



건축구조기준을 활용한 농가지도형 G형 비닐하우스의 풍하중 안전성 평가

Evaluation of Wind load Safety for Single G-type Greenhouse Using Korean Design Standard

이우근^a · 신경재^{b, †}

Lee, Woogeun · Shin, Kyungjae

ABSTRACT

Plastic greenhouses are simple structures consisting of lightweight materials such as steel pipes and polyvinyl chloride. However, serious damage occurs due to heavy winds and typhoon every year. To prevent a collapse of structural members, the Ministry of Agriculture and Rural Development has distributed plans and specifications for disaster-resistant standards. Despite these efforts, more than 50% of greenhouses still do not satisfy the disaster-resistant standards. Among the greenhouses that do not meet these standards, 85% are single-span greenhouses proposed 20 years ago. Consequently, there is a need to evaluate the safety of wind loads for the single-span greenhouse. Unfortunately, there are no design specifications for the greenhouses under wind loads. Therefore, a Korean design standard (KDS) has been utilized. KDS is defined with reference to wind speeds occurring once every 500 years, raising concerns about potential overdesign when considering the durability of plastic greenhouses. To address this, the modified wind load, considering the durability of the plastic greenhouse, was calculated, and a safety evaluation was conducted for single G-type plastic greenhouse. It was observed that the moment acting on the windward surface was substantial, and there was a risk of the foundation being pulled out if the basic wind speed exceeded 32 m/s. In terms of the combination strength ratio, it was less than 1.0 only on the leeward side when the basic wind speed was 24 m/s and 26 m/s. However, in all other cases, it exceeded 1.0, indicating an unsafe condition and highlighting the necessity for reinforcement.

Keywords: Wind Load; basic wind speed; structural safety; uplift capacity; combined forces

1. 서론

1. 연구 배경

2021년 기준, 우리나라 시설채소 온실 총면적은 53,239 ha이며, 이중 비닐하우스가 52,846 ha, 경질판온실 71 ha, 유리온실 322 ha를 차지하고 있다 (MAFRA, 2022). 비닐하우스는 시공이 간편하고 시공비가 저렴하여 2021년 기준 전체 온실 면적의 99% 이상을 차지하고 있지만 매년 태풍 및 강풍으로 인한 비닐하우스 피해가 발생하며, 2018년 13억 원, 2019년 97억 원, 2020년 42억 원, 2021년 1억 원 이상의 피해액이 발생하고 있다 (MOIS, 2019, 2020, 2021, 2022). 강풍 및 태풍은 비닐하우스 상부 구조의 변형, 기초부 인발로 인한 전도와 같

은 비닐하우스의 파괴를 일으키며 Fig. 1은 강풍에 의한 비닐하우스의 피해 사례를 보여준다 (Lim, 2021).

풍하중에 의한 비닐하우스의 파손을 예방하기 위해 농촌진흥청에서는 원예특작시설 내재해형 규격 설계도·시방서 (MAFRA, 2014)를 배포하여 내재해형 비닐하우스를 보급하고 있다. 하지만 2021년 기준 전체 비닐하우스의 48%만 내재해형 비닐하우스이며, 현재 폐규격인 비내재해형 (농가 지도·보급형) 비닐하우스가 전체 온실의 50% 이상 사용되고 있어 비내재형 비닐하우스의 안전성 분석이 필요한 실정이다 (MAFRA, 2022). 비닐하우스 설계는 1995년 원예시설 구조안전기준(안)을 바탕으로 1995년 3월 온실구조설계기준이 제정되고 1999년 개정 (RDA, 1999)되어 현재까지 사용되고 있고 이를 활용하여 태풍과 같은 이상기후에 대한 비닐하우스 구조 안전성에 대한 연구들이 많이 수행되었다 (Nam, 2001; Yoon et al., 2007; Lee, 2013; Hong, 2017). 하지만 일부 연구기관에서는 1994년에 작성된 기준과 1999년 기준을 혼용해 사용하며 통일된 기준이 필요해졌다 (Kim, 2015; Lee, 2016). 이에 따라 2015년 농촌진흥청에서는 온실구조설계기준(안) (RDA, 2015)을 제안하였지만 법령으로 고시되지 못한 상황이다.

^a Master Course Student, Department of Architecture Engineering, Kyungpook National University

^b Professor, Department of Architecture Engineering, Kyungpook National University

[†] Corresponding author

Tel.: ***-****-****

E-mail: shin@knu.ac.kr

Received: November 15, 2023

Revised: December 30, 2023

Accepted: January 02, 2024



Fig. 1 Greenhouse damaged by wind load (RDA, 2012)

2. 기존 연구 고찰

이전에도 비닐하우스에 풍하중이 작용할 때의 안전성 평가를 위한 연구가 진행되었다. Yoon et al (2007)은 재현기간 15년에 해당하는 설계풍속을 산정하여 딸기재배용 단동비닐하우스의 안전성을 검토하였다. 연구 결과 15년 빈도의 풍하중에 대하여 불안정한 것으로 나타나 서까래 간격을 감소시키거나 부재의 단면치수를 증가시켜야 하는 것으로 나타났다. Lee (2013)은 단동형 비닐하우스의 내구연한을 5년으로 보고 재현기간 8년의 지역별 설계풍속에 따른 비닐하우스의 안전성을 검토하였다. 연구 결과 성주, 이천 등 일부 지역을 제외한 나머지 지역에서는 모두 불안정한 것으로 나타났으며, 서까래 간격 감소 및 부재 단면치수 증가 등의 보강이 필요한 것으로 나타났다. Hong (2017)은 간척지 내 단동형 온실의 풍하중에 대한 구조 안전성 분석을 진행하였으며, 풍하중 산정 시 온실구조설계기준 및 해설 (RDA, 1999)을 준용하였다. 연구 결과 간척지에서는 일반 지역에 비하여 풍압계수가 약 2배 정도 크게 나타나 강한 양력을 받는 것으로 나타났으며, 복숭아형 온실의 경우 간척지에서의 안전풍속이 일반 지역에 비해 약 48% 감소하는 것으로 나타났다. Paik (2018)은 건축구조기준을 활용하여 산정한 풍하중에 대한 비닐하우스의 구조 안전성 검토를 진행하였다. 연구 결과 풍상면에서 가장 큰 모멘트가 발생하였으며 조합강도비가 1.0이상으로 나타나 안정성을 확보하지 못한 것으로 나타났다. Ko (2020)은 1995년 온실구조설계기준과 2017년도 온실구조설계기준(안)에 따른 제주지역 비닐하우스의 내재해성 평가를 진행하였다. 연구 결과 2017년 기준(안)을 적용하면 1995년 기준보다 횡방향하중이 40%정도 감소하였으나 연직방향 하중은 2~3배 증가하여 기초부의 보강이 필수적으로 나타났으며, 두 기준 모두 서까래의 요구성능은 만족하였으나 기둥의 요구성능은 만족하지 못하는 것으로 나타났습니다.

이처럼 풍하중에 대한 비닐하우스의 안전성 평가 연구는 지속되고 있지만 다양한 기준이 혼재되어 사용되고 있는 상

황이다. 최신 기준은 2015년 농촌진흥청에서 제안한 온실구조설계기준(안) (RDA, 2015)이지만 법령으로 고시되지 못했고, 따라서 현재 비닐하우스의 설계는 건축구조기준 (KDS, 2022)을 준용하며 구조기술사의 재량에 따라 설계되고 있다. 하지만 건축구조기준은 재현기간 500년의 10분간 평균풍속을 기본풍속으로 풍하중을 산정하고 있어 내구연한이 짧은 비닐하우스에 적용할 경우 과다설계가 이루어지는 상황이다 (Lee, 2022). 따라서, 본 연구에서는 건축구조기준의 적용에 있어 과다설계를 방지하기 위해 비닐하우스의 내구연한을 고려하여 풍하중을 산정하고, 이에 따른 비내재해형 비닐하우스의 안전성 평가를 진행하고자 한다.

3. 연구 범위

2021년 전체 비닐하우스의 50% 이상이 비내재해형 규격인 농가 보급 및 지도형 비닐하우스이며 그 중 농가지도형 비닐하우스가 90% 이상 차지하고 있다 (MAFRA, 2022). 농가지도형 비닐하우스는 A형~K형 까지 13종이 있으며, 그중 A~B-1형은 단동형, K형은 3 연동형이다 (MAFRA, 2014). 농가지도형의 서까래 간격은 대부분 80~90 cm이며, 내재해형 비닐하우스의 서까래 간격인 50~60 cm에 비해 넓은 편이다. 풍하중은 유효수압면적에 비례하기 때문에 비닐하우스의 서

Table 1 Standard of G type greenhouse (MAFRA, 2014)

Division	G-type
Total length (m)	97
Width (m)	8
Eave height (m)	1.6
Roof height (m)	3.2
Rafter section (mm)	∅31.8×1.5t
Rafter interval (m)	0.9
Purlin section (mm)	∅25.4×1.5t
Number of Purlin	5

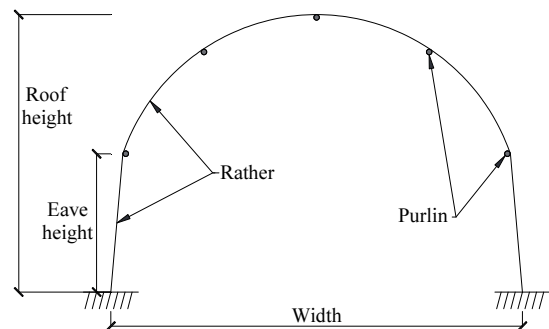


Fig. 2 Cross-sectional view of plastic greenhouse

Table 2 Material properties of greenhouse pipes (MAFRA, 2014)

Material properties	Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Modulus of elasticity (N/mm ²)	Weighth density (N/m ³)
SPVH	over 205	over 270	over 20	205,000	7,698 × 10 ⁻⁵
SPVHS	over 295	over 400	over 18		

까래 간격이 넓고, 지붕의 폭이 넓을수록 풍하중에 취약해진다. 따라서 본 연구에서는 단동형 농가지도형 중 지붕의 폭이 넓으면서 서까래 간격이 좁지 않은 G형을 모델로 선정하였다. Table 1은 농가지도형 G형의 규격을 보여준다 (MAFRA, 2014). MAFRA (2014)에 따르면 비닐하우스에 사용되는 파이프는 SPVH와 SPVHS가 있으며, 내재해형은 SPVHS를 필수적으로 사용하여야 한다. 농가지도형 G형의 경우 비내재해형 규격이므로 SPVH를 사용하였으며 Table 2는 SPVH와 SPVHS의 물성치를 보여준다.

II. 풍하중 산정

1. 풍하중 기준 비교

비닐하우스 설치 시 내재해형으로 간주되기 위해서는 원예

특작시설 내재해형 규격 설계도 · 시방서 (MAFRA, 2014)의 풍하중 및 적설하중 기준의 만족함을 보장하여야 한다. 하지만 풍하중 및 적설하중의 기본풍속과 기본적설심에 대한 기준을 제시할 뿐 이를 비닐하우스에 적용하기 위한 산정기준은 미흡한 실정이다. 현재 국내에서 비닐하우스 설계 시 사용되는 풍하중 산정기준은 원예특작시설 내재해형 규격 설계도 · 시방서의 풍하중 및 적설기준에 따라 농촌진흥청에서 제안한 온실구조설계기준(안) (RDA, 2015)과 국토교통부에서 고시한 건축물을 위한 건축구조기준 (KDS 41 12 00) (KDS, 2022)이다. 하지만 온실구조설계기준(안)은 제도적으로 고시되지 못하고 법적 구속력이 없는 상태로 활용됨에 따라, 건축구조기준을 적용하여 비닐하우스 설계에 적합한 풍하중 산정을 수행하고자 한다. 비닐하우스 설계 시 사용되는 국내 기준별 설계 풍하중을 비교한 것은 Table 3과 같으며, Fig. 3은 국내 기준별 지붕의 외압계수 산정방식을 보여준다.

Table 3 Wind load design in accordance with domestic standards

Division	Greenhouse structural design standard (draft) (RDA, 2015)	Korean design standard (KDS, 2022)
Basic wind speed(V_0) (m/s)	30 year recurrence, 3 second mean wind speed	500 year recurrence, 10 minute mean wind speed
Design wind speed(V_H) (m/s)	$V_H = V_0 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^a \cdot K_{zt}$ V_0 : Basic wind speed h : Reference height h_0 : 10 m a : Mean wind speed profile factor(0.25) K_{zt} : Topography factor	$V_H = V_0 \cdot K_D \cdot K_{zr} \cdot K_{zt} \cdot I_W(T)$ V_0 : Basic wind speed K_D : Wind directional coefficient K_{zr} : Mean wind speed profile factor K_{zt} : Topography factor $I_W(T)$: Importance factor
Design velocity pressure (q_H) (N/m ²)	$q_H = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \rho \cdot V_H^2$ ρ : Air density (1.225 kg/m ³)	$q_H = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \rho \cdot V_H^2$ (2)
Gust effect factor (G_f, G_D, G_{pe})	$G_f = 1$	$G_D = 1 + 4 \cdot \gamma_D \cdot \sqrt{B_D}$ $G_{pe} = 1 + 4 \cdot \gamma_{pe} \cdot \sqrt{B_{pe}}$ γ_D, γ_{pe} : Turbulence factor for fluctuating wind speed B_D, B_{pe} : Background response factor
Internal pressure coefficient (C_π)	-0.2	0 or -0.2
Design wind pressure(P) (N/m ²)	$P = q_H \cdot G_f \cdot (C_{pe} - C_\pi)$ C_{pe} : External pressure coefficient	$P_D = G_D \cdot q_H \cdot (C_{pe} - C_\pi)$ $P_R = G_{pe} \cdot q_H \cdot (C_{pe} - C_\pi)$ C_{pe} : External pressure coefficient

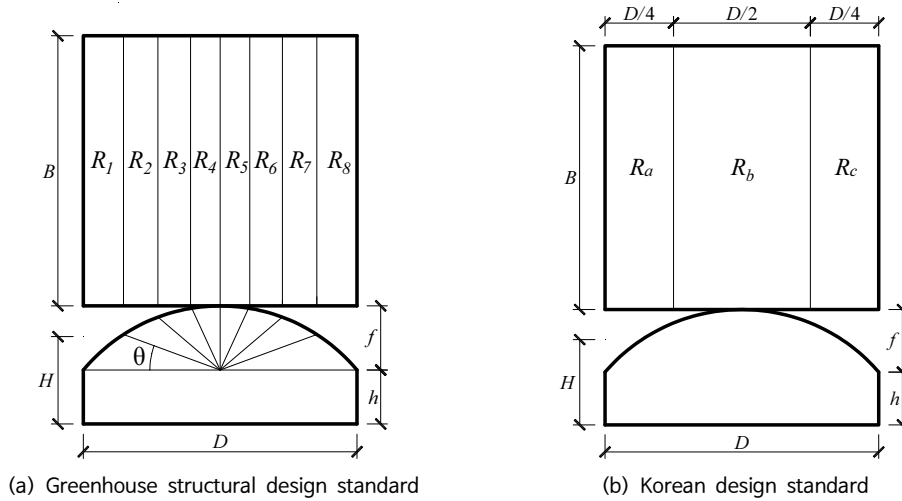


Fig. 3 Roof external pressure coefficient(C_{pe}) by design standards (RDA, 2015; KDS, 2022)

원예특작시설 내재해형 규격 설계도·시방서 (MAFRA, 2014)의 기본풍속을 따르는 온실구조설계기준(안) (RDA, 2015)에서는 재현기간 30년의 3초간 평균풍속을 기본풍속으로 설정하여 설계풍속을 산정하고 이에 따라 가스트 영향계수는 1.0으로 고정하여 풍하중을 산정하며, 아치 지붕의 외압계수 (C_{pe})는 지붕의 중심으로부터의 경사에 따라 8구역으로 구분하여 지붕 곡률반경에 따라 제시하고 있다. 건축구조기준 (KDS 41 12 00)의 경우 재현기간 500년의 10분간 평균풍속을 기본풍속으로 설계풍속을 산정하고, 가스트 영향계수는 풍속변동계수와 비공진계수를 통해 산정하며 벽체와 지붕의 가스트 영향계수가 상이하다. 건축구조기준에서의 아치지붕 외압계수는 건축물의 폭에 따라 3구역으로 구분하고, 아치높이 (f)와 지표면에서 아치 지붕 처마까지의 높이 (h)를 고려하여 제시하고 있다.

2. 기본풍속 산정

온실구조설계기준(안) (RDA, 2015)과 건축구조기준 (KDS 41 12 00) (KDS, 2022)의 가장 큰 차이점은 풍속의 재현기간과 측정시간이다. 비닐하우스 및 온실 구조물은 일반 건축물과는 달리 내구연한을 30년 내외로 정하며, 순간적인 돌풍의 영향을 고려한 풍하중 산정이 필요하다. 따라서 온실구조설계기준(안)의 재현기간 30년과 3초간 평균풍속을 기반으로 활용하되 건축구조기준의 재현기간 500년과 10분간 평균풍속으로 변환하여 풍하중 산정을 수행한다. 식 (7)은 재현기간 변환식을 나타낸다 (ASCE, 2010).

$$V_T / V_{50} = [0.36 + 0.11 \ln(12T)] \quad (7)$$

여기서, V_T = 재현기간 T에 따른 풍속

V_{50} = 재현기간 50년에 따른 풍속

T = 재현기간

V_T / V_{50} 의 경우 재현기간 50년을 재현기간 T년으로 바꾸는 변환값을 나타낸다. 따라서 재현기간 30년 기본풍속을 건축구조기준에 적용가능한 재현기간 500년 기본풍속으로 변환하기 위해 $(V_{500} / V_{50}) / (V_{30} / V_{50})$ 을 적용하여 재현기간 30년을 500년으로 바꾸는 변환값을 산정하였다.

Fig. 4는 평균화 시간 1시간을 기준으로 할 때 풍속의 평가 시간에 따른 변화 양상을 나타낸 것이며, 그림에서 종축은 1시간을 평가 시간으로 하는 가스트계수를 나타낸 것과 같다 (ASCE, 2010). 가스트계수는 평균화 시간에 다른 풍속으로 변환할 때 사용하는 계수이다. 식 (7)에서 50년을 기준으로 500년 재현기간의 변환값 (V_{500} / V_{50})은 1.23과 50년을 기준으로 30년 재현기간의 변환값 (V_{30} / V_{50})은 0.95로 두 변환값을 조합하면 30년을 기준으로 500년 재현기간 변환값은 1.29(1.23/0.95)이다. Fig. 4에 따르면 평균화 시간이 3초일 때 1시간 기준의 가스트계수는 1.514이고, 평균화 시간이 10분일 때 1시간 기준의 가스트계수는 1.067이다. 이를 고려하여 평균화 시간이 3초에서 10분으로 변환은 0.70(1.067/1.514)이다. Table 4는 재현기간과 가스트계수를 적용하여 기본풍속 변환값을 산정한 표이다.

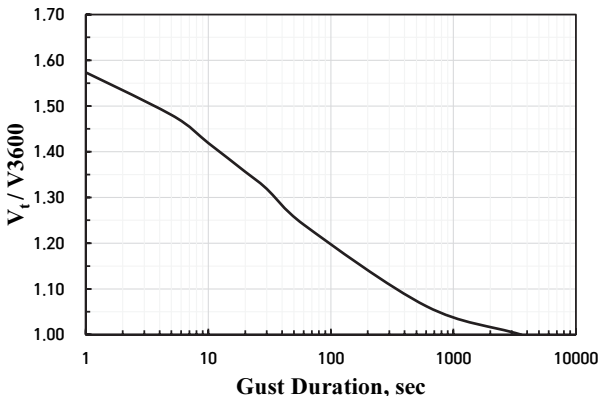


Fig. 4 Maximum speed averaged over t (s) to hourly mean speed (ASCE, 2010)

Table 4 Basic wind speed in accordance with design standards

	RDA, 2015	Converted value	KDS, 2022
Reproduction period	30 years	1.29	500 years
Wind speed averaged	For 3 seconds	0.70	For 10 minutes
Basic wind speed	24~40 m/s	0.90	21.6~36.0 m/s

3. 풍하중 산정

농가지도형 G형에 작용하는 풍하중은 건축구조기준 (KDS 41 12 00) (KDS, 2022)에 따라 산정하였다. 원예특작시설 내 재해형 규격 설계도 (RDA, 2014)에 따르면 국내 지역별 설계 기준 풍속은 여주시, 이천시, 봉화군과 같은 일부 내륙지방에서 24 m/s로 가장 작고 대관령, 여주시, 제주도과 같은 고산지대와 해안지역에서는 40 m/s로 가장 큰 것으로 나타났다. 따라서 풍속 24~40 m/s를 기본풍속으로 설정하였고, 식 (1)를 사용하여 설계풍속을 산정하였다. 설계풍속 산정 시 풍향계수 (K_D)는 1.0을 적용하였고, 풍속고도분포계수 (K_{zt})는 지표면조도구분 C를 적용하여 1.0으로 설정하였다. 지형계수 (K_{zt})는 건축물이 위치한 지역의 형태에 따라 달라지는 값으로서, 대부분의 비닐하우스가 평지에 있는 것을 고려하여 평탄한 지역의 지형계수 1.0을 적용하였고, 중요도계수 ($I_w(T)$)는 건축구조기준 (KDS 41 10 05) (KDS, 2022)을 따라 농업시설물의 중요도계수인 0.9를 적용하였다. Table 5는 30년 재현기간, 평균화 시간 3초 기본풍속에서 500년 재현기간, 평균화 시간 10분의 변환된 기본풍속과 중요도계수 0.9를 적용한 설계풍속을 보여준다.

식 (2)를 사용하여 속도압 (q_H)을 산정하고 식 (3), (4)를 사용하여 벽체와 지붕의 가스트 영향계수 (G_D , G_{pe})를 산정

Table 5 Design wind speed derived from basic wind speed

Basic wind speed (30 year, 3 seconds) (m/s)	Converted basic wind speed (500 year, 10 minutes) (m/s)	Design wind speed (m/s)
24	21.6	19.4
26	23.4	21.1
28	25.2	22.7
30	27.0	24.3
32	28.8	25.9
34	30.6	27.5
36	32.4	29.2
38	34.2	30.8
40	36.0	32.4

Table 6 External pressure coefficient for exterior walls (KDS, 2022)

	D/B	C_{pe}
Windward wall	≤ 1	$0.8k_z$
	> 1	$0.8k_z + 0.05$
Leeward wall	≤ 1	-0.5
	> 1	-0.35

※ $k_z = 1.0$ ($H \leq 10m$)

하였다. 벽체부 외압계수 (C_{pe})의 경우 Table 6을 참고하여 산정하였고, 지붕부 외압계수 (C_{pe})의 경우 Fig. 2(b)의 형상을 고려한 Table 7을 참고하여 산정하였다. 내압계수 (C_{pi})는 구조물의 밀폐 정도에 따라 달라진다. 건축구조기준 (KDS, 2022)에 따르면 모든 표면이 밀폐된 건축구조물의 경우 0.0 또는 -0.2의 내압계수를 적용하라고 명시되어 있다. 비닐하우스의 경우 모든 부분이 피복재 (비닐)로 감싸져있는 구조이지만 100% 밀폐형 건축물로 볼 수 없기 때문에 -0.2 값을 적용하였다. Table 8은 식 (3), (4)와 건축구조기준에서 풍하중 산정 시 필요한 계수값을 정리한 표이며, Table 9는 식 (5), (6)을 활용하여 농가지도형 G형에 작용하는 설계 풍압을 기본풍속에 따라 정리한 표이다.

4. 하중 조합

비닐하우스 설계는 건축구조기준 강구조설계 (허용응력설계법) (KDS 14 30 10) (KDS, 2019)을 준용하고 있다. 허용응력설계법에서 사용되는 풍하중 계수는 단기하중으로 인한 부재의 하중지지능력을 확대 적용한 것으로 허용응력의 1.5배를 적용하는 것이 일반적이며, 이를 풍하중 계수로 적용하면 0.65로서 재현기간 50년을 고려하여 설정된 것이다. 하지만

Table 7 External pressure coefficient for arched roofs (KDS, 2022)

f/B	Zone R _a			Zone R _b			Zone R _c		
	h/D =0	h/D =0.3	h/D =0.7	h/D =0	h/D =0.3	h/D =0.7	h/D =0	h/D =0.3	h/D =0.7
0.1	-0.5	-1.2	-1.5	-0.9	-1.0	-1.0	-0.5	-0.5	-0.5
0.3	-0.1	-0.4	-0.9	-1.2	-1.4	-1.5	-0.5	-0.5	-0.5

Table 8 Coefficient value required to calculate wind load

Gust effect factor of wall (G_D)		2.45		
Gust effect factor of roof (G_{pe})		1.53		
External pressure coefficient (C_{pe})	Wall part	Windward Wall		Leeward Wall
		0.8		-0.5
	Roof part	Zone Ra	Zone Rb	Zone Rc
Internal pressure coefficient (C_a)		-0.2		
		-0.52	-1.21	-0.5

Table 9 Design wind pressure by basic wind speed (N/m²)

Wind speed (m/s)	Wall		Roof		
	Windward	Leeward	R _a	R _b	R _c
24	+562.26	-168.68	-112.56	-353.05	-105.34
26	+659.87	-197.96	-132.10	-414.34	-123.63
28	+765.30	-229.59	-153.20	-480.54	-143.38
30	+878.53	-263.56	-175.87	-551.64	-164.60
32	+999.57	-299.87	-200.10	-627.64	-187.28
34	+1128.42	-338.53	-225.89	-708.55	-211.42
36	+1265.08	-379.52	-253.25	-794.36	-237.02
38	+1409.55	-422.87	-282.17	-885.08	-264.09
40	+1561.83	-468.55	-312.66	-980.69	-292.62

※ + sign indicates positive pressure, and - sign indicates negative pressure

단동형 비닐하우스의 내구연한은 8년~15년이며, 우리나라는 비닐하우스의 내구연한을 15년으로 제한하였다 (Jung et al., 2014). 따라서 재현기간 50년 기준으로 풍하중 설계를 하게 되면 과다설계가 이루어진다. 식 (8), (9)는 풍하중계수 산정식을 보여준다 (Ha, 2023).

$$I_W(T_{SD}) = 0.465 + 0.086 \ln(T_{SD}) \quad (8)$$

$$\gamma_W = I_W^2 \quad (9)$$

여기서, I_W = 중요도계수
 T_{SD} = 재현기간
 γ_W = 풍하중 계수

이번 해석에서는 단동형 비닐하우스의 내구연한을 15년으

로 설정하고, 재현기간 또한 15년으로 설정하여 풍하중 계수를 산정하였고, 식 (10)의 하중 조합에 따라 해석을 진행하였다.

$$D + 0.48 W \quad (10)$$

여기서, D = 자중
 W = 풍하중

III. 전산 해석 및 결과 분석

1. 비닐하우스 모델링

본 연구에서는 상용 전산해석프로그램인 MIDAS-GEN(v.940 R3, MIDAS Information Technology Co., Ltd., Seongnam-si,

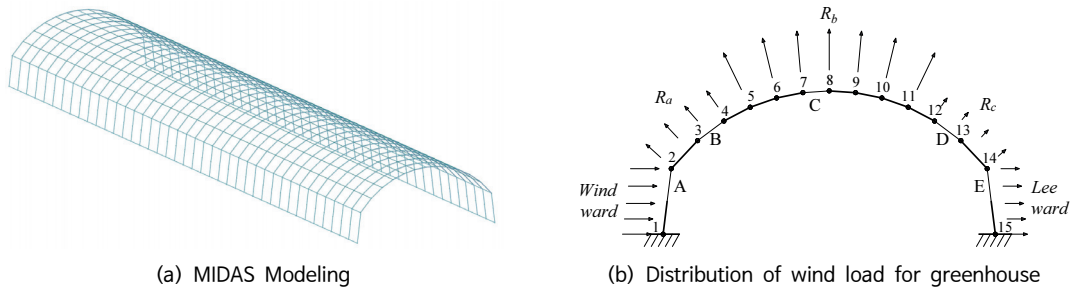


Fig. 5 Modeling of G-Type Greenhouse

Gyeonggi-do, Korea)을 사용하여 농가지도형 G형 비닐하우스의 구조안전성을 분석하였다. 원예특작시설 내재해형 규격설계도·시방서 (RDA, 2014)에서 농가지도형 G형의 길이는 97 m이다. Paik (2019)의 경우 서까래 1개로 2D 모델링하여 풍하중에 대한 안전성 분석을 진행하였고, Jo et al. (2010)의 경우 길이 8 m의 3D모델링을 통해 비닐하우스 구조해석을 진행하였다. 이와 같이 비닐하우스의 길이는 자유로이 적용 가능하며, 본 연구의 경우에는 36 m로 서까래 40개를 모델링 하였다. 농가지도형 비닐하우스 기초부는 대부분 파이프 단독기초와 파이프 줄기초로 이루어져 있다. Choi et al. (2014)에 따르면 조사한 단동형 비닐하우스의 58%가 파이프 단독기초로 이루어져 있고, 기초의 매립 깊이는 30 cm 이상 매립된 경우가 약 90%로 나타났으며, 그중 50~59 cm의 경우가 34% 가장 많은 것으로 나타났다. 따라서 비닐하우스 기초부를 파이프 단독기초로 설정하였다. 파이프 단독기초의 경우 고정단과 힌지로 설정할 수 있는데 Kim and Nam (1995)에 따르면 단동형 비닐하우스 풍하중 설계 시 기초부를 힌지로 설정하는 것 보다 고정단으로 설정하는 것이 실험값과 더 유사했으며, Lee et al. (2008) 역시 기초부를 힌지로 설정할 경우 과다설계가 우려되며 고정단 또는 지하고정단을 통해 해석을 하는 방안을 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 농가지도형 비닐하우스의 기초부를 고정단으로 설정하여 전산해석을 진행하였다. Fig. 5는 농가지도형 G형 모델링을 보여준다. 바람은 비닐하우스 측면면에 수직인 방향으로 부는 것으로 가정하여 Fig. 5(b)와 같이 풍상면 (Windward)는 정압, 지붕부 (R_b , R_c)와 풍하면 (Leeward)은 부압이 작용하는 것으로 모델링 하였다. 풍하중의 방향은 건축구조기준의 외압계수 (Fig. 3과 Table 7)에 따라 제시되어진 값으로 바람의 진행방향에 따라 바람이 작용하는 풍상면에서는 측벽을 밀어냄과 함께 지붕으로 바람이 이동하면서 양력 (Lift)의 발생으로 인해 전체적으로 비닐하우스 서까래를 상향으로 올리는 하중이 발생한다. 또한, 바람이 지상으로 이동하면서 풍하면에서 측벽을 당김에 따라 한 방향으로 쓸림이 가중된다.

2. 구조안전성 분석

본 연구에서는 비닐하우스 서까래를 14개의 요소로 구분하여 Fig. 5(b)와 같이 절점을 부여하여 구조해석을 진행하였다. Fig. 6은 기본풍속에 따른 각 절점에 작용하는 모멘트 분포를 나타낸 그림이다. 기본풍속이 증가할수록 모멘트가 증가하며, 풍상면 (Windward)에서 가장 크게 발생함을 알 수 있다.

Fig. 7은 농가지도형 G형 기초부의 인발력을 보여준다. Choi et al. (2015)에 따르면 매입 깊이 30 cm 일 때 파이프 단독기초의 인발저항력은 378 N으로 나타났으며, 매입 깊이 50 cm 일 때 인발저항력은 594 N으로 나타났다. 기초의 매입 깊이가 30 cm 일 경우 기본풍속 24 m/s일때를 제외하면 모두 불안정한 것으로 나타났고, 매입 깊이가 50 cm일 경우 기본풍속 34 m/s 이상의 경우에는 불안정한 것으로 나타나 기초부의 뽑힘이 우려된다.

건축구조기준 강구조설계 (KDS 14 30 10) (KDS, 2019)에 따르면 축인장과 휨을 함께 받는 부재의 경우, 조합강도비는 축인장응력과 휨인장응력을 고려하여 식 (11) 통해 산정할 수 있고, 조합강도비가 1.0 이상으로 나타날 경우 불안정한 구조물로 볼 수 있다.

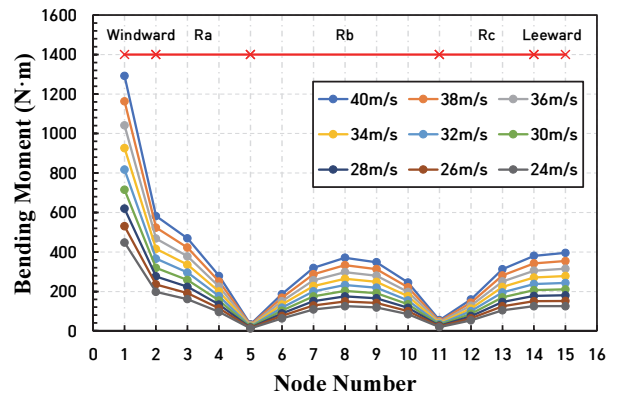


Fig. 6 Moment Distribution of G-Type Greenhouse

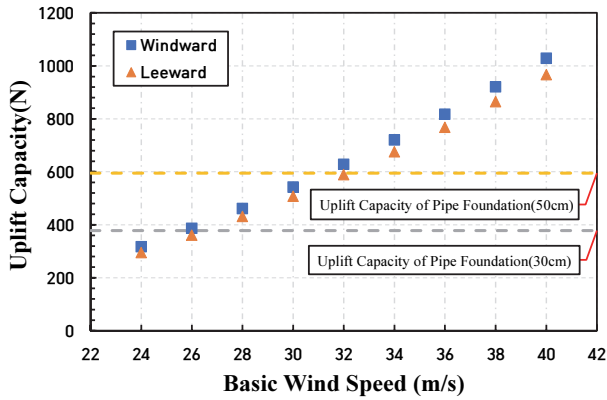


Fig. 7 Uplift Capacity Distribution

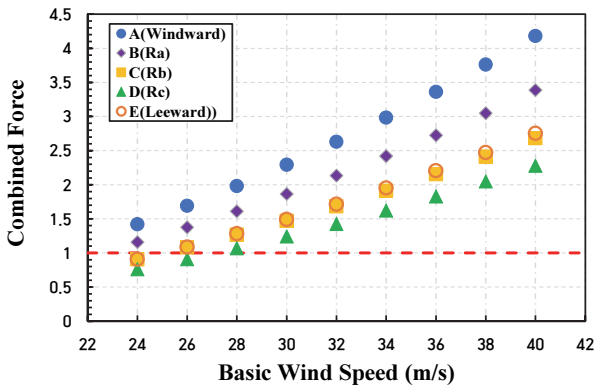


Fig. 8 Combined Force Distribution

$$\frac{f_t}{F_t} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (11)$$

여기서, f_t : 축인장응력 (MPa)
 f_b : 휨인장응력 (MPa)
 F_t : 허용축인장응력 (MPa)
 F_b : 허용휨인장응력 (MPa)

Fig. 8은 기본풍속에 따른 조합강도비를 보여주며 허용응력 산정시 안전율은 1.5로 설정하였고, 조합강도비를 검토한 부재는 풍하중이 작용하는 구역별 1개의 부재씩 선정했으며 Fig. 5(b)에 나타나있다. 기본풍속이 24 m/s일 경우 지붕부의 Rb, Rc 구역과 풍하면 구역만 1.0 이하의 값을 보여 안전한 것으로 나타났고 기본풍속 26 m/s일 경우 풍하면 구역만 1.0 이하의 값을 보이는 것으로 나타났다. 기본풍속 28 m/s 이상의 경우 모든 구역의 조합강도비가 1.0 이상의 값을 보여 구조적으로 불안정한 것으로 나타나므로 기존 비닐하우스의 보강이 필수적으로 이루어져야한다고 판단된다.

IV. 결론

비닐하우스를 포함한 원예시설은 내재해형 기준 (기본풍속 30년 재현주기, 3초간 평균 풍속)에 따라 설치하여 최근 기상 이후로 인한 피해 예방 및 복구 지원을 받을 수 있다. 본 연구에서는 농가지도형 비닐하우스에 풍하중이 작용할 경우 건축구조기준을 준용하여 풍하중을 산정하고 이에 따른 비닐하우스의 구조적 안전성을 평가하였다. 연구 대상은 파이프 단독기초를 가지며, 서까래 간격과 지붕의 폭이 넓어 가장 취약할 것으로 예상되는 농가지도형 G형으로 선정하였다. 본 연구를 통해 요약한 결과는 다음과 같다.

1. 비닐하우스를 대상으로 건축구조기준을 활용하여 풍하중을 산정할 경우 0.9의 저감 계수를 적용하여 비닐하우스의 기본풍속을 결정할 수 있다. 또한, 비닐하우스의 내구 연한을 고려하여 허용응력설계법 하중 조합의 풍하중 계수 0.48를 적용함에 따라 비닐하우스 설계에서 건축구조기준의 현실적인 적용 방안을 제시하였다.
2. 비닐하우스에 풍하중이 작용할 때 풍상면에서 가장 큰 모멘트가 발생하며 Ra, Rb, 풍하면, Rc 순으로 모멘트가 크게 작용하는 것으로 나타났다. 설계응력과 소요응력의 비인 조합강도비의 경우 기본풍속이 24 m/s와 26 m/s 일 때 Rc와 일부 풍하면에서 1.0 이하의 값이 나와 안전한 것으로 나타나지만 그 외 나머지 경우에서 1.0 이상의 값이 나와 구조적으로 불안정하므로 설치된 비닐하우스의 경우 상부보강이 필수적이다.
3. 파이프 단독기초는 농가지도형 비닐하우스의 대표적인 기초부 형태이며, 파이프 단독기초의 매립깊이가 30 cm 일 경우 기본풍속 24 m/s 일 때만 안전한 것으로 나타나며, 매립 깊이가 50 cm일 경우 기본풍속 34 m/s 이상의 경우에서 기초의 뽑힘이 우려되므로 기초부 보강이 필수적이다.
4. 단독형 비닐하우스의 안전성 측면에서 서까래의 휨강도 보강과 지지부의 뽑힘에 대한 고려가 동시에 이루어져야 한다. 현재 단독형 G형 비닐하우스의 경우 내재해형 규격에 적합하지 않으며, 강풍에 대비한 추가 보강을 위한 연구가 필요하다.

현재 비닐하우스 설계는 하중산정에 있어서 법령으로 고시된 건축구조기준을 준용하여 구조기술사의 판단으로 이루어지고 있다. 하지만 건축구조기준의 경우 비닐하우스의 내구 연한을 고려하지 않은 기본풍속과 하중계수를 사용하고 있어서 비닐하우스 설계에 그대로 사용하기 어려운 실정이다. 따라서 본 논문에서 제시하는 저감계수, 하중계수를 적용하여 구조설계할 수 있지만, 건축구조기준에서 가스트계수의 설정,

지붕측에 간략화된 외압의 분포 및 밀폐된 내압계수 적용 등 비닐하우스 설계에 적합하지 않은 사항이 존재함에 따라 비닐하우스의 특성을 고려한 설계 기준 마련이 필요하다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청에서 시행한 공동연구사업과제 (번호: RS-2021-RD009628)에 의해 수행되었음.

REFERENCES

- ASCE(American Society of Civil Engineers), 2010. *Minimum Design Load for Buildings and Other Structures*.
- Cho, J. U., E. J. Lee, and J. S. Nam, 2010. Development by Structural Analysis of Vinyl House at Heavy Snow. *Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society* 11(8): 2727-2733. (in Korean).
- Choi, M. K., S. W. Yun, H. N. Kim, S. Y. Lee, C. Yu, and Y. C. Yoon, 2015. Uplift capacity of pipe foundation for single-span greenhouse. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 24(2): 69-78. (in Korean).
- Choi, M. K., S. W. Yun, H. T. Kim, S. T. Lee, and Y. C. Yoon, 2014. Current status on the greenhouse foundation. *Journal of Agriculture & Life Science* 48(3): 251-260. (in Korean).
- Lee, J. W., 2022. Greenhouse design and disaster preparedness. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers* 64(1): 43-53.
- Ha, Y. C., 2023. A practical guides to the use of wind load provisions. Seoul: Goo Mi.
- Hong, S. W., R. W. Kim, and W. Choi, 2017. Structural safety of single-span greenhouses under wind load of costal reclaimed lands. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 59(4): 109-117. (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2017.59.4.109.
- Kim, M. K., and S. W. Nam, 1995. Experimental studies on the structural safety of pipe-house. *Journal of Bio-Environment Control* 4(1): 17-24. (in Korean).
- Paik, S. W., 2019. A study on the structural safety analysis for vinly house at wind load. *Journal of the Korean Society of Safety* 34(5): 72-77. (in Korean). doi:10.14346/JKOSOS.2019.34.5.72.
- Jung, S. H., H. W. Lee, J. W. Lee, W. H. Na, and S. Y. Lee, 2014. Comparison of recurrence interval and wind pressure calculation standards for wind load calculation in some nations. *Proceedings of the Korean Society of Agricultural Engineers Conference*, 139. (in Korean).
- KDS (Korean Design Standard), 2019. Steel structure standard design(Allowable stress design) (KDS 14 30 10: 2019). <https://www.kcsc.re.kr/>
- KDS (Korean Design Standard), 2022. General provisions (KDS 41 10 05 : 2022). <https://www.kcsc.re.kr/>
- KDS (Korean Design Standard), 2022. Design load (KDS 41 12 00 : 2022). <https://www.kcsc.re.kr/>
- Kim, Y. M., Accelerating the Establishment of Korean Greenhouse Design Standards... Urgent Need for the Formation of a Verification Committee. <https://www.agrinet.co.kr/news/articleView.html?idxno=141172>. Accessed 5 Nov. 2015.
- Ko, D. W., 2020. Performance evaluation of disaster resistance of plastic greenhouse in Jeju region according to 2017 design code draft. *Journal of Korean Institute of Rural Architecture* 22(1): 13-20. (in Korean). doi:10.14577/kirua.2020.22.1.13.
- 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).
- Lee, S. G., Lee, J. W., Kwak, C. S., and Lee, H. W., 2008. Experimental study on the ground support conditions of pipe ends in single span pipe greenhouse. *Journal of Bio-Environment Control*, 17(3): 188-196. (in Korean). doi:10.17660/ActaHortic.2011.893.20.
- Lim, S. Y., and J. W. Eu, 2021. Analysis of structure vulnerability farm supply and single type greenhouses, *Proceedings of the Korean Society of Agricultural Engineers Conference*, 165. (in Korean).
- Lee, S. Y., We need to establish Korean greenhouse design standards. <https://www.agrinet.co.kr/news/articleView.html?idxno=146008>. Accessed 20 Jun. 2016
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs), 2014. *Design and Specifications of Standardized Anti-disaster Prototypes for Greenhouses*. retrieved from <https://www.nongsaro.go.kr/portal/contentsFileView.do?ep=MRK/ignq2cyAsQnwotwvUaF1juab8B2M@r/xMBcjs5BtyvGH/qhCuqmdMsUch4d/>
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs),

2022. Facility Vegetable Greenhouse Status and Vegetable Production Output Report: 105-111. retrieved from <https://www.mafra.go.kr/bbs/mafra/131/401130/artclView.do>
22. MOIS (Ministry of the Interior and Safety), 2019. 2018 Disaster Yearbook: 179-180, Korea. retrieved from https://www.mois.go.kr/frt/bbs/type001/commonSelectBoardArticle.do?bbsId=BBSMSTR_00000000014&nttlId=73590
 23. MOIS (Ministry of the Interior and Safety), 2020. 2019 Disaster Yearbook: 159-160, Korea. retrieved from https://www.mois.go.kr/frt/bbs/type001/commonSelectBoardArticle.do?bbsId=BBSMSTR_00000000014&nttlId=81886
 24. MOIS (Ministry of the Interior and Safety), 2021. 2020 Disaster Yearbook: 191, Korea. retrieved from https://www.mois.go.kr/frt/bbs/type001/commonSelectBoardArticle.do?bbsId=BBSMSTR_00000000014&nttlId=89542
 25. MOIS (Ministry of the Interior and Safety), 2022. 2021 Disaster Yearbook: 176-178, Korea. retrieved from https://www.mois.go.kr/frt/bbs/type001/commonSelectBoardArticle.do?bbsId=BBSMSTR_00000000014&nttlId=97685
 26. 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).
 27. RDA (Rural Development Administration), 1995. Greenhouse Structure Requirements
 28. RDA (Rural Development Administration), 1999. *Greenhouse Structure Design Standards and Explanations*
 29. RDA (Rural Development Administration), 2015. *Greenhouse Structure Design Standards (draft)*
 30. 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).