

교량의 시간영역 공탄성 해석을 위한 공기동역학적 전달함수의 푸리에 급수 근사

Fourier Series Approximation of the Aerodynamic Transfer Function for the Time-domain Aeroelastic Analysis of Bridge

박진욱* · 정길제** · 김호경*** · 이해성****

Park, Jinwook · Jung, Kilje · Kim, Ho-Kyung · Lee, Hae Sung

시간영역 공탄성 해석은 공기력 자체의 주파수 의존성으로 인한 어려움이 있다. 본 연구에서는 교량의 시간영역 공탄성 해석을 수행하기 위한 푸리에 급수 근사법을 제안한다. 푸리에 급수 근사법은 공기동역학적 전달함수를 푸리에 급수로 근사함으로써, 임펄스 응답함수가 causality condition을 만족하도록 한다. 푸리에 급수의 계수는 실험에서 측정되는 전달함수와 수정되는 전달함수가 최소제곱오차를 만족하도록 결정된다. 푸리에 급수 근사를 함으로써 causality condition은 정확히 만족될 수 있고, 수정된 전달함수에 대응하는 임펄스 응답함수는 푸리에 급수 근사에서 사용된 기저의 개수에 해당하는 디랙 델타 함수의 시리즈가 된다. 제안되는 방법의 타당성과 적용성은 H-형 단면예제와 제2진도대교 실험교량 예제를 통해 검증된다.

핵심용어 : 푸리에 급수, causality condition, 합성곱, 공탄성 해석, 플러터 계수

1. 서 론

최근 구조적 시스템의 비선형성과 바람의 비정상성을 고려하기 위해 시간영역 공탄성 해석의 중요성이 증대되고 있다(Chen, 2003). 그러나 공기력은 기본적으로 실험에서 추출되는 플러터 계수를 통해 주파수영역에서 정의된다. 따라서 시간영역 공탄성 해석의 핵심은 플러터 계수로 정의되는 공기동역학적 전달함수를 푸리에 역변환하여 얻어지는 임펄스 응답함수를 산정하는 것에 있다(Park, 2014). 시간영역에서 일방향 합성곱을 수행하기 위해서 임펄스 응답함수는 causality condition을 만족해야 한다. 여기서 causality condition이란 음의 시간영역에서 임펄스 응답함수가 0이어야 한다는 조건을 말한다. 그러나 실험을 통해 구해지는 전달함수는 causality condition을 만족하지 않으므로, causality condition을 만족하도록 수정되어야 한다. RFA(Rational Function Approximation)는 전달함수를 수정하기 위해서 널리 사용되는 방법이다(Chen, 2000). 그러나 이 방법은 복잡한 단면에 적용하는데 한계가 있다. 이 한계를 극복하기 위해 PFA(Penalty Function Approximation)가 제안되었다(Jung, 2012). 이 방법은 복잡한 단면에도 적용 가능하지만, 다소 복잡한 유한요소해에 근거한 공식화가 필요하고 penalty number가 결정되어야 한다.

2. 공기동역학적 전달함수의 푸리에 급수 근사

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

** 한국건설기술연구원 박사후연구원 · 공학박사 (E-mail: kjung@kict.re.kr)

*** 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 부교수 · 공학박사 (E-mail: hokyungk@snu.ac.kr)

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

푸리에 급수 근사법(Fourier Series Approximation, FSA)은 실험에서 측정된 공기동역학적 전달함수를 푸리에 급수로 근사함으로써 이에 대응하는 임펄스 응답함수가 causality condition을 완전히 만족하도록 수정한다. 이 때 푸리에 시리즈의 계수는 측정치 전달함수와 수정된 전달함수가 최소제곱오차를 만족하도록 쉽게 결정된다. 이에 대응하는 임펄스 응답함수는 푸리에 급수 근사에서 사용된 기저의 개수에 해당하는 디랙 델타 함수의 시리즈가 된다. 따라서 합성곱으로 공기력을 계산함에 있어서 계산적인 효율도 향상된다.

3. 예제 적용 및 타당성 검증

복잡한 H-형 단면과 실교량인 제2진도대교에 대한 예제를 통해 제안된 방법을 검증한다. 먼저 RFA가 적용성에 한계를 보이는 H-형 단면 예제를 통해 제안되는 방법의 타당성을 보인다. 그림 1은 강제가진 시 정상상태의 수직방향 응답으로 RFA만이 차이를 보이고, FSA와 PFA는 해석해인 Particular solution과 비슷한 결과를 보인다. 다음으로 그림 2는 제2진도대교의 버페팅해석 시 거더 중앙에서의 휨방향 응답으로 RFA, PFA, FSA의 제곱평균제곱근을 살펴보면 각각 0.0185, 0.0198, 0.0195 (10^{-2} rad)으로 마찬가지로 RFA의 회전방향 응답이 PFA, FSA와 차이를 보인다.

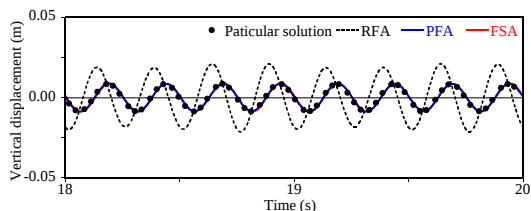


그림 1. H-형 단면의 강제가진 시 수직방향 응답

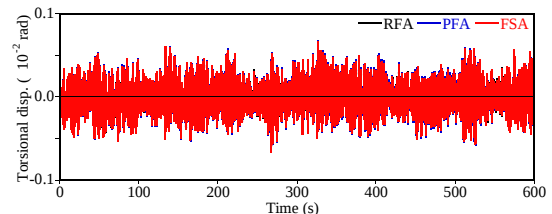


그림 2. 제2진도대교 거더 중앙에서의 휨방향 응답

4. 결 론

본 연구에서는 공기동역학적 전달함수의 각 성분을 푸리에 급수로 표현함으로써 causality condition을 정확히 만족시키도록 했다. 제안하는 방법에서 합성곱은 푸리에 급수의 개수만큼의 현재와 과거 응답에 대한 식으로 표현되고, 이를 통해 계산적인 효율이 향상된다. 제안되는 방법을 H-형 단면과 제2진도대교 예제에 적용하여 복잡한 단면과 실교량에서도 타당한 결과를 보이며 효율적으로 적용 가능함을 검증한다.

감사의 글

이 연구는 초장대교량 사업단 제1핵심과제를 통하여 지원된 국토교통부 건설기술혁신사업(08기술혁신E01)의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 연구 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Chen, X., and Kareem, A., "Aeroleastic Analysis of Bridges: Effects of Turbulence and Aerodynamic Nonlinearities." ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 129, No. 8, 2003, pp. 885–895.
2. Park, J., Jung, K., Kim, H. K., and Lee, H.S., "Exact Enforcement of the Causality Condition on the Aerodynamic Impulse Response Function Using a Truncated Fourier Series." ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 140, No. 5, 2014, 04014017
3. Chen X., Matsumoto M., and Kareem A., "Aerodynamic Coupling Effects on Flutter and Buffeting of Bridges." ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 126, No. 1, 2000, pp. 7–16.
4. Jung, K., Kim, H. K., and Lee, H. S., "Evaluation of Impulse Response Functions for Convolution Integrals of Aerodynamic Forces by Optimization with a Penalty Function." ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 138, No. 5, 2012, pp. 519–529.