



일반배치도 직접 측정에 기반한 유조선 거주구역 체적 추정식

손영택[†]

경상남도청 주력산업과 조선해양산업파트

Parametric Estimation of Tanker Deckhouse Volume from Direct General Arrangement Measurements

Young-Taek Sohn[†]

Key Industries Division, Shipbuilding and Marine Industry Team, Gyeongsangnam-do Provincial Government

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.

This study analyses the parametric scaling of deckhouse volume (V_{dh}) and engine casing volume (V_{ec}) of oil tankers, based on direct measurements of general arrangement (GA) drawings of 80 vessels from Handysize to VLCC in RINA Significant Ships (1991-2019). Power-law regression yields $V_{dh} = 76.55 \times DWT^{0.3667}$ ($R^2 = 0.710$, $n = 80$), $V_{ec} = 1.37 \times DWT^{0.6062}$ ($R^2 = 0.641$, $n = 77$), and $V_{tot} = 56.82 \times DWT^{0.4150}$ ($R^2 = 0.757$, $n = 80$); all exponents are well below unity. The V_{ec}/V_{dh} ratio shows a discontinuous step from 0.14 at Handysize to 0.29-0.36 from Panamax upwards, with no significant temporal trend ($p = 0.850$). Applying the multiple regression framework of Frančić et al. (2023), established for tanker lightship displacement (R^2 up to 0.99), to V_{dh} yields $R^2 = 0.68$, a gap of about 0.31, i.e. an indication of component-specific applicability between mass-derived and space-derived metrics. Volume elasticity decreases monotonically relative to the Panamax reference (Aframax 0.56, Suezmax 0.42, VLCC 0.29), and the deck count saturates at five to six decks beyond Handysize. Sub-linear scaling reflects four drivers: engine room bulkhead alignment, longitudinal stiffener alignment, forward visibility, and manning saturation. The estimators support early-stage volume estimation.

Keywords : Deckhouse volume(거주구역 체적), Superstructure(상부구조), Oil tanker(유조선), Parametric design(파라메트릭 설계), Power-law regression(멱함수 회귀), General arrangement(일반배치도)

1. 서론

선박의 초기 설계는 상세 설계 진입 전 주요 중량·체적 항목의 파라메트릭 예측에 의존한다. 그 가운데 거주구역 체적(deckhouse volume, V_{dh})과 기관실 케이싱 체적(engine casing volume, V_{ec})은 주갑판 위 후방 상부구조(superstructure) 공간의 대부분을 차지하며, SOLAS 전방 시야 규정과 MLC 2006 객실 면적 기준의 충족 여부, 선체 굽힘 강성에 영향을 미친다.

선체 강재 중량, 기관 중량, 경하중량 등의 중량 예측은 파라메트릭 설계 문헌에서 광범위하게 다루어져 온 데 반해(Watson, 1998; Schneekluth and Bertram, 1998; Papanikolaou, 2014; Lamb, 2003), 두 체적의 회귀 분석은 드물며, 유조선을 대상으로 한 사례는 특히 그렇다. 기존 연구들이 사용한 자료원인 IHS

Fairplay (Lützen and Kristensen, 2012), INTERTANKO Q88 (Frančić et al., 2023), 조선소 실적 카탈로그(Rinauro et al., 2024)는 주요 제원은 제공하나 일반배치도 수준의 치수는 제공하지 않아, 두 체적에 대한 체계적인 회귀 분석은 이루어지지 못했다. 국내에서는 초기 설계 단계의 GA 수준 배치를 다룬 연구로 유조선 격실 배치 자동화 알고리즘이 제시된 바 있으나(Song et al., 2013), 거주구역과 기관실 케이싱 체적의 회귀 추정은 다루어지지 않았다.

Frančić et al. (2023)은 유조선 80척 표본에서 전장(LOA), 폭(B)과 DWT 기반 그룹 더미를 예측 변수로 한 경하중량(lightship displacement, LD) 회귀로 R^2 최대 0.99를 얻어, 선체 치수 기반 경하중량 회귀 체계가 유조선에서도 유효함을 확인하였다. 그렇다면 동일 체계를, 서로 관련되어 있으나 성격이 다른 응답 변수

인 V_{th} 와 V_{ec} 에 적용해도 그만큼 높은 결정계수를 얻을 수 있는가 하는 질문이 뒤따른다. 그 답은 쉽게 단정하기 어렵다.

경하중량은 선체 강재 중량이 대부분을 차지하는 질량 기반 집계량이며, 선체 강재 중량은 선체 표면적과 구조 스펠에 비례하므로 LOA·B와 상관성이 높다. 반면 거주구역 체적은 공간 기반 지표로서, 객실 규제 요건(MLC 2006), 거의 일정한 승선인원(Panamax 이상 약 26~32명; Vidmar and Perkovič, 2023), SOLAS Ch.V Reg.22 전방 시야 제약, 기관실과의 구조적 정합, 내벽의 종보강재 정렬과 같이 선체 치수에 선형 비례하지 않는 서로 다른 성격의 인자들이 그 크기를 결정한다.

본 연구는 이 질문에 답하기 위하여 RINA Significant Ships (1991~2019)의 유조선 80척(Handysize-VLCC) 일반배치도를 자료원으로 삼고, polyline 면적 측정과 LOA 기반 pixel-to-meter 스케일링으로 V_{th} , V_{ec} , V_{tot} 를 직접 산출하였다. 저자가 조사한 범위에서 GA 수준 치수 자료에 기반하여 두 체적의 회귀 추정식을 제시한 선행 사례는 확인되지 않았다.

본 연구에서 도출한 추정식은 일반배치도 확정 이전의 견적·기본설계 단계에서 DWT만으로 거주구역·기관실 케이싱 체적의 일차 추정치를 제공하며, 사내 체적 산정값의 교차 검증과 초기 배치 검토의 기준값으로 활용될 수 있다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 관련 문헌을 고찰하고, 3장에서 데이터와 측정·통계 방법을 기술한다. 4장에서 회귀 결과와 그룹 단위 경향을 제시하며, 5장에서 형상 메커니즘과 초기 설계 활용 방안 및 한계를 고찰하며, 6장에서 결론을 맺는다.

2. 문헌 고찰

2.1 경하중량의 파라메트릭 예측

경하중량 구성 요소의 파라메트릭 예측은 오랫동안 연구되어 왔다. Watson (1998)은 경하중량을 선체 강재, 의장, 기관, 여유의 네 요소로 구분하는 추정식을 제시하고, Schneekluth와 Bertram (1998)은 의장 중량 대 경하중량 비(WOT/WLS) 등 크기 의존 비율을 표준편차 약 $\pm 15\%$ 수준으로 제시하며, Papanikolaou (2014)는 LOA, B, D, Cb 기반의 초기 설계 중량 추정법을 제안하였다. 국내에서도 회귀·통계 기반 중량 추정 연구가 수행되어 왔다. Seo et al. (2013)은 통계적 방법에 기반한 부유식 해양플랜트 중량 추정 간이 모형을, Seo et al. (2014)은 비선형 회귀 분석에 기반한 부유식 해양구조물 중량 추정 모형을 개발하였다. 이러한 흐름에서 Frančić et al. (2023)은 유조선 80척에 대해 LOA, B 및 DWT 기반 그룹 더미를 예측 변수로 하는 경하중량 다중 선형 회귀와 XGBoost로 R^2 최대 0.99 (XGBoost 0.990, 다중 선형 회귀도 유사)를 얻었다. 이 연구는 유조선 경하중량 회귀의 가장 최근 성과이며, 동일 체계를 거주구역·기관실 케이싱 체적에 적용한 결과를 직접 비교할 수 있는 본 연구의 방법론적 기준이 된다.

2.2 거주구역 체적의 파라메트릭 연구

거주구역·기관실 케이싱 체적에 대한 체계적 파라메트릭 연구는 상대적으로 드물다. Lamb (2003)은 거주구역을 의장 중량 추정 한 구성 요소로 다루었으나 별도의 체적 회귀식을 도출하지는 않았다. 한편 거주구역 체적이 선박 크기에 연속 비례한다고 보는 여객선 설계의 통상적 전제는, 기능적 인자(승선인원)와 규제적 인자(객실 표준)가 본질적으로 다른 유조선에서 체계적으로 검증된 바 없다. 또한 기관실 케이싱 체적의 별도 파라메트릭 연구는 저자가 조사한 범위에서 학술 문헌에서 확인되지 않았다.

Papanikolaou (2014)로 대표되는 위험 기반·전체론적 최적화 연구 흐름은 선체·화물 구역에 초점을 둔 순방향 합성 접근으로서, 기존 운항 선박의 GA를 직접 측정하여 추정식을 도출하는 본 연구의 역방향 경험적 접근과는 방법론적 방향이 반대이다. 다만 본 회귀식이 그러한 최적화의 초기 입력값을 제공할 수 있으므로 두 접근은 상호 보완 관계에 있다.

2.3 유조선 거주구역의 규제·구조 체계

유조선 거주구역 체적을 결정하는 인자는 국제 규제와 선급 체계에서 나온다. MLC 2006 Standard A3.1은 단일 점유 객실의 최소 바닥 면적 $7m^2$ (1만 GT 이상 선박 기준)와 최소 천장 높이 2.03m를 규정하고, 최소 안전배승은 IMO Resolution A.1047 (27)에 따라 DWT가 아닌 선박 크기와 유형, 자동화 수준, 항차 특성 등 여러 요소와 요구되는 기능 수행 능력을 기준으로 결정된다. 그 결과 일반 유조선의 운항 승무원은 Handysize 약 20명에서 VLCC 약 32명 수준에 그친다(Vidmar and Perkovič, 2023, Table 3).

이 수치는 설계 거주 정원(design berths)이 아닌 운항 승무원(operating crew) 기준이다. 승선인원이 거의 일정하고 최소 객실 표준이 고정되어 있으므로, Handysize 이후 DWT 영역 전반에서 요구되는 객실 바닥 면적은 거의 일정하다. SOLAS Ch.V Reg.22는 조타 지휘 위치에서 선수 전방의 가시 해역이 $2 \times LOA$ 또는 500m 가운데 작은 값 이상 가려지지 않을 것을 요구한다. VLCC (LOA 약 330m)에서는 500m가 구속 조건으로 작용한다. 구조 측면에서 IACS CSR은 상부구조 격벽을 가능한 범위에서 선체 주요 구조부재 위에 정렬하여 배치하도록 요구한다.

3. 데이터 및 방법론

3.1 자료원 및 표본 구성

본 연구의 자료원인 RINA Significant Ships는 매년 인도되는 대표적 신조 선박의 일반배치도(GA)와 주요 제원을 수록한 연간 발행물로, 상업 선박의 GA 수준 정보를 체계적으로 정리한 소수의 공개 자료원 가운데 하나이다. GA 도면은 작은 축척, 세부 정

보의 생략 단순화 등 한계가 있으나, 학술 연구 목적으로 접근 가능한 자료원 가운데 조선소와 시기를 가장 폭넓게 아우르는 파라메트릭 자료원이다.

본 연구의 표본은 위 발행물의 1991년부터 2019년까지 인도 분 29개 권을 추출 틀로 삼아 구성하였다. 이 가운데 단일 거주구역 구조를 갖는 유조선(원유·제품·케미컬 운반선)으로서, GA 도면에 거주구역과 기관실 케이싱의 치수를 측정할 수 있는 정보가 수록된 선박을 선별하여 80척을 확정하였다. 표본의 80척은 모두 선미 단일 거주구역 배치이며, 이는 표본 기간 유조선의 통상적 배치 관행과 부합한다.

선박은 산업계 표준 분류에 따라 Handysize($DWT \leq 30,000$), Panamax($30,000 < DWT \leq 80,000$), Aframax($80,000 < DWT \leq 120,000$), Suezmax($120,000 < DWT \leq 200,000$), VLCC($DWT > 200,000$)의 5개 그룹으로 분류하였다. Frančić et al. (2023)의 분류와는 Aframax 경계($80,000DWT$)에서 일치하며, Handysize 상한을 $30,000DWT$ 로 두는 점에서 차이가 있다. DWT 범위는 3,778–348,732t이다.

3.2 측정 파이프라인과 체적 산출

본 연구의 측정은 단일 측정자(본 논문 저자)가 표준화된 절차에 따라 수행하였다. 이하 주요 단계에는 Panamax 유조선 Horizon Armonia(2008년 인도, $DWT 50,100t$)의 측정 예시를 병기하며, 그 측정 화면은 Fig. 1과 같다.

1단계로 각 간행물 PDF에서 선박별 GA 도면 페이지를 300 DPI로 추출하고, 대비·선명도 등을 보정하였다.

2단계로 주요 제원 표의 LOA 값을 도면상 선수-선미 픽셀 수와 대조하여 pixel-to-meter 변환 비율을 산출하였다. 예시선에서는 제원표의 LOA 183.0m로부터 변환 비율 0.0808m/px를 얻었다.

3단계로 저자가 작성한 간단한 웹 기반 계측 보조 도구를 사용하여, 측면 투영도에서 거주구역($L_{dh} \times h_{dh}$)과 기관실 케이싱(L_{ec}

$\times h_{ec}$)의, 평면 투영도에서 거주구역($L_{dh} \times B_{dh}$)과 기관실 케이싱($L_{ec} \times B_{ec}$)의 외곽을 polyline으로 측정하였다. 이 도구는 도면 이미지 위에 지정한 polyline 꼭짓점 좌표에 2단계의 변환 비율을 적용해 실치수로 환산하며, 면적은 폐합 다각형의 꼭짓점 좌표에 Shoelace 공식을 적용하여 산출한다. 기관실 케이싱 측정의 상한 경계는 밀폐 구획 블록의 최상단이며, 케이싱 상부로 솟은 연돌(funnel)은 밀폐 상부구조가 아니므로 전 표본에서 일관되게 측정 범위에서 제외하였다.

4단계로 평면도·정면도·측면도 간 L_{dh} 와 L_{ec} 의 일치를 교차 점검하고 불일치 시 재검토하였다. V_{dh} 와 V_{tot} 은 80척 전체에 대해 산출하였으며, V_{ec} 는 밀폐 케이싱 블록이 식별되는 77척에 대해 산출하였다. 나머지 3척은 밀폐 케이싱 블록이 식별되지 않아(2척은 연돌만 식별, 1척은 케이싱이 거주구역에 통합) 별도로 산출할 수 없으며, 이 경우 $V_{tot} = V_{dh}$ 이다. 거주구역과 기관실 케이싱 사이의 간극(L_{gap})은 거주구역 후벽에서 후방 구조물(케이싱 블록 또는 연돌) 전벽까지의 수평 거리로 측정하고, 접촉 또는 통합 배치는 0으로 기록하였다($n = 80$).

5단계로 갑판 수를 기록하였다. 거주구역 갑판 수(n_{dh})는 주갑판 레벨부터 항해 함교 갑판까지의 밀폐 층 레벨 총 개수로 정의하며, 몽기 아일랜드 등 개방형 상부 구조물은 포함하지 않는다. 기관실 케이싱 갑판 수(n_{ec})는 동일 기준으로 기관실 케이싱 내부의 밀폐 층 레벨을 계수하였다.

본 연구의 체적 산출은 polyline 직접 측정값에 기반하며, 직사각 가정이나 테이퍼 계수 보정은 적용하지 않는다. 체적은 식 (1)로 산출하였다.

$$V = \sum (A_i \times d_i) \quad (1)$$

여기서 A_i 는 i 번째 투영도에서 polyline으로 측정한 면적(m^2), d_i 는 해당 투영도의 직교 방향 깊이(m)이다. 측면 투영도($L \times h$)와 평면 투영도($L \times B$)에서 각각 측정한 면적의 치수가 서로 정합하는지 확인함으로써, 단일 투영도만으로 측정할 때 생길 수 있는 계통 오차를 억제하였다. $V_{tot} = V_{dh} + V_{ec}$ 는 주갑판 위 상부구조의 총 체적이며, 분리형 케이싱 블록이 없는 3척의 V_{tot} 은 V_{dh} 와 같다. 예시선에서는 이 절차로 $V_{dh} = 4,960m^3$, $V_{ec} = 1,234m^3$ 를 얻었다.

3.3 통계 방법

본 절의 통계 분석은 멱함수 회귀 적합, Frančić 다중회귀 명세 적용, 정규화 지표 분석, 체적 탄력성 산출의 네 범주로 구성된다.

첫째, V_{dh} , V_{ec} , V_{tot} 각각에 식 (2)의 멱함수 회귀 계수를 로그 영역 직선 회귀(OLS)로 추정하였다.

$$V = a \times DWT^b \quad (2)$$

여기서 V 는 대상 체적(m^3), a 는 회귀 계수, b 는 스케일링 지수이다. 적합도 지표로 결정계수 R^2 , 평균 절대 백분율 오차(MAPE),

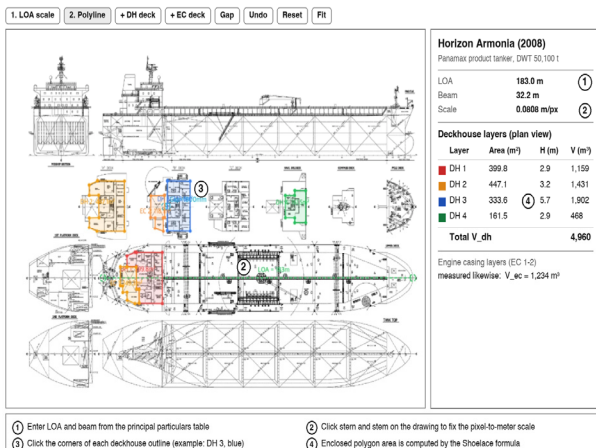


Fig. 1 Measurement example on a general arrangement drawing (Horizon Armonia, Panamax, $DWT 50,100t$)

평균 제곱근 오차(RMSE)를 사용하였다.

둘째, Frančić et al. (2023)의 명세를 식 (3)과 같이 적용하였다(Aframax는 Frančić et al.과의 일관성을 위해 기준 범주). Frančić et al.과 동일하게 LOA와 B를 모두 포함하되, LOA-B 공선성($r = 0.98$)을 고려하여 B를 제외한 축약 모형(LOA + 그룹 더미)을 함께 검토하였다.

$$V_{dh} = \beta_0 + \beta_{LOA} \times LOA + \beta_B \times B + \sum \beta_g \times D_g \quad (3)$$

여기서 β_0 는 절편, β_{LOA} 와 β_B 는 LOA와 B의 회귀 계수, D_g 는 DWT 그룹 더미 변수, β_g 는 그룹별 더미 계수이다.

셋째, V_{ec}/V_{dh} 등 정규화 지표의 그룹별 기술통계를 산출하고, 표본 기간 내 시간 의존성을 검정하였다. 정규화 지표 $V_{dh}/DWT^{0.3667}$ 은 식 (2)의 적합에서 얻은 지수 $b = 0.3667$ 을 사용하여 V_{dh} 에서 DWT 의존 부분을 제거한 값이다. 표본이 1991–2019년의 29개 연도에 걸쳐 있으므로, 규제 강화나 설계 관행 변화에 따른 계통적 추세가 있다면 시기를 통합한 회귀식은 편향된다. 특히 표본 기간은 거주 설비 기준을 강화한 MLC 2006의 발효 시점(2013년)을 포함한다. 이를 확인하기 위해 이 정규화 지표의 인도 연도에 대한 단순 선형 회귀를 수행하여 기울기의 유의성을 검정하였다.

넷째, Panamax 기준 체적 탄력성 ε_g 를 식 (7)의 정의에 따라 그룹별 평균에 대해 산출하였다. 이상치는 V_{dh} 회귀 잔차가 잔차 표준편차 σ 의 ± 2 배를 초과하는 선박으로 정의하였으며, 4.7절에서 다룬다.

3.4 표본 기술통계

Table 1은 분석 표본($n = 80$)의 그룹별 구성이다. 표본은 Handy 13척, Panamax 19척, Aframax 15척, Suezmax 18척,

Table 1 Composition of the analysis sample by DWT group

Group	n	DWT range (t)	LOA range (m)
Handy	13	3,778 – 29,999	88.8 – 178.2
Panamax	19	32,294 – 79,652	179.3 – 220.8
Aframax	15	80,385 – 118,138	232.0 – 264.7
Suezmax	18	120,000 – 152,001	258.9 – 285.0
VLCC	15	250,000 – 348,732	329.0 – 338.8
Total	80	3,778 – 348,732	88.8 – 338.8

Table 2 Descriptive statistics of the response variables

Variable	n	Mean	Std	Min	Q1	Median	Q3	Max
$V_{dh}(m^3)$	80	5,205	2,040	1,157	4,135	4,948	5,915	11,419
$V_{ec}(m^3)$	77	1,603	944	105	990	1,605	1,999	5,269
$V_{tot}(m^3)$	80	6,748	2,694	1,343	5,236	6,658	7,819	14,650
hdh(m)	80	16.1	3.4	10.9	14.2	15.1	17.6	30.1
hec(m)	77	8.6	2.8	2.0	6.3	9.1	10.6	14.2
Lgap(m)	80	3.5	2.0	0.0	2.4	3.2	4.8	11.2

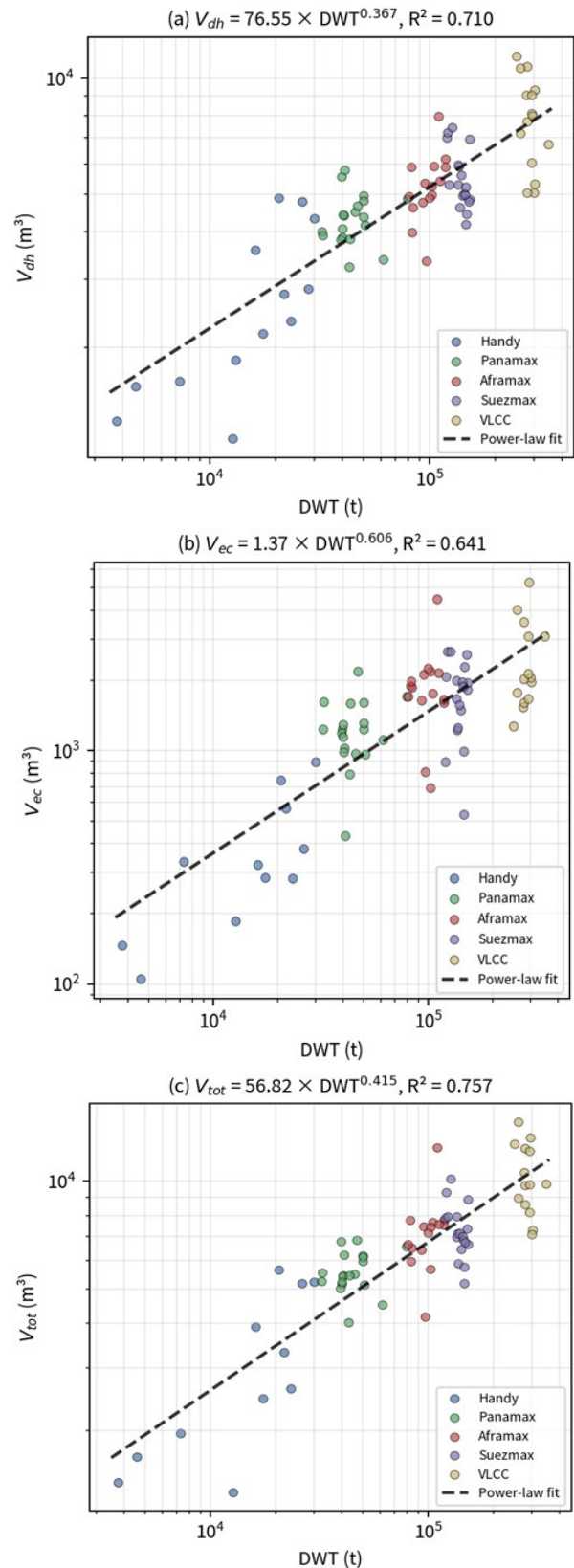


Fig. 2 Power-law regression results: (a) V_{dh} , (b) V_{ec} , (c) V_{tot}

VLCC 15척으로 유조선 크기 영역의 전 범위를 포괄하며, Aframax 이상 클래스의 표본 수는 Frančić et al. (2023)의 그룹별 표본 수

Table 3 Power-law regression results for V_{dh} , V_{ec} , and V_{tot} (R^2 in log domain; data-domain R^2 : 0.612 / 0.388 / 0.661)

Variable	a	b	R^2	MAPE	RMSE(m ³)	n
V_{dh}	76.55	0.3667	0.710	19.1%	1,271	80
V_{ec}	1.37	0.6062	0.641	40.5%	739	77
V_{tot}	56.82	0.4150	0.757	19.9%	1,568	80

와 같거나 그보다 많다. Table 2는 응답 변수 V_{dh} , V_{ec} , V_{tot} , h_{th} , h_{ec} , L_{gap} 의 전체 표본 기술통계이다.

4. 결 과

4.1 역함수 회귀

세 응답 변수는 모두 로그 영역에서 DWT와 뚜렷한 선형 관계, 즉 역함수 관계를 따른다(Fig. 2). V_{dh} , V_{ec} , V_{tot} 각각에 대해 식 (2)의 역함수 회귀 계수를 추정한 결과는 식 (4)–(6)과 같으며, 적합도 지표는 Table 3과 같다.

$$V_{dh} = 76.55 \times DWT^{0.3667} \quad (4)$$

$$V_{ec} = 1.37 \times DWT^{0.6062} \quad (5)$$

$$V_{tot} = 56.82 \times DWT^{0.4150} \quad (6)$$

V_{dh} 와 V_{ec} 모두 스케일링 지수가 1보다 현저히 작으며, 이는 DWT가 증가할 때 두 체적이 그보다 완만하게, 즉 준선형적으로 증가함을 보여준다. 예를 들어 DWT가 두 배가 될 때 V_{dh} 는 1.29배($2^{0.3667}$), V_{ec} 는 1.52배($2^{0.6062}$) 증가에 그친다.

두 지수를 비교하면 V_{ec} 의 0.6062가 V_{dh} 의 0.3667보다 크다. 이는 기관실 케이싱이 거주구역보다 DWT에 강하게 비례함을 의미하며, 기관실 케이싱이 주기관 출력(VLCC급 약 25–30 MW, Panamax급 약 10–13 MW; MAN Energy Solutions, 2021)에 직접 의존하는 반면 거주구역 체적은 거의 일정한 승선인원이 그 상한을 결정한다는 인자 차이와 부합한다.

합성 변수인 V_{tot} 의 R^2 는 0.757로 V_{dh} 단독(0.710)과 V_{ec} 단독(0.641)보다 모두 높다. 두 체적을 합하면 개별 성분의 변동이 서로 상쇄되기 때문이다. 역함수 회귀의 잔차 표준편차는 24.0%이며, 잔차 $\pm 2\sigma$ 초과 6척은 4.7절에서 다룬다.

식 (4)의 예측치를 측정치와 대조하면(Fig. 3) 측정치가 45도 대응선 주위에 그룹 간 계통적 치우침 없이 분포하여, 단일 변수 DWT 기반 회귀식이 유조선 전 크기 영역에서 일관된 예측 품질을 유지함을 보여준다.

1991–2019 표본 기간의 시간 의존성을 검정하기 위해 $V_{dh} / DWT^{0.3667}$ 대 인도 연도의 단순 선형 회귀를 수행한 결과, 기울기 = 0.0482/yr, $R^2 = 0.0005$, $p = 0.850$ ($n = 80$)으로 통계적으로

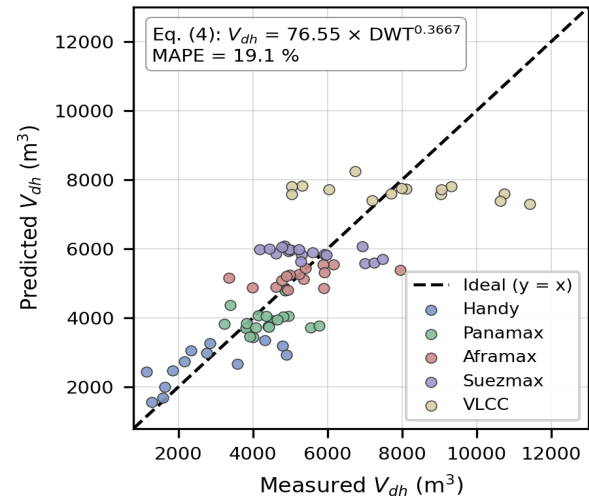


Fig. 3 Predicted versus measured V_{dh} for Eq. (4)

Table 4 Group means and derived ratios. ε : volume elasticity relative to Panamax (group means)

Group	n	V_{dh} (m ³)	V_{ec} (m ³)	V_{tot} (m ³)	V_{ec}/V_{dh}	$V_{dh}/10kD$ WT	ε
Handy	13	2,709	386	3,036	0.139	1,563	1.64
Panamax	19	4,348	1,246	5,594	0.292	951	1.00
Aframax	15	5,291	1,923	7,214	0.358	535	0.56
Suezmax	18	5,545	1,752	7,298	0.323	399	0.42
VLCC	15	7,961	2,509	10,302	0.345	277	0.29

유의한 시간 추세는 나타나지 않았다. 거주 설비 기준을 강화한 MLC 2006 발효(2013년) 전후로도 정규화 체적의 계통적 변화는 관찰되지 않으며, 이는 표본 기간 원양 유조선의 거주구역 설계가 강화된 기준을 이미 충족하는 수준이었다는 해석과 부합한다. 이 시간 비의존성은 표본 시기를 통합하는 근거가 되며, 본 회귀식이 표본 기간 전반에서 안정적 기준이 됨을 뒷받침한다.

4.2 DWT 그룹별 평균과 V_{ec}/V_{dh} 비율

회귀식이 나타내는 연속적 스케일링과 별개로, 초기 설계 실무에서는 DWT 그룹 단위의 평균값이 참조 기준이 된다. DWT 그룹별 평균값과 정규화 지표는 Table 4와 같다. Table 4의 V_{ec} 평균은 밀폐 케이싱 블록이 식별되는 선박에 한한 값이며(3.2절의 제외 3척은 Handy 2척, VLCC 1척), 이에 따라 두 그룹에서는 V_{dh} 와 V_{ec} 의 평균 합이 V_{tot} 평균과 일치하지 않는다.

이 평균값에서는 거주구역 체적이 준선형으로 증가하고, VLCC 구간에서 거주구역 높이가 급증하며, V_{ec}/V_{dh} 비율이 뚜렷한 단차를 보인다.

V_{dh} 는 모든 그룹 간 단조 증가하나 그 증가율은 선체 크기 증가율보다 작다. Panamax 대비 Aframax V_{dh} 는 $\times 1.22$, Suezmax $\times 1.28$, VLCC $\times 1.83$ 이며, 같은 구간에서 DWT 증가는 훨씬 크므로, V_{dh} 증가율은 DWT 증가율의 29–56% 수준(Aframax 0.56,

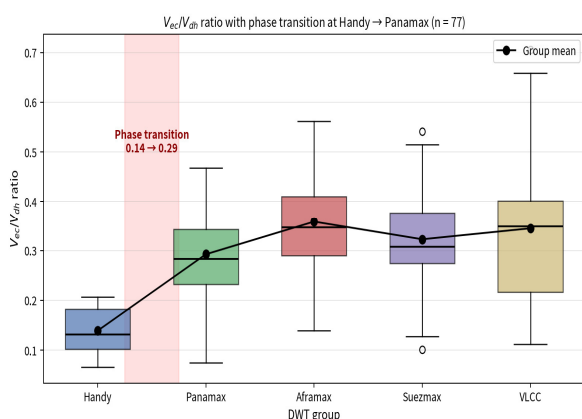


Fig. 4 V_{ec}/V_{dh} ratio by DWT group with a discontinuous step

Suezmax 0.42, VLCC 0.29; Table 4의 탄력성 열)에 머무른다.

한편 h_{th} 는 Panamax-Suezmax 영역에서 거의 일정(15.4~15.8m)하다가 VLCC에서 20.9m로 +36% 급증하며, 이상치 2척(Brightoil Glory 29.6m, Desh Vishal 30.1m) 제외 시에도 19.52m로 Suezmax 대비 +23% 크다. 이 h_{th} 의 VLCC 급증은 5.1절에서 SOLAS Ch.V Reg.22 전방 시야 요건의 구축 효과와 관련지어 다룬다.

V_{ec}/V_{dh} 비율은 Handysize 약 0.14에서 Panamax 이상 0.29~0.36으로 뚜렷한 단차를 보인다(Table 4, Fig. 4). Handysize-Panamax 사이의 평균값 증가(0.14 → 0.29)는 × 2.1에 이르며, Panamax 이상 그룹 간(0.29~0.36) 변동은 상대적으로 작다.

이 단차는 (1) Handysize가 단거리 벙커 운항으로 주기관 출력 요구가 낮아 기관실 케이싱 점유면적이 작고, (2) Panamax 이상은 장거리 원양 운송 요건으로 출력이 급증하여 기관실 케이싱이 그에 비례해 커지기 때문으로 해석된다. Panamax 이상에서 비율이 안정적인 것은 거주구역과 기관실 케이싱이 주갑판 위 상부구조에서 쌍을 이루며 함께 비례적으로 커지기 때문이다.

4.3 Frančić 다중회귀 체계의 적용

Frančić et al. (2023)의 회귀 명세인 식 (3)을 본 표본의 V_{th} 에 적용하였다. Aframax를 기준 범주로 두고, Frančić et al.과 동일하게 LOA와 B를 모두 포함한 6변수 모형을 구성하였다.

LOA와 B를 모두 포함한 완전한 Frančić 명세를 적용한 결과 $R^2 = 0.683$ ($n = 80$)을 얻었다. B는 통계적으로 유의하다($p = 0.035$) LOA-B 공선성($r = 0.98$, $VIF > 30$)으로 인해 LOA 계수는 유의하지 않으며($p = 0.483$), B를 제외한 축약 모형(LOA + 그룹 더미)의 R^2 는 0.663이다. 반대로 LOA를 제외하고 B를 남긴 대안 모형(B + 그룹 더미)의 R^2 는 0.681로, 세 명세 모두 0.66~0.68 수준이며 변수 선택이 결론을 좌우하지 않는다.

공선성이 있는 상태에서는 개별 선체 치수 계수의 해석이 불안정하므로, V_{th} 는 선체 치수보다 DWT 그룹 분류와 그룹 내 변동으로 더 잘 설명된다.

Frančić et al. (2023)이 동일 명세로 동일 선종(유조선)의 경하중량에 대해 얻은 $R^2 = 0.99$ 와 본 연구의 V_{th} $R^2 = 0.68$ 의 격차는 약 0.31이다. 이 격차는 방법의 한계라기보다 질량 기반 지표와 공간 기반 지표의 기원 차이에서 비롯된다. 그 메커니즘은 4.6절에서 논의한다.

4.4 체적 효율과 체적 탄력성

질량 정규화 지표 V_{th}/DWT (10,000 DWT당 m^3)는 유조선 크기 영역 전반에 걸쳐 단조 감소한다(Table 4). $V_{th}/10kDWT$ 는 Handysize 약 1,563에서 VLCC 약 277로 약 5.6배, $V_{col}/10kDWT$ 는 약 1,752에서 359로 약 4.9배 급감한다. 이 급감은 경하중량대 DWT 비율(LD/DWT)이 동일 DWT 영역에서 일반적으로 30% 미만의 변동(유조선의 경우 0.13~0.18)을 보이는 것(Schneekluth and Bertram, 1998; Papanikolaou, 2014)과 뚜렷이 대조되며, 질량 기반과 공간 기반 지표에서 회귀의 결정계수가 다르게 나타난다는 4.6절의 발견을 뒷받침한다.

이 급감을 정량적으로 나타내기 위해 체적 탄력성 ε_g 를 산출하였다. Panamax를 기준 그룹으로 두고 그룹 g의 탄력성은 식 (7)과 같이 정의하였다.

$$\varepsilon_g = (V_{th,g} / V_{th,Panamax}) / (DWT_g / DWT_{Panamax}) \quad (7)$$

이 지표는 DWT 증가에 대한 V_{th} 의 비례 증가 정도를 나타낸다. $\varepsilon = 1$ 은 선형 비례를, $\varepsilon < 1$ 은 준선형 스케일링을, $\varepsilon > 1$ 은 초선형 스케일링을 의미한다. 그룹별 평균을 기준으로 산출한 결과는 Table 4의 ε 열과 같다.

Aframax 이상의 모든 그룹에서 탄력성이 1.0보다 작고(Aframax 0.56, Suezmax 0.42, VLCC 0.29) 그룹 크기 증가에 따라 단조 감소하여 준선형 스케일링을 정량적으로 뒷받침한다. VLCC는 DWT가 Panamax의 6.27배이지만 V_{th} 는 1.83배에 그친다. Handysize의 탄력성 1.64는 초선형 스케일링을 뜻하지 않는다. 이는 최소 거주 요건(MLC 2006 객실 표준과 최소 승선인원)이 V_{th} 의 하한, 즉 거주구역 체적의 '바닥'을 형성하기 때문이며, Handysize 그룹의 V_{th} 는 작은 DWT 변동에 비탄력적이다. 본 탄력성(Table 4의 ε 열)의 초기 설계 활용은 5.2절에서 다룬다.

4.5 거주구역·기관실 케이싱 갑판 수 분포

본 연구에서는 거주구역 갑판 수(n_{th})와 기관실 케이싱 갑판 수(n_{ec})를 함께 기록하였으며, 이 자료는 MLC/STCW 승선인원 포화(5.1절의 인자 (4))를 정량적으로 검증하는 근거가 된다. n_{th} 평균은 Handysize 4.5층 → Panamax 5.2층 → Aframax 5.3층 → Suezmax 5.4층 → VLCC 6.2층으로 단조 증가하나 증가 폭은 약 38%에 그치고, Panamax-Suezmax 영역에서 5.2~5.4층으로 안정되어 Handysize 이후 유조선의 특징적 5~6 갑판 포화를 보인다. 이 포화는 5.1절 인자 (4)와 정량적으로 부합한다. 즉 MLC 2006 객실 표준($7m^2$ /single, 천장 2.03m)이 정해져 있고 운항 승선인원

(26~32명; IMO Resolution A.1047(27)에 따른 최소 안전배승, Vidmar and Perkovič, 2023)도 거의 일정하므로, 요구되는 객실 면적 역시 거의 일정하다. VLCC에서 갑판이 약 1층 더 늘어나는 것은 4.2절 h_{th} 의 VLCC 급증 및 SOLAS Ch.V Reg.22 전방 시야의 구속 조건과 부합한다. n_{ec} 평균은 모든 그룹에서 2.0~2.8층으로 안정되며, 주기관 배치가 DWT에 따라 점유면적은 변해도 갑판 수는 변하지 않는다는 산업 관행과 일치한다.

4.6 경하중량 회귀 체계의 성분별 적용성

Frančić et al. (2023)이 LOA-B와 그룹 더미로 경하중량에 대해 $R^2 = 0.99$ 를 얻은 반면, 본 연구가 동일 예측 변수 집합으로 V_{th} 에 대해 얻은 R^2 는 0.68이다. 이 차이는 방법의 실패가 아니라 두 지표의 성격 차이에서 비롯된다. 두 분석은 모두 유조선이라는 동일 선종을 대상으로 수행되었으나, 표본은 서로 다른 80척이다. 경하중량은 질량 기반 집계량으로, 지배적 구성 요소인 선체 강재 중량(통상 경하중량의 65~75%)이 근사적으로 비례하므로(Watson, 1998; Schneekluth and Bertram, 1998) 선체 치수가 공통의 스케일링 인자로 작용한다. 반면 거주구역 체적은 공간 기반 지표로, 객실 표준(MLC 2006), 승선인원(약 20~32명, IMO Resolution A.1047(27), Vidmar and Perkovič, 2023), 전방 시야(SOLAS Ch.V Reg.22), 기관실 격벽 정렬과 종보강재 정렬(5.1절) 등 선체 치수에 선형 비례하지 않는 별개의 인자들이 그 크기를 결정한다. 따라서 경하중량 회귀 체계는 질량 기반 집계량에는 잘 맞지만 규제·기능·구조적 기원의 공간 기반 구성 요소에 대해서는 결정계수가 낮게 나타남을 알 수 있다. 약 0.31의 R^2 격차는 이러한 성분별 적용성을 보여준다.

4.7 이상치 분석

이 절에서는 4.1절 회귀가 포착하지 못하는 개별 선박 수준의 편차를 점검한다. 잔차가 $\pm 2\sigma$ ($\sigma = 24.0\%$)를 초과하는 선박 6척은 Table 5와 같다.

6척 가운데 5척이 상위 이상치(평균 대비 49.5~67.6% 초과, Handysize 2척·Panamax 2척·VLCC 1척)이고, 1척이 하위 이상치(Belisaire, -52.7%)로 거주구역 체적이 Handysize 그룹 평균 V_{th} 2,709m³ 대비 약 43% 수준이다. 이 이상치 선박들은 5.3절에서 다룬다.

5. 고 찰

5.1 거주구역·기관실 케이싱 형성의 물리적 메커니즘

거주구역 체적의 준선형 스케일링($b = 0.3667$)과 기관실 케이싱 체적의 준선형 스케일링($b = 0.6062$)은 네 가지 인자가 함께 작용한 결과이다(Fig. 5).

인자 (1): 종방향 정렬 제약(L 축). 거주구역 전벽은 기관실 전

Table 5 Six vessels with V_{th} regression residuals exceeding $\pm 2\sigma$

Name	Group	DWT(t)	Measured (m ³)	Predicted (m ³)	Residual
Arbat	Panamax	39,700	5,556	3,717	+49.5%
TS Prosperity	VLCC	250,000	11,419	7,297	+56.5%
Lista	Handy	26,400	4,794	3,200	+49.8%
Azov Sea	Panamax	41,154	5,783	3,766	+53.6%
Wolgastern	Handy	20,660	4,902	2,925	+67.6%
Belisaire	Handy	12,680	1,157	2,446	-52.7%

단 횡격벽과, 기관실 케이싱 후벽은 기관실 후단 횡격벽과 정렬되므로 $(L_{th} + L_{gap} + L_{ec}) = L_{engine\ room}$ 이 된다. 이는 IACS CSR이 부과하는 격벽과 선체 부재의 구조 연속성 원칙을 따른 통상의 설계 관행이며, 두 블록 사이의 구조 간극은 통상 4 frames $\times$ 800mm = 3.2m로 유지된다. 간극을 줄이면 선미 구조 강성이 약해지므로 실무에서는 이를 피하며, 본 표본에서 직접 연결 배치 5척(Handysize 4척, Panamax 1척)이 관찰되었다. 기관실 길이는 LOA에 선형 비례하지 않으므로 L_{th}/LOA 는 단조 감소하며, 간극이 Handysize 1.2 m $\rightarrow$ VLCC 6.2 m로 약 $\times 5.3$ 증가하는 것도 이 메커니즘과 부합한다.

인자 (2): 횡방향 종보강재 정렬(B 축). B_{th} 와 B_{ec} 는 통상 중심선 기준 양현 8~9번 종보강재에 정렬되는 내벽으로 결정된다. 특정 보강재 번호는 설계 관행이며, 격벽을 선체 부재 위에 정렬하는 IACS CSR의 구조 연속성 원칙을 따른 것이다. 이 위치는 선체 폭에 선형 비례하지 않으므로(종보강재 간격을 일률적으로 정량화할 수는 없다) B_{th} /폭은 단조 감소하며 4.4절 효율 급감의 횡방향 인자가 된다. 대형 유조선의 상부 갑판은 상층으로 갈수록 점유면적이 축소되는 계단형 피라미드 형태를 이루며, 그 결과 갑판을 올릴수록 늘어나는 체적이 점차 줄어든다.

인자 (3): SOLAS Ch.V Reg.22 전방 시야(수직 높이). VLCC(LOA 약 330m)는 $2 \times LOA = 660m > 500m$ 로 500m가 구속 조건이며, 만재 흘수에서 화물 갑판 너머 500 m 시야를 확보하려면 조타 지휘 위치를 높여야 하고, 이는 거주구역(함교)의 수직 높이(h_{th}) 증가로 나타난다. 4.2절 h_{th} 의 VLCC 급증은 이 요건과 부합한다.

인자 (4): MLC/STCW 승선인원 포화(수직 갑판 수). 최소 안전배승은 DWT가 아닌 기능별로 결정되어(IMO Resolution A.1047(27)) 운항 승무원은 Handysize 약 20명에서 VLCC 약 32명에 그치고, Panamax 이상에서 26~32명으로 거의 평탄하다(Vidmar and Perkovič, 2023). 이 거의 일정한 승선인원에 MLC 2006 Standard A3.1의 객실 표준(7m², 천장 2.03m)을 적용하면 약 180~220m²의 객실 면적이 요구되며, 인자 (1)·(2)의 점유면적 제약까지 고려하면 Handysize 이후 유조선의 갑판 수는 5~6층에서 포화된다. 4.5절의 측정 결과는 이 포화를 정량적으로 뒷받침한다.

네 인자가 함께 작용하여 Handysize 이후 유조선의 특징적 거주구역 형태(약 5~6 갑판, 기관실 정합 점유면적, 계단형 피라미드)

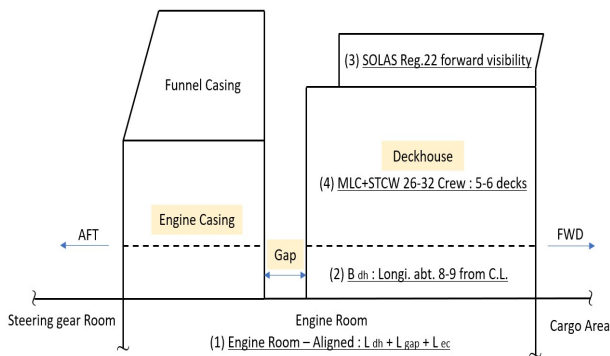


Fig. 5 Four-driver mechanism of tanker deckhouse and engine casing formation

를 만들며, VLCC에서만 전방 시야 인자가 더해져 갑판이 1층 더 적층된다.

5.2 유조선 초기 설계에 대한 시사

본 연구의 역함수 회귀식(Table 3)은 초기 설계 단계에서 V_{dh} , V_{ec} , V_{ot} 의 파라메트릭 추정치 직접 적용 가능하다. 즉 DWT가 결정되면 식 (4)–(6)을 일차 추정식으로 사용할 수 있다. 예를 들어 DWT 115,000 t의 Aframax에 대입하면 V_{dh} 는 약 5,492m³, V_{ot} 은 약 7,156m³로 산출되며, 본 표본의 Aframax 그룹 평균(5,291 m³와 7,214m³, Table 4) 대비 각각 +3.8%와 -0.8%이다. MAPE 19.1%(V_{dh})와 19.9 %(V_{ot}) 수준의 절대 오차는 초기 설계의 종량-체적 여유 일반 표준($\pm 15\sim 20\%$)과 부합한다. V_{ec} 의 MAPE 40.5%는 V_{dh} 의 약 2배로, V_{ec} 는 참고 추정치로 한정하며, 주기관 출력과 실린더 수를 입력값으로 추가하면 정밀도를 높일 수 있다.

4.4절의 체적 탄력성(Table 4의 ε)은 역함수 회귀의 보조 추정 도구로 활용된다. DWT 그룹이 사전 결정된 경우 Panamax 평균 V_{dh} (4,348m³, Table 4)에 (DWT/DWT_{Panamax})의 탄력성으로 가중한 비율을 곱한 그룹별 일차 추정치가 가능하며, 역함수 회귀가 그룹 내 변동성을 포착하지 못하는 약점을 보완한다. 예를 들어 VLCC급(탄력성 0.29)은 DWT가 Panamax의 약 6.27배여도 V_{dh} 는 약 1.83배(약 7,957m³)로 추정되며, 본 표본의 VLCC 평균 V_{dh} (7,961m³, Table 4)와 일치한다. 이 활용 방식이 규제적-기능적 인자가 그 크기를 결정하는 다른 공간 기반 지표로 일반화될 가능성은 6장 말미에서 다룬다.

5.3 한계

본 연구의 한계는 측정, 표본, 분석 범위의 세 측면에 걸쳐 있다.

먼저 측정 측면이다. 모든 측정을 단일 측정자(저자 본인)가 수행하였으므로 측정자 간 교차 검증은 본 논문의 범위 밖이며, 4.6절 0.31 격차의 신뢰도를 한정한다. 모든 측정은 표준화 절차(영상 처리 → pixel-to-meter 결정 → polyline 측정 → 투영도 간 점 검)를 따랐으나, 무작위 측정 요인의 분리는 향후 다중 평가자 재 측정 과제이다.

거주구역과 기관실 케이싱의 경계 배분은 설계 관행에 의존하며, GA의 외형 블록을 기준으로 나눈 것이므로 V_{ec} 의 그룹 내 변동(MAPE 40.5%)에 설계 주관성이 일부 반영될 수 있다. V_{ec} 회귀는 밀폐 케이싱 블록이 식별되는 77척에 한정되며, 간극은 접촉 또는 통합 배치 6척을 0으로 기록하여 80척 전체에 대해 집계하였다. 기관 관련 장비가 연돌 내부 또는 주갑판 하부에 배치될 가능성은 GA로 판단할 수 없으므로 측정 범위 밖이다.

다음은 표본 측면이다. V_{ec}/V_{dh} 그룹 평균에서 Suezmax(0.323)가 Aframax(0.358)보다 다소 낮다. 이 역전은 표본 분산 범위 안에 있으나, 선형 확대에 따라 비율이 유지 또는 증가하리라는 기대와 부분적으로 어긋나며, 이를 정밀하게 확인하는 것은 표본 확대 과제로 남는다.

4.7절의 이상치 6척은 표본에서 제외하지 않았다. $\pm 2\sigma$ 초과 6척을 트리밍한 재회귀는 $a = 76.55 \rightarrow 76.34(-0.3\%)$, $b = 0.3667 \rightarrow 0.3652$, $R^2 = 0.710 \rightarrow 0.769$, MAPE = 19.1% $\rightarrow$ 16.6%, RMSE = 1,271 $\rightarrow$ 1,145m³로, 회귀식 본체(a , b)는 거의 영향을 받지 않고 절대 오차 지표만 개선된다. 본 분석은 표본의 자연 분포를 반영하는 보존적 접근이며, 하위 이상치 Belisaire는 GA 세부 정보 또는 특수 목적 배치 가능성을 추가로 검증할 대상이다.

아울러 RINA Significant Ships는 주목할 만한 신조선을 선별해 수록하는 발행물로 무작위 표본이 아니므로 선택 편향이 있다. 다만 주된 발견은 조선소 간기간 간 80척의 분포에서 도출되었고 4.1절의 연도 추세 무관성이 안정 적용을 시사하므로 영향은 제한적이며, IHS Sea-Web 또는 조선소 카탈로그 등 대안 자료원과 교차 검증이 후속 연구로 필요하다.

끝으로 분석 범위 측면에서, IACS CSR의 단계적 도입(CSR-OT 2006 발효, 통합 CSR BC and OT 2015 발효)에도 4.1절의 연도 추세 분석($p = 0.850$)은 시간 의존성이 없음을 보여주나, CSR이 두 구조 세부 정보에 미친 영향을 분리하는 것은 향후 시기 추화 분석 과제로 남는다.

이상의 한계는 주로 절대 오차의 크기와 일반화 범위에 관한 것으로, 앞의 트리밍 재회귀가 보여주듯 회귀식 본체(a , b)에 미치는 영향은 제한적이다.

6. 결론

본 연구는 RINA Significant Ships(1991–2019)의 일반배치도 직접 측정으로 유조선 80척의 거주구역-기관실 케이싱 체적 특성에 관해 다음 결과를 얻었다.

본 연구의 중심 결과는 세 추정식이다. $V_{dh} = 76.55 \times \text{DWT}^{0.3667}$ ($R^2 = 0.710$), $V_{ec} = 1.37 \times \text{DWT}^{0.6062}$ ($R^2 = 0.641$), $V_{ot} = 56.82 \times \text{DWT}^{0.4150}$ ($R^2 = 0.757$)으로 모든 스케일링 지수가 1보다 작다. 그중 V_{ec} 의 지수(0.6062)가 V_{dh} (0.3667)보다 커, 기관실 케이싱은 주기관 출력, 거주구역은 거의 일정한 승선인원이 그 크기를 결정하는 인자 차이를 보인다. 이 준선형성은 탄력성 지표에서도 확인된다. 체적 탄력성은 Panamax 기준 Aframax

0.56, Suezmax 0.42, VLCC 0.29로 단조 감소하며, Handysize의 1.64는 최소 거주 요건의 '바닥'을 의미한다.

그룹 단위에서는 두 가지 불연속 현상이 관찰된다. V_{ec}/V_{ch} 비율은 Handysize 0.14에서 Panamax 이상 0.29–0.36으로 뚜렷한 단차를 보인다. 또한 거주구역 갑판 수는 Handysize 이후 영역에서 5–6층으로 포화되며, VLCC에서 갑판이 1층 더 늘어나는 것은 전방 시야 구축과 부합한다.

체계 차원에서 보면, 연도 추세는 유의하지 않아($p = 0.850$) 본 회귀식은 표본 기간 전반의 안정적 기준이다. 한편 본 연구가 Frančić 체계의 명세를 V_{ch} 에 적용해 얻은 $R^2 = 0.68$ 은 Frančić et al. (2023)이 제시한 경향중량 R^2 0.99 대비 약 0.31의 격차로, 지표 유형(질량 기반 대 공간 기반)에 따라 회귀 체계의 적용성이 달라짐을 보여준다. 이 준선행 스케일링은 (1) 기관실 격벽 정렬, (2) 종보강재 정렬, (3) SOLAS Ch.V Reg.22 전방 시야(VLCC 구축), (4) MLC/STCW 승선인원 포화(26–32명)의 네 인자로 해석된다.

이 성분별 적용성 발견을 바탕으로 세 가지 후속 연구를 제안한다. 먼저 동일 체계를 기관·구조강재·의장 중량으로 확장하는 성분별 회귀 분류 체계의 정립이다. 이어서 타 선종 검증이다. 승선인원이 비슷한 벌크선은 유사한 준선행 스케일링을, 승선인원이 더 많은 LNG 운반선은 더 큰 V_{ch} 고원 구간을 보일 것으로 예상된다. 끝으로 측정 신뢰도 보강이다. 다중 평가자 재측정, 조선소 카탈로그 등 대안 자료원과의 교차 검증, 추가 치수 확보를 통한 5.1절 메커니즘의 정량 검증을 후속 연구 과제로 남긴다.

References

- Frančić, V., Hasanspahić, N., Mandušić, M. and Strabić, M., 2023. Estimation of tanker ships' lightship displacement using multiple linear regression and XGBoost machine learning. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(5), 961.
- IACS, 2019. *Common structural rules for bulk carriers and oil tankers, 1 January 2019*. International Association of Classification Societies.
- ILO, 2006. *Maritime Labour Convention, 2006 (MLC 2006)*. International Labour Organization.
- IMO, 1974 (as amended). *International convention for the safety of life at sea (SOLAS)*. International Maritime Organization.
- IMO, 1978 (as amended). *International convention on standards of training, certification and watchkeeping for seafarers (STCW)*. International Maritime Organization.
- IMO, 2011. Resolution A.1047(27): *Principles of minimum safe manning*. International Maritime Organization.
- Lamb, T. (ed.), 2003. *Ship design and construction* (Vols. 1 and 2). Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Lützen, M. and Kristensen, H.O., 2012. A model for prediction of propulsion power and emissions – tankers and bulk carriers. World Maritime Technology Conference, Saint-Petersburg, Russia, 29 May – 1 June 2012.
- MAN Energy Solutions, 2021. *Propulsion trends in tankers*. Copenhagen: MAN Energy Solutions.
- Papanikolaou, A., 2014. *Ship design: methodologies of preliminary design*. Springer.
- Rinauro, B., Begovic, E., Mauro, F. and Rosano, G., 2024. Regression analysis for container ships in the early design stage. *Ocean Engineering*, 292, 116499.
- Royal Institution of Naval Architects, 1991–2019. *Significant ships* (annual volumes). London.
- Schneekluth, H. and Bertram, V., 1998. *Ship design for efficiency and economy*. 2nd ed. Butterworth-Heinemann.
- Seo, S.H., Roh, M.I., Ku, N.K. and Shin, H.K., 2013. A study on the simplified model for the weight estimation of floating offshore plant using the statistical method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(6), pp.373–382.
- Seo, S.H., Roh, M.I. and Shin, H.K., 2014. A study on the weight estimation model of floating offshore structures using the non-linear regression analysis. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(6), pp.530–538.
- Song, H.C., Na, S.S., Jo, D.Y., Shim, C.S., Lee, G.H., Jeong, S., Heo, J.H., Jeong, T.S., Lee, C.H., Jo, Y.C. and Kim, D.C., 2013. Development of automated algorithm for compartment arrangement of oil tanker. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(1), pp.59–68.
- Vidmar, P. and Perković, M., 2023. Update on risk criteria for crude oil tanker fleet. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(4), 695.
- Watson, D.G.M., 1998. *Practical ship design*. Elsevier.

Authorship Contribution Statement

Young-Taek Sohn: Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.



손 영택