

중차량중량분포를 이용한 차량하중모형 개발(II) - 연행차량 효과 분석 및 모형 개발

Development of Vehicular Load Model using Heavy Truck Weight Distribution (II) - Multiple Truck Effects and Model Development

황의승*

Hwang, Eui-Seung

Abstract

In this paper, new vehicular load model is developed for reliability-based bridge design code. Rational load model and statistical properties of loads are important for developing reliability-based design code. In the previous paper, truck weight data collected at eight locations using WIM or BWIM system are analyzed to calculate the maximum truck weights for specified bridge lifetime. Probability distributions of upper 20% total truck weight are assumed as Extreme Type I (Gumbel Distribution) and 100 years maximum weights are estimated by linear regression. In this study, effects of multiple presence of trucks are analyzed. Probability of multiple presence of trucks are estimated and corresponding multiple truck weights are calculated using the same probability distribution function as in the previous paper. New vehicular live load model are proposed for span length from 10 m to 200 m. New model is compared with current Korean model and various load models of other countries.

Keywords : vehicular load model, reliability, design code, probability distribution, multiple presence

요 지

본 논문에서는 신뢰도기반 도로교설계기준을 위한 새로운 활하중모형을 개발하였다. 합리적 하중모형과 함께 하중의 통계적 특성의 구축은 신뢰도기반 설계기준의 개발에 매우 중요하다. 이전 논문에서는 WIM 또는 BWIM시스템을 이용하여 수집된 국내 8개 지역의 자료를 분석하여 교량수명기간동안의 예상최대중량을 구하였다. 차종별 총중량의 확률분포는 상위 20%의 자료를 이용하여 극한분포(Gumbel분포)로 가정되었으며 이 확률분포를 사용하여 교량수명기간동안의 최대중량을 예측하였다. 이 논문에서는 교량상에 두 대 이상의 차량이 동시에 재하되는 경우를 분석하였다. 여러 자료를 이용하여 동시재하의 확률을 구하였으며 이에 따른 동시재하차량의 총중량을 이전 논문과 같은 확률분포를 이용하여 구하였다. 10-200 m까지의 기간별로 예측된 하중효과를 모사할 수 있는 공칭하중모형이 제안되었다. 제안된 하중모형은 기존의 하중모형 뿐만 아니라 국외의 여러 기준들과 비교분석되었다.

핵심용어 : 차량하중모형, 신뢰도, 설계기준, 확률분포, 동시재하

1. 서 론

차량에 의한 활하중의 효과는 일반적인 중소지간 규모의 교량 설계에서 가장 중요한 인자이다. 설계기준에서 이러한 활하중의 모형은 교량이 위치한 지역 또는 국가의 차량, 특히 중차량의 제원, 중량 및 통행특성을 반영하여 결정되어야 한다. 국내에서는 1970년대에 도로교설계기준(건설교통부, 2005)의 차량 활하중모형으로 DB/DL하중이 도입된 이후 물동량의 증가와 중차량의 대형화 등으로 새로운 하중모형의 개발이 필요한 실정이다. 또한 합리적인 구조물의 설계를 위하여 도입되고 있는 신뢰도기반 설계기준을 위하여 국내의 현실을 반영한 하중의 통계적 특성이 반드시 도출되어야 한다.

활하중의 새로운 모형 개발과 통계적 특성의 구축을 위해서는 장기적인 자료의 수집과 함께 다양한 지역에서의 자료가 수집되어야 한다. 이전 논문에서는 WIM(Weigh-In-Motion)시스템 및 BWIM(Bridge WIM)시스템을 이용하여 수집된 국내 8개 지역의 자료를 분석하여 대표적인 차량의 종류를 구분하였으며 각 차종별 대표적인 크기 및 중량분포를 구하였다. 각 차종별 총중량의 확률분포는 상위 20%만의 자료를 이용하여 극한분포로 가정하고, 선형회귀선을 이용하여 100년 최대중량을 예측하였다. 본 논문에서는 이전 논문에서 예측된 차량의 최대중량과 두 대 이상의 차량이 교량상에 동시에 재하되는 경우를 고려하여 최대하중효과를 계산하고 이에 적합한 설계활하중모형을 제시하고자 한다.

*정회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수 (E-mail : eshwang@khu.ac.kr)

차량에 의한 교량의 하중효과는 차량의 중량 및 크기와 함께 두 대 이상의 차량이 동시에 교량에 재하되는 경우도 중요하다. 여러 대의 차량이 동시에 교량에 재하되는 경우는 한 차로에 두 대 이상의 차량이 재하되는 경우(직렬차량)와 두 차로 이상의 차로에 차량이 동시에 재하되는 경우(병렬차량)로 구분할 수 있다. 직렬차량의 하중효과는 하중모형에 포함되어 고려되며, 병렬차량의 하중효과는 다차로재하계수 또는 동시재하계수를 사용하여 고려되어진다. 본 논문에서는 직렬차량의 경우만을 다루고 있다. 한 차로에 두 대 이상의 차량이 재하되는 영향을 구하기 위하여 국내 여러 지역에서 실제 통행상황을 비디오로 촬영하여 분석한 자료 및 국외의 여러 자료를 사용하여 최대 4대까지의 동시재하의 발생확률을 구하였으며 각 확률에 따른 차량의 중량을 이용하여 하중효과를 분석하였다. 이상의 결과로부터 10 m~200 m까지의 시간별로 하중효과를 예측하였으며, 이를 모사할 수 있는 하중모형이 제안되었다. 전체적인 활하중모형의 개발과정은 그림 1과 같다. 제안된 하중모형은 기존의 하중모형 뿐만 아니라 국외의 여러 기준들과 비교, 분석되었다.

활하중의 통계적 특성은 수집된 자료의 지역적 차이, 확률 분포의 불확실성, 하중예측기법과 해석방법의 불확실성, 충격하중의 불확실성 등을 고려하여 계산되었다. 하중모형 및 통계적 특성은 하중저항계수법(Load and Resistance Factor Design) 설계기준의 신뢰도분석을 위한 핵심자료이며 이를 이용하여 현행 설계기준의 신뢰도수준, 목표신뢰도수준의 결정, 결정된 목표신뢰도수준에 따른 하중계수 및 저항계수의 결정 등에 이용된다.

제안된 새로운 하중모형은 합리적인 교량설계를 가능하게 하며 교량에 합리적이며 균일한 수준의 신뢰도를 부여할 수 있다. 이는 전체 Network적 관점에서 교량의 적정 신뢰도를 유지함으로써 궁극적으로 경제적인 교량의 건설 및 유지관리가 기대된다. 또한 시간 200 m 이상의 장대교량에도 본

연구에서 제안된 방법을 사용하여 하중모형의 개발이 가능하며 기존교량의 유지관리 및 평가에도 적용됨으로써 유지관리비용의 절감에도 기여할 것으로 기대된다.

2. 동시재하의 확률 및 차량최대중량

2.1 두 대 이상의 차량 재하 확률

시간이 긴 교량이나 차로가 2개 이상인 교량에서는 두 대 이상의 차량이 교량상을 주행할 수 있으며 경우에 따라 두 대 이상의 차량 효과가 한 대의 차량 효과보다 더 지배적일 수 있다. 두 대 이상의 차량이 재하되는 경우는 크게 차량이 앞뒤로, 즉 직렬로 재하되는 경우와 차량이 옆으로, 즉 병렬로 재하되는 경우로 나눌 수 있다.

일반적으로 설계기준의 하중모형에서 직렬의 차량효과는 공칭의 하중모형에서 고려하게 되며, 병렬의 차량효과는 다차로재하계수(동시재하계수)를 이용하여 고려하게 된다. 두 경우 모두 두 대 이상의 차량이 교량에 재하될 확률을 고려하여, 두 대 이상의 차량의 중량을 구하고 이를 반영한 차량활하중모형이 정해지게 된다. 본 연구에서는 직렬의 차량효과를 고려한 하중모형에 대해 연구하였으며, 병렬의 차량효과는 포함하지 않았다. 기존의 WIM이나 BWIM시스템을 이용하여 수집된 자료에 차량도착시간이 있으나 연행의 확률을 구할 수 있을 정도로 정밀한 시간을 쫓 수 없었으므로, 본 연구에서는 직접 Video촬영을 하여 자료를 수집하였다. Video 촬영은 일반국도(PH지역, BB지역)와 고속국도(SW지역)에서 수행되었다. PH지역과 BB지역은 이전 연구에서 차량중량자료가 수집된 지역이며, SW지역은 중량자료는 수집되지 않았으나 타지역에 비해 교통량이 많고 정체가 자주 발생하는 지역이어서 결과의 신뢰성을 높이기 위해 선정되었다. 또한 Nowak(1993)의 연구 자료도 참고하여 함께 분석하였다.

Video에 대한 분석은 촬영된 Video를 컴퓨터상에서 동영상파일로 변환한 후 같은 차로에서 두 대 이상의 차량이 직렬로 주행하는 경우를 고려하였는데, 이 때 차간거리는 15 m를 기준으로 하였다. 즉, 15 m 이상의 차간거리로 주행하는 경우는 한 대의 차량이 주행하는 경우로 간주하였다. 표 1은 3개 지역 및 Nowak(1993)이 제시한 직렬차량의 확률을 나타내고 있다. 이 표에서 완전무관은 앞뒤 두 대의 차량의 중량의 상관관계가 없다는 것을 의미하고 완전상관은 두 대의 차량 중량이 완전상관관계에 있다는 것을 의미한다. Video촬영에서 이를 구분하는 것은 어려우나 적재된 재하물의 크기와 종류를 구분하여 판단하였다. 대략적으로 완전상

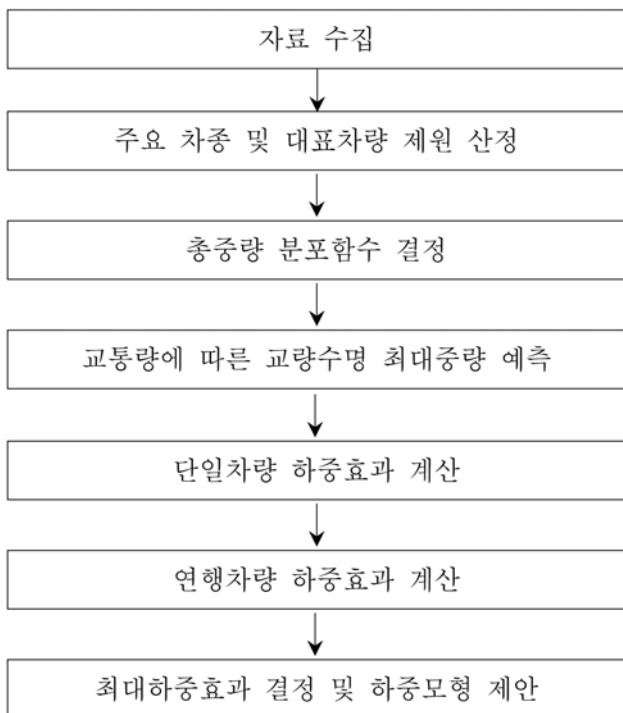


그림 1. 활하중모형의 개발 과정

표 1. 직렬차량의 연행확률

지역	연행확률(직렬)		ADTT*
	완전무관	완전상관	
SW (고속국도)	1/20	1/100	13,589
PH (일반국도)	1/60	1/300	3,439
BB (일반국도)	1/55	1/330	6,745
Nowak의 자료	1/50	1/500	5,000

*일평균중차량교통량으로 2007 도로교통량통계연보의 차종4-차종12까지의 통행량의 합

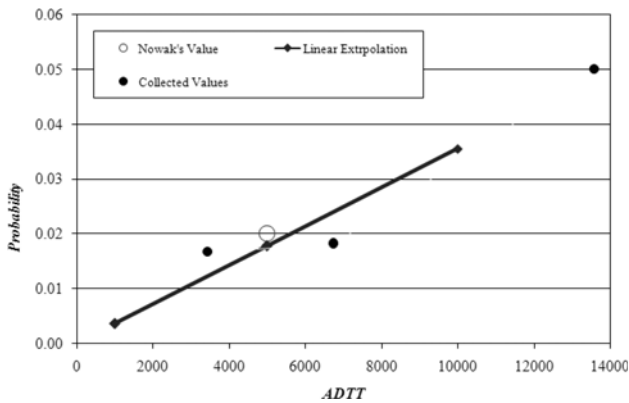


그림 2. 직렬 연행차량의 확률

관의 확률은 완전무관의 확률의 약 1/5배 정도인 것으로 나타났다. SW지역의 경우, 통행량도 매우 크며, 하루에 몇 시간씩 정체가 되는 지역으로 동시제하의 확률도 가장 크게 나타났으며, 직렬차량의 동시제하확률은 중차량의 통행량에 비례한 것으로 나타났다. 각 지역의 ADTT(Average Daily Truck Traffic, 일평균중차량교통량으로 2007 도로교통량통계 연보의 차종4~차종12까지의 통행량의 합)와 완전무관의 동시제하확률을 비교하여 그림 2에 나타내었다. 그림에서 Video에서 분석된 3개 지역의 값을 이용하여 선형추세선을 구하면 식(1)과 같다.

$$p_{\text{직렬}} = 0.355 \times 10^{-5} \times ADTT \quad (1)$$

이 식에 의해 평균적인 중차량교통량 5,000대 수준에서 직렬차량의 동시제하확률은 0.018 정도로 Nowak(1993)이 제시한 1/50(=0.02)과 유사한 것으로 판단된다.

2.2 동시제하차량의 총중량 예측

국내 교통량통계(건설교통부, 2007)에 의하면 대부분의 국도와 지방도에서의 ADTT는 5,000대 이하이며 고속국도에서도 평균값은 5,000대 이하이다. Nowak(1993)과 Moses(2001)의 연구에서도 ADTT의 기준을 5,000대로 사용하고 있으므로 본 연구에서도 ADTT를 5,000대로 정하고 식(1)에 따라서 직렬차량의 완전무관의 확률은 1/50, 완전상관의 확률은 1/250을 기준으로 하였다. 다만, 본 연구에서 동시제하의 확률을 측정할 지역의 수가 적고, 대표적인 값으로 하기에 무리가 있으므로 완전무관의 확률을 1/30, 1/50, 1/70으로, 완전상관의 확률을 각각 1/150, 1/250, 1/350으로 가정

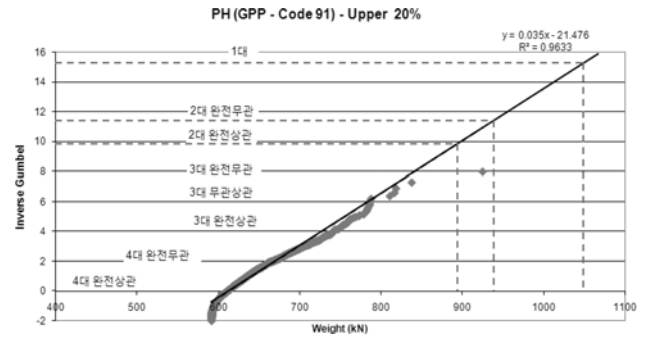


그림 3. 연행차량의 최대중량 예측

하여 100년 최대 총중량을 예측하고 비교하였다.

총중량에 대한 확률분포는 이전 논문에서와 마찬가지로 상위 20%의 자료를 Gumbel분포로 가정하여 구하였다. PH지역의 두 대의 Code 91에 대하여 완전무관확률 1/50을 적용하여 최대중량을 추정하는 계산과정은 다음과 같다.

① 이전 논문에서 단일차량의 경우 교량수명을 100년을 가정할 때 총차량대수는 22,763,833대이며 이중 상위 20%의 차량대수는 4,552,767대이며 확률 1/50을 적용하면 완전무관으로 운행하는 차량대수는 91,055이다.

② 이 차량대수에 해당하는 역Gumbel확률값은 다음 식에 의하여 11.419이다.

$$z = -\ln(-\ln p) \quad (2)$$

여기서 p 는 누적분포함수의 값으로 최대값의 누적분포함수의 값은 $n/(n+1)$ 로 계산된다. n 은 교량수명기간의 총차량대수의 20%의 1/50이다.

③ 추세선 식 $y=0.0349x-21.47$ 에 의하여 y (역Gumbel확률값)가 11.419일 때, x (예상최대중량)는 939.7 kN이다.

세 대 이상의 차량연행의 경우에는 두 대의 차량연행확률을 이용하여 구할 수 있다. 예를 들어 두 대의 완전무관 확률이 1/50이라면, 3대의 완전무관 확률은 $1/50 \times 1/50 = 1/2,500$ 이 된다. 이와 같은 계산에 의하여 4대까지의 연행차량에 대하여 각 지역별로 계산한 최대중량의 평균값은 표 2와 같으며, 그림 3에 도식적으로 나타내었다. 실제 연행의 확률은 차종 구분없이 구한 값이지만, 본 연구에서는 같은 차종끼리의 연행의 확률로 가정하였다.

표 2에서 나타난 바와 같이 연행확률의 차이에 따른 중량의 오차는 2대의 경우에는 $\pm 2\%$, 3대의 경우에는 $\pm 6\%$, 4대의 경우에는 $\pm 12\%$ 정도 차이가 발생하고 있다. 4대의 경우

표 2. 연행확률에 따른 직렬차량(Code91)의 100년 최대 중량(kN)

수(대)	종류	Case 1		Case 2		Case 3	
		연행확률	최대중량	연행확률	최대중량	연행확률	최대중량
1		-	1,182	-	1,182	-	1,182
2	완전무관	1/30	1,032	1/50	1,010	1/70	995
	완전상관	1/150	961	1/250	939	1/350	924
3	무관무관	1/900	882	1/2500	837	1/4900	808
	무관상관	1/4500	812	1/12500	767	1/24500	737
	상관상관	1/22500	741	1/62500	696	1/122500	666
4	완전무관	1/27000	733	1/125000	665	1/343000	621
	완전상관	1/3375000	520	1/15625000	453	1/42875000	408

표 3. 직렬 연행차량의 중량 (kN)

연행		Code 70		Code 91	
수(대)	종류	최대중량	다른 차량중량	최대중량	다른 차량중량
1		815	-	1,182	-
2	완전무관	718	488	1,010	576
	완전상관	678	678	939	939
3	무관무관	620	488 488	837	576 576
	무관상관	580	580 488	767	576 767
	상관상관	540	540 540	696	696 696
4	완전무관	522	488 488 488	665	576 576 576
	완전상관	402	402 402 402	453	453 453 453

에 오차가 조금 크지만 4대의 차량이 지배하는 지간 약 100 m 이상에서는 그림 11~13에서와 같이 제안된 하중모형이 충분히 안전측으로 되어 있으므로 큰 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 완전무관 1/50, 완전상관 1/250의 확률을 기준으로 직렬차량의 총중량을 계산하였으며, Code70과 Code91에 대한 지역별 총중량의 평균값을 표 3에 나타내었다.

2.3 직렬차량의 하중효과

직렬의 연행차량 하중효과를 구하기 위하여 여러 대의 연행차량을 단순지간과 2연속 지간에 채하하였다. 완전무관의 두 대의 차량은 하중의 조합에 대한 이론(Turkstra, 1980)에 따라 한 차량은 2.2에서 구한 최대중량을 갖고, 또 다른 차량은 평균의 중량을 갖고 운행하는 경우에 해당된다. 여기서 평균의 중량은 상위 20% 차량의 평균중량을 의미한다. 완전상관의 두 대의 차량은 두 대의 차량이 모두 2.2에서 구한 완전상관의 최대중량을 갖는 경우에 해당된다. 마찬가지로 3대의 완전무관의 경우는 한 대는 표 3의 최대중량을, 다른 두 대는 평균중량을 갖는 경우이다. 완전상관 3대의 경우는 세 대가 각각 최대중량을 갖는 경우이다. 3대의 무관상관의 경우에는 두 대는 각각 최대중량을, 나머지 한 대는 평균중량을 갖는 경우이다. 4대의 경우에는 마찬가지로 완전무관, 완전상관 및 일부상관의 경우를 분류하여 각 차량의 중량을 결정하였다. 연행의 경우별 각 차량의 중량은 표 3에 정리하였으며 Code91의 완전무관과 완전상관의 연행의 경우를 도식적으로 그림 4에 표시하였다.

표 3의 직렬차량의 중량을 이용하여 교량의 하중효과를 계산하였다. 그림 5는 Code70과 Code91의 두 대의 직렬차량에 의한 단순지지된 보의 중앙점 휨모멘트이다. 여기서 휨모

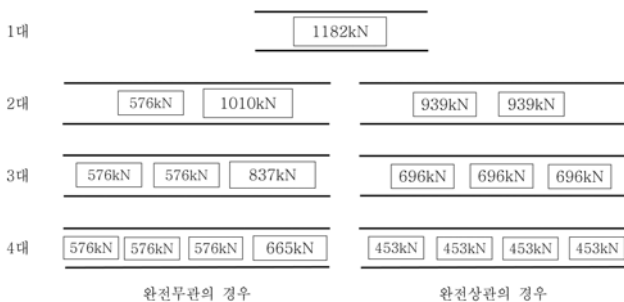


그림 4. Code91 연행차량의 경우

멘트 계산시 차량의 간격은 기존의 연구(김상효 등, 1991)에서 제안된 정체시 선행차량과 후행차량의 범퍼간 최소간격 1.2 m임을 고려하여 선행차량의 마지막 축과 후행차량의 첫 번째 축간의 거리를 5 m로 가정하였다. 세로축은 모멘트비로서 차량에 의한 중앙점 최대휨모멘트를 현재 도로교설계 기준(2005)의 1등교 활하중인 DB24/DL24에 의한 중앙점 최대휨모멘트로 나눈 것이다. 그림에서 본 것과 같이 지간이 짧은 경우(약 30 m이하)에는 완전무관의 Code70이, 지간이 긴 경우(약 30 m이상)에는 완전상관의 Code91이 지배적인 것으로 나타났다.

3대와 4대의 직렬차량에 대한 경우는 그림 6와 그림 7에 나타내었다. 단독차량의 경우와 직렬차량의 경우의 최대모멘트비를 그리면 그림 8과 같다. 그림에서 나타난 것과 같이 지간 30 m이하에서는 단독차량이, 지간 100 m까지는 2대의 차량이, 그 이상에서는 4대의 차량이 더 지배적인 것을 알 수 있다.

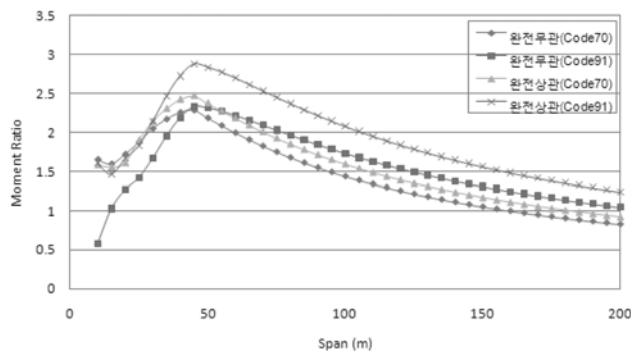


그림 5. 직렬 2대연행 모멘트비

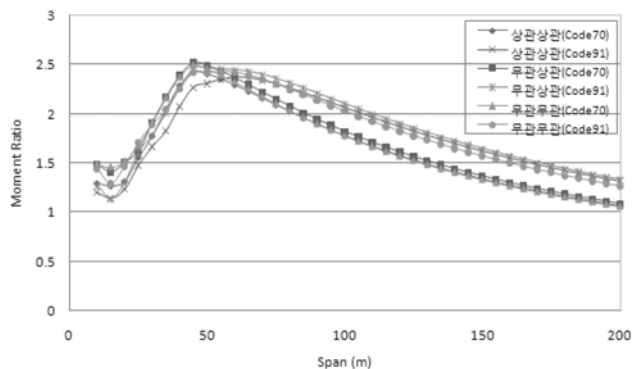


그림 6. 직렬 3대연행 모멘트비

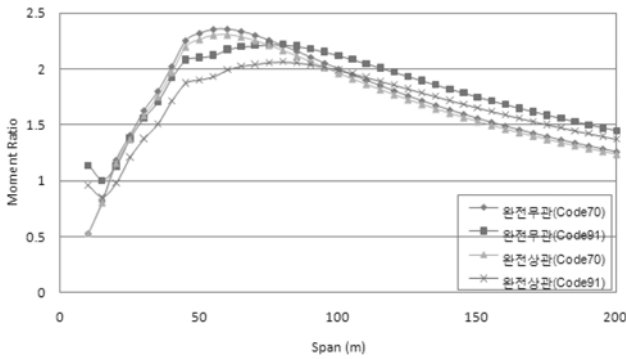


그림 7. 직렬 4대연행 모멘트비

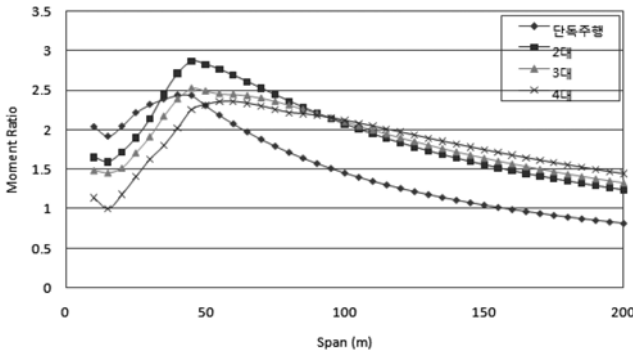


그림 8. 단일 및 직렬연행차량 모멘트비 비교

그림 8에서 가장 큰 값을 갖는 곡선(Envelop curve)이 활하중모형에 사용되는데, 실제 이 값들은 연행차량의 경우 차량의 간격 5 m를 기준으로 계산된 값들이다. 그러나 정상적인 통행상태에서 차간거리 5 m는 거의 불가능한 값으로, 정체시에만 나타날 수 있는 값으로 판단된다. 본 연구에서는 차간거리 5 m의 경우는 정체시의 경우이며, 이 때는 차량의 속도가 매우 느리므로 충격하중의 영향이 없는 것으로 판단

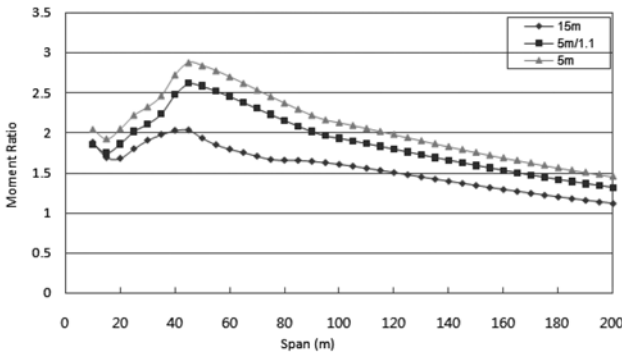


그림 9. 충격하중계수 10%를 고려한 모멘트비 비교

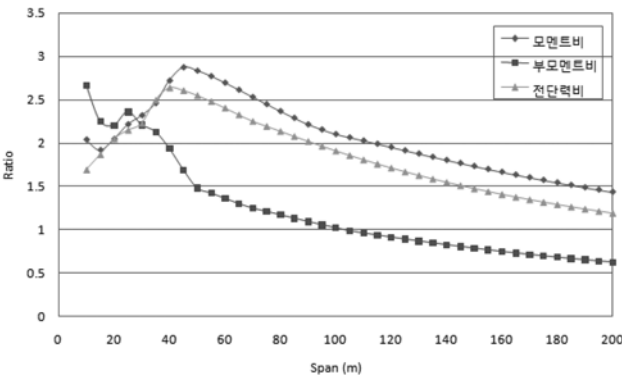


그림 10. 단순지간 중앙점 정모멘트, 2연속지간의 내부지점 부모멘트, 단순지간 지점 전단력에 대한 최종 목표설계값

하였다. 정상통행상태에서의 충격하중의 평균값은 활하중의 10%정도로 알려져 있다(고현무 등, 2005). 따라서 최대하중 효과는 그림 8의 최대값을 1.1로 나눈 값과 차간거리를 정상상태인 15 m로 하는 경우를 고려하여야 한다. 그림 9은 두 가지 경우를 비교한 그림으로 차간거리 5 m의 값을 1.1로 나눈 값, 즉 정체시의 상태가 더 지배적임을 알 수 있다. 그림 9는 최종적으로 활하중모형의 기준이 되는 단순지간 중앙점 최대휨모멘트비를 나타낸 그림이다. 이와 같은 절차로 2경간 연속지간의 내부지점 부모멘트와 단순지간의 지점 전단력에 대하여 구한 값도 그림 10에 나타내었다. 이러한 결과는 기준에 국내에서 수행된 연구(심재수 등, 1996; 황학주 등, 1993; 고현무 등, 1998) 등과 비교하여 유사한 경향을 나타내고 있다.

3. 활하중의 모형 및 통계적 특성

3.1 제안된 하중모형

공칭 하중모형은 그림 10에 근거하여 결정된다. 그림 10은 교량의 수명(100년)동안 발생할 수 있는 최대하중효과로 간주될 수 있으며, 본 연구에서는 공칭하중에 하중계수를 곱한 값(계수하중 또는 극한하중)과 동일하다고 가정하였다. 이에 따라 그림 10의 값을 가정한 활하중계수로 나눈 값과 같은 모멘트비를 갖도록 공칭하중모형을 결정하였으며, 또한 공칭하중모형은 상위 20% 차량자료의 평균중량을 갖는 차량에 의한 효과와 가능한 유사하도록 결정하였다. 활하중계수는 일반적으로 하중의 통계적 특성에 따라 결정되는데 본 연구에서 결정된 하중의 통계치는 3.2에 기술되어 있으며, 활하중계수는 1.75로 가정하였다. 제안된 하중모형은 그림 11과 같다.

제안된 하중모형은 설계트럭하중, 설계탠덤하중 및 설계차로하중으로 이루어져 있다. 설계트럭하중은 현재 도로교설계 기준(2005)의 DB24 트럭하중과 동일하며 설계탠덤하중은 간격 1.2 m의 두 개의 145 kN의 힘이다. 설계차로하중은 등

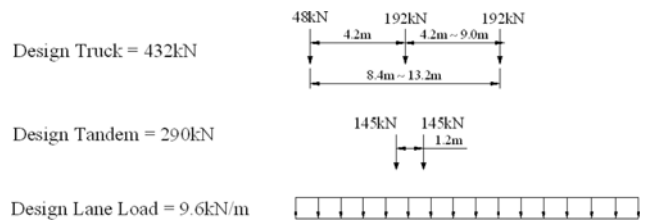


그림 11. 제안된 하중모형

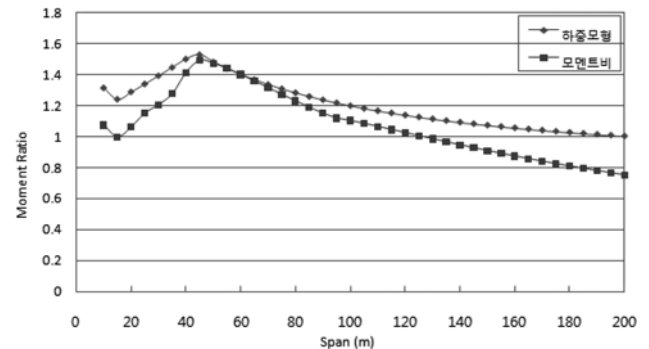


그림 12. 하중계수 1.75를 고려한 최대하중효과와 제안된 활하중 모형과의 정모멘트비

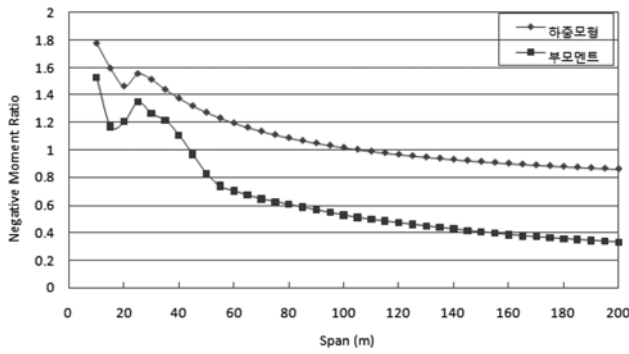


그림 13. 하중계수 1.75를 고려한 최대하중효과와 제안된 활하중 모형과의 부모멘트비

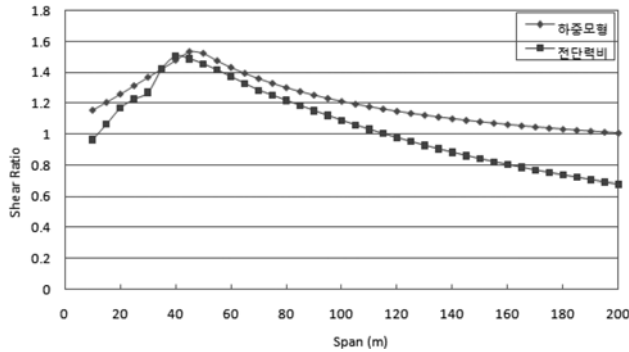


그림 14. 하중계수 1.75를 고려한 최대하중효과와 제안된 활하중 모형과의 전단력비

분포하중으로 그 크기는 9.6 kN/m이다. 설계차량활하중은 기존의 DB24 또는 DL24 중 큰 값을 선택하는 것과 달리 설계 트럭하중과 설계차로하중의 조합 또는 설계택담하중과 설계차로하중의 조합 중 큰 값을 선택한다. 실제 두 조합의 하중효과를 비교하면 약 10 m의 지간 이상에서 설계트럭하중과 설계차로하중의 조합이 더 큰 효과를 준다. 국내의 거의 모든 교량이 지간 10 m이상인 것을 감안하면 실제적으로 설계트럭하중과 설계차로하중의 조합이 모든 경우에 사용되게 된다.

제안된 하중모형과 그림 9의 하중효과를 가정된 하중계수 1.75로 나눈 값과 비교하면 그림 12과 같다. 수치적으로 조정을 하면 하중모형을 실제 하중효과와 더 유사하게 맞출 수 있으나 본 연구에서는 설계자들에게 친숙한 DB트럭하중 모형을 그대로 사용하는 것이 더 바람직하다고 판단하여 그림 11의 설계차량모형을 하중모형으로 제안하였다.

그림 13와 14은 연속교의 내부지점부모멘트와 단순지간의 전단력을 비교한 것이다. 그림 13에서 내부지점 부모멘트 계산을 위한 하중재하는 AASHTO(1994)와 유사하게 인접지간에 각각 한 대의 설계차량을 재하하고 전지간에 설계차로하중을 재하하되, 하중효과의 90%를 취하는 것으로 하였다.

3.2 활하중 통계특성

신뢰도이론에서 구조물의 신뢰도(신뢰도지수 또는 파괴확률)를 계산하기 위해서는 확률변수들(하중 및 저항)의 통계적 특성이 필요하다. 현재 국내에서 개발중인 신뢰도기반 설계기준은 하중계수와 저항계수를 도입한 LFRD(Load and Resistance Factor Design)설계기준인데, 적절한 신뢰도를 갖기 위해 필요한 하중계수와 저항계수를 구하기 위해서도 하중의 통계적 특성이 필요하게 된다. 통계적 특성에는 일반적

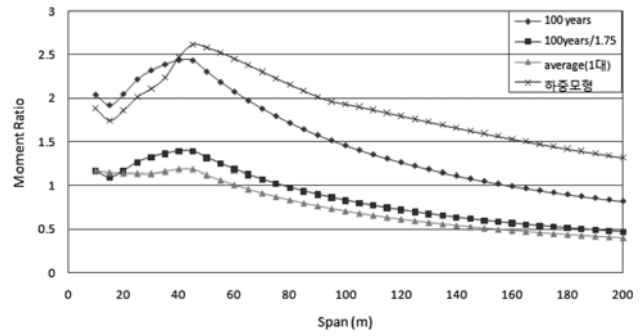


그림 15. 제안된 활하중모형과의 모멘트비 비교

으로 확률분포함수, 평균, 변동계수 등이 포함된다. 평균은 공칭값과의 비를 나타내는 편심계수(bias factor, mean-to-nominal ratio)로 나타내기도 한다.

선행논문의 결과로부터 3장에서 중차량의 최대중량은 극한 제1분포인 Gumbel분포로 가정하였다. 따라서 활하중의 중량에 대한 확률분포함수는 Gumbel분포로 간주하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 다만, 활하중효과는 차량중량 이외의 지간길이 등의 곱으로 계산되므로, 중심극한정리(Ang, 1975)에 의해 대수정규분포로 가정해도 무리가 없을 것으로 판단된다. 편심계수를 구하기 위하여 선행논문의 3장에서 예측한 단일차량의 최대중량을 재현기간별로 가정된 하중계수 1.75로 나눈 값과 상위20%자료의 평균중량에 의한 하중효과를 그림 15에 도시하였다. 편심계수는 평균값을 공칭값으로 나눈 값이며 이 그림에서 나타난 비와 같이 편심계수는 지간에 따라 약간 다르나 0.95(지간 15 m)에서 1.15(지간 35 m) 정도로 판단된다.

한편 활하중의 변동계수는 여러 가지 요인을 고려해야 한다. 첫째로 선행추세선에 의한 최대중량 예측에 관계된 변동요인으로 이전 논문의 추세선식에 의한 차량중량의 변동계수는 약 7%정도이다. 두 번째는 지역별 차이로 이전 논문의 표 3에서 나타난 지역별 최대중량의 변동계수는 약 10%이다. 세 번째로 활하중효과에 포함된 충격하중의 변동요인을 고려해야한다. 충격하중계수의 평균값은 약 10%정도인데, Nowak(1999)의 연구에 의하면 충격하중의 변동계수는 약 70%정도이다. 이를 활하중의 값으로 환산하여 충격하중의 변동요인을 약 10%로 가정하였다. 네 번째로 구조해석에 관계된 변동요인을 들 수 있다. 실제로 구조해석시 어떠한 모델을 사용하느냐에 따라 다른 하중효과가 나타날 수 있다. 이와 관련된 변동요인은 연구된 바 없으나 Nowak(1999)과 Moses(2001)의 연구에서 약 10%정도로 가정하였다. 이와 같은 변동요인을 전부 합하면 활하중의 변동계수(C.O.V)는 다음 식과 같이 계산된다.

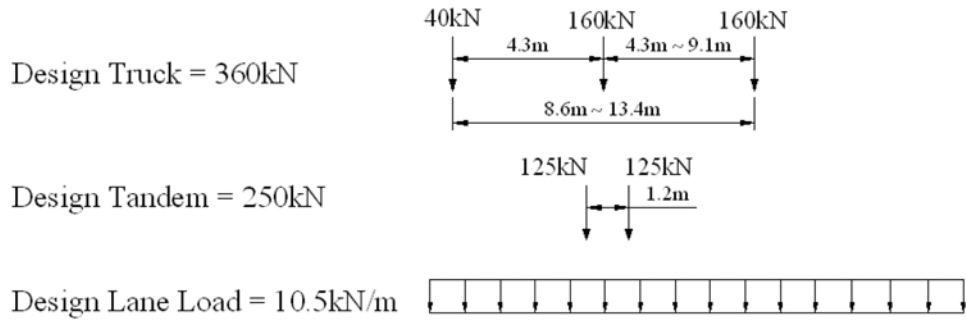
$$COV = \sqrt{0.07^2 + 0.1^2 + 0.1^2 + 0.1^2} = 0.19$$

따라서, 본 연구에서는 활하중의 변동계수를 0.20으로 제안하였다.

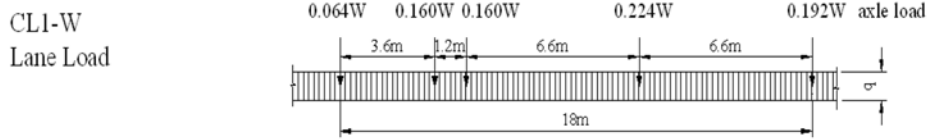
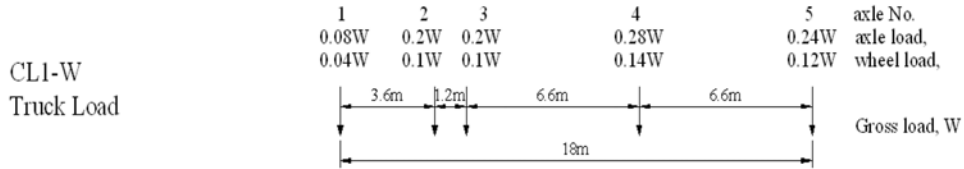
4. 활하중모형의 하중효과 비교분석

4.1 공칭하중모형 비교

제안된 하중모형을 국외의 여러 나라의 하중모형과 비교하

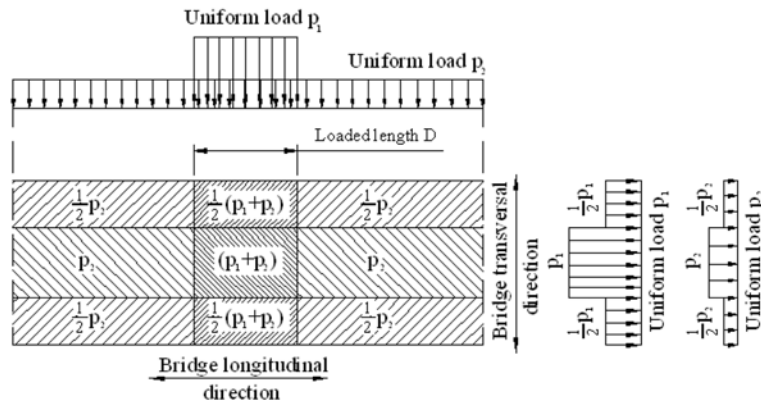


(a) AASHTO LRFD



Highway Class	A	B	C or D
q_s (kN/m)	9	8	7

(b) CHBDC



Load	Live load on main lanes (width 5.5m)						Live load on secondary lanes
	Loaded length D (m)	Uniform load p_1		Uniform load p_2			
		For calculation of bending moment	For calculation of shearing force	$L \leq 80$	$80 \leq L \leq 130$	$130 \leq L$	
A live load	6	10	12	3.5	4.3-0.1L	3.0	50% live load on main lanes
B live load	10						

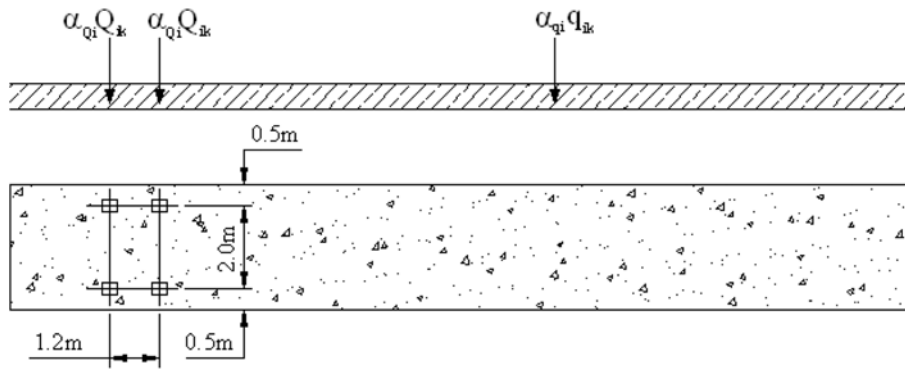
(c) Japan

그림 16. 각국의 설계 차량하중

였다(그림 16). 비교 대상 하중모형은 AASHTO LRFD (1994)의 HL93, 캐나다 CSA(2001)의 CL-625, 일본(2002)의 B모형, Eurocode(2001)의 Load Model 1이다. 모든 하중모형은 일련의 집중하중(트럭하중)과 분포하중(차로하중)의 합으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 개발된 하중모형도 이와 같은 형식으로 되어 있다.

설계트럭을 비교하면 다음과 같다, 본 연구에서 제안된 설

계트럭하중은 기존의 DB24 트럭과 같으며 총중량 432 kN에 총길이 8.4~13.2 m이다. AASHTO의 HL93하중의 트럭하중은 기존 AASHTO설계기준(1996)의 HS20-44모형과 같으며 총중량 360 kN에 총길이는 8.4~13.4 m이다. 이 트럭은 국내의 기존 도로교설계기준의 2등교 하중인 DB18과 같은 것이다. 캐나다의 CL-625트럭모형은 총중량 625kN에 총길이 18 m로 가장 긴 트럭모형이다. 일본의 경우에는 트럭



Location	Axle loads Q_{ik} (kN)	q_k (or q_k) (kN/m^2)
Lane Number 1	300	9
Lane Number 2	200	2.5
Lane Number 3	100	2.5
Other lanes	0	2.5
Remaining area (q_k)	0	2.5

(d) Eurocode
그림 16. 계속

표 4. 각국의 설계차로하중 비교

설계기준	설계차로하중의 크기 (kN/m)	비고
제안된 하중모형	9.6	
AASHTO LRFD	10.5	
CSA	9.0	A Class
Japan	9.625~8.25	L하중, 지간에 따라 변함
Eurocode	27	보정계수 사용

하중을 등분포하중으로 재하하였는데 길이 10 m에 10 kN/m²를 사용하였다. 재하폭이 2.75 m이므로 총폭에 대한 총중량은 275 kN이다. Eurocode의 Load Model 1은 탠덤축으로 간격 1.2 m이고 중량이 각각 300 kN인 두 개의 축으로 구성되어 있다. 다른 기준보다 중량이 무겁지만 각 나라의 사정에 따라 가감을 할 수 있도록 되어 있다.

설계차로하중을 비교하면 표 4와 같다. Eurocode의 값이 비정상적으로 크지만 이 역시 유럽연합의 각국의 사정에 따라 가감할 수 있도록 되어있다. 제안된 값은 AASHTO와 CSA의 중간정도 값을 보이고 있다.

4.2 하중효과 비교

앞에서 언급한 하중모형과 하중계수를 고려하여 활하중모형의 효과를 각국의 설계기준별로 비교하였다. 그림 17은 하중계수의 적용없이 모형차체만의 1차로 하중효과를 단순지간 중앙점의 휨모멘트비로 비교한 것이다. 세로축은 현행 도로교설계기준에 의한 값과의 비를 나타낸다. 그림에서 나타난 바와 같이 현행 도로교설계기준 이외의 대부분의 하중모형이 유사한 형태를 보이고 있어 현재의 하중모형(DB24/DL24)은 개선이 필요한 것으로 판단된다. 본 연구에서 제안된 하중은 미국 AASHTO와 유사하나 단지간에서는 조금 크고, 장지간에서는 약간 작은 값을 보이고 있다. 장지간에

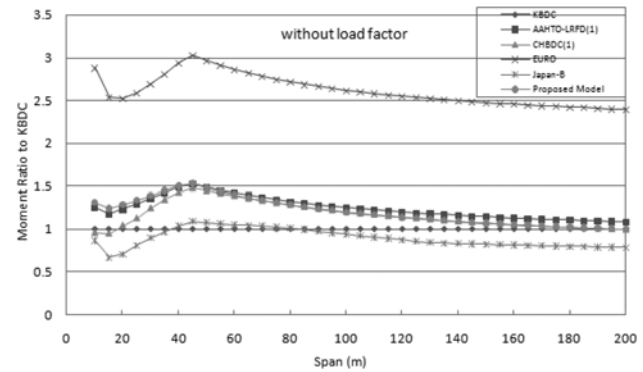


그림 17. 각국의 활하중모형 하중효과 비교(단순지간 중앙점 휨모멘트, 1차로 재하, 하중계수 미적용)

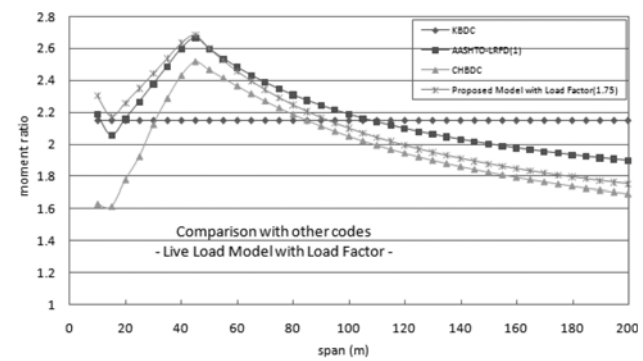


그림 18. 각국의 활하중모형 하중효과 비교(단순지간 중앙점 휨모멘트, 1차로 재하, 하중계수 적용)

서는 캐나다의 하중모형과 유사한 값을 보이고 있다. 그림 18은 하중계수를 적용한 계수하중의 효과를 비교한 것으로 현행 도로교설계기준은 2.15, 본 연구에서 제안된 하중계수는 1.75, AASHTO LRFD의 하중계수는 1.75, 캐나다의 하중계수는 1.70을 사용하여 비교한 것이다. 현행 도로교설계기준에 비하여 지간 45 m에서 최대 약 25%정도 하중효과가 커지는 것으로 나타났으며 지간 90 m 이상에서는

현행 기준에 비해 작아지며 지간 200 m에서 약 20%정도 작아지는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 신뢰도기반 도로교설계기준을 위한 새로운 활하중모형을 개발하였다. 신뢰도기반의 설계기준을 위해서는 합리적 하중모형과 함께 하중의 통계적 특성의 구축이 중요하다. 활하중의 통계적 특성의 구축을 위하여 본 연구에서 수집한 4개 지역의 자료와 타연구에서 수집된 4개지역의 자료를 이용하였다. 차량의 자료는 WIM 또는 BWIM시스템을 이용하여 신뢰할 수 있는 자료를 수집하였다. 수집된 자료로부터 대표적인 차량의 종류를 구분하였으며 각 차종별 대표적인 크기 및 중량분포를 구하였다. 각 차종별 총중량의 확률분포는 상위 20%의 자료를 이용하여 극한분포로 가정되었으며 이 확률분포를 사용하여 100년 최대중량을 예측하였다. 또한 차량이 직렬로 동시에 재하되는 확률을 분석하여 그 중량을 예측하였으며 이에 따른 하중효과를 분석하였다. 10-200 m까지의 지간별로 예측된 하중효과를 모사할 수 있는 공칭하중모형이 제안되었다. 제안된 하중모형은 기존의 하중모형 뿐만 아니라 국외의 여러 기준들과 비교분석되었다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 신뢰도기반 도로교설계기준을 위한 설계활하중모형을 제안하였다. 설계활하중모형은 한 대부터 여러 대의 차량주행의 경우를 고려하여 분석된 하중효과를 구현할 수 있도록 설계트럭하중 또는 설계탠덤하중의 효과와 설계차로하중의 효과를 중첩한다. 이는 기존의 타 연구결과 및 다른 국가의 설계활하중모형과 유사하다.
2. 단순지간의 중앙점 휨모멘트의 경우, 단지간(약 30 m 이내)에서는 한 대의 차량이, 중지간(30 m~100 m)에서는 완전상관의 두 대의 차량이, 장지간(100 m 이상)에서는 네 대 이상의 차량이 지배적이다.
3. 활하중의 통계적 특성은 편심계수(mean-to-nominal ratio) 약 0.95~1.15, 변동계수는 약 20%로 나타났다.

보다 정확한 차량에 의한 하중효과의 분석을 위하여 많은 지역에서의 장기적인 자료의 수집이 필수적이다. 지역별, 계절별 특성에 따른 통행패턴과 연도별 차량증가 및 중량증가의 효과를 고려하는 것도 중요하다. 이 설계모형은 지간 200 m까지 적용하는 도로교설계기준을 위한 것이지만 그 이상 지간의 장대교량에 대한 활하중모형도 필요하다. WIM시스템이나 BWIM시스템과 같은 무인자동계측장비를 장기적으로 운영하고 이 시스템으로부터의 자료를 체계적으로 분석하고 관리하는 연구체계를 갖추는 것이 매우 중요하다.

감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설기술혁신사업 (03산C02-01)에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- 건설교통부(2005) **도로교 설계기준**, 한국도로교통협회
- 고현무 등(1998) **도로교 차량 활하중 및 피로하중모형 개발에 관한 연구**, 건설교통부 R&D/96-0013 최종보고서, 서울대학교
- 고현무 등(2005) **교량설계핵심기술연구단 연차보고서**, 연구보고서, 서울대학교.
- 김상효 등(1991) **도로교 설계하중의 확률론적 분석**, 최종보고서 91-SE-113-2, 한국건설기술연구원.
- 심재수, 황의승, 하준수(1996) **도로교 차량 활하중의 최대단면력 산정에 관한 연구**. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제16권, 제1-4호 pp. 387-397.
- 황학주, 김상효(1993) **도로교 최대차량하중효과 분석을 위한 모의해석기법**. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제13권, 제4호 pp. 77-86.
- 日本道路協會(2002) **道路橋示方書・同解説**, 일본도로협회
- AASHTO (1994) **AASHTO LRFD Bridge Design Specifications**, 1st Edition, Washington, D.C.
- AASHTO (1996) **Standard Specifications for Highway Bridges**, Washington, D.C.
- Ang, A. H-S. and Tang, W. (1975) **Probability Concepts in Engineering Planning and Design-Decision Risk and Reliability**. John Wiley & Sons, New York, N.Y.
- CEN (2002) **Eurocode 1. Actions on Structures**, European Committee for Standardization.
- CSA (2001) **Canadian Highway Bridge Design Code**, Canadian Standard Association, Ontario, Canada.
- Moses, F. (2001) **Calibration of Load Factors for LRFR Bridge Evaluation**. NCHRP Report 454, National Academy Press, Washington, D.C.
- MOTC (1983) **Ontario Highway Bridge Design Code**, Ministry of Transportation and Communications, Toronto, Canada.
- Nowak, A.S., Nassif, H., and DeFrain, L. (1993) Effect of truck loads on bridges. *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 6, pp. 853-867.
- Nowak, A.S. (1999) **Calibration of LRFD Bridge Design Code**. NCHRP Report 368, National Academy Press, Washington, D.C.
- Turkstra, C.J. and Madsen, H. (1980) Load combinations for codified structural design, *Journal of the Structures Division*, ASCE, Vol. 106, No. 12, pp. 2527-2543.

(접수일: 2009.1.5/심사일: 2009.2.23/심사완료일: 2009.4.13)