

플라스틱온실 내부 환경 인자 다중센서 설치 위치 최적화 전략

이정규¹ · 강동현² · 오상훈³ · 이동훈^{1*}

¹충북대학교 바이오시스템공학과, ²한국농수산대학 교양교통과, ³(주)무하기술

Strategies about Optimal Measurement Matrix of Environment Factors Inside Plastic Greenhouse

JungKyu Lee¹, DongHyun Kang², SangHoon Oh³, and DongHoon Lee^{1*}

¹Department of Biosystems Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

²Department of General Education, Korea National College of Agriculture & Fisheries, Jeonju 54874, Korea

³Muha, Inc., LTD., Seongnam 13201, Korea

Abstract. There is systematic spatial variations in environmental properties due to sensitive reaction to external conditions at plastic greenhouse occupied 99.2% of domestic agricultural facilities. In order to construct 3 dimensional distribution of temperature, relative humidity, CO₂ and illuminance, measurement matrix as 3 by 3 by 5 in direction of width, height and length, respectively, dividing indoor space of greenhouse was designed and tested at experimental site. Linear regression analysis was conducted to evaluate optimal estimation method in terms with horizontal and vertical variations. Even though sole measurement point for temperature and relative humidity could be feasible to assess indoor condition, multiple measurement matrix is inevitably required to improve spatial precision at certain time domain such as period of sunrise and sunset. In case with CO₂, multiple measurement matrix could not successfully improve the spatial predictability during a whole experimental period. In case with illuminance, prediction performance was getting smaller after a time period of sunrise due to systematic interference such as indoor structure. Thus, multiple sensing methodology was proposed in direction of length at higher height than growing bed, which could compensate estimation error in spatial domain. Appropriate measurement matrix could be constructed considering the transition of stability in indoor environmental properties due to external variations. As a result, optimal measurement matrix should be carefully designed considering flexibility of construction relevant with the type of property, indoor structure, the purpose of crop and the period of growth. For an instance, partial cooling and heating system to save a consumption of energy supplement could be successfully accomplished by the deployment of multiple measurement matrix.

Additional key words : environment prediction, indoor greenhouse, measurement system, measurement spot

서 론

우리나라 시설채소 온실분포는 플라스틱온실 51,997ha, 경질판온실 75ha, 유리온실 346ha로 99.2%가 플라스틱온실에 집중되어 있다(MAFRA, 2018). 대표적인 겨울 과일인 딸기의 국내 생산액은 10,503억원으로 과채류 중 25%를 차지하며 생산액이 가장 높다(An 등, 2013). 최근 5년간 시설딸기 소득은 2.7~4.1% 증가하였으나 생산비용 증가는 3.0~4.4%로서 생산비용이 소득 증가율에 비해 높아 장기적으로 경영에 악영향을 미칠 수 있다. 시설딸기 재배 농가들의 상대적 생산 효율성 분석결과, 13.6%의 순수기술 비효율과 9.1%의 규모

비효율이 존재하며(Yi 등, 2015) 기술적인 문제를 극복하기 위해서 다양한 방법의 문제해결이 필요하다.

기술적인 문제 극복은 재배자가 원하는 수준의 시설 내부 환경을 조절 할 수 있어야 한다. 최적의 난방부하 요구 시간대를 분석하고 순환식 수막시스템을 도입하여 재배작물, 외부온도 등의 조건에 따른 보온기간 수막시스템의 수온을 조절하는 방안(Kim 등, 2015)이 연구되었다. 데이터에 근거한 농업을 실현할 수 있는 정밀한 생육 및 환경관리 시스템을 구축하기 위해 시스템 및 매뉴얼의 표준화를 실현할 수 있는 'ICT기반 스마트팜 확산', '스마트팜 혁신밸리', '농식품ICT 융복합 확산 대책' 등과 같은 시설농업의 기술적인 문제 극복을 위한 국가적인 노력이 진행되고 있다(Kim 등, 2016).

시설재배 농가의 전체 경영비 중에서 30~50%를 차지하는 난방비용(Hong, 2015)의 절감을 위한 공기순환팬 설치 온

*Corresponding author: leedh@cbnu.ac.kr

Received November 28, 2019; Revised February 13, 2020;

Accepted March 27, 2020

실과 미설치 온실의 온습도 균일도를 비교하여 난방 장치의 가동 시간과 에너지소비량을 절약 할 수 있는 근거를 제시하였다(Lee 등, 2017). 또한 적외선 난방등을 이용한 가온방법이 딸기의 생육과 난방비 효율에 있어 경유 온풍난방기보다 62.2%의 비용절감 효과를 확인(An 등, 2013)하고 지역적 특성에 따른 난방 프로세스 및 비용을 분석(Canakci 등, 2013) 등 다양한 방식의 연구가 수행중이다. 이와 같이 농장주의 경험에 의존하지 않고 최적화된 난방 전략 수립을 위해서는 효과적인 시설환경 모니터링 기술이 요구된다.

기존의 선행 연구에서는 외부 기상조건의 변화에 따른 시설 내부 기온 변이는 길이별 측정 지점에서 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 의 유의미한 편차가 나타났으나, 고저차에 따른 시설의 기온 편차는 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 이내로 매우 미소(Hong과 Lee, 2014)하여 유의미한 변수로 해석하기 어렵다고 볼 수 있다. 한편 Lee 등(2017)은 시설 내부의 계측 지점에 따른 온도차는 최대 3.36°C , 습도는 13.27%로 수평 및 수직적 위치에 따라 유의미한 편차가 존재한다고 보고하였다.

WSN(Wireless Sensor Networks)를 효과적으로 활용하여 최적의 성장환경을 조성한다면 재배 활동의 올바른 의사 결정을 통한 정확한 작물 생산 계획에 의한 생산성 향상, 냉난방에 필요한 에너지 절감의 효율성이 증가한다(Rubanga 등, 2019). 정밀한 농사 관리를 위한 스마트 팜 클라우드 시스템이 가능하며(Skobelev 등, 2019), 데이터 및 필드의 정보를 기반으로 시설 내부 환경을 예측하고 수분관리를 자동제어 하는 등의 응용이 가능해진다(Muangprathub, 2018).

생산성 향상과 작물 성장에 직접적인 영향을 주는 온도, 습도, CO_2 , 조도는 외부 환경의 변화에 의해 온실 내부 분포가 불규칙해진다(Choi 등, 2019). 시설 내부의 환경요소가 완벽하게 균일하다면 기온 및 특정인자를 쉽게 파악할 수 있지만 내부를 균일하게 유지하는 것은 현실적으로 어려운 상황이다. 센서의 지점에 따라 다수의 피드백 과정을 거쳐 환경조절을 위한 목표에 도달하기까지 시간적 지연과 에너지를 효과적으

로 활용하지 못하는 문제가 발생한다. 유리온실을 모델링하여 전산유체역학 시뮬레이션을 활용한 다양한 기상 조건과 환기구조에 따른 환기량 변화를 예측한 결과, 3개 지점의 예측 지점과 각 지점의 3지점의 높이별 온도변화 추이가 다르게 나타났다으며, 동일 시설의 온도분포도 내부 공간에 따라 상이한 결과를 확인하여 ICT 기술을 접목시킨 공간정밀제어와 예측제어의 필요성이 검증되었다(Hong과 Lee, 2014).

작물 재배시 다수의 센서를 설치할 경우 정밀한 계측은 가능하지만 시설비용이 증가하는 단점이 발생한다. 본 연구에서는 단동형 플라스틱온실의 측창개폐, 환기팬 구성 및 가동 등의 환경제어 시스템 알고리즘을 구성하기 위한 환경인자의 공간 분포 특성을 계측하고, 센서 위치별 실측데이터와 예측데이터의 상관관계 분석을 통한 계측 매트릭스의 최적구성 방안을 설계하였다.

재료 및 방법

1. 재배 환경

실험은 설향 품종의 딸기(*Fragaria x ananassa* Duch.)를 재배중인 충청북도 청주시 상당구 가덕면 노동리 39번지에 위치한 Fig. 1의 베리원 딸기농장에서 진행하였으며, 동서방향의 단동 아치형 플라스틱온실로 폭 10m, 길이 100m, 측고 1.2m, 동고 3.6m의 규격이다. 1중 피복재는 두께 0.15mm의 PO 필름(솔라리움, Ihlshin chemical, Korea), 2중 피복재는 두께 0.07mm의 PE 필름(대풍, Ihlshin chemical, Korea)을 사용하고 있었다. 실험기간 중 딸기는 고온에 의한 품질 저하로 5월 20일 경 재배를 종료하였으며, 동절기를 지난 시기이므로 개폐기를 작동하지 않는 일상적인 재배관리 형태의 자연환기 방식의 환경관리가 이루어졌다.

2. 계측 매트릭스 시스템

온도, 습도, CO_2 , 조도를 측정하기 위해 온습도 센서(HDC



Fig. 1. Experimental greenhouse with front view and side view.

1080, Texas Instrument, USA), CO₂ 센서(TG100-33, Trueyes, Korea), 조도 센서(BH1710FVC, Rohm, Japan)로 센서 모듈을 구성하여 현장에 설치하였다(Fig. 2).

일반적으로 광대역을 고려한 무선 센서 노드의 통신환경은 2.4, 5GHz 의 주파수를 사용하는 WLAN(Wireless LAN)방식은 주변 네트워크에 의한 간섭이 발생하므로 더 낮은 주파수로 인한 우수한 전송 특성 및 안정성, 유효거리가 높은 Sub-1-GHz 대역의 통신 시스템이 대안으로 제시되었다(Aust and Ito, 2011). 따라서 본 실험에서는 시설 내부에 국한된 통신 인프라 구축이 유연하며 스마트팜 활용 효율성 및 안정성이 검증된 920.1Mhz 주파수를 이용하는 무선 통신 시스템을 이용하였다. 실시간 관찰을 위하여 개별 계측 노드에서

는 0.5Hz의 주기로 Gateway와 통신을 수행하여 데이터를 기록하였다.

시설 내부는 외부 환경 변이에 따라 내부 환경인자의 편차가 존재한다(Lee 등, 2017). 이에 근거하여 정밀한 시설 내부공간의 환경인자 분포를 계측하기 위해 3차원 Matrix를 구성하여 45개의 WSN모듈을 배치했다. 온실 길이 방향은 입구를 기준으로 10, 30, 50, 70, 90m 폭은 우측을 기준으로 2, 5, 7m 이는 바닥을 기준으로 0.2, 1.1, 2m에 위치하여 각각의 차원은 균등한 간격으로 Figs. 3, 4와 같이 설계하였다.

3. 데이터 처리

실험을 위한 45개 계측 지점에서 2019년 6월 8일부터 23일



Fig. 2. Picture of installed sensor nodes in the experimental facility.

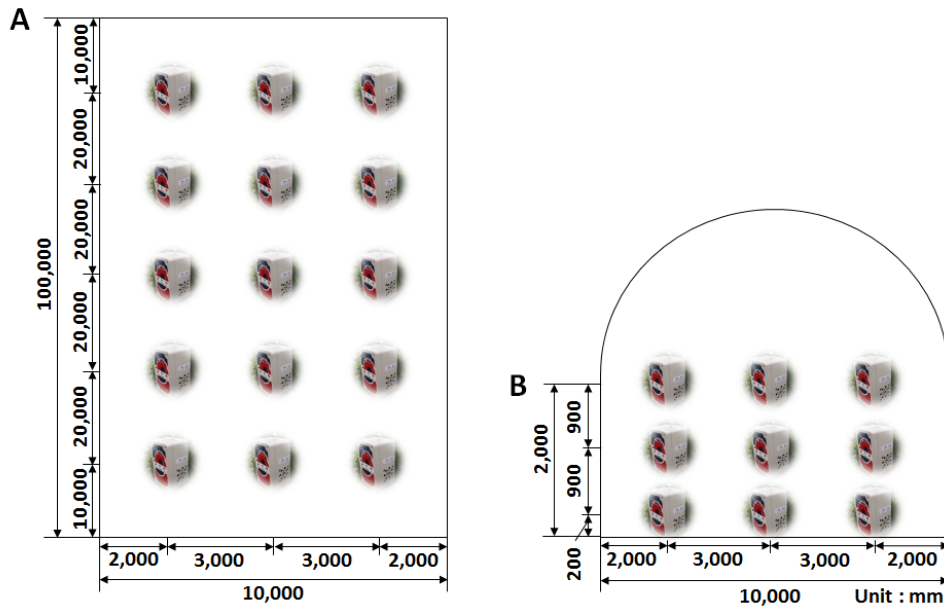


Fig. 3. Size of testbed and position of sensors: A, Top view, B, Front view.

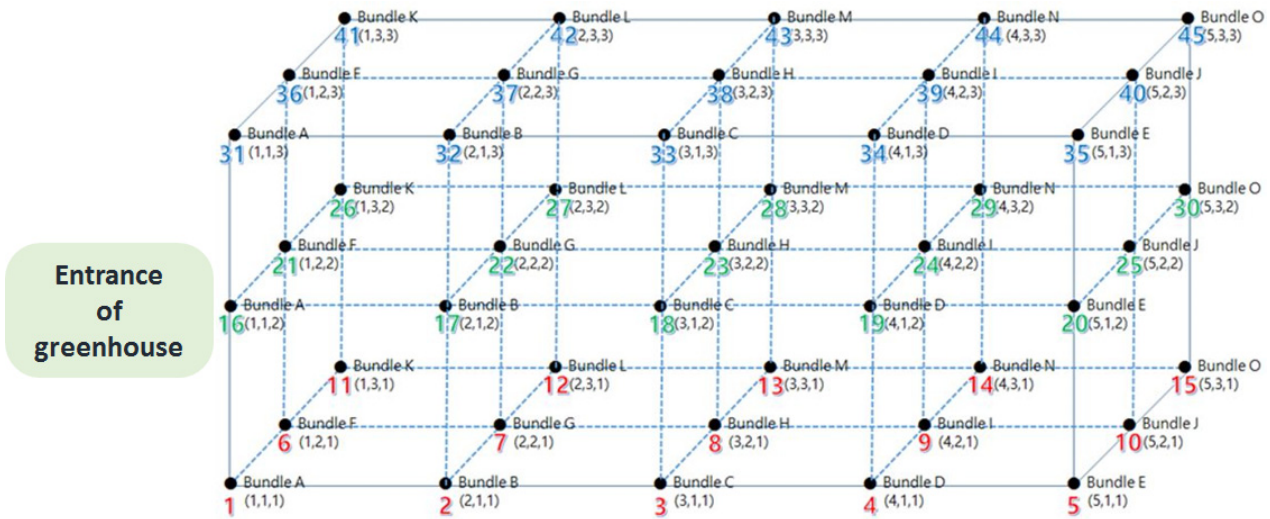


Fig. 4. Sensor matrix and each of number.

까지 온도, 습도, CO₂, 조도 데이터를 수집하였다. 2초당 수집되는 1일 Raw 데이터는 각 센서당 43,200개, 총 약 200만회이며, 데이터 분석을 위해 Matlab2014(Mathworks, USA)를 이용하여 1시간 단위 평균으로 재분류하였다. Fig. 5는 각 센서에서 측정된 데이터의 평균과 표준편차를 나타낸 그래프이다.

다을 기준으로 0.2, 2m의 데이터로 1.1m를 예측값으로 가공하여 작물이 재배중인 높이인 1.1m의 실제 데이터 측정값과 선형회귀분석을 실시하였다. 이 때 독립변수는 예측값, 종속변수는 실측값으로 설정하여 선형회귀분석을 진행하고 두 값의 상관관계를 결정계수(R²)로 해석하였다.

4. 매트릭스 최적화 분석

본 연구에서는 계측 매트릭스지점의 센서의 최적화분석을 위해 보간법(interpolation)을 사용하였다. 공간상에 특정 지점이나 조사되지 않은 지점의 값을 추정하는 기법을 보간법이라 한다. 이는 적절한 현상에 유사한 수학적 모델이 적용되었을 때 효과적인 결과를 기대할 수 있으며, 공간 보간의 정확도는 알려진 점들의 수, 분포 등이 중요한 요인이 되며 보간 파라미터를 선정하기 위해서는 평면적으로 다수의 샘플이 존재해야 정밀도가 향상된다(Kim 등, 2010).

데이터 분석에 사용된 선형보간법의 식은 아래의 산술평균과 같다. 실측값을 도출하기 위해 예측지점에서 가장 신뢰도가 높은 인접한 직선의 경계구간 데이터를 활용하였다.

$$p(x) = \frac{x_{i-1} + x_{i+1}}{2} \quad (1)$$

이때, p(x)는 예측값, x는 실측값, i는 예측지점이다.

온실의 길이 방향인 수평적 분석은 10, 50m와 50, 90m에 위치한 센서의 데이터를 보간하여 30m와 70m를 예측값으로 가공하고 각각 30, 70m에 위치한 센서의 실제 데이터 측정값과 선형회귀분석을 실시하였다. 높이 방향인 수직적 분석은 바

결과 및 고찰

1. 온도

측창을 작동하지 않는 자연환기 상태의 시설 환경 계측 데이터로부터 온도의 실측값과 예측값의 결정계수 값을 나타내는 Fig. 6에서 온도의 수평적 예측성능 결정계수는 하루 중 0.9이하 3회, 0.9이상 21 회로 나타났으며, 수직적 예측성능은 모든 시간대에서 0.9이상의 정확도를 나타냈다. 하루 중 가장 낮은 예측성능은 수평적 예측결과 중 오전 8시이며, 결정계수는 0.8557을 나타냈다(Fig. 7). 급격한 온도의 변화구간에서 예측성능이 크게 감소하였다. 8시의 온도는 6시 온도에 비해서 약 7°C, 조도는 약 1000lx가 상승했으며, 일출 이후 시설 내부로 유입되는 조도가 급격히 증가하고 외부의 온도 상승으로 인해 수평적 공간에서 온도 편차가 발생하여 예측성능이 급격히 저하된다고 판단된다. 온도 하강 구간인 16시부터 18시까지 약 2시간 동안 온도는 7°C, 조도는 2000lx가 하강하였으며 이는 온도 상승구간과 마찬가지로 급격한 온도 변화가 예측성능에 영향을 미치는 것으로 보여진다. 18시의 온도는 16시에 대비 7°C, 조도는 2000lx가 하강하였고 회귀분석 결과가 크게 감소하였다. 이는 외부 환경에 따라 내부 환경변수가 불안정해지며(Hong와 Lee, 2014), 시설 내부 온도가 급강하할 때

플라스틱온실 내부 환경 인자 다중센서 설치 위치 최적화 전략

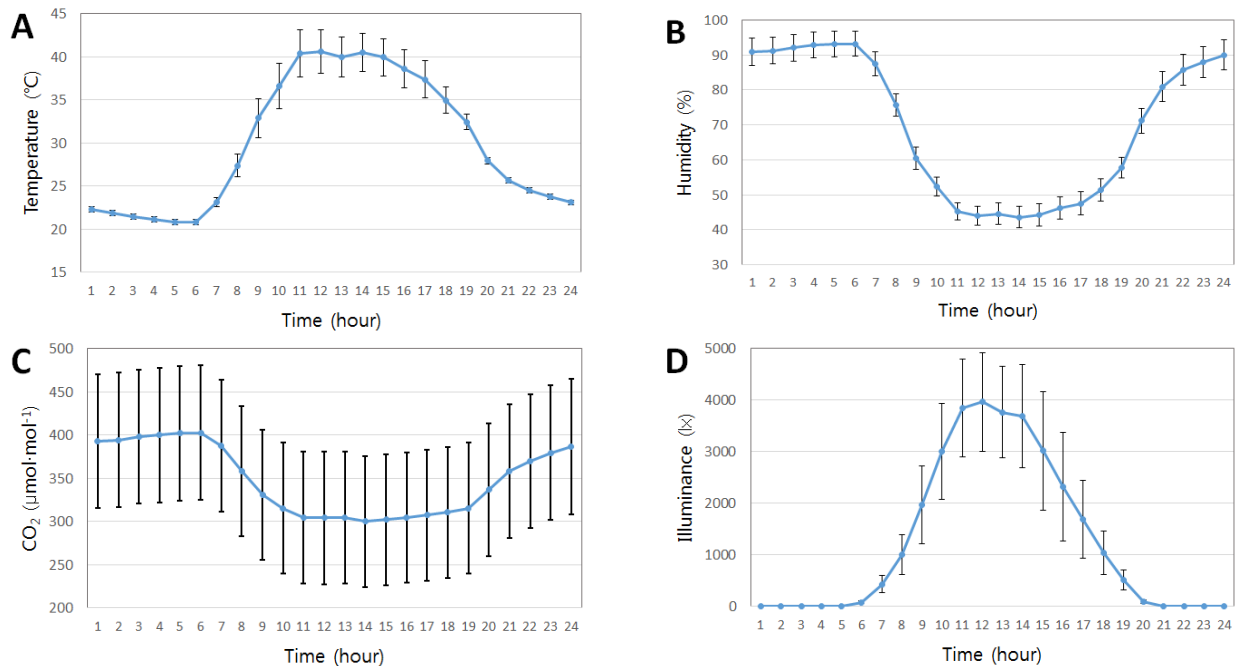


Fig. 5. Average hourly data and standard deviation for each sensors: A, Temperature, B, Humidity, C, CO₂, D, Illuminance.

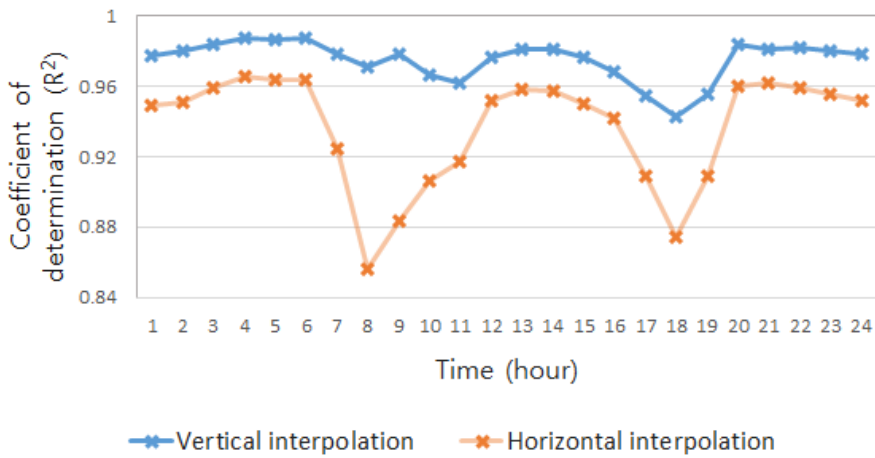


Fig. 6. Linear regression result of vertical and horizontal interpolation of temperature.

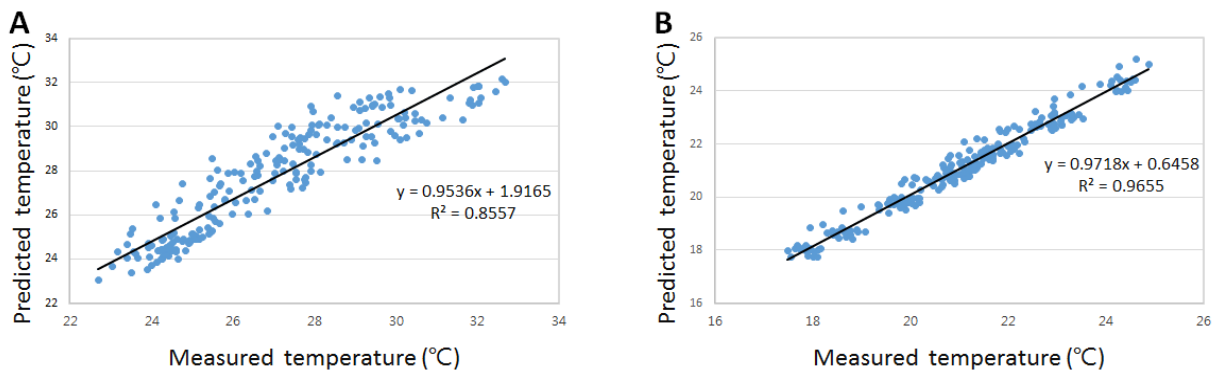


Fig. 7. A daily lowest(A: 8 am) and best(B: 4 am) temperature-correlation data per hour average.

수평적인 계측 지점의 위치에 따라 편차가 발생하는(Choi 등, 2019) 연구와 유사한 결과를 보이는 것으로 나타났다. Fig. 8은 실측값과 예측값을 비교하기 위하여 3차원적으로 재구성한 분포도를 예시로 나타낸 것이다.

시설 내부 공간의 수직적인 방향에 비해 수평적인 방향의 온도 변화 예측이 민감하고, 특히 외부 환경요인에 의한 급격한 온도변화 발생 시 예측능력이 낮아지므로 시설 내 온도의 정확한 계측을 위해서는 수평적 방향의 예측 및 외부 환경 요인에 영향이 적은 위치를 선정하는 것이 중요하다고 판단된다.

2. 습도

Fig. 9는 하루 중 회귀분석 결과가 가장 낮은 오전 5시, 높은 오전 11시의 상관관계 그래프이다. Fig. 10에서 수평적 회귀분석 결과 하루 중 3개의 시간대를 제외한 21개의 지점에서 0.9이상의 결정계수를 나타내었다. 수직적 회귀분석 결과 7시

부터 19시까지 주간의 결정계수는 0.9이상이며, 그 외에는 0.9이하로 나타났다. 습도는 수평적인 방향의 회귀분석 결과가 수직적인 방향에 비하여 우수한 것으로 해석된다.

습도의 회귀분석 결과는 온도와 반대의 양상을 보였다. 특히 수직방향 습도값의 결정계수는 야간에 0.7~0.8의 결과를 나타냈으며, 이는 이미 시설 내부의 수직차에 따른 습도의 편차가 존재하기 때문으로 판단되며 선행연구와 유사한 형태를 나타내었다(Lee 등, 2017).

따라서, 시설 내부의 정확한 습도 예측을 위해서 주간에는 1개의 센서로 대응이 가능하나, 야간에 수직적인 방향에서의 예측능력을 높일 수 있는 위치 선정이 필요하다. 작물 위치에 센서를 위치시키는 것이 일반적이나 작물재배 형태, 환풍기 가동 등의 재배전략에 따라 작물의 상·하단부에 2개의 센서를 운용하는 방법을 고려할 수 있다. 또한 센서 성능의 편차를 줄이기 위해서 가습기 등을 운용하여 재배 작물에 따른 시설 내부의 적정 습도 환경을 조성하는 것이 바람직하다.

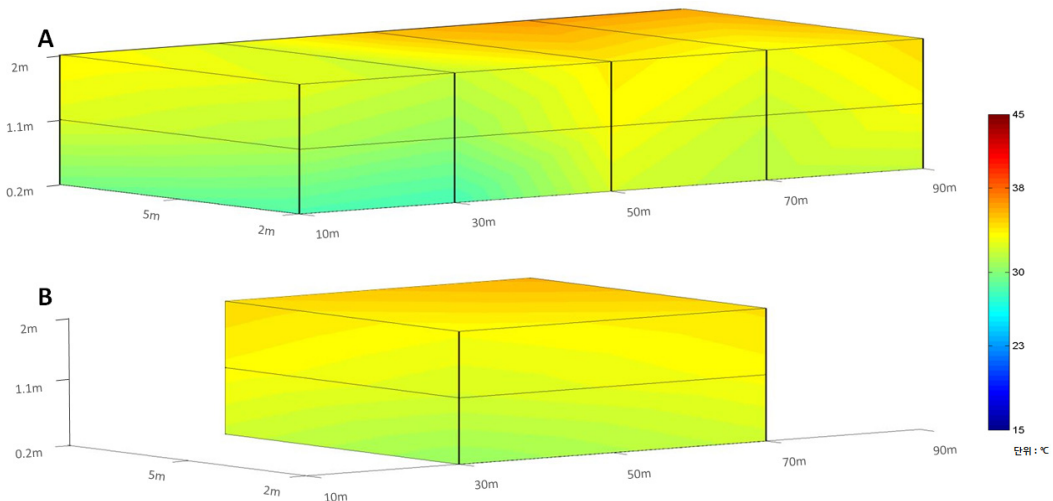


Fig. 8. 3D dimensional distribution of estimated temperature by linear interpolation given by measured temperature in the indoor greenhouse: A, Measured temperature by 3 x 3 x 5 matrix, B, predicted temperature from 30 and 70m.

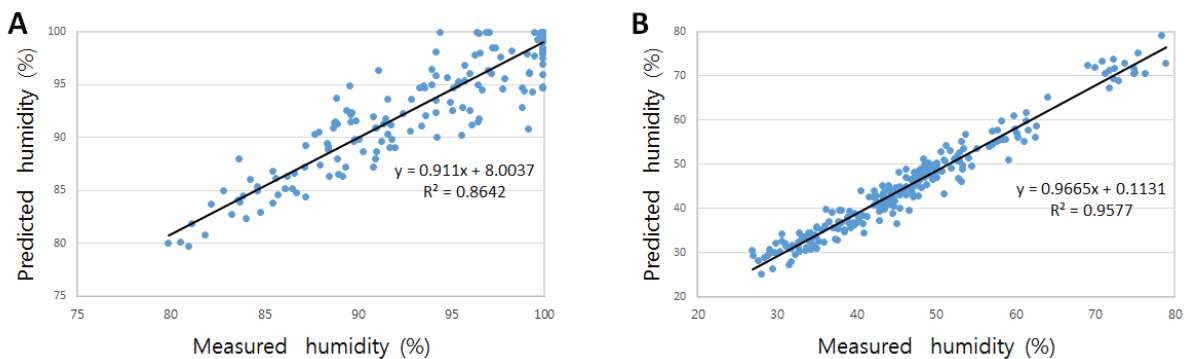


Fig. 9. A daily lowest(A: 5 am) and best(B: 11 am) humidity-correlation data per hour average.

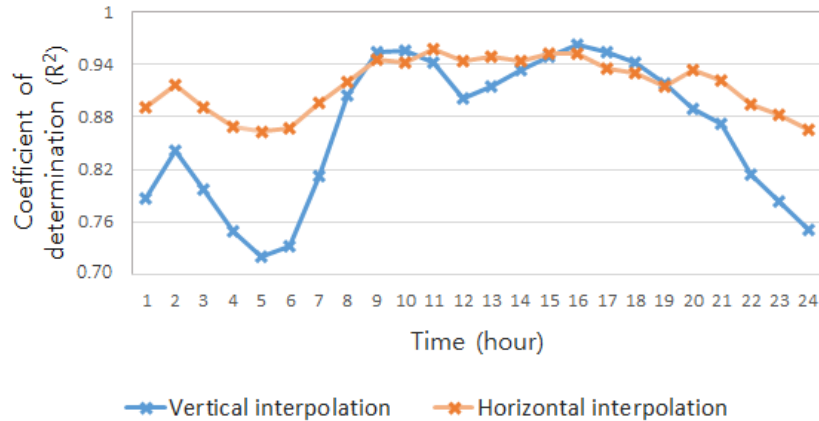


Fig. 10. Linear regression result of vertical and horizontal interpolation of humidity.

3. CO₂

CO₂는 광합성 과정에서 호흡을 통해 주간에는 흡수하고 야간에 배출한다(Park 등, 2010). Fig. 5의 C에서 알 수 있듯이 CO₂는 오전 6시에 최대치의 농도(402 μmol·mol⁻¹) 이후 주간에 미세하게 낮아지고 야간에 높아지는 것으로 보아 인위적인 환경 변화를 제공하지 않아도 충분한 환기가 이루어지는 기간에는 작물의 호흡이 시설환경 내부 CO₂에 영향을 미치는 것으로 예상된다.

선행연구 결과 CO₂는 보급형 센서의 시스템적인 오차가 존재하며, 실제 1분당 센서에서 계측한 값의 표준 편차가 166 μmol·mol⁻¹ 내외로 오차범위의 3배에 해당하였고 디지털 필터링을 수행하지 않으면 사용하기 어렵다(Lee 등, 2019). CO₂의 공간별 센서의 예측성능 평가 결과는 Fig. 11과 같으며, 수직 수평적인 보간에 의한 예측값과 실측값의 예측성능은 결정계수가 0.3미만으로 신뢰할 수 없다고 판단된다. 이는 각 센서의 표준 편차가 최소 70 μmol·mol⁻¹ 이상을 나타내므로 센서의 필터링이 필요하며, Fig. 12와 같이 공간 매트릭스 내의 계측 지점간의 측정치의 편차가 큰 것은 시설 내부에 CO₂ 분포가 매우 불규칙한 상태로 존재하고 있음을 의미한다.

4. 조도

야간에는 조도가 측정되지 않아 0의 결과를 나타내었고, 일출 이후 측정된 조도의 공간별 예측성능의 결정계수는 대부분 0.9 이하로 나타났으며 신뢰성이 높지 않다. Fig. 13은 24시간 중 가장 편차가 큰 값의 수평적 예측의 대표적인 결정계수이다. 특히 일사각이 낮아지는 15시 이후부터 수직적 예측의 결정계수 값이 급격히 저하되었다(Fig. 14). 온실의 방향 및 형태, 1, 2중 피복재 및 골격, 천장에 위치한 환풍기, 포그시스템, 재배중인 작물에 의한 간섭 등에 의한 변수가 불규칙하게 작용하여 나타난 결과로 판단된다.

5. 센서의 적정위치 고찰

시설 내부의 환경 계측을 위한 센서의 적정위치 선정을 위해 실험하였으며, 그 결과 하루 시간대에 따라 센서의 실측치와 예측치의 회귀분석의 결과가 급변화되는 시점을 확인하였다.

온도 인자의 경우 수평적으로 미지의 지점의 온도를 추정하려면 일출, 일몰과 같이 외부 환경이 급격한 변화를 보이는 시간영역(6월 기준 오전 8시와 오후 6시 구간)에서 상대적으로 더 많은 계측 노드가 소요된다고 판단할 수 있다. 작물의 높낮이를 고려한 센서의 위치 선정은 결정계수를 근거하여 최소한의 계측 지점으로 미세계측 지점의 예측이 가능할 것으로 예상된다.

습도 인자는 온도의 결과와는 반대로 수평적 예측성능이 수직적 예측성능보다 우수하였다. 두 조건 모두 주간(오전 8시부터 오후 7시 구간)이 야간보다 공간상의 습도 예측의 결정계수가 높은 0.9이상으로 확인되었다. 야간에 시설 내부 습도의 분포를 정밀하게 측정하기 위해서는 구간별 최소 2개 이상의 센서가 필요할 것으로 예상된다. 주간에 수직 수평적 구간에 1개의 센서 노드로 계측하여도 무리가 없을 것으로 판단된다.

CO₂는 디지털 필터링을 통한 데이터의 안정화가 필요한 것으로 예상된다. 본 연구의 결과 예측성능의 결정계수는 0.3미만으로 나타났다. 하절기 측창을 개방한 상태의 환경조건에서는 정밀한 공간측정과 센서의 적정 위치를 판단하기가 난해한 결과를 나타내었다.

조도 인자는 구조적인 다양한 변수에 의해 결정계수가 다소 낮은 0.8 내외의 결과를 도출했다. 하이베드 재배 조도를 정상적으로 측정하기 어려운 0.2m 지점은 계측의 필요성이 낮으므로 제외하고 상부에서 시설물의 간섭이 최소화 되는 곳을 적정위치로 선정하기 위한 연구가 요구된다. 다만 하이베드의 간섭을 고려하더라도 주간에 0.8 내외의 결정계수를 나타내는 것으로 보아 소수의 센서로 조도분포의 공간예측이 가능

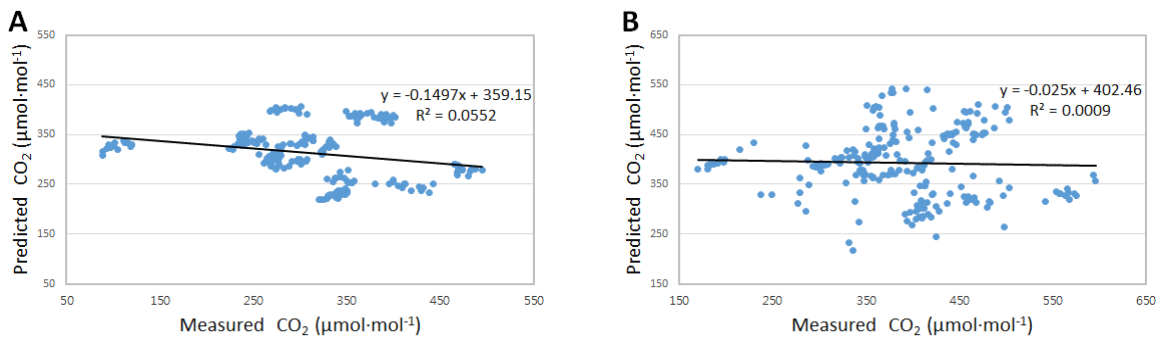


Fig. 11. A daily lowest(A: 4 pm) and best(B: 8 am) CO₂-correlation data per hour average.

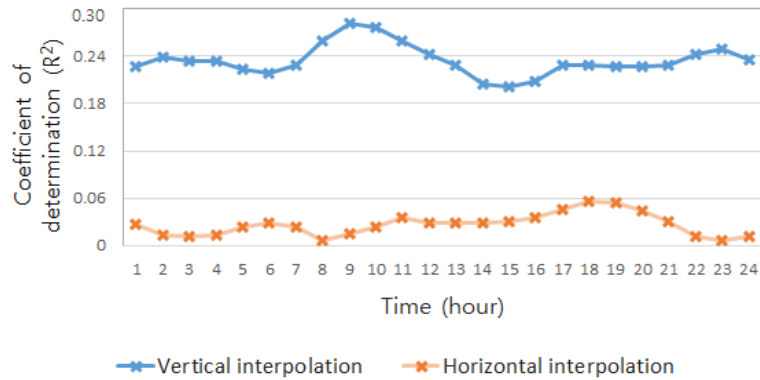


Fig. 12. Linear regression result of vertical and horizontal interpolation of CO₂.

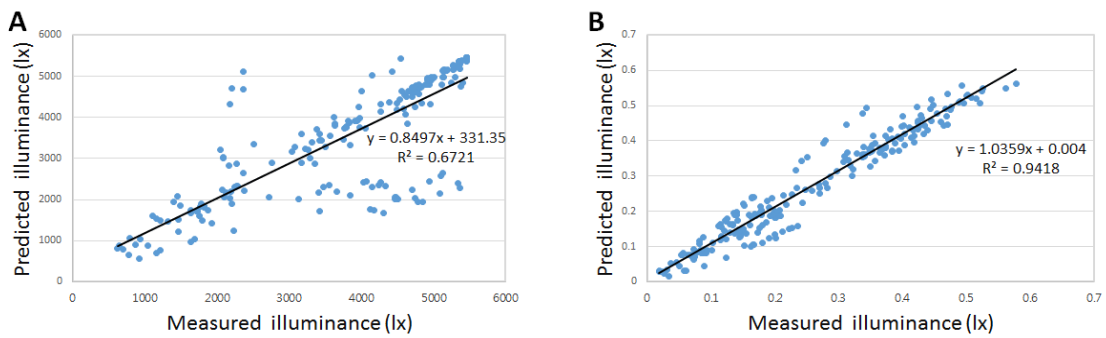


Fig. 13. A daily lowest(A: 2 pm) and best(B: 5 am) illuminance-correlation data per hour average.

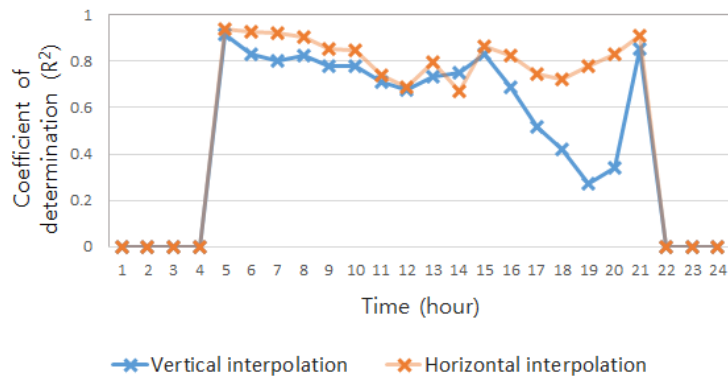


Fig. 14. Linear regression result of vertical and horizontal interpolation of illuminance.

할 것으로 예상된다.

결과적으로 온습도는 연구 및 재배자의 목적과 여건에 맞는 유연한 측정지점의 선정이 요구된다. 충분한 자연환기가 이루어지는 하절기 기간 시설 내부 환경인자의 공간 분포 특성을 고려한 다중센서의 최적 위치는 과도한 시설비용의 투자를 방지하고 온실 내부의 편차를 감소할 수 있는 높이 1.1m, 길이 30, 70m 지점에 각 2개, 폭 기준 2, 8m 지점 총 4개의 센서 배치가 효율적이라 판단된다. 계측하고자 하는 환경인자의 종류에 따라 센서 위치의 조정이 요구된다. 하절기 기간 단동형 플라스틱온실에서 최소한의 센서 수량으로 환경인자의 불균형 지점을 예측하여 국소제어가 가능한 계측 매트릭스의 활용 방안을 제시한다. 단 온실의 종류, 크기, 재배기간 등에 따라 환경인자의 분포가 상이하므로 본 연구의 단동형 플라스틱온실의 최적의 계측 위치 및 데이터를 일반화 할 수 없다.

적 요

국내 시설 농업의 99.2%를 차지하는 플라스틱온실의 내부 환경인자는 외부 환경의 변화에 민감하게 반응하고 온실 공간 내부에서 편차가 발생한다. 온도, 습도, CO₂, 광도의 환경인자를 계측하기 위한 지점을 3 × 3 × 5로 구성하여 데이터를 취득하고 내부 공간을 수직, 수평적인 측면으로 분할하여 환경 인자의 분포를 확인하였다. 계측지점의 최적점을 선정하고자 계측 공간을 수직, 수평적인 방향으로 분할하고, 측정 데이터와 이를 활용한 예측지점의 선형회귀분석 결과로 성능평가를 실시하였다.

일반적인 상황에서는 온도와 습도 인자의 경우 1개의 센서로 플라스틱온실 내부 환경의 계측이 가능할 수 있으나, 특정 구간의 경우 다수의 센서를 활용하여 내부공간의 정밀성을 확보하는 것이 필요하다. CO₂의 경우 실험기간 내의 계측 매트릭스의 증가에도 불구하고 변이를 정의하는데 한계가 있음을 발견하였다. 조도 분포의 경우 일출 이후 지속적으로 회귀분석 결과가 작아짐을 발견하였다. 구조물의 간섭 등을 고려해 동일한 수평적인 방향에서 미세 측정지점의 결정계수가 감소하였고, 센서 매트릭스 배치를 작물 높이 위로 위치하여 다수의 센서 노드 설치로 개선 가능하다고 예상된다. 외부 환경의 변화에 따라 온실 내부 환경이 불규칙하게 변화되며, 이 구간은 시설의 규격을 고려하여 계측 매트릭스를 구성해야 한다. 반대로 안정적인 구간에서는 최소한의 센서 노드로 내부 환경의 예측이 가능한 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로 측정하고자 하는 환경인자와 시설의 구조 등 연구 및 재배자의 목적에 맞는 계측 매트릭스 위치 선정의 유동성이 요구되며, 덕트의 개폐위치를 조절하여 필요한 곳에 에너지를 투입하는 국소냉난방 및 생육제어 모델링 설계에 적용 가능하다고 판단된다.

추가 주제어: 환경 예측, 온실 내부, 계측 시스템, 측정 지점

사 사

본 연구는 농촌진흥청 연구개발과제(과제번호: PJ013925-2019)의 지원으로 수행되었음.

Literature Cited

- An, J.U., C.G. An, Y.H. Hwang, H.S. Yoon, Y.H. Chang, G.M. Shon, and B.R. Jeong. 2013. Effect of heating by infrared heating lamps on growth of strawberry and heating cost. *Protected Horticulture and Plant Factory* 22:355-360 (in Korean).
- Aust, S. and T. Ito. 2011. Sub 1GHz Wireless lan deployment scenarios and design implications in rural areas. *Globecom Workshops IEEE* p.1045-1049.
- Canakci, M., N.Y. Emekli, S. Bilgin, and N. Caglayan. 2013. Heating requirement and its costs in greenhouse structures: A case study for mediterranean region of turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24:483-490.
- Choi, H.Y., T.W. Moon, D.H. Jung, and J.E. Son. 2019. Prediction of air temperature and relative humidity in greenhouse via a multilayer perceptron using environmental factors. *Protected Horticulture and Plant Factory* 28:95-103 (in Korean).
- Hong, S.G. 2015. Strategies for increasing biomass energy utilization in rural areas - focusing on heating for greenhouse cultivation. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57:9-20 (in Korean).
- Hong, S.W. and I.B. Lee. 2014. Predictive model of micro-environment in a naturally ventilated greenhouse for a model-based control approach. *Protected Horticulture and Plant Factory* 23:181-191 (in Korean).
- Kim, J.H., J.H. Choi, and C.S. Kim. 2010. Comparative evaluation of interpolation accuracy for CO₂ emission using GIS. *Journal of Environmental Impact Assessment*. 19:647-656.
- Kim, H.K., J.G. Jeon, Y. Paek, H.Y. Pyo, J.W. Jeong, and Y.C. Kim. 2015. Analysis of temperature changes in greenhouses with recirculated water curtain system. *Protected Horticulture and Plant Factory* 24:93-99 (in Korean).
- Kim, Y.J., J.Y. Park, and Y.G. Park. 2016. An analysis of the current status and success factors of smart farms. KREI (Korea Rural Economic Institute) Research Report 1-74 (in Korean).
- Lee, J.K., D.H. Kang, and D.H. Lee. 2019. Research about digital filtering optimization of realtime CO₂ measurement. *The Korean Society of the Agricultural machinery* 24:524

- (in Korean).
- Lee, T.S., G.C. Kang, H.K. Kim and J.P. Moon, S.S. Oh, and J.K. Kown. 2017. Analysis of air temperature and humidity distributions and energy consumptions according to use of air circulation fans in a single-span greenhouse. *Protected Horticulture and Plant Factory* 26:276-282 (in Korean).
- MAFRA, 2018. <http://www.mafra.go.kr/mafra/366/subview.do?enc=Zm5jdDF8QEB8JTJGYmJzJTJGbWFmcmElMkY3MSUyRjMyMTY2OCUyRmFydGNsVmllldy5kbyUzRg%3D%3D>
- Muangprathub, J., N. Boonnam, S. Kajornkasirat, N. Lekbangpong, A. Wanichsombat, and P. Nillaor. 2018. IoT and agriculture data analysis for smart farm. *Computer and Electronics in Agriculture* 156:467-474.
- Park, S.A., M.G. Kim, M.H. Yoo, M.M. Oh, and K.C. Son. 2010. Comparison of indoor CO₂ removal capability of five foliage plants by photosynthesis. *Korean journal of horticultural science & technology* 28:864-870 (in Korean).
- Rubanga, D.P., K. Hatanaka, and S. Shimada. 2019. Development of a simplified smart agriculture system for small-scale greenhouse farming. *Sensors and Materials* 31:831-843.
- Skobelev, P.O., E.V. Simonova, S.V. Smirnov, D.S. Budaev, G.Y. Voshchuk, and A.L. Morokov. 2019. Development of a knowledge base in the “smart farming” system for agricultural enterprise management. *Procedia Computer Science* 150:154-161.
- Yi, H.Mi., H.M. Kim, and M.K. Jang 2015. Analyzing the influence factors on production efficiency of strawberry farmers. *Korean Journal of Food Marketing Economics* 32:25-45 (in Korean).