



유전 알고리즘을 이용한 9,400 TEU 컨테이너 선박 주위의 방향파 스펙트럼 모수 추정

송우선·손재현·김유일[†]
인하대학교 조선해양공학과

GA-Based Parametric Estimation of Directional Wave Spectrum Around a 9,400 TEU Container Ship Using Full-Scale Measurement Data

Wuseon Song·Jaehyeon Son·Yooil Kim[†]
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, INHA University

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.

The structural integrity of ships and offshore structures is a critical aspect of maritime engineering, as these structures are continuously subjected to complex and uncertain ocean wave loads. Accurately estimating the directional wave spectrum is essential for understanding the wave-induced responses of ships and ensuring their long-term structural performance. In this study, we propose a parametric estimation method for the directional wave spectrum using the wave buoy analogy concept, where a ship's response is utilized similarly to a wave buoy. The wave model employed is a 10-parameter bimodal wave spectrum, which effectively represents both long and short-wave components. A genetic algorithm is used to optimize the estimation by minimizing the error between the measured and predicted response spectrum. To validate the proposed methodology, we applied it to full-scale measurement data obtained from a 9,400 TEU container ship. The estimated wave spectrum was compared with WaMoS data to assess the accuracy and reliability of the method. The results indicate that the proposed approach effectively estimates the directional wave spectrum while accounting for uncertainties in the response data, demonstrating its feasibility for practical wave spectrum estimation in real operational conditions.

Keywords : Directional wave spectrum(방향파 스펙트럼), Parametric estimation(모수 추정), Genetic algorithm(유전 알고리즘)

1. 서론

선박의 구조적 안전성은 설계 인자뿐만 아니라 해상에서 발생하는 환경 하중과 같은 불확실성 요소에 크게 영향을 받는다. 이러한 불확실성은 설계 초기 단계에서 정량적으로 반영하기 어려우며, 이에 따라 일반적으로 안전율(safety factor) 개념이 도입되어 왔다. 특히 International Association of Classification Societies (IACS)의 공통구조규칙(Common Structural Rules)의 도입 이후 설계는 더욱 보수적인 방향으로 변화하였다 (IACS, 2024).

전산역학 기법의 발전으로 실제 해상 조건을 반영한 수치 해석 기반 구조 평가가 가능해졌지만, 선박이 운항 중 경험하는 모든 파랑 조건을 고려하기에는 여전히 한계가 존재한다. 이에 따라 최근에는 디지털 트윈(digital twin) 기술이 구조건전성 관리 (Structural Health Monitoring, SHM)를 위한 유망한 해결책으로

주목받고 있다. 디지털 트윈은 수학적 설계 모델과 실측 데이터를 융합하여 구조물의 상태를 실시간으로 평가할 수 있는 기술로, 선박과 같은 복잡한 구조물의 상태 모니터링 및 유지보수 전략 최적화에 효과적으로 활용될 수 있다.

선체 구조의 무결성을 실질적으로 유지하기 위해서는 외부 하중의 주요 원인인 방향파 스펙트럼(directional wave spectrum)을 정확히 추정하는 것이 필수적이다. 방향파 스펙트럼 정보를 기반으로 파랑에 따른 구조 응답을 예측할 수 있으며, 이를 통해 피로 손상 평가 및 유지보수 계획 수립이 가능하다.

초기 연구로는 Iseki and Ohtsu (2000)가 조우 주파수를 고려한 베이지안 모델을 제안하였으며, 이후 Saito et al. (2000), Maeda et al. (2001), Masuda et al. (2001) 등의 연구를 통해 비모수적 방법과 비선형 최소제곱법 기반의 기법이 발전하였다. Tannuri et al. (2003)은 응답 진폭 전달함수(Response

Amplitude Operator, RAO)의 민감도 및 비선형 효과가 추정 정확도에 미치는 영향을 분석하였다. 이후 칼만 필터 기반의 오차 보정 기법 (Nielsen, 2006; Pascoal et al., 2017), 유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)을 활용한 비선형 최적화 (Chen et al., 2020), 베이지안 추론 기반의 RAO 보정 (Mas-Soler and Simos, 2020), 베지에 곡면 및 L1 최적화 기법 (Ren et al., 2021) 등이 제안되었다.

최근에는 실선 계측 데이터를 활용한 추정 연구가 활발히 수행되고 있다. 대표적으로는 비 모수적 응답 기반 방법 (Lee and Kim, 2022), CNN 기반 베이지안 추론 (Nielsen et al., 2023), 위너 필터링을 접목한 실시간 칼만 필터링 (Kim et al., 2023), MCMC 기반의 확률론적 추정 (Park and Kim, 2024), 디지털 트윈 기반의 미계측 응답 예측 (Son and Kim, 2024) 등이 있다.

본 연구에서는 운항 중인 선박을 하나의 부이로 간주하고, 계측된 응답 데이터를 기반으로 선체 주변의 방향파 스펙트럼을 역추정하는 방법을 제안한다. 방향파 스펙트럼은 10개의 파라미터로 정의된 함수 형태로 가정되며, 이를 전달함수와 결합하여 선박 응답을 계산한 뒤, 실제 계측 응답과 비교하여 오차를 최소화하는 비선형 최적화 문제로 정식화하였다. 최적화는 GA를 이용해 수행되었으며, 실제 9,400TEU급 컨테이너 선박의 계측 데이터를 활용하여 제안 기법의 유효성을 검증하였다. 아울러, 추정된 방향파 스펙트럼은 레이더 기반 파랑 계측 시스템인 WaMoS (Wave Monitoring System)의 관측 결과와 비교하여 정확도를 평가하였다.

2. 이론적 배경

2.1 방향파 스펙트럼

방향파 스펙트럼은 파도의 주파수와 입사 방향에 따라 분포된 에너지를 나타내는 함수로, 해양 구조물이나 선박에 작용하는 파랑 하중을 정확히 평가하기 위한 핵심 요소이다. 본 연구에서는 식(1)과 같이 장파와 단파를 동시에 표현 가능한 10개 파라미터 이중 봉우리 파 스펙트럼 (10 parameter bimodal wave spectrum)을 사용하였다 (Tannuri et al., 2003).

$$E(\omega, \theta) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^2 \left(\frac{4\lambda_i + 1}{4} \omega_{p,i}^4 \right)^{\lambda_i} \frac{H_{s,i}^2}{\omega^{4\lambda_i + 1}} A(s_i) \cdot \cos^{2s_i} \left(\frac{\theta - \theta_{mean,i}}{2} \right) \exp \left[-\frac{4\lambda_i + 1}{4} \left(\frac{\omega_{p,i}}{\omega} \right)^4 \right] \quad (1)$$

H_s 는 유효 파고(significant wave), λ 는 형상 모수(shape parameter), θ_{mean} 은 파도의 평균 입사 방향(mean wave direction), ω_p 는 피크 주파수(angular peak frequency)이며 s 는 확산 모수(spreading parameter)를 의미한다. $A(s)$ 는 정규화 계수로 식

(2)로 정의된다.

$$A(s) = \frac{2^{2s-1} \Gamma^2(s+1)}{\pi \Gamma(2s+1)} \quad (2)$$

이 함수는 $\cos^{2s}$ 곡선의 면적을 정규화하기 위한 역할을 하며, 또한, 확산 모수 s 가 최댓값을 갖고, ω 가 ω_p 보다 크거나 작을 경우 s 가 감소하도록 식 (3)과 같이 정의된다 (Goda, 2000).

$$s = \begin{cases} \text{ceil} \left[\left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^5 s_{\max} \right], & \omega \leq \omega_p \\ \text{ceil} \left[\left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-2.5} s_{\max} \right], & \omega > \omega_p \end{cases} \quad (3)$$

여기서 $\text{ceil}[\cdot]$ 함수는 입력값을 근접한 정수로 반올림하는 수 치적 테크닉이다.

2.2 비선형 최적화 문제 구성

파랑과 선박의 응답이 선형적으로 관련된다고 가정할 경우, 선박의 운동 응답 스펙트럼과 방향파 스펙트럼은 RAO를 통해 서로 연계될 수 있다. 특히, 두 응답 간의 교차 스펙트럼은 각 응답의 RAO와 방향파 스펙트럼 간의 함수적 관계로 표현된다. 방향파 스펙트럼을 $E(\omega, \beta)$, 응답 간의 교차 스펙트럼을 $S_{ij}(\omega)$, 그리고 응답 i, j 에 대한 RAO를 각각 $H_i(\omega, \beta), H_j(\omega, \beta)$ 라고 하면, 이 관계는 식(4)처럼 표현할 수 있다.

$$S_{ij}(\omega) = \int_{-\pi}^{\pi} H_i(\omega, \beta) H_j^*(\omega, \beta) E(\omega, \beta) d\beta \quad (4)$$

여기서 $H_j^*(\omega, \beta)$ 는 $H_j(\omega, \beta)$ 의 켤레 복소수이며, β 는 선박의 진행 방향과 파 방향 사이의 상대 각이다.

방향파 스펙트럼이 파 주파수 ω_0 에서 정의될 경우, 실제 계측 응답은 조우 주파수 ω_e 에서 측정되므로, 두 주파수 간의 변환이 필요하다. 에너지 보존 법칙에 따라 주파수 변환 관계는 식(5)와 같다.

$$S_0(\omega_0) = S_e(\omega_e) \left| \frac{d\omega_0}{d\omega_e} \right| \quad (5)$$

여기서 선박이 전진 속도 U 를 가지는 경우, 도플러 효과로 인해 ω_e 와 ω_0 간의 변환은 식(6)과 같은 관계를 갖는다.

$$\omega_e = \omega_0 - \omega_0^2 A, \quad A = \frac{U}{g} \cos \beta \quad (6)$$

이러한 변환은 주파수 간 비선형성을 유발하며, 특히 선미파 조건에서는 하나의 조우 주파수가 세 개의 서로 다른 파 주파수에 대응하는 1:3 관계를 가질 수 있다. 이때, 각 파 주파수의 기여를 고려하여 조우 주파수 영역의 스펙트럼은 식(7)과 같이 표현된다.

$$S_e(\omega_e) = \sum_{k=1}^3 S_0(\omega_{0,k}) \left| \frac{d\omega_0}{d\omega_e} \right|_{\omega_{0,k}} \quad (7)$$

모수 추정 방법은 방향파 스펙트럼을 추정하고, 이를 기반으로 계산된 예측 응답 스펙트럼과 실제 계측 응답 스펙트럼 간의 오차를 최소화하는 방식으로 수행된다. 이때 RAO를 기반으로 예측 응답 스펙트럼을 계산하며, 조우 주파수와 파 주파수 간의 비선형 관계를 고려하여야 한다. 특히 선미파 조건에서는 하나의 조우 주파수에 복수의 파 주파수가 대응되므로, 이를 반영한 계산이 필요하다. 조우 주파수 영역에서의 예측 응답 스펙트럼 $\hat{S}_{e,ij}(\omega_e)$ 는 식 (8)로 정의된다.

$$\hat{S}_{e,ij}(\omega_e) = \begin{cases} \left[\sum_{k=1}^3 \left\langle \int_{-\pi}^{\pi} H_i(\omega_{0,k}, \beta) H_j^*(\omega_{0,k}, \beta) \cdot E(\omega_{0,k}, \beta) \left| \frac{d\omega_0}{d\omega_e} \right|_{\omega_{0,k}} d\beta \right\rangle \right]_{\omega_e}, & \omega_e < \frac{1}{4A} \\ \left[\int_{-\pi}^{\pi} \left\langle H_i(\omega_{0,k}, \beta) H_j^*(\omega_{0,k}, \beta) \cdot E(\omega_{0,k}, \beta) \left| \frac{d\omega_0}{d\omega_e} \right|_{\omega_{0,k}} d\beta \right\rangle \right]_{\omega_e}, & \omega_e > \frac{1}{4A} \end{cases} \quad (8)$$

여기서 $\langle \cdot \rangle_{\omega_e}$ 는 연산이 조우 주파수 ω_e 기준에서 수행됨을 나타낸다.

총 L 개의 이산 조우 주파수 $\omega_{e,L}$ 와 M 개의 응답 성분에 대해, 예측 응답 스펙트럼과 실제 응답 스펙트럼 간의 절대 오차를 계산한 절대 오차의 합(Sum of absolute error, SAE)은 식 (9)와 같이 정의된다.

$$SAE = \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M |N_{e,ij}(\omega_{e,l}) \cdot RI\{\hat{S}_{e,ij}(\omega_{e,l}) - S_{e,ij}(\omega_{e,l})\}| \quad (9)$$

여기서 $RI\{\cdot\}$ 는 교차 스펙트럼의 대칭성을 고려하여 실수부와 허수부 중 하나를 선택하는 연산자로, $i < j$ 일 때 실수부, $i > j$ 일 때 허수부를 반환한다. 이는 중복 계산을 방지하고 교차 스펙트럼 정보를 효율적으로 활용하기 위한 목적이다.

한편, $N_{e,ij}(\omega_{e,l})$ 는 정규화 함수로, 서로 다른 물리량 간의 스펙트럼 크기 차이를 보정하여 오차함수 계산 시 각 항목이 동일한 기여도를 갖도록 조정한다. 이를 위해 다음과 같은 방식으로 정규화 항을 정의한다.

$$S_{ij}(\omega) = C_{ij}(\omega) + iQ_{ij}(\omega) \quad (10)$$

$$\hat{C}_{ij}(\omega) = \frac{1}{\max \sqrt{\frac{S_{ii}(\omega)S_{jj}(\omega) + \text{Re}(S_{ij}(\omega))^2 - \text{Im}(S_{ij}(\omega))^2}{2}}} \quad (11)$$

$$\hat{Q}_{ij}(\omega) = \frac{1}{\max \sqrt{\frac{S_{ii}(\omega)S_{jj}(\omega) - \text{Re}(S_{ij}(\omega))^2 + \text{Im}(S_{ij}(\omega))^2}{2}}} \quad (12)$$

최종적으로 정규화 항은 식 (13)과 같이 정의된다.

$$N_{e,ij}(\omega_{e,l}) = \begin{cases} \hat{C}_{e,ij}(\omega_{e,l}), & i \leq j \\ \hat{Q}_{e,ij}(\omega_{e,l}), & i > j \end{cases} \quad (13)$$

2.3 유전 알고리즘

GA는 자연계의 생물 진화 원리를 모사하여 전역 최적화를 수행하는 탐색 기법으로, Holland (1975)에 의해 제안되었다. 생물 개체군이 자연 선택과 유전적 다양성을 통해 적응력을 높이듯, GA는 세대를 거치며 해의 적합도를 점진적으로 향상한다. 복잡하고 비선형적인 탐색 공간에서 효과적으로 작동하며, 다양한 공학 분야에 활용된다.

GA는 초기 해 집단 생성, 적합도 평가, 부모 선택, 교배, 돌연변이, 새로운 세대 생성의 절차로 구성된다. 초기 집단은 무작위 또는 문제 기반의 유도 초기화 방식으로 구성되며, 이후 적합도 함수를 통해 각 개체의 성능이 평가된다. 일반적으로 적합도는 식 (14)와 같이 정의된다.

$$fitness(a) = \frac{1}{Error(a)} \quad (14)$$

여기서 $Error(a)$ 는 개체 a 의 해가 갖는 오차를 나타낸다. 적합도가 높은 개체는 다음 세대에 선택될 확률이 높아지며, 대표적인 선택 연산으로는 룰렛 휠 선택(Roulette-Wheel Selection)이 사용된다. 이때, 각 개체의 누적 선택 확률 r_i 는 식 (15)와 같이 계산된다.

$$r_i = \sum_{k=1}^i p(a_k), \quad p(a_k) = \frac{fitness(a_k)}{\sum_{j=1}^N fitness(a_j)} \quad (15)$$

이때, a_k 는 k 번째 개체를 나타내며, N 은 전체 개체 수이다. 난수 $e \in [0,1]$ 가 누적 확률 구간 $[r_{i-1}, r_i)$ 에 속할 때 개체 a_i 가 선택된다. 선택된 부모 개체는 교배 연산을 통해 자식 개체를 생성하며, 실수 기반 문제에서는 산술적 교배(Arithmetic crossover)가 흔히 사용된다. 해당 연산은 식(16)과 같다.

$$\tilde{a}_i = \alpha a_i + (1-\alpha)a_j, \quad \tilde{a}_j = (1-\alpha)a_i + \alpha a_j \quad (16)$$

여기서 α 는 $[0,1]$ 사이의 가중 계수이며, a_i, a_j 는 부모 개체, $\tilde{a}_i, \tilde{a}_j$ 는 자식 개체이다. 이후 해의 다양성을 확보하고 지역 최적해에 빠지는 것을 방지하기 위해 돌연변이 연산을 적용하며, 탐색이 진행됨에 따라 변이 폭을 조절하는 비균등 돌연변이(non-uniform mutation)가 식 (17)과 같이 사용된다.

$$\tilde{x} = \begin{cases} x + \Delta(t, UB-x), & r=0 \\ x - \Delta(t, x-LB), & r=1 \end{cases}, \quad \Delta(t, y) = y(1-r^{(1-t/T^b)}) \quad (17)$$

여기서 $\tilde{x}$ 는 변이된 유전자 값, x 는 원래 값, UB 및 LB 는 유전자의 상한과 하한, T 는 최대 세대 수, b 는 변이 조절 계수이다. 또한, 해의 품질 저하를 방지하기 위해 엘리티즘(elitism) 전략이 적용되기도 하며, 이는 가장 적합한 개체를 다음 세대로 유지함으로써 최적해가 소실되는 것을 방지한다 (De Jong, 1975). 유전 알고리즘의 성능은 개체군 크기, 교배 및 돌연변이 확률 등 주요 매개변수에 민감하게 영향을 받기 때문에, 문제 특성에 맞는 설정과 실험적 조율이 필수적이다.

3. 계측 데이터

3.1 대상 선박 및 전달함수

본 연구에서는 9,400TEU급 컨테이너선인 Rigoletto 선박을 대상으로 하였으며, 선박의 주요 제원은 Table 1에 제시되어 있다. 이 선박에 작용하는 외력에 대한 운동 및 구조 응답을 수치적으로 예측하기 위해, 파랑에 대한 선체 응답 특성을 나타내는 RAO를 활용하였고, 본 연구에서는 한국선급에서 개발한 선형 회절-방사 해석 프로그램인 SeaTrust를 이용하여 이를 계산하였다. 계산은 파 주파수를 0.05 rad/s부터 1.5 rad/s까지 0.05 rad/s 간격으로, 입사각을 0도부터 330도까지 30도 간격으로 설정하여 수행하였으며, 해석에 적용된 적재 조건은 Table 2에 정리하였다. Fig. 2에는 이러한 조건에서 계산된 RAO 결과가 도시되어 있다.

3.2 구조 응답 계측 및 데이터 처리

실선 계측을 위해 선체의 프레임 75와 프레임 102구간의 상하부, 좌·우현에 총 8개의 장기 기선형 변형률계(Long Base Strain Gauge, LBSG)를 부착하였다. 계측된 변형률 데이터는 응력 데이터로 환산되어 방향파 스펙트럼 추정에 활용되었으며, 측정은 20Hz의 샘플링 주파수로 수행되었다. 각 LBSG의 부착 위치는 Fig. 1에 도시되어 있다. 계측 데이터는 아시아-유럽 항로를 운항 중인 Rigoletto에서 수집된 실선 데이터를 기반으로 하였으며, Fig. 3에는 해당 항로를 1시간 간격의 위치 정보를 활용해 지도상에 시각화한 결과를 나타내었다. 추정에 사용된 데이터는 선박의 속도 및 진행 방향의 변화가 크지 않은 구간을 선별하여 사용하였고, 해당 구간은 시간적으로 정상성을 가정할 수 있는

Table 1 Main particulars of Rigoletto

Item		Value
Maximum speed	kts	25.4
Overall length	m	350
Overall beam	m	42.8
Maximum draft	m	14.5
Dead weight	ton	108000
Maximum capacity	TEU	9415

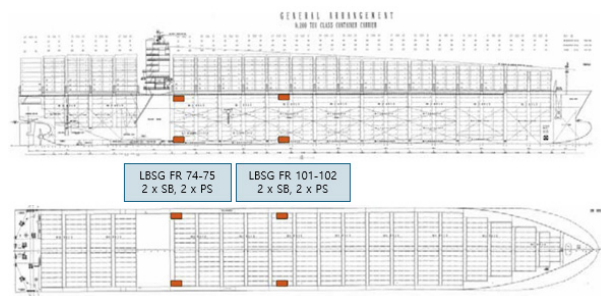


Fig. 1 Location of LBSGs

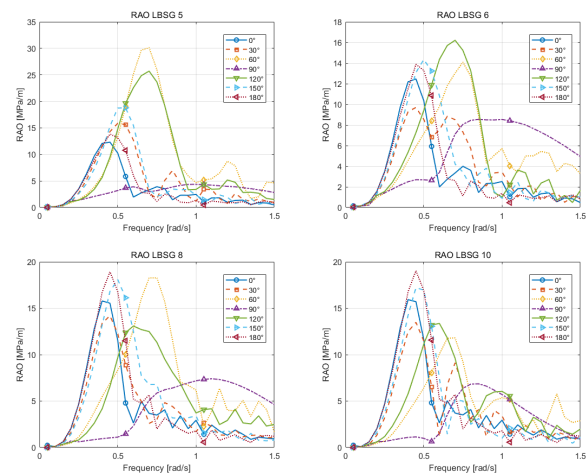


Fig. 2 Amplitudes of RAO for midship LBSG

Table 2 Analysis loading conditions

Item		Value
Displacement	ton	139,283
Draft	m	14.12
G.M.	m	0.7
Waterline length	m	338.9
Speed	kts	9.5
Damping ratio	10% of critical one	

구간으로 설정하여 분석을 진행하였다. 또한, RAO 해석 시 적용된 적재 조건과 최대한 유사한 조건에서의 계측 데이터를 선별적으로 활용함으로써 수치 해석과 실측 간의 정합성을 높이고자 하였다. 이러한 조건을 만족하는 데이터는 1시간 단위로 분할하여 파랑 추정에 적용하였다.

3.3 파랑 계측 시스템

추정 결과의 신뢰성 확보를 위해 선박에 탑재된 레이더 기반 파랑 계측 시스템인 WaMoS의 실측 데이터를 비교 기준으로 활용하였다. WaMoS는 해수면의 표면 반사 신호를 분석하여 유의파고 (significant wave height), 첨두 주기 (peak period), 평균 입사각 (mean wave direction) 등 다양한 파랑 특성치를 실시간으로 제공하는 장비로 알려져 있으며, 본 연구에서는 동일 시간 구간의

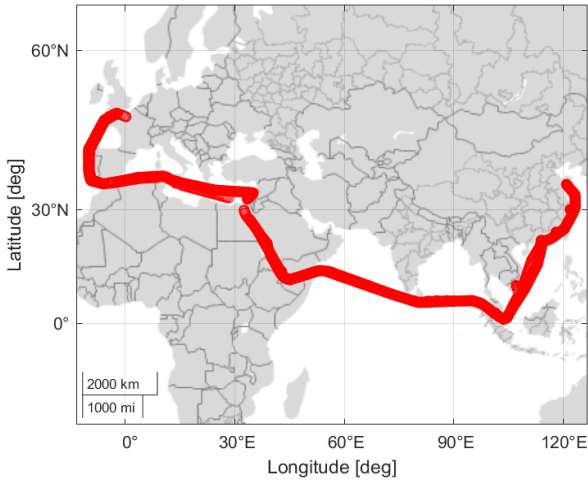


Fig. 3 Sea route of Rigoletto

WaMoS 계측 결과와 추정된 방향파 스펙트럼을 비교함으로써 제안된 추정 방법론의 정확도와 신뢰성을 정량적으로 평가하였다.

4. 방향파 추정

4.1 유전 알고리즘 기반 추정 절차

본 연구에서는 실제 계측 응답 데이터를 푸리에 변환하여 주파수 영역의 응답 스펙트럼을 구하고, 이를 RAO 기반의 예측 응답 스펙트럼과 비교하여 오차를 최소화하는 방향파 스펙트럼을 GA를 통해 추정하였다. 유전 알고리즘은 실수 기반 방식(Real-Coded Genetic Algorithm)으로 구현되었으며, 주요 연산으로 무작위 초기화, 룰렛 휠 선택, 산술적 교배, 비균등 돌연변이, 엘리트즘 전략을 적용하였다.

초기 해 집단은 사전에 정의된 파라미터의 물리적 제약 조건 내에서 각 개체에 무작위 실수 값을 할당하여 생성하였으며, 집단 크기는 200개체로 설정하였다. 교배 연산은 교차 확률 0.75를 적용하였으며, 산술 교배 시 가중 계수는 $[0,1]$ 범위의 균등 분포에서 무작위로 선택하였다. 이후 돌연변이 연산은 확률 0.1로 수행되었으며, 세대 수 1,000을 최대 반복 조건으로 설정하였다. 이와 같은 파라미터 설정은 기존의 유사 연구 (Pascoal et al., 2007) 및 내부 실험을 바탕으로 도출되었으며, 문제의 수렴 특성과 탐색 성능을 고려하여 여러 반복 실험을 통해 경험적으로 조정되었다.

4.2 추정 결과 및 WaMoS 데이터 비교

방향파 스펙트럼은 원래 이중 봉우리 구조로 가정하였으나, 사용된 계측 데이터에서는 단일 파고가 지배적으로 나타났기 때문에 추정 과정에서는 단일봉우리 조건으로 단순화하여 적용하였다. 계측 데이터는 응답 에너지가 크고, 해당 RAO의 적재 조건과 유사한 환경에서 수집된 사례를 선별하여 사용하였다. 총 14개의

Table 3 Comparison between estimated and WaMoS wave parameter

Case No.	WaMoS			Estimated		
	H_s (m)	ω_p (rad/s)	θ_{mean} (deg.)	H_s (m)	ω_p (rad/s)	θ_{mean} (deg.)
1	5.3	0.785	349	1.09	0.43	145
2	8.8	0.551	123	4.84	0.55	140
3	4.8	0.74	329	0.96	0.45	330
4	7	0.523	297	3.27	0.41	283
5	3.8	0.74	267	2.02	0.63	218
6	7	0.571	268	2.62	0.48	243
7	4	0.628	242	1.95	0.56	220
8	5	0.722	240	2.93	0.72	228
9	4.5	0.72	240	3.56	0.8	240
10	4.7	0.72	242	2.76	0.67	234
11	7.6	0.565	141	4.56	0.56	142
12	6.5	0.587	265	2.94	0.52	246
13	4.9	0.62	137	3.6	0.59	137
14	5.7	0.56	137	5.1	0.58	140

계측 사례에 대해 동일한 추정 절차를 적용하였으며, 각 사례에 대해 동시 시점의 WaMoS 파랑 계측 데이터가 함께 확보되어 있어, 추정된 방향파 스펙트럼의 주요 파라미터와 WaMoS 관측 결과 간의 비교·분석을 수행하였다.

Fig. 4는 본 연구에서 추정에 사용한 14개 계측 사례에 대해 계산된 방향파 스펙트럼과 해당 시점의 WaMoS 계측 결과를 비교한 것으로, 색상 등고선은 GA를 통해 추정된 방향파 스펙트럼을, 빨간 점은 WaMoS 계측 결과를 나타낸다. 이들 결과에 대한 정량적 비교는 Table 4에 제시하였다.

전체적으로 평균 입사각은 대부분 사례에서 WaMoS 계측 결과와 유사한 값을 보이며, 파향에 대한 전반적인 방향성은 비교적 정확하게 추정된 것으로 나타났다. 그러나 일부 사례에서는 큰 오차가 발생하기도 하였으며, 특히 Case 10에서는 추정된 입사각과 WaMoS 계측 결과가 정반대의 값을 보였다. 만약 WaMoS 계측 결과가 실제 파향을 잘 반영하고 있다고 가정할 경우, 해당 사례는 선미파 조건에 해당하며, 이때 조우 주파수와 파 주파수 간에는 도플러 효과로 인해 하나의 조우 주파수에 여러 파 주파수가 대응되는 1:3 주파수 대응 현상이 나타날 수 있다. 이러한 비선형적인 주파수 관계는 특히 선미파 또는 선미사파 조건에서 두드러지며, 추정 알고리즘의 수렴을 어렵게 만드는 하나의 가능성으로 고려될 수 있다. 예를 들어, 선속이 9.5 kts일 때 조우 피크 주파수가 0.5 rad/s로 관측되면, 이에 대응하는 절대 파 주파수는 약 0.9, 1.1, 2.44 rad/s로 최대 세 개의 해가 존재하지만, 선속이 10.5 knots로 증가할 경우에는 2.44 rad/s에 해당하는 하나의 절대 파 주파수만이 대응되어 1:1 매칭이 이루어진다. 이와 같이 선속 변화에 따른 주파수 매핑의 민감도는 알고리즘이 실제 존재했던 선미파의 영향을 포착하지 못하고, 선수파 조건에 해당하는 지역 최적해로 수렴하게 만드는 원인 중 하나로

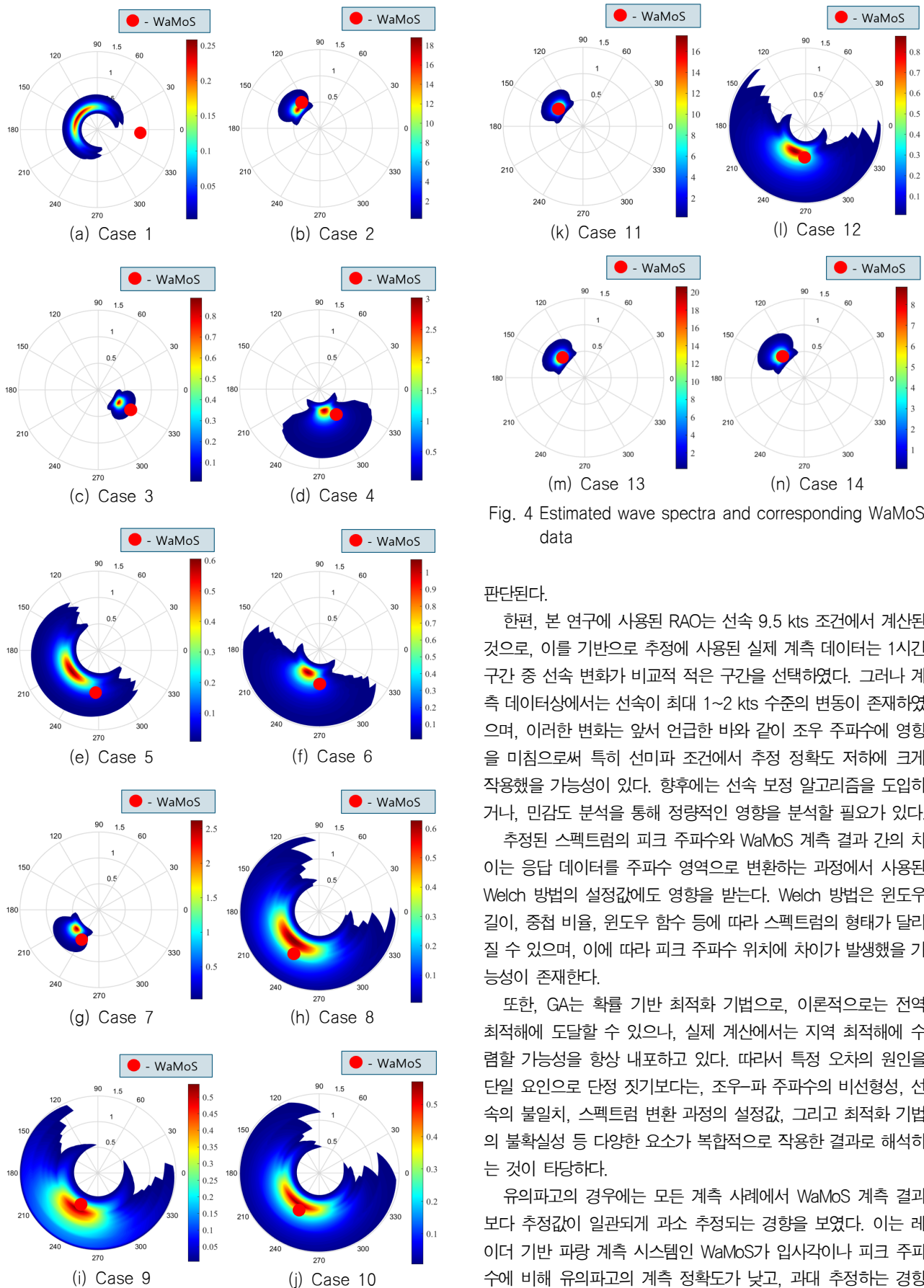


Fig. 4 Estimated wave spectra and corresponding WaMoS data

판단된다.

한편, 본 연구에 사용된 RAO는 선속 9.5 kts 조건에서 계산된 것으로, 이를 기반으로 추정에 사용된 실제 계측 데이터는 1시간 구간 중 선속 변화가 비교적 적은 구간을 선택하였다. 그러나 계측 데이터상에서는 선속이 최대 1~2 kts 수준의 변동이 존재하였으며, 이러한 변화는 앞서 언급한 바와 같이 조우 주파수에 영향을 미침으로써 특히 선미파 조건에서 추정 정확도 저하에 크게 작용했을 가능성이 있다. 향후에는 선속 보정 알고리즘을 도입하거나, 민감도 분석을 통해 정량적인 영향을 분석할 필요가 있다.

추정된 스펙트럼의 피크 주파수와 WaMoS 계측 결과 간의 차이는 응답 데이터를 주파수 영역으로 변환하는 과정에서 사용된 Welch 방법의 설정값에도 영향을 받는다. Welch 방법은 윈도우 길이, 중첩 비율, 윈도우 함수 등에 따라 스펙트럼의 형태가 달라질 수 있으며, 이에 따라 피크 주파수 위치에 차이가 발생했을 가능성이 존재한다.

또한, GA는 확률 기반 최적화 기법으로, 이론적으로는 전역 최적해에 도달할 수 있으나, 실제 계산에서는 지역 최적해에 수렴할 가능성을 항상 내포하고 있다. 따라서 특정 오차의 원인을 단일 요인으로 단정 짓기보다는, 조우-파 주파수의 비선형성, 선속의 불일치, 스펙트럼 변환 과정의 설정값, 그리고 최적화 기법의 불확실성 등 다양한 요소가 복합적으로 작용한 결과로 해석하는 것이 타당하다.

유익파고의 경우에는 모든 계측 사례에서 WaMoS 계측 결과보다 추정값이 일관되게 과소 추정되는 경향을 보였다. 이는 레이다 기반 파랑 계측 시스템인 WaMoS가 입사각이나 피크 주파수에 비해 유의파고의 계측 정확도가 낮고, 과대 추정하는 경향

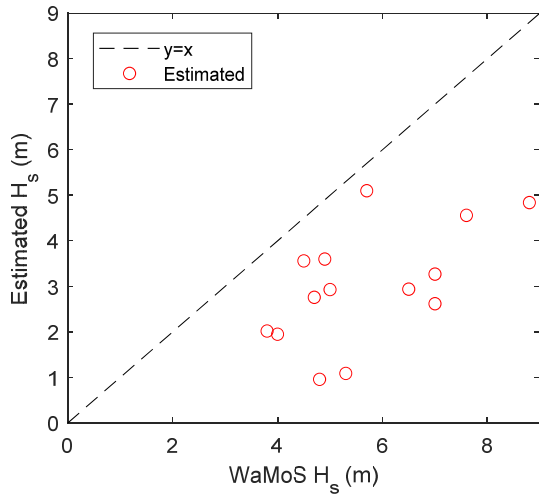


Fig. 5 Comparison between estimated and WaMoS H_s

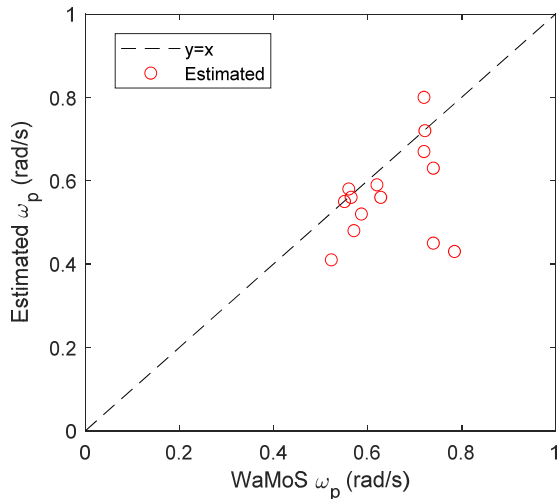


Fig. 6 Comparison between estimated and WaMoS ω_p

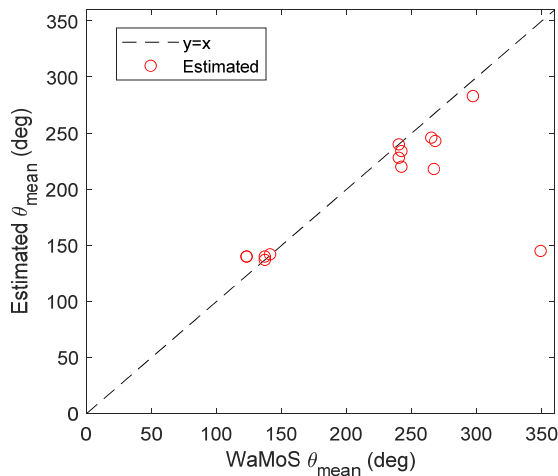


Fig. 7 Comparison between estimated and WaMoS θ_{mean}

이 있다는 점에서 기인한 현상일 수 있다 (Andersen, 2014). 하지만 이러한 추세 역시 단일 원인으로 해석하기보다는, 계측 시

스템의 한계와 알고리즘의 불확실성이 함께 영향을 미쳤을 가능성을 고려해야 한다.

Fig. 5, 6, 7은 각각 유의파고, 피크 주파수, 평균 입사각에 관해 본 연구에서 추정한 결과와 WaMoS 계측값을 비교한 그래프이다. 앞서 언급한 바와 같이, 유의파고는 전 계측 사례에서 WaMoS 계측값보다 추정값이 일관되게 낮게 나타나며, 전반적으로 과소 추정되는 경향이 뚜렷하게 관찰된다.

피크 주파수도 과소 추정되는 사례가 다수 존재하나, 유의파고처럼 모든 사례에 해당하는 것은 아니며, 일부 사례를 제외하면 비교적 양호한 일치도를 보였다. 평균 입사각에 대해서는 다른 파라미터들과 비교하여 전반적으로 높은 추정 정확도를 나타내었으며, 대부분 사례에서 WaMoS 계측값과의 차이가 작아 신뢰할

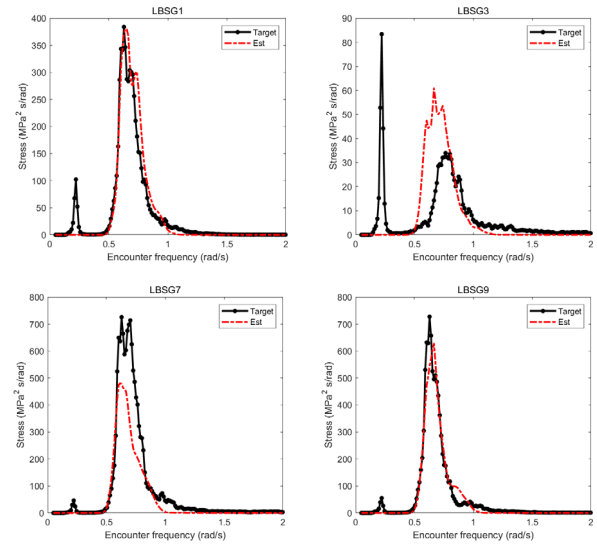


Fig. 8 Target and estimated response spectrum at Frame 75 for Case 10

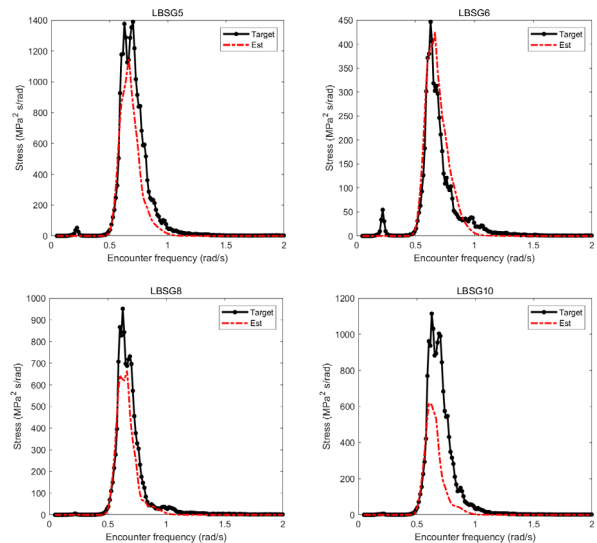


Fig. 9 Target and estimated response spectrum at Frame 102 for Case 10

수 있는 추정 결과를 확인할 수 있었다.

Fig. 8과 Fig. 9는 Case 10에 대해 각각 프레임 75 및 프레임 102에 부착된 LBSG를 통해 계측된 응력 응답 스펙트럼과 본 연구에서 추정한 응답 스펙트럼을 비교한 결과를 나타낸다. 이때

목표 응답 스펙트럼은 실제 계측된 응력 시계열 데이터를 푸리에 변환하여 계산된 계측 응답 스펙트럼이며, 추정 응답 스펙트럼은 유전 알고리즘을 통해 도출된 방향파 스펙트럼과 해당 위치의 RAO를 기반으로 계산된 결과이다.

실제 최적화 과정은 이처럼 계측 응답 스펙트럼과 추정 응답 스펙트럼 간의 차이를 최소화하는 방향으로 수행되며, 위 그래프에서도 전반적으로 양호한 일치도를 확인할 수 있다. 다만, 일부 센서 위치에서는 응답 에너지가 과소 또는 과대 추정되는 사례도 관측되었다. 이러한 경향은 단일 사례에 국한되지 않고, 전체 계측 사례 전반에서 공통으로 나타난 현상이다.

이러한 결과는 본 연구에서 제안한 방향파 스펙트럼 추정 기법이 다양한 해상 조건과 센서 위치에 대해 전반적으로 신뢰할 수 있는 응답 재현 성능을 보임과 동시에, 일부 사례에서는 파향 조건, 선속 오차, 주파수 변환 설정 등 복합적 요인에 따라 추정 성능이 저하되는 경우도 확인되었다. 이는 해석 모델의 한계, 계측 오차, 또는 해석 조건에 기인할 수 있으며, 향후 이러한 오차 요인을 정량적으로 평가하고 보완하는 작업이 추가로 필요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 유전 알고리즘을 기반으로 선박에 작용하는 방향파 스펙트럼을 역추정하는 방법론을 제안하고, 실제 선박의 계측 데이터를 활용하여 그 타당성을 검증하였다. 특히, 레이더 기반 파랑 계측 시스템인 WaMoS 데이터를 병행 활용함으로써 추정 결과의 정확도와 신뢰성을 정량적으로 평가하였다.

- 9,400TEU급 컨테이너선의 실선 계측 데이터를 대상으로 유전 알고리즘 기반의 역추정 절차를 적용하였으며, 추정된 방향파 스펙트럼의 주요 파라미터인 유의파고, 피크 주파수, 평균 입사각을 WaMoS 계측값과 비교하였다.
- 유의파고는 전체 사례에서 WaMoS에 비해 일관되게 낮게 추정되었으며, 이는 WaMoS의 과대 계측 경향과 함께 추정 기법의 보수적 특성에 기인한 것으로 판단된다. 피크 주파수와 평균 입사각은 전반적으로 양호한 일치도를 보였으나, 일부 조건에서는 추정 정확도의 저하가 나타났다.
- 또한, 특정 해상 조건, RAO와 실제 선속 간의 불일치, 응답 스펙트럼 계산 시 사용된 Welch 방식의 설정 등 다양한 요인이 복합적으로 작용하여 일부 사례에서 추정 성능이 저하되는 현상이 나타났다. 이러한 결과는 앞서 제시한 분석 내용과 일관되며, 제안된 기법이 실제 환경에서 일정 수준 이상의 신뢰도를 확보하였음을 보여주는 동시에, 일부 조건에서는 보완이 필요함을 시사한다.
- 향후 연구에서는 제어된 조건에서의 수조 실험을 통해 방법론의 정밀도를 추가로 검증하고, 다양한 선속 및 파향 조건

에 따른 민감도 분석을 수행할 필요가 있다. 아울러, 본 기법을 활용하여 미계측 위치에서의 구조 응답을 추정하고, 이를 실시간 선박 구조건전성 모니터링 시스템에 연계하는 연구도 유의미한 확장 방향으로 고려될 수 있다.

후 기

이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임을 밝힙니다(RS-2023-KI002688, 2025년 산업혁신인재성장지원사업)

References

- Andersen, I. M. V., 2014, *Full scale measurements of the hydro-elastic response of large container ships for decision support*, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark.
- Chen, X., Okada, T., Kawamura, Y. and Mitsuyuki, T., 2020. Estimation of on-site directional wave spectra using measured hull stresses on 14,000 TEU large container ships. *Journal of Marine Science and Technology*, 25(3), pp.690-706.
- De Jong, K.A., 1975. *An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems*. Ph.D. dissertation, University of Michigan, Ann Arbor. Dissertation Abstracts International, 36(10).
- Goda, Y., 2000. Random seas and design of maritime structures. *Advanced Series on Ocean Engineering*, vol. 15. World Scientific, Singapore.
- International Association of Classification Societies (IACS), 2024, Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers.
- Iseki, T. and Ohtsu, K., 2000. Bayesian estimation of directional wave spectra based on ship motions. *Control Engineering Practice*, 8, pp.215-219.
- Kim, H., Park, J., Jin, C., Kim, M. and Lee, D., 2023. Real-time inverse estimation of multi directional random waves from vessel-motion sensors using Kalman filter. *Ocean Engineering*, 280, 114501.
- Lee, C. and Kim, Y., 2022. Local response estimation of a seagoing vessel using onboard measurement data. *Marine Structures*, 86, 103298.
- Maeda, K., Akashi, T. and Saito, K., 2001. An estimation of ocean wave characteristics based on measured ship motions (4th report): directional wave spectrum estimated from full-scale measurements. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 190, pp.241-246.

- Mas-Soler, J. and Simos, A.N., 2020. A Bayesian wave inference method accounting for nonlinearity related inaccuracies in motion RAOs. *Applied Ocean Research*, 99, 102125.
- Masuda, K., Takaishi, Y. and Kawata, S., 2001. Development of an onboard system for wave data analysis and application to ship operation. *Proceedings of the 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE)*, OMAE01/OFT-5108, ASME.
- Nielsen, U.D., 2006. Estimation of on-site directional wave spectra from measured ship responses. *Marine Structures*, 19, pp.33-69.
- Nielsen, U.D., Mittendorf, M., Shao, Y. and Storhaug, G., 2023. Wave spectrum estimation conditioned on machine learning-based output using the wave buoy analogy. *Marine Structures*, 91, 103470.
- Park, M.J. and Kim, Y., 2024. Probabilistic estimation of directional wave spectrum using onboard measurement data. *Journal of Marine Science and Technology*, 29, pp.200-220.
- Pascoal, R., Guedes Soares, C. and Sørensen, A.J., 2007. Ocean wave spectral estimation using vessel wave frequency motions. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 129(2), pp.90-96.
- Pascoal, R., Perera, C. and Guedes Soares, C., 2017. Estimation of directional sea spectra from ship motions in sea trials. *Ocean Engineering*, 132, pp.126-137.
- Ren, Z., Han, Z., Verma, A.S., Dirdal, J.A. and Skjetne, R., 2021. Sea state estimation based on vessel motion responses: improved smoothness and robustness using Bezier surface and L1 optimization. *Marine Structures*, 76, 102904.
- Saito, K., Maeda, K., Matsuda, A. and Suzuki, S., 2000. An estimation of wave characteristics based on measured ship motions (3rd report). *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 187, pp.77-83.
- Son, J.H. and Kim, Y., 2024. Directional wave spectrum estimation through onboard measurement data utilizing B-spline basis functions. *Ocean Engineering*, 297, 117024.
- Tannuri, E.A., Sparano, J.V., Simos, A.N. and Da Cruz, J.J., 2003. Estimating directional wave spectrum based on stationary ship motion measurements. *Applied Ocean Research*, 25(5), pp.243-261.

