



# 비닐 온실의 현장 안전진단을 위한 3차원 LiDAR 스캔 기법 기반 구조 형상 추정

## Structural Shape Estimation Based on 3D LiDAR Scanning Method for On-site Safety Diagnostic of Plastic Greenhouse

서병훈<sup>a</sup> · 이상익<sup>b</sup> · 이종혁<sup>a</sup> · 김동수<sup>a</sup> · 김동우<sup>c</sup> · 조예림<sup>c</sup> · 김유용<sup>d</sup> · 이정민<sup>d</sup> · 최 원<sup>e,†</sup>

Seo, Byung-hun · Lee, Sangik · Lee, Jonghyuk · Kim, Dongsu · Kim, Dongwoo · Jo, Yerim · Kim, Yuyong · Lee, Jeongmin · Choi, Won

### ABSTRACT

In this study, we applied an on-site diagnostic method for estimating the structural safety of a plastic greenhouse. A three-dimensional light detection and ranging (3D LiDAR) sensor was used to scan the greenhouse to extract point cloud data (PCD). Differential thresholds of the color index were applied to the partitions of raw PCD to separate steel frames from plastic films. Additionally, the K-means algorithm was used to convert the steel frame PCD into the nodes of unit members. These nodes were subsequently transformed into structural shape data. To verify greenhouse shape reproducibility, the member lengths of the scan and blueprint models were compared with the measurements along the X-, Y-, and Z-axes. The error of the scan model was accurate at 2%-3%, whereas the error of the blueprint model was 5.4%. At a maximum snow depth of 0.5 m, the scan model revealed asymmetric horizontal deflection and extreme bending stress, which indicated that even minor shape irregularities could result in critical failures in extreme weather. The safety factor for bending stress in the scan model was 18.7% lower than that in the blueprint model. This phenomenon indicated that precise shape estimation is crucial for safety diagnostic. Future studies should focus on the development of an automated process based on supervised learning to ensure the widespread adoption of greenhouse safety diagnostics.

**Keywords:** Light detection and ranging (LiDAR); plastic greenhouse; structural analysis; structural safety diagnostic; unsupervised algorithm

### 1. 서론

기후 변화와 함께 폭설, 태풍과 홍수 등의 극한 기상이 증가하는 추세이며, 최근 10년간 자연재해로 인한 전국적인 재산 피해액은 연 평균 3,194억 원으로 막대한 경제적 손실이 보고되었다 (Ministry of the Interior and Safety, 2023). 특히 취약 시설물로 분류되는 비닐 온실의 경우 2022년도에만 105 ha의

피해 면적과 103억 원의 피해액이 발생하는 등 (Ministry of the Interior and Safety, 2023), 시설 농가의 재산 손실이 극심한 상황이다. 또한, 2022년 기준 국내 시설 재배 온실 면적 52,808 ha 중 55.8% (29,467 ha)가 농가지도형 및 비규격 온실 등의 소규모 농가이나 (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2023a), 아직까지 기상 재해에 대응한 비닐 온실의 안전진단 절차가 마련되지 않는 등 개별 시설 농가의 경제적 손실과 인명 피해 위험성이 과소평가된 실정이다. 농림축산식품부에서는 30년 빈도의 폭설과 강풍 극한 기상에 대해 안전하게 설계된 내재해형 온실 설계서와 온실 구조설계 기준 (안)을 제시한 바 있으나 (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2023b; Rural Development Administration, 2017), 실제 농가에서는 현재까지도 이와 상이한 형상의 비닐 온실을 시공 및 운영하고 있다. 따라서, 안전진단 절차와 같은 직접적인 피해 대응책 마련 및 이에 선행되는 비닐 온실 특성에 적합한 구조 안전성 해석 방법론 정립이 절실한 상황이다.

국내 시설 농업 육성과 함께 점차 구조적 안전성을 향상시킨 비닐 온실 설계안이 제시되어 왔으며, 이와 함께 온실을 구조해석하는 많은 연구가 수행되었다 (Suh et al., 2008; Ryu et al., 2012; Choi et al., 2017; Lee et al., 2022). Ryu et al. (2009)과 Choi et al. (2017)은 비닐 온실의 공간적 거동을 정밀

<sup>a</sup> Ph.D. Student, Department of Rural Systems Engineering, Integrated Major in Global Smart Farm, Seoul National University  
<sup>b</sup> Assistant Professor, Department of Agricultural Civil Engineering, Kyungpook National University  
<sup>c</sup> MS Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University  
<sup>d</sup> Researcher, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration  
<sup>e</sup> Associate Professor, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Integrated Major in Global Smart Farm, Seoul National University

† **Corresponding author**  
Tel.: +82-2-880-4715, Fax: +82-2-873-2087  
E-mail: [fembem@snu.ac.kr](mailto:fembem@snu.ac.kr)

Received: June 11, 2024  
Revised: July 08, 2024  
Accepted: July 15, 2024

하게 모의하기 위해 3차원 선형 구조해석을 통해 온실의 구조 안전성을 평가하였으며, 가력 장치에 의해 발생된 모형 온실의 응력과 변위 결과를 비교하였다. 또한, Lee et al. (2020)은 지반에 관입된 온실 강관의 하중에 따른 변위 응답을 구조해석에 반영하였으며, Lee and Ryu (2022)는 서까래와 가로대의 연결부 조리개 거동을 물성 시험에 따른 탄소성 (Elasto-plastic) 모델로 모의하였다. 이와 같이 비닐 온실의 구조 안전성을 정교하게 모의하기 위한 다양한 구조해석 연구가 수행되었으나, 현재까지는 실제 온실 형상과 변형에 따른 실제 구조 안전성을 정량적으로 평가하려는 연구는 수행된 바 없다.

대형 시설물의 현장 안전진단의 경우, 작성된 설계도면 상의 구조 형상을 3차원으로 모델링하고, 이에 대한 구조해석을 통해 구조 안전성을 평가하고 있다. 반면에 비닐 온실과 같은 중소형 시설물의 경우에는 개별 설계도면 없이 시공자 의도에 따라 형상이 상이한 경우가 많으며 (Nam and Yu, 2000), 기 시공된 비닐 온실의 구조 안전성 판단을 위해서는 시설물 크기 및 부재 제원에 대한 측량이 요구된다. 한편, UAV (Unmanned aerial vehicle) 항공사진 처리기술 및 LiDAR (Light detection and ranging) 센서를 이용한 시설물의 3차원 스캔 방법이 주목받고 있으며 (Wood and Mohammadi, 2015; Mader et al., 2016; Tran and Khoshelham, 2019; Trias et al., 2022), 3차원 스캔을 통해 추출된 PCD (Point cloud data)를 3차원 구조 모델로 변환하는 연구가 활발하게 수행되고 있다 (Bitelli et al., 2016; Rolin et al., 2019; Bassier and Vergauwen, 2020; Javaid et al., 2021). 특히, Pepe et al. (2020)과 Pan and Yang (2023)은 슬래브 (Slab) 구조의 대형 건축물을 3차원 셸 (Shell) 구조 모델로 변환하고, 이에 대한 구조해석을 통해 구조적 안전성을 검토하였다. 그러나, 대형 건축물의 경우에는 주요 부재인 슬래브 표면을 삼각망으로 변환하는 비교적 간단한 절차가 필요한 반면, 대부분이 비정형 곡선 구조인 온실 철골 부재의 경우 PCD를 구조 형상 모델로 변환하기 위한 특성화된 절차 마련이 요구된다.

따라서, 본 연구에서는 개별 시설물의 설계도가 부재한 비닐 온실의 현장 구조 안전진단을 위해, LiDAR 스캔 기법으로 추출된 PCD를 온실 구조 형상으로 추정 및 구조해석을 통한 안전성 평가를 수행하였다. 또한, 추정된 온실 구조 형상, 설계도면 모델과 현장 측량 결과 비교를 통해 LiDAR 스캔 구조 추정 기법의 정확성을 검증하였으며, 실제 온실 구조 형상과 설계도면 모델의 구조 안전성 평가 결과를 비교하였다. 이를 통해, 시설 농가의 비닐 온실 구조 안전성을 현장에서 진단하는 절차 활용성을 제고하는 것을 목표로 하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 연구 대상

#### 가. 대상 온실 설계안

본 연구에서는 3D (Three-dimensional) LiDAR 스캔 기법을 통한 비닐 온실 형상 추정 및 현장 구조 안전진단 방법 적용성 검증을 위해, 대한민국 전라북도 완주군의 국립농업과학원에 설치된 실내 모형 연동 온실을 대상 온실로 선정하였다 (Fig. 1).

본 연구에서는 현장 구조 안전진단의 대상으로 대부분이 비규격·소형으로 시공되는 단동 비닐 온실로 하였다. 대상 온실의 치수는 너비 5.20 m, 길이 2.00 m 및 동고 1.51 m로 실제 연동 온실의 축소 모형으로 제작되었으나 (Fig. 2), 극한 기상 취약 구조물로 실질적 현장 안전진단 대상인 단동 온실 단면의 일반적인 크기를 만족하기 때문에 연구 대상으로 적합하다고 판단하였다. 대상 온실에 사용된 서까래 (Rafters), 가로대 (Bracing) 및 전·후면 기둥 (Column) 부재의 단면 치수는 각각  $\Phi 10 \times 2.3T$ ,  $\Phi 10 \times 2.3T$  (외경 $\times$ 두께; 단위: mm) 및  $25 \times 25 \times 2.3T$  (가로 $\times$ 세로 $\times$ 두께; 단위: mm)이며, 내재해형 규격의 온실 강재 규격인 SPVHS (Steel pipe vinyl house structure)의 물리적 성능을 만족하였다.



(a) Front view



(b) Side view

Fig. 1 Indoor model of double-span plastic greenhouse in this study

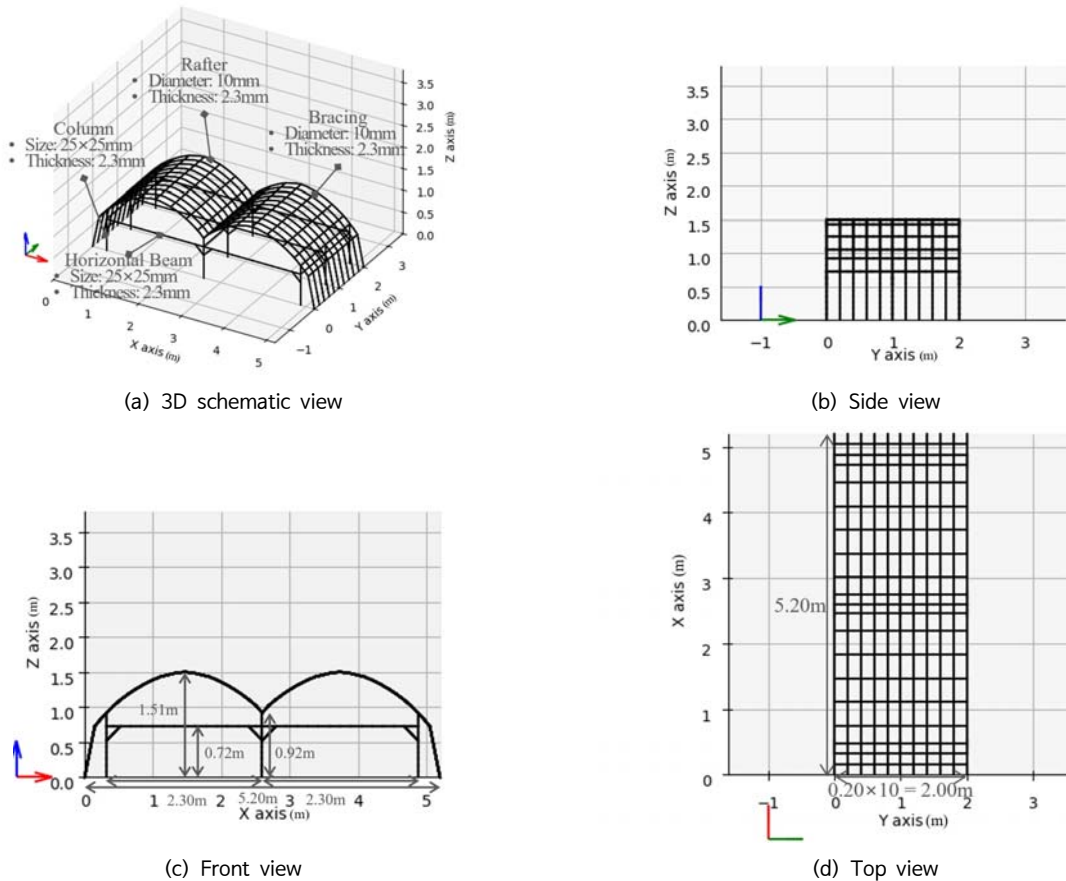


Fig. 2 Blueprint of target plastic greenhouse for application of on-site structural safety diagnostic method

#### 나. LiDAR 스캔 방법

외부 하중에 대응한 온실의 구조적 안전성은 비닐 피복이 아닌 강관 골조에 지배받으며, 이러한 온실 철골의 정확한 측정을 위해 3D 스캔 장치로 실내 LiDAR 센서를 이용하였다. 본 연구에서 쓰인 실내 고정식 LiDAR 센서는 Leica Geosystems 사의 BLK360이며 (Fig. 3 (a)), 해당 LiDAR 센서의 성능 및 제원을 Table 1에 나타내었다. 너비 5.20 m 및 길이 2.00 m인 대상 온실의 크기를 고려하여 내부 공간을 균등하게 나누는 4개 지점에서 촬영하였으며 (Fig. 3 (b)), 모든 각도에서 온실 PCD가 균등하게 촬영될 수 있도록 0.92 m의 촬영 높이에서 총 20,931,577개 점으로 이루어진 원시 PCD를 취득하였다. 여기서, 촬영 지점 높이는 4개 지점을 동일하게 결정하기 위해 중앙부 기둥의 끝점과 동일한 높이로 결정하였으며, 추후 농가 적용 시에는 모든 부재를 균일하게 측정할 수 있는 기준 높이를 결정할 필요가 있다. 원시 PCD는 영역 별로 비균등한 점 밀도와 오측정된 점을 포함하고 있어 형상 추정 에 오차가 발생할 수 있으며, 이를 방지하기 위해 센서 제원

상의 최소 좌표 오차인 0.006 m로 복셀화 (Voxelizing)를 수행하여 최종적으로 총 373,047개 점으로 구성된 PCD를 온실 구조 형상 추정에 사용하였다.

#### 2. 온실 구조 형상 추정

실내 LiDAR 센서로 촬영된 원시 PCD의 철골 구조 형상 추정 절차를 Fig. 4에 간략하게 나타내었다. 먼저, 원시 PCD를 구성하는 비닐 피복과 철골의 점을 각 점의 색상 값을 조합한 지표로 분할하였으며 (Fig. 4 (b)), 이렇게 분할된 철골만의 PCD를 밀도 기반 비지도 알고리즘을 통해 구조해석을 위한 개별 부재에 대한 클러스터로 나누었다 (Fig. 4 (c)). 또한, 최종적으로 개별 부재 클러스터에 속한 점들의 평균 점을 추정하여 온실 구조 형상의 개별 노드로 변환하였고 (Fig. 4 (d)), 이러한 노드를 연결하여 구조해석의 3차원 해석 모델로 변환하였다.

원시 PCD에서 철골만의 PCD를 분할하는 방법을 Fig. 5에 자세히 나타내었다. 특정 객체 종류에 대한 PCD를 분리하는

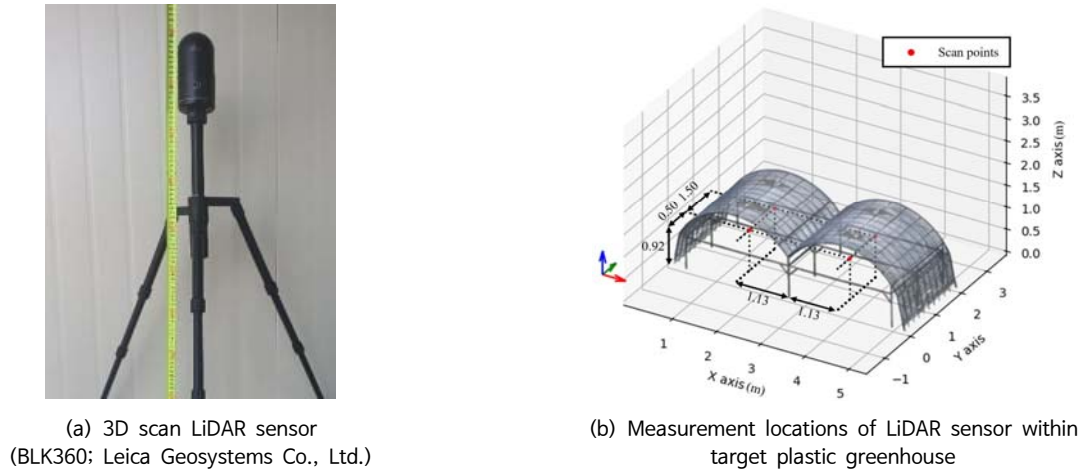


Fig. 3 Schematic of 3D scan method for target plastic greenhouse

Table 1 Specifications of 3D scan LiDAR sensor

Height of scan point (m)	Coordinate accuracy of PCD (m)	Range of observation distance (m)	Total points of raw PCD
0.92	0.006-0.008 (Observed at 10.0-20.0)	0.6-60.0	20,931,577

일반적인 비지도학습 방식의 알고리즘은 각 점의 색상 값으로 계산된 지표 (Index)를 임의의 임계값 (Threshold)을 기준으로 구분한다. 본 연구의 온실 원시 PCD는 촬영된 각도 및 지점에 따른 명암 차이로 인해 동일한 임계값을 모든 점에 일괄적으로 적용하는데 한계가 있으며, 본 연구에서는 대상 온실의 너비 방향인 X축 좌표를 0.5 m 간격으로 구분하여, 총 11개 영역 각각의 임계값 결정 및 철골 PCD로 분할하였다. 연구 대상인 실내 모형 온실은 비닐 피복과 철골로 이루어져 있어, 빨강 (R), 초록 (G), 파랑 (B)의 색상 값 중에 가장 대비되는 R 값의 차이를 반영하는 지표를 선정하였고 (Eq. 1), 이에 따른 첫 번째 영역 (0≤x<0.5) 내의 각 점 색상 지표의 분포 히스토그램을 예시로 나타내었다 (Fig. 5 (b)). 이러한 색상 지표에 따라 각 PCD 영역을 다시 시각화하였으며 (Fig. 5 (c)), 철골 PCD를 비교적 명확하게 분할해낼 수 있는 경계값을 결정하였다 (Fig. 5 (d)).

$$Index_{RGB} = \frac{R}{G^2 + B^2} \quad (1)$$

where,  $Index_{RGB}$  is a color combination index of each points for segmentation of steel pipe,  $R$ ,  $G$  and  $B$  is a normalized value of color labels of each points (Red, green and blue).

이러한 과정을 통해 전체 온실 PCD에서 철골 만을 분할 해냈으며, 분할된 PCD 중 완전하게 분할되지 않은 비닐 피복의 노이즈 점은 후처리를 통해 제거하였다 (Fig. 4. (b)). 또한, 철골 PCD를 온실 구조해석을 위한 구조 형상 모델로 변환하기 위해, 전체 철골 PCD를 K-means 알고리즘을 통해 일정한 부피 (부재 길이)를 가지는 클러스터로 구분하였다 (Fig. 4 (c)). K-means 알고리즘에 의한 PCD 클러스터링은 사전에 지정된 매개변수인 n의 개수만큼의 클러스터로 PCD를 나누고, Eq. 2-3과 같이 개별 클러스터에 할당된 점의 유클리드 거리를 반복하는 알고리즘이다 (Agarwal and Procopiuc, 2002). 이를 통해 추정된 900개의 클러스터 별 평균 점을 환산하여 온실 구조 형상의 노드를 추정하였다. 여기서, n 값은 클러스터 내의 점 사이 최대 거리로 계산된 개별 강관 부재 길이를 평균하였을 때, 이 값이 0.1 m에 근접하는 노드 수로 결정되었다.

$$\mu_j = \frac{1}{n_j} \sum x_i \quad (j = 1, \dots, N) \quad (2)$$

$$J = \sum_{j=1}^N \sum_k \|x_i - \mu_j\|^2 \quad (3)$$

where,  $\mu_j$  is Euclidean distance squared of each clusters (m),



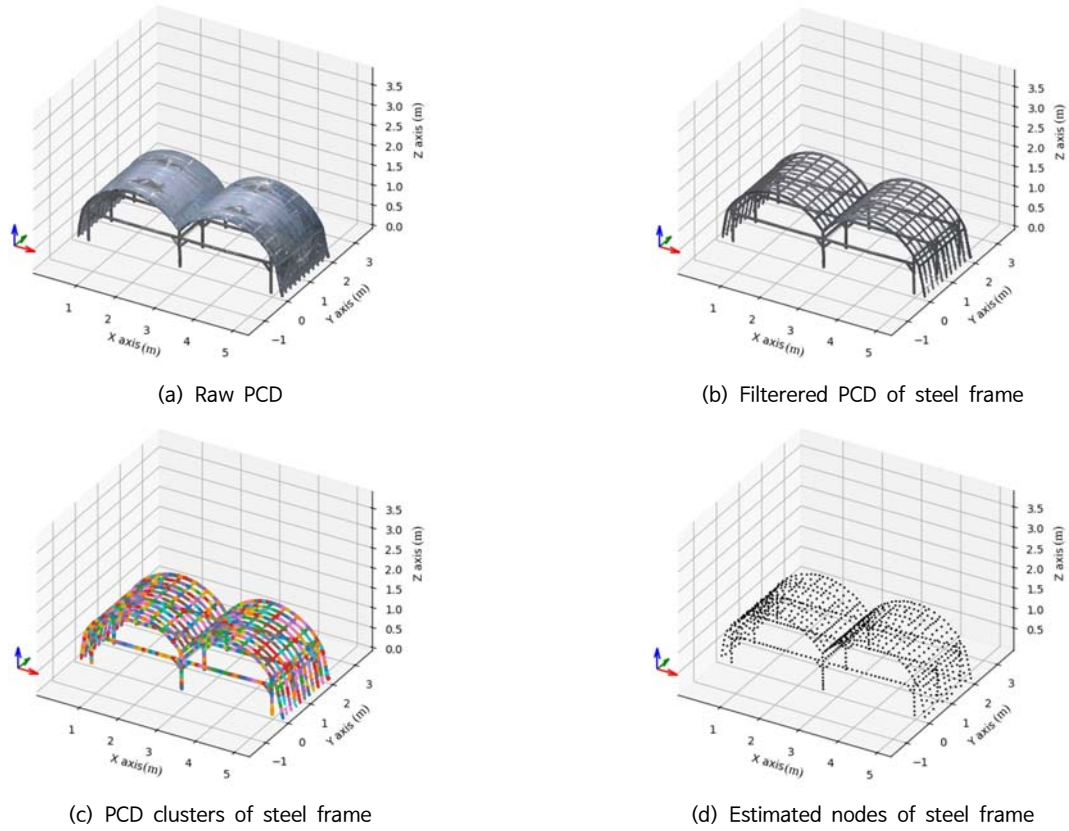


Fig. 4 Structural shape estimation of plastic greenhouse through transformation of 3D scan PCD

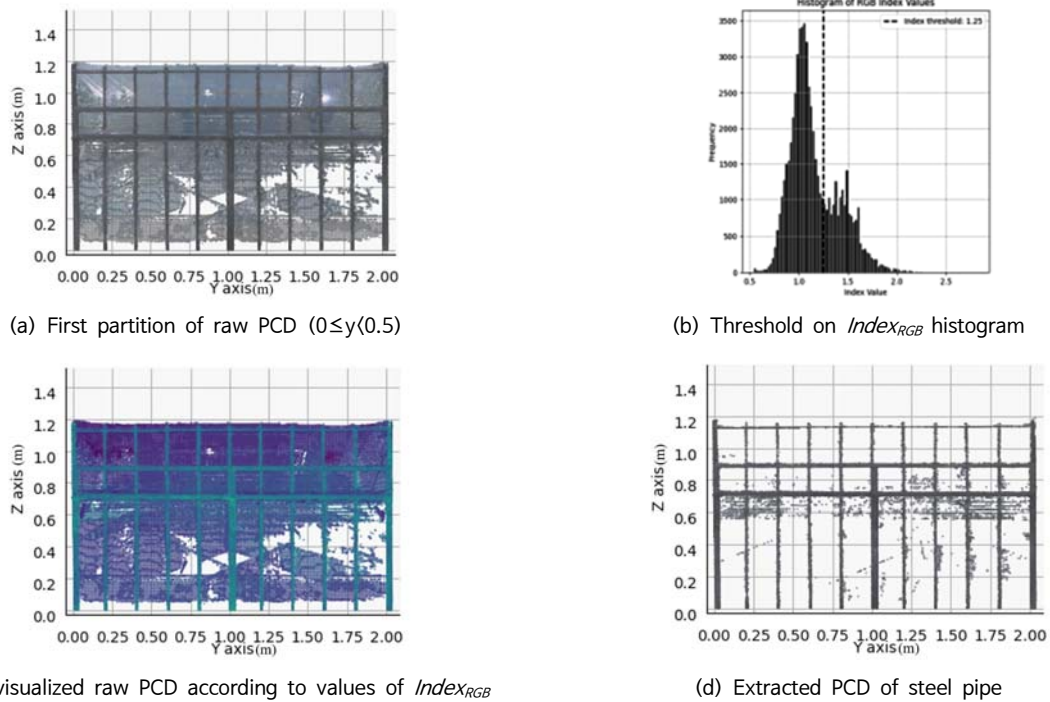


Fig. 5 Segmentation process of steel frame PCD based on the color combination index ( $Index_{RGB}$ ) from raw PCD ( $0 \leq x < 0.5$ )

$n_j$  is PCD numbers of each clusters,  $x_i$  is a global coordinate of PCD in each clusters,  $J$  is sum of total squared distances from centroid of PCD in each clusters.

### 3. 구조해석 모델

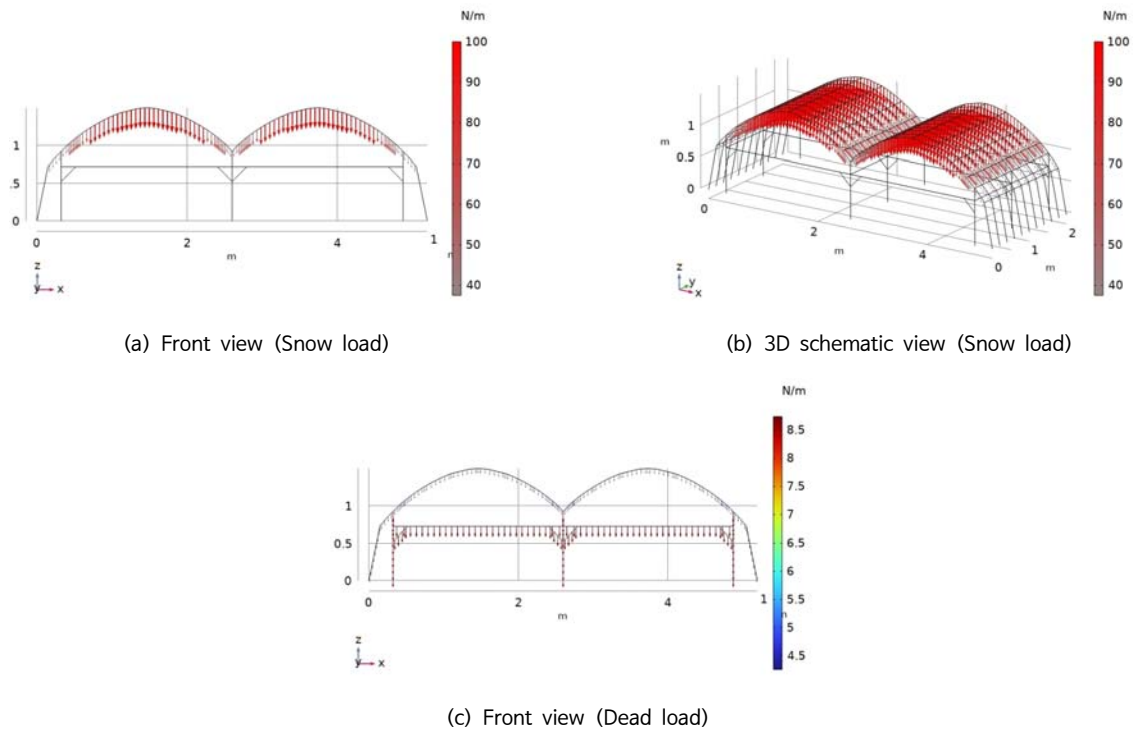
현장 3D 스캔을 통한 온실 구조 형상 모델과 설계도 모델에 대하여 3차원 선형 구조해석을 통해 구조적 안전성을 비교하였으며, 구조해석은 유한요소법 (Finite element method) 기반 상용 소프트웨어인 COMSOL Multiphysics 6.0 (COMSOL Inc.)을 통해 수행하였다. COMSOL Multiphysics는 철골 구조물을 대상으로 정밀한 안전성 평가를 위한 유한요소법 기반 구조해석 소프트웨어로 활발하게 사용되고 있다 (Liu et al., 2022; Ji et al., 2022). 노드와 선 부재로 추정된 온실 구조 형상의 구조해석을 위해 빔 구조해석 (Beam structural analysis)을 해석 물리학으로 선정하였으며, 각 부재 별 단면 형상 및 SPVHS 강관의 물성 제원을 입력하였다 (Table 2). SPVHS 강관의 물성 중 탄성계수의 경우 반복 실험을 통해 0.5% Offset

법으로 결정된 값을 입력하였으며 (Choi et al., 2017), 포아송 비는 일반적으로 사용되는 강재의 공칭 값을, 항복강도는 농촌진흥청에서 제시하는 온실 SPVHS 강관의 공칭 항복강도로 결정하였다 (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2023). 또한, 온실 구조 형상 모델의 지반 지지점은 스캔 및 설계도 모델 모두에 대하여 고정단 (Fixed-ends) 조건을 적용하였고, 서까래, 가로대 및 기둥의 교차 연결부는 강결 (Rigid connection) 조건을 부여하였다.

온실 구조설계 기준(안)에서는 온실의 구조 안전성 평가를 위해, 고려해야 할 설계하중으로 고정하중, 설비하중, 작물하중, 풍하중 및 설하중이 규정되어 있다. 온실 구조 안전성에 주요한 하중인 설하중과 풍하중에 대해 안전성을 각각 평가하도록 되어 있으나, 본 연구에서는 구조 부재의 재료적 안전성 측면에서 더욱 취약한 조건인 설하중에 대하여 구조해석하였다. 적설에 의한 설하중을 서까래 사이 단면에 작용하는 등가 압력으로 환산하는 식은 Eq. 4와 같다. 본 연구에서는 설하중 산정에 필요한 적설심으로 전국의 30년 빈도 적설심

**Table 2** Mechanical properties of greenhouse members

Pipe type	Standard code	Elastic modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Poisson ratio	Density (kg/m <sup>3</sup> )
SPVHC	KS D 3760:2014	205	295	0.3	7,850



**Fig. 6** Load conditions applied to structural analysis of the target greenhouse model (Snow depth = 0.5 m)

평균에 가까운 0.5 m를 선정하였으며 (Rural Development Administration, 2017), 이를 통해 산정된 단면 설하중 ( $S$ )에 대상 온실의 서까래 간격을 곱한 값을 각 부재에 선 하중으로 부여하였다 (Fig. 6 (a)-(b)). 고정하중의 경우 철골의 자중 및 비닐 피복재에 따라 계산되나, 피복재 하중이 철골 부재의 1% 미만 크기로 미소하기 때문에, 본 연구에서는 철골 자중만을 부재의 등분포 선 하중으로 부여하였다 (Fig. 6 (c)). 또한, 본 연구에서 고려되지 않은 설비하중과 작물하중은 실제 시공 대상지의 환경에 맞춰 산정해야 하며, 추후 현장 안전진단 적용 시에는 이에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

$$S = \rho \cdot Z_s \cdot C_e \cdot C_s \quad (4)$$

where,  $S$  is a design snow load of unit surface ( $N/m^2$ ),  $\rho$  is a unit weight of snow depth ( $N/m^3$ ; 1,000 at  $Z_s = 0.5$  m),  $Z_s$  is a design snow depth (m),  $C_e$  is an exposure coefficient ( $C_e = 1.0$ ),  $C_s$  is a slope coefficient of greenhouse roof.

#### 4. 평가 방법

##### 가. 형상 추정 재현성

3D 스캔을 통해 추정된 온실 구조 형상의 재현성을 평가하기 위해, 실제 모형 연동 온실의 X, Y, Z축 방향의 부재 길이를 측정하였다 (Fig. 7). 이와 같이 측정된 21개 부재 (X축 방향: 6개, Y축 방향: 6개, Z축 방향: 9개)의 길이를 스캔 및 설계도 모델에 대하여 동일하게 계산하였으며, 각각에 대한 실측 길이 대비 상대적인 비율 오차로 평가하였다 (Eq. 5).

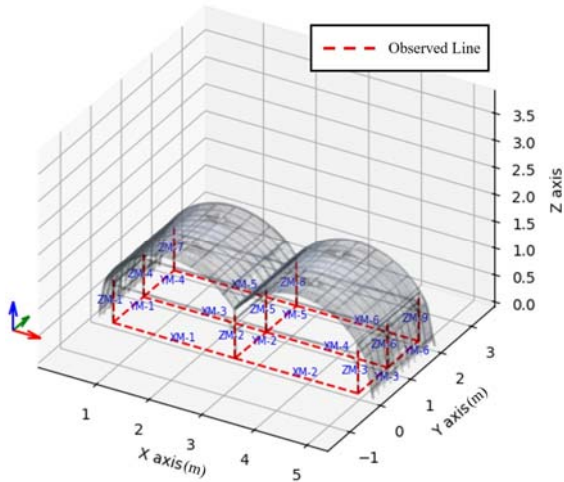


Fig. 7 Schematic of observed length of members for verification of estimated structural shape of greenhouse

$$Error (\%) = \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \times 100 \quad (5)$$

where,  $y_i$  is an observed length of each pipe members (m),  $\hat{y}_i$  is a simulated length of each pipe members (m).

##### 나. 구조 안전성

온실 구조설계 기준(안)에서는 설계된 온실의 구조적 안전성을 검토하는 기준으로 수평 처짐 (Horizontal deflection;  $\delta_h$ ), 수직 처짐 (Vertical deflection;  $\delta_v$ ), 축 응력 (Axial stress;  $\sigma$ ), 휨 응력 (Bending stress;  $\sigma_b$ ), 세장비 (Slenderness)를 제시하고 있다. 본 연구에서는 이를 기준으로 스캔 모델과 설계도 모델의 구조해석 결과에 따른 구조적 안전성을 비교하였으며, 각 구조 안전성 평가 기준의 계산식은 아래와 같다 (Eq. 6-10).

$$\lambda = \frac{KL}{r} \quad (6)$$

where,  $\lambda$  is a slenderness of pipe members of greenhouse ( $\lambda_{max} = 200$ ),  $K$  is a coefficient of effective length ( $K = 2.0$ ),  $L$  is a length of pipe members (m),  $r$  is a cross-sectional radius of pipe members (m).

$$\frac{\sigma_t}{f_t} \leq 1.0 \quad (7)$$

where,  $\sigma_t$  is a maximum tensile stress of pipe members (MPa),  $f_t$  is an allowable tensile stress of pipe members ( $f_t = \frac{F_y}{1.5}$ ),  $F_y$  is a nominal yield stress of pipe members (MPa).

$$\frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1.0 \quad (8)$$

where,  $\sigma_b$  is a maximum bending stress of pipe members (MPa),  $f_b$  is an allowable bending stress of pipe members ( $f_b = f_t = \frac{F_y}{1.5}$ ).

$$\delta_h \leq \frac{W}{60} \quad (9)$$

where,  $\delta_h$  is a maximum horizontal deflection of pipe members (m),  $W$  is a width of target greenhouse (m).

$$\delta_v \leq \frac{h}{35} \quad (10)$$

where,  $\delta_v$  is a maximum vertical deflection of pipe members (m),  $h$  is a height of target greenhouse (m).

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 현장 온실 형상 추정 결과

##### 가. 철골 PCD 분할 결과

모형 연동 온실의 PCD를 X축 좌표 기준으로 11등분 하였으며, 구분된 각 영역 내에서 철골과 비닐 피복의 PCD를 분할하는 색상 지수의 임계값은 Table 3과 같이 결정되었다. 서까래가 지면과 이루는 각도가 수평에 가까운 3, 4, 5, 7, 8, 9번 영역의 임계값은 전체 영역의 평균 임계값인 1.03보다 낮았던 반면에, 서까래가 지면과 이루는 각도가 수직에 가까운 1, 2,

**Table 3**  $Index_{RGB}$  thresholds of each partitions of raw PCD for segmentation of steel pipe PCD

Number of partition	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Coordinate range of X-axis (m)	0.0 -0.5	0.5 -1.0	1.0 -1.5	1.5 -2.0	2.0 -2.5	2.5 -3.0	3.0 -3.5	3.5 -4.0	4.0 -4.5	4.5 -5.0	5.0 -5.5
Threshold of color index	1.25	1.20	0.90	0.85	0.95	1.05	0.80	0.80	0.95	1.25	1.35

**Table 4** Reproducibility verification of estimated structural shape from 3D scan method by comparing the length of unit members according to axes

Axis	Number of observed members	Observed members	Blueprint members			Scan members		
		Length (m)	Length (m)	Error (%)	Average error (%)	Length (m)	Error (%)	Average error (%)
X-axis Direction	XM-1	2.391	2.300	4.0%	3.3%	2.337	2.3%	2.2%
	XM-2	2.379	2.300	3.4%		2.323	2.4%	
	XM-3	2.381	2.300	3.5%		2.330	2.2%	
	XM-4	2.381	2.300	3.5%		2.318	2.7%	
	XM-5	2.384	2.300	3.7%		2.328	2.4%	
	XM-6	2.346	2.300	2.0%		2.323	1.0%	
Y-axis Direction	YM-1	0.971	1.000	2.9%	2.9%	0.993	2.2%	2.3%
	YM-2	0.968	1.000	3.2%		0.992	2.4%	
	YM-3	0.964	1.000	3.6%		0.988	2.4%	
	YM-4	0.976	1.000	2.4%		1.000	2.4%	
	YM-5	1.030	1.000	3.0%		1.010	2.0%	
	YM-6	1.021	1.000	2.1%		1.000	2.1%	
Z-axis Direction	ZM-1	0.677	0.720	6.0%	5.4%	0.700	3.3%	2.4%
	ZM-2	0.688	0.720	4.5%		0.704	2.3%	
	ZM-3	0.685	0.720	4.9%		0.696	1.6%	
	ZM-4	0.685	0.720	4.9%		0.691	0.9%	
	ZM-5	0.680	0.720	5.6%		0.702	3.1%	
	ZM-6	0.681	0.720	5.5%		0.705	3.4%	
	ZM-7	0.681	0.720	5.5%		0.701	2.9%	
	ZM-8	0.675	0.720	6.3%		0.688	1.9%	
	ZM-9	0.680	0.720	5.6%		0.696	2.3%	
Average error of total members			4.4%			2.3%		



6, 10, 11번의 경우 1.20 - 1.35의 범위로 전체 영역의 평균 임계값보다 유의미하게 높은 값으로 결정되었다. 서까래와 지면의 각도가 수직에 가까운 영역의 경우, 외부 조명을 상대적으로 덜 받아 R, G, B 값이 비교적 높게 (어둡게) 나타났으며 (Fig. 4 (a)), 이로 인해 전체적인 색상 지표값과 임계값이 비교적 컸던 것으로 사료된다. 실제 현장 온실의 경우에는 지면과 부재 각도, 일사각, 넓은 공간 등 다양한 변수로 인해 명암 편차가 더욱 불규칙할 것으로 예상되며, 철골 만의 PCD로 분할함에 있어 임계값을 영역 별로 차분 적용하는 것이 필수적이라고 판단된다.

나. 온실 구조 형상 추정 재현성 평가

색상 지표로 분할된 철골 PCD에 K-means 알고리즘을 적용하여 노드를 추정하고, 추정된 노드를 연결하여 구조해석을 위한 3차원 온실 구조 형상 모델 (스캔 모델)을 구축하였으며, 이를 설계도면 상의 3차원 모델 (설계도 모델)과 비교하였다 (Fig. 8). 비교적 시공이 쉬운 서까래 지반 직선부 및 기둥 부재의 경우 설계도 모델과 스캔 모델의 외관 상의 차이가 크지 않았으나, 초기에 직선으로 제작된 강관을 인위적으로 곡률

성형하는 서까래 상부 부재의 경우 직선부와 가까운 외곽에 위치할수록 설계도면과의 차이가 크게 나타났다 (Fig. 8 (c)). 이를 고려하면 현장 온실의 설계도면 혹은 단순 치수 측량으로 구축된 구조 형상 모델이 실제 형상보다 유의미하게 왜곡될 것으로 예상된다. 따라서, 설계도 모델을 기반으로 구조 안전성을 검토할 경우, 설계하중이 주로 작용되는 서까래 부재의 위험성이 크게 과소 평가될 것으로 판단된다.

3D 스캔을 통해 추정된 온실 구조 형상 모델의 재현성을 평가하기 위해, X, Y, Z축 방향의 21개 부재의 직선 길이를 측정 및 비교하였으며, 이와 함께 설계도면 모델과의 차이를 분석한 결과는 Table 4와 같다. 모든 방향의 부재에 대해서 스캔 모델이 평균 2.3%의 오차로 설계도 모델 (4.4%)에 비해 정확한 것으로 나타났다. 지면과 평행한 방향인 X와 Y축 방향의 부재의 경우, 스캔 모델이 각각 1.1과 0.6% 만큼 정확한 것으로 나타났으며, 이러한 오차는 비닐 온실을 시공할 때의 서까래 너비, 간격 등의 치수 측정, 서까래 절단의 인위성에 기인한 것으로 사료된다. 특히 지면과 수직인 Z축 방향 부재의 경우, 스캔 모델과 설계도 모델의 오차가 각각 2.4와 5.4%로 다른 방향의 부재에 비해 매우 크게 나타났다. 이는 서까래

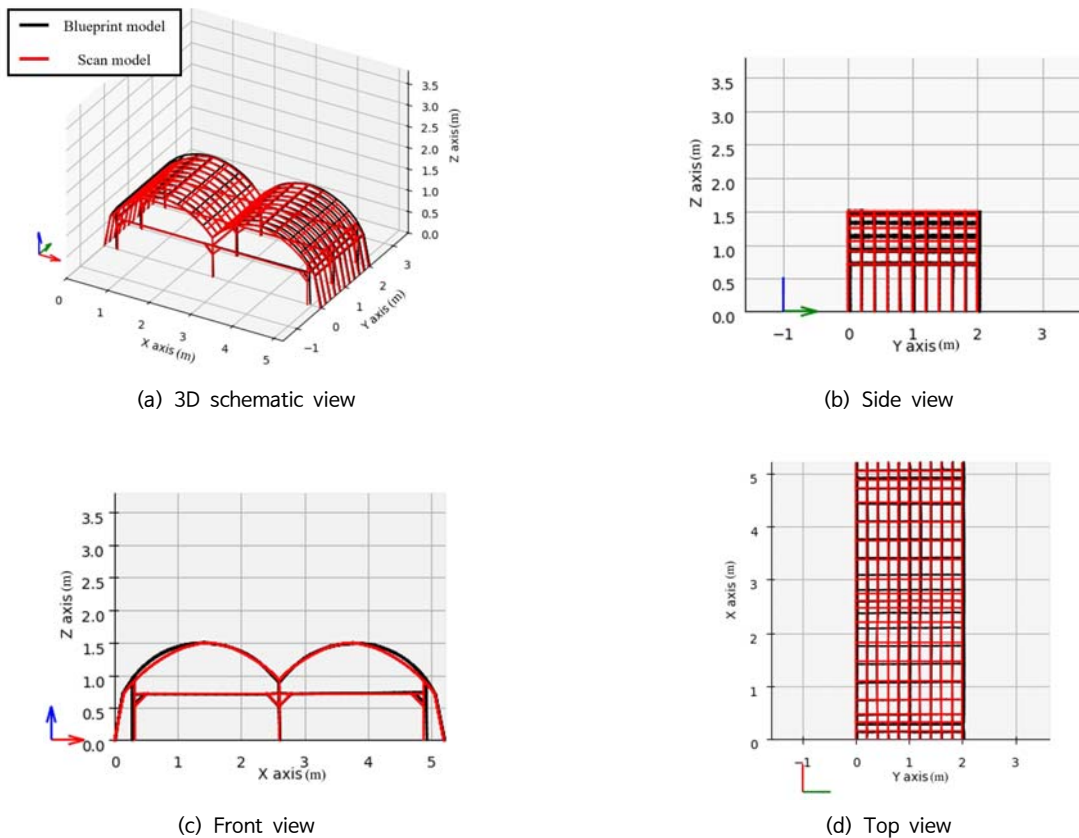


Fig. 8 Comparison of structural shape of greenhouse between blueprint model and 3D scan model

곡률부 성형, 강관과 지면 각도 측정, 대칭성 판단 등이 온실 시공 시의 인위성 중 불확실성이 큰 요인이기 때문인 것으로 판단된다. 특히, 연구 대상 온실이 피로되지 않은 상태인 점을 고려하면 실제 온실에서의 오차는 더욱 커질 것으로 예상된

다. 이러한 온실 형상의 오차는 구조 안전성의 잘못된 판단으로 이어질 수 있으며, 비닐 온실의 현장 구조 안전진단에 있어 3D 스캔을 통한 전역적인 구조 형상 추정이 필수적인 것으로 판단된다.

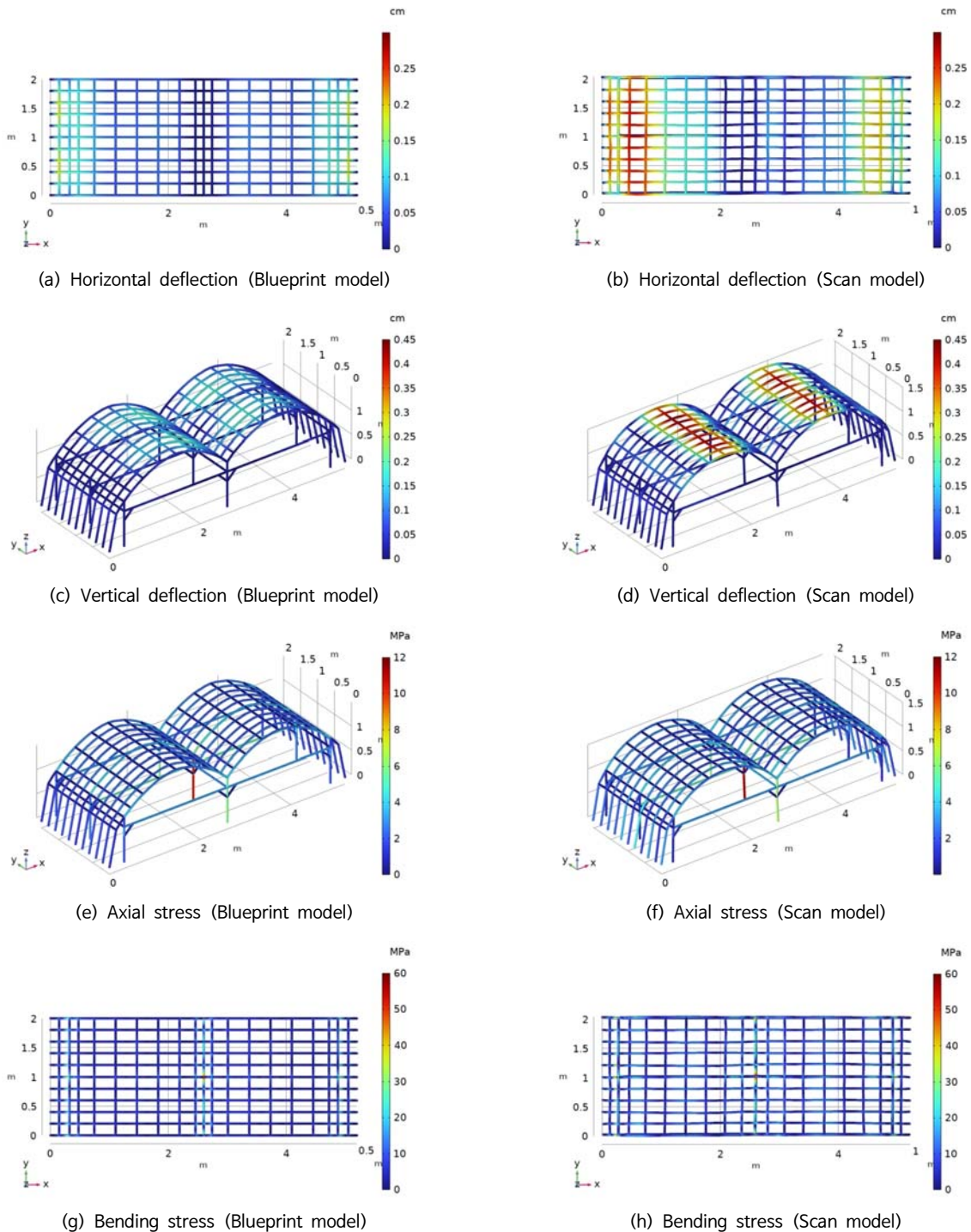


Fig. 9 Schematic of structural analysis results between the blueprint model and 3D scan model (Snow depth = 0,5 m)

## 2. 현장 온실 구조 안전성 평가 결과

### 가. 최대 설계하중에서의 온실 구조해석 결과

3D 스캔을 통해 추정된 스캔 모델과 설계도 모델에 대한 0.5 m 적설심에서의 구조해석 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 수평 처짐 (Fig. 9 (a), (b))과 수직 처짐 (Fig. 9 (c), (d))은 각각 서까래 측면부와 서까래 상단부에서 가장 크게 나타났으며, 이러한 경향성은 스캔 모델과 설계도 모델에 대하여 동일하였다. 그러나, 설계도 모델 온실의 수평 처짐은 가운데 점을 기준으로 대칭성을 나타낸 반면 (Fig. 9 (a)), 스캔 모델 온실의 경우 좌측부 서까래의 최대 수평 처짐이 우측부보다 2배 이상 큰 0.44 cm로 비대칭적으로 나타났다 (Fig. 9 (b)). 설계도 온실과 스캔 온실의 Y축 부재 길이의 차이가 0.6%로 비교적 작았던 점을 고려하면, 초기의 미소한 불균일함도 극한 기상 하에서는 치명적인 구조 취약성으로 이어질 수 있는 것으로 판단된다.

수직 처짐의 경우 설계도 모델에서는 하부 기둥이 지탱해주는 서까래의 처짐이 나머지 서까래보다 낮게 나타났으나, 비교적 하부 기둥 높이가 낮고 서까래 곡률이 불균일했던 스캔 모델에서는 서까래의 수직 처짐이 상부에서 집중적으로 나타났다. 또한, 설계도 모델과 스캔 모델의 응력 분포 경향성

및 최대값 차이가 작았던 축 응력에 비해, 휨 응력은 비대칭성과 최대값 차이가 매우 두드러졌다. 설하중이 작용한 온실 구조의 경우 수직 처짐과 강관의 휨 응력에 가장 취약하다는 점을 고려하면, 3D 스캔 구조 형상 추정을 통한 온실 구조안전 진단 방법이 기상 재해 위험성 평가에 의의가 있다고 판단된다.

### 나. 설계 적설하중에 대한 온실 구조 안전성 평가

적설심의 증가에 따라 온실 부재에 발생하는 최대의 처짐 및 응력을 비교하였다 (Fig. 10). 수직 및 수평 처짐은 모두 설계도 모델에 비해 스캔 모델에서 최소 2배 이상 취약한 것으로 해석되었으며 (Fig. 10 (a)-(b)), 두가지 모델의 비교적 작은 응력값 차이를 고려하면 온실의 형상 크기 차이가 처짐 격차에 더 유효한 것으로 사료된다. 휨 응력의 경우 나머지 안전성 기준과 다르게 설계 적설심 (0.5 m)에서 허용 기준값에 근접한 것으로 나타났다 (Fig. 10 (d)).

최대 적설심인 0.5 m에서의 설계 기준에 대한 처짐 및 응력의 안전율을 Table 5에서 비교하였으며, 스캔 모델의 수직 처짐 안전율은 설계도 모델보다 56.9% 낮은 가장 큰 차이를 나타냈다. 설계도 모델과 스캔 모델의 모두 안전율이 각각 3.94

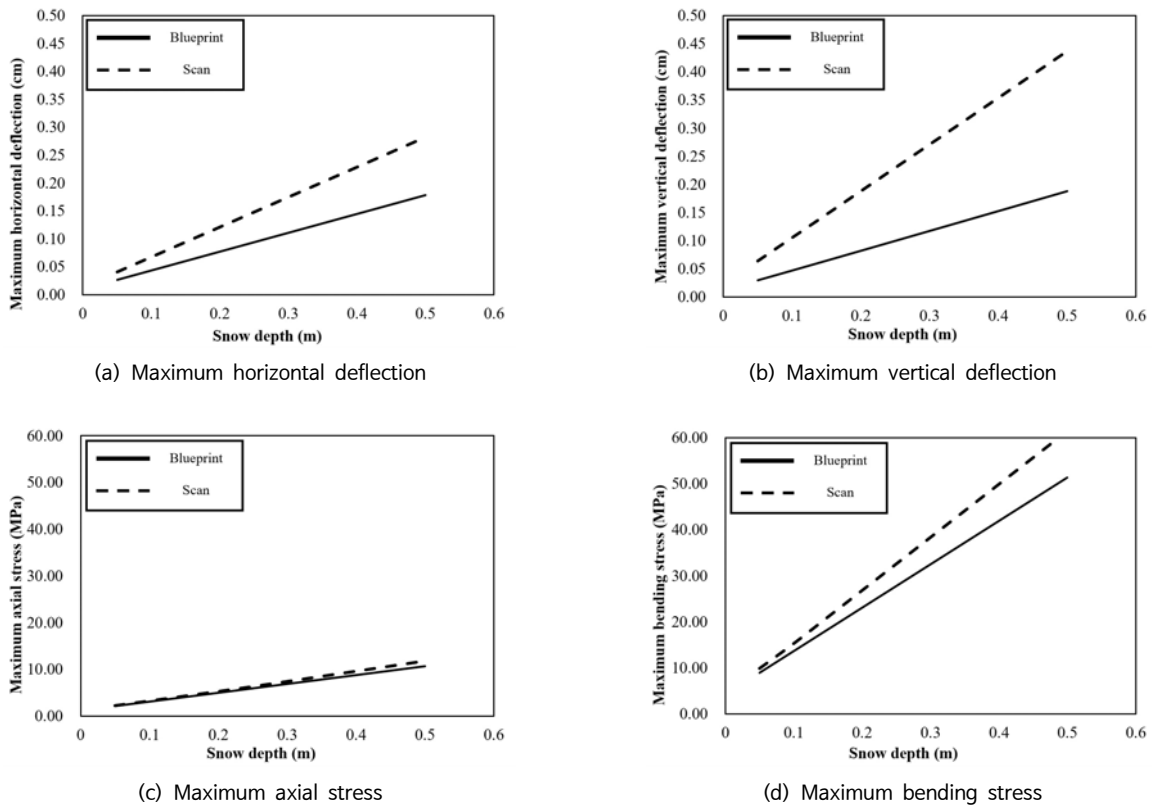


Fig. 10 Comparison of structural analysis results between blueprint model and 3D scan model

**Table 5** Comparison of quantitative results of structural analysis between blueprint model and 3D scan model

Model types	Horizontal deflection	Vertical deflection	Axial stress	Bending stress	Slenderness
Blueprint (Safety factor)	48.52	22.78	18.86	3.94	2.84
Scan (Safety factor)	30.71	9.81	16.67	3.20	2.85
Difference (%)	36.7	56.9	11.6	18.7	0.4

와 3.20으로 가장 낮았던 휨 응력의 경우, 스캔 모델의 안전율이 설계도 모델보다 18.7% 낮게 나타났다. 일반적으로 온실이 구조적으로 휨 응력에 가장 취약하다는 점을 고려하면, 설계도 모델 대비 3D 스캔 구조 형상 추정을 통해 약 18.7% 정확하게 온실의 구조적 안전성을 진단할 수 있을 것으로 판단된다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 현장에 설치된 기존 온실의 구조적 안전성을 진단하기 위해, 3D LiDAR 센서를 이용하여 온실 구조 형상을 추정하고 이를 구조해석하였다. 3D LiDAR 센서로 연동 온실을 스캔하여 좌표와 색상으로 이루어진 PCD를 추출하였으며, 이러한 원시 PCD의 영역 별로 차등 색상 지표 필터링을 적용하여 철골에 대한 PCD로 분할하였다. 또한, 이렇게 분할된 철골 PCD에 비지도학습 알고리즘인 K-means 알고리즘을 적용하여 구조해석을 위한 단위 크기의 부재 노드로 변환하였으며, 이를 구조해석에 필요한 온실 구조 형상 데이터로 최종 변환하였다. 구조 형상 재현성 검증을 위해 온실 스캔 모델과 설계도 모델의 X, Y, Z 축 방향 부재 길이를 실측치와 비교하였으며, 스캔 모델의 길이 오차는 2.3%로 비교적 정확한 것으로 나타났다. 반면에 설계도 모델의 지면과 수직한 부재의 오차가 5.4%로 나타나, 서까래 지면 관입 및 곡률 성형 등의 요인이 주요 시공 오차로 분석되었다. 최대 0.5 m 적설심에서 스캔 모델은 비대칭적 수평 처짐과 높은 휨 응력을 나타냈으며, 이는 초기의 미소한 온실 형상 불균일함도 극한 기상에서는 치명적 구조 위험성으로 이어질 수 있음을 시사한다. 특히, 온실이 가장 취약한 휨 응력에 대해 스캔 모델의 안전율이 설계도 모델보다 최대 18.7% 낮게 나타났으며, 이러한 안전율 오차는 극한 기상 대비 온실 구조 안전진단에 대한 정밀한 구조 형상 추정의 중요성을 부각한다.

본 연구에서는 원시 PCD에 경험적인 방식의 비지도학습 알고리즘을 적용하여 설계도에 비해 온실 구조 형상을 정확하게 추정할 수 있었으며, 대다수가 설계도면 없이 시공된 농가 온실에 구조 안전진단 적용 가능성을 확인했다는 점에 의

의가 있다고 할 수 있다. 추후 본 스캔 기법에 지도학습 기반의 자동화 프로세스를 도입하여, 온실 구조 안전진단의 농가 보급 및 정책 실용화가 가능할 것으로 사료된다. 한편, 본 연구에서는 온실 모델의 구조 안전성을 평가하는데 기존의 선형 구조해석을 적용하였으나, 활발하게 연구되고 있는 온실 비선형 구조해석을 도입할 경우 보다 정밀한 구조 안전진단이 가능할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 성과물은 (논문, 산업재산권, 품종보호권 등)은 농촌진흥청 연구사업 (세부과제번호: RS-2023-00218062)의 지원에 의해 이루어진 것임.

#### REFERENCES

1. Agarwal, P. K., and C. M. Procopiuc, 2002. Exact and approximation algorithms for clustering. *Algorithmica* 33: 201-226.
2. Bassier, M., and M. Vergauwen, 2020. Unsupervised reconstruction of building information modeling wall objects from point cloud data. *Automation in Construction* 120: 103338.
3. Bitelli, G., G. Castellazzi, A. M. D'altri, S. De Miranda, A. Lambertini, and I. Selvaggi, 2016. Automated voxel model from point clouds for structural analysis of cultural heritage. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 41: 191-197.
4. Choi, M. K., H. R. Ryu, M. W. Cho, and I. H. Yu, 2017. Effect of the member joint on structural performance of an arch-type multi-span greenhouse: A full-scale experimental and numerical study. *Journal of Bio-Environment Control* 26(4): 402-410. (in Korean).
5. Javid, M., A. Haleem, R. P. Singh, and R. Suman, 2021.



- Industrial perspectives of 3D scanning: Features, roles and its analytical applications. *Sensors International* 2: 100114.
6. Ji, Z., Y. Wang, and R. Zhao, 2022. Bridge structure and material stability analysis using Monte Carlo and COMSOL 3D modeling. *Highlights in Science, Engineering and Technology* 28: 193-199.
  7. Lee, J. Y., and H. R. Ryu, 2022. Structural analysis of pipe-framed greenhouses using interface elements for cross-over connections. *Engineering Structures* 266: 114504.
  8. Lee, S. I., J. H. Lee, Y. J. Jeong, and W. Choi, 2020. Development of a structural analysis model for pipe structures to reflect ground conditions. *Biosystems Engineering* 197: 231-244.
  9. Lee, S. I., J. H. Lee, Y. J. Jeong, D. S. Kim, B. H. Seo, Y. J. Seo, and W. Choi, 2022. System reliability analysis of semi-rigid frame structures - Focusing on greenhouses. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 64(5): 67-77. (in Korean).
  10. Liu, H., X. Wang, Z. Li, and Z. Zhong, 2022. Comparative study on ultimate stress test and COMSOL analysis of steel beam of pull-up cantilever scaffold. In *Hydraulic and Civil Engineering Technology VII*: 525-531.
  11. Mader, D., R. Blaskow, P. Westfeld, and C. Weller, 2016. Potential of UAV-based laser scanner and multispectral camera data in building inspection. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 41: 1135-1142.
  12. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2023a. *Agriculture, food and rural affairs statistical yearbook 2022*. No.11-1543000-000128-10. (in Korean).
  13. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2023b. *Regulations on the registration of disaster resistant design standards and disaster resistant facility standards for horticultural and special production facilities*. No. 2022-104. (in Korean).
  14. Ministry of the Interior and Safety, 2023. *2022 Disaster Report* (in Korean).
  15. Nam, S. W., and I. H. Yu, 2000. Survey and analysis of the structure and maintenance status of pipe frame greenhouses. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 42(4): 106-114. (in Korean).
  16. Pan, X., and T. Y. Yang, 2023. 3D vision-based bolt loosening assessment using photogrammetry, deep neural networks, and 3D point-cloud processing. *Journal of Building Engineering* 70: 106326.
  17. Pepe, M., D. Costantino, and A. Restuccia Garofalo, 2020. An efficient pipeline to obtain 3D model for HBIM and structural analysis purposes from 3D point clouds. *Applied Sciences* 10(4): 1235.
  18. Rolin, R., E. Antaluca, J. L. Batoz, F. Lamarque, and M. Lejeune, 2019. From point cloud data to structural analysis through a geometrical hBIM-oriented model. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)* 12(2): 1-26.
  19. Rural Development Administration, 2017. *Greenhouse structural design standards (Draft)* (in Korean).
  20. Ryu, H. R., E. H. Lee, M. W. Cho, I. H. Yu, and Y. C. Kim, 2012. Evaluation on the behavioral characteristics of plastic greenhouse by full-scale testing and finite element analysis. *Journal of Bio-Environment Control* 21(4): 459-465. (in Korean).
  21. Ryu, H. R., I. H. Yu, M. W. Cho, and Y. C. Um, 2009. Structural reinforcement methods and structural safety analysis for the elevated eaves height 1-2W type plastic greenhouse. *Journal of Bio-Environment Control* 18(3): 192-199. (in Korean).
  22. Suh, W. M., M. K. Choi, Y. H. Bae, J. W. Lee, and Y. C. Yoon, 2008. Structural safely analysis of a modified 1-2W type greenhouse enhanced for culturing paprika. *Journal of Bio-Environment Control* 17(3): 197-203. (in Korean).
  23. Tran, H., and K. Khoshelham, 2019. Building change detection through comparison of a lidar scan with a building information model. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 42: 889-893.
  24. Trias, A., Y. Yu, J. Gong, and F. L. Moon, 2022. Supporting quantitative structural assessment of highway bridges through the use of LiDAR scanning. *Structure and Infrastructure Engineering* 18(6): 824-835.
  25. Wood, R. L., and M. E. Mohammadi, 2015. LiDAR scanning with supplementary UAV captured images for structural inspections. *International LiDAR Mapping Forum* 2015: 10.