

# 신뢰도기반 하중계수 캘리브레이션을 통한 교량 평가 활하중계수 분석

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

## Analysis of Live Load Factor for Bridge Evaluation Through Reliability Based Load Factor Calibration

Min-Sun Yoo<sup>1</sup>, Kyung-Hyun Kim<sup>2</sup>, In-Yeol Paik<sup>3\*</sup>

**Abstract:** In this paper, the evaluation procedure applying the limit state design method is studied to be consistent with the newly issued bridge design code in Korea. The live load factor for evaluation is proposed by calibrating for the target reliability index through reliability analysis. Using the actual bridge information collected for the representative bridge types in Korea, the load effects of the design live loads for the previous and current design codes are calculated and compared. The live load factor is calibrated through reliability analysis using the minimum required strength which equals to the load effect obtained for the example bridge. Bridge evaluation is performed by applying the live load factors for the evaluation level as well as design level. The load rating result is generally increased by applying the limit state design method compared to the previous design method and applying the proposed load factor for lowered target reliability index further increased the rating result.

**Keywords:** Limit state design method, Reliability analysis, Load factor calibration, Safety evaluation and design live load

### 1. 서 론

국내 도로교설계기준(2010)(Korean high way bridge design code, 이하 KHBDC)은 허용응력설계법(Allowable stress design method, 이하 ASD)과 강도설계법(Ultimate strength design method, 이하 USD)에 근거하여 기술되어 왔으며, 2012년도 이후에는 통계 및 확률론적 개념에 근거한 신뢰도기반 한계상태설계법이 도입되었다. 현재 KDS(2021)로 코드화되어 적용되고 있는 현행 도로교설계기준(Korean highway bridge design code - limit state design, 이하 KHBDC-LSD)은 사용한 한계상태설계법과 극한한계상태설계법 등 한계상태별로 설계를 검토하도록 기술되어 있으며, 제정 후 3년간의 유예기간 및 개정을 거쳐 2015년도부터 이전 설계기준을 대체하여 적용되고 있다. 이에 따라 설계활하중도 현재의 교통량 및 차량 하중특성에 상응하도록 기존 도로교설계기준의 DB-24 하중에서 KL-510 하중으로 변경되었다. 국내 공용중인 교량을 평

가하는 방법은 한국시설안전공단의 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(안전점검·진단편)(2021)에 따라 이전 설계법인 ASD와 USD를 기반으로 수행되고 있으며, 설계와 평가에 일관성이 있도록 현행 한계상태설계법에 상응하는 평가방법의 추가가 필요하다.

미국 도로교설계기준에는 한계상태설계법과 동일한 개념인 하중저항계수설계법으로 AASHTO LRFD (Load and resistance factor design)가 1994년도에 제정되었으며, 이후 LRFD에 상응하는 한계상태설계법 평가지침인 LRFR (Load and resistance factor rating)이 2003년에 제정되었다. 현재에는 여러 차례 개정이 되어 MBE (Manual for bridge evaluation)가 개발되었으며, 현행 LRFD 설계기준을 따르는 LRFD 평가법을 Part A에 기술하고 이전 설계기준에 따르는 평가법을 Part B에 기술하고 있다. Part A에서는 통계적인 안전율인 신뢰도지수를 사용하여 설계의 목표신뢰도지수와 동일한 수준으로 평가하는 Inventory level 평가와 이보다 낮은 목표신뢰도지수로 평가하는 Operating level 평가를 제시하고 있다. 또한, 캐나다에서도 도로교설계기준(Canadian highway bridge design code, 이하 CHBDC), (2019)을 한계상태설계법 기반으로 2001년에 정립하였으며, 평가지침 또한 설계 기준 내에 규정하여 설계법과 평가법을 일원화하였다.

교량 설계와 평가는 전반적인 접근 방식은 유사하지만, 평가 단계에서의 중요한 차이점이 존재한다. MBE에서 기술하

<sup>1</sup>학생회원, 가천대학교 석사과정

<sup>2</sup>학생회원, 가천대학교 박사과정

<sup>3</sup>정회원, 가천대학교 교수

\*Corresponding author: pinyeol@gachon.ac.kr

Department of Civil and Environmental Engineering, Gachon University, Seongnam 13120, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2023년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2023년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

는 내용에 따르면 신설 교량의 설계 단계에서는 큰 추가적 비용 없이 보수적으로 높은 신뢰도지수를 확보 할 수 있으나, 공용중인 교량의 평가 단계에서 너무 보수적인 평가 수준이 요구되면, 통과 중량 제한, 보수 보강 또는 교체에 필요한 비용이 매우 커지므로 적절하지 않다는 점이다. 이에 안전성과 경제성의 균형을 갖추기 위하여, 교량 평가에서는 설계보다 낮은 평가 목표신뢰도지수를 제시하고 이에 상응하는 하중계수를 적용하여 교량을 평가한다. 캐나다에서도 CHBDC에서 평가 목표안전율이 설계 목표안전율보다 낮게, 설계보다 비교적 낮은 하중계수를 적용하여 교량을 평가한다. 이와 같이 목표신뢰도지수를 이용하여 설계의 안전율과 평가의 안전율을 차등을 두게 됨으로써, 설계활하중이 이전보다 크게 개정이 되거나, 설계활하중보다 더 큰 허가차량이 통행하게 될 때, 기존 설계기준에 따라 준공된 교량의 통행 가능성을 평가할 수 있게 된다. 국내 도로교에 한계상태설계법을 적용한 평가방법을 마련할 때에도 선진국의 경험을 참고하여 설계와 동일한 평가와 더불어 별도로 평가 목표신뢰도지수에 상응하는 하중계수의 개발이 필요하다.

이 논문에서는 공용중인 도로교량의 평가에 한계상태설계법을 적용하고, 평가법에 대한 목표신뢰도지수를 감소시켜 이에 상응하는 평가 활하중계수를 신뢰도기반 분석을 통하여 보정(Calibration)하는 과정을 제시한다. 또한, 평가에 적합한 신뢰도지수를 확보하기 위해 활하중계수를 낮추어 평가하는 방법을 적용하여 제시한다. 이 연구를 수행하기 위하여 국내 대표 중단경간 교량형식인 예제 교량을 대상으로 유한요소해석 및 신뢰도분석을 수행하여 평가 활하중계수를 보정한다. 연구과정에서 유한요소 해석프로그램(Midas-civil)을 이용하여 교량에 발생하는 하중효과를 해석하며 해석된 하중효과로부터 최소요구강도를 계산하며, 최소요구강도에 대한 신뢰도 분석으로부터 평가 활하중계수에 대한 캘리브레이션을 수행한다. 또한 연구를 위하여 수집한 실제 교량 예제에 대하여 안전성평가 방법에 따라 이 연구에서 제안하는 평가 활하중계수의 적용성을 검토한다. 안전성평가는 총 하중효과에 대한 구조성능의 비를 나타내는 안전율과 교량에 작용하는 고정하중에 대한 활하중의 여유도를 나타내는 내하율을 산정하여 기존 설계기준에 따른 평가, 현행 설계기준에 따른 설계수준의 안전성평가, 하중계수 캘리브레이션의 결과를 적용한 평가수준의 안전성평가를 비교한다.

## 2. 국내외 도로교 설계 및 평가 안전율

국내 교량의 평가에 대한 목표신뢰도지수와 활하중계수를 제안하기 위하여, 국외 도로교 평가에서 적용하고 있는 평가 기준의 하중계수를 분석하였다. 미국 신뢰도기반 평가지침인 MBE에는 설계기준인 LRFD와 동일하게 한계상태설계법을

적용하는 평가방법을 제시하고 있다. Table 1에는 MBE에서 LRFD 설계활하중인 HL-93으로 평가하는 두 가지 등급인 Inventory level과 Operating level의 평가 안전율인 목표신뢰도지수  $\beta_T$ 와 이에 상응하는 하중계수를 나타내었다. 교량 평가 시 고정하중계수  $\gamma_D$ 는 평가의 등급에 상관없이 동일한 값을 적용하고 있으며, 활하중계수  $\gamma_L$ 는 평가 등급에 따라 값을 달리 적용하고 있다. Inventory level의 경우는 신설교량의 설계와 동일한 목표신뢰도지수 3.50에 상응하는 활하중계수 1.75를 적용한다. Inventory level을 만족하지 못하는 경우, 이보다 낮은 신뢰도지수가 2.50 및 이에 상응하는 활하중계수 1.35를 적용하는 Operating level을 평가하여 이를 만족하면 정상 통행할 수 있도록 하고 있다.

캐나다는 도로교량 설계기준 CHBDC의 내부에서 교량의 평가 규정을 제시하고 있으며, 교량을 평가하는 경우 설계보다 낮은 안전율을 적용하고 있다. Table 2는 CHBDC에서 규정하는 목표신뢰도지수에 따른 하중계수조합을 보여준다. CHBDC는 설계의 목표신뢰도지수를 3.75이며, 이에 대한 고정하중계수 1.20, 활하중계수 1.70을 적용한다. 교량 평가 시에는 대상 교량의 시스템거동, 부재연성, 검사조건 등에 따라 등급을 구분하여 2.5에서 4.0까지로 세분하고 해당 목표신뢰도지수에 따라 Table 2와 같이 하중계수가 선정된다.

Table 3에는 국내 KHBDC-LSD에서 설계에 적용하고 있는 목표신뢰도지수와 이에 상응하는 하중계수를 나타내었다. 설계 목표신뢰도지수를 3.7로 하여 이에 상응하는 활하중계수 1.80을 적용하고 있다. 국내의 설계와 평가에 일관성을 갖

**Table 1** Load factor and reliability index by level in MBE

Level	$\gamma_D$		$\gamma_L$	$\beta_T$
	DC	DW		
Inventory	1.25	1.50	1.75	3.5
Operating			1.35	2.5

**Table 2** Load factor and reliability index in CHBDC

Load factor	$\beta_T$						
	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	3.75	4.00
$\gamma_D$	1.10	1.12	1.14	1.16	1.18	1.20	1.22
$\gamma_L$	1.35	1.42	1.49	1.56	1.63	1.70	1.77

**Table 3** Load factor and reliability index in KHBDC-LSD

Design	$\gamma_D$		$\gamma_L$	$\beta_T$
	DC	DW		
Design	1.25	1.50	1.80	3.7

추가 위하여, 교량 평가에도 한계상태설계법을 적용하고 평가의 목표 안전율을 설정하여 이에 따른 평가 활하중계수를 제시할 필요가 있다. 따라서 이 연구에서는 국내 도로교 평가에 대한 목표신뢰도지수를 설정하여, 대표 교량 형식을 대상으로 신뢰도기반 캘리브레이션을 통하여 평가 활하중계수를 제시한다.

### 3. 교량 형식별 활하중효과 비교

활하중에 대한 내하력 평가를 위하여, KHBDC와 현행 KHBDC-LSD의 설계활하중에 의한 하중효과를 비교한다. 각 설계기준의 설계활하중은 Fig. 1과 같이 KHBDC의 경우 DB-24 혹은 DL-24(이하 DB하중)이며, KHBDC-LSD의 경우 KL-510(이하 KL하중)이다. 또한, 활하중 관련 충격계수와 다차로재하계수를 Table 4와 Table 5에 각각 나타내었다. 충격계수의 경우 Table 4와 같이 KHBDC는 교량의 경간에 따라 최대 0.30까지 적용 가능하며, KHBDC-LSD는 최대 0.25로 교량 지간이 20m를 초과하는 교량부터 KHBDC-LSD의 충격계수가 더 크게 적용된다. Table 5에 나타난 각 설계기준의 다차로재하계수를 2차로 재하기준으로 비교한다면, KHBDC는 1.0이나, KHBDC-LSD는 0.9로 감소시켜 적용한다.

하중효과를 구할 대상 교량은 철근콘크리트교, 프리스트레스트 콘크리트교 및 강교에 대하여 각각 대표 형식으로 RC slab(이하 RCS)교, PSC beam(이하 PSC)교, Steel box(이하 STB)교를 선택하였다. 이들 교량 형식에 대하여 수집한 실 교량 자료를 이용하여 Table 6에 나타난 RCS 9개 교량, PSC 11개 교량, STB 11개 교량으로 총 31개의 실 교량에서 발생하는 하중효과를 분석한다. 교량 형식별 경간장 구성은 RCS 교량의 경우 최대 8m에서 21.6m, PSC 교량의 경우 25m에서 35m, STB 교량의 경우 40m에서 63m이다.

Table 6에는 수집한 총 31개의 교량의 경간, 폭, 사각, 거더

간격에 대한 제원을 나타내었으며, 교량 형식 별 최대 경간장 크기 별로 교량을 나열한 RCS교, PSC교, STB교의 순서에 따라 Br01부터 Br31까지 교량을 정의하였다. 또한 이 논문 5장의 신뢰도기반 안전성평가에 적용하기 위하여 형식별로 경간에 따라 각 4개씩 대표 교량을 선택하여, RCS교의 경우 R1에

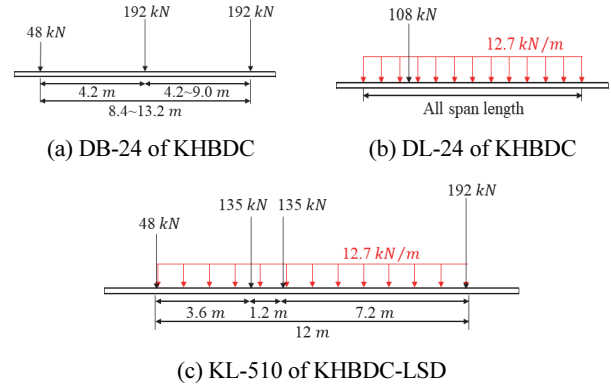


Fig. 1 Live load models

Table 4 Impact factor in KHBDC and KHBDC-LSD

	KHBDC	KHBDC-LSD
Impact factor	$\frac{15}{L+40} \leq 0.30$	0.25


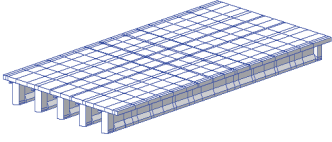

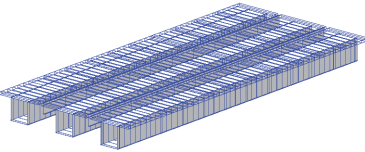
Table 5 Multiple presence factor in KHBDC and KHBDC-LSD

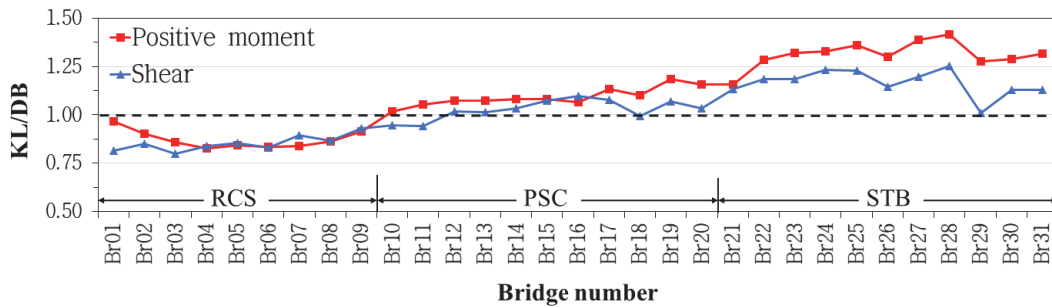
Number of load	KHBDC	KHBDC-LSD
1	1.00	1.00
2	1.00	0.90
3	0.90	0.80
4	0.75	0.70
≤ 5	0.75	0.65

Table 6 Specification of example bridges

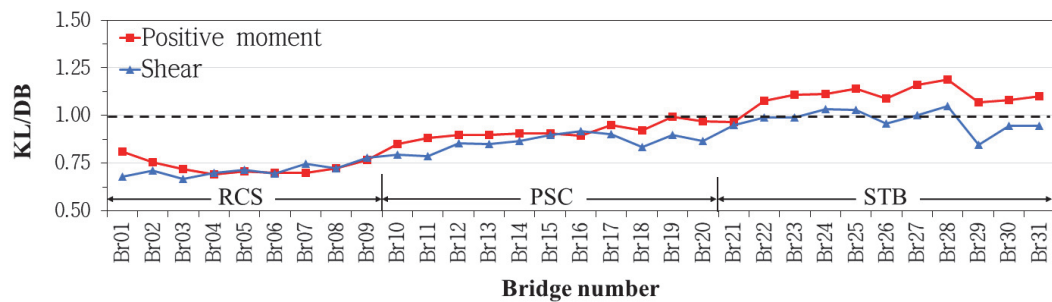
Type	Overview	Br. No.	Rep. Br.	Span (m)	Width (m)	Skew angle (degree)	Girder spacing (m)
RCS		Br01	-	8	9.5	0	
		Br02	-	10	10.0	0	
		Br03	-	12	10.0	0	
		Br04	-	15	16.0	0	
		Br05	R1	15+15+15	10.5	20	-
		Br06	R2	11+15+11	18.3	0	
		Br07	R3	12.5+15+12.5	10.5	0	
		Br08	-	12+17.8+12.8	19.5	8	
		Br09	R4	12.2+21.6+12.2	18.3	0	

**Table 6** (Continued)

Type	Overview	Br. No.	Rep. Br.	Span (m)	Width (m)	Skew angle (degree)	Girder spacing (m)
PSC		Br10	-	25	19.5	10	2.2
		Br11	P1	25	19.5	0	2.2
		Br12	-	30	19.5	0	2.2
		Br13	-	30	19.5	20	2.2
		Br14	-	30	23.5	5	2.4
		Br15	-	30	23.5	20	2.2
		Br16	-	30	19.8	0	2.2
		Br17	P2	30	28.0	0	2.4
		Br18	-	35	12.3	0	2.4
		Br19	P3	35	10.8	0	2.8
		Br20	P4	3@35	12.6	0	2.6
STB		Br21	-	40	20.5	50	5.0
		Br22	-	45+45	19.5	0	7.2
		Br23	-	45+45+45	39.0	0	5.6
		Br24	S1	45	19.5	0	7.2
		Br25	-	45	19.5	10	7.2
		Br26	S2	40+4*49+40	20.3	0	5.7
		Br27	-	50	28.2	0	4.5
		Br28	-	50	19.5	0	6.5
		Br29	-	55	20.9	0	5.8
		Br30	S3	45+50+56+50	38.1	0	5.6
		Br31	S4	63+63	21.2	0	3.5



(a) Unfactored live load effect



(b) Factored live load effect

**Fig. 2** Comparison of design live load effect of KHBDC and KHBDC-LSD

서 R4, PSC교의 경우 P1에서 P4, STB교의 경우 S1에서 S4로 정의하였다. Table 6에 나타난 공용중인 31개 교량에 대하여 유한요소해석 프로그램을 이용하여 구조해석 하였으며, 설계 활하중은 DB하중과 KL하중을 재하하여 각 교량에 발생하는 하중효과를 산정하였다.

Fig. 2에는 설계활하중 별 정모멘트와 전단력의 비계수하중효과와 계수하중효과를 비교하기 위하여, 각 교량에서 발생하는 DB하중효과에 대한 KL하중효과 비율을 나타내었다. Fig. 2(a)의 정모멘트를 보면, RCS교는 경간 길이가 비교적 짧아 DB하중효과가 KL하중효과보다 크게 산정되었으며, PSC교와 STB교는 모두 DB하중효과보다 KL하중효과가 크게 산정되었다. 전단력의 경우 최대 경간장이 25m이하인 RCS교 전체와 PSC교의 Br 10, 11은 DB하중효과가 KL하중효과보다 크고, 이외의 교량들은 DB하중효과보다 KL하중효과가 크게 산정되었다. Fig. 2(b)에 나타난 계수 하중효과는 정모멘트의 경우 RCS교, PSC교 전체와 STB교의 Br21까지 DB하중이 KL하중보다 더 큰 값을 보이며, 전단력의 경우 Br22, 23, 27, 28을 제외한 모든 교량에서 DB하중에 의한 효과가 KL하중에 의한 효과보다 더 크게 나타난다. 이와 같이 DB하중에 의한 계수하중효과가 크게 나타나는 이유는 활하중계수가 KHBDC-LSD보다 약 19% 크기 때문이다.

#### 4. 활하중계수 캘리브레이션

##### 4.1 활하중계수 캘리브레이션 방법

국내 KHBDC-LSD의 평가수준에 대한 활하중계수를 보정하기 위하여, 교량형식에 따른 총 31개 교량을 대상으로 신뢰도기반 캘리브레이션을 수행한다. 신뢰도분석은 Nowak and Collins(2000)에 수록된 개선된 일계신뢰도방법(Advanced First Order Reliability Methods, AFORM)인 Rackwitz- Fiessler method (Rackwitz and Fiessler, 1978)를 적용한다. 이 방법에서는 정규분포 이외의 분포를 따르는 변수도 고려할 수 있다. 한계상태함수 식은 식 (1)과 같이 저항과 하중효과의 차이로 나타낸다.

$$g = R - \sum Q \quad (1)$$

식 (1)에서 각 변수는 통계적으로 독립관계이며,  $g$ 는 한계상태함수,  $R$ 은 저항강도,  $Q$ 는 하중효과이며 구조부재 및 부작물 자중에 의한 고정하중효과 DC와 포장 및 시설물에 의한 고정하중효과 DW 및 충격계수를 고려한 활하중효과 LL 등을 포함한다. 신뢰도지수를 식 (2)과 같이 파괴점에 대한 해로 계산한다.

$$\beta = \frac{\{G\}^T \{z^*\}}{\sqrt{\{G\}^T \{G\}}} \quad (2)$$

여기에서  $\{G\}$  벡터는 설계점을 나타내는 \*에서 표준정규분포 변수인  $z$ 에 대한 한계상태함수의 부분 도함수를 포함하며, 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_i = - \frac{\partial g}{\partial z_i} \Big|_* \quad (3)$$

반복 계산을 통하여 설계점에서 수렴된 신뢰도지수를 얻게 된다.

이 연구에서 사용한 강도와 하중효과의 통계특성은 Table 7과 Table 8에 정리하였으며, 기본적으로 KHBDC-LSD 연구에 사용된 값을 적용하였다(Paik et al., 2009; Shin et al., 2006; Bae, 2016; Nowak, 1999; Hwang, 2009). 여기에서 편심계수 (Bias factor)  $\lambda$ 는 공칭값에 대한 평균값의 비율이며, 변동계수(Coefficient of variation)  $\delta$ 는 평균값에 대한 표준편차의 비율이다.

이 연구에서 보정하는 평가 활하중계수는 극한한계상태 (Ultimate limit state, 이하 ULS)1 하중조합을 기준으로 한다. 평가의 목표신뢰도지수는 KHBDC-LSD의  $\beta_T = 3.7$ 보다 낮고, 미국 MBE에서 제시하는 Operating level의  $\beta_T = 2.5$ 보다 높은 3.0으로 설정한다.

목표신뢰도지수를 만족시키는 활하중계수를 산출하기 위하여, 교량에 작용하는 하중효과를 산정하고, 이 하중효과와

Table 7 Statistical parameters for resistance

Random variable		$\lambda$	$\delta$	Distribution
Resistance	RCS	Moment	1.229	0.130
		Shear	1.289	0.144
	PSC	Moment	1.056	0.073
		Shear	1.274	0.139
	STB	Moment	1.180	0.093
		Shear	1.224	0.115
				Log normal

Table 8 Statistical parameters for load effect

Random variable		$\lambda$	$\delta$	Distribution	
Load effect	RCS	1.05	0.10	Normal	
	DC	PSC	1.03	0.08	Normal
		STB			Normal
	DW	1.00	0.25	Normal	
	LL	1.00	0.20	Gumbel	

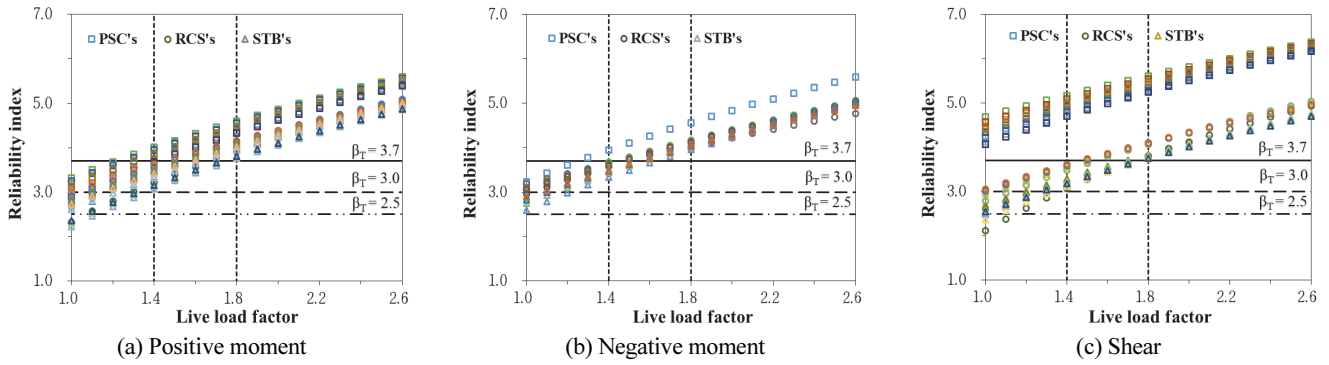


Fig. 3 Calibration of live load factor for load effects

동일한 값을 갖는 최소요구강도를  $R_{req}$  라고 하여 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$R_{req} = \frac{1}{\phi}(\gamma_{DC}DC + \gamma_{DW}DW + \gamma_L LL) \quad (4)$$

여기에서,  $\phi$ 는 저항계수를 의미한다. 저항계수는 현행 도로 교설계기준에서 재료계수를 사용하므로, 재료계수를 적용하여 계산한 설계강도와 공칭강도의 비를 구하여 등가의 저항계수로 적용하였다. 고정하중계수인  $\gamma_{DC}$ ,  $\gamma_{DW}$ 는 1.25, 1.50을 적용하며, 활하중계수는 1.00부터 0.10씩 증가시키며 신뢰도지수를 구하여 목표신뢰도지수를 만족하는 값을 얻도록 반복 수행하여 평가 활하중계수를 보정한다.

#### 4.2 평가 활하중계수 제안

한계상태설계법기반의 평가 활하중계수를 제안하기 위하여, 31개의 교량을 대상으로 신뢰도기반 하중계수 캘리브레이션 수행하였다. 각 하중효과에 대한 하중계수 캘리브레이션 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a), (b), (c)에서와 같이 정모멘트, 부모멘트, 전단력 모두 비슷한 경향을 보이며 PSC교의 신뢰도지수가 가장 높고, RCS교, STB교 순으로 산정되었다. Fig. 3(a)를 예시로 정모멘트에 대한 캘리브레이션 결과, 설계수준의 목표신뢰도지수인 3.7을 만족하는 최소 활하중계수는 RCS교의 경우 1.7, PSC교의 경우 1.5, STB교의 경우 1.8로 산정되었다. 이에 따라 전체 교량이 설계수준의 목표신뢰도지수 3.7을 확보하기 위해서는 최소 활하중계수가 1.8로 ULS 1의 활하중계수와 동일한 값으로 검토되었다. 설계수준과 평가수준의 목표신뢰도지수를 만족하는 최소 활하중계수에 대한 결과를 Table 9에 나타내었다. Table 9를 보면, 일반적으로 STB교는 저항계수가 1.0으로 저항강도에 대한 안전율이 낮아, 신뢰도지수는 RCS교와 PSC교에 비하여 낮게 산정된다. 이에 따라 평가수준의 목표신뢰도지수를 만족하도록 요구되는 최소 활하중계수는 STB교에서 1.40으로 가장

Table 9 Minimum required live load factor after calibration

Bridge type	Minimum required live load factor					
	Moment				Shear	
	Positive		Negative			
	$\beta_T = 3.7$	$\beta_T = 3.0$	$\beta_T = 3.7$	$\beta_T = 3.0$	$\beta_T = 3.7$	$\beta_T = 3.0$
RCS	1.7	1.3	1.5	1.1	1.8	1.4
PSC	1.5	1.1	1.3	1.0	1.0	1.0
STB	1.8	1.4	1.7	1.3	1.8	1.4

크게 계산되었다. 따라서 이 논문에서 결과적으로 제시하는 평가 목표신뢰도지수인 3.0을 확보하기 위한 활하중계수는 1.40으로 제안한다.

#### 5. 평가 활하중계수 적용성 검증

이 연구에서 제안하는 평가 활하중계수의 적용성을 검증하기 위하여, 교량형식별 경간에 따라 선정된 12개의 교량을 대상으로 안전성을 검토한다. 대상 교량은 31개의 교량 중 상이한 경간구성을 가진 형식별 4개씩의 교량이다. 12개 대상교량에 한계상태설계법을 적용하여 안전성을 검토하고, 추가로 ASD와 USD의 안전성평가와 비교한다. 이 논문에서는 구조성능(Structural capacity)과 하중효과(Load effect)의 비율인 구조성능-하중효과 비율을 현재 안전진단 보고서에서 흔히 사용하고 있어 익숙한 용어인 평가의 안전율(Safety factor, SF)로 사용하기로 한다. 허용응력과 강도에 대한 SF를 식으로 나타내면 식 (5)와 같다.

$$SF = \frac{C}{\gamma_D D + \gamma_L L} \quad (5)$$

활하중에 대한 내하율(Rating factor, RF) 계산식은 식 (6)에 나타내었다.

$$RF = \frac{C - \sum \gamma_D D}{\gamma_L L} \quad (6)$$

여기에서,  $C$ 는 구조부재의 성능을 의미하며 각 설계기준에서 제시한 방법에 따라, 응력검토의 경우 재료의 허용응력  $f_a$ , 강도검토의 경우 재료계수 및 저항계수를 고려한 구조부재의 설계강도  $S_d$ 를 의미한다. 이전 기준인 KHBDC와 현행 기준인 KHBDC-LSD에서 철근 콘크리트부재 및 프리스트레스부재의 구조부재 설계에 있어 가장 큰 차이는 저항계수와 재료계수에 있다. KHBDC에서는 공칭강도에 저항계수인 강도감소계수를 적용하여 설계강도를 계산하지만, KHBDC-LSD에서는 각 사용 재료에 부분안전계수인 재료계수를 적용하여 강도를 계산한다. 전단 설계의 경우 이전 기준은 콘크리트의 전단강도에 전단철근이 부담하는 전단강도를 더하여 강도를 산정하였지만, 현행 기준은 전단보강철근 유무에 따라 전단보강철근이 없는 부재, 전단보강철근이 배치된 부재로 나누어 식을 제시하고 있다. 강교의 경우, 현행 기준에서는 휨과 전단강도는 조밀성(Compactness)에 따라 조밀단면, 비조밀단면, 세장단면으로 구분하여 설계기준에 제시된 각 단면의 최소 요구 조건에 따라 설계강도를 계산한다. 설계기준별 적용하는 저항계수 및 재료계수는 Table 10에 나타내었으며, 각 설계법 별 허용응력, 구조부재의 설계강도와 고정하중 및 활하중에 대한 응력과 하중효과는 지면 제약으로 인하여 별도로 나타내지 않았다.

로 나타내지 않았다.

Table 11에는 기존 설계법인 ASD와 USD 및 현행 설계법인 한계상태설계법의 사용한계상태(Serviceability limit state, 이하 SLS)와 ULS에 대한 하중계수를 나타내었으며, 추가로 이 연구에서 캘리브레이션을 통하여 제안하는 평가 활하중계수를 나타내었다. ULS 1의 하중조합 검토 시 활하중계수 캘리브레이션 결과를 적용하여 설계수준(ULS 1-design,  $\beta_T = 3.7$ )과 평가수준(ULS 1-evaluation,  $\beta_T = 3.0$ )으로 나누어 비교한다.

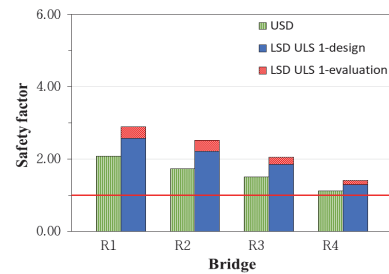
Fig. 4는 RCS교 예제 교량의 휨에 대한 하중조합별 안전을

**Table 10** Resistance factors for design codes

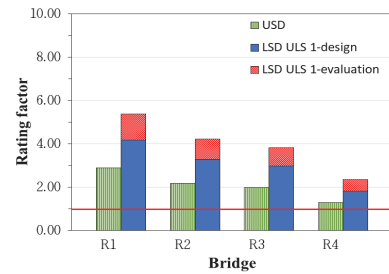
Design code	Bridge type	Member resistance factors		Material factors	
		Moment	Shear	Concrete	Reinforcement
USD	RCS	0.85	0.80	-	-
	PSC				
LSD	RCS	-	-	0.65	0.90
	PSC				
	STB				

**Table 11** Load factors according to design code

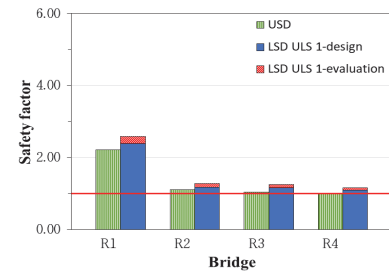
Design code	limit state	$\gamma_D$		$\gamma_L$
		DC	DW	
ASD	-	1.00	1.00	1.00
USD	-	1.30	2.15	
LSD	SLS 2 (STB)	1.00	1.00	1.30
	SLS 3 (PSC)	1.00	1.00	0.80
	ULS 1- design	1.25	1.50	1.80
	ULS 1- evaluation (proposal)	1.25	1.50	1.40



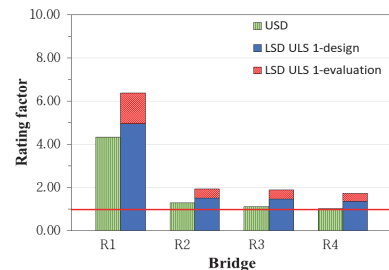
(a) Safety factor for positive moment



(b) Rating factor for positive moment



(c) Safety factor for negative moment

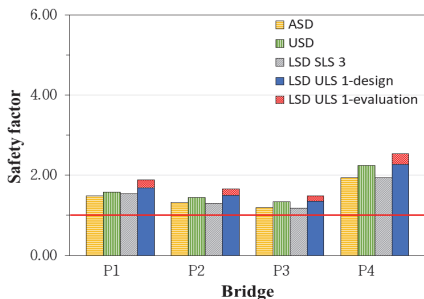


(d) Rating factor for negative moment

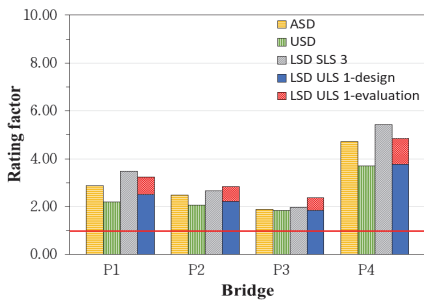
**Fig. 4** Safety evaluation for moment of RCS bridges

및 내하율 계산 결과이다. Fig. 4(a)와 (b)는 정모멘트에 대한 결과이며, RCS교는 경간 길이가 짧아 Fig. 2와 같이 일반적으로 KL하중효과가 DB하중효과보다 작기 때문에, 안전율과 내하율이 USD보다 LSD가 각각 평균 0.38, 0.98 더 큰 결과를 보인다. LSD의 평가 하중계수를 적용한 결과와 USD의 결과를 비교하면 안전율은 평균 0.61, 내하율은 평균 1.86이 증가한다. Fig. 4(c)와 (d)는 부모멘트에 대한 결과이며, 안전성 검토 결과는 USD보다 LSD가 약간 큰 경향을 보이지만 그 차이는 정모멘트의 경우에 비하여 크지 않다. 이는 부모멘트의 활하중효과에서 KL하중이 큰 정도가 정모멘트에 비하여 덜하기 때문이다. 또한, LSD의 평가 하중계수를 적용한 결과와 USD의 결과를 비교하면 안전율은 평균 0.23, 내하율은 평균 1.05가 증가한다.

Fig. 5는 PSC 교의 정모멘트에 대한 응력과 강도 검토 결과이다. PSC교의 허용응력 검토의 경우, 기존 ASD와 현행 LSD의 SLS 3에 대하여 수행하였다. ASD와 SLS 3의 결과는 안전율은 비슷한 수준으로 계산되나, 내하율의 경우 식 (6)에서 분모 값인 활하중효과에 의한 영향이 크게 되는데, 활하중계수가 ASD의 경우에는 1.0, SLS 3의 경우에는 0.80을 적용하므로, 이 차이로 인하여 SLS 3의 결과가 약간 크게 나왔다. 강도에 대한 검토 결과, USD와 LSD의 비교시 안전율과 내하율 모두 근소한 차이로 LSD의 결과가 더 높게 나오며, 이는 식 (6)의 분모인 계수활하중효과가 Fig. 2(b)와 같이 KL하중이 DB하중보다 약간 작기 때문이다. 또한, 평가수준의 활하중계수를 적용하는 경우 USD와 비교하여 안전율은 평균 0.23, 내하



(a) Safety factor for positive moment

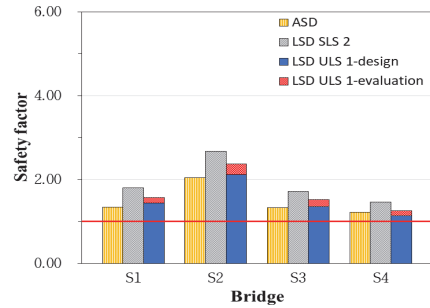


(b) Rating factor for positive moment

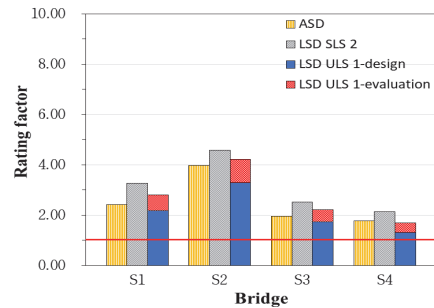
Fig. 5 Safety evaluation for moment of PSC bridges

율은 0.87이 상승하므로 더 높은 내하율을 얻을 수 있다. 이 논문에서는 PSC교의 부모멘트는 별도로 분석하지 않았으며, 그 이유는 국내 일반적인 연속 PSC교는 지점에서 슬래브만 철근으로 연속화되고 긴장재는 연속화되지 않은 구조형식이어서 그 특성이 RCS교와 유사하기 때문이다.

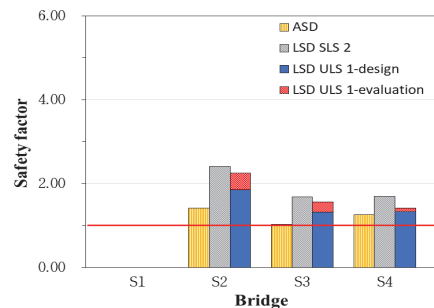
Fig. 6은 STB교의 모멘트에 대한 계산 결과이다. STB교는 KHBDC에서는 허용응력설계법만으로 검토를 수행하였다.



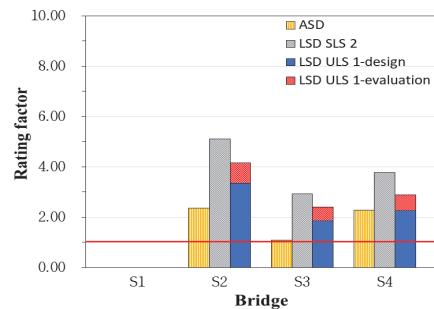
(a) Safety factor for positive moment



(b) Rating factor for positive moment



(c) Safety factor for negative moment



(d) Rating factor for negative moment

Fig. 6 Safety evaluation for moment of STB bridges



KHBDC-LSD에서는 응력검토의 경우 SLS 2하중조합을 적용하고, 강도검토의 경우 설계수준과 평가수준의 활하중계수를 적용하여 평가를 수행하였다. Fig. 6(a)와 (b)는 정모멘트에 대한 결과이며, ASD와 SLS 2 비교 결과 활하중에 의한 응력은 KL-510의 효과가 더 크지만, 설계기준의 허용응력 값이 SLS 2가 더 크므로 안전율과 내하율 모두 SLS 2가 더 큰 결과를 보인다. LSD는 강도검토도 수행하였으며, 응력검토의 결과보다 안전율과 내하율에서 평균적으로 각각 0.40, 1.00 작게 나왔으며, 평가수준이 설계수준에 비하여 평균적으로 각각 0.17, 0.61 더 크게 나왔다. Fig. 6(c)와 (d)는 부모멘트의 결과이며, 부모멘트도 정모멘트와 같은 경향을 보인다.

Fig. 7에는 전단에 대한 안전성 검토 결과를 나타내었다. RCS 및 PSC교의 전단은 모두 강도에 대하여만 검토하여, USD와 LSD-ULS를 적용하여 평가하였다. 대상 교량은 모두 전단 철근이 보강되어 있었으며 LSD를 적용한 경우의 전단강도가 더 크게 나왔고, 계수하중효과도 KL하중효과가 DB하중보다 작으므로, LSD의 안전율과 내하율이 더 큰 값을 보인다. STB교의 전단은 KHBDC는 허용응력설계법으로, KHBDC-LSD는 강도한계상태로 검토하여, 직접적인 비교는 어려우나, 참고로 구하여 그래프로 나타내었다. STB교 전단에 대한 ULS의 설계수준과 평가수준에 대한 결과를 비교하면, 안전율은 평균 0.14, 내하율은 평균 0.57이 상승하는 결과를 확인하였다.

또한, 총 12개의 교량 안전성검토 결과 KHBDC-LSD 강도한계상태에 대한 평가수준의 활하중계수를 감소시키는 경우

에 식 (5)와 식 (6)의 분모의 감소를 통하여 안전율은 평균적으로 11%, 내하율은 29% 증가된 값을 얻을 수 있게 된다.

## 6. 결론

이 연구에서는 국내 도로교의 안전성 평가를 위하여 한계상태설계법을 적용하고, 해외 선진국과 같이 평가의 목표신뢰도지수에 차등을 두어 이에 상응하는 하중계수를 보정하는 과정을 수행하여 국내 중단경간 교량 중 대표적인 교량형식에 적용 가능한 평가수준의 활하중계수를 제시하였다. 이 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

국내 대표 교량형식으로 구성된 31개 교량을 대상으로 DB하중과 KL하중에 의한 하중효과를 비교하였다. 비계수하중효과는 단시간인 RCS교에서는 DB하중이 크며 이보다 시간이 긴 PSC교와 STB교로 갈수록 KL하중에 의한 효과가 크다. 계수하중효과는 정모멘트인 경우에는 RCS교와 PSC교에서 DB하중이 더 크며 STB교는 KL하중이 더 크다. 전단 계수하중효과는 전체 교량 중 4개의 STB교를 제외하고 모두 DB하중에 의한 효과가 크다.

목표신뢰도지수를 감소시킨 평가수준의 활하중계수를 제안하기 위하여 대표 상부구조 형식들에 모두 적용 가능한 KHBDC-LSD의 ULS 1 하중조합을 기준으로 하중계수 캘리브레이션을 진행하였다. 한계상태설계법 기반의 국내 도로교량 평가에 대한 목표신뢰도지수는 미국 MBE에서 제시하는 Inventory level의 목표신뢰도지수인 2.5를 참고하여, 이보다 높은 3.0으로 설정하였다. 예제 교량에 대하여 신뢰도 분석을 수행한 결과, STB교의 정모멘트와 전단력에서 신뢰도지수의 최솟값을 얻게 되어, 이때의 활하중계수인 1.40을 평가수준의 활하중계수로 제안하였다.

이 연구에서 제안하는 평가수준의 활하중계수에 대한 적용성을 검증하기 위하여, 교량형식 별 경간이 다르게 구성된 4개씩의 교량을 선정하여 설계방법별 안전성평가를 수행하였다. 설계수준과 평가수준을 적용한 안전성평가는 활하중계수의 감소를 통하여 안전율은 평균 11%, 내하율은 29% 증가된 값을 얻을 수 있었다.

미국 MBE와 같이 공용중인 교량에 대하여 목표신뢰도지수를 낮추어 평가하는 방법의 활용성은 설계 시 적용한 활하중보다 교량 운용 시 통행할 차량 중량이 더 큰 경우, 예를 들어 DB-18로 설계된 교량에 DB-24 차량 통행 평가 문제나, 일반 교량에 중량 40톤이 넘는 특수 허가차량 통행에 관한 교량 평가 분야에 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 이 연구에서 보여준 국내 중단경간 교량 중 대표적인 교량형식 뿐만 아니라 이외의 교량형식에 대한 연구도 추후 지속적으로 수행하는 것이 필요하다.

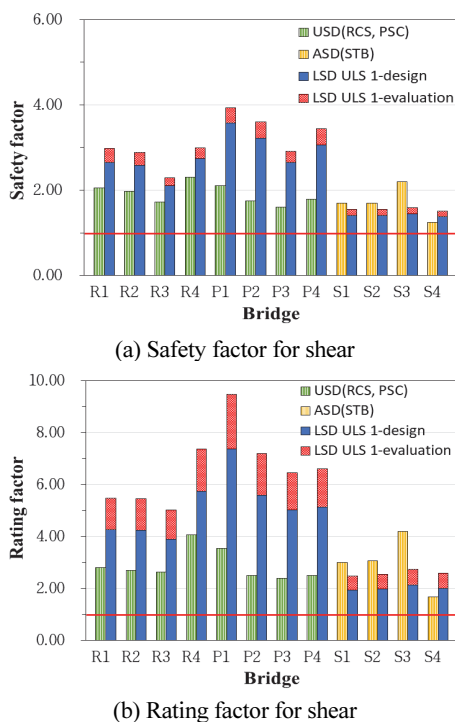


Fig. 7 Safety evaluation for shear of RCS, PSC and STB bridges

## References

1. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010), Highway Bridge Design Code, MLTM.
2. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2021), Bridge Design Code: KDS 24 00 00 Bridge Design Load, Korea Construction Standards Center.
3. Korea Infrastructure Safety Corporation. (2021), Detailed Guidelines for Safety and Maintenance of Facilities (Performance evaluation), KISC.
4. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2020), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, AASHTO, Washington, D.C.
5. 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.
6. Transportation Officials, Subcommittee on Bridges. (2018), The manual for bridge evaluation, AASHTO.
7. Canadian Standard Association. (2019), Canadian Highway Bridge Design Code (CSA S6:19), Ontario, Canada.
8. Nowak, A. S. and Collins, K. R. (2000), Reliability of Structures, McGraw-Hill.
9. Rackwitz, R., and Fiessler, B. (1978), Structural reliability under combined random load sequences. *Computers & Structures*, 9(5), 489-494.
10. 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.
11. Shin, D. K., Kim, C. Y., & Paik, I. Y. (2006), Reliability analysis of composite girder designed by LRFD method for positive flexure, *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, 26(3A), 539-546.
12. Bae, C. (2016), Determination of the load-resistance factors for reliability-based codes by optimization, Doctoral dissertation, Master thesis, Seoul National University, Seoul, South Korea, 26.
13. Nowak, A. S. (1999), Calibration of LRFD Bridge Design Code, NCHRP Report 368, Transportation Research Board, Washington, D.C., 9-28.
14. Hwang, E. S. (2009), Development of Vehicular Load Model using Heavy Truck Weight Distribution (I), (II)(in Korean), *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 29(3), 189-197(I), 199-207(II).

Received : 11/10/2022

Revised : 12/06/2022

Accepted : 12/11/2022

---

**요 지 :** 이 연구에서는 국내 도로교량 평가에서도 설계와 일관성이 있도록 한계상태설계법에 상응하는 평가방법을 마련하고, 선진국과 같이 평가에서 목표신뢰도지수를 감소시키는 경우 신뢰도분석을 통하여 보정하여 평가 활하중계수를 제안한다. 국내 대표 교량형식을 대상으로 수집한 실교량 자료를 활용하여 각 설계기준 별 설계활하중에 대한 하중효과를 산정하여 비교한다. 현행 설계법에 의해 산정된 하중효과를 바탕으로 최소요구강도를 산정하여 이에 대한 신뢰도분석을 통해 활하중계수 보정을 수행한다. 설계수준에 비하여 낮춰진 평가수준의 활하중계수를 교량 안전성평가를 수행하고, 이전 설계법의 안전성평가 결과와 비교하여 평가결과가 증가함을 확인하였다.

**핵심용어 :** 한계상태설계법, 신뢰도 분석, 하중계수 캘리브레이션, 안전성 평가, 설계활하중

---