

교량건전성 평가의 개선을 위한 상시진동시험

Ambient Vibration Tests for Enhanced Bridges Integrity Assessment

이진학*, 이종재**, 이창근***, 이원태***, 윤정방**

Jin-Hak Yi, Jong-Jae Lee, Chang-Geun Lee, Won-Tae Lee and Chung-Bang Yun

Key Words: 모드해석, 상시진동계측, 교량 내하력

ABSTRACT

In this study, ambient vibration tests are carried out to replace the current bridge integrity assessment using controlled vehicle test which requires the traffic control and may induce public complains. Ambient vibration tests and output-only modal identification can be very effective approach to evaluate the bridge integrity because the ambient vibration tests can be performed very easily without traffic control. The bridges in test road of Jungbu Inland Highway were tested and the results are discussed here.

1. 서 론

지난 90 년대 초반 국내에서 발생한 여러 시설물의 붕괴사고 이후 시설물 유지관리에 대한 관심과 관련연구가 증가하고 있다. 특히 교량과 같은 사회기반시설물의 유지관리를 소홀히 하는 경우 대형 사고로 이어질 수 있어 평상시의 정기적인 안전점검 및 이상발생시의 정량적인 평가가 매우 중요하게 인식되었다. 이 연구에서 다루고 있는 교량과 같은 시설물에 대한 정량적인 평가는 육안 점검을 기본으로 초음파 등을 이용한 비파괴검사와 필요한 경우에는 차량재하시험 등을 통한 정량적인 내하력 평가를 수행할 수 있다. 육안점검 또는 비파괴시험의 경우 차량통행을 차단하지 않고 시험을 수행할 수 있는 반면, 교량의 구조적인 특성을 평가하기 어려운 단점이 있으며, 차량재하시험의 경우 교량의 구조적 특성을 평가할 수 있으나 차량통행을 차단하여야 한다는 점 때문에, 일반 고속도로 상의 교량 또는 주요 국도상의 교량에 대해서는 정기적으로 수행하기 어렵게 된다. 이 연구에서는 통행을 차단하는 차량재하시험을 대체할 수 있는 방법을 개발하고 있으며, 기본적인 개념은 다음과 같다. 기존의 차량재하시험을 수행하여 얻는 정보는 해석모델로부터 특정 차량에 대한 해석적 처짐값과 실제 재하시험을 통하여 얻은 처짐값을 비교함으로써, 해석모델이 가지는 오차를 보정하는 것이며, 이로부터 실제 교량의

공용내하력을 산정하는 것이다. 결국 차량재하시험은 기존의 수치해석모델이 가지는 오차를 실제 정적 실험을 통하여 보정해주는 것이라고 할 수 있다.

몇 년 전까지만 해도 국내에서의 상시진동계측 및 활용에 관한 연구가 그다지 활발하지 않았으나 최근 수년동안의 남해대교 [1], 서해대교 [2], 한남대교 [3] 등의 장대교량에 대한 상시진동계측결과를 이용한 모드해석 및 구조해석모델 검증에 관한 연구가 활발해지면서, 상시진동시험의 응용기술에 많은 진전이 이루어졌다. 이 연구에서는 기존의 정적시험인 차량재하시험을 대신하여 주행중인 차량에 대한 구조물의 응답을 계측하여, 구조물의 동특성을 추정하고, 이를 바탕으로 구조물의 물성치를 추정함으로써, 수치해석모델을 보정할 수 있는 방법을 제안하였다. 이러한 견지에서 볼 때 몇 가지 선결 과제가 있는데, (1) 우선 온도 및 습도 등 환경적 요인에 의한 구조물의 동특성 변화, (2) 차량-교량 상호작용에 의한 응답의 영향, 차량 질량, 속도 등에 대한 동특성 변화, 그리고 (3) 지점부의 노후화 정도에 따른 교량 응답의 영향에 대한 분석이 필요하며, 이러한 영향을 배제하기 위한 방안 등이 필요하다. 이러한 여러 요인 및 그 영향에 대한 연구를 수행하기 위해서는 장기간의 집중적인 실험연구가 병행되어야 하며, 이 연구에서는 이를 위하여 한국도로공사의 시험도로 구간 상의 교량에 대하여 정기적인 현장실험을 수행하고 있다. 또한, 현장실험을 수행하고 있는데 있어 여러 가지 조건을 반영할 수 있도록 실험 설계를 하였으며, 이 발표에서는 시험도로에 대한 개괄적인 소개와 함께 현재까지 진행된 상시진동계측 및 모드해석 결과를 소개하고자 한다.

· 한국과학기술원 스마트사회기반시설연구센터
E-mail : yjh@kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-8293, Fax : (042) 869-8290
.. 한국과학기술원 건설및환경공학과
... 한국도로공사 도로교통기술원

2. 연구 배경 및 소개

2.1 시험도로 건설 배경 및 교량 현황

실제 고속도로를 이용하는 교통량 및 우리나라의 기후환경, 생산되는 도로건설재료를 고려하여 우리나라의 실정에 맞는 한국도로 포장설계법을 개발하고, 그 적용성을 검토하기 위한 목적으로 건설된 한국도로공사 시험도로는 중부내륙고속도로 여주 JC 에서 감곡 IC 사이의 총 연장 7.7km의 편도 2 차선도로로써, 1998년 1월부터 2002년 12월까지 총 4년간에 걸쳐 건설되었으며, 총 건설비용은 250억, 총 연구예산은 50억이 투입된 건설분야에 있어 매우 획기적인 대규모 프로젝트라 할 수 있다(그림 1).

그림 1에서 보인 바와 같이 시험도로상에는 총 3기의 교량이 설치되어 있으며, 이 도로의 목적이 포장관련 연구를 위한 것이어서, 현재 교량에 대해서는 계측시스템이 구축되어 있지 않은 상황이다. 이 3기의 교량은 각각 다음 그림 1과 2에서 제시한 바와 같이 시험도로 북단에서부터 PSC 상자형교량인 금당교(그림 2a), 강상자형 교량인 연대교(그림 2b), 그리고 강주형 교량인 삼승교(그림 2c)가 있으며, 각각의 형상 및 현황은 다음 그림 2와 같다.

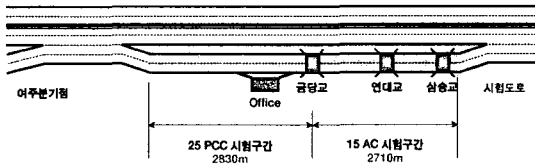


그림 1. 시험도로 개요

2.2 건전성 평가를 위한 상시진동시험

이 연구의 최종목적은 전술한 바와 같이 일반적인 교량 내하력 평가에서 수행되는 차량재하시험의 교통차단 문제를 해소하기 위하여 통행차량에 의하여 가진되는 응답을 계측하고, 기존의 모

드해석 및 역해석 등의 구조계 규명기법을 도입하며, 그 적용성을 평가하는 것으로 이와 함께 계절적, 환경적 요인에 대한 내하력의 변화, 지점부 조건에 의한 내하력 변화 등을 정량적 분석을 수행하는 것이다.

재하시험의 경우 구조물의 정적 혹은 준정적시험 통하여 구조해석모델과의 차이를 반영할 수 있도록 하는데, 이 연구에서는 상시진동계측을 통하여 같은 효과를 얻고자 하였다. 상시진동계측결과를 이용하여 모드해석을 수행함으로써 교량의 고유주파수 및 모드형상 등의 동특성을 추정하게 되며, 이 결과와 구조계규명기법을 이용하여 교량 상부구조물의 구조계수를 개선할 수 있다. 결국 개선된 모델에 대한 정적해석결과가 재하시험으로부터 얻은 처짐결과와 어느 정도의 오차범위 내에서 만족하게 되면 재하시험을 대체할 수 있게 되는 것이다. 이를 위해서는 신뢰성 있는 모드해석 기법과 구조계규명기법의 적용이 필요한데, 이 연구에서는 추계론적 부공간규명법(Stochastic Subspace Identification) [4]과 유전자알고리즘(Genetic Algorithm) [5]을 이용하고자 하였다. 한편, 유전자알고리즘에 의한 구조계규명은 현재 진행 중이므로 이 논문에는 포함시키지 않았으며, 여기서는 세 개 교량 중 금당교와 삼승교에 대한 상시진동계측 결과와 모드해석결과를 중심으로 소개하고자 한다.

3. 상시진동계측결과

3.1 삼승교

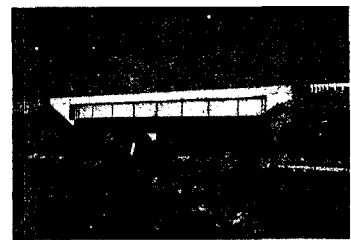
단경간 강주형교량인 삼승교에 대하여 두 차례에 걸친 예비시험과 한 차례의 차량주행시험 및 상시진동시험을 수행하였다. 다음의 그림 3은 삼승교의 형상과 가속도계 설치위치이다. 삼승교에 대해서 2004년 5월 28일 수행된 첫번째 예비시험에서는 대략적인 고유주파수를 추정하는 것을 목표로 하였기 때문에 4개의 가속도계를 설치하여 계측하였고, 2004년 6월 4일 수행된 두번째 시험에서는 가속도계 8개(그림 4에서 A2, A4,



(a) 금당교
(7 경간 272m)



(b) 연대교
(4 경간 강상자형 180m)



(c) 삼승교
(단경간 강주형 40m)

그림 3. 시험도로 구간 상의 교량 재원

A6, A8, A10, A11, A13, A15)를 사용하여 30분 동안 가속도계측을 수행하였으며, 그 자료를 이용하여 고유주파수, 모드형상 및 모드감쇠비를 추정하였다. 이 두 실험은 시험도로 상에 교통이 통행하고 있는 상태에서 상시진동을 계측하였다. 그리고 세번째 현장실험, 즉 2004년 8월 4일 수행된 본 실험에서는 차량 통행을 본선구간으로 돌려 시험도로 구간에는 통행차량이 없는 시점이었기 때문에 바람 등의 상시하중에 대한 응답을 계측하였는데, 이 경우에는 다음 그림 3과 같이 총 16개의 가속도계를 이용하여 계측을 수행하였다. 우선 삼승교는 5개의 주형이 있으며, 최외측 2개 주형과 가운데 주형에 가속도계를 설치하였다. 그림 4(a)는 두번째 예비시험 중 계측된 신호이며, 그림 4(b)는 본 실험 즉, 차량이 통행하지 않는 경우 바람 등의 상시하중에 의한 교량의 응답을 계측한 것이다. 두 신호를 비교해 볼 때, 그림 4(a), 즉 차량 통행시는 교량의 응답이 0.5g 수준으로 충분한 가진이 이루어졌으나, 그림 4(b) 즉 차량이 통행하지 않는 경우에는 크기가 0.02g 미만으로 그 응답이 매우 작음을 알 수 있다.

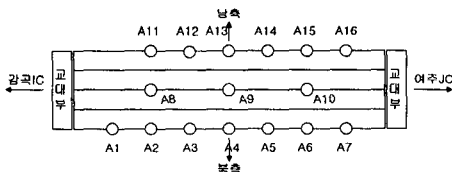
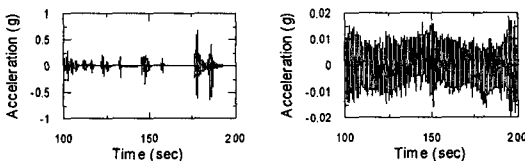


그림 3. 삼승교에 대한 가속도계측 위치



(a) 차량통행 중 (b) 차량통제 중

그림 4. 차량 통행 및 통제 중의 상시진동 계측

다음의 표 1과 그림 5는 차량이 통행 중인 경우와 차단된 경우, 상시진동계측으로부터 구한 모드형상 및 고유주파수, 모드감쇠비를 비교한 것이다. 6월 4일 계측된 신호를 분석한 결과, 휨모드, 비틀림모드, 면내휨모드가 저차 2개까지 모두 6개의 모드가 추정되었으나, 8월 4일 계측된 신호를 분석하였을 때는 이들 중 2차 휨모드와 2차 면내휨모드가 추정되지 않음을 알 수 있다. 이는 바람 등에 의한 교량의 응답이 차량에 의한 응답보다 현저히 낮고, 특히 추정되지 않은 모드에 대한 가진력이 충분하지 않았기 때문인 것으로 파악

할 수 있다. 한편, 추정된 고유주파수의 값을 비교해 보면, 고차모드 일수록 고유주파수의 차이가 작고, 1차 모드의 경우 가장 커서 7% 이상의 차이를 가지고 있는데, 이는 차량 통행시 차량의 질량효과와 함께 온도 등의 환경적 영향이 복합적으로 작용하였기 때문으로 파악된다. 한편 모드감쇠비의 경우 첫번째 모드의 경우 6% 정도의 감쇠비를 가지며, 그 외의 모드는 6% 미만으로 추정되었으며, 특히 고차모드의 경우 1% 미만의 매우 작은 모드감쇠비를 가지고 있는 것으로 추정되었다.

표 1. 삼승교의 동특성 추정결과

모드	고유진동수 (Hz)			모드감쇠비 (%)		
	6.4	8.4	변화량 (%)	6.4	8.4	변화량 (%)
1차휨	3.906	4.2086	7.46	6.60	6.29	4.81
1차비틀림	4.443	4.7065	5.76	3.20	2.60	20.69
1차면내휨	11.475	N/A	N/A	5.40	N/A	N/A
2차휨	13.08	12.824	1.98	2.50	2.44	2.43
2차비틀림	14.60	14.632	0.22	0.42	4.12	163.00
2차면내휨	18.55	N/A	N/A	0.14	N/A	N/A

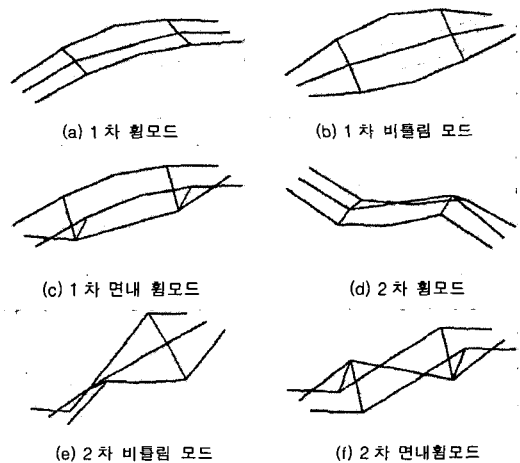


그림 5. 2차 예비시험 (2004년 6월 4일) 계측 신호로부터 구한 삼승교의 모드해석 결과

3.2 금당교

시험도로 상의 금당교 구간은 3경간 연속 PSC 상자형과 나머지 4경간은 단순 PSC I형으로 되어 있는 교량으로 이 연구에서는 3경간 연속 PSC 상자형 교량 구간에 대하여 재하시험 및 상시진동시험을 수행하였다. 다음의 그림 6은 상시진동시험시 계측한 가속도계의 설치위치이며, 그

림 7 은 차량 통행 중 그리고 차량 통제시 야간에 계측한 가속도응답자료이다.

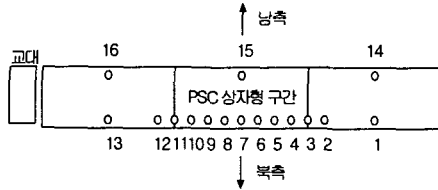
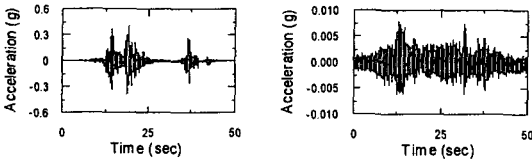


그림 6. 금당교에 대한 가속도계측 위치



(a) 차량통행중 (b) 차량통제시

그림 8. 차량 통행 및 통제 중의 상시진동 계측

다음의 표 2 와 그림 8 은 각각 금당교에 대하여 추정된 고유주파수, 모드형상, 모드감쇠비를 정리한 결과이며, 이 때 특이한 점으로는 2004년 8월 6일 야간에 계측된 신호로부터 더 많은 모드를 추정할 수 있었다는 점이다. 이는 단경간 교량 삼승교와는 달리 3 경간 연속교인 금당교에 대해서는 많은 수의 가속도계를 설치함으로써 비틀림 모드가 더 잘 추정될 수 있었다고 할 수 있다. 한편, 고유주파수의 차이도 삼승교의 경우와 달리 1차 모드의 차이가 1.27% 수준으로 작는데, 이는 삼승교의 경우 차량의 질량이 구조물에 비하여 크게 작용하는 반면, 금당교의 경우 금당교 자체의 사하중이 활하중에 비하여 매우 크고, 또한 계측시점이 삼승교보다 가까운 2004년 7월 29일과 2004년 8월 6일이었다는 점도 작용하였을 것으로 보여진다.

표 2. 삼승교의 동특성 추정결과

모드	고유진동수(Hz)			모드감쇠비(%)		
	7.29	8.6	차이 (%)	7.29	8.6	차이 (%)
1차횡	3.009	2.971	1.27	1.820	3.750	69.30
2차횡	4.351	4.448	2.20	1.698	1.690	0.47
3차횡	5.019	4.908	2.24	2.210	2.783	22.95
1차비틀림	N/A	7.467	N/A	N/A	0.686	N/A
2차비틀림	N/A	8.756	N/A	N/A	3.800	N/A
3차횡	9.412	9.443	0.33	0.540	1.398	88.54

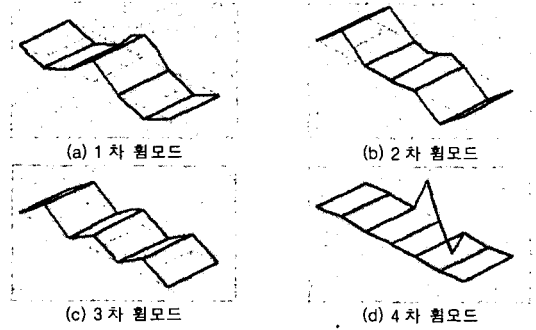


그림 8. 1차 예비시험 (2004년 7월 29일) 계측 신호로부터 구한 금당교의 모드해석 결과

4. 결론

이 연구에서는 교량의 건전성 평가 중 가장 객관적인 기준으로 이용되고 있는 교량 내하력 평가시 공용내하력 산정을 위하여 수행되는 차량재하시험을 대체하여 차량통행을 허용하면서, 신뢰성 있는 내하력 평가기법을 개발하고 있으며, 이 논문에서는 제안 과정 중 상시진동계측자료를 이용하여 구조물의 모드해석을 수행하는 단계까지를 소개하였다. 현재 차량 질량 및 주행속도와 동특성의 관계, 온도 등 환경적인 요인과 동특성의 관계 등을 연구하고 있으며, 또한 재하시험과 상시진동시험으로부터 구한 충격계수의 값이 어느 정도 일치하는지 등의 연구를 수행하고 있으며, 이후 연구결과들은 추후 다른 지면을 통하여 발표하고자 한다.

후기

이 연구는 한국도로공사 도로교통기술원 공동연구과제로 수행되었으며, 저자들은 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) 정대성, 김철영, 김남식, 윤자결, "상시진동실험을 이용한 남해대교의 동특성 평가," 대한토목학회 논문집, Vol.22 No.6-A p. 1501~1514, 2002.
- (2) 안상섭, 김만호, 김인배, "상시진동 계측에 의한 서해대교 사장교 케이블의 장력산정," 대한토목학회 2001 학술발표회 논문집, pp. 1~4.
- (3) 이종재, 이종원, 윤정방, "모델링 오차를 고려한 교량의 손상추정," 대한토목학회 2002년 학술발표회, pp 537~540.
- (4) Peeters, B. and De Roeck, G "Reference-Based Stochastic Subspace Identification for Output-Only Modal Analysis," Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.13, No.6, pp. 855-878, 1999.
- (5) 양영순, 김기화, "실수형 Genetic Algorithm에 의한 최적 설계," 전산구조공학 제 8 권 제 2 호, pp.123-132, 1995.