

도로교 최대차량하중효과 분석을 위한 모의해석기법

Simulation Technique for Estimation of Extreme Traffic Load Effects on Bridges

황학주* · 김상호**

Hwang, Hak Joo · Kim, Sang Hyo

Abstract

Recently it is reported in many countries that highway bridges are seriously damaged due to increasing volume of overloaded heavy vehicles. The safety of bridges are highly related to the design load level and the characteristics of extreme load effect induced by traffic loads during its lifetime. The maximum structural load effect during lifetime may be produced by simultaneous loading of trucks with moderate weights on a bridge rather than by single loading of extremely heavy trucks. In this study, a simulation technique to estimate extreme load effect due to traffic loadings has been developed, in which important characteristics of traffic loadings, such as heavy vehicle proportion, traffic mode, vehicle weights, headway distribution, daily traffic volume, etc., should be properly considered. In addition, sensitivity analysis on those factors have been performed.

요 지

최근 들어 중차량의 과적화와 교통량 증가에 따른 교통정체현상의 발생은 세계적인 추세이며, 이에 의한 도로교의 손상은 심각한 상태이다. 도로교의 손상도나 안전수준은 도로교 설계활하중 및 차량하중에 의해 도로교에 발생하는 하중효과의 최대치의 특성과 밀접한 관계를 보이고 있다. 최대차량하중효과는 단일 중차량에 의해서 발생하는 것보다는 상당한 중량을 가진 차량들이 동시에 재하되어 발생하는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 도로교상에 발생하는 최대차량하중효과를 중요한 교통특성을 합리적으로 반영하여 분석할 수 있는 모의분석기법을 개발하였으며, 개발된 기법을 이용하여 교량형식 및 각종 차량하중특성과 통행특성(중차량 혼입률, 연행특성, 차중모형, 차간거리, 일일교통량 등)에 대한 최대하중효과의 민감도를 분석하였다.

1. 서 론

중화물차량의 적재율 증가현상은 자동차공업의 발달과 운송사업체의 합리적인 운영에 따라 세계적

으로 나타나는 현상이며, 나아가 과적차량에 의한 도로교의 손상은 심각한 수준이다. 또한 교통량의 증가에 따른 교통정체현상도 도로교에 발생하는 차량하중효과를 상승시키는 요인이다. 즉 차량하중에 의해 도로교에 발생하는 하중효과의 최대치는 단일 중차량에 의해서 발생하는 것보다는 상당한 중량을

* 정회원 · 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수
** 정회원 · 연세대학교 공과대학 토목공학과 부교수

가진 차량들이 교통정체 등에 의해 짧은 차간거리를 유지하며 교량상에 동시에 재하되어 발생하는 경우가 많다.

따라서 도로교의 사용기간 동안에 발생하는 최대차량하중을 분석하기 위해서는 이에 영향을 주는 차량하중 및 통행특성에 대한 연구가 필요하다. 통행차량특성에 관한 연구는 국내외에서 많이 진행되었으며^(1,4), 통행차량특성을 고려한 최대차량하중효과에 대한 연구도 이루어졌다^(4,5). 일정기간 동안에 발생할 최대차량하중효과의 분석은 각종 통행차량의 특성이 복잡하게 영향을 주고 있기 때문에 해석적으로 수행하는 것은 어려우며, 따라서 모든 기존의 연구에서도 모의분석기법을 적용하고 있다. 국내에서 도로교의 설계하중과 관련된 연구로는 참고문헌 [6] 등이 있다.

특정교량에 발생할 최대차량하중효과의 수준에 영향을 주는 통행차량특성에는 중차량혼입률, 차종별 총중량모형, 주행속도 및 차간거리, 일일교통량 등이 있으며, 기존의 연구에서는 반영되지 않았던 중차량의 연행가능성을 나타내는 차종별 연행특성이 주요 영향인자로 분석된다. 따라서 본 연구에서는 차종별 연행특성을 포함한 차량하중 및 통행특성을 합리적으로 반영할 수 있으며, 일반적인 모의분석기법에서 요구되는 과다한 계산량을 줄일 수 있는 기법을 개발하고자 한다. 또한 개발된 기법을 이용하여 현행 설계활하중이 내포하고 있는 안전수준을 분석하고, 최대차량하중효과의 교량특성 및 통행특성에 대한 민감도를 분석하고자 한다. 단, 충격계수에 관한 부분은 본 연구범위에서 제외하였다. 즉 현행시방서에서 제시하고 있는 충격효과 만큼이 실제차량에 의해 발생된다고 가정하였다.

2. 차량하중 및 통행특성의 모형

본 연구에서 이용한 차량하중모형 및 통행특성은 참고문헌[1]의 결과에 기초하였다. 따라서 여기에서는 중요한 특성만 요약하여 언급하고자 한다. 차량의 기본형식은 승용차 및 소형트럭을 반영하는 P형을 비롯하여 B형(버스), T형(중형트럭), TT형(렌덤축 대형트럭), ST형(세미트레일러) 등의 5종으로 구성하였다. 차량형식별 총중량의 확률적 모형은 P

형에서는 단일모드를 가지는 단봉분포로, 나머지는 적재상태에 따라 나타나는 두개의 모드를 가지는 쌍봉분포로 모형화하였으며 각 모드들은 정규분포나 대수정규분포함수에 의해 확률모형화되었다. 각 모형에 있어 총중량 상한치가 주어져 있으며, 각 차량형식별로 결정된 총중량의 축중분배모형을 이용하여 축하중을 모의발생하게 된다.

차량통행특성에는 일일교통량, 차량혼입률, 주행속도 및 차간거리 등이 반영되었으며, 도로교의 최대차량하중효과에 많은 영향을 줄 것으로 예측되는 중차량의 연행특성을 변이확률행렬(transition probability matrix)를 이용하여 모형화하였다. 중차량 연행모형은 국도상에서 조사된 자료를 이용하여 결정되었으며, 예를 들어 국도상 교통량에서 ST형의 혼입률은 3.32%인데 비하여 ST형 뒤에 ST형이 연행하는 비율은 11.16%로 3배 이상 증가하는 것으로 나타났다.

3. 최대차량하중효과 분석기법

3.1 개요

도로교 설계하중의 안전수준을 분석하기 위해서는 도로교의 사용기간 동안에 발생할 최대차량하중효과를 분석하여야 한다. 이를 해석적으로 분석하기 위해서는 복잡한 통행특성을 모두 반영하는 것이 거의 불가능하다. 따라서 대부분의 연구⁽⁴⁾에서 모의분석기법을 이용하고 있다. 이러한 모의분석기법에서는 일정한 단위교통량을 모의발생하여 대상교량상에서 이동시키며 발생하는 최대하중효과를 분석하고, 이를 반복적으로 수행하여 최대하중효과의 확률적 특성을 분석하고 있다. 따라서 요구되는 계산량이 매우 많게 된다.

본 연구에서는 이러한 과다한 계산량을 줄이기 위해 전체 차량행렬을 모의발생시키는 대신에 최대하중효과를 발생시킬 가능성이 높은 차량행렬만을 모의발생하여 분석하는 기법을 이용하였다. 즉 참고문헌[1]의 분석결과를 살펴보면 모든 교량형식에서 TT형과 ST형의 차량이 가장 불리한 하중효과를 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서는 일정단위교통량에 의해 발생하는 차량하중효과의 최대치는 단위교통량중에서 가장 큰 중량을 가지는 TT형이나

ST형의 차량이 교량상의 가장 불리한 위치에 재하되었을 때 최대차량하중효과가 발생한다고 가정하였다.

이러한 가정하에서는 단위교통량 중의 최대중량은 아니나 상당한 중량의 차량들이 연행하여 최대하중효과를 일으키는 경우가 무시될 수 있으나 본 연구에서의 통행모형과 같이 중차량의 연행특성을 반영할 수 있는 경우와 최대하중효과 분석대상기간이 선정된 단위교통량의 통행기간에 비해 매우 길게 되면 그 오차는 작아지게 된다. 즉 년최대하중효과를 발생시키는 차량행렬의 주요 중차량은 차종별 중량 특성상 TT형이나 ST형이 될 것이며, 이 중차량은 최소한 단위교통량중의 TT형이나 ST형의 최대중차량이 될 것이다. 본 연구에서의 단위교통량은 일일교통량이며 사용한 기법의 타당성을 분석하기 위한 검증이 실시되었다.

참고문헌[4]에서는 이러한 분석을 위하여 단위교통량을 모의발생하여 이들 중에서 단일차량의 총중량의 크기가 상위 10위에 해당하는 차량들을 포함하는 차량행렬에 의한 하중효과를 분석하여 이들 중의 최대치를 단위교통량의 최대치로 선정하는 기법을 이용하였다.

3.2 단위교통량의 차종별 최대하중

단위교통량에 대한 차종별 최대하중의 모형은 극한값 이론에 의해 분석될 수 있다. 분석대상이 되는 TT형과 ST형의 총중량 모형은 모두 총중량 상한치를 가지고 있는 모형이다. 따라서 이들의 극한값 모형은 Gumbel의 Type III 분포형을 따를 것이다. 즉 단위교통량에서 특정차종의 통행량은

$$n_i = N \times P_i \quad (1)$$

여기에서, N = 단위교통량

P_i = 특정차종의 단순혼입률

이며, 따라서 n_i 대의 차량중 최대중량 S의 모형은 앞에서 언급한 바와 같이 Type-III 분포를 가진다. 즉,

$$F_S = \exp\left[-\left(\frac{\omega - S}{\omega - w_n}\right)^k\right] \quad (2)$$

여기에서 ω 는 상한치이며 w_n 과 k는 Type-III 분

포의 특성치로써, w_n 은 i-형 차종의 총중량 분포모형 F_{w_i} 에 의하여 다음과 같이 정의된다

$$F_{w_i}(w_n) = 1 - \frac{1}{n_i} \quad (3)$$

특성치 k는 식 4와 같이 정의되며,

$$1 + \left[\frac{\sigma_S}{\omega - \mu_S}\right]^2 = \frac{\Gamma\left[1 + \frac{2}{k}\right]}{\Gamma^2\left[1 + \frac{1}{k}\right]} \quad (4)$$

여기에서

$\mu_S = n_i$ 대의 차량중 최대중량 S의 평균

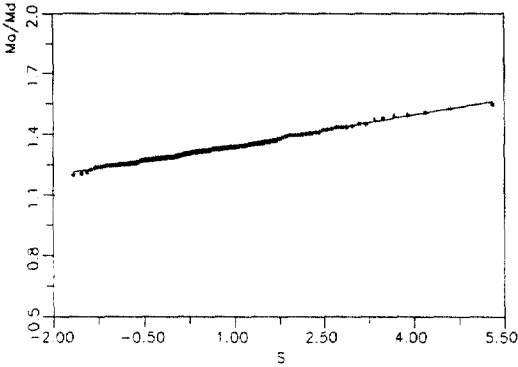
$\sigma_S = n_i$ 대의 차량중 최대중량 S의 표준편차

이며, Γ 는 gamma함수이다. 특성치 k를 다양한 통행량 규모에 대해서 모의분석한 결과, ST형은 $k=20$ 을 가지며, TT형은 $k=12$ 를 가지는 것으로 분석되었다.

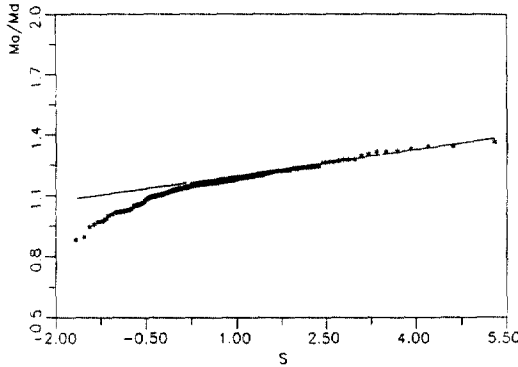
3.3 단위교통량에 의한 최대하중효과

앞에서 설명하였듯이 임의의 단위교통량에 의해 교량에 발생할 수 있는 최대하중효과는 단위교통량 중에서 최대중량을 가지는 TT형이나 ST형이 교량상에 가장 불리하게 재하되는 경우에 발생한다고 가정하였다. 따라서 TT형과 ST형 차종의 단위교통량에서의 최대중량차량을 3.2절에서 설명한 모형을 이용하여 모의발생한 후 가장 불리한 위치에 재하되게 하고, 나머지 선행 또는 연행되는 차량을 차량연행모형에 의해 모의배치하여 하중효과를 분석한다.

이와 같이 분석된 하중효과는 기본적으로 여러 차량의 복합적인 하중효과의 합으로 표시되며, 또한 이러한 하중효과의 최대값에 대한 분석이므로 Gumbel의 극한값 분포 Type-I에 의해 모형화하는 것이 합리적이다. 따라서 각 단위교통량에 대해 모의분석된 최대하중효과를 Gumbel의 Type-I 분포를 이용하여 모형화하며, 특히 하중효과의 상부분포모형이 중요하므로 모의분석된 단위교통량의 최대하중효과들 중에서 상부 10%에 대한 모형화를 실시하였다. 이는 Gumbel의 Type-I 확률용지에 도식된 모의분석결과와 분포형태들을 분석하여 결정한 것



(a) 30 m 단순교 지간 중앙부



(b) 30 m 3경간 연속교 외측경간 중앙부

그림 1. 단위교통량에 의한 최대하중효과의 모의 분석결과

이다. 그림 1은 30 m 단순교와 90 m 3경간연속교에 있어 각각 지간 중앙부와 외측경간 중앙부에서의 발생최대모멘트(M_d)에 대한 분석결과로 상부 10% 부분에 대한 Gumbel의 Type-I 분포의 적합성을 보여주고 있다. 그림에서 종축은 설계활하중모멘트(M_d)에 대해 표준화 되었으며, S는 Type-I 변수이다.

본 연구에서 선정한 단위교통량은 기본적으로 대 상교량의 일일교통량이다. 그러나 지간장이 비교적 짧은 교량(지간장 40 m 이하)에서는 중요차량 1대에 의한 하중효과가 선행이나 연행하는 차량에 의한 하중효과보다 월등히 크므로 1일 교통량의 차종별 최대중량을 이용한 모의분석기법은 정확도가 떨어 진다. 따라서 단경간교량에서는 연간 교통량의 차 종별 최대중량모형을 이용하여 연간 최대하중효과를 직접적으로 분석하였다. 또한 지간장이 상대적으로 긴 경우(영향길이 80 m 이상)에는 앞에서 언급한

바와 같이 일일교통량중에서 차종별 최대중량의 차 량이 재하되는 경우보다, 일일최대중량은 아니나 상당한 중량의 차량들이 연행하여 더 큰 하중효과를 발생시키는 경우가 있으므로 단위교통량을 일일교 통량의 25% 씩으로 세분하여 년최대하중효과를 분 석하였으며, 이를 일일교통량에 의한 결과와 비교 하였다. 자세한 것은 4장에서 분석하고자 한다.

3.4 년최대하중효과와 사용기간 최대하중효과

3.3 절에서 분석한 단위교통량에 의한 최대하중 효과를 이용하여 특정기간중의 최대하중효과를 분 석할 수 있다. 즉 단위교통량에 의한 최대하중효과를 Gumbel의 Type-I 분포를 이용하여 모형화하였으 므로, 특정기간중의 최대하중효과는 다시 Type-I 극 한값 분포를 따르게 된다. 예를 들어 단위교통량으로 일일교통량을 선정하고, 년중교통량과 통행특성이 일정한 특성을 가진다고 가정하면 년간최대하중효과 (S_Y)는 Type-I 극한값분포로서 다음과 같은 특성치를 가진다. 즉 평균과 변이계수는

$$E[S_Y] = \mu_s \left(1 + \frac{\sqrt{6}}{\pi} \delta_s \cdot \ln 365 \right) \quad (5)$$

$$\delta_{S_Y} = \mu_s \cdot \delta_s / \mu_{S_Y} \quad (6)$$

이 된다. 여기에서 μ_s 와 δ_s 는 단위교통량(일일교통량) 에 의한 최대하중효과의 평균과 변이계수이며, μ_{S_Y} 와 δ_{S_Y} 는 년간최대하중효과의 평균과 변이계수이다. 식 5와 식 6에 의해 구해진 년간 최대하중효과는 각각 TT형과 ST형 차종을 중심으로 한 특정차량행렬의 년간 최대하중효과의 특성치이다.

따라서 최종단계로 전체 통행차량에 의한 년간 또는 사용기간 최대하중효과의 확실적인 특성이 분 석되어야 하는데, 특정차량행렬에 의한 최대하중효 과의 발생특성상 Poisson 확률과정을 이용하여 분 석하는 것이 적합하다.

즉 대상교량의 한계상태(M_o)가 초과될 가능성은

$$\text{Prob}[M_o \leq M_d] = 1 - \exp\left[-\sum \alpha_i T_i\right] \quad (7)$$

으로 평가되며, 여기에서 T_i 는 사용기간 또는 분석 대상기간이며, α_i 는 특정차량행렬에 의한 단위기간 동안의 초과발생빈도로서 단위기간을 1년으로 하였 을 때

$$\alpha_i = \text{Prob}[M_o \leq S_{Vi}] \quad (8)$$

이 된다. 본 연구에서 $i=1\sim 2$ 이며, $i=1$ 은 TT형을 중심으로 하는 차량행렬이며, $i=2$ 는 ST형을 중심으로 하는 차량행렬이다.

4. 현행 설계활하중의 분석 및 민감도 분석

4.1 교량형식에 따른 분석

현행 설계활하중이 내포하고 있는 안전수준을 분석하기 위해 다양한 교량형식에 대하여 사용기간 중에 발생하는 최대하중효과의 수준을 분석하였다. 이를 위해 선정된 차량통행모형은 1일 교통량 10,000대, 중차량 혼입률 25%인 통행모형이다. 중차량 혼입률 25%는 국도상에서 조사된 자료에서 평균수준의 중차량 혼입률이나, 10,000대는 평균 수준을 상회하는 교통량이다.⁽¹⁾ 이를 선정한 이유는 현행 설계활하중이 내포하고 있는 안전수준을 분석함에 있어 다소 불리한 하중조건을 가정하고자 한 것이다.

분석대상교량은 임의로 선정하여 30m~200m 단경간교량과 30~30m, 45~45m, 60~60m 2경간 연속교 및 30~30~30m, 45~45~45m, 60~60~60m 3경간 연속교이다. 표 1에는 년최대하중효과의 비초과가능성 95% 및 98% 특성값이 영향길이별로 정리되어 있다. 여기에서 영향길이는 교량설계시 대상지점에 가장 불리하도록 재하하는 경우의 총 재하길이이다. 단 3경간 연속교의 외측경간 중앙부에 대한 영향길이는 타 외측경간의 길이보다 작으므로(그림 2) 타 외측경간의 길이를 제외한 길이이다.

표 1에 정리된 값은 현행 설계활하중(DB24 또는 DL24)에 의한 하중효과에 의해 표준화된 수치이다. 즉 단순교 영향길이 30m에 대한 95% 특성 값 1.99는 현행 1등급 표준트럭하중에 의한 하중효과의 1.99배 되는 하중효과가 초과발생할 가능성이 5%인 것을 나타낸다. 즉 20년 재현빈도에 해당하는 수준이다. 표 1의 발생위치에서 예를 들어 영향길이 90m에서 45SP3#2는 45~45~45m 3경간 연속교에서 2번째 하중효과검토지점을 의미하며, 각 교량형식별 하중효과검토지점은 그림 2에 표시되어 있다. 표 1의 결과를 분석하면 지간장 40m 단순교의 최대하중효과는 지간중앙점에 발생하는데 95% 최대값이 설

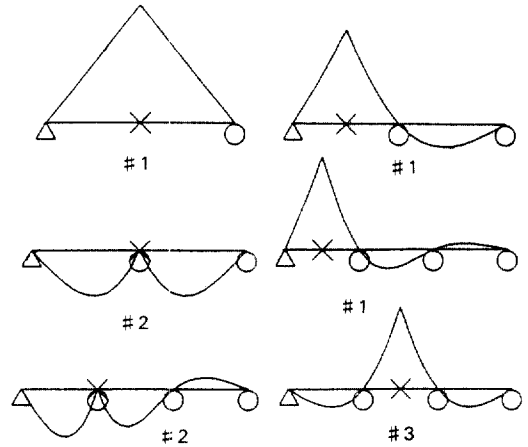


그림 2. 대상지점에서의 휨모멘트의 영향선

계휨모멘트의 2.16배 수준이며, 98% 최대값은 2.24배 수준이다. 참고로 본 연구에서 이용한 차종 및 차량 총중량모형에서 ST형의 상한치(105 ton)를 40m 단순교에 단독재하시켰을 경우, 설계하중효과의 2.18배 수준의 하중효과가 발생하며, 도로상에서 조사된 최대 ST형 차량(90.6 ton)⁽¹⁾의 단독재하시의 하중효과가 설계하중효과의 1.88배인 점을 감안하면 본 연구의 분석결과는 타당한 것으로 판단된다.

본 연구에서 분석한 하중효과비는 현행 설계활하중의 단일차선 재하에 의한 하중효과와 모의발생한 단일차선 통행차량행렬에 의한 하중효과의 비이다. 그러나 2차선 교량의 경우 설계시에는 2차선 재하를 하는 반면에, 실제 통행시에는 본 연구에서 가정하는 최대하중효과를 유발하는 재하형태가 2차선에 동시에 발생할 가능성이 적다. 또한 설계하중의 횡방향 재하위치와 실제 통행하는 차량의 재하위치에도 차이가 있다. 따라서 실제 교량에서 발생가능한 최대하중효과 대 설계하중효과비는 이보다 낮아질 것이다. 이러한 특성은 교량 상부구조의 횡분배 특성에 따라 변화하는 것으로 그 정도를 분석하기 위하여 2개의 대상교량을 선정하였다. 그림 3과 같은 횡단면을 가지는 30m 및 60m 단경간교량에 대하여 외측거더에서의 설계모멘트와 본 연구에서 모형화된 차량행렬에 의한 최대 모멘트를 비교하였다. 여기에서 설계모멘트는 현행 도로교 시방서에 준하여 산정하였으며, 모형화된 차량행렬은 차선의 중앙에 재하되는 것으로 가정하였다. 또한 한 차선에 정체

표 1. 교량형식에 따른 년최대하중효과

영향길이		단순교	2경간연속교		3경간연속교		
30 m	95%	1.99	1.90		1.78	1.78	
	98%	2.05	1.96		1.80	1.84	
	발생위치	30SP1 # 1	30SP2 # 1		30SP3 # 3	30SP3 # 1	
40 m	95%	2.16					
	98%	2.24					
	발생위치	40SP1 # 1					
44 m	95%	2.07					
	98%	2.11					
	발생위치	44SP1 # 1					
45 m	95%		2.07		1.92	1.99	
	98%		2.15		1.99	2.06	
	발생위치		45SP2 # 1		45SP3 # 1	45SP3 # 3	
50 m	95%	2.11					
	98%	2.19					
	발생위치	50SP1 # 1					
60 m	95%	2.01	1.90	1.90	1.75	1.84	1.89
	98%	2.09	1.98	2.00	1.83	1.91	1.97
	발생위치	60SP1 # 1	60SP2 # 1	30SP2 # 2	30SP3 # 2	60SP3 # 1	60SP3 # 3
80 m	95%	1.95					
	98%	2.04					
	발생위치	80SP1 # 1					
90 m	95%		1.64		1.68		
	98%		1.72		1.77		
	발생위치		45SP2 # 2		45SP3 # 2		
100 m	95%	1.83					
	98%	1.91					
	발생위치	100SP1 # 1					
120 m	95%	1.68	1.60		1.58		
	98%	1.76	1.69		1.67		
	발생위치	120SP1 # 1	60SP2 # 2		60SP3 # 2		
160 m	95%	1.61					
	98%	1.70					
	발생위치	160SP1 # 1					
200 m	95%	1.47					
	98%	1.56					
	발생위치	200SP1 # 1					

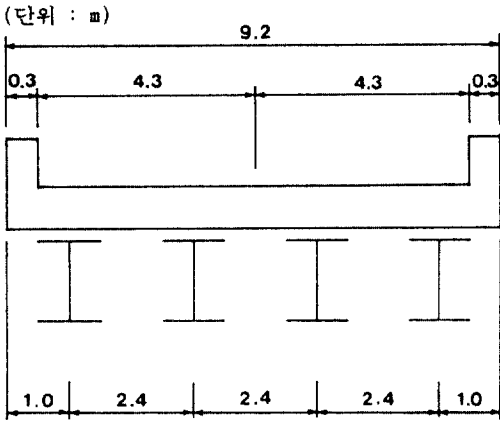


그림 3. 모의분석 대상교량

행렬이 발생하였을 때, 다른 차선에는 통상적인 주행행렬이 통행하는 것으로 가정하였다. 분석된 결과는 95% 최대값이 30m에서 설계모멘트 대비 1.56의 수준이며, 60m에서는 1.48의 수준으로 나타났다. 즉 단일차선 대비로 분석한 결과와 비교하여, 30m에서는 78%(1.99:1.56), 60m에서는 74%(2.01:1.48)의 수준이다. 따라서 2차선 교행교량인 경우, 단일차선 대비의 결과의 약 75% 수준으로 판단되나, 보다 일반적인 결론을 내리기 위해서는 다양한 교량형식에 대하여 분석하여야 할 것이다.

전체적인 경향을 분석하면 30m 지간장과 같이 매우 짧은 경우를 제외하면 영향길이가 길어짐에 따라 최대하중효과가 낮아지며, 단순교보다는 연속교에서 작아지는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 그림 4에서보다 명확하게 알 수 있는데 이는 연속경간수 및 영향길이의 소분류별 평균값을 44m 지간장 단순교의 결과를 표준치로 하여 정리한 결과이다. 44m 지간장의 단순교를 표준치로 선정한 것은 이를 중심으로 DB하중과 DL하중이 구별되기 때문이다. 전반적인 수준은 95% 최대값에서 0.71~1.04의 범위로 최대 33% 정도의 차이를 보이고 있다. 연속교에서는 동일한 수준의 영향길이를 가진 단순교에 비하여 전반적으로 5~10% 정도 낮은 수준을 보이고 있다. 98% 최대값에서도 유사한 경향을 보이고 있다.

4.2 단위교통량 선정에 따른 민감도 분석

3장에서 설명하였듯이 차량하중에 의한 특정기간

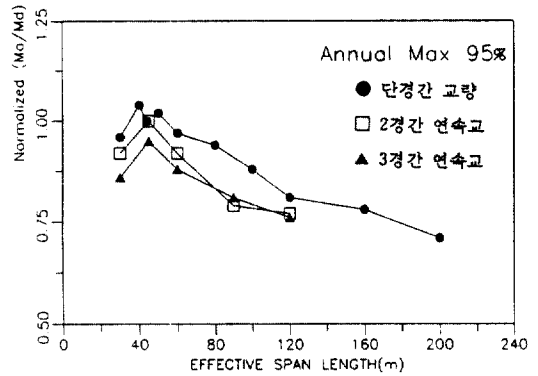


그림 4. 연속경간수 및 영향길이에 따른 최대하중효과치의 변화

중의 최대하중효과치의 분석에서는 단위교통량의 선정이 중요하다. 일일교통량을 단위교통량으로 선정하였을 경우, 지간장이 비교적 짧은 경우와 긴 경우에는 실제의 최대하중효과 보다 낮은 수준으로 평가된다. 따라서 비교적 지간장이 짧은 교량에서는 단위교통량을 년 교통량으로 분석하여야 하며, 장대교량에서는 일일교통량보다 더 세분된 단위교통량을 이용하여야 한다.

장대지간장의 교량에서 일일교통량보다 세분된 단위교통량을 이용할 경우, 세분된 모든 단위교통량이 정체차량행렬로 통행한다고 가정하는 것은 타당하지 못하다. 즉 세분된 단위교통량에서의 차종별 최대중량의 차량이 교량상에 가장 불리하게 재하될 때의 선행 및 연행차량이 정체행렬로 재하된다고 가정하는 것은 통상적인 주행특성으로 미루어 합리적이지 못하다. 따라서 본 민감도 분석에서는 일일교통량을 4등분하여 그 중 2개의 단위교통량은 정체행렬로 가정하고, 나머지 2개의 단위교통량은 통상적인 주행행렬로 가정하여 분석하였다.

표 2는 단경간 교량에서 일일교통량을 단위교통량으로 선정한 결과와 년교통량을 단위교통량으로 선정한 결과를 비교한 것이다. 일일교통량은 10,000대이며, 중차량혼입률은 25%인 경우이다. 비교표에서 알 수 있듯이 영향길이 40m 이하에서는 일일교통량을 단위교통량으로 이용한 결과가 다소 낮은 수준(5~10%)으로 나타났으나, 44~60m에서는 근사한 결과를 주며 90m에서는 일일교통량에 의한 결과가 매우 높게 나타나고 있다. 따라서 4.1 절에

표 2. 단위교통량 규모에 따른 민감도 분석
(단경간 교량 : 95% 최대값)

영향길이(m)	30	40	44	50	60	90
일일교통량	1.78	2.07	2.01	2.07	1.90	1.94
년교통량	1.99	2.16	2.07	2.11	1.90	1.39

표 3. 단위교통량 규모에 따른 민감도 분석
(장경간 교량)
(a) 98% 최대값

단위교통량	영향길이	80	100	120		
				단경간	2경간	3경간
일일교통량		2.04	1.91	1.76	1.69	1.67
25%교통량	2-5	2.05	1.99	1.80	1.72	1.70
	2-10	2.05	1.92	1.78	1.72	1.70

(b) 95% 최대값

단위교통량	영향길이	80	100	120		
				단경간	2경간	3경간
일일교통량		1.95	1.83	1.68	1.60	1.58
25%교통량	2-5	1.97	1.85	1.73	1.64	1.62
	2-10	1.96	1.84	1.70	1.63	1.61

서는 영향길이가 짧은 경우에는 두가지의 결과를 비교하여 큰 값을 취하였다.

영향길이가 긴 교량에서 일일교통량을 이용한 결과와 일일교통량의 25%를 단위교통량으로 이용한 결과비교는 표 3에 정리되어 있다. 여기에서는 앞에서 언급하였듯이 2개의 단위교통량은 정체행렬로 가정하여 평균 차간거리를 2m로 하여 차량을 모의 배치하였으며, 나머지 2개의 단위교통량은 통상주행으로 가정하여 평균 차간거리를 5m 또는 10m로 모형화하여 분석한 결과가 정리되어 있다. 표 3으로부터 앞에서 분석한 것과 같이 영향길이가 길어짐에 따라 세분된 단위교통량을 이용한 결과가 다소 높은 결과를 주고 있으나, 그 차이는 1~2% 수준으로 매우 미미한 것을 알 수 있다. 따라서 4.1절에서의 분석에서는 이를 무시하였다.

표 4. 중차량 혼입률에 따른 최대하중효과의 변화
(95% 최대값)

영향길이	중차량 혼입률	15%	25%	35%
		30 m	단순교	1.90
60 m	단순교	1.85	2.01	2.20
	2연속교	1.78	1.90	2.04
	3연속교	1.69	1.84	1.96
100 m	단순교	1.71	1.83	1.98
120 m	2연속교	1.47	1.60	1.69
	3연속교	1.42	1.58	1.63

4.3 통행특성에 대한 민감도 분석

4.3.1 중차량 혼입률

본 연구에서는 전국의 차량혼입률을 분석한 결과⁽¹⁾로부터 대표적인 중차량 혼입률을 15%, 25% 및 35%의 3가지로 선정하였다. 표 4는 일일교통량 10,000대에 대한 결과를 비교한 것이다. 중차량 혼입률 25%를 기준으로 하였을 때, 15%에서는 5~10% 정도 낮은 수준으로 나타났으며, 35%에서는 5~9% 정도 높은 수준으로 나타났다. 그러나 30m와 같은 단경간교량에서는 중차량 혼입률에 따른 변화가 비교적 작은 것(5% 수준)을 제외하면 영향길이에 따른 특별한 경향은 나타나지 않고 있다. 60m 단순교에서는 중차량혼입률 15%와 35%간에 19%의 차이를 보이고 있어 중차량혼입률의 중요성을 보여주고 있다.

4.3.2 연행모형 및 단순혼입모형

본 연구에서는 기존의 다른 연구들에서 반영되지 못했던 중차량의 연행특성을 반영할 수 있는 모형을 이용하였다. 따라서 연행특성의 반영에 따른 영향을 분석하기 위해 동일한 중차량혼입률에 대하여 본 연구에서 선정된 연행모형과 단순혼입모형을 적용한 결과들을 비교하였다. 표 5에 정리된 것과 같이 최대 15%(60m 단순교, 35%)까지 차이가 나며 전반적으로 5~10% 정도의 차이를 보이고 있어, 교량의 안전수준분석에서 통행차량의 연행특성이 합리적으로 반영되어야 한다는 것을 알 수 있다.

표 5. 연행모형과 단순혼입모형에 의한 최대하중효과 (95% 최대값)

중차량혼입률		35%		25%		15%	
영향길이		연행	단순	연행	단순	연행	단순
		30 m	단순교	2.08	1.99	1.99	1.93
60 m	단순교	2.20	1.88	2.01	1.86	1.85	1.71
	2연속교	2.04	1.82	1.90	1.81	1.78	1.65
	3연속교	1.96	1.74	1.84	1.70	1.69	1.65
100 m	단순교	1.98	1.78	1.83	1.75	1.71	1.62
120 m	2연속교	1.69	1.59	1.60	1.53	1.47	1.32
	3연속교	1.63	1.46	1.58	1.46	1.42	1.33

4.3.3 차종별 총중량 상한치

본 연구에서 이용한 차량모형들은 총중량의 상한치를 가지고 있다. 도로교에 발생하는 최대하중효과와 수준에 많은 영향을 미치는 ST형의 경우 최대상한치가 총중량 105 ton이다. 이는 도로상에서 실측된 자료들로부터 ST형의 각 축에 있어 측정 최대축하중들의 조합에 의해 결정된 값이며, 실제 측정된 ST형의 단일 최대총중량이 90.6 ton⁽¹⁾에 이르는 것으로 미루어 충분히 발생 가능한 중량이다. 그러나 총중량 상한치가 분석결과에 주는 영향을 분석하기 위하여 ST형의 상한치를 105 ton에서 95 ton으로 하향조정된 모형에 의한 결과를 비교 분석하였으며, 결과는 그림 5에 정리되어 있다. 분석 결과는 상한치 105 ton의 경우와 비교하여 2% 미만의 차이를 보여주고 있다.

4.3.4 차간거리

통행차량에 의해 교량에 발생하는 하중효과와 수준은 통행차량의 중량은 물론, 차간거리와 높은 상관관계를 가진다. 본 연구에서는 단위교통량에서의 차종별 최대중량차량이 교량상에 가장 불리하게 재하될 때의 차량행렬을 정정상태로 가정하여 평균차간거리를 2m로 모형화하였다. 이는 실제 도로상의 통행특성을 조사 분석한 결과에 기초하여 결정한 모형이다. 그러나 앞에서 언급하였듯이 차간거리모형은 매우 중요한 요소이므로 이에 대한 민감도 분석을 실시하였으며, 그 결과는 그림 6에 정리되어

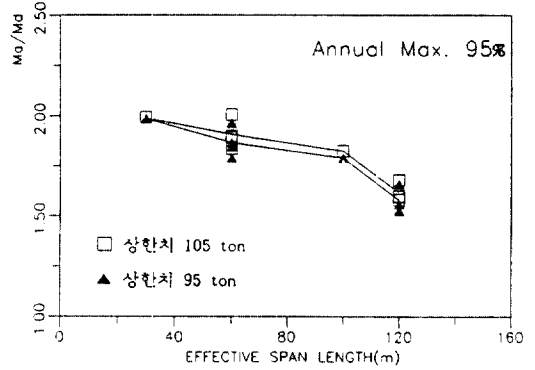


그림 5. ST형 총중량 상한치에 대한 민감도 분석

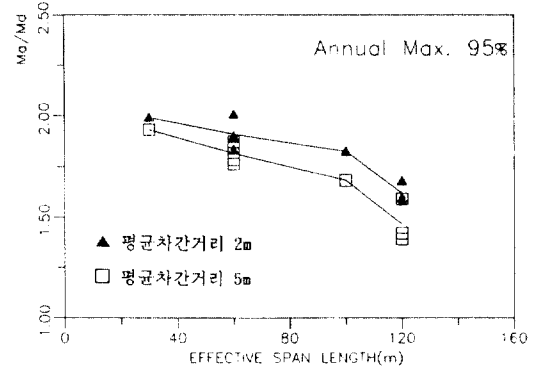


그림 6. 차간거리모형에 따른 민감도 분석

표 6. 일일교통량에 따른 최대하중효과와 변화 (95% 최대값)

영향길이		일일교통량	7,500대	10,000대	12,500대
30 m	단순교		1.97	1.99	2.01
	단순교		1.98	2.01	2.02
60 m	2연속교		1.89	1.90	1.91
	3연속교		1.83	1.84	1.85
100 m	단순교		1.82	1.83	1.83
120 m	2연속교		1.59	1.60	1.60
	3연속교		1.58	1.58	1.59

있다. 예측할 수 있듯이 평균차간거리 5m로 모형화된 차량행렬의 결과가 평균차간거리 2m의 결과보다

3~10% 정도 낮은 수준으로 평가되었으며, 영향지간장이 길어질수록 차이가 커지는 것을 알 수 있다. 따라서, 최대하중차량 재하시의 통행조건을 정체상태로 가정하는 것이 다소 과대분석으로 나타날 수 있으나 그 차이가 10% 미만이며, 구조물의 안전적인 측면에서는 타당한 것으로 판단된다.

4.3.5 일일교통량

교량상의 통행량 규모가 최대하중효과에 미치는 영향을 분석하기 위하여 다양한 경간장의 교량에 대해 일일교통량 7,500대, 10,000대, 12,500대를 각각 적용하여 분석하였다. 중차량 혼입률은 25%로 고정하였다. 표 6에 정리되어 있듯이 특정기간에 발생할 수 있는 최대하중효과의 수준은 교통량 규모와 큰 관계를 가지지 않으며, 특히 영향길이가 길어질수록 변화가 없는 것으로 나타났다. 즉, 특정단위차량의 중량보다는 연행하는 차량들에 의한 복합적인 하중효과가 중요한 것으로 분석된다. 본 연구에서는 정체차량행렬의 발생가능성을 교통량 규모에 관계 없이 일정한 것으로 모형화하였다. 이러한 모형의 영향은 안전측의 분석결과로 나타날 것이나 교통량 규모에 따라 차이가 있는 정체행렬의 발생가능성을 반영하지 못하고 있다. 이러한 점을 차량통행모형에 반영하기 위해서는 관련된 자료수집이 보다 많이 이루어져야 할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 차량하중에 의해 도로교에 발생할 수 있는 하중효과의 최대치를 분석할 수 있는 기법을 개발하고, 이를 이용하여 교량형식별로 최대차량하중효과의 특성을 분석하였다. 또한 통행차량의 각종 특성치(중차량혼입률, 연행특성, 차종별 총중량모형, 차간거리, 일일교통량 등)에 대한 최대하중효과의 민감도를 분석하였다.

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 본 연구에서 제시한 최대차량하중효과 분석기법은 통행차량의 다양한 특성을 합리적으로 반영할 수 있으며, 타당한 결과를 얻을 수 있었다.

2) 교량형식별로 분석한 최대차량하중효과의 결과로부터 시간장 40 m 내외의 단순교가 가장 불리한 것으로 나타났으며, 영향길이가 길어질수록 최대하

중효과의 수준이 낮아진다. 동일한 영향길이에 있어서는 단순교가 연속교보다 불리한 것으로 나타났다.

3) 최대차량하중효과는 중차량혼입률 및 연행특성에는 민감한 변화를 보이고 있으나, 차종별 총중량상한치, 차간거리, 일일교통량 등에 대해서는 비교적 완만한 민감도를 보이고 있다.

4) 본 연구의 분석결과에 의하면 최대차량하중효과의 수준은 교량형식별로, 또한 통행차량의 특성에 따라 다양하게 변하고 있다. 따라서 최대하중효과에 대한 도로교의 안전수준도 이에 따라 많은 차이를 가지게 되므로, 도로교의 설계하중 선정에도 이러한 특성이 반영될 수 있다면 보다 합리적이며 일정한 수준의 안전도를 확보할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단의 1991년도 자유공모과제 연구비 지원에 의해 연구되었다. 연구비 지급으로 본 연구를 가능하게 해준 재단당국에 감사를 드린다.

참 고 문 헌

1. 김상효, 박홍석, "도로교 차량하중 및 통행특성에 관한 연구", **대한토목학회 논문집** 제12권 제4호, 1992. 12.
2. Csagoly, P.F., and Knobel, Z., "The 1979 Survey of Commercial Vehicle Weights in Ontario", Ministry of Transportation and Communications, MTC Report RR-230, Downsview, Ontario, 1981.
3. Jacob, B., Maillard, J.B., and Gorse, J.F., "Probabilistic Traffic Load Models and Extreme Loads on a Bridge", 5th Int. Conf. on Structural Safety and Reliability, 1989, PP1973~1980.
4. 阪神고속도로공단, 阪神고속도로의 설계하중체계에 관한 조사연구, 설계하중위원회보고서, 1986.
5. Ghosn, M.J., Bridge load Modelling and Reliability Analysis, Ph.D. Thesis, Case Western Reserve Univ., 1984.
6. 오병환, "교량구조물의 합리적인 설계하중 결정 및 설계기준", **대한토목학회 논문집** 제11권 제4호, 1991. 12.

(接受: 1993. 7. 20)