

작물을 고려한 자연환기식 다연동 온실의 환기 효율성 비교 분석 Study on Ventilation Efficiencies of Naturally-Ventilated Multi-Span Greenhouses with internal crops

이인복^{1*} · 홍세운¹ · 윤남규² · 황현섭¹ · 서일환¹

¹서울대학교 농업생명과학대학 생태조경·지역시스템공학부

²농촌진흥청 농업공학연구소 시설방재공학연구실

Lee, In-Bok^{1*} · Hong, Se-Woon¹ · Yun, Nam-Kyu² · Hwang, Hyun-Seop¹ · Seo, Il-Hwan¹

¹*Dept. of Landscape Architecture and Rural System Eng., Seoul National Univ.*

²*Agricultural Structures Engineering, National Institute of Agricultural Engineering*

서 론

시설재배는 사계절이 뚜렷한 우리나라에서 고품질 농산물을 안정되게 주년생산하기 위하여 필수적인 방식으로 각광받고 있으며 자동화 및 생산성향상을 위하여 시설의 대형화가 추진되고 있다. 하지만 온실의 규모가 커질수록 온실 내 비균질적인 기후분포를 일으키며, 이에 환기작용은 시설 내부 공기의 유동을 유도하여 기후 분포를 개선하는데 큰 효과를 나타낼 수 있다. 특히 고온스트레스의 피해가 심한 하절기 동안의 환기개선에 대한 연구가 중요하며 경제성을 고려할 때 자연환기식 온실에 대한 연구가 반드시 실시되어야 한다.

현재까지 자연환기식 다연동 온실의 환기 작용에 대하여 많은 현장실험과 시뮬레이션 등의 연구가 수행되어져 왔으나, 대부분 특정 온실에 국한되어 단발성 연구로 끝나는 경우가 많아 효과적이고 체계적으로 각 온실 환기구조의 장단점을 비교 분석하고 개선한 연구는 없는 실정이다. 더구나 현장실험에서는 다양한 기후인자를 인위적으로 제어할 수 없고, 많은 정밀 기자재와 인력이 요구되어 정량적인 데이터를 다량 확보하기 어려운 실정이며, 이에 적용된 환기량은 소수의 측점에 의존하여 온실 전체 영역에 대하여 하나의 환기량을 적용함으로써 부분적으로 발생하는 환기의 차이를 명확히 규명하지 못하였다. 또한 작물의 복잡한 형상과 메커니즘으로 인하여 작물을 배제한 연구가 대부분이었다.

이러한 문제를 보완하기 위해서는 현장실험과 함께 다양한 환경과 조건들을 모사할 수 있는 시뮬레이션 연구가 병행되어야 하며, 이 연구에서는 환기 작용의 주 메커니즘인 공기 유동을 모사할 수 있는 전산유체역학(Computational fluid dynamics)을 이용하였다. 온실 내의 작물은 다공성 매체로 묘사하였고, 작물에 의한 미기상의 변화는 UDF(User Defined Function) 틀을 통하여 시뮬레이션에 접목하였으며, 환기량은 tracer gas decay 방법으로 산정하였다. 이를 통해 본 연구에서는 우리나라의 대표적인 자연환기식 다연동 온실들의 환기효율성을 시설 구조, 외부 풍향 및 온실 내 위치에 따라서

정량화하여 비교분석하고자 한다. 본 연구에서 사용된 CFD 모델 설계는 내부 기류의 경우 Lee et al.(2005)에 의하여 7.9%의 오차를 보인바 있으며, 작물에 온습도 및 공기 유속의 변화는 각각 2.2%, 2.1%, 7.7%의 오차를 보였다.

재료 및 방법

CFD(Computational fluid dynamics)는 온실의 영역 내부에서의 하나하나의 셀에 대하여 Navier-Stokes 방정식의 Reynolds 이론의 개념을 계산하는 기술이다. 계산을 수행하는 메인 모듈로는 Fluent(Ver.6.2, Fluent Co. New Hampsher, USA)을 사용하였다. 유동에 관련된 난류 모델은 현재 모든 종류의 문제에 대해 포괄적으로 사용할 수 있는 단일한 난류 모델은 존재하지 않으며, 각 모델에서의 물리적인 특성과 문제의 특성, 요구되는 정확도의 정도, 시뮬레이션에 소요되는 시간 등을 고려하여 난류 모델을 결정해야 한다. 본 연구에서는 Lee et al.(2005)에 의해 농업시설에 대하여 높은 정확도를 보이는 RNG k-ε 모델을 사용하였다. 환기량을 계산하는데 사용된 Tracer gas decay 방법은 기존의 환기량과 같이 유출입구를 통과하는 공기량에 의존한 계산이 아니라 가스를 이용하여 환기에 의해 실제 가스가 희석되는 정도로 계산을 한다.

$$AER = \frac{\ln\left(\frac{C_0}{C}\right)}{(t-t_0)} \quad (1)$$

여기서 t 는 시간, C 는 가스 농도를 나타내며, 하첨자 0는 초기에서의 상태값을 나타낸다.

작물은 그 형상이 복잡하여 메쉬를 구성하는데 한계가 있으므로, 직육면체의 다공성 매체로 가정하여 투과성의 정도로 모델링 하였다. 작물에 의한 공기유동의 관성손실 및 온습도 발생은 다음과 같다.

$$\Delta p = - \sum_{j=1}^3 C_{2,j} \left(\frac{1}{2} \rho v_j v_{mag} \right) \quad (2)$$

$$\frac{dR(z)}{dz} = L_{ai} \cdot \rho \cdot C_p \cdot \frac{T_i - T_a}{r_a} + L_{ai} \cdot \rho \cdot \lambda \frac{w_i - w_a}{r_a + r_s} \quad (3)$$

여기서 Δp 는 압력손실, C_{2j} 는 투과계수, $R(z)$ 는 높이 z 에서의 순 복사량, L_{ai} 는 앞면적 지수, ρ 는 공기 밀도, C_p 는 공기 비열, T 는 온도, w 는 습도, r_a 는 공기동역학적 저항, r_s 는 기공의 저항, 하첨자 1, a는 각각 잎과 공기에서의 값을 나타낸다.

우리나라에서 주로 사용되고 있는 온실 중 와이드스팬형, 1-2W형, 광폭단독형, 벤로

형 4가지에 대하여 연구를 수행하였으며, 효과적인 비교분석을 위하여 4가지 온실은 바닥면적이 거의 동일하도록 선택하였다.

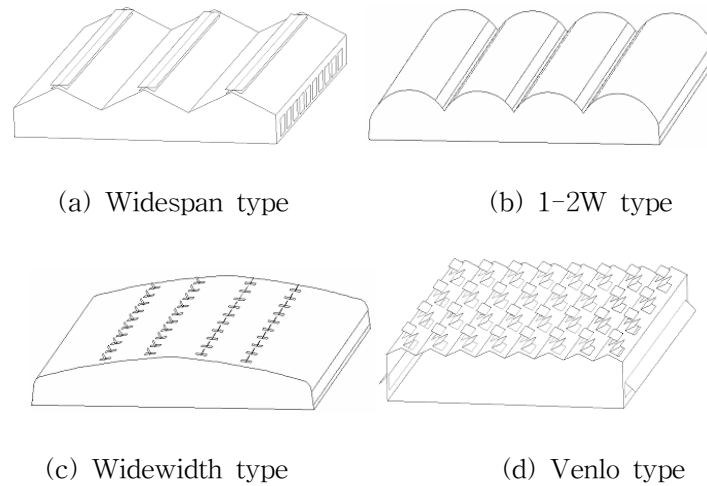


Figure 1. Sketches of multi-span greenhouses used in this study

결과 및 고찰

계산은 온실 전체에 대하여 초기농도의 2%미만으로 동일한 환기효과가 나타나는 시점까지 수행하였으며, 온실 전체 또는 각 높이 별로 평균 가스 농도의 변화로부터 TGD 방법에 의한 환기량을 계산하였다.

먼저 작물이 없는 상태에서 계산된 높이별, 온실 전체의 환기량은 다음과 같다.

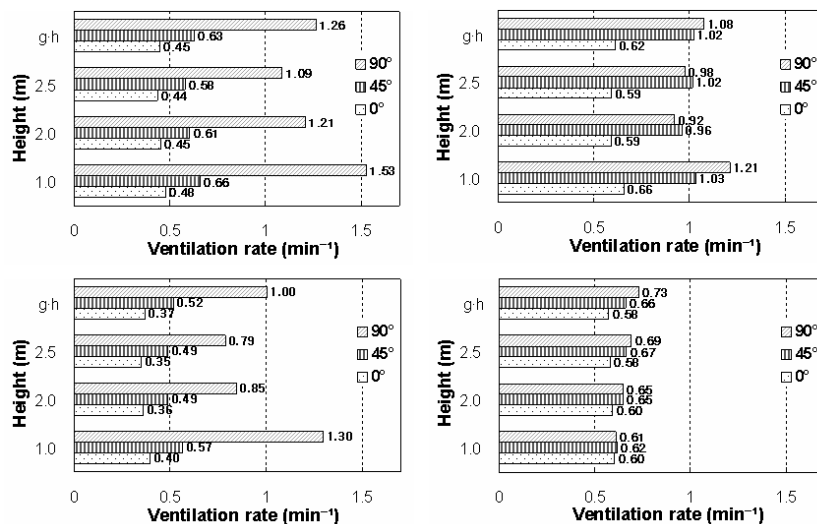


Figure 2. Ventilation rates according to the heights and wind directions

온실 측창에 평행한 외기에 대해서는 1-2W형 온실이 가장 좋은 환기효과를 보이며, widespan형, widewidth형, venlo형은 각각 1-2W형 온실에 비해 73%, 60%, 94%의 환기량을 보였다. 45°각도인 외기에 대해서도 1-2W형 온실이 가장 좋은 환기효과를 보이며, 1-2W형 온실의 환기량에 비해 다른 온실들은 각각 61%, 51%, 65%의 환기량을 보였다. 측창에 수직인 외기에 대해서는 widespan형 온실이 가장 좋은 환기효과를 보였다. 풍향이 측창에 평행한 상태에서 수직인 상태로 변화함에 따라 온실의 환기효과도 크게 향상됨을 보이며, 1-2W형과 venlo형 온실은 다른 온실에 비해 풍향에 비교적 적은 영향을 받는 것으로 나타났다.

다공성 매체에 의한 작물 모델링을 추가한 경우, 아래와 같이 작물에 의한 유속의 감소 및 작물 높이 층에서의 환기량 감소가 뚜렷하게 나타났다.

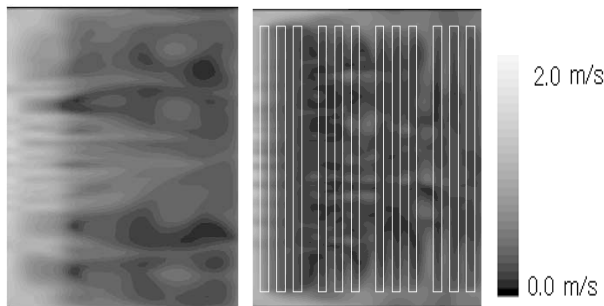


Figure 3. Air velocity distributions without crop(left) and with crop(right)

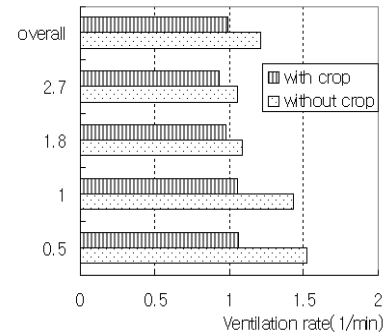


Figure 4. Ventilation rates according to the crop presence

요약 및 결론

본 연구에서는 한국의 대표적인 다연동 온실에 대하여 환기 효율성을 환기구조별로, 풍향별로 온실 내 위치별로 비교 분석하였다. 또한 작물 모델링을 통하여 작물이 환기 작용에 미치는 영향을 고려하였다. 환기와 같이 공기유동에 근거한 작용을 연구할 때 전산유체역학을 이용한 접근이 효율적인 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

인용문헌

1. Lee, I., S. Lee, G. Kim, J. Sung, S. Sung, Y. Yoon. 2005. PIV Verification of greenhouse ventilation air flows to evaluate cfd accuracy. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. 48(5):2277-2288
2. 이인복, 윤남규, Thierry Boulard, Jean Claude Roy, 이성현, 김경원, 홍세운, 성시홍. 2006. 공기유동해석을 통한 온실내 식물군 미기상 분석기술 개발 - (2)온실내 대기환경에 미치는 작물의 영향 분석을 위한 CFD 모델개발. Journal of Bio-Environment Control. 15(4):296-305