지털 트윈 기술이 빠르게 확산되고 있다. 디지털 트윈은 작물의 생육 환경과 생리 반응을 실시간 시뮬레이션함으로써, 기후나 관리 조건이 달라질 때의 생육 변화를 예측하고 최적의 재배 전략을 도출할 수 있는 강력한 도구로 평가된다. 이때 광합성은 디지털 트윈 모델의 핵심 생리 변수로서 기능한다. 광합성률은 이산화탄소, 온도, 광량, 수분 등 외부 환경 변화에 가장 민감하게 반응하는 생리 지표이며, 이를 실시간 센서 데이터(열화상, 초분광 영상, CO₂ 농도, 토양 수분 등)와 결합하면 작물의 상태를 가상 환경에서 정량적으로 재현하고 예측할 수 있다.

예를 들어, 광합성 반응식을 기반으로 한 AI 학습 모델은 “온도 + 광량 + 수분 조건”의 조합에 따른 생육 반응을 예측하여 최적의 재배환경(Optimal Cultivation Condition)을 가상 공간에서 도출할 수 있다. 이러한 접근은 단순한 환경 제어를 넘어, ‘광합성 중심의 재배 의사결정 시스템(Decision-support System)’ 구축으로 확장될 수 있다. 결국, 디지털 트윈은 광합성이라는 생리학적 원리를 AI, 센서, 모델링 기술로 확장한 새로운 농공학적 실험실이라 할 수 있다. 이는 농업이 나아가야 할 지속가능하고 예측 가능한 생산체

계의 과학적 기반을 제공하며, 궁극적으로는 데이터 기반의 광합성 생리 모델을 중심으로 한 차세대 스마트농업의 구현으로 이어질 것이다.

3. 광합성은 농업 현상을 읽는 언어이다

광합성은 단순히 식물 내부에서 일어나는 생화학적 반응이 아니라, 농업 현상을 해석하는 보편적 언어이다. 가뭄이 닦쳤을 때 수확량이 감소하는 이유는 결국 광합성 저하 때문이다.

비료의 양이 많을수록 잎의 질소 농도가 높아지고, 이는 엽록소 합성과 광합성 능력을 변화시킨다. 이처럼 기상재해·비료 관리·품종 선택·생육모델링 등 농업 전반의 현상은 모두 광합성을 매개로 설명될 수 있다. 농공학에서 작물생리현상을 정량화하고, 환경과 생리의 상호작용을 모델화함으로써, 생명 시스템을 더 깊이 이해하는 할 수 있다.

결국, 광합성을 이해한다는 것은 농업 전체의 메커니즘을 이해하는 일과 다르지 않다.

“광합성은 생명 현상의 일부가 아니라, 농업을 이해하는 가장 기본적인 문법이다.”

4. 마치면서

과거의 작물 연구는 주로 $G \times E$ (Genotype \times Environment), 즉 작물(유전형)과 환경 간의 상호작용을 분석하는 데 초점이 맞추어져 있었다. 하지만 최근 농업 연구는 $G \times E \times M$ (Genotype \times Environment \times Management) 으로 확장되고 있다. 이는 단순히 작물과 환경의 반응을 넘어서, 인간의 관리(Management)가 생리적 반응과 생산성에 미치는 영향을 통합적으로 분석하려는 시도로 볼 수 있다. 이러한 변화는 AI와 데이터

분석 기술의 발전 덕분에 가능해졌다. 과거에는 통계적 접근으로만 파악할 수 있었던 단순 상관관계 분석을 넘어, 이제는 복잡한 환경 요인과 생리적 신호를 동시에 고려하는 정밀한 예측이 가능해졌다. 특히 광합성 연구 분야에서는, AI 기반 이미지·센서 데이터 분석을 통해 그동안 병목으로 여겨졌던 생리 데이터의 해석 한계가 해소되고 있다. 이는 다시 한 번 광합성 연구의 중요성을 부각시키며, 작물의 생산성과 환경 적응성을 동시에 향상시킬 수 있는 새로운 가능성을 열고 있다.

또한, 기후위기와 탄소중립 농업의 대두는 광합성의 역할을 더욱 강조한다. 광합성은 이산화탄소를 흡수하고 유기탄소로 전환하는 유일한 생물학적 과정으로, 농업이 단순한 식량 공급자를 넘어 탄소저감 주체로 기능할 수 있는 과학적 근거를 제공한다. 즉, 농업은 식량안보뿐 아니라 기후안보의 중심축으로 자리매김하고 있다.

이제 농공학에는 새로운 기회가 열리고 있다고 믿는다. AI, 센서, 데이터, 모델링 기술이 빠르게 융합되는 지금, 농공학은 광합성의 효율과 반응을 정량적으로 규명하고 이를 물·에너지·탄소 관리로 확장할 수 있는 가장 유연한 학문적 기반을 갖추고 있다고 생각한다.

다시 말해, 농공학은 생리-환경-기술을 아우르는 통합적 농업 플랫폼으로 발전할 잠재력을 지니고 있으며, 이는 곧 농업의 지속가능성과 기후 대응력을 동시에 높일 수 있는 절호의 전환점이 될 것이다.

결국, 광합성 연구의 확장은 농공학이 생명과 환경, 그리고 인간의 관리가 만나는 교차점에서 미래 농업의 방향을 제시하는 새로운 언어로 자리 잡는 과정이다.

농공학은 이제 “생명을 이해하는 기술”을 바탕으로 지속가능성과 탄소중립이라는 인류의 과제

에 과학적으로 답할 가장 중요한 열쇠가 되고 있다고 믿는다.

참고문헌

1. Xin-Guang Zhu, Stephen P Long, Donald R Ort (2010). Improving photosynthetic efficiency for greater yield. *Annual review of plant biology*, 61: 235–261.
2. Stephen P Long, Elizabeth A Ainsworth, Alistair Rogers, Donald R Ort (2004). Rising atmospheric carbon dioxide: plants FACE the future. *Annual review of plant biology*, 55: 591–628.
3. Carl J Bernacchi, Stephen P Long, Donald R Ort (2025). Safeguarding crop photosynthesis in a rapidly warming world. *Science*, 388: 1153–1160.
4. Peng Fu, Katherine Meacham-Hensold, Kaiyu Guan, Jin Wu, Carl Bernacchi (2020). Estimating photosynthetic traits from reflectance spectra: A synthesis of spectral indices, numerical inversion, and partial least square regression. *Plant, Cell & Environment*, 43: 1241–1258.