



소형 알루미늄 어선 3종의 고유진동 특성 분석

김대현¹·홍현진¹·이상목¹·손영태²·문병영^{3,†}
군산대학교 조선해양기자재 역량강화센터¹
군산지방해양수산청²
군산대학교 조선해양공학과³

Characterizing the Natural Frequencies of Three Small Aluminum Fishing Boats

Daehyeon Kim¹·Hyeonjin Hong¹·Sangmok Lee¹·Yeong-Tae Son²·Byungyoung Moon^{3,†}
Shipbuilding and Ocean Equipment Industry Empowerment Center, Kunsan National University¹
Gunsan Regional Office of Oceans & Fisheries²
Department of Shipbuilding and Ocean Engineering, Kunsan National University³

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.

As the government encourages the replacement of small FRP ships with eco-friendly aluminum ships due to environmental pollution problems, interest and demand for small aluminum ships are increasing. It is known that the vibration and noise of aluminum ships are somewhat vulnerable than that of FRP ships. However, in the process of designing and manufacturing small aluminum fishing boats, vibration and noise are not reviewed. In this study, vibration analysis is performed on three existing aluminum fishing boats, and the vibration characteristics of small aluminum boats are identified. Through this study, we intend to contribute to improving the vibration quality of small aluminum ships.

Keywords : Aluminum vessels(알루미늄 선박), Small fishing vessels(소형 어선), Vibration analysis(진동해석)

1. 서론

기존의 소형 어선들은 건조/수리가 쉽고 단가가 저렴한 FRP 선박을 주로 사용하였다. 그러나 FRP 어선의 폐기처분이 어렵고 폐선으로 인한 환경오염 문제가 대두됨에 따라 정부에서도 2006년부터 FRP 어선의 건조 지원을 중단하고 알루미늄 어선에 대한 건조 지원을 시작하였다(MOF, 2005). 알루미늄 어선은 FRP 어선 대비 내구성이 높고 외부 충격에 강하며 연비가 좋고 재활용이 가능한 친환경 선박이다.

대형선박은 설계단계에서부터 진동/소음 해석을 수행하여 방진/방음 설계를 수행하고 시운전 계측을 통해 진동/소음 레벨이 국제 규정에 적합하지 확인한다. 그러나 주로 FRP나 알루미늄으로 제작되는 소형 어선의 경우, 비용 문제로 인해 설계단계에서 진동/소음과 관련된 검토를 수행하지 않고 있으며 적합한 관련 규정도 없는 실정이다.

특히, 소형 알루미늄 선박은 FRP 선박에 비해 진동/소음에 더욱 취약한 것이 일반적이지만 설계단계의 검토 과정 없이 건조되고 있으며 이와 관련된 연구도 거의 진행되지 않고 있다. 한국해

양교통안전공단에서 알루미늄을 사용한 연안소형어선의 설계 및 건조공법에 관한 연구가 진행된 바가 있지만 진동/소음에 관한 연구는 수행되지 않았다(Ku et al., 2007). 연안어선과 달리 요트와 같은 레저용 선박은 작업이 아니라 휴양이 목적이기 때문에 진동/소음에 매우 민감한 편이다. 이와 관련하여 국내의 알루미늄 쌍동선 요트의 진동/소음 레벨을 국제 규정을 기준으로 평가한 사례를 살펴보면 국내 쌍동선 요트의 진동/소음은 국제 요트 선박의 진동/소음 규정에는 다소 미흡한 것으로 나타난다(Yu and Kim, 2012). 또한, 연안 경비함정의 선내 진동 계측을 통한 ISO 6954:2000(E) 평가 사례는 경비함정의 근무 환경이 안락성을 확보하기 어려운 상태라고 판단하였다(Koh and Kim, 2003).

기존 FRP 어선의 노후화와 정부의 친환경 선박 건조 정책 기조로 인해 기존의 FRP 어선의 수요는 점차 감소하고 소형 알루미늄 어선의 건조 수요는 점점 늘어날 것으로 예상된다. 선주들에게 안전하고 편안한 작업환경을 제공하고 FRP 선박에 대한 알루미늄 선박으로의 교체 수요를 증가시키기 위해서는 소형 알루미늄 어선에 대한 진동/소음 연구가 활성화되어 품질 향상이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 소형 알루미늄 어선의 진동 문제를 설계단계에

서 검토할 수 있는 해석적 방법을 적용해 보았다. 본 연구를 위해 이미 건조된 3가지 대표적인 소형 알루미늄 어선인 4.99톤 복합어선, 9.77톤 연안자망어선, 50톤 채낚기어선에 대한 고유진동해석을 수행하여 각 선박의 고유진동 특성을 분석하였으며, 그 결과로부터 대상 선박의 전선 및 국부진동 모드의 고유진동수를 도출하였다. 고유진동수 분석 결과는 기진력 정보와의 비교 분석을 통해 공진 회피 설계에 활용되어 선박의 진동품질 향상에 기여할 수 있다.

2. 고유진동수 해석

2.1 소형 알루미늄 어선 제원

해석 대상 3종 선박의 주요 치수 및 기진원 정보를 Table 1~6에 정리하였다.

Table 1 Principal dimensions of 4.99ton fishing vessel

Hull dimensions	Value
Length (O.A)	16.740 m
Length (B.P)	12.100 m
Breadth (MLD.)	3.200 m
Depth (MLD.)	0.800 m
Draft (D.L.W.L)	0.750 m

Table 2 Main vibration sources of 4.99ton fishing vessel

Main engine	Value	Propeller	Value
Model	WP12C450-21	Type	F.P.P
Num. of sets	1 set	Num. of sets	1 set
NCR	295 kW x 1,800 RPM	Num. of blades	4ea
MCR	330 kW x 2,100 RPM	Diameter	0.940 m

※ Reduction ratio : 3.0

Table 3 Principal data of 9.77ton fishing vessel

Hull dimensions	Value
Length (O.A)	20.800 m
Length (B.P)	17.800 m
Breadth (MLD.)	4.400 m
Depth (MLD.)	1.000 m
Draft (D.L.W.L)	0.735 m

Table 4 Main vibration sources of 9.77ton fishing vessel

Main engine	Value	Propeller	Value
Model	4V222TIH	Type	F.P.P
Num. of sets	1 set	Num. of sets	1 set
NCR	340 kW x 1,500 RPM	Num. of blades	4ea
MCR	588 kW x 1,800 RPM	Diameter	1.0160 m

※ Reduction ratio : 3.5

Table 5 Principal data of 50ton fishing vessel

Hull dimensions	Value
Length (O.A)	32.650m
Length (B.P)	24.500m
Breadth (MLD.)	6.000m
Depth (MLD.)	2.000m
Draft (SUMMER DRAFT)	2.295m

Table 6 Main vibration sources of 50ton fishing vessel

Main engine	Value	Propeller	Value
Model	4V222T(H)	Type	F.P.P
Num. of sets	1 set	Num. of sets	1 set
NCR	340 kW x 1,500 RPM	Num. of blades	4ea
MCR	588 kW x 1,800 RPM	Diameter	1.780 m

※ Reduction ratio : 4.95

2.2 해석 조건

본 연구에서는 대형선박의 진동해석에 사용되고 있는 이미 검증된 진동해석 절차를 따라 해석을 수행하였다.

3종 알루미늄 어선의 선체에 사용된 재료는 알루미늄 5083-H321이며, 물성치는 Table 7과 같다.

Table 7 Material properties of Aluminum 5083-H321

Young's modulus	71 GPa
Poisson's Ratio	0.33
Density	2.66 g/cc

설계목표진동수는 대상 어선의 주요 운항 조건인 NCR(Normal Continuous Rating) 및 MCR(Maximum Continuous Rating) 상태에서 공진을 회피하기 위한 조건이며 Fig. 1의 허용 영역에 해당한다. 대상 어선의 NCR 조건은 어선 건조사로부터 실제 선주가

가장 많이 사용하는 영역이 85 %임을 확인하여 MCR 조건의 85 %로 설정하였다. 인선미진 오차는 조선소의 경험치에 따라 10 %를 고려하였으며, 이 수치는 모달테스트와 해석결과의 비교 검토를 통해 결정된 것이다. 엔진 실용 영역과 해석 오차를 고려하여 Table 8과 같이 설계목표진동수를 계산하였다.

Table 8에서와 같이, 4.99톤 어선은 $f_N < 27$ Hz 그리고 51 Hz $< f_N < 54$ Hz, 9.77톤 어선은 $f_N < 23$ Hz 그리고 38 Hz $< f_N < 45$ Hz, 50톤 어선은 $f_N < 18$ Hz 그리고 33 Hz $< f_N < 36$ Hz 조건 내에 선체의 고유진동수가 위치할 때 공진으로부터 가장 안전하다. 따라서, 이상적인 설계 조건은 설계목표진동수의 범위가 4.99톤은 27 Hz 미만, 9.77 Hz는 23 Hz 미만, 50톤은 18 Hz 미만인 경우라고 볼 수 있다.

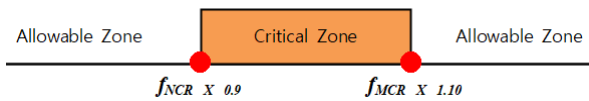


Fig. 1 Allowable zone and critical zone

Table 8 Design target frequency of 3 type fishing vessels

4.99ton vessel	9.77ton vessel	50ton vessel
$f_N < 27$ Hz or 51 Hz $< f_N < 54$ Hz	$f_N < 23$ Hz or 38 Hz $< f_N < 45$ Hz	$f_N < 18$ Hz or 33 Hz $< f_N < 36$ Hz

f_N : Design target frequency

2.3 유한요소 모델

진동해석 프로그램은 조선해양 분야에서 구조 및 진동해석을 위해 주로 사용하고 있는 MSC Patran-Nastran 2022 버전을 사용하였다. 본 연구에서는 전선 및 국부 모델의 고유진동수를 모두 평가하기 위해 전선 모델과 각 데크(deck)의 국부 모델을 모두 적용하였다. 어선의 전선 해석용 유한요소 모델의 요소(element)와 절점(node)의 수를 Table 9에 정리하였다.

유한요소 모델의 외판, 갑판 등의 판 부재에는 판 요소(shell element), 종늑골 등과 같은 판 보강재에는 보 요소(beam element), 탱크의 유체 등의 질량에는 점 요소(point element)를 사용하였다. 유한요소 모델의 요소 크기(mesh size)의 기준은 한 국선급의 구조해석 모델링 기준을 적용하여 종늑골 간격을 요소의 한 면의 길이로 정의하였다 (KR, 2021). 전선진동해석(hull-girder vibration analysis) 모델의 수면 하부 접수 면적을 고려하기 위해 Nastran 접수 코드인 MFLUID를 사용하였으며, 유한요소 모델에 포함되지 않는 의장품의 무게를 고려하기 위해 판 요소에 비구조적 질량(nonstructural mass)를 적용하였다. 전선진동해석 모델은 선박의 전체 거동 모드를 확인하기 위한 것이므로 구속조건을 적용하지 않았다. 국부진동해석(local vibration analysis) 모델에는 외판, 격벽 등과 같은 구속조건

에 단순지지(simply supported) 경계조건(boundary condition)을 적용하였다. 실선과 해석모델의 중량 및 LCG(Longitudinal Center of Gravity)은 Table 10과 같으며, Figs. 2~4는 전선 유한요소 모델을 나타낸다.

Table 9 Number of elements and nodes in FE model

Modeling	Number of elements	Number of nodes
4.99ton vessel	10,894	6,263
9.77ton vessel	18,009	8,750
50ton vessel	10,713	5,779

Table 10 Comparison of weight & LCG between vessel and F.E. model

Ship Type	Condition	Weight (ton)		LCG (m) from A.P	
		Vessel	F.E. Model	Vessel	F.E. Model
4.99ton	Lightship	13.00	12.99	5.20	5.15
	Full load	16.00	16.00	6.00	5.91
9.77ton	Lightship	28.00	27.99	7.35	7.12
	Full load	51.09	51.00	9.16	8.81
50ton	Lightship	87.58	87.73	10.69	10.36
	Full load	122.895	123.09	10.06	10.00

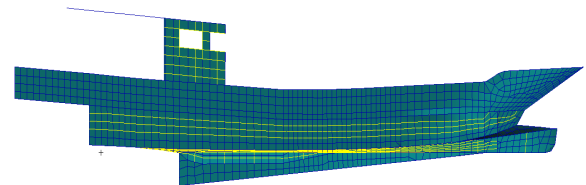


Fig. 2 Finite element model of 4.99ton vessel

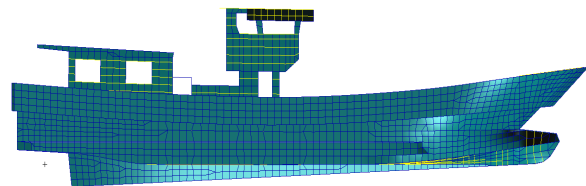


Fig. 3 Finite element model of 9.77ton vessel

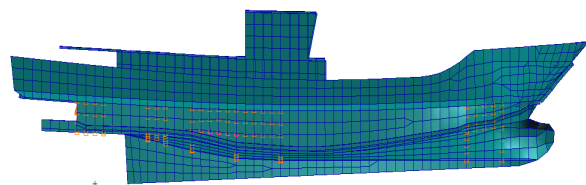


Fig. 4 Finite element model of 50ton vessel

2.4 전선진동해석 결과

3종 알루미늄 어선에 대한 전선(hull-girder) 고유진동수해석을 경하(lightship) 및 만재(full load) 조건에 대하여 수행하였으며, 3종 어선의 경하 및 만재 조건의 횡수는 Table 11과 같다. 해석 결과를 Table 12 및 Figs. 5~8에 나타내었다.

Table 11 Draft conditions of 3 type fishing vessels

Ship Type	Condition	Draft
4.99ton	Lightship	0.680 m
	Full load	0.750 m
9.77ton	Lightship	0.407 m
	Full load	0.735 m
50ton	Lightship	1.867 m
	Full load	2.066 m

Table 12 Hull-girder vibration results of 3 type fishing vessels

Ship Type	Condition	Natural Freq.	Resonance
4.99ton	Lightship	8.4 Hz	Safe
	Full load	8.2 Hz	Safe
9.77ton	Lightship	3.18 Hz	Safe
		6.03 Hz	Safe
	Full load	3.05 Hz	Safe
		5.68 Hz	Safe
50ton	Lightship	12.34 Hz	Safe
	Full load	11.28 Hz	Safe

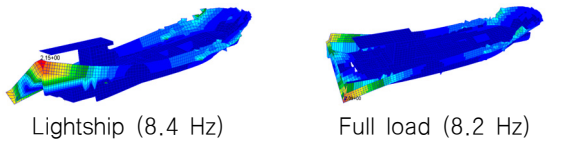


Fig. 5 Hull-girder vibration results of 4.99ton vessel

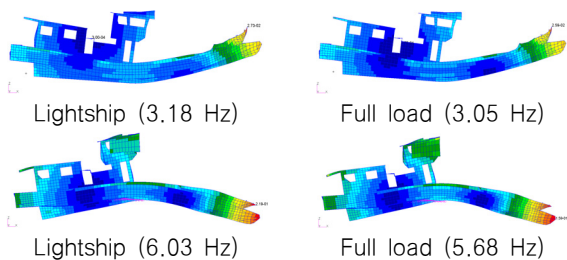


Fig. 6 Hull-girder vibration results of 9.77ton vessel

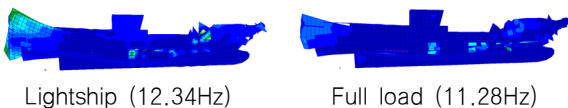
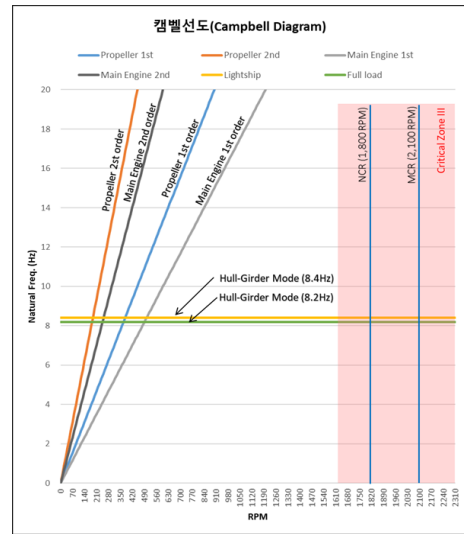
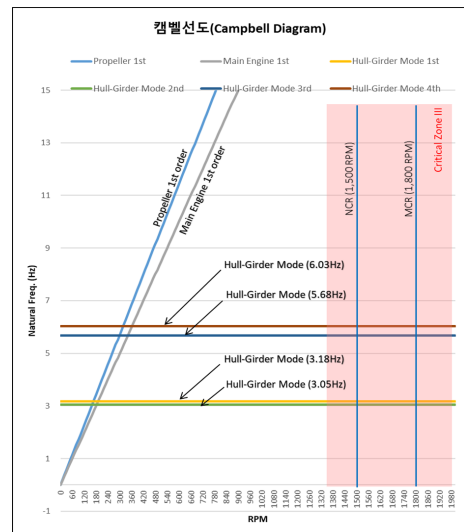


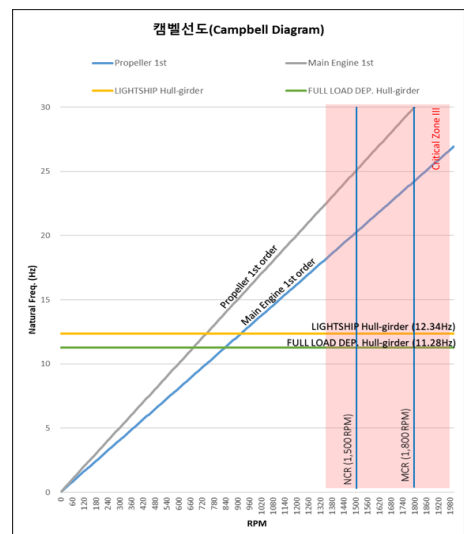
Fig. 7 Hull-girder vibration mode of 50ton vessel



4.99ton vessel



9.77ton vessel



50ton vessel

Fig. 8 Campbell diagram for hull-girder mode

4.99톤과 9.77톤 어선의 전선진동 모드는 모두 10 Hz 이하로 나타났으며, 50톤 어선의 전선진동 모드도 15 Hz를 넘지 않는 것을 확인할 수 있었다. 현재 상용되는 어선의 크기와 형태가 대부분 유사하다는 점을 비추어 볼 때, 일반적인 소형 알루미늄 어선의 전선진동 모드는 공진으로부터 안전할 것으로 판단된다.

2.5 국부진동해석 결과

3종 대상 선박의 국부진동을 평가하기 위해 각 어선의 모든 데크를 대상으로 고유진동수 해석을 수행하였다. 4.99톤 복합어선은 3개의 데크로 구성되어 있다. 4.99톤 어선의 국부진동해석 결과와 위치를 Table 13과 Figs. 9~10에 나타내었다. 국부진동해석 결과 총 3개의 데크 내 9개의 구역에서 고유진동수가 확인되었고, 이들 중 2개를 제외한 7개의 구역에서 공진 가능성이 발견되었다.

Table 13 Local vibration results of 4.99ton fishing vessel

Area	Natural frequency	Resonance
Bottom	68.4 Hz	Not safe
	74.0 Hz	Not safe
	76.1 Hz	Not safe
Upper deck	8.8 Hz	Safe
	25.7 Hz	Safe
	36.7 Hz	Not safe
	60.5 Hz	Not safe
House top	49.9 Hz	Not safe
	72.5 Hz	Not safe

9.77톤 연안자망어선은 4개의 데크로 구성되어 있다. 9.77톤 어선의 국부진동해석 결과와 위치를 Table 14와 Figs. 11~12에 나타내었다. 국부진동해석 결과 총 4개의 데크 내 11개의 구역에서 고유진동수가 확인되었고, 이들 중 3개를 제외한 8개의 구역에서 공진 가능성이 발견되었다.

Table 14 Local vibration results of 9.77ton fishing vessel

Area	Natural frequency	Resonance
Bottom	103.53Hz	Not safe
	105.56Hz	Not safe
	116.95Hz	Not safe
Upper deck	24.73Hz	Not safe
	48.98Hz	Not safe
	67.68Hz	Not safe
	77.89Hz	Not safe
	12.74Hz	Safe
Deck house	19.62Hz	Safe
	28.16Hz	Not safe
Wheel house	8.53Hz	Safe

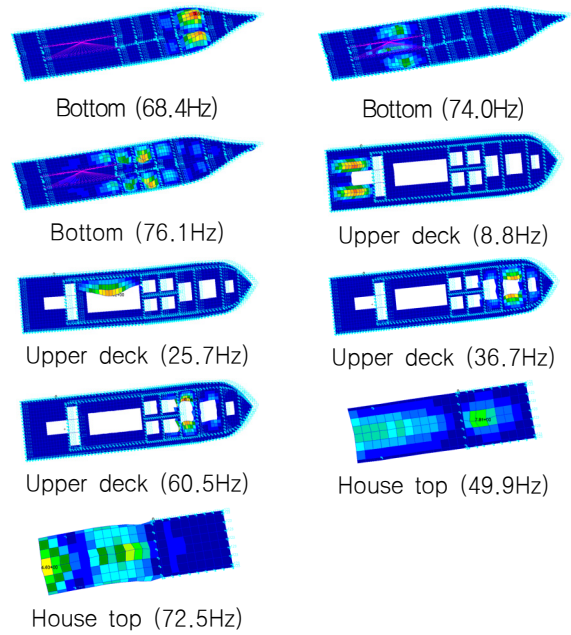
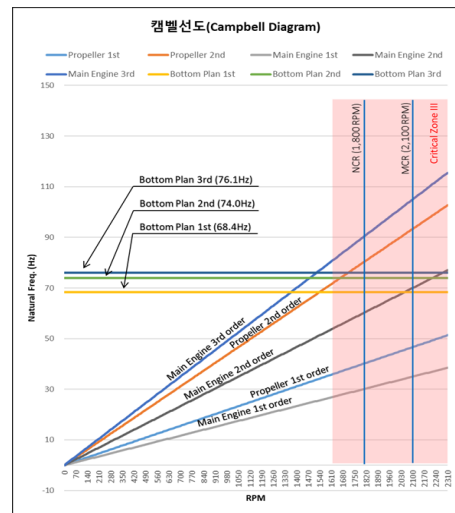
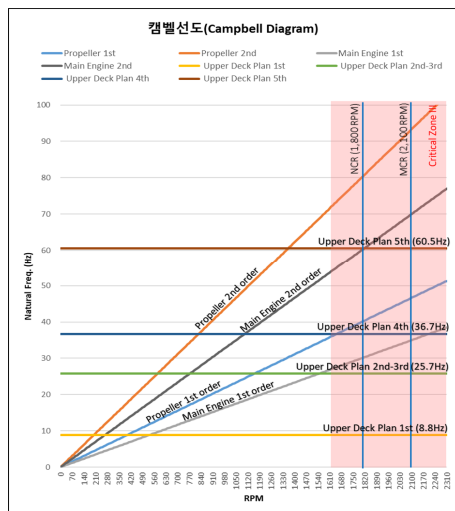


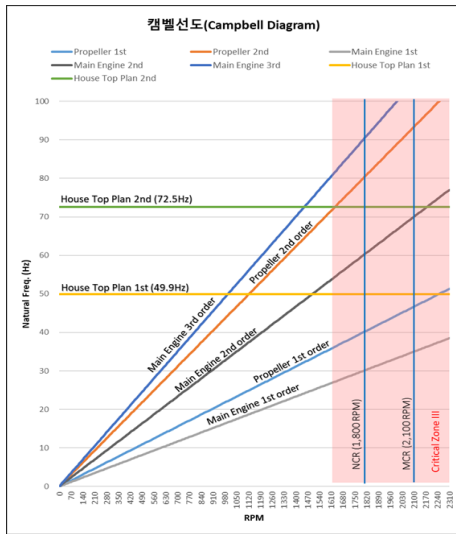
Fig. 9 Local vibration mode of 4.99ton vessel



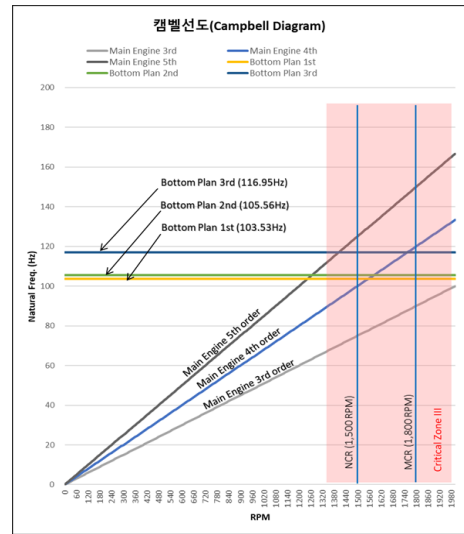
Bottom



Upper deck

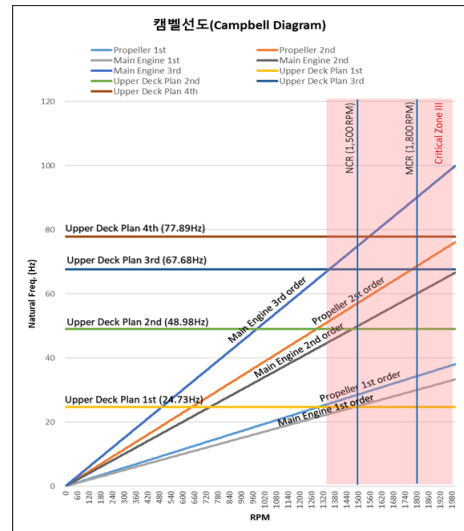
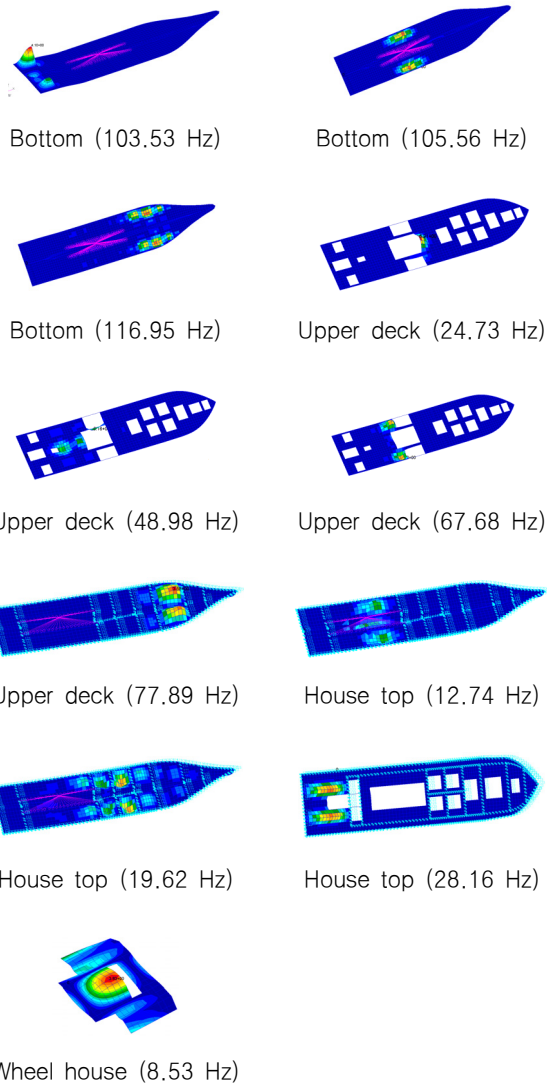


House top

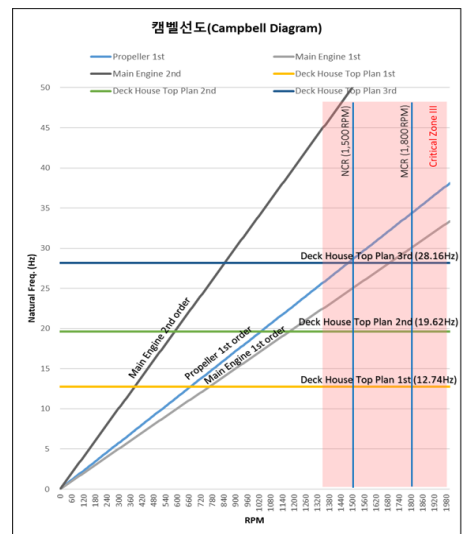


Bottom

Fig. 10 Hull-girder vibration results of 9.77ton vessel

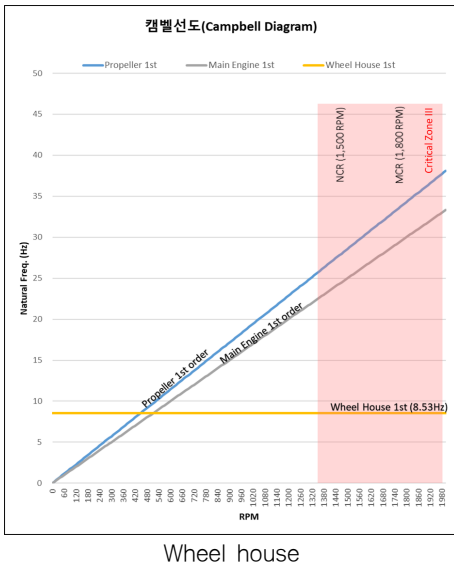


Upper deck



Deck House

Fig. 11 Local vibration mode of 9.77ton vessel



Wheel house

Fig. 12 Hull-girder vibration results of 9.77ton vessel

50톤 채낚기어선은 4개의 데크로 구성되어 있다. 50톤 어선의 국부진동해석 결과와 위치를 Table 15와 Figs. 13~14에 나타내었다. 국부진동해석 결과 총 4개의 데크 내 15개의 구역에서 고유진동수가 확인되었고, 이들 중 2개를 제외한 13개의 구역에서 공진 가능성이 발견되었다.

Table 15 Local vibration results of 50ton fishing vessel

Area	Natural frequency	Resonance
Bottom	36.64Hz	Not safe
	39.62Hz	Not safe
	58.88Hz	Not safe
	61.07Hz	Not safe
	61.64Hz	Not safe
Upper deck	72.92Hz	Not safe
	17.88Hz	Safe
	20.88Hz	Not safe
	25.94Hz	Not safe
Deck house top	27.86Hz	Not safe
	16.73Hz	Safe
	24.16Hz	Not safe
Wheel house top	27.86Hz	Not safe
	28.76Hz	Not safe
Wheel house top	28.76Hz	Not safe
	31.54Hz	Not safe

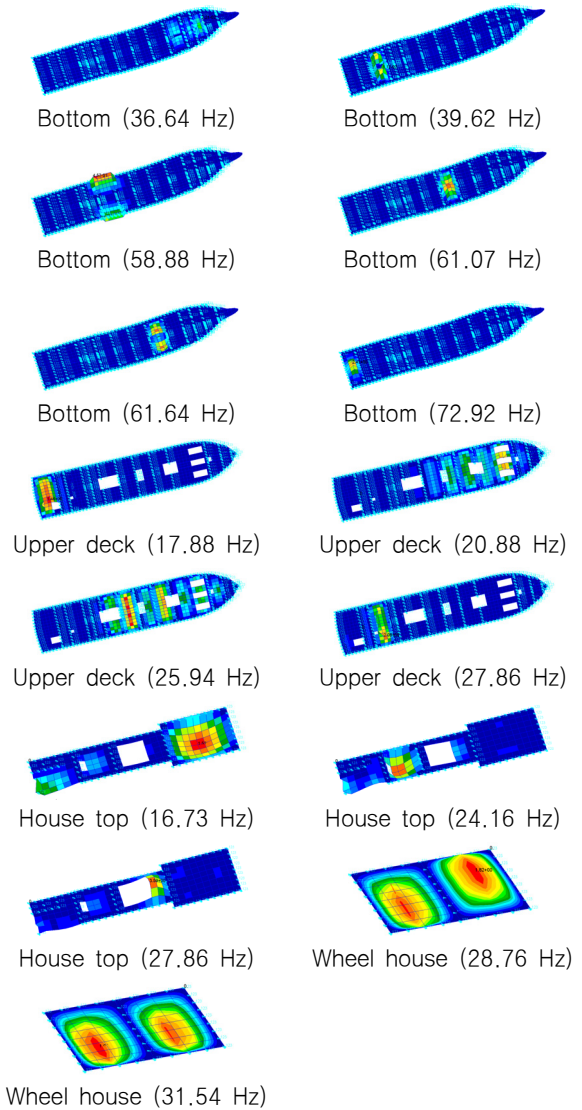
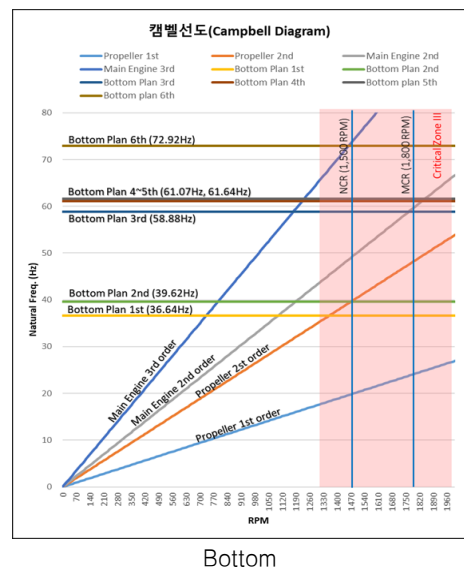
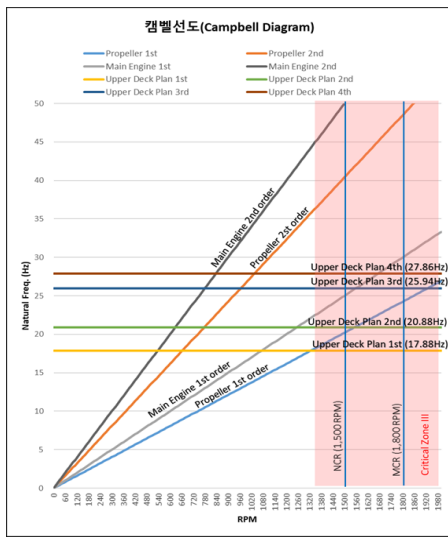


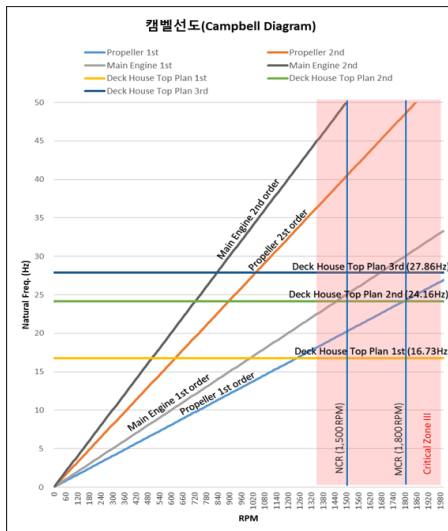
Fig. 13 Local vibration mode of 50ton vessel



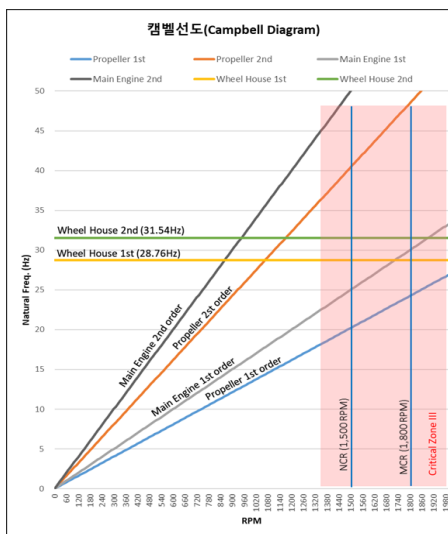
Bottom



Upper deck



Deck house top



Wheel house top

Fig. 14 Hull-girder vibration results of 9.77ton vessel

소형 어선이 대부분 유사한 구조로 건조되고 있는 점을 고려하면, 현재 제작되는 대부분의 소형 알루미늄 어선에서 국부적인 공진이 발생할 수 있다고 판단된다. 그러나 이러한 분석은 모든 기진 주파수의 기진력이 상당한 진동을 유발할 수 있다는 전제를 바탕으로 한다. 엔진과 프로펠러의 기진력을 주파수별로 분석하면 기진력이 큰 주파수와 기진력이 작은 주파수를 분석할 수 있고, 주로 기진력이 큰 주파수에서 과도 진동이 발생한다. 과도 진동이 발생하는 주파수에 대해서만 공진 회피 설계를 수행하더라도 실제 선박의 진동은 상당히 줄어들게 된다.

하지만 본 연구에 사용된 어선을 포함, 대부분의 소형 어선용 엔진 및 프로펠러는 비용과 시간이 많이 소요되는 기진력 계측 및 분석을 수행하지 않고 있으므로 기진력 분석을 통한 공진 여부 확인은 수행할 수 없었다.

3. 결론

대표적인 알루미늄 소형 어선인 4.99톤 복합어선, 9.77톤 연안자망어선, 50톤 채낚기어선에 대한 진동해석을 수행하여 진동 특성을 분석하고자 하였다. 선체 진동의 주요 기진원인 메인엔진과 프로펠러의 기진력 정보를 확인할 수 없어 강제응답해석은 제외하였고 고유진동수 해석만 수행하였다. 고유진동수 해석은 각 어선에 대해 전선진동 및 국부진동 모드를 모두 수행하였고 그 결과를 분석해 보았다.

전선진동 모드의 고유진동수 해석 결과 4.99톤 어선은 8 Hz 대역, 9.77톤 어선은 3~6 Hz 대역, 50톤 어선은 11~12 Hz 대역에서 각각 나타났다. 각 어선의 공진 가능 영역인 critical zone이 4.99톤 어선은 27 Hz 이상, 9.77톤 어선은 23Hz 이상, 50톤 어선은 18Hz 이상에서 나타나기 시작하므로 전선진동 모드에 의한 공진 가능성은 매우 희박한 것을 확인할 수 있었다. 또한, 유사 톤수 어선의 크기와 형태가 크게 다르지 않은 점을 고려하면 현존하는 4.99톤급에서 50톤까지의 소형 알루미늄 어선에서는 전선진동 모드의 공진은 나타나지 않을 것으로 판단한다.

국부진동 모드의 고유진동수 해석 결과 4.99톤 어선은 모든 데크(bottom, upper deck, house top)에서 공진 가능성이 발견되었고, 9.77톤 어선은 wheel house를 제외한 모든 데크(bottom, upper deck, deck house)에서 공진 가능성이 발견되었으며, 50톤 어선은 모든 데크(bottom, upper deck, deck house top, wheel house top)에서 공진 가능성이 발견되었다. 이러한 결과는 현존하는 대부분의 소형 알루미늄 어선이 국부진동 모드의 공진에 노출되어 있음을 의미한다. 유사 톤수의 알루미늄 어선이 FRP 어선에 비해 진동/소음이 더 크게 나타나는 점을 고려하면, 소형 알루미늄 어선의 국부진동 모드 공진이 진동/소음을 더욱 크게 만드는 원인 중 하나임을 알 수 있었다.

공진이 발생하면 진동 응답이 더욱 증폭하므로 공진 회피 설계를 수행하면 소형 알루미늄 어선의 진동을 상당히 저감할 수 있다. 그러나 본 연구 결과가 보여주듯이 모든 기진 주파수에 대한 공진 회피가 매우 어려운 상황이므로 공진 회피 설계에 앞서

기진력 분석을 통한 공진 여부 분석을 수행하여 공진 가능성이 높은 주파수를 정의하는 과정이 필요하다. 기진력의 모든 주파수가 공진 주파수에 해당하지는 않기 때문에 실제로 공진 가능성이 높은 주파수만을 대상으로 공진 회피 설계가 수행되어야 한다.

본 연구에서는 연구 대상 어선의 기진력 정보를 수집 및 분석할 수 없어서 공진 여부 판단에 기진력의 크기를 반영할 수 없었다. 따라서 국부 진동의 공진에 의한 과진동 가능성은 밝혀내었지만, 과진동이 크게 발생하는 구역을 특정하기는 어려웠다.

본 연구와 관련하여 현재 국가과제로 개발 중인 전기복합 추진어선 표준선체 개발 과제와 관련하여 초기 개발 단계부터 진동 분석 및 방진 설계를 수행하는 후속 연구를 계속 이어갈 예정이며, 이를 통해 전기복합 추진어선의 진동/소음 성능을 향상시켜 고품질 어선 보급에 도움이 되고자 한다.

후 기

이 논문은 2021년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임을 밝히며, 위 기관의 연구 지원에 감사드립니다. (20210559, 전기복합 추진어선 표준선체 설계 및 관련 기술 개발)

References

Koh, C.D. and Kim, S.H., 2003. Evaluation of environmental conditions on board in term of noise and vibration in coastal small-sized ships. *Journal of Korean Navigation and Port Research*. 27(1), pp.27-32.

Korean Register, 2021. Rules for the classification of steel ships, Annex 3-2 guidance for the direct strength assessment.

Ku, H.M., Kang B.J. and Kang D.S., 2007. A study on designs and construction methods of coastal aluminum fishing vessel. *Journal of the Korea Ship Safety Technology Authority*, 23, pp.51-64.

Ministry of Oceans and Fisheries(MOF), 2005. *Support of KRW 30 million per ton for the construction of new fishing boats* [Online] (Updated 22 November 2005) Available at: <https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=120070021#pressRelease> [Accessed 27 April 2023]

MSC, 2022. MSC Patran/Nastran 2022.2. HEXAGON.

Yu, Y.H. and Kim, B.C., 2012. A Study on the sound and vibration for an aluminium catamaran yacht. *The Korean Society for Noise and Vibration Engineering*. Vol.2012(10), pp.115-116.



김대현



홍현진



이상목



손영태



문병영