



# 대형 비행갑판을 갖는 함정과 풍동시험 결과를 활용한 고신뢰도 함정 Airwake 예측

정진덕<sup>†</sup>·조태환·이승훈·최재훈·이학민  
한국항공우주연구원

## High-Fidelity Ship Airwake CFD Simulation Method Using Actual Large Ship Measurement and Wind Tunnel Test Results

Jindeog Chung<sup>†</sup>·Taehwan Cho·Sunghoon Lee·Jaehoon Choi·Hakmin Lee  
Korea Aerospace Research Institute

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.

Developing high-fidelity Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation methods used to evaluate the airwake characteristics along a flight deck of a large ship, the various kind of data such as actual ship measurement and wind tunnel results are required to verify the accuracy of CFD simulation. Inflow velocity profile at the bow, local unsteady flow field data around the flight deck, and highly reliable wind tunnel data which were measured after reviewing Atmospheric Boundary Layer (ABL) simulation and Reynolds Number effects were also used to determine the key parameters such as turbulence model, time resolution and accuracy, grid resolution and type, inflow condition, domain size, simulation length, and so on in STAR CCM<sup>†</sup>. Velocity ratio and turbulent intensity difference between Full-scale CFD and actual ship measurement at the measurement points show less than 2% and 1.7% respectively. And differences in velocity ratio and turbulence intensity between wind tunnel test and small-scale CFD are both less than 2.2%. Based upon this fact, the selected parameters in CFD simulation are highly reliable for a specific wind condition.

**Keywords** : Airwake(에어웨이크), Flight deck(비행갑판), Actual ship testing(실선 측정), Unsteady Flow-field(비정상 유동장), Wind tunnel Testing(풍동시험), CFD simulation(전산 유체 해석기법), STAR CCM<sup>†</sup>

## 1. 서론

우리나라 주변 국가들이 해군 군사력을 지속적으로 증가시키는 현 상황에 대응하여, 고정익 함재기를 포함한 다양한 함재기를 운반할 수 있는 대형 수송함 개발이 국내에서 지속적으로 요구되고 있다. 이러한 수송함을 개발하기 위해서는 함재기들이 운용되는 비행갑판에 대한 설계 능력을 반드시 확보해야 한다. 이를 위해 본 연구는 현재 해군이 보유한 헬리콥터 수송함을 대상으로 실선 측정을 수행하고, 이 결과를 활용하여 풍동시험 기법을 개발하고 상용 CFD 해석 코드인 STAR CCM<sup>†</sup>에 사용하는 다양한 변수들을 분석하여, 대형 수송함 비행갑판 설계에 활용할 수 있는 비행갑판 유동장 해석기술을 개발하고자 한다.

함정 상부 면에 생성되는 Airwake는 갑판 구조물의 기하학적 형상과 바람의 상호 작용으로 생성되는 난류이다. Airwake는 대기 유입 조건, 파도로 인한 선박 운동, 함정운항 속도 및 함정 상부 구조물의 형상 때문에 영향을 받는다. 이러한 환경에서 운용되는 함재기들은 비행갑판 상의 Airwake에 대한 정확한 정보와 이해를 바탕으로 운용이 되어야 안정적인 제어가 가능하다. 비행갑판상 Airwake는 3차원적이고 매우 복잡한 형태를 유지하고 있는데, 이러한 현상을 연구하기 위한 노력은 미 해병대가 운영하는 강습함(LHA와 LHD)에서 V-22 Osprey의 실선 배치 때부터 시작이 되었다 (Long, 2002). 실선 배치 훈련 중에 다수의 un-commanded 롤링이 발생하여 함재기가 위험한 환경을 경험하게 되었는데, 이러한 현상을 규명하고자 2000년부터 NAVAIR(Naval Air Systems Command) 프로그램에서 Airwake에

대한 연구를 수행하였다. 첫 번째 단계로 Fig. 1과 같이 두 척의 강습함 갑판에서 Airwake를 측정하였고, 실선 시험에서 측정할 수 없었던 운항 조건과 지역들에 대한 데이터 확보를 위해 NASA Ames 풍동 설비에서 1/48 축소형 모델을 만들어서 시험하였다. 실선 시험과 풍동시험으로 확보한 데이터들은 당시 미 해군이 사용 중인 해석 코드에 제공하여 함정 Airwake를 예측하고 비행갑판 상의 구조물 설계의 적정성을 분석하는데 활용되었다 (Polisky and Bruner, 2001).

미 해군사관학교 (Brownell et al., 2012)는 훈련용 근해 운용 함정인 길이 33m급 YP를 이용하여 함수부로 유입되는 유입류 특성을 측정하였고, 영국 해군 (Wilkinson et al., 1999)은 TYPE 23 호위함(Frigate)의 헬리콥터 착륙용 비행갑판 유동장 측정을 수행하였다. 브라질 해군은 (Mauricio, 2012) 길이 96m인 헬리콥터 탑재 함정을 이용하여 실선 측정을 하고, 풍동 모델로 데이터를 획득하고, 이 결과들은 CFD 해석에 제공하여 정확도를 증진하는 데 활용하였다.

풍동시험을 활용한 Airwake 연구는 실선 측정으로 기준 데이터를 얻기 어려운 경우에 CFD 해석 정확도 검증을 위한 데이터를 생성하는 것이 주목적이다. 이 연구에 주로 사용하는 함형은 SFS2(Simple Frigate Shape)이고, 이 모델을 이용하여 미 해군의 연구시설인 Carderock (Sydney et al., 2016)과 캐나다의 NRC (Yuan et al., 2018) 이외의 여러 풍동 설비에서 수행되었다. 유동장 특성은 주로 함재기들이 이착함하는 장소로 사용되는 Fig. 2와 같은 선미부 갑판 주변을 중심으로 데이터를 획득하였다. Shim et al. (2022)은 해군의 헬리콥터 수송함으로 사용하는



Fig. 1 Airwake measurements using US LHA and LHD

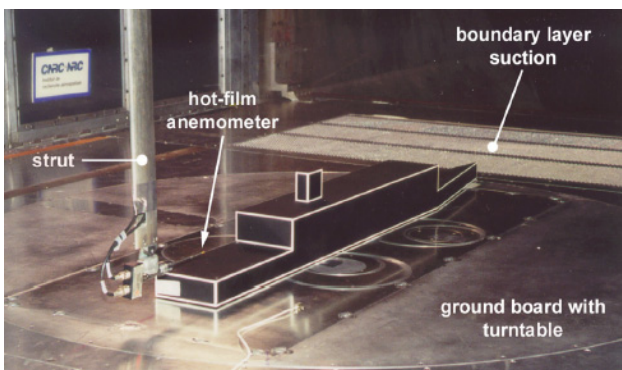


Fig. 2 Wind tunnel testing using SFS2 generic model

함정의 1.5% 축소형 모델을 대상으로 입자영상유속계를 활용한 2D 정상(steady) 유동장 측정을 수행하였다.

CFD 해석기법을 활용한 연구는 비행갑판 위에서 운용되는 함재기들의 안정적인 운용을 위해서, 안정적이고 효율적인 함정 Airwake에 대한 modeling 기법을 개발해야 한다고 요구가 많아지면서 이에 관한 다양한 연구가 활발히 진행되었다. 이러한 연구를 수행하기 위해 단순한 함정 모델인 SFS2 함형에 대한 시험 결과와 해석을 비교함으로써 함정 주변과 Airwake는 완전한 난류 상태이고, 레이놀즈수와 무관하게 일정한 유동장을 가지고 있음을 확인하였다.

함정 비행갑판 주변 유동장을 예측하기 위한 simulation 방법은 함정을 설계할 때 Airwake 유동 현상에 대한 이해도를 증진하고, 갑판 상부 구조물을 설계할 때 크기, 형상, 위치 등을 결정하는데 활용할 수 있고, 조종사들 훈련을 위한 simulator 개발에도 활용되어 광범위하게 사용되고 있다. CFD 해석기법을 활용한 Airwake 연구에서는 RANS 기반의 hybrid 난류모델인 URANS, SAS와 DES를 사용한다 (Shukla et al. 2021). Linton and Thomber (2021)은 CFD 해석에서 고려할, 지배 방정식, 난류 모델, time resolution과 accuracy, grid resolution, inflow condition, domain size, simulation length 등에 대해서 지금까지 연구 내용을 정리하였다. 국내에서는 해양경비대의 제민호 비행갑판에 UAV를 이착륙 시험을 위해 Fluent를 활용하여 갑판 유동장을 분석하였고 (Lee et al., 2014), 최근에는 DES 난류모델을 이용하여 비행갑판 유동장을 해석하였다 (Kim and Kim, 2022).

본 논문은 실선 측정, 풍동시험과 CFD 해석으로 구성이 되어 있다. Airwake 연구를 수행하기 위해서는 기준 데이터가 필요한데, 이를 위해 우리나라 해군이 보유한 함정 중 가장 큰 비행갑판을 갖는 함정을 이용하여 함수부에서 유입류(inflow) 속도 프로파일과 함정의 이착함 장소로 정의되는 SPOT과 주변에서 측정된 결과를 정리하였다. 실선 측정에서 얻은 기준 데이터를 활용하여 풍동시험 기법 개발할 때 고려할 조건들과 실선 측정에서 획득할 수 없었던 함정운항 조건과 다양한 지점들에서 측정된 결과를 정리하였다. CFD 해석에서는 상용 코드인 STAR CCM+를 사용하여 해석에서 고려할 다양한 변수들을 분석하여 실선 측정과 풍동시험 데이터와 가장 근접하는 결과를 얻을 수 있는 해석 기술을 개발하는 과정을 소개하고자 한다.

## 2. 실선 측정

넓은 비행갑판을 갖는 함정에 대한 Airwake를 측정하는 연구는 국내에서 수행한 경험이 없으므로, 해당 연구를 위해서는 함정이 운항할 때 어떤 속도 프로파일을 갖는 유동장이 함수부로 유입되는지, 유입된 유동장이 비행갑판에 있는 island를 포함한 다양한 구조물을 지나면서 어떤 형태로 변화하는지에 대한 데이터가 필요하다. 이를 위해 해군의 협조를 얻어, 국내에서 가장 큰 함정을 대상으로 실선 측정을 수행하였다. 실선 측정은 시험 도중에 타 선박에 의한 측정 중단과 지연을 방지하고자 상대적으

로 함정운항 빈도가 낮은 동해 먼바다에서 수행하였다.

함정으로 유입되는 속도 프로파일을 획득하고자 고정식 지지부를 함수부에는 Fig. 3과 같이 높이 2m 간격으로 Gill 시의 Windmaster HS 3D 초음파 센서 5개를 설치하고 32Hz의 샘플링 주파수로 비정상(unsteady) 유동을 기록하고 각각 지점에서의 시간 평균속도와 난류강도를 측정하였다. 측정 지점 중 가장 높은 위치인 10m는 함정 형상에 의한 영향을 가장 작게 받으므로 이 지점에서 속도를 유입류 기준속도로  $|U_{ref}|$  정의하였다. 비행갑판 유입류의 속도와 각도는 아래와 같이 정의하였다.

$$WOD_{speed} = \left| \vec{U}_{ref} \right| = \sqrt{u_{ref}^2 + v_{ref}^2 + w_{ref}^2} \quad (1)$$

$$WOD_{\angle} = \tan^{-1} \left( \frac{v_{ref}}{u_{ref}} \right) \quad (2)$$

여기서  $u_{ref}$ ,  $v_{ref}$ ,  $w_{ref}$  는 Fig. 3의 10m라고 표시된 지점으로 들어오는 유입류 기준속도 X, Y, Z 방향 성분이다.

비행갑판 함수부를 지나온 유동장이 상부에 있는 island를 포함한 다양한 구조물을 지나면서 어떻게 변화하는지를 측정하기 위한 Fig. 4와 같이 3대 이동식 지지부 장치를 묶어서 연결하였다. 각각 지지부의 5.5m와 10m 높이에 두 개의 3D 초음파 센서를 부착하였고, 각 센서의(즉 측정 지점) 위치에서 평균속도와 난류강도를 측정하였다. 측정에 사용한 센서 높이는 미 해군이 실선 측정에서 센서를 설치한 높이와 같다. (RTO AGARDograph 300) 이동식 지지부가 비행갑판 상에 한 지점에 고정되면, 동시에 6개 지점에 대한 유동장 데이터를 획득할 수 있다. 샘플링 주파수는 유입류 프로파일 측정과 동일한 32Hz를 사용하였다. 이동식 지지부를 이용하여 측정된 데이터들은 함수부에 있는 고정식 지지부의 10m 높이에서 측정된 유입류 기준속도  $|U_{ref}|$  를 사용하여 속도비와 난류강도를 계산하였다. 이동식 지지부를 이용하여 비행갑판 상에서 난류강도는 측정 지점에서의 속도 편차를 유입류 기준속도로 정규화하여 정의하였다, u, v, w 방향 표준편차는 수식 (3)과 같이 정의하였다.

비행갑판에는 윈드라이더라는 원거리 속도 프로파일을 측정할 수 있는 장비를 설치하였는데, 함정으로부터 1km 전방에서 어떤 속도 프로파일을 갖는 해양풍이 접근하는지 측정하였다. 이 결과는 CFD 해석에서 Far-field 경계 조건으로 활용하였다. 실선 측정 과정에서는 함정의 자세와 방향, 속도에 대한 정보를 수시로 확인을 하기 위해 AHRS(Attitude and Heading Reference System)을 설치하였고, GNSS 수신기 2대를 사용하여 정확한 방위각을 측정하였다. 함정속도는 추가로 함교와 통신을 하면서 함교에 표시된 측정된 속도를 기록하여 데이터 분석할 때 참고로 활용하였다. Fig. 5는 실선 측정에서 사용된 모든 장비들을 보여준다.

$$TI_x = \frac{\sigma_x}{|U_{ref}|}, \text{ where } x = u, v, w \quad (3)$$

## 2.1 유입류 속도 프로파일

실선 측정을 수행하는 동안 함수부에 위치한 고정용 유입류

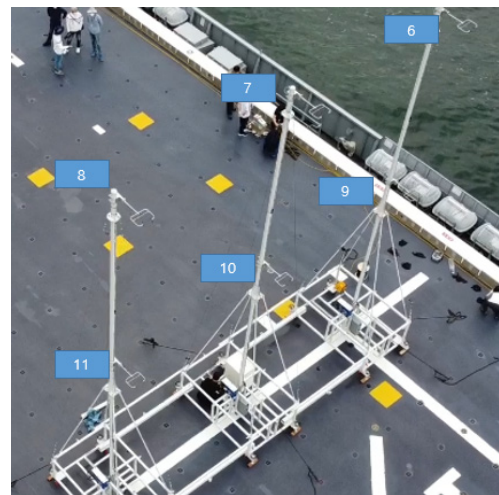


Fig. 4 Local flow-field measurement using moveable support with 3D sensors

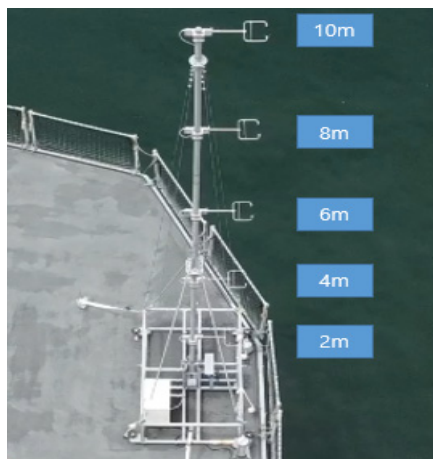


Fig. 3 Inflow velocity profiles measurement using fixed support with 3D sensors

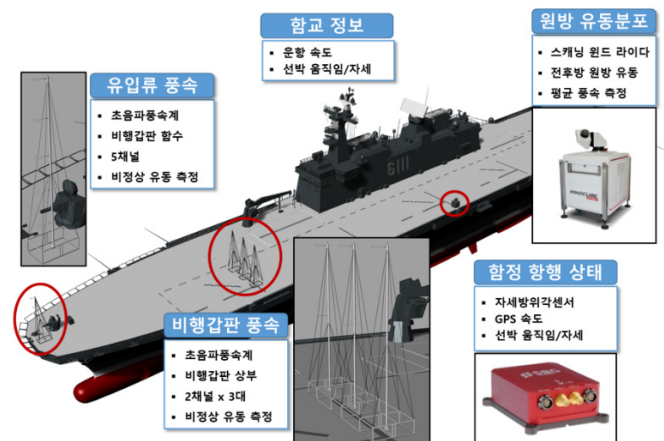


Fig. 5 Measurement equipment and sensors layout on the flight deck

측정 장치들을 활용하여 함정이 정풍 방향으로 운항할 때 어떤 속도 프로파일을 갖는 유동장이 함정으로 들어오는지를 측정하였다. 시험 도중에는 상대풍 속도(함정속도 + 해양풍 속도)를 12m/s로 유지하려고 하였으나, 시험마다 약간 차이가 있어 각각 시험조건에서 측정된 값들을 10m 높이에 있는 유입류 기준속도  $|U_{ref}|$  로 나눠서 속도비로 정리하였다. 함정 waterline부터 비행갑판까지 높이는 13m인데, 유입류 기준속도를 측정하는 지점은 측정 당시 sea-state마다 차이가 있으나, 잔잔한 해상상태에서는 해수면으로부터 23m 높이에 해당한다.

Fig. 6은 실선 시험 동안 함수부에서 5개 3D 초음파 센서를 사용하여 5개 높이에서 측정된 유입류 속도를 평균하여 u, v, w 속도비를 보여준다. u 속도 성분은 비행갑판 높이와는 무관하게 매우 작은 기울기를 갖는 속도 프로파일을 가지고 있다. 가령 유입류 속도 중에서 u 속도가 12m/s라고 가정하면 높이에 따라 u 속도는 최대 0.4m/s (10m 높이와 4m 높이) 정도의 속도 차이를 갖는다. v 속도 성분(함정의 좌우 방향)은 높이에 따라 차이가 없고, w 속도 성분(삼정의 상하)은 함수부에 생기는 bow vortex에 의해서 높이가 낮은 지역의 w 속도가 상승하는 특성을 보여준다.

Table 1은 각각의 높이에서 측정된 난류강도를 보여준다. u-속도 성분은 대체로 2% 미만을 가지고 있다. v와 w 속도 성분의 난류강도 역시 2% 미만 값을 보여준다. 제시된 난류강도는 실선 측정하는 동안 유입류를 대상으로 평균 처리한 값이고, 해양풍 속도가 함정속도보다 빠른 몇몇 경우에는 난류도 변화가 최대 4% 이상 발생함을 확인하였다.

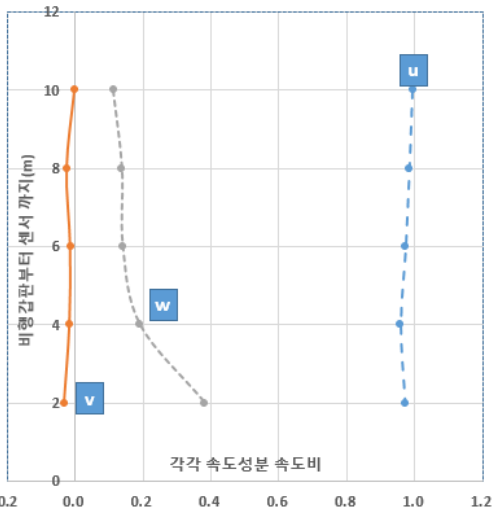


Fig. 6 Inflow velocity profile for 3 velocity components

Table 1 Turbulent intensity of inflow flow-field

Height	u	v	w
10m	1.74	1.78	1.54
8m	1.78	1.82	1.45
6m	1.82	1.86	1.52
4m	1.87	1.93	1.88
2m	1.86	1.95	2.02

## 2.2 비행갑판을 따라 측정된 결과

이동식 지지부를 이용한 비행갑판 유동장 측정은 Fig. 7과 같이 함수부부터 함미부까지 12개 측정 위치(72point)에서 수행하였다. 측정 지점 1부터 8까지는 함재가 이·착륙하는 SPOT(빨강)들과 이들 사이에서 측정하였고, 11번과 12번은 island 후방에 위치하여 유동장 변화가 큰 지역이다. 이 지역을 선정한 이유는 풍동시험과 CFD 해석이 이러한 지역들의 유동장 특성을 얼마나 정확하게 예측할 수 있는지를 확인하기 위해 측정점에 포함했다.

Table 2는 island의 영향을 받지 않는 지점(Fig. 7의 함수부 지점)과 island 끝 단 (Fig. 7의 함미부 지점)에 위치한 측정 지점에서 얻은 u 성분 속도를 유입류 기준속도로 나눈 속도비와 난류강도를 정리하였다. 각각 측정 당시의 함정속도와 해양풍 속도도 표에 기록하였다. 이들 두 지점에서는 두 번씩 측정하였는데, 측정 지점 10에서 첫 번째 측정을 제외한 나머지 3번 시험은 상대풍 속도를 12m/s로 유지하였다.

Table 2에 있는 6부터 11은 Fig. 4에 있는 초음파 센서들의

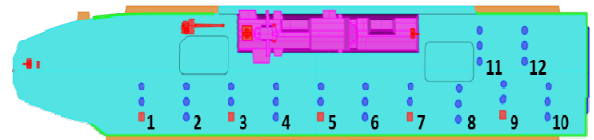


Fig. 7 Moveable measurement points

Table 2 Velocity ratio and turbulent intensity at the bow and stern locations

Bow region measurement points					
Ship speed		8.22	Ship speed		2.06
Wind speed		1.38	Wind speed		10.56
Relative speed		9.6	Relative speed		12.62
Point	S.R.	T.I.	Point	S.R.	T.I.
6	1.03	0.42	6	1.02	3.69
7	1.02	0.43	7	1.01	3.77
8	1.01	0.48	8	1.00	4.24
9	1.03	0.70	9	0.99	4.07
10	1.03	0.55	10	0.99	4.29
11	1.00	1.15	11	0.95	6.33

Stern region measurement points					
Ship speed		5.09	Ship speed		1.92
Wind speed		7.06	Wind speed		10.18
Relative speed		12.15	Relative speed		12.31
Point	S.R.	T.I.	Point	S.R.	T.I.
6	1.03	3.28	6	1.02	4.54
7	1.04	2.15	7	1.02	4.88
8	1.04	2.66	8	0.98	8.21
9	0.98	4.76	9	0.95	5.96
10	1.01	3.24	10	0.96	6.45
11	0.96	5.74	11	0.94	7.92

위치인데, 8번과 11번은 island와 가까운 위치이면서 함정의 중앙선과 근접한 위치이다. 측정 당시 유입류 기준속도로 각각 측정 지점들에서 얻은 속도를 나눠주어 속도비(S.R.)로 정리하였는데, 정풍조건에서는 측정 위치와 무관하게 거의 같은 값을 가지고 있다. 난류강도(T.I.)는 함정속도와 해양풍 속도의 강약에 따라 큰 차이를 보여주는데, 함수부 측정 지점에서 해양풍 속도가 10.56m/s일 때는 해양풍속도가 1.38m/s인 경우에 비해 난류강도가 최소 3배 이상 증가하였다. 마찬가지로 함미부에서 측정한 난류강도를 보면, 해양풍 속도가 증가함에 따라 난류강도가 증가하는 결과를 보여준다. CFD 해석을 수행할 때 같은 상대풍 조건이라도 함정속도와 해양풍 속도에 따라 유입류의 난류강도가 달라지고, 이로 인해 비행갑판 유동장의 난류강도가 달라진다.

국내 최초로 비행갑판을 갖는 함정을 대상으로 실선 측정을 수행하였다. 실선 측정을 위해 선정된 센서류와 센서류 고정용 지지부, 데이터 획득과 분석용 기법은 향후 대형 수송함 실선 측정에도 활용할 수 있다. 풍동시험과 CFD 해석에서는 실선 측정에서 얻은 유입류 속도 프로파일과 가장 근사한 유입류를 모사하는 방법을 먼저 찾아내고, 다음 단계로 이동식 지지부를 이용하여 측정한 지점들과 유사한 속도비와 난류강도를 얻을 수 있는 방법을 찾는다.

### 3. 풍동시험

Airwake 관련 풍동시험에서는 해양 경계층 재현 장치를 사용하여 부가 주요한 관심사이다. 캐나다 NRC 풍동설비에서는 풍동 모델을 시험부 바닥에 설치하고 시험부 바닥을 따라 성장하는 경계층이 모델에게 영향을 주는 효과를 제거하기 위해 suction 장치를 사용하는데, 모델을 풍동 바닥에서 임의로 높이 떨어진 지상판을 사용할 때는 경계층 재현 장치를 사용하지 않는다. 또한 실선보다 작은 축소비를 갖는 모델 시험에서는 레이놀즈수 영향을 반드시 확인해야 한다. 실선 측정 데이터를 활용하여 풍동시험 기법을 개발하는 과정에서는 실선 측정과 유사한 유입류 프로파일을 가지면서도 비행갑판 상에서 측정한 결과와 같은 속도비와 난류강도를 갖기 위해서 해양 경계층 재현 장치 사용 여부를 먼저 확인하고 이후에 레이놀즈수 효과를 분석하였다.

#### 3.1 해양경계층 재현 장치

Fig. 8과 같이 한국항공우주연구원 풍동 설비에서 약 20여 가지 함정 모델 풍동시험을 하는 동안 해양경계층(ABL Atmospheric Boundary Layer)을 모사하기 위해 사용하였던 장치를 시험부 입구에 설치하였다. 풍동 모델 함수부에는 실선 측정과 같은 지점에 total pressure rake를 설치하여 유입류 속도 프로파일을 측정하였다. 경계층 재현 장치 효과를 확인한 이후에는 total pressure rake를 함수부부터 함미부까지 이동시켜 가면서 실선 측정과 유사한 지점들에 대해 속도비가 얼마나 잘 일치하는지를 확인하였다.



Fig. 8 ABL device on/off test

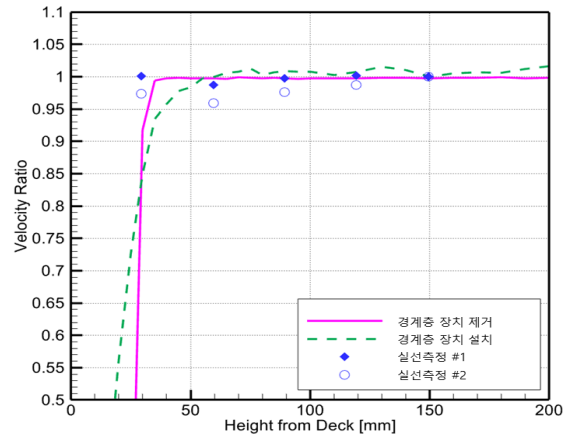


Fig. 9 Inflow velocity profile depending on ABL device ON/OFF

Fig. 9는 해양 경계층 재현 장치를 사용할 때(초록색), 두 번의 실선 측정 결과(사각형과 속이 빈원), 경계층 장치를 사용하지 않고 측정한 유입류 속도비(분홍색)는 보여준다. 해양경계층 재현 장치를 사용하면 특정 높이를 지나면 매우 일정한 속도비를 가지고 있는데, 반면에 해양경계층 장치를 사용하면 특히 갑판과 근접한 높이 부분에서 일치하지 않는 결과를 보여준다.

해양경계층 장치 적용 여부에 따라 실선측정에서 특정 두 개 높이인 5.5m와 10m를 따라 측정한 결과와 비교하였다. Fig. 10의 속이 빈원처럼 rake를 비행갑판을 따라 이동시키면서 측정한 결과들을 비교하였다. 해양경계층 장치를 사용하면 함수부를 제외하고 모든 영역에서 속도비 차이가 매우 증가하는 결과를 보여준다. 따라서 함수부로 유입되는 유입류 속도 프로파일과 비행갑판을 따라 측정한 결과를 보면 해양경계층 재현 장치를 사용하지 않는 것이 실선 측정과 가장 유사한 결과를 얻을 수 있다.

#### 3.2 레이놀즈수 효과

한국항공우주연구원 풍동시험 설비는 시험 매질의 밀도 혹은 점성계수를 변경시킬 수 없으므로, 레이놀즈수 변화 효과를 시험하는 방법은 시험 속도를 변경시키는 방법이 유일하다. 레이놀즈수 효과를 확인하기 위해 풍동시험 속도를 최소 12m/s부터 최대 50m/s까지 레이놀즈수를 4배 증가시켜 가면서 Fig. 8에 있는 total pressure rake를 사용하여 함수부부터 함미부까지 이동하면서 측정하였다. 시험 속도가 20m/s와 50m/s(9가지 속도 중 최저와 최고만)인 경우만 정리하였는데, Fig. 10과 같은 속도비를 갖

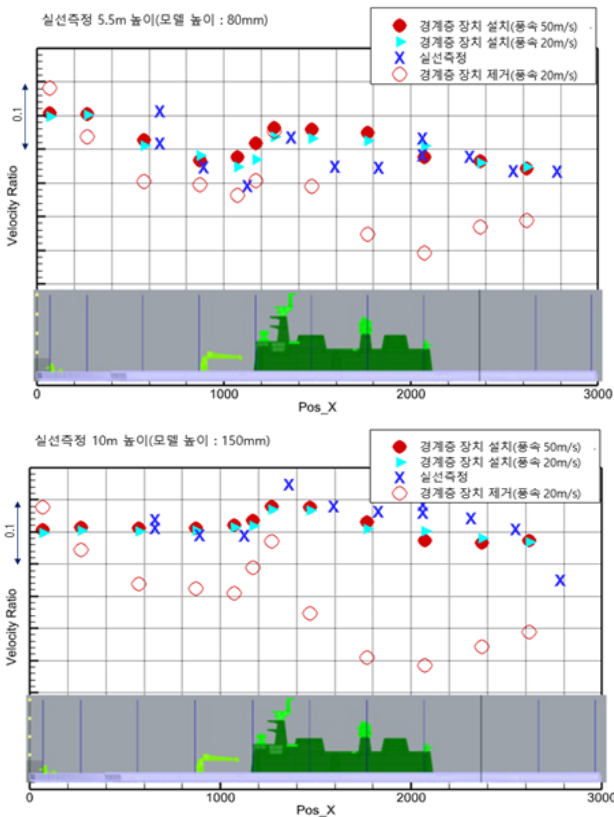


Fig. 10 Velocity ratio from bow to stern

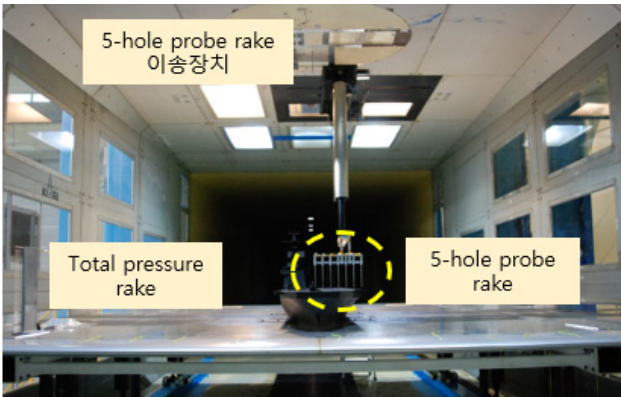


Fig. 11 Unsteady flow-field measurement devices and tunnel reference velocity measurement

는다. 따라서 풍동시험을 수행하는 속도 범위에서는 레이놀즈수가 존재하지 않는다고 가정을 하여도 무방하다. Fig. 10의 수직 축인 속도비에서 작은 눈금 간의 크기는 0.01로 속도비 차이 1%를 나타낸다.

이처럼 풍동시험을 위해 기본적으로 확인할 항목들인 해양 경계층 모사와 레이놀즈수를 점검한 이후에 본격적인 측정을 시작하였다. 5-hole probe(Fig. 11)를 사용하여 실선 측정 72개 point를 포함하여 약 4천 point 이상을 측정하였는데, 실선 측정 지점들만을 비교한 결과가 Table 3에 되어있다. 풍동시험 결과를 정리하는 과정에서는 풍동 모델에 의한 upstream 영향을 받지 않는 곳(Fig. 11 좌측)에 설치한 rake로 측정된 유입류 기준속도를 사

Table 3 Difference between the actual ship measurement and wind tunnel test (%)

height	u	v	w	TI_u	TI_v	TI_w
5.5m	5.1	3.3	3.2	2.5	2.6	2.5
10m	3.3	3.6	2.7	2.0	2.1	1.9
Mean	4.3	3.5	2.9	2.3	2.4	2.4

용하여 각각 지점에서 측정된 unsteady 데이터를 사용하여 속도와 난류강도를 계산하였다. 정풍 조건에서 u-속도 성분은 5.1% 난류강도는 2.5% 차이를 보여주고 있으며, v와 w 속도 성분의 속도비와 난류강도 차이는 각각 4와 3%를 초과하지 않는다.

풍동시험은 실선 측정 결과와 비교하여 적합한 시험기법을 개발하는 목적 이외에도 실선 측정에서 획득하기 어려운 다양한 풍 조건과 다양한 지점들에서 데이터를 획득하여, CFD 해석과 비교하여 CFD 해석의 정확성을 확인할 수 있다. 이를 위해 풍동시험은 함재기가 이·착함하는 조건에서 함정 이동 방향을 가능한 정풍으로 유지한다는 사실을 확인한 이후 최악의 경우 예상되는 유동장을 파악하고자 정풍 대비  $\pm 20$ 도까지 측정하였다. Fig. 12은 정풍, 상대풍이 좌현(WOD +10, +20)과 우현(WOD -10, -20) 방향에서 불어온다고 가정하여 측정된 결과이다. 다양한 풍향 조건에서 island와 함형에 의한 와류와 박리 특성을 확인하고자 v와 w 속도 성분을 함정 기준으로 변경시킨 평면에 정리하였다. 이 결과들은 CFD 해석에 제공되어 개발한 해석기법의 정확도를 확인하는 데 활용된다.

## 4. CFD 해석기법 개발

CFD 해석은 상용 코드인 STAR CCM+를 사용하였는데, 해석 과정에서 다양한 변수들을 고려해서 실선 측정과 풍동시험으로 확보된 데이터들과 가장 잘 일치하는 결과를 생성하도록 변수를 찾아내야 한다. STAR CCM+에서는 공간 차분화, 난류모델, 시간 전진 기법 관련 변수들을 분석하였고, 해석 코드와 무관하게 CFD 해석에서 항상 고려할 변수들은 격자와 관련하여 크기, 경계층 격자, 공간 격자, 격자 타입을 해석 도메인 관련해서는 수평과 높이 방향 크기, 유입류 속도분포와 난류도 분포, unsteady 해석에서는 시간 간격, 시간 간격 반복 횟수, 총 해석 시간 등을 고려하였다. CFD 해석은 실선 측정과 동일한 크기를 갖는 함정을 대상으로 수행하는 Full-scale과 풍동시험에서 얻은 결과와 비교를 위해 시험 환경을 모사하는 Small-scale 해석으로 분류하였다. Small-scale 해석에서는 풍동시험 환경을 모사하기 위해 시험부 형상과 모델이 위치한 지상판을 모사하였다.

### 4.1 Full-scale CFD 해석

Full-scale CFD 해석은 실선 측정과 비교를 하는데, 함수부로 실선 측정에서 얻은 유입류 속도 프로파일을 모사하는 방법을 찾아내고, Fig. 7과 같이 실선 측정 지점들에서 유사한 결과를 얻

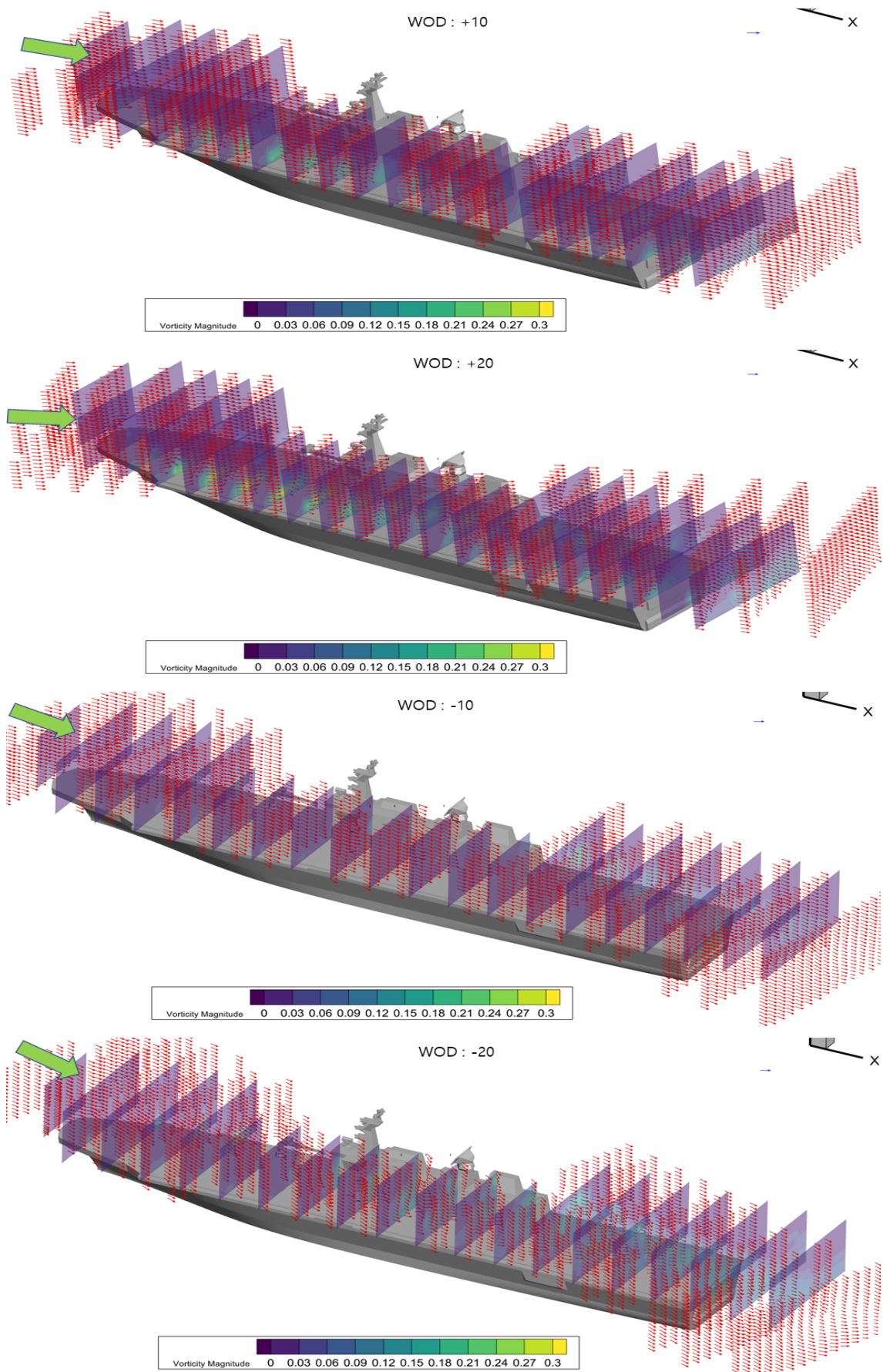


Fig. 12 Results of unsteady flow-field measurement at the various wind directions

도록 변수들을 찾아내야 한다.

해양풍 속도 프로파일을 모사하는 데 사용하는 수식(ESDU)은 아래와 같다.

$$U(Z) = U(Z_r) \left(\frac{z}{Z_r}\right)^\alpha \quad (4)$$

여기서  $U(Z_r)$ 은 기준 높이인 10m에서 예상하는 해양풍 속도 이고,  $Z_r$  해수면부터 높이(10m), 해양풍 모사를 위해서는  $\alpha=0.1 \sim 0.18$  범위 값을 사용한다.

위의 수식을 사용하여 해양풍을 모사하는 경우, 실선 측정 정 풍 조건에서 얻은 유입류 프로파일인 Fig. 6과 같은 결과를 얻을 수 없다. 따라서 수식 4를 실선 측정 결과와 동일한 결과를 얻기 위해 식을 변경하였다.

$$U(Z) = \frac{1}{2} U(Z_r) \left(\frac{z}{Z_r}\right)^\alpha + \frac{1}{2} U(Z_r) \quad (5)$$

수식에서  $\alpha$ 를 어떤 값을 사용할 것인가를 결정해야 하는데,  $\alpha$  값이 커지면 해양풍 프로파일의 기울기가 커지는 방향으로 확장 되고,  $\alpha$  값이 작아지면 완만한 기울기를 갖는다. 이 값을 찾기 위해 실선 측정에서 윈드라이더를 사용하였고,  $\alpha$  값은 0.162를 얻었다. 이 값은 실선 측정할 당시에 얻은 값으로, sea-state에 따라 다른 값을 사용하기를 권장한다.

유입류의 난류강도를 결정해야 하는데, 함정속도와 해양풍 속도비에 따라 큰 차이가 발생한다. 실선 측정에서는 해양풍 속도와 함정 속도비가 최대 4배 이상 발생하는 조건까지 측정하였는데, 해양풍 속도가 빨라질수록 난류강도가 증가한다는 결과를 활용하여 해석할 때 유입류의 난류강도를 조정해야 한다.

실선 측정에서 얻은 72개 지점과 가장 근사한 속도비와 난류 강도를 갖도록 변수들을 지속적으로 변경해 가면서 Full-scale 해석을 수행하였다. 실선 측정과 비교를 위해 확정한 변수들은 비압축성 조건으로 segregated solver 와 일정한 밀도, 2차 공간 차분화, 난류모델은 SST-DDES, implicit unsteady scheme, 표면 격자는 비행갑판 구조물은 함정 길이의 0.02%, 갑판 하부는 함정 길이의 0.1%. 시간 간격과 sub iteration은 0.06초와 10회, 원방 경계는 모델 중심으로 앞, 뒤, 좌, 우 방향으로 5배, 높이 방향으로 0.75배, 해 도출 평균 시간과 총 해석 시간은 무차원 기준으로 14와 33을 적용하였다.

본 연구에서 수행한 변수 분석 중에서 핵심이라고 할 수 있는 다양한 난류모델을 적용하였을 때 어떤 모델이 실선 측정 결과와 가장 근접하는지 비교하였다(Fig. 13). 실선 측정과 Full-scale CFD 해석 결과를 실선 측정이 수행된 함수부부터 함미부까지 3 개 선상을 따라 비교하였다. 수직축의 큰 눈금은 해석과 실선 측정 값이 10%(작은 눈금은 2% 차이)의 차이를 나타내는데, SST-DDES 모델을 사용하면 비교 대상 지점에 대해 평균 속도 비는 1.76%, 난류강도는 1.65% 차이를 갖는다. 가장 큰 차이가 발생하는 지점은 Fig. 7에서 함미부 측정 지점 중에 함정 중심선

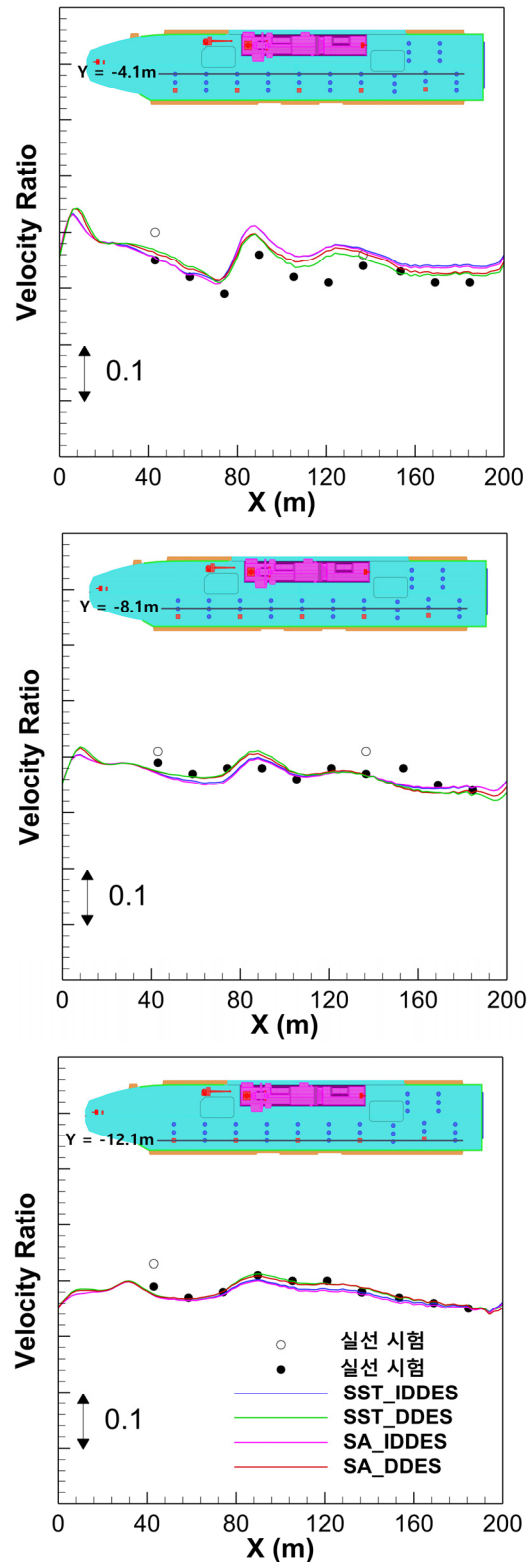


Fig. 13 Comparison between full-scale CFD simulation and the actual ship measurement

에 가장 근접한 위치(Fig. 13의  $y = -4.1m$ )이다. 원인 분석을 하였는데, 실선 측정 중에 함정 중앙에 있는 Goal Keeper라는 방 어 체계에 대한 형상 데이터를 활용할 수 없어서 차이가 발생한 것으로 판단된다.



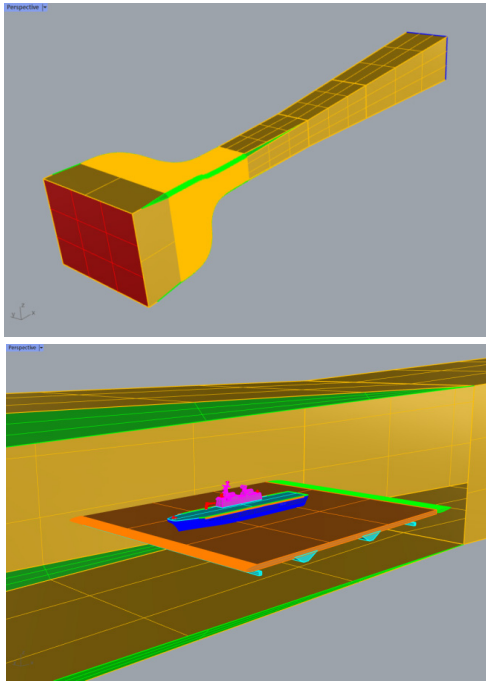


Fig. 14 The wind tunnel configuration for small-scale CFD simulation

### 4.2 Small-scale CFD 해석

축소형 풍동 모델에서 얻은 데이터와 정확한 비교를 위해 동일한 크기를 갖는 모델(실선 길이의 1.5%, 3m)을 대상으로 Small-scale CFD 해석을 수행하였다. Small-scale 해석에서는 Full-scale 해석에서 선정한 변수 중에 해석 도메인 크기와 유입류 난류강도를 제외하고 동일한 변수를 사용하였고, 풍동시험 환경을 모사하기 위해서 Fig. 14와 같이 풍동시험부의 입구부터 diffuser, 풍동 벽면은 점성 벽면으로 가정하였고, 모델 이동에 사용하였던 지상판 형상도 반영하였다.

풍동시험은 정풍과 측풍( $\pm 10$ 도,  $\pm 20$ 도) 조건에서 각각 최소 4,000지점 이상에서 데이터를 획득하여, 이 모든 점에서 비교하는 것보다 실선 측정 72개 지점들과 가장 근접한 지점들을 대상으로 비교하였다. Fig. 15과 16은 함수부에서 함미부까지 실선 측정에서 데이터를 획득하였던 동일한 위치에서 풍동시험 결과와 해석 결과를 비교하는 그림이다. Fig. 15와 16에서 작은 눈금은 2%의 차이를 나타낸다. 정풍 조건에서 속도비의 차이는 갑판으로부터 높이가 증가할수록, 함정 중심에서 멀어질수록 줄어드는 것을 확인할 수 있는데, 이는 island 주변의 복잡한 후류 구조

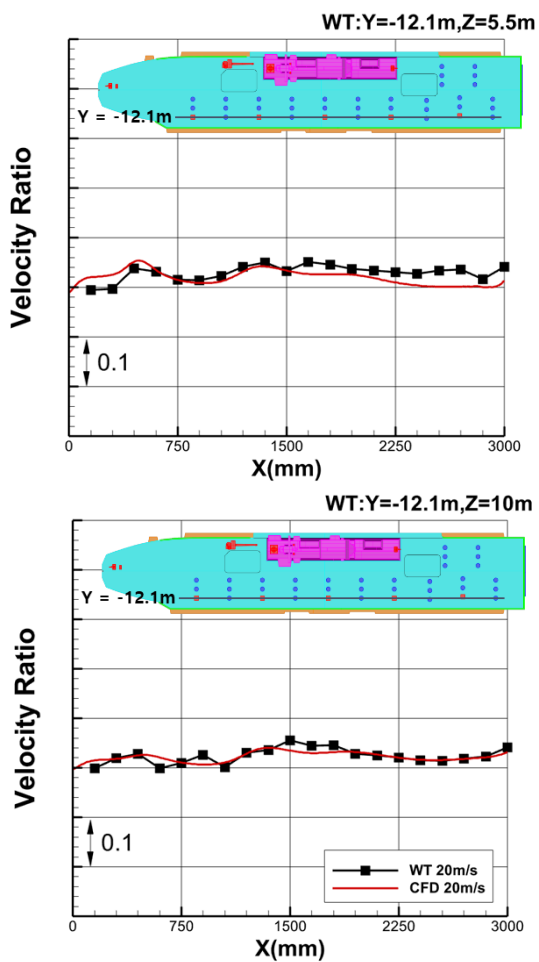


Fig. 15 Comparison between wind tunnel test and small-scale CFD simulation( $y = -12.1m$ )

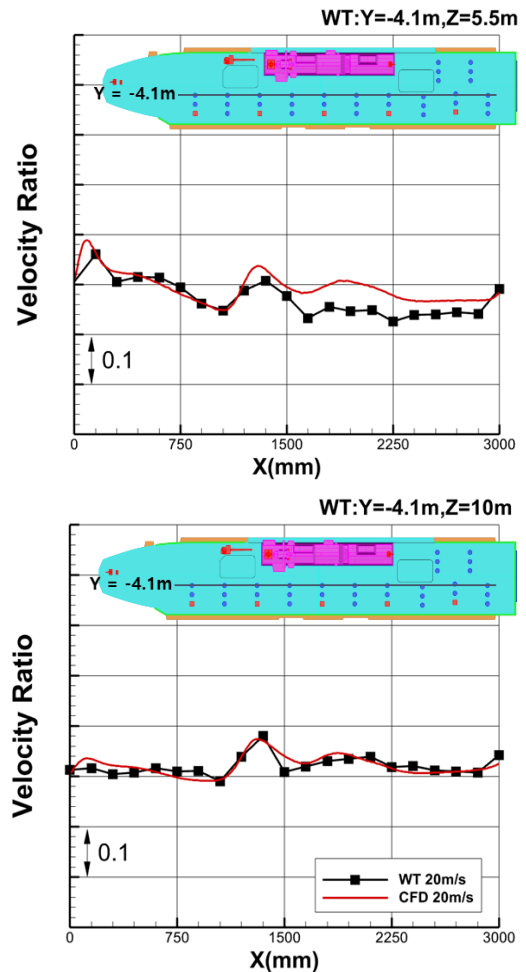


Fig. 16 Comparison between wind tunnel test and small-scale CFD simulation( $y = -4.1m$ )

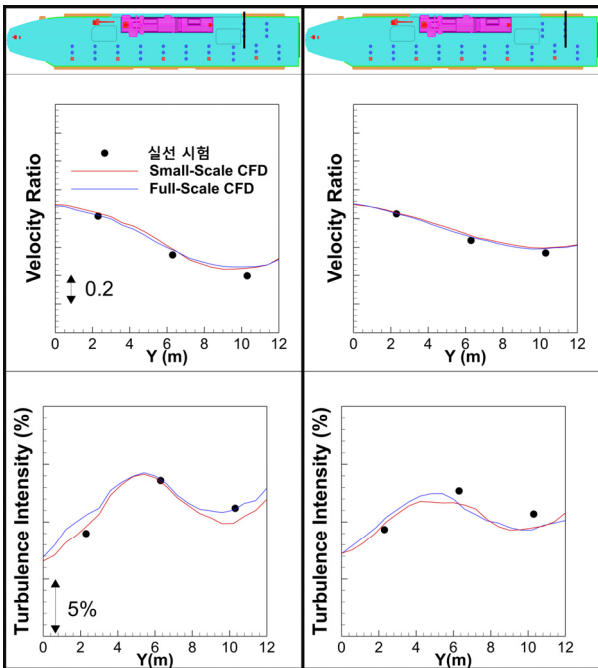


Fig. 17 Evaluation of Reynolds number effect

에 의해 발생한 것으로 판단된다. island와 가장 가까운 비교 지점( $y=-4.1m, z=5.5m$ )에서 속도비의 차이는 평균 속도비 3%, 최대 속도비 6%를 보여주고 있다.

### 4.3 레이놀즈수 효과

실선 측정에 사용하였던 실제 길이(199m) 함형과 풍동시험에서 사용하였던 1.5% 풍동 모델(3m)에 대한 해석을 수행하여 1.6억과 2.5백만 레이놀즈수 차이에 따라 유동장 특성이 어떤 변화를 주는지를 확인하였다.

레이놀즈수 효과에 따른 전산해석 결과를 비교하기 위해, 실선에서 측정된 72개 지점에서 Small-Scale CFD 해석과 Full-Scale CFD 해석 결과를 비교하였다. 레이놀즈수에 따른 속도비 및 난류강도의 차이는 평균 속도비 0.4%, 최대 속도비 2.3%, 평균 난류강도 0.22%, 최대 난류강도 0.83%이다.

Fig. 17은 Fig. 6의 측정 위치 중 함미부 후방에서 높이 5.5m에서 측정한 값과 Full-scale(파랑)과 Small-scale(빨강) CFD 해석 결과를 보여준다. 측정 위치가 island 후방에 위치하여 왕성한 유동장 교란이 발생하지만 거의 동일한 결과를 보여준다. 이러한 Small/Full-scale에 따른 전산해석 결과는 리버풀대학교(N.A. Watson et al., 2019)에서 수행한 Queen Elizabeth Class (QEC) 함모에 대한 Small/Full-Scale 전산해석 결과와 유사하다.

## 5. 결론

한반도 주변 국가들이 해군력을 강화하는 상황에 대응하여 고정익과 회전익기를 운용할 수 있는 대형 수송함 개발에 대한 요

구가 지속적으로 증가하고 있다. 안정적인 함재기들 운용을 위해서는 설계 과정부터 함형과 비행갑판 구조물에 의한 유동장 변화를 정확히 예측하고 조종사 훈련을 위한 데이터 생성을 위해 신뢰도 높은 풍동시험 기법과 CFD 해석기술을 확보해야 한다.

이를 위해 먼저 우리나라 해군이 운용 중인 다수의 헬리콥터가 동시에 운용할 수 있는 함정을 대상으로 기존 데이터 확보에 필요한 측정장치와 센서류, 데이터 획득 및 처리기술을 개발하였다. 실선 측정에서는 함수부로 유입되는 유입류 속도 프로파일과 비행갑판상을 따라 unsteady 유동장을 측정하였다.

풍동시험은 실선 측정을 토대로 경계층 재현 장치 사용 여부와 레이놀즈수 효과를 검토하여 풍동시험 방법을 개발하였다. 유입류 속도 프로파일은 실선 측정과 동일한 형태를 유지하였고, 비행갑판 측정 지점들은 대상으로 풍동시험과 실선 측정 결과를 비교하였는데, 속도비는 4.3% 난류강도는 2.3% 이내를 유지하고 있다.

CFD 해석은 STAR CCM+을 사용하여 다양한 해석변수들은 분석하여, 정풍 조건에서 실선 측정과 풍동시험 결과는 속도비는 1.8%와 2% 이내이고, 난류강도는 1.7%와 2.2% 미만의 차이이다. CFD 해석은 레이놀즈수 효과를 분석하였는데, 속도비와 난류강도는 레이놀즈수 영향을 무시할 수 있는 수준인 0.4%와 0.2%이다. 현재까지 CFD 해석기술은 매우 신뢰도가 높은 결과를 생성하고 있다. 이후에는 다양한 함형에도 동일한 변수들을 적용할 수 있는지 혹은 부분적인 변경을 해야 하는지를 확인하기 위해 풍동시험 결과를 활용하여 지속적인 비교 및 검증을 수행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 국방신속획득기술연구원으로부터 연구비를 지원받아 수행되었음(계약번호 UC200007D).

## References

- Brownell, C.J., Luznik, L., Snyder, M.R., Kang, H.S. and Wilkinson, C.H., 2012. In Situ Velocity Measurements in the Near-Wake of a Ship Superstructure. *Journal of Aircraft*, 49(5), September–October 2012. 1440–1450
- Kim, E.S. and Kim, J.A., 2022. *Numerical Investigation into Ship Airwake using Detached Eddy Simulation*, APISAT–2022.
- Lee, C.H., Yoo, C.S. and Lee, M.K., 2014. Airwake modeling around ship using CFD. *2014 Autumn Conference of Korea Industrial Technology Convergence Society*, Kwangju, Republic of Korea, December 2014.
- Linton, D. and Thornber, B., 2021. Quantifying uncertainty in turbulence resolving ship Airwake simulation. *Ocean Engineering*, pp.229.

Long, K., 2002. V-22 Aeromechanics: Shipboard Compatibility Issues. NAVAIR 4.11 Patuxent River MD. 2002.

Mauricio, G., Viera, M., Martins, E., 2012. Brazilian Navy Air Wake Program. *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*, Minneapolis, 13-16 August, AIAA 2012-4791.

Polsky, S.A. and Bruner, W.S., 2001. *A computational study of unsteady ship airwake*, RTO-MP-069, Norway, 7-11 May 2001.

RTO AGARDograph 300 Flight Test Techniques Series - Volume 22 Helicopter/Ship Qualification Testing, 1995.

Shim, H.J., Chung, J.D., Cho, T.H., Lee, S.H. 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 Architectures of Korea*, 59(4), pp.225-234

Shukla, S., Singh, S.N., Sinha, S.S. and Jiyakumar, R.V., 2021. Comparative assessment of URANS, SAS, DES turbulence modeling in the predictions of massive separated ship Airwake characteristics. *Ocean Engineering*, 229.

Sydney, A.J., Ramsey, P. and Kimmel, K.R., 2016. Experimental investigation of the turbulent aerodynamic environment produced by a generic ship. *54th AIAA Aerospace Science Meeting*, San Diego, 4-8 January, AIAA 2016-1071

Wilkinson, C.H., Zan, S.J., Gilbert, N.E. and Funk, J.D., 1999. Modelling and simulation of ship air wakes for helicopter operations - A collaborative venture. *Fluid Dynamics Problems of Vehicles Operating Near or in the Air-Sea Interface*, RTO Meeting Proceedings, 15.

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.

Yuan, W., Wall, A. and Lee, R., 2018. Combined numerical and experimental simulation of unsteady ship Airwakes. *Computers and Fluids*, 172.



정진덕



조태환



이승훈



최재훈



이학민