

유체-구조 연성해석을 통한 삼각단면 형상의 비닐하우스에 관한 연구

이규한* · 김정재** · 김정주** · 이상준*** · 하호진* · 강태원*†

A study of the triangular cross section type greenhouse using fluid-structure interaction

GyuHan Lee*, Jeong Jae Kim**, Jeongju Kim**,
Sang Joon Lee**, Hojin Ha* and TaeWon Kang*†

Abstract The purpose of this study is to study the fluid-dynamic and structural characteristics of the conventional greenhouse and to find possible improvement on the current greenhouse. The greenhouse is required to have enough rigidity of the structure while the installation and reinforcement should be as easy as possible. In this study, the structural stability to the snow load was tested through the computational structure analysis based on the building structure standard, and the wind load was computed by computational fluid-structure interaction analysis. The current analysis can be used as a reference data for a new greenhouse and it will be economically viable by reducing installation and maintenance costs.

Key Words : Greenhouse (비닐하우스), Fluid-Structure Interaction (유체-구조 연성해석), Safety Evaluation (안전성 평가), Wind Experiment (풍동 실험)

1. 서론

국내에서 비닐하우스의 피해는 해마다 천억 단위의 대규모 피해가 발생하고 있으며, 폭설과 태풍이 대부분을 차지하고 있다. 비닐하우스는 농촌 진흥청에서 제시한 기준을 만족해야 하며,

이를 개선하기 위한 연구 및 구조 안전성 평가는 꾸준히 진행되어왔다. 하지만 제시한 규격들은 비닐하우스의 다양한 형태와 무분별한 시공, 해석의 오차 등의 여러 가지 요인으로 인하여 안전성이 확보되지 못하고 있다. 그리고 우리나라 대부분의 비닐하우스 형태는 아치 형상인데, 10m 이상의 파이프를 구부러서 수직으로 설치할 때 하중이 크므로 작업 및 보강이 힘들다. 그리고 피해 발생 후 복원 작업을 할 때 기존 자원을 활용하지 못하기 때문에 폐자재가 증가하여 농가에 큰 부담이 되고 있다.

이러한 문제들을 해결하기 위한 대부분의 노력은 비닐하우스의 구조를 개선하는 점에서 시

† Dept. of Mechanical and Biomedical Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Korea.
E-mail : jirehk@kangwon.ac.kr

* Dept. of Mechanical and Biomedical Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Korea.

** Dept. of Mechanical Engineering, POSTECH, Pohang, Korea.

작되었다. Jung¹⁾ 등은 출력과 굽힘 모멘트를 토대로 적설하중 증가에 관련한 비닐하우스 골조 성능의 개선을 연구하였고, Han²⁾ 등은 조립형 비닐하우스를 연구하였는데, 실제 시험 및 전산 해석을 통한 처짐의 크기를 비교 분석하였다. Shim³⁾ 등은 변형하는 최대 변위의 양의 비교를 통하여 유형별 비닐하우스의 골조를 분석하였으며, Ro⁴⁾는 조립식 클립형 비닐하우스를 전산해석을 통하여 안전성 평가를 진행하였다.

적설하중의 경우 수직 하중만 작용하기 때문에 건축구조기준을 참고한 값으로 정하중 해석 진행 시 오차가 크게 발생하지 않겠으나 풍하중의 경우는 건축구조기준에서 제시한 값으로 풍하중을 산정할 때 지면과의 각도로 값을 선정하는 계수가 있는데 곡면의 경우 한 면에서 각도가 점점 변화하므로 애매하고, 그 면에 전체에 동일한 압력이 작용한다는 가정이 현실과 맞지 않으므로 한계가 있다. 그리고 풍동 실험을 통해 실제와 유사한 환경을 만들어 실험하고 실험 결과와 비교하여 해석의 신뢰성을 확인할 필요가 있다.

본 연구는, 비닐하우스의 구조를 새롭게 제안하여 기존 비닐하우스와 구조적 안전성을 비교하는 것을 목표로 하고 있다. 비교를 위한 기존 비닐하우스 모델은 07-단동-2형을 채택하였으며, 구조적 안전성 비교방법으로 유동해석과 구조해석 모두를 사용하였다.

유동해석은 Ansys의 Fluent를 사용하였으며, 구조해석은 Dassault Systems의 Abaqus를 사용하였다. 적설하중은 건축구조기준을 참고하여 기준에 맞게 각 계수를 정하고 값을 산정한 뒤 해당 영역 별로 적용하여 구조해석을 진행하였다. 풍하중은 바람에 의한 난류 유동해석을 통해 해당 영역별 작용하는 압력 값을 구하고 구조해석에 적용하는 1-way 유체-구조 연성해석을 진행하였다.

그리고 비닐하우스 모형을 제작한 뒤 풍동 실험을 진행하고, 실험과 같은 조건의 해석을 진행하여 각 비닐하우스의 주변 속도를 구하였다. 속도 분포를 통하여 실제와 해석이 얼마나 유사성이 있는지 비교하였다.

2. 전산해석 및 실험

2.1 비닐하우스 개요

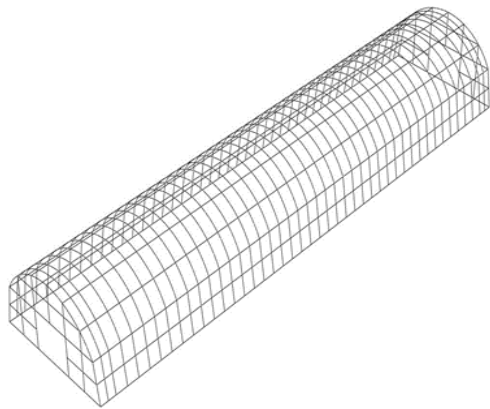
비닐하우스는 폭과 높이는 실제 비닐하우스와 일치하게, 길이는 100m 기준으로 1/4 축소한 약 46평형으로 모델링 하였다. 기존 비닐하우스의 너비는 6m, 높이는 3.3m, 길이는 25.6m이며, 제안 비닐하우스의 너비는 6m, 높이는 3m, 길이는 25.2m이다. 그리고 기존 비닐하우스는 10m 이상의 파이프를 굽혀서 제작하지만, 제안 비닐하우스는 자가 조립이 가능할 수 있게 짧은 파이프들을 연결하여 삼각단면 형상으로 설계하였으며, 들어가는 파이프의 양 또한 기존 비닐하우스에 비해 적게 든다. 파이프의 물성은 KS D 3760⁵⁾에 있는 SPVHS 물성을 사용하였다.

Table 1. Mechanical properties of SPVHS

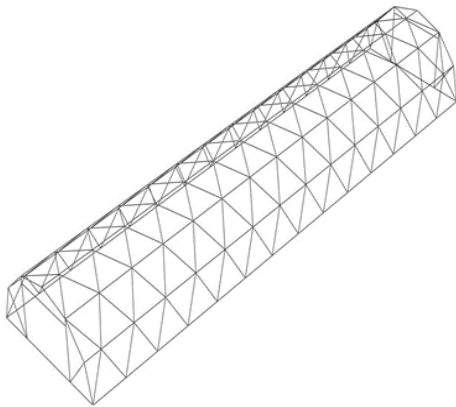
List	Value
Size	∅ 31.8*1.5mm
Density	7,800kg/m ³
Elastic modulus	200,000MPa
Possion ratio	0.3
Yield strength	295MPa
Tension strength	400MPa
Elongation	0.18

비닐하우스는 파이프 위의 비닐에 작용하는 하중에 주위 골조로 분산되므로 본 연구에서는 비닐에 작용하는 하중이 파이프로 고루 분산된다는 가정 하에 비닐을 제외하고 파이프만 모델링을 하였다. Abaqus를 이용하여 Fig. 1과 같이 1D 요소들로 3D 모델링을 진행하였고 그 후에 beam section과 pipe profile을 적용하였다.

실제 비닐하우스 크기로 풍동실험을 진행하기 어려우므로 Fig. 2와 같이 실험 장치에 맞게 너비와 높이를 1/10로 축소하였고 길이는 540mm로 통일하였다. 지름이 3.2mm인 스테인리스 용접봉을 이용하여 절단 및 굽힘, 용접을 통해서 비닐하우스 골조를 만들고 실제 비닐하우스에 사용되는 0.1mm 두께의 비닐로 바깥 부분을 감싸고 테이프 및 에폭시로 고정하여 비닐하우스 모형을 제작하였다.



(a) Existing model



(b) Proposed model

Fig. 1. 3D modeling of greenhouses

2.2 전산해석

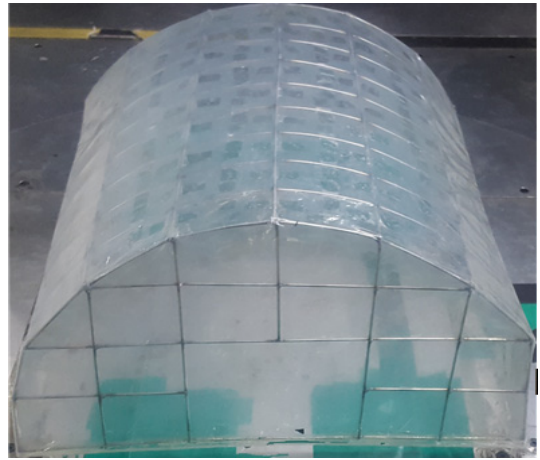
2.2.1 적설하중 해석

본 연구에서 적설하중을 구하기 위해 선택한 방법은 국토교통부의 건축구조기준⁶⁾에서 제공하는 환경과 수식을 기준으로 Abaqus를 이용하여 비닐하우스의 안전성을 확인하였다.

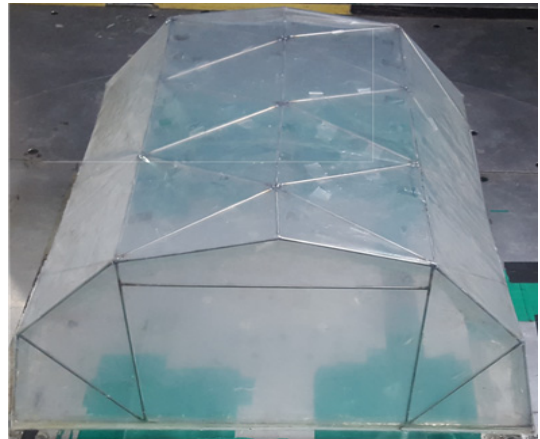
적설하중을 산정하는 식(1)은 다음과 같다.

$$S_s = C_b C_c C_t I_s S_g C_s \quad (1)$$

S_s 는 적설하중, C_b 는 기본 지붕적설하중 계수, C_c 는 노출 계수, C_t 는 온도 계수, I_s 는 건축물의 중요도 계수, S_g 는 지상 적설하중 계수, C_s 는 지붕 경사도 계수를 나타낸다. 비닐하우스의 적설하중



(a) Existing model



(b) Proposed model

Fig. 2. Greenhouse models for PIV experiments

값 S_s 의 산정을 위하여 기본 적설하중 계수 C_b 는 기준에서 제시하는 일반 값인 0.7을 사용하였고, 노출 계수 C_c 는 주변 환경에 의해 지붕이 바람에 노출되는 정도를 고려하는 계수로 바람에 의한 눈의 제거가 지형, 높은 구조물 또는 근처의 몇몇 나무들 때문에 지붕 하중의 감소를 기대할 수 없는 위치인 1.0을 적용, 온도 계수 C_t 는 비닐하우스 내부의 난방에 의한 적설하중이 제어되는 구조인지를 고려하는 계수로 비난방구조물 값인 1.2를 적용하였다. 건축물의 중요도 계수 I_s 는 구조물의 용도 및 중요도, 사회성과 경제성을 고려하여 설계용 재현 기간을 고려하는 계수로 농업 시설물에 해당하는 중요도 3인

0.8을 적용하였다. 지상 적설하중 값 S_g 는 적설 50cm 기준 기본값인 $0.5kN/m^2$ 를 적용하였으며, 지붕 경사도 계수 C_s 는 내리는 눈이 모든 부분에서 똑같은 적설하중으로 작용하지 않는다고 제시하였고, 지면과 이루는 경사도에 따라 계수를 분류하였다. 지면과 이루는 각도가 70도 이상인 곳에서는 적설하중이 작용하지 않는다고 가정하였다.

Table 2. Roof slant coefficient

Slant (degree)	Coefficient
0~15	1.0
15~30	0.85
30~45	0.55
45~70	0.02
70~90	0

경사도에 따라 영역을 나누어서 적설하중을 구하였다. 그리고 영역별 압력에 해당 면적을 곱하고 총 파이프의 길이로 나누어 단위길이 당 작용하는 힘을 구하였다. 지면과 닿는 부분들은 회전 방향을 제외한 모든 자유도를 구속하였고, 맞닿는 파이프들은 용접상태로 가정하였다. 그리고 중력 방향으로 선 하중을 적용하였다.

2.2.2 풍하중 해석

본 연구에서 풍하중 값의 산정과 실험과 비교하기 위해서 Fluent를 이용하여 유동장을 모델링한 후 입구에 지면 방향과 평행하게 속도를 적용하여 유동해석을 하였고, 실험과 비교하기 위한 것과 실제와 유사한 환경에 적용하기 위한 것 2가지를 진행하였다. 실험과 비교하기 위한 유동장의 크기는 실제 시험장치 크기와 같은 너비 0.72m, 높이 0.6m이며, 유동의 안정을 위하여 입구 방향은 비닐하우스 길이의 3배 길이, 출구 방향은 10배의 길이로 설정하였고 길이는 7.8m이다. 입구 조건은 실험 속도와 똑같이 14m/s로 하였고, 출구 조건은 대기압으로 설정하였다. 그리고 입구와 출구로 제외한 면들은 모두 미끄러짐이 일어나지 않는 벽으로 설정하였다. 실제와 유사한 환경에 적용하기 위한 유동장의 크기는 너비 40m, 높이 15m, 길이 78m이다. 입구 조건

은 건축구조기준에 명시된 지역 중 80%가 30m/s 이하인 지역이므로 30m/s로 해석을 진행하였고, 출구 조건은 대기압으로 설정하였다. 이전 유동장과 다르게 실제 조건을 고려하여 지면과 비닐에 해당하는 면만 미끄러짐이 일어나지 않는 벽으로 설정하였다. 본 연구에서는 $k-\omega$ SST(Shear-Stress Transport)를 난류모델로 사용하였다.

2.2.3 유체-구조 연성해석

Fluent에서 도출한 결과를 Abaqus에 연동하지 위하여, 풍동해석을 통한 각 면에 걸리는 압력분포를 통하여 X, Y, Z방향의 분력을 구한 뒤, 해당 길이로 나누어 단위길이당 작용하는 힘을 구하여 적설해석과 동일하게 진행하였다.

2.3 Particle image velocimetry (PIV) 실험

본 실험에서는 PIV를 진행하기 위하여 POSTECH 중형 풍동을 이용하였으며, Δt 를 30 us, 유속은 14m/s로 설정하여 촬영하였다. Fig. 4와 같이 비닐하우스 모형을 바닥 면에 고정한 후 비닐하우스 입구 기준 측면방향으로 바람을 불었다. 촬영은 비닐하우스 모형의 중앙 면을 기준으로 하였고, 한 번에 모든 영역을 촬영할 수 없어서 세 영역으로 나누어 촬영하였다. 영역별로 1800장을 촬영하였고, PIVlab을 이용하여 촬영된 사진의 입자들의 속도 정보를 얻었다. 그리고 Matlab으로 평균 속도를 구한 뒤 영역별 사진을 합쳐 속도분포를 나타내었다.

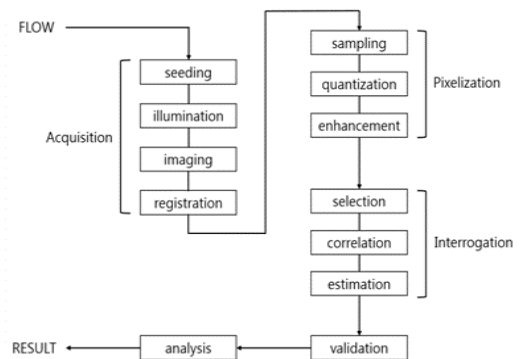


Fig. 3. Basic principle of PIV

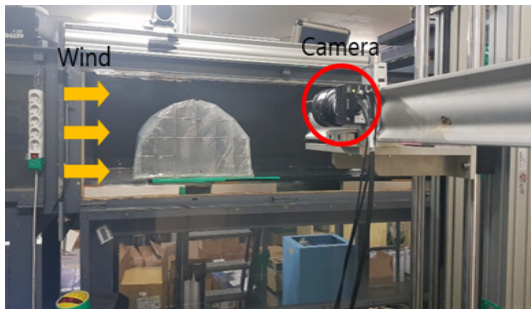
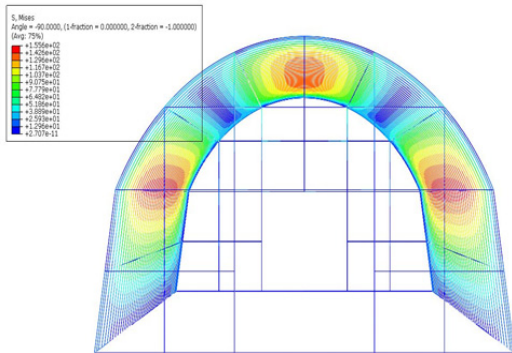


Fig. 4. Set up of PIV experiment

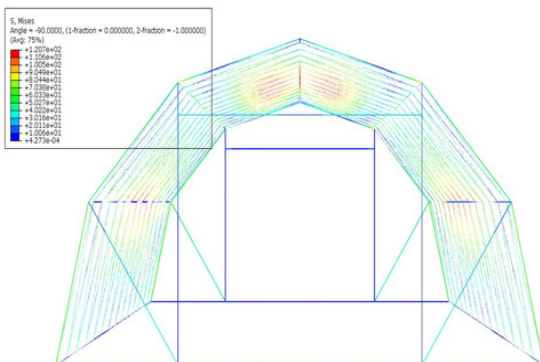
3. 결과

3.1 적설하중 해석 결과

Fig. 5에서와 같이 계산한 적설하중을 적용하여 구조 해석한 결과 기존 모델의 경우 비닐하우스의 중앙 상단 부분과 양쪽 아치형이 시작되

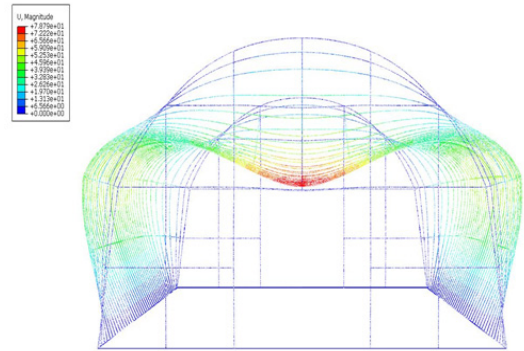


(a) Existing model

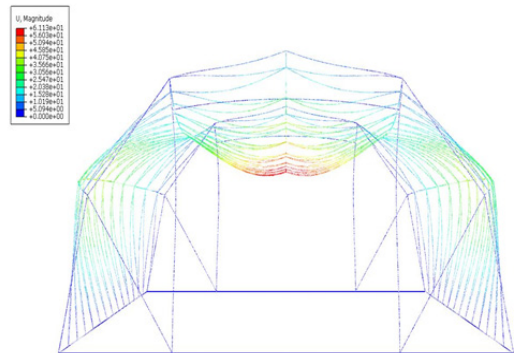


(b) Proposed model

Fig. 5. Von-Mises stress at snow load



(a) Existing model



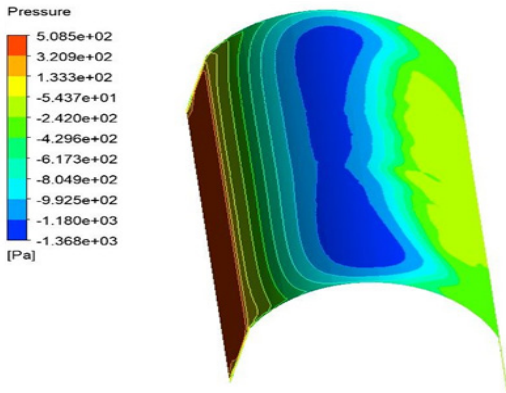
(b) Proposed model

Fig. 6. Deformation at snow load

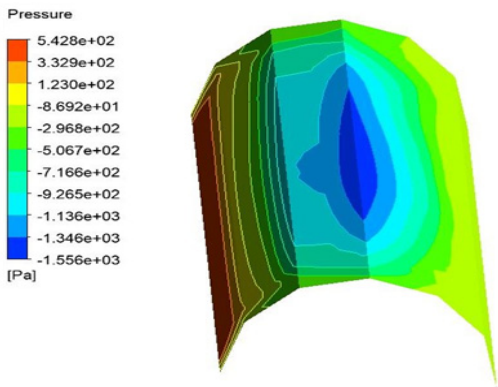
는 부분에서 응력 집중이 발생하며 아치형이 시작되는 부분에서 최대 본-미세스 응력 이 약 155.6MPa이 발생한다. 제안 모델의 경우 기존 모델과 비슷하게 중앙 상단 부분과 양쪽 옆 부분에서 응력 집중이 발생하며 중앙 상단 부분에서 최대 본-미세스 응력이 약 120.7MPa이 발생한다.

Fig. 6에서는 적설하중에 대한 변형을 가시적으로 보여주기 위하여 실제 결과보다 20배 확대하였다. 기존 모델과 제안 모델 둘 다 중앙 상단 부분에서 가장 많은 변형을 보였다. 기존 모델은 최대 약 78.79mm, 제안 모델은 약 61.13mm 발생하였다.

3.2 풍하중 해석 결과



(a) Existing model



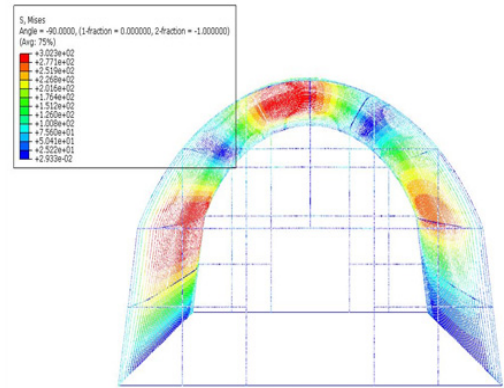
(b) Proposed model

Fig. 7. Pressure at wind load

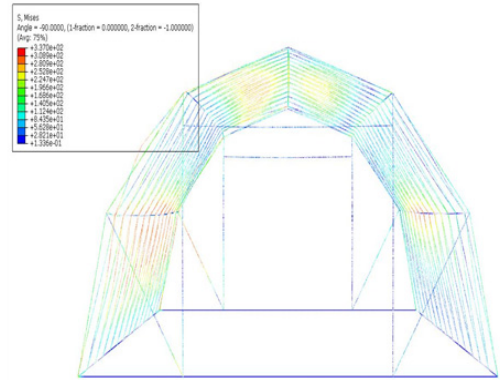
Fig. 7은 풍하중에 대한 CFD 결과이며, 기존 모델과 제안 모델 모두 중앙 상단부에서 최대 압력 값이 발생하고 기존 모델이 약 200Pa 정도 더 높은 압력을 보여준다. 기존 모델의 중앙 상단부가 제안 모델에 비해 최대 압력이 넓게 분포하였다.

3.3 유체-구조 연성해석 결과

Fig. 8에서는 유동해석을 통해서 구한 분력을 적용하여 구조해석을 한 결과 기존 모델은 바람이 불어오는 왼쪽 중앙부와 중앙 상단부에서 응



(a) Existing model



(b) Proposed model

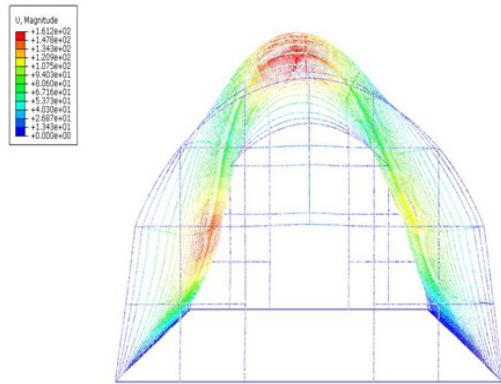
Fig. 8. Von-Mises stress at wind load

력 집중이 발생하며, 왼쪽 중앙부에서 최대 분-미세스 응력이 약 302.3Mpa이 발생한다. 제안 모델은 왼쪽 중앙부에서만 응력 집중이 발생하며 최대 분-미세스 응력이 약 337Mpa이 발생한다.

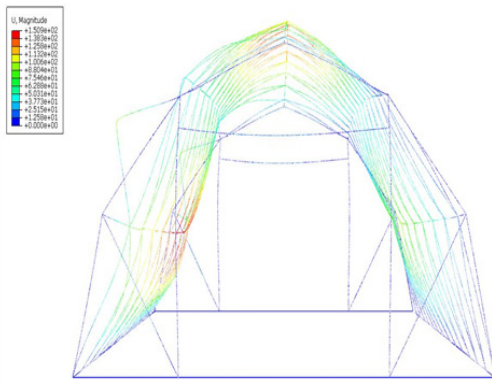
Fig. 9에서도 마찬가지로 변형을 가시적으로 보여주기 위하여 실제 결과보다 5배 확대하였다. 기존 모델은 중앙 상단부부분에서, 제안 모델은 왼쪽 중앙부에서 최대 변형량을 보였다. 기존 모델은 최대 약 161.2mm, 제안 모델은 약 150.9mm이 발생하였다.

3.4 유동해석 & PIV 비교

Fig. 10과 Fig. 11은 유동해석과 PIV의 결과를 각 모델에 따라 나눈 그림이며 속도분포를 비교



(a) Existing model



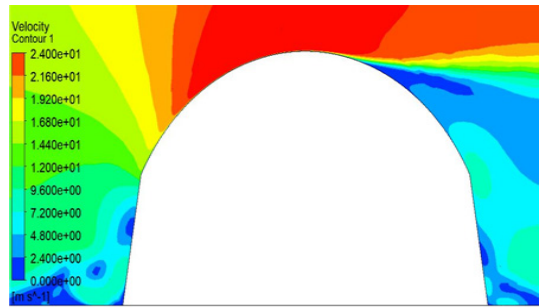
(b) Proposed model

Fig. 9. Deformation at wind load

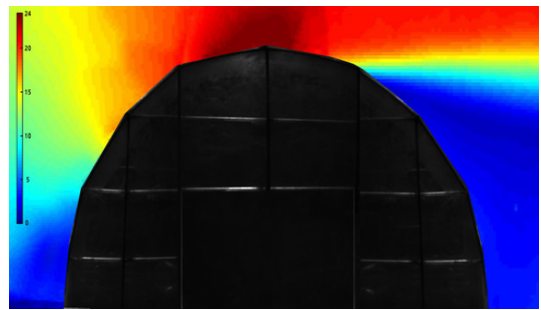
하기 위하여 최대 속도를 24m/s로 통일하였다. 실험과 해석 모두 기존 모델이 제안 모델보다 최대 속도도 빨랐으며 전체적으로 속도가 빠른 경향을 보였다. 두 모델 다 중앙 왼쪽 상단부에서부터 속도가 빨라지는 경향을 보였다.

4. 결론

본 연구에서는 새로운 디자인의 비닐하우스를 제안하고 기존 모델과 비교하였을 때 구조적 안전성을 비교해석 하였다. 기존 모델과 제안 모델에 대하여 구조해석과 유체-구조 연성해석을 통하여 안전성 평가를 진행하였고, 유동해석과 풍동실험을 통하여 해석과 실험이 얼마나 유사성이 있는지 간략하게 비교해 보았다.

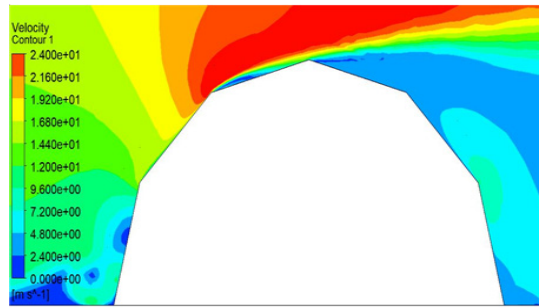


(a) CFD analysis



(b) PIV experiment

Fig. 10. Velocity contour of existing model



(a) CFD analysis



(b) PIV experiment

Fig. 11. Velocity contour of proposed model

1) 적설하중의 경우 두 모델 모두 최대 본-미세스 응력 값이 항복강도보다 작게 발생하였으나 기존 모델이 제안 모델보다 최대 본-미세스 응력 값이 약 35Mpa 더 크게 발생하였고, 변형 또한 기존 모델이 제안 모델 보다 약 17mm 정도 더 크므로 제안 모델의 안전성이 더 좋다고 평가한다.

2) 풍하중의 경우 두 모델 모두 본-미세스 응력이 항복강도보다 크게 발생하였다. 제안 모델이 기존 모델에 비하여 약 35Mpa 큰 값을 보였지만 국부적으로 발생하였고, 그 곳을 제외하면 기존 모델과 비슷한 응력 값을 보였다. 오히려 변형에서는 기존 모델이 제안 모델보다 최대 약 10mm 정도 더 크므로 풍하중에 대한 안전성은 비슷하다고 평가한다.

3) 해석과 실험에서 구한 속도 분포 모두 제안 모델의 최대 속도 부분의 컨투어가 기존 모델에 비해 넓은 분포를 보였고, 실험과 해석의 속도분포를 비교했을 때 약간의 차이는 있지만 전체적으로 비슷한 속도분포를 보이므로 실험과 해석의 결과가 유사성이 있다고 판단된다.

4) 종합적으로 제안 모델이 기존 모델보다 안전하다고 판단된다. 제안 모델의 경우 적설하중의 경우 더 작은 응력 값이 발생하고, 풍하중의 경우 더 큰 응력 값이 발생하지만 국부적이며 응력 집중이 발생하는 곳만 따로 보강이 가능하다.

REFERENCE

- 1) Jung. H. J., Yang. S. H., Lee. T. J., 2018, "A Study Improvement of Greenhouse Frame to Bear the Heavy Snow", Journal of the Korea Academic-Industrial cooperation Society, Vol. 16(3), pp.2242~2248.
- 2) Han. D. J., Shim J. S., 2016, "A Study on the Development of Stress Tolerant Structure Systems in the Frame of Built-up Greenhouses", Journal of the Korean Institute of Rural

Architecture, Vol.18(2), pp.11~18.

- 3) Shim. J. S., Lee. C. H., 2012, "A Study on Development of Stress Tolerant Structure System in the Frame of Greenhouses", Journal of The Korean Digital Architecture-Interior Association, Vol.12(1), pp. 5~13.
- 4) Ro. K. C., 2014, "An Evaluation of the Structure Stability of a Clip Type Prefabricated Greenhouse under Strong Wind and Heavy Snow Conditions", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.15(6), pp.3423~3428.
- 5) KS D 3760, Coated steel pipes for vinyl housing, Korean Standards Association, 2014
- 6) Korean Design Standard, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2018
- 7) Lee. G. H., Kang. T. W., 2018, "Study of a Greenhouse Structure Having Self-Assembly Frame", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol.27(5), pp.439~445.