플라스틱 온실의 강관 이음부 휨성능 분석

최만권 · 류희룡* · 조명환 · 유인호

농촌진흥청·국립원예특작과학원·시설원예연구소

Evaluation of Steel-Pipe Connections in Plastic Greenhouse Using Bending Test

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. In this paper, experimental study performed on steel-pipe connections for structural members of a greenhouse is presented. By those experiments performed, bending moment, deformation and stress distribution of specimens were investigated under four point bending test. The bending performance according to connection method using pin and the stretching is also investigated. The results of bending performance of the no connection specimen were compared to those of other connection specimens. The pin and stretching connection specimens showed lower bending performance than the no connection specimen. The stretching connection method was relatively higher bending performance than the pin connection specimens. According to the results, we proposed the connection method with good bending performance that can be applied to steel-pipe connection in greenhouse.

Additional key words : 4 point bending test, bending moment, joint, vinyl-house

서 론

농가 현장에서는 기존 온실 대비 폭과 높이가 더 넓고 높은 시설을 요구하는 추세다(Yu 등, 2012, 2013). 즉 5~6m 폭이 주로 사용되었으나 최근 8m 이상의 폭을 원하는 경우가 많으며 광폭 온실의 경우는 20m를 초과한다.

폭이 넓고 높이가 높은 온실은 긴 강관이 필요하기 때문에 운반할 때 어려움이 있다. 강관 길이가 11m 이하인 경우는 25t 이하의 트럭(적재길이 10.2m)으로 운반이 가능하나 15m 이상일 경우 트레일러 차량을 이용해야만 운반이 가능하다. 이와 같이 대형 차량은 농로 폭이 좁기 때문에 현장까지 강관 운반이 어렵다. 따라서 폭이 넓고 높이가 높은 단동 또는 연동 온실의 지붕을 시공하려 할 때에는 긴 강관을 절단하여 운반한 후 현장에서 연결핀 또는 인발한 강관을 사용하여 연결한 강관으로 온실을 시공하고 있다.

이러한 형태의 강관 이음부는 구조적 취약부로서 온실의 구조성능에 영향을 미칠 수 있으므로 설계과정에서 안전을 또는 강관이음의 구조적 특성 등을 적용하여 온

실의 성능을 산정할 수 있다. 국내 온실구조설계기준(MAFRA and RDA, 2014)에 적용된 온실의 구조성능에 대한 연구(Ryu 등, 2009; Yu 등, 2013)에서는 강관의 이음을 강결(Rigid connection) 조건으로 가정하여 구조적 거동을 해석하고 그 과정에서 안전율을 적용하고 있다. 강관 이음을 강결 조건으로 가정하는 것은 실제의 구조적 거동을 정밀하게 분석하는데 한계가 있다. 따라서 정밀한 구조성능 산정을 위해서는 강관 이음 및 이를 적용한 온실의 구조적 특성 분석이 필요하다.

강관 이음을 비롯하여 온실의 구조성능에 영향을 미칠 수 있는 구조적 요인에 대한 연구는 지속적으로 진행되고 있다. Ogawa 등(1990)은 강관을 서로 끼워서 연결할 때 이음 길이를 얼마나 해야 하는지를 휨 실험과 이론적 해석을 통해 평가하였고, Nam(2000)은 온실 시공에 많이 사용하는 연결 및 결합부(휼쇠, 연결 핀, 지주 파이프, 연동 꽃이, T클램프)에 대한 내력을 평가하였다. 또한 휼쇠(clamp) 결합부의 세부적인 구조적 성능 평가의 필요성을 제시하고 그 성능이 온실의 구조성능에 미치는 영향을 분석하기 위한 실험적, 해석적 연구가 진행되었다(Choi 등, 2016a, 2016b, 2016c, 2017; Ryu 등, 2012, 2017). 그러나 현장에서 사용되고 있는 다양한 강관 이음 방법에 대한 구조적 성능 평가 자료는 부족한 실정이다.

*Corresponding author: baradori@korea.kr

Received October 2, 2018; Revised October 22, 2018;

Accepted October 23, 2018

Table 1. Material properties of steel pipes for vinyl house structure (SPVHS).

Coupon	E (GPa)	F _y (MPa)	F _u (MPa)	δ _y (mm)	R _e (%)
S-1	187	405	505	0.002179	33
S-2	195	398	497	0.002092	31
S-3	213	400	509	0.001645	27
Avg.	198	401	504	0.001972	30

Fig. 1. Dimensions of tensile coupon (unit: mm).

본 연구에서는 온실의 구조재인 서까래 및 도리용 강관을 절단한 후 연결편을 삽입한 후 직결나사와 편치 방법으로 고정한 이음부에 대해 4점 굽힘시험 방법으로 휨성능을 평가하였다. 이 결과를 바탕으로 고정방법에 따른 이음부의 역학적 특성을 파악하고 현장 이음 방법이 절단하지 않은 강관과 동등한 휨성능을 발휘할 수 있는지를 알아보았다. 그리고 최종적으로 가장 휨성능이 좋은 이음 방법을 제안하였다.

재료 및 방법

1. 재료의 특성

실험용 강관의 기계적 성질을 알아보기 위해서 인장시험을 실시하였다. 인장시험용 강관은 비닐하우스용 도금강관으로 KS D 3760 규격 인증을 받은 제품이다. 인장시편(Fig. 1)은 성형에 의한 손상을 최대한 줄이면서 실험체 중앙 부분을 잘라 냈다. 인장시험은 KS 규격에 규정된 방법 (KS B 0802)을 따라 진행했으며, 항복강도는 0.2% 오프셋 방법으로 구하였다.

측정된 탄성계수(E), 항복강도(F_y), 항복변형률(δ_y), 인장강도(F_u), 파단연신율(R_e)은 Table 1과 같다. 항복강도 및 인장강도는 비닐하우스 도금 강관(KS D 3760, SPVHS)의 공칭강도 295 MPa, 400 MPa 보다 큰 값을 나타냈으며, 파단연신율도 평균 30%로 기준값 18% 이상을 나타냈다. 3반복 시험한 응력-변형률 선도는 Fig. 2와 같다.

2. 실험체

실험체는 이음이 없는 강관을 포함하여 현장에서 많이

Fig. 2. Stress-strain curves obtained from tensile coupon test of SPVHS.

사용되고 있는 방법으로 총 8 종류를 제작하였다. 강관을 절단하지 않은 이음이 없는 실험체(1개), 연결편을 사용한 실험체(4개), 강관을 인발하여 제작한 실험체(3개)이다. Fig. 3은 실험체 치수 및 모식도를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 Fig. 3(a)는 대조구 실험체로 이음이 없는 실험체(SPJ), Fig. 3(b) ~ (e)은 연결편 사용 실험체(SPJ-A ~ D), Fig. 3 (f) ~ (h)는 인발하여 제작한 실험체이다(SPJ-E ~ G).

연결편 및 인발 실험체의 이음새 고정에는 직결나사와 편치 방법으로 하였다. Fig. 4는 직결나사와 편치를 시공한 실험체 사진 예를 보여준다. Fig. 4(a)는 연결편 실험체 이고, Fig. 4(b)는 인발 실험체이다. 각 실험체의 직결나사 설치와 편치 작업은 드릴로 직접 설치하였다. 설치간격의 경우, 삽입 길이를 3 등분하는 지점으로 연결편 실험체의 직결나사 및 편치 시공은 21mm, 인발 실험체는 30mm 간격으로 설치하였다.

Table 2는 각 실험체의 치수를 정리한 것이다. 각 실험체의 길이는 600mm 이며, 직경은 31.8mm, 두께는 1.5mm이다.

3. 실험장치 및 방법

실험체의 휨성능 평가는 4점 굽힘시험 방법으로 실험

Fig. 3. Shape of specimens for 4-point bending test: (a) SPJ, (b) SPJ-A, (c) SPJ-B, (d) SPJ-C, (e) SPJ-D, (f) SPJ-E, (g) SPJ-F, (h) SPJ-G.

Fig. 4. Photos of connecting part of specimens: (a) using connecting pin, (b) using the stretch.

Table 2. Nominal dimension of specimens (unit: mm).

Specimen	L	L_a	L_b	L_c	d	D	t	D_i	t_i
SPJ	600	-	-	-	-	31.8	1.5	-	-
SPJ-A	600	134	8	246	21	31.8	1.5	28.6	1.5
SPJ-B	600	134	8	246	21	31.8	1.5	28.6	1.5
SPJ-C	600	134	8	246	21	31.8	1.5	28.6	1.5
SPJ-D	600	134	8	246	21	31.8	1.5	28.6	1.5
SPJ-E	600	90	300	300	-	31.8	1.5	26.7	2.3
SPJ-F	660	90	300	300	30	31.8	1.5	26.7	2.3
SPJ-G	600	90	300	300	30	31.8	1.5	26.7	2.3

Fig. 5. Illustration of the symmetric four-point bending test.

Fig. 6. Sensor installation locations (unit: mm).

을 하였다. 굽힘시험은 양 끝단이 단순 지지되며 2점으로 하중이 가려지는 방법이다. 실험체에 접하는 가력 지그와 양단을 지지하는 지그는 국부좌굴 발생을 방지하기 위해 우레탄으로 코팅하였다. 하중을 가력하는 두 가력 지점 간 거리는 258mm이다.

굽힘시험은 총 8종류의 실험체에 대해 2 반복 실험을 하였다. 하중가력은 변위제어 방식이며 가력속도는 $10\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 이다. Fig. 5는 실험장치에 실험체를 설치한 모식도이다.

Fig. 6은 각 실험체별 센서 설치 위치를 나타낸 것이다. 변위계(DE-500E, TML, JAPAN)는 실험체 처짐을 측정하기 위해 3개소, 액추에이터 변위를 측정하기 위해 1개소를 설치하였다. 변형률계(FLA-5-11-1L(1-Gauge 4-Wire), TML, JAPAN)는 실험체의 인장 측에 6개소, 압축 측에 6개소 총 12개소를 설치하였다. 변형률계 부착 위치는 직결나사 설치 위치 및 강관 연결 방법에 따라 다르다. 모든 변위, 변형률 데이터는 수집장치(TMR-720, TML, JAPAN)를 사용해 컴퓨터에 기록하였다.

4. 응력 계산

변형률계는 접합부 부근의 응력 분포를 알아보기 위해 사용했다. 변형률계로부터 측정된 변형률은 식 (1)을 사용하여 응력으로 변환했다.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

여기서, σ 는 응력 (MPa), E 는 탄성계수, ε 는 변형률계로부터 얻은 변형률이다. 탄성계수는 인장시험 결과를 참고하여 200 GPa를 적용했다.

결과 및 고찰

1. 모멘트-회전각

Fig. 7에 실험체의 모멘트-회전각 곡선을 보였다. 그리고 점선은 이음부 없는 실험체 단면의 소성모멘트(M_p =공칭항복응력 $\times$ 소성단면계수)를 표시한 것이다. Fig. 7에서 세로축은 실험체 중앙에서 작용하는 모멘트이고, 가로축은 단부 회전각으로써 D3 지점에서 측정한 변위를 지지점과 변위 측정 지점 사이의 길이로 나눈 값이다.

모든 실험체는 이음부 없는 실험체 보다 휨성능이 작게 나타났다. 연결핀 실험체와 인발 실험체를 비교하여 보면, 인발 실험체가 연결핀 실험체보다 휨성능이 컸다. 또한 모든 실험체의 최대 휨모멘트는 이음부 없는 실험체의 소성모멘트 이상의 내력을 보였다.

거동을 살펴보면, 모든 실험체는 실험설정 변위까지 항복모멘트 점을 특정할 수 없었지만, 인발 실험체는 최

Fig. 7. Load-deformation curves comparing: (a) SPJ specimen and specimens using a pin (b) SPJ specimen and specimens with stretching

대 휨모멘트에 도달한 후 연성 거동을 보였다.

Table 3은 각 실험체의 굽힘시험 결과를 요약한 것이다. L_1 은 실험체를 지지하는 지점 사이의 거리, L_2 는 하중을 가력하는 지그(jig) 사이의 거리, P_{max} 는 실험 최대 변위 40mm내에서 최대 하중, D_{max} 는 최대하중 일 때의 변위, M_{max} 는 P_{max} 로부터 계산된 휨 모멘트, $M_{max-ave}$ 는 2 반복한 결과의 평균값을 나타낸 것이다.

총 8개의 실험체 굽힘시험 결과, 최대 휨모멘트는 이음부 없는 실험체가 0.63 kN·m로 가장 컸다. 연결핀 및 인발 실험체 중에서는 SPJ-C가 0.51kN·m, SPJ-G가 0.54kN·m로 가장 큰 값을 보였다. 최대 휨모멘트와 소성모멘트 값의 비를 보면 인발 실험체가 연결핀 보다 약간 높았으며, 이음부 없는 실험체 1.53kN·m 보다 모두 작았다.

이음부 연결방법 뿐만 아니라 이음부를 고정하는 편치와 직결나사 위치에 따라 휨성능의 차이가 있었다. 연결

Table 3. Bending test results of specimens.

Specimen	L_1 (m)	L_2 (mm)	P_{max} (kN)	D_{max} (mm)	M_{max} (kN·m)	M_{max_ave} (kN·m)	M_{max_ave}/M_p^a	Failure mode
SPJ-1	500	258	10.41	34.88	0.63	0.63	1.53	BF ^{b)}
SPJ-2	500	258	10.29	33.80	0.62			BF
SPJ-A1	500	258	7.38	34.96	0.45	0.46	1.12	L ^{c)}
SPJ-A2	500	258	7.77	34.96	0.47			L
SPJ-B1	500	258	8.50	34.96	0.51	0.47	1.16	L
SPJ-B2	500	258	7.17	35.00	0.43			L
SPJ-C1	500	258	8.29	38.80	0.50	0.51	1.24	L
SPJ-C2	500	258	8.50	38.88	0.51			L
SPJ-D1	500	258	7.33	38.72	0.44	0.44	1.07	L
SPJ-D2	500	258	7.22	37.76	0.44			L
SPJ-E1	500	258	8.67	24.92	0.52	0.52	1.27	L
SPJ-E2	500	258	8.56	21.84	0.52			L
SPJ-F1	500	258	8.72	20.96	0.53	0.54	1.31	L
SPJ-F2	500	258	9.06	27.19	0.55			L
SPJ-G1	500	258	8.88	17.32	0.54	0.53	1.29	L
SPJ-G2	500	258	8.59	17.60	0.52			L

^{a)}Nominal plastic moment, ^{b)}Bending failure, ^{c)}L: Local buckling.

Fig. 8. Deformation shape of specimens.

핀 및 인발 실험체는 펀치보다 직결나사의 경우가 휨성능이 컸다. 이러한 실험 결과를 근거하여 강관을 고정하는 펀치 및 직결나사 연결 방법이 이음부의 휨성능에 영향을 미치는 것으로 보인다.

모든 실험체의 휨성능이 이음이 없는 경우보다는 떨어지지만 소성모멘트 보다 높은 휨성능을 보이므로 이음부

의 휨성능을 발휘하는데 문제가 없을 것으로 판단된다. 그러나 연결핀과 인발 실험체의 단면이 증가한 만큼 휨성능이 증가하지 않았다. 그 이유는 이음부의 결속이 느슨하여 강관에 작용하는 축력이 이음새 접촉면에 끌고루 분포되지 않기 때문인 것으로 판단된다. 그러므로 이음부에 작용하는 축력 평가가 향후 연구로 필요하다.

Fig. 9. Stress distribution at S3 ~ S10.

2. 변형형상

이음이 없는 실험체, 연결핀, 인발 실험체의 실험 후 변형 형상을 Fig. 8에 나타냈다. 이음이 없는 실험체 (SPJ)는 전형적인 휨변형을 보였다. 연결핀 실험체 (SPJ-A ~ C)는 중앙 이음부 연결핀에서 국부좌굴 양상을 보였으며, 인발 실험체 (SPJ-D ~ G)는 인발 하역 삽입한 쪽의 강관에서 국부좌굴이 발생하였다.

3. 응력분포

Fig. 9는 각 변형률계 설치 위치에 따른 응력-하중 그래프를 나타낸 것이다. 홀수는 압축 측(S3, S5, S7, S9), 짝수는 인장 측(S4, S6, S8, S10)이다. 그래프 안에 비닐하우스 구조용 도금 강관(SPVHS)의 공칭 항복강도와 인장강도를 점선으로 표시하였고, 굵은 점선은 이음이 없는 실험체의 선형 해석 결과를 나타낸 것이다. 가로축의 하중은 7,500 N 까지만 나타냈다.

이음이 없는 실험체가 항복응력에 도달할 때 까지는 측정된 모든 위치에서 선형적인 거동을 보이며 해석 값과 유사하게 나타났다. 연결핀과 인발 실험체는 이음이 없는 실험체와 다른 경향을 보였다. 그 이유는 직결나사 설치 위치와 강관 단부에서 하중을 전달하지 못했기 때문인 것으로 판단된다.

연결핀 실험체에서 이음이 없는 실험체와 비교해 가장 큰 변화가 있는 변형률계 위치는 S6과 S8이다. 이 위치는 강관의 끝부분으로 응력을 전달하지 못해 거의 '0'이었다. 그러나 압축 측의 S7과 S9는 연결핀과 강관 단부가 접촉해 국부 좌굴이 발생하는 지점으로 응력이 상대적으로 다른 지점보다 컸다.

인발 실험체는 연결핀과 유사하게 인장 측 S8지점의 응력이 거의 '0'이었다. 또한 응력집중에 의한 국부좌굴이 발생하는 압축 측의 S5, 인장 측의 S6에서 인발 가공 작업에서 단면의 크기가 변경되어 상대적으로 응력이 컸다. 이 결과는 Ogawa 등(1990)이 연구한 결과와 유사하였다.

적 요

본 연구에서는 현장에서 사용되는 온실 강관의 이음 방법에 대해 휨성능을 평가하고 그 결과를 바탕으로 가장 휨성능이 우수한 이음 방법을 알아보았다. 실험 결과, 모든 실험체는 이음이 없는 실험체 보다 휨성능이 작았다. 그러나 모든 실험체의 최대 휨모멘트는 이음이 없는 실험체 소성모멘트의 1.07~1.3정도로 나타났다. 또한 연결 방법에 따른 결과는 연결핀 보다 인발 실험체가 상대적으로 큰 휨성능을 보였다. 현장 이음 방법의 파괴 모드는 연결핀과 강관 끝부분의 응력집중에 의한 국부좌굴이 지

배적이었다. 현장시공 시 강관을 절단 후 연결할 경우, 이음 없이 사용하는 것이 가장 우수한 휨성능을 발휘하지만 부득이 강관을 절단할 경우는 연결핀보다는 인발 강관에 직결나사로 고정한 이음 방법(SPJ-F)으로 시공하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

추가 주제어: 4점 굽힘시험, 비닐하우스, 접합부, 휨모멘트

사 사

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ01139701) 지원에 의해 이루어진 것임

Literature cited

- Choi, M.K., H.R. Ryu, M.W. Cho, I.H. Yu and Y.A. Shin. 2016a. Evaluation of optimum constraint condition to measurement of slip-resistance force of rafter-purlin clamp. Proceedings of the KSBEC Conference. May. KSBEC. 25:69-170 (in Korean).
- Choi, M.K., H.R. Ryu, I.H. Yu, M.W. Cho and Y.A. Shin. 2016b. Flexural performance evaluation of steel pipe joint of plastic film covered greenhouse. The 2016 KSAE Annual Conference. October. KSAE. p. 132 (in Korean).
- Choi, M.K., H.S. Song, M.W. Cho, I.H. Yu, Y.A. Shin, S.Y. Lim and H.R. Ryu. 2016c. Test methods for evaluation of slip-resistance force of clamp for plastic greenhouse. Protected Hort. Plant Fac. 25:193-199 (in Korean).
- Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs and Rural Development Administration. 2014. <http://www.nongsaro.go.kr/portal/contentsFileView.do?cnt-ntsNo=89218&fileSeCode=185001&fileSn=1>
- Nam, S.W. 2000. A field survey on the structures and maintenance status of pipe framed greenhouses. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers. 42:106-114 (in Korean).
- Choi, M.K., H.R. Ryu, M.W. Cho, I.H. Yu and Y.A. Shin. 2017. Flexural performance evaluation of steel pipe connections for plastic greenhouses. Proceedings of the KSBEC Conference. May. KSBEC. 26:145 (in Korean).
- Nam, S.W. 2000. A field survey on the structures and maintenance status of pipe framed greenhouses. Journal of the KSAE. 42:106-114 (in Korean).
- Ogawa, H., I. Tsuge, Y. Sato, S. Hoshiba and S. Yamashita. 1990. Experimental analysis on strength of pipe-houses with ground anchoring (ii) - yield strength of joints, fixed piles and pipe connectors -. Nogyo Shisetsu (Journal of the SAS, Japan). 20:262-269.
- 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). August, ISHS. p. 204.
- 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. J. Bio-Env. Con. 21:459-465 (in Korean).
- 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. J. Bio-Env. Con. 18:192-199 (in Korean).
- Yu, I.H., M.W. Cho, E.H. Lee, H.R. Ryu and Y.C. Kim. 2012. Development of evaluation indicators of greenhouse for tomato cultivation using delphi survey method. J. Bio-Env. Con. 21:466-477 (in Korean).
- Yu, I.H., E.H. Lee, M.W. Cho, H.R. Ryu and D.G. Moon. 2013. Development of single-span plastic greenhouses for hot pepper rainproof cultivation. Protected Hort. Plant Fac. 22:371-377 (in Korean).