

한국형 SPAR(Soil-Plant-Atmosphere-Research) 시스템에서 대용량 관측 자료의 처리 및 품질관리

상완규*, 김준환, 신평, 백재경, 서명철

농촌진흥청 국립식량과학원

(2020년 10월 14일 접수; 2020년 11월 20일 수정; 2020년 11월 25일 수락)

Processing and Quality Control of Big Data from Korean SPAR (Soil-Plant-Atmosphere-Research) System

Wan-Gyu Sang*, Jun-Hwan Kim, Pyong Shin, Jae-Kyeong Baek, Myung-Chul Seo

National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, 181,

Hyeoksinsin-ro, Iseo-myeon, Wanju-gun, Jeollabuk-do 55365, Republic of Korea

(Received October 14, 2020; Revised November 20, 2020; Accepted November 25, 2020)

ABSTRACT

In this study, we developed the quality control and assurance method of measurement data of SPAR (Soil-Plant-Atmosphere-Research) system, a climate change research facility, for the first time. It was found that the precise processing of CO₂ flux data among many observations were significantly important to increase the accuracy of canopy photosynthesis measurements in the SPAR system. The collected raw CO₂ flux data should first be removed error and missing data and then replaced with estimated data according to photosynthetic light response curve model. Comparing the correlation between cumulative net assimilation and soybean biomass, the quality control and assurance of the raw CO₂ flux data showed an improved effect on canopy photosynthesis evaluation by increasing the coefficient of determination (R²) and lowering the root mean square error (RMSE). These data processing methods are expected to be usefully applied to the development of crop growth model using SPAR system.

Key words: Quality control, CO₂ flux, SPAR system

I. 서 언

농업 생산성은 토양, 물, 대기 등 다양한 농업 환경 요인 간의 복잡한 상호작용을 통해 결정된다. 따라서 작물-대기-토양 간의 상호 반응을 구체화하고 정량화 하기 위해서는 기상, 토양 등 농업환경 요소 뿐 아니라 광합성과 같은 작물 생육 지표의 수집이 매우 중요하

다(Reddy *et al.*, 2001). 2018년 이후 한국형 SPAR 시스템에서는 다양한 온도 및 대기 이산화탄소(Carbon dioxide, CO₂)농도 조건에서 한발, 습해 등 복합 환경 스트레스에 대한 대용량의 작물 광합성 및 호흡 자료를 관측하여 왔다. SPAR 내 관측자료를 구성하고 있는 요소는 챔버 내 지표 1m 높이의 온도, CO₂농도, 습도 등의 대기 요소와 대형 토양상 내 땅 속의 온도,



* Corresponding Author : Wan-Gyu Sang
(wg_sang@korea.kr)

수분 등의 토양 요소, 그리고 균락수준에서 실시간 CO₂교환율로 대표되는 작물 요소로 구분된다. 이러한 대용량 관측자료들은 측정 오류를 사전에 예방하기 위한 품질보증(Quality Assurance, QA)과 이미 생성된 자료의 오차 판별 및 사후 수정에 초점을 맞춘 품질관리(Quality Control, QC) 작업이 반드시 선행되어야 한다. 특히 SPAR와 같은 기체 순환형 챔버에서의 이산화탄소 관측 자료는 이러한 정제 및 보정 과정이 추후 균락 CO₂플럭스 산정에 더욱 중요하게 작용한다.

본 연구에서는 전주 국립식량과학원에 설치된 SPAR 시스템을 이용하여 대기 및 작물 관측자료, 특히 CO₂ 플럭스 자료의 품질을 관리하는 방법을 예시를 통해 소개하고 처리과정에서 발견된 문제점과 향후 연구 방향을 제시하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. SPAR 시스템의 관측 기기 및 관리

2018년 이후 전북 완주군 국립식량과학원에는 총 9기의 한국형 SPAR 챔버를 이용하여 대기 온도 및 CO₂농도를 각각 독립적으로 제어하고, 고성능 적외선 기체 분석기(Model Li-810, Li-COR Inc., Lincoln Nebraska, USA)를 이용하여 챔버 내 CO₂교환율을 실시간으로 측정하고 있다(Fig. 1). 개발된 한국형 SPAR

는 약 2.0×0.6×1.5m 크기의 대형 토양상에 상부 투명 챔버가 밀폐되어 있는 구조로 CO₂교환을 측정하는 기존의 단위시간당 챔버 내 CO₂주입량을 측정하는 mass balance 이론에 기반한 방식과는 다르게 챔버 내 순환 대기에서 CO₂농도차를 직접 측정하는 방식을 통해 이루어진다. 또한 본 시스템에서는 균락 CO₂교환을 자료와 함께 챔버 내 기상 변수(온도, 습도, 일사량, 토양 온도, 토양 수분 등)도 동시에 측정되었다. 온습도 센서 및 기체분석기 보정 등의 관측 기기 관리는 정기적으로 연간 2회 이상 실시하고 있으며 관측 자료의 품질 검증을 위해 일별 기기 상황에 대해 별도의 기록물로 관리하였다. 각 관측 요소의 종류와 기록 형식은 Table 1에 제시되어 있다.

2.2. 환경 관측 자료의 처리

SPAR에서 관측된 기상 및 토양 관측 자료 중 특히 대기 온도는 CO₂농도 측정 자료와 함께 균락광합성량 산정에 활용되기 때문에 매우 중요하다. 수집되는 기상 원시 자료는 30초 평균값의 대기 온도, 습도, 일사량이며 각 항목들은 각각 1분, 5분, 15분 평균값으로 계산되어 csv (comma-separated values) 형식으로 저장된다. 반면 토양 자료는 지표면으로부터 6단계 깊이 별로 온도와 수분함량이 각각 1시간 평균값으로 저장된다.

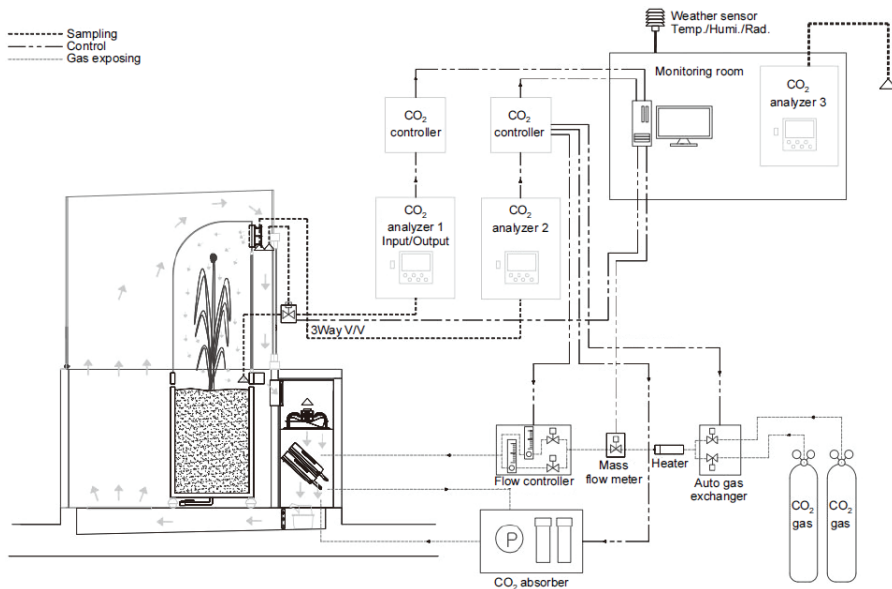


Fig. 1. CO₂ flux measurement scheme in SPAR system. Each line indicates the flow of CO₂ gas.

Table 1. Agricultural and environmental data collected in SPAR system

Elements		Unit	Range	Measuring position	Interval
Air Temperature		°C	-40 ~ 60 °C (accuracy <0.1 °C)	1 m ^{a)}	30 sec
Relative Humidity		%	0 ~ 100% (accuracy <2%)		
Soil Temperature		°C	Accuracy <2 °C	-0.1, -0.2, -0.3, -0.4, -0.5, -0.6 m ^{a)}	1 hour
Soil Water Content		VWC %	Accuracy <0.03%		
Solar Radiation		μmolm ⁻² s ⁻¹	Accuracy <5%	1.5 m ^{a)}	
Canopy Temperature		°C	-30 ~ 65 °C (accuracy <0.2 °C)	0.5 m ^{b)}	10 min
Photochemical Reflectance Index			Accuracy <10%		
CO ₂ Concentration	Input	ppm	0 ~ 2000 ppm (accuracy <2.5%)	Chamber air way in	10 times min ⁻¹
	Output	ppm	0 ~ 2000 ppm (accuracy <2.5%)	Chamber air way out	

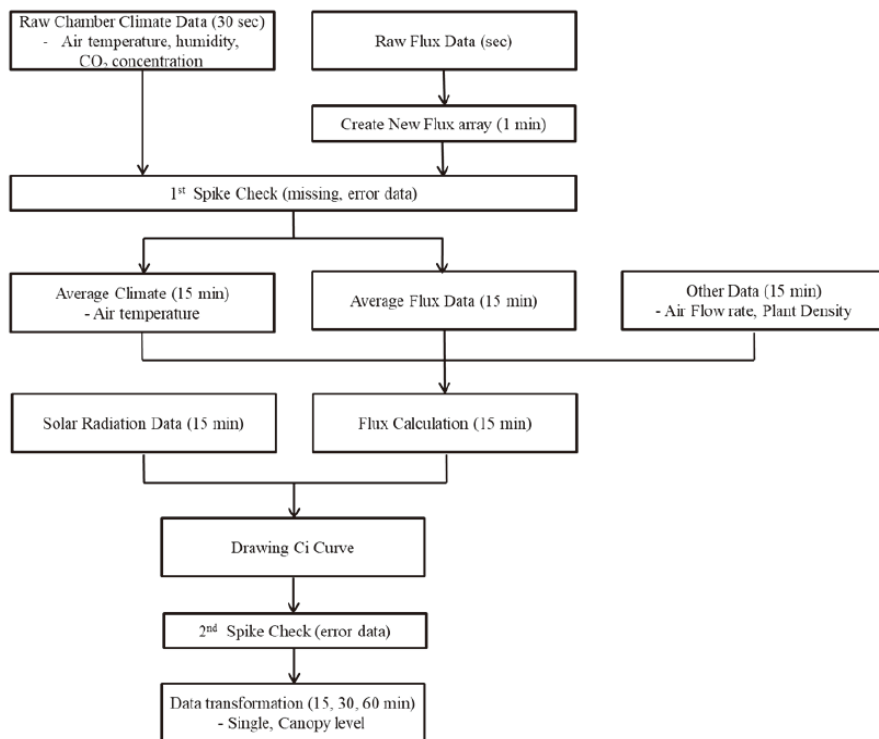


Fig. 2. Schematic flow chart of CO₂ flux data process in SPAR system.

2.3. CO₂농도 관측 자료의 처리

SPAR에서 관측된 CO₂농도 관측 자료는 Fig. 2의 단계를 거쳐 처리되었다. SPAR에서 근략 광합성 산정은 작물 생장이 이루어지는 챔버 상단부 입구와 하단부 출구의 CO₂농도를 적외선가스분석기로 각각 측정

한 후 그 농도 차를 직접적으로 계산함으로써 이루어진다(Sang *et al.*, 2019). 각 챔버 내 대기는 일정한 유속으로 순환하는데 이때 CO₂농도 측정은 각 지점을 30초 간격으로 교번하여 회당 10초씩 측정한 후 csv 형식의 원시 자료로 저장된다. 수집된 자료는 R version

3.5.1 통계 프로그램을 통해 해당 평균값으로 변환한 후 그 농도차를 1분, 5분, 15분 평균값으로 계산하여 각각 저장한다.

최종 순광합성량(CO₂ exchange rate, CER)은 수집된 챔버 내 대기 절대온도(Absolute temperature, T), 챔버 내 지점별 CO₂농도차(ΔCO₂), 절대압(Absolute pressure, P), 이상기체상수(Ideal gas constant, R), 대기 유속(Flow rate, F), 시간(Time, s) 및 단위면적(Area, A) 등을 종합하여 계산한다(Eq. 1). 이때 챔버 내 대기 유속, 단위 면적은 재배기간 중 별도의 조정이 없는 한 고정된 상수로 적용되는 요소이다. 모든 연산 과정은 R version 3.5.1 통계 프로그램을 통해 자동 처리되며 시간 별 평균값 자료의 일별 csv 파일 형태로 중앙 서버에 저장된다.

$$\text{CER} (\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}) = \frac{F(\text{m}^3 \text{ s}^{-1}) * P(\text{atm}) * \Delta\text{CO}_2(\text{mg m}^{-3})}{R(\text{atm L mol}^{-1} \text{ K}^{-1}) * T(\text{K}) * A(\text{m}^2)} \quad (\text{Eq. 1})$$

2.4. 기타 환경 관측 자료의 처리

앞서 기술한 바와 같이 SPAR 시스템에서 온도, CO₂농도차와 같이 근략 광합성 계산에 필요한 요소들은 기본적으로 1분 평균값으로 관측 시간에 대한 해상도를 일치시키는 과정을 거친다. 반면 토양수분, 토양 온도, 엽온 및 광화합반사지수 같은 부수적 관측 요소들은 센서 및 저장기기 각각의 특성상 관측 시간 해상도를 모두 일치시키기가 현실적으로 어려우므로 원시 데이터 형태로 저장을 한 후 사용자의 필요에 따라 추출, 가공 및 분석이 용이하도록 구성한다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 근략 CO₂플럭스 관측 자료의 점검 및 품질 관리

관측 자료에 대한 품질 관리는 크게 두 부분으로 나누어지는데, 이상치와 결측치를 표시하고 분류하는 과정과 이를 통계적으로 유의미한 자료로 보정하는 과정으로 이루어져 있다. 1차 점검에서는 Table 1의 각 기기별 측정 한계치를 참고하여 장비의 기계적인 측정 범위를 벗어나는 관측자료를 제거하기 위한 물리적 범위 검사를 실시한다. 먼저 1분 평균 자료의 온도 등 기후 관측 자료 중에서 기계 측정 한계치를 기준으로 이상치를 제거한 다음 챔버 설정값과의 비교를 통해

오차 분석을 실시한다. 이때 설정값과의 차이가 0.1% 이상이면 관측 자료의 품질을 의심하고 별도 표시한다. 다만 온도의 경우 이 연구의 사례에서 센서의 물리적 측정 범위와는 별개로 공조 시설의 가용 한계로 인해 설정값 10~40°C 범위에서만 품질 평가를 실시하였고 그 외 이상값들은 일괄 표시하였다.

CO₂플럭스 자료의 경우는 온도 등 다른 기상 관측 자료에 비해 품질 관리가 더욱 어려운 경향을 보였다. 먼저 계산된 CO₂플럭스의 1분 평균 자료에서 적외선 기체 분석기에서 관측된 CO₂농도의 물리적 측정 한계치를 벗어나는 열을 표시 및 제거한다. 이후 해당 시간대를 기준으로 이전 5분 동안의 플럭스 측정값에 대해 평균과 표준편차를 계산하고, 계산된 평균 자료로부터 플럭스 값이 5배 이상의 표준편차를 보이면 역시 이상치로 의심하고 표시한다. 이 때 정확한 이상치 판별을 위해서는 이러한 기준을 활용한 일괄적인 분류방법 이외에 직접 분단위 시계열 그래프를 그리고 연구자가 일일이 플럭스 자료의 변동 양상을 점검하는 것이 매우 중요하다. 이를 위하여 생육 조사를 위한 챔버문 개폐, 기기 수리작업 등 플럭스 패턴에 영향을 미치는 다양한 정보들이 기록된 운영일지 자료는 이상치 판별에 큰 도움을 줄 수 있다. 이러한 과정들을 통해 남겨진 최종 품질 보증된 자료들은 15분 평균치 변환 등 자료 평활화(data smoothing) 작업을 적용한다(Kwon *et al.*, 2007; Lim *et al.*, 2008). 이후 SigmaPlot 10.1 (Systat Software Inc., Erkrath, Germany)을 이용하여 Eq. 2에 표시된 Michaelis-Menten 식의 광 반응 곡선(A/PPF curve)를 일별로 모의한 후, 제거된 이상치를 통계적으로 추론하고 보정한다(Acock *et al.*, 1976). 이 식은 광량에 따른 작물의 CO₂교환을 반응을 나타내며 I(PPF, μmolm⁻²s⁻¹)와 CER을 활용하여 a, b, A_{max}의 파라미터를 산정할 수 있다. Fig. 3(C)에서 보는 바와 같이 1차에서 점검된 CO₂플럭스 자료 대부분은 광 반응 곡선의 95% 예측 구간 이내로 분포함을 확인할 수 있으며 따라서 이를 통한 결측치 보정은 통계적으로 유의한 과정으로 간주한다. 최종적으로 품질 보증이 완료된 일순광합성 자료는 Fig. 3(D)에서처럼 15, 30, 60분 평균치로 자료 평활화를 거친 후 중앙 서버에 csv 파일 형태로 저장된다.

$$\text{CER} = \frac{a * I * A_{\text{max}}}{a * I + A_{\text{max}}} + b \quad (\text{Eq. 2})$$

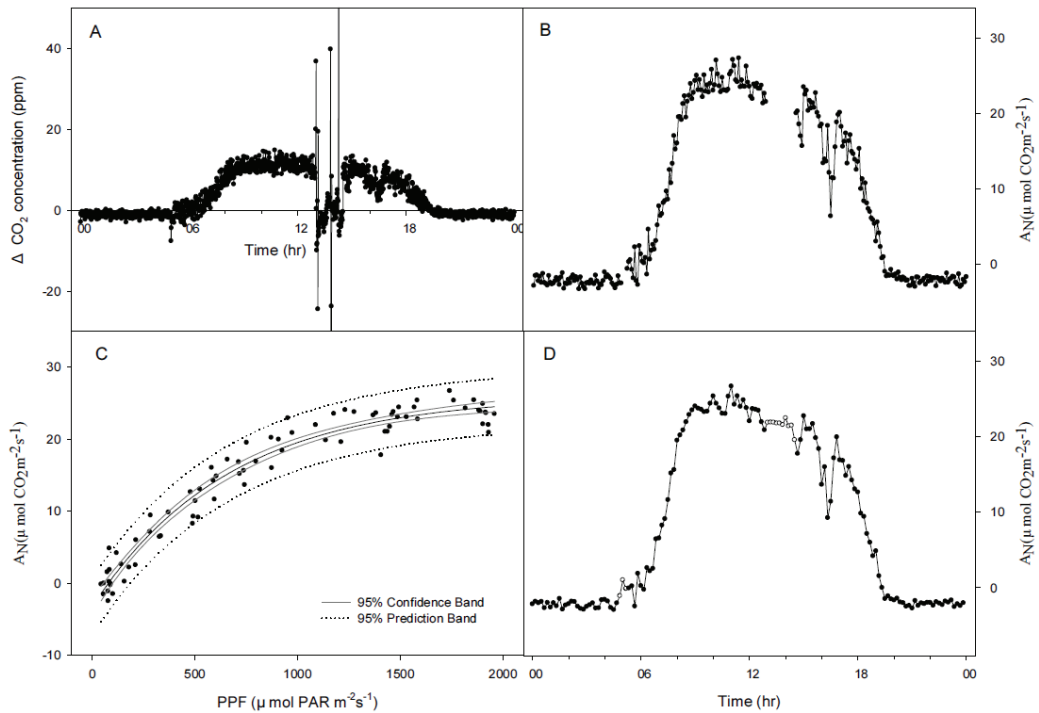


Fig. 3. Example of quality control case for soybean canopy photosynthesis data using SPAR system in August 15, 2018. A, B, C, and D indicate raw CO₂ data, CO₂ flux data after 1st quality control (delete, smoothing, etc.), Light response curve analysis, Final CO₂ flux data after 2nd quality control (repair, smoothing, etc.), respectively.

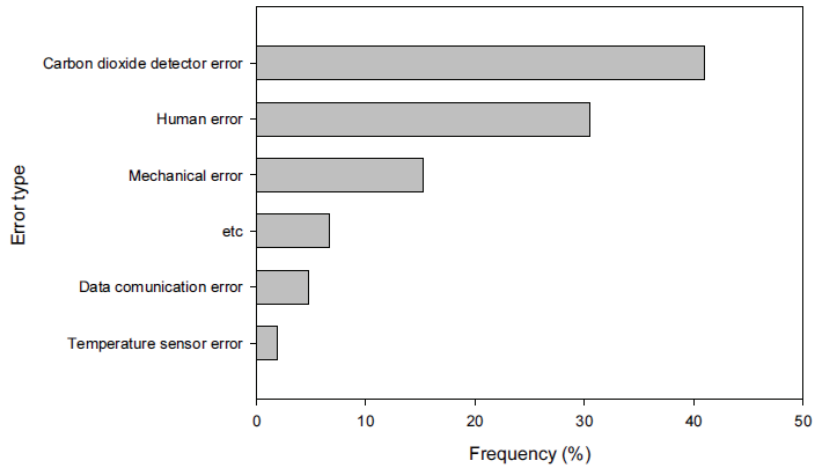


Fig. 4. Frequency by error type of SPAR system during 2018~2019.

3.2. 자료 품질 관리의 의의

Fig. 4는 2018년부터 2019년까지 수집된 SPAR 관측자료를 토대로 오류 자료의 발생 빈도를 일별로 분석한 후 각 유형에 따라 분류한 것이다. 2년간 총 254

개의 일별 관측자료가 수집되었으며 그 중 40%는 앞서 기술한 품질 관리 과정이 필요한 자료로 분류되었다. 유형별로 살펴보면 CO₂ 적외선 분석기의 측정 오류가 총 발생 오류의 약 41%를 차지하였으며 그 뒤로

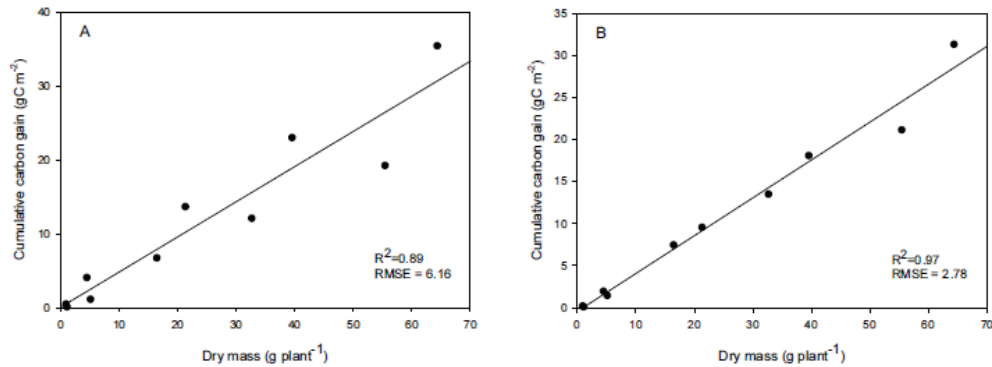


Fig. 5. Carbon gain balance before (A) and after (B) the quality control for CO₂ flux in SPAR system.

챔버 개폐 등 자발적인 연구활동으로 인한 오류 발생 (human error) 또한 30%의 높은 수치를 보였다. 그 외 SPAR 시스템의 기계적 오류, 자료 송수신 오류, 온도센서의 오류 발생 빈도는 각각 15, 5, 2%로 산정되었다. 이러한 결과는 SPAR 시스템에서 자료의 품질을 결정하는데 다른 관측 요소보다 우선 CO₂관측 자료의 처리 및 정밀 보정이 매우 큰 비중을 차지함을 보여 준다.

관측 자료에 대한 품질 관리 효과를 평가하기 위해 2018년 7월부터 9월까지 SPAR에서 관측된 콩 군락 CO₂플럭스의 정확도를 품질 관리 전과 후로 나누어 비교하였다(Fig. 5). 계산된 누적 순광합성량과 실제 건물생산량과의 상관관계를 비교한 결과 수집 원자료의 품질 관리 과정은 R²를 높이고 RMSE는 낮추는 등 실제 생육량 추정에 보다 개선된 효과를 보였다.

적 요

본 연구에서는 첨단 옥외환경조절시설인 SPAR 시스템의 작물 및 환경 관측 자료의 품질 관리와 보증 방법을 최초로 제시하였다. 특히 실시간 군락 CO₂플럭스의 경우에는 수집되는 자료의 특성을 고려하여 이상치의 제거와 보정이 병행되어야 함을 확인하였다. 본 연구를 통해 구축된 자료 처리 방법들은 향후 SPAR 자료를 통한 작물 생육 모형 개선에 매우 중요하게 활용될 수 있을 것으로 보인다. SPAR 내 작물과 환경 관련 10분 평균 자료는 국립식량과학원 내 작물 연구 통합 정보시스템(Crop Research Information System, CRIS) 웹사이트(www2.nics.go.kr/cris)에서 이용 가능하다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 국립식량과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제 번호: PJ0135662020)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.
- Kwon, H., S. Park, M. Kang, J. Yoo, R. Yuan, and J. Kim, 2007: Quality control and assurance of eddy covariance data at the two KoFlux sites. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **9**(4), 260-267.
- Lim, H. J., and Y. H. Lee, 2008: Processing and quality control of flux data at Gwangneung forest. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **10**(3), 82-93.
- 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.
- Sang, W. G., J. H. Kim, P. Shin, J. K. Baek, Y. H. Lee, J. I. Cho, and M. C. Seo, 2019: Development of Korean SPAR (Soil-Plant-Atmosphere-Research) system for impact assessment of climate changes and environmental stress. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **21**(3), 187-195.