

강합성 데크 트러스 보도교의 자유진동해석 및 상시진동실험에 관한 연구

Free and Ambient Vibration of Steel-Deck Truss Bridge

정 성 엽^{1)*} 오 순 택²⁾
Jung, Sung Yeop Oh, Soon Taek

Abstract

This study describes an analytical and experimental investigation of the pedestrian steel-deck truss bridge in the City of Rochester, New York, U.S.A. This investigation was undertaken to provide assurance that this important bridge continues to be functional for this use. An ambient vibration experiment on full-scale structures is a way of assessing the reliability of the various assumptions employed in the mathematical models used in analysis. It is also the most reliable way of determining the structural parameters of major importance in structural dynamics, such as the mode shapes and the associated natural frequencies. Pedestrian-induced vibrations have been measured on the bridge to determine the displacement and the vertical and transverse dynamic characteristics of the steel deck truss. In the analytical modeling, three-dimensional finite element analysis was developed and validated against the ambient tests.

Keywords : Free vibration test, Ambient vibration test, Three-dimensional finite element method, Natural frequency, Mode shape

1. 서 론

트러스 구조물은 경제성과 장기간에의 적용성으로 인하여 교량 구조물에 널리 사용되고 있다. 이러한 트러스 교량은 상대적으로 작지만 많은 수의 부재가 서로 연결되어 교량을 형성하게 된다. 현재 사용 중에 있는 많은 수의 트러스 교량은 장기간 사용에 의한 심각한 손상, 활하중에 대한 충분치 못한 단면력, 설계 시 반영하지 않았던 지진하중 등으로 인하여 보수나 보강이 필요한 상황이다. 특히 최근의 교량 설계에 있어서 핵심사항 중 하나가 된 내진 성능 평가나 내진 해석을 감안해 보면 더 더욱 필요하다고 할 수 있다.

현재 사용 중에 있는 교량의 성능을 파악하기 위해서는 일반적으로 진단이나 점검을 수행하게 되나, 이에 의해 얻어진 교량의 상태에 대한 물리적인 자료는 정확하지 못한 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 정적처짐 실험 및 상시진동실험을 통하여 구조물의 정적·동적 거동을 파악하였다. 상시진동이란 실제 교량의 사용 중 작용하는 하중, 즉, 바람, 차량이동, 보도 상의 통행인 등에 의해 발

생하는 진동을 의미한다. 이를 입력하중으로 함으로서 실험절차가 간편하고, 단지 교량의 사용 중 상태에서 얻어진 데이터를 수집하고 분석하여 구조물의 동적 응답 특성을 구할 수 있게 된다는 점에서 현재 널리 사용되고 있다.

차량하중을 이용한 교량의 상시진동 실험을 통하여 교량의 동적거동을 검토하여 교량의 안전성에 대한 연구가 수행되었다 (Harik, 1997; Ventura, 1994). 보도현수교에 대한 상시진동실험을 통하여 교량의 동적거동이 연구되었다(Brownjohn, 1994). 또한, 지진하중을 이용한 시간이력해석을 통한 교량의 동적거동이 검토되었다 (Ely와 Birdy, 1997).

본 교량은 차로교에서 보도교로 바뀐 이후 명확한 정적 및 동적 현장 측정이 이루어지지 않아 그 필요성이 꾸준히 논의되어 왔다. 이에 따라 본 연구의 정적 및 동적실험을 통하여 구조물의 상태를 파악하여 교량의 사용성 및 안정성을 진단하고자 한다. 본 연구에서는 보행자에 의하여 발생하는 진동에 의한 상시진동 실험을 통하여 교량의 동적 특성인 고유주기와 모드형상 뿐만 아니라 정적실험을 통하여 교량의 처짐량을 측정하였다. 이를 위하여 교

1) 정회원, SK건설 과장, 공학박사, 교신저자

2) 정회원, 서울과학기술대학교 건설공학부 교수

* Corresponding author : syjung1@hotmail.com 02-3499-1311

• 본 논문에 대한 토의를 2012년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2012년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

량의 구조적인 거동을 파악하고 안전도를 정확하게 산정하기 위하여 필요한 변위 측정시스템을 실험에서 사용하였다. 또한 교량의 현재 상태를 정확히 모사할 수 있는 3차원 유한요소로 모델링하여 해석하였고 해석에 의한 결과와 실험에 의한 결과를 비교하였다.

2. 대상 구조물

본 대상 교량은 미국 뉴욕주 로체스터 시에 소재하고 있으며, 문화재 보존 대상으로 등록이 되어 있는 상태이다. 1898년에 준공되어 현재까지 일상적인 페인팅이나 콘크리트 데크 공사를 제외한 4회의 대규모 보수공사가 1946년, 1959년, 1980년 및 1993년에 수행되었다. 준공 당시의 교량명은 Platt Street Bridge 로서 차량의 통

행이 허용되었으나 이후 1980년의 대규모 보수공사를 거친 후 교량명을 Pont de Rennes 로 바꾸고 보도교 전용으로 전환하여 현재에 이르고 있다.

대상 교량은 Fig. 1에 보이는 바와 같이 강상판 트러스가 5경간을 구성하고, 하부에는 양단의 교대와 4개의 타워가 교각의 역할을 하면서 상부구조를 지지하고 있다. 본 교량은 12feet(3.66m) 폭의 보도와 8feet(2.44m) 폭의 자전거 도로로 구성되고 차량을 위한 차선은 존재하지 않는다. Fig. 2는 교량 상부구조에 대한 단면으로서 콘크리트 슬래브와 콘크리트 연석 및 강제 가드레일로 이루어져 있으며, 횡방향 바닥보와 종방향 스트링거로 구성되어 있다. 또한, Fig. 3은 대상교량의 상부 트러스 구성을 나타내고 있다.

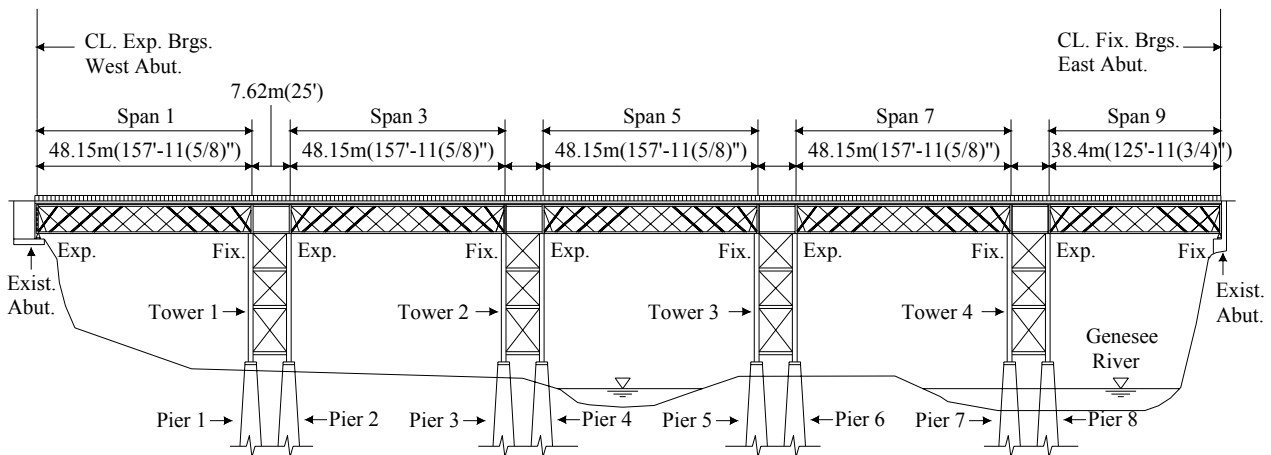


Fig. 1 Elevation View

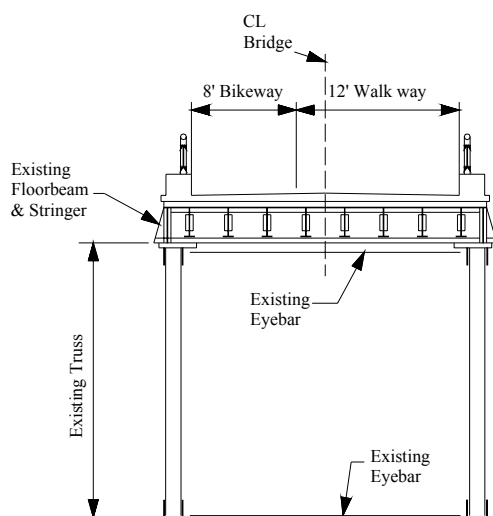


Fig. 2 Cross Section View



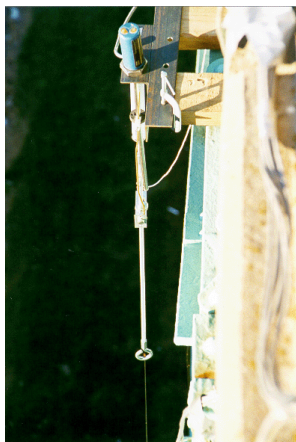
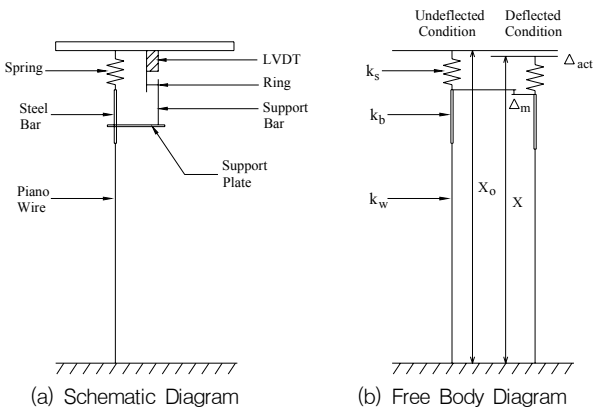
Fig. 3 View of Floor System and Cross Bracing

3. 실험적 연구

3.1 실험 개요

실험이 수행된 기간 중에는 교량 부근에서 레이저 쇼와 불꽃놀이를 포함한 축제가 진행되어 교량 상판에서 이를 관전하는 최대 4,000명의 행인이 활하중으로 작용하는 상황으로서, 대상 교량의 성능을 파악할 수 있는 좋은 기회가 되었다. 실험은 정적 처짐과 상시진동 실험으로 나누어 수행되었다.

현장실험에서 변위의 측정은 구조물의 거동과 교량의 안전도 산정을 위하여 중요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 변위 측정 시스템을 사용하였으며 이는 Fig. 4에 보이는 바와 같이 스프링, 지지 강판과 강봉, 피아노 와이어, 앵커, 변위 측정기, 마그네틱 링 타입 보조봉으로 구성된다. 교량에 하중이 작용하면 연직하향으로 처짐이 발생하고 이로 인하여 스프링이 수축함으로써 LVDT를 통하여 변위를 측정하게 된다.



(c) Displacement Device at End-Span (P1)

Fig. 4 Detail of Displacement System

하중이 작용하는 상태에서 스프링에 작용하는 힘 F 와 변위는 식 (1)과 (2)에 의하여 계산된다.

$$F = k \cdot X = k \cdot (X_o - \Delta_{act}) \quad (1)$$

$$\Delta_{act} = X_o - F/k = F_o/k - F/k = (F_o - F)/k \quad (2)$$

여기서, F_o : 하중 제거시 저항력, F : 하중 재하시 저항력, k : 총 강성도, Δ_{act} : 실제변위, X_o : 하중 제거시 높이, X : 하중 재하시 높이, k_s, k_b, k_w : 스프링, 강봉, 피아노 와이어의 스프링상수

측정된 변위값(Δ_m)은 스프링의 수축량으로서 식 (3)에 의해 계산된다.

$$\Delta_m = X_{s_o} - X_s = F_o/k_{s_o} - F/k_s = (F_o - F)/k_s \quad (3)$$

여기서, $k_{s_o} = k_s$: 스프링 상수, X_{s_o} : 하중 제거시 스프링 길이, X_s : 하중 재하시 스프링 길이

$$\Delta_{act}/\Delta_m = k_s/k \quad (4)$$

$$\Delta_{act} = (k_s/k) \cdot \Delta_m = Q \cdot \Delta_m \quad (5)$$

여기서, Q 는 보정계수로서 스프링의 수축시 발생하는 피아노 와이어와 스프링 하부의 강봉의 수축량을 고려하여 결정된다. 따라서 스프링, 피아노 와이어 및 강봉이 직렬로 연결되어 있으므로 등가 스프링 상수 k 는 다음과 같이 구한다.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_b} + \frac{1}{k_w}} \quad (6)$$

현장실험 후 실험실에서 스프링 인장 실험이 수행되었으며, 스프링 상수 $k_s = \Delta P/\Delta \delta = 4.3 \text{ lb/in} (0.75 \text{ N/mm})$ 로 측정되었으며, 또한 강봉과 피아노 와이어에 대한 인장실험 결과, $k_b = 6901.5 \text{ lb/in} (1210 \text{ N/mm})$, $k_w = 49.314 \text{ lb/in} (8.64 \text{ N/mm})$ 의 값이 각각 얻어졌다. 보정계수 Q 는 식 (8)에 의하여 계산되며 이를 측정된 변위값 Δ_m 과 곱하여 실제 변위 (Δ_{act})가 구해진다.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_b} + \frac{1}{k_w}} = 3.95 \text{ lb/in} (0.7 \text{ N/mm}) \quad (7)$$

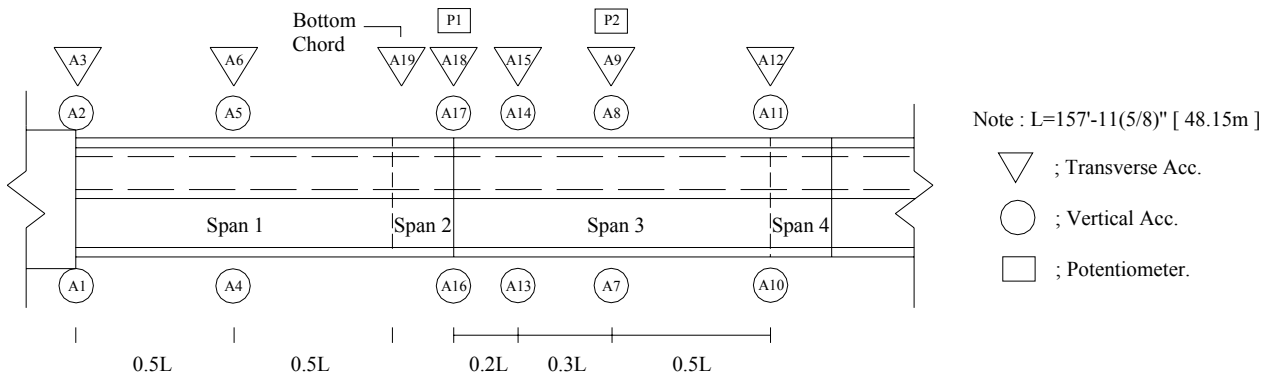


Fig. 5 Instrumentation Layout

$$Q = k_s/k = 4.292/3.9461 \approx 1.088 \quad (8)$$

동적 실험에서는 대상 교량에 동적 하중이 작용하는 상황에서 트러스 패널 지점의 수직 및 수평 가속도를 측정하였다. 이를 위하여 실험교량에 19개소에 가속도계를 설치하였고 2개소에 Potentiometer를 설치하였으나 13채널에서만 데이터의 수집이 가능하였다. 가속도계는 최대 값이 예상되는 중앙경간을 포함하여 대상구조물의 동적인 모드형상을 파악할 수 있는 위치를 선정하여 부착하였다. 현장실험은 4인이 교량의 상판(지간 중앙)에서 동시에 뛰는 자유진동 실험과 교량 상을 균중이 왕래하는 실제 활하중 상태 실험으로 나누어 수행하였다. Fig. 5는 트러스 강상판의 단부 상단에 설치된 가속도계와 전위차계(potentiometer)의 위치를 포함한 동적실험을 위한 측정계기들의 배치상태를 보여주고 있다.

3.2 실험 절차

현장실험은 3일간에 걸쳐 3회 실시하였으며, 매회의 실험은 4개의 단계로 이루어진다. 단계 I은 교량 상에 점프 테스트를 위한 실험 요원 4명만이 있는 상태에서 교량에 자유진동을 유발시키기 위하여 교량의 가드레일에서 일렬로 서 있다가 교축 직각방향으로 동시에 점프를 하도록 하였다. 단계 II는 통행인들이 레이저 쇼와 불꽃놀이를 구경하기 위하여 교량의 상판에 모여 있는 상태에서 정적하중 상태를 모사하게 된다. 단계 III은 쇼가 끝난 후 통행인들이 서서히 이동하는 동적하중 상태를 모사하게 된다. 마지막으로, 단계 IV는 레이저 쇼를 포함한 모든 이벤트가 끝나 교량 상에는 아무도 없는 즉, 활하중이 작용하지 않는 상황을 나타낸다.

3.3 실험 데이터 분석

본 연구에서는 11개소의 가속도계와 2개소의 전위차계를 통하여 얻어진 실험 결과를 분석하였다. 노이즈의 영향을 제거하고 모드별 고유 진동수를 구하기 위하여 Fast Fourier Transform(FFT) 해석 결과에 대하여 three point moving average 값을 택하였다. 모드형상은 모드별 고유진동수에 대하여 수직과 수평방향으로 나누어 구하였으며 응답에 대한 위상각은 modal amplitude의 부호를 결정하는데 이용되었다. Fig. 6은 현장 하중재하 단계별(Stage 1~3)로 시간에 따른 정적변위 실험결과를 나타내었다. P1(테크의 왼쪽 끝)과 P2테크 중앙)는 Fig. 5에 보인 바와 같이 potentiometer의 위치를 나타낸다. P1과 P2에서의 최대 처짐은 0.04 inch(1.02mm)와 0.1 inch(2.54mm)로 측정되었다. Fig. 6에 보인 바와 같이 최대 처짐은 행사가 끝난 직후에 발생하였다.

정적실험결과에 의한 처짐은 활하중에 대한 일반적인 보도교의 처짐 한계인 2.4 inch(61mm, L/800)에 비하

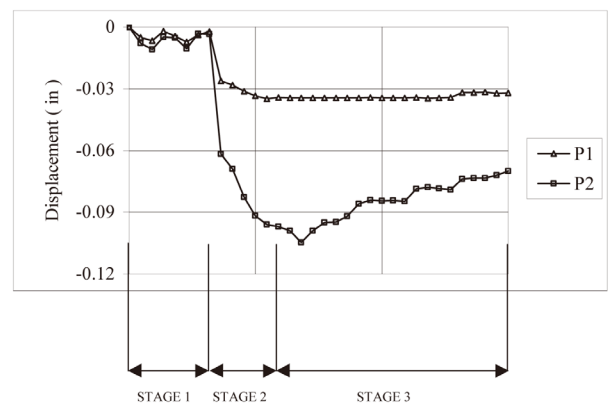


Fig. 6 Variation of Displacement with Time

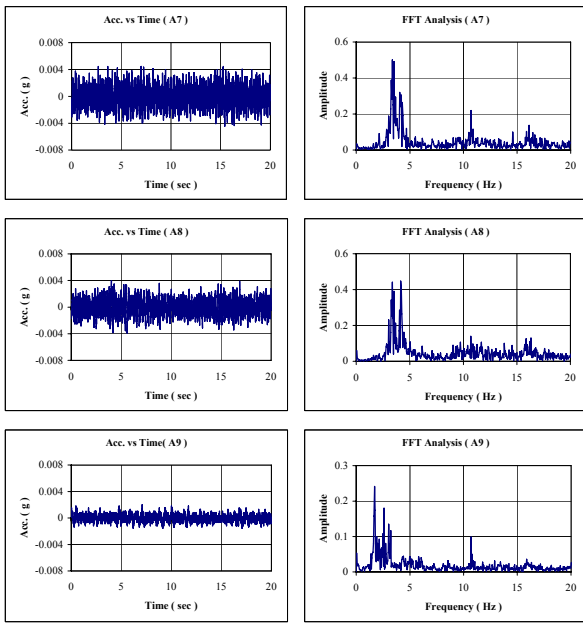


Fig. 7 Dynamic Data Results (Phase II)

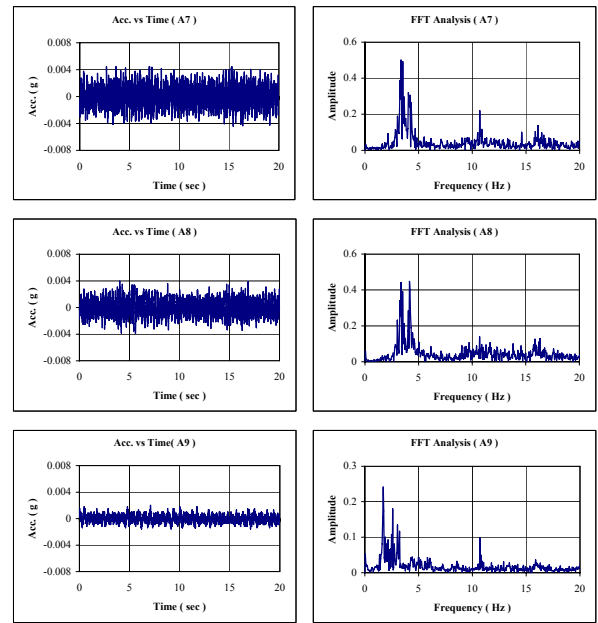


Fig. 8 Dynamic Data Results (Phase III)

여 낮은 값이 계측되었다(AASHTO, 1998). 이는 교량에 적용된 하중이 최대하중에 비하여 상대적으로 작은 상시하중이 작용하였기에 얻어진 결과라 판단된다. 상시진동 계측결과, 하중재하 단계 I에서는 수직 및 수평 고유진동수는 각각 3.54Hz와 1.7Hz으로 나타났으며 최대 수직 가속도는 0.04g, 최대 수평 가속도는 0.01g로 측정되었다. Fig. 7과 8은 가속도 시간이력곡선과 이에 대한 진동수 영역 FFT 해석결과를 보여주고 있다. Fig. 7은 하중재하 단계 II (교량 상에 모인 인파가 레이저 쇼를 구경하는 상태)에 대하여 실시된 실험결과로서 여기서 제시된 결과는 최대값이 계측된 교량(Span 3)의 중간 지점인 A7, A8(수직 가속도계) 및 A9(수평 가속도계)에서 측정된 값으로서 1차 모드에서의 수직 및 수평 고유진동수는 각각 3.37Hz와 1.7Hz으로 나타났다. 또한, 최대 수직 가속도는 0.004g, 최대 수평 가속도는 0.002g로 측정되었다. Fig. 8은 하중재하 단계 III (레이저 쇼가 끝남에 따라 모여든 인파가 교량을 빠져나가는 상황)에 대하여 측정된 값으로 최대 수직 가속도는 0.006g로서 하중단계 II에서의 0.004g에 비하여 50%가 증가한 반면에 최대 수평 가속도는 증감 없이 0.002g로 측정되었다. 수직 및 수평 고유진동수는 각각 3.54Hz와 1.71Hz으로 나타났다. 하중재하 단계 IV에서의 수직 및 수평 고유진동수는 각각 3.52Hz와 1.7Hz으로 나타났다. 또한, 최대 수직 가속도는 0.0016g, 최대 수평 가속도는 0.0006g로 측정되었다.






실험결과에 따르면 최대가속도는 대상교량에 상시하중으로 작용하는 인파의 다소에 따라 변화가 발생하였으며, 고유진동수는 전체적으로 하중재하 단계별로 큰 차이가 없는 것으로 계측되었다. 이는 고유진동수결정의 요인으로 작용하는 대상 구조계의 강성과 질량의 산정에 있어서 구조물의 질량에 인파가 미치는 영향이 작기 때문으로 판단된다. 본 연구에서는 고유진동수와 모드별 형상을 포함한 모드별 특성을 상시 진동 실험에서 측정된 구조물의 응답에 관한 데이터를 후처리하여 얻었으며, 진동수 영역 해석에서는 “Peak-picking method”를 채택하였다.

4. 상시진동실험 및 수치해석결과

4.1 유한요소 모델링

실험 결과와 해석 결과를 서로 비교하기 위하여 유한요소법을 이용한 3차원 선형 탄성해석을 실시하였으며 사용된 소프트웨어는 SAP2000 이다. 유한요소 해석시 적용된 콘크리트의 압축강도는 4,000 psi(28 MPa)를 적용하였으며, 강재의 탄성계수는 29,000 ksi(200 GPa)를 적용하였다. 단면적과 단면 2차 모멘트는 부식 등으로 인한 단면손실을 고려하여 실제 보다 10% 감소된 값을 적용하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 주요부재의 제원을 나타내었다. 이는 본 실험에 앞서 실시된 교량에 대

Table 1 Section Properties

Member	Legend	Area	Moment of Inertia
Truss Top Chord		28.6 in ² (184.4 cm ²)	I _x = 781 in ⁴ (32512 cm ⁴) I _y = 1310 in ⁴ (54465 cm ⁴)
Truss Bottom Chord		31 in ² (200 cm ²)	I _x = 773 in ⁴ (31267 cm ⁴) I _y = 1582 in ⁴ (65834 cm ⁴)
Truss End Column		17.72 in ² (114.3 cm ²)	I _x = 528 in ⁴ (21990 cm ⁴) I _y = 901 in ⁴ (37513 cm ⁴)
Tower Leg		26.3 in ² (170 cm ²)	I _x = 753 in ⁴ (32351 cm ⁴) I _y = 757 in ⁴ (31489 cm ⁴)
Tower Strut		8.75 in ² (56.45 cm ²)	I _x = 387 in ⁴ (16111 cm ⁴) I _y = 398 in ⁴ (16583 cm ⁴)

한 정밀점검의 결과를 바탕으로 결정되었다 (Bergmann Associates, 1999).

교량의 상부구조와 하부구조는 준공도면을 참조하여 모델링 하였다. 상부구조의 콘크리트 슬래브는 쉘 요소로, 바닥판은 보 요소로, 트러스 상판은 트러스 요소로 각각 모델링 하였으며, 콘크리트 슬래브와 바닥판은 강결로 처리하여 변위와 회전을 구속하였다. 또한, 교량 베어링은 상부구조에 가해지는 하중을 교량 기초로 전달하며 상부구조가 신축할 수 있도록 하는 역할을 한다. 본 교량은 회전을 허용하는 힌지 역할의 고정단과 온도 변화나 변위에 의해 발생하는 상부구조의 이동뿐만 아니라 회전도 허용하는 가동단의 두 종류의 베어링으로 구성되어 있다. 베어링은 보 요소로 모델링 하였다.

그리고, 하부구조는 4개의 타워로 구성되어 있으며 각각 16개의 절점과 58개의 보 요소로 모델링 하였다. 타워 저면에서의 경계조건은 회전과 변위를 모두 구속하는 것으로 하였다.

4.2 자유진동 해석

자유진동 해석은 구조물의 동적해석을 위하여 필요한 과정 중의 하나이며, 결과로서 얻어지는 고유 진동수와 모드 형상은 구조물의 동적 특성을 파악하는데 중요한 요소이다.

다음은 자유진동을 위한 동적 운동방정식을 나타낸다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0 \tag{9}$$

여기서, [M]은 질량 행렬, [K]는 강성도 행렬, {u}는 절점 변위벡터, { \dot{u} }는 절점 속도벡터, { \ddot{u} }는 절점 가속도 벡터를 나타낸다.

식 (9)의 해는 {u} = {a}sin(ω · t + θ)이 되고 여기서 {a}는 arbitrary vector, ω는 진동수 그리고 θ는 위상각을 나타낸다. 이를 이용하여 아래의 고유치 문제를 품으로서 구조물의 고유진동수와 모드별 형상을 얻을 수 있다.

$$([K] - \omega^2[M])\{a\} = 0 \tag{10}$$

4.3 상시진동실험과 수치해석 결과 비교

상시진동 실험의 주요 목적은, 현장 실험에서와 같은 조건을 가정한 수학적 모델의 정확도를 검증하고, 이로부터 실제 상황에서의 교량의 거동을 파악하여 교량의 또 다른 거동을 예측 할 수 있다. 본 연구에서는 현장실험을 통하여 구조물의 동적거동을 측정하였으며 수치해석을 통하여 이를 검증하였다. 고유진동수에 대하여 실험에서 얻어진 결과와 해석에서 얻어진 결과를 비교하였으며, Table 2에 제시된 바와 같이 수평방향과 수직방향에 대한 고유진동수가 복잡한 교량의 형상에도 불구하고 서로 잘 일치 하는 것으로 나타났다.

Fig. 9와 10은 현장 실험에 의한 진동수 분포와 함께 실험 및 해석에 의한 1차 수평 및 수직 진동 형상을 보여 주고 있다. 위쪽에 제시된 그림은 현장실험 결과로 얻어진 고유진동수를 각 모드별로 파악하여 최대 진동수 분포를 구하여 각각의 고유진동수로 결정하였으며, 아래쪽에 제시된 그림은 이에 따른 모드형상을 나타내었다. 또한,

Table 2 Experimental and Analytical Natural Frequencies

Mode Number	Field Test Results (Hz)	SAP 2000 Results (Hz)	Direction Type
1	1.70	1.717	Transverse
2	2.04	2.017	Transverse
3	3.04	3.434	Transverse
4	3.54	3.504	Vertical
5	3.84	3.883	Transverse
6	4.29	4.054	Vertical

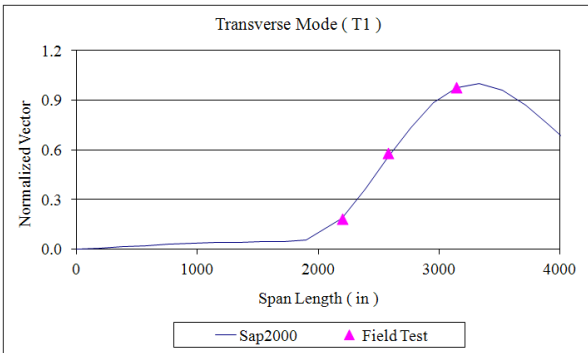
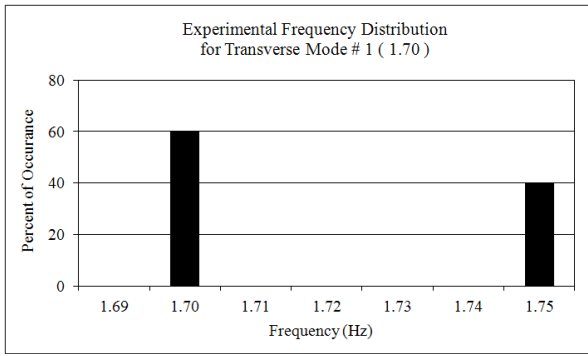


Fig. 9 Experimental and Analytical Transverse Mode #1

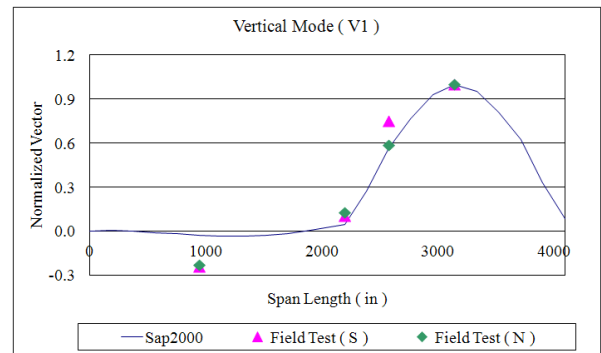
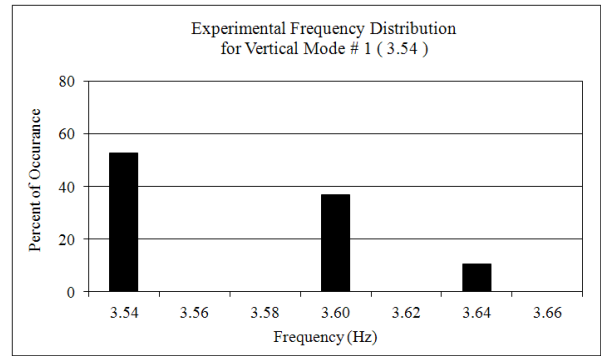


Fig. 10 Experimental and Analytical Vertical Mode #1

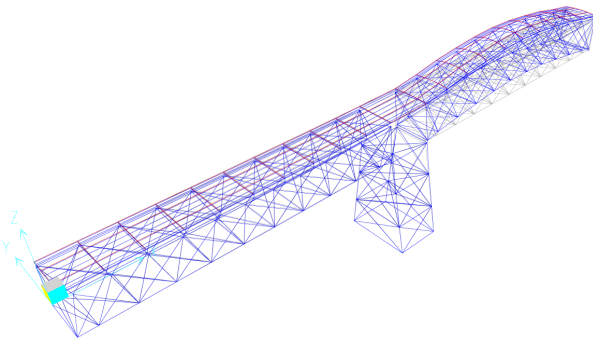


Fig. 11 Analyzed Transverse Mode Shape #1

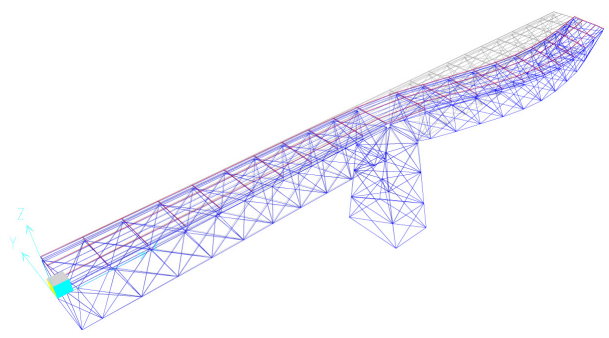


Fig. 12 Analyzed Vertical Mode Shape #1

이때 구하여진 결과를 SAP 2000을 이용한 유한요소 해석 결과(실선 표시)와 비교하여 제시하였다.

Fig. 9에서는 위치별로 계측된 수평모드 결과(삼각형 모양)와 유한요소 해석결과를 비교하였다.

그리고 Fig. 10에서는 교량의 교직방향 양단에서 계측된 수직모드(삼각형 모양: A1 방향, 다이아몬드 모양: A2 방향)와 유한요소 해석결과를 비교하였다. 그림에 제시된 바와 같이 현장실험 결과와 3차원 유한요소 해석 결과는 서로 잘 일치 하는 것으로 나타났다.

Fig. 11과 12는 3차원 유한요소해석에 결과에 따른 수평방향 및 수직방향 1차 모드 형상을 보여 주고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 대상 교량의 정적 및 동적거동을 파악하기 위하여 처짐 및 상시진동 실험과 함께 3차원 유한요소 해석을 수행하였으며 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 고유 진동수와 모드 형상에 대한 실험 및 해석적 결과는 잘 일치하는 것으로 나타났다.
- (2) 자유 진동 및 상시진동 실험을 포함한 현장 실험은 교량의 동적 특성을 파악할 수 있는 매우 유용한 방법이다.
- (3) 정적실험의 결과, 활하중에 대한 일반적인 보도교

의 한계 값에 비하여 작은 값이 계측되었는데, 이는 대상교량이 도로교에서 보도교로 교통하중을 제한함에 따른 결과라 사료된다.

- (4) 동적실험의 하중단계는 레이저 쇼 진행 전 점프테스트 단계, 레이저 쇼 진행 단계, 쇼가 끝난 후 인파가 교량을 빠져나가는 단계, 교량에 인파가 거의 없는 단계로 수행되었으며, 점프테스트 단계를 제외한 하중단계의 경우 최대수직가속도는 각각 0.004g, 0.006g, 0.0016g로 측정되었으며 최대 수평가속도는 0.002g, 0.002g, 0.0006g로 측정되어 인파의 다소 및 레이저 쇼의 진행상황에 따라 약간의 증감을 보였다.

또한, 고유진동수 분석을 통하여 각 하중단계별 고유진동수는 수직방향의 경우 각 단계별로 3.37Hz, 3.54Hz, 3.52Hz로 약간의 차이를 보였으며, 수평 방향의 경우 각 단계 모두 약 1.7Hz로 차이가 거의 없음을 보였다.

동적실험의 결과 상시하중이 교량의 구조시스템에 미치는 영향이 미미함을 알 수 있었다. 따라서 상시진동실험 결과에 따라 본 교량에 대한 사용성 및 안정성에 대한 문제는 없다고 판단된다.

- (5) 대상 교량에 대한 3차원 유한요소 해석을 통하여 교량의 수직방향과 수평방향 고유 진동수 및 모드 형상을 정확히 파악할 수 있었다.
- (6) 현장실험 및 해석 결과의 일치를 통하여 본 연구에서의 교량의 해석에 사용한 유한요소법 모델링이 유효한 것으로 파악되었다.

1. AASHTO, LRFD Bridge Design Specification, Second Edition, 1998.
2. Bathe, K. J., Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, Inc., 1996.
3. Bergmann Associates, Engineering Report, Pont de Rennes Investigation, 1999.
4. Bleich, F., Buckling Strength of Metal Structures, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, N.Y., 1952.
5. Brownjohn, J. W., Dumanoglu, A. A. and Taylor, C. A., "Dynamic Investigation of a Suspension Footbridge", Engineering Structures: the Journal of Earthquake, Wind and Ocean Engineering, vol. 16, 1994, pp.395-406.
6. Chopra, K. Anil., Dynamics of Structures: theory and application to earthquake engineering, Prentice-Hall, N.J., 1995.
7. Computers and Structures, Inc., SAP2000 Structural Analysis Users Manual Version 7, Berkely, C.A., 1998.
8. Douglas B. M., Reid, W. H., "Dynamic Tests and System Identification of Bridges", Journal of Structural Division, ASCE, vol. 108, 1982, pp.2295-2312.
9. Ely, Al., Birdy, Jal., "Vincent Thomas Bridge: Seismic Retrofit Design Details", Proceedings of the National Seismic Conference on Bridges and Highways, "Progress in Research and Practice", July 8 through July 11, 1997, Sacramento, CA., pp.1-14.
10. Harik, I. E., Allen, D. L., Street, R. L., Guo, M., Graves, R. C., Harison, J. and Gawry, M. J., "Free and Ambient Vibration of Brent-Spence Bridge", Journal of Structural Engineering, ASCE, vol. 123, 1997, pp.1262-1268.
11. Moses, F., Lebet, J. P., Bez, R., "Application of Field Testing to Bridge Evaluation", Journal of Structural Engineering, ASCE, 120(6), June, 1994, pp.1745-1762.
12. Ventura, C. E., Felber, A. J. and Stiemer, S. F., "Dynamic Characteristics of Bridges by experimental investigations of ambient vibrations: Queensborough Bridge", Proceedings of the Fifth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, July 10 through July 14, 1994, Chicago, IL. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA., vol. 2, 1994, pp.733-742.

(접수일자 : 2011년 6월 27일)

(1차 수정일자 : 2011년 10월 7일)

(2차 수정일자 : 2012년 2월 20일)

(심사완료일자 : 2012년 5월 22일)

요 지

본 연구에서는 미국 뉴욕주 로체스터시 소재 강합성 테크 트러스 보도교를 대상으로 사용성을 평가하기 위한 상시진동 실험 (ambient vibration test)을 수행하였고 이를 해석적 방법에 의한 결과와 비교하였다. 교량전체에 대한 상시진동실험은 수치모델 작성 시 도입되는 여러 가정들에 대한 타당성을 평가하는데 있어서 유용한 방법이며, 교량의 고유진동수나 모드형상과 같이 구조 동력학에서 중요한 구조적인 변수를 결정하는데 있어 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 교량의 수직방향 및 수평방향 진동 특성과 변위를 측정하기 위하여 실제 교량에서 보행자에 의해 발생하는 진동을 입력하중으로 사용하였다. 교량 구조물에 대한 모델링을 위하여 3차원 유한 요소법을 사용하여 해석을 수행하였으며, 이를 통하여 현장실험 결과와의 유효성을 입증하였다.

핵심 용어 : 자유진동 실험, 상시진동 실험, 3차원 유한 요소법, 고유진동수, 모드 형상
