

부재 연결부 회전 강성의 불확실성을 고려한 가설 구조물의 신뢰성 해석

류선호* · 옥승용**†

Reliability Analysis of Temporary Structures Considering Uncertainty in Rotational Stiffness at Member Joints

Seon-Ho Ryu* · Seung-Yong Ok**†

†Corresponding Author

Seung-Yong Ok

Tel : +82-31-670-5282

E-mail : syok@hknu.ac.kr

Received : July 8, 2019

Revised : August 13, 2019

Accepted : October 8, 2019

Abstract : This study deals with the reliability analysis approach of the temporary structure that can consider the uncertainty in rotational stiffness at the joints of the members, for which the semi-rigid connections are modelled as rotational spring and its coefficient is treated as a random variable following uniform distribution. In addition, this study introduces a computational procedure of the effective length coefficient for more accurate buckling load according to connection conditions of the supporting members attached to the joint. From the results of this study, it can be seen that the failure probability of the joint-hinge model (Case 1) presented in the design standard is higher than that of the practical model (Case 5) considering the rotational stiffness at the joints. This implies that the design standard leads to a conservative design of the temporary structure. The results also confirmed that the failure probability of the vertical member, i.e., the most critical member, can be further reduced when the base connection is provided with a fixed end. The comparative results between FORM, SORM and MCS further demonstrated that FORM can have a high level of numerical efficiency while ensuring the accuracy of the solution, compared with SORM and MCS. Based on these results, the proposed approach can be used as an accurate and efficient reliability analysis method of the three dimensional temporary structure.

Copyright©2019 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Key Words : temporary structures, reliability analysis, rotational stiffness, uncertainty, failure probability

1. 서론

최근 정부에서는 국민생명 지키기 3대 프로젝트의 일환으로 2022년까지 산업재해 사망 사고를 획기적으로 줄이기 위한 대책을 마련해 왔다. 이러한 노력에도 불구하고 건설업에서의 사망자 수 및 재해자 수는 여전히 타 산업 분야에 비해 매우 높은 비중을 차지하고 있다. 재해유형별로는 떨어짐 유형에서, 규모별로는 중소 규모의 현장에서 발생 건수가 가장 높게 산정되었다¹⁾. 최근 노동부는 떨어짐에 의한 산업재해를 줄이고자 기존 일반 비계보다 안전성이 우수하고, 설치가 간편한 시스템 비계의 사용을 적극적으로 권장하고 있다.

하지만 일반 비계보다 안전성이 보장되는 시스템 비계를 사용한 현장임에도 불구하고 최근 몇몇 현장에서 시스템 비계의 붕괴사고가 발생하기도 하였다²⁾. 이러한 사고 발생은 다양한 불확실성에 의하여 초래되는 작용 하중 산정에서의 오차 및 부재 저항 능력의 저하 등에 기인하였으며, 그 세부 원인으로 설계 및 시공 단계에서의 설계기준 미준수 또는 가설재의 재사용에 따른 단면 변형 등이 보고된 바가 있다³⁾.

한편 국내에는 가설 구조물과 관련하여 거푸집 및 동바리 설계기준⁴⁾을 적용하고 있다. 이 설계기준에서는 부재 연결 조건 및 지점 조건을 힌지로 규정하고 있는 반면, 김경윤 등⁵⁾은 실험을 통하여 실제 가설 구조

*한경대학교 토목안전환경공학과 석사과정 (Department of Civil, Safety and Environmental Engineering, Hankyong National University)

**한경대학교 토목안전환경공학과 부교수 (Department of Civil, Safety and Environmental Engineering & Construction Engineering Research Institute, Hankyong National University)

물의 연결부에서 회전 강성이 발휘되고 있음을 보이고 힌지 연결보다는 회전 강성을 고려한 연결 조건이 실제 구조물과 더 유사할 수 있음을 보였다.

이와 같이 하중 산정의 불확실성, 부재 저항 능력의 변동뿐만 아니라 부재들 간의 연결 조건에 있어서도 다양한 불확실성 및 변동성이 존재할 수 있다. 이러한 다양한 불확실성 및 변동성을 확률론적 관점에서 고려하는 신뢰성 해석(structural reliability analysis)을 통하여 가설 구조물의 안전성 평가를 수행한 연구가 몇몇 이루어진 바가 있다^{3,6,8)}. 이 중 류선호 등³⁾은 김승민⁷⁾의 연구를 바탕으로 기존 연구들^{6,7)}에서 다루어지지 않은 부재의 회전 강성을 고려한 연결 조건을 반영하여 구조 해석을 수행하고 그 결과로부터 신뢰성 해석을 수행하였다. 하지만 이 연구³⁾에서는 회전 강성을 고정된 값으로만 반영함으로써 실제 구조물에서 발생할 수 있는 회전 강성의 변동성을 표현하지 못하는, 즉 회전 강성에 대한 불확실성을 확률변수로서 고려하지 못했다는 한계점이 존재하였다. 이러한 한계점을 보완하고자 류선호와 옥승용⁸⁾은 선행 연구^{3,7)}를 바탕으로 부재의 연결 조건에 따른 회전 강성을 확률변수로 고려할 수 있도록 구조 해석 기법 및 신뢰성 해석 기법을 확장하는 후속 연구를 발표한 바 있으나 해석 기법의 검증에 초점이 맞춰져 있어 보다 다양한 경우에 대한 경향성 분석은 수행된 바가 없다.

한편, 기존 연구들^{3,7,8)}에서는 모두 공통적으로 설계 기준에서 제시하는 조합응력에 대하여 가설 구조물의 한계상태식을 정의하고 있다. 다만, 좌굴 하중(buckling load)을 산정하기 위하여 도입되는 유효길이계수의 값을 모두 1로 가정함으로써 부재 양단의 연결 조건을 힌지로 고려하든지 또는 회전 강성을 고려함에 따라 크게 달라질 수 있는 좌굴 하중을 적절히 반영하지 못하는 한계를 가진다고 할 수 있다. 이를 개선하고자 이 연구에서는 브레이싱 설치 유무에 따른 부재의 양단 지지조건을 적절히 고려하도록 강구조 골조의 안정성 설계기준(하중저항계수설계법)⁹⁾에서 제시하고 있는 유효길이계수 산정식을 한계상태식에 추가로 도입하였다. 이는 양단 브레이싱 부재의 구속조건을 적절히 반영하는 좌굴 하중을 산정할 수 있도록 한다.

따라서 이 연구에서는 부재 양단의 브레이싱 부재의 구속 조건을 적절히 반영한 유효길이계수를 산정하고, 이를 좌굴 하중의 산정에 적용함으로써 조합 응력 산정 과정을 개선하고자 하였다. 또한, 부재간의 연결 부분에서 존재하는 회전 강성을 확률변수로 고려하여 이를 설계 기준에서 힌지로 고려할 때와의 신뢰성 해석 결과를 비교 분석함으로써 회전 강성의 불확실성 정도

에 따른 부재별 파괴확률에의 영향 및 신뢰성 지수의 변화 경향을 분석하고자 하였다.

2. 회전 강성을 고려한 가설 구조물의 모델링

기존 설계기준에서 제안하고 있는 부재간 힌지 연결에 대한 개념도를 Fig. 1(a)에 도시하였으며, 이 연구에서 제안하는 반강접 연결부, 즉 회전 강성(rotational stiffness)을 갖는 연결부를 회전 스프링으로 나타낸 개념도를 Fig. 1(b)에 비교 도시하였다.

Fig. 1에서 확인할 수 있듯이, 수직재와 수직재의 연결은 두 모델에서 동일하게 연속 부재로 고려되며, 나머지 연결부에서는 힌지 연결 또는 회전 강성을 갖는 회전 스프링 요소로 고려된다. 회전 스프링 요소로 표현된 반강접 연결부(semi-rigid connection)에 대한 모델링은 Midas에서 적용하고 있는 알고리즘¹⁰⁾을 도입하여 모델링하였다. 이는 수직재와 수평재의 연결을 Fig. 2와 같이 고려한다.

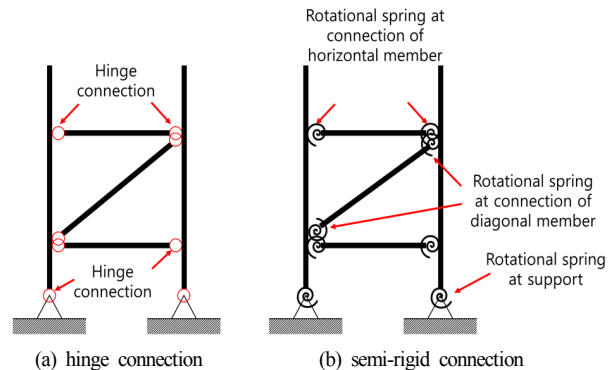


Fig. 1. Comparison of conceptual models between hinge and semi-rigid connections.

Fig. 2에서 수직재와 수평재가 만나는 점을 각각 노드 1과 노드 2라 할 때, 수평재와 노드 사이에 가상의 회전 스프링 A와 B를 삽입하여 반강접 효과를 모사할 수 있다. 이 때, 회전 스프링과 수평재가 만나는 절점을 노드 i 및 노드 j라 정의하였다. 여기서 회전 스프링 계수를 각각 k_{θ}^A 와 k_{θ}^B 이라 할 때 회전 스프링 A에 대하여 식 (1)의 힘-변위 관계식을 정의할 수 있다.

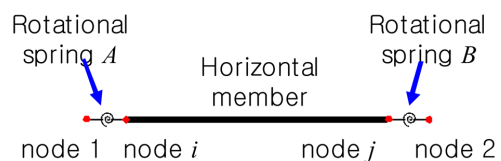


Fig. 2. Configuration of element with semi-rigid connection.

$$K^A = \begin{bmatrix} k_{11}^A & k_{1i}^A \\ k_{i1}^A & k_{ii}^A \\ \infty & 0 & 0 & -\infty & 0 & 0 \\ 0 & \infty & 0 & 0 & -\infty & 0 \\ 0 & 0 & k_{\theta}^A & 0 & 0 & -k_{\theta}^A \\ -\infty & 0 & 0 & \infty & 0 & 0 \\ 0 & -\infty & 0 & 0 & \infty & 0 \\ 0 & 0 & -k_{\theta}^A & 0 & 0 & k_{\theta}^A \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, 회전 스프링 계수 k_{θ}^A 는 힌지 연결을 포함하여 반강접 상태를 모사할 수 있도록 $\frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot \frac{4EI}{L}$ 으로 정의되며, 계수 α 는 0~1의 범위를 가진다. 참고로 0은 힌지 연결을 의미한다.

Fig. 2의 세 요소(스프링 A, B 및 수평재)의 강성 행렬 및 하중-변형 관계식은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} p_1^A \\ p_i^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11}^A & k_{1i}^A \\ k_{i1}^A & k_{ii}^A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1^A \\ u_i^A \end{bmatrix} \quad (2a)$$

$$\begin{bmatrix} p_i^{beam} \\ p_j^{beam} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{ii}^{beam} & k_{ij}^{beam} \\ k_{ji}^{beam} & k_{jj}^{beam} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i^{beam} \\ u_j^{beam} \end{bmatrix} \quad (2b)$$

$$\begin{bmatrix} p_j^B \\ p_2^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{jj}^B & k_{j2}^B \\ k_{2j}^B & k_{22}^B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_j^B \\ u_2^B \end{bmatrix} \quad (2c)$$

여기서 식 (2c)의 강성 행렬은 식 (1)의 강성 행렬에서 스프링 계수 k_{θ}^A 대신 k_{θ}^B 를 대입하여 정의된다. 또한 식 (2b)의 강성 행렬은 일반적인 frame 요소의 강성 행렬로 정의되며, 여기서는 지면 관계상 상세한 표현은 생략한다¹¹⁾.

전체 강성 행렬식은 식 (3)으로 표현되며, 이는 정적 응축(static condensation)에 의하여 식 (4)로 축약된다. 따라서 식 (4)로 표현되는 강성 행렬식을 이용하여 수평재, 경사재 및 수직 바닥재의 회전 강성을 모사할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_i \\ p_j \\ p_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 \\ 0 \\ 0 \\ p_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$= \begin{bmatrix} k_{11}^A & k_{1i}^A & 0 & 0 \\ k_{i1}^A & k_{ii}^A + k_{ii}^{beam} & k_{ij}^{beam} & 0 \\ 0 & k_{ji}^{beam} & k_{jj}^{beam} + k_{jj}^B & k_{j2}^B \\ 0 & 0 & k_{2j}^B & k_{22}^B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_i \\ u_j \\ u_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11}^A & 0 & k_{1i}^A & 0 \\ 0 & k_{22}^B & 0 & k_{2j}^B \\ k_{i1}^A & 0 & k_{ii}^A + k_{ii}^{beam} & k_{ij}^{beam} \\ 0 & k_{j2}^B & k_{ji}^{beam} & k_{jj}^{beam} + k_{jj}^B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_i \\ u_j \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{pp} & k_{p0} \\ k_{0p} & k_{00} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_p \\ u_0 \end{bmatrix}$$

$$\Leftrightarrow p = [k_{pp} - k_{p0}k_{00}^{-1}k_{0p}]u_p$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} = [k_{11} \ k_{12}]$$

이 연구에서는 부재의 반강접 연결 조건을 확률변수로 고려하고자 하였으며, 이를 위해 회전 강성 계수 α 가 0~1 범위로 정의되는 균등분포(uniform distribution) 확률함수를 도입하였다. Table 1은 이 연구에서 고려한 모델을 분류한 표로서 각 부재별 연결부 회전 강성의 고려 유무에 따라 7가지 경우로 정의하였다.

Table 1. Cases of semi-rigid connections

	α	Case						
		1	2	3	4	5	6	7
Element	Support	0	0~1	0	0	0~1	1	1
	Beam	0	0	0~1	0	0~1	0~1	0
	Bracing	0	0	0	0~1	0~1	0	0~1

Case 1은 모든 연결 조건을 힌지로 고려한 모델로서 기존 설계기준에서 제시하고 있는 설계모델을 나타낸다. 따라서 이 경우는 연결부의 불확실성을 고려하지 않는 경우이다. Cases 2~4는 부재별 회전 강성을 하나씩만 0~1 범위의 균등분포로 정의되는 확률변수로 고려하고 나머지 연결부는 모두 힌지로 고려한 모델을 의미한다. Case 5는 모든 연결부의 회전 강성을 동시에 고려하되 불확실성을 고려하여 균등분포로 모델링한 경우로서 실제 구조물에 가장 근접한 모델이라 할 수 있다. Cases 6과 7은 지점부를 고정단으로 모델링한 경우로서 수직 부재를 지면에 고정단으로 설치한 이상적인 경우에 해당한다. 따라서 Cases 1과 6은 Case 3의 지점 조건의 양 극단에 해당하며, Cases 1과 7은 Case 4의 지점 조건의 양 극단에 해당한다.

3. 가설 구조물의 신뢰성 해석

이 연구에서는 가설 구조물의 파괴를 각 부재의 조합응력(σ_v)이 허용응력(σ_y)을 초과하는 경우로 정의하였으며, 이를 나타내기 위한 한계상태식 $g(\mathbf{v})$ 를 식 (5)

로 정의하였다. 따라서 $g(\mathbf{v}) < 0$ 가 파괴를 나타내며, 반대의 경우는 안전한 상태를 나타낸다.

$$g(\mathbf{v}) : 1 - \sum_{i=1}^3 [r_i^\sigma(\mathbf{v})] \quad (5)$$

여기서, \mathbf{v} 는 확률변수 벡터로서 시스템을 구성하는 다양한 매개변수들로 정의된다. 또한 $r_i^\sigma (i=1,2,3)$ 는 압축 응력 및 양방향 휨응력의 비로서 확률변수의 함수이다.

이 연구에서 다루고자 하는 한계상태식은 류선호 등³⁾의 연구와 동일하다. 다만, 류선호 등³⁾에서는 응력 비를 산정하는 과정에서 오일러(Euler)의 좌굴 응력(buckling stress)을 결정하는 유효길이계수(k)를 1.0으로 단순 가정하였으나 이 연구에서는 연결 조건을 고려하여 산정하였다. 즉, 강구조 골조의 안정성 설계기준(하중저항계수설계법)⁹⁾에서 브레이싱이 설치된 뼈대 구조에 대하여 제시하고 있는 식 (6)을 통하여 유효길이계수를 산정하였다.

$$\frac{G_a G_b}{4} \left(\frac{\pi}{k}\right)^2 + \frac{G_a + G_b}{2} \left(1 - \frac{\pi/k}{\tan(\pi/k)}\right) + \frac{2 \tan(0.5\pi/k)}{\pi/k} = 1, \text{ where } G = \frac{\Sigma(E_c I_c / L_c)}{\Sigma(E_g I_g / L_g)} \quad (6)$$

여기서, G_a 와 G_b 는 압축을 받는 기둥 부재 양단 a 와 b 에서 기둥 부재에 연결된 구속 부재의 회전 강성에 대한 기둥 부재의 회전 강성의 비율을 의미한다. 따라서 E_c, I_c, L_c 는 각각 기둥 부재의 탄성계수(modulus of elasticity), 단면 2차 모멘트(moment of inertia), 부재의 길이(length)를 의미하며, E_g, I_g, L_g 는 구속 부재의 해당 물성치를 의미한다. 식 (6)의 해는 golden section search 기법과 parabolic interpolation을 접목한 방법으로 구할 수 있다¹²⁾.

가설구조물의 신뢰성 해석은 주어진 확률변수 벡터로 정의되는 결합 확률밀도함수를 식 (5)의 한계상태식에 의하여 파괴로 판별되는 영역에 대하여 다차원 적분으로 산정할 수 있으며, 이는 식 (7)로 표현될 수 있다.

$$P_f = \int_{g(\mathbf{v}) < 0} f_{PDF}(\mathbf{v}) d\mathbf{v} \quad (7)$$

여기서, $f_{PDF}(\mathbf{v})$ 는 확률변수 벡터 \mathbf{v} 에 대한 결합 확률분포 함수(joint Probability Distribution Function; jPDF)이며, P_f 는 파괴확률로서 파괴 영역, 즉 $g(\mathbf{v}) < 0$ 영역에

대한 다차원 적분으로 산정된다. 한계상태식 $g(\mathbf{v})$ 의 산정은 주어진 확률변수의 샘플에 대하여 구조 해석을 통하여 이루어진다. 즉, 구조 해석 수행 결과, 부재력을 얻게 되며 이로부터 식 (5)의 조합응력 비를 산정하게 된다. 조합응력 비의 산정에서는 유효길이계수가 요구되며, 이는 식 (6)의 최적 검색을 통하여 얻어진다.

한편, 이 연구에서는 Table 1의 7가지 케이스를 고려하므로 각 케이스별 신뢰성 해석을 반복적으로 수행하였다. 이 때, 식 (7)의 다중 적분 방법으로 FORM(First-Order Reliability Method), SORM(Second-Order Reliability Method), MCS(Monte Carlo Simulation) 방법^{13,14)}을 적용하여 해의 정확성 및 수치 효율성도 함께 살펴보고자 하였다. 신뢰성 해석 방법에 대한 설명은 지면 관계상 생략한다(류선호 등³⁾ 참조). 다만, MCS 방법으로 수치 효율성을 높이기 위하여 FORM 해석으로부터 얻어지는 설계점(design point)을 초기 값으로 이용하는 Important Sampling MCS 기법을 사용하였으며 해의 수렴성 조건으로는 파괴확률의 변동 계수(coefficient of variation)에 대하여 0.03을 적용하고 최대 시뮬레이션 횟수는 10^6 으로 설정하였음을 밝힌다.

4. 수치 예

제안하는 신뢰성 해석 방법을 적용한 수치 예로서 3차원 가설 구조물을 고려하였다. 이 연구에서는 류선호 등³⁾ 연구에서 사용된 6본×5본×4단 시스템 동바리와 동일한 모델을 고려하였다. 수직재는 STK500의 $\Phi 60.5 \times 2.6t$ 로서 x 방향과 y 방향으로 1.219 m의 간격으로 설치되며, 수평재는 STK400의 $\Phi 42.7 \times 2.2t$ 로서 수직 z 방향으로 1.725 m의 간격으로 설치된다. 가새재도 수평재와 동일한 STK400의 $\Phi 42.7 \times 2.2t$ 를 사용하였으며, 수직 및 수평 하중의 산정을 위하여 0.25 m 두께의 슬래브를 고려하였다³⁾.

예제 구조물의 물성치 및 확률분포 모델 정보를 Table 2에 수록하였다. 여기서 E는 탄성계수, A는 부재 단면적, I는 단면 2차 모멘트, σ_y 는 항복응력, P_x, P_y, P_z 는 고정하중 및 작업하중에 의한 연직하중 및 최소 수평하중에 해당한다. Fig. 3에는 편의상 연직하중 P_z 만 대표적으로 도시하였으며, P_x 및 P_y 는 최소 수평하중으로서 상부 노드에 각각 x 방향과 y 방향으로 재하된다. 각 물성치들의 평균값은 해당 제품의 물성치로 제시되는 값을 사용하였으며, 확률분포 유형 및 표준편차는 기존 연구들에서 제시된 바가 없어 E, A, I, P에 대해서는 20%, σ_y 에 대해서는 10%의 변동계수(coefficient of variation)를 가정하였다. 또한, 회전 강성을 나타내

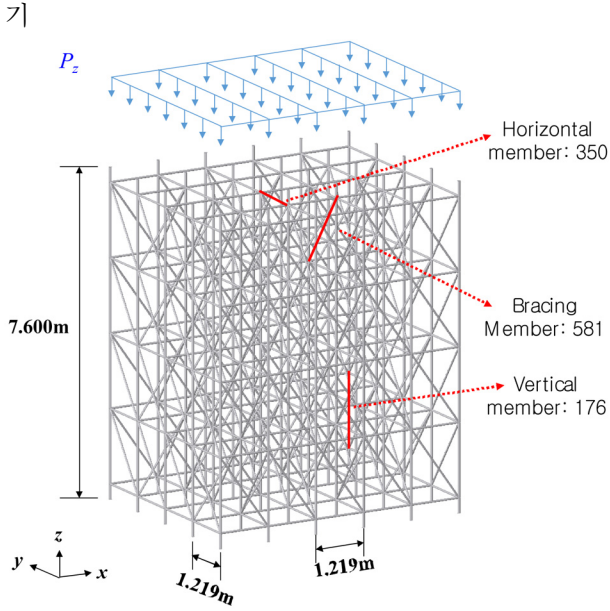


Fig. 3. Layouts of temporary shoring structure.

Table 2. Probability distributions of random variables

Properties	Elements	Probability models		
		Mean	Standard deviation	Distribution type
E (MPa)	Column	2.05×10^5	0.41×10^5	Normal
	Beam			
	Bracing			
A (m ²)	Column	4.73×10^{-4}	0.95×10^{-4}	Normal
	Beam	2.92×10^{-4}	0.58×10^{-4}	
	Bracing	2.92×10^{-4}	0.58×10^{-4}	
I (m ⁴)	Column	19.86×10^{-8}	3.97×10^{-8}	Normal
	Beam	5.97×10^{-8}	1.19×10^{-8}	
	Bracing	5.97×10^{-8}	1.19×10^{-8}	
σ_y (MPa)	Column	355.0	35.5	Normal
	Beam	235.0	23.5	
	Bracing	235.0	23.5	
P (kN)	Pz	13.22	2.64	Lognormal
	Px	0.305	0.061	
	Py	0.366	0.073	
α	Base	0.5	0.289	Uniform
	Beam			
	Bracing			

위하여 도입한 α 계수는 0~1 사이의 균등 분포모델을 적용하였기에 그에 상응하는 평균 $0.5(=1/2)$, 표준편차 $0.289(=\sqrt{1/12})$ 으로 산정되었다.

주어진 구조물에 대한 부재별 신뢰도 해석은 조합응력에 대하여 가장 취약한 부재로 선정된 176번 수직재, 350번 수평재, 581번 가새재를 대상으로 수행되었다

(Fig. 3 참조).

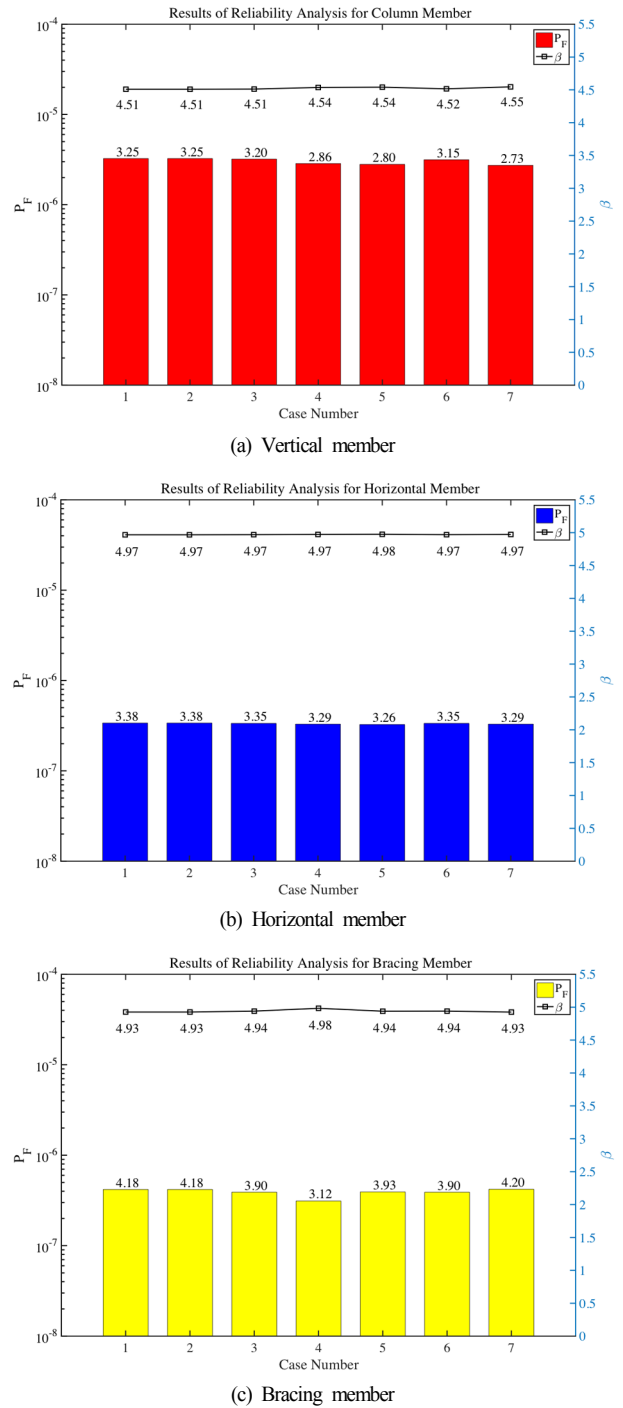


Fig. 4. Reliability analysis results with respect to uncertainty of rotational stiffness at joints.

4.1 회전 강성의 영향

회전 강성의 고려 유무에 따른 영향을 살펴보기 위하여, FORM 신뢰성 해석 기법에 의하여 산정된 파괴 확률 및 신뢰도 지수를 Fig. 4에 도시하였다. 수평축은 Table 1에 제시한 Case 번호이며, 수직축은 파괴확률과

신뢰도 지수를 2축 그래프로 나타내었다. 좌측의 파괴 확률은 로그 스케일의 수직 막대그래프로 나타내었으며, 우측의 신뢰도 지수는 마커를 잇는 선분그래프로 표시하였다.

Fig. 4(a)에서 수직재의 파괴확률은 힌지 모델(Case 1)에서 가장 높게 나타나며, 회전 강성의 불확실성을 고려한 경우들(Case 2~7)에서 감소하고 있음을 알 수 있다. 한편, 지점부에서의 회전 강성만을 고려한 경우(Case 2), 수평재의 연결부 회전 강성만을 고려한 경우(Case 3), 경사재의 연결부 회전 강성만을 고려한 경우(Case 4)를 상호 비교하면, Case 4에서 파괴확률이 가장 낮게 평가되고 있으므로, 수직재의 파괴확률에 가장 큰 영향을 미치는 연결부는 경사재라 할 수 있다. 다시 말하면, 경사재의 회전 강성이 수평재 및 지점부에서의 회전 강성보다 수직재의 파괴확률을 저감하는 효과가 가장 크다는 것이다. 이는 연결부의 회전 강성을 고려함으로써 각 부재들의 저항 모멘트 성능이 발현되고 그에 따라 외부 하중을 분담함으로써 최종적으로는 수직재에 전달되는 하중을 경감시키고 그에 따라 수직재의 파괴확률이 감소하기 때문이다. 한편, 지점에서의 회전 강성을 고려하는 것(Case 2)은 힌지 모델(Case 1)과 비교할 때 수직재의 파괴확률에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 덧붙여, 모든 연결부의 불확실성을 동시에 고려할 때(Case 5), 파괴확률이 가장 낮게 산정되었다. Case 1, Case 3, Case 6을 비교하는 것은 지점부가 힌지 및 고정단의 양 극단적인 경우에서 수평재 회전 강성의 영향성을 비교하는 것이다. 이 경우, 파괴확률이 Case 1>Case 3>Case 6의 순서로 감소하므로 고정단이 수직재의 파괴확률을 저감시키고 있음을 확인할 수 있다. 마찬가지로, 경사재 회전 강성의 영향성을 살펴보면, Case 1>Case 4>Case 7의 순서로 파괴확률이 저감되고 있음을 다시 한 번 확인할 수 있다. 특히, Case 7의 파괴확률(2.73×10^{-6})은 Case 5(2.80×10^{-6})보다 작게 산정됨으로써 지점부를 구속시키는 정도가 수직재의 파괴확률에 미치는 영향이 매우 크다고 할 수 있다.

Fig. 4(b)는 연결부의 회전 강성이 수평재의 파괴확률에 미치는 효과를 나타내고 있다. 전반적인 효과는 수직재와 유사한 경향을 보이거나 파괴확률의 저감 효과는 크지 않음을 확인할 수 있다. 즉, 수직재에서는 힌지 모델(Case 1)에서 파괴확률 3.25×10^{-6} 이 Case 5에서 2.80×10^{-6} 으로 줄어든 반면, 수평재의 파괴확률은 힌지 모델에서 3.38×10^{-7} 이 Case 5에서 3.26×10^{-7} 으로 감소 효과가 매우 미비함을 알 수 있다. 또한, 지점을 고정시킨 Case 7에서 수평재의 파괴확률은 3.29×10^{-7} 의 값

을 보임으로써 근소하게나마 증가하는 결과를 보이고 있다. 따라서 부재 연결부의 회전 강성은 수평재의 파괴확률에 미치는 영향은 근소하다고 판단된다.

마지막으로, 경사재에 대한 연결부 회전 강성의 불확실성 고려 유무의 효과를 Fig. 4(c)에 도시하였다. 경사재의 경우에는 Case 4에서 가장 낮은 파괴확률을 보임으로써 경사재의 회전 강성을 고려하는 것이 가장 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 그에 반해 지점부를 고정단으로 설치하는 것은 오히려 파괴확률을 근소하게나마 증가시킬 수도 있음을 Case 1, Case 4, Case 7의 결과로부터 확인할 수 있다.

4.2 연결부 회전 강성의 부재별 영향

가설구조물의 조합응력에 대한 파괴확률을 수직재, 수평재, 경사재 등 부재 유형에 따라 살펴보고자 Fig. 5를 도시하였다. Fig. 5에서는 기존 설계에서 사용하는 힌지 모델(Case 1)과 실제 구조물에 가장 근접하는 모델로서 연결부에서의 회전 강성을 고려한 경우(Case 5)를 함께 도시하였다.

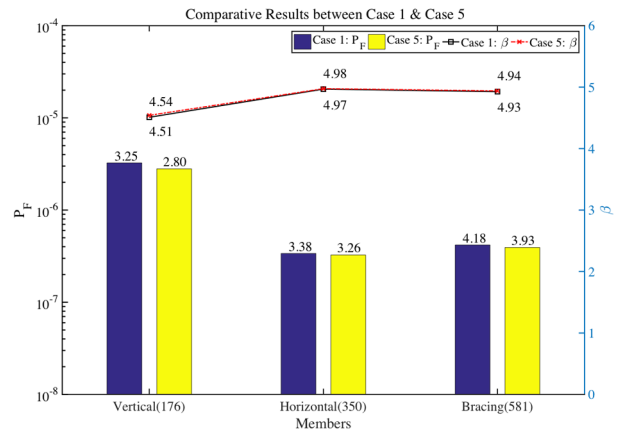


Fig. 5. Influence of rotational stiffness on failure probabilities of three different members.

힌지 모델(Case 1)과 실제 모델(Case 5)에서 공통적으로 수직재가 가장 높은 파괴확률을 보이며, 수평재가 가장 낮은 파괴확률을 보이고 있다. 이로부터 조합응력의 측면에서 가장 취약한 부재는 수직재라 할 수 있다.

4.3 신뢰성 기법별 수치 정확성 및 효율성

이 연구에서는 수치 해의 정확성 및 효율성을 확인하고자 FORM뿐만 아니라 SORM 및 MCS도 함께 수행하였다. 그 결과, Table 1의 각 케이스별 부재의 파괴확률 및 신뢰도 지수 산정 결과를 Table 3에 수록하

였다.

Table 3. Comparison of numerical accuracy and efficiency between FORM, SORM and MCS

Vertical: 176		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
FORM	$P_f (\times 10^{-6})$	3.25	3.25	3.20	2.86	2.80	3.15	2.73
	β	4.51	4.51	4.51	4.54	4.54	4.52	4.55
SORM	$P_f (\times 10^{-6})$	3.54	3.54	3.48	3.12	3.04	3.41	2.93
	β	4.49	4.49	4.49	4.52	4.52	4.50	4.53
MCS	$P_f (\times 10^{-6})$	3.21	3.22	3.22	2.84	2.74	3.10	2.65
	β	4.51	4.51	4.51	4.54	4.55	4.52	4.55
Horizontal: 350		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
FORM	$P_f (\times 10^{-7})$	3.38	3.38	3.35	3.29	3.26	3.35	3.29
	β	4.97	4.97	4.97	4.97	4.98	4.97	4.97
SORM	$P_f (\times 10^{-7})$	3.41	3.41	3.38	3.31	3.28	3.38	3.31
	β	4.97	4.97	4.97	4.97	4.97	4.97	4.97
MCS	$P_f (\times 10^{-8})$	8.85	9.07	8.58	8.61	8.08	8.26	7.81
	β	5.22	5.22	5.23	5.23	5.24	5.23	5.25
Bracing: 581		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
FORM	$P_f (\times 10^{-7})$	4.18	4.18	3.90	3.12	3.93	3.90	4.20
	β	4.93	4.93	4.94	4.98	4.94	4.94	4.93
SORM	$P_f (\times 10^{-7})$	4.23	4.23	3.96	3.15	3.98	3.95	4.26
	β	4.92	4.92	4.94	4.98	4.94	4.94	4.92
MCS	$P_f (\times 10^{-7})$	1.47	1.39	1.27	1.18	1.34	1.31	1.61
	β	5.13	5.14	5.16	5.17	5.14	5.15	5.11

Table 3에서 FORM, SORM 및 MCS의 해를 비교할 때, 176번 수직 부재에서는 세 방법들이 거의 유사한 파괴확률과 신뢰성 지수 값을 보인다. 한편, 350번 수평재와 581번 경사재에서도 FORM과 SORM은 거의 유사한 파괴확률과 신뢰성 지수 값을 보이는 반면, MCS는 약간의 차이를 보인다. 수평재와 경사재에서 신뢰성 지수의 차이는 근소하지만 그에 상응하는 파괴확률은 다소 큰 차이를 보이고 있다. 이는 신뢰성 지수보다 파괴확률의 변화가 더욱 민감하기 때문이다³⁾. 이러한 관점에서 볼 때, 세 부재들의 신뢰성 지수가 FORM과 MCS 사이에서 최대 5% 이내의 상대오차를 보이므로 전반적으로 해의 정확성은 확보되었다고 판단된다. 특히, 가장 높은 파괴확률을 보이는 수직재에서는 신뢰성 지수가 최대 0.15%, 파괴확률도 최대 3.1%로서 FORM과 MCS의 오차가 매우 미비함을 확인할 수 있다.

한편, 세 가지 방법들의 소요 연산 시간을 Table 4에 수록하였다. 표에서 각 수치는 소요 연산 시간(CPU time)이며, 괄호 안의 숫자는 FORM 연산시간 대비 각 방법의 연산시간 비율이다. Table 4에서 알 수 있듯이, 모든 경우들에 대해서 SORM과 MCS의 산정시간이

FORM보다 훨씬 크다는 것을 확인할 수 있다. SORM

Table 4. Comparison of CPU time between FORM, SORM and MCS (unit: second)

176		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
FORM		2,444	2,308	2,590	2,374	2,739	3,926	2,656
SORM		22,924	22,476	23,175	24,583	24,931	36,504	23,116
		(9.4)	(9.7)	(8.9)	(10.4)	(9.1)	(9.3)	(8.7)
MCS		111,430	111,150	118,810	109,210	109,680	181,660	116,200
		(45.6)	(48.2)	(45.9)	(46.0)	(40)	(46.3)	(43.8)
350		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
FORM		6,482	5,542	34,269	2,410	14,998	42,663	2,393
SORM		48,084	44,999	76,463	45,095	60,329	106,780	44,610
		(7.4)	(8.1)	(2.2)	(18.7)	(4.0)	(2.5)	(18.6)
MCS		635,600	634,130	688,030	634,630	698,570	875,890	724,290
		(98.1)	(114.4)	(20.1)	(263.3)	(46.6)	(20.5)	(302.7)
581		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
FORM		2,521	2,466	2,562	2,701	4,046	3,789	4,533
SORM		29,283	28,962	30,670	40,806	35,058	49,685	31,726
		(11.6)	(11.7)	(12.0)	(15.1)	(8.7)	(13.1)	(7.0)
MCS		510,720	541,690	517,600	416,060	535,710	534,330	459,220
		(202.6)	(219.7)	(202.0)	(154.0)	(132.4)	(141.0)	(101.3)

은 최대 약 19배, MCS는 최대 약 300배 많이 소요될 수 있음을 확인할 수 있다. Table 3과 Table 4의 수치 정확성 및 효율성을 동시에 고려할 때, 가설 구조물의 조합응력에 대한 신뢰성 해석은 FORM 방법만으로도 해의 정확성을 확보할 수 있으며 동시에 수치 효율성 측면에서는 가장 우수하다고 할 수 있다.

5. 결론 및 고찰

이 연구에서는 가설 구조물의 신뢰성 해석에서 부재 연결부에서의 회전 강성을 불확실성을 갖는 확률변수로 포함시킬 수 있는 신뢰성 해석 기법을 제안하였다. 이를 위해 반강접 연결부를 회전 스프링 계수로 고려할 수 있는 역학적 모형을 구조 해석 알고리즘에 적용하였으며, 좌굴 하중 산정에서 요구되는 부재의 유효 길이계수를 부재 양단의 구속조건을 반영하여 산정하는 식을 추가로 고려하였다. 신뢰성 해석은 각 부재 연결부의 회전 강성 고려 유무 및 지점부의 구속 조건을 고려하여 총 7가지 경우로 분류하여 파괴확률에의 영향을 살펴보았다.

수치 해석 결과, 수평재는 연결부의 회전 강성의 고려 유무에 의한 영향이 미비한 반면, 수직재와 경사재는 파괴확률을 감소시키는 영향이 비교적 크게 작용할 수 있음을 확인하였다. 특히, 경사재의 회전 강성이 수직재와 경사재의 파괴확률에 미치는 영향이 매우 크게

작용할 수 있음을 확인하였다.

부재별 파괴확률은 각 모델들에서 공통적으로 수직재가 가장 높은 파괴확률을 보이고, 다음으로 차이는 크지 않지만 경사재, 수평재의 순으로 파괴확률이 발생함을 확인하였다. 따라서 수직재가 가장 취약한 부재로서 다른 부재보다 안전성 점검이 중요하다고 할 수 있다.

마지막으로 FORM, SORM, MCS의 3가지 방법들의 수치 정확성 및 효율성을 비교한 결과, 가장 높은 파괴확률을 보이는 수직재에서 FORM 방법이 충분한 정확성을 확보하면서 수치 효율성은 월등히 우수함을 확인할 수 있었다.

본 연구 결과로부터 설계 기준에서 제시하고 있는 연결부 힌지 모델(Case 1)의 파괴확률이 연결부 회전 강성을 고려한 실제 모델(Case 5)보다 높게 산정되고 있어 보수적인 설계를 유도하고 있음을 확인할 수 있다. 덧붙여, 지점부를 고정단으로 설치할 경우 수직재의 파괴확률은 더욱 감소할 수 있음을 확인하였다. 다만, 이 경우 경사재는 반대급부로 파괴확률이 다소 높아질 수는 있으나 수직재에 비하여 파괴확률 자체가 이미 낮은 수준이므로 큰 문제는 없을 것으로 사료된다.

Acknowledgement: 이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2017R1D1A04031418).

References

- 1) Occupational Safety and Health Research Institute, Industrial Disaster Statistics News Release, KOSHA, 2019, <https://www.kosha.or.kr/>.
- 2) Construction Safety Management Information System, Accident Case DB Search, <https://www.cosmis.or.kr>.
- 3) S. H. Ryu, S.-Y. Ok and S. M. Kim, "Reliability Analysis of Three-Dimensional Temporary Shoring Structures Considering Bracing Member and Member Connection Condition", J. Korean Soc. Saf., Vol. 34, No. 1, pp. 53-61, 2019.
- 4) MOLIT, Korean Design Standard, KDS 21 50 00 : 2018, <http://www.kcsc.re.kr>.
- 5) G. Y. Kim, J. H. Won and S. H. Kim, "Structural Behavior Analysis of System Supports according to Boundary Condition of Joints between Vertical and Horizontal Members", J. Korean Soc. Saf., Vol. 32, No. 3, pp. 60-65, 2017.
- 6) Y. Seong, A Failure Probability of Temporary Structure, Master Thesis, Myongji University, 2016.
- 7) S. M. Kim, "Three-Dimensional Reliability Analysis of Temporary Shoring Structures", Master Thesis, Hankyong National University, 2018.
- 8) S. H. Ryu and S.-Y. Ok, "Influence Investigation of Rotational Stiffness at Member Joint on Reliability Analysis of 3-Dimensional Temporary Structure", Spring Conference of the Korean Society of Safety, 2019.
- 9) MOLIT, Korean Design Standard, KDS 14 31 15 : 2017, <http://www.kcsc.re.kr>.
- 10) Midas User Support System, MQCS, Analysis Algorithm, <http://kor.midasuser.com/civil/>.
- 11) J. C. McCormac, "Structural Analysis: Using Classical and Matrix Methods", John Wiley & Sons, 2006.
- 12) R. P. Brent, "Algorithms for Minimization without Derivatives", Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1973.
- 13) A. Der Kiureghian "First- and Second-order Reliability Methods", Engineering Design Reliability Handbook, Edited by E. Nikolaidis, D. M. Ghiocel & S. Singhal, CRC Press, Boca Raton, FL, Chapter 14, 2005.
- 14) N. Metropolis and S. Ulam, "The Monte Carlo Method", Journal of the American Statistical Association, Vol. 44, No. 247, pp. 335-341, 1949.