

상시진동을 이용한 교량 내하력 추정 알고리즘의 실험적 성능 검증

이우상 · 박기태* · 한성호^{†**}

한국스마트구조시스템연구원 · *한국건설기술연구원 · **충남대학교 토목공학과
(2010. 1. 15. 접수 / 2010. 5. 3. 채택)

Experimental Performance Verification of Load Carrying Capacity Algorithm of Bridges using Ambient Vibration

Woo-Sang Lee · Ki-Tae Park* · Sung-Ho Han^{†**}

Korea Research Institute of Smart Materials & Structure System

*Korea Institute of Construction Technology

**Department Civil Engineering, Chungnam National University

(Received January 15, 2010 / Accepted May 3, 2010)

Abstract : In this study, it is conducted that the performance verification of the ambient load carrying capacity algorithm using long-term measurement systems of bridges. For this purpose, a steel-box type model bridge is fabricated and the public load carrying capacity of a steel-box model bridge is estimated by conducting the numerical analysis and load test. In addition, we compare the public load carrying capacity with the estimated result of a steel-box model bridge using the ambient load carrying capacity algorithm. By the assessment result, it is shown that the estimated ambient load carrying capacity is the difference of approximately 6.0 percentages as compared with the public load carrying capacity.

Key Words : ambient load carrying capacity algorithm, model bridges, performance verification, long term measurement system, FE analysis and load test

1. 서론

신행주대교(1995년)에 교량 상시계측시스템이 처음으로 설치된 이후, 최근에는 사장교와 현수교 같은 장경간 교량을 대상으로 하여 설치·운영되고 있다. 그러나 지속적인 관리 소홀과 전문 인력의 부족으로 인해 실제 운영되고 있는 시스템은 전체 상시계측시스템의 약 40% 이하에 불과한 실정이다¹⁾. 이러한 상황에도 불구하고, 서울시는 “한강교량 On Line 안전감시망 구축”에 관한 연구를 통해 상용 인터넷 망을 이용하여 한강 상 5개 교량을 대상으로 장기계측시스템을 위한 통합관리체계를 구축하였다²⁾. 또한 국토해양부에서는 국가 주요 도로시설물에 첨단센서를 설치하여 통합관리 하는 “도로시설물 안전관리 네트워크 시범 구축”에 관한 연구를 추진하고 있다³⁾. 그러나 장기계측시스템 이용하

여 효과적인 교량 상시모니터링시스템이 구현되기 위해서는 외력에 의한 교량응답 신호를 획득·저장해야 할 뿐만 아니라, 획득한 응답데이터를 바탕으로 하여 교량상태를 실시간 평가할 수 있는 분석시스템의 구축이 요구된다. 현재의 교량 상시모니터링시스템은 원시데이터(Raw Data)의 크기를 관리기 준치와 단순 비교하여 교량상태를 평가하는 방법이 대부분 적용되고 있는 실정이다. 이와 같은 방법으로는 교량상태의 정량적 분석과 경제적인 계측시스템을 구축하기가 현실적으로 불가능하다. 그러므로 교량 장기계측시스템으로 획득한 계측데이터를 이용하여 교량의 내하력을 실시간 분석함으로써, 기존 재하실험의 문제점을 해결하고, 상시모니터링시스템의 효율성을 높일 수 있는 상시내하력 평가시스템의 적용이 필요한 것으로 판단된다. 이 연구에서 소개하고자 하는 교량 상시내하력 평가알고리즘은 한국도로공사 도로교통기술원에서 발표한 “상시교통하중에 의한 교량 내하력 평가시스템 개발”에 관한 연구보고서 내용을 참고한 것이다⁴⁾.

[†] To whom correspondence should be addressed.
han2001@cnu.ac.kr

이 연구와 관련된 국내·외 연구동향은 다음과 같이 정리할 수 있다. 조수진 등은 실제 교량을 대상으로 상시대하력 알고리즘의 적용성을 검증하는 연구를 실시하여, 상시대하력 평가알고리즘으로 추정된 교량 공용내하력이 기존 재하실험에 의한 공용내하력 평가결과와 거의 일치함을 확인하였다⁵⁾. Faulkner 등은 가속도 측측데이터를 이용한 교량의 처짐응답계수 추정에 관한 연구를 수행하였다. 이들은 가속도 측측데이터를 수치적분 하여 처짐데이터를 획득하는 방법을 적용하였다⁶⁾. James 등은 구조물의 동적특성을 분석하기 위해 상시진동에 의한 자연가진기법을 이용하여 입력신호의 측정문제를 해결할 수 있는 가능성을 제시하였고⁷⁾, Farrar 등은 실제 교량의 고유진동수와 모드형상과 같은 동적특성을 활용하여 교량의 손상검출을 위해, 자연가진기법을 적용하였다⁸⁾. Juang 등은 다중 입출력을 갖는 시스템에 적합한 시간영역의 동적특성 분석 알고리즘인 고유계 구현기법을 제시하였다^{9,10)}. 허광희 등은 실제 교량의 실시간 모니터링을 위해 자연가진기법과 고유계 구현기법을 적용하여 교량의 동적특성을 분석하였다¹¹⁾. 이와 같은 다양한 연구결과들은 상시측측시스템을 활용하여 교량의 공용내하력을 추정한 연구결과이다. 이 연구의 목적은 교량 장기측측시스템을 활용하여 교량 내하력 추정 가능성을 확인하기 위한 것으로, 교량 상시대하력평가 알고리즘의 성능검증을 위한 실험 및 FE 해석을 수행하였다. 이를 위해, 강상자형 모형교량을 제작하여 재하실험과 FE 해석을 수행하여 모형교량의 공용내하력을 추정하였다. 또한 상시대하력평가 알고리즘을 이용하여 모형교량의 내하력 추정결과를 공용내하력과 비교·분석함으로써, 이 연구에서 제시된 상시대하력 평가 알고리즘의 성능을 검증하였다.

2. 실험 모형교량 제작

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 강상자형 모형교량을 제작하여 안전성 평가기법 검증과 사용성 등을 검토하였다. 모형교량은 구조용 강재와 콘크리트를 사용하여 일반적인 2연 강상자 교량의 동적거동과 유사하도록 제작하였다. 모형교량의 총 길이는 3m로 제작하였으며, Fig. 2의 모형교량 단면도에서 제시된 것과 같이 주거더 크기는 120mm×75mm이고, 두께는 2.3mm인 강각관 2개를 사용하였다. 주거더 사이는 하중 횡분배를 고려하여 20cm 간격으로 가

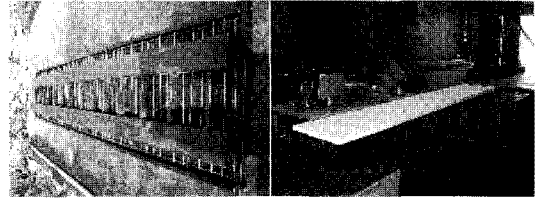


Fig. 1. Fabrication picture of a model bridge.

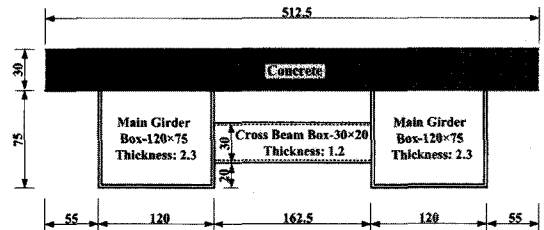


Fig. 2. Cross section of a model bridge(unit: mm).

Table 1. Material properties of a model bridge

재료	탄성계수 (MPa)	단위중량 (kN/m ³)	강도 (MPa)
Steel	203,890	78,200	$f_y=250(f_a=140)$
Concrete	24,647	25,000	$f_{ck}=27$

로보를 설치하였다. 바닥판은 콘크리트를 사용하여 폭이 51.25cm, 두께가 3cm인 슬래브로 제작하였으며, 강성보강을 위해 Wire Mesh를 단면중간에 매설하였다. Table 1은 모형교량 제작에 사용된 재료의 물성치를 정리한 것이다.

3. 모형교량의 FE 해석

3.1. 모달(Modal) 해석

모형교량의 안전성 평가에 필요한 동적특성인 자인 고유진동수와 모드벡터를 획득하여 실험결과와 비교·분석을 목적으로 모달(Modal) 해석을 수행하였다. FE 모델은 2절점 보 요소(Beam Element)를 적용하여 주거더와 가로보를 모델링하였으며, 바닥판은 쉘 요소(Shell Element)를 사용하였다. 전체 모형교량의 FE 모델은 총 600개의 쉘 요소와 134개의 보 요소가 적용되었다. FE 해석은 EDS의 I-DEAS를 이용하여 Normal 모드해석이 수행되었으며, 가이언소거법을 적용하여 바닥판 중앙, 1/4지점 및 3/4지점 양쪽 6개 절점의 수직방향으로 Fig. 3과 같이 자유도를 응축하였다. 이때, 응축된 자유도의 위치와 방향은 실험 수행 시, 센서의 부착위치와 측정방향이 일치해야 한다. Table 2와 Fig. 4는 각각 FE 해석에 의한 모형교량의 고유진동수와

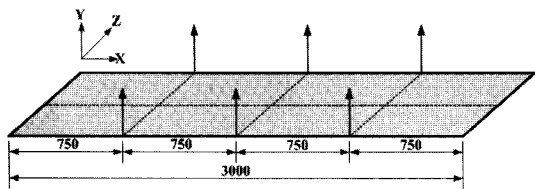


Fig. 3. Location and direction of condensation degree of freedom(unit: mm).

Table 2. Natural frequency of a model bridge by FE analysis

Mode	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
Frequencies (Hz)	20.76	41.20	49.01	93.02	103.02	182.48

모드형상을 나타낸 것이다. 모형교량은 1~6차 모드의 고유진동수 범위는 약 20~183Hz까지 분포하고 있다. 1, 3, 5차 모드는 휨 모드이며, 2, 4, 6차 모드는 비틀림 모드에 의해 지배받는 것을 확인할 수 있었다.

3.2. 계산내하력 산정

내하율(Rating Factor: RF)은 설계하중을 기준으로 하여 교량이 감당할 수 있는 활하중의 크기를 비례적으로 나타낸 일종의 비례계수이다. 즉, 교량이 안전하게 부담할 수 있는 활하중에 의한 응력의 최대값은 부재의 허용응력에서 고정하중에 의한 응력을 제한 나머지 결과이므로, 식 (1)과 같은 비

례식이 성립된다.

$$RF = \frac{f_a - f_d}{f_t(1+i)}, P = P_r \times RF \quad (1)$$

여기서, f_a 는 허용응력, f_d 는 고정하중에 의한 응력, f_t 는 설계활하중에 의한 응력이다. i 는 충격계수로서 재하실험으로부터 산정된 결과를 고려하는 것이 원칙이나, 재하실험을 실시하지 않는 경우에는 도로교시방서에 제시된 충격계수 식을 이용할 수 있다. 계산내하력 산정은 상용해석프로그램을 이용하였으며, 모형교량은 Fig. 5와 같이 3차원으로 모델링하였다. Fig. 6은 고정하중에 의한 주거더의 응력분포 양상을 도시한 것이다. 모형교량에 대한 주거더의 계산내하력 평가는 식 (1)에 제시된 허용응력법을 이용하였으며, 설계활하중은 500N으로 가정

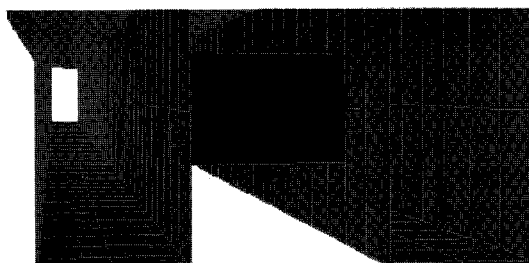


Fig. 5. 3-dimensional FE model of a model bridge.

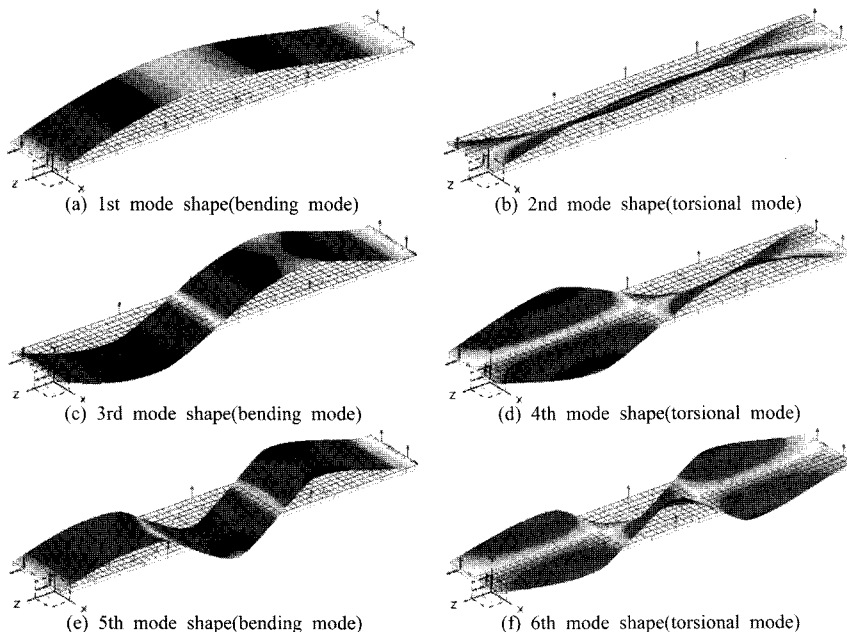


Fig. 4. Mode shape of a model bridge by FE analysis.



Fig. 6. Stress distribution of main girder by dead load.

Table 3. Assessment result of calculation load carrying capacity

구분	f_a (MPa)	f_d (MPa)	f_i (MPa)	i_{code}	R.F.	P_r (N)	P (N)
계산값	140	12.2	18.4	0.3	5.34	500	2,670

하며, 충격계수(i)는 도로교시방서의 제안식($i_{code} = 15/(40 + L) \leq 0.3$)을 적용하였다¹²⁾. Table 3은 모형교량의 계산 내하력 산정결과를 정리한 것으로, 모형교량 주거터의 계산내하중 및 내하력은 각각 5.34와 2,670N으로 계산되었다.

4. 공용내하력 산정

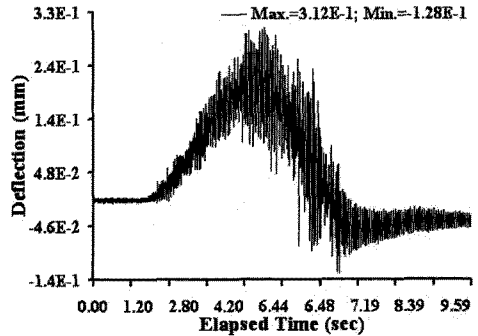
4.1. 재하실험

모형교량의 계측 내하력을 산정하기 위해 처짐보정계수(K_b)와 응력보정계수(K_e), 충격계수(i_{static})를 획득하기 위한 정적재하실험을 수행하였다. 이를 위해, 모형교량 주거터 중앙에 변위계와 변형률계이지를 부착하였다. Fig. 7은 정적재하시험에 의한 처짐이력곡선을 도시한 것이다. 응력계측을 위한 실험은 주거터 중앙 위의 바닥판에 132N 중량의 추들을 연속적으로 재하한 후, 계측된 변형율을 평균하여 산정하였다. Table 4는 정적재하시험에 의해 산정된 응력보정계수를 정리한 것이다. Table 5에 제시된 처짐보정계수는 원형의 구조물을 저속으로 주행시킨 준 정적재하시험으로부터 산정된 처짐을 이용하여 결정하였다. 또한 충격계수는 원형 구조물의 주행속도를 다양하게 변화를 주며 획득한 처짐이력곡선을 고려하여 각각 계산한 후, 최종적으로 산정된 결과를 평균하여 결정하였다.

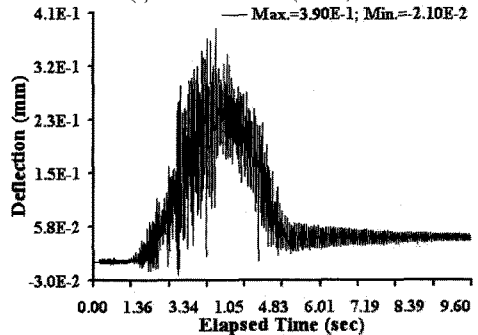
4.2. 공용내하력 추정

교량의 공용내하력(P_c)은 설계활하중(P_r), 내하중(RF), 응력, 노면상태 및 교통상태 등에 대한 보정계수(K_b , K_r , K_t)를 이용하여 식 (2)와 같이 평가할 수 있다¹²⁾.

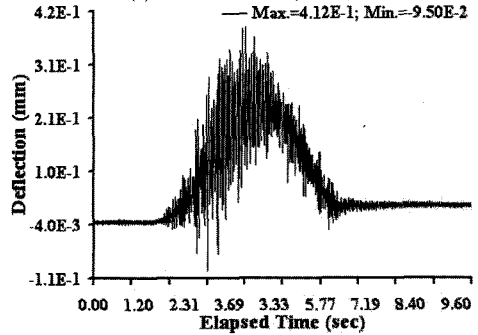
$$P_c = P_r \times R_F \times K_b \times K_r \times K_t \quad (2)$$



(a) Deflection curve(SET-1)



(b) Deflection curve(SET-2)



(c) Deflection curve(SET-3)

Fig. 7. Deflection history curve by loading test.

Table 4. Stress correction factor by loading test

하중 (N)	변형율 ($\mu\epsilon_{static}$)	변형율 ($\mu\epsilon_{calc}$)	응력보정계수 ($K_{e(static)}$)	$K_{e(Static)}^{proposed}$
132	29.51	32.28	1.094	1.077
264	59.02	63.95	1.084	
396	88.53	94.33	1.066	
528	118.04	125.67	1.064	

Table 5. Deflection correction factor and impact factor by loading test

SET	처짐 (δ_{static})	처짐 (δ_{calc})	처짐보정계수 ($K_{\delta(static)}$)	$K_{\delta(Static)}^{proposed}$	i_{static}	$i_{Static}^{proposed}$
1	0.24mm		1.042	1.142	0.58	0.64
2	0.20mm	0.25mm	1.250		0.64	
3	0.22mm		1.136		0.71	

이때, K_r , K_s 는 일반적으로 적용되는 1.0을 고려하였으며, 내하율은 식 (1)에 의해 산정하였다. 응력보정계수는 식 (3)과 같이 실측변형률과 계산변형률 혹은 실측처짐과 계산처짐비를 이용하여 검토할 수 있다.

$$K_s = \frac{\varepsilon_{calc}}{\varepsilon_{static}} \times \frac{1+i_{code}}{1+i_{static}}, K_s = \frac{\delta_{calc}}{\delta_{static}} \times \frac{1+i_{code}}{1+i_{static}} \quad (3)$$

여기서, ε 과 δ 는 각각 변형률과 처짐이며, i 는 충격계수를 의미한다. 공용내하력은 식 (3)의 변형률 또는 처짐을 이용할 수 있다. 변형률을 이용하는 경우에는 교량 전체보다는 국부적인 영향에 의해 크게 지배를 받는다. 최근에는 교량 전체거동을 평가하고 있으며, 보다 신뢰성 있는 평가결과를 얻기 위해 처짐보정계수를 많이 적용하고 있다. 이 연구에서도 처짐보정계수를 고려하여 모형교량의 공용내하력을 검토하였다. 공용내하력의 산정결과는 계산내하력의 90% 수준인 2,417N으로 평가되었다. 이와 같이 모형교량의 공용내하력이 크게 산정된 것은 동적증폭효과가 고려된 결과로 판단된다.

5. 상시진동에 의한 내하력 추정

5.1. 동적특성 분석 실험

모형교량의 동적특성 실험은 상시진동에 의한 교량의 응답신호만을 가지고 동적특성을 추정하는 NEXt, ERA방법을 이용하였다. Fig. 8과 같이 총 3개의 계측점 위치에서 모형교량에 발생하는 출력신호를 1,000Hz의 샘플링율로 획득 하였으며, 기준 채널은 목적하는 모든 모드(1~3차의 휨 모드)의 응답을 적절하게 반영할 수 있도록 CH-1로 설정하였다.

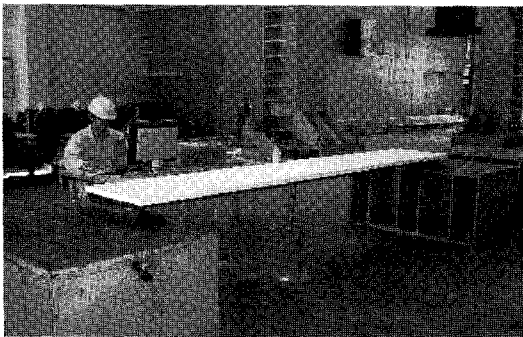
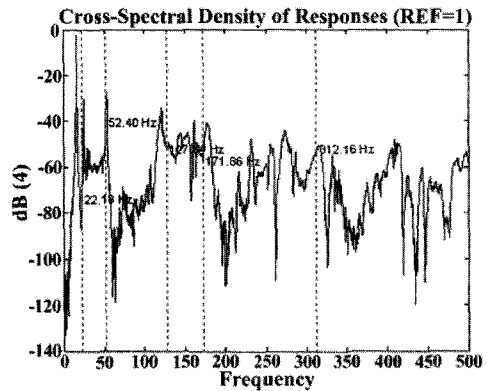
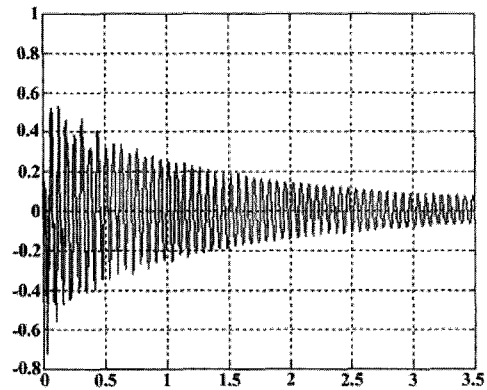


Fig. 8. Dynamic characteristic experiment picture.

상시진동은 모형교량의 외부에서 임의로 발생시켰으며, 외부가진력에 대한 측정은 수행하지 않았다. 상시진동을 측정하여 모형교량의 동적응답을 분석하고, 손상검출을 위한 목적 모드는 1~3차까지의 휨 모드로 제한하였다. 획득한 데이터분석은 Los Alamos National Lab에서 개발한 DIAMOND 프로그램을 이용하였다. Fig. 9는 계측된 데이터를 DIAMOND의 NEXt모듈을 이용하여 교차파워스펙트럼(CPS)과 이를 역 푸리에 변환하여 상호상관함수(CCF)로 변환된 무선계측시스템과 유선계측시스템의 대표적인 신호처리 결과를 도시한 것이다. ERA모듈은 NEXt모듈에 의해 최종적으로 획득한 각 계측점의 CCF를 이용하여 모형교량의 동적특성을 분석하였다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 측정범위 내에서 목적했던 휨 모드(1~3차)가 모두 분포하고 있음을 확인할 수 있었다. 이와 같은 방법으로 실험 목표모드인 처음 세 개 휨 모드의 고유진동수와 모드형상들을 분석하여 Fig. 10에 정리하였다.



(a) Cross power spectrum(CH-2)



(b) Cross correlation function(CH-2)

Fig. 9. Cross power spectrum and cross correlation function.

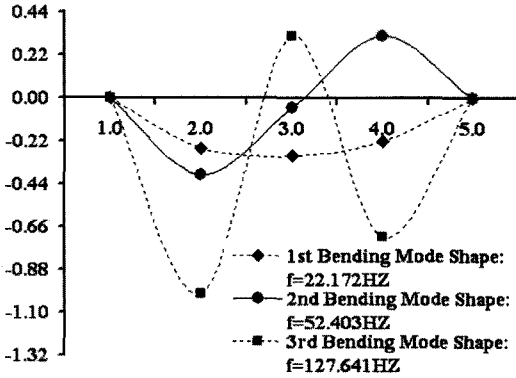


Fig. 10. Mode shape of a model bridge by dynamic characteristic experiment.

FE 해석결과와 실험에 의해 획득한 모드형상의 상관관계를 수치적으로 분석하기 위해 MAC 알고리즘을 이용하였다. Ewins 등의 연구결과에 의하면 MAC의 지표값이 0.9 이상이면 상관관계가 우수하다고 판정할 수 있다. 그러나 상관관계의 지표가 절점(계측점)의 수에 많은 영향을 받게 되기 때문에 실험 등과 같이 계측점의 수에 제약을 받게 되는 경우에는 0.8까지도 허용하고 있다¹³⁾. Fig. 11과 Table 6은 실험 및 FE 해석에 의해 획득한 모드 간의 상관관계를 정리한 것이다. MAC 분석결과, 모드형상은 전체모드에서 상관관계의 지표가 0.9 이상으로 높게 산정되었으며, 고유진동수는 고차모드로

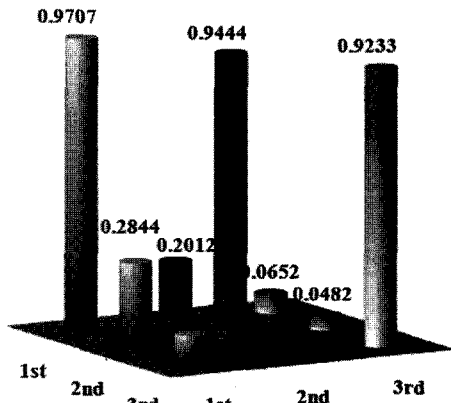


Fig. 11. MAC value plotting by FE analysis and experiment.

Table 6. Result of MAC value plotting by FE analysis and experiment

FE 해석	모형교량 실험		
	1st Mode	2nd Mode	3rd Mode
1st Mode	0.9707	0.2844	0.1007
2nd Mode	0.2012	0.9444	0.0501
3rd Mode	0.0652	0.0482	0.9233

갈수록 상관관계의 지표가 하락하는 양상이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

5.2. 상시내하력 추정

상시내하력 추정을 위해서는 초기 FE 해석모델 및 개선된 FE 해석모델의 결과를 이용하여 처짐보정계수($K_{\delta}^{proposed}$)를 추정하는 것이다. FE 해석모델을 개선하기 위한 방안으로는 직접탐색방법(Direct Search Method)의 하나인 다운힐 심플렉스(Downhill Simplex)방법¹⁴⁾, 구조물의 손상에 의한 강성변화를 구하는 직접행렬(Direct Matrix Updating Method: DMUM)방법 및 오차행렬법(Error Matrix Method: EMM) 등이 있다¹⁵⁾. 이 연구에서는 MAC값을 이용하여 FE 해석모델을 개선하였다. 즉, MAC값을 1.0에 최대한 접근하도록 모형교량 주거더의 탄성계수를 조절하는 방법을 이용하였다. Table 7은 개선된 FE 해석모델의 고유진동수와 개선 전 동적실험 결과를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 12와 Table 8은 개선된 FE 해석모델과 동적실험에 의한 모드형상을 MAC을 이용하여 분석한 것이다. Table 9에 제시된 것과 같이 처짐보정계수($K_{\delta}^{proposed}$)는 1.134로 산정되었으며, 재하실험에 의한 처짐보정계수($K_{\delta}^{proposed}$)의 약 99.3% 수준의 결과가 검토되었다. 충격계수는 실제 교량의 노면조도 및 현재 상태 등

Table 7. Natural frequency of a model bridge by FE analysis

Mode		1st Mode	2nd Mode	3rd Mode
FE 해석	개선 전	20.761	49.01	103.019
	개선 후	22.216	52.586	110.535
모형교량 실험		22.176	52.403	127.641

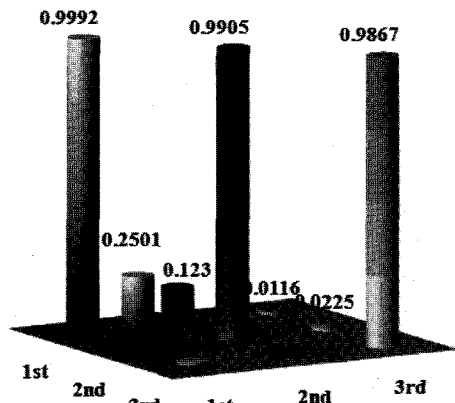


Fig. 12. MAC value plotting by advanced FE analysis and experiment.

Table 8. Result of MAC value plotting by advanced FE analysis and experiment

FE 해석 (개선 후)	모형교량 실험		
	1st Mode	2nd Mode	3rd Mode
1st Mode	0.9992	0.2501	0.0184
2nd Mode	0.1230	0.9905	0.0202
3rd Mode	0.0116	0.0225	0.9867

Table 9. Comparison of load carrying capacity by estimating method

구분	$P_d(N)$	RF	i	K_δ	$P(N)$
계산내하력			$i_{code} = 0.30$	-	2,670
공용내하력	500	5.34	$i_{static}^{proposed} = 0.64$	$K_{\delta(staic)}^{proposed} = 1.142$	2,417
상시진동			$i_{Dynamic}^{proposed} = 0.57$	$K_{\delta(Updating)}^{proposed} = 1.134$	2,552

에 의해 실측되어야만 하는 수치이므로, 이동하중을 고려하여 FE 해석을 검토할 수 있으나, 이러한 FE 해석에서는 노면조도나 단차효과 등을 모두 고려하기가 매우 어렵게 된다. 따라서 이 연구에서는 충격계수 역시, 계측한 가속도 계측자료를 이중적분하여 유사치짐을 구한 후, 충격계수를 산정하였다. 가속도를 이중적분하여 치짐을 구하는 경우, 속도 및 치짐의 초기치와 저주파 잡음에 의하여 실제 치짐을 정확하게 구하는 것이 매우 어려운 것으로 알려져 있다¹⁶⁾.

그러나 충격계수의 경우, 치짐의 절대값 자체가 중요한 것이 아니고, 정·동적치짐 사이의 비율이 중요하므로, 단순히 이중적분만으로도 이러한 비율을 구할 수 있는 것으로 가정하였다⁵⁾. 이와 같은 방법을 적용한 결과, 모형교량의 충격계수는 $i_{Dynamic}^{proposed} = 0.57$ 로 추정되었다. 이러한 결과는 재하실험에 의해 추정된 $i_{static}^{proposed}$ 보다 약 10% 정도 감소한 것이다. 모형교량의 상시내하력 추정결과, 2,552N로 공용내하력에 비해 약 5.3% 증가한 결과가 검토되었다.

6. 결론

이 연구에서는 교량 장기계측시스템을 활용한 교량 내하력 추정 가능성을 확인하기 위해 FE 해석과 실험 결과를 바탕으로 교량 상시내하력평가 알고리즘의 성능 검증을 수행하였다. 실험결과, 강상자형 모형교량의 상시내하력은 2,552N이며, 공용내하력은 2,417N으로 검토되었다. 따라서 추정된 상시내하력은 약 5.3% 정도 공용내하력에 비해 크게 평가된 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글 : 본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업 연구개발사업의 연구비지원(06건설핵심B05)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) 한국도로공사 도로교통기술원, “교량 계측시스템 운영상태 조사 및 관리방안 검토”, 연구보고서, 2003.
- 2) 서울특별시 건설안전본부, “한강교량 On Line 안전감시망 구축용역”, 종합보고서, 2007.
- 3) 한국건설기술연구원, “도로시설물 안전관리네트워크 시범 구축”, 기획보고서, 2007.
- 4) 한국도로공사 도로교통기술원, “상시교통하중에 의한 교량 내하력 평가시스템 개발”, 연구보고서, 2005.
- 5) 조수진, 이진학, 이창근, 윤정방, “상시진동에 의한 교량의 공용내하력 평가”, 대한토목 학회논문집, 제 27권, 제1A호, pp. 79~89, 2007.
- 6) B.C. Faulkner, F.W. Barton, T.T. Baber, and W.T. McKeel, “Determination of bridge using acceleration data”, Virginia Transportation Research Council, VA, USA, pp. 54~66, 1996.
- 7) G.H. James III, T.G. Carne, and J.P. Lauffer, “The Natural Excitation Technique(NExT) for Modal Parameter Extraction from Operating Wind Turbines”, SAND92-1666, UC-261, pp. 3~10, 1993.
- 8) C.R. Farrar, Jauregui. and David., “Damage Detection Algorithms Applied to Experimental and Numerical Model Data from the I-40 Bridge”, Los Alamos National Laboratory Report LA-13074-MS, pp. 1~22, 1997.
- 9) J.N. Juang and R.S. Pappa, “An Eigensystem Realization Algorithm for Modal Parameter Identification and Model Reduction”, Journal of Guidance, Vol. 8, No. 5, pp. 620~627, 1985.
- 10) R.S. Pappa and J.N. Juang, “Some Experiences with the Eigensystem Realization Algorithm”, Journal of Sound and Vibration, pp. 30~34, 1988.
- 11) 허광희, 이규, 이진옥, “자연가진기법을 이용한 대형 구조물의 스마트 모니터링시스템”, 대한 토목학회논문집, 제24권, 제1A호, pp. 135~142, 2004.
- 12) 건설교통부(2000) 도로교 표준시방서
- 13) D.J. Ewins, “Modal Testing: Theory, Practice and Application”, R. S. P., 2000.
- 14) J.A. Nelder and R. Mead, “A simplex method for function minimization”, The computer Journal. Vol.

- 7, No. 4, pp. 308~313, 1965.
- 15) G.H. Heo, J.Y. Jeon, C.O. Lee and W.S. Lee, "FE Model Updating for Health Monitoring of Structures and Its Experimental Verification by Damage Detection", The 1st International Conference on Advanced Nondestructive Evaluation jesu, Korea, pp. 123~132, 2005.
- 16) 이형진, 박정식, "수정된 웨이블릿 개념을 이용한 계측 가속도 기록의 이중 적분법", 한국지진공학 회논문집, 제7권, 제5호, pp. 11~17, 2003.