

고속도로 교량의 개선된 안전성 평가방안을 위한 실측자료에 기초한 공용 내하력 검토

The Examination of Load Carrying Capacity Based on Existing Data for Improved Safety Assessment Method of Expressway Bridges

이종호* · 한성호** · 신재철***

Lee, Jong Ho · Han, Sung Ho · Shin, Jae Chul

Abstract

The safety of expressway bridges was estimated by checking the external condition rank based on the nondestructive inspection and material test and by measuring load carrying capacity based on the result of load test. Although the load carrying capacity of the bridges was clearly low compared to the design standard, it was examined that many of the bridges have good external condition rank relatively. Also, it can be assured that load carrying capacity shows a considerable difference according to various condition even though the bridges have similar construction year and a structural type. Therefore, this study showed various problems of the current safety measurement of expressway bridges by considering the status of the expressway bridges, external condition rank, and method of safety diagnosis and repair, rehabilitation for maintenance. Based on the existing data of over 400 expressway bridges, the load carrying capacity was analyzed quantitatively considering bridge type, serviced life, design live load, external condition rank and traffic count as variables. The result of this study will be expected to provide the basic information for a reasonable safety assessment of expressway bridge.

Keywords : *expressway bridges, external condition rank, load carrying capacity, safety assessment*

요 지

고속도로 교량의 안전성은 주요 구조부재의 정밀육안검사, 비파괴 현장시험 및 재료시험 등의 결과를 바탕으로 외관 상태 등급을 검토하고, 현장재하시험 결과에 의해 공용 내하력을 산정함으로써 평가되고 있다. 그러나 교량의 공용 내하력이 설계 기준에 비하여 상당히 낮은 상태임에도 불구하고, 실제 외관 상태등급은 비교적 양호한 교량이 상당수 있는 것으로 검토되고 있다. 또한 비슷한 준공시기 및 구조형식을 갖는 교량이라도 여러 가지 조건에 따라 공용 내하력은 큰 차이를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 고속도로 교량의 현황, 외관 상태등급 및 유지관리 위한 안전진단 및 보수·보강방안 등을 고찰한 후, 기존 고속도로 교량의 안전성 평가에 관한 다양한 문제점을 제시하였다. 400여 개소의 고속도로 교량 실측자료를 기초로 교량형식, 공용기간, 설계활하중, 외관 상태등급 및 교통량을 변수로 하여 공용 내하력을 정량적으로 비교·분석하였다. 본 연구결과는 합리적인 고속도로 교량 안전성 평가를 위한 기초자료를 제공할 것으로 기대된다.

핵심용어 : 고속도로 교량, 외관 상태등급, 공용 내하력, 안전성 평가

1. 서 론

고속도로망의 주요 시설물인 교량은 2008년 12월 현재 고속도로의 총연장 2,804 km상에 3,419개소가 건설되었다(한국도로공사(2008)). 교량의 안전점검, 진단 및 보수·보강 등 유지관리에 대한 관심은 공용연수가 증가와 더불어 열화 손상이 급증함에 따라 국·내외적으로 매우 높아지고 있다(박창호 등(2007)). 따라서 현재 정기적 검사 및 안전도 판정 등은 교량의 종류, 사용목적, 요구 성능을 고려하여 일정 간

격으로 수행되고 있다(건설교통부(2003)). 교량 점검은 외관 상태를 파악하여 이상 및 손상을 조기에 발견함으로써, 안전하고 원활한 기능 확보 및 합리적인 유지관리 자료를 획득하기 위한 수단이다. 이러한 교량 점검은 일반적으로 정기점검, 정밀점검 및 긴급점검으로 나누며, 이상 정도가 심하거나 보수·보강에 대한 필요성이 있는 경우에는 추적조사나 상세조사를 실시하고 있다. 또한 전문적인 조사가 필요하다고 판단될 경우에는 정밀안전진단을 실시하고 있다. 정밀안전진단은 '안전점검 및 정밀안전진단 세부지침'에 따라 수

*정회원 · 한국도로공사 인천대교건설사업단 과장 (E-mail : leejongho@dreamwiz.com)

**정회원 · 충남대학교 토목공학과 · 공학박사 (E-mail : han2001@cnu.ac.kr)

***정회원 · 교신저자 · 충남대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 (E-mail : shin120@cnu.ac.kr)

행되고 있으며, 교량의 외관 상태등급 및 공용 내하력 등은 정밀안전진단 평가결과를 바탕으로 하여 정량적으로 산정되고 있다(건설교통부(2003)). 그러나 공용 내하력 평가 식은 신설교량의 설계개념과 일치하지 않을 경우, 토압 및 온도하중 등이 주요 하중으로 작용하는 경우에는 적용이 곤란하다. 또한 처짐 및 응력 보정계수의 산정방법은 구체적으로 언급되어 있지 않은 관계로 평가기관이나 평가자의 주관에 따라 적용되기 때문에 객관성 있는 검토결과를 기대하기 어려운 실정이다(건설교통부(2005)). 아울러 처짐, 충격계수 및 응답비 산정은 반드시 재하시험을 실시하도록 규정하고 있기 때문에 실질적으로 교통통제가 곤란한 경우, 공용 내하력을 평가하는데 있어 많은 문제점이 따른다. 이러한 제반조건으로 인해 공용 내하력에 대한 평가결과는 설계기준에 비하여 상당히 낮은 상태임에도 불구하고 외관 상태등급은 비교적 양호한 상태를 유지하고 있는 경우가 상당 수 있다. 또한 준공시기 및 구조형식이 같은 교량이라도 공용 내하력은 큰 차이를 나타내고 있다(이재덕(1998)). 따라서 본 연구에서는 ‘안전점검 및 정밀안전진단 세부지침’에 따라 평가된 400여개의 고속도로 교량의 실측자료를 기초로 다양한 변수를 고려하여 공용 내하력을 통계적으로 비교·분석하였으며, 상기의 문제점에 따른 합리적인 고속도로 교량의 안전성 평가방안에 대해 고찰하였다.

2. 고속도로 교량현황

고속도로 교량의 상부 구조형식에 따른 비율은 라멘교(RA), PC빔교(PSCI), 강박스교(STB), 슬래브교(SLAB), 강거더교(SPG) 및 T빔교(RCT) 등이 다수를 점유하고 있다. 고속도로 건설 초기인 1970년대에는 슬래브교(SLAB), T빔교(RCT), 강T형교(STI) 및 라멘교(RA) 등과 같은 교장이 짧은 소교량이 가설되었으며, 1990년대부터는 라멘교(RA) 및 PC빔교 등이 가설되었다. 특히, 1970년대에 많이 가설되었던 강거더교는 강박스교로 대체되면서 단순확장 교량에서만 일부 공용중에 있다. 또한 소교량에서 상당수 사용되었던 T빔교는 모두 라멘교나 PC빔교로 전면 개량되었다(건설교통부(2000)). 교장이 긴 장대교량의 경우, 1970년대에는 강거더교, PC빔교 및 아치교(AR) 등이 가설된 반면, 1990년대부터는 강박스교와 PCBOX교 등이 가설됨에 따라 1970년대에 비해 교량형식이 단순화되었다. 1980년대 중반까지의 설계활하중은 DB18을 적용하였으나, 그 이후에는 DB24로 가설되었으며, 현재 공용중인 교량의 대부분(96.17%)을 점유하고 있다(한국도로공사(2008)).

2.1 교량 상부구조형식

그림 1은 공용되고 고속도로 교량의 상부구조 형식에 대한 비율을 나타낸 것으로, 라멘교(32%), PC빔교(26%), 강박스교(22%), SLAB교(9%) 및 기타형식(11%) 등의 분포를 이루고 있다. 기타 상부구조의 형태로는 프리플렉스교(PF)가 가설되었으며, 일부 교량하부 통과높이를 확보하기 어려운 곳에 적용되었다(한국도로공사(1996~2006)).

고속도로 교량의 상부구조 형식에 따른 교장과 최대경간장에 대한 평균값은 그림 2와 같이 검토되었다. 교장과 최대

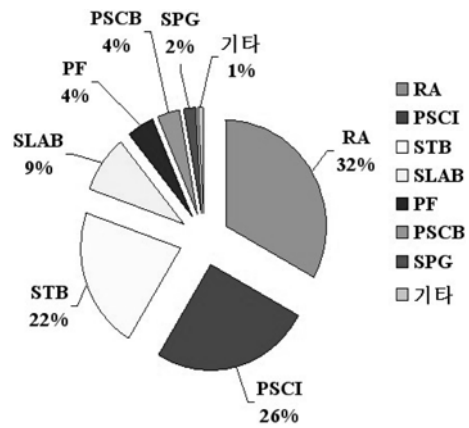


그림 1. 고속도로 교량의 상부구조형식

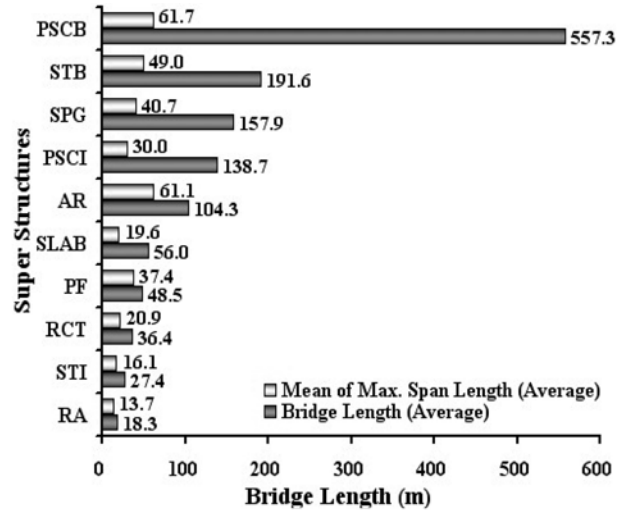


그림 2. 상부형식별 평균교장 및 평균최대경간장

경간장이 비교적 짧은 교량은 라멘교, 소규모 교량은 프리플렉스교 및 슬래브교, 중규모 교량은 PC빔교 및 강박스교, 교장이 길고 최대경간장이 큰 경우, 강박스교 및 PCBOX 거더 형식의 교량이 다수 가설되었다(한국도로공사(1996~2006)).

2.2 건설년도에 따른 교량형식

연도별 가설교량의 형식을 검토한 결과, 경부고속도로(1970년 개통), 호남·남해고속도로(1973년 개통) 및 중부고속도로(1987년 개통) 등과 같은 고속도로 건설 초창기에는 외국 자본과 설계기술이 국내에 큰 영향이 미친것을 알 수 있다. 그림 3에 도시된 가설년도에 따른 교량 수 및 구조형식은 고속도로 건설 초기인 1970년대의 경우, 슬래브교, T빔교 및 PC빔교 형식이 주로 가설되었으며, 80년대 이후에는 슬래브교가 줄어들고 강박스교나 PCBOX교의 가설이 증가되는 경향을 확인할 수 있다. 소교량은 1970년대말 이후 T빔교가 거의 가설되지 않았으며, 라멘교로 대체되었다. 중규모의 교량인 강박스교나 PC빔교의 경우, 1980년대 이전까지는 가설이 비교적 적었으며, 1980년 이후에는 강거더교와 아치교를 대체하여 가설되었다. 수원~청원간 확장(경부고속도로, 1993년), 신갈~원주간 확장(영동고속도로, 1994년) 및 중앙고속도로(1999년 개통) 등과 같은 기존 고속도로 확장과 더불어 교량을 전면 개량되었고, 설계속도가 기존 80~110(km/hr)에서 100~120(km/hr)로 상향됨에 따라 교장

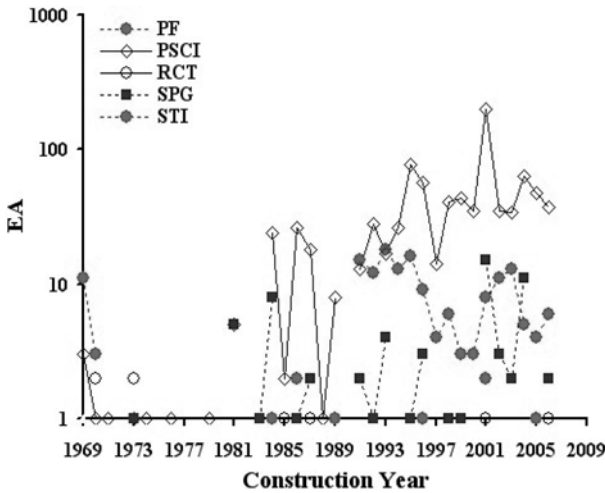
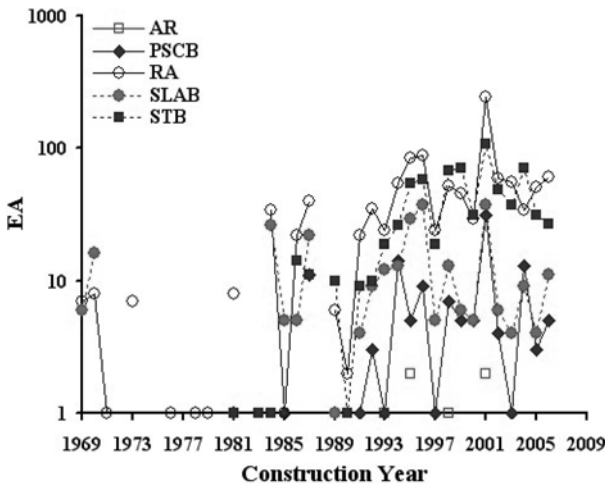


그림 3. 건설연도별 고속도로 교량상부형식

이 장대화 되었으며, PCBOX교 등과 같은 특수교량의 가설이 증가하였다. 특히, 1990년대 후반부터 현재까지는 1992년 시작한 정부의 전국도로망 체계 재정비계획에 따라 건설된 고속도로가 개통됨에 따라 교량수가 급격히 증가하는 양상을 나타냈다(한국도로공사(1996~2006)).

2.3 설계활하중에 의한 분포

그림 4는 건설연도별로 설계활하중에 따른 교량수를 도시한 것이다. DB13.5 교량은 고속도로 횡단도로를 연결하는

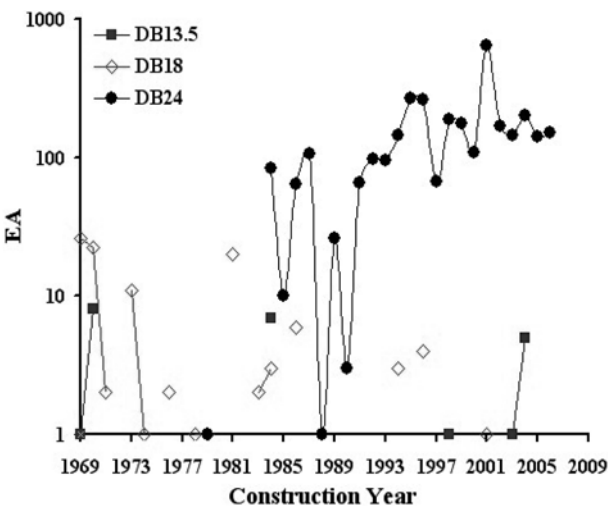


그림 4. 설계활하중(DB)에 따른 가설연도별 개수

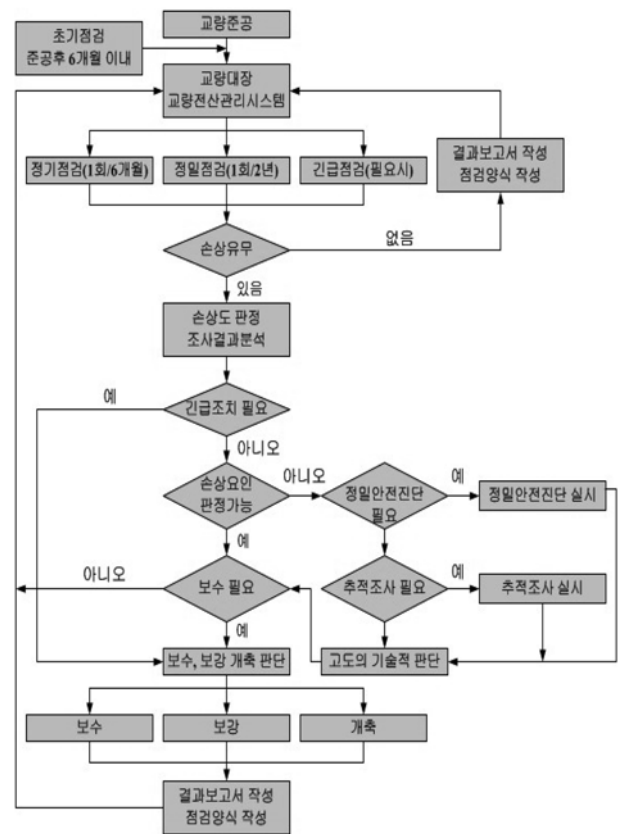


그림 5. 고속도로 교량 유지관리 절차도

목적으로 가설되었으며, 지속적으로 개량되거나 기존도로의 확장으로 인해 해체되었다. 또한 고속도로 주변도로가 고급화되면서 효율성의 저하와 맞물려 공용되고 있지 않는 실정이다. DB18에 해당하는 교량은 1990년대 고속도로 확장으로 대부분 DB24로 전면 개량되었고, 일부 교통량이 적은 호남고속도로 및 88고속도로 등에서 공용되고 있다(3.14%). 최근에는 차량하중의 대형화 및 중량화로 인해 대부분의 교량이 DB24의 교량으로 가설되고 있으며, DB13.5교량의 경우, 횡단교량으로 일부 가설되고 있다(한국도로공사(2008)).

3. 외관 상태등급 및 안전성 평가방안

고속도로 교량의 유지관리는 준공에서부터 수명을 다할 때까지 지속적으로 수행되며, 보수, 보강 및 성능개선 등이 광범위하게 진행된다. 현재 고속도로 교량의 유지관리, 안전점검 및 진단은 그림 5 및 표 1과 같은 체계로 수행되고 있다(서상길(2004)). 노후화 된 교량의 보수·보강은 손상구조물의 영향정도, 구조물의 중요도, 사용 환경 조건 및 경제성 등을 감안하여 보수·보강방법 및 수준을 결정하여야 할 것이다. 또한 교량의 안전점검 및 진단은 관리 시설물별로 안전 및 유지관리 계획을 수립하여 체계적이고 일관성 있게 실시되어야 할 것이다. 아울러, 성공적인 시설물의 점검 및 진단을 위해서는 적절한 계획과 기법, 필요한 장비의 확보 그리고 점검자의 경험과 신뢰성이 필요하며, 노출된 결함 및 발생 가능한 문제점의 예측까지도 포함시키는 것이 중요하다. 그러므로 안전점검 및 진단은 정확해야 할 뿐만 아니라 재해 및 재난의 예방적 차원에서의 교량 시설물에 대한 과학적 관리체계의 개발이 지속적으로 요구되고 있는 실정이다.

표 1. 조사의 종류 및 빈도

점검종류	대상 구조물	시 기	
정밀 안전진단	1, 2종 시설물	완공 후 10년 경과시점부터 1년 이내 실시 및 그 후 5년에 1회 이상 정기적 실시	
	기타 시설물	필요시	
정기점검	1, 2종 시설물	1회/6개월	
	기타 시설물	1회/년	
	암거	필요시 *파형강판 암거: 2회/년	
정밀점검	1, 2종 시설물	1회/2년 (짝수해)	
	기타 시설물	1회/2년 (홀수해, B급 이하)	
초기점검	기존 구조물 (구조형태 변경시), 신설 구조물	1, 2종 시설물	
긴급 점검	손상	당해 구조물	필요시
	특별	주요 구조물	필요시 (해빙기, 우기, 결함시)

3.1 외관 상태등급 평가방안

고속도로 교량의 외관 상태등급 평가는 시설물의 관찰된 상태, 유지관리 또는 사용제한사항 등을 포함한 시설물 상태에 대한 점검 및 진단결과를 기록하고, 시설물에 대한 육안 검사에 의한 조사결과를 포함시켜야 한다. 또한 정밀점검 및 정밀안전진단 결과에 따라 시설물로부터 발견된 결함의 범위 및 정도(심각도)에 따라 A~E의 5가지 단계 중 해당되는 외관 상태평가 등급을 명시하여야 한다(건설교통부(2003)). 한편, 외관 상태등급 평가는 안전점검 및 정밀안전진단 실시자의 주관적인 판단에 따라 시설물의 상태 및 안전성 평가가 이루어질 우려가 있다. 따라서 평가의 객관성과 일관성을 확보하기 위해 교량의 외관 상태등급 평가, 안전성 평가 및 종합 평가사항 등은 통일된 서식과 기준에 따라 재료시험 및 육안조사로 교량의 각 부재로부터 발견된 결함, 손상 및 열화 등을 토대로 검토되어야 한다.

교량의 정기점검은 시설물별 세부지침의 점검서식에 따라 평가하는 것을 원칙으로 하고 있다. 정밀점검은 각 부재별로 점검하고, 주요부재의 문제 부분에 대하여 외관 조사방도를 작성하여 외관 상태등급 평가를 상세히 실시하고 있다. 또한 외관 조사방도를 작성하지 않은 부분은 이전의 안전점검 및 정밀안전진단보고서에 수록된 외관 상태 평가결과를 참조하여 평가기준에 따라 교량 전체에 대한 외관 상태평가 등급을 검토하고 있다. 정밀안전진단은 교량 전체부재에 대하여 외관 조사방도를 작성하여 부재별로 상세한 외관 상태평가를 실시하고 있으며, 표 2와 같은 평가기준에 따라 외관 상태평가 등급을 결정하고 있다.

3.2 안전성 평가방안

교량의 외관상태 등급과 내구성조사를 기초로 대표등급을 산정하는 경우, 실질적인 안전성을 확보하기에는 어려움이 따른다. 따라서 교량 안전성 평가는 주요 구조부재의 정밀육안검사, 비파괴 현장시험 및 재료시험의 결과를 토대로 종합

표 2 교량의 상태평가 기준 (교량 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침)

상태평가 등급	상태 및 안전성
A 등급	문제점이 없는 최상의 상태
B 등급	보조부재에 경미한 결함이 발생하였으나 기능발휘에는 지장이 없으며 내구성 증진을 위하여 일부의 보수가 필요한 상태
C 등급	주요부재에 경미한 결함 또는 보조부재에 광범위한 결함이 발생하였으나 전체적인 시설물의 안전에는 지장이 없으며, 주요부재에 내구성, 기능성 저하 방지를 위한 보수가 필요하거나 보조부재에 간단한 보강이 필요한 상태
D 등급	주요부재에 결함이 발생하여 긴급한 보수·보강이 필요하며 사용제한 여부를 결정하여야 하는 상태
E 등급	주요부재에 발생한 심각한 결함으로 인하여 시설물 안전에 위협이 있어 즉각 사용을 금지하고 보강 또는 개축을 하여야 하는 상태

적으로 수행되어야 한다. 현재 도로교나 철도교는 강교의 경우 허용응력설계법, 콘크리트교의 경우 강도설계법으로 설계되고 있다. 기존교량의 공용 내하력 산정은 신설교량의 설계 개념과 일관성을 기하는 것이 타당하나, 평가결과를 상호 보완하기 위하여 두 가지 방법이 모두 이용되고 있다. 최근 도입되고 있는 신뢰성이론에 의한 평가방법은 충분한 통계 자료가 뒷받침되어야 하므로 참고자료로 활용되고 있다(신재철 등(1987)). 교량의 안전성 평가는 공용 내하력 평가 개념으로 규정되어 왔으나 공용 내하력은 하중비에 따라 변동폭이 크게 나타나므로 교량의 안전성을 일관되게 평가하는 기준으로 적절하지 못한 실정이다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 안전을 개념을 도입하여 교량의 안전성 평가를 수행하고 있다. 그러나 안전율이 0.9에서 1.0사이에 있고, 재하 시험에 의한 공용 내하력 평가를 실시한 경우, 교량의 안전성 평가등급은 공용 내하력 평가결과에 따라 결정되어야 한다.

1) 강도설계법에 의한 공용 내하력

강도설계법에 의한 교량부재의 내하율과 공용내하력은 식 (1), (2)를 이용하여 산정한다(건설교통부(2005)).

$$\text{내하율}(RF) = \frac{\phi M_n - \gamma_d M_d}{\gamma_1 M_f (1+i)} \quad (1)$$

여기서, ϕM_n = 극한저항 모멘트 (강구조물 $\phi=1$, RC 및 PC 구조물의 휨부재 $\phi=0.85$)

M_d = 실측 고정하중모멘트

M_f = 설계 활하중(도로교의 경우 DB 또는 DL하중, 철도교의 경우 LS 하중)에 의한 모멘트

γ = 활하중 계수(2.15)

γ_d = 고정하중 계수(1.30)

i = 도로교 표준시방서에서 제시한 설계 충격 계수 적용

$$\text{공용내하력}(P) = RF \times K_s \times P_r \quad (2)$$

2) 허용응력법에 의한 공용 내하력

허용응력법에 의한 교량부재의 내하율과 공용내하력은 식 (3), (4)를 이용하여 산정한다(건설교통부(2005)).

여기서, K_s = 응답보정계수($\frac{\delta_{계산} \cdot 1+i_{계산}}{\delta_{실측} \cdot 1+i_{실측}}$)
 P_r = 설계 활하중 (도로교의 경우 DB 또는 DL하중, 철도교의 경우 LS하중)
 $\delta_{계산}(\delta_{실측})$ = 이론(실측) 처짐량
 $i_{계산}(i_c)$ = 도로교의 경우 도로교표준시방서, 철도교의 경우 철도건설공사 표준시방서에 의한 충격계수
 $i_{실측}(i_m)$ = 동적재하시험으로부터 평가된 최대 충격계수

$$\text{내하율}(RF) = \frac{f_a - f_d}{f_i(1+i)} \quad (3)$$

여기서, f_a = 실측 허용응력
 f_d = 실측 고정하중에 의한 응력
 f_i = 설계 활하중 (도로교의 경우 DB 또는 DL하중, 철도교의 경우 LS하중)에 의한 응력

$$\text{공용 내하력}(P) = \frac{f_a - f_d}{f_i(1+i)} \times K_s \times P_r \quad (4)$$

4. 실측자료에 기초한 고속도로 교량평가

공용중인 400여 개소의 고속도로 교량을 대상으로 수행된 정밀안전진단 평가결과(이종호(2009), 한국도로공사(1996~2006))를 이용하여 교량의 주요부재별, 상부형식별, 공용기간에 따라 외관 상태등급을 분석하였다. 또한 상부형식, 공용기간, 충격계수, 응력비 및 교통량 등을 변수로 고려하여 공용 내하력과 관계도를 검토하였다.

4.1 외관 상태등급

고속도로 교량의 재해 및 재난 예방과 안전성 확보 등을 위하여 필요하다고 인정하여 실시한 정밀안전진단결과에 따라 각 구조부재별 외관 상태등급의 백분율은 표 3과 같이 나타났다. 바닥판(Slab)은 C, D등급이 가장 높은 부재로 평가되었고, 유지관리 시 보수·보강을 수행하여도 원상복구가 어려운 상태이므로 적절한 개선대책이 필요한 것으로 검토되었다. 교면포장(Pavement)은 대체로 B 등급이 많아 재포장이나 부분 패칭 등의 보수공법을 이용하여 등급 상향 시용이한 것으로 평가되었다.

그림 6은 고속도로 교량형식별 외관 상태등급을 분류하여 도시한 것으로, 아치교, 강형교, 강거더교, PC빔교 및 슬래브교가 C등급이 비교적 많은 것으로 검토되었다. PSCBOX

표 3. 고속도로 교량의 외관 상태등급 (%)

구조부재	A 등급	B 등급	C 등급	D 등급
Pavement	8.82	46.47	37.35	7.35
Slab	2.97	39.17	51.93	5.93
Girder	4.33	52.38	41.56	1.73
Shoe	4.72	42.52	46.85	5.91
Abut, Pier	1.52	47.58	47.88	3.03

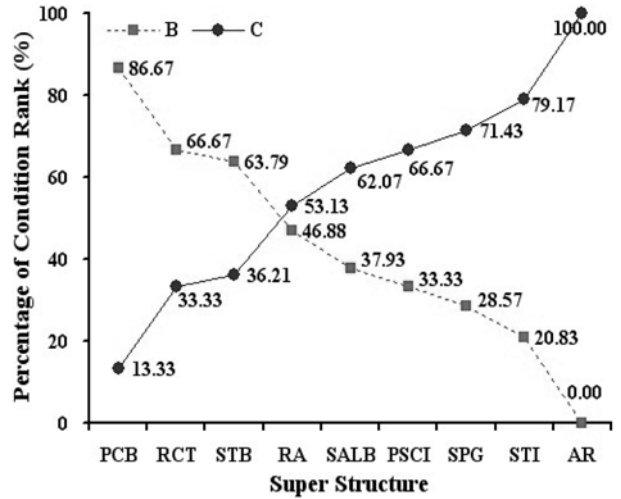


그림 6. 고속도로 교량형식별 외관 상태등급

표 4. 공용기간에 따른 외관 상태등급 (%)

공용기간 (년)	A 등급	B 등급	C 등급	D 등급
0~5	2.63	84.21	13.16	0.0
6~10	0.0	81.82	18.18	0.0
11~15	0.0	58.33	41.67	0.0
16~20	0.0	41.07	58.93	0.0
21~25	0.0	35.00	65.00	0.0
26~30	0.0	23.36	71.03	5.61
30 이상	0.0	9.84	90.16	0.0

교, T빔교 및 강박스교는 60% 이상이 B등급으로 평가되었다. 그러나 PC빔교의 경우, 최근에도 비교적 상당수 가설되고 있는 점을 감안할 때, 교량형식은 외관 상태등급 결정에 있어 주요한 요인이 아닌 것으로 검토되었다. 이러한 양상은 정밀안전진단 대상에 포함된 교량 중, 30년 이상 공용되어 노후화된 교량의 개수에 따라 결정된 것이다. 따라서 고속도로 교량의 외관 상태등급은 공용기간과 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 사료된다.

공용기간에 따른 고속도로 교량의 외관 상태등급의 백분율은 표 4와 같이 검토되었다. 공용 10년까지의 외관 상태등급 평가결과는 B등급이 80% 이상, C등급이 20% 미만이지만, 공용기간이 15년 이상 되면 C등급이 B등급을 상회하기 시작하여 30년이 되면 확연히 C등급이 증가하는 것으로 검토되었다. 따라서 공용기간 10년 경과부터는 예방적 유지, 관리 측면에서 적절한 유지관리공법과 보수·보강비용의 투입이 필요할 것으로 판단된다.

4.2 공용 내하력

그림 7~10은 DB18 및 DB24 고속도로 교량의 상부구조형식 및 공용기간에 따른 공용 내하력의 분포를 도시한 것이다. 가설된 교량의 공용 내하력은 교량형식별로 다양하게 분포하였으며, 공용기간이 증가함에 따라 서서히 저하되는 것으로 평가되었다. 또한 DB18보다도 작은 값의 공용 내하력을 가진 교량도 상당수 있는 것으로 나타났으며, 라멘교의 평균 공용 내하력은 다른 형식에 비하여 15이상 높은 것으로 검토되었다. 그러나 교량형식 및 공용기간에 따른 공용 내

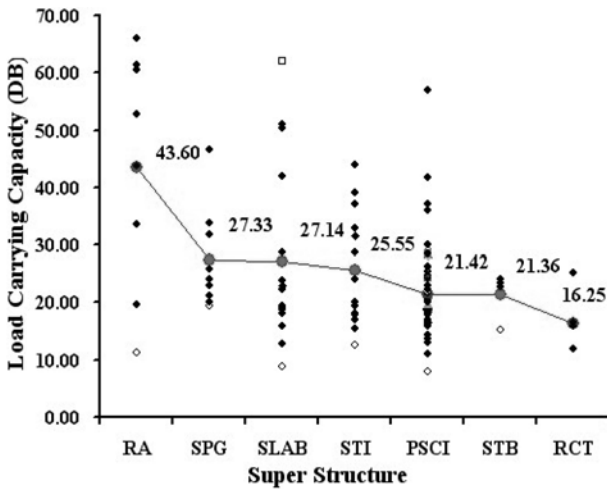


그림 7. DB18 교량의 상부구조형식에 따른 내하력

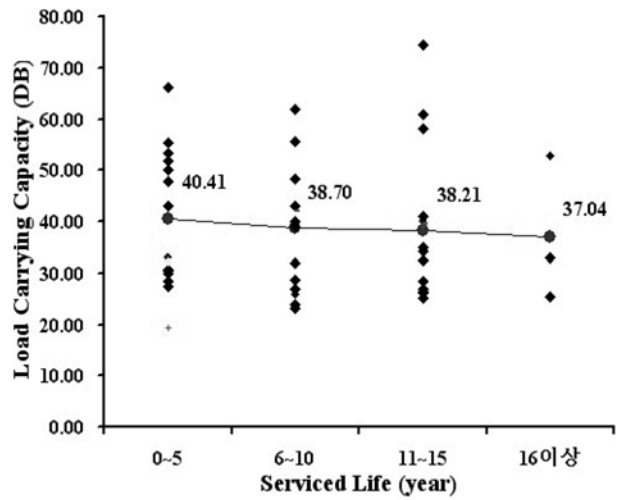


그림 10. DB24 교량의 공용기간에 따른 내하력

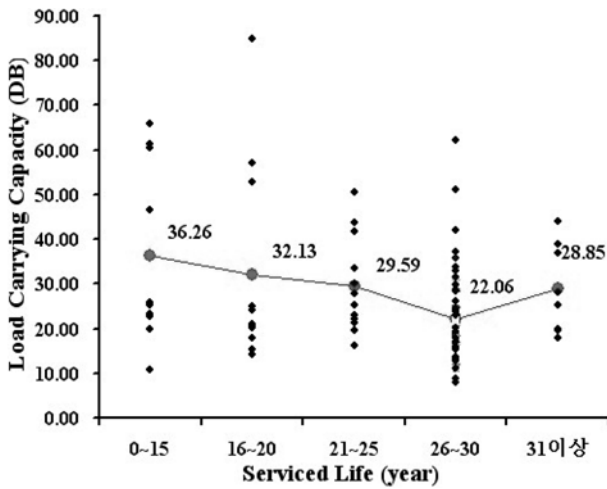


그림 8. DB18교량의 공용기간에 따른 내하력

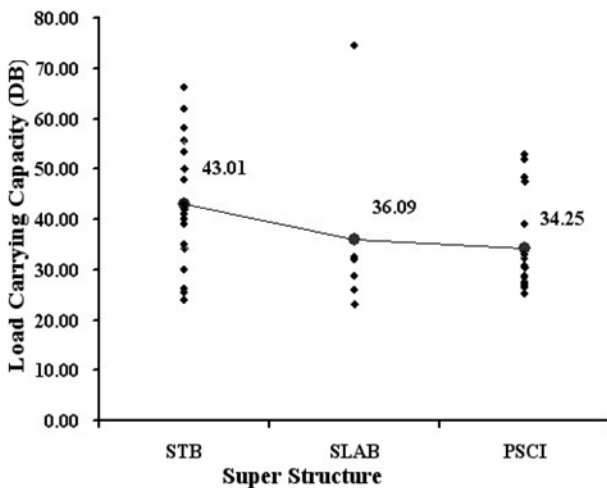


그림 9. DB24 교량의 상부구조형식에 따른 내하력

하력은 다소 넓게 분포되어 있고, 30년에 걸친 여러 설계방법과 시공환경 등이 다양한 점을 고려할 때, 공용 내하력 평가 결과에 대한 신뢰성을 확보하기에는 미흡한 실정으므로, 이에 대한 지속적인 재평가 과정이 필요할 것으로 사료된다.

4.3 충격계수 및 응답비

충격계수는 재하시험으로부터 실측한 최대 충격계수를 이용하는 것이 원칙이나, 동적재하시험을 실시하지 않는 경우

에는 다음 사항과 같이 도로교 표준시방서에서 제시한 설계 충격계수를 적용하고 있다.

- 1) 거더의 동적처짐, 증폭률($\alpha = \delta_{동적} / \delta_{정적}$)
- 2) 주행 속도별 충격계수 분석(i_m / i_c)

여기서, $i_m = (\alpha - 1) / \sqrt{N}$, $i_c = 15 / (40 + L)$

N = 교상에 동시에 재하할 수 있는 설계 하중의 트럭의 수

- 3) 최대 충격계수가 발생하는 최고속도의 평가

기존 연구에서와 같은 방법으로(김동용 등(1999)) 고속도로 교량의 상부 구조형식과 경간장에 따른 충격계수의 이론

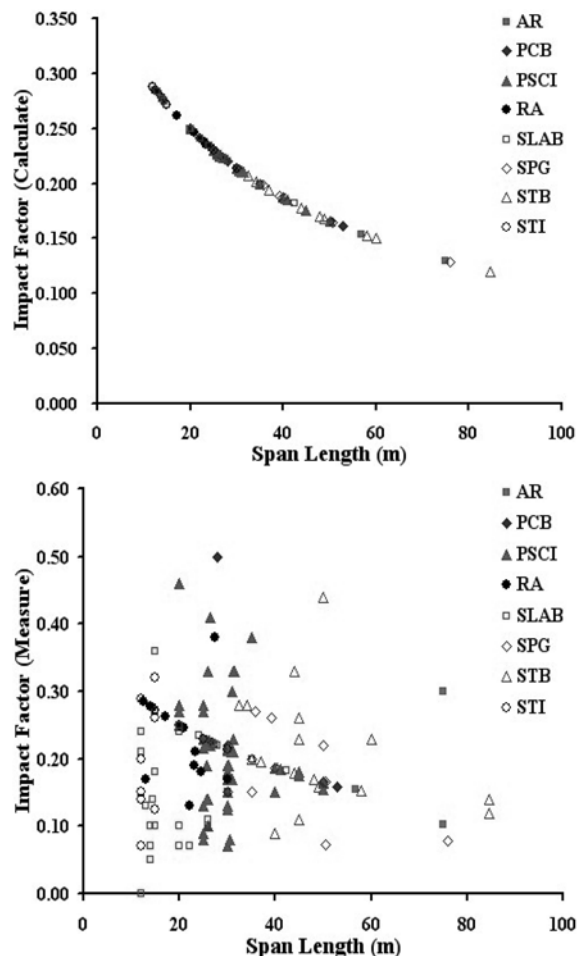


그림 11. 고속도로 교량의 경간장에 따른 충격계수

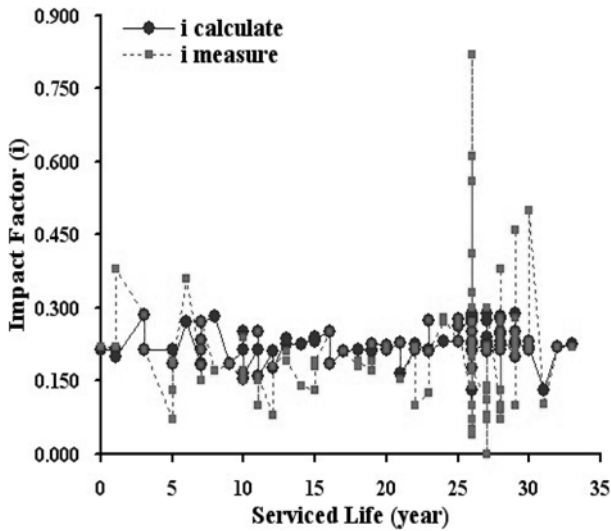


그림 12. 공용기간에 따른 충격계수(콘크리트교)

값(i_c)과 실측값(i_m)을 비교, 분석하여 그림 11에 도시하였다.

교량형식별 충격계수의 실측값은 이론값 보다 25% 정도가 크게 나타났으며, 분산정도가 큰 것을 확인할 수 있다. 이러한 양상은 교량의 노후화에 비해 하중 재하방법, 교량형식, 교량지간 및 노면상태 등이 실측 충격계수에 큰 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다.

그림 12, 13에 도시된 콘크리트교 및 강교의 공용기간에 대한 충격계수를 분석한 결과, 이론값과 실측값은 일부 교량을 제외하면 0.3이하인 것으로 검토되었다. 따라서 공용기간에 따른 충격계수 0.3을 적용하는 것은 과다 설계된 것으로 볼 수 있으며, 도로교시방서에 제시한 충격계수에 대해 적절한 보완이 필요할 것으로 사료된다.

교량의 이론적 부재응력은 일반적으로 실제의 현장재하시험에서 얻는 값보다 큰 경향을 나타낸다. 따라서 공용하중을 증가시켜줌으로써, 이론치와 실측치의 차이로 인한 오차를 보정할 수 있다. 이때, 실측치 및 이론치의 비를 응답비(실측치/이론치)라 정의할 수 있으며, 이 값은 개개의 교량을 측정하여 결정할 수 있으나, 일반적으로 현지 교량조사로부터 얻은 결과를 토대로 하여 도로교시방서에 규정된 값을 적용할 수 있다. 그림 14, 15는 설계활하중(DB24)을 적용하

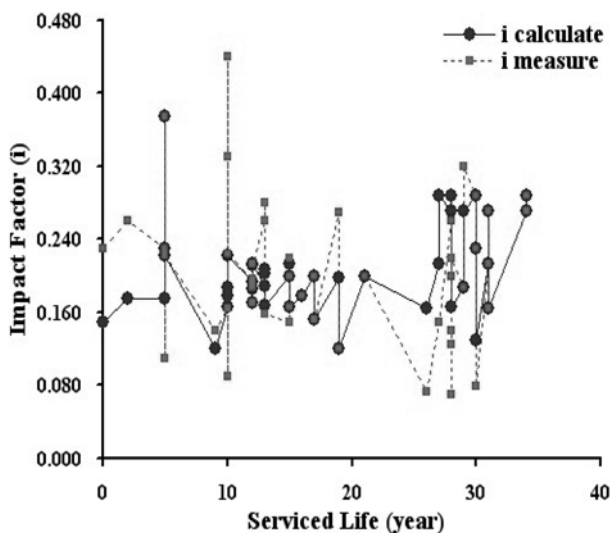


그림 13. 공용기간에 따른 충격계수(강교)

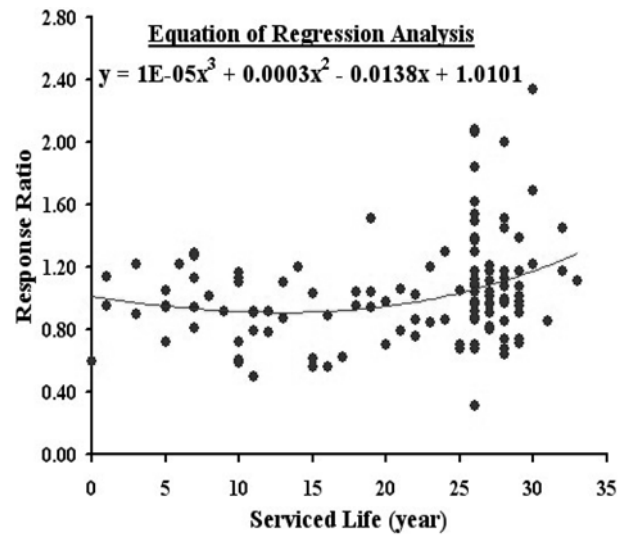


그림 14. 설계활하중(DB24)의 응답비 포도(콘크리트교)

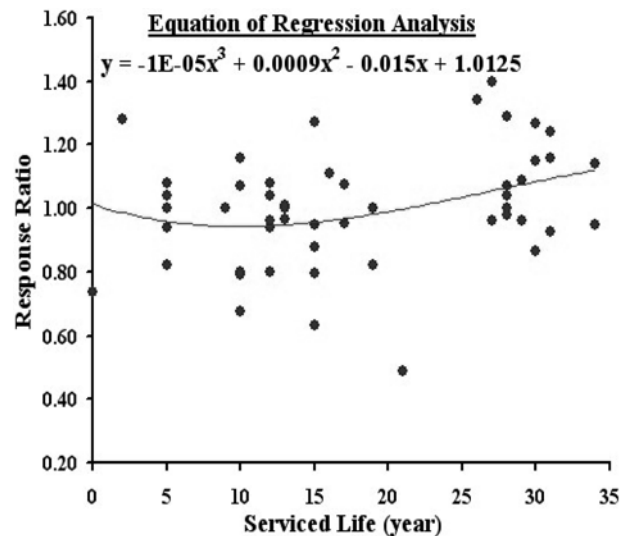


그림 15. 설계활하중(DB24)의 응답비 분포도(강교)

여 동적재하시험에 의해 산정된 교량의 응답비를 회귀분석하여 도시한 것이다. 그래프의 가로축은 공용기간, 세로축은 조사된 응답비를 각각 표시하였다. 강교의 응답비 분포는 공용기간과 무관하게 일정한 상태를 유지하고 있으나, 콘크리트교의 경우, 콘크리트의 내구성, 균열, 열화 및 박리·박락 등 노후 및 손상정도가 공용 내하력 저하와 관계가 있으며, 응답비의 변동폭이 강교에 비해 비교적 큰 것으로 검토되었다. 특히, 콘크리트교는 초기균열 발생으로 인해 응답비가 낮게 평가될 수 있는 경향이 있다. 그러나 이러한 양상이 공용 내하력의 감소로 인한 결과인 것으로 평가하기에는 문제점이 따를 것으로 예상된다. 따라서 콘크리트교의 공용 내하력의 경우, 항복설계를 기준으로 평가하는 것이 타당하며, 응답비를 이용한 현행 공용 내하력 평가방법은 많은 오류를 내재하고 있으므로 개선방안이 필요할 것으로 사료된다.

4.4 외관 상태등급과 공용 내하력

현재까지 국내에서는 교량의 외관 상태에 대한 평가는 뚜렷한 근거와 판정방법이 결정되어 있지 않기 때문에 실질적인 외관 상태와 공용 내하력 평가결과가 서로 상이한 오류를 항상 포함하고 있는 실정이다. 그림 16, 17은 실측자료

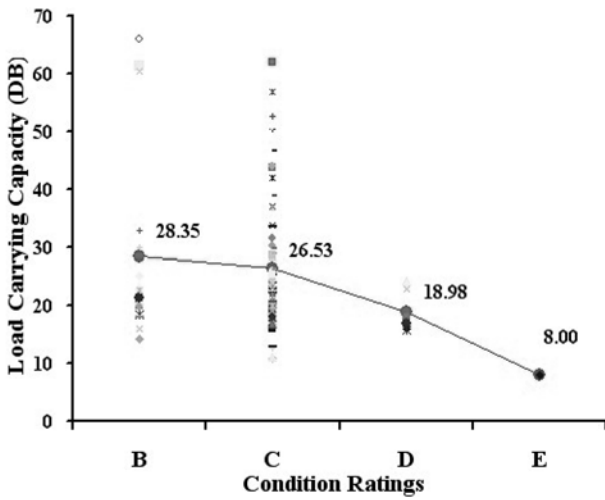


그림 16. 외관상태 등급과 공용 내하력의 분포도(DB18)

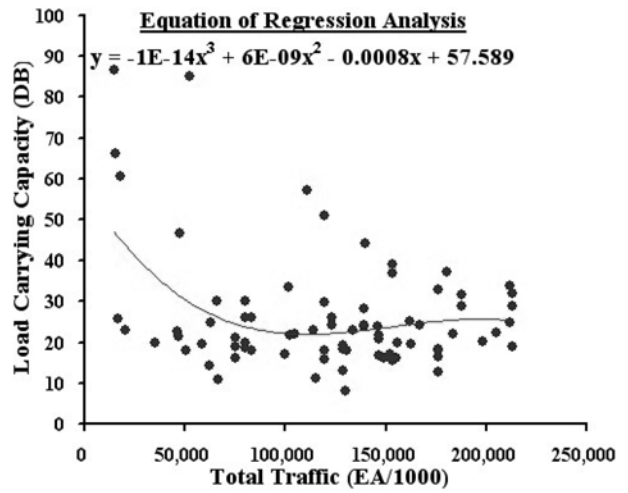


그림 18. 교통량과 공용 내하력의 분포도(DB18)

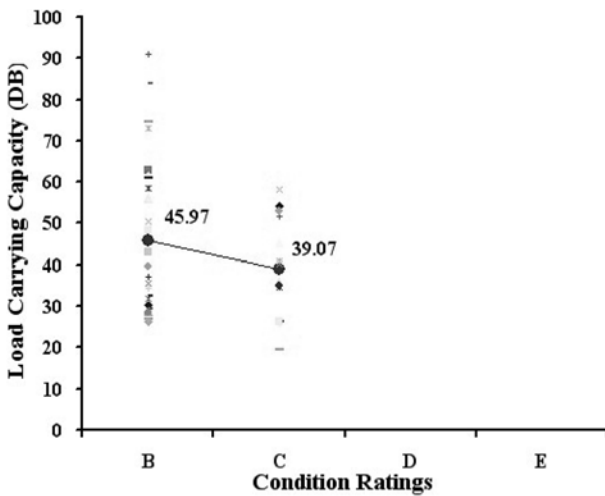


그림 17. 외관상태 등급과 공용 내하력의 분포도(DB24)

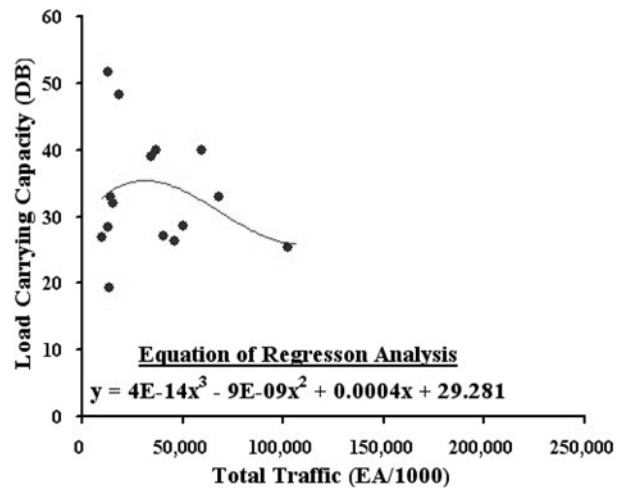


그림 19. 교통량과 공용 내하력의 분포도(DB24)

를 토대로 외관상태의 등급과 고속도로 교량의 외관 상태등급과 공용 내하력의 관계를 검토하여 도시한 것이다. 그래프의 세로축은 설계활하중(DB18, DB24)하중, 가로축은 결함의 범위 및 정도에 따라 표 2에 제시된 5단계의 외관 상태 등급을 표시하였다. 평가결과를 검토해보면, 보수·보강에 따라 외관 상태등급의 향상이 가능한 C등급 교량의 공용 내하력은 설계활하중에 미치지 못하는 경우가 상당수 있는 것으로 검토되었다. 이러한 양상은 식 (1)~(4)와 같은 공용 내하력 평가식에 포함된 실측인자 결정 시, 평가오류에 의한 것으로 판단되며, 실제 교량의 외관 상태등급과는 무관하게 나타날 수 있는 것으로 분석되었다.

4.5 교통량과 공용 내하력

교통량은 AADT(Annual Average Daily Traffic)을 기초로 차로별 공용기간을 고려하여 산정한 결과, 누계 교통량은 5,000~115,000대로 다양하게 분포하고 있는 것으로 검토되었다(한국도로공사(1995~2006)). 공용기간 동안 누적된 충격하중과 피로하중은 외관 상태등급과 공용 내하력의 저하에 상당한 영향을 미칠 것으로 판단되기 때문에 차로당 교통량과 공용 내하력의 관계를 비교, 분석하였다. 그림 18, 19는 교통량과 공용 내하력의 관계를 회귀분석 하여 도시한 것으로 교통량의 증가에 따라 공용 내하력은 지속적으로 감소하는

추세를 나타내는데 것으로 평가되었다. DB24 교량은 공용기간이 단기간이기 때문에 교통량에 따른 공용 내하력의 저하가 상대적으로 작은 것으로 검토되었다. 그러나 누계 교통량이 14,000천대일 때, DB18 교량의 공용 내하력은 DB33, 누계 교통량이 211,000천대일 때, 공용 내하력 DB20으로 나타났다. 따라서 교통량의 증가는 공용 내하력 저하와 상호 밀접한 관계가 있는 것으로 분석되었으며, 이러한 경향을 적절히 고려한 재평가 과정이 필요할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구는 현재 공용되고 있는 고속도로 교량의 실측자료를 이용하여 합리적인 교량 안전성 평가방안을 위해 다양한 문제점과 개선방안에 관해 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 유추할 수 있다.

고속도로 교량은 공용기간이 15년 이상 되면 C등급 이 B 등급을 상회하기 시작하며, 30년 이상의 경우, C등급이 확실히 증가하는 양상을 나타냈다. 따라서 공용기간의 증가와 더불어 적절한 유지관리가 필요하며, 공용 내하력은 신뢰성을 확보하기 위해 체계적인 계획 및 대처방안이 수립되어야 할 것으로 사료된다. 공용기간에 대한 고속도로 교량의 이론 및 실측 충격계수는 소수의 교량을 제외하면 도로교시방서에서 제시한 0.3이하인 것으로 나타났으며, 응답비의 경우, 교량형

식별로 다양하게 검토된 점을 감안할 때, 충격계수 및 응답비 평가방안에 대한 보완이 필요할 것으로 판단된다. 외관 상태등급과 공용 내하력의 결과는 상호 일치하지 않는 경우가 있으므로, 공용 내하력 평가식을 구성하는 각각의 실측인자 검토 시, 현장상태 및 시공환경 등이 적절히 반영되어야 할 것으로 사료된다. 교통량과 공용 내하력은 매우 큰 상관성을 갖는 점을 고려하여 고속도로 교량에 대한 교량안전점검 지침 적용 시, 합리적인 교통량 적용이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

건설교통부(2003) 교량안전점검 및 정밀안전진단 세부지침.
건설교통부(2005) 도로교 표준시방서.
건설교통부(2000) 도로설계편람.
김동용, 경갑수, 전준장, 이희현, 장동일(1999) 실 측자료의 통계

분석에 기초한 도로교 내하력 평가방법의 개선방안, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제19권 제1-6호, pp. 847-857.
박창호, 신재인, 이병주(2007) 유지관리를 고려한 교량의 설계와 시공 방안 고찰, 한국도로공사 도로교통연구원.
서상길(2004) 고속도로 교량의 예방적 유지관리 체계 구축방안, 박사학위논문, 경북대학교.
신재철, 조효남, 장동일(1987) 구조신뢰성 방법에 의한 도로교의 내하력 평가에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제7권 제2호, pp. 107-120.
이재덕(1998) 고속도로 교량에 대한 내하력 평가 방법의 타당성 분석, 석사학위논문, 한국도로공사 도로기술대학원.
이중호(2009) 고속도로 교량의 내하력을 고려한 상태등급 평가에 관한 연구, 석사학위논문, 충남대학교.
한국도로공사(1995-2006) 고속도로교통량조사.
한국도로공사(1996-2006) 교량정밀안전진단보고서.
한국도로공사(2008) 교량현황조사.

(접수일: 2009.1.5/심사일: 2009.2.3/심사완료일: 2009. 6.26)