

# 로터세일의 배열 형태가 양력 형성에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구

김정은\* · 조대환\*\* · 이창용\*\*\*†

\* 목포해양대학교 대학원 박사과정, \*\* 목포해양대학교 기관시스템공학과 교수, \*\*\* 강원도립대학교 교수

## Numerical Study on the Effect of the Arrangement Type of Rotor Sail on Lift Formation

Jung-Eun Kim\* · Dae-Hwan Cho\*\* · Chang-Yong Lee\*\*\*†

\* Doctor Degree Course, Graduate School of Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

\*\* Professor, Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

\*\*\* Professor, Department of Coast Guard, Gangwon State University, Gangneung 25425, Korea

**요 약** : 최근 국제해사기구(IMO)를 비롯한 국제사회에서 선박의 대기오염 배출 규제를 강화하고 있으며, 배기가스 배출을 줄이기 위한 친환경 선박 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 그중에서도 풍력 보조 선박추진 시스템 중 하나인 로터 세일(Rotor Sail, RS)이 다시금 주목 받고 있다. RS는 선박 데크에 설치되는 원통형 실린더 장치로 마그누스 효과를 사용하여 유체 동역학적 양력을 생성하는 장치이다. 이는 차세대 친환경 보조 추진 기술 중 하나이며, RS 적용 선박을 개발한 Enercon社에서는 약 30% 이상의 연료 절감이 가능하다고 발표했다. 본 연구에서는 다중 RS를 선박에 설치할 경우 RS 간격 및 배열 형태와 같은 최적의 설치 조건을 선정하고자 하였으며, RS 배열에 따른 유동특성을 확인하기 위하여 AR(Aспект Ratio)=5.1, SR(Spin Ratio)=1.0 및 로터세일 지름과 엔드 플레이트 지름 비( $D_e/D$ )=2.0로 고정하고 자유 유속  $U=5$  m/s로 풍향은 +y 축 단방향에 대한 조건만 고려하였다. 배열 조건은 횡방향 거리는 +x 축 방향으로 3D ~ 15D까지 3D 간격으로 총 5가지 조건을, 종방향 거리는 +y 축 방향으로 5D ~ 25D까지 5D 간격으로 총 5가지 조건을 설정하였으며, 사각 형태(□)와 마름모 형태(◇) 배열에 따른 양력계수( $C_L$ ), 항력계수( $C_D$ )와 공기역학적 효율( $C_L/C_D$ )을 비교하였다. 결과적으로 종방향 간격에 따른 RS의 영향은 크게 차이가 없었으나, 횡방향 간격에 따른 RS 유동특성의 경우 두 RS가 바람 방향에 거의 일치할 때 RS의 상호작용 효과가 가장 크게 나타났다. 배열에 따른 RS 유동특성의 경우, 전방(0°) 방향에서 바람이 불 때 마름모 형태(◇) 배열이 RS 간의 후류 영향을 가장 덜 받는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 풍력 보조 선박추진 기술, 로터세일, 플레트너 로터, 마그누스 효과, 공기역학적 효율

**Abstract** : Recently, the international community, including the International Maritime Organization (IMO), has strengthened regulations on air pollution emissions of ships, and eco-friendly ships are actively being developed to reduce exhaust gas emissions. Among them, rotor sail (RS), a wind-assisted ship propulsion system, is attracting attention again. RS is a cylindrical device installed on the ship deck, that generates hydrodynamic lift using a magnus effect. This is a next generation eco-friendly auxiliary propulsion technology, and Enercon company, which developed RS-applied ships, announced that fuel savings of more than 30% are possible. In this study, optimal installation conditions such as RS spacing and arrangement type were selected when multiple RSs were installed on ships.  $AR=5.1$ ,  $SR=1.0$ , and  $D_e/D$  was fixed at 2.0 according to the RS arrangement, and the wind direction was considered only for the unidirectional +y-axis. Regarding arrangement conditions, five conditions were set at 3D intervals in the +x-axis direction from 3D to 15D and five conditions in the +y-axis direction from 5D to 25D.  $C_L$ ,  $C_D$  and aerodynamic efficiency ( $C_L/C_D$ ) were compared according to the square(□) and diamond(◇) shape arrangements. Consequently, the effect of RS on the longitudinal distance was not significantly different. However, in the case of RS flow characteristics according to the transverse distance, the interaction effect of RS was the greatest when the two RSs almost matched the wind direction. In the case of the RS flow characteristics according to the arrangement, notably, when the wind blew in the forward (0°) direction, the diamond (◇) arrangement was least affected by the backward flow between RSs.

**Key Words** : Wind Assisted Ship Propulsion Technology, Rotor Sail, Flettner Rotor, Magnus Effect, Aerodynamic Efficiency

\* First Author : kje38kkr@naver.com, 061-240-5035

† Corresponding Author : greenpia77@naver.com, 032-770-1000

## 1. 서론

해상 탄소중립 실현 목표에 따라 강화된 해상환경규제에 대한 그린에너지 발굴 및 상용화 흐름이 가파르게 진행 중이다. 국제해사기구(IMO)는 2022년 4월부터 선박 탄소 배출량을 2008년 대비 30% 감축하기로 발표했다. 이 때문에 국내 외적으로 선박 연료유를 대체할 그린에너지 개발에 힘을 쏟고 있다. 그중에서도 풍력에너지를 이용한 선박 추진기술인 로터세일(Rotor Sail, RS)이 다시금 주목받고 있다(Kim, 2022).

## 2. 선행 연구

RS는 선박 데크에 설치되는 원통 실린더 형태의 기둥으로, 마그누스 효과를 이용하여 유체 동역학적 양력을 생성하는 장치이다(Nicolas et al., 2021).

RS는 1920년대 독일의 항공 엔지니어인 Anton Flettner에 의해 개발되었다. 최초의 RS 적용 선박은 ‘Buckau’호로 두 개의 RS를 사용하여 재래식 돛단배들의 추진력을 증가시켰다. 21세기 이후 환경문제로 인해 친환경 선박에 대한 관심이 증가하면서 RS 선박은 다시 등장하였으며, 2010년 풍력에너지 회사인 Enercon社에서 ‘E-ship 1’호를 출범시켰다. RS가 설치된 선박의 데이터는 Table 1에 요약하였다(Marco and Mancini, 2016).

RS와 관련된 연구는 전 세계적으로 활발하게 이루어지고 있으며, 선박 추진력을 향상시키기 위해 RS의 활용에 대한 많은 실험과 수치 시뮬레이션이 수행되었다.

Marco et al.(2014)는 RS에 대해 수치 시뮬레이션을 통한 연구를 진행하였다. 매개변수 AR(Aspect Ratio), SR(Spin Ratio), EP(End plate)를 변화시키며 RS의 효과를 심층적으로 평가하였고 이들의 상호작용에 따른  $C_L$ 과  $C_D$ 의 관계를 그래프로 분석하였다. 그 이후에 Badalamenti and Prince(2008)가 수행한 실험 결과를 바탕으로 수치 시뮬레이션을 통한 예비시험을 수행하였다. RS 제원인  $AR=5.1$ ,  $D=0.0889\text{ m}$  및  $D_e/D=2.0$ 인 조건에 대해 연구를 수행하였다(Marco et al., 2015).

Devaraj and Raju(2017)는 자유 유속에서 SR 변화에 따른

## Abbreviations

$AR$	: 종횡비(Aspect Ratio)
$C_L$	: 항력계수(Lift Coefficient)
$C_D$	: 양력계수(Drag Coefficient)
$D$	: 로터세일 지름(m)
$D_e$	: 엔드 플레이트 지름(m)
$EP$	: 엔드 플레이트(End plate)
$H$	: 로터세일 높이(m)
$Re$	: 레이놀즈 수( $= U \cdot d/\nu$ )
$RS$	: 로터세일(Rotor Sail)
$SR$	: 속도비(Spin Ratio)( $= \omega \cdot D/2U$ )
$URANS$	: Unsteady Reynolds averaged Navier-Stokes
$U$	: 자유 유동 속도(m/s)
$\omega$	: 로터세일 각속도( $= rad/s$ )

RS의 성능을 수치해석 프로그램을 통해 검증하였다.

Badalamenti and Prince(2008)는 풍동시험을 통해 높은 레이놀즈수에서 회전하는 원형 실린더 거동에 미치는 영향을 확인하였으며, RS 엔드 플레이트(End Plate, EP) 설치에 따른 양력계수( $C_L$ )과 항력계수( $C_D$ )의 상관관계를 분석하였다.

또, Bordogna and Muggiasca(2020)는 RS의 공기역학적 성능에 대한 레이놀즈수의 영향을 확인하기 위해 대형 풍동시험을 수행하였다. 그 결과, RS의 공기역학적 성능이 종횡비(Aspect Ratio, AR)와 속도비(Spin Ratio, SR) 변화에 따라 영향을 받으며, 이중 RS가 설치될 경우에는 풍향과 동일한 선상에 위치할 때 효과가 크게 나타나는 것을 확인하였다.

Li et al.(2021)는 9면의 다각형 돛 형상에 대한  $C_L$ 과  $C_D$ 를 비교 분석하였고 면의 수가 많을수록  $C_L$ 이 더 크다는 것을 검증하였다.

Hu and Wang(2019)는 원뿔 형태의 RS를 제안하였으며, 수치 시뮬레이션을 통해 높은 SR에서 높은  $C_L$ 을 얻을 수 있고 결과적으로 높은 공기역학적 효율( $C_L/C_D$ )을 얻을 수 있다고 하였다.

Table 1. Geometric and performance parameters collected from all-known RS

Ship(year)	Buckau(1924)	Barbara(1926)	E-ship 1(2010)	Estraden(2014)	Pelican(2018)	Zhoushan(2021)
Height (m)	15.6	17.0	27.0	19.0	30.0	24.0
Diameter (m)	2.8	4.0	4.0	3.0	5.0	4.0
Aspect ratio	5.6	4.3	6.8	6.3	7.0	6.0
End plate	yes	yes	yes	yes	yes	yes

Kang(2003)은 수치해석을 통해 이차원 유동장에서 나란히 배열된 한 쌍의 실린더 후류 양식을 파악하였으며, 후류 양식은 실린더 간격과 레이놀즈 수에 의존한다는 것을 확인하였다. Lee and Park(2006)은 다중격자 유한체적법을 적용하여 병렬로 나열된 두 원형실린더 사이 간격에 따른 5가지 조건에 대해 층류 후류 특성을 연구하였다.

현재 RS에 대한 다양한 연구들이 수행되고 있으나, 다중 RS에 대한 간격 및 배열에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다.

본 논문은 RS 매개변수에 따른 공기역학적 힘에 대해 연구한 Kim et al.(2022)의 후속연구이며, 본 연구에서는 다중 RS를 선박에 설치할 경우 RS 간격 및 배열 형태와 같은 최적의 설치 조건을 선정하고자 하였다. 또한 RS 배열에 따른 유동특성을 확인하기 위하여  $AR=5.1$ ,  $SR=1.0$  및  $D_e/D=2.0$ 로 고정하고 자유 유속  $U=5\text{ m/s}$ 로 풍향은  $+y$  축 단방향에 대한 조건만 고려하였다. 배열 조건은 횡방향 거리는  $+x$  축 방향으로  $3D\sim 15D$ 까지  $3D$  간격으로 총 5가지 조건을, 종방향 거리는  $+y$  축 방향으로  $5D\sim 25D$ 까지  $5D$  간격으로 총 5가지 조건을 설정하였으며, 사각 형태( $\square$ )와 마름모 형태( $\diamond$ ) 배열에 따른  $C_L$ ,  $C_D$ 와 공기역학적 효율( $C_L/C_D$ )을 비교하였다. 결과적으로 종방향 간격에 따른 RS의 영향은 크게 차이가 없었으나, 횡방향 간격에 따른 RS 유동특성의 경우 두 RS가 바람 방향에 거의 일치할 때 RS의 상호작용 효과가 가장 크게 나타났다. 배열에 따른 RS 유동특성의 경우, 전방( $0^\circ$ ) 방향에서 바람이 불 때 마름모 형태( $\diamond$ ) 배열이 RS 간의 후류 영향을 가장 덜 받는 것으로 나타났다.

### 3. 수치해석

#### 3.1 수치해석 모델

수치해석에 사용된 RS의 형상은 Fig. 1에 나타내었으며, 제원은  $AR=5.1$ ,  $H=1.5\text{ m}$ ,  $D=0.3\text{ m}$  및  $D_e/D=2.0$ 으로 Bordogna and Muggiasca(2020)의 풍동시험에서 사용한 축소모델과 동일한 형상을 사용하였다. 먼저 단일 RS에 대해 풍동시험과 동일한 모델을 기준으로 수치 시뮬레이션에서 도출한  $C_L$ 을 비교하여 격자 독립성을 검증하였고, 이후 다중 RS 배치에 따른  $C_L$ 과  $C_D$ 를 비교하여 최적의 RS 배열 형태를 선정하였다.

Fig. 2는 수치해석 유동장 영역(Domain)을 나타낸 것이다. 다중 로터를 배열하였을 때 Domain 벽면의 영향을 받지 않도록 충분한 거리를 두었으며, 다중 RS 배열을 고려하여 Marco et al.(2014)에서 검증한 Domain을 참고하여 생성하였다. 본 연구에서 사용한 Domain 크기는 RS 지름을 기준으로 가로  $40D$ , 세로  $50D$  및 높이  $3.5H$ 로 설정하였다.

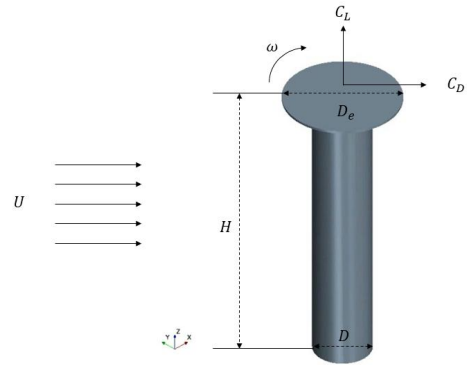


Fig. 1. Geometry of Rotor Sail.

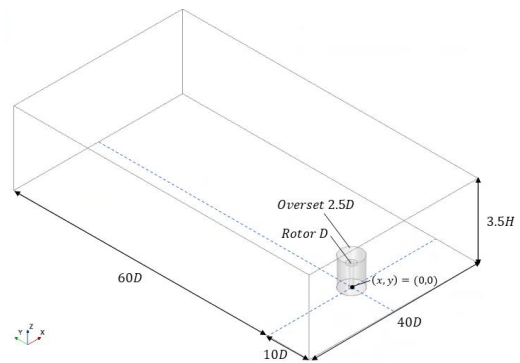


Fig. 2. Computational domain dimension.

#### 3.2 경계조건

본 연구에서는 STAR-CCM+ Ver.15.06을 이용하여 URANS 모델을 통한 유동특성을 분석하였다. 난류 모델은 회전체 벽면 유동에서 정확도가 높은  $k-\omega$  Shear Stress-Transport(SST) 모델을 사용하였다. 사용한 수치해석 경계조건은 Fig. 3과 같이 자유 유속은  $+y$  축 방향으로 유입되고, RS는  $+Z$  축을 중심으로 반시계방향으로 회전한다. 경계조건으로 유동이 유입되는 Inlet은 Velocity Inlet으로 설정하였고, 유동이 빠져나가는 Downstream 방향의 Outlet은 Pressure Outlet으로 설정하였다. 나머지 Top, Side 및 Bottom은 Symmetry로 설정하였다.

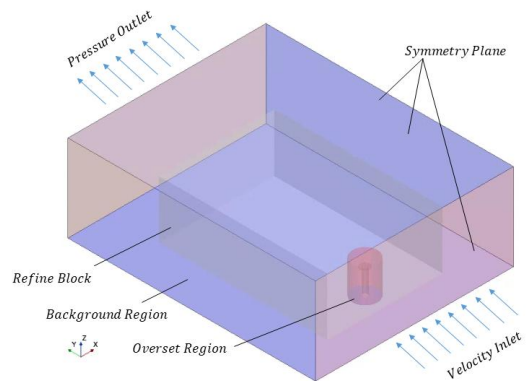


Fig. 3. Boundary Condition.

RS의 회전을 구현하기 위해 회전영역(Overset Region)과 비회전 배경영역(Background Region)으로 구성하였고, 영역 간 원활한 운동량 및 에너지의 상호교환을 위해 중첩 원통형 영역(Interface)를 설정하였다.

### 3.3 격자조건

수치해석에 사용된 격자 조건은 회전체 운동에 적합한 다면체 격자인 Polyhedral Mesh와 Prism layer를 사용하였다. Prism layer의 경우 RS 주변에 전단력이 작용하기 때문에 6개의 경계층을 나누어 벽함수(Wall function)를 적용하였다. No-slip 조건을 만족하기 위해 첫 번째 경계층에서 1.0 이하의 연직거리(Y+)를 적용하였다(Marco and Mancini, 2016).

Fig. 4는 Domain 내에 생성된 격자의 형상을 나타낸 것이다.

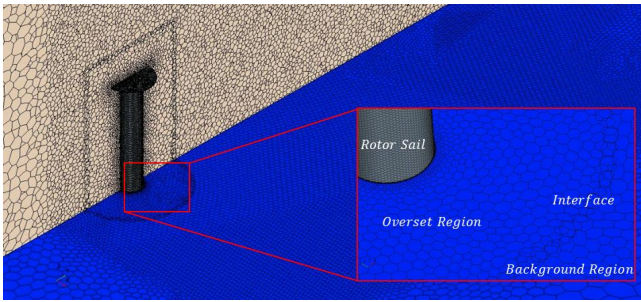


Fig. 4. Mesh of Domain and Rotor Sail.

### 3.4 격자의 독립성 검증

격자의 독립성 검증을 위해 격자 분할비를  $\sqrt{2}$  간격으로 설정하여 Coarse, Medium 및 Fine mesh 3가지 격자를 생성하였다. 독립성 검증은 단일 RS에 대해 Bordogna and Muggiasca (2020)의 풍동시험에서 사용한 동일조건인  $U = 5 \text{ m/s}$ ,  $Re = 1.0 \times 10^5$  및  $SR = 1.0$  ( $\omega = 33.33 \text{ rad/s}$ )에서  $C_D$ 를 비교하였다. 물리적 시간(Physical Time)은 잔차(Residual)가  $10 \times 10^{-4}$ 에 도달하고 결과값의 수렴성이 확보되는 15s로 설정하였다. 수렴성을 위해 Courant - Friedrichs - Lewy(CFL)수에 따른 Time-step = 0.001885s로 설정하였다(Li et al., 2021).

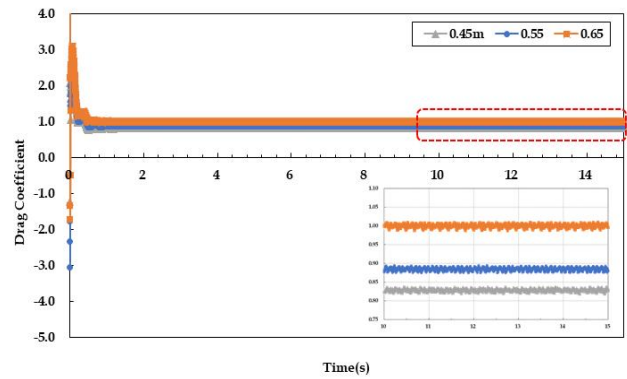
해석 격자 독립성 결과는 Table 2와 Fig. 5(a)에 나타내었으며, 결과값이 수렴하는 Physical Time 10~15s 사이의 시간평균 데이터 비교를 통해 풍동시험과 수치해석에서 도출한  $C_D$ 를 비교하였다.

비교 분석 결과 약 170 만개 이상 격자에서는 결과에 큰 영향을 미치지 않았다. 따라서 해석시간의 효율성과 정확성을 고려하였을 때, 약 170 만개의 격자를 사용하였다.

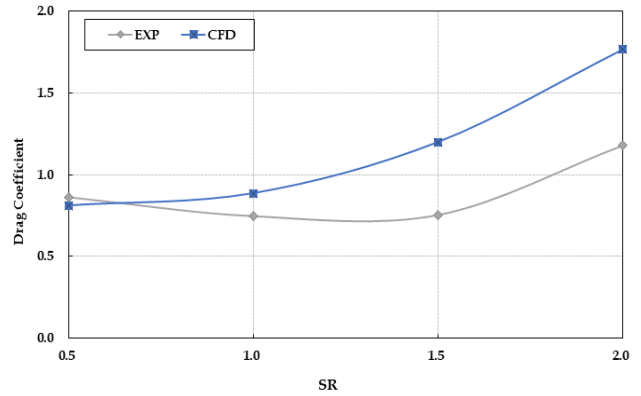
Fig. 5(b)는 SR에 따른 풍동시험 결과 데이터와 수치해석 결과를 비교한 그래프로 두 결과의 경향성은 대체로 일치함을 알 수 있다.

Table 2. Results for grid independency validation

Scale (Base size)	Element number	Average- $C_D$ (Physical Time : 10s - 15s)	Error of average- $C_D$
Coarse (0.65 m)	$1.396 \times 10^6$	1.000	-24.82
Medium (0.55 m)	$1.762 \times 10^6$	0.885	-15.03
Fine (0.45 m)	$2.304 \times 10^6$	0.829	-9.34



(a) Data curves of  $C_D$



(b) Comparison of experimental data and CFD simulation results

Fig. 5. Validation of the numerical method.

### 3.5 로터 배열에 따른 수치해석 조건

해석 격자 독립성 검증을 통해 수치해석 격자 및 경계조건의 타당성을 검증하였고 동일한 수치해석 조건에서 종방향, 횡방향 RS 간격과 배열 형태에 따른  $C_L$ ,  $C_D$ 의 영향을 비교하고 최적의 RS 배열 형태를 제안하였다.

RS 배열에 따른 영향만을 보기 위해 RS의 제원은  $AR = 5.1$ ,  $SR = 1.0$  및  $D_c/D = 2.0$ 로 고정하고 자유 유속은  $U = 5 \text{ m/s}$ , 풍향은 +y 축 단방향에 대한 조건만 고려하였다.

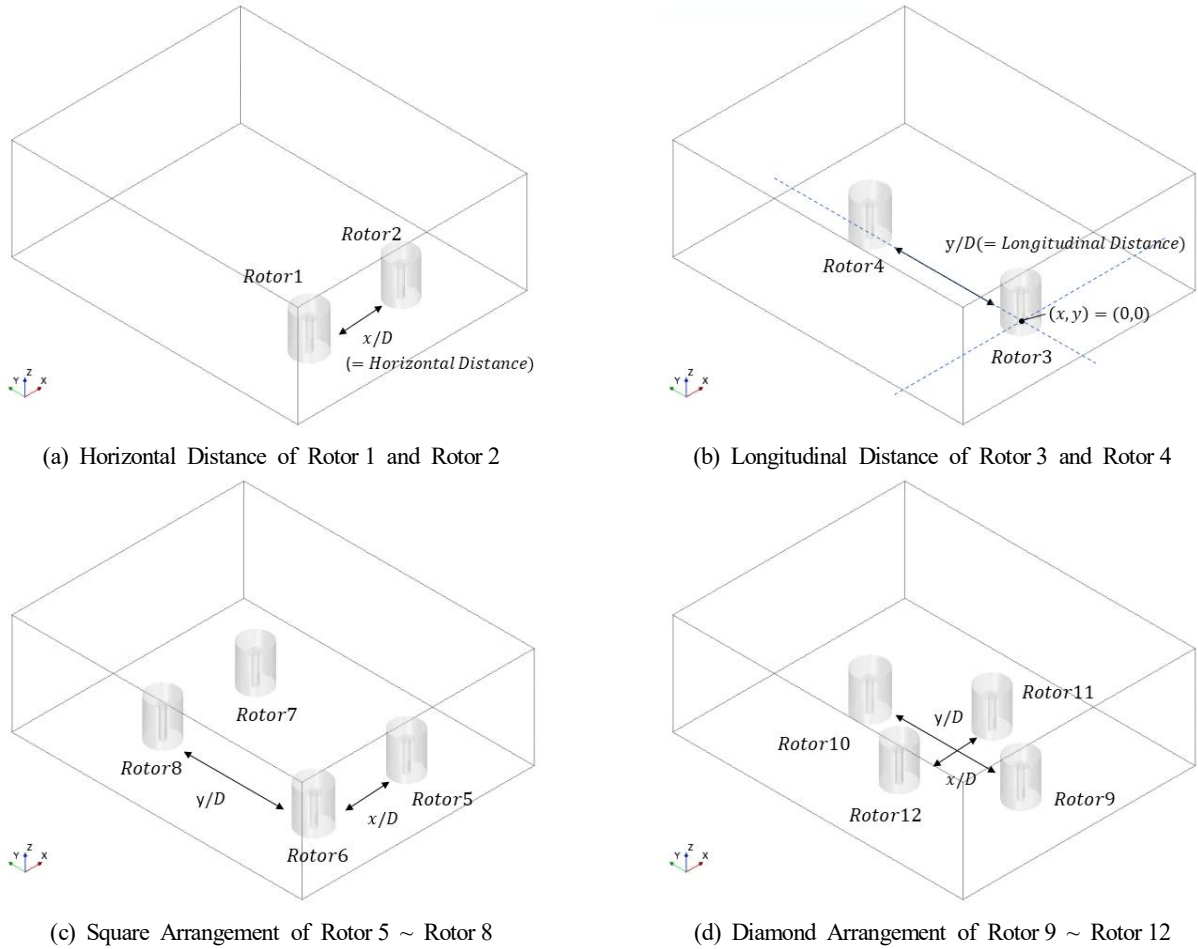


Fig. 6. Arrangement of Rotor Sails.

수치해석에 사용된 RS의 간격 및 배열 조건은 Bordogna and Muggiasca(2020)의 풍동시험장의 구조적 한계로 인해 수행하지 못했던 추가적인 시험조건에 대해 고려하였으며, 해석 조건은 Fig. 6과 Table 3에 나타내었다. 횡방향 거리는 +x 축 방향으로 3D~15D까지 3D 간격으로 총 5가지 조건을 설정하였고, 종방향 거리는 +y 축 방향으로 5D~25D까지 5D 간격으로 총 5가지 조건을 설정하여 RS 간의 공기역학적 힘에 대한 영향을 확인하였다. 또한 배열 형태에 따른 RS의 영향을 확인하기 위해, 사각 형태(□)과 마름모 형태(◇) 두 가지 배열에 따른 각각의 RS에 대한  $C_L$ 과  $C_D$  값을 확인하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 종방향 간격(Horizontal Distance)에 따른 유동특성

Figs. 7 (a)~(c)는 종방향 간격에 따른 RS의  $C_L$ ,  $C_D$ 와 공기역학적 효율( $C_L/C_D$ ) 결과를 나타낸 그래프이다.

Figs. 7 (a)와 (b)에서는 각각 x/D와 y/D에 따른 Rotor 1과

Rotor 2의  $C_L$ 과  $C_D$ 가 큰 차이가 없었고, 증가와 감소형태도 동일한 경향을 보였다. Fig. 7 (c)에서는 종방향 간격에 따른  $C_L/C_D$ 의 변화를 나타냈으며, Rotor 1은 간격이 멀어질수록  $C_L/C_D$ 는 소폭 증가하였고 Rotor 2는 간격이 멀어질수록  $C_L/C_D$ 가 소폭 감소하거나 일정하게 유지하는 경향을 보였다.

결론적으로 RS들의 종방향 간격에 대한  $C_L$ 과  $C_D$  영향은 큰 차이가 없었으나,  $C_L/C_D$ 는 +y 축 기준 좌측에 위치하는 Rotor 1이 우측에 위치하는 Rotor 2 보다 최대 약 75% 효율이 좋은 것으로 나타났다.

Figs. 8 (a)와 (b)는 종방향 최소 간격 x/D=3D와 최대 간격 x/D=15D에 대한 속도장을 나타낸 것이다. Fig. 8 (a)와 같이 x/D=3D 간격에서는 Rotor 1과 Rotor 2 주위의 유동이 서로 영향을 미치는 것으로 나타났으며, Fig. 8 (b)와 같이 x/D=15D 간격에서는 Rotor 1과 Rotor 2 사이에 충분한 간격을 유지하고 있어 두 RS 주위의 유동이 서로 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

Table 3. Values of analyzed Variables.

		Rotor 1			Rotor 2								
Case	Distance (Horizontal/Longitudinal)	x	y	z	x	y	z						
Horizontal direction	3 D / -	-0.6	0	0	0.6	0	0						
	6 D / -	-1.05	0	0	1.05	0	0						
	9 D / -	-1.5	0	0	1.5	0	0						
	12 D / -	-1.95	0	0	1.95	0	0						
	15D / -	-2.4	0	0	2.4	0	0						
		Rotor 3			Rotor 4								
Case	Distance (Horizontal/Longitudinal)	x	y	z	x	y	z						
Longitudinal direction	- / 5 D	0	0	0	0	1.8	0						
	- / 10 D	0	0	0	0	3.3	0						
	- / 15 D	0	0	0	0	4.8	0						
	- / 20 D	0	0	0	0	6.3	0						
	- / 25 D	0	0	0	0	7.8	0						
		Rotor 5			Rotor 6			Rotor 7			Rotor 8		
Case	Distance (Horizontal/Longitudinal)	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Square arrangement	15 D / -	2.4	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	15 D / -	-	-	-	-2.4	0	0	-	-	-	-	-	-
	15 D / 25 D	-	-	-	-	-	-	2.4	7.8	0	-	-	-
	15 D / 25 D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-2.4	7.8	0
		Rotor 9			Rotor 10			Rotor 11			Rotor 12		
Case	Distance (Horizontal/Longitudinal)	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Diamond arrangement	- / -	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	15 D / 12 D	-	-	-	-2.4	3.9	0	-	-	-	-	-	-
	15 D / 12 D	-	-	-	-	-	-	2.4	3.9	0	-	-	-
	- / 25 D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	7.8	0

4.2 횡방향 간격(Longitudinal Distance)에 따른 유동특성

Figs 7. (d)~(f)는 횡방향 간격에 따른 RS의  $C_L$ ,  $C_D$ 와  $C_L/C_D$  결과를 나타낸 그래프이다.

Figs. 7 (d)와 (e)에서는 종방향 간격에 따른 Rotor 3과 Rotor 4에 대한  $C_L$ 과  $C_D$ 의 값을 비교하였으며, 후면에 위치한 Rotor 4가 전면에 위치한 Rotor 3보다  $C_L$ 과  $C_D$ 가 작게 나타났다. 이는 두 RS가 바람 방향에 거의 일치할 때, RS의 상호작용 효과가 가장 두드러지기 때문이다(Bordogna and Muggiasca, 2020). 또한 횡방향 간격이 멀어질수록 후류에 위치한 Rotor 4의  $C_L$ 과  $C_D$ 가 증가하는 추세를 보였다.

Fig. 7 (f)에서는 횡방향 간격에 따른  $C_L/C_D$ 의 변화를 나타냈다. 횡방향 간격이 커질수록 전면, 후면 RS 모두  $C_L$ 은 소폭 증가하나,  $C_D$ 가 크게 증가함에 따라 전체적인  $C_L/C_D$ 는 감소하는 경향을 보였다.

Figs. 8 (c)와 (d)는 횡방향 최소 간격  $y/D=5D$ 와 최대 간격  $y/D=25D$ 에 대한 속도장을 나타낸 것이다.  $y/D=5D$ 에서는

Rotor 3과 Rotor 4의 간격이 좁아 전면에 있는 Rotor3의 후류에 의해 Rotor4 주위의 유동장에 영향을 직접적으로 받는 것으로 나타났다.

$y/D=25D$ 의 경우, Rotor 3으로부터 일정 간격 떨어져 있음에도 불구하고 +y 축으로부터 불어오는 바람의 방향과 나란히 위치하기 때문에 전면 RS의 후류에 의한 영향이 더 작용하는 것으로 나타났다.

결과적으로 RS를 더 멀리 배치하게 되면 전면에 위치한 RS의 후류 영향을 덜 받기 때문에 추진효율을 높일 수 있게 된다. 그러나 RS의 배열형태는 적용 선박의 제원을 고려하여 설정되어야 한다(Bordogna and Muggiasca, 2020).

4.3 배열 형태에 따른 유동특성

Fig. 9는 RS의 배열 형태에 따른 유동특성을 나타낸 것으로, Figs. 9 (a)~(d)는 사각 형태(□)의 배열일 때, Figs. 9 (e)~(h)는 마름모 형태(◇) 배열일 때 RS의  $C_L$ 과  $C_D$ 의 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

로터세일의 배열 형태가 양력 형성에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구

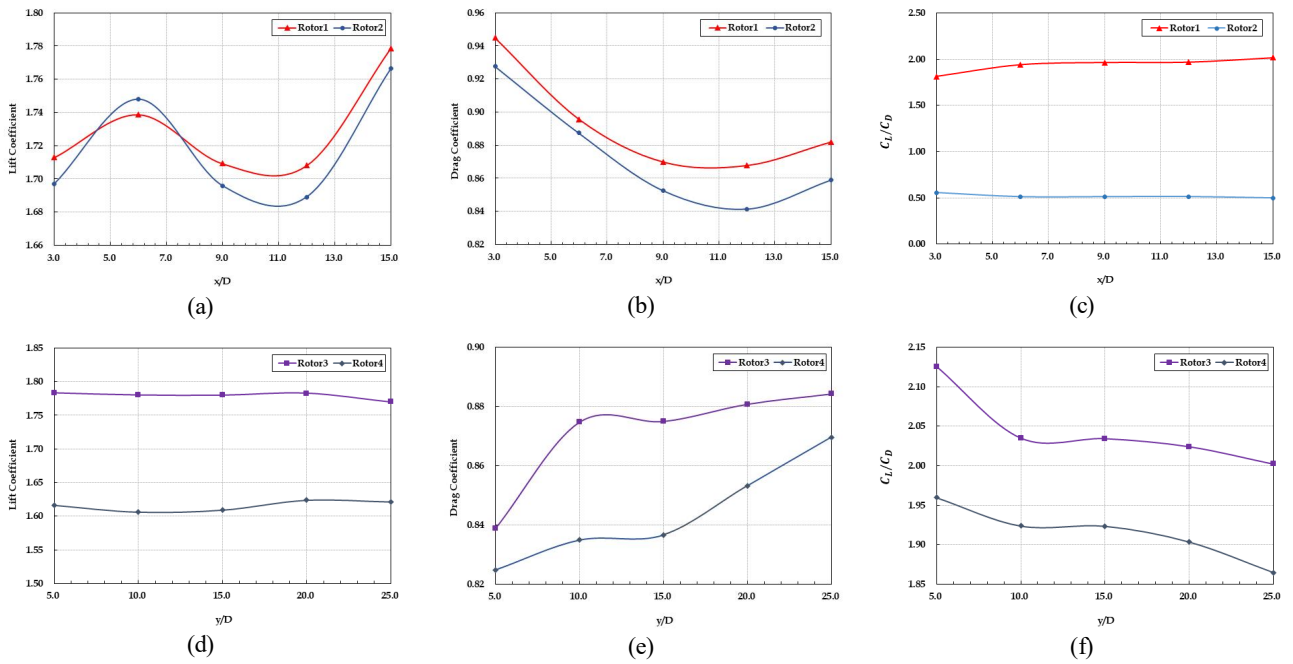


Fig. 7. Response curves for  $C_L$ ,  $C_D$  and  $C_L/C_D$  for (a)~(c) horizontal distance and (d)~(f) Longitudinal distance.

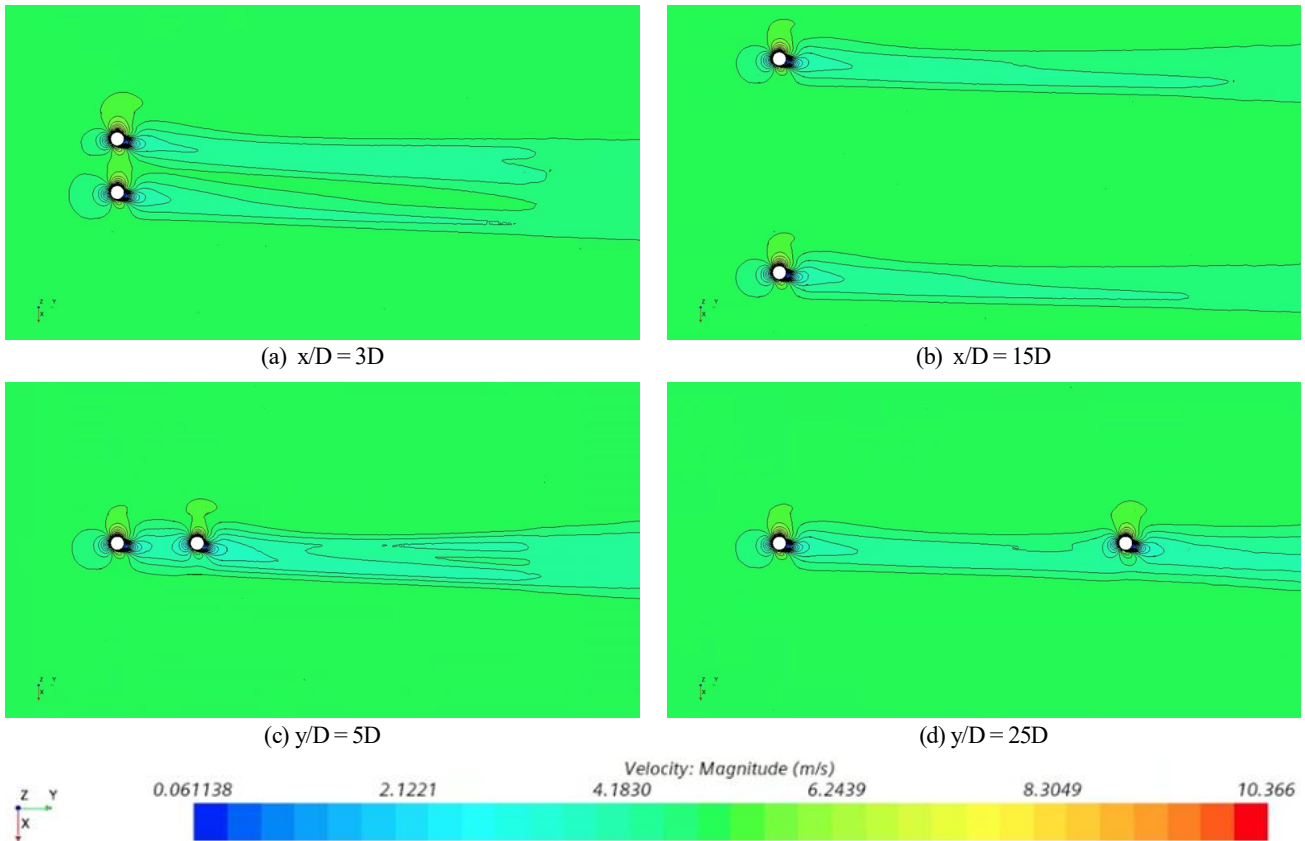


Fig. 8. Velocity field for (a), (b) horizontal distance and (c), (d) Longitudinal distance.

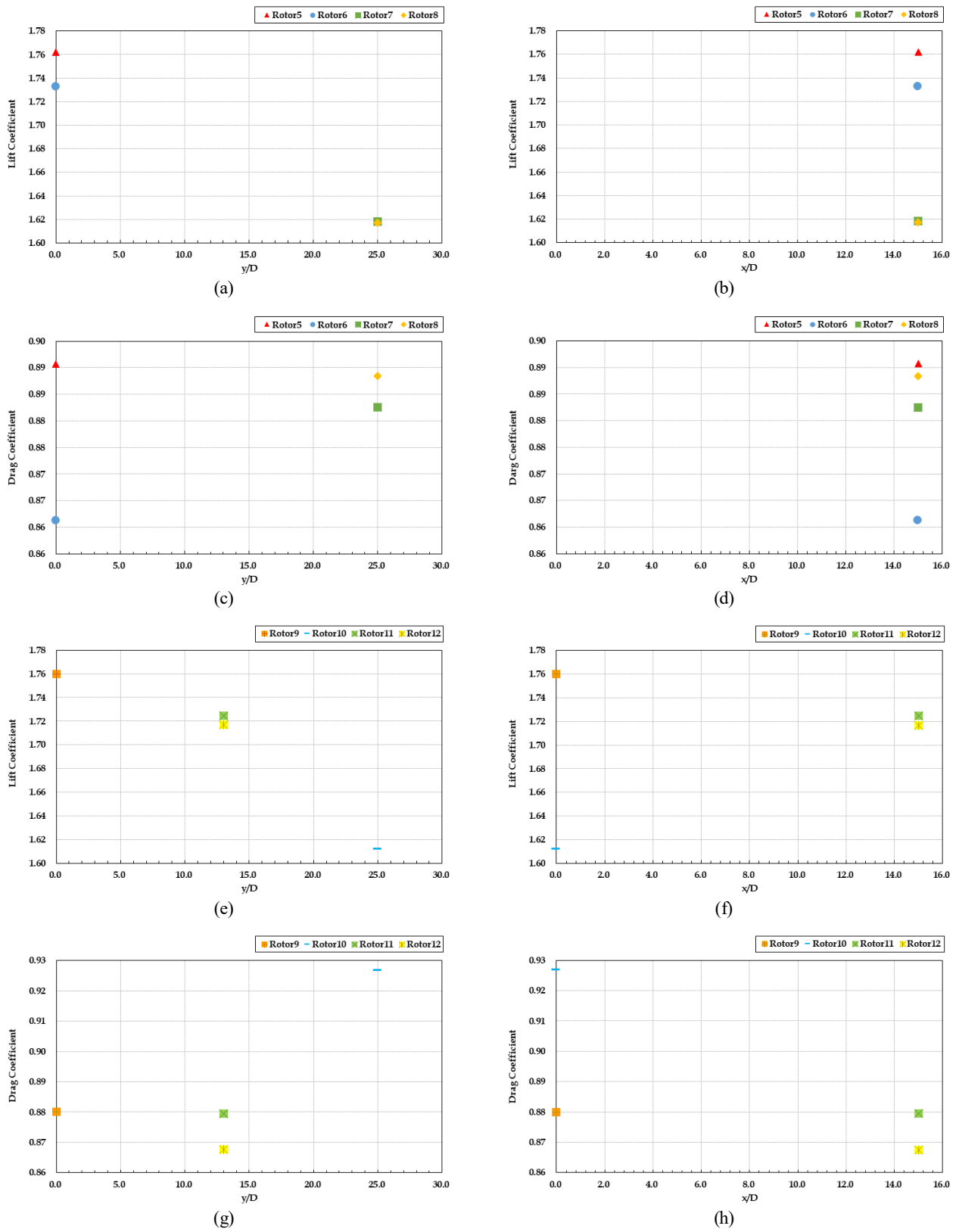


Fig. 9.  $C_L$  and  $C_D$  for (a)~(d) square arrangement and (e)~(h) diamond arrangement.



로터세일의 배열 형태가 양력 형성에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구

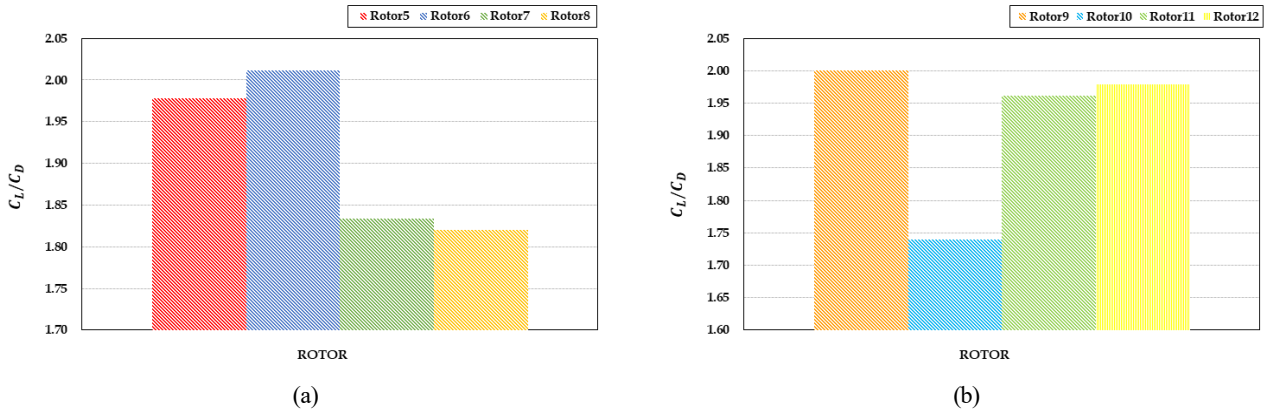


Fig. 10. Aerodynamic efficiency graph for (a) square arrangement and (b) diamond arrangement.

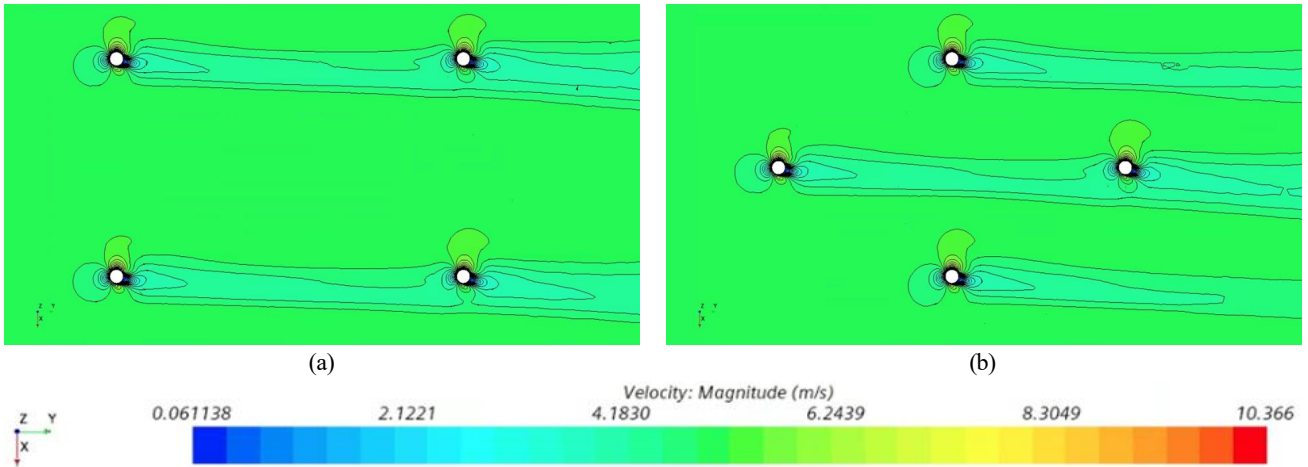


Fig. 11. Velocity field for (a) square arrangement and (b) diamond arrangement.

Figs. 9 (a)~(d)는 사각 형태(□) 배열에서 RS의 공기역학적 힘을 나타낸 것이며, Figs. 9 (a)와 (b)에서는 횡방향, 종방향 간격에 따른 Rotor 5~8 각각의  $C_L$ 을 나타내었다.

횡방향 간격으로 멀어질수록 후면에 위치한 Rotor 7과 Rotor 8이 전면에 위치한 Rotor 5와 Rotor 6 대비  $C_L$ 이 감소하는 것으로 나타났다. 또한  $x/D=15$ 의 종방향 간격에 위치하는 Rotor 5와 Rotor 6, Rotor 7과 Rotor 8은 각각  $C_L$ 이 유사하게 나타났다며, RS 간 상호작용의 영향은 적은 것으로 나타났다.

Figs. 9 (c)와 (d)에서는 종방향, 횡방향 간격에 따른 Rotor 5~8에 대한  $C_D$ 를 나타내었다.  $C_L$ 의 경향과 동일하게 후면에 위치한 RS가 전면에 위치한 RS보다  $C_D$ 가 작게 나타났으며, 동일한 종방향 간격에 위치하는 RS들은 유사한  $C_D$ 값을 가지는 것으로 나타났다.

Figs. 9 (e)~(h)는 마름모 형태(◇) 배열에서 RS의 공기역학적 힘을 나타낸 것이며, Figs. 9. (e)과 (f)에서는 횡방향, 종방향 간격에 따른 Rotor 9~12에 대한 각각의  $C_L$ 을 나타내

었다. 해석결과 가장 전면에 위치한 Rotor 9가 가장 큰  $C_L$  값을 나타냈고,  $y/D=15$  거리에 위치한 Rotor 11과 Rotor 12는 유사한  $C_L$  값을 나타냈으며,  $y/D=25$ 의 후면에 위치한 Rotor 10이 전면 Rotor 9 후류의 영향으로 가장 작은  $C_L$  값을 나타내었다. 또한  $x/D=15$ 의 간격에 위치한 Rotor 11과 Rotor 12는 유사한  $C_L$  값을 가졌으며, 종방향 간격에 대한 영향은 미미한 것으로 나타났다.

Fig. 9 (g)과 (h)에서는 횡방향, 종방향 간격에 따른 Rotor 9~12에 대한 각각의  $C_D$ 를 나타내었다. 횡방향의 경우  $x/D=25$ 로 가장 멀리 위치한 Rotor 10이  $C_D$ 가 크게 나타났으며, 종방향의 간격이  $x/D=15$ 인 Rotor 11과 Rotor 12는 유사한  $C_D$  값을 가지며 종방향 간격에 대한  $C_D$ 의 영향은 미미한 것으로 나타났다.

Fig. 10은 사각 형태(□) 배열과 마름모 형태(◇) 배열에서 각각의 RS에 대한  $C_L/C_D$ 를 나타낸 것이다. Fig. 10 (a)에서는 전면에 위치한 Rotor 5와 Rotor 6이 Rotor 7과 Rotor 8에 비하여

$C_L/C_D$ 이 높게 나타났으며, Fig. 10 (b)에서는 Rotor 9, Rotor 11 과 Rotor 12가 Rotor 10보다  $C_L/C_D$ 이 높게 나타났다.

Fig. 11은 사각 형태(□)의 배열과 마름모 형태(◇) 배열일 때 속도장을 나타낸 그림이다. Fig. 11 (a)에서는 +y 축으로 불어오는 자유 유속 방향과 나란히 위치하기 때문에 전면 RS의 후류에 의한 영향이 작용하는 것으로 나타났다.

Fig. 11 (b)에서는 Rotor 9와 동일한 열의 후면에 위치한 Rotor 10을 제외하고, 나머지 RS는 전면 RS의 후류에 의한 영향을 받지 않기 때문에 RS 간 상호작용의 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 동일한 RS 형상과 자유 유속 조건에서 종 방향, 횡방향 RS 간격과 배열 형태에 따른  $C_L$ 과  $C_D$ 의 영향 및 유동특성을 비교하고 최적의 RS 배치조건을 선정하고자 하였다. 그 결과 해석한 결론은 다음과 같았다.

(1) 종방향 간격( $x/D$ =Horizontal Distance)에 따른 RS의  $C_L$  과  $C_D$ 의 값은 크게 차이가 없었으나, 공기역학적 효율 측면에서는 +y축 기준 좌측에 위치하는 RS가 우측에 위치하는 RS 보다 최대 약 75% 효율이 좋은 것으로 나타났다.

(2) 횡방향 간격( $y/D$ =Longitudinal Distance)에 따른 RS 유동 특성의 경우, 두 RS가 바람 방향에 거의 일치할 때 RS의 상호작용 효과가 가장 크게 나타났으며, 횡방향 간격이 멀어 질수록 후류에 위치한 RS의  $C_L$ 과  $C_D$ 가 증가하는 추세를 보였다.

(3) 배열에 따른 RS 유동특성의 경우, 사각 형태(□)의 배열에서는 전면에 위치한 RS 후류가 후면에 위치한 RS의 공기역학적 힘에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 마름모 형태(◇) 배열에서는 가장 후면에 위치한 RS를 제외하고 나머지 RS는 다른 RS의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

(4) RS의 전방( $0^\circ$ ) 방향에서 불어오는 바람의 경우, 마름모 형태(◇) 배열이 RS 간의 후류 영향을 가장 덜 받는 것으로 나타났다. 또한 동일한 열에 위치한 다중 RS의 경우, 횡방향 간격을 크게 할수록 높은  $C_L$ 을 얻는데 유리하나 이는 적용 선박의 제원에 따른 배치가 고려되어야 한다.

본 연구에서는 동일한 풍속과 풍향에 대한 RS 배열의 영향을 확인하였으나, 추후 연구에서는 다양한 각도에서의 풍속 조건에 대한 연구를 추가로 진행할 계획이다.

## References

- [1] Badalamenti, C. and S. A. Prince(2008), Effects of endplates on a rotating cylinder in crossflow, the 26th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Honolulu, Hawaii, USA.
- [2] Bordogna, G. and S. Muggiasca(2020), The effects of the aerodynamic interaction on the performance of two Flettner rotors, Final version published in: Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics 196.
- [3] De Marco, A. and S. Mancini(2016), Flettner Rotor Concept for Marine Applications : A Systematic Study, Hindawi Publishing Corporation International Journal of Rotating Machinery Volume 2016, Article ID 3458750, 12 pages
- [4] De Marco, A., S. Mancini, and C. Pensa(2014), Preliminary analysis for marine application of Flettner rotors, in Proceedings of the 2nd International Symposium on Naval Architecture and Maritime (INT-NAM '14), Istanbul, Turkey, October.
- [5] De Marco, A., S. Mancini, C. Pensa, R. Scognamiglio, and L. Vitiello(2015), Marine application of flettner rotors: numerical study on a systematic variation of geometric factor by DOE approach, the 6th International Conference on Computational Methods in Marine Engineering (MARINE '15), Vol. 1, Rome, Italy.
- [6] Devaraj, V. and J. Raju(2017), Feasibility Study of Flettner Rotor Propulsion Using Numerical Analysis, 2017 IJEDR, Volume 5, Issue 4.
- [7] Hu, J. and Y. Wang(2019), The Dynamic Performance of a Rotating Frustum of a cone, in Proceedings of Sixth International Symposium on Marine Propulsors, smp'19, Rome, Italy.
- [8] Kang, S. M.(2003). Characteristics of Flow over a Pair of Circular Cylinders in a Side-by-Side Arrangement. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - B, 27(7), pp. 909-919.
- [9] Kim, H. W.(2022), Global shipping industry is struggling to find alternative green energy to strengthen maritime environmental regulations, hankookilbo.
- [10] Kim, J. E., D. H. Cho, and C. Y. Lee(2022), Numerical Analysis Study on the Turbulent Flow Characteristics around the Rotor Sail for Vessels, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 28, No. 4, pp. 648-656.
- [11] Lee, S. B. and J. C. Park(2006), Characteristics of Laminar Wake Around Two-Circular Cylinder in Side-by-Side Array. Journal of Ocean Engineering and Technology, 20(5), pp. 15-22.

Received : 2022. 05. 26.

Revised : 2022. 06. 27. (1st)

: 2022. 08. 12. (2nd)

Accepted : 2023. 04. 27.