



고속도로 WIM 데이터의 통계분석을 통한 교량 설계활하중 KL-510의 모멘트 효과 분석

백인열^{1*} · 정길환²

¹교수, 가천대학교, 토목환경공학과, ²석사과정, 가천대학교, 토목환경공학과

Analysis of Moment Effect of Bridge Design Live Load KL-510 by Statistical Analysis of WIM Data of Expressway

Paik, Inyeol^{1*}, Jeong, Kilhwan²

¹Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Gachon University, Gyeonggi-Do, 13120 Korea

²Master student, Department of Civil and Environmental Engineering, Gachon University, Gyeonggi-Do, 13120 Korea

Abstract - The live load effect of KL-510 of the current Korean bridge design code is examined by comparing with that of the multiple trucks of which the weights are statistically estimated from measured traffic data as well as with those of the related live load models. The truck weight data measured on the expressway before and after overweight enforcement are used to obtain the truck weights following the same procedures in deciding the live load model of the design codes and the results are compared with the load effect of KL-510. KL-510 yields a very uniform loading effect compared with the multiple truck effects when the weights are estimated from the data which contains some of the heavy trucks over the operational weight limit. KL-510 yields consistent results with the live load of AASHTO LRFD and shows less variation than the past load model DB-24 over the span lengths considered in this study. As a result of this research, the actual truck combinations equivalent to the notional KL-510 load model are constructed and it can be applied to the evaluation of the existing bridge and the calibration of the load factor of the permit vehicle.

Keywords - Limit state design method, KL-510, Multiple truck effect, WIM data, Statistical estimation, Bridge design, Live load

1. 서론

전 세계적인 경제 발전과 더불어 물류 운송을 위한 화물트럭의 통행이 과거에 비하여 매우 빈번해지고 있다. 전보다 무거운 트럭들이 앞, 뒤로 연속하여 통행할 확률이 증가하는 추세이다. 따라서 근래 도로교 설계를 위한 활하중 모델들은, 통행 트럭을 실측한 데이터를 기반으로 하여, 이전의 단독 트럭 중심의 모델을 개정하여, 연행하는 트럭들의 하중효과를

나타낼 수 있는 모델로 바뀌고 있다.

신뢰도기반 한계상태설계법인 미국의 AASHTO LRFD^[1]의 활하중 모델인 HL-93은 계측자료를 기반으로 개정된 대표적인 사례이다. HL-93을 도입하기 위한 연구에서 Nowak^[2]은 트럭 계측자료에 대한 통계 및 신뢰도분석 결과를 제시하였다. 계측자료를 기반으로 두 대의 트럭이 연행하는 경우가 하중효과를 지배한다는 결론을 얻고, 3축 트럭 하중과 등분포하중을 조합한 모델을 제시하여, 기존 설계하중에 비하여 시간별로 훨씬 균일한 비율로 지배 하중효과를 잘 나타냄을 보였다.

국내에서도 도로교설계기준에 신뢰도기반 한계상태설계법을 도입하기 위한 선행 연구에서 Hwang^{[3],[4]}은 국내 국도 및 고속도로에서 계측된 자료를 사용하여 트럭을 차종별로 구분하고 설계수명에 대한 최대 하중효과를 통계적으로 예측

Note.-Discussion open until June 30, 2018. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 13, 2017; revised October 31, 2017; approved on November 6, 2017.

Copyright © 2017 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-31-750-5340 Fax. +82-31-750-5344

E-mail. pinyeol@gachon.ac.kr

하였다. 이 최대 하중효과를 공칭하중에 활하중계수를 곱한 값으로 가정하여 1.75로 나눈 값을 기준으로 기존 DB24 3축 트럭 모델에 등분포하중을 추가한 하중모형을 초안으로 제시한 바 있다. 이 연구 결과를 토대로 도로교설계기준-한계상태설계법^[5] (Korea Highway Bridge Design Code - Limit State Design Method, 이하 KHBDC-LSD)의 활하중 모델인 KL-510이 도입되었다. KL-510은 기본적으로 4축 트럭과 등분포하중이 조합된 모형이다.

계측자료를 기반으로 객관적이며 합리적인 분석과정을 통하여 활하중의 크기를 산정하기 위해서는 정밀한 계측자료의 확보가 필수적이다. 최근에 측정된 대표적인 운행트럭에 대한 중량 자료로는 한국도로공사에서 고속 WIM(weigh in motion) 시스템을 사용하여 과적단속을 시범적으로 시행하면서 과적단속 전후의 운행차량의 중량을 측정된 자료가 있다^[6]. 본 논문의 선행 연구^[7]에서는 KECRI^[6]의 WIM 데이터를 과적단속 전후로 구분하여 통계적 방법을 적용하고 단독 차량의 활하중 효과를 KL-510과 비교 분석한 바 있다.

새로 국내에 도입된 설계활하중인 KL-510의 초기 설계 적용 과정에서 기존 DB-24 활하중과 시간별로 하중효과에서 차이가 발생하는 이유에 관한 설명이 필요하고, 실제 운행 트럭의 연행에 따른 최대 하중효과를 나타내기 위하여 설계 목적으로 도입된 가상의(notional) 활하중 모형이 주는 하중효과 크기에 대한 설명이 필요한 시점이다. 이를 위해서는 활하중계수를 곱하기 전의 KL-510 활하중 모형 자체의 하중효과를 실제 운행트럭과 연관시켜서 정의하는 것이 매우 중요하다. 비계수 활하중 모형에 의한 하중효과가 먼저 정의되면, 공용중인 교량의 안전성 평가를 위한 하중계수의 결정이나, 운행제한기준 초과 차량의 통행허가 여부 판단을 위한 하중계수의 결정 과정에도 동일하게 적용될 수 있으므로, 설계와 평가 과정이 논리적으로 부합될 수 있다.

본 논문에서는 국내 도로법의 운행제한기준인 총중량 40톤(392.4kN)으로 진입중량을 제한하고 있는 고속도로 구간에서 실측된 KECRI^[6] 자료를 대상으로 통계 분석을 통하여, 실제 운행하는 국내 트럭의 중량과 복수로 연행하는 효과를 구하고, 활하중계수를 적용하지 않은 KL-510의 하중효과와 비교하는 연구를 수행한다. 또한 KL-510의 하중효과를 기존 DB-24 활하중 및 미국의 HL-93 활하중에 의한 하중효과와 비교하여 새로 도입된 설계활하중의 합리성을 분석한다.

2. WIM 데이터 및 중량 추정

2.1 WIM 데이터

국내 도로법의 운행제한기준은 총중량 40톤(392.4kN), 축중 10톤(98.1kN)이며, 허용오차 10%를 고려한 단속기준은 총중량 44톤(431.6kN), 축중 11톤(107.9kN)이다. 중량의 SI 단위는 kN을 사용하여야 하나, 현행 도로법에 톤으로만 표기되어 있으므로, 이 논문에서는 가능한 kN을 사용하고, 도로법과 비교할 경우에만 톤을 병기하였다. 고속도로 진입부 톨게이트에는 차량의 운행제한기준을 만족하도록 유압측정기를 설치하여 통과하도록 되어 있다. 그러나 실제로 고속도로를 통행하는 트럭을 대상으로 계측한 WIM데이터에 따르면, 차량중량제한을 초과하는 트럭의 통행 횟수가 빈번한 것으로 나타난다^[6]. Fig. 1은 김천 부근 고속도로에서

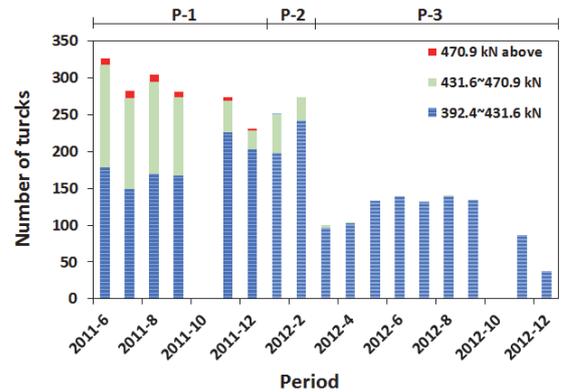


Fig. 1. Average number of daily truck traffic of class 7 and 12 over the legal restriction weight of 40tonf (392.4kN) by month

Table 1. Average dimension and axle weight distribution of class 7 and class 12 truck

CL7	
CL12	

WIM 시스템으로 계측된 통행트럭 중 중량 392.4kN을 넘는 트럭의 일일 평균 트럭대수를 월별로 나타낸 그래프이다. 이 그래프에서는 운행제한중량인 392.4kN, 단속기준 431.6kN 및 운행제한기준의 120%인 470.9kN으로 구분하여 나타내었다. 과적단속을 시작한 2012년 1월을 기준으로 단속기준 431.6kN을 넘는 트럭의 수가 현저하게 차이가 있으며, 단속 이후에는 470.9kN이 넘는 중차량은 거의 사라졌음을 확인할 수 있다.

계측된 트럭 차종들 중 교량에 대한 하중효과가 가장 큰 대표적인 차량 2종인 5축 트럭과 6축 세미 트레일러를 선정하였다. 국토교통부의 12종 차종분류에 따르면 이들은 각각 7종과 12종에 해당한다. Table 1에는 WIM 데이터에서 측정된 이들 2 차종에 대한 총 축거, 축중 비율의 평균값을 나타내었다.

하중효과 분석에는 트럭 통행이 가장 빈번한 가장 외측 차선인 3차선에서 측정된 데이터를 사용하였다. 적용한 2종의 차종을 가지고 단독, 직렬연행 및 병렬연행을 시뮬레이션 하여 하중효과를 분석하였다. 그리고 이 결과값을 도로교설계 기준인 KL-510과 비교한다.

Fig. 1에서 보면, 과적단속을 시행하기 시작한 시점인 2012년 1월에는, 홍보 후에 단속이 시작된 기간이라, 392.4kN 이상의 차량 대수는 과적단속 이전에 비하여 크게 줄지 않고 꽤 많이 존재하지만, 운행제한기준의 120%인 470.9kN 이상은 현저하게 감소한 기간이다. 이와 같이 중차량은 많으면서 도로법은 비교적 준수하고 있는 이 기간의 데이터를 기본 데이터로 삼고, 이 연구에서는 이 기간에 측정된 자료를 P-2 자료라고 한다. 또한, 과적 단속 이전과 이후인 2011년 7월과 2012년 7월에 측정된 자료는 각각 P-1, P-3 자료라고 한다.

2.2 통계기반 중량 추정

이 논문에서는 과적단속이 이루어진 기간별로 계측된 WIM 자료를 대상으로 통계분석 방법을 적용하여 설계수명 100년에 대한 하중효과를 산정하고, 설계기준의 활하중모델에 의한 하중효과와 비교한다. 이 논문에서 적용한 통계분석 방법은 국내 KHBDC^[5] 및 미국 AASHTO LRFD^[1]의 활하중 모델 개발에 적용한 방법인 설계수명에 대한 확률지(probability paper)를 이용한 추정방법과 동일하다.

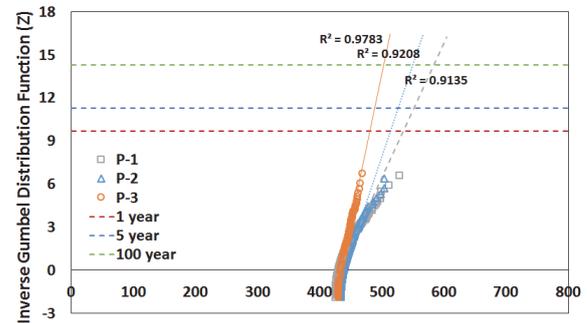
이 연구에서는 계측된 트럭 중에서 중량 상위 10%의 데이터를 이용하여 최대 하중효과를 추정하는데 적용하였으며, 이들의 분포는 제 1형 극치분포(Extreme Type I, Gumbel Distribution)를 따른다고 가정하였다. 이 연구에서는 차종

별 중량분포가 정규분포와 로그정규분포에 비하여 극치분포가 더 적합함을 확인하였으며, Hwang^[3]의 연구에서 정규분포와 비교하여 극치분포가 더 적합함을 보였으므로 지면 제약 상 참고문헌으로 대신하다. Fig. 2에 7종 및 12종 트럭에 대한 P-1, P-2, P-3 자료로부터 중량을 추정하는 추세선을 나타내었으며, Gumbel분포로 가정한 경우의 선형추세선에 대한 결정계수 R^2 의 값이 각각 97.8%, 92.1%, 91.4% 및 95.9%, 97.3%, 98.1%를 보이고 있다.

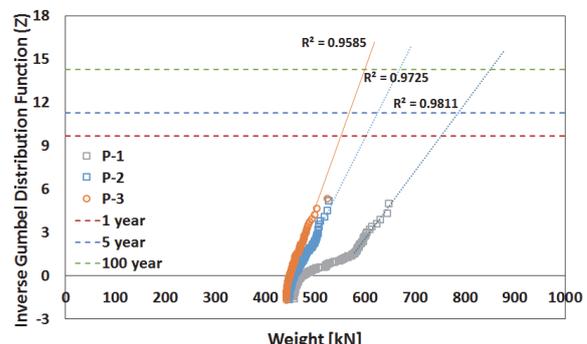
확률지를 이용한 추정방법은 참고문헌^{[2],[3],[4]}에 자세히 설명되어 있으며, 이 연구에서 적용한 과정을 요약하면 다음과 같다. 확률지 방법에서는 데이터를 오름차순으로 정렬하였을 때 최대값인 N번째 값의 누적확률 P_N 을 식 (1)로 나타내며, 이 값은 N이 증가함에 따라 1에 수렴한다.

$$P_N = \frac{N}{N+1} \tag{1}$$

2주 동안 측정된 자료를 대상으로, 100년 설계수명에 대한 중량을 추정하면 다음과 같다. 2주 동안 계측된 7종 트럭



(a)



(b)

Fig. 2. Estimation of maximum weight of (a) CL 7 truck (b) CL 12 truck

의 대수를 N_{2w} 라고 하면, 100년 동안 통행할 대수 N_{100y} 는 $N_{100y} = \frac{36,500}{14} \times N_{2w}$ 라 할 수 있다. 따라서, 100년 통행 트럭의 중량을 오름차순으로 정리하였을 때, 최대 중량 데이터의 누적확률은 N_{100y} 을 식 (1)에 대입하여 구하게 된다. 이로부터 극치분포 누적확률의 역함수 값은 다음 식 (2)로부터 구한다.

$$Z = \ln(-\ln(1 - P_N)) \tag{2}$$

Fig. 2에 나타난 바와 같이 설계수명 100년에 대한 역함수 값은 14.3이다. Fig. 2에서 P-2 자료에 대한 확률지 추세선에 외삽(extrapolation)하면 사용수명 100년에 대한 최대중량을 550kN으로 추정할 수 있게 된다.

동일한 방법으로 P-1과 P-3 자료에 대하여 7종과 12종 트럭에 대한 추정중량을 구하고, 이 기간에 계측된 실측 최대중량과 비교하여 Table 2에 나타내었다.

축의 수가 많고 길이가 긴 12종 트레일러의 계측 최대중량이 7종 트럭의 계측 최대중량에 비하여, 과적단속 이전의 P-1 자료에서는 23% 더 무거웠으나, 과적단속 이후의 P-2,

Table 2. Maximum measured weight in 2weeks and estimated weight for 100years (kN)

Data	CL 7		CL 12	
	Measured Max.	Estimated Max.	Measured Max.	Estimated Max.
P-1	528	592	648	834
P-2	504	550	527	612
P-3	468	504	524	588

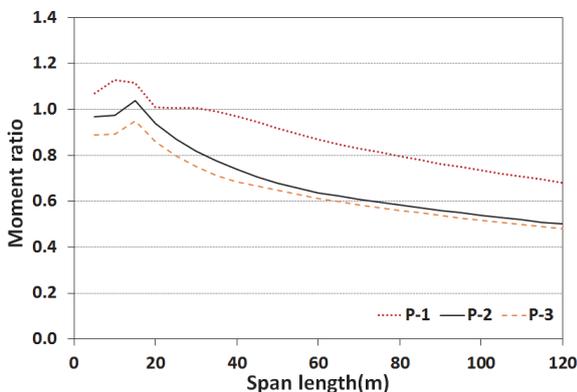


Fig. 3. Moment ratio of a single truck with maximum estimated weight to KL-510

P-3 자료에서는 각각 5%, 12%로 줄어들었다. 이는 과적단속으로 최대 중량의 절대값이 제한되므로, 중량초과가 심하던 12종 트레일러의 최대 중량이 크게 감소하기 때문이다. 이후의 교량에 미치는 하중효과 계산에서도 P-1 자료를 적용하는 경우에는 12종이 지배하는 기간이 있으나, P-2, P-3는 거의 대부분의 기간에서 차량 길이가 짧은 7종 트럭이 연행하는 경우가 하중효과를 지배하게 된다.

Fig. 3은 Table 2에 나타낸 단독트럭의 최대추정중량에 의한 단순보 정모멘트효과를 기간별로 구하여, KL-510에 의한 모멘트효과에 대한 비율로 나타낸 것이다. P-2 자료와 P-3 자료의 경우에는 7종 트럭이 모멘트 효과를 지배하여 서로 비슷한 양상을 보이나, P-1 자료의 경우에는 12종 트레일러의 중량이 매우 크게 추정되어 모멘트 효과를 지배하여 곡선의 형상이 차이를 보이고 있다.

3. 활하중 직렬연행 효과

중차량의 통행이 빈번해짐에 따라 복수의 중차량이 연속하여 운행할 확률이 매우 높다. 이 논문에서는 한 차선에 앞뒤로 연속하여 연행하는 경우를 직렬연행이라 하고, 인접 차선에 나란히 연행하는 경우를 병렬연행이라 한다. 이와 같이 복수의 차량이 연행하는 경우에 교량 구조물에 미치는 하중효과가 크므로, 교량설계기준에서는 이 경우를 고려하여 활하중 모델을 결정하고 있다. 이 절에서는 먼저 직렬연행 효과를 구하여 KL-510과 비교한다.

3.1 직렬연행 확률 및 연행 효과

직렬연행에 의한 모멘트 효과를 구하기 위하여 직렬연행 차량들의 중량을 결정하여야 한다. 차량의 중량은 연행 확률에 의하여 구하게 되며, 이 연구에서는 Nowak^[2]과 Hwang^{[3],[4]}이 설계기준의 활하중모델을 결정하는 과정에서 적용한 확률을 사용한다. 이와 더불어, 이 연구에서 사용하는 국내 고속도로 WIM 데이터에 사고 상황이나 정체 상황을 적용하여 차량들이 앞뒤 순서 그대로 간격이 좁혀지는 경우를 가정하고, 이에 대한 연행 확률도 참고로 포함시켰다.

Table 3에는 2대가 직렬연행하는 경우에 대한 확률을 나타내었다. Table 3에서 완전무관(No correlation, 이후 No cor. 또는 N.C.)의 경우는 앞뒤 두 대의 차량의 중량이 서로 상관관계가 없다는 것을 의미하며, 완전상관(Full correlation,

이후 Full cor. 또는 F.C.)의 경우는 두 대의 차량 중량이 완전상관관계에 있다는 것을 의미한다. 완전무관의 경우에 두 문헌의 확률은 0.02로 동일하며, 정체를 가정한 WIM Data의 경우에도 과적단속 이전과 이후에 동일하게 0.01로 문헌의 확률과 큰 차이를 보이고 있지 않다. 또한, 완전상관의 경우에도 모든 경우에 0.002 또는 0.004 이므로 서로 큰 차이는 없다고 할 수 있다.

연행확률을 이용하여 차량들의 중량을 추정하게 되며, 완전무관의 경우에는, 한 대는 평균중량으로 하고, 나머지 한 대는 Table 3에 나타난 확률에 해당하는 중량을 2.2절에서 설계수명에 대한 중량추정 방법에 따라 구한다. 또한 완전상관의 경우에는 각각의 중량은 위에서와 같은 방법을 적용하여 이 표에 나타난 확률로 추정하여 구한다. Table 4에 P-2 자료로 7종과 12종 트럭의 직렬 2대 연행에 대하여 추정된 100년 최대중량을 나타내었다. 차량의 순서에 따라 중량을 배치하였으며, 예를 들어 7&12는 7종 차량이 앞에 배치되고, 12종 차량이 뒤로 배치되는 경우이다.

Table 4와 같은 중량의 트럭 2대를 단순보에 재하시켜서 휨 모멘트를 구하는 경우에 직렬 차량 2대 사이의 거리는 참고문헌과 동일하게 정하였다. 즉, 정체 상황을 모사하여 앞뒤 차의 축간 거리를 5m로 하는 경우와 주행 상황을 모사하

여 앞뒤 차의 축간 거리를 15m로 하고 충격계수 1.1을 적용하는 경우 중에 큰 값을 택하였다. 이 연구에서 대상으로 하는 차량은 Table 4에서 보듯이 중량이 매우 크므로, 제동거리를 감안할 때 운행시의 차량간격 15m는 매우 좁은 간격으로 판단되어 활하중효과를 계산할 때 안전측이라고 할 수 있다.

Fig. 4에는 Table 4에서 Nowak 확률^[2]을 적용한 중량의 연행트럭으로 인한 모멘트를 KL-510를 재하시켜서 나오는 모멘트에 대한 비율로 나타내었다. Table 4의 나머지 두 경우인 Hwang의 확률^{[3],[4]}과 WIM Data의 확률에 따른 트럭 중량을 적용한 경우에 대하여도 Fig. 4을 구하기 위한 동일한 계산을 수행한다. Fig. 5에는 Fig. 4의 최대값만으로 envelop그래프를 그린 것이다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 세 경우의 모멘트 차이가 크지 않은 것을 확인할 수 있다.

3대 연행확률의 경우 2대 직렬연행 확률을 곱해주는 방법으로 확률을 구한다. 예를 들어, 무관상관의 경우 무관확률과 상관확률을 곱하여 확률을 구한 후 그 확률에 의한 100년

Table 3. Probability of back-to-back traffic

		No correlation	Full correlation
Nowak		0.02	0.002
Hwang		0.02	0.004
WIM Data*	P-1	0.01	0.004
	P-2, P-3	0.01	0.002

Note: Assuming traffic jam situation

Table 4. Estimation of 100years maximum weight of two serial trucks (kN)

	7&7		7&12	
	No cor.	Full cor.	No cor.	Full cor.
Nowak	519 442	501 501	519 469	501 547
Hwang	519 442	507 507	519 469	506 553
Data	512 442	499 499	512 469	-
	12&7		12&12	
	No cor.	Full cor.	No cor.	Full cor.
Nowak	570 442	547 501	570 469	546 546
Hwang	570 442	553 506	570 469	553 553
Data	561 442	543 499	561 469	543 543

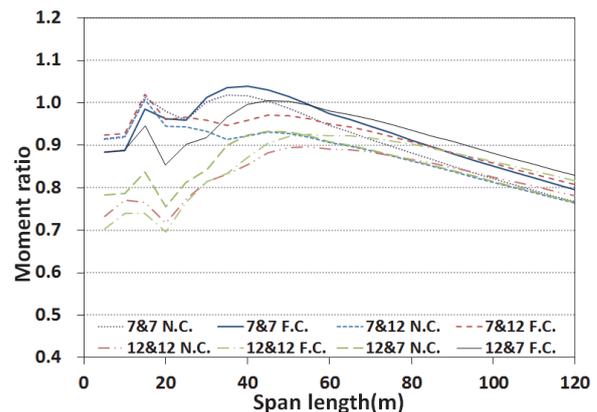


Fig. 4. Maximum moment effect by two serial trucks of Table 4 with Nowak's probability

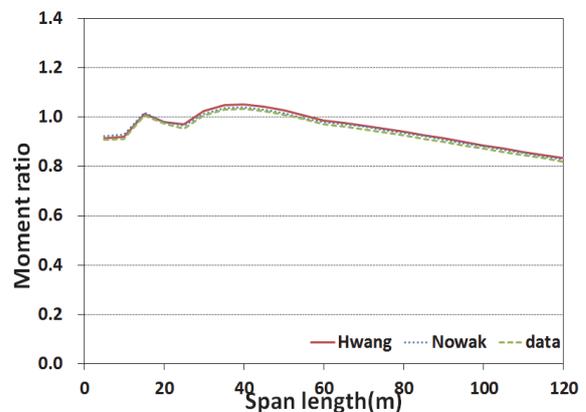


Fig. 5. Maximum moment envelop by two serial trucks

예측 중량값을 구한 후 모멘트 값을 구하게 된다. 직렬차량 3대의 경우에는 참고문헌^[2]과 동일하게 앞뒤 차의 축간 거리를 15m로 하고 축계승수 1.1을 적용하였다. 이를 Table 5와 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에는 단독 및 2대와 3대 직렬 연행에 의한 모멘트를 KL-510 모멘트에 대한 비율로 도시하였다. 지간 5~15m 구간은 단독차량이 최대 모멘트 값을 주며, 15~70m 구간은 2대 직렬연행이, 그 이후의 비교적 장 구간은 3대 직렬연행이 최대 모멘트 값을 주는 것을 확인할 수 있다. Table 6에 이를 요약하였다. 각 지간의 최대값의 평균은 0.99이므로 거의 1.0과 같다고 할 수 있다. 즉 P-2 자료로 추정된 차량의 중량에 따른 지간별 모멘트 값은 KL-510에 의한 모멘트와 일치

Table 5. Estimation of 100years maximum weight of three serial CL7 trucks (kN)

	N & N cor.	N & F cor.	F & F cor.
Nowak	442 482 442	442 464 464	447 447 447
Hwang	442 482 442	442 470 470	457 457 457
Data	442 468 442	442 455 455	444 444 444

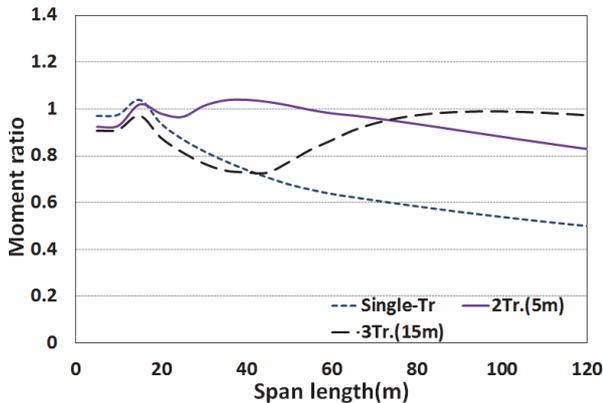


Fig. 6. Maximum moment effect by a single, two and three serial trucks estimated by P-2 data

Table 6. Truck combinations governing moment effect per span lengths

span (m)	5~10	15~25	30~55	60~75	80~120
Truck Combo.	Single 7	7&12, 7&7 F.C.	7&7 F.C.	12&7, 7&7 F.C.	7&7&7 N.C.
weight (kN)	550	501 & 501*			442& 483& 442

Note: As the difference in value is not large, CL7 vehicles are shown, representatively.

한다고 할 수 있다.

3.2 과적단속 유무에 따른 결과 비교

이 절에서는 과적차량이 많은 P-1 자료. 및 과적차량이 드문 P-3 자료를 적용하여, 이전 절에서 P-2 자료에 대한 Fig. 6과 같이 KL-510 모멘트에 대한 비율을 구한다.

Fig. 7은 P-1 자료를 적용하여 구한 KL-510 모멘트에 대한 비율이다. 10m 부근과 60m 부근에서 P-1자료에 의한 추정 모멘트가 KL-510 보다 최대 1.16배 더 크음을 알 수 있다. Fig. 8은 P-3 자료를 적용한 경우이며, 전체 구간에서 1.0 미만으로 KL-510 보다 작은 값을 보이고 있다.

Figs. 6~8의 최대값 envelop를 Fig. 9에 그려서 비교하였다. Fig. 9에는 법적 제한 중량인 392.4kN 트럭에 의한 모멘트 비율도 참고로 함께 나타내었으며, 제일 아래 곡선이다. Fig. 9에서 P-1, P-2, P-3 및 운행제한기준인 392.4 kN 트럭에 의한 KL-510에 대한 모멘트 비율은 평균 1.11, 0.99, 0.92, 0.80을 보이고 있다.

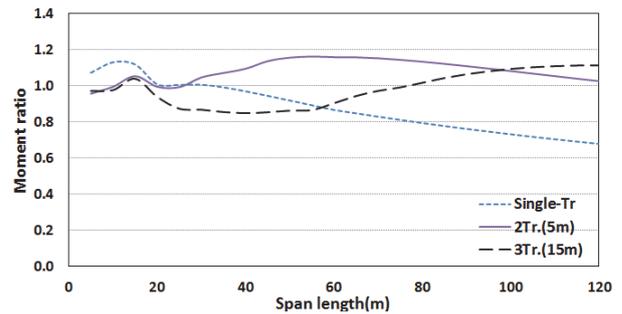


Fig. 7. Maximum moment effect by a single, two and three serial trucks estimated by P-1 data

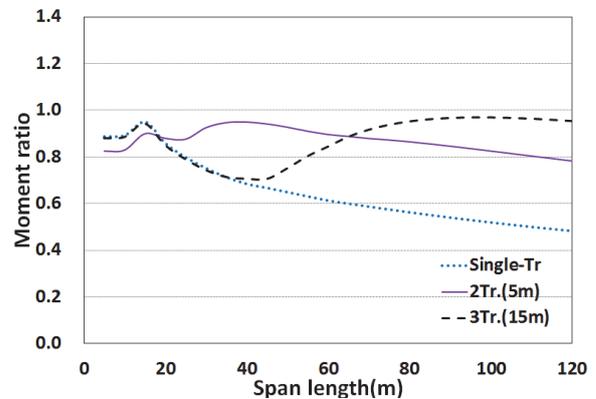


Fig. 8. Maximum moment effect by a single, two and three serial trucks estimated by P-3 data

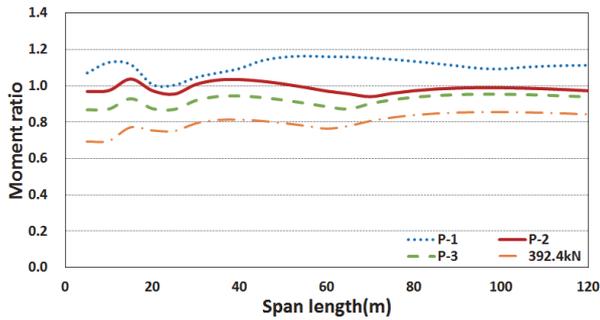


Fig. 9. Envelop of maximum moment effect in each period as well as by the legal restriction weight of 40tonf (392.4 kN) truck

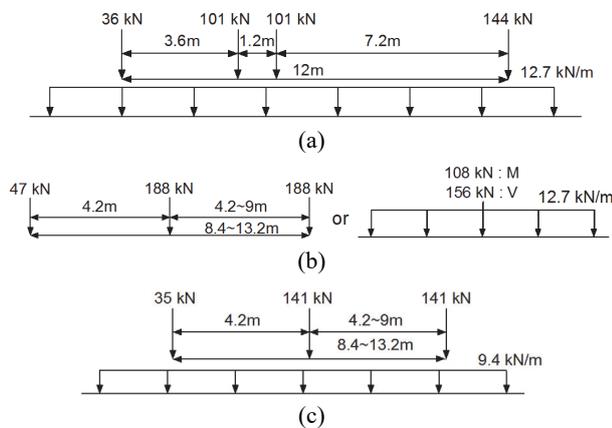


Fig. 10. Selective live load model (a) KL-510 of KHBDC-LSD (75% of truck weight considered) (b) DB-24 of KHBDC (c) HL-93 of AASHTO LRFD

3.3 설계기준별 하중모델과 비교

이 절에서는 KHBDC^[5]의 활하중모델인 KL-510의 하중효과를 미국 AASHTO LRFD^[1]의 활하중모델인 HL-93 및 기존 국내 도로교설계기준의 활하중모델인 DB-24와 비교한다. 설계활하중모델에는 각 설계기준의 충격계수 및 차차로 재하계수를 적용한 후에 서로 비교한다. Fig. 10에는 각 설계기준에서 트럭과 등분포하중을 위주로 비교하여 나타내었다. KL-510은 4축 총중량 510kN로 구성된 가상적인 트럭모델에 의한 하중효과, 또는 Fig. 10(a)와 같이 트럭의 중량은 75%이고 등분포하중을 추가한 모델에 의한 하중효과 중 큰 값을 택하도록 한다. HL-93은 3축 가상 트럭에 등분포하중을 추가하여 하중효과를 구한다. 이 논문에서는 지면 제약으로 각 설계기준 활하중에 대한 상세한 설명은 참고문헌^{[1],[5],[8]}으로 대신한다.

각 설계기준^{[1],[5],[8]}에서 제시한 차차로재하계수 및 충격계

Table 7. Multilane presence factors

No. of Loaded Lanes	KHBDC-LSD	AASHTO LRFD	KHBDC (2010)
1	1.00	1.20	1.00
2	0.90	1.00	1.00
3	0.80	0.85	0.90
4	0.70	0.65	0.75
≥ 5	0.65	0.65	0.75

Table 8. Dynamic load factor applied to truck model

	KHBDC-LSD	AASHTO LRFD	KHBDC (2010)
Dynamic Factor	25%	33%	$\frac{15}{L+20}$

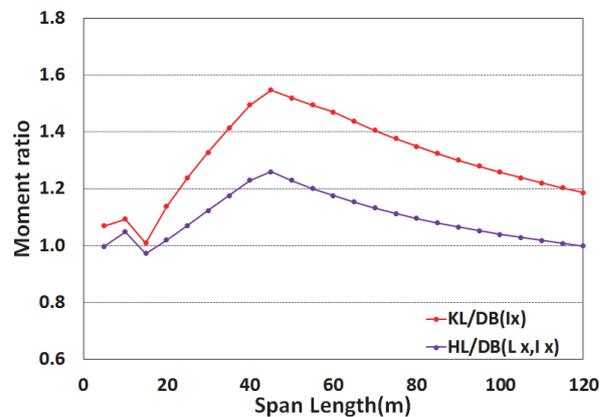


Fig. 11. Moment ratio of KL-510 and HL-93 to DB24

수는 Tables 7 및 8에 나타내었다. 예를 들면, HL93하중을 1차로 재하하는 경우에는 차차로계수 1.2를 곱하고, Fig. 10(b)에서 트럭하중에는 충격계수인 1.33을 곱한다.

Fig. 11은 KHBDC 해설^[9]과 같이 KL-510과 HL-93에 의한 모멘트를 DB-24와 비교한 그림이다. 이 그림은 차차로계수와 충격계수 및 활하중계수가 모두 적용되지 않은 결과이다.

앞의 Fig. 9에서 P-2 자료의 단독 트럭 및 연행 트럭으로 인한 모멘트를 DB-24 및 HL-93에 대한 비율을 구하고 KL-510에 대한 비율과 함께 Fig. 12에 도시하였다.

Fig. 12를 보면 국내 WIM 데이터에 따른 모멘트는 미국 HL-93 활하중에 비하여 작으며 평균 0.83이다. 기존 국내 활하중인 DB-24에 비해서는 지간 20m 이상에서 매우 크며, 이는 2대 이상 연행하는 경우에 해당하며 이들 지간에서는 DB-24에 비하여 평균 1.25배 크다. 또한 KL-510과 HL-93은 전체 지간에 대하여 비교적 균일한 비율을 보여주고 있으

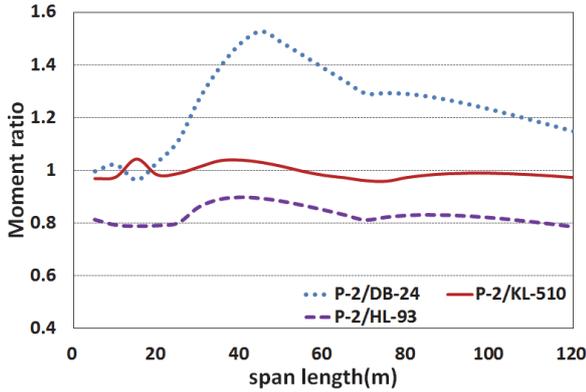


Fig. 12. Ratio of moment by estimated truck effect to KL-510, HL-93 and DB24 loaded in one lane

나, DB-24는 비율이 균일하지 않음을 볼 수 있다.

4. 병렬 연행에 의한 하중효과

이 장에서는 두 차로에 활하중을 재하하는 경우에 대한 다 차로 계수 효과를 검토한다. 먼저 각 차로에 단독차량이 있는 2개 차로 병렬재하의 경우를 검토하고, 다음으로 각 차로에 2대 직렬연행 차량이 있는 2개 차로 병렬재하의 경우를 검토한다.

4.1 단독 차량으로 2차로 병렬연행

두 차로에 트럭이 나란하게 병렬로 연행하는 경우에 발생하는 최대 모멘트를 구하기 위해서는 병렬로 주행하는 두 트럭의 중량을 정해야 한다. 이 연구에서는 Nowak^[2] 및 Hwang^[10]의 연구에서 채택한 방법을 동일하게 적용하여, Table 9와 같은 병렬 주행 확률을 가정한다. 즉, 완전무관인 경우에는 한 차선에 주행하는 때 15번째 트럭에 한 번 꼴로 옆 차선에도 트럭이 나란하게 주행하는 확률이다. 완전상관인 경우에는 완전무관으로 나란히 주행하는 경우 중에 30번에 한 번 꼴로 두 트럭 모두 중량이 매우 무거운 차량인 경우이다.

앞에서 직렬연행 확률을 이용하여 연행 트럭의 중량을 정하였던 Table 3과 Table 4와 동일한 과정을 따라서 병렬연행하는 트럭의 중량을 구하면 Table 10과 같다.

Table 10에 나타난 1차로와 1차로의 트럭을 재하하여 구한 모멘트와 Table 2에서 구한 단독트럭의 100년 추정 중량에 의한 1차로 모멘트를 2배하여 2차로 재하한 효과를 낸 모멘트와의 비율을 구한다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같으며, 이

Table 9. Probability of side-by-side

	Degrees of correlation	
	No correlation	Full correlation
Nowak & Hwang	1/15	1/15/30

Table 10. Estimation of 100-years maximum weight of two trucks in parallel (kN)

		7&7		12&12	
		No cor.	Full cor.	No cor.	Full cor.
parallel trucks	lane 1	529	502	583	547
	lane 2	442	502	469	547
max. estimated weight of a truck		550	550	612	612

Table 11. Moment ratio of the parallel single trucks to the max. single truck on two lanes

		7&7		12&12	
		No cor.	Full cor.	No cor.	Full cor.
		0.88	0.91	0.86	0.90

는 2차로에 대한 다차로 재하계수와 같은 의미를 가진다.

$$M.F. = \frac{\text{moment by parallel single trucks}}{\text{moment by max. single truck} * 2} \quad (3)$$

식 (3)에 따라 구한 결과를 Table 11에 정리하였으며, 최대값이 0.91을 나타낸다. 즉, Table 7에서 보인 국내 KHBDC-LSD의 2차로에 대한 다차로 재하계수인 0.90과 일치함을 알 수 있다.

4.2 직렬연행 차량으로 2차로 병렬연행

Fig. 6에서 볼 수 있는 바와 같이, 지간이 20m에서 70m 사이에서는 2대가 직렬로 연행하는 경우의 모멘트가 가장 크므로, 이 절에서는 각 차로에 2대가 직렬로 연행하는 2차로 병렬연행인 경우를 대상으로 다차로재하계수를 구하여 본다. 이를 식으로 표현하면 식 (4)와 같다.

$$M.F. = \frac{\text{moment by 2 serial trucks on 2 lanes}}{\text{moment by 2 serial trucks on 1 lane} * 2} \quad (4)$$

Fig. 13은 7종 트럭 두 대가 직렬연행하는 경우의 모멘트를 확률지에 나타낸 그림이다. 여기서 가로축은 Table 4의

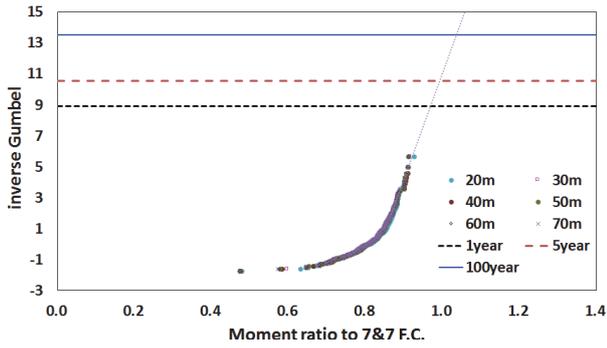


Fig. 13. Estimation of maximum moment ratio of two serial trucks on two lane loading

Table 12. Maximum moment ratio of two serial trucks on two lane loading

	20	30	40	50	60	70
7&7	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
12&12	0.75	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74

7&7 완전상관 모멘트에 대한 비율로 나타내었다. 식 (4)의 분자가 분모에 비하여 발생할 확률을 구하면 다음과 같다. 먼저 Table 6과 Table 11로부터 7종 완전상관인 경우에 직렬 및 병렬연행의 최대값이 발생하므로, Table 9에서 완전상관 확률인 1/15/30을 택하고, 한 차로에 직렬로 2대인 트럭의 옆 차로에 각각 병렬연행 하므로 $1/15/30 * 1/15/30$ 이 된다. 이 값을 누적확률로 하는 역함수 값을 구하여 Fig. 13으로부터 모멘트 비율을 읽고, 동일한 방법으로 12종 트럭에 대한 계산을 수행하여 그 값을 Table 12에 정리하였다.

Table 12에서 보인 2대 직렬연행으로 2차로 병렬연행 하는 경우에 대한 다차로 재하계수도 최대 0.86이므로, KHBDC-LSD^[5]의 2차로에 대한 다차로 재하계수인 0.90은 안전측의 값을 알 수 있다.

2대 직렬연행으로 2차로 병렬연행 하는 경우에 KL-510에 대한 비율과 DB-24 및 HL-93에 대한 비율을 나타내면 Fig. 14와 같다. 여기에서는 2대 직렬연행이 모멘트를 지배하는 경우인 지간 20m에서 70m 사이만을 대상으로 하였다. 이 지간 범위에서 KL-510에 대한 비율은 최소 0.93, 최대 1.02, 평균 0.97이고, HL-93에 대한 비율은 최소 0.83, 최대 0.96, 평균 0.90이며, 대상 지간에 대하여 전반적으로 비율의 차이가 크지 않다. 반면에 DB-24에 대한 비율은 최소 0.90, 최대 1.32, 평균 1.17으로 값의 차이가 크고 지간별로 차이도 크게 발생함을 알 수 있다.

Fig. 15에는 각 설계기준의 활하중계수를 곱한 계수활하중

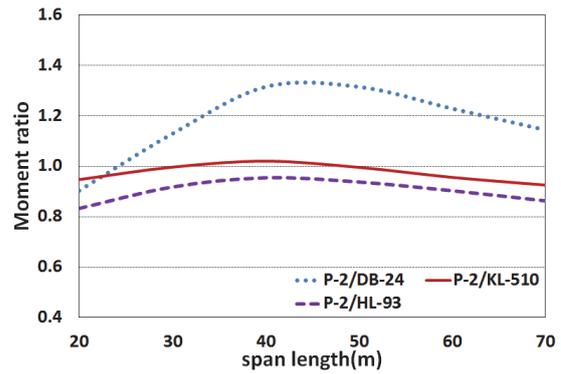


Fig. 14. Ratio of moment by the estimated two serial trucks on two lane loading to KL-510, HL-93 and DB24 loaded in two lanes

Table 13. Live load factor applied to truck model

	KHBDC-LSD	AASHTO LRFD	KHBDC (2010)
Load Factor	1.80	1.75	2.15

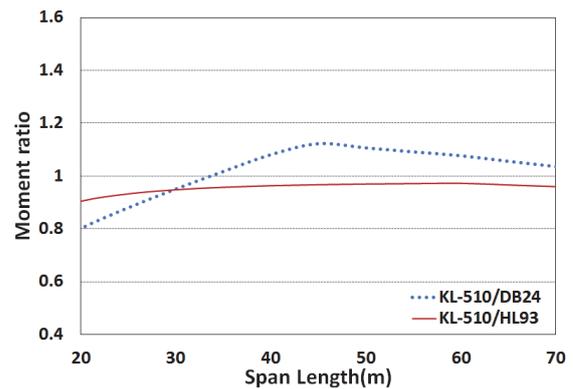


Fig. 15. Ratio of the factored moment of KL-510 compared to DB24 and HL-93 loaded in two lanes

모멘트를 비교하였다. Table 13에 보인 바와 같이 KL-510, DB-24, HL-93에 각각 1.80, 2.15, 1.75를 곱하고, KL-510을 다른 두 활하중모델에 대한 비율로 나타내었다. 이 그림으로부터 KL-510을 2차로 재하한 경우에 계수활하중 모멘트는 HL-93에 비하여 평균 0.96으로 약간 작으며, DB-24에 비하여 평균 1.02으로 거의 같다. 지간별 차이의 추세를 보면, KL-510과 HL-93은 대상 지간에서 크기가 매우 비슷한 추세를 보이는 반면에, DB-24는 지간별로 차이가 크게 발생함을 알 수 있다.

5. 결론

경제의 발전으로 운송량이 증가함에 따라, 중차량이 연행하는 경우에 교량에 미치는 하중효과가 크므로, 이를 설계에서 반영하기 위하여 트럭과 등분포하중을 동시에 재하시키는 방식으로 국내 도로교설계기준의 활하중 모형인 KL-510이 개발되었다. 이 연구에서는 KL-510과 동일한 하중효과를 주는 국내 대표적인 트럭 차중의 무게와 거리를 구하여 제시하였다. 이 결과는 추후 공용중인 교량에 대한 안전성 평가 및 중량제한을 초과하는 허가차량에 대한 활하중계수의 산정 분야에서 KL-510과 동일한 효과를 내는 실제 트럭의 참고 값으로 사용할 수 있다. 다음에 이 연구의 주요한 결과를 요약하였다.

- (1) KL-510은 과적단속 초기에 측정된 P-2 자료로 통계 추정된 트럭들이 연행하는 하중효과와 거의 일치하였다.
- (2) 단독차량이 최대 모멘트를 발생시키는 시간은 15m 이하이며, 이 구간에서는 추정된 중량의 트럭 하중효과와 비교하여 KL-510과 DB-24은 모두 1.0의 평균값을 주고 있다.
- (3) 1차로 재하인 경우의 활하중효과는 KL-510이 추정 중량의 트럭 하중효과와 비교하여 전 시간에서 균일하게 1.0에 근사함을 알 수 있다. 미국 HL-93의 1차로 활하중효과는 이 연구에서 대상으로 한 시간에서 KL-510보다 크며, 추정 트럭의 하중효과는 HL-93에 비하여 평균 0.85이었다.
- (4) 추정 중량 트럭을 적용하여 2차로에 대한 다차로재하계수를 구해보면, 단독 차량 또는 2대 연행인 경우에 2차로 재하계수는 각각 0.91과 0.86으로, 설계기준의 0.90과 비슷하다.
- (5) 2차로에 재하한 경우에 KL-510과 HL-93을 비교하면, 이 두 모형은 모두 중차량이 연행하는 경우를 목표로 하여 개발되었으므로, 이 연구에서 적용한 추정 중량의 트럭이 연행하는 경우에 최대 모멘트가 발생하는 시간 구간에서 잘 맞음을 알 수 있다. 즉, 연행 효과가 지배하는 20m~70m 구간에서 KL-510은 평균 약 1.0이며, HL-93의 하중효과는 이보다 커서 평균 약 0.9이다.
- (6) 각 기준의 활하중계수를 곱한 후의 계수활하중효과는 위 (4)번 시간에서 매우 균등하며, KL-510/HL-93의 비율이 평균 0.95로 HL-93의 크기가 약간 크다.
- (7) DB-24는 2대 연행이 지배하는 시간에서 추정 중량의 트럭이 연행하는 하중효과와 비교할 때, 그 비율이 시간

별로 균등하지 않았으며, 특히 25m 이상의 시간에서 다른 두 하중 모형에 비하여 하중효과가 작게 나타났다. 또한, 각 기준의 활하중계수를 적용한 후의 계수활하중 효과도 30m 이상에서 DB-24의 효과가 약 10% 작게 나타났다.

- (8) 이 논문은 고속도로에서 측정한 트럭 데이터를 기반으로 수행한 연구결과이다. 일반국도나 지방도 등에서 측정한 트럭 데이터를 사용하는 경우에는 다른 결과가 나올 수 있으므로, 이에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 건설기술연구개발사업의 연구비지원(17SCIP-B128569-01 2)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials (2014) *AASHTO LRFDF Bridge Design Specifications* (7th Ed.), USA.
- [2] Nowak, A.S. (1999) *Calibration of LRFDF Bridge Design Code*, NCHRP Report No. 368, Transportation Research Board, USA, pp.B-1-B-15.
- [3] 황의승(2009) 중차량중량분포를 이용한 차량하중모형 개발(I): 자료수집 및 단일차량 최대중량 예측, 대한토목학회 논문집 A, 대한토목학회, 제29권, 제3A호, pp.189-197. 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*, KSCE, Vol. 29, No.3, pp.189-197 (in Korean).
- [4] 황의승(2009) 중차량중량분포를 이용한 차량하중모형 개발(II): 연행차량 효과 분석 및 모형 개발, 대한토목학회 논문집 A, 대한토목학회, 제29권, 제3A호, pp.199-207. Hwang, E.-S. (2009) Development of Vehicular Load Model Using Heavy Truck Weight Distribution (II): Multiple Truck Effects and Model Development, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol.29, No. 3, pp.199-207 (in Korean).
- [5] 국토교통부(2016) 도로교설계기준(한계상태설계법). Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016) *Highway Bridge Design Standard (Limit State Design)*,

- Korea (in Korean).
- [6] 권순민, 손덕수, 이재훈, 이경배(2013) 자동검측장비를 활용한 고속도로 운행제한차량 단속체계 개선 연구, 한국도로공사 도로교통연구원, pp.68-77.
Kwon, S.M., Sohn, D.S., Lee, J.H., and Lee, G.B. (2013) (2013) *Improvement of Enforcement System for Restricted Access Vehicles in Expressway using the Automatic Measuring Equipment*, Korea Expressway Corporation Research Institute, Korea, pp.68-77 (in Korean).
- [7] 윤태용, 안상섭, 권순민, 백인열(2016) 고속도로 통행차량 통계 분석을 통한 단독차량의 활하중 효과 추정, 한국도로학회 논문집, 한국도로학회, 제18권, 제1호, pp.1-11.
Yoon, T., Ahn, S.-S., Kwon, S.-M., and Paik, I. (2016) Estimation of Live Load Effect of Single Truck Through Probabilistic Analysis of Truck Traffic on Expressway, *International Journal of Highway Engineering*, Korean Society of Road Engineers, Vol.18, No.1, pp.1-11 (in Korean).
- [8] 국토해양부, 한국건설기술연구원(2006) 교통량조사 차중 분류가이드 (12종), 국토해양부.
Korea Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, and Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (2006) *Vehicle Classification Guide for Traffic Survey by Twelve Classes*, MLTM, Korea (in Korean).
- [9] 한국교량및구조공학회(2015) 도로교설계기준(한계상태설계법) 해설, 건설정보사.
Korea Institute of Bridge and Structural Engineering (2015) *Commentary of Highway Bridge Design Standard (Limit State Design Method)*, Gunseoljeongbosa, Korea (in Korean).
- [10] 황의승, 응위엔 티 행(2011) 고속충중계 자료를 이용한 차량하중 다차로재하계수 결정, 한국도로학회 논문집, 한국도로학회, 제13권, 제4호, pp.123-132.
Hwang, E.-S., and Nguyen, T.H. (2011) Determination of Multi-Lane Loading Factors for Vehicular Load of Bridges Using Weigh-in-Motion Data, *International Journal of Highway Engineering*, Korean Society of Road Engineers, Vol.1 No.4, pp.123-132 (in Korean).

요 약 : 현행 국내 교량 설계기준의 활하중 모형인 KL-510의 하중 효과를 실측된 통행자료로부터 통계적으로 추정된 트럭의 연행효과 및 국내외 관련 설계기준이 하중모형과 비교한다. 과적단속 전후에 고속도로에서 측정된 트럭의 중량 자료를 이용하여 설계기준의 활하중 모형 결정과 동일한 과정을 따라서 트럭 중량을 산정하여 그 하중효과를 KL-510과 비교하였다. KL-510은 운행제한중량을 초과하는 트럭을 일부 포함하는 자료로부터 추정된 트럭의 연행에 의한 하중효과와 매우 부합하는 결과를 보였다. KL-510은 미국 AASHTO LRFD의 활하중 모형과 일관성 있는 결과를 주며, 기존 하중 모형인 DB-24보다 하중효과의 비율이 균일하였다. 이 연구의 결과로 가상의 하중 모형인 KL-510에 해당하는 실제 트럭의 조합을 구성하였으며, 향후 공용중인 교량의 평가와 허가차량의 하중계수 보정에 적용할 수 있다.

핵심용어 : 한계상태설계법, KL-510, 연행 트럭 효과, WIM 자료, 통계적 추정, 교량 설계, 활하중
