

# 농업용 파이프 하우스의 2차원 및 3차원 구조해석 비교분석

The Comparative Analysis of Agricultural Pipe House  
by 2 and 3-Dimensional Modeling

최 원\* · 윤 성 수 · 이 정 재(서울대)

Choi, Won · Yoon, Seong Soo · Lee, Jeong Jae

## Abstract

The scope has been small and the specification has been not suggested yet when the pipe house was planed by farmer in Korea. The construction has been made by the suitable agreement of builder and farmer. Also, life cycle time of the pipe house material under serviceability load is not suggested yet.

This study is to consider problems of past 2-dimension modeling, to introduce new 3-dimension modeling about pipe house analysis and to know that how the structure under various loads conditions behaves. Therefore, the object is to discuss the current design and to suggest new analysis modeling of the pipe house.

## I. 서론

최근 다양한 작부체계를 지원할 수 있고, 적은 시설비를 투입하여 비교적 큰 효과를 얻을 수 있는 파이프 온실이 증가하고 있다. 현재 원예 및 특작 하우스 시설물의 총 80%를 차지하는 지중 투입식 파이프 하우스는 설비비가 적게 소요되어 고정비가 적고, 인력으로 시공이 가능하며, 농민이 원하는 형태로 쉽게 변경이 가능하다. 이러한 장점으로 농가의 경영개선에 일조를 하고 있다.

그러나 파이프 하우스는 소규모로 제작되고, 법적인 구체적 기준이 마련되어 있지 않은 실정이며, 편의에 따라 시공업자와 농민사이의 합의에 의한 시공이 이루어지고 있다. 또한 사용하중 상태에서의 관리 방법을 제시하지 못하고 있다. 2001년의 경우, 겨울철 이상기후로 파이프 하우스는 전체 파이프 하우스 면적 51천ha의 약 10% 수준인 4,973ha가 파손되었고, 이에 따라 많은 사회적 비용이 지불되었으며, 그 중 정부 피해 보상액만 3,395억원에 달하고 있다.

소형 파이프 하우스의 붕괴는 재료조건, 하중조건, 기하조건에 따르는데, 재료조건은 선행의 많은 연구를 통해 적합한 재료의 물성이 제시되고 있다. 반면 하중조건은, 최근 강설의 경우 함수율이 설계기준보다 높았고, 파이프 하우스 골조 간격이 넓어서 파이프 하우스 골조 사이에 쌓여진 적설하중이 피복재에 인장력을 발생시켜 설계보다 큰 하중으로 작용하는 등 설계 할

때 고려한 하중보다 더 큰 하중이 부과되었을 가능성이 크다. 기하조건은 파이프 하우스의 기하적 형상이 일반적으로 아치형태로 대부분의 수직하중을 아치의 압축력과 기둥의 압축력으로 전달하는 형식을 띄고 있다. 그러나 이 경우 예상보다 큰 적설하중에서 쉽게 좌굴 되었다.

본 연구에서는 파이프 하우스를 해석하는 기존의 방법인 2차원적 해석의 문제점을 살펴보고 3차원 해석을 도입해서, 다양한 하중조건이 발생하였을 때 파이프 하우스의 구조적 거동을 고찰하고자 한다. 이를 통해 파이프 하우스 구조 해석의 발전방향을 제시하고자 한다.

## II. 구조해석을 위한 모델링

### 1. 2차원 해석을 위한 모델링 과정

길이방향의 모든 서까래는 동일한 응력분포를 보인다고 가정하기 때문에, 서까래만 구조해석에서 고려되는 2차원 해석방법을 적용하였다.

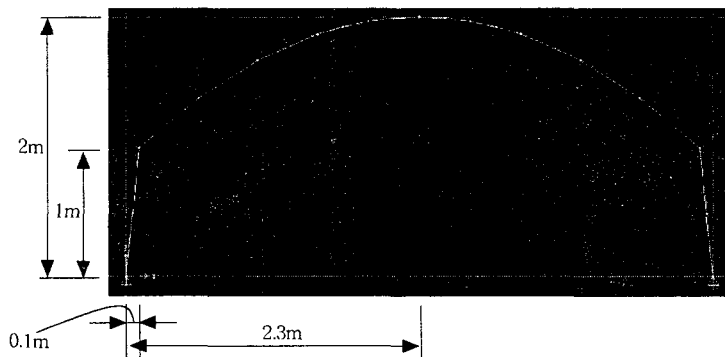


Fig. 1. 2-Dimensional Modeling of Pipe House

구조해석을 위한 기하조건으로 모든 부재는 Frame으로 모델링 하였으며, 모멘트에 대한 안전측 설계를 위해서 기초는 힌지로 구성하였다. 서까래의 곡선형은 연속하중을 파이프의 압축력으로 전달하기 위한 아치형상이다. 파이프 하우스의 제원은 다음과 같다.

Table 1. The Shape Dimension of Pipe House

	Rafter	Column
Pipe Dimension	$\phi 25 \times 1.5mm$	$\phi 25 \times 1.5mm$
Area	$A = 111mm^2$	$A = 111mm^2$
Moment of Inertia	$I = 7676mm^4$	$I = 7676mm^4$
Distance between Columns		1400mm

재료조건으로, 서까래와 기둥의 단위중량은  $7.85 \times 10^{-9} t/mm^3$ , 탄성계수( $E_s$ )는 20.4

$t/mm^2$ , 포아송비( $\nu$ )는 0.3, 온도팽창계수( $\alpha$ )는  $1.2 \times 10^{-5} / ^\circ C$ 을 사용하였다.

하중조건으로, 자중은 모든 서까래와 기둥에 단위중량  $7.85 \times 10^{-9} t/mm^3$  을 적용하였고, 풍하중은 풍속 25m/s를 높이에 따라 동일하게 적용하였다. 적용한 풍압계수와 풍압은 다음과 같다.

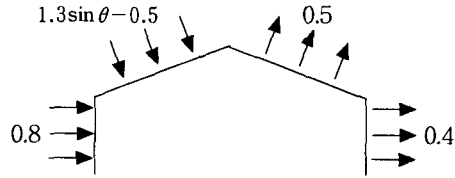


Fig. 2. Wind Coefficient C

$$P_w = q \times C = 0.0197 V^2 h^{\frac{1}{2}} C \quad (\text{kg}/\text{m}^2) \quad \text{단, } V : \text{m}/\text{s}, h : \text{m} \quad (1)$$

눈의 밀도는 대략 보통 순수한 물 밀도의 10%에 해당하기 때문에 설하중의 단위중량은  $0.1 t/m^3$ 로 가정하였다. 적설심은 2001년 1월 최고값인 25cm를 등분포로 부과하였다. 연중최고 편차를 28도라 가정하고 온도하중을 설정하였다.

### 2. 3차원 해석을 위한 모델링 과정

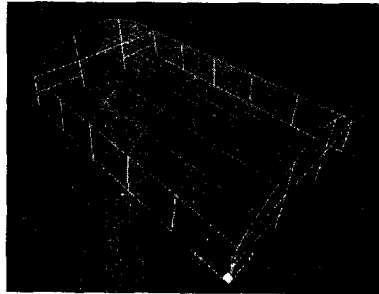


Fig. 3. 3-Dimensional Modeling of Pipe House

Table 2. The Comparison of 2 and 3-Dimensional Modeling

	2-Dimensional Analysis	3-Dimensional Analysis
Modeling	Plane Analysis by 2-D Frame	3-D Geometrical Modeling
Clothing Material	not Considering	Shell Element
Longitudinal Beam	not Considering	Frame Element

기하조건의 경우, 모든 연질필름은 Shell로 모델링 하였고 연질필름의 두께는 0.1mm로 가정하였으며 나머지는 2차원 해석방법과 동일하다.

재료조건의 경우, 연질필름의 단위중량은  $1.4 \times 10^{-9} t/mm^3$ , 탄성계수( $E_s$ )는  $0.0023 t/mm^2$ , 포아송비( $\nu$ )는 0.5, 온도팽창계수( $\alpha$ )는  $1.2 \times 10^{-5}/^\circ C$ 을 사용하였다.

하중조건의 경우, 자중, 풍하중, 설하중은 2차원 해석방법과 동일하다. 온도차이에 의해 연질필름에 발생하는 하중은 파이프에 영향을 미치지 못하므로 온도하중은 파이프에만 적용하였다.

### III. 해석결과

#### 1. 재료의 허용응력 및 기둥의 임계하중

일반 구조용 강관의 허용응력  $2400 kg/cm^2$  을 기준으로 안전율 1.5를 적용하면 허용 인장, 압축, 휨 응력은 모두  $1600 kg/cm^2$  이다. 기둥의 세장비  $\lambda = \frac{L}{r} = \frac{502.49}{8.32} = 60.40$  이므로 기둥의 임계하중은 양단 힌지인 경우  $P_{cr} = \pi^2 \frac{EI}{L^2} = \pi^2 \times \frac{20.4 \times 7676}{502.49^2} = 6.12$  이다.

#### 2. 구조해석 결과

2차원 해석이나 3차원 해석에서 온도하중은 설하중, 풍하중, 조합하중(설하중+풍하중)에 의한 영향과 비교해 영향이 아주 작았다. 기둥부재의 압축력과 파이프부재의 모멘트값은 구조물이 붕괴될 것인가를 검토하기 위한 인자로 결정되었다. 부재의 축력이나 전단력은 검토인자에서 충분히 제외될 만큼 작았다. 결과는 다음과 같다.

Table 3. the Result of 2-D vs 3-D Analysis

	Buckling Load of Column : $P_{cr}$	Stress by Moment
2-D Analysis	Max. Load of Column : 90kg < 6120kg → Stable	Max. Moment : 40.64 ton · mm $\sigma = \frac{M}{I} y = \frac{40.64}{7676} \frac{25}{2} \frac{1000}{0.1^2} = 6618.03 kg/cm^2 > 1600 kg/cm^2$ → Unstable
3-D Analysis	Max. Load of Column : 30kg < 6120kg → Stable	Max. Moment : 7.57 ton · mm $\sigma = \frac{M}{I} y = \frac{7.57}{7676} \frac{25}{2} \frac{1000}{0.1^2} = 1232.74 kg/cm^2 < 1600 kg/cm^2$ → Stable

### IV. 결론

파이프와 연질필름이 복합된 파이프 하우스 구조물을 정확히 해석하기 위해서, 연질필름은 Shell로, 파이프는 Frame으로 모델링하고, 구조해석을 수행하여 기존의 해석과 비교하였다.

2차원 구조해석을 실시한 결과 현재 사용하는 파이프 하우스의 응력은 응력 한계를 넘어 붕괴될 것으로 해석되었으나, 3차원 정밀 해석의 결과는 모든 부재가 안전측에 있었다.

파이프 하우스를 구조설계 할 때 현재와 같이 2차원 해석만을 실시하고, 길이방향에 대하여는 검토하지 않으면, 길이 방향으로 넣은 가로대의 영향과 연직 필름의 하중 분배 영향으로 응력이 감소된다. 따라서 3차원 해석을 고려하지 않은 설계는 과도한 설계를 유발시킬 수 있을 것으로 판단된다.

1. 본 연구의 결과, 3차원 해석의 경우 응력은 안전측에 있었고, 모든 하중 조건에 대하여 정면과 후면(출입구)의 부재는 서까래에서 발생하는 응력보다 컸다.
2. 3차원 해석의 경우 연질필름에 작용하는 전체적인 응력 분포로 파이프 하우스에 작용하는 하중에 의한 전체적인 응력 경향을 파악할 수 있었다.
3. 파이프 하우스가 붕괴된 사례들을 조사한 결과 연질필름의 붕괴보다는 파이프 하우스의 중심부분 서까래가 하중을 견디지 못하고 붕괴된 경우가 대부분이다. 구조 해석을 할 때 연질필름에 작용하는 하중이 서까래로 충분히 전달되어야 한다는 것을 알 수 있다. 3차원 해석의 결과 파이프 부재는 작은 응력이 발생하여 모두 안전측으로 평가되었으나 연질필름은 상당한 응력이 발생함을 알 수 있었다. 연질필름에 작용하는 하중이 Frame요소로 하중을 전달해야 함에도 불구하고, 잘 전달되지 않았기 때문이다. 연질필름을 모델링한 Shell 요소가 얇은 박막으로 작용하지 못하고, 판요소와 유사하게 구조 모델링이 이루어졌기 때문일 것이다.

소규모 파이프 하우스의 구조해석 방법으로 3차원 구조해석을 실시하되, 연질필름을 구조해석에서 제외시키고, 하중을 직접 Frame요소에 적용함이 타당하다고 사려된다.

## 참고문헌

1. 고재균, 김문기, 리신호, 1986, 하우스 안전구조 설정을 위한 역학적 연구, 농촌진흥청 농시 논문집, 농업산학협동편, pp.251-266.
2. 고재균 외, 1990, 농업시설공학, 서울대학교 출판부
3. 김문기, 고재균, 이신호, 1987, 플라스틱 하우스의 구조실태의 조사 연구, 한국농공학회지 29(3), pp.113-124.
4. 김문기, 신만균, 정두호, 김인수, 농업경영관실, 1995, 시설구조의 기준화 및 작물재배연구, 농촌진흥청
5. 농업과학기술연구소, 1993~1995, 원예시설의 구조안전기준 작성, 농어촌진흥공사
6. 이기명, 이석건, 장익주, 1990, 시설원예에 있어서 구조의 표준화 및 환경제어·재배관리 자동화에 관한 연구, 과학기술처
7. 한국농자재산업협회, 1995, 시설원예 생산자재 단체표준 기준설정사업, 농림수산부