

# 허가차량 통행에 대한 교량의 안전성 평가를 위한 허가차량 분류 체계 개발

유상선<sup>1</sup>, 김경현<sup>1</sup>, 백인열<sup>1</sup>, 김지현<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>가천대학교 토목환경공학과, <sup>2</sup>가천대학교 스마트첨단건설기술연구센터

## Development of Permit Vehicle Classification System for Bridge Evaluation in Korea

Sang Seon Yu<sup>1</sup>, Kyunghyun Kim<sup>1</sup>, Inyeol Paik<sup>1</sup>, Ji Hyeon Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil & Environment Engineering, Gachon University

<sup>2</sup>Smart Advanced Construction Technology Research Center, Gachon University

**요약** 이 연구에서는 분리불가능한 허가차량의 통행에 대한 교량의 안전성 평가 체계를 정립하여 제안하였다. 대상으로 하는 허가차량의 하중효과와 도로교설계기준(한계상태설계법)의 설계차량하중의 계수하중효과를 비교하여, 허가차량의 체계를 일상허가와 두 개의 특별허가로 분류하였다. 일상허가 및 특별허가 1에서는 일반차량과 동시 통행하도록 제안하였으며, 특별허가 2에서는 허가차량이 단독 통행하도록 제안하였다. 허가차량의 전후에 동시 통행하는 일반차량의 연행을 고려하기 위하여 도로교설계기준의 표준차로하중을 이용하여 허가 하중 모형을 제안하였다. 제안된 허가 하중 모형을 적용하여 공용중인 프리스트레스트빔 및 강박스교의 구조해석을 수행하였으며, 도로교설계기준의 하중·저항계수를 이용하여 허가하중 및 설계차량하중의 내하율 계산을 수행하였다. 교량 거더의 휨 및 전단에 대한 내하율 검토 결과 모든 차량하중의 내하율이 크게 계산되어 통행 가능한 것으로 확인되었다. 허가하중 및 설계차량하중의 휨 및 전단에 대한 교량의 신뢰도해석을 수행하여 신뢰도관점에서 충분한 안전성을 확보하는지 여부를 확인하였다. 도로교설계기준의 하중·저항계수를 이용하여 허가하중에 대한 최소요구강도를 계산하였으며, 최소요구강도의 신뢰도해석을 수행하였다. 최소요구강도의 신뢰도해석 결과 대부분의 허가차량에 대하여 도로교설계기준의 목표신뢰도지수를 확보하는 것으로 확인되었다.

**Abstract** This study proposes a bridge evaluation system for indivisible permit vehicles such as hydraulic cranes. The permit loads for the bridge evaluation are divided into three categories: routine permit loads, special permit 1 loads, and special permit 2 loads. Routine permit and special permit 1 vehicles are allowed to cross a bridge with normal traffic. For these two permits, the standard lane model in the Korean Highway Bridge Design Code was adopted to consider normal traffic in the same lane. Special permit 2 vehicles are assumed to cross a bridge without other traffic. Structural analyses of two prestressed-beam bridges and two steel box girder bridges were conducted for the proposed permit loads. The rating factors of the four bridges for all permit loads were calculated as sufficiently large values for the moment and shear force so that crossing the bridges can be permitted. A reliability assessment of the bridges was performed to identify the reliability levels for the permit vehicles. It was confirmed that the reliability level of the minimum required strength obtained by the load-resistance factors yields the target reliability index of the design code for the permit vehicles.

**Keywords** : Bridge Evaluation, Rating Factor, Permit Vehicle, Structural Analysis, Reliability Analysis

이 연구는 국토교통부의 교통물류연구(도로) (과제번호 No. 20POQW-B152738-02) 지원사업으로 이루어진 것으로 국토교통부에 감사드립니다. 또한 허가체계 정립을 위한 실제 교량의 설계 및 구조해석 자료를 제공해 주신 ㈜천일 구조부에 감사드립니다.

\*Corresponding Author : Ji Hyeon Kim(Smart Advanced Construction Technology Research Center, Gachon Univ.)

email: jhkimcivil@gachon.ac.kr

Received November 6, 2020

Revised December 1, 2020

Accepted December 4, 2020

Published December 31, 2020

## 1. 서론

도로법 시행령의 차량운행제한규정에 따르면 차량의 축중 10톤 또는 총중 40톤을 초과하는 차량은 운행제한 차량에 해당하며, 통행시 제한 차량 운행허가 시스템을 통하여 운행허가를 신청하도록 명시되어 있다. 이러한 차량의 운행허가를 판단하기 위하여 통행차량에 대한 교량의 안전성 평가 체계 정립이 필수적이다.

미국에서는 교량설계기준(AASHTO LRFD Bridge Design Specifications)[1]에 상응하는 교량 안전성 평가 매뉴얼(The Manual for Bridge Evaluation) (MBE)[2]을 정립하여 사용하고 있으며, 캐나다의 교량설계기준(Canadian Highway Bridge Design Code)[3]에서는 설계기준 내에서 교량의 안전성 평가 체계 및 절차에 대하여 상세히 기술하고 있다. 호주 역시 교량설계기준(Australian Standard Bridge Design) PART 7 (AS 5100.7)[4]에서 교량의 안전성 평가 방법과 체계에 대한 내용을 명시하고 있다. 국외의 안전성 평가 체계 매뉴얼 및 기준에서는 설계차량뿐만 아니라 운행제한 차량과 같이 허가가 필수적인 차량에 대한 교량의 안전성 평가 체계를 갖추고 있다. 또한 설계기준에 상응하여 신뢰도기반으로 정립되어 있기 때문에 목표신뢰도지수를 명확하게 명시하고 있으며, 안전성 평가 체계의 신뢰도기반 하중계수 결정과 관련한 많은 연구가 보고되어 있다[5,6].

국내의 경우 한국도로공사에서 신뢰도기반 교량 안전성 평가 지침(안)[7]을 출판하여 도로교설계기준(한계상태설계법)(이하 도로교설계기준)[8]에 상응하는 안전성 평가 방법을 처음으로 제안하였다. 하지만 해당 안전성 평가 지침(안)은 명확하게 목표신뢰도지수를 명시하고 있지 않으며, 도로교설계기준의 설계 차량할중인 KL-510을 대상으로 교량을 평가하고 있기 때문에 허가 차량에 적용하기 어렵다는 한계점이 있다. 따라서, 이 연구에서는 국토교통부 훈령에 따라 운행 허가를 반드시 받아야 하는 허가차량에 대한 안전성 평가 체계를 정립하고, 도로교설계기준을 적용하여 검토하였을 때 확보되는 내하율 및 신뢰도수준을 확인한다.

대상으로 하는 허가차량은 축중 12톤의 타이어식(유압식) 기중기 차량이며, 4축 ~ 7축 기중기를 포함한다. 이 연구에서 허가차량의 분류는 일상허가, 특별허가 1, 특별허가 2로 세 개의 허가체제로 구성하였다. 일상허가와 특별허가 1은 일반차량과 동시 통행하도록 규정하였으나, 특별허가 2는 총중 80톤 초과 차량으로 그 중량이 운행제한 차량 중량의 두 배를 초과하기 때문에 단독 통

행하도록 규정한다. 일반차량과 동시 통행하는 경우에는 허가차량의 앞뒤 차량의 연행을 고려하여 표준차로하중을 동시 재하하도록 규정하였으며, 허가차량의 중량은 실제 통행 상황과 등가의 하중효과를 발생시키기 위하여 감소시킬 것을 제안한다.

이 연구에서 제안하는 안전성 평가 체계를 공용중인 4개의 교량에 적용하여 허가차량에 대한 내하율과 신뢰도 지수를 계산한다. 내하율 계산을 위한 하중-저항계수는 도로교설계기준의 값을 채택하였으며, 교량의 거더 강도 역시 도로교설계기준에 따라 계산한다. 4개 교량의 허가 차량에 대한 내하율로부터 허가차량의 통행 가능여부를 확인하며, 신뢰도해석 결과로부터 설계기준의 목표신뢰도지수 3.72보다 높은 신뢰도수준이 확보되는지 여부를 확인한다. 설계기준의 하중-저항계수에 의해서 계산되는 최소요구강도를 계산하고, 신뢰도해석을 수행하여 안전성 평가 체계가 확보하는 신뢰도수준을 확인한다.

## 2. 허가차량의 분류 체계

### 2.1 일상허가 및 특별허가 분류

축중 12톤의 타이어식 기중기는 국토교통부훈령 차량 운행제한규정에 따라 통행시 운행허가가 반드시 필요하다. 현재 국내에서 건설기계로 등록되어 통행중인 타이어식 기중기는 축수가 2축부터 9축까지 다양하며, 가장 일반적인 축중 12톤 기중기의 경우 총중 24톤부터 108톤까지로 총중의 범위가 넓기 때문에 모든 기중기의 통행에 동일한 허가 방식을 적용하는 것은 합리적이지 않다. 따라서 이 연구에서는 차량 통행 허가를 일상허가, 특별허가 1, 특별허가 2 세 종류로 분류하여 허가 체계를 정립하였으며, 기중기의 축수에 따라 다른 허가 체계를 적

Table 1. Classification of permit types, regulations and examples of cranes

Permit type	Regulation			Example of crane
	Period	Frequency	Loading condition	
Routine permit	Less than 1 year	Unlimited crossing	Mix with normal traffic	2, 3, 4 axle cranes
Special permit 1	30 ~ 90 days	Less than 100 crossing	Mix with normal traffic	5, 6 axle cranes
Special permit 2	-	Single trip only	Escorted with no other vehicles	7, 8, 9 axle cranes

용할 것을 제안한다. Table 1에는 이 연구에서 제안하는 허가 분류 체계와 허가차량의 통행규정, 각 허가에 해당 되는 허가차량에 대하여 정리되어 있다.

타이어식 기중기에 대한 허가 분류 체계는 차량의 총 중 및 구조해석 결과를 바탕으로 결정하였다. 국토교통부 차량운행제한규정의 '별표 2' 차량의 축수 및 최원축간 거리에 따른 운행허가 기준표에 따르면 분리운송이 불가능한 규격화된 차량의 축중이 12톤 이하 일 때 최원축간 거리에 따라 총중 최대 48톤까지는 운행 허가 신청 시 별도의 구조물 통과 하중계산서 서류를 생략할 수 있도록 허용하고 있다. 이를 바탕으로 이 연구에서는 2축 ~ 4축 타이어식 기중기를 일상허가로 분류하여 총중 최대 48톤까지 일상허가로 적용 가능하도록 제안하였다.

도로교설계기준[8]에서 사용되는 설계 차량활하중 (KL-510)에 의한 하중효과와 타이어식 기중기 차량에 의한 하중효과를 비교하여 특별허가를 두 종류로 분류하였다. Fig. 1에는 KL-510의 표준트럭하중에 대한 제원이 도시되어 있으며, Fig. 2에는 대표적으로 6축 타이어식 기중기 차량의 제원이 나타나 있다. 도로교설계기준의 KL-510에 의한 하중효과와 4축 ~ 7축 기중기 차량에 의한 하중효과를 비교하기 위하여 단순교를 대상으로 차량하중에 의한 계수모멘트 및 계수전단력을 계산하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 각 차량하중의 충격계수는 설계기준의 충격계수 0.25를 적용하였으며, 도로교설계기준에 따라 설계 차량하중의 활하중계수는 1.8을 허가차량의 활하중계수는 1.4를 적용하였다. Fig. 3의 y 축은 개별 기중기에 의한 계수하중효과를 KL-510에 의한 계수하중효과로 표준화하여 나타낸 값으로, 대상으로 하는 단순교의 경간을 10m부터 60m까지 5m 간격으로 설정하여 다양한 경간에 대한 표준화된 하중효과와 변화를 확인하였다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 4축 기중기의 경우에는 경간 10m 교량의 전단력을 제외하고 계수하중효과가 KL-510에 의한 계수하중효과보다 작은 것을 확인할 수 있다. 따라서 2 ~ 4축 기중기까지 일상허가차량으로 분류하는 것이 타당하다고 판단된다. 그림에서 7축 기중기에 의한 하중효과는 경간 45m 미만인 범위에서 KL-510에 의한 하중효과보다 항상 크게 발생하는 것을 알 수 있으며, 특히 정모멘트에 대해서 최대 1.3배의 하중효과가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 전술한 계수하중효과를 바탕으로, 이 연구에서는 KL-510에 의한 계수하중효과와 1.2배를 기준으로 하여 특별허가 1과 특별허가 2를 분류하는 것으로 제안한다. 따라서 7축 이상의 기중기의 경우에는 동

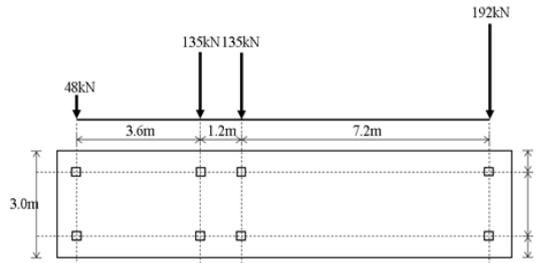


Fig. 1. Axle loads and dimensions of the standard truck load in Korean Highway Bridge Design Code (Limit State Design)

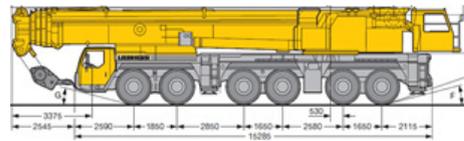


Fig. 2. Dimensions of the 6 axle hydraulic crane

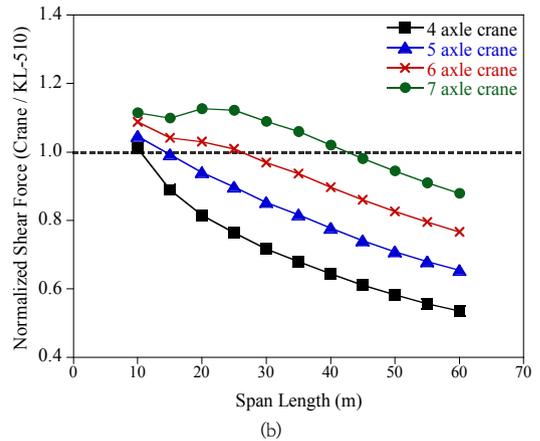
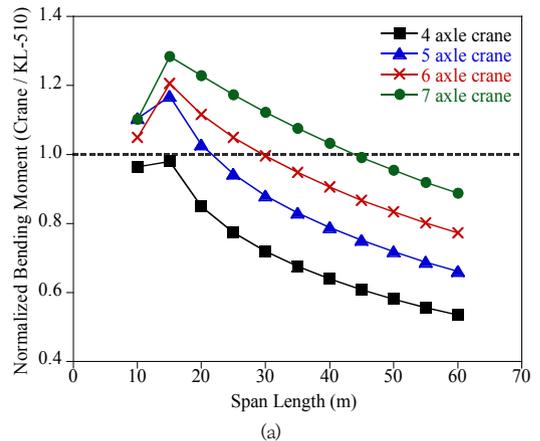


Fig. 3. Factored Load effects of the cranes normalized by those of the KL-510: (a) Bending moment, (b) Shear force

시 통행하는 차량 없이 단독 통행할 것을 허용하며, 1회 통행을 허가하는 특별허가 2로 분류한다. 이 연구에서 제안하는 허가 분류 체계는 모든 허가차량의 분리 가능한 부품을 탈거하고 차량 외 다른 적재 물품이 없는 상태에서 운행하는 경우에만 적용할 수 있는 것으로 제한한다.

### 2.2 직렬 연행을 고려한 허가 하중 정의

일상허가와 특별허가1에서는 허가차량의 앞뒤를 직렬로 동시 통행하는 일반 차량의 연행효과를 고려하기 위하여 차로하중을 정의하여야 한다. 이 연구에서는 일반차량의 직렬연행을 반영하기 위하여 도로교설계기준 KL-510의 표준차로하중 12.7kN/m를 채택하였다. Fig. 4(a)에는 허가차량과 일반차량의 동시 통행을 나타내는 실제 허가 하중모형이 도시되어있다.

실제 통행 가능한 상황 중에서 가장 보수적인 형태를 나타내기 위하여 허가차량의 붐 선단(main boom head)과 연행하는 일반차량의 차미의 거리를 1m, 허가차량의 차미와 연행하는 일반차량의 차두의 거리를 1m로 가정하였다. 하지만 Fig. 4(a)와 같이 허가 하중모형을 제안하는 경우, 연속교에 다차로재하시 영향선을 고려한 하중 모델링을 구현하는데 어려움이 있다.

제안하는 안전성 평가 체계의 적용성을 위하여 Fig. 4(a)와 동일한 하중효과를 발생시키는 이상화된 허가 하중모형을 Fig. 4(b)와 같이 제시한다. Fig. 4(b)의 이상화된 허가 하중모형에서 허가차량 중량의 감소 비율 0.80은 구조해석 결과를 바탕으로 다음과 같이 결정하였다. 경간 10m부터 60m까지 5m 간격의 단순보를 대상으로 4축 ~ 6축 기중기 차량을 표준차로하중과 중복 재하한다. 이 때 허가차량 중량의 감소 비율로 도로교설계기준의 KL-510에서 사용중인 0.75를 포함하여 0.75, 0.80, 0.85를 고려하였다.

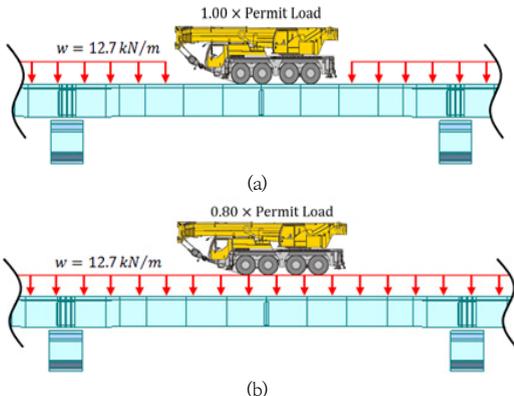


Fig. 4. Permit load models: (a) Actual loading condition, (b) Idealized loading condition

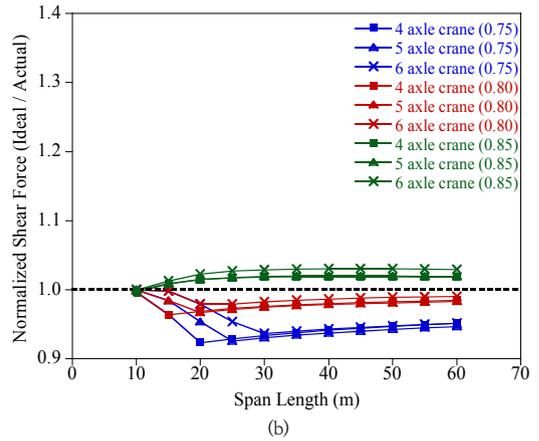
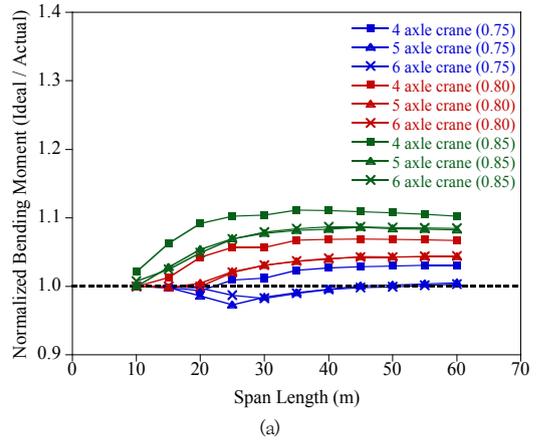


Fig. 5. Load effects of the idealized permit load model normalized by those of the actual permit load model in simple beams: (a) Moment, (b) Shear force

이상화된 허가 하중모형에 의한 하중효과를 실제 허가 하중모형(Fig. 4(a))에 의한 하중효과로 표준화하여 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 중앙 심볼은 기중기 종류별로 다르게 설정하였으며, 선의 색은 허가차량의 감소 비율에 따라 구별하여 도시하였다. Fig. 5(a)는 표준화된 모멘트를 Fig. 5(b)는 표준화된 전단력을 나타내고 있다. 그림에서 허가차량의 감소 비율이 0.75 일 때 대부분의 경간에서 5축 및 6축 기중기의 표준화된 모멘트가 1.0 미만이며, 표준화된 전단력은 0.95 내외이다. 즉, 허가차량의 감소 비율을 0.75로 설정하게 되면 이상화된 하중 모형의 하중효과가 모멘트가 실제 하중 모형의 하중효과보다 더 작게 발생하기 때문에 비 안전측 평가를 유도하게 된다. 허가차량의 감소 비율이 0.80인 경우, 모멘트는 실제 하중 모형보다 1.05배 정도 크게 발생하지만 전단력은

실제 하중 모형과 매우 비슷한 값으로 발생하는 것을 알 수 있다. 허가차량의 감소 비율이 0.85인 경우에는 실제 허가 하중모형보다 약 10% 정도 보수적인 모멘트를 발생시키며 3% 정도 보수적인 전단력을 발생시키게 된다. 따라서 이상화하여 허가 하중을 모형화 할 때에 허가차량의 감소 비율을 0.80으로 설정하는 것이 가장 합리적이다.

이상화된 허가 하중모형의 타당성을 확인하기 위하여, 경간 10m부터 60m까지 2경간 연속보를 대상으로 구조 해석을 수행하였다. 그 결과 이상화된 하중 모형의 하중 효과가 실제 하중 모형에 의한 하중효과의 0.98 ~ 1.09 배 정도로 하중 모형의 합리성을 확인할 수 있었다. 지면 제약으로 인하여 상세 결과는 별도로 나타내지 않는다.

### 3. 실교량 내하율 분석

이 연구에서 제안한 안전성 평가 체계를 실제 공용중인 2개의 프리스트레스트 I형 거더교(이하 PSC교)와 2개의 강박스교에 적용하여 허가차량 통행에 대한 내하율을 분석한다. PSC교는 단경간교와 연속교를 각각 하나씩 대상으로 하며, 강박스교는 2BOX 연속교와 3BOX 연속교를 대상으로 구조해석을 수행한다. Fig. 6에는 대상으로 하는 4개교의 횡단면도가 주어져 있다. 교량 A는 경간 35m의 단경간 PSC교로 폭원 약 21m이며, 양방향 분리되어 있어 활하중을 최대 3차선까지 재하할 수 있다. 교량 B는 35m의 경간 3개로 구성되어 있는 PSC 연속교로, 일방향 폭원 12.6m이며 최대 3차선까지 활하중이 재하될 수 있다. 교량 C는 2BOX 강교로 양쪽 측경간의 길이가 40m이고, 중앙경간 4개의 길이가 모두 49m인 총 6경간 연속교이다. 폭원은 약 21m로 양방향 분리되어 통행하며, 활하중이 최대 3차선까지 재하될 수 있다. 교량 D는 경간이 45m, 50m, 56m, 50m로 구성되어 있는 3BOX 4경간 연속교이며, 양방향 폭원 약 39m로 활하중을 최대 5차선까지 재하할 수 있다.

구조해석을 위한 교량의 모델링은 MIDAS Civil로 수행되었으며, 구조해석 결과 계산된 최대하중효과는 PSC교와 강박스교에 대해 각각 Table 2와 Table 3에 정리되어있다. 표에서 *DC*는 구조부재 및 부차물의 자중에 의한 고정하중, *DW*는 포장 및 시설물에 의한 고정하중을 의미한다. *LL*는 차량하중에 의한 활하중효과로 충격계수에 의한 효과를 포함하고 있다. 활하중효과의 아래첨자 *KZ*은 KL-510을 지칭하며, *CR*은 기중기를 지칭한다.

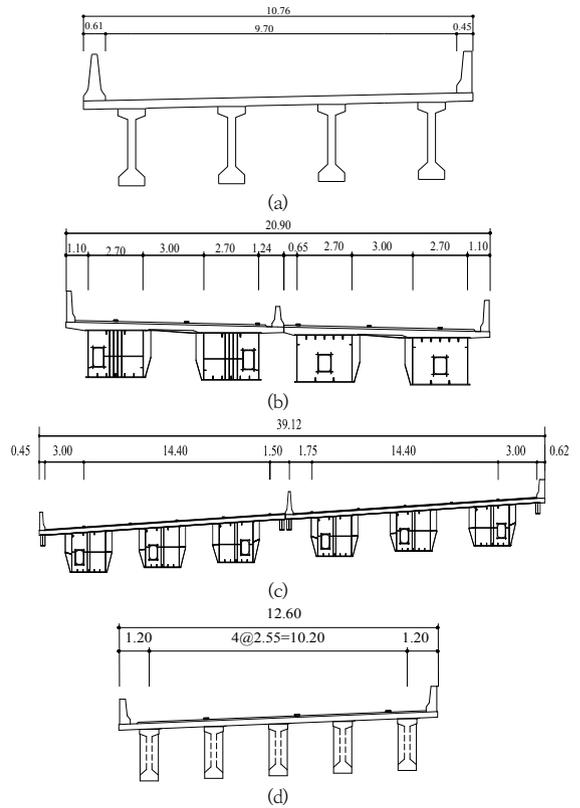


Fig. 6. Section of the girder for two PSC beam and two steel box girder bridges: (a) Bridge A, (b) Bridge B, (c) Bridge C, (d) Bridge D (unit: m)

이 연구에서 허가차량은 최외측차로로 운행하도록 규정하기 때문에 외측거더에 허가차량에 의한 하중효과가 더 크게 발생하고 내하율이 더 작게 계산된다. 따라서 경간 내에서 최소 내하율이 계산되는 외측거더의 하중효과에 대해서만 결과를 나타낸다. 두 개의 PSC교는 정모멘트가 최대 발생하는 경간 중앙부의 모멘트에 대해 Table 2에 정리하였다. PSC 연속교는 슬래브만 연속되어 있기 때문에 거더 부재에 발생하는 부모멘트는 무시할 수 있는 수준으로 이 연구에서 고려하지 않는다. PSC교는 지점부에서 전단력이 가장 크게 발생하지만 지점부에서 4.20m 떨어진 곳에서 I형 거더의 복부폭이 가장 좁기 때문에 해당 위치의 단면 검토가 설계를 지배한다. 따라서 Table 2에는 지점부로부터 4.20m 떨어진 곳에서의 전단력을 정리하여 나타내었다. Table 3에는 강교의 외측박스에서 휨 응력과 전단력이 정리되어 있다. 2BOX교의 경우에는 지점부의 부모멘트에 의한 응력과 지점부에서의 전단력이 정리되어 있으며, 3BOX교의 경우에는

외측경간의 최대정모멘트에 의한 응력과 중앙경간의 지점부 전단력이 정리되어 있다.

Table 2와 3에서 기증기의 축 수가 증가할수록 활하중효과가 증가하지만 7축 기증기의 하중효과는 감소하는 경향성을 보인다. 그 이유는 4축 ~ 6축 기증기의 경우, 일반차량의 연행을 고려한 표준차로하중이 하중모형에

포함되어 있어 추가적인 하중효과를 발생시키기 때문이다. 7축 기증기의 경우에는 허가차량이 단독으로 통행하기 때문에 다른 기증기와 비교하여 활하중효과가 작게 발생하고, 동시에 옆차선의 KL-510에 의한 하중효과가 발생하지 않는 것을 볼 수 있다.

Table 2. Load effects in girders of PSC bridges

Bridge	Type of live load	Bending Moment (kN·m)				Shear force (kN)			
		DC	DW	LL <sub>KL</sub>	LL <sub>CR</sub>	DC	DW	LL <sub>KL</sub>	LL <sub>CR</sub>
Bridge A (Simple Beam)	KL-510	6496.1	643.1	3557.3	-	586.9	59.6	407.7	-
	4 axle crane	6496.1	643.1	1082.1	2898.4	586.9	59.6	69.7	372.4
	5 axle crane	6496.1	643.1	1082.1	3333.2	586.9	59.6	69.7	420.3
	6 axle crane	6496.1	643.1	1082.1	3651.4	586.9	59.6	69.7	456.6
	7 axle crane	6496.1	643.1	-	3633.6	586.9	59.6	-	479.8
Bridge B (Continuous Beam)	KL-510	6068.2	209.3	2034.1	-	560.2	24.9	325.7	-
	4 axle crane	6068.2	209.3	617.5	1713.9	560.2	24.9	68.1	318.1
	5 axle crane	6068.2	209.3	617.5	1948.4	560.2	24.9	68.1	357.2
	6 axle crane	6068.2	209.3	617.5	2101.6	560.2	24.9	68.1	377.0
	7 axle crane	6068.2	209.3	-	2146.3	560.2	24.9	-	401.5

Table 3. Load effects in girders of the steel box bridges

Bridge	Type of live load	Stress due to the bending moment (MPa)				Shear force (kN)			
		DC	DW	LL <sub>KL</sub>	LL <sub>CR</sub>	DC	DW	LL <sub>KL</sub>	LL <sub>CR</sub>
Bridge C (2BOX)	KL-510	72.3	11.8	33.8	-	851.9	140.3	494.4	-
	4 axle crane	72.3	11.8	17.8	20.2	851.9	140.3	222.3	371.8
	5 axle crane	72.3	11.8	17.8	22.0	851.9	140.3	222.3	411.0
	6 axle crane	72.3	11.8	17.8	23.7	851.9	140.3	222.3	451.2
	7 axle crane	72.3	11.8	-	15.6	851.9	140.3	-	397.5
Bridge D (3BOX)	KL-510	95.5	14.4	67.4	-	1101.8	179.9	658.1	-
	4 axle crane	95.5	14.4	45.3	36.3	1101.8	179.9	280.5	454.2
	5 axle crane	95.5	14.4	45.3	41.4	1101.8	179.9	280.5	507.4
	6 axle crane	95.5	14.4	45.3	45.0	1101.8	179.9	280.5	551.2
	7 axle crane	95.5	14.4	-	43.7	1101.8	179.9	-	470.3

Table 4. Strengths, rating factors, and reliability indexes of the girders for the four bridges

Load effect	Bridge	Load type	Strength		Rating factor, <i>R<sub>FLL</sub></i>	Reliability index, <i>β</i>			
			Nominal	Design		Actual	Required		
Bending moment /Stress	PSC	A	KL-510	21309.1kN·m	18970.7kN·m	1.55	6.22	4.61	
			6 axle crane			1.40	5.62	4.25	
		B	KL-510	21331.4kN·m	18998.5kN·m	3.02	8.90	4.61	
			6 axle crane			2.73	8.45	4.28	
	Steel	C	KL-510	292.0MPa	292.0MPa	3.02	8.30	4.16	
			6 axle crane			2.82	8.63	4.11	
		D	KL-510	354.6MPa	354.6MPa	1.76	6.21	4.12	
			6 axle crane			1.48	6.02	4.25	
	Shear force	PSC	A	KL-510	2870.0kN	2583.0kN	2.71	7.65	4.30
				6 axle crane			2.60	7.07	3.81
B			KL-510	3126.5kN	2813.9kN	3.15	8.12	4.26	
			6 axle crane			2.84	7.42	3.82	
Steel		C	KL-510	3080.0kN	3080.0kN	2.03	6.29	3.93	
			6 axle crane			1.75	5.80	3.74	
		D	KL-510	4434.0kN	4434.0kN	2.35	6.89	3.93	
			6 axle crane			2.18	6.73	3.75	

Table 5. Load and resistance factors in Korean Highway Bridge Design Code (Limit State Design)

Load factor				Resistance factor ( $\phi_r$ )			
DC	DW	LL <sub>KL</sub>	LL <sub>CR</sub>	Material factors for PSC		Member resistance factors for steel structures	
				Concrete	Reinforcement	Moment	Shear
1.25	1.50	1.80	1.40	0.65	0.90	1.00	1.00

각 교량 거더의 실제 휨 및 전단에 대한 설계강도 및 공칭강도를 도로교설계기준에 따라 계산하여 Table 4에 나타내었다. 설계강도 계산을 위한 PSC부재의 콘크리트 재료계수 및 보강재의 재료계수, 강부재의 휨 및 전단에 대한 부재저항계수가 Table 5에 주어져 있다. PSC교의 경우 전단철근이 배근되어 있으므로 이를 고려하기 위하여 수직 스트럿이 배치된 부재의 설계 전단강도식을 적용하여 계산하였다. 강교의 경우 웹 단면비 요구조건을 만족하지 못하므로 비조밀단면으로 판정되어 플랜지의 휨 응력에 대한 강도를 계산하여 나타내었다.

미국 MBE [2]의 내하율 계산식에 따라, 이 연구에서는 KL-510 및 기중기 통행에 대한 내하율을 다음과 같이 계산한다.

$$RF_{LL} = \frac{C - \gamma_{DC}DC - \gamma_{DW}DW}{\gamma_{KL}LL_{KL}} \quad \text{for } KL - 510$$

$$RF_{LL} = \frac{C - \gamma_{DC}DC - \gamma_{DW}DW}{\gamma_{KL}LL_{KL} + \gamma_{CR}LL_{CR}} \quad \text{for } 2 - 6 \text{ axle cranes} \quad (1)$$

$$RF_{LL} = \frac{C - \gamma_{DC}DC - \gamma_{DW}DW}{\gamma_{CR}LL_{CR}} \quad \text{for } 7 - 9 \text{ axle cranes}$$

여기서  $RF_{LL}$ 은 내하율(Rating Factor)이며,  $\gamma_X$ 는 변수  $X$ 의 하중계수를 지칭한다.  $C$ 는 구조부재의 성능 즉, 현재 강도를 의미한다. 식 (1)에서 첫 번째 식은 KL-510에 의한 내하율을 계산하기 위한 식이며, 두 번째 및 세 번째 식은 허가차량 통행에 대한 내하율을 계산하는 식이다. 4축 ~ 6축 기중기의 통행시 일반차량의 동시 통행을 고려해야 하므로, 전체 활하중에 대한 내하율을 계산하여야 한다. 내하율 계산을 위한 하중계수와 저항계수는 도로교설계기준의 값을 채택하였으며 Table 5에 주어져 있다. 설계차량의 활하중계수는 극한한계상태1 하중조합

의 하중계수이며, 허가차량의 하중계수는 극한한계상태2 하중조합의 하중계수이다.

강도한계상태에서  $C$ 는 다음과 같이 공칭강도와 계수의 곱으로 계산된다.

$$C = \phi_c \phi_s \phi_r S_n \quad (2)$$

여기서  $S_n$ 은 구조부재의 공칭강도이며  $\phi_r$ 는 설계기준에 명시하고 있는 저항계수이다.  $\phi_c$ 는 상태계수로 열화된 부재강도의 불확실성을 고려하는 계수이며,  $\phi_s$ 는 시스템계수로 구조계의 여유성을 고려하는 계수이다. 예제 교량의 조건계수와 시스템계수는 MBE에 명시된 규정에 따라 다음과 같이 결정하였다. 국토교통부의 도로 교량 및 터널 현황정보시스템에서 조회한 결과 예제 교량 중 3개교가 준공된지 10년 이내이며, 모든 예제 교량의 안전 등급이 B등급 이상인 것으로 확인되었다. 따라서 예제 교량의 구조부재의 상태가 양호하다는 가정하에 상태계수를 1로 설정하였으며, 일반적인 거더교의 시스템계수 = 1을 적용하여 예제 교량의 설계강도를 현재 교량의 강도로 가정한다.

대상 4개 교량의 설계차량과 허가차량 통행에 대한 내하율을 계산하여 Fig. 7에 도시하였으며, 대표 값으로 설계차량에 대한 내하율과 최소 내하율인 6축 기중기에 대한 내하율을 Table 4에 나타내었다. Fig. 7에서 설계차량과 허가차량 통행에 대해 모든 교량의 내하율이 1 이상으로 계산되었기 때문에, 대상 교량이 설계강도를 유지하고 있는 경우에는 별도의 보수·보강 없이 모든 기중기에 대해 통행 허가가 가능할 것으로 판단된다. 각 교량에 대해서 설계차량과 4축 ~ 6축 기중기 모두 비슷한 수준의 내하율을 가지는 것을 알 수 있다. 이는 Table 2와 3에서 4축 ~ 6축 기중기와 일반 차량 활하중에 의한 하중 효과가 KL-510에 의한 하중효과에 비교하여 더 크지만, 기중기 활하중에 대한 하중계수가 1.4로 작기 때문에 결과적으로 비슷한 계수활하중효과를 발생시키기 때문으로 판단된다. 7축 기중기의 경우에는 단독으로 통행하며 하중계수도 작기 때문에 다른 차량과 비교하여 매우 큰 내하율이 계산되었다. Table 4로부터 6축 기중기가 재하될 때의 전체 활하중에 의한 내하율이 KL-510 하중에 의한 내하율보다 약 0.1에서 0.3까지 작게 계산되는 것을 알 수 있다. 따라서 허가하중에 의한 내하율이 설계하중의 내하율보다 더 작게 계산되는 가능성을 고려하여, 허가차량 통행에 대하여 반드시 내하율 검토를 수행해야 할 것으로 판단된다.

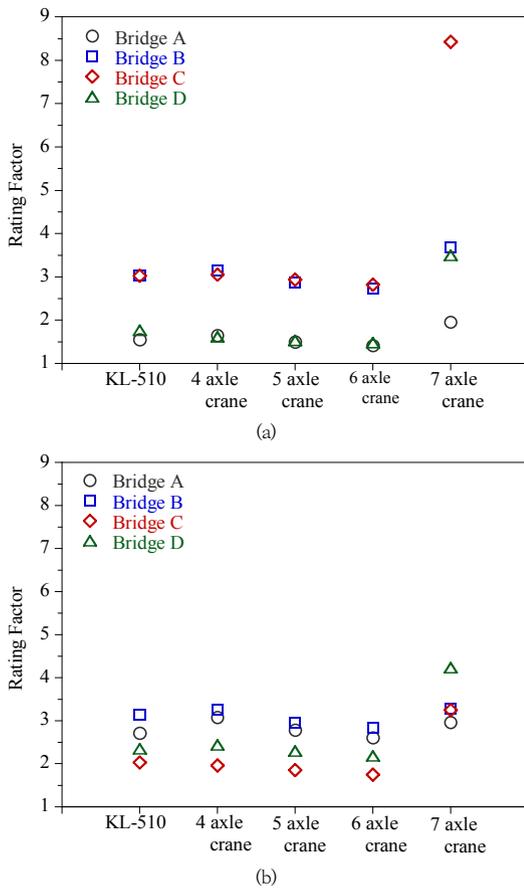


Fig. 7. Rating factors of the four girder bridges for the design and permit vehicular loads: (a) Moment, (b) Shear force

### 4. 허가차량에 대한 실교량 신뢰도지수

신뢰도해석을 위한 한계상태함수는 다음과 같이 정의된다.

$$G = S - DC - DW - \sum_{i=KL, CR} LL_i \quad (3)$$

여기서  $G$ 는 한계상태함수이며  $S$ 는 강도변수이다. 신뢰도해석을 위한 확률변수는  $S, DC, DW, LL_{KL}, LL_{CR}$ 를 포함하며, 모든 확률변수는 통계적으로 독립이다. KL-510에 대하여 신뢰도해석을 수행하는 경우에는  $LL_{KL}$ 만 고려하며, 7축 기중기 하중에 대하여 신뢰도해석을 하는 경우에는  $LL_{CR}$ 만 고려한다. 4축 ~ 6축 기중기의 경우에는  $LL_{KL}$ 과  $LL_{CR}$ 를 모두 개별적인 확률변수로 고려하여 신뢰도해석을 수행한다. 신뢰도해석을 위한 확률변수의

통계특성은 Table 6[9-13]에 정리되어 있으며, 원칙적으로 도로교설계기준의 코드 캘리브레이션을 위해서 사용된 통계특성을 이용한다[14]. 기중기 하중효과의 통계특성에 대하여는 아직 보고된 바가 없으며, MBE의 체계정립을 위한 연구보고서[5,6]에서 허가차량의 통계특성을 설계기준 코드 캘리브레이션을 위한 활하중의 통계특성과 동일하거나 비슷한 값으로 채택하고 있으므로 이 연구에서도 기중기 하중효과의 통계특성으로 KL-510하중효과의 통계특성과 동일한 값을 사용한다.

식 (3)의 신뢰도지수는 개선된 일계이차모멘트법[15]에 의하여 정의되는 다음과 같은 최적화 문제로부터 계산할 수 있다.

$$\text{Min}_{\bar{X}} \beta^2 = \|\bar{X}\|_2^2 \quad \text{subject to } \bar{G}(\bar{X}) = 0 \quad (4)$$

여기서  $\beta$ 는 신뢰도지수이며,  $\|\cdot\|_2$ 는 L2-norm이다. 위의 식에서  $\bar{X}$ 와  $\bar{G}$ 는 각각 표준정규분포공간에서의 확률변수벡터와 한계상태함수를 의미한다. 식 (4)로부터 신뢰도지수를 계산하기 위한 알고리즘으로 Hasofer-Lind-Rackwitz-Fessler algorithm with the gradient projection method[16]을 채택하였다. 비정규분포 확률변수는 Rackwitz-Fiessler method[17] 이용하여 등가의 정규분포 확률변수로 변환하여 해석을 수행하였다.

설계차량 및 허가차량에 대한 4개 교량의 신뢰도지수를 계산하여 Fig. 8에 도시하였다. 신뢰도해석을 위한 각 교량의 거더 하중효과는 Table 2와 3의 값을 사용하였으며, 거더 강도는 Table 4의 값을 이용하였다. Fig. 7의 내하율과 Fig. 8의 신뢰도지수를 비교 하였을 때, 내하율이 클수록 강도의 여유 성능이 큰 것을 의미하기 때문에 내하율에 비례하여 신뢰도지수가 크게 계산되는 것을 알 수 있다. Fig. 7(a)에서 설계하중 및 4축 ~ 6축 기중기에

Table 6. Statistical parameters of random variables

Random variable		Bias factor	Coefficient of variation	Distribution type	Reference	
Load effect	DC	1.03	0.08	Normal	[9]	
	DW	1.00	0.25	Normal		
	LL <sub>KL</sub>	1.00	0.20	Lognormal	[10]	
	LL <sub>CR</sub>	1.00	0.20	Lognormal	Present study	
Member strength	PSC	Moment	1.056	0.073	Lognormal	[11]
		Shear	1.274	0.139	Lognormal	
	Steel	Moment	1.180	0.093	Lognormal	[12]
		Shear	1.224	0.115	Lognormal	[13]

대한 교량 A와 교량 D의 내하율이 비슷한 반면, Fig. 8(a)에서 해당 차량에 대한 교량 D의 신뢰도지수가 교량 A와 비교하여 상대적으로 더 크게 계산된 것을 알 수 있다. 이러한 경향성은 교량 B와 C의 휨에 대한 내하율과 신뢰도지수에서도 확인할 수 있는데, 강교 휨 강도의 편심계수가 PSC교 휨 강도의 편심계수보다 크기 때문에 상대적으로 높은 신뢰도수준을 확보하게 되기 때문이다.

Fig. 8에서 기중기 차량의 신뢰도지수 변화를 살펴보면 4축에서 6축까지 축 수가 많을수록 기중기에 의해 발생하는 하중효과가 증가하기 때문에, 신뢰도지수가 작게 계산되는 것을 볼 수 있다. 7축 기중기의 경우에는 KL-510에 의하여 발생하는 하중효과가 없기 때문에, 다른 기중기 차량의 신뢰도지수보다 크게 계산된다. Table

4에는 KL-510에 대한 신뢰도지수와 허가차량 중에서 최소신뢰도지수가 계산되는 6축 기중기에 대한 신뢰도지수가 각 교량별로 정리되어 있다. 각 교량에 대하여 KL-510은 최소 6.21에서 최대 8.90까지 충분한 신뢰도지수를 확보하고 있으며, 6축 기중기 역시 최소 6.02에서 최대 8.63까지 충분한 신뢰도수준을 가지는 것을 확인하였다.

제안하는 허가차량의 안전성 평가 체계가 확보하는 신뢰도를 확인하기 위하여, 허가차량 하중과 하중-저항계수에 의하여 확보되는 최소요구강도의 신뢰도지수를 계산하였다. 최소요구강도는 다음과 같이 계산된다.

$$S_{req} = \frac{1}{\phi_r} (\gamma_{DC}DC + \gamma_{DW}DW + \gamma_{KL}LL_{KL} + \gamma_{CR}LL_{CR}) \quad (5)$$

여기서  $S_{req}$  는 최소요구강도이며, 이 연구에서는 Table 5에 주어진 하중계수와 저항계수를 이용하여 계산된다. 도로교설계기준에서 PSC 부재의 설계를 위하여 재료계수를 사용하도록 명시되어 있기 때문에, 식 (5)을 적용하기 위하여 등가의 저항계수 계산이 필요하다. 도로교설계기준의 재료계수에 대한 등가의 저항계수는 Table 4에서 계산된 교량의 공칭강도에 대한 설계강도의 비로 계산하며, 그 값은 휨에 대하여 0.89 전단에 대하여 0.90이다. 따라서 PSC교의 최소요구강도는 휨과 전단에 대하여 각각 등가의 저항계수인 0.89와 0.90을 적용하여 계산한다. 신뢰도해석을 위한 한계상태함수는 식 (3)의 한계상태함수에 최소요구강도를 대입하여 구성된다.

최소요구강도에 대한 신뢰도해석 결과를 각 교량에 대해 Fig. 9에 도시하였으며, Table 4에 KL-510 및 6축 기중기에 대하여 신뢰도지수를 정리하였다. Fig. 9에서 PSC교와 (교량 A, B) 강교 (교량 C, D)의 신뢰도지수를 비교하였을 때 항상 강교의 신뢰도지수가 작게 계산되는 것을 볼 수 있다. 이는 강교의 휨 및 전단에 대한 부재저항계수가 1.0으로 PSC교와 비교하여 상대적으로 크기 때문에 하중-저항계수가 확보해 주는 안전 수준이 상대적으로 작아져서 발생하는 현상으로 판단된다. 하지만 KL-510의 휨에 대하여 설계기준이 확보하는 신뢰도지수는 4.12 ~ 4.61, KL-510의 전단에 대한 최소요구강도의 신뢰도수준은 3.93 ~ 4.30으로, 교량 종류와 상관없이 도로교설계기준의 하중-저항계수가 설계하중에 대하여 목표신뢰도지수 3.72를 충분히 확보하는 것을 알 수 있다.

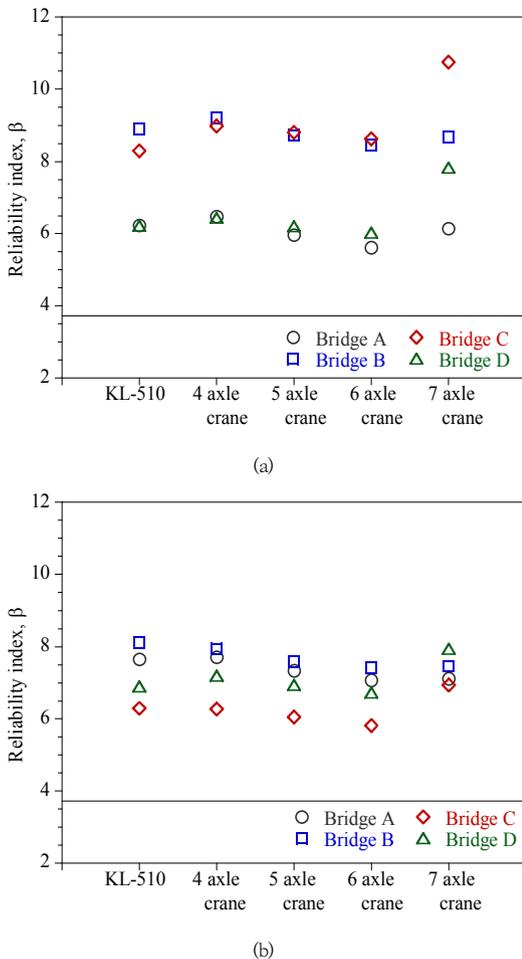


Fig. 8. Reliability indexes of the four girder bridges for the design and permit vehicular loads; (a) Moment, (b) Shear force

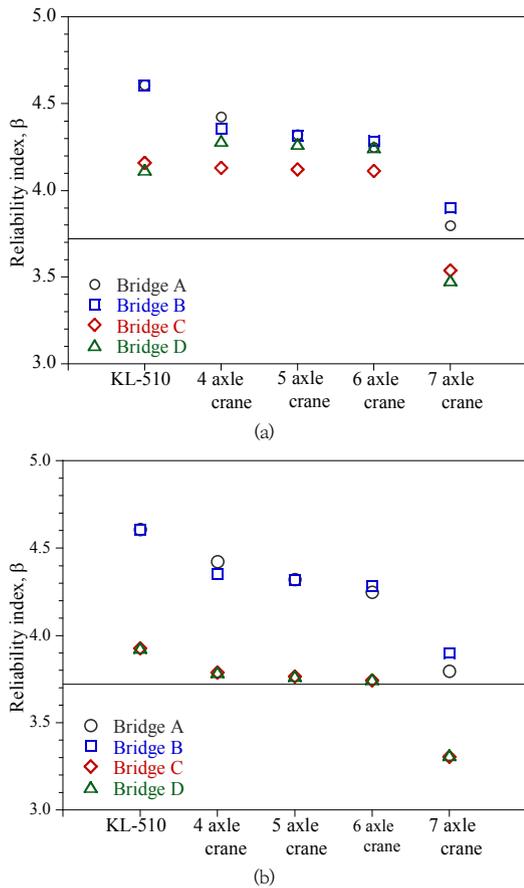


Fig. 9. Reliability indexes of the minimum required strength for the design and permit vehicular loads; (a) Moment, (b) Shear force

4축 ~ 6축 기중기의 휨에 대해서는 교량별로 최소신뢰도지수 4.11 ~ 4.28이 계산되었으며 전단에 대해서는 교량별로 3.74 ~ 3.82 수준의 신뢰도수준을 갖는 것으로 확인되었다. 제안하는 안전성 평가 체계로 하중을 재하하고 설계기준의 하중-저항계수를 적용 하였을 때, 휨과 전단에 대하여 모두 설계기준의 목표신뢰도지수 3.72 이상을 확보하고 있는 것이다. 하지만 7축 기중기의 경우에는 강교 휨 및 전단에 대해서 목표신뢰도지수 3.72 미만의 신뢰도가 계산되어, 단독 통행임에도 불구하고 1.4의 하중계수가 충분한 신뢰도를 확보하지 못하는 것을 확인하였다. 또한 모든 교량에 대하여 7축 기중기의 신뢰도지수가 다른 차량의 신뢰도지수보다 항상 작게 계산되는 것을 확인하였다.

## 5. 요약 및 결론

이 연구에서는 허가차량의 통행에 대한 교량의 안전성 평가 체계를 정립하고, 현재 도로교설계기준의 하중-저항계수를 적용하여 4개 교량의 내하율을 계산하였다. 또한 교량의 실제 강도 및 최소요구강도에 대한 신뢰도해석을 수행하여 신뢰도기반으로 안전성 평가 체계의 타당성을 확인하였다.

이 연구에서는 분리불가능한 타이어식 기중기 차량을 대상으로 구조해석을 수행하여 안전성 평가를 위한 허가차량의 분류 체계를 정립하였다. 국토교통부 차량운행제한규정에 따라 총중 48톤을 기준으로 일상허가와 특별허가를 분류하였으며, 도로교설계기준의 설계하중과 허가차량의 구조해석 결과를 바탕으로 특별허가를 두 개로 분류하였다. 일상허가와 특별허가 1은 일반차량과 동시 통행하도록 규정하였으며, 특별허가 2는 단독 통행하도록 규정하였다. 일반차량과 동시 통행하는 경우에는 표준차로하중을 동시 재하하도록 규정하였으며, 허가차량의 중량은 실제 통행 상황과 등가의 하중효과를 발생시키기 위하여 80%로 감소시켜서 재하할 것을 제안하였다.

이 연구에서 제안하는 안전성 평가 체계를 공용중인 4개 교량에 적용하여 설계강도에 대한 내하율을 계산하였다. 내하율 계산을 위한 하중-저항계수는 도로교설계기준의 값을 채택하였으며, 교량의 거더 강도 역시 도로교설계기준에 따라 계산하였다. 4개 교량의 설계하중에 대한 최소내하율은 휨과 전단에 대하여 각각 1.55와 2.03으로 계산되었으며, 허가차량에 대한 최소내하율은 휨과 전단에 대하여 각각 1.40와 1.75로 계산되었다. 허가차량 통행에 대한 교량의 내하율은 충분히 크기 때문에 통행이 가능할 것으로 판단되지만, 설계차량과 비교하여 내하율의 크기가 작기 때문에 다른 교량에 적용시 반드시 유의하여 검토해야할 것으로 판단된다.

대상 교량의 허가차량에 대한 실제 강도의 신뢰도지수와 최소요구강도의 신뢰도지수를 계산하여 신뢰도 관점에서의 안전율을 확인하였다. 교량의 설계하중 및 허가차량에 대한 설계강도의 신뢰도지수는 휨과 전단에 대하여 5.62 이상으로 계산되어, 설계기준의 목표신뢰도지수 3.72를 초과하는 것으로 확인되었다. 설계차량 및 4축~6축 기중기에 대한 최소요구강도의 신뢰도지수는 3.74 이상으로 목표신뢰도지수보다 크게 계산되었으나, 7축 기중기에 대한 강교의 신뢰도지수는 목표신뢰도지수에 미치지 못하는 것으로 확인되었다.

일상허가와 특별허가 1의 경우에는 현재 도로교설계 기준의 극한한계상태2의 활하중계수인 1.4에 의하여 충분한 신뢰도가 확보되는 것을 확인하였다. 하지만 7축 기중기에 대한 최소요구강도의 신뢰도지수가 다른 차량과 비교하여 약 0.5정도 작게 계산되므로, 모든 차량에 대하여 비슷한 수준의 신뢰도를 확보하기 위하여 특별허가 2의 활하중계수를 조정하는 후속연구가 필요할 것으로 판단된다.

이 연구에서 제안하는 허가차량 분류 체계 및 하중 모형은 국내 허가차량의 안전성 평가 체계 정립을 위한 기반이 될 수 있을 것으로 기대된다. 이 연구에서 제안하는 허가체계를 적용하여 실제 교량의 내하율 및 신뢰도지수를 계산할 때에는, 교량의 현장조사 및 상태평가를 수행하여 현재 성능을 정확히 반영하여야 할 것이다.

## References

[1] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Washington, D.C., 2014.

[2] American Association of State Highway and Transportation Officials, *The Manual for Bridge Evaluation*, Washington, D.C., 2018.

[3] Canadian Standard Association, *Canadian Highway Bridge Design Code (CSA S6:19)*, Ontario, Canada, 2019.

[4] Standards Australia, *Australian Standard - Bridge Design Part 7: Bridge Assessment (AS5100.7:2017)*, New South Wales, Australia, 2017.

[5] M. Mlynarski, W. G. Wassef, and A. S. Nowak, *A Comparison of AASHTP Bridge Load Rating Methods*. NCHRP Report 700, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2011.

[6] F. Moses, *Calibration of Load Factors for LRFR Bridge Evaluation*, NCHRP Report 454, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2001.

[7] Korea Expressway Corporation, *Guidelines for Reliability-Based Bridge Evaluations*, Seoul, South Korea, 2013 (in Korean).

[8] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, *Korean Highway Bridge Design Code (Limit State Design)*, MOLIT, 2012 (in Korean).

[9] A. S. Nowak, *Calibration of LRFD bridge design code, NCHRP Report 368*, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1999, pp.10.

[10] S. H. Lee, *Calibration of the Load-Resistance Factors for the Reliability-based Design of Cable-supported Bridges*, Ph. D. thesis, Seoul National University, 2014,

pp.113-114. (in Korean).

[11] I. Paik, E. S. Hwang, and S. Shin, "Reliability analysis of concrete bridges designed with material and member resistance factors." *Computers and Concrete*, Techno-Press, Vol. 6, No. 1, pp. 59-78. February 2009, DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/cac.2009.6.1.059>

[12] D. K. Shin, C. Y. Kim, and I. Paik, "Reliability analysis of composite girder designed by LRFD method for positive flexure." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 26, No. 3A, pp. 539-546, May 2006 (in Korean).

[13] C. Bae, *Determination of the Load-Resistance Factors for Reliability-Based Codes by Optimization*, Master thesis, Seoul National University, Seoul, South Korea, 2016, pp.26.

[14] H. S. Lee, S. W. Song, and J. H. Kim, "Determination of Load-Resistance Factors for Gravitational Loads-Governed Limit State of Korean Bridge Design Code", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.23, No.8, pp.3451-3463, August 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-019-1245-1>

[15] A. Haldar and S. Mahadevan, *Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design*, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 181-224, 2000.

[16] P. L. Liu and A. Der Kiureghian, "Optimization algorithms for structural reliability" *Structural safety*, Vol. 9, pp. 161-177, February 1991. DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-4730\(91\)90041-7](https://doi.org/10.1016/0167-4730(91)90041-7)

[17] R. Rackwitz and B. Fiessler, "Structural reliability under combined random load sequences." *Comput. Struct.*, Vol. 9, No. 5, pp. 489-494, 1978.

유 상 선(Sang Seon Yu)

[준회원]



- 2019년 2월 : 가천대학교 토목환경공학과 (공학사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 토목환경공학과 석사과정

<관심분야>

구조공학, 구조신뢰성

김 경 현(Kyunghyun Kim)

[정회원]



- 2018년 2월 : 가천대학교 토목환경공학과 (공학사)
- 2020년 2월 : 가천대학교 토목환경공학과 (공학석사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 토목환경공학과 박사과정

<관심분야>

구조공학, 구조신뢰성

---

백 인 열(Inyeol Paik)

[정회원]



- 1986년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1994년 12월 : U. of Texas at Austin 토목구조 (공학박사)
- 1996년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 토목환경공학과 교수

<관심분야>

구조공학, 구조신뢰성, 교량공학

---

김 지 현(Ji Hyeon Kim)

[정회원]



- 2013년 2월 : 서울대학교 건설환경공학부 (공학석사)
- 2018년 2월 : 서울대학교 건설환경공학부 (공학박사)
- 2018년 3월 ~ 2019년 3월 : 서울대학교 교량설계핵심기술연구단 선임연구원
- 2019년 5월 ~ 현재 : 가천대학교 스마트첨단건설기술연구센터 선임연구원

<관심분야>

구조공학, 구조신뢰성, 코드캘리브레이션