내재해형 온실구조의 해석을 위한 구조모델

정 지 은¹ · 김 대 진^{1*} · 김 홍 진² · 신 승 훈² · 김 진 원³

¹경희대학교 건축공학과, ²경북대학교 건설환경에너지공학부, ³포스코 철강솔루션 마케팅실

Structural Analysis Modeling of Disaster Resilient Greenhouse Structures

Ji-Eun Jung¹, Dae-Jin Kim^{1*}, Hong-Jin Kim², Seung-Hoon Shin² and Jin-Won Kim³

¹Department of Architectural Engineering, Kyung Hee Univ., Yongin, 17104, Korea

²Department of Architectural Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu, 41566, Korea

³POSCO Global R&D Center, Incheon, 21985, Korea

Abstract

This paper presents the results of the parametric study to investigate the effects of several analysis modeling parameters such as support conditions, member connectivities and cable member stiffness on the main mode shapes and natural frequencies of a representative disaster resilient greenhouse structure. In addition, an ambient vibration test was performed on the representative greenhouse structure and its main mode shapes and natural frequencies were obtained. By comparing the experimental and analysis results, a proper analysis modeling method of the representative greenhouse structure was proposed.

Keywords : greenhouse structure, connection modeling, modal analysis, ambient vibration test

1. 서 론

1.1 연구배경

우리나라 시설원에 설치 면적은 2014년 말 기준 51,787 ha으로 이 중 유리온실이 329ha(0.64%), 철골 경질판 온실이 76ha(0.15%), 비닐하우스가 51,382ha(99.22%)로서 파이프 골조로 구성된 비닐하우스가 대부분을 차지한다(Kim, 2015). 이는 다른 종류의 온실보다 약 2~4배 저렴한 설치비용을 요구함에도 불구하고 비교적 견고한 구조를 지니고 있으며 보온과 통풍 성능 또한 우수하기 때문이다. 따라서 앞으로도 파이프 골조 비닐하우스가 지속적으로 높은 비율의 시설 원에 설치 면적을 차지할 것으로 예상된다(Lee *et al.*, 2008; Nam and Yu, 2000; Choi *et al.*, 2014).

하지만 최근 들어 빈번히 나타나는 이상 기후로 인해 다수의 온실구조물 붕괴사태가 보고되고 있다. 특히, 파이프 골조

비닐하우스와 같은 경량구조물은 강풍에 의해 구조물 전체가 공명현상을 일으켜 순간적으로 발생하는 인발력을 견디지 못하고 기초의 일부 또는 전부가 뽑혀 구조적으로 기능을 상실하기도 하며, 이는 온실내부에 재배되는 작물에 치명적인 피해를 입히게 된다(Ryu *et al.*, 2014; Yoon *et al.*, 2003). 따라서 이상 기후로 인한 재해에 대해서도 구조적 안전성을 지닌 온실구조물의 설계에 대한 중요성이 점차 커지고 있다.

구조해석 프로그램을 사용하여 온실구조 성능 검토를 수행할 경우 각 구조요소의 거동을 해석 모델링에 정확히 반영하여야 한다. 온실구조는 일반적인 강구조 프레임 구조와 달리 구조요소 간의 연결성이 명확히 규정되지 않는 경우가 많다. 따라서 이들의 구조적 성능을 평가하기 위해 여러 연구가 수행되었으며 대부분 실험적 방법에 의존하고 있다. Nam(2001)은 온실 구조의 접합부 성능을 평가하기 위해 조립 연결부에 수직 하중을 작용시켜 하중-변위 거동을 평가하였으며, Lee와 Shin(2014)은 온실구조 파이프 결속조리개에 대한 미끄럼 실험을 수행하여

* Corresponding author:

Tel: +82-31-201-3329; E-mail: djkim@khu.ac.kr

Received September 25 2016; Revised November 2 2016;

Accepted November 3 2016

©2017 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

그 성능을 평가하였다. Kim 등(1994)은 별도의 콘크리트 기초없이 지붕 서까래를 직접 땅속에 매입한 온실 구조를 대상으로 정적해석을 수행한 결과를 분석하였으며, Kim(1972)은 케이블지지로 지지되는 온실구조의 케이블 인장력 및 변형에 대한 근사식을 유도하였다.

이와 같은 연구가 온실구조를 구성하는 여러 구조 요소의 성능을 평가하기 위한 시도이기는 하지만 온실구조의 유한 요소해석을 수행하는데 필요한 정보를 체계적으로 제시하고 있지는 못하다. 따라서 본 연구에서는 해석 및 실험 대상 온실 구조물을 선정하여 구조해석 모델링 방법에 따라 전체 구조물의 동적 특성이 어떻게 변화하는지 분석하고 실험결과에 가장 근접한 해석 모델링 방법을 제시하고자 한다.

1.2 연구방향 및 대상

본 논문에서는 서론에서 언급된 세 가지 주요 온실구조 구성 요소의 모델링 방법이 전체 구조물의 거동에 미치는 영향을 규명하기 위해 대표적인 대상 온실구조물을 선정하고 이에 대해 다양한 모드 해석을 수행하여 구조물의 고유진동수 및 모드 형상을 파악하고 실험결과와 비교 및 분석하고자 한다. 이를 위해 농림축산식품부 산하 농촌진흥청이 고시한 원예특작시설 내재해형 규격 설계도 및 시방서(Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs of Korea, 2014)에 제시된 감귤 하우스를 대상 구조물로 선정하였다. 제시된 설계도 및 시방서에는 10연동의 구조로 설계되어 있지만 해석 및 실험 상의 편의를 위해 3연동 구조에 대해 연구를 수행하였다. 도면 및 시방서에 근거하여 실제 시공된 구조물을 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1 View of the prototype greenhouse structure

2. 온실구조해석

2.1 해석 대상 온실구조물

본 연구에서 선정한 대상 구조물의 규모 및 기하학적인 형상이 Fig. 2에 제시되어 있다. 온실구조의 전체 규모는 그림에 나타난

Fig. 2 Prototype greenhouse

Fig. 3 Interior and exterior cable elements

Fig. 4 Bracing elements

바와 같이 폭 5.5m의 단동 구조물 세 개가 연결되어 전체 폭 16.5m, 측고 3.3m, 동고 4.5m 그리고 전체 길이가 36m에 달한다. 이 때, 측고는 구조물 측면의 높이, 동고는 지반에서 지붕 최상층까지의 높이를 의미한다.

대상 구조물의 구조부재는 항복강도 295MPa 및 인장강도 400MPa를 지니며, 이를 구성하는 주요 부재로 외경 60.5mm, 두께 3.65mm의 원형강관 주기둥 및 외경 48.1mm, 두께 2.1mm의 원형강관 주서까래를 들 수 있다. 대상 구조물은 풍하중과 같은 횡력에 효율적으로 저항하기 위해 다양한 케이블 및 브레이싱 요소가 설치되어 있다. 구조물의 내외부에 설치된 케이블 요소를 Fig. 3에 굵은 실선과 점선으로 표시하였다. x 방향으로 14개 및 y 방향으로 V자 형태로 7개의 케이블이 설치되어 있다. 대상 구조물의 모드해석 시 케이블 요소는 트러스 요소를 이용해 모델링이 가능하기 때문에, 그림에서

굵은 점선으로 표시된 압축력이 작용하는 케이블은 실제 모드 해석에서는 제외하고 모델링하였다. Fig. 4는 원형 강관을 이용한 총 8개의 브레이싱 요소를 굵은 실선으로 표시하였다.

2.2 온실구조 주요 모델링 요소

2.2.1 지점 조건

Fig. 5는 대상 구조물의 측면 및 내부 기둥 기초상세도로 콘크리트 독립기초의 형태로 각각 500mm 및 350mm의 깊이로 매설되어 설치된다. 두 기초 모두 콘크리트 기초와 함께 매설되기 때문에 x , y , z 축 세 방향으로의 변위는 구속시킬 수 있지만 세 방향 회전에 대한 구속력도 충분히 가지는지의 여부는 명확히 규명하기 어렵다. 세 방향 회전에 대해 충분한 구속력을 지닐 경우 고정단(fixed end)으로 전혀 구속력을 가지지 못할 경우 힌지 지점(hinge support)로 모델링이 가능하다. 매설 깊이 및 콘크리트 기초의 형상에 따라 고정단과 힌지지점의 중간에 해당하는 경우는 지점에 적절한 회전 강성을 스프링을 삽입하여 모델링할 수 있다.

Fig. 5 Column foundation details

Ogawa 등(1990)은 기초가 충분한 매설 깊이를 지닌 단단한 지반에 설치될 경우 기둥 기초를 고정단으로 모델링할 것을 제안하고 있다. 그러나 이외의 경우 적절한 강성을 지닌 회전 스프링을 지점에 추가하여 모델링하여야 정확한 모델링이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 기둥 지점의 회전 스프링 강성이 전체 대상 구조물의 거동에 어떠한 영향을 미치는지 파라메트릭 스터디를 통해 알아보고자 한다. 기둥 요소를 제외한 케이블 요소의 지점은 전부 힌지 지점으로 모델링한다.

2.2.2 부재 접합부 조건

온실구조를 구성하는 기둥, 횡대, 서까래, 중방 등의 주요 부재를 연결하기 위해 다양한 접합 철물이 사용되며 대표적인 접합부가 Fig. 6에 제시되어 있다. 본 연구의 대상 구조물에서는 기둥과 가로부재(중방)의 접합을 위해 Figs. 6(a), 6(b)에 나타난 T- 및 I-클램프가 각각 사용되고, 기둥 및

서까래의 접합을 위해 Fig. 6(c)의 Y-클램프가 이용된다. 그리고 기둥 및 각종 가로 부재(전후면, 측면 가로 횡대, 내부 발판) 혹은 가로 부재 사이의 접합을 위해 Fig. 6(d)에 나타난 U-클램프가 사용된다.

Fig. 6 Connection types of greenhouse structures

이와 같이 다양한 온실구조 접합부의 해석 모델링은 전체 구조물의 거동에 큰 영향을 미치며 접합부 별로 다양한 접합 방식을 고려할 수 있다. 연속인 수직 부재와 접합부에서 연속이 아닌 수평 부재가 만나는 Figs. 6(a)~6(c)의 접합부의 경우 각각 T-, I- 및 Y-클램프를 이용해 접합되는데, 이들 접합부에서 부재들 간의 변위는 공유가 되지만 회전은 완전히 구속되지 못한다. 이들 접합부는 일반적으로 Figs. 7~9에 각각 나타난 것처럼 강접 혹은 단부 구속 해제(end release) 중 하나의 방법을 이용해 모델링할 수 있다.

Fig. 7 Modeling of T-clamp connection

Fig. 8 Modeling of I-clamp connection

Fig. 9 Modeling of Y-clamp connection

Fig. 10 Modeling of U-clamp connection

Fig. 6(d)에 나타난 접합부의 경우 연속된 교차 부재가 U-클램프를 이용해 연결되어 있다. 접합부에 존재하는 U-클램프는 교차하는 부재 간에 변위는 공유하도록 만들어 주지만 연속이 아닌 두 교차 부재 사이의 회전은 완전히 구속하지 못한다. 따라서 이 접합부의 경우 완벽한 방법은 아니지만 Fig. 10에 나타난 것과 같이 내부 힌지의 삽입을 통한 단부 구속 해제 방법을 이용하여 다양하게 모델링하는 것을 고려해 볼 수 있다.

2.2.3 케이블 설치 조건

Fig. 11은 실제 설치된 대상 구조물의 케이블 부재의 시공 상태를 보여주는 사진이다. 서론에서 언급된 바와 같이 우리나라 원예시설의 대부분은 파이프 골조로 구성된 소규모의 비닐하우스로 전문 건설업체에 의해 시공되는 경우가 드물다. 그 결과 시공된 케이블 부재는 해석모델링에서 가정되는 것처럼 충분한 인장 강성을 지니지 못하고 느슨하게 설치되는

Fig. 11 Cable member anchoring

경우가 많다. 따라서 케이블 부재의 원래 총 단면적 대신 이를 일부 감소시켜 모델링하는 것이 실제 시공된 구조물의 거동을 더 정확하게 묘사할 수도 있다. 본 연구에서는 실제 케이블 설치 조건이 전체 구조물의 거동에 미치는 영향을 파악하기 위해 케이블 단면적을 일정 비율로 감소시킴에 따라 발생하는 전체 구조물의 고유진동수 및 모드형상의 변화를 조사하고자 한다.

3. 주요 모델링 요소가 구조물의 거동에 미치는 영향 분석

본 장에서는 앞에서 논의된 세 가지 주요 모델링 요소가 전체 구조물의 동적 거동에 미치는 영향을 분석하기 위해 주요 모델링 요소별로 변수 값을 변화시켜 가며 구조물의 고유진동수 및 모드형상의 변화를 조사하였다. 대상 온실 구조물의 모드 해석을 수행하기 위해 상용 구조해석 프로그램인 MIDAS GEN (2010)을 사용하였다.

3.1 지점 조건의 영향

지점 조건의 변화에 따른 구조물의 거동 변화를 파악하기 위해 수직 부재의 모든 지점 조건을 고정단(회전 스프링 강성 $=\infty$), 스프링 회전 강성 $100(\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad})$ 및 $10(\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad})$ 그리고 힌지 지점(회전 스프링 강성 $=0$)의 네 가지 경우(Case 1~4)로 나누어 구조물에 대한 모드 해석을 수행하였으며, Case 1에서 4로 갈수록 구조물의 강성이 점진적으로 감소되게 된다. 구조 부재의 접합부는 강점으로 가정하였으며, 시공 시 케이블 부재가 느슨하게 설치되는 것을 고려하기 위해 케이블 단면적을 원래 면적의 50%로 감소시켜 모델링하였다.

Table 1은 네 가지 경우의 지점 조건을 변수로 수행한 해석 결과를 요약해 나타낸 표로 각 경우에 대해 주요 모드(1~3차)의 고유진동수 및 Case 1의 고유진동수 값에 대한 다른 경우의 고유진동수 비율을 나타내었다. Fig. 12에 표에 나타난 네 가지 경우에 대한 고유진동수 비율을 그래프로 제시하였다. 앞서 언급한 네 가지 모든 경우에 있어 세 가지 주요 모드

Table 1 Effects of support conditions

Case	Support conditions	1st mode		2nd mode		3rd mode	
		Frequency (Hz)	Ratio (%)	Frequency (Hz)	Ratio (%)	Frequency (Hz)	Ratio (%)
1	Fixed	4.80	100	8.67	100	9.67	100
2	Spring100 (kN·m/rad)	4.50	93.8	8.66	99.9	9.47	97.9
3	Spring10 (kN·m/rad)	4.11	85.6	8.63	99.5	9.21	95.2
4	Hinge	3.99	83.1	8.63	99.5	9.13	94.4

Fig. 12 Effects of support conditions

형상은 Fig. 13에 나타난 바와 같이 각각 x 방향 변형, y 방향 변형 그리고 z 방향의 비틀림 변형으로 일정하게 나타났으며, 이는 일반적으로 각 방향에 대한 구조물의 상대적인 강성비에 의해 결정된다.

이들 결과로부터 몇 가지 흥미로운 사실을 관찰할 수 있는데, 우선 예상되는 바와 같이 지점의 회전 스프링 강성이 감소할수록 전체 구조물의 강성 또한 감소되어 고유진동수 값이 감소됨을 알 수 있다. 회전 스프링 강성의 감소에 따른 전체 구조물의 최종적인 고유진동수 감소 비율은 1차 모드의 경우 약 17%, 2차 모드의 경우 약 1%, 3차 모드의 경우 약 6%로 1차 모드에서 가장 큰 강성 감소가 발생했다. 따라서 지점 조건의 변화에 따라 전체 구조물의 강성이 크게 달라짐을 알 수 있으며, 1차 모드에서 가장 큰 고유진동수 변화가 발생한 것으로부터 지점 조건이 전체 구조물의 강성에 기여하는 비율이 1차 모드에 해당하는 x 축 방향에서 가장 크다는 사실을 알 수 있다. 하지만

Fig. 13 First three mode shapes

대상 구조물이 x 축 방향으로 3연동이 아니라 더 많은 연동수를 지닐 경우 다른 결과가 나올 수도 있다.

3.2 부재 접합 조건의 영향

부재 접합 조건의 변화에 따른 구조물의 거동 변화를 파악하기 위해 접합부 조건을 전부 강접(Case 1) 및 Fig. 14에서 Fig. 16에 나타난 세 가지 조건으로(Case 2~Case 4) 변경시켜 가면서 전체 구조물의 고유진동수 및 모드 형상에 미치는 영향을 조사하였다. Fig. 14에서는 수평 부재가 연속되지 않는 끝단에만 Fig. 7(b), Fig. 8(b) 그리고 Fig. 9(b)에 나타난 방법으로 내부 힌지를 삽입하여 단부 구속을 해제시켰다(edge

Fig. 14 Connection modeling for Case 'edge beam end release'

Fig. 15 Connection modeling for Case 'every beam end release'

Fig. 16 Connection modeling for Case 'beams and columns end release'

beam end release). Fig. 15은 Fig. 14에 나타난 구속 해제에 추가로 모든 U-클램프를 이용한 기둥-보 접합부에 Fig. 10(b)에 나타난 2 point release를 수행한(every beam end release) 모델이다. 이와 유사하게 Fig. 16은 Fig. 15에 나타난 구속 해제에 추가로 모든 U-클램프를 이용한 기둥-보 접합부에 Fig. 10(c)에 나타난 3 point release를 수행한(beams and columns end release) 모델이다. 네 가지 접합부 모델에 대한 모드 해석 수행 시 모든 지점은 한지 지점으로 케이블 부재의 단면적은 원래 면적의 50%로 감소시켜 모델링하였다.

Table 2는 언급된 네 가지 경우의 접합부 조건을 변수로 수행한 해석 결과를 요약해 나타난 표로 주요 모드(1~3차)의 고유진동수 및 Case 1의 고유진동수 값에 대한 해당 경우의 고유진동수 비율을 보여준다. Fig. 17에 표에 정리된 네 가지 경우에 대한 고유진동수 비율을 그래프로 나타내었다. 앞서 언급한 네 가지 모든 경우에 있어 세 가지 주요 모드 형상은 지점 조건을 변수로 해석을 수행한 경우와 동일하게 Fig. 13과 같이 나타났다.

이들 결과로부터 알 수 있는 흥미로운 사실은 다음과 같다. 지점 조건에 대한 분석 결과와 유사하게 내부 한지 개수의 증가에 따라 접합부의 강성이 감소될수록 전체 구조물의 강성

또한 감소되어 고유진동수 값이 감소됨을 알 수 있다. 접합부 강성의 감소에 따른 전체 구조물의 최종적인 고유진동수 감소 비율은 1차 모드의 경우 약 28%, 2차 모드의 경우 약 66%, 3차 모드의 경우 약 51%로 2차 모드에서 가장 큰 강성 감소가 발생했다. 따라서 접합부 강성의 변화에 따라 전체 구조물의 강성이 크게 달라짐을 알 수 있으며, 지점 조건에 대한 분석 결과와 비교할 때 전반적으로 고유진동수 감소 비율이 더 크게 나타나 접합부 조건이 지점 조건에 비해 전체 구조물의 강성 변화에 더 큰 영향을 미침을 알 수 있다. y 축 방향 변형에 해당하는 2차 모드의 고유진동수가 접합부 조건의 변화에 따라 가장 크게 감소한 이유는 대상 구조물의 형상이 y 축 방향으로 길어 y 축 방향의 힘에 저항하는 접합부의 개수 또한 가장 많아 이 방향으로 구조물의 강성이 가장 크게 감소하기 때문으로 판단된다.

3.3 케이블 부재 단면적의 영향

케이블 부재 단면적의 변화에 따른 구조물의 고유진동수 및 모드 형상 변화를 파악하기 위해 Fig. 18에 굵은 선으로 표시된 모든 케이블 부재를 Table 3에 나타난 것과 같이 각각 본래 단면적의 0, 30, 50 및 70%를 감소시켜(Case 1~Case 4) 해석을 수행하였다. 네 가지 모든 경우에 대해 지점 조건은 전부 한지 지점으로, 접합부 조건은 Table 2의 Case 3(every beam end release) 조건으로 설정하였다. 이들 네 가지 조건에 대한 해석결과는 앞서와 동일한 방법으로 Table 3 및 Fig. 19에 정리하였다. 앞서 언급한 네 가지 모든 경우에 있어 세 가지 주요 모드 형상은 지점 및 접합부 조건을 변수로 해석을 수행한 경우와 동일하게 Fig. 13과 같이 나타났다.

표와 그래프에 나타난 결과로부터 다음과 같은 사실을 알 수가 있다. 앞서 소개된 두 가지 분석 결과와 유사하게 케이블 단면적의 감소에 따라 전체 구조물의 강성 또한 감소되어 고유진동수 값이 감소됨을 알 수 있다. 케이블 부재 단면적 감소에 따른 전체 구조물의 최종적인 고유진동수 감소 비율은

Table 2 Effects of connection rigidity(ER: end release)

Case	Connection conditions	1st mode		2nd mode		3rd mode	
		Frequ ency (Hz)	Ratio (%)	Frequ ency (Hz)	Ratio (%)	Frequ ency (Hz)	Ratio (%)
1	Fixed	3.99	100	8.63	100	9.13	100
2	Edge beam ER	3.90	97.7	7.15	82.9	9.05	99.1
3	Every beam ER	3.78	94.7	5.34	61.9	8.91	97.6
4	Beams and columns ER	2.89	72.4	2.94	34.1	4.48	49.1

Fig. 17 Effects of connection rigidity(ER: end release)

Fig. 18 Object of cable cross-section area conditions analysis

Table 3 Effects of cable sectional area reduction

Case	Cable sectional area reduction	1st mode		2nd mode		3rd mode	
		Frequ ency (Hz)	Ratio (%)	Frequ ency (Hz)	Ratio (%)	Frequ ency (Hz)	Ratio (%)
1	0%	5.16	100	5.40	100	9.55	100
2	30%	4.40	85.3	5.36	99.3	9.18	96.1
3	50%	3.78	73.3	5.34	98.9	8.91	93.3
4	70%	3.02	58.5	5.31	98.3	8.63	90.4

Fig. 19 Effects of cable sectional area reduction

1차 모드의 경우 약 42%, 2차 모드의 경우 약 2%, 3차 모드의 경우 약 10%로 1차 모드에서 가장 큰 강성 감소가 발생했다. 전체 구조물의 전반적인 고유진동수 감소 비율은 앞서 논의된 지점 및 접합부 조건을 변화시킨 경우의 중간 정도에 해당함을 알 수 있다. x 축 방향 변형에 해당하는 1차 모드의 고유진동수가 케이블 부재 단면적의 변화에 따라 가장 크게 감소한 이유는 x 축 방향으로 설치된 케이블 부재의 강성이 대상 구조물의 x 축 방향 강성에 기여하는 정도가 상대적으로 크기 때문인 것으로 판단된다.

4. 온실구조실험

4.1 실험 방법 및 결과

2.1장에 소개된 대상 구조물에 대해 상시 진동을 계측하여 이로부터 대상 구조물의 주요 모드 형상 및 고유진동수를 측정하였다. 이미 현장 시공 완료된 실제 구조물에 하중을 작용시켜 거동을 파악하는 정적 실험을 수행하는 것은 실험 환경을 조성하기 힘들뿐만 아니라 정확한 실험 결과를 얻기 힘들기 때문에 이와 같은 방법이 시도되었다. 이를 위해 현장 가속도계 측정법(Kim *et al.*, 2016)을 도입하여 Fig. 20의 가속도계와 Fig. 21의 현장 계측 시스템을 이용한 3축 계측법을 사용하였다. Fig. 22에서 확인할 수 있듯이 총 6개의 계측 지점 중 기준이 되는 계측 지점을 1번으로 설정하고, 동시에 나머지

5지점에 대해 순차적으로 계측을 수행하였다. 가속도계는 주서까래와 파이프 접합부 주변에 부착하였으며, 구조 부재와의 일체화를 위해 합판과 U볼트를 이용한 가속도계 세트를 제작하여 활용하였다.

Fig. 23은 기준점에 대해 5개 지점에서 계측한 1~3차 고유 진동수의 평균값과 평면에 대해 모드 형상을 표시한 그림이다. 이로부터 1차 모드는 x 축 방향으로의 변형, 2차 모드는 y 축 방향으로의 변형 그리고 3차 모드는 z 축에 대한 비틀림 변형이 발생함을 알 수 있다.

Fig. 20 Accelerometer installed **Fig. 21** On-site measurement system **Fig. 22** Installation of accelerometers

(a) All rigid (b) 2 point release (c) 3 point release

Fig. 23 Experimental results

4.2 실험 및 해석 결과의 비교

본 장에서는 4.1장에 나타난 실험결과를 가장 정확하게 묘사할 수 있는 해석 모델링 및 그 결과에 대해 논의한다. Table 4는 실험결과와 가장 유사한 해석결과를 얻어낼 수 있는 지점 조건, 접합부 조건, 케이블 부재 단면적 감소 비율을 나타낸다. Table 5는 Table 4에 나타난 조건들을 적용시켜 얻은 해석 결과를 실험 결과와 비교한 표이다.

Table 4에 나타난 세 가지 조건에 대해 좀 더 자세히 분석해 보면, 지점 조건의 경우 대상 구조물은 Fig. 5에 나타난 것과 같이 측면 및 내부 기둥이 콘크리트 독립기초의 형태로 각각 500mm 및 350mm의 깊이로 매설되어 있는데 10(kN·m/rad)의 강성을 지닌 회전 스프링을 설치할 경우 실험 결과와 가장 유사한 해석 결과를 얻을 수 있었다. 접합부 조건은 Fig. 15에 나타난 'every beam end release'조건을 적용시킬 경우 Fig. 18에 나타난 케이블 부재의 단면적은 전부 50%를 감소시킬 경우 실험 결과와 가장 유사한 해석 결과를 얻을 수 있었다.

Table 4 Analysis modeling details

	Frequency(Hz)
Support condition	Spring stiffness of 10(kN·m/rad)
Connection condition	Every beam end release
Cable sectional area reduction	50(%)

Table 5 Comparison between experimental and analysis results

	1st mode		2nd mode		3rd mode	
	Frequency (Hz)	Relative error (%)	Frequency (Hz)	Relative error (%)	Frequency (Hz)	Relative error (%)
Test	3.65	-	5.48	-	6.19	-
FE analysis	3.89	6.58	5.39	-1.64	8.98	45.07

Table 5에 나타난 결과를 분석해 보면, 1차 및 2차 모드 의 경우 실험 결과에 대한 해석 결과의 고유진동수 오차가 각각 6.58% 및 1.64%로 해석 결과가 실험 결과와 매우 유사함을 알 수 있으며, 3차 모드의 경우 오차가 45.07%로 그 차이가 상당하다. 이와 같은 비교 결과를 바탕으로 실제 온실구조의 설계를 위해 해석을 수행할 경우 Table 4에 나타난 모델링 조건을 우선적으로 적용해 볼 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 온실 구조물의 구조 성능 검토 시 적합한 모델링 방법을 제시하기 위해 대상 온실 구조물을 선정하고 지점

및 접합부 조건 그리고 케이블 요소의 단면적을 변화시켜 가며 파라메트릭 스터디를 수행하였으며, 이들 파라메터의 변화에 따른 대상 구조물의 주요 모드 형상 및 고유진동수 변화를 조사하였다. 또한 대상 구조물에 대해 현장 가속도계 측정법을 이용하여 상진동을 계측하여 주요 모드 형상 및 고유진동수를 측정하여 해석 결과와 비교하였다. 구조 해석을 수행하고자 하는 온실 구조물의 구조 형식 및 디테일에 따라 결과가 조금씩 달라질 수 있겠지만 본 연구의 대상 온실 구조물에 대한 해석 및 실험을 수행하고 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 해석 대상 온실 구조물의 지점 및 접합부 조건 그리고 케이블 부재의 단면적 감소 비율에 따라 전체 구조물의 강성이 크게 변화될 수 있다.
- 2) 이들 세 가지 조건 중 전체 구조물의 강성에 가장 큰 영향을 미치는 조건은 접합부 조건이며 이는 구조물의 세 가지 주요 모드의 고유진동수를 크게 변화시킬 수 있다.
- 3) 이들 세 가지 조건이 구조물의 주요 모드 형상에 미치는 영향은 고유진동수에 비해 상대적으로 크지 않다. 본 연구에서 수행된 모든 해석 조건에 대해 세 가지 주요 모드 형상은 각각 x 방향 변형, y 방향 변형 그리고 z 방향의 비틀림 변형으로 일정하게 나타났다.
- 4) 대상 구조물에 현장 가속도계 측정법을 적용시켜 얻은 실험 결과와 가장 유사한 주요 모드 형상 및 고유진동수를 얻을 수 있는 해석 조건은 지점 조건의 경우 10(kN·m/rad)의 강성을 지닌 회전 스프링 설치, 접합부 조건은 'every beam end release'조건 그리고 케이블 부재의 단면적은 50%를 감소시킨 경우이다. 본 연구의 대상 온실 구조물과 비슷한 유형의 온실구조를 해석할 경우 이 조건들을 적용시키는 것을 우선적으로 검토해 볼 수 있다. 하지만 태풍과 같이 구조물이 붕괴 혹은 손상을 입을 정도로 큰 하중이 작용할 경우에는 이들 해석조건은 유효하지 않을 수 있다.

감사의 글

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림수산식품기술기획평가원의 첨단생산기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다 (No. 315092).

References

- Choi, M.G., Yun, S.W., Kim, T.H., Lee, S.Y., Yoon, Y.C. (2014) Current Status on the Greenhouse Foundation, *Gyeongsang National University Laboratory of Agriculture Resources*, 48, pp.251~260.

- Kim, M.K.** (1972) Structural Analysis of An Experimental Cable-Supported Air-Inflated Green House, *Korean Soc. Agric. Eng.*, 14, pp.2793~2799.
- Kim, D.Y.** (2015) Status of Protected Vegetables in Greenhouse and Vegetable Production Performance, 11-1543000-000051-10, Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs of Korea, Rural Development Administration(RDA), pp.1~159.
- Kim, H., Ko, Y.N., Cho, J.M.** (2016) Evaluation of Ambient Vibration Test for Historic Wooden Buildings Based on the Rigid Diaphragm Assumption, *J. Asian Archit. & Build. Eng.*, 15, pp.287~294.
- Kim, M.K., Nam, S.W., Son, J.E., Yun, N.K.** (1994) Analysis of Actual State and Structural Safety of Regionally Characterized Greenhouses in Korea, *Korean Soc. Bio-Environ. Control*, 3, pp.128~135.
- Lee, S.G., Lee, J.W., Kwak, C.S., Lee, H.W.** (2008) Experimental Study on the Ground Support Conditions of Pipe Ends in Single Span Pipe Greenhouse, *Korean Res. Soc. Prot. Hortic.*, 17, pp.188~196.
- Lee, S.H., Shin, K.J.** (2014) Slip Test of Pipe Connector for Greenhouse Frame, *Archit. Inst. Korea*, 30, pp.9~17.
- MIDAS GEN** (2010) User's Manual. ver 785, MIDAS IT.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs of Korea** (2014) Design and Specifications of Standardized Anti-disaster Prototypes for Greenhouses, 2014-78, Rural Development Administration(RDA).
- Nam, S.W.** (2001) Experimental Analysis on Yield Strength of Pipe Connectors and Joints for Pipe Framed Greenhouses, *Korean Soc. Agric. Eng.*, 43, pp.113~119.
- Nam, S.W., Yu, I.H.** (2000) A Field Survey on the Structures and Maintenance Status of Pipe Framed Greenhouses, *Korean Soc. Agric. Eng.*, 42, pp.106~114.
- Ogawa, H., Tsuge, I., Sato, Y., Hoshiba, S., Yamashita, S.** (1990) Experimental Analysis on Strength of Pipe-houses with Ground Anchoring (1): Actual Size Experiment, *J. Soc. Agric. Struct.*, 19, pp.29~38.
- Ryu, H.R., Cho, M.W., Yu, I.H., Moon, D.G.** (2014) Finite Element Modeling for Structure-soil Interaction Analysis of Plastic Greenhouse Foundation, *Chungnam Nat. Univ. Lab. Agric. Sci.*, 41, pp.455~460.
- Yoon, Y.C., Lee, K.H., Yu, C.** (2003) A Study on the Uplift Capacity Improvement of Pipe-framed Greenhouse Foundation Using Circular Horizontal Anchors, *Korean Nat. Comm. Irrig. & Drain.*, 10, pp.55~61.

요 지

본 논문에서는 온실 구조물의 구조 성능 검토 시 적합한 모델링 방법을 제시하기 위해 대상 온실 구조물을 선정하고 지점 및 접합부 조건 그리고 케이블 요소의 단면적을 변화시켜 가며 파라메트릭 스터디를 수행하였으며, 이들 파라메터의 변화에 따른 대상 구조물의 주요 모드 형상 및 고유진동수 변화를 조사하였다. 또한 대상 구조물에 대해 현장 가속도계 측정법을 이용하여 상시진동을 계측하여 주요 모드 형상 및 고유진동수를 측정하여 해석 결과와 비교하였다. 이들 비교 결과로부터 대상 온실 구조물의 해석에 적합한 모델링 기법을 제시하였다.

핵심용어 : 온실구조, 접합부 모델링, 모드해석, 현장 가속도계 측정법