



전산유체역학을 통한 간척지 내 벤로형 온실의 자연환기량 분석

Analysis of Natural Ventilation Rates of Venlo-type Greenhouse Built on Reclaimed Lands using CFD

이상연* · 이인복*,† · 권경석* · 하태환* · 여욱현* · 박세준* · 김락우* · 조예슬* · 이승노*

Lee, Sang-Yeon · Lee, In-Bok · Kwon, Kyeong-Seok · Ha, Tae-Hwan · Yeo, Uk-Hyeon · Park, Se-Jun · Kim, Rack-Woo · Jo, Ye-Seul · Lee, Seung-No

Abstract

Recently, the Korean government announced a new development plan for a large-scale greenhouse complex in reclaimed lands. Wind environments of reclaimed land are entirely different from those of inland. Many standard books for ventilation design didn't include qualitative standard for natural ventilation. In this study, natural ventilation rates were analyzed to suggest standard for ventilation design of venlo type greenhouse built on reclaimed land. CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation models were designed according to the number of spans, wind conditions and vent openings. The wind profile at a reclaimed land was designed using ESDU (Engineering Sciences Data Unit) code. Using the designed CFD simulation model, ventilation rates were computed using mass flow rate and tracer gas decay method. Additionally computed natural ventilation rates were evaluated by comparing with ventilation requirements. As a result of this study, ventilation rates were decreased with increasing of the number of spans. Ventilation rates were linearly increased with increasing of wind speed. When the wind speed was $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, only side vent was open and wind direction was 45° , homogeneity of ventilation rate at $0 \sim 1 \text{ m}$ height is the worst. Finally, chart for computing natural ventilation rate was suggested. The chart was expected to be used for establishing standard of ventilation design.

Keywords: Computational Fluid Dynamics; greenhouse; reclaimed land; tracer gas decay; ventilation rate

1. 서 론

우리나라의 온실 면적은 고품질의 농산물 생산, 수확 시기의 조절, 고소득 창출 등의 장점으로 1970년대부터 꾸준히 증가하여 2013년에는 약 53,732 ha까지 증가하였다(MIFAFF, 2014). 단동형 온실은 우리나라의 온실 중 약 73%로 대부분을 차지하지만, 농산물 수요의 증가와 농업인구의 감소에 따라 시설의 자동화와 대형화가 추진되고 있다. 하지만 우리나라 국토의 70%는 산지로 구성되어 있으며 지속적인 산업화와 도시화로 농경지가 감소하고 있어 대형 시설을 조성하기에 공간적 제약이 존재한다(MIFAFF, 2014). 간척지는 새롭게 생겨나는 토지로써 주변 지형에 구애받지 않고 넓은 면적의 토지를 계획적으로 이용할 수 있다는 장점이 있다. 이에 맞춰 정부는 화용, 시화, 석문, 영산강, 새만금 등 국내 간척지 12 지구에 고품질 농산물의 연중 안정된 대량 생산을 목적으로

한 첨단 원예 단지 3,000 ha, 일반 원예 단지 2,185 ha 등 대규모 시설 농업 단지 조성 계획을 고시하였다(MIFAFF, 2010).

온실에서 적절한 환기는 하절기의 과도한 온도 상승과 겨울철 과습을 억제하며 가스농도의 조절과 내부 기류의 조성에 기여하므로 재배 농산물의 품질에 미치는 영향이 매우 크다. 우리나라 대부분의 온실은 설비비와 운용비 등 경제적 이유로 강제환기보다는 주로 자연환기에 의존하고 있다(Kwon et al., 2011). 온실의 자연환기는 외부 풍환경에 직접적인 영향을 받기 때문에 자연환기 해석에 있어 외부 풍환경의 고려는 필수적이다. 간척지의 경우 내륙에 비해서 상대적으로 주변 장애물이 없어 풍향이 일정하고 풍속이 크며 해안에서 발생하는 대류 순환으로 인한 난류의 영향을 강하게 받는 기상 특성을 가지기 때문에 간척지 설치 온실의 자연환기에 있어 이를 고려한 환기 분석이 요구된다(KMA, 2014).

온실의 자연환기 특성에 대한 선행 연구로는 외부 풍속에 따른 환기 특성 연구(Sase et al., 1984; Mistriotis et al., 1997), 외부 풍향에 따른 환기량 분석(Campen and Bot, 2003; Hong et al., 2008; Bartzanas et al., 2002), 환기구구조에 따른 환기 효율 연구(Kittas et al., 1996; Bartzanas et al., 2004; Lee and Short, 2000), 온실의 형태에 따른 환기 특성 비교(Boulard et al., 1997; Boulard and Fatnassi, 2005; Hong et al., 2008) 등이 수행된 바 있다. 선행연구들을 통하여 다양한 환경조건에

* Department of Rural Systems Engineering, Research Institute for Agriculture and Life Science, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

† Corresponding author

Tel.: 02-880-4588 Fax: 02-873-2087

E-mail: iblee@snu.ac.kr

Received: October 6, 2015

Revised: October 14, 2015

Accepted: October 16, 2015

따른 환기 특성에 대해 연구되었지만, 간척지 풍환경이 고려된 온실의 내부 공기 유동 및 환기 분석에 대한 구체적인 연구는 미흡한 실정이다.

한편 온실의 환기 설계 시 이용되는 기존의 국내·외 설계 기준들(Korea Rural Community Corporation, 1997; ASAE, 2003; NRAES, 1994; Hellickson and Walker, 1983; Lindley and Whitaker, 1996)은 온실의 열평형 방정식을 이용한 난방과 냉방 시스템 설계, 냉방을 위한 필요환기량 산정 등에 대해 주로 서술하고 있을 뿐, 환기 시 가장 일반적으로 활용되는 자연환기의 설계에 대한 정량적인 기준을 제시하고 있지 않다. 또한 국내·외 설계 기준들 대부분은 다양한 형태의 온실을 고려하지 않았으며, 정량적인 설계 기준의 제시 없이 일반화하여 포괄적인 기준으로만 제시되어 있다. 하지만 온실의 자연환기 시 외부의 풍환경 및 열환경, 온실의 형태, 온실의 환기구 구조 등에 따라 매우 다양한 형태로 자연환기가 이루어지므로 설계자, 시공업자, 관리자가 자연환기를 고려하여 온실을 설계하기 위해서는 다양한 환경 조건에서 정량적으로 평가된 자연환기량이 제시되어야 한다.

본 연구의 목적은 간척지 내 온실의 설계 기준을 제시하기 위한 기초 연구로서 다양한 환경조건 (풍속, 풍향, 환기구 구조, 연동 수)에서 벤로형 온실의 환기량 분석 및 평가하고 자연환기량 산정 도표를 작성하여 제시하는데 있다. 이를 위하여 온실의 CFD 시뮬레이션 모델을 설계하였으며, 간척지의 풍환경을 설계하여 CFD 시뮬레이션에 적용하였다. 설계된 CFD 시뮬레이션 모델을 바탕으로 질량교체 환기량 산정법과 추적 가스 농도감쇠법을 통하여 벤로형 온실의 자연환기량을 산정하였으며 환경 조건에 따라 비교·분석하였다. 최종적으로 다양한 환경조건에서 산정된 자연환기량을 바탕으로 벤로형 온실의 자연환기량 산정 도표를 작성하여 제시하였다.

II. 재료 및 방법

1. 대상온실

본 연구에서는 세계적으로 가장 많이 보급된 연동형 유리 온실인 벤로형 온실을 연구 대상으로 선정하였다. 벤로형 온실의 제원은 한국형 유리온실 표준 설계도 농진-나-1 (RDA, 1997)에 의거하였으며 온실의 형태와 제원을 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. 본 연구 대상인 벤로형 온실의 측창은 권취식이며, 지붕창은 지그재그로 열리는 특징이 있다. 또한 벤로형 온실은 골조율이 12% 정도로 일반 유리 온실의 20%에 비해 낮아 광투과율이 상대적으로 높다.

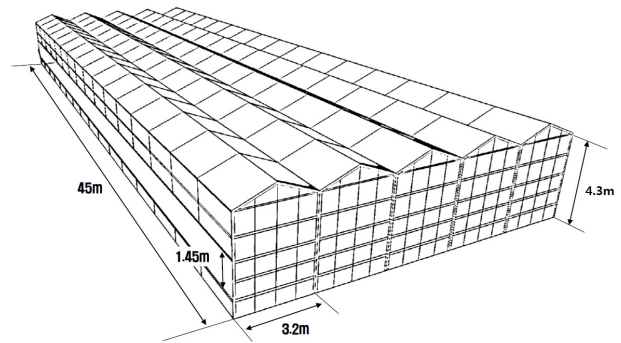


Fig. 1 Schematic information of venlo type greenhouse

Table 1 Specification of venlo type greenhouse

	Value
Width (per span)	3,2 m
Ridge height	4,95 m
Eave height	4,3 m
Length	45,0 m
Side vent height	1,45 m
Roof vent height	1,1 m
Floor area (per span)	144 m ²
Volume (per span)	666,0 m ³

2. 대상 지역 및 풍환경

국내 주요 간척지 7곳 (화옹, 시화, 석문, 이원, 고흥, 영산강, 새만금)을 대상 지역으로 선정하였다. 대상 간척지의 풍환경을 분석하기 위해서 간척지 주변 기상대 9곳 (인천, 우정, 서산, 군산, 부안, 목포, 진도, 해남, 고흥)의 최근 30년치의 1시간 단위 평균 기상 자료 (1984년 4월-2013년 3월)를 이용하였다. Fig. 2는 연구 대상 간척지 7곳과 기상대 9곳을 지도에 표시하여 나타낸 것이다.

3. 환기량 산정법

가. 필요환기량 산정법

여름철 온실의 과도한 온도 상승은 작물에 고온피해를 입혀 생육에 악영향을 미친다. 여름철 온도 조절을 위한 필요환기량 (Ventilation Requirements)은 다음 식 (1)으로 산정되며 주어진 환경조건에서 온실 내부 기온을 외기온과 ΔT 만큼의 차이 수준까지 낮추는데 필요한 환기량을 의미한다.

$$Air\ Exchange_{VR} = \frac{1}{C_v} \times \left\{ \frac{\alpha\tau S(1-f)A_f}{\Delta T} - kA_c \right\} \times \frac{1}{V} \quad (1)$$

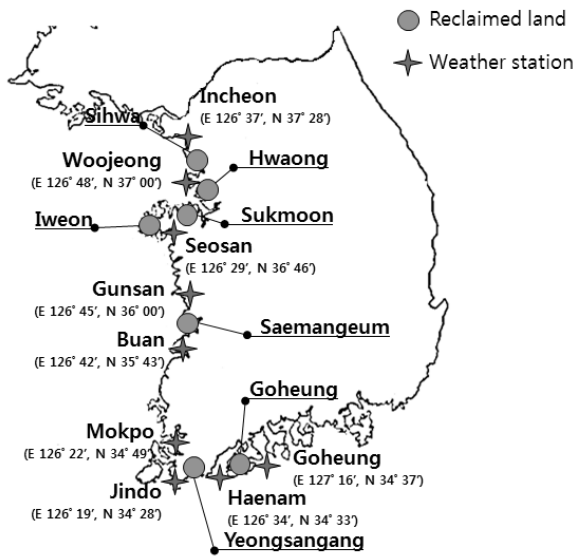


Fig. 2 Target reclaimed lands and weather stations located at near reclaimed lands

Air Exchange_{VR} : Air exchange of ventilation requirement (AE·s⁻¹)

C_v : Specific heat of air leaving greenhouse (kcal·m⁻³·°C⁻¹)

α : Correction rate of heat area

τ : Solar transmissivity of greenhouse cover

S : Solar radiation (kcal·m⁻²·min⁻¹)

f : Evapotranspiration coefficient

ΔT : Inside and outside temperature difference (°C)

k : Overall heat transfer coefficient (kcal·m⁻²·min⁻¹·°C⁻¹)

A_f : Floor area of greenhouse (m²)

A_c : Cover area of greenhouse (m²)

V : Volume of greenhouse (m³)

나. 자연환기량 산정법

온실 내부의 자연환기량을 산정하기 위한 방법으로 질량 교체 환기량 (Mass Flow Rate) 산정법과 추적가스 농도감쇠법 (Tracer Gas Decay)이 활용될 수 있다. 질량교체 환기량은 전 세계적으로 통용되어온 방법으로 온실 내부로 유입된 공기가 전부 시설 내부의 공기를 교체하는데 이용된다는 가정 하에 단위 시간당 시설의 공기 교환 횟수를 산정하는 방법이다. 질량교체 환기량은 식 (2)으로 산정되며 간단한 계산식으로 온실 전체의 환기량을 산정할 수 있는 장점이 있지만 온실 내부 구역에 따른 환기량 차이를 분석하기에는 어려움이 있다. 또한 환기량 산정 시 시설 내부의 유동을 고려하지 못한다는 단점이 있다.

추적가스 농도감쇠법은 온실 내부에 추적가스를 균일하게 채운 뒤, 환기 시작 시부터 시간에 따른 시설 내부의 추적가스 농도 감소를 정량적으로 분석하여 환기량을 계산하는 실험적인 방법이며 식 (3)을 통하여 산정된다. 이는 외부 풍환경뿐만 아니라 온실의 구조적 특징, 환기 형태 등을 고려할 수 있으며 시설 내부 구역별 환기량 차이를 분석할 수 있는 방법이다. 추적가스 농도 감쇠법을 이용하여 현장에서 환기량을 평가하고자 하는 경우 초기 가스 농도를 균일하게 분포시키는 어려움, 실험오차 발생, 비가시적 공기 기류의 정성적·정량적 분석의 어려움, 경제적 제한에 따른 다점 측정의 한계 등이 있다. 하지만 전산유체역학을 이용할 경우 대상 구조물 내부의 초기 가스 농도와 환경 요소 등을 연구자의 요구에 맞게 제어 가능하기 때문에 상기의 문제점을 극복할 수 있다.

$$Air\ Exchange_{MFR} = \frac{\sum v_i A_i}{V} \times 60 = \frac{\sum v_o A_o}{V} \times 60 \quad (2)$$

$$Air\ Exchange_{TGD} = \frac{\ln\left(\frac{C_0}{C_t}\right)}{(t-t_0)} \times 60 \quad (3)$$

Air Exchange_{MFR} : Air exchange of mass flow rate (AE·min⁻¹)

Air Exchange_{TGD} : Air exchange of tracer gas decay (AE·min⁻¹)

V : Volume of greenhouse (m³)

v_i, v_o : Velocity at inlet and outlet (m·s⁻¹)

A_i, A_o : Vent area of inlet and outlet (m²)

C₀, C_t : Concentration of tracer gas at *t₀*, *t* time (ppm)

4. 연구 방법

가. CFD 시뮬레이션 모델 설계

실험 온실의 구조를 설계하고 연산을 위한 3차원 격자망 설계를 위하여 상용 소프트웨어인 GAMBIT (ver. 2.4, Fluent Co. New Hampshire, USA)을 사용하였으며, ANSYS FLUENT (ver. 15.0, ANSYS Inc., PA, USA)를 이용하여 대상 영역에 대한 유체 유동을 해석하였다. GAMBIT을 이용하여 3차원 격자망 설계 시 온실 피복재의 두께, 온실의 골조 등은 온실 내·외부의 유동에 영향을 거의 미치지 않기 때문에 무시하여 CFD 시뮬레이션 모델을 간략화하였다.

CFD 시뮬레이션을 이용한 연구에 있어서 CFD 모델의 정확도와 신뢰도 확보가 매우 중요하다. Ha (2015)는 풍동에서 PIV (Particle image Velocimetry) 실험을 통하여 가시화된 온

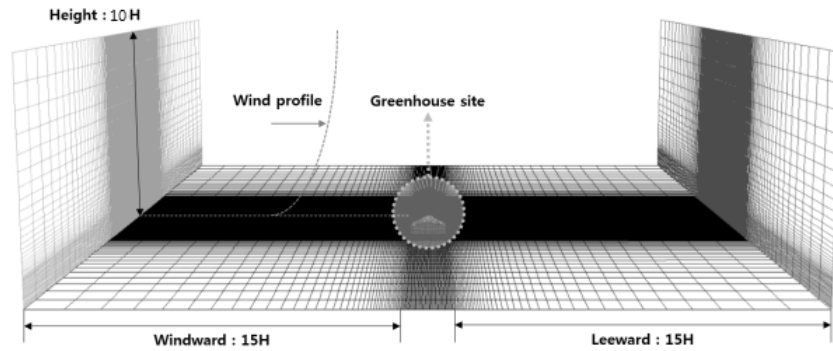


Fig. 3 Design of CFD simulation model domain

실 모형 내부의 공기 유동을 초고속카메라로 화상처리하여 유동 및 속도 분포를 정량적·정성적으로 분석하였다. 이를 CFD 시뮬레이션 모델의 연산 결과와 비교·분석을 통하여 CFD 시뮬레이션 모델을 검증하였다. 본 연구에서는 Ha (2015)의 연구에서 검증된 모델 설계 방법을 바탕으로 내부 격자 사이즈는 정확도와 연산 시간을 고려하여 0.2 m로 설계하였으며, 난류모델은 온실의 자연환기 분석 시 PIV 실험 결과와 비교하여 신뢰도가 가장 높은 것으로 제시된 RNG k-ε 난류 모델을 사용하였다.

온실의 자연환기 분석을 위해서는 외부 풍환경의 모의가 중요하며 이에 따라 온실의 외부 유동 영역 설계가 요구된다. 본 연구에서는 선행 연구 (Franke et al, 2004; Bournet et al, 2007; Bournet and Boulard, 2010)를 바탕으로 높이방향으로 10H (H: 온실의 등고 높이), 폭과 길이 방향으로 15H로 다음 Fig. 3과 같이 설계하였다. 3차원 격자망 설계 시 온실 내부와 온실 주변의 유동을 보다 정확하게 관찰하고 분석하기 위하여, 온실 내부와 온실 주변의 격자를 외부 유동 영역보다 조밀하게 설계하였다.

내륙과 상이한 기상특성을 띠는 간척지의 외부 풍환경을 모사하기 위하여 ESDU code (Engineering Sciences Data Unit, 84011 and 84030, IHS, UK)를 이용하였으며, 대상 간척지 주변의 지표면 거칠기의 변화를 반영한 대표 풍속 및 난류 프로파일을 설계하였다. ESDU 기법을 통하여 설계된 풍환경을 CFD 시뮬레이션에 동일하게 적용하고자 CFD 시뮬레이션의 경계층을 Log Law (Hoxey and Richards, 1992; Richardson and Blackmore, 1995)에 따라 풍속 및 난류 프로파일을 산정하였고 이를 FLUENT 프로그램의 User Defined Function (UDF) 기능을 이용하여 CFD 모델에 간척지 풍환경 프로파일을 적용하였다. Log Law에 따른 풍속 및 난류의 산정식은 식 (4), (5), (6)과 같다. 이때 카르만 상수 (k)는 0.42, 조도길이 (z_0)는 0.03 m, 기준높이 (z)는 10 m, 경험상수 (C_μ)는 0.09를 사용하였으며 기준 높이에서의 풍속은 풍빈도 분

석을 통하여 선정하였다 (Ha, 2015).

$$U(z) = \frac{u^*}{k} \ln \frac{z+z_0}{z_0} \quad (4)$$

$$k(z) = \frac{u^{*2}}{\sqrt{C_\mu}} \quad (5)$$

$$\epsilon(z) = \frac{u^{*3}}{k(z+z_0)} \quad (6)$$

온실 내부의 구역별 환기량을 산정하기 위하여 CFD 시뮬레이션 모델의 온실 내부는 다음 Fig. 4와 같이 1연동 당 길이 방향으로 11구역, 작물군의 높이를 고려하여 높이 방향으로 0~1 m, 1~2 m, 온실 상부 3구역으로 나누어, 1연동당 총 33개의 구역으로 (8연동 온실의 경우 총 264개 구역) 구분하여 설계하였다. 추적가스 농도감쇠법으로 각 분할된 구역별 환기량을 산정하여 0~1 m 높이에서 환기 균일성을 분석하였으며, 부피가중평균으로 온실의 높이별 환기량, 온실 전체의 환기량을 산정하여 환경 조건에 따라 비교·분석하였다.

벤로형 온실의 환기량 분석 조건은 연동수 3가지 (2, 5, 8연동), 풍속 3가지 (1.0, 2.5, 5.5 m·s⁻¹), 풍향 3가지 (0, 45, 90°), 환기방식 3가지 (측창 환기, 측·천창 환기, 천창 환기)로 총 81가지이다. 분석 조건으로 2연동, 5연동, 8연동 온실을 선정하여 연동수 증가에 따른 환기율 감소를 분석하고자 하였으며, 풍속은 대상 간척지 인근 9개의 기상 관측소의 자료를 풍빈도 분석을 통하여 선정하였다. 풍향의 경우 모든 풍향에서의 온실의 환기에 미치는 영향을 분석하기 위하여 온실의 대칭성을 고려하여 선정하였다. 측창을 기준으로 측창에 평행하게 불어오는 풍향을 0°, 직각으로 불어오는 풍향을 90°로 정했다. 환기 방식의 경우 풍상측 및 풍하측의 측창만 완전 개방한 조건을 ‘측창환기’, 풍상측 및 풍하측의 측창과 천창을 모두

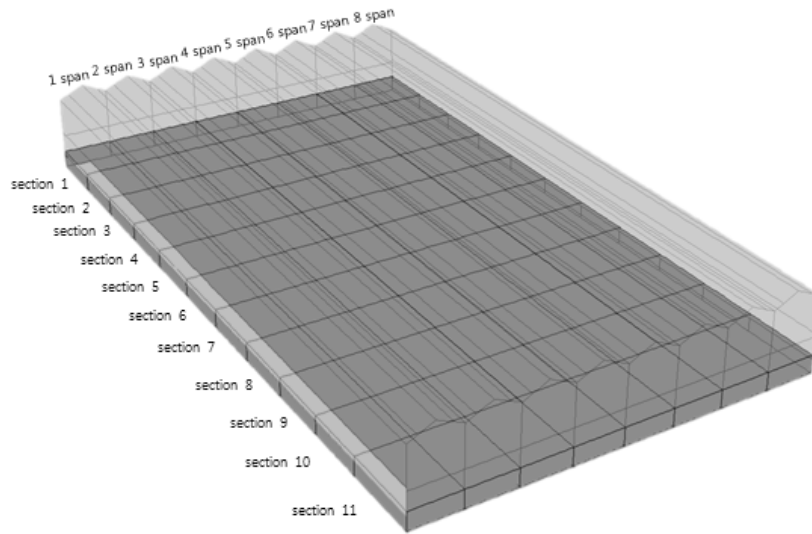


Fig. 4 Departmentalization of greenhouse model for analysis of local ventilation rate

완전 개방한 조건을 ‘측·천창환기’, 풍상측 및 풍하측의 천창만 완전 개방한 조건을 ‘천창환기’라 명명하였다.

나. 필요환기량 및 자연환기량 분석

본 연구에서는 온실의 설치 지역에 따라 일사량 조건이 다른 것을 고려하여 일사량 조건이 800, 600, 400, 200 W·m⁻² (14, 8.6, 5.7, 2.9 kcal·m⁻²·min⁻¹)일 때의 필요환기량을 산정하여 제시하였다. 필요환기량 산정 시 작물이 없다고 가정하였으며, 산정시 필요 인자들은 농어촌진흥공사의 ‘원예시설의 환경 설계 기준 작성연구(1997)’에 따라 용적비열 (C_v)은 0.3 kcal·m³·°C, 수열 면적보정율 (α)은 1.2, 일사투과율 (τ)은 0.7, 피복면의 열관류율 (k)은 0.08 kcal·m²·°C의 값을 이용하였다. 온실의 바닥면적 (A_f), 피복재면적 (A_c), 체적 (V)은 앞서 제시한 벤로형 온실의 제원을 따랐다.

질량교체 환기량을 산정하기 위하여 CFD 시뮬레이션을 통하여 모델 내 환기창의 모든 격자에서 유출·입되는 질량유량을 계산하였다. 환기창의 각 격자에서 질량 유량의 흐름 방향을 고려하여 유출·입을 구분하였으며 각 격자에 대한 질량 유량을 면적가중 평균하여 환기창에서의 유출·입량을 산정하였다. 이를 통하여 앞서 언급한 식으로 온실 전체에 대한 환기량을 산정하였다.

추적가스 농도 감쇠법을 통한 환기량은 초기 내부 추적가스 농도와 환기가 완료된 시점의 내부 추적가스 농도의 비율과 환기 완료까지 소요된 시간을 이용하여 구한다. 본 연구에서는 초기 온실 내부의 추적가스 농도를 2000 ppm으로 가정하였으며 환기 완료 시점은 초기 농도 대비 내부 추적가스 농도가 1%에 도달한 시점으로 가정하였다 (Hong et al., 2008;

Table 2 Analysis of wind speed frequency at weather stations located at near target reclaimed lands

Weather station	Prevailing wind speed (m · s ⁻¹)	Frequency (%)
Buan	1.5~3.5	35.9
Goheung	1.5~3.5	36.8
Goosan	1.5~3.5	39.4
Haenam	1.5~3.5	34.8
Incheon	1.5~3.5	46.9
Jindo	3.5~7.5	55.7
Mokpo	3.5~7.5	36.0
Seosan	1.5~3.5	34.2
Woojung	0.5~1.5	34.4

Ha, 2015). 이를 통하여 온실 전체 체적에 대한 환기량 뿐만 아니라 온실 내부 구역별 환기량을 산정하였고 온실 내부의 환기 정체 구역을 분석하는데 활용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 간척지의 풍빈도 분석

본 연구에서는 자연환기량을 평가하기 위한 기준 풍속을 선정하기 위해 간척지 주변에 위치한 기상대의 풍속자료를 이용하여 풍빈도 분석을 수행하였다. 각 기상대의 풍빈도 분석 결과를 통하여 최빈풍 구간과 빈도를 Table 2에 제시하였다. 다음의 풍빈도 분석 결과를 바탕으로 저풍속과 고풍속 조건에서 환기량을 평가하기 위하여 기준 풍속을 1.0, 2.5, 5.5

$m \cdot s^{-1}$ 로 선정하였으며, 이를 기준으로 풍속 및 난류강도 프로파일을 CFD 시뮬레이션에 적용하였다.

2. 필요환기량 산정 결과

본 연구에서는 자연환기량을 평가하기 위한 기준으로 필요환기량을 산정하여 Fig. 5에 도시하였다. 산정된 필요환기량 값은 환기횟수로 표현하였기 때문에 동일한 환경 조건에서는 온실의 연동 수와 관계없이 일정한 값을 지닌다. 필요환기량 산정 결과 일사량이 높은 조건일수록, 같은 온도차이로 온실내부를 유지하는데 필요한 환기량이 더 크게 나타났다. 다음의 그래프를 통하여 해당 지역에서의 일사량 조건에 따른 필요환기량을 산정하여 온실의 환기 설계 시 기준으로 활용할 수 있다. 예를 들어 온실의 설치 지역의 여름철 외기온 30 °C, 일사량이 $600 W \cdot m^{-2}$ 일 때 베로형 온실에서 자연환기

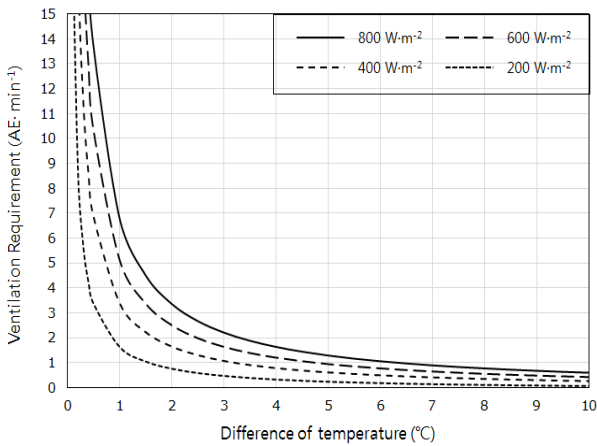


Fig. 5 Ventilation requirement of venlo type greenhouse according to solar radiation conditions

이용하여 33 °C로 유지하기 위하여 필요한 환기량은 약 $1.5 AE \cdot min^{-1}$ 이다.

3. 온실의 자연환기량 산정 결과

온실의 연동 수, 외부 풍환경, 온실의 환기 구조에 따른 베로형 온실의 자연환기량을 CFD 시뮬레이션을 통하여 질량 교체 환기량 산정법과 추적가스 농도감쇠법으로 산정하였으며 Table 3와 Table 4에 나타내었다. 환기량은 풍속, 풍향, 환기구조, 온실의 연동 수에 따라 매우 상이하게 산정되었다. 질량 교체 환기량을 기준으로 풍향 90°, 풍속 $5.5 m \cdot s^{-1}$ 인 조건에서 측 천창환기 시 2연동 베로형 온실의 환기량이 $10.00 AE \cdot min^{-1}$ 으로 가장 컸으며 풍향 0°, 풍속 $1 m \cdot s^{-1}$ 인 조건에서 천창환기 시 8연동 베로형 온실의 환기량이 $0.08 AE \cdot min^{-1}$ 으로 가장 작게 산정되었다. 추적가스 농도감쇠법으로 산정된 결과 풍향 90°, 풍속 $5.5 m \cdot s^{-1}$ 인 조건에서 측 천창환기 시 2연동 베로형 온실의 환기량이 $10.67 AE \cdot min^{-1}$ 으로 가장 컸으며 풍향 0°, 풍속 $1 m \cdot s^{-1}$ 인 조건에서 천창환기 시 8연동 베로형 온실의 환기량이 $0.09 AE \cdot min^{-1}$ 으로 가장 작게 산정되었다. 두 방법에 의하여 산정된 환기량 값들은 같은 환경조건에서 산정되었을지라도 차이가 발생하였으며 평균 11.5% 정도의 차이를 보였다. 이는 각 환기량 산정법의 특징에서 기인된다고 판단된다. 예를 들어, 환기가 진행되면서 매 순간 온실 내의 평균 가스 농도에 해당하는 가스의 양이 배출된다면 질량 교체 환기량과 추적가스 농도감쇠법으로 산정된 환기량 값과 동일할 것이다. 하지만 시설 내부의 추적가스가 항상 균일하게 분포하지 않기 때문에 배출되는 추적가스의 농도가 온실 내 평균 가스 농도보다 높을 경우 추적가스 농도감쇠법으로 산정한 환기량 값이 질량교체 환기량보다 높은 수치를 나타낸다. 반대로 배출되는 추적가스의 농도가 온실 내 평균 가스

Table 3 Computed natural ventilation rate of venlo type greenhouse using MFR method

(Unit: $AE \cdot min^{-1}$)

Vent opening	Wind speed ($m \cdot s^{-1}$)	2-span			5-span			8-span		
		Wind direction								
		90°	45°	0°	90°	45°	0°	90°	45°	0°
Side vent	1.0	0.73	0.65	0.19	0.46	0.36	0.15	0.27	0.23	0.11
	2.5	1.87	1.66	0.37	1.10	0.96	0.35	0.67	0.51	0.28
	5.5	6.97	3.84	1.65	2.42	2.08	0.84	1.47	1.17	0.64
Side-roof vent	1.0	2.49	1.40	0.37	0.80	0.70	0.23	0.59	0.48	0.20
	2.5	4.32	3.73	0.93	1.96	1.70	0.76	1.45	1.21	0.49
	5.5	10.00	8.33	1.97	4.28	3.72	1.35	3.18	2.70	1.10
Roof vent	1.0	0.30	0.25	0.12	0.19	0.21	0.09	0.17	0.20	0.08
	2.5	0.72	0.72	0.32	0.45	0.57	0.28	0.39	0.46	0.27
	5.5	1.58	1.65	0.72	0.99	1.10	0.67	0.79	1.09	0.62

Table 4 Computed natural ventilation rate of venlo type greenhouse using TGD method

(Unit: AE·min⁻¹)

Vent opening	Wind speed (m · s ⁻¹)	2-span			5-span			8-span		
		Wind direction								
		90°	45°	0°	90°	45°	0°	90°	45°	0°
Side vent	1.0	0.72	0.71	0.20	0.30	0.26	0.09	0.23	0.26	0.09
	2.5	0.97	0.71	0.51	0.75	0.37	0.32	0.48	0.35	0.24
	5.5	3.68	3.53	1.12	1.57	1.74	0.61	1.09	1.74	0.55
Side-roof vent	1.0	2.79	1.96	0.23	0.87	0.66	0.16	0.81	0.48	0.11
	2.5	5.22	3.43	0.57	2.08	1.54	0.43	1.88	1.11	0.29
	5.5	10.67	7.00	1.22	4.45	3.01	0.78	4.26	3.07	0.63
Roof vent	1.0	0.24	0.26	0.11	0.12	0.13	0.10	0.11	0.13	0.09
	2.5	0.59	0.62	0.37	0.34	0.35	0.28	0.28	0.34	0.27
	5.5	1.26	1.23	0.81	0.75	0.78	0.72	0.58	0.72	0.62

Table 5 Ratio of ventilation rate according to number of spans

Vent opening	Method	Wind direction 90°			Wind direction 45°			Wind direction 0°		
		2span	5span	8span	2span	5span	8span	2span	5span	8span
Side vent	MFR	100 %	52 %	31 %	100 %	56 %	32 %	100 %	75 %	57 %
	TGD	100 %	54 %	37 %	100 %	46 %	45 %	100 %	54 %	47 %
Side-roof vent	MFR	100 %	40 %	30 %	100 %	47 %	33 %	100 %	71 %	54 %
	TGD	100 %	38 %	35 %	100 %	41 %	34 %	100 %	70 %	50 %
Roof vent	MFR	100 %	63 %	54 %	100 %	77 %	70 %	100 %	85 %	79 %
	TGD	100 %	56 %	46 %	100 %	57 %	54 %	100 %	85 %	77 %

농도보다 낮을 경우 추적가스 농도감쇠법으로 산정한 환기량 값이 질량교체 환기량보다 낮은 수치를 나타낸다 (Hong et al., 2008). 따라서 자연환기량을 산정하기 위한 두가지 방법 중 질량교체 환기량 산정법은 더 간편하게 자연환기량을 평가할 수 있지만, 추적가스 농도감쇠법은 온실 내부의 유동을 고려하여 산정하므로 보다 실제 자연환기량에 가깝게 평가한다고 판단된다.

4. 온실의 연동 수에 따른 자연환기량 분석

연동 온실의 연동 수가 온실의 환기량에 미치는 영향을 분석하기 위하여 2, 5, 8연동 온실에 대해 환기량을 산정하고 분석을 수행하였다. Fig. 6은 풍속 1 m·s⁻¹, 풍향 90°, 측창환기인 조건에서 연동 수에 따른 추적가스 농도 저감 곡선을 나타낸 것이다. 연동이 증가할수록 온실 내부 추적가스의 농도가 완만히 저감되어 환기가 천천히 이루어지는 것으로 나타났다. 동일한 환경조건에서 연동 수가 증가함에 따라 환기량 감소 정도를 분석하기 위하여 2연동 기준으로 5연동과 8연동의 환기량 비율을 Table 5에 나타냈다. 측창환기 시 풍향이 90°, 45° 인 경우 2연동 온실을 기준으로 5연동 온실의 환기량은

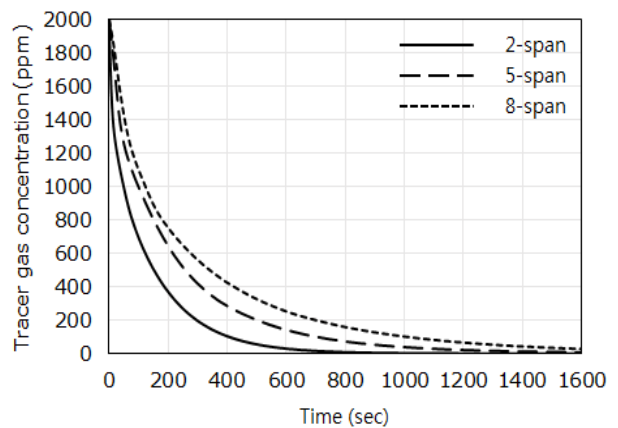


Fig. 6 Decay curve of tracer gas according to number of spans

약 50 %, 8연동 온실은 약 35 %로 감소하는 것으로 나타났다. 측·천창환기 시 풍향이 90°, 45° 인 경우 2연동 온실을 기준으로 5연동 온실의 환기량은 약 40 %, 8연동 온실은 약 35 %로 감소하였다. 연동 수가 증가함에 따라 자연환기량 값이 감소하는 것은 환기창을 통하여 유입되는 공기량에 비해 온실의 체적 증가 비율이 크기 때문으로 판단된다. 천창환기 시 연동

수가 증가함에 따라 환기량 감소 비율이 측창환기와 측·천창 환기 시 보다 낮게 나타났다. 이는 측창의 면적은 연동 수가 증가하여도 일정하지만, 천창의 면적은 연동 수가 증가함에 따라 함께 증가하기 때문에 그 감소 비율이 낮은 것으로 판단 된다.

5. 외부 풍환경에 따른 자연환기량 분석

외부 풍환경이 온실의 자연환기에 미치는 영향을 분석하기 위하여 풍속 1.0, 2.5, 5.5 m·s⁻¹, 풍향 90, 45, 0° 조건에서의 자연환기량을 산정하였다. 다음 Fig. 7은 8연동 벼로형 온실의 환기량을 질량교체 환기량 산정법과 추적가스 농도감쇠법으로 산정하여 나타낸 그래프이다.

풍속에 따른 환기량 차이 분석 결과, 질량교체 환기량과 추적가스법으로 산정한 자연환기량 모두 풍속이 1.0 m·s⁻¹에서 2.5 m·s⁻¹와 5.5 m·s⁻¹로 증가함에 따라 환기량 또한 모든 케이

스에서 선형적으로 약 2.5배, 5.5배 증가하였다. 하지만 풍향 0°조건에서 천창환기 시 풍속이 1.0 m·s⁻¹에서 2.5 m·s⁻¹와 5.5 m·s⁻¹로 증가함에 따라 환기량은 약 3배와 7배로 다른 경우보다 크게 증가하는 경향을 보였다.

풍향에 따른 환기량 차이 분석 결과, 질량교체 환기량과 추적가스법으로 산정한 자연환기량 모두 천창환기를 제외한 측창환기와 측·천창환기 시에는 동일한 풍속일 때 풍향 90, 45, 0° 순서로 높은 환기량을 보였다. 특히 풍향 90°일 때의 환기량과 0°일 때의 환기량 차이가 크게 나타났다. 이는 풍향 0°일 때 풍향이 90°에 비해서 환기창을 통하여 유입되는 공기량이 적기 때문으로 판단된다. 천창환기 시에는 다른 환기 구조와 달리 풍향이 45°일 때 질량교체 환기량과 추적가스법으로 산정한 자연환기량이 90°일 때의 환기량보다 크게 산정되었다.

풍향에 따라 0~1 m 높이에서의 자연환기량 분포 특성을 비교·평가하기 위하여 추적가스 농도감쇠법을 이용하여 풍

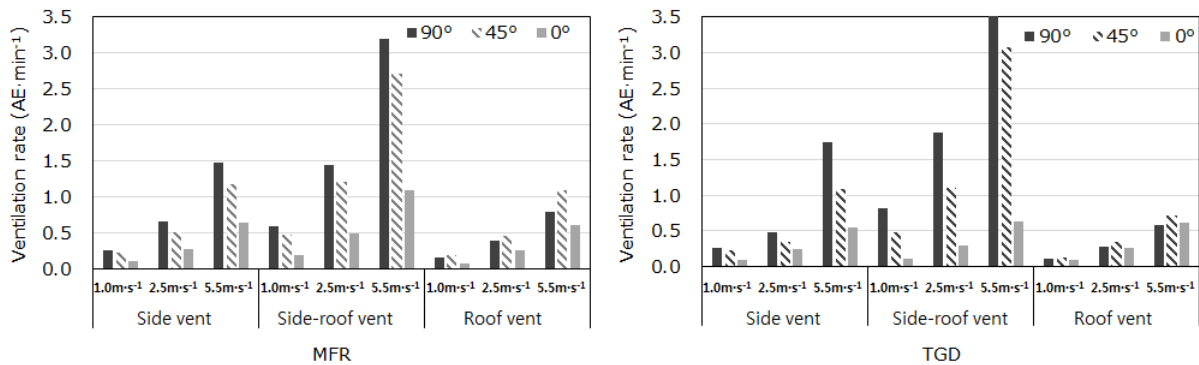


Fig. 7 Ventilation rate of 8-span venlo type greenhouse

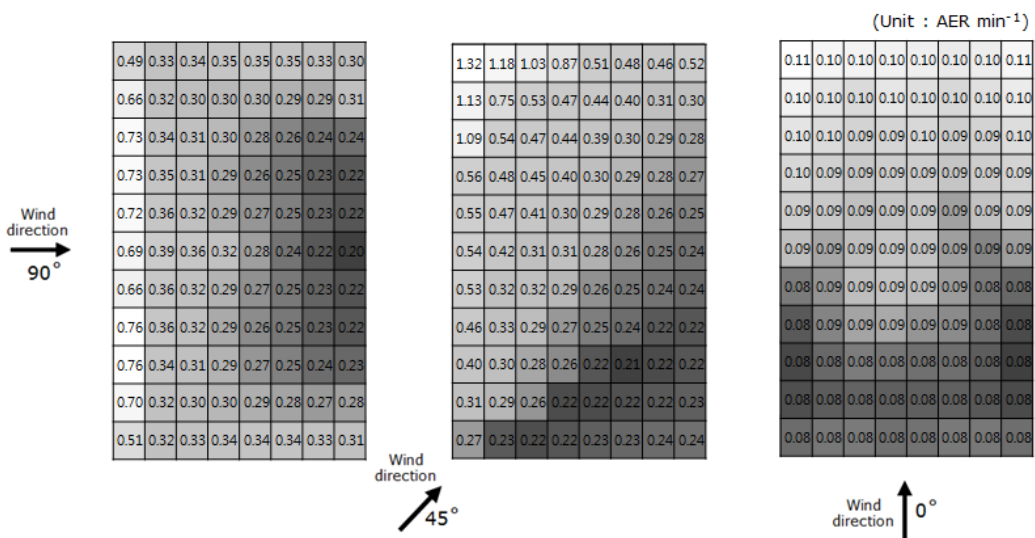


Fig. 8 Distribution of ventilation rate at 0~1 m height according to wind direction when wind speed is 1.0 m·s⁻¹, the number of spans is eight and vent openings is side vent (white color: maximum ventilation rate, black color: minimum ventilation rate)

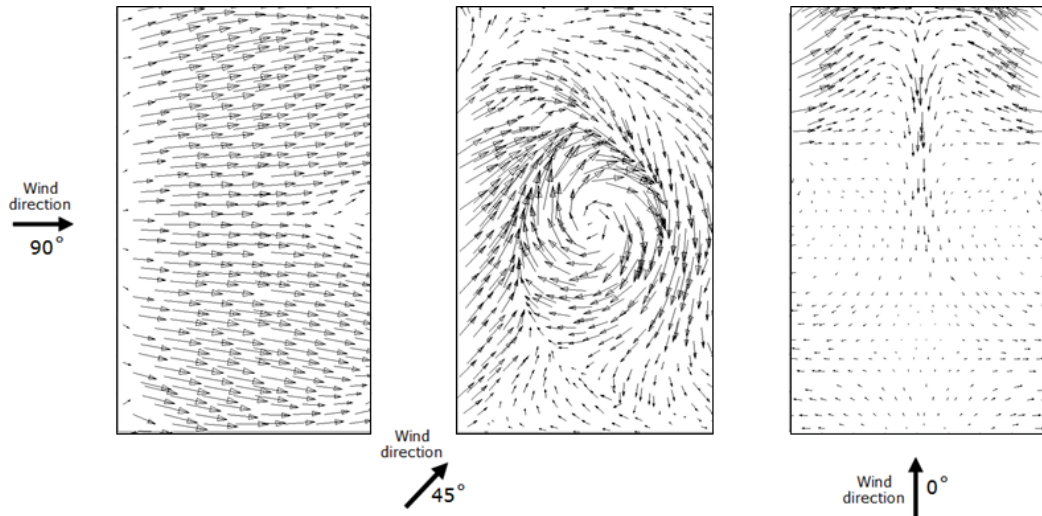


Fig. 9 Air flow pattern at 1 m height according to wind direction when wind speed is $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, the number of spans is eight and vent openings is side vent

Table 6 Homogeneity of ventilation rate at 0~1 m height according to wind direction when wind speed was $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, the number of spans is eight and vent openings is side vent

Index	Wind direction		
	90°	45°	0°
Average ventilation rate at 0~1 m height ($\text{AE}\cdot\text{min}^{-1}$)	0.34	0.38	0.09
Standard deviation ($\text{AE}\cdot\text{min}^{-1}$)	0.14	0.23	0.01
Coefficient of variation	0.41	0.60	0.07
Maximum ventilation rate/Minimum ventilation rate	3.80	6.29	1.38

향에 따라 풍속 $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 측창환기 조건에서 8연동 온실의 작물 균 높이를 세분화하여 환기량을 산정한 뒤 Fig. 8과 같이 평면도로 나타내었다. 풍향 90°인 경우 풍상측 구역이 환기가 원활히 이루어지며 상대적으로 풍하측 구역이 다른 구역에 비해 환기량이 낮게 나타났다. 풍향이 45°인 경우 온실의 풍상측 끝단부(그림상 오른쪽 아랫부분)의 환기량이 다른 구역에 비해 낮게 나타났다. 풍향이 0°인 경우 온실의 0~1 m 높이에서 환기량이 전체적으로 낮게 형성되었으며 특히 풍상측 끝벽 구역에서 환기량이 낮게 나타났다. 이를 통하여 풍향이 45, 0° 경우 환기 정체구역이 발생하며, 풍향이 0°인 경우 0~1 m 높이의 환기량이 다른 풍향에 비해 매우 낮은 것을 확인하였다. 풍향에 따라 0~1 m 높이에서 온실 내부의 구역별 환기량은 다른 경향성이 보였다. Fig. 9는 위와 동일한 조건으로 풍속 $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 측창환기 조건에서 8연동 온실 1 m 높이에서의 유동 패턴을 풍향에 따라 나타낸 것이다. 환기량 분포 경향성은 Fig. 9에 나타낸 유동 패턴을 통하여 확인된다. 풍향이 90°인 경우 전체적으로 풍상측에서 풍하측으로 이동하는 유동패턴이 형성되며, 풍하측 중앙부에서 유속이 감소하는 것으로 나타났다. 풍향이 45°인 경우 외기가 측창을 통하여 비

스듬히 유입되어 온실 중앙에 순환하는 유동이 형성되면서 온실의 풍상측 끝단부(그림상 오른쪽 아랫부분)에 유동 정체 구역이 발생하는 것이 확인되었다. 풍향이 0°인 경우 풍하측 측창을 통하여 외기가 유입되어 온실의 중앙을 따라 풍상측으로 흐르는 유동 패턴을 보이며 온실의 풍상측 부분에는 유속이 매우 작아 유동 정체구역이 발생하는 것으로 나타났다.

각 풍향에서의 환기량의 균일성을 평가하기 위하여 위의 3가지 경우에 대해 표준 편차, 변동계수, 최대·최소환기량의 차이를 산정하여 Table 6에 나타내었다. 각 풍향에서의 표준 편차와 변동계수는 각각 풍향 90°일 때 $0.14 \text{ AE}\cdot\text{min}^{-1}$ 와 0.41 , 풍향 45°일 때 $0.23 \text{ AE}\cdot\text{min}^{-1}$ 과 0.60 , 풍향 0°일 때 $0.01 \text{ AE}\cdot\text{min}^{-1}$ 과 0.07 로 산정되었다. 또한 각 풍향 조건 90, 45, 0°에서 최대 환기량은 최소환기량의 3.80배, 6.29배, 1.38배 큰 환기량을 보이는 것으로 분석되었다. 따라서 0~1 m 높이에서의 환기량 균일성은 표준편차, 변동계수, 최대·최소환기량의 차이가 가장 작은 풍향이 0°인 경우가 가장 높고, 45°일 때 표준편차, 변동계수, 최대·최소환기량의 차이가 가장 크게 분석되어 환기량 균일성이 가장 낮은 것으로 판단된다.

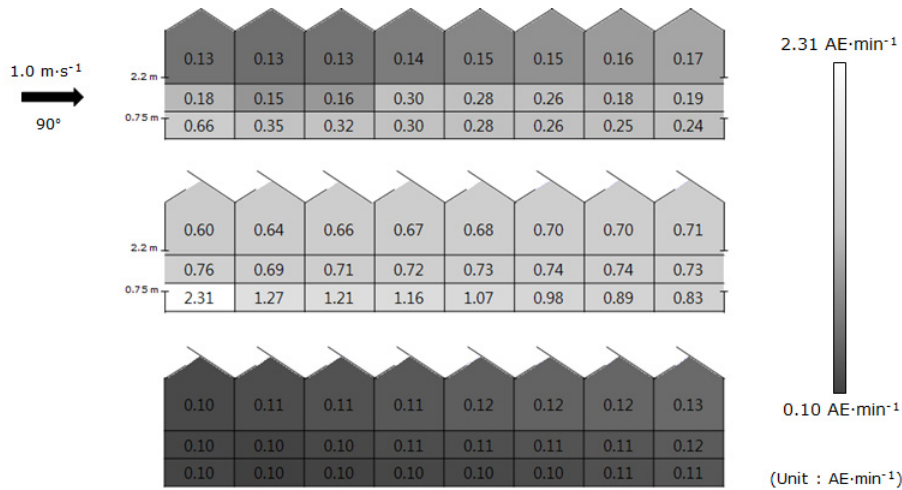


Fig. 10 Internal ventilation rate according to vent openings when wind speed was $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, the number of spans is eight and wind direction is 90°

Table 7 Homogeneity of internal ventilation rate according to vent openings when wind speed was $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and wind direction is 90°

Index	Vent opening		
	Side vent	Side-roof vent	Roof vent
Total ventilation rate of greenhouse ($\text{AE}\cdot\text{min}^{-1}$)	0,23	0,81	0,11
Standard deviation ($\text{AE}\cdot\text{min}^{-1}$)	0,11	0,36	0,01
Coefficient of variation	0,50	0,41	0,07
Maximum ventilation rate/Minimum ventilation rate	5,08	3,85	1,30

6. 환기 구조에 따른 자연환기량 분석

온실의 환기 구조에 따른 온실의 자연환기 특성을 분석하기 위하여 측창과 천창의 개폐에 따라 온실의 자연환기량을 산정하고 분석하였다. 산정 결과, Table 3와 Table 4에 제시한 바와 같이 측·천창환기, 측창환기, 천창환기 순서로 자연환기량이 높게 산정되었다. 환기 구조에 따른 환기 특성의 차이를 정성적·정량적으로 비교하기 위하여 추적가스 농도감쇠법을 이용하여 풍향 90° , 풍속 $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 조건에서 온실 내부의 구역별 (0~1 m, 1~2 m, 온실상부) 환기량을 산정하여 Fig. 10과 같이 정면도로 나타내었다. 측창환기의 경우 풍상측 온실 하부에서 환기량이 높았으며 반대로 풍상측 상부에서 환기량이 낮게 나타났다. 측·천창환기의 경우 구역별 환기량의 경향은 측창환기와 비슷하지만, 천창을 개방함으로써 온실 상부의 환기가 측창환기 시보다 개선되는 것으로 나타났다. 하지만 천창환기의 경우 다른 환기 구조에 비해 전체적으로 환기량이 낮은 것으로 나타났으며, 구역별 환기량을 살펴보면 풍하측 온실 상부의 환기량이 높고 풍상측 온실 하부의 환기량이 낮게 나타났다. 따라서 온실 설계 시 필요환기량을 충족시킬 수 있는 환기구조를 선정하여 설계해야 할 것으로 판

단된다.

환기 구조에 따라 높이별 환기량의 균일성을 평가하기 위하여 위의 3가지 경우에 대해 표준편차, 변동계수, 최대·최소 환기량의 차이를 산정하여 Table 7에 나타내었다. 산정 결과, 표준편차는 측창환기 시 $0.11 \text{ AE}\cdot\text{min}^{-1}$ 이며 측·천창환기일 때 $0.36 \text{ AE}\cdot\text{min}^{-1}$ 으로 측·천창환기 시 표준 편차가 크지만 변동계수는 측창환기 시 0.50, 측·천창환기 시 0.41로 측창환기 시 변동계수가 더 크다. 환기구조에 따라 구역별 환기량의 평균값이 다르기 때문에 변동계수를 기준으로 비교·평가하는 것이 타당하다. 또한 각 풍향 조건 $90, 45, 0^\circ$ 에서 최대 환기량은 최소환기량의 5.08배, 3.85배, 1.30배 큰 환기량을 보이는 것으로 분석되었다. 따라서 변동계수와 최대·최소환기량의 차이가 가장 큰 측창환기 조건일 때 균일성이 가장 낮은 것으로 판단된다.

7. 자연환기량 산정 도표 제시 및 필요환기량과 비교·분석

최종적으로 온실의 환기 설계 기준서에 제시하고자 다양한 환경 조건에서 벤로형 온실의 자연환기량 산정하여 Fig. 11과 같이 도표를 작성하였다. 이때 벤로형 온실의 자연환기

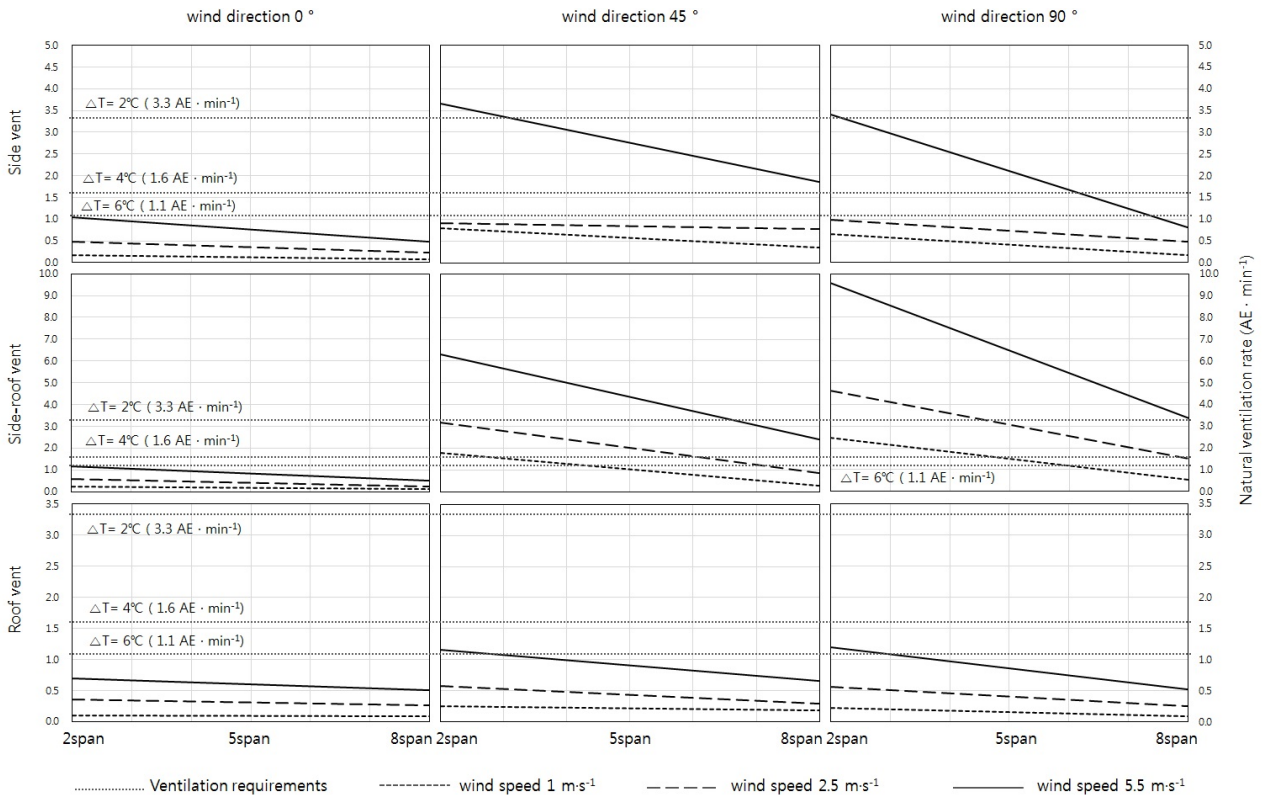


Fig. 11 Chart for computing natural ventilation rate of venlo type greenhouse

량 산정 결과 중 질량교체 환기량 산정법보다 추적가스 농도 감쇠법으로 산정한 결과가 실제 환기량을 잘 반영한다고 판단하여 추적가스 농도감쇠법으로 산정한 결과를 이용하여 도표를 작성하였다. 온실의 환기 설계 시 주어진 환경 조건에서 베로형 온실의 자연환기량을 필요환기량과 비교하여 평가하기 위하여, 일사량 $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 인 조건에서 산정된 필요환기량 결과 중 온도차 2, 4, 6 °C에 해당하는 필요환기량 결과를 그래프에 함께 도시하였다. 베로형 온실의 자연환기량을 필요환기량과 비교하여 평가한 결과, 풍향이 0° 조건일 때 모든 환기구조에서 6 °C에 해당하는 필요환기량 $1.1 \text{ AE} \cdot \text{min}^{-1}$ 을 충족하지 못하는 것으로 평가되었다. 또한 천창환기 시 본 연구의 환경 조건에서 산정된 자연환기량 값들은 대부분 6 °C에 해당하는 필요환기량 $1.1 \text{ AE} \cdot \text{min}^{-1}$ 을 충족하지 못하는 것으로 평가되었다. 따라서 보다 적절한 온실의 환기 설계를 위해서는 온실이 설치될 지역의 풍환경과 일사량 조건, 설치되는 온실 구조 등을 파악하여 제시된 그래프를 활용해야 될 것으로 판단된다. 본 연구에서 최종적으로 제시한 베로형 온실의 자연환기량 산정 도표는 온실 설계 단계에서 온실 설치 지역의 환경 조건을 통하여 해당 온실의 자연환기량이 필요환기량을 충족하는지 여부를 판단하는데 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 간척지 내 온실의 환기 설계 기준 마련을 위한 기초 연구로써 CFD 시뮬레이션을 통하여 연동 수 (2, 5, 8 연동), 풍속 ($1.0, 2.5, 5.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 풍향 ($90, 45, 0^\circ$), 환기방식 (측창환기, 측·천창환기, 천창환기)에 따른 베로형 온실의 자연환기량을 산정하고 분석하였다. 질량교체 환기량 산정법과 추적가스 농도감쇠법을 통하여 자연환기량을 산정하였으며 이를 통하여 베로형 온실의 자연환기량 산정 도표를 작성하였다.

연동 수에 따른 분석 결과, 연동 수가 증가함에 따라 환기량이 낮아지는 것으로 나타났다. 풍향이 $90, 45^\circ$ 인 경우 측창환기 시 2연동 온실을 기준으로 5연동 온실의 환기량은 약 50%, 8연동 온실은 약 35%로 감소하는 것으로 분석되었다. 풍속에 따른 분석 결과, 풍속이 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 와 $5.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 증가함에 따라 환기량 또한 모든 케이스에서 선형적으로 약 2.5배, 5.5배 증가하였다. 풍향에 따른 분석 결과, 측창환기와 측·천창환기 시에는 동일한 풍속일 때 풍향 $90, 45, 0^\circ$ 순서로 높은 환기량을 보였다. 풍향에 따라 0~1 m 높이에서의 환기 균일성을 살펴본 결과, 풍속 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 조건에서 측창환기 시 풍향 45° 인 경우 변동계수가 0.6으로 다른 풍향에 보다 균일성

이 가장 떨어지는 것으로 분석되었다. 환기 구조에 따른 분석 결과, 측·천창환기, 측창환기, 천창환기 순으로 높은 환기량을 나타냈다. 높이에 따른 온실 내부 구역별 환기량은 측창환기와 측·천창환기 시 풍상측 온실하부에서 환기량이 높고 반대로 풍상측 상부에서 환기량이 낮은 분포를 나타냈다. 최종적으로 다양한 환경조건에서 산정된 벤로형 온실의 자연환기량 결과를 이용하여 설계 시 주어진 환경 조건에 대한 벤로형 온실의 자연환기량을 산정할 수 있는 도표를 작성하였다. 또한 자연환기량을 필요환기량과 비교·평가할 수 있게 도표에 필요환기량 결과를 함께 도시하였다.

본 연구의 결과는 온실 설계 단계에서 온실 설치 지역의 환경 조건을 통하여 해당 온실의 자연환기량이 필요환기량을 충족하는지 여부를 판단하는데 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구의 결과와 더불어 향후 연구를 통하여 다른 형태의 온실에 대한 자연환기량 산정 도표가 제시되어 간척지 설치 온실의 환기 설계 시 유용하게 활용될 것으로 전망된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ009412)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

1. American Society of agricultural Engineering (ASAE), 2003. *ASAE Standard: Heating, ventilating and cooling greenhouse*. ASAE. St Joseph, Michigan. p. 699-707.
2. Bartzanas, T., T. Boulard, and C. Kittas, 2002. Numerical simulation of the airflow and temperature distribution in a wind tunnel greenhouse equipped with insect-proof screen in openings. *Computers and Electronics in Agriculture* 34: 207-221.
3. Bartzanas, T., T. Boulard, and C. Kittas, 2004. Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse. *Biosystems Engineering* 88: 479-490.
4. Boulard, T., G. Papadakis, C. Kittas, and M. Mermier, 1997. Airflow and associated sensible heat exchanges in a naturally ventilated greenhouse. *Agriculture and Forest Meteorology* 88(1): 111-119.
5. Boulard, T., and H. Fatnassi, 2005. Greenhouse aeration and climate optimization based on CFD studies. *Plasticulture* 124: 38-57.
6. Bournet, P. E., S. A. Ould Khaoua, T. Boulard, C. Migeon, and G. Chasseraux, 2007. Effect of roof and side opening combinations on the ventilation of a greenhouse using computer simulation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50: 201-212.
7. Bournet, P. E., and T. Boulard, 2010. Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouse: A review of experimental and CFD studies. *Computers and Electronics in Agriculture* 74: 195-217.
8. Campen, J. B., and G.P.A. Bot, 2003. Determination of greenhouse-specific aspects of ventilation using three-dimensional computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering* 84(1): 69-77.
9. Franke, J., C. Hirsch, A. G. Jensen, H. W. Krus, M. Schatzmann, P. S. Westbury, S. D. Miles, J. A. Wisse, and N. G. Wright, 2004. Recommendations on The Use of CFD in Wind Engineering. In Cost action C 14: p.C1.
10. Ha, J.S., 2015. Evaluation of natural ventilation efficiency of protected cultivation system in reclaimed land using aerodynamic simulation. MS. diss., Seoul National University, Seoul, South Korea. (in Korean).
11. Hellickson, M.A., and J.N. Walker, 1983. *Ventilation of agricultural structures*. ASAE. St. Joseph, Michigan.
12. Hong, S.W., I.B. Lee, N.K. Yun, H.S. Hwang, I.H. Seo, J. P. Bitog, J.I. Yoo, K.S. Kwon, and Y.H. Kim, 2008. Analytical comparison on ventilation efficiencies of naturally-ventilated multi-span greenhouses. *Proceedings of Bio-Environment Control* 17(1): 229-232 (in Korean).
13. Hong, S.W., I.B. Lee, H.S. Hwang, I.H. Seo, J. P. Bitog, J.I. Yoo, K.S. Kim, S.H. Lee, K.W. Kim, and N.K. Yoon, 2008. Numerical simulation of ventilation efficiencies of naturally ventilated multi-span greenhouse in Korea. *Transactions of the ASABE* 51(4): 1417-1432.
14. Hoxey, R. P., and P. J. Richards, 1992. Structures of the atmospheric boundary layer below 25m and implications to wind loading on low-rise buildings. *Journal of Wind Engineering and Industry of Aerodynamics* 44(2): 317-327.
15. Kittas, C., T. Boulard, M. Mermier, and G. Papadakis, 1996. Wind induced air exchange rates in a greenhouse tunnel with continuous side openings. *Journal of Agricultural Engineering Research* 65(1): 37-49.
16. Korean Meteorological Administration (KMA), 2014. <http://www.kma.go.kr> Accessed 1 July 2014.
17. Korea Rural Community Corporation (KRC), 1997. *Design Standards for Greenhouse Environment*. Research report 97-05-06. (in Korean).
18. Kwon, J.K., S.H. Lee, J.H. Seong, J.P. Moon, S.J. Lee, B.M. Choi, and K.J. Kim, 2011. Analysis of natural ventilation characteristics of venlo-type greenhouse with continuous roof vents. *Journal of Biosystems Engineering* 36(6): 444-452.
19. Lee, I.B., and T. Short, 2000. Two-dimensional numerical

- simulation of natural ventilation in a full-scale naturally ventilated greenhouse. *Transaction of the ASAE* (44): 119-127.
20. Lindley, J.A., and J.H. Whitaker, 1996. *Agricultural Building and structures*. ASAE. St. Joseph, Michigan.
21. Ministry of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (MFAFF), 2010. Notification of using Reclaimed Land, No. 2010-47. (in Korean).
22. Ministry of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (MFAFF), 2014. Major statistics data of Agriculture, Food and Rural Affairs. 11-1543000-000128-10. (in Korean).
23. Mistriotis, A., G. Bot, P. Picuno, and G. Searascia-Mugnozza, 1997. Discharge coefficients of greenhouse windows with insect screens. *Acta Horticulture* 443: 71-77.
24. Natural Resource, Agriculture and Engineering service (NRAES), 1994. *Greenhouse engineering*. NRAES. Ithaca, New York.
25. Richardson, G. M., and P. A. Blackmore, 1995. The Silsoe structures building: Comparison of 1:100 model-scale data with full-scale data. *Journal of Engineering and Industry of Aerodynamics* 57(1): 191-201.
26. Rural Development Administration (RDA), 1997. *Design Standard of Korean glass greenhouse*.
27. Sase, S., T. Takakura, and M. Nara, 1984. Wind tunnel testing on airflow and temperature distribution of a naturally ventilated greenhouse. *Acta Horticulture* 148: 329-336.