

01

최첨단 반밀폐온실의 성능 및
도입효과

이철성
미래농어촌연구실
/ 책임연구원
csleekor@ekr.or.kr



임희성
미래농어촌연구실
/ 선임연구원
hslim1@ekr.or.kr



김남기
미래농어촌연구실
/ 연구위원
nkkim@ekr.or.kr



노경환
미래농어촌연구실
/ 미래농어촌연구실장
lionking@ekr.or.kr

1. 서론

그동안 온실 관련 기술은 자원(에너지, 물, 영양분)의 투입을 줄이고 생산량과 품질을 높이는데 중점을 두고 발전해 왔다. 그중 반밀폐온실은 기존의 자연형 환기시스템을 기계를 활용한 환기시스템으로 대체하여 내외부 공기를 적극 제어함으로써 생산량과 품질을 크게 향상시키고 있다. 현재 반밀폐온실은 시설원에 소득향상 및 기후변화에 대응해 에너지 절약 및 CO₂ 배출감소를 목표로 보급되고 있다. 반밀폐온실의 에너지 절감은 환기량 감소에 의한 열손실 방지, 열저장시스템을 활용한 계간축열로 그 열성능을 크게 향상시킬 수 있다. 또한 밀폐온실의 특성과 공조를 통해 온도, 습도, 이산화탄소 농도를 독립적으로 제어할 수 있어, 보광등과 높은 CO₂의 조합 등 기존온실에서 제공할 수 없었던 작물생장에 더 적합한 환경을 제공할 수 있다. 그 외에도 기존온실에 비해 환기량을 감소시켜 습도 유지로 물 사용량을 줄일 수 있으며, 곤충과 곰팡이의 유입을 방지함으로써 병해충에 의한 작물 피해 방지 및 농약 사용을 최소화할 수 있다.

이러한 반밀폐온실의 성능 및 도입효과에 대한 연구와 실험은 온실 관련 산업이 발달한 유럽을 중심으로 광범위하게 수행되어 왔다. 본 고는 해외 연구결과를 중심으로 반밀폐온실의 도입효과를 조사하였다.

2. 반밀폐온실의 특징

기존온실과 반밀폐온실의 가장 큰 차이점은 목표한 온도를 어떻게 제어해서 유지시키는가이다. 기존온실의 경우 천창에 설치된 환기구로 내외부 공기의 자연순환을 통해 온도, 습도, CO₂ 농도를 조절한다. 반면, 반밀폐

온실은 기계적인 방법에 의해 내외부 공기를 순환시키며, 내부공기의 일부를 재활용 한다. 즉, 공조실로 들어온 내부 순환공기를 외부의 공기와 적절히 혼합하여 목적에 맞게 냉난방 및 제습하여 온실에 공급하게 된다. 이때 외부공기가 기계 환기시스템을 통해 실내로 유입될 경우 온실 내부에 양압이 발생하고 따라서 외부의 병해충 유입을 방지할 수 있다. 이와 같은 특성으로 반밀폐 온실은 외부 환경에 의존도가 낮다고 판단할 수 있다.

네덜란드에서 수행한 선행연구에 따르면 온실의 외부공기에 대한 의존성은 결합계수(1-Q)로 표현할 수 있다. 결합계수의 값이 1에 가까울 경우 외부환경에 완전히 의존적인 온실이며, 0에 가까우면 외부 환경과 독립적인 온실을 의미한다. 분석결과 냉방시스템이 없는 온실은 그리스와 알제리 지역의 경우 약 0.27의 결합정도를 보이는 반면, 네덜란드 기존온실은 0.12의 결합정도를 가지고 있다고 분석되었다. 그 이유는 네덜란드는 기후특성상 지중해성 기후인 그리스나 알제리보다 여름철 냉방을 위한 환기량이 적게 필요하기 때문이다. 온실을 냉방과 제습시스템이 있는 반밀폐 온실로 대체했을 경우 결합계수의 값이 그리스 0.2, 네덜란드 0.07로 추정되었다. 따라서 기존온실과

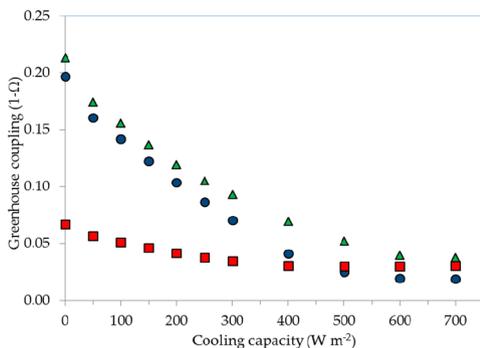


그림 1. 토마토 온실의 냉방용량에 따른 결합계수 (□: 네덜란드, △: 알제리, ○: 그리스)

비교할 때 반밀폐온실에서 수행하는 냉방과 제습은 외부환경에 대한 의존성을 크게 낮출 수 있음을 알 수 있다.

3. 반밀폐온실의 성능

3.1 환경 성능

현재 여러 가지 방식의 반밀폐온실이 개발되어 보급되고 있으며 냉방방식에 따라 온실의 환경 성능이 달라진다. 일반적으로 공기를 가열하거나 냉각하는 팬 코일이 온실 상부에 설치되어 있을 경우 장기적으로 온도와 습도를 균일하게 유지 시킬수 있다. 기존 연구결과에 따르면 온실 수평온도는 2℃ 내외의 순간적인 차이를 보일 수 있는 것으로 나타났는데, 이 온도 차이는 1℃ 미만으로 떨어질 수 있으며 작물 성장에 큰 영향을 끼치지 않을 것으로 예상된다. 이러한 시스템이 구축된 온실에서는 일반적으로 공기 수직온도, 상대 습도 및 증기압 변화가 높다. 따라서 열 교환기의 용량, 공조기 위치, 공기 흐름 특성 등이 시스템의 전반적인 성능에 큰 영향을 끼치므로 이에 대한 최적화가 필요하다.

공조기와 천공덕트를 통해 난방을 할 경우 수평공기온도차는 천공튜브 길이에 따라 최대 2℃

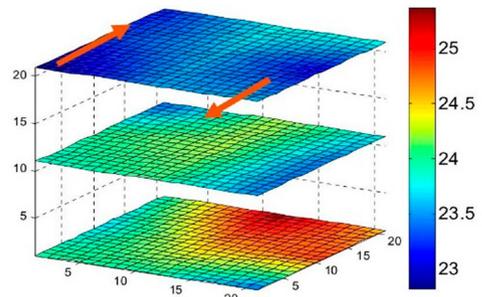


그림 2. 상부에서 냉열을 공급하는 온실의 상·중·하 온도분포 (화살표는 냉공기의 공급방향)

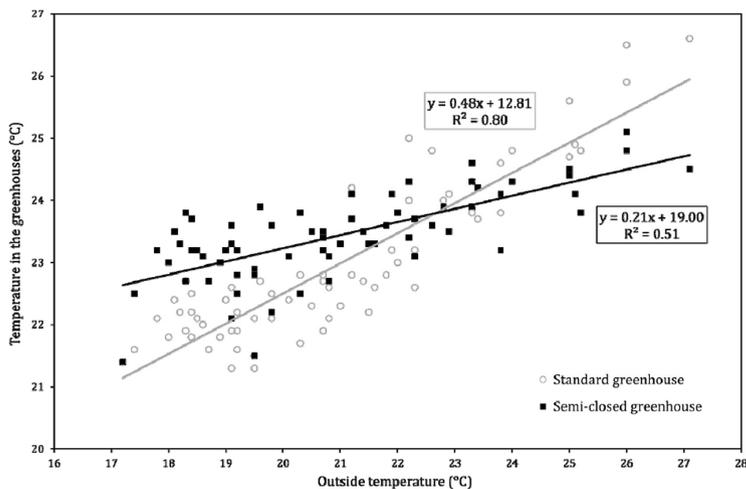


그림 3. 일반온실과 반밀폐온실의 평균온도분포 분석결과

까지 발생할 수 있다. 이 시스템이 냉각모드로 작동할 때 수평온도 분포는 균질하지만 거터 아래의 수직온도는 6℃까지 온도구배가 발생할 수 있다고 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 수직환기팬을 활용해서 식물에 일정한 기류를 형성하고 온실상단의 따뜻한 공기와 하부의 찬공기를 혼합하는 시스템을 도입한다고 한다.

자연환기를 도입한 일반 온실의 미기후는 온실에 적용된 제어 및 장비, 온실 구조와 통풍구 구성, 외부 공기 상태(속도, 온도, 습도) 등 여러 요인의 영향을 받는다. 반면, 반밀폐형 온실은 자연환기를 제한하며, 온실을 최대한 밀폐하고 외부 환경의 의존성을 최소화하기 위해 기계적인 냉각 시스템을 사용한다. 냉각 시스템의 용량을 늘리면 외부 기후에 덜 의존하고 설정온도를 유지해 작물 생장에 적합한 환경을 제공하지만 냉각 용량이 증가하면 에너지 소비도 증가한다. 그림 3과 같이 반밀폐온실과 일반 온실 내부의 일평균 기온을 비교하면 반밀폐형 온실 내부의 미기후가 일반 온실보다 외부 기후에 덜 의존적이고 안정적이라는 것을 확인할 수 있다.

3.2 CO2 농도

온실에서 환기량을 줄이는 주된 이유는 에너지 절감뿐만 아니라 내부공기의 CO2 농도를 높여 작물의 수확량을 증가시키기 위해서다. 개방온실과 밀폐온실의 CO2 차이를 비교하면 개방온실의 높은 환기량 때문에 여름철 두 온실의 CO2 농도차가 매우 높게 나타났다.

네덜란드 밀폐온실에서 연평균 1,000ppm 이상을 유지하기 위해서는 14kg/m²의 CO2 공급이 필요하나 개방형 온실에서는 600ppm을 유지시키기 위해 55kg/m²의 CO2 공급이 필요한 것으로 나타났다. 또한 온실의 냉방장치 용량 크기에 따라 필요한 CO2 공급량이 달라지는 것으로 계산되었는데, 냉방장치가 없는 경우 42.8kg/(m²,yr), 150 W/m²의 냉각용량이 설치된 경우 28.5kg/(m²,yr), 350 W/m²의 냉각용량이 설치된 경우 21.4kg/(m²,yr)의 CO2가 필요했다.

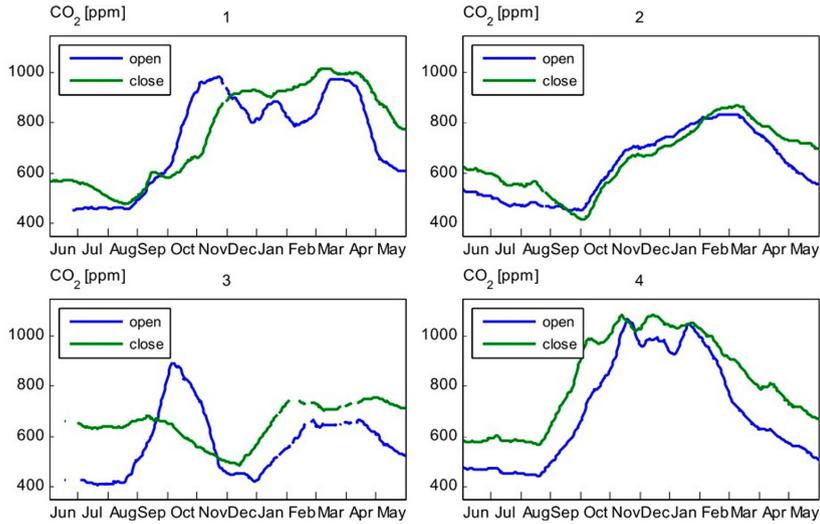


그림 4. 개방온실과 밀폐온실의 일평균 CO2 농도
(네덜란드 4개 온실 농도측정 결과)

3.3 에너지 성능

환기로 많은 에너지가 손실되는 일반온실에 비해 공기를 재사용하는 반밀폐온실의 에너지 효율이 더 높다. 일반온실과 반밀폐온실의 에너지 소비를 여름과 가을 두 기간 동안 프랑스에서 수행한 연구에 따르면 반밀폐형 온실의 경우 가스 소비량이 더 낮았지만, 전기 소비량은 일반 온실이 더 낮은 것으로 나타났다. 일반온실에 비해 반밀폐온실이 절감한 가스 소비량은 약 10%였다. 이 연구에서 가을철 반밀폐온실에서 일반 온실에 비해 전력소모가 크게 높은 것은 최대 팬 속도의 80%로 설정되어 최적 범위(30~65%)를 벗어났기 때문이다. 결국 에너지 절감형 반밀폐온실에서도 운영방식에 맞는 적절하고 효율적인 용량의

장치 설치가 설계에 반영되어야 한다는 것을 알 수 있다.

독일에서 수행한 연구에 따르면 에너지 저장과 고단열 스크린과 결합한 반밀폐온실로 약 43%의 에너지사용효율을 향상시켰다. 실험결과에 따르면 토마토 1kg을 생산하는데 필요한 에너지는 반밀폐온실 39.49MJ이고 일반온실 57.27MJ로 나타났다.

시뮬레이션 모델을 사용하여 스페인의 일반온실, 완전밀폐온실, 반밀폐온실의 에너지 성능을 비교하였다. 에너지 성능평가 결과 완전밀폐온실과 반밀폐온실의 난방에너지요구량은 일반온실의 절반 수준으로 나타났다(각각 53% 및 48% 감소). 반면 냉방에너지요구량 평가 결과, 완전밀폐온실이 반밀폐온실보다 약 4배 더 높게 나타났다. 총

표 1. 일반온실과 반밀폐온실의 에너지소비량 차이

(단위: kWh/m ²)	2014년 가을		2015년 여름	
	가스	전기	가스	전기
일반온실	253	3.5	322	5.2
반밀폐온실	217	11.3	307	31.9

표 2. 일반, 완전밀폐, 반밀폐온실의 연간 에너지요구량 차이

(단위: MJ/(m ² ,yr))	일반온실	완전밀폐온실	반밀폐온실
난방에너지요구량	1182	557	620
냉방에너지요구량	0	530	134
총냉난방에너지요구량	1,182	1,087	754

냉난방에너지요구량은 일반온실과 완전밀폐온실의 에너지요구량이 비슷하게 나타났으며, 반밀폐온실의 에너지요구량은 일반온실의 64% 수준으로 에너지 절감능력이 매우 크게 나타났다. 또한 스페인 알메리아 지역을 대상으로 수행한 경제성 평가결과 일반적인 생산시스템보다 반밀폐온실을 도입하는 것이 더 경제적으로 나타났다. 여름철 생산기간 연장과 작물의 최적환경 제공에 따른 생산성 향상으로 높은 초기투자비 및 유지관리비에도 불구하고 반밀폐온실이 더 경제적으로 나타났다.

3.4 물 소비량

토마토 1kg을 생산하는데 필요한 물의 양을 산정하여 냉각시스템 용량과의 상관관계를 분석한 결과 325W/m²의 냉각용량이 설치된 반밀폐온실이 일반온실에 비해 물사용효율을 최대 71% 개선시키는 것으로 나타났다. 온실 냉각시스템의 용량이 증가할수록 필요한 물의 양이 감소하는 것으로 확인되었는데, 그 이유는 반밀폐온실에서 작물의 증산률이 일반온실보다 58% 낮기 때문이다. 즉, 증산작용의 여러 목적 중 하나는 온도를 낮추기 위해서인데, 냉방시스템이 도입된 반밀폐온실은 작물에 적합한 온도를 제공하므로 온도를 낮추기 위한 작물의 증산작용이 감소 되었기 때문이다.

기후조건에 따라 작물의 증산량이 달라지고 따라서 물소비량도 크게 달라진다. 그림 5는 지중해 지역과 네덜란드 지역의 냉각시스템 용량에 따른 물사용량을 분석한 결과이다. 분석 결과 냉방을

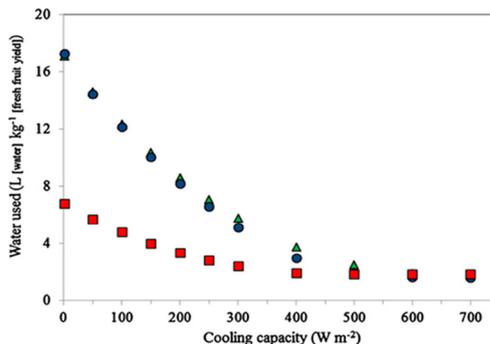


그림 5. 냉방장치 용량별 토마토 1kg을 생산하기 위해 필요한 물사용량

하지 않을 경우 네덜란드의 물소비량이 알제리나 그리스 보다 반이상 낮았는데 그 이유는 네덜란드가 냉방에 더 유리한 기후이기 때문이다. 반면, 알제리와 그리스의 냉방장치용량을 450W/m²보다 높였을 경우 두 지역의 물소비량 차이는 없는 것으로 나타났다. 따라서 반밀폐온실 도입시 낮은 증산작용에 따른 물소비량 감소뿐만 아니라 증산된 물을 공조시스템에서 재흡할 때 모아 재사용할 경우 물사용 효율을 더욱 증가시킬 수 있다.

3.5 병충해 방제

온실내부 환경은 식물성장 및 생산성뿐만 아니라 해충 및 익충의 성장과 행태, 상호작용에도 영향을 끼친다. 해충 침입에 관해 반밀폐온실과 일반온실을 상호 비교한 결과 반밀폐온실의 양압이 해충의 침입을 예방할 수 있는 것으로 나타났다. 살충제 사용 감소 및 그에 따른 안정적인 작물생산량 확보는 반밀폐온실의 가장 큰 장점 중 하나

표 3. 기존온실과 반밀폐온실의 냉각용량에 따른 생산량 차이

(단위:kg/m ²)	초기 생산량	최종 생산량	공급된 CO ₂
기존온실	24	55	55
반밀폐온실(냉각용량:150W/m ²)	26	59	46
반밀폐온실(냉각용량:350W/m ²)	27	61	30

이다. 또한 반밀폐온실에서도 방충망의 메쉬크기에 따라 해충침입 여부가 크게 달라지는 것으로 나타났다.

3.6 작물 성장 및 생산

일반적으로 반밀폐온실이 일반온실보다 CO₂ 농도를 더 높게 유지시킬 수 있어 광합성량이 많기 때문에 반밀폐온실의 작물 생산량은 일반온실에 비해 높다. 연구에 따르면 반밀폐온실의 CO₂ 농도가 일반온실보다 25% 높을 경우 작물의 CO₂ 흡수량은 21% 증가되는 것으로 나타났다. 그 결과 과일 생산량이 28% 증가하였고 과일의 질량도 8% 증가한 것으로 나타났다. 공조방식에 따른 비교결과에 따르면 상부에서 냉기를 내려보내 냉방하는 방식보다 하부에서 냉방하는 방식의 생산량이 6% 더 높게 나타났다.

또한, 350W/m²의 냉각용량을 갖춘 반밀폐온실과 일반온실 작물의 광합성 비교결과 높은 CO₂에 따른 광합성 순응(기공의 수와 면적이 작아져 CO₂ 공급효과가 떨어지는 현상)은 과일의 수가 상당히 감소한 경우에만 발생했다고 한다. 이는 과채류와 같이 생산량이 높은 작물의 경우 동화물질 흡수기관인 과실을 갖고 있어 높은 CO₂에 의한 피드백 억제가 발생하지 않기 때문이라고 한다. 따라서 표 3과 같이 CO₂ 농도를 높게 유지시킬 수 있는 반밀폐온실에서의 토마토 생산량이 일반온실 보다 높았다. 또한, 반밀폐온실의 냉각용량에 따라 생산량의 차이가 발생했는데, 150W/m²

의 냉각용량이 설치된 온실이 350W/m² 냉각용량이 설치된 온실보다 CO₂ 공급량 16kg/m² 적음에도 불구하고 단위면적당 생산량이 2kg/m² 더 높았다.

4. 결론

스마트온실은 대표적인 에너지 다소비 시설로 난방비가 전체 경영비의 30%~40%(최고 60%)로 비중이 크며, 최근 에너지비용 상승에 따라 농가 부담이 지속적으로 증가하고 있다. 반밀폐온실은 최첨단 에너지 절감 온실로 도입 시 에너지비용에 대한 농가부담을 크게 줄일 수 있다. 또한 높은 CO₂ 농도 유지로 광합성을 높여 작물 생산량을 크게 증대시킬 수 있으며, 병해충 방제 및 물절약 등 도입 시 많은 이점이 있음이 선행연구결과로 증명되었다.

현재 세계적인 온실의 보급추세는 기존 벤로형 온실에서 반밀폐온실로 전환되고 있으며, 국내 또한 첨단 대형온실의 보급과 함께 반밀폐형온실의 보급이 향후 확대될 것으로 예상된다. 하지만 반밀폐온실 관련 기술 및 자재는 100% 해외 의존하고 있어 반밀폐온실 확대보급에 대비한 기술 국산화 시급하다. 또한 국내 기후 및 재배환경에서 반밀폐온실의 에너지절감 및 생산성향상 성능이 정량적으로 명확히 규명되어 있지 않으므로 이에 대한 연구와 국내환경에서의 반밀폐온실 최적 운영기술 개발이 필요하다.

참고문헌

1. Jarvis, P.G.; Mcnaughton, K.G. Stomatal control of transpiration: Scaling up from leaf to region. *Adv. Ecol. Res.* 1986, 15, 1–49.
2. Katsoulas, N.; Sapounas, A.; De Zwart, F.; Dieleman, J.A.; Stanghellini, C. Reducing ventilation requirements in semi-closed greenhouses increases water use efficiency. *Agric. Water Manag.* 2015, 156, 90–99.
3. Campen, J.B.; Kempkes, F.L.K. Climatic evaluation of semi-closed greenhouses. *Acta Hortic.* 2011, 893, 495–502.
4. Quillec, S.L.; Albert, B.; Lesourd, D.; Loda, D.; Barette, R.; Brajeul, E. Benefits of a semi-closed greenhouse for tomato production in the West of France. *Acta Hortic.* 2017, 1170, 883–888.
5. De Gelder, A.; Dieleman, J.A.; Bot, G.P.A.; Marcelis, L.F.M. An overview of climate and crop yield in closed greenhouses. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 2012, 87, 193–202.
6. Gieling, T.H.; Dieleman, J.A.; Janssen, H.J.J.; Campen, J.B.; Raaphorst, M.G.M.; Kromwijk, J.A.M.; Kempkes, F.L.K.; Garcia, N. Monitoring of climate variables in semi-closed greenhouses. *Acta Hortic.* 2015, 893, 1073–1080.
7. Coomans, M.; Allaerts, K.; Wittemans, L.; Pinxteren, D. Monitoring and energetic performance of two similar semi-closed greenhouse ventilation systems. *Energy Convers. Manag.* 2013, 76, 128–136.
8. Dannehl, D.; Josuttis, M.; Ulrichs, C.; Schmidt, U. The potential of a confined closed greenhouse in terms of sustainable production, crop growth, yield and valuable plant compounds of tomatoes. *J. Appl. Bot. Food Qual.* 2014, 87, 210–219.
9. Qian, T. Crop Growth and Development in Closed and Semi-Closed Greenhouses. Ph.D. Thesis, Wageningen University & Research, Wageningen, The Netherlands, 2017; p. 112.
10. Van't Ooster, A.; Van Ieperen, W.; Kalaitzoglou, P. Model study on applicability of a semi closed greenhouse concept in Almeria: Effects on greenhouse climate, crop yield and resource use efficiency. *Acta Hortic.* 2012, 927, 51–58.
11. Dannehl, D.; Suhl, J.; Huyskens-Keil, S.; Ulrichs, C.; Schmidt, U. Effects of a special solar collector greenhouse on water balance, fruit quantity and fruit quality of tomatoes. *Agric. Water Manag.* 2014, 134, 14–23.
12. Sugiyama, K.; Ohishi, N.; Saito, T. Preliminary evaluation of greenhouses employing positive-pressure forced ventilation to prevent invasion by insect pests. *Appl. Entomol. Zool.* 2014, 49, 553–559.