

8,000 TEU급 컨테이너선의 진동 특성에 관한 연구

안선민 · 이준호 · 전해주 · 정원식 · 배성용[†]
국립부경대학교(학생 · [†]교수)

A Study on the Vibration Characteristics of an 8,000 TEU Container Ship

Seon-Min AHN · Jun-Ho LEE · Hye-Joo JEON · Won-Sik JEONG · Sung-Yong BAE[†]
Pukyong National University(student · [†]professor)

Abstract

To improve fuel efficiency and comply with environmental regulations, container ships continue to increase in size and adopt slow-steaming operations. Consequently, low-frequency excitation forces from engines and propellers are more likely to coincide with the natural frequencies of the container ship, making resonance-induced vibration a growing concern. This study investigates how mechanical excitations from the main engine and propeller affect the global vibration characteristics of an 8,000 TEU container ship. Free and forced vibration analyses based on the finite element method were carried out using MSC PATRAN/NASTRAN to evaluate the vibration characteristics of the container ship and full-scale vibration measurements were also conducted for validation. Through Campbell diagram, principal hull vibration modes and potential resonance regions are identified as process of free vibration analysis. It showed significant vibration responses in upper deck that mainly caused by the 2nd and 6th order excitation components of the main engine. The numerical results showed strong agreement with the experimental measurements, thereby confirming the reliability of the adopted analysis approach. These findings provide useful reference data for vibration evaluation and vibration reduction design of large container ships.

Key words : Containership, Finite element method, Vibration analysis, Vibration measurement, Resonance

I. 서 론

최근 전 세계 컨테이너 물동량은 연간 약 8억 TEU 수준에 도달한 것으로 보고되고 있으며(ISL, 2025), 국제 교역의 약 80% 이상이 해상 운송을 통해 이루어지고 있다. 컨테이너선은 전 세계 운항 중인 상선의 주요 선종 중 하나로 지속적인 증가 추세를 보이고 있다(UNCTAD, 2024). 한편, 물동량 증가에 따른 선박의 대형화가 진행되면서 이를 추진하기 위한 엔진 역시 대형화되는 추세이다. 또한 IMO 환경 규제와 연료 절감을 위해

저속 운항이 확산되고 있다. 이는 운항 RPM을 감소시켜 엔진의 부하 조건을 변화시킴과 동시에 저속 운전 시 특정 가진 주파수가 선체의 고유진동수와 가까워질 수 있어 공진 등의 진동 문제를 일으킨다. 컨테이너선은 중·대형화될수록 선체 중량도 해석을 비롯한 정적 구조해석이 대단히 중요하며 과도한 공진 등으로 인하여 피로 파괴 현상을 유발하여 선박의 수명을 감소시켜 막대한 경제적 손실을 초래하고 안전 면에서도 심각한 사고를 발생시킬 가능성이 있으므로 동적 특성을 파악하여 초기 설계 단계에서 적용할 필요가 있

[†] Corresponding author : 051-629-6616, sybac@pknu.ac.kr

※ 이 논문은 국립부경대학교 자율창의학술연구비(2025년)에 의해 연구되었음.

다.

Park and Jung(2002)은 5,000 TEU급 이상의 컨테이너선을 대상으로 선체, 선미 구조 및 거주구에서 발생하는 진동 특성과 저감 대책을 검토하였다. 해당 연구에서는 유한요소해석과 실선 계측을 통해 컨테이너선의 진동 특성을 평가하였으며, 주기관 및 프로펠러에 의한 가진력과 구조연성(coupling)이 진동 응답에 복합적으로 영향을 미칠 수 있음을 보고하였다. 또한 ISO 기준을 만족하는 수준으로 선박 진동을 저감하기 위해 공진 회피, 구조 강성 조정, 가진원 제어, 모멘트 보상기(compensator) 및 방진 장치 적용 등의 저감 방안을 제시하였다.

Chae et al.(2004)에서는 2,400 TEU급 컨테이너선의 거주구와 선미부의 진동 특성을 분석하기 위해 NASTRAN을 이용하여 선체 및 거주구를 모델링하고, 자유진동 해석을 통해 고유진동수와 모드 형상을 분석하여 종방향, 횡방향, 비틀림 모드를 도출하였다. 또한, 강제진동 해석은 주요 가진원으로 주기관 H-moment, X-moment 그리고 프로펠러 1차 성분을 고려하여 수행하였고 각 가진원별 진동 응답을 계산 및 주파수 응답을 분석하여 선체 거주부에 미치는 진동은 엔진 및 프로펠러에 의한 복합 진동으로 발생하고 있다는 것을 주장하며, 설계 시에 공진 회피 또는 구조 보강의 필요성을 강조하고 있다.

Cho et al.(2010)에서는 유한요소법을 이용한 구조 강도 해석 기법을 대형 선박과 같은 복잡한 구조물의 전선 진동에 대해 적용하였다. 해당 연구는 선박과 같은 대형 박판 구조물의 구조 강도를 해석하고 시각화할 수 있는 수치 시뮬레이션 시스템을 제안한다. 또한, 4,100 TEU급 컨테이너선을 대상으로 모드 중첩법을 이용한 구조 강도 해석을 수행하였고, 이를 통해 선체 거더 및 상부구조물의 공진 모드에서 가진원으로부터 상부구조물까지 전달되는 주요 진동 에너지 흐름 경로를 분석하였다.

이러한 선행 연구들은 주로 파랑 하중, 엔진

및 프로펠러 등 복합 가진원으로부터 발생하는 진동 특성에 관한 해석에 국한되어 있으며, 실선 계측을 통한 검증이 병행된 사례는 매우 드물다. 따라서, 본 논문에서는 8,000 TEU급 대형 컨테이너선의 구조적 특성을 반영하여, 엔진 및 프로펠러 기인의 다양한 기계적 가진원이 선체 진동에 미치는 영향을 자유진동 및 강제진동 해석을 통해 분석하였다. 특히, Campbell 선도를 통해 공진 가능 영역을 정량적으로 도출하고, 해당 부위의 실선 계측을 병행하여 해석과 계측의 진동 응답 결과를 수치적으로 비교·검증하였다. 이를 통해, 대형 선박 진동 해석 기법의 신뢰성을 실증적으로 입증했다는 점에서 기존 연구와 차별화되는 기술적 기여가 있다.

II. 연구 방법

1. 유한요소 모델링 및 해석 조건

대상 선박은 8,000 TEU급 컨테이너선으로, 해석 모델은 MSC PATRAN을 이용하여 선체 거더의 수직, 수평 굽힘 및 비틀림뿐만 아니라 상부 구조 및 주기관까지 포함한 전선 진동 특성을 동시에 평가할 수 있는 3차원 유한요소 모델로 구성하였다. 선체 구조의 재료 물성치는 <Table 1>과 같이 강재를 기준으로 적용하였다. 또한, 기기류 및 컨테이너 하중은 집중질량 형태로 반영하여 전선 진동 해석에 필요한 질량 분포를 재현하였다.

<Table 1> Material properties of steel

Property	Material	Value
Young's modulus	Steel	$2.06 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2$
Poisson's ratio	Steel	0.3
Density	Steel	$7.85 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$

본 연구의 해석 및 경계조건은 실제 계측과 동일한 조건에 대해 해석을 수행하였다. 적재 조건은 Lightship 및 각 구역별 Dead weight를 해당

구역에 집중질량 형태로 반영하였다.

해수와 접하는 선체 구조의 유체-구조 연성 효과를 반영하기 위하여 부가수질량을 고려하였다. 부가수질량은 MSC NASTRAN의 MFLUID 해석 옵션을 이용한 가상질량법(Virtual mass method)으로 산정하였다. 경계조건은 선박 전체를 자유-자유 조건으로 모델링하여, 인위적 지지에 의한 고유특성 왜곡을 배제하였다.

대상 선박의 주요 가진력은 주기관 가진력과 프로펠러 변동압력이다. 본 연구에서는 주요 가진 성분으로 확인된 주기관 2차 외부 불평형 모멘트, 3차 및 4차 가이드포스 X-moment, 6차 가이드포스 H-moment를 적용하였다. 한편, 프로펠러 가진력은 프로펠러 블레이드 주위의 유동 변화에 의해 발생하는 변동압력을 선미부 외판에 작용하는 등가 표면력으로 환산하여 적용하였다.

주기관은 1기 1축 추진계의 저속 2행정 디젤엔진으로 설정하였으며, 형식은 WIN G&D 6X82-2.0이다. 주기관의 연속최대출력(MCR)은 68.2 rpm에서 26,760 kW, 상용출력(NCR)은 65.0 rpm에서 23,201 kW로 설정하였다. 이러한 회전수 조건은 자유진동 해석에서 공진 회피 범위를 검토하는 기준이 될 뿐만 아니라, 강제진동 해석에서 가진 주파수 범위를 결정하는 핵심 입력값으로도 사용된다.

프로펠러는 1기 고정피치프로펠러(FPP)로 블레이드 수는 5개, 직경은 9.3 m로 설정하였다. 프로펠러 가진력은 블레이드 주위의 와류 및 캐비테이션에 의해 발생하는 변동압력을 기반으로 정의하였고, 선박 모형시험에서 얻어진 변동압력 계측값을 프로펠러 유효 단면적과 곱하여 선체 외판에 작용하는 등가 표면력으로 환산하였다. 이 표면력은 프로펠러 회전수 증가에 따라 가진력이 증가하는 특성을 반영하기 위하여 회전수의 세제곱에 비례하는 것으로 가정하였다.

응답 평가 위치와 진동 평가 기준은 <Table 2>와 같이 거주구역 및 선체 구조로 구분하여 설정하였다. 거주구역의 진동 평가 기준은 여객선과

상선의 거주성에 대한 평가 지침인 ISO 21984:2018(E) 기준을 적용하였고, 일반 선체 구조의 진동 평가 기준은 연구 대상 선박의 적용 선급인 ABS 선급의 기준을 적용하였다. 거주구역은 Wheelhouse, Captain room, Crew room 및 E.C.R.까지 4개 위치, 선체 구조는 Radar mast, Stern 및 Funnel top까지 3개 위치를 설정하여 총 7개 위치에 대해 검토하였다. 이러한 응답 위치 설정은 실제 사용성, 구조 건전성 및 취약도 측면에서 의미 있는 위치를 중심으로 이루어졌다.

<Table 2> Vibration response location

Location	Criteria	
	Velocity	Standard
Wheelhouse	6.0 mm/s	ISO 21984:2018 (overall frequency-weighted r.m.s value)
Captain room	5.0 mm/s	
Crew room	5.0 mm/s	
E.C.R.	6.0 mm/s	ABS Guidance (r.m.s value)
Radar mast	45.0 mm/s	
Stern	45.0 mm/s	
Funnel top	45.0 mm/s	

2. 자유진동 해석

자유진동 해석은 MSC NASTRAN을 이용하여 구조계의 질량행렬과 강성행렬로부터 고유치 문제를 해석하여 구조물의 질량 및 강성 특성에 따른 고유진동수와 모드 형상을 산정하였다.

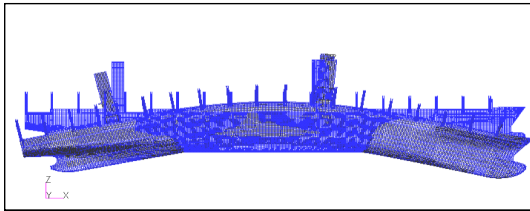
해석 결과는 대상 선박의 고유 모드의 수직 굽힘, 수평 굽힘 및 비틀림 계열로 명확히 구분되었으며, 각 모드별 고유진동수는 <Table 3>에 나타내었다.

고유 모드는 단순히 선체 거더에 국한되지 않고 갑판실 및 기관 케이싱과 같은 상부구조 응답과도 연계되므로, 주파수 값만이 아니라 해당 주파수에서의 변형 양상을 함께 분석하는 것이 중요하다. 특히 수직 굽힘 모드의 경우 상부구조의 진동 수준과 밀접한 관련이 있으므로, 강제진동 해석에서 응답이 집중되는 위치를 확인하는 중요한 기준이 된다. 각 고유 모드의 대표 형상을 수

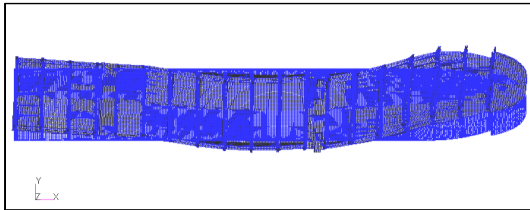
<Table 3> Results of free vibration analysis

Component		Freq
Vertical bending mode	2-node	0.79 Hz
	3-node	1.49 Hz
	4-node	2.16 Hz
	5-node	2.71 Hz
	6-node	3.39 Hz
Horizontal bending mode	2-node	1.09 Hz
	3-node	1.97 Hz
	4-node	2.91 Hz
	5-node	3.28 Hz
Torsional mode	1st	0.71 Hz
	2nd	2.25 Hz
	3rd	3.64 Hz

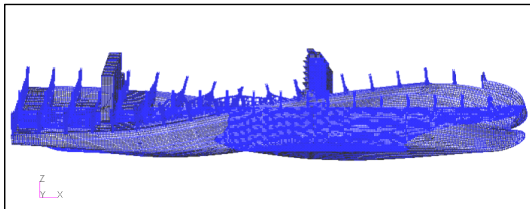
직 굽힘 모드는 [Fig. 1], 수평 굽힘 모드는 [Fig. 2], 비틀림 모드는 [Fig. 3]에 나타내었다.



[Fig. 1] Mode shapes of vertical mode



[Fig. 2] Mode shapes of horizontal mode



[Fig. 3] Mode shapes of torsional mode

고유치 해석을 통해 산정된 고유진동수와 주요

가진원과의 공진 평가를 위해 실제 운항 중 발생 가능한 회전수 변동을 고려하여 NCR 및 MCR에 대응하는 가진 주파수를 기준으로 $\pm 10\%$ 의 안전 여유를 적용하였으며, Campbell 선도로 분석을 수행하였다. 이를 통해 평가 주파수 영역에서 수직 굽힘 모드와 수평 굽힘 모드, 그리고 비틀림 모드에 대한 분석을 수행하였다.

3. 강제진동 해석

강제진동 해석은 자유진동 해석에서 도출된 고유 모드와 주요 가진 성분의 관계를 바탕으로 수행하였고, 운항 회전수 범위에서 각 응답 평가 위치의 진동 응답을 산정하였다. 거주구역 응답은 Wheelhouse, Captain room, Crew room, E.C.R 총 4개 위치에서 평가하였다. 해석 결과는 주기관 2차 가진 성분에 의해 Wheelhouse 종방향으로 64.8 rpm에서 6.67 mm/s 및 Captain room 종방향으로 64.8 rpm에서 5.76 mm/s로 각각의 허용 기준을 초과하는 응답이 확인되었다.

선체 구조 응답은 Radar mast, Stern, Funnel top까지 총 3개 위치에 대해 검토하였다. 해석 결과는 주기관 2차 가진 성분에 의해 Radar mast의 종방향 응답은 64.8 rpm에서 46.89 mm/s, Funnel top의 종방향 응답은 64.8 rpm에서 52.18 mm/s로 나타나 허용 기준을 초과하였다. 허용 기준을 초과하는 대표 고응답 위치와 응답 수준은 <Table 4>에 정리하였으며, 기준을 만족한 Crew room, E.C.R, Stern은 표에서 제외하였다.

응답 곡선은 NCR 및 MCR에 대응하는 가진 주파수로 설정한 평가구간에서 뚜렷한 피크를 나타내며, 종방향 응답 성분이 상대적으로 크게 나타나는 경향을 보였다. 이는 저차 주기관 가진 성분이 선체 거더의 전선 굽힘계 모드와 결합하여 거주구역 및 선체 구조의 진동을 지배함을 의미한다. 따라서 이러한 문제 응답은 단순한 국부 진동이 아니라 전선 고유 모드와 가진원의 결합 효과로 이해하는 것이 타당하다.

<Table 4> Summary of critical vibration responses from forced vibration analysis

Location	Criteria	Maximum response
Wheelhouse	6.0 mm/s	6.67 mm/s (o.f.w. r.m.s, L)
Captain room	5.0 mm/s	5.76 mm/s (o.f.w. r.m.s, L)
Radar mast	45.0 mm/s	46.89 mm/s (r.m.s, L)
Funnel top	45.0 mm/s	52.18 mm/s (r.m.s, L)

4. 해석 결과 분석 및 고찰

주요 가진원과 구조 응답의 관계를 검토하면, 모든 위치에서 동일한 메커니즘으로 진동이 발생하는 것은 아니었다. 거주구역과 일반 선체 구조의 응답은 주로 주기관 2차 외부 불평형 모멘트와 6차 가이드포스 H-moment와 밀접하게 연관되며, 이는 전선 굽힘계 모드 및 상부구조의 유연성과 결합하여 응답을 증폭시키는 것으로 분석되었다. 즉, 대상 선박의 진동 문제는 하나의 단일 원인으로 설명되기보다, 위치별로 상이한 가진원과 구조 모드의 조합에 의해 발생하는 것으로 판단된다.

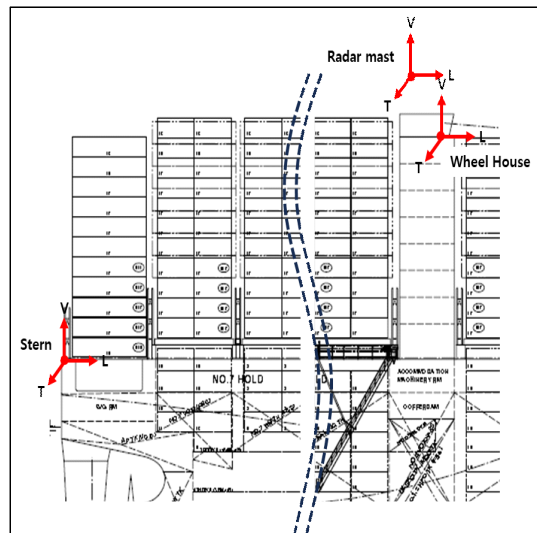
따라서 해석 결과를 종합하면, 대상 선박의 진동 특성을 고유 모드, 주요 가진원 및 위치별 응답 특성의 관점에서 체계적으로 파악할 수 있었다. 자유진동 해석은 공진 가능성이 있는 후보 모드와 민감 주파수 대역을 제시하였고, 강제진동 해석은 실제 운항영역에서 문제가 될 수 있는 응답 위치에서 지배 가진원에 의한 진동 수준을 정량적으로 확인하였다.

5. 계측

계측에는 다채널 데이터 취득 및 신호해석이 가능한 진동 분석 시스템을 사용하였다. 가속도계는 Dytran사의 3148E를 사용하였으며, 데이터 취득 및 분석 장비로는 B&K PULSE를 사용하였

다. 계측된 신호는 FFT(Fast Fourier Transformation)를 이용하여 time-averaged vibration spectra로 변환하였다. 이때 샘플링 주파수는 2,560 Hz, 분석 상한 주파수는 200 Hz, spectral lines 수는 1,600, 주파수 분해능은 0.125 Hz로 설정하였다. 시간 창 함수는 Hanning window를 적용하였고, overlap은 75%로 설정하였다. 진동 계측은 32 rpm ~ 68.2(MCR) rpm 까지 1~3 rpm 간격으로 수행하였다.(32, 35, 38, 41, 44, 47, 50, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 61, 63, 64, 65, 66, 67, 68.2 / 총 21단계)

측정 위치는 [Fig. 4]와 같이 하여 선체 전반의 진동 전달 특성과 상부구조의 응답을 확인할 수 있도록 선정하였다. 측정점은 Wheelhouse, Stern 및 Radar mast 위치에서 응답을 측정하였으며, 결과의 평가는 구역별로 진동 해석과 동일한 기준을 적용하였다.



[Fig. 4] Vibration measurement location

계측 결과, Wheelhouse 및 Radar mast의 종방향 위치에서 진동 평가 기준을 초과하는 과진동 현상이 확인되었다. 세부 계측 데이터를 살펴보면, Wheelhouse의 경우 주기관 2차 가진 성분(67 rpm)에서 12.490 mm/s, 6차 성분(32 rpm)에서

12.198 mm/s의 진동 속도가 나타났다. 동일한 조건에서 Radar mast는 주기관 2차 성분(67 rpm)에서 60.408 mm/s, 6차 성분(32 rpm)에서 65.915 mm/s로 계측되었다.

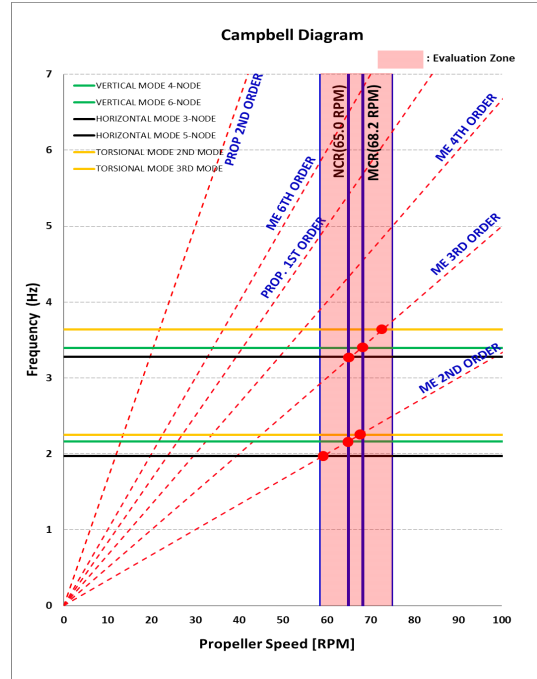
과진동이 발생한 운전 조건에서의 가진 주파수를 산출한 결과, 67 rpm에서의 주기관 2차 성분은 2.23 Hz, 32 rpm에서의 6차 성분은 3.2 Hz에 해당하였다. 이는 앞선 자유진동 해석에서 도출된 선체 비틀림 2차 및 수평 5절점 굽힘 모드와 고유진동수와 일치하는 수치이다. 결론적으로 해당 회전수 대역에서 주기관의 가진력과 구조물의 고유진동수가 일치함에 따라 공진 현상이 발생하였으며, 이로 인해 과도한 진동이 유발되었음을 확인하였다.

Ⅲ. 연구 결과

진동 해석 결과, 자유진동 해석을 통해 대상 선박의 수직 굽힘, 수평 굽힘 및 비틀림 모드를 중심으로 고유진동 특성을 도출하였으며, 이를 바탕으로 [Fig. 5]와 같이 Campbell 선도를 활용하여 공진 평가를 수행하였다. Campbell 선도는 가로축에 주기관의 회전속도를, 세로축에 진동수를 나타내어 시스템의 진동 특성을 분석하는 그래프이다. 그래프 상에서 선박 구조물의 고유진동수는 수평 형태의 곡선으로 표시되며, 엔진 회전에 비례하여 발생하는 가진력은 원점을 지나는 다수의 사선으로 표현된다.

그래프 상에서 선이 교차하는 지점이 바로 가진 주파수와 고유진동수가 일치하여 진폭이 극대화되는 공진점을 의미한다. 본 해석 결과, 수직 4절점 및 6절점 굽힘 모드, 수평 3절점 및 5절점 굽힘 모드, 그리고 비틀림 2차 및 3차 모드가 주기관의 2차, 3차 가진 성분의 평가 영역에 포함되어 해당 운전 구간 내에서 공진 발생 가능성이 존재하는 것으로 나타났다.

이는 자유진동 해석 단계에서 단순한 고유치 도출을 넘어, 실제 운전 조건에서 문제가 될 수



[Fig. 5] Campbell diagram

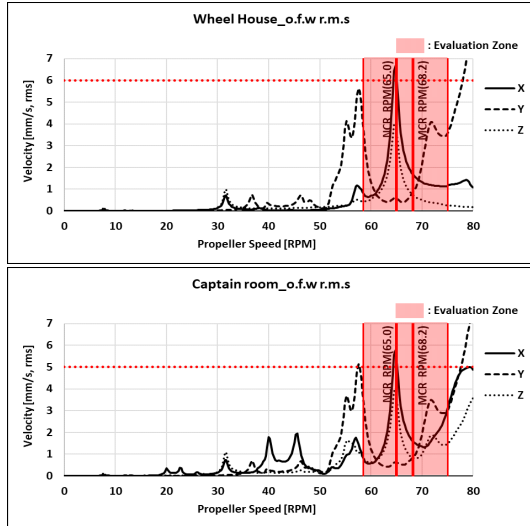
있는 민감 주파수 대역 및 공진 후보군을 효과적으로 식별할 수 있음을 의미한다.

또한, 강제진동 해석 결과를 통해 공진 후보 모드가 실제 응답으로 발전하는 양상을 구체적으로 확인하였다. 거주구역에서는 [Fig. 6]과 같이 Wheelhouse 및 Captain room에서 평가 기준을 초과하는 큰 응답이 나타났으며, 선체 구조에서는 [Fig. 7]과 같이 Radar mast 및 Funnel top 부위에서 높은 진동 응답이 집중되는 경향을 보였다.

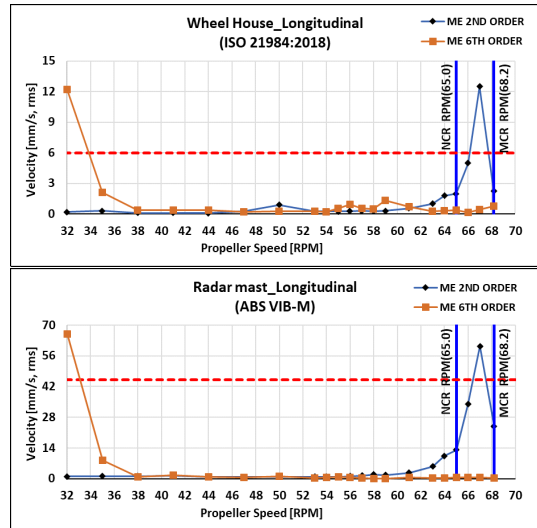
이와 같이 자유진동 해석과 강제진동 해석은 각각 공진 가능성 식별 및 실제 응답 수준 평가라는 상호 보완적인 역할을 수행하며, 해석 단계에서 진동 취약 위치 및 지배 가진원을 체계적으로 도출할 수 있었다.

진동 계측 결과, [Fig. 8]과 같이 Wheelhouse 및 Radar mast에서 발생한 높은 진동 응답은 주로 주기관의 2차 및 6차 가진 성분에 의한 것으로 분석되었다. 특히 계측값이 평가 기준을 초과함에 따라, 주기관 가진력이 선박 상부구조물의 주

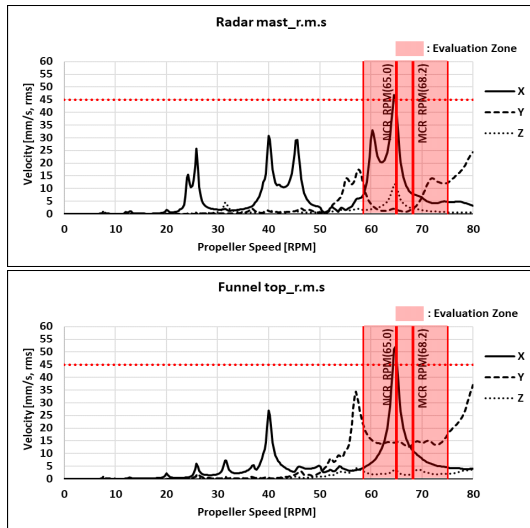
요 원인임을 확인하였다.



[Fig. 6] Analysis results for Accommodations



[Fig. 8] Vibration measurement results



[Fig. 7] Analysis results for Hull structures

해석과 계측 결과를 종합하면 진동 취약 위치, 지배 가진원 성분 및 응답 경향 측면에서 높은 일관성이 확인되었다.

즉, 본 연구에서 수행된 전선 진동 해석은 실선 계측 결과를 잘 재현하며 높은 신뢰성을 확보한 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구는 8,000 TEU급 컨테이너선의 전선 진동 특성을 규명하기 위하여 유한요소 기반 진동 해석과 실선 계측을 병행하여 수행하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

첫째, 자유진동 해석을 통해 선체의 수직 및 수평 굽힘 모드와 비틀림 모드를 포함한 주요 고유진동 특성을 도출하였고, Campbell 선도를 기반으로 주기관 가진력과 중첩되는 공진 가능 영역을 식별하였다. 강제진동 해석에서는 이러한 공진 후보 모드가 실제 응답으로 나타나며, 특히 상부구조에서 진동 취약성이 두드러지는 것으로 확인되었다.

둘째, 실선 계측 결과 주기관 2차 및 6차 가진 성분에 의해 특정 상부구조에서 허용 기준을 초과하는 진동이 발생하였다.

셋째, 본 연구의 진동 해석 결과는 실선 계측 결과와 비교하여 취약 위치 및 지배 가진원 측면에서 전반적으로 높은 일관성을 보였다. 그러나 특정 가진원에 의한 응답 결과에서는 해석값이

계측값 대비 약 53 % 수준으로 다소 과소 예측되는 경향을 나타내었다. 이러한 정량적 차이는 해석 모델에 적용된 감쇠 계수의 불확실성과 선체 건조 과정에서 발생하는 용접 잔류응력 등 비선형 요소, 그리고 실제 해상 환경의 외력이 복합적으로 작용한 결과로 판단된다. 비록 국부적인 진폭 산정에는 일부 수치적 한계가 존재하였으나, 공진 대역을 예측하고 위험 요소를 사전에 식별하는 해석적 접근 방식의 신뢰성은 충분히 확보된 것으로 평가된다.

본 연구 결과는 향후 컨테이너선의 진동 설계 및 저감 기술 개발에 있어 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- Chae SI, Song JD, Yang BS, Kong YM and Choi SH(2004). Vibration Analysis for the D/H parts of the Container Ship. In: Proceedings of the Korea Society for Power System Engineering Conference. Korea Society for Power System Engineering, Korea, 60~63.
- Cho DS, Kim BH and Kim KS(2010). Structural intensity analysis of a large container carrier under harmonic excitations of propulsion system. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2(2), 87~95.
<http://dx.doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0023>
- Hexagon(2020). MSC Nastran Documentation: Release 2020. Retrieved from <https://simcompanion.hexagon.com/customers/s/article/MS-C-Nastran-Doc-Release-2020> on May 11.
- ISL(2025). SSMR Vol. 09: The development of global cargo throughput is positive overall. Retrieved from <https://www.isl.org/en/ssmr-vol-09-development-global-cargo-throughput-positive-overall> on May 11.
- ISO(2018). Ships and marine technology – Guidelines for measurement, evaluation and reporting of vibration with regard to habitability on specific ships. ISO 21984:2018, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Park JH and Jung GY(2002). Vibration Characteristics and Mitigation Measures of Container Ships. *Journal of KSNVE*, 12(1), 18~26.
- Park JH, Lee D, Yang JW and Song CY(2019). Design Enhancement to Avoid Radar Mast Resonance in Large Ship using Design of Experiments. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 33(1), 50~60.
<https://doi.org/10.26748/KSOE.2018.088>
- UNCTAD(2024). Review of Maritime Transport 2024: Navigating maritime chokepoints. United Nations publication, UNCTAD/RMT/2024, 1~147.

-
- Received : 13 May, 2026
 - Revised : 10 June, 2026
 - Accepted : 16 June, 2026