02

농업분야 탄소중립과 시설원예 에너지 절감기술

여욱현
경상국립대학교
/ 조교수
uhyeo@gnu.ac.kr

유재민
경상국립대학교
/ 학생연구원
woals5965@naver.com

박건률
경상국립대학교
/ 학생연구원
rjsfbf3819@naver.com

최강혜
경상국립대학교
/ 학생연구원
myexbfij@naver.com

강성하
경상국립대학교
/ 학생연구원
kasv123@naver.com

송서연
경상국립대학교
/ 학생연구원
ssy3060@naver.com

1. 머리말 또는 서언

기후변화에 대응하고 지구환경을 보존하기 위하여 전 세계적인 노력의 일환으로 탄소중립을 목표로 하고 있으며, 국가 차원에서의 다양한 정책과 기술이 도입 및 개발 · 보급되고 있다. 탄소중립은 우리의 생활에서 발생하는 온실가스 (발생량)를 절감 (산림 조성 및 보존, 재생에너지의 도입, 에너지 효율화)하고, 탄소 포집 및 저장 등과 같은 기술로 상쇄하여 실질적으로 대기 중에 탄소 배출량이 없도록 하는 것을 의미한다.

농업 분야에서의 온실가스 배출은 국가 전체 배출량의 2.9% 수준이며 약 20.4 백만 톤 CO_2-eq를 배출하고 있다. 세부적으로는 경종부문에서 11.8 백만 톤 CO_2-eq, 축산부문 (장내발표, 가축분뇨) 9.4 백만 톤 CO_2-eq, 시설원예 · 농업기계 등 에너지 부문에서 1.0 백만 톤 CO_2-eq이다 (농림축산식품부, 2021). 국가 전체 온실가스 배출량과 비교하면 농업 분야에서의 온실가스 배출량은 낮은 수치이지만 농업 분야에서 탄소중립은 국가의 식량안보와 생태계 보호, 농업종사자의 경제적 이익 등을 위해서 중요한 현안이다.

온실가스 중 큰 비중을 차지하는 이산화탄소(CO_2)는 인간의 활동과 화석연료의 연소 과정에서 대기 중으로 배출된다. 원예시설에서 냉 · 난방 에너지를 위한 화석연료의 사용은 무시할 수 없는 수준이다. 작물별로 상이하지만 농가 경영비 가운데 난방비의 비중 일반적으로 30~40%이다. 이는 유류를 이용하는 난방기의 비중이 높기 때문이다. 이러한 이유로 유가 상승은 농사용 전기 이용료를 상승시키는 기제로 작용하기 때문에 농가 경영에 있어서 큰 부담이 되고 있다. 실제로, 2020년부터 국제 유가가 단기간 크게 상승하였으며 [그림 1], 2022년에는 국내 농사용 전기요금이 45.7%

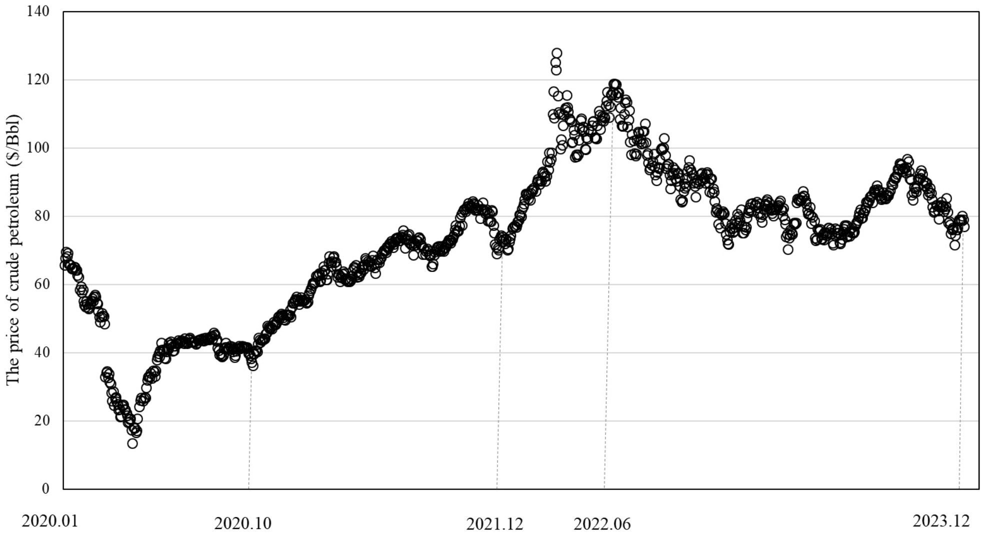

그림 1. 일별(2020.01~2023.12) 두바이유의 가격 변화 (한국석유공사, 2024)

표 1. 2022년 농업용 전기료의 인상 전 · 후 단가 비교 (한국농어민신문, 2022)

단위(kW)		전력량 요금	기후환경요금	연료비조정요금	총 요금
인상 이전		36.9원	5.3원	0원	42.2원
인상	4월	4.9원 △	2원 △		
	7월			5원 △	
	10월	2.5원 △			
인상 이후		49.2원	7.3원	5원	61.5원

인상됨에 따라 농업 종사자들의 어려움이 곳곳에서 호소되었다 [표 1]. 특히, 전체 원예시설 중 비닐하우스가 차지하는 비율이 약 98%이며, 대부분이 10년 이상 경과한 노후 온실 (90%이상)이기 때문에 일정한 농작물 재배 온도 유지를 위한 화석연료 에너지 투입이 많은 실정이다.

따라서, 시설원예산업에서도 탄소중립을 위한 노력이 필요한 시점이며, 기후변화와 탄소중립을 위한 시설원예산업 종사자들의 적극적인 협조가 필요하다. 그러므로, 본 고에서는 현재 탄소중립을 위한 국가정책사업 및 시설원예산업에 적용 가능한 에너지 효율화 기술을 소개한다.

2. 정부 정책 방향

정부는 에너지 효율화와 관련하여 화석연료 사용량 감축을 시도하고 있다. 2021년에 ‘2050 농식품 탄소중립 추진전략’을 발표했고 국정과제를 위하여 농림축산식품부의 기존 ‘농촌재생에너지팀’을 ‘농촌탄소중립정책과’로 개편했고, 저탄소농업 기술보급과 연관된 에너지 이용 효율화 사업, 가축분뇨 에너지화 사업 등을 확대하려 노력하고

있다. 더 나아가 비용 효과적인 기술 개발 및 보급, 실용화 기술 개발, 정보제공 등을 추진하고 있다. (한국농촌경제연구원, 2023)

시설원예 분야에서는 온실가스를 줄이기 위하여 고효율 에너지 시설을 도입함으로써 화석연료 사용을 줄이고자 하는 노력이 이루어지고 있으며, 시설뿐만 아니라 농업용 기계장치의 에너지 효율화 · 고도화도 이루어지고 있다. 시설원예 현대화 사업 (자동개폐기, 방제기, 환풍기 등), 스마트팜 시설보급사업 (ICT 융 · 복합 시설, 기자재 제어 장치 등), 에너지 효율화 사업 등이 대표적인 사업이다. 시설원예에 적용 가능한 에너지 효율화 (절감) 기술은 다겹보온커튼, 수막재배시스템 등의 에너지 저감 기술 활용과 태양광, 지열, 히트펌프 등 재생에너지를 이용하여 온실가스를 줄일 수 있다.

특히, 앞서 언급한 정부의 농식품 탄소중립 추진전략에 따라 '온실가스 감축사업', '저탄소 농 · 축산물 인증제', '배출권거래제' 등을 통하여 탄소중립 실천 농가의 경제적 지원을 위한 직불제도가 국정과제에 포함되었다. 그러므로 이러한 경제적 지원사업을 활용하여 저탄소 농업에 동참해야 한다.

3. 시설원예 에너지 효율화 기술

농림업 부분에서의 에너지 소비량은 2,333천 toe이고 농업기계의 에너지 소비량의 비중이 47%로 가장 많으며 관련 시설의 에너지 소비량은 13% 수준이다 (한국농촌경제연구원, 2022). 시설원예 농가의 에너지 비용 부담을 에너지 이용 효율화와 재생에너지 적용을 통해 완화해 나갈 계획을 수립하고 있다. 온실가스 감축 논의 및 시행이 활발해짐에 따라 에너지 효율화 사업이 더욱 주목받고 있다. 특히, 시설원예를 중심으로 에너지 절감 기술은 열 회수형 환기장치, 배기열 회수 장치, 다겹보온커튼, 알루미늄 스크린, 비 · 순환식 수막시설, 작물별 변온 관리 등이 있다. 이외에도 농촌진흥청에서는 시설원예 농가의 난방비 부담을 줄일 수 있는 에너지 절감 기술을 소개하고 있다.

시설원예산업에서의 배기열 회수 장치는 추가적인 연료 없이 시설에서 발생하고 버려지는 배기가스 (열)를 회수하고 재활용하여 물을 가열하기나 증기를 생성해서 가온에 사용하여 에너지 효율을 향상시킴으로써 에너지 비용을 절감하기 위한 목적으로 사용된다 (그림 2). 배기열 회수 장치의 작동원리는 냉 · 난방공조시스템, 발전기 등으로부터 직접적으로 배기되는 열에너지를 회수하는 방법이 있으며, 열교환기를 통해 배기되는 열을 다른 매체로 전달하는 열교환 원리가 적용됨으로써 작물의 생육에 필요한 최적환경을 조성함에 있어서 효율적인 에너지 소비를 가능하게 한다. 일례로, 유류 온풍난방기에서 외부로 버려지는 폐열 (250℃～350℃)을 회수해 온풍기의 가동시간과 연료의 사용량을 약 25%~40% 이상 줄이고 송풍온도를 크게 상승시킨 바 있다 (국립원예특작과학원, 2018).

열 회수형 환기장치는 온실 내 · 외부의 공기 교환을 통하여 발생하는 열 손실을 최소화한다. 온실의 내부 공기가 외부로 배출하는 동시에 외부 공기를 내부로 유입시키는 과정에서 내부 공기의 열을 회수하여 신선한 외부 공기의 온도를 상승시킨다 (그림 3). 이러한 이유로, 온실을 환기시킬 때 외부의 차가운 공기가 실내로 바로 들어오는 것을 막고, 유입된 찬 공기는 내부의 따뜻한 공기와 잘 혼합되도록 설계하는 것이 중요하다 (국립원예특작과학원, 2018).

배기열 회수장치와 열 회수형 환기장치의 차이

그림 2. 배기열 회수장치
(국립원예특작과학원, 2018)

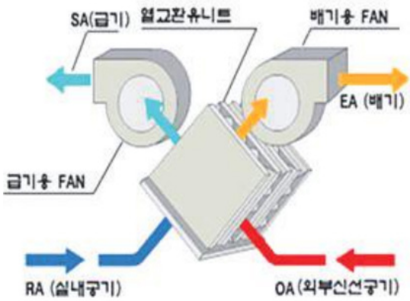

그림 3. 열회수형 환기장치
(국립원예특작과학원, 2018)

는 배기열 회수장치는 온실의 난방 시스템과 같은 고온 발열 장치에서 발생하는 열을 활용하며, 열 회수형 환기장치는 온실 내부의 공기열을 활용하여 신선한 외부 공기의 온도를 상승시키는데 목적이 있다. 이러한 원리로 인하여, 배기열 회수 장치는 상대적으로 고온의 열원을 활용하지만 열 회수형 환기장치는 상대적으로 저온의 열원을 활용한다는 특징이 있다.

겨울철 온실 내의 열은 60% 이상이 피복재를 통하여 손실되기 때문에 피복면의 보온 성능을 높이는 것이 주요하다. 다겹보온커튼은 여러 겹의 보온재로 이루어진 커튼을 이용하여 원예시설 내부의 열 손실을 최소화하고 단열효과를 증가시켜 온실 내부의 온도를 안정적으로 유지하는 장치이다 (그림 4). 주로 온실의 지붕과 측면에 설치된다. 특히, 다겹보온커튼은 개폐를 조절할 수 있기 때문에 일출 이후에는 태양광을 활용하고 일몰 이후에는 열 손실을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 최근에는 가벼우면서 보온 성능이 우수한 단열소재인 에어로겔을 이용한 다겹보온커튼이 개발되어 신기술 보급이 이루어지고 있다 (그림 5). 에어로겔 다겹보온커튼은 기존 다겹보온커튼 대비 15~20% 단동온실 난방비를 절감할 수 있다. 장기간 다겹보온커튼 이용 시 기존 다겹보온커튼에서 발생하던 내구성 감소와 수분흡수로 인한 중량 증가 등의 문제가 개선되는 것이 실증되었다. 농촌진흥청은 관련 특허를 산업체에 기술이전하는 등의 사업화 성과를 내고 있다 (농촌진흥청, 2024).

온실의 알루미늄 스크린 역시 다겹보온커튼과 동일하게 내부 온도 환경을 관리하고 에너지 효율을 높이기 위한 것이지만 현대적인 온실 자재이다. 알루미늄은 반사성 재료로 만들어져 온실 내 광과 열 분포를 조절할 수 있다. 온실의 지붕이나 측면에 설치되어 태양광의 온실 내 입사량을 조절하고 광포화점 이상의 일사량을 차단함으로써 작물의 증산작용을 줄이고 수분 손실을 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 또한, 온실 내 열 환경 분포를 균일하게 유지하는데 도움을 준다.

수막재배시스템은 2중 비닐하우스 위에 지하수를 뿌려 수막을 형성해 비닐하우스 내 열 손실을 줄이는 재배기술이다. 외부 기온과 관계없이 비교적 일정한 온도(약 15°C)의 지하수를 이용하여 난방비를 줄이는 에너지 효율화 방법이다.

작물의 변온 관리는 작물의 생육에 있어서 온도 환경을 최적으로 관리하는 기술이다. 작물의 생물학적 필요조건에 맞춰 온도를 조절함으로써 생육을 촉진할 수 있으며 특정 성질을 개선할 수 있다는 장점이 있다. 특히 낮 동안에는 더 높은 온도

그림 4. 다겹보온커튼(에어로겔)

그림 5. 수막재배 시스템

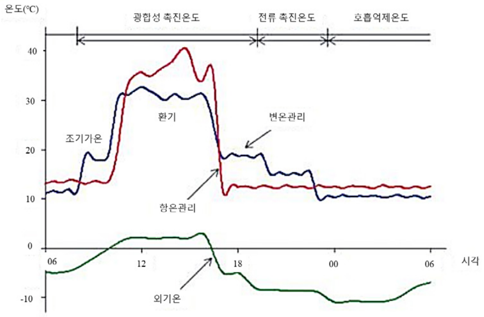

그림 6. 시설 내에서 일사량에 따른 변온관리
(국립원예특작과학원, 2018)

그림 7. 상업용 건물에 적용된 옥상온실
(한국기계연구원, 2023)

는 작물의 광합성을 촉진하는 반면에 밤 동안에는 낮은 온도는 작물의 호흡 속도를 줄여 에너지 소비를 최소화할 수 있다 (그림 6). 이로부터 원예시설 내부의 온도를 일정하게 유지하는 것보다 전체적인 에너지 효율을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다.

최근에는 옥상 온실을 활용해 건물에너지 효율을 극대화하기 위해 도시 유휴 공간인 옥상에서 작물을 재배하고, 건물에서 버려지는 열과 이산화탄소를 온실에 활용하여 온실 환경을 최적제어 하는 기술이 개발 · 현장 적용되고 있다 (그림 7). 온실과 건물이 독립적으로 이루어져 있을 때는 환경 조절 장치가 개별적으로 설치되어야 하고 운영비가 이중으로 소요된다. 그러나, 옥상 온실은 불필요한 에너지의 획득과 손실을 줄일 수 있으며, 온실과 건물에서 발생하는 잉여 에너지를 교환하여 에너지를 효율적으로 이용할 수 있다 (그림 8). 이러한 기술은 도시농업의 하나의 형태로 분류되고 있으며, 도시로의 인구 밀집화, 녹지 부족, 물류비 증가, 기후변화 등의 문제를 해결하기 위하여 도시와 농촌이 공간적으로 통합된 새로운 개념의 농업이 되고 있다. 특히, 생산된 농산물과 소비자 사이의 생산적 거리를 줄이면서 수송 및 저장에 소비하는 에너지를 최소화 및 효율적으로 사용할

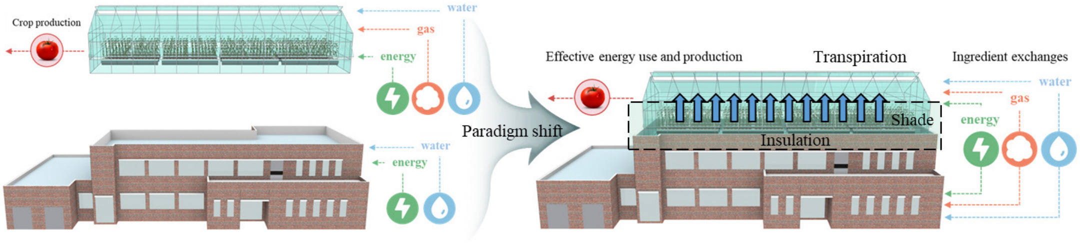

그림 8. 개별 건물의 통합을 통한 환경 · 에너지 효율적 공간으로의 패러다임 전환
(여욱현, 2021)

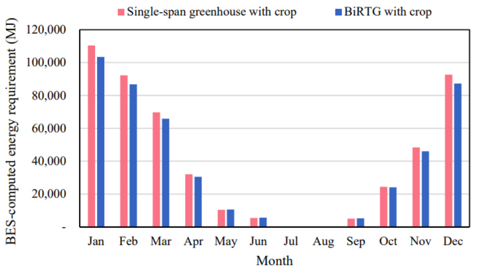

그림 9. 옥상온실 적용에 따른 온실에서의 월별 에너지 부하
(Yeo et al., 2022)

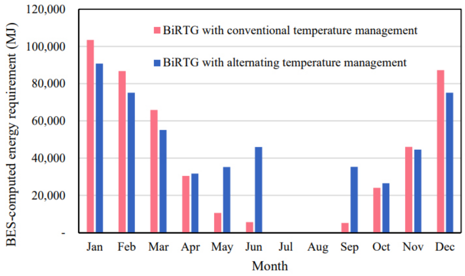

그림 10. 옥상온실의 변온관리 효과 분석
(Yeo et al., 2022)

수 있다 (Astee and Kishnani, 2010; Ceron-Palma et al., 2012). 여욱현 등 (2022)은 건물통합형 옥상 온실의 적용에 따라 연간 평균 온실에서의 에너지 소비량을 평균 5.2% 절감할 수 있는 것을 건물에너지 시뮬레이션 기법(수치해석)을 통하여 정량적으로 분석한 바 있다 (그림 9). 또한, 건물통합형 옥상 온실에 변온 관리를 적용할 경우 1년 중 11월부터 3월까지 난방에너지 부하를 절감할 수 있는 유효한 기간으로 평가되었으며 해당 기간 동안 평균적으로 11.8%의 절감효과가 있는 것으로 분석하였다 (그림 10).

4. 마치면서 또는 결언

러시아-우크라이나 이후 에너지 위기가 고조되면서 농사용 전기 가격이 상승하여 농가 경영에 커다란 부담이 되고 있다. 따라서, 에너지 효율 시스템을 적극적으로 활용하고 기술 고도화를 통하여 농가 경영비 부담을 줄이고 나아가 국가 탄소중립 목표 달성을 위한 기반을 마련이 필요하다.

시설원예산업에서 에너지 효율을 극대화하기 위한 다양한 기술들이 개발 · 보급되고 있다. 개발된 기술의 경우에는 지방자치단체, 기업, 농업관계자가 수행하는 특정한 목적의 사업을 장려하기 위하여 비용의 전부 또는 일부를 지원(국고보조금)하고 있다. 국고보조금과 자부담금이 투여되는 만큼 도입하려는 시스템 또는 장치에 대한 정량적 · 정성적 효과가 분석될 필요가 있다. 실제 시설 규모로 바로 현장에 도입 · 평가할 수 있지만 이에 대한 부지 선정, 환경에 따른 성능 차이 등이 발생하기 쉽다. 따라서 도입 이전에 수치해석 시뮬레이션을 통한 시스템 및 기자재의 타당성 분석이 필요하다. 시설에서 소비되는 에너지에 대한

수치해석 시뮬레이션이 필요한 구체적인 이유는 시뮬레이션을 통해 에너지 사용 효율성을 높이고, 내부 환경의 질 (온 · 습도, 공기 유속, 가스 환경 등)을 개선할 수 있기 때문에 시설의 설계 운영 (냉 · 난방, 조명, 환기, 구조, 단열자재 등 다양한 시스템), 유지관리에서 매우 중요한 역할을 수행한다. 특히, 현대에는 건물에너지의 효율성과 관련한 다양한 규제가 제정되기 때문에 에너지 시뮬레이션을 통하여 이러한 규제 준수 여부를 확인하고 필요한 대응을 할 수 있다. 또한, 미래의 에너지 가격 변동, 기후변화 등을 고려하여 미래지향적인 건물 에너지 관리 계획을 수립하는데 의사결정을 지원할 수 있다. 이를 효과적으로 구현하려면 정보통신기술 (Information and Communication Technologies; ICT)과 시설의 융합이 더할 나위 없이 중요하다.

참고문헌

1. 국립원예특작과학원, 2018, 스마트온실환경관리 가이드라인
2. 농촌진흥청, 2024, 보도자료(에너지 절감 기술 적용 농가 점검)
3. 한국기계연구원, 2023, 옥상온실 연구성과
4. 한국농어민신문, 2022, 농사용 전기요금
5. 한국농촌경제연구원, 2022, 농업전망 2022
6. 한국농촌경제연구원, 2023, 농업부문 탄소중립 의미와 농업인의 자세
7. 한국석유공사, 2024, 오피넷 국제유가 통계
8. 여욱현. “DYNAMIC ENERGY ANALYSIS OF BUILDING?INTEGRATED ROOFTOP GREENHOUSE FOR URBAN AGRICULTURE : MODEL DEVELOPMENT AND APPLICABILITY ASSESSMENT.” 국내박사학위논문 서울대학교 대학원, 2021. 서울
9. Astee, L. Y., & Kishnani, N. T. (2010). Building integrated agriculture: Utilising rooftops for sustainable food crop cultivation in Singapore. Journal of Green building, 5(2), 105-113.
10. Cerón-Palma, I., Sanyé-Mengual, E., Oliver-Solà, J., Montero, J. I., & Rieradevall, J. (2012). Barriers and opportunities regarding the implementation of Rooftop Eco. Greenhouses (RTEG) in Mediterranean cities of Europe. Journal of Urban Technology, 19(4), 87-103.
11. Yeo, U. H., Lee, S. Y., Park, S. J., Kim, J. G., Cho, J. H., Decano-Valentin, C., ... & Lee, I. B. (2022). Rooftop Greenhouse:(2) Analysis of Thermal Energy Loads of a Building-Integrated Rooftop Greenhouse (BiRTG) for Urban Agriculture. Agriculture, 12(6), 787.