

## 제한 중량을 초과하는 기중기 차량 통행에 대한 콘크리트 교량의 안전성 평가

이성재<sup>1</sup>, 유상선<sup>2</sup>, 박영환<sup>3</sup>, 백인열<sup>4\*</sup>

### Safety Evaluation of Concrete Bridges for Passage of Crane Vehicle Exceeding Weight Limit

Sung-Jae Lee<sup>1</sup>, Sang Seon Yu<sup>2</sup>, Younghwan Park<sup>3</sup>, Inyeol Paik<sup>4\*</sup>

**Abstract:** It is necessary to develop a rational method for evaluating the safety of bridges for the passage of inseparable crane vehicles exceeding the limit weight. In this study, the same method applied to the development of the recently introduced reliability-based highway bridge design code - limit state design method is applied to the calibration of the live load factor for the crane vehicle. Structural analysis was performed on the concrete bridge and the required strengths of the previous design code, the current design code and AASHTO LRFD were compared. When comparing the unfactored live load effect, the live load of the crane was greater than that of the current and previous design code. When comparing the required strength by applying the calibrated live load factor, the previous design code demands the largest strength and the current design code and the crane live load effect yields similar value. The results of safety evaluation of the actual bridges on the candidate route for the crane passage secured the same reliability as the target reliability index required by the design code and the strength of the cross section of the actual bridge is calculated greater than the required strength for the passage of the crane, which confirms the safety for the passage of the crane.

**Keywords:** assessment of concrete bridge, crane vehicle, design live load, overweight indivisible vehicle, reliability analysis, safety evaluation of bridge

## 1. 서 론

이 논문에서 대상으로 하는 분리 불가능한 중차량인 기중기 차량은 현행 국내 도로법에서 규정하고 있는 제한 중량인 40톤을 초과하여, 운행에 많은 제한을 받고 있다. 특히 중차량에 대한 도로 교량의 안전성을 평가할 수 있는 합리적인 방법이 아직 국내에는 정립되지 않고 있어 이에 대한 대책이 시급한 상황이다.

국내에 2012년에 최초로 도입된 후 최근 코드화된 도로교 설계기준 한계상태설계법(2018)(이하 도설한 또는 KHBDC-LSD (Korea highway bridge design code by limit state design method))은 이 문제를 해결하기 위한 좋은 해결 방법을 제시해 주고 있다. 도설한은 작용 활하중에 대한 교량의 안전검증을 위하여, 교량구조와 활하중의 통계특성에 맞추어 목표신

뢰도지수를 확보하는 활하중계수를 보정 (calibration)하여 제시하는 신뢰도기반 설계방법을 채택하고 있다. 기존의 도로교설계기준(2010, 이하 도설기 또는 KHBDC (Korea highway bridge design code))에서는 안전율을 확보하는 하중계수를 주로 경험적인 방법으로 정하고 있었으므로, 일반적인 트럭 하중과는 다른 특별한 중량의 기중기와 같은 차량하중에 대한 활하중 계수를 정하는데 어려운 점이 있었다.

미국 AASHTO는 1994년에 신뢰도기반 설계방법인 AASHTO LRFD (Load and resistance factor design)을 제정하였고, 2003년에 이에 상응하는 신뢰도기반 평가방법인 LRFR (Load and resistance factor rating)을 도입하였다. 이를 위하여 신뢰도기반 평가방법 개발 연구(Moses, 2001)를 수행하였다. LRFR은 신뢰도기반 기준에서 정의하는 안전율인 목표신뢰도지수를 2.5로 하여 LRFD의 3.5보다 감소시켰으며, LRFD의 개발(Nowak, 1999)에 사용한 교량구조의 저항강도 및 작용 하중의 통계특성을 동일하게 적용하여 목표신뢰도지수를 확보하는 평가용 활하중계수를 구하였다. 이후 추가로 진행된 연구 과제를 통하여(Sivakumar and Ghosn, 2011) 개정을 거쳐 MBE (Manual for bridge evaluation)의 명칭으로 현재 적용하고 있다. MBE에서는 기중기와 같이 분리 불가능하며 무게가 제한 중량을 초과하는 중차량에 대하여 허가차량으로 별도로 구분하여 설계활하중과는 다른 활하중

<sup>1</sup>정회원, 가천대학교 석사

<sup>2</sup>학생회원, 가천대학교 석사과정

<sup>3</sup>정회원, 한국건설기술연구원 선임연구위원

<sup>4</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 2021년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2021년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

계수를 제시하고 있다.

국내에서는 국토교통부에서 제한차량 운행허가 시스템 (MLIT, 2020)을 개발하여 웹사이트를 운영 중이며, 이에 연계시킬 수 있는 허가차량의 통행을 위한 평가방법 개발을 진행 중이다. 서울특별시 중차량 통행 노선 및 시스템 개발 (Seoul M.G., 2003)에서는 Moses (2001)의 연구방법을 채택하여, 미국의 설계활하중과 허가차량의 관계를 당시 국내 설계활하중인 DB-24에 적용하여 간접적으로 국내 허가차량의 활하중계수를 도출하여 적용하였다.

국내에 2011년에 도입된 도설한의 설계 활하중인 KL-510은 현재 국내 교량에 재하되는 차량 데이터를 기반으로 개발되었으므로, KL-510을 기반으로 하는 교량 안전성 평가가 필요하며, 도설한의 통계 및 신뢰도에 기반한 활하중계수 결정 과정을 동일하게 적용하여 기중기 중차량에 대한 활하중계수를 결정하는 연구가 필요하다. 현재 국내 교량 평가는 한국시설안전공단의 시설물의 안전 및 유지관리 세부지침(KIMC, 2019)을 따르며, 교량 평가에 적용하는 하중계수 및 저항계수는 설계기준의 값과 동일하게 적용하고 있으므로, 국내 교량 평가의 안전율은 교량 설계의 안전율과 동일하다고 할 수 있다.

이 논문에서는 국내 현행 설계기준인 도설한의 목표신뢰도 지수인 3.7과 동일한 목표신뢰도지수를 확보하는 기중기 활하중에 대한 활하중계수를 구하는 과정을 제시한다. 이를 위하여 국내 제한 중량을 50% 초과하는 총 중량 60톤인 기중기를 대상으로 하여 일반 차량과 함께 운행하는 경우에 대하여 교량 평가를 위한 기중기 활하중계수를 결정하는 과정을 보인다. 철근콘크리트 슬래브교와 프리스트레스 빔교를 대상으로 국내 기존 및 현행 설계 활하중의 하중 효과를 비교 분석하며 미국 AASHTO LRFD의 활하중인 HL-93의 값과 비교한다. 신뢰도분석을 위한 통계특성은 대부분 국내 도설한 개발에 적용한 국내 통계특성을 적용하고, 국내 값이 아직 알려지지 않은 경우에는 미국의 신뢰도분석 보고서 (Nowak, 1999; Moses, 2001) 값을 적용한다. 국내 기중기 통행 대상 노선 상의 다수의 교량들에 적용하여 결과를 분석한다.

## 2. 기중기 차량의 활하중 효과

### 2.1 설계활하중 및 기중기활하중

이 논문에서 대상으로 하는 3가지의 설계기준은 국내 도로교설계기준 한계상태설계법 (KHBDC-LSD), 국내 기존 도로교설계기준 (KHBDC) 및 미국 AASHTO LRFD이다. 이 3가지 설계기준의 활하중 모형은 각각 KL-510, DB-24, HL-93이

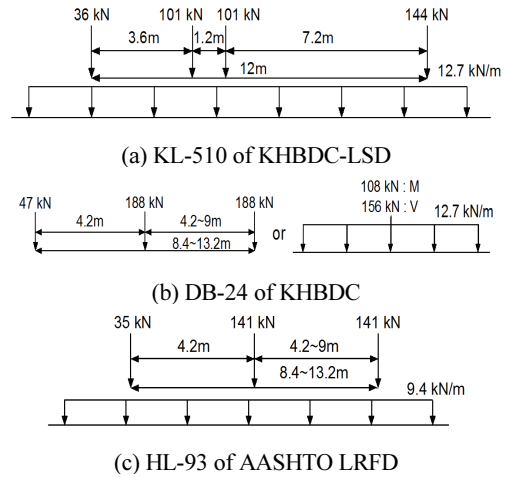


Fig. 1 Design live load model

며 Fig. 1과 같다. 이 논문에서는 동일한 교량에 대하여 이들 설계하중에 의한 소요강도를 구하여 비교한다.

활하중에 대한 내하율을 계산하기 위한 수식은 다음과 같다.

$$\text{내하율} (RF) = \frac{M_d - (\gamma_{DC} M_{DC} + \gamma_{DW} M_{DW})}{\gamma_L M_L (1 + IM)} \quad (1)$$

이 식에서  $M_d$  은 설계휨강도,  $M_{DC}$  는 부재자중,  $M_{DW}$  는 포장하중,  $M_L$  는 설계활하중을 나타내고  $\gamma_{DC}$  는 부재자중계수,  $\gamma_{DW}$  는 포장하중계수,  $\gamma_L$  는 설계활하중의 활하중계수,  $IM$ 은 충격계수이다. 이 식은 일반적인 내하율 수식에 포장 고정하중을 추가한 식이다. 3가지 설계기준의 하중계수 및 충격계수는 Table 1 과 같다. 고정하중 계수를 살펴보면, 기존 도로교설계기준에 비하여 도로교설계기준-한계상태설계법 및 미국 LRFD의 고정하중계수는 0.05만큼 작다. 교량의 총 설계하중에서 고정하중이 차지하는 비중이 매우 크므로, 고정하중계수의 감소는 소요강도를 감소시키는 효과가 있다. 활하중계수는 각 설계기준의 활하중 모형에 곱해지므로, 활하중 자체의 크기와 함께 비교되어야 한다. 충격계수의 크기는 국내 기준이 미국 기준보다 작다.

3가지 설계기준의 다차로재하계수는 Table 2 와 같다. 교량 설계에서 2차로 재하를 기준으로 비교한다면, 기존 도로교설계기준에서는 1.0을 적용하여 2차로 재하 하중효과를 더하게 되나, 도로교설계기준-한계상태설계법에서는 2차로 재하 하중효과를 0.9로 감소시키고 있다. 미국 LRFD는 1차로 재하인 경우에 1.2를 곱하며, 2차로 이상부터 감소시키고 있으며 1차로를 1로 보았을 때 2차로는 0.83의 비율로 감소시킨다.

또한 국내 도로법에서 제한하는 차량 중량인 40톤을 초과하는 기중기가 통행하는 경우에 대한 소요강도를 구하여 설

**Table 1** Load factor and impact factor

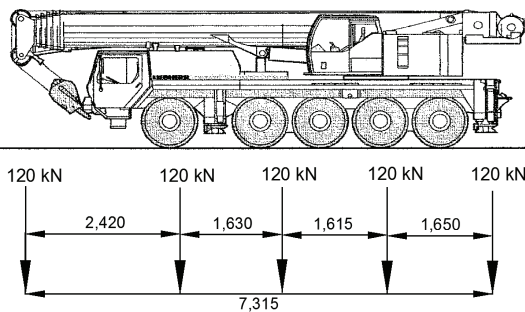
	KHBDC -LSD(2015)	KHBDC (2010)	AASHTO LRFD
Dead Load Factor	1.25 (*1.50)	1.30	1.25 (*1.50)
Live Load Factor	1.80	2.15	1.75
Impact factor	25%	$\frac{15}{L+40}$ ≤ (30%)	33%

\*Dead load factor for wearing surface

**Table 2** Multiple presence factor

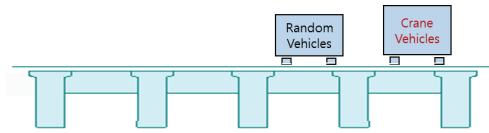
Number of load	KHBDC -LSD	KHBDC (2010)	AASHTO LRFD
1	1.00	1.00	1.20 (1.0)
2	0.90	1.00	1.00 (0.83)
3	0.80	0.90	0.85 (0.71)
4	0.70	0.75	0.65 (0.54)

계하중과 비교한다. 이 논문에서는 Fig. 2에 보인 바와 같이 제한 중량을 50% 초과하는 중량 60톤인 5축 기중기를 예를 들어 평가하고 결과를 비교한다. 일반적으로 기중기 각 축의 축중량은 12톤으로 구성되며, Fig. 2에 구조해석에 필요한 기중기의 축간 거리를 나타낸다. 기중기의 총 축거리는 7.32m이며, 이는 총축거 12m 인 KL-510보다 많이 짧고, DB-24 및 HL-93의 8.4m 보다도 짧으므로, 활하중 모멘트 효과가 매우 크게 작용할 수 있다.



**Fig. 2** Crane vehicle with total weight of 60 tons

60톤 중량의 기중기가 일반차량과 함께 교량을 통과하는 경우를 보수적으로 가정하여, Fig. 3과 같이 기중기 차량을 외측 차선에 재하하고, 설계 활하중을 내측차선에 재하한다. 내측에 재하하는 설계활하중은 최근 차량 통행특성을 반영하여 개발된 도설한의 KL-510을 재하한다.



**Fig. 3** Crane vehicle loaded on outside lane and design live load on inside lane

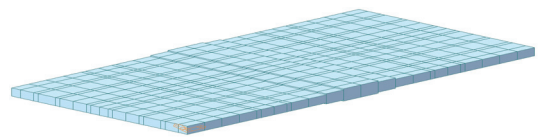
기중기 차량에 대한 구조부재의 소요강도는 다음과 같다.

$$M_d \geq \gamma_{DC}M_{DC} + \gamma_{DW}M_{DW} + \gamma_L M_L (1 + IM) + \gamma_{CR}M_{CR} (1 + IM) \quad (2)$$

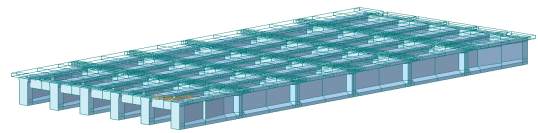
이 식에서  $M_{CR}$ 는 기중기 활하중,  $\gamma_{CR}$ 는 기중기 허가차량의 활하중계수를 나타내며 2.4절에서 신뢰도분석을 통하여 결정한 값을 적용한다. 충격계수는 보수적으로 판단하여 설계기준 활하중과 동일한 값을 적용한다.

## 2.2 설계활하중 및 기중기활하중 효과 비교

이 연구에서는 기중기 통행 검토를 위하여 국도 상의 하나의 대상 노선 상에 위치한 교량들을 예제 교량으로 선정하였다. 이 논문에서는 RC 슬래브교와 PSC 빔교를 대상으로 하며 구조해석은 MIDAS/CIVIL (2020) 를 이용한다. Fig. 4에는 이들 중 하나의 교량에 대한 구조해석 모델링을 보여준다. Fig. 4(a)는 지간이 10m+10m인 연속 슬래브 교량이며, (b)는 지간이 30m이고 거더 간격이 2.40m인 PSC 빔 교량이다. PSC 빔 교량은 한 방향에 대하여 6 개의 빔으로 구성되어 있다.



(a) RC slab bridge (10+10m)



(b) PSC beam bridge (30m)

**Fig. 4** Example bridge

3가지 설계기준의 활하중인 KL-510, DB-24, HL-93는 교량 폭을 고려하여 RC교는 2차로까지, PSC교는 3차로까지 재하할 수 있다. 기중기차량 재하의 경우에는 기중기차량을 외측 차로에 재하하고 현행 설계기준의 설계활하중 KL-510을 교량 폭을 고려하여 내측에 추가로 재하한다. RC교는 추가 1

차로, PSC교는 추가로 2차로까지 재하하며, 설계활하중에만 다차로재하계수를 적용하여 추가 1차로, 2차로인 경우에 각각 2차로, 3차로 다차로재하계수를 적용한다. Fig. 3과 같이 일반 차량과 함께 통행하는 교통상황을 고려하여 추가로 재하하며, 너무 과도한 활하중이 추가되는 것을 방지하기 위하여 다차로재하계수를 적용하였다. 이와 같은 재하 방법은 호주 설계기준 (Standards Australia, 2017)에서 제시하고 있는 방법과 동일하다.

Fig. 5는 활하중에 대한 슬래브교 정모멘트 및 부모멘트와 PSC 교 정모멘트를 나타낸다. 1차로 재하 결과를 비교하면, 슬래브교는 DB-24가 가장 작고, KL-510, HL-93, 기중기 순서로 크며, PSC 빔교는 DB-24가 가장 작고, KL-510, 기중기, HL-93 순서로 크다. 설계 활하중으로 선택되는 2차로 재하인 경우에는 다차로재하 계수 효과로 인하여 활하중 모멘트 크기의 순서가 달라진다. 슬래브교와 PSC 빔교 모두에서 KL-510, HL-93 이 작고, 그 다음으로 DB-24이 크며, 두 교량 모두에서 기중기

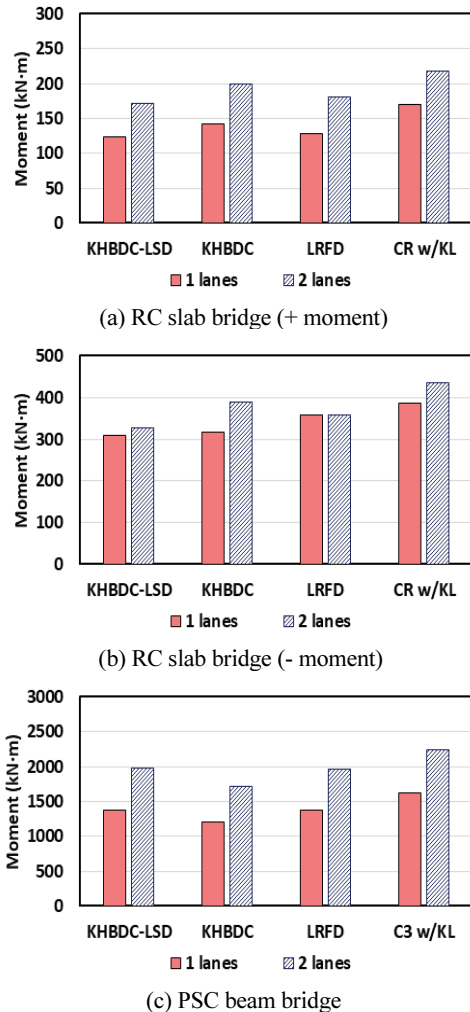


Fig. 5 Live load moment for design load models

활하중 모멘트가 가장 크다.

### 2.3 교량 단면 강도

설계기준에서는 부재의 강도를 산정할 때 Table 3과 같은 저항계수를 적용한다. 도설한에서는 재료의 공칭강도에 저항계수를 미리 곱하는 방식으로, 콘크리트에 0.65, 철근 및 긴장재의 공칭강도에 0.90을 곱하여 감소시킨 재료의 설계강도로 단면의 휨강도를 구하는 방식이다. 기존 도설기에서는 재료의 공칭강도를 적용하여 부재의 공칭휨강도를 구하고, 여기에 휨에 대한 강도감소계수로 0.85를 곱한다. 미국 LRFD도 도설기와 같이 부재의 공칭강도를 구한 후에 강도감소계수를 곱하지만, 도설기보다 큰 강도감소계수를 적용하여 휨에 대한 철근콘크리트 부재는 0.9, 프리스트레스 부재는 1.0이다.

구조해석을 통하여 Fig. 5와 같이 각 설계기준의 활하중모형을 적용하여 구한 활하중효과 및 고정하중효과를 나타내면 Table 4와 같다. 지면의 제약상 정모멘트만 나타내었다.

설계기준별로 각각의 하중계수를 적용하여 소요강도 (required strength)를 구한 후 이와 같은 값으로 최소 단면 (minimum section)의 설계강도를 구하고, 여기에 각 설계기준의 저항계수를 적용하여 최소단면의 공칭강도를 구하였다. 이 경우에 도설한의 재료계수의 효과를 등가의 부재 저항계수로 환산하였는데, 즉, 설계강도를 재료계수 1로 구한 공칭강도로 나누어 등가의 부재 저항계수로 나타내었다. 예제 단면에 대한 도설한의 등가부재계수는 RC 슬래브교는 0.87, PSC 빔교는 0.89로 나타났으며, 이는 콘크리트의 재료계수인 0.65보다 인장축의 철근 및 긴장재의 재료계수인 0.90에 보다 더 가까움을 알 수 있다.

각 설계기준별로 다른 활하중효과와 하중계수 및 저항계수를 적용한 후에 결과로 얻어지는 교량 부재의 최소 공칭강도를 그래프로 비교하면 Fig. 6과 같다. 지간이 짧은 RC슬래브교는 도설한에 비하여 도설기가 요구하는 공칭강도가 1.29배 더 크며, 미국 LRFD는 0.98배로 거의 같다. 지간 30m인 PSC 빔교는 도설한을 기준으로 도설기의 요구 공칭강도는 1.07배로 비슷하며, 미국 LRFD는 0.88배로 가장 작다.

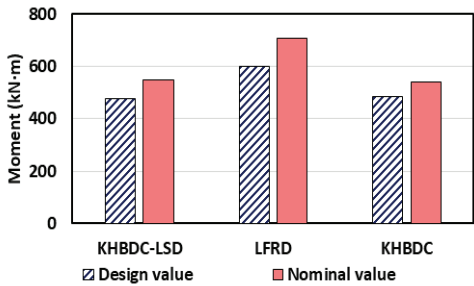
Fig. 7과 같은 예제 교량의 실제 단면에 대하여 공칭강도를 계산하고, 저항계수를 곱하여 설계강도를 구하여 Table 4에 나타내었다. 동일한 RC슬래브교 및 PSC 빔교 예제 교량단면에 대하여 도설한을 기준으로 볼 때 도설기는 각각 0.98배,

Table 3 Resistance factor for flexure

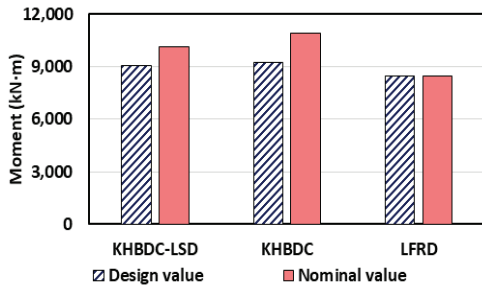
	KHBDC-LSD	KHBDC	AASHTO LRFD
Resistance factor	concrete 0.65 steel 0.90	0.85	RC 0.9 PSC 1.0

**Table 4** Design strength of bridges for each design code (positive moment, kN-m)

Type	Design Code (by live load model)	Dead load $M_D$		Live load $M_L$	Minimum section		Actual section		Resistance factor $\phi = M_d / M_n$
		$M_{DC}$	$M_{DW}$		Design strength $M_d$	Nominal strength $M_n$	Design strength $M_d$	Nominal strength $M_n$	
RC slab br.	KHBDC-LSD	118.7	12.92	171.3	476.1	547.2	726.0	834.5	0.87
	KHBDC	131.6		199.2	599.3	705.1	709.3	834.5	0.85
	LFRD	118.7	12.92	181.1	484.7	538.6	751.1	834.5	0.90
PSC beam br.	KHBDC-LSD	3,924	367	1,984	9,026	10,140	14,114	15,859	0.89
	KHBDC	4,291	-	1,709	9,251	10,880	13,480	15,859	0.85
	LFRD	3,924	367	1,964	8,892	8,892	15,859	15,859	1

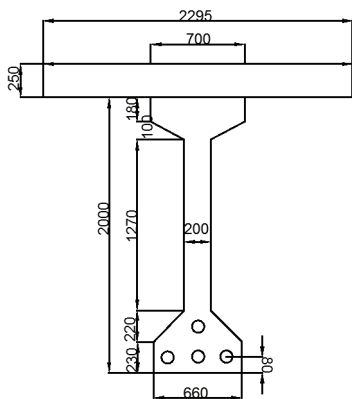


(a) RC slab bridge



(b) PSC beam bridge

**Fig. 6** Design and nominal flexural strength for minimum required strength (positive moment)



**Fig. 7** Dimension of an example PSC girder

0.96배, LFRD는 각각 1.03배, 1.12배의 설계강도를 주고 있다. 이는 각 설계기준의 저항강도의 차이에 기인한다.

### 3. 기중기 활하중계수 보정 및 실교량 적용 예

#### 3.1 신뢰도분석을 통한 활하중계수 보정

이번 연구에서는 최근 국내에 도입된 도설한의 신뢰도기반 활하중계수 보정(calibration) 절차와 동일한 과정을 거쳐 기중기 차량에 의한 교량의 안전성 평가에 적용할 활하중계수를 구한다. 신뢰도분석을 위한 하중 및 저항강도에 대한 통계 특성은 국내 도설한에서 적용한 값을 동일하게 사용하며, 기중기 차량의 통계특성은 일반 트럭을 모델링한 설계활하중의 통계특성과 비교하고 선행 연구를 참고하여 정한다.

Table 5에 도설한의 신뢰도분석에 적용된 설계변수들의 통계특성 값을 정리하였다. 이 표의 RC 및 PSC교량 공칭횡강도 통계특성은 국내 콘크리트, 철근 및 긴장재의 재료강도, 단면 치수 및 산정 수식의 통계특성을 적용하여 시뮬레이션을 통하여 구한 값이다. (Paik et al., 2009)

이 표에서 DC는 구조부재와 비구조적 부착물의 고정하중, DW는 포장과 시설물의 고정하중이다. 그리고 편심계수(bias

**Table 5** Statistical properties of design variables

	Nominal strength		Dead load		Live load
	RC slab	PSC beam	DC	DW	
bias factor	1.227	1.056	1.04	1.00	1.00
c.o.v.	0.130	0.090	0.09	0.25	0.20
distribution	log-normal	log-normal	normal	normal	extreme

**Table 6** Design strength of bridges for crane load with different live load factors (positive moment, kN·m)

Outer lane vehicle	Dead load		Outer lane $M_{CR}$	Inner lane (design load) $M_{KL}$	Live load factor $\gamma_L$		Design strength $M_d$	Nominal strength $M_n$	Reliability index $\beta$					
	$M_{DC}$	$M_{DW}$			Outer lane	Inner lane								
RC slab br.	KL-510	118.4	12.9	123.2	48.1	1.80		476.1	547.2	3.97				
						1.80		559.9	643.5	4.71				
						1.60		525.9	604.5	4.35				
						CR w/KL	118.4	12.9	169.8	48.1	1.80	492.0	565.5	3.95
												1.40	458.0	526.5
PSC beam br.	KL-510	3924	367	1368	616	1.8		9,026	10,142	3.91				
						1.80		9,481	10,653	4.42				
						1.60		9,157	10,289	4.13				
						CR w/KL	3924	367	1,621	616	1.8	8,833	9,924	3.82
												1.40	8,508	9,560

factor)는 변수의 평균값을 공칭값으로 나눈 비율이며, 변동계수(coefficient of variation, c.o.v.)는 표준편차를 평균으로 나눈 비율이다.

신뢰도지수를 구하기 위하여 이 연구에서는 도설한에서와 동일하게 FORM(First Order Reliability Methods) (Nowak and Collins, 2000)을 이용하여 분포가 정규분포가 아닌 통계 변수도 고려할 수 있는 Rackwitz-Fiessler 알고리즘을 적용하였다. 신뢰도지수를 구하기 위한 단면강도에서 하중효과를 제외한 안전여유를 나타내는 한계상태방정식은 다음과 같다.

$$g = M_n - (M_{DC} + M_{DW} + M_L) \quad (3)$$

한계상태방정식은 하중계수를 곱하여 구한 소요강도  $M_d$ 를 저항계수로 나눈 값인 구조부재의 공칭강도  $M_n$ 의 고정하중과 활하중에 대한 안전여유를 나타내는 식이며, 공칭강도와 고정하중 및 활하중의 통계특성을 적용하여 신뢰도분석을 하면 이 과정에 적용된 하중계수 및 저항계수가 확보하는 신뢰도지수를 얻게 된다.

기중기 차량에 의한 활하중효과의 통계특성은 다음과 같다. 기중기 차량은 일반 화물을 운송하는 트럭과는 달리 중량과 제원이 결정되어 있으므로, 이 논문에서는 기중기의 중량은 등록 시의 중량과 같이 축중량 12톤이고 총중량 60톤인 차량의 통행을 기준으로 편심계수는 1.0으로 한다. 교량에 미치는 활하중 효과의 통계특성 중 변동계수는 미국 평가지침의

활하중계수 보정 연구보고서(Sivakumar and Ghosn, 2011)를 참고하여 다음과 같이 크게 3가지로 구성 요소를 구분한다.

$$V_L = \sqrt{V_{LST}^2 + V_{LM}^2 + V_{DF}^2} \quad (4)$$

여기서  $V_{LST}$ 는 지역별 통행차량 중량을 측정하여 통계적 방법으로 설계수명 동안 발생할 수 있는 최대 중량을 추정하는 과정에서 발생하는 지역별 차량 중량 변동성, 교통량 별 통계적 추정값의 변동성, 데이터 수의 제한에 따른 변동성 등을 고려한 값이며,  $V_{LM}$ 는 충격계수의 변동성을 나타내고,  $V_{DF}$ 는 하중분배와 같은 구조해석 과정의 변동성을 나타낸다. 예를 들어 설계기준 활하중에 대하여는 각각 0.14, 0.07, 0.12를 적용하면  $V_L = 0.20$ 의 변동성을 얻게 된다. 이 연구의 대상인 기중기 차량의 경우에는 중량이 정해져 있으므로, 첫 번째 요소인 통계적인 중량추정이나 데이터의 지역별 변동성은 해당되지 않으므로 변동성이 감소시켜 각각 0.05, 0.07, 0.12를 사용하여 기중기에 의한 활하중효과의 변동성은  $V_{CR} = 0.15$ 로 적용하고 몇 가지 요소의 곱에 의한 변수이므로 그 분포는 로그정규분포를 적용한다. 기중기와 설계활하중을 함께 재하하는 경우 Table 9와 같이 외측에 재하되는 기중기에 의한 하중효과가 크므로, 하중효과의 비율에 따라 가중치를 적용하여 기중기와 설계활하중을 합친 활하중효과에 대한 변동계수를  $V_{CR+KL} = 0.16$ 으로 적용한다.

기중기의 활하중계수를 보정하기 위하여 Table 6와 같이

**Table 7** Dimensions of RC slab bridges on a candidate route for crane vehicle passage (m)

Bridge	Span	Width	Thickness of slab
RCS 1	10 + 10	19.5	0.60
RCS 2	13 + 13	41.0	1.00
RCS 3	11 + 15 + 11	38.5	0.66
RCS 4	12 + 18 + 12	19.5	0.50

**Table 8** Dimensions of sample PSC beam bridges on a candidate route for crane vehicle passage (m)

	Span	Width	Girder spacing	Girder height
PSC 1	25	19.5	2.2	1.75
PSC 2	30	14.0	2.4	2.00
PSC 3	30	23.5	2.4	2.00
PSC 4	35	12.3	2.4	2.20

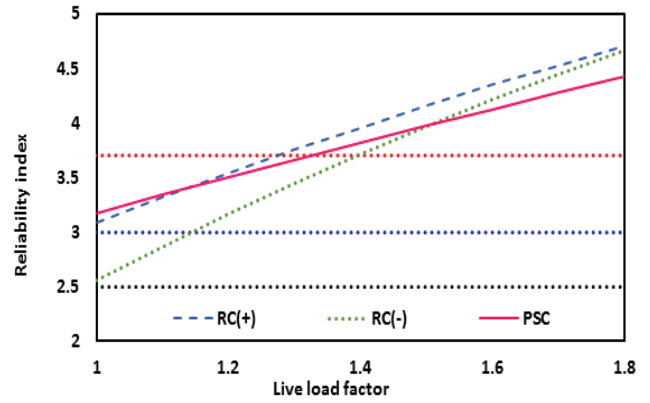
외측차선에 기중기를 재하하고 내측 차선에는 설계하중 KL-510을 재하한 후, 외측 차선의 허가차량에만 활하중계수를 1.80에서 점차로 낮춰가며 필요한 단면의 최소 공칭강도  $M_d$  한다. 이로부터 강도감소계수로 나누어서 공칭강도  $M_n$  을 구한 후, 식 (3)과 FORM을 적용하여 신뢰도지수를 구하면 Table 6의 맨 우측 열과 같다. 도설한의 목표신뢰도지수는 3.7로 정의하고 있으므로, 기중기 활하중계수로 1.4를 선택하면 목표신뢰도지수를 확보할 수 있다. Fig. 8은 RC 슬래브교의 정모멘트, 부모멘트 및 PSC 빔교의 정모멘트에 대한 목표신뢰도지수에 따른 기중기 활하중계수 추이를 보여준다.

참고로 AASHTO MBE의 허가차량에 대한 활하중계수는 허가 기간이나 통행방식에 따라 구분하여 1.10~1.40의 범위로 주어지고 있으므로, 이번 연구의 결과는 그 중 가장 큰 활하중계수에 해당한다.

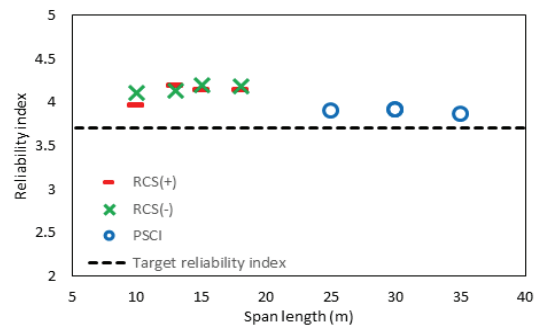
### 3.2 실교량의 내하력 평가 적용 예

이 절에서는 기중기 통행 수요가 많은 국도의 후보 노선을 대상으로 기중기 통행 가능성 검토 예를 보인다. 후보 노선 상의 RC 슬래브교와 PSC 빔교를 선택하여 기중기 차량이 일반 차량과 함께 통행하는 경우를 대상으로 활하중을 재하하고, 앞에서 도출한 기중기 활하중계수를 적용하여 안전성 평가를 수행하는 예를 보인다.

Table 7에는 후보 노선 상의 4개의 RC 슬래브 교량의 제원을 나타내며, 2경간과 3경간 연속이고 한 경간이 10m부터



**Fig. 8** Relationship between reliability index and crane live load factor for RC slab bridge and PSC beam bridge



(a) KL-510,



(b) Crane live load

**Fig. 9** Reliability index of the minimum required strength with respect to the load effects for the bridges on a candidate route for crane vehicle passage

18m까지로 구성되어 있다. 교폭과 슬래브의 두께를 표시하였다. Table 8은 후보 노선 상의 4개의 PSC 빔 교량의 제원을 나타내며, 경간이 25m에서 35m까지인 단순지지 교량이며, 교폭과 거더 제원을 나타내었다.

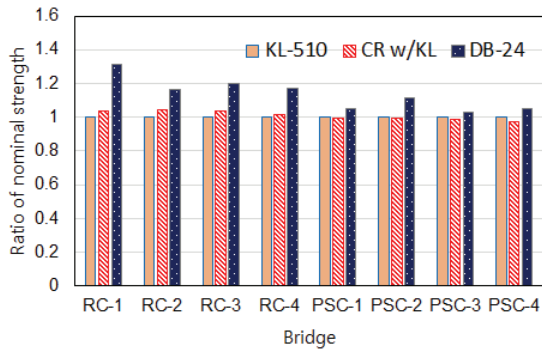
노선 상의 실교량들을 대상으로 구조해석 모델링을 수행하고, 이 교량들에 기중기를 재하하여 최소 소요강도를 구한다. 실교량들에 대한 최소 소요강도로부터 최소 공칭강도를 산정

하고, 이를 이용하여 이 연구에서 제안한 기중기 활하중계수를 적용한 경우의 신뢰도지수를 도시하면 Fig. 9와 같다.

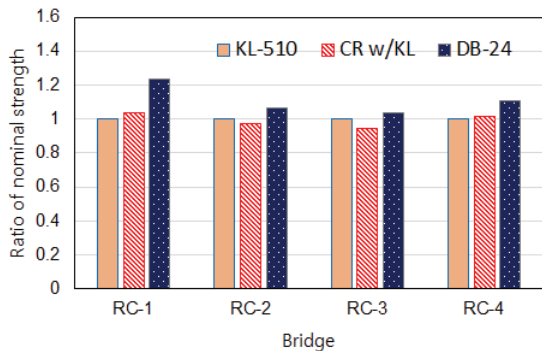
신뢰도기반 설계기준인 도설한의 활하중인 KL-510에 대한 신뢰도지수를 Fig. 9(a)에 도시하였으며, 도설한은 지간이 짧은 RC 슬래브교에 대하여 정모멘트 및 부모멘트 모두에서 목표신뢰도를 상회하는 신뢰도지수를 보이고 있으며, PSC 빔교에 대하여도 목표신뢰도를 확보하고 있음을 확인할 수 있다. 이 연구에서 보정한 기중기 활하중계수를 적용하여 노선상의 실교량들에 대한 최소 공칭강도에 대한 신뢰도지수를 구하면, Fig. 9(b)와 같다. RC슬래브교의 정·부 모멘트와 PSC 빔교에 대하여 모두 목표신뢰도지수를 확보하는 균일한 신뢰도지수를 보이고 있다.

Fig. 10에는 KL-510에 대한 비율로 DB-24 및 기중기 차량의 모멘트 효과에 각 활하중계수를 곱한 계수활하중효과를 도시하였다

Fig. 10에서 기중기의 계수활하중효과는 KL-510과 매우 비슷한 값을 주어서 정모멘트는 0.97~1.04, 부모멘트는 0.95~1.04의 비율을 보인다. DB-24의 계수활하중효과는 RC 슬래브교에서 정모멘트 1.16~1.31, 부모멘트 1.04~1.23이고, PSC 빔교에서 1.03~1.11의 비율을 보인다.



(a) Positive moment



(b) Negative moment

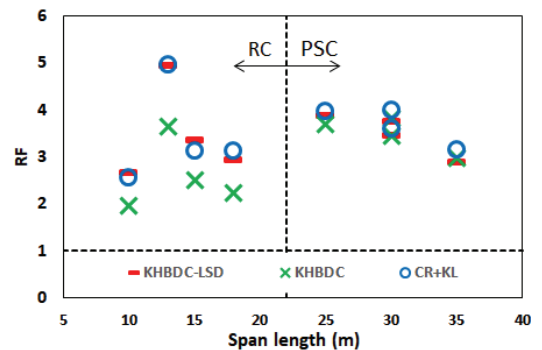
Fig. 10 Ratio of the factored live load effect of crane and DB-24 with respect KL-510

실교량의 단면 제원에 대한 구조계산을 통하여 실교량 단면의 강도를 구하고, 실단면의 강도가 확보하는 내하율(RF)을 식 (1)을 적용하여 구하였다. 식 (1)의 분모에는 각 활하중의 계수활하중을 적용한다. Fig. 11(a)에 후보 노선상의 RC슬래브교 및 PSC 빔교의 내하율을 도시하였다. 대개 도설기를 적용한 내하율이 가장 작았으며, 도설한과 기중기 활하중에 대한 내하력은 서로 비슷한 값을 주었다.

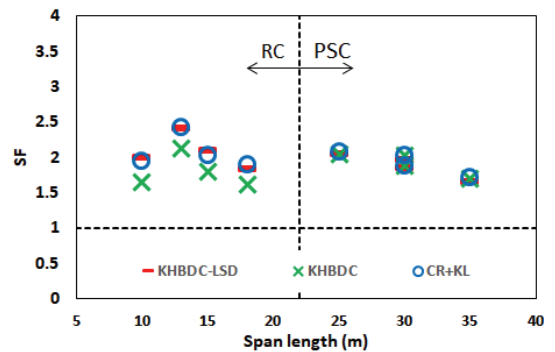
식 (2)와 같은 설계식에서 우변의 외력에 의한 소요강도에 대하여 좌변의 구조물이 제공하는 설계강도의 비율을 흔히 안전율(safety factor, SF)이라고 나타내므로, 실교량의 단면 강도를 적용한 SF를 각 활하중에 대하여 도시하면 Fig. 11(b)와 같다.

RC 슬래브교에서는 RF의 경우와 비슷하게 대개 도설기를 적용한 안전율이 가장 작았으나 그 차이는 크지 않았으며, PSC 빔교에서는 도설한, 도설기 및 기중기 활하중에 대한 안전율이 비슷한 값을 주었다.

이 연구에서 대상으로 한 교량들은 모두 기중기 차량의 통행에 대하여 신뢰도분석을 통하여 보정한 활하중계수를 적용할 때 충분한 내하율 및 안전율을 확보하고 있음을 알 수 있다.



(a) RF



(b) SF

Fig. 11 Safety factor and rating factor of the bridges on a candidate route for crane vehicle passage



## 4. 결 론

이 연구에서는 현행 국내 도로교설계기준과 동일한 목표신뢰도지수를 얻을 수 있도록 중량이 크며 분리 불가능한 기중기 차량에 대한 평가활하중계수를 보정하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 미국 AASHTO MBE에서 제시하고 있는 허가차량에 대한 활하중계수를 결정하는 방법과 원칙적으로 동일한 방법을 따른다. 다만 AASHTO MBE에서는 설계의 목표신뢰도지수보다 낮은 값에 대하여 평가의 활하중계수를 보정하고 있으나, 국내 교량평가는 시설물의 안전 및 유지관리 세부지침을 따라서 설계에서 적용하는 하중계수와 저항계수를 동일하게 적용하고 있으므로, 설계와 동일한 목표안전율로 평가를 수행하고 있다. 따라서 이 연구에서 국내 평가를 위하여 제안한 방법에서는 설계의 목표신뢰도지수와 동일한 값에 대하여 보정하였다.

이 연구에서는 예제 교량인 PSC 빔교, RC 슬래브교를 대상으로 하고 도로법에서 규정한 제한 중량인 40톤을 50% 초과하는 총중량 60톤인 5축 기중기 차량에 대하여 일반 차량과 함께 통행하는 경우에 대한 활하중계수를 산정한 예를 제시하였다. 함께 재하하는 일반차량을 나타내기 위하여 최신 차량 통행특성을 반영하여 최근 개발된 도설한의 KL-510을 재하한다. 이 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 신뢰도기반 설계기준인 도설한의 도입으로 국내 교량 평가도 하중 및 저항의 통계특성의 상대적인 차이를 반영하여 목표신뢰도지수를 확보할 수 있는 활하중계수 보정이 가능하게 되었다.
- 2) 이 연구의 대상 교량인 RC 슬래브교와 PSC 빔교에 대한 3가지 설계기준의 활하중 모형과 기중기 차량의 활하중 효과를 비교하면 2차로 재하인 경우를 기준으로 KL-510, HL-93이 작고, 그 다음으로 DB-24이 크며, 두 교량 모두에서 기중기 활하중 모멘트가 가장 크다.
- 3) 고정하중과 활하중의 하중조합으로 교량에 가해지는 소요강도를 비교하면, RC 슬래브교와 PSC 빔교에 대하여, 도설한을 기준으로 도설기가 요구하는 공칭강도가 1.29배, 1.07배더 크며, 미국 LRFD는 0.98배, 0.88배로 가장 작다.
- 4) 기중기 차량의 특성인 중량의 변동성이 신뢰도기반 활하중인 KL-510이 모사하는 일반 화물트럭보다 작다는 점을 변동계수에 반영하여 신뢰도분석을 통하여 도설한의 설계활하중계수인 1.8보다 작은 1.4를 적용하여도 목표신뢰도지수 3.7을 확보하는 과정을 보였다.
- 5) 국도의 기중기 통행 수요가 많은 후보 노선 상의 실교량

들을 대상으로 이 연구에서 보정한 활하중계수를 적용할 때 모두 목표신뢰도지수를 만족하며, 활하중에 대한 내하율과 소요강도에 대한 설계강도가 확보되어 있어 대상 기중기가 통행할 수 있음을 알 수 있다.

신뢰도 분석의 정확성을 위해서는 국내 주요 지역에 대한 통행 트럭의 중량에 대한 최신 통계특성 데이터와 교량의 거동에 대한 계측 데이터의 확보가 필수적이다. 향후 다양한 허가차량 형식 및 교량 형식, 대상 단면, 단면력 종류 등에 대하여 적용성을 검토하여 종합적인 분석을 거쳐 제한 중량을 초과하는 허가차량에 대한 활하중계수 보정이 필요하다.

## 감사의 글

이 연구는 국토교통부의 교통물류연구(도로) (과제번호 No. 20POQW-B152738-02) 지원사업으로 이루어진 것으로 국토교통부에 감사드립니다.

## Reference

1. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2018), Bridge Design Code : KDS 24 12 21 Bridge Design Load, 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) (2014), 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. Moses, F. (2001), Calibration of Load Factors for LRFR Bridge Evaluation, NCHRP Report 454, Transportation Research Board, Washington, D.C., 4-10.
6. Nowak, A. S. (1999), Calibration of LRFD Bridge Design Code, NCHRP Report 368, Transportation Research Board, Washington, D.C., 9-28.
7. Sivakumar, B., and Ghosn, M. (2011), Recalibration of LRFR Live Load Factors in the AASHTO Manual for Bridge Evaluation, NCHRP, New York, 40-57.
8. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2008, 2018), The Manual of Bridge Evaluations, AASHTO, Washington, D.C., 6:15-37.
9. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2020), Operation Permit System for Limited Vehicle : <https://www.ospermit.go.kr/>.
10. Seoul Metropolitan Government (2003). Development of Heavy

Vehicle Routes and System, 133-196

11. Korea Infrastructure Safety Corporation (2019), Detailed Guidelines for Safety and Maintenance of Facilities (Performance evaluation), KISC, 87-91.
12. MIDAS IT (2020), MIDAS/CIVIL.
13. Standards Australia (2017). Australian Standard - Bridge Design Part 7: Bridge Assessment (AS5100.7:2017), New South Wales, Australia, 22.
14. Paik, I., Hwang, E, and Shin, S. (2009), Reliability Analysis of

Concrete Bridges Designed with Material and Member Resistance Factors, Computers & Concrete, Techno-Press, 6(1), 59-78.

15. Nowak, A. S. and Collins, K. R. (2000), Reliability of Structures, McGraw-Hill., 120-129.

Received : 10/21/2020

Revised : 11/13/2020

Accepted : 11/20/2020

---

**요 지 :** 제한 중량을 초과하는 분리 불가능한 기중기 차량의 통행에 대한 교량 안전성 평가를 위한 합리적인 방법의 개발이 필요하다. 이 연구에서는 최근 도입된 신뢰도기반 도로교설계기준 한계상태설계법 개발에 적용된 동일한 방법을 기중기 차량 활하중계수 보정에 적용한다. 콘크리트 교량을 대상으로 구조해석을 수행하여 기존 설계기준에 의한 소요강도와 현행 설계기준 및 AASHTO LRFD에 의한 소요강도를 비교하고 실교량 단면의 설계강도를 비교하였다. 비계수 활하중 효과를 비교하면, 기중기 활하중이 현행 설계기준의 활하중과 기존 설계기준의 활하중보다 더 컸다. 보정된 활하중계수를 적용한 소요강도를 비교하면, 기존 설계기준의 소요강도가 가장 크고 기중기 활하중 효과는 현행 설계기준의 소요강도와 비슷하다. 기중기 통행 후보 노선 상의 실교량에 대한 안전성 평가 결과는 모든 교량에 대하여 설계기준에서 요구하는 목표신뢰도지수와 동일한 신뢰도를 확보하고 있으며, 실교량 강도는 기중기 통행에 필요한 소요강도보다 커서 대상 기중기 통행에 대한 안전성이 확인된다.

**핵심용어 :** 콘크리트 교량 평가, 기중기 차량, 설계 활하중, 분리불가능한 중차량, 신뢰도 분석, 교량 안전성 평가

---