



반강결 프레임 구조물의 시스템 신뢰성 해석 - 비닐하우스를 중심으로 -

Structural System Reliability Analysis of Semi-rigid Connected Frame - Focused on Plastic Greenhouse -

이상익^a · 이종혁^b · 정영준^b · 김동수^c · 서병훈^c · 서예진^c · 최원^{d†}

Lee, Sangik · Lee, Jonghyuk · Jeong, Youngjoon · Kim, Dongsu · Seo, Byunghun · Seo, Yejin · Choi, Won

ABSTRACT

Recently, the trend in structural analysis and design is moving towards the development of reliable system. The reliability-based method defines various limit states related to usability and failure, thereby enabling multiple levels of design according to the importance of a structure. Meanwhile, an actual structure is composed of a set of several elements, and particularly, a frame type is composed of a system in which the members are connected each other. At this time, the actual connection between members is in a semi-rigid condition, not in complete rigid or hinged. This semi-rigid is found in several structures, especially in agricultural facilities designed with lightweight materials. In this study, a system reliability analysis technique for frame structure was established, and applied to an analysis of the semi-rigid connection. Various conditions of correlation were applied to reflect the connectivity between members, and through this, the limitations of existing structural analysis method and the behavioral characteristics of structure were analyzed. The failure probability of the frame member component and the overall structure system was significantly different in consideration of the semi-rigid connection. In addition, it was evaluated that the behavior of structure can be more accurately analyzed if the correlation according to the position of members in a system is further investigated.

Keywords: Reliability analysis; failure probability; structural reliability; system reliability; plastic greenhouse; semi-rigid connection

1. 서론

실제 구조물은 여러 요소들의 집합으로 구성되며, 특히 프레임 구조물의 경우 부재들끼리 연결된 시스템으로 이루어진다. 이때 프레임 구조물의 연결 형태는 강결 (rigid) 및 회전 (hinged)으로 구분되며, 구조해석 및 설계 시 일반적으로 연결부의 조건과 안전성을 고려하여 두 가지의 형태 중 하나를 선택하게 된다 (Simitse and Vlahinos, 1982). 그러나 실제 구

조물의 거동에서는 완전한 결합 형태로 나타나지 않는다. 특히 경량구조재로 설계된 농업시설물은 그 연결부에서 충분한 강성이 확보되지 않아 반강결 (semi-rigid) 상태로 결합된다 (Kim and Lee, 1998; Kartal, 2010; Yang, 2020; Rigi et al., 2021; Hou et al., 2021; Zhao et al., 2022). 그 대표적 예는 비닐하우스가 있으며, 서까래 파이프와 도리의 결합부 혹은 지반과의 접합부에서 이러한 반강결 상태를 볼 수 있다 (Ryu, et al., 2012; Lee et al., 2020). 특히 조리개를 이용해 골조를 연결하기 때문에 볼트 등으로 연결되는 일반 강재에 비해 더욱 취약하다. 따라서 단순 고정 혹은 회전의 경계조건으로 해석 시 과다 혹은 과소 설계로 이어질 수 있으며, 성능 평가 시 적지 않은 영향을 주게 된다 (Ryu et al., 2012; Choi et al., 2016). 이러한 경량구조물의 특성 상 비닐하우스의 재해 피해가 지속적으로 발생하고 있으며, 지난 10년 간 3,503억 원에 달하는 피해액이 발생한 바 있다 (MOIS, 2019). MAFRA (2014) 및 MAFRA (2019)는 안전설계기준을 포함한 내재해 규격시설을 배포하였지만, 아직까지 비닐하우스의 실제 거동을 충분히 고려한 구조설계에는 한계가 있는 실정이다.

한편, 한 부재 요소의 파기가 전체 구조 시스템의 파기로 바로 이어지는 않지만, 서로 연결되어 있기 때문에 그 파괴

^a Researcher, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

^b PhD Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

^c MS Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

^d Associate Professor, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Global Smart Farm Convergence Major, Seoul National University

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4715, Fax: +82-2-873-2087

E-mail: fembem@snu.ac.kr

Received: August 25, 2022

Revised: September 07, 2022

Accepted: September 07, 2022

확률에 영향을 미치게 된다 (Liu and Kiureghian, 1986; Kim and Ok, 2011). 따라서 구조물의 설계에 있어 각 요소 별 해석과 더불어 전체 시스템에 관한 신뢰성 해석이 필요하다. (Adduri and Penmetsa, 2009). 또한, 구조물의 복잡한 한계상태와 실제 파괴확률을 직접 계산하는 것은 어렵기 때문에, FORM (first-order reliability method), SORM (second-order reliability method), MCS (Monte-carlo simulation), MSR (Matrix-based system reliability) 등의 방법이 활용되고 있다 (Hohenbichler et al., 1987; Haldar and Mahadevan, 1995; Papadrakakis et al., 1996; Song and Kang, 2009).

이처럼 신뢰성 해석의 적용성을 높여, 최근에는 건축물들의 신뢰성에 기반한 해석 및 설계로의 발전으로 넘어가고 있는 추세이다. 뿐만 아니라 그동안 모델링에 어려움을 겪던 반강결 결합 형태의 일반 건축물에 대한 신뢰성 기반 해석이 수행되고 있다 (Agostini et al., 2018; Nguyen, 2019; Tran and Nguyen, 2019). 그러나 앞서 언급된 비닐하우스를 포함한 농업시설물의 구조 설계에 있어서는, 현재까지 허용응력을 기반으로 그 안전성을 단순 평가하고 있다 (NAAS, 2015). 따라서 이들에 관한 신뢰성 해석을 바탕으로 신뢰도를 제고한 설계가 필요하며, 특히 반강결 형태와 같이 실제 거동을 반영할 수 있는 시스템 해석이 이루어져야 한다.

따라서 본 연구에서는 프레임 구조물의 시스템 신뢰성 해석을 통해, 각 부재 요소별 파괴확률을 산정하고, 이들 간의

반강결 결합조건에 따른 비닐하우스 구조 시스템의 파괴확률과 실제 거동을 평가하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 대상 시설

프레임 구조물의 부재간 연결은 다양한 방법과 부품으로 결합된다. 이 중 농업시설물인 비닐하우스에서는 조리개, 클램프 등을 이용하여 서까래와 도리를 연결하게 된다. 이러한 결합 형태는 외부하중의 작용에 의한 구조물의 실제 거동 시, 완전한 고정으로 작용하지 못하며, 회전 결합조건에도 해당하지 않게 된다. 만일 완전한 고정조건일 경우, 한 서까래 부재 요소의 파괴가 다른 요소의 파괴로 직접 이어지게 된다. 그러나 반강결 결합조건으로 인해 한 요소의 파괴가 다른 요소의 파괴에 확률적으로 영향을 미치게 된다.

본 연구의 대상 시설은 Fig. 1과 같이 구성되며, 하나의 서까래 부재 요소는 5개의 지점에서 가로대와 결합되고, 전체 구조물 시스템에 대해서는 길이방향으로 일정한 간격으로 설치되어있다. 해당 비닐하우스에 이용된 부재는 한국 산업규격 비닐하우스용 도금 강관 KS D 3760 SPVHS이며, 그 물성치는 Table 1과 같다.

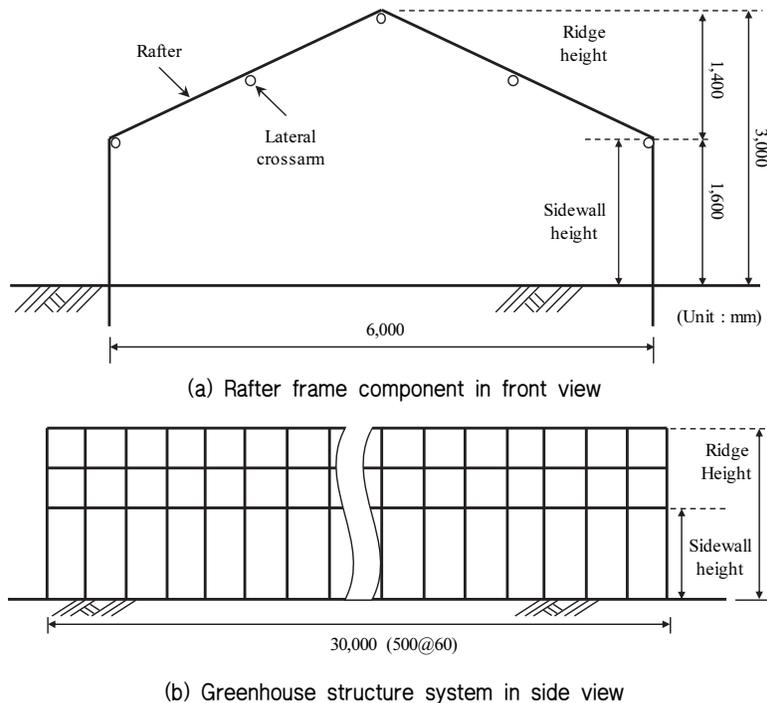


Fig. 1 Specifications of target facility

Table 1 Material property of standard structural steel for plastic greenhouse

Code number	Steel symbol	Specification (mm)	Tensile strength (N/mm ²)	Yield strength (N/mm ²)	Plastic section modulus (mm ³)
KS D 3760	SPVHS	∅25.4×1.5t	400	295	857.9

2. 구조신뢰성 해석

구조신뢰성 해석은 구조물의 구성요소 또는 시스템에 관한 하중과 저항의 확률적 모델을 분석하여 한계상태를 벗어난 파괴확률을 평가하는 기법이다 (Ang and Cornell, 1974; Rackwitz and Fiessler, 1978; Chojaczyk et al., 2015; Ang and Tang, 2006). 이때 한계상태는 특정한 설계 요구사항에 관한 조건이며, 수학적으로는 한계상태방정식 $g(X)$ 로 표현된다. 이에 따라 파괴확률 P_f 는 $g(X) \leq 0$ 조건에서의 확률로 표현되며, X 는 재료 및 형상과 관련된 저항과 하중에 관한 불확실성을 포함한 확률변수이다. 일반적으로 구조물은 다수의 설계변수들로 구성되며, 서로 복잡한 상관관계를 가지고 있다. 이들에 관한 확률변수 $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T$ 와 한계상태에 대해 다음과 같이 파괴확률을 산정할 수 있다.

$$P_f = \int_{\Omega} f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \tag{1}$$

$$\Omega \equiv \{g(\mathbf{x}) \leq 0\} \tag{2}$$

- where, P_f : Failure probability
- $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$: Joint probability density function (joint PDF)
- Ω : Failure domain
- $g(\mathbf{x})$: Limit state function

그러나 대부분의 경우 $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ 와 Ω 의 산정이 어려우며, 해당 적분을 위한 명확한 해석해가 존재하지 않는다 (Hohenbichler et al., 1987; Der Kiureghian, 2005). 뿐만 아니라 3개 이상의 다수의 확률변수가 존재할 경우, 직접적인 수치해석은 실용적이지 못한 한계가 있다. 이에 실용적으로 널리 이용되는 해석적 기법인 FORM (first-order reliability method)은 식 (3), (4)와 같이 한계상태방정식을 표준정규 (standard normal) 공간으로 변환하여 기하학적 최적화 문제로 풀이하게 된다 (Fig. 2).

$$P_f = \int_{g(\mathbf{x}) \leq 0} f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \tag{3}$$

$$= \int_{G(\mathbf{u}) \leq 0} \varphi_n(\mathbf{u}) d\mathbf{u}$$

$$\mathbf{u}^* = \operatorname{argmin} \{ \|\mathbf{u}\| \mid G(\mathbf{u}) = 0 \} \tag{4}$$

- where, \mathbf{u} : Standard normal random variables
- $G(\mathbf{u})$: Limit state function in the standard normal space
- $\varphi_n(\mathbf{u})$: Joint PDF of n standard normal random variables
- \mathbf{u}^* : Design point for the linearization of the limit state function

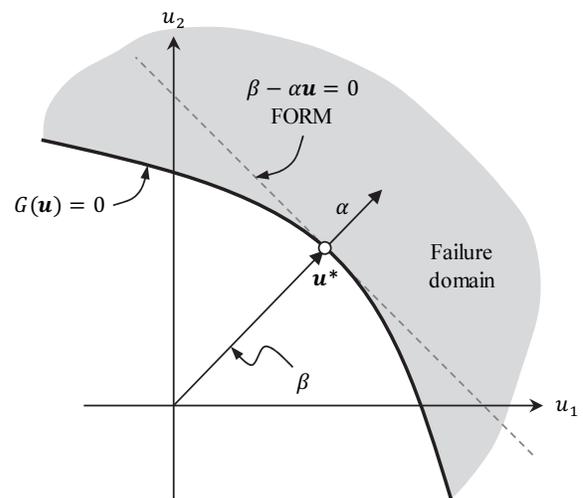


Fig. 2 Design point of first-order approximation for component reliability problem

식 (4)에서와 같이 design point \mathbf{u}^* 는 $G(\mathbf{u}) = 0$ 을 만족하는 표준정규 확률변수 \mathbf{u} 중에서 l_2 -norm이 최소가 되는 벡터이다. 그 기하학적 의미는, Fig. 2에서와 같이 표준정규 공간에서 한계상태 위의 여러 점들 중 원점과의 거리가 최소인 점이다. 해당 점에서의 한계상태방정식을 아래와 같이 선형 근사하게 되면, 신뢰도 지수 β 를 얻을 수 있으며, 이를 통해 파괴확률을 근사적으로 계산할 수 있게 된다.

$$G(\mathbf{u}^*) = 0 \tag{5}$$

$$G(\mathbf{u}) \cong G_1(\mathbf{u}) = \nabla G(\mathbf{u}^*)(\mathbf{u} - \mathbf{u}^*) = \|\nabla G(\mathbf{u}^*)\| (\beta - \alpha\mathbf{u}) \tag{6}$$

$$P_f \cong \Phi(-\beta) \tag{7}$$

where, $G_1(\mathbf{u})$: First-order approximation of $G(\mathbf{u})$
 $\nabla G(\mathbf{u})$: Gradient row vector of $G(\mathbf{u})$
 β : Reliability index
 α : Normalized negative gradient row vector at the design point
 Φ : Cumulative distribution function of standard normal distribution

가. 확률변수 설정

신뢰성 해석을 위해서는 구조물의 저항에 해당하는 강도와 하중에 관한 변수를 특정 분포를 가지는 확률변수로 설정함으로써 파괴확률을 도출하게 된다. 비닐하우스의 프레임 부재에 대해서는 아래와 같이 항복응력과 강관의 소성단면계수를 이용하여 소성 휨강도를 산정할 수 있다.

$$M_p = \sigma_y Z_p \tag{8}$$

where, M_p : Plastic moment capacity (N · mm)
 σ_y : Yield stress (N/mm²)
 Z_p : Plastic section modulus (mm³)

이때 항복응력에 관한 표준규격에서는 특정 값 이상의 강도가 확보되도록 규정하고 있으며 (295 N/mm² 이상, KS D 3760), 이에 따라 항복응력을 통해 계산되는 휨강도는 그 분포와 강관의 재료적 특성 및 불확실성을 고려해 로그 정규분포를 가지는 확률변수로 설정하였다 (Chojaczyk et al., 2015; Zhang et al., 2019). 휨강도 값의 변동성을 고려하기 위해서는, 항복응력에 관한 재료적 변동성과, 소성단면계수에 관한 기하학적 변동성을 반영해야 한다. 강재의 항복강도에 관한 변동계수 (coefficient of variance; C.O.V.)는 0.014~0.107, 형상에 관한 변동계수는 0.0132~0.0364로 제시된 바 있으며, 이러한 두 가지 불확실성을 함께 반영해 휨강도의 변동계수를 선정하였다 (Groth and Johansson, 1990; Leffler, 1990; Gunn,

1997; Outokumpu, 2005; Afshan et al., 2015). 또한, 하나의 부재 내에서도 한 지점의 파괴는 다른 지점의 파괴에 영향을 미치게 되므로 지점별 휨강도간의 상관관계를 고려하였다 (Der Kiureghian, 2005) (Table 2).

구조물에 작용하는 외부하중으로는 적설에 의한 설하중을 고려하였다. 비닐하우스에 작용하는 설하중은 적설심과 눈의 밀도 (Lee and Chung, 2018), 서까래 간격을 고려해 아래와 같이 산정된다.

$$w = d \times \rho \times D \tag{9}$$

where, w : Snow load (N/mm)
 d : Snow depth (mm)
 ρ : Snow density (N/mm³)
 D : Distance between rafter frames (mm)

이때 자연에서 발생하는 적설의 특성에 따라 적설심을 정규분포를 가지는 확률변수로 설정하였다. 또한, 다양한 적설 조건에서의 파괴확률을 평가하기 위해 적설심의 평균값을 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250 mm로 설정하고, 서까래의 양쪽 지붕에 불균등하게 적설되는 양상을 고려하기 위해 다양한 변동계수를 가지는 적설 시나리오를 구축하였다. 또한 한 지점의 적설심은 다른 지점의 값과 독립임을 고려해 상관계수를 설정하였다 (Table 2).

대상 시설의 설하중에 의한 주요 파괴점은 지붕의 양 끝단과 지반과의 접합부, 그리고 반강결 결합 주변부임을 반영해 해당 지점들에 저항과 관련된 확률변수를 설정하였으며, 소성 한지로의 파괴를 고려하였다 (Fig. 3). 또한, 바람과 같은 외부환경에 의해 지붕에 적설심의 편차가 발생할 수 있기 때문에 이와 관련된 확률변수는 Fig. 3과 같이 양쪽 지붕에 각각 설정하였다.

나. 파괴 시나리오 구축

비닐하우스에 작용하는 설하중에 따른 신뢰성 해석을 위해, Fig. 4와 같이 파괴 시나리오를 구성하였다. 이때 설하중은

Table 2 Distribution parameter of random variables in the greenhouse system

Variable	Symbol	Unit	Mean value (μ)	Coefficient of variance (δ)	Correlation coefficient	Type of distribution
Plastic moment capacity	M_i	N · mm	2.531×10^5	0.2	0.3	Log-normal
Snow depth	d_i	mm	100, 125, 150, 175, 200, 225, 250	0.1, 0.2, 0.3	0	Normal

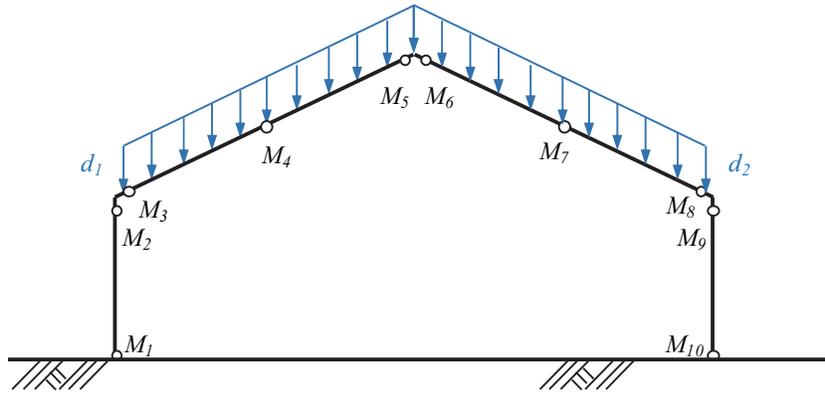


Fig. 3 Description of random variables in the rafter frame

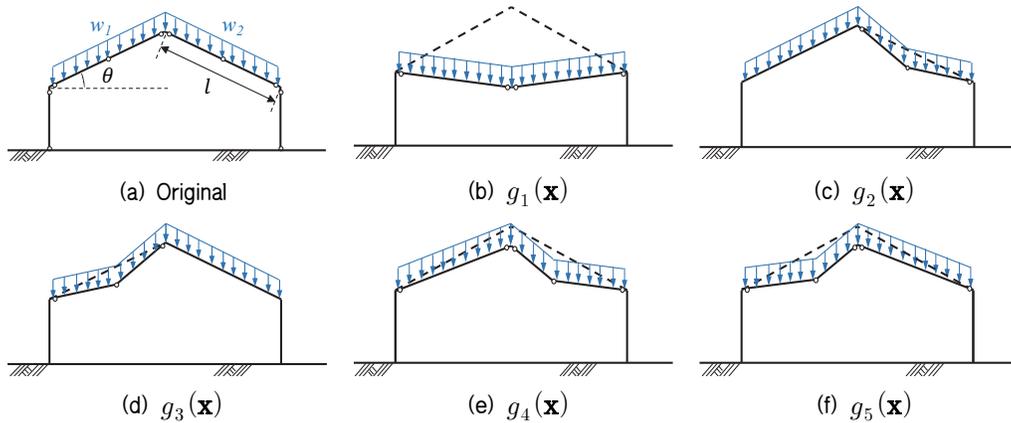


Fig. 4 Failure scenarios and limit states of the rafter frame

중력방향으로 작용함을 고려해 좌우 진동에 의한 파괴모드는 제외하였으며, 시나리오 구축의 효율성을 위해 2차원 단면의 파괴를 반영하여 한계상태를 설정하였다. 각각의 시나리오는 부재의 주요 취약부에서 소성 힌지로의 변형 및 파괴로 인해 부재 시스템 전체의 파괴로 이어지는 한계상태를 고려하였다. 또한, 식 (10)과 같이 파괴 시나리오에 관한 한계상태방정식을 설정하였으며, 이를 바탕으로 FORM을 이용한 각 시나리오별 프레임 부재의 요소 파괴확률 $P_{f,comp,i}, i = 1, \dots, 5$ 을 산정하였다.

$$\begin{aligned}
 g_1(\mathbf{x}) &= M_3 + M_5 + M_6 + M_8 - 2l(w_1 + w_2) \\
 g_2(\mathbf{x}) &= M_3 + 2M_4 + M_5 - 2l \cos \theta w_1 \\
 g_3(\mathbf{x}) &= M_6 + 2M_7 + M_8 - 2l \cos \theta w_2 \\
 g_4(\mathbf{x}) &= M_3 + M_5 + M_6 + 2M_7 + M_8 - 2l(w_1 + w_2 \cos \theta) \\
 g_5(\mathbf{x}) &= M_3 + 2M_4 + M_5 + M_6 + M_8 - 2l(w_1 \cos \theta + w_2)
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

3. 시스템 신뢰성 해석

구성요소 하나를 대상으로 한 신뢰성 해석에서는, 한계상태의 정의에 따라 파괴 도메인 (failure domain)을 나타내고, 이를 이용해 해석적 방법으로 파괴확률을 도출할 수 있었다. 그러나 실제 구조물은 다양한 요소들이 독립적이지 않고 복잡한 상관관계로 구성되어있고, 다수의 한계상태가 존재할 수 있게 된다. 따라서 이들의 상관관계와 구조물의 전체적 구성에 대한 이해를 바탕으로 시스템적인 접근방법이 필요하다 (Hendawi and Frangopol, 1994; Liu and Tang, 2004; Der Kiureghian, 2005; Thoft-Christensen and Murotsu, 2012).

구조 시스템에서 발생할 수 있는 여러 한계상태 중 하나의 파괴가 시스템의 파괴를 야기하는 신뢰성 문제는 직렬 시스템 (series system)으로 정의된다. 이와 반대로 시스템의 파괴가 일어나기 위해서는 모든 구성요소의 파괴가 필요한 신뢰성 문제는 병렬 시스템 (parallel system)으로 정의된다. 이때 식 (2)에서 요소에 대해 정의되었던 파괴 도메인은 두 가지 시스템에 대해 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\Omega \equiv \bigcup_k \{g_k(\mathbf{x}) \leq 0\} \text{ for series system} \quad (11)$$

$$\Omega \equiv \bigcap_k \{g_k(\mathbf{x}) \leq 0\} \text{ for parallel system} \quad (12)$$

이처럼 요소 신뢰성해석과 달리, 다수의 한계상태 $g_k(\mathbf{x}), k=1, \dots, m$ 이 존재하며, 이에 따라 표준정규 공간에서도 $G_k(\mathbf{u}), k=1, \dots, m$ 및 $\mathbf{u}_k^*, k=1, \dots, m$ 과 같이 다수의 linearization points가 존재하게 된다 (Fig. 5 (a)). 이들은 앞선 요소 해석에서와 마찬가지로 식 (13)~(15)를 각각 만족하며, FORM을 이용한 선형 근사를 통해 최적화 문제를 해결함으로써 시스템에 관한 신뢰성 지수를 도출하게 된다 (Fig. 5 (b)).

$$\beta_k - \alpha_k \mathbf{u} = 0 \quad (13)$$

$$\alpha_k = -\nabla G_k(\mathbf{u}_k^*) / \|\nabla G_k(\mathbf{u}_k^*)\| \quad (14)$$

$$\beta_k = \alpha_k \mathbf{u}_k^* \quad (15)$$

$$\mathbf{u}^* = \operatorname{argmin}\{\|\mathbf{u}\| \mid G_k(\mathbf{u}) = 0, k=1, \dots, m\} \quad (16)$$

한편, $v_k = \alpha_k \mathbf{u}, k=1, \dots, m$ 이라 하면, 벡터 $\mathbf{v} = \{v_1, \dots, v_m\}^T$ 는 평균이 0이고, 단위분산을 가지고 있으며, $\rho_{kl} = \alpha_k \alpha_l^T, k, l=1, \dots, m$ 를 상관계수로 가지는 정규화률변수라는 것을 알 수 있다. 또한, design points를 통해 산정한 신뢰성 지수들을 바탕으로 아래와 같이 직렬 및 병렬 시스템의 파괴확률을 산정할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{f,series} &\cong P_{f1,series} = P\left[\bigcup_{k=1}^m (\beta_k \leq v_k)\right] \\ &= 1 - P\left[\bigcap_{k=1}^m (v_k \leq \beta_k)\right] \\ &= 1 - \Phi_m(\mathbf{B}, \mathbf{R}) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} P_{f,parallel} &\cong P_{f1,parallel} = P\left[\bigcap_{k=1}^m (\beta_k \leq v_k)\right] \\ &= P\left[\bigcap_{k=1}^m (v_k < -\beta_k)\right] \\ &= \Phi_m(-\mathbf{B}, \mathbf{R}) \end{aligned} \quad (18)$$

where, $\Phi_m(\mathbf{B}, \mathbf{R})$: The m -variate standard normal CDF evaluated at the thresholds $\mathbf{B} = (\beta_1, \dots, \beta_m)$ with correlation matrix $\mathbf{R} = [\rho_{kl}]$

P_{f1} : First-order approximation of P_f

가. 프레임 부재 시스템

본 연구의 대상시설을 하위 시스템 (lower-scale system)에서 살펴보면 (Fig. 1 (a)), 앞서 Fig. 4 및 식 (10)에서 정의된 한계상태들은 각각 하나의 파괴만으로 프레임 부재 전체의 파괴를 초래하게 된다. 따라서 여러 한계상태 중 최소 하나의 파괴가 시스템의 파괴를 야기하는 직렬 시스템으로 정의될 수 있다. 즉, 5개의 한계상태방정식 $g_i(\mathbf{x}), i=1, 2, \dots, 5$ 에 관한 프레임 부재 시스템의 파괴확률 $P_{f,l-sys}$ 을 산정하였으며, 다양한 적설하중 조건에 대한 결과를 도출하였다. 이를 위해서는 요소 신뢰성 해석에서 각 한계상태별로 도출된 신뢰성 지수 $\beta_i, i=1, \dots, 5$ 와, 각 요소간의 상관계수 $\rho_{ij} = \alpha_i \alpha_j^T, i, j=1, \dots, 5$ 를 이용하였다.

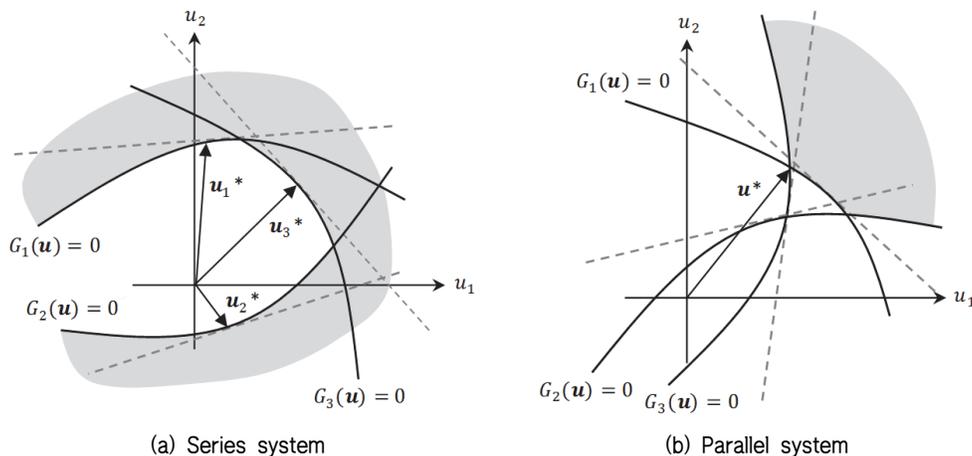


Fig. 5 First-order linearization points for system reliability problem

나. 반강결 조건에 따른 구조 시스템

비닐하우스의 전체 구조에 관한 상위 시스템 (higher-scale system)의 관점에서 살펴보면 (Fig. 1 (b)), 프레임 부재는 가로대를 통해 다른 프레임들과 연결되어있다. 이때 연결부에 조리개가 사용되며, 이들의 영향정도에 따른 비닐하우스 시스템의 파괴확률 $P_{f,h-sys}$ 을 평가하였다. n 개의 프레임 부재에 대해 산정된 $P_{f,l-sys k}$, $k=1, \dots, n$ 을 통해 식 (19)와 같이 부재 시스템의 신뢰성 지수 B_k 를 도출하였으며, 이들로 구성된 \mathbf{B} 와, 각 부재간의 상관성을 나타내는 상관계수행렬 (correlation matrix) \mathbf{R} 을 이용해 시스템 신뢰성 해석을 수행하였다. 이때 연결부의 결합조건에 따라 상관계수를 아래와 같이 설정하였다.

$$B_k = \Phi^{-1}(P_{f,l-sys k}) \tag{19}$$

$$\mathbf{B} = (B_1, \dots, B_n) \tag{20}$$

$$\mathbf{R} = [\rho_{kl}], k, l = 1, \dots, n$$

$$P_{f,h-sys} = 1 - \Phi_n(\mathbf{B}, \mathbf{R}) \tag{21}$$

For $k=l$, $\rho_{kk} = 1$ (22-1)

For $k \neq l$,

$$\rho_{kl} = 1 : \text{rigid connection} \tag{22-2}$$

$$\rho_{kl} = 0 : \text{hinged connection} \tag{22-3}$$

$$\rho_{kl} = 0.5 : \text{semi-rigid connection} \tag{22-4}$$

$$\rho_{kl} = L_k(x) : \text{semi-rigid connection using linearly decreasing function with distance } L(x) \tag{22-5}$$

부재간의 상관계수가 1인 경우는, 한 부재에서 파괴가 일어나면 다른 모든 부재에서 동시에 파괴가 일어나는 것으로, 결합조건이 극한의 상황에서도 완전한 고정일 경우 나타나게 된다. 반면 0의 상관계수는 회전 가능한 형태로 결합됨에 따라 각 부재의 파괴가 다른 부재의 파괴여부에 전혀 영향을 주지 않는 경우이다. 이 두 가지 경우 모두 실제 현실에서 발생하기는 어려우며, 반면, 상관계수가 0과 1 사이의 값인 경우는, 한 부재의 파괴가 다른 부재에 특정한 확률로 영향을 주는 경우이다. 이때 길이방향으로 길게 설치된 비닐하우스의 특성상, 떨어진 거리에 따라 부재간의 파괴 상관성은 감소하게 된다. 이를 고려하기 위해서는 식 (22-5)에서와 같이 각 k 번째 프레임별로 거리에 따라 선형으로 감소하는 함수 $L_k(x)$ 를 정의하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 파괴 시나리오별 요소 신뢰성 해석결과

서까래 프레임에 대해 정의된 한계상태와 FORM를 이용하여 산정한 부재의 요소 파괴확률 $P_{f,comp}$ 결과는 다양한 적설 시나리오에 따라 Fig. 6과 같이 나타났다. 이때 $g_2(\mathbf{x})$ 와 $g_3(\mathbf{x})$, 그리고 $g_4(\mathbf{x})$ 와 $g_5(\mathbf{x})$ 는 각각 대칭의 형상이기 때문에 같은 파괴확률이 나타났다. 또한, 변동성에 따른 차이를 살펴보기 위해 변동계수 0.1 및 0.2에 관한 적설심별 결과를 도시하였으며, 같은 적설심에 대해서도 하중의 변동성을 크게 고려했을 때 더 큰 파괴확률이 도출되었다.

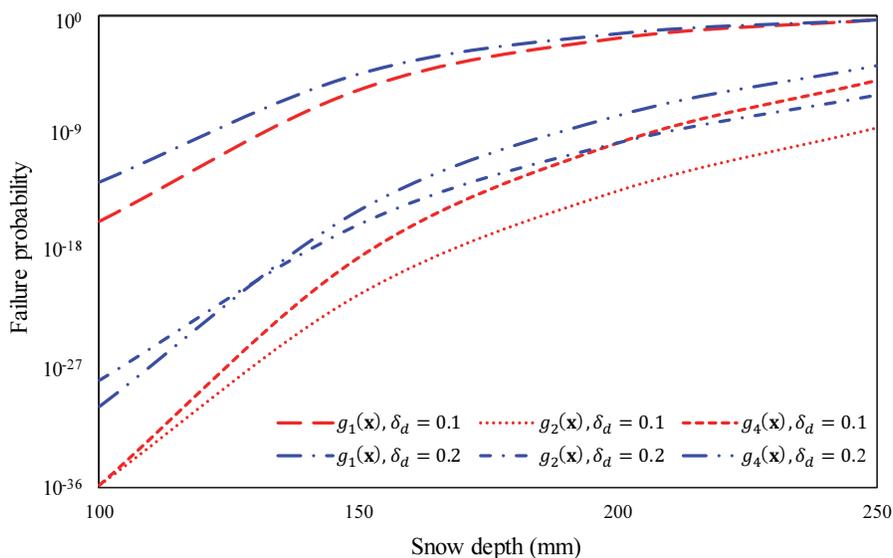


Fig. 6 Component failure probability of each limit state according to various snow depth in log scale: the red and blue lines represent δ_d of 0.1 and 0.2, respectively

Table 3 Failure probability of frame system according to various snow depth

Mean value of snow depth μ_d (mm)	C.O.V. of snow depth $\delta_d = 0.1$	C.O.V. of snow depth $\delta_d = 0.2$	C.O.V. of snow depth $\delta_d = 0.3$
100	1.110×10^{-16}	1.965×10^{-13}	4.557×10^{-10}
125	2.909×10^{-10}	2.586×10^{-8}	3.900×10^{-6}
150	2.009×10^{-6}	3.318×10^{-5}	7.263×10^{-4}
175	5.362×10^{-4}	2.700×10^{-3}	1.550×10^{-2}
200	1.741×10^{-2}	3.890×10^{-2}	9.200×10^{-2}
225	1.385×10^{-1}	1.865×10^{-1}	2.571×10^{-1}
250	4.319×10^{-1}	4.452×10^{-1}	4.609×10^{-1}

Table 4 Failure probability of greenhouse structure system according to connecting conditions with $\mu_d = 200$ mm and $\delta_d = 0.1$

$P_{f,h-sys}$ with $\rho_{kl} = 1.0$	$P_{f,h-sys}$ with $\rho_{kl} = 0.0$	$P_{f,h-sys}$ with $\rho_{kl} = 0.5$	$P_{f,h-sys}$ with $\rho_{kl} = L_k(x)$
0.0176	0.1000	0.0756	0.0565

가장 큰 파괴확률이 도출된 시나리오는 $g_1(\mathbf{x})$ 이었으며, 이는 지붕의 중앙 상단부가 소성 한지로 파괴되는 형태였다. 따라서 설하중과 같이 중력방향으로 작용하는 하중에 대해, 비닐하우스와 같은 프레임 구조물 경우 중앙 상단부가 주요한 파괴점임이 분석되었다. 한편, 150 mm 이하의 적설심에서는 모든 요소에서 3.317×10^{-5} 이하의 매우 작은 파괴확률이 나타났다. 또한, 200 mm 이상의 적설심에서 1.741×10^{-2} 이상의 파괴확률이 나타났으며, 이에 따라 그 이상의 하중 조건에서 본 대상 시설의 유의미한 거동이 발생하는 것으로 분석되었다.

2. 시스템 신뢰성 해석결과

가. 프레임 부재 시스템 해석결과

앞선 프레임의 요소 신뢰성 해석을 통해 신뢰성 지수와 design point에서의 단위 기울기 벡터 (normalized negative gradient row vector)가 산정되었으며, 특히 $\mu_d = 200$ mm, $\delta_d = 0.1$ 의 하중조건에서는 식 (23)과 같이 도출되었다. 또한, 다양한 하중조건에서의 이들을 이용한 프레임 부재 시스템의 파괴확률 $P_{f,l-sys}$ 는 Table 3과 같이 나타났다. 프레임 부재 시스템에서도 요소에 관한 신뢰성 해석과 같이, 적설심과 변동계수 증가에 따라 파괴확률이 높게 나타났다. 또한, 각 한계상태에서 β_1 은 다른 신뢰성 지수에 비해 작게 산정되었는데, 이는 해당 파괴 시나리오가 주요한 파괴모드로 작용했기 때문이었다. 뿐만 아니라, 이에 따라 부재 시스템의 파괴확률은 $g_1(\mathbf{x})$ 에 해당하는 요소 파괴확률과 비슷하게 나타났다.

$$\beta_1 \alpha_1 = 2.1104 [-0.262 \ -0.192 \ -0.474 \ -0.063 \ -0.387 \ -0.337 \ 0.041 \ -0.304 \ 0.067 \ 0.061 \ 0.401 \ 0.373] \quad (23-1)$$

$$\beta_2 \alpha_2 = 7.4608 [-0.248 \ -0.181 \ -0.448 \ -0.548 \ -0.286 \ 0.068 \ 0.060 \ 0.054 \ 0.049 \ 0.045 \ 0.554 \ 0.000] \quad (23-2)$$

$$\beta_4 \alpha_4 = 6.2764 [-0.277 \ -0.202 \ -0.397 \ -0.086 \ -0.319 \ -0.278 \ -0.412 \ -0.203 \ 0.068 \ 0.063 \ 0.431 \ 0.365] \quad (23-3)$$

$$\beta_2 \alpha_2 = \beta_3 \alpha_3, \ \beta_4 \alpha_4 = \beta_5 \alpha_5 \quad (23-4)$$

나. 반강결 조건에 따른 구조 시스템 해석결과

부재간의 결합조건을 고려한 전체 구조 시스템의 파괴확률 산정결과는 Table 4와 같다. 고정조건을 고려하였을 경우 0.0176로 가장 작았으며, 회전조건을 고려하였을 경우에는 0.1000으로 가장 크게 나타났다. 반강결 결합을 고려한 경우, 고정과 회전조건 결과 사이의 값이 도출되었으며, 0.5의 상관계수에 대해서는 0.0756, 거리에 따른 선형함수를 이용한 상관계수에 대해서는 0.0565의 파괴확률이 나타났다.

이와 같이 단면에 관한 프레임 부재 시스템과, 전체 구조 시스템의 파괴확률은 반강결 결합을 고려함에 따라 매우 다르게 나타났다. 실제 비닐하우스의 구조해석 또는 안전성 검토를 위해 서까래 단면만을 이용하는 경우가 있으나, 이는 Table 4의 결과에서도 살펴볼 수 있듯 과소평가될 위험성이 있다. 특히 이러한 경우는 서까래간의 연결이 완전한 고정으로 이루어졌다는 가정을 근거로 두고 있으나, 앞서 언급된 것과 같이 실제 구조물의 거동에서는 매우 다른 양상을 나타낸다. 또한 비닐하우스의 3차원 모델링 시, 안전측으로 설계하기 위해 연결부를 힌지 조건으로 설정하는 경향이 있는데, 이는 상관계수가 0으로 설정된 회전 결합조건인 결과에서도 살펴볼 수 있듯이 충분한 안전율을 가지고 해석할 수는 있으

나, 과다 설계될 가능성이 있다. 따라서 비닐하우스와 같이 부재간의 연결로 구성되는 구조물의 경우 결합부의 반경결 상태를 반드시 고려해야할 것으로 분석된다.

한편, 상관계수를 특정 값으로 고정한 신뢰성 해석에서는, 선형함수를 이용했을 때보다 더 큰 파괴확률이 나타났다. 이는 부재간 거리가 멀어짐에 따라 주고받는 영향이 감소되는 점을 충분히 반영하지 못했기 때문으로 분석된다. 대상 시설의 전체 시스템 구성을 살펴보면, 가장 끝단에 위치한 프레임 단면은 그 바로 옆에 위치한 단면보다 반대편 끝단에 위치한 단면에 비교적 적은 영향을 주게 되며, 이러한 상관성의 변화는 거리와 밀접하게 관련되어 있는 것으로 판단된다. 따라서 시스템 내에서의 부재 위치에 따른 상관성을 고려할 경우 보다 정확한 구조물의 거동을 해석할 수 있을 것으로 사료된다.

IV. 결론

그간 허용응력을 바탕으로 발전해오던 구조설계는 최근 신뢰도를 제고한 신뢰성 기반의 방법으로 넘어가고 있는 추세이다. 특히 신뢰성 기반 설계에서는 사용성과 파괴에 관한 다양한 한계상태를 정의하고, 구조물의 중요도에 따라 여러 수준의 설계를 가능케 한다. 농업시설물의 경우에서도 그 사용성이 다양해지고 있으며, 보다 합리적인 안전성에 대한 고려와 이에 대응되는 유지관리방안이 요구되고 있다. 그러나 비닐하우스의 경우 아직 허용응력을 기반으로 단순 안전성 검토에 그치고 있는 실정이다. 따라서 비닐하우스의 실제 구조적 특성을 반영한 종합설계와 유지관리 기법의 개발을 통해 기후변화에 따른 재해에 충분히 대응하도록 해야 한다. 이에 본 연구에서는 프레임 형태의 구조물에 적용될 수 있는 시스템 신뢰성 해석기법을 구축하여, 특히 구조해석 시 난해할 수 있는 반강결 결합 형태에 관한 해석을 수행하였다. 부재간 연결성을 고려할 수 있는 다양한 상관관계를 적용하였으며, 이를 통해 기존 구조해석 방법의 한계와, 실질적 구조물의 거동 특성을 분석하였다. 구조물 전체 시스템의 파괴확률은, 부재간 반강결 결합을 고려함에 따라 부재 단면에 대한 파괴확률과 다르게 나타났다. 또한, 부재 접합부에 고정 혹은 회전 연결조건을 적용할 경우 실제 구조물의 거동과 다르게 해석되며, 과다 혹은 과소 설계로 이어질 수 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 대상 시설과 외부환경조건에 대해 한정적이었기 때문에, 보다 다양한 시설 규격과 하중조건들에 관한 고려로 농업시설물의 고도화를 가져올 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 부재 간에 주고받는 영향에 관한 추가적인 자료 수집과 실질적 분석을 통해 구조물의 거동을 보다 정확히 파악할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

이 논문은 행정안전부 기후변화대응 AI기반 풍수해 위험도 예측기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (2022-MOIS61-003).

REFERENCES

1. Adduri, P. R., and R. C. Penmetsa, 2009. System reliability analysis for mixed uncertain variables. *Structural Safety* 31(5): 375-382.
2. Afshan, S., P. Francis, N. R. Baddoo, and L. Gardner, 2015. Reliability analysis of structural stainless steel design provisions. *Journal of Constructional Steel Research* 114: 293-304.
3. Agostini, B. M., M. S. D. R. Freitas, R. A. D. M. Silveira, and A. R. D. D. Silva, 2018. Structural reliability analysis of steel plane frames with semi-rigid connections. *REM-International Engineering Journal* 71: 333-339.
4. Ang, A. H., and C. A. Cornell, 1974. Reliability bases of structural safety and design. *Journal of the Structural Division* 100(9): 1755-1769.
5. Ang, A. H., and W. H. Tang, 2006. *Probability Concepts in Engineering: Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering*, 2nd edition, Wiley, New York.
6. Choi, M. K., H. S. Song, M. W. Cho, I. H. Yu, Y. A. Shin, S. Y. Lim, and H. R. Ryu, 2016. Test methods for evaluation of slip-resistance force of clamp for plastic greenhouse. *Journal of Bio-Environment Control* 25(3): 193-199 (in Korean).
7. Chojaczyk, A. A., A. P. Teixeira, L. C. Neves, J. B. Cardoso, and C. G. Soares, 2015. Review and application of Artificial Neural Networks models in reliability analysis of steel structures. *Structural Safety* 52: 78-89.
8. Der Kiureghian, A., 2005. First-and second-order reliability methods. *Engineering Design Reliability Handbook*, 14. CRC Press Boca Raton, FL.
9. Groth, H. L., and R. E. Johansson, 1990. Statics of the mechanical strength of stainless steels-sheet. *Proceedings of Nordic Symposium on Mechanical Properties of Stainless Steel*, Sweden.
10. Gunn, R., 1997. *Duplex Stainless Steels: Microstructure, Properties and Applications*, Woodhead Publishing.
11. Haldar, A., and S. Mahadevan, 1995. First-order and second-order reliability methods. *Probabilistic Structural*

- Mechanics Handbook*: 27-52. Springer, Boston, MA.
12. Hendawi, S., and D. M. Frangopol, 1994. System reliability and redundancy in structural design and evaluation. *Structural Safety* 16(1-2): 47-71.
 13. Hohenbichler, M., S. Gollwitzer, W. Kruse, and R. Rackwitz, 1987. New light on first-and second-order reliability methods. *Structural Safety* 4(4): 267-284.
 14. Hou, R., J. L. Beck, X. Zhou, and Y. Xia, 2021. Structural damage detection of space frame structures with semi-rigid connections. *Engineering Structures* 235: 112029.
 15. Kartal, M. E., H. B. Basaga, A. Bayraktar, and M. Muvafik, 2010. Effects of semi-rigid connection on structural responses. *Electronic Journal of Structural Engineering* 10: 22-35.
 16. Kim, D. S., and S. Y. Ok, 2011. Dominant failure mode selection and system reliability analysis. *Computational Structural Engineering* 24(4): 40-48.
 17. Kim, H. J., and J. J. Lee, 1998. Development of the nonlinear structural analysis model for the light-weight framed structures (2)-With the semi-rigid connected framed structures analysis. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 40(1): 78-87 (in Korean).
 18. Lee, H. J., and G. Chung, 2018. Measurement of snow density according to regional snow depth in South Korea. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 18(7): 497-501 (in Korean).
 19. Lee, S. I., J. H. Lee, Y. J. Jeong, and W. Choi, 2020. Development of a structural analysis model for pipe structures to reflect ground conditions. *Biosystems Engineering* 197: 231-244.
 20. Leffler, B., 1990. A statistical study of the mechanical properties of hot rolled stainless steel. *Proceedings of Nordic Symposium on Mechanical Properties of Stainless Steel*, Sweden.
 21. Liu, N., and W. H. Tang, 2004. System reliability evaluation of nonlinear continuum structures—a probabilistic FEM approach. *Finite Elements in Analysis and Design* 40(5-6): 595-610.
 22. Liu, P. L., and A. Der Kiureghian, 1986. Multivariate distribution models with prescribed marginals and covariances. *Probabilistic Engineering Mechanics* 1(2): 105-112.
 23. MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs), 2014. *Standard Designs and Specifications for Disaster Resilience of Horticultural Facilities*. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. No. 2014-78 (in Korean).
 24. MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs), 2019. *Regulations on the Registration of Disaster Resistant Design Standards and Disaster Resistant Facility Standards for Horticultural and Special Production Facilities*. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. No. 2019-44 (in Korean).
 25. MOIS (Ministry of the Interior and Safety), 2019. *Statistical Yearbook of Natural Disaster 2018*. No. 11-1741000-000002-11 (in Korean).
 26. NAAS (National Academy of Agricultural Science, RDA), 2015. *Greenhouse Structural Design Standards (Draft)*. Rural Development Administration. No. 11-1390802-001030-01 (in Korean).
 27. Nguyen, T. H., 2019. Reliability assessment of frame steel considering semi-rigid connections. *Journal of Materials and Engineering Structures* 6(1): 119-126.
 28. Outokumpu, A. B., 2005. *Standard Cr-Ni-Mo Stainless Steels*. Avesta Research Centre, Avesta.
 29. Papadrakakis, M., V. Papadopoulos, and N. D. Lagaros, 1996. Structural reliability analysis of elastic-plastic structures using neural networks and Monte Carlo simulation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 136(1-2): 145-163.
 30. Rackwitz, R., and B. Fiessler, 1978. Structural reliability under combined random load sequences. *Computers & Structures* 9(5): 489-494.
 31. Rigi, A., B. JavidSharifi, M. A. Hadianfard, and T. Y. Yang, 2021. Study of the seismic behavior of rigid and semi-rigid steel moment-resisting frames. *Journal of Constructional Steel Research* 186: 106910.
 32. 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 (in Korean).
 33. Simitse, G. J., and A. S. Vlahinos, 1982. Stability analysis of a semi-rigidly connected simple frame. *Journal of Constructional Steel Research* 2(3): 29-32.
 34. Song, J., and W. H. Kang, 2009. System reliability and sensitivity under statistical dependence by matrix-based system reliability method. *Structural Safety* 31(2): 148-156.
 35. Thoft-Christensen, P., and Y. Murotsu, 2012. *Application of Structural Systems Reliability Theory*. Springer Science

& Business Media.

36. Tran, N. L., and T. H. Nguyen, 2020. Reliability assessment of steel plane frame's buckling strength considering semi-rigid connections. *Engineering, Technology & Applied Science Research* 10(1): 5099-5103.
37. Yang, H., 2020. Performance analysis of semi-rigid connections in prefabricated high-rise steel structures. *Structures* 28: 837-846.
38. Zhang, X., L. Wang, and J. D. Sørensen, 2019. REIF: a novel active-learning function toward adaptive Kriging surrogate models for structural reliability analysis. *Reliability Engineering & System Safety* 185: 440-454.
39. Zhao, H., X. G. Liu, and M. X. Tao, 2022. Component-based model of semi-rigid connections for nonlinear analysis of composite structures. *Engineering Structures* 266: 114542.