부재 접합부가 아치형 연동온실의 구조 성능에 미치는 영향: 실대형 실험적 및 해석적 연구

최만권 · 류희룡* · 조명환 · 유인호
농촌진흥청 국립원예특작과학원 시설원예연구소

Effect of the Member Joint on Structural Performance of an Arch-type Multi-span Greenhouse: A Full-scale Experimental and Numerical Study

Man-kwon Choi, Hee-ryong Ryu*, Myeong-whan Cho, and In-ho Yu

Protected Horticulture Research Institute, National Institute of Horticultural & Herbal Science,
Rural Development Administration, Haman 52054 Rep. of Korea

Abstract. The effect of the steel pipe member joint on the design performance of a plastic multi-span greenhouse was analysed through the comparing full-scale experiment and numerical analysis. The design performance of the greenhouse is generally evaluated through numerical analysis, but it is rare to consider the characteristics of the connections or joints of the members. In this study, the effect of the column-gutter beam-rafter-wind break wall joint on the design performance of the whole structure of a plastic multi-span greenhouse was analysed. The numerical results with assuming that the member joint are rigid condition were compared with the full-scale load test results using member joints used in the field. The stiffness of the entire structure was compared using the load-displacement relationship and the change of the load sharing ratio that the main members such as column, rafters, and wind break wall was analysed. The results of the load test were about 40% larger than the numerical result and the member stress was more than twice as large as those of the loaded columns. In order to increase the reliability of the design performance of the greenhouse, it is necessary to develop a numerical analysis model which can consider the characteristics of various joints.

Additional key words : connection, finite element analysis, fracture, load test, load sharing ratio

서 론

플라스틱 온실(비닐하우스)에서 구조 부재의 각종 접합 방법, 기초의 형태와 조건 등은 구조물의 성능에 많은 영향을 끼치는 요인들이다. 한편 현장에서는 시공의 편의성과 구조물의 경제성을 보다 중요한 요소로서 인식하고 있으며 이러한 의견들이 설계 시 안전을 결정에 많은 영향을 미친다. 그러나 외력과 각종 하중에 의한 구조의 국부적인 파괴 또는 구조물의 붕괴 방지를 위해서는 설계 시 각종 현장 조건을 고려한 체계적인 안전을 적용이 필요하며 이를 위하여 그 구조적 특성에 대한 신뢰성 높은 수치 정식화가 필요하다. 유럽온실기준(European Standard [EN], 2001)에서는 상업용 온실을

설계할 때 한계상태 설계법을 준수하도록 규정하고 있다. 즉, 모든 구조물은 온실 등급에 따라 사용한계상태 또는 극한한계상태로 불확실성의 정도를 정량적으로 평가하여 자중, 풍하중, 설하중, 작물하중 및 지진하중에 안전하도록 설계를 해야 한다. 한국(Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs (MAFRA) and Rural Development Administration (RDA), 2014)과 일본(Japan Greenhouse Horticulture Association, 1999)은 강관 골조 온실에 대해 구조물의 저항력 범위를 설정하고 이를 설계하중에 의한 변형결과와 비교하는 허용응력 설계법을 대체로 적용하고 있다. 한국의 온실 설계 기준에서는 강관 부재를 서로 결속하는 휨쇠에 대하여 성능 범위를 규정하고 있으나 휨쇠가 사용되는 부재 접합부에 대한 구조적 특성 또는 설계 방법에 대해서는 명확히 나타나 있지 않다. 이러한 접합부의 구조적 특성이 정의되지 않은 상태에서 강관과 강관을 결속하는

*Corresponding author: baradori@korea.kr
Received September 21, 2017; Revised October 11, 2017;
Accepted October 21, 2017

접합부를 고려하여 온실의 역학적 거동을 예측하는 것은 어렵다. 따라서 최근에는 이러한 온실의 접합부에 대한 연구들이 이루어지고 있으며 향상된 수치해석 기술과 설계기준을 제시하기 위해 다양한 실험 데이터를 얻고 있다.

Yum et al. (2007)은 포도 비가림 하우스를 설계하기 위해 수치해석을 실시하였다. 수치해석은 탄성 범위내의 선형거동만 분석하였고, 허용응력 설계법으로 하우스에 적용 가능한 최적의 강관 규격을 제시하였다. Castellano et al. (2005)는 단동온실을 대상으로 실험대 실험과 유한요소해석을 실시하였다. 측정된 변위는 실험대 실험 결과가 유한요소 해석의 결과 보다 크다고 하였으며, 이러한 차이는 온실의 접합부를 시뮬레이션 하기 어렵기 때문이라고 보고하였다. Ryu et al. (2012)는 단동 플라스틱 온실 구조물의 부재 교차 결합 조건이 전체 구조물의 거동특성에 미치는 영향을 재하실험과 수치해석을 통해 비교분석 하여 접합부의 성능이 플라스틱 온실 거동에 영향을 미치는지를 보고하였다. 또한 동적 응답 특성 분석을 통한 플라스틱 온실의 구조성능 및 접합부 특성을 평가한 연구들도 보고되었다(Ryu et al., 2012; Choi et al., 2016; Ryu et al., 2017; Ha et al., 2017).

이와 같이 플라스틱 온실의 구조성능에 대한 신뢰성을 높이기 위하여 강관 접합부의 특성을 고려한 다양한 실험적, 해석적 연구가 진행되었다.

본 연구에서는 플라스틱 연동온실의 서까래-도리를 U-

클램프로 접합하고, 기둥-서까래-도리를 삽입형 연결구조로 접합한 온실의 구조성능을 실험과 수치해석을 이용하여 분석하였다. 실험체에서 이 두 접합은 반강접합(U-클램프, 연결구)으로 설치되었고 이외 나머지 접합부는 강접합(용접)으로 설치되었다. 실험체는 파괴될 때까지 극부도리와 직교하는 횡방향으로 하중을 가하였으며 수치해석을 위하여 범용 유한요소해석 프로그램인 VisualFEA (Lee, 2001)를 사용하였다.

재료 및 방법

1. 플라스틱 연동온실 실험체

1.1 실험체 제작

본 연구에서 분석한 온실 모형(Fig. 1)은 국내 온실 기준인 원예특작시설 내재해형 규격 설계도 및 시방서 (Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs (MAFRA) and Rural Development Administration (RDA), 2014)에 수록된 파프리카 재배용 온실(10-연동-1형)이다 (You et al., 2007). 이 온실은 길이 6.0m (two bays * 3m), 폭 16.0m (two spans*8m), 동고 7.4m, 측고 5.4m이고, 온실 양쪽 끝에 폭 1.5m인 방풍벽이 있다 (Fig. 1). 온실 실험체 주 구조재의 치수는 Fig. 1에 나타난 것과 같고, 기타 세부사항은 원예특작시설 내재해형 규격 설계도 및 시방서와 동일하다. 일반적으로 농가에서는 길이 90m 정도의 온실을 설치하지만 선정된 실험체는 6.0m의 길이로 모델화 하였다.

Fig. 1. Views and details of specimen.

Fig. 2. Views and details of connections: (a) photos, (b) rafter-purlin clamp; (c) column-rafter-purlin joint.

1.2 접합부

실험체에는 부재와 부재를 결속하는 접합부가 포함된다. 주요 접합부는 온실의 기초, 서까래-도리, 기둥-서까래-도리, 기둥-방풍벽 등이 있다. 이들 접합부들 중에서 서까래-도리 접합부는 일반적으로 온실 시공 시 많이 사

용되고 있는 U-클램프로 시공하고, 기둥-서까래-도리 접합부는 현재 내재해형 규격서에 규정되어 있지 않아 일부 현장에서 사용된 접합부를 적용하였다. 그리고 구조물 내의 다른 접합부들은 아크 용접으로 접합하였다 (Fig. 2(a)).

Fig. 3. Instrumentation and sensors positions for specimen: displacement transducers used to measure horizontal and vertical displacement of each steel pipe frame (D1~D17), strain gauge used to determine stress of each steel pipe frame (S1~S19), applied force (F).

Fig. 2(b)-(c)는 부재 접합부의 단면형상 및 강관과 강관을 결속하는 부속품의 제작 방안에 대해 나타냈다. Fig. 2(b)는 도리-방풍벽, 도리-서까래를 결속하는 U-클램프 이고, Fig. 2(c)는 기둥-서까래-방풍벽을 연결하는 연결구이다. U-클램프는 U자형 홈에 서까래를 끼우고 U-볼트로 도리를 감싸 너트로 고정하여 도리가 길이방향으로 빠지는 것과 아래로 떨어지는 것을 방지한다. 기둥-서까래-방풍벽 접합부는 3mm 철판을 도리가 들어갈 수 있도록 절곡한 후 양쪽면에 서까래 직경보다 작게 인발한 파이프를 용접하는 형식으로 제작 하였다. 서까래와 방풍벽은 인발한 파이프에 끼운 후 직결나사 1개로 고정하고, 도리와 기둥 고정용 볼트 2개와 직결나사 6개로 고정하였다. 이 접합부는 기둥-서까래-도리 접합에 사용하였다.

2. 재하실험

2.1 센서 설치

Fig. 3은 센서 위치를 나타내고 있다. 실험에서 응력과 변위는 구조물에 지정된 위치에서 스트레인 게이지와 변위계로 측정되었다. 부재의 응력 측정을 위해 19개의 스트레인 게이지(FLA-5-11-1L, TML)를 설치하였다. 기둥 상부 6개(S4, S5, S7, S11, S13, S15), 기둥 하부 9개(S1, S6, S10, S12, S14, S16, S17, S17, S19), 방풍벽 2개(S3, S8), 하부측벽이음에 2개(S2, S9)를 부재 단면 중앙에 부착하였다. 수직과 수평 변위를 측정하기 위해 18개의 변위계(DP-500E, DP-1000E, DP-2000E, TML)를 설치하였다. 수평변위는 동고 높이에 6개(D3, D6, D10, D11, D14,

Fig. 4. Views of specimen, test setup, and instrumentation.

D15), 기둥 상부 7개(D2, D5, D8, D9, D12, D13, D16), 기둥 하부 1개(D1), 방풍벽에 2개(D9, D10)를 설치 하였고, 수직변위는 동고 높이에 2개(D4, D7)를 부착하였다 (Fig. 3). 응력은 Fig. 3에 나타난 위치에 선형 스트레인 게이지(120 ohms)를 사용하여 측정하였다. 스트레인 게이지는 기둥 부재의 상하부, 방풍벽, 측벽하부에 부착하였다. Fig. 4는 플라스틱 연동온실 실험체 모습이다.

2.2 가력 계획

정적 가력 방식으로 최대변위 200mm까지 횡하중을 입

력하였다. 횡하중은 반력벽(L 10m, W 7m, T 0.7m)에 설치되어 있는 용량 100kN의 동적가력기(stroke 1,000mm, $\pm 20\text{mm}$ at 5Hz/100kN)를 사용하여 5.1m 높이에서 $2\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 변위제어 방식으로 가력 하였다. 가력기와 방풍벽용 강관은 Fig. 3과 같이 U볼트를 이용해 연결하였다.

결과 및 고찰

1. 실험결과

횡하중은 실험체가 파괴 될 때까지 점진적으로 가력 하였다. 변위 측정 위치 D2에서 측정된 하중-변위 그래프를 Fig. 5에 나타냈다. 가로축은 측정지점에서 측정된 변위 값이고, 세로축은 가력기 끝에 설치된 로드셀에서 측정된 값이다. 온실에 국부적인 파괴가 발생했을 때의 하중과 최대하중을 그림에 점선으로 표시하였다. 파열음 및 그래프의 불연속성에 의해 판단한 국부적인 파괴는 22,720N의 하중에서 발생하였으나 발생 위치는 파악하지 못하였다. 첫 번째 파열음 이후 하중이 다소 감소하는 경향을 보인 후 다시 하중이 증가되어 온실의 기둥과 트러스 상현재를 용접한 부위에서 국부 좌굴이 발생하였고 용접부위에 균열이 발생했다. 하중이 30,740N에 도달 했을 때, 두 번째 파열음이 들리면서 접합부에 연결되어 있는 방풍벽 부재가 파괴되었으며 이 후 150mm 변위 발생시점에서 실험을 종료하였다. Fig. 6은 주요

변형 부위를 보여준다.

2. 실험과 수치해석 결과 비교

2.1 변위

수치해석으로부터 얻은 변위는 실험으로 측정한 값과 일치하지 않았다. Fig. 7에는 하중이 0, 5,000, 10,000, 15,000, 20,000, 22,720, 30,740N 일 때의 변위를 각각의 센서 설치 위치별로 나타내었다. 음의 값은 가력 방향으로 발생한 변위를 나타내며 대부분의 위치에서 실험

Fig. 5. Load-displacement curve at D2 location.

Fig. 6. Deformation of the specimen.

으로 측정한 값이 해석 값보다 컸다. 국부파괴가 발생한 시점인 22,720N 하중 단계의 예를 들면 가장 큰 값을 보인 수평변위(Fig. 7 (D2))는 실험 값이 -24mm인 반면 해석 값은 -17.2mm를 나타냈다. 동고 높이에서 측정한

수직변위(Fig. 7 (D4))도 실험과 해석이 서로 다른 양상을 보였는데, 실험 결과는 0.4mm, 해석에서는 -3.8mm를 나타냈다. Fig. 8은 22,720N의 하중이 가해졌을 때의 각 측정 위치별 변위를 나타낸 것이다.

Fig. 7. Load-displacement graph at displacement measurement location.

Fig. 8. Comparison of experiment and numerical displacement at 22,720 N.

2.2 응력

실험과 구조해석의 차이는 측정된 조합응력 비교에서도 관찰되었다. 응력도 변위와 마찬가지로 아주 작게 발생하는 지점을 제외하면 하중이 증가함에 따라 실험과

해석 결과의 차이는 증가하는 경향을 보였다(Fig. 9). 하중이 22,720N 일 때를 예를 들면, 기둥 상부 측정 지점(Fig. 10 (S7))에서 실험 결과는 103.3MPa 이었고, 수치해석은 53.6MPa를 보였다. 기둥하부(Fig. 10 (S10))의

Fig. 9. Load-stress graph at strain measurement location.

Fig. 10. Comparison of experiment and numerical normal stress at 2,2720 N.

Fig. 11. Comparison of experiment and numerical load sharing ratio at 2,2720 N.

Fig. 12. Detailed view of joint of column-rafter-purlin.

경우는 비교적 실험 값과 해석 값이 잘 일치하였다. 최대응력이 발생한 위치는 실험에서는 S7(기둥 상부)지점 130MPa, 해석에서는 S3(방풍벽)지점 108MPa으로 서로 달랐다.

Fig. 11은 S3(방풍벽) 지점에서의 응력을 기준으로, 각 측정지점 즉 각 부재별 하중 분담률을 나타낸 것이다. 구조해석과 실험에서의 부재별 하중 분담률이 서로 큰 차이를 보였다. S7(기둥 상부) 지점의 하중 분담률이 실험에서 1.13으로 가장 컸으며 구조해석의 0.52와 비교하여 두 배 이상 컸다.

이러한 결과는 Fig. 12에서 보인 것과 같이 실험에서 사용한 기둥-서까래-도리 접합부가 해석 모델에서 가정했던 강접합과 비교하여 충분히 견고하지 않아 나타나는

현상으로 판단된다. 시공성과 경제성을 고려하여 연결구와 서까래를 고정하기 위하여 사용한 직결나사, 기둥과 도리의 고정에 사용한 볼트 접합이 충분한 강성을 확보하지 않음으로써 하중을 각 부재로 원활하게 전달하지 못 하는 것으로 보인다.

적 요

본 연구에서는 실험형 실험과 구조해석을 통하여 현장에서 사용되는 기둥-서까래-도리, 기둥-도리-방풍벽 접합부를 적용한 강관 골조 플라스틱 연동온실의 정적 구조 성능을 분석하였다.

실험형 재하실험 결과는 접합부를 강접합으로 가정한 구조해석 결과와 비교하여 구조물의 횡방향 강성과 각 부재의 하중분담률에서 많은 차이를 보였다. 동고 높이에서 측정한 수평변위는 실험과 구조해석의 차이가 40% 이었고 수직변위는 89%의 차이를 보였다. S3 부재의 발생응력을 기준으로 한 각 부재별 하중분담률을 비교한 결과 실험과 구조해석에서 두 배 이상의 차이를 보이는 부재가 있었으며, 하부측벽이음(S2), 기둥 상부(S7) 등 주요 부재의 실험결과가 구조해석의 하중분담률을 재현하지 않았다.

현장에서 사용하는 접합부가 충분한 강성을 확보하지 않음으로써 구조물에 작용하는 외력을 각 부재에 적절하게 전달하지 못했으며 이로 인해 구조물의 강성이 저하되는 현상이 나타났다. 설계 단계에서 일반적으로 구조해석에 의해 결정되는 구조성능의 신뢰도는 접합부의 특성을 보다 면밀하게 고려했는지 여부에 따라 좌우 될 수 있다. 따라서 온실 구조 성능에 대한 신뢰성을 높이기 위해서는 온실에 사용되는 다양한 접합부를 고려할 수 있는 구조해석 기술의 개발이 필요하며 설계 기준에

서 상세 설계 방법을 보다 명확히 규정해야 할 것으로 판단된다.

추가 주제어 : 연결부, 유한요소해석, 파괴, 하중 분담률, 하중 실험

사 사

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ01139702) 지원에 의해 이루어진 것임

Literature Cited

- Castellano, S., A. Candura and G. Scarascia-Mugnozza. 2005. Greenhouse structures sls analysis: Experimental results and normative aspects. *ISHS Acta Hort.* 691:701-708.
- Choi, M.K., S.K. Chang, M.W. Cho, I.H. Yu, Y.A. Shin and H.R. Ryu. 2016. Dynamic analysis for full-scale single-span plastic greenhouse with joint in rafter. *Proceedings of the Korean Society for Agricultural Machinery Conference. The Korean Society of the Agriculture Machinery (KSAM).*p. 255-256.
- European Standard [EN]. Nen-en 13031-1 greenhouse: Design and construction – part 1 : Commercial production greenhouse. European Committee for Standardization CEN. Brussels, Belgium. 2001.
- Ha, T.H., J.W. Kim, B.H. Cho, D.J. Kim, J.E. Jung, S.H. Shin and H.J. Kim. 2017. Finite element model updating of multi-span greenhouses based on ambient vibration measurements. *Biosyst Eng.* 161:145-156.
- Japan Greenhouse Horticulture Association. Standard for structures of greenhouse. Greenhouse Horticulture Association. Japan 1999.
- Lee, J.Y. 2001. *Visualfea user's manual.* Intuition Software, Jeonbuk, Korea.
- Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs (MAFRA) and Rural Development Administration (RDA). 2014. Design and construction code on horticultural and herbal facilities for disaster resistance. MAFRA & RAD, Gwacheon and Jeonju, Korea.
- Ryu, H.R., M.K. Choi, M.W. Cho, I.H. Yu and Y.A. Shin. 2017. Dynamic analysis of single-span film plastic greenhouse with joint in rafter. *International Symposium on New Technologies for Environment Control, Energy-Saving and Crop Production in Greenhouse and Plant Factory (Greensys 2017).* International Society for Horticultural Science (ISHS).
- Ryu, H.R., E.H. Lee, M.W. Cho and I.H. Yu. 2012. Vibration characteristics change of steel-pipe greenhouse with different damage levels. *Joint Conference on Environmental Engineering on Agriculture 2012.* SASJ.p. 62.
- 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.
- You, H.Y., Y. Paek, H.J. Kim, H. Chun and I.H. Yu. 2007. A study on structural behaviour characteristics of high-rise improved 1-2w vinyl-house for paprika cultivation. *Proceedings of the Korean Society for Bio-Environment Control Conference. Journal of Bio-Environment Control.*p. 42.
- Yum, S.H., Y. N.G. H.S. Lee, G.W. Kim, Y.H. Cho, S.J. Park and M.K. Park. 2007. The optimum specification of pipes in rain-sheltering greenhouse with roof vents for large-grain grapevine cultivation. *Journal of Bio-Environment Control* 16(4):275-283.