



해양 환경변수를 고려한 주성분 회귀모형 기반의 함정 평형수 탱크 부식 예측

원남경¹·김상부^{2,†}

해군정비창¹

국립창원대학교 산업시스템공학과²

Corrosion Prediction for Naval Ship Ballast Tanks Based on Principal Component Regression Model Incorporating Marine Environmental Variables

Nam Kyoung Won¹·Sang Boo Kim^{2,†}

R.O.K. Naval Shipyard¹

Department of Industrial and Systems Engineering, Changwon 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.

Ballast tanks are important structures to the stable navigation of ships. Corrosion, however, is often detected only after it has progressed significantly, which can lead to structural damage to the hull and seriously affect the behavior of the ship even though the ballast tanks are mostly sealed structures. Corrosion prediction of ballast tanks has been studied mainly in relation to mathematical prediction models based on variables such as paint life, temperature, and ship age. Since the environmental seawater variables are not fully considered in those models, they have some difficulties in predicting the accurate amount of corrosion. In this study, a principal component regression model is proposed and compared with extant models, which could more accurately predict the corrosion of ballast tanks incorporating ship age and the other seawater related environmental variables.

Keywords : Ballast tank(평형수 탱크), Corrosion prediction model(부식 예측 모형), Principal component analysis(주성분 분석), Linear regression model(선형 회귀모형), Naval vessel(해군 함정)

1. 서론

평형수 탱크는 함정의 안정적인 항해를 위해 필요한 구조물로 hull수를 조정하고 무게 중심을 균형 있게 유지하는 중요한 역할을 한다. 그러나 평형수 탱크는 주로 밀폐된 구조와 복잡한 형태로 주기적인 점검과 유지보수가 어려운 실정이다. 따라서 Fig. 1과 같이 부식이 심각하게 진행된 후에 확인되는 경우가 많으며, 이러한 부식은 선체의 강도 저하 및 구조 손상으로 이어져 함정의 안전에 심각한 영향을 미칠 수 있다.

부식 예측과 연관된 연구는 다음과 같다. Southwell et al. (1979)은 해수에 대한 철강의 부식 예측을 선형 및 두 개의 선형 모형으로 나타냈으며, Melchers (1998)는 해양 환경에서의 확률론적 부식 모형을 세 개의 선형 및 거듭제곱 모형으로 나타내었

다. Yamamoto et al. (1998)은 도장의 열화와 부식 발생, 부식 진행이라는 각 과정에 적합한 단순 확률론적 모형을 도입하였으며, Soares and Garbatov (1999)는 판재의 비선형 일반 부식 소모량에 대한 모형을 제안하였고, Qin and Cui (2003)는 부식 환경에서 실제 철 구조물의 부식을 설명하는 모형을 세 가지 단계로 구분하였다.

선박에 대한 부식 예측으로 Paik and Park (1998)은 유조선의 종강도 부재를 대상으로 한 확률론적 부식 예측 모형을 개발하였다. Paik et al. (2003)은 도장수명과 부식 진행 계수를 적용하여 상선의 구조물에 대한 부식 예측 모형을 제안하였고, Paik et al. (2004)는 평형수 탱크의 부식 예측 모형을 제안하였다. Noor et al. (2007)은 선박의 해수 평형수 탱크에 대한 시간에 따른 부식 모형을 Weibull 분포로 사용하였으며, Garbatov and Guedes

(2009)는 유조선의 갑판에 대한 부식 데이터를 기반으로 확률론적 유지 관리 계획을 제시하였다. 또한 Landolfo et al. (2010)는 ISO 9224 (ISO, 1992)에 기반한 bi-linear 부식 예측 모형을 제시하였다.

Paik and Kim (2012)은 노후 선박의 해수 평형수 탱크 구조에 대하여 노출된 시간에 따른 부식 손실을 통계적으로 분석하고 Weibull 분포를 사용하여 경험적 부식 모형을 생성하였고, Garbatov et al. (2018)는 선박의 보강재 앞·뒤에서 측정된 부식 데이터를 기반으로 부식 모형을 제시하였다.

최근의 연구로는 Kim et al. (2020)이 Weibull 분포의 누적분포함수(CDF) 식을 통해 최적식을 도출한 선박 평형수 탱크의 비선형 부식 예측 모형을 제안하였고, Bozali et al. (2022)은 Arrhenius 방정식을 접목하여 평형수 탱크의 부식 소모량을 추정하는 수학적 모형을 구축하였다. Kim et al. (2006)은 선체의 부식된 쇠모 강판의 피로강도 평가에 관한 연구를 수행하였으며, Park and Lee (2013)은 부식과 도장 상태를 기반으로 한 선박의 잔여 수명 예측 시스템을 설계하였다. 기존의 부식 예측 모형은 주로 상선(bulk carrier, oil tanker 등)을 대상으로 개발되었으며, Gudze and Melchers (2008)는 상선과 함정의 평형수 탱크는 서로 다른 부식 환경에 노출되어 있음을 명시하면서 상선 데이터를 기반으로 한 기존의 부식 예측 모형은 함정의 다양한 운영 환경을 반영하지 못하였다고 언급하였다.

이러한 상선을 대상으로 한 부식 모형은 해군 함정의 운용 특성과 구조적 조건의 차이로 인해 직접 적용하기에는 적합하지 않다는 연구 결과가 있다. 이에 대해 추가로 설명하면 아래와 같이 요약할 수 있다.

첫째는 설계 목적과 구조적 차이로 상선은 화물 적재 효율과 연료 경제성을 중요시하여 비교적 단순한 평형수 탱크 구조를 갖는다. 하지만 해군 함정은 기동성과 생존성을 중요 요소로 고려한 설계로 내부 격벽, 보강재 등이 복잡하다. 이러한 구조적 차이는 동일한 선령과 동일한 환경 조건에서도 부식이 다르게 진행될 수 있음을 암시한다. 둘째로 정비 및 점검 주기의 차이가 존재한다. 상선의 검사 종류는 연차검사(1년), 중간검사(2.5년), 정기검사(5년)로 구성되어 있으며, 상선의 평형수 탱크 검사는 중간검사와 정기검사 항목에 포함되어 있다. 상선은 이러한 주기적인 검사를 통해 탱크 내부에 과도한 부식이 관측되는 경우 탱크의 정비를 하도록 규정되어 있다. 하지만 해군 함정의 경우 정해진 주기적인 검사가 없으며 안전진단 및 함정조사 대상 함정에 포함되어야만 평형수 탱크 검사를 할 수 있다. 또한 상선과 해군 함정의 도장수명 등 도장 관련 사항이 같지 않으므로 탱크 내 부식이 발생하는 속도가 차이 날 수 있다.

따라서 상선 중심의 기존 부식 예측 모형은 해군 함정의 탱크 구조와 검사 주기, 운용 환경 등 다른 부분이 다수 존재하므로 해군 함정에 특화된 부식 예측 모형의 개발이 필요하다.

이 연구에서는 이러한 한계를 극복하고자 실제 함정에서 수집된 정량적인 탱크 두께 측정 데이터와 해역별 해수 성분과 선령을 변수로 고려한 주성분을 선형회귀 모형의 독립변수로 적용하여 실제 함정에 적용이 가능한 예측 모형을 제안하고자 한다. 해

군의 함정들은 다양한 해역을 운항하는 일반 상선과 달리 구축함을 제외한 다수의 함정은 특정 해역에서 주로 작전을 수행하기에 활동 중인 해역의 해수 성분 등을 부식 예측 모형의 변수로 반영하였다. 해역별 평형수 탱크의 격벽의 두께 감소에 대한 회귀식을 제시하고 실제 측정된 두께 감소 값의 차이를 확인한 후 선행 연구된 부식 예측 모형과 비교함으로써 해군 함정의 평형수 탱크 부식 예측에 적용 가능성을 확인하였다.



Fig. 1 Normal and corroded ballast tanks

2. 부식 예측 모형의 개발 단계

이 연구에서는 해양 환경 변수와 함정의 선령이 평형수 탱크 부식에 미치는 영향을 통계적으로 분석하고, 이를 바탕으로 주성분 회귀분석(principal component regression)을 이용하여 부식 예측 모형을 제안하였다. 부식 예측 모형의 개발 과정은 데이터 수집 및 변수 설정, 주성분 분석(PCA), 선형 회귀모형 구성, 예측 모형 평가의 네 단계로 구성된다.

2.1 데이터 수집 및 변수 설정

이 연구에 사용된 두께 감소 값은 해군의 의뢰를 받아 한국선급(KR)에서 실시한 초계함(PCC) 및 후위함(FF) 11척에 대한 안전진단의 평형수 탱크 두께 측정 데이터를 기반으로 한다. 이때 함정 선령은 안전진단 기간인 25년에서 33년까지이다. 이 연구에서는 부식이 구조적 안전성에 미치는 영향을 보수적으로 평가하기 위하여, 각 선령에서 관측된 두께 감소값의 단순 평균값 대신 두께 감소 값이 큰 상위 3개의 값을 활용하였다. 이는 두께 감소 값의 평균을 사용하는 경우 부식으로 인한 두께 감소가 심각한 부분의 정보를 반영하지 못하여 부식의 위험 수준을 낮게 평가하는 결과를 초래할 수 있기 때문이다. 해역별 대상 함정은 Table 1과 같이 동해 5척, 서해 4척, 남해 3척이며 서해의 2척의 함정과 남해 3척의 함정은 해당 기간 중 2회씩 평형수 탱크의 두께를 측정하였다.

독립변수로는 선령과 한국 해양 환경 조사 연보에 포함된 해수 성분 중 부식 진행과 관련성이 높은 해수 온도, 염분(salinity), 수소이온농도(pH) 용존산소량(DO, Dissolved Oxygen), 화학적 산소요구량(COD, Chemical Oxygen Demand)을 독립변수로 선정하였다(Korea Marine Environment Management Corporation, 2024). 한편 영양염 순환과 관련된 성분인 총질소(TN, Total Nitrogen), 총인(TP, Total Phosphorus), 규산규소(Si(OH)₄) 등은 부식과 직접적인 상관성이 낮아 변수에서 제외하였다(Melchers,

Table 1 Navy vessels subject to ballast tank data collection

Ship age (Years)	East sea	West sea	South sea
25	-	-	PCC-008
26	-	PCC-005	PCC-009
27	PCC-001	PCC-006	PCC-010
28	PCC-002	PCC-007	-
29	PCC-003	PCC-005	-
30	PCC-004	-	PCC-009
31	-	PCC-006	-
32	FF-001	-	PCC-008
33	-	FF-002	PCC-010

2014).

선령은 구조물이 해수 환경에 노출된 누적 시간이며 기존 대부분의 부식 예측 모형에서도 핵심 독립변수로 사용되었으며, 이 연구에서도 시간에 따른 부식 진행 경향을 반영하기 위한 필수 독립변수로 포함하였다.

해수 온도는 금속의 부식 속도에 가장 직접적인 영향을 미치는 변수 중 하나로, 온도가 상승할수록 금속의 전기 화학적 부식 반응을 가속하며, 계절적 온도 변화 중 특히 여름철에 부식률이 증가하는 경향을 보인다. 이는 온도 상승이 전극 반응의 활성화를 촉진하여 부식 속도를 증가시키기 때문이다. 염분(salinity)의 농도 증가는 전해질의 전도도를 높여 부식 반응을 촉진하며, 특히 해수 내 염화물 이온은 부동태를 파괴하여 국부부식을 촉진한다. 수소이온농도(pH)는 해수의 산성도를 나타내는 변수로, pH가 낮아질수록(산성화) 금속 표면의 부동태 피막이 불안정해져 쉽게 파괴되며, 부식 전위가 활성 방향으로 이동함에 따라 부식 속도가 증가한다(Chohan et al., 2024).

용존산소량(DO)은 금속이 산화되는데 필요한 전지수용체 역할을 하며, 용존산소량 농도가 높을수록 산화 반응이 활발해져 전반적인 부식 속도가 증가한다. 특히 용존산소량 농도의 불균형은 이종 금속부식을 유도할 수 있으며, 용존산소량이 낮은 혐기성 환경에서는 황산염 환원균(SRB, Sulfate-Reducing Bacteria) 등에 의한 생물학적 부식이 발생할 수 있다(Zhu et al., 2024).

화학적 산소요구량(COD)은 해수 내 유기물 농도를 반영하는 대표 지표로, 유기물은 금속 표면에 흡착되어 미세한 전기화학 반응을 유도하거나, 미생물의 영양원이 되어 미생물 유도 부식(MIC, Microbiologically Influenced Corrosion)을 유발할 수 있다. 따라서 화학적 산소요구량은 해역별 오염도 및 해수 내 부식성 물질 농도의 간접 지표로 활용될 수 있다(Lee et al., 1996).

이 연구에서 사용한 독립변수들은 물리적·화학적 해양 환경 조건과 구조물 부식과의 인과관계에 기반을 두어 선정되었으며, 주성분 분석(PCA)을 통해 주성분을 선별하여 회귀모형의 변수로 대입시키는 방식으로 활용되었다. 각 변수는 해역별 환경 특성을 반영하면서도 부식 현상의 주요 촉매 또는 제어 인자로 작용하였다. 각 해역의 해수 성분은 국립수산과학원에서 발간한 2023년 해양환경 조사 연보를 바탕으로 동해, 서해, 남해 각 8개 항만을

선정하여 실제 함정의 평형수 탱크 두께 감소값 측정 연도(2013년~2021년)와 맞춰 분석 자료로 활용하였다.

최근 기후변화에 관한 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 2021 보고서에 따르면 지난 1880년에서 2020년까지 전 세계 평균 기온은 1.10°C 상승했으며, 이로 인해 해수면 온도 역시 1.03°C 상승하는 기후 온난화 현상이 나타났다. 대한민국의 경우 국립수산과학원에서 발간한 “2022 수산 분야 기후변화 영향 및 연구보고서”에는 1968년부터 2021년까지 동해의 표층 수온은 1.35°C, 서해의 표층 수온은 1.24°C, 남해의 표층 수온은 1.07°C 상승하였다 (National Institute of Fisheries Science, 2022). 온난화 추세는 동해와 남해에서 가장 두드러졌으며 이는 쿠로시오 해류를 통한 열대 태평양의 온난화 영향을 시사한다.

또한 해당 기간 중 해수 표층의 염분 감소율은 증가하고 있으며 특히 서해에서 염분 감소 추세가 가장 두드러졌고 용존산소량(DO) 역시 모든 해역에서 감소했으며 동해에서 가장 많이 감소하였다(Jung, 2008). 수소이온농도의 경우 전 세계적으로 산업혁명 이후 현재까지 약 0.1 pH가 감소 된 것으로 보고되었으며(Caldeira and Wickett, 2003) 지금과 같은 추세로 CO₂가 배출된다면, 2100년까지 약 0.3의 추가적인 pH가 감소 될 것으로 추측되고 있다(Orr et al., 2005).

2.2 주성분 분석(PCA)

이 연구에서는 부식에 영향을 미치는 해양 환경 변수들의 상관관계로 인한 다중공선성 문제를 해결하고, 변수들이 포함된 변동양상을 도출하기 위하여 주성분 분석을 사용하였다.

주성분 분석(PCA, Principal Component Analysis)은 고차원의 다변량 데이터를 저차원 공간으로 투영함으로써 데이터 구조를 더욱 명확하게 파악할 수 있도록 하는 차원 축소 기법이다. 주성분은 원래 변수들의 선형결합으로 정의되며, 전체 데이터의 변동성(분산)을 최대한 보존하도록 새로운 축을 구성한다. 이러한 특성으로 PCA는 변수 간의 중복 정보를 제거하고, 주요 패턴을 직관적으로 해석할 수 있는 통계적 기반을 제공해준다(Omer, 2024).

주성분 분석은 데이터 행렬의 공분산 행렬(covariance matrix) 또는 상관행렬(correlation matrix)에 대한 고유값(eigenvalue) 분해를 통해 수행되며 원래 변수들의 선형결합으로 얻어지는 주성분 중 첫 번째 주성분(PC1)은 가능한 가장 큰 분산과 설명을 차지한다. 두 번째 성분(PC2)은 첫 번째 성분과 직교하면서 가능한 가장 큰 분산을 가져야 한다는 제약 조건에 따라 계산되며 다른 성분들도 같은 방식으로 계산되어 진다(Jin et al., 2021).

2.3 선형 회귀모형 구성

이 연구에서는 관측되지 않은 종속변수의 값을 예측하기 위해 회귀모형을 적용하였는데 회귀모형은 변수들과의 관계를 통계적으로 검증할 수 있다. 부식과 같이 여러 요인이 복합적으로 작용

할 때 회귀모형으로 분석하는 경우 일반적으로 두 개 이상의 독립변수가 종속변수에 영향을 미치게 되며, 이처럼 종속변수의 변화를 설명하기 위해 두 개 이상의 독립변수가 사용되는 선형 회귀모형인 다중 선형 회귀모형을 활용하게 된다(Montgomery et al., 2021). 이 연구에서의 독립변수는 주성분 분석을 통해 도출한 주성분(PC1, PC2)을 선택하였는데 일반적으로 고유값이 1보다 큰 주성분만을 유의미한 요인으로 채택하는 Kaiser 기준(Kaiser, 1960)을 적용하였다. 이 연구의 경우, 독립변수로 고려한 두 주성분이 해역별 전체 변동의 82.8% ~ 96.8%를 나타내고 있다.

두 개의 주성분을 기반으로 식 (1)과 같이 회귀식을 구성하였으며 여기서 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 는 회귀계수이며 ϵ 는 종속변수 Y 의 오차로 분산이 σ^2 으로 일정한 정규분포를 따른다고 가정한다.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 PC1 + \beta_2 PC2 + \epsilon \quad (1)$$

(단, $\epsilon \sim N(0, \sigma^2)$)

2.4 예측 모형의 평가

이 연구에서 제안한 부식 예측 모형의 적합성을 확인하기 위해 선령 25년에서 33년까지의 범위를 대상으로 선행 연구된 모형의 두께 감소 예측값과 이 연구에서 제시한 모형의 두께 감소 예측값을 실제 합정에서 측정한 남해 해역의 평형수 탱크 두께 감소값과 비교하였다. 비교 기준은 통계적으로 많이 사용되는 잔차 제곱합(SSE: Error Sum of Squares)을 사용하였다. 그리고 또 다른 기준은 모형의 상대적 우수성을 평가하는 AIC(Akaike Information Criterion)를 사용하였다(Greene, 2012).

3. 주성분 회귀분석 모형

합정의 평형수 탱크 부식에 영향을 미치는 해양 환경 변수들을 선형 회귀모형의 독립변수로 사용하면 해양 환경 변수들 사이의 상관관계로 인하여 다중공선성 문제가 발생하므로 이를 해결하기 위해 주성분 분석을 사용하였다. 또한 해양 환경 변수인 수온(°C), 염분(psu), pH, DO(mg/L), COD(mg/L)와 선령(year)은 단

위와 스케일이 서로 다르므로, Z-transform을 활용하여 동일한 스케일로 변환한 후 주성분 분석을 수행하였다. 이를 통해 각 변수가 주성분 형성에 불균형한 영향을 미치는 것을 방지하고자 하였다.

Table 2는 해역별 해양 환경 변수에 대한 통계적 요약을 나타낸 표이다. 여기서 각 해역의 해수 온도, 염분(salinity), 수소이온농도(pH) 용존산소량(DO), 화학적 산소요구량(COD)과 선령을 대상으로 주성분 분석을 통해 유효한 주성분을 도출하고 이를 독립변수로 하여 종속변수인 두께 감소 값에 대한 해역별 선형 회귀모형을 구성하였다. 해역별 선형 회귀모형 식의 결정계수(R^2)와 회귀계수에 대한 유의성 검정($P < 0.05$), 분산 팽창 계수(VIF < 10) 값에 대한 검토를 통해 회귀모형의 유의성과 성능을 평가하였다.

3.1 해역별 주성분 분석

해역별 수행한 주성분 분석의 결과인 PC1과 PC2는 선형 식으로 표현되며 동해 해역의 PC1과 PC2는 식 (2)와 식 (3)으로 표현되고, 서해 해역은 식 (4)와 식 (5), 남해 해역은 식 (6)과 식 (7)로 표현된다. 각 식에서 x_1 은 선령, x_2 는 해수 온도, x_3 는 염분, x_4 는 수소이온농도, x_5 는 용존산소량, x_6 는 화학적 산소요구량이다.

$$PC1(East\ sea) = 0.333x_1 + 0.432x_2 - 0.427x_3 + 0.389x_4 - 0.424x_5 + 0.435x_6 \quad (2)$$

$$PC2(East\ sea) = 0.727x_1 + 0.109x_2 + 0.323x_3 - 0.535x_4 + 0.111x_5 + 0.238x_6 \quad (3)$$

$$PC1(West\ sea) = 0.328x_1 + 0.539x_2 + 0.551x_3 + 0.527x_4 - 0.049x_5 + 0.137x_6 \quad (4)$$

$$PC2(West\ sea) = 0.549x_1 - 0.112x_2 - 0.088x_3 - 0.239x_4 + 0.526x_5 + 0.587x_6 \quad (5)$$

Table 2 Statistical summary of seawater environmental variables by sea (2013~2021)

Classification		Temperature(°C)	Salinity(psu)	pH	DO(mg/L)	COD(mg/L)
East sea	Average	16.90	32.88	8.16	8.59	1.44
	Max.	18.08	33.31	8.21	9.21	1.69
	Min.	15.33	31.91	8.12	8.05	1.26
West sea	Average	14.87	30.13	8.05	8.94	1.69
	Max.	16.01	30.84	8.14	9.15	2.20
	Min.	14.20	28.24	8.01	8.66	1.33
South sea	Average	17.50	32.31	8.20	8.65	2.15
	Max.	18.71	32.86	8.27	9.76	2.92
	Min.	16.43	31.54	8.11	8.04	1.21

$$PC1(South\ sea) = 0.504x_1 + 0.498x_2 - 0.331x_3 - 0.431x_4 - 0.132x_5 + 0.431x_6 \quad (6)$$

$$PC2(South\ sea) = 0.241x_1 + 0.224x_2 + 0.598x_3 + 0.474x_4 + 0.283x_5 + 0.479x_6 \quad (7)$$

Table 3 Results of principal component analysis

Classification	PC1(PC2)		
	East	West	South
Eigenvalue	4.974 (0.825)	3.154 (2.167)	3.567 (1.402)
Proportion of variance	0.829 (0.139)	0.526 (0.631)	0.595 (0.234)
Cumulative proportion of variance	0.829 (0.968)	0.526 (0.887)	0.595 (0.828)

분석 결과를 요약한 Table 3은 해역별 주요 주성분의 고유값, 분산 기여도, 누적 기여도를 나타낸다. 동해의 경우 PC1의 분산 기여도는 82.9%로 가장 높았으며, PC2 포함 시 누적 기여도는 96.8%에 달해 대부분의 분산을 설명하였다. 서해의 누적 기여도는 88.7%이며, 남해는 82.8%로 타 해역 대비 다소 낮았다. Table 3으로부터 확인한 누적 기여도는 각 해역에서 주성분이 부식에 영향을 미치는 해수 성분과 선령 정보를 충분히 반영하고 있음을 의미한다.

Fig. 2는 해역별 해수 성분 및 선령 변수를 대상으로 수행한 주성분 분석 결과에서 도출된 주성분 로딩 플롯(Loading plot)이다.

이 플롯은 주성분 방향과 변수 간 상관 구조를 시각화하며 각 로딩 값은 원 변수(선령, 수온, 염분, pH, DO, COD)가 각 주성

분에 얼마나 기여하는지를 나타낸다. 절대값이 클수록 주성분 형성에 해당 변수가 더 큰 영향을 미침을 의미한다. PC1의 주요 변수와 로딩 절대값으로 동해는 해수 온도(0.43), COD(0.43), 염분(0.43)이며 서해는 염분(0.55), 해수 온도(0.54), pH(0.53)이고, 남해는 선령(0.50), 해수 온도(0.50), pH(0.43)이다. PC2의 경우, 동해는 선령(0.73), pH(0.54), 염분(0.32)이며 서해는 COD(0.59) 선령(0.55), DO(0.53)이고, 남해는 염분(0.60), COD(0.48), pH(0.45)이다. 분석 결과 PC1에는 부식에 직접적인 영향을 미치는 주요 인자(해수 온도, pH, 염분)가 포함되어 있으며 PC2에는 선령과 해수의 화학적 성분(DO, COD)이 주로 반영되어 있음을 확인할 수 있다.

3.2 해역별 회귀분석 결과

동해의 경우 선령 27년~30년까지의 데이터를 바탕으로 주성분 분석과 회귀분석을 실행하여 도출된 회귀모형을 선령 32년의 변수 데이터를 대입하여 실제 측정값과 비교하였고, 남해는 선령 26년~31년의 회귀모형을 선령 33년 측정값과 비교하였으며 서해는 선령 25년~32년의 회귀모형을 선령 33년 측정값과 비교하였다. Table 4는 주성분 분석을 통해 도출한 해역별·연도별 주성분을 독립변수로, 각 선령의 평형수 탱크에서 측정된 두께 감소값 중 상위 3개 값을 종속변수로 설정하여 평형수 탱크 격벽의 두께 감소 예측 모형을 만들었다.

Fig. 3은 해역별(동해, 서해, 남해) 선령 증가에 따른 평형수 탱크 격벽(Plate)의 실제 측정된 두께 감소값을 나타낸 그래프이다.

전반적으로 선령이 증가함에 따라 두께 감소값이 점진적으로 증가하는 추세를 보이며, 특히 남해의 두께 감소값이 서해와 동

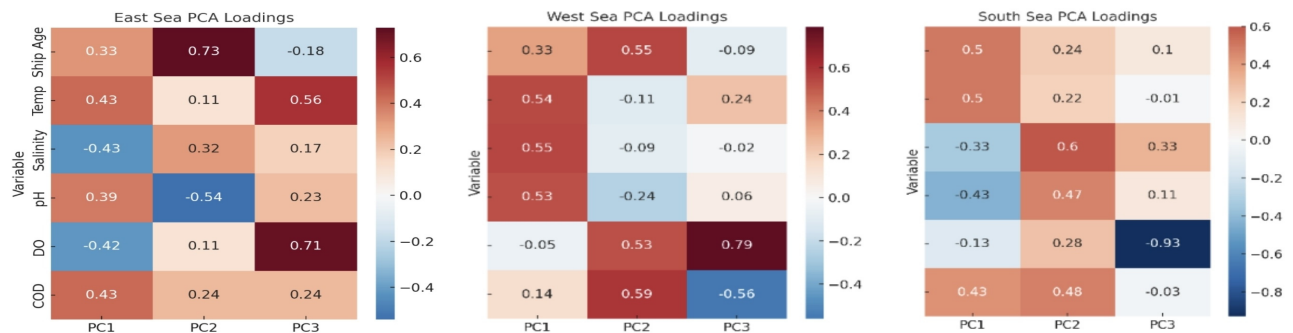


Fig. 2 PCA loading plot (East, West and South seas)

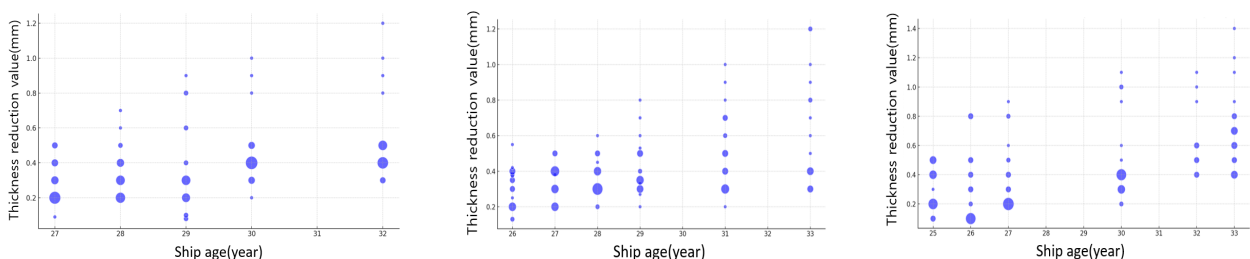


Fig. 3 Plate thickness reduction measurement value (East, West and South seas)

Table 4 Principal component values by ship age and sea

Ship Age (Year)	PC1(PC2)		
	East	West	South
25	-	-	-2.3160 (-0.2602)
26	-	-1.7853 (-1.3827)	-0.4433 (-1.8694)
27	-1.8281 (-0.8037)	-0.9824 (-0.5128)	-1.0447 (1.3245)
28	-2.2560 (0.3057)	-0.7754 (0.5749)	-
29	2.8986 (-0.7996)	3.1447 (0.6995)	-
30	1.1854 (0.9215)	-	0.7320 (1.0753)
31	-	0.3985 (2.5037)	-
32	1.1875 (2.2491)	-	3.0750 (-0.2702)
33	-	2.4574 (1.4555)	2.7555 (1.0493)

Table 5 ANOVA result for the corrosion prediction model (East sea)

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	0.40872	0.20436	15.59	0.001
PC1	1	0.23858	0.23858	18.21	0.002
PC2	1	0.17013	0.17013	12.98	0.006
Error	9	0.11795	0.01311		
Lack-of-Fit	1	0.01128	0.01128	0.85	0.385
Pure Error	8	0.10667	0.01333		
Total	11	0.52667			

Table 6 ANOVA result for the corrosion prediction model (West sea)

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	0.53761	0.268805	30.32	0.000
PC1	1	0.24163	0.241634	27.25	0.000
PC2	1	0.29598	0.295977	33.38	0.000
Error	12	0.10639	0.008866		
Lack-of-Fit	2	0.03306	0.016528	2.25	0.156
Pure Error	10	0.07333	0.007333		
Total	14	0.64400			

해에 비해 큰 값을 나타내고 있다.

탱크 격벽에 대한 회귀분석 결과로 아래 제시된 식 (8), 식 (9), 식 (10)은 동해/서해/남해의 두께 감소 예측값(\hat{Y}_1 , \hat{Y}_2 , \hat{Y}_3)을 독립변수인 주성분 PC1과 PC2를 이용하여 구한 선형 회귀모형 식이다. 해역별 회귀모형의 회귀계수인 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 의 추정값은 최소제곱법을 통해 도출하였다. 아울러 해역별 회귀모형은, Minitab statistical software (Minitab, 2024)를 이용하여 수행한 Table 5, Table 6, Table 7의 분산분석(ANOVA: Analysis of

Table 7 ANOVA result for the corrosion prediction model(South sea)

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	0.76186	0.38093	17.99	0.000
PC1	1	0.58496	0.58496	27.62	0.000
PC2	1	0.17690	0.17690	8.35	0.014
Error	12	0.25414	0.02118		
Lack-of-Fit	2	0.03414	0.01707	0.78	0.486
Pure Error	10	0.22000	0.02200		
Total	14	1.01600			

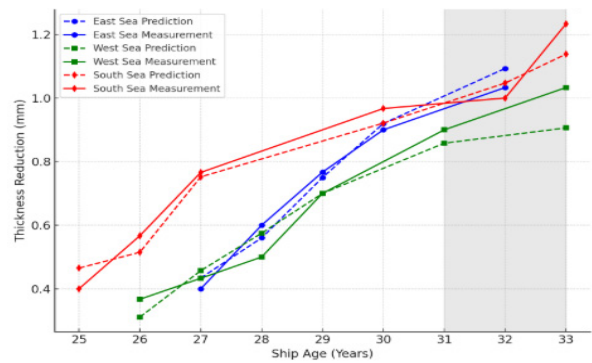


Fig. 4 Predicted and measured thickness reduction values by ship age (East, West and South seas)

Variance) 결과를 통해 유의수준 5%에서 유의함을 알 수 있다. 해역별 회귀모형 식의 결정계수(R^2)는 동해 77.6%, 서해 83.5%, 남해 75.0%이며, VIF(Variance Inflation Factor)도 1.0으로 다중공선성 문제도 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

$$\hat{Y}_1 = 0.667 + 0.0660 \times PC1 + 0.1361 \times PC2 \quad (8)$$

$$\hat{Y}_2 = 0.580 + 0.0738 \times PC1 + 0.0993 \times PC2 \quad (9)$$

$$\hat{Y}_3 = 0.740 + 0.1082 \times PC1 + 0.0949 \times PC2 \quad (10)$$

Fig. 4는 모든 해역의 선령별 탱크 격벽의 실제 측정값과 부식 예측 모형을 이용하여 예측한 값을 나타낸 그래프이며, 해역별로 구축된 주성분 회귀모형의 예측 성능을 평가하기 위하여 회귀식 도출에 사용된 학습데이터(동해: 선령 27년~32년, 서해: 선령 25년~31년, 남해: 선령 25년~32년)와 마지막 측정 연도의 검증 데이터(동해: 선령 32년, 서해: 선령 33년, 남해: 선령 33년)를 분리하여 비교한 결과를 나타낸다. 각 해역의 마지막 선령 데이터는 PCA 및 회귀모형 구축 과정에 포함되지 않은 독립 데이터이며, 이에 해당하는 PC1과 PC2의 값을 회귀식에 대입하여 산출한 예측값과 실제 측정값을 비교하였다.

측정값의 경우 평형수 탱크에서 측정된 두께 감소값 중 선별한 상위 3개의 두께 감소값 평균으로 나타내었다.

그래프에 비교 결과를 나타내기 위해, 함정의 두께가 측정된

Table 8 Selected corrosion prediction models for comparison

Classification	Corrosion prediction model
Paik et al. (2003)	<ul style="list-style-type: none"> • $T_r = C_1(T - T_C)$ • T_r : Corrosion depth(mm) • T : Ship age(Year) • T_C : Coating life(10 Year) • C_1 : Coefficient(0.0579)
Garbatov and Guedes (2009)	<ul style="list-style-type: none"> • $d(t) = d_{\infty}(1 - e^{-(t-\tau_c/\tau_t)})$ • $d(t)$: Corrosion depth at t(mm) • d_{∞} : Long term corrosion depth (1.85mm) • t : Ship age(Year) • τ_c : Coating life(10.54 Year) • τ_t : Transition time(17.54)
Landolfo et al. (2010)	<ul style="list-style-type: none"> • $d(t) = r_{av} \times t \times r_{lin} \times (t - 10)$ • $d(t)$: Corrosion depth(μm) • r_{av} : average corrosion rate(27μm) • r_{lin} : steady state corrosion rate(16μm) • t : Exposure time(Year) ($t > 10$)
Kim et al. (2020)	<ul style="list-style-type: none"> • $D_C = A(t_e) \cdot [(-\ln(1 - CDF))]^{\frac{1}{B(t_e)}}$ • D_C : Corrosion depth(mm) • t_e : Exposure Time(Year) • $A(t_e)$: Scale Parameter (0.0004te³-0.0248te²+0.4793te-2.381) • $B(t_e)$: Shape Parameter (0.002te³-0.0994te²+1.5604te-6.0025) • CDF : 0.5

연도에 해당하는 해역별 해양 환경 변수의 값을 대응시켜 선령과 환경변수가 같은 시점의 값을 가질 수 있도록 하였다. 이 과정을 통해 같은 시점의 선령과 해양 환경 변수의 값을 확보하였으며, 이를 바탕으로 부식이 진행된 선령의 해양 환경 조건을 고려한 주성분 값을 도출하였다.

함정의 두께가 측정된 연도에 해당하는 해역별 해양 환경 변수의 값을 이용하여 산출된 주성분(PC1, PC2) 값을 해역별 회귀모형 식에 대입하여 두께 감소 예측값(\hat{y})을 도출하였으며, 그래프의 색칠된 부분은 해역별 마지막 두께 측정을 한 연도의 측정값과 예측값의 차이를 비교한 결과를 나타낸 것이다. 동해의 마지

막 두께 측정 연도의 PC1(1.8175)과 PC2(2.2491)를 회귀모형 식 (8)에 대입한 결과 부식 예측값은 1.093mm로 실제 측정값인 1.033mm 대비 0.06mm 큰 값을 나타냈고, 서해의 마지막 두께 측정 연도의 PC1(2.4574)과 PC2(1.4555)를 식 (9)에 대입한 결과 부식 예측값은 0.905mm로 실제 측정값인 1.033mm 대비 0.128mm 작은 값을 나타냈다. 남해의 마지막 두께 측정 연도의 PC1(2.7555)과 PC2(1.0493)를 식 (10)에 대입한 결과 부식 예측값은 1.137mm로 실제 측정값인 1.233mm 대비 0.096mm 작은 값을 나타내었는데 연구에서 구축한 회귀모형이 학습 데이터 외에 독립된 검증 데이터에서도 안정적인 예측 결과를 나타냈다.

4. 부식 예측 모형의 비교

다양한 부식 예측 모형 중에서 Paik et al. (2003) 등 4개의 선행 연구 모형을 Table 8과 같이 선별하여 이 연구의 부식 예측 모형과 비교하였다. 이 연구에서 제안한 부식 예측 모형의 적합성을 확인하기 위해 선령 25년에서 33년까지 선행 연구된 모형의 예측값과 이 연구 모형의 예측값을 남해 해역 함정의 평형수 탱크에서 측정된 두께 감소값을 대상으로 비교하였다. 모형 적합도 비교 기준은 잔차 제곱합(SSE)과 Akaike Information Criterion (AIC) 이다.

선행 연구된 부식 예측 모형은 일반화된 관계식 또는 경험적 모형의 형태로 제시되어 있으며 통계적 추론을 통한 파라미터 추정 단계가 포함되어 있지 않다. 그러나 이 연구에서 제안한 부식 예측 모형은 통계적 접근 방식을 이용한 선형 회귀모형을 구축하여 활용하였다. 또한 선행 연구 부식 모형은 상선 데이터를 기반으로 한 것과 달리 이 연구에서는 해군 함정의 실측 데이터를 기반으로 하였다. 모형의 적합성 비교는 선령 범위가 가장 넓은 남해 해역의 격벽 두께 감소 데이터를 기준으로 하였다. 남해의 경우, 선령 28년과 29년, 31년에는 실제 두께 측정이 수행되지 않아 실측값이 없으므로 선형 보간법(Linear Interpolation)을 이용하여 결측값(Missing value)을 추정하였으며 부식 예측 모형의 예측값과 함께 Table 9에 표기하였다. Fig. 5의 부식 예측 모형별 그래프 분석 결과 Weibull 분포를 적용한 Kim et al. (2020) 모형

Table 9 Thickness reduction values by ship age between corrosion prediction models(South sea)

Ship Age (Year)	South Sea Actual Value(mm)	Proposed model (mm)	Paik model (mm)	Garbatov model (mm)	Kim model (mm)	Landolfo model(mm)
25	0.400	0.464	1.234	1.038	0.311	0.510
26	0.567	0.514	1.316	1.083	0.307	0.526
27	0.767	0.752	1.399	1.126	0.316	0.542
28	(0.833)	0.808	1.481	1.166	0.339	0.558
29	(0.900)	0.864	1.563	1.204	0.380	0.574
30	0.967	0.921	1.646	1.240	0.440	0.590
31	(1.000)	0.984	1.728	1.273	0.522	0.606
32	1.033	1.047	1.810	1.305	0.628	0.622
33	1.233	1.137	1.892	1.335	0.761	0.638

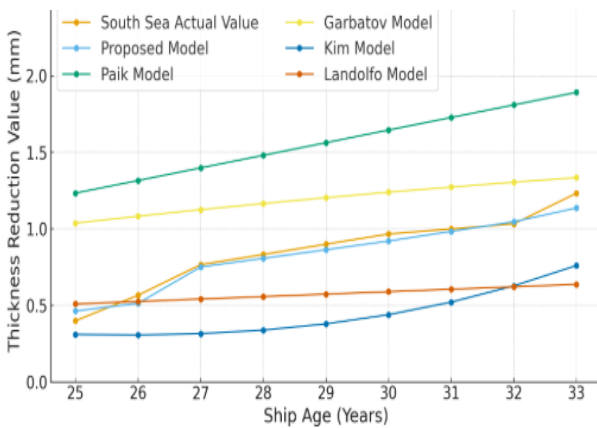


Fig. 5 Thickness reduction values comparison graph

Table 10 SSE and AIC values of corrosion prediction models compared

Model	SSE	AIC
Proposed model	0.0208	-48.6151
Paik et al. (2003) model	4.5493	-4.1494
Garbatov and Guedes (2009) model	1.2414	-13.8468
Kim et al. (2020) model	1.6848	-11.0718
Landolfo et al. (2010) model	1.0672	-15.1946

을 제외하고 나머지 모형들은 일정한 선형을 나타냈다. Paik et al. (2003) 모형과 Garbatov and Guedes (2009) 모형은 실제 측정값보다 높은 수치의 예측값을 나타냈으며 Landolfo et al. (2010) 모형과 Kim et al. (2020) 모형은 실제 측정값보다 낮은 수치의 예측값을 나타냈다.

각 모형의 격벽 부식 예측의 적합도를 판단하기 위하여 각 모형에서 예측한 두께 감소 값과 남해 해역의 탱크에서 측정된 평균 두께 감소 값의 잔차 제곱합(SSE)을 사용하였다. 잔차 제곱합(SSE) 식은 식 (11)과 같으며 y_i 는 실제 관측값, \hat{y}_i 는 회귀모형에 의해 예측된 값이며 n 은 전체 관측치의 개수이다.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (11)$$

남해 해역의 데이터를 이용하여 선형 연구된 모형과 이 연구에서 제시한 모형의 잔차 제곱합과 AIC값을 계산한 결과는 Table 10과 같다. 남해 해역을 중심으로 모형의 비교 분석을 수행한 이유는, 남해 해역의 경우 두께 감소 값의 측정 기간이 타 해역보다 길어서 부식의 경향을 비교 분석하는 데에 유리하며 동시에 남해 해역의 데이터를 활용한 선형 회귀모형 식의 결정계수(R^2)가 75%로 동해(77.6%)나 서해(83.5%) 해역보다 낮게 나타나므로 더 보수적인 조건에서 이 연구에서 제시한 모형을 평가할 수 있기 때문이다.

잔차 제곱합의 값을 비교한 결과 이 연구에서 제시한 모형의 값이 0.0208로 가장 낮을 뿐만 아니라 남해 해역의 평형수 탱크

에서 실제 측정된 두께 감소 값에 근접한 예측치를 보였다. 선형 연구된 예측 모형 중에서는 Landolfo et al. (2010) 모형이 다른 예측 모형 대비 남해 해역의 측정된 두께 감소 값에 가장 근접하였고 Paik et al. (2003) 모형은 실제 측정된 두께 감소 값과 가장 큰 차이를 나타냈다.

AIC를 이용한 부식 예측 모형의 적합도는 AIC 값이 낮을수록 모형의 설명력이 높고 통계적으로 더 우수한 것으로 평가된다. AIC의 공식은 식 (12)와 같고, RSS(Residual Sum of Square)는 잔차 제곱합이며 n 은 표본의 개수, k 는 모형 내 추정된 파라미터의 수로 회귀계수의 개수를 의미한다.

$$AIC = n \cdot \ln\left(\frac{RSS}{n}\right) + 2k \quad (12)$$

AIC 계산 결과 이 연구에서 제시한 모형의 값이 -48.6151로 다른 선형 연구된 부식 예측 모형보다 낮음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 제안된 모형이 가장 높은 적합도를 지니고 있음을 시사하며 다른 모형들에 비해 통계적으로도 우수한 성능을 가지고 있음을 뜻한다.

5. 결론

이 연구에서 상선을 대상으로 한 부식 모형이 해군 함정의 운용 특성과 구조적 조건의 차이로 인해 직접 적용하기에 적합하지 않다는 연구 결과를 바탕으로 해군 함정 평형수 탱크 격벽의 부식 예측값을 잘 설명하기 위한 예측 모형을 개발하였다. 부식에 영향을 미치는 해양 환경 변수 간의 상관관계로 인한 다중공선성 문제를 해결하고, 변수들의 내재 된 변동 양상을 도출하기 위하여 주성분 분석을 사용하였다. 또한 관측되지 않는 종속변수의 값을 예측하기 위해 변수들과의 관계를 통계적으로 검증할 수 있는 회귀모형을 적용 하였다.

예측 모형 개발을 위해 실제 함정에서 수집된 정량적인 탱크 두께 측정 데이터와 해역별 해수 성분과 선령을 변수로 고려한 주성분을 선형회귀 모형의 독립변수로 적용하였고, 독립변수 선정 시에는 선령과 함께 다양한 해수 성분 중 평형수 탱크의 부식 진행과 관련성이 높은 해수 온도, 염분(salinity), 수소이온농도(pH) 용존산소량(DO), 화학적 산소요구량(COD)을 포함하였다. 주성분 분석 결과 두 개의 주성분(PC1, PC2)으로 해역별 선형 회귀모형을 구성했으며 이 연구에서 제시한 주성분 회귀모형과 선형 연구된 4개의 부식 예측 모델을 남해 해역의 실제 두께 감소 값과 비교하였다. 비교 기준은 통계적으로 많이 사용되는 잔차 제곱합(SSE)과 AIC를 사용하였다. 비교 결과 이 연구에서 제안된 예측 모형이 남해 해역의 실제 두께 감소 값에 가장 근접한 예측치를 보이면서 통계적으로 가장 우수함을 증명하였는데 이처럼 연구에서 제시한 모델의 예측 성능이 뛰어난 것은 활동 해역의 환경 요인의 반영과 실제 함정의 평형수 탱크 실측 데이터를 기반으로 회귀계수를 도출하였기 때문으로 판단된다. 반면에, 일반 상선의 경우와 같이 선박의 운항 조건과 노출되는 해역 환경

특성이 다양하여 함정의 경우와 차이가 나는 경우는 기존의 상선을 대상으로 한 선행 연구 모델이 더 적합할 수도 있을 것이다.

이 연구는 실제 함정이 활동하는 해역의 해수 성분을 부식 모형에 적용함으로써 해역에 따른 부식 진행의 차이를 연구 결과를 통해 제시하였다. 아울러 제시한 부식 예측 모형으로 평형수 탱크의 쇠모 한도 도달 시기를 예측함으로 탱크의 검사와 정비계획 수립에 기여될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2025년도 국립창원대학교 중견 교원 연구 지원 사업 연구비에 의하여 연구되었음.

References

- Bozali, O.K., Ince, S.T., Demir, O., 2022. A temperature and time dependent corrosion wastage model for seawater ballast tank structures of ships, *International Graduate Research Symposium(IGRS'22)*, Istanbul, Türkiye, 21–23 June 2022.
- Caldeira, K. and Wickett, M.E., 2003. Anthropogenic carbon and ocean pH, *Nature*, 425(6956), pp.365.
- Chohan, I.M., Ahmad, A., Sallih, N., Bheel, N., Salilew, W.M., and Almaliki, A.H., 2024. Effect of seawater salinity, pH, and temperature on external corrosion behavior and microhardness of offshore oil and gas pipeline: RSM modelling and optimization, *Scientific Reports*, 14(1), no.16543.
- International Organization for Standardization (ISO), 1992. *ISO 9224: Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Guiding values for the corrosivity categories*. Geneva, Switzerland.
- Garbatov, Y., and Guedes Soares, C., 2009. Structural maintenance planning based on historical data of corroded deck plates of tankers, *Reliability Engineering and System Safety*, 94(11), pp.1806–1817.
- Garbatov, Y., Guedes Soares, C. and Zayed, A., 2018. Corrosion degradation of ship hull steel plates accounting for local environmental conditions, *Ocean Engineering*, 163, pp.299–306.
- Greene, W.H., 2012. *Econometric analysis*. 7th ed. Pearson Education, Upper Saddle River, NJ, USA.
- Gudze, M.T. and Melchers, R.E. 2008. Operational based corrosion analysis in naval ships. *Corrosion Science*, 50 (12), pp.3296–3307.
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, 2021. *Climate change 2021: The physical science basis. summary for policymakers*, Working Group I, Sixth Assessment Report.
- Jin, Y.H., Ji, S.H. and Han, K.H., 2021. Time series data analysis and prediction system using PCA, *Journal of the Korea Convergence Society*, 12(11), pp.99–107.
- Jung, S., 2008. Spatial variability in long term changes of climate and oceanographic conditions in Korea, *Journal of Environmental Biology*, 29(4), pp.519–529.
- Kaiser, H.F., 1960. The application of electronic computers to factor analysis, *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), pp.141–151.
- Kim, D.K., Lim, H.L., and Cho, N.K., 2020. An advanced technique to predict time-dependent corrosion damage of onshore, offshore, nearshore and ship structures : Part II – Application to the ship's ballast tank, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 12, pp.645–656.
- Kim, W.B., Paik, J.K., Iwata, M., and Yajima, H. (2006). Fatigue strength evaluation of rusting decayed hull steel plate in air and in artificial seawater condition. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(4), pp.467–475.
- Korea Marine Environment Management Corporation (KOEM), 2024. *Annual report on marine environment monitoring in Korea 2023*. Seoul, Republic of Korea: Korea Marine Environment Management Corporation.
- Landolfo, R., Cascini, L., and Portioli, F., 2010. Modeling of metal structure corrosion damage: A state of the art report. *Sustainability*, 2(7), pp.2163–2175.
- Lee, Y.D., Ryu, S.K. and Kim, Y.H., 1996. Microbially influenced corrosion of stainless steels, *Corrosion Science and Technology*, 25(2) pp.249–258.
- Melchers, R.E. 1998. Probabilistic modelling of immersion marine corrosion. *Structural safety and reliability*, 3, pp.1143–1149.
- Melchers, R.E. 2014. Long-term immersion corrosion of steels in seawaters with elevated nutrient concentration. *Corrosion Science*, 84, pp.229–237.
- Minitab, LLC. 2024, *Minitab statistical software, Version 21*, State College, PA: Minitab, LLC.
- Montgomery, D.C., Peck, E.A. and Vining, G.G., 2021. *Introduction to Linear Regression Analysis, 6th ed.*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA.
- National Institute of Fisheries Science (NIFS), 2022. *Annual report for climate change trends in fisheries*. Busan, Republic of Korea.
- Noor, N.M., Smith, G.H. and Yahaya, N. 2007. The Weibull time-dependent growth model of marine corrosion in seawater ballast tank. *Malaysian Journal of Civil*

- Engineering*, 19(2), pp.142–155.
- Omer, F.M., 2024. Application of principal component analysis to vehicle sales: *Case Study at IBM Company, Zanco Journal of Humanity*, 28(1), pp.219–237.
- Orr, J.C., Fabry, V.J. and Aumont, O., 2005. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organism, *Nature*, 437(7059), pp.681–686.
- Paik, J.K., and Park, Y.E. 1998. A probabilistic corrosion rate estimation model for longitudinal strength members of tanker structures. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 35(2), pp.83–93.
- Paik, J., Lee, M., Hwang, S. and Park, Y. 2003. A time dependent corrosion wastage model for the structures of single and double hull tankers and FSOs and FPSOs. *Marine Technology*, 40(3), pp.201–217.
- Paik, J.K., Thayamballi, A.K., Park, Y.I., and Hwang, J.S. 2004. A time-dependent corrosion wastage model for seawater ballast tank structures of ships. *Corrosion science*, 46(2), pp.471–486.
- Paik, J.K., and Kim, D.K., 2012. Advanced method for the development of an empirical model to predict time dependent corrosion wastage. *Corrosion Science*, 63, pp.51–58.
- Park, S.W., and Lee, H.M. 2013. Design of hull residual life prediction system considering corrosion and coating. *Journal of the society of naval architects of Korea*, 50(2), 104–110.
- Qin, S. and Cui, W. 2003. Effect of corrosion models on the time-dependent reliability of steel plated elements. *Marine Structures*, 16(1), pp.15–34.
- Southwell, C.R., Bultman, J.D., Hummer, C.W., and Schumacher, M. 1979. Estimating service life of steel in seawater. *Seawater corrosion handbook*, pp.374–387.
- Soares, C.G., and Garbatov, Y. 1999. Reliability of maintained, corrosion protected plates subjected to non-linear corrosion and compressive loads. *Marine structures*, 12(6), pp.425–445.
- Yamamoto, N., Ikegami, K. 1998. A study on the degradation of coating and corrosion of ship's hull based on the probabilistic approach. *Offshore Mechanism and Arctic Engineering*, 120(3), pp.121–128.
- Zhu, Y., Wang, J., Liu, H., Ren, P., and Yan, F. 2024. Effect of dissolved oxygen content on tribo-corrosion behavior of monel 400 alloy in seawater. *Metals*, 14(1), pp.6.

Authorship Contribution Statement

Nam Kyoung Won: Writing-original draft, Investigation, Data curation, Conceptualization, Methodology, Visualization, Software, Formal Analysis; **Sang Boo Kim:** Supervision, Funding acquisition, Project administration, Methodology, Validation, Writing-review & editing.

