

# 내항 성능과 운용 시나리오에 기반한 함정의 실해역 운항성 평가

최성은<sup>1</sup>·김기원<sup>1</sup>·김호용<sup>1</sup>·서정화<sup>1,†</sup>·양경규<sup>2</sup>·이신형<sup>3,4</sup>·김범진<sup>5</sup>  
충남대학교 선박해양공학과<sup>1</sup>  
충남대학교 자율운항시스템공학과<sup>2</sup>  
서울대학교 조선해양공학과<sup>3</sup>  
서울대학교 해양시스템공학연구소<sup>4</sup>  
대한민국 해군 전력분석시험평가단<sup>5</sup>

## Operability Assessment of a Naval Vessel in Seaways Based on Seakeeping Performance and Operation Scenario

Sungeun Choi<sup>1</sup>·Kiwon Kim<sup>1</sup>·Hoyong Kim<sup>1</sup>·Jeonghwa Seo<sup>1,†</sup>·Kyung-Kyu Yang<sup>2</sup>·Shin Hyung Rhee<sup>3,4</sup>·Beomjin Kim<sup>5</sup>  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University<sup>1</sup>  
Department of Autonomous Vehicle System Engineering, Chungnam National University<sup>2</sup>  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University<sup>3</sup>  
Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University<sup>4</sup>  
Naval Force Analysis, Test and Evaluation Group, Republic of Korea Navy<sup>5</sup>

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 present study concerns assessing the operability of a surface combatant, based on the Percent-Time-Operable (PTO). For validation of the seakeeping analysis in the regular waves, the model test is first conducted in a towing tank. The seakeeping analysis results in the regular waves are expanded to the irregular waves, considering the wave spectra around the Korean peninsula and in North Pacific. The seakeeping criteria of the surface combatant in transit, combat, replenishment operation, and survival condition are defined by the literature review. An annual operation scenario of the surface combatant in two operation areas, i.e., advance speed and wave direction, are combined with the seakeeping analysis results to assess PTO. The main constraints of operability of the surface combatant are identified as the pitch angle and vertical velocity at the helicopter deck.

**Keywords** : Naval vessel(함정), Percent-time-operable(운용 가능 시간 비율), Operability(운항 성능), Survivability(생존성)

## 1. 서론

함정의 내항 성능은 함의 설계 단계에서 필수적으로 확인해야 하는 사항으로, 특정 해상상태 조건에서 대상 임무를 수행할 수 있는지의 여부로 판단한다. 구체적으로는 목표 해상상태에서 발생할 수 있는 함의 운동 크기가 기준값 이하여서 임무 수행에 필요한 작업에 지장이 없는지를 평가하게 된다.

함정의 내항 성능 기준은 기본적으로 승조원의 작업성을 고려해 정한다. Graham (1990)의 연구에서는 함의 특정 위치에 승조원이 서 있을 때 횡방향 가속도로 인한 넘어짐, 미끄러짐 등을 Motion-Induced Interruption(MII)라고 제안하고, 이를 함 내항 기

준 수립에 반영하기 위한 예를 보였다. 비슷한 연구가 Hosoda et al. (1983)에 의해 수행되었는데, 수직, 수평 가속도와 횡동요 크기에 따른 승조원의 작업 효율의 저하를 나타내었다.

승조원의 작업성 외에도, 함의 주요 탑재 장비의 운용 기준 등을 고려해 내항 성능 기준을 정하기도 한다. 이러한 과정에 대해, 북대서양조약기구(North Atlantic Treaty Organization, NATO) 소속의 함정 내항 성능 해석과 관련해 Military Agency for Standardization(MAS)에서 STANAG4154 표준안을 제정한 바 있다(MAS, 2000). 여기에서는 함의 작전 내용을 상세하게 분류하여, 주요 탑재체계의 운용이 가능한 함 운동 조건을 각각 산정하여 내항 성능 산정의 기준으로 활용하는 예시를 보였다.

STANAG4154에서는 내항 기준의 선정 과정에 못지않게 함의 운용 효율을 비중 있게 다루는데, 함의 운용상 시나리오, 즉 함정 주기 중 함속, 항로, 운용 해석 등을 모두 고려하여 작전의 수행이 가능한 운용 가능 시간 비율(Percent-time-operable, PTO)을 구하는 과정을 보인다.

이렇게 운용 효율상의 관점에서 함의 내항 성능을 평가한 연구의 사례로 Comstock et al. (1982)가 있다. 여기서는 각종 함재기를 운용할 수 있는 미 해군의 함정들에 대해 연간 함재기의 운용 성능을 평가하였다. 이를 위해 각 함의 운용 조건을 정리하고, 대상 해역의 해상상태별 발생 빈도, 함의 해상상태별 내항 성능을 종합하였다. 그리고 최종적으로 PTO를 계산하였다. 비슷한 방식으로 함정 설계 중 각 함형의 내항 성능에 근거한 전투 효율을 비교해 최적 함형을 찾는 과정을 Schaffer et al. (1983)의 연구에서 보인 바가 있다.

본 연구에서는 STANAG4154에서 다룬 내용에 기반하여, 함의 내항 성능의 기준을 세우고, 평가하고, 이를 운용 가능 시간과 연계하여 함정의 운용 측면의 관점에서 내항 성능을 판단하는 일련의 과정을 보였다. 본 연구는 학술적인 관점에서는 공개 함형의 내항 성능 자료를 제공하는 데 목적을 두었고, 함정 설계의 관점에서는 대한민국 인근 해역을 포함한 운용 시나리오에 대해 PTO를 구하는 예시를 상세히 소개하는 데 집중하였다.

논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 특정 임무에 대해 내항 성능 기준을 세우는 과정을 관련 문헌 내용과 함께 소개하였다. 3장은 본 연구에서 사용된 내항 성능 해석의 대상 선박과 내항 해석의 비교검증 결과를 수록하였다. 4장에서는 대상 선박의 실제 PTO를 구하는 과정을 보였다. 5장에 본 연구의 결과를 정리하였다.

## 2. 내항 성능 기준 선정 과정

본 장에서는 함정에서 요구되는 내항 성능 기준과 그 근거에 대한 문헌 조사 결과를 바탕으로 본 연구에 적용될 내항 성능 기준을 정하는 과정을 보였다. 함정의 구체적인 설계, 즉 탑재 장비의 종류와 위치가 정해지지 않은 상황에서는 세부 임무별 내항 성능 기준을 정할 수가 없으므로, Schaffer et al. (1983)의 연구와 같이 승조원의 작업성에 기반한 내항 성능 기준을 주로 적용하였다. 실제 함 설계가 수행되어 탑재 장비의 종류와 위치가 정해진 상태에서의 구체적인 내항 성능 기준을 정하는 과정은 STANAG4154 (MAS, 2000)을 참고할 수 있다.

Nordforsk (1987)에서는 작업의 복잡도에 따라 작업 가능한 함 운동의 크기를 Table 1과 같이 제안하였다. 해당 문헌에서는 함 운동의 크기를 표준편차로 표현하였으나, 본 연구에서는 함정의 운동을 모두 유의 단일 진폭(Single significant amplitude, SSA)으로 통일하여 나타내었다. 이는 상위 1/3 운동 크기의 평균인데 본 연구에서는 운동 스펙트럼 면적 제공근의 2배로 구하였다.

함정의 내항 성능 기준에는 Light manual work와 Heavy manual work가 적용되며 나머지 세 가지 기준은 함 운동에 익숙하지 않은 탑승객을 대상으로 하는 조건이기 때문에 적용하지 않

Table 1. Seakeeping criteria with regard to acceleration terms and roll motion (Nordforsk, 1987)

Single significant amplitude criteria			Description
Vertical acceleration	Lateral acceleration	Roll (°)	
0.40g	0.20g	12.0	Light manual work
0.30g	0.14g	8.0	Heavy manual work
0.20g	0.10g	6.0	Intellectual work
0.10g	0.08g	5.0	Transit passengers
0.04g	0.06g	4.0	Cruise liner

는다. 서론에서 다룬 Hosoda et al. (1983)의 연구에서도 Nordforsk (1987)과 비슷하게 운동 크기에 따른 승조원의 작업 효율을 정리한 바 있다.

승조원의 작업성, 각종 장비의 운용, 함체의 운동 등을 감안해 함정의 주요 임무별 내항 성능 기준을 제안한 사례로는 Bales and Cieslowski (1981), Schaffer et al. (1983)의 연구가 있다. Bales and Cieslowski (1981)의 연구에서는 5,000톤급 구축함의 내항 성능 기준을 정상 임무 수행, 이동성 보존, 생존 가능의 세 가지 측면에서 제안하였다. 해당 연구에서는 운동의 통계적 크기, 빈도에 대한 기준만을 제안하고 있으므로, 시계열 상의 운동 해석이 요구되지는 않는다. Table 2는 상세한 내항 기준값이다. 표에서 사용된 스테이션(station)은 일반적인 선박의 설계와 반대로 함수가 스테이션 0으로 정의되었음에 유의한다.

Table 2. Limiting-motion criteria sets for 5,000 ton-class destroyer (Bales and Cieslowski, 1981)

Item	Location	Tasks		
		Combat operation	Full mobility	Seaway survivability
Roll (°)	-	5.0	10.0	30.0
Pitch (°)	-	3.0	3.0	8.0
Deck wetnesses per hour	Station 0 (FP)	30	30	50
Slams per hour	Station 3	20	20	50
Emergences per hour	Sonar dome	24		
Vertical acceleration	Bridge	0.4g	0.4g	0.8g
Lateral acceleration	Bridge	0.2g	0.2g	0.4g
Vertical velocity (m/s)	Station 4	2.0		
Lateral velocity (m/s)	Station 17	2.0		

Schaffer et al. (1983)에서는 구축함에 요구되는 주요 임무를 이동 및 전투(Transit and combat), 해상보급(Underway replenishment, UNREP), 전투(combat)의 세 가지로 나누어 운항 성능을 평가하였다. 각 조건의 함 운동 요구사항을 Table 3에 나타내었다. Bales and Cieslowski (1981)과 Schaffer et al. (1983)의 연구 모두 함의 가속도 관련 값은 함교를 기준으로 정하게 되어 있으며, 그 크기는 대체로 Table 1의 Light manual work에 대응된다. 이는 함교에서 특정 작업을 수행하는 구체적인 시나리오에 근거했다기보다는 함 설계 초기 단계에서는 마땅한 기준 위치를 선정해 운동 값 기준을 정하기가 어렵기 때문에 함교를 운동 기준으로 삼은 탓으로 생각된다. 해상 보급에 대해서는 승조원 직업성에서 제안된 범위보다 작은 값을 기준으로 삼은 점이 두드러지는데, 이는 해상보급을 위한 장비의 운동 기준을 적용하기 때문으로 보인다.

Table 3. Limiting-motion criteria sets for the concept design of DDGX (Schaffer et al., 1983)

Item		Tasks		
Motion and events	Location	Transit and combat	UNREP	Combat
Roll (°)	-	10.0	5.0	13.6
Pitch (°)	-	3.0	2.0	2.7
Deck Witnesses per hour	Station 0 (FP)	30	30	30
Slams per hour	Station 3	20	20	20
Emergences per hour	Sonar dome	24	-	-
Vertical acceleration	Bridge	0.4g	0.4g	0.4g
Lateral acceleration	Bridge	0.2g	0.2g	0.2g
Longitudinal acceleration	Station 3	0.2g		
Longitudinal acceleration	Bridge		0.14g	0.2g
Vertical velocity (m/s)	Helicopter deck			1.34

Bales and Cieslowski (1981)과 Schaffer et al. (1983)의 연구에서 이동성 보존(Full mobility), 이동 및 전투 조건은 서로 같은 운동 기준값을 갖는 것을 알 수 있다. 그리고 Schaffer et al. (1983)의 연구에서 제안된 전투 관련 운동 기준은 DDGX 설계 시 작전 요구 사항(Required operational capabilities, ROC)에 따른 값으로 실제 함정의 운용 환경을 고려한 것으로 판단하여 본 연구에서도 이를 그대로 적용하였다.

정리하자면 본 연구에서는 Bales and Cieslowski (1981)의 연구에서는 생존 조건(Seaway survivability)만을 취하고, Schaffer

et al. (1983)의 연구에서는 기동 및 전투, 해상보급, 전투의 세 가지 모두의 내항 조건을 적용하여 PTO를 구하였다.

### 3. 내항 해석

#### 3.1 대상 함정

연구에 사용된 함형은 DTMB5415M 함형이다. 이는 미 해군의 DDG51 알레이버크급 구축함(Arleigh Burke-class destroyer)의 초기 개념설계안 중 연구목적으로 공개된 함형인 DTMB5415에 대해, 횡동요 감쇠와 관련한 연구를 위해 빌지킵(Bilge keel)과 스태빌라이저(Stabilizer)를 장착한 함형이다 (Toxopeus et al., 2018). Fig. 1은 대상 함형의 형상 정보이다.

Table 4에 대상 함형의 주요 정보를 기재했다. 내항 시험을 위한 실험 모형은 축척비 1/55로 제작하였다. 실험 모형의 크기가 2.6m가량으로 작다 보니 내항 시험을 위한 정확한 무게 배치에 어려움이 있었다. 따라서 실험에 사용된 모형선의 무게 배치는 설계값과 조금 다르게 적용되었으며, 이를 Table 4의 Model (set) 항목에 표시하였다. 대상 함정의 실제 설계값은 Model (Designed)의 항목이다.

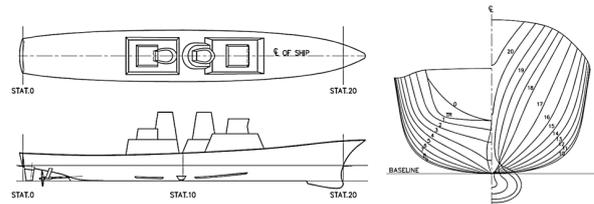


Fig. 1 Lines and geometry of DTMB5415M

Table 4. Principal particulars of the test model

	Symbol	Unit	Ship	Model (Designed)	Model (Set)
Length between perpendiculars	$L$	m	142.0	2.582	
Breadth	$B$	m	19.06	0.347	
Draft	$T$	m	6.15	0.112	
Displacement	$\nabla$	m <sup>3</sup>	8424	0.0506	
Block coefficient	$C_b$	-	0.507		
Longitudinal center of buoyancy from midship	$LCB$	m	-0.970	-0.0176	
Vertical center of gravity from keel	$KG$	m	7.547	0.137	0.133
Transverse metacentric height	$GM$	m	1.95	0.0355	0.0393
Roll radius of gyration	$k_{xx}$	-	7.05	0.128	0.114
Pitch and yaw radius of gyration	$k_{yy}, k_{zz}$	-	35.5	0.645	0.685

수치해석에서의 모형 무게 배치에 대해, 모형시험과의 비교검증을 통한 횡동요 감쇠(roll damping)항의 결정에서는 Model (set)과 같은 무게 배치 결과를 적용했다. 그리고 무게중심 위치를 Model (designed)로 바꿔 같은 규칙과 조건에서 같은 횡동요 감쇠값을 적용한 해석을 다시 수행한 결과를 이용해 실험역의 운동 스펙트럼을 구하였다.

DTMB5415M 함형의 내부 배치에 대해서는 구체적인 참고 사례가 없다. 다만 Diez et al. (2015)의 연구에서 함교의 위치로 함 중앙(Midship)에서 선수 쪽으로 27 m, 용골(Keel)에서 상방으로 24.75 m의 깊이 제안된 바 있으므로, 이를 반영해 무게중심 위치에서 선수 쪽으로 27.97 m, 상방으로 17.20 m 위치에 함교가 있다고 정하였다. 운동 분석의 지점인 헬리콥터 갑판의 위치는 유사한 크기의 실적함형을 참고하여 무게중심으로부터 선미 쪽으로 63.4 m, 상방으로는 3.1 m로 정하였다.

### 3.2 내항 해석 프로그램

파랑 중 모형선의 내항 해석을 위해 Ansys Aqwa(ANSYS, Inc., Canonsburg, PA) 프로그램을 이용하였다. 이 프로그램은 패널법에 기반한 유동 해석을 통해 부유체의 운동을 시간, 주파수 영역에서 해석할 수 있다.

본 연구에서는 우선 해석 프로그램의 검증을 위한 규칙파, 모형선 스케일에서의 내항 해석을 수행하고, 그 결과를 모형시험과 비교하였다. 검증 이후 대상 해역의 운동 스펙트럼을 구해 불규칙파 조건의 운동을 해석해 이로부터 PTO를 계산하였다. 실선 스케일 확장은 프루드(Froude) 상사를 적용하였다.

### 3.3 내항 해석 조건

내항 해석의 비교검증을 위해 동일한 규칙파 조건에서 모형 시험과 내항 해석을 수행하였다. Table 5는 내항 해석을 수행한 규칙파 조건으로, 컨테이너 선 모형의 규칙파 중 시험 사례를 참고하여 고유 횡동요 주기를 포함하도록 시험 조건을 정하였다 (Wu et al., 2020). 시험 조건은 총 5개의 파장비( $\lambda/L$ ) 조건이다. 조우각( $\mu$ )은 0°(선미파)에서 180°(선수파)까지 30° 간격으로 적용하였다. 규칙파 실험 중 모형의 전진속력은 0 m/s이다.

Table 5. Regular wave test condition

$\lambda/L$	0.65	0.85	1.15	1.37	1.95
$kA$	0.0483	0.0469	0.0551	0.0533	0.0374
$H$ (m)	0.0258	0.0328	0.0521	0.06	0.06
$T$ (s)	1.0372	1.1861	1.3796	1.5058	1.7965

### 3.4 내항 시험 구성

내항 시험은 서울대학교 예인수조에서 수행되었다. Fig. 2에서 보인 바와 같이 선수, 선미 위치에 스프링을 이용해 모형선을 계

류하였다. 모형선은 조파기로부터 40 m 떨어진 위치에 배치하였다. 실험 모형은 초기 길이 1 m의 계류 스프링을 선수, 선미에 걸쳐 파랑 중에 표류하지 않도록 하였다. 계류 스프링의 초기 장력은 28 N이다.

계류 스프링의 선정에 대한 사항은 국제수조회의(International Towing Tank Conference, ITTC)의 내항 성능 시험 절차에 기술되어있다 (ITTC, 2021). 여기서는 계류 스프링으로 인한 공진 주기가 최대 운동 주기의 6배 이상일 것을 권장하는데, 본 실험의 스프링 상수(100 N/m)는 ITTC의 기준에 비하면 과도한 면이 있다. 본 연구가 수행된 예인수조 실험 환경에서는 예인전차 상의 스프링 계류점을 모형에서 멀리 떨어뜨릴 수 없어서 모형선의 수평면 상 변위를 제한할 필요가 있었다. 따라서 본 연구에서는 강한 계류 스프링을 사용하였고, 스프링의 영향이 작은 횡동요, 종동요, 상하동요 위주로 모형시험과의 비교검증을 수행하였다.

실험과 수치해석의 비교를 위해서는 우선 실험의 신뢰성을 확인해야 한다. 모형과 수조 벽면의 거리가 충분한 사각수조와는 달리 예인수조에서는 수조 측벽 면의 반사파가 금방 모형시험 영역으로 되돌아오기 때문에 실험 데이터에서 반사파의 영향을 배제할 수 있는 운동 성분을 식별해 검증자료로 활용해야 했다. 본 연구의 대상 선형과 같은 함형을 이용한 Toxopeus et al. (2018)의 연구에서는 선수파, 횡파 중 시계열 운동을 한 개의 파장 조건에 대해 제공하고 있다. 이와 본 연구의 예인수조 실험 결과의 시계열을 비교하여 상하동요, 횡동요, 종동요에 대해서 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 따라서 내항 해석 결과는 저 세 운동 성분의 RAO(Response Amplitude Operator)에 대해 비교검증하였다.

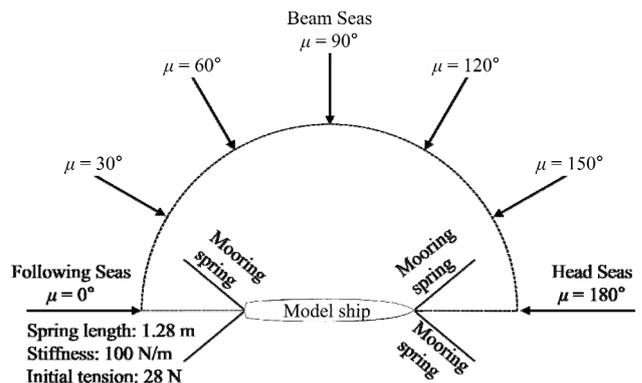


Fig. 2 Test setup of seakeeping test

모형선의 무게중심 위치에 관성계측장치(Inertial measurement unit, IMU)를 배치하여 모형선의 운동을 계측했다. 사용된 IMU는 MTi-680G(Xsens, Enschede, Netherlands)로, 횡동요와 종동요의 계측 오차의 표준편차는 0.25°, 상하동요 0.150  $\mu\text{m/s}^2$ 이다.

상하동요에 대해 계측된 가속도 성분은 고속 푸리에 변환 후 이중적분을 통해 변위의 시계열을 만들어 RAO를 구할 수 있었다.

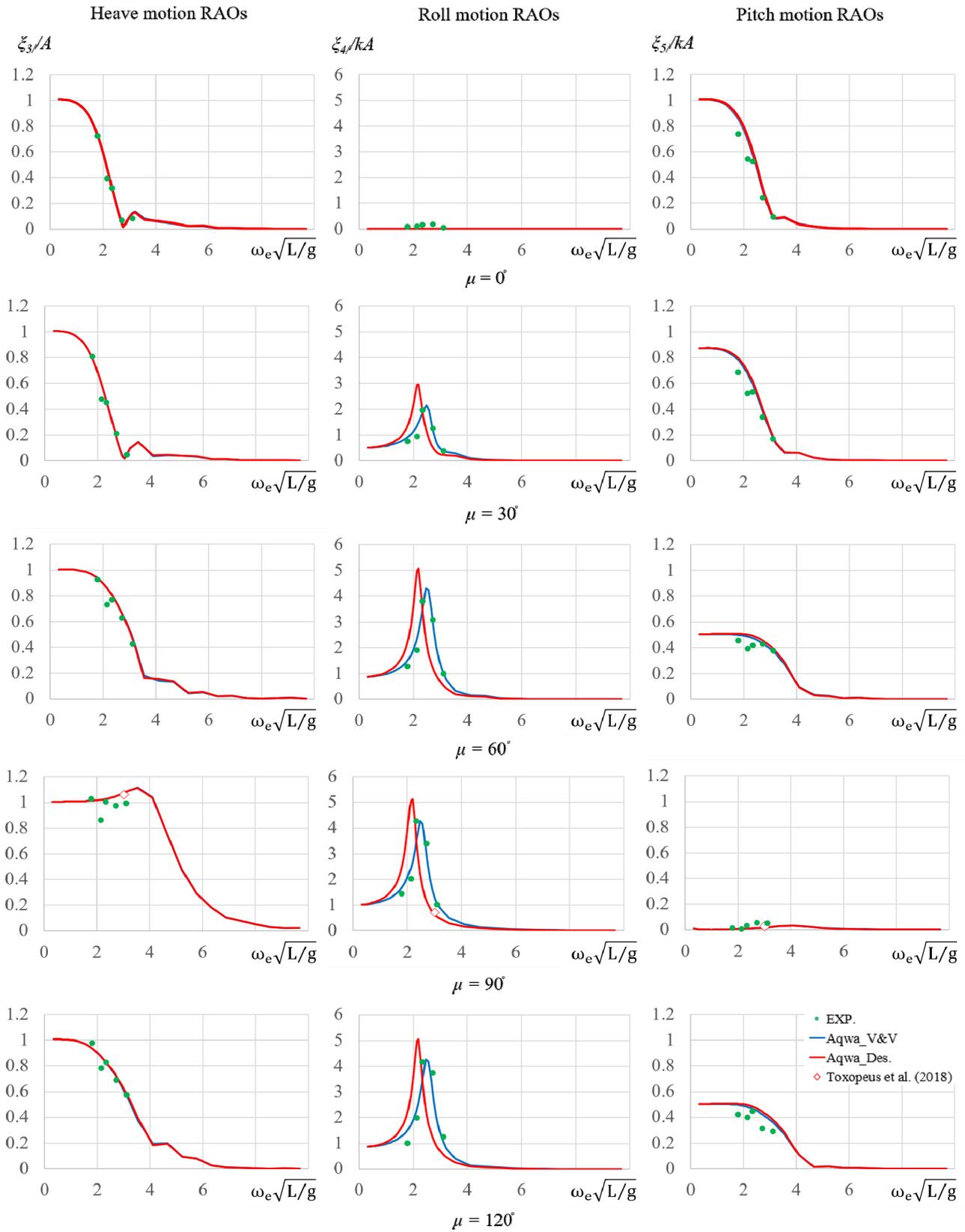


Fig. 3 Comparison of seakeeping experiments and numerical analysis ( $0^\circ \leq \mu \leq 120^\circ$ ): Aqwa\_V&V and Aqwa\_Des. mean that the GM and radius of gyration are set to be same as the experimental condition and designed value respectively.

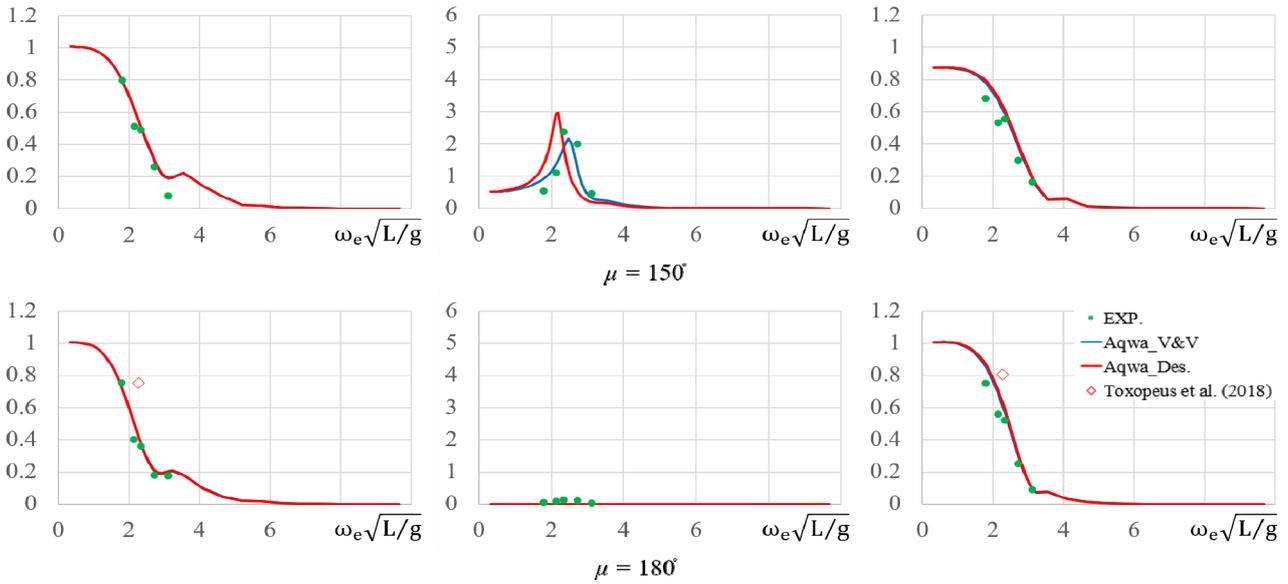


Fig. 4 Comparison of seakeeping experiments and numerical analysis ( $\mu = 150^\circ, 180^\circ$ ): Aqwa\_V&V and Aqwa\_Des. mean that the GM and radius of gyration are set to be same as the experimental condition and designed value respectively.

### 3.5 내항 해석 검증

내항 해석과 시험 결과를 비교하여 Fig. 3과 4에 나타내었다. 모형시험에서 6자유도 운동을 계측하였으나, 앞에서 설명한 바와 같이 예인수조 환경과 강한 스프링 상수의 영향이 무시될 수 있는 것으로 식별된 중동요, 횡동요, 상하동요의 결과만을 비교하였다.

본 연구의 모형시험에서 얻은 횡동요 감쇠값은  $0.011 \text{ Nms}^\circ$ 로, Toxopeus et al. (2018)의 횡동요 감쇠 시험 결과에서 추정된 횡동요 감쇠값인  $0.017 \text{ Nms}^\circ$ 보다는 작은 값을 보였다. 이 차이는 Toxopeus et al. (2018)의 연구에서는 방향타를 포함한 선형에 대한 시험을 수행한데 반해, 본 연구의 모형시험에서는 방향타를 제외한 조건을 적용한 데서 기인한 것으로 보인다.

Fig. 3과 4에서 Exp.는 수조 시험, Aqwa\_V&V는 비교검증을 위해 실험 모형과 동일하게 무게 배치가 적용된 조건의 수치해석, Aqwa\_Des.는 설계값의 무게 배치에 대한 내항 해석 결과를 뜻한다. Toxopeus et al. (2018)의 연구 결과는 Aqwa\_Des.에 대응된다. 횡방향 GM의 차이로 인해 Aqwa\_V&V와 Aqwa\_Des.의 차이가 횡동요 운동에 한해 유의미하게 발생하였다.

## 4. 운용 효율 평가

본 장에서는 2장에서 다룬 주요 임무의 내항 성능 기준과 3장의 내항 성능 해석 기법을 바탕으로 DTMB5415M함형의 연중 운용 효율을 계산하는 과정을 정리하였다. 우선 운용 시나리오를 수립하고, 대상 해역의 운용 시 내항 성능 해석을 수행했다. 마지

Table 6 Annual seastate occurrence around the Korean peninsula and in the North Pacific

Seastate	$H_{1/3}$ (m)		$T_m$ (Korean peninsula)			$T_m$ (North pacific)		
	Range	Mean	Probability (%)	Range (s)	Most probable (s)	Probability (%)	Range (s)	Most probable (s)
0 - 1	0 - 0.1	0.05	5.44	-	-	1.30	-	-
2	0.1 - 0.5	0.3	18.94	< 7.9	3.4	6.40	5.1 - 14.9	6.3
3	0.5 - 1.25	0.88	50.08	< 8.6	4.5	15.50	5.3 - 16.1	7.5
4	1.25 - 2.5	1.88	22.54	< 9.7	6.3	31.60	6.1 - 17.2	8.8
5	2.5 - 4	3.25	3.00	5.7-11.2	8.2	20.94	7.7 - 17.8	9.7
6	4 - 6	5.00				15.03	10.0 - 18.7	12.4
7	6 - 9	7.50				7.60	11.7 - 19.8	15.0
8	9 - 14	11.50				1.56	14.5 - 21.5	16.4
9	> 14	> 14				0.07	16.4 - 22.5	20.0

막으로 이 시나리오대로 함정을 운용할 때의 임무별 PTO를 계산하였다.

### 4.1 해석 조건의 선정

일반적으로 대한민국 해군 함정의 내항 성능 해석은 북태평양의 해상상태를 기준으로 수행된다. 이에 더하여 본 연구에서는 Kim and Rhee (2003)의 연구에서 제안된 한반도 근해역의 운항 시나리오를 추가하였다. Table 6은 북태평양과 한반도 근해역의 해상상태 비교로, 해상상태별 모달주기( $\omega_m$ )와 유의파고( $H_{1/3}$ ), 발생 빈도를 나타냈다. 각 해상상태의 파 스펙트럼을 구하기 위해 본 연구에서는 식 (1)의 Bretschneider 스펙트럼을 적용했다.

$$S(\omega) = \frac{5}{16} \frac{\omega_m^4}{\omega^5} H_{1/3}^2 \exp\left(-\frac{5\omega_m^4}{4\omega^4}\right) \quad (1)$$

함정 운용 시나리오에서 운항 속력은 해상상태별로 달라질 수 있다. 함정의 운항 속력에 대한 자료로는 Kehoe et al. (1983)의 연구를 활용할 수 있다. 해당 연구에서는 실제 함정의 운용 사례에 대한 조사를 통해 해상상태 4까지는 함정의 동력이 최대속력의 주된 제한 요소이나, 그 이상의 해상상태에서는 파랑 중 운동이 제한 요소로 작용함을 확인하였다. Fig. 5는 Kehoe et al. (1983)의 연구 내용을 반영해 재구성한 함정의 해상상태별 최대속력의 분포도이다.

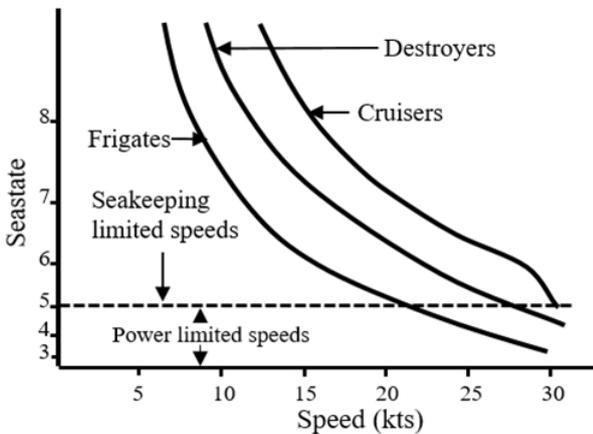


Fig. 5 Maximum advance speed of surface combatants with respect to seastates (Kehoe et al., 1983)

본 연구의 대상인 구축함(destroyer)에 대한 해상상태별 최대속력은 Table 7과 같다.

함정의 운용 성능 분석 과정에서 파도 조건은 단파정파(short crested wave)와 장파정파(long crested wave)의 두 가지 조건을 고려하여 적용할 수 있다. 이전의 실적선 사례에서 장파정파 조건의 내항 해석이 더 보수적인 결과를 내어 운항 성능 평가에 더 지배적인 영향을 주는 것으로 확인되어 (Kim and Rhee, 2003) 본 연구에서는 장파정파 조건의 운동 스펙트럼만 구하였다.

Table 7 Maximum advance speed of destroyer with respect to Sea states

Sea state	Maximum speed (kts)
2	30
3	30
4	30
5	25
6	20
7	15
8	10
9	5

### 4.2 함 운용 시나리오

4.1장에서 정리한 함 운용 조건들을 조합해 운용 속력, 파 방향, 해역에 대한 함 운용 시나리오를 정했다. 본 연구에서는 한반도 근해역과 북태평양 작전 시의 연중 PTO를 따로 구하였다. 만약 실적 함정의 운항 경로 분포와 대상 해역의 계절별 해상상태 정보 등이 제공된다면 더 상세한 운용 시나리오를 개발해 PTO 계산의 현실성을 높일 수 있다.

운용 시나리오의 선정에서 함속, 침로(파 방향)에 대한 부분은 임무별로 다르게 적용되어야 한다. 만약 실적함의 운용 자료가 충분히 갖춰졌다면 PTO의 계산에서 함속의 비율, 파 방향 등을 실제 운항 사례에서 얻은 값을 적용할 수 있겠지만, 자료 접근의 한계상 다음 사항을 고려하여 임무별 함속 범위를 결정하였다.

- 생존성과 전투는 해상상태에서 나올 수 있는 모든 속력 영역에 대해 검증해야 하므로 0 kts에서 각 해상상태별 최대속력까지 같은 비율로 정하였다.
- 이동 및 전투는 완전 이동 성능을 확보한 상황에 대응하므로 각 해상상태의 최대속력으로 정하였다.
- UNREP은 실적함 자료 검토 결과, 규범상의 속력인 15 kts로 정하였다.

이렇게 정한 임무별 함속 범위를 Table 8에 정리하였다. 함속이 특정 값이 아니라 범위로 정해진 생존성, 전투 조건에서 내항 해석을 수행한 함속 조건은 5 kts 간격으로 설정하였다.

Table 8 Advance speed distribution in operation

Tasks	Speed range
Seaway survivability	0 kts - Maximum speed
Transit and combat	Maximum speed
UNREP	15 kts
Combat	0 kts - Maximum speed

조우각 비율은 실적함의 내항 기준 선정 과정에서 고려한 파 방향 분포를 기반으로 정했다. 함정 운용 시에는 횡파를 최대한 피하고 주로 선수, 선미파 중으로 나타나는 최적 침로 위주로 운

용하는 것으로 보아 선수/선미파는 각 24 %, 횡파는 좌/우 각 1 %의 비율로 정했다. 다만 전투 임무에 대해서는 현행 내항 성능 기준이 전방향에 대해 적용되는 점을 감안해 모든 파 방향에 대해 동일한 비율을 적용하였다. 이동 및 전투, 해상보급, 생존 조건의 내항 해석에서 적용된 조우각 비율을 Fig. 6에 나타내었다.

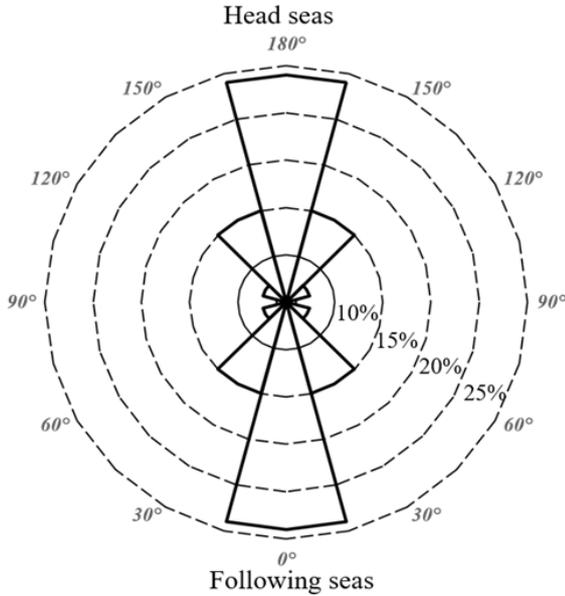


Fig. 6 Heading angle in operation of transit and combat, UNREP, and survivability

### 4.3 PTO 해석

내항 해석을 통해 해상상태와 함속 별로 운항 가능성을 평가한 결과의 일부를 정리해 Fig. 7에 나타냈다. 해상상태는 5 이상, 북태평양 영역에서의 이동 및 전투, 해상보급, 전투 임무에 대한 결과이다. 생존 조건은 모든 해상조건에 대해 만족하였기 때문에 표시하지 않았다. 그림에서 외곽의 회색 영역은 Fig. 5에서 식별된 최대 함속을 초과한 함속 영역이다.

모든 임무에 대해 해상상태 5, 6에서는 횡파 조건에서 임무 수행이 불가능한 경우가 자주 나타났으며, 이는 횡파 조건을 피하여 최적침로를 취하는 실제 함 운용 경향과 일치한다. 해상상태 7이나 8에서는 임무수행이 거의 불가능한 것으로 나타났다. Table 6에서 확인할 수 있듯 이러한 해상상태의 분포 비율이 10% 미만이므로 전체 PTO에 미치는 영향은 제한적일 것으로 보인다.

PTO는 모든 해상상태(S), 선속( $V_S$ ), 조우각( $\mu$ ) 조건에 대해, 임무의 수행이 가능한 조건의 발생 빈도를 계산해 구한다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$(PTO) = \sum (\alpha(S, V_S, \mu) \times p(S, V_S, \mu)) \quad (2)$$

여기서  $\alpha$ 는 임무 수행 가능 여부로, Fig. 7에서 임무 수행이 불가

능한 조건은 0, 임무 수행이 가능한 조건에 대해서는 1을 부여한다.  $p$ 는 S,  $V_S$ ,  $\mu$ 의 조합이 발생하는 빈도로, S는 Table 6에서,  $V_S$ 와  $\mu$ 는 각각 Table 8과 Fig. 6에서 구할 수 있다. 한 예로, 북태평양에서의 전투에 대한 PTO 계산 과정을 설명하자면 각 해상상태, 함속, 조우각의 발생 빈도를 계산해야 한다. 해상상태 5, 함속 15 kts, 조우각 150° 조건의 발생 빈도는 식 (3)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} p(5, 15, 150) &= p(S) \times p(V_S) \times p(\mu) \\ &= 20.94\% \times 16.7\% \times 10\% \\ &= 0.350\% \end{aligned} \quad (3)$$

Fig. 7에서 확인할 수 있듯, 이때는 함 운동이 기준을 넘어가므로 전투가 불가하다. 따라서  $\alpha(5, 15, 150)$ 는 0이다. 이렇게 모든 해상상태, 함속, 조우각 조건의 확률을 구하고, 이때의 임무 수행 여부를 종합하면 PTO를 구할 수 있다.

함정의 생존, 기동 및 전투, 해상보급, 전투의 네 가지 임무 시나리오에 대해 내항 기준을 충족하는 시간의 비율과 주된 제한사항을 구하여 Table 9에 나타냈다. 우선 모든 시나리오에서 함정의 생존성이 확보되어 PTO가 100 %임을 확인하였다. 이동 및 전투, 해상보급은 높은 해상상태 조건이 더 자주 나타나는 북태평양에서 더 낮은 것을 알 수 있다. 임무 수행의 주된 제한사항은 종동요나 헬리콥터 갑판의 상하운동 속력으로 나타났는데, 이는 종동요가 크게 발생하는 선수/선미파 조건에서의 운용 비율이 큰 탓으로 보인다.

Table 9. PTO analysis results

Tasks	PTO around Korean peninsula	PTO in North Pacific	Main restraint
Seaway survivability	100 %	100 %	-
Transit and combat	100 %	83.9 %	Pitch
UNREP	99.9 %	72.8 %	Pitch
Combat	98.9 %	80.6 %	Vertical velocity at the helideck

## 5. 결론

함정의 내항 성능 해석과 관련하여 운용 효율을 PTO를 통해 나타내는 일련의 과정을 보였다. 주요 임무의 내항 성능 기준을 문헌 조사를 통해 선정하였다. 공개함형인 DTMB5415M 함형을 이용한 내항 수치 해석을 수행해 운용 대상 해역에서 운동 스펙트럼을 구하였다. 운동 스펙트럼에서 내항 기준의 충족 여부를 판별해 북태평양과 한반도 인근 해역에서 운용될 경우의 각 임무의 작전 가능 시간을 계산하였다. 본 연구의 한계와 이를 극복하기 위한 제안은 다음과 같다.

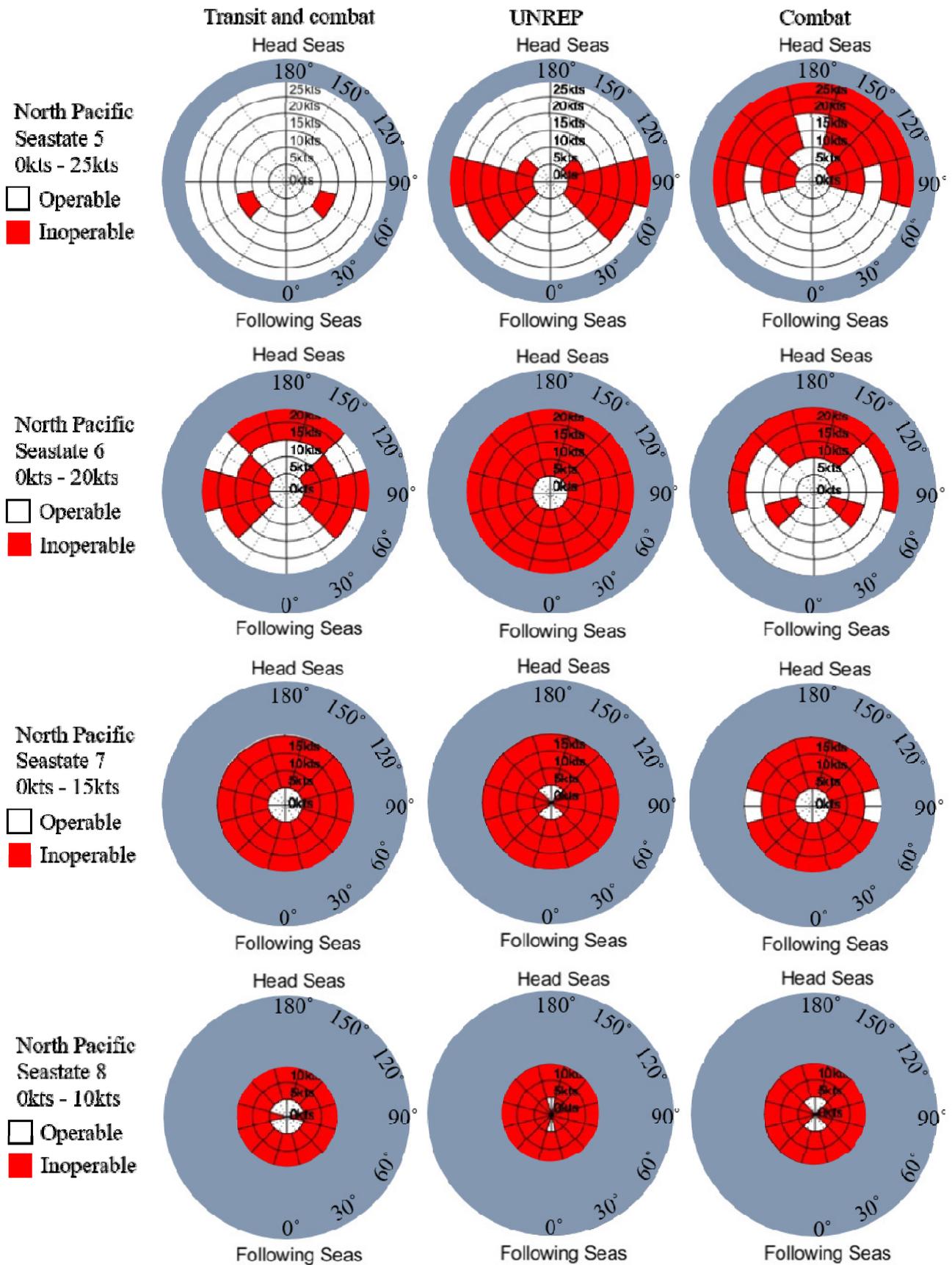


Fig. 7 Operability envelopes in the North Pacific

- 함의 해상상태별 최대 속력은 미 해군의 조사 자료를 활용하였다. 함정 건조 기술의 발달로 달성 가능한 최대 함속은 증가하였을 것으로 보아, 최신 자료를 반영할 필요가 있다.
- 본 연구에서는 임무 조건을 개략적으로 정했으나, 실제 함정의 PTO 계산에서는 세세한 임무별 주요 탑재체계의 운동 한계로부터 각 임무의 내항 기준을 선정해야 한다.
- 본 연구는 함 운동 기준에 따라 임무 수행을 가능/불가능으로만 나누었지만, Hosoda et al. (1983)의 연구와 같이 함 운동에 따른 작업 능력의 감소를 연속적인 함수로 적용할 수 있다. 최근 함정의 무인화 추세를 감안하여 탑재체계의 작동 효율의 감소를 기준으로 내항 성능 기준을 수정할 필요가 있다.

## 후 기

본 연구는 대한민국 해군과 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (P0001968. 2022년 산업혁신인재성장지원사업).

## References

Bales, N.K. and Cieslowski, D.S., 1981. A guide to generic seakeeping performance assessment. *Naval Engineers Journal*, 93(1), pp.59-66.

Comstock, E.N., Bales, S.L. and Gentile, D.M., 1982. Seakeeping performance comparison of air capable ships. *Naval Engineers Journal*, 94(2), pp.101-117.

Diez, M., Serani, A., Campana, E.F., Goren, O., Sarioz, K., Danisman, D.B., Grigoropoulos, G., Aloniati, E., Visonneau, M., Queutey, P. and Stern, F., 2015. Multi-objective hydrodynamic optimization of the DTMB 5415 for resistance and seakeeping. *13<sup>th</sup> International Conference on Fast Sea Transportation*, Washington DC, USA, 2-4 September 2015.

Graham, R., 1990. Motion-induced interruptions as ship operability criteria. *Naval Engineers Journal*, 120(2), pp.65-71.

Hosoda, R., Koyama, H., Kunitake, Y., Misyake, S., Maruyama, H., Nakamura, H., Matsushima, M. and Taguchi, K., 1983. Integrative evaluation of seakeeping performance in initial ship design (1st report). *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 153, pp.151-161.

ITTC, 2021. Seakeeping Experiments, *ITTC-Recommended Procedures and Guidelines*, 7.5-02-07-02.1.

Kehoe, J.W., Brower, K.S. and Comstock, E.N., 1983. Seakeeping and combat system performance - the operators' assessment. *Naval Engineers Journal*, 95(3), pp.256-266.

Kim, S.H. and Rhee, K.P., 2003. Annual sea state occurrences around the Korean Peninsula. *Journal of Ship and Ocean Technology*, 7(2), pp.20-28.

MAS, 2000. *Common procedures for seakeeping in the ship design process*. NATO Standardization Agreement 4154 Third Edition.

Nordforsk, 1987. *Assessment of ship performance in a seaway -the Nordic co-operative project: seakeeping performance of ships-*. Hirtshals Bogtryk/Offset A/S.

Schaffer, R.L., Byers, D.W. and Slager, J.J., 1983. Towards an improved hull form design methodology. *Naval Engineers Journal*, 95(3), pp.109-126.

Toxopeus, S., Sadat-Hosseini, H., Visonneau, M., Guilmineau, E., Yen, T.G., Lin, W.M., Grigoropoulos, G. and Stern, F., 2018. CFD, Potential flow and system-based simulations of fully appended free running 5415M in calm water and waves. *International Shipbuilding Progress*, 65(2), pp.227-256.

Wu, P.C., Hossain, M.D., Kawakami, N., Tamaki, K., Kyaw, H.A., Matsumoto, A., and Toda, Y., 2020. EFD and CFD study of forces, ship motions and flow field for KRISO container ship model in waves. *Journal of Ship Research*, 64(1), pp.61-80.

