



간척지 내 단동형 온실의 풍하중에 대한 구조 안정성 분석

Structural Safety of Single-Span Greenhouses under Wind Load of Costal Reclaimed Lands

홍세운* · 김락우** · 최 원***,†

Hong, Se-Woon · Kim, Rack-Woo · Choi, Won

Abstract

Coastal reclamation has created large flat lands, part of which is an attractive site to construct greenhouse complexes for the horticulture industry. Wind environments over these coastal lands are entirely different from those of the inland area, and demand increased structural safety. The objective of this study is to evaluate the structural safety of two single-span greenhouses, peach type and even-span type, under the wind characteristics of coastal reclaimed lands. The wind pressure coefficients acting on the walls and roofs of two greenhouses were measured by wind tunnel experiments, and those acting on the roofs were approximately two times larger than those suggested by the existing design guidelines. Consequently, structural analysis conducted by SAP2000 showed that greenhouse structures designed by the existing guidelines might lead to structural failure under coastal wind conditions because their maximum allowable wind speeds were lower than the design wind speed. Especially, the peach type greenhouse constructed in a reclaimed land could be damaged by approximately 48 % of the design wind speed and needed improvement of structural designs. This study suggested increasing the spacing of rafters with thicker pipes for the peach type greenhouse to enhance economic feasibility of the building under strong wind conditions of reclaimed lands.

Keywords: Greenhouse, Structural analysis, Structural safety, Wind pressure coefficient

1. 서 론

우리나라의 채소 생산량은 연간 약 9백만 톤으로 이 중 약 30 %는 시설재배로 생산된다 (MAFRA, 2016). 시설채소용 온실 총 면적은 2015년에 52,526 ha로 1990년에 비해 두 배 이상 증가하였으며, 고품질, 고소득의 농산물을 생산하기 위하여 지속적으로 시설농업 중심의 패러다임으로 변화하고 있다. 한편 시설농업의 경쟁력은 생산 시설의 규모화와 단지화를 통한 기술과 에너지의 집약이 필수적이나, 국내에는 대부분 소규모 온실이 사용되고 있으며 대규모 온실 단지를 건설할 공간적인 제약이 있다. 이에 따라 정부는 시설농업의 국제

경쟁력을 강화하고자 국내 간척지 12지구에 대규모 원예단지를 조성하는 계획을 고시하였다 (MFAFF, 2010a).

간척지는 일반 농경지와 달리 해안지역에 위치하고 있기 때문에 새로운 환경 요인에 대비한 온실의 건설 및 운영에 대한 기술적인 검토가 필요하다. 특히 경량구조물인 온실은 풍하중에 크게 영향을 받으므로, 간척지에서의 강풍에 대한 구조적 안전성이 필수적으로 검토되어야 한다 (Yun et al., 2013). 국내의 온실 설계기준은 온실구조 설계기준 및 해설서 (MFAFF, 1999)가 주로 활용되고 있으며, 태풍, 적설 및 이상기후에 대처하기 위하여 구조 안전성에 대한 연구들이 수행된 바 있다 (Nam, 2001; Yoon et al., 2007; Suh et al., 2008; Park et al., 2010; Lee, 2013; Lee et al., 2014). 또한 농촌진흥청에서는 2007년부터 원예특작시설 내재해형 규격 설계도·시방서를 통해 기상재해에 대비하여 내재해형 표준온실설계도를 제시하고 있다. 온실의 구조 설계에 적용되는 하중은 고정하중, 설비하중, 작물하중, 적설하중, 풍하중이며, 이 중 풍하중 및 적설하중은 지역별, 재현기간별 기상 조건에 따라 상이하게 적용된다. 특히 간척지는 지면에 장애물이 거의 없고 조도가 매우 작아 풍속과 난류의 연직 분포 및 특성이 일반 지역과는 다르게 형성되므로, 온실 벽면에 작용하는 풍력의 분포가 간척지와 일반 지역에서 서로 차이가 나타난다 (Kwon et al., 2016).

온실에 작용하는 풍력의 분포는 주로 풍동실험에 의해 온

* Postdoctoral researcher, Department of Food, Agricultural and Biological Engineering, The Ohio State University, USA

** Graduate student, Department of Rural Systems Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Korea

*** Assistant Professor, Department of Rural Systems Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Korea

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4715 Fax: +82-2-873-2087

E-mail: fembem@snu.ac.kr

Received: July 13, 2017

Revised: July 20, 2017

Accepted: July 20, 2017

실 외벽의 풍압 계수로 측정된다(Lee et al., 1993; Robertson et al., 2002; Yun et al., 2008; Kim et al., 2014a; Kwon et al., 2016). 한편 국내의 풍동 실험 결과는 다소 큰 풍압계수 차이를 보이고 있는데, 이러한 차이는 풍환경의 레이놀즈 수, 모형의 표면 조도, 풍압공의 위치, 계측 방법 및 온실 모형 등 풍동 실험 조건의 불일치 때문으로 추정된다(Lee et al., 1993). 과대평가된 풍압 계수는 과대설계로 인한 비용 손실을 유발하지만, 과소평가된 풍압계수는 온실 붕괴를 초래할 수 있다. 실제로 Lee et al. (1993)은 우리나라의 단동, 2연동 및 3연동 온실에 대하여 풍압계수를 측정하였고, 지붕면에 작용하는 풍압계수는 최대 -1.5로 측정되었다. 이는 국외 연구들과 비교하여 0.5 이상 크며, 온실구조 설계기준 및 해설서(MFAFF, 1999)의 약 -0.7과 비교하여도 2배 정도 큰 값이다. Kim et al. (2014a) 또한 복숭아형 온실의 풍압계수를 측정하였고, 지붕면에 대해 -0.8~-1.9의 값을 도출하였다. 한편 유럽의 설계서(EN13031, 2001)에서는 -1.4의 값이 제시되어 우리나라 기준에 비하여 크게 산정되었다. 이는 현재 설계에 활용되는 풍압계수의 분포가 특정 풍환경에서는 보완될 필요가 있음을 의미한다. 실제로 원예시설의 구조 안전기준(KRC, 1995), 온실구조 설계기준 및 해설(MFAFF, 1999) 등이 제정되었지만, 매년 기상재해로 온실이 붕괴되는 피해를 겪고 있다.

우리나라의 기상상태와 대표적인 온실 형태들을 고려하여 다양한 풍하중 조건에 대한 안전성 설계가 필요하다. 본 연구에서는 간척지 내 온실 설계 시 풍하중에 의한 온실의 구조 안전성을 평가하고 간척지의 풍환경에 적합한 온실 구조의 보강안을 제시하고자 한다. 간척지의 기상 특성에서의 온실 풍압계수는 Kim et al. (2014a; 2014b)와 Kwon et al. (2016)에 의해 측정되었으며, 본 연구에서는 온실의 구조해석을 통해 설계의 안전성을 평가하였다.

II. 재료 및 방법

1. 대상 온실 및 간척지 내 풍환경 특성

본 연구에서는 국내 대표적인 단동형 온실인 복숭아형 온실과 양지붕형 온실을 대상으로 구조 안전성을 평가하였다. 구조해석을 수행하기 위한 온실의 양 지점은 고정으로 설정하였으며, 양지붕형의 경우는 지붕재 사이에 횡방향의 중방보를 가지고 있는 특징이 있다. 구조물의 외형에 대한 자세한 사항은 Fig. 1에 나타내었다.

온실의 구조와 크기는 Fig. 1에 제시되어 있다. 복숭아형 온실과 양지붕형 온실은 지붕의 곡률(4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5 m)과 지붕 각도(22, 24, 26, 28, 30, 32°)에 따라 각각 6개의 형태로 설계되었으며, 온실의 길이는 모두 44 m이다. 세부 사항은 ‘원예특작시설 내재해형 규격 설계도·시방서’(MAFRA, 2014)에 제시되어 있다.

원예시설은 일반적으로 저층 건물(높이 5 m 이하)에 해당하며 대기 경계층의 하부에 위치하여 온실 구조로 인한 난류에 큰 영향을 받는다. 특히, 간척지는 일반 지역과 비교하여 지표면의 거칠기가 작으므로 지표면 부근에서의 풍속이 강하고 온실에 더 큰 풍압이 작용하게 된다. 따라서 온실에 작용하는 풍하중을 정확히 산정하기 위해서는 연직 풍속 및 난류의 프로파일을 정확히 모의할 필요가 있다.

간척지의 연직 풍속 및 난류 프로파일은 Kwon et al. (2016)이 우리나라 7개의 간척지(화옹, 시화, 석문, 이원, 고흥, 영산강, 새만금)에 대하여 ESDU E0108 code (Engineering Sciences Data Unit, IHS, UK)로 분석하여 추정된 결과를 사용하였으며, 프로파일의 지표면조도는 C 등급, 연직 분포 지수(power law exponent)는 0.15로 산정되었다.

2. 온실 풍압 계수의 풍동실험

현재 온실의 벽면에 작용하는 풍압계수는 온실구조 설계

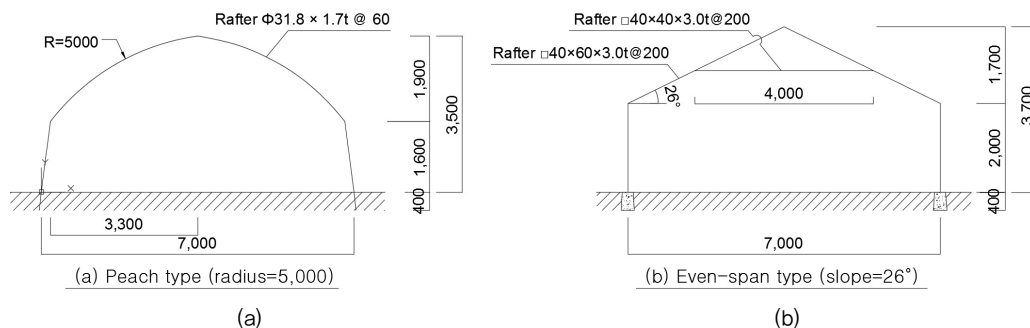


Fig. 1 Targeted greenhouse structures: (a) peach type and (b) even-span type (unit in drawing: millimeters). □ indicates a rectangular pipe

기준 및 해설 (MFAFF, 1999) 혹은 원예특작시설 내재해형 규격 설계도·시방서 (MAFRA, 2014)를 따른다. MAFRA (2014)에서는 규격 설계도를 작성할 때 사용된 풍압계수 등 그 설계방법에 대해 자세히 밝히고 있지 않지만, 간척지 온실의 구조설계 기준 연구 (Lee, 2016)에 그 기준 및 방법이 명시되어있다. Kim et al. (2014a)과 Kim et al. (2014b)은 간척지 풍환경을 모의한 풍동실험을 이용하여 복숭아형 온실과 양지붕형 온실에 대한 풍압 계수를 측정하여 더 강화된 풍하중 조건을 제시하였다. 11두 온실의 풍동실험은 폭 8.0 m, 높이 2.5 m, 길이 23.0 m의 대형 경계층풍동 (경기도 안성시 티이솔루션 소재)에서 수행되었다. 모형 크기와 풍속은 각각 1:20과 1:6으로 축소되었으며, 상사법칙을 만족하기 위하여 시간 차원은 1:3.33의 축척으로 분석되었다. 온실 모형에는 436개의 풍압측정공을 설치하여 0.15% 오차 (정확도)의 다채널 풍압계 (ZOC33/64Px×8, Scanivalve, USA)로 풍압을 측정하였다. 측정된 풍압 계수의 분포는 Fig. 2와 같다. 샘플링 주파수는 625 Hz이며, 측정값은 풍압튜브 길이를 고려하여 튜브 내에서의 압력 손실을 보정하였다.

3. 온실 구조 해석

가. 설계하중 산정

설계하중으로 풍하중과 자중에 의한 고정하중만을 고려하여 구조해석을 시행했다. 온실 구조물의 자중은 온실 구조용

파이프 (SPVHS, SPVHS-AZ)인 아연도금강관의 밀도 값인 $7,849 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 을 적용하여 계산하였다. 본 연구에 사용된 부재의 규격 및 기계적 성질은 Table 1과 같다.

바람은 온실 측벽 면에 수직인 방향으로 부는 것으로 가정하여 풍하중을 계산하였다. 온실구조설계기준 및 해설 (MFAFF, 1999)에 따라, 온실에 작용하는 풍하중은 식 (1)로 구하였다. 설계풍압력과 설계속도압은 각각 식 (2)와 (3)을 이용하여 계산하였다.

$$W = pA \tag{1}$$

$$p = q_h GC_f \tag{2}$$

$$q_h = \frac{1}{2} \rho V_h^2 \tag{3}$$

여기서, W 는 온실에 작용하는 풍하중 (N), p 는 설계풍압력 ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$), A 는 유효 면적 (m^2), q_h 는 온실지붕면 평균높이에서의 설계속도압 ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$), G 는 가스트 영향계수로 1.4 (MFAFF, 1999), C_f 는 풍압 계수로서 측벽면에 작용하는 풍압을 계산할 경우 풍상측면과 풍하측면의 풍압 계수의 차로 계산하며, 지붕면에 작용하는 풍압을 계산할 경우 풍압계수와 내압 계수의 차로 계산한다. 단, 내압 계수는 온실구조설계기준 및 해설 (MFAFF, 1999)에 따라 지붕면에 대해서만 -0.3을 적용하

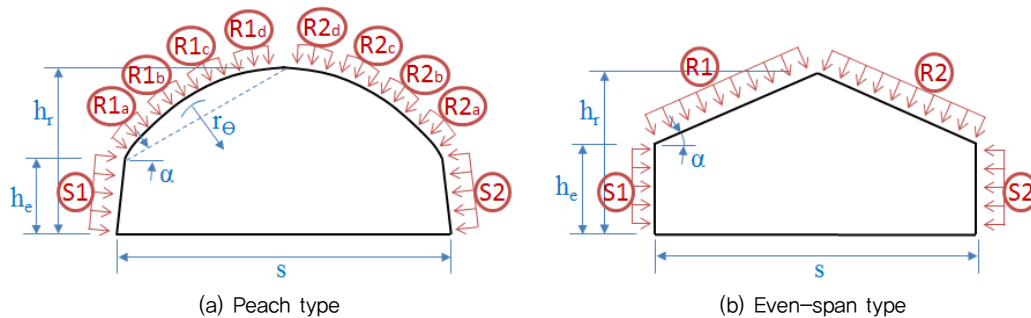


Fig. 2 Wind pressure of target greenhouses: (a) peach type and (b) even-span type. Symbols indicate h_r =ridge height, h_e =eave height, s =span width, r_e =curvature radius of the roof, α =roof slope, and R1, R2, S1, S2=wind loads, where 1 and 2 indicate windward and leeward direction, respectively

Table 1 Mechanical properties of structural members for greenhouses

Greenhouse	Members (mm)	Section area (cm^2)	Section modulus (cm^3)	Tension strength (MPa)	Yield strength (MPa)	modulus of elasticity ($\text{t} \cdot \text{cm}^{-2}$)
Peach type	$\Phi 31.8 \times 1.7\text{t}$	1,608	1,149	400	295	2100
Even-span type (columns)	$\square 40 \times 60 \times 3.0\text{t}$	5,640	9,128			
Even-span type (beams)	$\square 40 \times 40 \times 3.0\text{t}$	4,440	5,099			

였다. ρ 는 공기의 밀도로 $1.25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, V_h 는 온실지붕면 평균 높이에서의 설계풍속 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)이다.

나. 구조해석 방법

온실의 구조해석은 SAP2000 (v.9.0, Computers and Structures, Inc., Berkeley, CA, USA)을 이용하였다. 2차원 온실 구조에 풍하중과 고정하중을 적용하여 온실 부재에 발생하는 최대 단면력을 산정하였다. 다만, MFAFF (2010)에 제시된 양지붕형 (08-단동(만)-1) 모델은 방풍벽을 포함한 것이지만, 본 해석에서는 방풍벽을 제외하였다. 본 연구에서 구조안전성을 위해 검토된 항목은 인장, 압축, 휨응력 세 가지의 조합이 고려되었다. 부재의 구조 안전성은 계산된 부재의 최대 단면력과 부재의 허용 응력을 비교하여 식 (4)에 따라 판별하였다 (MFAFF, 1999).

$$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1.0, \quad \frac{\sigma_t + \sigma_b}{f_t} \leq 1.0 \quad (4)$$

여기서, σ_c 는 축방향력에 의한 압축응력 ($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$), σ_b 는 휨 모멘트에 의한 압축응력 ($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$), σ_t 는 축방향력에 의한 인장 응력 ($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$), f_c 는 허용 압축응력 ($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$), f_b 는 허용 휨응력 ($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$), f_t 는 허용 인장응력 ($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$)이다.

온실 부재의 허용 응력은 한국산업규격 KS D3760 비닐하우스 구조용 파이프 (SPVHS, SPVHS-AZ)의 최소 항복응력인 295 MPa을 사용하였으며, 안전율은 1.3을 적용하여 식 (5), (6)으로 계산하였다.

$$f_t = f_b = \frac{f_y}{n} \quad (5)$$

$$1) \lambda \leq \lambda_p \text{ 일 때 } f_c = \frac{1 - 0.4(\frac{\lambda}{\lambda_p})^2}{n} f_y$$

$$2) \lambda > \lambda_p \text{ 일 때 } f_c = \frac{0.277}{(\frac{\lambda}{\lambda_p})^2} f_y$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\pi^2 E_s}{0.6 F_y}} \quad n = \frac{3}{2} + \frac{2}{3} (\frac{\lambda}{\lambda_p})^2 \quad (6)$$

여기서, f_y 는 항복 응력 ($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$), n 은 안전율이다.

다. 연구 방법

국내의 대표적인 온실 형태 중 양지붕형과 복숭아형 온실에 대하여 기존의 국내 시방서에서 제시하고 있는 풍압계수 (MFAFF, 1999; MAFRA, 2014) 와 Kwon et al. (2016)에서

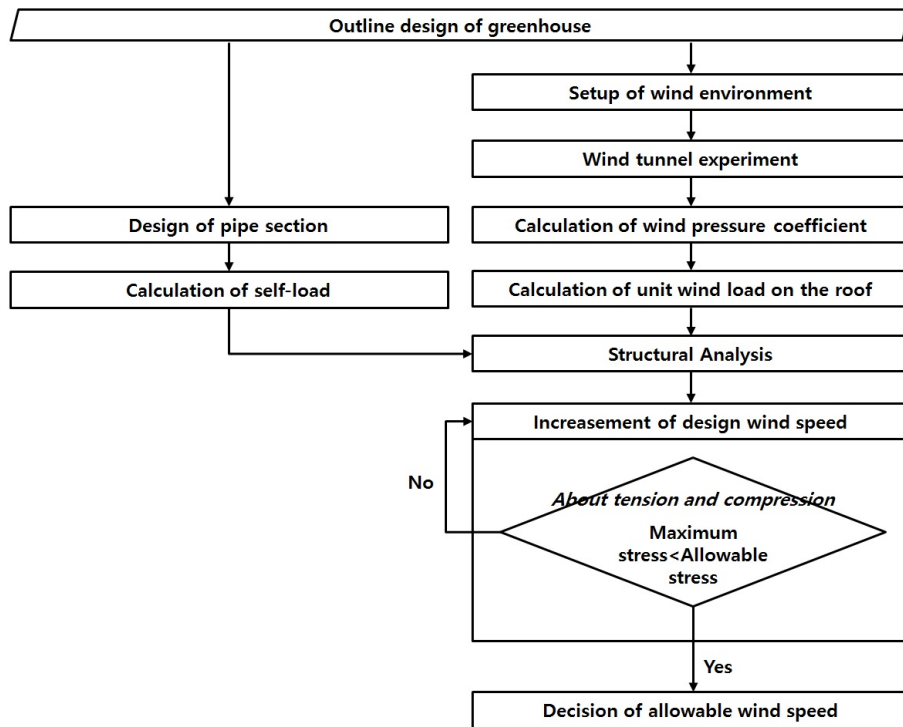


Fig. 3 Calculation process of allowable wind speed of greenhouses

제시한 간척지 풍환경에서의 풍압계수를 각각 적용하여 구조 안전성을 만족하는 최대 허용 설계풍속을 산정하여 비교하였다. 온실의 지붕면에 작용하는 풍하중은 지붕 각도 및 곡률에 따라 변화하므로, 복숭아형 온실은 지붕의 곡률반경을 4.0 m에서 6.5 m까지 0.5 m 간격으로 변화시키고, 양지붕형은 지붕 기울기를 22°에서 32°까지 2° 간격으로 변화시켜 각각 6가지 온실 단면을 해석 대상으로 정하였다.

온실의 자중에 의한 고정하중과 1 kN·m²의 단위설계속도 압을 온실에 적용하여 각 부재의 최대단면력을 구하고, 부재의 허용응력을 만족하는 최대 설계풍속을 계산하였다. 이 때 지점조건은 양쪽 서까래 기둥이 지면에서 고정된 것으로 가정하였다. 구조해석 및 설계 과정을 요약하면 Fig. 3과 같다.

III. 결과 및 고찰

1. 풍압계수에 대한 고찰

현재 설계기준에서 제시된 풍압 계수의 분포와 풍동실험에서 측정된 간척지 환경에서의 풍압 계수의 분포는 Table 2와 3과 같다. 간척지 환경에서 측정된 풍압 계수는 두 온실 모두 기준의 설계서에서 제시된 기준과는 차이를 보이고 있다.

풍상측 측벽면의 풍압은 더 낮게 측정되었으나 풍하측 측벽면에 작용하는 부압은 최대 두 배 정도 크게 측정되었다. 지붕면에 작용하는 부압은 약 두 배 정도 크게 측정되었는데, 특히 복숭아형 온실의 풍상측 지붕면에 작용하는 부압은 최대 -0.7에서 -1.90로 약 2.7배 정도 크게 측정되었다. 반면, 양지붕형 온실의 지붕면에 작용하는 부압은 최대 -0.5에서 -0.91로 1.8배 증가하였다. 복숭아형 온실은 지붕의 곡률반경이 커질수록 풍하중에 의한 부양력이 작아졌으며, 곡률반경이 6.5 m로 가장 클 경우에는 지붕이 편평한 양지붕형 온실의 풍압 계수와 유사해졌다. 곡률반경이 가장 클 때의 풍압 계수는 곡률반경이 가장 작을 때의 풍압 계수와 비교하여 약 42%로 감소하므로, 복숭아형 온실을 설계할 때 지붕면의 곡률 반경이 풍하중에 의한 온실의 구조 안전성에 상당히 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 복숭아형 온실의 경우 지붕의 곡률에 따라 난류의 박리점이 이동하며 지붕에 작용하는 풍하중의 크기 및 지붕면 내 위치에 따른 국소 풍압의 분포가 다르게 형성되기 때문이다. 양지붕형 온실은 지붕면 및 측벽에 가해지는 풍압이 지붕 경사각에 따라 크게 변하지는 않았지만, 지붕 경사각이 커질수록 풍상측 지붕면에 가해지는 부압이 약간 감소하는 경향을 보였다. 양지붕형 온실의 경우 지붕면이 편평하기 때문에 복숭아형 온실과 비교하여 지붕면 내에서의 풍압 계수

Table 2 Wind pressure coefficients of peach type greenhouses for structural design

References		R1a	R1b	R1c	R1d	R2a	R2b	R2c	R2d	S1	S2
MFAFF (1999)		-0.6	-0.6	-0.7	-0.7	-0.2	-0.2	-0.5	-0.5	0.8	-0.4
MAFRA (2014)	$\alpha < 22^\circ$	-0.6	-0.6	-0.7	-0.7	-0.2	-0.2	-0.5	-0.5	0.8	-0.4
	$\alpha \geq 22^\circ$	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6	-0.2	-0.2	-0.4	-0.4	0.8	-0.4
Kim et al. (2014a)	$r_\theta = 4.0 \text{ m}$	-0.09	-1.09	-1.73	-1.90	-0.50	-0.61	-1.20	-1.76	0.50	-0.50
	$r_\theta = 4.5 \text{ m}$	-0.10	-0.95	-1.47	-1.77	-0.55	-0.64	-1.04	-1.86	0.51	-0.50
	$r_\theta = 5.0 \text{ m}$	-0.02	-0.79	-1.11	-1.35	-0.73	-0.81	-1.00	-1.36	0.52	-0.64
	$r_\theta = 5.5 \text{ m}$	0.05	-0.53	-0.77	-0.83	-0.79	-0.80	-0.82	-0.87	0.55	-0.74
	$r_\theta = 6.0 \text{ m}$	0.03	-0.46	-0.79	-0.91	-0.78	-0.79	-0.83	-0.90	0.55	-0.71
	$r_\theta = 6.5 \text{ m}$	0.05	-0.44	-0.68	-0.80	-0.81	-0.81	-0.81	-0.84	0.55	-0.75

Table 3 Wind pressure coefficients of even-span type greenhouses for structural design

References		R1	R2	S1	S2
MFAFF (1999)		$1.3\sin(\alpha)-0.5$	-0.5	0.8	-0.4
Kim et al. (2014b)	$\alpha = 22^\circ$	-0.33	-0.85	0.64	-0.67
	$\alpha = 24^\circ$	-0.25	-0.84	0.61	-0.68
	$\alpha = 26^\circ$	-0.23	-0.89	0.57	-0.71
	$\alpha = 28^\circ$	-0.18	-0.91	0.56	-0.72
	$\alpha = 30^\circ$	-0.13	-0.88	0.56	-0.71
	$\alpha = 32^\circ$	-0.07	-0.85	0.50	-0.73

가 비교적 일정하게 나타났다.

전반적으로 양지붕형 온실에 작용하는 풍압 계수가 복숭아형 온실에 비하여 작게 측정되었으므로, 구조물의 안전성에 대한 바람의 영향은 양지붕형 온실이 복숭아형 온실에 비해 비교적 적을 것으로 예상된다. 하지만 두 온실 형태 모두 새롭게 도출된 풍압 계수가 기존 설계서의 풍압 계수보다 크기 때문에 강화된 풍하중 조건에 대한 구조 안전성 분석이 필요하다. 특히, 기존의 온실 설계는 간척지 풍환경에서 지붕면에 강한 양력을 받게 될 것으로 예상되며, 이에 따른 설계와 보완이 필요할 것이다.

2. 단동형 온실의 구조 안전성

대상온실에 단위 풍하중 및 자중이 작용했을 때의 각 부재

에 작용하는 최대 단면력과 이를 이용하여 부재의 허용응력을 초과하지 않는 범위에서 각 온실이 견딜 수 있는 최대 안전 풍속을 산정한 결과는 Table 4와 같다. 온실의 부재에 작용하는 하중은 자중에 의한 하중에 비하여 풍하중에 의한 하중이 현저히 크게 계산되었다. 따라서 풍하중이 온실의 구조 안전성에 미치는 영향이 상당히 크다고 할 수 있다.

복숭아형 온실의 경우, 기존 설계서에 따르면 단위 풍하중에 의해 부재에 작용하는 최대 하중은 약 -340 N·M의 모멘트와 약 380 N의 축력이 작용하는 것으로 계산되며, 이에 따라 약 36 m·s⁻¹의 설계 풍속까지 허용이 된다. 반면 동일한 온실 구조에 간척지 풍환경에 대한 풍하중 분포를 적용시킬 경우, 단위 풍하중에 의해 부재에 작용하는 최대 하중은 약 -1200~1299 N·M의 모멘트와 553~1837 N 범위의 축력이 작용하여

Table 4 Maximum section force (MSF) and maximum allowable wind speed for single-span greenhouses

Greenhouse	Design variables	Load type	General wind pressure coefficients			Wind pressure coefficients in coastal reclaimed land (Kwon et al., 2016)		
			Moment (N·M)	Axial force (N)	Allowable wind speed (m·s ⁻¹)	Moment (N·M)	Axial force (N)	Allowable wind speed (m·s ⁻¹)
Peach type	$r_{\theta} = 4.0$ m	Unit wind load	-334.19	383.89	36.8	-1246.64	1837.89	19.0
		Self-weight	18.49	-71.91		18.49	-71.91	
	$r_{\theta} = 4.5$ m	Unit wind load	-337.48	382.40	36.6	-1273.57	1622.47	18.8
		Self-weight	18.70	-71.53		18.70	-71.53	
	$r_{\theta} = 5.0$ m	Unit wind load	-339.94	381.21	36.5	-1299.25	1185.69	18.7
		Self-weight	18.87	-71.27		18.87	-71.27	
	$r_{\theta} = 5.5$ m	Unit wind load	-341.85	380.25	36.4	-1191.08	645.83	19.5
		Self-weight	19.01	-71.10		19.01	-71.10	
	$r_{\theta} = 6.0$ m	Unit wind load	-343.35	379.45	36.3	-1200.07	651.98	19.5
		Self-weight	19.13	-70.97		19.13	-70.97	
	$r_{\theta} = 6.5$ m	Unit wind load	-344.60	378.77	36.3	-1200.41	553.50	19.5
		Self-weight	19.23	-70.88		19.23	-70.88	
Even-span type	$\alpha = 22^{\circ}$	Unit wind load	-3290.36	-851.50	32.0	-4287.32	1465.01	28.7
		Self-weight	107.56	-319.05		107.56	-319.05	
	$\alpha = 24^{\circ}$	Unit wind load	-3468.06	-1005.98	31.1	-4318.83	1096.20	28.7
		Self-weight	109.47	-321.50		109.47	-321.50	
	$\alpha = 26^{\circ}$	Unit wind load	-3671.32	-1149.92	30.2	-4647.57	1164.54	27.7
		Self-weight	111.35	-324.23		111.35	-324.23	
	$\alpha = 28^{\circ}$	Unit wind load	-3902.84	-1281.90	28.4	-4983.40	1042.00	26.7
		Self-weight	113.21	-327.27		113.21	-327.27	
	$\alpha = 30^{\circ}$	Unit wind load	-4165.71	-1400.30	28.4	-5124.93	815.54	26.4
		Self-weight	115.08	-330.63		115.08	-330.63	
	$\alpha = 32^{\circ}$	Unit wind load	-4638.09	-1526.79	26.9	-5199.28	553.49	26.1
		Self-weight	116.95	-334.35		116.95	-334.35	

풍하중에 의한 하중이 약 4배 정도 증가하였다. 이에 따라 최대 안전풍속은 약 $19 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 48 % 감소하였다. 복숭아형 온실은 지붕면의 곡률반경에 따라 풍압 계수의 값이 크게 달라지는데, 이에 따라 곡률반경이 커질수록 부재에 작용하는 축력이 1838 N에서 554 N으로 70 % 감소하였다. 하지만 곡률반경에 따라 부재에 작용하는 모멘트의 변화는 크지 않았으며, 부재에 작용하는 모멘트가 축력에 비해 상당히 크기 때문에 최대 안전풍속은 크게 변화가 없었다.

양지붕형 온실은 기존 설계서에 따라 -4638~-3290 N·M 범위의 모멘트와 -1527~-851 N의 축력이 작용하는 것으로 계산되며 이에 따라 $27\sim 32 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 안전풍속을 갖는다. 간척지의 강화된 풍하중 조건에서 부재에 작용하는 최대 모멘트는 -5199~-4287 N·M로 최대 20 %까지 증가하였으며, 최대 축력은 553~1465 N으로 계산되어 압축력에서 인장력으로 변화하였다. 복숭아형 온실과 같이 부재에 작용하는 모멘트가 축력에 비해 상당히 크기 때문에 최대 안전풍속은 모멘트에 의해 결정되었다. 최대 안전풍속은 지붕의 경사각이 커짐에 따라 약 $29 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 $26 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 값으로 감소하였다.

복숭아형과 양지붕형 모두 강화된 간척지에서의 풍압계수를 적용한 경우, 설계 안전풍속이 감소하여 설계 시 구조 안전성에 대한 검토가 필요할 것으로 나타났다. 단, 양지붕형 온실은 설계풍속이 약 10 % 감소하는데 반해, 복숭아형 온실의 경우 최대 안전풍속이 약 48 % 감소하였기 때문에 설계 시 적절한 보강이 필요할 것으로 보인다.

지붕의 형상에 따른 설계풍속을 비교해보면, 양지붕형의 경우 두 가지 풍압계수 모두 공통적으로 해석한 각도 범위 내에서 지붕각도가 작으면 풍하중에 대해 유리한 것으로 나타났다. 기존의 풍압계수를 적용한 경우 허용 안전 풍속은 최대 $5.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 간척지에서의 풍압계수를 적용한 경우 최대 $2.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 차이를 보였다. 하지만 지붕각도가 감소함에 따라 온실고가 낮아지므로, 작물의 재배 시스템과 환경 조절에 대한 고려가 필요할 것이다.

복숭아형의 경우, 기존 풍압계수를 적용했을 때, 지붕곡률이 클수록 즉 곡률반지름(r_0)이 작을수록 설계풍속이 크게 나타났다. 그 차이가 최대 $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 설계에 고려할 정도로 유의미한 관계는 나타나지 않았다. 이는 기존 풍압계수가 지붕 곡률에 관계없이 같은 기준을 적용하고 있기 때문인 것으로 생각할 수 있다. 반면, 간척지의 풍압계수를 적용한 경우는, $r_0=4 \text{ m}$ 에서 5 m 까지 허용 안전풍속이 작아지다가 풍압계수가 비교적 크게 변하는 $r_0=5 \text{ m}$ 에서부터는 증가하는 양상을 보인다. 그러나 최대 $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 차이로 역시 설계 시에는 유의미한 차이라고 보기 어렵다.

3. 온실 설계 보강

양지붕형의 경우는 강화된 풍하중 조건을 적용하여도 기존 시방서에서 도출된 결과와 차이가 미비하기 때문에 기존 설계서대로 시공하여도 큰 문제는 없을 것으로 보인다. 그러나 복숭아형 온실의 경우는 기존 시방서에서 제시된 설계안이 강화된 풍하중 조건에서는 구조적 안전성에 확연한 차이를 보이기 때문에, 복숭아형 온실의 설계 보강 방법을 제시하고자 한다.

우리나라의 주요 간척지의 재현 기간 별 설계 풍속은 Yun et al. (2013)에 의해 산정되었다. Yun et al. (2013)은 국내 71개 지역의 기상관측자료를 기반으로 Kriging 보간법에 의해 미관측지역의 설계 풍속을 산정하였으며, 국내 10개 간척지 지역에 대한 재현 기간 별 설계 풍속을 제시하였다. 현재 우리나라의 온실 설계서 (MFAFF, 1999)에서는 재현 기간을 22년으로 설정하였으나 Lee (2016)에 따르면 온실의 구조재 및 형태에 따라 15~60년 등 다양한 재현 기간을 고려할 필요가 있으며, 향후 적절한 재현 기간을 선정하기 위한 연구도 필요할 것이다.

복숭아형 온실을 군산 지역의 간척지에 건설한다고 가정하고, Yun et al. (2013)에 따라 $35.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 를 설계 풍속으로 정하였다. 간척지에 적합한 강화된 풍하중 분포(Kwon et al., 2016)에서 설계 풍속을 만족하기 위한 구조 보강 방법을 검토하였다. 요소는 그대로 두고, 본 연구에서는 서까래 간격과 규격만을 변화시키며, 다른 설계 요소는 기존 설계 방법과 동일하게 유지하였다. 또한 이에 따른 서까래 간격과 비용을 산정해 보았다.

곡률반경(r_0)이 5 m인 복숭아형 온실에 대해 온실 구조용 파이프(SPVHS)의 상용 규격에 따라 파이프 규격을 변화시키며 $35.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 안전풍속을 확보하는 데에 필요한 서까래 간격을 각각 산정하였다(Fig. 4). 또한 KS D 3760 규격 인증을 받은 하우스용 파이프를 판매하는 업체들의 평균 단가(2017년 06월~07월 기준)를 참고하여 소요되는 파이프의 가격을 산출하였다. 이 때, 필요한 파이프의 개수는 97 m 길이의 하우스 1동 기준으로 산정하였으며, 서까래간격은 최소단위를 5 cm로 하여 결정하였다.

Table 5의 결과를 보면, 기존의 파이프를 그대로 사용할 경우 ($\Phi 31.8 \times 1.7 \text{ t}$) 필요 서까래 간격이 15 cm이며, 이는 실제로 시공 및 사용 시에 충분한 간격을 확보하지 못하므로 파이프의 직경 및 두께를 늘리는 것이 바람직함을 알 수 있다. 작물의 형태, 비닐의 처짐 정도, 설하중 등의 설계변수를 고려하지 않은 경우 비용만을 고려하여 가장 합리적인 파이프 규격은 $\Phi 59.9 \times 2.1 \text{ t}$ 로 판단되었다. 따라서 간격을 좁히는 것 보다는 간격을 늘리고 큰 규격의 파이프를 사용하는 것이 간척지 지역에 시공하는데 경제적인 것이라 판단이 된다. 참고로, 위에 제시한 것은 직강관만의 가격으로, 관 벤딩(bending) 비용, 부자재 가격, 시공비용의 차이는 포함하지 않았다. 따라서

Table 5 Cost of reinforcing rafters of peach type greenhouse ($r_{\theta} = 5.0$ m) for structural safety in coastal reclaimed lands

Members (mm)	Rafter spacing (cm)	Cost for pipes ($\text{₩} \cdot \text{m}^{-1}$)	Length of rafter (m)	Number of pipes	Total cost (₩)
$\Phi 31.8 \times 1.7t$	15	1,453	11.84	648	11,147,881
$\Phi 42.2 \times 2.1t$	30	2,349	11.84	324	9,011,140
$\Phi 42.2 \times 2.3t$	35	2,559	11.84	278	8,423,000
$\Phi 48.1 \times 2.1t$	45	2,696	11.84	217	6,926,779
$\Phi 48.1 \times 2.3t$	50	2,946	11.84	195	6,801,725
$\Phi 59.9 \times 2.1t$	75	3,398	11.84	130	5,230,202
$\Phi 59.9 \times 2.3t$	80	3,706	11.84	122	5,353,243

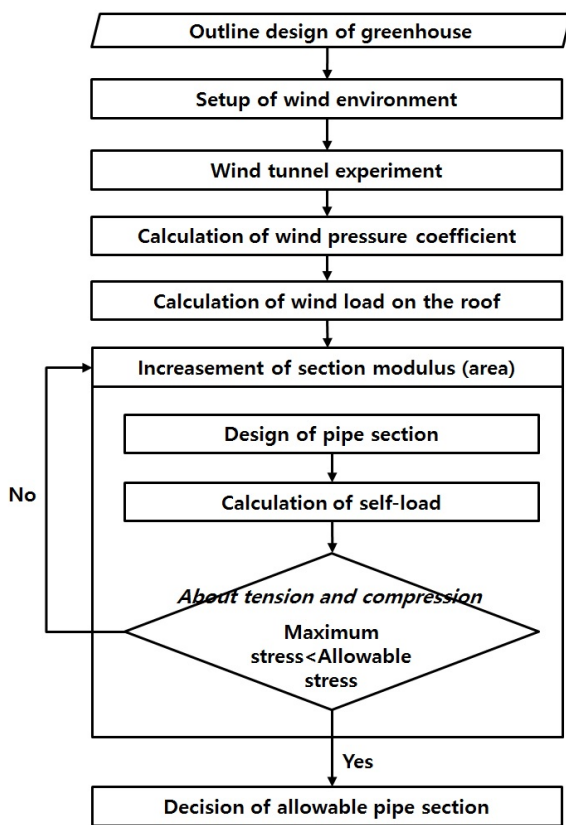


Fig. 4 A schematic overview of the decision process of allowable pipe section

이에 대한 비용과 작물에 따라 필요한 서까래 간격, 운영상 요구되는 시설의 유연성 등을 고려할 경우 보다 합리적인 보강 방법을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구는 간척지 내 온실 설계 시 풍하중에 의한 봉숭아형

과 양지봉형 단동온실의 구조 안전성을 평가하고 간척지의 풍환경에 적합한 온실 구조의 보강 방법을 제시하였다. 간척지는 일반 지역과 다른 풍속분포를 가지며, 이러한 풍환경 하에서 온실에 작용하는 풍압 계수는 기존 설계서에 제시된 값에 비하여 약 2배 정도 크며, 따라서 강한 양력을 받는 것으로 풍동실험에서 밝혀졌다. 풍동실험에서 측정된 풍압 계수를 사용하여 단동형 온실의 구조 안전성을 해석한 결과, 기존 시방서에 따라 온실을 설계할 경우 간척지 환경에서는 허용 안전풍속이 설계 시 반영된 풍속보다 낮아져 구조적 위험성을 초래할 수 있었다. 양지봉형 온실의 경우 허용 안전풍속이 설계 풍속보다 약 10% 낮아지는데 반해, 봉숭아형 온실은 약 48% 감소하여 간척지 내 건축을 위해서는 적절한 설계의 보강이 필요할 것으로 판단되었다. 특히, 봉숭아형 온실의 경우 기존 설계와 비교하여 파이프의 직경과 두께를 늘려 서까래의 간격을 늘리는 것이 경제적으로 합리적인 보강안으로 판단되었다. 향후 온실 설계 시에는 온실의 기초 조건 및 작물 재배와 온실 운영상 필요한 시설의 규격 등을 고려하여 간척지 지역에 적합한 설계가 수행되어야 할 것으로 판단되었다. 간척지 지역에 일반온실을 설치하는 경우, 별도의 기초 없이 서까래를 땅에 직접 매입하는 경우의 구조해석에서 지점조건을 어떻게 설정하여야 하는지에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다. 특히, 지점 조건의 가정에 따라 구조해석 및 구조설계의 결과에 매우 큰 영향을 줄 수 있다. 특히, 비가 온 경우는 흙이 포화되어서 구조물의 지점 조건이 한지에 가깝게 변할 수도 있다. 따라서 향후 기초 조건에 대한 면밀한 조사 및 연구를 통해 간척지 지역에 적합한 구조해석 및 구조설계가 수행되어 할 것으로 보인다.

REFERENCES

1. EN13031, 2001. *Greenhouses - Design and construction - Part 1 Commercial production greenhouses*. European Standards.

2. Kim, D. W., K. C. Ryu, and S. J. Joo, 2014a. Estimation of wind pressure coefficients on peach-type greenhouse according to roof curvature. *Journal of the Wind Engineering Institute of Korea* 18(4): 215-223 (in Korean).
3. Kim, R. W., D. W. Kim, K. C. Ryu, J. S. Kwon, and I. B. Lee, 2014b. Estimation of wind pressure coefficients on even-span greenhouse built in reclaimed land according to roof slop using wind tunnel. *Protected Horticulture and Plant Factory* 23(4): 269-280 (in Korean).
4. KRC, 1995. *Greenhouse structural requirements*. Korea Rural Community Corporation.
5. Kwon, K. S., D. W. Kim, R. W. Kim, T. H. Ha, and I. B. Lee, 2016. Evaluation of wind pressure coefficients of single-span greenhouses built on reclaimed coastal land using a large-sized wind tunnel. *Biosystems Engineering* 141: 58-81.
6. Lee, J. W., H. B. Chul, H. W. Lee, and S. W. Chung, 2014. Current status and development of greenhouse models for oriental melon cultivation in Seongju region. *Protected Horticulture and Plant Factory* 23(2): 95-108 (in Korean).
7. Lee, J. W., 2013. Analysis of safety wind speed and snow depth for single-span plastic greenhouse according to growing crops. *Current Research on Agriculture and Life Sciences* 31(4): 280-285 (in Korean).
8. Lee, S. G., H. W. Lee, and J. W. Lee, 1993. Analysis of wind force coefficients for structural design of houses. *Annual Meeting of the Korean Society for Bio-Environmental Control*, 1993: 16-17 (in Korean).
9. Lee, S. Y., 2016. Study on requirement for structural design of greenhouse in reclaimed land, 15-157. Project number PJ009492. Jeollabuk-do: National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration (in Korean).
10. MAFRA, 2014. *Standard designs and specifications for disaster resilience of horticultural facilities*. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, No. 2014-78 (in Korean).
11. MAFRA, 2016. *Greenhouse and protected vegetable production statistics 2015*. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, No. 11-1543000-000051-10. Sejong (in Korean).
12. MFAFF, 1999. *Standards for structural design of greenhouses*. Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, No. 99-Yu Tong 34 (in Korean).
13. MFAFF, 2010a. *Notification of using reclaimed land*. Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, No. 2010-47 (in Korean).
14. MFAFF, 2010b. *Specification and Drawing of Horticulture facility*. Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, No. 2010-128 (in Korean).
15. Nam, S. W., 2001. A study on the standard durable years of pipe framed greenhouses. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 43(1): 96-101 (in Korean).
16. Park, S. E., J. W. Lee, S. G. Lee, H. W. Lee, and J. H. Choi, 2010. The cause analysis of greenhouse damage for heavy snow using large displacement analysis. *Journal of the Korean Association for Spatial Structures* 10(2): 61-68 (in Korean).
17. Robertson, A. P., Ph. Roux, J. Gratraud, G. Scarascia, S. Castellano, M. Dufresne de Virel, and P. Palier, 2002. Wind pressures on permeably and impermeably-clad structures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90: 461-474.
18. Suh, W. M., M. K. Choi, Y. H. Bae, J. W. Lee, and Y. C. Yoon, 2008. Structural safety analysis of a modified 1-2W type greenhouse enhanced for culturing paprika. *Journal of Bio-Environment Control* 17(3): 197-203 (in Korean).
19. Yoon, Y. C., T. K. Kim, M. G. Choi, Y. J. Kim, J. W. Lee, and W. M. Shu, 2007. Natural disaster resistance of single-span plastic greenhouse for strawberry cultivation. *Journal of Agriculture & Life Science* 41(3): 63-68 (in Korean).
20. Yun, N. K., S. H. Yum, G. W. Kim, S. H. Lee, and Y. H. Cho, 2008. Study on wind pressure distribution and coefficient of arched type single-span greenhouse by wind tunnel test. *Annual Meeting of the Korean Society for Bio-Environmental Control* 2008: 319-322 (in Korean).
21. Yun, S. W., M. K. Choi, C. Yu, J. W. Lee, S. Y. Lee, and Y. C. Yoon, 2013. Estimation of design load for greenhouse applicable in coastal reclaimed lands. *Journal of Agriculture & Life Science* 47(3): 123-131 (in Korean).