

트러스웹을 가진 보의 허용하중 산정

Determination of the Allowable Load for Trussed Web Beam

김명한*

Kim, Myeong-Han

Abstract

The efficient beam members for modern greenhouse need to be much lightweight with the required flexural and buckling strength. To confirm the applicability and practicality of the trussed web beam recently proposed for column and beam members of greenhouse, the flexural behavior and buckling characteristics were analyzed by the finite element approach. On the basis of analytical studies, the member design process was presented considering the lateral and local buckling behavior. Also, two improved alternatives which were capable of retaining the lateral and local buckling effectively were suggested.

Key words : Greenhouse, Lateral buckling, Local buckling, Finite element analysis

요 지

유리온실에 효과적으로 적용할 수 있는 보는 최대한 가벼운 중량을 유지하면서, 요구되는 휨모멘트 강도와 좌굴 강도를 만족시켜야 한다. 이 연구에서는 유리온실의 보 및 기둥 부재로 최근에 제안된 트러스웹을 가진 보의 실무적인 적용성을 확립하기 위해서 휨거동과 좌굴거동을 해석적으로 분석하였다. 이 결과를 바탕으로 횡좌굴 및 국부좌굴을 고려한 부재설계 프로세스를 제시하였다. 또한 유한요소 해석결과를 바탕으로 횡좌굴 혹은 국부좌굴을 지연시킴으로써 단면성능을 향상시킬 수 있는 개선안을 제시하였다.

핵심용어 : 온실, 횡좌굴, 국부좌굴, 유한요소해석

1. 서 론

국내에서 온실(Greenhouse) 건설은 1991년 네덜란드의 벤로형 온실(Venlo Greenhouse, 혹은 유럽형 온실) 샘플이 수입되면서 본격화 되었으며, 1994년부터 화훼 및 채소의 생산·유통 지원사업 추진에 힘입어 전국적으로 온실이 보급되었다. 한국형 온실의 5가지 모델(양쪽지붕형[兩面式], 3/4식[不等式], 외쪽지붕형[片面式], 반원형식[半圓形式], 연동식[連棟式])이 1997년에 개발되었으며, 1999년에는 24,000평의 벤로형 온실이 국내의 자재와 기술로 건설되었다.

현재까지 국내 온실의 대표적인 시스템으로 자리잡고 있는 벤로형 온실은 기둥이 각형강관이며, 보는 래티스 트러스로 구성되어 있다(그림 1). 그러나 래티스 트러스는 이형철근을 상하현재에 직접 용접하여 제작해야 하므로 작업과정이 까다로우며, 장스팬이 요구되는 경우에는 부재의 중량이 커져서 효율적인 시스템이 되지 못한다. 이에 대한 대안으로서 보 부재를 경량 H형강이나 PEB 시스템으로 대체하려는 연구들(오명호 등, 2009; 오명호 등, 2010)이 시도되고 있다.

이 연구에서는 유리온실의 보 및 기둥 부재로 최근에 제안된 트러스웹을 가진 보(Trussed Web Beam)(동부제철, 2009)의 실무적인 적용성을 확립하기 위해서 횡좌굴 및 국부좌굴을 고려한 부재설계 프로세스를 제시하였다. 또한 유한요소 해석결과를 바탕으로 횡좌굴 혹은 국부좌굴을 지연시킴으로써 단면성능을 향상시킬 수 있는 개선안을 제시하였다.

이 연구는 향후에 수행예정인 실험적인 검증과 비선형 해석연구의 선행단계로서 제안된 부재의 휨거동과 좌굴거동을 해석적으로 분석하고, 이 결과를 부재설계 프로세스에 반영하는데 중점을 두고 진행하였다.

2. 트러스웹을 가진 보

유리온실에 효과적으로 적용할 수 있는 보는 최대한 가벼운 중량을 유지하면서, 요구되는 휨모멘트 강도와 좌굴 강도를 만족시켜야 한다. 이러한 조건을 충족시킬 수 있는 부재로서 트러스웹을 가진 보가 제안되었다(그림 2).

이 보의 두께 5 mm 내외의 상부 플레이트(Steel Upper

*정회원 · 대전대학교 건축공학과 조교수 (E-mail: mhk314@daejin.ac.kr)

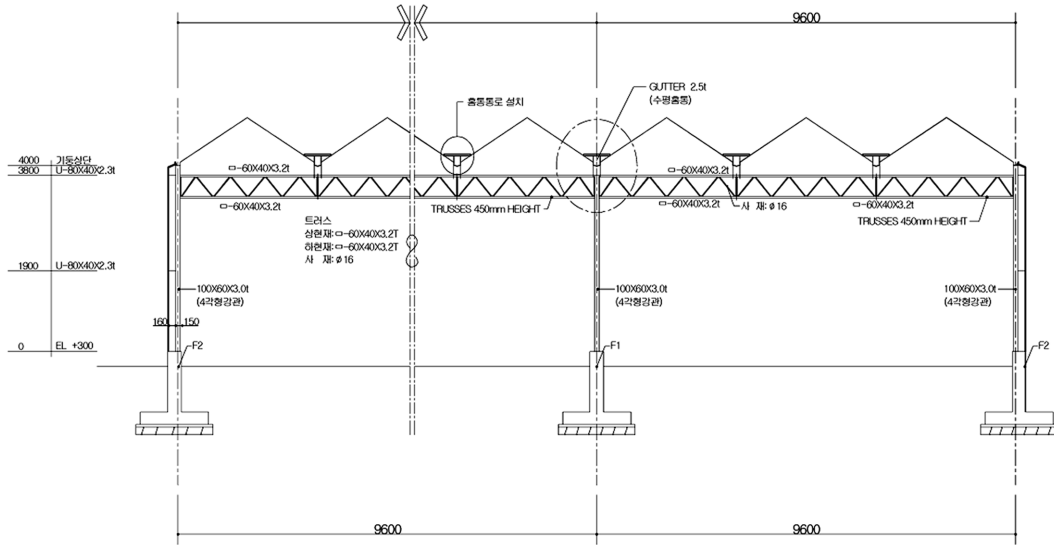


그림 1. 벤로형 온실

Plate)와 하부 플레이트 (Steel Lower Plate)를 직경 5 mm의 봉재 (Steel Rod)로 연결한 것이다. 상부 및 하부 플레이트는 보의 플랜지 역할을 하며, 트러스 형태를 가진 봉재는 보의 웨브 역할을 한다. 일반적인 H형강의 웨브 플레이트와는 달리 트러스 형태의 봉재가 상부 및 하부 플레이트를 연결하므로, 요구되는 휨모멘트 강도를 만족시키면서 최대한의 경량을 유지할 수 있다. 또한 트러스 형태의 봉재는 플랜지 역할을 하는 플레이트의 양측단 모드를 지지하기 때문에 폐쇄형 단면의 효과를 나타낼 수 있다. 따라서 제안된 보 부재는 뛰어난 횡좌굴 강도를 가지며, 플레이트의 국부좌굴도 지연되는 장점을 가진다.

3. 좌굴을 고려하지 않은 설계 프로세스

그림 2에서 제시된 단면형태를 가진 스패น 6m의 단순보 (SS400 강재)에 대해서 일반적인 형강부재의 허용응력 설계법에 근거하여 허용하중(ω_a)과 처짐(Δ_{max})을 구하는 과정을 서술한다.

허용휨응력(F_b), 단면2차모멘트(I_x), 단면계수(S_x), 허용휨모멘트(M_a)를 순서대로 구하면 허용하중을 계산할 수 있으며, 계산과정은 다음과 같다. 여기에서 횡좌굴 및 국부좌굴은 고려

되지 않으므로, 허용인장력과 허용휨응력이 같다고 가정한다.

$$F_b = F_t = 235/1.5 = 157 \text{ MPa} \quad (1)$$

$$I_x = (100 \times 100^3)/12 - (100 \times 90^3)/12 = 2,258,333 \text{ mm}^4 \quad (2)$$

$$S_x = 2,258,333/50 = 45,167 \text{ mm}^3 \quad (3)$$

$$M_a = F_b S_x = 157 \times 45,167 = 7,091,219 \text{ Nmm} \quad (4)$$

$$\omega_a = 8M_a/L^2 = 8 \times 7,091,219/6,000^2 = 1.58 \text{ N/mm} \quad (5)$$

중앙부의 최대처짐은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \Delta_{max} &= \frac{5\omega_a L^4}{384EI} \\ &= \frac{5 \times 1.58 \times 6,000^4}{384 \times 205,000 \times 2,258,333} \\ &= 57.59 \text{ mm} \end{aligned} \quad (6)$$

4. 응력, 처짐 및 좌굴 해석

앞에서 서술한 부재설계 프로세스의 적합성을 검증하기 위해서 유한요소해석을 수행하였다. 해석프로그램은 MIDAS/

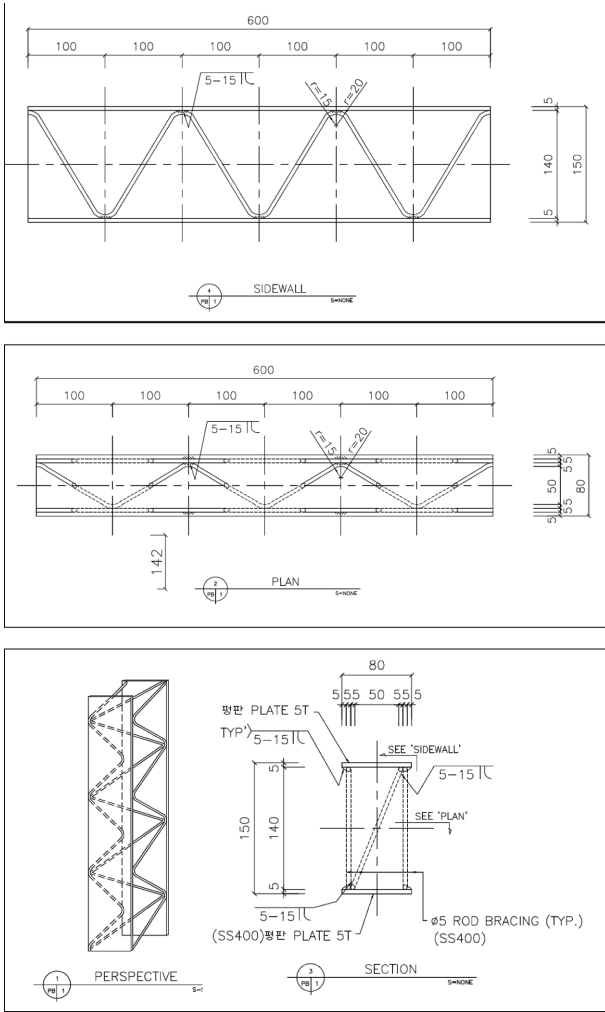


그림 2. 트러스웹을 가진 보

Gen을 이용하였으며, 상부 플레이트와 하부 플레이트는 PLATE 요소로, 봉재는 TRUSS 요소로 모델링하였다.

식(5)에서 계산된 허용하중을 입력하중으로 설정한 정적해석(그림 3)의 결과와 설계 프로세스에서 가정되거나 계산된 결과를 표 1에서 비교하였다. 플레이트의 최대응력과 중앙부의 최대처짐이 비교적 유사한 값을 나타내며, 이를 통해서 3장에서 서술한 부재설계 프로세스가 보의 휨거동은 적절히 반영하고 있음을 알 수 있다. 그러나 이러한 설계 프로세스는 보의 전체적인 좌굴이나 플레이트의 국부좌굴은 고려하지 않은 것이므로, 좌굴해석을 통하여 설계 프로세스의 적합성을 다시 검토할 필요가 있다.

그림 4는 좌굴해석 수행결과이며, 하중의 크기가 1.26 N/mm 인 상태에서 상부 플레이트에 국부좌굴이 발생함을 나타낸다. 이 하중은 3장의 부재설계 프로세스에서 계산된 허용하중인 1.58 N/mm 보다 작은 값이며, 허용인장응력의 크기에 도달하기 이전에 상부 플레이트에서 국부좌굴이 먼저 발생함을 의미한다. 따라서 허용휨응력은 국부좌굴이 발생하는 하중에 근거하여 다시 계산되어야 한다.

국부좌굴이 발생하는 하중인 1.26 N/mm에서 상부 플레이트의 최대응력은 125.7 MPa이며, 이 값에 1.5의 안전율을 적용하여 식(7)과 같이 허용휨응력을 제시할 수 있다. 좌굴을

트러스웹을 가진 보의 허용하중 산정

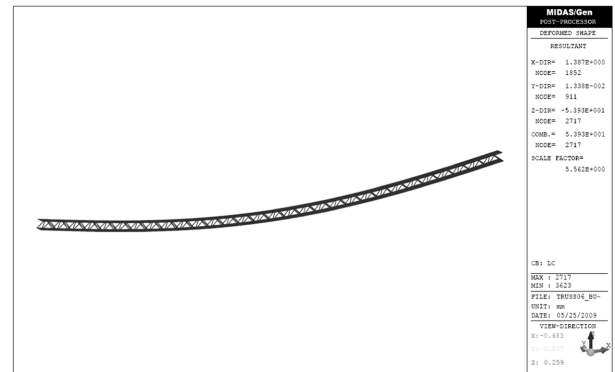
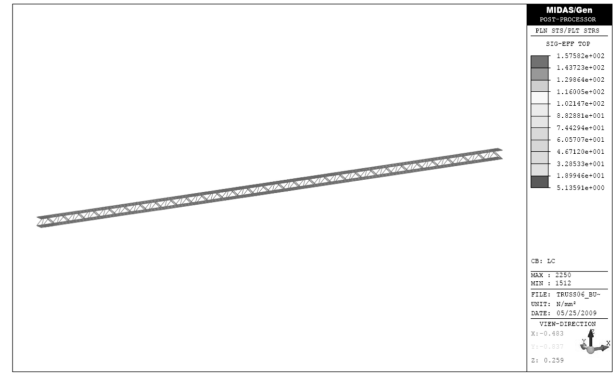


그림 3. 유한요소해석(정적해석) 결과

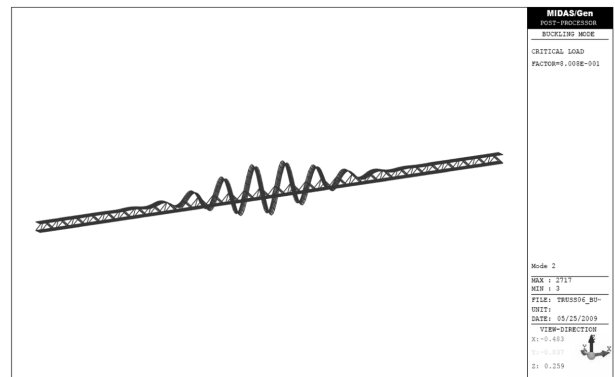


그림 4. 유한요소해석(좌굴해석) 결과

표 1. 유한요소해석과 설계 프로세스의 비교

구분	유한요소해석	설계 프로세스
플레이트 최대응력 (MPa)	157.6	$F_b = 157$
봉재 최대응력 (MPa)	126.6	-
최대처짐 (mm)	53.93	57.59

고려한 이 허용휨응력은 허용인장응력의 53%에 해당된다.

$$F_b = \frac{\sigma_{max}}{1.5} = \frac{125.7}{1.5} = 83.8 MPa \quad (7)$$

5. 좌굴을 고려한 설계 프로세스

좌굴을 고려한 허용휨응력을 기준으로 허용하중과 처짐을 다시 산정하는 과정은 다음과 같다.

$$F_b = 125.7/1.5 = 83.8 \text{ MPa} \quad (7)$$

$$M_a = F_b S_x = 83.8 \times 45,167 = 3,784,995 \text{ Nmm} \quad (8)$$

$$\omega_a = 8M_a/L^2 = 8 \times 3,784,995/6,000^2 = 0.84 \text{ N/mm} \quad (9)$$

$$A_{\max} = \frac{5\omega_a L^4}{384EI} \quad (10)$$

$$= \frac{5 \times 0.84 \times 6,000^4}{384 \times 205,000 \times 2,258,333}$$

$$= 30.32 \text{ mm}$$

6. 성능향상을 위한 개선안

2장에서 제시된 트러스웨이를 가진 보는 매우 가벼운 부재이면서 우수한 단면성능을 나타내고 있다. 그러나 4장의 좌굴 해석에서 분석된 것과 같이 상부 플레이트의 국부좌굴이 지연된다면 더욱 우수한 단면성능을 발휘할 수 있을 것이다.

제시된 부재의 형태에서 상부 플레이트와 하부 플레이트를 연결하는 봉재의 형태를 그림 5와 같이 변경하면 플레이트 양측단의 지점거리가 절반으로 감소한다. 따라서 플레이트의 국부좌굴이 상당히 지연될 것이다. 다만 상부 플레이트의 좌측단과 하부 플레이트의 우측단 (혹은 상부 플레이트의 우측단과 하부 플레이트의 좌측단)을 대각선 방향으로 연결하는 봉재가 생략되므로 폐쇄형 단면의 효과가 감소할 것이며, 따라서 횡좌굴에 대한 저항성이 다소 떨어질 것이다. 또한, 상부 플레이트와 하부 플레이트를 수직으로 연결하는 봉재들의 개별적인 접합은 까다로운 제작과정이 될 수 있다.

그림 6는 개선안(1)에 대한 좌굴해석 수행결과이며, 하중의

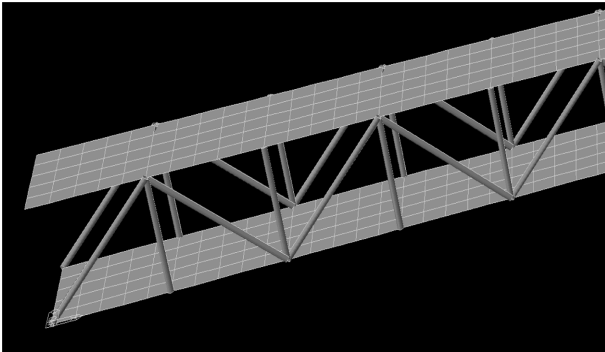


그림 5. 성능향상을 위한 개선안(1)

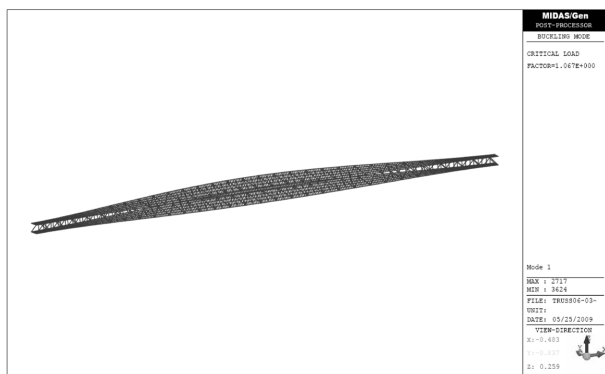


그림 6. 개선안(1)의 좌굴해석 결과

크기가 1.69 N/mm인 상태에서 전체적인 횡좌굴이 발생함을 나타낸다. 횡좌굴이 발생하는 하중인 1.69 N/mm에서 상부 플레이트의 최대응력은 163.6 MPa이므로, 허용인장응력의 크기인 157 MPa에 도달한 이후에 횡좌굴이 발생한다. 그러나 허용휨응력은 횡좌굴이 발생하는 하중에서의 최대응력에 1.5의 안전율을 적용하여 식(11)과 같이 제시할 수 있다. 좌굴을 고려한 이 허용휨응력은 허용인장응력의 70%에 해당된다.

$$F_b = \frac{\sigma_{\max}}{1.5} = \frac{163.1}{1.5} = 109.1 \text{ MPa} \quad (11)$$

그림 7은 개선안(2)를 나타내는데, 개선안(1)에서 상부 플레이트와 하부 플레이트를 수직으로 연결하는 봉재들을 상부 플레이트의 좌측단과 하부 플레이트의 우측단 (혹은 상부 플레이트의 우측단과 하부 플레이트의 좌측단)을 연결할 수 있도록 대각선 방향으로 눕혀 설치한 것이다. 이를 통해서 폐쇄형 단면의 효과가 증가하며, 따라서 횡좌굴에 대한 저항성도 커질 것이다. 이 개선안(2)에서도 연속적이지 않은 개별적인 봉재들의 접합은 까다로운 제작과정이 될 수 있다.

그림 8는 개선안(2)에 대한 좌굴해석 수행결과이며, 하중의 크기가 4.43 N/mm인 상태에서 상부 플레이트에서 국부좌굴이 발생함을 나타낸다. 국부좌굴이 발생하는 하중인 4.43 N/mm에서 상부 플레이트의 최대응력은 430.2 MPa이므로, 항복응력인 235 MPa에 도달하기 이전에는 좌굴이 전혀 발생하지 않는다. 따라서 허용휨응력은 허용인장응력과 동일한 값으로 식(12)과 같이 제시할 수 있다.

$$F_b = F_t = 235/1.5 = 157 \text{ MPa} \quad (12)$$

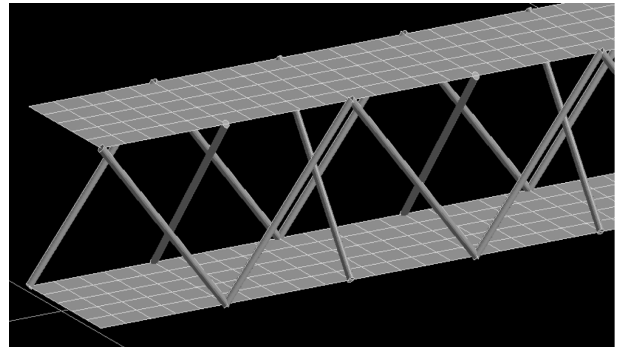


그림 7. 성능향상을 위한 개선안(2)

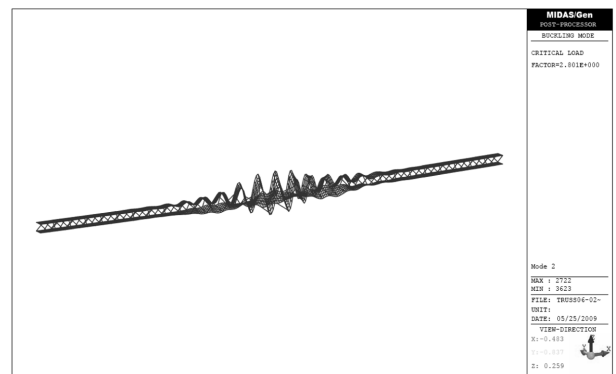


그림 8. 개선안(2)의 좌굴해석 결과

7. 결 론

유리온실에 효과적으로 적용할 수 있는 보는 최대한 가벼운 중량을 유지하면서, 요구되는 휨모멘트 강도와 좌굴 강도를 만족시켜야 한다. 이 연구에서는 유리온실의 보 및 기둥 부재로 최근에 제안된 트러스웹을 가진 보의 실무적인 적용성을 확립하기 위해서 횡좌굴 및 국부좌굴을 고려한 부재설계 프로세스를 제시하였다. 또한 유한요소 해석결과를 바탕으로 횡좌굴 혹은 국부좌굴을 지연시킴으로서 단면성능을 향상시킬 수 있는 개선안을 제시하였다. 이 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 제안된 트러스웹을 가진 보 (스팬 6 m, 단순지지, SS400 강재)에서는 허용인장응력의 크기에 도달하기 이전에 상부 플레이트에서 국부좌굴이 발생한다. 국부좌굴을 고려한 허용휨응력은 허용인장응력의 53%에 해당되며, 허용허중은 0.84 N/mm이다.
 - 2) 제안된 부재의 국부좌굴을 지연하기 위한 개선안(1)에서는 허용인장응력의 크기에 도달하기 이전에 전체적인 횡좌굴이 발생한다. 횡좌굴을 고려한 허용휨응력은 허용인장응력의 70%에 해당된다.
 - 3) 제안된 부재의 횡좌굴과 국부좌굴을 지연하기 위한 개선안(2)에서는 허용인장응력의 크기에 도달하기 이전에 횡좌굴이나 국부좌굴이 발생하지 않는다. 따라서 허용휨응력은 허용인장응력과 동일하게 가정할 수 있다.
- 이 연구에서는 제안된 부재의 휨거동과 좌굴거동을 해석적

으로 분석하였고, 이 결과를 부재설계 프로세스에 반영하고자 하였다. 후속 연구로서 실험적인 검증과 비선형 해석을 통해서 제안된 부재의 실무적인 적용성과 설계 프로세스의 적합성이 좀 더 합리적으로 검증되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2009학년도 대전대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

참고문헌

- 오명호, 김용석 (2009) 경량H형강을 이용한 유리온실의 구조시스템 개발, **대한건축학회연합논문집**, 대한건축학회지회연합회, 제11권 제2호, pp.211-218.
- 오명호, 김용석 (2010) 선설계기법을 이용한 장경간 유리온실 구조시스템 개발, **한국방재학회논문집**, 제10권 제1호, pp.1-7.
- 동부제철 (2009) 온실용 기둥, 특허출원, 제2009-0011063호.
- 농림부, 농어촌진흥공사 (1997) 한국형 유리온실 표준설계도.
- 이석진 (2007), 온실의 자재절감 및 안전성 향상을 위한 최적 모델 및 설계시스템 개발, **농림부 연구개발보고서**, 경북대학교.
- 도병호 (2007) PEB (Pre-Engineered Metal Building) System 설계 검토, 건축구조기술사회지, 건축구조기술사회, 제14권 제1호, pp.39-45.

- ◎ 논문접수일 : 10년 03월 17일
- ◎ 심사의뢰일 : 10년 03월 17일
- ◎ 심사완료일 : 10년 03월 22일