

# 고속철도 WIM 데이터에 대한 통계분석을 통한 철도교량 설계활하중 분석

박수민<sup>1</sup> · 여인호<sup>2</sup> · 백인열<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>가천대학교 토목환경공학과, <sup>2</sup>한국철도기술연구원 첨단인프라연구팀

## Analysis of Design Live Load of Railway Bridge Through Statistical Analysis of WIM Data for High-speed Rail

Sumin Park<sup>1</sup>, Inho Yeo<sup>2</sup> and Inyeol Paik<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Gachon University, Songnam, 13120, Korea

<sup>2</sup>High-speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute, Uiwang, 16105, Korea

### Abstract

In this paper, the live load model for the design of high-speed railway bridge is analyzed by statistic and probabilistic methods and the safety level that is given by the load factors of the load combination is analyzed. This study is a part of the development of the limit state design method for the railway bridge, and the train data collected from the Gyeongbu high-speed railway for about one month are utilized. The four different statistical methods are applied to estimate the design load to match the bridge design life and the results are compared. In order to examine the safety level that the design load combination of the railway bridge gives, the reliability indexes are determined and the results are analyzed. The load effect from the current design live load for the high-speed rail bridge which is 0.75 times of the standard train load is came out greater than at least 30-22% that from the estimated load from the measured data. If it is judged based on the ultimate limit state, there is a possibility of additional reduction of the safety factors through the reliability analysis.

**Keywords** : high-speed railway bridge, train live load, statistical estimation, reliability index, limit state design methods, load and resistance factor

### 1. 서 론

이 연구에서는 철도교량 설계기준에 대한 한계상태설계법 개발을 위하여 실제 운행하는 열차에 대한 계측자료를 활용하여 교량의 설계활하중을 분석하였다. 현재 국내 도로교설계기준(2014)은 이미 한계상태설계법을 적용하고 있으며, 미국의 AASHTO LRFD, 유럽의 Eurocode, 캐나다의 CHBDC 등 국제적인 설계기준에서는 대부분 한계상태설계기준을 적용하고 있다. 이들 기준들에서는 설계의 목표안전율을 정의하고 있으며, 이는 오랜 기간 동안의 경험과 전문가적인 판단 및 실제 계측 데이터에 대한 통계분석을 근거로 하고 있다.

철도교량 설계의 주요하중인 활하중을 나타내는 표준열차 하중은 설계의 안전성과 경제성에 매우 큰 영향을 주며 하중 모델을 결정하기 위하여 실측자료를 중심으로 국내외에서 연구가 수행되었다. 국내에서는 최근 철도설계기준의 표준열차 하중을 합리적으로 수립하기 위하여 체계적인 연구가 수행되기 시작하였다. 이들 연구에서는 실제 운행열차를 대상으로 하중 자료를 수집하고 이를 결정론적 및 확률론적으로 분석하여 기존 국내 하중과 해외 설계하중과의 비교를 수행하였다(KRNA, 2010; Kim *et al.*, 2010). 이 연구를 통하여 국내 표준열차하중 모델을 수립하였고 설계하중조합의 하중계수를 개정하는 근거가 되었다(KRNA, 2011; 2013).

\* Corresponding author:

Tel: +82-31-750-5340; E-mail: pinyeol@gachon.ac.kr  
Received October 11 2015; Revised November 1 2015;  
Accepted November 2 2015

©2015 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

유럽에서는 열차하중 체계를 결정하기 위하여 광범위한 연구를 수행하고 있다. 유럽에서는 결정론적 방법으로 LM71 하중체계를 제정한 이후에 열차하중 데이터의 통계적 분석을 위한 연구를 도입하였다(ORE, 1973). 이후 LM2000 하중체계를 결정하기 위하여 당시 운행하던 열차의 현황 및 미래의 운행 전망을 포함하여, 결정론적 및 확률론적 연구방법을 자세하게 제시하고 있다(ERRI, 1994). 또한 통합 Eurocode에 맞추어 공용중인 철도교량을 평가하기 위한 표준열차하중을 측정된 데이터로부터 산출하는 확률통계적 방법을 제시하였다(SB-LRA, 2007).

이 논문에서는 고속철도교량 설계의 주요하중인 활하중의 하중효과와 극한한계상태의 활하중조합을 구성하는 하중계수를 분석한다. 현재 고속철도 활하중은 표준열차하중에 0.75배를 곱하도록 되어 있다. 이 연구에서는 경부고속철도를 실제 운행 중인 열차에 대하여 측정한 WIM(weigh in motion) 데이터를 통계 분석하여 이를 검토하도록 한다. 교량의 설계수명에 따르는 활하중을 추정하기 위하여 가용한 여러 통계방법을 검토하였고, 이 방법들을 실제 데이터를 통하여 비교 검토하였다. 또한, 고속철도교량에 대한 설계하중조합의 안전율을 분석하기 위하여 신뢰도분석을 수행하였다.

### 2. 고속철도 계측시스템

고속철도 운행 중인 열차에 대한 계측을 위하여 Fig. 1과 같이 울산역을 선정하였다. Fig. 2는 계측시스템 구성도를 보여준다. 이 연구에서는 운중에 관한 계측데이터를 사용하였고, Fig. 3과 같이 열차 진행방향으로 1.96m 서로 떨어진 W1+W2, W3+W4의 2개의 계측점에서 데이터를 수집하였다. FCA-5-11 2축 센서를 사용하였고 2014년 10월 21일부터 11월 24일까지 34일간 울산역을 통과한 935 편성의 고속열차의 운중을 계측하였다. 935 편성의 열차는 KTX 861 편성, KTX-산천 45 편성, 그리고 중련 연결한 KTX-산천 29 편성으로 구성된다. 이 논문에서는 W3+W4 계측점의 데이터를 분석한 결과를 나타낸다.

### 3. 통계적 추정 방법

이 장에서는 계측데이터를 이용하여 설계활하중을 비교, 분석하는데 사용한 4가지 통계적 방법을 소개한다.

#### 3.1 계측기간 총 데이터를 이용하는 방법

##### 3.1.1 확률지를 이용한 추정방법(Method 1)

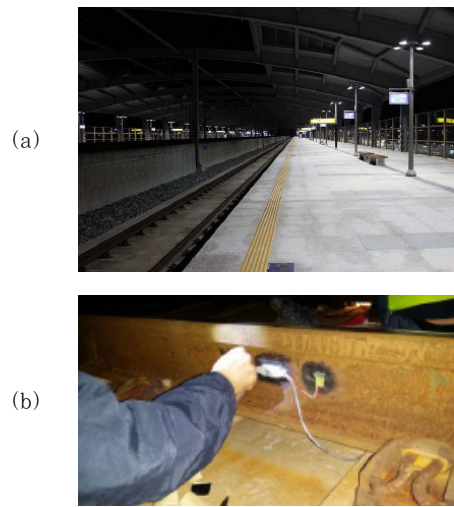


Fig. 1 Sensor installation (a) Ulsan station (b) axle weight sensor

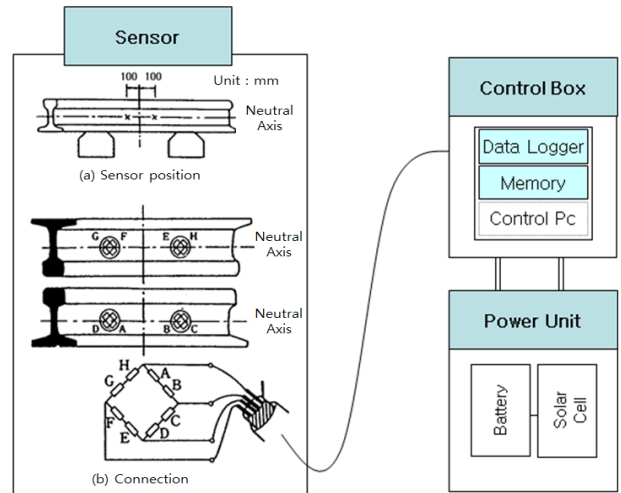


Fig. 2 Measurement system configuration diagram

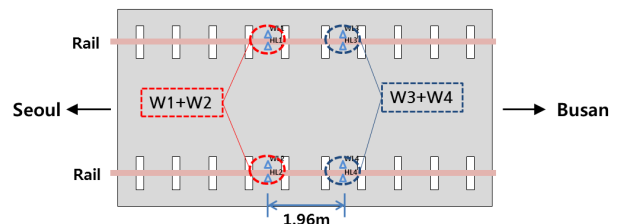


Fig. 3 Measuring point at Ulsan station

첫번째 방법은 계측기간 동안 수집된 총 데이터를 크기 순으로 나열하고, 누적확률분포도를 작성하여 필요한 설계수명에 대한 하중효과를 추정하는 방법이다. 이 방법은 도로교설계기준(한계상태설계법) 개발(Hwang, 2008)과 AASHTO LRFD 개발(Nowak, 1999)에서 사용되었다.

계측된 데이터를 이용하여 하중효과 분포를 구하고, 설계수명에 해당하는 데이터수를  $n$  이라고 할 때 최대 하중효과

의 누적분포확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p = \frac{n}{n+1} \tag{1}$$

만일 데이터의 확률분포가 제1형 극치분포(Extreme Type I)를 따르는 경우에는 식 (1)에 대한 역검별 확률값을 식 (2)를 통하여 산정한다.

$$z = \ln(-\ln(1-p)) \tag{2}$$

이를 확률지 추세선에 대입하면 설계수명에 대한 하중효과 추정값을 얻게 된다.

### 3.1.2 극치분포의 최빈값 이용 추정방법(Method 2)

이 방법은 모집단에서  $n$  개의 데이터를 추출할 때 이 중 최대값의 분포는  $n$  이 증가할수록 극치분포에 접근한다는 이론을 적용한 방법이다(Ang and Tang, 1990). 즉, 계측된 데이터를 모집단으로 가정하고, 설계수명에 따른 열차 이동수  $n$  을 구하여 극치분포함수의 확률밀도함수를 식 (3)과 같이 설정하며, 매개변수는 식 (4), (5)로 나타낸다.

$$f_{Y_n}(y) = \alpha_n e^{-\alpha_n(y-u_n)} \exp[-e^{-\alpha_n(y-u_n)}] \tag{3}$$

$$\alpha_n = \sqrt{2 \ln n} \tag{4}$$

$$u_n = \sqrt{2 \ln n} - \frac{\ln \ln n + \ln 4\pi}{2\sqrt{2 \ln n}} \tag{5}$$

최종적으로 설계수명에 대한 최대 하중효과는 식 (5)의 최빈값에 모집단의 표준편차를 곱하고 평균을 더하여 추정한다.

## 3.2 계측기간 일 최대값 데이터를 이용한 방법

### 3.2.1 극치분포형태 불변성 이용 추정방법(Method 3)

이 방법은 최대값으로 이루어진 극치분포는  $n$  이 증가하여 매개변수는 변하여도 극치분포의 형태는 불변성이라는 원리를 이용한 방법이다(Ang and Tang, 1975). 시간에 따라 변하는 하중에 대한 특성값(characteristic value)을 단위 기간 동안의 최대값의 분포로 정의하는 방법을 적용하였다(Gulvanessian *et al.*, 2012). 이 연구에서는 Fig. 4와 같이 단위기간을 1일로 정하고 일별 최대값의 분포를 구하였다. 일별 최대값의 분포는 극치분포 함수인 식 (3)과 같지만 매개변수는 식 (6), (7)을 따른다.

$$u = \mu_{Y_n} - \frac{\gamma}{\alpha_n}, \quad \gamma = 0.577216 \text{ (오일러 상수)} \tag{6}$$

$$\alpha_n = \sqrt{\frac{\pi^2}{6\sigma_{Y_n}^2}} \tag{7}$$

산정된 매개변수 식 (8)를 이용하여 설계수명에 대한 최대 하중효과를 추정한다.

$$u_n = u + \frac{\ln n}{\alpha_n} \tag{8}$$

### 3.2.2 반복분포 특성값 이용 추정방법(Method 4)

이 방법에서는 일정 기간 동안 계측된 값의 분포가 기간이 증가하여도 변하지 않고 반복된다고 가정한다(Miao and Chan, 2002). 이 연구에서는 Fig. 4의 계측된 데이터의 일 최대값으로 극치분포의 누적분포함수 식 (9)를 구성한다.

$$F_{Y_n}(y) = \exp[-e^{-\alpha_n(y-u_n)}] \tag{9}$$

극치분포 함수의 매개변수인 식 (6)과 식 (7)을 식 (9)에 적용하고 이 연구에서는 누적분포함수의 95%가 되는 값을 특성값으로 정하여 이를 하중효과로 한다.

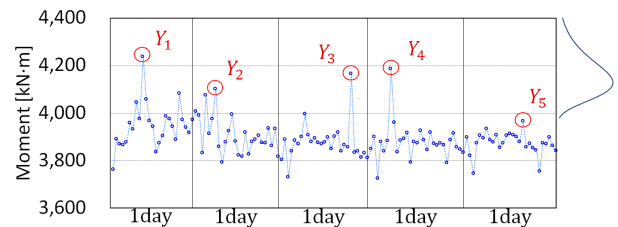


Fig. 4 Example of daily maximum distribution

## 4. 실측 데이터를 적용한 하중효과의 통계적 추정

이 장에서는 WIM 계측을 통하여 얻은 축중, 축거 데이터를 이용하고 이들을 정모멘트, 부모멘트, 전단력의 영향선에 적용하여 하중효과의 통계분포를 구성한다. 이로부터 4가지 통계적 추정방법으로 설계수명에 대한 최대 하중효과를 추정한다. 이 연구에서 정모멘트와 전단력은 1경간 단순보, 부모멘트는 2경간 연속보를 사용하였다.

### 4.1 Method 1

Method 1을 적용하여 확률지에 나타난 추세선을 이용하여 최대 하중효과를 구할 수 있다. 예를 들면, WIM 데이터에서 14일간의 통행 차량수가 375대인 경우, 1년, 5년,

100년의 통행 차량수  $n$ 을 Table 1과 같이 구하여 확률지상에 나타내고 분포의 추세선을 이용하여 해당 년의 최대 하중효과를 구한다. 30m지간의 정모멘트에 대한 Fig. 5에서 100년에 대한 최대하중효과를 예로 들면,  $n=977,679$ 를 식 (1), (2)에 대입하여  $z=13.79$ 를 구하고, 이를 추세선의  $y$ 에 대입하여 얻은  $x$ 가 100년 최대 하중효과가 된다. Fig. 6,

7은 각각 30m 지간에 대한 부모멘트, 전단력의 분포이며, 동일한 방법을 적용하여 설계수명에 따른 최대 하중효과를 구하여 Table 1에 나타내었다.

Fig. 6의 부모멘트의 경우에는 전체 분포의 추세선을 적용하면 매우 큰 값이 추정되므로, 상위 하중효과에 대한 추세선을 적용하여 현실적인 하중효과를 추정하였다.

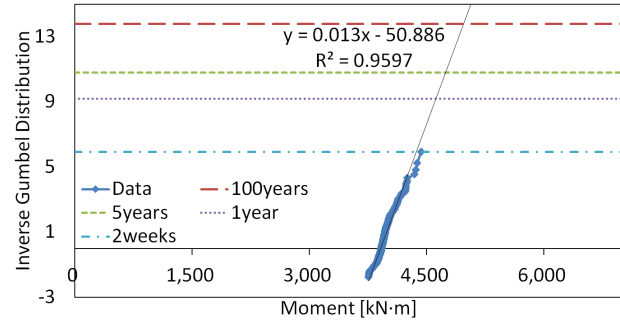


Fig. 5 Estimation of moment of 30m span by Method 1

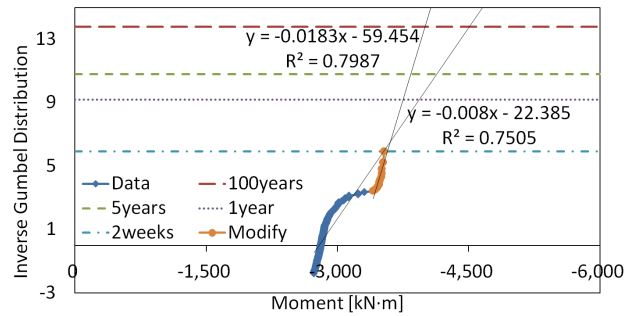


Fig. 6 Estimation of negative moment of 30m span by Method 1

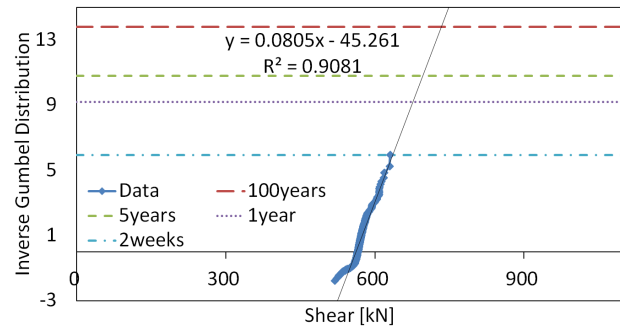


Fig. 7 Estimation of shear of 30m span by Method 1

Table 1 Estimation of load effects of 30m span by Method 1

	$n$	$z$	Moment (kNm)	Negative Moment (kNm)	Shear (kN)
2wks.	375	5.928	4,370	-3,573	636
1yr.	9,776	9.187	4,621	-3,751	676
5yrs.	48,883	10.79	4,745	-3,839	696
100yrs.	977,678	13.79	4,975	-4,003	734

## 4.2 Method 2

Method 2에서는 30일 계측데이터를 적용한 하중효과의 분포가 Fig. 8과 같이 정규분포를 따른다고 가정한다. 이로부터 열차 통행 수에 따른 최대 하중효과를 추정하기 위하여, WIM 데이터의 30일간 열차 통행 수가 818대인 경우, 일 평균 통행 수는  $28(=818/30)$ 이 되고, 1일, 1년, 5년, 100년의 통행 차량수를 구한다. 통행 차량수  $n$ 을 통하여 식 (5)에서  $u_n$ 을 구하고 30일 하중효과의 평균값에  $u_n \times$  표준편차를

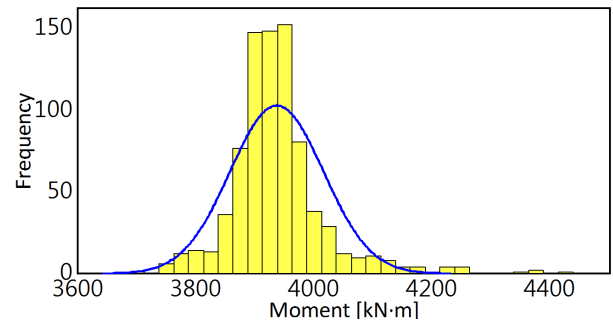


Fig. 8 Normal distribution of moment for 30 days

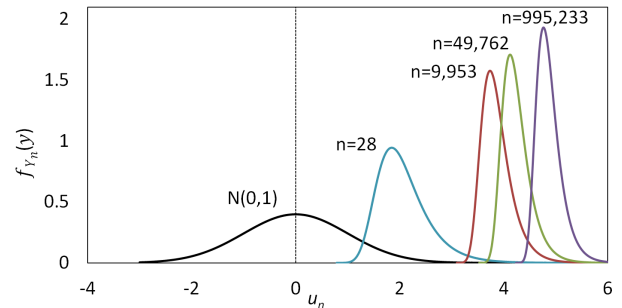


Fig. 9 Estimation of maximum moment based on 30 days distribution by Method 2

Table 2 Estimation of load effects of 30m span by Method 2

	$n$	$u_n$	Moment (kNm)	Negative Moment (kNm)	Shear (kN)
1day	28	1.846	4,082	-3,084	591
1yr.	9,953	3.737	4,232	-3,329	615
5yrs.	49,762	4.122	4,262	-3,379	620
100yrs.	995,233	4.765	4,313	-3,462	629

더하여 설계수명에 대한 최대 하중효과를 추정하고 이를 Table 2에 나타내었다.

### 4.3 Method 3

이 방법에서는 30일간 일별 최대 계측데이터를 이용하여 Fig. 10과 같이 하중효과의 일별 최대값 극치분포를 구성한다. Fig. 11은 극치분포 불변성방법을 이용할 때 설계수명에 따른 그래프의 형태가 변하지 않는 것을 나타낸 것이다.

이 방법에서는 일별 최대값을 이용하므로  $n$ 은 1일=1, 1년=365, 5년=1,825, 100년=36,500으로 되며, 식 (8)을 이용하여 설계수명에 대한 최대하중효과를 구한다. Table 3에 30m 지간에 대한 정모멘트, 부모멘트, 전단력의 설계수명에 대한 최대 하중효과를 추정하여 나타내었다.

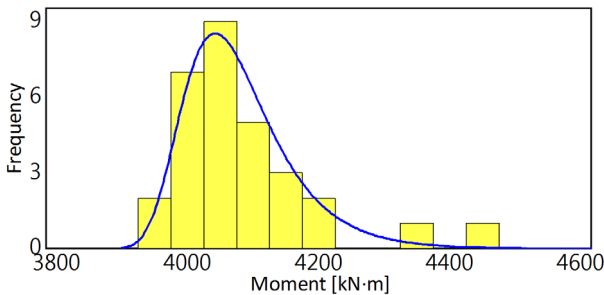


Fig. 10 Extreme distribution of moment for daily maximum

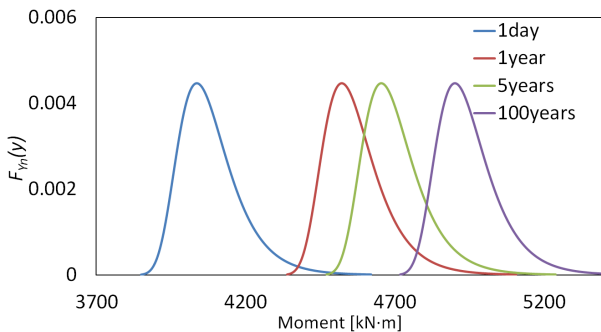


Fig. 11 Estimation of moment by Method 3

Table 3 Estimation of load effects of 30m span by Method 3

	$n$	Moment (kNm)	Negative Moment (kNm)	Shear (kN)
		$\alpha = 0.012$ $u = 4.036$	$\alpha = 0.007$ $u = -3.350$	$\alpha = 0.104$ $u = 582$
1day	1	4.036	-3.350	582
1yr.	365	4.522	-4.111	639
5yrs.	1,825	4.654	-4.319	655
100yrs.	36,500	4.901	-4.706	683

### 4.4 Method 4

이 방법에서는 계측기간에 측정한 값의 분포인 Fig. 10이 반복되어, 최대 하중효과의 분포가 기준기간이 변하여도 변하지 않고 Fig. 10과 동일하다고 가정한다. 식 (9)에서 95% 값으로 특성값을 정의하고, 식 (6), (7)을 이용하여 이를 만족하는  $y$ 값을 구한 후, Table 4에 하중효과별로 나타내었다.

Table 4 Characteristic value of load effects of 30m span by Method 4

	$\alpha$	$u$	Characteristic value
Moment	0.012	4.036	4.273kNm
Negative Moment	0.007	-3.350	-3.721kNm
Shear	0.104	582	611kN

### 4.5 설계기준과의 비교

이 절에서는 이와 같이 추정된 하중효과를 설계기준의 하중효과와 비교한다. 즉, 실제 운행 중인 열차에 대한 계측값으로부터 4가지의 통계방법을 적용하여 추정된 최대 하중효과와 철도교량 설계기준(KRNA, 2013)에 제시되어 있는 고속철도 교량 설계를 위한 활하중 모델(0.75KRL-2012)에 의한 하중효과를 비교한다.

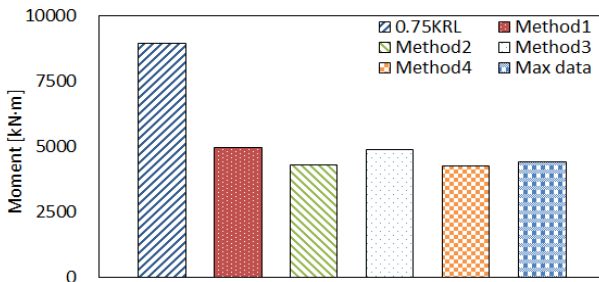
Table 5에는 설계기준에 의한 활하중효과를 지간 10m에서 50m까지 구하여 나타내었다. Fig. 12는 설계기준, 4가지 통계방법에 의한 추정값, 30일 측정값 중 최대값을 30m 지간 정모멘트에 대하여 비교하여 나타낸 그림이다. 설계기준의 활하중에 의한 모멘트가 매우 크고, 추정값 중에는 Method 1, Method 3의 값이 크고, Method 2, Method 4는 계측 최대값과 비슷한 수준이다.

Fig. 13은 철도교량의 설계수명을 도로교설계기준(2014)과 동일하게 100년으로 설정하고 추정된 모멘트를 설계기준의 0.75KRL-2012에 의한 모멘트와 비교하여 10m~50m 지간에 대하여 나타낸 그림이다. 이 비율이 활하중의 편심계수 (bias factor,  $\lambda$ )를 나타낸다. 이 그림에서 보면, 가장 큰 편심계수는 Method 1과 Method 3의 지간 10m에서 각각 0.69, 0.68이고, 50m에서 각각 0.49, 0.48이다. Method 2와 Method 4가 가장 작은 값을 주었으며 지간 10m에서 동일하게 0.60이고 50m에서도 동일하게 0.43이다. 편심계수는 지간이 커질수록 감소함을 알 수 있다.

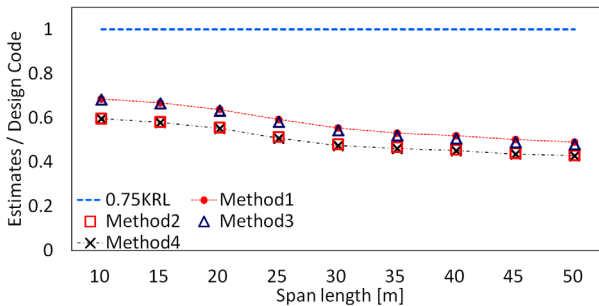
Fig. 14는 부모멘트에 대하여 설계값과 추정값들을 비교한 그림이다. 부모멘트는 Method 3이 가장 크고, Method 1, Method 4, Method 2의 순이다.

**Table 5** Live load effects of 0.75KRL-2012

Span Length(m)	10	20	30	40	50
Moment (kNm)	1,328	4,403	8,979	15,053	22,628
Negative Moment (kNm)	-1,022	-3,607	-7,680	-13,251	-20,320
Shear(kN)	491	830	1,144	1,450	1,754

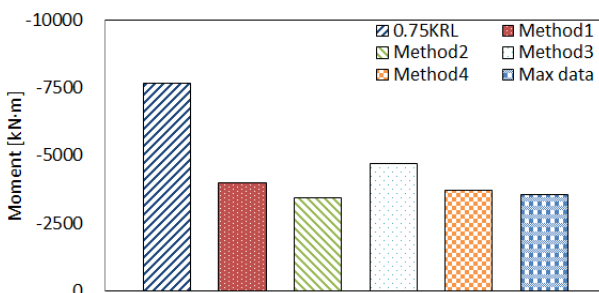


**Fig. 12** Comparison of moment due to design live load, 4 estimation methods and maximum measured data for 30m span

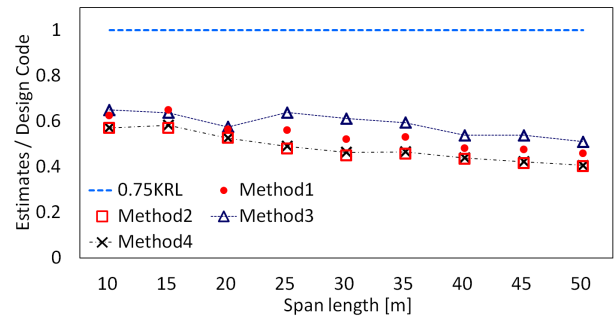


**Fig. 13** Ratio of moment due to design live load and 4 estimation methods

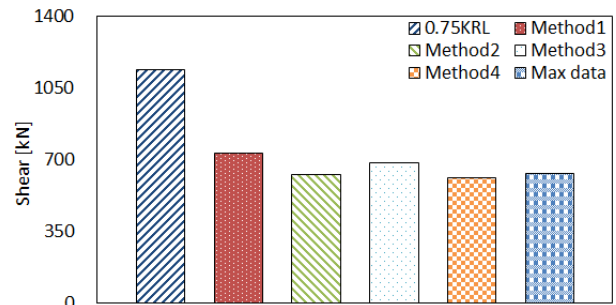
Fig. 15의 설계기준에 대한 추정값의 비율인 편심계수의 크기는 Method 3이 지간 10m에서 0.65이며 50m에서 0.51이다. Method 2와 Method 4는 지간 10m에서 각각 0.57, 0.58이며 50m에서 0.40, 0.42로 가장 작은 값을 나타낸다. Method 1은 지간 10m에서 0.63이며 50m에서 0.46으로 중간 정도의 값을 보인다.



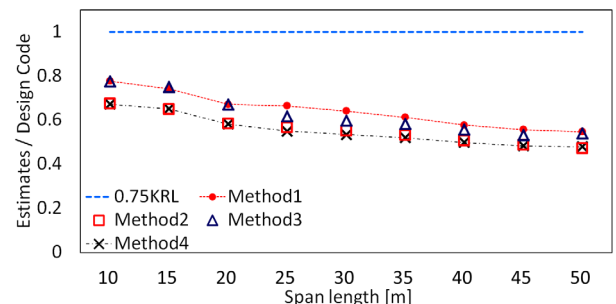
**Fig. 14** Comparison of negative moment due to design live load, 4 estimation methods and maximum measured data for 30m span



**Fig. 15** Ratio of negative moment due to design live load and 4 estimation methods



**Fig. 16** Comparison of shear force due to design live load, 4 estimation methods and maximum measured data for 30m span



**Fig. 17** Ratio of shear force due to design live load and 4 estimation methods

Fig. 16과 Fig. 17은 전단력에 대한 결과이며, 정모멘트의 그래프와 비슷한 경향을 보이고 있다.

### 5. 철도교량 설계 활하중조합의 신뢰도 분석

이 장에서는 위에서 나타난 활하중의 통계특성과 PSC거더 저항강도 통계특성을 이용하여 신뢰도지수를 구한다. 신뢰도 지수 산정에 필요한 교량 구조 저항강도의 통계특성은 철도교량 PSC 박스거더에 대한 시물레이션을 통하여 산정한 결과를 적용한다(KRRI, 2015). 모멘트에 대한 편심계수  $\lambda$ 는 1.16, 변동계수(COV, 표준편차/평균)는 0.10을 적용하고, 전단력의  $\lambda$ 는 1.08, COV는 0.08을 적용하며, 저항강도의 분포는 로그정규분포로 가정한다.

현행 철도교량의 활하중에 대한 설계 하중조합은 다음과 같다.

$$U = 1.35D + 1.85(L + I) \tag{10}$$

Table 5에 나타낸 0.75KRL-2012 설계활하중에 의한  $L$  값을 식 (10)에 적용하여 계수하중효과  $U$ 를 구하면 Table 6과 같다. 연속교로 설계되는 철도교량에 있어서 프리스트레스 효과로 인한 부정정력이 고정하중효과를 상쇄하고 설계에 따라 다양한 값을 갖게 되므로, 이 연구에서 단순화시켜 고정하중  $D$ 의 크기는  $L$ 과 같도록 가정하였다. 고정하중의 통계 특성은 편심계수 1.05, 변동계수 0.1에 정규분포를 적용하였다. 활하중의 편심계수는 4장의 4가지 통계방법들에 의해 추정된 하중효과와 설계기준의 비율을 사용하였다. 충격이 포함된 활하중의 변동계수는 도로교 활하중과 동일하게 0.2를 적용하였다.

Table 6 Factored load  $U$

Span Length(m)	10	20	30	40	50
M+	2,996	9,223	16,226	25,620	36,384
M-	-2,140	-6,963	-13,057	-21,335	-30,315
V	1,456	2,172	2,719	3,214	3,585

철도설계기준을 참고하여 강도감소계수  $\phi$ 는 0.85를 사용하고 식 (11)을 통하여 저항강도의 공칭값  $R_n$ 을 구하여 Table 7에 나타내었다.

$$\phi R_n \geq U \tag{11}$$

Table 7 Design strength  $R_n = U/0.85$

Span Length(m)	10	20	30	40	50
M+	3,524	10,850	19,089	30,141	42,805
M-	-2,518	-8,192	-15,361	-25,100	-35,664
V	1,456	2,172	2,719	3,214	3,585

저항강도  $R_n$ , 고정하중  $D$ , 활하중  $L + I$ 의 공칭값을 이용하여 식 (12)와 같이 한계상태방정식을 수립한다.

$$g = R_n - (D + L + I) \tag{12}$$

일계신뢰도방법(FORM, first order reliability method) (Ang and Tang, 1990)을 이용하여 신뢰도지수를 구하여 하중효과별로 Fig. 18, Fig. 19, Fig. 20에 도시하였다. 지

간이 장지간일수록 신뢰도지수가 커지는 것을 볼 수 있는데 이는 4장에서 보인 활하중의 편심계수와 반대의 경향을 나타낸다. 정모멘트 신뢰도지수의 전체 평균은 6.01이고 최대값과 최소값 차이의 평균은 1.89이다. 부모멘트 신뢰도지수의 전체 평균은 5.98이고 최대값과 최소값 차이는 평균적으로 2.12이다. 전단력 신뢰도지수의 전체 평균은 5.57이고 최대값과 최소값 차이는 평균적으로 2.03이다. 전단력에 대한 신뢰도지수가 모멘트에 비하여 더 작다. 도로교설계기준의 목표신뢰도지수가 3.7임을 감안할 때, 여기에서 구한 신뢰도지수는 매우 높은 수준임을 알 수 있다.

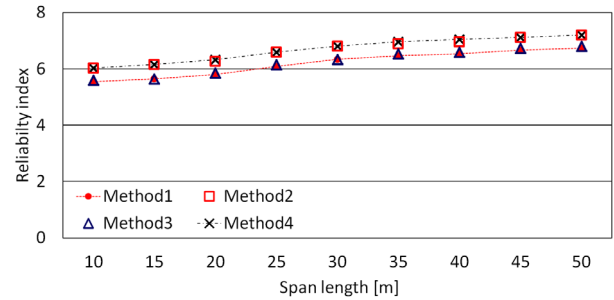


Fig. 18 Reliability index for moment

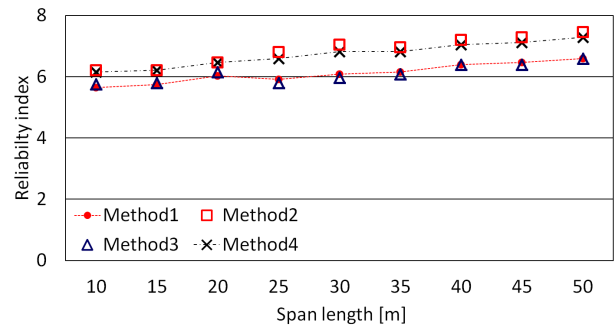


Fig. 19 Reliability index for negative moment

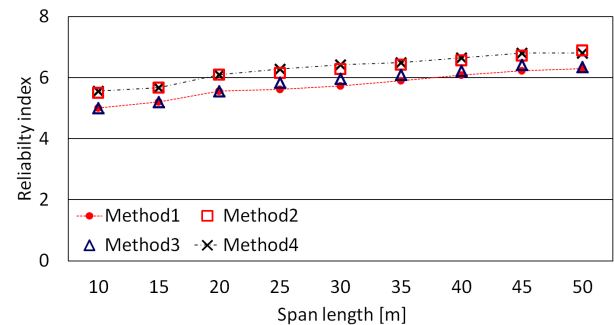


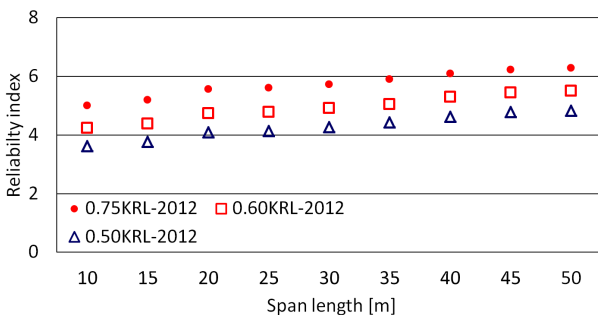
Fig. 20 Reliability index for shear force

고속철도 설계활하중의 크기를 감소시킨다고 가정하고 신뢰도지수를 구하여 보았다. 현행 고속철도 설계기준인 0.75 KRL-2012의 계수를 0.75 대신 0.60과 0.50으로 가정하고, 이에 의한 하중효과를 Method 1과 비교하여 새로운 편심계수를 구하여 Table 8에 나타내었다.

**Table 8** Bias factor for shear force assuming reduction of design live load

Span Length(m)	10	20	30	40	50
0.60 KRL	0.97	0.84	0.80	0.72	0.68
0.50 KRL	1.16	1.01	0.96	0.87	0.82

신뢰도지수가 가장 작은 전단력을 대상으로 하여, 감소시킨 설계활하중을 식 (10), (11), (12)에 적용하여 신뢰도지수를 구한 후 Fig. 21에 나타내었다. 신뢰도지수의 최소값은 10m 지간에 대하여 현행 설계활하중인 0.75KRL은 5.0이며, 0.60KRL과 0.50KRL은 각각 4.2와 3.61임을 알 수 있다.



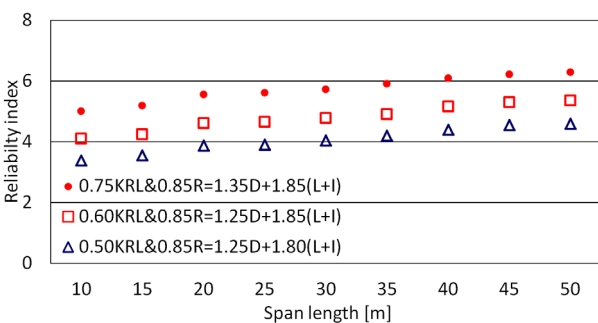
**Fig. 21** Reliability index for shear force assuming reduction of design live loads

이번에는 식 (10)의 하중계수를 감소시키는 효과를 살펴본다. 식 (13)과 같이 고정하중계수를 1.25로 감소시키고, 식 (14)와 같이 활하중계수도 1.80으로 감소시켜서 현행 도로교설계기준의 하중계수와 같도록 하여, 각 설계식이 주는 신뢰도지수를 구하여 Fig. 22에 나타내었다.

$$U = 1.25D + 1.85(L + I) \tag{13}$$

$$U = 1.25D + 1.80(L + I) \tag{14}$$

설계활하중을 0.60KRL로 감소시키고, 고정하중계수를 1.25로 감소시키는 경우에 신뢰도지수는 최소 4.1의 값을 주었다. 설계활하중을 0.50KRL로 감소시키고, 하중계수를



**Fig. 22** Reliability index assuming reduction of design load factors as well as live loads

도로교설계기준과 동일하게 하는 경우에 신뢰도지수는 최소 3.4가 되므로, 도로교설계기준의 목표신뢰도지수인 3.7과 비교할 때, 설계활하중 0.60KRL과 식 (13)을 적용한 경우가 비슷한 결과를 줄 수 있다.

## 6. 결 론

이 논문에서는 고속철도 교량설계를 위한 활하중 모델을 검토하고, 하중조합의 하중계수가 주는 안전율을 분석하였다. 이를 위하여 경부고속철도를 운행하는 열차를 대상으로 약 한 달 동안 실측하여 데이터를 수집하였다. 이 데이터를 대상으로 교량의 설계수명에 맞도록 4가지 통계 방법을 적용하여 설계하중을 추정하였다. 그리고 철도교량의 설계하중조합이 주는 안전율을 검토하기 위하여 신뢰도지수를 구하여 이를 분석하였다.

현행 고속철도 설계활하중은 표준열차하중의 0.75배를 적용한다. 이로부터 교량의 지간별로 정모멘트, 부모멘트 및 전단력 등 설계활하중효과를 구하여 분모로 하고, 실측 데이터로부터 도로교의 설계수명과 동일하게 가정한 100년 대하여 구한 추정활하중효과를 분자로 하여 편심계수를 구하였다. 편심계수의 크기는 가장 큰 값을 주는 방법1과 지간 10m에서, 정모멘트는 0.69, 부모멘트는 0.63, 전단력은 0.78이었다. 편심계수는 지간이 커질수록 좀 더 감소함을 알 수 있었다. 즉, 고속철도 활하중의 크기는 실측 열차로부터 추정한 값보다 추가로 최소 약 31~22% 더 큼을 알 수 있다.

이 연구에서 비교한 4가지 통계적 추정방법 중에 Method 1이 가장 큰 하중 값을 예측하고 있음을 알 수 있다. Method 2에 의한 추정값은 상위 95% 분위값인 Method 4와 계측 최대값과 비교하여 비슷한 크기의 값을 보인다. Method 3은 다소 일정하지 않은 추정값을 주는 경우도 보인다. 일반 철도와 같이 추후 보다 많은 경우에 대한 분석이 필요하며, 이 연구만으로 판단한다면 Method 1을 적용하는 경우에, Fig. 6과 같이 너무 과다하게 예측되지 않도록 주의한다면, 안전측의 설계를 유도할 수 있다고 판단된다.

현행 철도교설계기준의 하중조합이 주는 설계의 안전율을 검토하기 위하여 구한 신뢰도지수를 분석하면 다음과 같다. 현행 기준의 신뢰도지수는 최소 5.0으로 도로교설계기준의 목표신뢰도지수인 3.7과 비교하면 매우 크다. 큰 값이 나온 원인은 먼저 설계활하중의 편심계수가 1보다 작기 때문인데 이는 위에서 분석한 바와 같이 추정한 열차보다 큰 설계하중을 사용하기 때문이다. 또한, 고정하중계수와 활하중계수가 각각 1.35와 1.85로 도로교의 1.25와 1.80보다 크므로 추가의 안전율을 확보하기 때문이다. 즉, 교량의 파괴에 대한



극한한계상태의 측면에서 보면, 현행 철도교설계는 도로교에 비하여 좀 더 안전을 여유를 확보하고 있다고 할 수 있다.

철도교량의 특성으로 볼 때 고속주행에 따른 열차의 안전을 위하여 교량의 처짐, 진동 등 사용성 관련 규정이 매우 중요하다. 이 논문에서 검토한 교량의 극한강도와 관련한 안전성의 검토와 더불어, 철도교량의 설계 안전율을 보다 정확하게 분석하기 위하여 추후 사용성 한계상태에 대한 지속적인 연구가 필수적이다.

### 감사의 글

본 논문은 국토교통부 철도기술연구사업(과제번호 : 15RT RP-B067919-03)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### References

- Ang, A.H-S., Tang, W.H.** (1975) *Probability Concepts in Engineering - Emphasis on Applications to Civil & Environmental Engineering*, John Wiley & Sons, pp.300~301.
- Ang, A.H-S., Tang, W.H.** (1990) *Probability Concepts in Engineering Planning and Design - Volume II-Decision, Risk, and Reliability*, pp.194~206.
- ERRI D 192 RP3** (1994) *Loading Diagram to be Taken into Consideration for the Calculation of Rail-carrying Structures on Lines used by International Services-on a Probabilistic Basis*, European Rail Research Institute.
- Gulvanessian, H., Calgaro, J-A., Holicky, M.** (2012) *Designers' Guide to Eurocode: Basis of Structural Design*, ICE Publishing, pp.43~47.
- Hwang, E.S.** (2008) *Development of Live Load Model for Reliability-Based Design Code*, Korea Bridge Design & Engineering Research Center.
- KRNA** (2010) *Final Report on Railway Design Load System*, Korea Rail Network Authority.
- KRNA** (2011, 2013) *Design Specification of Railway (Railway Bridge)*, Korea Rail Network Authority.
- KRRI** (2015) *Annual Report of Development of Railway Performance and Optimum Construction Cost Technology*, Korea Railway Research Institute.
- Kim, S., Kim, H., Lee, M.** (2010) A Deterministic Investigation for Establishing Design Load of Railway Bridges, *J. Korean Soc. Railw.*, 13(3), pp.290~297.
- Miao, T.J., Chan, T.H.T.** (2002) Bridge Live Load Models from WIM Data, *Eng. Struct.*, 24, pp.1071~1084.
- MLTM** (2014) *Highway Bridge Design Code (Limit State Design Method)*, Korea Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs.
- Nowak, A.S.** (1999) *Calibration of LRFD Bridge Design Code*, NCHRP Report 368, Transportation Research Board, Washington DC.
- ORE** (1973) *Statistical Distribution of Axle Loads and Stresses in Railway Bridges*, Office of Research and Experiments of the International Union of Railways, Report D 128 No. 1-10.
- SB-LRA** (2007) *Guideline for Load and Resistance Assessment of Railway Bridges*, Prepared by Sustainable Bridges - A Project within EU FP6, 31-47.

### 요 지

이 논문에서는 고속철도교량 설계를 위한 활하중 모델을 통계 및 확률적 방법으로 검토하고, 하중조합의 하중계수가 주는 안전율을 분석하였다. 이 연구는 철도교량 설계기준에 대한 한계상태설계법 개발의 일환이며, 이를 위하여 경부고속철도를 운행하는 열차를 대상으로 약 한달 동안 실측하여 데이터를 수집하고 분석하였다. 이 데이터를 대상으로 교량의 설계수명에 맞도록 4가지 통계 방법들을 적용하여 설계하중을 추정하여 비교·검토하였다. 또한, 철도교량의 설계하중조합이 주는 안전율을 검토하기 위하여 신뢰도지수를 구하고 이를 분석하였다. 실측 데이터로부터 추정된 활하중효과에 대하여, 현행 고속철도 설계활하중인 표준열차하중의 0.75배를 적용한 설계활하중 효과의 크기가 최소 30~22% 더 크게 나왔다. 신뢰도분석을 통하여, 극한한계상태만을 기준으로 본다면, 추가적인 하중계수 감소의 가능성이 있음을 알 수 있다.

**핵심용어** : 고속철도교량, 열차활하중, 통계적 추정, 신뢰도지수, 한계상태설계법, 하중저항계수