

다중 공기층 패널을 활용한 스마트팜 에너지 효율 실증

최제호*, 조윤찬**, 김승한***, 김승환**, 윤재철****, 이홍균****, 진주완*

*건양대학교 스마트농산업학과, **건양대학교 재난안전소방학과, ***건양대학교 방재보안학과,

****그린팜텍

e-mail:25369503@konyang.ac.kr

Demonstrating Smart Farm Energy Efficiency Using Air Space Panel Greenhouses

JeHo-Choi*, Yun-Chan Jo**, Seung-Han Kim***, Seung-Hwam kim**, ****Jae-cheol Yoon,
****Hong-gyun Lee, Juan Jin*

*Dept of Smart agricultural Technology and Innovation, **Dept of Department
of Disaster Safety & Firefighting, ***Dept of Disaster Prevention and Security,
Konyang University, ****Green Farm Tech

요약

기후변화로 인한 평균 온도 상승, 강수량 변화, 극단적 기상이변 증가는 농업 생산성 저하와 시설 피해 증가로 이어지며, 최근 10년간 국내 농업시설 피해액은 연평균 1,300억 원에 달한다. 이에 시설농업 연구는 생산성 중심에서 에너지 효율 실증 연구로 확장되는 추세다. 그러나 기존 온실의 PE·PO 필름과 유리는 보온성·내구성이 부족하고 교체 주기가 짧아 농가 부담을 심화시킨다. 본 연구는 이를 해결하기 위해 다중 공기층 패널(Air Space Panel) 온실을 구축하고 3년 8개월간 온도·습도·일사량을 모니터링하여 성능을 검증하였다. 결과적으로 여름철 혹서기 외부 평균 기온이 30°C를 초과할 때도 내부 온도를 안정적으로 유지했으며, 7월 1.1°C, 8월 4.5°C 낮게 나타났다. 또한 냉방부하 지수와 전력요금은 PE·PO 온실 대비 50~70% 절감되어 농가 비용 완화 효과가 확인되었다. 이러한 성과는 작물 생육 안정과 지속가능한 스마트농업 기반 조성에 기여하며, 향후 농업 경영 효율성과 온실 설계 혁신 방향을 제시하는 대안 모델로 평가된다.

1. 서론

기후변화는 농업 생산성에 중대한 위협을 가하는 요인으로, IPCC 보고서에 따르면 평균 온도 상승, 강수량 변화, 극단적 기상 이변의 빈도 증가는 농업의 안정성과 지속가능성을 저해하는 핵심 요소로 지적되고 있다[1]. 최근 10년간 국내 농업시설 피해액은 연평균 약 1,300억 원에 달하며, 예측 불가능한 재해 규모의 확대는 기존 비닐하우스 형태의 시설농업 시스템의 한계를 드러내고 있다[2]. 또한 농촌진흥청의 분석에 따르면 농업인들의 기상 이변 대응 인식은 점차 높아지고 있으며, 신규 농자재, 고효율 설비, 안정적인 외피 자재에 대한 수요가 확대되고 있다[3]. 기존 PE, PO 필름이나 유리 소재가 지난 한계를 극복할 수 있는 새로운 형태의 온실 외피 개발 필요성과 맞닿아 있다[4].

새만금 간척지 첨단온실단지 조성 연구에서는 간척지의 강한 풍속이 유리 단열재의 효율에 미치는 영향을 분석하며, 온실 폐복재 선정이 시설의 안정성과 에너지 효율 확보의 핵심임을 강조하였다[5]. 또한 국립농업과학원은 생산성 향상에 집중되던 시설 농업 재배기술 발전 위주에서, 점차 에너지 효율 실증 연구로 확장되고 있음을 보여주었다[6]. 본 연구에서는 다중 공기층 패널

(Air Space Panel)을 통해 스마트팜 운영에서의 에너지 효율을 실증적으로 평가하고, 향후 기후변화 대응형 시설농업의 대안으로서 그 가능성을 검토하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 스마트팜 에너지 관리

스마트팜은 ICT 기술을 활용하여 온실 내부의 온도, 습도, 광량, CO₂ 농도 등을 정밀 제어함으로써 작물 생육 환경을 최적화하는 농업 시스템을 의미한다[7]. 그러나 스마트팜 운영에서 에너지 비용은 전체 운영비의 30% 이상을 차지하며, 특히 동절기 난방부하와 하절기 냉방부하는 농가 경영 안정성에 큰 부담으로 작용한다[8]. 이에 따라 스마트팜 기술의 발전은 단순한 생육 환경 모니터링을 넘어, 에너지 절감형 환경제어 및 피복재 개선을 통한 운영 효율성 제고로 확장되고 있다.

2.2 온실 피복재의 특성과 한계

기존 온실에서 주로 사용되는 피복재는 PE, PO 필름과 유리 소재가 대표적이다. PE와 PO 필름은 시공이 간편하고 초기 비용

이 저렴해 농가에서 가장 널리 활용되고 있으나, 열관류율이 높아 보온성이 낮고 결로 발생으로 광투과율 저하가 쉽게 나타난다. 또한 내구성이 부족해 교체주기가 짧아 장기 운영 시 유지관리 비용이 증가하는 단점을 지닌다[9]. 또한 유리온실은 결로 현상이 빈번하게 발생하고 유지보수가 까다로우며 비용이 크다는 한계가 있다[10]. 이러한 특성은 기상 이변이 심화되는 기후환경에서 시설의 안정성과 에너지 효율성을 저해하는 요인으로 작용한다.

3. 연구 방법

3.1 실험 설계 및 측정 방법

본 연구에서는 다중 공기층 패널의 적용 가능성을 검증하기 위하여 패널을 실제 온실 모형에 설치하고, 내부 환경의 변화를 일정 기간 동안 관찰했다.



그림 1 다중 공기층 패널 온실

측정 항목은 온도, 습도, 일사량, 외부 기상조건 등으로 설정하였으며, 이를 위해 소형 센서 네트워크를 구축하여 주기적으로 데이터를 기록하였다. 수집된 자료는 시간대별·계절별로 구분하여 누적 및 평균값을 산출하였으며, 이를 통해 열적 완충 효과와 내부 환경 안정성을 확인하였다. 실험은 일정 면적의 시험 구간을 대상으로 2017년 5월부터 3년 8개월간 수행되었으며, 계절 변화에 따른 패널 성능의 차이를 반영하였다. 특히 여름철 고온 기에서 내부 온도 변화를 세밀하게 기록하여 냉 부하 저감 가능성을 분석하였다. 또한 장기 모니터링을 통해 구조적 안정성과 내구성을 함께 검토하였으며, 수집된 자료는 통계적 분석을 통해 일관성과 신뢰도를 확보했다.

3.3 데이터 수집 및 분석 방법

ASP 온실의 성능을 검증하기 위하여 구축된 센서 네트워크를 통해 내부 및 외부 환경 데이터를 실시간으로 수집하였다. 측정 항목은 온도, 습도, 일사량 등 주요 기후 요인으로 설정하였으며, 여름철 혹서기와 장마철을 포함한 다양한 시기에 걸쳐 자료를 확보하였다. 수집된 데이터는 시간대별 및 계절별로 구분하여 누적값과 평균값을 산출했다.

데이터 분석은 냉방부하 지수, 전력 소비량 등의 지표를 중심으로 수행되었으며, 이를 통해 에너지 절감 효과와 내부 환경 안정성을 정량적으로 평가하였다. 또한 작물 생육 환경 적합성을

평가하기 위해 내부 온도 변동폭과 외부 조건과의 차이를 검토함으로써 효과를 확인했다.

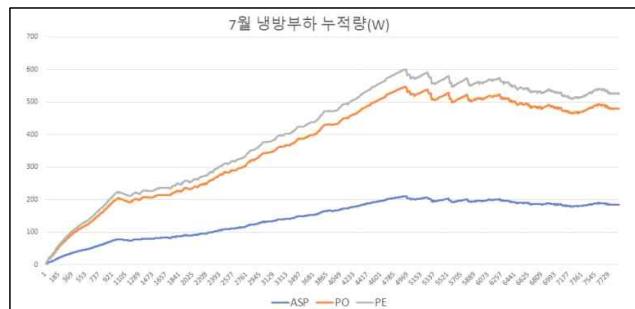


그림 2 7월 냉방부하 누적량(w)

본 연구에서 구축한 온실은 내부와 외부에 설치된 센서를 통해 방대한 환경 데이터를 실시간으로 수집하였으며, 여름철 장마기간과 주요 냉방기인 7월 11일부터 8월 31일까지의 자료를 중심으로 에너지 효율성을 분석하였다. 센서 일부 결손으로 소수의 데이터가 누락되었으나 전체 분석에는 영향이 미미하였다. 7월 한 달간 수집된 7,729개의 데이터는 장마철 기온 변화로 인한 냉방부하의 변동 패턴을 보였으며, ASP 적용 시 누적 냉방부하는 PO와 PE 폐복재 대비 최대 2.5배까지 절감되는 것으로 예측되었다. 7월 ASP 온실의 전력요금은 약 114,000원이었으나, 동일 조건에서 PO와 PE를 적용할 경우 각각 약 225,000원과 213,000원이 소요될 것으로 산출되어, ASP가 에너지 비용 절감에 뚜렷한 효과를 가지는 것으로 확인했다.

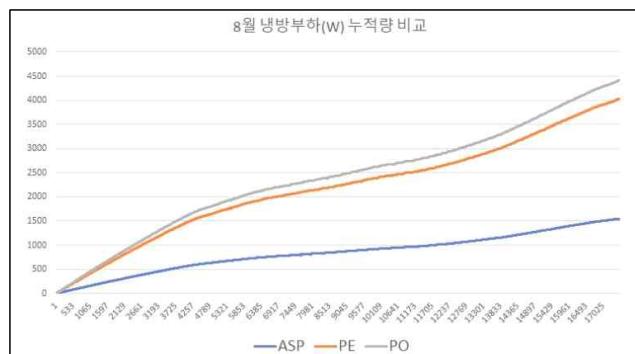


그림 3 8월 냉방부하 누적량(w)

8월 분석에서는 총 17,025개의 데이터가 수집되었다. ASP는 누적 냉방부하는 실제 값으로 산출되었으며, 이를 기준으로 PO와 PE 폐복재를 적용할 경우 열관류율 차이에 따라 체적당 냉방부하가 더욱 증가하여 최대 3배 수준의 전력 비용 차이가 발생할 것으로 예측되었다. 8월 전력요금은 180,740원이었으나, 동일 조건에서 PO와 PE를 사용할 경우 각각 약 542,000원과 524,146원이 청구될 것으로 산출되어, 혹서기 환경에서도 탁월한 에너지 비용 절감 효과를 보여주었다.



그림 4 7월 혹서기 실내외 온도 편차

7월 혹서기 동안 ASP 온실은 외부 온도에 비해 안정적이고 낮은 내부 온도를 유지하였다. 외부 평균 온도가 26.8 °C였을 때 내부 평균 온도는 25.7 °C로 약 1.1 °C 낮게 나타났으며, 외부 온도가 30 °C를 초과하는 시기에도 내부 온도는 작물 생육에 적합한 수준을 유지하였다. 내부 온도의 변동폭 또한 작아 외부 기온 변동의 영향을 최소화하였고, 이는 구조가 열 차단과 환경 안정화에 효과적임을 보여준다.



그림 5 7월 냉방부하 지수

냉방부하 지수 분석 결과 ASP는 0.02로 산출되었으나, PO는 0.04, PE는 0.07로 각각 2배, 3.5배 높은 값을 나타냈다. 이러한 결과는 7월 냉방 비용을 기준 피복재 대비 절반 이상 절감할 수 있음을 의미하며, 고온 민감 작물의 안정적인 재배 환경 제공에 기여한다.



그림 6 8월 혹서기 실내외 온도 편차

8월의 경우 혹서기 기온에서도 내부 온도를 효과적으로 조절하였다. 외부 평균 온도가 29.4 °C로 상승했을 때 내부 평균 온도는 24.9 °C로 약 4.5 °C 낮아, 여름철 고온기에 탁월한 냉각 효과를 제공함을 확인하였다. 또한 내부 온도의 변동폭이 작아 외부 기온 상승에도 안정적인 생육 환경이 유지되었으며, 이는 특히 딸기와 같은 고온 민감 작물의 생산성 확보에 유리한 조건을 제공한다.

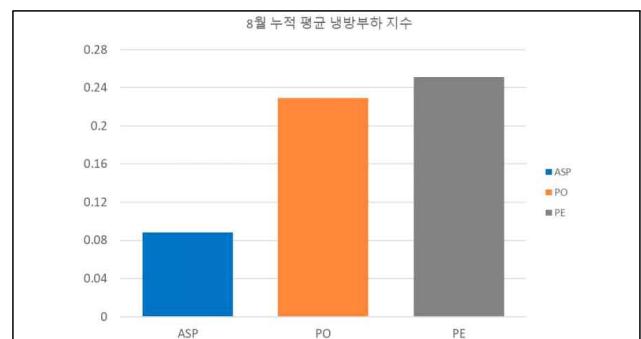


그림 7 8월 냉방부하 지수

냉방부하 지수는 ASP가 0.08로 산출된 반면, PO는 0.24, PE는 0.26으로 각각 약 3배 이상의 값을 보였다. 이로써 ASP는 8월과 같은 혹서기 조건에서도 기존 피복재에 비해 50~70% 수준의 냉방 비용 절감 효과를 나타내며, 온실 운영의 경제성을 뚜렷하게 높이는 것으로 평가된다.

3.2 ASP(Air Space Panel)의 적용 가능성

표 1의 비교 항목은 온실 성능을 다각도로 검증하기 위해 선정된 지표들이다. 보온성, 결로현상, 온도편차, 유지보수, 내구년수는 에너지 효율성, 작물 생육 안정성, 그리고 장기적 시설 운영의 경제성을 종합적으로 판단할 수 있는 기준으로 기능한다.

[표 1] ASP온실 실증 모델 에너지 효율성 평가

구분	ASP	유리온실	3중 비닐하우스	비닐하우스
보온성 (W/m ² K)	매우 좋음 (1.98)	안 좋음 (5.1~7.2)	좋음	안 좋음
결로현상	없음	있음	있음	있음
온도편차	거의 없음 1°C	매우 큼 (2~4°C)	있음 (1~2°C)	매우 큼 (2~4°C)
유지보수	쉬움	보통	다소 어려움	보통
내구년수	15년	15년 이상	5~7년	3~7년

ASP는 열관류율이 1.98 W/m²K로 매우 낮아 보온성이 우수하며, 결로현상이 발생하지 않고 내부 온도편차 또한 거의 없는

것으로 나타났다. 반면 기존 비닐하우스는 보온성이 낮고 온도변동이 큰 특성을 보이며, 내구년수 역시 3~7년으로 짧아 장기적 안정성 확보가 어렵다. 유리온실은 광투과율과 내재해성 면에서는 장점이 있으나, 결로현상이 발생하고 유지보수가 상대적으로 까다롭다. 이에 비해 ASP는 보온성, 안정성, 유지관리의 용이성 등에서 경쟁력이 높아, 스마트팜 적용 시 에너지 절감 및 생산성 향상 측면에서 유리한 대안으로 평가된다.

4. 결론

기후변화에 따른 평균 기온 상승과 기상이변의 빈도 증가는 농업 생산성과 시설 안전성에 심각한 위협을 주고 있으며, 기존 PE·PO 필름이나 유리온실은 열관류율이 높고 결로 발생, 짧은 내구연한 등 구조적 한계를 드러내고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구는 다중 공기층 구조를 가진 ASP 온실을 구축하고, 장기간의 모니터링과 혹서기 실증 실험을 통해 에너지 효율성과 내부 환경 안정성을 검증하였다. 연구 설계는 온도, 습도, 일사량, CO₂ 농도 등 주요 지표를 중심으로 이루어졌으며, 실험 구간은 3년 8개월 이상 운영되었다. 이를 통해 ASP의 구조적 안정성과 내구성이 실증적으로 검증되었으며, 장기적 활용 가능성을 확인할 수 있었다.

실험 결과 ASP 온실은 열관류율 1.98 W/m²K의 우수한 단열 성능을 기반으로 외부 온도가 30°C를 초과하는 혹서기에도 내부 온도를 안정적으로 유지하였다. 7월에는 내부가 외부보다 약 1.1°C 낮았고, 8월에는 약 4.5°C 낮게 나타나 고온 민감 작물의 생육 안정성을 높이는 결과를 보였다. 또한 냉방부하 지수는 7월 ASP 0.02, PO 0.04, PE 0.07, 8월 ASP 0.08, PO 0.24, PE 0.26으로 산출되어, ASP가 기존 피복재 대비 2배에서 최대 3.5 배까지 효율적인 성능을 보였다. 전력요금 분석에서도 7월 ASP 온실은 약 114,000원으로 추산된 반면, PO와 PE는 각각 225,000원, 213,000원이 소요되는 것으로 나타났다. 8월 역시 ASP 180,740원에 비해 PO 542,000원, PE 524,146원이 산출되어, 50~70%의 비용 절감 효과를 제공함을 확인하였다.

이러한 결과는 ASP 온실이 에너지 비용 절감과 생산성 향상이라는 두 가지 목표를 동시에 충족시킬 수 있는 농업 시설 모델임을 보여준다. 단순한 피복재의 대체재가 아니라, 기후위기 속에서 농업의 안정성과 지속가능성을 보장할 수 있는 기반 기술로 평가된다. 초기 설치비용과 유지관리 비용을 포함한 종합 경제성 검토, 작물별 맞춤형 설계, 최적 환경제어 시스템 고도화가 병행된다면 ASP는 탄소중립 실현과 에너지 자립형 스마트팜 구축을 위한 핵심 인프라로 발전할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] IPCC, Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Working Group I Sixth Assessment Report, Summary for Policymakers, IPCC, 2021.
- [2] 행정안전부, 2020년 재해연보(자연재난), 2021 12월
- [3] 성재훈, 유럽의 농업부문 기후변화 적응 정책, KREI 연구보고서, 2020 5월
- [4] 농촌진흥청, 기후변화 대응을 위한 기후스마트농업 국제동향 분석, 2022 12월
- [5] 서효재, 서일환, 노득하, 이학성, “새만금 간척지 첨단온실에너지 설계를 위한 풍환경 및 온실 피복재의 영향 분석”, 한국생물환경조절학회, pp57~63, 2023.
- [6] 국립농업과학원, 온실 에너지 절감 및 환경개선을 위한 순환 팬 최적 운용기술 연구, 2018 2월
- [7] 이수아, 김병준, 변성우, 노동희, 박근호, 임태범, 정성환, “디지털 트윈을 활용한 지능형 온실 시스템 개발 연구”, 한국산학기술학회, pp925~927, 2022
- [8] 임청룡, 박영준, 이철성, “스마트팜 에너지소비량 예측 모델 개발에 관한 연구”, 한국산학기술학회, pp71~74, 2022
- [9] Maraveas, C., Environmental Sustainability of Greenhouse Covering Materials, Sustainability, Vol. 11, No. 21, Article 6129, 2019.
- [10] 조종수, 김영민, “액티브형 유리 재료의 건축디자인 적용과 특성에 관한 연구”, KIEAE Journal, pp.59~66, 12월, 2020.