

# 인장 타이 보강한 광폭형 비닐하우스의 적설하중에 대한 거동

이수현<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>부교수, 경북대학교, 스마트플랜트공학과

## Behavior of Wide-Span Greenhouse Strengthened with Tension-Tie under Snow Load

Lee, Swoo-Heon<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Associate Professor, Dept. of Smart Plant Engineering, Kyungpook National University, Sangju, 37224, Korea

**Abstract** – This study aims to evaluate the resistance of wide-span greenhouse structures, characterized by large pipe diameter and relatively long span, against snow loads. Based on previous experimental studies that proposed strengthening methods and conducted loading tests, structural analysis was performed using the stiffness method to predict the progressive collapse load and verify its reliability. It was found that structural analysis needs to consider the residual strain that occurs during the curvature forming of the greenhouse frame. In addition, the structural safety of wide-span greenhouses was assessed in accordance with the disaster-resistance design criteria suggested by the government. The greenhouse specifications established about a decade ago may be adequate for regions with low snowfall or light snow conditions; however, in areas that have recently experienced frequent heavy and wet snow, a risk of structural collapse is anticipated. In contrast, recently developed greenhouse systems with column supports have demonstrated significantly improved resistance to snow loads.

**Keywords** – Greenhouse, Strengthening, Tension-tie, Snow load, Stiffness matrix method, Disaster-resistance standard

### 1. 서론

#### 1.1 연구 배경 및 목적

최근 이상 기후의 영향<sup>[1]</sup>으로 대한민국에서는 강풍, 대설 및 습설이 예보되는 빈도가 점차 증가하고 있다. 이에 기상청은 폭설로 인한 시설물 피해를 예방하기 위해 눈의 무게(무거운 눈, 보통 눈, 가벼운 눈)를 고려한 상세 강설정보를 제공하고 있다<sup>[2]</sup>. 2025년 말-2026년 초의 겨울에는 건조한 날씨가 지속되었으나, 2026년 3월에는 일부 지역에서 적설심 500 mm를 초과하는 대설이 발생하기도 하였다. 이처럼 강설량의 증가뿐만 아니라, 최근에는 단위 중량이 큰 ‘무거운 눈’ 형태의 폭

설이 빈번하게 나타나고 있다.

‘무거운 눈’ 즉, 습설(濕雪)은 물기를 많이 머금은 눈으로, 눈 결정에 수증기가 엉겨붙어 똥똥해진 형태이다. 그래서 건설(乾雪)보다 습설이 2-3배 무겁고, 건설은 빗자루로 쓸면 다 쓸려나가고 쉽게 흩어지는 반면 습설은 잘 뭉쳐지고 표면에 달라붙는 특성이 있다. 그래서 지붕이나 비닐하우스 위에 쌓인 습설은 제거하기가 쉽지 않아 시설물 위에 쌓이게 되면 구조물이 붕괴할 위험이 있다<sup>[3]</sup>. 1) 한편, 기상청에서 최근 5년간 온라인으로 배포한 “이상기후 보고서”<sup>[4]-[8]</sup>에 따르면, 과거 적설량이 많지 않았던 전라도와 경기도 지역에서도 평년보다 많은 대설로 인하여 피해가 집중된 것으로 나타났다. 특히, 농촌 지역에 널리 설치된 비닐하우스는 구조적으로 과도한 하중에 취약하여 폭설 시 붕괴 사고가 발생하고 이에 따른 농작물 피해와 복구 비용이 동시에

Note.-Discussion open until October 31, 2026. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 26, 2026; revised on April 9, 2026; approved on April 9, 2026. Copyright © 2026 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-54-530-1481 Fax. +82-54-530-1489

E-mail. [finksnow@knu.ac.kr](mailto:finksnow@knu.ac.kr)

1) 본 저작물은 ‘대전지방기상청’에서 ‘2026년’ 작성하여 공공누리 제4유형으로 개방한 ‘2025-2026 대전지방기상청 웹진 겨울호(제42호)’를 이용하였으며, 해당 저작물은 ‘기상청, <https://www.kma.go.kr/>’에서 무료로 다운받으실 수 있습니다.

증가하는 사례가 보고되고 있다.

MAFRA & RDA (2013)<sup>[9]</sup>은 폭설에 대응하기 위한 비닐하우스 관리 요령으로 지붕 위 눈 쓸어내리기, 수막장치나 난방기 등을 이용하여 눈 녹이기, 보강이 필요한 부분에 버팀기둥 설치하기, 구조체 붕괴가 예측되면 과감히 비닐 찢기 등의 대책을 제시하고 있지만, 현실적이지 못한 부분이 많다.

이에 여러 국내 연구자에 의하여 비닐하우스 구조의 취약한 점을 보완하기 위한 다양한 보강법을 제시하였다. Lee *et al.* (2001)<sup>[10]</sup>은 농림수산식품부(現 농림축산식품부)가 2008년에 원예특작시설 내재해기준<sup>[11]</sup>을 고시하면서 지정한 비닐하우스 파이프의 KS 규격 기준인 내재해형 구조용 강재(SPVH)가 적용되기 전에 수행한 해석연구이다. 농가에서 필요에 의해 자체적으로 제작·설치하여 사용하던 단동형의 농가지도형 비닐하우스가 적설심 250 mm의 적설하중에 저항하도록 지름 2 mm의 철사를 수평 혹은 X형 가새로 적용하거나 중앙에 지주 보강의 효과를 수치해석으로 검토하였다. 유사한 보강 방식으로 Jung & Teng (2010a)<sup>[12]</sup>과 Jung & Teng (2010b)<sup>[13]</sup>는 지름 3 mm의 강선으로 보강한 비닐하우스의 거동을 Midas-Gen을 사용하여 분석하여, 적설하중에는 제안 방식이 효과가 있었던 반면, 풍하중에서는 역효과를 보이기도 함을 발견하였다.

Kim *et al.* (2010)<sup>[14]</sup>, Jang *et al.* (2010)<sup>[15]</sup>, Shin *et al.* (2011)<sup>[16]</sup>은 양쪽 기둥의 상부 사이를 강연선, 밧줄 등의 인장재로 연결하고 벌어지려는 추력을 제어하여 그 성능을 확인하는 실험연구를 진행하였다. 내재해형 구조용 강재 SPVHS로 비닐하우스 실험체를 제작하여 경사지붕 적설하중과 경사지붕 편심하중을 가정한 가력 실험을 수행하고, 타이 보강이 36 %~76 %의 강도 증가, 14 %~93 % 처짐 감소 효과를 확인하였다.

농가에서 사용하고 있는 대부분의 비닐하우스가 폭설에 붕괴 피해를 입는 이유는 과도한 하중에 저항할 수 있는 휨내력이 부족하기 때문이다. 이를 보완하기 위해 여러 연구자가 비슷한 유형의 보강법을 제안했다<sup>[10],[12]-[16]</sup>. 이 연구에서는 인장 타이 보강한 단동형의 광폭 비닐하우스의 가력실험<sup>[16]</sup>를 다룬 Jang (2010)<sup>[17]</sup>과 Shin (2011)<sup>[18]</sup>을 기초 자료로 활용하여 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하여 수치해석의 신뢰성을 확인하고, 농림축산식품부에서 고시한 내재해형 비닐하우스

규격<sup>[18]</sup>의 적설량에 따른 위험도를 분석하였다.

## 1.2 연구 방법 및 제한사항

비닐하우스 구조체는 아치형상으로, 축력과 휨이 상호작용하는 거동을 보인다. 그러나 거시적 거동 관점에서 휨이 지배적인 것으로 분석되어 해석의 효율성을 확보하기 위해 휨응력만을 고려한 해석을 수행하고, 소성힌지의 발생 위치와 붕괴하중을 순차적으로 산정하였다. 수치해석은 강성행렬법을 적용하였고, 기하학적 비선형만을 고려하여 하중 단계별로 절점 좌표를 추적·갱신하여 해석을 수행하였다. 한편, 본 해석연구에 인용된 실험연구를 살펴보면, 가력장치는 이론적으로 모든 가력점에 동일한 수직하중이 작용하도록 설계되었으나, 실제 실험에서는 불균형하중이 발생하여 다양한 파괴모드가 관찰되었다. 그러나 이러한 불균형하중을 정량적으로 측정하지 못한 한계가 있어, 본 해석에서는 모든 가력점에 동일한 하중이 작용한 것으로 가정하여 해석이 진행되었다.

## 2. 실험 개요 및 결과

### 2.1 실험 개요

해석연구에 사용한 자료는 Jang (2010)<sup>[17]</sup>과 Shin (2011)<sup>[18]</sup>의 실험연구를 인용하였다. Table 1은 인용한 실험체의 형상과 실험 결과 등을 요약한다. 실험에서는 가력을 쉽게 하도록 나란한 2개의 프레임(서까래)을 가로대로 연결하여 가로대의 중앙부를 가력하였고, 최상단인 아치 크라운의 처짐과 기둥 상부 1개소의 수평변위, 가로대 1개소의 가력하중 등을 측정하였다.

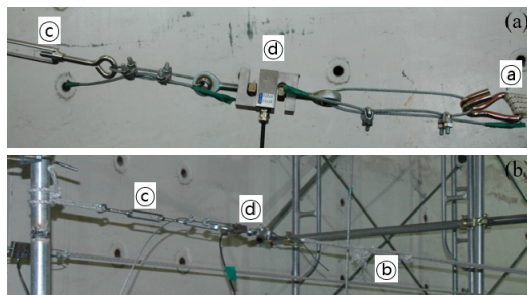
실험체는 3개의 그룹(G8-d48, G10-d48, G10-d48-E)으로 분류되는데, 스패인 8,100 mm, 10,200 mm인 서까래에 대칭하중 혹은 편심하중이 작용하는 실험체로 나뉜다. 사용한 비닐하우스 구조용 파이프의 단면 크기는  $\phi 48.1 \times 2.1t$  mm이고, 단면적은  $303.5 \text{ mm}^2$ , 단면2차모멘트는  $80,737.2 \text{ mm}^4$ , 소성단면계수는  $4,446.7 \text{ mm}^3$ 으로 계산된다. 단주압축시험에 의해서 항복강도는 355 MPa, 극한강도는 400 MPa로 측정되었다. SPVHS 강재는 공칭항복강도 295 MPa 이상, 인장강도 400 MPa 이

**Table 1.** Summary of experimental specimens

Specimen	Strengthening materials	$T_{pre}$ (N)	$\delta_{uplift}$ (mm)	Size of greenhouse and loading point (mm)	$P_{peak}$ (N)	Inc. (%)	$\delta_{peak}$ (mm)	Inc. (%)	Failure mode
G8-d48-No	—	—	—		796.8	—	268.9	—	sway mode
G8-d48-FR-0N	Flat Rope	—	—		1268.2	59.2	198.4	-26.2	flexural failure
G8-d48-FR-100N		100	2.2		1233.1	54.8	227.9	-15.2	
G8-d48-FR-200N		203	4.6		1284.5	61.2	213.8	-20.5	
G8-d48-FR-300N		297	8.5		1304.1	63.7	242.5	-9.8	
G10-d48-No	—	—	—		689.4	—	404.7	—	sway mode
G10-d48-FR-200N	Flat Rope	202	16.7		1448.2	110.1	379.5	-6.2	arch buckling
G10-d48-RR-200N	Round Rope	203	18.7		1160.8	68.4	466.2	+15.2	
G10-d48-No-E	—	—	—		537.8	—	192.3	—	combined mechanism
G10-d48-FR-200N-E	Flat Rope	200	18.4		647.2	20.4	98.7	-48.7	arch buckling
G10-d48-RR-200N-E	Round Rope	202	17.8		594.1	10.5	124.7	-35.2	

G8 - d48 - FR - 200N - E  
 E: Application of eccentric load  
 Target pre-tension (N)  
 Strengthening materials - FR: Flat rope 37 mm×2 mm  
 RR: Round rope φ8 mm  
 Section of pipe - d48: φ48.1×2.1t mm  
 Span of frame - G8: 8,100 mm & G10: 10,200 mm

Note:  $T_{pre}$  and  $\delta_{uplift}$  are the pre-tension and corresponding uplift, respectively;  $P_{peak}$  and  $\delta_{peak}$  are first peak load and corresponding deflection, respectively;  $W_1$  is the span;  $W_2$  is the distance between the tops of two columns;  $H_1$  is the vertical height of column; and  $H_2$  is the arch rise.



**Fig. 1.** Device setup for pretension

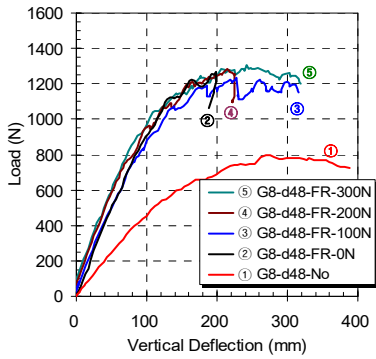
상의 특성을 갖는 재료이다. 타이 보강재로 사용한 재료는 37 mm×2 mm 크기의 직사각형 단면의 밧줄과 지름 φ8 mm의 원형 단면의 밧줄이고, 인장시험을 통해 최대 인장하중이 각각 28.6 kN, 6.6 kN임을 확인하였다.

인장 타이재는 기둥상부에 Fig. 1과 같이 체결하였다. 기둥상부와 타이재(㉑ 직사각형 단면, ㉒ 원형 단면) 사이에는 장력을 조절하고 측정할 수 있도록 턴버클(㉓)과 로드셀(㉔)을 삽입하였다.

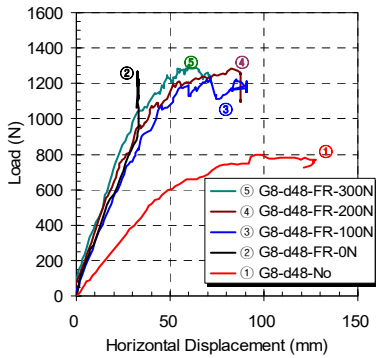
대칭하중 가력은 지붕의 경사도계수  $C_s$ 를 고려한 사다리꼴 형태로 분포된 적설하중을 등가의 집중하중으로 환산하였다. 기본적으로 평지붕설하중  $S_f$ 는 기본지붕설하중계수  $C_b$ , 노출계수  $C_e$ , 온도계수  $C_t$ , 중요도계수  $I_s$ , 지역별설하중  $S_g$ 를 곱하여 산정한다. 실제로 평지붕설하중은 등가의 집중하중의 위치에 영향을 주지는 않고, 경사도계수에 의하여 등가의 4점 집중하중으로 치환이 된다. 편심하중 가력은 바람의 영향을 고려한 사항으로, 곡면지붕의 불균형적설하중에 대한 등가의 4점 집중하중으로 치환되었다. 이때 접선경사도가 70°를 초과할 때는 불균형하중을 고려하지 않는 조건을 적용하였다<sup>[19]</sup>.

2.2 하중-변위 실험 결과

Fig. 2–Fig. 4는 가력실험의 결과로 하중-(최상단 아치 크라운)수직처짐과 하중-(오른쪽 기둥상부)수평변

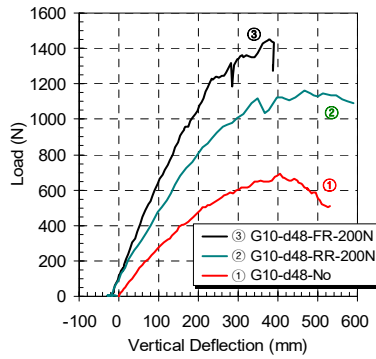


(a) Load-deflection

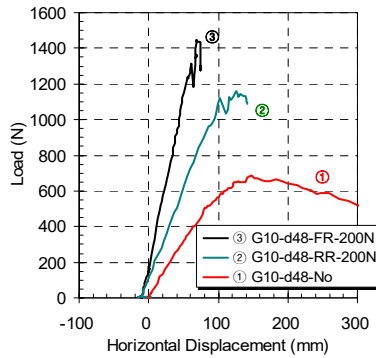


(b) Load-horizontal displacement

Fig. 2. Test results of G8-d48 group

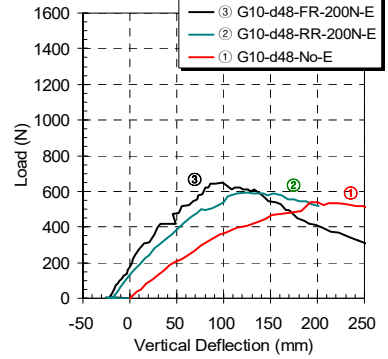


(a) Load-deflection

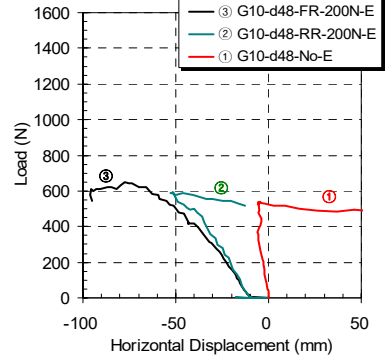


(b) Load-horizontal displacement

Fig. 3. Test results of G10-d48 group



(a) Load-deflection



(b) Load-horizontal displacement

Fig. 4. Test results of G10-d48-E group

위를 보여준다. 수직처짐은 하향, 수평변위는 측정위치에서 오른쪽 방향이 (+)이다.

먼저 Fig. 2는 스펠 8,100 mm의 구조체에 대칭하중을 적용한 G8-d48 실험군의 실험결과이다. 이 실험군의 보강에는 직사각형 단면의 빗줄만 적용되었다. 초기 긴장력에 의해 FR-100 실험체는 2.2 mm의 치올림이 발생하였고, FR-200과 FR-300 실험체는 긴장력의 상승과 함께 치올림이 증가하여 각각 4.6 mm, 8.5 mm를 기록하였다. 가력은 치올림 상태에서 원치를 회전시키면서 가력이 시작된다. 무보강 실험체는 최대하중이 약 796.8 N일 때 처짐이 268.9 mm 발생하였다. 직사각형 단면의 빗줄을 이용한 보강은 무보강에 비하여 약 60%의 하중 증가 효과를 발휘하였고, 처짐의 감소효과를 보였다. 그러나 이 실험군에서는 빗줄에 적용한 초기 긴장력의 효과는 크게 나타나지 않아 4개의 곡선이 거의 같은 양상을 보였다. 무보강 실험체는 sway 모드가 발생하면서 아치 크라운의 수평변위가 발생하였는데, 변위계 몸체가 수평이동을 하지 못하여 측정된 처짐은 수직처짐과 수평변위가 조합된 값이다.

스패이 10,200 mm이고 대칭하중을 받는 G10-d48 실험군의 실험결과는 Fig. 3에 나타내었다. 보강재는 직사각형과 원형의 빗줄을 각각 설치하고 긴장력은 200 N을 적용하였다. 직사각형 빗줄은 매듭과 긴장력 도입 시에 불편한 점이 있어서 주변에서 더욱 쉽게 구할 수 있어 보이는 원형 빗줄의 적용성 검토를 위해 사용하였다. 직사각형 빗줄을 사용한 FR-200 실험체는 16.7 mm, 원형 빗줄을 사용한 RR-200 실험체는 18.7 mm의 치올림이 발생하였다. 무보강 실험체는 689.4 N의 최대하중과 함께 404.7 mm의 처짐을 기록하였다. FR-200과 RR-200은 최대하중이 각각 1448.2 N, 1160.8 N을 기록하여 110%, 68%의 증대 효과를 보였다.

편심하중을 가정한 가력실험 결과는 Fig. 4에 표현되었다. 같은 스펠의 대칭하중 실험 결과인 Fig. 3와 비교하면 저항력이 감소한 결과를 보였다. 긴장력에 의한 치올림은 대칭하중 수직 가력 전의 치올림과 비슷한 정도로 발생하였고, 최대하중은 직사각형 단면, 원형 단면 순으로 크기의 차이를 보였다. 하중 측면에서는 편심하중일 경우에는 인장 타이 보강의 효과가 20% 이

하를 보이며 그 효과가 크지 않았다.

대칭하중을 받은 두 실험군 G8-d48과 G10-d48의 수평 변위는 초기 긴장력 시를 제외하고는 실험이 종료될 때까지 기둥 상부가 벌어지는 오른쪽 방향의 (+)수평변위가 발생하였다. 다만, 측정위치의 기둥 상부가 소성 힌지가 되면서 sway 모드 거동으로 수평변위가 상대적으로 크게 측정된 2개의 무보강 실험체가 있었고, 반대쪽에서 소성힌지가 발생하면서 상대적으로 작게 측정된 G10-d48-FR-200N 실험체가 있었다. 반면, 편심하중을 받은 G10-d48-E 실험군에서, 무보강 실험체는 크기가 작기는 하지만, 세 개의 실험체 모두에서 왼쪽 방향의 (-)변위가 측정되었다. 무보강실험체와 원형 맞출을 사용한 실험체는 최대하중 이후에 변형의 방향이 바뀌는 현상도 보였다.

### 2.3 실험 결과 분석

스팬 8,100 mm 구조체에서 긴장력의 효과가 크게 나타나지 않은 이유는, 하중 증가에 따라 추력으로 인해 발생하는 수평변위의 차이가 크지 않기 때문이다. 한편, 스팬 10,200 mm 구조체의 실험 및 해석결과를 종합적으로 검토하면, 긴장력의 크기보다는 인장재의 강성이 구조 거동에 더 중요한 영향을 미치는 것으로 확인된다. 인장재는 추력에 의해 기둥 상부가 벌어지는 거동을 제어함으로써 구조체의 휨저항성을 증대시키는 역할을 한다. 이때 인장재의 강성이 클수록 수평변위를 보다 효과적으로 억제하여 구조체의 내력을 향상시킨다. 따라서 상대적으로 강성이 큰 직사각형 맞출을 사용하였을 때에 보강효과가 크게 나타났다. 편심하중 실험에서는 기둥 상부의 벌어짐 현상이 제한적으로 발생하여 인장재에 추가적으로 유도되는 장력이 크지 않았다. 이로 인하여 인장재에 의한 보강효과 또한 상대적으로 작게 나타난 것으로 판단한다.

## 3. 강성행렬법을 이용한 해석

### 3.1 해석 개요

대칭하중을 적용한 실험군의 해석모델은 대칭성을 이용하여 Fig. 5처럼 1/2만을 모델링하고, 편심하중 모

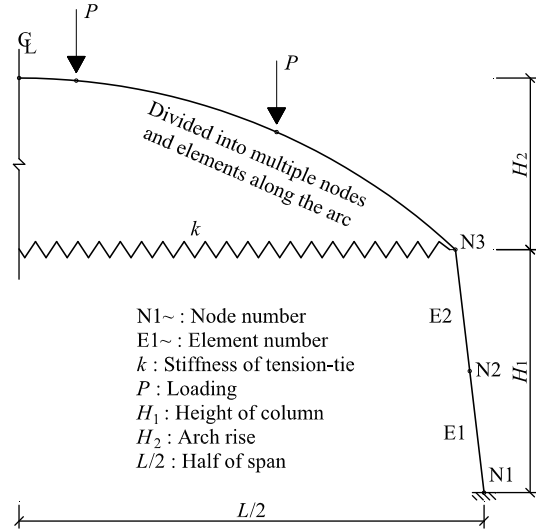


Fig. 5. Modeling for analysis

델은 전체 모델링을 하였다. 기둥 부재는 2개의 보 요소, 아치부분은 다수의 선형 보 요소로 분할하였고<sup>[20]</sup>, 인장 타이 요소는 트러스 요소 1개로 모델링하였다. 지점은 실험조건을 반영하여 고정단으로 설정하였고, 대칭모델에서의 최상단 아치 크라운 부분은 수평이동과 회전만 고정으로 하고, 하중은 절점력으로 적용하였다. 강성행렬법은 식 (1)의 행렬식으로 주어진 하중에 의한 변위와 부재력, 반력 등을 계산하게 된다<sup>[21]</sup>.

$$\begin{bmatrix} [S_{uu}] & [S_{ur}] \\ [S_{ru}] & [S_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta_u] \\ [\Delta_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [JL_u] \\ [JL_r] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [0] \\ [R_r] \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $[S_c]$ 는 전체 구조 강성행렬,  $[\Delta_c]$ 는 전체 절점 변위행렬,  $[JL_c]$ 는 전체 절점력행렬,  $[R_c]$ 는 전체 지점반력행렬이다.  $[S_c]$ 는 4가지로 구분되는데, 미지의 절점 변위에 단위값을 각각 독립적으로 적용함으로써 발생하는 성분 중에서, 미지 절점 변위의 구속 작용을 나타내는 성분을  $[S_{uu}]$ , 지점에 의해 구속된 절점 변위의 구속 작용을 나타내는 성분을  $[S_{ru}]$ 라고 한다. 또한 지점에 의해 구속된 절점 변위에 단위값을 각각 독립적으로 적용함으로써 발생하는 성분 중에서, 미지의 절점 변위의 구속작용을  $[S_{ur}]$ , 지점 변위의 구속작용을  $[S_{rr}]$ 이라고 한다.

$[S_c]$ 는 구조체를 구성하는 여러 요소별 강성행렬의

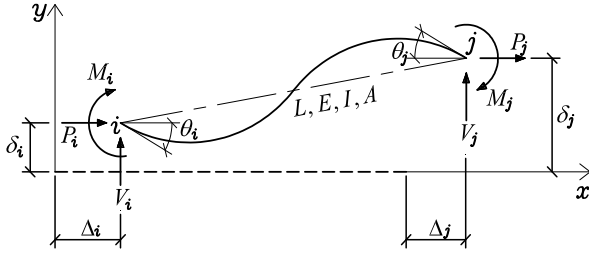


Fig. 6. General displacement of typical beam element with restrained ends

\*Note:  $L$ ,  $E$ ,  $I$ , and  $A$  are the length, modulus of elasticity, moment of inertia, and cross-sectional area of the beam element, respectively;  $i$  and  $j$  are the left and right ends, respectively;  $M_i$ ,  $M_j$ ,  $V_i$ ,  $V_j$ ,  $P_i$ , and  $P_j$  are the components of end action at both ends; and  $\theta_i$ ,  $\theta_j$ ,  $\delta_i$ ,  $\delta_j$ ,  $\Delta_i$  and  $\Delta_j$  are the possible components of end displacement at both ends

중첩이 필요한데, Fig. 6로부터 요소별 강성행렬은 식 (2)-식 (5)로 계산하고, 각 요소별로 경사각( $\theta$ )에 의한 좌표변환행렬 식 (6)도 적용이 된다. 보 요소의 양 절점 ( $i$ ,  $j$  절점)이 회전에 구속되는 초기 해석에는 식 (2)의 강성행렬  $[K]_{rr}$ 을 적용한다. 가력 후 소성힌지가  $i$  절점에 발생하면 식 (3)의  $[K]_{ur}$  행렬, 소성힌지가  $j$  절점에 형성되면 식 (4)의  $[K]_{ru}$  행렬을 사용하게 된다. 추가 하중에서 만약에 두 절점 모두 소성힌지가 되면 식 (5)의  $[K]_{uu}$  강성행렬을 적용한다<sup>[22]</sup>. 강성행렬( $[K]_{rr}$ ,  $[K]_{ur}$ ,  $[K]_{ru}$ , &  $[K]_{uu}$ )의 아래첨자는 순서대로  $i$  절점과  $j$  절점을 표현하고, ‘ $r$ ’과 ‘ $u$ ’는 각각 구속과 비구속을 뜻한다. 시계방향의 모멘트와 회전각, 위쪽 방향의 변위, 절점력, 전단력, 수직반력, 오른쪽 방향의 변위, 절점력, 축력, 수평반력을 (+)부호로 규약한다.

$$[K]_{rr} = \begin{bmatrix} \theta_i & \theta_j & \delta_i & \delta_j & \Delta_i & \Delta_j \\ \frac{4EI}{L} & \frac{2EI}{L} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & 0 \\ \frac{2EI}{L} & \frac{4EI}{L} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & 0 \\ -\frac{6EI}{L^2} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{12EI}{L^3} & 0 & 0 \\ \frac{6EI}{L^2} & \frac{6EI}{L^2} & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{12EI}{L^3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & -\frac{EA}{L} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & \frac{EA}{L} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[K]_{ur} = \begin{bmatrix} \theta_i & \theta_j & \delta_i & \delta_j & \Delta_i & \Delta_j \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3EI}{L} & -\frac{3EI}{L^2} & \frac{3EI}{L^2} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{3EI}{L^2} & \frac{3EI}{L^3} & -\frac{3EI}{L^3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3EI}{L^2} & -\frac{3EI}{L^3} & \frac{3EI}{L^3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & -\frac{EA}{L} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & \frac{EA}{L} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[K]_{ru} = \begin{bmatrix} \theta_i & \theta_j & \delta_i & \delta_j & \Delta_i & \Delta_j \\ \frac{3EI}{L} & 0 & -\frac{3EI}{L^2} & \frac{3EI}{L^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{3EI}{L^2} & 0 & \frac{3EI}{L^3} & -\frac{3EI}{L^3} & 0 & 0 \\ \frac{3EI}{L^2} & 0 & -\frac{3EI}{L^3} & \frac{3EI}{L^3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & -\frac{EA}{L} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & \frac{EA}{L} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[K]_{uu} = \begin{bmatrix} \theta_i & \theta_j & \delta_i & \delta_j & \Delta_i & \Delta_j \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & -\frac{EA}{L} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & \frac{EA}{L} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \theta_i & \theta_j & \delta_i & \delta_j & \Delta_i & \Delta_j \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\theta & 0 & -\sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 0 & \sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (1)로는 미지의 변위값을 직접적으로 계산할 수 없기 때문에 작용한 하중과 경계조건이 고려된 식 (7)로 재표현되어 미지의 절점 변위를 계산하게 된다.

$$[S_{uu}][\Delta_u] = [JL_u] \quad (7a)$$

$$[\Delta_u] = [S_{uu}]^{-1}[JL_u] \quad (7b)$$

3.2 해석 결과

광폭형 비닐하우스의 실험 결과와 강성행렬법을 이용한 해석 결과를 Fig. 7-Fig. 9에 정리하였다. 하중 측면에서 보면 실험의 최대하중과 해석의 최대하중을 비교하면 차이가 크게 나타난다. 하지만, 1차소성인지 발생하중을 비교하면 거의 비슷한 크기를 보였고, 초기 강성을 비교해 보면 거의 비슷한 경향의 하중과 변위의 관계를 보였다.

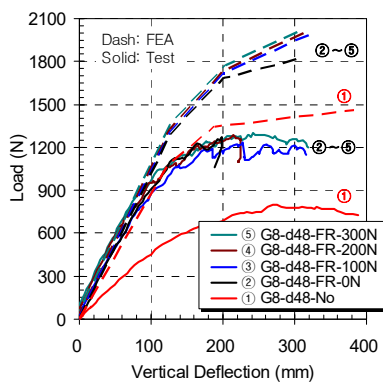
G8-d48 실험군을 비교한 Fig. 7에서 무보강실험체의 해석과 실험 결과의 초기 강성이 차이가 크게 나는 것은 실험에서는 sway가 발생하여 상대적으로 실험에서 변위가 많이 발생하였기 때문이다. 실험 결과에서도 긴 장력의 크기가 결과에 크게 영향을 미치지 못하였는데, 해석에서도 그 경향을 확인할 수 있었다. Fig. 8의 G10-d48 실험군을 비교한 결과에서도 해석 결과가 실험 결과에 비하여 하중 측면에서 과하게 산출되었고, 상대적인 높은 강성을 가진 직사각형 단면 밧줄 사용

때의 보강 효과가 크게 나타났다. 무보강 실험체에의 초기 강성의 차이가 발견되었는데, G8-d48-No 실험체 처럼 sway로 인하여 수평변형이 많이 발생하였기 때문이다. Fig. 9의 G10-d48-E 실험군의 해석 결과는 대칭 하중 실험군에 비하여 초기 강성은 비슷하게 산출되었으나 최대하중 측면에서 상대적으로 실험과의 오차가 크게 나타났다.

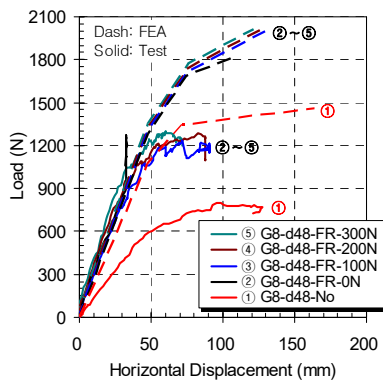
해석 결과 전체적으로 보면 최대 하중의 오차가 크게 나타나고 있다. 이는 기본적으로 비닐하우스 골조의 제작 시에 아치부를 곡선으로 굽힘 시에 발생하는 소성변형의 영향이 반영되지 않았기 때문으로 판단이 된다. 이는 다음 절에서 다루어 보기로 한다.

3.3 소성변형 고려한 해석

비닐하우스 구조체의 제작 도면의 규격에 따라 Fig. 10의 개념에 맞추어 식 (8)을 이용해서 구조체의 제작 시에 발생한 굽힘 잔류변형<sup>[23]</sup>을 예측해 보았다. 반지름

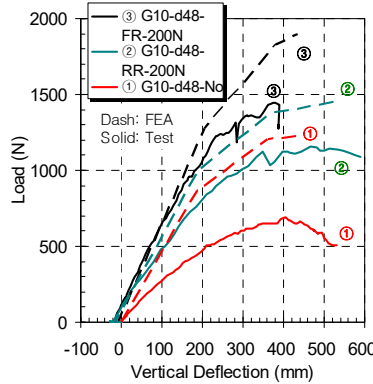


(a) Load-deflection

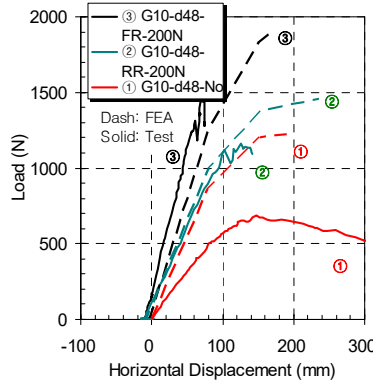


(b) Load-horizontal displacement

Fig. 7. Comparisons of G8-d48 group

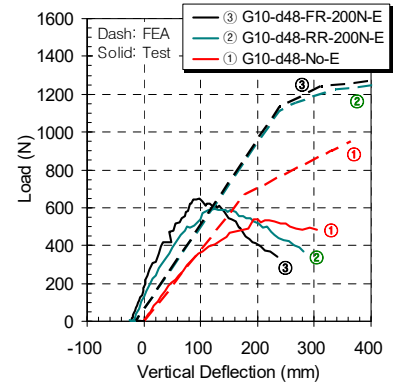


(a) Load-deflection

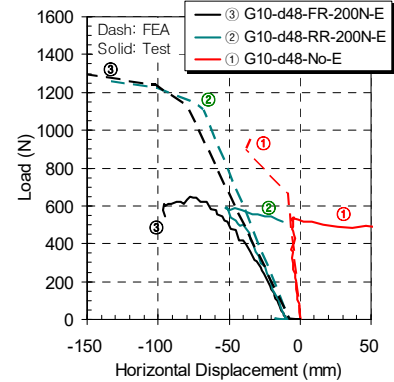


(b) Load-horizontal displacement

Fig. 8. Comparisons of G10-d48 group



(a) Load-deflection



(b) Load-horizontal displacement

Fig. 9. Comparisons of G10-d48-E group

$R$ 과 수평거리의 1/2인  $b/2$ , ( $R-c$ )로 이루어지는 직각삼각형에서 피타고라스 정리에 따라 식 (8a)가 세워지고 순서대로 파이프의 변형률을 예측한다. 스패 8,100 mm, 10,200 mm의 비닐하우스 구조체는 각각 단면이 60 %, 56 %의 소성변형이 진행된 것으로 계산되었다.

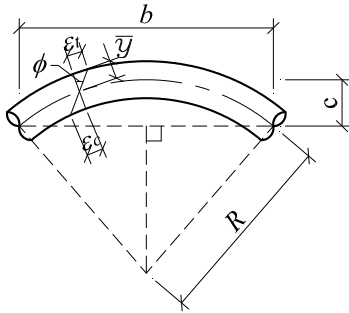


Fig. 10. Strain in fibers due to bending

\*Note:  $R$  and  $\phi$  are the radius and curvature, respectively;  $b$  is the horizontal distance between two points;  $c$  is the height between end point and neutral axis;  $\bar{y}$  is the neutral axis depth; and  $\epsilon_i$  and  $\epsilon_c$  are strains on outer and inner fibers, respectively

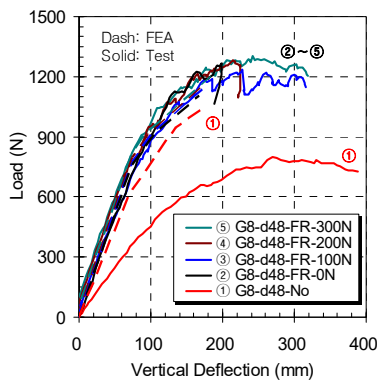
이를 반영하여 실험연구에서 수행한 총 11개의 실험체를 대상으로 재해석을 수행하여 그 경향을 살펴보았다.

$$R = \frac{4c^2 + b^2}{8c} \quad (8a)$$

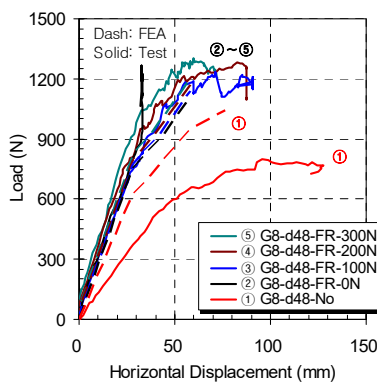
$$\phi = 1/R \quad (8b)$$

$$\epsilon_i \text{ or } \epsilon_c = \phi \times \bar{y} \quad (8c)$$

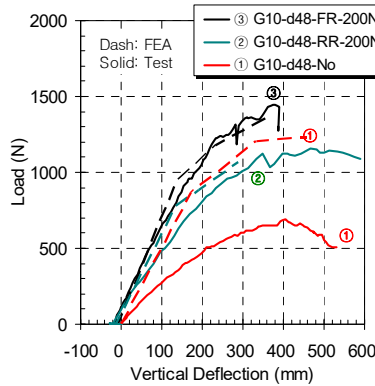
잔류변형을 고려하지 않은 1차 해석 결과인 Fig. 7-Fig. 9과 비교하면, 굽힘에 의한 잔류변형을 반영한 해석 결과인 Fig. 11-Fig. 13과 Table 2에서 강도가 감소하며 실험값에 더욱 근접하는 경향을 확인할 수 있다. 또한 편심하중을 제외한 모든 모델에서, 잔류변형을 고려하지 않은 경우에는 지점에서 1차 소성힌지가 먼저 발생하고, 이후 기둥상부나 아치부에서 2차 소성힌지가 형성되었다. 반면, 잔류변형을 고려한 경우에는 기



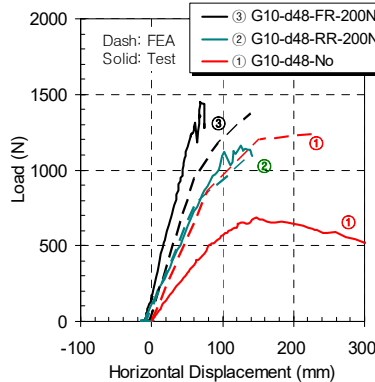
(a) Load-deflection



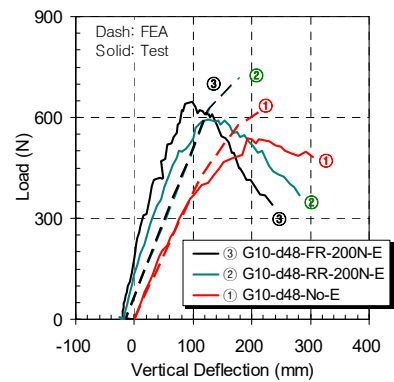
(b) Load-horizontal displacement



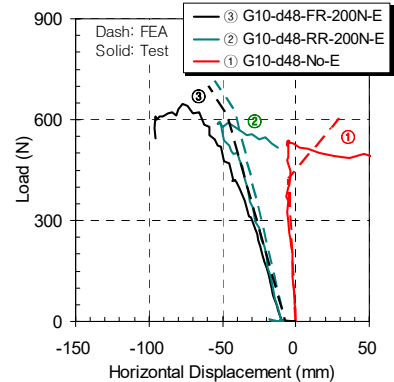
(a) Load-deflection



(b) Load-horizontal displacement



(a) Load-deflection



(b) Load-horizontal displacement

Fig. 11. Comparisons of G8-d48 group

Fig. 12. Comparisons of G10-d48 group

Fig. 13. Comparisons of G10-d48-E group

등상부나 아치부에서 1차 소성힌지가 선행하여 발생하고, 이후 지점이나 1차 소성힌지 인근에서 2차 소성힌지가 발생하였다.

3.4 내재해형 비닐하우스 해석

농림축산식품부와 농촌진흥청에서 제시하고 관리하는 Table 3의 단동형 비닐하우스의 설계도(10-단동-07형, 24-단동(등)-06-09형)<sup>[24]</sup>에서 총 6가지 유형의 비닐하우스를 검토하였다. 많은 내재해형 비닐하우스

스 중에서 서까래가 아치형이고, 파이프 지름이 크고, 스패인 큰 유형만으로 선택되었다. 2010년형 10-단동-07형은 서까래의 간격에 따라 4가지 모델(Types 1-4)을 해석하였고, 2024년형 24-단동(등)-06-09형은 파이프 지름과 서까래 간격에 따라 2가지 모델(Types 5-6)이고, 기둥 상부와 최상단 아치 크라운에 지반으로의 지지대가 설치된 보강된 비닐하우스 구조이다. 파이프의 재료강도는 SPVHS의 최소항복강도 295 MPa로 적용하였다. 하중은 경사지붕 적설하중( $S_s = S_f C_s$ )을 적용하였는데, 평지붕 설하중( $S_f = C_b \cdot C_e \cdot C_t \cdot I_s \cdot S_g$ )에서 기본지붕설하중계수  $C_b = 0.7$ , 노출계수  $C_e = 1.0$ (주변 환경에 바람에 의한 설하중 감소를 기대할 수 없는 지역), 온도계수  $C_t = 1.2$ (비난방구조물로 설하중 비제어 구조), 중요도계수  $I_s = 0.8$ (중요도 3등급)로 가정하고, 소성힌지가 발생하는 지상설하중  $S_g$ 를 Table 3에 정리하였다. 2차 소성힌지가 발생하는 지상설하중  $S_g$ 가 약 0.6-0.9인 Types 1-4는 MLIT (2022)<sup>[19]</sup>에 고시한 기본지상설하중이 1을 초과하는 경상북도 북부지방과 강원도 지역에서는 안전하지 못한 규격이라 할 수 있다. 반대로 Types 5-6는 고시한 지역별 기본지상설하중에 따르면 대한민국에서는 안전한 비닐하우스 구조라 할 수 있다.

Table 2. Comparison with experimental and analysis

Specimen	Test		Analysis		$\frac{P_{Test}}{P_{Ana}}$ (%)
	$P_{peak}$ (N)	$\delta_{peak}$ (mm)	$P_{peak}$ (N)	$\delta_{peak}$ (mm)	
G8-d48-No	797	269	1043	174	76
G8-d48-FR-0	1268	198	1106	168	115
G8-d48-FR-100	1233	228	1137	173	108
G8-d48-FR-200	1285	214	1168	178	110
G8-d48-FR-300	1304	243	1199	183	109
G10-d48-No	689	408	1234	456	56
G10-d48-FR-200	1448	380	1436	374	101
G10-d48-RR-200	1161	466	1071	289	108
G10-d48-No-E	538	192	617	213	87
G10-d48-FR-200-E	647	99	702	169	92
G10-d48-RR-200-E	594	125	717	180	83

Table 3. Analytical results for disaster-resistant greenhouse proposed by government

Type	$W_1$ (mm)	$W_2$ (mm)	$H_1$ (mm)	$H_2$ (mm)	$s$ (mm)	Pipe size (mm)	Design snow depth (mm)	$S_g$ (kN/m <sup>2</sup> )	
								1 <sup>st</sup> hinge	2 <sup>nd</sup> hinge
1	8,900	8,300	1,700	2,200	900	$\phi 42.2 \times 2.1t$	270	0.5366	0.5847
2								0.6037	0.6578
3								0.6900	0.7519
4								0.8050	0.8771
5	14,000	12,200	2,000	2,300	1,000	$\phi 48.1 \times 2.1t$	340	6.1450	6.9245
6					1,500			$\phi 59.9 \times 2.3t$	550

See Table 1 for symbols of greenhouse size; and  $s$  is the distance between two frames

Table 4. Ground snow load ( $S_g$ ) according to snow depths and types

Type	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Ground snow load according to snow depth (kN/m <sup>2</sup> )		
		200 mm	300 mm	500 mm
New snow (immediately after falling in calm)	50 - 70	0.10 - 0.14	0.15 - 0.21	0.25 - 0.35
Damp new snow	100 - 200	0.20 - 0.40	0.30 - 0.60	0.50 - 1.00
Settled snow	200 - 300	0.40 - 0.60	0.60 - 0.90	1.00 - 1.50
Depth hoar	100 - 300	0.20 - 0.60	0.30 - 0.90	0.50 - 1.50
Wind packed snow	350 - 400	0.70 - 0.80	1.05 - 1.20	1.75 - 2.00
Firm	400 - 830	0.80 - 1.66	1.20 - 2.49	2.00 - 4.15
Very wet snow and firm	700 - 800	1.40 - 1.60	2.10 - 2.40	3.50 - 4.00
Glacier ice	830 - 917	1.66 - 1.83	2.49 - 2.75	4.15 - 4.59

추가로, 최근에 이상기후로 인하여 습설이 내리는 경우가 많아졌기 때문에 눈의 상태<sup>[25]</sup>와 적설심에 따라서 위험성을 분석해 보았다. Table 4는 눈의 상태에 따른 밀도와 적설하중을 정리하였다. Types 1-4 유형의 비닐하우스는 바람에 다져진 눈(Wind packed snow) 200 mm, 속서리(Depth hoar) 300 mm, 젖은 새눈(Damp new snow) 500 mm에서 붕괴 위험이 있으며, Types 5-6는 제시된 유형의 눈 상태에서도 안전할 것으로 보인다. 실제로도 최상단 아치 크라운에 지지대를 세우는 것은 정부에서도 권장하는 효과적인 방법임을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 해석 연구는 최근 비닐하우스 붕괴 사례를 계기로, 실험 기반 구조체 거동을 보다 체계적으로 분석하기 위해 수행되었다. 기존 실험체는 실험실 여건에 맞춰 제작되어 정부 제시 표준 제원과 규모 차이가 있어, 실제 붕괴 사례를 반영한 추가적인 해석적 검토가 필요하였다. 이에 따라 본 연구는 실험 결과의 신뢰성을 검증하고, 내재해형 비닐하우스의 적설하중 등 변화하는 기후환경에 대한 안전성을 평가하는 것을 목적으로 한다. 국내 연구자에 의하여 제안된 인장 타이 보강법을 해석적으로 검토하고, 보강의 효과와 해석의 신뢰성을 확인하였다. 추가로 정부에서 제시한 내재해형 비닐하우스 중에서 사용한 파이프 지름과 스펀이 큰 광폭형 구조를 선택하여 국내의 변화하는 기후 환경에 적합한 지 해석적으로 검토하였다.

- (1) 강성행렬법을 이용하여 인용한 실험체에 대해서 구조해석을 수행하였고, 비닐하우스 프레임(서까래)의 휨가공 시에 발생한 잔류변형률을 고려하면 실험 결과에 가까운 결과를 도출해 낼 수 있었다.
- (2) 정부에서 제안한 2가지 형태의 내재해형 비닐하우스 구조해석 결과, 2010년에 제시된 10-단동-07형은 최근에 발생하는 폭설이나 습설에는 안전에 취약한 부분이 있는 것으로 판단되고, 상대적으로 최근에 제시된 2024년형 24-단동(등)-06-09형은 큰 스펀임에도 불구하고 중앙부의 기둥 지지대로 인하여 높은 저항성을 보였다.

- (3) 이에 정부에서 상대적으로 오래전에 제시한 내재해형 비닐하우스의 재검토도 필요해 보인다. 특히, 이번 연구에서는 다루지 않은 작은 파이프 지름의 비닐하우스는 상대적으로 작은 휨성능으로 적설에 대한 저항성이 높지 않아 보인다.
- (4) 실험연구에서 제시된 인장 타이재는 구조체의 기둥 상부에 연결되는 형태인데, 비닐하우스 내부 작업성에 영향을 줄 수 있기 때문에 간편한 임시 설치법과 긴장력 도입 방법에 관한 추가 연구도 필요해 보인다.

### 감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1F1A1062907). 또한 이 연구는 2025년도 한국연구재단 연구비 지원에 의한 결과의 일부임(No. RS-2025-02310831).

### 참고문헌(References)

- [1] Park, H., You, S., and Kwon, Y. (2024) A Study on Structural Analysis and Design Criteria Improvement for Enhancing Stability of 154kV Transmission Towers in Extreme Environment, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.36, No.5, pp.253-262 (in Korean).
- [2] KMA. (2025) *2024 Meteorological Yearbook* (11-1360000-100038-10), Korea Meteorological Administration (KMA) (in Korean).
- [3] Lee, M.-S. (2026) White Flowers Blooming in Winter, the Hidden Dangers Behind Them, *2025-2026 Winter Webzine e-Weather*, No. 42, Daejeon Regional Meteorological Administration, pp.5-6 (in Korean).
- [4] KMA. (2021) *2020 Report on Abnormal Climate* (11-1360000-001109-10), Korea Meteorological Administration (KMA) (in Korean).
- [5] KMA. (2022) *2021 Report on Abnormal Climate* (11-1360000-001109-10), Korea Meteorological Administration (KMA) Korea (in Korean).
- [6] KMA. (2023) *2022 Report on Abnormal Climate* (11-1360000-001109-10), Korea Meteorological Administration (KMA) Korea (in Korean).

- [7] KMA. (2024) *2023 Report on Abnormal Climate* (11-1360000-001109-10), Korea Meteorological Administration (KMA) Korea (in Korean).
- [8] KMA. (2025) *2024 Report on Abnormal Climate* (11-1360000-001109-10), Korea Meteorological Administration (KMA) Korea (in Korean).
- [9] Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs and Rural Development Administration. (2013) *Guidelines for Managing Greenhouses in Response to Heavy Snowfall, Technical Information of National Institute of Horticultural and Herbal Science (Leaflet)*, MAFRA and RDA, No.18 (in Korean).
- [10] Lee, T. H., Lee, D. G., and Ahn, S. K. (2001) The Repair and Strengthening of Vinyl-House Providing Against Heavy Snow, *Proceedings of Annual Conference of the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.21, No.1, pp.119-122 (in Korean).
- [11] Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. (2008) *Official Notification on the Disaster-Resistant Standards for Horticulture and Special Crops*, No. 2008-76, MAFRA (in Korean).
- [12] Jung, D., and Teng, C. (2010a) Effect of Wire Bracing to Wind Load Acting on Vinyl House Frame, *Journal of the Korean Institute of Rural Architecture*, KIRUA, Vol.12, No.2, pp.23-30 (in Korean).
- [13] Jung, D. J., and Teng, C. (2010b) Effect of Wire Bracing to Snow Load Acting on Vinyl House Frame, *Journal of the Korean Institute of Rural Architecture*, KIRUA, Vol.12, No.3, pp.27-34 (in Korean).
- [14] Kim, B.K., Lee, S.H., Kim, J.W., and Shin, K.-J. (2010) Collapse Prevention Method of Long-Span Plastic Greenhouse for Heavy Snow, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No.1, pp.67-74 (in Korean).
- [15] Jang Y.J., Lee, S.H., Chae, S.H., and Shin, K.-J. (2010) Experimental Study on Strengthening Effect of Plastic Greenhouse using Tension-Tie, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No.2, pp.151-160 (in Korean).
- [16] Shin, K.-J., Shin, D.-H., Lee, S.-H., and Chae, S.-H. (2011) Reinforcement Method of a Long Span Plastic Greenhouse using Tension-Tie, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.23, No.1, pp.41-49 (in Korean).
- [17] Jang, Y.-J. (2010) *Experimental Study on Strengthening Effect of Plastic Greenhouse using Tension-Tie*, Master's Thesis, Kyungpook National University (in Korean).
- [18] Shin, D.-H. (2011) *Behavior Analysis and Experiment of a Long Span Plastic Greenhouse using Tension-Tie*, Master's Thesis, Kyungpook National University (in Korean).
- [19] Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2022) *Design Loads for Buildings* (KDS 41 12 00 : 2022), Architecture Institute of Korea (AIK) (in Korean).
- [20] Choi, D.-H. Lee, H.J., and Ma, C.Y. (2023) Dynamic Analysis of Curved Beams with Moving Load Using Midas, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.35, No.6, pp.417-425 (in Korean).
- [21] Beaufait, F.W., Rowan, W.H., Hoadley, P.G., and Hackett, R.M. (1970) *Computer Methods of Structural Analysis*, Prentice-Hall, Inc., USA.
- [22] Chen, W.F., and Sohal, I. (1995) *Plastic Design and Second-Order Analysis of Steel Frames*, Springer-Verlag New York, Inc., USA.
- [23] Kim, H.D., Choi, J.Y., Lee, H.S., and Yang, J.G. (2024) Residual Stress Distribution and the Effect on Flexural Members of Hot-Rolled H-Beam, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.36, No.3, pp.197-207 (in Korean).
- [24] Rural Development Administration (n.d.). Nongsaro, <https://www.nongsaro.go.kr/> (in Korea).
- [25] Paterson, W.S.B. (1994) *The Physics of Glaciers* (3rd Ed.), Elsevier, Oxford, New York and Tokyo.

**요약**: 이 연구는 파이프 지름이 크고, 스패인 상대적으로 큰 광폭형 비닐하우스의 적설하중에 대한 저항성을 검토하고자 하는데 목적이 있다. 비닐하우스 보강법을 제시하고 가력 실험을 수행한 기존의 실험 연구를 바탕으로 강성행렬법으로 구조해석을 진행하여 순차적인 붕괴하중을 예측하고 그 신뢰성을 확인하였다. 추가로 정부에서 제시한 내재해형 기준에 대해 광폭형 비닐하우스의 거동이 안전한지를 검토하였다. 10여 년 전에 제시된 비닐하우스 규격은 저적설 지역이나 가벼운 눈에서는 안전할 수 있으나, 최근에 폭설 및 습설의 빈도가 높은 지역에서는 붕괴 위험이 예상된다. 최근에 제시된 기둥지지대가 있는 비닐하우스는 적설에 대해서 상당한 저항성을 보였다.

**핵심용어**: 비닐하우스, 보강, 인장 타이, 적설하중, 강성행렬법, 내재해기준