

플라스틱 연동온실 기둥-서까래-도리 접합부의 성능 평가 실험

최만권¹ · 류희룡^{2*} · 조명환¹ · 유인호³ · 김승유⁴

¹농촌진흥청 국립원예특작과학원 시설원에연구소 농업연구사, ²농촌진흥청 연구정책국 연구성과관리과 농업연구사,
³농촌진흥청 국립원예특작과학원 채소과 농업연구관, ⁴농촌진흥청 국립원예특작과학원 시설원에연구소 농업연구관

The Experiment for Performance Evaluation of Column-rafter-purlin Connections of an Arch-type Plastic Multi-span Greenhouse

Man-kwon Choi¹, Hee-ryong Ryu^{2*}, Myeong-whan Cho¹, In-ho Yu³, and Seung-yu Kim⁴

¹Junior Research Scientist, Protected Horticulture Research Institute, NIHHS, RDA, Haman 52054, Korea

²Junior Research Scientist, Research Policy Bureau, RDA, Jeonju 54875, Korea

³Senior Research Scientist, Vegetable Research Division, NIHHS, RDA, Wanju 55365, Korea

⁴Senior Research Scientist, Protected Horticulture Research Institute, NIHHS, RDA, Haman 52054, Korea

Abstract. In this study, the structural experiment was conducted with two types of specimens to investigate the mechanical behavior of the column-rafter-purlin connection of an arch-type greenhouse under monotonic loading. Based on the experimental results, the flexural performance was analyzed for two types of connections, and connection classification was attempted. Type B showed 77% of flexural performance compared to Type A, and both types showed that the rigidity and flexural strength did not reach the level of the full rigid. The behavior of the column-rafter-purlin connection was dominated by local buckling due to deformation of the weld and fasteners. As a result of connection classification by AISC standard, both Type A and B connections showed a result that did not meet the rigid connection performance assumed during design, and were classified as simple connection. Therefore, the connection performance evaluation and classification results show that the greenhouse design should be made in consideration of connection performance and in order to design a reliable greenhouse structure, a study on establishing clear design standards for the greenhouse connection is necessary.

Additional key words : AISC classification, fully rigid connection, joint, moment, rotation

서 론

최근 시설원에 관한 농가지원사업에 의한 온실 신축 그리고 스마트팜혁신밸리 등 시설원예단지가 조성되면서 시설별 온실구조검토가 활발하게 이루어지고 있지만 온실에 대한 명확한 설계기준이 없어 다양한 기준이 적용되고 있다. 특히 온실의 부재(기둥)와 부재(서까래와 도리)를 연결하는 접합부에 대한 설계기준이 명확하지 않아 용접 또는 이상적인 강접 상태를 가정하여 온실구조 설계가 이루어지고 있는 실정이다. 온실구조 설계의 신뢰성을 높이기 위해서는 실험적 연구를 바탕으로 구조 해석 및 검토가 이루어져 한다. 그러나 온실 접합부에 대한 실험적 연구는 미비하며 대부분의 연구결과들이 일반 건축물 접합부에 대한 것이어서 온실에 바로 적용하기에는

어려움이 있다. 본 연구에서는 온실 접합부의 역학적 거동을 실험적으로 평가하는 연구를 수행하였다.

Kim 등(1996)은 K형 접합부에 대한 내력과 초기강성을 실험적으로 평가하여 폭비, 편심비에 따른 영향을 분석하였다. Lee 등(2012)은 원형강관에 직각방향으로 거셋플레이트가 설치된 접합부에 대해 내력을 평가하고 그 결과를 유한요소해석을 통해 비교분석하였다. Oh and Park (2015)은 경량형강 보와 각형강관 기둥 접합부 실험체를 제작하여 성능을 평가하고 AISC와 Eurocode No. 3의 접합부 성능평가 기준에 따라 접합부 구속력에 따른 분류를 하였다. 이와 같은 연구들은 대부분 일반적인 건축구조에서 사용되는 접합부 성능평가 연구들이며 온실구조 설계에 적용하기에는 한계가 있다. 온실구조 설계의 신뢰성을 높이기 위해 온실 접합부에 대한 실험적 연구들이 일부 진행되었지만 세부적인 후속 연구가 필요한 실정이다(Choi 등, 2017). 따라서 본 연구에서는 현장에서 시공되고 있는 연동 비닐온실 접합부 두 가지 형식에 대해

*Corresponding author: baradori@korea.kr

Received September 29, 2020; Revised October 25, 2020;

Accepted October 26, 2020

실험적으로 성능을 평가하고 그 결과를 바탕으로 미국의 AISC에서 제시하는 접합부 성능평가 기준에 따른 접합부 분류를 하였다.

재료 및 방법

1. 기둥-서까래-도리 접합부 실험체 설계

기둥-서까래-도리 접합부 실험체는 원예특작시설 내재해형 규격 온실(MAFRA & RDA 10-연동-1형)을 참고하여 실험대형 크기에서 일부분만을 따로 제작하여 기둥-서까래-도리 접합부 실험체를 제작하였다. 접합부 제작에 사용된 부재의 단면은 실제 설계 단면과 동일하게 하였다. 기둥, 서까래, 도리

에 사용된 단면 부재는 각각 $\square 75 \times 75 \times 3.2t$, $\phi 59.9 \times 3.2t$, $\square 75 \times 75 \times 3.2t$ 이다. 접합부 실험체는 현장에서 연동온실 시공 시 적용되고 있는 접합 형식을 사용하였다. 온실 시공에 있어 접합부는 내재해형 규격서에 상세히 명시되어 있지 않아 현장 상황에 맞게 시공되고 있다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 기둥-서까래-도리 접합부 실험체의 상세도를 나타내었다. 접합부 형식은 Type A와 B 두 가지이다. Type A는 연결구가 도리를 위쪽에서 감싸는 형식이고 Type B는 아래쪽에서 도리를 감싸는 형식이다. 접합부 형식은 Fig. 2와 같다.

2. 실험체 가력방법

하중 가력은 일정한 속도로 변위를 증가시키는 변위제어

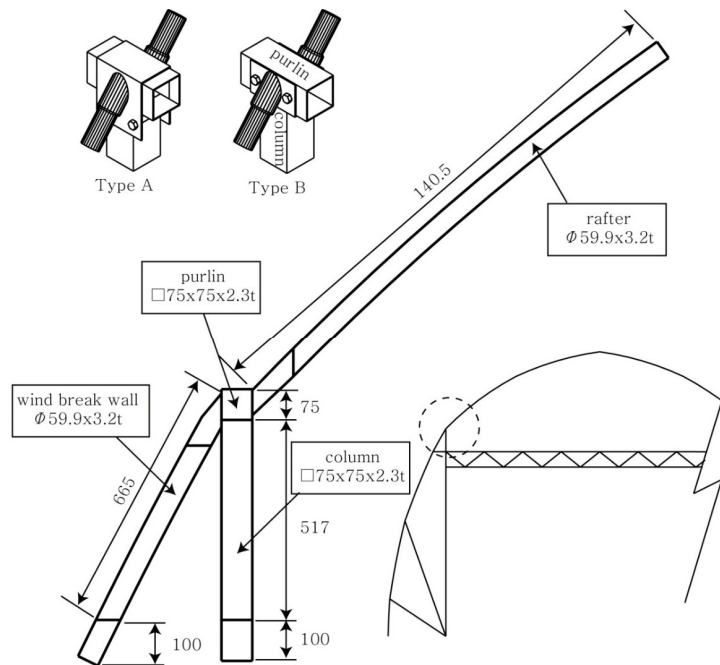


Fig. 1. Detail view of column-rafter-purlin connection specimens.



Fig. 2. Photo of connection types: (a) Type A; (b) Type B.

방식으로 하였다. 변위를 한쪽 방향으로 가력하는 단조가력 방식이다. 접합부 실험은 20kN 용량의 로드셀이 설치된 피로 시험기가 사용되었으며, 변위제어 속도는 $2\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 설정하였다. 접합부 가력실험은 형식별로 각 한번씩 수행하였다.

3. 실험장치 설계

실험체 셋팅과 가력 계획은 Fig. 3과 같다. 기둥-서까래-도리 접합부 실험체의 설치는 실제 거동을 고려해 기둥과 방풍벽 끝단에 지그를 설치하여 힌지 거동을 하도록 하였다. 실험체와 액추에이터 고정은 U-볼트로 체결하였고 수직으로 하중이 가력될 수 있도록 실험체와 액추에이터 사이에 L/N 가이드를 설치했다. 액추에이터는 실험체 접합부 중심에서 733 mm 떨어진 위치에 있다. 기둥-서까래-도리 접합부 실험체에 대한 변위는 와이어 변위계(DP-500E, TML)를 사용하여 수직 변위를 측정했고 하중은 가력 계획에 따라 재하하였다.

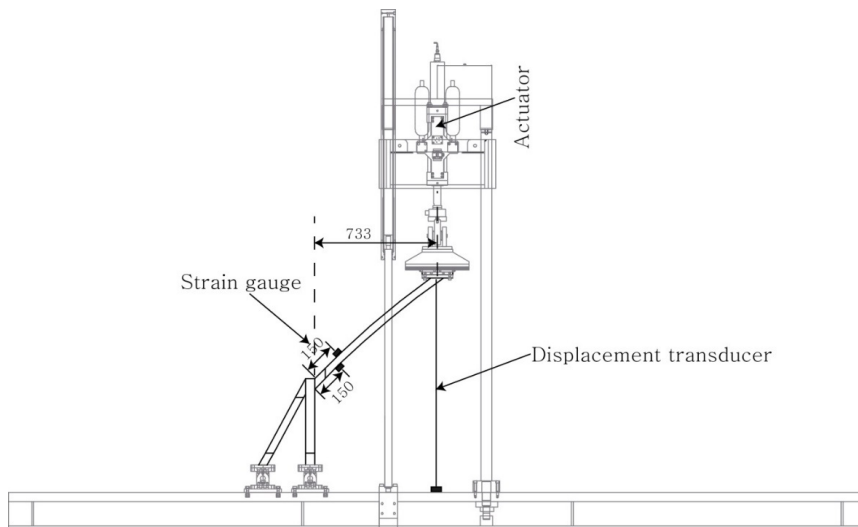


Fig. 3. Testing arrangement and instrumentation.

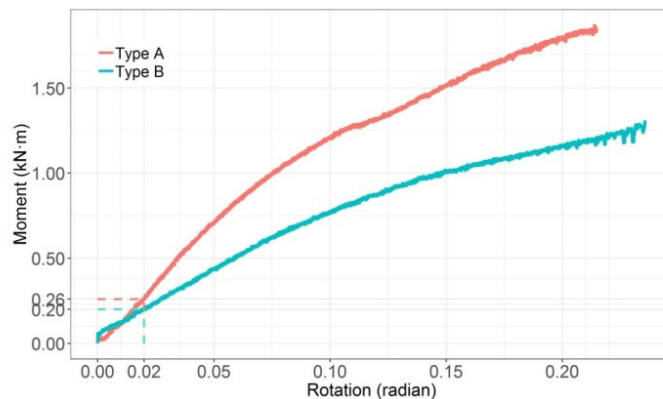


Fig. 4. Estimation method of maximum moment.

결과 및 고찰

1. 모멘트-회전각

Fig. 4는 기둥-서까래-도리 접합부 실험체의 두 가지 형식 (Type A, Type B)에 대한 모멘트-회전각 곡선을 나타낸 것이다. Fig. 4에서 세로 축은 접합 부분인 서까래 단부에 작용하는 모멘트이고 가로 축은 기둥과 서까래 사이의 상대 회전각으로 측정된 변위를 접합부와 액추에이터 사이의 거리로 나눈 값이다.

Fig. 4에 나타낸 것과 같이 Type A가 B 실험체 보다 힘 성능이 컸다. 두 가지 형식 모두 하중이 증가하면 회전각이 증가하는 선형적인 거동을 나타냈다. 그러나 모멘트-회전각 그래프 상에서 최대 모멘트는 특정할 수 없었다. 따라서 미국의 AISC 기준을 참고하여 최대 모멘트를 결정하였다. 결과 분석에 사용된 최대 모멘트는 회전각 0.02 radian 일 때의 모멘트를 최

대 모멘트로 하였다(Hsieh and Deierlein, 1991).

접합부 형식에 따른 최대 모멘트를 비교한 결과를 Table 1에 나타냈다. Type A 실험체의 최대 모멘트는 0.26 kN·m였고 Type B는 0.20 kN·m이었다. 최대 모멘트는 Type A에 비해 Type B가 76.92%로 감소한 수치를 나타내고 있다. 따라서 Type B로 접합부를 사용하는 경우 Type A 보다 약 33% 정도 적은 휨 성능을 갖게 됨을 알 수 있었다.

2. 변형 형상

접합부 실험체의 변형 형상은 Fig. 5와 같다. Type A 실험체의 경우는 서까래 부재가 삽입된 체결구 용접부위가 찢어져

변형이 크게 발생하였고 Type B 실험체도 체결구 상단의 변형이 크게 발생했다. 두 가지 형식 모두 가력 범위(변위 150mm) 내에서 최종 파단 부위는 특정하기 어려웠다.

Fig. 6은 Fig. 3에 표시된 지점에서 측정된 변형률 데이터를 이용하여 변형률-회전각 그래프를 나타낸 것이다. Type A와 B 실험체 모두 서까래 부재가 항복 응력에 도달하지 않았다. 회전각이 0.02 radian에 도달했을 때 Type A 실험체의 압축 변형이 서까래 상부에서 측정된 인장 변형보다 약 2.1배 크게 발생했다. Type B 실험체의 경우는 압축 변형이 약 1.7배 크게 발생하였다. Type A와 B 실험체 거동은 인장보다는 압축이 지배적인 것으로 나타났다 (Table 2).

Table 1. Comparison of maximum moment by specimens.

Specimen	Max. moment (kN·m) ²	Rotation (radian)	Ratio (%)
Type A	0.26	0.02	100.00
Type B	0.20	0.02	76.92

²Moment at 0.02 radian

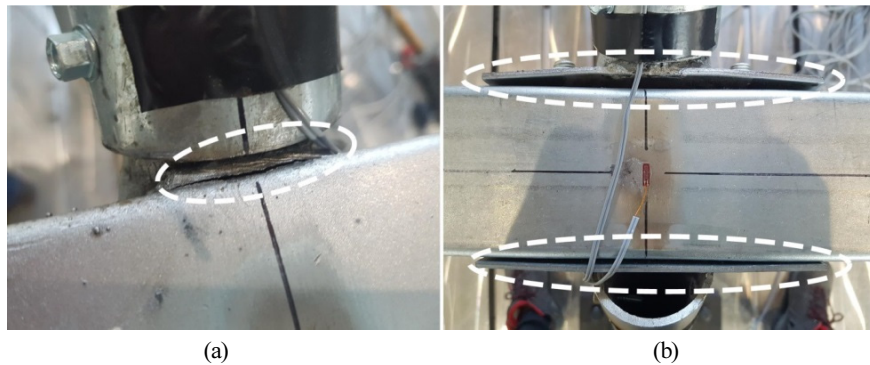


Fig. 5. Final deformation shape of column-rafter-purlin connections: (a) Type A; (b) Type B.

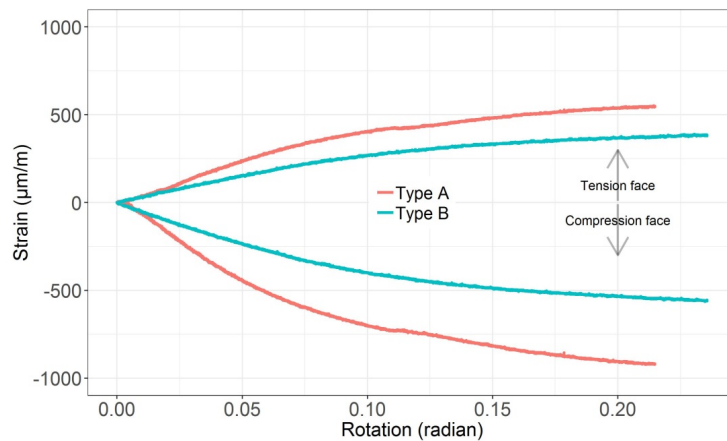


Fig. 6. Comparison of strain-rotation curves by connection types.

3. 접합부 성능 평가

일반적으로 강구조에서 기둥-보 접합부는 모멘트-회전각의 특성에 따라 접합부를 강접합, 반강접합, 단순접합으로 분류할 수 있다. 접합부 분류 방법에는 대표적으로 ANSI/AISC 360-10(ANSI/AISC, 2010), Eurocode No.3에 의한 방법이 있다. 그러나 이 접합부 성능 평가 기준은 HSS 등의 강관 건축 구조물에 대한 기준이며, 비닐온실의 접합부 분류에 대한 성능 평가 기준은 현재까지 정립이 되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 탄성 영역에서의 거동에 국한된 미국 기준의 ANSI/AISC 360-10에 의한 분류 방법에 따라 접합부 분류를 시도했다.

3.1 AISC에 의한 분류

AISC 기준은 사용하중 작용 시 휨 모멘트에 대한 접합부의 구속 정도를 평가하여 분류한다(Fig. 7). 여기서 Beam-line은 양단이 완전 고정 시 발생하는 보의 단부 모멘트 식(1)과 단순

보일 경우 보 단부에서 발생하는 처짐각 식(2)를 연결한 직선이다. Table 3은 AISC의 강도 및 강성에 따른 접합부 분류를 나타낸 것이다. 접합부의 휨 모멘트 구속 정도가 90% 이상이면 강접합, 20% 이하이면 단순 접합, 그 사이 구간은 반강접합으로 분류된다. AISC 접합부 분류는 회전 강성의 정의가 세분화되어 있지 않아 단부 구속도와 회전각 관계를 통해 정의했다(Table 3).

$$M_{Fa} = M_y = F_y \times S_r \tag{1}$$

$$\theta_a = L_r / 2 EI_r \times M_{Fa} \tag{2}$$

여기서, $M_{Fa} = M_y$: 서까래의 항복 모멘트, F_y : 서까래의 공칭 항복강도, S_r : 서까래의 단면계수, L_r : 서까래의 길이, I_r : 서까래의 단면 2차 모멘트

Table 2. Comparison of strain results by specimens.

Specimen	Side	Strain ($\mu\text{m/m}$)	Rotation (radian)	Ratio (%)
Type A	Compress	-165.26	0.02	100.00
	Tensile	78.87	0.02	47.72
Type B	Compress	-103.29	0.02	100.00
	Tensile	60.09	0.02	58.18

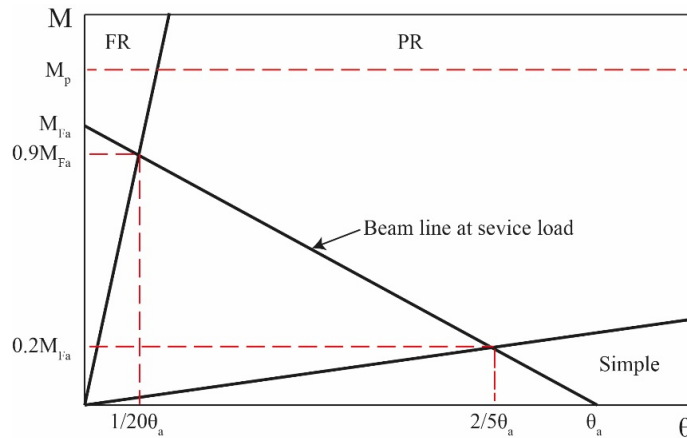


Fig. 7. Classifications of moment-rotation response of fully restrained (FR), partially restrained (PR) and simple connections based on strength (AISC)

Table 3. Classification of connection in AISC.

	Strength	Rigidity
FR	$M \geq 0.9M_{Fa}$	$K \geq 18EI/L$
PR	$0.2 < M \leq 0.9M_{Fa}$	$0.5EI/L < K < 18EI/L$
Simple	$M \leq 0.2M_{Fa}$	$K \leq 0.5EI/L$

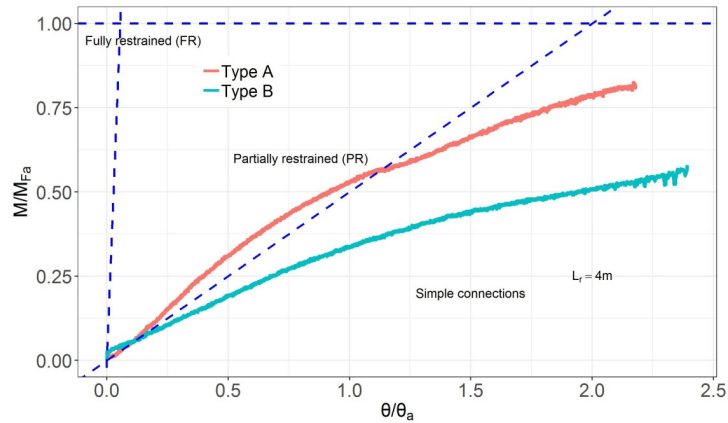


Fig. 8. Normalized connection classification in AISC.

Table 4. The ratio of maximum moment of specimens to plastic moment and moment at 0.02 radian.

Specimen	Mp (kN·m) ^z	M0.02rad (kN·m) ^y	Ratio (%)
Type A	3.04	0.26	11.49
Type B	3.04	0.20	15.21

^zPlastic moment of rafter pipe

^yMoment at 0.02 radian

3.2 접합부 분류 평가

Fig. 8은 AISC 접합부 분류 기준에 따라 모멘트-회전각 곡선을 무차원화하여 적용한 결과를 나타낸 그래프이다. Fig. 8에 나타난 것과 같이, Type B는 단순접합으로 분류할 수 있었다. Type A는 단순 접합과 반강접합의 경계 부분으로 분류되어 명확한 분류에 어려움이 있었다. 그러나 $M_{0.02rad}$ 에서 측정된 모멘트(Table 4)가 서까래 파이프 소성 모멘트의 20% 이하의 성능을 보이므로 Type A와 B는 단순 접합으로 분류할 수 있었다(ANSI/AISC, 2010). 실험적으로 평가한 접합부는 비닐온실 설계 시 강접합으로 설계하나 용접부 및 체결구의 변형으로 인하여 강접합 성능에 미치지 못하는 결과를 보였다. 뿐만 아니라 접합부 분류 결과에서도 단순접합으로 나타났다. 그러므로 현재 연동온실을 설계할 때 강접합으로 가정하는 것은 온실 설계가 과소 설계될 우려가 있으므로, 강접합에 해당하는 성능을 확보할 수 있는 접합부 보강 또는 단순접합으로 온실 설계가 필요할 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 단조가력 하중을 받는 실물크기 비닐온실의 기둥-서까래-도리 접합부의 역학적거동을 알아보기 위해 현장에서 시공되고 있는 두 가지 형식의 실험체로 구조실험을 수

행하였다. 실험결과를 바탕으로 두 가지 형식의 접합부에 대해서 휨성능을 분석하고 접합부 분류를 시도하였다. Type B는 Type A에 비해 휨 성능이 77% 수준으로 나타났으며 두 형식 모두 강성 및 휨내력이 강접합 수준에 미치지 못하는 것으로 나타났다. 기둥-서까래-도리 접합부의 거동은 용접부 및 체결구 변형에 의한 국부좌굴이 지배적이었다. AISC 기준에 의한 접합부 분류 결과, Type A와 B 접합부 모두 설계 시 가정하는 강접합 성능에 미치지 못하는 결과를 보였으며 단순 접합으로 분류되는 것으로 나타났다. 따라서 접합부 성능평가 및 분류 결과, 접합부 성능을 고려한 온실 설계가 이루어져야 하며 신뢰성 높은 온실 구조설계를 위해서 온실 접합부에 대한 명확한 설계기준 정립 연구가 필요할 것으로 판단된다.

추가 주제어: AISC 분류, 강접합, 모멘트, 이음, 회전각

Literature Cited

- ANSI/AISC. Specification for structural steel buildings. American Institute of Steel Construction. Chicago, Illinois. 2010.
- Choi, M.K., H.R. Ryu, M.W. Cho, I.H. Yu and S.Y. Kim. 2017. Connection classification and performance evaluation of multi-span greenhouse. The 2017 KSAE Annual Conference. KSAE. p. 149.

- Hsieh, S.H. and G.G. Deierlein. 1991. Nonlinear analysis of three-dimensional steel frames with semi-rigid connections. *Computers and Structures*. 41:995-1009.
- Kim, H.J., K.S. Park, K.W. Bae and T.S. Moon. 1996. A study on the k - joints using square hollow steel sections in truss. *J of Korean Soc of Steel Construction*. 8:3-17.
- Lee, S.H., K.J. Shin, H.D. Lee and W.B. Kim. 2012. Test and analysis on the transverse gusset plate connection to circular hollow section(chs) of high strength. *J of Korean Soc of Steel Construction*. 24:163-173.
- 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 & RDA, Gwacheon and Jeonju, Korea.
- Oh, M.H. and S.J. Park. 2015. The experiment for performance evaluation of beam-column connections in the modular structures. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 15:25-33.