

대형 컨테이너 선박의 유탄성 실선 계측 데이터 분석 Part I – 모달 파라미터 추정

김병훈¹·최병기²·박준석²·박성건³·기혁근³·김유일^{1,†}
인하대학교 공과대학 조선해양공학과¹
현대중공업 선박구조연구소²
대우조선해양 중앙연구원³

Full Scale Measurement Data Analysis of Large Container Carrier with Hydroelastic Response, Part I – Identification of Modal Parameters

Byounghoon Kim¹·Byungki Choi²·Junseok Park²·Sunggun Park³·Hyeokgeun Ki³·Yooil Kim^{1,†}
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, INHA University¹
Marine Structure Research Department, Hyundai Heavy Industries, Co., Ltd.²
DSME R&D Institute, Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering, Co., Ltd.³

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.

To understand the dynamic characteristics of the vessel with hydroelastic response, it is very important to estimate the dynamic modal parameters such as mode shapes, natural frequency, and damping ratio. These dynamic modal parameters of full scale ship are a priori unknowns, hence to be estimated directly based upon the full scale measurement data. In this paper, dynamic modal parameters were extracted by signal processing of acceleration and strain data measured from a large container ship whose loading capacity is 9400TEU. The mode shapes of the vibrating hull were identified using the proper orthogonal decomposition and the vibration response of hull was decomposed into its modal magnitudes. Natural frequencies of specific modes were derived via Fourier transform of these modal magnitude. Also, the free decay signal of the vibrating hull was obtained through the random decrement technique and the damping ratio was estimated with accuracy.

Keywords : Hydroelasticity(유탄성), Springing(스프링잉), Whipping(휘핑), Dynamic modal parameter(동적 모달 변수), Random decrement technique(랜덤 감쇠 기법), Proper orthogonal decomposition(적합 직교 분해)

1. 서론

최근 선박의 대형화, 고속화 추세와 맞물려 스프링잉, 휘핑과 같은 유탄성 응답의 중요성이 부각되고 있다. 유탄성 응답은 파랑하중에 의한 선박의 전선 진동현상을 의미하는 것으로, 입사파의 조우주파수와 선체의 고유진동수가 일치하여 발생하는 정상 진동 현상인 스프링잉과 선수 또는 선미부의 입수 충격에 의해 발생하는 과도 진동 현상인 휘핑이 이에 해당한다.

과거에는 선체의 고유진동수와 입사파의 조우주파수의 차이가 컸기 때문에 선박의 설계 시 유탄성 응답은 중요한 고려 대상이 되지 못했다. 하지만, 선박의 고속화 추세가 입사파의 조우주파

수의 증가를 불러왔으며, 선박의 대형화 추세는 선체 고유진동수의 감소를 야기시켰다. 이로 인해 선체의 고유진동수와 입사파의 조우주파수가 공진을 일으키는 스프링잉 현상의 발생 빈도가 높아졌으며, 유탄성 응답에 대한 해석의 중요성 역시 부각되고 있다.

유탄성 응답하는 선박의 동적 특성을 파악하기 위해선 모드 형상, 고유주파수, 감쇠비와 같은 동적 모달 변수의 추정이 매우 중요하며 이를 위한 다양한 해석 기법이 연구되었다. 동적 모달 변수들은 선형적 미지수이기 때문에 진동하는 선체의 응답으로부터 직접 구할 필요가 있으며, 실선 계측 자료에 대한 해석은 더욱 중요해지고 있다(Drummen, et al., 2009; Hirdaris, et al., 2009; Jensen, 2009; Miyake, et al., 2010).

진동하는 구조물의 모드 형상을 식별하기 위해 적합 직교 분

해(Proper Orthogonal Decomposition, POD) 기법이 보편적으로 사용된다. POD는 서로 다른 위치에서 계측된 신호 정보를 조합하여 진동하는 구조물의 모드 형상을 식별하고 이를 통해 모드를 분해하는 신호처리 기법으로, 계측 신호의 공간간섭행렬(spatial coherence matrix)을 정의하여 해당 행렬의 고유 벡터가 구조물의 고유모드 근사치가 된다는 원리에 기반하고 있다. POD는 공학 분야에서 유동장 내의 난류 분포 연구에 최초 적용되었으며 (Lumley, 1967), 이후 Feeny (2002)에 의해 진동하는 구조물의 모드 형상 추출에 확장 적용되었다.

동적 모달 변수를 추정하는 또 다른 방법으로는 랜덤 감쇠 기법(Random Decrement Technique, RDT)이 있다. RDT는 트리거링 조건을 만족하는 신호의 양상을 평균을 통해 기진력에 의한 시스템의 특이해 성분을 제거하고 동차해 성분만을 남겨 자유감쇠신호를 도출해내는 신호처리 기법이다. 도출해낸 자유감쇠신호의 포락선 값을 통해 진동하는 구조물의 감쇠계수와 감쇠비를 구해낼 수 있다. RDT는 항공기의 손상 여부 판단 및 동적 특성을 파악하기 위해 Cole (1968, 1971)에 의해 최초로 제안되었다. 이후 Ibrahim and Mikulcik (1977)은 자기 랜덤 감쇠 및 상호 랜덤 감쇠 개념을 도입해 진동 신호의 고유주파수와 고유모드를 추출해내었다.

Kim and Park (2013)은 분할 선체 모형에 대해 수직 굽힘 모멘트의 시간이력을 측정하고 RDT를 적용하여 접수 견인 조건에서의 고유주파수와 감쇠계수를 도출하였다. Mariani and Dessi (2012)는 POD를 사용하여 축소 모형의 진동 모드 응답을 추정하였으며, POD를 통해 분해한 가속도와 수직 굽힘 모멘트의 1, 2, 3차 수직 모드 형상이 일치함을 보였다. Kim, et al. (2015)는 POD와 교차 랜덤 감쇠 기법을 적용하여 400K 살물운반 모형선의 모드 형상을 추출하고 비교, 분석을 수행하였다.

본 논문에서는 Kim, et al. (2015)의 모형선에 대한 연구를 확장하여 실선 계측 데이터를 기반으로 실선의 모달 파라미터를 도출하는 연구를 수행하였다. 9400TEU급 대형 컨테이너 선박으로부터 계측한 가속도 데이터를 신호 처리하여 동적 모달 변수를 추출하였다. POD 기법을 이용하여 진동하는 선체의 모드 형상을 식별하였으며, 이를 기반으로 진동 응답을 모드 분해하여 모드별 고유주파수를 도출하였다. 계측된 변형을 데이터를 이용한 피로 손상도 추정에 대한 해석은 별도의 시리즈 논문에서 상세히 논할 계획이다.

2. 이론적 배경

2.1 대역필터(Band-Pass Filter)

Fig. 1은 주파수 영역에서 표현된 대역필터의 형상과 파라미터를 나타낸 그림이다.

일반적인 필터는 인접 모드 간의 중첩이 발생할 경우, 에너지 중첩 구간의 분해가 적절히 이루어지도록 경사 구간을 두고 설계

한다. 주파수 영역에서의 대역필터를 수식으로 표현하면 식 (1)과 같다.

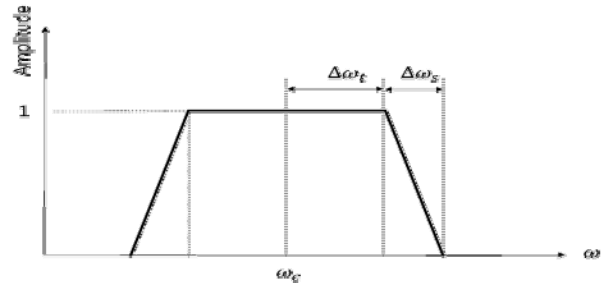


Fig. 1 Band-pass filter and its parameters

$$H(\omega) = \begin{cases} 0 & \text{to } 1, & \omega_c - \Delta\omega_t - \Delta\omega_s \leq \omega < \omega_c - \Delta\omega_t \\ 1, & \omega_c - \Delta\omega_t \leq \omega < \omega_c + \Delta\omega_t \\ 1 & \text{to } 0, & \omega_c + \Delta\omega_t \leq \omega < \omega_c + \Delta\omega_t + \Delta\omega_s \end{cases} \quad (1)$$

식 (2)는 주어진 신호 $f(t)$ 를 식 (1)의 대역필터로 필터링하는 과정을 내포하고 있다. 주어진 신호를 대역필터로 필터링하기 위해서는 $f(t)$ 를 푸리에 변환한 후, 대역필터 $H(\omega)$ 로 윈도우 처리하여 다시 역 푸리에 변환을 해야 한다.

$$\tilde{f}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)H(\omega)e^{i\omega t}d\omega \quad (2)$$

대역필터를 역 푸리에 변환하면 시간 영역에서의 충격 응답 함수가 되며, $\Delta\omega_s=0$ 일 때 식 (3)의 형태로 표현된다.

$$h(t) = \frac{\sin(\omega_c + \Delta\omega_t)t}{\pi t} - \frac{\sin(\omega_c - \Delta\omega_t)t}{\pi t} \quad (3)$$

시간영역에서의 대역필터링은 주어진 신호 $f(t)$ 와 충격 응답 함수 $h(t)$ 사이의 컨볼루션 적분으로 표현 가능하다. 이를 식으로 표현하면 식 (4)와 같다.

$$\tilde{f}(t) = \int_0^t f(\tau)h(t-\tau)d\tau \quad (4)$$

2.2 적합 직교 분해 - POD

POD는 기존의 모드 분해법과 달리 서로 다른 위치에서 계측된 물리량의 시계열들을 이용해 다자유도계의 모드 형상을 도출하고, 이에 기반하여 주어진 신호의 모드를 분해하는 방법이다.

POD는 특정 물리량의 공간간섭행렬에 기초한다. 우선 진동하는 다자유도계의 M 개의 서로 다른 위치에서 계측된 특정 물리량에 관한 신호의 양상 행렬을 식 (5)와 같이 정의한다.

$$X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_M] \quad (5)$$

여기서 열벡터 x_i 는 i 번째 위치에서의 특정 물리량의 시간이력을 의미하며, 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_i = [x_i(t_1), x_i(t_2), x_i(t_3), \dots, x_i(t_N)]^T \quad (6)$$

계측된 시스템의 응답은 서로 직교하는 시스템 고유모드의 선형 조합으로 표현이 가능하며, 시스템 응답 벡터의 시간이력 $x(t)$ 는 식 (7)의 형태로 주어진다.

$$x(t) = e_1(t)v_1 + e_2(t)v_2 + \dots + e_M(t)v_M \quad (7)$$

여기서, $e_i(t)$ 는 i 번째 모드의 시간 변조(time modulation)를 의미하며, 식 (5)의 양상블 행렬은 식 (8)의 형태로 변환 가능하다.

$$X = [x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_N)]^T \quad (8)$$

$$= [e_1v_1^T + e_2v_2^T + \dots + e_Mv_M^T]$$

행벡터 e_i 는 $[e_i(t_1), e_i(t_2), \dots, e_i(t_N)]$ 로 정의된다. 공간간섭행렬 R 은 $X^T X / N$ 으로 정의되며 여기에 v_j 를 곱하면 식 (9)의 형태로 표현된다.

$$Rv_j = \frac{1}{N} X^T X v_j = \frac{1}{N} v_j e_j^T e_j = \lambda v_j \quad (9)$$

식 (9)는 다자유도 시스템의 고유모드 벡터 v_j 는 공간간섭행렬의 고유벡터와 같음을 의미한다.

2.3 랜덤 감쇠 기법 - RDT

랜덤 감쇠 기법은 동적 시스템을 식별하기 위한 간단하지만 매우 강력한 방법이며 사전 정보없이 모달변수를 추정하는데 유용한 방법이다. 이는 식 (10)에 보인 바와 같이 주어진 조건, $T_{x(t)}$ 에 대한 신호 $x(t)$ 의 양상블 평균으로 정의된다.

$$D_{XX}(\tau) = E[x(t+\tau)|T_{x(t)}] \quad (10)$$

랜덤 감쇠 기법은 양상블 평균을 거쳐 평균이 0인 기진력에 의한 시스템의 특이해를 제거하고, 트리거링 조건에 의해 기진되는 동차해 성분만을 잔여시키는 신호처리 기법이다. 주어진 신호 $x(t)$ 가 정상적(stationary)이라는 에르고딕 가정을 도입하면 식 (10)은 주어진 샘플에서의 시간 평균으로 치환되며, 이를 이산화된 신호 $x(t)$ 에 적용하면 식 (11)와 같이 표현할 수 있다.

$$D_{XX}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(t_i + \tau) | T_{x(t_i)} \quad (11)$$

여기서 N 은 트리거링 조건을 만족하는 데이터의 개수, τ 는 랜덤 감쇠신호의 길이를 의미한다. $T_{x(t)}$ 는 트리거링 조건을 나타내며 그 종류에는 레벨 교차 트리거링, 제로 교차 트리거링, 국부 최대값 트리거링 등이 있다. 본 연구에서는 레벨 교차 트리거링 조건을 적용하였으며, 이를 식으로 표현하면 식 (12)와 같다.

$$T_{x(t)}^L = \{a \leq x(t) < a + \Delta a, -\infty \leq \dot{x}(t) < \infty\} \quad (12)$$

3. 대상 선박 및 신호 계측 시스템

3.1 대상 선박 주요목

본 연구에서는 CMA-CGM사의 9400TEU 컨테이너 선박에 대한 실선 계측 데이터를 분석하여 유탄성 응답 하는 선박의 동적 특성을 분석하였다. Fig. 2는 연구 대상 선박의 모습이며, Table 1은 해당 선박의 주요목이다.



Fig. 2 9400TEU container carrier

Table 1 Main particulars of container carrier

Items	Value	Unit
Power output	68,666	kW
Maximum speed	25.4	kts
Overall length	350.00	m
Overall beam	42.80	m
Maximum draft	14.50	m
Maximum TEU capacity	9,415	TEU
Reefer container	700	TEU
Dead weight	108,000	ton

3.2 신호 계측 시스템

본 선박의 유탄성 응답 분석을 위한 가속도와 변형을 계측은 MARINE에 의해 이루어졌다. 본 연구에서는 2007년 8월 5일부터 2008년 5월 13일, 약 9달 동안의 계측 데이터가 분석에 이용되었다.

선박에는 총 11개의 가속도계가 부착되어 있으며 각 위치에서의 x, y, z 축 방향 가속도를 계측하였다. 계측 단위는 m/s^2 이며, 가속도계의 위치는 Fig. 3과 같다.

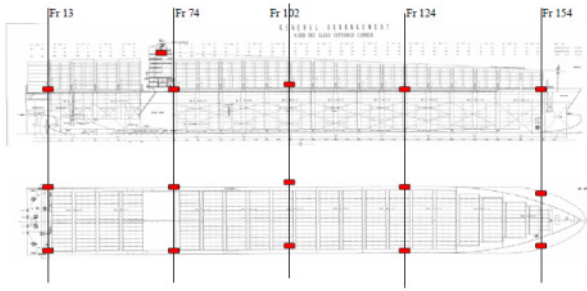


Fig. 3 Accelerometer arrangement

가속도계는 양현 갑판 통로(Fr 13, 74, 102, 124)와 선수부 프레임 구조물(Fr 154), 조타실에 총 11개가 설치되었다. 가속도계의 x축 국부 좌표는 선박 고정 좌표계의 x축과 일치하며, 프레임 구조물에 설치된 센서를 제외하고 z축 국부 좌표가 연직 아래 방향으로 향하게 설치되었다. 프레임 구조물에 설치된 가속도계는 z축 국부 좌표의 방향이 선박의 양현 비깅쪽을 향하도록 설치되었다. 가속도계의 위치는 아래의 Table 2와 같다.

Table 2 Accelerometer positions

Sensor	Position	X (m)	Y (m)	Z (m)
S1	Sb frame 13	9.60	19.25	25.70
S2	Sb frame 74	86.80	19.25	25.70
S3	Sb frame 102	167.30	19.25	25.70
S4	Sb frame 128	231.60	19.25	25.70
S5	Sb frame 154	319.50	19.25	25.70
S6	Ps frame 13	9.60	-19.25	25.70
S7	Ps frame 74	86.80	-19.25	25.70
S8	Ps frame 102	167.30	-19.25	25.70
S9	Ps frame 128	231.60	-19.25	25.70
S10	Ps frame 154	319.50	-19.25	25.70
S11	Wheel house	75.00	4.30	47.60

4. 동적 모달 변수 식별

4.1 모드 형상 식별

POD 방법을 이용하여 선체의 수직 굽힘 응답을 모드 분해하고 모달 변수를 식별하였다. 선체 길이 방향으로 5개의 서로 다른 위치에서 측정된 가속도 신호를 이용하여 식 (5)와 같은 양상 불 행렬을 구성하고 공간간섭행렬 R을 정의하였다. 수직 굽힘 응답을 얻기 위해 같은 프레임의 양현에 계측된 가속도를 평균하여 수직 방향으로의 가속도를 얻어 분석에 적용하였으며, 식 (9)와 같이 공간간섭행렬의 고유치 문제를 풀어 진동하는 선체 구조물

의 고유벡터를 도출하였다. 각 고유벡터의 크기를 1로 정규화하여 나타낸 모드 형상은 Fig. 4와 같다. 각 모드 형상에서의 표시 점은 선박의 길이를 1로 정규화 했을 때, 계측이 이루어진 5곳에서의 가속도의 정규화 된 값을 나타낸다.

Fig. 4(a), (b)에서의 첫 번째, 두 번째 모드 형상은 선체의 강제 운동을 나타내며 선형 중첩을 통해 상하동요 및 종동요를 표현할 수 있다. 이후의 모드 형상들은 각각 선체의 2절점, 3절점, 4절점 수직 굽힘 모드를 나타낸다. 서로 다른 5곳에서의 계측 신호를 이용해 모드 분해를 진행하였기 때문에 5개의 수직 굽힘 모드 형상이 도출되었다.

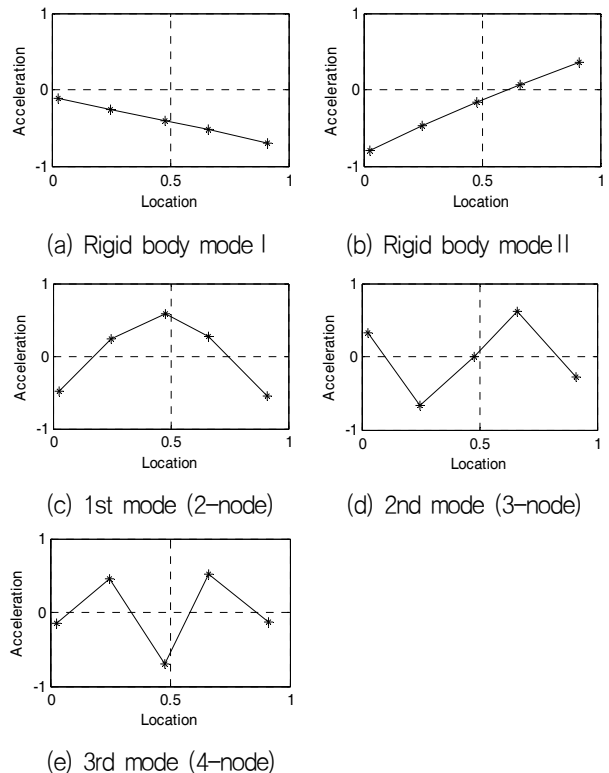


Fig. 4 Vertical mode shapes (at 21:54 of 2007/12/23)

4.2 고유주파수 식별

POD를 이용해 분해한 고유벡터를 차례로 식 (8)에 곱하면 정규직교화 조건에 따라 모드 별 가속도의 시간 변조를 구할 수 있다. Fig. 5는 모드 별 가속도의 시간 변조를 고속 푸리에 변환을 통해 주파수 영역에서 스펙트럼으로 나타낸 것이다.

주파수 스펙트럼의 형상을 통해 신호의 주파수 성분이 특정 주파수 영역대로 모드 분해된 것을 확인할 수 있다. 또한, 분해된 주파수 스펙트럼의 peak가 나타나는 곳에서의 x축 값을 읽음으로써 해당 모드의 고유주파수 식별이 가능하다. 고차 모드일수록 고유주파수 값이 고유주파수 영역에서 나타났으며, modulus 값이 현저히 작아졌다. 각 모드 별 주파수 스펙트럼의 상대적 크기를 통해 신호를 이루는 성분은 저차 모드가 지배적이며, 4노드 이상의 고차 모드는 충분히 무시할 수 있다는 것을 확인하였다.

5개의 수직 굽힘 모드 중 선체의 강체 운동을 제외한 2절점 및 3절점 모드에 대한 분석을 진행하였다. Fig. 5(c), (d)의 주파수 스펙트럼 peak 값을 통해 식별한 2절점 수직 굽힘 모드 성분의 고유주파수는 0.54 Hz이며, 3절점 수직 굽힘 모드 성분의 고유주파수는 1.08 Hz이다.

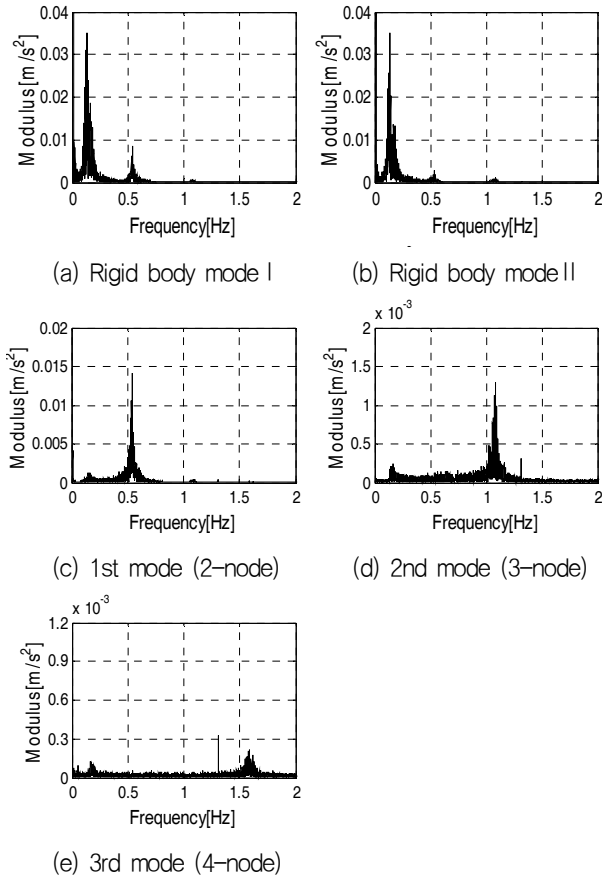
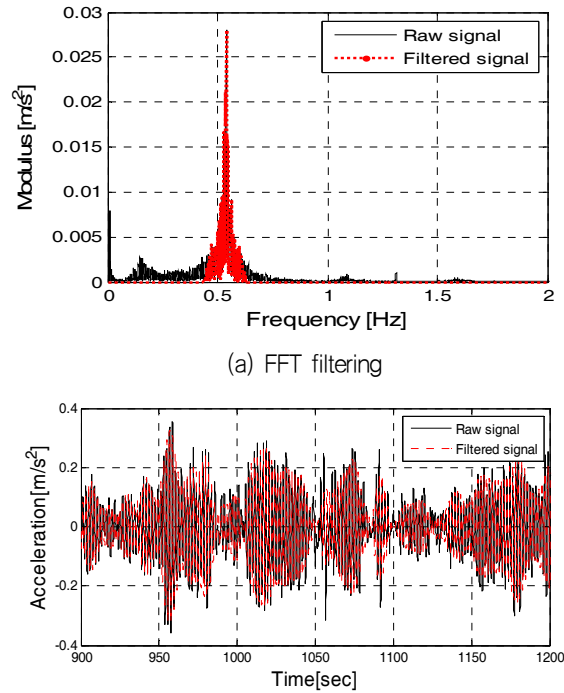


Fig. 5 FFT results of vertical modal magnitude (at 21:54 of 2007/12/23)

4.3 감쇠비 식별 - 2절점 수직 굽힘 모드

분해된 선체의 수직 굽힘 모드 중 2절점 굽힘 모드에 대한 동적 모달 변수를 추출하였다. 앞서 POD 방법을 통해 모드 형상과 고유주파수를 식별하였으며, 감쇠비를 구하기 위해 랜덤 감쇠 기법을 이용하였다.

Fig. 6(a)는 2절점 수직 굽힘 모드 성분으로 분해된 주파수 스펙트럼에 대역필터를 적용한 그림이다. 에너지 총합 구간을 적절히 분해하기 위해 Fig. 1과 같은 사다리꼴 형상의 대역필터를 적용하여 진동성분의 주파수 대역을 필터링하였다. 검은색 스펙트럼은 분해된 2절점 수직 굽힘 모드 시간 변조의 주파수 스펙트럼을 의미하며, 붉은색 스펙트럼은 대역필터를 통해 필터링한 주파수 성분을 의미한다. 대역필터의 형상계수는 $\omega_c=0.5385$, $\Delta\omega_i=0.07$, $\Delta\omega_s=0.03$ 이다. Fig. 6(b)는 필터링 전, 후의 신호의 시계열을 비교해 나타낸 것이다.



(a) FFT filtering
(b) Time series of filtered/unfiltered modal magnitude
Fig. 6 Filtering of modal magnitude of 2-node vertical bending mode (at 21:54 of 2007/12/23)

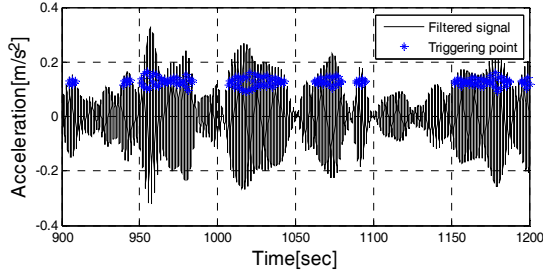
Fig. 7(a)는 대역필터를 통해 필터링한 신호와 레벨 교차 트리거링 조건을 만족하는 트리거링 포인트들을 함께 나타낸 것이다. 레벨 교차 트리거링 포인트를 선정하는 기준 값인 레벨은 신호의 표준편차 값을 사용하였으며, 양상별 평균을 위한 구간 길이는 신호의 고유주기의 N 배수 값으로 선정하였다. 본 시간대의 분석에서는 N의 값을 15로 정하였다.

Fig. 7(b)는 랜덤 감쇠 기법을 적용해 트리거링 포인트로부터 일정 시간간격 만큼의 신호들을 양상을 평균하여 자유감쇠신호를 도출하는 과정을 보여준다. Fig. 7(b)에서 검은 선은 일정 시간간격을 갖는 신호들의 양상을 평균 과정을 나타내며, 붉은 선은 위의 과정을 거쳐 수렴한 자유감쇠신호를 의미한다.

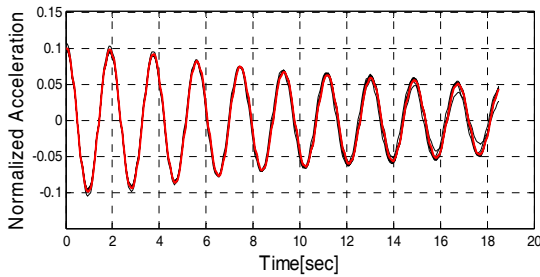
Fig. 7(c)는 자유감쇠신호의 국부 극치와 그에 대한 선형회귀 결과를 보여준다. 랜덤 감쇠 기법을 통해 얻어낸 자유감쇠신호의 국부 극치를 대수좌표계로 나타낸 후 기울기 값을 선형 회귀를 통해 구하고, 식 (13), (14)를 통해 대수감쇠율 δ 와 감쇠비 ζ 를 구하였다. $x(t)$ 는 t 에서의 자유감쇠신호의 진폭과 같으며 $x(t_2)/x(t_1)$ 는 대수좌표계에서의 자유감쇠신호의 포락선의 기울기 값을 의미한다. 해당 시간대에서의 2절점 수직 굽힘 모드 응답의 감쇠비는 1.33%이다. r은 상관계수로 -1에 가까울수록 선형회귀 정확도가 높다는 것을 의미한다.

$$\delta = \ln \left(\frac{x(t_2)}{x(t_1)} \right) = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (13)$$

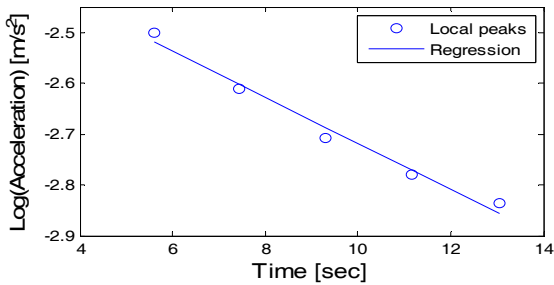
$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (14)$$



(a) Filtered modal magnitude time history and triggering points



(b) Free decay signal ($\zeta=1.33\%$)



(c) Local peaks and linear regression ($r=-0.9911$)

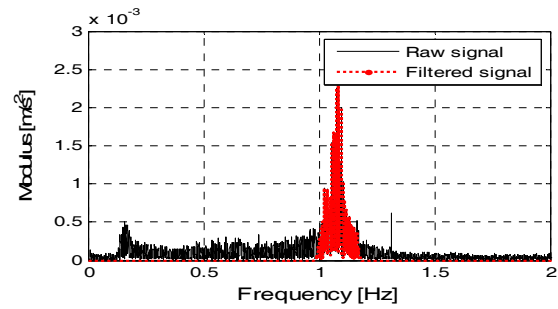
Fig. 7 Triggering points and free decay signal of 2-node vertical mode (at 21:54 of 2007/12/23)

4.4 감쇠비 식별 - 3절점 수직 굽힘 모드

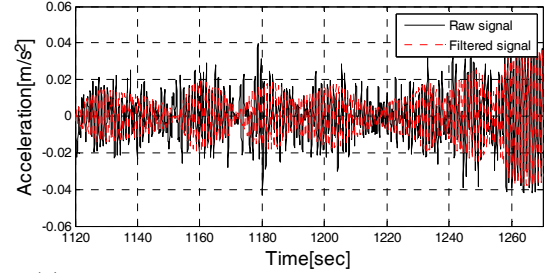
분해된 선체의 수직 굽힘 모드 중 3절점 굽힘 모드에 대한 동적 모달 변수를 추출하였다.

Fig. 8(a)는 3절점 수직 굽힘 모드 성분으로 분해된 주파수 스펙트럼에 대역필터를 적용한 그림이다. 대역필터의 형상계수는 $\omega_c = 1.0848$, $\Delta\omega_l = 0.07$, $\Delta\omega_s = 0.03$ 이다. Fig. 8(b)는 필터링 전, 후의 신호의 시계열을 비교해 나타낸 것이다.

Fig. 9(a)는 대역필터를 통해 필터링한 신호와 레벨 교차 트리거링 조건을 만족하는 트리거링 포인트를 함께 표시한 것이다. Fig. 9(b)는 양상을 평균 과정을 거쳐 자유감쇠신호를 도출하는 과정을 보여준다. Fig. 9(c)는 자유감쇠신호의 국부 극치와 그에 대한 선형회귀 결과를 나타낸다. 자유감쇠신호의 대수감쇠율을 계산해 3절점 수직 굽힘 모드 응답의 감쇠비를 구하였다. 해당 시간대에서의 3절점 수직 굽힘 모드 응답의 감쇠비는 1.74%이다.

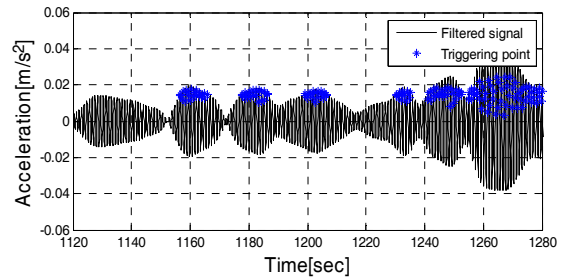


(a) FFT filtering

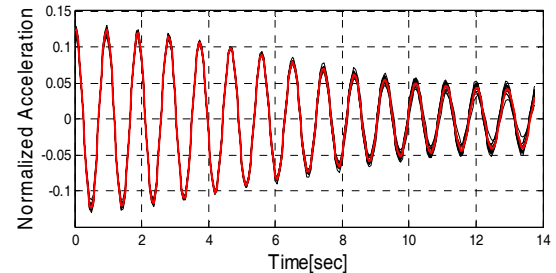


(b) Time series of filtered/unfiltered modal magnitude

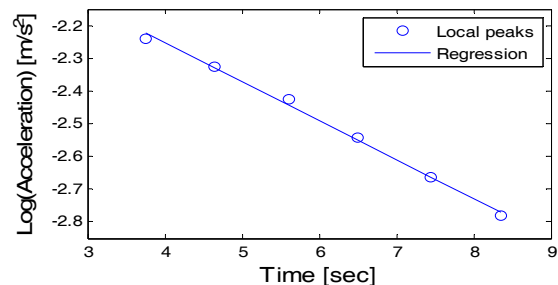
Fig. 8 Filtering of modal magnitude of 3-node vertical bending mode (at 21:54 of 2007/12/23)



(a) Filtered modal magnitude time history and triggering points



(b) Free decay signal ($\zeta=1.74\%$)



(c) Local peaks and linear regression ($r=-0.9981$)

Fig. 9 Triggering points and free decay signal of 3-node vertical mode (at 21:54 of 2007/12/23)

4.5 모달 파라미터의 시간이력 분석

전체 계측 기간 중 선체 수직 굽힘 응답이 컸던 207개의 시간대를 선정하여 모달 변수를 도출하여 이의 변화 양상을 분석하였다.

Fig. 10의 (a), (b)는 각각 2절점 및 3절점 수직 굽힘 모드의 모드 형상을 박스 도식(box and whisker plot)을 이용해 나타낸 것이다. 붉은 선은 모드 형상 통계치의 중앙값을 이은 것이며 박스의 상단은 상위 50%의 중앙값, 하단은 하위 50%의 중앙값을 의미하며, 수염의 상단은 최대값 하단은 최소값을 나타낸다.

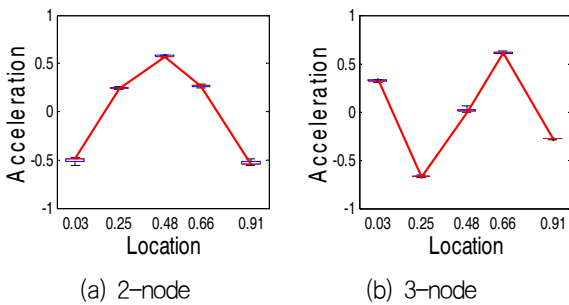


Fig. 10 Box and whisker plot of mode shapes

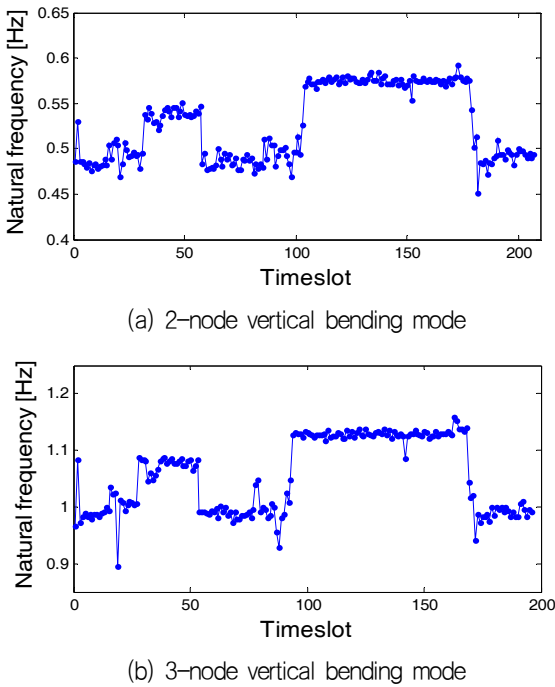


Fig. 11 Evolution of natural frequencies

Fig. 11은 2절점 및 3절점 수직 굽힘 모드의 고유주파수 값을 시간대별로 도식화 한 것이다. 이 때 x축에 나타낸 시간대는 선체 수직 굽힘 응답이 컸던 시간대로 연속적인 시간대가 아님을 유의해야 한다. Fig. 11(a)는 2절점 수직 굽힘 모드의 고유주파수를 나타내며 0.45~0.6Hz 사이의 값을 갖는다는 것을 확인할 수 있다. 시간대별 고유주파수의 차이가 발생하는 이유는 선박의 적재조건이 달라졌기 때문일 것이라 추측되며, 고유주파수가 작

은 구간은 만재조건에 가까울 것으로 반대로 고유주파수가 큰 구간은 발라스트 조건에 가까울 것으로 추정할 수 있다. Fig. 11(b)는 3절점 수직 굽힘 모드의 고유주파수를 나타내며 0.9~1.15Hz 사이의 값을 갖는다는 것을 확인할 수 있으며, 시간에 따른 변화 양상은 2절점의 경우와 유사함을 알 수 있다.

Fig. 12는 2절점 및 3절점 수직 굽힘 모드의 감쇠비 값을 시간대별로 도식화 한 것이다. Fig. 12(a)는 2절점 수직 굽힘 모드의 감쇠비를 나타내며 1~4% 사이의 값을 갖는다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 12(b)는 3절점 수직 굽힘 모드의 감쇠비를 나타내며 1~3% 사이의 값을 갖는다. 감쇠비의 변동 양상이 다소 불규칙하게 나타나는 것은 RDT에 의해 얻어진 자유감쇠신호가 근사치임으로 인한 영향이라 판단된다. 또한, Fig. 11, Fig. 12를 통해 미약하나마 고유주파수가 커질수록 감쇠비가 감소하는 반비례 관계를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

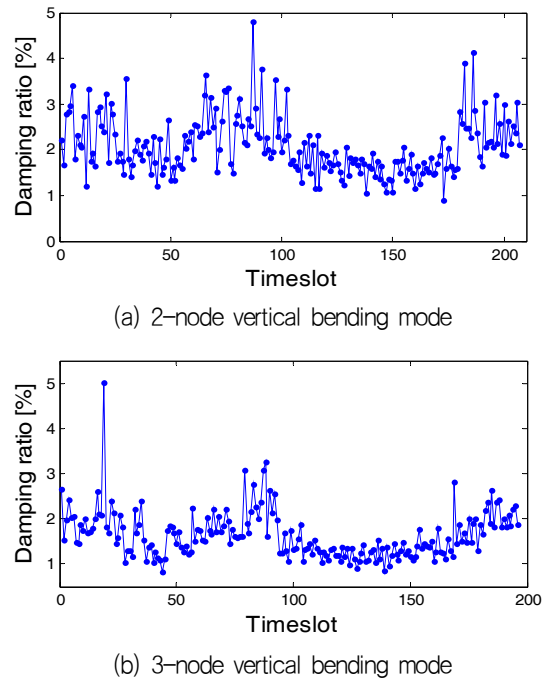


Fig. 12 Evolution of damping ratios

5. 결론

본 연구에서는 대형 컨테이너 선박의 실선 계측 데이터를 분석하여 모달 변수를 추정하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 9400TEU급 대형 컨테이너 선박의 Fr 13, 74, 102, 124, 154 위치에서 가속도의 시간이력을 계측하였으며, POD 기법을 적용하여 2절점, 3절점 수직 굽힘 모드에 해당하는 모드 형상을 추출하였다. 이를 기반으로 모달 벡터를 내적하여 가속도의 시간이력을 2절점 및 3절점 수직 굽힘 모드로 분해하였다.
- 2절점 수직 굽힘 모드로 분해된 가속도의 시간이력을 주파수 영

역으로 나타내어 고유주파수를 식별하였으며, RDT 기법을 통해 자유감쇠신호를 얻어 감쇠비를 구하였다. 전체 측정 기간 동안 2절점 수직 굽힘 모드에 해당하는 고유주파수는 0.45~0.6Hz 사이로 나타났으며, 감쇠비는 1~4 % 사이로 나타났다.

- 3절점 수직 굽힘 모드로 분해된 가속도의 시간이력을 주파수 영역으로 나타내어 고유주파수를 식별하였으며, RDT 기법을 통해 자유감쇠신호를 얻어 감쇠비를 구하였다. 전체 측정 기간 동안 3절점 수직 굽힘 모드에 해당하는 고유주파수는 0.9~1.15Hz 사이로 나타났으며, 감쇠비는 1~3% 사이로 나타났다.
- 고유주파수의 시간이력을 분석한 결과 적재조건에 따른 변동이 비교적 큰 폭으로 나타남을 확인하였으며, 만재조건에서는 작아지며 발라스트 조건에서는 커지는 경향을 나타내는 것으로 추정이 가능하다. 감쇠계수의 변동 양상은 고유주파수의 경우처럼 뚜렷하지 않으나 대체적으로 적재조건에 따라 변화하는 2절점 수직 굽힘모드의 고유주파수에 반비례하는 경향을 보였다.
- 감쇠비, 고유주파수 및 진동 모드와 같은 모달파라미터의 정밀한 추정선 설계 시에 수행되는 수치해석의 정확도 향상에 지대한 영향을 끼치는 중요한 요소들이다. 특히 모드중첩법에 기반하는 해석에 있어 모드형상의 정확도 및 정확한 감쇠계수의 적용은 수치해석을 통해 얻어지는 피로손상도의 추정에 매우 중요한 역할을 한다.

후 기

본 연구는 현대중공업, 대우조선해양의 재정지원으로 수행된 연구의 일부이며 CMA-CGM 및 프랑스 선급과의 협업 하에 수행된 연구임을 밝힙니다. 관련 기관의 지원과 협조에 감사의 말씀을 드립니다. 본 연구는 산업통상자원부 해양플랜트 특성화대학의 지원을 통해 수행되었습니다.

References

Cole, H.A., 1968. *On-The-Line analysis of random vibrations*, AIAA Paper No. 68-288.

Cole, H.A., 1971. *Method and apparatus for measuring the damping characteristics of a structure*. United States Patent No.3, 620,069, Nov.16.

Drummen, I. Wu, M.K. & Moan, T., 2009. Experimental and numerical study of containership responses in severe head seas. *Marine Structures*, 22, pp.172-193.

Feeny, B.F., 2002. On proper orthogonal coordinates

as indicators of modal activity. *Journal of Sound and Vibration*, 255, pp.805-817.

Hirdaris, S.E. Bakkers, N. White, N. & Temarel, P., 2009. Service factor assessment of a great lakes bulk carrier incorporating the effects of hydroelasticity. *Marine Technology*, 46(2), pp.116-121.

Ibrahim, S.R. & Mikulcik, E.C., 1977. A Method for the direct identification of vibration parameter from the free response. *Shock and Vibration Bulletin*, 47(4), pp.183-198.

Jensen, J.J., 2009. Stochastic procedures for extreme wave load predictions - wave bending moment in ships. *Marine Structures*, 22(2), pp.194-208.

Kim, Y. & Park, S.G., 2013. Wet damping estimation of the segmented hull model using the random decrement technique. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(4), pp.217-223.

Kim, Y. Ahn, I.G. & Park, S.G., 2015. Extraction of the mode shapes of a segmented ship model with hydroelastic response. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7, pp.979-994.

Lumley, 1970. *Stochastic tools in turbulence*. Academic Press: New York.

Mariani, R. & Dessi, D., 2012. Analysis of the global bending modes of a floating structure using the proper orthogonal decomposition. *Journal of Fluids and Structures*, 28, pp.115-134.

Miyake, R. Matsumoto, T. Yamamoto, N. & Toyoda, K., 2010. On the estimation of hydroelastic response acting on an ultra-large container ship. *In: Proceedings of the 20th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Beijing, China, June 2010, pp.849-856.

