

WIM 데이터를 이용한 고속도로 중차량 특성 분석

길흥배* · 강상규**

Gil, Heungbae*, Kang, Sang Gyu**

Characteristics of Heavy Vehicles Using Expressway Networks Based on Weigh-in-motion Data

ABSTRACT

The design life and durability of the bridges are strongly affected by the Gross Vehicle Weight(GVW) of heavyweight trucks. The Weigh-In-Motion(WIM) systems are typically used to collect information on truck total weight and speed. The statistical analysis of the GVW measured using High Speed WIM systems showed that most of heavy vehicles were from Vehicle Type 7, 10, and 12. The analysis was also carried out to determine goodness of fit with theoretical probability distributions. The normal distribution was shown to best describe the overall distribution of GVW. The top 10% of the GVW appeared to best fit by the Weibull 3 probability distribution.

Key words : Expressway, Live loads, WIM(Weigh-in-motion) system, Probability distribution

초록

교량의 내구성과 설계수명 평가에 있어 대형화물차와 같은 중차량의 총중량 크기와 분포 특성은 큰 영향을 미치며, 총중량의 특성은 WIM 시스템에서의 측정 데이터를 활용하여 파악하고 있다. 고속도로상에 설치된 고속 WIM 시스템을 통해 측정된 중차량의 분포를 분석한 결과, 대부분의 중차량은 7종, 10종, 12종 화물차에서 발생하였다. 이들 화물차의 전체적인 총중량 분포와 상위 총중량 분포에 대한 확률분포 모델을 추정하였다. 전체적인 총중량 분포는 정규확률 분포에 근접하는 것으로 분석되었으며, 상위 10% 데이터는 극치분포의 하나인 Weibull 3 확률분포에 가장 높은 적합도를 갖는 것으로 나타났다.

검색어 : 고속도로, 활하중, 축중계, 확률분포

1. 서론

도로를 이용하는 각종 차량들의 총중량 특성을 파악하여 교량의 설계수명이나 잔존수명 중에 발생할 것으로 예측되는 최대 활하중을 예측하는 것은 설계 및 내하력 평가에서 아주 중요하다. AASHTO LRFD BDS(Bridge Design Specifications)의 트럭하중은 1975년에 캐나다의 Ontario주에서 수행된 트럭하중 조사 결과에 기반을 두고 도출되었다. 중차량으로 판단되는 10,000대의 트럭 무게를 조사하였으며, 이 조사결과를 토대로 AASHTO LRFD BDS에서 제시하고 있는 75년의 공용수명동안에 발생할 수 있는 최대의 활하중 효과를 도출하였다(Nowak, 1999). 주행하는 차량의 축중량, 총중량 등을 자동적으로 측정할 수 있는 WIM(Weigh-In-Motion) 시스템을 통해 측정된 트럭의 중량 특성 값들을 활용하여 교량의 활하중 계수를 유도하고 안전성 등을 판단하기 위한 연구가 지속적으로 수행되었다. Moses (2001)는 공용중인 교량의 안전성을 평가하기 위한 하중계수 보정에서 WIM 시스템을 통해 측정된 트럭 중량 데이터의 95백분위수(95th

* 정회원 · 교신저자 · 한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원 (Corresponding Author · Korea Expressway Corporation · hgil@ex.co.kr)

** 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원 (kevin@ex.co.kr)

Received February 18, 2013/ revised July 9, 2013/ accepted August 7, 2013

Percentile)를 Nowak이 측정한 값들과 비교 평가하였다. Sivakumar 등(2011)은 WIM 측정 데이터를 이용하여 AASHTO LRFD BDS에 제시된 활하중을 새롭게 제정하거나 수정할 수 있는 상세한 절차와 방법을 제시하였다.









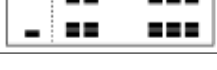
국내에서는 신뢰도 기반의 도로교설계기준(한계상태설계법) 개발을 위해 WIM 시스템 혹은 BWIM(Bridge WIM) 시스템을 통해 측정된 중량 데이터를 활용한 것으로 보고되어 있다(Hwang, 2009). Hwang(2009)에 따르면 8개 지점에서 측정된 200,740대의 차량 중에서 트럭 하중들을 분리하여 단일차량 및 연행차량에 의해 교량에서 발생하는 최대하중효과를 계산하였다. 차종 별로 중량을 분석한 결과, 7종 중형트럭(5축)과 10종 대형트럭이 평균적으로 가장 무거운 것으로 제시하였다. 또한 각 지역별, 차종별로 측정된 트럭 중량데이터에서 차종별로 상위 10%와 20%를 이용하여 교량에 발생하는 차량에 의한 최대 중량 효과를 분석하였다. Park 등(2006)은 서해안고속도로상의 도곡교에 BWIM시스템을 설치하여 차량 중량 자료를 수집하였으며, 설계 활하중 모형과 피로하중 모형을 제안하였다.

본 연구에서는 고속도로의 과적차량들을 단속하기 위하여 경부고속도로 김천 지역 상행선과 중부내륙고속도로 선산 지역 상행선에 설치된 고속축중계(High-Speed Weigh-in-motion, HS-WIM) 시스템에서 측정된 데이터를 이용하여, 차종별 축중량, 총중량 및 중량분포 등의 각종 특성을 조사하였다. 김천

지역은 편도 3차로의 고속도로이며 선산 지역은 편도 2차로의 고속도로이다. HS-WIM(Kwon and Lee, 2010)은 피에조 퀴츠(Piezo Quartz) 센서를 활용한 고속축중계로 고속도로상의 과적 차량단속을 위하여 설치되었지만, 통과 차량에 관련된 주요 정보가 계속되고 있다. 측정된 자료 중에는 1/100초의 정밀도로 측정되는 통과시간, 속도, 차선, 차두 간격, 축거, 전체차량의 길이, 축중량(Axle Weight), 전체 중량(Gross Vehicle Weight, GVW), 축당 타이어수 등이 포함되어 있다. 측정된 정보를 이용하여 국토해양부의 교통량조사관련 예규(MLTM, 2009)에 따른 12종 차종분류 및 내부 분류 코드에 따른 세부적인 차종 분류도 수행된다. 12종의 차량 중에서 Table 1에 있는 4종 이상의 트럭을 교량의 거동에 영향을 미칠 수 있는 중차량으로 분류하고 분석을 수행하였다.

WIM 시스템은 각종 환경 변수에 민감하여 측정데이터의 정당성을 확보하기 위해서는 주기적인 검교정과 오차 보정이 요구된다. HS-WIM 시스템의 검교정이 이루어진 직후인 2011년 11월 중순에서 12월 중순까지 한 달 동안 측정된 데이터를 이용하여 통행 트럭의 분포와 특성을 평가하였다. 특히 2011년 12월 5일부터는 HS-WIM 시스템에 기반한 고속도로 과적차량 단속시스템을 운영하기위하여, 과적 위반차량의 총중량, 속도 등을 전달하기 위한 VMS(Variable Message Sign) 표출이 시작되어 총중량 특성에 변화 있을 것으로 예상된다.

Table 1. Vehicle Classes

Vehicle Type	Axle Arrangements	Description
4 Small Trucks B		Trucks on a single frame with two axles. Loading limit: 85kN
5 Medium Trucks A		Trucks on a single frame with three axles
6 Medium Trucks B		Trucks on a single frame with four axles
7 Medium Trucks C		Trucks on a single frame with five axles
8 Large Trucks A		Semi-trailer trucks with four axles consisting of two units, one of which is a tractor
9 Large Trucks B		Single-trailer trucks with four axles consisting of two units, one of which is a tractor
10 Large Trucks C		Semi-trailer trucks with five axles consisting of two units, one of which is a tractor
11 Large Trucks D		Single-trailer trucks with five axles consisting of two units, one of which is a tractor
12 Large Trucks E		Semi-trailer trucks with six axles consisting of two units, one of which is a tractor

2. 김천 HS-WIM 데이터 분석

2.1 일별 통행량 분포

김천 HS-WIM 시스템은 편도 3차로의 고속도로 상행선에 설치되어 있다. 차로별 통행량 분석 결과, 대부분의 트럭은 3차로를 이용하였으며, 추월이나 교행 등을 위해 2차로를 이용하는 트럭도 있는 것으로 측정되었다. 김천 HS-WIM 시스템에서 측정된 통과 차량의 측정상 오류를 제거하고 데이터를 일별로 정리한 결과, Fig. 1에 제시된 것과 같이 평균적인 일별통행량(Daily Traffic)은 15,000대 이상인 것으로 측정되었다. 또한 평일에 비하여 휴일에 전체 교통량이 증가하는 것으로 나타났다. 4종 화물차 이상의 전체 화물차 통행량도 상당히 높아 평일의 일별트럭통행량(Daily Truck Traffic)이 5,000대 이상으로 기록되었다. 그러나 전체 차량의 교통량이 증가하는 것과는 반대로 토요일과 일요일에는 트럭 통행량이 1,500~3,000대 수준으로 감소하는 것으로 나타났다.

1개월 동안 측정된 142,366대의 전체 트럭을 12종 차량분류 시스템에 따라 차종별로 분류한 결과, Table 2에 있는 것과 같이

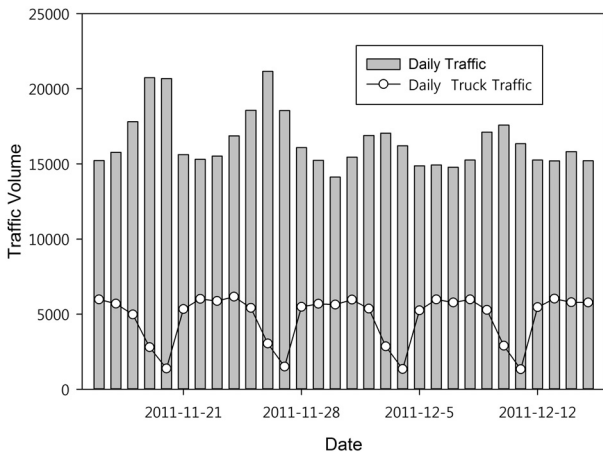


Fig. 1. Daily Truck Traffic Volume at Kimchon HS-WIM Site

Table 2. Filtered Truck Data from Kimchon HS-WIM Site

Vehicle Type	Count	% of Total
4	41,197	28.9%
5	32,863	23.1%
6	11,963	8.4%
7	24,505	17.2%
8	6,776	4.8%
9	386	0.3%
10	16,940	11.9%
11	987	0.7%
12	6,749	4.7%

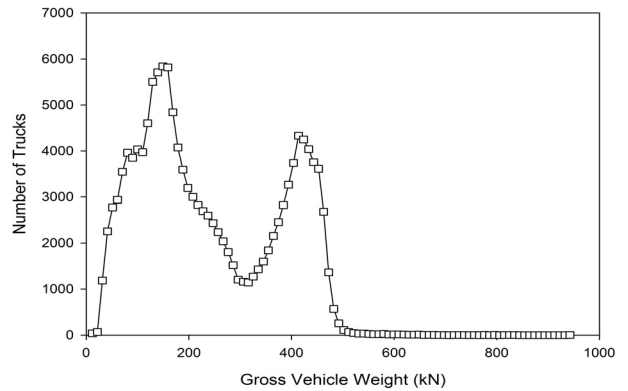


Fig. 2. GVW Distribution at Kimchon HS-WIM Site

나타났다. 대부분의 트럭이 비교적 적은 중량을 적재하는 2축을 갖는 소형 화물수송용 4종 트럭(28.9%)과 3축을 갖는 중형 화물수송용 5종 트럭(23.1%)인 것으로 나타났다. 중형의 화물 수송용 트럭중 상대적으로 중량을 많이 적재하는 5축의 7종 대형화물차가 17.2%를 구성하는 것으로 분석되었다. 세미 트레일러 형식의 화물차인 5축의 10종 대형화물차와 6축의 12종 대형화물차도 각각 11.9%와 4.7%를 점유하는 것으로 나타났다.

측정된 4종 이상 트럭의 총중량(Gross Vehicle Weight)은 최소 하중 7.0kN에서 최고 하중 947.7kN까지 변화하였으며, 총중량의 히스토그램은 Fig. 2에 있는 것과 같이 150kN과 420kN을 중심으로 상당수 트럭들이 분포되어 있는 쌍봉우리형으로 나타났다. 도로 교통법에서 허용하는 트럭의 최대총중량인 392kN(40ton)을 초과하는 과적트럭도 전체 트럭통과 대수의 22%(31,364대)에 달하는 것으로 나타났다.

2.2 일별 총중량 변화

일별로 측정된 트럭의 최대 중량(Maximum), 95 백분위수(95th Percentiles) 중량, 평균 중량을 이용하여 교량의 내구성과 안전성에 영향을 미치는 중차량의 중량 변화를 비교하였다. 총중량의 95백분위수(Percentile)는 Gindy 등(2007)이 측정된 트럭 중량의 특성, 특히 교량 설계 및 안전성에 영향을 미치는 대표 중차량 하중으로 활용하였다.

Fig. 3에 있는 것과 같이, 트럭의 최대 중량은 일별로 크게 변화하는 것으로 나타났다. 이에 비하여 트럭의 평균 중량과 95백분위수 중량에는 큰 변화가 없었다. 그러나 2011년 12월 5일부터 HS-WIM 시스템 측정 자료를 활용한 과적 트럭에 단속에 대한 VMS(Variable Message Sign) 정보가 표출된 후에는 과적차량이 HS-WIM 시스템 설치 구간을 회피함에 따라 통행 트럭의 최대 총중량 및 95백분위수 중량이 감소하는 것으로 나타났다.

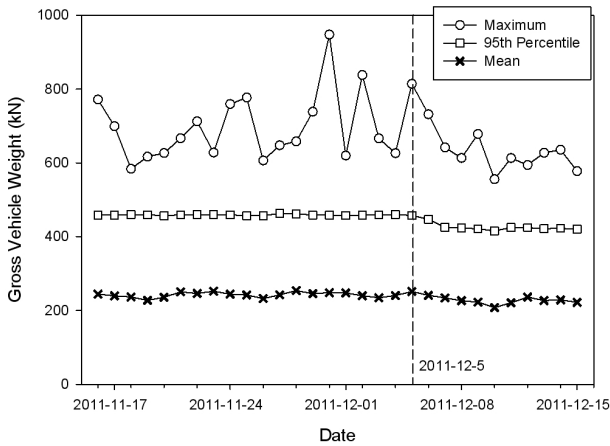


Fig. 3. Daily GVW Stats at Kimchon HS-WIM Site

2.3 차종별 총중량 특성

김천 HS-WIM에서 측정된 각 차종별 총중량 분포가 Fig. 4에 비교되어 있다. 트럭 통행의 많은 부분을 차지하는 4종과 5종 중 소형 화물차의 총중량은 대부분 허용 트럭 총중량인 392kN 이하인 것을 알 수 있다. 6종, 7종, 10종, 11종 및 12종 중 대형 화물차들에는 도로교통법에서 허용하는 허용 총중량인 392kN을

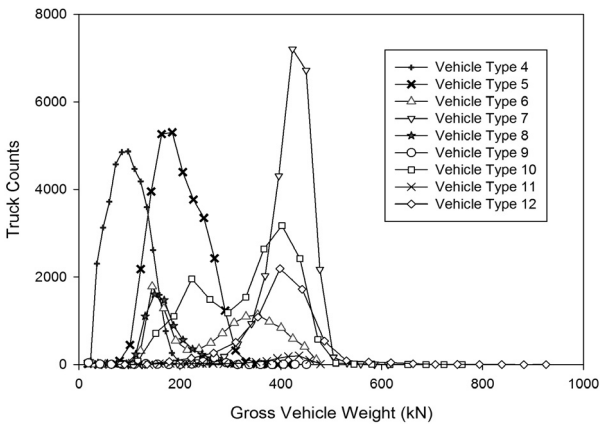


Fig. 4. GVW Histograms by Vehicle Types for Kimchon HS-WIM Site

Table 3. Gross Vehicle Weight Statistics from Kimchon HS-WIM Site (in KN)

Statistics	Vehicle Type		
	7	10	12
Mean of all trucks	418.6	331.6	397.9
Mean of top 10% trucks	475.3	456.3	514.4
Mean of top 5% trucks	483.8	468.5	553.1
95% Percentile	470.8	451.2	487.2
Maximum of all trucks	626.2	777.0	947.7

초과하는 중차량이 다수 존재한 것으로 나타났다. 특히, 7종 트럭은 통과 횟수도 많고 중차량도 많은 것으로 측정되었으며, 10종 및 12종 트럭들에서는 교량의 안전에 영향을 미치는 과적 차량의 크기와 비율이 높은 것으로 측정되었다. 측정된 과적차량 중에서 최고 중량은 12종 대형화물차로 947.7kN을 기록하였으며, 심야에 800kN 정도의 중량을 갖는 2대의 12종 대형화물차들이 연행하여 통과한 것도 2회나 기록되었다.

차종별로 하중 데이터를 분석한 결과 7종, 10종, 11종, 12종 대형화물차의 평균 총중량이 높은 것으로 Table 3에 있는 것과 같이 분석되었다. 교량의 안전성 및 내구성에 영향을 미치는 중차량의 특성을 파악하기 위하여, 이들 차종의 상위 5%와 10% 총중량 데이터를 평균한 총중량도 Table 3에 조사되어 있다. 평균 총중량은 7종 화물차가 크지만, 상위 5%와 10%의 평균 총중량과 최대 중량은 12종 화물차에서 가장 큰 것으로 나타났다.

3. 선산 HS-WIM 데이터 분석

3.1 일별 교통량

2차로인 선산 지역의 차로별 이용량을 조사한 결과, 80% 정도의 화물차는 주행차로인 2차로를 이용하였으며, 추월이나 교행 등을 위해 추월 차로인 1차로를 이용하는 화물차는 20% 정도인 것으로 측정되었다. 선산 HS-WIM 시스템에서 측정된 일별 통행량(Daily Traffic)과 4종 화물차 이상의 일별트럭통과대수(Daily Truck Traffic)는 Fig. 5와 같이 나타났다. 비정상적인 측정 데이터와 기기 이상으로 부분적으로만 측정이 수행된 날짜를 제거하고 데이터를 일별로 정리하였다. Fig. 5에 제시된 것과 같이 선산 구간에는 평균적으로 20,000대 이상의 차량이 통행하는 것으로 나타났다. 화물차(4종~12종) 통행량도 상당히 높아 주중에는 거의 9,000대 정도가 기록되었다. 주중에 비하여 주말에 전체 교통량이 증가하는

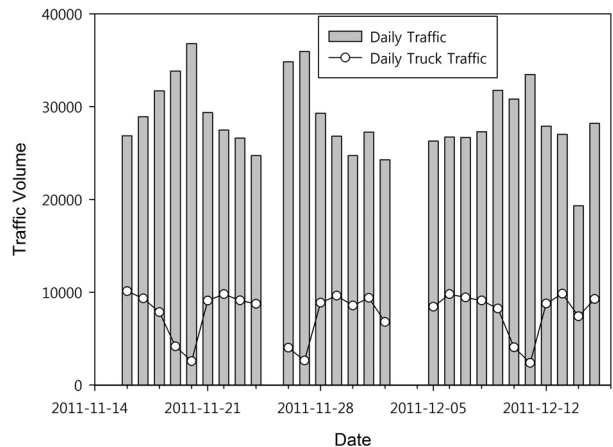


Fig. 5. Daily Truck Traffic Volume at Sunsan HS-WIM Site

것으로 나타났지만, 전체 차량의 교통량 증가하는 것과는 반대로 주말에는 트럭의 통행량이 3,000대 이하 수준으로 감소하는 것으로 측정되었다.

2종 차량분류 시스템을 따라 측정된 203,945대의 화물차를 차종별로 분류한 결과, Table 4에 있는 것과 같이 나타났다. 대부분의 차량이 비교적 적은 중량을 적재하는 중소형 화물차인 4종(33.8%)과 5종(29.9%)인 것으로 나타났다. 중형의 화물 수송용 트럭중 상대적으로 중량을 많이 적재하는 5축의 7종 트럭은 10.2%를 구성하는 것으로 분석되었다. 트레일러 형식의 대형 화물차인 5축의 세미트레일러(10종)와 6축의 세미트레일러(12종)도 각각 11.7%와 3.2%인 것으로 측정되었다.

측정된 4종 이상 트럭의 총중량(Gross Vehicle Weight)은 최소 하중 7kN에서 최고 하중 815kN까지 변화하였으며, 총중량의 히스토그램은 Fig. 6에 있는 것과 같이 150kN과 420kN을 중심으로 상당수 트럭들이 분포되어 있는 쌍봉우리형으로 나타났다. 과적차량의 기준인 392kN(40ton)을 초과하는 과적트럭도 13.8%(28,055대)에 상당하는 것으로 나타났다.

Table 4. Filtered Truck Data from Sunsan HS-WIM Site

Vehicle Type	Count	% of Total
4	68,893	33.8%
5	61,010	29.9%
6	14,610	7.2%
7	20,765	10.2%
8	6,406	3.1%
9	898	0.4%
10	23,771	11.7%
11	1,133	0.6%
12	6,459	3.2%

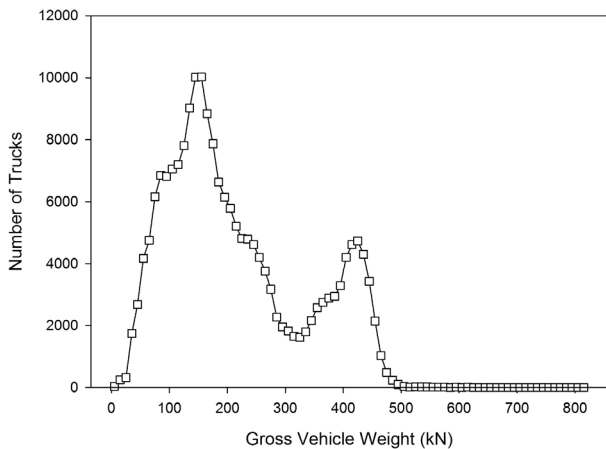


Fig. 6. Gross Vehicle Weight Distribution at Sunsan HS-WIM Site

3.2 일별 총중량 변화

측정된 화물차의 최대 중량은 Fig. 7에 있는 것과 같이 일별로 상당히 변화하는 것으로 나타났다. 이에 비하여 화물차의 평균 중량과 95백분위수에는 큰 변화가 없었다. 주말에는 화물차의 통행량이 감소함에 따라 최대 중량과 평균 중량이 감소하는 것으로도 나타났다.

3.3 차종별 총중량 특성

선산 HS-WIM에서 측정된 총중량 분포를 각 차종별로 비교한 결과가 Fig. 8에 제시되어 있다. 화물차 통행량의 많은 부분을 차지하는 소형화물차(4종)과 중형화물차(5종)의 총중량은 대부분 허용 트럭 총중량인 392kN(40ton) 이하인 것을 알 수 있다. 6종, 7종, 10종, 11종 및 12종 화물차들에는 과적차량 다수 존재하는 것으로 나타났다. 특히, 7종 트럭은 통과 횟수도 많고 중차량 비율도 높은 것으로 측정되었다. 10종 트럭과 12종 트럭은 7종 트럭에

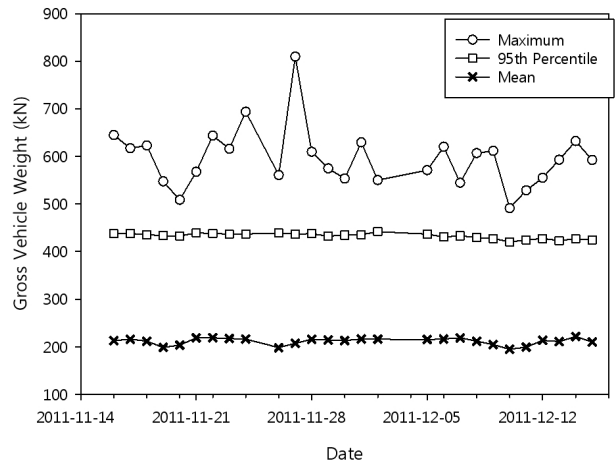


Fig. 7. Daily GVW Statics at Sunsan HS-WIM Site

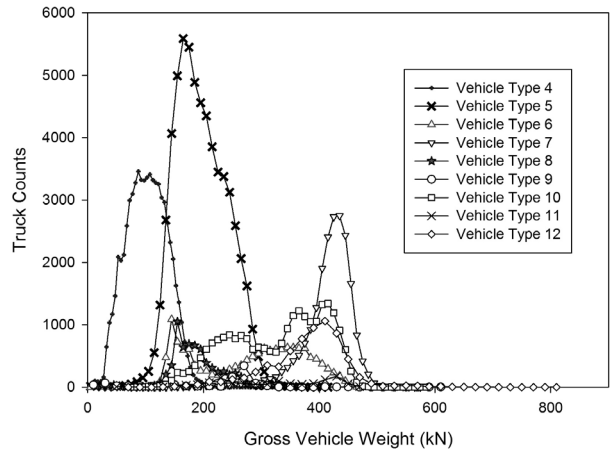


Fig. 8. GVW Histograms by Vehicle Types for Sunsan HS-WIM Site

Table 5. Gross Vehicle Weight Statistics from Sunsang HS-WIM Site (in KN)

Statistics			
	7	10	12
Mean of all trucks	415.1	326.7	378.8
Mean of top 10% trucks	469.6	439.3	480.0
Mean of top 5% trucks	478.8	447.6	506.0
Maximum of all trucks	573.2	581.4	810.3

비하여 통과 대수는 적지만, 교량의 안전에 영향을 미치는 총중량이 큰 화물차가 많은 것으로 측정되었다. 측정된 화물차의 총중량 중에서 최고 총중량은 810.3kN(12종)으로 기록되었다.

7종, 10종, 12종의 전체 평균 총중량과 상위 5% 및 10%의 평균 총중량 및 차종별 최대 중량이 Table 5에 비교되어 있다. 총중량의 평균은 7종 화물차가 12종 화물차 보다 크지만, 상위 5%와 10% 화물차의 총중량 평균은 12종 화물차가 큰 것으로 나타났다. 이것은 12종 화물차의 중차량 비율이 높기 때문이다.

4. 총중량 확률 분포

교량의 활하중 계수 결정, 내하력 평가 등에 대한 기존의 연구에서는 상위 10% 혹은 20%의 차량 총중량에 적합한 확률분포를 적용하여 공용기간 중의 최대 활하중을 추정하고 신뢰성 등을 산정하였다. Nowak(1999)은 캐나다의 Ontario주에서 측정된 중차량을 교량에 재하한 후, 이들 중차량에 의해 발생하는 모멘트와 전단력을 정규분포로 고려하여 교량의 공용수명 중에 발생할 수 있는 최대하중 효과를 도출하였다. Ghosn 등(2008, 2010)은 WIM 측정 차량 하중의 영향이 전체적으로는 정규분포에 부합되지 않지만 상위 5%의 데이터는 정규분포에 적합한 것으로 고려하여 최대하중 효과를 유도하였으며, 각종 트럭 하중에 의해 교량에 발생하는 모멘트와 전단력 분포의 최대값들이 정규분포를 갖는 것으로 고려하였다. 그러나 Caprani 등(2006)은 극치분포들을 모두 포함하는 GEV(Generalized Extreme Value) 분포가 하중에 의한 교량 영향 분포에 적합한 것으로 제시하고 있다. Hwang(2009)은 정규분포 보다는 Type-I 극치분포(Extreme Value Distribution)인 Gumbel 분포가 최대중량 분포를 좀 더 정확하게 묘사하고 예측할 수 있는 것으로 제시하였으며, 설계하중을 유도하는데 활용하였다. Zhou 등(2012)은 Normal 분포, Gumbel 분포, GEV 분포와 같은 통계 확률분포가 최대 하중 효과를 유도하는데 있어 미치는 영향을 비교하여, 적용된 분포에 따라 최대하중이 변하는 것을 보여주었다.

김천과 선산 HS-WIM 시스템에서 측정된 차량의 총중량 데이터에 적합한 확률분포 모델을 선정하기 위하여, 중차량 비율이 높은

7종, 10종, 12종 화물차량을 대상으로 통계분석을 수행하였다. 전체 총중량 및 상위 5%, 10%의 총중량 데이터와 일반적으로 활용되는 확률분포인 정규분포 및 Gumbel 분포와의 적합도를 우선 검토하였다. 측정된 총중량, 축중량에 적합한 확률분포 모델을 검정하고, 공용기간중의 최대 중량이나 최대 중량에 의한 모멘트, 전단력 등을 예측하기 위하여 확률지(Probability Paper)가 이용된다. 트럭 중량 분포가 정규분포이면 정규확률지(Normal Probability Paper)에 직선으로 나타나야 하며, 극치분포인 Gumbel 분포에 적합하면 Gumbel 확률지(Gumbel Probability Paper)에 직선으로 나타나야 한다. 확률지에 있어 수평축은 측정된 트럭의 총중량이 되며, 수직축은 축소변량(Reduced variate)으로 환산하여 도시한다. 각 분포별 축소변량은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$v = \Phi^{-1}(p) \tag{1}$$

$$v' = -\log(-\log p) \tag{2}$$

여기서, v = 정규분포 축소변량

v' = Gumbel분포 축소변량

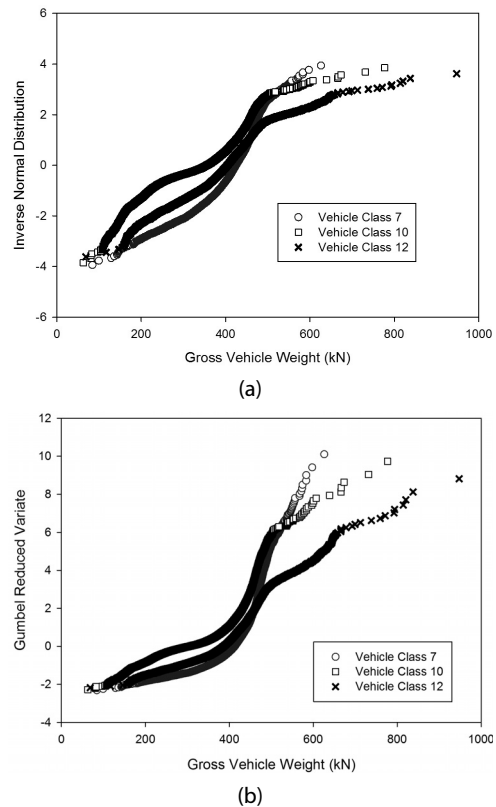


Fig. 9. GVW of Heavy Trucks for Kimchon HS-WIM Site (a) Normal Probability Paper Plot (b) Gumbel Probability Plot

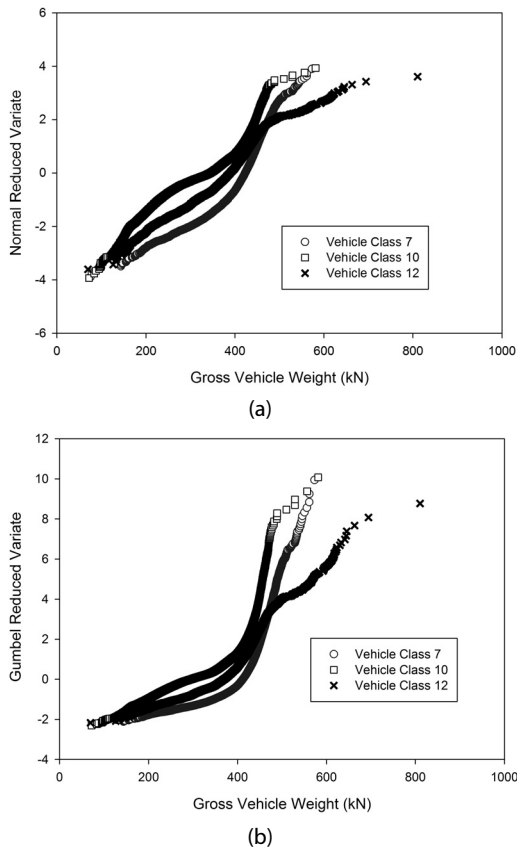


Fig. 10. GVW of Heavy Trucks for Sunsan HS-WIM Site (a) Normal Probability Paper Plot (b) Gumbel Probability Plot

축소변량을 구하기 위한 각각의 총중량 확률, p_i 는 n 개의 총중량 데이터를 오름차순으로 정리한 후, $p_i = i/(n+1)$ 식을 이용하여 산정하였다(Castillo 등, 2005).

각 차종별로 측정된 총중량을 정규 확률지(Normal Probability Paper)와 Gumbel 확률지(Gumbel Probability Paper)에 도시한 결과가 Figs. 9 and 10에 주어져 있다. 두 종류의 확률지에 도시된 김천 및 선산 HS-WIM의 전체 중량 분포는 직선으로 나타나진 않았지만, 기존의 연구 결과들과 유사하게 Gumbel 분포 보다는 정규분포에 좀 더 부합하는 것으로 나타났다.

상위 총중량 데이터와 정규분포 및 Gumbel분포와의 적합도(Goodness of Fit)를 검정하기 위하여, 상위 총중량 데이터들을 별도의 확률지에 도시하였다. 김천 HS-WIM에서 측정된 7종과 12종 화물차의 상위 5%와 10%의 총중량 데이터를 정규 확률지와 Gumbel 확률지에 도시한 결과가 Figs. 11 and Fig. 12에 주어져 있다. 차종별 총중량의 데이터점들로 구성된 그래프는 확률지에 관계없이 선형성을 보이지 않는 것으로 나타났다. 선산 HS-WIM의 총중량 데이터 도시 결과도 유사하게 나타났다. 이것은 기존의 설계기준들에 규정된 활하중들의 유도 과정에서 가정한 것과는

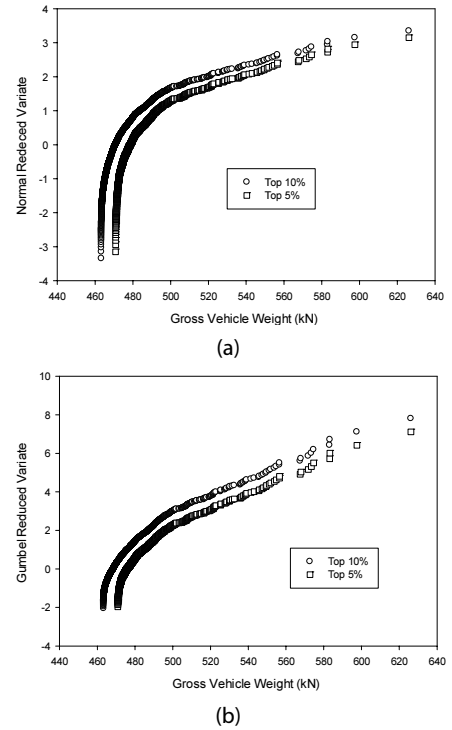


Fig. 11. Distributions fitted to Kimchon HS-WIM Data for Vehicle Type 7 (a) Normal Probability Paper Plot (b) Gumbel Probability Plot

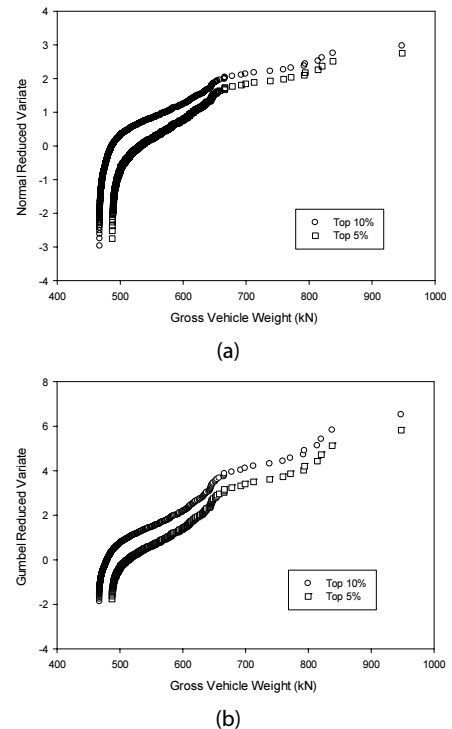
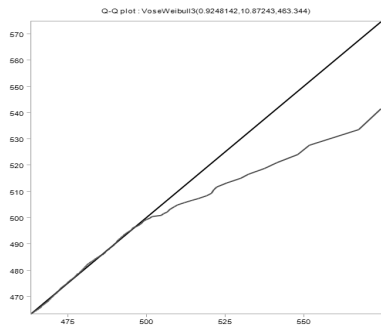
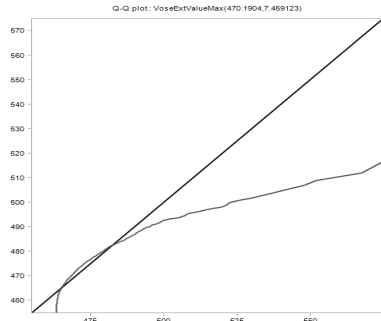


Fig. 12. Distributions fitted to Kimchon HS-WIM Data for Vehicle Type 12 (a) Normal Probability Paper Plot (b) Gumbel Probability Plot

WIM 데이터를 이용한 고속도로 중차량 특성 분석

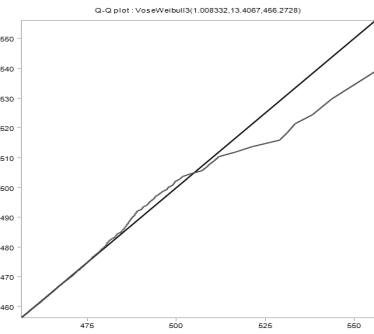


(a)

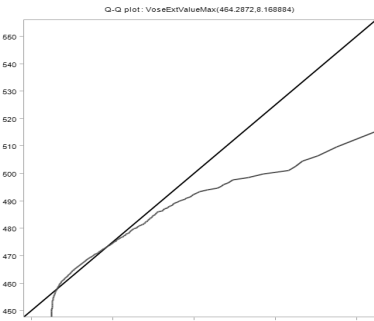


(b)

Fig. 13. Q-Q Plots of Extreme Value Distributions fitted to Top 10% of Kimchon HS-WIM Data for Vehicle Type 7 (a) Weibull 3 Distribution (b) Gumbel Distribution

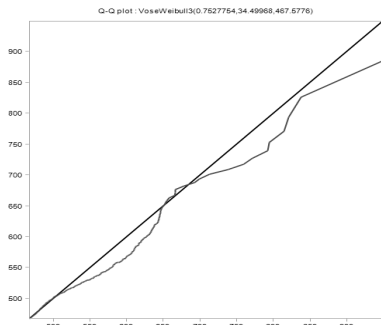


(a)

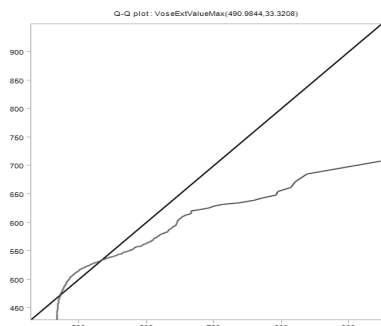


(b)

Fig. 15. Q-Q Plots of Extreme Value Distributions fitted to Top 10% of Sunsan HS-WIM Data for Vehicle Type 7 (a) Weibull 3 Distribution (b) Gumbel Distribution

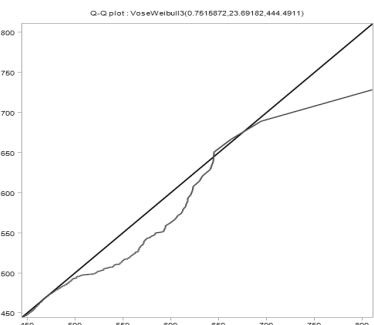


(a)

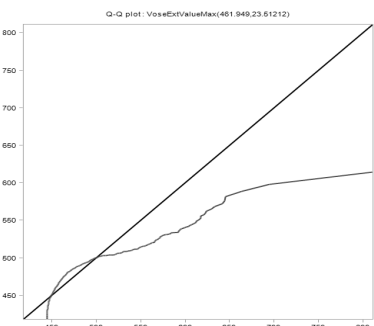


(b)

Fig. 14. Q-Q Plots of Extreme Value Distributions fitted to Top 10% of Kimchon HS-WIM Data for Vehicle Type 12 (a) Weibull 3 Distribution (b) Gumbel Distribution



(a)



(b)

Fig. 16. Q-Q Plots of Extreme Value Distributions fitted to Top 10% of Sunsan HS-WIM Data for Vehicle Type 12 (a) Weibull 3 Distribution (b) Gumbel Distribution

Table 6. Parameters of Weibull 3 Distribution for HS-WIM Data

HS-WIM Site	Vehicle Type	Scale Parameter, α	Shape Parameter, β	Location Parameter, θ
Kimchon	7	0.925	10.87	463.3
	12	0.753	34.50	467.6
Sunsan	7	1.008	13.41	456.3
	12	0.752	23.09	444.5

달리, 정규분포나 Gumbel 분포가 적합한 확률분포 모델이 아닌 것을 의미한다.

HS-WIM 측정 데이터의 다양한 확률분포와의 적합도(Goodness of Fit) 검증을 위해 각종 확률분포의 적합도 검증 프로그램인 ModelRisk(Vose Software, 2007)를 활용하였다. ModelRisk는 측정 데이터의 각종 확률분포에 대한 적합도를 SIC(Schwarz Information Criterion), AIC(Akaike Information Criterion), HQIC(Hannan-Quinn Information Criterion) 등의 정보척도(Information Criterion)를 이용하여 결정하고, 데이터에 적합도가 높은 연속확률분포를 순서대로 제시한다. 정보척도인 SIC, AIC, HQIC가 가장 작은 값을 갖는 연속확률분포가 측정 데이터와의 적합도가 높아 통계적 특성을 가장 잘 표현할 수 있다. 정규분포와 극치분포인 Gumbel 분포(Maximum Extreme Value Distribution), Weibull 분포, Weibull 3 분포 등의 다양한 연속 확률분포의 정보척도를 비교한 결과, Weibull 3 확률분포가 가장 높은 적합도를 갖는 것으로 나타났다. Weibull 3 확률분포는 3-매개변수 Weibull 분포를 의미하며, 일반적으로 사용되는 2-매개변수 Weibull 분포에 비하여 위치 매개변수를 추가적으로 갖는 분포를 의미한다. 3-매개변수 Weibull 분포인 Weibull 3의 확률밀도함수, $f(x)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$f(x) = \alpha\beta^{-\alpha}(x-\theta)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{x-\theta}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (3)$$

여기서 α = 규모 매개변수(Scale Parameter), β =형상 매개변수(Shape Parameter), θ = 위치 매개변수(Location Parameter)를 각각 의미한다.

측정된 데이터의 확률분포 적합도는 Q-Q도(Quantile-Quantile Plot)와 P-P도(Probability-Probability Plot)를 통해서도 파악할 수 있다. 여기서는 이론적인 확률분포의 분위수와 이에 대응하는 데이터 분포의 분위수(Quantile)를 수평축(x축)과 수직축(y축)의 좌표로 하여 점을 찍은 Q-Q도를 이용하여 확률분포를 비교하였다. Castillo 등(2005)에 따르면 Q-Q도에서 대각선 ($y=x$)에 데이터들이 군집하여 선형성을 가지면 이론적인 확률분포를 따르는 것으로

고려한다. Figs. 13~16에 김천 HS-WIM과 선산 HS-WIM에서 측정된 7종과 12종 트럭의 상위 10% 총중량 데이터에 대한 Weibull 3 확률분포와 Gumbel 확률분포의 Q-Q도가 제시되어 있다. Figs. 13~16에 비교되어 있는 Q-Q도에서도 기존에 주로 활용되었던 Gumbel 확률분포보다는 3개의 매개변수를 갖는 Weibull 3 확률분포가 좀 더 적합한 확률 분포로 나타났다. Table 6에 김천 HS-WIM과 선산 HS-WIM에서 측정된 트럭하중에 대한 Weibull 3 확률분포의 매개 변수 값이 제시되어 있다.

5. 결론

교량의 설계와 유지관리에 큰 영향을 미치는 활하중의 특성을 파악하기 위하여, 고속도로에 설치된 HS-WIM(High Speed Weigh-in-Motion) 시스템을 이용하여 측정된 차량의 총중량 분포를 조사 하였다. 조사 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 2개 지역에 설치된 HS-WIM 시스템은 통과시간(정밀도: 1/100초), 통과속도, 전체 중량 및 축별 중량 등의 차량관련 상세정보의 측정이 가능하며, 12종 분류시스템에 따른 정밀한 차중 분류도 가능하다. 검교정된 HS-WIM 시스템을 이용하여 측정된 1개월 동안의 총중량 데이터를 이용하여 연구가 수행되었다.
- (2) 각 지역에서 주중의 트럭 통행량이 5,000대를 초과하는 것으로 나타났으며, 트럭의 총중량 히스토그램은 150kN과 420kN을 중심으로 상당수의 트럭 총중량이 분포하는 쌍봉우리형으로 나타났다. 그러나 교량에 영향을 미치는 중차량의 분포는 측정 지역에 따라 차이가 있는 것으로 나타났다. 트럭의 허용 최대중량인 392kN을 초과하는 과적트럭도 10%이상인 것으로 나타났다. 최대 중량이 948kN인 트럭도 측정되었다.
- (3) 중차량은 7종 화물차, 10종 화물차, 12종 화물차에서 대부분 발생하는 것으로 측정되었으며, 특히 7종 화물차와 12종 화물차의 중차량 비율과 평균 총중량이 높은 것으로 측정되었다. 또한 교량의 활하중 모형 유도에 주로 활용되는 상위 총중량의 평균도 높은 것으로 나타났다.
- (4) 상위 10%의 총중량 데이터와 이론적인 확률분포들과의 적합

도를 정보척도(Information Criterion)와 Q-Q도를 이용하여 조사한 결과, 기존에 주로 활용되었던 정규분포나 Gumbel 확률 분포 보다는 3개의 매개변수를 갖는 Weibull 3 확률분포의 적합도가 가장 높은 것으로 나타났다.

- (5) 보다 정확한 중차량의 총중량 분포특성을 파악하기 위해서는 WIM이나 HS-WIM 시스템을 이용해 장기적으로 측정된 트럭 총중량 데이터 확보 및 분석이 필요한 것으로 판단된다.

References

- Caprani, C. and O'Brien, E. (2006). "Statistical computation for extreme bridge traffic load effect." *Proceedings of the 8th International Conference on Computational Structures Technology*, Civil-Comp Press, Stirling, Scotland.
- Castillo, E., Hadi, A., Balakrishnan, N. and Sarabia, J. (2005). *Extreme value and related models with applications in engineering and science*, John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
- Ghosn, M. and Sivakumar, B. (2010). "Using weigh-in-motion data for modeling maximum live load effects on highway bridges." *Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization*, Taylor & Francis Group, London, pp. 927-933.
- Ghosn, M., Sivakumar, B. and Moses (2008). "Modeling maximum live load effects in highway bridges." *Life-Cycle Civil Engineering*, Biondi & Fgangopol, ed., Taylor & Francis Group, London, pp. 335-341.
- Hwang, E.-S. (2009). "Development of vehicular load model using heavy truck weight distribution (i)-data collection and estimation of single truck weight." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Korean Society of Civil Engineers, Vol. 29, No. 3A, pp. 189-197 (in Korean).
- Kwon, S.-M. and Lee, K.-H. (2010). "Development of the high-speed weigh-in-motion systems for overweight enforcement in expressways." *Journal of Korean Road Association*, Korean Road Association, Vol. 12, No. 2, pp. 45-52 (in Korean).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (2009). *Guidelines for road traffic surveys*, MLTM Regulations, Form 101, Sejong, Korea (in Korean).
- Moses, F. (2001). *Calibration of load factors for LRFR bridge evaluation*, NCHRP Report 454, Transportation Research Board, National Academy Press, Washington D.C., USA.
- Nowak, A. S. (1999). *Calibration of LRFD bridge design code*, NCHRP Report 368, Transportation Research Board, National Academy Press, Washington, D.C., USA.
- Park, M.-S., Jo, B.-W. and Bae, D.-B. (2006). "Development of statistical truck load models for highway bridge using bwim system." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Korean Society of Civil Engineers, Vol. 26, No. 1A, pp. 143-153 (in Korean).
- Sivakumar, B., Ghosn, M., Moses, F. and TranSystems Corporation (2011). *Protocols for collecting and using traffic data in bridge design*, NCHRP Report 683, Transportation Research Board, National Academy Press, Washington D.C., USA.
- Vose Software (2007). *Help file for model risk version 5*, Gent, Belgium.
- Zhou, X. Y., Schmidt, F. and Jacob, B. (2012). "Extrapolation of traffic data for development of traffic load models: Assessment of Methods used during Background Works of the Eurocode." *Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability*, Taylor & Francis Group, London, pp. 1503-1509.