

# PSC Beam교의 실측실험을 반영한 한계상태설계법 기반 교량 평가법 적용 분석

김경현<sup>1</sup>, 유민선<sup>2</sup>, 백인열<sup>3</sup>, 신수봉<sup>4\*</sup>

## Analysis on Application of Limit State Design Method for Bridge Evaluation Considering PSC Beam Bridge Experiment Results

Kyunghyun Kim<sup>1</sup>, Minsun Yoo<sup>2</sup>, Inyeol Paik<sup>3</sup>, Soobong Shin<sup>4\*</sup>

**Abstract:** This study analyzes the applicability of limit state design method on bridge evaluation by considering the experiment of the existing bridge. The test strength of the member is obtained from the PSC beam bridge experiment. The test strength is compared with the calculated strength obtained from the statistical characteristics of material test strength and the two values are almost the same. The response modification factor and dynamic impact factor are obtained from the vehicle loading test. The rating factor is calculated by applying limit state design method as well as current evaluation method and the results are compared. The reliability index of the test bridge is calculated by using the statistical properties of the member strength obtained from material test and simulation. When the statistical properties of the PSC beam tested in this study are applied, the reliability index with a larger value was obtained than the reliability index obtained with the statistical properties of the design code.

**Keywords:** Limit state design method, Bridge evaluation method, Actual girder test, Rating factor, Reliability index

### 1. 서 론

현재 국내 도로교량의 설계에 적용되는 도로교설계기준(한계상태설계법)(2018)(Korean highway bridge design code-limit state design, KBDC-LSD)은 국제 수준의 설계기술을 확보하기 위하여 2012년에 제정되었으며, 3년간의 유예기간을 거쳐서 2015년부터 기존 도로교설계기준(2010)(Korean highway bridge design code, KHBDC)을 대체하여 적용되고 있다. 또한 건설기준 코드체계 전환에 따라 유일한 도로교설계기준(한계상태설계법)으로 KDS 24 00 00에 코드화되어 있다.

현재 국내 공용 중인 교량에 대한 평가법도 현행 도로교설계기준(한계상태설계법)과 상응하도록 일관성 있는 개념을 적용하는 것이 필요하다. 현재 공용 중인 교량에 가해지는 활하중은 현재의 교통을 고려해야 하며, 구조물의 거동 예측을 위한 최신 기법을 적용하고 있는 새로운 설계기준을 적용하여 평가를 수행하는 것이 필요하다.

새로 제정된 설계기준에 상응하도록 평가기준을 제정한 대표적인 사례로 미국 도로교 기준을 예로 들 수 있다. 미국에서는 신뢰도기반 하중저항계수 설계법인 AASHTO LRFD (1998)(Load and resistance factor design)의 제정에 따라 곧 이어 대대적인 연구를 수행하면서 새로운 설계법과 일관된 개념을 적용하는 평가법인 AASHTO LRFR(2003)(Load and resistance factor rating) 개발하였으며, 몇 차례 개정을 통하여 기존 평가법과 통합하여 Manual for bridge evaluation (2010) (이하 MBE)를 제정한 후 정기적인 개정을 통하여 현재까지 운영하고 있다.

이 논문에서는 국내 기존 교량 내하성능 평가법에 한계상태설계법을 도입하기 위한 연구의 일환으로, 공용 중인 교량에 대한 실증실험 결과를 반영하여 교량 안전성 평가를 수행하고 새로운 평가법의 적용성 분석을 수행하였다. 국내 공용 중인 교량의 구조물 거동을 예측하기 위하여, 노후화된 실증 교량을 철거한 후에 실험실(명지대학교 하이브리드 구조실험실)에서 구조성능을 분석하고자 실증실험이 수행되었다. 수행된 실증실험으로는 철거 전 교량에 대한 재하시험과 철거 후 실증 거더에 대한 구조성능시험 및 콘크리트와 강재에 대한 재료강도 시험이다.

이 논문에서는 노후화된 교량을 대상으로 수행된 실험 결과 데이터를 분석하여, 한계상태설계법을 기존 교량의 내하성능 평가법에 적용하여 분석 과정을 제시하였다. 공용 중인

<sup>1</sup>정회원, 가천대학교 박사과정

<sup>2</sup>정회원, 가천대학교 석사과정

<sup>3</sup>정회원, 가천대학교 토목환경공학과 교수

<sup>4</sup>정회원, 인하대학교 사회인프라공학과 교수

\*Corresponding author: sbshin@inha.ac.kr

Department of Civil Engineering, Rm 2S-304, Inha University, 100 Inha-ro, Nam-gu, Incheon 22212, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2022년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2022년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

교량의 내하성능 평가는 교량에 작용하는 하중에 대한 교량의 현 구조성능의 지표를 나타내는 내하율로 산정하여 충분한 안전율을 확보하는 지 여부로 판단된다. 국내 노후화된 교량을 대상으로 수행된 실험으로부터 교량의 구조성능을 확인하여 수식으로 산정한 값과 비교하며, 설계기준과 동일한 통계 및 확률론적 방법을 적용하여 교량의 평가 안전율을 분석하였다.

이를 위하여 모든 공용 중인 교량에 적용하기 위하여 한계상태설계법의 개념에 따라 교량의 단면 및 구성 재료, 즉 설계변수의 변동성을 고려한 저항강도로 비교해야 할 필요가 있다. 이에 따라 대상 실증교량의 설계 변수에 대한 실측 및 실험을 통하여 수집된 데이터로부터 추정된 통계특성을 적용하여 시뮬레이션으로 산정된 교량의 평균 저항강도와 교량의 실제 소요강도를 비교하여 예측식을 검증하였다. 이와 같은 과정으로 실제 소요강도로부터 검증된 실증교량의 저항강도를 적용하여 한계상태설계법 기반 교량 평가법에 대한 내하율을 산정하였다.

또한 한계상태설계법 기반 교량 내하성능 평가법의 적용성을 분석하기 위하여, 교량의 설계 변수 통계특성을 적용하여 추정된 저항강도 통계특성을 적용한 신뢰도지수와 교량 설계기준 개발에 적용되었던 통계특성으로 산정한 신뢰도 지수를 비교하였다.

## 2. 내하력 평가를 위한 하중효과 분석

### 2.1 교량 내하력 평가 산정식

국내 공용 중인 교량을 평가하기 위한 지침(2019)에서는 기존 설계법인 강도설계법과 허용응력설계법을 기반으로 교량의 내하성능을 평가하도록 제시하고 있다. 이 연구에서는 통계 및 확률 이론을 기반으로 제정된 현행 도로교설계기준에 상응하도록 국내 교량 평가지침에도 한계상태설계법 기반 내하력 평가법을 추가하기 위한 연구를 수행하였다. 따라서 기존 교량 평가지침에서 적용하는 교량의 내하성능을 나타내는 내하율에 대하여, 현행 도로교설계기준의 하중 및 저항계수를 반영할 수 있는 산정식을 제시하였다.

식 (1)은 기존 교량 평가법에 적용하고 있는 내하율 산정식이고, 식 (2)는 본 연구에서 제안하는 한계상태설계법 기반 내하율 산정 식이며 이는 MBE(2018)와 같은 형식이다.

$$RF = \frac{\phi R - \gamma_D(D)}{\gamma_{LL}(1 + I)} \quad (1)$$

$$RF = \frac{R_A - \gamma_{DC}(DC) - \gamma_{DW}(DW)}{\gamma_{LL}(LL)(1 + IM)} \quad (2)$$

여기서,  $\phi$ 는 저항계수,  $R$ 는 공칭저항강도,  $R_A$ 는 재료계수가 적용된 부재의 구조성능, 즉 평가저항강도를 나타내며,  $\gamma_X$ 는 설계기준에서 제시하는 하중  $X$ 에 대한 하중계수이다. 따라서 이 논문에는 기존 교량의 평가법에 대한 내하율과 한계상태설계법 기반으로 분석한 내하율을 비교하기 위하여, 위의 두 식을 적용하여 각 설계법 기반의 내하율을 산정하여 비교하였다.

### 2.2 설계기준별 설계활하중 비교

설계기준이 한계상태설계법 기반으로 제정될 때 설계활하중도 최근 통행 중인 차량의 운행 특성을 반영하여 개발되었다. 기존 도로교설계기준의 설계활하중은 도로교량의 등급에 따라 설계 하중 크기가 결정되며, 1등급 교량 설계 시 적용하는 설계활하중은 Fig. 1(a)와 1(b)에서 보여주는 DB-24와 DL-24 하중 중 지배적인 하중(이하 DB 하중)을 적용한다. 현행 도로교설계기준 한계상태설계법의 설계활하중 KL-510은 통행량 증가에 따른 복수 차량의 연행 효과를 고려하여 표준 트럭하중과 표준차로하중을 통합한 하중(이하 KL 하중)을 Fig. 1(c)와 같이 적용하고 있다.

현재 대부분의 공용 중인 교량은 설계활하중으로 DB 하중을 설계되었으며, 평가기법을 한계상태설계법 기반으로 개발하기 위하여 DB 하중과 현행 도로교설계기준의 설계활하중인 KL 하중에 대한 교량에 작용되는 하중효과 비교가 필요하다. 경간 길이에 따라 대상 교량에 지배적인 설계활하중은 상이할 수 있으며, 이 논문에는 중단 경간인 PSC Beam 예제 교량에 대하여 각 설계활하중을 재하하여 산정된 하중효과를 비교하였다.

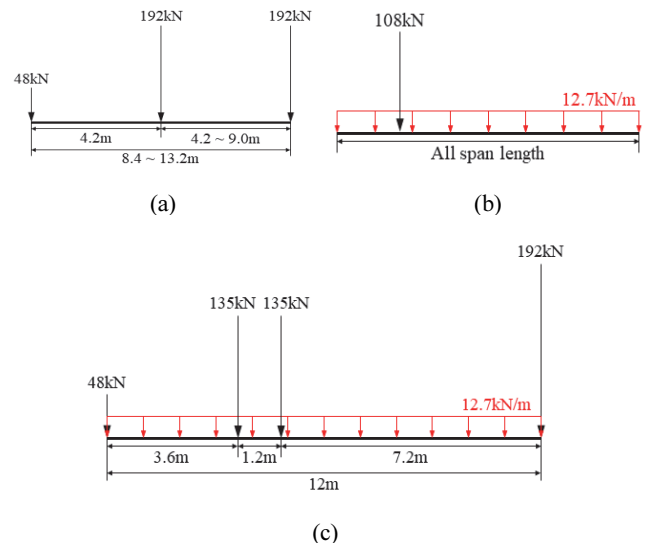


Fig. 1 Design live load model : (a) DB-24 of KHBDC; (b) DL-24 of KHBDC; (c) KL-510 of KBDC-LSD

### 2.3 실 교량 하중효과 분석

이 연구의 대상 교량은 Photo 1과 같이 경간 길이는 26.3m이며, DB-18로 설계된 PSC Beam 교량이다. 구조해석에 필요한 단면 및 재료 제원은 현장에서 실측을 통하여 측정하였다. 설계에 적용되는 단면치수의 공칭 값은 원칙적으로 설계 도면에서 보여주는 값이나, 해당 교량이 준공된 지 46년으로 설계 도면에 대한 수집이 어려워 이 교량을 진단한 회사에서도 추정된 값을 적용하였다. 이에 현장 실측을 통하여 측정된 제원과 진단사에서 추정된 제원을 비교하였으며, 주요 단면치수(부재 전체높이, 슬래브 두께, 상하부 플랜지 폭, 복부 폭 등)가 평균적으로 0.992로 동등한 수준을 보였다. 따라서 이 연구에서는 현장에서 측정된 값을 공칭값으로 적용하였으며, Fig. 2에 대상 교량의 중앙부 및 지점부 단면을 나타내었다.

Fig. 2에서 보여주는 바닥판의 폭은 실증교량의 전체 유효 폭이 아닌 실험을 수행하기 위하여 철거한 실제 부재를 측정된 값을 나타낸다. 이에 따라 실험부재 분석 시에는 바닥판 폭으로 실측값인 1,020 mm를 적용하였으며, 교량 전체 거더에 대한 분석을 수행하는 경우에는 유효 폭을 설계식에서 제시하는 산정 식에 따라 계산하여 구조해석에 적용하였다.

실증교량은 경간 길이가 26.3m인 PSC Beam 교량으로 유한요소해석을 통한 기존 설계활하중(DB 하중)과 현행 설계



Photo 1 PSC beam girder bridge for verification

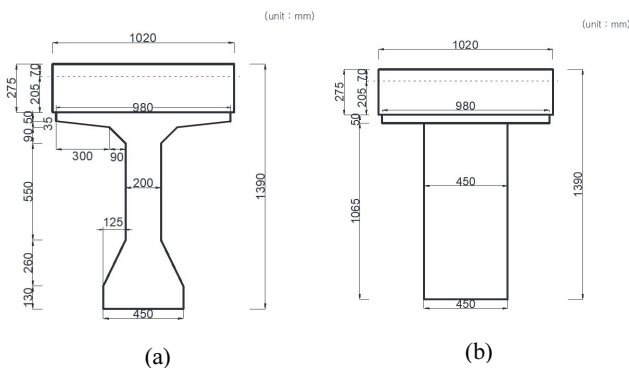


Fig. 2 Section of PSC beam girder for evaluation : (a) center section ; (b) support section

활하중(KL 하중)을 비교하기 위하여, 구조해석프로그램 (Midas-civil)을 이용한 모델링으로부터 구조물에 작용하는 하중효과를 해석하였다.

대상 교량은 가로보(Cross beam)가 양끝 지점부에만 배치되어 있으므로, 3D Frame 요소로 모델링하면 교량 중앙부에서는 활하중에 의한 횡분배가 적용되지 않은 문제가 발생된다. 이에 따라 3D Plate-Frame 요소(이하 3D P-F)로 모델링을 수행하였으며, Fig. 3에는 해석 결과로 나오는 Plate요소 및 Frame 요소에 작용하는 축력 및 모멘트로부터 합성단면에 대한 모멘트의 종합하는 방법을 나타내었다. 여기서 아래 첨자  $c$ 는 합성단면,  $s$ 는 바닥판,  $g$ 는 PSC 거더를 지칭하며, 각 요소  $X$ 에 대하여  $C_X$ 는 도심(Centroid),  $F_X$ 는 축력,  $d_X$ 는 합성단면 도심까지의 거리,  $M_X$ 는 모멘트를 나타낸다. 구조해석 프로그램의 3D P-F으로 수행된 합성단면 모델링에서 바닥판과 거더 자중에 의한 하중효과는 합성전 거더에서 모멘트로 해석된다. 반면 활하중과 2차 고정하중에 의한 하중효과는 각 요소에 축력과 모멘트가 발생되어, 최종 합성단면에 작용하는 모멘트는 각 요소의 모멘트뿐만 아니라 축력으로부터 발생하는 모멘트까지 고려해야 한다. Fig.4에는 실증교량의 3D

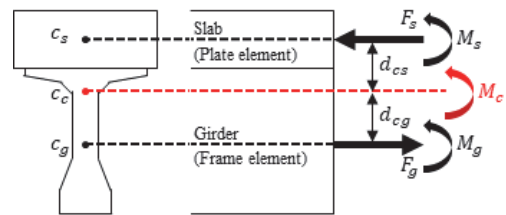


Fig. 3 Summation of moment acting on composite section

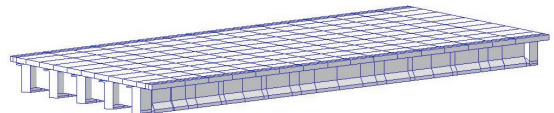


Fig. 4 3D P-F Modeling of a PSC beam bridge for verification

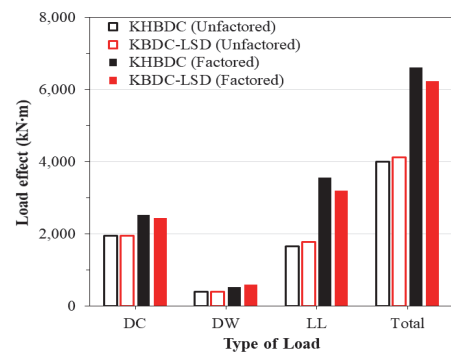


Fig. 5 Comparison of unfactored and factored load effects of design codes

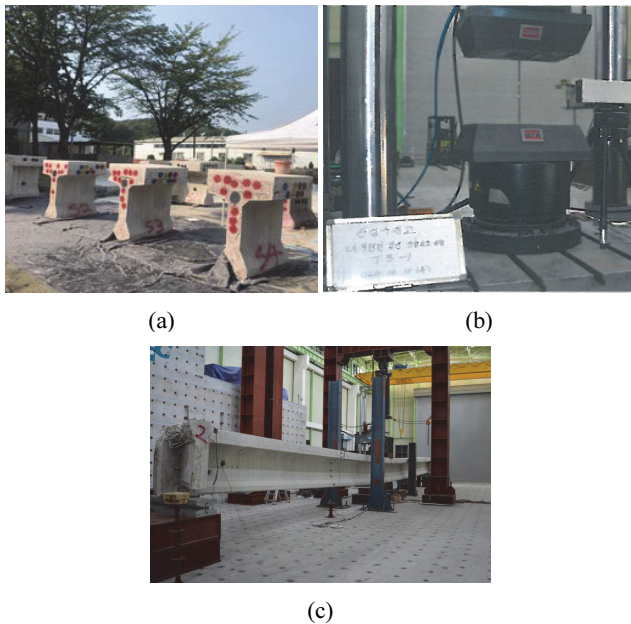
P-F 모델링을 나타내었으며, 교량에 발생하는 각 하중에 대한 모멘트효과를 해석하여 Fig. 5에 도시하였다.

총 비계수하중효과는 KBDC-LSD가 KHBDC 보다 2.9% 더 큰 값을 보여주고 있으나, 각 설계기준에서 제시하는 하중계수를 고려한 총 계수하중효과는 5.9% 작은 수준을 보이고 있다. 이는 KHBDC 및 KBDC-LSD에서 제시하는 하중계수는 각 1.30D+2.15L, 1.25DC+1.50DW+1.80LL로 비계수하중효과의 경우 KBDC-LSD가 크지만 KHBDC의 고정하중(DC) 계수와 활하중(LL)계수가 더 크기 때문에, 계수하중효과의 경우 KHBDC가 큰 수준을 보인다.

### 3. 교량 실증실험을 통한 평가 저항강도 분석

#### 3.1 재료 시험값의 통계특성 추정

이 연구에서는 확률과 통계 기반인 한계상태설계법과 동일한 개념을 적용하여 설계변수의 변동성을 고려한 교량 평가



**Photo 2** Material strength test specimen obtained from PSC beam : (a) compression strength of concrete; (b) tensile strength of prestressing steel (c) structural performance test of PSC Beam

**Table 1** Estimation of statistical properties for design parameters

Parameter	No. of specimen	Nominal		$\mu$	$\sigma$	$\lambda$	$\delta$			
		Design	Test				Test	KBDC-LSD		
Compression strength of concrete (MPa)	Girder	45	35.00	25.73	38.03	7.50	1.087	1.180	0.197	0.120
	Slab	39	24.00	23.41	44.35	12.77	1.848	1.180	0.288	0.120
Tensile strength of tendon (MPa)		18	1500.00	1637.25	1691.89	33.32	1.128	1.040	0.020	0.050
Area of tendon (mm <sup>2</sup> )		18	50.27	49.40	49.99	0.359	0.994	1.000	0.007	0.040

방법을 검증한다. PSC Beam 교량의 휨 저항강도는 주로 긴장재의 인장강도 및 콘크리트의 압축강도 등 재료의 강도에 영향을 많이 받는다. 따라서 이 연구에서는 Photo 2(a)와 (b)에서 보여주는 것과 같이 실증교량의 긴장재에 대한 인장강도와 콘크리트 코어의 압축강도 실험으로부터 측정된 재료 강도 실험값의 통계특성을 추정하였다. 재료 시험은 Photo 2(c)의 대상교량 거더 실증실험 이후에, 거더를 분해하여 긴장재와 콘크리트 코어를 채취하여 수행되었다.

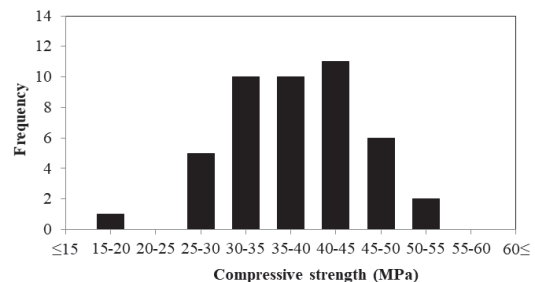
Fig. 6에는 대표적으로 데이터 수가 가장 많은 PSC 거더 콘크리트 압축강도의 확률분포를 나타내었으며, 다른 변수에 대한 확률분포는 지면 제약 상 생략한다. Fig. 6에 보인 바와 같이 콘크리트 거더 압축강도는 정규분포를 보였으며, 다른 변수들도 정규분포를 보였다.

이 연구에서는 재료 강도의 시험값을 적용하는 경우와 재료강도의 공칭값을 적용하는 경우에 각각 저항강도를 구하여 결과를 비교하였다. 시험값을 적용하는 경우의 재료강도의 기준값  $f_k$ 은 현행 도로교설계기준(한계상태설계법)에 따라 시험으로 구한 자료의 확률분포곡선 상의 특정한 분위수에 해당하는 값으로 식 (3)을 적용하여 구하였다.

$$f_k = f_m - ks \quad (3)$$

여기서  $f_m$ 은 재료강도의 평균값,  $s$ 는 표준편차이고, 계수  $k$ 는 하위 5%에 해당하는 1.64로 채택하도록 제시하고 있다.

Table 1에는 대상교량 재료 시험값으로부터 추정된 공칭



**Fig. 6** Probability distribution of compressive strength of PSC girder concrete

값과 통계특성을, KBDC-LSD 개발에 적용한 통계특성과 비교하여 나타내었다. 설계변수의 통계특성은 주로 변수의 공칭 값에 대한 평균 지표를 나타내는 편심계수(Bias factor,  $\lambda$ )와 평균에 대한 표준편차의 지표를 나타내는 변동계수(Coefficient of variation,  $\delta$ )로 표시한다.

KBDC-LSD 개발에 적용된 통계특성에 비교하여, 이 시험의 콘크리트 압축강도 통계특성은 거더의 편심계수는 낮고 변동계수는 높으며, 바닥판의 편심계수와 변동계수는 모두 높았다. 긴장재 인장강도 통계특성의 경우에는 편심계수가 높고 변동계수는 낮은 수준을 보인다. 일반적으로 저항강도에 대한 통계특성은 편심계수가 높을수록, 변동계수가 낮을수록 신뢰도분석을 통한 신뢰도지수는 높게 산정된다. 따라서 콘크리트 압축강도의 경우 변동계수도 높은 수준이나 PSC Beam의 휨강도는 긴장재 인장강도에 대한 민감도가 높으므로, 실증교량의 신뢰도지수는 설계기준 개발에 적용된 통계특성을 적용한 신뢰도지수보다 높을 것으로 예측된다.

### 3.2 부재의 실증 저항강도 분석

이 연구에서는 재료강도의 통계특성을 고려하여 산정한

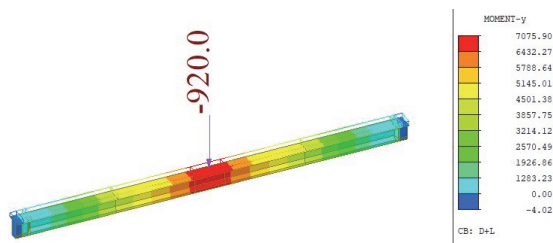


Fig. 7 Modeling of PSC test beam

PSC 빔 부재의 저항 강도와 부재의 구조성능 실험을 통하여 얻은 시험 강도를 비교하였다. 부재의 구조성능 실험은 실내 실험실에서 Photo 2(c)과 같이 수행되었으며, 지점부에서 12.6m 떨어진 중앙부 위치에서 하중이 재하되었다. 실험 부재에서는 920kN의 하중에 도달하였을 때 상부슬래브에 압축균열이 발생되어 휨강도에 도달하였다. 시험 하중에 추가하여 부재의 유한요소 모델링을 통하여 얻은 자중에 의한 하중효과를 종합하여 부재의 최대 시험 강도를 구하였다. Fig. 7에는 최대 하중이 재하된 실험부재의 모델링을 보여주며, Table 2에는 실험부재의 자중을 포함하여 실험 부재에 발생하는 각 하중에 의한 휨모멘트를 나타내었다. 실험부재에 재하되는 최대 하중에 의한 휨모멘트는 5,809kN·m이며, 자중에 의한 휨모멘트까지 고려한 실험부재의 휨강도는 7,076kN·m이다.

설계기준에 따라 산정하는 실험부재의 저항강도는 변형률 적합조건을 적용하는 방법으로 계산하였다. 또한 설계변수의 변동성을 고려하기 위하여, Monte-Carlo 시뮬레이션 기반으로 개발된 강도 해석프로그램으로부터 부재강도의 평균 저항강도를 계산하였다. Fig. 8에는 Monte-Carlo 시뮬레이션 기반 PSC Beam 교량의 휨 저항강도 해석 프로그램을 이용하여 실험부재의 공칭 저항강도와 평균 저항강도의 산정 결과를 보여준다. 재료 공칭값을 사용하여 구한 보의 공칭 휨강도는

Table 2 Resistance strength of test beam by combining dead load

Component	Positive moment (kN · m)			
	Test load (P=920kN)	Girder	Slab	Total
Member	5,809	729.77	537.55	7075.90

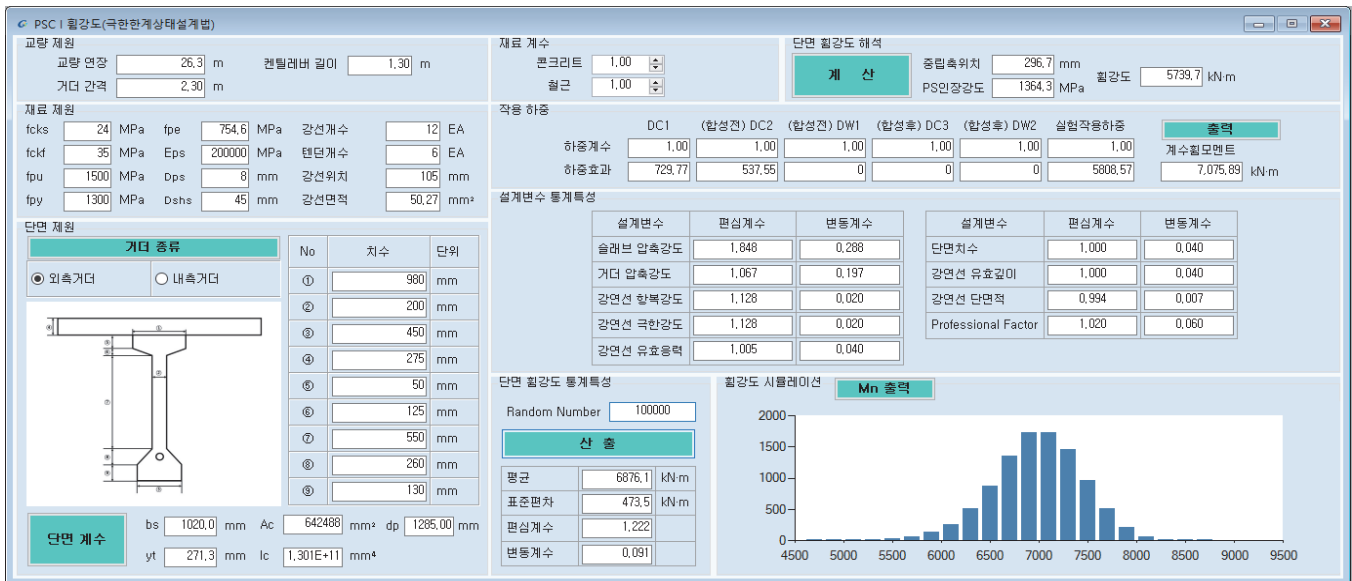


Fig. 8 Calculation of flexural strength of PSC beam bridge

5,740kNm이며, 부재 휨 실험 강도에 비하여 81.1%이다. 또한 재료 시험 통계특성을 적용하여 100,000번의 시뮬레이션으로부터 산정된 부재의 평균 저항강도는 6,876kNm으로 부재 휨 실험에 비하여 97.2%로 매우 비슷하였다. 실험부재를 대상으로 수행한 재료 강도 실험과 구조성능 실험의 평가 저항강도에 대한 결과는 동등한 수준을 보였다. 이에 따라 재료 시험값의 통계특성을 교량 평가 저항강도에 적용하여, 신뢰도 지수 산정을 위한 저항강도 통계특성을 추정하였다.

### 3.3 평가 저항강도 및 통계특성 산정

한계상태설계법 기반 평가 내하율 산정과 신뢰도지수 산정 과정에 실증교량의 실측실험을 반영하기 위하여, 실험결과를 적용하여 평가 저항강도를 산정하고 이로부터 저항강도 통계특성을 추정하였다.

PSC Beam의 설계 저항강도는 KHBDC의 경우 공칭 저항강도에 부재 강도감소계수를 적용하여 산정된다. KBDC-LSD의 경우에는 콘크리트 및 강재 등 재료강도에 각각의 재료계수를 곱하여 산정된다. 두 설계법에서 제시하는 휨 저항강도의 산정 과정은 기본적으로 동일하며, 이 논문에서는 저항강도의 정밀한 해석을 위하여 변형률 적합조건에 의한 해석 방법을 적용하였다.

Table 3에는 KHBDC 및 KBDC-LSD를 기반으로 산정한 공칭 저항강도  $M_n$ 와 설계 저항강도  $M_d$ , 100,000번의 시뮬레이션을 통하여 산정된 평균 휨 저항강도  $M_{mean}$ 와 통계특성을 보여준다. KHBDC의 설계 저항강도는 공칭 저항강도에 PSC Beam 휨에 대한 강도감소계수인 0.85를 적용하여 산정되었으며, KBDC-LSD의 설계 저항강도는 산정 식에서 콘크리트 압축강도 및 긴장재의 인장강도에 재료계수로 각 0.65와 0.90을 적용하여 산정되었다. 또한 추정된 설계변수 통계특성을 적용하여 시뮬레이션으로 산정된 편심계수는 1.176, 변동계수는 0.081으로, 설계기준에서 일반적으로 적용되는 저항강도의 편심계수인 1.056, 변동계수인 0.076보다 편심계수는 높고 변동계수는 낮은 수준을 보인다(Paik et al., 2009). 따라서 실증 교량의 신뢰도지수는 설계기준 개발에 적용된 통계특성으로 산정한 신뢰도지수보다 높을 것으로 예측된다.

**Table 3** Flexural strength of PSC beam

Design code	Flexural strength (kN · m)			Statistical properties	
	$M_n$	$M_d$	$M_{mean}$	$\lambda$	$\delta$
KHBDC	6,193	5,264	-	-	-
KBDC-LSD		5,294	7,140	1.176	0.081

## 4. 교량 내하율 및 신뢰도 분석

### 4.1 재하시험을 통한 응답보정계수 및 동적충격계수

이 연구에서는 실증교량에 차량 재하시험 결과로부터 응답보정계수와 동적충격계수를 산정하였다. 이를 위하여 정적 및 동적 재하시험으로부터 동일한 위치에서 차량 종류 및 총중량이 동일한 차량을 재하하였을 때 측정된 연직 방향 처짐량을 이용하였다. 시험차량은 Table 4에서 보여주는 제원과 같이 3축(전륜 1축-단륜, 후륜 2축-복륜)으로 구성된 총 중량 264.60kN의 덤프트럭이다.

실증교량에 시험차량을 정적재하 하였을 때 실측 처짐량  $\delta_m$ 에 대한 유한요소해석으로 구한 처짐량  $\delta_a$ 의 비율로 응답보정계수  $K_s$ 를 계산하였다. Table 5에는 시험차량의 재하위치에 따른 실측 및 해석 처짐량과 응답보정계수를 식 (4)으로부터 계산하여 나타내었으며, Fig. 9에는 각 거더에 발생하는 처짐량을 그래프로 도시하였다.

$$K_s = \frac{\delta_a}{\delta_m} \quad (4)$$

평가 내하율에 고려되는 응답보정계수는 최대 처짐이 발생하는 LC의 값을 적용한다. 차량이 LC1에 재하되는 경우 최대 처짐은 G5에서 발생되고 LC 2에 재하경우에는 G1에서 최대 처짐이 발생한다. 이 중 LC2의 G1 실측 처짐량이 최대이므로, 이 경우 응답보정계수인 0.994로 내하율 계산에 적용하였다.

또한 교량 평가 시 활하중효과에 고려되는 동적충격계수는

**Table 4** Loading configurations of test truck

Component	Test truck			Total
	1 <sup>st</sup> axle	2 <sup>nd</sup> axle	3 <sup>rd</sup> axle	
Axle load (kN)	74.30	95.15	95.15	264.60
Tread (m)	2.050	1.850	1.850	-
Wheel spacing (m)		3.225	1.300	4.525

**Table 5** Response modification factor  $K_s$  from static load test

Girder	Displacement (mm)				$K_s$	
	LC 1		LC 2			
	$\delta_a$	$\delta_m$	$\delta_a$	$\delta_m$	LC 1	LC 2
G1	-0.068	-0.060	-7.222	-7.264	1.132	0.994
G2	-1.019	-0.923	-5.001	-4.921	1.104	1.018
G3	-2.638	-2.550	-2.554	-2.399	1.034	1.065
G4	-5.161	-5.194	-0.998	-0.869	0.994	1.148
G5	-7.434	-7.254	-0.080	-0.120	1.025	0.669

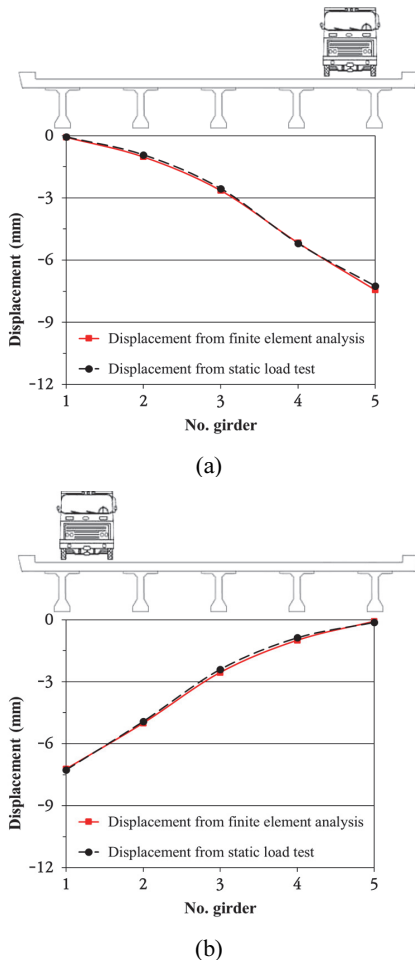


Fig. 9 Comparison of displacement obtained from static load test and finite element analysis: (a) LC 1; (b) LC 2

Table 6 Dynamic impact factor of measured data and design code

Component		Speed of test truck		
		V=10km/h	V=30km/h	V=50km/h
Deflection (mm)	Dynamic	-6.773	-6.651	-7.168
	Static		-6.540	
Dynamic impact factor		0.036	0.017	0.096
KHBDC		0.226		
KBDC-LSD		0.25		

Table 7 Comparison of rating factor based on KHBDC and KBDC-LSD

Evaluation method	Load effect (kN · m)								Flexural strength (kN · m)		RF
	Unfactored				Factored				$M_n$	$M_d$	
	DC	DW	LL	Total	DC	DW	LL	Total			
KHBDC	1,950	401	1,660	4,011	2,535	521	3,569	6,625	6,193	5,264	0.615
KBDC-LSD	1,950	401	1,776	4,127	2,438	602	3,197	6,236	6,193	5,294	0.701
Test data	1,950	401	1,557	3,908	2,438	602	2,803	5,843	6,549	5,601	0.908

정적 및 동적재하시험으로부터 측정된 처짐량으로 계산된다. 일반적으로 동적충격계수는 교량에 재하되는 차량이 주행할 때 모든 거더에 발생하는 동적충격비율을 계산하여 이 중 최대값으로 결정한다. 다만 동적충격계수는 대상 거더에 작용되는 최대 활하중효과에 곱해지는 것이므로, 먼 거더에 작용되는 활하중으로 인한 작은 변위로 구한 동적충격계수는 의미가 없다. 따라서 이 연구에서는 재하차량이 직접적으로 영향을 주는 거더, 즉 거더의 최대 처짐이 발생하는 경우의 처짐량 측정값을 이용하여 동적충격계수를 계산하였다. 또한 정적 처짐량은 정적 재하시험으로 측정된 값을 이용하였다.

Table 6에는 차량 재하시험을 통하여 측정된 차량 속도 별 동적재하시험에서 측정된 처짐량(Dynamic deflection,  $\delta_d$ )과 정적재하시험에서 측정된 처짐량(Static deflection,  $\delta_s$ )을 나타내었으며, 식 (5)으로부터 동적충격계수(Dynamic impact factor,  $IM$ )를 계산한 값을 나타내었다.

$$IM = \frac{\delta_d}{\delta_s} - 1 \quad (5)$$

대상 교량의 재하시험을 통하여 측정된 처짐에 대한 최대 충격계수는 시속 50km/h일 때 0.096으로 산정되었으며, 기존 도로교설계기준의 충격계수인 0.226과 현행 도로교설계기준에서 제시하는 충격계수인 0.25보다 낮은 수준을 보인다. 이 연구에서는 실측실험을 반영하여 교량 평가법의 적용성을 검토하기 위하여, 계산된 동적충격계수를 적용하였을 경우와 안전 측으로 각 설계기준에서 제시하는 충격계수를 제시하였을 경우의 내하율을 계산하여 비교하였다.

## 4.2 교량 평가 내하율 분석

기존 설계기준을 적용하는 교량 평가법과 현행 한계상태설계법에 상응하는 평가법을 비교하기 위하여, 각 평가법을 적용하여 산정한 하중효과와 저항강도로부터 각각의 내하율을 계산하였다. Table 7에는 실증교량에 대하여 발생하는 하중효과와 저항강도, 응답보정계수를 고려하여 계산된 내하율을 나타내었다. KHBDC의 내하율은 0.619로 응답보정계수를 고

려하면 0.615이며, KBDC-LSD의 내하율은 0.705로 응답보정 계수를 고려하면 0.701이 된다. 이에 따라 KBDC-LSD 기반 평가법으로 산정된 내하율은 KHBDC 기반 교량 평가의 내하율보다 14% 크게 산정되었다.

또한 실측실험으로부터 얻은 재료 강도의 공칭 실험값과 동적충격계수를 반영하여, 교량의 평가 내하율을 계산하였다. 실측실험을 반영한 평가 내하율은 설계기준보다 소요강도가 낮고 저항강도가 큰 값으로 계산되었으므로, 교량의 평가 내하율은 0.908로 설계기준 기반 평가 내하율보다 높게 산정되었다. 따라서 한계상태설계법 기반 교량 평가 내하율은 기존 설계법에 기반한 내하율보다 조금 크게 나왔으며, 이 연구의 대상 PSC beam 교량의 실측 데이터를 적용한 내하율보다 안전 측의 값을 주었다.

### 4.3 신뢰도분석을 통한 교량 평가법 적용 분석

실교량의 구조성능을 신뢰도분석하기 위한 한계상태함수는 식 (6)과 같이 정의된다.

$$g = S - DC - DW - LL \quad (6)$$

여기서  $g$ 는 저항 및 하중효과에 의한 확률변수  $S$ ,  $DC$ ,  $DW$ ,  $LL$ 을 포함한 한계상태함수이며,  $S$ 는 강도에 의한 확률변수,  $DC$ ,  $DW$ ,  $LL$ 은 설계기준에서 제시하는 각 하중에 의한 확률변수로 모든 확률변수는 통계적으로 독립이다. 신뢰도를 해석하기 위한 확률변수의 통계특성 및 확률분포는 Table 8에 정리되어 있으며, 하중에 의한 통계특성은 원칙적으로 도로교설계기준(한계상태설계법)의 코드 켈리브레이션에 적용되고 있는 값을 이용한다(Nowak, 1999; Hwang, 2008). PSC 부재의 저항강도에 의한 통계특성은 이 연구에서 분석한 실증교량 시험 데이터로부터 추정된 값과 설계기준 개발에 적용된 통계특성을 이용한다(Paik et al., 2009).

식 (3)에서 제시하는 한계상태함수에 대한 신뢰도지수는 개선된 일계이차모멘트법에 의하여 정의되는 식 (7)과 같은 최적화 문제로부터 계산할 수 있다(Haldar and Mahadevan, 1995).

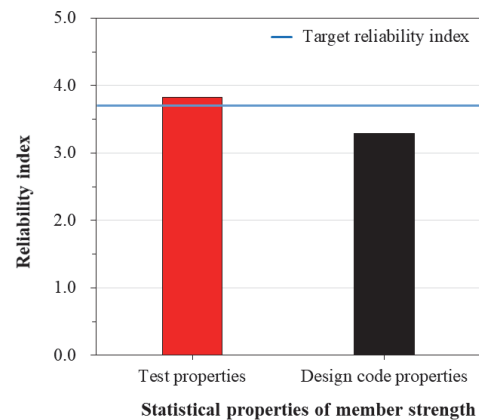
**Table 8** Statistical properties of random variables

Random variable	Statistical properties		Distribution type	
	$\lambda$	$\delta$		
Load effect	$DC$	1.030	0.080	Normal
	$DW$	1.000	0.250	Normal
	$LL$	1.000	0.200	Gumbel
Member strength	KBDC-LSD	1.056	0.073	Lognormal
	Test	1.176	0.081	Lognormal

$$\text{Min} \frac{\beta^2}{\bar{X}} = \|\bar{X}\|_2^2 \quad \text{subject to } \bar{g}(\bar{X}) = 0 \quad (7)$$

여기서  $\beta$ 는 신뢰도지수,  $\bar{X}$  및  $\bar{g}$ 는 각각 표준정규분포공간에서 확률변수벡터와 한계상태함수를 지칭하며,  $\|\cdot\|_2$ 는 L2-norm을 의미한다. 이 연구에서 실교량의 신뢰도지수를 해석하기 위한 방법으로 Hasofer-Lind-Rackwitz-Fiessler 알고리즘을 채택하였다(Liu and Kiureghian, 1991). 비정규분포의 확률변수는 Rackwitz-Fiessler method을 이용하여 등가 정규분포 확률변수로 변환하여 신뢰도해석을 수행하였다(Rackwitz and Fiessler, 1978).

실증교량의 신뢰도를 분석하기 위하여, 재료 강도 시험을 통하여 추정된 전체 합성단면의 휨 강도 통계특성을 적용하여 신뢰도를 산정한다. Fig. 10에는 실증실험을 통하여 추정된 저항강도 통계특성을 적용한 신뢰도지수와 설계기준 개발에 적용된 저항강도 통계특성을 이용한 신뢰도지수를 비교하여 나타내었다. 실증교량의 실험을 통하여 분석한 신뢰도지수는 3.83으로, 목표신뢰도지수인 3.7을 만족하는 수준을 보인다. 실증교량의 경우 내하율은 최소 안전율인 1을 만족하지 못하는 수준을 보였으나, 신뢰도분석에서는 목표 신뢰도지수를 만족하는 수준을 보이고 있다. 그 이유 중 하나로는 안전율을 나타내는 강도감소계수가 작아서 매우 큰 신뢰도지수를 주고 있다. 비슷한 수준의 신뢰도지수를 목표로 하는 미국 AASHTO LRFD(2018)에서는 PSC 교량의 휨 저항계수를 1.0으로 적용하고 있어서, 국내 교량 기준의 콘크리트와 철근에 대한 재료 저항계수를 적용할 때 나오는 약 0.85 수준의 등가 부재저항계수에 비하여 큰 차이를 보인다. PSC beam의 휨 강도는 PS긴장재의 인장강도에 큰 영향을 받으며, 신뢰도지수도 긴장재의 통계특성에 큰 영향을 받게 된다. 일반적으로 긴장재는 매우 고강도의 값이므로 표준편차를 평균강도로 나는



**Fig. 10** Reliability index of test beam obtained by applying different set of static properties



값인 변동계수가 Table 8과 같이 매우 작아 큰 값의 신뢰도지수를 얻게 된다. 실증교량의 내하율은 안전율을 만족하지 못하는 반면, 실증 실험을 통하여 얻은 부재의 재료 변동성을 고려한 저항강도 통계특성이 설계기준 개발에 적용된 통계특성보다 높은 수준이므로 이 연구의 대상 교량에 대한 신뢰도지수는 목표신뢰도지수를 만족하고 있다. 또한 설계기준의 코드 캘리브레이션에 적용된 저항강도 통계특성을 적용한 신뢰도지수는 3.29로 산정되었으며, 목표신뢰도지수를 만족하지 못하는 수준을 보인다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 국내 노후화된 PSC Beam교를 대상으로 수행한 실측 및 실험 데이터를 반영하여 한계상태설계법을 적용한 평가법을 분석하였다. 또한 재료 시험값의 통계특성을 반영한 교량의 실제 저항강도 통계특성과 평가 하중에 대한 소요강도로부터 내하율과 신뢰도지수를 계산하여 한계상태설계법 기반 교량 평가법의 적용성을 분석하였다.

현행 교량 평가법과 한계상태설계법 기반 교량 평가법의 비교를 위하여, 각 설계기준의 소요강도의 차이를 비교하였다. 실증교량 3D P-F 모델링에 KHBDC 및 KBDC-LSD에서 제시하는 설계활하중을 재하하여 소요강도를 해석하였다. 예제교량에 대한 비계수하중효과의 크기는 KBDC-LSD가 KHBDC보다 2.9% 더 크며, 계수하중효과는 KBDC-LSD가 KHBDC보다 오히려 5.9% 더 작다. 이는 KHBDC에서 제시하는 고정하중계수 및 활하중계수가 더 크기 때문이다.

PSC 부재의 평가 내하율을 계산하기 위하여, 철거된 PSC Beam 부재에 대한 실측실험으로부터 구한 휨강도와 계산으로 구한 휨강도를 비교 분석하였다. 부재의 공칭 휨강도 계산값은 실험으로 구한 휨강도에 비하여 81.1%이다. 재료 시험값으로 추정된 통계특성을 적용한 부재 휨강도의 평균값은 부재 실험으로 구한 휨강도와 비교하여 97.2%로 비슷한 결과를 보였다. 또한 강도감소계수를 고려한 PSC Beam 교량의 설계휨강도를 계산하여 두 설계기준을 비교하였다. 재료계수를 적용하는 KBDC-LSD로 구한 설계휨강도는 부재계수를 적용하는 KHBDC로 구한 값과 거의 같은 1.006의 비율을 보였다.

차량재하시험 결과로부터 교량의 평가 내하율 계산에 사용하는 동적충격계수와 응답보정계수를 구하였다. 이 연구에서는 거더의 최대 처짐이 발생하는 경우의 실측값만을 이용하여 동적충격계수 및 응답보정계수를 구하였다. 동적충격계수는 동적 처짐 실측값을 정적 처짐 실측값으로 나누어 계산되어, 설계기준의 동적충격계수 0.25보다 작은 0.096을 얻었다. 또한 응답보정계수는 재하시험과 동일한 하중조건으로 수행한 유한요소해석값과 정적 처짐 실측값을 비교하여 구하였

다. 이 교량의 경우에는 최대 처짐이 발생하는 LC의 응답보정계수는 0.994로 실측값과 해석값이 매우 비슷하였다.

실측실험으로부터 얻은 값과 각 설계기준에서 제시되는 값을 이용하여 내하율을 계산하였다. 이 연구의 대상 PSC beam 교량에 대하여, KBDC-LSD 기반 교량 평가법에 의한 평가내하율은 0.701로 KHBDC에 의한 평가법의 내하율인 0.615보다 크게 산정되었다. 또한 재료시험으로부터 얻은 재료 공칭값과 재하시험으로 얻은 동적충격계수를 적용하여 구한 내하율은 0.908로 설계기준에 의한 평가내하율보다 크게 산정되었다. 따라서 이 연구의 대상인 PSC Beam 교량의 실측 데이터를 적용한 내하율보다 한계상태설계법 기반 교량 평가내하율은 안전 측의 값을 준다.

실증교량을 대상으로 한계상태설계법 기반 교량 평가법의 국내 교량에 대한 적용성을 분석하기 위하여, 실측 및 실험 데이터를 적용한 신뢰도분석을 수행하였다. 실 교량의 재료시험과 시뮬레이션을 통하여 구한 저항강도 통계특성은 설계기준 개발에 적용한 저항강도 통계특성과 비교할 때 변동계수는 동등한 수준이며 편심계수는 훨씬 높다. 그 결과 실험결과를 적용하여 계산된 신뢰도지수는 3.83으로 설계기준 통계특성을 적용한 신뢰도지수인 3.29보다 높게 산정되었다.

이 연구에서 보여주는 PSC Beam 교량을 대상으로 수행한 교량의 안전성능에 대한 평가방법은 추후 국내 교량 평가법에 한계상태설계법을 적용하기 위한 기초 자료가 될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 이 연구에서 보여준 안전성능에 대한 평가법 뿐만 아니라 사용성능에 대한 연구도 추후 지속적으로 수행하는 것이 필요하다.

## 감사의 글

이 연구는 국토교통부 건설기술연구개발사업의 연구비지원(21SCIP-B128569-05)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## References

1. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2018), Bridge Design Code : KDS 24 00 00, Korea Construction Standards Center.
2. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. (2010), Highway Bridge Design Code, MLTM.
3. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (1998, 2018), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, AASHTO, Washington, D.C.
4. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2003), Manual for Condition Evaluation and Load and Resistance Factor Rating (LRFR) of Highway

- Bridges, AASHTO, Washington, D.C.
5. Transportation Officials. Subcommittee on Bridges (2010, 2018), The manual for bridge evaluation, AASHTO.
  6. KALIS. (2019), Specification for Detailed Violation of Safety Inspection and Precision Safety Diagnosis (Performance evaluation), Korea Authority of Land & Infrastructure Safety (KALIS), Korea.
  7. Nowak, A. S. (1999), Calibration of LRFD Bridge Design Code, NCHRP Report 368, Transportation Research Board, Washington, D.C., 9-28.
  8. Hwang, E. S. (2009), Development of Vehicular Load Model using Heavy Truck Weight Distribution (I), (II)(in Korea), *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 29(3), 189-197(I), 199-207(II).
  9. Paik, I., Hwang, E. S., and Shin, S. (2009), Reliability analysis of concrete bridges designed with material and member resistance factors, *Computers and Concrete*, 6(1), 59-78.
  10. Haldar, A., and Mahadevan, S. (1995), First-order and second-order reliability methods, In Probabilistic structural mechanics handbook (pp. 27-52), Springer, Boston, MA.
  11. Liu P. L. and Der Kiureghian A. (1991), "Optimization algorithms for structural reliability" *Structural safety*, 9, 161-177.
  12. Rackwitz, R., and Flessler, B. (1978), Structural reliability under combined random load sequences, *Computers & Structures*, 9(5), 489-494.

Received : 11/09/2021

Revised : 11/15/2021

Accepted : 11/23/2021

---

**요 지 :** 본 연구에서는 한계상태설계법에 기반한 교량 평가법을 개발하기 위하여, 공용 중인 교량의 실측실험을 반영하여 적용성을 분석하였다. 예제 PSC Beam 실 교량의 부재 실험 결과로부터 부재의 시험강도를 구하였으며, 재료 시험값으로부터 추정된 통계특성을 적용하여 산정된 저항강도와 시험강도를 비교하였다. 부재의 시험강도와 재료의 변동성을 고려한 저항강도는 동등한 수준으로 계산되어 실측실험의 적합성이 검증되었다. 차량제하시험으로부터 응답보정계수와 동적충격계수를 계산하였으며, 실측실험 결과를 반영한 내하율을 적용하여 현행 교량 평가법과 한계상태설계법 기반으로 산정된 내하율을 비교하였다. 재료 시험값의 통계특성으로부터 추정된 부재 저항강도의 통계특성을 적용하여 실 교량의 신뢰도지수를 계산하였다. 설계기준 개발에 적용한 저항강도 통계특성으로 구한 신뢰도지수보다 실측실험의 통계특성을 적용하는 경우 더 큰 값의 신뢰도지수를 얻었다.

**핵심용어 :** 한계상태설계법, 교량 평가법, 실 거더 실험, 내하율, 신뢰도지수

---