



무인수상정 내항성능 기준 설정 방안에 관한 연구

신광호[†] · 송현우 · 최용훈 · 이웅기 · 최원삼 · 이원희
LIG 넥스원(주)

A Methodological Approach to Defining Seakeeping Performance Criteria for Unmanned Surface Vessel

Kwangho Shin[†] · Hyunwoo Song · Yonghoon Choi · Woongki Lee · Wonsam Choi · Wonhee Lee
LIG NEX1 Co., LTD.

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.

In response to the evolving nature of future naval warfare, the Navy is pursuing a strategic plan to enhance its existing manned forces and secure a range of unmanned surface vehicle (USV) assets designed for mission-specific operations. This initiative aims to strengthen operational capabilities and establish maritime superiority in future battlefields through the integration of manned and unmanned forces. USV is expected to operate independently in harsh maritime environments or conduct joint missions in coordination with manned ships, thereby expanding the Navy's operational flexibility and effectiveness in multi-domain maritime operations. Under such circumstances, USV is expected to be at a disadvantage in terms of seakeeping performance compared to larger and more capable manned ships. Therefore, greater attention should be directed toward the design and improvement of seakeeping performance during the development phase. Consequently, a preliminary examination of methods for establishing seakeeping performance criteria—which serve as the foundation for seakeeping-oriented design of USV is considered necessary. This paper aims to propose a method for establishing seakeeping performance criteria for USV to ensure their effective operation in harsh maritime environments. The main content includes a comparative and analytical review of seakeeping performance data for various vessels, including manned ships, to develop a procedure suitable for USV. As a case study, a 7-meter-class USV was used to establish preliminary seakeeping criteria and to validate them through model tests.

Keywords : Unmanned surface vessel(무인수상정), Seakeeping performance(내항성능), Design criteria(설계 기준), Optimal heading(최적 침로), Naval ship(함정), Model test(모형 시험)

1. 서론

오늘날 현대전과 미래전에서 무인체계의 중요성이 보다 강조되고 있다. 특히, 2022년 2월에 시작되어 현재까지 진행되고 있는 러시아-우크라이나 전쟁(이하, 러-우 전쟁)의 교훈을 살펴보면, 무인체계 운용에 대하여 시사하는 점이 많다.

국내에서도 국방 무기체계 소요 및 획득에서 무인체계의 연구 개발 및 도입이 본격적으로 진행되고 있는데, 해군에서는 기존 유인 전력을 보강하고, 향후 미래 해전의 전장 우세권 선점을 위해, 임무에 따른 각종 무인수상정(USV) 전력의 확보를 계획하고 있다.

무인수상정의 확보는 국내 인구절벽으로 인한 병역자원 감소 추세를 고려하여, 유인 플랫폼 운용 및 전투 수행 인력을 대체할 수 있는 해양 유·무인 복합 전투 체계로의 전환을 꾀하고, 4차 산업혁명 기술혁신에 따른 미래 전쟁 환경 및 양상 변화 등 불확실한 안보 환경에 능동적인 대응을 할 수 있을 것으로 기대한다. 또한, 위험 지역(또는 상황) 작전 시 유·무인 복합 전투 체계를 활용하여, 작전 효과를 극대화하고 인명 손실 최소화 및 병력 감소에 따른 전투력 저하의 상쇄 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

이러한 무인수상정의 국산화 개발을 위해서는 무인수상정에 적합한 설계/건조 기준이 마련되어야 하는데, 최근 해군에서는

기존 함정 설계/건조 기준에 별도 항목을 구성하여 “무인수상정 설계 지침서”를 제정하였다. 하지만, 무인수상정 설계/건조 기준을 위한 제반 연구나 경험이 부족한 상황에서 “무인수상정 설계 지침서”의 많은 부분이 기존 중·대형함에 적용하고 있는 수상함 설계/건조 기준을 따르도록 구성되어 있어, 현재 중·소형급으로 개발이 진행되고 있는 무인수상정 획득 사업에 직접적인 적용이 제한되는 상황이다.

중·소형급 무인수상정은 동일 임무를 수행하는 유인 전력 대비 규모나 제원이 작을 것으로 예상되며, 유·무인 복합 전투 체계를 구성하여 유인 전력과 함께 작전을 수행할 가능성이 높다. 이러한 상황에서 무인수상정은 상대적으로 규모나 제원이 큰 유인 전력 대비 내항성능(seakeeping performance) 측면에서 불리할 것으로 예상되며, 거친 해상 환경에서 완벽한 임무 수행을 하려면, 개발간 내항성능 설계 측면에 보다 많은 관심을 가져야 한다. 그리고 내항성능 설계의 출발점이 되는 무인수상정 내항성능 기준 정립 방법에 대하여 선행적인 검토가 필요할 것으로 여겨진다.

이러한 현실적인 부분을 감안하여, 본 논문에서는 거친 해상 환경에서 운용이 예상되는 무인수상정의 원활한 임무 수행을 보장하기 위한, 무인수상정의 내항성능 기준 설정 방안을 제시하고자 한다.

2. 현대 해상전과 무인수상정

2.1 러-우 전쟁

현대 해상전에서 무인체계의 부상은 기존의 해군 작전 개념을 근본적으로 변화시키고 있다. 특히, 무인수상정의 등장은 항공모함이나 이지스 구축함 등 거함 중심으로 이루어졌던 전통적 제해권 확보 및 유지 개념에 근본적인 혁신을 요구하고 있다. 이러한 변화는 최근 러-우 전쟁에서 극명하게 드러났다. 우크라이나는 전통적인 해군 전력의 대부분을 상실한 상태에서도 소형 무인수상정을 활용한 비대칭 전략을 통해 러시아 흑해함대의 작전 활동을 효과적으로 억제하였다. 결과적으로 러시아 해군은 흑해함대를 크림반도에서 동쪽으로 약 300km 떨어진 노보로시스크항으로 철수시킬 수밖에 없었다. 이 사례는 소형 무인수상정이 강력한 상대 해군의 작전 수행을 효과적으로 거부할 수 있음을 명확히 보여주었으며, 현대 해양 거부 전략의 중요한 수단으로서 무인수상정의 잠재력을 입증한 것이다(Kim and Ha, 2025).

2.2 무인전력(USV/UAV 등)의 활약

개전 이전과 개전 초, 러시아 해군은 함정의 기동성을 활용하여 흑해함대 전력 증원, 해상교통로(sea lines of communications) 봉쇄, 지상 핵심목표 타격 등을 통해 전쟁 수행에 유리한 여건을 조성했다. 개전 당시 러시아 흑해함대는 대형 함정 12척(순양함 1척, 호위함 5척, 잠수함 6척) 등을 포함하여 총 68척의 함정을

Table 1 Loss of Russia naval ship(as of March 2025)

Weapon	Damage	Sinking	Total
USV	7 (2FF, 2PCC, 1LST, 1MLS, 1LCM)	5 (2PCC, 1LST, 1MLS)	12
UAV	2 (2PB)	1 (1LCM)	3
Missile	11 (2FF, 1PCC, 6LST, 1SS, 1AGS)	3 (1CG, 1PCC, 1LST)	14
Other	2 (1PCC, 1LCM)	-	2
Total	22	9	31

보유하고 있었던 반면, 우크라이나 해군은 대형 함정 1척(호위함)과 소형 경비함정 위주로 총 16척의 함정을 보유했다. 러시아 해군은 전쟁 개시 전 함정의 기동성을 효과적으로 활용하여 양적/질적 측면에서 우크라이나 해군을 압도할 수 있는 유리한 전쟁 여건을 조성했다(Han, 2025).

러-우 전쟁에서 무인수상정(USV)/무인기(UAV)와 같은 무인전력은 함정, 항구에 대한 공격뿐만 아니라 육상 지휘 시설과 같은 핵심표적에 대한 타격 등 여러 방면에서 활용되었다. 이러한 상황을 두고 러-우 전쟁을 최초의 드론 전면전(the first full-scale drone war)이라고 언급하기도 한다. 무인수상정은 러-우 전쟁 이전부터 군사적 수단으로 운용되었지만, 대규모 무인수상정이 운용된 것은 러-우 전쟁이 최초이다. Table 1은 우크라이나에 의해 침몰 또는 손상된 러시아 해군 함정을 나타낸 것이다.

Table 1에서 보는 것처럼 우크라이나에 의해 격침 또는 손상을 입은 러시아 해군 함정의 약 50%(15척)가 무인수상정/무인기와 같은 무인전력의 공격에 의한 것으로 나타났다. 대형 함정이 거의 없었던 우크라이나 해군은 무인 전력의 활약으로 러시아 해군에게 수세적인 상황을 강요했고, 러시아 해군의 자유로운 해양 사용을 제한하는 해양 거부를 달성했다. 우크라이나는 소형·저비용의 무인 전력을 활용하여 러시아가 지배하고 있던 흑해에서 새로운 전선을 열었고, 흑해에서 군사력 균형을 변화시킨 것이다(Han, 2025).

3. 내항성능

3.1 선박의 내항성능

해양에서 선박은 바람과 파도가 끊임없이 변화하는 가혹한 환경 속에서 운항한다. 이와 같은 환경에서의 운항 능력을 기술적으로 선박의 내항성능이라 한다. 선박의 내항성능은 파랑 중 운동 특성에 의해 결정되며, 이는 탑승 인원의 안전과 작업 수행 능력뿐만 아니라, 선내 기계 및 장비의 성능, 선체 구조 건전성 에까지 직접적인 영향을 미친다(Zu et al., 2024).

기존에 발표된 선박 내항성능 기준 및 관련 논문을 전반적으로

Table 2 General operability limiting criteria for ships

Item	Naval vessels	Fast small craft
Vert. acc. RMS, FP	0.275 g	0.650 g
Vert. acc. RMS, bridge	0.200 g	0.275 g
Lat. acc. RMS, bridge	0.100 g	0.100 g
Roll RMS	4.0 deg	4.0 deg
Slamming, crit. prob.	0.03	0.03
Deck wetn., crit. prob.	0.05	0.05

Table 3 Points of view considered in the criteria

Item	Hull safety	Equipment operation	Cargo safety	Personnel safety & efficiency
Vert. acc. FP	○		○	
Vert. acc., bridge		○		○
Lat. acc., bridge		○	○	○
Roll		○	○	○
Slamming	○			
Deck wetness	○			

검토한 Zu et al. (2024)에 따르면, 현존하는 소형 선박의 정형화된 내항성능 기준은 거의 없는 상황이며, 매우 도전적인 과제로 언급하고 있다. 이러한 상황에서 무인수상정 특히, 중소형급 무인수상정의 공개된 내항성능 기준은 전무하며, Table 2 및 Table 3과 같이 NORDFORSK (1987)에서 일부 유인 소형 선박의 내항성능 기준을 참고할 수 있는 수준이다.

3.2 함정 내항성능 기준

함정의 내항성능은 함정이 해상 운용 중 임의 해상상태에서 주어진 임무를 달성할 수 있는 능력을 말하며, 승조원의 안락성, 탑재 장비의 운용성, 함의 생존성 등과 같은 성능을 판단하는 기준이 된다(ROK Navy, 2022). 상기 정의에서도 알 수 있듯이, 함정 내항성능의 세부 기준은 승조원 및 탑재 장비의 관점에서 검토되어야 하나, 일반적으로 탑재 장비보다는 승조원의 작업 효율성이 내항성능 측면에서 많은 영향을 받을 것으로 여겨져, 통상 승조원 측면에서 내항성능 기준을 검토하고 있다. 또한, 새로운 함정이 설계/건조될 경우, 비슷한 규모나 제원을 갖는 유사 실적함의 내항성능 세부 기준을 차용하고 있는 것이 현실이었다. 하지만, 무인수상정의 경우 함 운용을 위한 승조원이 탑승하지 않으므로, 기존과 다른 새로운 관점에서의 접근이 필요하다.

대한민국 해군의 함정 설계/건조 기준은 “내항성능 기준 설정 지침”을 포함하고 있는데, 본 기준에서는 함정별 내항성능 기준 값이 명시되어 있는 것이 아니라, 실무서 성격의 함정 내항성능 기준 설정을 위한 가이드 라인이 명시되어 있다. 즉, 함정의 내항성능은 함정 설계 시마다 함정의 규모나 임무 등을 종합적으로

판단하여, 개별 맞춤형으로 그 기준을 설정하고 있다.

최근 제정된 “무인수상정 설계 지침서”의 내항성능 항목을 살펴보면, 내항성능 기준은 해당 무인수상정의 운용 개념, 크기, 선형 특성 등을 고려하여 설계 간 구체화하여야 하며, 본 지침서에서 별도 규정하고 있지 않은 사항은 함정 설계/건조 기준 “내항성능 기준 설정 지침” 및 “함정 탑재 체계 함 운동 적용 기준”을 참고 할 수 있는 것(ROK Navy, 2024)으로 명시되어 있다. 세부 내용을 살펴보면, 중·대형함에 적용하는 기존 내항성능 기준 설정 지침과 내용 구성이 유사하나, 주목할 사항으로 침로 제한 여부는 설계 요구조건에 따르며, 무인수상정에 파항의 인식 및 최적 침로 도출 기능이 있는 경우 최적침로 조건을 적용할 수 있다(ROK Navy, 2024) 라고 명시되어 있다. 이는 승조원이 없는 상

Table 4 Categorization of seakeeping performance assessment criteria(ROK Navy, 2022)

Categorization	Unit	Effects on the performance of Naval Ship
Roll	deg	<ul style="list-style-type: none"> Decrease in crew work efficiency and personnel injuries Decrease in the ship's operational capability
Pitch	deg	<ul style="list-style-type: none"> Decrease in crew work efficiency and personnel injuries Decrease in the ship's operational capability
Vertical acceleration	g	<ul style="list-style-type: none"> Crew fatigue and reduction in work productivity Decrease in the ship's functional capability
Longitudinal acceleration	g	<ul style="list-style-type: none"> Crew fatigue and reduction in work productivity Decrease in the ship's functional capability
Vertical velocity	m/sec	<ul style="list-style-type: none"> Relative velocity to the aircraft Inability to safely take off and land the aircraft Damage to the aircraft and landing gear
Frequency of slamming events	No./s	<ul style="list-style-type: none"> Reduced functionality of mast-mounted equipment Damage to the forward bottom of the hull
Frequency of deck wetness events	No./s	<ul style="list-style-type: none"> Crew injuries and drowning incidents Damage to equipment on the forecastle deck
Frequency of sonar dome exposure	No./s	<ul style="list-style-type: none"> Reduced functionality of the sonar system
Frequency of propeller exposure	No./100 pitch	<ul style="list-style-type: none"> Degradation of the propulsion system Increase in ship speed loss

황에서 자율운항 또는 원격통제를 통해 항해하는 무인수상정이 스스로 운용에 적합한 최적 침로(Optimal heading)를 찾을 수 있거나, 권고할 수 있는 기능을 요구하는 것으로 볼 수 있다.

일반적인 유인 함정에 적용하는 함정 설계/건조 기준 “내항성능 기준 설정 지침”에서는 Table 4와 같이 내항성능 평가 요소를 분류하고 있고, “무인수상정 설계 지침서”에는 Table 5와 같이 내항성능 평가 요소별 분류 및 고려 요소를 언급하고 있다.

Table 5 Classification and considerations by seakeeping performance evaluation factors (ROK Navy, 2024)

Evaluation factors (Unit)	Considerations (Influence on ship performance)
Roll / Pitch (deg)	• Degradation of the ship's mission performance capability
Vertical / Longitudinal acceleration (g)	• Degradation of the ship's mission functions
Vertical velocity (m/s)	• Degradation of the ship's mission functions

[Notes]

For phenomena such as slamming, deck wetness, and the exposure of the sonar dome or propeller, reference may be made to the guidelines for establishing seakeeping criteria as necessary.

4. 무인수상정 내항성능 기준 설정 방안

4.1 무인수상정 내항성능 기준 설정 절차

함정으로 분류되는 무인수상정은 항만, 해상의 감시 및 정찰, 기뢰전, 해상전투 등 해양 작전 임무 수행을 위해 고정된 승조원 없이 원격제어 및 자율적으로 수상에서 임무를 수행하는 경하톤 수 500톤 이하의 수상 무인체계를 말한다(ROK Navy, 2024). 이러한 무인수상정은 크기 및 제원에 따라 Table 6와 같이 분류할 수 있다.

본 논문에서는 Table 6의 분류를 고려, 소형 무인수상정에 해당하는 7m급 무인수상정(이하 본 정)의 내항성능 기준을 설정하

Table 6 Classification of USV by lightweight displacement (ROK Navy, 2024)

Item	Lightweight displacement	Remarks
Small USV	10 Ton or less	Lenght overall about 10 m or less
Medium USV	More than 10 ton ~ 100 Ton or less	Lenght overall about 10 ~ 30 m
Large USV	More than 100 ton ~ 500 Ton or less	Lenght overall about 30 m or more

[Notes]

More than 500 Ton : Unmanned surfac combatant

는 과정을 예시로 들어, 무인수상정 내항성능 기준 설정 방안을 제시하고자 한다.

유인 함정의 내항성능은 임무 수행을 위한 승조원 안락성 및 탑재 장비 운용성 등의 관점에서 기준값을 설정하나, 거친 해상 환경에서 승조원이 탑재 장비보다 민감도가 높으므로, 통상 승조원의 안락성 및 작업 효율성 등을 고려하여 기준값을 설정한다. 무인수상정의 경우 별도 승조원이 없으므로 탑재 장비의 운용성 관점에서 기준값 설정이 필요하다.

함정의 내항성능 기준 설정 과정은 함정의 최상위 운용 성능에서 제시하는 내항성능 요구조건에서부터 시작한다. 통상 함정의 운용 개념과 고유 임무 등을 고려하여 최상위 요구조건에서 내항성능 요구조건을 기술하는데, 본 정의 내항성능 최상위 요구조건은 “해상상태 3에서 자율운항 및 원격통제를 통해 목적지 이동 가능”으로 가정하였다.

먼저, 내항성능 요구조건에 명시된 해상상태 3은 Table 7과 같이 유의파고 0.5~1.25m 범위의 파고 상태인데, 해상상태 3 조건에서 모형시험 및 실해상시험 등 성능 검증을 위한 기준 파고는 평균값인 '0.88m' 를 적용하였다.

해상상태 3에서 파향 조건은 전 침로(all-direction heading) 또는 최적침로 중에서 선택해야 하는데, 전 침로는 360도 전방위 파고에 대해 성능을 유지해야 하고, 최적침로는 특정 방위 파고에 대해 성능을 유지하는 조건이다. 최적침로는 함정의 임무별 기준 함속의 내항성능 해석(또는 모형시험) 결과에서 연속된 두 파향 조건(파향조건의 간격은 30도 이하로 설정)에서 내항성능 기준을 충족하는 침로로 정의할 수 있다(ROC Navy, 2022). 본 정의의 파향 조건은 본 정의 제원 및 규모, 유사 실적함의 기준 등을 고려하여, 「최적침로」로 설정하였다.

속력 조건은 본 정의 제원 및 규모, 유인 함정과 동조 기동을 고려한 해군 함정 통상 작전 속력 및 유사실적선(해검 시리즈) 운용 경험 등을 고려, 「10kts 및 20kts」로 설정하였다.

세부 평가 요소는 Table 3 ~ 5를 참고하여, 「횡동요(roll), 종동요(pitch), 수직가속도(vertical acceleration), 수평가속도(longitudinal acceleration)」로 설정하였다. ROK Navy(2024)는 Table 5와

Table 7 Sea state (ROK Navy, 2022)

Sea state	Significant wave height (m)		Wind speed (kts)		Wave period (sec)	
	Range	Mean	Range	Mean	Range	Most probable
0 ~ 1	0 ~ 0.1	0.05	0 ~ 6	3.0	-	-
2	0.1 ~ 0.5	0.30	7 ~ 10	8.5	5.1 ~ 14.9	6.3
3	0.5 ~ 1.25	0.88	11 ~ 16	13.5	5.3 ~ 16.1	7.5
4	1.25 ~ 2.5	1.88	17 ~ 21	19.0	6.1 ~ 17.2	8.8
5	2.5 ~ 4	3.25	22 ~ 27	24.5	7.7 ~ 17.8	9.7
6	4 ~ 6	5.00	28 ~ 47	37.5	10.0 ~ 18.7	12.4
7	6 ~ 9	7.50	48 ~ 55	51.5	11.7 ~ 19.8	15.0
8	9 ~ 14	11.50	56 ~ 63	59.5	14.5 ~ 21.5	16.4
> 8	> 14	> 14	> 63	> 63	16.4 ~ 22.5	20.0

같이 내항성능 세부 평가 요소로 중동요, 횡동요, 수직가속도, 수평가속도, 수직속도를 언급하고 있고, 슬래밍, 갑판침수 및 소나돔/프로펠러 노출은 필요시 참고 수준으로 언급하고 있다. NORDFORSK (1987)은 Table 3과 같이 탑재 장비 운용성 관점에서 횡동요, 수직가속도, 수평가속도를 언급하고 있고, 선체 안전성 관점에서 슬래밍, 갑판침수를 언급하고 있다. 수직속도는 Table 4에 언급된 바와 같이 항공기 이착함 상황을 고려한 사항으로 본 정 운용 개념과는 맞지 않는 항목이며, 소나돔/프로펠러 노출도 본 정과 맞지 않는 항목이다. 또한, 슬래밍 및 갑판침수는 탑재 장비보다는 선체 안전성과 관련한 항목으로, 본 정 선체 구조 설계 기준인 한국선급(KR) 고속경구조선 규칙에 따라 선체구조 안전성을 위한 설계하중 계산 시, 슬래밍/충격압력 및 갑판침수 사항이 포함되어 있으므로, 본 정 내항성능 세부 평가 요소에서 제외하였다.

정리하자면, 상기 내용에서 본 정 내항성능 최상위 요구조건인 “해상상태 3에서 자율운항 및 원격통제를 통해 목적지 이동 가능”을 구체화하는 과정에서, 파고, 침로, 속력, 세부 평가 요소를 설정하였다.

다음 단계에서는 세부 평가요소인 횡동요, 중동요, 수직가속도, 수평가속도의 기준값을 설정해야 한다. 무인수상정의 특성을 고려하여 탑재 장비 관점에서 기준값을 설정해야 하는데, 자율운항 및 원격통제를 통해 목적지를 이동함에 있어, 필수적으로 정상 작동이 요구되는 주요 장비 체계의 선정이 선행되어야 한다. 상기 내항성능 요구조건 구현을 위한 주요 장비 체계는 추진장비(디젤엔진, 발전기), 탐지/인식장비(향해레이더, 근거리장애물탐지모듈, 라이더, 전자광학장치, 카메라), 항법장비, 통신장비, 통제장비(탐지/인식처리모듈, 자율제어모듈, 정보처리모듈)로 선정하였다. 이러한 장비 체계 중에 장비 정상 작동/운용 측면에서 상대적으로 함 운동으로 인한 영향이 작을 것으로 예상되는 항법장비, 통신장비, 통제장비는 제외하고, 나머지 추진장비 및 탐지/인식장비의 운동 제한값을 기준으로 본 정 내항성능 세부 평가 요소의 기준값을 설정하였다.

4.2 7m급 무인수상정 내항성능 기준(안)

자율운항 및 원격통제를 통해 본 정이 목적지 이동을 할 경우, 필수적인 주요 장비 체계 중 내항성능 세부 평가요소값으로 활용하는 장비 체계는 추진장비(디젤엔진, 발전기), 탐지/인식장비(향해레이더, 근거리장애물탐지모듈, 라이더, 전자광학장치, 카메라)로 선정하였다. 그리고 상기 장비 체계의 운동 한계값을 검토하여, 본 정 내항성능 세부 평가요소의 기준값 설정에 활용하였다. 추진장비인 디젤엔진 및 발전기는 장비 내부 유허율 분배 제한을 고려하여, 횡동요 및 중동요의 운동 한계값을 가진다. 그리고 탐지/인식장비인 향해레이더, 근거리장애물탐지모듈, 전자광학장치, 카메라는 센서 시야각(FOV, Field Of View) 제한을 고려하여 횡동요 및 중동요 운동 한계값을 검토하였고, 내부 구성품 장비의 내구성 등을 고려하여 수직가속도 및 수평가속도의 운동 한계

Table 8 Motion limit values of major equipment systems

Item	Diesel Engine		Generator		Navigation Radar	
	Max.	RMS	Max.	RMS	Max.	RMS
Acquisition Strategy	COTS		COTS		COTS	
-	Max.	RMS	Max.	RMS	Max.	RMS
Roll (deg)	± 20.00	7.84	± 30.00	11.76	-	6.00
Pitch (deg)	± 10.00	3.92	± 30.00	11.76	-	4.00
Vertical acceleration (g)	-	-	-	-	-	0.20
Longitudinal acceleration (g)	-	-	-	-	-	0.08
Item	Close-range obstacle sensing module		EO/IR		Camera	
	Max.	RMS	Max.	RMS	Max.	RMS
Acquisition Strategy	Development Item		Development Item		Development Item	
-	Max.	RMS	Max.	RMS	Max.	RMS
Roll (deg)	± 8.00	3.14	-	10.00	-	7.00
Pitch (deg)	± 8.00	3.14	-	6.00	-	5.00
Vertical acceleration (g)	± 4.00	1.57	-	0.40	-	0.24
Longitudinal acceleration (g)	± 3.00	1.57	-	0.20	-	0.15

값을 검토하였다. 라이더의 경우, 설계 단계에서 운동 한계값 제시가 어려운 상황에서, 향후 실장비 탑재 후 해상시험을 통해 운동 한계값 확인이 가능할 것으로 판단되어, 현 시점에서는 검토 대상에서 제외하였다. Table 8은 본 정의 주요 장비 체계별 운동 한계값이다. 여기서 운동 한계값은 개별 장비 제작사 또는 개발자로부터 확보한 보증값을 적용하였다.

장비별 운동 한계값의 최대값(Max.)과 RMS(Root Mean Square)의 변환 관계는 불규칙파의 파고 및 파 주기 관련 Yum (2015)에 명시된 수식을 준용하여, 최대값(Max., 파고 개념)은 RMS값의 5.1배를 갖는 것으로 적용하였다. 참고로 내항성능의 또다른 정량적 지표로 사용하는 유의 단일 진폭(SSA, Single Significant Amplitude)은 RMS 값의 2배이다.

본 정은 센서 성능의 향상을 위해 마스트 상단에 수평안정화기를 탑재하여, 횡동요 및 중동요 ± 5 도(RMS 1.96 도)의 운동값을 보상하도록 설계하였다. 따라서, 본 정 내항성능 세부 평가요소의 횡동요 기준값은 Table 8에서 횡동요 최소 운동 한계값을 갖는 근거리장애물탐지모듈(close-range obstacle sensing module)에 수평안정화기 보상값을 더하여 기준값을 설정하였다. 그리고, 중동요의 기준값은 Table 8에서 중동요 최소 운동한계값을 갖는 디젤엔진(Diesel Engine)을 기준으로 설정하였다. 근거리

장애물탐지모듈의 중동요의 경우, 수평안정화기 보상값 RMS 1.96도를 더할 경우 한계치가 RMS 5.10도가 되므로 디젤엔진 한계치 RMS 3.92도보다 크게 된다. 그리고, 수직가속도 및 수평 가속도 기준값은 Table 8에서 최소 운동 한계값을 갖는 항해레이더(navigation Radar)를 기준으로 설정하였다.

상기 근거를 바탕으로 7m급 무인수상정 내항성능의 기준은 Table 9와 같이 설정하였다.

Table 9 Seakeeping performance criteria for 7m class USV

Item	Contents	
Seakeeping performance	Transit to destination under Sea State 3 through autonomous navigation and remote control	
Condition	Significant wave height	0.88 m
	Heading course	Optimal heading
	Ship speed	10 / 20 kts
Evaluation factors	Roll	5.10 deg
	Pitch	3.92 deg
	Vertical acceleration (CG)	0.20 g
	Longitudinal acceleration (CG)	0.08 g

4.3 7m급 무인수상정 내항성능 모형시험

내항성능 모형시험은 해상 환경의 파랑 중에서 선박이 나타내는 동요 특성을 정량적으로 평가하기 위한 시험으로, 모형선이 실선과 동일한 동역학적 특성을 보이도록 하는 것이 핵심이다. 특히, 파랑 중 선박 거동은 중력의 영향을 받으므로, 모형시험에서는 프루드(Froude) 상사법칙을 적용하여 실선과의 유사성을 확보한다. 이 상사법칙의 원리는 파랑의 길이, 주기, 속력과 같은 주요 파라미터를 축척비에 따라 정밀하게 변환하는 데 사용하며, 내항성능 모형시험의 신뢰성을 확보하기 위한 필수 조건이다.

모형시험은 국내 중소조선연구원의 해양공학수조(ocean engineering basin)(Fig. 1)에서 무인수상정 축소모형을 제작하여 수행하였으며, 모형시험 결과를 통해 실선 내항성능을 예측하였다. 무인수상정 축소모형은 1 : 18 의 축척비(scale)로 제작하였고, 모형선에 센서를 부착하여 해상상태 및 속력별 모형선의 운동값(roll, pitch, heave)을 측정하여 실선으로 확장(extrapolation) 하였다.

4.4 내항성능 기준(안) - 모형시험 결과 비교

해상상태 3에서 무인수상정 속력이 10kts 및 20kts 일 때, 횡동요, 종동요, 수직가속도 및 수평가속도 모형시험 결과는 Polar Plot(합수 180°) 형태의 Fig. 2 ~ 5와 같다. Polar Plot은 중심값

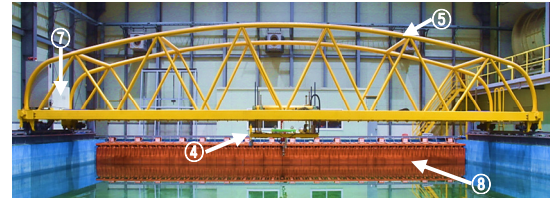
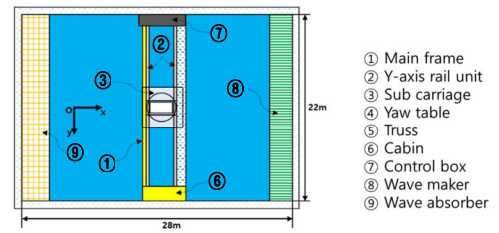


Fig. 1 Ocean Engineering Basin

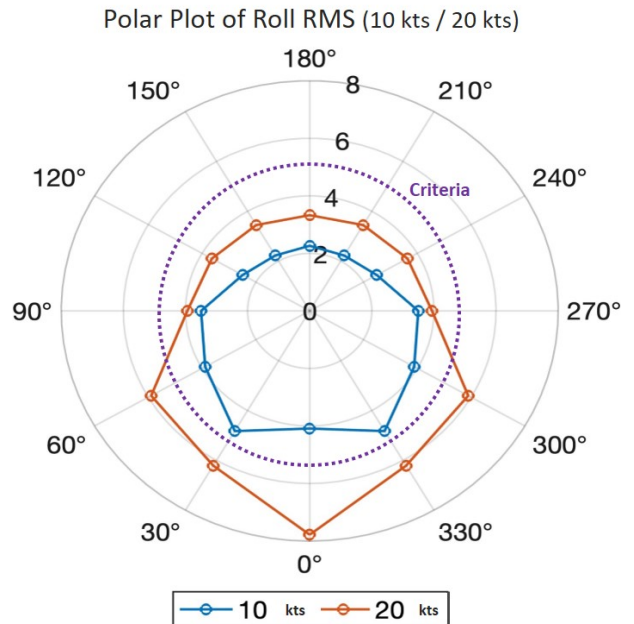


Fig. 2 Roll (deg)

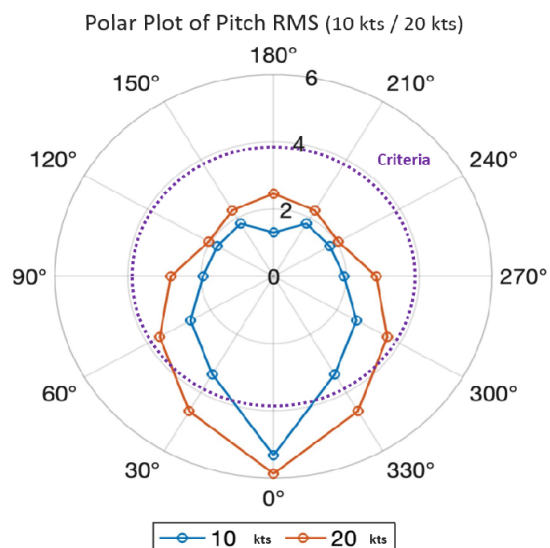


Fig. 3 Pitch (deg)

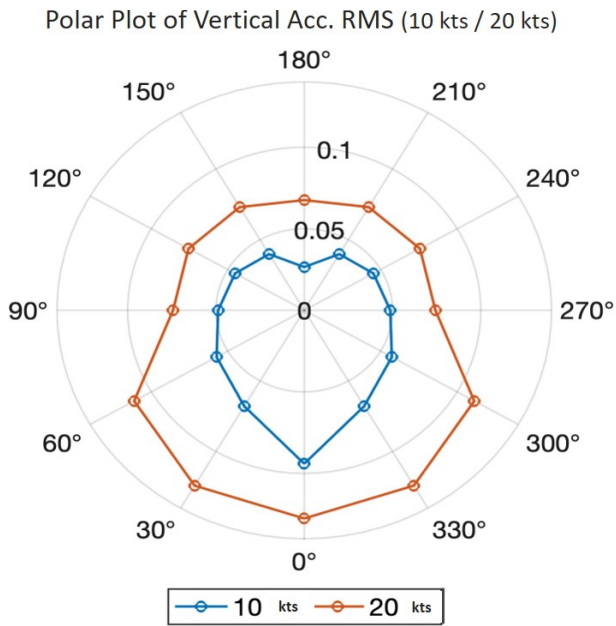


Fig. 4 Vertical acceleration (g)

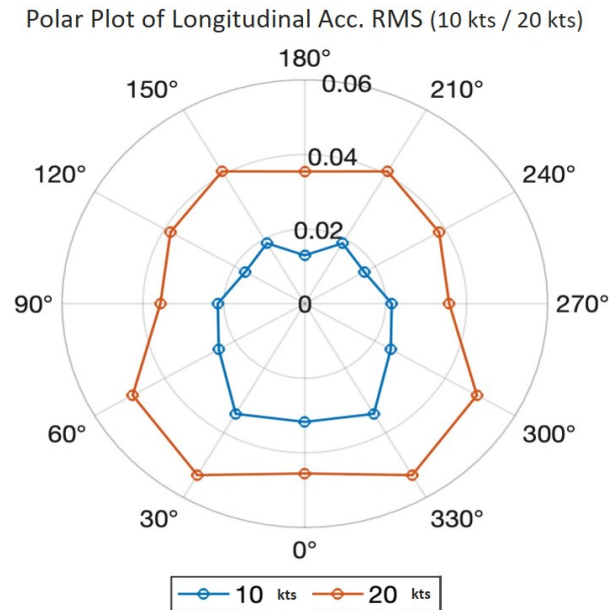


Fig. 5 Longitudinal acceleration (g)

0에서부터 반경이 커져 갈수록 횡/종동요는 각도(°)가 큰 값을, 수직/수평가속도는 가속도값(g)이 큰 값을 갖는 형태이다.

해상상태 3 일 때, 7m급 무인수상정의 내항성능 모형시험 결과를 살펴보면, 횡동요(Fig. 2)는 속력 10 kts 조건에서 전 방위 기준값을 만족하였고, 속력 20 kts 조건은 함미 일부 구간에서 기준값을 초과하나, 최적 침로 구현은 가능하므로 기준값을 만족하였다.

종동요(Fig. 3)은 10 kts 및 20 kts 모두 함미파(0°, Following sea) 구간에서 기준값을 초과하나, 최적 침로 구현이 가능하므로 기준값을 만족하였다.

수직가속도(Fig. 4) 및 수평가속도(Fig. 5)는 전방위에서 기준

값을 만족하였다.

전반적으로 함수파(180°) 대비 함미파(0°)에서 함의 운동값이 크게 측정되었는데, 이는 날렵한 형태의 함수 형상 대비, 평판 형태의 함미 형상 특성에 따라, 함의 불균형 발생 시 무인수상정 모형을 반응하는 정도의 차이가 운동값의 차이로 이어지는 것으로 판단된다. 향후 실선을 기반한 해상시험에서 본 모형시험과 실선과의 내항성능 경향 차이를 비교할 예정이다.

5. 무인수상정 내항성능 향상 방안

본 연구를 시작하기 전에는 승조원이 탑승하지 않는 무인수상정 특성을 감안했을 때, 무인수상정의 내항성능 기준은 유인 함정보다 높게 설정해도 되는 것 아니냐는 선입견이 있었다. 하지만, 무인수상정 자체도 선박 또는 함정이고, 내항성능 자체가 플랫폼의 규모나 제원에 따라 대부분 결정되기 때문에 그 물리적 한계를 뛰어넘기는 쉽지 않다. 이러한 상황에서 임무 수행을 위해 탑재하는 장비들의 운동 한계값을 높이는 방안들을 적용하여, 본 정의 내항성능을 향상할 방안을 검토하였다.

5.1 근거리접촉물탐지장치

무인수상정이 실 해상에서 자율운항을 하는 경우, 주요 장비 체계의 정상 작동을 기반으로 한 임무 수행을 위해서는 최적침로로 기동해야 하는데, 이러한 최적침로의 구현을 위해서는 무인수상정이 조우하는 파도의 높이 및 방향을 인식하는 기술이 필요하다.

근거리접촉물탐지장치는 무인수상정의 최적침로 판단에 필수적인 센서 체계이며, 4D 이미지 레이더와 RGB 카메라를 기반으로 무인수상정 침로 방향에 근접한 접촉물 및 파도 상태(파고 및 파향) 등을 탐지한다. 그러나 실제 해상 환경에서는 파고의 변화, 선체의 횡동요 및 종동요 등 복합적인 요인이 작용하여 센서의 물리적 탐지 범위가 제한되는 문제가 발생한다. 특히, 4D 이미지 레이더의 상하 센서 시야각은 ±15도 수준에 불과하다. 이는 무인수상정이 횡동요 및 종동요가 큰 환경에 진입할 경우, 기계적으로 수평선 아래 또는 위쪽을 충분히 관측할 수 없는 구조적 한계를 일으킨다. 예를 들어, 파고 증가로 선수부가 상승하거나 순간적으로 피치업(pitch-up) 동작이 발생하면, 레이더의 빔이 해수면을 지나치게 벗어나 탐지하고 있던 근거리 접촉물을 놓치는 문제가 발생한다. 반대로 피치다운(pitch-down) 상황에서는 해수면을 주시하기 때문에 접촉물의 탐지 거리가 줄어드는 문제가 발생한다. 이를 극복하고자 내항성능 향상을 위한 몇 가지 방안을 검토하였다.

첫 번째 방안은 상·하 이중 구조 레이더 배치(dual-layer radar placement) 방식이다. 이 방식은 동일한 4D 이미지 레이더를 상부 및 하부에 각각 설치하여 서로 다른 관측각을 확보하는 구성이다. 두 센서의 데이터는 시간 동기(time synchronization)의 중첩 처리를 통해 고해상도의 데이터를 획득할 수 있다. 이 방식은 단

일 레이더 대비 피치 변화에 대한 관측 안정성을 크게 향상할 수 있다.

두 번째 방안은 다중 칩 기반 4D 이미지 레이더(multi-chip MIMO 4D radar)를 활용하는 방식이다. 다중 칩(multi-chip) 구조의 4D 이미지 레이더는 단일 칩 기반 레이더 대비 더 넓은 범위 각 및 고도각의 FOV를 제공할 수 있으며, 송수신 채널 수 증가로 인해 고해상도 포인트 클라우드(point cloud)를 생성한다. 특히 고도 영역 확장이 가능해지므로 선체 중동요 변화로 인한 관측 손실 구간을 축소시킬 수 있다. 그러나 위 두 방안은 탐지 성능 측면에서는 유의미한 향상을 제공하나, 실 운용 관점에서는 몇 가지 구조적 제약이 존재한다. 두 방안 모두 장비 수 또는 크기가 증가함에 따라 시스템의 전체 부피와 중량이 증가하여 상대적으로 크기가 제한된 중·소형 무인수상정의 상부 구조물에 탑재가 제한될 수 있다. 또한, 전력 소비량이 증가하고, 열 방출 관리가 복잡해지는 문제도 함께 발생할 수 있다.

상기 사유로 센서의 성능 향상을 단순히 장비의 증설이나 고사양화에 의존하지 않고, 선체 동요에 대응할 수 있는 능동적 보정 기법 등을 적용할 수도 있다. 이러한 관점에서 센서부 수평 안정화 또는 짐벌(gimbal) 시스템 적용 방식이 더욱 현실적인 대안이 될 수 있다.

5.2 수평안정화기

수평안정화기는 무인수상정의 선체 동요(회전 및 병진 운동)와 상관없이 센서의 시야 방향을 일정하게 유지하기 위한 능동 보정 장치로써, 2축 짐벌과 상하 병진운동(heave) 안정화 제어 기능을 기반으로 한다. 본 장치는 관성측정장치(IMU, Inertial Measurement Unit)에서 획득한 각속도를 기반으로 플레이트의 속도를 추정하고, 각속도를 측정한다. 그리고 전체 시간에 걸쳐 적분한 값을 활용하여 플레이트 자세 변화를 추정 및 제어하고, 엔코더에서 획득한 각속도를 기반으로 플레이트를 제어할 모터의 위치 추정, 가속도 미분값을 활용한 속도 추정, 관성측정장치로부터 획득한 각속도의 시간 변화에 따른 적분 오차를 보정하여 정밀하게 자세를 제어한다(Fig. 6).

수평안정화기를 탑재하면 근거리접촉탐지장치 내 4D 이미지 레이더 및 RGB 카메라의 상하 센서 시야각 한계로 인해 발생하던 관측각 손실을 효과적으로 줄일 수 있으며, 특히 파고가 높은 해역에서 장치 성능을 크게 향상할 수 있다. 향후 실선 해상시험을 통해 수평안정화기 효과에 대한 검증이 필요할 것으로 판단된다.

5.3 횡동요저감장치

자이로 방식의 횡동요저감장치는 본 정과 같은 중·소형 선박의 횡동요를 감소시키기 위한 장치로, 주로 선체 무게중심 인근 기관실 거더에 장착한다. 횡동요저감장치 내부에 고속으로 회전하는 플라이휠을 이용하여 자이로스코픽 토크를 발생시키는 원리로 작동한다. 자이로는 회전축의 방향을 유지하려는 성질을

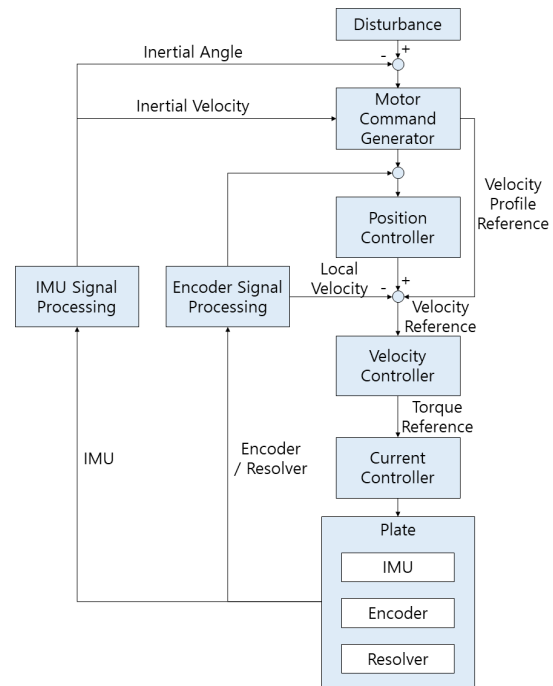


Fig. 6 Gimbal-based horizontal stabilization control algorithm

가지는데, 선박이 파랑 등에 의해 좌우로 기울면 자이로의 프리세션 운동이 유도되어 선박의 기울어지는 방향과 반대 방향으로 토크를 발생시켜 선박의 횡동요를 감소시킨다. 자이로 방식은 외부 유체 저항을 이용하는 부가물 부착방식과 달리 정지상태나 저속에서도 효과를 발휘할 수 있으며 구조가 선체 외부에 노출되지 않아 손상위험이 적고, 유지보수가 용이하다. 횡동요저감 장치는 선체 크기와 무게 등을 고려하여 선정하여야 하는데, 일반적으로 50 ~ 80% 이상 횡동요 저감 효과가 있는 것으로 알려져 있다.

5.4 인터셉터

인터셉터는 선박의 트림 각과 횡/중동요를 감소시키기 위한 장치로, 선체 선미 트랜섬에 장착된다. 인터셉터는 얇은 판형으로 구성된 블레이드, 구동장치 및 제어장치로 구성되어 있다. 블레이드가 수직으로 하강하면 선체 하부 유동을 차단하여 선미 부근의 압력이 증가하고, 선수 방향으로 작용하는 음의 모멘트를 발생시켜 트림 감소 및 고속 항주 시 선체 저항 및 선체의 중동요를 감소시킨다. 일반적으로 인터셉터를 좌현 및 우현 트랜섬 하단에 독립적으로 설치하여 각 블레이드를 개별 제어를 통해 선체의 중동요와 횡동요를 동시에 제어하는 방식으로 운영하고 있다.

6. 결론

무인수상정은 오늘날 해군의 핵심 전력으로 부각되고 있다. 하

지만, 무인수상정을 개발하는 연구개발주관기관의 입장에서는 제 반 사항들이 아직 부족한 것이 사실이다. 물론, 산·학·연·관·군 관계자 모두의 관심으로 향후 이런 어려움들은 해결해 나갈 수 있으리라 기대해 본다.

본 논문에서는 무인수상정을 단독으로 운용하거나 유인 함정과 함께 운용하는 상황에서 갖춰야 할 무인수상정의 내항성능 기준을 설정하는 방안에 대해 연구하였다. 국내·외 무인수상정 내항성능 관련 자료 중 기준 설정에 활용이 될 만한 항목을 비교·분석하였고, 국내 현실에 적합한 무인수상정 내항성능 기준 설정 방안을 제시하였다. 또한, 7m급 무인수상정의 내항성능 기준(안)을 제시하였고, 실제 모형시험을 수행하여 기준의 적절성을 확인하였다. 끝으로, 무인수상정에 적용할 수 있는 내항성능 향상 방안에 대해서도 살펴보았다.

References

Han, J.H., 2025. Lessons from the Russia-Ukraine War at sea and implications for development of naval strategy and force development. *Journal of national defense studies*, 68(2), pp.157-185.

Kim, T.Y. and Ha, Y.H., 2025. Employment and countermeasures of unmanned surface vessels for the Republic of Korea Navy : An analysis of recent maritime combat cases. *Journal of national defense studies*, 68(2), pp.57-82.

NORDFORSK, 1987. *Assessment of ship performance in a seaway*. NORDFORSK Report.

ROK Navy, 2022. *Guideline for Seakeeping*. Naval ship design/building criteria.

ROK Navy, 2024. *Guideline for unmanned surface vehicle design*. Naval ship design/building criteria.

Yum, D.J., 2015. Marine environment and offshore structures, GS Intervention.

Zu, M., Garne, K. and Rosen, A., 2024. Seakeeping criteria revisited. *Journal of Ocean Engineering*, 297, 116785.

Authorship Contribution Statement

Kwangho Shin: Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing; **Hyunwoo Song:** Writing – original draft, Software; **Yonghoon Choi:** Writing – original draft, Investigation; **Woongki Lee:** Conceptualization, Software; **Wonsam Choi:** Project administration, Funding acquisition; **Wonhee Lee:** Supervision.

