

신뢰도 기반 교량 안전성 평가를 위한 구조신뢰성 해석 플랫폼 FERUM-MIDAS의 개발

이승준, 이영주*
울산과학기술원 도시환경공학과

Development of Structural Reliability Analysis Platform of FERUM-MIDAS for Reliability-Based Safety Evaluation of Bridges

Seungjun Lee, Young-Joo Lee*

Department of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology

요약 교량은 현대 사회에서 중요한 사회기반시설물 중에 하나로 교량의 붕괴는 막대한 인명 피해와 경제적 손실을 일으킬 수 있다. 따라서 교량의 구조적 안전성을 평가하는 것은 매우 중요하며, 이를 위해 교량을 둘러싼 여러 종류의 불확실성 요인들을 고려하는 구조신뢰성 해석이 흔히 사용된다. 본 연구에서는 다양한 하중 조건에서 교량의 안전성을 평가하기 위한 새로운 구조신뢰성 해석 플랫폼을 제안한다. 제안 플랫폼 FERUM-MIDAS는 신뢰성 해석 소프트웨어인 Finite Element Reliability Using MATLAB(FERUM)과 교량 설계/해석에 특화된 상용 소프트웨어인 MIDAS/CIVIL을 연결하여, 자동적인 입출력 데이터 교환을 통해서 구조신뢰성 해석을 수행한다. 나아가 MIDAS/CIVIL의 그래픽 사용자 인터페이스로만 소프트웨어 구동이 가능한 한계점을 극복하기 위하여 FERUM에 별도의 그래픽 사용자 인터페이스 제어 모듈을 추가하였다. 본 연구에서는 제안 플랫폼을 간단한 프레임 예제에 적용하여 대표적인 신뢰성 해석 방법인 FORM(First-Order Reliability Method)과 MCS(Monte Carlo simulation)의 해석 결과를 비교·분석하였으며, 계산된 파괴확률 차이가 5% 미만인 것을 확인하여 제안 플랫폼의 검증을 완료하였다. 이와 더불어 개발된 플랫폼을 활용하여 KL-510 활하중 모델을 고려한 프리스트레스트 콘크리트(pre-stressed concrete, PSC)교의 파괴확률과 신뢰도 지수를 도출하고, 그 결과를 분석하여 교량의 구조적 안전성을 평가하였다. 본 연구에서 제안한 새로운 구조신뢰성 해석 플랫폼을 통해 교량의 효과적인 신뢰도 기반 안전성 평가가 가능할 것으로 기대된다.

Abstract The collapse of bridges can cause massive casualties and economic losses. Therefore, it is thus essential to evaluate the structural safety of bridges. For this task, structural reliability analysis, considering various bridge-related uncertainty factors, is often used. This paper proposes a new computational platform to perform structural reliability analysis for bridges and evaluate their structural safety under various loading conditions. For this purpose, a software package of reliability analysis, Finite Element Reliability Using MATLAB (FERUM), was integrated with MIDAS/CIVIL, which is a widely-used commercial software package specialized for bridges. Furthermore, a graphical user interface (GUI) control module has been added to FERUM to overcome the limitations of software operation. In this study, the proposed platform was applied to a simple frame structure, and the analysis results of the FORM (First-Order Reliability Method) and MCS (Monte Carlo simulation), which are representative reliability analysis methods, were compared. The proposed platform was verified by confirming that the calculated failure probability difference was less than 5%. In addition, the structural safety of a pre-stressed concrete (PSC) bridge was evaluated considering the KL-510 vehicle model. The proposed new structural reliability analysis platform is expected to enable an effective reliability-based safety evaluation of bridges.

Keywords : Bridge Safety, Structural Reliability, FERUM, MIDAS/CIVIL, Computational Platform

본 논문은 국토교통부 교통물류연구(도로)사업의 연구비 지원(20POQW-B152755-02)에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Young-Joo Lee(Ulsan National Institute of Science and Technology)

email: ylee@unist.ac.kr

Received October 5, 2020

Revised October 27, 2020

Accepted November 6, 2020

Published November 30, 2020

1. 서론

주요한 사회기반시설 중 하나인 교량은 교통시설로서 핵심적인 임무를 수행한다. 이러한 교량의 붕괴는 막대한 인명 피해와 경제적 손실을 일으킬 수 있기 때문에 자연히 교량의 구조적 안전성을 평가하는 것은 매우 중요하게 여겨지고 있으며, 그에 관해 오랜 시간 동안 많은 연구자에 의해 연구가 수행되어오고 있다.

일반적으로 구조물의 안전성을 평가하기 위해서는 구조물의 저항과 구조물에 가해질 수 있는 하중을 고려하며, 또한 이들에 영향을 줄 수 있는 다양한 인자들을 고려해야 한다. 과거에는 이러한 인자들이 일정한 불변의 값을 갖고 있다는 가정에 근거한 결정론적 방법으로 구조물의 안전성을 평가하였으나, 최근에는 확률론을 바탕으로 다양한 영향 인자들의 불확실성을 고려하는 구조신뢰성 해석으로 신뢰도에 기반해 구조물의 안전성을 평가하고 있다[1].

이러한 구조신뢰성 해석을 정확하고 효율적으로 수행하기 위해 다양한 연구들이 활발히 진행되고 있으며[2], 그 일환으로 Der Kiureghian과 Taylor[3]가 신뢰성 및 구조해석 알고리즘의 연결을 시도한 이래 다양한 구조신뢰성 해석 소프트웨어들이 개발되어 왔다. 이러한 구조신뢰성 해석 소프트웨어들은 크게 두 가지 유형으로 나눌 수 있다. 첫 번째 유형은 CalREL[4], FERUM[5]과 같이 자체 구조해석 모듈이 내장된 해석 소프트웨어이다. 이는 별도의 구조해석 소프트웨어가 필요하지 않지만, 내장된 구조해석 소프트웨어의 한계로 인해 비교적 단순한 구조물들에만 적용이 가능하다는 문제점을 갖고 있다. 또 다른 구조신뢰성 해석 소프트웨어 유형으로는 NESSUS[6], FERUM-ABAQUS[7-9], FERUM-ZEUS[10, 11] 등이 있으며, 이는 구조해석 전용 소프트웨어와 신뢰성 해석 전용 소프트웨어를 연결하여, 두 소프트웨어가 마치 하나의 소프트웨어처럼 작동하도록 만든 유형이다. 이 경우 연결된 두 소프트웨어 각각의 장점을 극대화하면서 복잡하고 다양한 구조물들에 대한 구조신뢰성 해석을 할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 교량의 구조적 안전성을 평가할 수 있는 새로운 구조신뢰성 해석 플랫폼인 FERUM-MIDAS를 개발하였다. 제안 플랫폼은 신뢰성 해석 전문 소프트웨어인 FERUM과 교량 해석/설계 전문 소프트웨어인 MIDAS/CIVIL을 결합하여 상호 반복적인 입출력 데이터 교환을 통해 구조신뢰성 해석을 수행할 수 있도록 한다. 특히 MIDAS/CIVIL은 기존에 개발된 소프트웨어 플

랫폼들에서 사용된 구조해석 프로그램들과 달리, 교량의 유한요소 해석에 특화된 소프트웨어로 교량의 동적해석, 비선형 해석, 시공단계해석 등 범용 구조해석 알고리즘과 PSC교, 사장교, 현수교 등의 다양한 교량의 구조 형식에 대해서 구조해석 및 설계를 할 수 있으며 국내외의 한계상태설계법뿐만 아니라 다양한 국가의 설계 코드를 지원하고 있다. 한편, MIDAS/CIVIL은 ABAQUS 등과 같은 여타의 구조 해석 소프트웨어와는 달리 DOS(Disk Operating System) 환경에서 소프트웨어를 구동해 구조 해석을 수행하는 것이 불가능하고, 그래픽 사용자 인터페이스(Graphic User Interface, GUI) 환경에서만 구조 해석 수행이 가능하다. 이에 제안 플랫폼에서는 MIDAS/CIVIL의 GUI 제어 모듈이 FERUM에 추가되었다. 이를 통해서 FERUM-MIDAS는 MIDAS/CIVIL의 구조 해석 결과를 바탕으로 해석적 신뢰성 해석 기법인 FORM[10, 12]과 샘플링 기반의 신뢰성 해석 기법인 MCS[10, 13]를 활용해 사용자가 교량의 안전성을 평가할 수 있도록 해준다.

2. 구조신뢰성 해석 플랫폼

2.1 신뢰성 해석 기법

구조물에 대해 신뢰성 해석을 수행하기 위해서 일반적으로 한계상태함수(limit-state function)를 정의하게 된다. 이는 구조물의 거동이 특정 상태에 도달하는 것을 수식으로 표현한 것이며, 구조물의 파괴 확률을 계산하고자 할 때 구조물의 저항(R)과 하중(L)의 관계를 식으로 표현하는 한계상태함수 $g(\mathbf{x})$ 는 다음 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$g(\mathbf{x}) = R(\mathbf{x}) - L(\mathbf{x}) < 0 \quad (1)$$

여기에서 \mathbf{x} 는 확률변수들(random variables)로 이루어진 벡터이며, $g(\cdot) < 0$ 은 구조물의 파괴를 의미한다.

구조신뢰성 해석에서 주어진 한계상태방정식으로 구조물의 파괴확률을 계산하기 위해서 다수의 신뢰성 기법들이 개발되고 다양한 문제에 적용되었다[14]. 신뢰성 해석 기법들은 크게 샘플링 기반의 기법과 해석적 기법 두 종류로 분류되는데, 대표적으로 각각 MCS와 FORM이흔히 사용된다[10].

샘플링 기반의 해석 방법은 여러 확률 변수에 대해 수많은 샘플들을 발생시킨 후, 각각의 샘플에 대해 반복적인 구조 해석을 수행하여 얻은 결과를 바탕으로 확률을

계산하는 방법이다. 이때 구조물의 파괴확률 P_f 는 다음 Eq. (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$P_f = n_f / n_s \quad (2)$$

여기에서 n_s 는 확률 변수에 대해 발생시킨 샘플의 수이며, n_f 는 그 중 구조물이 파괴로 판명된 샘플 수를 의미한다.

즉, 샘플링 기반의 기법에서는 한계상태방정식 $g(\mathbf{x})$ 가 0 미만인 경우의 수를 세어 파괴확률을 계산하게 된다. 이러한 샘플링 기반 기법은 비교적 단순하고 직관적이면서도 충분한 수의 샘플을 사용할 경우 정해에 매우 근접한 답을 구할 수 있으므로 많은 연구에서 널리 사용되어 왔다. 본 기법의 더 자세한 설명은 Melchers[13]에서 얻을 수 있다.

한편, 해석적 신뢰성 기법을 이용하는 경우, 파괴확률 P_f 는 다음 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다[12].

$$P_f = P[g(\mathbf{x}) < 0] = \int_{g(\mathbf{x}) < 0} f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) \quad (3)$$

여기에서 $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ 는 확률변수 벡터 \mathbf{x} 의 결합확률밀도함수(joint probability density function, joint PDF)를 의미한다.

Eq. (3)에서의 적분을 확률변수 \mathbf{x} 가 아닌 표준정규(standard normal) 변수 \mathbf{u} 에 대해 표현하면, 파괴확률 P_f 는 아래 Eq. (4)와 같다.

$$P_f = \int_{g(\mathbf{x}) < 0} f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) = \int_{G(\mathbf{u}) < 0} \varphi_n(\mathbf{u}) d\mathbf{u} \quad (4)$$

여기에서 $G(\mathbf{u})$ 는 한계상태함수 $g(\mathbf{x})$ 를 표준정규공간(standard normal space)으로 변환한 것이다. $G(\mathbf{u}) = g(T^{-1}(\mathbf{u}))$ 의 관계를 갖는다. $\varphi_n(\cdot)$ 는 n 개의 표준정규 변수에 대한 결합확률밀도함수를, T 는 $\mathbf{u} = T(\mathbf{x})$ 를 만족하는 일대일매핑 변환 매트릭스를 의미한다.

대표적인 해석적 기법인 FORM을 이용해 파괴확률 P_f 를 구하기 위해서는, 표준정규공간으로 변환된 한계상태 함수 $G(\mathbf{u})$ 를 활용해 아래와 같은 기하학적 최적화 문제를 풀게 된다.

$$\mathbf{u}^* = \arg \min \{ \| \mathbf{u} \| \mid G(\mathbf{u}) = 0 \} \quad (5)$$

여기에서 ‘ $\arg \min$ ’은 주어진 함수의 최소화를, $\| \cdot \|$ 는 L^2 -norm을 의미한다. 즉, Eq. (5)에서 \mathbf{u}^* 는 $G(\mathbf{u}) = 0$ 을 만족하는 벡터 \mathbf{u} 중에서 $\| \mathbf{u} \|$ 가 최소인 것을 뜻한다.

일반적으로 구조신뢰성 해석에서 \mathbf{u}^* 는 Most Probable Point(MPP) 또는 Design Point라고 부르며,

기하학적으로는 표준정규 공간에서 $G(\mathbf{u})=0$ 을 만족하는 여러 점들 중에서 원점과의 거리가 최소인 점을 의미한다. 이는 또한 구조물의 파괴를 의미하는 $G(\mathbf{u}) < 0$ 을 만족하는 점들 중에서 가장 큰 확률을 갖는 점을 뜻한다. Fig. 1은 2차원 표준정규 공간에서 FORM 해석의 개념도를 보여준다.

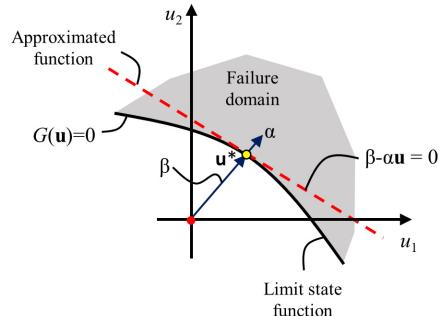


Fig. 1. Linear approximation in FORM[12]

또한, MPP에서 한계상태함수는 Eq. (6)처럼 선형근사(linearly approximated) 된다.

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

여기에서 ∇ 는 구배(gradients) 함수이며, $\alpha = -\nabla G(\mathbf{u}^*) / \| \nabla G(\mathbf{u}^*) \|$, $\beta = -\alpha \mathbf{u}^*$ 이고, 특히 여기에서 β 는 신뢰도 지수(reliability index)라고 불리면서 파괴확률을 나타내는 또 하나의 지표로 흔히 사용된다.

이때 파괴확률은 다음 Eq. (7)과 같이 근사적으로 계산할 수 있다.

$$P_f \cong \Phi(-\beta) \quad (7)$$

여기에서 $\Phi(\cdot)$ 는 표준정규분포의 누적분포함수(cumulative distribution function, CDF)이며, FORM에 대한 자세한 설명은 Der Kiureghian[12]에서 찾아볼 수 있다.

2.2 구조신뢰성 해석 플랫폼: FERUM-MIDAS

본 연구에서는 신뢰성 해석 기법인 MCS와 FORM을 활용하여 구조물의 안전성 평가를 수행하기 위해서 신뢰성 해석 전문 소프트웨어인 FERUM을 도입하였다. FERUM은 University of California, Berkeley 연구팀에서 개발한 오픈소스 원칙(open-source strategy)의 신뢰성 해석 소프트웨어 패키지이며, FORM, second-order reliability method(SORM), MCS, importance sampling simulation 등 다양한 신뢰성

해석 기법들을 제공한다[5]. 또한, 사용자들은 정규분포, 로그 정규분포, 감마분포, 베타분포, 겹벨(Gumbel)분포 등 총 16종의 확률분포를 사용할 수 있으며, FERUM의 소스코드를 홈페이지 (<http://www.ce.berkeley.edu/projects/ferum/>)에서 내려 받을 수 있다.

한편, MIDAS/CIVIL은 토목 분야 범용 구조해석 및 최적 설계 소프트웨어로 직관적인 사용자 인터페이스 환경과 컴퓨터 그래픽스 기술이 적용되었다. 동적 해석, 비선형 해석, 시공단계 해석 등의 다양한 범용 구조 해석 알고리즘들과 이동하중 해석, 수화열 해석 등의 다양한 해석 기능들이 탑재되어 있다. 또한, PSC교, 사장교, 현수교 등의 다양한 교량 구조물의 구조해석 및 설계를 할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 FERUM과 MIDAS/CIVIL을 연결한 FERUM-MIDAS를 구축해 교량 구조물의 신뢰도 기반 안전성 평가를 수행하였다. 신뢰성 해석과 구조 해석 소프트웨어 간의 양방향 소통을 위해 개발된 FERUM-MIDAS 플랫폼의 대략적인 기능은 Fig. 2에 나타나 있다. 구조신뢰성 해석 중 MIDAS/CIVIL은 FERUM으로부터의 확률 변수들에 대한 결정론적 입력값들을 받아 구조 해석을 수행하고, FERUM에서는 MIDAS/CIVIL에서 해석된 결괏값(힘, 응력, 변위 등)을 입력받아 구조물의 한계상태함수 값을 계산하게 된다. 이러한 두 소프트웨어 간의 자동적인 데이터 교환을 통해서 구조신뢰성 해석의 효율성을 증대시키고 대상 구조물의 파괴화를 및 신뢰도 지수를 얻을 수 있다.

또한, FERUM-MIDAS에서는 MIDAS/CIVIL이 GUI 환경에서만 구조해석 수행이 가능한 문제점을 해결하기 위해서 Fig. 3과 같이 Java의 Robot 클래스[15]를 활용한 별도의 GUI 제어 모듈이 FERUM에 추가되었다.

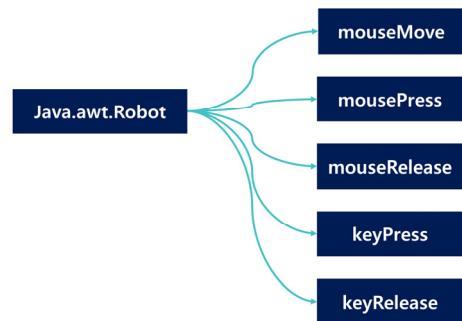


Fig. 3. GUI Control Module

본래 Robot 클래스는 마우스 및 키보드 제어가 필요한 응용 프로그램을 위해서 시스템 입력 이벤트를 생성하는 데 주로 사용된다. FERUM-MIDAS에서는 이러한 Robot 클래스의 기능을 활용해, GUI 제어 모듈에서 Fig. 3과 같이 마우스 및 키보드 제어 명령어를 통해서 DOS 환경에서는 불가능했던 소프트웨어 구동 및 구조 해석을 수행할 수 있도록 했다. 이를 통해서 제안 플랫폼 FERUM-MIDAS는 효율적인 구조신뢰성 해석이 가능해졌다.

3. FERUM-MIDAS 적용

3.1 FERUM-MIDAS 검증

본 장에서는 개발된 구조신뢰성 해석 플랫폼 FERUM-MIDAS로 MCS와 FORM의 해석을 수행하고, 그 결과들을 상호 비교하여 검증한다. 대상 구조물은 해

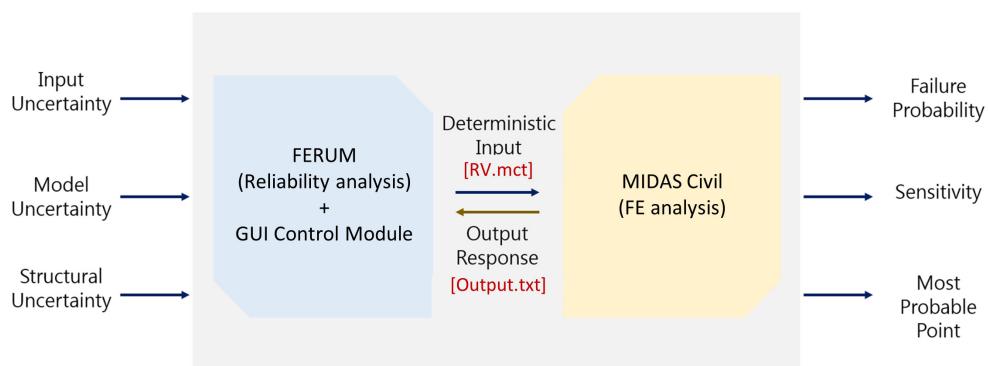


Fig. 2. Outline of structural reliability analysis using FERUM-MIDAS

석 플랫폼의 검증을 위해 가상으로 개발된 간단한 프레임 구조물로써, Fig. 4에서는 대상 구조물 문제의 정면도를, Fig. 5에서는 구조해석을 위해 구축된 MIDAS/CIVIL 모델을 보여주고 있다. 대상 프레임 구조물은 2개의 수직 부재와 1개의 절점을 가진 수평 부재로 구성되어 있으며, Fig. 4에서 볼 수 있듯이 바닥에 고정 지지 되어 있고 수직 하중과 모멘트 하중을 받고 있다. 또한, 수직 부재와 수평 부재의 단면적과 부재 길이가 다르게 가정되었다.

본 검증 예제에서는 각 부재의 단면이 차모멘트, 탄성 계수, 수직 하중과 모멘트 하중을 불확실성 요소로 결정하였으며, Table 1에 고려된 불확실성 요소들의 통계적 특성이 정리되어 있다. 검증 예제에서 고려된 구조물의 한계상태는 수직 하중이 작용하는 위치의 수직 변위가 0.7 cm 이상 발생하는 경우를 구조물의 한계상태로 결정하여 파괴확률을 계산하였다.

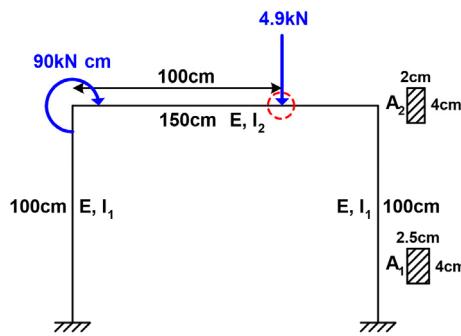


Fig. 4. Elevation view of the frame example

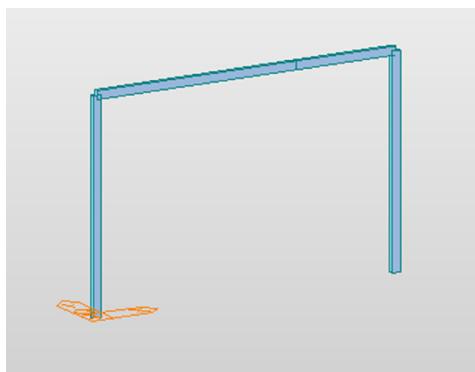


Fig. 5. Simple frame structure model for MIDAS/CIVIL

Table 1. Statistical properties of random variables for frame example

Random variables (RVs)	Mean	Coefficient of variation	Distribution type	Number of RVs
Moment Load (kN·cm)	90.00	0.40	Normal	1
Vertical Load (kN)	4.90	0.20	Normal	1
Young's modulus (kN/cm ³)	21,000	0.10	Normal	4
Moment of inertia #1 (cm ⁴)	13.33	0.10	Normal	2
Moment of inertia #2 (cm ⁴)	10.67	0.10	Normal	2

Fig. 6은 제안 플랫폼인 FERUM-MIDAS에서 수행한 FORM 및 MCS 해석으로부터 얻어진 프레임 구조물의 파괴 확률을 나타낸다. 파란색 점선은 FORM에서 얻어진 확률을 나타내며, 빨간색 실선은 샘플의 수가 증가함에 따른 MCS 해석 결과를 나타내는데, 샘플 수가 증가함에 따라 MCS에서 얻어진 파괴 확률이 FORM으로 계산된 확률값으로 수렴되어 가는 것을 확인할 수 있다. 계산된 프레임 구조물의 파괴확률은 FORM 해석의 경우 9.61×10^{-2} , 4,000개의 샘플을 사용한 MCS의 경우 9.33×10^{-2} 로 얻어져 5% 미만의 차이를 보이는 것으로 확인되었으며, 이로써 FERUM-MIDAS 해석의 정확성이 확인되었다.

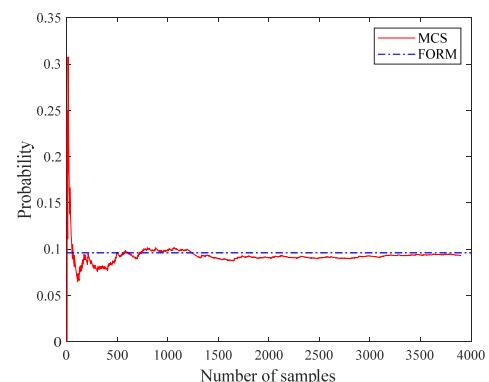


Fig. 6. Failure probabilities obtained from FORM and MCS with increasing number of samples

한편, 대표적인 신뢰성 기법인 MCS와 FORM은 다음과 같은 특징이 있다. MCS에서 추정된 파괴확률의 정확도 수준은 샘플 수(즉, 시뮬레이션 횟수)에 따라 크게 달라지는데, 특히 낮은 수준의 파괴확률을 계산하는데 필요 한 샘플의 수가 크고 그에 따라 필요한 구조해석 비용이

커서, 이런 경우에는 MCS를 활용해 파괴확률을 구하는 것이 매우 어렵다. 반면 FORM 해석의 경우 MCS와 비교해 적은 수의 구조 해석으로도 파괴확률을 계산할 수 있다는 장점이 있다.

3.2 FERUM-MIDAS 교량 적용 예제

본 연구에서는 FERUM-MIDAS 플랫폼을 활용하여 KL-510 활하중 모델[16]이 재하되는 교량 구조물에 대한 신뢰도 기반 안전성 평가를 수행하였다. 예제 교량은 도교로 지간 35m 4주형 단순 PSC-I형 거더교이며, Fig. 7에 대상 교량에 대해 구축된 MIDAS/CIVIL 모델을 나타내었다.

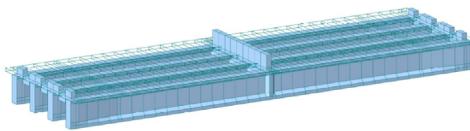


Fig. 7. Finite element (FE) model of the example bridge for MIDAS/CIVIL

본 예제 교량의 불확실성 요소로 저항(R) 부분에서는 텐더의 항복강도(f_{py})와 콘크리트의 압축강도(f_{ck})를 고려하였으며, 하중(L) 부분에서는 강재나 프리스트레스트 콘크리트 같은 공장 제작 부재의 자중(D_1), 현장타설 콘크리트 부재의 자중(D_2), 아스팔트 같은 포장하중(D_3), 비구조적 부착물의 하중(D_4), 다차로 재하 계수와 동적효과 [16]를 적용한 KL-510 활하중 모델 하중(LL)을 고려하였다. 확률변수에 대한 통계적 특성은 여러 문헌자료 [17-19]를 참고하였으며, Table 2에 요약되어 있다.

신뢰성 해석을 수행에서 구조물의 파괴를 판단할 한계 상태함수는 Eq. (8)처럼 PSC 거더의 휨 파괴에 대한 모

멘트 기반 함수로 정의하였다.

$$g = M_R - (M_D + M_L) < 0 \quad (8)$$

여기에서 M_R 은 해당 단면의 저항 벤딩모멘트, M_D 는 사하중에 의한 벤딩모멘트, M_L 은 활하중에 의한 벤딩모멘트를 각각 의미한다.

FERUM-MIDAS 구조신뢰성 해석 플랫폼에서 FORM 을 활용해 주어진 한계상태에 대한 구조물의 파괴확률을 계산하고, 그 결과를 Table. 3에 각 거더에 대해서 나타내었다. FORM을 활용하여 약 수십 회의 MIDAS/CIVIL 구조 해석을 통해 각 거더에 대한 신뢰도 지수를 계산하였으며, MCS는 필요한 샘플 및 구조 해석 수가 매우 큼에 따라 적용하지 않았다. Fig. 8은 AASHTO LRFD Bridge Design Specifications[20]에서 제시한 설계 수명 75년에 대한 강도 한계상태의 목표 신뢰도 지수 (target reliability index, β_T) 3.5(파괴확률 약 2.33×10^{-4})에 대해서 제안 플랫폼의 FORM 해석으로 계산된 신뢰도 지수를 각 거더별로 나타낸다. Table. 3 와 Fig. 8에서 확인되듯이 고려된 네 단면 모두에서 신뢰도 지수가 3.5를 상회하는 것으로 계산되었으며, 따라서 대상 교량은 KL-510 차량 하중이 작용할 때 휨 파괴에 대하여 충분히 안전한 것으로 판단된다.

Table 3. Reliability index and failure probability for example bridges calculated with FERUM-MIDAS

Girder	Reliability index	Failure probability
#1	6.1891	3.0257×10^{-10}
#2	6.8274	4.3244×10^{-12}
#3	6.9140	2.35573×10^{-12}
#4	6.3005	1.48299×10^{-10}

Table 2. Statistical properties of random variables for numerical example

Random variables (RVs)	Resistance		Load				KL-510, LL
	Tendon	Concrete	Dead			Live	
	Yield stress (MPa), f_{py}	Compressive strength (MPa), f_{ck}	Factory-made members (kN/m^3), D_1	Cast-in-place members (kN/m^3), D_2	Wearing surface (kN/m^3), D_3	Miscellaneous weight (kN/m^3), D_4	
Nominal values	1600	40	25	25	23	25	-
Bias factor	1.040	1.130	1.030	1.050	1.000	1.050	1.000
Coefficient of variation	0.025	0.060	0.080	0.100	0.250	0.100	0.200
Distribution type	Log-normal[17]	Normal[18]	Normal[17]	Normal[17]	Normal[17]	Normal[17]	Log-normal[19]

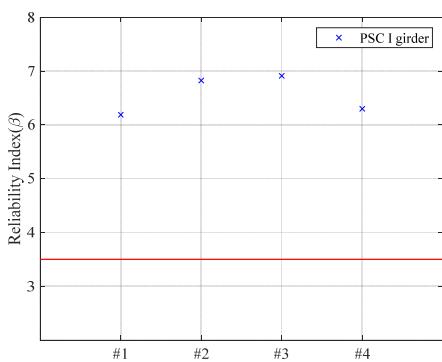


Fig. 8. Reliability index for each girder of the PSC I bridge

4. 결론

본 연구에서는 교량 구조물에 구조적 안전성을 평가할 수 있는 새로운 구조신뢰성 해석 플랫폼 FERUM-MIDAS를 제안하였다. 개발된 플랫폼에서는 신뢰성 해석 소프트웨어인 FERUM과 교량 구조물 전문 사용 소프트웨어인 MIDAS/CIVIL을 결합하여 상호 반복적인 입출력 데이터 교환을 통해서 구조신뢰성 해석을 수행한다. 또한, MIDAS/CIVIL의 GUI를 제어하고 원활한 구조신뢰성 해석을 수행하기 위하여 별도의 GUI 제어 모듈이 FERUM에 추가되었다.

제안 플랫폼인 FERUM-MIDAS는 FORM 해석과 MCS를 구조신뢰성 해석에 활용할 수 있으며, 간단한 프레임 구조물 예제에 적용, 해석 결과들을 비교하여 검증하였다. 프레임 구조물의 파괴확률은 FORM 해석 결과와 4,000개의 샘플을 사용한 MCS의 해석 결과의 차이가 5% 미만으로 본 플랫폼 해석의 신뢰성을 확보하였다. 또한, 본 연구에서는 FERUM-MIDAS를 PSC-I형 거더교에 적용해 FORM 해석을 수행하여 휨 파괴에 대한 거더들의 신뢰도 지수와 파괴확률을 성공적으로 도출하였다. 고려된 네 단면 모두 신뢰도 지수는 목표 신뢰도 지수 3.5(파괴확률 약 2.33×10^{-4})를 상회하는 것으로 계산되었으며, 따라서 대상 교량은 휨 파괴에 대하여 충분히 안전한 것으로 판단할 수 있었다.

본 연구에서 제안한 새로운 구조신뢰성 해석 플랫폼 FERUM-MIDAS를 통해 교량의 효과적인 신뢰도 기반 안전성 평가가 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] Y. S. Yang, Y. S. Seo, J. O. Lee, Structural Reliability Engineering, p.448, Seoul National University Press, 1999.
- [2] T. Haukaas, *Finite element reliability and sensitivity methods for performance-based engineering*, Ph.D dissertation, University of California, Berkeley, CA, USA, pp.85-133, 2003.
- [3] A. Der Kiureghian and R.L. Taylor, "Numerical methods in structural reliability", *Proc. Fourth International Conference on Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering*, Florence, Italy, pp. 769-784 June, 1983.
- [4] P.L. Liu, H.Z. Lin, A. Der Kiureghian, CalREL User Manual, Report No. UCB/SEMM-89/18, University of California, Berkeley, CA, USA, 1989.
- [5] T. Haukaas, A. Hahnel, B. Sudret, J. Song, and P. Franchini, FERUM, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, CA, USA, 2003 [cited 2020 Sep. 23], Available From: <http://projects.ce.berkeley.edu/ferum/>
- [6] SwRI. NESSUS (ver 9.6), Southwest Reserch Institute, 2011 [cited 2020 Sep. 23], Available From: <http://www.nessus.swri.org>
- [7] Y.-J. Lee, J. Song and E.J. Tuegel, "Finite element system reliability analysis of a wing torque box", Proc. of the 10th AIAA Nondeterministic Approaches Conference, Schaumburg, IL, April, 2008. DOI : <https://doi.org/10.2514/6.2008-1718>
- [8] W.H. Kang, Y.-J. Lee, J. Song and B. Gencturk, "Further development of matrix-based system reliability method and applications to structural systems", *Struct. Infrastruct. E.*, Vol.8, No.5, pp. 441-457, 2012.
- [9] H. Kim and S.-H. Sim, "Flood fragility analysis of bridge piers in consideration of debris impacts", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.17, No.5, pp.325-331, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.5.325>
- [10] Y.-J. Lee, & D.-S. Moon, "A new methodology of the development of seismic fragility curves", *Smart Structures and Systems*, Vol.14, No.5, 847-867, 2014. DOI: <https://doi.org/10.12989/ss.2014.14.5.847>
- [11] D.-S. Moon, Y.-J. Lee, & S. Lee, "Fragility analysis of space reinforced concrete frame structures with structural irregularity in plan", *Journal of Structural Engineering*, Vol.144, No.8, 04018096, 2018. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002092](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002092)
- [12] A. Der Kiureghian. First- and second-order reliability methods. chap.14, CRC press, Boca Raton, FL, USA, 2005.
- [13] R. E. Melchers & A. T. Beck, Structural reliability

- analysis and prediction, p.528 John wiley & sons, 2018.
- [14] A. Haldar, Recent developments in reliability-based civil engineering, p.277, World Scientific Publishing Company, Singapore, 2006.
- [15] D.-H. Beak, Y. Seon, & C.-H. Lee, "Design and Implementation of Event Handling in AWT for Java Virtual Machine GUI", *Proc. of the Korean Information Science Society Conference*, Korea, April, pp.94-96, 2003.
- [16] MLTM, Highway Bridge Design Code (Limit State Design Method), Korea Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, Seoul, 2015.
- [17] A.S. Nowak, Calibration of LRFD Bridge Design Code, NCHRP Report 368, Transportation Research Board, Washington D.C. pp.B1-B15, 1999.
- [18] I.-Y. Paik, C.-S. Shim, Y.-S. Chung, and H.-J. Sang, "Statistical Properties of Material Strength of Concrete, Re-Bar and Strand Used in Domestic Construction Site," *Journal of the Korea Concrete Institute*, vol. 23, no. 4, pp. 421-430, Aug. 2011.
DOI: <https://doi.org/10.4334/JKCI.2011.23.4.421>
- [19] S. H. Lee, Calibration of the load-resistance factors for the reliability-based design of cable-supported bridges, Ph.D dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea, pp.75-114, 2014.
- [20] AASHTO, AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials, 8th Edition, Washington, D.C., 2017.

이영주(Young-Joo Lee)

[정회원]



- 2006년 2월 : 서울대학교 지구환경시스템공학부 (토목공학석사)
- 2012년 5월 : Univ. of Illinois, Urbana-Champaign (토목공학 박사)
- 2012년 6월 ~ 2013년 5월 : 울산과학기술원 도시환경공학부 연구조교수
- 2013년 6월 ~ 2018년 8월 : 울산과학기술원 도시환경공학부 조교수
- 2018년 9월 ~ 현재 : 울산과학기술원 도시환경공학부 부교수

〈관심분야〉

구조공학, 신뢰성공학, 교량공학

이승준(Seungjun Lee)

[정회원]



- 2017년 8월 : 부산대학교 사회환경시스템공학부 (토목공학학사)
- 2018년 10월 ~ 2019년 8월 : 울산과학기술원 도시환경공학부 학사후연구원
- 2019년 9월 ~ 현재 : 울산과학기술원 도시환경공학부 석·박사 통합과정

〈관심분야〉

구조공학, 신뢰성공학