

기후변화 및 환경스트레스 영향평가를 위한 한국형 SPAR(Soil-Plant-Atmosphere-Research) 시스템의 개발

상완규 · 김준환 · 신평 · 백재경 · 이윤호 · 조정일 · 서명철*
농촌진흥청 국립식량과학원
(2019년 8월 27일 접수; 2019년 9월 18일 수정; 2019년 9월 19일 수락)

Development of Korean SPAR(Soil-Plant-Atmosphere-Research) System for Impact Assessment of Climate Changes and Environmental Stress

Wan-Gyu Sang, Jun-Hwan Kim, Pyong Shin, Jae-Kyeong Baek,
Yun-Ho Lee, Jung-Il Cho and Myung-Chul Seo*

National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, 181, Hyeoksins-ro,
Iseo-myeon, Wanju-gun, Jeollabuk-do 55365, Republic of Korea

(Received August 27, 2019; Revised September 18, 2019; Accepted September 19, 2019)

ABSTRACT

The needs for precise diagnostics and farm management-decision aids have increased to reduce the risk of climate change and environmental stress. Crop simulation models have been widely used to search optimal solutions for effective cultural practices. However, limited knowledge on physiological responses to environmental variation would make it challenging to apply crop simulation models to a wide range of studies. Advanced research facilities would help investigation of plant response to the environment. In the present study, the sunlit controlled environment chambers, known as Korean SPAR (Soil-Plant-Atmosphere-Research) system, was developed by renovating existing SPAR system. The Korean SPAR system controls and monitors major environmental variables including atmospheric carbon dioxide concentration, temperature and soil moisture. Furthermore, plants are allowed to grow under natural sunlight. Key physiological and physical data such as canopy photosynthesis and respiration, canopy water and nutrient use over the whole growth period are also collected automatically. As a case study, it was shown that the Korean SPAR system would be useful for collection of data needed for understanding the growth and developmental processes of a crop, e.g., soybean. In addition, we have demonstrated that the canopy photosynthetic data of the Korean SPAR indicate the precise representation of physiological responses to environment variation. As a result, physical and physiological data obtained from the Korean SPAR are expected to be useful for development of an advanced crop simulation model minimizing errors and confounding factors that usually occur in field experiments.

Key words: Climate change, Photosynthesis, SPAR Chamber



* Corresponding Author : Myung-Chul Seo
(mcseo@korea.kr)

I. 서 언

농업은 대기 온도, 강수량, 이산화탄소 농도 등 기상 환경에 의해 크게 좌우되는 산업이다. 해마다 변동하는 기상 요소에 토양, 품종, 재배 방식 등의 다양한 요소가 결합되면 효과적인 영농 의사 결정 시스템 구축은 더욱 어려워진다. 따라서, 효과적인 재배 관리를 위해서는 의사 결정 프로세스를 지원할 수 있는 이론적 또는 예측적 프레임워크 내에서 구성된 생육 정보의 구축이 무엇보다 필수적이다. 현재 ICT 기술의 발달과 기상 요소 별 작물 반응에 대한 지식이 증가함에 따라 작물 생산에 있어서 의사 결정을 지원하기 위해 다양한 작물 생육 모형이 개발되어 활용되고 있다 (Reddy *et al.*, 2001). 작물 생육 모형에서 성장과 발달은 각 작물의 성장 잠재력과 다양한 환경적 한계 사이의 상호 작용에 의해 결정된다. 여기서 각 작물의 유전형질에 대한 잠재적인 성장 및 발달 속도는 양분 및 수분에 의해 제한 받지 않는 조건 하에서 각 온도 조건 별 달성 가능한 최대 속도로 정의된다 (Reddy *et al.*, 2001). 따라서 보다 정확한 작물 생육 모형 개발을 위해서는 기상 요소뿐 아니라 재배양식까지 정밀하게 제어 가능한 환경 제어 연구 시설의 구축이 무엇보다 중요하다. 이는 다른 환경 요인에 대한 효과는 배제한 채 단일 환경 변수에 대한 작물 반응 정보를 수집하는데 도움을 주어, 노지 실험에서 얻은 데이터보다 작물 생육 반응을 해석하는데 훨씬 용이하다.

기존의 식물 성장 챔버를 이용한 연구 결과는 낮은 광도와 광질로 인해 작물 생육 모형 적용에 어려움이 있어왔다. 또한 생육 공간의 한계로 뿌리의 성장이 제한되고 식물체간 경합효과를 반영하기 어려워 많은 농학자들은 작물 생육 모형을 개발하는데 성장 챔버를 이용한 연구결과를 일정 부분 제한하였다 (ARP, 1991; Sage, 1994). 이에 Phene *et al.* (1978)는 이러한 기존 성장 챔버의 한계점을 보완하고자 옥외 생육 챔버인 Soil-Plant-Atmosphere-Research (SPAR) 챔버를 개발하였다. 현재까지 SPAR 챔버는 1997년 미시시피주립대학에 처음 건설된 이후 플로리다 대학, 배틀 퍼시픽 노스웨스트 연구소, 미국 환경보호국 그리고 최근에는 미국 메릴랜드에 위치한 농업연구청(ARS) 등에서 환경 요인에 대한 작물 반응을 연구하는데 널리 활용되어 왔다. SPAR 시설의 주요 장점은 반복성과 환경 변수의 제어 및 측정의 높은 정확도에 있다 (Jones *et al.*, 1984; Reddy *et al.*, 1995a; 1995b). 특히, 이

시스템은 재배기간 중 작물의 전생육기간 동안 균락단위의 광합성 및 증발산량을 실시간으로 측정할 수 있어 환경변화에 따른 작물의 생육 반응을 보다 정밀하게 분석할 수 있다는 특징이 있다 (Reddy *et al.*, 2001). 지금까지 SPAR 시스템을 활용한 연구결과들은 미농무성 ARS (Agricultural research service)를 중심으로 2000년대 초반부터 꾸준히 발표되고 있는데 주로 감자, 옥수수 등 밭 작물을 대상으로 기후변화(고온, 고CO₂) 조건에서의 생육 변동 평가, 기상재해 피해 경감을 위한 재배관리법 분석 및 개발, 실제 미래기후에 적용 가능한 작물생육모형 개발 등의 주제로 연구가 이루어져 왔다 (Sang *et al.*, 2017). 특히 작물의 광합성에 관하여 많은 연구가 이루어져왔는데 최근 광합성을 통한 포장 생태계의 CO₂ 순환 및 물질 생산과 관련된 전체 생태시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며 (Running *et al.*, 2000; Tenhunen *et al.*, 2009), 이를 통해 개엽-개체-군락에 이르는 단계적 수준에서의 광합성 특성과 물질 생산 및 CO₂ 순환을 복합적으로 구명하고 이를 작물모형으로 모의하려는 연구가 진행되고 있다 (Adiku *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2006). 실제로도 SPAR 시스템을 통해 구축한 균락광합성 모형을 기반으로 면화, 감자 등 다양한 작물에 대해 보다 정밀한 작물모형이 개발되었다 (Sang *et al.*, 2017).

하지만 수년간의 연구에도 불구하고 환경 변이에 따른 작물 생육 반응의 정량적 정보는 여전히 부족한 실정이다. 본 연구는 기존 SPAR 챔버의 균락광합성 측정 시스템을 개선한 한국형 SPAR 시스템 개발을 통해 수집된 작물 생육 정보가 향후 작물 생육 모형 개발을 위해 어떻게 사용될 수 있는지에 대해 명시하고자 수행되었다. 이를 위해 국립식량과학원에 설치된 한국형 SPAR 시스템에서 콩 재배 시험을 진행하고 수집된 작물 생육 정보의 사례를 제시함으로써 향후 SPAR를 활용한 작물 및 기후변화 연구의 적용 가능성에 대해 알아보하고자 한다.

II. 한국형 SPAR 시스템의 구조 및 환경조절

현재 전북 완주군 국립식량과학원에 설치된 총 9기의 한국형 SPAR 챔버는 자연광 하에서 작물 성장 연구를 위해 챔버 내 대기 온도 및 조성(특히 CO₂ 농도)를 각각 독립적으로 제어할 수 있는 기능을 가지고 있다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 각 SPAR 챔버의 1/3

하단부는 작물의 근권부가 형성되는 대형 토양상으로 구성되어 있으며 2/3 상단부는 토양 위 실제 작물 재배가 이루어지는 부분으로 투과율 약 94%이상의 Plexiglas 재질로 밀폐되어 있다. 개발된 한국형 SPAR 챔버는 기존 챔버와는 다르게 외부와 내부의 2중 챔버 구조로 이루어져 있으며 외부 챔버는 콘크리트 패드 지면과, 내부 챔버는 대형토양상과 완전 밀착되어 있다. 북쪽 면의 덕트는 온도 조절 및 공기 순환을 위해 2기의 냉각 공조 시스템에 연결되어 있다. 다만 한국형 SPAR 챔버의 공기 순환 시스템은 기존 SPAR 챔버와 다르게 외부와 내부의 각 챔버가 독립적으로 구분되어 있다. SPAR 내 공기는 일정한 풍속으로 순환되는데 먼저 후면 공조 시스템의 대형 팬을 통해 일정한 풍속으로 외부 챔버 지하부로 유입된다. 유입된 공기는 4 수준으로 조절이 가능한 내부 챔버 상단부의 팬을 통해 일정한 풍속으로 균락 내부로 흘러 들어가며 최종적으로 작물 균락을 통과해 토양 표면 바로 위의 덕트로 되돌아가게 된다. 이러한 이중 챔버 구조에서의 공기 순환 시스템은 온도 및 풍속 조절을 다소 용이하게 해주는 장점을 가진다. 기존 단일 챔버 구조의 SPAR 챔버는 태양 복사열로 인한 급격한 온도 상승을 방지하고 설정 온도 값을 일정하게 유지하고자 높은 풍속을 유지해야 하는데 이때 작물에 따라서는 높은 풍속이 생육반응의 부효과로 작용할 우려가 있다. 반

면 한국형 SPAR 챔버는 이중 챔버 구조로 인한 버퍼 효과로 기존 시스템에 비해 풍속 감소가 가능할 뿐 아니라 낮은 풍속에도 온도 및 CO₂가 외부환경 변화와 무관하게 매우 안정적으로 유지되는 것을 확인하였다(Fig. 3). 대형 토양상은 약 2.0×0.6×1.5 m 크기의 스테인리스 재질의 라이시메타 구조로 구성되어 있으며 전면부는 작물 근권부를 관찰할 수 있도록 전면 강화 유리로 제작되었다(Fig. 2). 토양상 하단부는 배수구를 통해 토양 수위를 조절할 수 있도록 구성되어 있으며 관수는 점적 관수 시스템을 통해 양과 시간이 자동으로 조정될 뿐 아니라 토양수분 센서와의 연계를 통해 토양 수분 함량을 상시 모니터링 할 수 있도록 설계되었다. 이밖에 이산화탄소 가스 분석기, 냉각 시스템, 데이터 수집 시스템 등 관련 계측기, 센서 및 배선은 기존 상업용 작물 생육 챔버와 유사한 수준으로 구비하였다.

한국형 SPAR 챔버는 자연 태양 복사 환경(광 투과율 94% 이상)을 제공하며 대기 및 토양환경을 광범위한 수준에서 제어할 수 있다. 대기 환경 제어는 대기 이산화탄소 농도, 대기 습도 및 대기 온도 등에 대해 사인파 형태로 매시간마다 지속적으로 변화하도록 설정이 가능하다. 대기 온도는 밤낮으로 10초마다 자동으로 모니터링 되는데 온도 설정은 1시간 간격으로 0.1℃ 단위로 조정 가능하며 13℃~ 40℃ 범위에서

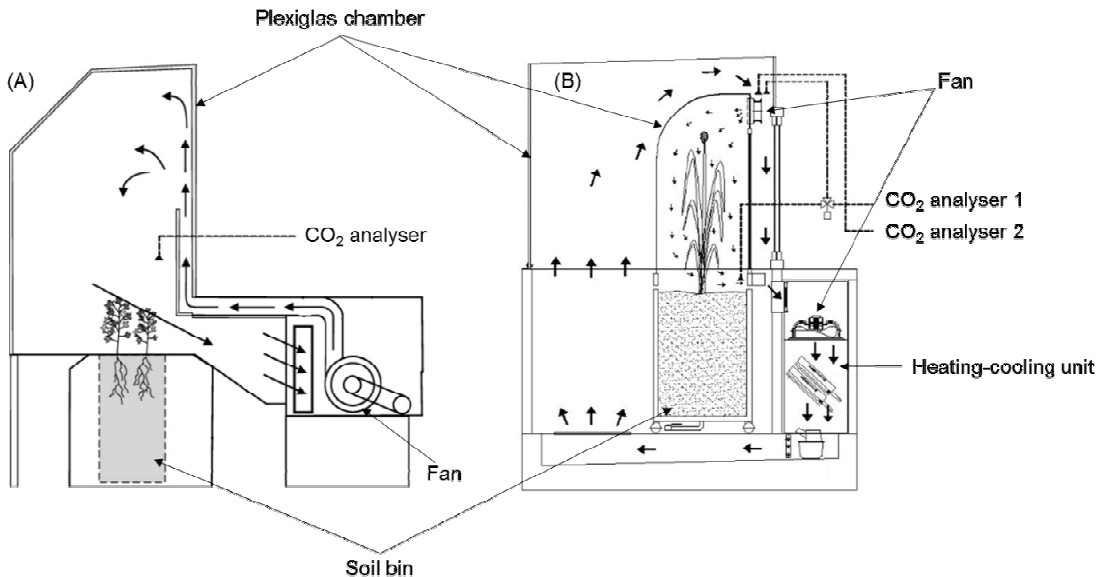


Fig. 1. Comparison of structures for two SPAR (Soil-Plant-Atmosphere-Research) system including (A) single layer chamber (Adapted from Ready *et al.*, 2001) and (B) double layer chamber.

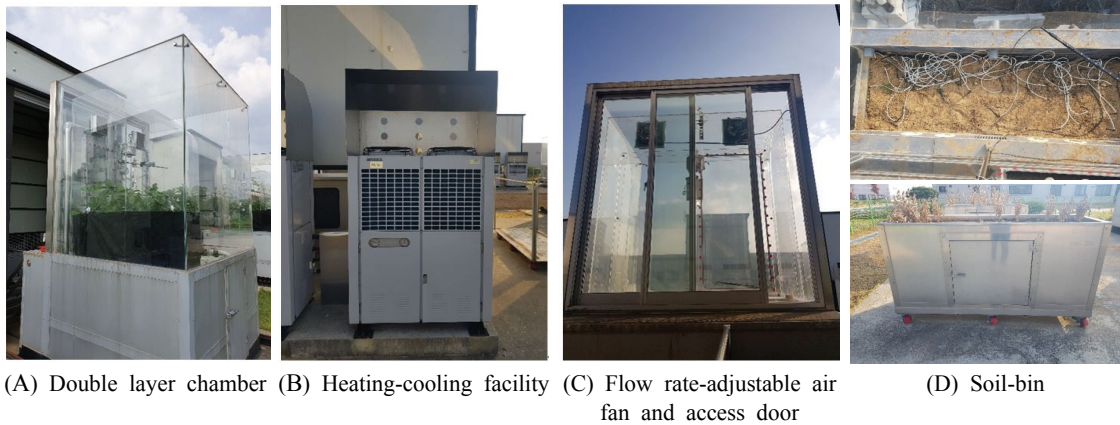


Fig. 2. The Korean SPAR chamber installed at NICS (National Institute of Crop Science, Wanju, S. Korea) (A) Double layer chamber, (B) Heating-cooling facility, (C) Flow rate-adjustable air fan and access door, and (D) Soil-bin.

약 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 오차범위로 유지가 가능하다. 실제 본 실험에서도 재배기간 동안 외부 환경과 무관하게 매시간 설정 값 대비 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 수준에서 안정적으로 온도가 제어됨을 확인하였다(Fig. 3). 특히 Fig. 3에서 보는 바와 같이 단일 온도 조건뿐 아니라 실제 자연환경과 유사한 일주기 모의 또한 가능하여 미래기후에 대한 실질적인 장기적 모의뿐 아니라 폭염, 냉해 등 특정 생육시기의 단기적 이상기후에 대한 연구도 가능할 것으로 보인다. CO_2 센서(LI-810)는 챔버마다 CO_2 설정 값 유지를 위한 용도와 광합성 측정을 위한 용도로 각각 2기가 구비되어 있다. 설정된 CO_2 값 유지를 위해 순

도 99%의 CO_2 가스를 CO_2 센서의 측정값과 연계하여 압력조절기, 솔레노이드, 밸브 및 유량계로 구성된 조절기를 통해 챔버 내부로 주입하며 오차범위는 설정 값에서 약 ± 10 ppm 이내로 유지가 가능하다. 그 외 내부 챔버 안에는 온습도계뿐 아니라 RGB 카메라, 엽온 센서, 광화학반사지수 센서, 일사량 센서, 토양수분 센서 등 다양한 계측 장비가 연구목적에 따라 설치 가능하다.

이처럼 SPAR 시스템은 실제 포장 조건의 환경을 최대한 구현하여 실질적인 재배 데이터 획득에 유용한 장비로 활용 가능할 뿐 아니라 작물 생육에 미치는

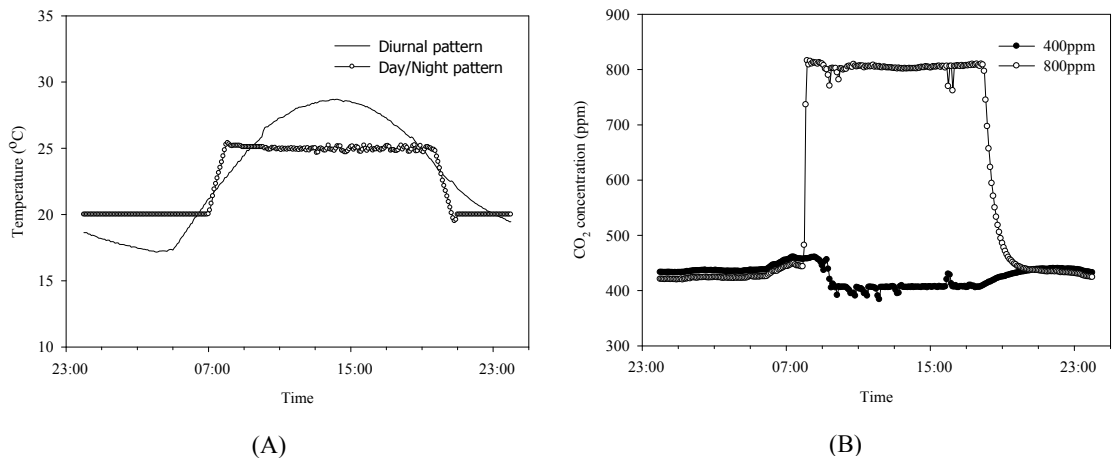


Fig. 3. Chamber environmental controls for daily air temperature and CO_2 concentration for SPAR system. (A) Air temperature control at diurnal and day/night patterns, (B) Day CO_2 concentration control at ambient (400 ppm) and elevated (800 ppm) levels.

여러 복합적인 환경요인들을 정밀하게 조정할 수 있어 온도, 수분, 양분, CO₂ 등 주요 환경요인에 대한 영향 평가 및 상호작용 효과를 분석하기에 매우 도움이 될 것으로 보인다. 실제로 미국에서는 SPAR 시스템의 정밀한 환경제어를 통해 면화의 환경 조건 별 다양한 생장 반응 양상을 분석하였고 이 결과로부터 수확적 생장 속도 방정식을 도출하여 보다 개선된 작물 생육 모형인 GOSSYM을 개발한 바 있다(Reddy *et al.*, 2002).

III. 균락광합성 및 호흡의 측정

균락광합성의 정량화 방법으로는 일반적으로 작물체 위의 일부분을 광합성 측정장치로 측정하여 작물체 전체의 광합성량을 추정하는 방법이 광범위하게 이용되어 왔으나 실제 포장에서는 같은 환경조건에서도 재식밀도에 따른 수광태세, 노엽과 신엽, 상위엽과 하위엽에 따라 광합성능력의 차이가 있어 현재의 측정방법으로는 식물개체 및 균락 수준의 광합성량을 정확하게 추정하는데 어려움이 있어 왔다(Flexas *et al.*, 2007). 또한 엽 광합성 측정은 동일 품종 내에서 환경요인에 따른 반응 차이 및 경향을 비교하는 데는 유용하지만, 발달 특성이 상이한 품종 간의 생산성 비교에는 한계가 있다고도 하였다(Kang *et al.*, 2015). 따라서 실제 균락 수준의 광합성 특성을 제대로 이해하기 위해서는 작물 균락 전체의 CO₂ 흡수량을 직접적으로 정밀하게 측정 할 필요가 있다.

한국형 SPAR 시스템의 Plexiglas 챔버와 냉각 공조 시설은 균락광합성 및 호흡을 측정하기 위한 시스템을 구비하고 있으며 이를 위해 작물, 대형토양상을 포함하는 Plexiglas 내부 챔버는 완전 밀폐조건을 유지하고 있다. 한국형 SPAR 챔버와 기존 SPAR 챔버는 균락광합성 측정 시스템에서 큰 차이가 있는데 기존 SPAR 챔버는 mass balance 이론에 기반하여 작물 균락의 순 CO₂ 교환율(Pn)을 다음 과정을 통해 계산한다(Eq. 1). 우선 1) CO₂ 공급 솔레노이드 밸브의 개방 시간 간격을 측정해 단위시간당 CO₂ 주입량을 계산하고, 2) 작물 생육과는 무관한 N₂O 가스를 활용한 챔버 누설 시험을 매일 야간에 수행하여 챔버별 CO₂ 가스 누설율을 계산한 후, 3) 처리 설정 값을 유지하기 위해 주입된 CO₂ 질량 값과 누설을 통해 손실된 CO₂ 질량 값을 사용하여 단위 면적당 순 균락 광합성을 간접적으로 계산한다(Baker *et al.*, 2004). 이처럼 기존 시스템은

CO₂ 주입량 뿐만 아니라 단위시간당 누설량을 별도의 누설 시험을 통해 정확히 산정하는 과정이 매우 중요하다(Baker *et al.*, 2004).

$$\bullet \text{Net photosynthesis rate} = \text{Amount of CO}_2 \text{ injected} - \text{Leak rate} \dots\dots\dots (\text{Eq. 1})$$

반면 한국형 SPAR 챔버는 내부 챔버 상단부 입구와 하단부 출구의 CO₂ 농도를 적외선가스분석기로 각각 측정 후 그 농도 차를 직접적으로 계산하여 광합성량을 산정한다(Eq. 2). 이를 위해 CO₂ 센서는 챔버 내 CO₂ 농도 유지를 위한 설정용 센서와 실제 광합성 측정을 위한 측정용 센서로 각각 구분한다. 설정용 센서는 내부 챔버 공기가 주입되는 상단부에서 상시적으로 CO₂ 농도를 측정하며 챔버 내 CO₂ 농도 값이 설정 값과 항상 동일하게 유지되도록 하는 목적으로 CO₂ 공급 솔레노이드 조절 시스템과 피드백 작용으로 상호 연계되어 있다. 반면 광합성 측정용 센서는 내부 챔버 상단부와 하단부의 CO₂ 농도를 30초 간격으로 회당 10초씩 교번하여 측정 후 평균값을 산출한다. 각 지점별 CO₂ 평균값 간 농도 차는 풍속, 절대온도 등의 파라미터 값을 적용한 후 단위시간당 광합성 속도로 계산한다(Fig. 3). 한국형 SPAR 챔버의 광합성 측정 시스템은 기존 시스템과 달리 매일 수행되는 별도의 챔버 누설 시험 과정이 생략되어 작업 편의성이 높아지고 수집 데이터의 오차가 최소화되도록 제작되었다.

$$\bullet \text{Net photosynthesis rate} = \Delta\text{CO}_2 (\text{in-out}) / \text{sec} \dots\dots\dots (\text{Eq. 2})$$

IV. 환경변이에 따른 콩 순동화량 정량화 사례 연구

한국형 SPAR 챔버를 활용하여 기상조건 및 환경스트레스에 따른 콩의 균락광합성 반응을 분석하였다. 본 시험을 위해 대원콩을 2017년 6월 20일에 포트에 파종 후 7월 1일경 균일한 개체를 선별하여 각 SPAR 챔버에 30개체씩 이식하였다. 처리 환경 조건은 전주 지역 2001~2010년 평균기후를 대조구로 설정하였고 시험구는 각각 고온 처리구(+4.7°C), 고CO₂ 처리구(CO₂ 800 ppm), 고온+고CO₂ 복합 처리구(+4.7°C, CO₂ 800 ppm) 및 생식생장기 한발처리구로 구성하였다. 광합성 측정 기간은 파종 후부터 착엽기 전까지

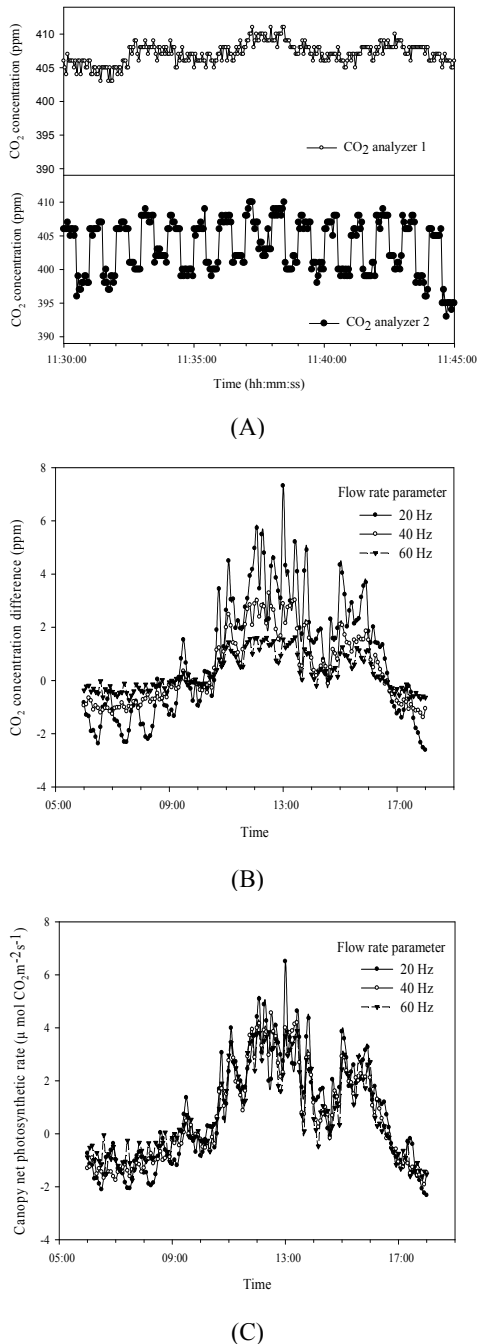
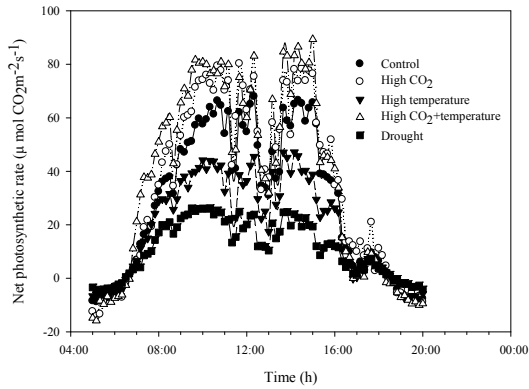


Fig. 4. The process of canopy photosynthesis and respiration calculation. (A) CO₂ supply at a steady level(CO₂ analyzer 1) and alternately measured CO₂ concentration(CO₂ analyzer 2), (B) The pattern of CO₂ concentration difference by flow rate, and (C) Calculation of canopy photosynthesis using flow rate, plant population, absolute temperature, etc.

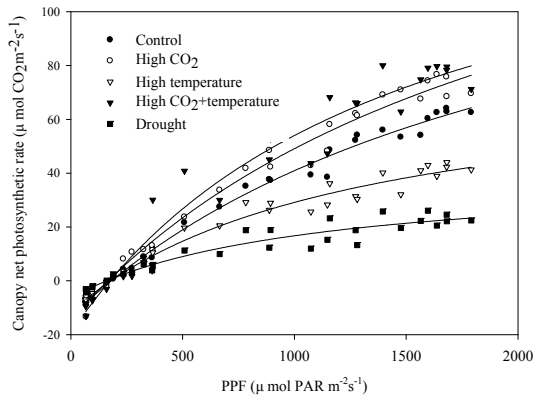
약 70여일간이었으며 모든 처리에 대해 균락광합성 및 호흡량을 실시간 측정된 후 일 순광합성 및 누적 광합성량으로 계산하였다.

균락 수준에서 파종 후 56일째의 콩 작물에 대한 단위시간당 CO₂ 고정 속도는 전형적인 일주기 패턴을 보임을 확인하였다(Fig. 5). 생식생장기에 해당하는 이 시기에 콩은 고온 및 한발에 따른 광합성 저해 반응이 나타났으나 고CO₂ 조건에서는 광합성 증가 반응이 뚜렷이 나타남을 알 수 있었다. 현재온도, 400 ppm의 대기 CO₂ 농도에서 이 시기의 주간 평균 순광합성율은 $37.6 \mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 야간 호흡률은 $6.4 \mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이었으며 일 평균 순광합성율은 $15.7 \mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이었다. 또한 이 시기 콩 균락은 총 태양 일사량의 96%를 흡수하였는데 이에 따라 일별 단위면적당 광 이용효율은 $67.3 \text{mmolCO}_2\text{m}^{-2}\text{MJ}^{-1}$ 로 평가되었다. 고CO₂는 일 평균 순광합성율을 약 19.6% 증가시킨 반면에 고온과 한발 스트레스는 각각 33.7, 62.2% 감소시켰다. 특히 복합 환경 처리조건인 고온+고CO₂ 조건에서는 고온에 의한 광합성 저해반응이 고CO₂에 의해 상쇄될 뿐만 아니라 광합성 속도가 오히려 28.4% 증가하는 것으로 나타나 온도와 CO₂ 처리간 상호작용 효과가 존재한다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 콩의 경우 고CO₂에 의한 광합성 증가율이 고온 일수록 더욱 커진다는 기존 연구 내용과도 일치하는 결과이다(Gesch *et al.*, 2001). 또한 실내 인공광 성장 챔버에서 얻은 데이터와 달리, 균락광합성 속도는 일중 최대 광량인 약 $1800 \mu\text{mol PAR m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에도 광포화되지 않았는데 이 또한 기존 SPAR를 활용한 연구결과와 유사한 경향이었다(Wells *et al.*, 1986; Reddy *et al.*, 1997). 수집된 균락광합성 정보는 환경 조건에 관계없이 Michaelis-Menten equation을 통해 실제 일사량과 $R^2=0.93\sim0.99$ 로 매우 밀접한 상관관계를 보였다(Acock *et al.*, 1976). Fig. 5에 묘사된 광 반응 곡선을 통해 초기 기율기와 최대 광포화점 등 작물의 광이용 특성에 관한 중요한 생육정보를 얻을 수 있는데 특히 특정 광량 수준에서의 순광합성 속도로 정규화하면 생육시기 및 재배 환경에 따른 생육 반응을 실시간으로 해석할 수 있을 것으로 보인다. 이처럼 한국형 SPAR 챔버를 통한 균락광합성 측정 시스템은 환경 변이에 따른 생육 반응을 객관적 수치로 정량화할 수 있다는 점에서 매우 중요한 의미를 가진다고 할 수 있다.

일 순광합성량을 전생육기간으로 나타낸 Fig. 6을 보면 2001~2010년 전주 평균 기후 조건에서 콩 재배



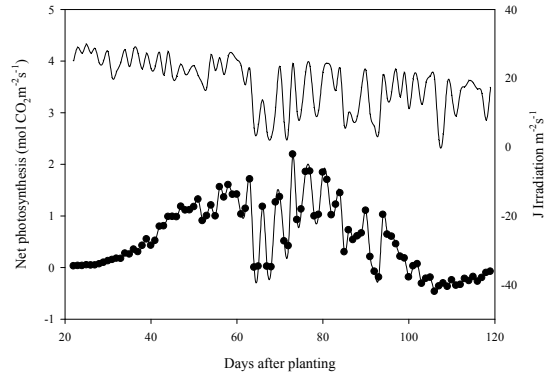
(A)



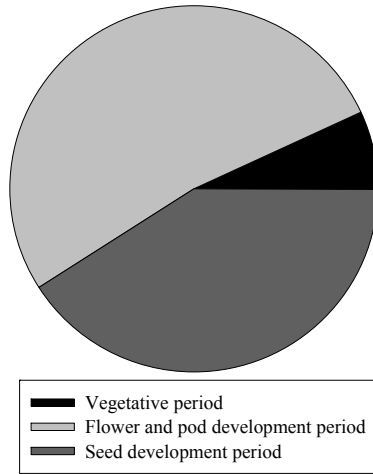
(B)

Fig. 5. Daily canopy photosynthesis characteristic analysis of soybean canopies at 56 days after emergence grown at current climate, High CO₂, High temperature, High CO₂+temperature condition, and drought stress conditions. (A) Canopy net photosynthetic rate pattern, and (B) Light response curve. Data were averaged across 30 min.

시 단위면적당 근락광합성은 파종 후 70일경에 최대 값에 도달한 후 계절이 진행됨에 따라 점차 감소함을 알 수 있다. 개화 착엽 시기에 해당하는 8월달의 누적 순광합성량은 전 생육기간의 누적 광합성량의 약 52.1%를 차지하였는데 이는 콩의 경우 개화 착엽 시기에 해당하는 8월달의 기상환경과 재배관리가 콩 생육에 있어서 매우 중요하다는 것을 시사한다. 반면 9월 이후 종실 비대기(R3~R7)의 근락 광합성은 점차 감소하는데 이는 작물 자체의 엽노화 진행과 함께 계절이 진행됨에 따라 대기 온도 및 일사량이 감소하기 때문인 것으로 보인다.



(A)



(B)

Fig. 6. Example of daily canopy net photosynthesis of soybean canopies grown at current climate condition over entire growth period. (A) Temporal changes in daily canopy net photosynthesis and solar radiation, and (B) Ratio of cumulative canopy net photosynthesis by growth stages (vegetative, flower and pod development, and seed development stage)

Fig. 7은 각 처리 별 누적 탄소동화량과 생육시기별 실제 건물중의 시계열 수치에 대한 상관관계를 나타낸 것으로서 분석결과 약 R²=0.95로 매우 높은 상관관계를 보였다. 추세선 기울기 0.45는 건물중당 탄소소비율을 의미하는데 이는 콩 종실을 제외한 지상부의 탄소 함량이 건물중의 40~50%를 차지한다는 기존 결과와도 부합되는 결과이다(Singh *et al.*, 2018). 이를 통해 한국형 SPAR 챔버의 근락광합성 측정 시스템이 실제 작물 생육 반응을 매우 정밀하게 반영하고 있다는 것을 확인하였다.

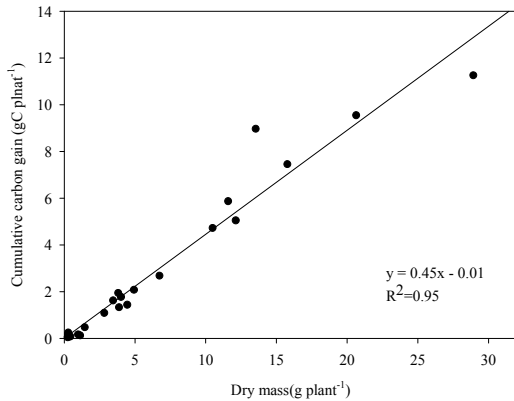


Fig. 7. Carbon balance comparing dry matter and total carbon assimilation at each sampling period.

이처럼 SPAR를 통한 연구결과는 제한된 광 조건의 실내 챔버에서 이루어지는 단위엽 수준의 광합성 측정으로는 얻을 수 없는 실제 포장에서의 개체간 광 경합 및 수광태세에 관한 정보를 포함한 실질적인 재배 정보를 제공하여 근락 탄소 교환율 모형 개발 등 작물 생육 모형 개선에 매우 중요하게 활용될 수 있을 것으로 보인다.

적 요

기후변화에 따른 환경 스트레스 대응 기술과 영농 의사결정 플랫폼 개발을 위해서는 환경 조건에 따른 작물의 반응을 이해하기 위한 시스템 개발이 매우 중요하다. 본 연구는 한국형 SPAR 시스템이 다양한 환경 조건에서 작물 생육 반응을 어떻게 정량화하고, 향후 작물 생육 모형 개발에 어떻게 연계될 수 있는지에 대해 방향을 제시하고자 수행되었다. 한국형 SPAR 시스템은 온도, CO₂ 농도 등의 기상요소와 양 수분 관리 등 재배요소를 동시에 정밀 조절할 수 있을 뿐 만 아니라 근락수준에서 광합성 및 호흡 등 작물의 생육 반응을 실시간으로 정량화하기에 최적화되어 있다. 본 시스템을 통해 수집된 근락 광합성 정보는 실제 작물의 환경조건에 따른 생육량 변동을 매우 유의하게 반영하여 향후 작물 생육 모형에 실질적으로 적용 가능한 환경-유전 요인간 특이적 반응 함수 개발에 크게 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 국립식량과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제 번호: PJ013574012019)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- Acock, B., D. W. Hand, J. H. M. Thornley, and J. W. Wilson, 1976: Photosynthesis in stands of green peppers. An application of empirical and mechanistic models to controlled-environment data. *Annals of Botany* **40**(170), 1293-1307.
- Adiku, S. G. K., M. Reichstein, A. Lohila, N. Q. Dinh, and M. Aurela, 2006: PIXGRO: A model for simulating the ecosystem CO₂ exchange and growth of spring barley. *Ecological Modelling* **190**, 260-276.
- Arp, W. J., 1991: Effects of source-sink relations on photosynthetic acclimation to elevated CO₂. *Plant, Cell & Environment* **14**(8), 869-875.
- Baker, J. T., S. H. Kim, D. C. Gitz, D. Timlin, and V. R. Reddy, 2004: A method for estimating carbon dioxide leakage rates in controlled-environment chambers using nitrous oxide. *Environmental and Experimental Botany* **51**(2), 103-110.
- FLEXAS, J., A. DIAZ-ESPEJO, J. GALMÉS, R. KALDENHOFF, H. MEDRANO, 2007: Rapid variations of mesophyll conductance in response to changes in CO₂ concentration around leaves. *Plant, Cell & Environment* **30**(10), 1284-1298.
- Gesch, R. W., J. C. V. Vu, L. H. Allen, K. J. Boote, and R. W. Goch, 2001: Photosynthetic responses of rice and soybean to elevated CO₂, and temperature. *Recent Research Developments Plant Physiology* **2**, 125-137.
- Jones, P., J. W. Jones, L. H. Allen, and J. W. Mishoe, 1984: Dynamic computer control of closed environmental plant growth chambers. design and verification. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* **27**(3), 879-888.
- Kang, W. H., J. S. Kim, D. Kim, D. H. Jung, and J. E. Son, 2015: Measurements of leaf and canopy photosynthetic rates as indicators of productivity of Kale (*Brassica oleracea* Acepala Group) cultivars. *한국농업기계학회 학술발표논문집* **20**(1), 405-406.
- Kim, S. H., R. C. Sicher, H. Bae, D. C. Gitz, and

- J. T. Baker, 2006: Canopy photosynthesis, evapotranspiration, leaf nitrogen, and transpiration profiles of maize in response to CO₂ enrichment. *Global Change Biology* **12**(3), 588-600.
- Phene, J. C., D. N. Baker, J. R. Lambert, J. E. Parsons, and J. M. McKinion, 1978: SPAR—A Soil-Plant-Atmosphere Research System. *Transactions of the ASAE* **21**(5), 924-930.
- Raja Reddy, K., V. Gopal Kakani, J. McKinion, and D. Baker, 2002: *Applications of a cotton simulation model, GOSSYM, for crop management, economic, and policy decisions*. CRC Press, LLC, Boca Raton, FL, 33-73
- Reddy, K. R., H. F. Hodges, and J. M. McKinion, 1995a: Carbon dioxide and temperature effects on pima cotton growth. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **54**, 17-29.
- Reddy, K. R., H. F. Hodges, and J. M. McKinion, 1995b: Carbon dioxide and temperature effects on pima cotton development. *Agronomy Journal* **87**(5), 820-826.
- Reddy, K., H. F. Hodges, J. Read, J. M. McKinion, and J. Baker, 2001: Soil-Plant-Atmosphere-Research (SPAR) facility: A tool for plant research and modeling. *Biotronics* **30**, 27-50.
- Reddy, A. R., K. R. Reddy, and H. F. Hodges, 1997: Dynamics of canopy photosynthesis in Pima cotton (*Gossypium barbadense* L.) as influenced by growth temperature. *Indian Journal of Experimental Biology* **35**(9), 1002-1006.
- Running, S. W., P. E. Thornton, R. Nemani, and J. M. Glassy, 2000: Global terrestrial gross and net primary productivity from the Earth Observing System. *Methods in Ecosystem Science*, Springer, New York, NY, 44-57.
- Sage, R. F., 1994: Acclimation of photosynthesis to increasing atmospheric CO₂: The gas exchange perspective. *Photosynthesis Research* **39**(3), 351-368.
- Sang, W. G., J. H. Kim, P. Shin, H. S. Cho, M. C. Seo, and G. H. Lee, 2017: Current research works on climate change issue using SPAR(Soil-Plant-Atmosphere-Research) system in USDA-ARS. *The Journal of the Korean Society of International Agriculture* **29**(4), 382-388.
- Singh, S. K., V. R. Reddy, D. H. Fleisher, and D. J. Timlin, 2018: Phosphorus nutrition affects temperature response of soybean growth and canopy photosynthesis. *Frontiers in Plant Science* **9**, 1116pp.
- Tenhunen, J., R. Geyer, S. Adiku, M. Reichstein, and U. Tappeiner, 2009: Influences of changing land use and CO₂ concentration on ecosystem and landscape level carbon and water balances in mountainous terrain of the Stubai Valley, Austria. *Global and Planetary Change* **67**, 29-43.
- Wells, R., W. R. Meredith, and J. R. Williford, 1986: Canopy photosynthesis and its relationship to plant productivity in near-isogenic cotton lines differing in leaf morphology. *Plant Physiology* **82**(3), 635-640.