



함재기 안전임무수행범주 평가를 위한 함정갑판 공기유동의 CFD 모델링 DB 활용연구

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

A Study on the Methodology for Assessment of Safe Operating Envelope on Light Aircraft Carrier Using CFD Modeling Database of Flight Deck Air-wake

Jae Hwan Jung·Dong-Min Park·Seok-Kyu Cho·Sa Young Hong[†]
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.

This study aims to evaluate the safe operating envelope (SOE) for light aircraft carriers using a computational fluid dynamics (CFD) modeling database of flight deck air-wake. Assessing the SOE is crucial for ensuring the safe operation of carrier-based aircraft, particularly during take-off and landing maneuvers. Traditional methods that only consider relative wind envelopes (RWE) provide basic information but fail to account for the complex airflow patterns over the flight deck. To address this limitation, this research utilizes CFD to analyze the air-wake and integrate these findings into the SOE assessment. Various studies on CFD modeling of airflow around naval ships and aircraft carriers were reviewed, confirming the importance of accurate airflow databases for operational safety. This study employs the KRISO-CVX1 model, a light aircraft carrier designed by the Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO), to demonstrate the application of CFD data in SOE evaluations. The methodology involves a detailed analysis of turbulent flow and thermal fields around the carrier deck under different wind speed, direction, and ship speed conditions. The results indicate significant variations in air-wake characteristics depending on the relative wind speed and direction, impacting the operational safety of carrier-based aircraft. This study emphasizes the need for incorporating CFD-based airflow data into SOE assessments to enhance the accuracy and reliability of operational safety evaluations for aircraft carriers. In conclusion, the integration of CFD air-wake modeling databases provides a more comprehensive approach to assessing the SOE, offering improved safety margins for carrier-based aircraft operations. This research is expected to contribute to the development of more robust and precise operational guidelines for naval aviation.

Keywords : Air-wake(공기유동), CFD modeling database(CFD 모델링 데이터베이스), Light aircraft carrier(경함공모함), Safe operating envelop(안전임무수행범주)

1. 서론

항공모함에 이·착함을 시도하는 함재기의 안전한 임무수행을 위해서는 함정갑판 공기유동과 관련된 안전임무수행범주(SOE, safe operating envelope)의 평가가 중요하다. 풍향, 풍속, 그리고 선속에 따른 상대속도를 비교하는 함정갑판 상대풍속범주(RWE, relative wind envelope)는 함재기의 이·착함 여부를 판단할 수 있는 기본적인 정보를 제공하지만 갑판 위에서 형성되는 복잡한 유동 정보를 고려하지 못해 실제 임무에 해당 정보만 활용하는

데에 한계가 있다. 이를 극복하기 위해, 갑판 위의 공기유동(air-wake) 정보를 추출할 수 있는 전산유체역학(CFD, computational fluid dynamics) 해석이 SOE 평가에 활용되고 있으며 대표적인 연구로는 Hodge et al. (2012)과 Kelly et al. (2018) 등이 있다. 갑판 위 공기 유동 정보의 추출을 위해 전산유체역학 해석을 활용한 연구들은 Mahaffey et al. (1986)를 시작으로 90년 후반에 본격적으로 수행되어 왔으며 실전에 활용된 최근 사례로 2017년에 취역한 영국 해군의 중형항공모함인 HMS Queen Elizabeth 주위 공기유동의 풍동 및 전산유체역학 해석 연구가 있다 (Watson et al., 2019).

90년 후반부터 전산유체역학 해석을 활용한 공기유동 모델링 데이터베이스(DB, database) 구축 연구의 중요성이 점차 부각되기 시작한 반면, 함선 또는 항공모함 주위 공기유동 정보는 군사 보안에 해당되어 해당 정보를 활용한 학술연구는 제한적이었다. 그러나 TTCP(the technical co-operation program)에서 형상을 단순화 시킨 연구용 함선인 (SFS)을 개발하면서 본격적인 학술연구도 함께 진행된다. Cheney and Zan (1999)은 풍속 60m/s 및 다양한 WOD(wind over deck) 조건에서 상부 구조물, 비행 갑판, 굴뚝 그리고 격납고 면을 포함한 224개의 입력 탭으로부터 시간 평균 압력을 측정하여 전산유체역학해석의 수치기법을 검증할 수 있는 데이터를 제공하였다. SFS(simple frigate shape)의 후속연구로 Forrest and Owen (2010)은 SFS의 형상을 좀 더 함선에 가깝게 수정한 SFS2 모델에 대한 풍동시험을 수행하였으며 함선 주위 국부 유동 정보를 DES(detached-eddy simulation) 해석결과와 비교하여 전산유체역학 해석의 높은 활용 가능성을 보여주었다. SFS와 SFS2의 갑판 위 공기유동의 기초연구 자료들이 수집되기 시작하면서 2010년 이후에 정도 높은 수치해석기법 구축을 위한 격자 및 레이놀즈 수 의존성 그리고 난류모델 특성 평가에 관한 연구들이 활발하게 진행된다 (Lawson et al., 2012; Zhao et al., 2015; Linton et al., 2016; Forrest et al., 2016; Thedin et al., 2018 Yuan et al., 2018).

국내에서도 전산유체역학 해석으로부터 추출된 공기유동 DB를 항모설계 또는 SOE 평가 등에 활용하기 위한 연구들이 수행된 바 있다. Lee et al. (2014)은 무인항공기의 함상운용을 위해 1,500톤급 경비함인 제민호 주위 공기유동 DB 구축에 관한 연구를 수행하였다. 여기서 해상풍, 10m/s 조건에서 풍향 0°, 45° 그리고 180°를 고려하였으며 선박 갑판 주위에 특정 크기를 갖는 보간 영역을 두어 공기 유동 정보를 추출하는 과정을 소개하였다. Kim (2019)는 DES 및 SAS(scale adaptive simulation) 난류모델을 이용하여 TTCP에서 연구용으로 제안한 SFS2 주위 난류유동을 해석하였으며 헬리콥터의 발착장(helideck) 주위 평균 유동과 유동의 섭동 성분의 결과를 실험결과와 비교하여 SAS 모델이 DES 모델에 근접한 수준의 정확도를 보임을 확인하였다. Shim et al. (2022)은 입자영상상속계를 활용하여 대형수송함의 갑판에서 수직방향 위치별 속도장을 계속하여 갑판 위 공기유동의 특성을 체계적으로 분석하였으며, 후속 연구로 Chung et al. (2023)은 비행갑판을 갖는 함정 주변의 공기 유동을 정도 높게 예측하기 위해 실선 측정, 풍동시험, 그리고 전산유체역학 해석을 일괄적으로 수행하였다. 여기서 다양한 해양 경계 조건에서 유입류 속도 프로파일과 비정상 유동장 데이터를 수집하고 이를 기반으로 전산유체역학 해석 모델의 정확성을 검증하였다. 그 결과, 실험과 전산유체역학 해석의 결과 차이는 2% 이내로 전산유체역학 해석을 통해 얻어진 데이터가 대형 수송함 설계와 함재기 운용의 안전성을 향상시키기 위한 기초 자료로 활용될 수 있음을 보여주었다. 앞서 언급한 국내외 연구들의 경우 주로 신뢰도가 높은 공기 유동 모델링 DB를 얻기 위해 수치해석기법을 검증하거나 WOD에 따른 공기유동 특성 파악에 초점을 둔 연구들이 주를 이루었다. 그리고 SFS 및 SFS2와 같은 실전에 배치가 불가능한 매

우 단순한 형태의 함형을 고려하였기에 실전을 위한 응용 연구로 확장에 제한적이다. 또 공기 유동 모델링 DB 구축에 대한 연구와 더불어 얻어진 DB를 SOE 평가에 활용하기 위한 방법은 연구도 매우 중요하지만 안타깝게도 이를 구체적으로 다룬 연구는 국내 외적으로 찾기 어려운 실정이다.

본 연구에서는 KRISO가 자체 개발한 KRISO-CVX1을 활용해 SOE 평가에 전산유체역학 공기 유동 모델링 DB를 적용하는 절차를 수립하고, 이를 통해 도출된 결과를 상대풍속 범주만 고려한 경우와 비교하여 유효성을 검토하고자 한다. 연구 목적의 달성을 위해 논문 결과 검토는 다음과 같은 순서로 진행된다. 먼저 풍향과 풍속 그리고 선속에 따른 항모 주위 난류 및 열유동장 특성을 논의하고, 이착함 경로와 풍향별로 임무수행제한 기준을 초과하는 통계를 다룬다. 풍향/풍속/선속에 대한 갑판 위 공기유동에 대한 이해를 바탕으로 RWE에 관한 극좌표 그래프에 전산유체역학 공기 유동 모델링 DB를 반영하여 해상 상태별 SOE 평가 결과를 고찰하였다.

2. 공기유동 DB를 활용한 SOE 평가절차

2.1 해석대상

KRISO에서 자체 설계한 경항모 모델, KRISO-CVX1을 대상으로 SOE 평가를 수행하였으며 상세 제원과 이착함 위치(spot)의 정의는 Fig. 1에 나타내었다. 여기서 본 함형은 이탈리아와 일본의 경항모인 Cavour와 Izumo를 각각 참고하여 설계하였으며 갑판의 배치는 F35-B를 가장 오랫동안 운용한 미국의 강습함 landing helicopter assault(LHA)를 참고하였다 (Hong et al., 2024). KRISO의 CVX1은 연구용으로 개발된 SFS 및 SFS2와 달리, 실전에 배치된 항모의 특징을 고려하여 개발되었다. 따라서 본 연구에서 얻어진 공기 유동 모델링 DB를 SOE에 적용하는 과정은 실제 항모 설계와 운영 지침 수립에서 기존 연구와 차별성을 보여줄 것으로 판단된다.

2.2 SOE 평가절차 상세

SOE 평가는 함재기가 안전하게 이착함할 수 있는 조건을 해상상태 별 함속과 파향 그리고 바람 조건 등을 식별하여 평가하는 것으로 내항성과 함께 갑판위의 공기유동에 대한 상대풍속 범주가 전제가 되어야한다 (Hong et al., 2024). 그러나 본 연구는 공기유동 모델링 DB의 활용에 관한 것으로 SOE 평가에서 필요한 내항성 부분을 고려하지 않으며 갑판 위 공기유동에 대한 임무수행제한기준만 다룬다. 좀 더 상세한 이해를 위해 SOE 평가에 전산유체역학 해석과 공기유동 DB를 적용하는 절차를 Fig. 2에 정리하였다. 본 해석절차는 갑판 위 난류유동 및 온도장 해석을 위해 고려되어야 할 입력 값과 가정들(assumptions) 그리고 이착함 임무수행제한기준(SOE criteria)을 고려한 출력 값을 다룬다. 입력 값으로는 풍속과 풍향 그리고 선속이 고려되며 온도장 해석을 위해 대기 온도, 가스 터빈과 디젤 엔진 발전기에서 배출되는 온도 그리고 질량유량 정보가 사용된다. 마지막 입력 조건으

Table 2 Test matrix for SOE evaluation

No.	Sea state (SS)	Wind speed [kts]	Ship speed [kts]	Wind direction θ [°]
1	SS3	13.5	0	0° - 330° [$\Delta\theta=30^\circ$]
2			10	
3			20	
4	SS4	19.0	0	
5			10	
6			20	
7	SS5	24.5	0	
8			10	
9			20	
10	SS6	37.5	10	
11			20	
Total 132 cases				

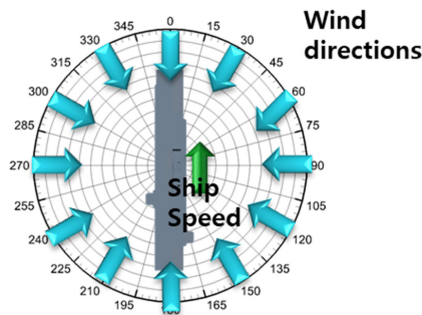


Fig. 3 Definition of wind and ship directions

리드 유계중심차분 및 2차 정확도의 음해법이 각각 적용되었다.

경항모가 운영되는 조건에서의 레이놀즈 수는 약 10^8 으로 이에 해당하는 난류구조를 모두 모사하는 데에 필요한 직접수치모사(DNS, direct numerical simulation)는 현재 존재하는 계산자원과 해석 사례를 고려한다면 수행이 불가능하다. 반대로 전산유체역학의 공기유동 DB를 활용한 SOE 평가에 있어 갑판 위 속도 변동량의 획득이 필요한 본 문제에서 레이놀즈 평균 기반 난류 모델(Reynolds-averaged Navier-Stokes)들은 수직방향 속도성분에 대한 변동량 계산이 불가능하다. 따라서 타협점으로 대형와모사법(LES, large eddy simulation)과 RANS 모델을 혼합한 IDDES(improved delayed detached-eddy simulation) 모델이 적용되었다. DES 모델의 특징은 벽면의 부착 유동 영역(attached flow regime)에 대해서는 RANS 모델을 적용하고, 유동의 박리 이후 영역에 대해서는 LES를 적용하는 방식으로 매우 높은 레이놀즈 수에서 효율적으로 난류 유동장을 모사할 수 있는 방법이다(Spalart et al., 1997). 그러나 격자 밀도에 따라 인위적인 유동 박리가 발생하는 문제점과 기존의 DES 및 DDES(delayed detached-eddy simulation)가 가지는 로그층 불일치 문제(LLM, log-layer mismatch)를 개선하기 위해 Shur et al. (2008)이 제안한 IDDES를 사용하였다. 부착 유동에 대한 RANS 모델은 선박 및 해양구조물 뿐만 아니라 함선 주위 공기유동 모사에 가장 많이 적용되는 모델 중 하나인 SST $k-\omega$ 모델이 사용되었다.

레이놀즈 수가 약 10^8 인 조건에서 항모 표면에서 발달하는

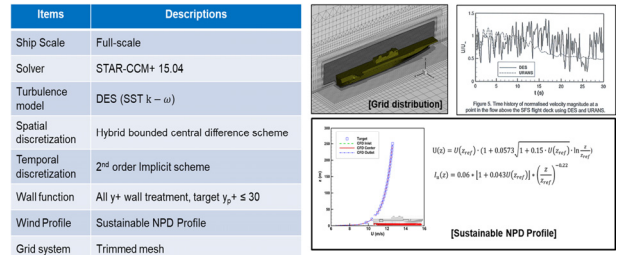


Fig. 4 Numerical details for air-wake and stack gas analysis

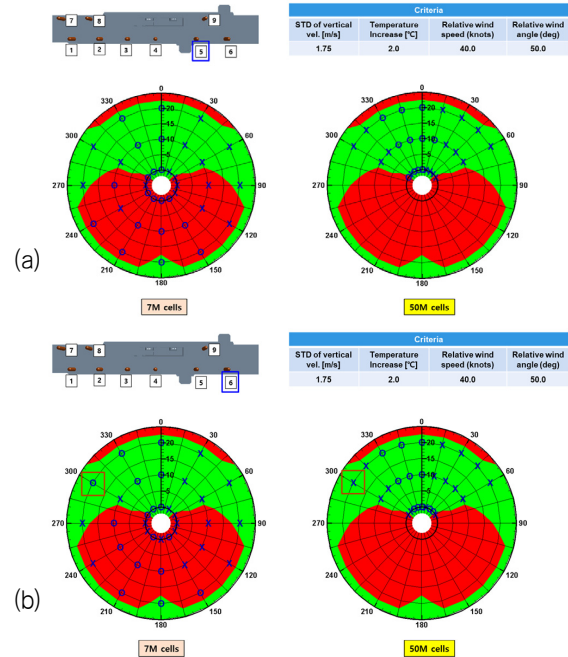


Fig. 5 Comparison of SOE results for low and high fidelity analysis: (a) Spot 5 and (b) Spot 6

속도 경계층과 박리 이후의 후류에서 모두 완전 발달된 난류가 관찰되기 때문에 효율적인 벽면 경계층 유동 계산을 위해 벽함수의 적용은 타당하다. 여기서 STAR-CCM+에서 지원하는 벽함수인 All y^+ wall treatment가 사용되었으며 벽함수의 처리 방식으로 y^+ 가 0에 다가가는 경우 low y^+ 경계 조건식으로 처리하고, y^+ 가 30 이상인 경우는 high y^+ 경계조건식을, $1 < y^+ < 30$ 은 혼합함수 (blending function)을 통해 처리된다.

본 연구에서 고려된 격자수는 약 7백만개로 실선 척도에서의 갑판 위 공기 유동을 정도 높게 모사하는 데 한계가 있다. 그 이유는 본 연구는 전산유체역학 모델링 DB를 SOE 평가에 활용하기 위한 '방법론'과 풍속과 풍향 그리고 선속 변화가 갑판 위 공기 유동과 SOE에 미치는 영향을 '정성적으로 비교'하는 것에 초점을 두어 대량의 전산유체역학 DB의 구축을 목적으로 하였기 때문이다. 따라서 공기유동 모사를 위해 선행연구들에서 고려된 수치해석기법을 참고 (Linton and Thornber, 2021)하였으나 정도 높은 공기유동 DB 도출에 제한사항이 존재한다. 다만, 격자수 변화가 SOE 결과에 미치는 영향을 검토하기 위해서 SS4 조건에서 5천만개 격자를 활용하여 SOE를 추가로 평가하였다. Fig. 5에

해당 결과를 도시하였으며 격자수에 따른 결과 비교를 통해 주어진 평가범위 내($300^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$)에서 SOE 결과들은 일부 특정 풍향을 제외하고 전반적으로 잘 일치하는 것을 확인하였다.

3.3 해석영역 및 경계조건

갑판 위 난류 유동장과 연돌 가스 해석을 위해 고려된 경계 조건과 해석 영역은 국제 공동 연구로 수행된 ‘Reproducible Offshore CFD JIP - CFD Modeling Practice’를 참고 (Yeon et al., 2022)하여 설정되었으며, 상세한 내용은 Fig. 6과 같다. 바람의 속도 및 풍향, 그리고 선속 변화를 경향모 위치 변화에 따른 새로운 격자 생성 없이 손쉽게 구현하고자 해석 영역의 바닥면을 제외한 나머지 경계면에 ‘velocity inlet’ 조건을 적용하고 풍향과 풍속 변화를 속도 성분으로 구현할 수 있도록 하였다. 입구 경계의 속도는 Table 2의 풍속과 풍향에 맞춰 변경되며, 온도장 해석을 위해 ISA(international standard atmosphere) 표준 조건인 15°C가 외기 온도로 사용되었다. 연돌 해석을 위해 Fig. 6의 확대 영역에 표시된 4개의 실린더 표면에 질량 유량 및 온도 조건을 지정하였으며, 이 때 배출가스는 Air, N₂, O₂, CO₂, H₂O이 혼합된 상태로 0%, 72%, 18%, 5% 그리고 5%의 구성비를 가진다.

3.4 SOE 수행을 위한 CFD 데이터의 결과 추출 방법

SOE 평가를 위해 이착륙 경로와 동일한 9개의 추출선을 생성한 뒤, 각 추출선에 설치된 약 50개의 물리량 계측점에서 수직 속도 성분의 표준편차(STD, standard deviation) 최댓값과 평균 온도를 측정하였다(Fig. 7). 이렇게 얻어진 물리량들은 Fig. 2에서 나타낸 것과 같이 임무수행제한 기준을 판단하는 데 활용되며 극좌표 등고선(contour line) 그래프를 이용하여 이착륙 위치별로 SOE 결과를 출력하게 된다. 추출선의 길이는 65 feet로, 호버링 높이(30~50 feet)를 포함할 수 있도록 설정 (Kelly et al., 2018) 되었으며 각 추출선에서 수직 속도의 최대 표준편차와 평균 온도가 실시간으로 계측되어 통계치의 수렴여부를 확인할 수 있도록 하였다.

수렴 기준에 대한 판단 근거를 확립하기 위해 Fig. 7과 같이 통계구간을 변경시켜 가면서 평가한 결과, 수렴이 필요한 무차원 시간(=속도×데이터 샘플링 시간/특성길이, Lpp)은 3.5 이상(차원화 된 시간 기준으로 약 90초)으로 대부분의 케이스들의 물리

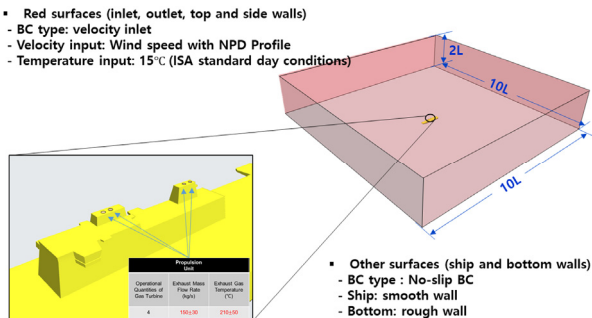


Fig. 6 Computational domain and boundary conditions

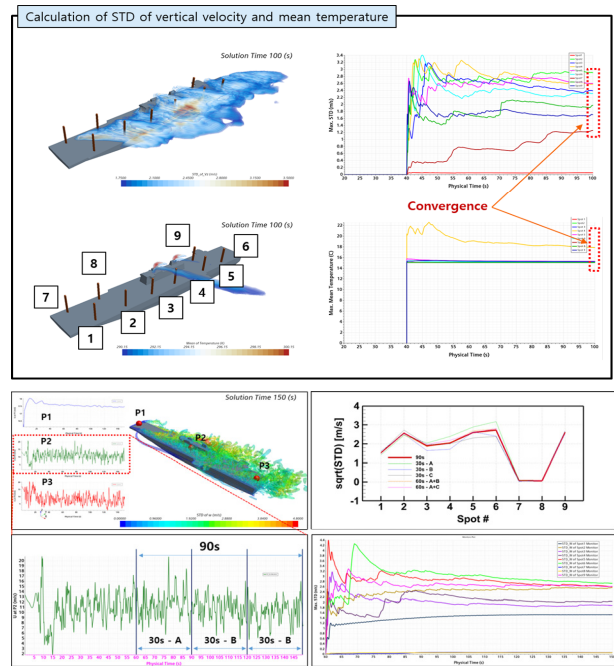


Fig. 7 Calculation procedures for standard deviation of vertical velocity and mean temperature

량은 해당 시간 내에서 수렴되는 경향을 가지는 것을 확인하였다. 본 기준을 바탕으로 시간 변화에 따라 계측된 물리량들이 수렴된 결과를 보이면 계산을 종료하였다.

4. CFD 공기유동 모델링 DB를 활용한 SOE 평가

4.1 SS4에서 풍향/선속에 따른 항모 주위 유동 특성 비교

풍향과 풍속 그리고 선속에 따라 갑판 위 공기유동과 연돌 가스의 거동을 관찰하고자 Table 3에 해당 결과들을 나타내었다. 총 132 사례에 대한 항모 주위 가시화 결과를 논문의 한정된 지면에 모두 나타내는 데 어려움이 있으므로 본 연구에서는 SS4 조건에서 선속 0kts 와 10kts에 관한 결과만 도시하였다. 풍속, 풍향과 선속 변화에 따라 달라지는 갑판 위 난류유동장을 가시화하기 위해서 3차원 와류 탐지법중에 하나인 λ_2 -criterion을 등치면으로 설정하였다. 그리고 임무수행제한기준인 수직속도의 표준편차, 1.75m/s의 초과 여부를 나타내기 위해 해당 물리량을 등고선으로 고려하였다. 여기서 빨간색이 출력되는 영역은 임무수행제한 기준의 초과를 의미한다. 항모 주위에서 발생하는 대표적인 유동 특성들 중(Fig. 8)에서 이착륙 임무수행제한 조건과 밀접한 관련이 있는 유동을 Table 3의 해석결과와 연계하여 아래와 같이 정리하였다.

1) Reverse and separated flow at bow는 풍향이 0° 또는 180° 가까워질수록 선수와 선미의 전단부(leading edge)에서 뚜렷이

Table 3 Visualizations of air-wake and stack gas flow

$\theta [^\circ]$	Air-wake visualizations		Stack gas visualizations	
	Ship speed 0 kts	Ship speed 10 kts	Ship speed 0 kts	Ship speed 10 kts
180				
150				
120				
90				
60				
30				
0				
330				
300				
270				
240				
210				
180				

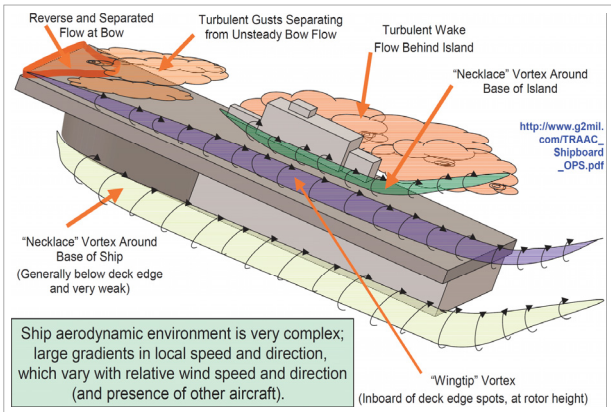


Fig. 8 Basic flow structures around USN amphibious assault ships(http://www.g2mil.com/TRAAC_Shipboard_OPS.pdf)

관찰되며 선수부에서는 선속이 증가할수록 선미부에서는 선속이 감소할수록 해당 유동의 영역은 점점 더 발달하는 특징을 가진다 (Table 3의 2번째 및 8번째 행, 0° 및 180°).

2) “Wingtip” vortex는 330°~30°의 풍향 범위에서 주로 관찰되며 좌현에서 발생하는 “wingtip” vortex가 우현에서 발생하는 것보다 이착함 임무수행에 더 많은 영향을 끼친다. 그 이유는 선수부 우측 모퉁이에서 생성된 “wingtip” vortex는 우현에 배치된 상부구조물이 가로막음으로써 갑판 하류로 나아가는데 제한을 받기 때문이다. 반대로 좌현에서 형성된 “wingtip” vortex는 이착륙 레인(lane)에 걸쳐 하류로 나아가는 특징을 보인다. 특히 난류천이에 따른 속도 변동성분의 증가로 일부 특정 이착륙 위치는 수직방향의 속도표준편차 기준을 초과하는 결과를 가질 수 있기 때문에 해당 소용돌이(vortex)의 발달과 진화과정은 유체역학적으로 중요한 관찰대상이 된다. 선속이 증가할수록 “wingtip” vortex의 천이가 점점 하류쪽으로 지연되고 길게 늘어지는 특성을 확인할 수 있는데, 원인은 선속이 증가할 때 상대 풍향이 선수부쪽으로 가까워지는 것에 있다. 이러한 특징은 풍향 330°에서 선속 0kts와 10kts의 공기 유동 가시화 결과의 비교를 통해 확인할 수 있다(Table 3의 9번째 행, 330°).

3) Turbulent wake flow behind island는 선속에 영향을 받을 수 있으나 주로 풍향, 60°~120°에서 상부 구조물과 갑판 길이 방향을 따라 발생하는 후류 및 대규모 박리로 인해 광범위 한 영역에서 속도표준편차 1.75m/s 기준을 초과하는 난류유동이 관찰된다. 본 유동은 착륙지점과 경로에 함재기가 이착함을 하는 데 가장 많은 영향을 미치므로 60°~120° 내의 풍향에서 특별한 경우를 제외하고 이착함임무는 제한된다(Table 3의 4행 ~6행, 60°~120°). 반대로 풍향, 240°~300° 범위에서 상부구조물의 후류가 갑판에 미치는 영향은 매우 제한적이며 좌현쪽 갑판의 모서리에서 발생하는 대규모 박리 유동이 임무수행제한을 결정하는 중요한 요소가 된다(Table 3의 10행~12행, 240°~300°).

4) “Necklace” vortex around base of ship은 갑판 아래로 바람이 유입될 때 관찰되나 상부 갑판에 미치는 영향은 제한적이므로 본 연구에 고려된 함형에 국한해서 해당 유동은 이착함임무수행 제한 여부 판단에 큰 영향을 끼치지 않는 것을 확인하였다.

갑판 위 공기유동과 함께 SOE에 중요한 평가 요소인 연돌로부터 배출되는 고온의 가스는 외부 공기와의 혼합 및 확산과정을 통해 갑판 위 공기 유동의 온도 변화를 일으킨다. 즉, 4개의 엔진 배기구에서 약 120~260°C 사이의 온도를 가지는 가스가 배출되면서 15°C의 온도를 가지는 바람에 혼합되고 풍향에 영향을 받아 확산되면서 함재기의 이착함 임무에 영향을 줄 수 있다. 결과적으로 연돌 가스로 인해 이착함 경로에서 공기 온도가 2°C 상승하게 되면 이착함 임무수행은 제한된다. 따라서 수직 속도의 표준편차 및 공기 온도 증가량의 초과에 따른 임무제한 여부를 직관적으로 판단할 수 있도록 대기온도 15°C를 기준으로 2°C 상승한 17°C를 등치면으로 고려하고 해당면에 수직속도의 표준편차 등고선을 가시화하였다(Table 3). Table 3을 통해서 2°C 상승한 배기가스가 이착함 경로를 지나는 사례는 주로 우현에서 갑판으로 유입이 될 때이며 좀 더 상세하게는 풍향, 30°~90°에서 이착함 지점 4,5 그리고 6의 경로에 연돌 가스가 지나는 것을 확인할 수 있다.

4.2 이착함 위치 및 풍향별 수직속도 표준편차의 기준초과 발생률 비교

Fig. 9에 착륙 위치별 수직 속도 표준편차의 기준초과 발생률을 나타내었으며 이 값은 모든 해상상태(풍속)와 풍향 그리고 선속 조건에서 착륙 위치별로 임무제한 기준에 초과하는 횟수를 총 시행 횟수로 나누어 얻어진다. 9개의 이착함 지점의 경로 중에서 수직속도의 표준편차 기준, 1.75m/s를 초과할 확률이 가장 높은 위치는 6번과 9번으로 각각 54.6%와 55.3%의 발생률을 보이며 갑판 위 상부 구조물의 좌측 및 후방에 위치한 이착함 경로들은 다른 이착함 지점들과 달리 50% 이상 되는 높은 발생률을 가진다. 이러한 이유는 해당 경로들이 갑판 길이 방향 및 선미부 모서리에서 발생하는 광역 박리유동과 상부 구조물의 후류에 직접적으로 많은 영향을 받는 위치에 있기 때문이다. 결과분석을 통해 이착함이 주로 수행되는 지점 5와 6이 주의 영역에 포함되므로 본 결과를 통해 주요 이착함 지점에서 원활한 임무 수행을 위해서는 갑판 상부 구조물 또는 모서리 형상의 개선이 필요함을 확인하였다. 그리고 갑판 위 구조물을 배치하거나 갑판의 모서리 형상 변경에 따른 공기 유동의 개선 사항의 여부를 판단할 때 본 결과자료와 연구 방법이 중요한 근거자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 10에 풍향별 수직속도 표준편차의 기준 초과 발생률 나타내었으며 이 값은 모든 해상상태(풍속)와 착륙위치 그리고 선속 조건에서 풍향별로 임무제한 기준에 초과하는 횟수를 총 시행 횟수로 나누어 얻어진다. Fig. 10를 통해 풍향이 선수 및 선미로 다가갈 때 기준초과 발생률은 점점 낮아지고 반대로 풍향이 좌현과 우현쪽으로 이동하게 되면 증가하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 풍향이 0°와 180°에서 각각 8.1% 및 5.1%로 가장 낮은 초과확률을 보이며 풍향이 90°와 270°로 다가가게 되면 70% 이상의 확률을 보인다. 흥미로운 점은 풍향이 90°와 270°가 아닌 120°에서 가장 높은 기준 초과 발생률을 보이는 데에 있다. 해당 원인은 선미쪽에서 우현으로 바람이 유입될 때 선속이 증가하게 되면 갑판 우측 상부 구조물과 길이 방향의 모서리에서 발달되는 난류

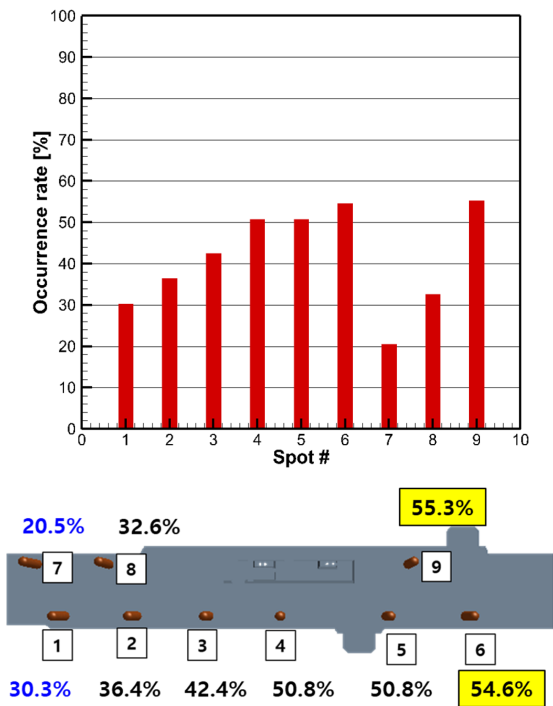


Fig. 9 Occurrence rates for exceeding maximum STD of vertical velocity according to spot positions

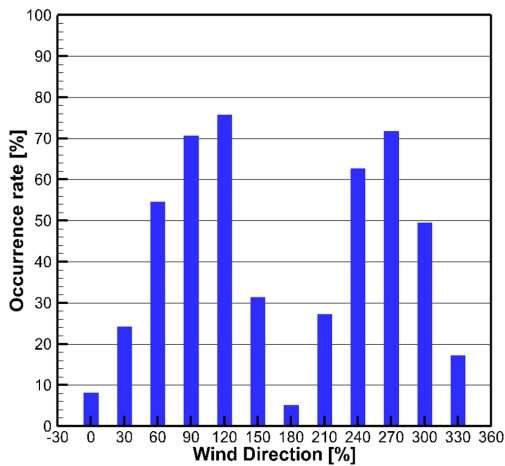


Fig. 10 Occurrences rate for exceeding maximum STD of vertical velocity according to wind directions

유동이 선수부쪽으로로 나아가게 됨으로써 수직방향 속도의 표준 편차, 1.75m/s를 초과하는 영역이 확대된 데에 있다. 이러한 특성은 풍향 90°와 120°의 공기유동 결과에서 이·착함 지점 1, 2 그리고 7을 관찰하면 쉽게 확인할 수 있다(Table 3의 4행과 5행). 따라서 선속이 증가할 때 풍향 120°에서 선수쪽 이·착륙 위치별 임무제한 기준을 초과하는 횟수의 증가는 기준초과 발생률을 높이는 원인이 된다. 그리고 풍향 90°와 270°에서 임무제한 기준초과 발생률이 전반적으로 높은 이유는 풍향이 선수 또는 선미부에서 좌현과 우현쪽으로 이동하게 되면 바람이 만나게 되는 갑판의 길이 방향의 날카로운 모서리 영역이 증가하면서 유동의 박리 영역이 확대되기 때문이다. 본 결과를 통해서 풍향이 90°와 270°로 갈수록 이·착함 임무수행 제한이 필요함을 확인할 수 있으며 이러한 결과 경향은 공기 유동의 대규모 유동 박리에 대한 물리적 직관과 전반적으로 일치한다.

4.3 이·착함 위치 및 풍향별 갑판 위 공기 온도의 2°C 상승 기준초과 발생률

Fig. 11에 이·착함 위치별 갑판 위 공기 온도의 2°C 상승 기준 초과 발생률을 나타내었으며 이 값은 수직속도 표준편차의 기준 초과 발생률의 계산법과 동일한 방식으로 얻어졌다. Table 3의 공기유동 및 연돌가스 가시화를 통해서 2°C 상승한 배기가스가 이·착함 경로를 지나는 사례는 주로 바람이 우현에서 갑판으로 유입이 될 때이며, 특히 배기가스가 풍향 30°~90°에서 이·착함 지점 4,5 그리고 6의 경로를 주로 지나는 것을 확인할 수 있다. Table 3에서 관찰한 풍향/풍속/선속에 따른 배기가스의 확산 특성은 통계 결과에서도 동일하게 나타난다. 수직속도 표준편차의 기준을 초과하는 이·착함 지점이 광범위한데에 비해 온도 상승 초과 기준이 발생하는 지점은 3,4,5,6 그리고 9로 상대적으로 제한적임을 확인할 수 있다. 반대로 선수부에 위치한 이·착함 지점 1,2,7 그리고 8은 기준초과 발생률이 1% 이하로 연돌 가스에 거의 영향을 받지 않는다. 기준 초과 발생률이 가장 높은 이·착함 지점은 4와 5로 각각 14.4%와 15.2%가 되며 이·착함 위치별 수직 속도의 표준편차 기준초과 발생률과 비교하면 이·착함의 임무 수행제한에 있어 갑판 위 공기유동의 변동성이 연돌가스의 온도 상승보다 더 중요한 평가요소임을 Figs. 9~12의 발생률 비교를 통해 확인할 수 있다.

4.2절에서 언급하였듯이 이·착함 지점 5번과 6번은 함재기의 이·착함 임무가 주로 수행되는 가장 중요한 위치이다. 풍향 별 수직속도 표준편차의 기준초과 발생률과 동일하게 지점 5번과 6번은 다른 이·착함 지점들에 비해 상대적으로 더 높은 온도 2°C 상승 초과기준 발생률을 가진다. 따라서 본 결과로부터 함재기의 원활한 임무수행을 위해서는 갑판 위 배기가스 배출경로의 개선이 필요함을 확인할 수 있다. 실제로 USS Gerald R. Ford class와 같은 가장 최신의 항공모함들은 연돌 가스가 갑판 측면에 방출하도록 설계되고 있다.

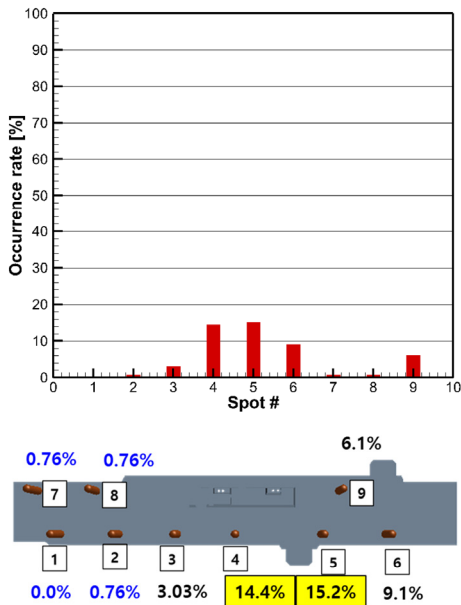


Fig. 11 Occurrence rate for exceeding a 2°C increase of mean temperature according to spot positions

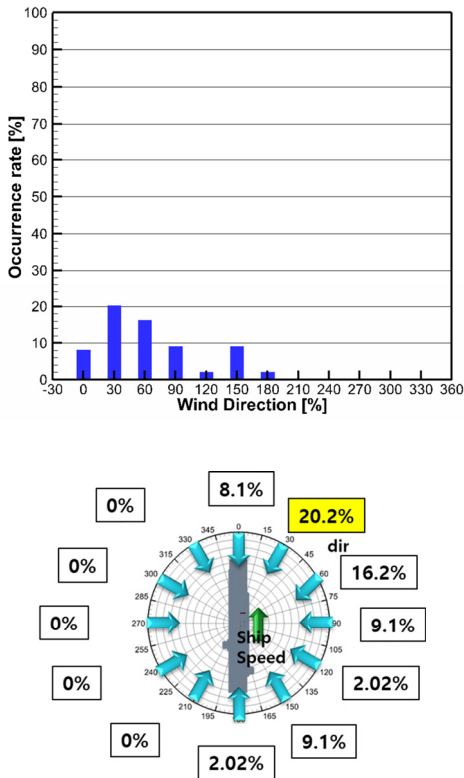


Fig. 12 Occurrence rate for exceeding a 2°C increase of mean temperature according to wind directions

Fig. 12에 풍향별 갑판 위 공기 온도의 2°C 상승 기준초과 발생률을 나타내었는데 풍향 0°와 180° 안의 범위에서만 공기 온도의 2°C 상승 기준초과가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 Table 3에서도 관찰하였듯이 연돌 배출구를 중심으로 좌측에 갑판 위 이착함 경로들이 존재하기 때문에 기준초과 발생률은 우

현쪽에서 유입되는 바람에 지배적인 영향을 받을 수밖에 없다. 그리고 선속이 증가하게 되면 RWE 관점에서 상대속도의 증가 및 상대각도 감소로 선수부에 위치한 이착함 경로들보다 연돌 배기구 좌측과 후방에 위치한 이착함 지점(4, 5, 6 그리고 9)들이 배스 가스의 영향을 더 높은 확률로 받게 된다(Fig. 11). 그 결과, 풍향 30°와 60°에서 20.2% 및 16.2%로 10.0%가 넘는 높은 발생률을 가지며 이 두 풍향을 제외하고 0°와 180° 안의 범위 내 나머지 풍향들에서는 기준초과 발생률이 10.0% 이하의 값을 가진다(Fig. 12).

4.4 공기유동 모델링 DB를 반영한 SOE 평가

본 장에서는 연구의 최종 목적인 SOE 평가에 전산유체역학 공기 유동 모델링 DB를 적용하여 얻은 결과를 상대풍속 범주만 고려한 경우와 비교하여 전산유체역학 DB 활용에 대한 유효성을 검토하였다. Figs. 13~16은 이착함 경로에서 속도 표준편차와 국부 온도 상승 기준 초과여부를 평가하여 얻어진 전산유체역학 DB 결과를 극좌표계 RWE 등고선 그래프에 결합한 결과를 보여준다. 여기서 극좌표계에 나타낸 RWE 등고선들은 Hong et al. (2024)의 상대풍속 및 상대풍향 정의를 바탕으로 각각 헬리콥터 이착함 조건에 해당하는 40kts 및 50° 조건에서 결정되었으며 빨간색은 상대풍속 및 상대풍향의 기준을 초과했음을, 초록색은 초과하지 않았음을 의미한다. 그리고 Table 1의 임무수행제한 기준을 초과하지 않는 지점은 'O'로 나타내었고 초과한 지점은 'X'로 나타내었다. 본 논문에서는 한정된 지면을 고려하여 갑판 위 총 9개의 이착함 경로 중에서 가장 중요한 지점인 5와 6의 SOE에 대해서만 결과를 다루었다. Fig. 13은 해상상태 3에서 이착함 지점 5의 속도 표준편차와 국부 온도 상승 기준 초과여부를 RWE 등고선 그래프에 적용한 결과를 보여준다. 해상상태 3에서 RWE의 기준을 초과하는 영역은 빨간색으로 선속은 약 15~17 kts 이하, 풍향은 대략 90°~270° 범위를 가지며 해당 조건에서 함재기 임무수행을 제한해야 한다. 초록색 영역의 경우 RWE 기준상 임무수행이 가능하지만 Table 1의 공기유동에 의한 임무수행제한 기준으로 인해 속도 표준편차와 온도 상승 초과여부를 함께 고려하여 SOE를 결정해야한다. Fig. 13(a)와 (b)를 통해 풍향 60°~120°와 240°~300° 범위에서 STD 기준 초과 사례들이 관찰되는 반면에 온도 상승 초과기준의 경우 풍향 30°~90°에서만 확인된다. 최종 SOE는 Fig. 13(c)와 같이 두 가지 초과 기준 결과를 합쳐서 얻어지므로 경우에 따라 임무제한의 범위가 확대될 수 있다.

Fig. 14는 이착함 지점 6에 대한 SOE 결과를 보여주며 선속 10kts에서 풍향 120°와 270°를 제외하면 지점 5의 최종 SOE와 동일한 결과를 보인다. 그러나 Fig. 15와 같이 해상상태의 단계가 3에서 4로 증가하면 이착함 지점 5와 6의 SOE 결과는 다소 많은 차이를 보이게 되며 해상상태의 단계가 5(Fig. 16)에 이르면 선속 10kts에서 풍향 210°를 제외하고 다시 두 지점의 결과는 전반적으로 일치하는 결과를 가진다. 이것은 갑판 위 유동의 강한 비선형으로 인해 해상상태별로 SOE 결과가 이착함 위치에 따라

다르게 나타나므로 CFD를 통한 공기유동 모델링 DB 구축이 중요함을 확인할 수 있다. 또 해상상태의 단계가 증가할수록 RWE와 공기유동에 관한 임무수행제한 범위는 점차 확대되는 것을 Figs. 13~16의 비교를 통해 관찰할 수 있다.

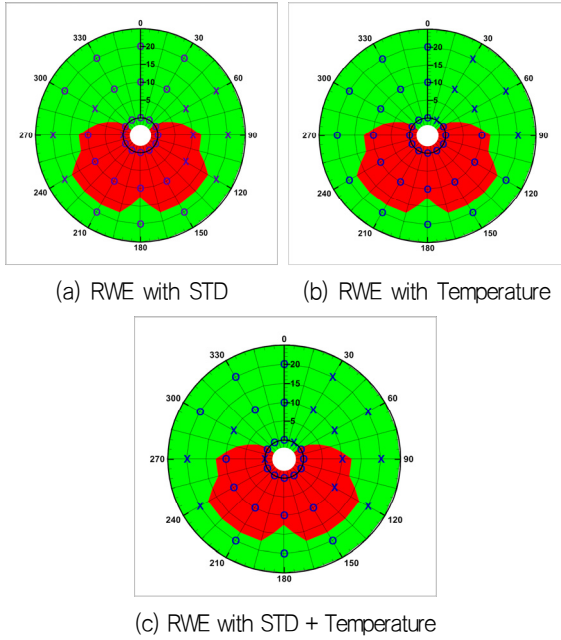


Fig. 13 Safe operating envelope at landing spot #5 under sea state 3: (a) relative wind with STD criterion, (b) relative wind with temperature increase criterion and (c) relative wind with STD + temperature increase criteria

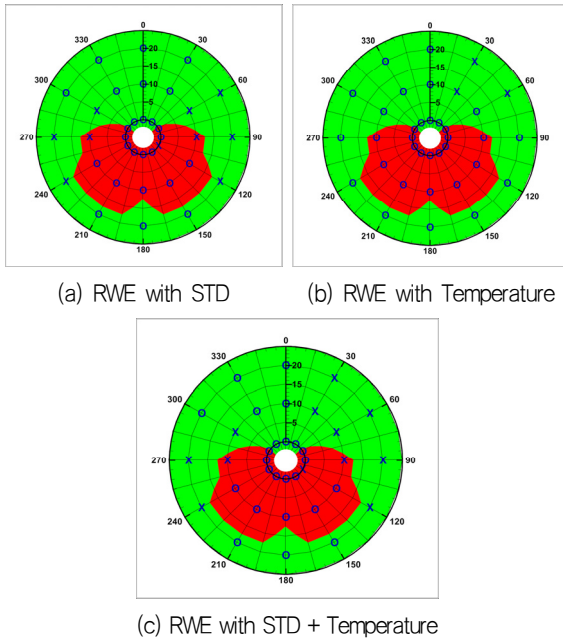
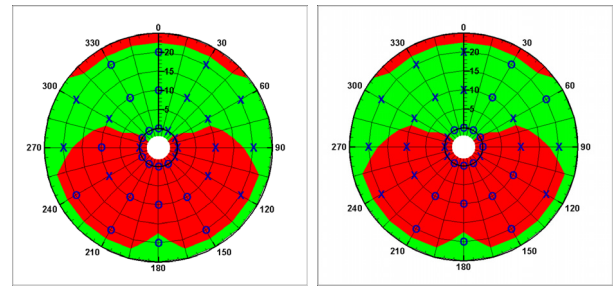
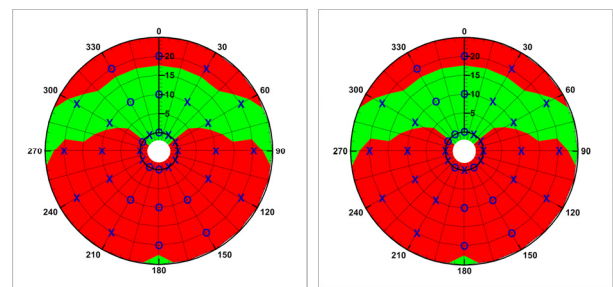


Fig. 14 Safe operating envelope at landing spot #6 under sea state 3: (a) relative wind with STD criterion, (b) relative wind with temperature increase criterion and (c) relative wind with STD + temperature increase criteria



(a) Spot 5 (b) Spot 6
Fig. 15 Safe operating envelope (RWE with STD + temperature criteria) under sea state 4: (a) landing spot #5 and (b) landing spot #6



(a) Spot 5 (b) Spot 6
Fig. 16 Safe operating envelope (RWE with STD + temperature criteria) under sea state 5: (a) landing spot #5 and (b) landing spot #6

앞선 결과들을 통해 RWE와 전산유체역학 DB를 활용하여 해상상태(풍속)와 풍향 및 선속별 SOE의 특성을 관찰하였다. 여기서의 핵심결과는 RWE만을 통해 임무수행제한 여부를 판단하는 것에 한계가 있다는 것을 확인한 점이다. 즉, RWE 기준의 임무수행 가능영역이 실제 공기유동 DB를 활용할 경우 임무수행 제한 영역으로 바뀌기 때문이다. 따라서 갑판 유동에 대한 체계적인 SOE 수립에 있어서 RWE에 CFD 공기유동 DB의 추가는 설계 성능 평가를 위해 필수적인 방법임을 확인하였으며, 앞으로 병렬 연산자원의 급격한 발달과 항공모함의 작전수행 능력의 확대에 대한 수요가 맞물려 CFD를 활용한 공기유동 모델링 기술의 중요성은 더욱 더 증가할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 경항모의 갑판유동성능에 대한 SOE를 평가하기 위해 상대풍속범주(RWE)에 전산유체역학 모델링 데이터베이스(DB)를 활용하는 절차를 제시하였다. 이를 통해 전통적인 RWE 평가 방법과 비교하여 전산유체역학 공기유동 모델링 DB의 활용에 대한 유효성을 확인하고 더욱 체계적인 SOE 도출이 가능함을 확인하였다. 주요 연구결과들에 대한 세부 내용은 아래와 같다.

- 1) RWE에 공기유동 DB를 결합한 SOE 평가를 수행하기 위해 고려되는 임무수행제한기준은 크게 세 가지로 첫 번째는 상

대풍속범주이며 두 번째는 수직방향 속도성분의 속도표준편차, 1.75m/s 초과여부 그리고 세 번째는 고온의 연돌가스로 인한 갑판 위 공기의 2°C 온도 상승이다. 여기서 두 번째 및 세 번째 제한기준은 전산유체역학 열·유동해석을 통해 평가되며 해석 데이터들은 RWE와 연동하기 위한 DB로 구축된다.

- 2) 갑판 위 공기유동과 연돌가스는 풍속과 풍향 그리고 선속에 매우 의존적임과 동시에 비선형적인 특성을 가진다. 선행연구들에서 관찰된 전형적인 갑판 유동구조들이 본 연구에서도 관찰되었는데, 특히 ‘Reverse and Separated Flow at Bow’ 와 ‘Wingtip’ Vortex 그리고 Turbulent Wake Flow behind Island 등은 이·착함 임무수행제한 여부에 영향을 주는 중요한 유동 특성이다.
- 3) 9개의 이·착함 지점의 경로중에서 수직속도의 표준편차 기준, 1.75m/s를 초과할 확률이 가장 높은 위치는 6번과 9번으로 각각 54.6%와 55.3%의 발생률을 보이며 갑판 위 상부 구조물의 좌측 및 후방에 위치한 이·착함 경로들은 다른 이·착함 지점들과 달리 50% 이상 되는 높은 발생률을 가진다. 그리고 풍향별 기준 초과 발생률은 바람이 선수 및 선미부(0°와 180°)로 유입될수록 낮아진다.
- 4) 공기 온도의 2°C 상승 기준초과 발생률이 가장 높은 이·착함 지점은 4와 5로 각각 14.4%와 15.2%가 되며 지점 1,2,7 그리고 8은 기준초과 발생률이 1% 이하로 연돌 가스에 거의 영향을 받지 않는다. 풍향별 기준 초과 발생률은 30°와 60°에서 20.2% 및 16.2%로 가장 높고 이 두 풍향을 제외하고 0°와 180° 안의 범위 내 나머지 풍향들에서는 기준초과 발생률이 10.0% 이하의 값을 가진다.
- 5) RWE에 공기유동 DB를 결합한 SOE 평가에서 갑판 위 유동 특성 변화가 큰 비중으로 영향을 미친다. 즉, RWE의 임무수행 가능 영역도 실제 공기유동 DB를 활용할 경우 제한이 필요한 경우들이 다수로 발생한다. 따라서 갑판 유동에 대한 SOE 수립에 있어서 RWE에 전산유체역학 공기유동 DB의 추가는 매우 중요한 방법임을 확인하였다.

후 기

본 논문은 국방신속획득기술연구원로부터 연구비를 지원(계약번호:UC200006D)받아 선박해양플랜트연구소에서 “함재기 이·착함 시뮬레이션 기술”(PGS4280)로 수행된 연구결과입니다.

References

Cheney, B. and Zan, S., 1999. CFD code validation data and flow topology for the technical co-operation program AER-TP2 simple frigate shape. *National Research Council of Canada*, Technical Report LTR-A-035.

Chung, J., Cho, T., Lee, S., Choi, J. and Lee, H., 2023.

High-fidelity ship airwake CFD simulation method using actual large ship measurement and wind tunnel test results. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 60(2), pp.135-145.

Forrest, J.S. and Owen, I., 2010. An investigation of ship airwakes using Detached-Eddy Simulation. *Computers & Fluids*, 39(4), pp.656-673.

Forrest, J.S., Kääriä, C. and Owen, I., 2016. Evaluating ship superstructure aerodynamics for maritime helicopter operations through CFD and flight simulation. *Aeronautical Journal*, 120 (1232), pp.1578-1603.

Hodge, S.J., Forrest, J.S., Padfield, G.D. and Owen, I., 2012. Simulating the environment at the helicopter-ship dynamic interface: research, development and application. *The Aeronautical Journal*, 116(1185), pp.1155-1184.

Hong, S.Y., Park, D.-M., Jung, J.H., Seo, M.-G. and Cho, S.-K., 2024. 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). *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 61(2), pp.125-134.

Kelly, M.F., Watson, N.A., Hodge, S.J., White, M.D. and Owen, I., 2018. The role of modelling and simulation in the preparations for flight trials aboard the Queen Elizabeth Class aircraft carriers. *Conference Proceedings*, 3 October 2018.

Kim, G., 2019. *Numerical study on frigate airwake using DES and SAS turbulence models*. Master's Thesis, University of Ulsan, Korea.

Lawson, S., Crozon, C., Dehaeze, F., Steijl, R. and Barakos, G., 2012. Computational fluid dynamics analyses of ship air wakes using detached-eddy simulation. In: *Proceedings of the 38th European Rotorcraft Forum*, Amsterdam, Netherlands.

Lee, C.-H., Yoo, C.-S. and Lee, M.K., 2014. Airwake modeling around ship using CFD. *Proceedings of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, pp.439-441.

Linton, D. and Thornber, B., 2021. Quantifying uncertainty in turbulence resolving ship airwake simulations. *Ocean Engineering*, 229, 108983.

Linton, D., Thornber, B. and Widjaja, R., 2016. A study of LES methods for simulation of ship airwakes. In: *Proceedings of the 46th AIAA Fluid Dynamics Conference*, AIAA, Washington, D.C.

Mahaffey, W., Mukerjee, T. and Singhal, A., 1986. Prediction of turbulent ship air-wake characteristics. In: *Numerical Simulation of Fluid Flow and Heat/Mass Transfer Processes*. Lecture Notes in Engineering, vol. 18, Springer, Berlin,

- Heidelberg.
- Shim, H., Chung, J., Cho, T., Lee, S. and Song, G., 2022. A research of the flow-field measurement above the flight deck on LHP by PIV System. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 59(4), pp.225–234.
- Shur, M.L., Spalart, P.R., Strelets, M.Kh. and Travin, A.K., 2008. A hybrid RANS–LES approach with delayed–DES and wall–modelled LES capabilities. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29(6), pp.1638–1649.
- Spalart, P.R., Jou, W.–H., Strelets, M. and Allmaras, S.R., 1997. Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach. In: Liu, C., Liu, Z. (Eds.), *Advances in DNS/LES*, pp.137–147. Columbus, OH: Greyden Press.
- Thedin, R., Kinzel, M., Horn, J. and Schmitz, S., 2019. Coupled simulations of atmospheric turbulence–modified ship airwakes and helicopter flight dynamics. *Journal of Aircraft*, 56(2), pp.812–824.
- UK Civil Aviation, 2021. *Standards for offshore helicopter landing areas*. CAP437.
- Watson, N.A., Kelly, M.F., Owen, I., Hodge, S.J. and White, M.D., 2019. Computational and experimental modelling study of the unsteady airflow over the aircraft carrier HMS Queen Elizabeth. *Ocean Engineering*, 172, pp.562–574.
- Yeon, S.M., Auburtin, E., Shen, Z., Loubeyre, S., Lee, B.H., Seo, M.–G., Sileo, L. and Kim, H.J., 2022. Development and verification of modeling practice for numerical estimation of wind loads on offshore floating structures. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 14, 100434. ISSN 2092–6782.
- Yuan, W., Wall, A. and Lee, R., 2018. Combined numerical and experimental simulations of unsteady ship airwakes. *Computers & Fluids*, 172, pp.29–53.
- Zhao, R., Rong, J.–L., Li, H.–X., and Zhao, P.–C., 2015. Entropy–based detached–eddy simulation of the airwake over a simple frigate shape. *Advances in Mechanical Engineering*, 7(11).



정재환



박동민



조석규



홍사영