

장미 재배 온실 환경 데이터의 상관관계 및 선형회귀 분석 연구

김경훈, 박근호, 장훈석, 김동신, 최주환

한국전자기술연구원

khkim@keti.re.kr, root@keti.re.kr, jhs0053@keti.re.kr, axis@keti.re.kr, netside@keti.re.kr

A Study on Correlation and Linear Regression Analysis of Greenhouse Environmental Data in Rose Cultivation

Kyeonghun Kim, Keunho Park, Hoon-Seok Jang, Dongsin Kim, Juhwan Choi

Korea Electronics Technology Institute

요 약

시설원에 작물인 장미는 대표적인 절화작물로, 기온, 상대습도, 누적광량, CO₂ 농도와 같은 기후 요인에 민감하게 반응하며, 스마트팜 기술을 활용하여 작물 생육 환경을 정밀하게 제어함으로써 생산성과 품질을 향상시키고 있다. 본 연구는 전북 지역 장미 재배 온실에서 수집된 데이터를 바탕으로 이슬점, 절대습도, 수증기압포차를 산출하고 환경 요인과의 관계에 대해 상관관계 분석과 선형회귀 분석을 진행하였다. 상관분석 결과, 수증기압포차는 기온과 양의 상관($r=0.90$), 상대습도와 음의 상관($r=-0.98$)을 보였으며, 누적광량과도 중간 정도의 양의 상관($r=0.60$)을 보였다. 이슬점과 절대습도는 $r\approx 0.996$ 으로 높은 중복성을 보였으나, 각각 결로 위험 예측과 대기 수분량 추정에 활용 가능성이 있었다. 선형회귀 분석에서는 온도·상대습도와 수증기압포차의 강한 선형 관계가 확인되었으며, 누적광량은 간접적 영향으로 인해 분산된 형태의 상관성을 볼 수 있었다.

I. 서론

스마트팜 기술은 정보통신기술(ICT)을 활용하여 작물 생육 환경을 정밀하게 제어함으로써 생산성과 품질을 향상시키고 있다. 장미는 대표적인 절화작물로, 기온, 상대습도(%), 누적광량, CO₂ 농도와 같은 환경 요인에 민감하게 반응한다. 그러나 상대습도는 단순 백분율 지표에 불과해 작물의 증산과 병해 발생 위험을 충분히 설명하지 못하는 한계가 있다[1, 2].

이를 보완하기 위해 기온과 상대습도를 기반으로 한 파생 변수들이 활용되고 있으며, 대표적으로 이슬점(Dew Point, T_d), 절대습도(Humidity Density, HD), 수증기압포차(Vapor Pressure Deficit, VPD)가 있다. 이슬점은 응결 발생 가능성, 절대습도는 단위 부피당 수분량, 수증기압포차는 대기의 건조도를 설명한다[3-5]. 특히 수증기압포차는 기온, 상대습도만으로는 작물 생육과의 연결성이 부족하여 두 변수를 통합한 수증기압포차를 통해 작물 수분 스트레스와 증산 작용을 직접적으로 반영하는 핵심 변수로 주목받고 있다. 본 연구는 전북 지역 장미 재배 온실 데이터를 활용하여 이슬점, 절대습도, 수증기압포차를 산출하고, 기존 환경 변수와의 관계를 분석하여 기초적인 연구적 의미를 검토하고자 한다.



그림 1. 재배 시설 및 수집 장치

II. 본론

본 연구에서는 2023년 9월 5일부터 10월 16일까지 그림 1과 같은 전북 지역 장미 재배 온실에서 수집된 총 16,800개의 시계열 데이터의 환경 변수와 파생 변수 간의 관계성을 확인하기 위한 상관관계 분석(correlation analysis), 선형회귀 분석(regression analysis)을 진행하였다. 주요 변수는 기온(T, °C), 상대습도(RH, %), CO₂ 농도, 누적광량, 양액 특성(EC, 수온, pH, 투입량)이며, 이를 기반으로 파생 변수인 이슬점(T_d, °C), 절대습도(HD, g/m³), 수증기압포차(VPD, kPa)는 다음과 같이 산출하였다. 이슬점은 대기 중 수증기가 응결하기 시작하는 온도를 의미하며 수식 1과 2를 통해 계산할 수 있다.

$$\text{이슬점}(T_d) = \frac{b \times a(T, RH)}{a - a(T, RH)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$a(T, RH) = \frac{a \times T}{b - T} + \ln\left(\frac{RH}{100}\right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서 계수 $a=17.27$, $b=237.7$ 이다. 절대습도는 공기 중 실제 수분량을 의미하며, 수식 3-5를 통해 계산할 수 있다.

$$\text{절대습도}(HD) = \frac{216.7 \times e}{T + 273.15} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$e = \frac{RH}{100} \times e_s(T) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$e_s(T) = 0.6108 \times \exp\left(\frac{17.27 \times T}{T + 237.3}\right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

여기서 e 는 실제 수증기압(kPa)이며, 상대습도와 포화수증기압 $e_s(T)$ 에 의해 산출된다. 수증기압포차는 포화수증기압과 실제 수증기압의 차이를 의미한다. 작물 수분 스트레스와 직결되는 주요 지표이며, 수식 6을 통해 계산할 수 있다.

$$\text{수증기압차}(VPD) = e_s(T) \times \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

여기서 $e_s(T)$ 는 기온에 따른 포화수증기압(kPa)이다.

그림 2와 같이 상관관계 분석에서 수증기압포차는 기온과 $r=0.90$ 으로

강한 양의 상관관계를 보이며, 상대습도와는 $r=-0.98$ 의 강한 음의 상관 관계를 나타내어 환경 요인을 종합적으로 반영하는 지표임을 확인하였다. 이슬점과 절대습도는 $r\approx 0.996$ 으로 높은 중복성을 보였으나 각각 결로 위험 예측과 대기 수분량 추정에 보완적으로 활용될 수 있다.

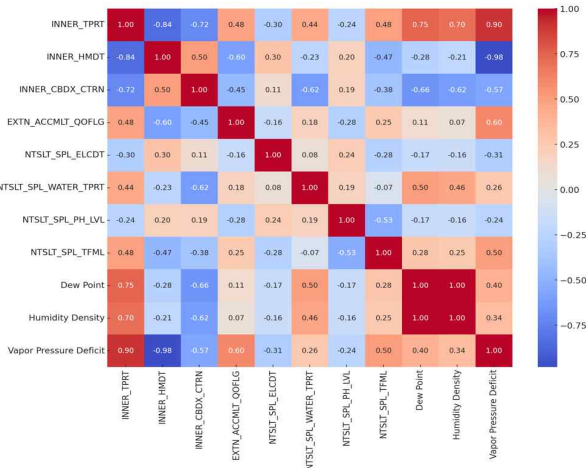


그림 2. 환경 변수와 과생 변수의 상관관계 분석

그림 3과 같이 상관관계 분석에서 확인된 결과에서 변수 간의 선형성 정도와 데이터 분산 패턴을 시각적으로 확인하기 위해 선형회귀 분석을 진행하였다. 수증기압포차-기온, 수증기압포차-상대습도, 수증기압포차-누적광량으로 두 변수 간의 관계를 확인하였으며, 수증기압포차와 기온과의 관계에서는 $R^2=0.82$, 상대습도와의 관계에서는 $R^2=0.96$ 의 결과가 나왔으며 뚜렷한 선형적 경향을 확인할 수 있었다. 반면 수증기압포차와 누적 광량은 양의 관계를 보였으나 데이터 분산이 크고, $R^2=0.36$ 으로 회귀선의 설득력은 낮았다. 이는 광량이 온도 상승 및 상대습도 하락을 매개로 간접적인 영향을 미치며, 환기·가습 등 환경 제어 요인의 개입으로 선형성이 약해지게 된 결과로 해석된다.

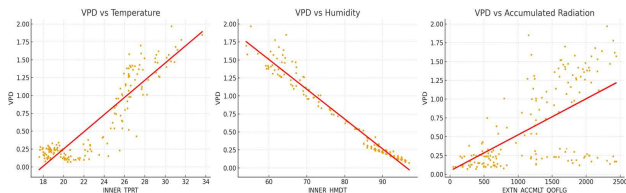


그림 3. 수증기압포차와 주요 환경 변수 간의 선형회귀 분석

분석 방법으로 장미 재배 온실의 기온, 상대습도, 누적광량 등의 환경 변수 간 관계를 해석하기 위한 기초 단계로 선형 회귀 모델을 적용하였다. 온실 내 주요 기후 변수들은 열역학적으로 복잡한 비선형 특성을 가질 수 있으나, 제한된 제어 환경(기온 20 - 35°C, 상대습도 50 - 90%)에서는 국소적으로 근사적인 선형 관계를 보이는 것으로 보고되어 있다[45]. 또한 본 연구에서 사용된 16,800개의 시계열 데이터는 자동화된 환경 제어 시스템 구간에서 수집된 안정적 데이터로, 비선형 모델 적용 시 과적합(overfitting) 위험이 존재한다. 이에 따라 본 연구는 정밀 예측보다는 변수 간 영향 구조와 상관성 해석에 중점을 두었으며, 해석 가능성이 높고 일반화 성능이 우수한 단순 선형 회귀 모델을 채택하였다. 이는 기존 연구[45]에서 제시된 온도·습도 기반 증기압 및 습도 제어 모델링 접근과도 일관된 타당한 분석 방법으로 볼 수 있다.

III. 결론

본 연구는 장미 재배 온실 데이터를 기반으로 과생 변수인 이슬점, 절대 습도, 수증기압포차를 산출하고, 주요 환경 변수와의 관계를 분석하였다. 수증기압포차는 환경 요인과 밀접히 연관되어 작물 수분 스트레스를 설명하는 핵심 변수임이 확인할 수 있었다. 이슬점과 절대습도는 높은 상관성을 보였으나 각각 결로 위험과 대기 수분량 추정에서 보완적 의미를 갖는다고 볼 수 있었다. 또한 선형회귀 분석에서는 온도·상대습도와 수증기압 포차의 선형성이 확인되었고, 누적광량은 간접적 영향으로 인한 분산을 보였다. 향후 본 연구 분석 결과를 바탕으로 다른 테스트베드 환경에 적용하여 환경 변수 간의 상관성뿐만 아니라 작물 생장 요소들과의 연관성도 검증할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 정보통신산업진흥원(NIPA)에서 지원한 AI융합 지능형 농업 생태계 구축 사업으로 수행된 연구임(S0103-24-1001).

참 고 문 헌

- [1] 김영수, 김기선, “온실 환경 제어를 위한 수증기압포차(VPD) 기반의 습도 관리 기법,” 한국생물환경조절학회지, 제27권, 제4호, pp. 279-285, 2018.
- [2] 이정훈, 박상혁, “장미 재배에서 환경변화가 생육 및 개화에 미치는 영향,” 원예과학기술지, 제39권, 제2호, pp. 145-153, 2021.
- [3] 송민호, “스마트팜 온실의 기후환경 분석 및 제어 모델링,” 한국농업기계학회논문집, 제25권, 제1호, pp. 23-31, 2020.
- [4] F. Körner and J. Challa, “Design for improved humidity control in greenhouses,” Biosystems Engineering, vol. 81, no. 3, pp. 377-388, 2002.
- [5] J. Zhang, Y. He, and M. Yang, “Vapor pressure deficit control for greenhouse crop production,” Acta Horticulturae, vol. 1187, pp. 235-242, 2017.