

교량의 신뢰성 검증을 위한 지역적 활하중 확률모형 구축*

엄준식†

상지대학교 건설시스템공학과

Study on Location-Specific Live Load Model for Verification of Bridge Reliability Based on Probabilistic Approach*

Jun Sik Eom †

Department of Civil Engineering, Sangji University

Purpose: Majority of bridges and roads in Gangwon Province have been carrying loads associated with heavy materials such as rocks, mining products, and cement. This location-specific live loads have contributed to the present situation of overloading, compared to other provinces in Korea. However, the bridges in Gangwon province are designed by national bridge design specification, without considering the location-specific live load characteristics. Therefore, this study focuses on the real traffic data accumulated on regional weighing station to verify the live load characteristics, including actual live load gross vehicle weight, axle weight axle spacings, and number of trucks.

Methods: In order to take into account the location specific live load, a governmental weigh station (38th national highway Miro) have been selected and the passing truck data are processed. Based on the truck survey, trucks are categorized into 3 different shapes, and each shape has been idealized into normal distribution. Then, the resulting survey data are processed to predict the target maximum live load values, including the axle loads and gross vehicle weights in 75 years service life span.

Results: The results are compared to the nationally used DB-24 live loads, and the results show that nationally recognized DB-24 live load does not sufficiently represent real traffic in mountainous region in Gangwon province.

Conclusion: The comparison results in the recommendation of location-specific live load that should be taken into account for bridge design and evaluation.

Keywords: Bridge Reliability, Target Live-Load Model, Life Span Estimation

* 이 논문은 2014년도 상지대학교 교내 연구비 지원에 의한 것임

† 교신저자 eompro@gmail.com

2016년 4월 7일 접수; 2016년 5월 17일 수정본 접수; 2016년 5월 25일 게재 확정.

1. 서론

1.1 연구배경

강원도 내의 도로 및 교량은 석산, 광산, 시멘트 등의 물동량을 주로 담당하고 있다. 이 같은 지역적 특성은 수도권 등 다른 지역과 비교해 볼 때 매우 다른 교통하중의 전형적 형태를 유발하고 있다[1]. 그 결과 지역 내의 상당수의 도로와 교량이 반복적인 중차량 통과에 의한 손상 및 노후도가 매우 높은 상황이다 [2]. 그럼에도 불구하고, 도내 교량의 설계는 전국적으로 적용되는 활하중 설계기준인 DB-24 하중을 적용하여 설계되고 있는 실정으로 이에 따라 법적인 설계기준을 이용한 안전성 평가는 실존하는 지역적 교통하중을 과소평가하여 교량의 안전성을 확보하기 어려우므로 이에 따라 사용교량의 신뢰도 향상을 위해 지역적 특성을 반영하는 활하중 모델의 도입이 시급한 실정이다.

1.2 연구목적

도로상을 주행하는 차량 이동하중에 의한 피로 손상도는 통행차량의 총중량, 축중량, 축간격, 축수 등의 여러 가지 요인에 의해 변한다[3].

이러한 특성을 실제 교량의 설계나 해석에 반영하기 위해서는 실제 이동하중의 통행특성을 반영할 수 있는 하중모형을 개발하여야 한다[4]. 이를 위해 본 연구에서는 실제 트럭축 중 및 총중량 조사 자료를 이용하여 지역적 특성에 맞는 하중모형을 개발하기 위한 실제 데이터를 조사하여 지역적 특성에 부합하는 실제적인 하중 모형과정을 구축하고, 전국에 공통으로 사용되는 교량설계하중인 DB24 하중과 지역적으로 일반 교량의 설계수명인 75년간 발생할 수 있는 최대하중을 비교하여 기존 설계 하중과 지역적 최대 하중의 실제적인 차이를 검증 하고 이를 교량의 경제적인 설계 및 내하력 평가의 개선을 위한 기초자료로 사용하고자 한다. 이를 위해 지역적 물동량의 특성에 따른 중차량의 통행이 많은 38번 국도에 위치한 미로검문소에서 축적된 중차량 단속 데이터를 대표차중으로 활용하여 이 국도 상에 위치하고 있는 교량구조물의 설계수명에 사용될 확률적인 중하중의 최대값을 결정하고, 그 결과를 일반적인 DB-24 하중에 의한 결과와 비교분석하여, 이를 기존 교량 설계법과 내하력

평가법에 접목할 수 있는 지역적 특성에 맞는 활하중을 제안하려고 한다.

2. 연구 방법

2.1 국내의 과적 단속 기준

차량하중과 도로구조물 건설체계에서 급속한 경제 성장 및 자동차 생산기술 향상에 따른 차량의 대형화 및 중량화 추세에 맞추어 도로 구조물의 설치기준을 높이는 데는 정부재정에 한계가 있으며 도로구조물 설치기준을 중차량 통행능력에 부응하여 상향조정 건설할 경우에도 차량은 개정된 기준을 훨씬 능가하는 성능의 차량이 일상적으로 제작되고 과적하는 악순환이 계속되었다[5]. <Table 1>은 화물자동차 및 교량설계하중 변천과정을 나타내고 있다[6].

Table 1 History of standard bridge design load and legal limit change

Year	1927~1939	1940~1962	1963~1978	1979~Present
Legal Truck Limit (Gross Vehicle Weight)	10ton	13ton	15ton	40ton
Bridge Design Load (first degree)	12ton	13ton	22.4ton	43.2ton

따라서 우리나라의 운행 제한차량 기준은 차량하중과 도로구조물설치 상관관계에서 차량의 대형화 및 중량화 추세에 맞추어 도로시설기준을 무한정 높일 수 없는 실정이므로 차량의 화물운송능력에 따른 경제성, 차량자체의 주행 안전성, 한정된 정부재정형편에 따른 도로포장 및 교량등급 상향조정 건설 한계 등을 고려하여 설계하중과 과적하중의 상관성에 대한 이론적인 검증 없이 설정되어 있는 것이 현실이다 특히 1980년대 이전에 설계된 교량은 32.4톤의 차량하중을 기준으로 설계되었음에도 불구하고, 현재의 도로 단속기준인 40톤 트럭의 통행이 자유로운 상태로 노후교량에 중대한 부담을 주는 상황이다. <Table 2>는 각 국가별 차량 과적 기준을 정리한 것으로 우리나라의 단속기준이 다른 외국 선진국에 비해 관대하다는 것을 확인할 수 있으며, 이는 도로구조물의 조기 노화 및 파손에 심각한 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다

Table 2 Legal maximum traffic loads of world

Country	Axle Weight(ton)	Gross Vehicle Weight(GVW, ton)	Width (m)	Height (m)	Length (m)	Enforcement
Korea	10.0	40.0	2.5	4.0	16.7	Government Road Authority
Japan	10.0	36.0	2.5	3.8	12.0	Government Road Authority and Police
USA	9.1 (dual axle 14.5)	36.4	2.5	4.0	18.3	Government Road Authority
Germany	10.0	40.0	2.5	4.0	18.0	Police
UK	-	38.0	2.5	4.0	18.0	Government Road Authority
France	13.0 (dual axle 19)	38.0	2.5	-	18.0	-
EU	11.0	40.0	-	-	-	applies from 1999

2.2 지역적 활하중 조사

본 연구에서는 실제 트럭축중 및 총중량 조사 자료를 이용하여 지역적 특성에 맞는 하중모델을 개발하기 위한 실제 데이터를 조사하였다. 지역적 특성을 고려하여 중차량의 통행이 많은 38번 국도에 위치한 미로검문소에서 축적된 중차량 단속데이터를 이용하여 트럭의 총중량, 축중량, 축간격, 축수 등의 정보를 정리하였다. <Fig. 1>은 고정식 검문소에 설치된 이동하중계근장비(Weigh-In-Motion, WIM) 매설 장면이다.

<Fig. 1>의 매설된 WIM 장비를 통해 차량의 축중량, 총중량, 축간거리를 알 수 있으며, 이 정보는 영상감지 시스템을 통해 저장된다. <Fig. 2>는 강원도 태백시에서 동해항으로 석회석과 골재 등의 물동량을 운송하기 위해 과적차량이 매우 높은 밀도로 통과하는 미로검문소의 차량진입 계측장면이다.

이 결과를 이용하여 트럭의 축수 및 축중에 따라 트럭을 3가지로 분류하여 각 트럭의 총중 및 분포를 조사하였다.

<Table 3>는 미로검문소를 통과한 차량축별 1년간 통과대수와 통행빈도를 조사한 것이다. <Table 4>는 통행차량을 하중별로 분류하고 이를 다시 한 번 차량의 형태별로 분류한 표로, 이를 통해 통행차량 중에 4축 차량이 88.9%로 가장 많다는 점을 분석하였다. 이는 이 지역의 활하중 통과와 대부분이 석산 및 석회석 등의 벌크 화물로 구성되어 있으며 이에 따라 국내 벌크 화물 운송의 대부분을 차지하는 4축 덤프트럭의 통행이 주를 이룬다는 것을 알 수 있다. 또한 <Table 3>의 데이터를 분석해 본 결과 3축 트럭의 경우, 통행빈도는 높으나 실제 차량의 하중은 4축과 5축 트럭의 결과와 비교해 볼 때 심각한 과적을 유발하지 않는 것을 알 수 있다. 이에 반해 5축 트럭은 대부분 시멘트 완제



Fig. 1 Weigh-In-Motion installation for weighing moving truck loads



Fig. 2 Truck load verification in progress in miro weighstation

Table 3 Annual traffic statistics in miro weighstation

Axle	3 axles	4 axles	5 axles	6 axles	total
truck pass count	11616	148081	6840	71	166608
frequency	7.0%	88.9%	4.1%	0%	100%

Table 4 Annual traffic count statistics based on truck types vs. gross vehicle weight in miro weighstation

Axle \ GVW	30ton or less	30~35ton	35~40ton	40~45ton	45~50ton
3 axles	11594 (99.8%)	22 (0.2%)	0	0	0
4 axles	344 (0.2%)	2417 (1.6%)	13304 (9%)	131988 (89.1%)	728 (0.1%)
5 axles	45 (0.7%)	558 (8.2%)	1750 (25.6%)	4403 (64.4%)	84 (1.2%)

품을 수송하는 차량으로 총중량의 평균치는 4축 트럭을 초과하지만 통행빈도는 4축 트럭보다는 적은 횟수의 교통량을 나타내는 것을 알 수 있다. 전체 통행차량 중에 통행량이 많은 4축 차량의 총중량이 40~45ton 인 경우가 대부분이었으며, 이는 이미 과적기준인 40ton을 초과한 것으로, 89.1%의 4축 차량이 규정보다 과적인 상태로 운행되고 있다는 것을 알 수 있다

은 캐나다의 온타리오주에서 조사한 약 10,000대의 중차량 계측자료를 이용하였다. 이 자료는 일일 중차량 통행량에 근거하여 약 2주일 동안의 중차량 통행량으로 가정한 후 수집된 중량자료로부터 다양한 경간의 교량에 재하시켜 최대 휨모멘트와 전단력의 값을 구한 후 이 값들을 식 (1)에 의해 역정규분포확률지(Inverse Normal Probability Paper)에 표시하였다.

2.3 확률분포를 이용한 통행량 예측

본 연구에서는 이러한 자료를 토대로 확률론적인 접근을 통해 1년, 5년, 10년, 그리고 75년 설계수명을 고려했을 때의 조사 구간에 대한 총중량 및 축중에 대한 최대치의 변화를 평가하고, 각 설계수명 중 확률적인 중하중의 최댓값을 결정하여 이를 구조해석 및 신뢰성 평가의 자료로 사용할 수 있도록 하여 교량의 실제 거동 및 안전성을 검증하는데 하중의 자료로 사용할 수 있도록 하고자 한다.

활하중 모형 개발을 위해 Moses *et al.*[7]와 Nowak[8], 그리고 Hwang[9]이 제안한 역정규 확률분포식을 이용한 방법을 이용하였다. Nowak[8]의 방법은 수집된 차량 통행 자료에 근거한 방법으로 여러 장소에서 수집된 Weigh-In-Motion 자료, 또는 과적검문소 등에서 계측된 자료 등을 이용하였으며 이 연구의 결과는 새로운 미국 AASHTO 하중저항계수설계기준[8]의 차량활하중의 기본 자료로 이용되었다 이 연구에서 Nowak[8]

$$Z = \phi^{-1}[F(X)] \tag{1}$$

이러한 역정규분포확률지에 도시된 단면력의 분포는 선형성을 유지하는 것으로 가정하고 선형연장(extrapolation)으로 구조물 평균 수명 동안 발생하는 최대 하중효과(최대 휨모멘트, 최대 전단력)를 구하였다. 본 연구에서는 동일한 방법으로 미로검문소에서 얻어진 차량활하중 자료를 분석하고 이를 역정규분포확률지에 출력하여 지역 특성을 반영한 실제 활하중을 계산하고자 하였다.

3. 지역적 활하중모형 산정

3.1 지역적 활하중 조사

본 연구에서는 38번 국도 상의 미로 검문소에서 축적된 WIM 자료를 활용하여 트럭의 축수 및 축중에 따라 트럭을 3가지로 분류하였으며 각 트럭의 총중분

포를 정규분포로 이상화하였다. 본 연구에서는 이를 위해 미국 AASHTO 도로교 설계기준[10] 활하중의 기반이 된 Nowak[8]의 하중조사 방법을 근거로 하였다. 이러한 자료를 토대로 확률론적인 접근을 통해 1년, 5년, 10년, 그리고 75년 설계수명을 고려했을 때의 조사 구간에 대한 총중량 및 축중에 대한 최대치의 변화를 평가하고, 각 설계수명 중 확률적인 중하중의 최댓값을 결정하였다. 이 추정에서는 통행허가 차량에 대한 법적인 기준은 미래에 변하지 않는다고 가정하였고, 장래의 화물교통량도 현 상태를 유지한다고 가정하였다.

3.2 38번국도 지역적 활하중

2013년 1월부터 2013년 12월까지의 1년 동안의 축별 총중량의 차량통행 자료를 활용하여 1년, 5년, 10년, 75년 후의 이 지역을 지나가는 차량의 축별 최대총중량을 예측하였다. <Fig. 3>~<Fig. 5>에서는 설계수명을 1년, 5년, 10년, 75년 후로 가정하여 지나가는 3축, 4축, 5축 차량의 최대총중량을 각각 나타낸 것이다. <Table 5>는 역정규확률값에 의한 하중값을 나타낸 표이다. <Table 5>의 자료를 통해 75년 후 4축 차량은 53.8ton, 5축 차량은 51.8ton의 과적차량이 통행할 것을 예측할 수 있었다.

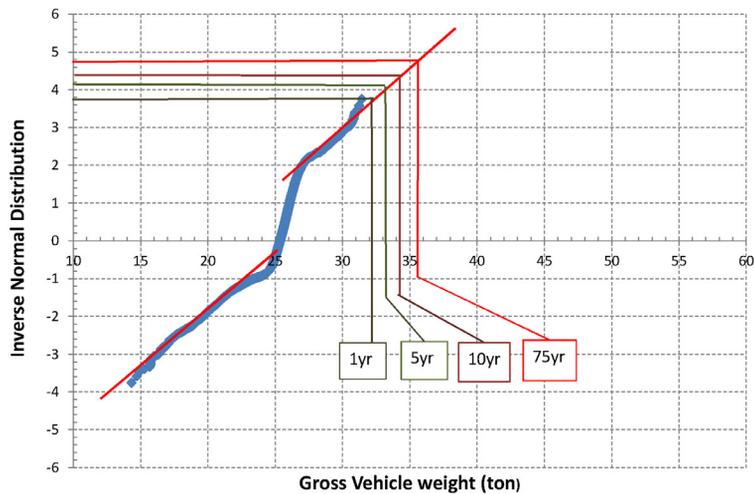


Fig. 3 75 year GWW prediction of 3-axle trucks in miro weighstation

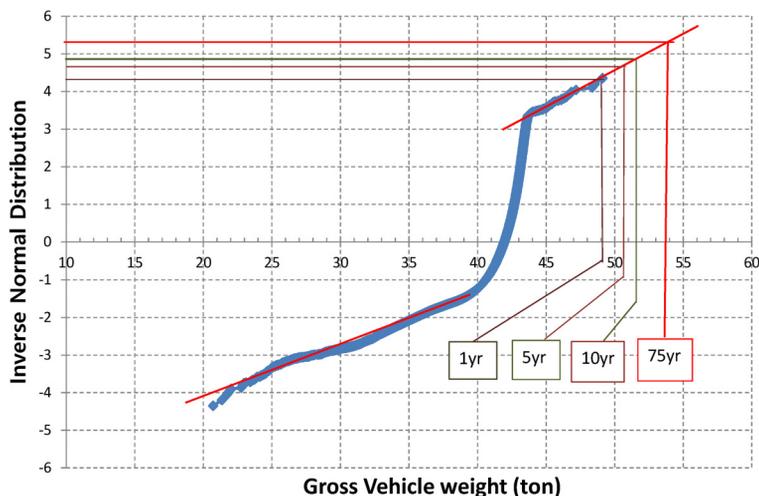


Fig. 4 75 year GWW prediction of 4-axle trucks in miro weighstation

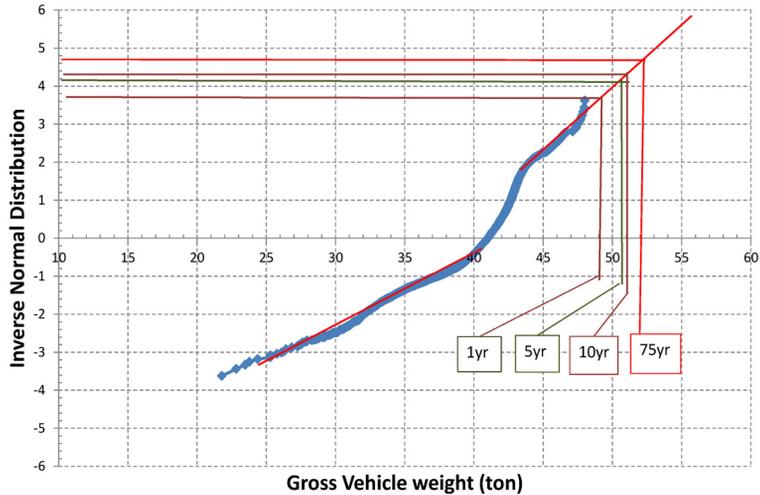


Fig. 5 75 year GVW prediction of 5-axle trucks in miro weighstation

Table 5 Yearly prediction of GVW by using inverse-normal distribution

Truck Type	1 Year		5 Years		10 Years		75 Years	
	Inverse Normal Dist.	Max. Weight (ton)						
Miro 3 axles	3.76	32.58	4.14	33.73	4.30	34.2	4.73	35.84
Miro 4 axles	4.35	49.11	4.69	50.85	4.83	51.56	5.22	53.8
Miro 5 axles	3.62	49.09	4.02	50.22	4.18	50.67	4.62	51.8

우리나라 1등급인 DB-24 하중은 43.2t[6]으로 설계되어 있으며 과속 기준 하중이 총중량의 경우 40ton, 그리고 축중의 제한이 10ton인 상황에서 시점에서 53.8ton, 51.8ton의 과적차량의 도로교 파손정도는 심각할 것으로 예상된다.

3.3 38번국도 하중 특성

미로검문소의 경우 4축 차량의 통과량이 전체 화물 차량 통과량의 90%를 차지하는 통계를 보였다. 또한 하중 상위 90%의 트럭을 조사해 본 결과, 각 축중의 경우 4축의 무게가 거의 변화없이 25%의 비율로 균등하게 트럭의 무게를 분산하는 것으로 나타났다. 또한 축간 거리도 마찬가지로 통과하는 트럭이 예외없이 일정한 간격을 가진 것으로 나타났으며 통계적인

변동성은 전혀 없는 것으로 조사되었다 이는 대형 4축 화물차량의 제조사가 제한되어 있으며 과적단속 및 교통 위반을 피하기 위해 최적의 하중 배분과 축간격을 가진 트럭을 제조하는 제조사의 특성상 합리적인 결과로 보인다. 조사에서 얻어진 4축 차량의 하중 배분과 축간 거리는 <Fig. 6>에 나타나 있다.

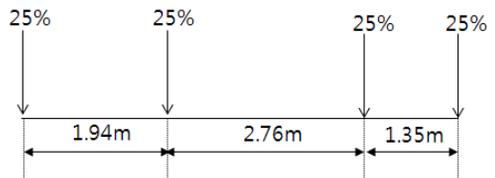


Fig. 6 Typical weight distribution and axle spacing of 4-axle trucks

3.4 대표차량의 활하중

2013년 1월부터 2013년 12월까지의 1년 동안의 통과 차량 조사 결과 4축 트럭이 전체 물동량의 90%를 차지하였으며 또한 과적의 비율이 다른 트럭의 형태에 비해 압도적으로 과다하여 이 지역의 교량 및 도로의 손상 및 파괴에 4축 트럭이 지배적인 역할을 할 것임을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 4축 화물트럭이 현재와 같은 빈도와 하중으로 동일지역을 통과할 경우를 가정할 때 75년 후 확률적인 최대 하중을 <Fig. 7>과 같이 예측하였다.

3.5 통행량 조사 결과 분석

38번 국도 미로 검문소의 경우 일반적으로 교량 설계에 사용하는 설계중량인 DB24의 43.2ton을 훨씬 초과하는 과적차량이 만성적으로 통과하고 있는 지역임을 알 수 있었다. 이 결과, 전국 공통으로 사용하고 있는 DB24트럭을 통한 신규 교량의 설계나 기존 교량의 안전성 검토는, 강원도 산간 광산지역의 물동량을 고려해 볼 때 충분한 안전성을 지니지 못한다는 결과를 보여주고 있다. 따라서 중차량 통과가 빈번한 강원도 산간지역에는 기존의 전국적으로 통일되어 있는 도로교설계기준이 아닌 지역적 특성을 반영한 설계방법 도입의 필요하다는 것을 알 수 있었다. 이를 위해 지역적 활하중에 대한 전반적인 재조사가 이루어진다면 전 국토에 풍하중의 예와 같이 지역적으로 다양하게 반영할 수 있는 활하중 분포도 등을 제작하여 설계 및

유지보수에 반영할 수 있을 것으로 판단된다

4. 결론

본 연구의 목적은 강원도의 지역적 교통 특성을 반영하는 실제적인 하중모형을 구축하여 이를 반영할 수 있는 경제적 설계 및 내하력 평가기준을 제시하는 것이다. 이를 위해, 본 연구에서는 실제 차량하중을 통계적으로 조사하여, 확률적인 방법으로 이상화 하고, 이 자료를 토대로 기존 도로교설계기준 활하중의 지역적 적용성을 검증하였다. 본 논문에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 강원도 산간 지방의 교통 특성은 석산 광산, 시멘트 공장 등에서 발생하는 물동량의 특성이 수도권 등 다른 지역과 비교하였을 때 현저히 다른 교통하중의 형태를 가지고 있다고 분석되었다.
- 2) 이러한 하중 특성은 동 지역 내 교량 등의 구조물 시공 및 유지보수 시 기존의 규정을 이용할 경우 지역적 특성을 정확하게 반영할 수 없는 결과를 초래할 수 있다.
- 3) 통행 하중에 대한 확률적인 예측 결과, 75년 설계 수명을 고려했을 때, 정부에서 허용하는 규정 하중보다 약 23% 이상 과중한 하중이 이 지역 국도를 통과하는 것으로 분석되었다.
- 4) 본 연구 결과를 토대로, 추후 지역적 활하중의 확률적 하중모델의 데이터베이스를 각 국도 노선 및 지역 별로 수집하여, 이미 지역적으로 정립되어 있는 풍하중이나 적설하중의 경우와 유사하게 교량 설계에 이용할 수 있는 활하중영향지도를 작성하여 각종 설계기준에 반영한다면 보다 경제적이고 안전성이 높은 교량 설계에 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

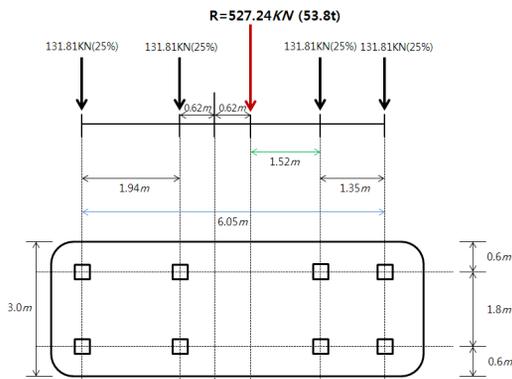


Fig. 7 75 year prediction of representative 4-axle trucks (Gross vehicle weight and weight distribution)

References

[1] Park, Y. S. and Shim, N. H. (2000). "Study on the Fatigue Load Model for Girder Bridges". *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 20, No. 5, pp. 715-724.

[2] Gil, H. and Kang, S. G. (2013). "Characteristics of heavy vehicles using expressway networks based on

- weigh-in-motion data". Journal of The Korean Society of Civil Engineers, Vol. 33, No. 5, pp. 1731-1740.
- [3] Yun, S. G. (2004). "Evaluation of Repeated Number of Equivalent Axle Load of Bridge Decks". KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 24, No. 2, pp. 311-319.
- [4] Shin, D. K., Kim, C. Y. and Paik, I. Y. (2006). "Reliability Analysis of Composite Girder Designed by LRFD Method for Positive Flexure". Journal of The Korean Society of Civil Engineers, Vol. 26, No. 3A, pp. 539-546.
- [5] Chung, C. H. and Kim, Y. J. (1996). "A Study on Load Distribution Effect for Bridge Structures". Journal of The Korean Society of Civil Engineers, Vol. 16, No. 4, pp. 455-455.
- [6] Ministry of Land, Infrastructure, and Transportaion (2012). "Design Specification of Highway Bridges (Load and Resistance Factor Design)". pp. 1-1~4-58
- [7] Moses, F., Ghosan, M. and Gobieski, J. (1985). "Weigh-in-motion applied to bridge evaluation". Final report, No. FHWA/OH-85/012.
- [8] Nowak, A. S. (1992). "Calibration of LRFD Bridge Design Code. NCHRP Project 12-33". University of Michigan. Ann Arbor.
- [9] 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 the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 29, No. 3A, pp. 189-197.
- [10] AASHTO, L. (1998). "LRFD bridge design specifications. Washington". DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.