

# 케이블 교량의 등가 정적 버페팅 하중

## Equivalent static buffeting loads for cable supported bridges

권순덕\* · 이승호†

Kwon, Soon-Duck · Lee, Seungho

### 요약

본 연구에서는 추계학적 해석을 통하여 구한 교량의 동적 변위와 동일한 변위를 발생시키는 등가 정적 버페팅 하중을 구하는 방법을 제시하고, 단순 양단 캔틸레버에 적용하여 타당성을 검증하였다. 모드 형상이 복잡한 사장교의 경우에 2개 이상의 모드를 포함해야 정확도를 높일 수 있는 것으로 나타났다

*Keywords*: 등가 하중, 풍하중, 버페팅 하중, 케이블 교량

## 1. 서론

바람의 난류 성분에 의하여 발생하는 교량의 버페팅 응답은 추계학적 해석으로 추정이 가능하다. 이때 버페팅 해석은 일반적으로 풍동실험에서 구한 공기력 데이터와 구조해석에서 구한 모달 데이터를 결합하여 수행한다. 버페팅 해석의 최종 결과는 교량 변위의 스펙트럼이며, 이를 적분하여 변위의 확률적인 특성(표준편차)를 추정하게 된다. 그런데 교량 설계를 위해서 변위보다 내력이 필요한 경우가 많으므로, 변위로부터 하중을 구하기 위한 효과적인 방법이 필요하다.

본 논문에서는 버페팅 해석을 통하여 구한 교량의 동적 변위와 동일한 변위를 발생시키는 등가 정적 버페팅 하중을 산정하는 방법을 기술하였다. 개발된 방법을 먼저 단순 양단 캔틸레버에 적용하여 타당성을 검증하고, 실제 케이블 교량에 대한 적용성을 평가하였다.

## 2. 버페팅 풍하중

### 2.1 버페팅 응답

자연적인 바람은 불규칙적인 특성 때문에 통계 혹은 확률적인 방법으로만 접근이 가능하다.

---

\* 정회원 · 전북대학교 토목공학과 교수 [sdkwon@chonbuk.ac.kr](mailto:sdkwon@chonbuk.ac.kr)

† 전북대학교 대형풍동실험센터 선임연구원 [guide1th@chonbuk.ac.kr](mailto:guide1th@chonbuk.ac.kr)

이러한 특성 때문에 난류에 의한 교량의 최대 응답을 직접 구할 수는 없고, 응답의 통계적인 특성, 예를 들면 응답의 분산(혹은 표준편차) 등을 구할 수 밖에 없다. 풍하중을 받는 교량의 운동 방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 교량에 작용하는 풍하중은 자발 하중( $F_{self}$ )과 버페팅 하중( $F_{buffet}$ )으로 구분할 수 있다.

$$M\ddot{d}(t) + C\dot{d}(t) + Kd(t) = F_{self}(t) + F_{buffet}(t) \quad (1)$$

식 (1)에서 자발 하중은 교량의 진동에 의해 발생하며, 버페팅 하중은 바람이 불규칙하게 변화함에 따라 발생하므로, 일반적으로 두 하중은 서로 중첩이 가능하다고 가정한다. 버페팅 해석의 기본적인 방법은 풍하중 스펙트럼을 구하고, 이를 구조계의 응답함수와 곱하여 응답 스펙트럼을 산정한 후, 적분하여 응답의 분산을 추정한다. 이때 최대 변위는 계산된 변위의 표준편차( $\sigma_d$ )에 피크팩터  $g$ 를 곱하여 다음과 같이 추정한다.

$$d_{max}(x) = d_{static}(x) + d_{buffeting}(x), \quad d_{buffeting}(x) = g\sigma_d(x) \quad (2)$$

## 2.2 등가 정적 풍하중

버페팅 해석을 통하여 구한 식 (2)의 응답은 변위이므로 설계를 위해서는 이를 내력이나 응력으로 변환해야 한다. 그런데 일반적으로 구조해석 소프트웨어를 사용하여 구한 자유진동 데이터를 바탕으로 별도의 모듈에서 버페팅 해석을 수행하므로 부재 내력을 바로 구하기 어렵다. 따라서 버페팅 해석에서 구한 변위와 동일한 변위를 발생시키는 다음과 같은 등가의 정적 버페팅 하중을 구할 수 있다.

$$F_{eq}(x) = \pm \sum_i W_i \phi_i(x) \quad (3)$$

여기서  $W$ 는 가중치이고  $\phi$ 는 모드형상이다. 단위길이당 질량을  $m$ , 영향선을  $\beta$ , 일반화 모달 변위의 최대값을  $\bar{q}$ 라 할 때,  $i$ 번째 모드의 가중치  $W$ 와 적분값  $\alpha$ 는 다음과 같다.

$$\alpha_i(x) = \int_0^L m(x)\phi_i(x)\beta(x)dx \quad (4)$$

$$W_i = \frac{\alpha_i \cdot \omega_i^4 \cdot \bar{q}_i^2}{\sqrt{\sum_i (\alpha_i \cdot \omega_i^2 \cdot \bar{q}_i)^2}} \quad (5)$$

## 3. 적용 예제

### 3.1 양단 캔틸레버

식 (3)의 등가 정적 버페팅 하중이 타당한지 확인하기 위하여 그림 1(a)와 같은 총길이 200m인

양단 캔틸레버 구조에 대한 해석을 수행하였다. 이때 SAP2000을 사용하여 구한 구조물의 모드별 고유진동수는 각각 0.170Hz, 0.193Hz, 0.989Hz, 1.193Hz, 1.480Hz이고, 그림 1(b)에 모드 형상을 나타내었다.

풍속 50m/s에 대한 버페팅 해석을 수행하여 모달 변위를 구하고, 식 (3)~(5)를 사용하여 등가 정적 모달 풍하중을 구한 결과를 그림 2a에 나타내었다. 그리고 이를 SAP2000에 하중으로 재하하여 구한 정적 변위와 버페팅 해석으로 구한 동적 변위(SRSS)를 그림 2b에 비교하였다. 그림에서 보듯이 2개 모드만 사용하더라도 변위가 잘 일치하여 등가 하중이 적절함을 알 수 있다.

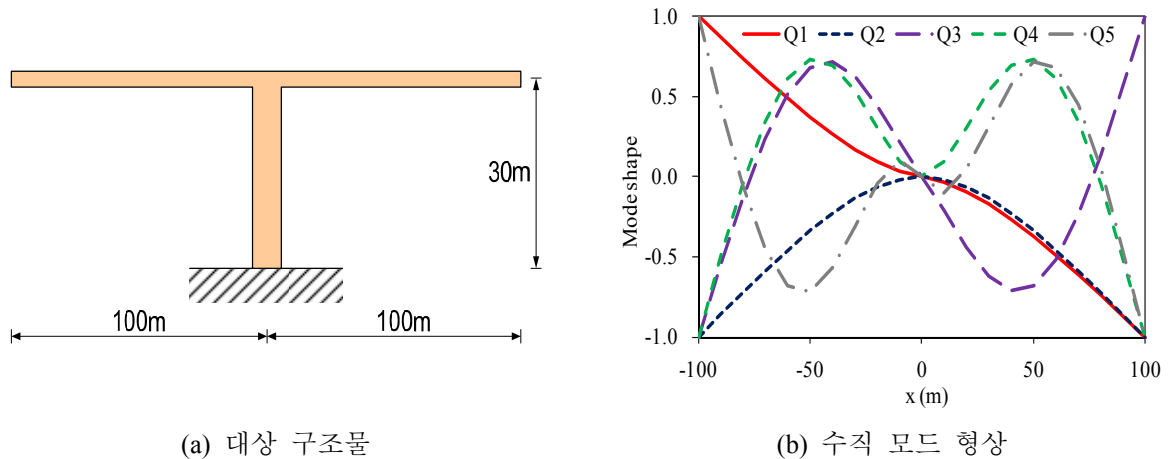


그림 1 양단 캔틸레버 해석 예제

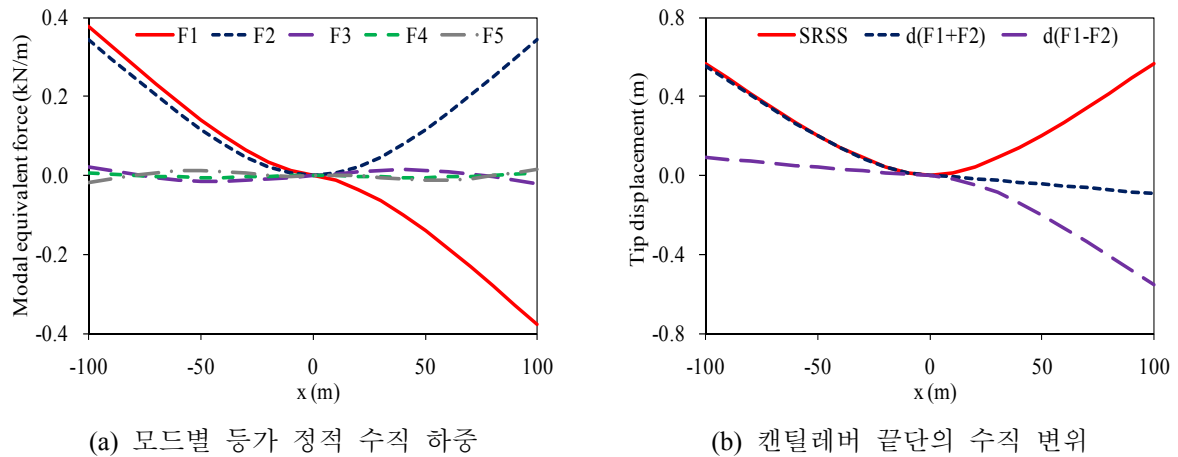


그림 2 등가 정적 버페팅 하중과 거더 변위 비교

### 3.2 사장교

측경간 폐합 직전의 총길이 300m인 사장교 시공단계를 대상으로 버페팅 해석을 통하여 구한 동적 변위와 등가 정적 풍하중을 사용하여 구한 변위를 비교하였다. 수직과 수평 각각 20개 모드

를 사용한 경우에는 두 결과가 일치하였다. 하지만 모드가 복잡한 실제 사장교의 경우에 2개 모드만 사용하면 수평 방향과 달리 수직 방향은 변위가 저평가되는 것으로 나타났다.

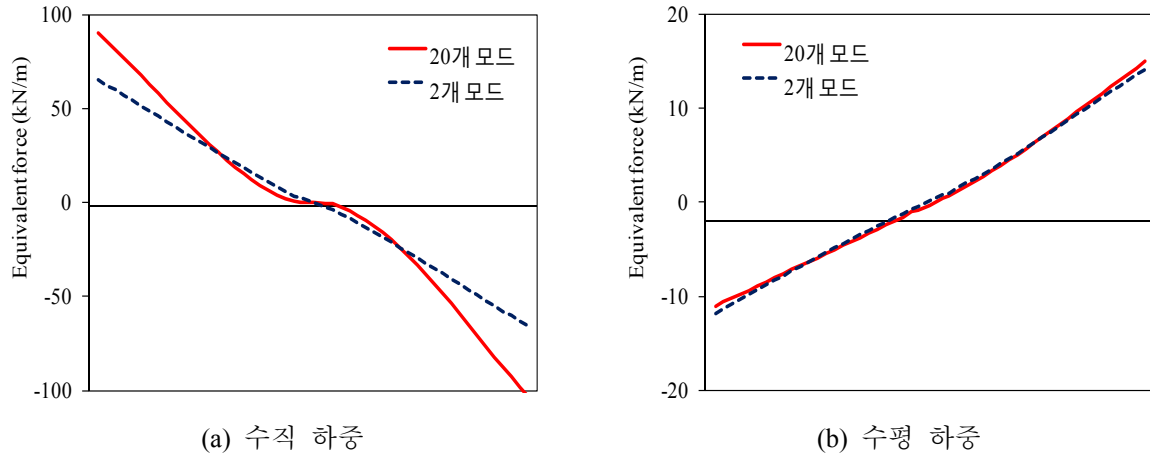


그림 3 시공단계 사장교의 모드수별 등가 정적 풍하중 비교

#### 4. 결론

본 연구에서는 버페팅 해석을 통하여 구한 교량의 동적 변위와 동일한 변위를 발생시키는 등가 정적 버페팅 하중을 구하는 방법을 제시하였다. 단순 양단 캔틸레버의 경우에 2개 모드만 사용하여도 거의 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 모드 형상이 더 복잡한 실제 사장교 예제의 경우에 2개 모드보다 더 많은 모드를 포함해야 하는 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

이 연구는 초장대교량 사업단 제1핵심과제를 통하여 지원된 국토해양부 건설기술혁신사업(08기술혁신E01)에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

Chen, X., Kareem, A. (2001) Equivalent static wind loads for buffeting response of bridges, *J. of Structural Engineering*, ASCE, 127(12).

Holmes, J.D. (2002) Effective static load distributions in wind engineering, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(2).

Kasperski, M., Niemann, H.J. (1992) The LRC (Load-response-correlation) method: a general method of estimating unfavorable wind load distributions for linear and nonlinear structural behavior, *J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 43(1).