

선박의 parametric roll 위험성 평가를 위한 선박 안전 운항 서비스 개발 연구

이보경[†] · 김대해^{*} · 백종엽^{**} · 권승철^{***}

케닛 주식회사([†]책임 · ^{*}대표) · ^{**}일본해사협회(검사관) · ^{***}한국해양수산연수원(교수)

A Study on the Development of a Ship Safe Navigation Service for Assessing the Risk of Parametric Rolling

Bo-Kyeong LEE[†] · Dae-Hae KIM^{*} · Jong-Youp BAEK^{**} · Seung-Cheol KWON^{***}

KeNiT Co., Ltd.([†]researcher · ^{*}CEO) · ^{**}Nippon Kaiji Kyokai(surveyor) ·

^{***}Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology(professor)

Abstract

This study assesses the risk of parametric roll in large container ships and examines the feasibility of applying a cloud-based ship safety operation service based on that assessment. Actual accident cases were analyzed to confirm the potentially severe consequences of parametric roll. We then derived approximate probabilities of occurrence by analyzing the relationship between the vessel's natural roll frequency and the wave encounter frequency. To evaluate the accuracy of these approximate calculations, the results were validated against previously reported Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations and additional CFD simulations performed for the KRISO Container Ship (KCS) hull form. For risk assessment, we propose four indices: (1) Roll Motion Amplification Index (RMAI), (2) Probability of Occurrence (PI), (3) Exceedance Probability (P_{exceed}) relative to safety limits, and (4) an integrated Risk Level Index (RLI). In particular, RMAI is referenced to the $\pm 25^\circ$ safety limit specified in the International Maritime Organization (IMO)'s second-generation intact stability guidance. Based on these metrics, we propose a method to compare live ship environmental data with a CFD result database in the cloud to evaluate parametric-roll risk in real time. The proposed service architecture comprises three layers - data collection, risk analysis, and user service - enabling operators to monitor parametric-roll risk intuitively via a dashboard and alarm system. Finally, we discuss how integrating the proposed framework with Artificial Intelligence (AI)-based predictive analysis could extend the functionality and practical utility of cloud-based safe-navigation services.

Key words : Cloud service, Ship safe navigation service, Predictive analysis, Parametric roll, IMO's second-generation intact stability guidance

I. 서론

해상에서의 선박 운송은 세계 물류의 약 80%를

차지하며(Golovan et al., 2024), 선박과 항만의 효율과 안전은 국가 간 경쟁력 확보에 결정적인 역할을 한다. 최근 해운·조선 산업은 4차 산업혁명 기술의

[†] Corresponding author : 051-404-1016, leona49@nate.com/orcid.org/0000-0002-6281-454X

* 본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 "국제공동기술개발사업"의 지원을 받아 수행된 연구결과임.(과제번호 : P0028244)

발전으로 인하여 스마트화가 가속화되고 있고, 선진국들을 중심으로 디지털 트윈, 사물인터넷, 인공지능 등 첨단 신기술을 접목한 스마트화를 추진 중이다(Cho et al., 2022). 특히, 머신러닝 및 AI 기반 예측 분석(Predictive Analytics)은 연료 소비 최적화, 항로 최적화, 항만 적시도착예측, 사고 위험 탐지, 선박 안정성 점검 등의 기능을 제공하며, 이를 통해 계획적이고 효율적인 운항을 가능하게 한다.

클라우드 컴퓨팅 기술의 발전은 다양한 운항 데이터를 통합·분석하여, 선박 운영자와 항만 관리자가 실시간으로 활용할 수 있는 정보 서비스를 제공할 수 있는 기반을 마련하고 있다. 이는 개별 선박 중심의 전통적 안전 관리 방식을 넘어서는, 서비스형 안전·효율 관리 체계로의 전환의 시작점이며, 이러한 전환은 운항 안전성, 운영 신뢰도, 비용 효율성, 환경 지속가능성 모두를 동시에 향상시킬 수 있다(Maritime Education, 2025).

한편, 선박 안전 운항에서 가장 심각한 위험 요소 중 하나는 parametric roll 현상이다. 이 현상은 파랑의 주기와 선박의 고유 횡요 주기가 특정 조건에서 공진할 때 발생하며, 단기간에 선박의 횡요가 급격히 증폭됨으로써 선박의 사고를 야기한다. 2018년 CMA CGM G. Washington에서 발생한 대규모 컨테이너 유실 사고(MAIB, 2020), 2020년 ONE Apus의 약 1,800개 컨테이너 상실 사고(JTSB, 2024), 2021년 Maersk Essen의 대규모 화물 유실 사고(DMAIB, 2022)는 초대형 컨테이너선에서의 parametric roll에 의한 대표적 사고 사례이다. 이들 사례는 초대형 컨테이너선의 복원성 한계가 운항 환경의 작은 변동에도 민감하게 반응할 수 있음을 보여주며, 기존의 기상 예보 중심 위험 회피 전략만으로는 충분한 안전 확보가 어렵다는 사실을 시사한다.

국제해사기구는 이러한 위험 요인을 고려하여 제2세대 복원성 기준(Second Generation Intact Stability Criteria)을 채택하였으며, parametric roll을 비롯한 동적 복원성 현상을 검증 항목으로 포함하였다(IMO, 2023). 그러나 이 기준은 주로 설

계·검증 단계에 초점이 맞추어져 있어, 실제 운항 중 실시간 대응에는 한계가 존재한다. 또한 이미 건조되어 운항 중인 선박에서의 parametric roll에 대한 위험성 평가를 적용하기 어렵다는 단점이 있다. 현행 규제만으로는 실제 운항 중 발생할 수 있는 위험을 충분히 예측하고 제어하는 데 한계가 존재한다. 이에 본 연구는 클라우드 기반 선박 안전 운항 서비스의 일환으로 parametric roll의 위험성 평가 개념을 클라우드 서비스에 접목할 수 있도록 설계하는 것을 목적으로 한다.

II. 연구 방법

1. Parametric roll 현상과 사고 사례

Parametric roll은 선박의 횡요 주기와 파랑의 만남 주기가 특정 관계에 있을 때 발생하는 비선형적 동요 증폭 현상이다. 일반적으로 선박의 고유 횡요 주기(TR)가 파랑의 만남 주기(TE)와 동일하거나 그 절반일 때, 선체의 복원력이 파랑의 위상 변화와 상호작용하여 동요가 급격히 증폭된다(IMO, 2023).

Paulling and Rosenberg(1959)는 Mathieu 방정식을 적용하여 선수파·선미파에서 큰 횡요 각도가 발생할 수 있음을 제시하였고, Nayfeh(1988)은 이를 이용해 선박 횡요 운동의 불안정 영역을 추가적으로 분석하였다. Dunwoody(1989)는 GM 변동을 스펙트럼 형태로 확장하여 보다 정밀한 접근을 제안하였다.

일반적인 Mathieu 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d^2x}{d\tau^2} + (p + q\cos\tau)x = 0 \dots\dots\dots (1)$$

이때, $x(\tau)$ 는 변위 또는 각도 등의 종속변수, $\frac{d^2x}{d\tau^2}$ 는 $x(\tau)$ 의 2차 미분이며, τ 는 무차원 시간, p 는 고유 진동수 관련 파라미터, q 는 주기적 계수의 진폭을 의미한다.

GM이 파랑에 의해 주기적으로 변한다고 가정하면 Mathieu 방정식을 이용하여 parametric roll 발생 가능성을 예측할 수 있고, 이는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\omega_e \approx 2\omega_n \dots\dots\dots (2)$$

여기서 ω_e 는 파랑과 선박이 만나는 조우 주파수(encounter frequency), ω_n 는 선박의 고유 횡요 주파수이다.

식 (2)는 선수파 또는 선미파 조건에서 파랑에 의해 변동하는 선박의 복원력 GM의 주파수가 선박의 고유 주파수 약 2배와 일치할 때 parametric roll이 발생할 수 있음을 나타낸다. 그러나 이는 단일 주기 성분만 고려하여 실제 복잡한 해상 조건의 불안정성을 설명하기에는 한계가 있다. Kim and Kim(2011) 연구에서는 이러한 한계를 보완하기 위해 quasi-periodic Mathieu 방정식을 이용하여 두 파랑 성분의 주파수 차이가 선박 고유 횡요 주파수와 거의 동일할 때에도 parametric roll이 발생할 수 있음을 연구하였다.

parametric roll이 발생하면 선박은 단기간 내 수십 도의 횡경사를 경험할 수 있으며, 이는 선체 구조의 손상, 화물 유실, 나아가 전복으로까지 이어질 수 있다. 특히 초대형 컨테이너선의 경우 선체 길이와 선형 특성으로 인해 특정 파랑 조건에서 parametric roll 발생 확률이 높으며, 그 결과 발생하는 횡요의 규모 또한 치명적이다. 실제 parametric roll로 인해 사고가 발생하거나 상황이 악화된 대표적인 사고 사례를 아래와 같이 조사하였다.

가. CMA CGM G. Washington (MAIB, 2020)

해당 사고는 2018년 1월 20일, CMA CGM G. Washington이 태평양 항로 중 갑작스러운 20° 횡요를 경험하고, 137개의 컨테이너가 유실되고 85개는 파손된 사고이다. 해당 사고의 원인은 parametric roll의 영향으로 횡요 각도가 선박 설

계 시 설정된 한계를 초과하였기 때문으로 추정된다. 이때 선교팀은 선박 자세 모니터링 시스템의 기능을 충분히 이해하지 못해 위험을 실시간으로 인지하지 못했으며 규격화되지 않은 53ft 컨테이너를 실었으며, 잘못된 중량정보, 잘못된 적하 및 고정 등이 복합적인 요인으로 작용하였다.

나. ONE Apus (JTSB, 2024)

2020년 11월, ONE Apus는 하와이 북서쪽 해역에서 심한 횡요를 겪으며 약 1,841개의 컨테이너가 유실되고 983개가 손상되었다. 선박은 파랑이 선미 좌현 방향에서 들어오는 위험 구간에서 항해 중이었으며, 항로 변경이 오히려 횡요각을 키워 추가 붕괴를 초래했다. 야간 항해로 파랑 방향을 인지하기 어려워 parametric roll이 발생하기 쉬운 조건에서 운항했으며, 위험 회피를 위한 속도의 조정이 적절히 이루어지지 못한 것이 주요 원인으로 분석되었다.

다. Maersk Essen (DMAIB, 2022)

2021년 1월, Maersk Essen은 태평양에서 약 26°~30°의 심한 횡요로 인해 689개의 컨테이너가 유실되고 258개가 손상되었다. 파고는 약 5 m였고, 선박의 횡요 주기와 파랑 만남 주기가 일치해 parametric roll이 발생하였다. 횡요각이 설계 한계를 초과하면서 고정 장치가 파손되었고, 실시간 경고 체계 부재로 승무원들의 대응이 지연된 것이 사고를 키운 원인으로 분석되었다.

사고 사례들을 정리하면 <Table 1>과 같다.

공통적으로 세 경우 모두 parametric roll이 초대형 컨테이너선의 운항 안전에 치명적인 영향을 미칠 수 있음을 보여준다. 위 사례에서 parametric roll은 단기간에 발생하였으며, 기존 운항 지원 체계로는 조기 인지가 어렵다는 한계를 드러냈다. 또한 부정확한 적재 정보, 불안정한 래싱, 사용자 훈련 부족 등 복합적 요인이 작용하여 피해 규모가 확대되었다. 이는 parametric roll이 해상 사고와 피해의 주요 원인으로 작용할 수 있음을 의미하며, 예방적 차원에서 설계 및 건조 단계의

<Table 1> Major Container Ship Accidents Related to Parametric Roll

Category	CMA CGM G. Washington (2018, MAIB)	ONE Apus (2020, JTSB)	Maersk Essen (2021, DMAIB)
Date & Location	- Jan 20, 2018 - North Pacific Ocean	- Nov 30-Dec 1, 2020 - NW of Hawaii	- Jan 16, 2021 - Pacific Ocean, near Hawaii
Accident Summary	- Severe roll up to ~20° - Collapse of several container bays	- Severe roll >20° - Chain collapse of container stacks	- Severe roll 26°-30° - Collapse of container stacks Causes (Reported / Probable)
Causes (Reported / Probable)	- Parametric roll (suspected / possible) - Cargo weight errors - Weak lashing & poor system use	- Parametric roll (exposure / uncertain) - Risky course & swell direction - Nighttime, poor visibility	- Parametric roll (resonance / confirmed) - Stability loss at wave crests - Lashing design exceeded
Container Damage / Loss	- 137 lost - 85 damaged	- 1,841 lost - ~983 damaged	- ~689 lost - ~258 damaged
Notable Features	- Small-scale but multi-factor accident	- Record container loss - Major disruption	- Occurred under non-extreme sea states

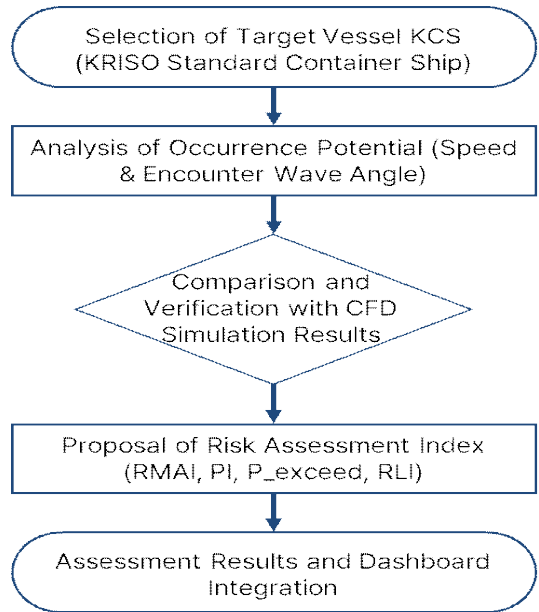
제2세대 복원성 기준 준수뿐 아니라 동시에 실제 운항 현장에서 선박이 직면한 해상 조건에 따라 실시간으로 위험을 예측하고 대응할 수 있는 체계가 필요함을 보여준다. 따라서 향후 선박 안전 운항 서비스는 parametric roll을 포함한 동적 복원성 현상에 대해 실시간 위험성 평가와 경보 시스템을 갖출 필요가 있다. 이는 단순한 규제 준수 차원을 넘어, 선박 운항의 효율성 제고와 글로벌 해상 물류의 안정성을 보장하는 핵심 요소로 자리매김할 것이다.

2. Parametric roll 평가 방법 및 절차

이 연구는 선박의 안전 운항을 위한 클라우드 기반 서비스에 parametric roll 위험성 평가 기능을 적용하기 위한 기초 연구로서, 제2장에서는 parametric roll의 이론적 현상과 실제 사고 사례를 검토하였으며, 제3장에서는 실제 운항 선박의 parametric roll 위험을 평가하기 위해 특정 선박을 대상으로 다양한 상황에서의 발생 가능성을 분석하고 위험성 평가 방법을 제시하였다.

대상 선박은 parametric roll에 취약한 대형 컨테이너 선박으로서, KRISO에서 개발한 표준형 컨테이너선(KCS, KRISO Container Ship)을 대상으

로 하였으며, 연구 방법은 [Fig. 1]과 같다. KCS 선형에 대해 다양한 속도와 만남각 조건에서 parametric roll 발생 가능성을 분석하고 이를 CFD 시뮬레이션 연구 결과와 비교하였으며, parametric roll 위험성 평가 지표를 제안하고 이에 따른 결과를 도출하였다.



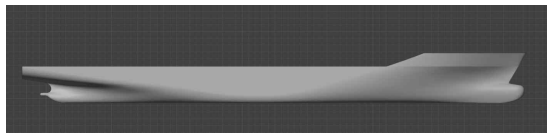
[Fig. 1] Research Process.

Parametric roll 발생 가능성 분석은 실제 운항 중인 다양한 선박에 적용하기 위해서 보편적인 다수 사례에 대한 데이터를 확보하기 위함이나, GM 변동, 횡요 감쇠, 선형/비선형 선체 응답 등이 고려되지 않았기 때문에 예측 신뢰도는 다소 낮다. 이는 CFD와 같은 정교한 분석을 통해 정확도를 높일 필요가 있다.

III. 연구 결과

1. Parametric roll 발생 위험성 평가

먼저 기초적인 parametric roll 현상 발생 가능성 유무를 확인하기 위하여 KCS 선형을 대상으로 parametric roll 발생 가능성을 계산하였다. 대상 선박의 형상은 [Fig. 2]와 같고, 주요 제원은 <Table 2>에 제시하였다.



[Fig. 2] KCS geometry.

<Table 2> Main particulars of the KCS

Main particulars	Full Scale
LBP (m)	230.0
Breadth (m)	32.2
Draft (m)	10.8
Displacement (m ³)	52,030
KG (m)	14.34
Kxx/B	0.45
Kyy/LBP	0.25
Roll period (s)	34.72

Choi et al.(2025)의 연구에서는 KCS를 대상으로 선미파 조건에서 파의 길이와 선박 길이의 비인 λ/LBP가 0.5, 0.7, 1.0, 1.2, 1.5, 1.7, 2.0, 2.2 사이일 때 CFD를 이용한 선박의 parametric roll

현상을 해석하였다. 해당 연구 결과와 비교해 보기 위해 본 연구에서는 <Table 3>과 같은 조건에서 해석을 수행하였다.

<Table 3> Calculation Conditions for Predicting Parametric Rolling

Ship speed (m/s)	4.115
Encounter angle (μ, °)	180, 0
Wave Length (λ, m)	115, 161, 230, 276, 345, 391, 460, 506
λ/LBP	0.5, 0.7, 1.0, 1.2, 1.5, 1.7, 2.0, 2.2
Wave Height (m)	2.3

KCS 선형에서 식 (1)을 이용하여 parametric roll 발생 가능성을 계산하였다. 편차(detuning)는 식 (3)과 같다.

$$\text{detuning} = \frac{\omega_e - 2\omega_n}{2\omega_n} \times 100\% \dots\dots\dots (3)$$

선미파일 때 파장 115, 161, 230, 276, 345, 391, 460, 506 m에서 선박의 조우 주파수가 선박의 고유 횡요주파수 2배와 근사해지는 구간은 <Table 4>와 같다. 선수파에서는 파장 598, 690 m를 추가하여 <Table 5>와 같이 계산하였다.

<Table 4> Detuning Analysis for Parametric Roll in Following Seas

λ (m)	k (1/m)	ω (rad/s)	ω _e (rad/s)	detuning (%)	T (s)	T _e (s)
115	0.05464	0.7320	0.5072	+40.12%	8.58	12.39
161	0.03903	0.6186	0.4580	+26.56%	10.16	13.72
230	0.02732	0.5177	0.4547	+11.95%	12.14	13.82
276	0.02276	0.4727	0.3788	+4.66%	13.30	16.58
345	0.01821	0.4226	0.3477	-3.94%	14.87	18.07
391	0.01607	0.3970	0.3303	-8.59%	15.83	19.02
460	0.01366	0.3660	0.3098	-14.41%	17.17	20.28
506	0.01242	0.3490	0.2979	-17.70%	18.01	21.09

<Table 5> Detuning Analysis for Parametric Roll in Head Seas

λ (m)	k (1/m)	ω (rad/s)	ω_e (rad/s)	detuning (%)	T (s)	T_e (s)
115	0.05464	0.732	0.957	+164.4	8.58	6.57
161	0.03903	0.619	0.779	+115.3	10.15	8.06
230	0.02732	0.518	0.630	+74.1	12.14	9.97
276	0.02276	0.473	0.566	+56.5	13.30	11.10
345	0.01821	0.423	0.498	+37.5	14.87	12.63
391	0.01607	0.397	0.463	+28.0	15.83	13.57
460	0.01366	0.366	0.422	+16.7	17.16	14.88
506	0.01242	0.349	0.400	+10.5	18.00	15.0
598	0.01051	0.321	0.364	+0.6	19.57	17.25
690	0.00911	0.299	0.336	-7.1	21.03	18.68

선미파 조건에서는 파장 230, 276, 345, 391 m 일 때, 선수파 조건에서는 파장 506, 598, 690 m 일 때 parametric roll 발생 가능성(detuning)이 12% 이내임을 확인하였다. <Table 4>와 <Table 5>의 계산 결과는 parametric roll 발생 조건에 근접한 단순한 공진 발생 확률이며, 실제 선박 동요 응답, 감쇠 추정, GM 변동량 등 상세한 분석이 보완되어야 한다. 이를 위한 대표적인 방법으로 CFD를 이용한 시뮬레이션이 있다. Choi et al.(2025) 연구에서는 <Table 3>과 같은 조건에서 시뮬레이션한 결과 파장이 230, 276, 345, 391 m 조건일 때 parametric roll 현상이 발생했으며, 이는 <Table 4>의 근사 계산과 유사한 결과를 보여 주고 있다.

2. 위험성 평가 지표 설정

위험성 평가는 IMO 제2세대 복원성 기준을 참고하여 parametric roll vulnerability assessment의 횡요각 한계값을 기준으로 설정하였다. 특히 parametric roll 위험성을 판단할 때 횡요각 진폭이 $\pm 25^\circ$ 를 초과하는지 여부를 안전성 평가의 기준으로 제시하고 있어 이에 따라 다음과 같이 정량적 지표를 설정하였다.

가. 횡요각 증폭비(Roll Motion Amplitude Index, RMAI)

이는 특정 파랑 조건에서 발생한 횡요각 최대 진폭을 IMO에서 규정한 안전 한계각 $\pm 25^\circ$ 와 비교한 비율이다. 100%를 초과하면 안전 한계를 벗어난 것으로 판단할 수 있다.

$$RMAI = \frac{\theta_{\max}}{\theta_{\lim}} \times 100(\%) \dots\dots\dots (4)$$

나. 발생 확률(Probability Index, PI)

CFD 사례 및 실제 운항 데이터의 통계 분포를 기반으로 특정 조건에서 parametric roll 발생 확률을 산출한다.

$$PI = \frac{N_{PR}}{N_{total}} \dots\dots\dots (5)$$

N_{PR} 은 parametric roll 발생 케이스 수이며, N_{total} 은 전체 시뮬레이션 수로 케이스 수가 많을수록 발생 확률의 정확도가 올라간다.

다. 안전 한계 초과율(Exceedance Probability, P_{exceed})
주어진 시간 간격 내에서 roll 각도가 IMO 안전 한계를 초과하는 빈도이다. T_{exceed} 는 roll 각도가 안전 한계를 초과한 지속 시간이며, T_{total} 은 전체 관찰 시간이다.

$$P_{\text{exceed}} = \frac{T_{\text{exceed}}}{T_{total}} \dots\dots\dots (6)$$

라. 위험도 등급(Risk Level Index, RLI)

위험도 등급 RLI는 RMAI, PI, P_{exceed} 를 종합하여 위험도를 3단계로 등급화하는 방법이다. PI, P_{exceed} 는 다수 사례가 있어야 도출할 수 있으므로 RMAI를 기준으로 RLI를 도출하면 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

Low : RMAI < 50%

Moderate : $50\% \leq \text{RMAI} < 100\%$

High : $\text{RMAI} \geq 100\%$

이 방법은 선박의 횡요각 안전 한계를 포함함으로써 parametric roll의 발생 확률뿐 아니라 parametric roll이 발생했을 때 큰 선박 손상을 입을 수 있을 위험도를 같이 나타낼 수 있는 지표이다.

본 장에서는 CFD 시뮬레이션 기반 데이터와 클라우드 시스템을 결합한 위험성 평가 절차를 제안하였다. 특히, 횡요각 응답을 정량화할 수 있는 세 가지 지표 RMAI, PI, P_exceed와 이를 종합한 위험도 등급 RLI를 제안하여, parametric roll 위험성을 객관적으로 수치화하는 방법을 제시하였다.

3. CFD 시뮬레이션

가. 시뮬레이션 대상

본 연구에서는 추가적으로 <Table 5>의 parametric roll 발생 조건에 대해 근사 판단의 결과를 비교해 보기 위해서 KCS 선형을 대상으로 선수파에서의 CFD 시뮬레이션을 수행하였다.

대형 컨테이너선의 형상적 특징을 잘 반영한 KCS는, 비선형 복원력 효과를 포함한 파랑 중동적 거동 분석을 위해 다수의 연구에서 채택되어 온 표준 선형이다. 대상 선박의 형상은 [Fig. 2]에 제시하였으며, 주요 제원은 <Table 2>와 같다. 또한 본 시뮬레이션에 사용된 KCS는 실선 스케일을 기준으로 하였으며, 사전 CFD 기반 free-roll decay 시뮬레이션을 통해 고유 횡요 주기가 34.72초임을 확인하였다.

나. 시뮬레이션 조건

본 연구의 수치 해석은 상용 CFD 소프트웨어 STAR-CCM+를 이용하여 수행하였다. 지배 방정식은 비정상 RANS 방정식을 적용하였으며, 난류 모델은 k- ω SST 모델을 사용하였다. 계산은 시간 간격 0.005초와 2차 정확도의 시간 적분법으

로 수행하였다.

본 연구에서는 KCS의 parametric roll 현상을 <Table 6>과 같은 조건에서 시뮬레이션하였다. 조우 주파수와 선박 고유 주파수의 비를 1.859에서 2.560까지 변화시킨 네 가지 조건에 대해 수치 해석을 수행하였다. 파랑 조건은 선수파(head sea)이며, 모든 경우에서 파고(H)는 2.3 m로 일정하게 유지하였다. 또한 선속은 약 4.1 m/s로 동일하게 적용하였다.

<Table 6> Overview of the simulation conditions used in the CFD model

Wave	λ/L	Wave period (s)	ω_e / ω_{roll}
Head sea	1.7	15.74	2.56
	2.2	17.93	2.21
	2.6	19.55	2.01
	3.0	21.01	1.86

여기서, L은 선박의 LBP, ω_e 는 조우 주파수, ω_{roll} 는 선박의 횡요 고유 주파수를 의미한다.

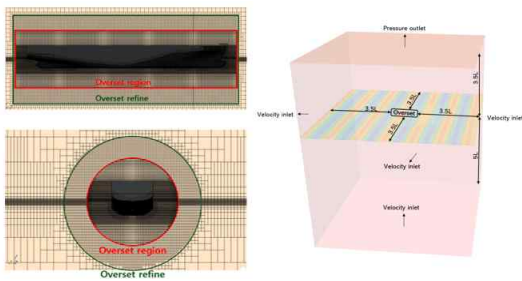
다. 격자 및 경계 조건

본 연구에서 사용한 전산유체역학 모델은 기존 연구(Choi et al., 2025)에서 구축·검증된 기법을 기반으로 하였다. 해당 연구에서의 모델은 대형 컨테이너선의 parametric roll 해석을 위해 개발된 것으로, 본 논문에서는 이를 그대로 활용하였으며 주요 격자 및 경계 조건을 인용하면 아래와 같다.

해석은 동적 격자 중첩 기법을 적용하여 수행하였다. 계산 격자는 배경 격자와 선체 격자로 구분하여 중첩하였으며, 선체 주위의 중첩 영역은 원통형으로 구성하였다. 격자 분포는 횡요 운동 및 자유수면 변동을 충분히 수용할 수 있도록 설정하였으며, 자유수면 영역은 ITTC(2011) 권고 기준에 따라 수직 방향 최소 20개, 수평 방향 파장당 80개 이상의 격자를 배치하였다. 계산 영역은 선체 길이(L)를 기준으로 전방·후방·측방 및

상하 방향에 대해 약 3.5L 이상의 여유를 확보하였고, 수직 하부는 5L까지 확장하여 침수 조건을 모사하였다. 경계 조건은 velocity inlet, pressure outlet, no-slip 조건 등을 문제 특성에 맞게 설정하였다. 해당 모델은 parametric roll 해석 시 선박의 sway 및 yaw 운동의 영향이 제한적이라는 가정을 두고, surge, heave, pitch, roll의 네 자유도를 고려하여 선수와 조건에서 KCS 선체의 운동을 해석하도록 구성된 것이다. 선박은 전차 이동을 통해 일정한 전진 속도를 유지하도록 설정되었으며, roll, pitch, heave 운동 자유도는 제약 없이 허용된다.

본 논문에서는 격자 구성 및 경계 조건은 기존 연구(Choi et al., 2025)를 이용하여 [Fig. 3]과 같이 제시한다. 해석을 위한 격자는 배경 격자와 선체 격자를 각각 생성하여 중첩하는 Dynamic overset grid 기법이며, 계산 영역의 상류, 하류, 측면, 바닥 경계는 velocity inlet 경계 조건을, 상부 경계는 대기압 조건을 반영하기 위해 pressure outlet 경계 조건을, 선체는 점성 효과를 고려하여 no-slip 경계 조건을 적용하였다.



[Fig. 3] Mesh configuration and boundary conditions of the CFD model (adopted from Choi et al., 2025).

라. 시뮬레이션 결과

(1) CFD 모델 검증

본 연구에서 활용한 CFD 모델은 기존 연구(Choi et al., 2025)를 통해 이미 신뢰성이 검증된 바 있다. 형상 시험 결과와의 비교를 통해

parametric roll 발생 여부 및 진폭 수준에서 전반적으로 높은 일치도가 확인되었으며, 특히 $\lambda/L = 1.0, 1.2, 1.5$ 조건에서 실험과 수치 해석 모두 20° 이상의 횡요 진폭을 동반한 parametric roll이 발생함을 보여주었다. 반면, $\lambda/L = 0.5\sim 0.7$ 구간에서는 실험과 수치 해석 모두 parametric roll이 발생하지 않았으며, 일부 조건에서 실험 자료가 부족함에도 불구하고 주요 경향성과 발생 조건은 실험과 정량적으로 잘 일치하였다. 따라서 본 장에서는 해당 CFD 모델을 기반으로 선수와 조건에서의 시뮬레이션 결과를 제시한다.

(2) 선수와 조건에서의 롤 해석

본 연구에서는 [Fig. 4]와 같이 총 4가지 선수와 조건(Case 1-4)을 대상으로 전산유체역학 기반 횡요 시뮬레이션을 수행하였다. 모든 조건에서 초기 횡요 응답을 유도하기 위해 약 2°의 강제 횡요 모멘트를 부여하였으며, 이후 시간 영역에서 자유 응답을 관찰하였다. 각 조건별 시계열 응답 특성과 parametric roll 발생 여부는 다음과 같다.

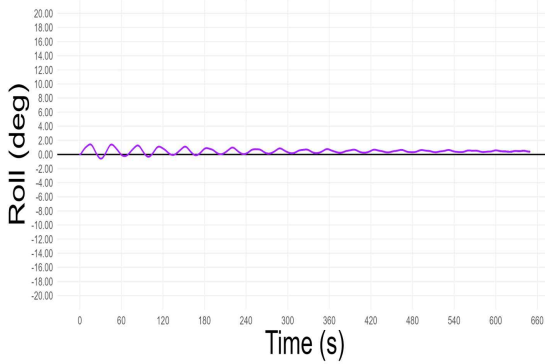
Case 1에서는 초기 강제 횡요로 인해 약 ±2° 범위의 응답이 나타났으나, 이후 진폭이 점차 감소하면서 안정화되었다. 전체 시뮬레이션 시간 동안 횡요 진폭은 ±2°를 넘지 않았으며 (peak-to-peak 약 2.02°), 추가적인 증폭 현상은 관찰되지 않았다. 이는 조우 주파수와 횡요 고유 주파수의 비가 2.56으로 공진 조건에서 크게 벗어나 있어, 초기 외란에도 불구하고 parametric roll이 발생하지 않은 결과로 해석된다.

Case 2 역시 초기 약 ±2°의 외란 응답 이후 진폭이 크게 성장하지 않고, ±2° 이내(peak-to-peak 약 2.40°) 수준에서 유지되었다. 시간 경과에 따라 안정적인 응답이 이어졌으며, 이는 조우 주파수 비가 2.21로 공진 영역에서 벗어나 있어 parametric roll이 발생하지 않은 것으로 판단된다.

Case 3에서는 초기 ±2° 수준의 외란 이후, 시간이 지남에 따라 횡요 진폭이 점진적으로 증가

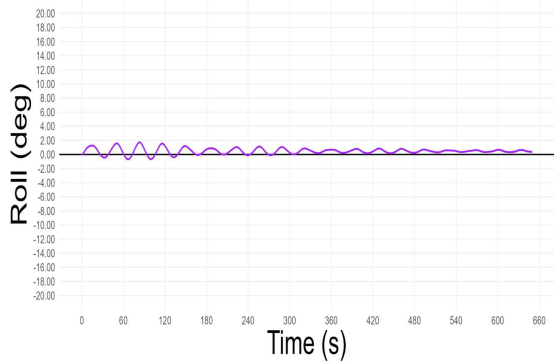
(a) Case 1

$\lambda/L=1.7, T=15.74s$



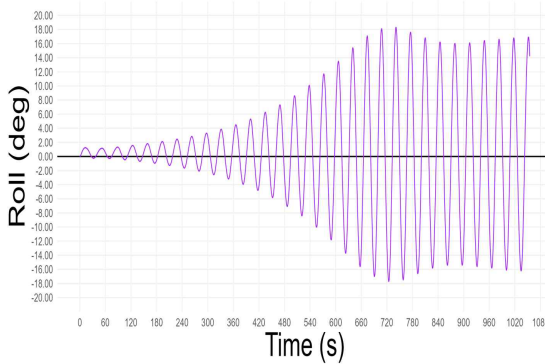
(b) Case 2

$\lambda/L=2.2, T=17.93s$



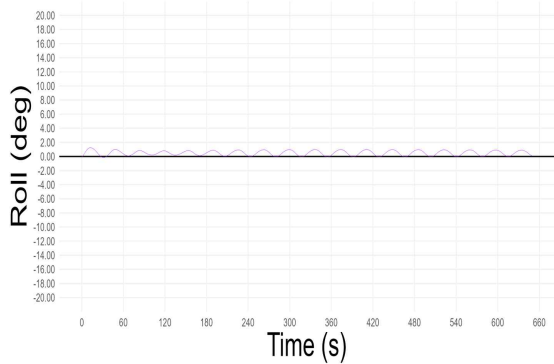
(c) Case 3

$\lambda/L=2.6, T=19.55s$



(d) Case 4

$\lambda/L=3.0, T=21.01s$



[Fig. 4] Time series response of roll angle under each case.

하였다. 약 50초 이후에는 급격한 증폭이 발생하여 최종적으로 $\pm 18^\circ$ (peak-to-peak 약 36°)에 이르는 매우 큰 진폭의 parametric roll 현상이 확인되었다. 이는 조우 주파수와 고유 주파수의 비가 2.01로 공진 조건에 근접하여, 작은 초기 외란이 지속적으로 증폭되는 전형적인 parametric roll 거동을 보여준다.

Case 4에서도 초기 $\pm 2^\circ$ 의 외란 이후 진폭은 빠르게 감쇠되었으며, 전체 응답은 $\pm 1.5^\circ$ 이내 (peak-to-peak 약 1.39°)로 제한적인 수준에 머물렀다. 이는 조우 주파수 비가 1.86으로 공진 조건에서 벗어나 있어, 초기 강제 횡요에도 불구하고 parametric roll이 발생하지 않은 것으로 해석된다.

종합하면, 본 연구에서 수행한 네 가지 파장 조건에 대한 횡요 시뮬레이션 결과는 초기 약 $\pm 2^\circ$ 의 강제 횡요 모멘트가 부여되었음에도 불구하고, 공진 조건과 거리가 먼 경우에는 모든 응답이 빠르게 감쇠하며 안정적인 거동을 유지하였다. 반면, 조우 주파수와 횡요 고유 주파수의 비가 공진 조건에 근접한 Case 3에서는 작은 초기 외란이 점차 증폭되어 큰 진폭의 parametric roll로 발전하는 전형적인 불안정 응답이 관찰되었다. 이러한 결과는 parametric roll의 발생 여부가 초기 조건보다는 파-선박 상호작용의 주파수 특성에 의해 지배된다는 점을 보여주며, 제안된 수치 해석 모델이 실제 현상을 신뢰성 있게 재현할

수 있음을 입증한다.

결과적으로 parametric roll 발생 가능성에 대한 단순 계산 결과와 CFD 시뮬레이션 결과를 비교하면 <Table 7>과 같다.

<Table 7> Comparison between Detuning Estimate and CFD Results

Wave	λ (m)	detuning (%)	CFD results
Following seas	230	+11.95%	Yes
	276	+4.66%	Yes
	345	-3.94%	Yes
	391	-8.59%	Yes
Head seas	506	+10.5	No
	598	+0.6	Yes
	690	-7.1	No

선수파에서는 detuning 12% 미만인 파장 230, 276, 345, 391 m 조건에서 CFD 결과에서도 parametric roll이 발생함을 보여주었으나, 선미파에서는 detuning이 0.6%인 파장 598 m에서만 parametric roll이 발생하였다. parametric roll 위험 발생 가능성을 예측할 수 있는 서비스 수행을 위해서는 근사 계산을 통한 대량의 케이스를 확보함과 동시에 CFD 시뮬레이션 등을 통하여 정확도를 향상시키는 것이 필요하다.

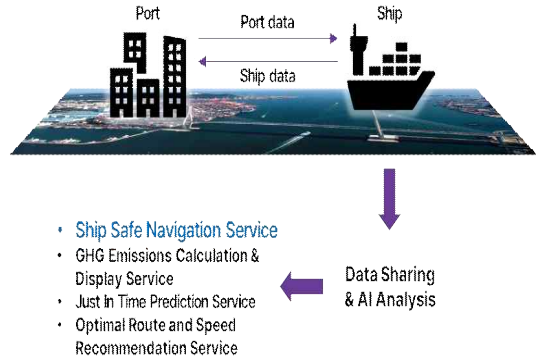
4. 클라우드 선박 안전 운항 서비스

가. 서비스 개념

본 연구에서 제안하는 선박 안전 운항 서비스는 [Fig 5]와 같이 현재 국제 공동 연구의 목표로 제안된 클라우드 기반의 데이터 공유·분석 플랫폼 개념을 핵심으로 한다.

해당 플랫폼에서 선박의 데이터로서 운항 과정에서 수집되는 환경 데이터(파고, 주기, 파향, 풍속 등)와 선박 응답 데이터(횡요 각도, 속도, metacentric height 등)를 클라우드에 실시간으로 업로드하고, 이를 바탕으로 위험성을 평가한다. 특히, IMO 2세대 복원성 기준에서 주목하는

parametric roll 현상에 대한 위험 평가를 서비스의 중심 기능으로 통합하였다.



[Fig. 5] Cloud Digital Platform.

나. 서비스 구조

서비스는 크게 (1) 데이터 수집 계층, (2) 위험성 분석 계층, (3) 사용자 서비스 계층으로 구성된다.

(1) 데이터 수집 계층에서는 선박에 설치된 센서 및 항해 장비에서 얻은 기상·해양 데이터와 선박 운동 데이터를 클라우드 서버로 전송한다. 또한, 선행 연구에서 수행된 CFD 기반 시뮬레이션 데이터가 데이터베이스에 저장되어 비교·활용된다.

(2) 위험성 분석 계층은 실시간으로 입력되는 운항 데이터를 기반으로, 기존 parametric roll 발생 가능성 및 CFD 시뮬레이션 결과의 케이스와 매칭하여 parametric roll 발생 가능성을 평가한다. 위험도 지표는 횡요 각도의 증폭비(Roll Magnification Factor, RMAI), 발생 확률(Probability Index, PI), 안전 한계 초과율(Exceedance Probability, P_exceed), 그리고 이를 종합한 위험도 등급 (Risk Level Index, RLI)으로 수치화하여 제공한다.

<Table 4>와 <Table 5>의 CFD 시뮬레이션 결과에서 parametric roll이 발생한 케이스에서의 RMAI와 RLI를 구해보면 <Table 8>과 같이 나타낼 수 있다.

<Table 8> Detuning Analysis for Parametric Roll in Following & Head Seas

Wave	λ (m)	detuning (%)	RMAI (%)	RLI
Following sea	230	+11.95	120	High
	276	+4.66	110	High
	345	-3.94	85	Moderate
	391	-8.59	60	Moderate
Head sea	598	-	75	Moderate

(3) 사용자 서비스 계층은 선박 운항자가 직관적으로 이해할 수 있도록, 위험성 평가 결과를 알람 또는 대시보드 형태로 시각화하는 부분이다. [Fig. 6]과 같은 형태로 실시간 파형과 선박 응답 곡선을 그래프로 표시하며 parametric roll에 대한 위험 수준을 ‘안전(Low), 주의(Moderate), 위험(High)’ 등급으로 구분하여 안내한다. 또한, 클라우드 서비스는 다수의 선박 데이터를 통합 분석하여 선대(Fleet) 단위 안전 운항 관리에도 활용할 수 있다.

다. 서비스 제공 방식

클라우드 기반의 선박 안전 운항 서비스는 실시간 위험 예측 기능을 제공한다. 이는 운항 중인 선박이 특정 파랑 조건에서 parametric roll 가능성이 높을 경우, 조기 경보를 발생시킨다. 또한 사후 분석 서비스로 항차 종료 후, 저장된 데이터와 CFD 시뮬레이션을 기반으로 위험 상황 발생 원인을 분석하여 향후 운항 지침으로 반영할

수 있다. 또한 지속적 학습 시스템을 통해 클라우드 서버는 축적된 운항 데이터와 시뮬레이션 결과를 이용하여 AI 기반 예측 모델을 학습함으로써, 위험 예측 정확도를 점진적으로 향상시키며, 시간이 지남에 따라 위험 예측 정확도와, 관리 대상 선박의 최적화된 모델로 진화하는 것이 가능하다.

IV. 결론

본 연구는 초대형 컨테이너선에서 자주 발생하는 parametric roll 현상을 대상으로, 이론적 배경과 사고 사례, parametric roll 발생 조건에 대한 단순 계산 및 CFD 수치 해석을 결합하여 클라우드 기반 실시간 선박 안전 운항 서비스의 개념을 제안하였다.

먼저, 실제 사고 사례 분석을 통해 parametric roll이 단기간에 선박의 횡요를 급격히 증폭시켜 대규모 화물 유실과 구조적 손상을 야기할 수 있음을 확인하였다. 이를 대비하기 위한 대응책으로서 IMO의 제2세대 복원성 기준은 설계·검증 단계에 유용하나, 실제 운항 중 위험 예측 및 대응에는 한계가 있음을 지적하였다.

두 번째로 parametric roll 발생 가능성에 대한 근사 해석을 통해 선박의 다양한 항행 조건에서 parametric roll 발생 가능성을 확인하는 방법을 제안하였다. 선수파에서는 근사 계산에 따른 detuning 0.6% 이하에서 CFD 결과와 일치하고, 선미파에서는 detuning 12% 미만에서 CFD 결과와 일치함을 확인하였다. parametric roll 발생 확률을 근사적으로 계산하는 방법은 클라우드 서비스를 배포하기 위해 parametric roll 발생 사례를 다양으로 확보하는데 필요한 방법이다. 다만 정확도와 신뢰도 향상을 위해서는 CFD 시뮬레이션 등이 추가로 수행할 필요가 있다.

parametric roll 위험에 대한 근사 계산 결과를 클라우드 플랫폼에 집적하여, 실제 운항 선박의



[Fig. 6] User Interface for Ship Safe Navigation Service.

실시간 데이터와 비교·매칭할 수 있는 가능성을 제시하였다. 계산된 결과는 parametric roll 발생 위험성을 RMAI, PI, P_exceed, RLI 수치를 적용해 정량적으로 평가하고, 대시보드 및 경보 시스템을 통해 운항자에게 직관적으로 제공할 수 있도록 제안하였다.

본 연구는 parametric roll 위험성 평가를 기존 규제 준수 차원을 넘어 실시간·예측적 운항 안전 관리 체계로 확장할 수 있는 기초적 가능성을 확인하였다. 향후에는 다양한 선종과 실제 운항 데이터의 축적을 통해 예측 정확도를 높이고, AI 기반 학습 기능을 결합하여 클라우드 서비스의 실효성을 강화할 필요가 있다.

제안된 서비스는 향후 개발될 클라우드 디지털 플랫폼에서 선박에 적용되는 안전 운항 서비스의 한 축으로 기능할 수 있으며, 선대를 관리하는 선박관리사가 자사 선박의 안전 운항을 실시간으로 모니터링하는 서비스로도 활용될 수 있을 것이다.

References

CFD software STAR-CCM+ (version 15.04, 2020.2 release, Siemens, 2020)

Cho YS, Cho YD, Koo HM and Kwon KP(2022). A Study on the Design of Digital Twin-Based Communication Tools for Smart Port and Autonomous Ship. Proceedings of the Korean Institute of Navigation and Port Research Conference, 2022(2), 362~365.

Choi JH, Kwon CS, Hong SY, Kim DW, Park JB, Kim DJ and Kim DJ(2025). A Study on Viscous Flow Computation for Parametric Rolling Analysis in Stern Waves of a Large Container Ship. Journal of Navigation and Port Research, 49(3), 283~284. <https://doi.org/10.5394/KINPR.2025.49.3.279>

DMAIB(2022). MAERSK ESSEN Marine accident report on loss of cargo 16 JANUARY 2021. 65. <https://dmaib.com/media/8489/maersk-essen-loss-of-cargo-on-16-january-2021.pdf>.

Dunwoody AB(1989). Roll of a Ship in Astern Seas - Metacentric Height Spectra. Journal of Ship

Research, 33(3), 221~228. <https://doi.org/10.5957/jsr.1989.33.3.221>

Golovan A, Mateichyk V, Gritsuk I, Lavrov A, Smieszek M, Honcharuk I and Volsak O(2024). Enhancing Information Exchange in Ship Maintenance through Digital Twins and IoT: A Comprehensive Framework, Computers, 13(10), 1~19. <https://doi.org/10.3390/computers13100261>.

IMO(2023). MSC.1/Circ.1652 Explanatory Note to the Interim Guidelines on the Second Generation Intact Stability Criteria, ANNEX 47-48.

ITTC(2011). ITTC - Recommended Procedures and Guidelines, Practical Guidelines for Ship CFD Application 7.5-03-02-03, 7.

JTSB(2024). MA2024-02 Marine Accident Investigation Report, iv - v. https://jtsb.mlit.go.jp/eng-mar_report/2024/2022tk0001e.pdf.

Kim TY and Kim YH(2011). Multi-level approach for parametric roll analysis, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 3(1), 53. <https://doi.org/10.3744/JNAOE.2011.3.1.053>.

MAIB(2020). Report on the investigation into the loss of 137 containers from the container ship CMA CGM G. Washington in the North Pacific Ocean on 20 January 2018, 1. <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5e1dc891e4915d7c7c397896/2020-2-CMACGMGWashington.pdf>.

Maritime Education(2025). Maritime Industry Trends 2025: AI, Automation & Smart Ports Shaping the Future of Shipping, Retrieved from <https://maritimeducation.com/maritime-industry-trends-2025-ai-automation-smart-ports-shaping-the-future-of-shippping/> on September 3.

Nayfeh AH(1988). On the Undesirable Roll Characteristics of Ships in Regular Seas, Journal of Ship Research, 3(2), 92~100. <https://doi.org/10.5957/jsr.1988.32.2.92>.

Paulling JR and Rosenberg RM(1959). On Unstable Ship Motions Resulting From Nonlinear Coupling, Journal of Ship Research, 3(2), 36~46. <https://doi.org/10.5957/jsr.1959.3.2.36>.

-
- Received : 02 October, 2025
 - Revised : 21 November, 2025
 - Accepted : 28 November, 2025