

이동최소제곱 응답면 기법을 활용한 교량의 플러터에 대한 신뢰도 해석

Reliability Analysis for Flutter of Bridges using Moving Least Squares
Response Surface Method

박진욱* · 이해성**

Park, Jinwook · Lee, Hae Sung

본 연구에서는 이동최소제곱 응답면 기법을 활용하여 교량의 플러터에 대한 신뢰도 해석을 수행한다. 플러터에 대한 한계상태식은 교량의 플러터 풍속과 풍속 간의 차로 정해진다. 이동최소제곱 응답면 기법은 최소제곱 응답면 기법과 달리 근사 한계상태식의 계수를 확률변수의 함수로 고려하여 비선형성이 큰 함수도 잘 근사할 수 있다. 이동최소제곱 응답면 기법을 통해 한계상태식을 파괴점 근처에서 더 정확히 근사하여 신뢰도 해석을 수행한다. 케이블 구조 수치모델과 제2진도대교 예제를 통해 이 방법의 효율성과 정확성을 검증한다.

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

1. 서 론

케이블 교량에 있어 플러터 현상은 발생 시 타코마 대교 사례와 같이 교량의 붕괴를 야기할 수 있으므로 매우 중요하다. 플러터는 교량에 플러터 풍속 이상의 바람이 불 경우 교량과 바람의 상호작용에 의해 음의 감쇠가 발생하여 교량이 발산하는 현상이다. 플러터 풍속과 관련된 교량의 물성치와 플러터계수에는 불확실성이 존재하고 풍속에도 큰 불확실성이 존재하므로 교량의 플러터에 대한 신뢰도 해석이 필요하다. 플러터풍속은 비선형 복소 고유치 해석을 포함하는 복잡한 과정을 통해 결정되므로 응답면 기법을 활용한 신뢰도 해석을 수행한다. 근사 응답면을 구하는 방법으로는 일반적인 최소제곱법이 아닌 이동최소제곱법을 적용하여 실제 한계상태함수를 더 잘 근사함으로써 효율적인 신뢰도 해석을 수행한다.

2. 한계상태식 및 이동최소제곱 응답면 기법을 활용한 신뢰도 해석 방법

신뢰도 해석을 위한 교량의 플러터에 대한 한계상태함수는 아래 식 (1)과 같이 플러터 풍속(V_f)과 재현기간 동안 교량 거더 위치에서의 10분 평균 최대풍속(V) 간의 차로 정할 수 있다.

$$G(\mathbf{x}) = F \cdot V_f(\mathbf{x}_m) - V \quad (1)$$

여기서 \mathbf{x}_m 은 교량의 물성치, 기하학적 파라미터에 대한 확률변수 벡터, F 는 플러터계수의 불확실성을 간접적으로 나타내는 확률변수다. 본 연구에서는 이동최소제곱 응답면 기법을 적용하여 한계상태함수를 확률변수 간의 연성향이 없는 이차 다항식으로 아래 식 (2)와 같이 근사한다.

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

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

$$\tilde{G} = a_0(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^n a_i(\mathbf{x})x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii}(\mathbf{x})x_i^2 \quad (2)$$

여기서 n 은 확률변수의 개수, a 는 계수이다. 이동최소제곱법과 최소제곱법의 큰 차이점은 계수가 확률변수 벡터 \mathbf{x} 의 함수라는 것이다. 최소제곱법에서 계수는 실제 한계상태함수에서 추출된 표본점과의 최소제곱오차를 만족하도록 결정되지만, 이동최소제곱법에서는 가중함수를 추가로 도입하여 가중잔차를 최소화시키는 계수가 결정된다. 신뢰도 해석 절차는 표본점이 증가할수록 정확도가 크게 증가하는 이동최소제곱법의 특징을 활용하여, 근사된 응답면에 대해 FORM(First Order Reliability Method)을 적용하여 MPFP(Most Probable Failure Point)를 결정하고, MPFP를 기존의 표본점에 추가시켜 MPFP 근처에서 한계상태함수에 더 가까운 응답면을 재생성하고 다시 FORM을 적용하는 방식을 반복수행하여 MPFP를 수렴시킨다. (강수창, 2009)

3. 예제 적용 및 검증

케이블 구조 수치모델과 제2진도대교에 대해 FORM, 최소제곱 응답면 기법, 이동최소제곱 응답면 기법 세 가지 신뢰도해석 방법을 적용한다. 여기서 가정된 확률변수의 통계특성은 Cheng et al.(2005)를 참고한다. 케이블 구조 수치모델과 제2진도대교의 플러터풍속 공칭값은 각각 48.9 m/s, 158.8 m/s이고 확률변수 V 의 평균은 각각 30 m/s, 50 m/s로 가정한다. 표 1, 2의 신뢰도해석 결과를 보면 이동최소제곱 응답면 기법이 FORM과 유사한 결과를 보이며 구조해석 수는 훨씬 적은 것을 확인할 수 있다.

표 1. 케이블 구조 수치모델 신뢰도해석 결과

케이블 구조 수치모델	FORM	최소제곱 응답면 기법	이동최소제곱 응답면 기법
신뢰도지수	2.00	2.00	2.00
구조해석 수	77	88	35

표 2. 제2진도대교 신뢰도해석 결과

제2진도대교	FORM	최소제곱 응답면 기법	이동최소제곱 응답면 기법
신뢰도지수	4.03	수렴 안함	4.03
구조해석 수	987	수렴 안함	110

4. 결론

본 연구에서는 이동최소제곱 응답면 기법을 활용하여 교량의 플러터 현상에 대한 신뢰도 해석을 수행한다. 케이블 구조 수치모델과 제2진도대교에 대해 신뢰도해석을 수행한 결과 이동최소제곱 응답면 기법이 효율적이고 정확한 신뢰도해석 결과를 보임을 확인할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 케이블교량글로벌연구단 2세부과제를 통하여 지원된 국토교통부 건설기술연구사업(17SCIP-B119964-02-000000)의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 연구 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

1. 강수창 (2009). “이동최소자승 응답면 기법을 이용한 구조 시스템의 신뢰도 기반 최적설계.” 서울대학교 대학원.
2. Cheng, J., Cai, C.S., Xiao, R., and Chen S.R. (2005). “Flutter reliability analysis of suspension bridges.” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 93, No. 10, pp.757-775.