

## 교량의 플러터 발생에 대한 신뢰도 해석

## Reliability Analysis for Flutter Onset of Bridges

박진욱\* · 이해성\*\*

Park, Jinwook · Lee, Hae Sung

본 연구에서는 응답면 기법을 활용하여 교량의 플러터 발생에 대한 신뢰도 해석을 수행한다. 확률변수로는 교량의 물성, 기하학적 파라미터, 감쇠비, 플러터계수, 재현기간 동안의 10분 최대풍속이 고려된다. 플러터 풍속을 포함하는 복잡한 한계상태식은 응답면 기법을 통해 간단한 이차 응답면으로 근사된다. 그리고 근사 응답면에 대해 FORM(First Order Reliability Method)을 수행한 결과를 통해 응답면을 재근사하고, 이 과정을 반복하여 신뢰도해석을 수행한다. 이 방법의 적용성을 케이블 구조 수치모델 예제를 통해 검증한다.

**핵심용어** : 플러터, 신뢰도 해석, 응답면 기법, 한계상태식, 케이블 교량

## 1. 서 론

장경간 케이블 교량에서 플러터 현상은 타코마 대교의 붕괴(1940)에서 알 수 있듯이 교량의 붕괴까지 야기할 수 있으므로 매우 중요하다. 플러터 현상은 교량의 플러터 풍속을 초과하는 풍속의 바람이 불 때 교량의 감쇠가 음의 감쇠에 도달하면서 발생한다. 따라서 그 동안 플러터 풍속을 정확히 구하기 위한 결정론적 연구는 활발히 이루어졌다. 그러나 실제로는 플러터 풍속에 영향을 미치는 교량의 물성, 기하학적 파라미터, 감쇠비, 플러터계수에 불확실성이 존재하고 풍속에도 큰 불확실성이 있기 때문에 교량의 플러터 발생을 엄밀히 고려하기 위해서는 확률론적 접근을 통한 신뢰도 해석이 필요하다.

## 2. 한계상태식 및 응답면 기법을 활용한 신뢰도 해석

교량의 플러터 발생에 대한 한계상태식은 다음 식 (1)과 같이 결정할 수 있다.

$$G = F \cdot U_f(\mathbf{x}, \xi) - U \quad (1)$$

여기서  $U_f$ 는 플러터 풍속,  $U$ 는 재현기간 동안 교량 거더 위치에서의 10분 최대풍속,  $\mathbf{x}$ 는 각각 교량의 물성, 기하학적 파라미터에 대한 벡터,  $\xi$ 는 구조감쇠비,  $F$ 는 플러터계수의 불확실성을 간접적으로 반영하는 확률변수다. 일반적으로 플러터 풍속은 고유치 해석을 포함하는 복잡한 과정을 통해 결정되므로, 응답면 기법(Bucher and Bourgund, 1990)을 활용하여 신뢰도 해석을 수행한다. 신뢰도 해석을 위해 먼저 한계상태식을 확률변수 간의 연성향이 없는 이차식 응답면으로 근사한다. 이 때 이차식의 계수는 중심점을 기준으로 주변의 표본점을 추출하고 근사면이 표본점에서 최소제곱오차를 만족하도록 결정된다. 이후 근사

\* 서울대학교 건설환경공학부 박사과정, 공학석사 (E-mail: jwpark07@snu.ac.kr) - 발표자

\*\* 서울대학교 건설환경공학부 교수, 공학박사 (E-mail: chslee@snu.ac.kr)

응답면에 대해 FORM을 수행하여 MPFP(Most Probable Failure Point)을 구한다. 그리고 MPFP를 이용해 중심점을 업데이트 하여 응답면을 재근사한다. 이 과정을 MPFP가 수렴할 때까지 반복수행 한다.

### 3. 예제 적용 및 검증

케이블 구조 수치모델(Jung et al., 2014)에 대해 플러터 발생에 대한 신뢰도 해석을 수행한다. 플러터 풍속은 Jung et al.(2014)에서 제시한 방법을 통해 구한다. 이 때 가정된 확률변수의 통계특성은 Cheng et al.(2005)와 Baldomir et al.(2013)을 참고하였다. 플러터풍속의 공칭값이 51.6 m/s인 케이블 구조 수치모델에 대해  $U$ 의 평균 30 m/s, 변동계수 0.1로 가정하여, 응답면 기법을 활용하는 방법과 유한차분으로 민감도를 계산한 FORM을 사용하여 각각 신뢰도해석을 수행한 결과 모두 신뢰도지수가 약 2.195로 차이가 거의 없었다. 아래 표 1에 정리된 응답면 기법을 활용한 신뢰도해석을 수행했을 때의 Normalized MPFP를 보면 상대적으로 확률변수  $F$ 와  $U$ 가 지배적으로 이동하여 파괴점에 도달하는 것을 알 수 있다.

표 1. 응답면 기법 적용 신뢰도해석 결과 MPFP

확률변수	물성, 기하학적 파라미터 벡터 $\mathbf{x}$ ( $E_{girder}, E_{cable}, A_{girder}, A_{cable}, I_y,$ $I_z, J, w_{girder}, w_{cable}$ )	구조감쇠비, $\xi$	플러터계수, $F$	재현기간 동안 교량 거더 위치에서의 10분 최대풍속, $U$
Normalized MPFP	(-0.49, -0.031, 0.003, 0.03, 0.39, 0.005, -0.49, 0.40, $-4.6 \times 10^{-6}$ )	-0.03	-1.71	1.04

### 4. 결론

본 연구에서는 응답면 기법을 활용하여 교량의 플러터 발생에 대한 신뢰도 해석을 수행한다. 이 신뢰도해석 방법을 케이블 구조 수치모델과 실교량인 제2진도대교에 적용하고 FORM과의 결과비교를 통해 검증한다. 추후 연구로는 플러터 풍속의 불확실성에 큰 영향을 미치는 플러터계수의 불확실성을 좀 더 엄밀히 고려하여 신뢰도 해석을 수행할 필요가 있다.

### 감사의 글

이 연구는 BK21+NEXT사업단의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 연구 지원에 감사 드립니다.

### 참고문헌

1. Bucher, C.G., and Bourgund, U., "A fast and efficient response surface approach for structural reliability problems." Structural Safety, Vol. 7, No. 1, 1990, pp.57-56
2. Jung, K., Kim, H.K., and Lee, H.S., "New unified approach for aeroelastic analyses using approximate transfer functions of aerodynamic forces." ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 140, No. 4, 2014, pp. 04013002.
3. Cheng, J., Cai, C.S., Xiao, R., and Chen S.R., "Flutter reliability analysis of suspension bridges." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 93, No. 10, 2005, pp.757-775.
4. Baldomir, A., Kusano, I., Hernandez, S., Jurado, J.A., "A reliability study for the Messina Bridge with respect to flutter phenomena considering uncertainties in experimental and numerical data." Computers and Structures, Vol. 128, 2013, pp. 91-100.