자유진동 및 강제진동 기법을 이용한 플레이트 거더교의 플러터 계수 산정

Estimation of Flutter Derivatives for a Plate Girder Bridge Using Forced and Free Oscillation Tests

김 종 대*
Kim, Jong-Dae

요 약

바람에 의해 발생하는 장대교량의 진동현상은 버펫팅과 와류진동 그리고 플러터 등으로 구분할 수 있으며, 특히 설계풍속에 해당하는 강풍에 안전한 교량을 설계하는 것이 주된 관심사항이다. 이러한 장대교량의 공기역학적인 안정성 검토에 사용되는 플러터 계수를 풍동실험을 통하여 산정하였다. 본 논문에서는 일반적인 플레이트 거더교의 강풍에 대한 안정성을 검토하기 위하여 풍동실험을 수행하였으며, 자유진동 기법과 강제진동 기법을 사용하여 추출한 플러터 계수를 비교하였다. 자유진동 기법은 교량단면에 초기변위를 주어 상하 및 회전 진동을 하는 교량단면의 변위를 측정한 후 system identification 기법으로 플러터 계수를 구하게 된다. 그리고 강제진동 기법은 상하방향의 강제진동과 회전방향의 강제진동 실험을 독립적으로 수행하여 교량단면에 작용하는 풍하중과 단면의 진동을 분석함으로써 플러터 계수를 추정하게 된다. 그리고 플러터 계수의 비교를 통하여 강제진동 기법과 자유진동 기법의 장단점을 분석하였다.

keywords : plate girder bridge, flutter derivatives, forced oscillation test, free oscillation test

1. 서 론

최근 서남해안에 건설되고 있는 대부분의 특수교량은 사장교 또는 현수교의 케이블지지 장대교량으로서, 초기설계 단계에서부터 풍동실험 등을 통하여 교량단면의 내풍성능을 검증함으로써 바람에 안전하고 효율적으로 거동하는 교량설계를 수행하고 있다. 바람에 의해 발생하는 장대교량의 진동현상은 버펫팅과 와류진동 그리고 플러터 등으로 구분할 수 있으며, 특히 설계풍속에 해당하는 강풍에 안전한 교량을 설계하는 것이 주된 관심사항이다. 플러터는 일정한 속도 이상의 바람과 교량이 상호작용에 의해 발생하는 현상으로서, 상하 및 좌우 진동이 과다하게 진행하여 교량이 붕괴하게 되며, Scanlan 등은 이러한 거동을 설명하기 위해 공기

* 삼성건설 기술연구센터 수석연구원 jd2009.kim@samsung.com

역학적 계수 또는 플러터 계수를 사용하고 있다. 식(1) ~ (4)에서 구조물의 상하진동 (heaving motion, h)과 회전진동 (rotational motion, α)을 설명하는 식을 보여주고 있으며, 상하진동과 관련된 플러터 계수는 H_1^* ~ H_4^*, 그리고 회전진동에 관련된 플러터 계수는 A_1^* ~ A_4^*이다. 이식에서 사용된 B는 교량단면의 폭, U는 교량단면 높이에서의 평균풍속, K는 무차원 진동수 (=Bω/U)이다. 그림1에서 교량이 정지상태에서 바람에 의해 전이된 상태를 보여주고 있으며 위쪽으로 움직이는 경우 상하진동이 양의 값을, 그리고 시계바늘 방향이 회전진동의 양의 값이다.

$$m_h\left(\ddot{h}+2\zeta_h\omega_h\dot{h}+\omega_h^2 h\right)=L \tag{1}$$

$$m_\alpha\left(\ddot{\alpha}+2\zeta_\alpha\omega_\alpha\dot{\alpha}+\omega_\alpha^2\alpha\right)=M \tag{2}$$

$$L=\frac{1}{2}\rho U^2 B\left[KH_1^*\dot{h}/U+KH_2^*B\dot{\alpha}/U+K^2H_3^*\alpha+K^2H_4^*h/B\right] \tag{3}$$

$$M=\frac{1}{2}\rho U^2 B^2\left[KA_1^*\dot{h}/U+KA_2^*B\dot{\alpha}/U+K^2A_3^*\alpha+K^2A_4^*h/B\right] \tag{4}$$

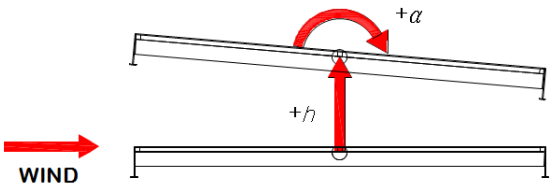

그림 1. Sign convention of bridge displacements

2. 강제진동 및 자유진동 기법을 이용한 플러터 계수 산정

Scanlan은 장대교량이 강풍에 의해 발생하는 불안정현상인 발산진동을 설명하기 위해 플러터 계수를 도입하여 비정상 풍하중을 산정하였다. 이때 비정상 풍하중에 의한 교량의 거동은 풍속에 따라 일정한 주파수를 갖는 사인파함수의 거동을 한다는 가정을 따르며, 플러터 계수는 무차원 진동수의 함수가 된다.

플러터 계수는 일반적으로 두 가지 풍동실험 기법, 즉 강제진동 기법 [Scanlan & Tomko]과 자유진동 기법 [Sakar 등, King 등]을 통하여 산정한다. 강제진동 기법은 상하방향의 강제진동과 회전방향의 강제진동 실험을 각각 독립적으로 수행하며, 교량단면에 작용하는 풍하중과 단면의 변위를 비교하여 플러터 계수를 추정하게 된다 (그림2 참조). 이 기법은 고풍속에서 안정적인 결과를 얻게 되지만, 저풍속 영역에서는 풍하중 측정에 어려움이 발생하여 계산결과의 신뢰도가 떨어지게 된다. 또한 실험에 많은 시간이 소요되어 실험비용이 증가하는 단점이 발생한다. 자유진동 기법은 교량단면에 초기변위를 주어 상하 및 회전 진동을 하는 교

량단면의 변위를 측정한 후 system identification 기법으로 플러터 계수를 구하게 된다. 이 방법은 실험이 간단하여 실험시간이 단축되는 단점이 있지만, 고풍속 영역에서 교량단면의 진동이 싸인파함수와 차이가 발생하여 플러터 계수의 변동성이 심하게 발생하게 된다. 그리고 공기역학적 감쇠율이 큰 단면 즉 초기진동이 급격히 감쇠하여 곧바로 버펫팅으로 진입하는 경우 플러터 계수 추출이 불가능한 경우가 발생하는 단점을 내포하고 있다.

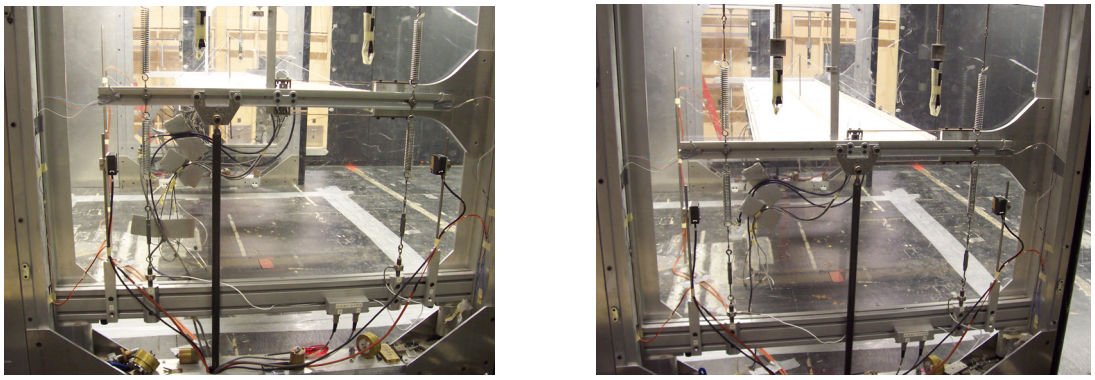

그림 2 강제진동 기법에 의한 플러터 계수 추출 실험: (a)회전진동, (b)상하진동

3. 결과

그림3에서 강제진동 및 자유진동 기법으로부터 추출한 플러터 계수를 비교하고 있다. 플러터 현상을 구조물 자체의 에너지 흡수력보다 외부 유동이 흡수하는 에너지가 더 많은 경우 (즉 공기역학적 감쇠가 구조물의 감쇠보다 더 큰 경우)라고 봤을 때, H_1^*은 상하진동에 대한 공기역학적 감쇠, 그리고 A_2^*는 회전진동에 대한 공기역학적 감쇠와 관련이 있다. 본 연구에 사용된 플레이트 거더 교량은 H_1^*이 음의 값을 갖게 되어 상하진동에 대해서는 안정적인 거동을 하는 반면, A_2^*는 무차원 풍속이 4정도일 때 양의 값을 갖게 되어 회전진동에 의한 불안정거동이 발생할 수 있음을 보여주고 있다.

2절에서 언급한 바와 같이 자유진동 기법으로 산정한 플러터 계수는 플러터 발현풍속 이상에서는 실험이 불가능하여 강제진동 기법에 비해 고풍속 영역에서의 실험이 제한적이며, 또한 고풍속 영역에서 발생하는 버펫팅 현상의 중첩 등으로 조화진동이 아닌 불규칙적인 진동이 됨으로써 결과에 상당한 차이를 보여주고 있다.

감사의 글

본 연구는 Alan G. Davenport Wind Engineering Group과 목포국립대학교 토목공학과의 협동연구에 의해 수행된 연구결과 (The development of wind tunnel test technique for an aeroelastic buffeting analysis of long-span bridges, BLWTL-SS19-2007-DRAFT)를 요약한 것으로 본 연구를 가능케한 목포대학교 김호경

교수 (현 서울대 토목공학과 교수)께 감사드립니다.

참고문헌

Scanlan, R., and Tomko, J., (1971) Airfoil and Bridge Deck Flutter Derivatives, J. of Engineering Mechanics Division, ASCE, 97(6), pp.1717 -1737

Sakar, P.P., Jones, N.P., and Scanlan, R.H., (1992) System identification for estimation of flutter derivatives, J. of Wind Eng. and Ind. Aerodyn., 42, pp.1243-1254

King, J.P.C, Kim, J.D., Hong, H.P. and Kong, L., (2004), A study of wind effects for the Stonecutters Bridge, Hong Kong - Section model investigatin, Estimation of aerodynamic derivatives, The University of Western Ontario, Faculty of Engineering Research Report, BLWT-ss37-2004

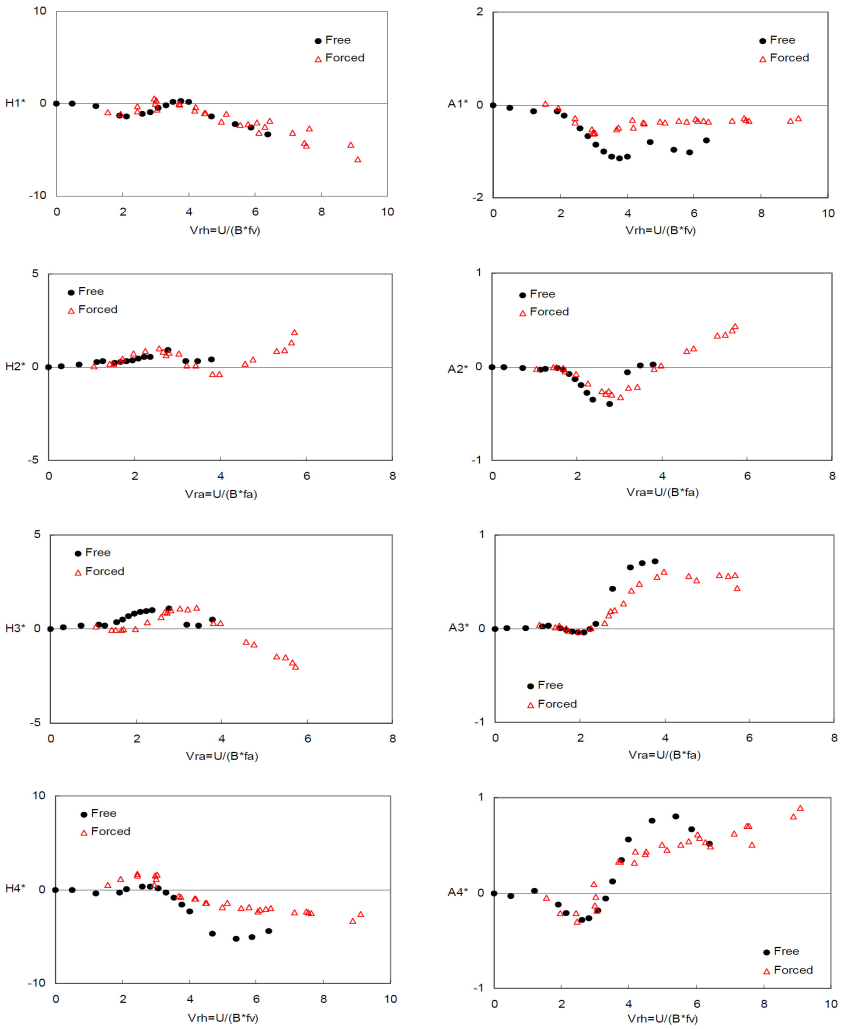

그림 3 강제진동 기법 및 자유진동 기법에 의한 플러터 계수