

경항공모함 이착함 성능평가 및 안전임무 수행범주 일관 해석 연구

홍사영[†] · 박동민 · 정재환 · 서민국 · 조석규
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

A Study on Short-Take-Off and Vertical Landing (STOVL) Performance Evaluation of a Light Aircraft Carrier and a Consistent Analysis of Safe Operating Envelope (SOE)

Sa Young Hong[†] · Dong-Min Park · Jae Hwan Jung · Min-Guk Seo · Seok-Kyu Cho
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering

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 Safe Operating Envelope (SOE) combined with Short-Take-Off and Vertical Landing (STOVL) performance is an essential consideration of a light aircraft carrier for design of hull shape with excellent seakeeping performance in terms of naval air operations as well as traditional naval ship missions such as Transit and Patrol (TAP), and Replenishment at Sea (RAS) and so on. A variety of procedures are systematically combined to determine SOE considering rather complicated missions associated with operation of aircraft onboard. The evaluation of take-off and landing safety missions onboard should consider wind effect on deck and severer seakeeping indices and standards compared with conventional naval ships. In order to support take-off and landing missions, various support activities of the crews are required. So, additional evaluation is needed for indicators such as MSI(Motion sickness Index) and MII(Motion Induced Interruptions), which are quantitative indicators of work ability that appear as a result of motion response. In this study, a standard procedure is developed including the seaworthiness performance indicators, standards, and evaluation procedures that should be considered during design of STOVL aircraft carrier. Analysis results are discussed in terms of air-wake on deck as well as seakeeping indices associated with design parameter changes in view of conceptual design of a light aircraft carrier.

Keywords : Light aircraft carrier(경항공모함), Safe operating envelop(안전임무 수행범주), Short-take-off and vertical landing (단거리 수직 이착륙), Seakeeping(내항성능)

1. 서론

함정의 내항성능은 설계단계에서 요구 작전임무능력 만족을 결정짓는 필수 고려 사항이다. 이에 따라 임무별 해상상태와 함속에 대해 구체적인 기준을 결정하고 이에 대한 만족여부를 평가해야 한다. 항공모함의 경우는 함정의 주 임무가 함의 탑재기의 운용이므로 일반 함정의 필수임무인 이동 및 순찰(TAP: Transit and Patrol)이외에 항공기 이착함 능력을 추가로 평가해야 한다. 본 연구에서는 이를 위해 설계 시 추가로 고려해야 하는 내항성능 지표 및 기준, 평가 절차를 고찰하고 내항성능해석부터 시작하여 최종적으로 경항공모함의 안전임무 수행범주를 산출하

는 체계적인 절차 개발에 대해 기술하였다 (Hong et al., 2022).

이착함 안전임무 평가는 함재기가 안전하게 이착함할 수 있는 조건을 해상상태 별 함속과 파향 등을 식별하여 운용 가능조건을 평가하는 것으로 함의 내항성능 이외에도 함재기의 이착함의 필수조건이 되는 상대풍속 범주(relative wind envelope)의 고려가 전제되어야 한다. 상대풍속 범주는 함재기의 종류에 따라 정해지는 풍속과 풍향의 조합을 나타내는 것으로 내항성능 평가에 앞서 전제되는 해상상태별 함속과 파향 결정에 필수 고려사항이다. 또한 설계가 진행되면서 갑판배치와 함형이 정해지면 전산 유체역학(CFD) 해석을 통해 공기유동(air-wake) 효과를 고려한 성능평가가 추가로 수행되어야 한다.

이착함 임무 지원을 위해서는 승조원의 다양한 지원활동이

요구되는데 그 중 갑판에서 이착함 지원, 해상 보급 지원활동이 필수 고려사항이며 이를 평가를 위해서는 통상적인 횡동요, 종동요, 국부 속도 및 가속도 수준 평가 외에도 운동응답의 결과로 나타나는 작업능력의 정량지표인 MSI(Motion Sickness Index), MII(Motion Induced Interruptions) 등의 지표에 대한 추가적인 평가가 필요하다 (Kery et al., 2018).

항공모함에서 중요한 고려사항 중 하나는 비행갑판과 격납고 구역(hangar zone)에 주기된 함재기의 이동성 확보를 담보하는 성능지표로서 함재기 승강기 침수, 함재기 이동작업 조건을 결정짓는 추가적인 상대풍속범주 등이 있으며, 경항공모함의 경우 이 함 및 착함 위치 별 이착함 성능지표 평가로서 0도부터 360도 전방향 파향에 대한 수직속도 평가가 필수적이다.

궁극적으로 함재기 이착함 안전임무 평가는 작전임무 해상상태 별 이착함 가능 함속 및 파향을 식별하는 것으로 통상적으로 해상상태 별 임무 가능 함속 및 파향 구간을 polar plot으로 표시한다. 이를 설계관점에서 설계 지표 변화에 대한 성능향상 정도를 비교하기 위한 목적으로는 해상상태 별 가동율(operability)을 산정한다.

STOVL(Short Take-Off and Vertical Landing) 항공기를 운용하는 3~4만톤급 경항공모함을 포함한 CATOBAR(Catapult Assisted Take-Off Barrier Arrested Recovery) 항공기를 운용하는 미해군 니미츠급(11만톤급) 항공모함은 그 규모가 일반 함정에 비해 월등하기 때문에 기본적으로 양호한 내항성능을 가지지만 궁극적인 내항성능의 차이는 항해 중 공진을 회피하기 힘든 횡동요 성능에 의해 우열이 좌우될 것으로 예상된다. 따라서 통상 함정에서 수행하는 보수적인 관점의 장파정파 중 성능 평가보다는 실제 해상에서 횡동요 성능 평가에서 더 현실적인 예측치를 주는 단파정파 중 성능 또한 중요한 고려 사항이다. 또한 항공모함의 배치는 전통적인 함정의 갑판 상부구조가 좌우 대칭 배열인데 비해 극단적인 비대칭 구조를 가지므로 이에 대한 고려도 필요하다.

본 연구에서는 “함재기 이착함 시뮬레이션 기술” 개발 중 자체설계 선형인 KRISO-CVX1 선형에 대한 이착함 안전임무 평가 예를 보이고 설계자 관점에서의 향상점, 운용자 관점에서의 안전 임무 수행범주 해석결과를 고찰하였다.

2. 안전임무 내항성능해석

항공모함은 무엇보다 작전요구 해상상태(예를 들면 해상상태 5)에서 함재기의 안정적인 이착함 임무를 보증하여야 한다. 따라서 항모의 설계에서 함재기의 이착함 시 요구되는 함정의 내항성능을 보증하는 것은 무엇보다 중요하다. 미국의 경우에는 니미츠급 항공모함을 개발하면서 우수한 내항성능 선형 개발을 위해 전산장비를 포함한 체계적인 내항성능 기반 설계 시스템을 구축한 바 있다 (Comstock and Keane Jr., 1980; Comstock, 1982). 유럽에서는 나토(NATO: North Atlantic Treaty Organization) 군사 표준화 기관(Military Agency for Standardization)에서 내항성

능 설계 공통절차(STANAG 4154 NAV(Edition 3) - Common Procedures for Seakeeping Design Process: NATO, 2000) 발간을 통해 나토국가 간 내항설계, 성능해석 절차 및 결과해석 표준을 정하였다.

이착함 상황에서 해상상태에 따라 해상풍이 존재하므로 갑판 상의 풍속과 풍향 조건에 맞춰 이착함 임무가 가능하도록 함속이 제한을 받게 된다. 따라서 함 고유의 내항성능은 물론 동시에 이착함이 가능한 갑판 상의 해상풍 조건을 동시에 고려해야 한다. 초기 선형설계 시에는 일반적인 함재기 형태를 기준으로 한 공칭 상대풍속/풍향 범주(relative wind speed, relative wind angle)를 고려한다. 해상상태에 따른 일반 함정의 임무수행 판단을 위한 내항성능 평가는 보수적인 관점에서 장파정파 조건을 기본으로 하고 있으나 함재기 이착함과 같이 횡동요 응답과 이로 부터 유발되는 가속도 및 속도가 성능의 중요한 지표인 경항공모는 단파정파 조건을 추가로 고려해야 한다. 또한 정기적으로 연료 및 항공유를 포함한 다양한 보급이 필요하기 때문에 이에 대한 작업 기준도 필요하다. 함재기 이착함은 물론 함재기의 이동, 무장장착/운용, 해상보급과 관련한 갑판 상 승무원의 작업능력에 대한 기준도 고려해야 한다. 이러한 작업능력 기준은 가속도 응답만 아니라 MII, MSI와 같은 보다 복합적인 성능지표를 필요로 한다.

Pattison and Bushway (1991)은 CATOBAR 미항모 Midway 선체확장 사례연구를 통해 선형변화가 내항성능에 미치는 영향의 중요성을 보여주었다. 아울러 횡동요 및 종동요 기준에 있어서 동요 고유주기에 따라 기준치가 바뀔 수 있음을 경험적으로 확인하였다. 특히 횡동요는 해상상태에 따라 공진에 민감하므로 선형설계 및 배치설계 시 횡동요 고유주기에 대한 고려가 필요하다. 횡동요 고유주기는 선폭과 무게중심이 가장 민감한 파라미터이므로 이에 대한 세심한 주의가 필요하다.

2.1 3차원 고차경계요소법 기반 내항성능해석

내항성능해석 이론은 전통적으로 포텐셜이론에 근거한 2차원 방법이 사용되어왔다. 미국을 비롯한 NATO국가에서는 항공모함을 개발한 시기가 1970년대이며, 내항성능해석법으로는 1970년 초에 발표된 STF (Salvenson et al., 1970) 스트립 이론에 기초한 SMP(Ship Motion Program) 프로그램이 근간이며 오늘날까지도 널리 사용되고 있는 실정이다 (STANAG 4154, NATO, 2000). 시간영역해석법은 해상상태 7 이상의 거친 해상에서의 비선형 현상(스프링링, 휘핑, 파라메트릭 횡동요)을 고려하는 경우 적용되며 (경)항공모함의 경우 이착함 임무의 상향선인 해상상태 6까지를 고려하는 기본설계 단계에서 안전임무 수행범주(SOE)와 운용효율 성능평가는 스트립 이론의 주파수 영역 해석을 적용한다. 영국선급 등에서는 구조해석을 목적으로 조우주파수 개념을 적용한 3차원 Green function 방법을 채용하고 있다.

본 연구에서는 조우주파수를 고려한 3차원 고차경계요소법을 채용하고 기본설계 시의 해석의 편의성과 결과의 적용성 확장을

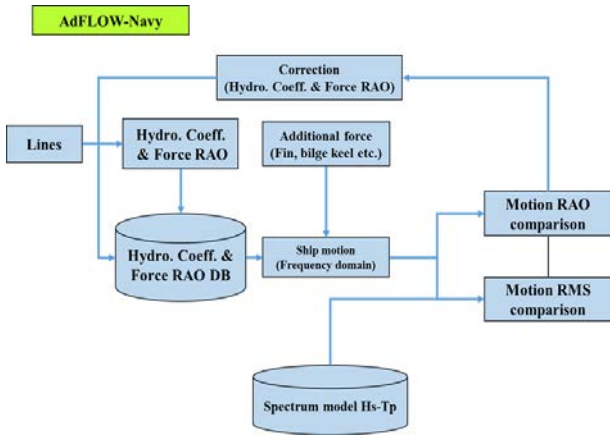


Fig. 1 Program structure of AdFLOW-Navy

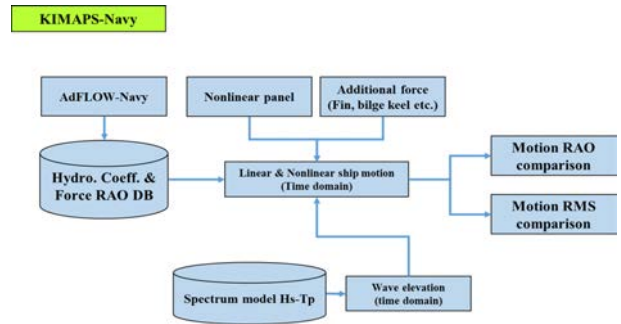


Fig. 3 Program structure of KIMAPS-Navy

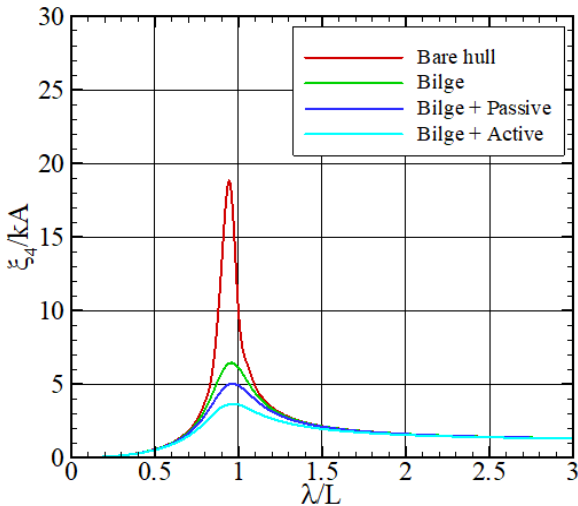


Fig. 2 Effects of roll damping devices from AdFLOW-Navy

위해 프로그램 내부에서 자동으로 2차원단면 특성을 추출하여 상용 스트립 프로그램에서 지원하는 단면특성에 따른 횡동요 감쇠계수효과, 빌지킬, 안정핀 등의 부가물 효과를 체계적으로 적용할 수 있게 하였다 (Park and Hong, 2022). Fig. 1은 프로그램 구조도를 나타내었으며, Fig. 2에는 횡동요 댐핑의 효과를 나타내었다. 이를 통해 횡동요 개선을 위한 다양한 설계변수의 효과를 확인할 수 있다.

2.2 황천 시 내향성능해석

본 연구에서는 황천 시 선박 형상의 비선형성을 일부 고려할 수 있는 weakly-nonlinear 기법을 도입할 수 있는 시간영역 해석을 아울러 적용하였다. 경향모는 선수 플레이어로 인해 흡수에 따른 수선면 변화가 크고, 황천과 같은 거친 해상 상황에도 기동을 해야 하기 때문에 weakly-nonlinear 기법의 적용이 필요하다. 운동방정식은 다음과 같이 Cummins (1962) 모델로 나타낼 수 있으며, 선박의 실제 입수면적을 고려한 비선형 복원력과 Froude-Krylov 힘을 적용하였다.

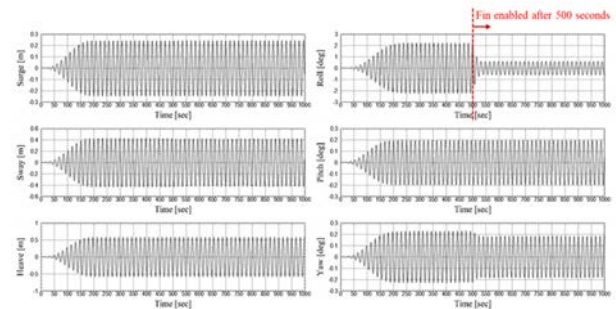


Fig. 4 Effects of active fin on roll motion from KIMAPS-Navy(Heading = 120 deg., λ/L = 2.0)

$$\{m_{ij} + a_{ij}(\infty)\}\ddot{\xi}_j(t) + \int_0^t R_{ij}(t-\tau)\dot{\xi}_j(\tau)d\tau + c_{ij}\dot{\xi}_j(t) + c_{ij}^{rad}\xi_j(t) = \{F_{D,ff}\}_i + \{F_{ext}\}_i + \{F_{N.Res.}\}_i + \{F_{N.F.K.}\}_i \quad (1)$$

(i = 1, 2, ..., 6)

$m_{ij} + a_{ij}, R_{ij}(t-\tau), c_{ij}, c_{ij}^{rad}, F_{D,ff}, F_{ext}, F_{N.Res.}, F_{N.F.K.}$ 는 각각 질량행렬, 메모리효과 행렬, 복원행렬, 전진속도에 의한 복원력행렬, 파랑기진력, 부가물 외력, 비선형 복원력 및 비선형 Froude-Krylov 힘을 나타낸다. Fig. 3에는 개발된 KIMAPS-Navy의 구조를 나타내고 있다.

Fig. 4는 능동핀 효과를 나타낸 시간영역 해석결과의 예시이다. 그림에서 볼 수 있듯이 안정핀이 작동되면서 75%의 횡동요 감소 효과를 나타내고 있다. 상하동요, 종동요에는 영향을 미치지 않으나 선수동요와의 연성효과가 나타남을 알 수 있다. 연성효과는 횡동요가 감소함에 따라 선수동요도 감소하는 것으로 나타났다.

3. 안전임무 수행범주 일관 해석

3.1 안전임무 수행범주 해석

함정임무 수행범주 일관 해석을 위해서는 임무 관련 평가지표 설정과 내향성능 평가를 위한 체계적인 시스템 접근법이 필요하다. 이를 위해서는 내향성능 요구사항 정의와 이 요구사항을 만족시키는 함정의 능력을 평가하는 지표선정을 위한 합리적인 절차가 선행되어야 한다. 이를 바탕으로 다음의 사항에 대한 고려가 우선되어야 한다 (STANAG 4154, NATO, 2000).

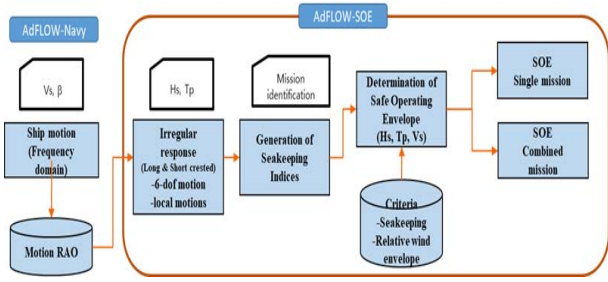


Fig. 5 Program structure of AdFLOW-SOE

- 함정임무 정의
- 작전활동과 임무의 기능적 세분화

운용가능 예측에는 임무 및 해상환경 정의에 대한 함운동과 관련 현상 해석, 함정시스템 성능기준 및 선원의 작업능률 저하 기준 적용 등의 일련의 의사결정과정 및 해석평가 활동이 포함된다.

함정의 건조 및 운용에서 최우선적으로 반영되어야 하는 해군 참모부의 최상위 요구사항은 예상 함정 임무(mission), 함정임무를 위한 활동(activities), 제안된 운용 해석, 운용 계절, 설계 구속조건, 함정의 임무 프로파일과 임무 기준 세트, 예상 특수 무기 및 서비스 시스템(무기, 비행기, 센서 등) 등이 있다. 본 연구에서는 이와 관련한 세부적 조건을 고려하여 안전임무 수행범주 일관 해석을 위한 절차를 전산프로그램화 하였다. Fig. 5는 개발된 AdFLOW-SOE의 구조를 나타내고 있다. 일관 해석은 AdFLOW-Navy 결과로부터 임무별 해상상태 및 함속조건에 대해 임무별 성능지표의 만족여부를 판단하여 해상상태별, 함속 별 안전임무 수행범주를 프로그램 내의 알고리즘에 따라 식별하게끔 하여 설계과정 중 반복되는 계산 과정에서 발생할 수 있는 인적 오류를 배제하였다. 아울러 단위 임무와 더불어 여러 임무를 동시에 고려한 복합임무조건에 대해서도 안전임무 수행범주를 식별할 수 있다. 해상상태별, 함속별 안전임무 식별을 통해 함의 목표성능 달성을 위한 설계개선, 주어진 환경조건에서의 안전한 임무운용계획 수립이 가능하다.

3.2 이착함 안전임무 수행범주 해석

경항모의 가장 중요한 임무는 함상 탑재기의 이착함 임무이다. 이착함 안전임무 수행범주 해석에는 내항성능지표와 별개로 함재기의 이함 및 착함에 직접적 영향을 주는 주변의 공기유동의 고려가 필수적이다. 초기 개념설계단계에서는 상세한 공기유동해석 자료가 없으므로 공칭상대풍속범주(generic relative wind envelope)를 고려하여 이착함 성능을 추정한다. 갑판의 배치설계가 완료된 시점에서는 아일랜드의 형상과 위치, 함수부 및 갑판측면의 형상의 효과를 확인할 수 있는 갑판유동해석결과를 포함하여 이착함 안전임무 수행범주 식별이 가능하다. Fig. 6은 STOL (Short-Take-Off-Landing) 임무에 대한 기준인 풍향과 풍속을 나타내며 Fig. 7에는 STOL 임무를 실제 해상상태 5조건에 적용했을 경우에 대한 예시를 나타내었다.

상대풍속(\$V_R\$)과 상대풍향(\$\beta_R\$)은 아래와 같이 정의된다.

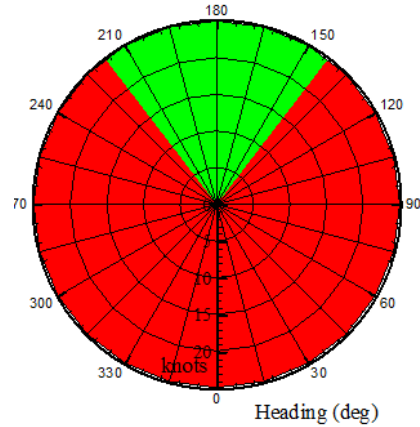


Fig. 6 Generic STOL relative wind envelope

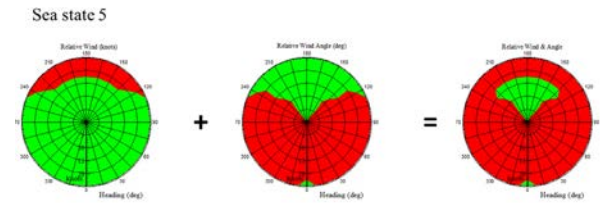


Fig. 7 STOL operable envelope determined by relative wind envelope under sea state 5

$$V_R = \sqrt{V_S^2 + V_W^2 + 2V_S V_W \cos\beta} \quad (2)$$

where,
 V_R = Rative wind speed (knots)
 V_S = Ship speed (knots)
 V_W = Ambient wind speed (knots)
 β = Wind heading (degrees)

$$\beta_R = \cos^{-1} \frac{V_W \cos\beta + V_S}{V_R}$$

Fig. 7에서 볼 수 있듯이 해상상태 5가 되면 내항성능과 별개로 상대풍속 조건에 의해 이착함 임무가 선수사파의 특정함속으로 국한되는 것을 알 수 있다.

3.3 안전임무 성능지표 설정

함정의 안전임무 지표는 기본적으로 함정의 내항성능을 바탕으로 설정된다. 가장 대표적인 내항성능지표는 횡동요와 종동요이며, 상향동요는 독립 지표는 아니지만 수직가속도, 수직속도, MI, MSI 및 갑판침수, 슬래밍 등에 반영된다. 경항모의 경우에는 함재기의 견인 이동, 무기장착, 해상보급 등 함상 승조원의 다양한 작업능력에 대한 기준이 요구되며, 이러한 성능지표는 기존 함정의 수직 및 수평가속도 뿐 아니라 MSI와 MI와 같이 작업 시간 및 자세 효과를 고려한 지표가 추가로 고려된다. STANAG 4154 (NATO, 2000) 및 관련 자료를 통해 정리한 경항모의 임무별 성능지표 및 한계 기준을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 A set of missions and criteria of light aircraft carrier

Application	Analysis conditions		Limiting criteria		
	Sea state	Speed (knots)	Motion	Limit	Location
Missions/Activities and criteria					
Transit and patrol	3, 4, 5, 6 (7, 8)	0, 5, 10, 15, 20, 25	Roll	4.0°	Global
			Pitch	1.5°	Global
			Wetness	30/hr.	Bow (worst location)
			Slamming	20/hr.	Keel (worst location)
			Propeller emergence	90/hr.	1/4 Propeller diameter
			MSI	20% of crew @ 4 hrs	Bridge
			MII	1/min	Bridge
			Vertical acceleration	0.2g	Bridge
Survival condition	9	0, 5, 10, 15, 20, 25	Roll	15.0°	Global
			Pitch	4.0°	Global
			Wetness	50/hr.	Bow (worst location)
			Slamming	50/hr.	Keel (worst location)
			Propeller emergence	90/hr.	1/4 Propeller diameter
			MSI	20% of crew @ 4 hrs	Bridge
			MII	1/min	Bridge
			Vertical acceleration	0.4g	Bridge
Aircraft handling	3, 4, 5, 6	0, 5, 10, 15, 20, 25	Lateral acceleration	0.2g	Bridge
			Roll	1.5°	Global
			Pitch	1.0°	Global
			Wetness	5/hr.	Bottom inner leading elevator edge
Generic helicopter launch/recovery	3, 4, 5, 6	0, 5, 10, 15, 20, 25	MII	1.0/min	Task location
			Roll	2.5°	Global
			Pitch	1.5°	Global
			Relative wind angle	±50°	Flight deck
Generic short takeoff and landing	3, 4, 5, 6	0, 5, 10, 15, 20, 25	Relative wind speed	40 knots	Flight deck
			Roll	2.5°	Global
			Pitch	1.5°	Global
			Vertical velocity	1.0 m/sec	Landing spot
Crew performance	3, 4, 5, 6	0, 5, 10, 15, 20, 25	Relative wind angle	±30°	Flight deck
			Relative wind speed	40 knots	Flight deck
			Roll	4.0°	Global
			Pitch	1.5°	Global
			MSI	20% of crew @ 4 hrs	Bridge
			MII	1/min	Bridge
			Relative wind	35 knots	Task Location if on Weather Deck
			Vertical acceleration	0.2g	Bridge
CONREP & FAS	3, 4 (5)	0, 5, 10, 15, 20, 25	Lateral acceleration	0.1g	Bridge
			Roll	2.2°	Global
			Pitch	2.2°	Global
			MSI	20% of crew @ 4 hrs	At station
			MII	0.5/min	At station
			Wetness	0.5/hr	At station
			Roll	2.2°	Global
			Pitch	2.2°	Global
VERTREP	3, 4 (5)	0, 5, 10, 15, 20, 25	MSI	20% of crew @ 4 hrs	At station
			MII	0.5/min	At station
			Relative wind	±30° off head seas, 15-30 knots	Flight deck
			Vertical displacement	0.7m	VERTREP station
			Vertical velocity	1.05 m/sec	VERTREP station
			Wetness	0.5/hr	At station
			Roll	2.2°	Global
			Pitch	2.2°	Global
Watercraft launch and recovery	3, 4, 5, 6	0, 5, 10, 15, 20, 25	Lateral acceleration	0.1g	Boat location
			Vertical acceleration	0.2g	Boat location
			Roll	3.8°	Global
			Pitch	3.8°	Global
Gun operation	3, 4, 5, 6	0, 5, 10, 15, 20, 25	Vertical velocity	0.5 m/sec	Gun barrel tip
			Roll	1.8°	Global
			Pitch	1.8°	Global
Support equipment	3, 4, 5, 6	0, 5, 10, 15, 20, 25	MII	1.0/min	Task location

함정에서 선원의 멀미로 인한 작업 성능 저하는 멀미지수 (MSI)로 표시되는데 4시간 노출 기준 20%의 멀미지수가 적용되고 있으며 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다 (Lloyd, 1991).

$$MSI = 100 \left[0.5 + erf \left(\frac{\log_{10} \left(\frac{|\ddot{s}_3|}{g} \right) - \mu_{MSI}}{0.4} \right) \right] \quad (3)$$

$$|\ddot{s}_3| = 0.798 \sqrt{m_4}$$

$$\mu_{MSI} = -0.819 + 2.32(\log_{10} \omega_c^2)$$

여기서 m_4 는 해당위치 수직가속도의 4차 스펙트럴 모멘트이다.

MIII는 선박의 동요로 인해 선원이 미끄러지거나 균형을 잃어 넘어지는 사고로서 갑판에서 이루어지는 작업에 중요한 영향을 주는 지표이다. 미끄러짐에 의한 작업중단은 좌현과 우현을 모두 고려하여 아래와 같이 정의된다. 첫 밀침자 s와 t는 미끄러짐과 넘어짐을, 둘째 밀침자 s와 p는 우현과 좌현을 의미한다. 상세한 정의는 참고문헌에 기술되어 있다 (Lloyd, 1991).

$$MIII_s = MIII_{sp} + MIII_{ss} \min^{-1} \quad (4)$$

$$MIII_t = MIII_{tp} + MIII_{ts} \min^{-1}$$

4. 안전임무 수행범주 해석에서 및 결과고찰

4.1 안전임무 수행범주 해석조건

KRISO에서 자체 설계한 경향모 모델 KRISO-CVX1을 대상으로 하여 안전임무 수행범주 해석을 수행하였다. Table 1에서 볼 수 있듯이 안전임무 수행범주 대상임무가 매우 광범위하지만 본 연구에서는 경향모의 가장 중요한 임무인 STOML 이·착함과 해상 보급, 생존조건에서의 성능평가와 개선점에 대해 고찰하고자 한다. STOML 이·착함 안전임무 범주는 함정의 내항성능 기준, 상대풍속조건, 갑판 상의 유동해석 결과를 반영하여 비교평가 하였다. 생존조건은 해상상태 9를 대상으로 하므로 주파수영역 해석은 물론 시간영역 해석결과를 바탕으로 그 성능을 평가하여 시간영역 해석의 필요성을 검토하였다.

안전임무 수행범주 해석을 위한 주파수영역 해석의 기본조건은 Table 2와 같다. 특기할 사항은 내항성능 해석 시 파향을 0~360사이 15도 간격으로 수행하는 것으로서 이는 안전임무 수행범주를 해석할 때 상대풍속 및 풍향의 해상도와 동일한 간격으로 내항성능해석을 수행하기 위함이다.

대상 함형은 Fig. 8에 나타내었다. KRISO-CVX1 함형은 이탈리아의 경향모 Cavour, 일본의 경향모 Izumo 등을 분석하여 설계하였다. 갑판의 배치는 F35-B를 가장 오랫동안 운용한 미국의 감습함 LHA를 참고하였다.

Table 2 Analysis condition for SOE

Item	Conditions
Application	Missions: TAP, AAW Support activities: NAO, VERTREP
Sea state	3, 4, 5, 6, (7, 8, 9)
Ship seed (knots)	0.0, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0
Wave heading (deg)	0~360, 15 degree interval
KRISO CVX 1	LPP=250m, BWL=32m, Draft=9.5m Displacement=42,600m ³

TAP: Transit And Patrol

AAW: Anti-Air Warfare

NAO: Naval Air Operation

VERTREP: VERTical REPlenishment

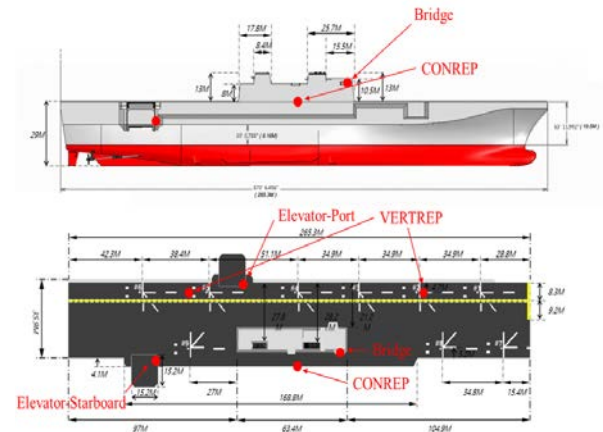


Fig. 8 Deck layout of KRISO-CVX1

4.2 함상 공기유동 해석

이·착함 판단 기준에 있어서 갑판유동 해석결과의 중요한 물리량은 크게 2가지로 속도 표준편차와 온도변화이다. 공기유동 특성과 직접 관련 있는 수직 방향 속도 표준편차의 경우 이·착함 경로와 관계된 모든 국부 영역에서 해당 값이 1.75m/s 이하여야 제약 없이 이·착함 임무 수행이 가능하다 (Authority, 2021). 배기가스(stack gas) 영향은 대기온도 15도 기준 2도 상승을 기준으로 한다.

안전임무 수행범주 평가 연구를 위해 CFD를 활용하여 KRISO-CVX1 선형 주위 난류유동해석을 수행하였으며 흡수선을 기준으로 상부 영역만 고려하였다. 수치해석 수행을 위해 STAR-CCM+ 15.04를 사용하였으며 난류모델은 DES(detached-eddy simulation)를, 공간 및 시간 이산화는 하이브리드 유계중심차분 및 2차 정확도의 음해법을 각각 적용하였다. 본 해석에서 고려된 격자수는 약 7백만 개이며 이때 격자 생성은 분할격자기법을 사용하였다. 본 수치해석은 정도 높은 해석 해의 도출이 아닌 안전임무 수행범주 평가를 목적에 둔 정성적 결과 도출에 초점을 두었다.

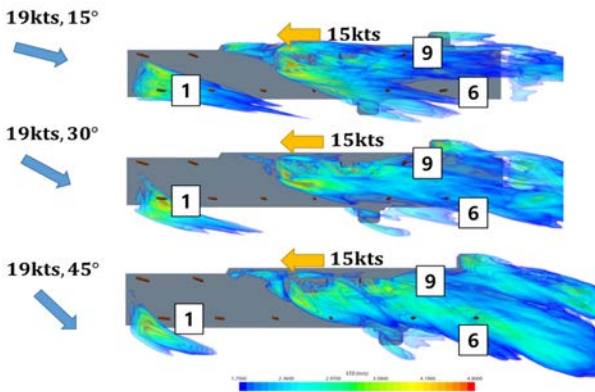


Fig. 9 Standard deviation contour of z-velocity (V= 15knots, standard deviation(STD) > 1.75m/s)

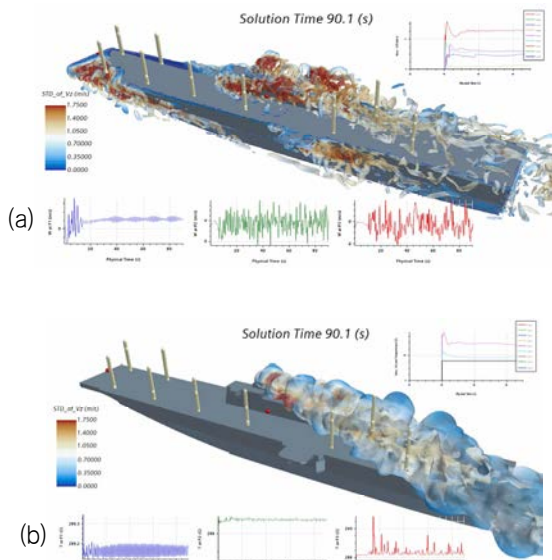


Fig. 10 Examples of exhaust gas analysis: (a) iso-surfaces of the λ_2 -criterion with STD contour and (b) iso-surfaces of the 2°C temperature increase with its contour (Vs= 10kts, STD > 1.75m/s, T>2°C)

Wind Direction [deg.]	spot 1	spot 2	spot 3	spot 4	spot 5	spot 6	spot 7	spot 8	spot 9
0	0.19	0.40	0.46	1.16	0.74	0.58	0.64	0.47	1.54
30	0.44	0.06	0.05	0.30	1.80	1.99	0.01	0.02	1.26
60	0.05	0.19	3.05	2.92	3.19	2.26	0.02	1.79	2.16
90	0.12	3.48	2.61	3.38	3.29	2.70	1.85	1.67	2.46
120	2.83	2.16	2.66	2.63	2.26	2.48	1.37	1.28	1.18
150	1.22	1.16	1.50	1.87	0.08	1.99	0.77	1.14	0.89
180	0.06	0.07	0.09	0.21	0.36	0.86	0.23	0.31	0.28
210	0.85	0.94	1.26	1.20	1.32	1.37	1.17	1.39	1.52
240	1.71	1.41	1.32	1.52	2.14	1.48	2.15	1.98	2.62
270	2.94	1.69	1.67	2.10	1.68	1.69	0.08	1.85	1.99
300	0.29	2.16	2.02	1.72	2.53	3.26	0.06	0.04	2.35
330	0.01	0.04	0.02	0.09	0.82	1.20	1.54	0.05	2.41

Fig. 11 Operable condition by stack gas

Fig. 9는 해석결과의 일례를 나타낸 것으로 풍향, 풍속, 함속의 결합조건에 대해 수직방향 속도의 표준편차기준인 1.75m/s를 초과한 영역을 가시화 한 것이다. 풍향에 따라 이·착함이 가능한 영역이 크게 바뀔 수 있다. 아울러 연돌에서의 배기가스 영

향에 대한 고려가 추가되어야 하는데 이는 앞서 해석한 함상유동 해석결과와 연돌의 배기가스 조건을 연동하여 해석한다 (Scott et al., 2015). 해석 예는 Fig. 10에 나타내었다. 최종적인 해석 결과는 Fig. 11과 같이 표로 착함위치별 운용가능조건으로 정리 된다.

4.3 이·착함 안전임무 수행범주 해석

Figs. 12~17에는 KRISO-CVX1을 대상으로 하여 착함위치 6에서 STOL 이·착함 안전임무 수행범주 해석결과를 polar plot으로 나타내었다. Figs. 12~14에는 함의 횡동요 고유주기 변화에 따른 안전임무 수행범주를 비교 검토하였다. 해상파는 장파정파, 단파정파를 모두 고려하였으며 성능지표로는 횡동요만 고려하였다.

전반적으로 횡동요 고유주기가 길어짐에 따라 이·착함 안전임무 수행범주가 확대되는 경향이 뚜렷하게 나타나고 있으며, 공진 효과는 선수사파영역에서 선미사파 영역으로 이동함을 볼 수 있다. 해상상태 6 조건에서는 횡동요로 인해 이·착함 임무가 제한 범위가 크게 확대됨을 알 수 있다. 또한 단파정파를 고려한 경우가 오히려 안전임무 수행범주가 크게 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 극한 해상에서의 위험도를 식별하는 생존 해석 관점과는 달리 해상상태 4~6에서 일정 수준의 기준초과를 식별하는 SOE 해석 관점에서는 공진의 효과를 가중평균하는 단파정파 해석을 고려한 결과로서, 이·착함 임무 안전임무 식별에는 단파정파 조건에 대한 고려가 필요함을 보여준다. Figs. 12~14에서 해상상태 5,6 과 달리 해상상태 4에서 장파정파 해석결과 기준초과 영역이 크게 나타난 것은 횡동요 공진응답 크기가 미미하여 가중평균 시 공진 효과가 무시되는 경우이다. 본 계산은 횡동요 공진효과를 부각하기 위해 점성효과와 빌지길 등을 고려하지 않은 결과이다. 빌지길 및 점성효과를 고려하면 해상상태 5까지 횡동요 기준초과 영역이 나타나지 않는다(Fig. 16).

빌지길 및 안정핀이 추가되면 해상상태 6에서도 임무 가능영역이 나선(bare hull) 조건의 해상상태 5보다 확대됨을 Fig. 15에서 볼 수 있다. 빌지길과 안정핀이 장착되면 해상상태 6까지 대부분의

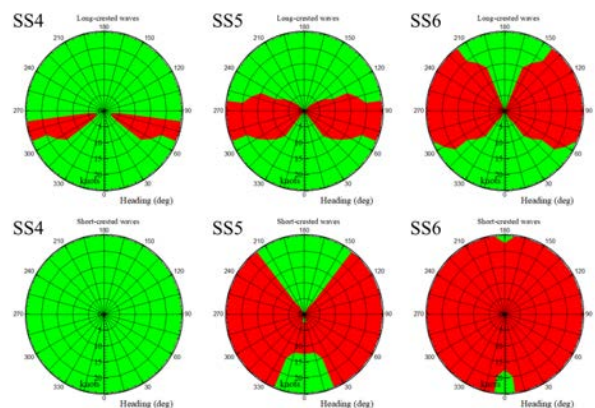


Fig. 12 STOLV SOE polar plot by roll motion(upper: long-crested sea, lower: short-crested sea, $T_{roll}=12.0$ sec, bare hull)

영역에서 이착함 임무가 가능한 것으로 예측되지만 Fig. 16에 나타난 바와 같이 해상상태 5, 빌지킬과 안정핀이 장착된 상태에서 횡동요, 종동요, 수직속도 등 함의 내향성능 관련 이착함 기준은 만족하더라도 상대풍속 조건에 의해 이착함 가능 함속과 풍향이 크게 제한됨을 볼 수 있다.

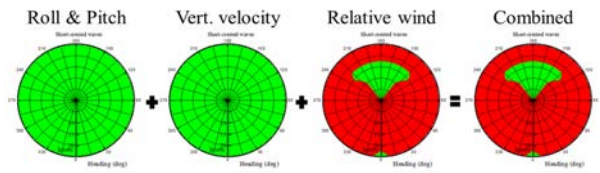


Fig. 16 STOVL SOE polar plot, (SS5, short-crested sea, $T_{roll}=12.0$ sec, with bilge keel and active fin)

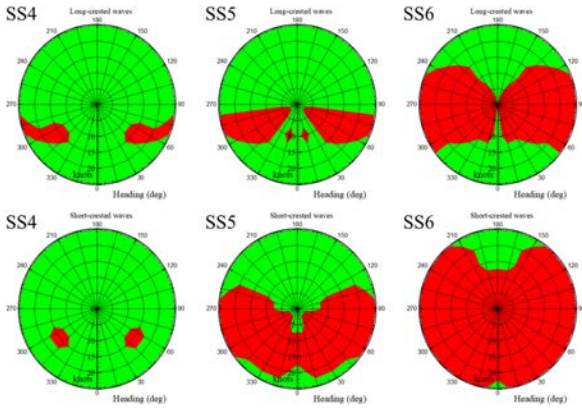


Fig. 13 STOVL SOE polar plot by roll motion(upper: long-crested sea, lower: short-crested sea, $T_{roll}=14.0$ sec, bare hull)

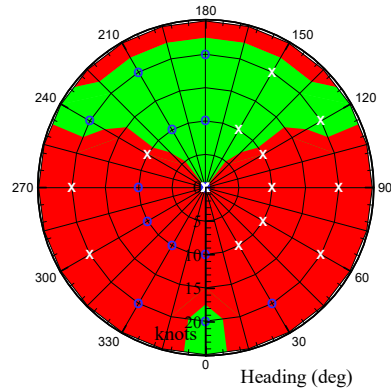


Fig. 17 Safe operating envelope at landing spot #6 under sea state 4 (relative wind + air-wake)

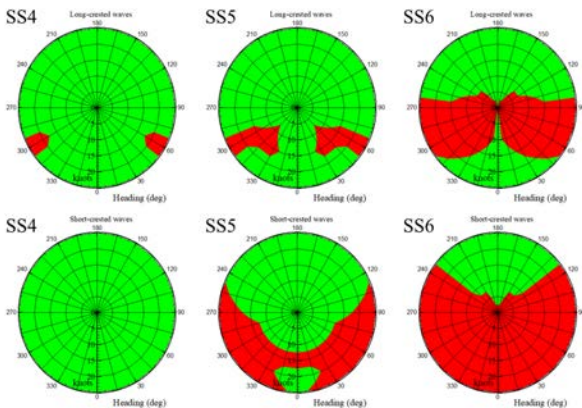


Fig. 14 STOVL SOE polar plot by roll motion(upper: long-crested sea, lower: short-crested sea, $T_{roll}=16.0$ sec, bare hull)

한편, Fig. 17은 해상상태 4, 착함 위치 6에서 CFD 해석으로 공기유동까지 고려한 결과를 polar plot으로 나타낸 것이다. 그림에서 공기유동 기준을 만족하는 영역은 ○로, 그렇지 않은 영역은 ×로 나타내었다. 함상유동을 고려하면 해상풍이 우현쪽에서 불어오는 경우 이착함 기준을 초과하는 것으로 나타난다. 이 결과는 이착함 안전임무 식별을 위해서는 다양한 내향성능지표 이외에도 갑판 배치설계 이후의 함상유동까지 고려해야함을 보여준다.

4.4 이동/순찰 및 생존조건 범주해석

모든 함정의 가장 기본적인 임무는 이동/순찰 (TPA: Transit and Patrol) 및 생존조건(survival condition)이다. 경항모의 경우는 길이 250미터, 배수량 40,000톤 급이기 때문에 통상적인 이동/순찰 요구조건을 만족한다. 생존조건은 갑판침수, 슬래밍, 프로펠러노출빈도, 함교에서의 수직, 수평기속도 기준 등을 만족시켜야 한다. Fig. 18에는 해상상태 9에서 생존조건을 만족하는 영역을 polar plot으로 나타내었다.

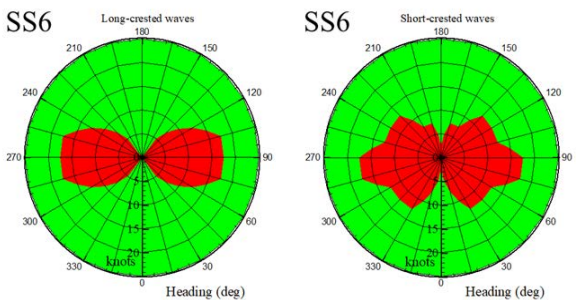


Fig. 15 STOVL SOE polar plot by roll motion(left: long-crested sea, right: short-crested sea, $T_{roll}=12.0$ sec, with bilge keel and active fin)

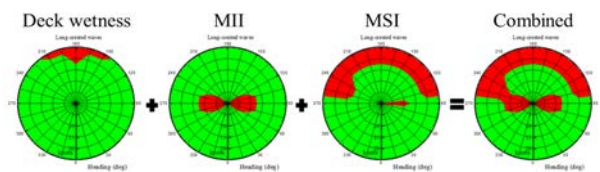


Fig. 18 Survival condition SOE, (SS9, long-crested sea, $T_{roll}=12.0$ sec, with bilge keel and active fin)

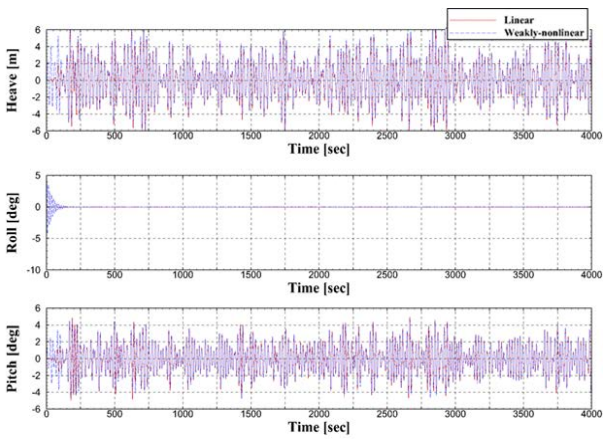


Fig. 19 Time history of motion (SS9, 8.0 knots, head sea, initial roll angle = 5.0 deg.)

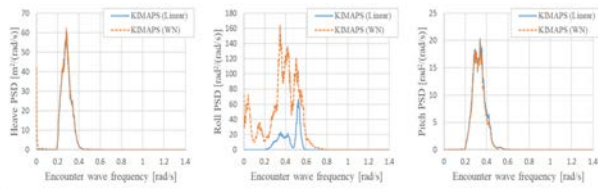


Fig. 20 Spectrum of motion (SS9, 8.0 knots, heading = 30deg.)

대상함은 생존조건 요구조건에 잘 대응하는 것으로 판단되나 저속구간에서 침로유지가 중요함을 나타내고 있다. 전통적인 수직, 수평가속도 기준은 모든 영역에서 만족하지만 가속도로 인해 유기되는 MSI, MI 등이 성능제한 설계인자로 식별됨을 알 수 있다. 해상상태 9가 대상인 생존조건에서는 통상적인 내항성지표의 만족 유무 이외에도 횡전 중 예상되는 비선형 거동에 대한 고찰 또한 필요하며 이는 시간영역해석으로 통해 확인이 가능하다. Fig. 19에는 해상상태 9, 함속 8노트, 선수파 조건에서의 비선형 거동 해석 예를 시계열로 나타내었다. 파라메트릭 횡동요 여부 판단을 위해 초기 횡경사 5도로 시뮬레이션을 한 결과이다. 초기 교란 이후 횡동요가 발산하지 않고 0으로 수렴되는 것이 확인되어 파라메트릭 횡동요는 발생하지 않는 것으로 판단된다. Fig. 20에는 선미사파조건에서 비선형 거동해석과 선형거동해석 결과를 스펙트럼으로 비교하였다. 비선형해석결과 횡동요가 눈에 띄게 증가하나 상항동요 및 종동요 운동에너지 변화는 관찰되지 않았기 때문에 이 조건에서도 대상선형에 대한 파라메트릭 횡동요 발생 가능성은 없는 것으로 판단된다. 하지만 이러한 해석을 통해 선미사파 중 비선형 효과로 횡동요가 증가함을 예측할 수 있다. 이와 같이 횡전조건에서는 시간영역해석을 통해 다양한 생존조건 시나리오에 대한 비선형 거동의 위험성을 사전에 확인하고 모형시험을 통해 최종 판단을 내릴 수 있다.

4.5 해상보급 안전임무 수행범주 해석

경항모에서 해상보급은 중요한 임무 중 하나이며 Table 1에 나타낸 바와 같이 이·착함 임무조건보다 엄격한 기준이 적용되는데,

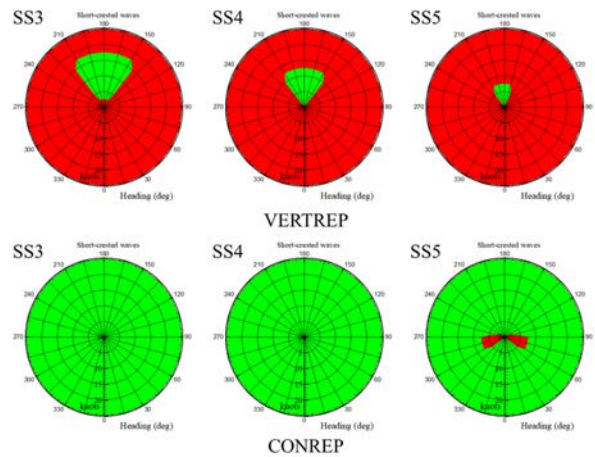


Fig. 21 Safe Operating Envelop of CONREP and VERTREP (short-crested sea, $T_{roll}=12.0$ sec, with bilge keel and active fin)

이는 해상보급 작업에는 함상에서 승조원의 작업이 포함되기 때문에 사료된다. 대상함에서 선박 간에 연결선을 통해 작업이 이루어지는 CONREP과, VERTREP의 안전임무 수행범주가 해상상태별로 Fig. 21에 도시되었다. CONREP의 경우는 해상상태 5까지 큰 제한 없이 임무가 가능하지만 VERTREP의 경우는 운용이 상당히 제한됨을 볼 수 있으며 그 주된 제한의 이유는 이·착함 임무와 마찬가지로 상대바람조건이다.

5. 결론

STOVL 함재기를 운용하는 경항공모함의 설계성능 평가에 필수적인 안전임무 수행범주 해석은 다양한 성능지표의 산출, 단독 임무 및 복합임무의 식별, 임무별 안전임무 수행범주 선정 등 복잡한 계산으로 인해 인적 오류의 발생이 빈번한 작업이다. 본 연구에서는 인적오류를 원천적으로 배제할 수 있는 안전임무 수행범주 일관 해석 시스템을 개발하였다. 이를 위해,

- 형상설계 인자의 체계적 검토를 위해 3차원 고차경계요소법을 도입하고 횡동요 감쇠장치효과를 자동으로 고려할 수 있는 AdFLOW-Navy를 개발하였다.
- AdFLOW-Navy결과를 이용하여 Cummins 방법과 Froude-Krylov 비선형 유체력을 결합한 비선형 시간영역 내항성능 해석 프로그램 KIMAPS-Navy를 개발하여 비선형 내항성능 해석에 활용하였다.
- AdFLOW-Navy 결과로부터 임무별 성능평가인자를 식별하고 해상상태, 선속, 파향의 결합조건에 대한 기준만족여부를 판단하고 그 결과를 polar plot으로 출력하는 안전임무조건 일관해석 프로그램 AdFLOW-SOE를 개발하였다.

경항모의 주요임무인 이·착함, 해상보급, 이동 및 생존조건에서의 안전임무 수행범주 해석을 수행하여 다음의 결론을 도출하였다.

경항모의 STOML 이착함 임무, VERTREP 등 횡동요 기준에 민감한 작업성능 평가를 위해서는 단파정파 해상에 대한 평가가 필수적이며, 설계 초기단계부터 대상함의 횡동요 고유주기에 설계목표 설정이 중요하며 횡동요 저감 장치의 설계가 필요하다.

함의 이착함 안전임무 수행범주 식별에는 내항성능 뿐 아니라 상대풍속 범주, 갑판형상과 배치에 영향을 받는 공기 유동해석 등 결과의 검토가 필요하다.

경항공모함의 경우 모든 착함 위치에서 임무평가를 위해 이착함 안전임무 수행범주 해석 시 상대풍속 및 풍향의 해상도와 동일한 간격으로 내항성능 해석을 수행하기 위해 내항성능의 해석 파향 범위를 0 ~ 360도 사이에 15도 간격으로 할 것을 권장한다.

기본적으로 수선면 위 형상이 좌우 대칭이지 않은 경항공모함의 생존조건에서 해석은 비선형 효과가 고려된 시간영역해석이 필요하다. 이를 통해 파라메트릭 횡동요와 같은 비선형 운동효과도 고려도 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 방위산업기술지원센터로부터 연구비를 지원(계약번호:UC200006D)받아 선박해양플랜트연구소에서 “함재기 이착함 시뮬레이션 기술”(PGS4280)로 수행된 연구결과입니다.

References

- Authority, C.A., 2021. Offshore Helicopter Landing Areas: Guidance on Standards.
- Comstock, E.N. and Keane Jr. R.G., 1980. SEAKEEPING BY DESIGN, *Naval Engineers Journal*, 92(2), 157-178.
- Comstock, E.N., 1982. Seakeeping performance comparison of air capable ships, *Naval Engineers Journal*, 94(2), 101-117.
- Cummins, W.E., 1962. The Impulse response function and ship motion. Report 1661, Department of the Navy, David W. Taylor Model Basin, Hydromechanics Laboratory, *Research and Development Report*, October 1962.
- Hong, S.Y. Park, D.M., Cho, S.K. and Lee, H.J., 2022, Evaluation of safe operating envelope of STOML performance of an aircraft carrier, *The Korean Association of Ocean Science and Technology Societies, Session I*, Jeju, Korea, 2-4 June 2022.

Kery, Sean, Scott Henry, Michael Eaton and John Vasilakos, 2018, On the creation of a safe operating envelope for ships, *SNAME Maritime Convention, Providence, Rhode Island, USA*, SNAME-SMC-2018-068

Lloyd, A.R.J.M., 1991. Seakeeping. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Physical and Engineering Sciences*, 334(1634), 253-264.

North Atlantic Treaty Organization(NATO), 2000. Common procedures for seakeeping in the ship design process, standardization agreement, *STANAG 4154 NAV*(Edition 3).

Park, D.M. and Hong, S.Y., 2022. A study on the analysis of the seakeeping performance of an aircraft carrier, *The Korean Association of Ocean Science and Technology Societies, Session I*, Jeju, Korea, 2-4 June 2022.

Pattison, J.H. and Bushway, R.R., 1991, Deck motion criteria for carrier aircraft operations, *Aircraft ship operations*, 21.

Salvensen, E.O. Tuck, O. and Faltinsen, O., 1970. Ship motions and sea loads. *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 78, pp.250-287.

Scott, P., White, M.D. and Owen, I., 2015. Unsteady CFD modelling of ship engine exhaust gases and over-deck air temperatures, and the implications, *71st American Helicopter Society Forum*, Virginia, USA, 5-7 May 2015.



홍사영



박동민



정재환



서민국



조석규