

웨이블릿 교차상관관계를 이용한 변형체 선박의 휘핑 응답 식별

김유일^{1,†} · 김정현² · 김용환²

인하대학교 공과대학 조선해양공학과
서울대학교 공과대학 조선해양공학과²

Identification of Whipping Response using Wavelet Cross-Correlation

Yooil Kim^{1,†} · Jung-Hyun Kim² · Yonghwan Kim²

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, College of Engineering, INHA University¹

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, College of Engineering, Seoul National University²

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Identification of the whipping response out of the combined wave-vibration response of a flexible sea going vessel is one of the most interesting research topic from ship designer's point of view. In order to achieve this goal, a novel methodology based on the wavelet cross-correlation technique was proposed in this paper. The cross-correlation of the wavelet power spectrum averaged across the frequency axis was introduced to check the similarity between the combined wave-vibration response and impulse response. The calculated cross-correlation of the wavelet power spectrum was normalized by the auto-correlation of the each spectrum with zero time lag, eventually providing the cross-correlation coefficient that stays between 0 and 1, precisely indicating the existence of the impulse response buried in the combined wave-vibration response. Additionally, the weight function was introduced while calculating the cross-correlation of the two spectrums in order to filter out the signal of lower frequency so that the accuracy of the similarity check becomes as high as possible. The validity of the proposed methodology was checked through the application to the artificially generated ideal combined wave-vibration signal, together with the more realistic signal obtained by running 3D hydroelasticity program WSH-Flex. The correspondence of the identified whipping instances between the results, one from the proposed method and the other from the calculated slamming modal force, was excellent.

Keywords : Wavelet tranform(웨이블릿 변환), Cross-correlation(교차상관관계), Ato-correlation(자기상관관계), Springing(스프링잉), Whipping(휘핑), Container carrier(컨테이너 선박)

1. 서론

최근 들어 급격히 진행되고 있는 선박의 대형화 고속화 추세에 따라 유탄성 효과를 고려한 건전한 선박의 설계가 새로운 화두로 대두되고 있다. 전통적인 선박의 설계 절차에서는 유체동역학적 운동해석, 구조모델로의 하중 매핑, 준정적 구조해석 등과 같은 일련의 절차가 일방적으로 이루어져 왔으나 선박의 변형에 의한 유체장의 교란을 고려하는 유탄성 해석의 경우 구조물의 변형과 유체장의 교란을 동시에 고려하는 양방향 해석이 필수적으로 이루어져야 한다. 일반적으로 선박의 유탄성 현상은 크게 파랑하중과의 공진에 의해 발생하는 정상진동 현상인 스프링잉과 입수 충격 시에 발생하는 슬래밍 압력에 의해 유발되는 과도진동 현상인 휘핑으로 구분이 가능하다. 정상진동 현상인 스프링잉은 선박의

피로 수명과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있는 반면, 과도 진동 현상인 휘핑의 경우 피로 수명과 더불어 선체 중앙부에 작용하는 굽힘 모멘트의 증가로 인해 선박의 최종 강도와의 상관관계가 더욱 밀접한 것으로 알려져 있다. 언급된 두 가지의 유탄성 현상은 그 기진원 및 응답특성에는 다소 차이가 있으나 선박의 고유 진동수와 일치하는 주파수로 진동하는 공통점으로 인해 두 현상을 분리해 내는 것은 매우 어렵다. 특히, 슬래밍 압력에 의해 기진되는 휘핑 응답이 스프링잉 응답에 비해 상대적으로 크지 않은 경우에는 두 신호의 중첩으로 인해 상황은 더욱 어려워진다. 실 설계에 있어 두 가지 유탄성 응답은 강체운동에 의한 응답과 구분되는 진동 응답이라는 측면에서 구분되지 않고 다루어지는 하나 두 종류의 응답이 설계에 미치는 영향에 대한 이해를 위해서 두 응답의 구분은 여전히 설계자들의 관심을 끄는 부분이기도 하다.

파랑 응답, 스프링잉 응답 및 휘핑 응답이 혼재한, 계측 혹은 계산 신호로부터 휘핑 현상이 발생한 시점 및 크기를 구분해 내는 식별 작업은 휘핑 응답이 다른 응답과 달리 충격하중에 의한 자유감쇠신호의 특성을 가진다는 점에서 출발한다. 이러한 휘핑 응답의 특성을 고려한다면, 휘핑 응답의 식별은 계측된 신호의 시계열과 선박의 충격응답함수간의 교차상관관계(cross-correlation)를 시간영역에서 수행함으로써 가능하다. 그러나, 일반적으로 2자유도 이상의 응답을 포함하고 있는 충격응답함수의 특성으로 인해 이러한 접근법은 휘핑 및 스프링잉 응답 간의 상호간섭으로 인해 효과적인 접근법이 되지 못한다. 스프링잉 응답과의 상호간섭을 피하기 위해서는 고유주파수에 따른 필터링을 수행하는 방법이 있으나 이러한 경우 두 개의 인접한 진동 모드의 연성효과로 인해 필터링된 신호의 정확도가 떨어지는 단점이 다시 발생하게 된다 (Staszewski, 1997; Marven & Ewers, 1996; Lardies & Gouttebroze, 2002; Amin, et al., 2012). 웨이블릿 변환은 이러한 필터링 과정에서 유발되는 신호의 왜곡을 회피할 수 있는 매우 유용한 신호 처리 기법 중 하나이다.

웨이블릿 변환은 전통적인 푸리에 변환이 신호의 시계열 특성에 대한 정보를 소실하는 단점을 극복할 수 있는 신호처리 기법으로 고장 진단, 패턴 인식 및 시스템 식별 등과 같은 다양한 공학 분야에 널리 적용되고 있다. Staszewski and Cooper (1995)는 연속 웨이블릿 변환을 적용하여 시스템을 식별하는 시도를 최초로 시도하였다. Staszewski (1997)는 후에 근사 접근 기법을 활용하여 시스템의 충격응답함수를 몰렛(Morlet) 웨이블릿 (Primer, 1998) 변환한 후 땀핑 계수, 고유 진동수 등과 같은 시스템의 모달 파라미터를 도출하였다. 이러한 시스템 식별법은 교량 구조물 (Ruzzene, et al., 1997), 항공기 (Staszewski & Cooper, 1995), 고층 빌딩 구조물 (Lardies & Gouttebroze, 2002)의 동적 특성 분석에 성공적으로 적용되었다.

Ermayuk and Okusu (2005)는 천수에 충격 입수하는 원형디스크에 작용하는 압력의 시계열을 몰렛 웨이블릿을 이용하여 해석하였으며, 디스크와 자유수면 상에 갇힌 공기에 의한 압력의 진동을 성공적으로 분석하였다. Kwon, et al. (2005)은 구조물에 충돌하는 이상파랑(freak wave)을 웨이블릿 변환하였으며 파랑의 고주파 성분과 충격력 간의 상관관계를 도출하였다. Storhaug (2007)는 선형 수조에서 건인되는 분할모형의 단면력을 계측하고 이를 웨이블릿 변환하여 신호를 분석하였다. 또한, 스프링잉에 의한 신호의 포락선은 휘핑에 의한 것 보다 비교적 완만히 변화한다는 것에 착안하여 휘핑을 식별하는 노력을 하였다. Du, et al. (2008)은 파랑 중 자항하는 S175 분할 모형에 대한 계측 데이터를 Daubechies 웨이블릿을 이용하여 분석하였으며 이를 토대로 휘핑 응답을 식별하였다. Amin, et al. (2009)은 연속 몰렛 웨이블릿 변환을 이용하여 슬래밍 하중에 의한 고속 쌍동선 선박의 휘핑 응답을 분석하였으며, 이를 토대로 대상 선박의 고유진동수와 감쇠계수 등과 같은 동적 파라미터를 도출하였다. 그들은 또한 몰렛 웨이블릿 변환의 시계열 분해능을 극대화하여 휘핑 응답의 발생 시점을 정확하게 예측하려는 시도를 하였다.

본 논문에서는 연속 몰렛 웨이블릿 변환으로 도출된 응답 웨이

블릿 스펙트럼과 자유감쇠신호의 웨이블릿 스펙트럼 간의 교차상관관계를 이용하여 변형체 선박의 휘핑 응답에 대한 분석을 시도하였다. 휘핑 응답 식별의 효율을 최대화 하기 위해 웨이블릿 변환을 통해 얻어진 스펙트럼 간의 상관관계를 정량화 할 수 있는 교차상관관계 계수를 정의하고 이를 통해 휘핑 현상의 발생 시점과 크기를 추정하는 방법론을 제시하였다. 제시된 방법론의 검증 위해 저주파수의 진동 응답과 충격 응답이 혼재하는 이상적인 신호를 생성하여 제시된 방법론의 성능을 검토하였다. 특히, 교차상관관계 계수를 계산하는 과정에서 주파수 축에 대한 적절한 필터링을 적용함으로써 스프링잉 및 파랑 하중에 의한 준정적 응답과 같은 강제 진동 성분이 교차상관관계의 정확도를 떨어뜨릴 수 있는 가능성을 제거하였다. 또한, 신호의 유사성을 확인하기 위해 웨이블릿 코히런스(coherence)를 적용하여 교차상관관계를 가지는 두 신호의 시간-주파수 영역에서의 유사성을 확인하였다. 마지막으로, 제안된 방법론을 3차원 유탄성 해석 프로그램인 WSH-Flex를 통해 얻어진 신호에 적용하여 휘핑 응답을 식별하였으며 수치해석을 통해 얻어진 모달 휘핑 기진력의 시간 이력과의 비교 분석하여 그 정확도를 확인하였다.

2. 이론적 배경

2.1 연속 웨이블릿 변환

웨이블릿 변환은 전통적인 푸리에 변환의 단점을 극복하기 위해 도입된 단시간 푸리에 변환(short-time Fourier transform)이 갖는 시간 및 주파수 분해능의 한계를 극복하기 위해 도입되었다. 웨이블릿 함수 $\Psi_{a,b}(t)$ 는 식(1)과 같이 모 웨이블릿 함수 $\psi(t)$ 를 팽창 및 이동시킴으로 얻을 수 있다.

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a > 0, b \in R \quad (1)$$

여기서 a는 웨이블릿 함수의 시간 분해능과 관계 있는 팽창 파라미터를, b는 웨이블릿 함수의 시간 축에서의 위치를 결정하는 이동 파라미터를 나타낸다. 웨이블릿 변환은 주어진 함수와 식(1)에 보인 웨이블릿 함수 간의 내적을 통해 이루어 지는데, 주어진 함수 $x(t)$ 가 전 구간에 걸쳐 적분 가능한 경우 함수 $x(t)$ 에 대한 웨이블릿 변환은 식(2)과 같은 형태로 정의 된다.

$$W_{\psi}(a,b) = \langle x(t), \Psi_{a,b}(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\Psi_{a,b}^*(t)dt \quad (2)$$

여기서, $\Psi_{a,b}^*(t)$ 는 $\Psi_{a,b}(t)$ 의 공액 복소함수를 의미한다. 주어진 함수를 상호 직교하는 웨이블릿 함수로 분해하는 이산 웨이블릿 변환과는 달리, 식(2)에 주어진 웨이블릿 함수의 파라미터 a 및 b는 임의의 연속 값으로 선정이 가능한데, 그러한 특성에 따라 식(2)은 연속 웨이블릿 변환이라고 일컬어진다.

웨이블릿 함수는 다양한 형태로 존재하는데, 적절한 웨이블릿 함수의 선정은 분석하고자 하는 함수 혹은 신호의 특성에 맞게 결정이 되어야 한다. 본 연구에서는 동적 시스템의 모달 파라미터 예측 혹은 충격신호 추출 등의 경우에 자주 사용되는 몰렛 웨이블릿 함수를 적용하였다. 몰렛 웨이블릿 함수는 식(3)에 보인 바와 같이 주파수가 f_c 인 삼각함수를 폭이 f_b 인 가우스 함수로 윈도우한 형태를 지닌다.

$$\Psi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} e^{2\pi i f_c t} e^{-(t^2/f_b)} \quad (3)$$

2.2 웨이블릿 교차상관관계

파랑 하중에 의한 저주파 응답과 진동에 의한 고주파 응답이 혼재한 신호로부터 휘핑 응답을 식별해 내기 위해서 웨이블릿 스펙트럼간의 교차상관관계를 적용한다. 식(4)는 웨이블릿 변환을 통해 얻어진 시간-주파수영역에서의 웨이블릿 스펙트럼의 교차상관관계를 나타낸다 (Li & Nozaki, 1997).

$$R_{xy}(a, \tau) = \int_R C_x(a, b) C_y(a, b + \tau) db \quad (4)$$

여기서 C_x 및 C_y 는 주어진 신호 $x(t)$ 와 $y(t)$ 에 대한 웨이블릿 변환을 통해 얻어진 웨이블릿 스펙트럼을 의미하며 식(5)와 같이 웨이블릿 계수와 그 공액복소수의 곱으로 주어진다.

$$C_x(a, b) = W_\Psi(a, b) W_\Psi^*(a, b) = |W_\Psi(a, b)|^2 \quad (5)$$

신호 $x(t)$ 를 l_1 의 길이를 갖는 충격응답함수로 간주하고, $y(t)$ 를 길이가 l_2 인 고주파 및 저주파 응답이 혼재된 혼합신호로 보았을 때 웨이블릿 스펙트럼의 자기 및 교차상관관계는 식(6)과 같이 정의된다.

$$RW_{xy}(a, \tau) = \int_0^{l_1} C_x^2(a, b) C_y^2(a, b + \tau) db \quad (6)$$

$$RW_{xx}(a, \tau) = \int_0^{l_1} C_x^2(a, b) C_x^2(a, b + \tau) db$$

$$RW_{yy}(a, \tau) = \int_0^{l_1} C_y^2(a, b) C_y^2(a, b + \tau) db$$

혼합신호로부터 충격응답함수를 식별해 내기 위해서 주파수 축에 대한 가중 평균이 적용된 웨이블릿 교차상관관계를 식(7)과 같이 정의한다.

$$RWW_{xy}(\tau) = \int_{a_L}^{a_U} RW_{xy}(a, \tau) w(a) da \quad (7)$$

여기서 a_L 과 a_U 는 웨이블릿 교차상관관계의 가중 평균이 구해지는 구간을 정의하는 값이며, $w(a)$ 는 주파수에 의존하는 가중함수로서 서로 다른 주파수 대역에서 서로 다른 가중치를 부여하기 위해 도입되었다. 본 계산에 적용된 가중함수는 $a_L \sim a_U$ 의 구간에서는 1의 값을, 그 외 구간에서는 0의 값을 갖는 계단형 함수를 적용하여 특정 주파수대역에 대한 필터링이 적용되도록 하였다. 식(7)에 주어진 두 신호 간의 교차상관관계를 시간 지연 τ 가 0일 때의 각 신호의 자기상관관계로 정규화하면 식(8)과 같이 0과 1사이의 값을 가지는 교차상관관계 계수를 유도할 수 있다.

$$\rho(\tau) = \frac{RWW_{xy}(\tau)}{\sqrt{RWW_{xx}(0)RWW_{yy}(0)}} \quad (8)$$

식(8)에 주어진, 시간지연이 0인 경우의 자기상관관계는 식(6)에 주어진 웨이블릿 스펙트럼의 자기상관관계를 특정 주파수 대역에 걸쳐 가중 평균함으로 식(9)와 같은 형태로 얻을 수 있다.

$$RWW_{xx}(0) = \int_{a_L}^{a_U} RW_{xx}(a, 0) w(a) da \quad (9)$$

$$RWW_{yy}(0) = \int_{a_L}^{a_U} RW_{yy}(a, 0) w(a) da$$

최종적으로 혼합신호와 충격응답함수 간의 유사성은 식(8)에 보인 교차상관관계 계수를 통해 얻을 수 있으며 가중 평균의 구간 및 가중 평균 함수의 적절한 선택을 통하여 그 정확성을 증대시킬 수 있다.

파랑 하중에 노출되는 변형체 선박의 응답은 크게 파랑의 주파수와 부합되는 준정적 응답, 파랑 하중에 의해 기진되는 진동 응답인 스프링링 응답 및 슬래밍 하중에 의해 기진되는 진동 응답인 휘핑 응답이 혼재하는 형태로 나타나게 되는데, 일반적으로 준정적 응답 및 스프링링 응답은 상대적으로 낮은 주파수영역에서의 응답이 지배적인 반면 휘핑 응답의 경우 슬래밍 하중의 백색소음(white noise)적 특성으로 인해 비교적 고주파수 영역에서도 응답이 나타나게 된다. 이러한 특성을 고려컨데 혼합신호와 충격응답함수 간의 상관성을 통해 휘핑 응답을 식별하는 경우 적절한 주파수영역에 걸친 필터링을 수행하는 것이 매우 효율적이며, 본 연구에서는 식(7) 및 식(9)에 보인 가중 평균의 구간 및 가중 함수를 도입하여 이러한 필터링 역할을 수행토록 하였다.

식(6)에 정의된 교차상관관계는 혼합신호와 충격응답함수 간의 상관관계를 시간 축에 대해 평균한 개념으로 충격응답함수의 길이에 대한 두 신호 간의 전체적인 유사성을 판단하기 위한 방법으로 이해될 수 있다. 본 연구에서는 두 신호의 국부적인 유사성을 추가적으로 파악하기 위해 식(10)에 보인 바와 같은 웨이블릿 코히런스 계산하여 휘핑 응답 식별의 유효성을 검토하였다.

$$COH(a,b) = \frac{S\{C_x^*(a,b)C_y(a,b)\}}{\sqrt{S\{|C_x(a,b)|^2\}S\{|C_y(a,b)|^2\}}} \quad (10)$$

여기서 $S\{\cdot\}$ 웨이블릿 스펙트럼에 대한, 시간 및 주파수 방향으로의 국부적인 평균을 의미하는 것으로 두 웨이블릿 스펙트럼 간의 국부적인 유사성에 대한 정보를 제공한다.

3. 휘핑 응답 식별

3.1 이상적인 신호에의 적용

전술된 기법의 타당성을 검증하기 위해서 저주파수로 응답하는 신호와 충격응답신호가 혼재하는 이상적인 혼합신호를 인위적으로 생성하여 충격응답의 발생 시점과 크기를 식별해 내는 해석을 수행하였다. 상기의 이상적인 혼합신호는 $x > 0$ 의 범위에 대해 식(11)과 같은 형태로 표현된다고 가정하였다.

$$\begin{aligned} x_{wave}(t) &= \alpha_1 \sin(2\pi f_{11}t) + \alpha_2 \sin(2\pi f_{12}t) + \alpha_3 \sin(2\pi f_{13}t) \\ x_{whip}(t) &= e^{-\zeta(2\pi f_{21}t)} \sin(2\pi f_{21}t) + 0.75 * e^{-\zeta(2\pi f_{22}t)} \sin(2\pi f_{22}t) \\ x_{com}(t) &= x_{wave}(t) + \beta_1 x_{whip}(t - t_1) + \beta_2 x_{whip}(t - t_2) + \beta_3 x_{whip}(t - t_3) \end{aligned} \quad (11)$$

파랑 주파수 f_{11}, f_{12} 및 f_{13} 는 각각 0.18, 0.2, 0.22Hz로 가정하였으며 각 주파수에 해당되는 진폭 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 는 각각 3, 5, 3m로 하였다. 휘핑 신호의 경우 2자유도의 자유감쇠신호로 가정하였으며 주파수 f_{21}, f_{22} 는 각각 0.5, 1.1Hz로, 두 신호간의 진폭 비는 0.75로 가정하였다. 자유감쇠신호의 감쇠계수는 0.02로 하였다. 휘핑 응답은 각각 20, 80, 140sec에서 발생하도록 하였으며 각각의 크기는 $\beta_1 = 4, \beta_2 = 2, \beta_3 = 10$ 로 가정하였다. Fig. 1은 전술한 혼합신호를 그림으로 표현한 것으로 (b) 및 (c)는 휘핑 신호 및 저주파 파랑 응답신호를 (a)는 두 신호가 공존하는 혼합 신호를 나타낸다.

Fig. 2는 식(2)에 정의된, 몰렛 웨이블릿 함수를 통해 얻어진 웨이블릿 변환계수를 시간-주파수 영역에 도시한 웨이블릿 스케일로그램(Scalogram)을 나타낸다. Fig. 2(a)에 보인 자유감쇠신호의 경우 상대적으로 높은 에너지가 0.5 및 1.1Hz 부근에서 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 식(11)에 언급된 휘핑 신호의 주파수와 일치하는 값이다. Fig. 2(b)에 보인 혼합신호의 경우 0.2Hz 근방의 주파수 대역에서 높은 에너지가 주기적으로 나타남을 확인할 수 있는데 이는 Fig. 1(c)에 보인 저주파 파랑 응답의 결과임을 짐작할 수 있다. 또한 0.5 및 1.1Hz 부근의 주파수 영역에서 각각 20, 80, 140sec에서 에너지가 집중되는 것을 확인할 수 있는데 이는 해당 시간에 위치하는 휘핑 응답의 결과로 나타났음을 알 수 있다.

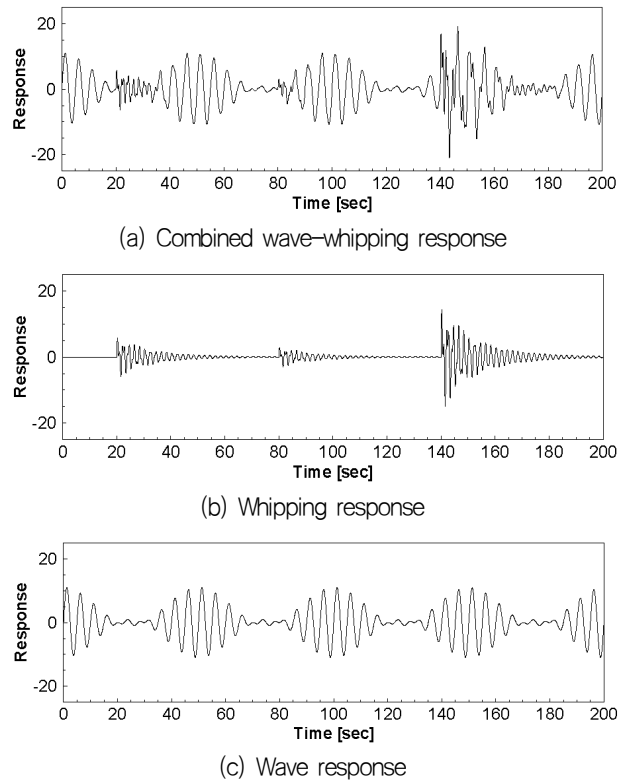


Fig. 1 Combined wave-whipping signal

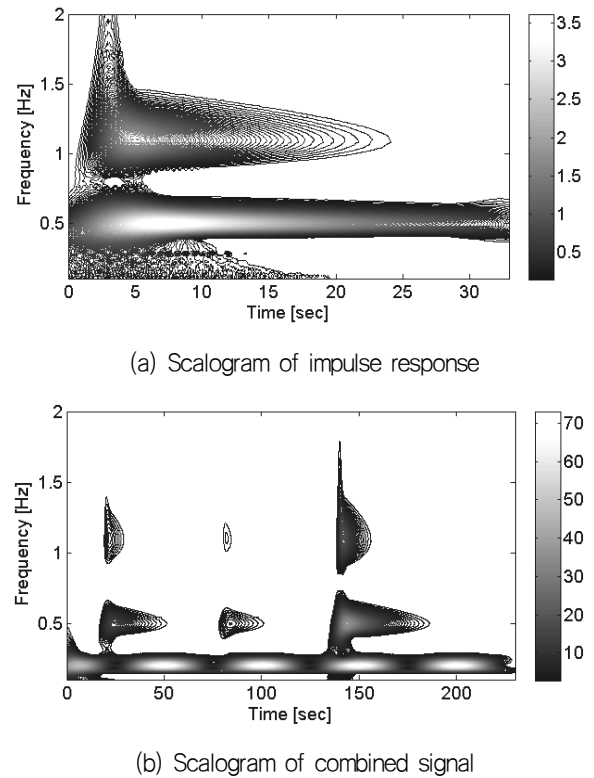
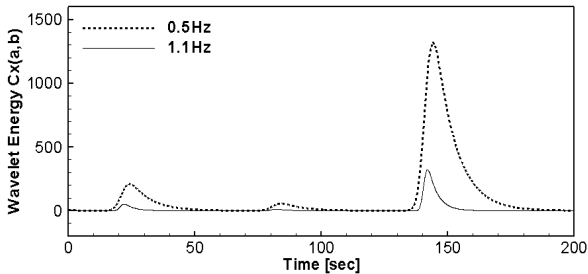


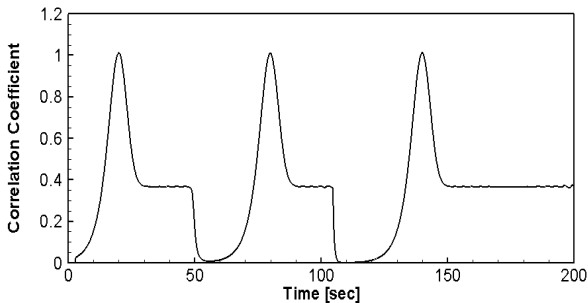
Fig. 2 Wavelet scalograms

Fig. 3은 웨이블릿 변환을 통해 얻어진 스펙트럼의 단면 및 자유감쇠신호와 혼합신호의 웨이블릿 교차상관계 계수를 도시한

그림이다. Fig. 3(a)의 스펙트럼 단면은 0.5 및 1.1Hz의 주파수에 대한 것으로 휘핑 응답이 위치한 시간대 부근에서 상대적으로 높은 에너지 값을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 스펙트럼의 단면은 휘핑 응답의 발생 시점과 그 크기에 대한 정보를 제공해 주고 있기는 하나 에너지의 국부적인 극치가 해당 주파수 값에 의존하여 이동하는 경향을 보임으로 인해 휘핑 응답의 시점을 정확히 식별해 내는 데에는 적합하지 못하다 할 수 있다. 이와 달리 Fig. 3(b)에 도시한 교차상관관계 계수는 휘핑 응답이 발생하는 시점에서 정확하게 1의 값을 보이고 있음을 확인할 수 있으며, 이를 통해 휘핑 응답의 발생 시점을 매우 정확하게 식별해 낼 수 있다. Fig. 3(b)의 교차상관관계 계수를 구하기 위해 계단형 가중 함수를 도입하였으며 0.35Hz 이하의 신호를 필터링하여 교차상관관계의 계산에서 저주파수로 진동하는 파랑 응답의 효과를 완전히 배제하였다.



(a) Section of wavelet power spectrum



(b) Cross-correlation coefficient

Fig. 3 Section of wavelet power spectrum and wavelet cross-correlation coefficient

휘핑 응답의 크기를 추정하기 위해서 식(12)에 정의된 휘핑 계수를 도입하였다. 이는 식(7)에 주어진 웨이블릿 교차상관관계를 그 최대값으로 정규화한 후 1/4승을 취한 값으로 정의된다. 휘핑 계수를 통해 추정된 휘핑 응답의 크기는 20sec, 80sec에 위치한 응답에 대해 각각 0.398 및 0.208로 계산 되었으며, 이는 초기에 가정한 자유감쇠신호의 크기에 비해 5% 이내의 오차를 보이는 값이다.

$$W(\tau_i) = \sqrt[4]{\frac{RWW_{xy}(\tau_i)}{\max_i [RWW_{xy}(\tau_i)]}} \quad (12)$$

3.2 휘핑 응답의 수치해석

제한된 기법의 추가적인 검증을 위하여 보다 현실적인 응답의 시계열을 검토하였으며, 이를 위해 대형 컨테이너 선박에 대한 3차원 유탄성 수치해석을 수행하여 파랑 응답, 스프링잉 및 휘핑 응답이 혼재하는 굽힘모멘트의 시간이력을 구하였다. 전진하는 선박의 유탄성 응답에 대한 수치해를 얻기 위해 유한요소법과 경계요소법을 시간영역에서 연성하여 해석을 수행하는 WSH-Flex 프로그램을 (Kim, et al., 2012; Kim, et al., 2013) 이용하였다.

입수 충격력에 의한 휘핑 응답을 고려하기 위해서 식(13)과 같이 모멘텀 보존법칙에 기반한 웨지 근사법을 적용하여 단면에 작용하는 충격력을 추정하였다.

$$F = \frac{d}{dt} M_a v = M_a a + \frac{dM_a}{dt} v \quad (13)$$

여기서 M_a 는 웨지의 부가질량을 v 와 a 는 각각 입수하는 웨지의 속도 및 가속도를 의미한다. 웨지 근사법은 단순한 웨지 형상을 가지는 입수체에 대한 Von Karman의 해에 기반하고 있으므로, 유체가 비압축성 비회전성의 특징을 갖는 포텐셜 유동을 한다는 가정하에 식(14)에 보인 바와 같은 부가질량의 해석해를 얻을 수 있다.

$$M_a = \frac{\pi}{2} \rho c^2(t) \left(1 - \frac{\gamma}{2\pi} \right) \quad (14)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도를, $c(t)$ 는 정수면에서 정의된 입수체의 반폭을, γ 는 입수각을 의미한다. 상기의 과정을 통해 계산된 하중을 2차원 스트립으로 분할된 대상 선박의 해당 위치에 부가하여 외력으로 고려하였다.

대상 선박은 337m의 길이, 48m의 폭, 27m의 깊이, 15m의 만재흘수를 가진 144,000tons의 중량의 18,000TEU급 컨테이너 선박이다. 유한요소 해석을 위해 선박의 길이 방향으로 36개의 2절점 보요소를 배치하였으며, 입수 충격력을 고려하기 위해 길이 방향으로 19개의 스트립을 배치하였다. 계산에 적용된 파랑 하중은 Pierson-Moskowitz 스펙트럼으로 표현된 불규칙 파랑이며, 9.0m의 유의파고 및 12.3sec의 모달주기를 가지는 것으로 가정하였다. 계산에 적용된 선박의 전진속도는 10.8knots이다.

Fig. 4는 수치해석을 통해 얻어진 굽힘모멘트의 시간이력 및 자유감쇠신호를 나타낸다. Fig. 4(a)의 시간이력은 다양한 주파수로 진동하는 응답의 혼합으로 구성되어 있음을 보여주고 있는데, 이는 약 10sec의 주기로 진동하는 파랑 응답 과 상대적으로 짧은 주기로 진동하는 스프링잉 응답으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 입수 충격력에 의한 휘핑 응답은 식별하기는 어려우나 약 40sec 근방에 과도 진동 신호의 흔적이 있음을 확인할 수 있다. Fig. 4 (b)는 접수 해머링 해석의 결과로 얻어진 굽힘모멘트의 시간이력을 나타낸다. 진동의 초기에 2개의 주파수가 혼재하여 응답하고

있음을 알 수 있고, 고주파수 응답은 감쇠효과로 인해 비교적 빠른 시간 내에 사라짐을 확인할 수 있다. 3절점 진동의 경우 선체 중앙부에서의 굽힘모멘트는 0에 가까우므로 이는 각각 2절점 및 4절점 진동에 해당되는 것으로 추정된다.

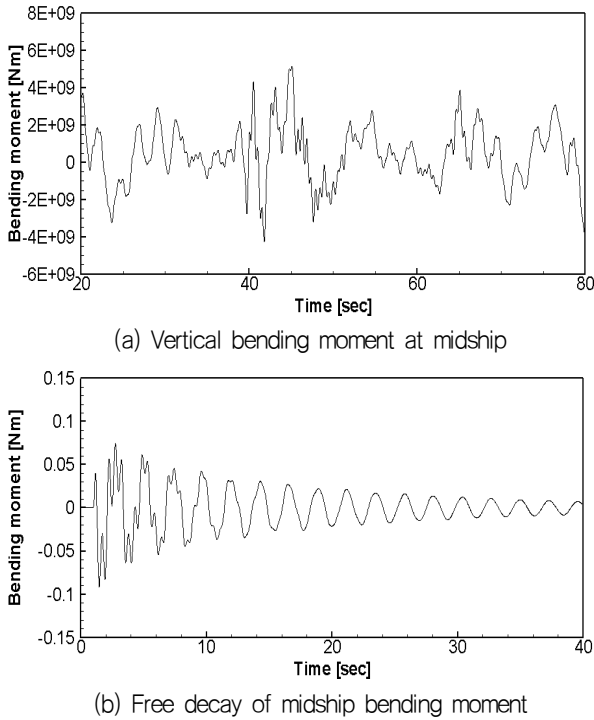


Fig. 4 Time history of vertical bending moment and free decay

3.3 휘핑 응답의 식별

Fig. 5는 수치해석을 통해 얻어진 충격응답신호 및 혼합신호의 웨이블릿 변환 결과이다. 충격응답신호의 경우 0.4, 1.0 및 1.9Hz 근방에서 상대적으로 높은 에너지 영역이 형성되는 것을 확인할 수 있는데, 이는 대상 선박의 2절점, 3절점 및 4절점 점수 고유주파수에 해당되는 값으로 이해할 수 있다. 3절점 진동의 경우 에너지의 집중도가 상대적으로 낮음을 알 수 있는데, 이는 앞서 언급된 바와 같이 3절점 진동의 모드형상이 선체 중앙부에서의 굽힘모멘트를 크게 유발하지 않기 때문이다. 혼합신호의 경우 0.1Hz 부근에 높은 에너지 영역이 형성되었는데 이는 예측한 바와 같이 파랑 하중에 의한 준정적 응답의 결과이며, 0.5, 1.0 및 1.9Hz 근방의 에너지 집중은 스프링잉 혹은 휘핑에 의한 진동 응답의 결과이다.

웨이블릿 스펙트럼간의 교차상관관계를 구하기 위해 적절한 가중함수의 선정을 통한 필터링 과정이 필요한데, 본 예제의 경우 1.4Hz를 필터링의 기준으로 설정하였다. 이는 1.4Hz 이상의 주파수 대역에 위치한 4절점 진동 성분이 스프링잉 기진력에 의해 기진될 가능성이 매우 낮아 교차상관관계의 정확도를 훼손시킬 염려가 상대적으로 적기 때문이다.

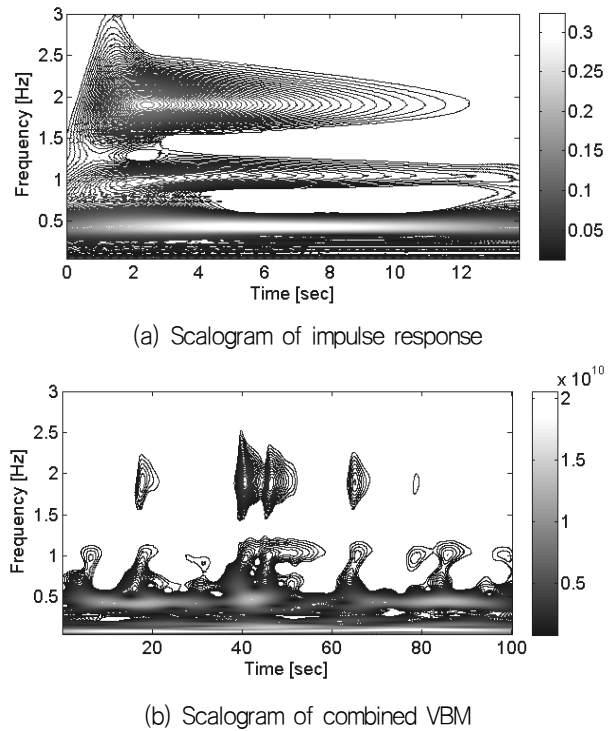


Fig. 5 Wavelet scalograms

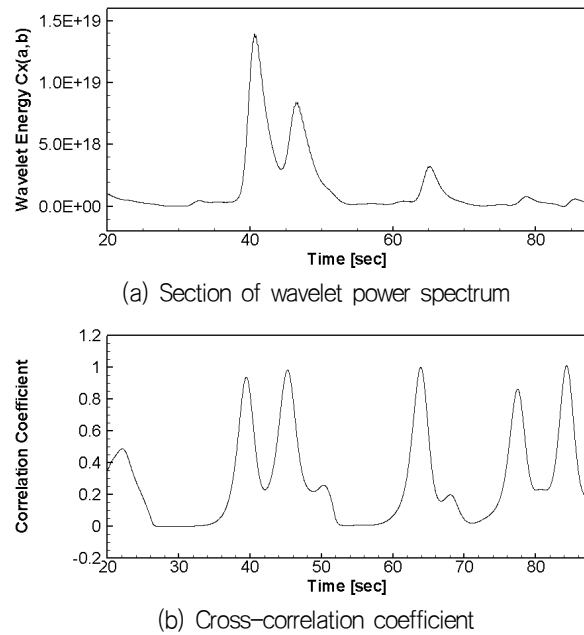


Fig. 6 Section of wavelet power spectrum and cross-correlation coefficient

Fig. 6은 웨이블릿 변환을 통해 얻어진 스펙트럼의 단면 및 자유감쇠신호와 혼합신호의 웨이블릿 교차상관관계 계수를 도시한 그림이다. 스펙트럼의 단면은 4절점 진동의 고유주파수인 1.9Hz에 해당되는 것으로 40~50sec 구간에 에너지가 집중해 있음을 확인할 수 있다. 언급된 바와 같이 스펙트럼의 단면은 휘핑 응답에 대한 개략적인 정보를 제공하고 있으나 응답의 크기가 작은

경우에는 휘핑을 명확히 식별하기에는 어려움이 있다. 반면에 Fig. 6(b)에 보인 교차상관관계 계수의 경우 휘핑 응답의 크기와 무관하게 두 신호의 유사성을 잘 표현해 주고 있음을 확인할 수 있다. 이상적인 신호의 경우와는 달리, 휘핑 응답이 크게 나타나는 경우에도 교차상관관계 계수는 정확하게 1의 값에 도달하지는 못하는데, 이러한 현상은 현실적인 상황에서는 자유감쇠신호가 노이즈 등에 의해 미약하게나마 오염이 되기 때문인 것으로 판단된다. 본 연구에서는 교차상관관계 계수의 임계치를 0.8로 선정하였으며, 이를 기반으로 한 경우 분석된 신호 범위 내에서 전체 5회의 휘핑 응답이 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 수치해석을 통해 얻어낸 슬래밍 모달 기진력의 시간 이력을 나타내는 그림이다. 슬래밍 모달 기진력은 수치해석을 통해 얻어진 유체동력학적 압력을 해당 모드 형상에 투영한 힘으로 정의되는 값으로, 대개 그 값이 클수록 해당 모드로의 응답이 커짐을 의미한다. Fig. 7에 보인 바와 같이 4절점 진동에 대한 슬래밍 모달 기진력은 휘핑으로 식별된 시간대에서 그 크기가 순간적으로 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 해당 시간대에서 4절점 진동을 기진하는 슬래밍 압력이 선체에 작용했음을 의미한다. 그러나, 32sec 근방에서 발생한 순간적인 모달 기진력의 증가는 휘핑으로 식별이 되지 않았는데, 이는 연속된 입수 충격력에 의한 동적 응답의 상호 간섭 효과로 인해 기진력은 있으나 응답으로는 연결되지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로 특정 시스템의 동적 응답은 응답 간의 상호간섭 효과로 인해 기진력과 직접 비례하지 않는 경우가 발생하므로 응답 특성을 기진력을 통해 분석하는 경우에는 주의가 필요하다.

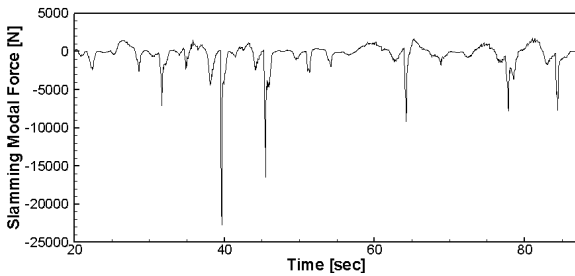


Fig. 7 Slamming modal force

Fig. 8은 충격응답신호와 혼합신호 간의 웨이블릿 코히런스를 나타낸 그림이다. 웨이블릿 코히런스는 두 신호간의 시간-주파수 영역에서의 국부적인 유사성을 나타내는 것으로 그 값이 1에 가까울수록 두 신호의 국부적인 유사성이 높음을 의미한다. 대부분의 식별된 휘핑 응답은 도시된 시간-주파수 영역에서 상호관계가 양호함을 확인할 수 있다. 일부 유사성이 낮아지는 영역이 관찰되기도 하는데, 이는 해당 영역에서는 웨이블릿 스펙트럼의 크기가 상대적으로 낮아서 발생한 결과로 신호의 유사성과는 크게 관계가 없다. 77.5sec에서 식별된 휘핑 응답의 경우 낮은 코히런스 영역이 신호의 에너지가 높게 분포된 중앙 영역까지 침범해 있음을 확인할 수 있으며 이는 Fig. 6에 보인 바와 같이 상대적으로 낮은 교차상관관계 계수로 나타났다. 이러한 경향은 해당 휘핑

응답이 순차적으로 발생한 비교적 작은 입수 충격력 등과 같은 여타의 신호들에 의해 왜곡되었기 때문인 것으로 판단된다.

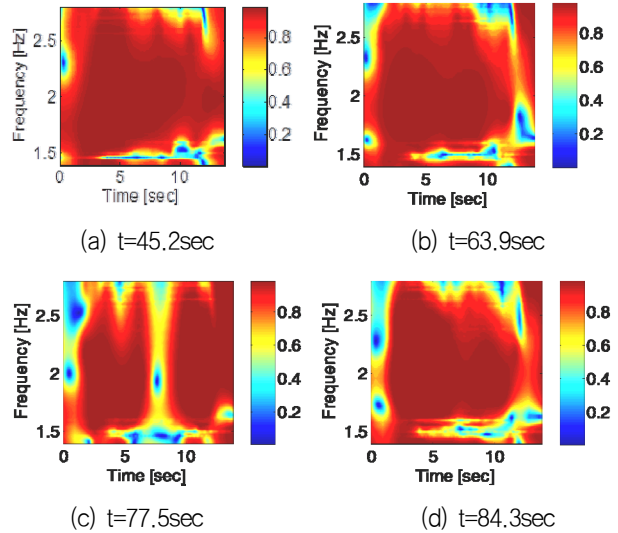


Fig. 8 Wavelet coherence for identified whipping

4. 결론

본 논문에서는 웨이블릿 교차상관관계를 이용하여 파랑 응답 및 스프링잉 응답과 혼재해 있는 휘핑 응답을 효과적으로 식별해 내는 기법을 제시하였으며, 이상적인 휘핑 신호 및 수치해석을 통해 생성한 신호에 적용하여 그 유효성을 입증하였다.

서로 다른 두 신호의 유사성을 확인하기 위한 기법으로 특정 주파수 대역에서 평균된 웨이블릿 교차상관관계 계수를 정의하고 제시하였다. 교차상관관계 계수는 웨이블릿 변환을 통해 얻어진 스펙트럼 간의 2차원 내적으로 정의가 되었으며 분석의 정확도 향상을 위해 가중 함수를 도입하였다.

교차상관관계 계수는 다양한 형태의 신호와 혼재된 충격응답 신호를 분리해 내는 방법론으로 제안되었으며, 파랑 응답 및 스프링잉 응답과 혼재해 있는 휘핑 응답을 식별해 내는 방법론으로서 매우 유용한 방법임을 확인하였다.

제안된 방법론의 검증을 위해 저주파수 신호와 충격응답신호로 구성된 이상적인 혼합신호를 생성하고 충격응답신호를 식별해 내는 시도를 하였다. 웨이블릿 교차상관관계 계수는 혼합혼합신호로부터 충격응답신호를 높은 정확도로 식별해 낼 수 있음을 확인하였다.

3차원 유탄성 해석 프로그램을 이용하여 초대형 컨테이너 선박에 대한 수치해석을 수행하여 보다 현실성이 있는 응답 시계열을 생성하였으며, 이를 통해 제안된 방법론의 타당성을 검증하였다. 웨이블릿 교차상관관계 계수를 통해 식별된 휘핑 응답은 슬래밍 모달 기진력의 국부 최대치가 발생하는 시점과 일치함을 확인하였다.

식별된 휘핑 응답의 시간-주파수 영역에서의 국부적인 유사성

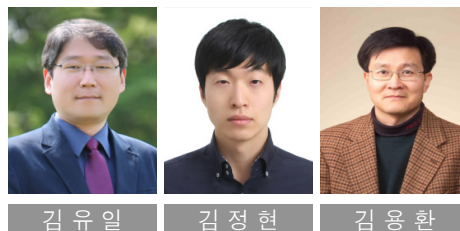
을 확인하기 위해 신호 간의 웨이블릿 코히런스를 비교 검토하였으며, 식별된 대부분의 휘핑 응답에 대해 신호 간의 국부적인 유사성이 매우 높음을 확인하였다.

후 기

1) 본 논문은 산업통상자원부 및 KEIT의 산업융합원천기술개발사업(10045212, 해양플랜트 통합 운영 및 유지보수를 위한 예지보전 시스템 개발)의 연구결과 수행되었음. 2) 본 논문은 산업통상자원부 해양플랜트 특성화 대학의 지원을 받아 수행되었음. 3) 본 논문은 인하대학교의 지원을 받아 수행되었음.

References

- Amin, W. Davis, M.R. Thomas, G.A. & Holloway, D.S., 2012. Analysis of Wave Slam Induced Hull Vibrations using Continuous Wavelet Transforms. *Ocean Engineering*, 58(15), pp.154–166.
- Du, S.X. Hudson, D.A. Price, G.W. Temarel, P. Chen, R. & Wu, Y., 2008. Wavelet Analysis of Loads on a Flexible Ship Model Traveling in Large-Amplitude Waves. *Journal of Ship Research*, 52(4), pp.249–262.
- Ermanyuk, E.V. & Ohkusu, M., 2005. Impact of a Disc on Shallow Water. *Journal of Fluids and Structures*, 20, pp.345–357.
- Kim, J.H. Kang, B.C. Kim, Y. & Kim, Y., 2012. Ship Springing Analysis for a Very Large Containership. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 22(3), pp.217–224
- Kim, J.H. Kim, Y. Kim, Y. & Kim, K.H., 2013. Study on ship structural hydroelasticity and fatigue assessment in irregular seaways. *Proceedings of ASME 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Nantes, France, 9–14 June 2013.
- Kwon, S.H. Lee, H.S. & Kim, C.H., 2005. Wavelet Transform based Coherence Analysis of Freak Wave and Its Impact. *Ocean Engineering*, 32(13), pp.1572–1589.
- Lardies, J. & Gouttebroze, S., 2002. Identification of Modal Parameters using the Wavelet Transform. *International Journal of Mechanical Sciences*, 44, pp.2263–2283.
- Li, H. & Nozaki, T., 1997. Application of Wavelet Cross-correlation Analysis to a Plane Turbulent Jet. *JSME International Journal, Series B* 40(1), pp.1–19.
- Marven, C. & Ewers, G., 1996. *A Simple Approach to Digital Signal Processing*. New York: John Wiley & Sons. Inc.
- Primer, A., 1998. *Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms*. New Jersey: Prentice Hall.
- Ruzzene, M. Fasana, A. Garibaldi, L. & Piombo, B., 1997. Natural Frequencies and Damping Identification Using Wavelet Transform: Application to Real Data. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 11, pp.207–218.
- Staszewski, W.J., 1997. Identification of Damping in MDOF Systems Using Time-Scale Decomposition. *Journal of Sound and Vibration*, 203(2), pp.283–305.
- Staszewski, W.J. & Cooper, J.E., 1995. Flutter data analysis using the wavelet transform. *Proceedings of the MV2 International Congress on New Advances in Modal Synthesis of Large Structure: Nonlinear Damped and Non-Deterministic Cases*, Lyon, France, 5–6 October 1995, pp.549–561.
- Staszewski, W.J. & Cooper, J.E., 1997. Wavelet approach to flutter data analysis. *AIAA Journal of Aircraft*, 39(1), pp.125–132.
- Storhaug, G., 2007. *Experimental investigation of wave induced vibrations and their effect on the fatigue loading of ships*. Ph.D. Norwegian University of Science and Technology.



김유일

김정현

김용환